

Peter Schossig und Thomas Haussmann

Wärme- und Kältespeicherung – Stand der Technik und Ausblicke

Ungefähr die Hälfte des Endenergieverbrauches in Europa entfällt auf Wärme. Thermische Energiespeicher stellen dabei einen wesentlichen Baustein dar, um den Anteil erneuerbarer Energien an der Energieversorgung zu erhöhen und die Energieeffizienz konventioneller Systeme zu verbessern. Je nach Anwendungsfall kommen dabei unterschiedlichste Technologien zum Einsatz, wobei nach wie vor der Einsatz von Wasser als konventionelles Speichermaterial überwiegt. Aber auch hier finden Weiterentwicklungen und Verbesserungen statt. In Zukunft können durch intensive Materialforschung vermehrt Systeme realisiert werden, die sich anderer Speicherprinzipien bedienen und Speicher größerer Energiedichte sowie höherer Effizienz ermöglichen.

1. Wärme- und Kältespeicherung in Gebäuden

Knapp die Hälfte des Endenergiebedarfes der EU wird in Form von Wärme benötigt, davon wiederum etwa 80 % bei Temperaturen unterhalb von 250 °C. Effiziente Wärmeerzeugung und Nutzung erneuerbarer Quellen zur Deckung dieses Wärmebedarfes spielen deshalb eine zentrale Rolle beim Erreichen der Klimaziele der EU.

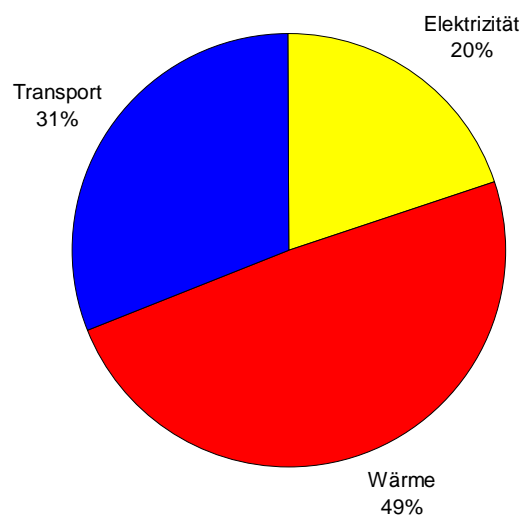


Abb. 1: Verteilung des Endenergiebedarfes innerhalb der EU. Quelle: ESTIF

Da insbesondere erneuerbare Energien nicht immer zum benötigten Zeitpunkt zur Verfügung stehen, kommt der Wärmespeicherung eine Schlüsselfunktion zu, beispielsweise um Nachtkälte für Kühlung am Tag zu konservieren oder Wärmeüberschüsse am Tag in die Nacht zu verschieben. Auch konventionelle Kältetechnik kann von Speichern profitieren, indem z.B. die Kälteerzeugung in kühlere Nachtstunden verschoben wird, was zu Effizienzsteigerungen, besserer Wirtschaftlichkeit, aber auch konstanteren Stromnetzbelastungen (Netzausfälle im Sommer durch Klima-Splittergeräte) führt. Wärmespeicherung ermöglicht somit, den Wärmebedarf mit einem höheren Anteil erneuerbarer Energien oder aber auch effizienter aus fossilen Energiequellen zu decken. Je nachdem zu welchem Zweck und aus welcher Quelle die Wärme gespeichert werden soll, ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an den Aufbau des Speichers.

2. Charakteristik von Wärmespeichern

Die wichtigsten Kenngrößen eines Wärmespeichers sind aus Nutzersicht die Temperatur – im Unterschied zu anderen Energiespeichern – bei der dem Speicher Wärme entnommen werden soll, sowie die energetische Speichergröße, die sich entweder durch den Energieinhalt oder in der Nenn-Entladezeit ausdrücken lässt. Wesentlich für die Wahl der optimalen Speichertechnologie ist weiterhin die zu erwartende mittlere Speicherdauer, über die die Wärme gespeichert werden soll, die von Sekunden – für technische Anwendungen – bis hin zu Monaten – für saisonale Speicher – reichen kann.

Die wichtigsten Anforderungen an einen Wärmespeicher sind:

- hohe Energiedichte, um ein möglichst geringes Raumvolumen zu beanspruchen;
- ausreichend hohe Lade- und Entladeleistung, um die vom Erzeuger bereitgestellte bzw. vom Verbraucher abgefragte Wärmeleistung aufnehmen bzw. abgeben zu können;
- geringe Stillstandsverluste und somit ein hoher energetischer Wirkungsgrad (geringe Stillstandsverluste sind insbesondere bei Speichern relevant, die die Wärme über lange Zeit zwischenspeichern müssen);
- möglichst gleich hohe Temperatur bei Speicherentladung wie bei Speicherladung.

Weitere Kennzeichen sind eine hohe Zyklen- und Langzeitstabilität, eine gute Handhabbarkeit, Umweltverträglichkeit und niedrige Kosten.

