

## PHASENÜBERGANGSMATERIALIEN (PCM) ALS LATENTWÄRMESPEICHER IN REVITALISIERUNGSOBJEKTEN

**S. Hoffmann**<sup>\*</sup>, O. Kornadt

<sup>\*</sup> *Lehrstuhl Bauphysik, Bauhaus-Universität Weimar*  
E-mail: Sabine.Hoffmann@bauing.uni-weimar.de

**Keywords:** Phase change materials, thermal mass, reduction of overheating hours

**Abstract.** *Summer overheating in buildings is a common problem, especially in office buildings with large glazed facades, high internal loads and low thermal mass. Phase change materials (PCM) that undergo a phase transition in the temperature range of thermal comfort can add thermal mass without increasing the structural load of the building. The investigated PCM were micro-encapsulated and mixed into gypsum plaster. The experiments showed a reduction of indoor-temperature of up to 4 K when using a 3 cm layer of PCM-plaster with micro-encapsulated paraffin. The measurement results could validate a numerical model that is based on a temperature dependent function for heat capacity. Thermal building simulation showed that a 3 cm layer of PCM-plaster can help to fulfil German regulations concerning heat protection of buildings in summer for most office rooms.*

## 1 SOMMERLICHE ÜBERHITZUNG IM BÜROBAU

Die Überhitzung von Gebäuden während heißer, strahlungsreicher Tage ist ein zunehmendes Problem in den letzten Jahren. Besonders im Bereich des Büro- und Verwaltungsbaus sind repräsentative Glasfassaden seit langem üblich. Nicht immer wurde im Planungsprozess der sommerliche Wärmeschutz bedacht und entsprechend während der Konstruktionsphase umgesetzt. Planungsfehler führen häufig zu Überhitzungsproblemen in Gebäuden mit hohem Verglasungsanteil in der Fassade.

Dort wo Sonnenschutzverglasungen mit einem geringen Gesamtenergiedurchlassgrad zur Verringerung des Solareintrags eingesetzt werden, klagen die Nutzerinnen und Nutzer des Gebäudes häufig über nicht ausreichenden visuellen Komfort aufgrund der geringen Transparenz im sichtbaren Wellenlängenbereich.

Um konstruktive Lasten und erhöhte Kosten im Bürobau einzusparen und gleichzeitig eine flexible Raumgestaltung zu ermöglichen werden Leichtbaukonstruktionen, häufig in Form von Gipskarton-Ständerwänden, für die Innenraumaufteilung bevorzugt. Abgehängte Decken trennen die massiven Deckenbauteile thermisch vom Luftvolumen im Raum ab. Dadurch verfügen solche Räume über eine geringe thermische Masse (thermische Masse = Speicherfähigkeit der Raum umschließenden Bauteile) und heizen sich an sonnigen Tagen vermehrt auf.

Ständig zunehmende interne Lasten durch Computer, Drucker, Faxgeräte etc. erhöhen die Kühllast eines Raumes. Dadurch können Innenraumtemperaturen entstehen, die den Bereich des thermischen Komforts übersteigen. Dessen Obergrenze liegt nach heutigen Erkenntnissen [1] in Abhängigkeit von Luftfeuchte und Luftgeschwindigkeit bei 28°C.

Um trotz erhöhter interner Lasten und hohem Solareintrag angenehme Innenraumtemperaturen zu schaffen, werden inzwischen vermehrt Raumklimatisierungsanlagen eingesetzt. Der hohe Energieverbrauch dieser Anlagen und der Einsatz von Kältemitteln, die durch Undichtigkeiten in die Atmosphäre gelangen können, führt mittel- und langfristig zu höheren Mitteltemperaturen, die speziell in den Sommermonaten die Problematik der Überhitzung von Gebäuden in Mittel- und Südeuropa verschärfen wird [2, 3, 4, 5].

## 2 WIRKUNGSWEISE DER PHASENÜBERGANGSMATERIALIEN

Der passive Einsatz von Phasenübergangsmaterialien (PCM = phase change materials) bietet die Möglichkeit, ohne zusätzlichen Energieverbrauch Innenraumtemperaturen während des Tages zu senken. Mit dem Einsatz von PCM-Bauteilen kann die thermische Masse eines Gebäudes um ein Vielfaches erhöht werden bei einer gleichzeitig relativ geringen Erhöhung der konstruktiven Last. Die für einen passiven Einsatz geeigneten PCM durchlaufen einen Phasenübergang von fest nach flüssig und umgekehrt. Steigt die Temperatur des festen Materials über eine Grenze  $\theta_1$  muss eine bestimmte Wärmemenge zugeführt werden, um das Material zu schmelzen. Reine und „ideale“ Phasenübergangsmaterialien durchlaufen den Phasenübergang bei einer diskreten Temperatur, während PCM-Mischungen und „reale“ Materialien ihren Aggregatzustand in einem Temperaturbereich  $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$  ändern.

Die für den Schmelzvorgang benötigte Wärmemenge wird Latentwärme genannt und führt nicht zu einer Erhöhung der Temperatur im Bauteil. Während des Schmelzvorgangs ist das PCM-Bauteil bei gleichen Randbedingungen (Solareintrag, interne Lasten) also kühler als ein Bauteil ohne Phasenübergang. Das Raumklima wird tagsüber als angenehmer empfunden, da in einem PCM-konditionierten Raum sowohl die Lufttemperatur aufgrund des Wärme-

übergangs Wandoberfläche/Luft wie auch die Strahlungstemperatur der PCM-Wände geringer ist. Im Gegenzug sind die Bauteil- und Lufttemperaturen im PCM-konditionierten Raum während des Erstarrungsvorgangs (vorwiegend in der Nachtzeit bei kühleren Temperaturen) entsprechend höher als im mit konventionellen Materialien ausgestatteten Raum.

