

## Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben

# Wassergestützte Latentwärmespeicher in Putz- und Dünnestrichsystemen

Der Projektpartner:

Maxit Deutschland GmbH  
Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme

Autoren:

Armin Zöllner, maxit  
Peter Schossig, Fraunhofer ISE  
Thomas Haussmann, Fraunhofer ISE

Hinweis:

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Innovationsfonds Klima- und Wasserschutz der Badenova AG & Co. KG gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Die Projektpartner danken dem Badenova Innovationsfonds für die Förderung des Forschungsvorhabens

# Inhalt

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>  | <b>4</b>  |
| <b>2</b> | <b>Projektziele</b>  | <b>6</b>  |
| <b>3</b> | <b>Projektergebnisse</b>                                   | <b>8</b>  |
| 3.1      | Arbeitsschritt 1: Systemkonzepte                           | 8         |
| 3.2      | Auswahl geeigneter Phasenwechselmaterialien                | 10        |
| 3.3      | Entwicklung Dünnschichtestrich für Fußbodenheizung         | 12        |
| 3.3.1    | Verbesserung Wärmeleitfähigkeit                            | 12        |
| 3.4      | Simulationsstudien   | 15        |
| 3.4.1    | Validierung des Simulationsmodells                         | 15        |
| 3.4.2    | Simulationen zur Ermittlung eines idealen Schmelzbereiches | 15        |
| 3.4.3    | Anlagensimulation Fußbodenheizung mit Solarkollektor       | 21        |
| 3.4.4    | Thermische Charakterisierung an Wandmustern                | 24        |
| 3.4.5    | Messungen Prüfkammer Fraunhofer ISE                        | 26        |
| <b>4</b> | <b>Zusammenfassung</b>                                     | <b>31</b> |

# 1 Einleitung

Die Beheizung und auch Kühlung von Gebäuden verursacht in Deutschland einen wesentlichen Teil des gesamten Energieverbrauchs. Im Wesentlichen werden für diesen Zweck der Beheizung oder Kühlung von Innenräumen auf ca. 20 °C wertvolle, meist fossile Energieträger wie Erdöl, Gas oder auch Strom eingesetzt. Die Notwendigkeit verstärkt sparsam und effizient mit der eingesetzten Energie umzugehen ist aus ökonomischen wie ökologischen Gründen unumstritten.

Neuere Entwicklungen zeigen, dass sich eine Temperierung von Räumen auf ein komfortables Niveau nicht allein durch herkömmliche Systeme und die Verbrennung von fossilen Energieträgern erreichen lässt. Vielmehr arbeiten innovative Systeme mit sehr kleinen Temperaturdifferenzen zwischen dem Heiz-/Kühlmedium und der zu erzielenden Raumtemperatur. Das Potenzial der Energie und passive Effekte werden effektiver eingesetzt. Auf diese Weise können auch regenerative Energiequellen, wie thermische Solartechnik zum Heizen oder die natürliche Kühle des Erdbodens zum Kühlen besser genutzt werden. Derartige, mit geringen Temperaturspreizungen arbeitende Systeme werden aufgrund des besseren Exergienutzungsgrades auch als LowEx-Systeme bezeichnet.

Mikroverkapseltes Paraffin ist ein neuartiges Wärmespeichermaterial welches solche energieeffiziente LowEx-Konzepte realisierbar macht. Der Latentwärmespeicher (PCM = phase change material) Micronal® und darauf basierende Baustoffe zur passiven Kühlung von Gebäuden konnten bereits in anderen Projekten des Fraunhofer ISE erfolgreich zur Marktreife mitentwickelt werden. Erste kommerziell realisierte Objekte zeigen deutlich das Energieeinsparpotential durch PCM basierte passive Gebäudekühlung im Vergleich zu konventionellen Kühlungstechniken.

Die passive Kühlung von Gebäuden scheitert häufig an der Verfügbarkeit ausreichend kühler Nachtluft, auch in unserer Region. Eine Gewähr für das Einhalten einer Temperaturgrenze kann somit nicht gegeben werden. Daher liegt der Fokus im vorliegenden Projekt auf der Entwicklung aktiver, d.h. mit Wasser betriebenen Heiz- und Kühlflächen.

In der bisherigen Forschung wurde Micronal® bisher nur für Anwendungen zur Gebäudekühlung eingesetzt. Ebenso möglich ist auch der Einsatz zur Raumheizungsunterstützung. Hierfür sollen im Rahmen dieses Projektes Putz- und Dünnschichtestrichsysteme für den Aufbau von Fußbodenheizsystemen untersucht und bis zur Marktreife entwickelt werden.

PCM bietet in diesem Zusammenhang mehrere Vorteile. Konventionelle Fußbodenheizungen sind relativ träge Systeme mit häufig mehr als 10 Stunden Ansprechzeit. Für das Erreichen einer gewissen Speichermasse müssen Fußbodenheizungen in der Regel mit Schichtdicken von 5-10 cm aufgebaut werden. Die Speichermasse ist für den Betrieb im Rahmen eines Lowex-Konzeptes (Antriebstemperaturen nahe an der Raumtemperatur) mit Umweltwärmequellen kleiner Leistung notwendig. Der Einsatz von PCMs bietet hier die Möglichkeit die Schichtdicke der Fußbodenheizung zu verringern und Gleichzeitig die Wärmespeicherfähigkeit einer dickeren Fußbodenheizung zu erreichen.

Vor Allem bei Renovationsvorhaben bieten sich neue Möglichkeiten der Nachrüstung alternativer Heizungskonzepte, da der Schichtaufbau deutlich reduziert werden kann. Energetisch kann durch den Einsatz eines PCM der Energiebedarf für Heizung und Kühlung deutlich reduziert werden.

## 2 Projektziele

Mit der Entwicklung von Phasenwechselmaterialien in Putzsystemen hat Maxit bereits ein Produkt entwickelt, das aus thermisch leichten Bauten thermisch träge Bauten macht ohne das spezifische Gewicht zu erhöhen.

Dieses Entwicklungsprojekt geht einen Schritt weiter. Durch die Kopplung unterschiedlicher Wärmesenken der Umwelt mit gebäudeintegrierten Speichern hoher Speicherdichte, kann der Energiebedarf für die sommerliche Kühlung oder winterliche Heizung ebenso wie die Peakleistung hierfür weiter deutlich reduziert werden. Dabei kommen als Wärmesenken das Erdreich (Erdsonden, Erdkollektoren), die nächtliche Außenluft (Außenluftwärmetauscher, Kühlturm) oder auch klassische Kältetechnik, die mit Nachtstrom und wegen der niedrigeren Außentemperatur bei günstiger Arbeitszahl betrieben werden kann, in Betracht. Solarkollektoren, Wärmepumpen, Abwärmenutzung oder Geothermie könnten als Wärmequellen für die Heizungsunterstützung genutzt werden. Das raumseitige System besteht aus einem flächenartigen System zur Wärmeaufnahme und –speicherung (Kühldecke, Fußbodenheizung) über ein wassergestütztes System an die oben genannten Wärmequellen, -senken. Durch die Ankopplung mittels Wasser kann die pro Fläche speicherbare Wärmemenge erheblich gesteigert werden, da bei den bis dato entwickelten Systemen die Wärmeabfuhr an die Luft der begrenzende Faktor ist. Außerdem ist dadurch eine deutlich größere Flexibilität der Systeme gegeben.

Die konkreten Systeme, die im Rahmen des Vorhabens entwickelt werden sollen, bestehen aus in Putze eingearbeiteten Rohrsystemen (z.B. Kapillarrohrmatten), die an Wänden oder Decken angebracht werden können und Estrichsysteme für Fußbodenheizungen. Diese können sowohl im Neubau als auch insbesondere in der Sanierung eine sinnvolle Anwendung finden.

Die Entwicklungsarbeiten umfassten dabei folgende Arbeitsschritte:

- 1 Erarbeitung sinnvoller Systemkonzepte zur Heizung und Kühlung in Gebäuden
- 2 Auswahl der geeigneten Phasenwechselmaterialien (Umwandlungstemperatur)
- 3 Materialentwicklung: Verhalten der Putzsysteme mit integriertem Phasenwechselmaterial und Kühlrohren wie Rissbildung, Aufbringbarkeit, Dauerhaltbarkeit usw.
- 4 Produktentwicklung: Entwicklung vermarktbarer Produkte im Sinne von Systemen (z.B. analog zu Wärmedämmverbund-System)

- 5 Tests im Labor/Technikum und unter kontrollierten (Testräume) und anwendungsnahen Bedingungen (Pilottests)

## 3 Projektergebnisse

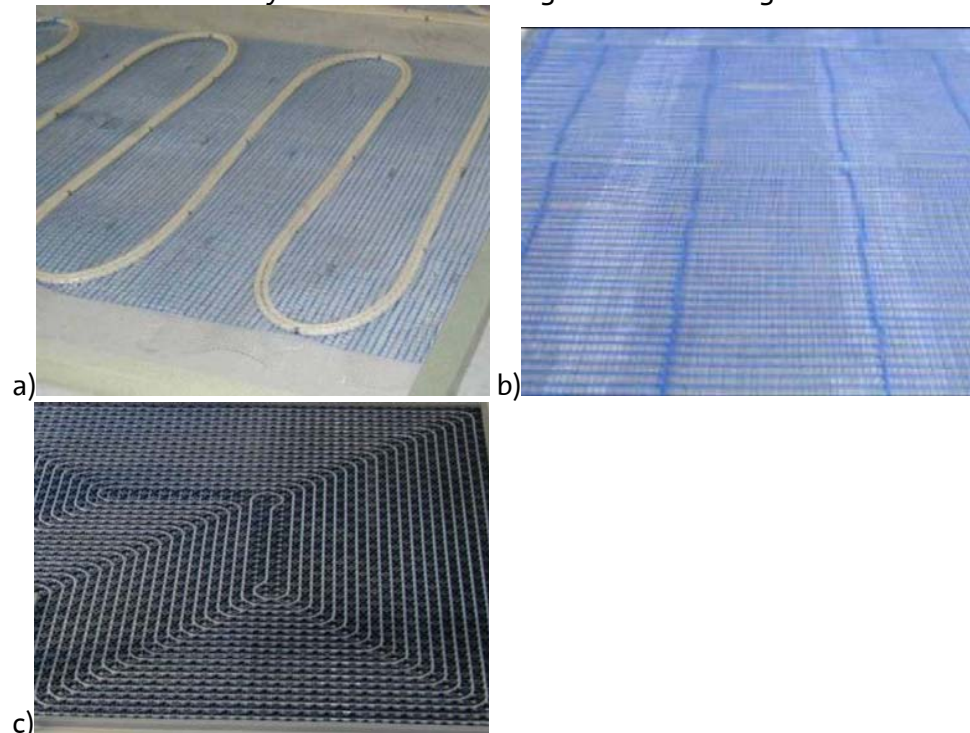
### 3.1 Arbeitsschritt 1: Systemkonzepte

Arbeitsschritt 1 beinhaltet die Entwicklung sinnvoller Systemkonzepte. Dazu wurden verschiedene handelsübliche Systeme untersucht und bewertet. Für den Bereich dünn-schichtige Heizestriche am Boden wurden folgende Systeme in Flächen von 9 x 9 m aufgebaut, um sowohl das Handling beim Aufbau der Heizelemente als auch das Einbringen von Dünnestrichen zu bewerten:

- Gegenläufige Doppelrohre
- Kapillarrohrmatten
- Minirohrfolienelemente

Die verschiedenen Systeme sind in der folgenden Abbildung zu erkennen.

