


Andreas Hauer | Stefan Hiebler | Manfred Reuß

# Wärmespeicher

5., vollständig überarbeitete Auflage



Fraunhofer IRB  Verlag

 **BINE**  
Informationsdienst

BINE-Fachbuch

Andreas Hauer, Stefan Hiebler, Manfred Reuß

## **Wärmespeicher**



BINE-Fachbuch

# Wärmespeicher

5., vollständig überarbeitete Auflage

Andreas Hauer  
Stefan Hiebler  
Manfred Reuß

Herausgeber

 **FIZ Karlsruhe**  
Leibniz-Institut für  
Informationsinfrastruktur

**Fraunhofer IRB**  **Verlag**

 **BINE**  
Informationsdienst



BINE Informationsdienst berichtet über Themen der Energieforschung: Neue Materialien, Systeme und Komponenten, innovative Konzepte und Methoden. BINE-Leser werden so über Erfahrungen und Lerneffekte beim Einsatz neuer Technologien in der Praxis informiert. Denn erstklassige Informationen sind die Grundlage für richtungsweisende Entscheidungen, sei es bei der Planung energetisch optimierter Gebäude, der Effizienzsteigerung industrieller Prozesse oder bei der Integration erneuerbarer Energien in bestehende Systeme.

BINE Informationsdienst ist ein Service von FIZ Karlsruhe und wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert.

Für weitere Fragen steht Ihnen zur Verfügung:

Dr. Franz Meyer (Redaktion)

BINE Informationsdienst, FIZ Karlsruhe, Büro Bonn

Kaiserstraße 185–197, 53113 Bonn

Tel. +49 2 28 923 79-0, E-Mail: [bine@fiz-karlsruhe.de](mailto:bine@fiz-karlsruhe.de), [www.bine.info](http://www.bine.info)

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über [www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar.

ISBN (Print): 978-3-8167-8366-4 | ISBN (E-Book): 978-3-8167-8751-8

Layout: Dietmar Zimmermann | Umschlaggestaltung: Martin Kjer | Herstellung: Tim Oliver Pohl

Satz: Mediendesign Späth GmbH, Birenbach | Druck: Gulde Druck GmbH & Co. KG, Tübingen

Alle Rechte vorbehalten.

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Titelfoto: Mobiler Sorptionsspeicher

(Quelle: Andreas Krönauer, ZAE Bayern)

© FIZ Karlsruhe, 2013

Verlag und Vertrieb:

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Telefon +49 7 11 970-2500

Telefax +49 7 11 970-2508

[irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

Hinweis zu den Abbildungen: Soweit nachfolgend keine anderen Quellen genannt werden, stammen die Abbildungen von den Autoren.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	9
<b>1 Einleitung / Motivation</b> .....	11
1.1 Wozu braucht man Energiespeicher? .....	11
1.1.1 Angebot und Nachfrage .....	11
1.1.2 Zeitliche Abweichung von Bereitstellung und Bedarf .....	12
1.2 Wie kann Energie gespeichert werden? .....	13
1.2.1 Elektrische/elektro-chemische Energiespeicher .....	14
1.2.2 Mechanische Speicher .....	14
1.2.3 Chemische Energiespeicher .....	15
1.2.4 Thermischer Energiespeicher .....	15
1.2.5 Möglichkeiten durch Umwandlung der Energien .....	16
1.2.6 Vergleich der Energiespeichertechnologien .....	16
<b>2 Charakteristische Größen eines thermischen Energiespeichers</b> .....	19
2.1 Prolog: Was ist thermische Energie? (Physik der Wärme) .....	19
2.2 Sensibel – Latent – Thermochemisch .....	22
2.3 Speicherkapazität .....	24
2.4 Lade- und Entladeleistung .....	24
2.5 Nutzungsgrad .....	25
2.6 Speicherzyklen .....	25
<b>3 Aufbau eines Speichers und Integration in ein Energiesystem</b> .....	27
3.1 Vom Speichermaterial zum Speichersystem .....	27
3.1.1 Material .....	27
3.1.2 Komponente .....	28
3.1.3 System .....	28
3.1.4 Zusammenspiel der Ebenen .....	29
3.2 Kosten und wirtschaftliche Betrachtung .....	29
<b>4 Speicherklassifikation</b> .....	33
4.1 Was soll der Speicher in der Anwendung leisten? .....	33
4.1.1 Klassifikation nach Einsatzbereich .....	33
4.1.2 Klassifikation nach Temperaturniveau .....	34
4.1.3 Klassifikation nach Speicherkapazität, thermischer Leistung und Speicherdauer .....	35
4.2 Das physikalische Speicherprinzip .....	35
4.2.1 Spezifische Wärmekapazität .....	36
4.2.2 Schmelzwärme .....	36

4.2.3	Reaktionsenthalpie . . . . .	38
4.3	Autarke – nicht-autarke thermische Speicher . . . . .	40
4.3.1	Thermodynamische Betrachtung nicht-autarker Speicherprozesse . . . . .	42
4.4	Empirische Regeln zur Abschätzung der Speicherkapazität . . . . .	44
4.4.1	Sensible Wärmespeicherung . . . . .	44
4.4.2	Latente Wärmespeicherung . . . . .	47
4.5	Typische Speichermaterialien . . . . .	48
4.5.1	Sensible Speichermaterialien . . . . .	48
4.5.2	Latentwärmespeichermaterialien . . . . .	50
4.5.3	Thermochemische Speichermaterialien . . . . .	56
4.6	Speicherdesign: Technische Bauformen . . . . .	58
4.7	Dämmmaterialien . . . . .	65
4.7.1	Allgemeines . . . . .	65
4.7.2	Konventionelle Speicherdämmung . . . . .	67
4.7.3	Vakuumdämmung und Vakuumsuperisolation (VSI) . . . . .	69
<b>5</b>	<b>Thermische Energiespeicher in der Anwendung . . . . .</b>	<b>71</b>
5.1	Sensible Speichersysteme . . . . .	71
5.1.1	Saisonale Speicherung solarer Wärme . . . . .	71
5.1.2	Superisolierter Speicher . . . . .	80
5.2	Latentwärmespeichersysteme . . . . .	85
5.2.1	Passive Kühlung mit PCM . . . . .	85
5.2.2	Latentwärmespeicher zur Rückkühlung einer Absorptionskältemaschine . . . . .	90
5.2.3	PCM-Slurries . . . . .	96
5.3	Thermochemische Speichersysteme . . . . .	102
5.3.1	Mobiler Adsorptionsspeicher zur Nutzung industrieller Abwärme . . . . .	102
5.3.2	Kälte speichern und Klimatisieren mit Salzlösungen . . . . .	110
5.3.3	Adsorptionsspeicher in einem Geschirrspüler . . . . .	119
<b>6</b>	<b>Stand der Forschung und Entwicklung . . . . .</b>	<b>125</b>
<b>7</b>	<b>Nachwort . . . . .</b>	<b>133</b>
7.1	Mit thermischen Energiespeichern ist es wie mit Handschuhen ... . . . .	133
7.2	Thermische Energiespeicher können die Welt retten .... . . . .	134
<b>8</b>	<b>Zitierte Literatur und Abbildungsverzeichnis . . . . .</b>	<b>137</b>
8.1	Zitierte Literatur . . . . .	137
8.2	Abbildungsverzeichnis . . . . .	141

---

<b>9</b>	<b>Forschungsvorhaben der Bundesregierung</b> . . . . .	143
9.1	Laufende und kürzlich abgeschlossene Forschungsvorhaben . . . . .	143
9.2	Forschungsberichte . . . . .	145
<b>10</b>	<b>Weiterführende Literatur</b> . . . . .	147
10.1	BINE Informationsdienst . . . . .	149
<b>11</b>	<b>Autoren</b> . . . . .	151



---

# Vorwort

Wärmespeicher begegnen uns überall in der Natur, ohne dass wir sie bewusst als solche wahrnehmen. Dabei können sie von existenzieller Bedeutung für uns sein. Die Speicherefähigkeit der Weltmeere verhindert zum Beispiel Extremtemperaturen und trägt damit zu einem lebensfreundlichen Klima auf der Erde bei.

Jeden Tag nutzen wir technische Wärme- und Kältespeicher. Die ständige Verfügbarkeit von warmem Wasser aus dem Wasserspeicher der Heizung ist für uns ebenso selbstverständlich, wie die Behaglichkeit, die aus der thermischen Trägheit der Gebäude in Kombination mit der Wärmedämmung resultiert. Auch wenn uns das Speicherprinzip unkompliziert erscheint, ist schon ein einfacher Solarspeicher heute ein exakt auf seine Aufgabe abgestimmtes, hochentwickeltes technisches System.

Wärmespeicher ermöglichen es, das Wärmeangebot im Zeitverlauf und in der Leistung dem Bedarf anzupassen. Erst durch Wärmespeicher lassen sich viele Energiequellen wie Sonnenenergie oder industrielle Abwärme effizient nutzen. Auch im Bereich der Versorgungssicherheit und beim Wärmetransport spielen sie eine wichtige Rolle. Mit dem Beschluss der Bundesregierung zum Umbau der Energieversorgung in Deutschland ergeben sich neue Aufgaben für Wärme- und Kältespeicher, so etwa zum Lastausgleich in elektrischen Netzen.

Die 5. Auflage des BINE Fachbuchs »Wärmespeicher« wurde mit neuen Schwerpunkten vollständig überarbeitet und trägt den Ergebnissen der aktuellen Forschung Rechnung. Es führt in die physikalischen Grundlagen ein, erläutert die charakteristischen Kenngrößen thermischer Speicher und stellt die Bandbreite verfügbarer Wärmespeicher vor. Diese reicht von kleinen Kurzzeitspeichern in Geschirrspülern bis hin zu saisonalen Wärmespeichern, die Siedlungen ganzjährig mit Wärme versorgen. Kältespeicher für die Klimatisierung werden ebenso vorgestellt wie Hochtemperaturspeichern für die Industrie. Im Fokus stehen insbesondere neue Technologien, wie zum Beispiel verschiedene Phasenwechselmaterialien oder Sorptionsspeicher.

FIZ Karlsruhe  
BINE Informationsdienst



---

# 1 Einleitung / Motivation

Das Fachbuch gibt eine Einführung in das Thema »thermische Energiespeicherung«. Es spannt den Bogen von grundsätzlichen Überlegungen zur Energiespeicherung und den charakteristischen Größen thermischer Energiespeicher bis zum Aufbau solcher Speicher und ihrer Integration in ein Energiesystem. Der Schwerpunkt liegt auf physikalischen und technischen Fragestellungen. Wirtschaftliche Aspekte werden nur kurz gestreift.

Durch die Einführung einer Klassifikation der verschiedenen Technologien und Anwendungsbereiche thermischer Energiespeicher sollen klare Begrifflichkeiten geschaffen werden, die es letzten Endes ermöglichen, den passenden Speicher für die jeweilige Anwendung zu identifizieren.

Ausführliche Beispiele dokumentieren den Stand der Technik und Forschung.

## 1.1 Wozu braucht man Energiespeicher?

### 1.1.1 Angebot und Nachfrage

Immer dann, wenn Energie bereitsteht, aber nicht unmittelbar genutzt werden kann, kann ein Energiespeicher eingesetzt werden. Er nimmt die Energie auf und gibt sie zu einem späteren Zeitpunkt (oder an einem anderen Ort), wenn eine Nutzung möglich ist, wieder ab. Energiespeicher stellen also nutzbare Energie zur Verfügung und sind damit äquivalent zu anderen Energiequellen, wie z.B. fossilen Energieträgern, und stehen in Konkurrenz zu diesen. Die konventionellen Energieträger – Erdöl, Erdgas und Kohle – besitzen hingegen in hohem Maße die Qualitäten eines Energiespeichers, können aber nicht regeneriert werden. Sie lassen sich ohne Verluste nahezu beliebig lagern und verfügen über hohe Energiedichten, z.B. Erdöl und Steinkohle  $40 \text{ GJ/m}^3$ . Vor diesem Hintergrund müssen Energiespeicher ähnliche Eigenschaften oder andere wirtschaftliche oder ökologische Vorteile aufweisen.

Am Beispiel der Elektromobilität lässt sich zeigen, wie ein Energiespeicher unmittelbar mit fossilen Energieträgern in Konkurrenz steht. Der Speicher, in diesem Fall die Batterie, sollte aus ökologischen Gründen Elektrizität aus erneuerbaren Quellen aufnehmen und dann bereitstellen, wenn der Verbraucher es wünscht. Gleichzeitig muss der Speicher dafür sorgen, dass der Verbraucher auch räumlich unabhängig von den Energiequellen agieren kann. Neben einem rein wirtschaftlichen Vergleich zwischen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor und Elektrofahrzeugen, spielen hier unter Umständen umweltpolitische Argumente, wie die Reinhaltung der Luft eine entscheidende Rolle zugunsten des Energiespeichers.

Die Kosten für einen Energiespeicher sind in der Regel zusätzliche Kosten, die sich zu den Kosten der Energieerzeugung addieren. Der Preis für eine gespeicherte Energiemenge darf nicht deutlich über dem Preis direkt bereitgestellter Energie liegen. Die Preise variieren allerdings mit der momentanen Nachfrage. Besonders interessant sind Speicher dann, wenn Energie günstig aufgenommen und bei großer Nachfrage zu hohen Preisen wieder abgegeben werden kann.





■ **Abb. 1:** Pumpspeicherwerk Wendefurth im Harz

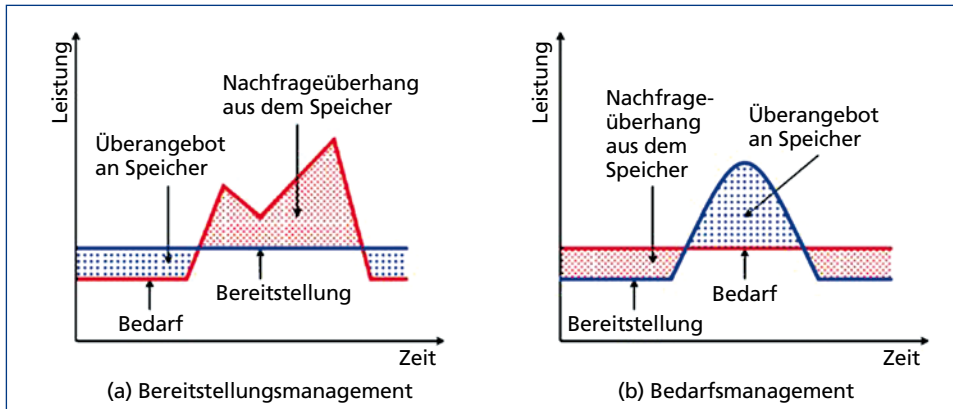
### *Beispiel: Windstrom im Pumpspeicherwerk*

*Ein sehr anschauliches Beispiel, wenn es auch nicht häufig vorkommt, ist das Laden eines Pumpspeicherwerks zum Zeitpunkt negativer Strompreise. In den Weihnachtsfeiertagen 2009 fiel der Strompreis bei hohem Angebot, z. B. aus Windkraftanlagen an der Küste, in negative Bereiche. Der Strom konnte also mit Gewinn für das Pumpen des Wassers in das höher gelegene Reservoir genutzt werden. Nach einigen Tagen wurde dann, bei jetzt wieder positiven Strompreisen, die potenzielle Energie des Wassers in Elektrizität umgewandelt. So wurde tatsächlich beim Laden und beim Entladen Geld verdient. Dieses Beispiel zeigt, dass die ökonomischen Randbedingungen entscheidend für die Amortisierung von Energiespeichersystemen sind.*

## 1.1.2 Zeitliche Abweichung von Bereitstellung und Bedarf

Ein Speicher kann immer da eingesetzt werden, wo ein Leistungsunterschied zwischen Bereitstellung und Bedarf besteht, der ausgeglichen werden muss. Ohne Speicher müsste der Nutzer die Energie so abnehmen, wie sie anfällt, oder der Anbieter muss die Energie so liefern, wie sie benötigt wird. Dies ist in der Realität selten der Fall. Abbildung 2 zeigt zwei Fälle, bei denen einmal die bereitgestellte Leistung und einmal der Leistungsbedarf konstant sind und die jeweils andere Größe zeitlich variiert.

Im Fall (a) wird Energie z. B. durch ein fossiles Kraftwerk bereitgestellt und der variierende Bedarf wird durch Energiespeicher so gedeckt, dass das Kraftwerk nicht darauf reagieren muss und gleichmäßig im optimalen Bereich gefahren werden kann. Da der Speicher in diesem Betriebsmodus die Leistungsspitzen abdeckt, können hier auch die höchsten Preise für die abge-



■ **Abb. 2:** Bereitstellungs- und Bedarfsmanagement (ZAE Bayern)

gebene Energie erreicht werden. Ein weiteres Beispiel wäre ein Blockheizkraftwerk, das mit Biogas läuft und bei konstanter Stromeinspeisung Wärme speichert. Bei Wärmebedarf wird die thermische Energie aus dem Speicher bereitgestellt.

Im Fall (b) variiert die Energiebereitstellung, z. B. bei erneuerbaren Energiequellen wie Photovoltaik, Wind oder Solarthermie. Der Energiespeicher stellt in diesem Fall Energie zur Deckung der Grundlast (konstanter Bedarf) bereit. Speicher dienen in einem solchen Szenario der Integration erneuerbarer Energien.

Die Realität der Energieversorgung wird in Zukunft eine zeitliche Variation sowohl der Energiebereitstellung, aufgrund des wachsenden Anteils fluktuierender Energiequellen, als auch des Bedarfs sehen und damit eine wachsende Notwendigkeit für den Einsatz effizienter Energiespeicher.

Die Aufgabe eines Energiespeichers lässt sich auch beschreiben, indem man ihm zuweist, ob er sich auf der Angebotsseite oder auf der Nachfrageseite befindet. Auf der Angebotsseite ist der Speicher auf die Aufnahme von Energie ausgelegt. Dies wäre typischerweise eine Anwendung im Bereich erneuerbarer Energien oder die Nutzung industrieller Abwärme. Im Vordergrund steht die Aufgabe, Energie zu speichern, die sonst ungenutzt bleiben würde. Speicher auf der Verbraucherseite sind so gestaltet, dass sie dem Bedarfsprofil folgen können. Die Energieerzeugung muss dies dann nicht tun. In diesem Fall wird das Bedarfsprofil von der Erzeugung entkoppelt. Man spricht dann auch von »Demand Side Management«.

Speicher auf der Nachfrageseite sind in der Regel dezentrale Speicher, die sich vor Ort beim Verbraucher befinden. Oft handelt es sich um kleinere Speicher, da sie dem Bedarf eines Verbrauchers angepasst sind. Speicher auf der Angebotsseite sind dagegen meist zentrale, größere Speichersysteme, die direkt mit den Erzeugungseinheiten verbunden sind.

## 1.2 Wie kann Energie gespeichert werden?

Physikalisch muss zwischen verschiedenen Energieformen differenziert werden. In der Energietechnik wird unterschieden, in welcher Form die Energie dem Verbraucher bereitgestellt wird: Als elektrischer Strom, als mechanische (kinetische) Energie, als chemischer Energieträger oder

als thermische Energie. Dabei unterscheiden sich diese Formen in ihrem tatsächlich nutzbaren Anteil. Kann elektrischer Strom in der Regel zu 100 % genutzt werden, muss bei der Nutzung der kinetischen Energie (z. B. bei einem Schwungrad-Speicher) oder der chemischen Energie (z. B. in Wasserstoff) die Effizienz der Umwandlung in die benötigte Energieform berücksichtigt werden. Bei thermischer Energie, sofern sie nicht direkt als Wärme oder Kälte gebraucht wird, gelten die Gesetze der Thermodynamik für eine weitere Umwandlung. Das Maß für die Nutzbarkeit, der Arbeitsfähigkeit in diesem Zusammenhang, ist die Exergie [1].

### 1.2.1 Elektrische/elektro-chemische Energiespeicher

In Zukunft kann die Integration erneuerbarer Elektrizität aus Photovoltaik und Wind zum Teil von elektrochemischen Speichersystemen übernommen werden. Der Bedarf an elektrochemischen Speichern (Akkumulatoren, Redox-Flow-Batterien) und Hybridsystemen aus Batterien und Superkondensatoren mit hoher Leistungsdichte und langer Lebensdauer wird in den kommenden Jahren stark ansteigen, denn der Anteil an Strom aus dezentralen und fluktuierenden Quellen wird sich erhöhen, was den stationären Einsatz dieser Technologien forcieren wird. Gleichzeitig wird die Entwicklung leistungsstarker Batterien für mobile Anwendungen im Verkehr zunehmend an Bedeutung gewinnen. Die zukünftigen Herausforderungen liegen in einer nutzerfreundlichen Kostenstruktur elektro-chemischer Speicher und der Produktion von anwendungsorientierten Systemlösungen. Dies gilt insbesondere für eine stationäre elektrochemische Stromspeicherung für fluktuierende Einspeisungen aus Photovoltaik- und Windanlagen. Hier zeichnet sich eine Entwicklung ab, mit der überschüssiger Windstrom in große Batteriesysteme geleitet wird, um diese in ein Energiedienstleistungssystem einzubinden, das Spannung und Frequenz im Verteilnetz effizient stabilisiert.

### 1.2.2 Mechanische Speicher

Speicher mechanischer Energie zeichnen sich vor allem durch große Speicherkapazität (absolute, nichtspezifische) und Leistung aus. Darüber hinaus sind sie heute die wirtschaftlichste Lösung der Elektrizitätsspeicherung:

- **Pumpspeicherwerke:** Pumpspeicher können zur Vergleichmäßigung der durch Kraftwerke zu deckenden Last (Lastglättung) sowie zur Speicherung der Energieüberschüsse genutzt werden und so zu einem technisch effizienteren Einsatz der konventionellen Kraftwerke sowie der Vermeidung des Abregelns erneuerbarer Energien beitragen. Ihr Wirkungsgrad (in diesem Buch als »Nutzungsgrad« bezeichnet) liegt bei ca. 80 %.
- **Druckluftspeicher:** In Schwachlastzeiten speichern sie Strom aus Grundlastkraftwerken durch Kompression von Luft in unterirdische Kavernen. Beim Verdichten anfallende Wärme wird in die Umgebung abgegeben. Bei Spitzenlastbedarf wird der Kavernenspeicher entladen, indem die komprimierte Luft in einer Gasturbine unter Wärmezufuhr entspannt wird. Diese »konventionelle« Druckluftspeichertechnik benötigt für ihren Betrieb Erdgas für die Wärme bei der Entspannung. Damit bleibt der Nutzungsgrad auf ca. 40 % beschränkt. Als Weiterentwicklung zielt die so genannte adiabate Druckluftspeichertechnik darauf ab, eine lokal emissionsfreie, reine Speichertechnik mit hohem Wirkungsgrad zur Verfügung zu stellen. Dieses Konzept verwendet einen zusätzlichen Wärmespeicher. Damit wird es möglich, die für den Expansionsprozess benötigte Wärme durch die Kompressionswärme des Bela-

dungsprozesses bereitzustellen und so den bisher benötigten Gasbrenner zu vermeiden. Solche Anlagen könnten hohe Stromspeicherwirkungsgrade von etwa 70 % realisieren.

### 1.2.3 Chemische Energiespeicher

Neben der direkten Speicherung von Energie ist auch eine »stoffliche« Speicherung möglich. Dabei wird unter Energieeinsatz ein Energieträger produziert, der die Energie über einen beliebigen Zeitraum speichert. Bei den Energieträgern handelt es sich in der Regel um Wasserstoff oder Methan.

#### ■ Wasserstoff als Energiespeicher

Durch Wasserelektrolyse kann z. B. der überschüssige Windstrom als chemische Energie gespeichert werden. Zentraler Punkt einer Wasserstoffwirtschaft ist die ökologisch und wirtschaftlich vertretbare Erzeugung des Wasserstoffs mit verschiedenen Verfahren (Elektrolyse aus erneuerbarem Strom, thermische Wasserspaltung oder Reformierung von aus regenerativen Ressourcen hergestellten Kohlenwasserstoffen (z. B. erneuerbares Methan)). Erneuerbarer Strom wird so in transportablen Energieträgern gespeichert, um ihn zeitlich oder räumlich versetzt zu nutzen. Der hergestellte und gespeicherte Wasserstoff kann so zur netzunterstützenden Rückverstromung eingesetzt werden und/oder als Kraftstoff für den mobilen Bereich. Im großen Maßstab wird die elektrische Pufferung z. B. von Strom aus Offshore-Windkraftparks über die Elektrolyse und Wasserstoffspeicherung in Kavernen mit einer Verstromung in Gasturbinen angedacht.

#### ■ Erneuerbares Methan als Energiespeicher

Verschiedene Energieszenarien für Deutschland sehen in der Herstellung von erneuerbarem Methan einen besonders interessanten Lösungsweg zur Speicherung erneuerbarer Energien. Mit einem Reservoir von Methangasen kann auch zu Zeiten eines geringen Angebots an erneuerbaren Energien (z. B. Windflaute) die Energieversorgung für alle Verbrauchssektoren gedeckt werden. Das neue Konzept besteht darin, aus überschüssigem Windstrom über die Wasserstoffherzeugung via Elektrolyse und anschließender Methanisierung von CO<sub>2</sub> synthetisches Methan zu erzeugen, das ins Erdgasnetz eingespeist werden kann. Dieser neue Lösungsansatz zur saisonalen Speicherung von erneuerbaren Energien bietet die Möglichkeit, intelligente und bidirektional verbundene Strom- und Gasnetze zu entwickeln. Während sich die Speicherkapazität des Stromnetzes heute auf nur ca. 0,04 TWh beläuft – mit einer Speicherreichweite von unter einer Stunde – beträgt die Speicherkapazität des heute schon vorhandenen Gasnetzes in Deutschland über 200 TWh mit Speicherreichweiten im Bereich von Monaten.

### 1.2.4 Thermischer Energiespeicher

Die Speicherung thermischer Energie ist ein wichtiges Instrument für eine effiziente Energienutzung.

Thermische Speicher lassen sich nach unterschiedlichen Kriterien einordnen: Nach dem Einsatzbereich, z. B. Pufferspeicher zur reinen Leistungsanpassung der Energiebereitstellung. Weitere Kategorien sind der Speicherzeitraum, vom Kurzzeitspeicher bis hin zu saisonalen Speichern und auch der Temperaturbereich, z. B. von Niedertemperaturwärme für die Warmwasserberei-

tung bis zu Hochtemperaturspeichern bei der solarthermischen Elektrizitätserzeugung (Concentrated Solar Power). Thermische Speicher können stationär oder mobil zum Einsatz kommen. Ein großer Beitrag zur Steigerung der Energieeffizienz kann insbesondere bei der Abwärmenutzung erwartet werden.

Grundsätzlich kann thermische Energie in Form von sensibler oder latenter Wärme sowie in thermochemischen Prozessen gespeichert werden. Ausführliche Definitionen finden sich in Kapitel 2.2.

Thermische Energiespeicher speichern »Kälte« und »Wärme«. Letztere Begriffe unterscheiden sich dadurch, inwiefern die Temperatur der bereitgestellten thermischen Energie über (= Wärme) bzw. unter (= Kälte) der Umgebungstemperatur liegt. Ein Kältespeicher unterscheidet sich von einem Wärmespeicher dadurch, dass er beim »Speichern« Wärme abgibt statt aufnimmt. In diesem Buch verwenden wir daher bevorzugt den allgemeineren Begriff »Thermischer Energiespeicher«.

### 1.2.5 Möglichkeiten durch Umwandlung der Energien

Die Umwandlung der verschiedenen Energieformen – elektrisch, elektrochemisch, mechanisch, chemisch oder thermisch – bietet neue Möglichkeiten der effizienten Energiespeicherung. So kann z. B. erneuerbar erzeugte Elektrizität, wenn diese kurzzeitig nicht ins Netz eingespeist werden kann, nach der Umwandlung in Wärme oder Kälte dezentral, kostengünstig und effizient thermisch gespeichert werden. Auch Sonnenwärme von über 400°C kann in thermischen Speichern aufgehoben und in der Nacht der Turbine wieder zugeführt werden. Damit erhöht sich die Effizienz und vor allem die Laufzeit von solarthermischen Kraftwerken deutlich. Durch die Möglichkeit der Umwandlung der Energieformen, lassen sich die technisch und ökonomisch am besten geeigneten Speicherkonzepte realisieren. Allerdings sind alle Umwandlungsprozesse prinzipiell mit Verlusten behaftet.

### 1.2.6 Vergleich der Energiespeichertechnologien

Abbildung 3 zeigt verschiedene Speichertechnologien mit ihren Eigenschaften. Die Zahlen sind als Richtwerte zu verstehen, da bei vielen Energiespeichern die aktuellen Randbedingungen einen entscheidenden Einfluss haben. Darüber hinaus sind gerade im Bereich der elektrochemischen Speicher durch die verstärkten Forschungsaktivitäten in letzter Zeit sowohl eine Steigerung der Speicherkapazität als auch eine Reduktion der Kosten zu beobachten.

Die in der Abbildung 3 aufgelisteten Größen werden in den Kapiteln 2.3 bis 2.6 ausführlich eingeführt [2], [3].

Bei allen Unsicherheiten ist festzuhalten, dass thermische Energiespeicher in ihren spezifischen Kosten deutlich unter den anderen Speichertechnologien liegen. Damit kann es durchaus interessant sein, elektrische Energie bei Bedarf in Wärme oder Kälte umzuwandeln und dann zu speichern, auch über längere Zeiträume.

Bei der Umwandlung der Energieformen ist zu berücksichtigen, dass Wärme z. B. nur mit geringer Effizienz wieder in Elektrizität umgewandelt werden kann. Dies ist bei einer Batterie deutlich besser. Chemische oder »stoffliche« Speicher stellen letztendlich einen Energieträger bereit, was für Anwendungen in der Mobilität von Vorteil gegenüber Strom sein kann.

Speichertechnologie	Speicherprinzip	Leistung		Kapazität	Speicherdauer		Energiedichte		Effizienz	Lebensdauer	Kosten		
		MW	MWh	Zeit	kWh/t	kWh/m³	%	Zyklenzahl	\$/kW	\$/kWh	€/kWh-Nutzen		
Lithium-Ionen Batterie (Li Ion)	Elektrochemisch	< 1,7	< 22	Tag – Monat	84–160	190–375	0,89–0,98	2960 – 5440	1230–3770	620–2760	17–102		
Natrium-Schwefel Batterie (NAS)	Elektrochemisch	1–60	7–450	Tag	99–150	156–255	0,75–0,86	1620 – 4500	260–2560	210–920	9–55		
Bleisäure-Batterie	Elektrochemisch	0,1–30	< 30	Tag – Monat	22–34	25–65	0,65–0,85	160 – 1060	350–850	130–1100	21–102		
Redox/Flow Batterie	Elektrochemisch	< 7	< 10	Tag – Monat	18–28	21–34	0,72–0,85	1510 – 2780	650–2730	120–1600	5–88		
Druckluftspeicher (CAES)	Mechanisch	2–300	14–2050	Tag	–	2–7 at 20–80 bar	0,4–0,75	8620 – 17100	15–2050	30–100	2–35		
Pumpspeicherwerk	Mechanisch	450–2500	8000 – 190000	Tag – Monat	0,27 at 100 m	0,27 at 100 m	0,63–0,85	12800 – 33000	540–2790	40–160	0,1–18		
Wasserstoff	Chemisch	versch.	versch.	indefinite	34000	2,7–160 at 1–700 bar	0,22–0,50	1	384–1408	–	25–64		
Methan	Chemisch	versch.	versch.	indefinite	16000	10 at 1 bar	0,24–0,42	1	–	–	16–44		
Sensible Wasserspeicher	Thermisch	< 10	< 100	Stunde – Jahr	10–50	< 60	0,5–0,9	~5000	–	0,1–13	0,01		
Latentwärmespeicher (PCM)	Thermisch	< 10	< 10	Stunde – Woche	50–150	< 120	0,75–0,9	~5000	–	13–65	1,3–6		
Thermochemische Speicher (TCS)	Thermisch	< 1	< 10	Stunde – Woche	120–250	120–250	0,8–1	~3500	–	10–130	1–5		

■ **Abb. 3:** Eigenschaften der verschiedenen Energiespeichertechnologien [3], [4], [5], [6], [7], [8]



## 2 Charakteristische Größen eines thermischen Energiespeichers

### 2.1 Prolog: Was ist thermische Energie? (Physik der Wärme)

Vor der Aufzählung der charakteristischen Größen eines thermischen Energiespeichers wird an dieser Stelle auf die Besonderheiten thermischer Energie im Vergleich zu anderen Energieformen eingegangen. Thermische Energie – Wärme und Kälte – ist eine prozessabhängige Größe und keine Zustandsgröße. Im Gegensatz zu einer Zustandsgröße, wie etwa Temperatur, Druck oder Entropie, ist eine prozessabhängige Größe nicht für einen bestimmten Zustand, sondern nur für einen bestimmten Prozess definiert. Einfacher gesagt ist es nicht möglich zu sagen: »Dieses Medium enthält diese Menge an Wärme (oder Kälte)«. Man kann lediglich Sätze formulieren wie: »Dieses Medium hat das thermodynamische Potenzial, diese Menge Wärme (oder Kälte) an ein anderes bestimmtes Medium zu übertragen.«

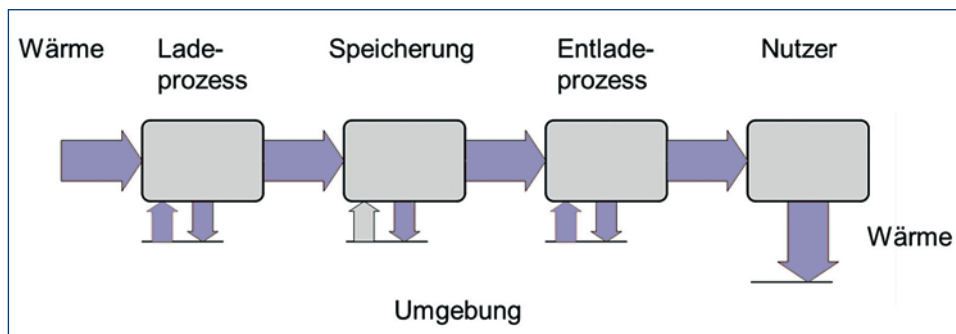
Die Konsequenz aus diesen Überlegungen für die Speicherung thermischer Energie ist, dass die gespeicherte Wärmemenge nur unter Angabe eines Referenz-Zustands definiert ist.