Die Entladung (= Erstarrung des Materials bis zum festen Zustand) ist Voraussetzung für einen effektiven Einsatz von PCM-Materialien. Findet kein Erstarrungsvorgang statt, verbleibt das Material im flüssigen Aggregatzustand und verhält sich entsprechend seiner thermischen Eigenschaften im flüssigen Zustand, d.h. es findet dann nur noch eine sensible Wärmespeicherung statt. In Bürogebäuden, die nachts ungenutzt sind, bietet sich deshalb eine erhöhte Nachtlüftung zur Unterstützung der PCM-Entladung an. Bei entsprechend niedrigen nächtlichen Außentemperaturen kann mit Hilfe eines erhöhten Luftwechsels während der Nachtstunden der Erstarrungsvorgang des PCM beschleunigt werden.

### 3 MESSERGEBNISSE AUS DEM VERIFIKATIONSOBJEKT

Im Rahmen des SFB 524 wurde ein PCM untersucht, dessen Phasenübergangstemperatur im Bereich der Obergrenze des thermischen Komforts liegt. Um ein Auslaufen im flüssigen Zustand zu verhindern, ist das untersuchte Material, ein industriell hergestelltes Paraffin-Gemisch, mikro-verkapselt (Durchmesser der Mikrokapseln  $\varnothing = 5 \mu\text{m}$ ). Die Mikrokapseln sind mit einem Masseanteil von ca. 20% in herkömmlichen Innenputz gemischt. [6, 7]

Die Testräume des Teilprojekts C5 im Verifikationsobjekt „Eiermann-Bau“ des SFB 524 bestehen aus zwei thermisch getrennten Räumen in Gipskartonständer-Bauweise mit großen, einfach verglasten Fensterflächen. Der untersuchte PCM-Putz wurde in verschiedenen Schichtdicken auf die GKB-Platten aufgeputzt; der Referenzraum ohne PCM war jeweils mit der gleichen Putz-Schichtdicke eines herkömmlichen Gips-Innenputzes versehen. Neben den Raumlufttemperaturen wurden in beiden Räumen Temperaturprofile des Putzes an verschiedenen Messpunkten aufgezeichnet. Zur Untersuchung der durch den PCM-Putz erzielbaren Temperaturreduktion wurden folgende Testläufe im Zeitraum vom Sommer 2003 bis zum Herbst 2005 bei unterschiedlichen Lüftungsregimes (Infiltration, mechanische Lüftung, erhöhte Nachtlüftung) durchgeführt:

1. 1 cm PCM-Putz an Wänden und Decke
2. 1 cm PCM-Putz an Wänden und Decke plus zusätzlich 16 m<sup>2</sup> PCM-Putz mit 1,5 cm Dicke
3. 3 cm PCM-Putz an Wänden, 1 cm PCM-Putz an der Decke

Zustand	WÄRMELEIT-FÄHIGKEIT [W/mK]		SPEZIFISCHE WÄRMEKAPAZITÄT [kJ/kgK]		ROHDICHTE [kg/m <sup>3</sup> ]		LATENT-WÄRME [kJ/kg]	SCHMELZ-PUNKT (peak-temp.) [°C]
	fest	flüssig	fest	flüssig	fest	flüssig		
<b>PCM-Putz</b>	0.23	0.20	1.10	1.07	957	(957)	16.5	28.1
Quelle:	1)	1)	1)	1)	1)	1)	2)	2)

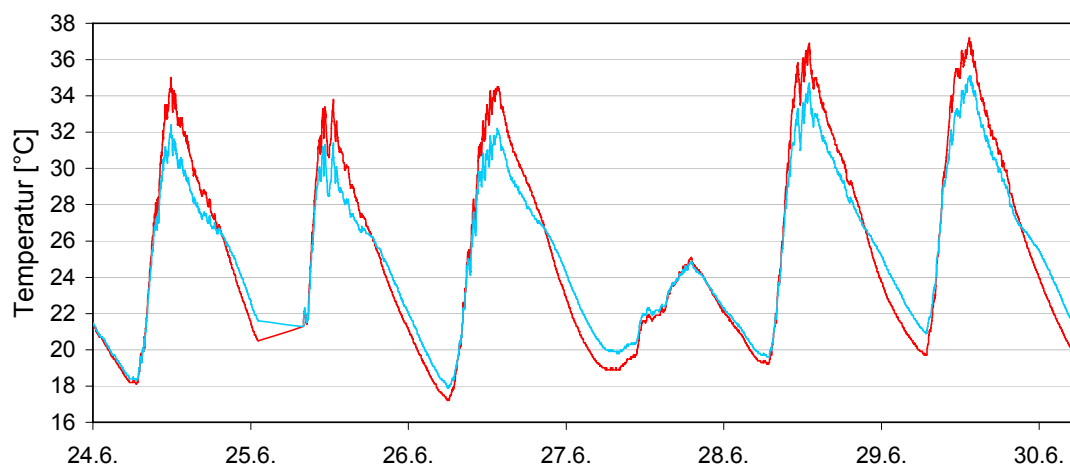
Quellen:

- 1) Messungen an der Bauhaus-Universität Weimar
- 2) DSC-Messungen an der Friedrich Schiller Universität Jena

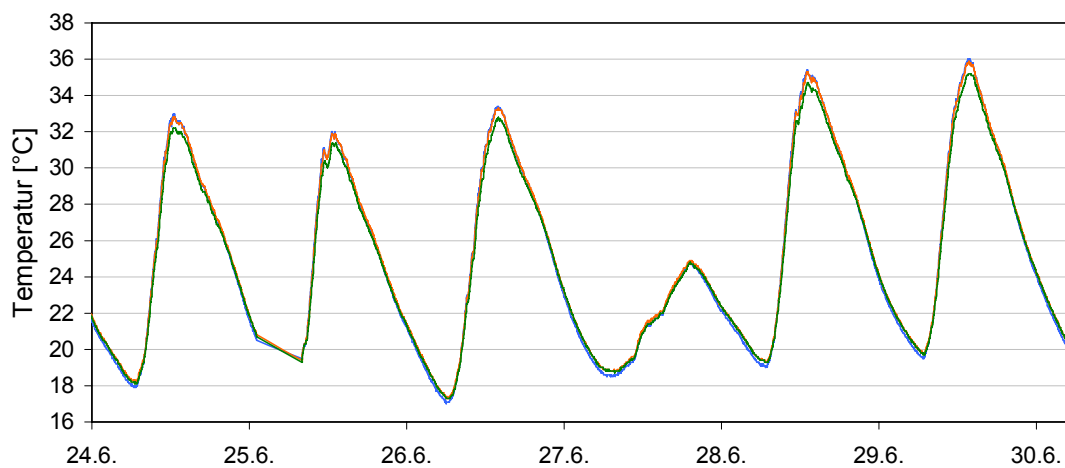
**Tab. 1: Thermische Eigenschaften des untersuchten PCM-Putzes**

