Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (http://www.ub.tuwien.ac.at).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/).

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

VIENNA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

DIPLOMARBEIT

Master's Thesis

„Einfluss von PCM auf das Verhalten von Bauteilen"

ausgeführt zum Zweck der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs unter Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Bednar
Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Azra Korjenic

E206
Institut für Hochbau und Technologie
Zentrum für Bauphysik und Bauakustik

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Christian Cervenka
E610/ 0125067
Gerasdorferstrasse 116
A-1210 Wien

Wien, im April 2008 ……

KURZFASSUNG

Die Diplomarbeit beschäftigt sich einleitend mit einer kurzen Literaturrecherche, bei der die Einflussfaktoren auf das Raumklima und die Arten der Wärmespeicherung (sensibel und latent) behandelt werden. Ein weiterer wichtiger Punkt befasst sich mit den Anforderungen, die bei der Wahl von „Phase Change Materials“ (nachfolgend mit PCM abgekürzt) beachtet werden sollten, sowie mit den Eigenschaften für die im Bauwesen wichtigsten PCM-Stoffe.

Das eigentliche Ziel dieser Arbeit ist zunächst die experimentelle Bestimmung der temperaturabhängigen spezifischen Wärmekapazität für 3 ausgewählte PCM-s, um anschließend den Einfluss ihrer thermischen Eigenschaften auf Bauteile überprüfen zu können.

Dazu wurden mit Hilfe des Simulationsprogramms „buildopt“ für ein Achtzonenmodell, das ein Einfamilienhaus abbilden soll, verschiedene Varianten mit unterschiedlicher Lage und Stärke der PCM-Füllungen im Hochlochziegel untersucht.

Abschließend wurden die Auswirkungen durch den PCM-Einsatz auf den Heizwärme- und Kühlbedarf sowie auf die sich einstellende operative Raumtemperatur dargestellt.

Bei den durchgeführten Untersuchungen hat sich gezeigt, dass jene Variante, bei der die ersten 5cm der Ziegelhochlöcher mit PCM verfüllt sind und deren Phasenwechseltemperatur zwischen 20 und 22°C liegt, die sinnvollste ist, denn dadurch ist es möglich, den Fensterflächenanteil vom niederen (13%) auf den mittleren (20%) Verglasungsanteil zu erhöhen, ohne dass sich die thermischen Eigenschaften des Gebäudes, wie Heizwärmebedarf und maximale operative Raumtemperatur verschlechtern.

Damit konnten Grundlagen für die Entwicklung eines neuen Außen- und Zwischenwandziegels mit PCM-Füllungen geschaffen werden.

Diese neue Ziegelgeneration sollte durch den PCM-Einsatz eine hohe Wärmespeicherfähigkeit der Räume gewährleisten und damit effektiv zur Verbesserung des sommerlichen Wärmeschutzes und der damit einhergehenden Minimierung bzw. den Verzicht des Energiebedarfes für Klimatisierungszwecke beitragen.

ABSTRACT

The Master's Thesis deals by the way of an introduction, with a short literature search of which the factors that influences the rooms climate and the kind of warm storage (sensitively and latent) are treated. Another important point deals with the requirements which should be followed with a choice of „Phase Change materials“ (in the following with PCM-s shortened) as well as with the qualities for the PCM-materials, which are most important in the civil engineering.

The real purpose of this work is firstly, the experimental regulation of the specific warm capacity, dependent on temperature for 3 well-chosen PCM-s, remembering to check afterwards the influence of their thermal qualities on components.

In addition different variations with different positions and strength of the PCM-fillings in the vertically perforated brick are examined with the help of the simulation program "buildopt" for an 8-zonal model, which should illustrate a single-family house.

Finally the consequences are shown with the PCM-application at the heating demand and cooling demand as well as on the appearing operative ambient temperature.

The carried out investigations have appeared that the variant, where the first 5 cm of the vertically perforated brick are filled with PCM and whose Phase-Change-Temperature has lain between 20 and 22℃, has shown the most sensi ble effect. Thereby it's possible to raise the window surface from low (13%) to middle (20%), without making worse the thermal qualities of the building.

With these bases a new external wall brick and internal wall brick with PCM-fillings can be created.

This new brick generation should guarantee a high heat accumulating ability of the rooms by the PCM-application and contribute to the improvement of the summery heat insulation, the minimisation and the renunciation of the energy demand for climate control purposes.

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei Herrn Univ.Prof.Dipl-Ing.Dr.techn. Thomas Bednar für seine gute Betreuung, seine wertvollen Ratschläge und Anmerkungen sowie für die Möglichkeit, meine Diplomarbeit am Institut für Bauphysik und Bauakustik zu schreiben, bedanken.
Ein besonderes Dankeschön geht an Frau Univ.Ass.Dipl.-Ing.Dr.techn. Azra Korjenic, die trotz vieler anderer Arbeiten stets für mich Zeit gehabt hat und mir immer geduldig und verständnisvoll mit Rat und Tat bei meiner gesamten Arbeit zur Seite gestanden ist.
An dieser Stelle darf ich auch Herrn Dipl.-Ing. Mario Sofic für seine Unterstützung bei den Simulationsdurchführungen recht herzlich danken.
Für die Vorbereitungen der Laborversuche möchte ich noch Herrn Dipl.-Ing. Manfred Grüner und Herrn Ing. Georg Eger meinen Dank aussprechen.
Abschließend möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Instituts für das gute Arbeitsklima, die angenehme Atmosphäre sowie die nette Aufnahme bedanken.

Ein ganz besonderer Dank gilt aber auch meinen Eltern, meinem Bruder und meiner Großmutter, denn ohne ihre moralische und auch finanzielle Unterstützung hätte ich mein Hochschulstudium nicht absolvieren können. Sie haben stets ein offenes Ohr und viel Verständnis für mich gehabt und mir so am Beginn meines Studiums aus einigen moralischen Tiefpunkten geholfen.

Abschließend möchte ich mich noch bei meinen Freunden und Studienkollegen für ihre Hilfe und Unterstützung während meines Studiums bedanken.

INHALTSVERZEICHNIS

NOMENKLATUR 7

1 **EINLEITUNG BZW. ZIELSETZUNG** 9

2 **GRUNDLAGEN** 10

3 **EINFLUSSFAKTOREN AUF DAS RAUMKLIMA** 14

3.1 **Arten der thermischen Energiespeicherung** 21

3.1.1 Sensible Speicherung thermischer Energie 21

3.1.2 Latente Speicherung thermischer Energie 22

3.1.3 Chemische Speicherung thermischer Energie 25

4 **ALLGEMEINES ÜBER PHASE CHANGE MATERIAL (PCM)** 26

4.1 **Anforderungen an PCM** 26

4.1.1 Schmelz- und Erstarrungsverhalten 26

4.1.2 Erstarrungsrate 27

4.1.3 Unterkühlung 27

4.1.4 Phasenstabilität 27

4.1.5 Langzeitstabilität 27

4.1.6 Wärmeleitfähigkeit 28

4.1.7 Volumenausdehnung 28

4.1.8 Korrosivität 28

4.1.9 Ökologie 29

4.2 **Arten von Latentwärmespeichermaterialien und ihre Eigenschaften** 30

4.2.1 Anorganische PCM-s – Salzhydrate 32

4.2.2 Organische PCM-s 33

4.2.2.1 Paraffine 33

4.2.2.2 Fettsäuren und Fettsäureester 34

4.2.2.3 Alkohole 34

4.3 **Konfektionierung der Latentwärmespeichermaterialien** 36

5 **EXPERIMENTELLE ERMITTLUNG DER SPEZIFISCHEN WÄRMEKAPAZITÄTEN AUSGEWÄHLTER PCM-S** 39

5.1 **Versuchsaufbau** 40

5.2 **Versuchsdurchführung und -auswertung** 42

5.3 **Ergebnisse** 45

5.3.1 Wasserprobe 45

5.3.2 PCM Rubitherm RT20 47
5.3.3 PCM Rubitherm RT27 48
5.3.4 PCM BASF Micronal 23℃ 49

6 **SIMULATIONSTECHNISCHE ÜBERPRÜFUNG DER THERMISCHEN EIGENSCHAFTEN VON BAUTEILEN MIT PCM** 50
6.1 **Beschreibung des Gebäudes** 51
6.1.1 Klima 51
6.1.2 Aufbauten 52
6.1.3 Nutzung 53
6.1.4 Variation des Fensteranteils 54
6.2 **Zeitschritt- und Schichtdickenvariation** 55
6.2.1 Ergebnisse der Zeitschrittvariationen 56
6.2.2 Ergebnisse der Schichtstärkenaufteilungen 57
6.3 **Thermisches Verhalten ohne PCM-Einsatz** 59
6.3.1 Niedriger Fensteranteil 59
6.3.2 Mittlerer Fensteranteil 61
6.3.3 Hoher Fensteranteil 63
6.3.4 Zusammenstellung der Ergebnisse 65
6.4 **Thermisches Verhalten mit PCM-Einsatz** 66
6.4.1 PCM in gesamter Wand 66
6.4.1.1 Variante A – PCM 20/22℃ (22.000 J/(kg.K)) 66
6.4.1.2 Variante B – PCM 22/24℃ (22.000 J/(kg.K)) 68
6.4.1.3 Variante C – PCM 26/28℃ (22.000 J/(kg.K)) 69
6.4.1.4 Variante D – PCM 26/28℃ (34.000 J/(kg.K)) 70
6.4.1.5 Zusammenfassung der Ergebnisse 72
6.4.2 Unterschiedliche Lage und Stärke der PCM-Schicht im Ziegelmauerwerk 74
6.4.2.1 Variante 1 74
6.4.2.2 Variante 2 77
6.4.2.3 Variante 3 79
6.4.2.4 Variante 4 81
6.4.2.5 Variante 5 83
6.4.2.6 Variante 6 85
6.4.2.7 Zusammenfassung der Ergebnisse 86

7 **SCHLUSSFOLGERUNG** 95

QUELLENVERZEICHNIS 97

Nomenklatur

Größe	Symbol	Einheit
Temperaturleitfähigkeit	a	cm^2/s
Breite/Länge/Höhe	B/L/H	m
spezifische Wärmekapazität	c, C	J/(kg.K)
spezifische Wärmekapazität der Probe	c_{Probe}	J/(kg.K)
spezifische Wärmekapazität des Wassers	c_{H2O}	J/(kg.K)
Schichtdicke	d	cm
Temperaturdifferenz / -änderung	ΔT, Δt	°C, K
spezifische Schmelzenthalpie	$\Delta h_{Schmelz}$	J
Gesamtenergiedurchlassgrad d. Verglasung	g	-
Heizlast	HL	kWh
Heizwärmebedarf	HWB	$kWh/(m^2.a)$
Kühlbedarf	KB	$kWh/(m^2.a)$
Kühllast	KL	kWh
Wärmeleitfähigkeit	λ	W/(m.K)
Masse	m	g bzw. kg
Masse des Dewars (Thermosflasche)	m_D	g
Masse des Wassers	m_{H2O}	g
Masse des Probekörpers	m_P	g
Wärmemenge	Q	J
Wärme - gesamt	Q_{Gesamt}	J
Wärme - latent gespeichert	Q_{latent}	J
Wärme - sensibel gespeichert	$Q_{sensibel}$	J
Dichte	ρ	kg/m^3
Entropie	δS	$J.K^{-1}$
Temperatur	T, t	°C, K
Raumlufttemperatur	t_l	°C
operative Raumtemperatur	t_{op}	°C
Temperatur im Dewar (Thermosflasche)	T_D	°C
Mischtemperatur	T_m	°C
Temperatur des Probekörpers	T_p	°C
Temperatur des Phasenüberganges (Schmelzpunkt)	T_{ph}	°C
Umgebungstemperatur (Temperatur d. Wände)	t_u	°C
Zeit	τ	sek, min, h
innere Energie	U	J
Arbeit	W	J
dissipierte Arbeit	δW_{diss}	J
Verschattungsfaktor	z	-

Abkürzungen	
Abbildung	Abb.
Außenwand	AW
beziehungsweise	bzw.
zirka	ca.
das heißt	d.h.
expandiertes Polystyrol	EPS
et cetera	etc.
Wasser	H_2O
Hochlochziegel	HZ
Innenwand	IW
maximal	max.
Predicted percentage of dissatisfied	PBD
Phase Change Material	PCM
Predicted mean vote	PMV
zum Beispiel	z.B.

1 Einleitung bzw. Zielsetzung

Das eigentliche Ziel dieser Arbeit ist es, experimentell die spezifischen Wärmekapazitäten dreier ausgewählter „Phase Change Materials“ (nachfolgend mit PCM-s abgekürzt) zu bestimmen und anschließend den Einfluss ihrer thermischen Eigenschaften auf Bauteile rechnerisch zu überprüfen.
Das Endziel der vorliegenden Arbeit ist, die Auswirkungen auf den HWB, KB und die sich einstellende sommerliche maximale Raumtemperatur, bei Verwendung von Bauteilen mit PCM-Materialien, für ein Einfamilienhaus mit Hilfe von Simulationen zu überprüfen.

Damit sollten Grundlagen für die Entwicklung eines neuen Außen- und Zwischenwandziegels mit PCM-Füllungen geschaffen werden.
Diese neue Ziegelgeneration sollte durch die PCM-Füllungen eine hohe Wärmespeicherfähigkeit der Räume gewährleisten und damit effektiv zur Verbesserung des sommerlichen Wärmeschutzes und der damit einhergehenden Minimierung des Energiebedarfes für Klimatisierungszwecke beitragen.

Latentwärmespeicher sind optimal dazu geeignet die Speicherkapazität von Räumen zu erhöhen, da sie auftretende Temperaturspitzen effizient abpuffern und so zu einem behaglicheren Raumklima beitragen. Diese passive Klimatisierung der Räume hat zur Folge, dass Energie für Kühlzwecke effizient eingespart werden kann, denn Ziel in naher Zukunft wird es sein, auf Raumklimatisierungen weitestgehend zu verzichten. [Hu07]

Latentwärmespeicher stellen somit innovative Produkte dar, die zu einer effizienten Energieeinsparung und damit verbunden zu einer beträchtlichen CO_2-Minderung im Bausektor beitragen können. [Hu07]

Der erste Teil dieser Arbeit zeigt kurz die Faktoren auf, die das Raumklima beeinflussen können und geht dann auf die Arten der Wärmespeicherung ein. Anschließend wird noch auf die Anforderungen, die bei der PCM-Wahl beachtet werden müssen, sowie die für das Bauwesen wichtigsten PCM-Stoffe eingegangen.
Der zweite Teil stellt die Ergebnisse der experimentellen Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität für die untersuchten PCM-Proben dar.
Am Ende werden dann noch mit Hilfe des Simulationsprogramms „buildopt“ die Auswirkungen auf ein Einfamilienhaus, bei Verwendung von PCM-Materialien in den Wänden, diskutiert.

2 Grundlagen

Einleitend wird auf einige wichtige physikalische Grundlagen, die für das Verfassen dieser Arbeit notwendig waren, eingegangen.

Anfangs werden einige thermodynamische Grundlagen erläutert, wobei zunächst kurz auf die ersten 2 Hauptsätze der Thermodynamik – von insgesamt 4 – eingegangen wird.

- ***1. Hauptsatz der Thermodynamik***

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik kann aus dem Energieerhaltungssatz abgeleitet werden. Jedes System besitzt eine innere Energie, welche sich nur durch den Transport von Energie in Form von Arbeit W und/oder Wärme Q über die Grenze des Systems ändern kann.

$$dU = \delta Q + \delta W \tag{2-1}$$

Die Gesamtenergie in einem abgeschlossenen thermodynamischen System bleibt daher immer konstant.
Somit können sich zwar verschiedene Energieformen ineinander umwandeln, aber Energie kann weder geschaffen noch zerstört werden. Daher ist auch ein Perpetuum Mobile erster Art unmöglich, d.h. ein System, das keine Energie benötigt, um Arbeit zu verrichten.
Einschränkungen bezüglich der Umwandelbarkeit von Wärme in Arbeit ergeben sich erst durch den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik. [Völ05]

- ***2. Hauptsatz der Thermodynamik***

Der zweite Hauptsatz beschäftigt sich hauptsächlich mit Gleichgewichtszuständen von Systemen und mit jenen Prozessen, die Zustandsänderungen in diesen Systemen ergeben.

Für den zweiten Hauptsatz kann eine allgemein gültige mathematische Formulierung mit Hilfe der Zustandsgröße Entropie, die ein Maß für die Unordnung in einem System ist oder ein Maß, wie nahe ein System dem Gleichgewicht ist, für alle geschlossenen Systeme in folgender Form angegeben werden:

$$\delta S = \frac{\delta Q}{T} + \frac{\delta W_{diss}}{T} \tag{2-2}$$

Der Term δW_{diss} steht für die im System dissipierte Arbeit und ist immer positiv.

Daraus folgt, dass die *Entropie innerhalb eines Systems nicht abnehmen kann.*

Wie bekannt ist, kann *thermische Energie nur von einem Körper höherer Temperatur auf einen Körper niedrigerer Temperatur übertragen werden*. Dieser Prozess ist ohne Zufuhr weiterer Energie auch *irreversibel*. [Völ05]

- ***Wärmeübertragung***

Die Wärmeübertragung ist der Transport thermischer Energie von einem Ort höherer Temperatur zu einem Ort niedrigerer Temperatur. Dies kann durch 3 unterschiedliche Arten erfolgen bzw. durch Kombinationen von diesen:

  - ***Wärmeleitung***

    Darunter versteht man den Energietransport mittels Materie, aber ohne Bewegung der Materie. Aufgrund des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik fließt Wärme von selbst immer nur in Richtung geringerer Temperatur.
    Ein Beispiel für die Wärmeleitung wäre der Wärmetransport vom Innenraum nach außen über Bauteile.
    Ein Maß für die Wärmeleitung ist die Wärmeleitfähigkeit.

  - ***Wärmekonvektion***

    Hier geschieht der Energietransport der Materie mittels Bewegung der Materie, d.h. die Wärmebewegung erfolgt durch bewegliche Teilchen wie Moleküle oder Atome, die die thermische Energie in Form von in ihnen gespeicherter Schwingungsenergie weitergeben.
    Ein Beispiel für konvektiven Wärmetransport ist der Transport thermischer Energie vom Innenraum nach außen mit Hilfe der Luftströmung.

  - ***Wärmestrahlung***

    Unter Wärmestrahlung versteht man den Energietransport ohne Materie mit Hilfe elektromagnetischer Wellen.
    Dies sind beispielsweise der Eintrag von Wärme durch die Sonneneinstrahlung oder der Strahlungswärmeaustausch von Oberflächen mittels Infrarotstrahlung.

Im Allgemeinen unterscheidet man zwischen **stationärem** und **instationärem Wärmetransport**.
Der *stationäre Wärmetransport* stellt eine zulässige Vereinfachung zur Betrachtung der thermischen Eigenschaften eines Gebäudes dar. Dabei geht man von konstanten

Temperaturen der einzelnen Bauteile aus. Auch die übertragenen Leistungen zwischen den Bauteilen sind zeitunabhängig. Diese Forderungen können jedoch nur unter Annahme unerschöpflicher Wärmequellen erreicht werden. Das heißt, in diesem Fall wird von konstanten Randbedingungen ausgegangen.
Im Allgemeinen ist jedoch der Wärmetransport zeit- und klimaabhängig, da die Bauteile ständig sich ändernden Temperaturen ausgesetzt sind. Diese Erwärmungs- und Abkühlungsvorgänge werden mit Hilfe des *instationären Wärmetransportes* beschrieben. [Völ05]
Mathematisch kann dies mit Hilfe der Differentialgleichung von J.B.J.Fourier beschrieben werden.

$$\frac{dt}{d\tau} = a \cdot \frac{d^2t}{dx^2}\ ,\ a = \frac{\lambda}{c \cdot p} \tag{2-3}$$

Für den stationären Fall gilt: $\frac{dt}{d\tau} = 0$ und somit $\frac{d^2t}{dx^2} = 0$. [Völ05]

- ***Spezifische Wärmekapazität***

Die nachstehenden Erläuterungen stellen die Grundlagen für die experimentelle Bestimmung der Wärmekapazitäten im Kapitel 5 dar.

Die Temperatur gibt Auskunft über den Wärmezustand eines Körpers und ist somit ein Maß für die Bewegungsenergie der Atome, aus denen der Körper besteht.
Betrachtet man einen Körper, dem äußere Energie zugeführt wird kann man einerseits feststellen, dass mit steigender Bewegungsenergie dessen Temperatur steigt, während andererseits bei sinkender Bewegungsenergie die Temperatur des Körpers abnimmt. [Fhm07]
Als Wärme bezeichnet man die Energie der ungeordneten Bewegung der Moleküle eines Körpers und man kann Wärme als eine Energieform der Materie deuten. [Lex56]

Bringt man 2 Körper mit unterschiedlichen Temperaturen zusammen, so wird Energie (Wärme) so lange vom Körper mit der höheren Temperatur zum Körper mit der niedrigeren Temperatur abfließen, bis sich ein Temperaturausgleich zwischen beiden einstellt.
Daher ist die Wärmezufuhr stets mit einer Temperaturerhöhung verbunden. Die Ausnahme bildet jedoch ein Phasenübergang (z.B. Schmelzen), denn dann wäre die Temperaturänderung $\Delta T = 0$.

Das heißt, wird einem Körper die Wärmemenge dQ zugeführt, kommt es zur Erhöhung der Temperatur T um dT und diese Eigenschaft des Körpers, Wärme aufzunehmen, wird als Wärmekapazität C bezeichnet.

$$C = \frac{dQ}{dT} \tag{2-4}$$

Die Wärmekapazität C ist abhängig von der Art des Körpers, seiner Masse und Stoffmenge. [Fhm07].

In der Praxis unterscheidet man zwischen massebezogener und volumbezogener Wärmekapazität.

Unter **massebezogener Wärmekapazität c** versteht man jene Energie (Wärmemenge) in kJ (=kWs), die man 1kg eines Stoffes zuführen muss, um seine Temperatur um 1K zu erhöhen bzw. die man 1kg eines Stoffes abführen muss, um seine Temperatur um 1K zu erniedrigen.

Die Einheit dieser Wärmekapazität ist $\frac{kJ}{(kg.K)}$.

Die **volumbezogene Wärmekapazität C** ist jene Wärmemenge in kJ, die $1m^3$ eines Stoffes zugeführt werden muss, um seine Temperatur um 1K zu erhöhen bzw. $1m^3$ eines Stoffes abgeführt werden muss, um seine Temperatur um 1K zu erniedrigen.
Diese Wärmekapazität wird auch als Wärmespeicherzahl bezeichnet.

Die Einheit ist $\frac{kJ}{(m^3.K)}$.

Ist die massebezogene Wärmekapazität bekannt, kann durch Multiplikation mit der Rohdichte die volumbezogene Wärmekapazität berechnet werden. [Sta89]

3 Einflussfaktoren auf das Raumklima

Die forcierten Verbesserungen des winterlichen Wärmeschutzes in den letzten Jahren, durch bessere Dämmungen der Gebäudehüllen, führten zu Reduktionen der Wärmeverluste und somit zur gewünschten Verringerung des Heizwärmebedarfs.
Die Maßnahmen zur Verbesserung des bauphysikalischen Verhaltens im Winter müssen jedoch vor allem auch im Sommer untersucht werden.
So gewinnt auch der „sommerliche Wärmeschutz“, dessen Aufgabe es ist, kritische Innentemperaturen in Bezug auf die Behaglichkeit weitgehend zu vermeiden, immer mehr an Bedeutung. [Sch07]

Den größten Einfluss auf unser sommerliches Raumklima haben die Außenlufttemperatur sowie die Sonneneinstrahlung.
Die nachstehenden Abbildungen zeigen die grafische Auswertung der mittleren Jahresaußenlufttemperatur für die Jahre 1961 bis 1990 für den Standort Wien (Schwechat) und die direkte solare Einstrahlung auf eine nord-, ost-, süd- und westseitig orientierte Wand sowie eine horizontale Fläche.

Wie erwartet, kann während der Sommermonate (ca. Stunde 4300 bis Stunde 5900) eine deutliche Erhöhung der Strahlungsmenge gegenüber den Wintermonaten verzeichnet werden (siehe Abbildung 2). Allerdings fällt auch auf, dass für eine südorientierte Wand die Strahlungsmenge im Sommer sinkt. Dies kann mit Hilfe des Sonnenstandes erklärt werden, denn im Winter steht die Sonne flacher als im Sommer und liefert damit einen höheren Beitrag bei der direkten solaren Einstrahlung auf südorientierte Fassaden.

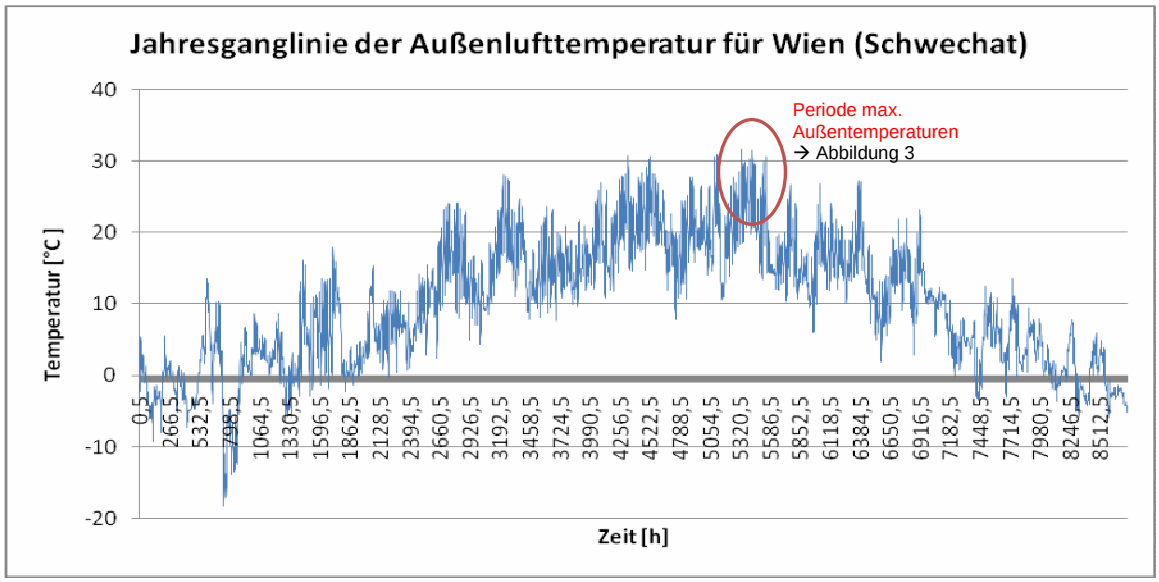


Abbildung 1: Jahresaußentemperaturen - Standort: Wien (Schwechat) [eigene Abbildung, Daten: IWEC]

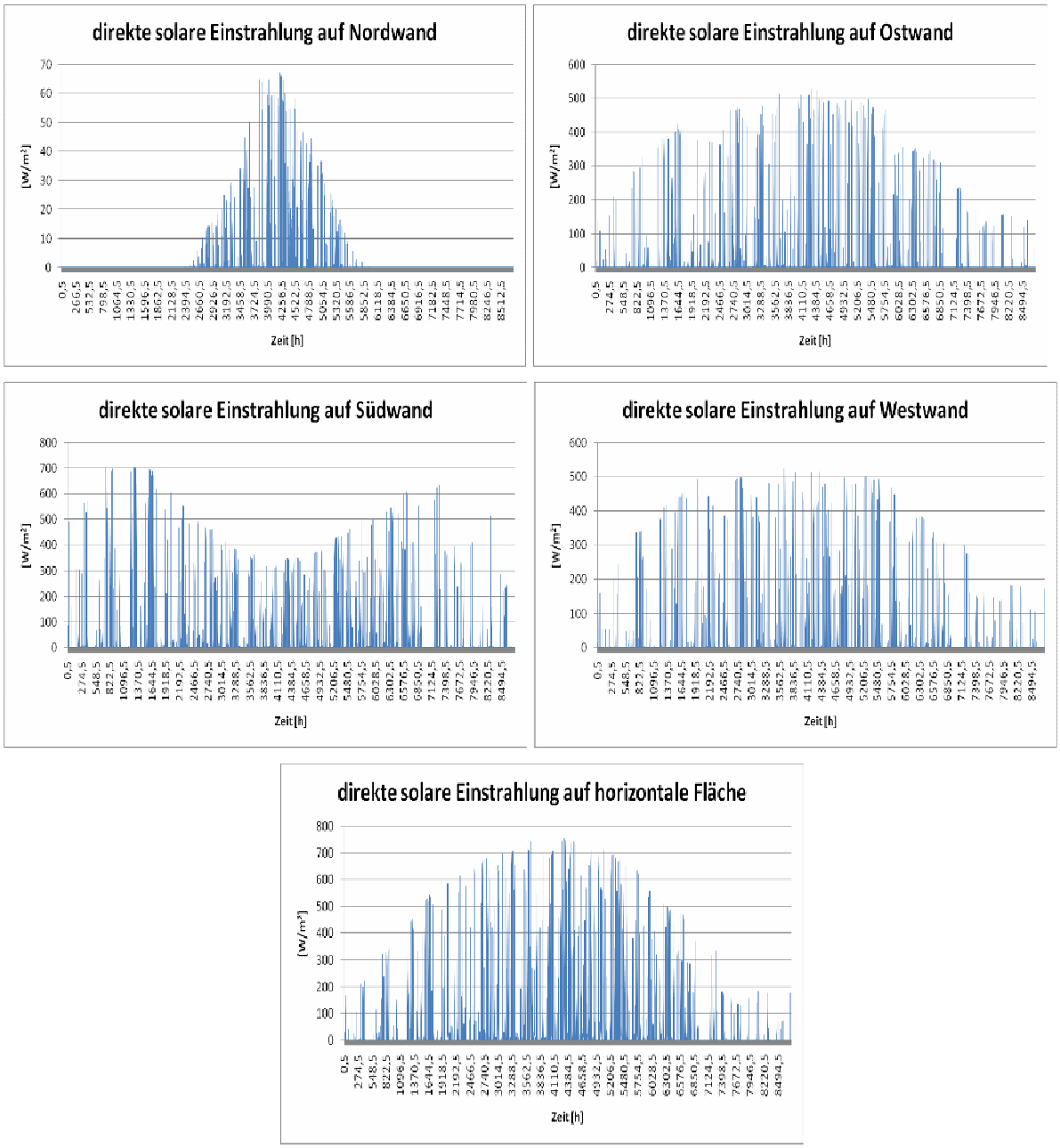


Abbildung 2: Direkte jährliche solare Einstrahlung auf eine Nord-, Ost-, Süd- und Westwand sowie auf eine horizontale Fläche – Standort: Wien (Schwechat) [eigene Abbildung, Daten: IWEC]

Zeichnet man nun jene Periode aus der Jahresganglinie (Abbildung 1 – rote Markierung) heraus, in der maximale Außenlufttemperaturen auftreten und legt anschließend noch einen Behaglichkeitsbereich (22℃ bis 26℃) fest, so erke nnt man, dass sich an einigen Tagen durchaus unbehagliche Außenlufttemperaturen einstellen, die wiederum das Raumklima von Gebäuden negativ beeinflussen können.

Abbildung 4 zeigt für die zuvor gewählte Periode den Strahlungseintrag auf die entsprechend orientierten Flächen.

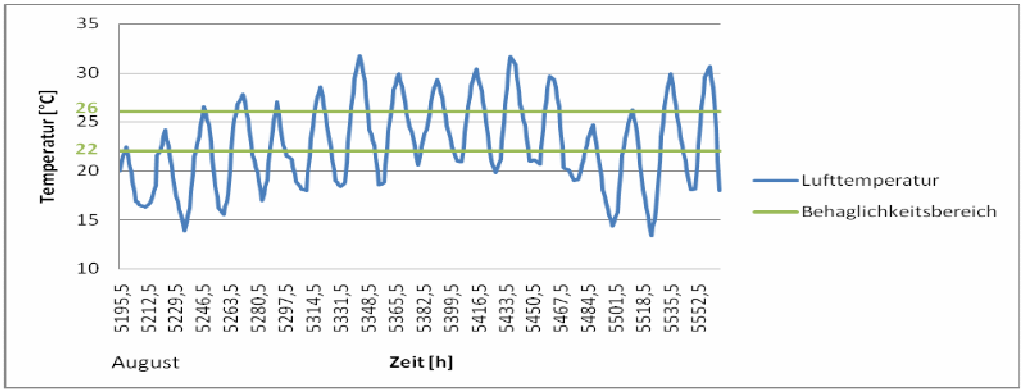


Abbildung 3: gewählte Periode, in der maximale Außenlufttemperaturen auftreten [eigene Abbildung, Daten: IWEC]

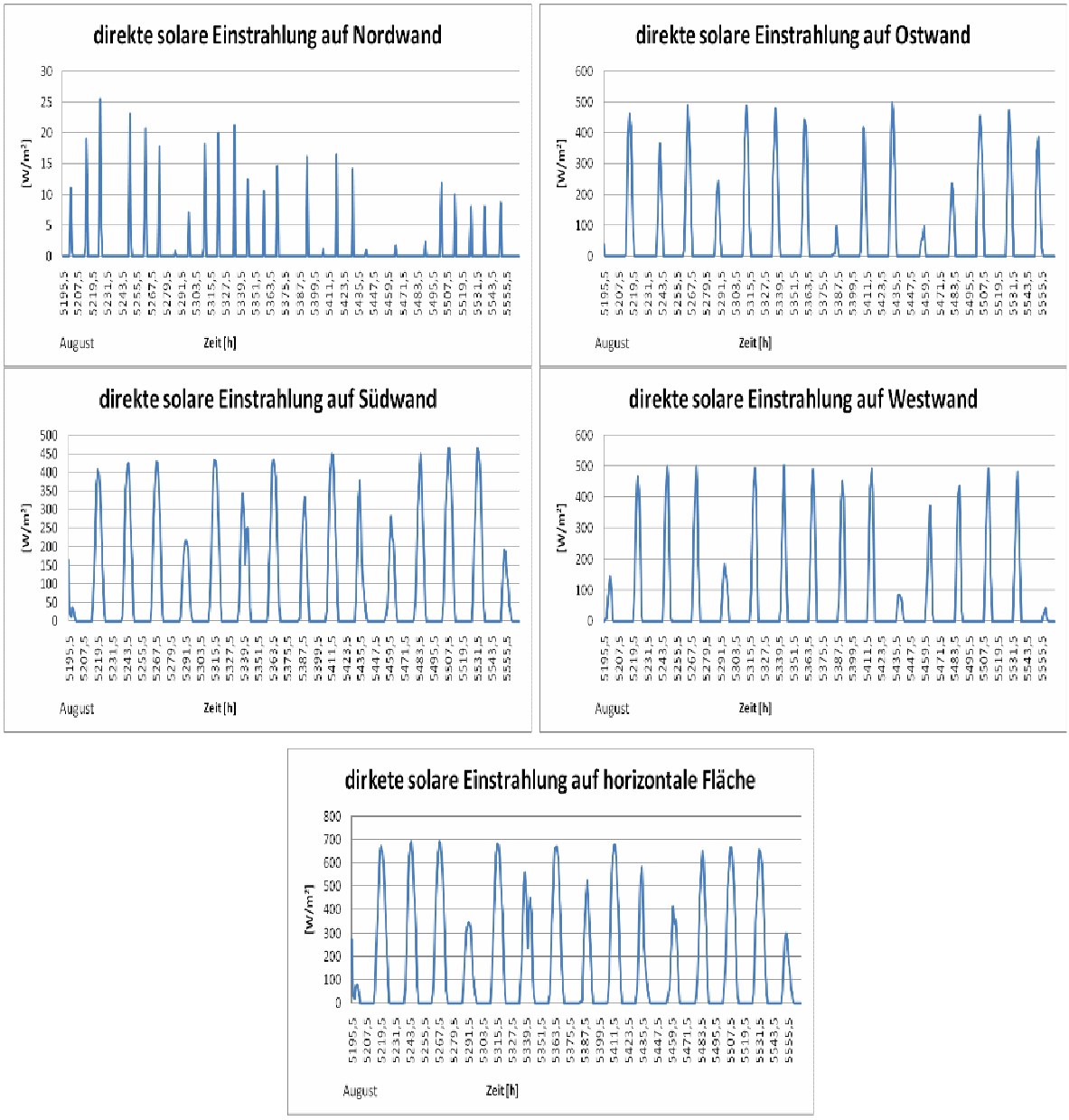


Abbildung 4: Direkte solare Einstrahlung für gewählte Periode mit max. Außentemperaturen auf eine Nord-, Ost-, Süd- und Westwand sowie auf eine horizontale Fläche – Standort: Wien (Schwechat) [eigene Abbildung, Daten: IWEC]

Abbildung 5 stellt die direkte solare Einstrahlung für einen Tag, an dem Temperaturen über 30℃ auftreten (beispielsweise für den 11. August), für verschieden orientierte Flächen dar.

