



## Latentwärmespeicher



**1** Polkappen sind Latentwärmespeicher – in einem kleinen Temperaturbereich lassen sich große Wärme- bzw. Kältemengen speichern (Quelle: Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung).

*Energie effizient nutzen heißt auch, effizient Wärme und Kälte speichern. Mit Latentwärmespeichern lassen sich sehr viel höhere Speicherdichten erzielen als mit herkömmlichen Warmwasserspeichern. Der Clou besteht darin, Wärme oder auch Kälte in einem Phasenübergang eines Latentwärmespeicher-Materials zu speichern.*

**W**ärmespeicherung spielt immer dort eine wichtige Rolle, wo es gilt Angebot und Nachfrage von Wärme im Zeitverlauf und in der Leistung anzupassen; aber auch dort, wo Versorgungssicherheit und die

Netz unabhängige Versorgung gewährleistet werden oder Wärme an einen anderen Ort transportiert werden muss.

Durch Wärmespeicherung können viele „Wärmequellen“ wie Solarenergie aber auch Abwärme aus Industrieprozessen und Kraftwerken wirtschaftlich nutzbar gemacht werden, da sie zur Verfügung gestellt werden können, wenn Sie gebraucht werden. Zunehmend werden dabei höhere Anforderungen an die Qualität der Wärme- und Kälteversorgung gestellt, z. B. eine gleichbleibende Temperatur beim Heizen bzw. Klimatisieren von Gebäuden oder für Transportbehälter. Wichtig ist auch ein geringer Platzbedarf für solche Versorgungssysteme.

Die Idee, Wärme oder Kälte in einem Phasenübergang zu speichern, ist nicht neu. Schon die Römer nutzten das Schmelzen von Eis, d.h. den Phasenübergang fest-flüssig, um Lebensmittel kühl zu halten. Die ersten Versuche Latentwärmespeicher (engl. Phase Change Material / PCM) zur Wärmespeicherung einzusetzen wurden um 1940 in den USA durchgeführt. Ziel war damals die Speicherung von solar erzeugter Wärme, um ein Wohnhaus zu heizen.

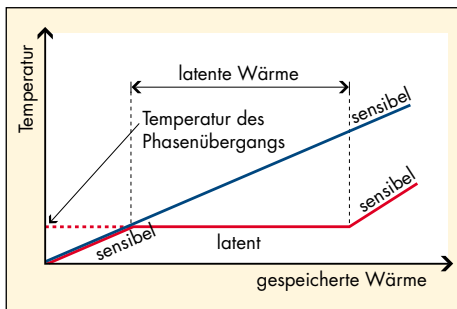
In den letzten 10 Jahren hat die Kommerzialisierung von Latentwärmespeichern große Fortschritte gemacht. Dies hat im Wesentlichen zwei Gründe: Zum einen konnten zahlreiche Verbesserungen in den technischen Eigenschaften der PCM erzielt werden, zum anderen konzentrierte sich die Vermarktung verstärkt auf Anwendungen, die wirtschaftlich waren – allerdings noch keine Energieeinsparung brachten. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) fördert im Rahmen des Energieforschungsprogramms eine Reihe von Arbeiten zu Latentwärmespeichern. Etwa 70 Jahre nach den eher unsystematischen ersten Versuchen scheint heute die Zeit für energetisch sinnvolle und wirtschaftliche Anwendungen gekommen.

# Wärme latent speichern

Da Eis natürlich vorkommt, war es das erste PCM, das zur Kältespeicherung, vor allem in sogenannten „Eisschränken“, verwendet wurde. Latentwärmespeicherung kann jedoch auch in anderen Temperaturbereichen eingesetzt werden. Je nach Anwendungsfall muss dazu ein Material mit geeigneter Temperatur des Phasenwechsels ausgewählt werden. Dabei werden je nach Temperaturbereich verschiedene Materialklassen eingesetzt.

## Sensible und latente Wärmespeicherung

Gewöhnlich treten beim Speichern von Wärme, z.B. im Warmwasserspeicher oder Kachelofen, Temperaturänderungen von mehreren 10°C auf. Bei der Speicherung von Wärme in das Speichermedium erhöht sich dessen Temperatur (blaue Kurve ②). Diese Form der Wärmespeicherung wird deshalb auch fühlbare oder sensible Wärmespeicherung genannt. Unter Latentwärmespeicherung versteht man die Speicherung von Wärme in einem Material, welches einen Phasenübergang, z.B. fest - flüssig, erfährt. Bei der Speicherung von Wärme in das Speichermedium beginnt das Material beim Erreichen der Temperatur des Phasenübergangs zu schmelzen und erhöht dann, trotz weiterer Einspeicherung von Wärme, seine Temperatur nicht, bis das Material komplett geschmolzen ist. Erst dann tritt wieder eine Erhöhung der Temperatur auf (rote Kurve ②).

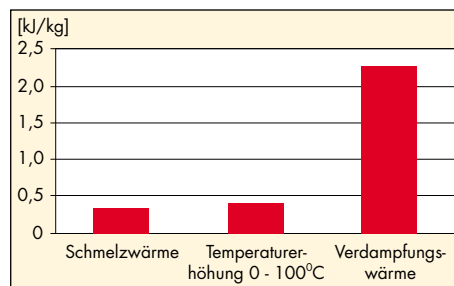


② Vergleich der Wärmespeicherung durch sensible und latente Wärme

Da für längere Zeit trotz Wärmezufuhr keine merkliche Temperaturerhöhung auftritt, nennt man die während des Phasenübergangs eingespeicherte Wärme „versteckte Wärme“ oder auch „latente Wärme“. Im Falle eines Phasenübergangs fest - flüssig ist die latente Wärme gleich der Schmelz- oder Kristallisationswärme des Speichermediums. Latentwärmespeicherung ist allgemein in Form von Wärmekissen, die in heißem Wasser „geladen“ werden, bekannt. Die Speicherung von Kälte im Winter mittels Eis oder Schnee zur Kühlung oder Klimatisierung im Sommer war früher eine weit verbreitete Anwendung, die mit der Einführung der Kompressionskältemaschinen verdrängt wurde. Heute wird sie, aus Energiepargründen, wieder diskutiert.

Durch den Effekt der latenten Wärme, d.h. der Wärmespeicherung ohne nennenswerte Temperaturänderung, ergeben sich zwei wesentliche Vorteile: 1. Es ist möglich, in einem kleinen Temperaturbereich verhältnismäßig große Wärme- bzw. Kältemengen zu speichern und somit hohe Speicherdichten zu erreichen ③.

2. Da der Phasenübergang bei konstanter Temperatur über einen gewissen Zeitraum vonstatten geht, besteht die Möglichkeit, Temperaturschwankungen zu glätten und Temperaturspitzen zu verhindern. Wie viel Energie in einem Phasenübergang gespeichert werden kann, zeigt sich leicht am Beispiel von Wasser: Um Eis (0°C) zu Wasser von 0°C zu schmelzen, braucht man in etwa so viel Energie, wie um Wasser von 0°C auf ca. 80°C zu erhitzen. Noch mehr



③ Die Schmelzwärme von Eis entspricht in etwa der Energiemenge, die man braucht, um Wasser von 0°C auf 80°C zu erhitzen.

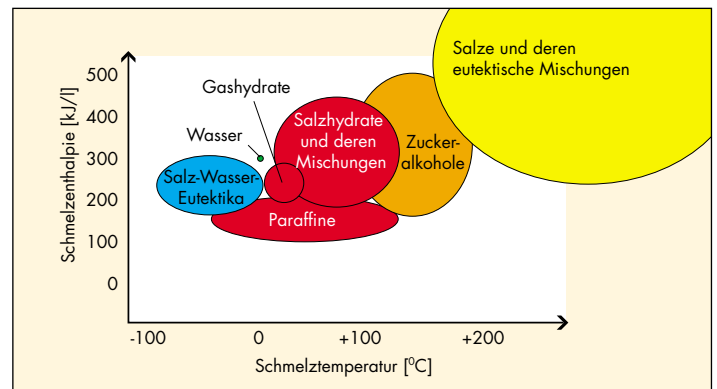
Energie wird für den Phasenübergang Wasser/Wasserdampf benötigt. Hier wird die 5,4-fache Menge der Energie benötigt, die notwendig ist, um Wasser von 0°C auf 100°C zu bringen. Wird Wasser vom festen in den dampfförmigen Zustand überführt, so werden lediglich 14% der benötigten Energie als sensible Wärme und 76% als latente Wärme gespeichert ③.

## Typische PCM-Materialien

Im Temperaturbereich um 0°C ④ wird typischerweise Wasser mit verschiedenen

Zusätzen als PCM verwendet. Wenn Wasser gefriert, so bildet sich ein Kristallgitter im Eis mit sehr vielen Fehlstellen. Daher auch der Volumenzuwachs des Wassers beim Gefrieren. Die Zusätze besetzen diese Fehlstellen und beeinflussen so die Struktur des Kristallgitters und somit auch den Schmelzpunkt und die Schmelz- bzw. Kristallisationsenergie.

Für die Kältespeicherung unterhalb 0°C werden wässrige, meist eutektische Salzlösungen verwendet. Diese PCM sind sehr preiswert. Um den Temperaturbereich zwischen 0°C und 20°C besser abzudecken, werden seit einiger Zeit Gashydrate bzw.



④ Typische volumenspezifische Schmelzenthalpien und zugehörige Temperaturbereiche von Materialklassen zur Latentwärmespeicherung.

Clathrathydrate erforscht. Dabei wird ein Gas, meist unter Druck, im Wasser gelöst. Die Gasmoleküle stabilisieren dann das Gitter des Eises und erhöhen somit dessen Schmelzpunkt.