Hinsichtlich der Reduktion der Lufttemperaturen konnten für den PCM-Putz viel versprechende Messergebnisse erzielt werden. **Abb. 1** zeigt die Lufttemperatur im Zustand 1 für den mit PCM-konditionierten Raum und für den Referenzraum ohne PCM. (In den Morgenstunden des 26.5. verhinderte ein Stromausfall eine Aufzeichnung der Temperaturen.) Eine Reduktion der Innenlufttemperatur von max. 2.5 K konnte unter diesen Randbedingungen erzielt werden. Bei den Messungen der Temperaturprofile im PCM-Putz traten gewisse Abweichungen auf. Diese sind durch das relativ enge Messgitter der Thermoelemente ( $d = 5 \text{ mm}$ ) und durch die geringen Temperaturdifferenzen im Bauteil, die im Bereich der Messgenauigkeit der Thermoelemente liegen, bedingt.

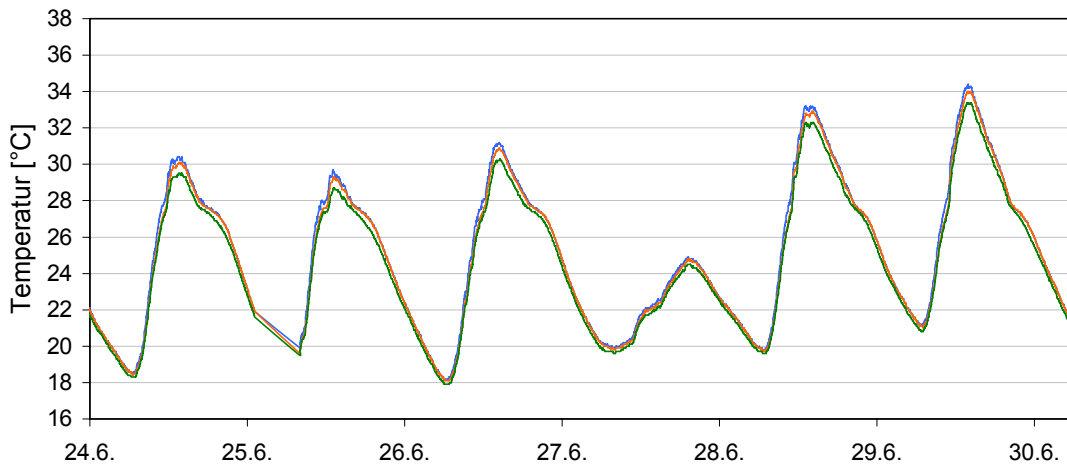
**Abb. 2a** zeigt das im selben Zeitraum gemessene Temperaturprofil für den Gipsputz ohne PCM und **Abb. 2b** stellt entsprechend das Temperaturprofil des PCM-Putzes dar. Obwohl die Temperaturspreizung in dem 1 cm dicken Putz in beiden Fällen nur gering ist, lässt sich beim Vergleich der Bauteiltemperaturen ohne PCM und mit PCM feststellen, dass die Reduktion bezüglich Bauteil- und Oberflächentemperaturen in derselben Größenordnung liegt wie die Differenz der Lufttemperaturen mit und ohne PCM. Dies ist von besonderer Bedeutung, da die thermische Behaglichkeit nicht nur durch den konvektiven Wärmeaustausch des Körper mit der Luft sondern auch durch den Strahlungsaustausch mit den umgebenden Flächen (Boden, Wände, Decken) bestimmt wird.



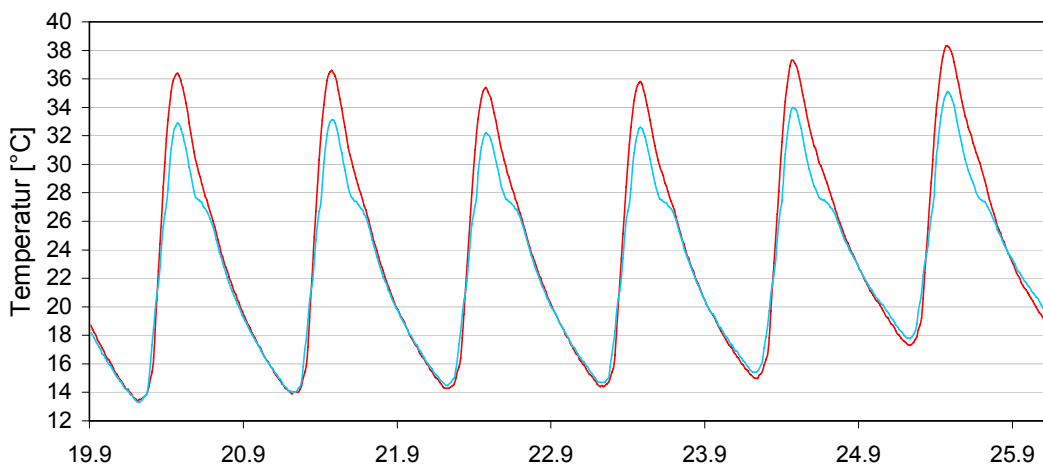
**Abb. 1:** Im Verifikationsobjekt gemessene Raumlufttemperaturen, Zustand 1  
Rot: Raum ohne PCM, Blau: Raum mit PCM-Putz



