

## ■ Revolution in der Bautechnik

- Wärmedämmung
- Neue Verglasungstechniken für Tageslicht und Wärmeschutz
- Wärmespeicher als integrierte und nicht integrierte Bauteile

# Wärmedämmung

Dr. Helmut Weinläder  
ZAE Bayern  
weinlaeder@  
zae.uni-wuerzburg.de

Hans Erhorn  
Fraunhofer IBP  
hans.erhorn@  
ibp.fraunhofer.de

Dr. Dietrich Schmidt  
Fraunhofer IBP  
dietrich.schmidt@  
ibp.fraunhofer.de

Werner Platzer  
Fraunhofer ISE  
werner.platzer@  
ise.fraunhofer.de

Dr. Peter Nitz  
Fraunhofer ISE  
peter.nitz@ise.fraunhofer.de

## Einführung

Energieeffizienzmaßnahmen speziell in Wohngebäuden dienen vor allem der Reduzierung der Transmissionswärmeverluste der Gebäudehülle. Neben dem verstärkten Einsatz konventioneller Dämmstoffe können neue Materialien und Komponenten wie evakuierte Dämmsysteme Lösungen anbieten, die insbesondere unter dem Gesichtspunkt des hierfür benötigten Raums effizienter sind und neue technische und gestalterische Möglichkeiten eröffnen. Energieeffiziente Fenster und Verglasungen sowie solare transparente Wärmedämmung<sup>1</sup> nutzen zusätzlich passive solare Gewinne zur Raumheizungsunterstützung.

## Konventionelle Dämmstoffe

Der aktuelle Dämmstoffmarkt wird im Wesentlichen von zwei Produktgruppen dominiert:

1. Mineraldämmstoffe (55%)
2. organische Schäume (41%), untergliedert in:
  - EPS-Hartschaumdämmstoffe (30%)
  - Polystyrol-Extruderdämmstoffe XPS (6%)
  - PUR-Hartschaumdämmstoffe (5%) (Stand 2005, [1]).

Andere Dämmstoffe wie Perlite, Schaumglas oder solche aus nachwachsenden Rohstoffen sind mit insgesamt etwa 4% vertreten. Die Wärmeleitfähigkeit ist eine temperaturabhängige Materialkonstante und wird in  $W/(m^2K)$  gemessen. Je kleiner dieser Wert ist, umso besser ist die Wärmedämmeigenschaft. Er liegt bei konventionellen Dämmstoffen typischerweise im Bereich 0,035 bis 0,040  $W/(m^2K)$ , für PUR-Schäume bei etwa 0,030  $W/(m^2K)$ . Ein neu am Markt angebotener Resol-Hartschaum wirbt mit Wärmeleitfähigkeiten von nur 0,022  $W/(m^2K)$ .

<sup>1</sup> Transparente Wärmedämmungen werden heute meist als solare Umweltwände bezeichnet.

## Wärmetransportmechanismen – Verbesserungs- und Optimierungsansätze

Ganz allgemein ist Wärmetransport die Gesamtheit des durch einen Temperaturgradienten hervorgerufenen Energietransports, welcher auf unterschiedlichen Transportmechanismen beruht. Er setzt sich zusammen aus:

- Wärmetransport durch Luftkonvektion
- Wärmeleitung
- Infrarotstrahlungstransport

Luftkonvektion zu unterdrücken, ist die primäre Aufgabe eines jeden Wärmedämmmaterials. Da ruhende Luft im Vergleich zu Festkörpern eine sehr niedrige Wärmeleitfähigkeit aufweist, sind Dämmstoffe meist hochporös. Damit sinkt auch die Dichte dieser Dämmmaterialien. Je geringer die Dichte, umso weniger trägt Wärmeleitung über den Festkörperanteil zum Gesamtwärmetransport bei. Da aber mit geringerer Dichte der Wärmetransport über Strahlung zunimmt und generell die mechanische Stabilität abnimmt, sind für eine Gesamtoptimierung der Verringerung des Materialeinsatzes Grenzen gesetzt. Bei den im Bauwesen gegenwärtig eingesetzten konventionellen Dämmstoffen wird der Gesamtwärmetransport dementsprechend durch die Wärmeleitung des Gases in den Hohlräumen dominiert (der Wärmeleitungsanteil durch das Gas ist größer als 60%). Verbesserungen der Dämmeigenschaften setzen insbesondere an einer Verringerung dieser Gaswärmeleitfähigkeit an. Die bessere Dämmeigenschaft von PUR-Schäumen ist so auf andere Gase mit noch geringerer Wärmeleitfähigkeit in den geschlossenen Zellen zurückzuführen. Der für die Praxis anzusetzende Dämmwert berücksichtigt jedoch, dass die Zellen nicht absolut dicht sind und dass dadurch ein Austausch der Zellgase mit der umgebenden Luft stattfindet und zu einer Verschlechterung des Dämmwerts führt. Durch



*Abbildung 1  
Sanierung eines  
Reihenmittelhaus in  
München, Architekt:  
F. Lichtblau (2001);  
VIP-Elemente,  
Gesamtdämmstärke  
9 cm,  $U = 0,15 \text{ W}/$   
 $(\text{m}^2\text{K})$*

Quelle: ZAE Bayern

diffusionshindernde Deckschichten kann diese Degradation erheblich verringert werden.

Verbesserungen bei den EPS-Schäumen setzen an dem Infrarotstrahlungstransport an. Aufgrund spezieller Infrarot-Trübungsmittel konnte so die Dämmwirkung verbessert oder bei gleicher Wärmeleitfähigkeit der Materialeinsatz auf die Hälfte reduziert werden.

### Nanostrukturierte Materialien

Bei Porengrößen unter 1 Mikrometer wird der Wärmetransport durch Gasmoleküle weniger durch die Anwesenheit anderer Gasmoleküle gebremst, sondern in zunehmendem Maße durch kleinste Poren mit einer Vielzahl von Zellwänden oder anderen Strukturelementen. Bei ausreichend niedriger Gesamtdichte eines Dämmmaterials lässt sich so der „magische“ Schwellwert der Wärmeleitfähigkeit ruhender Luft von ca.  $0,026 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  für den Gesamtwärmetransport unterschreiten. Die Wärmeleitfähigkeit von Pulverpresslingen aus pyrogener Kieselsäure (Kieselsäure, die in einem Hochtemperaturverfahren hergestellt wurde) oder aus in nasschemischen Verfahren hergestellten Silica-Aerogelen ist mit etwa  $0,018 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  nur etwa halb so groß wie die herkömmlicher, mit Luft gefüllter Dämmstoffe. Im Vergleich zu diesen  $\text{SiO}_2$ -basierten Materialien würden auf Nanometerskala strukturierte organische Schäume weitere Verbesserungspotenziale bieten.