Es gibt allerdings nicht nur Wärmespeicher, deren Nutzen in der Wärmeabgabe besteht, sondern bei vielen Anwendungen besteht der Hauptnutzen in der Wärmeaufnahme, z.B. bei Kältespeichern, die gezielt überschüssige Wärme aus einem Gebäude aufnehmen sollen. Im Wesentlichen sind vier verschiedene Arten der Wärmespeicherung bekannt:

- sensible Wärmespeicher,
- latente Wärmespeicher,
- Sorptionsspeicher,
- chemische Speicher.

In Abbildung 2 sind diese sich in ihren thermodynamischen Eigenschaften unterscheidenden Formen schematisch dargestellt; dabei steigt die theoretisch erreichbare Speicherdichte von links nach rechts an. Bedauerlicherweise steigt auch der Aufwand zur Nutzung des jeweiligen Speicherprinzips in diese Richtung an, so dass die wissenschaftliche Kenntnis und vor allem die Nutzung am Markt von links nach rechts signifikant fällt.

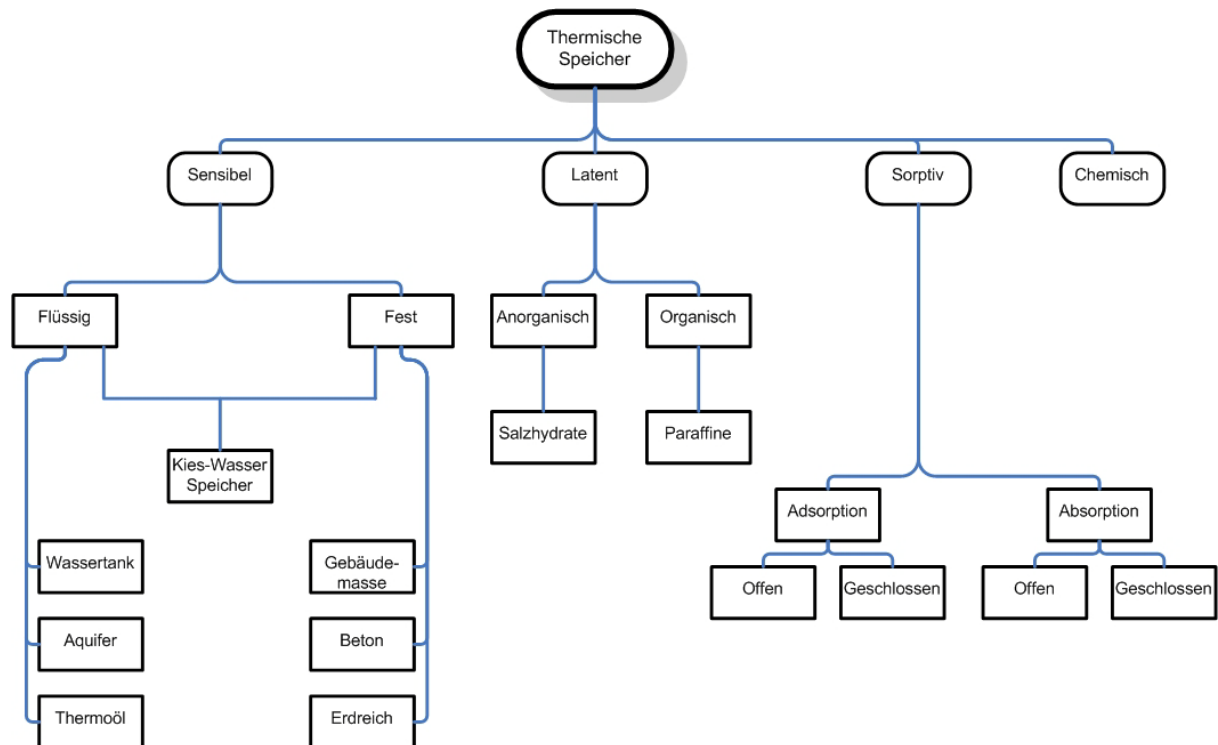


Abb. 2: Schematischer Überblick über die unterschiedlichen Formen der Wärme- und Kältespeicherung mit einigen Beispielen

3. Speicherung sensibler Wärme

Die mit großem Abstand am meisten genutzte Technologie zur Speicherung von Wärme stellt der klassische, sich sensibel erwärmende Wassertank dar. Die Wärmeaufnahme und Abgabe erfolgt proportional zu einer Temperaturänderung des Speichermaterials. Diese Form wird wegen ihrer fühlbaren Zustandsänderung auch sensible Wärmespeicherung genannt. Allein für thermische Solaranlagen wurden in Europa im Jahr 2008 geschätzte 150.000 m³ Wasserspeicher neu verbaut. Hinzu kommen unzählige Wasserspeicher in konventionellen Heizungssystemen und Kältespeicher, die dazu beitragen, fossile Brennstoffe effizienter zu nutzen.

Weitere Beispiele für sensible Wärmespeicher aus dem Bereich der Gebäudetechnik sind Brauchwasserspeicher und Heizungspufferspeicher, z.B. in Verbindung mit thermischen Solaranlagen, Biomassekesseln oder kleinen Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung.

Selbst wenn diese Technik seit Jahrtausenden erfolgreich genutzt wird, finden auch hier noch Weiterentwicklungen statt, hauptsächlich im Bereich der Be- und Entladung oder vermöge neuer neuer Materialien, z.B. bessere Dämmstoffe. Ein Beispiel sind drucklose, quadratische Speicher, die eine bessere Raumausnutzung ermöglichen.