Bild 1: untersuchte Systemkonzepte.  
a) gegenläufige Doppelrohre  
b) Kapillarrohrmatten  
c) Minirohrfolienelemente.



Beim gleichzeitigen Betrieb einer Fläche als Heizung im Winter und Kühlung im Sommer können aufgrund des verhältnismäßig großen Anwendungstemperaturbereichs Spannung im Estrich auftreten, die bei einer



Reduzierung der Schichtdicke zu einer größeren Rissbildung führen. Zur Minimierung der Rissgefahr hat sich der Einbau eines Glasfasergewebes bewährt. Die Heizrohre wurden mit jeweils 10 mm Überdeckung in den Fließestrich eingebettet. Beim nachfolgenden Aufheizen zeigte sich, dass das System der gegenläufigen Doppelrohre bei 10 mm Rohrüberdeckung eine höhere Welligkeit in der Wärmeverteilung zeigt im Vergleich zu den anderen Systemen. Für die weiteren Untersuchungen wurden deshalb die Kapillarrohrmatten und die Minirohrfolienelemente ausgewählt.

Kapillarrohrmatten haben den Vorteil, dass durch die sehr große Wärmeübertragungsfläche nur sehr niedrige Vorlauftemperaturen von ca. 30°C benötigt werden, so dass als Wärmequellen Erdwärme mittels Wärmepumpen und Sonnenkollektoren in Frage kommen. Nachteilig für dieses System ist der höhere Installationsaufwand. Mit dem System der Minirohrfolienelemente ist der Installationsaufwand vergleichbar zu dem bei üblichen Warmwasserfußbodenheizungen. Allerdings braucht dieses System höhere Vorlauftemperaturen des Wassers.

Im Bereich Kühlung werden die weiteren Untersuchungen mit Deckenelementen aus Metall durchgeführt, die mit Gipsbrei gefüllt werden, der PCM enthält. Erste Versuche zur Materialentwicklung wurden durchgeführt. Dabei zeigt sich, dass PCM in Gips gebundene Produkte leichter zu integrieren ist als in zementgebundene Produkte. Aber auch hier gibt es inzwischen erste positive Ansätze. Dennoch bleibt noch viel Entwicklungsarbeit zu leisten und die Implementierung von PCM in zementbasierte Systeme wurde im Rahmen dieses Projektes nicht weiter verfolgt.

Es wurden schließlich 3 Systeme als sinnvoll bewertet:

- PCM- Fußbodenheizungssysteme mit integrierten Kapillarrohrmatten oder Minirohrfolienelementen.
- Wandelemente zum Heizen und Kühlen des Raumes, ebenfalls mit integrierten Kapillarrohrmatten
- Aktive Kühldeckenelemente aus Metall verfüllt mit PCM-Gipsputz

Aufgrund einer Patentanmeldung der EMPA (WO 03/064931 A1, thermoaktives Wand- und Deckenelement) wurden die Arbeiten an dem Deckensystem eingestellt, da eine lizenzfreie Vermarktung bei Erteilung des Patents nicht möglich ist. Die Entwicklung einer Fußbodenheizung wird damit zentraler Bestandteil dieses Forschungsprojektes

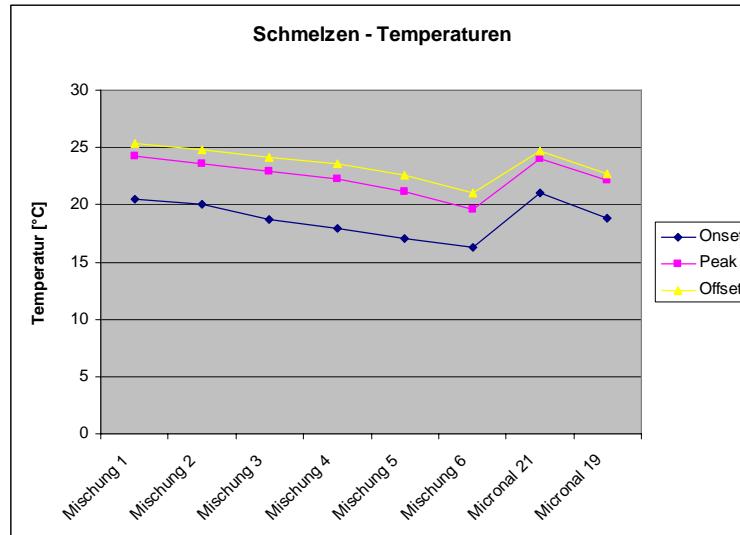
### 3.2 Auswahl geeigneter Phasenwechselmaterialien

Erste einfache Simulationen haben bereits im Vorfeld schnell gezeigt, dass aktive Systeme für Kühlung und Heizung andere Schmelzbereiche benötigen, als die bisher entwickelten passiven Baustoffe. Flächenkühlsysteme werden üblicherweise mit Oberflächentemperaturen von 20-23°C und Wassertemperaturen von 16-19°C betrieben. Der optimale Schmelzbereich liegt demnach bei rd. 21°C, da hier noch eine minimale Temperaturdifferenz von ca. 2K für die Entladung des Wärmespeichers durch die Kälteanlage zur Verfügung steht und die maximale Wärmespeicherfähigkeit liegt innerhalb des Betriebstemperaturbereiches der Kühldecke.

Für Heizungsunterstützung z.B. in Form einer Fußbodenheizung verhält sich dies ähnlich. Auch hier sollte der Schmelzbereich des PCM im Betriebstemperaturbereich der Heizung liegen, der etwa bei 30°C liegt.

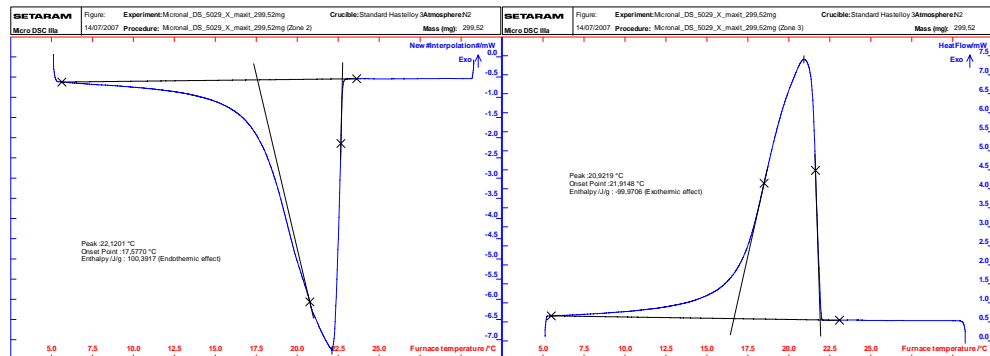
In diesem Projekt wurde für die Untersuchung der Heizungsunterstützung das bereits entwickelte PCM für passive Anwendungen verwendet, welches einen Schmelzbereich von 25-28°C besitzt. Für aktiv unterstützte Kühlanwendungen wurde in Zusammenarbeit mit der BASF als Rohstofflieferant ein PCM mit einem Schmelzbereich von 19-22°C entwickelt. Paraffine bieten den Vorteil, dass sie nicht nur chemisch unter den Anwendungs- und Kapselherstellbedingungen inert sind, sondern dass sich mit ihnen auch bevorzugte Schmelztemperaturen durch Mischungen verschiedener Paraffine relativ einfach einstellen lassen. Es wurden die in der folgenden Grafik zusammengefassten Mischungen hergestellt, um das ideale Mischungsverhältnis zu finden.

Bild 2: charakteristische Temperaturen gemessen an unterschiedlichen Paraffinmischungen im DSC zur bestimmung des idealen Mischungsverhältnisses



Die Mischung Nr. 5 erfüllt die Anforderungen am Besten und das neue Material konnte schließlich von der BASF produziert und beschafft werden. Im DSC (differential scanning calorimeter) wurde es am Fraunhofer ISE abschließend thermisch charakterisiert. Das folgende Bild 3 zeigt den gemessenen Enthalpie-Temperatur-Verlauf.

Bild 3: DSC-Messung maxit clima 23 Pulver: links schmelzen, rechts erstarren



Neben den thermischen Materialeigenschaften wurde bei maxit auch die technische Verarbeitbarkeit des neuen Latentwärmespeichermaterials untersucht. Eine Übertragung der vorliegenden Rezepturen von maxit clima 26 auf das neue Material war nicht direkt möglich. Durch das Scale-Up des Produktionsprozesses bei der BASF wurden Additive, die die Eigenschaften der Kapselhülle des PCMs und die Lagerstabilität beeinflussen verändert. Dies wirkte sich negativ auf die Rezeptur des Gipsputzes aus. In Laborexperimenten musste der Gipsputz an diese neuen Bedingungen angepasst werden. Diese zusätzliche unerwartete Entwicklungsarbeit

verzögerte den Projektablauf massiv, da die Weiterentwicklung erst nach Abschluss des Produktionsaufbaus weitergeführt werden konnte.

Schließlich stand jedoch ein Ausgangsmaterial für die Herstellung und Vermessung von Testmustern zur Verfügung.

