

# **Evaluation der Langzeitfunktionalität von paraffinbasierten Phasenwechsellmaterialien in Gebäudeanwendungen**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Architektur des  
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)  
genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Geoökol. Tabea Obergfell, M.Sc.

Tag der mündlichen Prüfung:	24. Februar 2024
Hauptreferent:	Prof. Dipl.-Ing. A. Wagner
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. H.-M. Henning



# Kurzfassung

Phasenwechselmaterialien (PCM), als Latentwärmespeicher in Gebäuden eingesetzt, gelten als vielversprechende Möglichkeit, den thermischen Komfort in den warmen Sommermonaten zu erhöhen. Im Betrieb benötigen sie keine zusätzliche Energie und sind damit deutlich klimafreundlicher als eine aktive Kühlung. Obwohl die Technologie schon seit mehreren Jahrzehnten marktreif und verfügbar ist, scheinen diverse Hemmnisse ihrer Verbreitung im Weg zu stehen. Als ein zentrales Hemmnis konnten fehlende Langzeiterfahrungen identifiziert werden, die ein wichtiger Entscheidungsfaktor in der Gebäudeplanung sind. Ziel dieser Arbeit ist, mit Hilfe eines interdisziplinären Forschungsansatzes reale Langzeiterfahrungen mit Latentwärmespeichern in Gebäuden zu erheben und zu evaluieren. Diese herstellerunabhängige Bewertung soll zu einer besseren Einschätzung der Technologie beitragen und mögliche Optimierungspotentiale vor allem auf der Seite der Gebäudenutzung identifizieren.

Zur Vorbereitung wurde eine Liste aller Gebäude in Deutschland, die mit dezentralen Latentwärmespeichern ausgestattet sind, erstellt. Aus dieser Liste wurden anschließend Gebäude ausgewählt, in denen die Latentwärmespeicher schon mehrere Jahre in Betrieb waren und die für die weiteren Analysen in Frage kamen. Die zentrale Forschungsphase lässt sich in drei methodisch unterschiedliche Teile untergliedern. Zuerst wurden in einigen Gebäuden Proben der PCM-Produkte genommen, im Labor ihre spezifische Enthalpie bestimmt und diese mit Refe-

renzwerten vom Beginn der Produktlebenszeit verglichen. Ziel war es herauszufinden, ob die PCM-Produkte nach mehr als zehn Betriebsjahren aus technischer Sicht noch funktionierten. Im zweiten Teil wurden während zwei Befragungsrunden – einer ersten qualitativen und einer zweiten quantitativen Befragung – von involvierten Nutzer:innen und Planern ihre subjektive Bewertung der thermischen Bedingungen und ihre Zufriedenheit hinsichtlich des thermischen Komforts erfasst. Außerdem wurden Planer dazu befragt, ob die Erwartungen an den Einsatz von Latentwärmespeichern aus der Planungsphase im Realbetrieb erfüllt werden konnten. Die zweite Befragung fand während mehrwöchiger Monitoringphasen statt, in denen raumklimatische Daten in insgesamt sechs Gebäuden dokumentiert wurden. Ein Vergleich der subjektiven Bewertungen durch Nutzer:innen mit den objektiven Messdaten ermöglichte eine Einordnung der thermischen Bedingungen in den untersuchten Gebäuden. Als drittes Werkzeug wurden Gebäudesimulationen erstellt und anhand zweier Fallstudien untersucht, (a) ob die installierten PCM nach mehr als zehn Betriebsjahren noch funktionieren und (b) welchen Einfluss neben einer potentiellen Produktdegradation das Verhalten der Nutzer:innen auf die Funktionalität der Latentwärmespeicher hat.

Die Untersuchungen ergaben, dass paraffinbasierte Latentwärmespeicher auch nach mehr als zehn Betriebsjahren noch eine spürbare Verbesserung der thermischen Gegebenheiten bewirken können, wenngleich es Optimierungspotential bei Planung und Nutzung der Gebäude gibt. Vor allem im Hinblick auf die im Zuge des Klimawandels steigenden Temperaturen bestätigen die Ergebnisse, dass PCM-Produkte eine ressourcensparende und im Vergleich zu aktiven Kühlgeräten kostengünstige Möglichkeit sind, den großen Gebäudebestand Deutschlands auf künftig heißere Sommer vorzubereiten.



# Abstract

Phase change materials (PCMs) used as latent heat storages in buildings are considered a promising way to increase thermal comfort in the warm summer months. In operation, they require no additional energy and are thus significantly more climate-friendly than active cooling. Although the technology has been market-ready and available for several decades, various barriers seem to hinder its widespread use. A lack of long-term experience, which is an important decision-making factor in building design, could be identified as a key obstacle. The aim of this work is to collect and evaluate real long-term experience with latent heat storage systems in buildings using an interdisciplinary research approach. This manufacturer-independent evaluation is intended to contribute to a better assessment of the technology and to identify possible optimization potentials, especially with regard to building use.

In preparation, a list of all buildings in Germany equipped with decentralized latent heat storage systems was compiled. From this list, buildings were subsequently selected in which the latent heat storage systems had already been in operation for several years and which were eligible for further analysis. The central research phase can be divided into three methodologically different parts. First, samples of the PCM products were taken in some buildings, their specific enthalpy was determined in the laboratory, and these were compared with reference values from the beginning of the product's lifetime. The aim was to find out whether the PCM products were still functioning from

a technical point of view after more than ten years of operation. In the second part, during two rounds of interviews – a first qualitative and a second quantitative survey – the involved users and planners were asked for their subjective evaluation of the thermal conditions and their satisfaction regarding the thermal comfort. In addition, planners were asked whether the expectations for the use of latent heat storage from the planning phase could be fulfilled in real operation. The second survey took place during monitoring phases lasting several weeks, during which indoor climatic data were documented in a total of six buildings. A comparison of the subjective evaluations by users with the objective measurement data made it possible to classify the thermal conditions in the buildings studied. As a third tool, building simulations were created and two case studies were used to investigate (a) whether the installed PCMs still function after more than ten years of operation and (b) what influence the behavior of the users has on the functionality of the latent heat storage systems in addition to potential product degradation.

The investigations showed that paraffin-based latent heat storage systems can still bring considerable improvements in thermal conditions even after more than ten years of operation, although there is potential for optimization in the planning and use of the buildings. Particularly in view of rising temperatures in the context of climate change, the results confirm that PCM products are a resource-saving and, compared with active cooling units, cost-effective way of preparing Germany's large building stock for hotter summers in the future.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Ziele und Vorgehensweise . . . . .	6
1.3 Struktur der Arbeit . . . . .	7
<b>2 Grundlagen und Vorarbeiten</b>	<b>11</b>
2.1 PCM in Gebäudeanwendungen . . . . .	12
2.1.1 Thermische Energiespeicher . . . . .	12
2.1.2 Materialien für Latentwärmespeicher . . . . .	16
2.1.3 Integration von PCM in Gebäude . . . . .	19
2.1.4 Ziele des Einsatzes von PCM in Gebäuden . . . . .	21
2.2 Thermischer Komfort . . . . .	22
2.2.1 Historische Entwicklung der Forschung über Komfort in Gebäuden . . . . .	22
2.2.2 Geltende Bestimmungen und Bewertung des thermischen Komforts . . . . .	25
2.3 Indikatoren zur Bewertung von PCM . . . . .	26
2.4 Vorarbeiten . . . . .	29
2.4.1 Erstellung einer Liste von Gebäuden mit PCM-Systemen . . . . .	29

2.4.2	Auswahl geeigneter Gebäude . . . . .	30
2.4.3	Monitoring verschiedener PCM-Räume . . . . .	30
<b>3</b>	<b>Laboranalyse von PCM-Proben</b>	<b>37</b>
3.1	Entnahme und Charakterisierung von PCM-Proben . . .	37
3.2	Auswertung . . . . .	39
3.3	Ergebnisse und Zwischenfazit . . . . .	39
<b>4</b>	<b>Befragung von Nutzer:innen und Planern</b>	<b>43</b>
4.1	Befragung als Methode der empirischen Sozialforschung	43
4.2	Qualitative Befragung . . . . .	44
4.2.1	Durchführung der qualitativen Befragungen . . .	46
4.2.2	Auswertung . . . . .	48
4.2.3	Ergebnisse . . . . .	49
4.2.4	Zwischenfazit . . . . .	51
4.3	Quantitative Befragung . . . . .	52
4.3.1	Durchführung der quantitativen Befragungen . .	52
4.3.2	Auswertung und Bewertung des thermischen Komforts . . . . .	53
4.3.3	Ergebnisse . . . . .	55
4.3.4	Zwischenfazit . . . . .	64
<b>5</b>	<b>Analyse der PCM-Funktionalität anhand zweier Fallstudien</b>	<b>67</b>
5.1	Die beiden Fallstudien . . . . .	68
5.1.1	<i>Sonnenschiff</i> in Freiburg . . . . .	68
5.1.2	Gymnasium in Diekirch, Luxemburg . . . . .	73
5.2	Verhaltensanalyse und Szenarienerstellung . . . . .	73
5.2.1	Fensteröffnung . . . . .	74
5.2.2	Jalousienutzung . . . . .	82
5.2.3	Erstellung verschiedener Verhaltensszenarien . .	88
5.3	Simulationen mit EnergyPlus . . . . .	93
5.3.1	Modellaufbau . . . . .	93

5.3.2	Kalibrierung und Validierung der Modelle . . . . .	99
5.4	Ergebnisse der Simulationen . . . . .	103
5.4.1	Temperaturreduktion durch PCM . . . . .	106
5.4.2	Einfluss des PCM auf CDH . . . . .	109
5.5	Zwischenfazit . . . . .	115
<b>6</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>119</b>
6.1	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen . . . . .	119
6.2	Grenzen Arbeit . . . . .	125
6.3	Ausblick . . . . .	127
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>131</b>
	<b>Nomenklatur</b>	<b>149</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>153</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>160</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>161</b>
A.1	Leitfaden: Befragung von Nutzer:innen . . . . .	161
A.2	Leitfaden: Befragung von Planern . . . . .	164
A.3	Fragebogen Nutzer:innen . . . . .	166
A.4	Übersicht der Gebäude mit PCM in Deutschland . . . . .	172
A.5	Ergänzende Informationen zu den beiden Fallstudien . . . . .	173
A.5.1	Sensorpositionierung in PCM-Räumen während des Monitorings . . . . .	173
A.5.2	Gebäudepläne und Details der Konstruktionen . . . . .	174
A.5.3	Lüftungsrate im <i>Sonnenschiff</i> . . . . .	180
A.6	Publikationen . . . . .	180
	<b>Danksagung</b>	<b>183</b>



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Der Klimawandel schreitet zunehmend voran und sorgt in Mitteleuropa für steigende Temperaturen. Damit wird auch der sommerliche Kühlbedarf in Gebäuden in Deutschland absehbar steigen. In 2020 entfielen in der Europäischen Union schätzungsweise 3% des Endenergiebedarfs (EEB) auf Gebäudekühlung, Prognosen rechnen mit einer Vervielfachung auf 8-9% des Endenergiebedarfs bis zum Jahr 2050 [1], [2] und in gleichem Maße mit einer Zunahme der assoziierten Treibhausgasemissionen. Um das von der Weltgemeinschaft beschlossene 1,5-Grad-Ziel einzuhalten, strebt die Europäische Union eine vollständige Dekarbonisierung des Heizungs- und Kühlungssektors bis 2050 an, auf den bis dahin 50% des EEB entfallen werden [2]. Aus diesen Entwicklungen ergeben sich zwei Herausforderungen: einerseits wird es zunehmend wichtiger in Ländern Mitteleuropas wie beispielsweise Deutschland, thermischen Komfort in Gebäuden in den warmen Monaten des Jahres sicherstellen zu können. Andererseits sollte dies möglichst klimaneutral umgesetzt werden – das heißt, mit möglichst geringen Mengen an Treibhausgasemissionen. Latentwärmespeicher in Form von Phasenwechselmaterialien (englisch: phase-change material, PCM) gelten schon seit mehreren Jahrzehnten als vielversprechende, klimafreundliche Option zur Erreichung der beiden genannten Zie-

le. Sie können große Energiemengen beim isothermen Phasenwechsel während des Schmelzens speichern und dadurch Temperaturspitzen in Gebäuden sowohl abmildern als auch zeitlich verschieben, so dass tagsüber der thermische Komfort verbessert wird [3]–[5]. Allerdings wird die notwendige nächtliche Entladung der Speicher bei zunehmenden Hitzeperioden immer schwieriger werden.

Die Integration von PCM-Baustoffen in Gebäude ist gut erforscht. Zahlreiche Studien konnten positive Effekte auf die thermischen Gegebenheiten bestätigen: Temperaturspitzen werden abgemildert und die täglichen Höchsttemperaturen zeitlich in die Abend- beziehungsweise Nachtstunden mit niedrigerer Umgebungstemperatur verschoben (z.B. [6]–[11]). Viele dieser Studien basieren jedoch auf Laboruntersuchungen, Experimenten oder Simulationen. Letztere Herangehensweise ist die am weitesten verbreitete unter den verfügbaren Studien, wobei die Anwesenheit von Nutzer:innen <sup>1</sup> entweder komplett weggelassen oder von einem idealen Verhalten der Personen ausgegangen wurde. Gleichzeitig ist bekannt, dass vom Verhalten der Nutzenden der Energiebedarf eines Gebäudes, der thermische Komfort und auch ihre Zufriedenheit maßgeblich abhängen [12]–[14]. Für Gebäude mit PCM gilt dies umso mehr, da die nächtliche Regeneration des Materials, also die Kristallisation während des Abkühlens, essentiell für ein gutes Funktionieren ist. Das Verhalten von Nutzer:innen gilt daher als zentraler Einflussfaktor auf den thermischen Komfort in Gebäuden mit PCM [15].

Das Verhalten von Nutzer:innen zu prognostizieren und in Simulationen realitätsnah abzubilden ist nach wie vor eine große Herausforderung, da sowohl individuelles als auch verhandeltes Verhalten – z.B.

---

<sup>1</sup> Der Gender-Doppelpunkt wird im vorliegenden Text verwendet, wenn alle Geschlechter gemeint sind. Werden explizit männliche oder weibliche Formen genannt, so beziehen sich die jeweiligen Aussagen auf geschlechtshomogene Gruppen.



bei Fensteröffnungen in einem Großraumbüro – nicht nur von bekannten Parametern beeinflusst wird, sondern auch stochastische Elemente eine Rolle spielen [16]. Die reale Komplexität verhaltensbezogener Entscheidungen lässt sich in Simulationen kaum abbilden, so dass es üblicherweise große Diskrepanzen zwischen Vorhersage und Realität gibt [17]. Auch in Gebäuden mit PCM gilt das tatsächliche beziehungsweise reale Verhalten der Nutzenden als wichtiger Faktor für die oft dokumentierte Leistungslücke zwischen prognostiziertem und tatsächlichem Benefit durch das PCM [18], [19]. Neben Prognosunsicherheiten aus der Planung kommt dazu, dass die Nutzer:innen oftmals nicht darüber informiert sind, wie sie das PCM-System<sup>2</sup> optimal nutzen können. Das resultiert häufig darin, dass sie die Nachtlüftung nicht konsequent umsetzen und das System daher nur unzureichend funktioniert. Eine weitere Ursache für die beschriebene Leistungslücke ist, dass die tatsächliche Nutzung eines Raums oder Gebäudes von der ursprünglich bei der Planung berücksichtigten Nutzung abweicht: dass beispielsweise mehr Personen einen Raum nutzen als ursprünglich vorgesehen und somit größere innere Lasten auftreten, für die das PCM-System nicht ausgelegt ist [18], [20].

Im Zuge einer Literaturrecherche konnten nur zwei Veröffentlichungen gefunden werden, die die Leistung von PCM-Systemen in realen Häusern mit realem Nutzer:innenverhalten evaluierten. Eine Studie [21] untersuchte den Einfluss von PCM in einem neu gebauten Passiv-Doppelhaus. Zu diesem Zweck führten die Forscher Messungen und Gebäudesimulationen mit der Software EnergyPlus (EP) [22] durch. Sie fanden heraus, dass das PCM den thermischen Komfort verbesserte und die Überhitzungsstunden um 50% reduzierte. In einer anderen Stu-

---

<sup>2</sup> Als PCM-System wird das realisierte Gesamtkonzept bezeichnet: Also das in ein Produkt integrierte PCM-Material, das in einem Gebäude installiert ist und für das eine passende Regenerationsmöglichkeit in Form von elektrischer oder natürlicher Nachtlüftung vorgesehen und umsetzbar ist.

die [19] rüsteten die Forscher:innen einen Raum in einem Wohnhaus in Melbourne mit makroverkapseltem PCM nach und dokumentierten den Temperaturverlauf in diesem Raum über zwei Sommermonate hinweg. Auf Grundlage dieser experimentellen Daten erstellten die Autoren ein Gebäudemodell, um den Einfluss des PCM zu quantifizieren. Sie fanden heraus, dass die Verwendung von PCM zu einer Temperatursenkung von bis zu  $1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  und einer Verringerung der Stunden thermischen Diskomforts um 34% führte. Beide Studien kamen zu dem Schluss, dass das Verhalten der Nutzenden einen großen Einfluss auf die thermische Behaglichkeit hat. Sage-Lauck und Sailor kamen in [21] außerdem zu dem Schluss, dass es wahrscheinlich ist, dass Variationen im Nutzer:innenverhalten größere Auswirkungen auf den Energieverbrauch und die thermische Behaglichkeit eines Gebäudes haben als die Kühlungs Vorteile durch das PCM.

Ein weiterer bislang in der Forschung vernachlässigter Aspekt ist die Langzeitfunktionalität. Einerseits versprechen Hersteller zwar „mit Microal PCM modifizierte Baustoffe [erhalten] jahrzehntelang ihre Funktion, ohne erneuert werden zu müssen“ [23]. Und in zahlreichen Studien durch Zyklentests im Labor konnte nachgewiesen werden, dass über Zykluszeiträume, die 20-30 Jahren entsprechen, keine Degradation der Paraffine zu erwarten ist und sie auch nach mehreren Jahrzehnten im Einsatz noch funktionieren sollten (vgl. z.B. [24]–[26]). Jedoch gibt es bislang nur einzelne Veröffentlichungen darüber, wie sich PCM-Materialien nach einigen Jahren im Realbetrieb außerhalb eines Labors verhalten. Über die Langzeitfunktionalität von PCM-Systemen in Feldanwendungen konnten nur zwei Studien gefunden werden. Cellat et al. bewerteten in [27] die Leistung von PCM-Beton in einer Testkabine nach zwei Jahren. Sie kamen zu dem Schluss, dass das PCM in der Lage war, die Raumtemperatur um bis zu  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  zu senken und dass nach zwei Jahren kein Leistungsabfall zu beobachten war. Cabeza et al. unter-

suchten in [28] die thermischen und mechanischen Eigenschaften einer im Jahr 2005 aus PCM-Beton gebauten hausähnlichen Kabine. Nach zehn Jahren fanden sie in diesem experimentellen Versuchsaufbau keine Unterschiede in der thermischen Reaktion des PCM und folgerten daraus, dass keine Degradation stattgefunden habe. Es gibt also noch Bedarf, weitere Studien zur Langzeitfunktionalität von PCM in realen Gebäuden durchzuführen. Aufgrund dieser Forschungslücke ist es nicht auszuschließen, dass als weiterer Grund für die Diskrepanz zwischen realer und simulierter PCM-Leistung neben dem nicht-optimalen Verhalten der Nutzenden noch eine zweite Ursache in Betracht kommt: Es besteht die Möglichkeit, dass Alterung und eine damit verbundene Minderung der spezifischen Enthalpie von Latentwärmespeichern in der Realität stärker auftritt als in Laborversuchen bislang beobachtet werden konnte. Das hätte zur Folge, dass ihre Funktionalität im Laufe der Lebensdauer abnimmt.

Eine Evaluation von PCM-Systemen nach zehn oder mehr Jahren in real genutzten Gebäuden gibt es bislang noch nicht. Angesichts der Tatsache, dass Häuser mehrere Jahrzehnte lang genutzt werden, scheinen diese Informationen für Architekt:innen, Bauverantwortliche und Handwerker:innen sehr wertvoll – nicht zuletzt um die Akzeptanz dieser Systeme zu verbessern. Daher sind Studien notwendig, die die Langzeitfunktionalität und die Leistungslücke zwischen Simulation und realer Anwendung sowie das Verhalten der Nutzenden in den Fokus nehmen. Auch der Einfluss unterschiedlicher Verhaltensmuster von Nutzer:innen auf die Leistungsfähigkeit von PCM-Systemen ist ein noch zu untersuchender Aspekt, insbesondere um zukünftig das Verhalten von Nutzer:innen in Simulationen realistischer abbilden zu können [29], [30].

## 1.2 Ziele und Vorgehensweise

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war, die in Kapitel 1.1 beschriebenen Forschungslücken zu schließen: Die Langzeitfunktionalität von dezentralen PCM-Systemen in Gebäuden sowie der Einfluss des Verhaltens der Nutzenden auf die Leistungsfähigkeit dieser PCM-Systeme sollte untersucht werden. Dabei ging es nicht nur um die technische Funktionalität, sondern auch um die subjektiv wahrgenommene Verbesserung des thermischen Komforts seitens der Nutzer:innen.

Die zentralen Fragen der Arbeit waren:

1. Funktionieren PCM Systeme nach mehr als zehn Jahren im realen Betrieb noch? Stimmen subjektive Wahrnehmung mit objektiver Bewertung überein?
2. Wie groß ist der Einfluss des PCM auf das thermische Verhalten der Räume?
3. Inwiefern beeinflusst das Verhalten der Nutzenden die Leistung eines PCM Systems?

Zur Beantwortung der Fragen wurde ein interdisziplinärer Ansatz gewählt, bei dem sowohl technische als auch sozialwissenschaftliche Methoden zum Einsatz kamen (vgl. Abb. 1.1). Solche gemischten Methodenansätze (englisch *mixed methods approaches*), bei dem sowohl qualitative als auch quantitative Methoden zum Einsatz kommen, wurden seit den 1980ern in der Wissenschaft immer populärer. Ursprünglich war damit die Kombination verschiedener sozialwissenschaftlicher Methoden gemeint, doch Brunsgaard et al. [31] adaptierten diesen Ansatz auf die Kombination von qualitativen sozialwissenschaftlichen Methoden mit empirischen quantitativen Methoden der Naturwissenschaften. Mittlerweile ist es üblich, das Innenraumklima von Gebäuden mit einem solchen zweigleisigen Ansatz zu evaluieren (vgl. [31]–[33]).

Der erste Schritt der vorliegenden Arbeit war die Erstellung einer Gebäudeliste aller Immobilien, die in den Jahren 2000 bis 2013 mit dezentralen PCM Systemen ausgestattet worden waren. In einzelnen Gebäuden war es möglich, Materialproben zu entnehmen, anschließend ihre aktuelle spezifische Enthalpie kalorimetrisch zu bestimmen und mit Werten vom Beginn ihrer Lebensdauer zu vergleichen. Im nächsten Schritt wurden für eine qualitative Befragung einzelne Planer und Nutzer:innen ausgewählt und interviewt. Ziel dieser Befragung war, einen Eindruck über die Zufriedenheit mit den PCM-Systemen und über die ursprüngliche Motivation für ihre Installation zu gewinnen. In jeweils mehrwöchigen Monitorings wurden in den Sommermonaten der Jahre 2018 und 2019 verschiedene raumklimatische Parameter in sechs ausgewählten Gebäuden aufgezeichnet. Zeitgleich fand eine digitale Befragung der jeweiligen Nutzer:innen zum empfundenen thermischen Komfort statt. Zur Bewertung des thermischen Komforts in den untersuchten Räumen wurden anschließend Komfortdiagramme gemäß der europäischen Norm DIN EN 16798-1 [34] erstellt. Für zwei ausgewählte Fallstudien wurden anschließend thermische Gebäudesimulationen zur detaillierten Analyse durchgeführt: Ausgewählt wurden ein Bürogebäude in Freiburg, Deutschland, sowie ein Klassenzimmer eines Gymnasiums in Diekirch, Luxemburg. Die Modelle wurden zur (a) Bestimmung der Leistung der real gealterten PCM-Systeme und (b) Untersuchung des Einflusses des Nutzer:innenverhaltens auf die Leistungsfähigkeit der PCM-Systeme verwendet.

### 1.3 Struktur der Arbeit

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurden Methoden verschiedener wissenschaftlicher Disziplinen herangezogen. Die Kombination der Teilergebnisse diente schließlich der Beantwortung der adressier-



**Abb. 1.1: Interdisziplinärer Ansatz der vorliegenden Arbeit**

ten Forschungsfragen. Die grundlegende Struktur ist in Abbildung 1.2 zusammengefasst. In Kapitel 2 werden die für ein besseres Verständnis des Kontexts der Arbeit notwendigen Grundlagen zu PCM in Gebäudeanwendungen, zum thermischen Komfort in Gebäuden sowie Indikatoren zur Bewertung von PCM-Produkten dargestellt. In der zweiten Hälfte dieses Kapitels werden die Vorarbeiten beschrieben, deren Ergebnisse als Basis für Untersuchungen dienen, die in den folgenden Kapiteln 3-5 erläutert werden. In Kapitel 3 ist die thermische Analyse von real gealterten PCM-Proben dargestellt. Die Proben wurden im Labor untersucht und die gemessenen Werte mit Referenzmessungen der ursprünglichen spezifischen Enthalpie zu Beginn ihrer Lebenszeit abgeglichen. Kapitel 4 widmet sich den sozialwissenschaftlichen Befragungen von Nutzer:innen und Planern. Diese dienen dazu, Erkenntnisse über individuelle Erfahrungen mit PCM und darüber, inwieweit Erwartungen erfüllt bzw. nicht erfüllt werden konnten, zu gewinnen. Außerdem wurden in einer zweiten Befragung zeitgleich mit techni-

schem Monitoring subjektive Bewertungen des thermischen Komforts dokumentiert und anhand von Komfortdiagrammen ausgewertet.

In Kapitel 5 wird die Funktionalität der PCM nach mehr als einem Jahrzehnt im Betrieb sowie der Einfluss von Nutzer:innenverhalten auf die Funktionalität des PCM anhand zweier Fallstudien untersucht. Beide Aspekte wurden mittels Gebäudesimulationen evaluiert. Die Funktionalität wurde anhand verschiedener PCM-Enthalpien und dem jeweiligen resultierenden Fit zwischen Modell und Messdaten bewertet. Zur Quantifizierung des Einflusses von Nutzer:innenverhalten wurde das während der Monitoringphasen dokumentierte Verhalten evaluiert, Szenarien mit verbessertem Verhalten erstellt und anschließend die Ergebnisse miteinander verglichen.

Schließlich werden in Kapitel 6 die Teilergebnisse zusammengeführt und Empfehlungen für zukünftige Forschungsansätze sowie für eine bessere Nutzung der Potentiale von PCM-Produkten in Gebäudeanwendungen diskutiert.

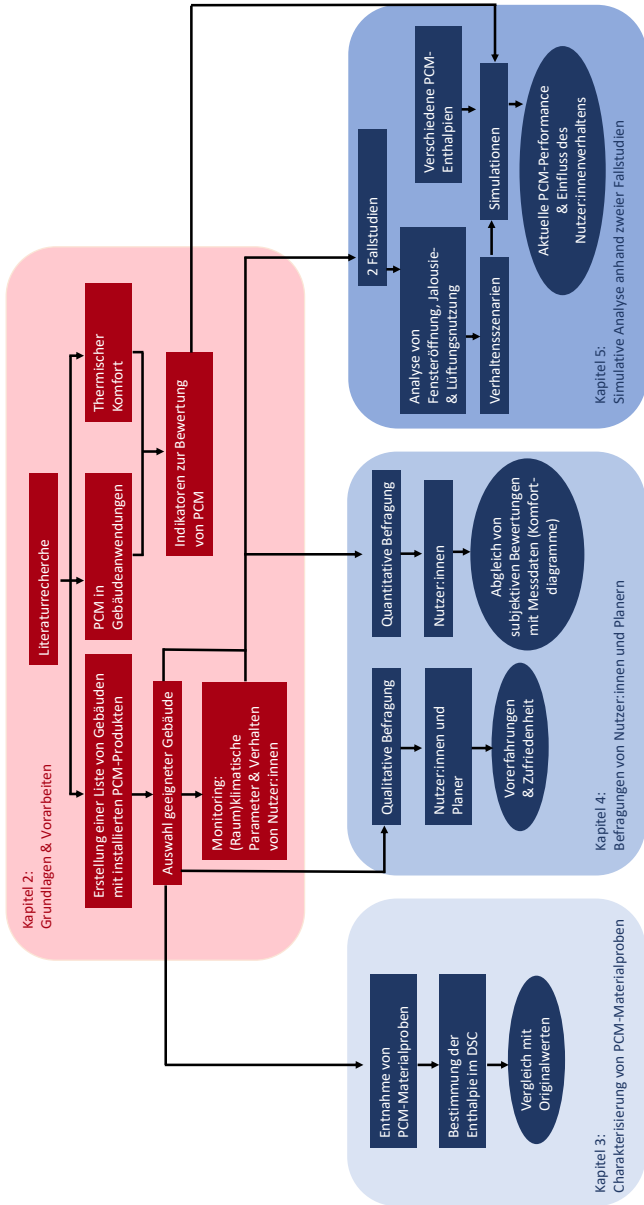


Abb. 1.2: Grundstruktur der vorliegenden Arbeit.



## 2 Grundlagen und Vorarbeiten

In diesem Kapitel werden die für die vorliegende Arbeit relevanten Grundlagen dargestellt. Der erste Teil, Abschnitt 2.1, beginnt mit einer kurzen Einführung in thermische Energiespeicher (TES) und der Einordnung von PCM innerhalb dieser Speichergruppe. Anschließend folgt eine Darstellung von verfügbaren Materialklassen und von Zielen beim Einsatz von PCM in Gebäuden. Im Abschnitt 2.2 folgt eine kurze Darstellung zur historischen Entwicklung der Forschung zu Komfort in Gebäuden und welche Kriterien zur Bewertung des PCM-Einflusses auf thermischen Komfort herangezogen wurden (Abschnitt 2.3).

In der zweiten Hälfte des Kapitels werden Vorarbeiten beschrieben, auf deren Grundlage die späteren Datenerhebungen und Auswertungen umgesetzt wurden: Zu Beginn der Arbeit wurde eine Liste aller Gebäude erstellt (Abschnitt 2.4.1), die potentiell als Untersuchungsobjekte in Frage kamen. In den nächsten Abschnitten wird die Auswahl geeigneter Gebäuden beschrieben (2.4.2) und in 2.4.3 die methodische Umsetzung der Monitoringkampagnen dargestellt.

## 2.1 PCM in Gebäudeanwendungen

### 2.1.1 Thermische Energiespeicher

Wärmeenergie kann in drei Formen gespeichert werden: sensibel, latent und thermochemisch [35, S. 537]. Die *sensible* Speicherform ist die bekannteste: bei dieser Speicherform führt die zugeführte Wärmemenge zu einer fühlbaren Temperaturerhöhung des festen oder flüssigen Speichermediums, ohne dass dieses einen Phasenwechsel oder eine chemische Reaktion durchläuft. Eine verbreitete Anwendung von sensibler Wärmespeicherung sind Zentralheizungen, bei denen ein Wärmeträgermedium – meist Wasser, da dies eine sehr hohe Wärmekapazität hat – erhitzt wird und das fühlbar warme Wasser durch den Heizkreislauf fließt, um die Wärme an den dezentralen Heizkörpern wieder abzugeben. Neben Wasser kommen als Speicher auch verbreitet Gesteine, Erdreich, Sand, Salze und Öl als sensible Speicher zum Einsatz [35, S. 544 ff.]. Die Menge an Energie, die in einem Medium gespeichert werden kann, ist abhängig von seiner Wärmekapazität  $C$ . Bei konstanter Wärmekapazität erhöht sich die Temperatur des Speichermediums proportional zur zugeführten Wärmeenergie. Berechnet wird  $C$  als Produkt aus Masse  $m$  und spezifischer Wärmekapazität  $c_p$  [36, S. 71]:

$$C = mc_p \tag{2.1}$$

Die Menge an Energie, die sensibel im Temperaturbereich zwischen  $T_1$  und  $T_2$  gespeichert werden kann, berechnet sich gemäß folgender Formel [35, S. 541]:

$$Q_{sens} = mc_p(T_2 - T_1) \quad (2.2)$$

Bei einer *latenten* Wärmespeicherung verändert das Speichermedium bei Aufnahme und Abgabe von Wärme seinen Aggregatzustand, wobei meist der Phasenwechsel fest-flüssig genutzt wird. Die Enthalpie beim Phasenwechsel flüssig-gasförmig ist zwar deutlich größer, aber die großen Volumenänderungen sind in der Anwendung so nachteilig, dass dieser selten zur Wärmespeicherung genutzt wird [35, S. 557]. Diese Speichermedien werden als Phasenwechselmaterialien (PCM) bezeichnet. Bei der Aufnahme von Energie handelt es sich bei PCM im Bereich des Phasenwechsels um einen isothermen Prozess. Das bedeutet, die Temperatur des PCM bleibt im Bereich seiner Schmelztemperatur nahezu konstant, da die aufgenommene Energie nur für eine Veränderung der molekularen Struktur sorgt. Die Wärmespeicherung findet sozusagen unmerklich beziehungsweise versteckt statt, weshalb dieser Vorgang als *latente Speicherung* (von lateinisch *latens* = heimlich, verborgen [37]) bezeichnet wird.

In Abb. 2.1 ist eine schematische Darstellung des Latentspeichervorgangs zu sehen. Steigt die Umgebungstemperatur, nimmt auch die Temperatur des Speichermediums bis zu seinem Schmelzpunkt zu (=sensible Speicherung). Ab dem Schmelzpunkt beginnt die isotherme latente Phase, in der der Phasenwechsel stattfindet (24 °C im Beispiel der Abb. 2.1). Ist der Phasenwechsel komplett vollzogen, setzt erneut eine Phase der sensiblen Speicherung ein, in der die Temperatur des Speichermediums weiter ansteigt. Kommt es anschließend zu einer Abkühlung der Umgebung, läuft der Prozess umgekehrt ab und führt zu einer Freisetzung der zuvor aufgenommenen Wärme.

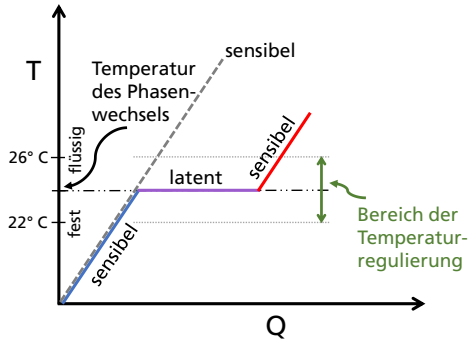


Abb. 2.1: Schematische Darstellung von sensibler und latenter Speicherung von Wärme  $Q$  [eigene Darstellung nach 38], [39].

PCM zeichnen sich durch eine hohe Energiedichte aus – das heißt, sie können bezogen auf ihr Volumen vergleichsweise große Energiemengen aufnehmen und abgeben. Dadurch können platzsparende kompakte Speicherlösungen realisiert werden, wenn diese im Schmelzbereich des eingesetzten PCM betrieben werden.

Zur Errechnung der in einem Latenwärmespeicher gespeicherten Wärmemenge  $Q_{lat}$  wird die Gleichung 2.2 um die Schmelzenthalpie  $\Delta H_s$  erweitert (vgl. auch Abb. 2.2 (b)). Dabei stehen  $c_{p,f}$  und  $\Delta T_f$  für die spezifische Wärmekapazität und Temperaturdifferenz im festen Zustand und  $c_{p,fl}$  und  $\Delta T_{fl}$  für die jeweiligen Eigenschaften im flüssigen Bereich [35, S. 554]:

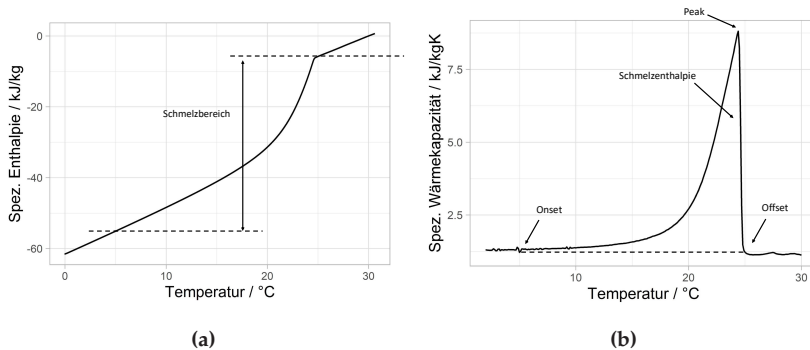
$$Q_{lat} = \int_{T_1}^{T_2} c_p dT + \Delta H_s = m(c_{p,f} \Delta T_f + \Delta h_s + c_{p,fl} \Delta T_{fl}) = m \Delta h \quad (2.3)$$

In der Praxis weisen die meisten verfügbaren PCM keinen scharfen Schmelzpunkt auf, da es sich meist um Stoffmischungen handelt und

nicht um reines PCM. Es ist vielmehr ein Temperaturbereich, innerhalb dessen das Material schmilzt bzw. kristallisiert (vgl. Abb. 2.2). Für das PCM Micronal beträgt der Schmelzbereich ungefähr 2,5 K (Abb. 2.2 (b)). Verläufe von spezifischer Enthalpie  $\Delta h$  und Wärmekapazität  $c_p$  des PCM Micronal wurden im Dynamischen Differenzkalorimeter (engl. Differential Scanning Calorimeter (DSC)) gemessen. Messungen mittels DSC sind die Standardmethode zur Bestimmung von Phasenwechseltemperatur und spezifischer Enthalpie bei PCM. Die Schmelzenthalpie entspricht der Fläche unter dem Peak der  $c_p$ -Kurve zwischen Onset und Offset. In DIN 51004 [40] ist festgelegt, wie aus einer  $c_p$ -Kurve mit Hilfsgeraden die extrapolierten Peakanfangs- (Onset) und Peakendtemperaturen (Offset) sowie die Peakmaximumtemperatur (Peak-Temperatur) bestimmt werden können. Wenn eine Schmelztemperatur von PCM angegeben ist, handelt es sich in der Regel um die Onset-Temperatur - gelegentlich aber auch um die Peak-Temperatur [38].

Eine ausführliche Darstellung von in Latentspeichern eingesetzten PCM folgt in Kapitel 2.1.2. Als Maß für die Leistungsfähigkeit eines PCM kann die spezifische Enthalpie (Synonym: latente Wärme) herangezogen werden.

Die dritte Form der thermischen Speicherung, die *thermochemische*, nutzt die Reaktionsenergie reversibler chemischer Prozesse oder von physikalischen Oberflächenreaktionen. Bei der Bindung und Aufspaltung von Molekülen können diese Speichersysteme große Energiemengen ohne nennenswerte Wärmeverluste aufnehmen und abgeben. Verglichen mit sensiblen und latenten Speichern erreichen thermochemische die größte Wärmekapazität [35, S. 565f.].



**Abb. 2.2:** (a) Spezifische Enthalpie und (b) spezifische Wärmekapazität beim Schmelzvorgang einer PCMhaltigen Gipskartonplatte (Smartboard 23) [nach 35, S. 559]

### 2.1.2 Materialien für Latentwärmespeicher

Geeignete Materialien für Latentwärmespeicher lassen sich in drei Kategorien unterteilen: organische (dazu zählen Paraffine und Fettsäuren), anorganische (beispielsweise Metalle und Salzhydrate) und eutektische Mischungen (wie z.B. Mischungen aus anorganischen und organischen Materialien) [41]. Essentiell für die Auswahl des passenden Materials für die jeweilige Anwendung ist der Schmelzbereich (vgl. Abb. 2.3). Dieser wird so gewählt, dass hauptsächlich der Phasenübergang zur Energiespeicherung genutzt werden kann und nicht der weniger nützliche sensible Speicherbereich.