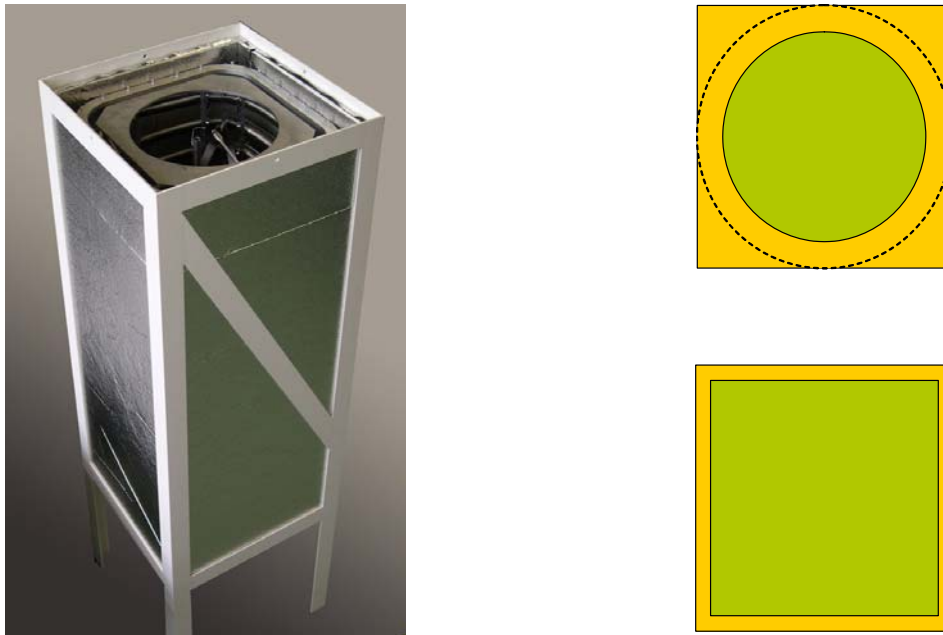


Abb. 3: Beispiel eines quadratischen, mit Vakuumisulationspanelen gedämmten Wasserspeichers. Durch die effizientere und damit dünnere Dämmung sowie den günstigeren Grundriss ist eine deutlich bessere Platzausnutzung gegeben. Quelle: ECN Holland

Neben der häufig genutzten Wärmespeicherung über einen bzw. einige Tage werden heute Langzeitspeicher zur saisonalen Wärmespeicherung von Solarenergie in Pilotvorhaben untersucht. Dabei kommen entweder große Wasserspeicher – z.B. in der Form von Erdbeckenspeichern – zur Anwendung oder Speicher, die das Erdreich als Speichermaterial verwenden. Bei letzteren wird eine Vielzahl von Erdsonden verwendet, die im Sommer das Erdreich „solar“ beladen und in der Heizperiode entladen. Die Wärme wird entweder direkt oder indirekt unter Nutzung einer Wärmepumpe genutzt. Ca. 15 verschiedene saisonale Speicher unterschiedlicher Bauart wurden im Rahmen eines vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) geförderten Programms (Solarthermie 2000+) in den letzten Jahren realisiert und versorgen teilweise ganze Neubausiedlungen.

Da insbesondere bei der Langzeitspeicherung von Wärme die Verluste durch die Speicherwand dominieren ist es – aus grundsätzlichen geometrischen Überlegungen ableitbar – schwierig, sensible Langzeitspeicher im Kleinen, sprich: für Einfamilienhäuser, zu realisieren. Der Energieinhalt eines Speichers wird durch sein Volumen definiert und dieses wächst mit der dritten Potenz seiner Ausdehnung; die Verluste erhöhen sich jedoch nur analog zur Hüllfläche und damit nur mit der zweiten Potenz der Ausdehnung. Bei großen Speichern ist also bei gleicher Dämmung der Langzeitverlust prozentual deutlich geringer.

Allerdings sind die ökonomischen Herausforderungen an einem im Wesentlichen nur einmal im Jahr genutzten saisonalen Speicher nach wie vor hoch, auch wenn mit jeder neuen Realisierung die Wirtschaftlichkeit verbessert werden konnte. Langzeitwärmespeicher, die auf anderen Speichermaterialien als Wasser oder Erdreich beruhen, sind jedoch bisher noch nicht wirtschaftlich zu betreiben.

Neben zentralen Wasserspeichern werden auch dezentral in Gebäuden die Baustoffe als Wärmespeicher eingesetzt. Aufgrund der großen Masse der Baustoffe können sensibel in kleinen Tem-

peraturänderungen bereits große Wärmemengen gespeichert (z.B. Betonwände/-decken) werden. Die Gebäudemasse wird entweder passiv (Be- und Entladung erfolgt über die Raumluft) oder auch häufig in Kombination mit wasser- oder luftgestützten Systemen eingesetzt. Beispiele sind Fußbodenheizungssysteme, Betonkernaktivierung oder Hypokaustensysteme. Wesentlicher Vorteil dieser dezentralen Wärmespeicher ist, dass der Wärmeaustausch mit dem Raum passiv ohne Energieaufwand und automatisch, dem Bedarf entsprechend, erfolgen kann; die Regenerierung erfolgt dann meist aktiv.