Für die Wärmespeicherung im Temperaturbereich von 5°C bis etwa 130°C setzt man Salzhydrate und eutektische Mischungen von Salzhydraten ein. Salzhydrate können als extreme Modifikation des Gitters des Wassers betrachtet werden. Aufgrund der hohen Massenanteile kann man sie allerdings auch als Salze mit hohem Wassergehalt (Kristallwasser) betrachten.

Eine andere Materialklasse im selben Temperaturbereich sind die Paraffine. Sie werden oft wegen ihrer chemischen Reaktionsträgheit und somit einfacheren Handhabung eingesetzt. Im Vergleich zu Salzhydraten haben sie ähnliche massenbezogene Energiedichten. Wegen ihrer geringeren Dichte sind sie allerdings den Salzhydraten bei der volumenbezogenen Energiedichte unterlegen. Eine neuere Materialklasse, die noch in der Entwicklung ist, sind „Zuckeralkohole“ im Temperaturbereich 90°C bis 180°C.

Für Temperaturen oberhalb etwa 130°C werden Salze sowie eutektische Mischungen von Salzen eingesetzt. Sie wurden vor allem für den Einsatz von Latentwärmespeichern für Parabolrinnen-Solkraftwerke untersucht ④.

Die hier dargestellten PCM zeigen alle einen Phasenübergang fest-flüssig. Dies ist nicht zwingend notwendig. Auch für fest-fest Phasenübergänge sind Materialien bekannt. Aufgrund ihrer niedrigeren Energiedichten und höheren spezifischen Kosten werden sie allerdings zur Zeit kaum diskutiert.

# Produkte am Markt

Bei Anwendungen mit Phasenübergang oberhalb 0°C haben sich zunächst jene PCM im Markt durchgesetzt, bei denen die Energieeinsparung nicht im Vordergrund steht, sondern vielmehr Kriterien wie Produktsicherheit oder Flexibilität. Ein Bereich, in dem der Energiepreis nur eine untergeordnete Rolle spielt, sind Anwendungen zur dezentralen Heizung und Kühlung.

PCM-Technik wird oft dann angewendet, wenn es gilt, die Energieversorgung zu sichern, auch wenn aktive Komponenten eingespart werden sollen, Platzmangel herrscht oder zusätzliches Gewicht eingespart werden muss. Im Gegensatz zur Wärmespeicherung haben PCM mit Phasenübergangstemperaturen unterhalb 0°C geringere Herstellungskosten, da sie im Wesentlichen aus einer Lösung meist kostengünstiger Salze in Wasser bestehen. Große Kältespeicher werden daher bereits seit langem wirtschaftlich als Pufferspeicher in der Klimatisierung eingesetzt und zählen zum Stand der Technik.

## Wirtschaftlichkeit

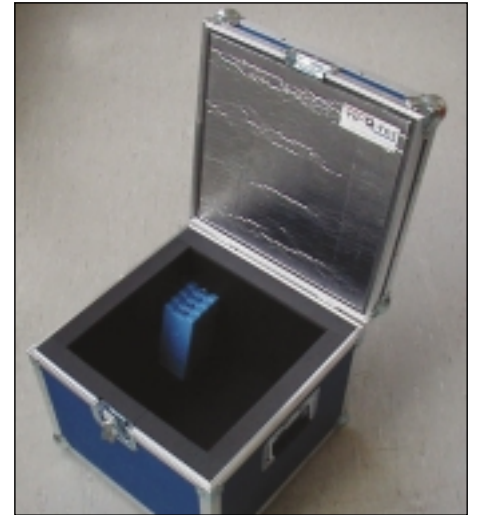
In den letzten Jahren haben zahlreiche PCM-Produkte die Marktreife erreicht. Das hat zwei Gründe: Erstens sind dies die Fortschritte in den technischen Eigenschaften der PCM. Seit einigen Jahren stehen die PCM selbst, sowie auch in verkapselter Form oder als Verbundmaterial zur Verfügung und können von Firmen als Vorprodukte zur Weiterverarbeitung verwendet werden. Zweitens hat sich die Vermarktung verstärkt auf Anwendungen konzentriert, die wirtschaftlich sind. Das Motiv der Energieeinsparung ist dabei zunächst in den Hintergrund getreten, denn Energieeinsparereffekte können zur Zeit nur in Ausnahmefällen zur Wirtschaftlichkeit führen. Das zeigt folgende Abschätzung:

Unter günstigsten Bedingungen steht Wärme kostenlos zur Verfügung. Das PCM hat einzig die Aufgabe, Wärme zur geeigneten Zeit zur Verfügung zu stellen. Preise für PCM überspannen einen weiten Bereich. Für den Temperaturbereich oberhalb 0°C liegen PCM-Preise typischerweise über 0,5 €/kg. Geht man von einem Energiepreis von 0,05 €/kWh aus, so müssen 10 kWh = 36 MJ in einem kg PCM gespeichert worden sein, damit die gespeicherte und später genutzte kostenlose Energie die Kosten des PCM ausgleicht. Bei einer typischen Speicherdichte von 150 - 200 kJ/kg entspricht das in etwa 200 Zyklen über die Lebensdauer des PCM. Eine Wirtschaftlichkeit aus der reinen Energieeinsparung ergibt sich daher nur in Anwendungen mit hoher Zyklenzahl. In den meisten Fällen führt die durch einen Speicher gewonnene Leistungsanpassung und speziell bei Latentwärme-

speichern das reduzierte Volumen und die gleichbleibende Temperatur sowie die Netzunabhängigkeit zur Wirtschaftlichkeit.

## Transportbehälter

Ein solcher dezentraler Anwendungsfall sind jegliche Art von Transportboxen für temperaturempfindliche Güter – beispielsweise Blut <sup>5</sup>. Gerade in den Sommermonaten sind viele Krankenhäuser auf Blutkonserven aus weit entfernten Blutbanken angewiesen. Ein Gefrieren des Blutes oder eine zu starke Erwärmung muss während des Transportes unbedingt vermieden werden, da die Konserven ansonsten nicht mehr verwendet werden darf. Der Transport solcher Blutpräparate konnte bisher nur mit sehr aufwändigen und daher teuren Systemen durchgeführt werden, um die Präparate auf der vorgeschriebenen Temperatur zu



Transportbox mit PCM - Modulen  
(Quelle: Va-Q-Tec).



**5** Bluttransportsystem (Quelle: delta T).

halten. Als wesentlicher Bestandteil des neuen Transportsystems kommt ein neuartiger Latentwärmeakku zum Einsatz, in dem ein speziell auf diese Anwendung angepasstes PCM als Kältespeichermaterial enthalten ist. Das vorgekühlte Akkusystem hält das Blutpräparat in einer speziellen Transporteinheit für mindestens 12 Stunden zwischen 2 und 10°C und das bei einer Außentemperatur von 35°C. Die Temperatur jeder Blutkonserven wird anhand eines Datenloggers während des gesamten Transportes aufgezeichnet, wodurch eine lückenlose

Dokumentation der Kühlkette garantiert werden kann.

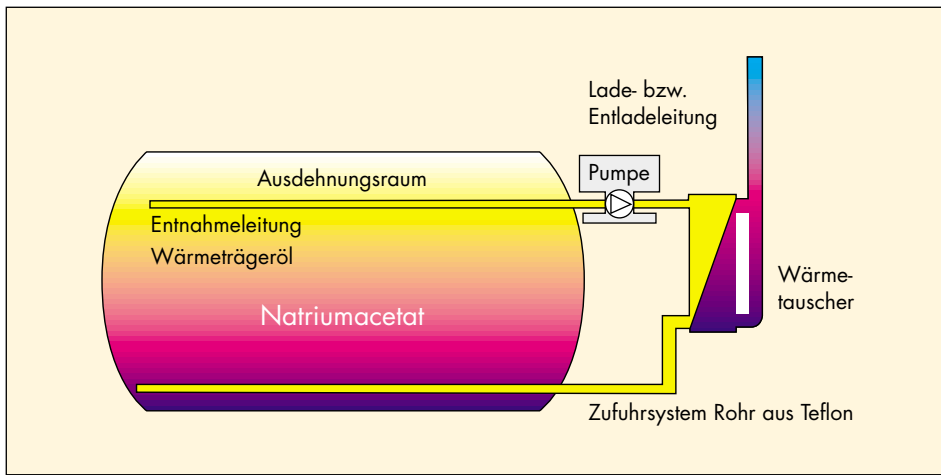
Für den Transport und Zwischenlagerung von temperaturempfindlichen Gütern wie Medikamenten, Pharmazeutika, Geräten, Instrumenten, etc. sind Transportboxen am Markt, die mit einer hoch effizienten Vakuumsuperisolierung ausgestattet sind. Die Innentemperatur wird zusätzlich mit einem PCM-Modul längerfristig stabilisiert <sup>6</sup>. So

ist es z.B. möglich, das Innere einer solchen Box über 4 Tage bei konstant -20°C zu halten, während die Außentemperatur 30°C beträgt.

Weitere Anwendungen von PCM zur dezentralen Wärme- und Kälteversorgung, die bereits in Produkte umgesetzt sind, hier aber nicht genauer dargestellt werden sollen, sind:

- das Vermeiden der Überhitzung von Elektronik in dezentralen Anwendungen ohne elektrische Kühlaggregate





Mobile Abwärmenutzung – ein technisches Wärmeträgeröl wird über ein Zufuhrsystem durch eine Natriumacetat-Lösung geführt (Quelle: Eureka AG)

■ das Vermeiden der Auskühlung von Batterien und somit deren Leistungsabfall, beim Außeneinsatz bei Kälte.

Im Weiteren soll nun auf Produkte eingegangen werden, bei denen die Energieeinsparung im Vordergrund steht.