#### Prinzipielle Schritte bei der Speicherung thermischer Energie

Ein Speicherprozess umfasst mindestens die folgenden Schritte:

1. Das Laden des Speichers
2. Die Speicherung
3. Das Entladen des Speichers

In einem thermischen Energiespeichersystem wird Energie in Form von Wärme/Kälte geladen, gespeichert und entladen. In Anbetracht der Tatsache, dass Wärme eine Prozessvariable ist, müssen alle Prozessschritte betrachtet werden.



■ **Abb.4:** Thermische Energiespeicherung setzt sich aus Prozessen zusammen, in denen thermische Energie geladen, gespeichert und schließlich einem Nutzer zugeführt wird.



## Energieerhaltung, Exergie und Anergie

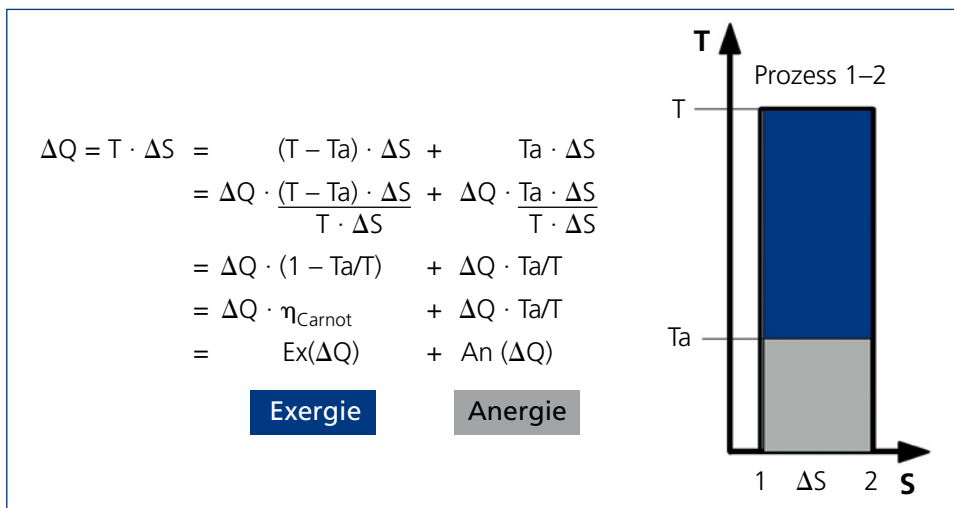
Wegen des Energieerhaltungssatzes ist es physikalisch nicht korrekt, von »Energieverbrauch« zu sprechen. Daraus ergibt sich, dass es genau genommen nicht sinnvoll ist von »Energiespeicherung« zu sprechen, da diese ja sowieso erhalten bleibt.

Allerdings gibt es thermische Energie, die mehr oder weniger »nutzbar« ist. Man denke an einen Topf mit kochendem Wasser, der langsam auf Umgebungstemperatur abkühlt. Das abgekühlte Wasser kann nicht mehr als Wärmequelle genutzt werden. Die Energie ist aber erhalten geblieben. Sie hat sich nur in eine weniger »nutzbare« Form umgewandelt.

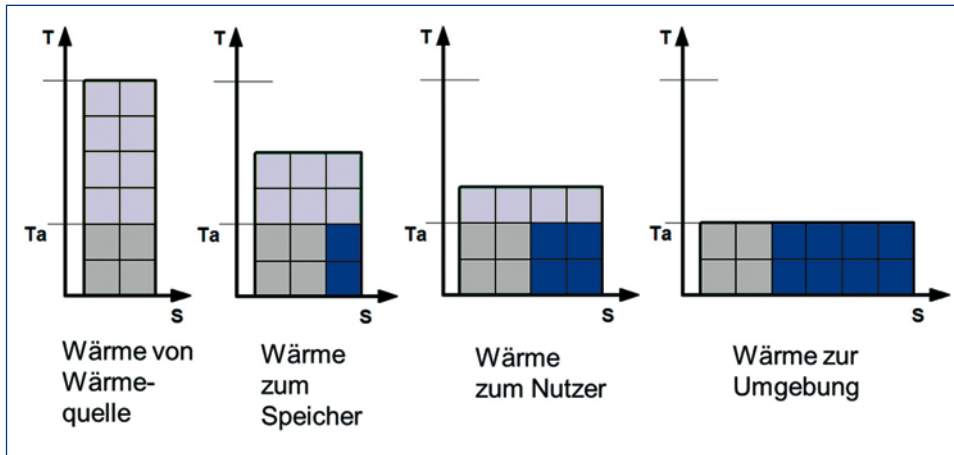
Um diesen Zusammenhang zu beschreiben wurde das Konzept von Exergie und Anergie eingeführt. Abbildung 5 zeigt Gleichungen, die eine bestimmte Wärmemenge  $\Delta Q$  in einen Teil Exergie und einen Teil Anergie trennen. Exergie kann in Arbeit umgewandelt werden. Anergie ist nicht weiter nutzbar und muss an die Umgebung abgeführt werden, wenn die Exergie abgetrennt ist. Exergie beschreibt die Qualität der gespeicherten Wärme. Ihre Definition bezieht sich immer auf einen bestimmten Referenzfall, der durch die aktuellen Umgebungsbedingungen beschrieben ist.

In Abbildung 5 ist dies die Temperatur  $T_a$  der Umgebung. In einer allgemeineren Formulierung ist das chemische Potenzial der Umgebung der Referenzzustand. Die Exergie der gespeicherten Energie bezogen auf die Umgebungsbedingungen beim Verbraucher, sowohl zeitlich als auch örtlich, kann als ein Maß für die Qualität dieser Energie angesehen werden. Die Energiemenge, die dem Nutzer zur Verfügung gestellt werden kann, entspricht dieser Größe.

Abbildung 6 zeigt, wie sich die Anteile von Exergie und Anergie während des Lade-, Speicher- und Entladevorgangs verändern. Obwohl die Energie erhalten bleibt, ist die Exergie (als grüne Blöcke dargestellt) verschwunden und wird schließlich als Anergie an die Umgebung abgeführt. Die Temperatur der gespeicherten Wärme fällt während des Prozesses auf Umgebungstemperatur.

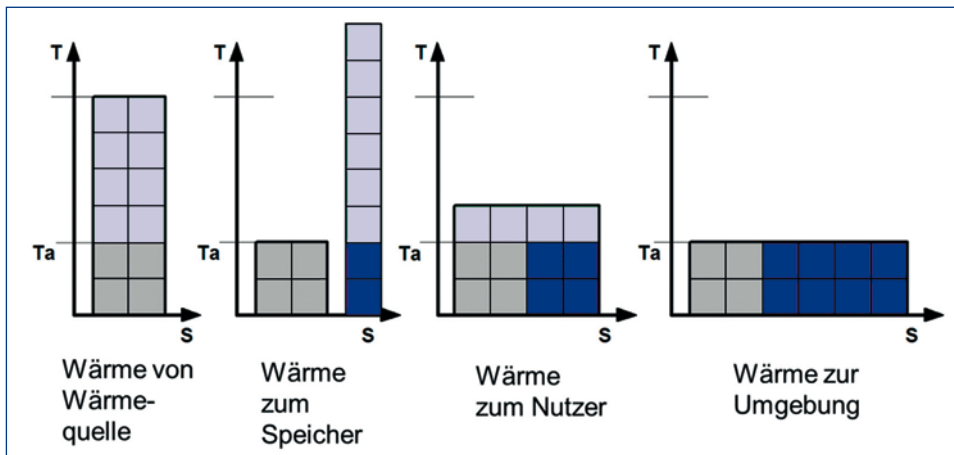


**Abb. 5:** Das Konzept von Exergie und Anergie mit Bezug zu einem Referenzzustand (Umgebung), wobei  $\Delta Q$  die Wärme,  $T$  die Temperatur,  $\Delta S$  die Entropiedifferenz und  $\eta_{\text{Carnot}}$  der Carnot-Wirkungsgrad ist.



■ **Abb. 6:** Wird Wärme gespeichert und verbraucht, wird sie in Energie umgewandelt. Energie, als die Summe der beiden Terme, bleibt erhalten.

Abbildung 7 zeigt, dass die Temperatur der Wärme während des Prozesses nicht unbedingt fallen muss. Z. B. kann eine Wärmepumpe eingesetzt werden um letztendlich die Menge der gespeicherten Energie, durch Erhöhung des Anteils an Exergie, anzuheben. Damit kann die Speicherkapazität gesteigert werden.



■ **Abb. 7:** Beim Einsatz einer Wärmepumpe kann die gespeicherte Energie eine höhere Temperatur haben als die von der Wärmequelle bereitgestellte Wärme.

## 2.2 Sensibel – Latent – Thermochemisch

Thermische Energie lässt sich auf verschiedene Weise speichern. Im Folgenden werden die Begriffe sensible (»fühlbare«), latente (eigentlich »verborgene«) und thermochemische Speicherung eingeführt.

### Sensible Speicherung thermischer Energie

Bei der sensiblen Speicherung wird ein Speichermedium erhitzt oder abgekühlt. In den meisten Fällen ist dies Wasser, da es eine hohe spezifische Wärmekapazität besitzt, ungiftig und sehr kostengünstig ist. Kleinere Speicher dienen als Pufferspeicher in thermischen Solaranlagen (Warmwasserbereitung) für eine Speicherung von Tagen oder Wochen. Große Wasserspeicher (bis zu mehreren tausend m<sup>3</sup>) werden zur saisonalen Speicherung solarer Wärme zum Heizen im Gebäudebereich meist in Verbindung mit einem Nahwärmenetz gebaut. Die in Deutschland realisierten solaren Nahwärmeprojekte mit großen saisonalen Wärmespeichern sind so konzipiert, dass die Hälfte des Gesamtwärmebedarfs für Heizung und Brauchwarmwasser der versorgten Gebäude solar gedeckt wird. Wärme und Kälte werden auch im Untergrund gespeichert. Hier kann im Winter dem Untergrund beispielsweise thermische Energie mit einer Wärmepumpe entzogen und auf eine Temperatur bis ca. 5 °C ausgekühlt werden. Im Sommer bietet sich die Möglichkeit, die »Kälte« aus dem Untergrund direkt zur Gebäudekühlung zu nutzen.

Feststoffe als sensible Wärmespeicher kommen vor allen bei sehr hohen Temperaturen (> 500 °C) zum Einsatz. In diesen Bereichen werden aktuell Gesteinsspeicher und Sand- oder Betonspeicher untersucht.

### Latentwärmespeicher

Latentwärmespeicher nutzen zusätzlich zur Temperaturerhöhung (oder -absenkung) einen Phasenwechsel (engl. Phase Change Materials, PCM) des Speichermediums. Typischerweise wird hier der Phasenübergang fest-flüssig genutzt, da dieser eine ausreichend hohe Übergangsenthalpie zeigt und die Volumenänderung nicht zu groß ist. Dadurch kann bei kleineren Temperaturunterschieden im Vergleich zu sensiblen Speichern deutlich mehr thermische Energie gespeichert werden. Dies ist unter anderem bei der Speicherung von Kälte von Vorteil. In die Gebäudestruktur integrierte PCMs können z. B. mit Schmelztemperaturen von 20–25 °C die Raumtemperatur bei komfortablen Werten halten und vor Überhitzung schützen. Die hohe Speicherkapazität trägt zu einer kompakten Speichergeometrie bei. Mögliche Speichermaterialien sind für einen weiten Temperaturbereich von etwa –40 bis weit über 1 000 °C bekannt.

Interessant vor allem für den Transport gespeicherter Energie sind so genannte Slurries (engl. Phase Change Slurries, PCS), die sowohl im geschmolzenen als auch im festen Zustand pumpfähig bleiben. Dabei befindet sich das PCM in einem flüssig bleibenden Trägerfluid oder es wird nur ein Teil des Materials ausgefroren, sodass feste Kristalle in Flüssigkeit schwimmen. Besonders bekannt sind Eis-Slurries zur Kältespeicherung und -verteilung in Gebäuden oder Industrieanlagen.

*Beispiel: Eisspeicher (historisch)*

*Die Leistungsfähigkeit latenter Kältespeicher demonstriert eindrucksvoll der Eisspeicher. Bevor Eis künstlich erzeugt werden konnte, wurde im Winter aus zugefrorenen Seen Eis geschnitten*

■ **Abb.8:** Schneiden von Eisblöcken zur saisonalen Kältespeicherung



(siehe Abbildung 8). Die Lagerung der geschnittenen Eisquader erfolgte in kühlen Kellergewölben, die bis in den Sommer zur Kühlung genutzt wurden. Prominentes Anwendungsbeispiel sind hier alte Brauereien, die ihr Bier in tiefen Kellern mit natürlichem Eis kühlten. Die Schmelzenthalpie von Eis liegt bei 334 kJ/kg. Damit hat eine Tonne Eis eine Kühlkapazität von ca. 92 kWh. Mit Eisspeichern wurde damals eine saisonale Kältespeicherung realisiert. Auch heute gibt es ähnliche Ansätze, wenn z.B. darüber diskutiert wird, den Schnee auf Japans nördlichster Insel Hokaido im Winter in Speichern zu sammeln, um ihn dann im Sommer in Frachtschiffen, die oft leer nach Tokio zurückfahren, zur Gebäudekühlung in der Hauptstadt einzusetzen.

### Thermochemische Speicherprozesse

Zur Speicherung thermischer Energie lassen sich auch reversible chemische Reaktionen nutzen. Diese Systeme verfügen über hohe Energiespeicherdichten und sind in der Lage, die Temperaturniveaus beim Laden und Entladen den aktuellen Bedürfnissen anzupassen. Am meisten untersucht sind Ad- und Absorptionsprozesse. Offene Sorptionsspeicher werden momentan für ihren Einsatz bei der Nutzung industrieller Abwärme untersucht. Vor allem im Bereich industrieller Trocknungsprozesse entstehen hier effiziente und wirtschaftlich interessante Systeme. Die Möglichkeit, neben der Speicherung auch Wärme in Kälte zu transformieren, wird in Anwendungen wie der solaren Gebäudeklimatisierung genutzt.

Der Begriff der thermochemischen Wärmespeicherung ist etwas unscharf, weil darunter eine Reihe von Speichersystemen verstanden wird, die nicht nur auf chemischen Reaktionen basieren. In der Tat sind Sorptionsspeicher eher »physikalische« Speicher. Dennoch folgt das Fachbuch hier der gängigen Bezeichnung.

## 2.3 Speicherkapazität

Als Speicherkapazität wird die Energiemenge bezeichnet, die ein Speicher dem Verbraucher unter bestimmten Prozessbedingungen zur Verfügung stellen kann. Diese Größe hängt, wie oben bereits erwähnt, entscheidend von einem Referenzfall ab.

*Zum Beispiel kann ein See im Sommer als Kältespeicher und im Winter als Wärmespeicher dienen. Im Sommer liegt die Temperatur des Seewassers deutlich unter der Umgebungstemperatur und könnte zur Kühlung genutzt werden. Die Kapazität des Sees als Speicher hängt in diesem Fall von eben diesem Temperaturunterschied ab. Im Winter liegt die Seetemperatur deutlich über der Umgebungstemperatur. Damit kann der See nun als Wärmespeicher genutzt werden. Ist die Wassertemperatur zu niedrig, um in einem Heizsystem genutzt zu werden, kann er als Wärmequelle für eine Wärmepumpe genutzt werden.*

Die Speicherkapazität ergibt sich aus dem genutzten physikalischen oder chemischen Effekt. Wird lediglich ein Speichermedium erwärmt, ist die Kapazität direkt proportional dem Temperaturunterschied zur Referenz. Findet bei der Temperaturerhöhung des Mediums auch ein Phasenwechsel statt, trägt die Schmelz- oder Verdampfungsenthalpie ebenfalls zur Kapazitätserhöhung bei. Im Falle chemischer Reaktionen zur Wärmespeicherung spielt die Reaktionsenthalpie die entscheidende Rolle. Diese wiederum ist von den jeweiligen Umgebungsbedingungen abhängig.

Die Speicherkapazität kann absolut in J oder kWh angegeben werden. In der Regel wird sie aber als spezifische Größe, volumetrisch (bezogen auf das Volumen) bzw. gravimetrisch (bezogen auf die Masse) festgelegt. In den meisten Fällen wird in der Literatur die spezifische Speicherkapazität auf das reine Speichermedium bezogen. In der konkreten Anwendung ist ein Bezug auf die gesamte Speicherkomponente, z. B. inklusive der Wärmedämmung oder das gesamte Speichersystem sinnvoller. Für eine ökonomische Bewertung muss die Speicherkapazität auf die Kosten des Speichers bezogen werden.

## 2.4 Lade- und Entladeleistung

Die Lade- und Entladeleistung beschreibt, wie schnell ein Speicher eine bestimmte Wärmemenge aufnehmen und wieder abgeben kann. Auch diese Größe hängt von den Prozessparametern ab und ist keine Zustandsgröße des Speichers.

Leistung ist Energie pro Zeit [J/s]. Sie ist entscheidend für eine optimale Anpassung eines Speichers an das durch die Anwendung vorgegebene Lade- und Entladeprofil. Die Anforderungen können zwischen Laden und Entladen stark variieren. Für die Bereitstellung solarthermischen Warmwassers kann zum Beispiel mit geringer Leistung geladen werden. Für das Entladen muss aber die erwartete Leistung, z. B. beim Füllen einer Badewanne aus dem Speicher zur Verfügung stehen.

Die Leistung hängt im Gegensatz zur Kapazität nicht von dem physikalischen oder chemischen Speichereffekt ab. Hier spielt der Wärmeübergang, bei den chemischen Reaktionen auch der Stoffübergang, eine entscheidende Rolle. Neben dem treibenden Gefälle, das durch die Höhe des Temperaturunterschieds definiert ist, ist jetzt die technische Ausführung beispielsweise eines Wärmeübertragers oder eines Reaktors mit spezifischen Austauschflächen von Bedeutung. Die Leistung eines Speichers wird oft unter Auslegungsparametern als Nennleistung angegeben. Die tatsächlichen Leistungen hängen dann von den aktuellen Prozessparametern ab.

Die Leistungen eines Speichers können absolut in W oder auch auf das Volumen oder die Masse des Speichers (analog zur Speicherkapazität) bezogen und dann in  $\text{W/m}^3$  bzw.  $\text{W/kg}$  angegeben werden. Für die wirtschaftliche Beurteilung eines Speichers muss auch hier die Leistung bezogen auf die Kosten betrachtet werden.

## 2.5 Nutzungsgrad

Der Nutzungsgrad gibt das Verhältnis der nutzbaren Energie beim Entladen zur vom Speicher aufgenommenen Energie beim Laden an. Im Allgemeinen ist die Nutzwärme aufgrund der Speicherverluste geringer als die dem Speicher zugeführte Wärme. Ebenso nimmt die gespeicherte Exergie mit sinkender Temperatur ab.

Weiterhin hängt der Nutzungsgrad von den Randbedingungen des tatsächlichen Speicherprozesses und dem Gesamtsystem, in das er integriert ist, ab. Vor allem die Speicherdauer und -temperatur, zusammen mit der Wärmedämmung des Speichers (Ausnahmen sind z. T. chemische Reaktionen zur thermischen Energiespeicherung) bestimmen die Verluste und damit den Nutzungsgrad. Damit kann neben dem Verhältnis der Energien auch das Verhältnis der Exergie beim Laden und Entladen als »exergetischer« Nutzungsgrad definiert werden. Hierbei ist der Verlust an »Qualität« (= Temperatur) der gespeicherten Wärme ausschlaggebend. Eine Vergleichbarkeit verschiedener Speichertechnologien ist schwierig, weil dazu die Randbedingungen vollständig berücksichtigt werden müssen.

Der Nutzungsgrad ist dimensionslos und wird in der Regel in Prozent angegeben.

Bei den chemischen Reaktionen wird der Nutzungsgrad z. T. anders ermittelt, als bei sensiblen oder latenten Speichern. Dies wird ausführlicher im Kapitel 4.2 behandelt.

In diesem Fachbuch wird der Begriff Nutzungsgrad den Begriffen »Wirkungsgrad« oder »Effizienz« vorgezogen, weil er eher die Abhängigkeiten von der konkreten Nutzung des Speichers suggeriert.

## 2.6 Speicherzyklen

Der Zeitraum zwischen dem Be- und Entladevorgang wird als Speicherperiode bezeichnet. Die Summe aus Beladungs-, Stillstands- und Entladungszeit (und u. U. noch einer Stillstandszeit) bildet einen Speicherzyklus.

Wie Speicherzyklen aussehen, hängt von den zeitlichen Profilen der Wärmequelle und des Verbrauchers, aber auch von der Speicherkapazität und der möglichen Lade- und Entladeleistung ab. Bei thermischen Energiespeichern liegen diese in einem Bereich von Minuten bis zu einem Jahr. Der längste Speicherzyklus findet sich z. B. im Bereich der Speicherung solarer Wärme aus dem Sommer in den Winter. Hier wird u. U. ab dem Frühjahr geladen und gespeichert und ab dem Herbst und den ganzen Winter hindurch entladen. Der Zyklus, vom Zustand »komplett entladen« (am Ende des Winters) über den Zustand »komplett geladen« (am Ende des Sommers) bis wieder zum Zustand »komplett entladen« ist hier ein Jahr. Tatsächlich kommt es aber in der Realität zu einer »Überlagerung« der saisonalen Speicherung mit einer Kurzzeitspeicherung, was zu mehr als nur 1 Speicherzyklus pro Jahr (eher 1,2–1,5) führt.

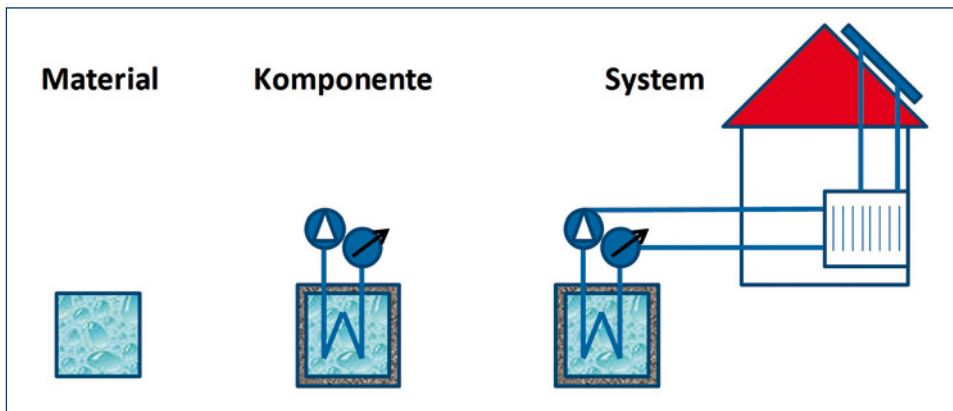
Finden innerhalb eines Speicherzyklus irreversible Prozesse statt, die die Speicherkapazität beeinträchtigen, so ist die Anzahl der ausführbaren Speicherzyklen begrenzt. Die Stabilität thermischer Speicher wird an ihrer Degradation über eine bestimmte Zyklenzahl festgemacht.

Werden mit einem Speichersystem viele Zyklen pro Jahr gefahren, wirkt sich dies positiv auf die Wirtschaftlichkeit aus. Das System setzt dann viel Energie um, stellt oft die gespeicherte Energie bereit und kann sich damit schneller amortisieren.

## 3 Aufbau eines Speichers und Integration in ein Energiesystem

### 3.1 Vom Speichermaterial zum Speichersystem

Ein thermischer Speicher besteht aus verschiedenen Bestandteilen, dem Speichermaterial selbst, Einbauten, die dafür sorgen, dass thermische Energie in und auch wieder aus dem Material transportiert werden kann und schließlich einem, meist isolierten, Behälter. Der Speicher ist in ein Energiesystem integriert, von dem er seinen Energieeintrag nimmt und an das er seinen Energieinhalt wieder abgibt.



■ **Abb.9:** Schematische Darstellung des Speichermaterials, der Speicherkomponente und des Speichersystems

#### 3.1.1 Material

Das Speichermaterial nimmt die thermische Energie auf. Dabei ändert es seinen Zustand. Zum Beispiel erhöht sich in einem Warmwasserspeicher beim Laden seine Temperatur.

Eine weitere entscheidende Rolle bei der Bestimmung der volumetrischen Speicherkapazität spielt auch die Dichte des Speichermaterials.

Bei thermischen Energiespeichern, die einen Phasenübergang nutzen oder auf reversiblen chemischen Reaktionen beruhen sind noch weitere Materialeigenschaften wie die Schmelztemperatur, die Schmelzenthalpie oder die Reaktionswärme von Bedeutung.

Weitere wichtige Größen zur Charakterisierung eines Speichermaterials sind bzgl. der Lade- und Entladeleistung eines Systems auch die Wärmeleitfähigkeit und ggf. die Viskosität. Für einen tatsächlichen Einsatz muss das Material aber auch unter Anwendungsbedingungen hinreichend stabil sein und darf seine Materialeigenschaften nicht deutlich verändern.

Für den praktischen Einsatz ist darüber hinaus der Preis eines Materials wichtig. Dieser ist abhängig vom Herstellungsverfahren, aber auch von der Herstellungsmenge. Bei der Suche nach neuen geeigneten Materialien kann Ersteres ein Problem darstellen. Auch Eigenschaften wie Toxizität, Recyclingfähigkeit oder die verfügbare Menge eines Speichermaterials können über die tatsächliche Einsetzbarkeit entscheiden.



Materialforschung auf dem Gebiet thermischer Energiespeicher ist heute ein sehr aktives Forschungsfeld. Es werden laufend neue Materialklassen untersucht und auf ihre Eignung als Speichermedium getestet.

### 3.1.2 Komponente

Um aus einem Speichermedium einen Speicher zu bauen, muss sichergestellt werden, dass die thermische Energie in der gewünschten Zeit in den Speicher und auch wieder aus dem Speicher transportiert werden kann. Dazu werden, wenn die Wärmeleitfähigkeit des Speichermediums selbst nicht ausreicht, Wärme übertragende Strukturen in das Speichermedium integriert. In vielen praktischen Fällen verbessert sich auf diese Weise die Lade- und Entladeleistung. Eine Ausnahme besteht dann, wenn das Speichermedium gleichzeitig das Wärmetransportmedium oder das genutzte Medium selber darstellt (vgl. Warmwasserspeicher).

Die Komponente, die aus dem Speichermedium und einem Wärmetauscher besteht, befindet sich im Allgemeinen in einem thermisch isolierten Behälter. Dieser Behälter erfüllt zwei Funktionen: Zum einen umschließt und schützt er das Speichermedium und die Einbauten und zum anderen minimiert er die thermischen Verluste und versucht einen möglichst hohen Exergieanteil an den Nutzer weiter zu geben.

Die Grenzen des Begriffes »Speicherkomponente« sind fließend. In manchen Fällen werden weitere Teile, wie Pumpen, Volumenstrommesser, Ventile oder ähnliches ebenfalls zur Komponente gezählt.

Die komplette Speicherkomponente, bestehend aus Speichermedium, Wärmeübertrager und Behälter kann nun quantitativ durch ihre Speicherkapazität, die bezogen auf die Komponente im Allgemeinen kleiner als die des reinen Speichermediums ist, und ihre thermische Leistung beschrieben werden. Wie Speicherkomponenten in ihrer ganzen Vielfalt aussehen können zeigt Kapitel 4.6.

### 3.1.3 System

Die Speicherkomponente wird in ein Speichersystem integriert. Sie steht mit diesem System in starker Wechselwirkung. Erst in diesem Zusammenspiel von Speicherkomponente und System können die charakteristischen Größen Nutzungsgrad und Speicherzyklus definiert werden. Das System beinhaltet die Energiequelle aus der der Speicher geladen wird, es bestimmt wie lange die Energie gespeichert bleibt und welche Anforderungen der Nutzer an den Speicher hat. Insbesondere werden durch das System die Temperaturen, die zur Verfügung stehen bzw. benötigt werden festgelegt.

Über die Integration in das Gesamtsystem kann erstmals die Wirtschaftlichkeit eines Speichers betrachtet werden. Erst jetzt kann der Wert der bereitgestellten Wärme quantifiziert werden.

Das System ist so definiert, dass es alle für den Speicherzyklus notwendigen Komponenten – Quelle, Speicher, Senke – beinhaltet. Ein System ist so zu wählen, dass es eine konkrete Fragestellung beantworten kann, wie z. B.: Wie kann ich ein Haus mit solarer Wärme beheizen? Dabei ist das Haus mit Sonnenkollektor, Warmwasserspeicher und Heizung das System. Der Speicher muss jetzt mit den zeitlichen Profilen von Wärmeangebot und Heizwärmebedarf funktionieren.

Ein System kann aber auch größer gewählt werden, wenn z. B. die Frage beantwortet werden soll: Wie kann die Versorgung Deutschlands nur mit erneuerbaren Energien bewerkstelligt werden? Dann umfasst das System die Energieversorgung Deutschlands mit all seinen Energiequellen und all seine Verbräuchen. Die Berechnung des Speicherbedarfs und auf welche Weise dieser am besten (technisch und wirtschaftlich) gedeckt werden kann sind extrem komplexe Fragestellungen, an deren Lösung intensiv gearbeitet wird.

### 3.1.4 Zusammenspiel der Ebenen

Aus den Materialien werden Komponenten entwickelt, diese werden für ein System ausgelegt. Das System deckt dann den Speicherbedarf. Aber gleichzeitig muss das Material schon auf seine Eignung in der Komponente im System ausgewählt worden sein. Daraus ergibt sich, dass die Materialentwicklung bereits das System klar vor Augen haben muss, damit ein geeignetes Material entwickelt werden kann.