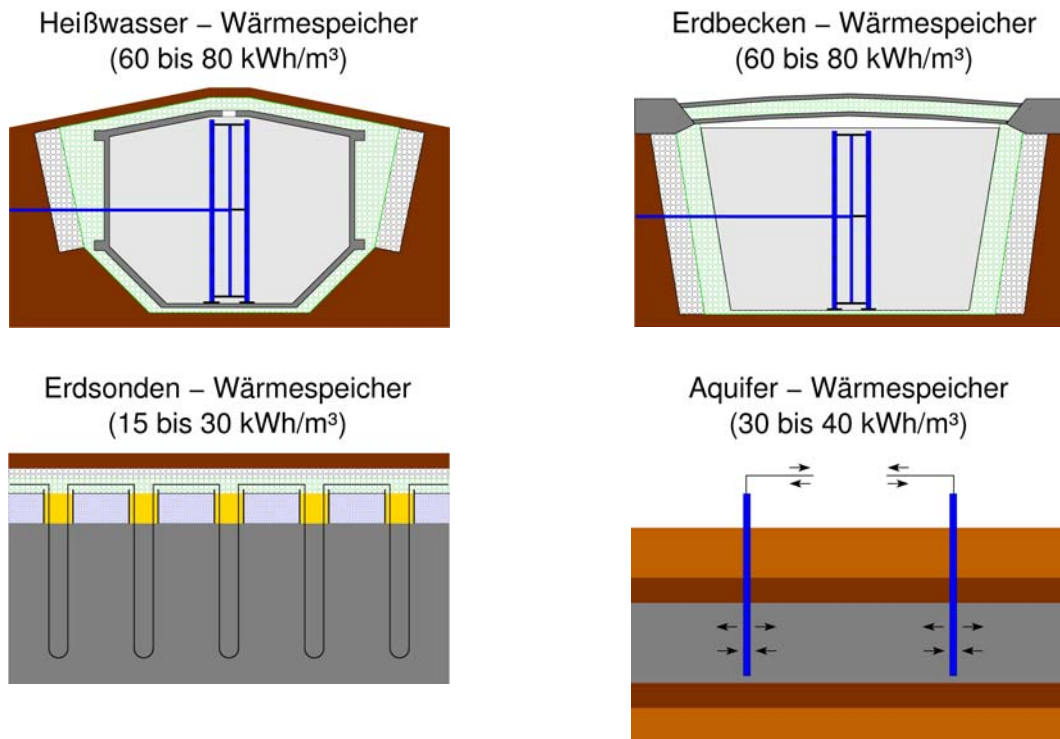


Abb. 4: Unterschiedliche Bauformen saisonaler Wärmespeicher. Quelle: Solites, Mangold



Abb. 5: Bau einer Geschossdecke mit Betonkernaktivierung

4. Speicherung latenter Wärme

Im Unterschied zur sensiblen (fühlbaren) Form der Wärmespeicherung, führt bei der latenten Wärmespeicherung die eingespeicherte Energie zur Änderung eines Aggregatzustands eines Speichermediums, ohne die Temperatur zu erhöhen. Bekannt ist diese Form der Wärmespeicherung bei Eiswürfeln in Wasser: Sie halten das Wasser solange bei 0 °C, bis sie vollständig geschmolzen sind. Die Energien beim Phasenwechsel sind sehr hoch: Die Energiemenge, die das Eis zum Schmelzen brachte, hätte ausgereicht, um eine entsprechende Menge Wasser von 0 °C auf 80 °C zu erwärmen.

Der Effekt der nahezu isothermen Wärmespeicherung führt, verglichen mit sensiblen Speichern, zum einen zu geringeren Verlusten des Speichers an die Umgebung – bei niedrigeren Temperaturen wird die gleiche Wärmemenge gespeichert – und hilft zum anderen bei der Nutzung von Wärmequellen, deren maximales Temperaturniveau in der Nähe der benötigten Nutztemperatur liegt. Dies ermöglicht z.B. die bessere Nutzung von Umweltwärmequellen, bei denen aufgrund der geringen nutzbaren Temperaturspreizung sensible Speicher sehr groß wären. Ein weitere Vorteil sind die relativ hohen Speicherdichten in kleinen Temperaturspreizungen, die ein reduziertes Speichervolumen ermöglichen können.

In der Praxis wird vor allem der Phasenübergang fest/flüssig genutzt, da beim Phasenübergang flüssig/gasförmig große Volumen- oder Druckänderungen des Speichermediums auftreten. Da die Vorteile dieses Speicherprinzips offensichtlich sind, wird seit den 40er Jahren des vergangenen Jahrhunderts intensiv an diesem Thema geforscht, jedoch haben erst wenige Produkte ihren Weg auf den Markt gefunden. Hauptprobleme sind die Langzeitstabilität der PCMs (phase change materials, Latentwärmespeichermaterial), die notwendige Verkapselung und die im Vergleich zu sensiblen Speichermaterialien (Wasser) hohen Preise.