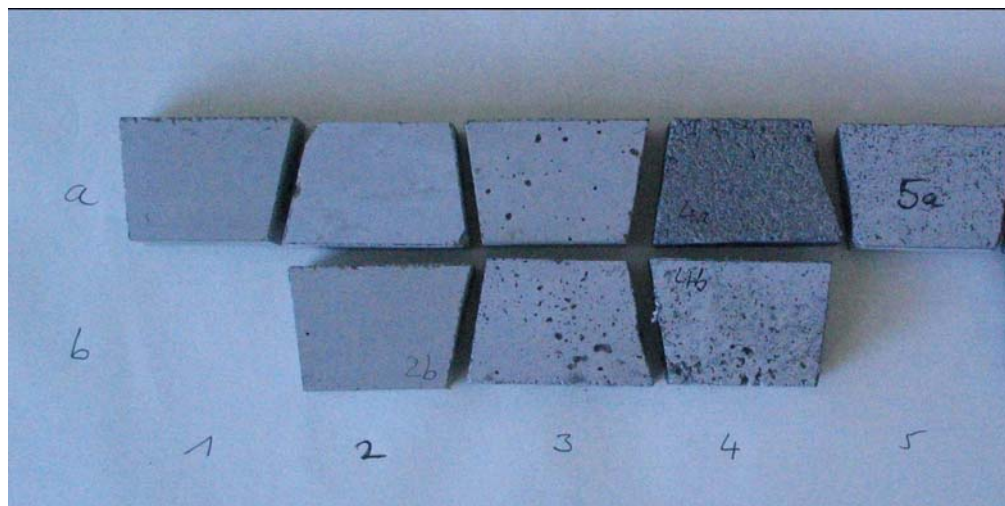
### 3.3 Entwicklung Dünnschichtestrich für Fußbodenheizung

#### 3.3.1 Verbesserung Wärmeleitfähigkeit

Im Rahmen der Entwicklung des Dünnschichtestrichs wurde zunächst an einer Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit gearbeitet. Eine erhöhte Wärmeleitfähigkeit würde ein schnelleres System und damit eine bessere Regelung ermöglichen. Bisherige Fußbodenheizungen sind üblicherweise sehr träge und benötigen mehrere Stunden, um auf eine Temperaturänderung zu reagieren. Durch einen dünneren Aufbau und verbesserte Wärmeleitfähigkeit kann diese Zeit reduziert werden. Damit ließen sich energieeffizientere Flächenheizungen und ev. ein erhöhter Komfort erreichen.

Zu diesem Zweck wurden verschiedene Additive zur Verbesserung dem Estrich beigemischt und dann die sich ergebende Wärmeleitfähigkeit gemessen. Bild 4 zeigt einige der hergestellten und vermessenen Proben. Als Additiv wurde Graphit in unterschiedlichen Mengenanteilen und Faserlängen erprobt.

Bild 4: Probe 1 ist die Referenzprobe. Die weiteren Proben enthalten unterschiedliche Additive zur Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit

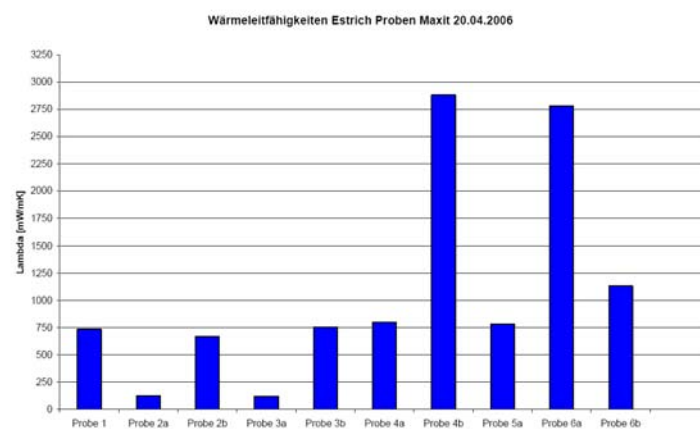


Die gemessene Wärmeleitfähigkeit an den Proben (Bild 5) zeigt ein sehr unterschiedliches Verhalten. Probe 1 ist die Referenz und dient als

Vergleichswert für die weiteren Proben mit Graphitzusatz. Jeweils die Proben a und b unterscheiden sich in der Länge der Graphitfasern. Der integrierte Graphitanteil wurde von Probe 2 -6 erhöht.

Die Ergebnisse der Messungen zeigen zunächst, dass tendenziell die Wärmeleitung bei Verwendung der längeren Fasern erwartungsgemäß verbessert ist. Das gleiche gilt auch für die Erhöhung des PCM-Anteils. Eine Ausnahme ist hier Probe 6. Probe 2a und 3a zeigen sogar deutlich geringere Wärmeleitfähigkeiten wie die Referenz. Diese Ergebnisse sind zunächst nicht plausibel und als Ursache für dieses unerwartete Ergebnis wird die verwendete Messmethode vermutet, die sehr fehleranfällig bei inhomogenen Methoden ist. Bestimmt wurde die Wärmeleitfähigkeit nach der Hitzdraht-Methode. Über einen dünnen Draht wird ein Wärmeimpuls in die Probe eingebracht und die Zeitdifferenz bis zum Durchdringen durch die Probe gemessen. Je nach Positionierung des Hitzdrahtes (Luftblase, Graphitfaser, Gipsputz) streuen die Ergebnisse stark. Das Ergebnis kann somit die Realität weit über- oder unterschätzen. Eine Bewertung der Proben ist somit nicht möglich.

Bild 5:  
Wärmeleitfähigkeit  
der Proben  
gemessen mit  
Hitzdraht-Methode



Eine bessere Methode ist die Vermessung in einer Plattenapparatur. Hier wird der Wärmeimpuls auf die gesamte Probenoberfläche einer großen Probe aufgebracht (50x50 cm), wodurch der Fehler durch Inhomogenität minimiert wird.

Insgesamt wurden sieben unterschiedliche Fußboden-Testplatten in der Größe 50x50cm von Maxit hergestellt. Variiert wurde wieder sowohl der Graphitgehalt zur Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit, als auch die Faserlänge des Graphits.

Bild 6: Estrichproben für die Plattenapparatur. insgesamt wurden 7 Platten (50x50 cm) und unterschiedlichen PCM-Gehalten und Graphitfaserlängen für die Wärmestrommessung gefertigt



Bild 7: Wärmeleitfähigkeitsmessung in einer Plattenapparatur (Taurus) am Fraunhofer ISE. Probe 1 ist wieder die Referenz, Proben 2,3 und 4 enthalten unterschiedliche Anteile an Graphit, die Probennummern a und b unterschiedliche Faserlängen

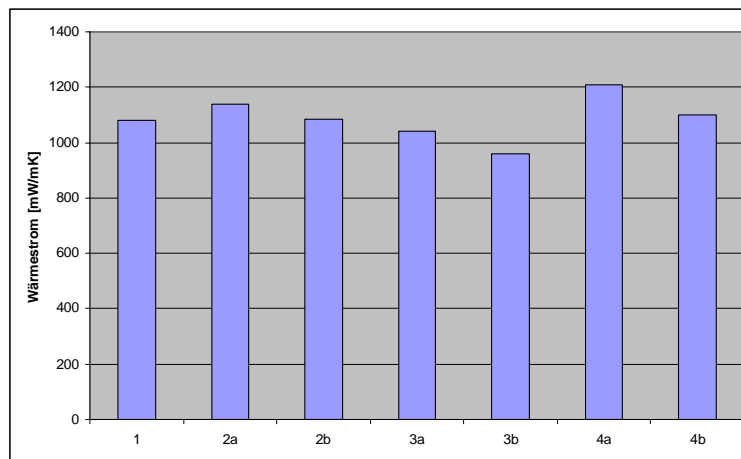


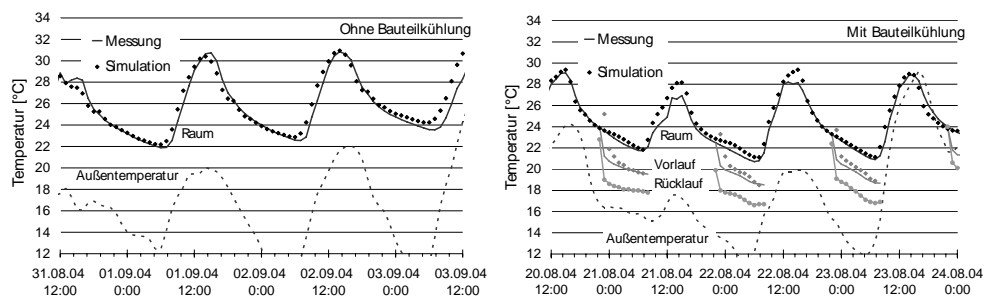
Abbildung 8 gibt die Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessung wieder. Die Fußbodenplatten mit den längeren Graphitfasern a) leiten die Wärme tendenziell besser, als die Platten mit den kurzen Graphitfasern b). Insgesamt streuen die Messergebnisse in der Plattenapparatur deutlich weniger, folgen aber auch hier nicht einem erwarteten eindeutigen Muster. Die Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit durch Zugabe von Graphit wird jedoch in keinem Falle so deutlich erweitert, die den zusätzlichen Aufwand bei der Produktion rechtfertigen. Die Arbeiten in dieser Richtung wurden daher erfolglos eingestellt und der Estrich im konventionellen Aufbau weiter verwendet.

### 3.4 Simulationsstudien

#### 3.4.1 Validierung des Simulationsmodells

Parallel zu den Untersuchungen an Prüfmustern sollen Simulationsstudien durchgeführt werden, die eine Optimierung des Schmelzbereiches des Phasenwechselmaterials in Hinblick auf die geplante Anwendung erlauben. Dazu wurden sowohl ein Raum- als auch ein Anlagenmodell erstellt und mit Messwerten aus Langzeitmonitoring (August bis September 2004) zur Bauteilkühlung im Fraunhofer Sobic in Freiburg [www.sobic.fraunhofer.de] validiert. Bild 8 zeigt den Vergleich der Simulation mit den Messdaten für eine Periode mit Bauteilkühlung und ohne. Beide Simulationen stimmen mit den Messungen gut überein, das Simulationsmodell ist somit für die weiteren Studien gut geeignet.

Bild 8: Validiertes Raummodell in ESP-r für den Betrieb ohne Bauteilkühlung auf der Basis von zwei Messdatensätzen.