### Mobile Abwärmenutzung

Kraftwerke und Großverbraucher von elektrischer Energie produzieren – quasi als Abfallprodukt – überschüssige Wärme. Diese Wärme muss, wenn sie nicht vor Ort verwendet werden kann, unter Einsatz von Primärenergie wieder abgeführt werden. Die EURECA (Europäische Energie Contracting AG) hat deshalb auf Basis eines dynamischen Latentwärmespeichers ein Verfahren entwickelt, mit welchem sich diese überschüssige Wärme sinnvoll nutzen lässt. Dabei wird die Überschusswärme von Kraftwerken oder Produktionsanlagen gesammelt, in einem mobilen Latentwärmespeicher gespeichert, und dann an einen anderen Ort transportiert, wo sie wirtschaftlich sinnvoll genutzt werden kann.

Der Latentwärmespeicher <sup>7</sup> wird dabei z.B. mit einem LKW von der Wärmequelle zum Wärmeabnehmer transportiert. Das System vereinigt die Vorteile der Fernwärme mit denen der Latentwärmespeicherung, indem die Fernwärme nicht mehr an ein Leitungsnetz gebunden ist. Wichtige Voraussetzungen für den Einsatz des Systems sind:

■ ausreichend Wärmebedarf, typischerweise Gebäude mit mehr als 10.000 m<sup>2</sup> Fläche bzw. 2.500 MWh/a Wärmebedarf

■ Entfernung zur Abwärmequelle 20 - 30 km.

Seit Januar 2001 ist dieses System zur Beheizung des Verwaltungsgebäudes der Clariant Deutschland GmbH in Sulzbach mit 25.000 m<sup>2</sup> Fläche im Einsatz. Verwendet wird dabei Industrieabwärme aus dem Industriepark Höchst.

### Technische Daten des mobilen Speichers

■ 23 Tonnen Natriumacetattrihydrat als Speichermedium (Schmelzpunkt von 58°C)

■ Laden/Entladen über einen Ölkreislauf

■ Speicherkapazität ca. 3,5 MWh

■ Nutzbare Temperatur ca. 56°C - 180°C

■ Ladeleistung: ca. 1 MW

■ Entladeleistung: ca. 0,5 MW

Seit Juni 2001 wird auch der neue Catering Betrieb der LSG Lufthansa Service GmbH am Flughafen Köln mit einem mobilen Latentwärmespeicher versorgt.

Für andere Anwendungen kann die Größe des Speichers im Bereich von etwa 10 - 300 Tonnen variiert werden. Zudem stehen neben den erwähnten 58°C auch Speicher-materialien mit Schmelztemperaturen von 78°C sowie 118°C zur Verfügung. Ein Speicher, basierend auf dem PCM mit Schmelzpunkt 78°C, wurde z.B. vor kurzem für den stationären Einsatz bei Vivendi in Ric St. Pierre in Frankreich an eine BHKW-Anlage angeschlossen.

### Heizen und Kühlen von Gebäuden



Aufbringen eines PCM-haltigen Gipsputzes im Neubau des Fraunhofer ISE

Die meisten Aktivitäten im Bereich PCM mit dem Motiv „Energie sparen“ gibt es bei Anwendungen zum Puffern von Temperaturzyklen in Gebäuden. Der Schwerpunkt liegt auf der Vermeidung von Spitzentempe-

raturen und somit der Einsparung von Energie zum Klimatisieren. Bei der konventionellen Nachtlüftung wird die Warmluft im Gebäude im Wesentlichen durch kalte Nachtluft ersetzt. Mit PCM kann die Wärmekapazität eines Gebäudes erhöht und dadurch zusätzlich Kälte in der Gebäudemasse gespeichert werden. Eine weitere, wichtige Anwendung sind Speicher zur Gebäudeheizung.

Generell lassen sich Anwendungen von PCM in Gebäuden unterteilen in:

■ PCM in die Gebäudestruktur (Wand, Decke) integriert <sup>8</sup>

■ PCM in sonstigen Gebäude-Komponenten (z.B. Fassadenelement)

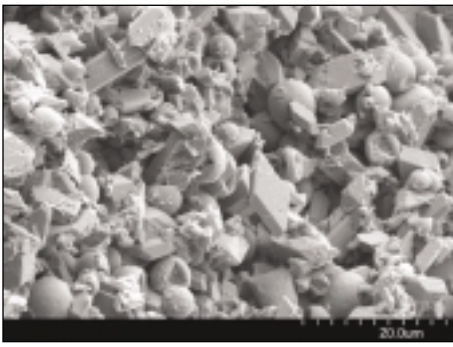
■ PCM in separaten Wärme- und Kältespeichern.

Die ersten beiden Anwendungen sind hierbei passive Systeme, welche die gespeicherte Wärme oder Kälte automatisch abgeben. Das dritte System benötigt aktive Komponenten, wie Lüfter und Pumpen sowie eine Regelung, bietet jedoch den Vorteil, dass die gespeicherte Wärme oder Kälte bei Bedarf gezielt abgerufen werden kann.

Abhängig vom Einsatzbereich in Gebäuden werden PCM mit unterschiedlichen Phasenübergangstemperaturen eingesetzt. Bevorzugt werden in Gebäuden typischerweise Speichertemperaturen von 0°C bis 40°C, mit Ausnahme der Warmwasser- und Heizwasserbereitung mit Temperaturen zwischen 50°C und 60°C. Die Integration von PCM in die Gebäudestruktur ist auf den Temperaturbereich 22-25°C fokussiert <sup>9</sup>.

### Fußbodenspeicherheizung

Bei einem Fußboden-Heizungssystem kann mit integriertem PCM-Granulat Wärme gespeichert werden. Die Nutzung der Schmelzwärme des Paraffins im Granulat ermöglicht es, bis zu 50 % der Schichtdicke einer reinen Estrichvariante einzusparen. Das im Speichergranulat enthaltene Paraffin sorgt außerdem für eine höhere Temperaturkonstanz im Fußbodenaufbau, d.h. Überhitzungen im



9 PCM-haltiger Gipsputz unter dem Rasterelektronenmikroskop. Die Mikrokapselformen sind deutlich zu erkennen (Quelle: Fraunhofer ISE).



10 Weiterentwicklung des patentierten, wasserführenden Fußboden-Heizungssystems (Quelle: Rubitherm).

Registerbereich bzw. an der Fußbodenoberfläche werden vermieden. Diese Fußboden-Heizungssysteme, vorzugsweise wasserführend, ermöglichen die einfache bauteilintegrierte Speicheranordnung zur Nutzung von Solarenergie oder Abwärme für die Raumheizung und Warmwasserbereitung 10.

### Fassadenelemente

Elemente zum Einfangen des Lichts, zur Absorption und Umwandlung in Wärme, einen Überhitzungsschutz und einen Wärmespeicher vereinigt eine neue Glasfassade 11. Sonnenlicht wird von diesen Elementen effizient absorbiert, die entstehende Wärme wird zum Schmelzen eines PCM verwendet. Dadurch bleibt die Temperatur des Elements bei etwa 27 °C, der Schmelztemperatur des PCM, konstant, solange bis der gesamte Vorrat aufgeschmolzen ist. Die 4 cm dicke Lage aus PCM-Elementen speichert dabei in etwa ebensoviel Energie wie eine 30 cm Ziegelwand bei 50°C. Während des Abkühlens bei Nacht oder bei fehlendem Sonnenschein verharrt die Temperatur wie beim Aufheizen ebenso bei etwa 27°C. Das Element speichert gewissermaßen große Mengen solarer Energie, die bei Bedarf in

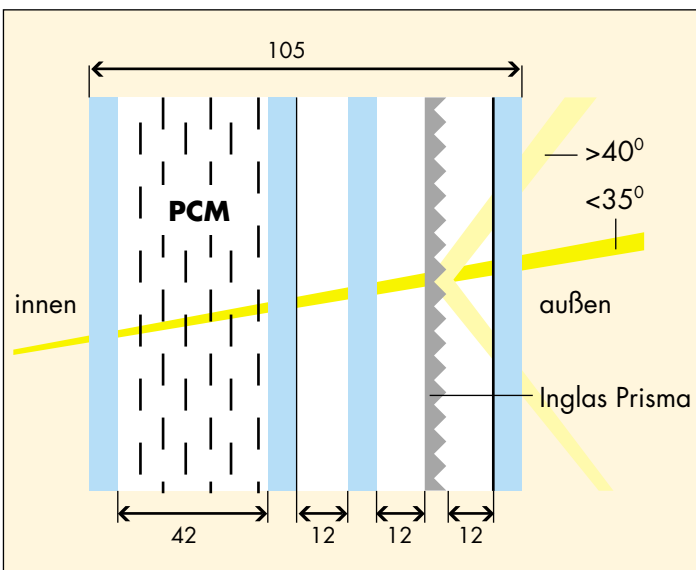
einem engen Temperaturintervall wieder abgegeben werden. Eine gut isolierende Verglasung verhindert, dass diese Wärme wieder nach außen verloren geht. Um im Sommer und bei hochstehender Sonne ein Überhitzen des Latentwärmespeichers zu verhindern, wird direktes Sonnenlicht aus



12 Installation einer Glasfassade mit PCM-Elementen im Solarhaus Ebnat Kappel/Schweiz (Quelle: INGLAS).

einem Winkel größer als 40° über Horizont durch eine Prismenscheibe vollständig nach außen zurückreflektiert, noch bevor es absorbiert und dann gespeichert wird. Aufgrund der optischen Eigenschaften der

PCM sind die Elemente transluzent, d.h. für Licht durchscheinend. Mit zunehmendem „Ladestadium“ der Wand nimmt auch die Transmission zu. 12 zeigt eine Wand aus sogenanntem Powerglas-Modulen (grün) im Solarhaus Ebnat in Kappel (Schweiz).