*In praktischen Fällen kann die Abgrenzung der Speicherkomponente und des Speichersystems schwierig sein. Im Falle eines mobilen Sorptionsspeichers mit dem Stoffpaar Zeolith/Wasserdampf ist das Speichermaterial Zeolith in pelletierter Form. Die Zeolithschüttung befindet sich in einem Container, durch den Luft geblasen wird, um Wasserdampf und Wärme in und aus dem Speicher zu transportieren. Der Container wäre also die Speicherkomponente. An der Wärmequelle und am Verbraucher müssen Übergabestationen vorhanden sein und der Container benötigt unter Umständen einen speziellen Anhänger für den Transport.*

*Die Frage, wie hoch zum Beispiel die erreichbare Speicherkapazität ist, kann nun unterschiedlich beantwortet werden, je nachdem auf was sich die nutzbare Wärme beim Entladen bezieht: Auf die Masse Zeolith oder auf den gesamten Container? Genauso ist die Frage nach der Wirtschaftlichkeit abhängig davon, ob nur die Containerkosten oder auch die Kosten der Übergabestationen und des Spezialanhängers in die Kalkulation einbezogen werden.*

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Grenzen der Ebenen – Material, Komponente und System – explizit definiert werden müssen, um Missverständnisse, Fehlinterpretationen und Falschinterpretationen technischer wie wirtschaftlicher Natur zu verhindern.

## 3.2 Kosten und wirtschaftliche Betrachtung

Um die Kosten eines thermischen Energiespeichersystems zu erfassen, müssen Speichermaterial, Lade- und Entladevorrichtung sowie die Betriebskosten berücksichtigt werden. Je nach System dominieren unterschiedliche Kostenanteile.

Sensible Wärmespeichersysteme sind vergleichsweise günstig, da sie lediglich aus dem Speichermaterial selbst, einem einfachen Tank mit Isolation und dem Equipment zum Laden und Entladen bestehen. Die eingesetzten Speichermedien, wie Wasser, Erdreich, Steine, Beton oder Salzschnmelzen sind relativ günstig. Der Behälter allerdings braucht eine effiziente thermische Isolierung, die nicht unwesentlich zu den gesamten Systemkosten beiträgt.

Saisonale Warmwasserspeicher, von denen bereits einige in Deutschland gebaut wurden, beinhalten zwischen 5 000 und 10 000 m<sup>3</sup> Wasser. Die spezifischen Investitionskosten werden maßgeblich durch den Behälter bestimmt und liegen zwischen 0,5 € und 3,0 € pro kWh Speicherkapazität [7]. Bei Erdsonden-Speichern sind hingegen die Bohrlöcher und die eingebracht-

ten Wärmeübertrager die entscheidenden Kostenfaktoren. Die spezifischen Kosten liegen hier zwischen 0,10 € und 10 € pro kWh, hängen aber stark von den lokalen Bedingungen ab.

Latentwärmespeicher und thermochemische Speicher sind dagegen deutlich komplexere und teurere Systeme. In den meisten Fällen werden aufwendige Konstruktionen zur Verbesserung des Wärme- und Stoffübergangs eingebaut, um die geforderte Speicherkapazität und Leistung zu erreichen. Die Kosten dieser Konstruktionen sind in der Regel deutlich über den Kosten für das eigentliche Speichermaterial.

Im Allgemeinen liegen die Kosten für einen PCM-Speicher zwischen 10 € und 50 € pro kWh Speicherkapazität [7]. Der Preis für ein System, das mikro-verkapseltes PCM benutzt und damit keinen zusätzlichen Wärmeübertrager benötigt, kann noch höher liegen. Beispielsweise ergibt sich der Preis eines fertigen Gips-Karton-Boards (für die passive Kühlung von Gebäuden durch die Erhöhung der thermischen Masse) aus den Kosten für das Board von ca. 5 €/kg und dem Preis für das mikro-verkapselte PCM von 13 €/kg.

Die Kostendifferenz zwischen dem reinen PCM und dem kompletten Speichersystem ist für aktive Latentwärmespeicher sogar noch größer. Als Beispiel sei hier ein Calcium-Chlorid-Hexahydrat-Speicher, der als Wärmesenke für eine Absorptionskältemaschine dient, erwähnt. Calcium-Chlorid-Hexahydrat selbst ist sehr preisgünstig (0,3 €/kg), aber die Kosten für Behälter, Wärmeübertrager und andere Komponenten liegen bei 65 €/kWh.

Bei thermochemischen Speichersystemen hat der Preis für das Speichermaterial, z. B. Adsorbentien, die gleiche Größenordnung wie bei PCMs. In den meisten Fällen muss das Material für die Anwendung aufbereitet werden, z. B. pelletiert oder dünn auf Austauschflächen aufgebracht werden. Aufwendiger sind hier auch die Behälter bzw. Reaktoren, die den notwendigen Wärme- und Stoffübergang gewährleisten. Die Kosten schwanken stark, je nachdem, ob das System offen (bei Umgebungsdruck) oder geschlossen (evakuiert) betrieben wird, und liegen zwischen 8 €/kWh und 100 €/kWh [7].

Eine Gesamtbeurteilung der Wirtschaftlichkeit eines thermischen Energiespeichers hängt entscheidend von der aktuellen Anwendung und deren Betriebsbedingungen ab. Dabei spielt die Anzahl der Speicherzyklen pro Zeit die wichtigste Rolle. Dieser Zusammenhang wird in Abb. 10 veranschaulicht [9]. Sie zeigt eine einfache Abschätzung, die auf einem Speichersystem mit einer Speicherkapazität von 100 kWh basiert. Es wird angenommen, dass der Wärmepreis bei 0,05 €/kWh und die Amortisationszeit bei 5 Jahren liegt. Die Tabelle gibt an, welche Energieeinsparungen durch den Speicher und seine, durch die Anwendung vorgegebene Zyklenzahl pro Jahr realisiert werden können und welche spezifischen Investitionskosten idealerweise (d. h. ohne Kapitalkosten) noch tolerabel sind. Das Ergebnis zeigt, dass ein Speicher mit 1 Zyklus pro Jahr (saisonale Speicher) max 0,25 €/kWh kosten darf. Damit sind PCM oder Sorptionspeicher für diese Anwendungen aus wirtschaftlicher Sicht nicht sinnvoll. Diese Speichertechnologien können aber eingesetzt werden, wenn die Anwendung Zyklenzahlen zwischen 1 000 und 3 000 pro Jahr erlaubt. Dann liegen die Investitionen unter Berücksichtigung der Kapital- und Betriebskosten zwischen 160 €/kWh und 540 €/kWh.

	Zyklen pro Jahr	Zyklen in 5 Jahren	Gesamt Energie- einspa- rung kWh	Ein- sparungen €	Spez. Investi- tionskosten (ideal) €/kWh	Einfaches Kostenmodell (Kapital + Betrieb) €/kWh
Saisonale Speicherung	1	5	500	25	<b>0,25</b>	<b>0,18</b>
Tagesspeicher	300	1 500	150 000	7 500	<b>75</b>	<b>54</b>
Kurzzeitspeicher (3 Zyklen pro Tag)	900	4 500	450 000	22 500	<b>225</b>	<b>160</b>
Pufferspeicher (10 Zyklen pro Tag)	3 000	15 000	1 500 000	75 000	<b>750</b>	<b>540</b>

■ **Abb. 10:** Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit von der Zyklenzahl [9]



## 4 Speicherklassifikation

Die verschiedenen Arten thermischer Energiespeicher und die Vielzahl möglicher Anwendungen erfordern eine Klassifikation der Speicher, sortiert nach Anwendungen. Nach der im Folgenden entworfenen Klassifikation lassen sich thermische Speicher mit wenigen Begriffen recht genau beschreiben und einordnen.

### 4.1 Was soll der Speicher in der Anwendung leisten?

Die Einordnung der thermischen Energiespeicher kann danach erfolgen, was sie in einer konkreten Anwendung leisten sollen. Dabei sind Kriterien die Anwendung selbst, die geforderte Temperatur beim Entladen oder spezifische Speichereigenschaften, wie die Kapazität oder die thermische Leistung.

#### 4.1.1 Klassifikation nach Einsatzbereich

Die meisten thermischen Speicher werden zur **Effizienzsteigerung** eines Gesamtsystems oder zur **Integration fluktuierender Energiequellen** in ein solches System eingesetzt. In der Regel mit dem übergeordneten Ziel der Reduktion des Primärenergiebedarfs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen.

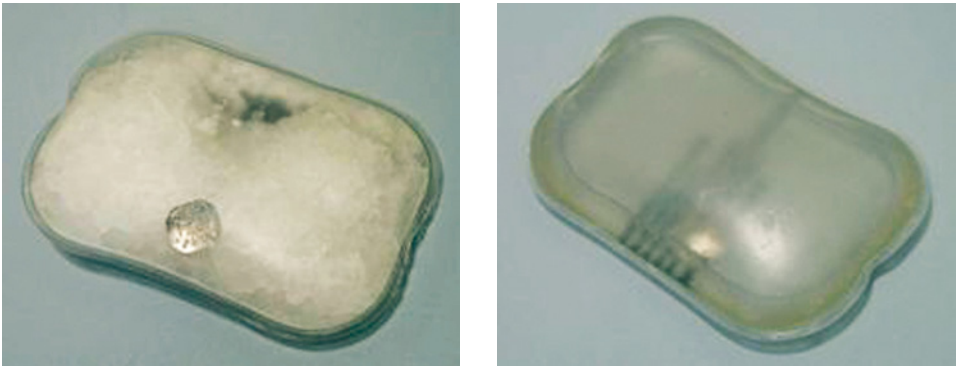
Steigerung der Effizienz heißt in der Regel, dass Wärme/Kälte, die momentan nicht genutzt werden kann, aufgehoben wird und zu einem anderen Zeitpunkt oder an anderer Stelle genutzt wird. Ein typisches Anwendungsbeispiel ist die Nutzung industrieller Abwärme. Bei der Integration erneuerbarer Energien stehen Aufgaben, wie das Kappen von Lastspitzen und eine »Vergleichmäßigung« der bereitgestellten Energie im Vordergrund.

Thermische Energiespeicher lassen sich je nach ihrer Position innerhalb eines Energiesystems in **zentrale** (d. h. beim Erzeuger) oder **dezentrale** (d. h. beim Verbraucher installierte) Systeme einteilen. So ist z. B. ein Speicher mit einer Salzschnmelze in einem solarthermischen Kraftwerk ein zentraler Speicher, wohingegen ein Latentwärmespeicher zur Kältespeicherung in einem Bürogebäude als dezentraler Speicher bezeichnet wird.

Die meisten Anwendungen thermischer Energiespeicher benötigen **stationäre** Systeme, d. h. sie sind an einem festen Standort installiert. Dies gilt für zentrale und dezentrale Speicher. Es gibt aber auch **mobile** Wärmespeicher, die dafür sorgen können, nicht-nutzbare Energie zu einem möglichen Verbraucher zu transportieren. Dies kann durch den Transport des Speicherbehälters selbst oder durch Pumpen des Speichermediums über längere Strecken (wie z. B. bei PCM-Slurries) geschehen.

*Beispiel: Ein unterkühlter Latentwärmespeicher mit Natriumacetat kann auf Raumtemperatur abgekühlt werden, ohne wieder fest zu werden. In diesem unterkühlten Zustand kann er verbleiben, bis durch einen externen Vorgang die Kristallisation eingeleitet wird. Dann wird die Schmelzwärme freigesetzt. Auf diesem Prinzip beruhen die Handwärmer (Abb. 11).*

Besondere Anforderungen werden an Speicher gestellt, die eine netzunabhängige Versorgung gewährleisten sollen. Diese Speicher müssen bzgl. ihrer Kapazität und Leistungsbereitstellung alle Anforderungen des Verbrauchers befriedigen können. Eher die Ausnahme sind auch so genannte »Einweg-Speicher«, die ihre Kapazität nur einmal nutzen.



■ **Abb. 11:** Handwärmer, links in festem Zustand und rechts geschmolzen

*Um Flugschreiber im Falle eines Flugzeugabsturzes eine bestimmte Zeit vor Überhitzung zu schützen, werden latente und thermochemische Speicher eingesetzt. Sie können eine große Wärmemenge aufnehmen, d. h. abpuffern, und somit den Flugschreiber schützen. Hier wird nur der Ladevorgang eines Speichers genutzt.*

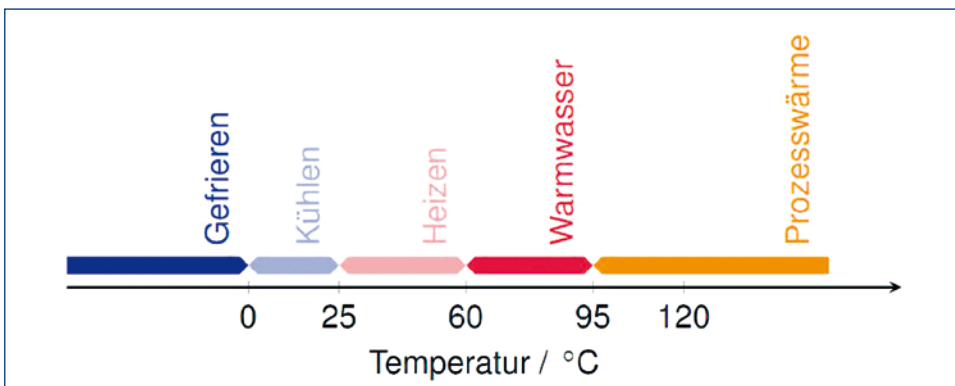
## 4.1.2 Klassifikation nach Temperaturniveau

Abbildung 12 zeigt verschiedene Temperaturbereiche für mögliche Anwendungsbereiche thermischer Energiespeicher.

Üblicherweise werden die Temperaturniveaus in drei Bereiche unterteilt:

- **Kälte**
- **Wärme**
- **Hochtemperatur**

Dabei schließt der Bereich Kälte das Gefrieren (bei Temperaturen von  $-18^{\circ}\text{C}$ ) und das Kühlen (üblicherweise von  $5-18^{\circ}\text{C}$ ) ein. Bei der Kälte kann noch zwischen dem Kühlen von bestimmten Gütern, z. B. Lebensmitteln (üblicherweise bei  $5-8^{\circ}\text{C}$ ) und der Kühlung von Räumen, d. h. Raumklimatisierung, (üblicherweise von  $6-18^{\circ}\text{C}$ ) unterschieden werden.



■ **Abb. 12:** Grobe Einteilung der Temperaturbereiche nach typischen Anwendungen

Auch der Bereich Wärme lässt sich wiederum in verschiedene Bereiche unterteilen: Gebäudeheizung findet im Allgemeinen bei Temperaturen von 25 °C (Flächenheizsysteme) bis 90 °C (Radiatoren) statt. Für die Bereitstellung von Warmwasser müssen aus hygienischen Gründen zeitweise höhere Temperaturen von über 65 °C erreicht werden, d. h. diese Speicher müssen über sehr hohe Leistungen verfügen. Bei Speichern in Heizanwendungen sind in der Regel geringe Leistungen gefordert.

Der Bereich Hochtemperatur-Speicher ist sehr heterogen und fasst alle Anwendungen zusammen, die sich jenseits der Warmwasseranwendungen befinden. Er umfasst Prozesswärme für die Lebensmittelindustrie (z. B. für die Sterilisation) bei Temperaturen von knapp über 100 °C, ebenso wie die Wärmeversorgung solarthermischer Kraftwerke bei Temperaturen von über 400 °C.

### 4.1.3 Klassifikation nach Speicherkapazität, thermischer Leistung und Speicherdauer

Durch die verschiedenen Anwendungen stellen sich auch verschiedene Anforderungen an die Speichereigenschaften Speicherkapazität, Lade- und Entladeleistung sowie die Speicherdauer.

Speicher mit **hoher Speicherkapazität/Energiedichte** sind vor allem in Bereichen wichtig, wo das Platzangebot gering ist oder große Energiemengen gespeichert werden müssen. Als Beispiel können hier ganz allgemein mobile Speichersysteme genannt werden, da sich hier großes Volumen bzw. hohes Gewicht in jedem Fall nachteilig auswirkt.

Speicher mit **hoher thermischer Leistung** werden in Bereichen wie z. B. der Warmwasserbereitstellung benötigt. Bestimmte Wärmespeichertechnologien, wie z. B. Latentwärmespeicher, eignen sich prinzipiell weniger für solche Anwendungen. Hier müssen die hohen thermischen Leistungen durch aufwendige Einbauten zur Wärmeübertragung realisiert werden. Im konventionellen Warmwasserspeicher, in dem das benötigte Warmwasser gleichzeitig das Speichermedium ist, sind hohe Leistungen allerdings einfacher zu erreichen.

Man unterscheidet auch zwischen **Langzeit- und Kurzzeitspeichern**. Dabei werden Langzeitspeicher mit Speicherzyklen von Wochen bis zu einem Jahr (saisonaler Speicher) betrieben. Thermische Kurzzeitspeicher speichern im Bereich von Stunden bis Tagen. Beide Kategorien unterscheiden sich deutlich in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht in den für sie geeigneten Speichertechnologien.

In der Regel müssen Langzeitspeicher große Mengen thermischer Energie bei geringer Lade- und Entladeleistung speichern können. Kurzzeitspeicher dagegen verfügen über hohe Leistungen und geringere gespeicherte Wärmemengen.

## 4.2 Das physikalische Speicherprinzip

Die der Speicherung thermischer Energie zugrunde liegenden Vorgänge können thermodynamisch beschrieben werden. Dabei gelten für die verschiedenen Arten der thermischen Energiespeicherung – sensibel, latent und thermochemisch – unterschiedliche Abhängigkeiten. Während bei der sensiblen Wärmespeicherung die Änderung des Wärmehalts einer Temperaturänderung des Speichermediums entspricht, ist bei den Latentwärmespeichern dies und ein Phasenwechsel, eine physikalische Strukturänderung, für die Wärmeaufnahme verant-



wortlich. Bei thermochemischen Speichern liegt eine chemische Reaktion oder ein Ad- bzw. Absorptionsprozess (basierend auf physikalischen Kräften) vor. Hier sind die Reaktionsenthalpien für den energetischen Umsatz entscheidend.

Der Übergang von der physikalischen zur chemischen Strukturänderung liegt in der Natur der Bindung und damit der Bindungsstärke. Im Prinzip ist der Übergang fließend. Im Allgemeinen bezeichnet man schwache Bindungen bis inkl. der Wasserstoff-Brückenbindungen als physikalische Bindungen.

## 4.2.1 Spezifische Wärmekapazität

Entscheidend für die Aufnahmekapazität eines sensiblen Wärmespeichers ist zunächst seine spezifische Wärmekapazität. Damit ergibt sich die aufgenommene Wärme zu

$$Q_{Sens} = \int_{T_1}^{T_2} c_p dT = \int_{T_1}^{T_2} \left( \frac{\partial S}{\partial T} \right)_P dT = \bar{T} \Delta S_{12}$$

wobei die gespeicherte Wärme  $Q$  dem Integral des Produkts aus der spezifischen Wärmekapazität  $c_p$  und der Temperaturerhöhung von  $T_1$  auf  $T_2$  entspricht. Ersetzt man die spezifische Wärmekapazität durch die Änderung der Entropie pro Temperatur, ergibt sich diese Wärme als Produkt der mittleren Temperatur  $\bar{T}$  mit der Entropieerhöhung  $\Delta S$ . Dies zeigt, dass die mögliche Entropieaufnahme eines Materials mit der Speicherkapazität gekoppelt ist und eine Eigenschaft des Speichermaterials ist.

## 4.2.2 Schmelzwärme

Im Falle eines Latentwärmespeichers ergibt sich die gespeicherte Wärme zu

$$Q_{Lat} = \int_{T_1}^{T_2} c_p dT = \Delta H_{Is} = \bar{T} \Delta S_{12} + T_{Is} \Delta S_{Is} \approx \bar{T} (\Delta S_{12} + \Delta S_{Is}) > Q_{Sens}$$

wobei  $\Delta H_{Is}$  die Schmelzenthalpie beim Phasenübergang von fest zu flüssig ist. In diesem Übergang, der bei der Temperatur  $T_{Is}$  stattfindet, vollzieht sich die Entropieänderung  $\Delta S_{Is}$ . Damit ist die gespeicherte Wärme  $Q_{Lat}$  eines Latentwärmespeichers im Allgemeinen größer als die eines sensiblen Speichers  $Q_{Sens}$ , wenn ein Phasenwechsel in der vorgenommenen Temperaturerhöhung überhaupt stattfindet.

*Sensibel oder Latent? Warmwasserspeicher oder Latentwärmespeicher?*

*Im Temperaturbereich zwischen etwa 5 °C und 95 °C ist Wasser ein aus vielen Gründen (hohe spezifische Wärmekapazität  $c_p$ , kostengünstig, einfache Handhabung) etabliertes Speichermedium. Die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  eines Warmwasserspeichers ist in diesem Fall maximal 90 K. Typische Werte und der Vergleich zur rein sensiblen Wärmespeicherung machen deutlich, welche Temperaturintervalle den Einsatz von PCM empfehlen.*

Es gilt allgemein

$$\begin{aligned}\Delta q^{PCM} &= c_p^{PCM} \cdot \Delta T + \Delta h \\ \Delta q^{Wasser} &= c_p^{Wasser} \cdot \Delta T \\ \frac{\Delta q^{PCM}}{\Delta q^{Wasser}} &= \frac{c_p^{PCM}}{c_p^{Wasser}} + \frac{\Delta h}{c_p^{Wasser} \cdot \Delta T}\end{aligned}$$

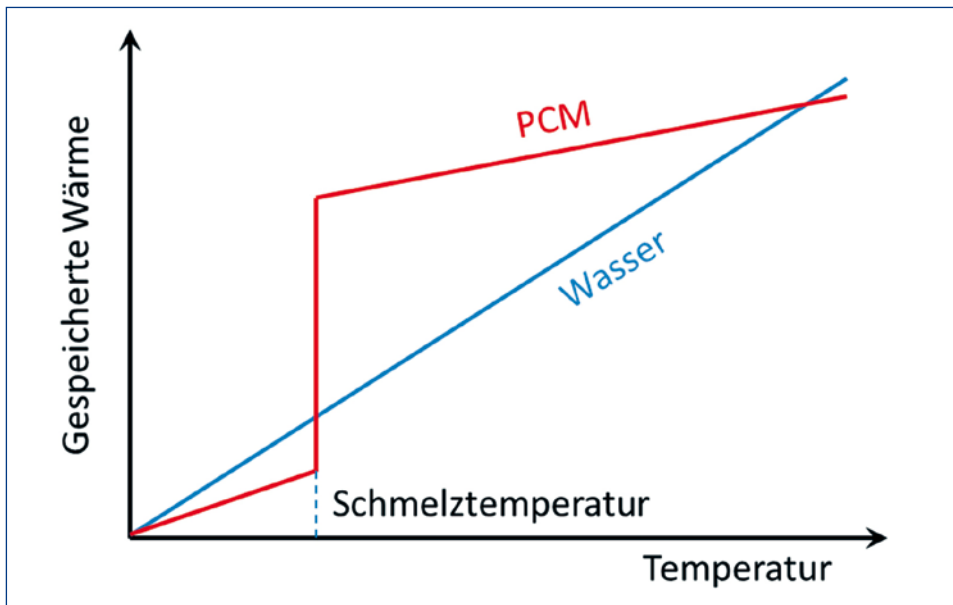
und damit für  $c_p^{Wasser} \approx 4,2 \frac{J}{g \cdot K}$  und z. B.  $c_p^{PCM} \approx 2,1 \frac{J}{g \cdot K}$  und  $\Delta h \approx 150 \text{ J/g}$

$$\frac{\Delta q^{PCM}}{\Delta q^{Wasser}} \approx 0,5 + \frac{35,7 K}{\Delta T}$$

d. h. für die oben angenommenen Materialdaten ist die Speicherkapazität des Latentwärmespeichers größer als die des sensiblen Speichers, wenn der Temperaturbereich deutlich kleiner als 70 K ist.

Für ein PCM mit höherer Speicherdichte von 250 J/g (z. B. Salzhydrat) ergibt sich ein Temperaturbereich von 120 K, d. h. der PCM-Speicher ist dem Warmwasserspeicher im Hinblick auf die materialbezogene Speicherdichte auf jedem Fall überlegen. Inwiefern dieser prinzipielle Vorteil in der Anwendung im System umgesetzt und genutzt werden kann, steht auf einem anderen Blatt.

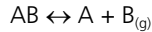
Ist also die Temperaturdifferenz sehr groß, kann die hohe Wärmekapazität des Wassers die Schmelzenthalpie des PCM übertreffen. Abbildung 13 zeigt schematisch diesen Zusammenhang. Geht man zu höheren Temperaturen, wird der Vorteil des PCM-Speichers abnehmen und der Wasserspeicher eine insgesamt höhere Speicherkapazität erreichen.



**Abb. 13:** Abhängigkeit der gespeicherten Wärme von der Temperatur für sensible und latente Speicherung

### 4.2.3 Reaktionsenthalpie

Thermochemische Wärmespeicherprozesse, wie z.B. die Adsorption von Wasserdampf an festen Adsorbentien, können als umkehrbare chemische Reaktionen aufgefasst werden. Die gespeicherte Energie entspricht der spezifischen Reaktionsenthalpie der zugrundeliegenden Reaktion. Das ideale Reaktionsschema ist die thermische unter Wärmeeaufnahme erzwungene (endotherme), reversible Dissoziation einer kondensierten (d.h. einer festen oder flüssigen) Verbindung AB zu einem kondensierten Reaktionsprodukt A und einem gasförmigen Produkt B:

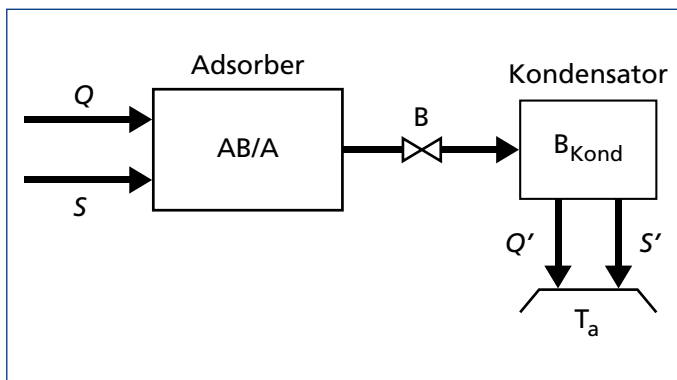


B wird als gasförmige Komponente aus zwei Gründen bevorzugt, da sich eine gasförmige Phase einfach von den kondensierten Phasen A und AB trennen lässt [10]. Damit kann eine verlustfreien Langzeitspeicherung durch Trennung der Reaktanden und somit Verhinderung der Rückreaktion erreicht werden. Die Gasbildung in der Reaktionsrichtung  $AB \rightarrow A+B$ , also beim Laden des Speichers, bewirkt eine starke Zunahme der Entropie. Dies erhöht die Kapazität der Wärmeeaufnahme des Speichers.

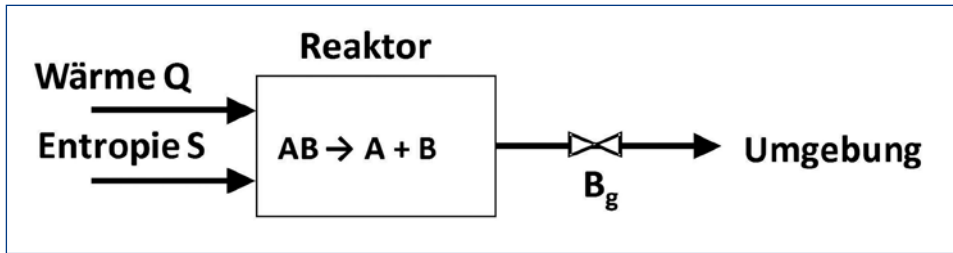
Die gasförmige Komponente kann nach der Dissoziation separat gespeichert werden. Dafür sind allerdings große Volumina notwendig, was die Energiespeicherdichte stark reduziert.

Um die Entropie nicht im thermochemischen Speicher aufnehmen zu müssen, kann die gasförmige Phase in einem geschlossenen Adsorptionssystem (Abb. 14) bei geschickter Wahl der Betriebsbedingungen kondensiert werden. Die gasförmige Phase verlässt den Adsorber und wird im Kondensator kondensiert. Abwärme  $Q'$  und Entropie  $S'$  verlassen das System bei der Kondensation. Bei der Bestimmung der Energiespeicherdichte kann die gespeicherte Wärmemenge jetzt auf das Volumen des Adsorbens plus das Volumen der kondensierten Komponente B bezogen werden.

Zum Entladen des Speichers ändern die Pfeile in Abbildung 14 ihre Richtung. Bei der Rückreaktion wird Wärme aus der Umgebung für die Verdampfung der kondensierten Komponente B eingesetzt. Damit wird der Umgebung Wärme entzogen: Sie wird gekühlt. Die gasförmige Komponente B reagiert mit der Komponente A im Reaktor und die Reaktionswärme wird freigesetzt. Beim Entladen solcher Speichersysteme kann also sowohl Kälte als auch Wärme bereitgestellt werden.



■ **Abb. 14:** Geschlossener Wärmespeicher über thermochemische Dissoziation von AB und anschließender Kondensation der Gaskomponente B



■ **Abb. 15:** Offener thermochemischer Wärmespeicher

Offene Adsorptionssysteme bieten eine weitere Möglichkeit: Ist die gasförmige Komponente B ein natürlicher Bestandteil der Atmosphäre, kann sie in der Umgebung zwischengelagert werden und geht in diesem Fall nicht in das Speichervolumen ein (Abb. 15). In diesem Fall verlässt die Entropie das Speichersystem mit dem Stoffstrom der gasförmigen Komponente B. Die erreichbare Energiespeicherdichte ist definiert als die nutzbare Wärme aus dem Speicher pro Volumen (oder Masse) der kondensierten Komponente A alleine. Im Falle thermochemischer Speicherung ist diese das Adsorbens. Dieser Vorteil macht offene Adsorptionssysteme mit Wasserdampf zur Wärmespeicherung sehr interessant. Allerdings muss die Komponente B beim Entladen in ausreichender Konzentration zur Verfügung stehen.

### Beispiel: Offener Adsorptionsspeicher

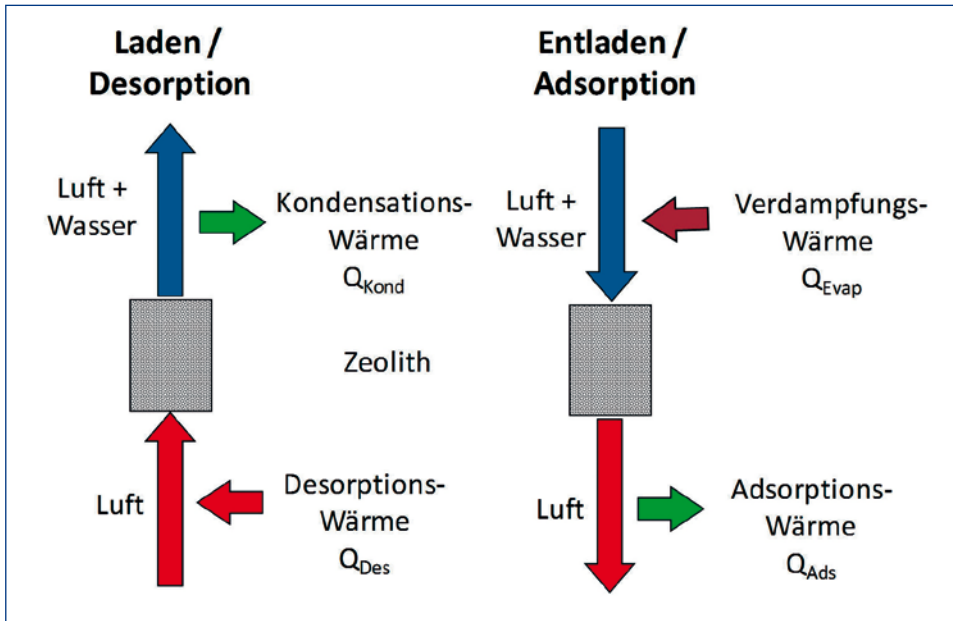
Als ein Beispiel gilt der offene Adsorptionsspeicher. Dabei sind die Komponenten A und B Zeolith und Wasser. Im Gegensatz zu chemischen Reaktionen handelt es sich hier um den physikalischen Vorgang der Adsorption, was mit »Anlagerung« übersetzt werden kann. Dabei wird der Wasserdampf im mikroporösen Adsorbens Zeolith durch elektrostatische Kräfte adsorbiert, wobei er die so genannte Adsorptionseenthalpie in Form von Wärme freisetzt. Dies entspricht dem Entladeprozess des Speichers. Um den Wasserdampf wieder zu lösen, zu desorbieren, muss Wärme eingesetzt werden, um das Wasser aus dem Zeolith zu »lösen« und zu verdampfen. Dies entspricht dem Laden des Speichers.