### Vakuumisolationspaneele (VIP)

Vakuumisolationspaneele sind Dämmelemente, welche prinzipiell aus einer Vakuumschicht und einem Füllmaterial bestehen. Während zum Beispiel bei einer Thermoskanne (der bekannten vakuumbasierten hocheffizienten Wärmedämmung) zylindrische Gehäuse in der Lage sind, den äußeren atmosphärischen Belastungsdruck von 1 bar zu tragen (dieser entspricht einer Gewichtslast von  $10 \text{ t}/\text{m}^2$ ), müssen bei flachen Vakuumisolationspaneelen druckstabile Füllmaterialien oder Strukturen die entsprechenden Druckkräfte aufnehmen. Besonders in der Kombination von nanostrukturierten Füllmaterialien auf der Basis von pyrogener Kieselsäure ( $\text{SiO}_2$ ) mit den geringsten Anforderungen an die Qualität des Vakuums und den dichtesten heute verfügbaren Kunststoffhochbarrierelaminaten ergeben sich VIP-Produkte mit Funktionsdauern von mehreren Jahrzehnten, wie sie im Bauwesen gefordert sind. Gegenüber nicht-evakuierten Dämmungen bieten diese bei gleicher Dämmstärke eine um einen Faktor 5 bis 10 bessere Dämmwirkung im Kernbereich. Somit werden schlanke, raumsparende und hocheffiziente Dämmbauten für unterschiedliche Einsatzbereiche im Neubau, insbesondere aber auch für Maßnahmen im Bestand möglich. Probleme bereiten allerdings noch die Wärmebrücke des Paneelrandes, die Verletzbarkeit der VIP und die fehlende Verarbeitbarkeit vor Ort. Mit einem auf VIP basierenden Wärmedämmverbundsystem Lockplate® (Maxit Deutschland GmbH, Merdingen) ist eine wärmebrückenminimierte,

Abbildung 2  
Neubau eines  
Einfamilienhaus in  
Burgberg (2007);  
Wärmedämmverbund-  
system mit VIP,  
Gesamtdämmstärke  
9 cm,  $U = 0,14 \text{ W}/$   
 $(\text{m}^2\text{K})$

Quelle: Fraunhofer ISE



baupraktische Entwicklung gelungen. Durch die Verwendung von nur wenigen Standardgrößen ist die Basis für eine kostengünstige, automatisierte Serienfertigung gelegt.

#### Fensterrahmen

Auch bei gut wärmedämmten Gebäuden liegen die thermischen Schwachstellen im Bereich der Fenster. Typische Passivhausfensterrahmen erreichen  $U_f$ -Werte<sup>2</sup> von  $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , allerdings bei Bautiefen von 120 mm und mehr. An einem neuen Fensterrahmen mit einem  $U_f$ -Wert von  $0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  bei einer Bautiefe von nur 90 mm wird gerade geforscht.

#### Fenster

Durch Kombination thermisch hochwertiger Fensterrahmen und Dreifachverglasungen mit  $U_g$ -Werten<sup>3</sup> von  $0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  lassen sich Fenster mit einem  $U_w$ -Wert<sup>4</sup> von  $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  realisieren. Die Dämmwirkung liegt damit zwar immer noch deutlich über der gut gedämmter opaker Wände von zum Beispiel  $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ; berücksichtigt man jedoch die solare Einstrahlung, so können Fenster auf der Südfassade ihre Wärmeverluste nicht nur kompensieren, sondern

effektiv Wärmegewinne aufweisen. Auf der sonnenabgewandten Nordfassade sind konventionelle Fenster nach wie vor opaken Wänden unterlegen.

#### Vakuumisolierglas (VIG)

Ähnlich wie bei den opaken VIP-Dämmelementen bietet auch bei Verglasungen die Evakuierung des Scheibenzwischenraums ein enormes Verbesserungspotenzial bezüglich der Dämmwirkung (Faktor 2). Die technische Herausforderung bestand in der Entwicklung von Stützen, die in der Lage sind, die externe Last des Luftdrucks aufzunehmen. Außerdem musste ein ausreichend dichter und doch thermisch stabiler Randverbund entwickelt werden. Beide Elemente sollen nicht nennenswert zum Gesamtwärmetransport beitragen. Bei einer Gesamtstärke von nur 9 mm und einem Gewicht entsprechend dem der Zweifachverglasung wird ein  $U_g$ -Wert von  $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  erreicht. Aufgrund ihres Aufbaus mit nur einer low- $\epsilon$ -Schicht<sup>5</sup> weist das VIG auch eine sehr gute Lichtdurchlässigkeit bei hohen Wärmegewinnen auf. Auch auf der Nordfassade hat das VIG eine ausgeglichene Energiebilanz, d. h., solare Wärmegewinne und Transmissionswärmeverluste halten sich während der Heizperiode die Waage.

<sup>2</sup>  $U$  ist der Wärmedämmwert, das tiefgestellte f steht für frame

<sup>3</sup>  $U$  ist der Wärmedämmwert, das tiefgestellte g steht für Glas

<sup>4</sup>  $U$  ist der Wärmedämmwert, das tiefgestellte w steht für windows

<sup>5</sup>  $\epsilon$  steht für Emissionsgrad

### Transparente Wärmedämmungen

Die bei der transparenten Wärmedämmungen eingesetzten Dämmmaterialien zeichnen sich durch eine hohe Lichtdurchlässigkeit (Transparenz) aus. Je nach Anwendung steht der Gewinn blendfreien Lichtes bei niedrigem Gesamtenergiedurchlassgrad  $g^6$  (solare Umweltwand als Tageslichtsystem) oder die thermische Nutzung solarer Einstrahlung bei hohem Gesamtenergiedurchlassgrad (solare Wandheizung) im Vordergrund. Die Wärmeleitfähigkeit solcher Materialien in Form von Kapillar- oder Wabenstrukturen ist im Vergleich zu konventionellen Dämmmaterialien um einen Faktor 2 bis 2,5 größer. Durch den Einsatz nanostrukturierter Silica-Aerogele in granularer Form lässt sich die Wärmeleitfähigkeit auf etwa  $0,025 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  deutlich reduzieren. Die Solare Wandheizung weist in der Heizperiode deutlich mehr Energiegewinne als Wärmeverluste auf. In der praktischen Anwendung ist der sommerliche Überhitzungsschutz zu beachten.

Aktuelle Entwicklungen zielen auf hochwärmedämmende Verglasungen mit Konvektionsunterdrückung bei hohem  $g$ -Wert. (TIGI Ltd., Israel [2]), bei einem anderen Produkt in Kombination mit saisonalem Prismensonnenschutz und integriertem Latentwärmespeicher (GlassX AG, Zürich [3]). Dadurch werden  $U_g$ -Werte kleiner als  $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  erreicht. Eine weitere Neuentwicklung kombiniert den saisonalen Sonnenschutz über eine Prismierung in eine speziell optimierte Stegplatte (Prokuwa GmbH, Dortmund [4]). Dabei wird ein äußerst preisgünstiges Einfachsystem angestrebt.