Neben dem passenden Schmelzbereich sind noch weitere Eigenschaften wichtig für den Einsatz eines PCM als Latentspeicher [42]:

#### Thermophysikalische Eigenschaften

hohe Schmelzenthalpie, geringe Unterkühlung, hohe Wärmekapazität, hohe Dichte, geringe Volumenausdehnung während des

Phasenwechsels, schnelle Kristallisationsrate, gute Wärmeleitfähigkeit

### **Chemische Eigenschaften**

hohe thermische Stabilität, geringe zeitabhängige Degradation, nicht brennbar, nicht korrosiv, nicht toxisch

### **Wirtschaftliche Voraussetzungen**

verfügbar, kostengünstig

### **Auswirkungen auf die Umwelt**

Möglichkeit des Recyclings, hohe Umweltverträglichkeit, gute CO<sub>2</sub>-Bilanz

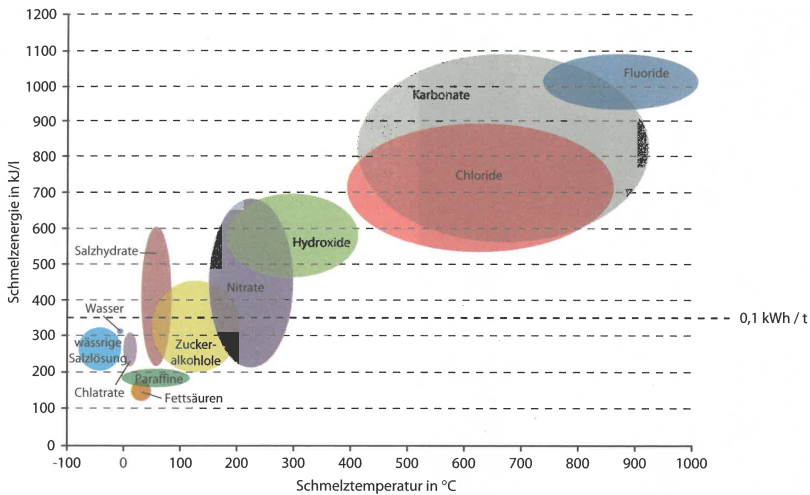
Für den Gebäudesektor werden hauptsächlich organische PCM – Paraffine und Fettsäuren – und anorganische Salzhydrate genutzt. In beiden Stoffgruppen lassen sich verschiedene, für den in unseren Breiten relevanten Temperaturbereich von 20 °C-25 °C passende, Materialien finden<sup>1</sup>.

Vorteilhaft bei der Gruppe der organischen PCM ist, dass Unterkühlung<sup>2</sup> höchstens minimal auftritt und es nicht zur Phasentrennung kommt. Sie sind für einen großen Temperaturbereich verfügbar, chemisch stabil, nicht korrosiv, recyclebar und haben eine hohe Schmelzwärme. Allerdings verfügen sie über eine relativ geringe Energiespeicherdichte und Wärmeleitfähigkeit im Bereich von 0.1 bis 0.7 W/mK [44]–[46]. Bei Paraffinen handelt es sich um Kohlenwasserstoffe ( $C_nH_{2n+2}$ ), deren latente Wärme und Schmelzpunkt mit der Kettenlänge ansteigen [47]. Fettsäuren weisen ähnliche Wärmeleitfähig-

---

<sup>1</sup> Der Markt an PCM-Produkten für Gebäudeanwendungen ist in stetem Wandel. Einen umfassenden – wenngleich auch vermutlich keinen vollständigen – Überblick verfügbarer PCM-Baustoffe und Hersteller ist in [43] zu finden.

<sup>2</sup> Unterkühlung bezeichnet den Effekt, dass das Material erst bei niedrigerer Temperatur kristallisiert als es zuvor geschmolzen ist. Für Anwendungen in Latentwärmespeichern ist das Auftreten von Unterkühlung ungünstig und gilt es deshalb zu vermeiden. Weiterführende Erläuterungen dazu sind in Mehling und Cabeza [38, S. 65ff.] zu finden.



**Abb. 2.3:** Eingesetzte Materialklassen in Latentwärmespeichern in Abhängigkeit von Schmelzenthalpie und -temperatur [35, S. 559]

keiten, aber einen etwas schärferen Phasenübergang auf als Paraffine. Außerdem sind sie etwas teurer und zudem leicht korrosiv [46].

*Salzhydrate* haben gegenüber Paraffinen die Vorteile, dass sie höhere Wärmleitfähigkeit, Energiespeicherdichte und einen schärferen Phasenwechsel aufweisen. Außerdem zeigen sie geringe Volumenänderungen, sind nicht brennbar, sehr kostengünstig und einfach herzustellen. Sie wurden Mitte des 20. Jahrhunderts als erste PCM eingesetzt und wurden seither umfassend erforscht. Allerdings haben sie drei entscheidende Nachteile: sie sind korrosiv, es tritt häufiger Unterkühlung und Phasentrennung auf [41], [45].

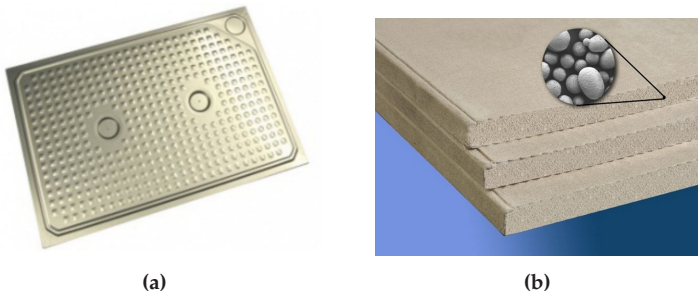


### 2.1.3 Integration von PCM in Gebäude

Grundsätzlich gibt es zwei Herangehensweisen zur Integration von PCM in Gebäude: bei zentralen Systemen wird das PCM in einem zentralen großen Speicher platziert, bei dezentralen – die deutlich weiter verbreitet sind – wird das PCM mikro- oder makroverkapselt dezentral in Wänden, Decken, Böden oder auch Jalousien eingebracht [44], [48]. Bei der dezentralen Variante stellt die Verkapselung die größte Herausforderung dar: Damit das PCM nicht im flüssigen Zustand aus den Bauteilen austritt, muss es verpackt werden. Das Verkapselungsmaterial muss stark genug sein, um den thermischen und mechanischen Stress aushalten zu können, der durch die Phasenwechsel auftritt. Außerdem muss es beständig gegenüber Korrosion und anderen Wechselwirkungen mit dem umgebenden Material sein und es sollte einfach installierbar sein [42].

Die *Mikroverkapselung* ist bislang nur für organische PCM kommerziell verfügbar. Die Mikro kapseln sind kugelförmig oder zylindrisch und haben einen Durchmesser  $< 1\text{ mm}$ . Der klassische und kosteneffiziente Herstellungsprozess ist auf Wasserbasis und lässt sich mit hydrophobem Füllmaterial wie bspw. Paraffin gut durchführen. Durch das große Oberflächen-Volumenverhältnis funktioniert die Wärmeübertragung zwischen PCM und Umgebung sehr gut. Außerdem verbessert die Mikroverkapselung die Zyklenstabilität, da eine eventuell auftretende Phasentrennung nur zu sehr geringen Abständen führt [49]. Salzhydrate sind ungeeignet für eine Mikroverkapselung. Selbst wenn es gelingt, sie einzuschließen, ist in der Regel die Wandstärke des organischen Kapselmaterials zu gering, so dass es zu Dampfdiffusion kommen kann. Dazu kommt, dass der Effekt der Unterkühlung bei Salzhydraten stark volumenabhängig ist: Je kleiner das Volumen, desto stärker tritt Unterkühlung auf [43].

Die mit PCM gefüllten Kügelchen, die eine Art Pulver ergeben, werden anschließend in Bauteile, z.B. Gipskartonplatten, Beton oder auch Wandputz eingebracht. Die Integration dieser PCM-Baustoffe in Gebäude ist ohne größere Eingriffe oder Aufwand möglich und die Installationskosten sind vergleichbar mit denen des Baumaterials ohne PCM. Sie können als Raumteiler oder Verkleidung verwendet werden, an eine Wand gehängt oder in eine Decke gelegt werden [50], [51].



**Abb. 2.4:** (a) Makrokapsel gefüllt mit organischem PCM RT des Herstellers Rubitherm GmbH [52] (b) Mikroverkapseltes Paraffin Micronal des Herstellers BASF [53]

Für die *Makroverkapselung* von PCM sind metallische Verkapselungen und Polymermaterialien verfügbar. Sie werden in verschiedenen Formen realisiert, wie Rohre, Kugeln, Platten oder Quader, und haben einen Durchmesser  $> 1\text{ mm}$ . Der wichtigste Aspekt ist eine möglichst große Oberfläche, um hohe Wärmeübertragungsraten erzielen zu können. Metallbehälter eignen sich gut für Paraffine, jedoch wegen möglicher Korrosion nicht für Salzhydrate. Bei Polymermaterialien ist es genau andersherum: Für Paraffine sind sie nicht geeignet, da diese durch die unpolaren Polymere entweichen können. Für Salzhydrate stellen sie jedoch eine gute Verpackung dar, da sie eine stabile Wasserbarriere bilden und keine Korrosion auftreten kann [43]. Zur Integration in Ge-

bäuden werden die Makrokapseln dann bspw. in abgehängten Decken platziert.

PCM-Anwendungen werden in drei Kategorien unterteilt: passive Systeme, aktive Systeme und Systeme mit freier Kühlung [44], [54, S. 1ff]. In einem passiven PCM-System werden diese ohne zusätzliche Anlagen für Heizung, Lüftung und Klimatechnik (HLK) integriert. Verbreitete passive PCM-Systeme sind in Wände oder Decken integrierte PCM, die durch natürliche Lüftung (z.B. geöffnete Fensterelemente) nachts regenerieren. Aktive PCM-Systeme werden mit Klimaanlage kombiniert und stellen gemeinsam den thermischen Komfort sicher. Bei der Nutzung von PCM in Kombination mit Freier Kühlung sorgt eine Lüftung für zusätzliche Luftbewegung im Gebäude. Eine verbreitete Anwendung ist, dass nachts kühle Außenluft im Gebäude verteilt wird, so dass die Wärmeübertragung erhöht und das PCM beim Phasenwechsel unterstützt wird [55].

### 2.1.4 Ziele des Einsatzes von PCM in Gebäuden

Die erste dokumentierte Anwendung von PCM in einem Gebäude ist das 1948 errichtete Dover Sun House. Als PCM kam Glaubersalz zum Einsatz, das in Fässern gelagert wurde. Solarkollektoren erwärmten Luft, die mit Hilfe von Ventilatoren um die Fässer geblasen wurde. Nachts konnte die Wärme aus dem Glaubersalz zum Heizen genutzt werden [56].

Während der folgenden Jahrzehnte wurden Latentwärmespeicher für Gebäudeanwendungen intensiv erforscht. Besonders um die Jahrtausendwende rückten sie wieder verstärkt in den Fokus als Instrument zur Erreichung klimapolitischer Ziele: Der Einsatz von PCM kann den thermischen Komfort in Gebäuden steigern – ohne zusätzlichen Energieaufwand durch beispielsweise HLK-Anlagen. PCM dienen vor allem

der Vermeidung bzw. Reduktion sommerlicher Überhitzung. Ihr größtes Potential entfalten sie in der Anwendung im Leichtbau, da durch die PCM die thermische Speicherkapazität des Gebäudes erhöht wird und dadurch Temperaturspitzen abgemildert und in die Abendstunden verschoben werden können. Bei geringerer Umgebungstemperatur kann dann die Wärme durch Lüften leichter nach draußen abgeführt werden als tagsüber bei hohen Außentemperaturen (z.B. [28], [57], [58]).

PCM können aber auch genutzt werden, um elektrische Lasten in Zeiten niedriger Energiepreise zu verschieben, indem HLK-Anlagen nachts eingesetzt werden statt tagsüber. Beispielsweise kann während des Winters die Klimaanlage nachts Wärme produzieren, die von den PCM gespeichert wird und tagsüber wieder abgegeben wird, um dann für eine angenehme Temperierung zu sorgen. Dies hat neben dem Sparen von Stromkosten noch den positiven Nebeneffekt, dass es tagsüber zu weniger Geräuschen und Luftbewegungen durch die Klimaanlage kommt, was z.B. für Büroräume ein großer Vorteil ist [59]. Diese Einsatzmöglichkeit ist allerdings eher relevant für wärmere Länder, in denen Klimaanlage bzw. elektrische Heizungen sehr viel verbreiteter sind als in Deutschland und während der Heizperiode zum Einsatz kommen.

## 2.2 Thermischer Komfort

### 2.2.1 Historische Entwicklung der Forschung über Komfort in Gebäuden

Zwei der wichtigsten Faktoren für die Produktivität der Menschen an ihrem Arbeitsplatz sind ihr Wohlbefinden und der Raumkomfort, die sich allerdings auch gegenseitig bedingen. Ihre herausragende Wich-

tigkeit zeigt sich darin, dass sie von zentraler Bedeutung für den wirtschaftlichen Erfolg von Unternehmen sind [34], [60], [61]. Daher beschäftigt diese Thematik die Wissenschaft bereits seit dem 19. Jahrhundert.

Ursprünglich war das Verständnis von Raumkomfort nur mit den Faktoren Licht, Wärme und Lüftung verknüpft [62]. Im Laufe des 20. Jahrhunderts wurde das Konzept erweitert und man erkannte die Bedeutung der Wechselwirkungen zwischen Mensch und Umwelt auf den wahrgenommenen Komfort (z.B. durch Anpassung von Kleidung oder der Arbeitsgeschwindigkeit, Möglichkeit zur aktiven Steuerung der Belüftung eines Raumes) [63]. Aus dieser Beobachtung wurde die These abgeleitet, dass der Mensch eine gewisse Fähigkeit zur Anpassung an seine Umwelt besitzt. Nach und nach wurde immer deutlicher, dass das Konzept der Behaglichkeit noch sehr viel komplexer ist. Behaglichkeit ist nicht nur eine Frage der Physiologie, sondern auch psychologische Aspekte haben großen Einfluss und sie wird nicht zuletzt von demografischen Faktoren, wie Geschlecht, Alter und Kultur beeinflusst [62]<sup>3</sup>. Subjektive Erwartungen hinsichtlich thermischer Bedingungen beeinflussen wiederum die Reaktionen von Nutzer:innen, was eine Abnahme des thermischen Komforts nach sich ziehen kann, wenn Erwartungen nicht erfüllt werden [65]. Verhalten von Nutzer:innen ist deshalb in den vergangenen zwei Jahrzehnten verstärkt in den Fokus der Forschung gerückt, um Interaktionen zwischen Verhalten von Nutzer:innen und Gebäudesystemen besser verstehen und vorhersagen zu können [16].

Darüber hinaus kamen viele Studien zu dem Schluss, dass es offensichtliche Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Komfortparametern (z.B. Luftqualität, thermischer Komfort, visuelle und akustische Raum-

---

<sup>3</sup> Darüber hinaus ist inzwischen bekannt, dass viele weitere Variablen die Wahrnehmung thermischen Komforts beeinflussen. Eine Übersicht relevanter Studien dazu ist bei Risetto et al. in [64] zu finden

qualitäten) gibt [66]<sup>4</sup>. Gleichzeitig wurde mit dem Aufkommen des adaptiven Ansatzes zur Erklärung von Raumkomfort die Erkenntnis gewonnen, dass die thermische Behaglichkeit in natürlich belüfteten Gebäuden als eine Funktion der Außentemperatur ausgedrückt werden kann, da alle anderen Faktoren, die zuvor als relevant angesehen wurden, letztlich auch von der Außentemperatur abhängen [68], [69]. Es wurde darüber hinaus auch deutlich, dass Laborexperimente Studien im Freien nicht ersetzen können, da die dort vorhandenen Wechselwirkungen in einer künstlichen Umgebung nicht angemessen reproduziert werden können [67], [68], [70].

Das zentrale Interesse der vorliegenden Arbeit lag auf der Untersuchung des thermischen Einflusses von PCM in einer realen Anwendungsumgebung. Daher wurde die Analyse auf den Teilaspekt des thermischen Komforts beschränkt. Besonders hinsichtlich des Aspekts der Arbeitsproduktivität (z.B. in Büros und Labors, aber auch in Schulen) ist der thermische Komfort von großem Interesse, denn ein als zu warm wahrgenommenes Raumklima korreliert mit Müdigkeit und einer als unproduktiv eingeschätzten Arbeitsleistung. Frühere Studien kamen zu dem Ergebnis, dass über die Hälfte der Interviewten im Sommer unzufrieden waren mit den Temperaturen, im Winter betrug ihr Anteil nur 30%. Vor dem Hintergrund, dass Personalkosten in vielen Branchen den Großteil der laufenden Kosten ausmachen, ist es für Arbeitgeber, Gebäudeeigentümer und die gesamte Gesellschaft essentiell, eine produktive Arbeitsumgebung mit angenehmen Temperaturen sicherstellen zu können [34], [60].

Das dieser Arbeit zugrunde liegende Verständnis von thermischem Komfort orientiert sich an der Definition der American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), die die

---

<sup>4</sup> Einen umfassenden Überblick zur historische Entwicklung der Forschung im Bereich der Behaglichkeit in Gebäuden ist in Gossauer [67] zu finden.

thermische Behaglichkeit als einen Gemütszustand ansieht, der die Zufriedenheit mit der thermischen Umgebung ausdrückt und eine subjektive Einschätzung ist, definiert [71, S. 3]. Aufgrund der Vielzahl von Einflussfaktoren und Wechselwirkungen kann die Behaglichkeit nicht einfach gemessen werden, sondern wird am besten durch die Kombination von Messungen physikalischer Parameter mit Nutzerbefragungen bewertet. Bei natürlich belüfteten Gebäuden – zu denen auch die beiden in Kapitel 5 präsentierten Fallstudien zählen – lässt sich die Behaglichkeit am besten durch eine Studie ermitteln, bei der beide Arten von Daten gleichzeitig erfasst werden [62].

### **2.2.2 Geltende Bestimmungen und Bewertung des thermischen Komforts**

In Deutschland gibt es verschiedene Normen und Verordnungen, die den thermischen Komfort sowie seine Bewertung in Innenräumen regeln und bei Planung und Bau von Gebäuden zu berücksichtigen sind.

Die DIN 4108-2 [72] gibt den Wärmeschutz in Gebäuden vor und definiert Anforderungen zur Vermeidung von sommerlicher Überhitzung. In der Norm wurde Deutschland in drei Sommerklimaregionen unterteilt mit Temperaturobergrenzen zwischen 25 °C und 27 °C. Die Norm definiert zulässige Zeiträume, innerhalb derer die Raumtemperaturen diese Temperaturobergrenzen übersteigen dürfen.

Ergänzend gelten die „Technische Regeln für Arbeitsstätten“ (ASR A3.5 Raumtemperatur) [73], die eine Konkretisierung der Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV) [74] sind. Die ASR A3.5 Raumtemperatur legt fest, dass ab einer Innenraumtemperatur von 26 °C zusätzlich zu den zuvor schon nötigen Sonnenschutzvorkehrungen weitere Maßnahmen

zur Kühlung ergriffen werden *sollen*, ab 30 °C *müssen* diese umgesetzt werden.

Randbedingungen zur objektiven Bewertung des Innenraumklimas in Gebäuden sind in der Norm DIN EN 16798-1<sup>5</sup> festgelegt. Unter anderen komfortrelevanten Parametern werden darin Anforderungen an das thermische Raumklima definiert. Für die Bewertung wird nach Gebäuden mit oder ohne maschinelle Kühlung unterschieden. Für Gebäude ohne aktive Kühlung wird das *adaptive Modell* herangezogen. Dieses basiert auf der Prämisse, dass die Raumtemperatur von der Außentemperatur abhängt und die Nutzer:innen in den Sommermonaten höhere Raumtemperaturen akzeptieren. Bei maschinell gekühlten Gebäuden wird das *Modell des vorhergesagten Mittelwerts* (englisch Predicted Mean Vote, PMV) herangezogen, das unabhängig von der Außentemperatur statische Komfortgrenzen definiert. Abhängig vom Maß an Erwartungen, die die Nutzer:innen an die Innenraumqualität stellen – hoch, mittel, moderat oder niedrig – werden im Anhang B entsprechende für Deutschland geltende Grenzwerte definiert.

### 2.3 Indikatoren zur Bewertung des Einflusses von PCM auf thermischen Komfort

Die Bewertung des Effekts von PCM auf das Raumklima bzw. den thermischen Komfort wird sehr unterschiedlich gehandhabt. Viele Studien analysierten das Profil der Raumtemperatur und verglichen Peak-Temperaturen oder die Ausprägung täglicher Temperaturamplituden von Anwendungen mit und ohne PCM (z.B. [19], [27], [28], [55], [76], [77]). Oft wurden dabei die Raumlufttemperaturen betrachtet – nicht die operativen Temperaturen, die für den thermischen Komfort rele-

---

<sup>5</sup> Der Vorgänger dieser Norm, die DIN EN 15251 [75], wurde im April 2021 ersetzt



vanter sind. Desweiteren lassen sich zahlreiche Studien finden, die Energie- oder Kosteneinsparung durch PCM quantifizieren (z.B. [59], [78]–[80]). Eine kleinere Anzahl an Studien analysierte Zeitspannen des Diskomforts mit und ohne PCM. Als Maß für Diskomfort werteten einige wenige Studien die Anzahl der Stunden oberhalb einer definierten statischen Komfortgrenze [21], [81], [82], Jamil et al. verwendeten in [19] keine statische, sondern eine adaptive Grenze, und zwei Studien analysierten nicht nur die Zeit, sondern auch den Grad des Diskomforts, die sogenannten Cooling Degree Hours (CDH, deutsch Kühlungsgradstunden). Dazu berechneten sie die jeweilige Temperaturdifferenz aus operativer Raumtemperatur  $T_{op}$  und Komfortgrenze  $T_{lim}$  in Zeiten der Überhitzung (+) und multiplizierten diese mit der Dauer  $\delta = 1h$  (s. Gleichung 2.4) [83], [84].

$$CDH = \sum_{i=1}^N (T_{op,i} - T_{lim,i})^+ \delta \quad (2.4)$$

Evola et al. bemerkten in [57] bereits diese Uneinheitlichkeit bei der Bewertung von PCM. Zur Vereinheitlichung schlugen sie vier Indikatoren für eine ganzheitliche Bewertung des Effekts von PCM auf den thermischen Komfort und der PCM-Effektivität vor.

Zur Bewertung

### **des thermischen Komforts:**

- Intensität des thermischen Diskomforts (ITD, engl. intensity of thermal discomfort)
- Häufigkeit thermischen Komforts (HTK, engl. frequency of thermal comfort conditions FTC)

### **der PCM-Effektivität:**

- Häufigkeit der Aktivierung des PCM
- Wärmespeichereffizienz.

Die ITD erfasst die Überhitzungsstunden und ist die Summe der Differenzen zwischen operativer Raumtemperatur  $T_{op}$  und einem Schwellenwert  $T_{lim}$  während der Belegungszeit  $P$  multipliziert mit der jeweiligen Zeitdauer. Neu gegenüber den schon vorher gelegentlich verwendeten CDH war bei Evola et al., dass der berücksichtigte Schwellenwert sowohl statisch als auch adaptiv, also abhängig von den Außentemperaturen, sein kann.

Die HTK ist definiert als prozentualer Anteil der Belegungszeit, der die Bedingungen für thermische Behaglichkeit erfüllt, wenn also die operative Raumtemperatur innerhalb eines genau definierten Bereichs liegt [85]. Auf die anderen beiden Indikatoren wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen, da der Fokus der Arbeit auf der Bewertung des thermischen Komforts lag.

Darüber hinaus bemerkten Evola et al., dass oftmals nur kurze Zeitperioden von einzelnen bis wenigen Tagen betrachtet und für diese Zeitspannen dann die jeweiligen Indikatoren analysiert wurden. In der Realität gibt es viele Tage, an denen das PCM nicht richtig arbeitet, da sich die Raumtemperaturen außerhalb des Schmelzbereichs bewegen oder die nächtliche Regeneration nicht oder nicht vollständig gewährleistet wird. Bei der Auswertung eines sehr kurzen Zeitraumes besteht daher die Gefahr, dass das Ergebnis verfälscht und das Potential des PCM falsch eingeschätzt wird. Deshalb betonten die Autoren, dass eine lange Analyseperiode im Bereich von mehreren Monaten wichtig und sinnvoll sei. Außerdem sei es wichtig, die operative Raumtemperatur – nicht die Lufttemperatur – zu analysieren, da es bei diesen Betrachtungen um eine Bewertung des thermischen Komforts geht [57].

Obwohl diese Vorschläge für eine Vereinheitlichung schon fast zehn Jahre zurückliegen, ist aus den neueren Publikationen nach wie vor kein Konsens darüber ersichtlich, wie die Effizienz von PCM-Systemen bewertet werden soll. Für die vorliegende Arbeit wurden für die Bewertung des PCM-Effekts sowohl das Maß der CDH verwendet, als auch die operative Raumtemperatur. Mehr Details werden im Unterkapitel 5.4 beschrieben.

## **2.4 Vorarbeiten**

### **2.4.1 Erstellung einer Liste von Gebäuden mit PCM-Systemen**

Zu Beginn wurde eine Liste aller Gebäude erstellt, in denen dezentrale PCM-Systeme in den Jahren 2000 bis 2015 installiert wurden (vgl. Tab. A.1). Bei vielen dieser Gebäude wurde die Installation des PCM wissenschaftlich begleitet und es waren daher öffentlich zugängliche Informationen in Form von Projektdokumentationen zu finden. Darüber hinaus wurden Hersteller und Vertreiber von PCM-Produkten kontaktiert und über diesen Weg noch weitere Gebäude gefunden. Die identifizierten Gebäude deckten ein breites Spektrum an Nutzungsarten ab: Schulen und andere Bildungseinrichtungen, Bürogebäude, Kindergärten, eine Arztpraxis, Wohngebäude, Gästehäuser, ein Gericht und ein Tropenhaus. Es ist anzunehmen, dass es noch zahlreiche weitere v.a. private Gebäude mit PCM-Installationen gab, die nicht in der Liste zu finden sind, da sie über eine Internetrecherche nicht auffindbar waren.

Während der Erstellung der Bestandsliste wurde zu den Gebäudeverantwortlichen Kontakt aufgenommen und ihre grundsätzliche Bereit-

schaft ermittelt, am Forschungsprojekt teilzunehmen. Konkret wurde nach einer Teilnahme an Befragungen, der Möglichkeit des Monitorings über mehrere Wochen und der Entnahme einer PCM-Probe gefragt.

### 2.4.2 Auswahl geeigneter Gebäude

Die Auswahl der für die weitere Analyse in Frage kommenden Gebäude hing in erster Linie davon ab, ob die jeweiligen Ansprechpersonen erreichbar waren, sie sich bereit erklärten teilzunehmen und ob noch ein funktionierendes PCM-System vorhanden war. Zahlreiche Gebäude kamen nicht in Frage für die Untersuchungen: Es gab einige Gebäude, in denen das PCM-System bereits wieder entfernt worden war, da Probleme bei den Komponenten bzw. den Verkapselungen aufgetreten waren. Einige Gebäude eigneten sich aufgrund ihrer Nutzungsart nicht für Befragungen (Kindergarten, Gästehaus, Besucherzentrum), bei anderen wurden die PCM-Räume nicht genutzt oder aktiv auf ein Temperaturniveau gekühlt, bei dem das PCM keinen Phasenwechsel durchlaufen konnte.

### 2.4.3 Monitoring verschiedener PCM-Räume

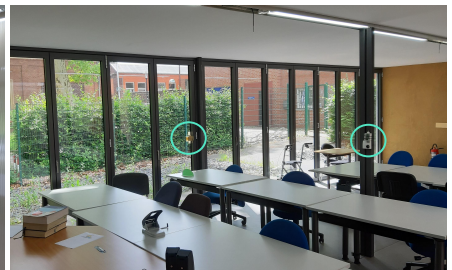
In 2018 und 2019 wurden in fünf Gebäuden in jeweils einem und in einem Gebäude (Freiburger *Sonnenschiff*) in zwei Räumen raumklimatische Daten aufgenommen (vgl. Tab. 2.1 und Tab. 2.4). Während der Monitoring-Zeiträume (vgl. Tab. 2.2) wurden verschiedene Temperaturen (Lufttemperaturen innen und außen, operative Raumtemperatur, Oberflächentemperaturen von Wänden und Decken), Einstrahlungs- und Luftqualitätsparameter sowie Aktivitäten der Nutzer:innen gemessen (vgl. Abb. 2.5).



(a)



(b)



(c)

**Abb. 2.5: Montierte Sensoren in einem Seminargebäude in Essen zur Erfassung raumklimatischer Daten in einem mit PCM-Lehmbauplatten ausgestatteten Gebäude.**

Die Messintervalle betragen zehn Minuten – falls nicht früher bereits ein definierter Grenzwert (z.B. bestimmtes Temperaturintervall) überschritten wurde (sogenannte Wertveränderungsmessung). Eine Übersicht der gemessenen Parameter ist in Tab. 2.3 zu finden.

Bei den dokumentierten Aktivitäten handelte es sich um Öffnen und Schließen von Fenstern und Türen, Betätigung von Jalousien und Nutzung von Ventilationssystemen, wenn diese vorhanden waren. Bei Fenstern, die über zwei Öffnungspositionen verfügten, wurden zwei Kontaktsensoren je Fensterflügel angebracht: je einer am seitlichen und einer am oberen Rahmen, so dass bei der Datenanalyse zwischen 'of-

**Tab. 2.1: Übersicht der Gebäude, in denen Monitoringkampagnen durchgeführt wurden, sowie Informationen über das jeweilige PCM-System. Alle PCM-Systeme waren mit paraffinbasierten Produkten ausgestattet. AB=Altbau, NB=Neubau, NL=Nachtlüftung.**

Standort	Installationsjahr	Gebäudetyp	PCM-Baustoff	Schmelzbereich [°C]	Regeneration	Quelle
Diekirch/ Luxemburg	2007	NB	Smartboard 23 (BASF)	23-26	freie NL (Fenster)	[86]
Freiburg	2004	NB	Comfortboard 23 (BASF)	23-26	elektrische & freie NL	[87]
Tübingen	2003	AB	Gipskartonplatten (BASF)	26-28	elektrische NL	[88]
Remscheid	2006	AB	Gipskartonplatten (BASF), PCM Estrich	24-27	elektrische & freie NL	[89]
Essen	2010	NB	Lehmbauplatten (Lehmorenge)	23-26	elektrische NL	[90]
Straelen	2008	AB	Smartboard 26 (BASF)	26-28	elektrische & freie NL	[91]

fen' und 'gekipp't unterschieden werden konnte. Bei Zimmertüren und Fenstern mit nur einer Öffnungsposition wurde je ein Kontaktsensor oben am Rahmen angebracht (vgl. Abb. 2.5a). Die Einstrahlung wurde von Sensoren dokumentiert, die an der Fensterinnenseite auf halber Höhe und am unteren Fensterscheibenrand positioniert waren (vgl. Abb. 2.5c). Die Nutzung der Ventilation wurde mittels Temperatursensor am Lüftungsausgang gemessen: Im Abgleich mit der Raumlufttemperatur konnte eruiert werden, ob und wann die Lüftung ein-

**Tab. 2.2: Zeitlicher Ablauf der durchgeführten Monitoringkampagnen.**

Standort	analysierter Raum	Messkampagne		
		Beginn	Ende	Dauer [#Wochen]
Diekirch/ Luxemburg:	Klassenzimmer	22.5.2018	3.8.2018	10
Freiburg:	Büros Sonnenschiff	6.6.2018	10.10.2018	18
Tübingen:	Büro Ebök	9.7.2018	23.10.2018	15
Remscheid:	Büro Entsorgungsbetriebe	12.9.2018	27.11.2018	11
Essen:	Seminarräume	2.6.2019	13.11.2019	23
Straelen:	Büro Rathaus	15.8.2019	13.11.2019	13

geschaltet war (vgl. Abb. 2.5b). Außerdem wurde die Anwesenheit von Menschen mittels Bewegungssensor dokumentiert und der  $CO_2$ -Gehalt in der Luft gemessen.

**Tab. 2.3: Gemessene Parameter im *Sonnenschiff* in Freiburg und im Gymnasium in Luxemburg während des Sommers im Jahr 2018.**

Parameter	Einheit	Messbereich	Messunsicherheit	Auflösung
1 Sonneneinstrahlung auf Fenster (mitte und unten)	Lux	300-30000	±5%	117
2 Öffnung von Fenstern und Lüftungspaneele (gekippt und geöffnet)	ja/nein	-	-	-
3 Türöffnung	ja/nein	-	-	-
4 Bewegung	ja/nein	-	-	-
5 Oberflächentemperaturen verschiedener Wände und der Decke	°C	0-40	±0.4	0.16
6 operative Raumtemperatur	°C	0-40	±0.4	0.16
7 Lufttemperatur innen	°C	0-40	±0.4	0.16
8 Umgebungstemperatur (Luft)	°C	0-40	±0.4	0.16
9 Lufttemperatur am Lüftungsausgang	°C	0-40	±0.4	0.16
10 CO <sub>2</sub> -Gehalt der Raumluft	ppm	0-2250	±10%	-



Tab. 2.4: Außenansicht der analysierten Gebäude

Diekirch/ Luxemburg:  
Klassenzimmer



Freiburg: Büros *Sonnen-*  
*schiff*



Tübingen: Büro Ebök



Remscheid: Büro Ent-  
sorgungsbetriebe



Essen: Seminargebäude



Straelen: Büro Rathaus



## 3 Laboranalyse von PCM-Proben

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie die entnommenen PCM-Proben im Labor mittels DSC thermisch charakterisiert und dabei ihre aktuellen spezifischen Enthalpien bestimmt wurden. Anschließend folgt ein Abgleich mit Ergebnissen aus Referenzmessungen und eine Interpretation der Ergebnisse.

### 3.1 Entnahme und Charakterisierung von PCM-Proben

Aus elf Gebäuden konnten Proben des installierten PCM genommen werden. Bei allen handelte es sich um micronalbasierte (=mikroverkapseltes Paraffin des Herstellers BASF) Systeme<sup>1</sup>. Die Gewinnung der Proben war oft nicht einfach, da eine möglichst unauffällige Stelle gefunden werden musste, an der ein würfelförmiges Stück mit einer Kantenlänge von ca. 0,5 cm aus der Wand entnommen werden konnte. Anschließend wurden die Löcher mit Spachtelmasse wieder aufgefüllt. Einzelne Proben wurden von den Gebäudeverantwortlichen selbst entnommen und nach Freiburg gesendet. Eine Übersicht der genommenen und charakterisierten Proben ist in Tab. 3.1 zu finden.

---

<sup>1</sup> Im Zuge der Recherche wurde deutlich, dass PCM-Systeme mit Salzhydraten in der Regel bereits nach wenigen Betriebsjahren wegen Leckagen in der Verkapselung wieder rückgebaut worden waren.

Die Proben wurden im Labor des Fraunhofer ISE im MicroDSCIIIa der Firma Setaram thermisch charakterisiert. Gemäß den aktuell gültigen Güte- und Prüfbestimmungen der RAL Gütegemeinschaft<sup>2</sup> [92] wurden die Proben jeweils zusammen mit einem Referenztiegel von 5 °C bis 30 °C mit einer Heizrate von 0,05 K/min aufgeheizt, zehn Minuten auf der Maximaltemperatur gehalten und dann mit der gleichen Rate wieder abgekühlt. Sofern Rückstellproben des Materials aus der Entwicklungszeit vorhanden waren, wurden diese ebenfalls noch einmal charakterisiert.

**Tab. 3.1: Übersicht der genommenen Proben und der zugehörigen Referenzmessungen.**

Standort	Gebäude	Referenzmessung aus dem Jahr
Konstanz	Demonstrationsgebäude: Ecolar Home	-
Ober-Ramstadt	Labor DAW	-
Remscheid	Büro Entsorgungsbetriebe	2007
Tübingen	Büro Ebök	-
Freiburg	Büro Fraunhofer ISE / C213	2001
Freiburg	Büro Fraunhofer ISE/C219	2001
Freiburg	Büro Fraunhofer ISE/I105	-
Garching	Büro ZAE	-
Karlsruhe	Druckerei E&B	-
Bensheim	Wohngebäude	2004
Luxemburg	Gymnasium	-

---

<sup>2</sup> Eine DIN zur Charaktersisierung von PCM wird aktuell von einer Expert:innengruppe erarbeitet. Für die Durchführung von DSC-Messungen an anderen Materialien gibt es Normen, an die die Prüfbestimmungen der RAL Gütegemeinschaft angelehnt sind.

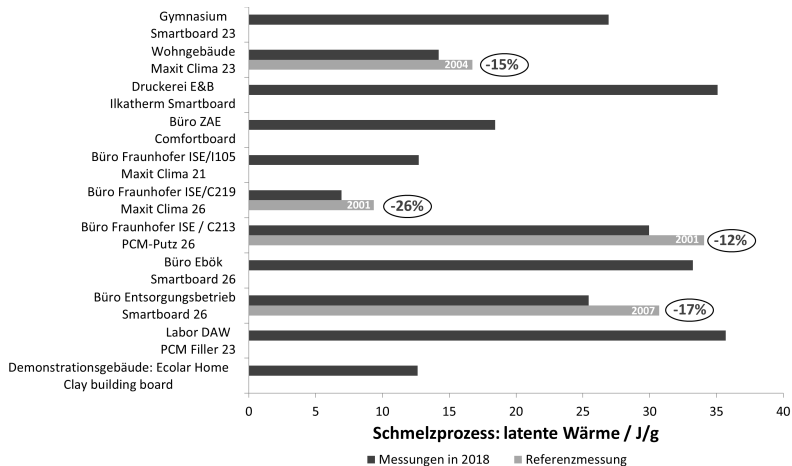
## 3.2 Auswertung

Das Fraunhofer ISE hat für die Auswertungen von DSC-Messkurven ein Softwaretool entwickelt, das auch in diesem Fall verwendet wurde. Diese Software berechnet jeweils aus dem Abgleich der Messkurven von Probetiegel und Referenztiegel die spezifische Wärmekapazität des Probenmaterials und ermittelt anschließend die spezifische Enthalpie.

## 3.3 Ergebnisse und Zwischenfazit

Um eine Aussage über die Veränderung der PCM-Leistungsfähigkeit treffen zu können, wurden Referenzwerte aus der Anfangszeit des jeweiligen Materials benötigt – was sich als zentrale Herausforderung herausstellte. Viele der Materialien wurden in ihrer Entwicklungsphase am Fraunhofer ISE charakterisiert, so dass diese Daten vorlagen. Allerdings wurden PCM Materialien ständig weiterentwickelt, weshalb bei manchen aktuellen Proben nicht bekannt war, mit welcher Referenzmessung sie verglichen werden müssten (s. Gebäude ohne Referenzmessung in Abb. 3.1).

In Abb. 3.1 sind die Ergebnisse der DSC-Messungen sowie der verfügbaren Referenzmessungen dargestellt. Alle vier Proben mit verfügbarer Referenzmessung zeigten eine Abnahme der latenten Wärme um 12-26% gegenüber der Referenz. Diese Ergebnisse stehen im Widerspruch zu den Ergebnissen zweier früherer Studien, die beide keine Leistungsabnahme feststellen konnten. Allerdings unterscheiden sich die Studien auch in der Betriebszeit – in [27] fand nach nur zwei Jahren eine Bewertung statt – und hinsichtlich der Anwendung – in [28] wurde ein experimentelles Gebäude ohne reale Nutzung untersucht. Aufgrund



**Abb. 3.1: Ergebnisse der DSC-Messungen der genommenen Proben und der entsprechenden Referenzmessungen. Das Jahr, aus dem die Referenzmessungen stammten, ist bei dem jeweiligen Messergebnis angegeben (weiße Schrift). Die eingekreisten Prozentangaben beziffern die Abnahme der spezifischen Enthalpie des PCMs.**

dieser abweichenden Ergebnisse sollte demnach weiterhin in diesem Themenfeld geforscht werden.

Die Ursache für die festgestellte Degradation könnte in der Diffusion von Paraffinen aus den Verkapselungen liegen, da eine Degradation des Paraffin selbst ausgeschlossen werden kann [z.B. 41]. Aufgrund der geringen Stichprobengröße sind die ermittelten Veränderungen gegenüber den Referenzwerten allerdings nur als erste Indizien für eine möglicherweise auftretende Alterung bei dem seit langem als sehr stabil geltenden Micronal zu sehen. Eine detaillierte Untersuchung von Alterungseffekten bei micronalbasierten PCM-Systemen in der realen Anwendung ist notwendig, um validere Aussagen darüber treffen zu können. Diese Erkenntnisse könnten der Optimierung von Verkapselungstechnologien und für die Entwicklung geeigneterer Methoden der

beschleunigten Alterung im Labor zur Abschätzung von Langzeitstabilität dienen.





## **4 Befragung von Nutzer:innen und Planern**

In diesem Kapitel werden sozialwissenschaftliche Methoden vorgestellt, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit bei der Befragung von Nutzer:innen und Planern angewendet wurden. Im Rahmen der Arbeit wurden zwei Befragungen durchgeführt: eine qualitative Befragung von Nutzer:innen und Planern von mit PCM ausgestatteten Gebäuden fand vor den Monitoringkampagnen statt und wird in Abschnitt 4.2 erläutert. Eine zweite quantitative Befragung von Nutzer:innen wurde während des Gebäudemonitorings durchgeführt und wird in der zweiten Hälfte des Kapitels in Abschnitt 4.3 beschrieben. Als zentrales Ergebnis dieser Befragungen werden in Abschnitt 4.3.3 die subjektiven Bewertungen des Komforts aus den sieben verschiedenen untersuchten Räumen in Form von Komfortdiagrammen präsentiert.