Vorteil eines offenen Systems ist, dass der Wasserdampf beim Laden einfach in die Umgebung entlassen werden kann. Beim Entladen allerdings muss der Wasserdampf auch wieder zur Verfügung stehen, d. h. zur Adsorption in ausreichendem Maße vorhanden sein.

Abbildung 16 zeigt schematisch einen offenen Adsorptionsspeicher. Das Festbett mit dem Adsorbens Zeolith wird von Luft durchströmt. Die Luft dient als Trägergas. Sie transportiert die zum Laden notwendige Wärme in und den desorbierten Wasserdampf aus der Schüttung. Beim Entladen bringt diese den Wasserdampf in und die Adsorptionswärme aus dem Festbett.

Die Desorptionswärme entspricht der eingespeicherten Wärme. Sie setzt sich zusammen aus der Überwindung der Adsorptionskräfte, genannt »Bindungsenergie«  $Q_{\text{bind}}$ , der Verdampfung des »gelösten« Wassers  $Q_{\text{Evap}}$  und der sensiblen Erwärmung von Zeolith und Wasser  $Q_{\text{Sens}}$ . Die Desorptionstemperatur sollte bei einem Zeolith-Speicher über 130 °C liegen, da sonst kaum adsorbiertes Wasser ausgetrieben werden kann.

Während des Ladens verlässt ein abgekühlter aber mit Wasserdampf praktisch vollständig gesättigter Luftstrom das Festbett. U. U. kann hier die Kondensationswärme  $Q_{\text{Kond}}$  noch genutzt werden (siehe Beispiel 5.3.3 Geschirrspüler).



■ **Abb. 16:** Offener Adsorptionsspeicher

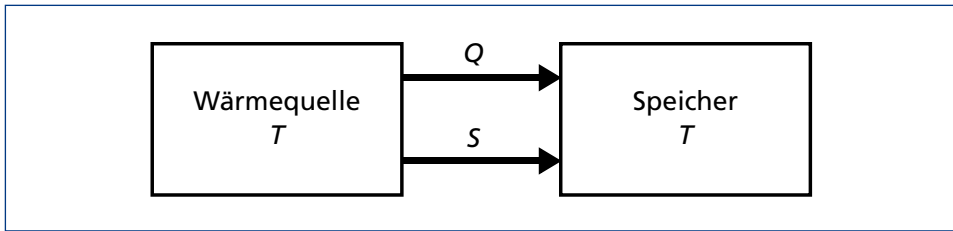
Bei der Adsorption muss ausreichend Wasserdampf bereitgestellt werden. Die Wasserdampfkonzentration ist für den Temperaturhub zwischen Luft eintritt und -austritt verantwortlich. Gegebenenfalls muss Wasser in den Luftstrom verdampft werden ( $Q_{\text{Evap}}$  muss aufgewendet werden). Die freiwerdende Adsorptionswärme setzt sich analog der Desorptionswärme aus Bindungswärme  $Q_{\text{Bind}}$ , Kondensationswärme  $Q_{\text{Kond}}$  und sensibler Wärme  $Q_{\text{Sens}}$  zusammen.

Für die Leistungsfähigkeit eines solchen Speichersystems sind neben den Temperaturen beim Laden und Entladen auch die jeweiligen Wasserdampfkonzentrationen entscheidend. Nur unter der Angabe dieser vier Parameter lassen sich basierend auf den Adsorptionsgleichgewichten Speicherkapazität, Nutzungsgrad und die erreichbare Entladetemperatur vorhersagen. Die Adsorptionsgleichgewichte geben an, bei welcher Temperatur und Feuchte sich welche Wasserbeladung im Zeolith einstellt. Dieser Zusammenhang ist eine Materialeigenschaft des Adsorbens und in der Regel nicht linear.

### 4.3 Autarke – nicht-autarke thermische Speicher

Thermische Energiespeicher lassen sich prinzipiell in »autarke« Wärmespeicher sensibler und latenter Wärme und »nicht-autarke« Wärmespeicher einteilen. Ein autarker Speicher ist schematisch in Abbildung 17 dargestellt [10]. Bei autarken Wärmespeichern liefert eine Wärmequelle Energie  $Q$  und Entropie  $S$  an den Speicher. Der Speicherinhalt nimmt dabei um beide Mengen  $Q$  und  $S$  zu und zwar im Verhältnis  $Q/S = T$ .

Sizmann zeigt, dass das Fassungsvermögen für thermische Energie eines direkten Wärmespeichers durch die Kapazität für die Entropieaufnahme bei vorgegebener Temperaturerhöhung beschränkt ist [10]. Dies gilt auch für den Fall, dass zusätzlich zur Speicherung von sensibler Wärme die latente Wärme einer Phasenumwandlung genutzt wird. Durch die zusätzliche En-



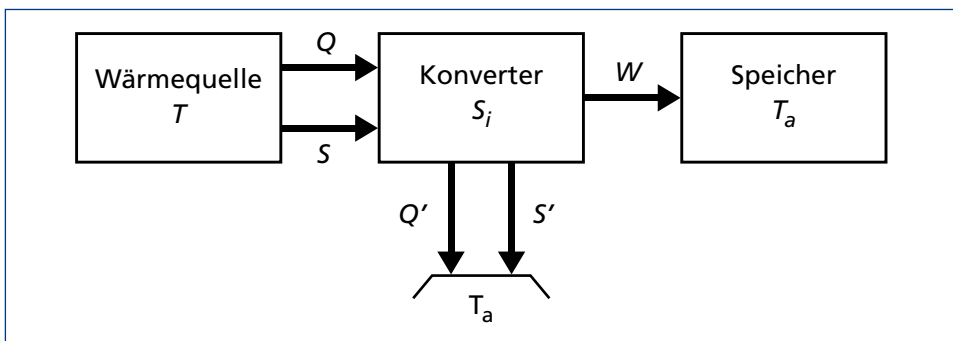
■ **Abb. 17:** Energieflüsse eines autarken Wärmespeichers

tropieänderung des Phasenübergangs kann die Speicherkapazität erhöht werden [11]. Damit würde z. B. ein Verdampfungsprozess aufgrund seiner hohen Entropieänderung theoretisch die Kapazität eines Wärmespeichers bei vorgegebener Temperaturerhöhung deutlich verbessern können.

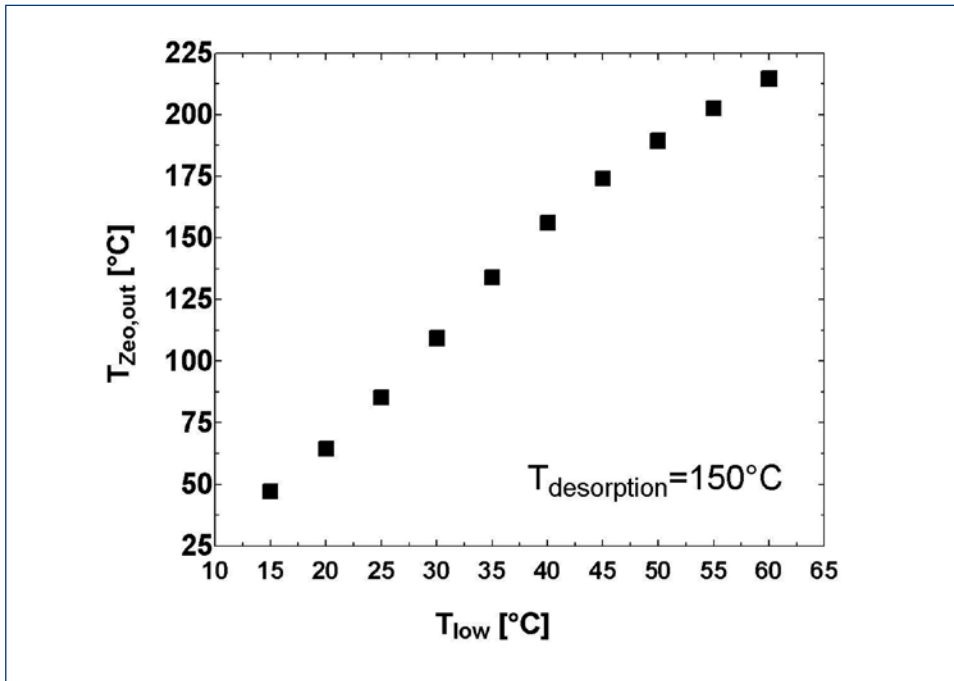
Um die prinzipielle Beschränkung durch die Entropieaufnahme bei direkten Wärmespeichern zu umgehen, muss die mit der dem Speicher zugeführten Wärme gekoppelte Entropie abgetrennt werden. Ziel eines solchen nicht-autarken Wärmespeichers ist es, reine Arbeit zu speichern. Das Schema eines nicht-autarken Energiespeichers ist in Abbildung 18 dargestellt [10].

Aus der Wärmequelle mit der Temperatur  $T$  fließt die Wärme  $Q$  und die Entropie  $S$  in den Konverter. Dort wird die Entropie abgetrennt und, vermehrt um die innere Entropieproduktion (Irreversibilitäten)  $S_i$ , mittels des Wärmeflusses  $Q'$  (Abwärme) als  $S' = S + S_i$ , bei der niedrigeren Umgebungstemperatur  $T_a$  abgeführt. Nur die entropiefreie Arbeit  $W$  wird gespeichert. Dies wird beispielsweise durch den Betrieb einer Wärmekraftmaschine (Konverter) möglich, bei der nun lediglich die entropiefreie Arbeit gespeichert wird. Diese kann als potenzielle Energie (z. B. durch Hochpumpen von Wasser), als kinetische Energie (z. B. in einem Schwungrad), als elektrische Energie (z. B. in einem Verbundnetz) oder als freie Enthalpie in einer chemischen Reaktion (z. B. durch elektrochemische Zersetzung von Wasser) gespeichert werden [11]. So können höhere Energiedichten im Speicher erreicht werden.

Allerdings sind nicht-autarke Wärmespeicher beim Entladen im Gegensatz zu autarken, bei denen Energie und Entropie im richtigen Verhältnis zur Verfügung stehen auf »Zuwärme« aus der Umgebung angewiesen. Bei der Entladung muss eine wärmeführende Kopplung zur Umgebung gewährleistet sein, da über diese Zuwärme Entropie für die Wärmeabgabe des Speichers zur Verfügung gestellt werden muss [10].



■ **Abb. 18:** Energieflüsse eines nicht-autarken Energiespeichers



■ **Abb. 19:** Entladetemperatur in Abhängigkeit von der zur Verfügung stehenden Niedertemperaturwärme.

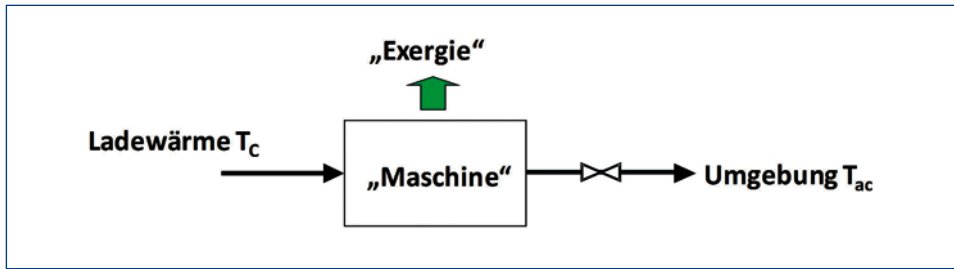
Vorteil solcher Systeme im Vergleich zu autarken Wärmespeichern ist ein Gewinn an Flexibilität bezüglich der Lade- und Entladetemperaturen. Die Lade- und Entladetemperatur eines nicht-autarken Speichers lässt sich in Grenzen frei wählen. Ein Beispiel dafür sind Sorptionsspeicher.

Abbildung 19 zeigt die Entladetemperatur eines Sorptionsspeichers in Abhängigkeit der Temperatur einer zur Verfügung stehenden »Zuwärme«-Quelle  $T_{low}$ . Den Werten liegt eine Ladetemperatur von  $150^{\circ}C$  zugrunde. Es ist deutlich zu erkennen, dass oberhalb einer Temperatur  $T_{low}$  von ca.  $40^{\circ}C$  höhere Entladetemperaturen als  $150^{\circ}C$  zu erwarten sind. Dies kann z. B. bei industriellen Trocknungsprozessen durchaus der Fall sein.

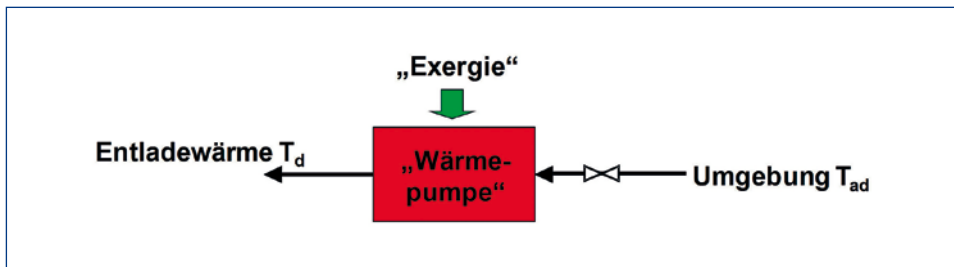
### 4.3.1 Thermodynamische Betrachtung nicht-autarker Speicherprozesse

Thermodynamisch kann der Ladeprozess eines nicht-autarken Speichers als »Wärme-Kraft-Maschine« verstanden werden. Hier wird Wärme in Entropiefreie Arbeit oder Exergie umgewandelt. Die Effizienz dieser Umwandlung lässt sich nach Carnot berechnen. Abbildung 20 zeigt schematisch diesen Vorgang. Beispielhaft kann man einen Sorptionsspeicher mit Zeolith/ Wasserdampf als Stoffpaar betrachten. Durch das Laden des Speichers wird »Adsorptionsfähigkeit« erzeugt.

Beim Entladen des Speichers wird die Fähigkeit, Wasserdampf zu adsorbieren, die gespeicherte Exergie, genutzt, um die frei werdende Adsorptionswärme einem Verbraucher zuzuführen. In diesem Fall wird der nicht-autarke Speicher thermodynamisch als Wärmepumpe betrachtet.



■ **Abb.20:** Ladevorgang eines offenen und nicht-autarken Wärmespeichers



■ **Abb.21:** Entladevorgang eines offenen und nicht-autarken Wärmespeichers

Abbildung 21 zeigt, wie Wärme aus der Umgebung aufgenommen werden muss, um auf einem nutzbaren Temperaturniveau abgegeben werden zu können.

Nach Carnot ergibt sich der Wirkungsgrad beim Laden (»Wärme-Kraft-Maschine«) zu

$$\eta_{Lad} = 1 - \frac{T_{Umg}}{T_{Lad}}$$

und beim Entladen (»Wärmepumpe«) zu

$$\eta_{Entlad} = 1 / \left( 1 - \frac{T_{Umg}}{T_{Entlad}} \right)$$

wobei  $T_{Lad}$  die Ladetemperatur,  $T_{Entlad}$  die Entladetemperatur und  $T_{Umg}$  die Umgebungstemperatur ist.

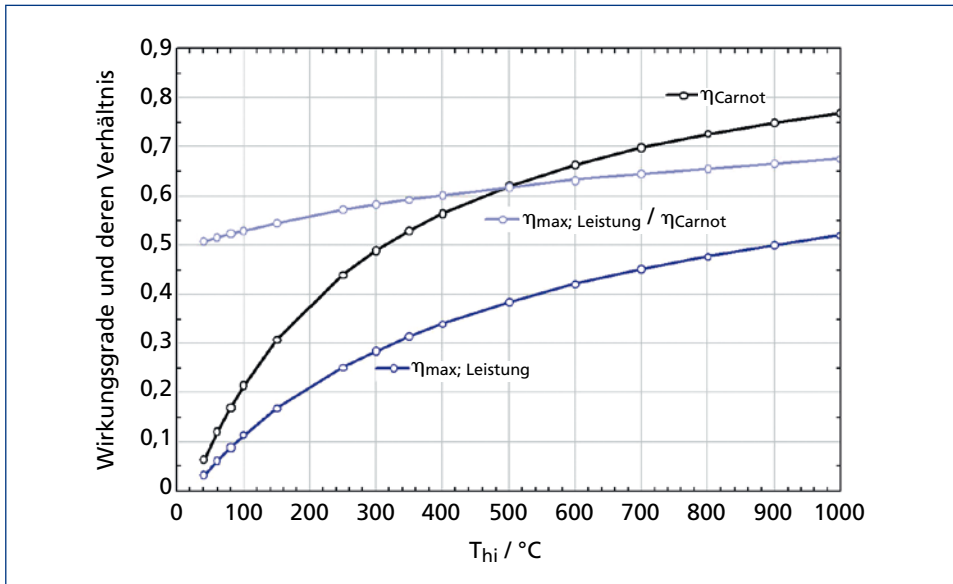
Der Wirkungsgrad des gesamten Speicherprozesses ergibt sich dann zu  $\eta_{Speicher} = \eta_{Lad} \cdot \eta_{Entlad}$ .

*Beispiel: saisonale Speicherung in einem nicht-autarken Wärmespeicher*

*Betrachtet man einen nicht-autarken Speicher für Speicherung solarer Wärme vom Winter in den Sommer, lassen sich für den Wirkungsgrad beim Laden und Entladen konkrete Temperaturen einsetzen.*

*Beim Laden wird eine Ladetemperatur von 120 °C (wird vom Kollektor bereitgestellt) und eine Umgebungstemperatur von 30 °C angenommen. Beim Entladen sollen 60 °C bereitstehen und die Umgebung hat sich auf –5 °C abgekühlt. Damit ergibt sich nach Carnot ein Wirkungsgrad für den gesamten Speicherprozess von  $\eta_{Speicher} = \eta_{Lad} \cdot \eta_{Entlad} = 1,17$ .*





**Abb. 22:** Der Carnot-Wirkungsgrad und der Wirkungsgrad nach Curzon und Ahlborn [12] und deren Verhältnis in Abhängigkeit der Ladetemperatur

Die Betrachtung von Carnot ist insofern idealisiert, als dass sie davon ausgeht, dass keine thermische Leistung übertragen wird. Dieser Speicher kann somit in dieser Betriebsweise keine Wärme aufnehmen oder abgeben. Bei der Umsetzung thermodynamischer Prozesse in die Realität ist davon auszugehen, dass sich lediglich 50 % des carnot'schen Wirkungsgrads realisieren lassen.

Curzon und Ahlborn [12] haben eine Reihe solcher Prozesse und ihre Umsetzung unter der Voraussetzung maximaler Leistungsbereitstellung betrachtet und sind zu der folgenden, empirischen Formel gelangt:  $\eta_{\text{real}} = (\eta_{\text{Entlad}})^{1/2} = (1 - T_{\text{Umg}}/T_{\text{Entlad}})^{1/2}$ . Damit würde sich der Wirkungsgrad für den realen saisonalen thermochemischen Wärmespeicher auf  $\eta_{\text{Speicher}} = 0,62$  reduzieren.

Abbildung 22 zeigt den Verlauf des Wirkungsgrads nach Carnot und nach der Methode von Curzon und Ahlborn [12] für maximale Leistung mit steigender Ladetemperatur. Die hellblaue Linie zeigt das Verhältnis der beiden Wirkungsgrade zueinander, das zwischen 50 % und ca. 70 % bei sehr hohen Temperaturen liegt.

## 4.4 Empirische Regeln zur Abschätzung der Speicherkapazität

### 4.4.1 Sensible Wärmespeicherung

Die Speicherung thermischer Energie in einen Stoff ohne Phasenübergang bezeichnet man als sensible Wärmespeicherung.

Die folgenden Annahmen und die daraus resultierenden theoretischen Grenzen sind der Arbeit von R. Sizmann [10] entnommen.

Für das weitere Verständnis wird zunächst die Wärmekapazität eines Stoffes bei konstantem Druck durch die Gleichung

$$c_P = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_P \text{ bzw. } c_P = T \left( \frac{\partial S}{\partial T} \right)_P$$

definiert. Die Wärmekapazität ist die Fähigkeit eines Körpers, thermische Energie zu speichern. Aus thermodynamischer Sicht wird diese thermische Energie in Form von Bewegungen innerhalb der Moleküle gespeichert. Sie ist die Summe aus den Beiträgen der möglichen Freiheitsgrade innerhalb der einzelnen Moleküle. Hierzu zählen die drei Freiheitsgrade der Translation. Hinzu kommen bei linearen Molekülen zwei Rotationsfreiheitsgrade, bei gewinkelten Molekülen sind es drei. Diese sind, wie die der Translation, bei Gasen immer aktiv. Bei hohen Temperaturen werden zusätzlich Schwingungsfreiheitsgrade aktiv. Man kann zunächst sagen, dass die Wärmekapazität eine Stoffeigenschaft ist, welche von der Temperatur abhängt (vgl. Gleichung). Sie ist streng genommen innerhalb eines Temperaturintervalls nicht konstant und ändert ihre Größe bei Phasenübergängen stark.

Allgemein ist die reversible Wärmeänderung thermodynamisch definiert als Temperatur mal Entropieänderung, wobei die Temperatur der Speichertemperatur entspricht. Soll eine konstante Wärmemenge in den Speicher transportiert werden, ist die Entropieänderung für niedrige Speichertemperaturen definitionsgemäß eine größere als für hohe Temperaturen.

$$\partial Q_{\text{rev}} = T \partial S$$

Als Resultat ist festzuhalten, dass das Fassungsvermögen eines Wärmespeichers durch die Kapazität für die Entropieaufnahme bei vorgegebener Temperaturerhöhung begrenzt ist.

Für die gespeicherte Wärme innerhalb eines Temperaturintervalls ergibt sich

$$Q_{\text{sensibel}} = \int_{T_1}^{T_2} c_P dT = \int_{T_1}^{T_2} T \left( \frac{\partial S}{\partial T} \right)_P dT = \bar{T} \Delta S_{12}$$

mit

$$\bar{T} \approx \frac{T_1 + T_2}{2}$$

Im weiteren geht Sizmann davon aus, dass die Molare Wärmekapazität aus thermodynamischen Gründen auf rund  $(3 \dots 4)Rn$ , mit  $n$  als Anzahl der Teilchensorten im Festkörper, beschränkt ist. ( $R$  ist hierbei die allgemeine Gaskonstante mit  $8,3144 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ )

$$Q_{\text{sensibel}} = (3 \dots 4)R \cdot n \cdot \Delta T$$

Zusammen mit dem Molaren Volumen einer Teilchensorte im Bereich von  $10 \dots 20 \text{ cm}^3$  ergibt sich die volumenbezogene sensible Speicherdichte.

$$E_{V,\text{sensibel}} \approx (2 \dots 3) \Delta T \text{ in MJ/m}^3$$

Die Abbildung 23 beschreibt die sich aus dem Sizmann-Ansatz ergebenden theoretischen Grenzen der Wärmespeicherkapazität im Vergleich zu realen volumetrische Speicherkapazitäten gängiger Stoffe. Ersichtlich ist, dass es Stoffe wie Wasser bzw. Sand gibt, deren Werte außerhalb dieser theoretischen Grenzen liegen. Festzustellen ist, dass die Größenordnung des theoretischen Ansatzes die Richtige ist, jedoch ist der von dem Ansatz beschriebene Bereich zu klein.

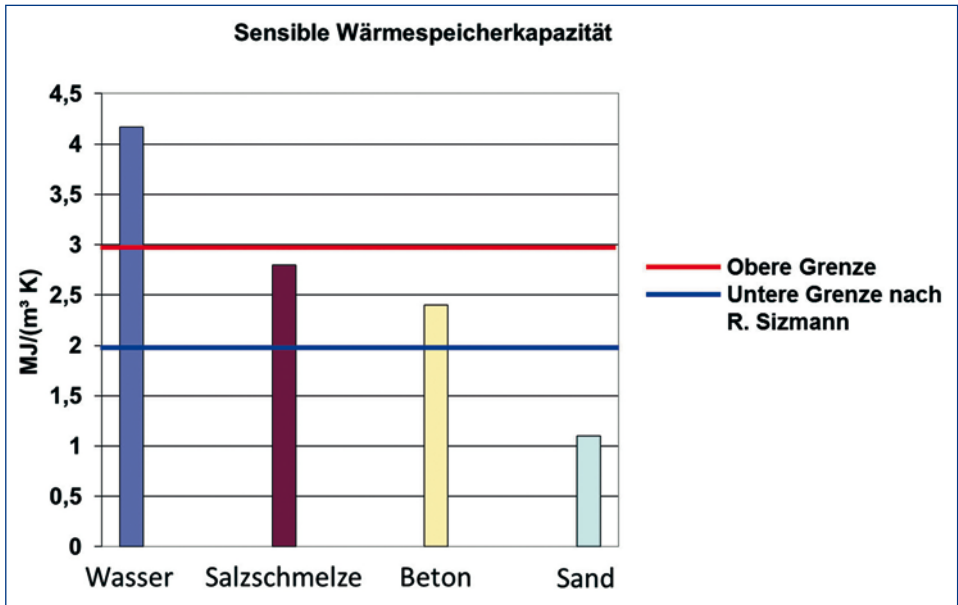


Abb. 23: Grenzen sensibler Speicherkapazität

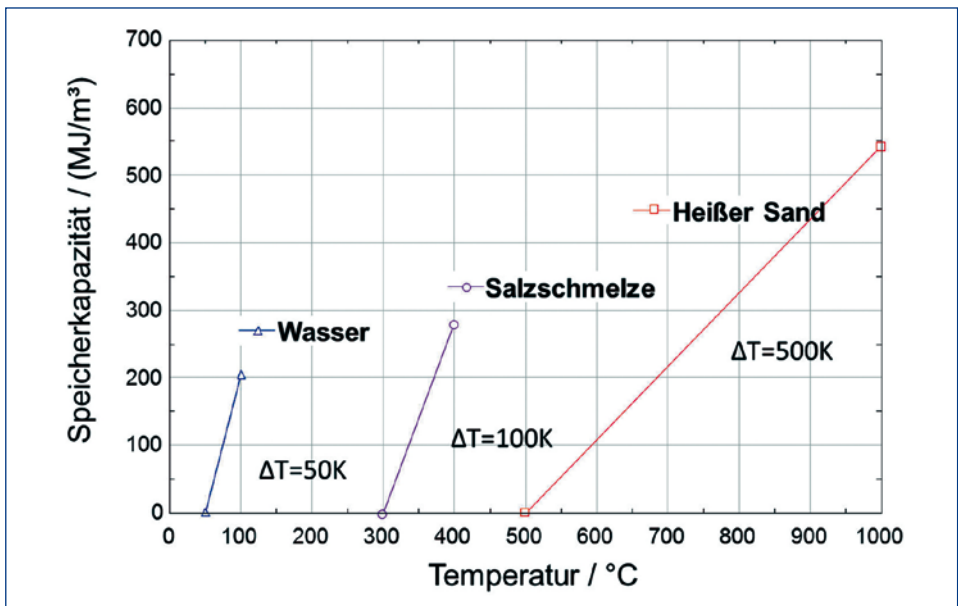


Abb. 24: Volumetrische Speicherkapazität verschiedener Materialien für sensible Speicherung

Die Abbildung 24 zeigt die volumetrische Speicherkapazität verschiedener Stoffe in Abhängigkeit von ihrem möglichen Temperaturhub. Hieraus kann abgeleitet werden, dass die Wärmekapazität eines Stoffes wie zum Beispiel die des Sandes bei der Gesamtkapazität eines Speichers eine untergeordnete Rolle einnehmen kann, wenn große Temperaturhübe ( $\Delta T$ ) möglich bzw. erforderlich sind.

$$Q_{\text{Speicher}} = V_{\text{Speicher}} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Sand erlaubt zusätzlich Arbeitsbereiche des Speichers weit über 700°C hinaus. Im Vergleich hierzu kann die hohe zu erwartende volumenbezogene sensible Energiespeicherdichte des Wassers in diesem Temperaturbereich nicht mehr genutzt werden. Wasser hat bei dieser Temperatur bereits seinen kritischen Punkt überschritten und liegt nur noch als überkritisches Fluid vor, das andere Eigenschaften als flüssiges Wasser aufweist.

#### 4.4.2 Latente Wärmespeicherung

Die Speicherung von Wärme im Phasenübergang, d. h. beim Übergang von fest nach flüssig bzw. flüssig nach gasförmig, bezeichnet man als latente Wärmespeicherung.

Latent beschreibt in diesem Zusammenhang eine verborgene Einspeicherung von Wärme, die zunächst nicht fühlbar ist. Eine zusätzliche Wärmezufuhr an der Phasengrenze führt zu keiner weiteren Temperaturerhöhung des Speichers, erst wenn der Phasenübergang vollständig abgeschlossen ist, steigt die Temperatur im Speicher weiter an.

Die folgenden Annahmen und die daraus resultierenden theoretischen Grenzen sind der Arbeit von R. Sizmann [10] entnommen.

Für die gespeicherte latente Wärmemenge gilt, dass die Wärmemenge des Phasenübergangs der Schmelz- bzw. der Verdampfungsenthalpie entspricht. Über die Definition der Wärmemengenänderung aus dem Abschnitt der sensiblen Wärmespeicherung kann diese wiederum umgeschrieben werden zu Temperatur am Phasenübergang mal Änderung der Phasenänderungsentropie (fest, flüssig bzw. flüssig, gas).

$$Q_{\text{latent}} = \Delta H_{\text{ls/gl}} = T_{\text{ls/gl}} \Delta S_{\text{ls,gl}}$$

Im Weiteren wird nicht mehr der Allgemeine Fall betrachtet, sondern nur noch der Übergang fest nach flüssig. Mit der Annahme, die weitgehend auch der Richardson-Regel für den Phasenübergang entspricht

$$\Delta S_{\text{ls}} \approx 20 \frac{\text{J}}{\text{mol K}} \approx 2,5 \cdot R$$

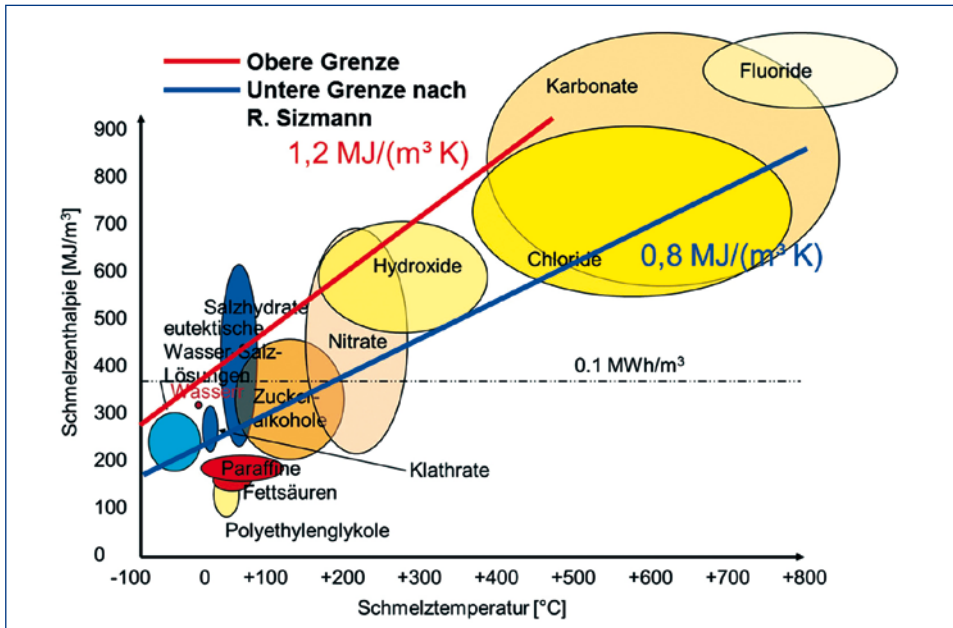
(R ist hierbei die Allgemeine Gaskonstante mit 8,3144 J/mol K) führt dies zu

$$Q_{\text{latent,ls}} = 2,5 \cdot R \cdot T_{\text{ls}}$$

Zusammen mit dem Molaren Volumen einer Teilchensorte im Bereich von 10 ... 20 cm<sup>3</sup> ergibt sich wiederum die volumenbezogene latente Speicherdichte.

$$E_{\text{V,latent,ls}} \approx (0,8 \dots 1,2) T_{\text{ls}} \text{ in MJ/m}^3$$

Die Abbildung 25 zeigt die Sizmann-Grenzen überlagert zu einer vom ZAE Bayern erzeugten Grafik, die die Schmelzenthalpie verschiedener Stoffe über die Schmelztemperatur darstellt. Auch hier zeigt sich, dass die Grenzen nicht für alle Stoffe gültig sind, jedoch wird durch die Grenzen ein Korridor aufgespannt, welcher den Großteil der Werte abdeckt. Somit können auch hier die theoretischen Werte für eine erste Orientierung verwendet werden.