### Schaltbare Wärmedämmung (SWD)

Einen alternativen Ansatz für den Überhitzungsschutz bietet die schaltbare Wärmedämmung. Sie basiert auf einem Vakuumisulationspaneel in der Ausführungsform mit Edelstahlhülle und relativ grobem Füllmaterial (Glasfasern). Zusätzlich ist in das VIP eine beheizbare Kapsel mit einem mit wasserstoffbeladenen Metallhydrid-getter (einer Art Wasserstoffspeicher) integriert. Durch Aufheizen des Getters wird eine geringe Menge des gut wärmeleitenden Wasserstoff-



Abbildung 3  
Blick durch ein  
Vakuumisoliertglas  
(Prototyp VIG) mit  
 $U_g = 0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Quelle: ZAE Bayern



Abbildung 4  
Projekt Alterswohnen  
in Domat/Ems mit  
solarer Umweltwand  
GlassXcrystal inkl.  
20 mm

<sup>6</sup> Der  $g$ -Wert gibt als Gesamtenergiedurchlassgrad an, wieviel Wärme durch ein Bauelement gelangt.

*Abbildung 5*  
*Latentspeicher und*  
*Prismen zum saison-*  
*alen Sonnenschutz*  
*mit  $U_g = 0,48 \text{ W/}$*   
*( $\text{m}^2\text{K}$ ),*  
*Architekt D. Schwarz,*  
*Domat/Ems, 2004*

Quelle: Fraunhofer ISE



gases freigesetzt und damit die Wärmeleitfähigkeit des Elementes um einen Faktor 100 erhöht. Aus einem hochwärmedämmenden wird ein gut wärmeleitendes Element. Der Prozess ist reversibel: lässt man die Getterkapsel abkühlen, so wird der Wasserstoff wieder vom Getter aufgenommen. Bei fehlender solarer Einstrahlung oder bei unerwünschtem Wärmeeintrag im Sommer bleibt das Paneel passiv und im hochwärmedämmenden Zustand. Lediglich in der Heizperiode bei gleichzeitigem Wärmebedarf und solarem Angebot wird das Paneel wärmeleitend geschaltet und die Wärme in das Gebäude hereingelassen. Die hierfür benötigte elektrische Leistung beträgt lediglich  $5 \text{ W/m}^2$ .

## Literatur

- [1] Gesamtverband Dämmstoffindustrie GDI, [www.gdi-daemmstoffe.de](http://www.gdi-daemmstoffe.de), privat communication
- [2] Die Firma Tigi Ltd. In Israel besitzt noch keine Webseite, Startup bisher ohne Produkt
- [3] [www.glassx.ch](http://www.glassx.ch)
- [4] [www.prokulit.de](http://www.prokulit.de)

# Neue Verglasungstechniken für Tageslicht und Wärmeschutz

## Einleitung

Architekten bauen heute hochtransparente Fassaden und beziehen Tageslicht in die Planung mit ein. Die hohen Anforderungen an Energieeffizienz sowie thermischen und visuellen Komfort lassen sich nur durch den differenzierten Umgang mit solarer Einstrahlung erfüllen. Neuartige mikrostrukturierte, zum Beispiel prismatisch strukturierte Lichtlenkelemente können das einfallende Sonnenlicht je nach Sonnenstand gezielt umlenken oder reflektieren. In Verglasungen integriert können solche Strukturen als Lichtlenkelemente eingesetzt werden, wobei sie Sonnenlicht tief ins Gebäude lenken oder sie werden als statisch-saisonal wirksame Sonnenschutzelemente eingesetzt und verbessern saisonal variabel den sommerlichen Wärmeschutz. Es wird angestrebt, die Strukturen zu miniaturisieren, um Material, Gewicht und Kosten zu sparen, die Absorption zu vermindern, ein flächig-homogenes Erscheinungsbildes zu erzielen und die Lichtlenkelemente einfacher in einen Glasverbund zu integrieren.

Am Fraunhofer ISE und dem ISFH werden die Anwendungsmöglichkeiten mikrostrukturierter Elemente in Verglasungen für einen saisonalen Sonnenschutz sowie zur Tageslichtlenkung untersucht und Strukturen für Lichtlenkelemente oder einen statisch-saisonalen Sonnenschutz entwickelt, hergestellt und optimiert. Gemeinsam mit Industriepartnern arbeiten wir an einer Umsetzung der Ideen in Produkte.

## Funktionsweise und Einsatzmöglichkeiten

Mikrostrukturierte Lichtlenkelemente können das einfallende Sonnenlicht gezielt umlenken oder reflektieren. Die Lichtlenkung und -reflexion in mikrostrukturierten Elementen basieren

auf Brechung und interner Totalreflexion in den Strukturen. Im Jahresverlauf gibt es verschiedene Anforderungen an den Sonnenschutz, bzw. die Lichtausbeute. Saisonal variable Transmissions-eigenschaften von Strukturen mit statischem Sonnenschutz werden durch die winkelabhängige Transmission und den saisonal variierenden Sonnenstand erzielt: Die saisonale Regelung übernimmt der sich ändernde Sonnenstand: während flach einfallende Strahlung im Winter und helles Zenithimmelslicht transmittiert wird, wird die hoch stehende Sommersonne reflektiert.

Bei Strukturen zur verbesserten Tageslichtnutzung wird die Richtung von transmittiertem Licht so verändert, dass das Licht tiefer in den Raum eindringt und auch weit vom Fenster entfernte Bereiche ausreichend mit Tageslicht versorgt. Da gleichzeitig die Blendung von Personen im Raum vermieden werden muss, gelingt dies z. B. dadurch, dass das Licht unter flachem Winkel nach oben an eine hell reflektierende Decke gelenkt wird. Zusätzlich zu den hier vorgestellten Arbeiten im Bereich der Verglasungsentwicklung werden am Fraunhofer ISE Verfahren für die Bewertung des visuellen Komforts entwickelt. Dies umfasst u. a. die Vermeidung von Blendung durch Tageslicht, Kontrastminderung bei der Bildschirmarbeit, Sichtkontakt sowie die Farbwirkung von Fassadensystemen im Tagesverlauf. Für die Blendung durch Tageslicht wurde ein neues Verfahren etabliert und validiert [4]. Die „daylight glare probability (DGP)“ gibt dabei die Wahrscheinlichkeit einer Störung durch Blendung an.