### **4.1 Befragung als Methode der empirischen Sozialforschung**

Zur Befragung von Nutzer:innen gibt es zwei methodische Herangehensweisen in der empirischen Sozialforschung: qualitative und quantitative Ansätze. Die beiden Ansätze schließen sich nicht gegenseitig aus. Im Gegenteil: Eine Kombination beider Ansätze – parallel oder

nacheinander – wird in der angewandten Forschung häufig gewählt, um die jeweiligen Stärken nutzen zu können und ihre Schwächen auszugleichen. Im Zentrum des qualitativen Forschungsprozesses steht der Wunsch, die Zielgruppe des Interesses selbst zu Wort kommen zu lassen und ihre subjektive Sichtweise erfassen zu können. Quantitative Forschung dagegen zielt darauf ab, repräsentative – also verallgemeinerbare – Ergebnisse für eine Grundgesamtheit zu generieren und menschliches Verhalten mit Hilfe von Modellen beschreiben und damit prognostizieren zu können. Oder anders formuliert: Qualitative Forschung zielt darauf ab, Hypothesen zu generieren, während quantitative Ansätze eine Annahme (Verifizierung) oder Ablehnung (Falsifizierung) von Hypothesen anstrebt. Daher ist qualitative Forschung oftmals die Grundlage, auf der weitere – quantitative oder qualitative – Analysen aufbauen [93, S. 24ff.]. In der vorliegenden Arbeit wurden beide Methoden verwendet.

## 4.2 Qualitative Befragung

Zu Beginn des Forschungsprojekts wurde eine erste qualitative Befragung in Form von halbstandardisierten persönlichen Interviews bei Vor-Ort-Terminen in Kombination mit standardisierten Fragebögen durchgeführt. Die Befragung wurde im Rahmen einer während dieser Arbeit betreuten Masterarbeit durchgeführt [94]. Die wichtigsten Ergebnisse werden im Folgenden wiedergegeben.

Ziel dieser ersten Befragung war, ein tieferes Verständnis der Perspektive der Nutzenden auf die PCM-Systeme und über die Motivation zur Installation von PCM bei Planer:innen und Architekt:innen zu erhalten. Dafür wurden zielgruppenspezifische Interviews vorbereitet und unterschiedliche Akteur:innen befragt (Nutzer:innen, Planer & Facility-

Manager). Die Befragungen wurden basierend auf dem *Leitfaden INKA: Instrument für Nutzerbefragungen zum Komfort am Arbeitsplatz* [95] und auf der Arbeit von Gossauer [67] gestaltet.

Die Interviews wurden als problemzentrierte Interviews aufgebaut:

"Die Konstruktionsprinzipien des problemzentrierten Interviews [...] zielen auf eine möglichst unvoreingenommene Erfassung individueller Handlungen sowie subjektiver Wahrnehmungen und Verarbeitungsweisen gesellschaftlicher Realität. [96]"

Drei Aspekte kennzeichnen das problemzentrierte Interview:

1. Orientierung an Problemstellung: Interviewer bringt Vorwissen mit und formuliert Fragen angelehnt an dieses Vorwissen
2. Orientierung an Gegenstand: Interview ist methodisch flexibel und kann bspw. mit einem Fragebogen kombiniert werden, wenn es der Untersuchungsgegenstand erfordert
3. Prozessorientierung: schrittweise Gewinnung und Prüfung von Daten, wobei der Interviewprozess als solcher flexibel gehalten wird

Während der Interviews wurden diese Punkte dahingehend umgesetzt, dass sie weitestgehend als offene Dialoge mit flexibler Leitfadenstruktur geführt wurden und sich die Gesprächspartner:innen frei äußern konnten. Zu Beginn füllten die Gesprächspartner:innen einen Kurzfragebogen aus, in dem Sozialdaten abgefragt wurden. Anschließend wurde anhand des Leitfadens (s. Anhang A.1) das Gespräch geführt, das mittels Tonbandaufnahme festgehalten wurde, um die Interviewerin nicht von der Gesprächsführung abzulenken. Im Anschluss an die Interviews erstellte die Interviewerin Postskripte, in denen sie zusätzliche Anmerkungen notierte.

Die Befragung der **Nutzer:innen** zielte darauf ab zu erfahren, wie sie mit unangenehmen Temperaturen im Raum umgehen und als wie wirksam sie ihr Verhalten für eine Verbesserung ihres Komfortempfindens einschätzen. Zum Einstieg wurde abgeklärt, ob den Nutzer:innen das Kühlkonzept des Gebäudes und die Funktionsweise von PCM bekannt waren. Anschließend wurden die Teilnehmenden nach der Temperaturentwicklung in den PCM-Räumen im Tagesverlauf gefragt. Bei Gebäuden, in denen nicht alle Räume mit PCM ausgestattet waren, wurde auch danach gefragt, ob Unterschiede wahrnehmbar waren in der Temperaturentwicklung zwischen den Räumen mit und ohne PCM. Bei funktionierendem PCM ist ein weniger starker Temperaturanstieg im Tagesverlauf zu erwarten als in einem Raum ohne PCM. Schließlich wurde noch geklärt, welche Vorrichtungen zur Raumtemperierung neben dem PCM noch vorhanden waren und als wie effizient diese wahrgenommen wurden.

Darüberhinaus wurden über einen standardisierten Fragebogen (s. Anhang A.3) einige Aspekte aus den Interviews vertieft und weitere zusätzlich aufgenommen. Die standardisierten Fragebögen wurden sowohl von den Interviewpartner:innen als auch von weiteren Nutzer:innen in den Gebäuden ausgefüllt und per Post zurückgesandt.

Die Interviews mit **Planern** (vgl. Leitfaden im Anhang A.2) zielten darauf ab, die Gründe für die Installation von PCM-Baustoffen, den Ablauf von Planung und Umsetzung sowie ihre Zufriedenheit mit den PCM-Produkten zu erfahren.

### 4.2.1 Durchführung der qualitativen Befragungen

Die Befragungen wurden zwischen Ende Juni und Ende Juli 2017 in einem Schul-, in drei Bürogebäuden sowie in einem Wohnhaus durchgeführt (vgl. Tab. 4.1). Es konnten insgesamt elf Nutzer:innen interviewt

werden, in drei Räumen saßen jeweils zwei Personen, die gemeinsam interviewt wurden und als jeweils ein:e Nutzer:in gewertet wurden. Insgesamt nahmen also 14 Personen an der Befragung teil, darunter acht Männer und sechs Frauen. Die Gespräche dauerten jeweils ca. 15 Minuten. Durch die Fragebögen konnte Feedback von 16 Personen, darunter fünf Männer und elf Frauen, erhalten werden.

Die Interviews mit Planern dauerten jeweils ca. 45 min und es nahmen vier Personen aus unterschiedlichen Gebäuden teil .

Es gab in keinem der Gebäude eine Kleidervorschrift, so dass davon ausgegangen werden kann, dass überall eine gewisse Anpassung an Temperaturveränderungen über die Kleidung möglich war.

**Tab. 4.1: Durchgeführte Befragungen von Planern und Nutzer:innen.**

Standort	Gebäude	Befragte Nutzer:innen	Rolle des Planers	Datum
Tübingen	Büro Ebök	1	Firmeninhaber	29.06.17
Berlin	Büros	1	–	25.07.17
Lauffen	Gymnasium	2	–	24.07.17
Freiburg	Büros Fraunhofer ISE	2	–	22.05.17
Bensheim	Wohnhaus	1	Bauherr	17.07.17
Diekirch/ Luxemburg	Gymnasium	1	–	09.01.18
Remscheid	Büro Entsorgungsbetriebe	6	Architekt	18.07.17
Freiburg	Büros Sonnenschiff	1	–	19.01.18
Berlin	Tropenhaus	–	Generalplaner	13.07.17

## 4.2.2 Auswertung

Die Interviews wurden mittels qualitativer Inhaltsanalyse ausgewertet. Gemäß dieser Methode wurden verschiedene inhaltliche Kategorien festgelegt, die während des Prozesses der Auswertung auch überarbeitet und abgeändert werden konnten. Das Interviewmaterial wurde anschließend diesen Kategorien zugeordnet und zum Schluss im Hinblick auf die Fragestellung hin interpretiert [97, S. 49ff.]. Die Inhaltsanalyse wurde mit der Software MAXQDA [98] durchgeführt. Eine große Stärke dieser Software ist, dass mit den Audiodateien der Interviews gearbeitet werden konnte und diese nicht transkribiert werden mussten. Die zu Beginn festgelegten inhaltlichen Kategorien wurden im Laufe der Kodierung weiter untergliedert. Die Haupt- und Unterkategorien, sowie die Anzahl der jeweils zugeordneten Aussagen sind in Abb. 4.1 dargestellt.

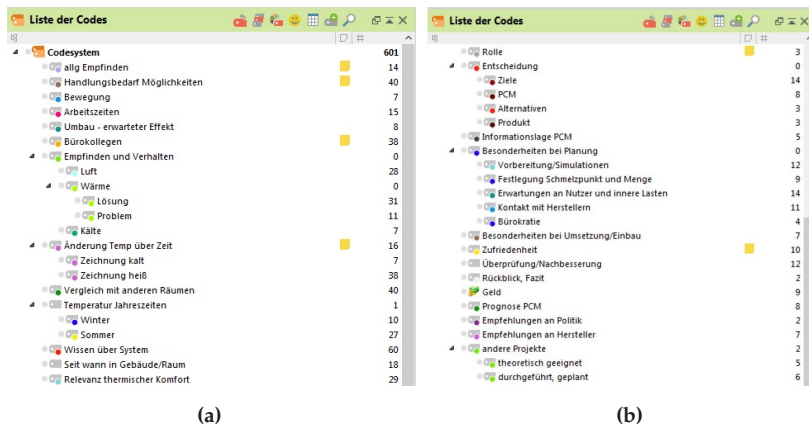


Abb. 4.1: MAXQDA Codes für die Ergebnisse der (a) Nutzer:innenbefragung und der (b) Planerbefragung [94]

Die Fragebögen wurden ebenfalls qualitativ ausgewertet. Die Fragen waren zwar so gestellt, dass auch eine quantitative Auswertung mög-

lich gewesen wäre, aufgrund der geringen Stichprobengröße und der damit einhergehenden begrenzten Aussagekraft wurde jedoch darauf verzichtet. Stattdessen wurden die wesentlichen Erkenntnisse qualitativ bewertet.

### 4.2.3 Ergebnisse

Die qualitative Interviewstudie, in der rund dreißig Nutzer:innen, Planer und Architekten befragt wurden, ergab, dass PCM-Systeme in der Wahrnehmung der Befragten oft nicht zufriedenstellend funktionierten. Als Ursachen konnten Planungsfehler (z.B. zu hohe Schmelztemperatur des verwendeten PCM), eine von der ursprünglichen Planung abweichende Nutzung (z.B. Raumebelegung höher als geplant, Fensterlüftung nicht möglich wie vorgesehen wegen Lärm, Niederschlag oder aus Datenschutzgründen) und nicht angepasstes bzw. nicht optimales Verhalten der Nutzer:innen identifiziert werden. Ein häufiger Konflikt zeigte sich darin, dass die Befragten zwar um die Anforderung wussten, die Fenster während der Arbeitszeit bei höheren Umgebungstemperaturen überwiegend geschlossen zu halten und sie über Nacht zur Abkühlung der Räume zu öffnen. Aber nur zwei der Befragten Personen waren über PCM und ihre Funktionsweise informiert. Den anderen war der Hintergrund dieser Anweisung nicht klar, weshalb wohl einerseits die Akzeptanz für diese Maßnahmen fehlte und andererseits bei einer Interessenabwägung zwischen dem Wunsch nach frischer Luft oder der Notwendigkeit, warme Umgebungsluft draußen zu halten, der wichtige Aspekt der PCM-Funktionalität mangels Nichtwissen bei der Entscheidungsfindung nicht berücksichtigt werden konnte. Das führte dann letztlich dazu, dass Fenster häufig geöffnet wurden, obwohl die Umgebungstemperaturen die Raumtemperaturen überstiegen und somit ein zusätzlicher Wärmeeintrag erfolgte. Dieser Mangel

an Informationen, der ein aus technischer Sicht ungünstiges Verhalten der Nutzer:innen begünstigte, trug also offensichtlich zu einer Beeinträchtigung des Funktionierens einiger PCM-Systeme bei.

In zwei Gebäuden war eine maschinelle Lüftung in der Planung des Gebäudes zur Unterstützung der nächtlichen Regeneration vorgesehen. In beiden Fällen wurde diese jedoch kürzer als geplant bzw. gar nicht eingesetzt, wodurch offensichtlich das PCM in seiner Funktion limitiert wurde. Begründet wurde die Vernachlässigung der Lüftungsanlage bei einem Gebäude durch die große Geräusentwicklung im Raum, was dazu führte, dass die Lüftung nur außerhalb der Arbeitszeiten eingesetzt wurde. Beim anderen Gebäude musste auf die Lüftung verzichtet werden, weil sich Anwohner:innen über die Geräusentwicklung beschwert hatten.

Ein weiterer häufig genannter Konflikt betraf die Nutzung der Jalousien. Einerseits war das Bewusstsein verbreitet, dass ein übermäßiger Energieeintrag durch die Fenster an heißen Tagen durch die Nutzung der Jalousien möglichst verhindert werden sollte. Dem gegenüber stand häufig das Bedürfnis nach Helligkeit und Tageslicht. Auch in diesen Situationen bedeutete eine Entscheidung gegen die technisch optimale Verhaltensweise, dass das PCM-System mit zusätzlicher Wärme im Raum konfrontiert wurde und je nach vorherrschender Temperatur dann mangels Regenerationsmöglichkeit nur eingeschränkt auf den thermischen Komfort einwirken konnte.

Auf die Frage nach der Zukunft von PCM-Produkten waren sich Planer einig, dass der finanzielle Aspekt eine entscheidende Rolle spielen wird. Werden die Baustoffe nicht deutlich günstiger, sahen sie keine Möglichkeit einer größeren Verbreitung. Sie sahen auch durchaus die Stärken der PCM-Baustoffe, gleichzeitig jedoch auch die starke Konkurrenz durch HLK sowie den großen Erklärungsbedarf. Weiter wurde zu bedenken gegeben, dass die zukünftig in unseren Breiten häufiger auf-



tretenden Hitzeperioden dazu führen werden, dass sich die Zeitspanne, während der die Regeneration nachts aufgrund der hohen Temperaturen nicht oder nur unzureichend stattfinden kann, vergrößern wird. Dennoch war die Einschätzung, dass der Einsatz von PCM für Arbeitsstätten (z.B. Büros), Passivhäuser in Leichtbauweise mit großen Unterschieden in Tag-Nacht-Lastprofilen (z.B. Kindergärten, Schulen) durchaus eine gewisse Relevanz haben werde. Für den privaten Wohnraum sahen sie hingegen kein großes Verbreitungspotential. Als Empfehlungen für Hersteller nannten die Befragten zum einen, dass die fehlende Produktpräsenz abgebaut werden müsste, und zum anderen Nachweise über die Wirkung im realen Betrieb auf lange Sicht erbracht werden sollten, um das Vertrauen der Verbraucher:innen in die Langlebigkeit der Produkte zu stärken.

### 4.2.4 Zwischenfazit

Zentrales Ergebnis der Befragung war, dass der Einsatz von PCM von Seiten der Planer:innen inklusive thermischer Simulationen und eines durchdachten Konzepts zur Regeneration intensiv vorbereitet muss. Darüber hinaus ist eine strikte Umsetzung der Planung eine notwendige Voraussetzung dafür, dass PCM-Systeme bestmöglich funktionieren können. Abweichungen von den geplanten inneren Lasten oder solaren Einträgen und mangelnde Möglichkeit der Regeneration können die Wirkung der PCMs beeinträchtigen. Dies stellt für Planer:innen eine gewisse Herausforderung dar, denn einerseits haben die Nutzer:innen durch ihr Verhalten einen enormen Einfluss darauf, ob das PCM wie vorgesehen funktionieren kann. Gleichzeitig verhalten sie sich auch nicht zwingend so, wie es aus Planer:innenperspektive sinnvoll wäre. Andererseits werden Gebäude immer langfristig für mehrere Jahrzehnte geplant, wobei die Nutzung beispielsweise eines Bürogebäudes

während der kommenden 20 Jahre großen Unsicherheiten unterworfen ist. Ähnlich verhält es sich mit der im Zuge des Klimawandels zu erwartende Zunahme von Hitzeperioden: Ein PCM-System, das an die heutigen thermischen Gegebenheiten angepasst ist, wird vermutlich in 20 Jahren nicht mehr so gut passen.

### 4.3 Quantitative Befragung

Eine zweite Erhebung zum thermischen Komfort wurde während der Monitoringkampagnen durchgeführt. Ziel war es, den subjektiv empfundenen Komfort über mehrere Wochen kontinuierlich zu erfassen und mit den zeitgleich erhobenen raumklimatischen Parametern abgleichen zu können. Daraus sollten anschließend Rückschlüsse auf den Nutzen der PCM-Baustoffe für den thermischen Komfort gezogen werden.

#### 4.3.1 Durchführung der quantitativen Befragungen

Diese Umfrage wurde digital durchgeführt, einerseits aus Gründen des Papierverbrauchs und der schnellen Übertragbarkeit der Daten, andererseits auch, um ein niedrighschwelliges Angebot für die Teilnahme zu bieten. Den Teilnehmenden wurden Tablets zur Verfügung gestellt, auf denen die App *Offline Surveys* installiert war. Mit dieser App, die auf der Open-Source-Umfragesoftware *LimeSurvey* [99] aufbaut, wurde eine kurze, aus drei Fragen bestehende Umfrage gestaltet, die drei mal täglich ausgefüllt werden sollte: Kurz nach Ankunft, gegen Mittag und vor dem Gehen. Die Nutzer:innen wurden sowohl nach ihrem Wärmeempfinden als auch nach einer Beurteilung der Luftqualität gefragt. Denn aus der Literatur ist bekannt, dass diese beiden Parameter vonein-

ander abhängen und beide Einfluss auf das Verhalten von Nutzer:innen haben [13], [100]. Folgende Fragen waren zu beantworten:

- Bitte geben Sie eine Abkürzung nach folgendem Muster ein: die ersten beiden Buchstaben des Vornamens Ihrer Mutter (z.B. Maria), die ersten beiden Zahlen ihres Geburtstags (z.B. 01.01.1960), zweiter Buchstabe Ihres Vornamens (z.B. Laura): Ma01a.
- Wie empfinden Sie die Lufttemperatur an Ihrem Arbeitsplatz?  
heiß - warm - angenehm - frisch - kalt
- Wie empfinden Sie die Luftqualität an Ihrem Arbeitsplatz?  
sehr schlecht - schlecht - mäßig - gut - sehr gut
- Haben Sie Maßnahmen ergriffen, um die Lufttemperatur oder -qualität zu verbessern?  
a) Fenster geöffnet b) Tür geöffnet c) Fenster verdunkelt d) Kleidung angepasst e) Ventilator eingeschaltet f) nichts g) Sonstiges

Die Antwortskala hatte angelehnt an die Likert-Skala [101] fünf Antwortmöglichkeiten. Dadurch konnten ausreichende Informationsdetails für die Auswertung gewonnen werden, ohne die Nutzer:innen durch zu viele Antwortoptionen zu überfordern.

### 4.3.2 Auswertung und Bewertung des thermischen Komforts

Aus den messtechnisch erhobenen Daten wurde für jeden der sieben Räume ein Komfortdiagramm gemäß der DIN EN 16798-1 [34] erstellt. Komfortdiagramme visualisieren die operative Raumtemperatur  $T_{op}$  in Abhängigkeit vom gleitenden Mittel der täglichen Umgebungstemperatur  $\Theta_{rm}$  und zeigen, wann die  $T_{op}$  definierte Komfortgrenzen über-

oder untersteigt. Zusätzlich wurde eine weitere Informationsebene in die Abbildungen integriert: Die über die quantitative Befragung erfassten Daten zur subjektiven Bewertung des thermischen Komforts wurden mittels unterschiedlicher Farben dargestellt.

Das gleitende Mittel der täglichen Umgebungstemperatur wurde nach folgender Gleichung (4.1) aus den gemessenen Umgebungstemperaturen  $T_{amb}$  berechnet [34]:

$$\Theta_{rm} = (\Theta_{ed-1} + 0,8 * \Theta_{ed-2} + 0,6 * \Theta_{ed-3} + 0,5 * \Theta_{ed-4} + 0,4 * \Theta_{ed-5} + 0,3 * \Theta_{ed-6} + 0,2 * \Theta_{ed-7}) / 3,8 \quad (4.1)$$

Dabei stand  $\Theta_{ed-i}$  für das Tagesmittel der Außentemperatur am  $i$ -ten vorausgegangenen Tag.

Die Grenzen des thermischen Komforts werden in der erwähnten Norm unterschieden für Gebäude ohne und mit maschineller Kühlung<sup>1</sup>. Alle sechs untersuchten Gebäude gehören zu jenen ohne maschinelle Kühlung, für die die adaptiven Komfortgrenzen gelten. Diese Komfortgrenzen sind für hohe, mittlere und niedrige Komfortansprüche in die Kategorien I - III eingeteilt und werden in der Norm wie folgt definiert [34]:

**Kategorie I** obere und untere Grenze:

$$T_{op} = 0,33 * \Theta_{rm} + 18,8 + 2 \quad (4.2)$$

$$T_{op} = 0,33 * \Theta_{rm} + 18,8 - 3 \quad (4.3)$$

---

<sup>1</sup> Außerdem unterscheidet die Norm noch zwischen Wohn- und Nichtwohngebäuden. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersuchten Gebäude waren alle Nichtwohngebäude.

**Kategorie II** obere und untere Grenze:

$$T_{Op} = 0,33 * \Theta_{rm} + 18,8 + 3 \quad (4.4)$$

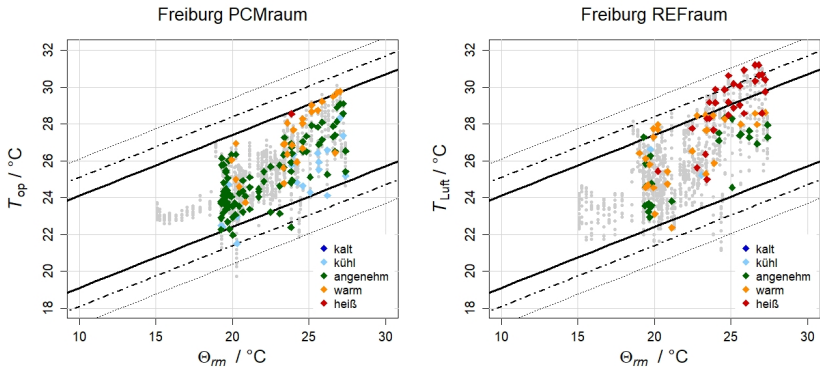
$$T_{Op} = 0,33 * \Theta_{rm} + 18,8 - 4 \quad (4.5)$$

**Kategorie III** obere und untere Grenze:

$$T_{Op} = 0,33 * \Theta_{rm} + 18,8 + 4 \quad (4.6)$$

$$T_{Op} = 0,33 * \Theta_{rm} + 18,8 - 5 \quad (4.7)$$

### 4.3.3 Ergebnisse



**Abb. 4.2:** Komfortdiagramme der beiden Büroräume im Sonnenschiff in Freiburg inklusive Bewertungen des thermischen Komforts durch die Nutzerinnen (farbige Rauten). Graue Punkte stellen Messpunkte ohne zeitgleiche Bewertung dar. Schwarze Linien visualisieren die drei Kategorien der Komfortgrenzen I (durchgezogen) - III (gepunktet).

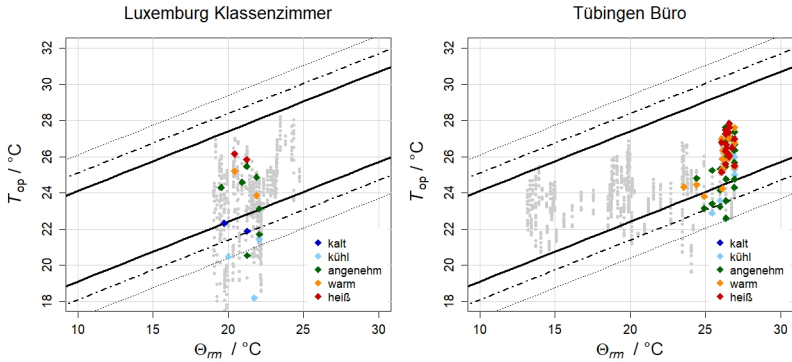
**Freiburg Sonnenschiff:** Die Raumtemperaturen unterschieden sich deutlich in den beiden analysierten Büros des *Sonnenschiffs* (vgl. Abb. 4.2).

Im PCMräum überstiegen die Temperaturen nur vereinzelt die Komfortgrenze der Kategorie I (durchgezogene Linie). Auch in der Bewertung durch die Nutzerin spiegelte sich wider, dass der thermische Komfort als hoch empfunden wurde: 67% der insgesamt 149 Bewertungen entfielen auf angenehm. Gelegentlich wurde die Temperatur als kühl (13%) oder als warm (18%) eingeschätzt, als heiß nur ein einziges Mal. Im REFraum hingegen überstiegen die Temperaturen häufiger die Grenzen der Kategorie I, gelegentlich auch die der Kategorie II (Strichpunkt-Linie). Die zwei befragten Raumnutzerinnen waren offensichtlich unzufriedener mit dem thermischen Komfort und empfanden die vorherrschenden Temperaturen überwiegend als warm und heiß (63% der 100 abgegebenen Bewertungen). Als angenehm wurde der Raum in 30% der Bewertungen eingestuft und nur gelegentlich als kühl (7%). In beiden Räumen kam es gelegentlich zur Unterschreitung der unteren Komfortgrenzen, allerdings jeweils in weniger als 1,5% der Zeit. Die thermischen Unterschiede alleine dem PCM zuzuschreiben hätte an dieser Stelle allerdings zu kurz gegriffen. Denn wie sich während der Analyse der Monitoringdaten herausstellte (vgl. z.B. Jalousienutzung 5.2.2), unterschieden sich die beiden Räume noch in weiteren Faktoren. Nicht nur die Lage im Gebäude (der REFraum liegt im obersten Geschoss während der PCMräum eine Etage tiefer liegt), sondern auch die Anzahl der Nutzerinnen und ihr Verhalten sowie die Menge an Einrichtungsmöbel war verschieden. Und ein weiterer Aspekt war, dass für die Erstellung des Komfortdiagramms des REFraums Raumlufttemperaturen verwendet wurden, da in diesem Raum die operative Temperatur nicht messtechnisch erfasst wurde<sup>2</sup>. Daher konnten anhand der Komfortdiagramme nur Unterschiede hinsichtlich des thermischen Verhaltens der Räume und des empfundenen

---

<sup>2</sup> Aufgrund eines Planungsfehlers gab es zu wenige Sensoren. Da drei Messkampagnen parallel liefen, wurden die vorhandenen Sensoren prioritär in den jeweiligen PCM-Räumen eingesetzt.

Komfort festgestellt werden, eine Quantifizierung des PCM-Einflusses hingegen wurde später simulativ durchgeführt und wird in Kapitel 5.4 dargelegt.



**Abb. 4.3: Komfortdiagramme inklusive Bewertungen des thermischen Komforts durch die Nutzer:innen (farbige Rauten). Graue Punkte stellen Messpunkte ohne zeitgleiche Bewertung dar. Schwarze Linien visualisieren die drei Kategorien der Komfortgrenzen I (durchgezogen) - III (gepunktet).**

**Luxemburg Klassenzimmer:** Im Klassenzimmer des Gymnasiums lagen die Temperaturen während der Messperiode stets unterhalb der oberen Komfortgrenze der Kategorie I (vgl. Abb. 4.3 links). Gemessen an den Norm-Kriterien war es demnach keineswegs zu warm in dem Raum. Am unteren Ende des Komfortbereichs kam es hingegen häufig zu Unterschreitungen der Komfortgrenzen. Diese Ergebnisse zeigen, dass in dem Gebäude gemessen an den Vorgaben der Norm einer Überhitzung gut vorgebeugt wurde und dies vermutlich einem Zusammenspiel aus PCM und Nutzer:innenverhalten zuzuschreiben ist. Die Bewertung des thermischen Komforts wurde durch die in dem Raum unterrichtenden Lehrkräfte vorgenommen. Es wurden zwar nur vergleichsweise wenige Bewertungen abgegeben – 16 durch insgesamt

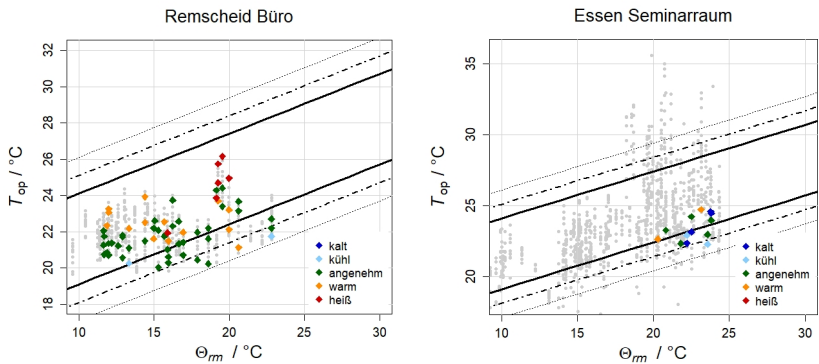
vier verschiedene Personen – jedoch deuteten die abgegebenen Votings auf eine überwiegende Zufriedenheit mit den Temperaturverhältnissen hin (44% der Bewertungen). In 25% der Fälle wurde der Raum als warm und heiß empfunden, in 31% als kühl und kalt. Es lässt sich schlussfolgern, dass der thermische Komfort in dem Klassenzimmer trotz einer leichten Tendenz zur Unterkühlung hoch war und sich das auch in der hohen Zufriedenheit der Nutzenden widerspiegelte. Eine Unterkühlung bei den während der Messperiode herrschenden hohen Außentemperaturen hätte sich leicht durch angepasstes Lüftungsverhalten (v.a. Geschlossenhalten von Fenstern während kalter Nächte) vermeiden lassen. Deshalb kann an dieser Stelle davon ausgegangen werden, dass die Unterkühlung gezielt angestrebt wurde, um einer Überhitzung des Raumes im Verlauf des Tages vorzubeugen, und dass die kühlen Temperaturen kein Hinweis auf eine bauliche Fehlplanung bzw. -konstruktion waren.

**Tübingen Büro:** Die gemessenen Temperaturen lagen in dem Büroraum eines Ingenieurbüros nie oberhalb der Obergrenze von Kategorie I (vgl. Abb. 4.3 rechts). Der thermische Komfort wurde von vier Personen insgesamt 127 mal bewertet und überwiegend als angenehm (40% der Bewertungen) bis warm (28%) eingestuft. Es gab auch einige Tage, an denen die Temperaturen, obwohl sie z.T. in der unteren Hälfte der Komfortkategorie I lagen, als heiß empfunden wurden (17%). Ein ähnlich großer Anteil (15%) entfiel auf die Bewertung kühl. Zusammenfassend ließ sich feststellen, dass auch in diesem Raum gemessen an den DIN-Vorgaben keine zu hohen Temperaturen erreicht wurden und die Nutzer:innen den thermischen Komfort auch überwiegend als hoch empfanden.

**Remscheid Büro:** Die Datenaufnahme im Büro der Remscheider Entsorgungsbetriebe fand im Herbst statt, als die Außentemperaturen schon deutlich niedriger lagen als während der drei zuvor beschrie-



benen Messkampagnen. Der Raum wurde von einem Mann und einer Frau genutzt und im Untersuchungszeitraum 62 mal bewertet. Sowohl die gemessenen Daten als auch die subjektiven Bewertungen ließen auf einen hohen thermischen Komfort schließen (vgl. Abb. 4.4 links): Der Raum wurde überwiegend als angenehm empfunden (64%), in 23% der Fälle als warm, sechs mal als heiß (10%) und als kühl zwei mal (3%). Aufgrund der herbstlichen Witterung und der vergleichsweise niedrigen Raumtemperaturen, die nur selten im Schmelzbereich des PCM lagen, ließ sich aus diesen Daten allerdings nicht ableiten, ob das PCM den thermischen Komfort beeinflusste.



**Abb. 4.4:** Komfortdiagramme inklusive Bewertungen des thermischen Komforts durch die Nutzer:innen (farbige Rauten). Graue Punkte stellen Messpunkte ohne zeitgleiche Bewertung dar. Schwarze Linien visualisieren die drei Kategorien der Komfortgrenzen I (durchgezogen) - III (gepunktet).

**Essen Seminarraum:** Die Messdaten zeigen, dass sich der einstöckige Flachdachbau mit großen Fensterfronten sehr stark aufheizen konnte und Temperaturen weit außerhalb des Komfortbereichs erreicht wurden (vgl. Abb. 4.4 rechts). Die hohen Temperaturen wurden überwiegend nachmittags und in Ferienzeiten erreicht, wenn die Räume nicht

genutzt und somit auch Fenster nicht geöffnet wurden. Einen begünstigenden Faktor für die starke Überhitzung stellen die großen Fensterfronten dar, durch die ein hoher Energieeintrag in die Räume ermöglicht wird. Außerdem wurde das Gebäude nicht mit einer Regenerationsmöglichkeit für das PCM ausgestattet: Es wurde erst nach Abschluss der Evaluation klar, dass das PCM in Essen als Teil der Wärmeversorgung im Winter (kombiniert mit Solarthermie) konzipiert war und nicht – wie bislang angenommen – zur Kühlung in den Sommermonaten [102]. Ohne nächtliche Regenerationsmöglichkeit kann das PCM während heißer Perioden auch keine Kühlfunktion übernehmen.

Die Ergebnisse wurden dennoch in die vorliegende Arbeit integriert, da vor dem Hintergrund dieser neuen Erkenntnis die Bewertung des thermischen Komforts während des Sommers durch die Nutzer:innen dennoch Interessantes zeigte. Der thermische Komfort wurde von zehn verschiedenen Personen insgesamt 81 mal bewertet<sup>3</sup>. Aus den Rückmeldungen ließ sich schließen, dass die Nutzer:innen den thermischen Komfort hoch einschätzten und überwiegend zufrieden waren (48% angenehm). Allerdings wurde der Raum in den heißesten Wochen während der Ferienzeit nicht genutzt. Als kühl oder kalt wurden die Räume in 12% bzw 8% der Fälle bewertet, als warm in 13%. Dennoch zeigten die Temperaturen eine große Schwankungsbreite: Sie reichten von sehr kalt bis über die höchste Komfortgrenze hinaus im dokumentierten Zeitraum. Das deutet daraufhin, dass die thermische Masse des Gebäudes vergleichsweise gering ist und trotz des integrierten PCMs die äußeren Temperaturschwankungen nur schwer ausgleichen kann. Dies

---

<sup>3</sup> In der Abbildung sind nur ein Teil der Bewertungen sichtbar aus zwei Gründen: Zum einen fiel über ca vier Wochen zwischen Mitte Juli und August die Messtechnik aus. Deshalb gibt es für diesen Zeitraum zwar Bewertungen, jedoch keine Raumtemperaturen und folglich sind diese Datenpunkte auch nicht sichtbar in der Abbildung. Zum anderen wurden häufig Bewertungen von verschiedenen Personen zeitgleich abgegeben. In diesen Fällen liegen die Bewertungen dann übereinander und können nicht unterschieden werden.

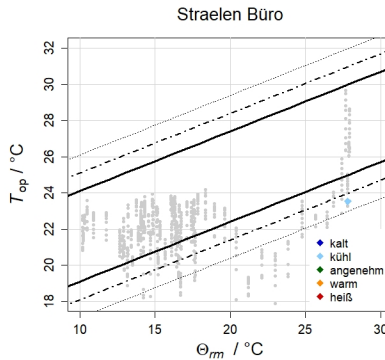


Abb. 4.5: Komfortdiagramm inklusive Bewertungen des thermischen Komforts durch die Nutzer:innen (farbige Rauten). Graue Punkte stellen Messpunkte ohne zeitgleiche Bewertung dar. Schwarze Linien visualisieren die drei Kategorien der Komfortgrenzen I (durchgezogen) - III (gepunktet).

ist vermutlich der Gesamtbauweise (leicht, einstöckig und mit Flachdach) geschuldet.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass trotz fehlender Regenerationsmöglichkeit und Kühlleistung durch das PCM die thermischen Bedingungen während der Nutzungszeit überwiegend angenehm waren. Spannend bei diesem Gebäude war, dass alle Beteiligten, mit denen das Monitoring besprochen wurde und die den Raum nutzten, davon ausgingen, dass das PCM zur Verbesserung des sommerlichen Raumklimas gedacht wäre. Niemandem war bekannt, dass das PCM Teil des winterlichen Heizkonzepts war. Möglicherweise wurde die Zufriedenheit mit dem thermischen Komfort durch diese falsche Annahme positiv beeinflusst.

**Straelen Büro:** Während der Messungen im Büro des Straelener Rathauses waren die Witterungsverhältnisse ähnlich wie in Remscheid, wengleich die Datenaufnahme in Straelen einen Monat früher Mitte

August begann. Auch im Fall Straelen waren die Außentemperaturen bereits recht niedrig und die Raumtemperaturen selten im oder oberhalb des PCM-Schmelzbereichs. Dazu gab es auch in diesem Raum ein Problem mit der Datenaufzeichnung – ähnlich wie in Essen fehlen deshalb einige Daten aus Zeiten, zu denen Nutzerbewertungen abgegeben wurden. Deshalb ist im zugehörigen Komfortdiagramm (Abb. 4.5) nur eine einzelne Bewertung sichtbar.

Der Raum wurde von zwei Nutzern insgesamt 61 mal bewertet. Der thermische Komfort war sehr hoch und wurde in 81% der Fälle mit angenehm bewertet. Gelegentlich wurde der Raum als warm empfunden (14%) und zu drei Zeitpunkten als kühl (5%). Auch bei diesem Raum lässt sich anhand der Messdaten und aus der Zufriedenheit der Nutzer schließen, dass der thermische Komfort in dem Büro während der Messperiode hoch war. Welchen Anteil allerdings das PCM daran hatte, ließ sich aus den vorhandenen Daten nicht eindeutig ableiten.

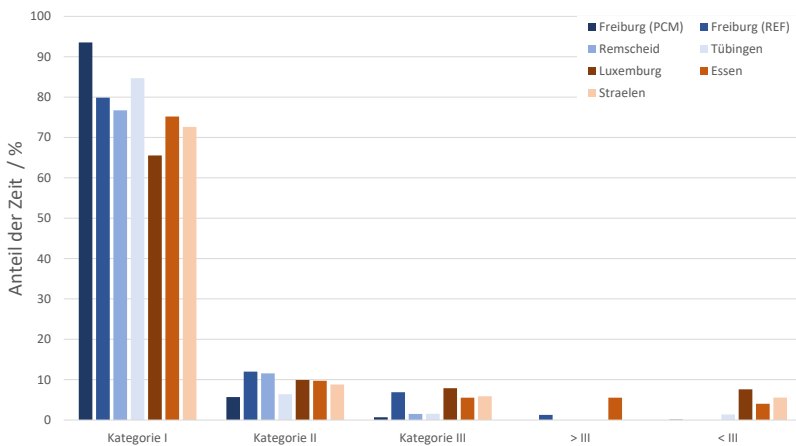


Abb. 4.6: Zeitliche Verteilung der Raumtemperaturen in den untersuchten Räumen auf die unterschiedlichen Komfortkategorien.

Beim Blick auf die zeitlichen Anteile, zu denen sich die sieben Räume in den verschiedenen Komfortkategorien befanden (Abb. 4.6), zeigte sich, dass die Bedingungen des thermischen Komforts recht unterschiedlich waren. Am besten schnitten die beiden Räume Freiburg PCMräum und Tübingen ab mit je über 85% der Zeit in Kategorie I, am schlechtesten die beiden Räume in Remscheid und Essen (< 77% in Kategorie I). In die Kategorie II entfiel am meisten Zeit bei den Räumen Freiburg REFraum, Remscheid und Essen, wobei hier noch zwischen dem oberen und unteren Bereich der Kategorie II zu unterscheiden ist: Während im *Sonnenschiff* aufgrund hoher Temperaturen der Anteil von 11,4% in der Kategorie fast vollständig auf den oberen Teil entfiel, war es in Remscheid genau gegenteilig (11,5% im unteren Teil der Kategorie II). In Essen war ebenfalls der untere Kategoriebereich häufiger (8,2% gegenüber 3,3% im oberen Teil). Das gleiche Muster zeigte sich für Kategorie III. Die Zeiten außerhalb der Komfortgrenzen waren zwar recht gering, traten aber dennoch auf. Eine Überschreitung konnte in Freiburg REFraum (1,3%) und Essen (5,1%) dokumentiert werden. Eine Unterkühlung trat in Luxemburg, Straelen, Essen und vereinzelt in Tübingen auf. Die Verteilung auf die unterschiedlichen Kategorien bestätigte im Seminarraum in Essen was schon aus dem Komfortdiagramm ersichtlich war: Die Temperaturen in dem Gebäude unterlagen einer so großen Schwankungsbreite, dass ein Effekt durch PCM nicht sichtbar wurde.

Der REFraum des *Sonnenschiffs* war bezogen auf die Zeiten in den unterschiedlichen Komfortkategorien der wärmste – allerdings auch der einzige ohne integrierte PCM. Für die restlichen Räume zeigte die Auswertung, dass sie eher eine Tendenz zur Unterkühlung zeigten (Luxemburg, Straelen, Tübingen) bzw. für den PCMräum des *Sonnenschiffs*, dass die Bedingungen für thermischen Komfort sehr hoch waren. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die Zeiträume der Datenaufnahmen in den

verschiedenen Gebäuden nicht identisch waren (vgl. Tab. 2.2) und deshalb ein direkter Vergleich der Räume nur unter Vorbehalt möglich ist. Die Standardisierung anhand von Komfortdiagrammen dient zwar einerseits der Vergleichbarkeit verschiedener Gebäude, doch für eine valide Bewertung und einen Abgleich mit den DIN-Anforderungen müssten Messdaten über noch längere Zeiträume – ganze Jahreszeiten oder sogar ein ganzes Jahr – ausgewertet werden.