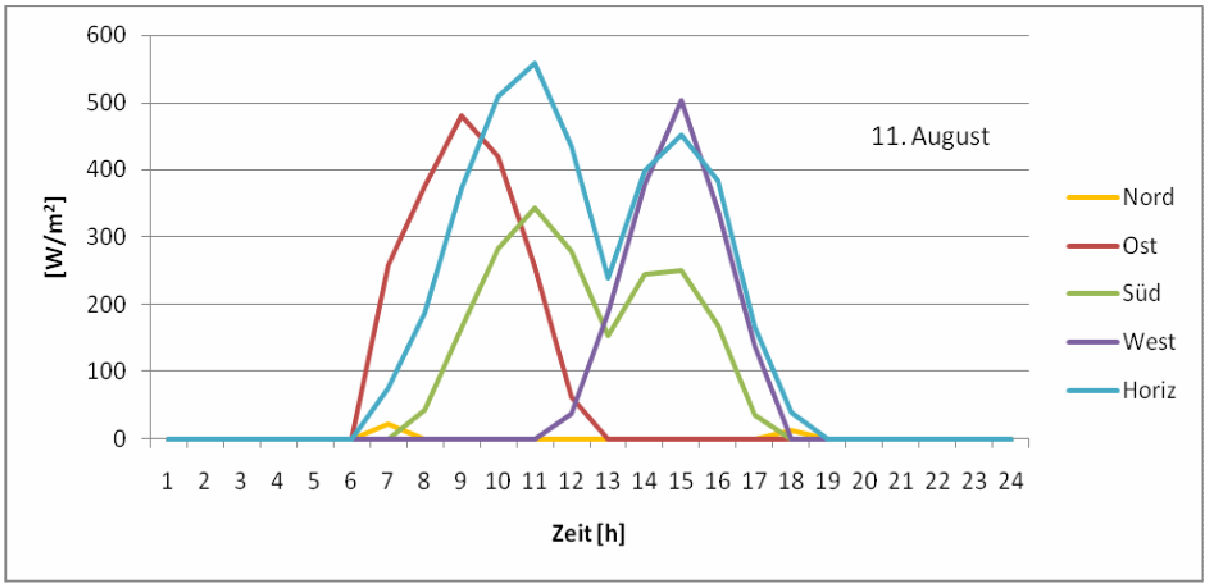


Abbildung 5: direkte solare Einstrahlung für verschieden orientierte Flächen [eigene Abbildung, Daten: IWEC]

Hier ist nochmals deutlich erkennbar, dass in den Sommermonaten an den Ost- und Westfassaden sowie an den horizontalen Flächen mit erhöhten Strahlungseinträgen zu rechnen ist.

Zusammenfassend kann man somit festhalten, dass die Sonneneinstrahlung vor allem durch die Fenster und die Wärmeleitung der Gebäudehülle ins Gebäudeinnere den größten Einfluss auf das sommerliche Raumklima ausmacht.

Wie aus den obigen Abbildungen ersichtlich ist, kann die Leistung der direkten Sonneneinstrahlung durchaus 500W/m^2 oder mehr betragen.

Zu dieser Leistung kommen auch noch die Beiträge der diffusen und reflektierten Sonneneinstrahlung hinzu, die jedoch zirka die Hälfte der Leistung der direkten Sonneneinstrahlung ausmachen.

Der Strahlungseintrag wird im Allgemeinen von einer Reihe von Faktoren beeinflusst wie Jahres- und Tageszeit, Standort, Seehöhe, Wetter (Bewölkung, Nebel,…), Nachbarbebauung, auskragende Bauteile, Sonnenschutz, Qualität der Fenster, usw.

Ein Teil dieser Strahlung gelangt durch die Fenster ins Gebäudeinnere und bewirkt dort eine Raumlufterwärmung – dahinter steckt das simple Prinzip des *Treibhauseffektes*:

das bedeutet, dass die energiereichen, kurzwelligen Anteile der Sonnenstrahlung die Fensterscheiben durchdringen, im Rauminneren auf Gegenstände treffen und diese

schließlich erwärmen. Für die abgegebene langwellige Wärmestrahlung sowie die erwärmte Luft ist das Glas jedoch nicht durchlässig und daher verbleibt die Energie im Inneren des Gebäudes.

Die Folge dieser Raumtemperaturerhöhung bewirkt im Sommer eine Verschlechterung des **Raumklimas**, welches von einer Reihe von Umwelteinflüssen abhängig ist, wie beispielsweise Lufttemperatur, -feuchte, und -geschwindigkeit, Sonneneinstrahlung, Infrarotstrahlung der Oberflächen, Schallpegel, usw.
Einerseits ist für jeden Nutzer ein anderes Klima behaglich und andererseits lässt sich auch eine starke Korrelation zwischen der Arbeitsleistung und dem vorhandenen Raumklima feststellen.
Die nachstehende Grafik verdeutlicht die Abnahme der geistigen Leistungsfähigkeit mit dem Anstieg der Raumtemperatur. [Küh06]

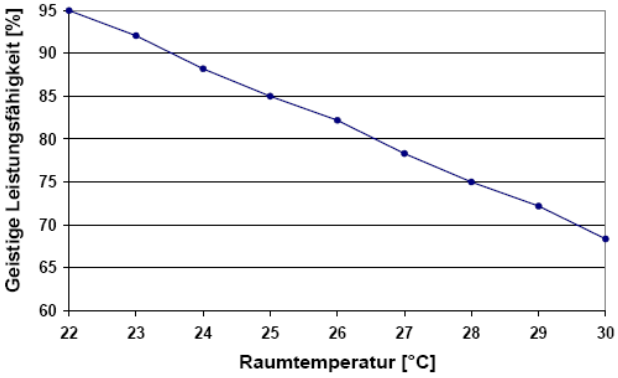


Abbildung 6: Geistige Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit von der Raumtemperatur [Wyo86]

Eine Methode zur Beurteilung der thermischen Behaglichkeit eines Raumes ist in der Norm EN ISO 7730 enthalten. Dabei werden Vorhersagen, ausgehend von den physiologischen Vorgängen im Wärmehaushalt des Menschen, anhand personenbezogener (z.B. Kleidung) und physikalischer Größen (z.B. Raumlufttemperatur, relative Luftfeuchte, usw.) über die thermische Behaglichkeit für die Nutzer des Raumes getroffen. Dazu werden der „PMV – und der PPD – Index“ herangezogen.
Unter dem *PMV – Index* versteht man den „predicted mean vote“, also dem vorausgesagten mittleren Votum einer Probandengruppe bei einer Befragung.
Der *PBD – Index* („predicted percentage of dissatisfied“) hingegen ist jener Prozentsatz an Menschen, die das Umgebungsklima als zu warm oder zu kalt empfinden, also der Prozentsatz der Unzufriedenen.
Das bedeutet, dass man niemals ein Raumklima schaffen kann, bei dem auch wirklich 100% der Rauminsassen zufrieden sind, denn es wird stets zirka 10% an Nutzern geben, die mit dem vorhandenen Klima unzufrieden sind.

Dies hat zur Folge, dass es stets unzufriedene Rauminsassen geben wird, denn mit 100% zufriedenen Nutzern kann man nur rechnen, wenn jeder die Möglichkeit hätte, sein Raumklima selbst einzustellen.

In Abbildung 7 sind nochmals die Faktoren zur Beeinflussung des Innenklimas grafisch dargestellt.

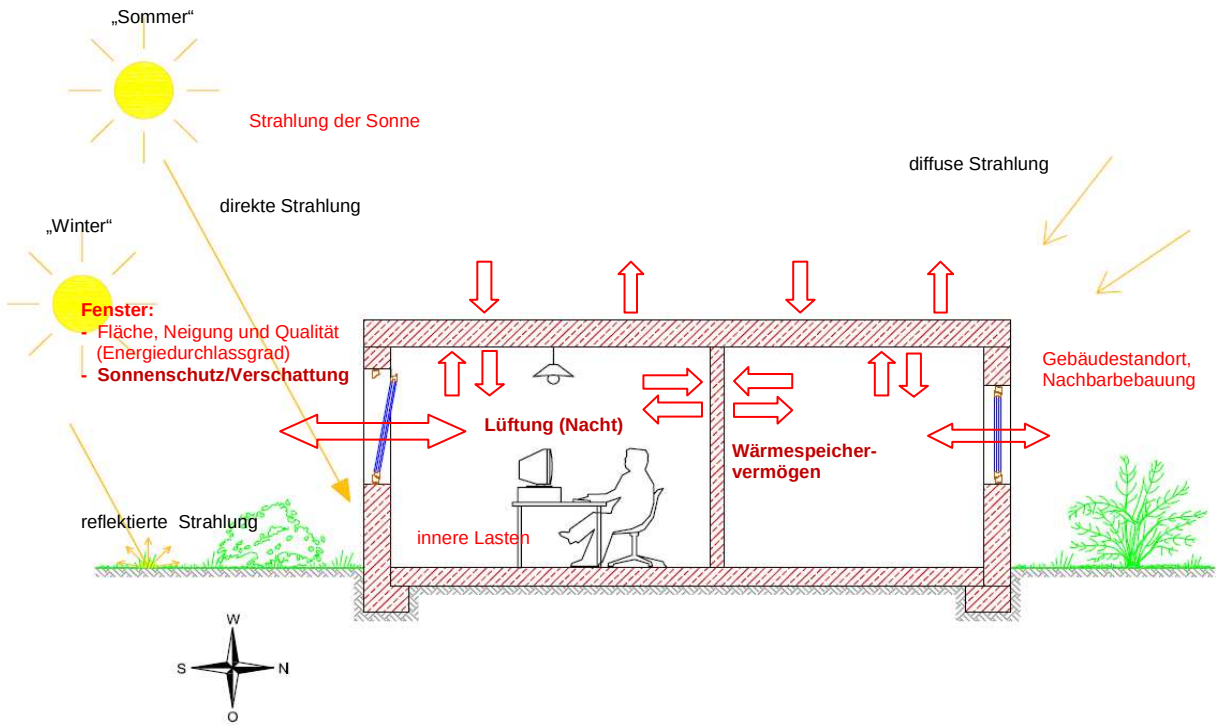


Abbildung 7: Einflussfaktoren auf das Raumklima [eigene Abbildung]

Zur Erreichung eines angenehmen Innenklimas können folgende Faktoren wesentlich beitragen:

- Sonnenschutz/Verschattung
- Nachtlüftung
- Wärmespeichervermögen der Konstruktion

Um den solaren Eintrag durch transparente Außenbauteile zu reduzieren, sind Sonnenschutzmaßnahmen wie beispielsweise Rollläden oder Jalousien hervorragend geeignet.

Auch die intensive Nachtlüftung trägt zu einem behaglichen Raumklima während der Sommermonate bei, da dadurch die Bauteile abgekühlt werden. So können diese wieder tagsüber Wärme speichern.

Daraus ergibt sich, dass einer der wichtigsten Einflussfaktoren auf das Innenklima die **Wärmespeicherfähigkeit der Bauteile** ist.

Die Temperaturerhöhung im Inneren eines Gebäudes wird umso geringer ausfallen, je mehr Wärmemenge ein Gebäude speichern kann.

Somit scheint der Einsatz von Latentwärmespeichermaterialien (PCM-s – „Phase Change Materials“) in Bauteilen aufgrund ihrer hohen Wärmespeicherfähigkeit ideal dazu geeignet zu sein, sommerliche Temperaturspitzen zu vermeiden und effektiv zu einem behaglicheren thermischen Raumklima, vor allem in den Sommermonaten, beizutragen.

3.1 Arten der thermischen Energiespeicherung

Prinzipiell kann thermische Energie auf 3 unterschiedliche Arten sowie Kombinationen aus diesen gespeichert werden:

- sensible Speicherung („sensible heat storage“)
- latente Speicherung („latent heat storage“)
- chemische Speicherung [Döt06]

3.1.1 Sensible Speicherung thermischer Energie

Unter thermischer Energie versteht man im Allgemeinen jene Energie, die in der ungeordneten Bewegung der Moleküle oder Atome gespeichert ist. Oft wird diese Energie auch als Wärme oder Wärmeenergie bezeichnet.

Die Speicherung dieser Wärme ist bei sensiblen Speichermaterialien stets mit einer Temperaturerhöhung verbunden, die jener der gespeicherten Wärmemenge proportional ist. Dieser Zusammenhang wird nochmals in Abbildung 9 (blaue Kurve) verdeutlicht.

Da die eingespeicherte Wärme aufgrund der Temperaturerhöhung fühlbar ist, spricht man in diesem Zusammenhang auch von der **fühlbaren** bzw. **sensiblen** Wärmespeicherung.

Die Speicherung von thermischer Energie erfolgt somit entsprechend der spezifischen Wärmekapazität *c* des jeweiligen Mediums. [Döt06], [Ver07]

Um die zu speichernde Energiemenge berechnen zu können, benötigt man die Menge des Speichermediums *m*, die Wärmekapazität des Speichermaterials *c* sowie die Temperaturdifferenz *ΔT*.

$$Q_{sensibel} = m \cdot c \cdot \Delta T \tag{3-1}$$

Die spezifische Wärmekapazität ist eine materialabhängige Größe und beschreibt jene Energie die notwendig ist, um 1 Kilogramm eines Stoffes um 1 Kelvin zu erwärmen.

Beispielsweise benötigt man 0,47 Kilojoule thermische Energie, um 1 Kilogramm Stahl um einen Kelvin zu erwärmen. Im Vergleich dazu benötigt man für die gleiche Menge Wasser 4,183 Kilojoule. [VÖZ08]

Die nachstehende Grafik (Abbildung 8) zeigt die unterschiedlichen Wärmekapazitäten einiger ausgewählter Stoffe.

Auf die Ermittlung der spezifischen Wärmekapazität für 3 ausgewählte PCM-Proben wird im Kapitel 5 eingegangen.

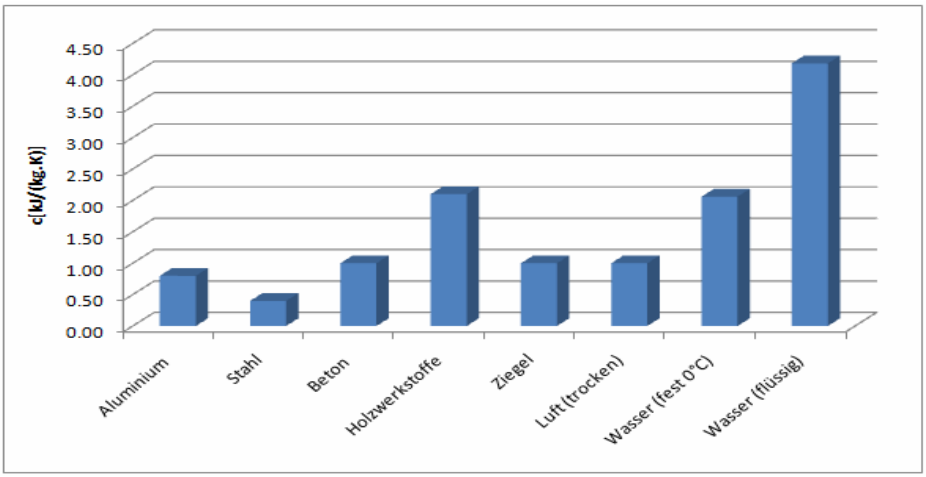


Abbildung 8: spezifische Wärmekapazität für einige ausgewählte Stoffe
[eigene Abbildung – Werte aus [VÖZ08]]

3.1.2 Latente Speicherung thermischer Energie

Die Grundlage für latente Wärmespeicherungen bilden so genannte PCM-s (Phase Change Materials). Diese Stoffe speichern die größten thermischen Energiemengen während einer Phasenumwandlung.
Beispiele für Phasenübergänge können folgende Umwandlungen sein:

fest-flüssig (Schmelzen)	bzw.	flüssig-fest (Erstarren)
flüssig-gasförmig (Verdampfen)	bzw.	gasförmig-flüssig (Kondensieren)
fest-gasförmig (Sublimieren)	bzw.	gasförmig-fest (Resublimieren)

Jene Prozesse mit Übergang in den gasförmigen Aggregatszustand eignen sich für technische Anwendungen nicht, da sie über eine große Volumenausdehnung verfügen.
Für technische Zwecke hingegen ideal geeignet sind jene PCM-s, die den Schmelzvorgang als Phasenumwandlung nutzen. [Ver07]

Wird nun einem festen PCM-Medium thermische Energie zugeführt, beginnt dieses nach Erreichen seines Schmelzpunktes seinen Aggregatszustand – meist von fest nach flüssig – zu ändern. Während dieses Phasenüberganges kommt es zur Absorption einer für das jeweilige PCM bestimmten thermischen Energiemenge – die so genannte Schmelzwärme (bzw. Kristallisationswärme). Das ist jene Energiemenge die notwendig ist, um einen festen Stoff in den flüssigen Aggregatszustand überzuführen.

Da sich während des Phasenüberganges trotz weiterer Wärmeeinspeicherung die Temperatur des PCM-s nicht ändert, spricht man in diesem Zusammenhang auch von der so genannten **latenten** bzw. **versteckten** Wärmespeicherung. Dieser Prozess soll durch die rote Kurve in Abbildung 9 nochmals verdeutlicht werden.
Erst nachdem der PCM-Stoff vollständig geschmolzen ist, kommt es wieder zu einer Temperaturerhöhung (rote Kurve).
Das heißt, vor und nach dem Phasenwechsel wird die eingetragene thermische Energie wieder entsprechend der spezifischen Wärmekapazität sensibel gespeichert und so ist in diesen Bereichen wieder die Energiezunahme direkt durch die Temperaturerhöhung spürbar. Unter Umständen können jedoch die spezifischen Wärmekapazitäten unterschiedliche Werte für die feste und flüssige Phase aufweisen. [Häc02], [Ver07]

Beim umgekehrten Phasenwechsel des PCM-Stoffes, also beim Erstarren, wird die zuvor eingespeicherte Latentwärme (Schmelzwärme) wieder unter konstanter Temperatur abgegeben. In diesem Fall spricht man aber nun von der so genannten Erstarrungswärme. [Häc02], [Ver07]

Das bedeutet aber, dass auch die Umkehrung des Prozesses nutzbar ist, beispielsweise kann eine Flüssigkeit Kälte aufnehmen, erstarrt dann beim Phasenübergang, schmilzt nach anschließender Erwärmung wieder und kühlt damit seine Umgebung ab. Nach diesem Prozess arbeiten beispielsweise heute viele Klimaanlagen in Bürogebäuden. [Häc02]

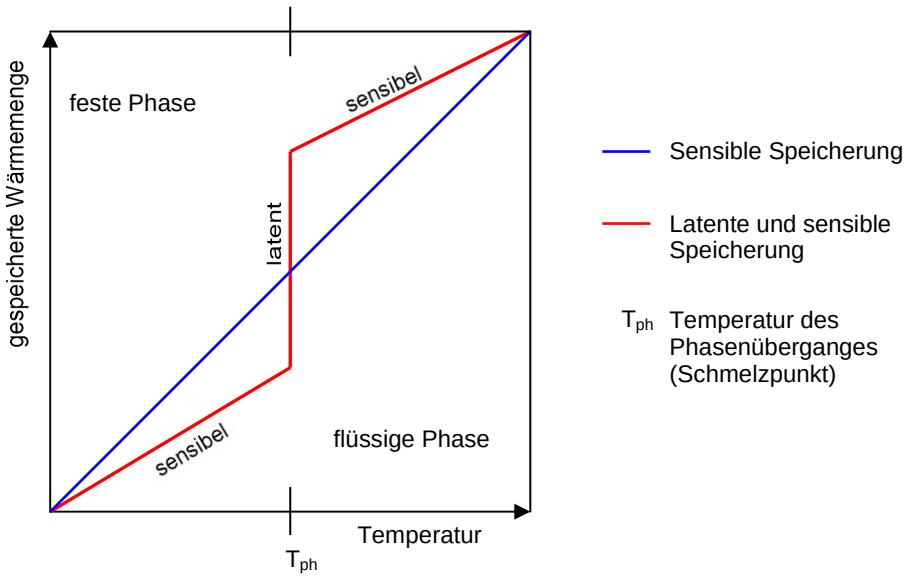


Abbildung 9: Vergleich der sensiblen und latenten Wärmespeicherung [eigene Abbildung]

In Latentwärmespeichern steht somit neben der sensiblen Wärmespeicherung auch die latente Speicherung thermischer Energie zur Verfügung, wobei die latente Speicherung durch die Schmelzenthalpie des Speichermediums und dessen Masse bestimmt wird.

$$Q_{latent} = m \cdot \Delta h_{Schm.} \tag{3-2}$$

$$Q_{Gesamt} = m \cdot c \cdot \Delta T + m \cdot \Delta h_{Schm.} \tag{3-3}$$

$$Q_{Gesamt} = Q_{Sensibel} + Q_{latent} \text{ [Rub07]} \tag{3-4}$$

Wünschenswert sind also jene PCM-s, die neben einer hohen Schmelzenthalpie auch möglichst große spezifische Wärmekapazitäten vor und nach dem Schmelzpunkt haben. [Ver07]

Durch die latente Wärmespeicherung ergeben sich 2 wesentliche Vorteile:

1. In einem kleinen Temperaturbereich ist es möglich, im Vergleich zu sensiblen Speichermedien, große Wärmemengen aufzunehmen und zu speichern und somit hohe Energiedichten zu erreichen.
2. „Da der Phasenübergang bei konstanter Temperatur über einen gewissen Zeitraum von statten geht besteht die Möglichkeit, Temperaturschwankungen zu glätten und Temperaturspitzen zu verhindern.“ [Meh02]

Die nachstehende Abbildung zeigt nochmals, dass mittels geeigneter PCM-Speicher Temperaturspitzen aufgrund der latenten Speicherung thermischer Energie (rote Kurve) sehr gut ausgeglichen werden können, im Vergleich zur sensiblen Wärmespeicherung (blaue Kurve).

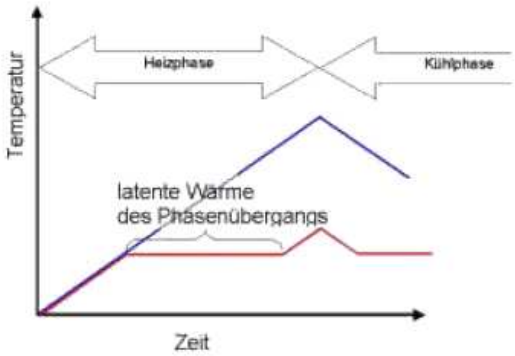


Abbildung 10: Glättung der Temperaturspitzen mittels Latentwärmespeicherung [Häc02]

In welchen Größenordnungen sich diese thermischen Energiespeicherungen während eines Phasenüberganges bewegen können, kann leicht am Beispiel von Wasser gezeigt werden.
Um einen Eiswürfel bei 0℃ zu Wasser zu schmelzen, benötigt man etwa 334kJ/kg latente Wärme. Das ist die gleiche Energiemenge die man benötigen würde, um das 0℃ kalte Wasser auf ca. 80℃ zu erhitzen (sensible Wärme).
Um Wasser in Wasserdampf überzuführen ist noch viel mehr Energie notwendig, nämlich die 5,4fache Menge der thermischen Energie die man benötigt, um 0℃ kaltes Wasser auf 100℃ zu erhitzen. (Abbildung 11)
Das heißt, wird Wasser von seinem festen in seinen dampfförmigen Aggregatszustand übergeführt, werden ca. 76% der benötigten thermischen Energie als latente Wärme und nur ca. 14% als sensible Wärme gespeichert. [Meh02]

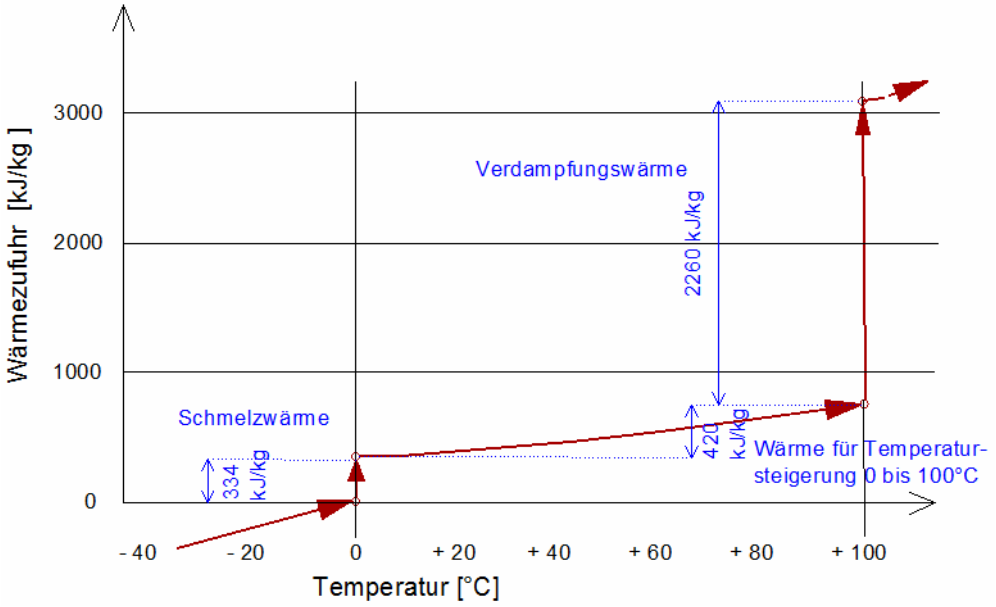


Abbildung 11: Aggregatszustandsänderungen bei Wasser [eigene Abbildung]

3.1.3 Chemische Speicherung thermischer Energie

Die Speicherung der Energie von thermochemischen Systemen erfolgt durch endotherme Reaktionen, die Energieabgabe durch exotherme Reaktionen.
Daraus ergibt sich die zu speichernde Energiemenge durch die Reaktionswärme, den Umwandlungsgrad und die Menge des Speichermediums. Temperaturänderungen können bewirken, dass auch sensible Wärmeanteile hinzukommen. [Döt06]

4 Allgemeines über Phase Change Material (PCM)

4.1 Anforderungen an PCM

Um Latentwärmespeicher technisch auch sinnvoll einzusetzen, müssen diese verschiedene Anforderungen erfüllen. Von besonderer Bedeutung sind vor allem das thermische Speichervermögen, die Zyklenstabilität und die günstigen Wärmetransporteigenschaften. Eine wichtige Rolle spielen aber auch die thermische Stabilität, Korrosivität, Löslichkeit, Volumenausdehnung, Unterkühlung sowie marktwirtschaftliche und ökologische Gesichtspunkte.

4.1.1 Schmelz- und Erstarrungsverhalten

Prinzipiell kann man Latentwärmespeicher in kongruent und inkongruent schmelzende Systeme unterscheiden. Bei den erst genannten handelt es sich um chemisch reine Materialien, die bei einer definierten Temperatur homogen aufschmelzen und beim Abkühlen eine direkte Kristallisation der Anfangsphasenzusammensetzung bewirken. Diese Materialien kommen jedoch im Bauwesen nicht zur Anwendung, denn dort werden nämlich hauptsächlich gemischte Stoffe verwendet, die in einem oder mehreren Temperaturbereichen schmelzen.

Dabei handelt es sich meist um inkongruent schmelzende Systeme, bei denen es beim Schmelzen zu einer Phasentrennung – sprich Stratifikation – kommen kann, die nicht mehr vollständig umkehrbar ist. Dieser Prozess führt in Folge zu einem Verlust der Speicherkapazität, der schließlich sogar bis zum Funktionsausfall führen kann. Um die Stratifikation zu verhindern, wird die PCM-Schmelze mit einer Matrix versehen. Dies kann beispielsweise ein offenporiger Feststoff wie Schäume aus Kunststoff oder ein viskositätserhöhender Zusatz wie Gelatine sein. [Ver07], [Völ05]

Der Schmelzbereich sollte deshalb idealer Weise in einem Bereich zwischen 20℃ und 30℃ liegen, denn PCM-s mit Schmelztemperaturen oberhalb der Raumtemperatur wären quasi wirkungslos, da sie ständig in der festen Phase verbleiben würden. Dasselbe gilt natürlich auch für den umgekehrten Fall.

4.1.2 Erstarrungsrate

Damit eine Schmelze erstarrt ist es notwendig, dass sich zuerst feste Keime bilden, an denen sich dann andere Moleküle anlagern können. Die Geschwindigkeit, mit der die Erstarrung abläuft, ist von Material zu Material unterschiedlich. Niedrige Erstarrungsraten bewirken, dass die eingespeicherte latente thermische Energie nicht mehr von der Wärmeleitfähigkeit des Materials, sondern maßgeblich von der Erstarrungsrate beeinflusst wird. [Völ05]

4.1.3 Unterkühlung

Liegt die Erstarrungstemperatur unterhalb der Schmelztemperatur, spricht man von Unterkühlung des PCM-s. Normalerweise sollte neben der gesamten Nutzung der eingespeicherten thermischen Energie das PCM auch das gleiche Temperaturniveau wie bei der Einspeicherung besitzen.
Um dieses Phänomen zu verhindern, können PCM-s mit so genannten Keimbildnern „geimpft“ werden. Dabei handelt es sich vor allem um chemische Substanzen, die beispielsweise durch strukturelle Ähnlichkeiten die Kristallisation auslösen. Dies kann jedoch zu negativen Auswirkungen auf die spezifische Schmelzwärme und die Schmelztemperatur führen. [Rub07], [Völ05]

4.1.4 Phasenstabilität

Bei einigen Latentwärmespeichern kann es vorkommen, dass sie sich im flüssigen Aggregatszustand aufgrund verschiedener Dichteverhältnisse irreversibel in verschiedene Verbindungen teilen. Die so entstandenen neuen Verbindungen weisen dann ein anderes Schmelz- und Erstarrungsverhalten als der Ausgangsstoff auf. [Rub07], [Völ05]

4.1.5 Langzeitstabilität

PCM-Stoffe durchlaufen während ihrer Nutzungsdauer eine Vielzahl von Be- und Entladezyklen. Aufgrund dieser Zyklen sollte es jedoch bei PCM zu keiner Änderung der wärmetechnischen Eigenschaften kommen, um weiterhin die gleiche Schmelz- und Erstarrungstemperatur sowie Speicherkapazität gewährleisten zu können.
Um eine derartige „Zyklenstabilität“ zu garantieren, sollte ein hygroskopisches Verhalten, Oxydation oder chemische Reaktionen mit den umgebenden Baustoffen unbedingt

vermieden werden, das heißt, die PCM-s sollten über eine geringe chemische Reaktivität verfügen. [Rub07], [Völ05]

4.1.6 Wärmeleitfähigkeit

Um eine schnelle Be- und Entladung des PCM-s zu gewährleisten, ist normalerweise eine hohe spezifische Wärmeleitfähigkeit erforderlich. Verglichen mit der Wärmeleitfähigkeit von Metallen ist die der Salze und Salzhydrate bzw. die der Paraffine eher klein. Trotzdem sind diese beiden Stoffe als PCM-s geeignet. Bei ersteren können entweder aufgrund kleinerer Volumina die Wärmetransportwege im Speichermaterial verkürzt werden oder andererseits die Wärmeleitung durch die Einbringung von gut gedämmten Strukturen (z.B. Metallgitter) beschleunigt werden. Auch Paraffine haben, wie bereits erwähnt, wie fast alle organischen Stoffe geringe Wärmeleitfähigkeiten, doch ist dies nicht als Nachteil anzusehen, da sie dieses scheinbare Manko mit ihrer großen, spezifischen Oberfläche wettmachen können. [Rub07] , [Ver07]

4.1.7 Volumenausdehnung

Kommt es beim Erwärmen bzw. Schmelzen zu einer Volumenzunahme des PCM-s, so werden aufgrund der auftretenden Spannungen Schäden die Folge sein. [Rub07]

4.1.8 Korrosivität

Bei der Wahl eines PCM-s sollte auch besonderes Augenmerk auf sein Verhalten mit anderen Werk- und Baustoffen gelegt werden. Im Idealfall sollte es sich chemisch inert verhalten, d.h. es sollte nicht mit anderen Materialien reagieren, um beispielsweise keine Korrosion zu verursachen.
Paraffine sind in dieser Hinsicht äußerst unproblematisch, da sie fast gegenüber allen Materialien inert sind.
Salz- und Salzhydratschmelzen hingegen reagieren beispielsweise mit Metallen oder Kunststoffen stark korrosiv und weisen weiters auch eine hohe Wasserlöslichkeit auf. Somit erfordern diese PCM-s eine Verkapselung. [Rub07], [Ver07]

4.1.9 Ökologie

Aufgrund des steigenden Umweltbewusstseins ist bei der Wahl von PCM-s auch auf die ökologischen Aspekte der jeweiligen Produkte zu achten. Beispielsweise können Paraffine als ökologisch unbedenklich eingestuft werden, da sie weder toxisch noch gesundheitsgefährlich oder wassergefährdend sind. [Rub07]

Letztendlich ist eine Reihe von Kriterien bei der Wahl des Latentwärmespeichermaterials ausschlaggebend. Einige wichtige Anforderungen sind nochmals in Abbildung 12 zusammengefasst. Welches PCM dann schlussendlich zum Einsatz kommt, wird sich aus der Summe aller Eigenschaften ergeben.

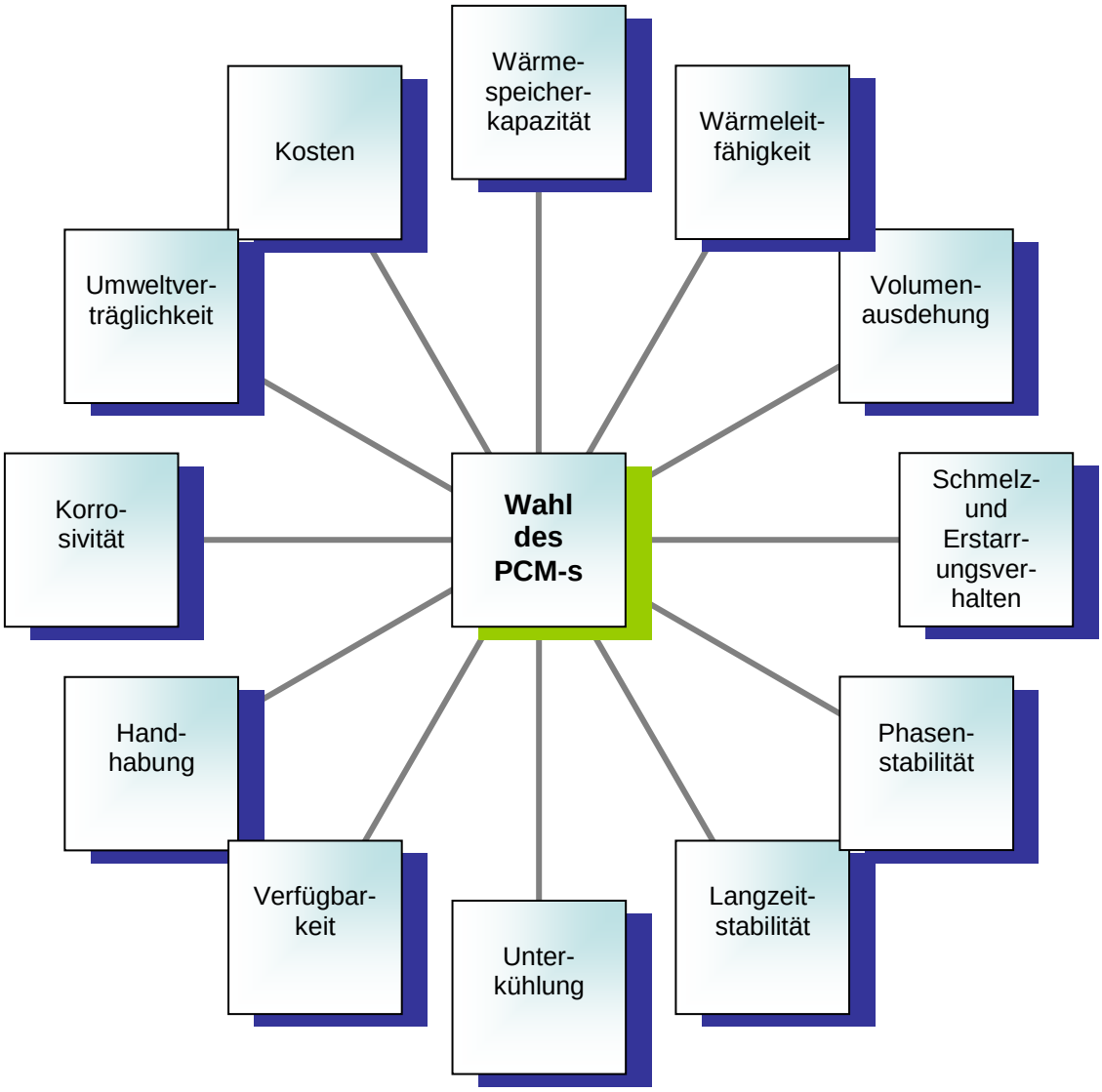


Abbildung 12: Einflussfaktoren bei der Wahl des PCM-s [eigene Abbildung in Anlehnung an [Völ05]]

4.2 Arten von Latentwärmespeichermaterialien und ihre Eigenschaften

Latentwärmespeicherung kann, wie die nachstehende Abbildung verdeutlicht, in einem sehr breiten Temperaturbereich angewendet werden. Dabei muss jedoch entsprechend der jeweiligen Anwendung ein Material mit geeigneter Phasenwechseltemperatur ausgewählt werden. Innerhalb dieses Temperaturbereiches gibt es ebenfalls verschiedene Materialklassen, die zur Auswahl stehen.