11 Querschnitt der Glasfassade (Quelle: INGLAS).

### Technische Werte der Glasfassade mit PCM

- Aufbau 4-fach Isolierverglasung mit Argon-Füllung, 6 mm ESG
- U-Wert ca. 0,4 W/(m²K)
- saisonale Verschattung innenliegender, statischer, prismatischer Sonnenschutz
- g-Wert (vor PCM Schicht) ca. 0,45 für Sonnenwinkel 0 - 35°, ca. 0,07 für Sonnenwinkel > 40°
- mittlerer g-Wert (total) typisch 0,17
- Latentspeicher, hellgrün, Dicke 42 mm

### Funktionsbekleidung



13 Warme Füße – dank PCM (Quelle: Jack Wolfskin).

Seit einigen Jahren werden auf dem Markt der Funktionskleidung von mehreren Firmen Produkte mit integriertem, mikroverkapseltem PCM zur Stabilisierung der Temperatur angeboten 13. Skibekleidung wurde z.B. mit mikroverkapseltem PCM ausgestattet, welches das Auskühlen der Kleidung bei Aufenthalt im Freien im Winter hinauszögern soll. Integration von mikroverkapseltem PCM in Feuerwehrranzüge soll das Gegenteil bewirken; das PCM soll das Aufheizen des Inneren des Schutzanzugs bei der Bekämpfung eines Brandes hinauszögern und somit die Einsatzzeit des Feuerwehrmanns am Brandherd verlängern.

# Konfektionierung der Speichermaterialien

Bei der Suche nach einem geeigneten PCM geht es nicht nur darum, ein Material zu finden, das Wärme in einem engen Temperaturbereich speichern kann. Häufig soll sich dieses Material soweit möglich wie jeder andere Konstruktionswerkstoff verhalten. Es soll formbeständig und mechanisch belastbar sein sowie nicht mit angrenzenden Materialien reagieren. Durch die Verkapselung des Speichermaterials können hierfür neue konstruktive Lösungen gefunden werden.

Aufgrund des Phasenübergangs fest - flüssig können die konstruktiven Anforderungen nicht allein mit dem PCM realisiert werden. Gewöhnlich wird daher das PCM in eine Art Behälter, Kapsel oder sonstige Struktur eingebracht. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten an PCM umfassen daher im Wesentlichen drei Gebiete:

- die Entwicklung von PCM mit optimalen Materialeigenschaften
- die Verkapselung von PCM
- die Modifikation der PCM-Eigenschaften durch PCM-Verbundmaterialien

## Materialeigenschaften

Die Forschungsarbeiten an PCM zielen vor allem auf passende Schmelztemperaturen, das Schmelz- und Kristallisationsverhalten und die Langzeitstabilität ab. Darüber hinaus wird der Wärmetransport im PCM, die Volumenänderung und das Korrosionsverhalten untersucht.

Die Langzeitstabilität des PCM kann durch Entmischung (bei Mehrkomponentensystemen) und chemische Veränderungen beeinträchtigt werden. Eine Eigenschaft vieler anorganischer PCM ist die sogenannte Unterkühlung, d.h. die Kristallisation des PCM wird erst bei Temperaturen signifikant unterhalb des Schmelzpunkts ausgelöst. Die Kristallisation muss dann durch geeignete Keimbildner, knapp unterhalb des Schmelzpunktes, ausgelöst werden.

Kommerzielle PCM sind hinsichtlich

Schmelz- und Kristallisationsverhalten, Langzeitstabilität sowie teilweise auch der Volumenänderung optimiert. 14 zeigt einen Überblick über die volumen- und massenspezifischen Schmelzenthalpien von zur Zeit kommerziell erhältlichen PCM.

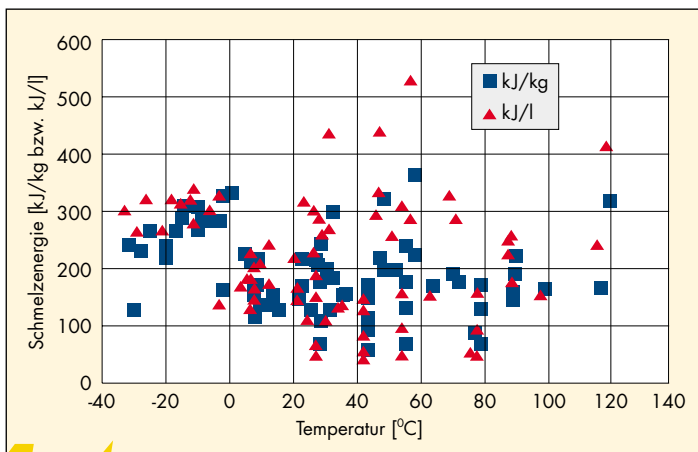
## Makroverkapselung

Unter Verkapselung versteht man eine hermetisch geschlossene Umhüllung des PCM. Je nach Größe der Kapsel bzw. Behälter unterscheidet man zwischen Makro- und Mikroverkapselung.

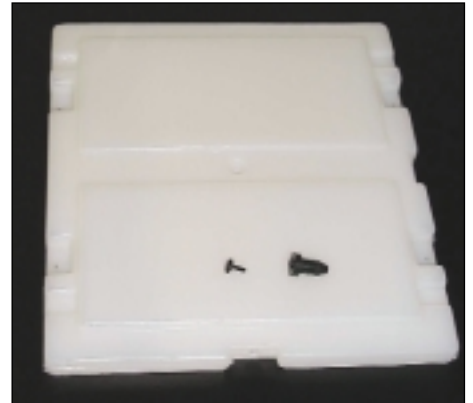
Bei den Makroverkapselungen verfolgt man unterschiedliche Ansätze. Die einfachste Form sind flache Container aus Kunststoff, wie sie z.B. in Kühlakkus eingesetzt werden. Diese sind auch in unterschiedlichen Größen und Formen erhältlich. 15 zeigt z.B. Kühlakkus, die als Kältepuffer in Kleinkühlschränken eingesetzt werden. Aufgrund des Verschlusssystems, das von Hand bedient werden kann, können diese Akkus auch für andere PCM und Anwendungen eingesetzt werden.

Kugelförmige Kunststoffbehälter 16 werden nach der Befüllung mit dem PCM mit einem Stöpsel verschweißt. Diese Art der Verkapselung wird vor allem für große Speicher eingesetzt. Dabei werden Stahl-tanks als Speicherbehälter verwendet. Die mit PCM gefüllten Kugeln werden durch eine Öffnung auf der Oberseite des Tanks als Kugelschüttung in den Tank einge-

bracht. Im frei bleibenden Hohlraum kann das Wärmeträgerfluid durch den Tank gepumpt werden und umspült dabei die Kugeloberflächen. Die Herstellung topfförmiger Behälter auf Matten 17 erlaubt die Fließbandproduktion inklusive Befüllung mit PCM. In einem ersten Schritt erfolgt das



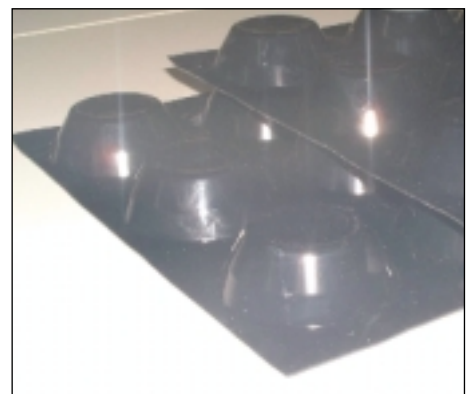
14 Volumen- und massenspezifische Schmelzenthalpie kommerzieller PCM.



15 Kunststoffbox als Makroverkapselung (Quelle: Kissmann).



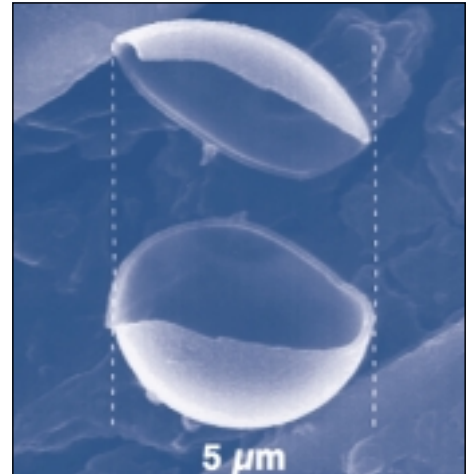
16 Makroverkapselung in Kunststoffkugeln (Quelle: Christopia, Frankreich).



17 Makroverkapselung in tiefgezogenen Kunststofffolien (Quelle: TEAP, Australien).



Tiefziehen einer Folie, um die töpffchenförmigen Behälter zu formen. Nach deren Befüllung mit PCM wird das Ganze dann mit einer zweiten Folie über die ganze Fläche versiegelt. Die so entstehenden Matten sind für eine großflächige Anwendung von PCM, wie z.B. in Fußbodenheizungen oder zum Heizen oder Kühlen von Luft gut geeignet. Einfacher in der Herstellung sind Beutel aus Spezialfolie <sup>18</sup>, die in Handarbeit hergestellt werden. Sie können ihre Form im flüssigen Zustand des PCM ändern und somit den unterschiedlichsten Geometrien angepasst werden. Eine mechanische Stabilität fehlt allerdings.



### Mikroverkapselung

Mikroverkapselte PCM unterscheiden sich grundlegend von makroverkapselten. Dies gilt nicht nur in Bezug auf ihre Größe und Anwendungsmöglichkeiten, sondern auch in Bezug auf ihren Herstellungsprozess. 1953 meldete die amerikanische NCR-Corporation ein Patent für ein neues Durchschreibepapier an, das mit ölgefüllten

**18** Makroverkapselung durch Einschweißen in Folie (Quelle: Climator, Schweden).

Mikrokapseln arbeitete. Dieses Datum ist der Beginn der großindustriellen Nutzung von Mikrokapseln mit einer polymeren Schale im Größenbereich von etwa 3-20 μm Durchmesser <sup>19</sup>.