Da in der Regel durch prismatisch (mikro-) strukturierte Elemente keine oder nur eingeschränkte Durchsicht möglich ist, eignen sich die Strukturen für den Einsatz in Bereichen, wo klare Durchsicht nicht zwingend erforderlich ist. Dazu zählen Oberlichter, Verglasungen von Nutz- und Verkehrsbereichen sowie Anwendungen, bei

Dr. Peter Nitz  
Fraunhofer ISE  
[peter.nitz@ise.fraunhofer.de](mailto:peter.nitz@ise.fraunhofer.de)

Federico Giovannetti  
ISFH  
[f.giovannetti@isfh.de](mailto:f.giovannetti@isfh.de)

Dr. Helmut Weinläder  
ZAE Bayern  
[weinlaeder@zae.uni-wuerzburg.de](mailto:weinlaeder@zae.uni-wuerzburg.de)

Jan Wienold  
Fraunhofer ISE  
[j.wienold@ise.fraunhofer.de](mailto:j.wienold@ise.fraunhofer.de)

denen die Strukturen nur teilflächig eingesetzt werden und so zwischen den strukturierten Bereichen auch Bereiche mit klarer Durchsicht vorliegen. Besonders vorteilhaft ist der Einsatz der Elemente in oder vor transluzenten oder opaken Fassadenteilen wie z. B. in Modulen mit transparenter Wärmedämmung (TWD) vor opaken Wänden, die im Winter zur Raumheizung beitragen und durch die saisonale Verschattungsfunktion vor unerwünschter sommerlicher Erwärmung geschützt werden.

Bei der Integration in moderne Wärmeschutzverglasungen werden verschiedene Ansätze verfolgt. Eine mikrostrukturierte Folie kann freitragend als „dritte Schicht“ in eine Zweischeiben-Isolierverglasung eingespannt werden (*Abbildung 1b*) [1]. Dies hat Vorteile bei den thermischen Eigenschaften, die mit  $U_g$ -Werten von bis zu  $0,6 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  mit denen von Dreischeiben-Isolierverglasungen vergleichbar sind. Nachteilig ist die etwas geringere Transmission im Winter durch die zusätzlichen Grenzflächen. Alternativ kann die mikrostrukturierte Folie auch einseitig auf eine Glasscheibe auf laminiert sein (*Abbildung 1c*) [2]. Hier entsprechen die thermischen Eigenschaften denen einer Zweischeiben-Isolierverglasung mit einer (im Vergleich zur eingespannten Variante) etwas höheren Transmission im Winter.

## Herstellung der Strukturen

Mikrostrukturen für Sonnenschutz, Lichtlenkung und andere Anwendungen werden am Fraunhofer ISE interferenzlithografisch generiert. Dabei wird ein lichtempfindlicher Lack (Fotoresist) mit einem Laser-Interferogramm belichtet. Von den entwickelten Fotoresists werden Prägewerkzeuge hergestellt, mit denen sich die Strukturen in Mikroreplikationsverfahren zu potenziell geringen Kosten in großen Flächen replizieren lassen.

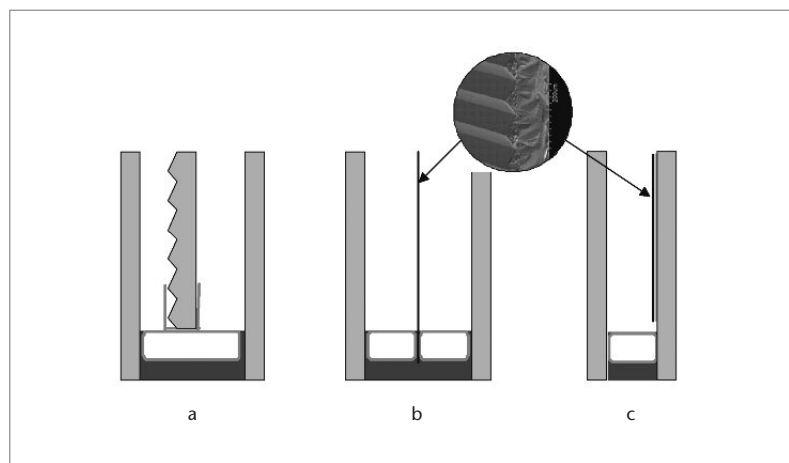
Alternativ zu interferenzlithografisch hergestellten Urformen werden Strukturen untersucht, die durch Ultrapräzisionsbearbeitung (z. B. Diamantfräsen oder -drehen) hergestellt wurden. Letztere lassen sich direkt auf eine Prägewalze schneiden, was bei der Replikation Vorteile bringt und die Abformung einer endlosen Folienrolle ohne Naht erlaubt.

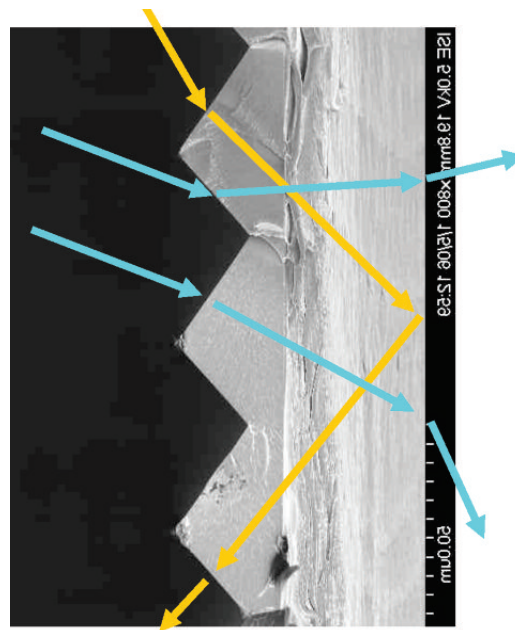
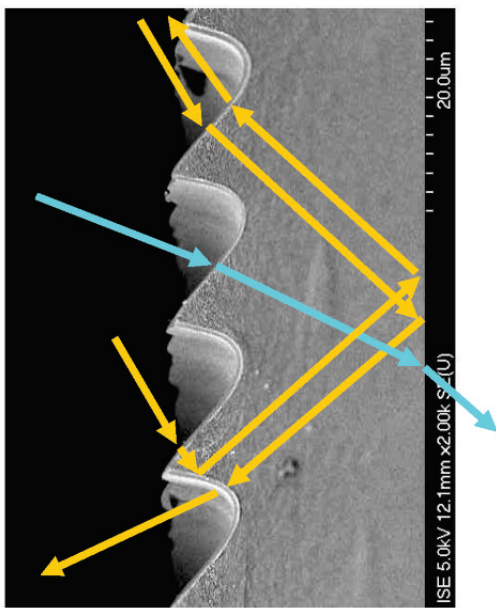
Bei beiden Herstellverfahren können die Strukturen zudem moduliert werden, was zu einer zusätzlichen Lichtstreuung führt. Diese reduziert mögliche Farbeffekte (Zerlegung des weißen Lichtes in die Spektralfarben durch die Brechung an den Prismen) und verringert hohe Leuchtdichten, die Blendung verursachen können.