Wasser/Eis-Gemische als PCM bei 0 °C haben sich vor allem im asiatischen Raum für die Gebäudeklimatisierung verbreitet. Insbesondere in Japan mit hohem Atomstromanteil, der nur langsam regelbar und dadurch besonders nachts günstig ist, wird der überschüssige Strom genutzt, um Eis zu erzeugen. Tagsüber wird das Eis dann für den Betrieb von Klimaanlage eingesetzt. Aufgrund der kleinen nutzbaren Temperaturspreizung müssten rein sensible Kältespeicher noch weiter abgekühlt oder deutlich größer ausgeführt werden, um den gleichen Wärmeinhalt zu speichern.

Seit Mitte der 90er Jahre wurden insbesondere in Europa die Forschung intensiviert und Produkte auf den Markt gebracht; allerdings sind bislang erst Nischen erfolgreich besetzt, so insbesondere Transportverpackungen, Komfortprodukte (z.B. Kleidung) und seit etwa dem Jahr 2000 auch vermehrt Bauprodukte.

Eine große Anzahl an PCM-Materialklassen sind bekannt, die einen weiten Temperaturbereich abdecken. Eingesetzt werden aufgrund der nutzbaren Temperaturen bisher hauptsächlich jedoch zwei Materialklassen: organische Paraffine und anorganische Salzhydrate. Eine Schlüsseltechnologie auf dem Schritt zur Anwendung stellt dabei die Mikroverkapselung dar, die bisher nur mit Paraffinen ausreichend gut realisierbar ist und die eine einfache Integration von PCM in die unterschiedlichsten Produkte, vom Kleidungsstück bis zum Gipsputz erlaubt.

In Gebäuden werden PCMs eingesetzt, um die thermische Wärmespeicherfähigkeit zu erhöhen. Hierdurch erwärmt sich das Gebäude im Tagesverlauf deutlich langsamer, was zu einem reduzierten Energiebedarf für die Kühlung führt oder im besten Fall diesen vollständig ersetzt. Die überschüssige Wärme wird im Schmelzprozess des PCMs gespeichert und erst wieder bei Unterschreiten der Schmelztemperatur freigegeben. Der gesamte Energieaustausch mit dem Raum

erfolgt passiv und bedarf nicht des Einsatzes von Hilfsenergie oder Steuerungstechnik. Um die Regenerierung des Speichers in der Nacht zu gewährleisten, muss jedoch meist auf eine mechanische Lüftung zurückgegriffen werden. Durch die vergleichsweise hohe Energiedichte werden die Gebäudemasse und das zusätzlich notwendige Volumen nur geringfügig vergrößert, wodurch die Flexibilität und weitere Vorteile leichter Baustoffe erhalten bleiben. PCMs erlauben einen verbesserten Nutzerkomfort, bei reduziertem oder zumindest gleich bleibendem Energieaufwand.

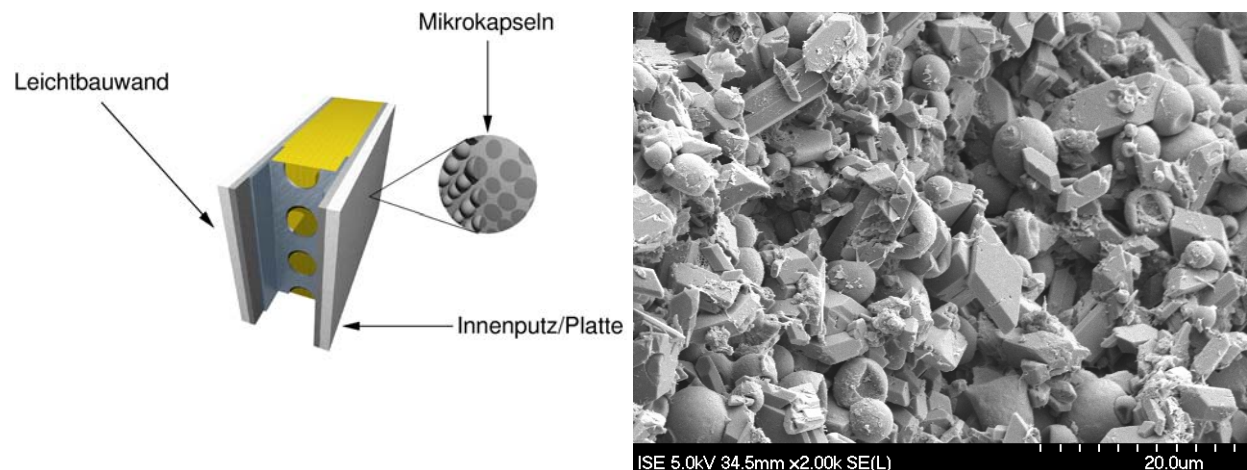


Abb. 6: Schematische Darstellung und Rasterelektronenmikroskopaufnahme von Paraffinmikrokapseln in Baustoffen

Eine Vielzahl solcher Baustoffe von Porenbetonsteinen, Gipsprodukten bis hin zu Lehmbaustoffen sind bereits entwickelt und marktverfügbar. Auch konnten bereits einige Demonstrationsprojekte und kommerzielle Objekte in den letzten Jahren realisiert werden. Messungen in den Gebäuden haben gezeigt, dass Temperaturreduzierungen von bis zu 4 K durchaus möglich sind, was jedoch individuell von den Voraussetzungen in den Gebäuden abhängig ist.