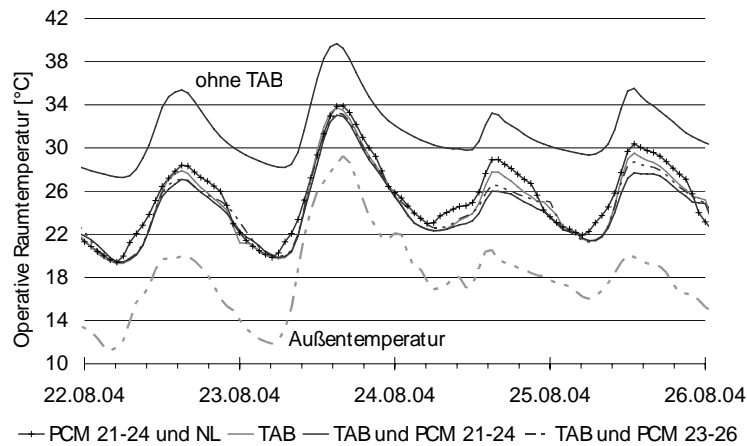


#### 3.4.2 Simulationen zur Ermittlung eines Schmelzbereiches

Für den Kühl- und Heizfall wurden zunächst erste Untersuchungen zur Optimierung der PCM-Schmelzbereiche durchgeführt. Die Rechnungen basieren auf dem an Messdatensätzen validierten Raum- und Anlagenmodell.

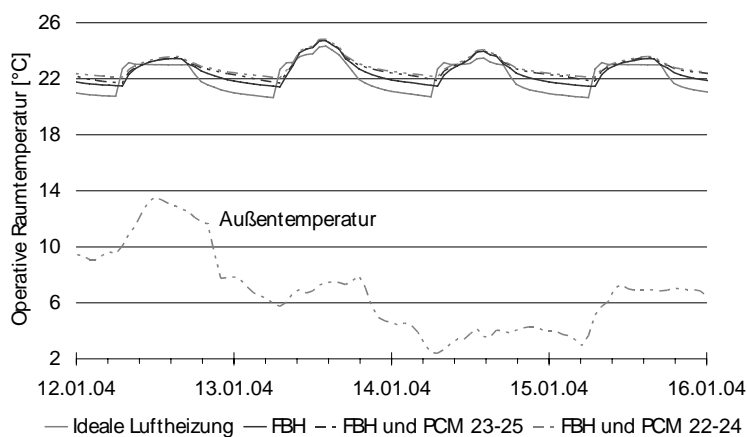
Für den Kühlfall (Betrieb von 22:00 bis 6:00) zeigt Bild 9 simulierte operative Raumtemperaturen unter Einsatz von Kapillarrohrmatten ohne und mit PCM's der Schmelzbereiche 21 bis 24 °C und 23 bis 26 °C. Die Beheizung des Raumes mit einer Fußbodenheizung (FBH) (Betrieb von 7:00 bis 18:00) unter Einsatz von PCM's der Schmelzbereiche 22 bis 24 °C und 23 bis 25 °C ist in Bild 10 dargestellt. Sowohl die Kühl- als auch die Heizfläche werden mit konstanten Volumenströmen und mit konstanten Vorlauftemperaturen betrieben.

Bild 9: Ergebnisse der Simulationsstudie für den Kühlfall: Operative Raumtemperaturen [°C] für (i) den unconditionierten Raum (ohne TAB) und für den Einsatz eines thermisch aktivierten Bauteils (TAB) (ii) ohne und (iii) mit Einsatz von PCMs in variierenden Schmelzbereichen



Wie erwartet zeigt sich, dass die passive Kühlung mit Nachtlüftung (NL) und PCM bei hohen Außentemperaturen schnell erschöpft ist. Mit einer aktiven Kühlung können hier deutlich länger die Komfortkriterien eingehalten werden. Die Leistung der Kühldecke ist für den extremsten Tag (24.08.08) jedoch deutlich zu klein ausgelegt. Besonders deutlich werden die Unterschiede der Systeme in den letzten 2 Tagen der Simulation. Hier zeigt dich, dass der Schmelzbereich 21-24°C deutlich besser geeignet ist, als der leicht höhere Schmelzbereich 23-26. Aus diesem Grund wurde für die weiteren Prüfmuster ein PCM-Material mit eben diesem Schmelzbereich entwickelt.

Bild 10: Ergebnisse der Simulationsstudie für den Heizfall: Operative Raumtemperaturen [°C] für (i) eine ideale Luftheizung und für den Einsatz einer Fußbodenheizung (FBH) (ii) ohne und (iii) mit Einsatz von PCMs in variierenden Schmelzbereichen



Im Heizfall zeigt sich, dass zwischen beiden untersuchten Schmelzbereichen keine nennenswerten Unterschiede feststellbar sind. Beide verhindern im Nachtmodus ein stärkeres Auskühlen der Fußbodenheizung.

Eine Empfehlung für den optimalen Schmelzbereich des PCMs konnte nach den ersten Simulationsstudien für den Heizfall noch nicht gegeben werden. Um einen genaueren Überblick zu bekommen wurde das Simulationsmodell



weiter verfeinert und eine neue Parametervariation durchgeführt. Folgende Simulationsparameter wurden für die Parametervariation verwendet:

#### RAUMMODELL

Ausgangspunkt für die Parameterstudie ist ein Büroraum in der Abmessung 3,60 m Breite und 5,40 m Länge. Die lichte Raumhöhe beträgt 3,0 m. Das Modell wird in der Nord-Süd-Ausrichtung betrachtet. Der Raum befindet sich in einer unverschatteten Lage, und über die beiden Innenwände sowie Decke und Boden wird keine Wärme mit der Umgebung ausgetauscht (adiabate Randbedingung).

Der Büroraum hat ein Fenster in der Südfassade, welches über eine außen liegende Sonnenschutzeinrichtung (Abminderungsfaktor FC 0,25) verfügt, die bedarfsgerecht betätigt werden kann. Daher wird angenommen, dass bei einer direkten Einstrahlung größer  $200 \text{ W/m}^2$  der Sonnenschutz komplett geschlossen ist, ansonsten wird ein komplett geöffneter Sonnenschutz angenommen.

#### NUTZUNGSBEDINGUNGEN

Die Aufenthaltszeit der Nutzer in den Büroräumen beträgt 10 Stunden, beginnend ab 8:00 Uhr. Dies repräsentiert einen üblichen Arbeitstag. Der Raum wird als Büro genutzt, wobei die Wärmeentwicklung in Folge der Nutzung durch Personen und Büroausstattung pauschal durch die internen Lasten beschrieben wird. Für das vorliegende Modell wurde folgendes interne Lastprofil gewählt: Während der Anwesenheit der Nutzer von 8:00 bis 18:00 Uhr wird eine interne Last von  $5 \text{ W/m}^2$  zugrunde gelegt. In den Zeiten, in denen die Büroräume nicht genutzt werden, wird keine interne Last angenommen.

Heizperiode: Die Raumsolltemperatur soll bei  $22^\circ\text{C}$  liegen, d.h. bei Unterschreitung der Solltemperatur wird geheizt. Effekte wie zum Beispiel Nachtabsenkung der Heizsolltemperatur bleiben ohne Berücksichtigung.

Luftwechsel: Die mittlere Luftwechselrate durch Infiltration wird zu  $n=0,2 \text{ h}^{-1}$  angesetzt. Ein hygienischer Frischluftwechsel bzw. ein konditionierter Zuluftvolumenstrom werden in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt.

#### WETTER

Die Parameterstudie wurde mit dem Wetterdatensatz für Freiburg 2004 gerechnet. Für die Auswertung wurden die Tage von 1.1 bis 12.1.2004 herangezogen.

## ANLAGENMODELL

Das Wärmeübergabesystem besteht aus 15 m<sup>2</sup> Kapillarrohrmatten (3 Matten in der Abmessung 5 m Länge und 1m Breite). Die Kapillaren (innerer Durchmesser von 3,4 mm) sind parallel zueinander in einem Abstand von 30 mm angeordnet. Der geförderte Massestrom beträgt 560 l/h. Als Wärmequelle dient ein Heizer mit begrenzter Vorlauftemperatur.

## REGELSTRATEGIE

Geregelt wird auf die Raumlufttemperatur. Ein Sollwert von 22°C soll nicht unterschritten werden (Werktag und Wochenende). Da der Schwerpunkt dieser Untersuchung auf dem Vergleich bzw. der Evaluation von PCM verschiedener Schmelzbereiche liegt und nicht beim Betrieb einer Fußbodenheizung mit PCM, werden folgende Randbedingungen gewählt:

- Regelgröße: Raumlufttemperatur
- Stellgröße: Intermittierender Betrieb des Heizers (Wärmequelle), d.h. on-off Betrieb
- Massenstrom ist konstant, 560 l/h
- Keine Nachtabsenkung (außer beim Referenzfall Luftheizung)

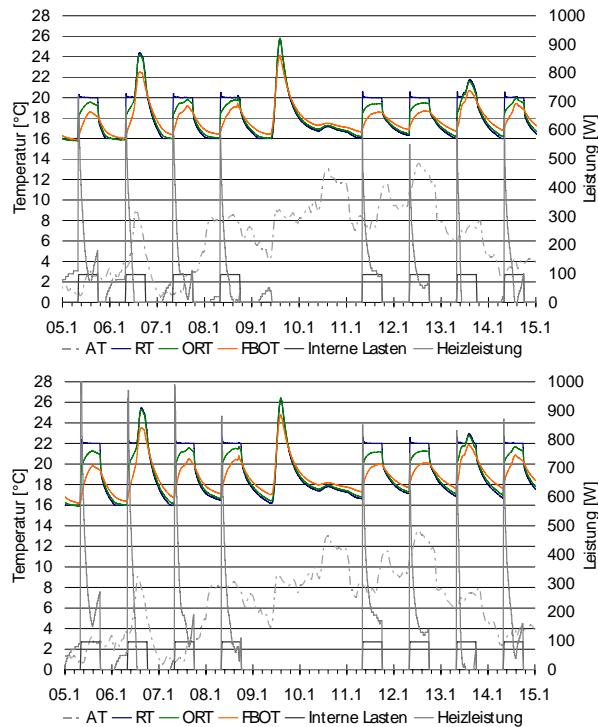
## PCM

Die untersuchten Phasenwechselmaterialien haben einen Schmelzbereich von 2 K und eine latente Wärmespeicherfähigkeit von 18 kJ/kg. Die Schmelzbereiche wurden wie folgt variiert: 22 – 24°C, 23 – 25°C, 24 – 26°C, 25 – 27°C, 26 – 28°C, 27 – 29°C, 28 – 30°C.