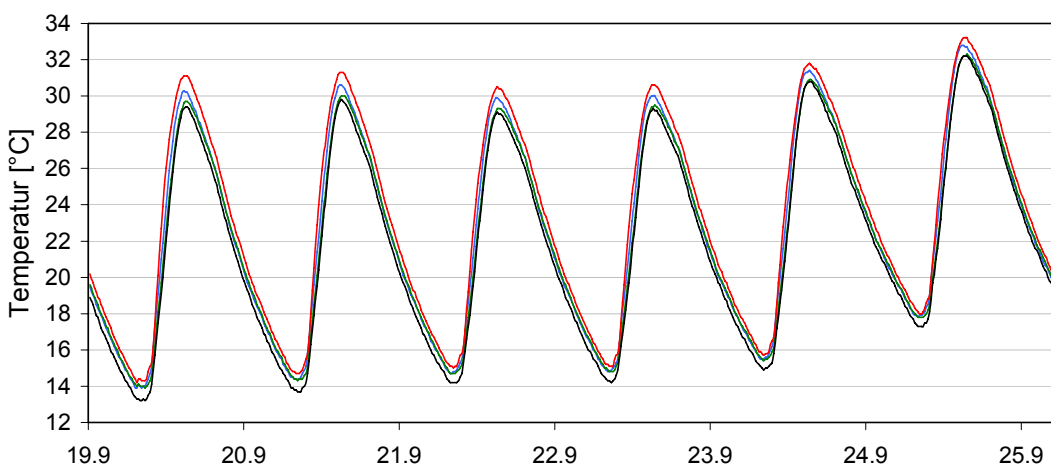
**Abb. 2a:** Temperaturprofil (Messung) des herkömmlichen Gipsputzes, 1 cm Putzschichtdicke



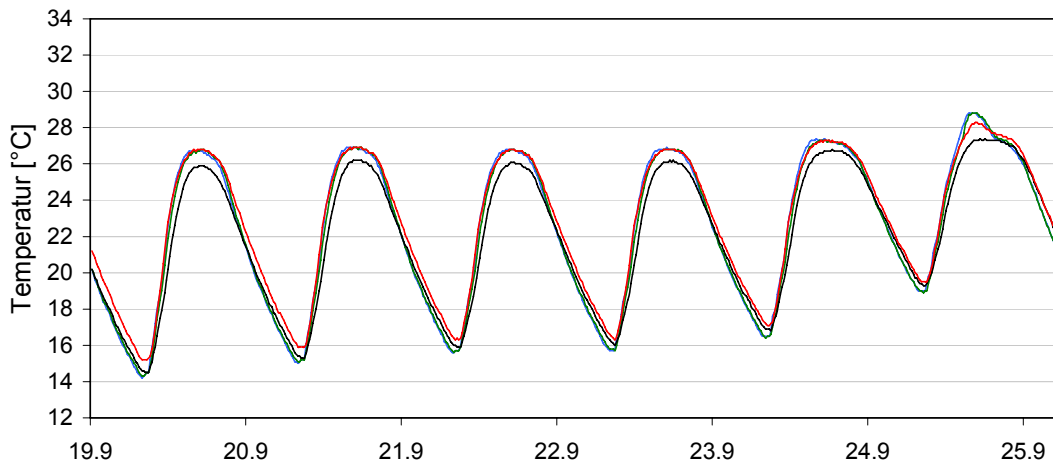
**Abb. 2b:** Temperaturprofil (Messung) im PCM-Putz, 1 cm Putzschichtdicke  
 Blau: Oberflächentemperatur; Orange: Temperatur im Abstand  $d = 0.5$  cm zur Oberfläche; Grün: Temperatur im Abstand  $d = 1$  cm zur Oberfläche (Grenzschicht zur Gipskartonbauplatte.)



**Abb. 3:** Im Verifikationsobjekt gemessene Raumlufttemperaturen, Zustand 3  
 Rot: Raum ohne PCM, Blau: Raum mit PCM-Putz



**Abb. 4a:** Temperaturprofil (Messung) des herkömmlichen Gipsputzes, 3 cm Putzschichtdicke



**Abb. 4b:** Temperaturprofil (Messung) im PCM-Putz, 3 cm Putzschichtdicke  
 Rot: Oberflächentemperatur; Schwarz: Temperatur im Abstand  $d = 1$  cm zur Oberfläche; Grün: Temperatur im Abstand  $d = 2$  cm zur Oberfläche, Blau: Temperatur im Abstand  $d = 3$  cm zur Oberfläche

**Abb. 3** zeigt Lufttemperaturen im Zustand 3 (3 cm PCM-Putz an Wänden und 1 cm PCM-Putz an Decke) bei erhöhter Nachtlüftung. Die maximale Reduktion der Innenlufttemperatur bei einer PCM-Putzschichtdicke von 3 cm bei gleicher Putzschichtdicke des herkömmlichen Putzes beträgt 3.5 K. Die erhöhte Nachtlüftung sorgt für Nachttemperaturen deutlich unter dem Temperaturbereich des Phasenübergangs und führt somit zu einer Entladung des PCMs.

**Abb. 4a** und **4b** zeigen die Bauteiltemperaturen für denselben Zeitraum im Putz mit und ohne PCM. Obwohl in Abb. 4a bei den im Bauteil gelagerten Messpunkten die genannten Messgenauigkeiten ersichtlich sind, kann beim Vergleich der Bauteiltemperaturen mit und ohne PCM eine Temperaturdifferenz festgestellt werden, die die Reduktion der Innenlufttemperatur aus Abb. 3 übersteigt und eine Senkung der Oberflächentemperatur durch das PCM von bis zu 4.5 K bedeutet.