Mikrokapseln sind winzig kleine Container,

**19** Mikrokapselform in Vergrößerung (Quelle: BASF)

die das flüssige oder feste Kernmaterial individuell mit einer harten Schale umschließen. Sie sind eine sehr belastbare Verpackung, die eine Vielzahl von Anwendungen erlaubt. Mikrokapseln tolerieren sogar Phasenumwandlungen des Kerns, einschließlich deren Volumenänderungen. Bei Durchschreibepapieren wird der farblose Kern allerdings gezielt durch Zerstörung freigesetzt und eine Farbreaktion auf dem Entwicklerpapier erzeugt. Besonders gut können mit Wasser nicht mischbare Stoffe, zum Beispiel Paraffinwachs, eingeschlossen werden. Abhängig von der Kettenlänge der Moleküle ist so ein großer Bereich von unterschiedlichen Schmelztemperaturen verfügbar, von etwa -30°C für n-Decan (C10) bis etwa 80°C für n-Tetracontan (C40). Neben den organischen Latentwärmespeichern wäre die Mikroverkapselung von Salzhydraten wünschenswert. Leider verhindert bisher die große Mobilität des Kristallwassers der Salzhydrate eine erfolversprechende Mikroverkapselung. Aufgrund ihrer geringen Größe haben Mikrokapseln spezielle Vorteile: Sie sind fließfähig als Pulver <sup>20</sup> oder Dispersion <sup>20</sup>, gut dosierbar und besitzen einen guten Wärmeübertrag durch ein hohes Oberfläche / Volumen-Verhältnis. Hieraus ergeben sich spezielle Einsatzgebiete der Mikrokapseln. In der Textilbranche werden von zwei Herstellern Bekleidungsstücke mit mikroverkapselten Latentwärme-

### Herstellung von Mikrokapseln

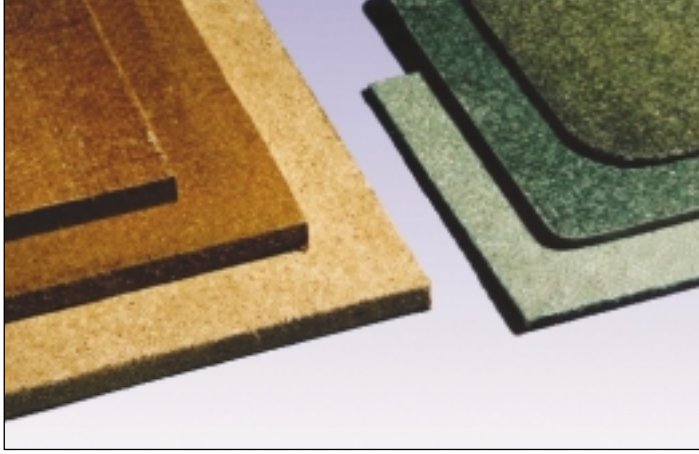
Die besten Mikrokapseln werden durch chemische Prozesse mit in-situ Synthesen hergestellt: Komplexkoazervation mit Gelatine, Grenzflächenpolyaddition zu Polyamiden oder Polyharnstoffen, Fällungspolykondensation mit Melaminharz oder radikalische Polymerisation von geeigneten Monomeren. Sie ergeben die gewünschten, zumeist hochvernetzten, polymeren Kapselwände. Die Wandstärke der Kapseln beträgt nur einige 100 nm, so dass Füllgrade mit Kernmaterial von 70 bis 90% erreichbar sind. Es werden wässrige Kapseldispersionen erhalten <sup>20</sup> oder auch trockene Pulver <sup>21</sup>.



**20** Wässrige Mikrokapseldispersion (Quelle: BASF).



**21** Mikrokapseln als trockenes Pulver (Quelle: BASF).

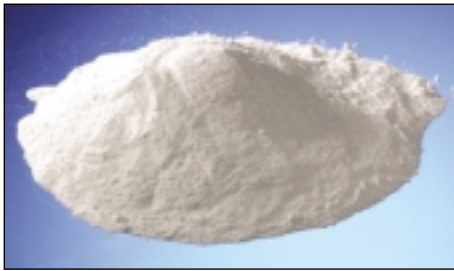


Faserplatten mit PCM (Quelle: Rubitherm).

22

speichern angeboten. In dieser Anwendung werden Mikrokapseln mit Paraffinkern zusammen mit geschäumten Bindemitteln auf Geweben fixiert und in Kleidungsstücke eingearbeitet.

Mitte der achtziger Jahre gab es erste Anläufe, Latentwärmespeicher in Bauprodukte einzubringen, um Energie zu sparen. Auch Mikrokapseln wurden in zahlreichen Patentanmeldungen genannt. Die Mikrokapseln werden hierbei den bekannten Baustoffen als Zuschlagstoffe hinzugegeben. Ein nachhaltiger Markterfolg war diesen frühen Produkten noch nicht beschieden.



PCM basierend auf einem Silikat-Trägerpulver (Quelle: Rubitherm).

24

In diesen Anwendungen stehen vor allem die Vorteile der Mikrokapseln bei der Handhabung und Verarbeitung im Vordergrund. Zur Zeit wird jedoch auch die Zugabe von mikroverkapseltem PCM zu Wärmeträgerflüssigkeiten intensiv diskutiert und erforscht (20). Durch die geringe Größe der Kapseln bleibt die Pumpfähigkeit der Flüssigkeit erhalten, deren Fähigkeit Wärme zu transportieren erhöht sich jedoch stark. Die hohe spezifische Oberfläche der Kapseln erlaubt dabei einen sehr effizienten Wärmeübergang zur Flüssigkeit.

### Verbundmaterialien

Bei der Verkapselung steht die Eingrenzung der flüssigen Phase des PCM durch eine geschlossene Kapselhülle im Vordergrund. Im Gegensatz dazu wird bei Verbundmaterialien dem PCM eine innere Struktur hinzugefügt. Diese Materialien lassen sich somit sägen oder schneiden, was eine Verarbeitung für Geometrien in den unterschiedlichsten Anwendungen erlaubt. Zudem können durch die zusätzliche Struktur im Verbundmaterial neue Eigenschaften, wie



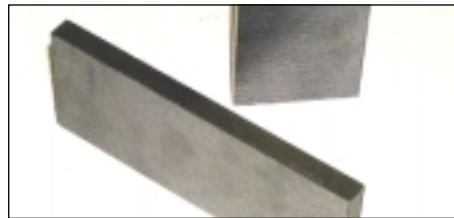
PCM-Verbundmaterial als Granulat (Quelle: Rubitherm).

23

z.B. eine bis zu 100-fach höhere Wärmeleitfähigkeit, hinzugefügt werden.

Ein Beispiel für PCM-Verbundmaterialien sind Holzfaserplatten wie sie (22) zeigt. Hierbei wird das PCM in ein Trägermaterial eingebettet und ist dort völlig homogen verteilt. Während des Phasenwechsels finden die Schmelz- und Erstarrungsprozesse innerhalb des Trägermaterials statt, wobei das PCM selbst in der Flüssigphase nicht aus dem Trägermaterial austritt und die Volumenausdehnung des PCM innerhalb der Trägerstruktur aufgenommen wird. Derartige Holzfaserplatten können leicht in unterschiedlichen Anwendungen wie Warmhalteplatten für Speisetransport eingebaut werden. Eine andere patentierte Möglichkeit ist die Einbringung in ein Granulat (23). Hierdurch entsteht ein rieselfähiges PCM-Produkt mit dem auch Hohlräume komplizierter Geometrie einfach gefüllt werden können. Ein Anwendungsgebiet ist beispielsweise die Fußbodenspeicherheizung.

Spezielle Latentwärmepulver für die medizinische Wärmetherapie (24) bestehen aus einem Trägerpulver aus Silikat, in das je nach Anwendung ein Wärmeparaffin geeigneter Schmelztemperatur eingebettet wird. Der rieselfähige Charakter des Pulvers bleibt bei jeder Temperatur bestehen, egal ob das Paraffin sich im flüssigen oder festen Zustand befindet.



PCM-Graphit-Verbundmaterial mit bis zu 100-fach höherer Wärmeleitfähigkeit (Quelle: SGL Technologies)

Ein anderes Verbundmaterial, das darauf abzielt, den Wärmetransport im PCM zu verbessern, wurde vor einigen Jahren am ZAE Bayern entwickelt und patentiert. Es besteht aus einem mikroporösen Graphitschaum (etwa 10 Vol%) mit hoher Wärmeleitfähigkeit und PCM (etwa 85%). Der Graphitschaum verleiht dem so entstehenden Verbundmaterial eine Wärmeleitfähigkeit von bis zu 30 W/mK, was einer Erhöhung um

einen Faktor 50 - 100 gegenüber dem des reinen PCM entspricht. Wegen des geringen Volumenanteils des Graphits ist das Wärmespeichervermögen kaum reduziert. Das Verbundmaterial ist mittlerweile marktverfügbar (25).

### Entwicklungstrends

Der Einsatz in der Gebäudetechnik fokussiert auf den Temperaturbereich zwischen 5°C und 25°C. An PCM in diesem Temperaturbereich werden hohe Anforderungen an das Kristallisationsverhalten gestellt. Die nicht brennbaren Salzhydrate weisen oft noch zu hohe Unterkühlung auf. Bei Paraffinen, die generell weniger Unterkühlung zeigen, bestehen allerdings wegen deren Brennbarkeit Bedenken. Die Zugabe von Brandhemmern wird daher zur Zeit intensiv diskutiert. Salzhydrate oder auch Gashydrate, die keine signifikante Unterkühlung zeigen, wären aber die bevorzugte Lösung. Die zur Beseitigung der Unterkühlung eingesetzten Keimbildner sind in vielen Fällen allerdings auch nur bis wenige 10°C oberhalb der Schmelztemperatur des PCM, für das sie verwendet werden, stabil. Dies schränkt in einigen Anwendungen die Nutzung der PCM deutlich ein. Keimbildner mit höherer Temperaturstabilität wären daher wünschenswert.