Am ISFH werden Varianten untersucht, bei denen eine unmodulierte Mikrostruktur mit Licht streuenden Gläsern kombiniert wird, um

**Abbildung 1**  
Integration mikrostrukturerter Folien in Verglasungen:  
a) in Verglasungen integrierte makroskopische Prismenplatte (Stand der Technik)  
b) frei eingespannte Folie mit Licht lenker Mikrostruktur  
c) auf Glas auf laminierte strukturierte Folie

Quelle: ISFH und Fraunhofer ISE





**Abbildung 2**  
 Rasterelektronen-  
 mikroskopische  
 Aufnahmen von  
 Prismenstrukturen mit  
 saisonaler Sonnen-  
 schutzfunktion.  
 Links: interferenzlitho-  
 graphisch hergestellte  
 Struktur mit über-  
 modulierter Streuung,  
 die als Höhenmodula-  
 tion der Prismen sicht-  
 bar ist. Die Strahlen-  
 gänge im Sommer  
 (gelb) und im Winter  
 (blau) sind schema-  
 tisch dargestellt.  
 Rechts: mikromecha-  
 nisch hergestellte  
 Struktur, die auf einer  
 Größenskala moduliert  
 ist, die wesentlich  
 größer als die Struktur-  
 periode ist. Daher ist  
 die Modulation im Bild  
 nicht sichtbar.

Quelle: Fraunhofer ISE

dieselben Effekte zu erzielen. Die verschiedenen Herstell-Technologien sowie Varianten zur Kombination mit Lichtstreuung stehen zur Verfügung, werden getestet und können je nach den speziellen Anforderungen eingesetzt werden.

## Strukturbeispiele und Eigenschaften

Die nachfolgend gezeigten Strukturtypen stellen nur eine Auswahl der im Verglasungsbereich einsetzbaren Strukturen dar. Prinzipiell werden hier nur lineare, prismatische Strukturen betrachtet. *Abbildung 2* zeigt zwei Strukturtypen und schematisch ihre Funktion. Die Strukturen sind in unterschiedlichen Verfahren hergestellt, aber beide sind lichtstreuend moduliert.

Der an einem Verglasungs-Prototypen gemessene Transmissionsgrad für Licht und Solarstrahlung ist in *Abbildung 3* gezeigt. Je nach exakten Strukturparametern und Art der Integration in die Verglasung kann der Abfall der Transmission bzw. des g-Wertes mit dem Einfallswinkel und damit das saisonale „Schalten“ der Sonnenschutzfunktion noch steiler verlaufen als in *Abbildung 3* gezeigt [1]. Durch die integrierte low-ε-Schicht ist der Transmissionsgrad für Solarstrahlung deutlich geringer als der für sichtbares Licht.

Die in *Abbildung 2* gezeigten Strukturen werden in vertikalen Verglasungen eingesetzt. Als statisch-saisonaler Sonnenschutz in geneigten Verglasungen wie Dachverglasungen eignen sich Strukturen, die nahezu senkrecht auf die Struktur einfallendes Licht reflektieren. Für eine nähere Beschreibung dieser Systeme für geneigte Verglasungen sei auf die Literatur [2] verwiesen. Andere Strukturen für den Einsatz als Tageslichtlenksystem lenken das Licht nach oben und weisen im Idealfall für große Einfallswinkel eine höhere Transmission auf als eine Standardverglasung ohne Lichtlenkstruktur [3].

Bei der Miniaturisierung prismatischer Strukturen treten neben Reflexionen zwischen den Grenzflächen der Strukturen auch Beugungseffekte auf, die die erwünschte Funktion abschwächen oder aufheben können und zu Nebenbildern und Farbeffekten führen können. Diese Phänomene können in wellenoptischen Simulationen vorhergesagt und quantifiziert werden. Es zeigt sich, dass bei Größen (Strukturperioden) im Bereich von 50 – 100 µm die Beugungseffekte prismatischer Strukturen praktisch vernachlässigbar sind. In beiden *Abbildungen 1b und 1c* gezeigten Varianten wurden großformatige Verglasungs-Prototypen gefertigt und charakterisiert. Erste durchgeführte Stabilitätsuntersuchungen zeigen vielversprechende Ergebnisse. Derzeit sind aber noch weitere Tests

Abbildung 3

Transmissionsgrad für Solarstrahlung und sichtbares Licht einer Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung mit integrierter Sonnenschutzstruktur (wie in Abb. 2 rechts), aufgetragen in Abhängigkeit vom Einfallswinkel der Sonne.

Quelle: Fraunhofer ISE

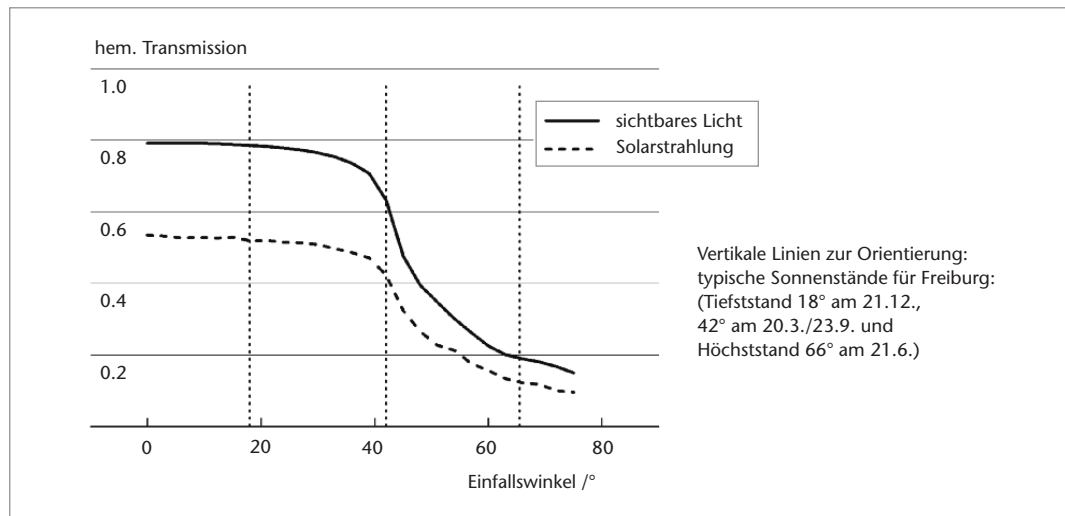
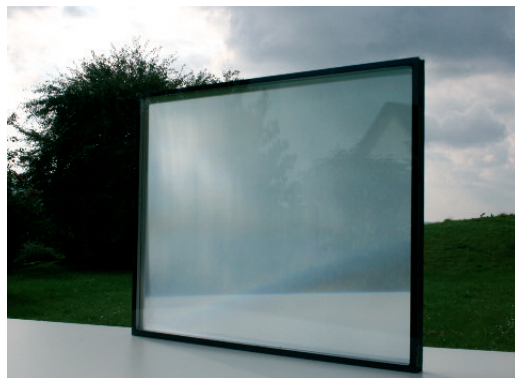


Abbildung 4

Prototypen großformatiger Isolierverglasungen mit mikrostrukturierten Folien mit saisonaler Sonnenschutzwirkung: links: Folie für Einsatz vor TWD-Modulen, Abmessungen 850x700 mm<sup>2</sup> (ISFH) rechts: laminierte Folie mit Lichtstreuung für den Einsatz im Oberlichtbereich, Abmessungen 1000x500 mm<sup>2</sup>

Quelle: Fraunhofer ISE



und Optimierungen notwendig, um die Arbeiten gemeinsam mit unseren Industriepartnern in verlässliche Produkte umzusetzen.