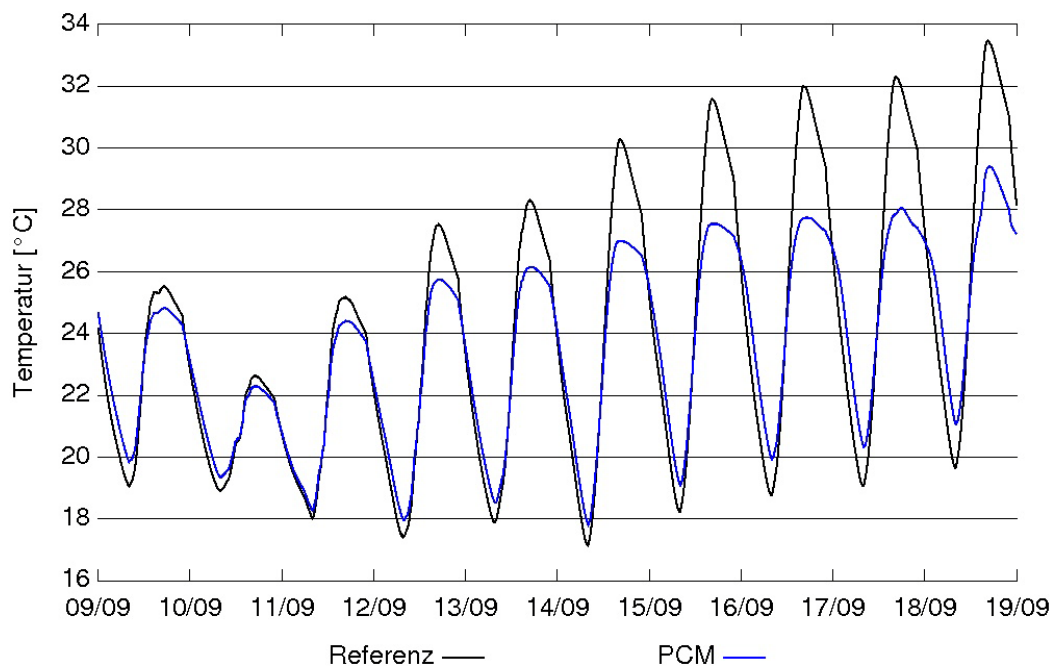


Abb. 7: Wandtemperaturverläufe eines Referenzraumes und eines mit PCM-Baustoffen (Gipsputz 1,5 cm) ausgestatteten Raumes mit außenliegender Verschattung und Nachtlüftung

Der nächste Schritt, der bereits in mehreren Forschungsprojekten untersucht wurde, ist der Einsatz von PCM-Baustoffen oder Verbundmaterialien in aktiven, steuerbaren Kühlungssystemen. Beispielsweise wurden dezentrale Lüftungsgeräte für die Fassadenintegration, aber auch Kühldecken, basierend auf PCM-Baustoffen, entwickelt. Diese aktiven Systeme erlauben die Nutzung größerer PCM-Speicher, eine garantierte Vermeidung von Überhitzung und die Nutzung weiterer Wärmequellen- und -senken neben der Nachtluft. Hier konnten bereits Demonstrationsanlagen und erste kommerzielle Projekte realisiert werden. In einem Demonstrationsprojekt, in dem in drei Gebäuden drei unterschiedliche Anlagenkonzepte realisiert wurden konnte gezeigt werden, dass durch das PCM aktive Kühlung am Tag vermieden werden kann und erst in der Nacht eine Rückkühlung erforderlich ist. Abhängig von der angeschlossenen Kältequelle ergeben sich hieraus verschiedene Vorteile. Die klassische Kompressionskälte profitiert dadurch, dass sie erst bei niedrigeren Außentemperaturen betrieben werden muss; regenerative Energiequellen, deren Leistung teuer aber deren Betriebskosten relativ gering sind (z.B. Erdsonden), profitieren dadurch, dass Wärme und Kälte über 24 Stunden genutzt und akkumuliert werden können. In einer weiteren Anlage wurde die gekühlte Fläche vergrößert, indem nachts überschüssige Kälte in PCM-Kühldecken eingespeichert und tagsüber direkt in weitere Räume eingebracht wird.