Bisher wurden nur PCM mit einem Festflüssig-Phasenübergang diskutiert. In einigen Anwendungen wären allerdings Festfest-Phasenübergänge vorzuziehen, da sich solche PCM wesentlich leichter und auch flexibler einsetzen lassen. Diese PCM haben zwar im allgemeinen niedrigere Speicherdichten, aber dürften für einige Anwendungen, wie die Kühlung elektronischer Bauteile, wesentlich besser geeignet sein.

Die thermischen und sonstigen technischen Eigenschaften der in (14) gezeigten Materialien sind, da sie als Produkt am Markt sind, weitgehend bekannt. Wie in (4) gezeigt, können Latentwärmespeicher allerdings in einem weit größeren Temperaturbereich eingesetzt werden. Obwohl hier schon eine große Anzahl von Materialien mit ausreichenden Schmelzenergien bekannt sind, ist jedoch über deren sonstige, technische Eigenschaften wenig Information verfügbar.



# PCM in Gebäuden

Zur Zeit werden in Deutschland zwei vom BMWA geförderte Forschungsprojekte durchgeführt, die sich mit der Integration von PCM in die Gebäudestruktur befassen. Mit der Mikroverkapselung von Paraffinen steht eine Technologie zur Verfügung, die es erlaubt Latentwärmespeicher in herkömmliche Baumaterialien einzubringen.

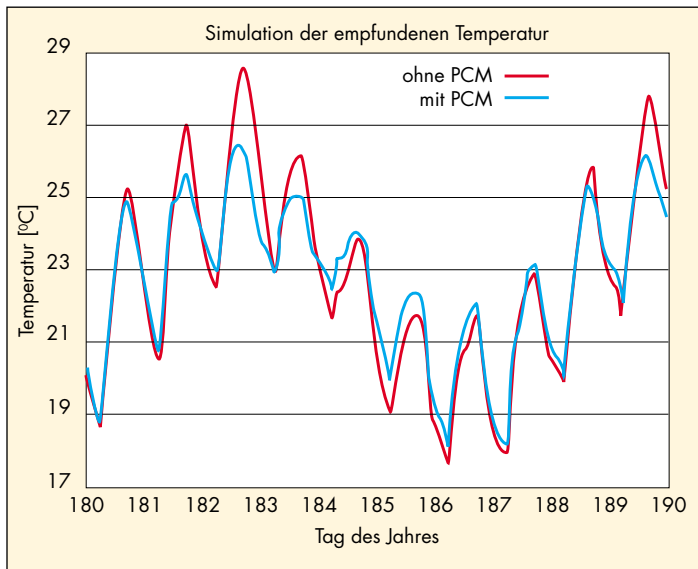
Ziel einer Reihe von F&E-Vorhaben ist das Einbringen von Phasenwechselmaterialien (PCM) in den Wandaufbau von Gebäuden. Damit kann die Wärmekapazität eines Gebäudes wesentlich erhöht werden. Steigt die Raumtemperatur über den durch den Schmelzpunkt des PCM definierten Temperaturbereich, wird Raumwärme in Schmelzwärme umgewandelt und in der Wand gespeichert. Die Raumtemperatur kann nicht

weiter ansteigen. Den größten Vorteil erwartet man bei Gebäuden in Leichtbauweise, die bisher generell eine unzureichende Wärmespeicherfähigkeit besitzen.

Um die Wärmespeicherfähigkeit dieser Gebäude zu erhöhen, werden unterschiedliche Ansätze zur Einbringung von PCM vor allem in Gipsplatten und Putze untersucht. Man erhofft sich, dass Gebäude in Leichtbauweise die thermische Masse eines Massivbaus

erreichen. Die Einbringung von PCM sollte zu einer starken Reduktion des Heiz- und Kühlbedarfs in Leichtbauten führen, da überschüssige Wärme zwischengespeichert und zu einem günstigeren Zeitpunkt – z.B. nachts – wieder abgegeben werden kann. 26 zeigt das Resultat der Simulation eines Büroraumes in einem Gebäude in Leichtbauweise, ohne sowie mit PCM. Der Einsatz des PCM führt demnach zu einer Reduktion der Maximaltemperatur um 2°C und somit zu einer signifikanten Reduzierung der Kühllast im Sommer durch Nachtkühlung mit Außenluft. In der Folge fühlen sich in Gebäuden in Leichtbauweise mehr Personen behaglich 27.

Mikroverkapselte PCM ermöglichen es, Latentwärmespeicher auch in herkömmlichen Baumaterialien einzusetzen. Sie lassen sich verkapselt im gewohnten Verarbeitungsverfahren als Zuschlagstoffe in Baumaterialien wie Gipsplatten und Putze einbringen 28.

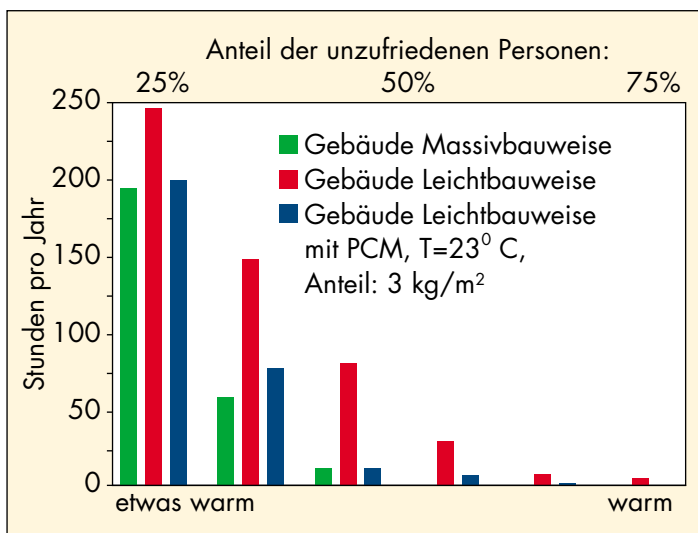


26 Temperaturvergleich in einem Büroraum – Simulation für August (Quelle: Fraunhofer ISE).

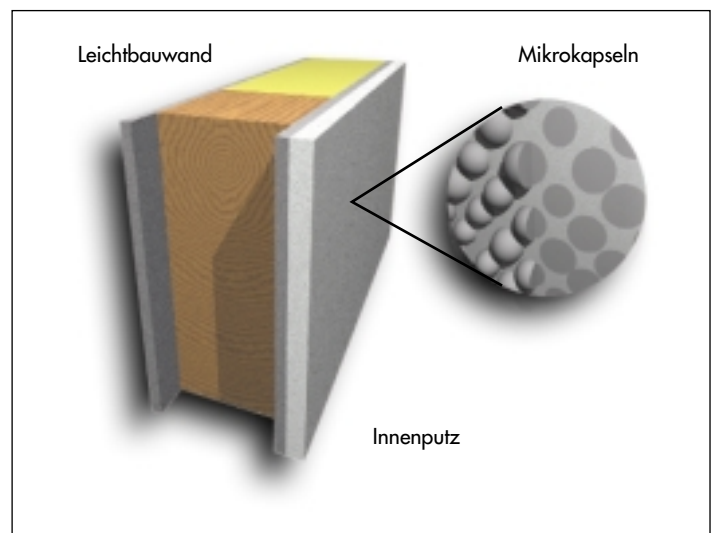
## PCM in Wandverbundsystemen

Seit etwa 6 Jahren werden bei der BASF Latentwärmespeicher für Anwendungen vornehmlich in der Bauindustrie mikroverkapselt. Man setzt dabei ein Kapselverfahren mit Polyacrylaten als Wandmaterial ein, das eine vollständig Formaldehyd-freie Verkapselung erlaubt.

Um sinnvolle Anwendungsgebiete für Phasenwechselmaterialien im Baubereich zu identifizieren und erste Potenzialabschätzungen zu treffen, wurde zunächst ein PCM-Modell für ein Gebäudesimulationsprogramm entwickelt. Mit diesem wurden anschließend Parameterstudien durchgeführt 26, auf deren Basis Zielwerte für die Materialparameter bestimmt wurden.

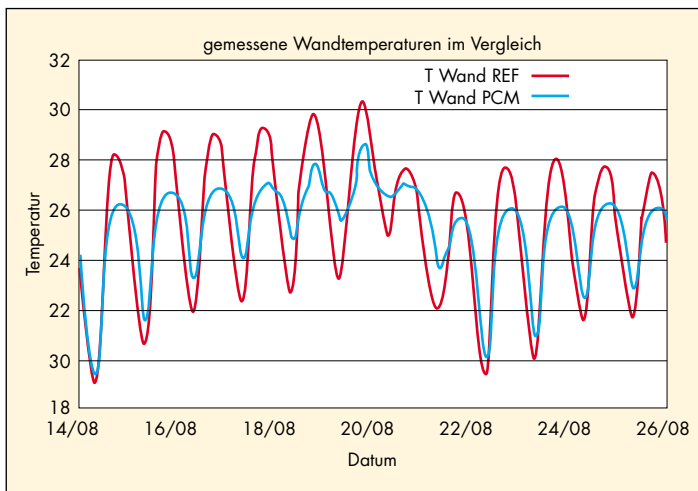


27 Simulation eines Büroraums in Massivbauweise, Leichtbauweise und Leichtbauweise mit PCM (Quelle: ZAE Bayern).



28 Mikroverkapselte PCM im Innenputz (Quelle: Fraunhofer ISE).

Damit konnten erste Proben hergestellt, mit DSC (Differential-Scanning-Calorimeter) Messungen geprüft und die Industriepartner anschließend mit den geeigneten Materialien beliefert werden.