Geht man davon aus, dass konvektiver und strahlungsbedingter Wärmeübergang eines sich in einem Innenraum befindlichen Menschen in etwa gleich groß sind, ergibt sich während des Tages eine maximale Reduktion der empfundenen Temperatur in dem mit PCM-konditionierten Testraum von ca. 4 K gemäß:

$$\theta_{\text{emp.}} = \frac{\theta_{\text{Luft}} \cdot \alpha_{\text{konv.}} + \theta_{\text{Umg.}} \cdot \alpha_{\text{Str.}}}{\alpha_{\text{konv.}} + \alpha_{\text{Str.}}} \quad (1)$$

Die Temperaturprofile des PCM-Putzes (Abb. 2b und 4b) weisen einen deutlichen Knick bei Erreichen der Phasenübergangstemperatur insbesondere beim Erstarrungsvorgang auf. Diese Peaktemperatur liegt im Falle des PCM-Putzes bei 28°C. Für den gewählten Testraum, in dem aufgrund der großen Fensterflächen hohe Raumtemperaturen zu erwarten sind, ist dieser Phasenübergangsbereich geeignet und führt zu optimierten Ergebnissen in Bezug auf die Temperaturreduktion. Dennoch übersteigen die mit PCM erzielten Raumtemperaturen den Bereich der thermischen Behaglichkeit, dessen Obergrenze bei ca. 28°C liegt.

## 4 SIMULATION VON PHASENÜBERGANGSMATERIALIEN

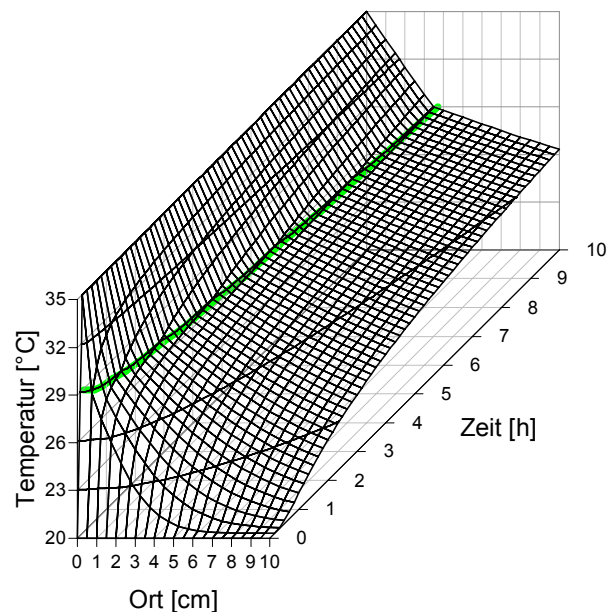
Grundsätzlich zeigten die Messungen in den Testräumen und im Verifikationsobjekt, dass mit PCM in passiver Anwendung im Innenraum eine tatsächliche Verbesserung des thermischen Komforts in Form von Reduktion der Raumluft- und Oberflächentemperaturen erzielt werden kann. Die Messungen an sich erlauben aber nur für die jeweils vorhandenen klimatischen, konstruktiven und lüftungsbedingten Randbedingungen zuverlässige Aussagen. Um diese Fallstudien auf verschiedene Randbedingungen übertragen und optimieren zu können, wurde ein Simulationsmodell entwickelt, das auf Grundlage der Messungen im Verifikationsobjekt validiert werden konnte.

### 4.1 Mathematische Darstellung des Phasenübergangs

Phasenübergänge erster Art sind durch eine Phasenumwandlung bei einer diskreten Temperatur  $\theta_{\text{melt}}$  gekennzeichnet. Das Material geht bei dieser Temperatur unter Zuführung der Schmelzenthalpie direkt vom festen Aggregatzustand in den flüssigen Zustand über. Dieser Vorgang lässt sich für bestimmte Randbedingung exakt analytisch beschreiben. **Abb. 5** zeigt die analytisch berechnete Temperaturverteilung während des Erstarrungsvorgangs in den ersten 10 cm einer eindimensionalen, halbunendlich ausgedehnten PCM-Platte, deren Materialeigenschaften Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität im festen und im flüssigen Zustand von einander abweichen. Zum Zeitpunkt  $t = 0$  befand sich das PCM im flüssigen Zustand bei uniformen  $35^\circ\text{C}$ . Der Erstarrungsvorgang wird durch das Absenken der Oberflächentemperatur auf konstante  $20^\circ\text{C}$  für  $t > 0$  ausgelöst. Die Phasenübergangstemperatur liegt bei  $29^\circ\text{C}$  (grüne Linie). Im Temperaturbereich oberhalb ist das PCM rein flüssig, darunter ist es rein fest. An der Phasengrenze gilt die Bedingung:

$$\lambda_s \cdot \frac{\partial T_s}{\partial x} - \lambda_l \cdot \frac{\partial T_l}{\partial x} = \rho \cdot l \cdot \frac{ds(t)}{dt} \quad (2)$$

$\lambda_s$  und  $\lambda_l$  bezeichnen die Werte für die Wärmeleitfähigkeit im festen und flüssigen Zustand,  $T_s$  und  $T_l$  entsprechen der Orts- und Zeitabhängigen Temperaturverteilung,  $l$  ist die für die Phasenumwandlung nötige Schmelzenthalpie und  $s(t)$  beschreibt das Fortschreiten der Phasengrenze.



**Abb. 5:** Analytische berechnete Temperaturverteilung an einem exemplarischen halbunendlichen PCM-Bauteil

Für die untersuchten Phasenübergangsmaterialien ist die Annahme eines Phasenübergangs erster Art nicht zulässig, da der Phasenübergang in einem Temperaturbereich  $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$  stattfindet. Für diese kontinuierlichen Phasenübergänge existieren keine exakten analytischen Lösungen. Näherungsweise analytische Lösungen lassen sich nur auf bestimmte Randbedingungen anwenden und können die realen Verhältnisse im Gebäude nur für bestimmte Spezialfälle

darstellen. Die Wahl einer numerischen Methode zur Beschreibung der Wärmetransportvorgänge in PCM-Bauteilen mit kontinuierlichem Phasenübergang liegt daher nahe.