Die hier vorgestellten Arbeiten wurden vom Bundeswirtschaftsministerium (BMW) unter dem Kennzeichen 0327312 und von der DBU unter dem Kennzeichen 24673 gefördert.

## Literatur

- [1] F. Giovannetti, Karl H. C. Fischer, „Integration mikrostrukturierter Lichtlenkungssysteme in Verglasungen“, Tagungsband 2. Internationales Anwenderforum Energieeffizienz und Bestand, Staffelstein, 14./15.2.2008
- [2] P. Nitz, A. Gombert, B. Bläsi, A. Georg, J. Mick, Ch. Bühler, G. Walze, W. Hossfeld, „Sonnenschutz und Lichtlenkung durch mikrostrukturierte Oberflächen“, Tagungsband 9. Sympos. Innovative Lichttechnik in Gebäuden, Staffelstein, 23./24.1.2003, S. 103-108
- [3] P. Nitz, B. Bläsi, J. Mick, G. Walze, A. Gombert „Verglasungen mit mikrostrukturierten optisch-funktionalen Komponenten“, Tagungsband 13. Symposium Licht und Architektur, Staffelstein, 8./9.2.2007, S. 20-25
- [4] J. Wienold, J. Christoffersen, „Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras“, Energy and Buildings 38,7 (2006), 743-757

# Wärmespeicher als integrierte und nicht integrierte Bauteile

## Wärme- und Kältespeicherung

Raumklimatisierung ist ein bedeutender Faktor bei der Konzeption moderner Büro- und Wohngebäude, denn es besteht ein hohes Einsparpotenzial von Heiz- und Kühlenergie. Neben einer Optimierung der Wärmedämmung leistet der Einsatz von Wärme- und Kältespeichern einen erheblichen Beitrag zur Steigerung der Energieeffizienz im Gebäudebereich und zur Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes.

Wärme kann grundsätzlich in Form von sensibler oder latenter Wärme gespeichert werden:

- Man spricht von **sensibler Wärme**, wenn ein Material erwärmt wird, Wärme aufnimmt und seine Temperatur sich dadurch erhöht.
- Als **latente Wärme** wird die im Phasenübergang gespeicherte Wärmemenge bezeichnet: Gelangt man in den Bereich des Phasenübergangs fest–flüssig eines Materials, so erfolgt eine Wärmeaufnahme ohne Erhöhung der Temperatur. Um ein Material vollständig aufzuschmelzen wird eine Wärmemenge benötigt, die der so genannten Schmelzenthalpie entspricht. Unter Latentwärmespeicherung versteht man die Speicherung

von Wärme in einem Material, das einen Phasenübergang, z. B. fest – flüssig, erfährt (engl. Phase Change Material, PCM) (siehe linker Graph in *Abbildung 1*)

Die Speicherung von Energie in Form von latenter anstatt von sensibler Wärme hat einige Vorteile. Dadurch, dass die Wärmespeicherung nicht mit einer Temperaturerhöhung verbunden ist, sind auch die Stillstandsverluste geringer als bei einem sensiblen Speicher, der aufgrund seiner höheren Temperatur immer Wärme an die Umgebung verliert. Außerdem wird bei Latentwärmespeichermaterialien die in der Heizphase aufgenommene Energiemenge ohne Temperaturerhöhung gespeichert und kann zeitverzögert wieder an die Umgebung abgegeben werden. Dieses Prinzip kann zur Vermeidung von Temperaturspitzen in Gebäuden verwendet werden (siehe rechter Graph in *Abbildung 1*).

Für den Einsatz im Gebäudebereich eignen sich zwei Arten von PCMs, deren Schmelztemperatur im Raumtemperaturbereich liegt, nämlich Salzhydrate und Paraffine. Paraffine zeichnen sich vor allem durch ihre hohe Zyklenstabilität und ihre geringe Unterkühlung aus. Salzhydrate

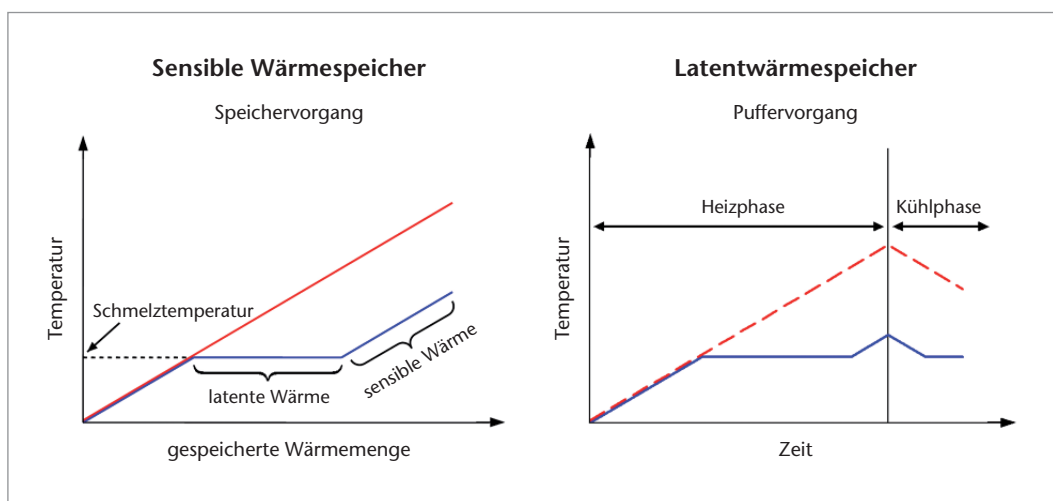
Dr. Jochen Manara  
ZAE Bayern  
manara@  
zae.uni-wuerzburg.de

Peter Schossig  
Fraunhofer ISE  
schossig@ise.fraunhofer.de

Dr. Harald Drück  
Universität Stuttgart  
Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)  
drueck@itw.uni-stuttgart.de

Henner Kerskes  
Universität Stuttgart  
Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)  
kerskes@itw.uni-stuttgart.de