■ Abb. 25: Schmelzenthalpie verschiedener Phasenwechsellmaterialien

## 4.5 Typische Speichermaterialien

### 4.5.1 Sensible Speichermaterialien

Für die Speicherung sensibler Wärme kommen je nach Einsatzbereich bzw. Anwendung verschiedene Materialien in Frage. Am häufigsten wird wegen seiner guten physikalischen Eigenschaften Wasser eingesetzt. Wasser ist fast überall in großen Mengen verfügbar, es ist umweltfreundlich und sehr kostengünstig. Es dient nicht nur als Speichermaterial sondern wird häufig gleichzeitig als Wärmeträgermedium eingesetzt. Die physikalischen Eigenschaften Wärmeleitfähigkeit, volumenbezogenen Wärmekapazität und Dichte sind in Abbildung 26 aufgeführt.

Ein Haupteinsatzbereich von Wasser als Speichermaterial sind Pufferspeicher zur Anpassung von Leistungsunterschieden bei der Wärmebereitstellung und beim Wärmebedarf. Ein weiterer großer Einsatzbereich ist die Wärmespeicherung im Temperaturbereich 0–100 °C und hier als Kurzzeitspeicher über einige Stunden/Tage über mittlere Zeiträume wie Wochen/Monate bis hin zum saisonalen Wärmespeicher z. B. Sommer/Winter. Bei Temperaturen über 100 °C steigt Dampfdruck rasch an, was hohe Druckanforderungen an den Behälter stellt und zu entsprechend höheren Kosten führt.

Als Langzeitwärmespeicher für Heiz- und Kühlanwendungen im Temperaturbereich 0–100 °C eignen sich auch die so genannten Untergrund-Wärmespeicher:

- Aquiferspeicher
- Erdwärmesonden-Speicher
- Kavernenspeicher
- Kies/Wasser- oder Erdreich/Wasser-Speicher

Die physikalischen Eigenschaften Wärmeleitfähigkeit, volumenbezogene Wärmekapazität und Dichte für verschiedene Gesteinsarten sind in Abbildung 26 aufgeführt.

	Gesteinstyp		Wärmeleitfähigkeit in W/(m·K)		Volumenbe- zogene spez. Wärme- kapazität in MJ/(m³·K)	Dichte in 10³ kg/m³
				empfohlener Rechenwert		
Lockergesteine	Ton/Schluff, trocken		0,4–1,0	0,5	1,5–1,6	1,8–2,0
	Ton/Schluff, wassergesättigt		1,1–3,1	1,8	2,0–2,8	2,0–2,2
	Sand, trocken		0,3–0,9	0,4	1,3–1,6	1,8–2,2
	Sand, feucht		1,0–1,9	1,4	1,6–2,2	1,9–2,2
	Sand, wassergesättigt		2,0–3,0	2,4	2,2–2,8	1,9–2,3
	Kies/Steine, trocken		0,4–0,9	0,4	1,3–1,6	1,8–2,2
	Kies/Steine, wassergesättigt		1,6–2,5	1,8	2,2–2,6	1,9–2,3
	Geschiebemergel/-lehm		1,1–2,9	2,4	1,5–2,5	1,8–2,3
	Torf, Weichbraunkohle		0,2–0,7	0,4	0,5–3,8	0,5–1,1
Sedimentäre Festgesteine	Ton-/Schluffstein		1,1–3,4	2,2	2,1–2,4	2,4–2,6
	Sandstein		1,9–4,6	2,8	1,8–2,6	2,2–2,7
	Konglomerat/Brekzie		1,3–5,1	2,3	1,8–2,6	2,2–2,7
	Mergelstein		1,8–2,9	2,3	2,2–2,3	2,3–2,6
	Kalkstein		2,0–3,9	2,7	2,1–2,4	2,4–2,7
	Dolomitstein		3,0–5,0	3,5	2,1–2,4	2,4–2,7
	Sulfatgestein (Anhydrit)		1,5–7,7	4,1	2,0	2,8–3,0
	Sulfatgestein (Gips)		1,3–2,8	1,6	2,0	2,2–2,4
	Chloridgestein (Stein-/Kalisalz)		3,6–6,1	5,4	1,2	2,1–2,2
	Steinkohle		0,3–0,6	0,4	1,3–1,8	1,3–1,6
Magmatische Festgesteine	Tuff		1,1	1,1		
	Vulkanit, sauer bis intermediär	z. B. Rhyolit, Trachyt	3,1–3,4	3,3	2,1	2,6
		z. B. Latit, Dacit	2,0–2,9	2,6	2,9	2,9–3,0
	Vulkanit, basisch bis ultrabasisch	z. B. Andesit, Basalt	1,3–2,3	1,7	2,3–2,6	2,6–3,2
	Plutonit, sauer bis intermediär	Granit	2,1–4,1	3,2	2,1–3,0	2,4–3,0
		Syenit	1,7–3,5	2,6	2,4	2,5–3,0
	Plutonit, basisch bis ultrabasisch	Diorit	2,0–2,9	2,5	2,9	2,9–3,0
		Gabbro	1,7–2,9	2,0	2,6	2,8–3,1

	Gesteinstyp		Wärmeleitfähigkeit in W/(m·K)		Volumenbezogene spez. Wärme- kapazität in MJ/(m³·K)	Dichte  in 10³ kg/m³
				empfohlener Rechenwert		
Metamorphe Festgesteine	gering metamorph	Tonschiefer	1,5–2,6	2,1	2,2–2,5	2,4–2,7
		Kieselschiefer	4,5–5,0	4,5	2,2	2,5–2,7
	mittel bis hoch metamorph	Marmor	2,1–3,1	2,5	2,0	2,5–2,8
		Quarzit	5,0–6,0	5,5	2,1	2,5–2,7
		Glimmerschiefer	1,5–3,1	2,2	2,2–2,4	2,4–2,7
		Gneis	1,9–4,0	2,9	1,8–2,4	2,4–2,7
		Amphibolit	2,1–3,6	2,9	2,0–2,3	2,6–2,9
Andere Stoffe	Bentonit		0,5–0,8	0,6	~3,9	
	Beton		0,9–2,0	1,6	~1,8	~2,0
	Eis (–10 °C)		2,32		1,87	0,919
	Kunststoff (HD-PE)		0,42		1,8	0,96
	Luft (0 °C bis 20 °C)		0,02		0,0012	0,0012
	Stahl		60		3,12	7,8
	Wasser (+10 °C)		0,59		4,15	0,999
Anmerkungen: Die Dichte variiert bei Lockergesteinen besonders stark mit Lagerungsdichte und Wassergehalt. Bei Sandstein, Konglomerat und Brekzie liegt eine besonders große Bandbreite der Wärmeleitfähigkeit vor; neben Kornmaterial und -verteilung und der Wassersättigung spielt hier noch die Art des Bindemittels bzw. der Matrix eine wesentliche Rolle.						

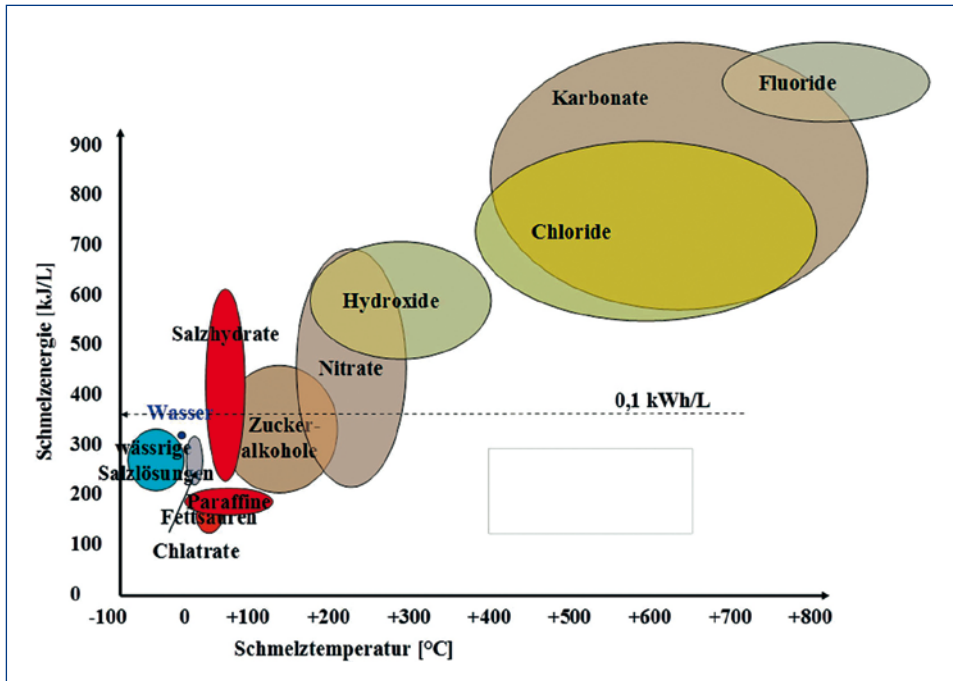
■ **Abb. 26:** Beispiele für Wärmeleitfähigkeit und volumenbezogene spezifische Wärmekapazität des Untergrunds

In Temperaturbereichen über 100 °C geht man wegen des rasch ansteigenden Dampfdrucks von Wasser häufig auf Thermalöl als Wärmeträger über. Die Wärmeleitfähigkeit ist erheblich niedriger als die von Wasser und liegt bei ca. 0,1 W/(m·K), die volumetrische Wärmekapazität etwa bei der Hälfte im Vergleich zu Wasser. Durch die Kombination von Thermalöl mit einer Gesteinsschüttung hoher Wärmekapazität kann die Speicherkapazität erhöht und die Menge an relativ teurem Thermalöl reduziert werden. Diese Kombination ist mit dem Kies/Wasser-Speicher für Niedertemperaturanwendungen vergleichbar.

Für höhere Temperaturen kommen auch Feststoffspeicher wie z. B. Beton oder spezielle Keramiken in Frage. Typische thermische Kennwerte für Beton sind in Abbildung 26 zu finden.

## 4.5.2 Latentwärmespeichermaterialien

Als Latentwärmespeichermaterialien (engl. Phase Change Materials, PCM) werden je nach Temperaturbereich verschiedene Materialklassen eingesetzt (Abb. 27). Dabei wird überwiegend der Übergang fest-flüssig verwendet, da hier die Volumenänderung im Vergleich zum



■ **Abb.27:** Materialklassen von PCM

Übergang fest-gasförmig noch einfach zu handhaben ist und die Übergangsenthalpie im Vergleich zu den fest-fest-Übergängen ausreichend hoch ist.

Um als PCM geeignet zu sein, müssen die Materialien folgende Eignungskriterien erfüllen:

- geeignete Schmelztemperatur,
- hohe Phasenübergangsenthalpie und spezifische Wärmekapazität,
- geeignetes Schmelz- und Erstarrungsverhalten; Zyklenstabilität,
- beherrschbare Volumenänderung,
- geringe bzw. beherrschbare Unterkühlung,
- chemische Stabilität,
- geringe Korrosivität gegenüber Konstruktionswerkstoffen,
- Umweltverträglichkeit; geringe Toxizität.

Das bereits am längsten und häufigsten eingesetzte PCM ist Wasser bzw. Eis bei einer Schmelztemperatur von 0 °C und einer Schmelzenthalpie von 334 kJ/kg. Es erfüllt die oben genannten Kriterien und ist zudem sehr kostengünstig und überall verfügbar. Gerade für Klimatisierungszwecke ist die Schmelztemperatur von Wasser sehr gut geeignet.

Im Folgenden werden die beiden Materialklassen Salzhydrate und Paraffine, die momentan neben Wasser am häufigsten in Latentwärmespeichern eingesetzt werden, ausführlicher beschrieben.



Materialklasse	Material	Summenformel	Schmelztemperatur [°C]	Schmelzenthalpie [kJ/kg]	Wärmeleitfähigkeit [W/m·K]	Dichte [kg/m³]
Eutektische Salz-/Wasser-Mischung	Wasser/Natriumchlorid	H <sub>2</sub> O/NaCl	-21	222	–	1 165 (flüssig, 20 °C)
	Wasser	H <sub>2</sub> O	0	334	0,597 (flüssig, 20 °C)	998 (flüssig, 20 °C) 917 (fest)
Salzhidrat	Calciumchlorid Hexahydrat	CaCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	29	171	0,54 (flüssig, 39 °C)	1 562 (flüssig, 32 °C)
	Di-Natriumhydrogenphosphat Dodekahydrat	Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> · 12H <sub>2</sub> O	35–44	280	0,476 (flüssig)	1 442 (flüssig)
	Natriumthiosulfat Pentahydrat	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 5H <sub>2</sub> O	48	187	–	1 670 (flüssig)
	Natriumacetat Trihydrat	Na(CH <sub>3</sub> COO) · 3H <sub>2</sub> O	58	226	–	1 280 (flüssig)
	Magnesiumnitrat Hexahydrat	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	89	149	0,49 (flüssig, 95 °C)	1 550 (flüssig, 94 °C)
Salz	Magnesiumchlorid Hexahydrat	MgCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	117	165	0,57 (flüssig, 120 °C)	1 450 (flüssig, 120 °C)
	Natriumnitrat	NaNO <sub>3</sub>	307	172	0,51 (flüssig)	1 900 (flüssig)
Salzmischung	Kaliumnitrat	KNO <sub>3</sub>	333	266	0,5 (flüssig)	1 890 (flüssig)
	Kaliumnitrat + Natriumnitrat	KNO <sub>3</sub> / NaNO <sub>3</sub>	222	100	–	1 950 (flüssig)
Paraffin	Oktadekan	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>	28	245	0,15 (fest)	777 (flüssig)
Fettsäure	Laurinsäure	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>10</sub> COOH	43	178	0,15 (flüssig, 50 °C)	870 (flüssig, 50 °C)
	Myristinsäure	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>12</sub> COOH	58	186	–	861 (flüssig, 55 °C)
Zuckeralkohol	Erythritol	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> (OH) <sub>6</sub>	120	340	0,32 (flüssig, 140 °C)	1 300 (flüssig, 140 °C)
PEG	PEG 6000	HO-[CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -O] <sub>n</sub> -H	60	190	–	1 085 (flüssig, 70 °C)

■ **Abb. 28:** Typische PCM-Materialien für unterschiedliche Temperaturbereiche

### Salzhydrate

Salzhydrate sind Salze mit einem stöchiometrisch festen Anteil an Wassermolekülen (z. B.  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ). Bereits geringe Abweichungen von der stöchiometrischen Konzentration wirken sich negativ auf die Übergangsenthalpie aus. Somit muss der Wassergehalt des PCM möglichst über die Lebensdauer des Speichers konstant gehalten werden. Salzhydrate zeigen meist ein komplexes Schmelz- und Kristallisationsverhalten, das zur Separation von verschiedenen Bestandteilen der Salzhydrate führen kann.

■ **Abb. 29:** Separiertes Glaubersalz ( $\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ). Oben: gesättigte wässrige Lösung, Mitte: Glaubersalz; unten: wasserfreies Natriumsulfat



Diesem Verhalten muss bei der Entwicklung von PCM bzw. PCM-Speichern auf Salzhydratbasis entgegengewirkt werden, damit eine ausreichende Zyklenstabilität erreicht wird. Salzhydrate zeigen in vielen Fällen auch eine hohe Unterkühlung, die ggf. ausgenutzt werden kann (z. B. Handwärmer), in vielen Fällen aber unerwünscht ist. Somit muss der Kontrolle der Unterkühlung besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Der Vorteil von Salzhydraten besteht in der hohen erreichbaren Speicherdichte und ihrer vergleichsweise guten Wärmeleitfähigkeit.

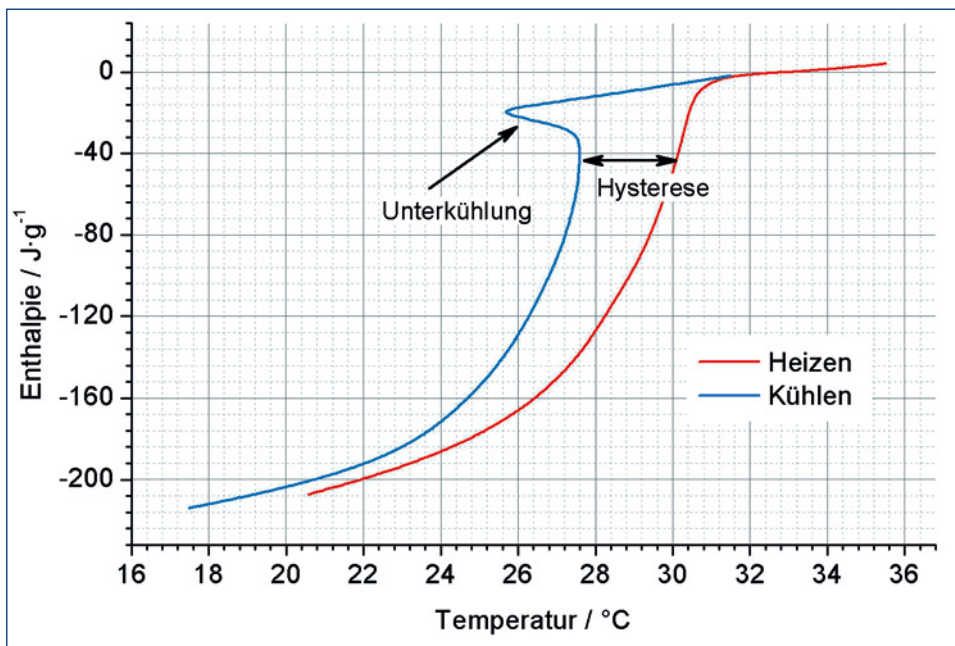
### Paraffine

Paraffine werden oft wegen ihrer chemischen Trägheit und somit einfacheren Handhabung eingesetzt. Im Vergleich zu Salzhydraten haben sie typischerweise ähnliche massenbezogene Energiedichten. Wegen ihrer geringeren Dichte sind sie allerdings den Salzhydraten bei der volumenbezogenen Energiedichte unterlegen. Paraffine sind ein Gemisch aus gesättigten Kohlenwasserstoffen, die sich hauptsächlich aus langkettigen Alkanen zusammensetzen. Diese werden durch Destillation aus Erdöl gewonnen. Je größer die Kettenlängen, desto höher ist auch die Schmelztemperatur, wodurch sich leicht ein bestimmter Schmelzpunkt einstellen lässt. Kommerziell angeboten werden Speicherparaffine in einen Temperaturbereich zwischen  $-5^\circ\text{C}$  und  $+120^\circ\text{C}$ . Solche PCMs auf Paraffinbasis zeichnen sich vor allem dadurch aus, dass sie kongruent schmelzen, zyklenstabil, ökologisch unbedenklich, nicht gesundheitsschädlich und nicht korrosiv gegenüber metallischen Konstruktionsmaterialien sind. Auch Unterkühlung spielt bei Paraffinen nur in sehr kleiner Verkapselung (Mikroverkapselung) eine Rolle. Nachteile von Paraffinen sind ihre relativ hohe Volumenänderung am Schmelzpunkt (5–20 %) und ihre sehr geringe Wärmeleitfähigkeit (typisch  $0,2 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ).

Da die Phasenwechseltemperatur das wichtigste Kriterium bei der Auswahl eines PCM für eine bestimmte Anwendung darstellt, wird versucht für alle Temperaturen geeignete Materialien bereitzustellen. Um die Lücken zwischen geeigneten Materialien zu schließen, kann man auf Mischungen der Materialien zurückzugreifen um den Schmelzpunkt anzupassen. Dabei ver-

breitert sich allerdings meist der Schmelzbereich und die Phasenübergangsenthalpie geht zurück. Aus Kostengründen werden Materialien mit technischer Reinheit verwendet, was ähnliche Auswirkungen hat. Somit ist der Charakterisierung dieser Materialien eine hohe Aufmerksamkeit zu widmen. Vor einiger Zeit wurde das RAL-Gütezeichen PhaseChangeMaterial (RAL-Gütezeichen 896) entwickelt, das die Qualität sicherstellt und die notwendigen Messvorschriften für PCM angibt.

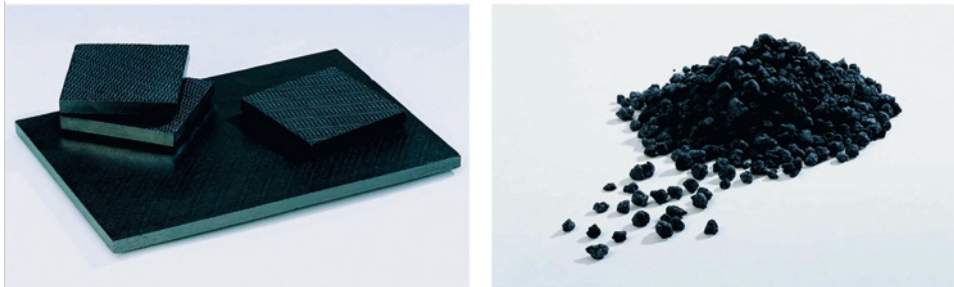
Das Ergebnis einer Messung an einem typischen PCM nach der T-History-Methode ist in Abbildung 30 dargestellt. Das Schmelzen findet hier, wie bei den meisten PCM, nicht bei einer Schmelztemperatur statt, sondern zieht sich über einen mehrere Kelvin breiten Schmelzbereich hin. Man sieht deutlich den Temperaturunterschied zwischen Schmelzen und Kühlen. Dieser Temperaturunterschied wird Hysterese genannt und ist bei den meisten PCM relativ klein. Er kann aber bei bestimmten Stoffen bis über 10 K betragen. Dieser Temperaturunterschied zwischen Heizen und Kühlen hat nichts mit der bekannten Unterkühlung zu tun. Bei Unterkühlung kühlt die Schmelze unter den Schmelzbereich ab, ohne zu kristallisieren. Dabei befindet sich die Probe in einem metastabilen Zustand. Wird die Kristallisation ausgelöst, kristallisiert das Material und setzt die Phasenübergangsenthalpie frei. Dabei erwärmt sich das Material bis maximal zur Kristallisationstemperatur, die bei einem Material ohne Hysterese der Schmelztemperatur entspricht. Welche maximale Temperatur wirklich erreicht wird, hängt von der Höhe der Unterkühlung, bei der die Kristallisation ausgelöst wurde und dem während der Kristallisation an die Umgebung auftretenden Wärmeverlust ab.



■ **Abb. 30:** Typische T-History Messung an Calciumchlorid Hexahydrat als PCM

### Verbundwerkstoffe

Viele der verwendeten PCMs haben eine geringe Wärmeleitfähigkeit, die zu Problemen bei der Auslegung von Latentwärmespeichern führt. Deshalb wurde vor einigen Jahren am ZAE Bayern ein Verbundmaterial aus PCM und Graphit entwickelt, das eine im Vergleich zu den Ausgangs-PCMs um einen Faktor 8–100 höhere Wärmeleitfähigkeit aufweist, wobei nur ein Volumenanteil von 10 % mit Graphit besetzt wird. Dieses Verfahren wurde von der Firma SGL TECHNOLOGIES GmbH aufgegriffen und für verschiedene PCMs weiterentwickelt.



■ **Abb.31:** Von SGL TECHNOLOGIES GmbH hergestellte Paraffin-Graphitmatrix-Verbund (links) und NaOAc·3H<sub>2</sub>O-Graphit-Verbund-Granulat

Ein weiterer Grund für die Herstellung eines Verbundmaterials ist die mangelnde Stabilität einiger PCMs, vor allem bei Mischungen aus mehreren Komponenten. Um zu verhindern, dass sich die einzelnen Komponenten des PCMs großräumig separieren, versucht man deren Viskosität über Zusätze sehr stark zu erhöhen oder in eine Trägerstruktur, wie z. B. einem Kunststoffschaum einzubringen.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, das flüssige PCM in eine saugfähige feste Struktur z. B. eine Holzfaserplatte, aufzusaugen. Das Ergebnis ist eine feste Platte, auch wenn das PCM flüssig ist. Allerdings besteht hier die Gefahr, dass das PCM, z. B. durch auf die Platte ausgeübten Druck, wieder austritt. Eine bessere Variante ist, wie bei Paraffinen möglich, das PCM in eine Kunststoffmatrix einzubinden. Aus solchen so genannten »Formstabilen PCM« kann man z. B. einen Speicher aus einer Schüttung aus vielen kleinen PCM-Teilchen aufbauen, durch die ein Wärmeträgerfluid strömt und aufgrund der hohen Oberfläche des PCM eine hohe Übertragungsleistung erhält. Generell ist die Anwendung eines Speichermaterials, das die äußere Form behält, deutlich einfacher als normale PCMs. Aktuelle Forschungsarbeiten beschäftigen sich damit, formstabile PCMs auf Kunststoffbasis zu entwickeln, die auf molekularer Ebene chemisch gebunden sind und damit einen quasi fest-fest-Übergang zeigen.

Eine weitere Möglichkeit mit der flüssigen Phase umzugehen besteht darin, das PCM zu verkapseln, d. h. in Behältern einzuschließen. Dies können Kunststoffbehälter, Beutel aus Kunststoff-Metall-Verbundfolie oder auch Metallbehälter sein. Diese Verkapselung hat den Vorteil, dass das PCM hermetisch eingeschlossen werden kann und somit keine Komponenten des PCM mit der Umgebung ausgetauscht werden können. Z. B. muss bei Salzhydraten die Wasserkonzentration über die Lebenszeit genau eingehalten werden.

Verkapselt man das PCM in sehr kleine Einheiten, spricht man von Mikroverkapselung. Ein Beispiel hierfür ist das mikroverkapselte Paraffin, das die Firma BASF unter dem Markennamen Micronal® vertreibt. Dieses mikroverkapselte PCM kann z. B. in Baustoffe wie Gips für Gipskar-

tonplatten oder in Stoffe für die Bekleidungsindustrie eingebracht werden. Dadurch, dass die Kapseln sehr klein sind, sind sie sehr stabil und falls doch einige Kapseln versagen, ist die austretende Menge an PCM sehr klein.

### 4.5.3 Thermochemische Speichermaterialien

Diese lassen sich in drei Kategorien einteilen:

- reversible chemische Reaktionen basierend auf chemischen Bindungen,
- Adsorption: Physikalische Bindungen (Physisorption, z. B. Van-der-Waals-Kräfte)
- Absorption: Aufnahme bzw. Lösung eines Stoffes (Lösungswärme).

Dabei handelt es sich auch immer um Stoffpaare, die die chemische Reaktion ausführen bzw. bei denen sich der eine Stoff am anderen anlagert (Adsorptions) oder der eine im anderen gelöst wird und diesen dadurch verdünnt (Absorption).

#### *Chemische reversible Reaktionen*

Theoretisch kann jede chemische Reaktion, die reversibel abläuft, zur Speicherung von thermischer Energie genutzt werden. Ein entscheidendes Kriterium zur Auswahl einer geeigneten Reaktion ist die Gleichgewichtstemperatur. Bei dieser Temperatur befinden sich die Produkte und die Edukte der Reaktion im thermodynamischen Gleichgewicht und es findet keine weitere Umwandlung statt. Diese Gleichgewichtstemperatur lässt sich aus thermodynamischen Stoffdaten der Reaktionsteilnehmer berechnen. Die Temperatur der endothermen Reaktion (Beladen des thermochemischen Speichers) muss über der Gleichgewichtstemperatur liegen. Die Temperatur der exothermen Reaktion (Entladen des Speichers) ist entsprechend geringer als die Gleichgewichtstemperatur. Die maximale Energiespeicherdichte einer Reaktion lässt sich mit Hilfe der Gleichgewichtstemperatur berechnen. Chemische Reaktionen besitzen im Vergleich zu sensiblen und latenten thermischen Speichermaterialien theoretisch die höchsten Energiespeicherdichten. Diese berechneten Daten sind für eine erste Auswahl von potentiellen chemischen Reaktionen nützlich.

Für die Auslegung eines thermochemischen Speichers sind weitere Kriterien zu berücksichtigen:

- Reversibilität, Zyklenstabilität,
- hohe Energiespeicherdichte im gewünschten Temperaturbereich,
- Reaktion muss innerhalb der gewünschten Temperatur stattfinden,
- Kosten und Verfügbarkeit,
- Umweltverträglichkeit.

Die komplizierte Verfahrenstechnik und hohe Anforderungen an die verwendeten Materialien, chemische Reaktionen zur thermischen Energiespeicherung zu nutzen, verhindert bisher, dass entwickelte Konzepte in großtechnischem Maßstab über längere Zeit in Betrieb sind.

Reaktionstyp	Gleichung	Gleichgewichtstemp bei 1 bar in °C	Energie- speicher- dichte kWh/kg
Salz Hydrate	$\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{MgSO}_4 + 7\text{H}_2\text{O}$	122	0,463
	$\text{CaCl}_2 \times 2\text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{CaCl}_2 \times \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$	174	0,091
Hydroxide	$\text{Mg}(\text{OH})_2 \Leftrightarrow \text{MgO} + \text{H}_2\text{O}$	268	0,372
	$\text{Ca}(\text{OH})_2 \Leftrightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$	521	0,373
Carbonate	$\text{CaCO}_3 \Leftrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$	896	0,463
	$\text{BaCO}_3 \Leftrightarrow \text{BaO} + \text{CO}_2$	1497	0,298
Metall Hydride	$\text{MgH}_2 \Leftrightarrow \text{Mg} + \text{H}_2$	293	0,834
Katalytische Reaktionen	$\text{SO}_3 \Leftrightarrow \text{SO}_2 + 0.5\text{O}_2$	767	0,340
Dampfreformierung	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$	687	1,672

■ **Abb.32:** Chemische Reaktionen, die zur Speicherung thermischer Energie genutzt werden

### Adsorption

Im Vergleich zu chemischen Reaktionen besitzen Adsorbentien keine eindeutige Gleichgewichtstempertur. Vielmehr ist diese abhängig vom Grad der Beladung des Adsorbens mit seinem Adsorbat. Die Beladungsplätze eines Adsorbens variieren in ihrer Bindungsenergie und damit in der Höhe der Wärmefreisetzung. Folglich bedeutet eine hohe maximale Beladung nicht gleichzeitig eine hohe Adsorptionsenthalpie.

Die Energiespeicherdichte eines Adsorbens hängt von folgenden Größen ab:

- Beladungshub zwischen der Desorption- und Adsorptionstempertur,
- Verdampfungsenthalpie des Adsorbats,
- Bindungskräfte zwischen dem Adsorbat und dem Adsorbens.

Adsorbentien	Maximale Beladung in $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{adsorbens}}$	Adsorptions- enthalpie in $\text{kWh}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$	Energie- speicherdichte in $\text{kWh}/\text{kg}_{\text{adsorbens}}$
Zeolith 13X	0,32	0,964	0,308
Silicagel Trockenperlen N	0,37	0,758	0,280

■ **Abb.33:** Vergleich zweier gebräuchlicher Adsorbentien

### Absorption

Bei dem Prozess der Absorption erfolgt die Einlagerung eines Atoms oder Moleküls in das freie Volumen der absorbierenden Phase. Im Gegensatz zur Adsorption wird der zu absorbierende Stoff nicht an der Oberfläche angelagert sondern vollständig gelöst. Der Stoff, der bei diesem Prozess als Lösungsmittel dient, wird als Absorbens, der zu lösende Stoff als Adsorbat bezeichnet.

Die Energiespeicherdichte eines Absorbats hängt von folgenden Größen ab:

- molare Masse Absorbat,
- Affinität zwischen Absorbens und Absorbat (Lösungswärme),
- Aggregatzustand Absorbens und Absorbat.