### 4.3.4 Zwischenfazit

Die Auswertung der Komfortdiagramme zeigte, dass in vier (Freiburg, Luxemburg, Tübingen und Essen) der sechs mit PCM ausgestatteten Räume der subjektiv bewertete thermische Komfort hoch war, trotz vergleichsweise hoher Außentemperaturen. Bei zwei Räumen (Remscheid und Straelen) waren die Außentemperaturen Ende des Sommers schon so niedrig, dass die Raumtemperaturen überwiegend unterhalb des PCM-Schmelzbereichs blieben.

Ob das integrierte PCM nach über zehn Betriebsjahren noch funktionierte und einen wertvollen Beitrag leistete, ließ sich anhand dieser Auswertungen nicht zweifelsfrei belegen, da bei fünf der sechs Gebäuden ein Referenzraum fehlte. Der Vergleich der beiden Räume im *Sonnenschiff* kann jedoch als Indiz dafür gewertet werden, dass das integrierte PCM durchaus einen ausgleichenden, temperatursenkenden Effekt hatte und es auch nach vielen Betriebsjahren noch zu funktionieren scheint. Gleichzeitig zeigten die beiden Fallbeispiele Remscheid und Straelen, dass für eine Analyse des thermischen Komforts der richtige Untersuchungszeitraum von großer Bedeutung ist. Für zukünftige ähnliche Untersuchungen wird deshalb empfohlen, einen möglichst langen Monitoringzeitraum zwischen Juni und September abzudecken,

um sicherzustellen, dass auch heiße Perioden in den Auswertzeitraum fallen.





# **5 Analyse der PCM-Funktionalität anhand zweier Fallstudien**

In diesem Kapitel wird ausgeführt, wie mittels Simulationen die Funktionalität des PCM und der Einfluss der Nutzer:innen auf den PCM-Effekt anhand zweier Fallstudien analysiert wurden. Dazu wurden Simulationsmodelle für zwei ausgewählte Gebäude erstellt und verschiedene Szenarien – mit und ohne PCM sowie verschiedene Verhaltensmuster – erstellt und ausgewertet.

Die beiden ausgewählten Gebäude werden im ersten Abschnitt 5.1 vorgestellt. Anschließend wird das Verhalten der Nutzer:innen in Bezug auf Fensteröffnung, Jalousienutzung und Nutzung der elektrischen Lüftung analysiert und Verbesserungspotentiale identifiziert. Darauf basierend werden in Abschnitt 5.2.3 verschiedene Verhaltensszenarien definiert, die in den späteren Simulationen implementiert wurden.

In der zweiten Hälfte des Kapitels wird zu Beginn die Auswahl der verwendeten Simulationssoftware erläutert (5.3) sowie der Modellaufbau und die Prozesse der Modellkalibrierung und -validierung beschrieben. In letzten Abschnitt 5.4 werden die Simulationsergebnisse präsentiert.

## 5.1 Die beiden Fallstudien

Aus den sieben durchgeführten Monitoringkampagnen wurden zwei Gebäude für eine detaillierte Analyse der PCM-Funktionalität ausgewählt. Das Hauptkriterium der Auswahl war die Datenverfügbarkeit: Für die Evaluation des PCM-Einflusses war es wichtig, dass Daten über einen möglichst langen Zeitraum verfügbar waren, möglichst Phasen abgedeckt wurden, in denen die Raumtemperatur im Arbeitsbereich des PCM lag und Phasen, in denen sie außerhalb lag, um so später die Simulationsmodelle validieren zu können. Außerdem sollten die aufgezeichneten Daten möglichst geringe Lücken aufweisen. Die Wahl fiel auf ein Büro- und ein Schulgebäude: a) das Sonnenschiff in Freiburg, Süddeutschland und b) das Gymnasium in Diekirch, Luxemburg. Eine erste Version des Modells der Sonnenschiff-Fallstudie wurde im Rahmen einer während der vorliegenden Arbeit betreuten Masterarbeit erstellt [103], später jedoch noch weiter modifiziert. Beide Gebäude wurden zuvor bereits in den beiden Journalbeiträgen [104], [105] beschrieben und Teile der Ergebnisse darin veröffentlicht.

### 5.1.1 *Sonnenschiff* in Freiburg

Das *Sonnenschiff* (Abb. 5.1) wurde im Jahr 2004 im Stadtteil Vauban von Freiburg im Breisgau in Süddeutschland errichtet. Es beherbergt neun Penthouse-Wohnungen, Büroräume und Gewerbeflächen. Für das Gebäude wurde ein innovatives Energiekonzept erarbeitet: Als Plusenergiehaus konzipiert erzeugt das Gebäude mehr Energie als es verbraucht. Fokus wurde dabei darauf gelegt, dass der Wärme- und Kältebedarf durch verschiedene Optimierungen auf ein Minimum gesenkt werden konnte. Realisiert wurde das mit Hilfe einer leichten Pfosten-Riegel-Konstruktion, die mit massiven Betondecken und leich-

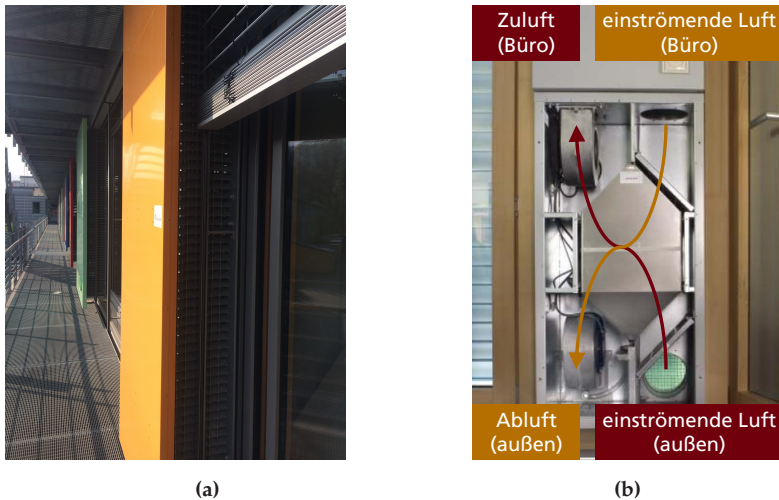
ten Zwischenwänden kombiniert wurde. Die Außenwände wurden vakuumgedämmt, wodurch eine deutlich effizientere Dämmung als mit herkömmlichen Materialien in vergleichbarer Dicke realisiert werden konnte. Decken, Wände und Böden stehen in Verbindung mit der Raumluft, so dass die Gebäudemasse als Temperaturpuffer sowohl im Winter als auch im Sommer dienen kann.



**Abb. 5.1:** Blick auf die Westfassade des *Sonnenschiffs* in Freiburg. Die farbige Umrandung markiert den Gebäudeteil, in dem die beiden analysierten Räume liegen [106].

Zusätzlich wurden einige Zwischenwände in den beiden Obergeschoßen (OG) mit den PCM-haltigen Gipskartonplatten *Smartboard 23* ausgestattet, um den thermischen Komfort in der warmen Jahreszeit zu verbessern (vgl. A.6). Das *Smartboard 23* enthielt Micronal©, mikroverkapseltes Paraffin des Herstellers BASF [107], mit einem Phasenwechselbereich zwischen 23 °C und 26 °C. Die Geometrien der Fenster und die Verwendung von dreifach Wärmeschutz-Isolierverglasung tragen zusammen mit entsprechenden Verschattungselementen zu einem optimierten passiven Wärmegewinn bei und maximieren gleichzeitig das natürliche Licht. Darüber hinaus wurde für die Regeneration des PCM-Systems ein innovatives Lüftungssystem implementiert, das hohe Anforderungen an sowohl Akustik als auch Bedienungsfreundlichkeit erfüllt und gleichzeitig den Energiebedarf minimiert. Das Lüftungssystem besteht aus einem separat steuerbaren Lüftungsgerät mit Kreuzstromwärmetauscher (Abb. 5.2b) und einem Lüftungspaneel. Ersteres

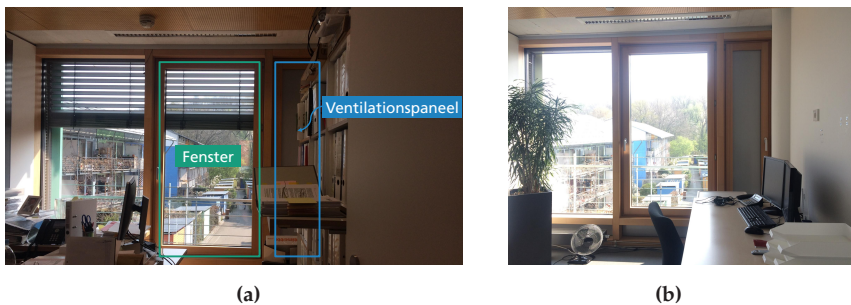
kann für den permanenten Luftaustausch mit der Außenluft genutzt werden, ist aber speziell für die Nachtabkühlung in wärmeren Perioden vorgesehen. Das manuell bedienbare Lüftungspaneel ist durch eine Blende vor Regen und Einbruch geschützt (Abb. 5.2a), so dass es nachts und am Wochenende geöffnet bleiben kann [87].



**Abb. 5.2:** (a) Außenliegender Schutz (orange) des Ventilationspaneels [eigene Darstellung], (b) wandintegrierter Wärmetauscher [eigene Darstellung nach 106].

Während des Sommers 2018 wurden über mehrere Wochen Daten in zwei übereinanderliegenden Büroräumen des *Sonnenschiffs* aufgenommen. Die ursprüngliche Intention war, zwei Räume, die sich nur in der Ausstattung mit bzw. ohne PCM unterscheiden, miteinander zu vergleichen und daraus Rückschlüsse auf den Nutzen des PCM zu ziehen. Wie sich jedoch herausstellte, unterschieden sich die beiden Räume in so vielen Faktoren (Verhalten und Anzahl der Nutzerinnen, Lage im Gebäude, Ausstattung, Raumgröße), dass über einen direkten Vergleich eine Bestimmung des PCM-Effekts nicht möglich war. Deshalb

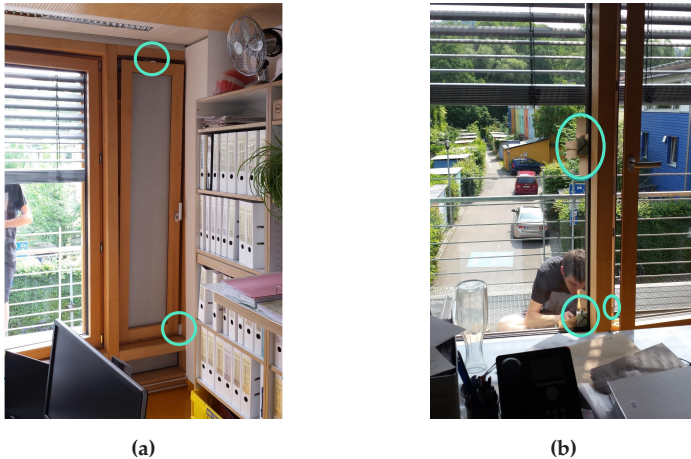
wurde der Einfluss des PCM auf das thermische Verhalten des PCM-Raumes simulativ analysiert<sup>1</sup>. Beide Räume lagen auf der nach Osten zeigenden Gebäudeseite (Ausrichtung: 92°) und unterschieden sich vor allem darin, dass ein Raum mit PCM ausgestattet war (im 1. OG: PCM-raum), während der andere Raum im 2. OG ohne PCM war (REFraum) (vgl. Abb. A.6 im Anhang). Genutzt wurde der untere Raum von einer Person, der andere Raum im 2. OG von einer Frau dauerhaft und einer zweiten sporadisch. Alle drei Frauen waren zwischen 20 und 35 Jahre alt. Beide Räume waren mit je einem komplett zu öffnenden Fenster ausgestattet, einem Lüftungspaneel, das gekippt oder geöffnet werden konnte (vgl. Abb. 5.3) und einem elektrischen Ventilationssystem, das für jedes Stockwerk manuell bedienbar war.



**Abb. 5.3: Blick in die beiden untersuchten Räume: (a) PCMraum und (b) REFraum [eigene Darstellungen].**

Die Datenaufnahme wurde vom 16. Juni bis zum 8. Oktober 2018 durchgeführt. Die Sensoren wurden in beiden Räumen an identischen Stellen positioniert, um eine Vergleichbarkeit der Messdaten zu gewährleisten.

<sup>1</sup> Der Vorteil einer simulativen Analyse liegt darin, dass einzelne Parameter verändert werden können, in diesem Fall mit/ohne PCM, während alle anderen Parameter konstant bleiben. Dadurch können Veränderungen eindeutig einem Parameter zugeordnet werden.



**Abb. 5.4: Sensorpositionen (markiert durch farbige Kreise) im PCMraum (a) Kontakte an Ventilationspanel, (b) Lichtsensoren am großen Fenster und Kontaktsensor am Fensterrahmen [eigene Darstellungen].**

Wie bereits erwähnt, wurde auch die Außentemperatur an der Fassade gemessen. Ein Abgleich mit Messdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) [108] ergab jedoch, dass es deutliche Unterschiede zwischen den direkt an der Hauswand gemessenen Daten und denen der offiziellen Wetterstation gab. Es ist davon auszugehen, dass die an der Hauswand gemessenen Daten durch das Gebäude und dessen thermische Trägheit beeinträchtigt wurden<sup>2</sup>. Die Daten des DWD wurden in 2 m Höhe mit einem Messintervall von einer Stunde aufgenommen und die Messstation liegt ungefähr zwei Kilometer entfernt vom *Sonnenschiff*. Für die späteren Simulationen schien es zur Beantwortung der Forschungsfragen sinnvoll, diese Daten statt der selbst gemessenen zu verwenden, um eine mögliche Verzerrung durch das Gebäude zu vermeiden.

<sup>2</sup> Empfehlungen zur Messung von Lufttemperaturen lauten, dass Messungen so weit entfernt von Gebäuden wie möglich durchgeführt werden sollten, um die Beeinträchtigung der Messwerte durch Gebäude zu minimieren [109].

### 5.1.2 Gymnasium in Diekirch, Luxemburg

Das Schulgebäude in Diekirch wurde im Jahre 2007 errichtet und ebenso wie das Bürogebäude in Freiburg mit den PCM-haltigen Gipskartonplatten *Smartboard 23* ausgestattet. Diese wurden an der Decke und den Tafel- und Flurseiten der Innenwände angebracht. Das Gebäude wurde als Passivhaus ohne aktive Kühlung konzipiert. Das untersuchte Klassenzimmer liegt im zweiten OG, die Fassade ist Richtung Nordosten orientiert ( $78^\circ$ ) und verfügt über drei öffentbare Fensterflügel mit außenliegendem Sonnenschutz (vgl. Abb. 5.5a). Die Konstruktionsdetails von Wänden, Decke und Boden wurde den Planungsunterlagen aus dem Jahr 2007 entnommen (vgl. A.4 und A.5 im Anhang). Der Raum wurde in der Regel von einer Klasse mit 25 Schüler:innen und einer Lehrkraft genutzt. Das Monitoring in diesem Gebäude fand vom 1. Juni bis 27. Juli 2018 statt. Eine Übersicht, wo die Sensoren in den beiden Räumen angebracht waren, ist im Anhang zu finden (A.2 und A.3). Die verwendeten Wetterdaten für den Standort der Schule stammen von Solargis, die diese wiederum aus numerischen Wettermodellen beziehen und mit einer räumlichen Auflösung von einem Kilometer zu Verfügung stellen<sup>3</sup>.

## 5.2 Analyse des Verhaltens der Nutzer:innen und Erstellung verschiedener Verhaltensszenarien

Während der Monitoringperioden wurden auch Verhaltensparameter dokumentiert: Öffnen von Fenstern und Türen, Bedienung von Jalousie

---

<sup>3</sup> Mehr Informationen über die Herkunft und die Genauigkeit der Daten sind unter *Dokumentation* auf der Website von Solargis zu finden [110]



Abb. 5.5: (a) Blick auf die Ostfassade des Gymnasiums in Diekirch. Die türkisene Umrandung markiert die Fenster des analysierten Raumes. (b) Blick von Innen auf die Fensterfront mit den drei zweigeteilten Fenstern [eigene Darstellungen].

und elektrischer Lüftung. Die Analyse dieser Verhaltensdaten wird in den beiden folgenden Abschnitten 5.2.1 und 5.2.2 erläutert.

## 5.2.1 Fensteröffnung

### Auswertung

Im Hinblick auf thermischen Komfort gilt es als ungünstig, wenn Fenster bei höherer Außentemperatur geöffnet werden. Um festzustellen, ob es in dieser Hinsicht Möglichkeiten der Optimierung im Verhalten gab, wurden in einem ersten Schritt die Messdaten visuell aufbereitet und analysiert. Dafür wurden Graphiken erstellt, in denen Raum- und Außentemperaturen sowie die jeweiligen Fensterpositionen dargestellt wurden. Anhand der Graphiken wurde dann geschaut, ob es ungünstige Fensteröffnungskonstellationen gegeben hatte.

In einem zweiten Schritt wurde untersucht, wie häufig jedes öffnbare Fensterelement bei bestimmten  $\Delta T$  mit



$$\Delta T = T_{op} > T_{amb} \quad (5.1)$$

während der gesamten Monitoringzeit geöffnet wurde.

Im dritten Schritt wurde die Fensteröffnungsrate  $R_{Fen}$  in Abhängigkeit von der  $\Delta T$  analysiert. Zunächst wurde dazu das binäre Öffnungssignal (0=geschlossen, 1=geöffnet) für jeden Fensterkontakt über Zeiträume von jeweils zehn Minuten gemittelt und auf ganze Zahlen gerundet. Anschließend wurde in 0,5-Kelvin-Schritten die Anzahl der geöffneten Fensterkontakte bestimmt und  $R_{Fen}$  als Anteil der geöffneten Fensterkontakte  $n_{Fen,o}$  an der Gesamtzahl der Fensterkontakte  $N_{Fen}$  ermittelt:

$$R_{Fen} = \frac{n_{Fen,o}}{N_{Fen}} \quad (5.2)$$

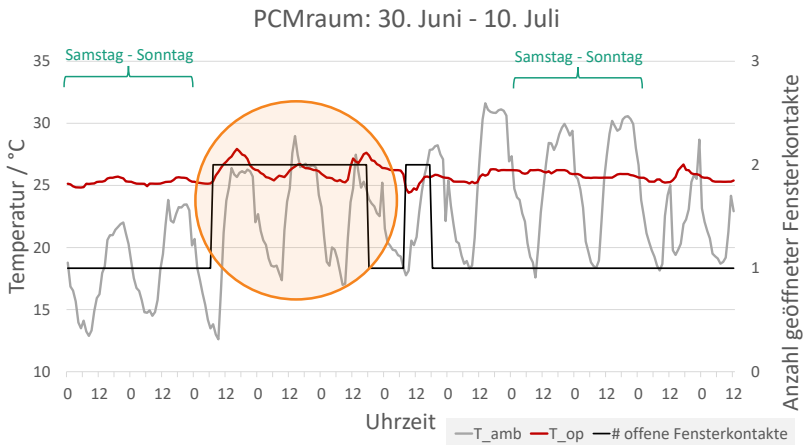
Im *Sonnenschiff* gab es je Raum drei Fensterkontakte (zwei am Lüftungspaneel und einen am großen Fenster), im Klassenzimmer des Gymnasiums drei (einer je offenbarem Fensterflügel).

### Ergebnisse

**Freiburg Sonnenschiff:** Das Lüftungsverhalten konnte nur für den PCMraum analysiert werden, da im REFraum wiederholt Fenstersensoren abgefallen waren. Im PCMraum waren alle Sensoren intakt, so dass die Fensteröffnung für die Zeit vom 16. Juni bis 15. September ausgewertet werden konnte. Das Fensteröffnungsverhalten war vor allem für die spätere Simulation von Bedeutung und da dabei ohnehin nur der PCMraum betrachtet wurde, beeinflussten die fehlenden Infor-

mationen über die Fensternutzung im REFraum die Studienergebnisse nicht.

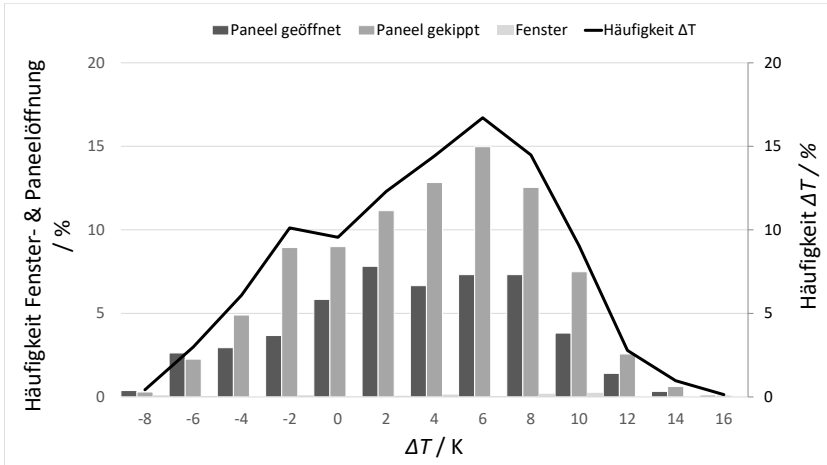
Bei warmer Witterung sollte die Fensteröffnung auf Zeiten beschränkt bleiben, in denen es außerhalb kühler als im Gebäude ist, um einen unnötigen Wärmeeintrag in das Gebäude zu vermeiden. Wird dies missachtet, steigt die Raumtemperatur an und der thermische Komfort kann dadurch vermindert werden. In passiven Gebäuden ohne HLK führt dies zu einem erhöhten Lüftungsbedarf zu Zeiten, wenn der Temperaturgradient günstiger ist, vor allem während der Nacht.



**Abb. 5.6: Anzahl der geöffneten Fensterkontakte im PCMraum sowie die Verläufe von  $T_{op}$  und  $T_{amb}$ . Der Kreis markiert ein Beispiel für gut umgesetzte Fensteröffnung.**

Im Auswertezeitraum erreichte die Raumtemperatur im PCMraum in ca. 30% der Tage Werte oberhalb des Schmelzbereichs des PCM. Bei solchen thermischen Bedingungen ist die Möglichkeit der nächtlichen Regeneration für das PCM essentiell, um am Folgetag wieder das gan-

ze Potential entfalten zu können. Dies wurde allerdings oftmals nur unzureichend umgesetzt (vgl. Abb. 5.6).



**Abb. 5.7:** Häufigkeit der verschiedenen Öffnungspositionen von Lüftungspaneel und Fenster im PCMRaum des Sonnenschiffs in Abhängigkeit von  $\Delta T$  (Säulen) sowie die Häufigkeit, in der die jeweiligen  $\Delta T$  aufgetreten waren (Linien).

Es gab vereinzelte Perioden, in denen das Lüftungspaneel mehrere Tage lang offen stand (s. Kreismarkierung). In diesem Zeitraum lag die Außentemperatur auch tagsüber meist unterhalb der Raumtemperatur, so dass durch das Lüften ein stärkeres nächtliches Abkühlen des Raumes möglich wurde als es am vorhergehenden Wochenende bei gekipptem Paneel erzielt wurde. Allerdings reichte auch das komplett geöffnete Paneel nicht aus, um eine vollständige Regeneration des PCM zu ermöglichen – die Raumtemperatur lag weiterhin über  $25^\circ\text{C}$ . Für eine vollständige Regeneration wäre eine noch stärkere Abkühlung auf  $23^\circ\text{C}$  notwendig gewesen. Besser wäre zusätzlich eine frühe morgendliche Öffnung des Fensters gewesen (8 - 9 Uhr), um die kühle Morgenluft

auszunutzen, und ein komplettes Schließen des Paneels tagsüber bei höherer Außentemperatur.

Die Nutzerin des PCMraums bediente während des ausgewerteten Zeitraums nur das Lüftungspaneel, während sie das Fenster nur selten nutzte (vgl. Abb. 5.7). Dabei wählte sie häufiger die Kippposition als die komplette Öffnung. Die Zimmertüre war meist offen, was auf dem Stock des PCMraums eine Querlüftung mit einem Fenster auf der gegenüberliegenden Gebäudeseite ermöglichte<sup>4</sup>.

Die Analyse der Fensteröffnungsrate  $R_{Fen}$  zeigte, dass diese größtenteils unabhängig von  $\Delta T$  war (vgl. Abb. 5.8). Im ungünstigen Bereich bei  $\Delta T < 0 K$ , wenn also die Umgebungstemperatur die Raumtemperatur überstieg, waren ähnlich viele Fensterkontakte geöffnet wie bei günstigen Bedingungen ( $\Delta T > 0 K$ ). Die geringe Öffnungsrate im Bereich von 13-14 K ist vermutlich ein dem Zufall geschuldeter Ausreißer. Eine weitere Auffälligkeit war, dass es nur kurze Zeiträume gab, in denen alle Fensterkontakte geschlossen waren (PCMraum = 1,2 h, was 0,14 % der Zeit entsprach). Es wurde also praktisch permanent gelüftet im ausgewerteten Zeitraum.

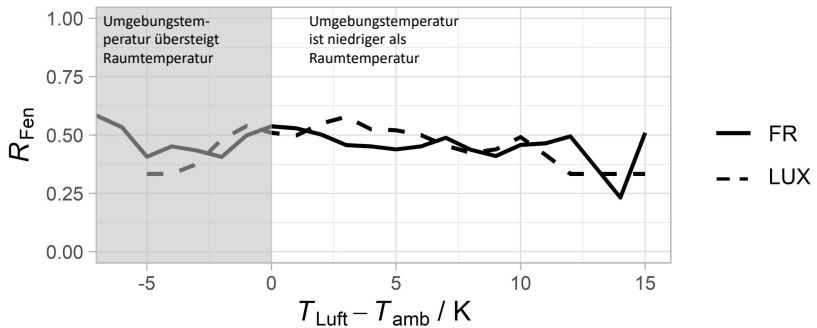
Aus raumklimatischer Sicht wäre eine höhere Lüftungsrate bei größerem  $\Delta T$  sinnvoll. Das Lüftungsverhalten wurde demnach vermutlich durch andere Parameter bestimmt: möglicherweise folgte es einer zeitlichen Routine, die ein starker Einflussfaktor bei der Fensternutzung ist [111, S. 157] oder wurde durch eine empfundene Verschlechterung der Luftqualität ausgelöst<sup>5</sup>.

**Luxemburg Klassenzimmer:** Über den gesamten Untersuchungszeitraum hinweg lag die Raumtemperatur im Klassenzimmer sehr häufig

---

<sup>4</sup> Allerdings wurde die Fensteröffnung auf der gegenüberliegenden Gebäudeseite nicht messtechnisch erfasst und deshalb auch in der späteren Simulation nicht berücksichtigt.

<sup>5</sup> Eine detaillierte Übersicht verschiedener Einflussfaktoren, die das Fensteröffnungsverhalten beeinflussen, ist bspw. in [13] und [112] zu finden.

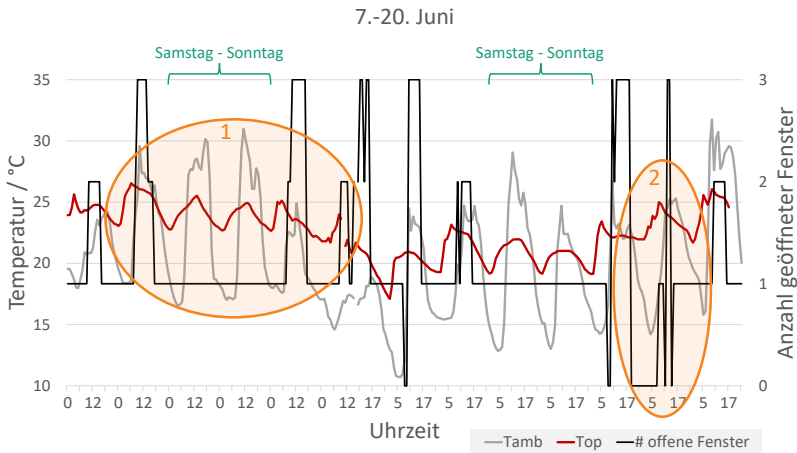


**Abb. 5.8:** Öffnungsrate der Fenster im PCMraum des Sonnenschiffs (FR) und im Klassenzimmer (LUX) abhängig von  $\Delta T$ .

im Schmelzbereich des PCM und nur selten darüber (vgl. Abb. 4.3 links). Deshalb spielte die Möglichkeit zur nächtlichen Regeneration des PCM in dieser Zeit eine besonders wichtige Rolle. Es gab vereinzelt Nächte, in denen kein Fenster geöffnet war (vgl. Abb. 5.9 Markierung 2).

Das hatte zur Folge, dass die Raumtemperatur nicht absinken konnte und am Folgetag trotz vergleichsweise geringer Umgebungstemperatur recht hoch war. Etwas häufiger trat der Fall auf, dass ein Fenster geöffnet war (Markierung 1), eine bessere Regeneration jedoch mit zwei oder drei geöffneten Fenstern berwerkstellig hätte werden können. Im gewählten Beispiel folgt auf das Wochenende, während dem das PCM nicht optimal regenerieren konnte, eine kühlere Periode. Dadurch sanken dann die Raumtemperaturen ab Montag wieder deutlich und das PCM konnte regenerieren. Wäre jedoch die Außentemperatur nicht so stark gesunken, wäre das PCM aufgrund der fehlenden Abkühlung übers Wochenende nur eingeschränkt funktionsfähig gewesen.

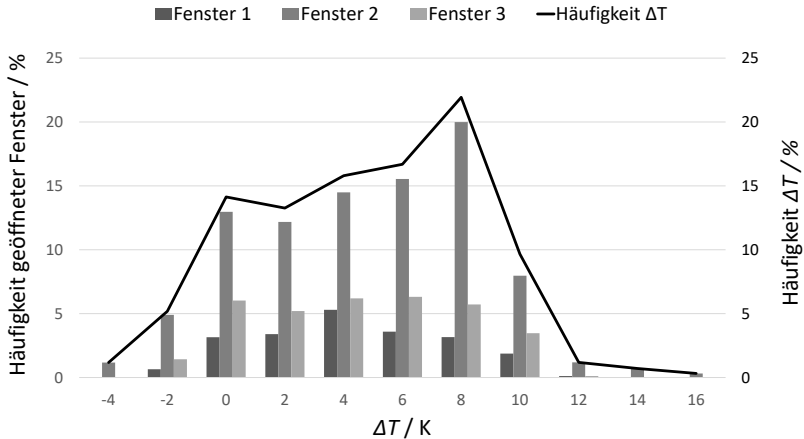
Es wurde während der Analyseperiode überwiegend das mittlere Fenster zum Lüften genutzt (vgl. Abb. 5.10). Die anderen beiden Fensterflü-



**Abb. 5.9:** Anzahl der geöffneten Fenster sowie die Verläufe von  $T_{op}$  im Klassenzimmer und  $T_{amb}$ . Kreise markieren Beispiele für nicht optimale Fensteröffnung.

gel kamen deutlich seltener zum Einsatz. Es war zudem eine deutliche Zunahme in der Häufigkeit des Lüftens im aus Komfortperspektive günstigen Bereich von  $\Delta T \geq 0$  K zu erkennen. Auch die Rate der geöffneten Fenster zeigte ausgehend von einem niedrigen Niveau bei ungünstigen Bedingungen einen Anstieg und im weiteren Verlauf höhere Werte als im ungünstigen Bereich (vgl. Abb. 5.8). Im Gegensatz zum Büroraum im *Sonnenschiff* wurden die Fenster im Klassenzimmer deutlich länger geschlossen gehalten: sie waren 2,6% der Zeit bzw. 35,7 h geschlossen.

Eine naheliegende Interpretation der beiden letztgenannten Abbildungen wäre, dass die Nutzer:innen das Lüften von den herrschenden Temperaturverhältnissen abhängig gemacht und gezielt zur Raumkühlung eingesetzt hätten. Doch zeigt die Häufigkeitsverteilung der verschiedenen  $\Delta T$ , dass die ungünstigen Bedingungen sehr viel seltener vorkamen



**Abb. 5.10:** Öffnungshäufigkeit der drei Fenster im Klassenzimmer in Abhängigkeit von  $\Delta T$  (Säulen) sowie die Häufigkeit, in der die jeweiligen  $\Delta T$  aufgetreten waren (Linie).

und bei diesen trotz zusätzlichem Wärmeeintrag mindestens ein Fenster ständig geöffnet war. Es ist also davon auszugehen, dass wie im Büro im *Sonnenschiff* auch das Lüftungsverhalten im Klassenzimmer von anderen Faktoren als den herrschenden Temperaturen beeinflusst wurde und auch stark von der Raumbelastung abhing. Nachmittags und an Wochenenden wurden die Fensterpositionen nur selten verändert: offene Fenster blieben in der Regel bis zum nächsten Unterricht geöffnet, geschlossene Fenster blieben geschlossen. Eine Intervention seitens des Reinigungspersonals oder Hausmeisters kam demnach nur vereinzelt vor.

## 5.2.2 Jalousienutzung

### Auswertung

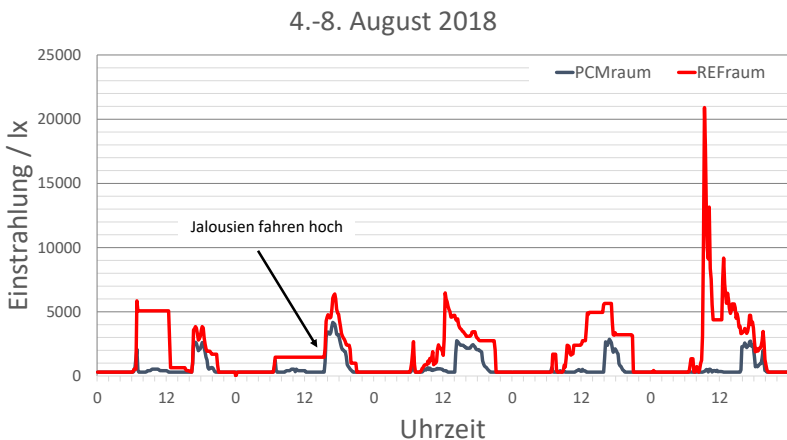
Übermäßiger Energieeintrag durch Fenster kann bei hohen sommerlichen Temperaturen zu einer Beeinträchtigung des thermischen Komforts führen. Deshalb wurde im nächsten Schritt analysiert, ob es bei der Nutzung der Jalousien Möglichkeiten der Verbesserung gibt. Die Nutzung der Jalousie wurde aus den Messdaten der auf der Fensterinnenseite angebrachten Strahlungssensoren abgeleitet. Diese Werte wurden als Stundenwerte gemittelt. Im Abgleich mit der in EP simulierten Einstrahlung auf die entsprechende Fassade wurde schlussgefolgert, wann die Jalousie aktiviert (=heruntergefahren) war und wann nicht: War Einstrahlung auf die Fassade vorhanden und lag die gemessene Einstrahlung am unteren Fenstersensor  $< 3500 \text{ lx}$ , wurde die Jalousie als heruntergelassen bzw. aktiviert gewertet, in allen anderen Fällen als nicht aktiviert. Dieser Grenzwert wurde auf Basis der visuellen Auswertung von Stundenmittelwerten der Einstrahlungsmessungen definiert (vgl. Abb. 5.11). Bei den über jeweils eine Stunde gemittelten Werten konnte es vorkommen, dass die Jalousie teilweise nicht aktiv war und somit trotz überwiegend aktivierter Jalousie der Einstrahlungswert über Null lag. Zudem ist davon auszugehen, dass auch eine geschlossene Jalousie nicht komplett lichtundurchlässig ist. Der oben genannte Wert erschien deshalb als sinnvoller Grenzwert für die weitere Auswertung.

### Ergebnisse

**Freiburg *Sonnenschiff*:** Die Jalousien im *Sonnenschiff* werden automatisch über integrierte Lichtsensoren gesteuert, können jedoch zusätzlich manuell beeinflusst werden. In den beiden Räumen wurde davon un-



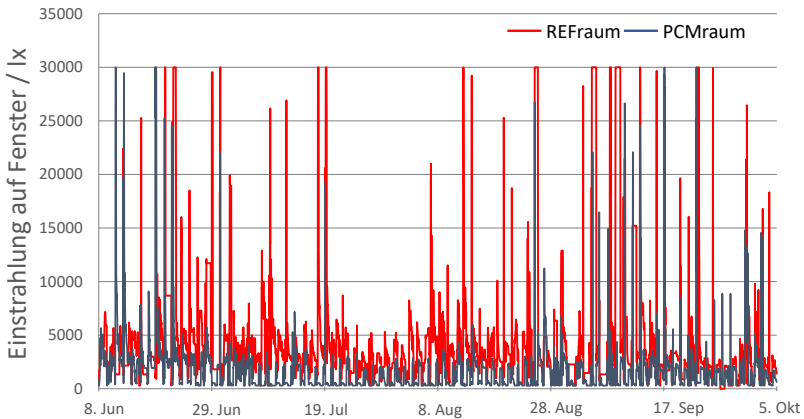
terschiedlich Gebrauch gemacht: Im PCMraum wurde die Jalousie an den meisten Tagen durch die automatische Steuerung geregelt – was zu einer Deaktivierung der Jalousie zwischen 14 – 15 Uhr führte, da zu diesem Zeitpunkt die Einstrahlung auf die Fenster nur noch gering war. Im REFraum hingegen wurde öfter in die automatische Steuerung eingegriffen und die Jalousie früher geöffnet. Der hinsichtlich der Einstrahlung relevante Zeitraum lag aufgrund der Orientierung der Fassade nach Osten zwischen 7 – 14 Uhr, also in dem Zeitraum, in dem die automatische Jalousiesteuerung diese für gewöhnlich aktivierte.



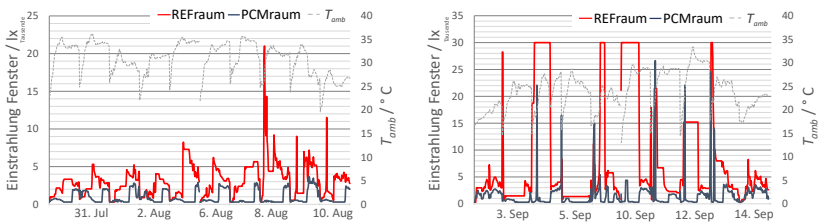
**Abb. 5.11:** Lichteinfall an der Unterkante der jeweiligen Fenster der beiden Räume im *Sonnenschiff*. Die Jalousie im REFraum wurde häufig schon vorzeitig deaktiviert.

Über den gesamten Monitoringzeitraum betrachtet resultierte aus dieser manuellen Interaktion eine höhere Einstrahlung im REFraum (vgl. Abb. 5.12). In Gesprächen mit den Raumnutzerinnen wurde deutlich, dass die Nutzerinnen des REFraums ein großes Bedürfnis nach Tageslicht hatten und sich deshalb häufig dafür entschieden, die Jalousien zugunsten einer besseren Beleuchtung hochzufahren, und dabei den

zusätzlichen Wärmeeintrag in Kauf nahmen. Sie neigten allerdings bei niedrigeren Außentemperaturen eher zu diesem Verhalten (Abb. 5.13 b), während heißerer Wochen ließen sie die Jalousien konsequent unten – genau wie die Nutzerin des PCMraums (Abb. 5.13 a).



**Abb. 5.12: Lichteinfall an der Unterkante der jeweiligen Fenster der beiden Räume im *Sonnenschiff* während der Arbeitszeit.**



**Abb. 5.13: Lichteinfall an der Unterkante der Fenster in der Arbeitszeit während einer heißen und einer kühleren Periode: (a) Heiße Periode, PCM nicht in Betrieb und (b) kühlere Periode mit aktivem PCM.**

Eine Abschätzung, wie stark diese nicht-optimale Jalousienutzung im REFraum zu den höheren Temperaturen beigetragen hat, ist allerdings sehr schwierig. Denn zum einen erreichte die Fensterfront aufgrund ihrer Ausrichtung nach Osten schon ab dem späten Vormittag keine direkte Sonneneinstrahlung mehr. Zum andern ist das Gebäude mit gut isolierenden Fenstern ausgestattet, die einen übermäßigen Wärmeeintrag verhindern.