Josef Jenni  
Jenni Energietechnik AG  
jennienergietechnik@  
livenet.ch



*Abbildung 1 Funktionsweise von sensiblen Wärmespeichern (links) und von Latentwärmespeichermaterialien (rechts). Die Speicherung in Form von latenter Wärme ist im Gegensatz zur Speicherung in Form von sensibler Wärme nicht mit einer Temperaturerhöhung verbunden.*

hingegen haben den Vorteil einer höheren Schmelzenthalpie und sind nicht brennbar. Darüber hinaus werden auch Wasserspeicher zur Wärmespeicherung sowie Eisspeicher in der Kälte- und Klimatechnik erfolgreich eingesetzt. Hier bietet beispielsweise die Kombination mit PCMs eine zusätzliche Optimierung. Alternativ kann eine Wärmespeicherung auch durch Adsorption erfolgen: Eine Möglichkeit ist hierbei die Nutzung von Zeolithen, die durch Wasseraufnahme bzw. -abgabe Wärme freisetzen bzw. speichern.

## Einsatz im Gebäudebereich zur Steigerung der Energieeffizienz

Raumklimatisierung kann über Aktiv-Klimatisierung durch Heizen und Kühlen realisiert werden. Doch speziell der Einsatz von fossilen Energieträgern sollte dabei reduziert werden, um den Ausstoß von Kohlendioxid zu vermindern. Zur Steigerung der Energieeffizienz bieten sich grundsätzlich zwei Alternativen bei der Verwendung von Wärme- und Kältespeichern an:

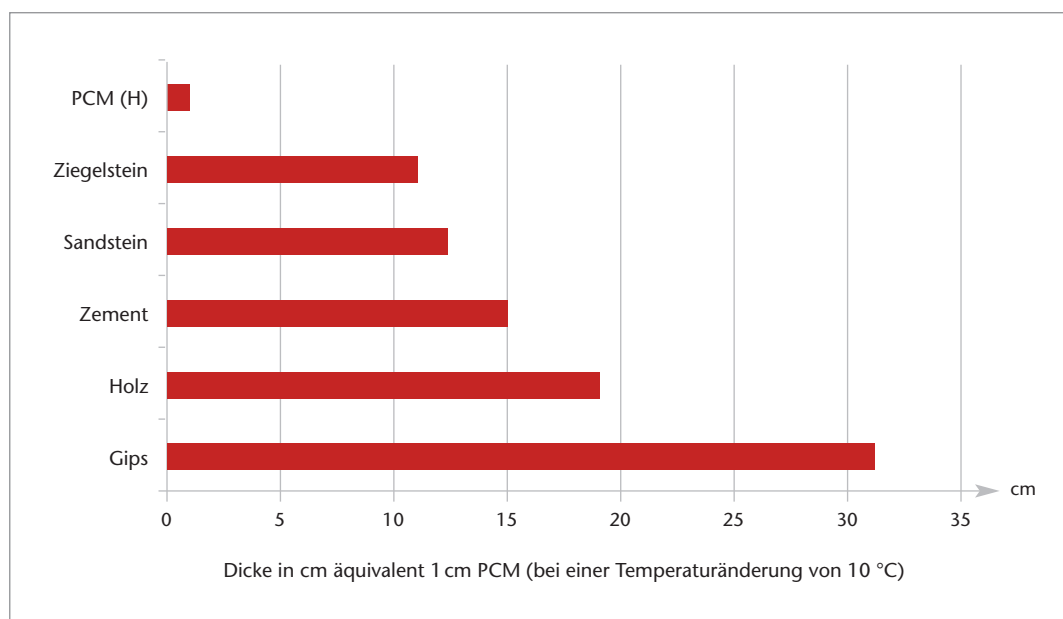
- a) Zum einen kann auf eine Passiv-Klimatisierung, wie in Gebäuden aus Stein oder Beton, zurückgegriffen werden, da die massiven Bauteilmassen beträchtliche Wärmemengen speichern bzw. puffern

können. Allerdings werden im modernen Trockenbau die Bauteilmassen ganz bewusst extrem verschlankt, so dass flexible wie kostengünstige Möglichkeiten zur Gebäudegestaltung gegeben sind. Um hier dennoch Passiv-Klimatisierung zu ermöglichen, sollen PCMs zum Einsatz kommen, die große Wärmemengen speichern und somit Temperaturspitzen abpuffern können (*Abbildung 2*).

- b) Zum anderen können Wärme- und Kältespeicher auch mit aktiven Systemen gekoppelt werden. Solche Systeme lassen beispielsweise die Nutzung von Energie niedrigen Exergiepotenzials zu, was auch einen effizienteren Einsatz regenerativer Energiequellen ermöglicht. Zusätzlich können durch die Speicher Lastspitzen verschoben werden, was eine kleinere Dimensionierung von Klimasystemen in Gebäuden oder alternativ eine Kappung der Lastspitzen im Versorgungsnetz ermöglicht.

**Abbildung 2**

PCM mit einer Dicke von 1 cm besitzt im Phasenübergang das gleiche Wärmespeichervermögen wie eine 11 cm dicke Ziegelsteinwand oder eine 19 cm dicke Holz wand bei einer Temperaturerhöhung von 10 °C.



## 1 Kompositmaterialien für Latentwärmespeicher

Zur Verwendung im Gebäudebereich stehen mehrere Materialien und Systeme für Latentwärmespeicher zur Verfügung. Dabei handelt es sich sowohl um Makroverkapselungen, die Abmessungen im Zentimeter- bis Dezimeterbereich aufweisen, als auch um Mikroverkapselungen mit Abmessungen im Mikrometerbereich. Speziell mikroverkapselte Paraffine können in Gipsputze, Gipskartonplatten oder andere Baumaterialien eingebracht werden. Durch eine Einbringung von PCM in Graphitplatten kann zusätzlich die Wärmeleitfähigkeit und damit die Be- und Entladezeit der Platten erhöht werden, was z. B. beim Einsatz in Klimasystemen interessant ist.

## 2 Wärme- und Kältespeicher mit Latentwärmespeichermaterialien

Gipsputze und Gipskartonplatten eignen sich als passive Speichermassen zur Erhöhung der thermischen Kapazität eines Leichtbaus auf das Niveau eines Massivbaus. Dies bewirkt eine Pufferung von Temperaturspitzen im Gebäude. Hierzu ist lediglich eine Nachtlüftung notwendig, um die tagsüber gespeicherte Wärme wieder abzuführen. Dieselbe Wirkungsweise wird mit passiven Kühldeckensystemen erzielt, die aus Gipskartonplatten mit Paraffinen bestehen oder aus PCM-Folienbeuteln mit Salzhydraten, die auf Metallkassettendecke aufgelegt werden. Solche Systeme erbringen Kühlleistungen von ca. 25 bis 40 W/m<sup>2</sup>. Abhängig von den gewählten Materialien ist eine aktive Hinterlüftung notwendig. Die nächtliche Regeneration des Systems erfolgt wiederum mit kühler Außenluft.