Absorbens	Absorbat	Absorptions-enthalpie kJ/mol <sub>absorbat</sub>	Molmasse g/mol <sub>absorbat</sub>	Energie- speicherdichte in kWh/ kg <sub>absorbat</sub>
H <sub>2</sub> O(l)	LiBr(s)	49,04	86,85	0,157
H <sub>2</sub> O(l)	NH <sub>3</sub> (g)	34,18	17,03	0,558
H <sub>2</sub> O(l)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (l)	95,28	98,08	0,270
GenosorbN verd. mit 50 Massen% H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> (g)			0,358

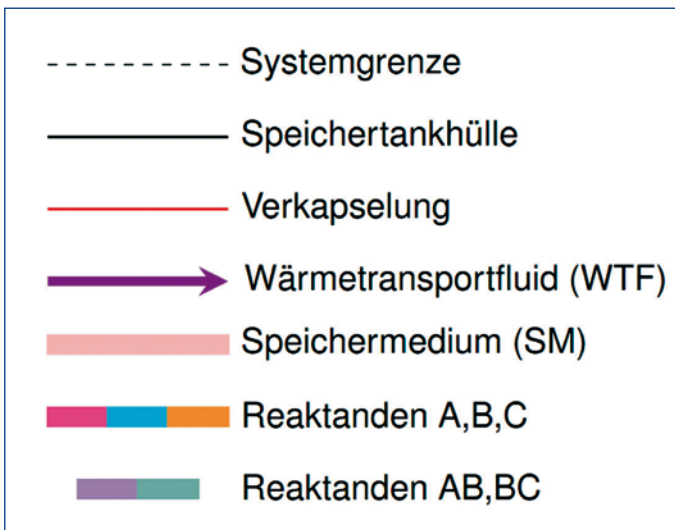
■ **Abb. 34:** Eigenschaften flüssiger Absorbentien [13], [14]

## 4.6 Speicherdesign: Technische Bauformen

Thermische Energiespeicher können in einer Vielzahl verschiedener Bauformen realisiert werden. Die Bauformen ergeben sich aus der genutzten Speichertechnologie und den Anforderungen der jeweiligen Anwendung.

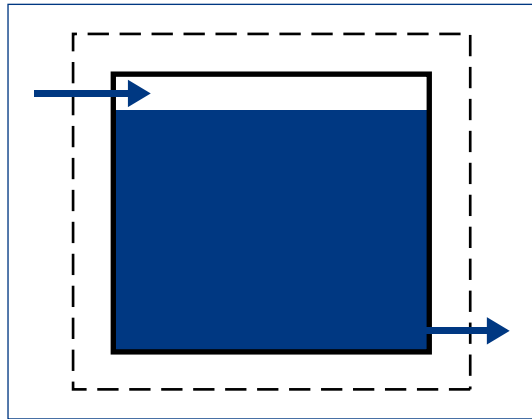
Zur Beschreibung der unterschiedlichen Bauformen wird auf Piktogramme verwiesen, die auf der folgenden Legende basieren (Abbildung 35).

Abbildung 36 zeigt einen Speicher mit so genannter »Direkt-Beladung«, die wohl einfachste Bauform.



■ **Abb. 35:** Legende zu den Piktogrammen/Definitionen

■ **Abb.36:** Speicher mit Direkt-Beladung: SM = WTF



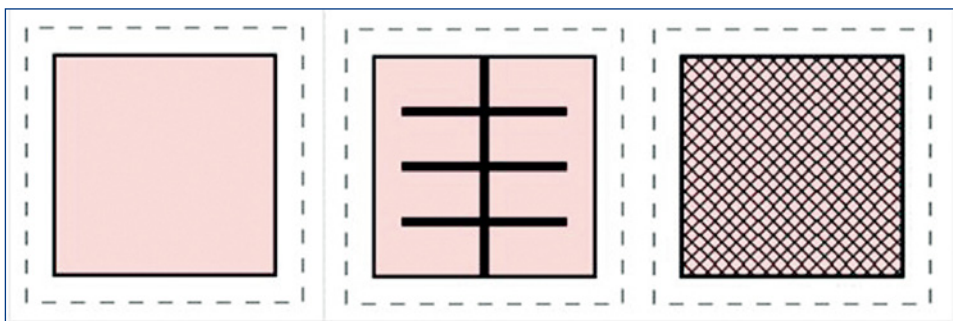
Dabei ist das Wärmespeichermedium auch gleichzeitig das Wärmeüberträgerfluid. Es gibt keine hydraulische Trennung. Der Speicher enthält chemisch gesehen nur eine Komponente, die ihre Temperatur ändert, aber nicht ihren Aggregatzustand.

Vorteil einer solchen Direktbeladung ist die sehr einfache Bauweise und der Verzicht auf innere Einbauten. Damit wird der Raum nur durch aktives Speichermedium ausgefüllt. Die Leistung eines solchen Speichers hängt nur vom Massenstrom des Speichermediums ab. Es können hohe Lade- und Entladeleistungen erreicht werden. Der Speicher muss an der Systemgrenze gedämmt werden, um Verluste zu minimieren.

Zum Einsatz können allerdings nur flüssige Medien zur sensiblen Wärmespeicherung kommen, was zu allgemein niedrigen Energiedichten führt.

Beispiele für Speicher mit Direkt-Beladung sind große Warmwasserspeicher für die saisonale Speicherung solarer Wärme (siehe Kapitel 5.1.1) oder Warmwasserspeicher mit hocheffizienter Superisolierung (siehe Kapitel 5.1.2).

Alle im Folgenden vorgestellten Speichertypen sind Speicher mit indirekter Beladung, d. h. das Speichermedium ist *nicht* zugleich das wärmeübertragende Medium. Beispiele für die einfachste Bauform dieser Speicherklasse zeigt Abbildung 37.



■ **Abb.37:** Einfacher Speicher, ohne und mit internen Wärmeleitstrukturen



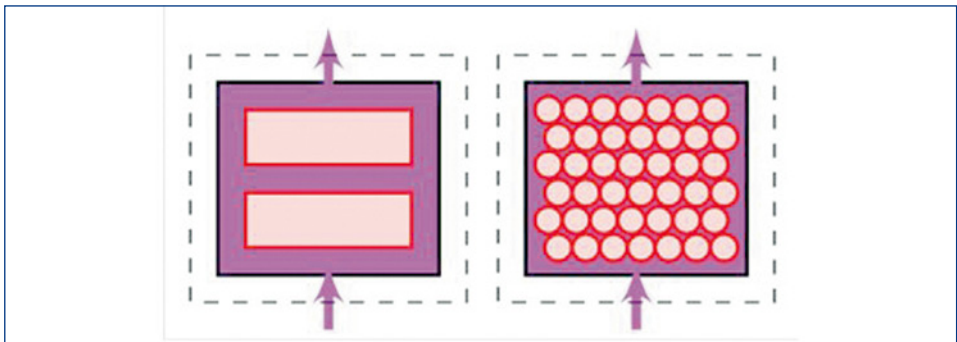
Diese Speicher nehmen die Wärme durch die Systemgrenze auf und geben sie so auch wieder ab. Dies geschieht in Abhängigkeit der Temperaturänderungen außerhalb des Speichers. Die Speicher können mit und ohne interne Wärmeleitstrukturen konstruiert werden und je nach dem über eine etwas höhere oder geringere thermische Leistung verfügen.

Die geschlossenen Systeme haben keine Stoffanbindung an die Außenwelt, was sie vor Korrosion, Verschmutzung, sowie Verlust und Degradation von Speichermaterial bewahrt. Auf das gesamte Speichersystem bezogen können hohe Speicherdichten erreicht werden, da keine Peripherie notwendig ist. Sie sind in der Regel günstig in Anschaffung und Betrieb.

Die Leistungen allerdings sind eher gering und hängen stark von Einbau des Speichers in das System ab. Die Systemauslegung kann schwierig sein und muss komplett beim Anwender erfolgen.

Beispiel für diese Bauart thermischer Speicher sind makroverkapselte PCMs zur Vermeidung von Überhitzung in Räumen (siehe Kapitel 5.2.1) oder Kühlakkus in Kühltaschen.

Um die Lade- und Entladeleistung zu erhöhen, können die geschlossenen Speicherbehälter in einem »Modul-Speicher« aktiv mit einem Wärmeträgerfluid umströmt werden. Abbildung 38 zeigt zwei solche Konzepte.



■ **Abb. 38:** Modul-Speicher. Links: Plattenmodule, rechts: Kugelmodule (»nodules«)

Mehrere makro-verkapselte Module (üblicherweise in der Größenordnung cm) sind mit einem Speichermaterial gefüllt. Sie befinden sich in einem mit Wärmeträger-Fluid (WTF) durchströmten Tank. In vielen Fällen sind die Module mit PCM gefüllt.

Modulspeicher kommen z. B. häufig in Japan als Kältespeicher zum Einsatz. Aufgrund der hohen Strompreise zu den Peak-Stunden der Klimatisierung am frühen Nachmittag, wird Kälte vorwiegend nachts produziert und in dieser Art von Speichern aufgehoben (<http://www.cristopia.com/cristopia/english/products/indproducts.html>). PCM-Platten im Luftkanal kommen z. B. im SolarDecathlon-Haus in Rosenheim zum Einsatz (<http://solar-decathlon.fh-rosenheim.de/pcm/>).

Die Module sind als Schüttgut verwendbar und können somit einfach und flexibel bzgl. der Tank-Geometrie eingesetzt werden. Modul-Speicher sind im Prinzip gut modellierbar und damit einfach dimensionierbar. Undichtigkeiten einzelner Module führen zunächst nicht zum Systemversagen (falls das auslaufende PCM mit dem WTF und Pumpen etc. kompatibel ist).

Allerdings muss viel Verkapselungsmaterial eingesetzt werden, was sich nachteilig auf den Preis des Systems auswirkt. Der PCM-Anteil im Speichervolumen ist auch relativ gering. Eine optimale Anströmung und Wärmeübertragung für alle Module ist in den meisten Fällen nicht gegeben, woraus eine eher geringe spezifische Leistung und Kapazität resultiert.

Eine der einfachsten Formen indirekter Beladung stellt ein Speicherbehälter mit innenliegendem Wärmeübertrager dar (Abbildung 39). Hierbei handelt es sich um einen vom Wärmeträgermedium durchströmten Wärmeübertrager in einem mit Speichermaterial gefüllten Behälter.

Als Beispiel eines solchen Speichertyps ist in Kapitel 5.2.2 ein Latentwärmespeicher zur Rückkühlung einer Absorptionskältemaschine beschrieben.

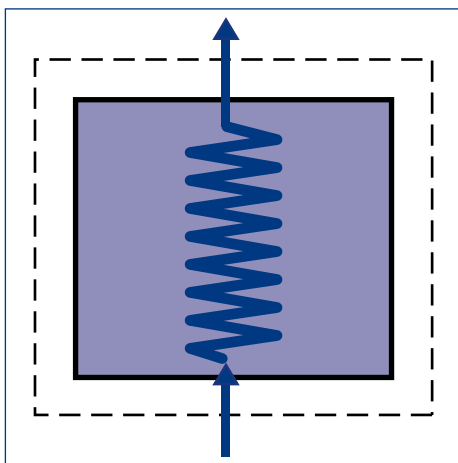
Bei diesem Speichertyp können sehr hohe Anteile an Speichermaterial erreicht werden. Typischerweise stellt das Speichermaterial mehr als 90 % des Gesamtvolumens. Ist das Speichermaterial allerdings nur gering Wärme leitend, muss der Wärmeübertrager größer ausgelegt werden. Grundsätzlich ist aber eine optimale Anpassung Leistung – Kapazität möglich.

In Abhängigkeit des Speichermaterials und der geforderten Speicherkapazität und -leistung muss der Wärmeübertrager individuell ausgelegt werden. Die Kosten für den angepassten Wärmeübertrager sind meist ausschlaggebend für die gesamten Systemkosten.

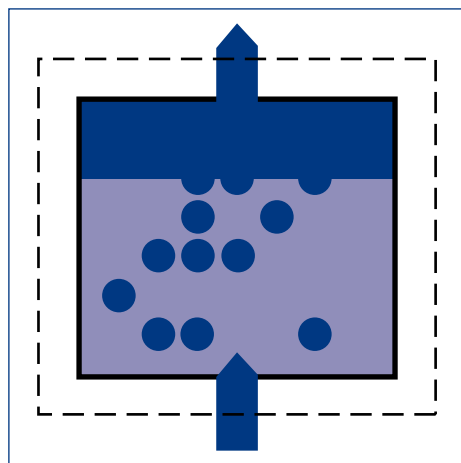
Bei einem »Direkt-Kontakt«-Speicher wird das Speichermaterial direkt von einem Wärmeträgerfluid durchströmt, ohne dass beide sich vermischen (Abbildung 40). Der Wärmeaustausch hat keine weiteren Widerstände zu überwinden, wie z. B. bei einer Verkapselung des Speichermaterials.

Sie können hohe Leistungen bei kompakter Bauweise realisieren, da kein Wärmeübertrager bzw. keine Verkapselung notwendig sind. Solche Systeme sind als Latentwärmespeicher mit einem PCM als Speichermaterial wenig anfällig für Separation.

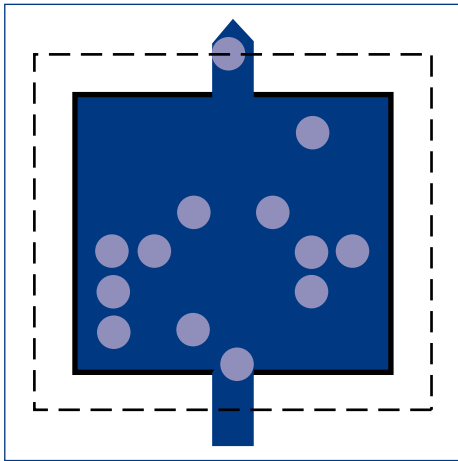
Da beide Stoffe aber in direktem Kontakt miteinander stehen, können sie nur für geeignete Materialkombinationen (SM/WTF) eingesetzt werden. Details der Realisierung wie z. B. Miedientrennung sind technisch hoch anspruchsvoll. Eine Regelung der Leistung ist im Allgemei-



■ **Abb. 39:** Speicher mit innenliegendem Wärmeübertrager.



■ **Abb. 40:** Direkt-Kontakt-Speicher



■ **Abb.41:** Slurry-Speicher

nen schwierig. Die Leistungsdichte des Gesamtsystems wird evtl. durch eine erweiterte Peripherie reduziert.

Als Slurries bezeichnet man Mischungen aus einem Wärmeträgerfluid und einem PCM, die auch bei festem PCM pumpfähig bleiben. Das Speichermedium wird in diesen Speichern mit dem Wärmeträgermedium transportiert. Je nach Heiz- oder Kühlanwendung wird der PCM-Anteil fest oder schmilzt beim »Entladen« des Speichers. Slurries dienen gleichzeitig der Speicherung thermischer Energie und deren Verteilung.

In Kapitel 5.2.3 werden Herstellungsverfahren und konkrete Anwendungen ausführlich erläutert.

Neben dem Sonderfall »Eis-Slurry«, bei dem Speichermaterial (SM) und WTF chemisch die gleiche Substanz sind, können aber auch Emulsionen, bei denen SM und WTF Materialien gegensätzlicher Hydrophilie sind, die mit einem Emulgator kombiniert werden, oder Mikroverkapseltes PCM in Suspension (d. h. eine Kombination von PCM und WTF) eingesetzt werden. Allgemein werden Slurries mit PCM »Phase Change Slurries«, PCS, genannt.

Slurry-Speicher können sehr hohe Leistungen realisieren. Die sonst durch die notwendige Temperaturdifferenz des WTF gegenüber der Umgebung auftretenden Transportverluste können durch PCS minimiert werden. Auch die Temperaturverluste bzw. Exergieverluste während der Verteilung können durch die konstante Temperatur beim Phasenwechsel reduziert werden. Es tritt keine Entmischung des PCMs auf, da das Fluid durch das Pumpen in ständiger Bewegung bleibt.

Allerdings liegt der Anteil des PCM typischerweise bei 20–40 %, in Ausnahmefällen kann er auch bis zu 60 % erreichen. Damit steigt die Viskosität des PCS, was zu einer erhöhten Pumpleistung und Mehrkosten führt. Bei Verwendung von mikroverkapseltem PCM muss darauf geachtet werden, dass die Verkapselung in der Pumpe nicht zerstört wird. Auch können Slurries mit PCM besonders anfällig für Unterkühlung sein.

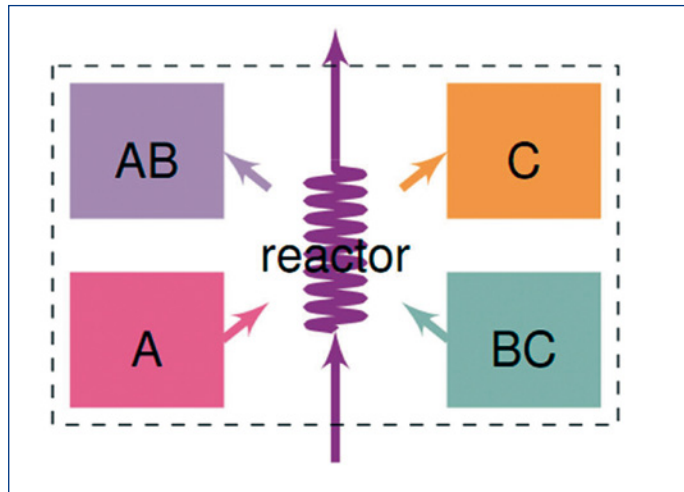
Bei diesem Speichertyp ist die Grenzziehung zwischen Speicherkomponente und System besonders schwierig, da das Speichermedium auch gleichzeitig für die Verteilung der thermischen Energie sorgt.

Für die Realisierung thermochemischer Speicher wird das Design der Speicherkomponenten deutlich komplexer, vor allem weil neben dem Wärme- auch der Stoffübergang ermöglicht werden muss. Im Allgemeinen müssen verschiedene stoffliche Komponenten getrennt und zusammengeführt werden, wobei Wärme zu- und abgeführt werden muss. Bei der Konstruktion geeigneter Speicher ist darauf zu achten, dass beides effizient und auf möglichst kleinem Raum umgesetzt wird, damit hohe Leistungen und Speicherkapazitäten erreicht werden.

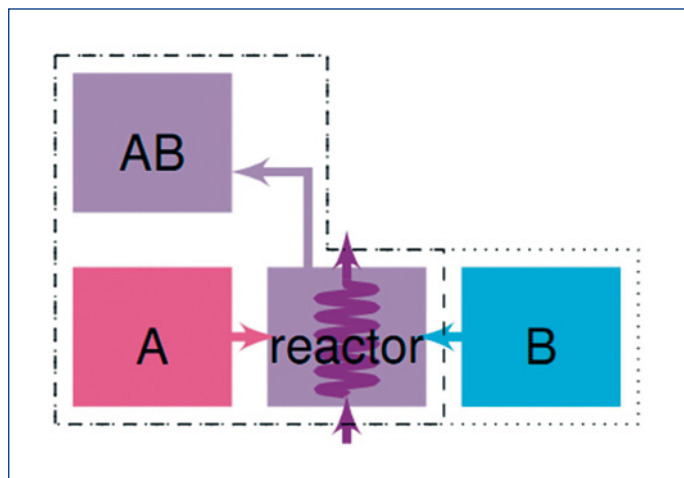
Ganz allgemein betrachtet setzt der Reaktor Wärme und Stoff um. Die einzelnen Reaktanden werden in separaten Behältern aufgehoben, die ebenfalls zum Speichervolumen gezählt werden müssen. Die Anzahl der Komponenten und Tanks hängt von der Reaktion ab, bzw. von der Anzahl und dem Aggregatzustand der Reaktanden. Der Wärmeaustausch findet in Abbildung 42 und 43 über einen Wärmeübertrager statt.

Bei den meisten der für thermochemische Speicherung diskutierten Reaktionen ist einer der Reaktanden Wasser. Ein solcher Reaktionspartner kann auch außerhalb der Speicherkomponente in der Umgebung aufgehoben werden. Damit kann die Speicherkomponente verklei-

■ **Abb.42:** Wärmespeicher mit Reaktor, Grundprinzip



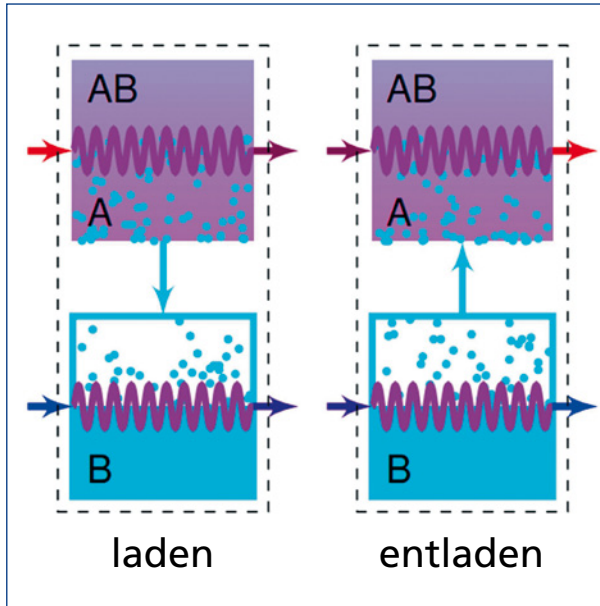
■ **Abb.43:** Beispiel 1: Offenes System A+B → AB, wobei B in der Umgebung vorkommt (z. B. Sauerstoff, Wasser)



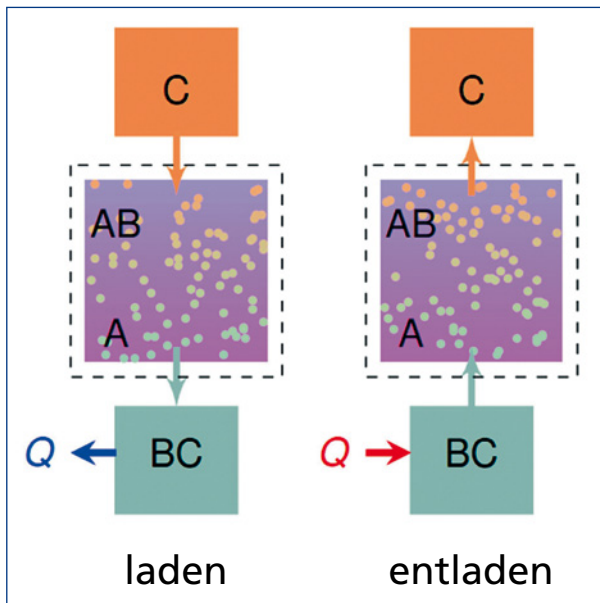
nert und die Speicherkapazität vergrößert werden. Dies kann prinzipiell mit allen Reaktanden passieren, die in der Umgebung vorkommen.

Beispiele für den Aufbau eines thermochemischen Speichers:

Abbildung 45 zeigt ein geschlossenes, luftfreies System, z. B. für einen Absorptionsprozess von Wasserdampf an einer wässrigen Salzlösung. Dabei ist A das Salz, B das Wasser und AB die wässrige Salzlösung. Neben dem Reaktor (oben) wird noch ein Kondensator/Verdampfer (un-



■ **Abb. 44:** Beispiele für Wärmespeicher mit Reaktor: geschlossener Reaktor für flüssige Sorption im Niederdruckbereich (links) und offener Festbett-Reaktor für Zeolith-Sorption bei Raumdruck (rechts)



■ **Abb. 45:** Geschlossenes thermochemisches Speichersystem

ten) benötigt. Die Wärmeübertragung wird über ein von der Reaktion unabhängig wählbares Medium über einen Wärmeübertrager gewährleistet. Die Reaktion findet bei niedrigen Drücken (Vakuum) statt. Geschlossene Systeme ermöglichen prinzipiell freie Wahl der Reaktionspartner.

Ein offenes System wird bei Umgebungsdruck betrieben und steht in direktem Kontakt mit der Umgebungsluft. Ein Beispiel dafür ist die Adsorption von Wasserdampf an Zeolith, mit A als trockenem Zeolith, B als Wasser und C als trockene Luft bzw. als Trägergas. Damit steht AB für den »feuchten« d. h. mit Wasser beladenen Zeolith und BC für feuchte Luft. Die Luft fungiert hier gleichzeitig als Wärme- und Stofftransportmedium. In einem offenen System besteht insofern keine Wahlfreiheit bzgl. Reaktionspartner B und C, als sie in der Atmosphäre vorkommen müssen.

Vorteil thermochemischer Speicher ist die unabhängige Dimensionierung von Leistung und Kapazität. Der Reaktor bestimmt die Leistung, während der (oder die) Behälter der Reaktionspartner die Speicherkapazität bestimmt. Dies gilt in der Realität für flüssige Reaktionspartner, wie Salzlösungen. Bei festen Reaktionspartnern, wie z. B. Zeolith, ist diese Trennung allerdings praktisch nicht umsetzbar. Zeolith kann nur schwer aus einem Tank in einen Reaktor transportiert werden. In diesem Fall ist das Zeolith-Festbett auch gleichzeitig der Reaktor.

Die hohe Komplexität dieser Speicherkomponenten stellt technisch und ökonomisch sicherlich einen Nachteil dar, der in einer konkreten Anwendung durch die Vorteile thermochemischer Speicherprozesse (siehe Kapitel 5.3) ausgeglichen werden muss.

## 4.7 Dämmmaterialien

### 4.7.1 Allgemeines

Dämmmaterialien sollen den Wärmetransport vom heißen (Temperatur  $T_1$ ) Inneren des Speichers zur kalten ( $T_2$ ) Umgebung verhindern. Die Verlustleistung pro  $\text{m}^2$  Oberfläche des Speichers und pro Temperaturdifferenz ( $T_1 - T_2$ ) wird meist als U- oder k-Wert der Dämmung bezeichnet und ist gegeben durch

$$U = k = \lambda/d \quad (1)$$

Hierbei ist  $\lambda$  (in  $\text{W/m K}$ ) die effektive Wärmeleitfähigkeit der Dämmung, ausgewertet bei der Mitteltemperatur  $(T_2 + T_1)/2$  und  $d$  (in m) die Dämmstärke. Diese Beziehung ist für alle gängigen Speicherformen gültig, insbesondere auch für zylindrische und kugelförmige Speicher, so lange  $d$  deutlich kleiner als Zylinder- bzw. Kugelradius ist. Der Wärmeverlust findet stets über drei Mechanismen statt, die für die Praxis in guter Näherung unabhängig voneinander summiert werden können:

- Konvektion durch natürliche (wie Luftauftrieb) oder erzwungene (wie Windströmung) Bewegung von Fluidteilchen. Dies ist ohne Dämmung der größte Anteil. Typische U-Werte liegen in diesem Fall bei etwa  $3\text{--}10 \text{ W/m}^2\text{K}$ , je nach Geschwindigkeit der den Speicher umströmenden Luft.
- Wärmeleitung durch ein ruhendes Medium, wie über eine metallische Wärmebrücke.
- Wärmestrahlung durch elektromagnetische Wellen, die von jedem Körper proportional zur 4ten Potenz seiner Temperatur (K) ausgestrahlt werden, wie bei einer glühenden Herdplatte sichtbar oder bei tieferen Temperaturen im für das Auge unsichtbaren Infrarotbereich.

Die Auskühlung eines sensiblen Speichers wird mit der natürlichen Exponentialfunktion über folgende Gleichung beschrieben:

$$\Delta T = \Delta T_0 \cdot e^{-\alpha t} \quad (2)$$

Wobei  $\Delta T$  die aktuelle Differenz zwischen Speicher- und Umgebungstemperatur,  $\Delta T_0$  diese Differenz zum Anfangszeitpunkt und  $t$  die aktuelle Zeit angibt. Der speicherspezifische Exponent  $\alpha$  beinhaltet die Speichergeometrie und Eigenschaften des Speichermediums sowie der Dämmung,

$$\alpha = A \cdot \lambda \cdot / (d \cdot V \cdot \rho \cdot c_p) \quad (3)$$

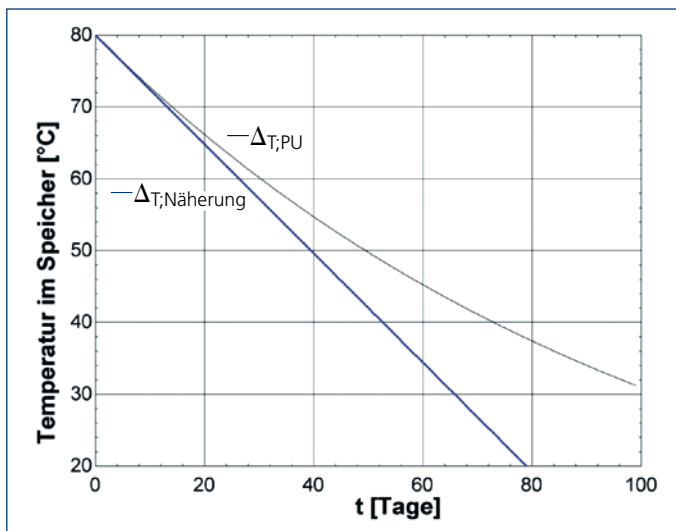
(Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , Stärke  $d$  der Dämmung, Oberfläche  $A$  und Volumen  $V$  des Speichers, Dichte  $\rho$  und Wärmekapazität  $c_p$  des Speichermediums).

Aus  $\alpha$  kann auf einfache Weise die Halbwertszeit  $t_{1/2}$ , definiert als die Zeit, innerhalb welcher ein Speicher auf die Hälfte seiner ursprünglichen Temperaturdifferenz zur Umgebung abgekühlt ist, berechnet werden:

$$t_{1/2} = 0,7 / \alpha \quad (4)$$

Für die bei der Speicherung erwünschten möglichst großen Auskühlzeiten kommt es also nicht nur auf die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  der Dämmung und ihre Dämmstärke  $d$ , sondern in gleicher Weise auch auf das Oberflächen-zu-Volumenverhältnis  $A/V$ , sowie auf Dichte  $\rho$  und Wärmekapazität  $c_p$  des Speichermediums an (s. Gl. (3) und (4)). Hier sind möglichst kugelförmige Wasserspeicher mit großem Volumen und Superisolation günstig.

Aus  $\alpha$  kann eine weitere, für den Vergleich verschiedener sensibler Speicher, praktische Größe abgeleitet werden: Der  $\alpha_d$ -Wert beschreibt den Temperaturverlust des Speichers an einem Tag pro Grad Temperaturdifferenz des Speichermediums zur Umgebung. Zur Berechnung, um welchen Betrag die Speichertemperatur über einen bestimmten Zeitraum abfällt, wird der  $\alpha_d$ -Wert mit dem Betrag der anfänglichen Temperaturdifferenz zwischen Speichertemperatur und Umgebung sowie mit der Anzahl der Tage multipliziert. Mathematisch beschreibt diese Methode eine lineare Annäherung an die Exponentialfunktion und ist sehr gut für Zeitbereiche bis



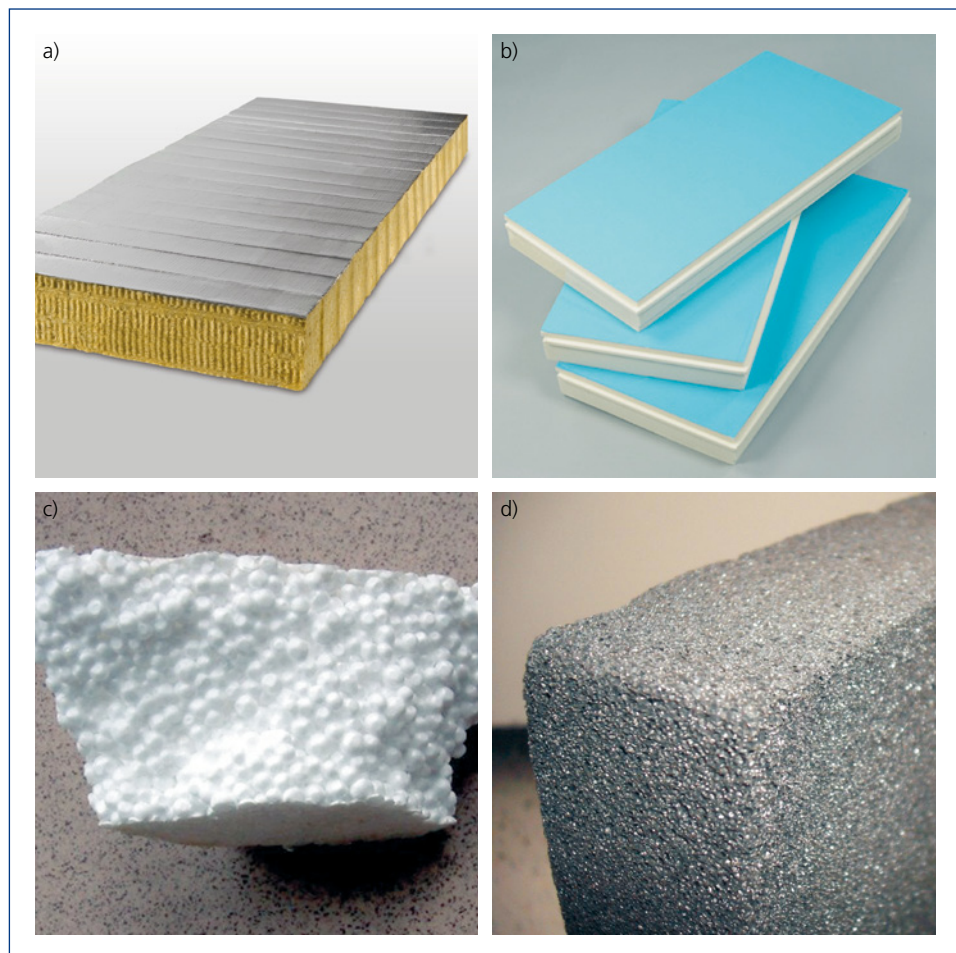
**Abb. 46:** Reale Auskühlkurve (schwarz) sowie Näherung nach dem  $\alpha_d$ -Wert (blau) für einen konventionellen Polyurethan-gedämmten sensiblen Speicher mit einer Halbwertszeit von 73 Tagen



zu einem Drittel der Speicher-Halbwertszeit gültig. Abbildung 46 zeigt den tatsächlichen Abkühlverlauf verglichen mit der Näherung nach dem  $\alpha_d$ -Wert für einen Speicher mit einer Halbwertszeit von 73 Tagen. Die Näherung beschreibt die Abkühlung gut für Zeiten kleiner als 25 Tage. Die technischen Daten eines sehr viel besser gedämmten superisolierten Speichers mit einer Halbwertszeit von einem Dreivierteljahr findet man in Kapitel 5.