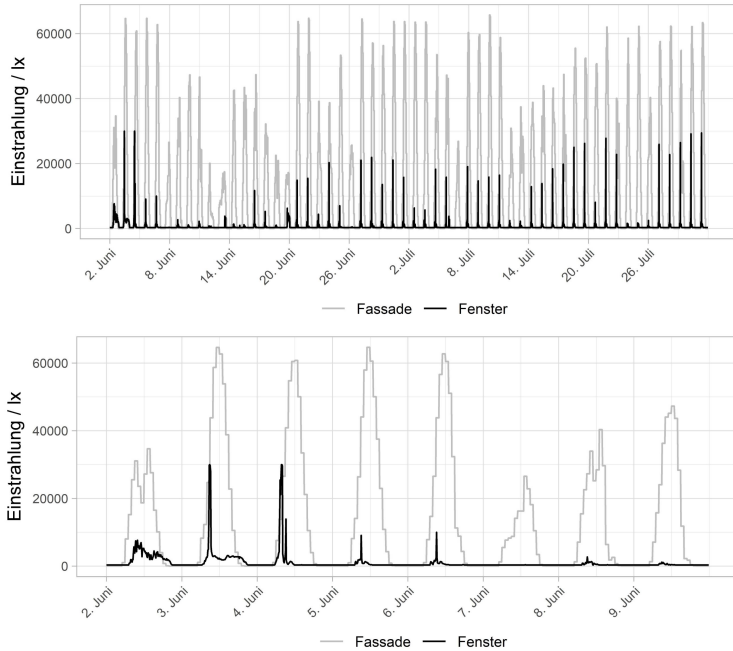
Aus den Einstrahlungsdaten wurden Rückschlüsse auf den Einsatz der Jalousien gezogen, wobei eine Teilbeschattung (wie in Abb. 5.3a zu sehen) in der Simulation nicht berücksichtigt wurde. Die reale Jalousienutzung im PCMräum wurde folgendermaßen operationalisiert: Jalousie war

$$\text{zw. 7 - 14 Uhr} = \begin{cases} \text{falls Einstrahlung} < 3500 \text{ lx} & \text{aktiviert} \\ \text{sonst} & \text{deaktiviert} \end{cases}$$

zw. 15 - 6 Uhr = deaktiviert

**Luxemburg Klassenzimmer:** Im Klassenzimmer wurden die Jalousien recht konsequent zur Vermeidung übermäßigen Lichteinfalls genutzt. Durch die Orientierung des Raumes traten die höchsten Einstrahlungswerte auf die Fensterfassade in der Regel morgens ab ca. 7:30 Uhr bis gegen 13:00 Uhr auf, danach nahm sie stark ab. Für gewöhnlich gab es morgens kurz vor Unterrichtsbeginn einen kurzen Zeitraum, in dem die Jalousien noch nicht aktiviert waren und der Strahlungssensor hohe Strahlungswerte dokumentierte (vgl. Abb. 5.14). Sobald der Raum belegt war und der Unterricht begann, sanken die Einstrahlungswerte schnell ab und es ist davon auszugehen, dass diese kurzfristige Än-

derung in der Einstrahlung meistens durch das Herunterfahren der Jalousie verursacht wurde.



**Abb. 5.14:** Zehnminuten-Mittelwerte des Lichteinfalls am unteren Lichtsensor. Oben: über den kompletten Messzeitraum, unten: Ausschnitt einer Woche beginnend mit Samstag, dem 2. Juni.

Analog zum Vorgehen im Fall des Büroraums wurde auch für das Klassenzimmer der gleiche Grenzwert herangezogen, unterhalb dessen die Jalousie als aktiviert galt: Jalousie war

$$\text{zw. 7 - 13 Uhr} = \begin{cases} \text{falls Einstrahlung} < 3500 \text{ lx} & \text{aktiviert} \\ \text{sonst} & \text{deaktiviert} \end{cases}$$

zw. 14 - 6 Uhr = deaktiviert

Diese indirekte Messung der Jalousieaktivität war jedoch nicht immer präzise wie folgendes Beispiel veranschaulichen soll. Es gab vereinzelt Wochenendtage, an denen die gemessene Lichtintensität schnell abnahm nach einem morgendlichen Einstrahlungsspeak (vgl. Abb. 5.15), obwohl gemäß Messdaten an diesem Sonntag keine Person im Raum anwesend war, die die Jalousie hätte aktivieren können. Es ist also davon auszugehen, dass die Einstrahlungsreduktion eine andere Ursache hatte, wie bspw. eine Wolke. Wahrscheinlich sind die von EP ausgegebenen Einstrahlungswerte beim Auftreten von kleinräumigen Verschattungen etwas unpräzise, da sie auf Satelitten- und nicht auf Messdaten basieren. D.h. es kann durchaus kleinräumige Wolkenverschattungen gegeben haben, die in dieser Präzision nicht in den Einstrahlungsdaten und Simulationen abgebildet werden konnten. Für die Auswertung im Rahmen der vorliegenden Studie schien es trotzdem vertretbar, die oben beschriebene Auswertungslogik anzuwenden, da auch eine Verschattung durch Wolken den Energieeintrag durch die Fenster in vergleichbarem Maße reduzieren konnte wie Jalousien.

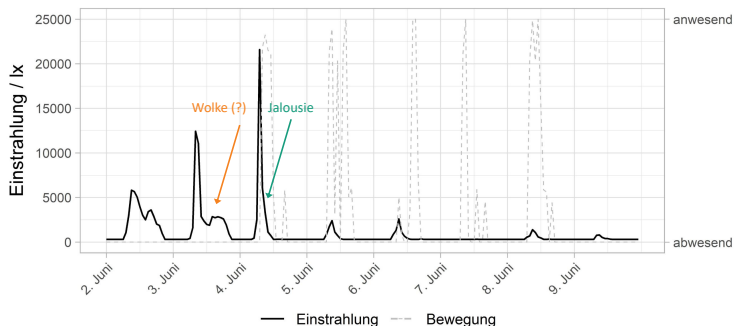
Und letztlich war das Verhalten, das als Stundenwerte in die Simulation einging, ohnehin eine deutliche Simplifizierung gegenüber der Realität. Eine Abbildung der wirklichen Komplexität bzw. Auflösung des Verhaltens wurde im Rahmen der vorliegenden Studie nicht umgesetzt, da sie zu sehr langen Simulationsdauern geführt hätte. Im Hinblick auf die

Forschungsfragen schien dies an dieser Stelle eine vertretbare Simplifizierung, die die Forschungsergebnisse nicht grundlegend beeinflusst.

Für den Parameter der Jalousienutzung sollte bei zukünftigen Datenerhebungen allerdings ein adäquateres Konzept erarbeitet werden, um diese zuverlässiger dokumentieren zu können. Ein Lösungsansatz könnte sein, dass ein zusätzlicher Strahlungssensor an der Außenwand angebracht wird und durch den direkten Abgleich zwischen Strahlung auf die Fassade und auf das Fenster hinter der Jalousie ein Rückschluss auf die Jalousieaktivität gezogen werden kann.

### 5.2.3 Erstellung verschiedener Verhaltensszenarien

Die Verhaltensanalysen ergaben, dass Verbesserungspotenzial sowohl beim Lüften als auch bei der Jalousienutzung vorhanden war. Für jede der beiden Fallstudien wurden jeweils drei Szenarien erstellt, wobei ein Basisszenario mit dem real dokumentierten Verhalten für die Parame-



**Abb. 5.15: Zehnminuten-Mittelwerte des Lichteinfalls am unteren Lichtsensor. Reduktion des Lichteinfalls konnte verschiedene Ursachen haben: An Tagen ohne Anwesenheit könnte eine mögliche Ursache eine Verschattung durch Wolken sein.**

ter Fensteröffnung, Jalousienutzung und elektrische Lüftung (im Fall des *Sonnenschiffs*) als Baseline diente. Anhand der identifizierten Verbesserungsmöglichkeiten wurden je zwei weitere Szenarien erstellt, um zu analysieren, welchen Einfluss die verschiedenen Verhaltensmuster auf den Verlauf der Raumtemperatur und die PCM-Performance haben, und die Ergebnisse mit dem jeweiligen Basisszenario verglichen. Dazu wurden eigene Annahmen darüber getroffen, wie eine Verbesserung des Verhaltens erzielt werden könnte. Die Szenarien werden im Folgenden beschrieben:

### **Freiburg *Sonnenschiff***

#### a) Bedienung von Fenster und Lüftungspaneel:

Die Messdaten zeigten, dass die Nutzerin des Büros hauptsächlich das Lüftungspaneel nutzte, um das Raumklima entsprechend ihrer Wahrnehmung von thermischer Behaglichkeit und Luftqualität zu regulieren. Das Fenster hingegen nutzte sie nicht. Damit die natürliche Nachtlüftung wie in der ursprünglichen Planung vorgesehen funktionieren kann, sollte das Lüftungspaneel am Abend vor dem Verlassen des Büros gekippt oder besser noch geöffnet und am nächsten Tag geschlossen werden, bevor sich die Umgebungsluft erwärmt. Das Fenster kann zwar nicht über Nacht geöffnet bleiben wegen Einbruchgefahr, sollte aber morgens zur Nutzung der kühlen Morgenluft bei Arbeitsbeginn kurz geöffnet werden. Die Daten zeigten, dass das Paneel über Nacht oft gekippt war, tagsüber jedoch dann nicht geschlossen wurde, was bei hohen Außentemperaturen zu erhöhtem Wärmeeintrag in den Raum führte. Als verbesserte Fensternutzung (Lüftungspaneel eingeschlossen) wurde auf Basis eigener Einschätzungen definiert:

- Lüftungspaneel geöffnet zwischen 17 - 8 Uhr
- Fenster geöffnet zwischen 8 - 9 Uhr
- bei Raumtemperatur  $> 26^\circ\text{C}$  konnten Fenster und Paneel nur geöffnet werden, wenn  $T_{amb} < T_{op}$ <sup>6</sup>

### b) Nutzung der Jalousie:

Die Jalousie wurde recht konsequent zur Verschattung genutzt und es gab im dokumentierten Zeitraum insgesamt nur neun Tage, an denen die Verschattung entweder nur für eine Stunde pro Tag oder überhaupt nicht aktiviert wurde. Als verbesserte Jalousienutzung wurde daher definiert, dass die Jalousie auch an diesen Tagen von 8 bis 14 Uhr aktiviert ist.

### c) Elektrische Nachtventilation:

Das Sonnenschiff ist mit einer elektrischen Lüftungsanlage ausgestattet, die einen Kreuzstromwärmetauscher mit drei Schaltstufen für unterschiedliche Luftvolumenströme enthält. Über diesen kann die Innenluft mit Frischluft von außen ausgetauscht werden (vgl. Abb. 2.2b). Über die den einzelnen Stufen entsprechende Luftwechselrate lagen keine genauen Angaben vor. Sie wurde bei der Gebäudeplanung für einen konstanten Luftaustausch mit der Außenluft vorgesehen, sollte jedoch zumindest für den nächtlichen Austausch eingeschaltet sein, um die Regeneration des PCM zu ermöglichen und die Gebäudemassen als Kältespeicher zu aktivieren. Aus den während der Messkampagne erhobenen Daten ging jedoch hervor, dass die Lüftungsanlage nicht genutzt wurde, auch nicht nachts. Das wurde auch in Gesprächen mit den

---

<sup>6</sup> Fensterlüftung kann auch bei höheren Außentemperaturen sinnvoll sein zur Verbesserung der Luftqualität. In der vorliegenden Studie wurde der Aspekt der Luftqualität jedoch völlig vernachlässigt, da der Schwerpunkt auf den thermischen Bedingungen und den wechselseitigen Einflüssen zwischen Verhalten, Nutzen des PCM und thermischen Bedingungen in den Räumen lag.



Nutzer:innen des Gebäudes bestätigt. Sie berichteten, dass aufgrund von Beschwerden aus der Nachbarschaft über eine zu starke Lärmentwicklung bei Nutzung der Lüftung diese permanent ausgeschaltet ist.

Um die Nachtventilation im Modell abzubilden, wurde ein Szenario erstellt, in dem eine Lüftungsanlage unter Verwendung des Objekts `ZoneVentilation: DesignFlowRate` in EP verwendet wurde. Die Art der Belüftung wurde als ausgeglichen definiert, was bedeutet, dass das System einen Ansaug- und einen Abluftventilator enthält, die mit dem gleichen Wirkungsgrad und der gleichen Durchflussrate arbeiten [113]. Außerdem wurde das Ventilationssystem so definiert, dass es jeden Tag abends zwischen 21 Uhr und 7 Uhr angeschaltet war. Die Luftwechselrate ACH (Englisch: air change rate) wurde auf 2 festgelegt<sup>7</sup>.

Eine Übersicht aller erstellten Szenarien ist in Tab. 5.1 zu finden.

### **Luxemburg Klassenzimmer**

#### a) Bedienung der Fenster:

Die beobachteten Fensternutzungsmuster waren denen im Büroraum sehr ähnlich. Auch nachts wurde häufig nur ein Fenster geöffnet, wenn möglichst alle drei hätten geöffnet werden sollen, um eine stärkere Abkühlung des Raumes zu erzielen. Daher wurde analog zum Büroraum verbessertes Fensterlüftungsverhalten folgendermaßen definiert:

---

<sup>7</sup> Da Informationen über die tatsächlichen Rate fehlten wurden drei Simulationen durchgeführt, in denen ACH von 1 bis 3 variiert wurde. Anschließend wurde auf Basis der jeweiligen Temperaturreduktion gegenüber dem Szenario ohne elektrische Lüftung ein Modell ausgewählt, vgl. Tab. A.3 im Anhang

- Montag - Freitag: wenn  $T_{op} > 23\text{ °C}$  drei geöffnete Fenster von 18 – 8 Uhr; sonst nur ein Fenster geöffnet
- Freitag-Montag: wenn  $T_{op} > 19\text{ °C}$  ein Fenster geöffnet von 18 – 8 Uhr; sonst alle Fenster geschlossen
- bei Raumtemperatur  $> 26\text{ °C}$  konnten Fenster nur geöffnet werden, wenn  $T_{amb} < T_{op}$

b) Nutzung der Jalousie:

Die Beschattung der Fenster wurde während des Beobachtungszeitraums recht konsequent umgesetzt. Die Messdaten zeigten, dass nur gelegentlich und vor allem an Wochenenden die Jalousien nicht genutzt wurden, obwohl dies aufgrund der Einstrahlung gut gewesen wäre. Aufgrund der Ausrichtung der Fensterfront nach Osten gab es ab dem späten Vormittag keine direkte Einstrahlung mehr auf die Fassade. Als verbessertes Szenario für das Klassenzimmer wurde definiert, dass die Jalousien jeden Tag zwischen 8 und 13 Uhr aktiviert sind und während der Wochenenden von Freitag 13 Uhr bis Montag 8 Uhr.

**Tab. 5.1: Übersicht der erstellten Verhaltensszenarien, + mit PCM, - ohne PCM. Die Szenarien S1-S3 wurden jeweils mit zwei verschiedenen PCM-Enthalpien, 50 und 100%, simuliert.**

Szenario	Raum	PCM	Jalousie	Fenster	Lüftung
S1	Büro	+/-	real	real	real
S2	Büro	+/-	verbessert	verbessert	real
S3	Büro	+/-	verbessert	verbessert	verbessert
S4	Klassenzimmer	+/-	real	real	-
S5	Klassenzimmer	+/-	verbessert	real	-
S6	Klassenzimmer	+/-	verbessert	verbessert	-

## 5.3 Simulationen mit EnergyPlus

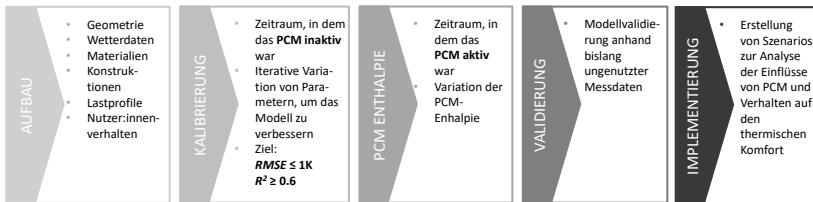
Simulationen von Energieflüssen in Gebäuden sind eine gute Möglichkeit, Erkenntnisse über PCM und ihren Effekt auf den thermischen Komfort zu erlangen. Durch sorgfältig erstellte und validierte numerische Simulationen lassen sich Kosten für Experimente einsparen und Antworten auf Forschungsfragen finden. Es gibt mittlerweile ein beträchtliches Angebot an über zwei Dutzend zum Teil kommerziellen Softwares, bei denen PCM in einer Simulation berücksichtigt werden können. Die verbreitetsten sind EP, ESP-r und TRNSYS [44], [114].

EP ist eine kostenlose, quelloffene und Plattformübergreifende Software, wodurch sie sehr beliebt bei Anwender:innen ist. Ihre Entwicklung begann 1996 in den USA basierend auf den beiden Vorgängern DOE-2 und BLAST. Unter anderen Neuerungen zählen variable Zeitschritte und eine auf Wärme- und Massebilanzen basierende Zonensimulation zu den bedeutendsten Weiterentwicklungen der vorherigen Softwares [115]. Darüber hinaus kann das Verhalten von Nutzer:innen detaillierter abgebildet werden in EP als in ESP-r. Da das Verhalten einen zentralen Bestandteil der Forschungsfragen dieser Arbeit ausmachte, fiel die Wahl auf diese Software. Seit April 2007 bietet EP (Version 2.0) die Möglichkeit, PCM zu integrieren, was durch die Einführung eines Finite-Differenzen-Lösungsalgorithmus für die Wärmeleitung erleichtert wurde [4]. Verschiedene Studien validierten diesen Ansatz in der Vergangenheit (z.B. [116], [117]).

### 5.3.1 Modellaufbau

Für beide Gebäude wurde jeweils ein Modell des untersuchten PCM-Raumes sowie des angrenzenden Flurs erstellt. Der Prozess der Modelerstellung und anschließenden Implementierung bestand aus fünf Ab-

schnitten, die im Folgenden detailliert erläutert werden und in Abb. 5.16 schematisch dargestellt sind. Der Simulationszeitraum deckte in beiden Fallstudien die Monate Mai<sup>8</sup> - September des Jahres 2018 ab, der Einfluss des PCM wurde für 1. Juni - 27. Juli (Gymnasium) bzw. 16. Juni - 15. September (*Sonnenschiff*) ausgewertet<sup>9</sup>.



**Abb. 5.16:** Darstellung der konsekativen Prozessschritte bei der Modellierung, der Bestimmung der aktuellen spezifischen Enthalpie und der Implementierung verschiedener Szenarios [eigene Darstellung].

*Wetterdatensatz:* Die Wetterdaten für den Standort Feriburg wurden vom Deutschen Wetterdienst bezogen, der seine Messdaten online zur Verfügung stellt [108]. Für den Standort Diekirch in Luxemburg wurde ein Wetterdatensatz von Solargis bezogen [110]. Die für die Simulation benötigten Wetterparameter waren Lufttemperatur<sup>10</sup>, Luftdruck, relative Luftfeuchtigkeit sowie Global-, Normal- und Diffusstrahlung. Mit diesen Daten wurde mit Hilfe der Software Elements jeweils eine EP-Wetterdatei (.EPW) erzeugt.

<sup>8</sup> Die Simulationsmodelle brauchen eine gewisse Anlaufzeit, bis sich die Räume thermisch korrekt darstellen lassen. Deshalb wurden die Simulationen schon vier bis sechs Wochen vor dem eigentlichen Auswertzeitraum starten gelassen.

<sup>9</sup> Diese Zeiträume sind etwas kürzer als die Messperioden. Das liegt daran, dass zu Beginn bei beiden Messkampagnen kleinere Probleme bei der Datenübertragung und Speicherung aufgetreten sind. Die analysierten Zeiträume entsprechen denen, mit vollständiger Datenverfügbarkeit.

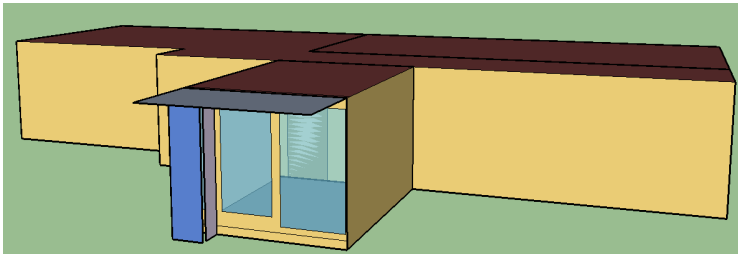
<sup>10</sup> Dafür wurde die Trockenkugeltemperatur verwendet, die mit einem der Luft frei ausgesetzten, aber vor Strahlung und Feuchtigkeit geschützten, Thermometer gemessen wurde.

*Geometrien der simulierten Räume:* Zuerst wurde die Geometrie des jeweiligen PCM-Raumes und seiner Umgebung in der Software SketchUp mit Hilfe der Erweiterung OpenStudio erstellt und als EP-Datei exportiert (vgl. Abb. 5.17). Der PCM-Raum des *Sonnenschiffs* wird in Abb. 5.17a durch den nach vorne-links orientierten Raum repräsentiert. Die vertikalen und horizontalen Verschattungsobjekte repräsentieren die außenliegenden Schutzplatten und den Balkon des darüber liegenden Stockwerkes. Das analysierte Klassenzimmer entspricht dem rechten Raum in Abb. 5.17b. Bei beiden Modellen wurden die jeweils angrenzenden Räume, die für die Simulation relevant erschienen, z.B. weil ein Luftaustausch bei geöffneten Türen stattfand, in der Geometrie abgebildet.

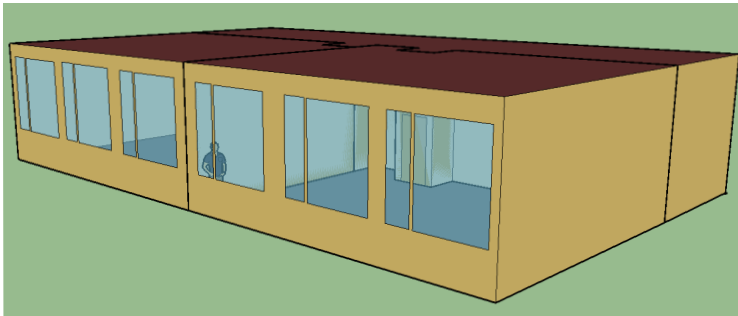
*Materialien und Konstruktion:* Im nächsten Schritt wurden alle verwendeten Materialien, Randbedingungen und Konstruktionen<sup>11</sup> in EP inklusive ihrer spezifischen Eigenschaften hinterlegt und die entsprechenden Eigenschaften allen Oberflächen innerhalb der Modelle zugewiesen. Manche Informationen bezüglich verwendeter Materialien mit ihren physikalischen und thermischen Eigenschaften, über den Schichtaufbau von Konstruktionen sowie die Dicke von Schichten innerhalb der Konstruktionen waren nicht verfügbar. Deshalb mussten an diesen Stellen Annahmen getroffen werden. Die Eigenschaften der verwendeten Materialien wurden dem online U-Wert-Rechner Ubakus entnommen, der über eine zuverlässige Datengrundlage verfügt und sich an in Deutschland geltenden Standards orientiert [118]. Eine detaillierte Auflistung der eingesetzten Baustoffe sowie der zugehörigen physikalischen Materialeigenschaften ist im Anhang in den Tabellen A.1 und A.2 zu finden.

---

<sup>11</sup> Als Konstruktion werden in EP beispielsweise Wände, Decken und Böden bezeichnet, die sich aus unterschiedlich geschichteten Materialien zusammensetzen.



(a)



(b)

**Abb. 5.17:** In SketchUp mithilfe der OpenStudio-Extension erstellte Geometrien der beiden Räume (a) Büro im *Sonnenschiff* mit den entsprechenden Verschattungsobjekten und (b) das Klassenzimmer (im Bild rechts) [eigene Darstellungen].

*Integration von PCM:* PCM lassen sich in ein EP-Modell über die Rubrik MaterialProperties integrieren, in der Materialien mit anspruchsvolleren thermischen Eigenschaften definiert werden können. Es gibt bei EP grundsätzlich zwei Wege, PCMs zu integrieren: die herkömmliche Enthalpie-Temperatur-Methode und die neuere Hysterese-Methode, bei der berücksichtigt wird, dass die Kurven von Schmelzen und Erstarren unterschiedlich verlaufen [119]. Beide Vorgehensweisen sind

etabliert und validiert<sup>12</sup>. Die Hysterese-Methode erschien für den Anwendungsfall der vorliegenden Arbeit präziser, deshalb wurde sie für die Gebäudesimulationen genutzt. Dabei verwendet die Software einen Finite-Differenzen-Algorithmus zur Integration von PCM, der den schon bestehenden Algorithmus (des Materials ohne PCM) um die komplexeren thermischen Eigenschaften des PCM ergänzt [121]. Einige der verwendeten thermischen Eigenschaften des PCM stammen aus früheren DSC-Messungen am Fraunhofer ISE. Für die Eigenschaften, die nicht bei Fraunhofer ISE gemessen werden konnten, wurden Literaturwerte herangezogen (vgl. Abb. 5.18).

Field	Units	Obj1
Name		Smartboard 23
Latent Heat during the Entire Phase Change Process	J/kg	100600
Liquid State Thermal Conductivity	W/m-K	0,067
Liquid State Density	kg/m <sup>3</sup>	250
Liquid State Specific Heat	J/kg-K	1300
High Temperature Difference of Melting Curve	deltaC	0,549
Peak Melting Temperature	C	24,129
Low Temperature Difference of Melting Curve	deltaC	3,677
Solid State Thermal Conductivity	W/m-K	0,067
Solid State Density	kg/m <sup>3</sup>	250
Solid State Specific Heat	J/kg-K	1480
High Temperature Difference of Freezing Curve	deltaC	0,726
Peak Freezing Temperature	C	22,944
Low Temperature Difference of Freezing Curve	deltaC	3,374

**Abb. 5.18:** Eingegebene Werte des PCM in EP entsprechend des Hysterese-Modells. Quellen: Dichtewerte [122], Werte für latente Wärme und Wärmeleitfähigkeit [123], alle anderen Werte Fraunhofer ISE.

*Verhalten der Nutzer:innen:* Das Verhalten von Nutzer:innen lässt sich über sogenannte Schedules in EP abbilden. Darunter sind Zeitpläne zu verstehen, die für jede Stunde des simulierten Zeitraums die entsprechende Aktivität definieren. Anhand der dokumentierten Daten wurden Zeitpläne erstellt um festzulegen, wann a) jemand anwesend war, b) Fenster oder Lüftungspaneele geöffnet, gekippt oder geschlos-

<sup>12</sup> Eine detaillierter Vergleich der beiden Funktionen ist bei Al-Janabi & Kavgić [120] zu finden.

sen wurden und c) wann die Jalousien betätigt wurden. Daraus resultierte eine Datei, in der für jede Stunde des simulierten Zeitraumes die Verhaltensparameter definiert wurden.

- a) Anwesenheit: Die Anwesenheit wurde über einen Bewegungssensor gemessen, der ein binäres Ergebnis (0, wenn keine Bewegung festgestellt wurde und 1, wenn Bewegung erfasst wurde) dokumentierte. Der Raum im *Sonnenschiff* wurde von einer Person genutzt, deshalb wurde in der Simulation bei ihrer Anwesenheit ein interner Wärmegewinn von  $120 \text{ W}^{13}$  berücksichtigt. Beim Klassenzimmer war anhand der Daten des Bewegungsmelders nicht ersichtlich, wieviele Personen jeweils anwesend waren. Deshalb wurde an dieser Stelle die Annahme getroffen, dass – davon ausgehend, dass oft ein Teil der Schüler:innen krank ist – stets 20 Personen im Raum waren. Während des Kalibrierungsprozesses stellte sich jedoch heraus, dass mit 40 Personen á  $120 \text{ W}$  eine bessere Übereinstimmung zwischen simulierten und gemessenen Werten erzielt werden konnte<sup>14</sup>.
- b) Öffnen und schließen von Fenstern: An Fenstern der beiden Räume sowie dem Lüftungspaneel im *Sonnenschiff* wurde über Kontaktsensoren dokumentiert, wann sie geschlossen, gekippt und geöffnet waren. Die beweglichen Fensterflügel der drei Fenster im Klassenzimmer konnten nur geöffnet, nicht gekippt werden. In EP wurde für jede der zwei bzw. drei Positionen ein entsprechender Infiltrationswert, der den von außen durch die Gebäudehülle eintretenden Luftstrom angibt, festgelegt. Ausgehend vom ge-

---

<sup>13</sup> Dieser Wert basiert auf der Empfehlung der Softwaredokumentation, in der Werte für verschiedene Aktivitäten vorgeschlagen werden [113].

<sup>14</sup> Möglicherweise ist auch der Wärmegewinn durch Schüler:innen pro Person höher als bei im Büro arbeitenden Erwachsenen. Für das Simulationsergebnis war es letztlich jedoch unerheblich, ob die Anzahl an Personen oder der spezifische Wärmeeintrag modifiziert wurde.



schlossenen Zustand wurde die Luftdichtigkeit der Gebäude auf 0,3 ACH geschätzt. Dieser Wert basiert auf den in der Norm DIN EN 16798-1 [34] definierten Vorgaben für energieeffiziente Gebäude. Die Luftwechselraten für gekippte und geöffnete Fenster wurden im Laufe des Kalibrierungsprozesses variiert (siehe Abschnitt 5.3.2).

- c) Nutzung der Jalousie: Basierend auf den Werten der Einstrahlungssensoren, die am unteren Rand der Fenster positioniert waren, wurde ein Zeitplan für die Jalousienutzung erstellt. Dafür wurden die Sensormesswerte mit den Einstrahlungswerten auf das jeweilige Fenster aus EP abgeglichen (vgl. Abschnitt 5.2.2). Daraus wurde wiederum eine Inputdatei erstellt, in der 0 und 1 für nicht aktivierte und aktivierte Jalousie stand.

### 5.3.2 Kalibrierung und Validierung der Modelle

Es gibt verschiedene Möglichkeiten der Modellkalibrierung und -validierung (vgl. [124]). Im vorliegenden Fall wurde der Ansatz der empirischen Überprüfung gewählt, bei der die Simulationsergebnisse mit gemessenen Daten verglichen, anhand von Gütemaßen unterschiedliche Modellvarianten bewertet und die bestpassende Variante identifiziert werden kann. Als relevante Zielfunktionen wurden das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  und die Wurzel des mittleren quadrierten Fehlers  $RMSE$  (engl. root mean square error) gewählt.  $R^2$  ist ein Maß dafür, wie gut das Modell zu den beobachteten Daten passt [125]. Akzeptable  $R^2$ -Werte variieren stark je nach Untersuchungsgebiet und gewünschter Genauigkeit des jeweiligen Modells. Im Allgemeinen gelten  $R^2$ -Werte größer als 0,60 als annehmbar [126]. Die Berechnung erfolgte gemäß folgender Gleichung 5.3, wobei  $N$  für die Anzahl der Datenpunkte steht,  $SIM_i$  und  $OBS_i$  für den simulierten bzw. beobachteten Datenpunkt  $i$ ,

$\overline{SIM}$  und  $\overline{OBS}$  für die Mittelwerte der simulierten bzw. beobachteten Daten.

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^N (OBS_i - \overline{OBS}) * (SIM_i - \overline{SIM}) \right]^2}{\sum_{i=1}^N (OBS_i - \overline{OBS})^2 * \sum_{i=1}^N (SIM_i - \overline{SIM})^2} \quad (5.3)$$

Die Abweichung der Simulationsergebnisse von den Messdaten wurde mit Hilfe des *RMSE* quantifiziert. Dieser ist ein Maß für die Streuung der Residuen und verdeutlicht dadurch, wie groß der Abstand zwischen Modell und Realität ist [124]. Ziel war, einen  $RMSE \leq 1\text{ K}$  zu erhalten. Berechnet wurde er anhand Gleichung 5.4:

$$RMSE = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (OBS_i - SIM_i)^2} \quad (5.4)$$

Während des Kalibrierungsprozesses wurden verschiedene Parameter variiert, um eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen den jeweiligen Messdaten und simulierten Daten zu erzielen. Die variierten Parameter bezogen sich zum Einen auf die Bauweise des Gebäudes und zum anderen auf den Betrieb bzw. das Verhalten der Nutzenden:

1. *Bauweise*: Der Fokus wurde auf Variationen der Eigenschaften von Fassadenelementen und Fenstern gelegt. Nach einigen Variationen zeigte sich, dass Veränderungen an diesen Stellschrauben zu relativ großen statischen Änderungen (Temperaturkurve wird nach oben oder unten verschoben, vgl. [127]) führten, da sich dadurch der Wärmeübergangskoeffizient  $U$  der gesamten Fassade änderte. Eine dynamische Änderung (in der Amplitude der

Temperaturkurve) wurde hingegen durch einer Änderung der thermischen Masse von Decken und Böden erzielt.

2. *Betrieb*: Großen Einfluss auf die Modelle hatten Änderungen der Parameter Infiltration und interne Gewinne. Da die Anwesenheitszeiten durch die Messdaten vorgegeben waren und die erzeugte Wärmemenge pro Person gemäß Normvorgaben festgelegt wurde, blieben noch die beiden Stellschrauben Infiltration und – im Fall der Schule – Anzahl der Personen, die während des Kalibrierungsprozesses variiert wurden. Im Klassenzimmer wurden zudem noch interne Gewinne durch Beleuchtung berücksichtigt. Dieser Parameter wurde zwar während des Monitorings nicht separat erfasst, stellte sich jedoch während der Modellerstellung als wichtiger zu berücksichtigender Faktor heraus. Für das Modell wurde deshalb die Annahme getroffen, dass das Licht immer angeschaltet war, wenn Personen anwesend waren und die Jalousien heruntergelassen waren. Für das Büro wurden Beleuchtung und elektrische Geräte mangels valider Daten nicht im Modell berücksichtigt.

Für die Kalibrierung wurde jeweils ein Zeitraum gewählt, in dem die Raumtemperaturen permanent über der Schmelztemperatur des PCM lagen und somit die Modelle unabhängig von den PCM-Eigenschaften verbessert werden konnten. Dabei wurden die oben beschriebenen Kalibrierungsparameter so lange variiert, bis die Simulationsergebnisse zufriedenstellend mit den Messdaten korrelierten. Alle Iterationen wurden manuell durchgeführt. Das Modell des *Sonnenschiffs* zeigte schon zu Beginn der Kalibrierung eine gute Übereinstimmung mit den Messdaten ( $R^2 = 0,80$ ). Am Ende konnte dieser Wert noch auf 0,91 verbessert und ein *RMSE* von 0,44 K erzielt werden. Für das Modell des Klassenzimmers wurden Werte von 0,62 und 0,97 K erreicht.

Der letzte Schritt des Kalibrierungsprozesses bestand darin, die aktuelle spezifische Enthalpie des PCM zu bestimmen. Da es aus DSC-Messungen Hinweise auf eine zeitabhängige Abnahme der Enthalpie von mikroverkapselten PCM gab (vgl. Kapitel 3.3), wurde diese in den Simulationen zwischen 0 % und 100 % des ursprünglichen Werts variiert. Die verschiedenen Temperaturkurven wurden anschließend für eine Zeitspanne, in der das PCM aktiv war, mit den Messdaten abgeglichen und anhand der beiden Gütemaße das bestpassende Modell identifiziert. Es zeigte sich, dass beim *Sonnenschiff* keines der Modelle eindeutig am besten passte. Das Bestimmtheitsmaß war beim 100%-Szenario am besten mit  $R^2 = 0,66$ , lag bei 75% und 50% allerdings nur wenig darunter mit  $R^2 = 0,65$ . Das Szenario mit dem besten  $R^2$ -Wert wies gleichzeitig den schlechtesten *RMSE*-Wert auf mit 0,60 K, den besten Wert erzielte das 50%-Szenario mit 0,54 K. Daher ist es wahrscheinlich, dass sich die Enthalpie des PCM in dem Bereich zwischen 50% und 100% des ursprünglichen Wertes bewegt. Da eine Eindeutigkeit fehlt, wurden die weiteren Simulationen jeweils mit den beiden Enthalpien durchgeführt. Die entsprechenden Ergebnisse sind daher so zu interpretieren, dass sie den Wahrscheinlichkeitsraum beschreiben und die Realität (vermutlich) irgendwo im Bereich dazwischen liegt. Beim Modell des Klassenzimmers hingegen zeigten die PCM-Szenarien ein eindeutigeres Ergebnis: der beste Fit ergab sich für eine reduzierte Enthalpie von 75 % (vgl. Tab. 5.2).

Schließlich wurde die Robustheit der Modelle in einem Validierungsschritt überprüft. Dazu wurden die simulierten Temperaturverläufe jeweils mit Messdaten aus einem Zeitraum verglichen, der zuvor nicht für den Kalibrierungsprozess genutzt wurde. Für das *Sonnenschiff* ergaben sich ein  $R^2$  von 0,74 und ein *RMSE* 0,79 K und für das Modell des Gymnasiums 0,87 und 0,93 K. Gemäß der definierten Zielwerte von  $R^2 \geq 0,60$  und  $RMSE \leq 1$  K konnten die Modelle als erfolgreich vali-

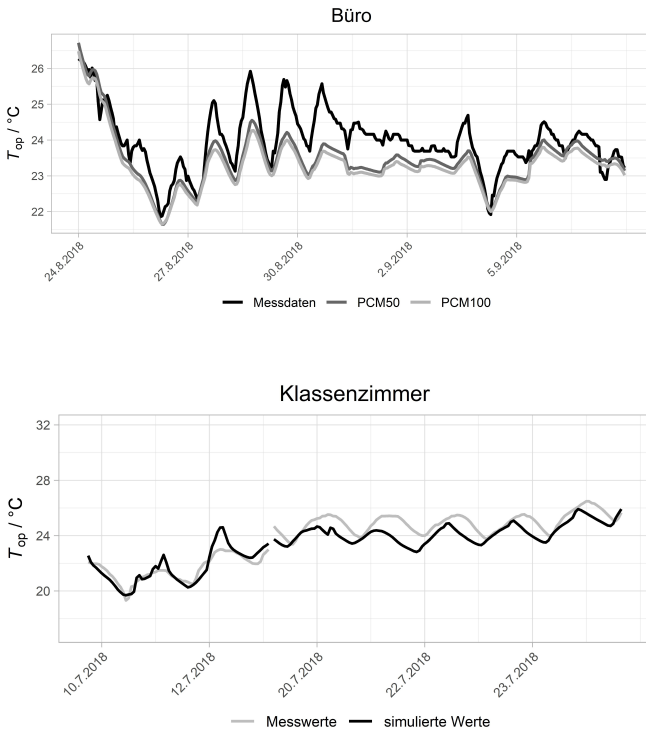
**Tab. 5.2: Ergebnisse der PCM-Szenarien mit unterschiedlichen spezifischen Enthalpien in Relation zu den ursprünglichen Werten von 100 kJ/kg. Das jeweils bestpassende Szenario ist fett hervorgehoben.**

PCM-Szenarien spezifische Enthalpie [%]	Sonnenschiff		Gymnasium	
	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE
		[K]	[K]	
100	<b>0,66</b>	<b>0,60</b>	0,63	0,88
75	0,65	0,54	<b>0,64</b>	<b>0,78</b>
50	<b>0,65</b>	<b>0,52</b>	0,62	0,81
25	0,64	0,53	0,63	0,90
0	0,63	0,56	0,64	1,08

diert angesehen und für weitere Auswertungen genutzt werden (vgl. Abb. 5.19).

## 5.4 Ergebnisse der Simulationen

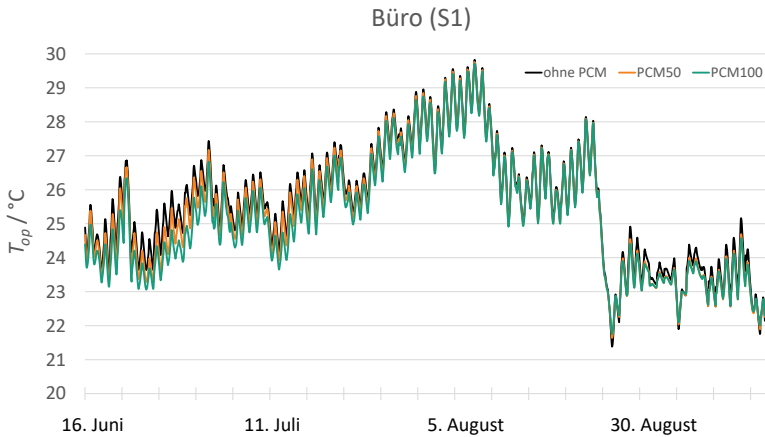
In den ersten ungefähr sechs Wochen bewegte sich die Raumtemperatur im Büro des *Sonnenschiffs* im Schmelzbereich des PCM. Die Temperaturverläufe der verschiedenen PCM-Enthalpien zeigten, dass das PCM einen Temperatursenkenden Effekt erzielen konnte und dass, je höher die spezifische Enthalpie war, desto größer dieser Effekt ausfiel (vgl. Abb. 5.20). Darauf folgten einige Wochen, in denen das PCM nicht kristallisieren konnte, da die Temperaturen stets oberhalb des Schmelzbereichs lagen. In dieser Zeit unterschieden sich die Kurven der drei PCM-Enthalpien kaum. Erst als dann nach einem Temperatursturz Ende August das PCM wieder regenerieren konnte, zeigte sich bis Mitte



**Abb. 5.19: Validierung der beiden Modelle.**

September erneut ein leichter Einfluss des PCM. Dieser fiel jedoch geringer aus als zu Beginn des simulierten Zeitraums. Grund dafür war, dass sich die Raumtemperaturen eher am unteren Rand des Schmelzbereichs bzw. darunter bewegten.