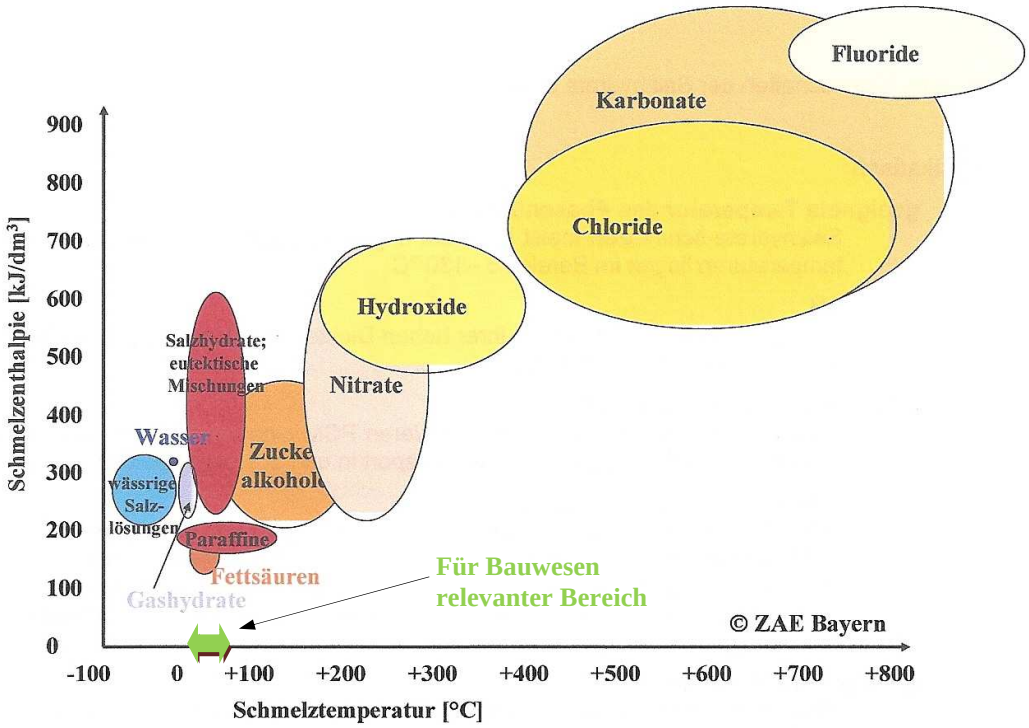


Abbildung 13: Materialklassen zur Latentwärmespeicherung und zugehörige typische Temperaturbereiche [Hau06]

Natürlich vorkommendes Eis mit einem Schmelzpunkt von 0℃ kann eigentlich als das erste PCM angesehen werden. Früher war die Speicherung von Kälte im Winter, mit Hilfe von Eis, zur Kühlung im Sommer eine weit verbreitete Anwendung.

Für den Temperaturbereich um 0℃ werden deshalb hauptsächlich Wasser mit verschiedenen Zusätzen, so genannte „Ice-Slurries“ bzw. „Eis-Wasser-Suspensionen“ als PCM verwendet. Beim Gefrieren von Wasser bildet sich meist ein hexagonales Kristallgitter mit vielen Fehlstellen aus. Aus diesem Zusammenhang resultiert auch der Volumenzuwachs beim Gefrieren. Durch die Zusätze, die die Fehlstellen besetzen, wird das Kristallgitter modifiziert und somit auch der Schmelzpunkt und die Schmelz- und Kristallisationsenergie. Diese PCM-s sind aufgrund des natürlich vorkommenden Wassers sehr kostengünstig,

können aber, wie aus der obigen Grafik ersichtlich ist, nur in einem schmalen Temperaturbereich eingesetzt werden.

Ist eine Speicherung thermischer Energie unterhalb 0℃ notwendig, werden für derartige Zwecke wässrige, meist eutektische, Salzlösungen verwendet. Auch diese Latentwärmespeichermaterialien sind sehr preiswert.

Neue Forschungen haben gezeigt, dass der Temperaturbereich zwischen 0℃ und 20℃ sehr gut von Gashydraten bzw. Clathrathydraten abgedeckt werden kann. Sie bewirken mit Hilfe von Gasmolekülen, die dadurch entstehen, dass Gas unter Druck im Wasser gelöst wird, eine Stabilisierung des Eisgitters und somit auch eine Erhöhung des Schmelzpunktes.

Im Temperaturbereich von 5℃ bis etwa 130℃ können zur Speicherung thermischer Energie Salzhydrate, deren eutektische Mischungen und auch Paraffine eingesetzt werden.
Auf diese Speichermaterialien wird später noch genauer eingegangen, da sie aufgrund ihres Temperaturbereiches jene PCM-Stoffe sind, die im Bauwesen Anwendung finden.

Eine völlig neue Materialklasse stellen die so genannten „Zuckeralkohole“ dar, die den Temperaturbereich zwischen 90℃ und 180℃ abdecken. [Meh02], [Döt06]

Für den Temperaturbereich oberhalb von 130℃ kommen dann wieder Salze und deren eutektische Mischungen zur Anwendung.

Alle PCM-s, die zuvor beschrieben und dargestellt wurden, verfügen über einen fest – flüssigen Phasenübergang. Natürlich gibt es auch PCM-s, die den Phasenübergang fest – fest nutzen, jedoch werden diese aufgrund ihrer niedrigen Energiedichte und der höheren Kosten zurzeit nicht verwendet. [Meh02], [Döt06]

Die Entwicklung der letzten Jahre hat gezeigt, dass die im Bauwesen verwendeten PCM-s zwei Gruppen zugeordnet werden können:
Zum einen die **anorganischen PCM-s**, vertreten durch Salze und Salzhydrate und zum anderen die **organischen PCM-s**, wie Paraffine, Fettsäuren und deren Derivate.

4.2.1 Anorganische PCM-s – Salzhydrate

Einerseits kann man Salzhydrate als eine „extreme Modifikation des Wassers“ und anderseits wegen der hohen Massenanteile auch als Salz mit einem hohen Kristallwasseranteil betrachten. Im Endeffekt sind Salzhydrate feste Verbindungen, die sich mit der chemischen Formel $M \cdot xH_2O$ beschreiben lassen, wobei M für ein wasserfreies Salz und x für die Anzahl der Wassermoleküle pro Salzmolekül steht. Bei x handelt es sich in den meisten Fällen um eine ganze Zahl.
Als Beispiele für im Bauwesen bereits oft verwendete und erforschte PCM-s kann man das Calciumchloridhexahydrat ($CaCl_2 \cdot 6H_20$) sowie das Glaubersalz ($NaSO_4 \cdot 10H_20$) nennen. [Hau06]

Nachfolgend werden die wesentlichsten Vor- und Nachteile der Salzhydrate aufgelistet:

<u>Vorteile:</u>

- hohe Schmelzwärme
- hohe spezifische Wärmekapazität
- hohe Speicherdichte aufgrund der hohen Rohdichte
- hohe Wärmeleitfähigkeit
- im allgemeinen nicht brennbar
- geringe Materialkosten

<u>Nachteile</u>:

- Unterkühlung
- kritische Phasenstabilität – inkongruentes Schmelzverhalten
- eingeschränkte Langzeitstabilität aufgrund hoher Dampfdrücke
- eingeschränkte Materialverträglichkeit durch Korrosivität [Sch04], [Völ05]

Abbildung 14: Salzhydrat [Rub07]

4.2.2 Organische PCM-s

4.2.2.1 Paraffine

Paraffine, die zu den bedeutendsten organischen PCM-s zählen, können wie auch die zuvor beschrieben Salzhydrate im gleichen Temperaturbereich wie diese verwendet werden.
Als Paraffine werden Gemische aus gesättigten Kohlenwasserstoffen bezeichnet, die sich aus langkettigen n-Alkanen zusammensetzen und mit der chemischen Summenformel $C_n + H_{2n+2}$ beschrieben werden. Die Zahl n liegt meist zwischen 18 und 32.
Durch die Wahl der Kettenlänge kann die Schmelztemperatur definiert werden, d.h. je größer die Kettenlänge, desto höher auch der Schmelzpunkt.
Paraffin wird überwiegend aus den Schmierölschnitten bei der Vakuumdestillation gewonnen, anschließend entparaffiniert, entölt und nochmals raffiniert. Es kann aber auch aus Braunkohle, bituminösen Schiefern oder Torfkohlen gewonnen werden.
Seit kurzem gewinnen aber auch die synthetischen Paraffine, die mit Hilfe des Fischer–Tropsch–Verfahren hergestellt werden, zunehmend an Bedeutung. Im Gegensatz zu den mineralölstämmigen Paraffinen bestehen sie aus unverzweigten n-Alkanen.
Für die durchgeführten Versuchsreihen, auf die später noch eingegangen wird, wurden derartige PCM-Proben auf paraffinischer Basis verwendet.

Abbildung 15: Latentwärmeparaffin [Rub07]

Nachfolgend werden die wesentlichsten Vor- und Nachteile der Paraffine zusammengefasst:

<u>Vorteile</u>:

- höhere Schmelzwärme als Salzhydrate
- höhere spezifische Wärmekapazität als Salzhydrate
- keine Unterkühlung
- gute Phasenstabilität
- geringe chemische Reaktivität
- nicht toxisch und umweltgefährdend

Nachteile:

- geringe Rohdichte → geringe volumenbezogene Energiedichte
- geringe Wärmeleitfähigkeit
- Volumenänderung beim Phasenwechsel
- 2 Phasenübergänge – bei einigen Paraffinen
- brennbar [Sch04], [Völ05]

4.2.2.2 Fettsäuren und Fettsäureester

Fettsäuren sind Verbindungen aus einer fast unverzweigten Kohlenwasserstoffkette und einer Carboxylgruppe (–COOH) und werden meist aus Tier- bzw. Pflanzenfetten gewonnen. Ihre Eigenschaften sind in etwa mit denen von Paraffinen vergleichbar. [Völ05]

Vorteile:

- hohe Schmelzwärme
- hohe spezifische Wärmekapazität
- ungiftig

Nachteile:

- starker Geruch
- noch nicht hinreichend untersucht und erforscht [Sch04]

4.2.2.3 Alkohole

Wie bisherige Untersuchungen gezeigt haben, sind beispielsweise die Alkohole Polyetherpolyol und Dodekanol als Latentwärmespeicherstoffe durchaus geeignet. [Völ05] Nachstehend sind wieder einige Vor- und Nachteile angeführt:

Vorteile:

- hohe Schmelzwärme
- hohe spezifische Wärmekapazität
- hohe Rohdichte

Nachteile:

- starker Geruch
- gute Brennbarkeit [Sch04]

Zusammenfassend kann man feststellen, dass PCM-s basierend auf paraffinischer Basis für den Einsatz im Bauwesen besser geeignet sind als Salzhydrate.
Der Grund dafür ist, dass Paraffine über eine hohe spezifische Wärmekapazität, eine gute Phasenstabilität und eine gute Umweltverträglichkeit verfügen. Nachteilig wirkt sich nur ihre erhöhte Brennbarkeit und geringe Wärmeleitfähigkeit aus.
Salzhydrate haben zwar, durch ihren geringen Materialpreis, einen „wirtschaftlich überzeugenden“ Vorteil, der jedoch aufgrund ihrer nachteiligen Eigenschaften wie Unterkühlung, Phaseninstabilität und korrosives Verhalten in den Schatten gestellt wird.
Welchem Stoff nun Vorrang eingeräumt werden soll lässt sich schwer sagen, da es hiezu in der Literatur durchaus unterschiedliche Meinungen gibt.
So sollte für jedes Projekt, stets unter Betrachtung aller Faktoren, jener Stoff gewählt werden, der ein Optimum darstellt.

4.3 Konfektionierung der Latentwärmespeichermaterialien

Bei der Wahl des PCM ist aber nicht nur der richtige Schmelzbereich entscheidend, sondern das Material sollte auch über Formbeständigkeit und mechanische Belastbarkeit verfügen, um eine Baustellentauglichkeit zu gewährleisten. Natürlich sollte es auch mit anderen Konstruktionswerkstoffen nicht reagieren.

Diese Anforderungen kann natürlich PCM alleine nicht erbringen, man bedenke nur den Phasenübergang von fest auf flüssig. Ohne entsprechende Maßnahmen würde das flüssige PCM-Medium sofort aus dem jeweiligen Konstruktionsstoff auslaufen. Deshalb wird auch das Latentwärmespeichermedium in eine Art Behälter, Kapsel oder anderwärtige Struktur eingebracht.

Prinzipiell kann man zwischen *Makro- und Mikroverkapselung* und *Verbundmaterialien* unterscheiden. [Meh02]

Makroverkapselung

Bei der Makroverkapselung wird das PCM-Material in verschiedenen Formen, wie beispielsweise Kissen, Kugeln oder Tafeln eingeschlossen. Das Verkapselungsmaterial muss natürlich auch auf die Eigenschaften des Speichermaterials abgestimmt werden. Im Allgemeinen werden dazu Polymere, aber auch metallische Schichten eingesetzt. Grundsätzlich werden die „Behälter“ auf die Anforderungen der jeweiligen technischen Anwendung abgestimmt.

Abbildung 16 zeigt beispielsweise Kunststoffbehälter in Kugelform, die vor allem in großen Speichern verwendet werden. Dazu wird zunächst PCM in die Kunststoffkugeln eingefüllt, verschlossen und anschließend über eine Öffnung dem Speicher zugeführt.

Ein weiters Beispiel wären die meist von Hand hergestellten PCM-Kissen aus Spezialfolie (Abbildung 17). Sie besitzen den Vorteil, dass sie im flüssigen Aggregatszustand ihre Form ändern und so auf verschiedene Geometrien angepasst werden können. Als Nachteil ist ihre fehlende mechanische Stabilität zu nennen.

Derartige Kissen könnten eventuell in das Lochbild eines Hochlochziegels integriert werden.

Komplizierter in der Herstellung sind die so genannten „topfförmigen Behältnisse auf Matten“, wie in Abbildung 18 ersichtlich. Dieses Produkt erlaubt eine Fließbandproduktion, da zunächst die topfförmigen Behälter aus einer Folie geformt, anschließend mit dem PCM-Medium befüllt und dann abermals mit einer Folie versiegelt werden. Die so entstandenen Matten erlauben einen großflächigen Einsatz, beispielsweise bei Fußbodenheizungen. [Meh02]

Abbildung 16: kugelförmige Kunststoffbehälter mit PCM-Füllung [Cri08]

Abbildung 17: PCM in Folie eingeschweißt [Cli08]

Abbildung 18: "Makroverkapselung in tiefgezogenen Kunststofffolien" [Dör08]

Mikroverkapselung

Die Mikroverkapselung wird bereits seit 1953 erfolgreich, beispielsweise von der Firma BASF, für die Herstellung kohlefreier Durchschreibpapiere eingesetzt und hat in den letzten Jahren auch zunehmend an Bedeutung im Bauwesen gewonnen. [Meh02]

Mikrokapseln bestehen aus mikroskopisch kleinen Kunststoffkapseln mit einem festen bzw. flüssigen Kern aus PCM – meist Paraffin. Der Durchmesser liegt im Bereich weniger Mikrometer.

Hergestellt werden Mikrokapseln zunächst dadurch, dass das geschmolzene Paraffin im Wasser durch Rühren fein verteilt wird. Anschließend wird durch chemische Prozesse –mit so genannter „in-situ Synthese“ – jeder einzelne Paraffintropfen mit einer Kunststoffschicht ummantelt (Abbildung 19, 20). [Kru02]

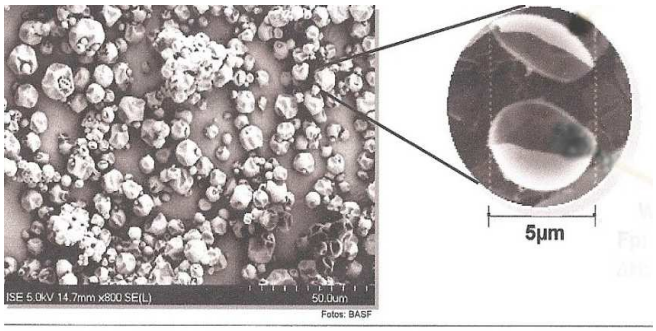


Abbildung 19: Mikroverkapseltes PCM [Mic08]

Abbildung 20: BASF Micronal 23°C [eigene Abb.]

Wie Dauertests gezeigt haben, sind diese Umhüllungen mechanisch praktisch nicht zerstörbar und tolerieren die Phasenumwandlungen und eventuelle Volumenänderungen des Kerns.
Diese Art der Konfektionierung birgt somit folgende Vorteile:

- Durch die Verkapselung ist ein hohes Oberflächen/Volumen – Verhältnis vorhanden. Dies begünstigt wiederum den Wärmeaustausch zwischen PCM und Baustoff.
- Aufgrund der Verkapselung kann kein geschmolzenes PCM in den Baustoff gelangen und diesen negativ beeinflussen.
- Es bietet sich an, mikroverkapselte PCM-s in Baustoffen wie beispielsweise bei Innenputzen oder Spachtelmassen einzusetzen, da sie pulverförmig sind. [Kru02]

Bei den Messungen der spezifischen Wärmekapazitäten wurde auch ein mikroverkapseltes Produkt der Firma BASF (Micronal 23℃) getestet (siehe Abbildung 20). Die daraus resultierenden Ergebnisse werden im Kapitel 5 dargestellt.

Verbundmaterialien

Wird dem PCM eine innere Struktur hinzugefügt, so erhält man ein Verbundmaterial. Dieses verfügt über eine hervorragende Verarbeitungsfähigkeit, da es ohne weiters geschnitten oder gebohrt werden kann, ohne Leckage zu verursachen. Ein weiterer Vorteil ist, dass diesen Verbundmaterialien aufgrund der zusätzlichen Struktur beispielsweise eine 100-fach höhere Wärmeleitfähigkeit zugefügt werden kann. [Meh02]
Beispiele für derartige Materialien sind die Holzfaserplatten der Firma Rubitherm (Abbildung 21), oder das Latentwärmegranulat von Rubitherm (Abbildung 22), welches ideal bei wassergeführten Fußbodenheizungen eingesetzt werden kann.

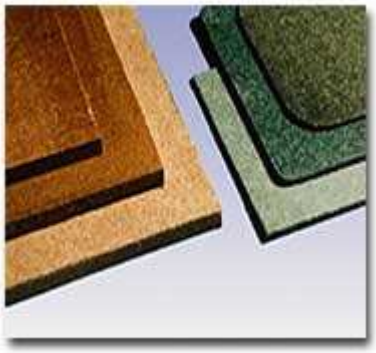


Abbildung 21: Latentwärmeplatten [Rub08]

Abbildung 22: Latentwärmegranulat [Rub08]

5 Experimentelle Ermittlung der spezifischen Wärmekapazitäten ausgewählter PCM-s

Für die in der nachstehenden Grafik abgebildeten drei PCM-Stoffe

- Rubitherm RT20
- Rubitherm RT27
- BASF Micronal 23℃

wurde experimentell die spezifische Wärmekapazität in verschiedenen Temperaturbereichen (18℃, 20℃, …, 36℃) ermittelt.

Dazu wurden Versuchsreihen mit 10℃ kaltem Wasser u nd mit 40℃ warmen Wasser in der Thermosflasche durchgeführt. Abschließend werden beide Ergebnisse grafisch dargestellt und miteinander verglichen.

Abbildung 23: eingeschweißte PCM-Proben – Rubitherm RT20, Rubitherm RT27, BASF Micronal 23°C [eigene Abbildung]

5.1 Versuchsaufbau

Für die Ermittlung der spezifischen Wärmekapazitäten wurde folgender Versuchsaufbau, der in Abbildung 24 grafisch dargestellt ist, verwendet:

- **Klimaschrank**: - zum Temperieren der Proben
  - darin befinden sich 2 Temperatursensoren:
  TC09 – zum Messen der Oberflächentemperatur der Proben
  TC10 – zur Messung der Temperatur im Schrankinneren.
- **Raumtemperatursensor** TC08: zur Erfassung der Raumtemperatur
- **6 Thermosflaschen (Dewar)** Nr.1-6 mit **Temperatursensoren** TC11-TC16: zur Messung (alle 30sek) der sich einstellenden Temperatur zwischen Wasser und Probe (PCM), wobei in regelmäßigen Abständen die Thermosflasche geschüttelt wurde.
- **Datenlogger**: zur Aufnahme der gemessenen Daten
- **PC**: zur Auswertung der Versuchsergebnisse
- **Waage**: zur Feststellung des Probengewichts, der Wassermengen und des Trockengewichts der Thermosflache.
- **Gerät zur Wassererwärmung bzw. –abkühlung**: zur Temperierung des in die Thermosflasche einzufüllenden Wassers

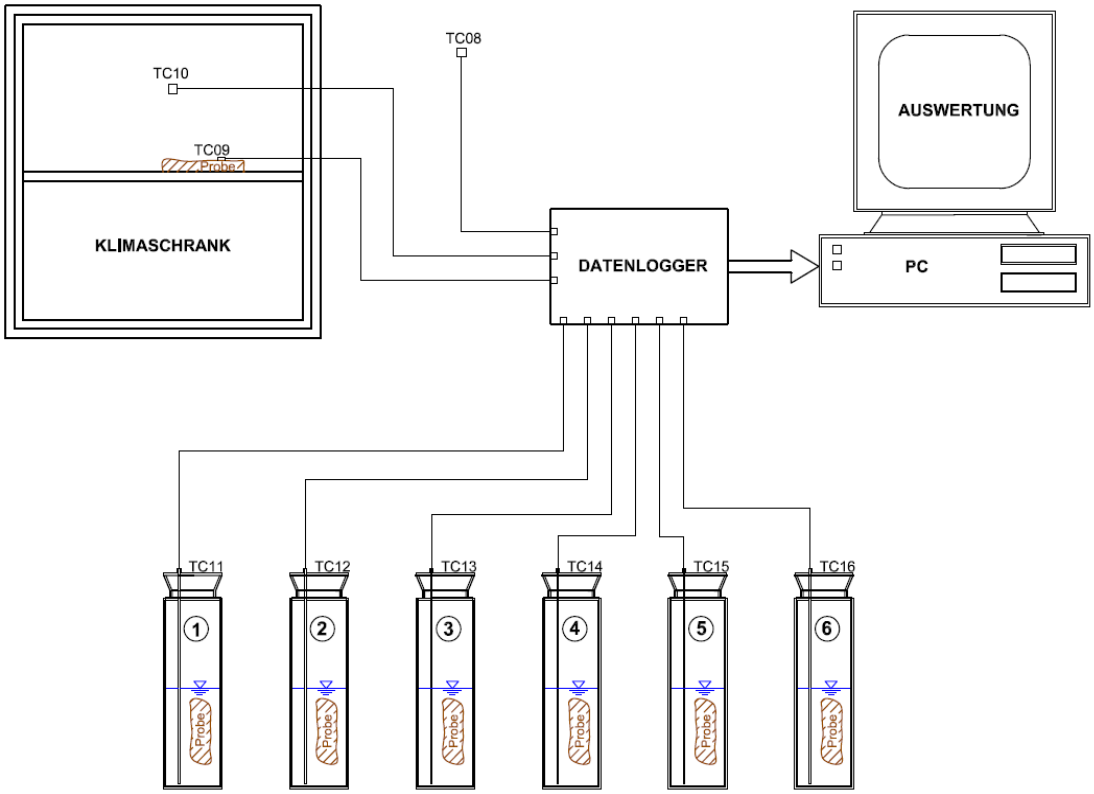


Abbildung 24: Versuchsaufbau [eigene Abbildung]

Abbildung 25: Thermosflaschen Nr. 1 bis 6 mit Temperatursensoren TC11 bis TC16 [eigene Abbildung]

Abbildung 26: Klimaschrank [eigene Abbildung]

Abbildung 27: Gerät zur Wassererwärmung bzw. -abkühlung und elektronische Waage [eigene Abbildung]

5.2 Versuchsdurchführung und -auswertung

Im Folgenden wird zuerst auf die Versuchsdurchführung und anschließend auf deren Auswertung eingegangen:

- Wiegen des entsprechenden Probekörpers (PCM-Probe) m_p und Erreichen der gewünschten Temperatur T_p mit Hilfe des Klimaschrankes
- Ermittlung der Masse m_o der Thermosflasche (Dewar)
- Füllen des Dewars mit einer 10℃ kalten bzw. 40℃ warmen, abgewogenen Wassermasse und Ermittlung der neuen Masse m_o+m_{H2O}
- Nach ca. 3-5 Minuten – Messung der sich eingestellten Temperatur in der Thermosflasche
- Öffnen des Dewars und Zugabe der Probe mit der Masse m_p
- Neuerliche Bestimmung der Masse $m_o+m_{H2O}+m_p$
- Erhöhung bzw. Erniedrigung der unterschiedlichen Temperaturen der Probe und des Wassers durch in gewissen Abständen durchgeführtes Schütteln der Thermosflaschen
- Messung der sich einstellenden Mischtemperatur im Inneren der Thermosflaschen im 30 Sekunden – Intervall

Prinzipiell gilt, dass die Wärmemenge ΔQ, die bei Erwärmung bzw. Abkühlung eines Körpers aufgenommen bzw. abgegeben wird, zur Temperaturänderung ΔT und zur Masse m des Körpers proportional ist.

$$\Delta Q = c \cdot m \cdot \Delta T \tag{5-1}$$

Der Proportionalitätsfaktor c ist die spezifische Wärmekapazität des Körpers. [Ley07]

Die spezifische Wärmekapazität der Probe kann nun mit Hilfe des Energieerhaltungssatzes bestimmt werden. Dabei ist die abgegebene Wärmemenge der Probe

$$\Delta Q_{\mathrm{Pr}obe} = c_{\mathrm{Pr}obe} \cdot m_{\mathrm{Pr}obe} \cdot (T_p - T_m) \tag{5-2}$$

gleich der aufgenommenen Wärmemenge des Wassers

$$\Delta Q_{H20} = c_{H2O} \cdot m_{H2O} \cdot (T_m - T_D)\ . \tag{5-3}$$

Ein Teil der abgegebenen Wärmemenge der Probe wird auch von der Thermosflasche aufgenommen, dieser Anteil muss folgendermaßen berücksichtigt werden:

$$\Delta Q = C \cdot (T_m - T_D) \tag{5-4}$$

Durch Anschreiben des Energieerhaltungssatzes wird durch Umformung aus diesem die spezifische Wärmekapazität der Probe errechnet.

$$C \cdot (T_m - T_D) + c_{H2O} \cdot m_{H2O} \cdot (T_m - T_D) = c_{Probe} \cdot m_{Probe} \cdot (T_p - T_m) \tag{5-5}$$

$$c_{Probe} = \frac{1}{m_{Probe}} \cdot \frac{(C + c_{H2O} \cdot m_{H2O}) \cdot (T_m - T_D)}{(T_p - T_m)} \quad \text{[Fhm07]} \tag{5-6}$$

Bevor jedoch die spezifische Wärmekapazität der Probe berechnet werden kann, muss noch die Mischtemperatur T_m, die sich während des Versuches eingestellt hat, ermittelt werden und dies erfolgt graphisch mit Hilfe der Temperatur – Zeit – Kurve in Microsoft Excel.
Ein gutes und brauchbares Ergebnis für die Mischtemperatur kommt durch Legen einer linearen Ausgleichsgeraden im annähernd konstanten Temperaturbereich zustande.

Anhand der linearen Geradengleichung $y = a + b \cdot x$ kann nun die Mischtemperatur (a) abgelesen werden. Abbildung 28 soll dies exemplarisch verdeutlichen. [Fhm07]

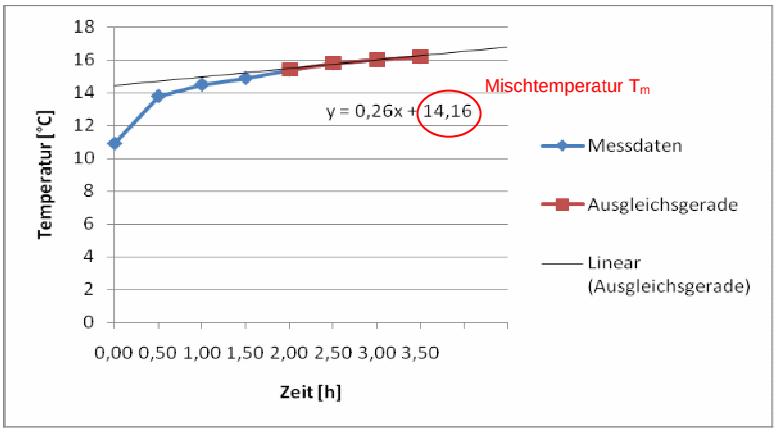


Abbildung 28: exemplarische Temperatur – Zeit – Kurve zur Ermittlung der Mischtemperatur [eigene Abbildung]

Zur Berechnung der Koeffizienten a und b können jedoch auch folgende Formeln herangezogen werden:

$$\begin{aligned} N &= \text{Anzahl der Messwerte} \\ \Delta &= \mathrm{N} \cdot \mathrm{S}_{\mathrm{xx}} - (S_x)^2 \\ a &= \frac{S_{xx} S_y - S_x S_{xy}}{\Delta} \\ b &= \frac{N S_{xy} - S_x S_y}{\Delta} \end{aligned} \tag{5-7}$$

$$S_x = \sum_{i=1}^{N} x_i \;,\; S_y = \sum_{i=1}^{N} y_i \;,\; S_{xx} = \sum_{i=1}^{N} x_i^{\,2} \;,\; S_{xy} = \sum_{i=1}^{N} x_i \cdot y_i \tag{5-8}$$

Bevor die eigentlichen Versuchsreihen gestartet werden konnten, ist zunächst versucht worden jene Wärmemenge, die beim Öffnen des Dewars aufgrund der Probenzugabe eingetragen bzw. abgeführt wird, zu ermitteln. Dazu sind mehrere Versuchsdurchgänge mittels so genannter „fiktiver Proben“ durchgeführt worden. Das heißt, nach Ablesung der Temperatur der Thermosflaschen wurde der Verschluss geöffnet, ohne jedoch eine Probe einzubringen.

Bei Auswertung dieser Messdaten konnte festgestellt werden, dass sich die eingetragene bzw. abgegebene Wärmemenge ΔQ stets im Bereich von 480J bewegte.

Dies hatte zur Folge, dass bei den nachfolgenden Versuchen diese Wärmemenge bei der Berechnung der spezifischen Wärmekapazitäten entsprechend berücksichtigt werden musste. Bei der Versuchsreihe mit 10℃ kaltem Wasser musste diese abgezogen werden, da durch Öffnen des Dewars Wärme von der Umgebung in die kältere Flasche eingetragen wurde. Bei der zweiten Versuchsreihe mit 40℃ warmen Wasser musste der Wert von 480J hinzuaddiert werden, denn hier wurde Wärme des Dewars beim Öffnen, aufgrund der niedrigeren Raumlufttemperatur, an die Umgebung abgegeben.

5.3 Ergebnisse

5.3.1 Wasserprobe

Um die Zuverlässigkeit und Genauigkeit des zuvor erläuterten Versuchsaufbaues sowie deren Durchführung zu überprüfen, ist zunächst ein Versuch mit einer Wasserprobe durchgeführt worden, da für das Wasser die spezifische Wärmekapazität von 4,18 J/(g.K) bekannt ist. Gleichzeitig wurde bei diesem Versuch auch die Wärmekapazität der verwendeten Thermosflasche ermittelt, welche 740 J/K beträgt.
Für diesen Versuch wird nochmals die Auswertung in tabellarischer Form angeschrieben. Bei den nachfolgenden Versuchsreihen wird auf die Auswertung nicht mehr eingegangen, da sie in exakt der gleichen Weise funktioniert. Deshalb werden für die PCM-Proben nur noch die Endergebnisse in grafischer Form angeführt.

Als erstes ist die eingeschweißte Wasserprobe im Klimaschrank auf 20℃ temperiert worden, um anschließend in den Dewar mit 10℃ kaltem Wasser eingebracht zu werden. In der nachstehenden Tabelle sind die ermittelten Massen und Temperaturen angeschrieben und Abbildung 29 zeigt die grafische Auswertung der Messdaten im Temperatur-Zeit-Diagramm.

Trockengewicht des Dewars	m_O=	569,8	g
Gewicht Dewar + Wasser	m_O+m_{H2O}=	1031,6	g
Eingefüllte Wassermasse	m_{H2O}=	461,8	g
Gewicht Dewar + Wasser + Probe	$m_O+m_{H2O}+m_P$=	1072,7	g
Masse der Probe	m_P =	41,1	g
Temperatur der Probe	T_P=	20,12	℃
Temperatur im Dewar	T_D=	10,53	℃
Wärmekapazität des Dewars	C=	740	J/K
Spezifische Wärmekapazität v. Wasser	c_{H20}=	4,18	J/(g.K)

Eingebrachte Wärmemenge	Δ Q=	480	J
Ermittelte Mischtemperatur	T_m=	11,278	℃

Tabelle 1: notwendige Werte zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität

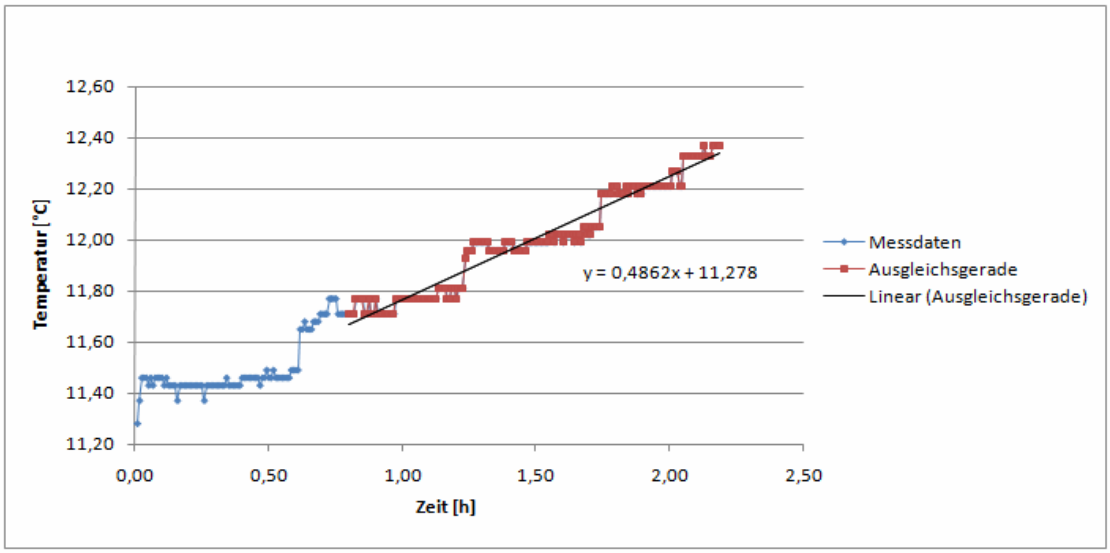


Abbildung 29: grafische Darstellung der Messwerte im Temperatur – Zeit – Diagramm für die 20°C warme Wasserprobe, Temperatur des Wassers im Dewar 10°C [eigene Abbildung]

Durch Legen einer linearen Ausgleichsgeraden war es, wie bereits zuvor beschrieben möglich, die sich einstellende Mischtemperatur abzulesen, um dann mit Hilfe der oben bereits angeführten Formeln die spezifische Wärmekapazität der Wasserprobe zu bestimmen.

$$\mathbf{c_{Probe}} = \frac{1}{m_{Probe}} \cdot \frac{(C + c_{H2O} \cdot m_{H2O}) \cdot (T_m - T_D) - \Delta Q}{(T_p - T_m)} = \mathbf{4{,}18\ J/(g.K)} \qquad (5\text{-}9)$$

Dabei zeigte sich, dass das Ergebnis mit der spezifischen Wärmekapazität von Wasser übereinstimmt, was die Zuverlässigkeit des Versuches an sich bestätigt.

Nachfolgend werden für die drei getesteten PCM-Proben die spezifischen Wärmekapazitäten, in Abhängigkeit von der Temperatur, dargestellt:

5.3.2 PCM Rubitherm RT20

Bei Rubitherm RT 20 handelt es sich um ein PCM auf paraffinischer Basis.

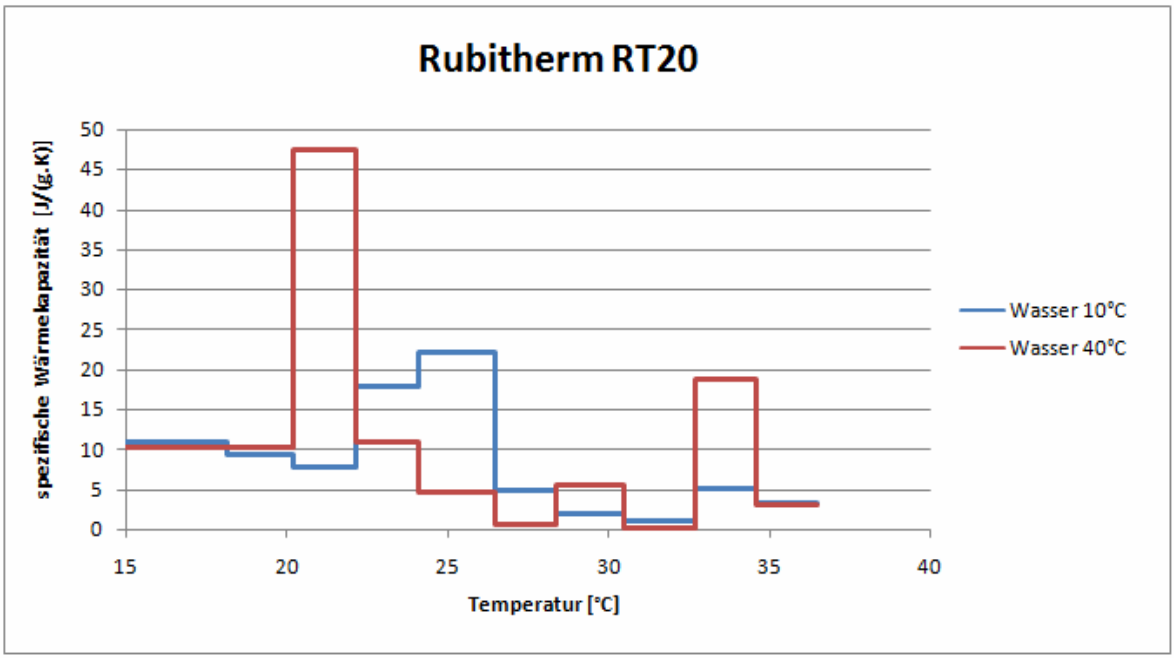


Abbildung 30: Zusammenstellung der Ergebnisse der spezifischen Wärmekapazität in Abhängigkeit von der Temperatur [eigene Abbildung]

Die obige Abbildung zeigt die Zusammenfassung der Ergebnisse der ermittelten spezifischen Wärmekapazitäten, in Abhängigkeit von verschiedenen Temperaturen, für die beiden Versuchsreihen mit 10℃ kaltem Wasser (blaue Kurve) und 40℃ warmen Wasser (rote Kurve).