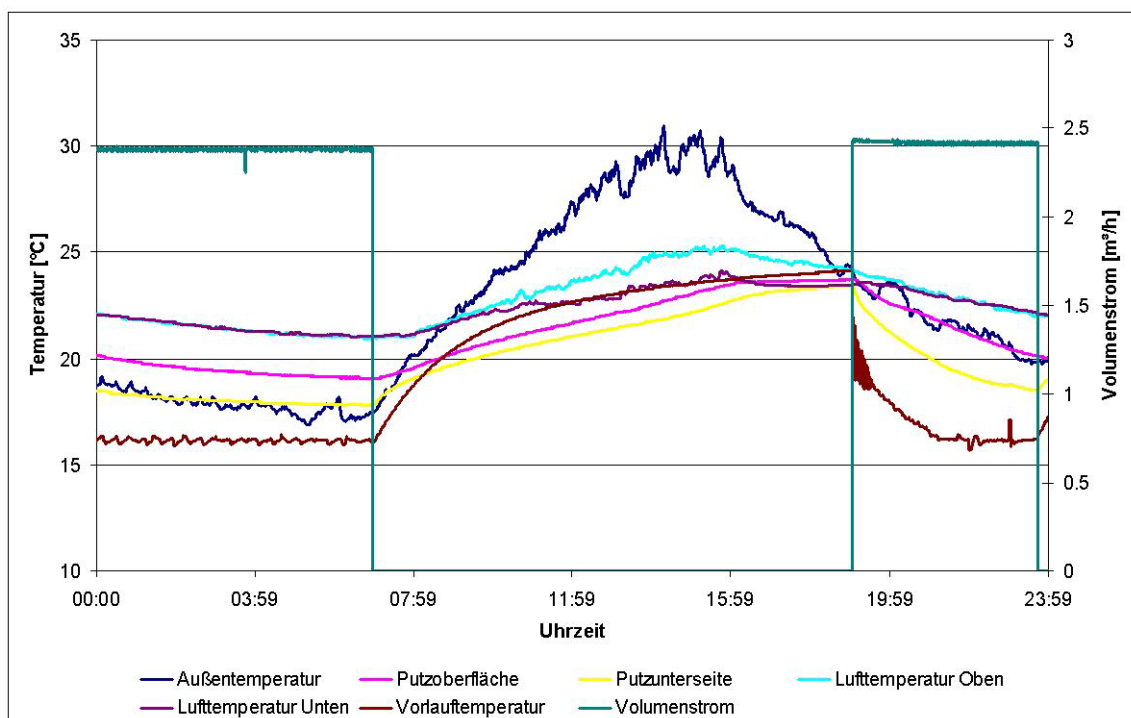


Abb. 8: Kühlbetrieb einer PCM-Kühldecke über einen Tag. Tagsüber wird der Raum gekühlt, indem überschüssige Wärme im PCM gespeichert wird. Nachts erfolgt dann eine aktive Rückkühlung über Kapillarrohrmatten, die mit Wasser durchströmt werden.

In den meisten Fällen wurde PCM bisher für die Vermeidung von Überhitzung in Gebäuden eingesetzt. Ein neuer Ansatz, der in einem aktuellen Forschungsprojekt untersucht wird, ist der Einsatz eines zentralen PCM-Speichers in einer Lüftungsanlage sowohl zum Vorheizen, als auch zum Vorkühlen der Lüftströme, die anschließend von einer konventionellen Klimaanlage temperiert wird. Je nach Sommer- oder Winterfall wird entweder Abwärme im PCM-Speicher oder Nachtkälte eingespeichert. Die nachgeschaltete Klimaanlage muss somit deutlich weniger Energie aufwenden, um die gewünschte Zieltemperatur zu erreichen. Aufgrund der größeren Energiedichte

und der Brennbarkeit von Paraffinen wird hier ein makroverkapseltes Salzhydrath in Kombination mit einem Graphitschaum zur Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit eingesetzt.

Ein weiteres Themengebiet ist der Einsatz von PCM in Wärmeträgerflüssigkeiten. Durch die Zugabe eines PCMs kann die Wärmekapazität in einem kleinen, definierten Temperaturbereich deutlich vergrößert werden. Insbesondere in Kälteverteilungsnetzen mit üblichen Temperaturspreizungen, z.B. 6/12 °C, ergeben sich deutliche Vorteile. So kann bei gleichbleibendem Volumenstrom im gleichen Netz mehr Wärme transportiert werden oder zum Transport der gleichen Wärmemenge kann der Volumenstrom reduziert werden. Außerdem bietet sich die Möglichkeit, die gleiche Wärmemenge bei niedrigeren Temperaturen zu transportieren, wodurch Verluste beim Transport reduziert werden. Wärmeträgerflüssigkeiten werden auch als PCS bezeichnet (phase change slurries) und sind für das PCM Wasser/Eis am weitesten erforscht. Wasser/Eis-Slurries sind jedoch oft ungünstig, da hier die Wärme bei 0 °C transportiert wird. Übliche Kälte-netze arbeiten jedoch bei anderen Temperaturen, daher wird zurzeit an PCS für diese Temperaturbereiche geforscht.