Die Simulationsergebnisse des Klassenzimmers zeigten, dass die Raumtemperaturen sich überwiegend im Schmelzbereich des PCM bewegten. Dadurch wurde fast die ganze Zeit über die ausgleichende Wirkung

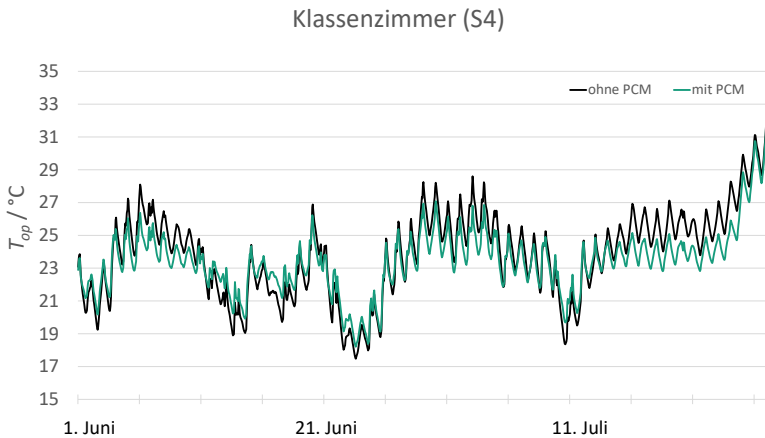


**Abb. 5.20:** Verlauf der simulierten Raumtemperaturen bei verschiedenen PCM-Enthalpien: 0%, 50% und 100%.

des PCM sichtbar: Entweder durch eine Senkung der Temperatur (z.B. in den ersten zehn Tagen) oder bei sehr niedrigen Raumtemperaturen durch eine leichte Anhebung (z.B. in der zweiten Hälfte des Juni).

Zur Bewertung der PCM-Leistungsfähigkeit und der verschiedenen Verhaltensszenarien wurden durchschnittliche und maximale Raumtemperaturen ( $T_{op,max}$ ) der verschiedenen Szenarien verglichen sowie die zeitliche Verteilung der  $T_{op}$  auf die in der Norm DIN EN 16798-1 festgelegten Komfortkategorien in Form von Komfortdiagrammen analysiert. Außerdem wurden die CDH herangezogen (vgl. Abschnitt 2.3). Die Analysen wurden jeweils mit einer statischen Komfortgrenze  $T_{lim}$  durchgeführt, die der DIN EN 4108-2 folgend für das *Sonnenschiff* in Freiburg bei 27 °C und für den Standort Diekirch bei 26 °C lag<sup>15</sup>.

<sup>15</sup> Streng genommen waren in der erwähnten Norm nur Vorgaben für Deutschland enthalten. Diekirch liegt allerdings nur unweit der deutschen Grenze, deshalb schien es legitim, die Komfortgrenzen, die auf Basis großräumiger klimatischer Verhältnisse festgelegt sind, bis zum Standort in Diekirch zu extrapolieren.



**Abb. 5.21:** Verlauf der simulierten Raumtemperaturen bei verschiedenen PCM-Enthalpien: 0% und 75%.

### 5.4.1 Temperaturreduktion durch PCM

Durch das PCM konnte bei allen Szenarien eine deutliche Senkung der Raumtemperatur erzielt werden. Unter Berücksichtigung des realen Nutzerverhaltens (S1) betrug die Temperaturreduktion im Büro maximal 1,22 K bzw. durchschnittlich 0,38 K während der Arbeitszeit unter der Annahme, dass das PCM noch über seine ursprüngliche Enthalpie (also 100%) verfügte (vgl. Tab. 5.3). Bei Zugrundelegung einer reduzierten Enthalpie fiel der Effekt geringer aus mit 0,69 K und 0,21 K.

Der Einfluss des PCM konnte durch verbessertes Verhalten bei einer angenommenen 50%-Enthalpie noch gesteigert werden: die mittlere Temperaturreduktion stieg von 0,21 K (S1) auf 0,35 K (S3). Die maximale Reduktion nahm zuerst leicht ab in S2, stieg dann aber in S3 auf 1,01 K deutlich an. Bei einer spezifischen Enthalpie von 100% zeigte sich in beiden Kennwerten eine leichte Abnahme von S1 zu S2, stieg jedoch



**Tab. 5.3: Ergebnisse der Verhaltensszenarien. Für das Büro (S1-S3) wurden jeweils Szenarien für PCM-Enthalpien von 50% und 100% gerechnet. Für das Klassenzimmer (S4-S6) wurde eine Enthalpie von 75% der ursprünglichen verwendet.**

Szenario	Jalousie	Fenster	Lüftung	max. Temperaturreduktion [K]	mittlere Temperaturreduktion [K]
S1-50	real	real	real	0,69	0,21
S1-100	real	real	real	1,22	0,38
S2-50	verbessert	verbessert	real	0,66	0,26
S2-100	verbessert	verbessert	real	0,94	0,31
S3-50	verbessert	verbessert	verbessert	1,00	0,35
S3-100	verbessert	verbessert	verbessert	1,01	0,35
S4	real	real	-	2,35	0,94
S5	verbessert	real	-	2,25	0,88
S6	vebessert	verbessert	-	2,04	0,61

bei S3 wieder an und erreichte gleiche Werte wie das PCM mit 50%-Enthalpie.

Auch bei der zweiten Fallstudie, dem Klassenzimmer, konnten die thermischen Bedingungen verbessert werden durch das PCM. Im Szenario mit realem Verhalten (S4) betragen die maximale und mittlere Temperaturreduktionen durch PCM 2,35 K bzw. 0,94 K und waren damit deutlich größer als im Büroraum. Durch eine Verbesserung des Nutzerverhaltens nahm der Einfluss des PCM in Form von Temperatursenkungen sowohl im Mittel als auch beim Maximalwert etwas ab. Ursache für diesen Effekt war vermutlich, dass durch das verbesserte Nutzer:innenverhalten das Temperaturniveau insgesamt gesenkt wurde und so der Einfluss des PCM nicht mehr ganz so groß ausfiel wie im

Szenario realen Verhaltens S4. In einer früheren Analyse des gleichen Klassenzimmers [86] wurde eine maximale Temperaturreduktion von 1 K ermittelt. Allerdings wurde für die damalige Studie die Gebäudesimulationsumgebung ESP-r verwendet, was eine mögliche Ursache für die in der aktuellen Studie deutlich höheren Temperaturreduktionen ist. Vermutlich spiegeln sich in den aktuellen Ergebnissen aber auch die veränderten sommerlichen Temperaturen wider<sup>16</sup>: Die mittlere Außentemperatur hat sich gegenüber dem Untersuchungszeitraum in 2008 um 2,5 K (von 16,9 auf 19,4 °C) erhöht. Während in 2008 die Höchsttemperatur noch 30,1 °C betrug, lag sie im Jahr 2018 bei 33,1 °C. Ebenso gab es eine deutliche Zunahme der Globalstrahlung um 11%. Solche spürbaren Veränderungen in den Einstrahlungs- und Temperaturverhältnissen beeinflussen auch das thermische Verhalten von Gebäuden: Ein höheres Temperaturniveau im Gebäude lässt auch das PCM häufiger zum Einsatz kommen, wodurch dann ein größerer Teil seines Potentials ausgeschöpft werden kann.

Bei den beiden Fallstudien sind auf den ersten Blick gegenläufige Trends zu erkennen. Im Fall des Klassenzimmers scheint durch besseres Verhalten der PCM-Effekt abgeschwächt zu werden. Die Hypothese, dass durch besseres Verhalten der Nutzer:innen das PCM besser arbeiten kann und einen größeren Einfluss auf das thermische Verhalten eines Raumes hat, wäre dadurch widerlegt. Wie jedoch bereits in Kapitel 2.3 erwähnt, ist eine bloße Bewertung von PCM anhand von mittleren und maximalen Temperaturreduktionen wenig aussagekräftig. Eine präzisere Bewertung ermöglicht die zusätzliche Analyse von CDH, da dabei auch das vorherrschende Temperaturniveau berücksichtigt wird. Denn es macht für den thermischen Komfort der Nutzer:innen durchaus einen Unterschied, ob Temperaturspitzen oberhalb oder unterhalb der Komfortgrenze reduziert werden.

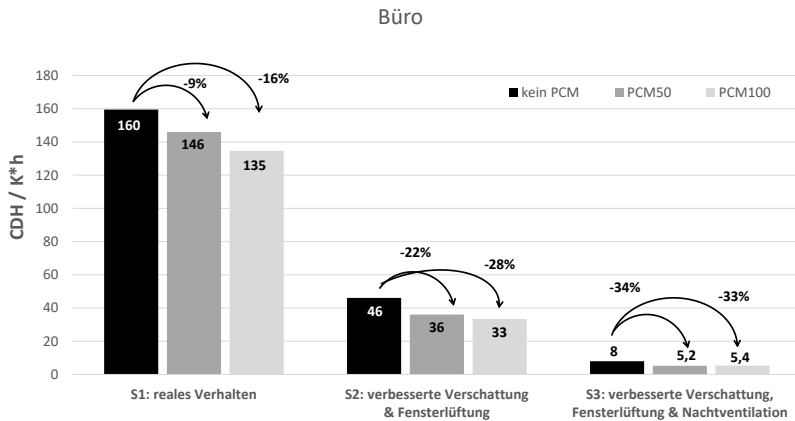
---

<sup>16</sup> Berechnet aus Daten des bezogenen Wetterdatensatzes von Solargis [110].

### 5.4.2 Einfluss des PCM auf CDH

Im Fallbeispiel des Büroraums konnten die CDH im realen Szenario (S1) durch das PCM um 9% (PCM-Enthalpie von 50%) bzw. 16% (100% PCM-Enthalpie) reduziert werden (Abb. 5.22). In den Szenarien S2 und S3 stieg der relative Anteil des PCM noch weiter an auf 22-34%, wobei es in S3 keinen nennenswerten Unterschied mehr gab zwischen den beiden Enthalpien. Vermutlich lag dies daran, dass auch im Szenario ohne PCM nur sehr wenige CDH auftraten (8 in S1 ohne PCM) und der in absoluten Zahlen gemessene Einfluss des PCM weniger als 3 CDH betrug. Der Einfluss von Verhaltensänderungen durch bessere Nutzung von Fensterlüftung und Jalousie hatte einen deutlich stärkeren Einfluss auf die CDH als das PCM selbst: die CDH konnten in S2 (ohne PCM) gegenüber S1 um 71% von 160 auf 46 reduziert werden. Insbesondere die morgendliche Fensteröffnung zwischen 8-9 Uhr leistete einen wertvollen Beitrag zur Entwärmung des Raumes. Durch eine Nutzung der elektrischen Nachtventilation konnten die CDH fast gänzlich auf 8 CDH reduziert werden (S3).

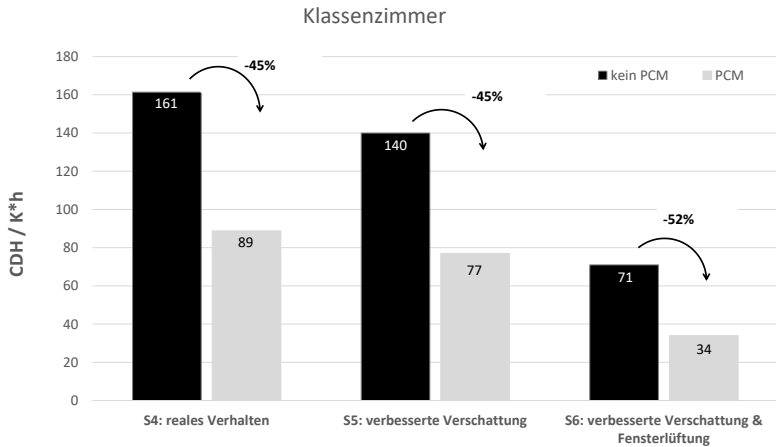
Das Fallbeispiel Klassenzimmer zeigte den gleichen Trend: Verbessertes Verhalten begünstigte auch hier die Bedingungen für thermischen Komfort und senkte die CDH um 56% von 161 auf 71 (Abb. 5.23). Die Beiträge des PCM waren mit einer Verringerung der CDH um 45-52% in diesem Raum jedoch deutlich größer als im Büro. Auch hier stieg der relative Beitrag des PCM zur Komfortoptimierung mit zunehmend besserem Verhalten. Besonders großen Einfluss hat auch in diesem Gebäude die – vor allem nächtliche – Nutzung der Fensterlüftung: Die CDH konnten durch eine verbesserte Verschattung von 161 um 21 reduziert werden, durch bessere Fensterlüftung wurde ihre Anzahl dann noch halbiert (vgl. S5 und S6). Kalz et al. [86] stellten in ihren Simulationen nur 4 Stunden oberhalb der Komfortgrenze von 26 °C fest. Dieser



**Abb. 5.22: CDH der drei Verhaltensszenarien jeweils ohne und mit PCM für das Büro. Zwei Enthaltien – 50% und 100% – wurden jeweils simuliert.**

Wert kann zwar nicht direkt mit den in der aktuellen Studie ermittelten CDH verglichen werden, da die CDH neben der Zeit auch die Temperaturdifferenz zur Komfortgrenze berücksichtigen. Nichtsdestotrotz zeigte sich auch bei diesem Vergleich, dass im aktuellen Untersuchungszeitraum die Raumtemperaturen bedingt durch die höheren Außentemperaturen häufiger sehr viel höher gelegen haben als in der früheren Studie.

Diese Ergebnisse bestätigten einerseits, dass es bei der Jalousienutzung im Klassenzimmer nur wenig Verbesserungsmöglichkeiten gab, da sie schon sehr konsequent zum Einsatz kam. Andererseits wurde noch einmal belegt, dass die nächtliche Regeneration essentiell für das gute Funktionieren von PCM ist und es sein Potential nur ausschöpfen kann, wenn die gespeicherte Wärme nachts oder früh morgens aus dem Raum abgeführt wird. Diese Ergebnisse entsprechen auch geltenden Betriebs-

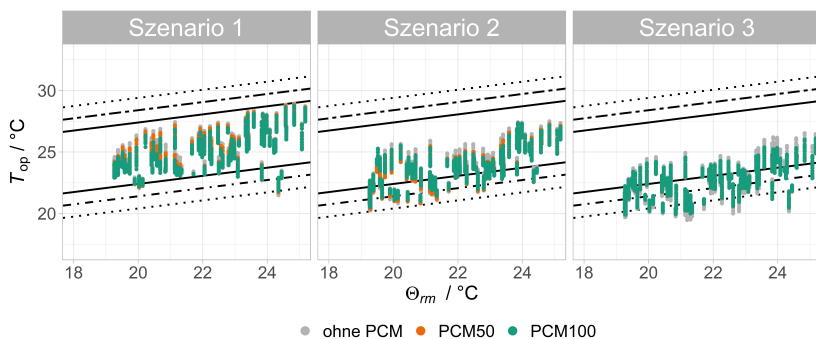


**Abb. 5.23:** CDH der drei Verhaltensszenarien jeweils mit und ohne PCM für das Klassenzimmer.

empfehlungen und wissenschaftlichen Studien zur optimalen Nutzung von PCM [30], [128], [129].

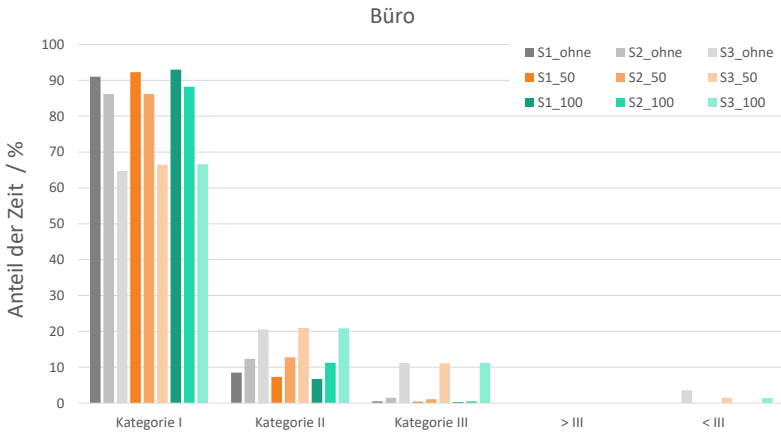
Die Komfortdiagramme veranschaulichten nochmals, wie sich das Verhalten auf die thermischen Bedingungen der Räume auswirkte. Durch verbessertes Verhalten konnte das Temperaturniveau im *Sonnenschiff* insgesamt deutlich gesenkt werden (Abb. 5.24). Während die mittlere  $T_{op}$  in S1 bei 25,7 °C lag (ohne PCM), sank es in den beiden Szenarien S2 und S3 auf 24,5 bzw. 23,3 °C. Allerdings nahmen bei diesen beiden Szenarien auch niedrige Temperaturen unterhalb der Komfortgrenzen zu, während die Zeit in Komfortkategorie I abnahm (vgl. dazu auch Abb. 5.25). Mit zunehmendem Einfluss des PCM (von 0 bis 100%) konnte die auf Kategorie I entfallene Zeit leicht gesteigert werden, durch verbessertes Verhalten sank die Raumtemperatur allerdings deutlich ab und unterschritt häufiger die untere Grenze von Kategorie I. Insbesondere in S3 fielen die Temperaturen aufgrund der eingesetzten

elektrischen Nachtlüftung häufig unter die Komfortgrenzen. Diese starke Auskühlung des Raumes ließe sich – wenn sie von den Nutzer:innen als unkomfortabel empfunden wird – leicht verhindern. In den Szenarien wurde als Untergrenze für die Öffnung des Lüftungspaneels  $19^\circ\text{C}$  festgelegt, für die elektrische Nachtlüftung gab es keine Abschalttemperatur. In der realen Nutzung kann folglich einer starken Auskühlung leicht vorgebeugt werden, indem bei entsprechend niedrigen Raumtemperaturen und einer bevorstehenden kalten Nacht die elektrische Lüftung ausgeschaltet bleibt.



**Abb. 5.24:** Komfortdiagramme der drei Verhaltensszenarien jeweils mit PCM (50%- und 100%-Enthalpie) und ohne für das Büro.

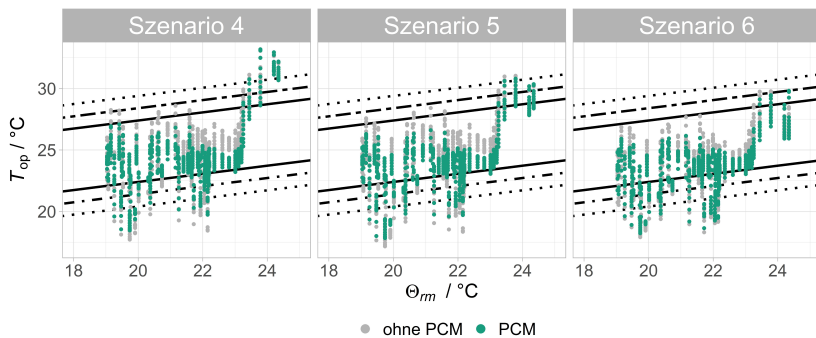
Die Komfortdiagramme bestätigten ebenfalls den im Vergleich mit der anderen Fallstudie geringen Einfluss des PCM in dem Büroaum: Die Raumtemperaturen ohne PCM lagen nur wenig über denen mit PCM. Ebenso zeigte sich in S1 noch die etwas stärker ausgeprägte temperatur-senkende Wirkung der 100%-Enthalpie des PCM. In S2 wurde dieser Effekt jedoch sehr gering und in S3 spielte der Enthalpieunterschied keine Rolle mehr. In S2 wurde noch ein weiterer Effekt des PCM ersichtlich: Das PCM diente nicht nur einer Vermeidung von Überhitzung, sondern auch das Abkühlen der Raumluft wurde durch die gespeicherte und



**Abb. 5.25:** Anteil der Zeit, in dem die Raumtemperatur im Büro innerhalb der verschiedenen Komfortkategorien lag. S1-S3: verschiedene Verhaltensszenarien, jeweils für 50%- und 100%-Enthalpie des PCM sowie ohne PCM.

dann zeitverzögert freigesetzte Wärme vermindert. Dies ließ sich in S2 deutlich an den Tagen erkennen, an denen bei der PCM50-Variante niedrigere Werte erreicht wurden als bei der PCM100-Variante. Auch in S3 wurde der Effekt sichtbar, dass sich die Temperaturamplitude im Tagesverlauf aufgrund des Puffereffekts des PCM verkleinert, was im wissenschaftlichen Diskurs rund um PCM bereits gut dokumentiert ist (z.B. [18], [29], [44]).

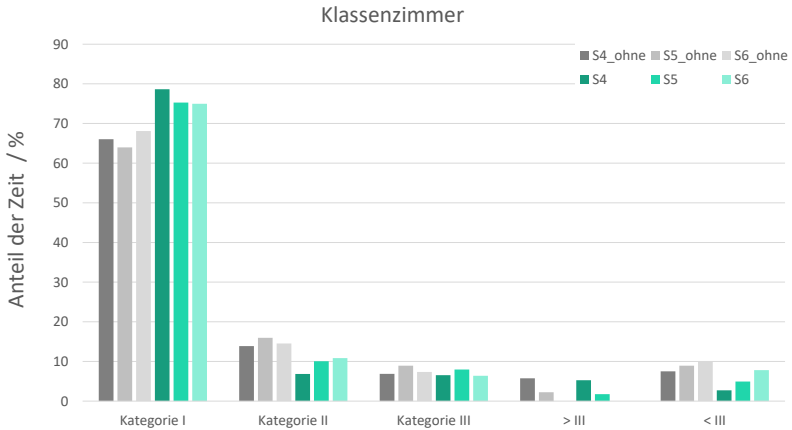
Für das Klassenzimmer ergaben sich teilweise ähnliche Trends. Auch hier konnten Verhaltensänderungen zu einer Senkung der mittleren Raumtemperatur beitragen (Abb. 5.26): Während diese bei S4 noch bei 24,4 °C lag, sank sie in den beiden anderen Szenarien über 24,1 °C auf 23,5 °C ab. Die Temperaturen oberhalb Kategorie III konnten ebenfalls reduziert werden, so dass in S6 nur noch vereinzelt die Kategoriegrenzen I und II überschritten wurden.



**Abb. 5.26: Komfortdiagramme der drei Verhaltensszenarien jeweils mit und ohne PCM für das Klassenzimmer.**

Im Unterschied zum Büroraum war die Temperaturamplitude im Klassenzimmer deutlich größer: die Untergrenzen der Komfortkategorien wurden hier häufig – auch in der realen Nutzung – und deutlich unterschritten. Ob die Nutzer:innen diese Unterschreitung als komforteinschränkend wahrgenommen haben, geht aus den Befragungsergebnissen nicht eindeutig hervor: von fünf Zeitpunkten unterhalb der Grenze von Kategorie II wurden drei als kühl und zwei als angenehm bewertet (vgl. Abb. 4.3 links). Es ist also durchaus möglich, dass die morgendliche Abkühlung im Sommer gewollt war und das subjektive Komfortempfinden von zumindest den Lehrer:innen (Schüler:innen namen nicht an der Umfrage teil) nicht beeinträchtigte. Die Komfortdiagramme visualisieren auch nochmals den stärkeren Einfluss des PCM in diesem Raum, erkennbar an der geringeren vertikalen Streuung der PCM-Datenpunkte verglichen mit denen ohne PCM. Auch in Abb. 5.27 wird deutlich, dass durch das PCM die Raumtemperatur deutlich länger auf höchstem Komfortniveau verblieb und die sehr kühle Temperaturen unterhalb Kategorie III ebenfalls durch das PCM reduziert werden konnten.





**Abb. 5.27:** Anteil der Zeit, in dem die Raumtemperatur im Klassenzimmer innerhalb der verschiedenen Komfortkategorien lag. S4-S6: verschiedene Verhaltensszenarien, jeweils für ohne und mit PCM.

## 5.5 Zwischenfazit

Der Einfluss des PCM war nach mehr als einem Jahrzehnt im Betrieb immer noch vorhanden und die Simulationsergebnisse konnten einen positiven Einfluss auf das thermische Verhalten der Räume zeigen. Bei beiden Fallstudien gab es Hinweise darauf, dass die Enthalpie des PCM seit Betriebsbeginn leicht abgenommen hat und zur Zeit der Datenerhebung im Bereich zwischen 50% und unter 100% lag. Darüber hinaus zeigten alle Verhaltensszenarien eine temperatursenkende Wirkung durch das PCM während der Arbeitszeiten. Im Büroraum lagen die Temperaturabsenkungen im Durchschnitt bei 0,2-0,4 K. Im Klassenzimmer lag der Effekt mit 0,6 K-0,9 K deutlich höher. Auch die Temperaturspitzen konnten durch das PCM deutlich gemildert werden. Im Büro konnten je nach Szenario maximale Temperatursenkungen von 0,7-1,2 K und im Klassenzimmer von 2,0-2,4 K erreicht werden.

Bei der Bestimmung der thermisch unbehaglichen Zeit (CDH) zeigte sich, dass das PCM diese im Büroraum um 9-34% – je nach spezifischer Enthalpie und Verhaltsszenario – verringern konnte. Im Klassenzimmer lag die Reduktion deutlich höher bei 45-52% Reduktion und konnte damit die Bedingungen für thermischen Komfort deutlich steigern. Die beiden eingangs zitierten Studien erzielten mit 34% [19] bzw. 50%-Reduktion [21] der CDH bei realer Nutzung etwas höhere Werte. Allerdings waren bei diesen beiden Studien die PCM nur jeweils kurze Zeit davor im Einsatz (1-2 Jahre), so dass ein zeitabhängiger Leistungsabfall in diesen Studien nicht erfasst werden konnte. Außerdem spielt die jeweils vorherrschende Witterung auch eine entscheidende Rolle, wie der Vergleich der Fallstudie Klassenzimmer mit der früheren Analyse zeigte. Das verdeutlicht, dass die Bewertung der Leistungsfähigkeit von PCM-Systemen auch stark vom Standort und der Witterung abhängt.

Der größere Einfluss des PCM im Klassenzimmer ist primär auf die Bauweise der beiden Gebäude zurückzuführen. Während das Büro im *Sonnenschiff* in massiver Konstruktion mit thermisch schweren Decken und Böden ausgeführt ist, ist das Schulgebäude thermisch leichter konstruiert. Die bessere Abpufferung von Temperaturschwankungen durch die thermische Masse zeigte sich auch in den geringeren Temperaturamplituden im Büro verglichen mit dem Klassenzimmer und darin, dass sich die Temperaturen seltener außerhalb der Grenzen der Komfortkategorien bewegten. Dass das PCM sein Potenzial vor allem in leichten Gebäuden ausspielen kann und sein Einfluss dort größer ist als in thermisch schweren Gebäuden deckt sich mit früheren Beobachtungen [10], [130]. In der vorliegenden Arbeit konnte nachgewiesen werden, dass sich daran auch in 15 Betriebsjahren nichts ändert. Ein weiterer Aspekt für die unterschiedlichen Auswirkungen des PCM in den beiden Gebäuden ist vermutlich das jeweilig vorherrschende Temperaturniveau, das den PCM-Betrieb im Klassenzimmer offensichtlich

begünstigte. Im Büro lagen die Temperaturen häufiger oberhalb des Schmelzbereichs des PCM und konnten daher die Wärmeleistung des Raums nicht beeinflussen, wohingegen das PCM im Klassenzimmer häufiger aktiviert werden konnte.

Der Einfluss des Nutzer:innenverhaltens auf die thermischen Bedingungen zeigte sich bei den verschiedenen Verhaltensszenarien. Verhaltensmuster beeinflussten jedoch nicht nur das thermische Verhalten der Räume, sondern auch das Ausmaß, in dem das PCM seine temperaturausgleichende Wirkung entfalten konnte. In beiden Fallstudien resultierten bessere Verhaltensmuster in relativ höhere PCM-Effekte bei den CDH. Dabei hing die Wirksamkeit des PCM bei verschiedenen Verhaltensszenarien stark vom vorherrschenden Temperaturregime ab. Lagen die Raumtemperaturen häufig oberhalb des Schmelzbereichs des PCM und wurde es dadurch praktisch ausgeschaltet, konnte ein verbessertes Verhalten in Form von Lüftung und Beschattung die Temperaturen so weit senken, dass das PCM wieder arbeiten konnte. Waren die Raumtemperaturen hingegen bereits im Arbeitsbereich des PCM, so nahm die PCM-Wirkung durch verbessertes Verhalten nicht mehr so stark zu. Gleichzeitig wurde aber auch offensichtlich, dass der Einfluss von Verhaltensmustern auf die thermischen Gegebenheiten eines Raumes den Einfluss von PCM deutlich übertrifft. Dieses Ergebnis bestätigt, was in früheren Studien bereits Erwähnung fand [19], [21], [104]

Aufgrund der gefundenen Wechselwirkung zwischen Verhalten und PCM-Effekt ist es von großer Bedeutung, in zukünftigen Studien oder Planungs- und Auslegungssimulationen realistisches Verhalten von Nutzer:innen zu implementieren, wie bereits von Lamrani et al. in [29] vorgeschlagen. Die Verwendung von optimalen bzw. stark simplifizierten Verhaltensmustern führt zu einer systematische Überschätzung des in der Realität erzielbaren Effekts von PCM und der bereits festgestellten Leistungslücke [18], [30], was zu überhöhten Erwartungen in der

Praxis und später zu Enttäuschungen seitens der Nutzenden führen kann. Dies deckt sich auch mit Erkenntnissen von Risetto et al., die in [64] zu dem Schluss kamen, dass ein besseres Verständnis von sowohl Erwartungen an die thermischen Bedingungen als auch des Verhaltens auf Seite der Nutzer:innen nützlich sein kann, um die Zufriedenheit mit dem Innenraumklima zu erhöhen. Eine positive Erwartungshaltung an installierte PCM-Produkte könnte nicht zuletzt einen erheblichen Einfluss auf Akzeptanz und Zufriedenheit haben.

# 6 Fazit und Ausblick

## 6.1 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Viele Nutzer:innen sind mit den thermischen Gegebenheiten in Gebäuden, die mit dezentral installierten PCM-Baustoffen ausgestattet sind, unzufrieden. Die realen Benefits für den thermischen Komfort bleiben oftmals hinter den Erwartungen zurück – diese Leistungslücke ist mittlerweile gut dokumentiert [29]. Als mögliche Ursachen für die Leistungslücke in realen Gebäudeanwendungen kamen zwei Faktoren in Frage: Degradation der PCM-Baustoffe und suboptimales Verhalten der Nutzer:innen.

Ziele der vorliegenden Arbeit waren,

1. die Funktionalität von PCM nach mehr als zehn Jahren im Betrieb zu analysieren und subjektive Einschätzungen zur Funktionalität mit objektiven Messdaten abzugleichen
2. den Einfluss des PCM auf das thermische Verhalten der Gebäude sowie
3. den Einfluss des Verhaltens der Nutzenden auf die Leistungsfähigkeit eines PCM Systems zu analysieren.

Zur Beantwortung dieser Forschungsfragen wurde ein interdisziplinärer Ansatz gewählt, bei dem technische und sozialwissenschaftliche Methoden kombiniert wurden. Es wurden eine Bestandsliste von mit PCM-Baustoffen ausgestatteten Gebäuden erstellt, Materialproben entnommen und diese im Labor charakterisiert sowie Befragungen von Nutzer:innen und involvierten Gebäudeplanern durchgeführt. In sechs ausgewählten Gebäuden wurde jeweils über mehrere Wochen ein Raum (bzw. in einem Gebäude zwei Räume) mit Messtechnik versehen, verschiedene raumklimatische Parameter sowie die Bewertung des Raumkomforts durch Nutzer:innen dokumentiert und anschließend der thermische Komfort dieser Räume analysiert. Für zwei der Räume wurde je ein Simulationsmodell erstellt, mit den dokumentierten Daten kalibriert und validiert. Anschließend wurden die Modelle genutzt, um anhand verschiedener Szenarien zu untersuchen, wie gut das PCM noch funktionierte und wie groß der PCM-Effekt war sowie welchen Einfluss verschiedene Verhaltensmuster auf den PCM-Effekt hatten.

Interviews mit Nutzer:innen von mit PCM-Baustoffen ausgestatteten Räumen bestätigten, was auch schon andere Studien herausfanden: In der Wahrnehmung der Befragten funktionierten die PCM-Systeme oft nicht zufriedenstellend. Als Gründe wurden Planungsfehler, eine von der ursprünglichen Planung abweichende Nutzung und nicht angepasstes bzw. suboptimales Verhalten der Nutzer:innen identifiziert. Auch scheint es ein verbreitetes Informationsdefizit zu geben, denn viele der Befragten wussten weder von den installierten PCM-Baustoffen noch worauf bei der Raumnutzung zu achten war. Zum einen stellt folglich eine strikte Umsetzung der Planung eine notwendige Voraussetzung dafür dar, dass ein PCM-System gut funktionieren kann. Zum anderen ist der Planungsprozess selbst nicht trivial und erfordert große Weitsicht, da PCM-Produkte stets auf ein bestimmtes Temperaturni-

veau festgelegt sind. In der Planung muss also für einen langen Planungshorizont – Gebäude werden für eine Nutzungszeit von mehreren Jahrzehnten gebaut – die zu erwartenden Nutzungsformen mit entsprechenden inneren Lasten berücksichtigt werden. Gleichzeitig sind die im Zuge des Klimawandels steigenden Außentemperaturen zu antizipieren und entsprechend zu beachten. Verglichen mit HLK sind PCM-Systeme sehr unflexibel, da sie nur in einem engen Temperaturband wirken können und nicht flexibel an das Komfortempfinden von Nutzer:innen angepasst werden können. Trotz der genannten Herausforderungen sahen die befragten Planer Potenzial für den Einsatz von PCM-Baustoffen in öffentlichen Gebäuden, Arbeitsstätten, insbesondere bei leichten Gebäuden mit unterschiedlichen Tag-Nacht-Lastprofilen (z.B. Kindergärten, Schulen, Büros). Als Voraussetzung für eine weitere Verbreitung nannten sie, dass zum einen die fehlende Produktpräsenz seitens der Hersteller abgebaut, die hohen Investitionskosten gesenkt und das Vertrauen von Kund:innen durch Nachweise über eine gewisse Lebensdauer erbracht werden müssten.

Die Charakterisierung von Proben mikroverkapselter Paraffine zeigte, dass die spezifische Enthalpie bei allen Proben zwischen 12-26% gegenüber der Ausgangsleistung abgenommen hatte. Auch die simulative Abschätzung ergab, dass im Laufe der Betriebszeit eine Abnahme der spezifischen Enthalpie der PCM im Bereich zwischen 0-50% (Fallstudie 1) bzw. 25% (Fallstudie 2) aufgetreten ist. Die reale Abnahme liegt demnach wahrscheinlich im Bereich von 20-30%. Entgegen der Befürchtung, das PCM entfalte gar keine Wirkung mehr nach einigen Betriebsjahren, zeigten die Ergebnisse, dass auch nach mehr als zehn Jahren noch mit einer spürbaren Wirkung des PCM-Baustoffes und mit 70-80% ihrer anfänglichen Leistungsfähigkeit zu rechnen ist. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich bei den im Rahmen der vorliegenden Arbeit analysierten Proben um PCM-Baustoffe aus einem frühen Stadium der

Entwicklung von vor 2007 handelte. Zwischenzeitlich fand eine kontinuierliche Weiterentwicklung von PCM-Baustoffen statt, daher sind bei heutigen Produkten möglicherweise niedrigere Degradationswerte zu erwarten.

Die thermische Bewertung von mit PCM-Baustoffen ausgestatteten Räumen in sechs Gebäuden ergab, dass der thermische Komfort trotz hoher Außentemperaturen hoch war. Auch seitens der Nutzer:innen wurde der thermische Komfort als überwiegend hoch bewertet. Mangels Referenzräumen in fünf der sechs Gebäude konnte zwar nicht eindeutig nachgewiesen werden, dass der hohe Komfort ursächlich dem PCM zuzuordnen war. Der Vergleich im Sonnenschiff mit einem Referenzraum<sup>1</sup> konnte jedoch zumindest Indizien darauf liefern, dass das PCM durchaus eine positive Wirkung auf die Raumtemperatur hatte.

Die thermische Bewertung von mit PCM-Baustoffen ausgestatteten Räumen in sechs Gebäuden ergab, dass der thermische Komfort trotz hoher Außentemperaturen hoch war. Auch seitens der Nutzer:innen wurde der thermische Komfort als überwiegend hoch bewertet. Mangels Referenzräumen in fünf der sechs Gebäude konnte zwar nicht eindeutig nachgewiesen werden, dass der hohe Komfort ursächlich dem PCM zuzuordnen war. Der Vergleich im Sonnenschiff mit einem Referenzraum<sup>2</sup> konnte jedoch zumindest Indizien darauf liefern, dass

---

<sup>1</sup> Der Referenzraum unterschied sich auch in anderen Faktoren von dem PCM-Raum, weshalb die unterschiedlichen Temperaturen nicht ausschließlich auf das PCM zurückgeführt werden konnten. Es ist jedoch davon auszugehen, dass neben anderen Faktoren wie andere Geschosshöhe, Unterschiede in Fenster- und Jalousienutzung, innere Lasten auch das PCM einen temperatursenkenden Effekt hatte.

<sup>2</sup> Der Referenzraum unterschied sich auch in anderen Faktoren von dem PCM-Raum, weshalb die unterschiedlichen Temperaturen nicht ausschließlich auf das PCM zurückgeführt werden konnten. Es ist jedoch davon auszugehen, dass neben anderen Faktoren wie andere Geschosshöhe, Unterschiede in Fenster- und Jalousienutzung, innere Lasten auch das PCM einen temperatursenkenden Effekt hatte.



das PCM durchaus eine positive Wirkung auf die Raumtemperatur hatte.

Die Simulationsergebnisse bestätigten diese positive Wirkung: In beiden Fallstudien hatte das PCM nach mehr als zehn Betriebsjahren noch einen temperatursenkenden Effekt, wenngleich durch die Abnahme der spezifischen Enthalpie der Benefit zu Beginn wahrscheinlich höher ausgefallen ist. Im Klassenzimmer, dem thermisch leichteren Gebäude, konnte das PCM einen deutlich größeren Einfluss geltend machen: Die mittlere Temperaturreduktion lag je nach Verhaltensszenario bei 0,6 – 0,9 K und Spitzentemperaturen wurden um bis zu 2,4 K gesenkt. Im thermisch schwereren *Sonnenschiff* waren mittlere und maximale Temperatursenkung mit 0,4 K und 1,2 K deutlich niedriger. Außerdem waren die Temperaturamplituden im Büro des *Sonnenschiff* geringer verglichen mit dem Klassenzimmer, was ebenfalls auf die Unterschiede in der thermischen Gebäudemasse zurückzuführen ist. Im Hinblick auf die Zeit thermischer Unbehaglichkeit zeigte sich der gleiche Trend: Im Klassenzimmer konnte das PCM die CDH um 45-52 % reduzieren, im Büro lag der Benefit mit 9-34 % deutlich niedriger. Es zeigte sich auch, dass neben der thermischen Masse auch das generelle Temperaturniveau eine wichtige Rolle spielt. Im Klassenzimmer lagen die Temperaturen häufiger im Schmelzbereich des PCM, so dass es immer wieder aktiviert werden konnte, während die Raumtemperaturen im Büro häufig darüber lagen.

Auch das Nutzer:innenverhalten (natürliche und elektrische Lüftung, Jalousienutzung) hatte einen großen Einfluss – sowohl auf das thermische Verhalten der Räume als auch auf die Effektivität des PCM. In beiden Fallstudien konnten Verbesserungspotentiale bei Lüftung und Jalousienutzung identifiziert werden. Durch – aus technischer Sicht – besseres Verhalten konnte in beiden Anwendungsfällen der thermische Komfort erhöhte werden und die Zeit thermischer Unbehaglichkeit re-

duziert werden. Wie stark der Einfluss des PCM durch verbessertes Verhalten zunahm, hing dabei vom vorherrschenden Temperaturniveau ab: Lagen die Raumtemperaturen häufig über dem Schmelzbereich, konnte verbessertes Nutzer:innenverhalten die Temperaturen soweit senken, dass das PCM wieder aktiviert wurde und seine Wirkung entfalten konnte. Der Einfluss des PCM konnte dadurch stark zunehmen mit verbessertem Nutzer:innenverhalten (s. Fallstudie *Sonnenschiff*). Lagen die Raumtemperaturen jedoch ohnehin schon im Schmelzbereich des PCM, vergrößerte sich der Einfluss des PCM mit verbessertem Nutzer:innenverhalten nicht mehr so stark (vgl. Fallstudie *Klassenzimmer*). Die vorliegende Arbeit konnte also zeigen, dass eine Wechselwirkung zwischen dem Verhalten der Nutzer:innen und dem Einfluss des PCM auf das thermische Verhalten des Raumes besteht. Gleichzeitig zeigten die Ergebnisse jedoch auch, dass Änderungen im Verhalten der Nutzer:innen einen deutlich größeren Einfluss auf die Raumtemperaturen hatten als das PCM selbst. Der Vergleich der verschiedenen Lüftungs- und Verschattungsszenarien demonstrierte, dass vor allem die nächtliche Lüftung sowie früh morgens für die Regeneration essentiell sind und dass eine in der Planung vorgesehene elektrische Lüftung genutzt werden sollte, um das ganze Potential des PCM auszuschöpfen.