## REFERENZFALL: Luftheizung

Als Referenzfall zur Untersuchung eines Fußbodenheizungssystems mit PCM wird der Verlauf der Raumtemperaturen beim Einsatz einer Luftheizung dargestellt (Bild 11). Die Luftheizung ist in einem Zeitraum von 8:00 bis 18:00 Uhr in Betrieb und berücksichtigt außerhalb der Anwesenheitszeit der Nutzer eine Nachtabsenkung von 16°C. Mittels eines intermittierenden Betriebs wird auf eine Raumluft Solltemperatur von 20°C bzw. 22°C geregelt. Erkennbar an den breiteren Peaks der Heizleistung ist, dass die Temperierung auf mindestens 22°C im Winter deutlich mehr Heizleistung benötigt.

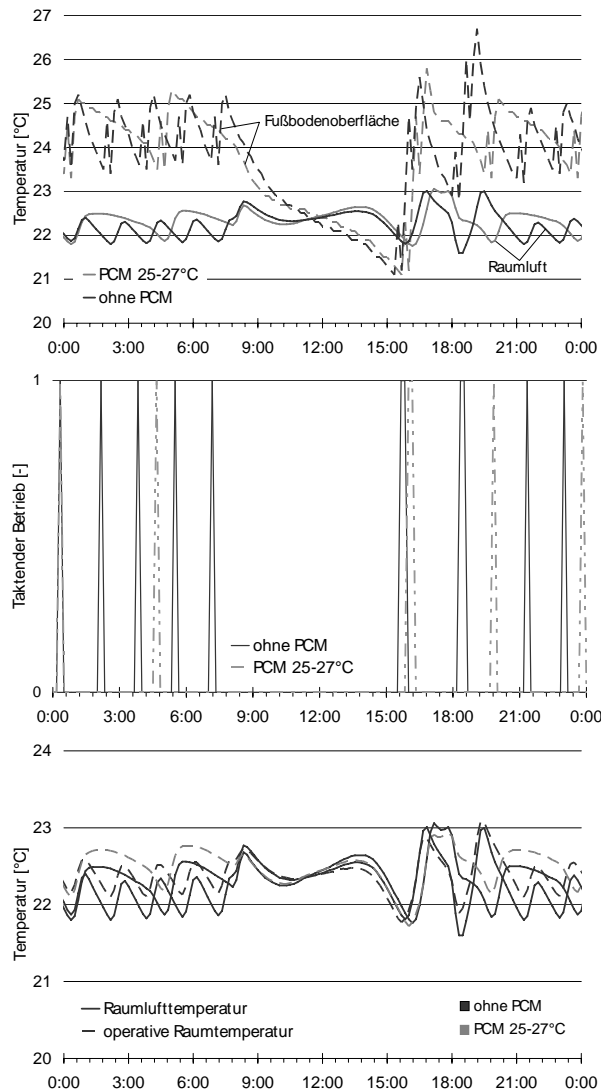
Bild 11: Auswertung für eine ideale Luftheizung: Regelgröße ist die Raumlufttemperatur, (20°C (oben) und 22°C (unten)), Stellgröße ist ein intermittierender (on-off) Betrieb des Heizers. Darstellung der Temperaturen im Raum (Raumlufttemperatur (RT), operative Raumtemperatur (ORT), Fußbodenoberflächentemperatur (FBOT)) sowie interne Lasten und Heizleistung.



## VERGLEICH: FUßBODENHEIZUNG OHNE PCM UND MIT PCM

Bild 12 zeigt die Raumtemperaturen und Fußbodenoberflächentemperaturen für Fußbodenheizung ohne und mit PCM des Schmelzbereiches 25 bis 27°C. Dieser Auswertung liegt eine einfache Regelstrategie zugrunde: Bei Unterschreitung einer Solltemperatur der Raumluft unter 22°C geht die Anlage in Betrieb, d.h. es wird geheizt. Es zeigt sich für den Heizfall ohne PCM, dass die Raumlufttemperatur und auch die Fußbodenoberflächentemperatur größeren Schwingungen unterliegen. Die Raumlufttemperatur schwingt stärker um die Solltemperatur. Daraus folgt für den Einsatzfall ohne PCM, dass die Anlage öfters taktet. Über den Auswertungshorizont von 12 Tagen taktet die Anlage für den Heizfall mit PCM bis zu 55% weniger. Daraus lässt sich schließen, dass der Einsatz von PCM auch im Heizfall Potentiale zur Anlagenoptimierung und Effizienzsteigerung ermöglicht, besonders wenn natürliche Wärmequellen zur Verfügung stehen.

Bild 12: Vergleich der Performance der Anlage für eine Fußbodenheizung ohne und mit PCM im Schmelzbereich 25-27°C. Oben: Ohne den Einsatz von PCM schwingt die Raumluft stärker und sinkt damit öfter unter die Raumluft Solltemperatur von 22°C als beim Einsatzfall mit PCM. Mitte: Daraus folgt für den Anlagenbetrieb ohne PCM, dass der Heizer öfter taktet; im Verlauf eines Tages fast doppelt so viel, über den Auswertungshorizont von 12 Tagen 50% mehr Taktzeiten. Unten: Beim Einsatz von PCM ist die operative (empfundene) Raumtemperatur höher verglichen mit dem Heizfall ohne PCM bei konstant bleibenden Randbedingungen

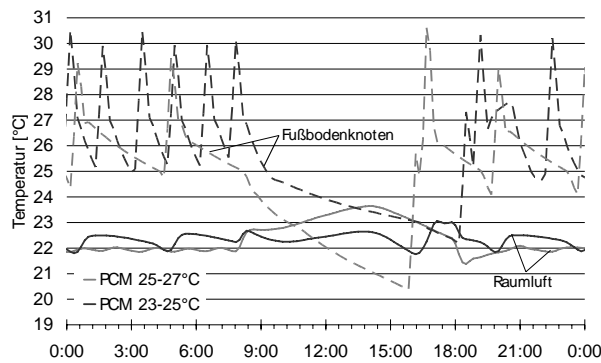


#### VARIATION DER PCM SCHMELZBEREICHE: 23-25°C UND 25-27°C

Abb. 5 stellt die Raumlufttemperaturen und die Fußbodenknotentemperaturen im Heizfall für den Einsatz von Phasenwechsellmaterialien eines niedrigeren (23-25°C) und eines höheren (25-27°C) Schmelzbereiches dar. Die Fußbodenheizung wird mit annähernd konstanten Vorlauftemperaturen von 30°C betrieben. Resultierend daraus befinden sich die Temperaturen im Fußbodenaufbau (Knotentemperaturen der einzelnen Bauteilschichten) in einem Bereich von 25 bis 30°C, d.h. sie liegen im gesamten Anlagenbetriebszeitraum über einer Temperatur von 25°C. Damit ist der Effekt der latenten Wärmespeicherung und

Wärmeentladung bei einem PCM eines niedrigeren Schmelzbereiches nicht mehr geben.

Bild 13: Vergleich Fußbodenheizung mit PCM 23-25°C und 25-27°C: Die Knotentemperatur im Fußboden befindet sich zwischen 25 und 30°C. Ein PCM mit einem Schmelzbereich von 23-25°C (Darstellung) kann somit für den Heizfall nicht eingesetzt werden.



Der Einsatz von PCM in Flächenkühl- und Heizsystemen erfordert unterschiedliche Schmelzbereiche. Erste Untersuchungen über optimale Schmelzbereiche der PCM zeigen, dass für den Kühlfall Schmelzbereiche von 18 bis ca. 22°C und für den Heizfall Schmelzbereiche von 25 bis ca. 29°C erforderlich sind. Erst durch ein integral geplantes, energieoptimiertes Gebäudekonzept (Architektur, Baukonstruktion, Nutzeranforderungen und Gebäudetechnik) mit reduzierten Heiz- bzw. Kühllasten können die Schmelzbereiche wahrscheinlich zu höheren (Kühlfall) und niedrigeren (Heizfall) Temperaturen verschoben werden.

### 3.4.3 Anlagensimulation Fußbodenheizung mit Solarkollektor

Nach der Ermittlung eines idealen Schmelzbereiches für PCM-Fußbodenheizungssysteme konnte im folgenden Schritt die Anlagenanalyse eines möglichen Gesamtsystems durchgeführt werden. Die bereits beschriebene Simulationsstudie wurde erweitert um die Kombination einer PCM-Fußbodenheizung mit einer thermischen Solaranlage zu simulieren. Durch den Einsatz von Phasenwechselmaterialien im Fußbodenaufbau soll das Potential, die Effizienz und die Regelbarkeit von Fußbodenheizungen verbessert bzw. optimiert werden. Die vorliegende Simulationsstudie zeigt erste Ergebnisse für die Performance einer Fußbodenheizung mit integrierten PCM in Kombination mit einer Solarkollektoranlage als natürliche Wärmequelle.

### Anpassung des Simulationsmodells für die Systemanalyse:

Interne Wärmegewinne: Das vorliegende Modell berücksichtigt keine internen Wärmelasten von Personen und Bürogeräten, da diese Simulation zu komplex wäre.

Anlagenmodell: Als Wärmequelle dient ein Solarkollektor mit begrenzter Vorlauftemperatur zwischen 25 und 35°C.

Regelstrategie: Es werden folgende Randbedingungen gewählt:

- Regelgröße: Vorlauftemperatur des Solarkollektors
- Stellgröße: Intermittierender Betrieb des Kollektors (Wärmequelle), d.h. on-off Betrieb
- Massestrom ist konstant, 15 l/(m<sup>2</sup>h)
- Keine Nachtabenkung
- Keine Berücksichtigung eines Pufferspeichers

### Simulationsergebnis

Vergleich: Performance Fußbodenheizung und Solarkollektor ohne PCM und mit PCM

Bild 14 und Bild 15 zeigen die Raum- und Kollektortemperaturen für die Fußbodenheizung ohne und mit PCM des Schmelzbereiches 24 bis 26°C. Dieser Auswertung liegt eine einfache Regelstrategie zugrunde: Bei Unterschreitung der Solarkollektortemperatur von 25°C wird der Kollektor außer Betrieb genommen und der Raum befindet sich thermisch im freischwingenden Zustand. Die maximale Kollektortemperatur von ca. 38°C ist durch die Kollektorgröße (im Modell 2 m<sup>2</sup>) begrenzt.