Wandtemperaturvergleich (Messung) an zwei Leichtbauwänden im August 2002 (Quelle: Fraunhofer ISE).

Parallel zur dortigen Materialentwicklung wurde am Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE) ein Teststand für Wandmuster von 50 x 50 cm aufgebaut. Mit diesem konnten reale Wandaufbauten dynamisch vermessen und auf ihre energetischen Eigenschaften hin bewertet werden. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse flossen in erste Demovorhaben an realen Gebäuden ein. Im November und Dezember 2000 wurden durch die Firmen DAW und Heidelberger Maxit erstmals zwei Wohnzimmer in einem sanierten Altbau, dem 3-Liter-Haus der LUWOG in Ludwigshafen, mit mikroverkapselten Latentwärmespeichern ausgerüstet. Weitere Räume im Neubau des ISE in Freiburg folgten. Diese Testobjekte werden zur Zeit messtechnisch betreut.

Da an diesen Objekten durch die Nutzereinflüsse der reine PCM-Effekt nur schwer quantitativ zu erfassen war, wurden im Jahr 2002 zwei identische Leichtbau-Testräume mit detaillierter Messtechnik ausgestattet und der eine mit einem PCM-Produkt und der andere mit einem Referenzprodukt versehen (29). Die Messungen (30) zeigen deutliche Komfortsteigerungen und stimmen gut mit den Simulationen überein.

Diese Messergebnisse lassen eine direkte quantitative Bestimmung des PCM-Effektes zu und werden zur Validierung und Verfeinerung des Computermodells herangezogen. Mit diesem verbesserten Modell werden

erweiterte Parameterstudien durchgeführt, um weitere sinnvolle Anwendungsgebiete zu identifizieren. Zudem kann dieses Simulations-Modell als Werkzeug für Architekten und Planer zum Einsatz kommen. Parallel

zur energetischen Bewertung und dem Monitoring von Gebäuden finden am ISE auch Untersuchungen zur beschleunigten Alterung der Mikrokapeln in den verschiedenen Endprodukten statt. Zu diesem Zweck werden Wandproben einem Temperaturprofil unterzogen und in regelmäßigen Abständen untersucht. Als Analyse-methode kommen unter anderem Rasterelektronenmikroskopaufnahmen zum Einsatz, da DSC-Messungen allein keinen sicheren Aufschluss über

den Zustand der Kapselhülle zulassen, da auch das freie Wachs noch thermisch aktiv ist.



Fassadenteststand des Fraunhofer-ISE: außen links übereinander die beiden Testzellen in Leichtbauweise.

den Zustand der Kapselhülle zulassen, da auch das freie Wachs noch thermisch aktiv ist.

### Einsatz von PCM in Gipsprodukten

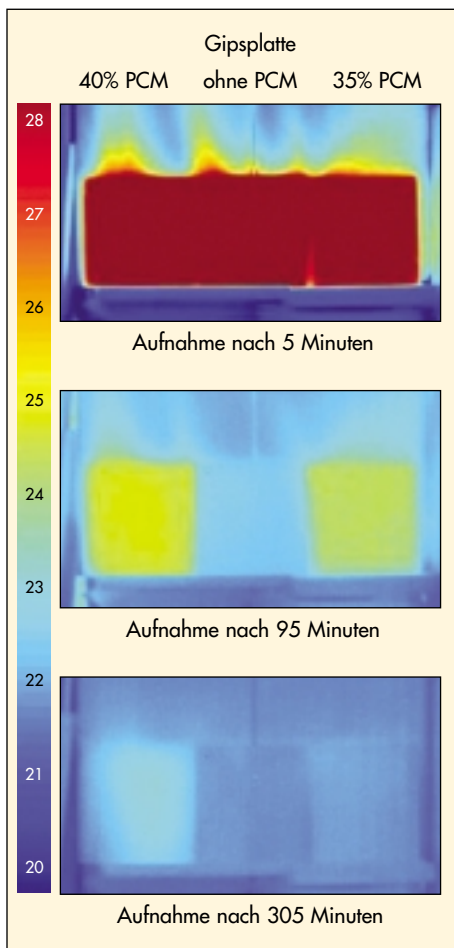
Untersucht werden Konzepte zum Einsatz von PCM beim Innenausbau; und zwar

sowohl mit Paraffinen als auch mit Salzhydraten. In Frage kommt u.a. die Einbringung von mikroverkapseltem Paraffin (Schmelztemperatur ca. 25°C) in Gipskartonplatten, die im Leichtbau Verwendung finden. Der Vorteil dieses Konzeptes besteht darin, dass die fertigen Platten beliebig zugeschnitten und bearbeitet werden können. Bei der Firma Knauf fand bereits eine Pilotproduktion statt, in der Gipskartonplatten mit mikroverkapselten Paraffinen hergestellt wurden. Das Abkühlverhalten der Platten der Pilotproduktion wurde mit einer Wärmebildkamera erfasst und ist in (31) für zwei Platten mit 35 % und 40 % PCM im Vergleich zu einer Platte ohne PCM dargestellt. Während die Platte ohne PCM schon nach weniger als 90 Minuten abgekühlt ist, befinden sich beide Platten mit PCM noch im Bereich der Schmelztemperatur von 25°C. Die Platten mit PCM können also wesentlich mehr Wärme speichern und diese langsam zur Beheizung des Raumes abgeben. Umgekehrt gilt ebenso, dass das Aufheizen des Raumes durch die Wärmeaufnahme lange hinausgezögert werden kann. Neben der Verwendung von Paraffinen wird innerhalb dieses Projekts auch der Ein-

satz von Salzhydraten untersucht, da diese spezifische Vorteile, wie Unbrennbarkeit und höhere Schmelzenthalpie, aufweisen. Leider verhindert bisher die große Mobilität des Kristallwassers der Salzhydrate eine erfolgversprechende Mikroverkapselung. Allerdings sind hier andere Systeme denkbar, wie z.B. Sandwichsysteme aus makroverkapseltem Salzhydrat hinter einer Gipskartonplatte. Bei der Verwendung als Deckenelement ist auch eine Hinterlüftung möglich, was durch den somit verbesserten Wärmeübergang den Effekt des PCM tagsüber verstärkt und die Abkühlung nachts beschleunigt.

### Geförderte Forschungsvorhaben

In einem vom BMWA geförderten Projekt „Mikroverkapselte Phasenwechselmaterialien in Wandverbundsystemen“ arbeitet das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) seit 1999 zusammen mit Industriepartnern an der Einbringung mikroverkapselter Paraffine in Baumaterialien und der Entwicklung von entsprechenden Systemlösungen. Ein weiteres, vom BMWA gefördertes Projekt, das unter anderem den Einsatz mikroverkapselter PCM in Baustoffen untersucht, ist das vom ZAE Bayern koordinierte Leitprojekt „Innovative PCM-Technologie“. Zu den Themen gehören Wärmespeicher auf PCM-Basis für die Hausheizungstechnik, Putze und Verbundsysteme mit hoher Wärmespeicherkapazität und transparente Wärmedämm- und Tageslichtelemente.



**31** Abkühlverhalten einer Gipskartonplatte mit 35 % bzw. 40 % PCM (Quelle: ZAE Bayern).

### Sonnenschutz-PCM Verbundsystem

Aus den unterschiedlichsten Gründen werden häufig Sonnenschutzsysteme im Inneren eines Gebäudes installiert. Dafür sprechen meist architektonische Gründe, die besseren Reinigungsmöglichkeiten, geringere mechanische Stabilitätsanforderungen und geringere Kosten.

Die Montage im Gebäudeinneren hat jedoch einen signifikanten Nachteil: Der Sonnenschutz verhindert nicht mehr das Eindringen der Sonnenstrahlung ins Gebäude, sondern wirkt sich fast nur auf die Lichtverhältnisse im Raum aus. Die Solarstrahlung wird großteils, nachdem sie das Fenster passiert hat, vom Sonnenschutz



**32** Funktionsmuster zur Integration von PCM in Sonnenschutzsysteme (Quelle: ZAE Bayern).

absorbiert. Dieser erwärmt sich daher und wirkt als solare Heizung am Fenster. Einen möglichen Lösungsansatz bieten PCM. Durch Integration von PCM soll dem Sonnenschutz eine höhere Wärmespeicherfähigkeit gegeben werden. Er erwärmt sich dann bei gleicher absorbierten Wärmestrahlung weniger stark. Untersuchungen und Berechnungen an ersten Funktionsmustern **32** zeigen gute Ergebnisse.

Die Erhöhung der Temperatur des Sonnenschutzes kann um bis zu 7 Stunden hinausgezögert werden. In Büroräumen würde dieser Effekt genügen, um ein Ansteigen der Temperatur des Sonnenschutzes auf Zeiten zu verschieben, in denen die Räume nicht von Personen genutzt werden. Die Regeneration geschieht dann in der Nacht unter Ausnutzung der kühlen Nachtluft.