Wie aus der Abbildung ersichtlich ist, liegt die maximale Speicherkapazität im Bereich zwischen 20 und 25℃, das ist auch jener Bereich, i n dem es zum Phasenwechsel kommt. Verglichen mit dem PCM Rubitherm RT27 ist die Speicherkapazität jedoch geringer.

Die Ursache für die Abweichung zwischen den beiden Kurven wird bei der nächsten Probe – Rubitherm RT27 – genau erläutert.

5.3.3 PCM Rubitherm RT27

Hierbei handelt es sich, wie bei Rubitherm RT20 auch, um ein ungebundenes Wärmespeichermaterial auf paraffinischer Basis, das den Schmelzvorgang von fest auf flüssig ausnützt, um bei fast konstanter Temperatur große thermische Energiemengen zu speichern. [Rub07]

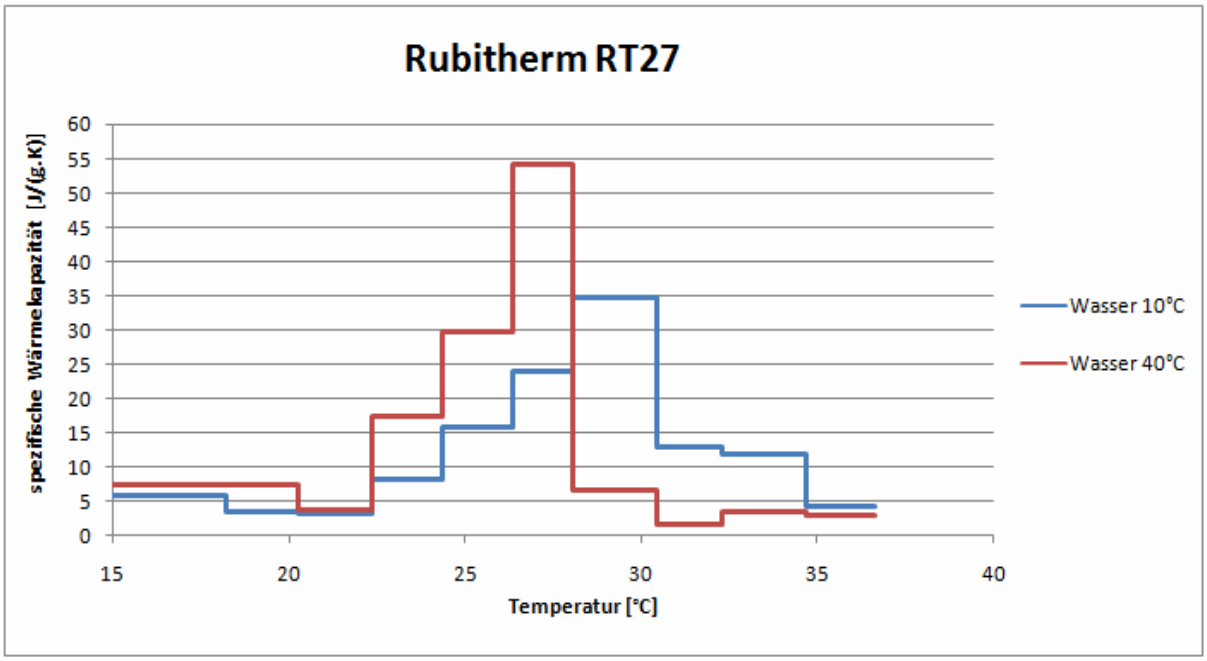


Abbildung 31: Zusammenstellung der Ergebnisse der spezifischen Wärmekapazität in Abhängigkeit von der Temperatur [eigene Abbildung]

Abbildung 31 zeigt die Auswertung der temperaturabhängigen spezifischen Wärmekapazität für die PCM-Probe Rubitherm RT27, zum einen für die Versuchsreihe mit 10℃ kaltem Wasser (blau dargestellt) und zum anderen für 40℃ warmes Wasser (rot dargestellt). Wie aus der Abbildung erkennbar ist, liegt bei diesem PCM die maximale Wärmespeicherfähigkeit im Temperaturbereich von 27°C bis 30℃. Dies ist auch jener Bereich, in der es zum Phasenübergang von fest auf flüssig kommt, also in dem die latente Wärmespeicherung von statten geht.

Die Diskrepanz zwischen der roten und der blauen Kurve lässt sich dadurch erklären, dass sich bei der Versuchsreihe mit 40℃ warmen Wasser die Proben stets im flüssigen Aggregatszustand befunden haben. Dadurch ist es zu einer Verschiebung und Erhöhung der spezifischen Wärmekapazität gekommen, da im PCM-Medium noch immer thermische Energie von vorigen Versuchen zwischengespeichert war.

Diese Abbildung bestätigt auch die zuvor angeführten Überlegungen, dass durch Latentwärmespeichermaterialien die speicherwirksame Masse von Räumen deutlich erhöht

werden kann und somit sommerliche Temperaturspitzen abgepuffert werden können. So kann durch Füllung von Ziegeln mit PCM auf paraffinischer Basis leicht eine Speicherkapazität des Ziegelblocks von 10.000 J/(kg.K) und mehr erreicht werden.
In welchem Bereich, wie viel PCM im Ziegel eingesetzt werden muss und welche Auswirkungen dies auf den HWB, KB und auf die sich einstellende maximale operative Raumtemperatur im Sommer hat, gilt es in den nachfolgenden Simulationen abzuklären.

5.3.4 PCM BASF Micronal 23℃

Bei dieser Probe handelt es ich um ein mikroverkapseltes Produkt. Aufgrund der polymeren Ummantelung der „Paraffintröpfchen“ ist von außen keine Konsistenzänderung bemerkbar, d.h. dieses PCM bleibt bei jeder Temperatur pulverförmig.

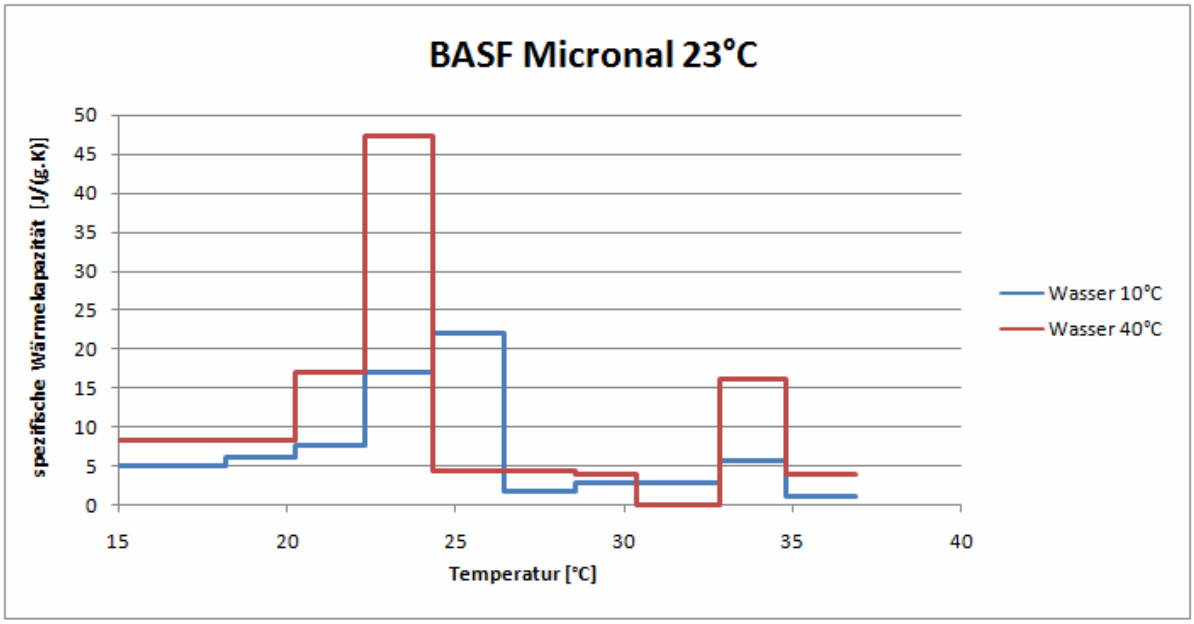


Abbildung 32: Zusammenstellung der Ergebnisse der spezifischen Wärmekapazität in Abhängigkeit von der Temperatur [eigene Abbildung]

Die obige Abbildung 32 stellt die Ergebnisse der ermittelten spezifischen Wärmekapazitäten der PCM-Probe BASF Micronal 23℃, in Abhängigkeit von der Temperatur, für die beiden Versuchsreihen mit 10℃ kaltem (wieder blau dargestellt) und 40℃ warmen Wasser (rote Kurve) gegenüber.
Wie man der Abbildung entnehmen kann, stellt sich eine deutliche Erhöhung der Speicherkapazität aufgrund des Phasenüberganges im Temperaturbereich zwischen ca. 22℃ und 26℃ ein.
Allerdings liegt die maximale Speicherkapazität ca. 10 J/(g.K) unter der von Rubitherm RT27. Auch hier ist wieder eine Verschiebung zwischen der roten und blauen Kurve zu erkennen, die sich auf gleicher Weise wie bei Rubitherm RT27 erklären lässt.

6 Simulationstechnische Überprüfung der thermischen Eigenschaften von Bauteilen mit PCM

Wie die vorigen Untersuchungen gezeigt haben, kann durch die Einbringung von Latentwärmespeichermaterialien in den Wandaufbau von Gebäuden die Wärmekapazität des Bauwerks deutlich erhöht werden. Dadurch kann überschüssige Raumwärme zwischengespeichert werden, denn kommt es zum Anstieg der Raumtemperatur über den Temperaturbereich, an dem der Phasenwechsel des PCM stattfindet, wird Raumwärme in Schmelzwärme umgewandelt.

Ziel der nachfolgenden Simulationen ist es, diese temperaturstabilisierende Wirkung der PCM-s sowie deren Energieeinsparungspotential auf ein Gebäude zu untersuchen.

Hierbei wurde besonderes Augenmerk auf folgenden Größen gelegt:

- ***Heizwärmebedarf*** – beschreibt jene Wärmemenge, die einem Gebäude zugeführt werden muss, um darin Temperaturen über einer minimalen Soll-Innentemperatur zu gewährleisten. [Pec07]
- ***Kühlbedarf*** – beschreibt im Gegensatz dazu jene Wärmemenge, die aus dem Gebäude abgeführt werden muss, um darin Temperaturen unter einer maximalen Soll-Innentemperatur zu gewährleisten. [Pec07]
- ***Maximale Heizlast***
- ***Maximale Kühllast***
- ***Maximale operative Raumtemperatur*** – setzt sich aus der Lufttemperatur des Raumes und der Temperatur der Raumumschließungsflächen zusammen. Sie wird oft auch als die vom Menschen empfundene Temperatur bezeichnet und kann näherungsweise wie folgt berechnet werden. [Oba05]

$$t_{op} = \frac{(t_i + t_u)}{2} \tag{6-1}$$

Die Simulationen wurden mit der Software „buildopt V1.0“ durchgeführt, welche am Institut für Bauphysik und Bauakustik der TU Wien von Herrn Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr.techn. Thomas Bednar entwickelt worden ist. Dabei handelt es sich um ein Multizonenmodell, das sich sowohl für thermische als auch hygrische Gebäudesimulationen eignet. Es ist in der Lage, alle inneren und äußeren Parameter in ihrem zeitlichen Verlauf zu berücksichtigen, wie beispielsweise Außenlufttemperatur, Sonnenstand und -einstrahlung, Windrichtung und -stärke, Verschattung, Speicherfähigkeit der Bauteile, Energiegewinn, Luftaustausch, Oberflächentemperatur usw.

Die Eingabe geschieht über Textfiles, bei welchen zunächst folgende Parameter festgelegt werden müssen: Materialdaten, Fensterdaten, Konstruktionen, Nutzung, Gelände, Wärmebrücken, Außenklima sowie das Gebäudemodell.

Der Ablauf der nachfolgenden Simulationsstudien erfolgte in 2 Schritten:
Zunächst wurde für jede Variante ein Simulationsszenario durchgerechnet, bei dem während der Sommermonate keine Kühlung vorgesehen war. Nur so war es möglich, die sich einstellenden maximalen operativen Raumtemperaturen zu erfassen.
Da auch der Kühlbedarf und die maximale Kühllast untersucht werden mussten, wurde in einem zweiten Simulationsszenario für die Sommermonate eine Kühlung vorgesehen, die ab einer Raumtemperatur von 26℃ aktiviert wurde.

6.1 Beschreibung des Gebäudes

Zur Überprüfung der bauphysikalischen energetischen Performance wurde ein Achtzonenmodell gewählt, das ein Einfamilienhaus abbilden soll.
Das zweigeschossige Achtzonenmodell besteht aus je 4 Zonen pro Geschoss. Eine Zone hat die Abmessung B/L/H = 5/5/3m. Damit misst das gesamte Gebäude B/L/H = 10/10/6m, verfügt über eine Bruttofläche von 200m^2 und einem Bruttovolumen von 600m^3. Die Außenwandfläche inklusive Fenster beträgt daher 240m^2.

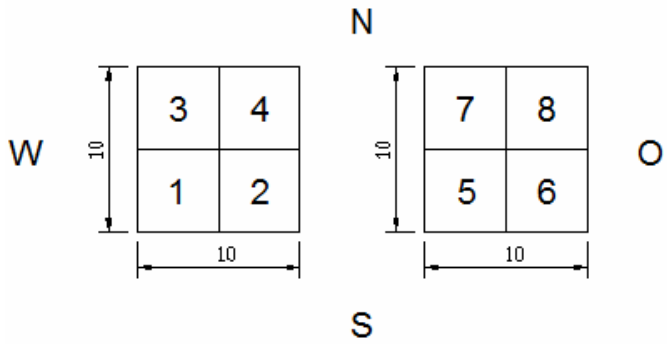


Abbildung 33: Grundriss des Achtzonenmodells – Zonennummerierung (links – Erdgeschoss, rechts – Obergeschoss) [eigene Abbildung]

6.1.1 Klima

Für die Simulationsszenarien des Achtzonenmodells wurden die IWEC-Wetterdaten für den Standort Wien – Schwechat nach den Testreferenzjahren herangezogen. In Abbildung 1 und 2 des Kapitels 3 sind bereits die Stundenwerte der Außentemperatur und die direkten solaren Einstrahlungen grafisch dargestellt worden.

6.1.2 Aufbauten

Nachfolgend werden die Aufbauten der Außen- und Innenbauteile für das Achtzonenmodell ohne PCM-Einsatz angegeben:

Erdanliegender Fußboden				
Bezeichnung	Dicke	Rohdichte	spez. Wärmekap.	Wärmeleitfähigkeit
	[cm]	[kg/m^3]	[J/kgK]	[W/mK]
Zementestrich	4	2000	1080	1.33
EPS	20	17	500	0.04
Stahlbeton	20	2300	1080	2.30
U=0,192W/m^{2}K				

Außenwand				
Bezeichnung	Dicke	Rohdichte	spez. Wärmekap.	Wärmeleitfähigkeit
	[cm]	[kg/m^3]	[J/kgK]	[W/mK]
EPS	20	17	500	0.04
Hochlochziegel	20	800	800	0.20
U=0,163W/m^{2}K				

Innenwand				
Bezeichnung	Dicke	Rohdichte	spez. Wärmekap.	Wärmeleitfähigkeit
	[cm]	[kg/m^3]	[J/kgK]	[W/mK]
Innenwandziegel	15	800	800	0.20
U=1.053W/m^{2}K				

Zwischendecke				
Bezeichnung	Dicke	Rohdichte	spez. Wärmekap.	Wärmeleitfähigkeit
	[cm]	[kg/m^3]	[J/kgK]	[W/mK]
Stahlbeton	20	2300	1080	2,30
EPS	3	17	500	0,04
Zementestrich	4	2000	1080	1,33
U=0,887W/m^{2}K				

Außendecke				
Bezeichnung	Dicke	Rohdichte	spez. Wärmekap.	Wärmeleitfähigkeit
	[cm]	[kg/m^3]	[J/kgK]	[W/mK]
EPS	20	17	500	0,04
Stahlbeton	20	2300	1080	2,30
U=0,190W/m^{2}K				

Tabelle 2: Aufbauten [eigene Abbildung]

Fenster

U-Fenster = 0,846 W/m^{2}K; g = 0,5; z = 0,2;

Sonnenschutz: Aktivierung ab einer Strahlung von 300 W/m^2 oder ab 23℃ Raumtemperatur

Für die nachfolgenden Simulationsszenarien, bei denen PCM auf paraffinischer Basis untersucht wurde, gelten ebenfalls die oben angeführten Aufbauten. Jedoch kommt es durch den PCM-Einsatz zu einer Veränderung des Wandaufbaus. Für die Füllung der Ziegelhochlöcher mit PCM ist ebenfalls eine Wärmeleitfähigkeit von 0,2 $\frac{W}{m \cdot K}$ in Rechnung gestellt worden. Die PCM-Schichtstärke sowie deren spezifische Wärmekapazität ist je nach untersuchter Variante unterschiedlich und daher dem jeweiligen Unterkapitel zu entnehmen.

6.1.3 Nutzung

Die Simulationen erfolgten auf Basis einer Wohnnutzung mit folgenden Parametern:

Winter:

Das Winterhalbjahr wird für das Intervall von Stunde 0 bis 2880 und von Stunde 6552 bis 8760 definiert.

Heizgrenztemperatur: 20°C

Luftwechsel = 0,12 h^{-1} (Wärmerückgewinnung)

Innere Lasten: 3W/m^2

Sommer:

Das Sommerhalbjahr erstreckt sich von Stunde 2880 bis 6552.

Luftwechsel: minimal = 0,12 h^{-1}, maximal = 2,0 h^{-1} (in Nachtstunden)

Innere Lasten: 3W/m^2

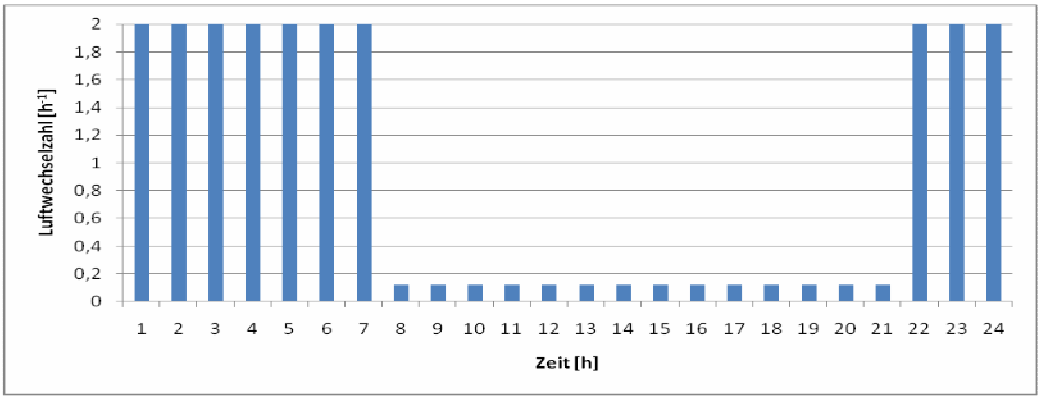


Abbildung 34: Luftwechselzahl im Sommer [eigene Abbildung]

Bei den nachfolgend untersuchten Varianten wurden stets eine ideale Klimatisierung jeder Zone, eine Lüftung aus der Nutzung sowie ein aktivierbarer Sonnenschutz angenommen.

6.1.4 Variation des Fensteranteils

Bei den nachfolgenden Simulationsszenarien wurden stets die folgenden 3 Fenstervarianten untersucht, um den Einfluss des Fensteranteils auf die energetische Performance des Gebäudes abbilden zu können.

- **Niedriger Fensteranteil**

Bei dieser Variante sind je zwei 2m^2 große Fenster pro Zone vorhanden. Daraus resultiert ein Fensteranteil von 13,3% der Außenwandfläche.

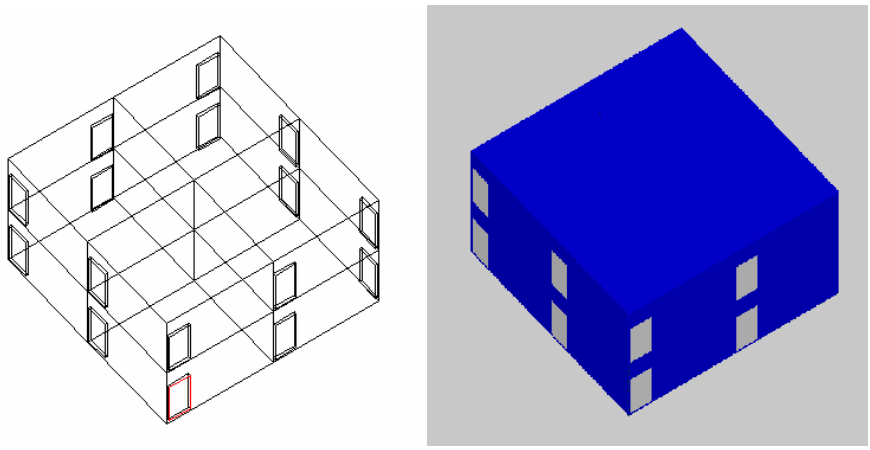


Abbildung 35: Achtzonenmodell - Niedriger Fensteranteil [eigene Abbildung]

- **Mittlerer Fensteranteil**

Hier sind südseitig vier 8m^2 große Fensterflächen, ost- und westseitig je vier 2m^2 große Fenster angeordnet. Nordseitig kommen diesmal keine Fenster zu liegen. Umgerechnet auf den Anteil der Fensterfläche an der Außenwand ergibt dies 20%.

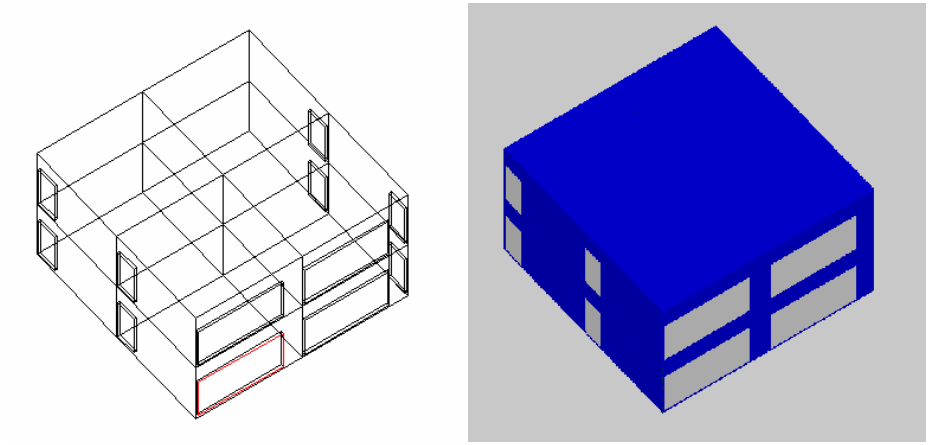


Abbildung 36: Achtzonenmodell - Mittlerer Fensteranteil [eigene Abbildung]

- **Hoher Fensteranteil**

Für diese Variante werden jeder Zone je zwei 8m^2 große Fensterflächen zugewiesen. Dies hat einen Fensteranteil von 53,3% an der Außenwandfläche zur Folge.

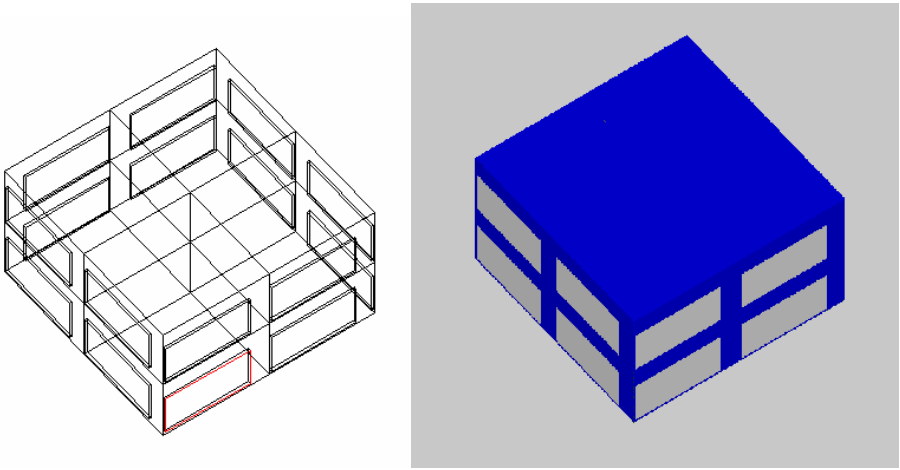


Abbildung 37: Achtzonenmodell - Hoher Fensteranteil [eigene Abbildung]

6.2 Zeitschritt- und Schichtdickenvariation

In einem ersten Schritt wurden für die zuvor beschriebenen 3 Fenstervarianten der Einfluss der Zeitschrittwahl und der Schichtdickenaufteilung auf die Ermittlung des Heizwärmebedarfs, der maximalen Heizlast sowie der sich einstellenden maximalen operativen Raumtemperatur untersucht, um für die nachfolgenden Simulationsszenarien jene Zeitschritt- und Schichtdickenaufteilung zu wählen, bei der keine all zu großen Abweichungen mehr auftreten.
Der Kühlbedarf wurde bei diesen ersten Untersuchungen vernachlässigt, denn nur so ist es möglich, die sich einstellende maximale operative Raumtemperatur zu erhalten.

Hierbei wurden folgende Zeitschritt- und Schichtdickenvariationen untersucht:

Δt_{max} = 1sek; 5sek; 10sek; 60sek; 120sek; 240sek; 480sek; 600sek

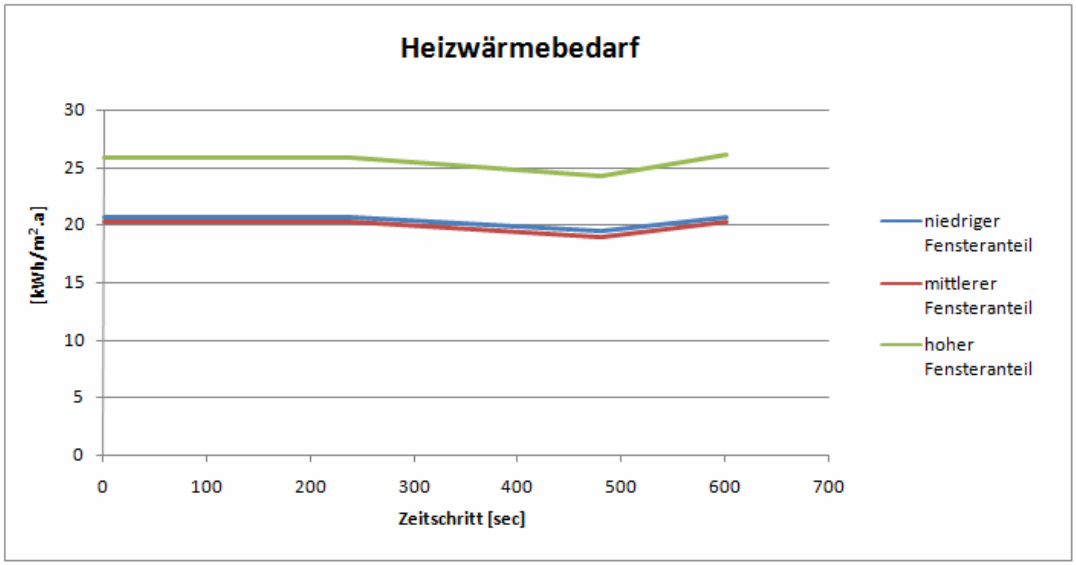
Δd = 10cm; 5cm; 1cm; 0,5cm

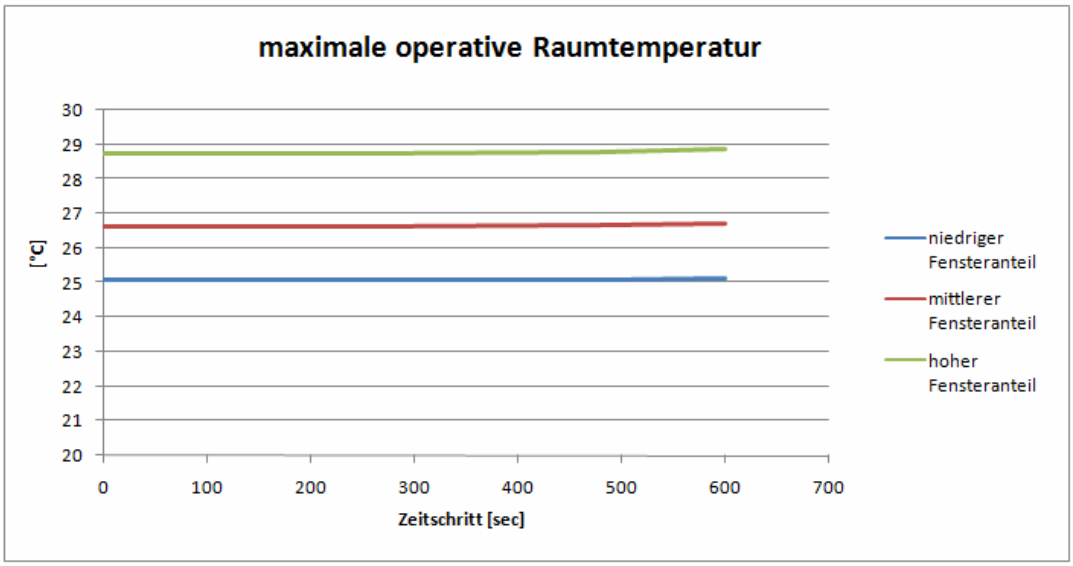
Δd steht für die jeweilige Schichtstärkenaufteilung, die das Programm „buildopt“ verwendet, um die Konstruktion in kleinere Schichten zu zerlegen.

Alle nachfolgenden Untersuchungen wurden für die Zeitdauer von 365 Tagen simuliert, wobei ein Vorlauf von 30 Tagen angesetzt wurde, damit sich das Gebäude bereits in einem sinnvoll eingespielten Zustand – hinsichtlich Temperatur, Heizlast, usw. – befindet.

6.2.1 Ergebnisse der Zeitschrittvariationen

Nachstehend werden die Simulationsergebnisse der Zeitschrittvariationen für das oben bereits beschriebene Achtzonenmodell – ohne PCM-Einsatz – angeführt. Für diese Untersuchungen ist eine Schichtdickenaufteilung Δd von 4cm verwendet worden.





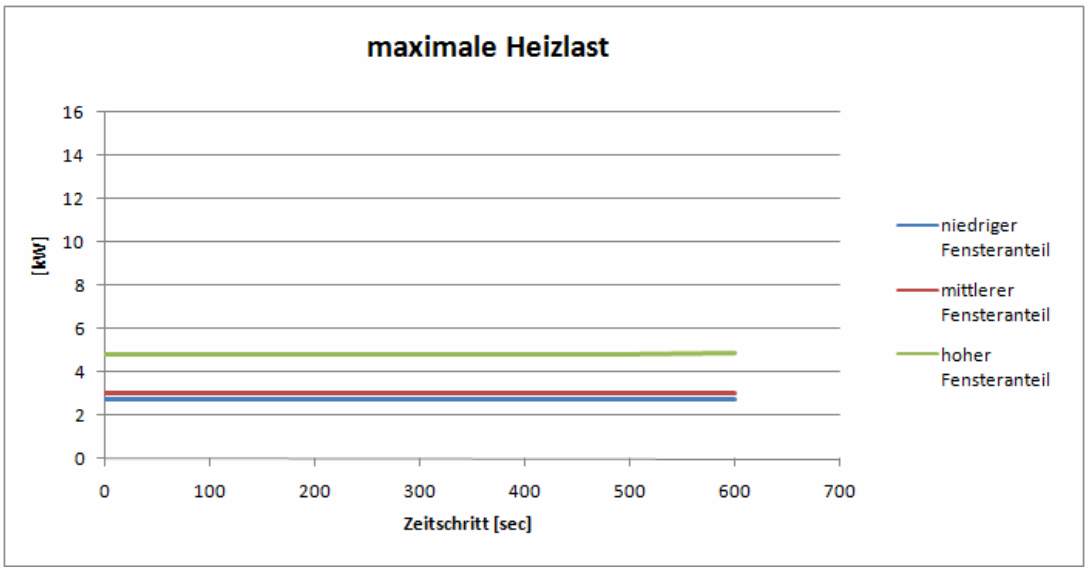


Abbildung 38: oben (Seite 56): Heizwärmebedarf; Mitte (Seite 56): maximale sich einstellende operative Raumtemperatur; unten: maximale Heizlast - für unterschiedlich gewählte Zeitschritte [eigene Abbildung]

Man erkennt, dass eine weitere Verkleinerung des Zeitschrittes unter 200sek keine wesentliche Auswirkung auf den Heizwärmebedarf, die maximale Heizlast und auf die sich einstellende maximale operative Raumtemperatur hat.

6.2.2 Ergebnisse der Schichtstärkenaufteilungen

In Abbildung 39 sind die Ergebnisse der Schichtdickenvariationen dargestellt, wobei die Berechnung mit einem Zeitschritt von 10sek. durchgeführt worden ist.

Für den Heizwärmebedarf, die maximale Heizlast und die sich einstellende maximale operative Raumtemperatur hat die Verfeinerung der Schichtdicken keinen nennenswerten Einfluss.

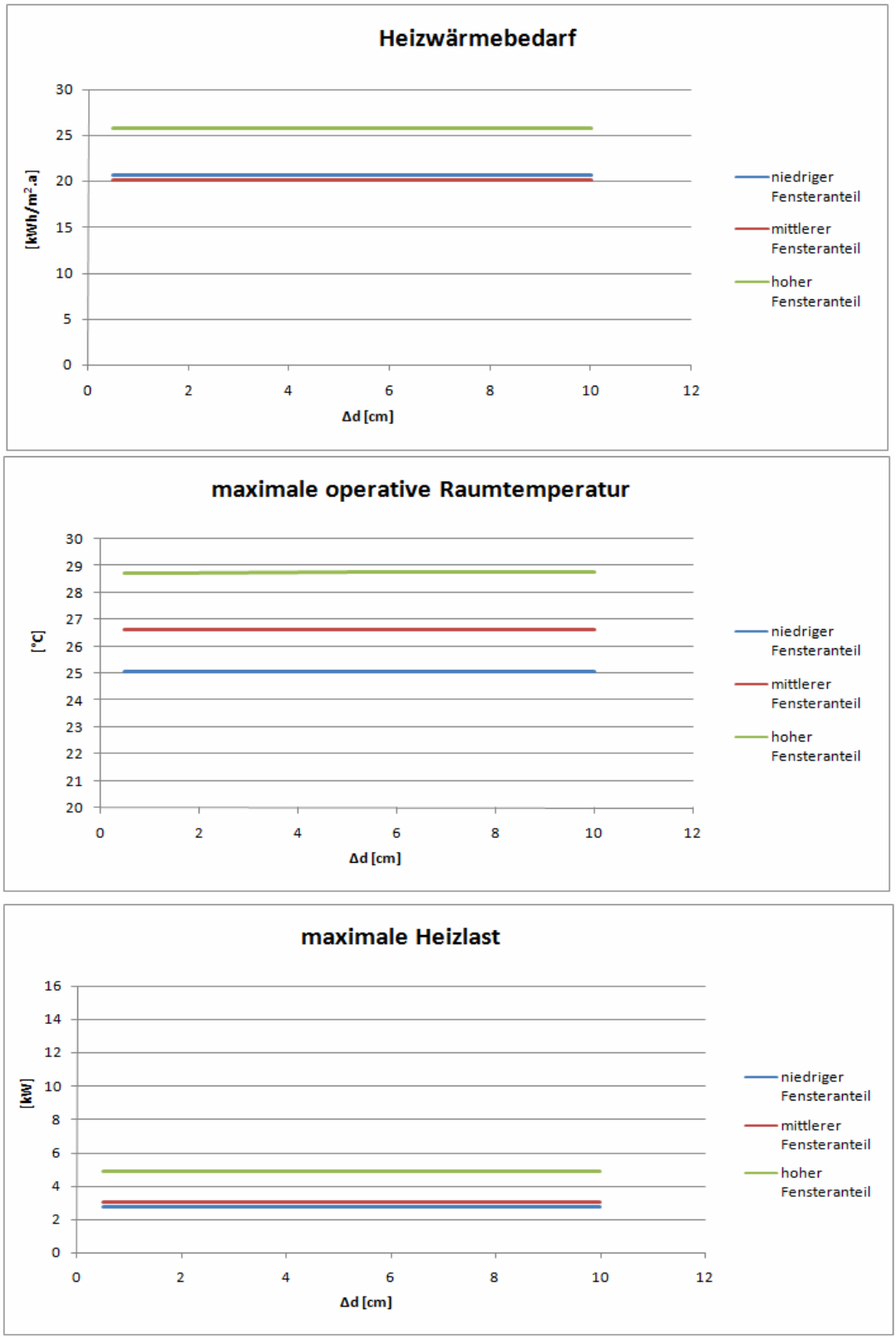


Abbildung 39: oben: Heizwärmebedarf; Mitte: maximale sich einstellende operative Raumtemperatur; unten: maximale Heizlast - für unterschiedlich gewählte Schichtdicken Δd [eigene Abbildung]

Aufgrund der oben untersuchten Variationen hat es sich als sinnvoll erwiesen, für die nachfolgenden Simulationsszenarien einen Zeitschritt von 10sek und eine Schichtstärkenaufteilung Δd von 1cm zu wählen.