#### 4.7.2 Konventionelle Speicherdämmung

Bei üblichen Dämmmaterialien wie porösen Schäumen oder Faserdämmstoffen wird die Luftkonvektion durch einen kleinkammerigen Aufbau unterdrückt, wie es z. B. auch in Federbetten der Fall ist. Kammern im Millimeterbereich sind hierzu bereits ausreichend und die Haftkräfte an den Kammerwänden sowie die Zähigkeit der Luft verhindern eine mit Wärmetransport verbundene Luftbewegung. Übliche Dämmungen werden entweder als Platten oder auch als schüttfähiges Pulver angeboten, wodurch sie sich einer beliebigen Speichergeometrie optimal



**Abb.47:** Konventionelle Dämmmaterialien: a) Mineralwolle, b) Polyurethan (PUR), c) Polystyrol (PS), d) Schaumglas



anpassen können, wenn man eine zweite Speicherhülle vorsieht. Dies wird gerade bei sehr großen saisonalen Erdbeckenspeichern für die solare Nahwärmeversorgung von Wohngebieten erfolgreich praktiziert [16]. Auch biegbare Vliesdämmstoffe, wie Mineral- oder Glaswolle mit  $\lambda = 0,035\text{--}0,045\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  (bei  $10^\circ\text{C}$ ) sind verbreitet, haben jedoch die nachteilige Neigung, Feuchtigkeit aufzunehmen und zu speichern. Typische Plattendämmstoffe sind Schaumglas, Polyurethane (PUR oder PU) und Polystyrole (PS) wie XPS oder EPS. Die Wärmeleitfähigkeiten liegen zwischen  $\lambda = 0,025$  und  $0,05\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ . Typische Pulverdämmstoffe sind Perlit, Schaumglasschotter oder Blähglas mit etwas schlechteren Werten  $\lambda = 0,06\text{...}0,07\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ . Auch mit nachwachsenden Rohstoffen wie Zellulose oder Holzwolle kann eine gute Dämmwirkung mit  $\lambda = 0,05\text{...}0,07\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  erzielt werden [17].

In konventionellen Dämmungen werden die Restwärmeverluste durch die Gaswärmeleitung der ruhenden Luft in den kleinen Strukturen dominiert. Daher können noch niedrigere Wärmeleitfähigkeiten durch den Einsatz spezieller Porengase mit niedrigerer Wärmeleitfähigkeit als Luft ( $\lambda = 0,025\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  bei  $10^\circ\text{C}$ ) erreicht werden. Voraussetzung sind aber geschlossporige Schäume wie z.B. PUR, denen die wärmeisolierenden Gase beim Aufschäumprozess zugesetzt werden. Wichtig sind auch das Grundmaterial, sowie die Anzahl und Größe der Kontaktstellen der Poren, bzw. Fasern untereinander, über deren Wände ebenfalls Wärme geleitet wird. Hieraus resultieren die leicht unterschiedlichen  $\lambda$ -Werte der konventionellen Dämmstoffe.

Die in der Literatur und von den Herstellern angegebenen  $\lambda$ -Werte gelten meist nach DIN 4108 für  $10^\circ\text{C}$  und für trockenes Material. Bei feuchter Dämmung können vielfach höhere Werte auftreten, in der Größenordnung der Wärmeleitfähigkeit von Wasser ( $0,7\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ). Ebenso wird die Dämmwirkung bei höheren Temperaturen leicht schlechter, was sich mit guter Genauigkeit durch einen Temperaturkoeffizienten  $a$  beschreiben lässt:  $\lambda(T[\text{in } ^\circ\text{C}]) = \lambda(10^\circ\text{C}) + a \cdot T[\text{in } ^\circ\text{C}]$

Typische Werte für  $a$  liegen im Bereich  $0,0001\text{--}0,0003\text{ W/(m}\cdot\text{K}\cdot^\circ\text{C)}$ . Eine detaillierte Messung von  $\lambda$  verschiedener Dämmstoffe in Abhängigkeit von Temperatur und Feuchtebeladung findet man in [16, 18]. Insgesamt ist der Einfluss der Temperatur jedoch deutlich schwächer als der von Feuchte, sodass auf die Trockenhaltung der Speicherdämmung gerade bei Vliesdämmungen großer Wert zu legen ist (Vermeidung hoher Luftfeuchte und Beregnung, ggf. durch äußere Schutzhüllen).

Neben der Auswahl des eigentlichen Dämmmaterials sind in der Praxis noch folgende wichtige Aspekte zu beachten, um eine gute Speicherdämmung zu realisieren:

- Das Dämmmaterial kann z.B. durch Sonnenbestrahlung aber auch durch Temperaturbelastung altern und dabei seine Form verlieren.
- Bei Plattenmaterialien können bei nachlässiger Installation aber auch durch thermische Ausdehnung im Betrieb irreversible Luftspalte und damit Konvektion und Kamineffekte entstehen [19].
- Bei Pulverschüttungen kann eine Setzung des Materials stattfinden, sodass gerade im oberen oft heißen Speicherbereich, ein ungedämmter luftgefüllter Raum mit hohen Wärmeverlusten entsteht.
- Die Dämmung des unteren Speicherbereichs sollte nicht vernachlässigt werden, da dort bei höheren Rücklauftemperaturen temporär große Verluste auftreten können.

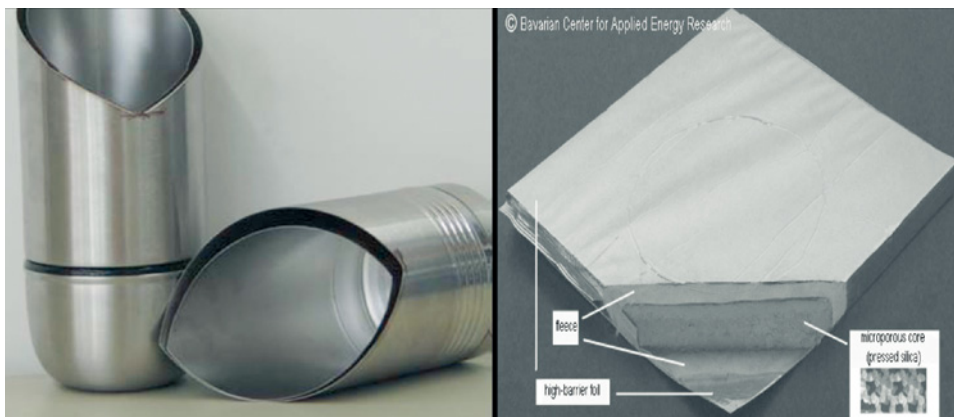
- Durch eine zu hohe Anzahl und schlecht gedämmte Anschlüsse können Verluste in der Größenordnung bis zur Hälfte der gesamten Hüllverluste über die Wanddämmung auftreten [19].
- Schließlich ist natürliche Konvektion in den Zuleitungen (Einrohrzirkulation) durch Konvektionsbremsen oder Einbau eines Siphons auszuschließen [19].

### 4.7.3 Vakuumdämmung und Vakuumsuperisolation (VSI)

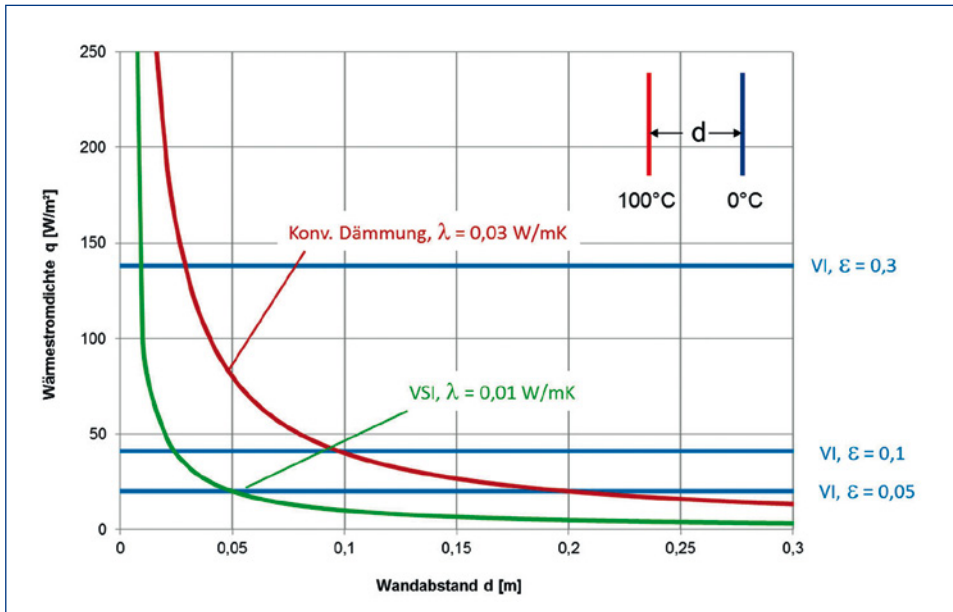
Ersetzt man das Dämmmaterial durch einen evakuierten Raum, gelangt man zur Vakuumdämmung (VI), wie in doppelwandigen Thermoskannen (siehe Abb.48). Bei Drücken unter 0,001 mbar findet der Wärmeverlust zwischen den aus Stabilitätsgründen meist konzentrischen und verspiegelten (mit einem niedrigen Emissionsgrad  $\varepsilon$  versehenen) Behälterwänden nur mehr durch Wärmestrahlung statt und ist unabhängig von der Dämmstärke. Daher ist eine Vakuumdämmung besonders günstig bei nur geringem Platzbedarf für die Dämmung. Ansonsten ist eine konventionelle Dämmung mit großer Dämmstärke stets effizienter. Dies zeigt Abbildung 48, die die U-Werte für konventionelle Mineralwolldämmung, VI- und VSI-Dämmung (siehe unten) für verschiedene Dämmstärken vergleicht.

Die bestmögliche Dämmung (Vakuumsuperisolation, VSI) erreicht man schließlich durch das Einbringen eines die Wärmestrahlung blockierenden Pulver- oder Faserdämmmaterials (Pulver oder Faser-VSI) bzw. von parallelen Metallfolien (Folien-VSI) in das Vakuum. Zwar erzeugt man dadurch wieder Festkörperbrücken, jedoch ist der Vorteil durch die Strahlungsreduktion bei geeigneten Pulvermaterialien (wie Perlit oder pyrogene Kieselsäure, ggf. mit IR-Trübung), bzw. einer genügend großen Folienanzahl, größer. Zusätzlich sind wegen der kleinen Kammern der eingebrachten Dämmmaterialien nun einfach zu erzeugende technische Vakua von 0,1–10 mbar ausreichend. Derartige Vakuumsuperisolationen erreichen Wärmeleitfähigkeiten von 0,01 W/(m·K) bis hinunter zu 0,003 W/(m·K) und dämmen damit 5–10 mal so gut wie konventionelle Dämmstoffe (s. Abb.49).

Die heute besten verfügbaren Dämmungen werden in der Kryotechnik zur Speicherung tiefkalter Flüssiggase bei ca.  $-200^{\circ}\text{C}$ , sowie in der Weltraumtechnik, z. B. zur Dämmung von Satelliten gegen das ultrakalte ( $-270^{\circ}\text{C}$ ) Weltall, verwendet.



■ **Abb.48:** Vakuumdämmung in einer Thermoskanne (links), Vakuumsuperisolation in einem evakuierten VIP-Panel mit einer Füllung aus pyrogener Kieselsäure (rechts)



**Abb. 49:** Vergleich der Dämmwirkung verschiedener Speicherdämmungen anhand des U-Wertes in Abhängigkeit von der Dämmstärke: Konventionelle Mineralwolle, Vakuumdämmung (VI) mit unterschiedlichen Oberflächenvergütungen (Emissionsgraden  $\epsilon$ ), sowie eine am ZAE Bayern entwickelte Vakuumsuperisolation (VSI) mit evakuiertem Perlit für bestmögliche Dämmung, z. B. in solaren Langzeitspeichern.

Neueste Forschungsarbeiten am ZAE Bayern machen diese Art der Dämmung auch für Anwendungen bei höheren Temperaturen, wie die höchsteffiziente Dämmung von Häusern durch VIP-Paneele (s. Abb. 48) nutzbar. In einer neuesten Entwicklung sind inzwischen superisolierte Heißwasserspeicher verfügbar, die z. B. zur saisonalen solaren Langzeitspeicherung aber auch zur Speicherung industrieller Prozesswärme eingesetzt werden können. Im Kapitel 5.3 wird ein solcher VSI-Speicher mit höchster Dämmwirkung, bestehend aus zwei konzentrischen Stahlzylindern, deren Zwischenraum mit Perlit gefüllt und auf 0,1 mbar evakuiert ist, im Detail vorgestellt.

---

## 5 Thermische Energiespeicher in der Anwendung

Dieses Kapitel stellt konkrete Anwendungsbeispiele verschiedener Speichertechnologien vor. Nachfolgend werden die eingeführten Begriffe noch einmal an Beispielen anschaulich dargestellt. Die Speicher werden nach ihrem Speicherprinzip, ihrem Einsatzbereich und dem Temperaturbereich, in dem sie geladen und entladen werden, eingeordnet.

In der konkreten Anwendung werden die Werte für die spezifische Speicherkapazität, die erreichbare thermische Leistung, der Nutzungsgrad und die mögliche Anzahl von Speicherzyklen pro Zeit angegeben. Je nachdem, ob es sich um erste Demonstrationsanlagen aus dem Bereich der Forschung und Entwicklung handelt oder bereits um Speicher, die unter kommerziellen Randbedingungen betrieben werden, lassen sich Aussagen zur Wirtschaftlichkeit treffen.

Die Kapitelaufteilung erfolgt nach den Speichermethoden sensibel, latent und thermochemisch.

### 5.1 Sensible Speichersysteme

#### 5.1.1 Saisonale Speicherung solarer Wärme

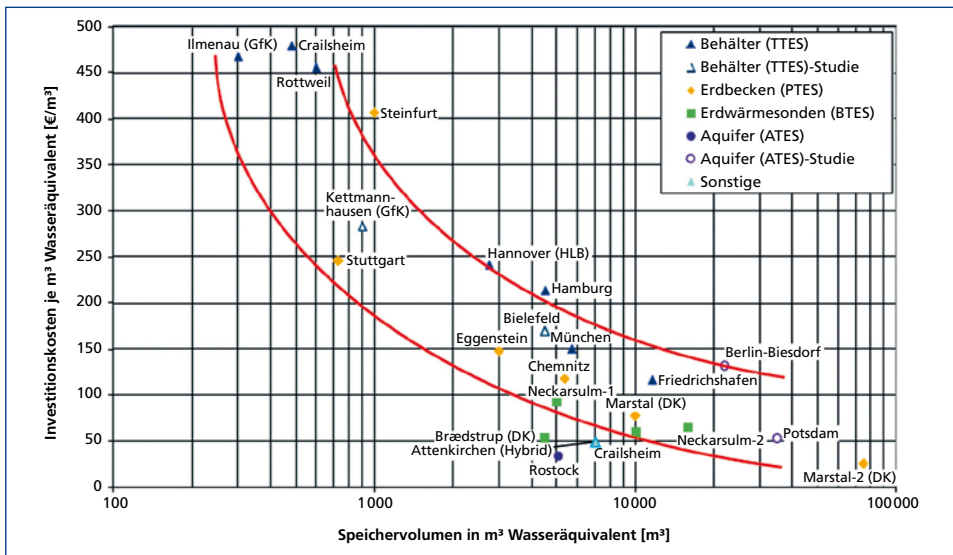
##### Einführung

Die Nutzung erneuerbarer Energien und hier insbesondere die Nutzung solarer Wärme sind ohne Wärmespeicher nicht effizient möglich. Dies trifft nicht nur für die solare Brauchwasserbereitung zu, sondern auch für das solare Heizen, die solare Prozesswärme in Industrie und Gewerbe bis hin zur Stromerzeugung in solarthermischen Kraftwerken.

Insbesondere beim solaren Heizen mit hohem solaren Deckungsanteil spielt die saisonale Wärmespeicherung eine entscheidende Rolle, da hier die in den Sommermonaten bei hoher Einstrahlung generierte Wärme in den Winter mit seinem hohen Heizwärmebedarf verschoben werden muss. Ähnlich verhält es sich mit der Verwertung von Wärme aus Kraftwärmekopplung mit Biogas. Das Biogas und damit die Wärme fallen mehr oder minder gleichmäßig über das ganze Jahr an, während der Bedarf für die Beheizung von Wohnräumen saisonal stark schwankt und damit eine Langzeitspeicherung notwendig macht.

Bei einem saisonalen Wärmespeicher mit 1 bis 2 Speicherzyklen pro Jahr spielen Wärmeverluste zwangsläufig eine wichtige Rolle. Sie werden einmal durch die Güte und Schichtdicke der Wärmedämmung selbst und einmal durch die Speichergeometrie und hier insbesondere durch das Verhältnis von Oberfläche (Wärmeverluste) zu Volumen (Speicherkapazität) beeinflusst. Bereits daraus lässt sich ablesen, dass sich saisonale Wärmespeicherung nur mit großen Speichervolumina und damit für große Energiemengen effizient und wirtschaftlich realisieren lässt.

Bei allen Großwärmespeichern zeigt sich mit zunehmender Größe ein deutlicher Rückgang der spezifischen Baukosten (Abb. 50). Aber auch die einzelnen Speichertypen – Behälter-, Erdbecken-, Erdwärmesonden- und Aquiferspeicher – unterscheiden sich bedingt durch die unterschiedlichen Bautechniken erheblich voneinander.

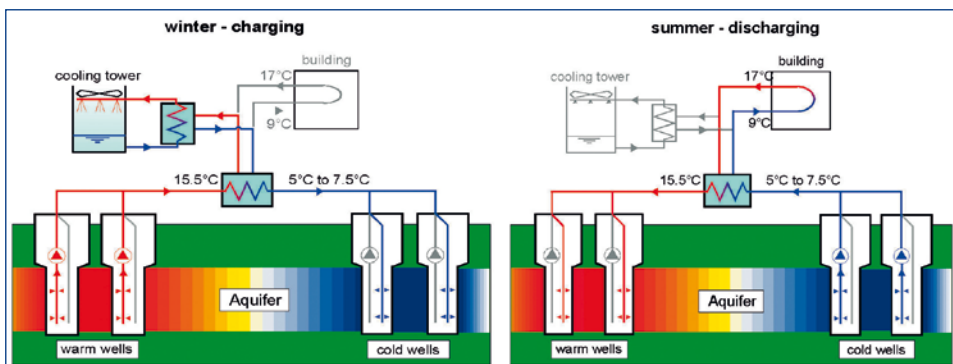


**Abb. 50:** Spezifische Investitionskosten verschiedener ausgeführter Langzeitwärmespeicher (ohne Planungskosten und MwSt.) nach [20]

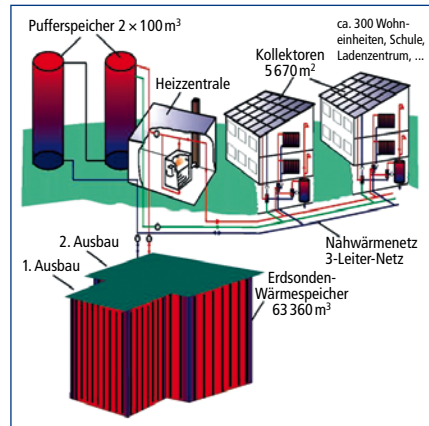
Für die Langzeitwärmespeicherung von großen Wärmemengen, wie sie im Fall solarer Nahwärmanlagen benötigt wird, kommen vor allem aus wirtschaftlichen Gründen Untergrundspeicher – Aquiferspeicher, Erdwärmesonden-Speicher und Erdbeckenspeicher sowie Kieswasserspeicher – in Frage. Die Auswahl des Speichertyps hängt wesentlich von den geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten am Standort ab.

Beim Aquiferspeicher (Abb. 51) wird ein Grundwasserleiter (Wasser einschließlich Gesteinsmatrix) als Speichermedium genutzt. Wärmeträgermedium ist Wasser, das über Brunnen gefördert, aufheizt oder abgekühlt wieder in denselben Aquifer zurückgeleitet wird. Dabei spielen für die Machbarkeit die hydrogeologischen und hydrochemischen Bedingungen am Standort eine entscheidende Rolle.

Erdwärmesonden-Speicher (Abb. 52) dagegen nutzen den gewachsenen Untergrund als Speichermedium, das Be- und Entladen erfolgt über Wärmeübertrager im Untergrund. Auch bei diesem Typ hängt die Machbarkeit an den geologischen Standortgegebenheiten.



**Abb. 51:** Aquiferspeicher zum Heizen und Kühlen



■ **Abb. 52:** Erdwärmesonden-Speicher solare Nahwärme Neckarsulm

Eine nur geringe Abhängigkeit von den Standortbedingungen haben Erdbeckenspeicher oder eingegrabene Behälterspeicher. Hier ist im Wesentlichen auf tragfähigen Untergrund und ausreichend Abstand zu einem Grundwasserleiter zu achten. Beim Erdbeckenspeicher wird eine entsprechend große Grube ausgehoben und mit geeigneter Wärmedämmung und einer wasserdampfdichten Folie ausgekleidet. Anschließend wird das Becken mit Kies aufgefüllt und mit Abdichtfolie sowie einer dicken Lage Wärmedämmung abgedeckt. Die Kiesschüttung wird mit Wasser gefüllt, das zusammen mit dem Kies das Speichermaterial darstellt und gleichzeitig als Wärmeträgermedium dient.

Aufgrund ihrer guten thermischen und betriebstechnischen Eigenschaften sind Behälterspeicher besonders interessant. Nachteilig allerdings sind die im Verhältnis zu den anderen Systemen, hohen Baukosten. In den bisher in Deutschland ausgeführten solaren Nahwärmeprojekten sind unterschiedliche bautechnische Varianten von Betonbehältern realisiert worden. Um bei Beton auch bei höheren Temperaturen Dichtheit für Wasserdampfdiffusion zu erreichen, muss der Betonbehälter entweder innen mit einem Edelstahl liner ausgekleidet oder aus speziellem, hochfesten Beton hergestellt werden. Neben der klassischen Bauweise in Ortbeton wurde in München erstmals ein Behälter aus Betonfertigteilen (Abb. 53) errichtet, dessen Innen-seiten bereits mit Edelstahlblechen verkleidet waren, die bei der Herstellung der Elemente als verlorene Schalung dienten.

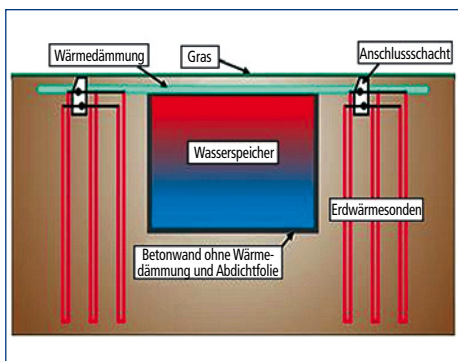
Der Edelstahl liner und die Wärmedämmung stellen bei den Betonbehältern einen wesentlichen Kostenfaktor dar, der bei Erdwärmesonden- oder Aquiferspeichern nicht anfällt. Ein weiterer Nachteil der Behälterspeicher ist, dass einmal gebaut ihre Größe festliegt. Sie können nicht erweitert werden. Wächst der Bedarf an Speicherkapazität, wie es bei der Erweiterung einer Nahwärmeversorgung durchaus der Fall ist, muss ein weiterer Behälter errichtet werden, während bei einem Erdwärmesonden-Speicher meist relativ leicht weitere Sonden gebohrt werden können. Beim Aquiferspeicher muss im günstigsten Fall nur die Pumprate erhöht werden, unter ungünstigen Bedingungen müssen zusätzliche Brunnen errichtet werden.

Nicht zuletzt ist der Wärmetransport beim Be- und Entladen des Speichers ein wichtiger Aspekt, der bei der Auswahl und Konstruktion eines Speichers Berücksichtigung findet. Ist das Speichermedium gleichzeitig auch Wärmetransportfluid, wie es beispielsweise bei Wasserspeichern der Fall ist, kann die Be- und Entladeleistung einfach über den Volumenstrom geregelt





■ **Abb. 53:** Heißwasserspeicher der Solaren Nahwärmanlage am Ackermannbogen in München [21]



■ **Abb. 54:** Hybridspeicher der Solaren Nahwärmanlage in Attenkirchen

werden. Bei Feststoffspeichern dagegen erfolgt im Festkörper der Wärmetransport durch Wärmeleitung, wodurch die Be- und Entladeleistung erheblich geringer wird. Dies ist auch bei Erdwärmesonden-Speichern der Fall und muss bei der Anlagenplanung entsprechend berücksichtigt werden. In der Regel werden in diese Systeme zusätzlich Pufferspeicher zur Leistungsanpassung integriert. Ein Beispiel hierfür ist der Hybridspeicher der solaren Nahwärmanlage in Attenkirchen (Abb. 54). Hier ist der Wasserpufferspeicher in das Erdwärmesonden-Feld integriert [22]. Bei dieser Konstruktion ist der zentrale Pufferspeicher thermisch an den Erdwärmesonden-Speicher gekoppelt, Wärmeverluste des Wasserspeichers sind dadurch Wärmegegewinne im Sondenfeld.

Vorteil dieser Kombination ist, dass auf die diffusionsdichte Auskleidung des Wasserspeichers und auf eine seitliche Wärmedämmung verzichtet werden kann, da Wärmeverluste des Wasserspeichers nach unten und zur Seite als Wärmegegewinne im Sondenfeld auftreten.

### Heißwasserspeicher der solaren Nahwärmanlage am Ackermannbogen

Die Schlüsselkomponente bei der solaren Heizung mit hohen Deckungsanteilen ist der Langzeit-Wärmespeicher, da große Energiemengen über mehrere Monate gespeichert werden. Insbesondere aus wirtschaftlichen Gründen kommen hier sensible Untergrund-Wärmespeicher in Frage, wie z. B.

- Erdwärmesonden-Speicher (vertikale Bohrungen in einem große Erdvolumen),
- Aquiferspeicher (Grundwasserleiter mit Lade- und Entladebrunnen),
- Kies/Wasserspeicher (Kiesgefülltes Becken mit Wasser geflutet),
- Wasserspeicher (gedämmter Behälter mit Wasser gefüllt).

Die Auswahl eines Speichertyps muss an Hand der geologischen und hydrogeologischen Standortbedingungen erfolgen. Die quartären Schotter und der Grundwasserleiter in etwa 8 m Tiefe am Standort Ackermannbogen schließen einen Erdwärmesonden-Speicher aus. Wegen des starken Gefälles und der damit hohen Fließgeschwindigkeit des Grundwassers scheidet auch ein Aquiferspeicher aus. Von den beiden verbleibenden Typen Wasser- oder Kies/Wasserspeicher fiel die Entscheidung aus wirtschaftlichen Gründen auf den Wasserspeicher, da der am Standort anstehende Kalksteinschotter des Isartals für einen Kies/Wasserspeicher nicht geeignet ist. Die Anlieferung von geeignetem Material wie Granit hätte aus den Zentralalpen oder dem Bayerischen Wald erfolgen müssen und kam aus wirtschaftlichen Überlegungen nicht in Frage. Mit dem Heißwasserspeicher wird Solarwärme saisonal bis zum Winter gespeichert.

#### *Konstruktion des Speicherbehälters*

Am Ackermannbogen wurde ein wärmegeprägter Betonbehälter ausgewählt. Die Geometrie des Speichers ist ein wichtiger Faktor für die Wärmeverluste. Während die Speicherkapazität proportional zum Volumen ist, hängen die Wärmeverluste von der Oberfläche ab. Der ideale geometrische Körper ist daher die Kugel, da sie maximales Volumen bei minimaler Oberfläche hat. Allerdings ist eine Kugel bautechnisch sehr schwierig herzustellen. Es wurde deshalb eine Kombination aus einem Kegelstumpf unten, einem Zylinder in der Mitte und einem Kegelstumpf oben gewählt, die in ihrem Oberflächen/Volumen-Verhältnis ( $A/V = 0,29 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ) der Kugel ( $A/V_{\text{Kugel}} = 0,27 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ) relativ nahe kommt. Der Speicher hat eine gesamte lichte Höhe von 16,08 m, wobei der untere Kegelstumpf eine Höhe von 2,80 m, der Zylinder 9,50 m und der obere Kegelstumpf 3,70 m hat. Im Bereich des Zylinders beträgt der Innendurchmesser 24,58 m, die Deckfläche des oberen Kegelstumpfes hat einen Durchmesser von knapp 6,00 m und die des unteren Kegelstumpfes von ca. 10,00 m. Der Speicher verfügt über ein Volumen von  $6000 \text{ m}^3$  und wurde mit einem Wasservolumen von  $5650 \text{ m}^3$  (bei  $20^\circ\text{C}$ ) befüllt. Im durchgeheizten Zustand von  $95^\circ\text{C}$  dehnt sich das Wasservolumen auf knapp  $5900 \text{ m}^3$  aus.

Der untere Kegelstumpf wurde in Ortbeton hergestellt und ist nach unten wärmegeprägter (s. Abb. 55). Erfahrungen aus den Messkampagnen bei anderen bereits realisierten Projekten zeigen, dass die Wärmeverluste nach unten stets höher waren als auf Grund von Simulationsrechnungen erwartet wurde. Deshalb wurde der Speicher in München mit der Bodendämmung aus rund 0,30 m Schaumglasschotter (Korngröße 10/75) ausgeführt, die mit einer Sauberkeitsschicht aus Magerbeton überdeckt wurde. Der Wärmedurchgangskoeffizient des Speicherbodens beträgt  $U_B = 0,768 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

Während die ersten Wasserspeicher in Friedrichshafen und Hamburg vollständig aus Ortbeton hergestellt und anschließend mit Edelstahlblech ausgekleidet wurden, wurde in München ein neuer Weg beschritten. Die vertikalen Seitenwände und das Dach, das ebenfalls die Form eines Kegelstumpfes hat, wurden aus Betonfertigteilen errichtet (Abb. 56), die innen bereits mit Edelstahlblech (1,25 mm stark) verkleidet waren. Das Blech diente gleichzeitig als verlorene Schalung. Die Bauteildicke der Wand- und Deckenelemente wurde so gering wie möglich ge-





■ **Abb. 55:** Wärmedämmung aus Glasschaumschotter, Speicherboden aus Ortbeton



■ **Abb. 56:** Seitenwände und Dach des Speichers aus Betonfertigteilen

halten, um Zwangsbeanspruchungen infolge des Temperaturgradienten zu reduzieren. Nach dem Aufstellen der Elemente wurde der Behälter vorgespannt und verbliebene Spalten ausbetoniert. Die Stöße der Edelstahlbleche wurden von innen verschweißt, um eine vollständig dichte Auskleidung zu erhalten. Damit wird eine Durchfeuchtung der Dämmung durch Wasser bzw. Wasserdampf aus dem Speicher auch bei höheren Temperaturen verhindert.