Als Ausgangsgleichung zur Beschreibung der Vorgänge in einem Körper, der eine kontinuierliche Phasenumwandlung erfährt, dient die allgemeine Energiebilanzgleichung, wobei  $u$  die spezifische Energie des Körpers darstellt und  $j$  die Energiestromdichte:

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

Wird die Energiestromdichte  $j$  als Wärmestromdichte geschrieben und die Rohdichte des Materials als konstant angenommen, erhält man folgende Formulierung:

$$\rho \cdot \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad \text{mit } \rho = \text{konst.}, \quad j = \lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (4)$$

Die zeitliche Änderung der spezifischen Energie  $u$  eines Körpers beinhaltet während des Phasenübergangs zusätzlich zur sensiblen Wärmespeicherung auch die Wärmeenergie, die als so genannte Latentwärme umgesetzt wird. Nach Erweiterung der linken Seite ergibt sich:

$$\rho \cdot c^*(\theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad \text{mit } \frac{du}{d\theta} = c^*(\theta) \quad (5)$$

Damit lässt sich der Phasenübergang in Form einer temperaturabhängigen Wärmekapazität  $c_{\text{latent}}(\theta)$  beschreiben, wobei abhängig vom betrachteten Temperaturbereich gilt:

$$\begin{aligned} \theta < \theta_1 : & \quad c^*(\theta) = c_{\text{solid}} \\ \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 : & \quad c^*(\theta) = c_{\text{solid}} + c_{\text{latent}}(\theta) \\ \theta > \theta_2 : & \quad c^*(\theta) = c_{\text{liquid}} \end{aligned} \quad (6)$$

Die für die sensible Wärmespeicherung bestimmende spezifische Wärmekapazität wird durch die im Allgemeinen als konstant anzunehmende Werte  $c_{\text{solid}}$  und  $c_{\text{liquid}}$  ausgedrückt. Die Funktion  $c_{\text{latent}}(\theta)$  lässt sich messtechnisch durch Differential Scanning Calorimetry (DSC) ermitteln. DSC-Messungen wurden während der gesamten Laufzeit der Versuche im Verifikationsobjekt an PCM-Proben durchgeführt. Die latente Wärmekapazität des PCM-Putzes lässt sich mit einer Exponentialfunktion hinreichend genau beschreiben:

$$c_{\text{latent}}(\theta) = \exp(a + b \cdot \theta) \quad (7)$$

Das Integral von (7) über den Temperaturbereich des Phasenübergangs ergibt die zur Phasenumwandlung nötige Latentwärme (siehe Tab. 1).

## 4.2 Validierung

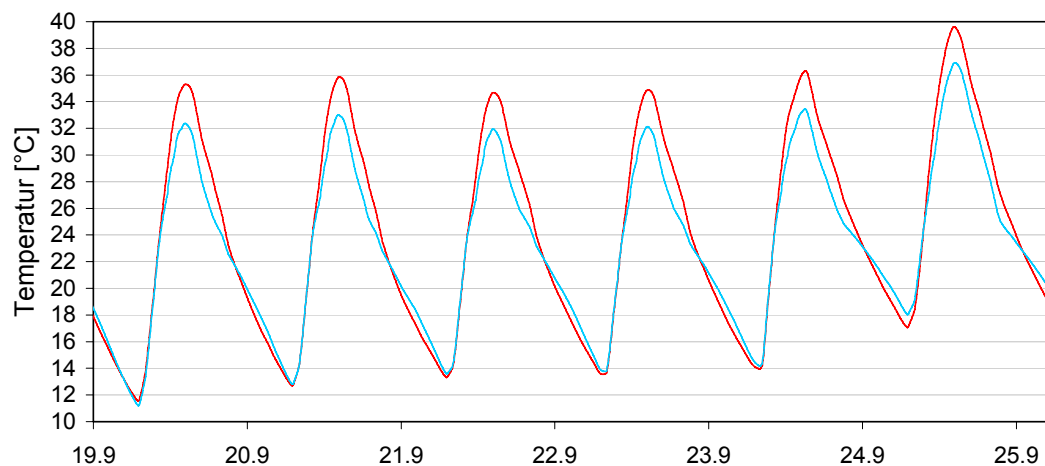
Das numerische Modell wurde in Form eines Finite-Differenzen Verfahrens umgesetzt. Dabei wurde sowohl ein separates Programm zur Berechnung von Temperaturverteilung und Wärmetransport bei Unterkühlung und unterschiedlichen thermischen Materialkonstanten erstellt, wie auch ein PCM-Modul in ein bestehendes Gebäudesimulationsprogramm implementiert. Beide basieren auf einer latenten Wärmekapazität gemäß Gl. 7. Die Messergebnisse aus dem Verifikationsobjekt dienen dazu diesen Ansatz zu validieren.

Die Validierung des numerischen Modells durch Vergleich von Raumlufttemperaturen aus der Messung mit Berechnungsergebnissen einer komplexen Gebäudesimulation stößt durch die Vielzahl möglicher Fehlerquellen an ihre Grenzen. Im Falle der Testräume im Verifikati-