6.3 Thermisches Verhalten ohne PCM-Einsatz

Bevor mit den Untersuchungen zum Einfluss der PCM-Stoffe auf das Modell begonnen werden konnte, wurde zunächst das thermische Verhalten des Gebäudes ohne PCM-Einsatz für die zuvor beschriebenen 3 Fenstervarianten mittels Simulationsszenarien ermittelt.

6.3.1 Niedriger Fensteranteil

In Abbildung 40 ist die operative Innenraumtemperatur für alle 8 Zonen über das gesamte Jahr aufgetragen, woraus deutlich die jahreszeitlichen Schwankungen mit annähernd konstanten Raumtemperaturen um 20℃ im Winter und deutlichen Schwankungen im Sommer erkennbar sind. Zur Verdeutlichung der Ergebnisse wird jener Tag, an dem mit der höchsten operativen Raumtemperatur zu rechnen ist, in Abbildung 41 dargestellt.

Beim Vergleich der sich einstellenden Raumtemperaturen der einzelnen Zonen ist bei diesem niedrigen Fensteranteil noch nicht so deutlich ersichtlich, dass in jenen Zonen, die sich im Obergeschoss (Zone 5,6,7,8) – also unter dem Flachdach – befinden, mit deutlich höheren Temperaturen zu rechnen ist als in jenen, die sich im Erdgeschoss befinden.

Wie erwartet, hat auch die Orientierung der einzelnen Zonen einen wesentlichen Einfluss auf die sich einstellende operative Raumtemperatur.

So ist auch die im Obergeschoss liegende und nach Süd-Westen orientierte Zone 5 jene, in der die maximale operative Raumtemperatur von 25,01℃ prognostiziert wird.

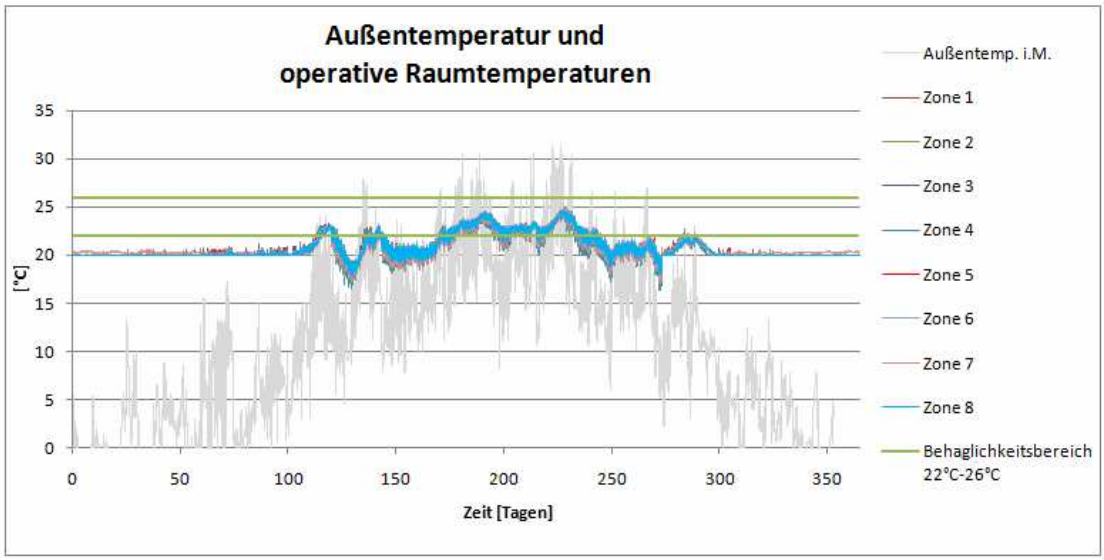


Abbildung 40: Verlauf der Außentemperatur und der operativen Raumtemperaturen aller Zonen für ein Jahr [eigene Abbildung]

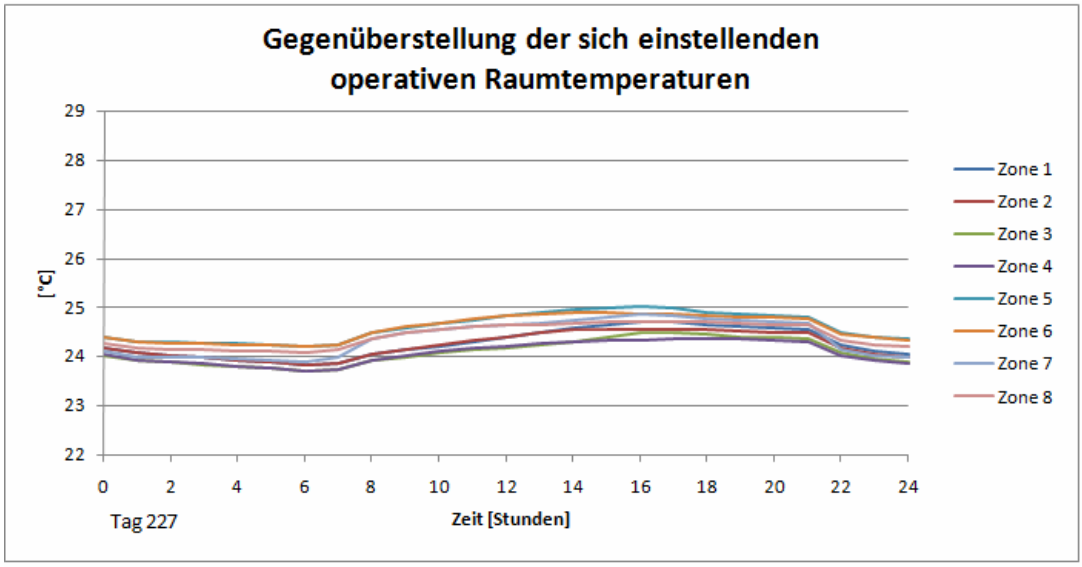


Abbildung 41: operative Raumtemperaturen aller Zonen am Tag mit der höchsten Raumtemperatur [eigene Abbildung]

Bei Betrachtung der operativen Temperaturverläufe der einzelnen Zonen fällt weiters auf, dass in keiner Zone der Behaglichkeitsbereich – also 26℃ – überschritten wird. Daraus kann man schließen, dass während der Sommermonate mit keiner zusätzlichen Kühlleistung gerechnet werden muss. Das heißt, dass aufgrund des niedrigen Fensteranteils die solaren Gewinne zu gering sind, um im Sommer ein Überhitzungsproblem zu verursachen.
Diese Überlegung wird auch durch die nachstehende Grafik verdeutlicht.
Die maximale Heizlast tritt zirka am 32. Tag des Jahres auf (Ende Jänner/Anfang Februar).

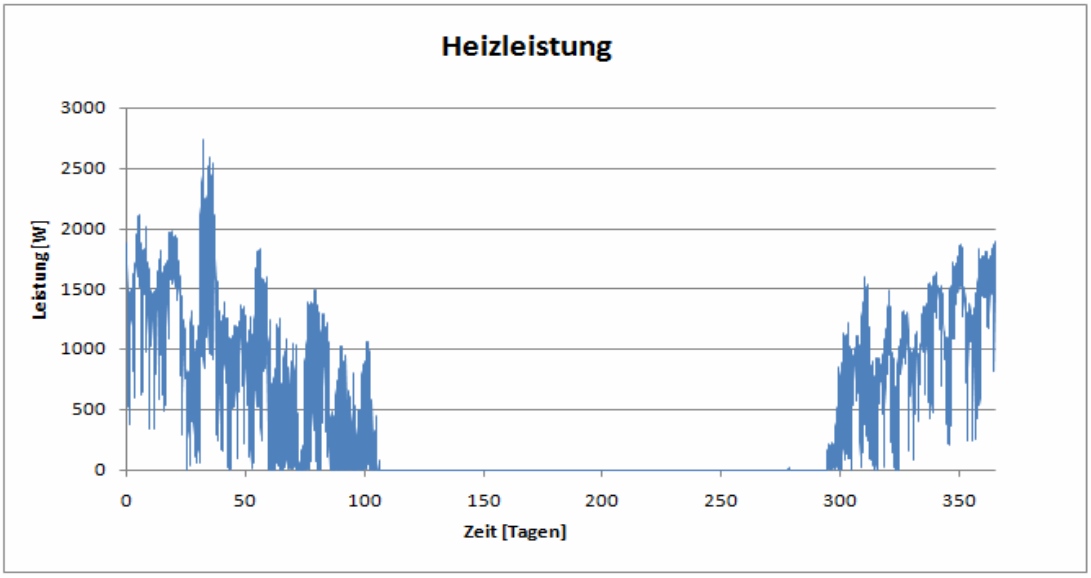


Abbildung 42: Verlauf der Heizleistung im Jahr, niedriger Fensteranteil - ohne PCM-Einsatz [eigene Abbildung]

6.3.2 Mittlerer Fensteranteil

Bei dieser Variante ist, aufgrund der großen südseitig angeordneten Fensterflächen, bereits mit einer Zunahme der sich einstellenden operativen Raumtemperatur zu rechnen. In Abbildung 43 wird für Zone 5, in der wie auch beim niedrigen Fensteranteil die maximale Raumtemperatur auftritt, der Verlauf der jährlichen operativen Raumtemperatur, bei deaktivierter Kühlung, dargestellt. Verglichen mit der vorigen Variante fällt auf, dass es hier bereits in den Wintermonaten zu kleineren Temperaturschwankungen kommt. Diese solaren Wärmegewinne in den Wintermonaten wirken sich jedoch günstig auf den Heizbedarf aus.
Zeichnet man nun wieder jenen Tag heraus, an der die höchste operative Raumtemperatur prognostiziert wird so sieht man, dass diesmal sehr wohl mit Raumtemperaturen über 26℃ zu rechnen ist. Hier erkennt man nun auch deutlich, aufgrund der solaren Einstrahlung, eine Temperaturdifferenz zwischen den nord- und südseitig orientierten Zonen.

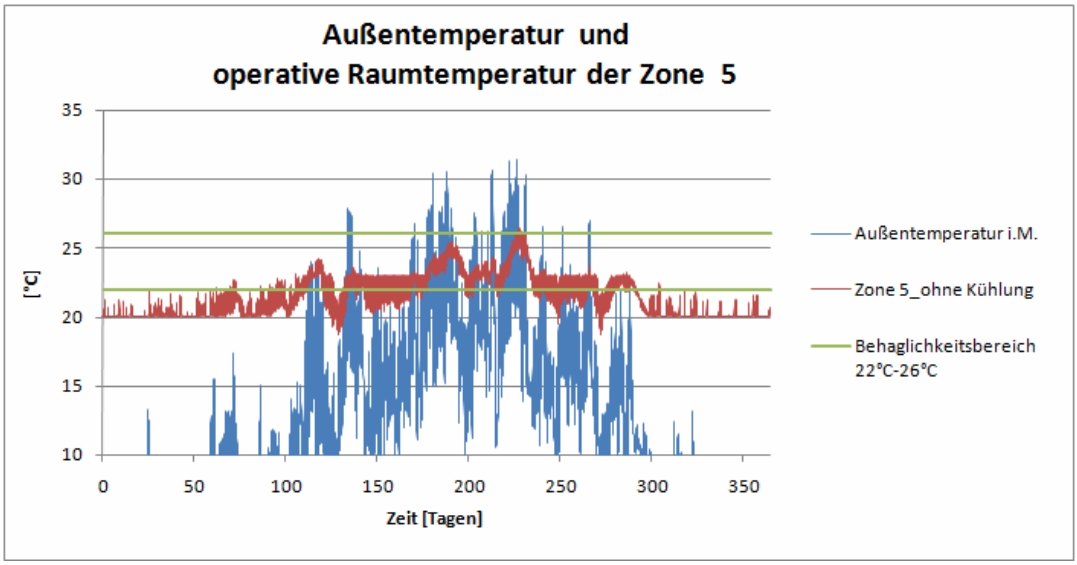


Abbildung 43: Verlauf der Außentemperatur und der operativen Raumtemperatur – Zone 5 (ohne Kühlung) für ein Jahr [eigene Abbildung]

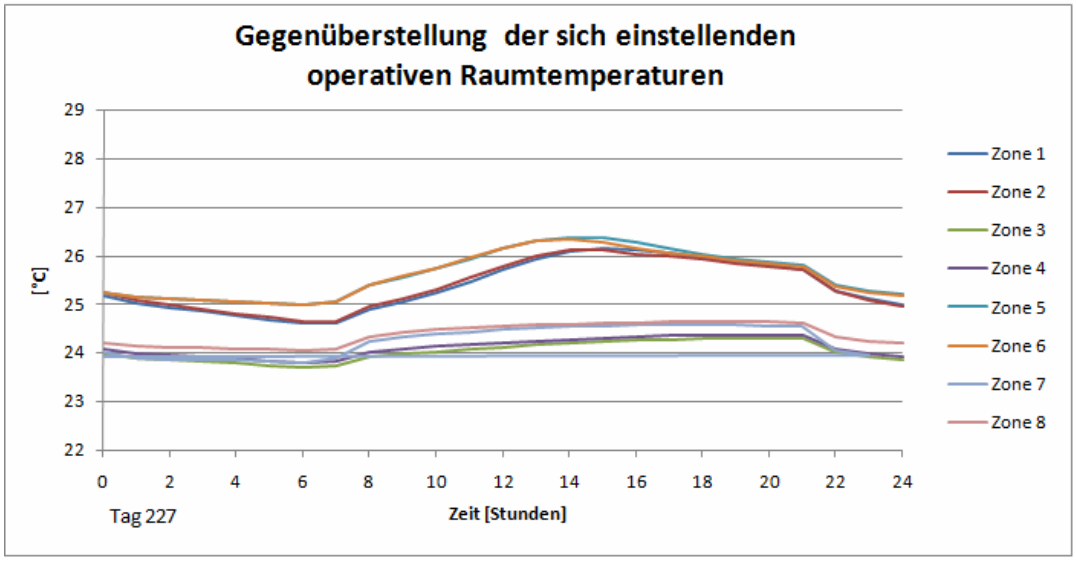


Abbildung 44: operative Raumtemperaturen aller Zonen am Tag mit der höchsten Raumtemperatur [eigene Abbildung]

Die Behaglichkeitsgrenze von 26℃ wird nur in den südseitigen Zonen 5, 6, 1 und 2 überschritten. Dies hat zur Folge, dass während der Sommermonate mit geringen Kühlleistungen gerechnet werden muss, um die Raumtemperatur innerhalb des Behaglichkeitsbereiches zu halten. (Abbildung 45)

Die maximale Heizlast tritt in derselben Periode (Ende Jänner/Anfang Februar), wie bei jener Variante mit dem niedrigen Verglasungsanteil, auf.

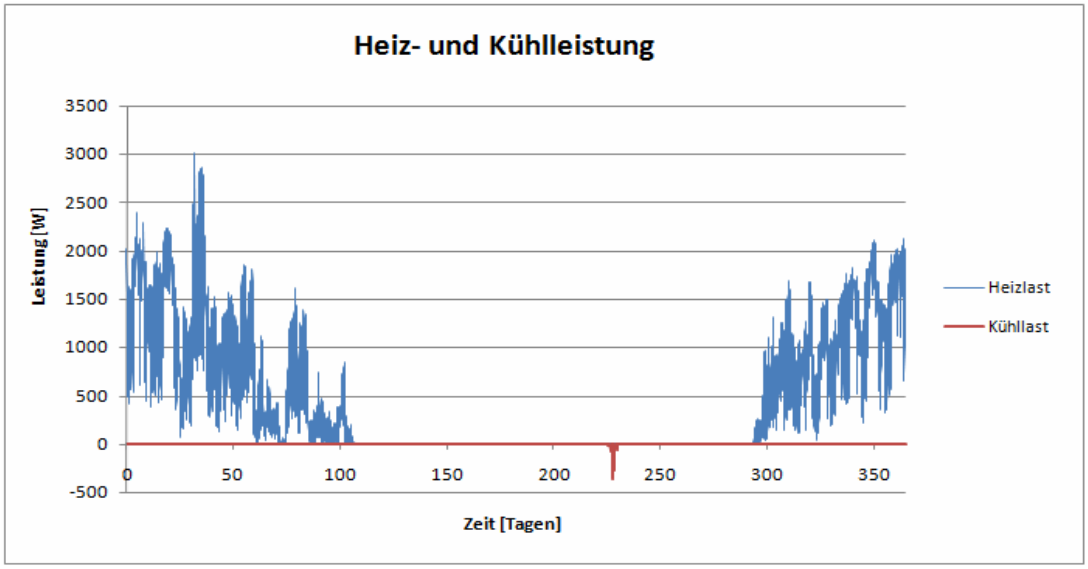


Abbildung 45: Verlauf der Heiz- und Kühlleistung im Jahr, mittlerer Fensteranteil - ohne PCM-Einsatz [eigene Abbildung]

6.3.3 Hoher Fensteranteil

Wie erwartet, treten aufgrund der großen Fensterflächen deutliche Temperaturschwankungen bereits im Winter auf. Der Grund für diese Schwankungen ist zum einen der solare Eintrag, der im Winter eigentlich gewünschte Energiegewinne bringen würde, doch durch den großen Verglasungsanteil geht während der kühlen Nachtstunden einiges der gewonnen thermischen Energie, trotz gutem U-Wert der Fenster, wieder verloren.

Im Sommer kommt es, wie erwartet, zu einer extremen Aufheizung aller Zonen. Dies ist in Abbildung 47 gut ersichtlich, in der wieder jener Tag heraus gezeichnet ist, an der mit der höchsten operativen Raumtemperatur zu rechnen ist.

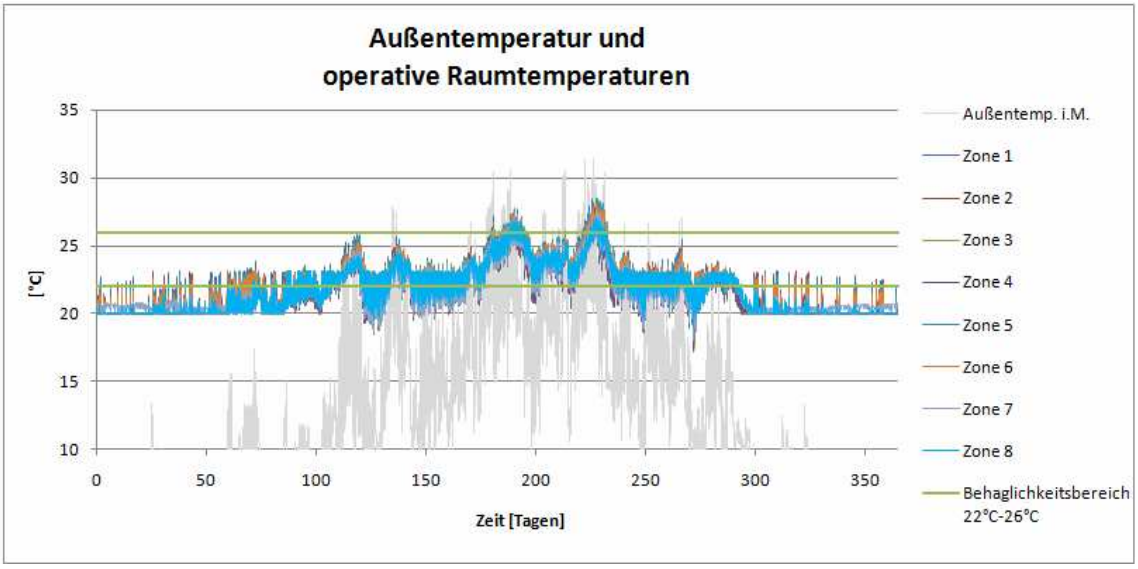


Abbildung 46: Verlauf der Außentemperatur und der operativen Raumtemperaturen aller Zonen für ein Jahr [eigene Abbildung]

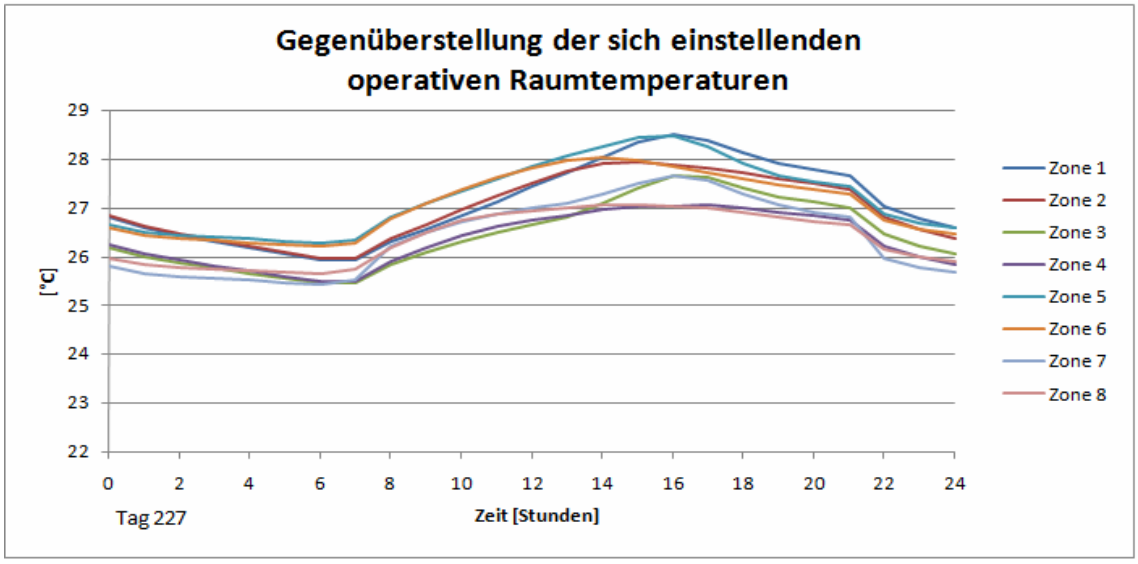


Abbildung 47: operative Raumtemperaturen aller Zonen am Tag mit der höchsten Raumtemperatur [eigene Abbildung]

Betrachtet man den Jahresverlauf der Raumtemperaturen so erkennt man, neben der deutlichen Korrelation mit der Außentemperatur, längere Hitzeperioden im Gebäudeinneren, in denen der Behaglichkeitsbereich deutlich überschritten wird. Diese überschüssige thermische Energie, die zur Aufheizung des Gebäudes führt, kann nur mittels zusätzlicher Kühlung wieder abgeführt werden.

Die dafür benötigte Kühlleistung ist in Abbildung 48 dargestellt. Man erkennt, dass durchaus beachtliche Kühllasten erforderlich sind, um das Gebäude wieder in den Behaglichkeitsbereich (Raumtemperatur < 26℃) zu br ingen.

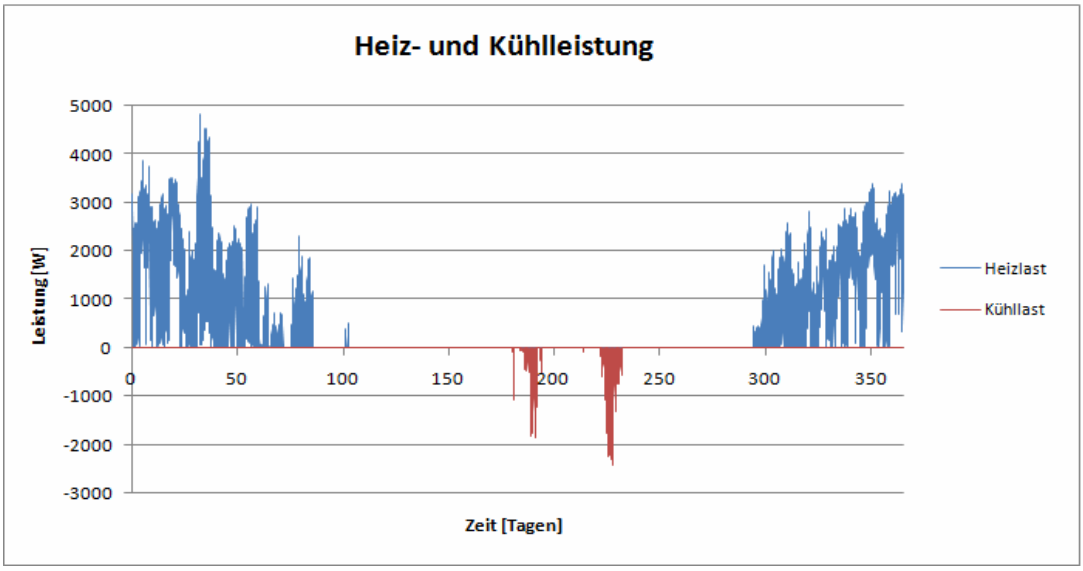


Abbildung 48: Verlauf der Heiz- und Kühlleistung im Jahr, hoher Fensteranteil - ohne PCM-Einsatz [eigene Abbildung]

6.3.4 Zusammenstellung der Ergebnisse

In den vorhergehenden Kapiteln wurde der Einfluss der Fensterflächen auf das thermische Verhalten des zuvor definierten Gebäudes (Achtzonenmodell) untersucht. In den folgenden Darstellungen werden die Ergebnisse dieser Simulationen nochmals zusammengefasst:

	HWB [kWh/m²a]	KB [kWh/m²a]	max. t_{op} [°C]	max HL [kW]	max KL [kW]
niedriger Fensteranteil	20.35	0.00	25.01	2.74	0.00
mittlerer Fensteranteil	19.78	-0.01	26 (26.39)	3.02	-0.36
hoher Fensteranteil	25.60	-0.67	26 (28.50)	4.84	-2.43

Tabelle 3: Zusammenstellung der Simulationsergebnisse des Achtzonenmodells – ohne PCM-Einsatz [eigene Abbildung]

Die in Klammer stehenden roten Zahlen stehen für die maximale operative Raumtemperatur die sich einstellen würde, ohne Aktivierung einer zusätzlichen Kühlung. Diese Temperatur ist auch im nachfolgenden Diagramm grafisch dargestellt, um eine bessere Vergleichbarkeit zu erzielen.

Diese Darstellungsweise wurde auch für alle nachfolgenden Simulationen beibehalten.

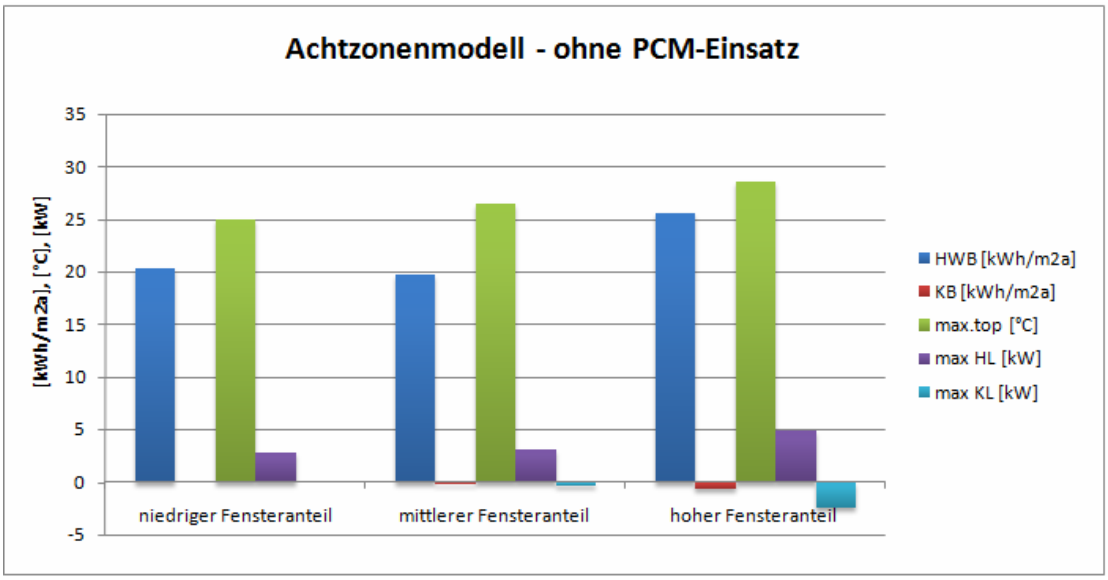


Abbildung 49: Grafische Zusammenstellung der Simulationsergebnisse des Achtzonenmodells – ohne PCM-Einsatz [eigene Abbildung]

Aus den durchgeführten Untersuchungen ist wie erwartet erkennbar, dass das thermische Verhalten eines Gebäudes sehr stark von den anteiligen Fensterflächen abhängig ist.

Im Allgemeinen kann man feststellen, dass durch den Anstieg des Verglasungsanteils an der Außenfläche die operative Raumtemperatur und damit auch der Kühlbedarf zunehmen.

Anhand des ermittelten Heizwärme- und Kühlbedarfs sowie der sich einstellenden operativen Raumtemperaturen ohne PCM-Einsatz wird es möglich sein, Vergleiche mit den nachfolgend untersuchten Varianten, in denen PCM zum Einsatz kommt, zu ziehen.

6.4 Thermisches Verhalten mit PCM-Einsatz

6.4.1 PCM in gesamter Wand

Bevor mit der Untersuchung der optimalen Lage des PCM im Ziegel begonnen werden konnte, wurde zunächst für die zuvor definierten Wandaufbauten (Kapitel 6.1.2, Außen- und Innenwand) das Ziegelmauerwerk, das komplett mit PCM gefüllt war, getestet, um dessen thermisches Verhalten darzustellen. Diese Untersuchungen waren notwendig um zu erkennen, welches der nachfolgend untersuchten PCM-s die größte temperaturstabilisierende Wirkung auf das Gebäude haben werden.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der 4 untersuchten Varianten dargestellt:

6.4.1.1 Variante A – PCM 20/22°C (max. spezifische Wärmekapazität = 22.000 $\frac{J}{kg \cdot K}$)

Für diese Variante wurde ein PCM gewählt, das seine maximale Wärmespeicherfähigkeit im Temperaturbereich von 20℃ bis 22℃ entfaltet. Dies wäre in etwa vergleichbar mit dem zuvor gemessenen Rubitherm RT20 (Kapitel 5.3.2). Die maximale spezifische Wärmekapazität ist mit 22.000 $\frac{J}{kg \cdot K}$ festgelegt worden, da diese von allen zuvor getesteten Paraffinen erreicht worden ist.

Für die nachfolgenden Simulationen wurde jedoch nicht der exakte Verlauf der gemessenen temperaturabhängigen spezifischen Wärmekapazität verwendet, sondern ein idealisierter Verlauf herangezogen. Damit liegt man nicht nur auf der sicheren Seite sondern kann, aufgrund des schmäleren Temperaturbereiches, in dem höhere Wärmekapazitäten auftreten, bessere Aussagen über das Einsparungs- und Wirkungspotential, in Abhängigkeit vom jeweiligen Schmelzpunkt des PCM, treffen. (Abbildung 50)

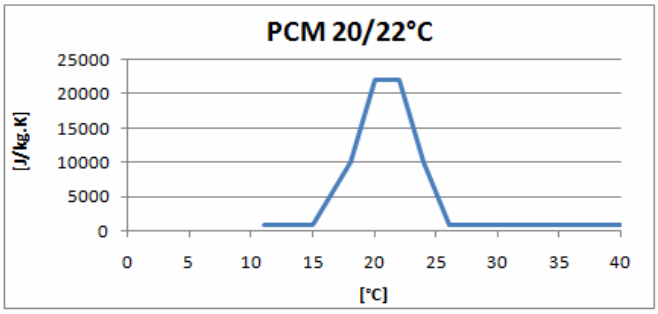


Abbildung 50: spezifische Wärmekapazität in Abhängigkeit von der Temperatur – PCM 20/22°C [eigene Abbildung]

Simulationsergebnisse:

	HWB [kWh/m²a]	KB [kWh/m²a]	max t_{op} [°C]	max HL [kW]	max KL [kW]
Niedriger Fensteranteil	19.29	0.00	23.77	2.27	0.00
Mittlerer Fensteranteil	18.58	0.00	24.76	2.52	0.00
Hoher Fensteranteil	23.90	-0.07	26 (26.83)	4.36	-0.67

Tabelle 4: Zusammenstellung der Simulationsergebnisse – PCM 20/22°C [eigene Abbildung]

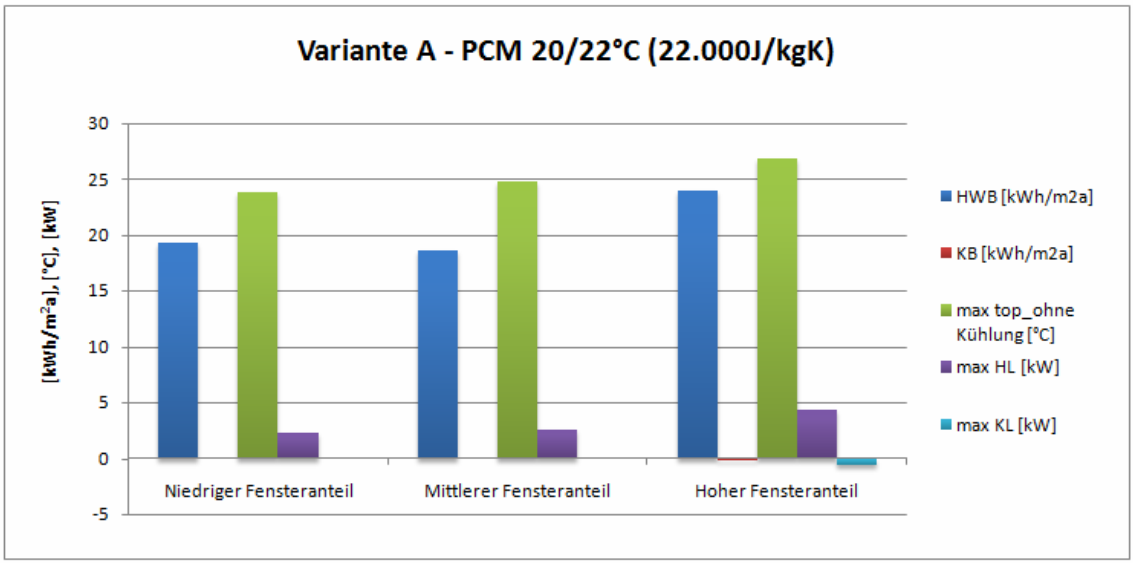


Abbildung 51: Grafische Zusammenstellung der Simulationsergebnisse – PCM 20/22°C in gesamter Wand [eigene Abbildung]

Vergleicht man die Ergebnisse mit jenen ohne PCM-Einsatz so erkennt man, dass die maximal sich einstellenden operativen Raumtemperaturen deutlich sinken. Dies ist auf den bereits mehrfach erwähnten temperaturstabilisierenden Effekt der Latentwärmespeichermaterialien zurückzuführen. Es ist interessant, dass durch die PCM-Anwendung auch der winterliche Wärmeschutz beeinflusst werden kann.

Für das untersuchte PCM kann somit, aufgrund der erhöhten Wärmekapazität, eine Reduktion des Wärmebedarfs für die Heizung und Kühlung erzielt werden. In diesem Fall entfällt sogar fast für die Variante mit dem großen Verglasungsanteil der Kühlbedarf, da der Behaglichkeitsbereich nur gering überschritten wird.

6.4.1.2 Variante B – PCM 22/24°C (max. spezifische Wärmekapazität = 22.000 $\frac{J}{kg \cdot K}$)

Bei Variante B wurde ein PCM mit einer Phasenwechseltemperatur von 22/24°C untersucht, dessen maximale Wärmekapazität ebenfalls 22.000 $\frac{J}{kg \cdot K}$ beträgt. Abbildung 52 zeigt den gewählten idealisierten Verlauf der temperaturabhängigen spezifischen Wärmekapazität.

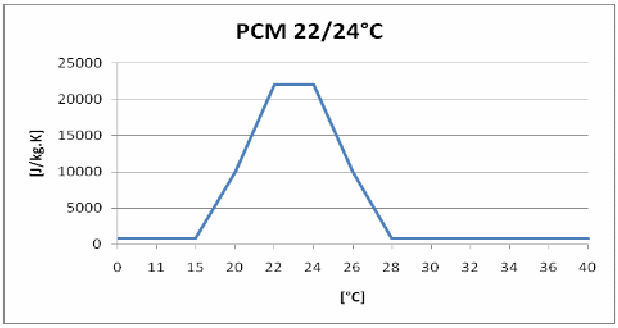


Abbildung 52: spezifische Wärmekapazität in Abhängigkeit von der Temperatur – PCM 22/24°C [eigene Abbildung]

Simulationsergebnisse:

	HWB [kWh/m²a]	KB [kWh/m²a]	max t_{op} [°C]	max HL [kW]	max KL [kW]
Niedriger Fensteranteil	20.25	0.00	24.16	2.74	0.00
Mittlerer Fensteranteil	19.51	0.00	25.22	2.96	0.00
Hoher Fensteranteil	24.90	-0.09	26 (26.90)	4.68	-0.81

Tabelle 5: Zusammenstellung der Simulationsergebnisse – PCM 22/24°C [eigene Abbildung]

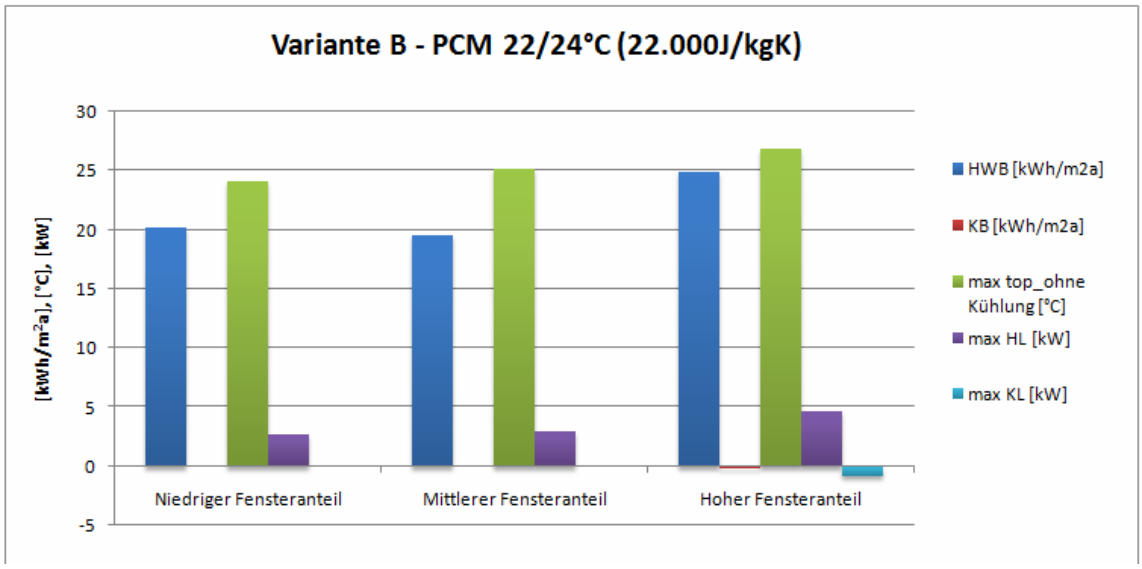


Abbildung 53: Grafische Zusammenstellung der Simulationsergebnisse – PCM 22/24°C in gesamter Wand [eigene Abbildung]

Vergleicht man die Ergebnisse mit jenen ohne PCM-Einsatz so erkennt man zwar wieder eine Reduktion des Heizwärme- und Kühlbedarfs sowie der sich einstellenden operativen Raumtemperatur, doch fällt diese geringer als bei der vorigen Variante (PCM 20/22°C) aus.