Nutzer:innen stehen oft vor dem Dilemma, sich zwischen widersprüchlichen Bedürfnissen entscheiden zu müssen, beispielsweise ob sie an einem heißen Sommertag ein Fenster öffnen, um die Luftqualität zu verbessern, obwohl das Öffnen gleichzeitig zu einem größeren Wärmeeintrag in den Raum und damit sinkendem thermischen Komfort führen wird. Wurden PCM-Baustoffe in einem Gebäude installiert, ist es umso wichtiger, die Nutzer:innen darüber in Kenntnis zu setzen und sie gezielt über die optimale Nutzung der Räume aufzuklären. Die Reduzierung von übermäßigem Wärmeeintrag tagsüber und die Notwendigkeit ausreichender nächtlicher Regeneration sind dafür die beiden

wichtigsten Aspekte. Um vor überhöhten Erwartungen zu schützen sollte auch kommuniziert werden, dass wenn während längeren Hitzeperioden das PCM nicht mehr entwärmt wird, es auch keinen komfortsteigernden Effekt entfalten kann. Gerade für Übergangszeiten Anfang des Sommers, das zeigten auch die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit, können PCM hingegen einen wertvollen Beitrag für eine angenehme Gebäudetemperierung leisten. Dass sie auch nach mehr als zehn Betriebsjahren noch funktionieren – wenngleich auch etwas schlechter als zu Beginn ihres Einsatzes – ist ebenfalls eine wichtige Erkenntnis, die zu einer Erhöhung der Akzeptanz seitens Planer:innen und Nutzer:innen führen kann. PCM-Produkte sind besonders im Hinblick auf den Gebäudebestand in Deutschland, der zu großen Teilen nur unzulänglich auf den Klimawandel und die dadurch ansteigenden sommerlichen Temperaturen vorbereitet ist, eine CO<sub>2</sub>-arme Anpassungsstrategie. Eine flächendeckende Nachrüstung mit PCM-Baustoffen könnte bei richtiger Planung, stringenter Umsetzung und gezielter Aufklärung von Nutzer:innen eine spürbare Komfortsteigerung bewirken, ohne mit einer drastischen Erhöhung des Strombedarfs einherzugehen, wie es bei einem alternativen Einsatz von Klimaanlage der Fall wäre.

## 6.2 Grenzen Arbeit

Die Aussagekraft der in dieser Arbeit gewonnen und präsentierten Erkenntnisse ist an einzelnen Stellen limitiert. Zum Einen war die Anzahl der Materialstichproben und der verfügbaren Referenzmesswerten sehr gering. Die ursprüngliche Intention eines Vergleichs verschiedener PCM-Materialien konnte mangels verfügbarer Proben ebenfalls nicht umgesetzt werden. Die getroffenen Aussagen sind folglich nicht allgemein gültig für dezentral eingesetzte PCM, sondern beziehen sich nur auf paraffinbasierte mikroverkapselte PCM. Weitere Experimente

zur Überprüfung der in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse wären wünschenswert. Wichtig ist dabei auch der Aspekt, dass es sich bei allen analysierten Proben um PCM-Baustoffe aus frühen Entwicklungsphasen handelte und sich die Langzeitfunktionalität bei heute hergestellten PCM-Produkten möglicherweise anders verhält. Auch die indirekte Herangehensweise, die spezifischen Enthalpie simulativ zu bestimmen, birgt gewisse Unsicherheiten. Dieses Vorgehen lässt sich angesichts fehlender Alternativen als eine erste Abschätzung legitimieren, birgt aber an verschiedenen Stellen die Gefahr (z.B. Auswahl des Zeitraums für Modellkalibrierung und Bestimmung der spezifischen Enthalpie, ungenau im Vergleich mit DSC-Messungen), zu verzerrten Ergebnissen zu führen. Sinnvoll scheint es deshalb, gezielt weitere Langzeitexperimente auf beispielsweise fünf bis zehn Jahre prospektiv zu planen und verschiedene Materialklassen dabei zu berücksichtigen. Eine retrospektive Analyse – wie im vorliegenden Fall – birgt stets das Risiko, dass statt eines validen experimentellen Designs ein an die Datenverfügbarkeit angepasstes Studiendesign die Forschungsrichtung vorgibt und die Aussagekraft der Ergebnisse darunter leidet.

Auch bei den Gebäudesimulationen wurden nur Gebäude zweier Nutzungsarten – Büro und Schule – untersucht. Die Ergebnisse sind damit zwar übertragbar auf Gebäude mit ähnlichen Nutzungsprofilen (z.B. Kindergärten, Labore), jedoch nicht unbedingt auf Gebäude mit zeitlich stark abweichenden Nutzungsprofilen wie z.B. private Wohnhäuser, die überwiegend abends und nachts genutzt werden.

Die Monitoringzeiträume in den sechs verschiedenen Gebäuden, auf denen die Komfortbewertungen basieren, unterschieden sich sowohl in der Länge der Messperioden als in den Zeitpunkten (Früh-/Spät-/Sommer). Für eine bessere Vergleichbarkeit der Komfortbewertungen empfiehlt es sich bei zukünftigen Studien einerseits darauf zu achten, dass möglichst lange Zeiträume (3-4- Monate) abgedeckt werden oder

zumindest im Hinblick auf die Vergleichbarkeit verschiedener Gebäude untereinander jeweils die gleichen Zeiträume abgedeckt werden.

Die verwendeten Verhaltensszenarien wurden absichtlich sehr einfach gehalten, da der zentrale Fokus war, ob das Verhalten grundsätzlich einen bedeutenden Einfluss auf die PCM-Wirkung hat. Die verwendeten Szenarien mit verbessertem Verhalten wurden auf Basis eigener Einschätzungen erstellt. In zukünftigen Studien wäre dies ein Aspekt, der noch verfeinert und präziser analysiert werden könnte. In der Literatur gibt es verschiedene detaillierte Verhaltensszenarien (vgl. z.B. [16], [111]), die in weiterführenden Simulationsstudien berücksichtigt werden könnten.

## **6.3 Ausblick**

### **Weitere Langzeitstudien**

Die Ergebnisse dieser Arbeit legen einen wichtigen Grundstein für eine unabhängige Bewertung der Langzeitfunktionalität von PCM. Eine Studie allein kann jedoch nicht alle relevanten Aspekte ausreichend beleuchten, deshalb sind weitere Untersuchungen notwendig. Optimal dafür wären Projekte, die auf einen Zeithorizont von fünf bis zehn Jahren angelegt sind. Darin sollten experimentelle Ansätze verfolgt werden, bei denen verschiedene Gebäude und -typen sowie PCM-Produkte berücksichtigt werden und die notwendigen Vergleichswerte – sowohl bei den PCM-Produkten als auch in Form von Referenzräumen ohne installierte PCM – verfügbar sind.

### **Verwendung realistischer Verhaltensmuster in Simulationen**

Die gefundenen Wechselwirkung zwischen Verhalten und PCM-Effekt belegen wie wichtig es ist, in zukünftigen PCM-Systemplanungen nicht

nur ideales, sondern auch realistisches Verhalten zu berücksichtigen. Dies ist notwendig, um eine systematische Überschätzung des PCM-Effekts zu verhindern, denn die Abweichungen zwischen angenommenem und tatsächlichem Verhalten können zu großen Unterschieden zwischen prognostiziertem und realisiertem PCM-Effekt führen. Eine Berücksichtigung von sowohl realistischem als auch optimalen Verhalten in Planungssimulationen kann helfen, überhöhten Erwartungen vorzubeugen und gleichzeitig das Potenzial aufzuzeigen, das bei entsprechenden Verhaltensweisen vorhanden ist.

Die Frage, wie man an solche realitätsnahen Verhaltensmuster kommt, ist nicht trivial. Es könnte zum einen im Rahmen von Messungen in Gebäuden dokumentiert werden. Dies ist allerdings sehr ressourcenaufwändig, da dafür möglichst lange Messzeiträume – idealerweise die gesamten Sommermonate – abgedeckt werden sollten, verschiedene Gebäude eines Typs, aber auch verschiedene Gebäudetypen und Nutzungsarten abgedeckt werden müssten. Eine schneller umsetzbare und ressourcenschonendere Möglichkeit wäre, verfügbare Verhaltensmodelle so zu modifizieren, dass gezielt (stochastisch oder auch systematisch) wiederholt 'ungünstiges Verhalten' integriert wird und dadurch idealerweise ein der Realität näherer PCM-Effekt abgeschätzt werden kann.

Ein weiteres wichtiges Handlungs- und Forschungsfeld ist die systematische Information und Aufklärung von Gebäudenutzer:innen. Denn jedes mit PCM-Baustoffen ausgestattete Gebäude ist auf bestimmte Rahmenbedingungen hin optimiert und eine davon abweichende Nutzung führt unweigerlich dazu, dass nicht das ganze Potential ausgeschöpft werden kann. Aber nur, wenn Nutzer:innen über das Wissen verfügen, wie PCM-Baustoffe funktionieren, ihr Potential optimal ausgeschöpft werden kann und wie wichtig eine der Planung entsprechende Nutzung (hinsichtlich Wärmeeintrag, Nutzung von Fenstern und elektri-

schen Lüftungen sowie Anzahl der Menschen, die einen Raum nutzen) für die Funktionalität sind, können sie verhaltensbezogene Entscheidungen bewusster treffen. Dieses Wissen kann sie befähigen, Entscheidungen nicht nur auf Basis ihrer subjektiven Bedürfnisse zu fällen, sondern auch technische Aspekte im Hinblick auf die Nützlichkeit ihres Handelns zu einem bestimmten Zeitpunkt in die Abwägung mit einfließen zu lassen. Eine spannende Forschungsfrage für zukünftige Studien ist, inwieweit eine systematische Aufklärung und Information der Nutzer:innen tatsächlich Verhaltensänderungen und eine spürbare Verbesserung des thermischen Komforts bewirken kann.

### **Degradation von PCM-Baustoffen**

Es konnten Hinweise auf eine zeitabhängige Leistungsabnahme der untersuchten paraffinbasierten PCM gefunden werden. Allerdings war die Größe der Stichprobe mit vier Materialproben, zwei simulativ bestimmten Fallbeispielen und nur einer Stoffklasse, mikroverkapseltes Paraffin, sehr gering. Deshalb sollten weitere systematische Studien zur genaueren Überprüfung des (a) Ausmaßes an Degradation und (b) Vorkommens bei weiteren PCM-Stoffklassen durchgeführt werden.

Ein möglicher physikalischer Prozess, der als Ursache für die beobachtete Leistungsabnahme in Frage kommen könnte, ist die Abnahme des PCM-Materials in den Baustoffen durch Diffusion. Da eine Degradation des PCM selbst auf Grund des aktuellen Wissensstands der Forschung ausgeschlossen wird, wäre ein möglicher Erklärungsansatz, dass Paraffin durch die Wände der Mikrokapseln diffundiert und dadurch kontinuierlich abnimmt. Ob sich diese Hypothese verifizieren lässt oder eine andere Ursache den Leistungsabfall bedingt, ist eine interessante und im Hinblick auf die Langlebigkeit von PCM-Produkten bedeutende Forschungsfrage. Nichtzuletzt vor dem Hintergrund bislang fehlender Akzeptanz seitens Nutzer:innen und Planer:innen ist

die Lebensdauer von PCM-Baustoffen ein wichtiger Aspekt, der weiter erforscht werden sollte.

### **Bewertung von PCM-Potentialen**

Die letzte Empfehlung dieser Arbeit bezieht sich auf die Variablen, die zur Evaluation der PCM-Leistungen herangezogen wurden. Es hat sich gezeigt, dass das alleinige Betrachten mittlerer und maximaler Temperatursenkungen keine aussagekräftige Bewertung zulassen. Denn das Ausmaß einer Komfortsteigerung bemisst sich nicht nur daran, wie stark die Raumtemperatur gesenkt wird, sondern vor allem auf welchem Niveau – oberhalb oder unterhalb einer definierten, von Standortfaktoren abhängigen Komfortgrenze – dies geschieht. Die gängige Praxis, PCM vor allem anhand von Temperatursenkungen zu bewerten, sollte daher im Sinne einer besseren Vergleichbarkeit um ein Maß, das das Temperaturniveau mit berücksichtigt, ergänzt werden. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Zeit des Unbehagens (CDH) scheint, wie schon von [19] vorgeschlagen, dafür gut geeignet zu sein.

Außerdem zeigten die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit, dass der Auswertzeitraum einen großen Einfluss auf die Resultate hatte. Viele Studien, die PCM bewerten, analysieren nur wenige Tage oder Wochen. Dabei kann es leicht zu einer Verfälschung durch besondere Witterungsumstände kommen. Ein Auswertzeitraum von mehreren Monaten, am besten der gesamten warmen Jahreszeit, ist dagegen robuster gegen Extremereignisse und resultiert in aussagekräftigeren und besser verallgemeinerbaren Bewertungen.



# Literaturverzeichnis

- [1] L. Kranzl u. a., *Heating & Cooling outlook until 2050, EU-28, Report*, 2018.
- [2] T. Fleiter u. a., *Heat Roadmap Europe: Profile of heating and cooling demand in 2015, D3.1: A low-carbon heating and cooling strategy*, Report, 2017. besucht am 6. Juli 2022. Adresse: [https://heatroadmap.eu/wp-content/uploads/2018/11/HRE4\\_D3.1.pdf](https://heatroadmap.eu/wp-content/uploads/2018/11/HRE4_D3.1.pdf).
- [3] A. Mavrigiannaki und E. Ampatzi, „Latent heat storage in building elements: A systematic review on properties and contextual performance factors,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 60, S. 852–866, 2016.
- [4] S. N. AL-Saadi und Z. Zhai, „Modeling phase change materials embedded in building enclosure: A review,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 21, S. 659–673, 2013.
- [5] A. M. Khudhair und M. M. Farid, „A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials,“ *Energy Conversion Management*, Jg. 45, Nr. 2, S. 263–275, 2004.
- [6] F. Ascione, N. Bianco, R. F. de Masi, F. de’ Rossi und G. P. Vanoli, „Energy refurbishment of existing buildings through the use of phase change materials: Energy savings and indoor comfort in the cooling season,“ *Applied Energy*, Jg. 113, S. 990–1007, 2014.

- [7] C. Barreneche, L. Navarro, A. de Gracia, A. I. Fernández und L. F. Cabeza, „In situ thermal and acoustic performance and environmental impact of the introduction of a shape-stabilized PCM layer for building applications,“ *Renewable Energy*, Jg. 85, S. 281–286, 2016.
- [8] D. Li, Y. Zheng, C. Liu und G. Wu, „Numerical analysis on thermal performance of roof contained PCM of a single residential building,“ *Energy Conversion and Management*, Jg. 100, S. 147–156, 2015.
- [9] M. Jaworski, P. Lapka und P. Furmanski, „Numerical modelling and experimental studies of thermal behaviour of building integrated thermal energy storage unit in a form of a ceiling panel,“ *Applied Energy*, Jg. 113, S. 548–557, 2014.
- [10] L. Karim, F. Barbeon, P. Gegout, A. Bontemps und L. Royon, „New phase-change material components for thermal management of the light weight envelope of buildings,“ *Energy and Buildings*, Jg. 68, S. 703–706, 2014.
- [11] L. Royon, L. Karim und A. Bontemps, „Optimization of PCM embedded in a floor panel developed for thermal management of the lightweight envelope of buildings,“ *Energy and Buildings*, Jg. 82, S. 385–390, 2014.
- [12] K. Schakib-Ekbatan, F. Z. Cakici, M. Schweiker und A. Wagner, „Does the occupant behavior match the energy concept of the building? Analysis of a German naturally ventilated office building,“ *Building and Environment*, Jg. 84, S. 142–150, 2015.
- [13] V. Fabi, R. V. Andersen, S. Corgnati und B. W. Olesen, „Occupants’ window opening behaviour: A literature review of factors influencing occupant behaviour and models,“ *Building and Environment*, Jg. 58, S. 188–198, 2012.

- [14] X. Zhou, D. Yan und G. Deng, „Influence of occupant behavior on the efficiency of a district cooling system,“ Aug. 2013.
- [15] M. Alam, H. Jamil, J. Sanjayan und J. Wilson, „Energy saving potential of phase change materials in major Australian cities,“ *Energy and Buildings*, Jg. 78, S. 192–201, 2014.
- [16] T. Hong, S. C. Taylor-Lange, S. D'Oca, D. Yan und S. P. Corgnati, „Advances in research and applications of energy-related occupant behavior in buildings,“ *Energy and Buildings*, Jg. 116, S. 694–702, 2016.
- [17] W. O'Brien und H. B. Gunay, „The contextual factors contributing to occupants' adaptive comfort behaviors in offices. A review and proposed modeling framework,“ *Building and Environment*, Jg. 77, S. 77–87, 2014.
- [18] M. Alam, P. X. Zou, J. Sanjayan und S. Ramakrishnan, „Energy saving performance assessment and lessons learned from the operation of an active phase change materials system in a multi-storey building in Melbourne,“ *Applied Energy*, Jg. 238, S. 1582–1595, 2019.
- [19] H. Jamil, M. Alam, J. Sanjayan und J. Wilson, „Investigation of PCM as retrofitting option to enhance occupant thermal comfort in a modern residential building,“ *Energy and Buildings*, Jg. 133, S. 217–229, 2016.
- [20] T. Obergfell, T. Haussmann und S. Gschwander, *Evaluation of the Influence of User Behavior on PCM Systems in Buildings and Real Long Term Stability after up to 15 Years in Operation: Presentation at Eurotherm Seminar 112 Advances in Thermal Energy Storage*, Lleida, Spain, 2019. besucht am 6. Juli 2022. Adresse: <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-565240.html>.

- [21] J. S. Sage-Lauck und D. J. Sailor, „Evaluation of phase change materials for improving thermal comfort in a super-insulated residential building,“ *Energy and Buildings*, Jg. 79, S. 32–40, 2014.
- [22] U.S. Department of Energy, *EnergyPlus Simulation Software*, Report, Washington, DC, USA, 2019.
- [23] A. Oebbeke, *Latentwärmespeicher Micronal PCM der BASF auch in Gipsbauplatten*, 2005. besucht am 6. Juli 2022. Adresse: <https://www.baulinks.de/webplugin/2005/1324.php4>.
- [24] S. de Ma, G. L. Song, Z. C. Miao und D. W. Wang, „Preparation and Characterization of Paraffin/PMMA Core/Shell Structured Microcapsules,“ *Advanced Materials Research*, Jg. 239-242, S. 524–527, 2011.
- [25] M. Uddin, H. Zhu und M. Hawlader, „Effects of cyclic operation on the characteristics of a microencapsulated PCM storage material,“ *International Journal of Solar Energy*, Jg. 22, S. 105–114, 2002.
- [26] A. Sharma, S. Sharma und D. Buddhi, „Accelerated thermal cycle test of acetamide, stearic acid and paraffin wax for solar thermal latent heat storage applications,“ *Energy Conversion Management*, Jg. 43, Nr. 14, S. 1923–1930, 2002.
- [27] K. Cellat u. a., „2 years of monitoring results from passive solar energy storage in test cabins with phase change materials,“ *Solar Energy*, Jg. 200, S. 29–36, 2020.
- [28] L. F. Cabeza u. a., „Behaviour of a concrete wall containing micro-encapsulated PCM after a decade of its construction,“ *Solar Energy*, Jg. 200, S. 108–113, 2020.
- [29] B. Lamrani, K. Johannes und F. Kuznik, „Phase change materials integrated into building walls: An updated review,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 140, S. 110751, 2021.

- [30] W. I. Wan Mohd Nazi, Y. Wang, H. Chen, X. Zhang und T. Roskilly, „Passive Cooling Using Phase Change Material and Insulation for High-rise Office Building in Tropical Climate,“ *Energy Procedia*, Jg. 142, S. 2295–2302, 2017.
- [31] C. Brunsgaard, P. Heiselberg, M.-A. Knudstrup und T. S. Larsen, „Evaluation of the Indoor Environment of Comfort Houses: Qualitative and Quantitative Approaches,“ *Indoor and Built Environment*, Jg. 21, Nr. 3, S. 432–451, 2012.
- [32] S. D. Jaffari und B. Matthews, „From occupying to inhabiting: a change in conceptualising comfort,“ *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Jg. 8, S. 012 008, Nov. 2009.
- [33] C. Aizlewood und C. Dimitroulopoulou, „The HOPE Project: The UK Experience,“ *Indoor and Built Environment*, Jg. 15, Nr. 5, S. 393–409, 2006.
- [34] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN 16798-1: Energetische Bewertung von Gebäuden: Lüftung von Gebäuden. Teil1: Eingangparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik*, Berlin, 2021.
- [35] M. Sterner und I. Stadler, *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration*. Berlin: Springer Berlin, 2014.
- [36] G. Cerbe and G. Wilhelms, *Technische Thermodynamik - Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen*, 15. Aufl., M. Hansen, Hrsg. 2008.
- [37] Pons GmbH, *Online Wörterbuch Latein-Deutsch*, 2021. besucht am 6. Juli 2022. Adresse: [https://de.pons.com/{\"u}bersetzung/latein-deutsch/latens](https://de.pons.com/{\).

- [38] L. F. C. Harald Mehling, *Heat and cold storage with PCM - An up to date introduction into basics and applications*. Berlin-Heidelberg: Springer, 2008.
- [39] J. Skovajsa, M. Kolàček und M. Zálesák, „Phase Change Material Based Accumulation Panels in Combination with Renewable Energy Sources and Thermoelectric Cooling,“ *Energies*, Jg. 10, S. 152, 2017.
- [40] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN 51004: Bestimmung der Schmelztemperaturen kristalliner Stoffe mit der Differenzthermoanalyse (DTA)*, Berlin, 1994.
- [41] M. K. Rathod und J. Banerjee, „Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 18, S. 246–258, 2013.
- [42] A. F. Regin, S. C. Solanki, J. S. Saini, „Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review,“ *Renewable and Sustainable Energy Review*, Jg. 12, Nr. 9, S. 2438–2458, 2008.
- [43] T. Haussmann, T. Oberfell und S. Gschwander, „Phase Change Materials in Buildings. State of the Art,“ in *Advances Energy Storage*, A. Hauer, Hrsg., Wiley, 2022, S. 709–731.
- [44] N. Soares, J. J. Costa, A. R. Gaspar und P. Santos, „Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings’ energy efficiency,“ *Energy and Buildings*, Jg. 59, S. 82–103, 2013.
- [45] F. Kuznik, K. Johannes und D. David, „Integrating phase change materials (PCMs) in thermal energy storage systems for buildings,“ in *Advances in Thermal Energy Storage Systems*, L. F. Cabeza, Hrsg., Woodhead Publishing, 2015, S. 325–353.

- [46] N. R. Jankowski und F. P. McCluskey, „A review of phase change materials for vehicle component thermal buffering,“ *Applied Energy*, Jg. 113, S. 1525–1561, 2014.
- [47] A. Abhat, „Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials,“ *Solar Energy*, Jg. 30, Nr. 4, S. 313–332, 1983.
- [48] B. Zalba, J. M. Marin, L. F. Cabeza und H. Mehling, „Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications,“ *Applied Thermal Engineering*, Jg. 21, Nr. 3, S. 251–283, 2003.
- [49] L. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Gracia und A. Fernández, „Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 15, Nr. 3, S. 1675–1695, 2011.
- [50] X. Mi, R. Liu, H. Cui, S. A. Memon, F. Xing und Y. Lo, „Energy and economic analysis of building integrated with PCM in different cities of China,“ *Applied Energy*, Jg. 175, S. 324–336, 2016.
- [51] V. Tyagi, S. Kaushik, S. Tyagi und T. Akiyama, „Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 15, Nr. 2, S. 1373–1391, 2011.
- [52] Rubitherm, *Rubitherm - Official Website*, 2021. besucht am 6. Juli 2022. Adresse: <https://www.rubitherm.eu/index.php/produktkategorie/makroverkaspelung-csm>.
- [53] MaterialDistrict, *Material District - Official Website*, 2021. besucht am 6. Juli 2022. Adresse: <https://materialdistrict.com/material/micronal-pcm/>.
- [54] L. F. Cabeza, *Advances in Thermal Energy Storage Systems - Methods and Applications*, L. F. Cabeza, Hrsg. Woodhead Publishing, 2015.

- [55] M. Alam, J. Sanjayan, P. X. Zou, S. Ramakrishnan und J. Wilson, „A Comparative Study on the Effectiveness of Passive and Free Cooling Application Methods of Phase Change Materials for Energy Efficient Retrofitting in Residential Buildings,“ *Procedia Engineering*, Jg. 180, S. 993–1002, 2017.
- [56] J. Charles, „Performance and Stability of  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -Based Phase Change Materials,“ Diss., Lehigh University, 2018.
- [57] G. Evola, L. Marletta und F. Sicurella, „A methodology for investigating the effectiveness of PCM wallboards for summer thermal comfort in buildings,“ *Building and Environment*, Jg. 59, S. 517–527, 2013.
- [58] P. Tatsidjodoung, N. L. Pierrès und L. Luo, „A review of potential materials for thermal energy storage in building applications,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 18, S. 327–349, 2013.
- [59] P. Devaux und M. Farid, „Benefits of PCM underfloor heating with PCM wallboards for space heating in winter,“ *Applied Energy*, Jg. 191, S. 593–602, Apr. 2017.
- [60] A. Wagner, E. Gossauer, C. Moosmann, T. Gropp und R. Leonhart, „Thermal comfort and workplace occupant satisfaction – Results of field studies in German low energy office buildings,“ *Energy and Buildings*, Jg. 39, Nr. 7, S. 758–769, 2007.
- [61] A. Leaman und B. Bordass, „Productivity in buildings: The ‘killer’ variables,“ *Building Research and Information*, Jg. 1, S. 4–19, 2010.
- [62] G. S. Brager und R. J. de Dear, „Thermal adaptation in the built environment: a literature review,“ *Energy and Buildings*, Nr. 27, S. 83–96, 1998.



- [63] F. Nicol und M. Humphreys, „Thermal comfort as part of a self-regulating system,“ *Building Research and Practice*, Jg. 1, S. 174–179, 1973.
- [64] R. Risetto, R. Rambow und M. Schweiker, „Assessing comfort in the workplace: A unified theory of behavioral and thermal expectations,“ *Building and Environment*, Jg. 216, S. 109 015, 2022.
- [65] M. Schweiker, R. Risetto und A. Wagner, „Thermal expectation: Influencing factors and its effect on thermal perception,“ *Energy and Buildings*, Jg. 210, S. 109 729, 2020.
- [66] C. A. Roulet, F. Flourentzou, F. Foradini, P. Bluysen, C. Cox und C. Aizlewood, „Multi-criteria Analysis of Health, Comfort and Energy Efficiency of buildings,“ *Building Research and Information*, Jg. 34, Nr. 5, S. 475–482, 2006.
- [67] E. Gossauer, „Nutzerzufriedenheit in Bürogebäuden - Eine Feldstudie: Analyse von Zusammenhängen zwischen verschiedenen Komfortparametern am Arbeitsplatz,“ Diss., Karlsruher Institut für Technologie KIT, Fakultät für Architektur, Karlsruhe, 2008.
- [68] F. Nicol und M. Humphreys, „Adaptive Thermal Comfort and Sustainable Thermal Standards for Buildings,“ *Energy and Buildings*, Jg. 34, S. 563–572, 2002.
- [69] E. Halawa und J. van Hoof, „The adaptive approach to thermal comfort: A critical overview,“ *Energy and Buildings*, Jg. 51, S. 101–110, 2012.
- [70] R. J. de Dear und G. S. Brager, „Towards an adaptive model of thermal comfort and preference,“ *ASHRAE Transactions*, Jg. 104, Nr. 1, S. 145–167, 1998.
- [71] ASHRAE, Hrsg., *ASHRAE Standard 55-2017: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, Atlanta, USA, 2017.

- [72] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN 4108-2: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden: Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*, Berlin, 2013.
- [73] *Technische Regeln für Arbeitsstätten: ASR A3.5 Raumtemperatur*, 2010. besucht am 6. Juli 2022. Adresse: [https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/ASR/pdf/ASR-A3-5.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/ASR/pdf/ASR-A3-5.pdf?__blob=publicationFile&v=6).
- [74] *Verordnung über Arbeitsstätten (Arbeitsstättenverordnung - ArbStättV)*, 2004. besucht am 6. Okt. 2021. Adresse: <https://www.bmas.de/DE/Service/Publikationen/Broschueren/A225-arbeitsstaettenverordnung.html>.
- [75] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN 1525: Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden*, Berlin, 2012.
- [76] X. Long, W. Zhang, Y. Li und L. Zheng, „Thermal performance improvement of lightweight buildings integrated with phase change material: An experimental and simulation study,“ *Advances in Mechanical Engineering*, Jg. 9, Nr. 6, S. 1 687 814 017 702 082, 2017.
- [77] M. Ozdenefe und J. Dewsbury, „Thermal performance of a typical residential Cyprus building with phase change materials,“ *Building Services Engineering Research and Technology*, Jg. 37, Nr. 1, S. 85–102, 2016.
- [78] M. Saffari, A. de Gracia, S. Ushak und L. F. Cabeza, „Economic impact of integrating PCM as passive system in buildings using Fanger comfort model,“ *Energy and Buildings*, Dez. 2015.

- [79] J. Lei, J. Yang und E.-H. Yang, „Energy performance of building envelopes integrated with phase change materials for cooling load reduction in tropical Singapore,“ *Applied Energy*, Jg. 162, S. 207–217, 2016.
- [80] N. Soares, C. Reinhart und A. Hajiah, „Simulation-based analysis of the use of PCM-wallboards to reduce cooling energy demand and peak-loads in low-rise residential heavyweight buildings in Kuwait,“ *Building Simulation*, Jg. 10, S. 481–495, Jan. 2017.
- [81] M. Auzeby u. a., „Effectiveness of Using Phase Change Materials on Reducing Summer Overheating Issues in UK Residential Buildings with Identification of Influential Factors,“ *Energies*, Jg. 9, Nr. 8, S. 605–621, 2016.
- [82] F. Jiao und P. Xu, „Simulation and Feasibility Analysis of PCM Based Passive Cooling Technique in Residential House,“ *Procedia Engineering*, Jg. 121, S. 1969–1976, 2015.
- [83] S. Medved und C. Arkar, „Correlation between the local climate and the free-cooling potential of latent heat storage,“ *Energy and Buildings*, Jg. 40, Nr. 4, S. 429–437, 2008.
- [84] K. Assawamartbunlue, „An Investigation of Cooling and Heating Degree-Hours in Thailand,“ *Journal of Clean Energy Technologies*, S. 87–90, Jan. 2013.
- [85] F. Sicurella, G. Evola und E. Wurtz, „A statistical approach for the evaluation of thermal and visual comfort in free-running buildings,“ *Energy and Buildings*, Jg. 47, S. 402–410, 2012.
- [86] D. Kalz, M. Fischer und P. Schossig, „Monitoring und modellbasierte Auswertung: Bewertung des Potentials von Phasenwechselmaterialien zur Verbesserung des thermischen Komforts im

- Sommer in einem Schulgebäude,“ Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Techn. Ber., 2008.
- [87] R. Disch, R. Schüle und S. Tebel-Haas, *Innovative Energiefassade für das Sonnenschiff der Solarsiedlung Freiburg: Final report DBU Research Project*, Solarsiedlung GmbH und Energieagentur Regio Freiburg GmbH, Hrsg., Abschlussbericht, 2009. besucht am 6. Juli 2022. Adresse: <https://docplayer.org/64623896-Innovative-energiefassade-fuer-das-sonnenschiff-der-solarsiedlung-freiburg.html>.
- [88] U. Eicker, P. Seeberger, H. Fischer, J. Werner und G. Lude, *Evaluierung eines im Passivhaus-Standard sanierten Bürogebäudes hinsichtlich des energetischen und raumklimatischen Verhaltens*, Abschlussbericht EnOB-Projekt 0329750T, Hrsg., 2007.
- [89] Remscheider Entsorgungsbetriebe, „Ökologische / ökonomische Bewertung zweier Fassadenkonzepte - Glasfassade versus Kunststofffassade,“ Abschlussbericht DBU-Projekt Az 22566, Techn. Ber., 2008.
- [90] Lehmbaushop, *Climate control - Eine Wand, die speichert und konstante Raumtemperatur garantiert*, online, 2010. besucht am 6. Juni 2022. Adresse: <https://lehm-bau-shop.de/waerme/climate-control.html>.
- [91] S. Straelen, *Angebot über auszuführende Trockenbauarbeiten im Dachgeschoss des Rathauses der Stadt Straelen, Rathausstr. 1*, 2007.
- [92] RAL GZ 896: *Phase Change Materials - Quality Assurance*, Beuth Verlag GmbH, 2018. besucht am 21. Okt. 2021. Adresse: <https://www.pcm-ral.org/pcm/en/quality-testing-specifications-pcm/>.
- [93] U. Flick, *An Introduction To Qualitative Research*, 4. Aufl. London: SAGE publications ltd, 2009.

- [94] R. Neubauer, *Branchenattraktivität von PCM in Baustoffen: Branchenanalyse und qualitative Untersuchung zur Planer- und Nutzerakzeptanz*, Masterarbeit, 2018.
- [95] K. Schakib-Ekbatan, T. Gropp und A. Wagner, *INKA Instrument für Nutzerbefragungen zum Komfort am Arbeitsplatz*, 2011. besucht am 6. Juli 2022. Adresse: <http://www.irbnet.de/daten/baufo/20128035527/Leitfaden-INKA.pdf>.
- [96] A. Witzel, „Das problemzentrierte Interview,“ *Forum Qualitative Sozialforschung / Forum: Qualitative Social Research*, Jg. 1, Nr. 1, 2000. besucht am 19. Okt. 2021. Adresse: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0114-fqs0001228>.
- [97] P. Mayring, *Qualitative Inhaltsanalyse*, G. Mey und K. Mruck, Hrsg. *Handbuch Qualitative Forschung in der Psychologie*. VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2010.
- [98] VERBI Software. Consult. Sozialforschung. GmbH, *MAXQDA 2018 - Software für qualitative und Mixed Methods-Forschung*, Berlin, Deutschland, 2017.
- [99] LimeSurvey GmbH, *Lime Survey - Online survey tool*, online, 2020. besucht am 6. Juli 2022. Adresse: [www.limesurvey.org](http://www.limesurvey.org).
- [100] R. Andersen, B. W. Olesen und J. Toftum, „Modelling window opening behaviour in Danish dwellings,“ *12th International Conference on Indoor Air Quality and Climate 2011*, Jg. 2, 2011.
- [101] S. Jamieson, „Likert scales: how to (ab)use them,“ *Medical Education*, Jg. 2004, Nr. 38, S. 1212–1218, 2004.
- [102] R. Hauschild M.; Karzel, *openOffice: energieautarkes Experimentalgebäude - Zeche Zollverein*, bk2a architektur, Hrsg., 2010. besucht am 10. Juli 2022. Adresse: <https://docplayer.org/25119684-Energieautarkes-experimentalgebäude-zeche-zollverein-bk2a-architektur.html>.

- [103] J. Solano Guzmán, „Energy-efficient room temperature control through the use of phase change materials: Identification of potential for optimization based on an ESP-r model and simulation,“ Técnico Lisboa, Lissabon, Portugal, Masterarbeit, 2019.
- [104] T. Oberfell, J. Solano Guzmán, T. Haussmann, S. Gschwander und A. Wagner, „Long-term functionality of a passive phase-change materials building application after more than a decade of operation,“ *Energy and Buildings*, Jg. 249, S. 111-213, 2021.
- [105] T. Oberfell, S. Götz, T. Haussmann, S. Gschwander und A. Wagner, „Influence of user behaviour on functioning and performance of passive phase-change materials systems after more than a decade of operation,“ *Energies*, 2022.
- [106] R. Disch, *Rolf Disch SolarArchitektur*, 2020. besucht am 6. Juli 2022. Adresse: <http://www.rolfdisch.de/projekte/das-sonnenschiff/>.
- [107] BASF SE, *Company website*, 2020. besucht am 6. Juli 2022. Adresse: <https://www.basf.com/global/de.html>.
- [108] Deutscher Wetterdienst, *Open Data*, 2020. besucht am 6. Juli 2022. Adresse: [https://opendata.dwd.de/climate\\_environment/CDC/observations\\_germany/climate/hourly/](https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/hourly/).
- [109] F. Lombardo, *How to Measure Temperature Correctly*, 2020. besucht am 1. Feb. 2022. Adresse: <https://weatherworksinc.com/news/temperature-measurement>.
- [110] Solargis s.r.o., *SOLARGIS - Weather data and software for solar power investments*, online, 2021. besucht am 6. Juli 2022. Adresse: [www.solargis.com](http://www.solargis.com).
- [111] N. Carbonare, „Occupant-centered control strategies for decentralized residential ventilation,“ Diss., Karlsruher Institut für Technologie KIT, Fakultät für Architektur, 2021.

- [112] S. D'Oca und T. Hong, „A data-mining approach to discover patterns of window opening and closing behavior in offices,“ *Building and Environment*, Jg. 82, S. 726–739, 2014.
- [113] US Department of Energy, *EnergyPlus™ Version 9.2.0 Documentation: Input Output Reference*, 2019. besucht am 6. Juli 2022. Adresse: <https://energyplus.net/documentation>.
- [114] A. Castell und C. Solá, „11 - Design of latent heat storage systems using phase change materials (PCMs),“ in *Advances in Thermal Energy Storage Systems*, L. F. Cabeza, Hrsg., Woodhead Publishing, 2015, S. 285–305.
- [115] D. B. Crawley u. a., „EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program,“ *Energy and Buildings*, Jg. 33, Nr. 4, S. 319–331, 2001.
- [116] P. C. Tabares-Velasco, „Energy Impacts of Nonlinear Behavior of PCM When Applied Into Building Envelope,“ ASME 2012 6th International Conference on Energy Sustainability and 10th Fuel Cell Science, Engineering and Technology Conferenc, San Diego, California, Juli 2012.
- [117] S. Shrestha u. a., „Modeling PCM-Enhanced Insulation System and Benchmarking EnergyPlus against Controlled Field Data,“ *Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association*, Sydney, Jan. 2011.
- [118] u-wert.net GmbH, *Ubakus - der Abakus für den U-Wert, online U-Wert-Rechner'*, 2021. besucht am 6. Juli 2022. Adresse: <https://www.ubakus.de/der-abakus-fuer-den-u-wert/>.
- [119] DesignBuilder Software Ltd, *Phase Change Material - Hysteris*, 2020. besucht am 6. Juli 2022. Adresse: <https://designbuilder>.

- co.uk/helpv6.0/Content/PhaseChangeMaterialHysteresis.htm.
- [120] A. Al-Janabi und M. Kavgic, „Application and sensitivity analysis of the phase change material hysteresis method in EnergyPlus: A case study,“ *Applied Thermal Engineering*, Jg. 162, S. 114-222, 2019.
- [121] Big Ladder Software, *Conduction Finite Difference Solution Algorithm*, 2018. besucht am 6. Juli 2022. Adresse: <https://bigladdersoftware.com/epx/docs/9-0/engineering-reference/conduction-finite-difference-solution.html>.
- [122] BASF SE, Hrsg., *Product Overview: Polymer Dispersions, Powders and Additives for Sealants, Flooring Adhesives and New Building Materials*, Produktdatenblatt, Ludwigshafen, Germany, 2011. besucht am 6. Juli 2022. Adresse: <https://pdfslide.net/documents/polymer-dispersions-powders-and-additives-for-sealants-din-en-iso-3219.html?page=1>.
- [123] L. Navarro u. a., „Benchmarking of useful phase change materials for a building application,“ *Energy and Buildings*, Jg. 182, S. 45–50, 2019, issn: 0378-7788.
- [124] A. Halimov, M. Lauster und D. Müller, „Development and Validation of PCM Models Integrated Into the High-order Building Model of Modelica Library – Aixli,“ *Proceedings of the 16th IBPSA Conference, Italy*, S. 4698–4705, 2019.
- [125] S. M. Ross, „Chapter 12 linear regression,“ in *Introductory Statistics*, S. M. Ross, Hrsg., Boston, MA, United States of America: Academic Press, 2010, S. 537–604.
- [126] D. Moore, W. I. Notz, and M. A. Fligner, Hrsg., *The basic practice of statistics*, 6. Aufl. New York City, NY, United States of America: W. H. Freeman and Company, 2013.



- [127] A. Reilly und O. Kinnane, „The impact of thermal mass on building energy consumption,“ *Applied Energy*, Nr. 198, S. 108–121, 2017.
- [128] X. Liu, Y. Zhou und G. Zhang, „Numerical study on cooling performance of a ventilated Trombe wall with phase change materials,“ *Building Simulation*, Jg. 11, Nr. 4, S. 677–694, 2018.
- [129] S. Soudian und U. Berardi, „Assessing the effect of night ventilation on PCM performance in high-rise residential buildings,“ *Journal of Building Physics*, Jg. 43, Nr. 3, S. 229–249, 2019.
- [130] H. Akeiber u. a., „A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 60, S. 1470–1497, 2016.
- [131] ALHO Systembau GmbH, *Ausführungsplan 2. Obergeschoss*, 2007.
- [132] ALHO Systembau GmbH, *Vertikalschnitt*, 2007.