5. Sorptionspeicher

Bei einem Sorptionspeicher macht man sich die große Energie, die in einem Verdampfungsprozess steckt, sowie die Bindungsenergie bei der Anlagerung bzw. Absorption von Molekülen zu Nutze. Beispiele von Sorptionsspeichern sind Speicher mit Zeolith oder Silikagel als Sorptionsmittel und Wasser als Arbeitsstoff. Dabei werden die beiden Komponenten Arbeitsstoff und Sorptionsmittel unter Wärmezufuhr getrennt. Reversibel werden bei Speicherentladung dann beide Komponenten zusammengeführt und verbinden sich, wobei Wärme entsteht. Die erreichbaren Temperaturniveaus hängen entscheidend von den beteiligten Sorptionsmitteln ab und können im Bereich von 30 °C bis 200 °C liegen. Natürlicherweise bedingt eine hohe Entladetemperatur eine entsprechend hohe Ladetemperatur bei der Trennung. Derartige Speicher sind allerdings bislang unter Kostengesichtspunkten im Vergleich zu Wasserspeichern nicht konkurrenzfähig; der Zue-gewinn an Speicherdichte rechtfertigt in aller Regel nicht den nennenswert höheren apparativen Auf-wand. Zukünftige Forschungsarbeiten konzentrieren sich deshalb auf die Entwicklung geeigneter Sorptionsmaterialien mit hoher Effizienz. In der Haustechnik finden diese Speicher bisher keine Anwendung, trotzdem sind erste Anwendungen am Markt; das bekannteste Produkt ist das „selbstkühlende Bierfass“.

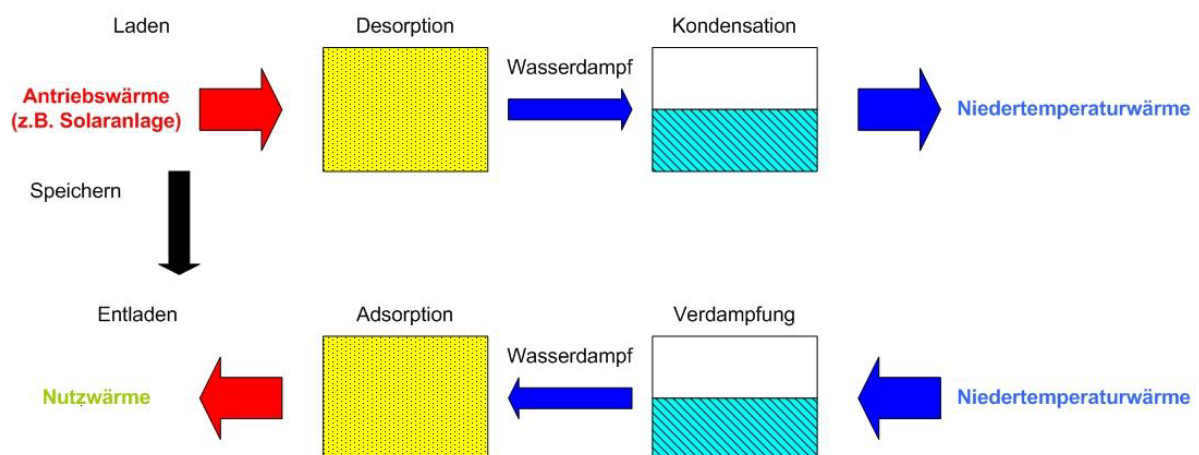


Abb. 9: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Sorptionsspeichers am Beispiel eines Wasser adsorbierenden Materials

6. Chemische Wärmespeicher

Bei diesem Speichertyp wird mit der zugeführten Wärme (mindestens in der Höhe der Bindungsenthalpie) eine reversible chemische Reaktion durchgeführt, bei der eine Verbindung in ihre Bestandteile zerlegt wird. Diese Komponenten werden getrennt und bis zur Speicherentladung bevorratet, welche durch die exotherme Rückreaktion erfolgt. Da bei einer getrennten Lagerung der Bestandteile keine zeitabhängigen Verluste auftreten, ist diese Art von Speicher besonders für Langzeitspeicher interessant. Jedoch befinden sich diese noch in der Phase der Grundlagenforschung, u.a. deshalb, weil bisher für die Trennung der Materialien und damit Ladung des Speichers sehr hohe Temperaturen notwendig waren. Auch stellt der Bau eines Reaktors und der geeigneten Speicherbehälter bisher eine Herausforderung dar. Dennoch ist in den letzten Jahren verstärkt ein aufkommendes Interesse wahrnehmbar und die beständig voranschreitende Materialforschung lässt in den kommenden Jahren spannende Weiterentwicklungen erhoffen.

Literatur

- BINE Informationsdienst: *Latentwärmespeicher in Gebäuden*. In: Themeninfo I/2009
- P. Schossig, H.-M. Henning, S. Gschwander, T. Haussmann: *Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials*. In: *Solar Energy Materials & Solar Cells* 89 (2005) 297-306
- BINE Informationsdienst: *Thermoaktive Bauteilsysteme*. In: Themeninfo I/2007
- K. Edem N'Tsoukpoea, Hui Liua, Nolwenn Le Pierrèsa and Lingai Luo: *A review on long-term sorption solar energy storage*. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 13, Issue 9, December 2009, 2385-2396
- Hauer A.: *Thermal Energy Storage with Zeolite for Heating and Cooling*. In: *Proceedings of the 7th International Sorption Heat Pump Conference ISHPC*, 385-390; Shanghai, China, 24.-27. September 2002. Science Press, New York, 2002

[11.04.11]

Anschrift der Autoren:

Dr.-Ing. Peter Schossig
Fraunhofer Institut für solare Energiesysteme (ISE)
Heidenhofstraße 2
D – 79110 Freiburg
peter.schossig@ise.fraunhofer.de
www.ise.fraunhofer.de