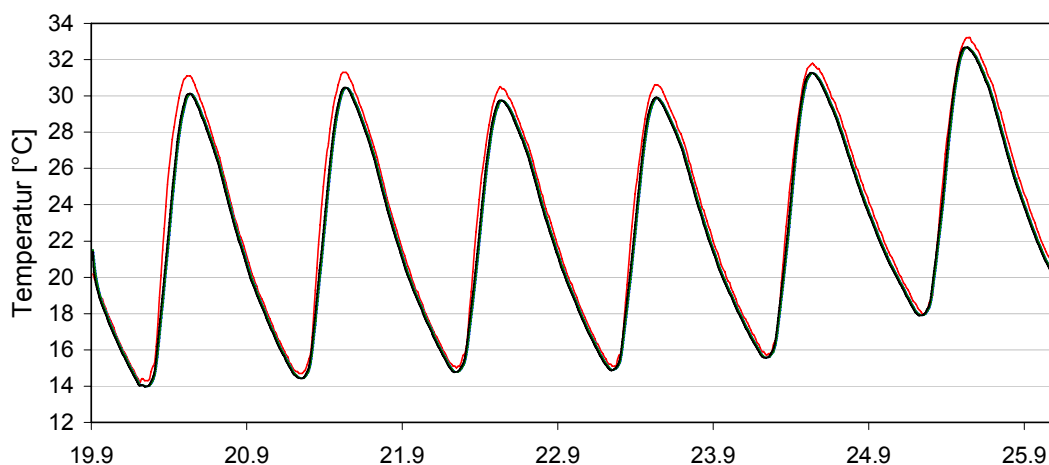


onsobjekt ist die größte Fehlerquelle der tatsächliche Solareintrag in den Raum. Dazu wurden Werte aus Pyranometermessungen, die die Globalstrahlung während des Tages aufzeichnen, unter Annahme verschiedener empirischer Algorithmen in direkten und diffusen Strahlungsanteil aufgeteilt. Eine weitere Unbekannte ist der tatsächliche Luftaustausch mit der Aussenluft, der die Innenraumtemperatur maßgeblich mitbestimmt. Dazu kommen die Messungenauigkeiten der Thermoelemente, die bereits bei der Messung der Temperaturprofile im PCM-Putz offensichtlich wurden.

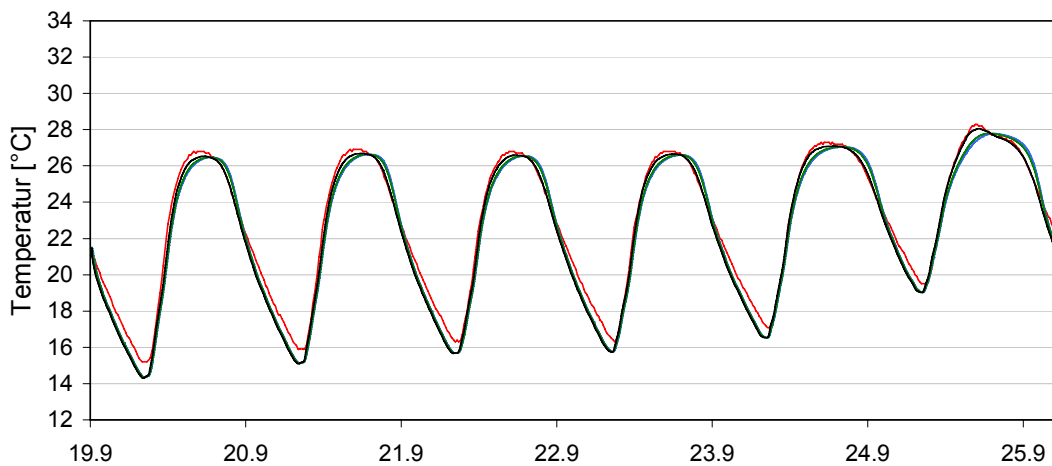
**Abb. 6** zeigt die berechneten und gemessenen Raumlufthtemperaturen einer Schönwetterperiode bei 3 cm PCM-Putz und erhöhter Nachtlüftung. Die Reduktion der Innenlufttemperatur kann im Simulationsmodell im Vergleich zu den Messergebnissen (Abb. 3) gut nachgebildet werden. **Abb. 7a** und **7b** zeigen die berechneten Temperaturprofile mit und ohne PCM auf Grundlage der gemessenen Oberflächentemperaturen (Abb. 4a und 4b). Da die Messungen Messfehler in der Größenordnung der Temperaturspreizung aufweisen und somit nicht aussagekräftig sind, kann hier von einer Validierung nur bedingt gesprochen werden. Die berechnete Temperaturverteilung und die Temperaturspreizung im PCM-Bauteil erscheinen jedoch plausibel.



**Abb. 6:** Simulierte Raumlufthtemperaturen, Zustand 5  
 Rot: Raum ohne PCM, Blau: Raum mit PCM-Putz



**Abb. 7a:** Temperaturprofil (Simulation) des herkömmlichen Gipsputzes, 3 cm Putzschichtdicke

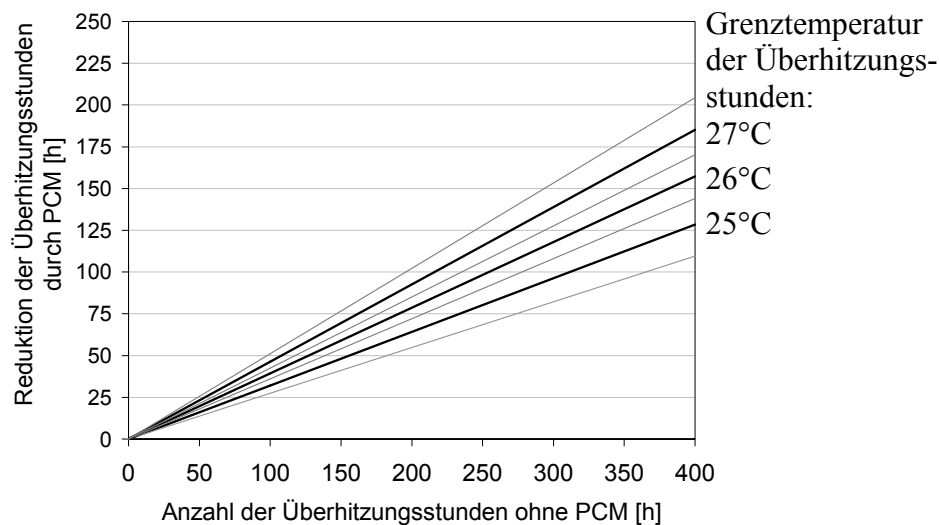


**Abb. 7b:** Temperaturprofil (Simulation) im PCM-Putz, 3 cm Putzschichtdicke  
 Rot: Oberflächentemperatur; Schwarz: Temperatur im Abstand  $d = 1$  cm zur Oberfläche; Grün: Temperatur im Abstand  $d = 2$  cm zur Oberfläche, Blau:  $d = 3$  cm zur Oberfläche