### Temperaturpufferung in solaren Luftsystemen

Solare Luftsysteme unterscheiden sich grundlegend von herkömmlichen Solaranlagen. Durch Einsatz des Mediums Luft für den Wärmetransport können Luftkollektoren nicht nur in geschlossenen, sondern auch im offenen System betrieben werden. Da Luft frost- und siedesicher ist, können Solar-Luft-Kollektoren problemlos in Gebäudehüllen integriert werden: Ganze Absorberfassaden ersetzen mittlerweile konventionelle Spiegelglasansichten. Da Luft als Wärmeträgermedium verwendet wird, kann sie direkt, d.h. ohne weiteren Wärmeübertrager, als Frisch- oder Umluft in die zu beheizenden Räume geleitet werden. Dies ermöglicht eine angenehme und energiesparende Durchlüftung und Erwärmung des Gebäudes. Schon bei niedrigen Außentemperaturen und schwacher Solarstrahlung im Winter wird mit Solarluftkollektoren eine Erwärmung der Luft um 15 - 25 K erreicht. Mit der heute verfügbaren solaren Lufttechnik ist es möglich, gleichzeitig den Lüftungs- und Raumwärmebedarf in Gebäuden zumindest teilweise zu decken. Da Wärmeangebot und -nachfrage zeitlich oft nicht übereinstimmen, liegt es nahe, die Systeme mit einer Zwischenspeicherung auszurüsten, um Schwankungen des solaren Energieangebots im Bereich von einigen Stunden auszugleichen. Gegenüber herkömmlichen Speichertechniken weisen Latentwärmespeicher eine höhere Speicherdichte sowie ein konstantes Temperaturniveau auf. Dadurch können die Anforderungen an Platzbedarf und Isolation herabgesetzt werden. Die Wärme kann zeitlich bei nahezu konstanter Temperatur abgegeben werden, was die Behaglichkeit steigert.

Prinzipiell können PCM in unterschiedliche Komponenten von Solar-Luft-Systemen integriert werden:

- Absorbereinheiten von Solar-Luft-Kollektoren und -Fassaden
- Zuluftleitungen
- Hypokausten-Wandheizungen, sowie in
- zusätzlichen Speichern.

Zur Zeit konzentrieren sich die Arbeiten

auf die Entwicklung eines separaten Latentwärmespeichers. Für das Jahr 2003 ist geplant, einen solchen Latentwärmespeicher zu Demonstrationszwecken bei der Firma Grammer Solar + Bau, Amberg in einem Verwaltungsgebäude in ein bestehendes solares Luftsystem zu installieren.

### free cooling – Klimatisierung mit Nachtkälte

Ein Kältespeicher wird nachts mit der Kälte der Nachtluft abgekühlt. Tagsüber kann dann mit der gespeicherten Kälte die Raumluft bei Bedarf gekühlt werden. Der Ausdruck „free“ bezieht sich hier darauf, dass die Kälte nicht erzeugt werden muss, also frei zur Verfügung steht. Eigentlich nutzt jeder, der im Sommer nachts die Fenster öffnet, um ein Gebäude zu kühlen, diesen Effekt. Die in das Gebäude einströmende, kühle Nachtluft bedingt nicht nur einen Austausch der warmen Innenluft, sondern über Stunden auch ein Abkühlen der Gebäudekomponenten wie Wände und Decken. Da die Temperaturdifferenz zwischen Raumtemperatur und Temperatur der Nachtluft im Sommer meist nicht wesentlich größer als 10°C ist, ist diese Anwendung wegen der notwendigen Speicherdichte für PCM prädestiniert. Auch die vorab geschilderte Abpufferung von Temperaturspitzen mittels mikroverkapseltem PCM in Baustoffen bedient sich dieses Effekts. Unter gewissen Umständen ist die Speicherung der Kälte in einem separaten, isolierten Speicher mit Ventilatoren zur gezielten Luftbewegung jedoch vorzuziehen:

- Laden und Entladen können zu kontrollierten Zeiten durchgeführt werden
- eine Regelung der Lade- und Entladeleistung ist möglich
- bessere Wärmeübergänge durch mit Ventilatoren erzeugte, erzwungene Luftbewegung.

Der Energieverbrauch eines solchen Systems besteht lediglich aus dem Stromverbrauch der Ventilatoren zur Bewegung der Luft. Dem entgegen steht vor allem der Platzbedarf des Speichers.

Zur Zeit wird dieser Ansatz zur Klimatisierung weltweit von vielen Arbeitsgruppen untersucht. Das Potenzial zur Energieeinsparung scheint enorm. Als Möglichkeiten zum Einbau der Speicher werden dabei in Büroräumen vor allem abgehängte Decken und Fußbodenaufbauten, die ansonsten z.B. Verkabelung aufnehmen, untersucht. In Gebäuden in Leichtbauweise werden zusätzlich alle Bauteile mit Hohlräumen, wie Decken und Wände in Betracht gezogen.

Wesentliche Hindernisse bei der Umsetzung sind zur Zeit die Verfügbarkeit von PCM im Temperaturbereich zwischen 22°C und 26°C, sowie das für diese Anwendung notwendige hohe Verhältnis zwischen Oberfläche des Wärmeübertragers und dem PCM-Volumen. Man kann allerdings erwarten, dass diese Probleme innerhalb der nächsten Jahre gelöst werden und diese Systeme zum Einsatz kommen.



## Fazit, Perspektiven

*Die vorgestellten Entwicklungen zeigen, dass im letzten Jahrzehnt ein Schub im Bereich der Latentwärmespeicherung stattgefunden hat. So gelangen wesentliche technische Verbesserungen bei den PCM selbst, deren Verkapselung und der Herstellung unterschiedlichster Verbundmaterialien. PCM sind nun als kommerzielle Produkte mit garantierten Eigenschaften erhältlich, was deren Weiterverarbeitung für die unterschiedlichsten Anwendungen erleichtert.*

Die PCM-Technologie hat zwar den Durchbruch von der Grundlagenforschung und -entwicklung zu den ersten Produkten erreicht. Ob Latentwärmespeicherung jedoch zu einer Standardtechnologie zur Wärme- oder Kältespeicherung wird, hängt u. a. davon ab, ob es gelingt, geeignete Speicher-materialien zu entwickeln. So ist der Temperaturbereich zwischen 5°C und 25°C noch nicht ausreichend mit PCM abgedeckt, aber gerade dieser Bereich ist für die Gebäudetechnik interessant. In Produkte umgesetzte Anwendungen sind zur Zeit vor allem in dezentralen, netzunab-

hängigen Anwendungen zum Warm- oder Kalthalten zu finden. Bei Boxen zum Transport und zur Zwischenlagerung temperatur-empfindlicher Güter dürften PCM-Speicher-module bald zum Standard gehören. Diese Produkte sind schon heute wirtschaftlich. Erste Produkte im Bereich der Energieeinsparung, wie mobile Wärmetransportsysteme oder Baustoffe mit mikroverkapseltem PCM, müssen zeigen, ob sie sich am Markt durchsetzen können. Es ist zu erwarten, dass in den nächsten Jahren zunehmend Produkte zur Energieeinsparung entwickelt werden.

### Literatur

- Abhat, A.: Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials. In: Solar Energy, Jg. 30 (1983), S. 313-332.
- Lane, G.A.: Solar heat storage: Latent heat materials. Volume 1. Background and scientific principles. Boca Raton (Florida, USA): CRC Press Inc., 1983. ISBN 0-8493-6585-6.
- Lane, G.A.: Solar heat storage: Latent heat materials. Volume 2. Technology. Boca Raton (Florida, USA): CRC Press Inc., 1986. ISBN 0-8493-6586-4.
- Heckenkamp, J.; Baumann, H.: Latentwärmespeicher. In: Nachrichten aus Chemie, Technik und Laboratorium, Jg. 45 (1997), H. 11, S. 1075-1081.
- Jahns, E.: Microencapsulated phase change material. In: International Energy Agency. Energy Conversion through Energy Storage Programme (ECES). Annex 10 (Hrsg.): Fourth Workshop. Benediktbeuren, 28.-29. Oct. 1999.
- Schossig, P.: Mikroverkapselte Phasenwechselmaterialien in Wandverbundsystemen zur Komfortsteigerung und Energieeinsparung. In: OTTI Energie Kolleg, Regensburg (Hrsg.): Zwölftes Symposium Thermische Solarenergie. Staffelstein, 24.-26. April 2002. S. 169-173.
- Fachinformationszentrum Karlsruhe, Büro Bonn (Hrsg.): Latentwärmespeicher in Baustoffen. 2002. BINE projektinfo 06/02.

### Ergänzende Informationen

Weitere Informationen sowie eine ausführliche Linkliste zum Thema sind bei BINE oder unter [www.bine.info](http://www.bine.info) (Service/InfoPlus) abrufbar.

### Förderung

Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA)  
11019 Berlin  
53107 Bonn

Projekträger Jülich (PTJ) des BMWA  
Forschungszentrum Jülich GmbH  
Dr. Volkmar Lottner  
52425 Jülich

### Projektadressen

ZAE Bayern  
Dr. Harald Mehling  
Walther-Meissner-Str. 6, 85748 Garching

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE  
Peter Schossig  
Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg

Adressen der Industriepartner finden Sie unter [www.bine.info](http://www.bine.info) (Service/InfoPlus).

### Projektkennzeichen

0329840A-D, 0327303A, C, F, G, L

## Impressum

### ISSN

1610 - 8302

### Herausgeber

Fachinformationszentrum Karlsruhe,  
Gesellschaft für wissenschaftlich-technische  
Information mbH,  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

### Nachdruck

Nachdruck des Textes nur zulässig mit vollständiger Quellenangabe und gegen Zusendung eines Belegexemplares. Nachdruck der Abbildungen nur mit Zustimmung des jeweils Berechtigten.

### Autor

Dr. Harald Mehling

### Redaktion

Paul Feddeck

## Kontakt

### Fragen zu diesem Themeninfo?

Wir helfen Ihnen weiter – wählen Sie die BINE Experten-Hotline:

Tel. 0228 / 923 79-44

### Allgemeine Fragen?

Wünschen Sie allgemeine Informationen zum energie- und umweltgerechten Planen und Bauen? Dann wenden Sie sich bitte an die unten stehende Adresse

 **BINE**  
Informationsdienst

Fachinformationszentrum Karlsruhe  
Mechenstraße 57, 53129 Bonn  
Tel. 0228 / 9 23 79 0  
Fax 0228 / 9 23 79 29  
eMail [bine@fiz-karlsruhe.de](mailto:bine@fiz-karlsruhe.de)  
Internet: [www.bine.info](http://www.bine.info)