6.4.1.3 Variante C – PCM 26/28°C (max. spezifische Wärmekapazität = 22.000 $\frac{J}{kg \cdot K}$)

Da der Temperaturbereich über 26°C als unbehaglich empfunden wird, ist bei Variante C ein PCM zur Untersuchung gekommen, welches seine maximale Wärmespeicherfähigkeit im Temperaturbereich von 26°C bis 28°C entfaltet. Die maximale spezifische Wärmekapazität wurde bei dieser Variante bei 22.000 $\frac{J}{kg \cdot K}$ belassen, um eine Vergleichbarkeit zwischen den untersuchten PCM-s zu gewährleisten.

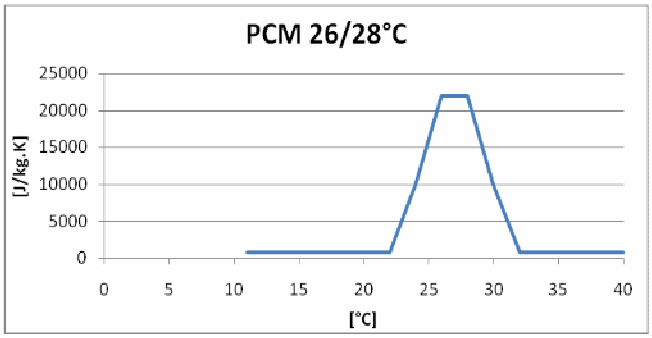


Abbildung 54: spezifische Wärmekapazität in Abhängigkeit von der Temperatur – PCM 26/28°C [eigene Abbildung]

Simulationsergebnisse:

	HWB [kWh/m²a]	KB [kWh/m²a]	max t_{op} [°C]	max HL [kW]	max KL [kW]
Niedriger Fensteranteil	20.35	0.00	24.79	2.74	0.00
Mittlerer Fensteranteil	19.78	0.00	25.90	3.02	0.00
Hoher Fensteranteil	25.60	-0.31	26 (27.36)	4.84	-1.68

Tabelle 6: Zusammenstellung der Simulationsergebnisse – PCM 26/28°C [eigene Abbildung]

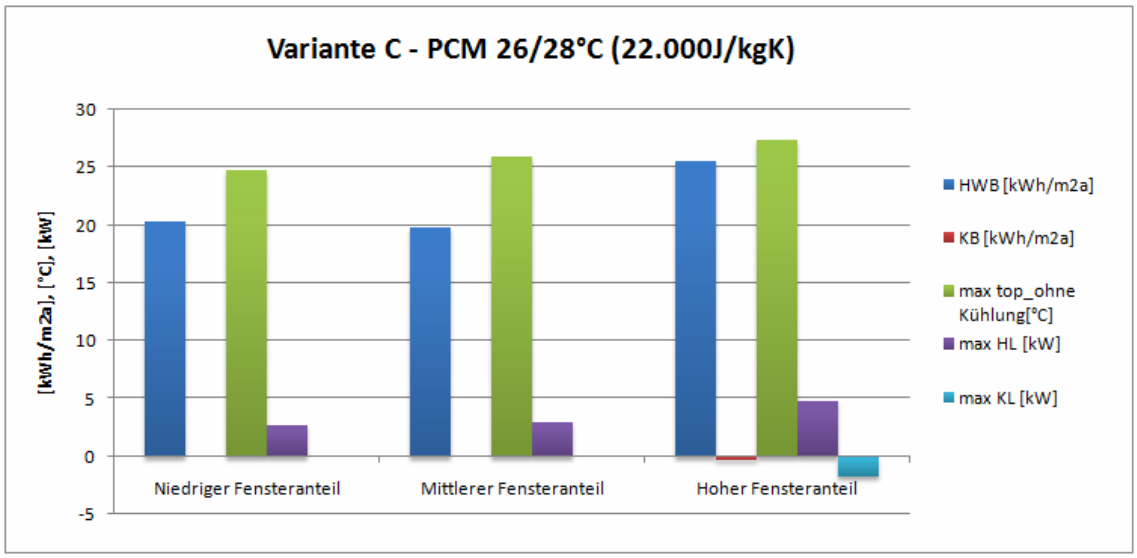


Abbildung 55: Grafische Zusammenstellung der Simulationsergebnisse – PCM 26/28°C in gesamter Wand [eigene Abbildung]

Beim Vergleich der Ergebnisse mit den vorhergehenden Varianten und mit jenen ohne PCM-Einsatz erkennt man, dass der gewählte Temperaturbereich von 26/28℃, in dem der Phasenwechsel von statten geht, keinen positiven Einfluss auf den Heizwärmebedarf hat. Auch die Einsparung an Kühlleistung fällt bei dem Gebäude mit hohem Verglasungsanteil deutlich geringer aus als bei den Schmelzbereichen 20/22℃ und 22/24℃. Dies macht sich auch bei der sich einstellenden maximalen operativen Raumtemperatur bei nicht aktivierter Kühlung bemerkbar.

6.4.1.4 Variante D – PCM 26/28°C (max. spezifische Wärmekapazität = 34.000 $\frac{J}{kg \cdot K}$)

Schließlich wurde noch das thermische Verhalten für ein Latentwärmematerial, dessen Phasenwechsel ebenfalls im Temperaturbereich von 26℃ bis 28℃ von statten geht, aber über eine höhere spezifische Wärmekapazität (34.000 $\frac{J}{kg \cdot K}$) als Variante C verfügt, untersucht. Diese Speicherfähigkeit wäre mit der ermittelten spezifischen Wärmekapazität von Rubitherm RT27 vergleichbar. In Abbildung 56 ist der idealisierte Verlauf der temperaturabhängigen spezifischen Wärmekapazität dargestellt.

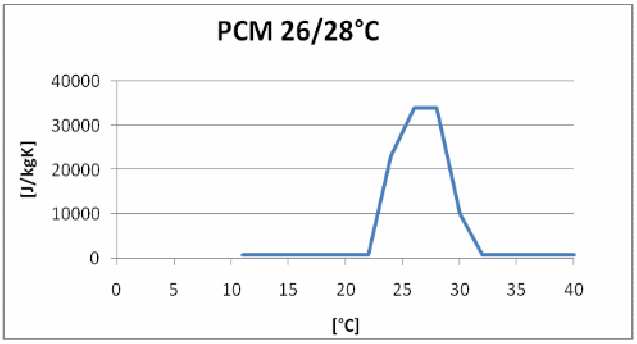


Abbildung 56: spezifische Wärmekapazität in Abhängigkeit von der Temperatur – PCM 26/28°C (34.000J/kgK) [eigene Abbildung]

Simulationsergebnisse:

	HWB [kWh/m²a]	KB [kWh/m²a]	max t_{op} [°C]	max HL [kW]	max KL [kW]
Niedriger Fensteranteil	20.35	0.00	24.73	2.74	0.00
Mittlerer Fensteranteil	19.78	0.00	25.68	3.02	0.00
Hoher Fensteranteil	25.60	-0.14	26 (26.96)	4.84	-0.99

Tabelle 7: Zusammenstellung der Simulationsergebnisse – PCM 26/28°C (34.000J/kgK) [eigene Abbildung]

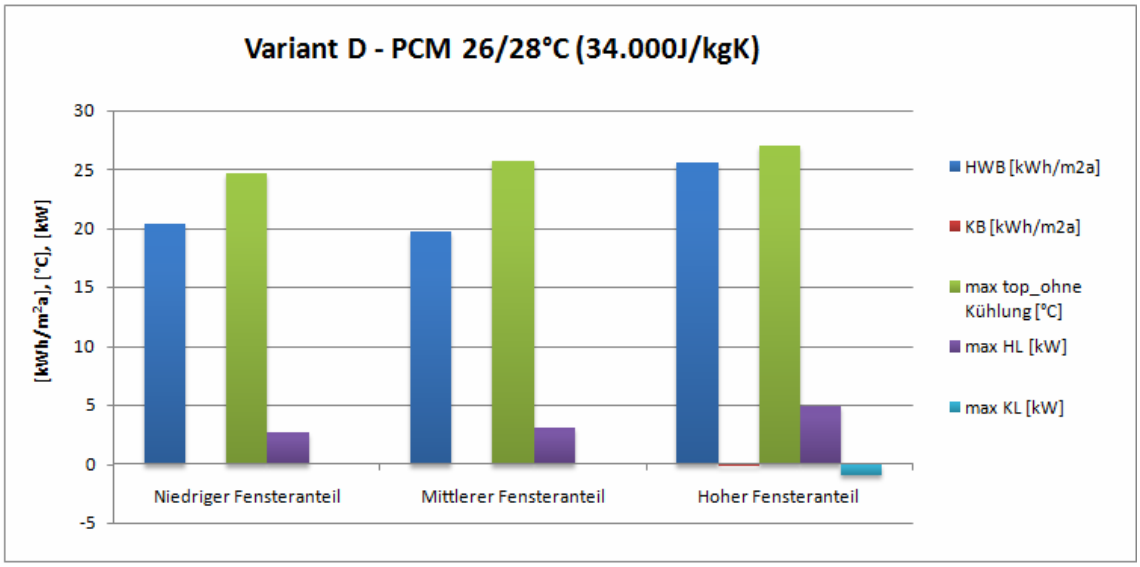


Abbildung 57: Grafische Zusammenstellung der Simulationsergebnisse – PCM 26/28°C (34.000J/kgK) in gesamter Wand [eigene Abbildung]

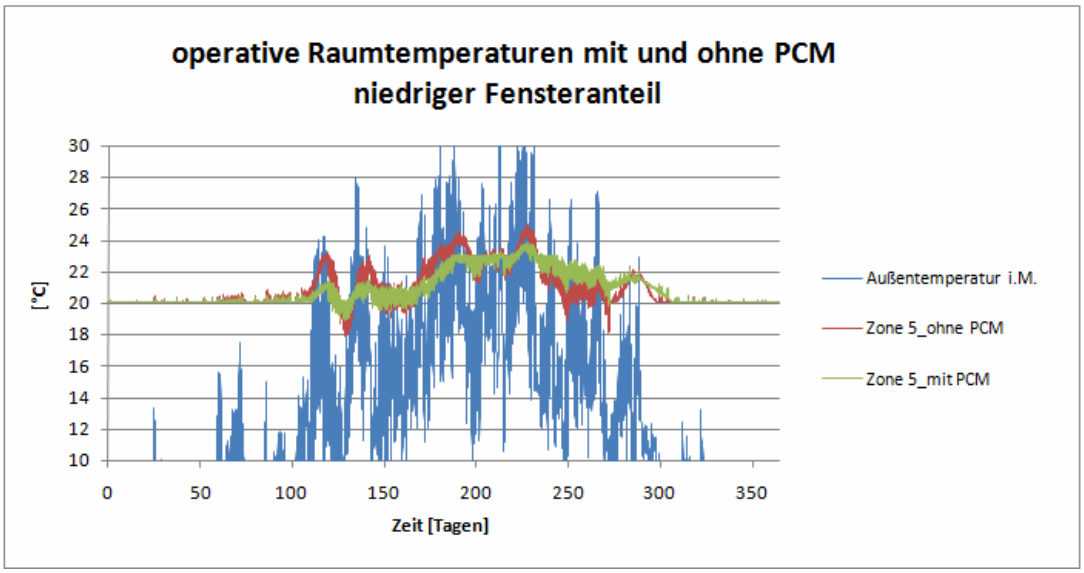
Auch diese Variante bringt keine Verringerung der Heizlast, verglichen mit jenen ohne PCM-Einsatz, mit sich. Dies ist vor allem auf den späteren Phasenwechsel zurückzuführen, denn während der Wintermonate bleibt das PCM inaktiv, da die Raumtemperatur während dieser Jahreszeit die 26℃ Marke nicht überschreitet. So wird das Latentwärmespeichermaterial lediglich während der heißen Sommermonate aktiviert.

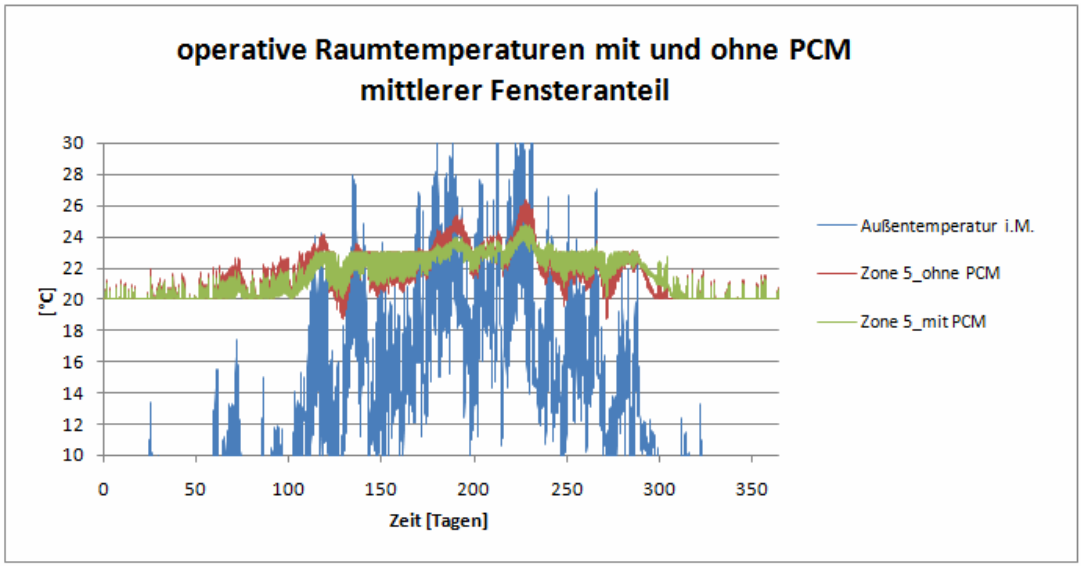
Durch die höhere Wärmekapazität kann, verglichen mit Variante C, durchaus Kühlleistung eingespart werden, da mehr thermische Energie in der PCM-Schicht zwischengespeichert werden kann. Dies wirkt sich auch günstig auf die sich einstellende maximale operative Raumtemperatur aus, die sich beispielsweise für den hohen Fensteranteil um 0,4℃, verglichen zur vorigen Variante, verringert.

6.4.1.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Generell kann durch die Erhöhung der Speicherkapazität der Kühlbedarf und bei entsprechend niedrigem Schmelzpunkt auch der Heizwärmebedarf, durch den Einsatz von PCM, reduziert werden.
Bei Vergleich aller Varianten verfügt jedoch Variante A – also jenes PCM, das seine maximale Speicherkapazität im Temperaturbereich 20/22℃ besitzt – über das größte Einsparungspotential für dieses Modell.

Um die temperaturstabilisierende Wirkung von PCM aufzuzeigen, wurden nachfolgend die sich einstellenden operativen Raumtemperaturen der Zone 5, mit und ohne PCM, für ein Jahr miteinander verglichen. Als PCM wurde jenes, dessen Phasenwechsel im Temperaturbereich 20/22℃ (Variante A) liegt, verwe ndet.





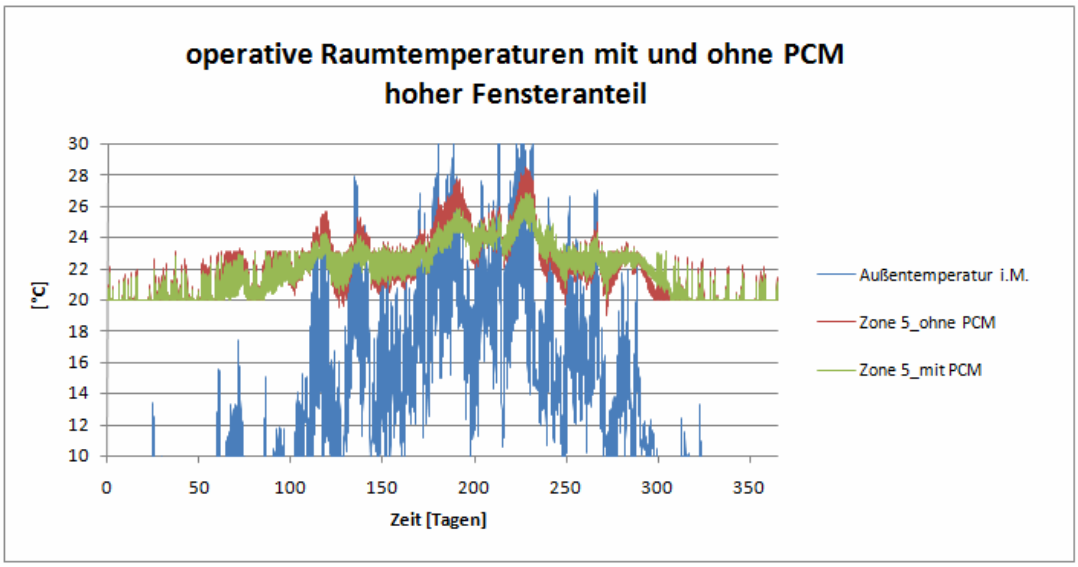


Abbildung 58: Temperaturverlauf mit und ohne PCM – oben (Seite 72): niedriger-; Mitte (Seite 72): mittlerer-; unten: hoher Fensteranteil [eigene Abbildung]

Man erkennt deutlich, dass durch den Einsatz von PCM die sommerlichen Temperaturspitzen bei allen Fenstervariationen deutlich verringert werden können. Am Tag mit der höchsten Raumtemperatur beträgt die erzielte Temperaturabsenkung für die Variante mit hohem Verglasungsanteil immerhin bis zu ca.1,7°C.

Durch den Phasenwechsel im Temperaturbereich um 20°C ist das PCM auch in den Wintermonaten aktiv und sorgt so für ein behaglicheres und ausgeglichenes Raumklima.

Es zeigt sich weiters, dass das Gebäude mit Latentwärmespeichermaterialien bei allen Fenstervariationen in der Nacht und während kurzer Kälteperioden langsamer auskühlt als ohne PCM. Dies ist ebenfalls auf die höhere thermische Speicherkapazität des Gebäudes mit PCM zurückzuführen.

6.4.2 Unterschiedliche Lage und Stärke der PCM-Schicht im Ziegelmauerwerk

Die vorhergehenden Untersuchungen bestätigen den positiven Effekt des PCM-Einsatzes in Gebäuden. Da es jedoch nicht unbedingt sinnvoll ist, die gesamten Ziegelhochlöcher mit Latentwärmespeichermaterialien aufzufüllen, wurden nachfolgend einige Varianten untersucht, um die optimale PCM-Lage und -Schichtstärke innerhalb des Ziegelmauerwerks zu finden.

Bei den nachfolgenden Variantenstudien wurden 2 der zuvor bereits untersuchten PCM-s verwendet. Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurde für beide die gleiche maximale Speicherkapazität angenommen, welche diese bei unterschiedlichen Temperaturen erreichen.

- PCM 20/22℃ (maximale spezifische Wärmekapazität = 22.000 $\frac{J}{kg \cdot K}$)
- PCM 26/28℃ (maximale spezifische Wärmekapazität = 22.000 $\frac{J}{kg \cdot K}$)

6.4.2.1 Variante 1

In der ersten Variante wurde der thermische Einfluss einer mittig angeordneten PCM-Schicht in der Außen- und Innenwand auf das Gebäude untersucht. Dazu werden die Außen- und Innenwände gemäß der nachfolgenden Abbildung modifiziert. Die Außenwand besteht aus 20cm starken Ziegeln mit einer mittig angeordneten 10cm starken PCM-Schicht. Auch in der 15cm starken Innenwand wird in der Mitte ebenfalls 5cm der Ziegelhochlöcher mit PCM verfüllt. Die restlichen Aufbauten aus Kapitel 6.1.2 wurden für die nachfolgenden Simulationsszenarien nicht verändert.

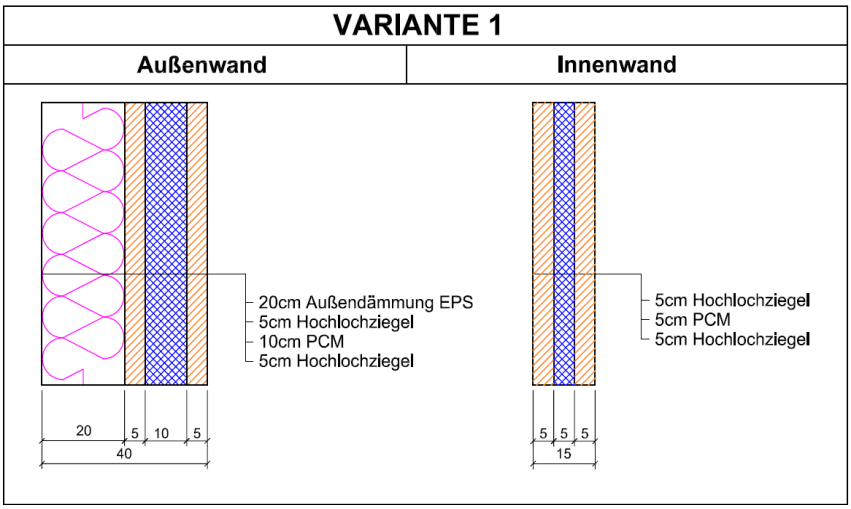


Abbildung 59: Aufbau der Außen- und Innenwand – Variante 1 [eigene Abbildung]

Simulationsergebnisse:

	HWB [kWh/m²a]	KB [kWh/m²a]	max t_{op} [°C]	max HL [kW]	max KL [kW]
Niedriger Fensteranteil	20.14	0.00	24.30	2.35	0.00
Mittlerer Fensteranteil	19.44	0.00	25.63	2.61	0.00
Hoher Fensteranteil	25.09	-0.33	26 (27.62)	4.47	-1.74

Tabelle 8: Zusammenstellung der Simulationsergebnisse – Variante 1 – PCM 20/22°C [eigene Abbildung]

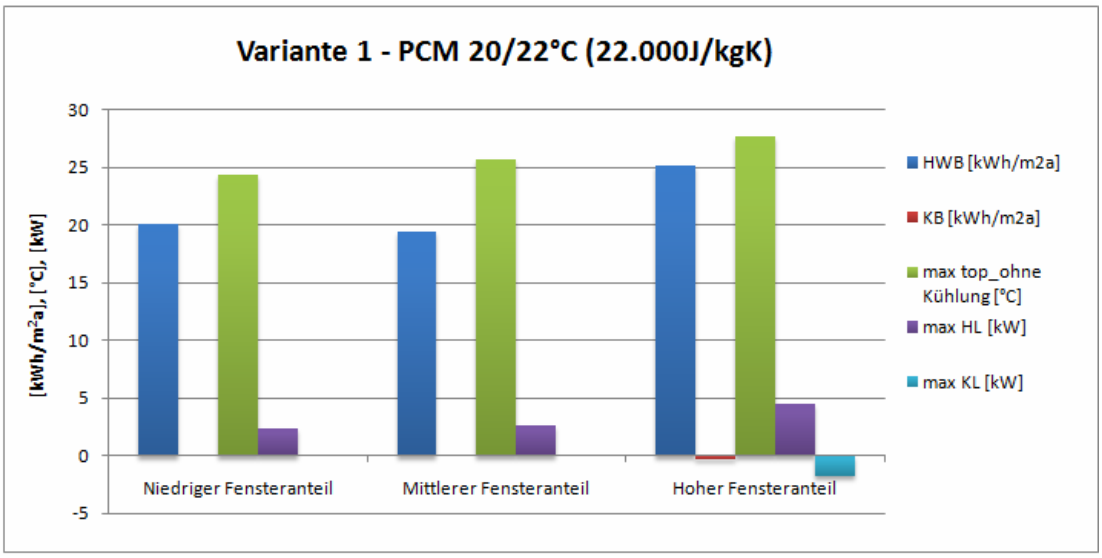


Abbildung 60: Grafische Zusammenstellung der Simulationsergebnisse – Variante 1 – PCM 20/22°C (22.000J/kgK) [eigene Abbildung]

	HWB [kWh/m²a]	KB [kWh/m²a]	max t_{op} [°C]	max HL [kW]	max KL [kW]
Niedriger Fensteranteil	20.35	0.00	25.01	2.74	0.00
Mittlerer Fensteranteil	19.78	-0.01	26 (26.39)	3.02	-0.36
Hoher Fensteranteil	25.60	-0.67	26 (28.50)	4.84	-2.43

Tabelle 9: Zusammenstellung der Simulationsergebnisse – Variante 1 – PCM 26/28°C [eigene Abbildung]

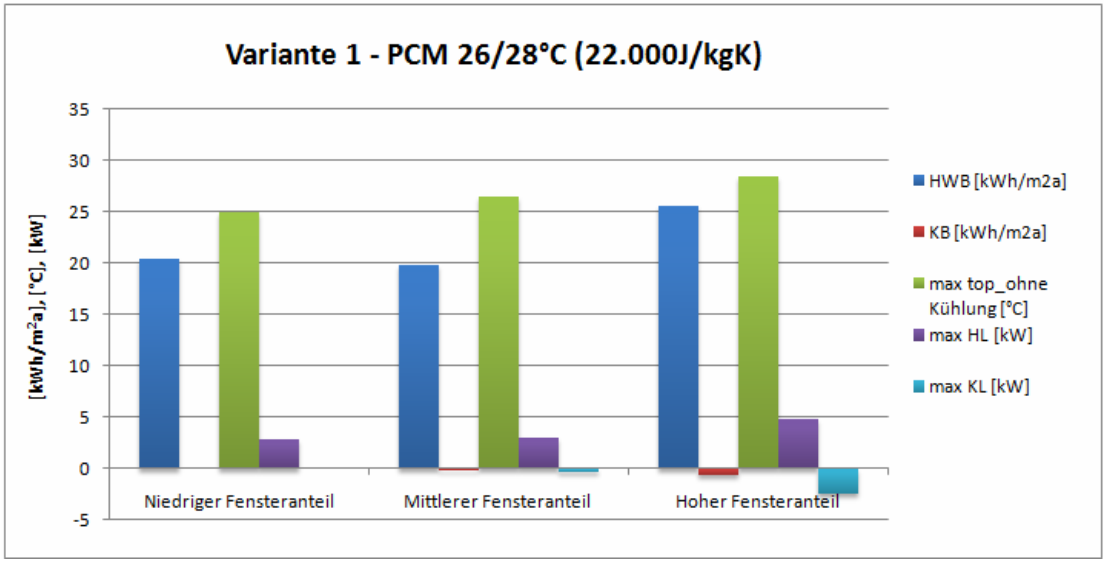


Abbildung 61: Grafische Zusammenstellung der Simulationsergebnisse – Variante 1 – PCM 26/28°C (22.000J/kgK) [eigene Abbildung]

Wie aufgrund der vorigen Untersuchungen zu erwarten war, schneidet bei dieser Variante ebenfalls das Latentwärmespeichermaterial, das seine maximale Speicherkapazität im Temperaturbereich um 20/22°C besitzt besser ab als jenes PCM, dessen Phasenwechsel im Temperaturbereich von 26°C bis 28°C liegt.
Beim Einsatz von PCM 20/22°C konnte für alle Varianten auch eine Reduktion des Heizwärme- und Kühlbedarfs sowie der sich einstellenden maximalen operativen Raumtemperatur, verglichen zur Ausgangssituation (ohne PCM-Einsatz), erreicht werden. Im Fall des mittleren Verglasungsanteiles konnte auf die Kühlung sogar komplett verzichtet werden.
Betrachtet man allerdings die Ergebnisse für PCM 26/28°C so erkennt man, dass sich bei dieser Variante höhere operative Raumtemperaturen, im Vergleich zu PCM 20/22°C, einstellen, die ident mit jenen ohne PCM-Einsatz sind. Dadurch kann keine Einsparung an Kühlleistung während der Sommermonate verzeichnet werden. Der Grund für diese Verschlechterung gegenüber PCM 20/22°C ist zum einen auf den späten Phasenwechsel zurückzuführen, da der Großteil der thermischen Energie erst im Temperaturbereich um 26°C, also in jenem Bereich, der bereits als unbehaglich gilt und in dem die Kühlung aktiviert werden muss, zwischengespeichert wird. Zum anderen dauert es länger bis die thermische Energie in die Mitte der Wand eingedrungen ist, um dort von der PCM-Füllung aufgenommen zu werden.

Durch die mittig angeordnete PCM-Schicht kann somit nicht rasch auf örtlich auftretende Temperaturspitzen reagiert werden, da die thermische Energie erst durch die außenliegende Ziegelschicht geleitet werden muss, was entsprechend der Wärmeleitfähigkeit des Materials einige Zeit in Anspruch nimmt. Das heißt, diese Variante kann nur langsam auf sich ändernde Raumklimata reagieren.

6.4.2.2 Variante 2

Variante 2 unterscheidet sich vom Aufbau nur durch die Änderung der Schichtstärken von Variante 1. Wie in der nachfolgenden Abbildung ersichtlich ist, kommt nun anstatt der zuvor 10cm bzw. 5cm starken PCM-Schicht im Außen- bzw. Innenwandziegel eine 2,5cm mittig angeordnete PCM-Lage zur Anwendung.

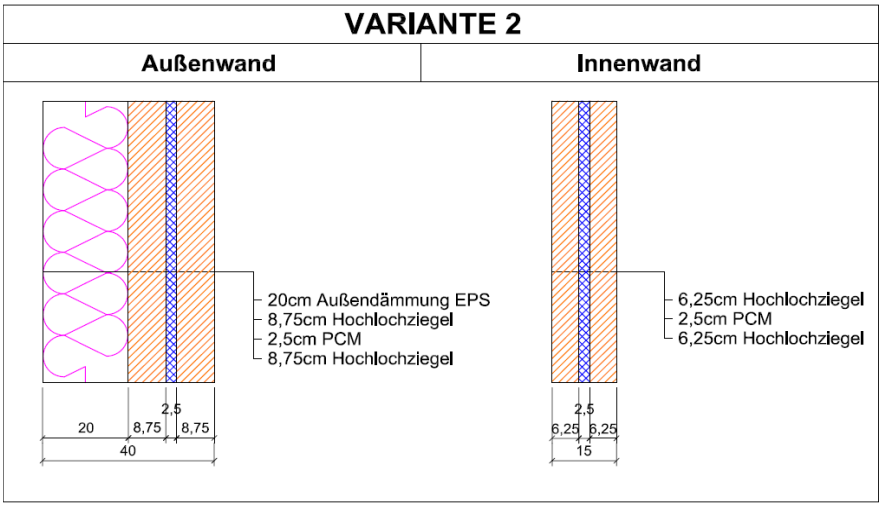


Abbildung 62: Aufbau der Außen- und Innenwand – Variante 2 [eigene Abbildung]

Simulationsergebnisse:

	HWB [kWh/m²a]	KB [kWh/m²a]	max t_{op} [°C]	max HL [kW]	max KL [kW]
Niedriger Fensteranteil	20.29	0.00	24.67	2.52	0.00
Mittlerer Fensteranteil	19.66	0.00	26 (26.06)	2.78	-0.03
Hoher Fensteranteil	25.38	-0.53	26 (28.11)	4.60	-2.23

Tabelle 10: Zusammenstellung der Simulationsergebnisse – Variante 2 - PCM 20/22°C [eigene Abbildung]

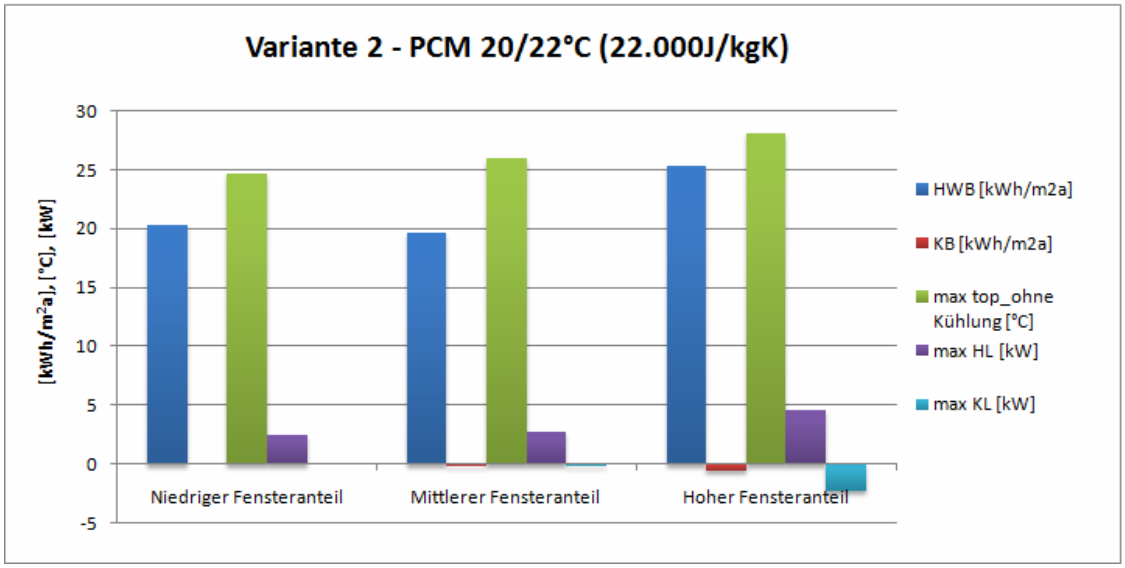


Abbildung 63: Grafische Zusammenstellung der Simulationsergebnisse – Variante 2 – PCM 20/22°C (22.000J/kgK) [eigene Abbildung]

	HWB [kWh/m²a]	KB [kWh/m²a]	max t_{op} [°C]	max HL [kW]	max KL [kW]
Niedriger Fensteranteil	20.35	0.00	25.01	2.74	0.00
Mittlerer Fensteranteil	19.78	-0.01	26 (26.39)	3.02	-0.36
Hoher Fensteranteil	25.60	-0.67	26 (28.50)	4.84	-2.43

Tabelle 11: Zusammenstellung der Simulationsergebnisse – Variante 2 - PCM 26/28°C [eigene Abbildung]

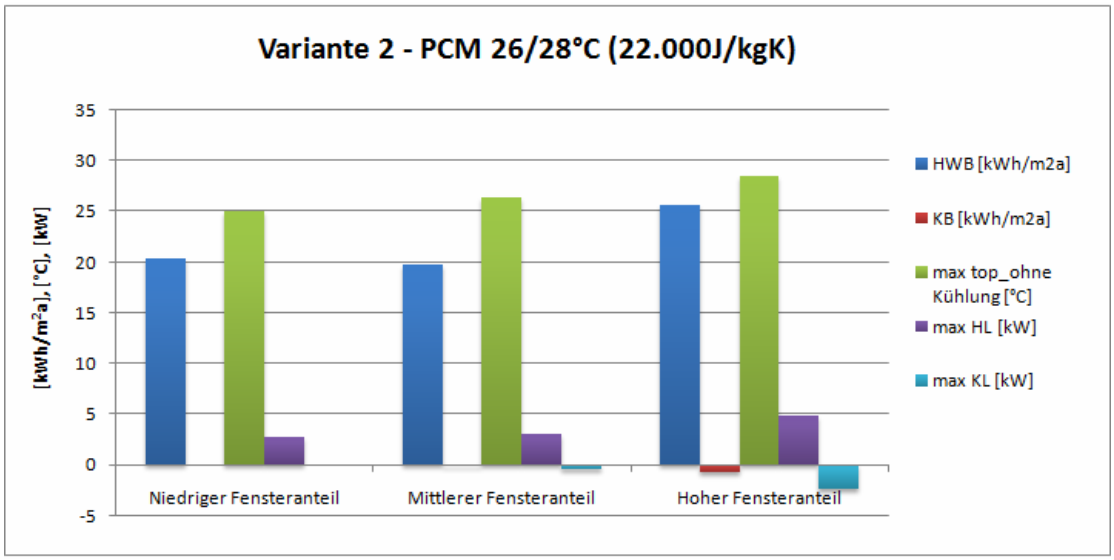


Abbildung 64: Grafische Zusammenstellung der Simulationsergebnisse – Variante 2 – PCM 26/28°C (22.000J/kgK) [eigene Abbildung]

Wie erwartet, kommt es aufgrund der geringeren PCM-Menge, im Vergleich zu Variante 1, zu einer Erhöhung des Heizwärme- und Kühlbedarfs sowie der sich einstellenden maximalen operativen Raumtemperatur für beide untersuchten PCM-Stoffe. Das heißt, eine Einsparung an PCM-Menge hat bei diesem Aufbau keinerlei Sinn da dadurch, aufgrund der ohnehin trägen mittig angeordneten PCM-Füllung, noch weniger thermische Energie zwischengespeichert werden kann.