# Nomenklatur

## Abkürzungen

AB	.....	Altbau
ACH	.....	engl. air changes per hour - Luftwechselrate pro Stunde [-]
ASHRAE	....	American Society of Heating, Refrigerating and Air- Conditioning Engineers
CDH	.....	engl. Cooling Degree Hour - Kühlungsgradstunden [Kh]
CO <sub>2</sub>	.....	Kohlendioxid
DSC	.....	engl. Differential Scanning Calorimeter - Dynamisches Differenzkalorimeter
DWD	.....	Deutscher Wetterdienst
EEB	.....	Endenergiebedarf
EP	.....	EnergyPlus
HLK	.....	Heizung, Lüftung, Klimatechnik
HTK	.....	Häufigkeit thermischen Komforts
ITD	.....	Intensität des thermischen Diskomforts
NB	.....	Neubau
NL	.....	Nachtlüftung
OG	.....	Obergeschoss

PCM ..... engl. Phase Change Material - Phasenwechselmaterial  
PMV ..... engl. Predicted Mean Vote - vorhergesagter Mittelwert  
TES ..... Thermische Energiespeicher

## Einheiten

h ..... Stunde  
J ..... Joule  
K ..... Kelvin  
kg ..... Kilogramm  
lx ..... Lux  
W ..... Watt  
°C ..... Grad Celsius

## Formelzeichen

$\Delta$  ..... Differenz  
 $\delta$  ..... Zeitdauer [h]  
 $\overline{OBS}$  ..... Mittelwert der Messdaten  
 $\overline{SIM}$  ..... Mittelwert der simulierten Daten  
 $\Theta$  ..... Tagesmittelwert der Umgebungstemperatur [°C]  
 $C$  ..... Wärmekapazität [J/K]  
 $g$  – Wert .... Gesamtenergiedurchlassgrad [-]  
 $H$  ..... Enthalpie [J]  
 $h$  ..... spezifische Enthalpie [J/kg]  
 $m$  ..... Masse [kg]  
 $N$  ..... Gesamtzahl an Datenpunkten  
 $n$  ..... Teilmenge der Datenpunkte  
 $OBS_i$  ..... Beobachteter Datenpunkt  $i$

$Q$ .....	Wärme [J]
$R$ .....	engl. ratio - Verhältnis / Anteil
$R^2$ .....	Bestimmtheitsmaß
$RMSE$ .....	engl. root mean square error - Wurzel des mittleren quadrierten Fehlers
$SIM_i$ .....	Simulierter Datenpunkt $i$
$T$ .....	Temperatur [°C]
$U$ .....	Wärmeübergangskoeffizient [W/(m <sup>2</sup> K)]

## Indizes

+	.....	natürliche Zahlen
amb	.....	Umgebung
ed-i	.....	$i$ -ter vorausgegangener Tag
f	.....	fest
Fen	.....	Fenster
fl	.....	flüssig
lat	.....	latent
lim	.....	Limit
max	.....	maximal
o	.....	geöffnet
op	.....	operativ
rm	.....	engl. running mean - gleitender Mittelwert
s	.....	schmelzen
sens	.....	sensibel



# Abbildungen

1.1	Interdisziplinärer Ansatz der vorliegenden Arbeit . . . . .	8
1.2	Grundstruktur der vorliegenden Arbeit. . . . .	10
2.1	Schematische Darstellung von sensibler und latenter Speicherung von Wärme $Q$ [eigene Darstellung nach 38], [39]. . . . .	14
2.2	(a) Spezifische Enthalpie und (b) spezifische Wärmeka- pazität beim Schmelzvorgang einer PCMhaltigen Gips- kartonplatte ( <i>Smartboard</i> 23) [nach 35, S. 559] . . . . .	16
2.3	Eingesetzte Materialklassen in Latentwärmespeichern in Abhängigkeit von Schmelzenthalpie und -temperatur [35, S. 559] . . . . .	18
2.4	(a) Makrokapsel gefüllt mit organischem PCM RT des Herstellers Rubitherm GmbH [52] (b) Mikroverkapseltes Paraffin Micronal des Herstellers BASF [53] . . . . .	20
2.5	Montierte Sensoren in einem Seminargebäude in Es- sen zur Erfassung raumklimatischer Daten in einem mit PCM-Lehmbauplatten ausgestatteten Gebäude. . . . .	31

3.1	Ergebnisse der DSC-Messungen der genommenen Proben und der entsprechenden Referenzmessungen. Das Jahr, aus dem die Referenzmessungen stammten, ist bei dem jeweiligen Messergebnis angegeben (weiße Schrift). Die Einkreisten Prozentangaben beziffern die Abnahme der spezifischen Enthalpie des PCMs. . . . . .	40
4.1	MAXQDA Codes für die Ergebnisse der (a) Nutzer:innenbefragung und der (b) Planerbefragung [94] . . . . .	48
4.2	Komfortdiagramme der beiden Büroräume im Sonnenschiff in Freiburg inklusive Bewertungen des thermischen Komforts durch die Nutzerinnen (farbige Rauten). Graue Punkte stellen Messpunkte ohne zeitgleiche Bewertung dar. Schwarze Linien visualisieren die drei Kategorien der Komfortgrenzen I (durchgezogen) - III (gepunktet). . . . . .	55
4.3	Komfortdiagramme inklusive Bewertungen des thermischen Komforts durch die Nutzer:innen (farbige Rauten). Graue Punkte stellen Messpunkte ohne zeitgleiche Bewertung dar. Schwarze Linien visualisieren die drei Kategorien der Komfortgrenzen I (durchgezogen) - III (gepunktet). . . . . .	57
4.4	Komfortdiagramme inklusive Bewertungen des thermischen Komforts durch die Nutzer:innen (farbige Rauten). Graue Punkte stellen Messpunkte ohne zeitgleiche Bewertung dar. Schwarze Linien visualisieren die drei Kategorien der Komfortgrenzen I (durchgezogen) - III (gepunktet). . . . . .	59



- 
- 4.5 Komfortdiagramm inklusive Bewertungen des thermischen Komforts durch die Nutzer:innen (farbige Raute). Graue Punkte stellen Messpunkte ohne zeitgleiche Bewertung dar. Schwarze Linien visualisieren die drei Kategorien der Komfortgrenzen I (durchgezogen) - III (gepunktet). . . . . 61
- 4.6 Zeitliche Verteilung der Raumtemperaturen in den untersuchten Räumen auf die unterschiedlichen Komfortkategorien. . . . . 62
- 5.1 Blick auf die Westfassade des *Sonnenschiffs* in Freiburg. Die farbige Umrandung markiert den Gebäudeteil, in dem die beiden analysierten Räume liegen [106]. . . . . 69
- 5.2 (a) Außenliegender Schutz (orange) des Ventilationspaneels [eigene Darstellung], (b) wandintegrierter Wärmetauscher [eigene Darstellung nach 106]. . . . . 70
- 5.3 Blick in die beiden untersuchten Räume: (a) PCMräum und (b) REFraum [eigene Darstellungen]. . . . . 71
- 5.4 Sensorpositionen (markiert durch farbige Kreise) im PCMräum (a) Kontakte an Ventilationspaneel, (b) Lichtsensoren am großen Fenster und Kontaktsensor am Fensterrahmen [eigene Darstellungen]. . . . . 72
- 5.5 (a) Blick auf die Ostfassade des Gymnasiums in Diekirch. Die türkise Umrandung markiert die Fenster des analysierten Raumes. (b) Blick von Innen auf die Fensterfront mit den drei zweigeteilten Fenstern [eigene Darstellungen]. 74
- 5.6 Anzahl der geöffneten Fensterkontakte im PCMräum sowie die Verläufe von  $T_{op}$  und  $T_{amb}$ . Der Kreis markiert ein Beispiel für gut umgesetzte Fensteröffnung. . . . . 76

5.7	Häufigkeit der verschiedenen Öffnungspositionen von Lüftungspaneel und Fenster im PCMRaum des Sonnenschiffs in Abhängigkeit von $\Delta T$ (Säulen) sowie die Häufigkeit, in der die jeweiligen $\Delta T$ aufgetreten waren (Linien).	77
5.8	Öffnungsrate der Fenster im PCMRaum des Sonnenschiffs (FR) und im Klassenzimmer (LUX) abhängig von $\Delta T$ .	79
5.9	Anzahl der geöffneten Fenster sowie die Verläufe von $T_{op}$ im Klassenzimmer und $T_{amb}$ . Kreise markieren Beispiele für nicht optimale Fensteröffnung.	80
5.10	Öffnungshäufigkeit der drei Fenster im Klassenzimmer in Abhängigkeit von $\Delta T$ (Säulen) sowie die Häufigkeit, in der die jeweiligen $\Delta T$ aufgetreten waren (Linie).	81
5.11	Lichteinfall an der Unterkante der jeweiligen Fenster der beiden Räume im <i>Sonnenschiff</i> . Die Jalousie im REFraum wurde häufig schon vorzeitig deaktiviert.	83
5.12	Lichteinfall an der Unterkante der jeweiligen Fenster der beiden Räume im <i>Sonnenschiff</i> während der Arbeitszeit.	84
5.13	Lichteinfall an der Unterkante der Fenster in der Arbeitszeit während einer heißen und einer kühleren Periode: (a) Heiße Periode, PCM nicht in Betrieb und (b) kühlere Periode mit aktivem PCM.	84
5.14	Zehnminuten-Mittelwerte des Lichteinfalls am unteren Lichtsensor. Oben: über den kompletten Messzeitraum, unten: Ausschnitt einer Woche beginnend mit Samstag, dem 2. Juni.	86
5.15	Zehnminuten-Mittelwerte des Lichteinfalls am unteren Lichtsensor. Reduktion des Lichteinfalls konnte verschiedene Ursachen haben: An Tagen ohne Anwesenheit könnte eine mögliche Ursache eine Verschattung durch Wolken sein.	88

---

5.16	Darstellung der konsekutiven Prozessschritte bei der Modellerstellung, der Bestimmung der aktuellen spezifischen Enthalpie und der Implementierung verschiedener Szenarios [eigene Darstellung]. . . . .	94
5.17	In SketchUp mithilfe der OpenStudio-Extension erstellte Geometrien der beiden Räume (a) Büro im <i>Sonnenschiff</i> mit den entsprechenden Verschattungsobjekten und (b) das Klassenzimmer (im Bild rechts) [eigene Darstellungen].	96
5.18	Eingegebene Werte des PCM in EP entsprechend des Hysterese-Modells. Quellen: Dichtewerte [122], Werte für latente Wärme und Wärmeleitfähigkeit [123], alle anderen Werte Fraunhofer ISE. . . . .	97
5.19	Validierung der beiden Modelle. . . . .	104
5.20	Verlauf der simulierten Raumtemperaturen bei verschiedenen PCM-Enthalpien: 0%, 50% und 100%. . . . .	105
5.21	Verlauf der simulierten Raumtemperaturen bei verschiedenen PCM-Enthalpien: 0% und 75%. . . . .	106
5.22	CDH der drei Verhaltensszenarien jeweils ohne und mit PCM für das Büro. Zwei Enthalpien – 50% und 100% – wurden jeweils simuliert. . . . .	110
5.23	CDH der drei Verhaltensszenarien jeweils mit und ohne PCM für das Klassenzimmer. . . . .	111
5.24	Komfortdiagramme der drei Verhaltensszenarien jeweils mit PCM (50%- und 100%-Enthalpie) und ohne für das Büro. . . . .	112
5.25	Anteil der Zeit, in dem die Raumtemperatur im Büro innerhalb der verschiedenen Komfortkategorien lag. S1-S3: verschiedene Verhaltensszenarien, jeweils für 50%- und 100%-Enthalpie des PCM sowie ohne PCM. . . . .	113
5.26	Komfortdiagramme der drei Verhaltensszenarien jeweils mit und ohne PCM für das Klassenzimmer. . . . .	114

5.27	Anteil der Zeit, in dem die Raumtemperatur im Klassenzimmer innerhalb der verschiedenen Komfortkategorien lag. S4-S6: verschiedene Verhaltensszenarien, jeweils für ohne und mit PCM. . . . .	115
A.1	Liste der Gebäude mit installierten PCM-Produkten [nach 43]. . . . .	172
A.2	Positionierung der Sensoren während des Monitorings im PCMraum des <i>Sonnenschiffs</i> . . . . .	173
A.3	Positionierung der Sensoren während des Monitorings im Klassenzimmer. . . . .	173
A.4	Grundriss des 2. OG, auf dem sich das analysierte Klassenzimmer (rote Umrandung) befindet [131]. . . . .	174
A.5	Querschnitt durch das Klassenzimmer mit Angaben zum Aufbau der Konstruktionselemente [132]. . . . .	175
A.6	Grundrisse der beiden Etagen im <i>Sonnenschiff</i> : (a) 1. OG und (b) 2. OG. Rote Rechtecke markieren die beiden analysierten Räume, rote Zahlen in roten Kreisen markieren die Wände, an denen Smartboards installiert sind [106]. .	176

# Tabellen

2.1	Übersicht der Gebäude, in denen Monitoringkampagnen durchgeführt wurden, sowie Informationen über das jeweilige PCM-System. Alle PCM-Systeme waren mit paraffinbasierten Produkten ausgestattet. AB=Altbau, NB=Neubau, NL=Nachtlüftung. . . . .	32
2.2	Zeitlicher Ablauf der durchgeführten Monitoringkampagnen. . . . .	33
2.3	Gemessene Parameter im <i>Sonnenschiff</i> in Freiburg und im Gymnasium in Luxemburg während des Sommers im Jahr 2018. . . . .	34
2.4	Außenansicht der analysierten Gebäude . . . . .	35
3.1	Übersicht der genommenen Proben und der zugehörigen Referenzmessungen. . . . .	38
4.1	Durchgeführte Befragungen von Planern und Nutzer:innen.	47
5.1	Übersicht der erstellten Verhaltensszenarien, + mit PCM, - ohne PCM. Die Szenarien S1-S3 wurden jeweils mit zwei verschiedenen PCM-Enthalpien, 50 und 100%, simuliert. . . . .	92

5.2	Ergebnisse der PCM-Szenarien mit unterschiedlichen spezifischen Enthalpien in Relation zu den ursprünglichen Werten von 100 kJ/kg. Das jeweils bestpassende Szenario ist fett hervorgehoben. . . . .	103
5.3	Ergebnisse der Verhaltensszenarien. Für das Büro (S1-S3) wurden jeweils Szenarien für PCM-Enthalpien von 50% und 100% gerechnet. Für das Klassenzimmer (S4-S6) wurde eine Enthalpie von 75% der ursprünglichen verwendet. . . . .	107
A.1	Physikalische Eigenschaften der Bauelemente des Klassenzimmers. Die Werte wurden mithilfe des online U-Wert-Rechners Ubakus ermittelt [118] . . . . .	177
A.2	Physikalische Eigenschaften der Bauelemente des Büros im <i>Sonnenschiff</i> . Die Werte stammen von [118] . . . . .	179
A.3	Einfluss verschiedener Lüftungsraten auf die Raumtemperatur im <i>Sonnenschiff</i> im Vergleich zum Szenario 1, indem die elektrische Lüftung inaktiv war. . . . .	180

# A Anhang

## A.1 Leitfaden: Befragung von Nutzer:innen

### Einleitung

Wir führen zurzeit ein Projekt durch bei dem es unter anderem um den thermischen Komfort in Gebäuden geht. Das Projekt wird vom Fraunhofer ISE durchgeführt und gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.

Vielleicht wissen Sie, dass es in diesem Gebäude (JAHR) einen Umbau gab, bei dem auch der thermische Komfort für die Mitarbeiter erhöht werden sollte. Wir wissen noch nicht wie die Situation jetzt ist bzw. wie es sich entwickelt hat. Aber da es ja nicht immer so funktioniert wie man sich das am Anfang vorstellt hat, wollen wir nachprüfen, wie es in diesem Fall ist. Aus diesem Grund sollen im Gebäude Messungen durchgeführt werden, aber eben auch Befragungen, bei denen es nur um das Empfinden der Betroffenen geht. Ich würde Ihnen gerne einige Fragen zu verschiedenen Aspekten stellen, die sich auf Ihren empfundenen thermischen Komfort auswirken können.

Das Gespräch dauert ungefähr 15 Minuten. Ich würde das Gespräch mit Ihrem Einverständnis gerne aufzeichnen. Die Aufzeichnung wird nach der Auswertung wieder gelöscht und das ganze passiert natürlich

anonymisiert. Am Ende unseres Gesprächs würde ich Sie noch bitten einen kurzen Fragebogen auszufüllen.

### **Einstieg**

Was bedeutet thermischer Komfort für Sie?

Ist der thermische Komfort für Sie ein relevantes Thema?

Seit wann arbeiten Sie schon in diesem Gebäude/Raum?

Haben Sie den Umbau im Jahr XX mitbekommen?

Wissen Sie was dort gemacht wurde?

Wissen Sie, wie der thermische Komfort hergestellt werden soll?

Wurden Ihnen Anweisungen über das richtige Verhalten gegeben bezüglich Lüf-ten/Temperaturregelung/Thermostat?

### **Beurteilung Temperatur**

Würden Sie bitte hier den Tagesverlauf der Raumtemperatur einzeichnen? Einmal für einen Tag, den Sie als angenehm bezeichnen würden und einmal für einen heißen Sommertag.

Wie erleben Sie die Temperatur in diesem Gebäude/Raum?

... In den verschiedenen Jahreszeiten?

Wie entwickelt sich die Raumtemperatur in einem durchschnittlichen Sommer?

Wie schätzen Sie die Temperatur im Sommer in Ihrem Raum im Vergleich mit anderen Räumen im Gebäude ein?

Erinnern Sie sich mal an einen extrem heißen Sommer zurück, wie haben Sie da die Raumtemperatur empfunden?

Gab es hier einen Unterschied zu anderen Räumen im Gebäude?



Haben Sie seit Sie hier arbeiten Änderungen in der Raumtemperatur wahrgenommen?

**Verhalten, Anwendung**

Wenn Sie mit der Raumtemperatur unzufrieden sind, was machen Sie normalerweise?

Welche Möglichkeiten stehen Ihnen zur Verfügung?

Wie viele Personen halten sich normalerweise in diesem Raum auf?

Haben Sie ein ähnliches Temperatur- und Lüftungsbedürfnis?

*Falls PCM bekannt:*

Was wissen Sie über PCM? Was wissen Sie über den richtigen Umgang damit?

Sind Sie selbst daran beteiligt, etwa durch Nachtlüften?

**Rückblick** Falls befragte Person schon seit Einbau/Umbau im Gebäude ist:

Wir haben ja vorhin über den Umbau geredet. Erinnern Sie sich an die Zeit nach den Baumaßnahmen? An was erinnern Sie sich? Haben Sie durch die Maßnahmen einen Effekt erwartet?

Wann sind Sie heute zur Arbeit gekommen?

Ist das die normale Zeit?

Was für Aufgaben haben Sie?

Wie ist dabei das Verhältnis zwischen sitzen und bewegen?

Wie viel Zeit verbringen Sie durchschnittlich pro Arbeitstag in diesem Raum?

Den ganzen Arbeitstag oder eher vormittags oder nachmittags?

### **Produkt**

Sehen Sie Handlungsbedarf im Bereich des thermischen Komforts?

Was könnte man tun, um etwas zu ändern?

*Falls PCM bekannt:*

Wo sehen Sie Vorteile gegenüber anderen Kühlungssystemen?

Wo sehen Sie Nachteile gegenüber anderen Kühlungssystemen?

Würden Sie PCMs auch privat in Betracht ziehen, im Falle eines Umbaus/Neubaus? Warum?

## **A.2 Leitfaden: Befragung von Planern**

### **Einleitung**

Wir führen zurzeit ein Projekt durch, bei dem es unter anderem um die realen Langzeiterfahrungen mit PCM in Gebäuden geht. Das Projekt wird vom Fraunhofer ISE durchgeführt und gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Ein Teil davon ist festzustellen, ob die verfolgten Ziele der Entscheider für den Einsatz von PCM-Systemen erreicht werden konnten. Die Erfahrungen der Nutzer, Anwender und Planer sollen gebündelt und energetische, wirtschaftliche und komfortbasierte Bewertungen vorgenommen werden. Sie waren ja hier am Entscheidungs- und Bauprozess beteiligt. Deswegen würden uns Ihre Erfahrungen interessieren und auch ob Sie Ihre Ziele erreichen konnten. Das Gespräch dauert ungefähr 30 Minuten. Ich würde das Gespräch mit Ihrem Einverständnis gerne aufzeichnen. Die Aufzeichnung wird

nach der Auswertung wieder gelöscht und das ganze passiert natürlich anonymisiert.

### **Entscheidungs-/Bauphase**

Welche Rolle haben Sie bei dem Umbau/Einbau des PCMs gespielt?

Können Sie davon erzählen, wie es zu der Entscheidung für den Einsatz von PCM kam?

Wie sind Sie an die nötigen Informationen gekommen?

Wer war an der Entscheidung beteiligt? Kannten Sie PCM vorher, woher? Warum dieses Produkt? Beratung?

Haben Sie alternative Kühlungssysteme in Betracht gezogen? Welche?

Welche Gründe gab es für Sie PCM einzubauen? Welches Ziel haben Sie damit verfolgt?

Welche Herausforderungen gab es im Planungsprozess? Eventuell im Vergleich mit anderen Projekten?

Entscheidung, welche Menge und welcher Schmelzpunkt benötigt wird

Kommunikation (mit Hersteller?), Schwierigkeiten, Was hätte anders laufen können?

Wie ist die Umsetzung abgelaufen?

Einbau, Schwierigkeiten, was hätte anders laufen können?

### **Aktuell**

Inwiefern haben Sie jetzt noch mit dem Gebäude zu tun?

Konnten Sie Ihre verfolgten Ziele mit dem Einsatz von PCM erreichen?

Wie zufrieden sind Sie mit dem PCM im Betrieb?

Haben Sie auch andere Projekte mit PCM umgesetzt? Wie zufrieden sind Sie damit?

Im Großen und Ganzen, wie zufrieden sind Sie mit der Entscheidung für PCM?

Würden Sie PCM auch für andere Projekte in Betracht ziehen?  
Für welche?

Was würden Sie den PCM-Herstellern empfehlen?

Was würden Sie der Politik empfehlen?

Wie schätzen Sie die zukünftige Entwicklung von PCM-Produkten ein?

### **A.3 Fragebogen Nutzer:innen**

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Fragebogen zum thermischen Komfort am Arbeitsplatz

**Sehr geehrte Damen und Herren,**

dieser Fragebogen ist Teil eines Forschungsprojekts, das vom Fraunhofer ISE durchgeführt und vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert wird.

Durch diese Befragung soll der thermische Komfort in Gebäuden erhoben werden, die in den letzten zwanzig Jahren mit Hinblick auf den thermischen Komfort renoviert oder gebaut wurden. Der Fragebogen wird in Abstimmung mit ... verteilt. Bitte füllen Sie ihn nach Ihrem persönlichen Empfinden aus.

Die nachfolgenden Fragen beziehen sich auf den Raum..

**Selbstverständlich werden Ihre Antworten anonymisiert bearbeitet.**



gar nicht                        sehr

4. Wenn Sie an die **letztes zwei Wochen** zurückdenken: Wie empfanden Sie die Temperatur an Ihrem Arbeitsplatz?

	kalt		genau richtig		heiß
vormittags	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
nachmittags	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

5. Wie unzufrieden bzw. zufrieden sind Sie bezogen auf die **Temperatur...**

mit den technischen Möglichkeiten im Raum, die Temperaturverhältnisse effektiv zu beeinflussen?

sehr unzufrieden                        sehr zufrieden

**Falls Sie mit mehreren Personen in einem Raum arbeiten:**

mit der Abstimmung mit Kolleginnen/Kollegen in diesem Punkt?

sehr unzufrieden                        sehr zufrieden

6. Haben Sie über die im Büro üblicherweise vorhandenen Möglichkeiten hinaus schon mal **eigene Maßnahmen ergriffen**, um die Temperatur zu verändern (z.B. Heizlüfter/Ventilator aufstellen)?

nein    ja, selten    ja, regelmäßig

Welche? \_\_\_\_\_

7. **Alles in allem**, wie unzufrieden bzw. zufrieden sind Sie **im Sommer** mit der **Temperatur** an Ihrem Arbeitsplatz?

sehr unzufrieden                        sehr zufrieden

### Teil 3: Luftqualität, Zuglufterscheinungen

1. Wie empfinden Sie **im Moment die Luftfeuchtigkeit** an Ihrem Arbeitsplatz?

sehr trocken                        sehr feucht

2. Wie hätten Sie die **Luftfeuchtigkeit** lieber?

sehr viel trockener                        sehr viel feuchter

3. Wie empfinden Sie die **Luftqualität** an Ihrem Arbeitsplatz?

sehr schlecht                        sehr gut

4. Wie häufig verspüren Sie **störende Zuglufterscheinungen** an Ihrem Arbeitsplatz?

nahezu nie                        nahezu immer

5. **Wie lange** steht die **Tür** bzw. stehen die **Türen** Ihres Büroraumes **offen**, wenn Sie sich darin aufhalten?

nahezu nie                        nahezu immer

6. Wenn während Ihrer Anwesenheit im Büro die Tür(en) offen ist/sind, was sind die Gründe dafür?  
(Mehrfachnennung möglich)

Im Raum ist es zu warm/kalt.

Die Luft ist verbraucht.

Es erleichtert die Kommunikation.

Es ist hier so üblich.

Sonstiges: \_\_\_\_\_

7. **Wie lange öffnen** Sie das bzw. die **Fenster pro Tag im Sommer** in der Regel?

nahezu nie                        nahezu immer

8. Wann hatten Sie **in den letzten 2 Wochen** die Fenster **hauptsächlich geöffnet**?

Wenn mir zu warm/kalt war.

nachts

Wenn die Luft verbraucht war.

morgens beim Betreten des Raumes.

Sonstiges: \_\_\_\_\_

9. Wie hatten Sie **in den letzten zwei Wochen** die Fenster **hauptsächlich geöffnet**?

gar nicht

auf Kippstellung

maximaler Öffnungswinkel

10. Wie unzufrieden bzw. zufrieden sind Sie bezogen auf die **Luftqualität** (Feuchtigkeit, Gerüche)...

mit den technischen Möglichkeiten im Raum, die Luftqualität effektiv zu beeinflussen?

sehr unzufrieden                        sehr zufrieden

**Falls Sie mit mehreren Personen in einem Raum arbeiten:**

mit der Abstimmung mit Kolleginnen/Kollegen in diesem Punkt?

sehr unzufrieden                        sehr zufrieden

11. Haben Sie über die im Büro üblicherweise vorhandenen Möglichkeiten hinaus schon mal **eigene Maßnahmen** ergriffen, um die Luftqualität zu verändern? (z. B. Luftbefeuchter aufstellen)

nein

ja, selten

ja, regelmäßig

Welche? \_\_\_\_\_

12. **Alles in allem**, wie unzufrieden bzw. zufrieden sind Sie **im Sommer** mit der **Luftqualität an Ihrem Arbeitsplatz**?







## A.5 Ergänzende Informationen zu den beiden Fallstudien

### A.5.1 Sensorpositionierung in PCM-Räumen während des Monitorings

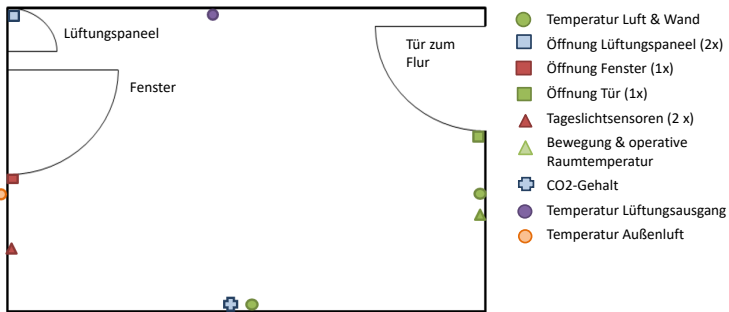


Abb. A.2: Positionierung der Sensoren während des Monitorings im PCM-Raum des *Sonnenschiffs*.

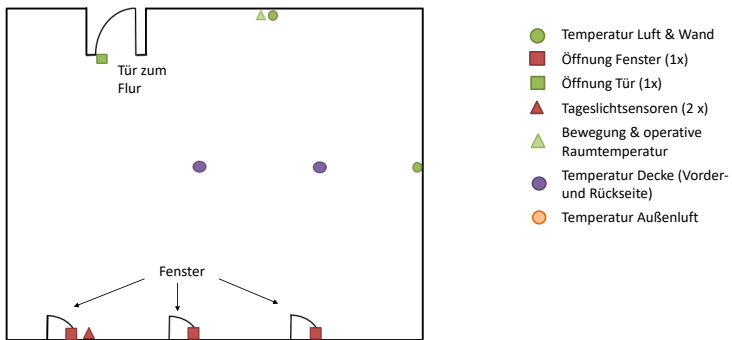


Abb. A.3: Positionierung der Sensoren während des Monitorings im Klassenzimmer.







Abb. A.6: Grundrisse der beiden Etagen im Sommerschiff: (a) 1. OG und (b) 2. OG. Rote Rechtecke markieren die beiden analysierten Räume, rote Zahlen in roten Kreisen markieren die Wände, an denen Smartboards installiert sind [106].

Tab. A.1: Physikalische Eigenschaften der Bauelemente des Klassenzimmers. Die Werte wurden mithilfe des online U-Wert-Rechners Ubakus ermittelt [118]

Bauelement	Material	Dicke	Leitfähigkeit	Spez. Wärme	Dichte
		[mm]	[W/(m*K)]	[J/(kg*K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]
Decke  [U = 0.28 W/(m <sup>2</sup> *K)]	Elastomer-Dichtfolie	1.5	0.170	1000	1400
	Dämmplatte	50	0.045	1300	110
	OSB-Platte	19	0.130	1700	650
	Mineralwolle	100	0.035	1700	650
	Stahlträger	100	50.000	1000	285
	Dichtungsfolie	0.25	0.170	1000	1100
	Knauf Brandschutz GKF	18	0.230	1100	800
	Knauf GKF	12.5	0.230	1100	800
	Luftschicht	172	1.075	1000	1.2
Smartboard	15	0.250	960	680	
Boden  [U = 0.20 W/(m <sup>2</sup> *K)]	Linoleum	5	0.170	1400	1200
	OSB-Platte	19	0.130	1700	650
	Fermacell GKF	15	0.350	1100	1150
	OSB-Platte	22	0.130	1700	650
	Dichtungsfolie	0.25	0.170	1000	1100
	Mineralwolle	140	0.035	1700	650
	Stahlträger	150	50.000	1000	285
	Trapezblech	1	10.000	1000	100
	OSB-Platte	10	0.130	1700	650
	Mineralwolle	100	0.035	1700	650
	Stahlträger	100	50.000	1000	285
	Dampfsperre	0.25	0.170	1000	1100
	Knauf Brandschutz GKF	18	0.230	1100	800
	Knauf Brandschutz GKF	15	0.230	1100	800
Luftschicht	172	1.075	1000	1.2	
Smartboard	15	0.250	960	680	
Fassade  [U = 0.24 W/(m <sup>2</sup> *K)]	Kunstharzputz	3	0.700	1000	1200
	Styropor	60	0.04	1500	20
	Fermacell GKF	15	0.350	1100	1150
	Dichtungsfolie	0.25	0.170	1000	1100
	Mineralwolle	100	0.035	830	20
	Stahlträger	100	50.000	1000	285
	Dichtungsfolie	0.25	0.170	1000	1100
	Luftschicht	135	0.750	1000	1.2
	Stahlträger	75	50.000	1000	285
	Luftschicht	75	0.750	1000	1.2
	Knauf GKF	12.5	0.230	1100	800
	Smartboard	15	0.250	960	680
Knauf GKF	12.5	0.230	1100	800	
Vorder- und Rückwand  [U = 0.34 W/(m <sup>2</sup> *K)]	Knauf GKF	12.5	0.230	1100	800
	Smartboard	15	0.250	960	680
	Knauf GKF	12.5	0.230	1100	800
	Dichtungsfolie	0.25	0.170	1000	1100

	Luftschicht	7.5	0.010	1000	1.2
	Stahlträger	75	50.000	1000	285
	Mineralwolle	60	0.035	830	20
	Luftschicht	7.5	0.010	1000	1.2
	Luftschicht	7.5	0.010	1000	1.2
	Stahlträger	75	50.000	1000	285
	Mineralwolle	60	0.035	830	20
	Luftschicht	75	0.750	1000	1.2
	Dichtungsfolie	0.25	0.170	1000	1100
	Knauf GKF	12.5	0.230	1100	800
	Knauf GKF	12.5	0.230	1100	800
<b>Flurwand</b>	Knauf GKF	12.5	0.230	1100	800
	Smartboard	15	0.250	960	680
	Knauf GKF	12.5	0.230	1100	800
	Luftschicht	7.5	0.010	1000	1.2
[U = 0.53 W/(m²*K)]	Mineralwolle	60	0.035	830	20
	Stahlträger	75	50.000	1000	285
	Luftschicht	7.5	0.010	1000	1.2
	Knauf GKF	12.5	0.230	1100	800
	Knauf GKF	12.5	0.230	1100	800
<b>Wand</b>					
<b>Waschbeckennische</b>	Knauf GKF	12.5	0.230	1100	800
	Smartboard	15	0.250	960	680
	Knauf GKF	12.5	0.230	1100	800
	Stahlträger	75	50.000	1000	285
	Luftschicht	275	1.528	1000	1.2
	Dichtungsfolie	0.25	0.170	1000	1100
	Luftschicht	75	0.750	1000	1.2
[U = 0.46 W/(m²*K)]	Mineralwolle	60	0.035	830	20
	Stahlträger	75	50.000	1000	285
	Luftschicht	7.5	0.010	1000	1.2
	Dichtungsfolie	0.25	0.170	1000	1100
	Knauf GKF	12.5	0.230	1100	800
	Smartboard	15	0.250	960	680
	Knauf GKF	12.5	0.230	1100	800
<b>Fenster</b>	Glas	6	0.760	840	2500
	Luft	16	0.000	1000	1.2
[U = 0.71 W/(m²*K)]	Glas	6	0.760	840	2500
	Luft	16	0.000	1000	1.2
	Glas	6	0.760	840	2500
<b>Tür</b>	Holztüre	50	0.13	1700	750
[U = 1.55 W/(m²*K)]					



Tab. A.2: Physikalische Eigenschaften der Bauelemente des Büros im *Sonnenschiff*. Die Werte stammen von [118]

Bauelement	Material	Dicke	Leitfähig-	Spez.	Dichte
		[mm]	keit [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Wärme [J/(kg*K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Decke und Boden</b> [U = 0.19 W/(m <sup>2</sup> *K)]	Beton extern	25	2.000	950	2400
	Zementestrich	60	1.400	1000	2000
	Styropor	200	0.040	1500	20
	Beton intern	25	2.000	950	2400
<b>Interne Wand</b> [U = 0.75 W/(m <sup>2</sup> *K)]	Smartboard	15	0.250	960	680
	Einblasdämmung	45	0.043	2200	105
	Beton	10	2.000	950	2400
	Smartboard	15	0.250	960	680
<b>Fenster</b> [U = 0.71 W/(m <sup>2</sup> *K)]	Glas	6	0.760	840	2500
	Luft	16	0.000	1000	1.2
	Glas	6	0.760	840	2500
	Lust	16	0.000	1000	1.2
	Glas	6	0.760	840	2500
<b>Pfosten-Riegel-Konstruktion</b> [U = 0.31 W/(m <sup>2</sup> *K)]	Massivholz	340	0.110	1700	480
<b>Fassadenwand</b> [U = 0.14 W/(m <sup>2</sup> *K)]	Vakuum Isolation	50	0.007	800	200
	Beton	100	2.000	950	2400
<b>Tür</b> [U = 2.70 W/(m <sup>2</sup> *K)]	Holztür	25	0.190	2390	700

### A.5.3 Lüftungsrate im *Sonnenschiff*

Tab. A.3: Einfluss verschiedener Lüftungsraten auf die Raumtemperatur im *Sonnenschiff* im Vergleich zum Szenario 1, indem die elektrische Lüftung inaktiv war.

elektrische Lüftung [ACH]	max. Temperaturreduktion [K]	mittlere Temperaturreduktion [K]
1	3.8	1.8
2	4	2.3
3	4	2.6

Als optimale Lüftungsrate wurde 2 ACH identifiziert, da die maximale Temperatursenkung bei 3 ACH nicht höher und die durchschnittliche nur geringfügig höher war. Da ein niedrigerer ACH mit geringerem Energiebedarf einhergeht, wurde diese Stufe als das Optimum zwischen Kühleffekt und Energiebedarf angesehen.

## A.6 Publikationen

### Beiträge in Journals und Büchern

- Oberfell T, Gözl S, Haussmann T, Gschwander S, Wagner A: Influence of user behaviour on functioning and performance of passive phase-change materials systems after more than a decade of operation. *Buildings* 12(11), 1797, 2022.
- Haussmann T, Oberfell T, Gschwander S: Phase Change Materials in Buildings. State of the Art. In *Advances in Energy Storage*:

*Latest Developments from R&D to the Market*, A. Hauer, Ed. Wiley, 2022, S. 709-731.

- Oberfell T, Solano Guzmán J, Haussmann T, Gschwander S, Wagner A: Long-term functionality of a passive phase-change materials building application after more than a decade of operation. *Energy and Buildings* 249, S. 111213ff, 2021.

### **Konferenzvorträge**

- Oberfell T: Improvement of thermal comfort in buildings through PCM – Even after 10 years of operation? *EnerStock Conference*, online 2021.
- Oberfell T, Haussmann T, Gschwander S: Evaluation of the Influence of User Behavior on PCM Systems in Buildings and Real Longterm Stability after up to 15 Years in Operation. *Seminar Advances in Thermal Energy Storage*, Lleida/Spain, 2019.

### **Konferenzposter**

- Oberfell T, Solano Guzmán J, Gschwander S, Haussmann T, Götz S, Wagner A: Performance Assessment of a PCM System after 14 Years of Operation and the Influence of User Behaviour. *International Renewable Energy Storage Conference*, Online 2021.
- Solano Guzmán J, Oberfell T, Haussmann T, Gschwander S: Evaluation of the effect of phase change materials on the room temperature in a commercial office: Assessment of occupant behaviour and potential for room climate improvement. *International Renewable Energy Storage Conference*, Online 2020.

### **Betreute Abschlussarbeiten**

- Juanita Solano Guzmán: Energy efficient room temperature control through the use of phase change materials: Identification of potential for optimization based on an ESPr model and simulation. Masterarbeit, Universität Técnico Lisboa, Lissabon/Portugal, 2019.
- Rebekka Neubauer: Branchenattraktivität von PCM in Baustoffen: Branchenanalyse und qualitative Untersuchung zur Planer- und Nutzerakzeptanz. Masterarbeit, Hochschule Trier Umwelt-campus Birkenfeld, 2018.





# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei den Menschen bedanken, die mich auf dem Weg zum Abschluss meiner Dissertation begleitet und unterstützt haben.

Ein großes Dankeschön an:

- **Stefan Gschwander, Thomas Haussmann** und die gesamte Gruppe PCM am Fraunhofer ISE. Durch unsere fachlichen Diskussionen, ihre wertvollen Beiträge zur Entwicklung der Forschungsfragen und ihre langjährige Erfahrung im Bereich PCM in Gebäuden hat diese Arbeit an Tiefe und Substanz gewonnen. Ein besonderes Extra-Dankeschön geht an **Sebastian Gamisch**, der mir nicht nur eine große Hilfe bei der Erstellung von Grafiken war, sondern auf den ich auch jederzeit als R-Joker bauen konnte. Seine positive Energie hat mir zudem oft die Mittagspausen versüßt. Apropos Mittagspausen: **Rahel Volmer** und **Katharina Morawietz** waren ebenfalls wichtige Mitglieder meiner Lieblings-Pausencrew und in vielen Motivationstälern ein großer Lichtblick.
- **Andreas Wagner** für die Betreuung dieser Dissertation und **Hans-Martin Henning** für die Begutachtung.
- **Juanita Solano Gùzman**, die als Studentin wertvolle Unterstützung bei der Entwicklung der Gebäudemodelle geleistet hat.

- das **Bundesministerium für Wirtschaft und Energie**, das durch die Finanzierung des Forschungsprojekts PCMEval maßgeblich zur Entstehung dieser Dissertation beigetragen hat.
- **I. Campagnolo**, ohne deren Unterstützung diese Arbeit wohl nicht vollendet worden wäre. Herzlichen Dank für den Support in der entscheidenden Phase.

Zu guter Letzt möchte ich **Kiron** und **Christian** danken, die mir immer wieder geholfen haben, meine Work-Life-Balance zu optimieren und dafür gesorgt haben, dass die Arbeit nicht zu viel Raum einnimmt. Vielen Dank für die Ablenkung, das gemeinsame Durchstehen der Pandemie und dafür, dass ihr mir trotz des herausfordernden Alltags mit Kleinkind in dieser Zeit geholfen habt, Freiräume für die Doktorarbeit zu schaffen.

Ihnen und Euch allen gilt mein aufrichtiger Dank!