- Es zeigt sich für den Heizfall ohne PCM, dass die Raumlufttemperatur und auch die Fußbodenoberflächentemperatur größeren Schwingungen unterliegen.
- Beim Einsatz von PCM ist die Raumtemperatur am Tag bis zu 2 K kleiner und in der Nacht bis zu 1 K höher verglichen mit dem Heizfall ohne PCM bei konstant bleibenden Randbedingungen. D.h., die im PCM eingespeicherte Wärme führt zu einem geringeren Absinken der operativen Raumtemperatur als im Vergleichsfall ohne PCM.
- Das Raumtemperaturniveau im Heizfall mit PCM liegt zu Beginn der Anwesenheitszeit ca. 1 Kelvin über dem Vergleichswert ohne PCM. Damit ist die Temperaturdifferenz bis zum erforderlichen Raumtemperatursollwert geringer.

- Das PCM steht als Speicher zur Verfügung, in dem Solarwärme eingespeichert werden kann, mit bedeutend geringerem Anstieg der Fußbodenoberflächentemperatur. Die Fußbodenoberflächentemperatur beim Einsatz von PCM ist bis zu 3 K geringer als beim Vergleichsfall ohne PCM.
- Mit dem Anstieg der Raumtemperaturen in Heizfall ohne PCM steigt auch die Rücklauftemperatur aus dem Fußbodenheizungssystem. Sofern ausreichend Solarstrahlung gegeben ist, steigt damit auch die Temperatur im Solarkollektor. Im Heizfall mit PCM sind die Raumtemperaturen geringer und auch die Rücklauftemperaturen des dem Fußbodenheizungssystem in den Kollektor. Es ist zu erwarten, dass bei einem geringeren Temperaturniveau der Rücklauftemperaturen höhere Kollektorerträge zu erzielen sind. Dies muss in weiteren Rechnungen untersucht werden.

Bild 14: Vergleich der Performance der Anlage für eine Fußbodenheizung ohne und mit PCM im Schmelzbereich 24-26°C. Ohne den Einsatz von PCM schwingt die Raumluft stärker als beim Einsatzfall mit PCM.

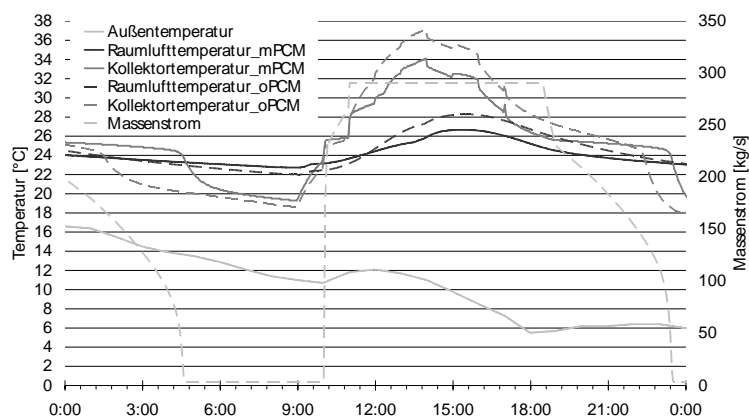
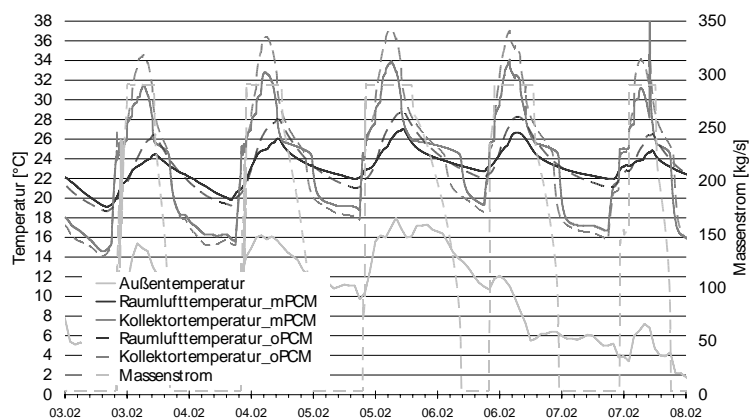


Bild 15: Vergleich der Performance der Anlage für eine Fußbodenheizung ohne und mit PCM im Schmelzbereich 24-26°C. Beim Einsatz von PCM ist die Raumtemperatur am Tag bis zu 2 K kleiner und in der Nacht bis zu 1 K höher verglichen mit dem Heizfall ohne PCM bei konstant bleibenden Randbedingungen.



### 3.4.4 Thermische Charakterisierung an Wandmustern

Nachdem die Rezeptur für den PCM-Estrich finalisiert werden konnte wurde eine Prüfplatte 50x50x3cm für die Plattenapparatur des Fraunhofer ISE gegossen. Für die Durchströmung der Platte wurde eine Clina-Kapillarrohrmatte in die Probe des Harfentyps (Zu-, Ableitung auf gegenüberliegenden Seiten, Kapillaren parallel angeordnet) integriert.

Bild 16: Testplatte einer Fußbodenheizung mit integriertem PCM und einer Kapillarrohrmatte für die Durchströmung mit Wasser.



Die Messung im DSC (Differential Scanning Calorimeter) ergab eine latente Wärmespeicherfähigkeit der Platte von ca. 13J/g, was einem PCM-Gehalt von rund 13% entspricht. Die spezifische Wärmekapazität des verwendeten Estrichs wurde in DSC-Messungen auf 2,5 kJ/kgK bestimmt. Damit kann die Wärmekapazität der Gesamtprobe bei einem Temperatursprung von 10K bestimmt werden:

PCM-Platte (14,25)kg:

$$\text{sensibel: } 2,5\text{kJ/kgK} \cdot 10\text{K} \cdot 14,25\text{kg} = 356,25\text{kJ}$$

$$\text{latent: } 13\text{kJ/kg} \cdot 14,25\text{kg} = 185,25\text{kJ}$$

$$\text{gesamt: } 541,5\text{kJ}$$

Referenz-platte:

$$\text{sensibel (5cm): } 2,5\text{kJ/kgK} \cdot 10\text{K} \cdot 25\text{kg} = 625\text{kJ}$$

$$\text{sensibel (4cm): } 2,5\text{kJ/kgK} \cdot 10\text{K} \cdot 20\text{kg} = 500\text{kJ}$$



Das in den Estrich integrierte PCM führt zu einer Erhöhung der Wärmespeicherfähigkeit von ca. 25%. Ziel sollte eine Erhöhung um ca. 100% sein. Aufgrund der hohen spezifischen Wärmekapazität des Estrichs, der großen Dichte und des relativ großen Temperaturbereiches müsste der PCM-Anteil auf rd. 30% erhöht werden, um dieses Ziel zu erreichen. Aufgrund von zu starken Änderungen in der Materialeigenschaft ist dies momentan nicht möglich.

Messergebnisse der anschließenden Vermessung in der Plattenapparatur sind den folgenden Abbildungen zu entnehmen. Bild 17 zeigt eine Messung ohne aktive Durchströmung der Prüfplatte. Die Probe wurde beidseitig mit einer konstanten Temperaturrampe erwärmt und anschließend wieder abgekühlt. Gemessen wird der entstehende Wärmestrom (QOM) und gleichzeitig der Temperaturverlauf in der Probe. Während des Schmelzprozesses führt das integrierte PCM zu einer Verdreifachung des benötigten Wärmestromes. Der Einfluss auf die Temperatur ist deutlich an den Abweichungen der Probensensoren von den temperierten Oberflächen (TOM) zu erkennen.

Bild 17: Messung eines Estrichmusters ohne aktive Rückkühlung über die Kapillarrohrmatte. Der Einfluss des PCM auf den Wärmestrom (QOM) und die Probentemperatur ist deutlich zu erkennen

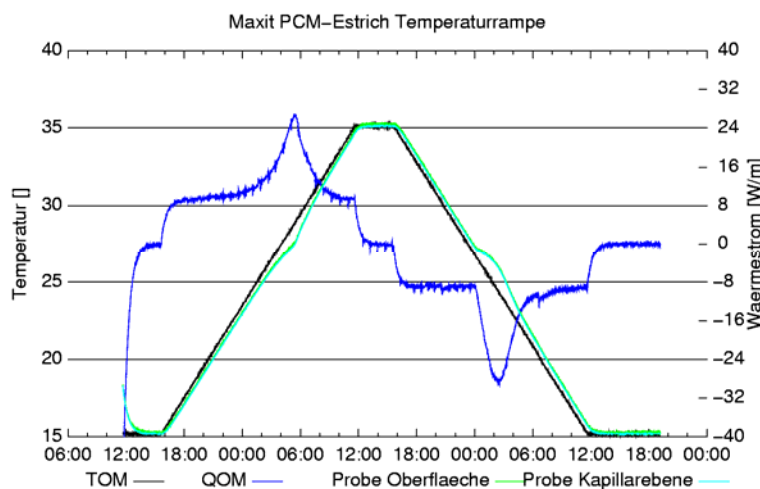
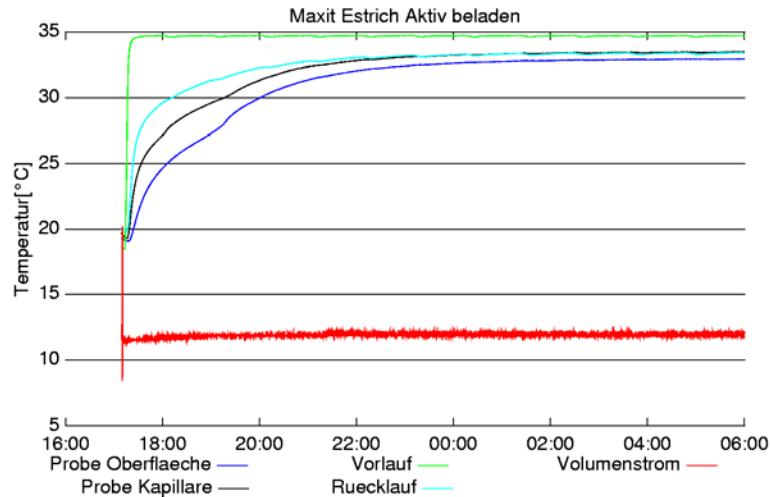


Abbildung 5 zeigt das Verhalten der Fußbodenheizung bei Wärmeeinspeicherung über die Kapillarrohrmatten. Das Aufheizen verzögert sich durch das integrierte PCM. Im Gegenzug, wird jedoch auch erreicht, dass die Temperatur im inaktiven Betrieb länger auf einem höheren Niveau verharrt. Nach 5-6 Stunden ist die Fußbodenheizung auf die Betriebstemperatur aufgeheizt und verfügt über eine deutlich reduzierte Ansprechzeit gegenüber konventionellen Fußbodenheizungen.