6.4.2.3 Variante 3

Um rascher und flexibler auf sich verändernde Raumtemperaturen reagieren zu können, wurde bei dieser Variante ein Aufbau untersucht, der zwar über die selbe PCM-Menge wie Variante 1 verfügt, bei dem aber jeweils die äußersten 5cm der Ziegelhochlöcher des Außenwandmauerwerks mit latentwärmespeichernden Materialien verfüllt sind. Die Wärmespeicherfähigkeit des Innenwandziegels wird ebenfalls links und rechts mit einer je 5cm starken PCM-Füllung verbessert. (Abbildung 65)

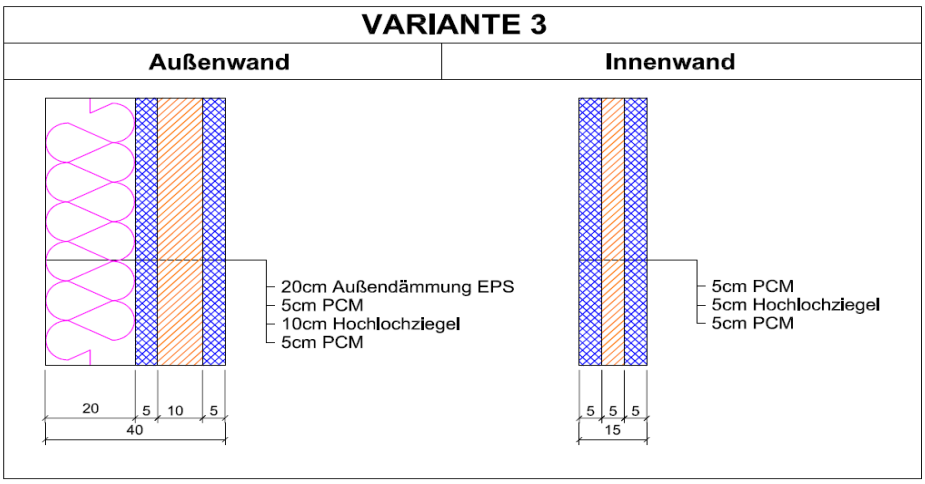


Abbildung 65: Aufbau der Außen- und Innenwand – Variante 3 [eigene Abbildung]

<u>Simulationsergebnisse</u>:

	HWB [kWh/m²a]	KB [kWh/m²a]	max t_{op} [°C]	max HL [kW]	max KL [kW]
Niedriger Fensteranteil	19.78	0.00	23.88	2.33	0.00
Mittlerer Fensteranteil	18.97	0.00	24.91	2.56	0.00
Hoher Fensteranteil	24.16	-0.09	26 (26,99)	4.35	-0.85

Tabelle 12: Zusammenstellung der Simulationsergebnisse – Variante 3 - PCM 20/22°C [eigene Abbildung]

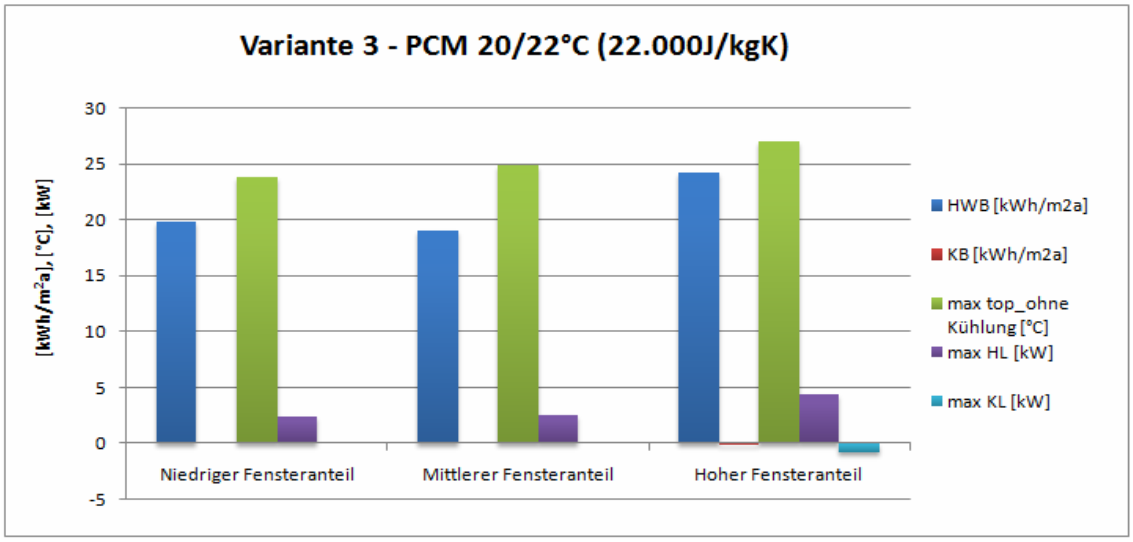


Abbildung 66: Grafische Zusammenstellung der Simulationsergebnisse – Variante 3 – PCM 20/22°C (22.000J/kgK) [eigene Abbildung]

	HWB [kWh/m²a]	KB [kWh/m²a]	max t_{op} [°C]	max HL [kW]	max KL [kW]
Niedriger Fensteranteil	20.35	0.00	24.79	2.74	0.00
Mittlerer Fensteranteil	19.78	0.00	25.90	3.02	0.00
Hoher Fensteranteil	25.60	-0.31	26 (27.36)	4.84	-1.68

Tabelle 13: Zusammenstellung der Simulationsergebnisse – Variante 3 - PCM 26/28°C [eigene Abbildung]

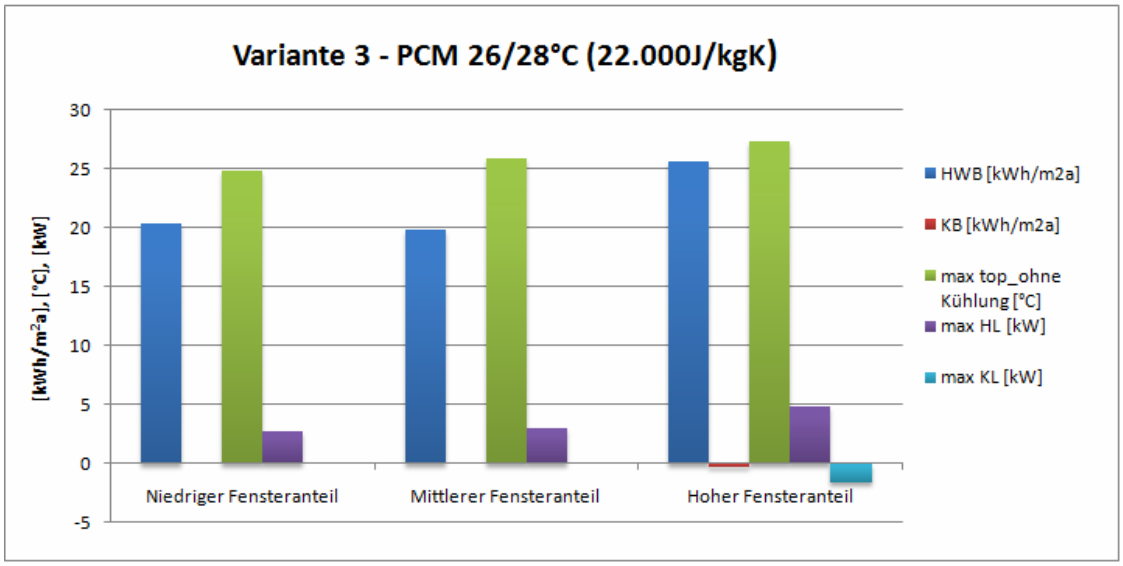


Abbildung 67: Grafische Zusammenstellung der Simulationsergebnisse – Variante 3 – PCM 26/28°C (22.000J/kgK) [eigene Abbildung]

Auch bei dieser Variante schneidet jenes PCM, das seine maximale Wärmespeicherkapazität im Temperaturbereich 20/22℃ besitzt besser ab als PCM 26/28℃, was auf die bereits erwähnten Gründe zurückzuführen ist.

Durch die oberflächennahe Anordnung des Latentwärmespeichermaterials kann auf etwaige Raumtemperaturschwankungen rasch und flexibel reagiert werden. Dies macht sich auch bei der sich einstellenden maximalen operativen Raumtemperatur bemerkbar und so kann bei Verwendung von PCM 20/22℃ auf die Klimatisierung des Gebäudes mit mittlerem Fensteranteil vollständig verzichtet werden. Auch bei der Variante mit hohem Verglasungsanteil wird am Tag mit der höchsten Raumtemperatur die Behaglichkeitsgrenze lediglich um ca. 1℃ überschritten. Dies hat eine deutliche Reduktion der Kühlleistung und somit des jährlichen Kühlbedarfs zur Folge.

Weiters kann beim Einsatz von PCM 20/22℃, verglichen zur Ausgangssituation (kein PCM-Einsatz), je nach Fenstervariation, zwischen 6 und 4% des Heizwärmebedarfs eingespart werden.

Würde man jedoch PCM 26/28℃ einsetzen, kann aufgrund des Phasenwechsels im Temperaturbereich von 26℃ keine Reduktion des Heizwärmebedarfs mehr genützt werden, da derartige Raumtemperaturen im Winter kaum auftreten. Es können bei dieser Phasenwechseltemperatur aber sehr wohl auch Gewinne hinsichtlich des Kühlbedarfs erzielt werden, jedoch ist die Absenkung der Raumtemperatur, im Vergleich zu PCM 20/22℃, deutlich geringer.

6.4.2.4 Variante 4

Variante 4 stellt eine Weiterentwicklung der Variante 3 dar. Hier sollte untersucht werden ob es sinnvoll wäre, die PCM-Füllung hinter der Außendämmung entfallen zu lassen. Dies hätte eine Materialeinsparung zur Folge, denn es ist vorab nicht klar, welchen Beitrag diese PCM-Lage auf das sich einstellende thermische Verhalten des Gebäudes haben wird.
Der Aufbau der Innenwand, wird verglichen mit der vorigen Variante, nicht verändert.

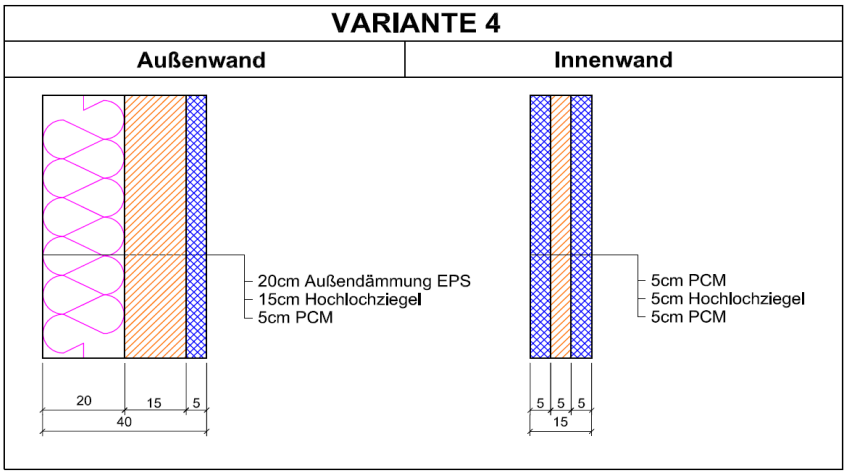


Abbildung 68: Aufbau der Außen- und Innenwand – Variante 4 [eigene Abbildung]

Simulationsergebnisse:

	HWB [kWh/m²a]	KB [kWh/m²a]	max t_{op} [°C]	max HL [kW]	max KL [kW]
Niedriger Fensteranteil	19.99	0.00	23.99	2.49	0.00
Mittlerer Fensteranteil	19.15	0.00	25.04	2.72	0.00
Hoher Fensteranteil	24.30	-0.11	26 (27,11)	4.42	-1.01

Tabelle 14: Zusammenstellung der Simulationsergebnisse – Variante 4 - PCM 20/22°C [eigene Abbildung]

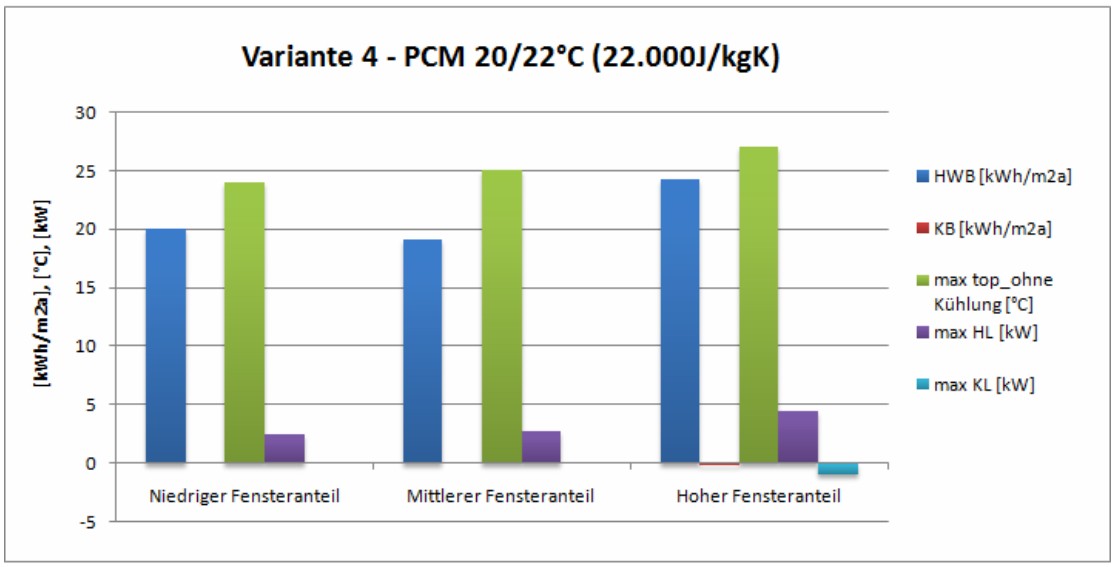


Abbildung 69: Grafische Zusammenstellung der Simulationsergebnisse – Variante 4 – PCM 20/22°C (22.000J/kgK) [eigene Abbildung]

	HWB [kWh/m²a]	KB [kWh/m²a]	max t_{op} [°C]	max HL [kW]	max KL [kW]
Niedriger Fensteranteil	20.35	0.00	24.79	2.74	0.00
Mittlerer Fensteranteil	19.78	0.00	25.90	3.02	0.00
Hoher Fensteranteil	25.60	-0.31	26 (27.36)	4.84	-1.68

Tabelle 15: Zusammenstellung der Simulationsergebnisse – Variante 4 - PCM 26/28°C [eigene Abbildung]

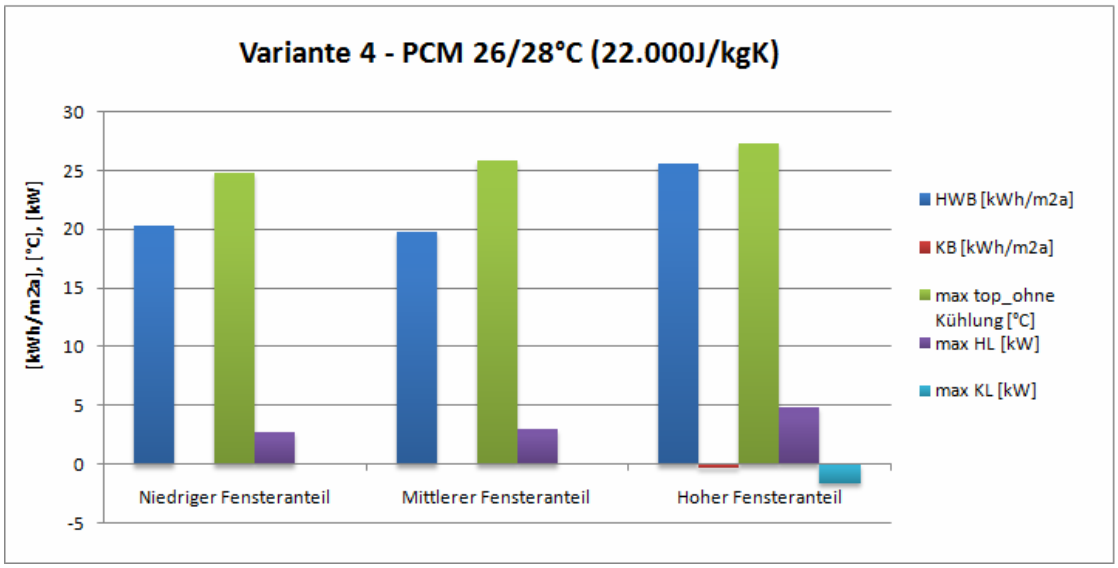


Abbildung 70: Grafische Zusammenstellung der Simulationsergebnisse – Variante 4 – PCM 26/28°C (22.000J/kgK) [eigene Abbildung]

Vergleicht man die Ergebnisse von PCM 20/22℃ mit der vorigen Variante, so erkennt man eine sehr geringe Erhöhung der sich einstellenden maximalen operativen Raumtemperatur in der Größenordnung von ca. 0,1℃. Das bewirkt wiederum eine Erhöhung des Kühlbedarfs für die Variante mit dem hohen Verglasungsanteil von ca. 18%. Dies kann jedoch relativiert werden, da sich der jährliche Kühlbedarf nur auf ca. 0,11 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$ beläuft. Die Erhöhung des Heizwärmebedarfs um ca. 1% ist ebenfalls vernachlässigbar gering.
Bei Betrachtung der Ergebnisse von PCM 26/28℃ fällt auf, dass die Einsparung der zweiten PCM-Schicht in der Außenwand keinerlei Auswirkung auf den Heizwärme- und Kühlbedarf sowie die sich einstellende maximale operative Raumtemperatur hat.

Zusammenfassend kann somit festgestellt werden, dass der Verzicht auf PCM-Füllung hinter der Außendämmung nur zu einer äußerst minimalen Verschlechterung des thermischen Verhaltens des Gebäudes führt. Diese Verschlechterung kann durchaus akzeptiert werden, da man durch die Aussparung der zweiten PCM-Schicht im Außenwandziegel die Hälfte der PCM-Menge, verglichen mit Variante 3, einsparen kann.

6.4.2.5 Variante 5

Diese Variante unterscheidet sich von Variante 4 nur durch die Änderung der PCM-Schichtstärke. Wie man aus Abbildung 71 entnehmen kann, wurden anstatt der ersten 5cm der Ziegelhochlöcher des Außen- und Innenwandziegels nur die ersten 2cm mit PCM verfüllt. Dieses Simulationsszenario dient dazu, um den Einfluss einer geringeren PCM-Menge auf das thermische Verhalten des Gebäudes für eine oberflächennahe Anordnung der latentwärmespeicherenden Schichte erfassen zu können.

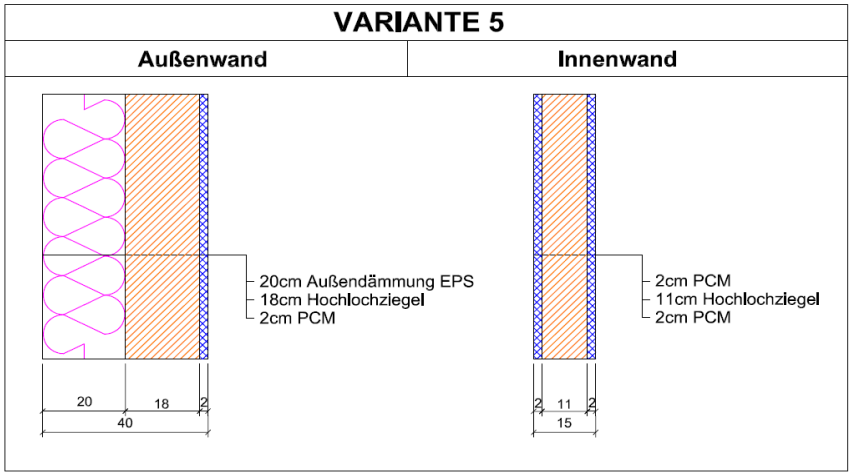


Abbildung 71: Aufbau der Außen- und Innenwand – Variante 5 [eigene Abbildung]

Simulationsergebnisse:

	HWB [kWh/m²a]	KB [kWh/m²a]	max t_{op} [°C]	max HL [kW]	max KL [kW]
Niedriger Fensteranteil	20.06	0.00	24.07	2.57	0.00
Mittlerer Fensteranteil	19.21	0.00	25.14	2.81	0.00
Hoher Fensteranteil	24.36	-0.13	26 (27,21)	4.54	-1.14

Tabelle 16: Zusammenstellung der Simulationsergebnisse – Variante 5 - PCM 20/22°C [eigene Abbildung]

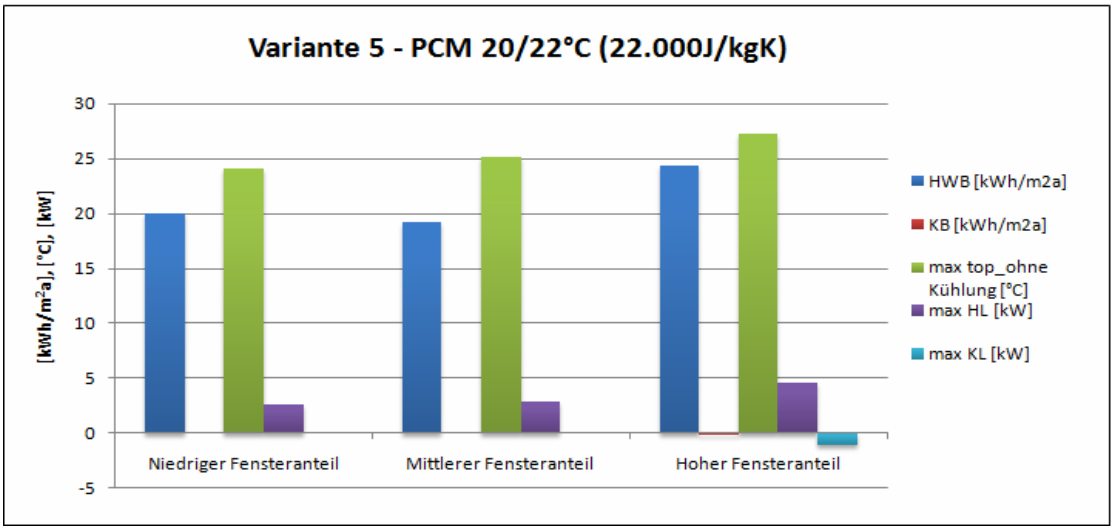


Abbildung 72: Grafische Zusammenstellung der Simulationsergebnisse – Variante 5 – PCM 20/22°C (22.000J/kgK) [eigene Abbildung]

	HWB [kWh/m²a]	KB [kWh/m²a]	max t_{op} [°C]	max HL [kW]	max KL [kW]
Niedriger Fensteranteil	20.35	0.00	24.79	2.74	0.00
Mittlerer Fensteranteil	19.78	0.00	25.90	3.02	0.00
Hoher Fensteranteil	25.60	-0.31	26 (27.35)	4.84	-1.68

Tabelle 17: Zusammenstellung der Simulationsergebnisse – Variante 5 - PCM 26/28°C [eigene Abbildung]

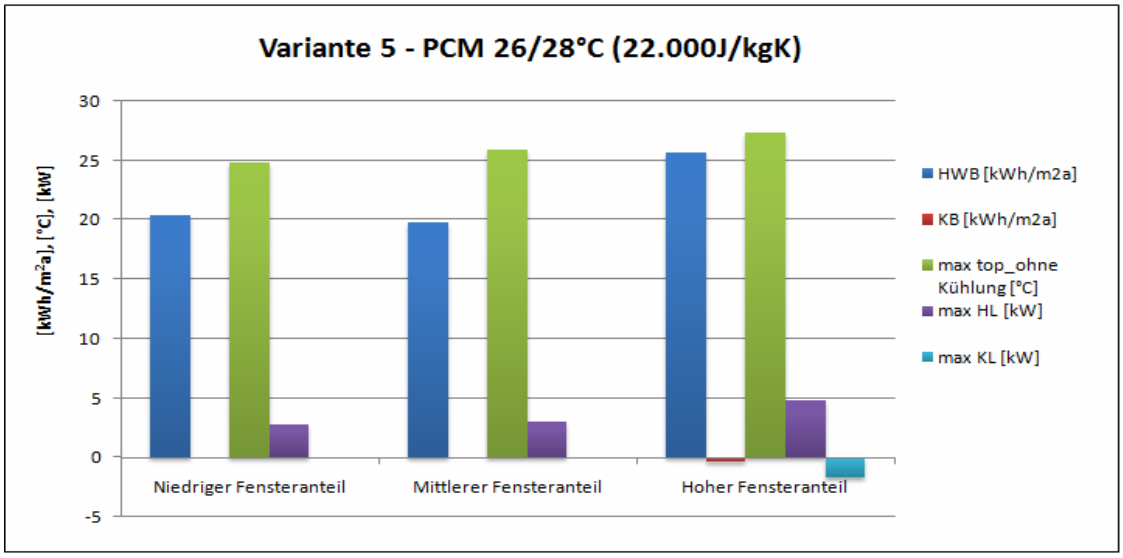


Abbildung 73: Grafische Zusammenstellung der Simulationsergebnisse – Variante 5 – PCM 26/28°C (22.000J/kgK) [eigene Abbildung]

Bei Betrachtung der Ergebnisse kann man nur eine sehr geringe Erhöhung der sich einstellenden operativen Raumtemperatur in der Größenordnung von ca. 0,1℃ für PCM 20/22℃, verglichen mit Variante 4, erkennen. Dadurch kommt es natürlich wieder zu einem leichten Anstieg des Kühlbedarfs von 0,11 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$ auf 0,13 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$ für jene Variante mit dem großen Fensteranteil. Für den mittleren und kleinen Fensteranteil ist weiterhin keine Kühlung erforderlich. Die Erhöhung des Heizwärmebedarfs von ca. 0,25% bis 0,35%, je nach Verglasungsanteil, ist ebenfalls vernachlässigbar gering.
Vergleicht man die Ergebnisse für PCM mit der Phasenwechseltemperatur 26/28℃, so kann man weder zur vorigen Variante noch zu Variante 3 einen Unterschied hinsichtlich des thermischen Verhaltens erkennen.

Zusammenfassend kann somit festgehalten werden, dass durch die Einsparung weiterer 3cm an PCM-Füllung nur mit einer marginalen Verschlechterung der sich einstellenden maximalen operativen Raumtemperatur, des Kühl- und Heizwärmebedarfs – verglichen zur Variante, bei der die ersten 5cm der Ziegelhochlöcher verfüllt waren – zu rechnen ist. Bei einem Materialpreis von ca. 2,5 Euro/kg für PCM auf paraffinischer Basis macht diese Variante eventuell Sinn, da durch die Reduktion der PCM-Schichtstärke ca. 60% der PCM-Menge eingespart werden kann.

6.4.2.6 Variante 6

In der letzten Variante ist noch die weitere Reduktion der PCM-Füllung auf das thermische Verhalten untersucht worden. Wie man aus Abbildung 74 entnehmen kann, wird anstatt der ersten 2cm der Ziegelhochlöcher des Außen- und Innenwandziegels nur der erste Zentimeter mit PCM verfüllt.

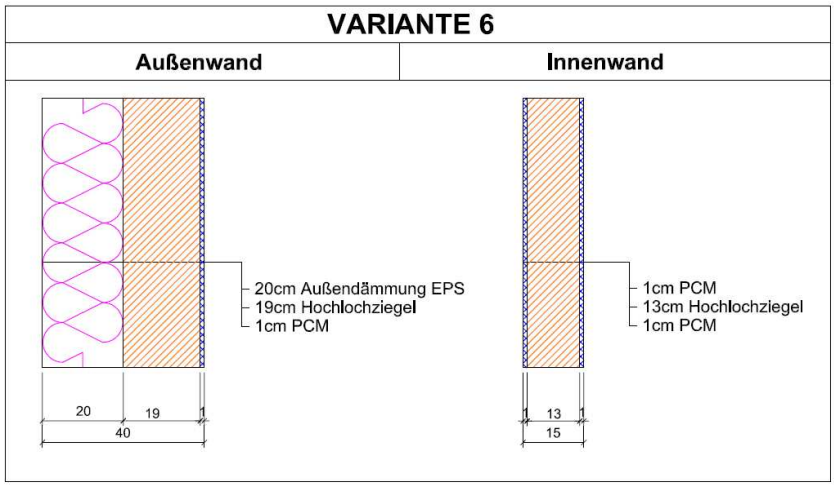


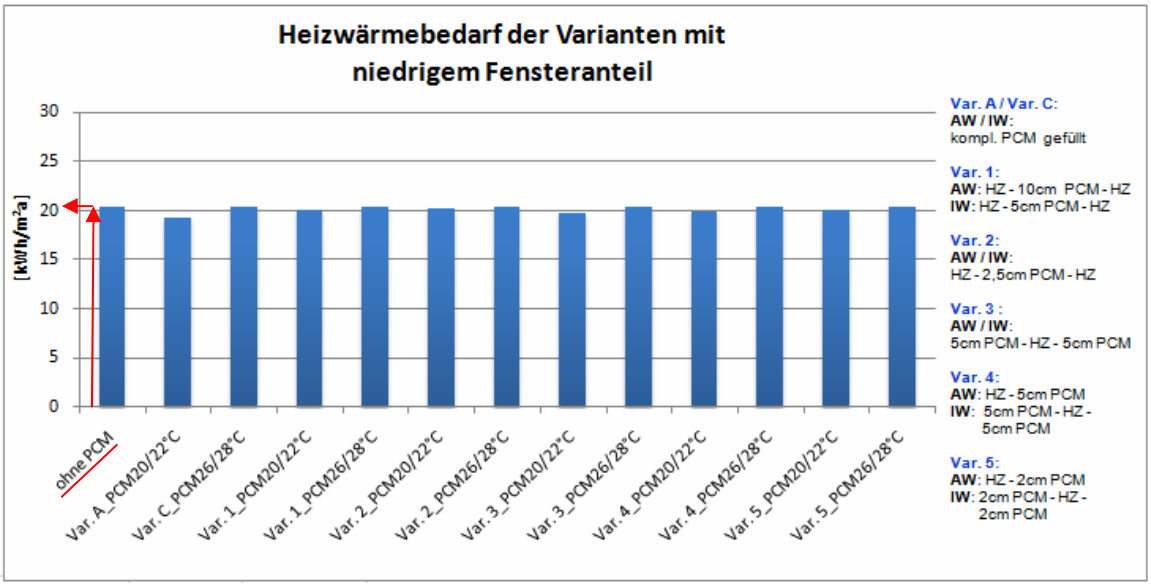
Abbildung 74: Aufbau der Außen- und Innenwand – Variante 6 [eigene Abbildung]

Es hat sich jedoch schnell gezeigt, dass aufgrund der geringen PCM-Menge mit deutlich höheren operativen Raumtemperaturen, im Vergleich zu Variante 5 bzw. 4, zu rechnen ist. Vergleicht man diese Variante mit dem Gebäude ohne PCM-Einsatz, so kann beispielsweise für die Variante mit dem hohen Verglasungsanteil die maximal sich einstellende operative Raumtemperatur lediglich um 0,2℃ reduziert werden, was nur noch eine ca. 9%ige Einsparung des Kühlbedarfs zur Folge hätte.

Das heißt, die Idee der weiteren Einsparung an PCM-Menge durch die Verringerung der PCM-Schichtstärke von 2 auf 1cm hat sich für diese Untersuchungen keinesfalls als sinnvoll erwiesen.