### 4.3 Simulationsergebnisse

Die positive Validierung des numerischen PCM-Modells rechtfertigt den Einsatz der Gebäudesimulation bei der Untersuchung, unter welchen Randbedingungen das Einbringen von Phasenübergangsmaterialien sinnvoll ist und welche Verbesserungen zu erwarten sind. Als Kriterium dient hierfür die Zeit, an der die Raumlufttemperaturen den Bereich des thermischen Komforts überschreiten. Diese Zeit kann in Form von Überhitzungsstunden beschrieben werden, an denen eine bestimmte Grenztemperatur überstiegen wird. Die DIN 4108-2 setzt für die Einhaltung des sommerlichen Wärmeschutzes unterschiedliche Grenztemperaturen für verschiedene Klimaregionen fest. Diese variieren zwischen  $25^{\circ}\text{C}$  und  $27^{\circ}\text{C}$ . Diese Grenztemperatur darf laut Norm an maximal 10% der Aufenthaltszeit überschritten werden, wobei die Aufenthaltszeit für Büroräume 10 h/d beträgt. Wird dieses 10% Kriterium auf ein ganzes Jahr übertragen, kommt man auf eine maximale Anzahl von Überhitzungsstunden von etwa 200 h/a [8].

**Abb. 8** fasst Simulationsergebnisse unter Variation von Orientierung, Raumschwere (Büroräume des Typs XL, L, M und S gemäß VDI 2878) und klimatischen Bedingungen zusammen. Abhängig von der Anzahl an Überhitzungsstunden, die ohne PCM auftreten, wird die mögliche Reduktion beim Einsatz eines 3 cm dicken PCM-Putzes bei verschiedenen Grenztemperaturen aufgezeigt. Die schwarzen Linien stellen die Regressionsgeraden jährlicher Simulationen dar, wobei die Streubreite durch die grauen Linien bezeichnet wird. Gebäude in Leichtbauweise sind jeweils im oberen Bereich anzusiedeln, da hier die zusätzliche thermische Masse des PCM besonders positiv zum Tragen kommt. Schwerere Gebäude sind im unteren Bereich zu finden, da die massiven Bauteile bereits über eine gewisse Wärmespeicherkapazität verfügen. Die aus Abb. 8 zu entnehmende Reduktion der Überhitzungsstunden durch den PCM-Putz hilft für die meisten Gebäude das 10% Kriterium aus der DIN 4108-2 zu erfüllen. Übersteigt die Anzahl der Überhitzungsstunden, die ohne PCM zu erwarten sind, allerdings 400 h/a darf die Regressionsgerade nicht extrapoliert werden. In Fällen übermäßiger Überhitzung in Räumen kann eine Entladung des PCM nicht gewährleistet werden.



**Abb. 8:** Reduktion der Überhitzungsstunden bei 3 cm dickem PCM-Putz an Wänden und Decke in einem Büroraum gemäß VDI 2878

## 5 ZUSAMMENFASSUNG

Der Einsatz von Phasenübergangsmaterialien (PCM) ist sinnvoll in Gebäuden, in denen eine besondere Gefahr der sommerlichen Überhitzung besteht. PCM können die thermische Masse eines Raumes um ein Vielfaches erhöhen, ohne eine besonders hohe konstruktive Last auf das Tragwerk einzubringen. Daher eignet sich der Einsatz dieser Materialien speziell bei Revitalisierungsobjekten.

Messergebnisse aus dem Verifikationsobjekt „Eiermann-Bau“ des Sonderforschungsbereichs 524 zeigten, dass durch den Einsatz eines PCM-Putzes mit mikro-verkapseltem Paraffin je nach Putz-Schichtdicke eine Reduktion der Lufttemperatur von 2.0 – 3.5 K und eine Reduktion der empfundenen Temperatur von bis zu 4 K möglich ist. Ein untersuchtes Salzhydrat erwies sich im Makroversuch als nicht stabil.

Die Messungen dienten dazu, ein numerisches Modell zu validieren, das den Phasenübergang mit Hilfe einer temperaturabhängigen latenten Wärmekapazität modelliert. Dieses numerische Modell wurde in ein Gebäudesimulationsprogramm implementiert. Dadurch konnte der Einsatz des PCM-Putzes unter verschiedenen Randbedingungen untersucht werden. Die Simulationsergebnisse zeigten, dass mit einem 3 cm dicken PCM-Putz die Anforderungen der DIN 4108-2 für Büroräume unter verschiedenen baulichen und klimatischen Randbedingungen eingehalten werden kann.

## REFERENCES

- [1] Bux, K.: *Klima am Arbeitsplatz – Stand wissenschaftlicher Erkenntnisse*, Forschung Projekt F 1987, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund, Dresden, Berlin, 2006
- [2] *Climate Change and the Built Environment*, Proceedings CIB W 108 Workshop 1.06.2006, Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, 2006
- [3] Hoffmann, S., Kornadt, O. 2005. Phase change materials to reduce summer overheating. CIB W 108: Climate change and the built environment, Paris, CSTB, April 2005
- [4] Hoffmann, S., Kornadt, O. 2005. Anforderungen an Gebäude durch langfristigen Klimawandel. Weimarer Bauphysiktage 2005
- [5] Hoffmann, S., Chow, D., Levermore, G., Kornadt, O. 2005. An investigation on phase change materials under climate change conditions. Submitted to: Building & Environment, (Oct. 2005)
- [6] SFB 524, 2005. Revitalisierung von Bauwerken, Schriften der Bauhaus-Universität Weimar, Veröffentlichungen des Sonderforschungsbereiches SFB 524 „Werkstoffe und Konstruktionen für die Revitalisierung von Bauwerken“ 2004/2005, ISBN 3-86068-248-2
- [7] Waldhelm, B., Kornadt, O. Einfluss von Phasenübergangsmaterialien zur Verbesserung des Raumklimas. WKSBS 54, Sep. 2005
- [8] Hoffmann, S., Kornadt, O. 2004. Sommerlicher Wärmeschutz eines Mehrfamilienhauses aus den 50er. In: Bauphysik H. 4/2004