Bild 18: PCM-Estrich über Kapillarrohrmatte beladen. Nach ca. 5-6 Stunden ist die Fußbodenheizung von 18°C auf 34°C erwärmt und der PCM-Speicher dabei vollständig beladen.



### 3.4.5 Messungen Prüfkammer Fraunhofer ISE

Den Abschluss des Projektes stellt noch die Vermessung einer Fußbodenheizung im Testraum des Fraunhofer ISE dar. Der Testraum wurde speziell für die Vermessung von Heiz- und Kühlflächen in Anlehnung an die DIN 4715-1 und EN14240:2004 aufgebaut. Zeitliche Verzögerungen bei der Vermessung anderer Testsysteme führten dazu, dass der Raum erst verspätet für den Einbau einer Fußbodenheizung zur Verfügung stand und die Messungen nicht wie geplant fristgerecht durchgeführt werden konnten.

Bild 19: Außenansicht (links) und Innenansicht (rechts) der Testkammer des Fraunhofer ISE zur Vermessung von Heiz- und Kühlflächen unter kontrollierten Bedingungen.

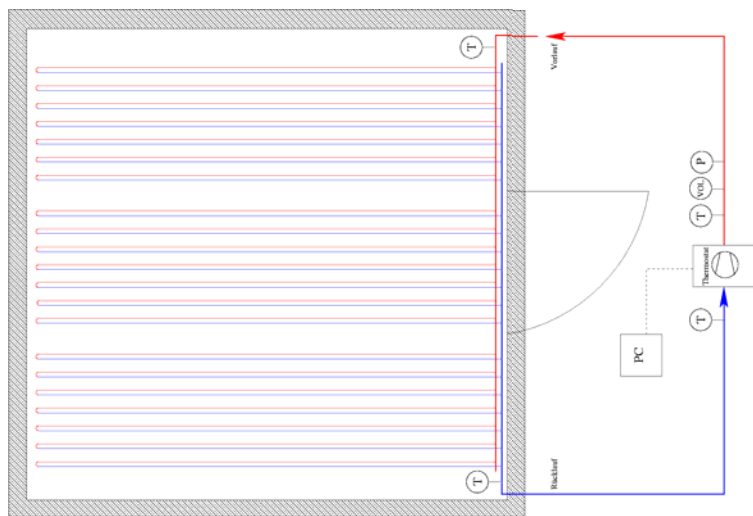


Der Raum mit einer Innen-Grundfläche von 3,95m x 4,05m x 2,9m (B x L x H) verfügt über temperierbare Wandflächen, so dass unter kontrollierten Randbedingungen die Leistung bestimmt werden kann und ein direkter Vergleich mit anderen Kühl- und Heizsystemen möglich ist. Die Messwerterfassung ermöglicht eine detaillierte Vermessung wesentlicher Parameter wie Boden- und Lufttemperaturen, Wärmeströme, Heiz- und

Kühlleistung. Über Kühllastsimulatoren kann der Raum kontrolliert beheizt oder über ein Kühldecke gekühlt werden, so dass verschiedene Regelungskonzepte in einer realen Größenordnung erprobt werden können.

Die Temperierung der Fußbodenheizung erfolgt über einen direkt angeschlossenen Thermostaten, der über einen PC angesteuert wird, so dass verschiedene Wärmequellen mit dem Thermostaten simuliert werden können.

Bild 20:  
Vereinfachtes  
Hydraulikschema  
für die  
Fußbodenheizung  
im Testraum des ISE.  
3  
Kapillarrohrmatten  
(je 1,3\*3,9m Typ  
Clina SB30) werden  
direkt mit einem  
Thermostaten  
verbunden.



Der Aufbau der realisierten Fußbodenheizung ist in Bild 21 dargestellt. Zunächst musste ein tragfähiger Untergrund für die Fußbodenheizung geschaffen werden. Hierfür wurde eine 4cm dicker Estrich ohne PCM auf die Innenisolierung des Kabinenbodens aufgebracht. Nach 3 Wochen Trocknungszeit wurden hierauf dann die Kapillarrohrmatten mit einem Kapillarabstand von 30mm montiert und mit dem PCM Estrich von 3cm Schichtdicke überdeckt. Der gesamte Aufbau der Fußbodenheizung entspricht somit nur 3cm. Vor der Durchführung der Messungen musste auch dieser Estrich erneut 3 Wochen durchtrocknen, so dass der gesamte Einbau rd. 8 Wochen in Anspruch nahm. Leider konnte dieser Einbau erst nach Abschluss der Vermessung eines anderen Systems im Testraum Anfang Juli erfolgen, so dass die Fertigstellung erst Anfang September erreicht wurde. Bild 22 zeigt den tatsächlichen Einbau der Fußbodenheizung in die Testkammer des ISE.

Bild 21: Aufbau  
Fußbodenheizung in  
Testkammer

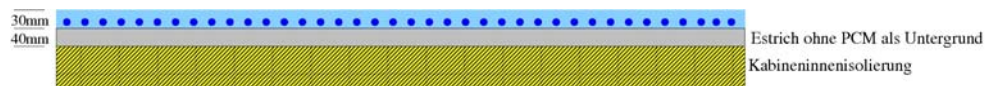
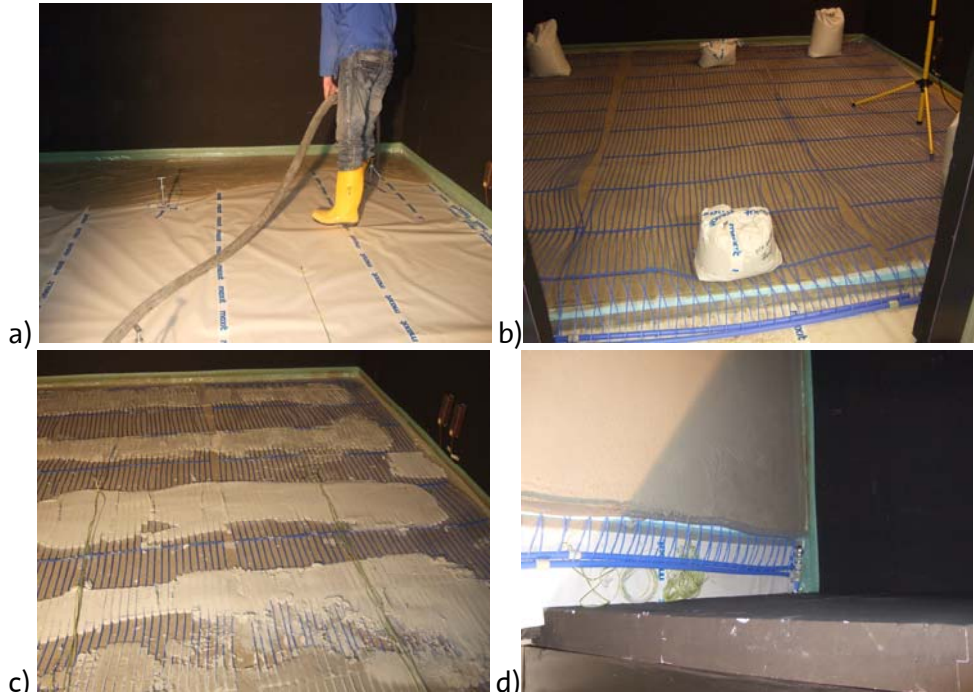


Bild 22: Einbau der Fußbodenheizung in den Testraum am Fraunhofer ISE

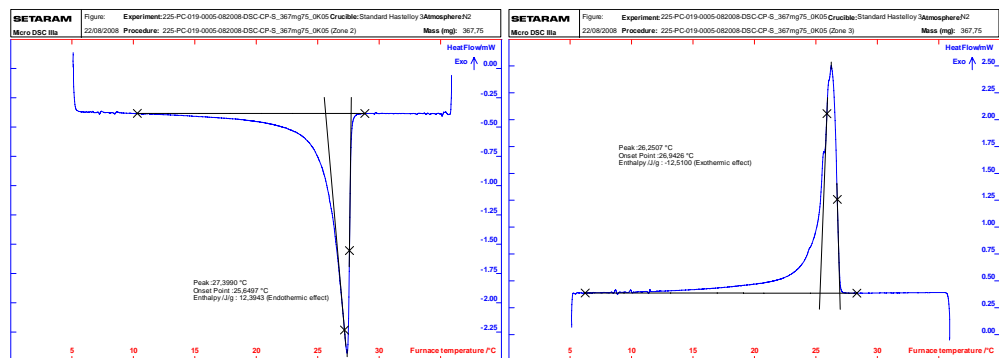
- a) Gießen eines konventionellen Estrichs als Untergrund (nicht Bestandteil einer Fußbodenheizung, nur in der Testkammer erforderlich)
- b) Einbau der Kapillarrohrmatten
- c) fixieren der Kapillarrohrmatten und Einbau von Temperatursensoren
- d) freiliegende Stammrohre im „Wartungsschacht“ nach gießen des PCM-Estrich



### Bestimmung der Wärmespeicherkapazität

Die Wärmespeicherfähigkeit der Fußbodenheizung wurde anhand von DSC-Messungen charakterisiert. Die in Bild 23 dargestellten Messergebnisse zeigen, dass die latente Wärmespeicherfähigkeit des PCM-Estrichs erneut bei rd. 13J/g liegt und die spezifische Wärmekapazität ca. 2,5kJ/kgK beträgt.