Wasserdurchströmte Kühldecken in abgehängter Bauweise erreichen höhere Kühlleistungen von rund 100 W/m<sup>2</sup> bei relativ kurzen Ansprechzeiten, erfordern dadurch jedoch oft hohe Spitzenlasten bei der Kältebereitstellung. Durch die Integration von PCM lässt sich tagsüber zu Zeiten der Kühllastspitzen eine rein passive Grundkühlleistung von etwa 40 W/m<sup>2</sup> sicherstellen. Während der Nacht wird das PCM dann durch kühles Wasser regeneriert. Auf diese Weise lassen sich tagsüber Lastspitzen vermeiden und die Kühllast wird vergleichmäßigt. Vor allem bei der Kältebereitstellung über Geot-

hermie (Erdsonden) ergeben sich hier Vorteile, da die Erdsonden auf die Spitzenlasten ausgelegt werden sollten.

Auch die Kombination von PCM mit innen liegenden Sonnenschutzsystemen verfügt über Potenzial. Die innen liegenden Systeme bieten einige Vorteile gegenüber außen liegenden Systemen (keine Windlasten, kostengünstig) und werden daher großflächig eingesetzt. Sie weisen jedoch im Vergleich zu außen liegenden Systemen einen höheren Energieeintrag auf. Zusätzlich werden sie bei Sonneneinstrahlung stark erwärmt, so dass sich Raumnutzer in Fensternähe zusätzlich durch die Wärmeabstrahlung der Lamellen thermisch unbehaglich fühlen. Abhilfe schafft hier ein innen liegender Sonnenschutz mit PCM. Vorteile sind geringere Jalousietemperaturen und ein reduzierter Wärmeeintrag in den Raum. Die PCM-Menge ist so ausgelegt, dass man einen sonnigen Sommertag auf der Südfassade komplett abpuffern kann. Die Regeneration des PCM erfolgt, wie bei den anderen Systemen, über Nacht durch kühle Außenluft.

Auch zum Heizen von Gebäuden können Latentwärmespeichermaterialien vorteilhaft eingesetzt werden. Als Beispiele hierfür sind solare Fassadenelemente (solare Wandheizung) sowie Solar-Luft-Kollektoren zu nennen. In beiden Fällen wird die Sonnenenergie in Form von Wärmeenergie im PCM gespeichert und zeitverzögert wieder an den Innenraum abgegeben. Die Einspeicherung erfolgt in Zeiten hoher solarer Einstrahlung, d. h. wenn ein Überangebot vorhanden ist, während die Freisetzung der Energie in Zeiten geringer oder fehlender solarer Einstrahlung erfolgt, wenn Wärmeenergie benötigt wird. Ebenso können Klimageräte mit PCMs ausgerüstet werden, um deren Performance entsprechend zu steigern.

## 3 Wärmespeicher durch Adsorption

Neben der Wärmespeicherung in einem Phasenübergang ist auch die Wärmespeicherung durch einen Adsorptionsprozess möglich. Hier stehen mehrere Systeme zur Verfügung. Bei Zeolithen wird die Ad- und Desorption von Wasser genutzt. Darüber hinaus können Ad- bzw. Absorptionsprozesse in einem entsprechenden System auch zur solaren Kühlung verwendet

werden. Dies gewährleistet die Bereitstellung von Kühlenergie genau dann, wenn sie benötigt wird, nämlich in Zeiten hoher solarer Einstrahlung.

#### 4 Wasserspeicher im Haus

Warmwasserspeicher in konventionellen Heizungssystemen tragen ebenfalls zur Steigerung der Energieeffizienz bei, indem sie z.B. eine optimale Nutzung von Solarthermieanlagen erlauben. PCMs können zur Optimierung solcher Warmwasserspeicher durch eine Reduktion der Stillstandsverluste und eine Verminderung des Speichervolumens beitragen.

Außerdem können Wasserspeicher auch zur Kühlung von Gebäuden genutzt werden. So kann beispielsweise Regenwasser auf dem Gebäudedach gesammelt und in eine Zisterne eingeleitet werden. Dieses Wasser kann zur Kühlung des Gebäudes verwendet werden und erwärmt sich dabei. Zur Rückkühlung wird das Regenwasser während der Nacht auf das Dach des Gebäudes gepumpt und dort nach flächiger Verteilung beim Abfließen durch Wärmeabgabe über Strahlungsaustausch mit der Atmosphäre, Konvektion und (teilweiser) Verdunstung idealerweise knapp unter Taupunkttemperatur abgekühlt. Über die Regenrinne wird das abgekühlte Wasser durch einen Filter wieder der Zisterne zugeführt, so dass es erneut zur Kühlung des Gebäudes zur Verfügung steht. Neben dem geschilderten offenen Kreislauf sind auch geschlossene Systeme mit einer Kollektorfläche geeignet, bei denen keine Verdunstung und damit kein Wasserverlust auftritt.

## Forschungsbedarf

Forschungsbedarf besteht unter anderem hinsichtlich einer messtechnisch fundierten Erfassung der Eigenschaften von Systemen mit PCMs sowie einer Validierung von Simulationstools und der Erstellung fundierter Auslegungsrichtlinien. Dazu werden aktuell Demonstrationsprojekte durchgeführt. Die Rückkopplung der Gebäudenutzer gibt außerdem unmittelbare Hinweise zur Akzeptanz der Produkte. Anhand von gemessenen Lastverschiebungen können Energieversorger außerdem eine energie-wirtschaftliche Analyse durchführen, um die Auswirkungen eines breiten Einsatzes von PCM-Systemen auf die Kraftwerks- und Netzkapazitäten zu beurteilen.

Darüber hinaus ist eine Weiterentwicklung der Kompositmaterialien notwendig. Derzeit werden beispielsweise Techniken zur Ummantelung von Salzhydraten entwickelt, mit denen auslaufsichere und wasserdampfundurchlässige Kapseln im Millimeterbereich herstellbar sein sollen. Diese können dann als nicht brennbare Materialien in Baustoffe bzw. -platten eingebracht werden, sowie als Schüttung in luft- oder wasserdurchströmten Klimageräten Verwendung finden.

Auch an der Entwicklung und Optimierung von pumpbaren Systemen bzw. Slurries auf Paraffin- und Salzhydratbasis wird gearbeitet.

Zur Sicherstellung definierter Eigenschaften der kommerziell erhältlichen PCM-Produkte, wie Schmelztemperatur und -enthalpie sowie Wärmeleitfähigkeit, wurde die PCM-Gütegemeinschaft ins Leben gerufen, die wesentliche Gütekriterien festlegt.