6.4.2.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse der zuvor untersuchten Varianten grafisch zusammengefasst, um eine bessere Vergleichbarkeit untereinander zu gewährleisten:



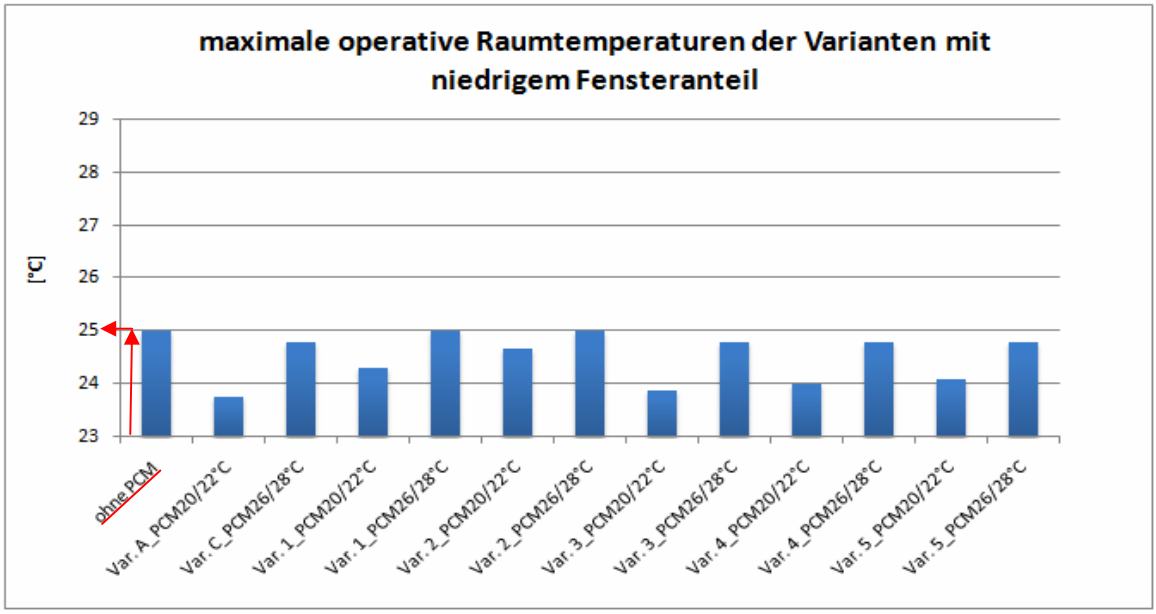
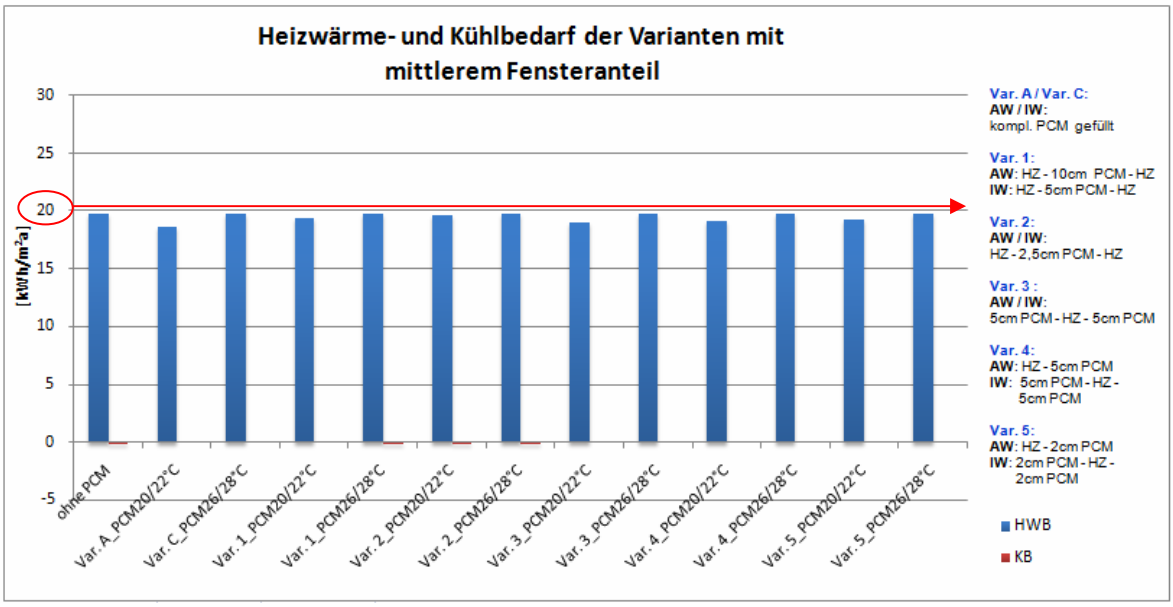


Abbildung 75: Zusammenstellung der Ergebnisse: Heizwärmebedarf sowie maximale operative Raumtemperatur der Variante für niedrigen Fensteranteil [eigene Abbildung]



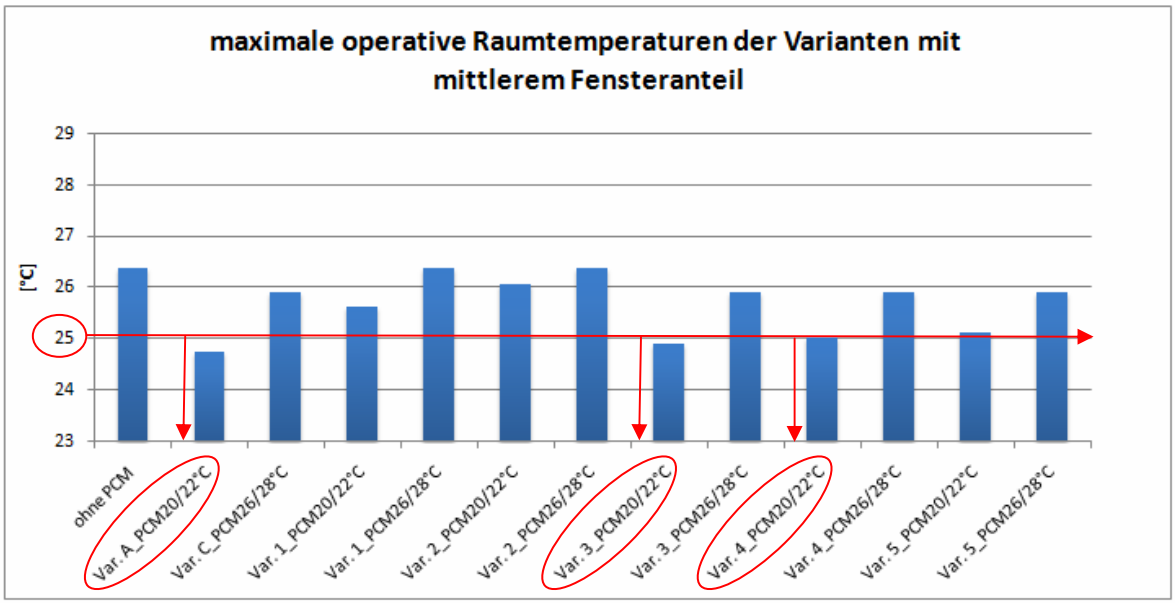
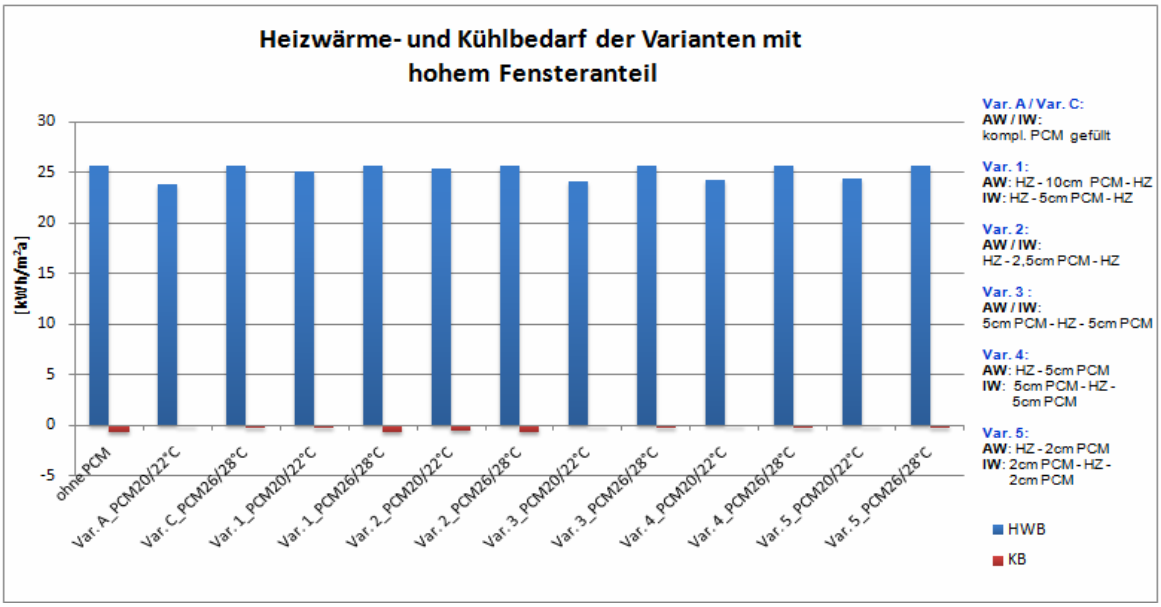


Abbildung 76: Zusammenstellung der Ergebnisse: Heizwärme- und Kühlbedarf sowie maximale operative Raumtemperatur der Variante für mittleren Fensteranteil [eigene Abbildung]



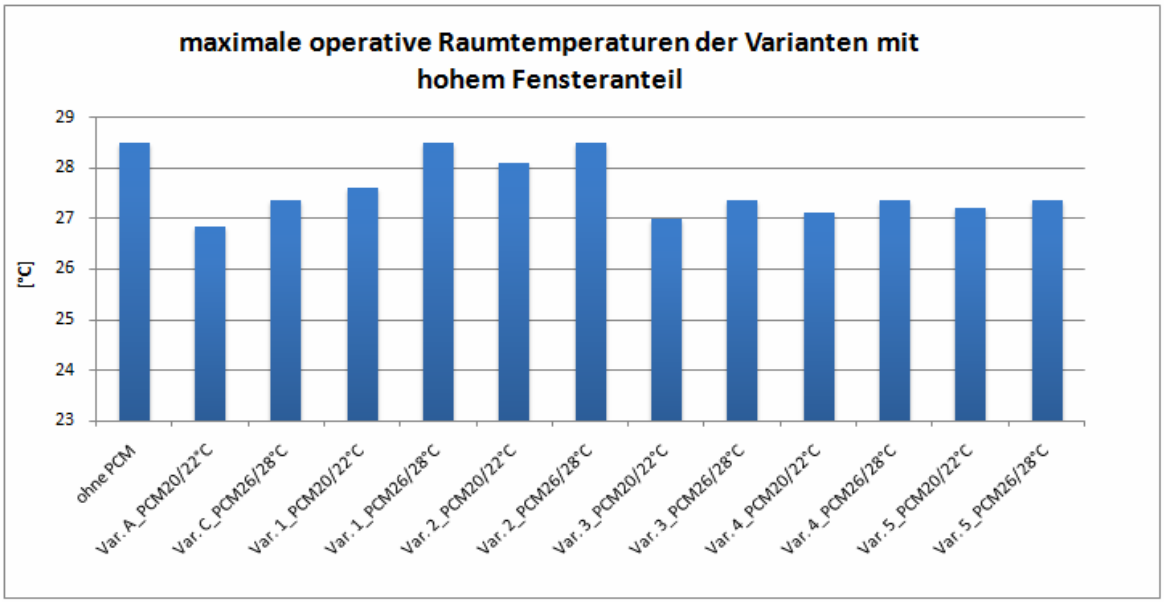


Abbildung 77: Zusammenstellung der Ergebnisse: Heizwärme- und Kühlbedarf sowie maximale operative Raumtemperatur der Variante für hohen Fensteranteil [eigene Abbildung]

Vergleicht man die Ergebnisse miteinander so erkennt man nochmals deutlich, dass stets jenes PCM, das seine maximale Speicherkapazität im Temperaturbereich um 20/22℃ besitzt, bei allen Varianten besser abschneidet als jenes PCM, dessen Phasenwechsel im Temperaturbereich zwischen 26 und 28℃ liegt. Dies rührt daher, dass bei höheren Phasenwechseltemperaturen, wie beispielsweise 26℃, der Anteil von geschmolzenem PCM über das Jahr betrachtet viel geringer ist, da es erst im unbehaglichen Temperaturbereich (Raumtemperatur >26℃) zum Phasenwechsel kommt. Som it können große Teile der hohen Wärmespeicherkapazität des PCM beim Phasenwechsel erst spät genutzt werden. Im Gegensatz dazu ist bei niedrigen Phasenwechseltemperaturen wie z.B. 20/22℃ der

geschmolzene Anteil von PCM deutlich größer was zur Folge hat, dass mit diesen Latentwärmespeichermaterialien wesentlich rascher, flexibler und effizienter auf Temperaturschwankungen eingegangen werden kann. Dies wirkt sich, wie die Simulationsszenarien gezeigt haben, positiv auf den Heizwärme- und Kühlbedarf sowie die sich einstellende maximale operative Raumtemperatur aus.

Vergleicht man nun die Lage der PCM-Schicht im Hochlochziegel, so kann eindeutig der Variante mit der oberflächennahen Anordnung der Vorzug gegeben werden.
Dies ist auch verständlich, denn bei einer mittig angeordneten PCM-Füllung muss die thermische Energie erst - entsprechend der Wärmeleitfähigkeit des Ziegels - durch die Ziegelschicht geleitet werden, was natürlich einige Zeit in Anspruch nimmt. Dadurch kann beispielsweise erst auf längere Hitzeperioden reagiert werden.
Bei der Anordnung der PCM-Füllungen nahe der Innenwandoberfläche ist später zu beachten, dass ein Putz mit einer entsprechend hohen Wärmeleitfähigkeit gewählt wird, um einen raschen Wärmetransport zu dieser latentwärmespeichernden Füllung zu gewährleisten.

Wie sich bei den vorigen Untersuchungen herausgestellt hat, kann im Außenwandziegel auf die Füllung der Ziegelhochlöcher mit PCM hinter der Außendämmung verzichtet werden. Dadurch kommt es zu einer minimalen Erhöhung der sich einstellenden operativen Raumtemperatur um ca. 0,5% für alle Varianten.

Bei den Simulationsszenarien hat sich weiters gezeigt, dass durch die Einsparung weiterer 3cm der PCM-Füllung, das heißt eine Reduktion von 5cm auf 2cm, nur minimale Erhöhungen hinsichtlich der sich einstellenden operativen Raumtemperaturen sowie des Heiz- und Kühlbedarfs zu verzeichnen sind. Durch diese weitere Einsparung an latentwärmespeicherndem Material erhöht sich die maximal einstellende Raumtemperatur, verglichen mit Variante 4 (5cm PCM), ca. um 0,1℃.
Es hat sich jedoch auch gezeigt, dass eine weitere Minimierung der verbleibenden oberflächennahen PCM-Schicht, beispielsweise auf 1 cm, keinesfalls angestrebt werden sollte, da dadurch kaum noch positive Effekte hinsichtlich der temperaturstabilisierenden Wirkung von PCM zu verzeichnen sind.

Abschließend stellt sich noch die Frage, welcher der untersuchten Varianten der Vorzug zu geben ist.

Dazu ist folgende Überlegung notwendig: Wie viel PCM wird bei Erhöhung des Fensterflächenanteils benötigt, um die gleiche thermische Qualität, beispielsweise hinsichtlich der sich einstellenden operativen Raumtemperatur, zu gewährleisten.

Abbildung 75 lässt erkennen, dass sich der Heizwärmebedarf für den niedrigen Fensterflächenanteil ohne PCM-Füllung mit 20,35 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$ und die maximale operative Raumtemperatur mit 25,01℃ einstellen.

Geht man mit diesen Vorgaben in Abbildung 76 (mittlerer Fensterflächenanteil) ist ersichtlich, dass bezüglich des Heizwärmebedarfs alle Varianten optimal wären. Betrachtet man hingegen die Grafik mit den sich einstellenden operativen Raumtemperaturen so erkennt man deutlich, dass lediglich „Variante A“, „Variante 3“ und „Variante 4“ Raumtemperaturen kleiner oder gleich 25℃ aufweisen (in Abbildung 76 – jeweils rot dargestellt). Daraus folgt, dass Variante 4 - also jene Variante bei der die ersten 5cm der Ziegelhochlöcher mit PCM verfüllt sind - den anderen Varianten vorzuziehen ist.

Das bedeutet, dass durch Erhöhung des Fensterflächenanteils bei Verwendung von Variante 4 (5cm PCM) die gleichen thermischen Eigenschaften hinsichtlich des Heizwärmebedarfs und der maximalen operativen Raumtemperatur, wie bei dem Gebäude mit niedrigem Verglasungsanteil, gewährleistet werden können.

Für den hohen Fensterflächenanteil lässt sich ein derartiger Schluss nicht mehr ziehen, da bei allen Varianten mit Raumtemperaturen über 25℃ zu rechnen ist.

In den nachfolgenden Abbildungen (78 bis 82) werden für die sich als optimal herausgestellte **Variante 4** (5cm PCM), mit der PCM-Phasenwechseltemperatur von 20/22℃, das thermische Verhalten sowie das Energie einsparungspotential aufgezeigt:

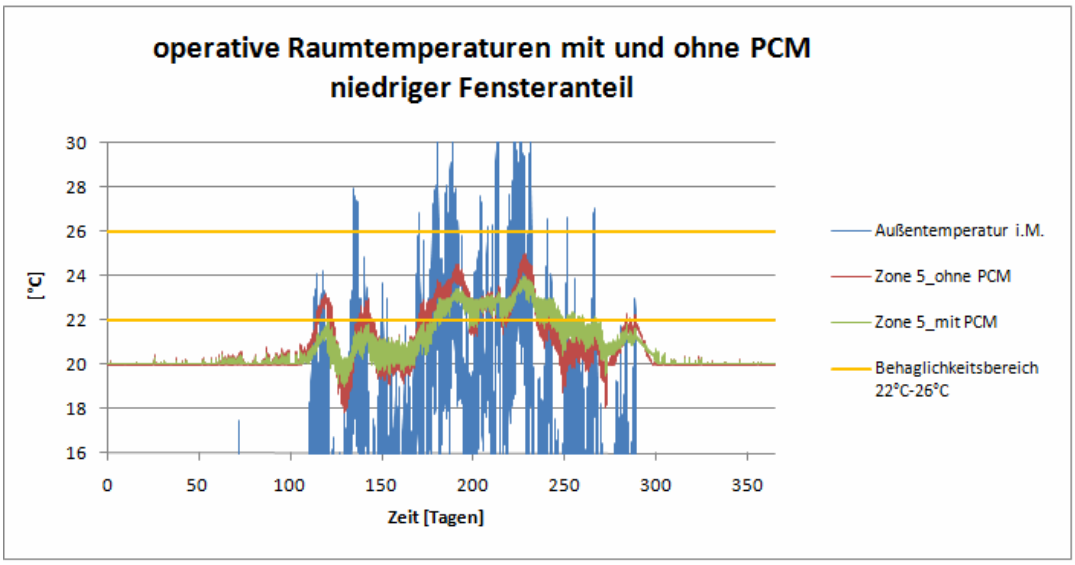


Abbildung 78: Temperatur ohne bzw. mit PCM 20/22°C – Variante 4 - niedriger Fensteranteil [eigene Abbildung]

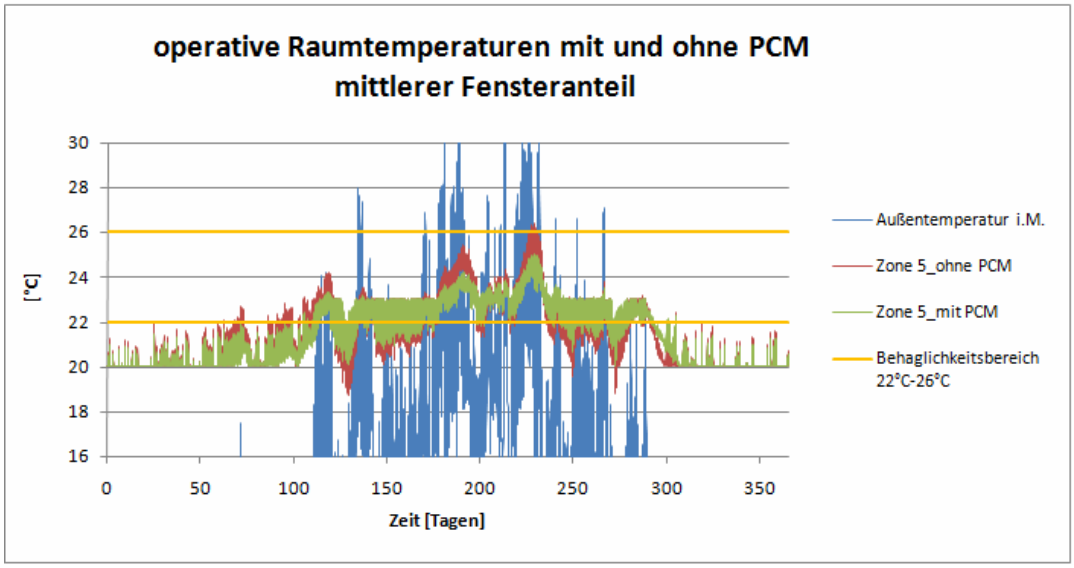


Abbildung 79: Temperatur ohne bzw. mit PCM 20/22°C – Variante 4 – mittlerer Fensteranteil [eigene Abbildung]

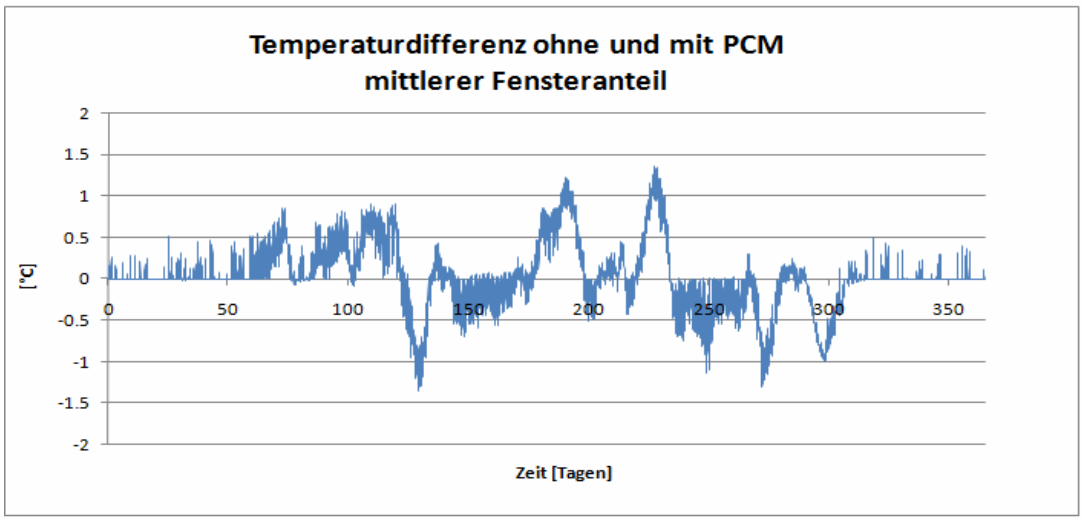


Abbildung 80: Temperaturdifferenz ohne und mit PCM-Einsatz – Variante 4 – mittlerer Fensteranteil [eigene Abbildung]

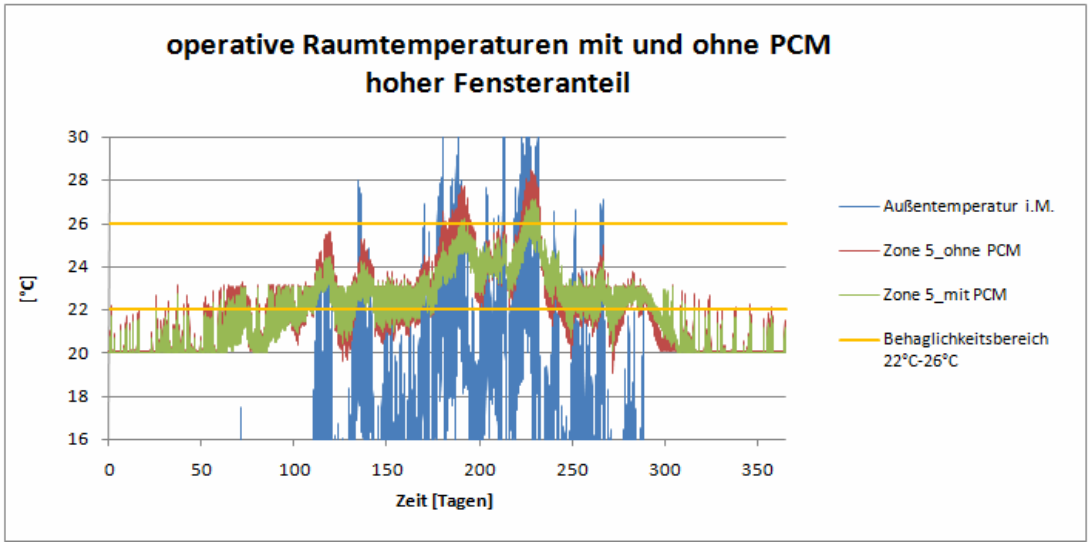


Abbildung 81: Temperatur ohne bzw. mit PCM 20/22°C – Variante 4 – hoher Fensteranteil [eigene Abbildung]

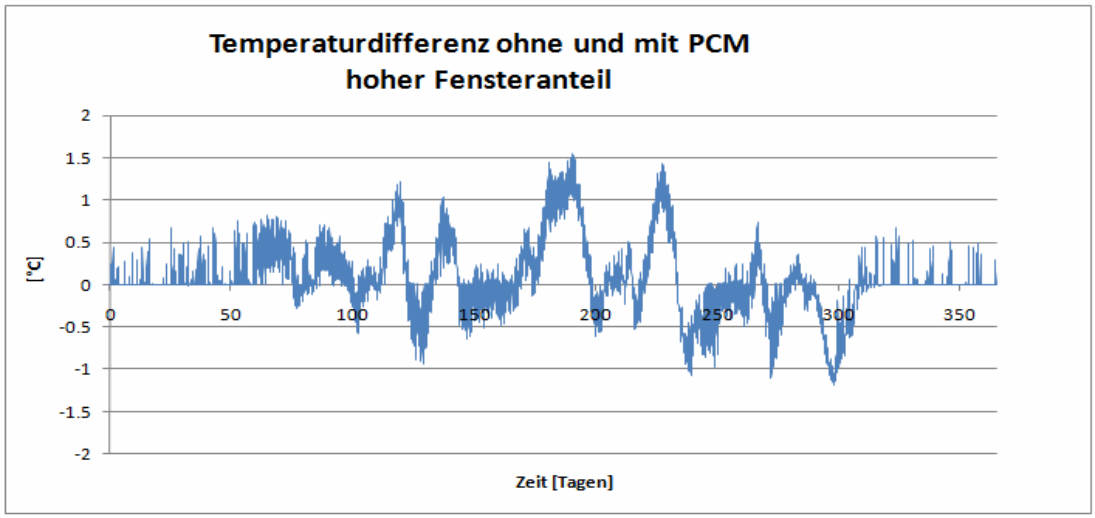


Abbildung 82: Temperaturdifferenz ohne und mit PCM-Einsatz – Variante 4 – hoher Fensteranteil [eigene Abbildung]

In den vorigen Abbildungen wird die sich einstellende operative Raumtemperatur für die 3 Fenstervariationen der Variante 4, mit und ohne PCM-Einsatz, gegenübergestellt. Man erkennt bei allen 3 Fenstervarianten sehr deutlich die temperatursenkende Wirkung des PCM. Diese wird nochmals exemplarisch für den mittleren und hohen Fensterflächenanteil durch die Darstellung der Temperaturdifferenz (Δt_{op} = t_{op}_ohnePCM – t_{op}_mit PCM) verdeutlicht.

Durch den Einsatz von PCM kann in diesem Fall, während der Sommermonate, eine Raumtemperaturabsenkung von bis zu 1,5°C bewirkt werden. Die negativen Temperaturdifferenzen rühren daher, dass während der Nachtstunden das Gebäude mit PCM langsamer auskühlt, da es die tagsüber gespeicherte thermische Energie wieder abgibt. Auch während der Übergangsjahreszeiten (Frühling und Herbst) ist mit einer Raumtemperaturerhöhung bei PCM-Einsatz zu rechnen, da die latentwärmespeichernde Wirkung der Materialien etwaige jahreszeitliche Temperaturschwankungen ausgleicht und so zu einem behaglicheren Raumklima beiträgt.

Alles in allem erkennt man jedoch, bei allen vorigen Abbildungen deutlich, dass durch den PCM-Einsatz das sich einstellende operative Raumtemperaturniveau während der Sommermonate stets innerhalb des definierten Behaglichkeitsbereiches (22°C bis 26°C) bewegt. Lediglich beim Gebäude mit hohem Verglasungsanteil kommt es an ca. 13 Tagen im Jahr zu einer geringen Überschreitung der 26°C Marke.

Deshalb kann der sommerliche Wärmeschutz für alle Varianten eigentlich als erfüllt betrachtet werden.

In Tabelle 18 ist der Energiebedarf für Heizen und Kühlen der 3 Fenstervarianten ohne und mit PCM-Einsatz (Variante 4) miteinander verglichen und das daraus resultierende Energieeinsparungspotential dargestellt. Durch den PCM-Einsatz kann nicht nur eine deutliche Reduktion bzw. sogar ein Verzicht des Kühlbedarfs verzeichnet werden, sondern auch ein geringerer Heizwärmebedarf. Wie man der nachstehenden Tabelle entnehmen kann, beträgt das jährliche Energieeinsparungspotential, je nach Fensterflächenanteil, zwischen 72 und 149kWh. Umgerechnet auf den jährlichen Energiebedarf für Heizen und Kühlen entspricht dies ca. 1,7 bis 3,14%.

In Abbildung 83 wird dieses Einsparungspotential für den hohen Verglasungsanteil nochmals grafisch aufgearbeitet:

	ohne PCM [kWh]	mit PCM 20/22°C [kWh]	Energie-einsparung [kWh]	Energie-einsparung [%]
Kleiner Fensteranteil				
Heizwärmebedarf	4069.83	3997.83	72.00	1.77
Kühlbedarf	0.00	0.00	0.00	0.00
Gesamter Energiebedarf	4069.83	3997.83	72.00	1.77
Mittlerer Fensteranteil				
Heizwärmebedarf	3955.76	3829.42	126.34	3.19
Kühlbedarf	-2.37	0.00	-2.37	100.00
Gesamter Energiebedarf	3953.38	3829.42	123.96	3.14
Hoher Fensteranteil				
Heizwärmebedarf	5119.95	4860.94	259.01	5.06
Kühlbedarf	-133.11	-22.94	-110.17	82.77
Gesamter Energiebedarf	4986.84	4838.00	148.84	2.98

Tabelle 18: Darstellung des Energieeinsparungspotentials durch den Einsatz von PCM – Variante 4 [eigene Abbildung]

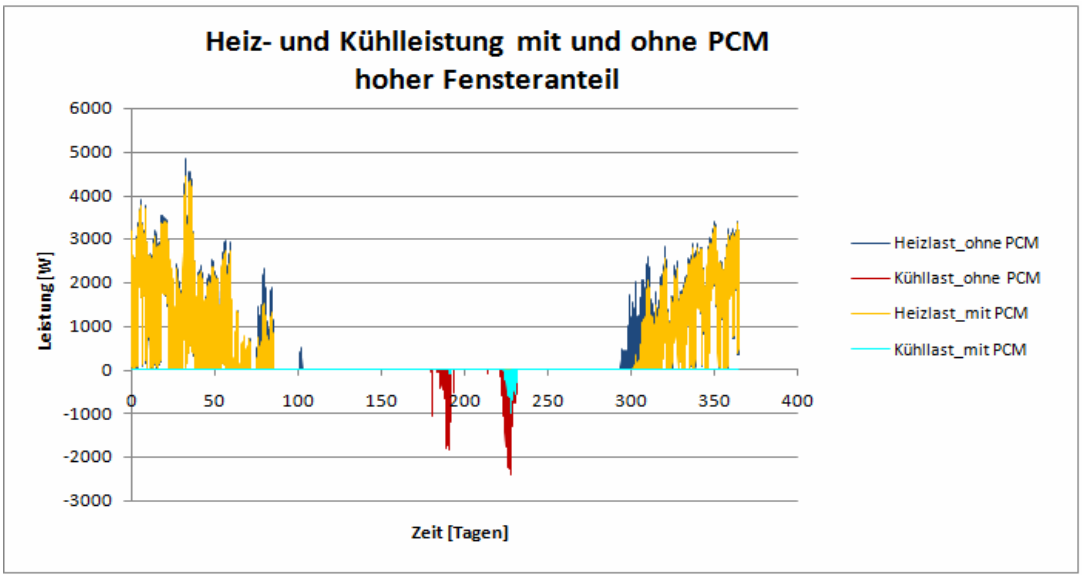


Abbildung 83: Vergleich der Heiz- und Kühlleistung mit und ohne PCM-Einsatz – Variante 4 – hoher Fensteranteil [eigene Abbildung]

Generell kann man feststellen dass durch den Einsatz von PCM, aufgrund der Erhöhung der Wärmekapazität, sowohl der Heizwärme- als auch der Kühlbedarf reduziert werden können. Es kann jedoch keine gültige Aussage über die tatsächlich eingesparten Energiemengen erfolgen, da diese stark vom betrachteten Projekt sowie der Lage und Art der verwendeten PCM-Füllung abhängen.

7 Schlussfolgerung

Zusammenfassend kann man feststellen, dass der Einsatz von PCM in Gebäuden eine hervorragende Lösung bietet, um langfristig und passiv den sommerlichen Wärmeschutz zu gewährleisten. Durch die latentwärmespeichernden Materialien kommt es zu einer deutlichen Erhöhung der Wärmespeicherkapazität des Gebäudes, die eine Reduktion der auftretenden Temperaturspitzen um bis zu 1,5℃ bewirken und damit zu einem behaglicheren Raumklima beitragen. Diese Absenkung der Raumtemperatur während der Sommermonate ist einer der größten Vorteile des PCM-Einsatzes.
Wie man den zuvor durchgeführten Simulationen entnehmen kann, führt dies auch zu einer Reduktion des jährlichen Energiebedarfs.
Bei den durchgeführten Untersuchungen hat sich gezeigt, dass Variante 4 – also jene, bei der die ersten 5cm der Ziegelhochlöcher mit PCM, dessen Phasenwechseltemperatur im Bereich zwischen 20 und 22℃ liegt, verfüllt sind – das sinnvollste Energieeinsparungspotential aufweist.
Dadurch kann der Fensterflächenanteil vom niedrigen auf den mittleren Verglasungsanteil erhöht werden, ohne dass sich die thermischen Eigenschaften des Gebäudes, wie Heizwärmebedarf und maximale operative Raumtemperatur, verschlechtern.
Für mitteleuropäische Klimaverhältnisse kann für die 3 untersuchten Fenstervarianten fast komplett auf eine Kühlung verzichtet werden, da lediglich bei einem über 50%igen Verglasungsanteil an der Außenwandfläche an ca. 13 Tagen im Jahr die 26℃ Marke leicht überschritten wurde.
Durch den Phasenwechsel im Temperaturbereich 20/22°C kann als positiver Nebeneffekt auch eine geringe Reduktion des Heizwärmebedarfs von ca. 1,7 bis 3,14%, je nach Verglasungsanteil, verzeichnet werden.
Eine allgemeine Aussage über das Energieeinsparungspotential mit PCM-Einsatz kann hier jedoch nicht getroffen werden, da dieses sehr stark vom betrachteten Gebäude, von der Bauweise sowie der Gewichtung des Heizwärme- und Kühlbedarfs abhängt.
Das heißt, für jedes Objekt sollte die Phasenwechseltemperatur sowie die Menge des einzusetzenden PCM genau untersucht werden, damit eine ausreichende Gesamtmenge an PCM zur Verfügung steht, um ein Optimum hinsichtlich der möglichen Absenkung der operativen Raumtemperatur im Sommer zu erzielen.

Nachfolgende Untersuchungen sollten sich mit der Applikation der PCM-Schicht im Hochlochziegel, das heißt mit der Anordnung und Optimierung der Ziegel-Hohlraumstruktur sowie deren Füllung beschäftigen. Außerdem sollten auch Versuchsreihen mit den „neuen PCM-Ziegeln“ durchgeführt werden, um deren tatsächliche Wärmespeicherkapazität und

weitere Baustoffkennwerte ermitteln zu können. Um ein serienreifes Produkt zu erhalten, müssen natürlich auch Fragestellungen der mechanischen und thermischen Belastbarkeit sowie feuchtetechnische und schallschutztechnische Eigenschaften geklärt werden.

Weiterführende Arbeiten sollten sich auch eventuell mit latentwärmespeichernden Salzhydraten beschäftigen, da sie im Gegensatz zu den in dieser Arbeit ausschließlich betrachteten Paraffinen zwar, wie bereits erwähnt, über eine höhere Wärmespeicherkapazität und einen günstigeren Materialpreis verfügen, jedoch wirkt sich ihre hohe Aggressivität nachteilig aus.

Quellenverzeichnis

Literaturquellen:

- Döt06: C. Dötsch, L. Huang: „PCM Slurries als Hochleistungs-Kältespeicher/Kälteträger“, Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen, in: Statusseminar „Thermische Energiespeicherung – mehr Energieeffizienz zum Heizen und Kühlen“, Freiburg, 02.11.2006 – 03.11.2006

- Hau06: A. Hauer, S. Hiebler, J. M. Kuckelkorn, A. Robrecht: Abschlussbericht „Simulation des Einsatzes von Latentwärmespeichern in Gewächshäusern“, durchgeführt vom Bayerischen Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. ZAE Bayern, 2006

- Hu07: J. Hu: Dissertation „Untersuchung und Optimierung des Einflusses von Latentwärmespeichermaterial auf das thermische und energetische Verhalten von Gebäuden“, TU-Wien – Fakultät für Bauingenieurwesen, 2007

- Kru02: M. Kruse, U. Friedrich: „Latentwärmespeicher in Baustoffen“, Projektinfo 06/02, BINE Informationsdienst - Fachinformationszentrum Karlsruhe - Gesellschaft für wissenschaftlich-technische Information mbH, 2002

- Küh06: L. Kühl, T. Dülger: „PCM-Nutzung in Bürogebäuden – latente Wärmespeicher zur Verbesserung des thermischen Komforts in der Sanierung“, Institut für Gebäude- und Solartechnik (IGS), TU Braunschweig, in: Statusseminar „Thermische Energiespeicherung – mehr Energieeffizienz zum Heizen und Kühlen“, Freiburg, 02.11.2006 – 03.11.2006

- Lex56: „Lexikon der Büchergilde – zweiter Band“, Büchergilde Gutenberg, Frankfurt am Main, 1956

- Meh02: H. Mehling: “Latentwärmespeicher”, Themeninfo IV/02, BINE Informationsdienst - Fachinformationszentrum Karlsruhe - Gesellschaft für wissenschaftlich-technische Information mbH, 2002

- Oba05: A. Obal: Diplomarbeit „Prognose der operativen Raumtemperatur in Gebäuden ohne raumlufttechnische Anlagen“, Fachhochschule Köln – Fakultät für Anlagen-, Energie- und Maschinensysteme, 2005

- Pec07: A. Pech, C. Pöhn, T. Bednar, W. Streicher: “Bauphysik, Erweiterung 1: Energieeinsparung und Wärmeschutz, Energieausweis – Gesamtenergieeffizienz”, Springer Verlag, Wien, 2007

- Sta89: G. Staufenbiel, J. Wessig: „Bauphysik und Baustofflehre – eine Einführung in Experimenten - Band 2 – Wärme – Wärmewirkungen – Wärmeschutz“, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, 1989

- Völ05: C. Völker: Diplomarbeit „Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses von PCM auf die Raumlufttemperatur“, Bauhaus Universität Weimar – Fakultät Bauingenieurwesen, 2005

- Wyo86: D. Wyon: „The effects of indoor climate on productivity and performance“, WS & Energie, 1986, aus: L. Kühl, T. Dülger: „PCM-Nutzung in Bürogebäuden – latente Wärmespeicher zur Verbesserung des thermischen Komforts in der Sanierung“, Institut für Gebäude- und Solartechnik (IGS), TU Braunschweig, in: Statusseminar „Thermische Energiespeicherung – mehr Energieeffizienz zum Heizen und Kühlen“, Freiburg, 02.11.2006 – 03.11.2006

Sonstige Quellen:

- Cli08: Firma Climator – Schweden, http://www.climator.com, Stand: Februar 2008

- Cri08: Firma Cristopia – Frankreich, http://www.cristopia.com, Stand: Februar 2008

- Dör08: Firma Dörken – Deutschland, www.doerken.de, Stand: Februar 2008

- Fhm07: „Spezifische Wärmekapazität fester Körper“, Fachhochschule München - Fachbereich 06 Physikalisches Praktikum, http://www.fh-muenchen.de/ home/fb/ fb06/labors/lab_didaktik/pdf/web-festkoerper.pdf, Stand: November 2007

- Häc02: E. Hächler – Suiselectra Ingenieurunternehmung AG
  B. Schneider – FH Esslingen:
  Schlussbericht „Phönix light Heizen und Kühlen mit PCM“, http://www.empa-ren.ch/ren/Projekte_P+D/Pdf_P+D/Phoenix_Light_SB.pdf, Stand: Dezember 2002

- IWEC: U.S. Department of Energy – Energy Efficiency and Renewable Energy, Weather Data – Austria,
  http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=6_europe_wmo_region_6/country=AUT/cname=Austria, Stand: März 2008

- Ley07: Leybold Handblätter Physik: „Kalorik – Bestimmung der spezifischen Wärme von festen Körpern“, Hürth, http://www.lddidactic.de/literatur/hb/d/p2/p2321_d.pdf, Stand: November 2007

- Mic08: Micronal - Firma BASF - Deutschland,
  http://www.micronal.de/portal/streamer?fid=309969, Stand: Februar 2008

- Rub07: Fa. Rubitherm Technologies GmbH - Deutschland,
  www.rubitherm.de, Stand: November 2007

- Sch04: P. Schmidtchen, J. Kozlowski: Präsentation „Latentwärmespeichertechnik für Gebäude“, Berlin, 6.12.2004,
  www2.tu-berlin.de/fb6/hri/html/lehre/documents/Latentwarmespeichertechnik.ppt

- Sch07: M. F. Schmidt: Präsentation „Temperaturmanagement – in seiner leichtesten Form“, BASF AG, Ludwigshafen – Deutschland, http://www.micronal.de/portal/streamer?fid=309969, Stand: Feber 2007,

- Ver07: Vercur – Forschungsinstitut für Chemie, Umwelttechnik und Recycling - Deutschland, http://vercur.de/schwer/index.html, Stand: November 2007

- VÖZ08: Verband Österreichischer Ziegelwerke, http://www.ziegel.at/main.asp? content =technik/waerme/spezifis.htm, Stand: April 2008