Bild 23: DSC-Messung PCM-Estrich



Bezogen auf die Fläche in der Testkammer ergibt sich die theoretische Wärmespeicherkapazität nach folgender Berechnung:

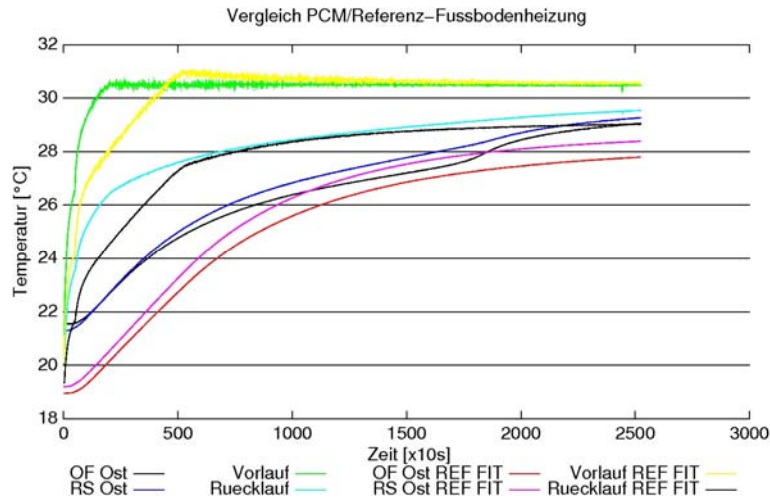
Dichte Estrich:  $1900 \text{ kg/m}^3$   
 Estrichvolumen in Testkammer:  $3,95\text{m} \cdot 3,75\text{m} \cdot 0,03\text{m} = 0,444\text{m}^3$   
 Masse Estrich =  $844 \text{ kg}$   
 $Q_{\text{latent}} = 844 \text{ Kg} \cdot 13 \text{ kJ/Kg} = 10972 \text{ kJ}$   
 $Q_{\text{sensibel}(dT=11\text{K})} = 2,5 \text{ kJ/kgK} \cdot 844 \text{ kg} \cdot 11 \text{ K} = 23210 \text{ kJ}$   
 $Q_{\text{gesamt}} = 34198 \text{ kJ}$

Die Wärmespeicherkapazität der Fußbodenheizung in der Testkammer beträgt theoretisch insgesamt ca. 35000 kJ bei einem Temperatursprung von 11 K und einer Schichtdicke von 3cm. Dies entspricht einer Referenzfußbodenheizung von 4cm Dicke bei einer leicht höheren Dichte von  $2000 \text{ Kg/m}^3$ .

Zur Bestimmung der tatsächlichen Wärmekapazität wird der Fußboden über die integrierten wasserführenden Rohre in der Testkammer einem Temperatursprung unterzogen. Ein Sprung wird dabei durch den kompletten Schmelzbereich des PCM und ein 2. Sprung oberhalb des Schmelzbereiches vollzogen. Phasenwechselmaterialien haben die positive Eigenschaft, dass die erhöhte Wärmespeicherkapazität nur innerhalb des Schmelzbereiches vorliegt. Außerhalb des Schmelzbereiches wird die Wärme nur sensibel gespeichert. Dadurch wird die Fußbodenheizung außerhalb des Schmelzbereiches deutlich schneller und verhält sich wie ein Referenzmaterial. Die Messung eines Temperaturintervalls über den Schmelzbereich und außerhalb des Schmelzbereiches ermöglicht somit einen annähernden Vergleich des thermischen Verhaltens und der Wärmekapazität eines Referenzbodens und eines PCM-Bodens.

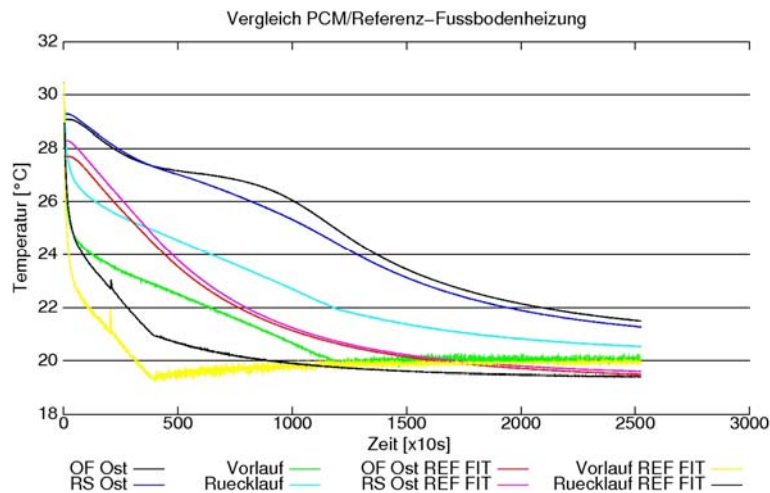
Bild 24 zeigt die Messungen dieser Sprungfunktionen im direkten Vergleich. Sprung 1 wurde von  $20^\circ\text{C}$ - $31^\circ\text{C}$  und Sprung 2 von  $30^\circ\text{C}$ - $42^\circ\text{C}$  durchgeführt. Beide Messergebnisse wurden dann so übereinander gelegt, dass die Vorlauftemperaturen bei der gleichen Temperatur starten. Leider reichte die Leistung der Thermostaten bei den hohen Temperaturen nicht aus, um ein gleiches Vorlauftemperaturprofil zu erreichen, erkennbar daran, dass die Kurve Temperatur „Vorlauf REF FIT“ deutlich verlangsamt ansteigt.

Bild 24: direkter Vergleich des Temperaturverlaufs beim Aufheizen der Fußbodenheizung über die Kapillarrohrmatten einer PCM und theoretischen Referenzfußbodenheizung. Die unterschiedlichen Temperaturverläufe zwischen PCM (Knick bei rd. 28°C) und Referenz werden deutlich



Im Kühlfall (Bild 25) reicht die Leistung beider Thermostaten nicht aus, um die Temperatur sofort konstant auf der Zieltemperatur zu halten. Deutlich tritt jedoch der Einfluss des PCMs auf das Auskühlverhalten hervor. Insbesondere die Kurve „OF Ost“ (Oberfläche Ost) zeigt einen deutlich verlangsamteten Temperaturverlauf im Schmelzbereich.

Bild 25: direkter Vergleich des Temperaturverlaufs beim Abkühlen der Fußbodenheizung über die Kapillarrohrmatten einer PCM und theoretischen Referenzfußbodenheizung. Auch hier wird der Einfluss des PCM deutlich durch das verlangsamtete Auskühlen des Estrichs



## 4 Zusammenfassung

Ziel des Projektes war aktive, wasserdurchströmte Flächenheiz- und Kühlsysteme in Kombination mit integriertem Latentwärmespeichermaterial zu entwickeln. Hierfür wurden zunächst Kapillarrohrmattensysteme, welche in einen PCM-Estrich integriert werden konnten, als ein möglicher Aufbau identifiziert.

Denkbar ist die Anwendung solcher Systeme für die Heizungs- und Kühlungsunterstützung, jedoch wurde die Entwicklung einer Kühldecke aufgrund einer konkurrierenden Patentanmeldung zunächst eingestellt. Der Fokus lag schließlich auf der Entwicklung einer Dünnschichtfußbodenheizung.

Für beide Anwendungsfälle (Heizen/Kühlen) wurden in Parameterstudien an validierten Simulationsmodellen geeignete Schmelzebereiche des PCM ermittelt. Für die Heizungsunterstützung liegt dieser bei ca. 25-29°C und für die Kühlungsunterstützung bei ca. 20-22°C.

Zur Entwicklung eines Flächenkühlsystems wurden geeignete PCM experimentell ermittelt und von der BASF wurden Kleinmengen für die Herstellung von Prüfmustern produziert.

Die Ansprechzeiten einer konventionellen Fußbodenheizung sind üblicherweise sehr lang (rd. ½ Tag). Durch eine höhere Wärmeleitfähigkeit des Bodenmaterials kann diese jedoch deutlich verkürzt werden. Daher wurden Versuche zur Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit durch Beimischung von Graphit durchgeführt. Die Verbesserungen durch das Graphit waren jedoch nicht so deutlich wie erhofft und rechtfertigen nicht den zusätzlichen Aufwand und die Kosten.

In einer Simulationsstudie zur Kombination einer Fußbodenheizung mit Solarkollektoren als Wärmequelle konnte gezeigt werden, dass diese einen energetischen Vorteil haben kann. Die Temperaturschwankungen im Raum werden reduziert und die Effizienz eines angeschlossenen Kollektors kann erhöht werden. Außerhalb des Schmelzbereiches besitzen PCM-Fußbodenheizungen den Vorteil, dass sie schneller auf Temperaturen nahe den Betriebstemperaturen gebracht werden können, da das PCM nur im Schmelzbereich die thermische Masse der Fußbodenheizung erhöht. Die Fußbodenheizung wird dadurch schneller warm

Technisch konnten in es Estrich nur rd. 13% PCM integriert werden, ohne die mechanischen Eigenschaften des Materials wesentlich zu verändern. Mit

dieser PCM-Menge kann die Wärmespeicherfähigkeit des Bodens jedoch nicht in dem gewünschten Umfang vergrößert werden. Die Schichtdicke kann dennoch um rd. 25% gegenüber einem konventionellen System reduziert werden. Insbesondere für Renovationsvorhaben ist die reduzierte Schichtdicke bei gleichbleibender Wärmespeicherfähigkeit ein wichtiger Faktor.

Eine Fußbodenheizung in einem Testraum zur Vermessung unter kontrollierten Bedingungen wurde aufgebaut. Die Messungen an diesem Testsystem konnten aufgrund technischer Schwierigkeiten nicht in vollem Umfang innerhalb der verlängerten Projektlaufzeit abgeschlossen werden. Insbesondere die Einbringung der Heizlast in den Versuchsraum konnte bisher nicht ausreichend realisiert werden. Die Untersuchungen werden daher auch nach Abschluss des Projektes fortgeführt

Die Projektziele konnten innerhalb des Projektes zu einem großen Teil erreicht werden. Ein neues Flächenheizsystem in Kombination mit Phasenwechselmaterialien mit geeigneter Schmelztemperatur konnte bis zur technischen Marktreife entwickelt werden. In einer Simulationsstudie konnte der energetische Vorteil dieses neuen Systems gegenüber einer konventionellen Anlage gezeigt werden. Weitere Systeme sind hier noch zu analysieren. Die zusätzliche Wärmespeicherfähigkeit ist relativ gering, so dass ein wirtschaftlicher Erfolg schwierig sein wird. Insbesondere aber in Renovationsobjekten ist der geringere Schichtaufbau bei gleichbleibender Wärmespeicherkapazität ein wesentlicher Vorteil. Die Systeme müssen auch nach Abschluss des Projektes weiter untersucht werden, insbesondere die Thematik der Regelung konnte zeitlich nicht mehr angegangen werden.