■ **Abb. 57:** Holzunterkonstruktion (links) und Membranverkleidung (rechts) für Wärmedämmschüttung aus Blähglasgranulat

Die Seitenwände (Betondicke = 0,16 m) des Speichers sind mit Blähglasgranulat in einer Membranschalung wärmegedämmt (Abb. 57). Die Schichtdicke der Dämmung beträgt an der Speicherwand unten ca. 0,40 m und nimmt nach oben, entlang der Wand, auf rund 0,80 m Stärke zu. Die Wärmedurchgangskoeffizienten nehmen von unten ( $U_{wu} = 0,154 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ ), wo die niedrigsten Speichertemperaturen herrschen, nach oben ( $U_{wo} = 0,100 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ ), wo die Wassertemperaturen bis 95 °C ansteigen können, ab. Auch auf der Decke ist die Dämmschicht 0,70 m dick. Blähglasgranulat wird aus Altglas hergestellt und hat den Vorteil, dass es feuchteunempfindlich und somit für den Einbau im Boden geeignet ist. Die Dämmung auf der Speicherdecke ist nochmals mit einer Schicht Schutzbeton überzogen.

Der Heißwasserspeicher am Ackermannbogen in München ist hinsichtlich der Baubedingungen am Standort mit den Speichern in Hamburg und Hannover vergleichbar. Trotz der zusätzlichen Bodendämmung konnten die Speicherbaukosten in München um ca. 20 % reduziert werden bei einer gleichzeitigen Steigerung der Speichereffizienz.

### *Speicherkonzept*

Die Beladung des Speichers erfolgt ausschließlich mit Solarwärme. Beim Entladen sind, je nach Temperatur, verschiedene Betriebszustände möglich. Liegt oben im Speicher im Bereich der Entnahme die Temperatur bei oder über 65 °C und somit über der Vorlauftemperatur des Nahwärmenetzes, erfolgt solare Direktversorgung. Zwischen 40 °C und 65 °C Speichertemperatur wird ebenfalls Wärme aus dem Speicher entnommen und wegen der meist noch geringen Leistungsanforderung mit Fernwärme direkt auf Netzzorlauftemperatur aufgeheizt. Erst unterhalb 40 °C wird die mit Fernwärme angetriebene Absorptionswärmepumpe zugeschaltet. Dann ist auch der Leistungsbedarf ausreichend hoch, um die Absorptionswärmepumpe sinnvoll betreiben zu können. In diesem Betriebsmodus dient der Speicher als Niedertemperatur-Wärmequelle für die Wärmepumpe.

Mit Hilfe der Absorptionswärmepumpe kann der Speicher somit erheblich unter die Rücklauftemperatur des Nahwärmenetzes ausgekühlt werden. Das Speichervolumen wird wegen des größeren Temperaturhubs erheblich besser ausgenutzt und die Zusatzenergie Fernwärme wird nochmals »veredelt«, mit rund 1 kWh Fernwärme können so 1,7 kWh Nutzwärme bereitgestellt werden, wobei 0,7 kWh Niedertemperaturwärme (Solarenergie) aus dem Speicher kommen.

### *Schichtladeeinrichtung*

Da die oberste Schicht zugleich immer die wärmste ist, erfolgt die Entnahme von Nutzenergie durch eine »feste Tasse« (Abb. 58) ganz oben. Allerdings hat auch diese Entnahmetasse einen gewissen Bewegungsspielraum. Sie wird durch einen Schwimmkörper immer knapp unter dem Wasserspiegel gehalten, dessen Höhe durch die Wärmeausdehnung bei Aufheizen und Auskühlen im Laufe eines Jahres um mehr als 2,00 m schwankt.

Ein wesentlicher Punkt des Anlagen- und Speicherkonzeptes der solaren Nahwärme am Ackermannbogen ist die ausgeprägte Temperaturschichtung im Speicher selbst. Das Konzept sieht vor, den oberen Speicherbereich über möglichst lange Zeit im Jahr auf einem Temperaturniveau über 60 °C zu halten, um einen hohen solaren Nutzwärmeanteil zu erreichen.

Durch eine gezielte Aufheizung des oberen Bereichs im Frühjahr wird hier in kurzer Zeit ein Temperaturniveau von über 60 °C, der Vorlauftemperatur des Nahwärmenetzes, erreicht und so zur Direktversorgung ausreicht. Erst dann wird der Speicher von oben nach unten durchgeladen.

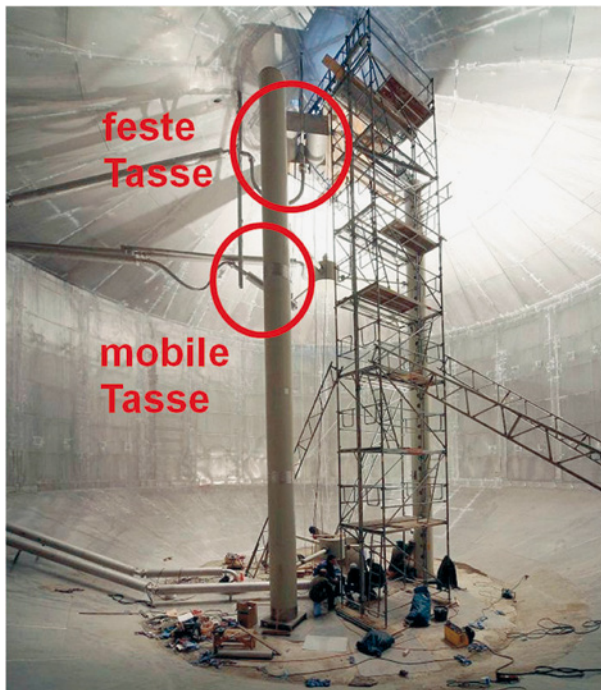
Um eine derartige Temperaturschichtung zu erreichen, sind entsprechende Einbauten im Speicher notwendig. Zentrales Element ist hierfür eine Schichtladeeinrichtung, die beim Beladen das Fluid in den Bereich gleicher Temperatur möglichst genau einschichtet. Solare Wärme wird dabei immer von oben in den Schichtlader eingespeist.

Durch eine in der Höhe verstellbare Entnahmeeinrichtung (mobile Tasse) im oberen Drittel kann das Puffervolumen variiert werden. Zu Beginn des Pufferspeicherbetriebs wird die Entnahme nach oben gefahren (minimales Puffervolumen von ca. 1 000 m<sup>3</sup>), um ein möglichst rasches Aufheizen zu erreichen. Durch Verfahren der Entnahme nach unten wird das Volumen in dieser Betriebsphase von März bis Juni stückweise (bis auf ca. 2 300 m<sup>3</sup>) vergrößert.

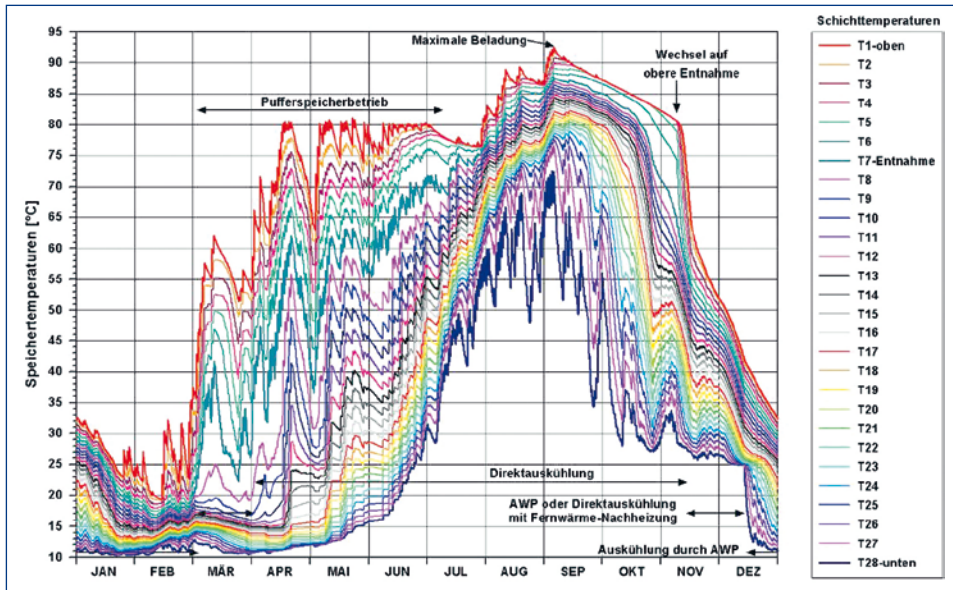
Um den Pufferspeicherbereich aufzuheizen, wird über die mobile Tasse Fluid (Abb. 58) aus dem Speicher entnommen, am Solarwärmeübertrager erhitzt und über den Schichtlader wieder in den Speicher zurückgeführt. Gegen Ende des Pufferspeicherbetriebs im Juni wird die Entnahme zum »Durchladen« des Speichers von der mobilen Tasse auf die feste Tasse am Speicherboden umgeschaltet, die Einspeisung erfolgt wie vorher über den Schichtlader oben.

Abbildung 59 zeigt diesen Aufheizvorgang des Pufferspeicherbereichs im Frühjahr. Bereits im März werden in den obersten Speicherschichten Temperaturen erreicht, die eine Solardirektversorgung zulassen, ab Juni wird dann der Speicher voll durchgeladen. Ohne den Pufferspeicherbereich könnte zwar vergleichbar viel Wärme in den Speicher geladen werden, allerdings wäre die Solardirektversorgung um etwa zwei Monate kürzer und somit der solare Deckungsanteil geringer. Dieses Beispiel zeigt deutlich den betriebstechnischen Vorteil einer geschichteten gegenüber einer gleichmäßigen Beladung.

Mit der Absorptionswärmepumpe kann im Winter der Speicher auch unter die Netzzrücklauf-temperatur von rund 30 °C ausgekühlt werden und die im Behältervolumen untergebrachte



■ **Abb. 58:** Entnahmetassen und Schichtlader im saisonalen Solar-speicher Ackermannbogen



■ **Abb. 59:** Temperaturschichtung im saisonalen Solarspeicher Ackermannbogen

Speicherkapazität durch den größeren Temperaturhub optimal ausgenutzt werden. Das von der Wärmepumpe ausgekühlte Wasser wird unten in den Schichtlader eingeleitet und so in den Speicher der Temperatur entsprechend zurückgespeist.

## Zusammenfassung

Für die saisonale Wärmespeicherung kommen aus technischen und wirtschaftlichen Gründen im Wesentlichen unterirdische thermische Energiespeicher in Frage. Die Auswahl hinsichtlich des Typs Aquifer, Erdwärmesonden, Kies/Wasserspeicher oder Behälter-Heißwasserspeicher erfolgt in erster Linie an Hand der geologischen und hydrogeologischen Bedingungen am Standort.

In der solaren Nahwärmeversorgung am Ackermannbogen wurde auf Grund der Lage im Isartal mit einem hohen Grundwasserspiegel mit entsprechenden Strömungsgeschwindigkeiten ein Heißwasserspeicher realisiert. Größe und Form des Behälters ergeben sich aus der erforderlichen Speicherkapazität und einem optimalen A/V-Verhältnis. Das Anlagenkonzept geht von einer maximalen Ausnutzung des Volumens und einem maximalen Temperaturhub von 80 K aus. Dies wird durch den Einsatz einer Wärmepumpe ermöglicht.

Der Behälter wurde aus Betonfertigteilen mit einem Boden aus Ortbeton errichtet. Er ist allseitig wärmegedämmt, wobei besonders auf Materialien (Schaumglasschotter, Blähglasgranulat) geachtet wurde, die eine geringe Feuchteaufnahme aufweisen. Um dauerhaft Diffusionsdichtheit gewährleisten zu können, wurde der Behälter innen mit einem Edstahlliner ausgekleidet.

Zur Maximierung des solaren Nutzenergieertrags sieht das Konzept einen stark geschichteten Speicher vor und ist deshalb innen mit einem Schichtlader ausgerüstet. Zusätzliche Einbauten wie eine mobile Entnahmeeinrichtung im oberen Drittel des Speichers ermöglichen den Aufbau eines Puffervolumens für rasches Aufheizen auf 65 °C, um den Zeitraum der Solardirektnutzung möglichst lange auszuweiten und den solaren Nutzenergieertrag anzuheben.

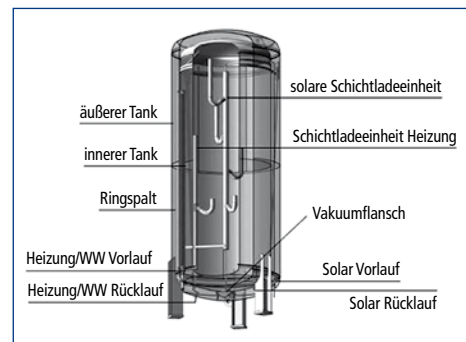


Beim saisonalen Heißwasserspeicher am Ackermannbogen wurden alle wichtigen Maßnahmen umgesetzt, die eine maximale Ausnutzung des Speichers möglich machen.

## 5.1.2 Superisolierter Speicher

Heutige thermische Solaranlagen decken in der Regel 10–30 % des Wärmebedarfs von Gebäuden. Die zugehörigen Wasserspeicher haben Volumina von ca. 0,5–2 m<sup>3</sup> und sind mit konventionellen Dämmstoffen mit Wärmeleitfähigkeiten von 0,03–0,06 W/(m·K) (im trockenen Zustand) ausgestattet. Sie verfügen im Idealfall über Schichtladevorrichtungen, die Durchmischungen von heißem und kaltem Wasser im Speicher verhindern. Für die gesellschaftlich angestrebte stärkere Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist es nun unumgänglich, gerade im Wohnbereich, wo ein Großteil der gesamten Wärmeenergie verbraucht wird, höhere solare Deckungsgrade zu realisieren. Die dazu nötigen Systeme benötigen größere Kollektorflächen, sowie effizientere und größere Solarspeicher. Die Speichereffizienz ist wesentlich von der Dämmung der Speicherhülle und von der thermischen Schichtung im Speicher abhängig.

Höchstgedämmte Speicher mit funktionierendem Schichtenlader waren bisher kommerziell nicht verfügbar. Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) geförderten Forschungsprojekts wurde am ZAE Bayern in Kooperation mit dem Industriepartner Hummelsberger GmbH ein superisolierter Langzeitwärmespeicher entwickelt und ein Prototyp mit 16,5 m<sup>3</sup> Wasservolumen aufgebaut (s. Abb. 60) [23]. Mit aus der Kryotechnik bekannter Vakuumsuperisolation (VSI) lassen sich dabei Dämmwerte der Speicherhülle erzielen, die vier- bis sechsfach besser sind als konventionelle Dämmung im trockenen Zustand (s. Abb. 62). Bei feuchter Dämmung ist der Vorteil noch deutlich größer.



■ **Abb. 60:** Vakuum-Superisolierter Speicher (VSI-Speicher): Erster solarer Prototyp (links) und Schnittdarstellung (rechts)

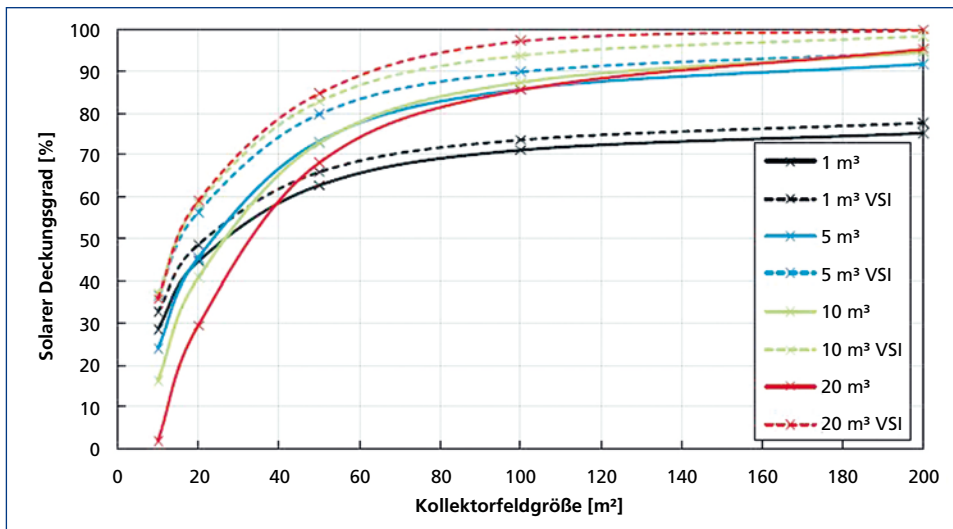
Zur Entwicklung eines effizienten Schichtenladere für den neuartigen VSI-Speicher, aber auch allgemein für große konventionelle Speicher wurde ein Speicher-Versuchsstand im Modellmaßstab (300 Liter, s. Abb. 63) für verschiedene Beladageometrien, Temperaturen und Volumenströme aufgebaut. Damit werden heute verfügbare Schichtenlader experimentell untersucht und auch eigene Schichtladesysteme entwickelt. Ein innovativer Schichtlader mit einem neuartigen, patentierten Klappenmechanismus zeigt im Labor die besten Resultate und wird ab Sommer 2012 in einem 6,5 m<sup>3</sup> VSI-Speicher erstmals im realen Betrieb erprobt.

Verschiedene Einsatz-Szenarien des VSI-Speichers werden mit Hilfe von Anlagensimulationen und auch anhand einer realen Pilotanlage studiert: Durch den Einsatz großer VSI-Speicher kann die für hohe solare Deckungsgrade benötigte Kollektorfläche deutlich verringert werden (s. Abb. 61), wodurch auch das Problem der Kollektorstagnation im Sommer entschärft wird.

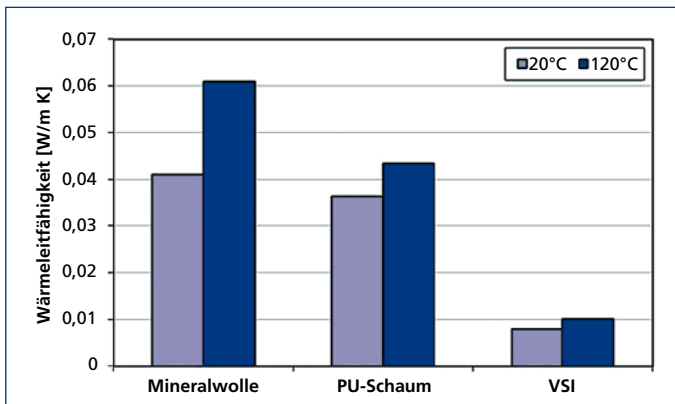
Der entwickelte VSI-Speicher kann prinzipiell auch sehr vorteilhaft in industriellen Prozesswärmeanwendungen z. B. zur Zwischenspeicherung nicht sofort nutzbarer Abwärme auf höheren Temperaturniveaus eingesetzt werden.

Der VSI-Speicher dient zur hocheffizienten, sensiblen Speicherung von thermischer Energie. Diese innovative Technologie erreicht, dass die Wärmeverluste über die Speicheroberfläche verglichen mit herkömmlichen Speichern auf einen Bruchteil minimiert werden.

Die Vakuum-Superisolation ähnelt dem Prinzip der Thermoskanne. Der Speicher besteht aus einem Außen- und einem Innentank aus Stahl, der Ringspalt (in der Regel 20 cm) zwischen den beiden Tanks wird auf unter 0,1 mbar evakuiert. Das Vakuum unterdrückt die Wärmeübertragung über Leitung und Konvektion fast vollständig, allerdings kann noch Wärme über Strahlung verloren gehen. Um den Strahlungstransport zu reduzieren, wird in den Ringspalt ein natürliches, poröses Vulkangestein (Perlit) eingebracht. Dieses Verbundsystem erreicht eine



**Abb. 61:** Solarder Deckungsgrad  $f_{\text{sol}}$  für ein modernes EFH (150 m<sup>2</sup>, 4 Personen, Heizwärmebedarf 50 kWh/m<sup>2</sup>a) mit Einspeichersystem als Funktion der Kollektorfeldgröße (Moderne Flachkollektoren, Kollektorneigung 45°, Ausrichtung: Süd) bei unterschiedlichen Speichervolumina und Speicherdämmungen. VSI bezeichnet den vakuumsuperisolierten Speicher (gestrichelte Kurven). Die durchgezogenen Kurven entsprechen heute verfügbaren Speichern mit Standardisolationen aus PU-Hartschaum. Die Werte für PU können sich in der Praxis durch Alterung, Feuchtigkeit und Einbaufehler verschlechtern.



■ **Abb. 62:** Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten unterschiedlicher Dämmsysteme bei 20°C und 120°C

optimale Dämmwirkung. Außerdem wird durch eine spezielle Konstruktion der Wärmeverlust über Rohrleitungen und Anschlüsse fast vollständig eliminiert. Im Labor wird eine minimale effektive Wärmeleitfähigkeit der Speicherdämmung von 0,007 W/(m·K) erzielt, ein Echtgrößen-Prototyp mit 16,5 m³ Wasserinhalt (s. Abb. 60) erreichte im Winter 2010/2011 0,009 W/(m·K) bei 90 K über der Umgebungstemperatur. In diesem Wert sind Anschlussverluste bereits enthalten.

Neben der optimalen Dämmung ist eine stabile thermische Schichtung im Speicher für eine effiziente Speichernutzung ausschlaggebend. Ein effizienter Speicher zeichnet sich dadurch aus, dass das von der Wärmequelle erzeugte Temperaturniveau möglichst rasch und möglichst lange zur Verfügung steht. Realisiert wird diese Anforderung über Schichtladeeinrichtungen, die schnell im oberen Speicherbereich eine Zone hoher Temperatur aufbauen und diese auch während der Speicherentladung und solaren Beladung erhalten. Da die bisher üblichen Systeme diese Anforderung nicht ausreichend erfüllen, wie in Laborexperimenten nachgewiesen werden konnte (Abb. 63), wurde ein völlig neuartiges System mit Klappenmechanismus entwickelt und erfolgreich geprüft. Die Ergebnisse zeigen, dass mit der neuen Schichtladeeinrichtung sehr schnell eine stabile thermische Schichtung aufgebaut wird und sehr schnell hohe Temperaturen zur Verfügung stehen.

Die Einsatzbereiche des entwickelten VSI-Speichers finden sich überall dort, wo Wärme auf hohem Temperaturniveau und/oder über einen langen Zeitraum effizient gespeichert werden soll. Die Hauptanwendung liegt bisher im Bereich der solaren Wärmespeicherung in Wohngebäuden, wo bei gleicher Kollektorfläche mit VSI-Speichern deutlich höhere solare Deckungsgrade erreicht werden als mit konventionellen Speichern. Wie bereits erwähnt, kann auch industrielle Prozesswärme vorteilhaft zwischengespeichert werden.

Die experimentell ermittelte Halbwertszeit für den Auskühlvorgang betrug beim ersten 16,5 m³ Prototypspeicher 270 Tage, also beträgt der Speichernutzungsgrad bei einer Speicherung über 9 Monate beachtliche 50 %. Das bedeutet, dass im Sommer solar erzeugtes, 100°C heißes Wasser nach einer Speicherdauer von einem halben Jahr (bei einer mittleren Speicherumgebungstemperatur von 20°C) immer noch deutlich über 60°C warm ist und somit im Winter direkt, das heißt ohne konventionelle Nachheizung, verwendet werden kann. Voraussetzung ist ein dem Energiebedarf des Gebäudes angepasstes ausreichendes Speichervolumen. Ein weiterer Vorteil der Vakuum-Superisolation besteht in ihrer Langzeitstabilität. Konventionelle Dämmmaterialien müssen über die gesamte Lebensdauer vor Feuchtigkeit

■ **Abb.63:** Prototyp des neuen Schichtladers im Modellmaßstab auf dem Speicherteststand



geschützt werden, da sich die Dämmwirkung sonst drastisch verschlechtert. Bei einer Vakuum-Superisolation darf hingegen eine maximale Leckrate nicht überschritten werden, um die Vakuumdichtigkeit über die gesamte Lebensdauer aufrecht zu erhalten. Diese Anforderung ist jedoch technisch beherrschbar. Der Wärmedurchgangskoeffizient (bei technischen Geräten: k-Wert) des ersten Prototyps mit  $16,5 \text{ m}^3$  Wasservolumen wurde experimentell zu  $0,04 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  bestimmt, wohingegen eine konventionelle Dämmung ca.  $0,2\text{--}0,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  aufweist.

Als praktische Bewertungsgröße der Fähigkeit eines Speichers ein gespeichertes Temperaturniveau zu halten, kann der Alpha-Wert, also der Exponent der Abkühlkurve, dienen. Dieser Wert gibt den Temperaturverlust pro Grad Temperaturdifferenz zur Umgebung und pro Zeit, z. B. pro Tag an. Für den  $16,5 \text{ m}^3$  VSI-Speicher wurde dieser Wert experimentell zu  $0,0026 \text{ K}/(\text{d K})$  bestimmt. Ein gleich großer Speicher mit konventioneller Dämmung weist hier einen Wert von circa  $0,0095 \text{ K}/(\text{d K})$  auf. Aus der exponentiellen Abkühlkurve errechnet man bei einer Speicherdauer von vier Wochen einen typischen Temperaturverlust von  $6,2 \text{ K}$  beim VSI-Speicher gegenüber  $22,6 \text{ K}$  beim konventionell gedämmten Speicher.

Die Speicherkapazität jedes sensiblen Speichers ist wesentlich vom Speichervolumen und dem Speichermedium abhängig. Bei einer maximalen Speichertemperatur von  $100^\circ\text{C}$  und einer Kaltwassertemperatur von  $10^\circ\text{C}$  ergibt sich für Wasser eine maximale spezifische Speicherkapazität von etwa  $100 \text{ kWh}/\text{m}^3$ .

Die maximal entnehmbare Leistung ist vom Volumenstrom, dem Wärmeträgermedium und vom Wärmeübertrager abhängig. Für einen typischen Volumenstrom von  $1200 \text{ l/h}$  sind mit einem guten Wärmeübertrager  $100 \text{ kW}$  Entzugsleistung möglich. Diese Leistung kann bei guter thermischer Schichtung im Speicher über einen Zeitraum von 50 Minuten pro  $\text{m}^3$  Speichervolumen entnommen werden, bei einem  $16,5 \text{ m}^3$  Speicher also über 13 Stunden.



Durch die zweite Speicherhülle ist der Speicher sowohl im Gebäude, als auch im Freien aufstellbar. Bei einer Gebäudeintegration ergibt sich der Vorteil, dass im Sommer das Gebäude nicht unerwünscht durch die Speicherverluste aufgeheizt wird. Die Aufstellung außerhalb des Gebäudes macht den Speicher vor allem auch für Altbautsanierungen attraktiv. Dabei ist es möglich, den Speicher aus ästhetischen Gründen im Boden zu versenken. Anstatt der bei Altbauten oft aufwendigen Dämmung kann, bei gleicher CO<sub>2</sub>-Einsparung, eine Solaranlage mit hohem Deckungsgrad (>50%, so genanntes »Solaraktivhaus«, Abb. 61) unter Verwendung eines großen VSI-Speichers zum Einsatz kommen. Hierbei ist die Speichergröße an den Heizenergiebedarf anzupassen. Typische Speichervolumina für die solare Anwendung bei hohen Deckungsgraden liegen zwischen 5 und 50 m<sup>3</sup>.

Der Speicher kann in der Standardversion drucklos bis 100 °C betrieben werden und wird momentan in Volumina bis maximal 50 m<sup>3</sup> hergestellt. Prinzipiell sind auch größere Speichervolumen realisierbar. Höhere Temperaturen bis ca. 150 °C sind durch Druckspeicher bis ca. 6 bar realisierbar und bereits in Vorbereitung. Damit kann Fernwärme gespeichert werden. Neben dem Speichermedium Wasser können auch andere Wärmeträger, wie beispielsweise Thermoöle eingesetzt werden. So kann der VSI-Speicher zur Effizienzsteigerung auch leicht in Prozesswärmeanwendungen bis 250 °C integriert werden, ohne dass die mit Druckkesseln verbundenen mechanischen und sicherheitstechnischen Aspekte beachtet werden müssen. Erst oberhalb von 250 °C müssen andere Stahlwerkstoffe eingesetzt werden. Damit sind auch Speicher für Temperaturen bis 400 °C vertretbar. Derartige Mitteltemperatur-VSI-Speicher lassen sich besonders vorteilhaft in industriellen Prozesswärmeanwendungen einsetzen. Gerade bei höheren Temperaturen und längeren Speicherzeiten bietet der VSI-Speicher aufgrund der extrem geringen Wärmeverluste einen deutlichen Vorteil gegenüber herkömmlichen Speichern.

Praktische Informationen des Herstellers finden sich im Internet unter:  
[www.vakuum-pufferspeicher.de](http://www.vakuum-pufferspeicher.de).

Steckbrief	
Technologie	Vakuum-Superisolierter (VSI) Langzeitspeicher, sensible Speicherung der Wärme, Speichermedium Wasser (Thermoöl)
Einsatzbereich	Stationär, zentral oder dezentral
Kapazität	Bei solarer Anwendung maximal ca. 100 kWh/m <sup>3</sup> , bisher maximale Speichergröße: 50 m <sup>3</sup> (entspricht 5 000 kWh)
Maximale Entzugsleistung	Typisch 100 kW über einen Zeitraum von 50 min pro m <sup>3</sup> , also über maximal 41 Stunden (bei 50 m <sup>3</sup> Speichervolumen)
Halbwertszeit	260 Tage (16 m <sup>3</sup> Speicher, 20 cm Dämmstärke)
Temperaturverlust (Alpha-Wert)	0,0026 K/(d K) (Temperaturverlust pro Grad Temperaturdifferenz zur Umgebung an einem Tag) bei 20 cm Dämmstärke
Nutzungsgrad	Bei einer Speicherzeit von 2 Wochen 96,4 %, bei 9-monatiger Speicherdauer: 50 % (Speichertemperaturniveau 100 °C, Umgebungstemperatur 0 °C)
Zyklenzahl	Unbegrenzt

## 5.2 Latentwärmespeichersysteme

### 5.2.1 Passive Kühlung mit PCM

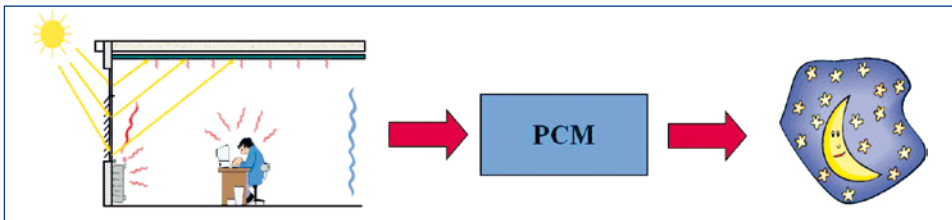
#### Hintergrund

Im Innern massiver Bauten herrscht auch bei sehr hohen Außentemperaturen noch eine angenehme Kühle. Auf dieser Erfahrung basieren die Nutzung von Höhlen, das Anlegen von Kellern und die dicken Steinmauern von Kirchen. All diese Räume sind von massiven Wänden umgeben, die ein hohes Wärmespeichervermögen im Tages- und Jahresverlauf aufweisen, so dass deren Klimatisierung rein passiv erfolgt. Seit etwa hundert Jahren, in zunehmendem Maß jedoch in jüngster Zeit, wurde eine aktive Klimatisierung aufgrund der leichteren Bauweise erforderlich. Zur aktiven Kälteerzeugung werden Kompressions- und Adsorptionskältemaschinen, Verdunstungskühlung sowie Sorptionstechnik eingesetzt. Problematisch ist allerdings der Primärenergieverbrauch aktiver Systeme in Verbindung mit hohen Kosten, die in Zeiten von Bedarfsspitzen anfallen.

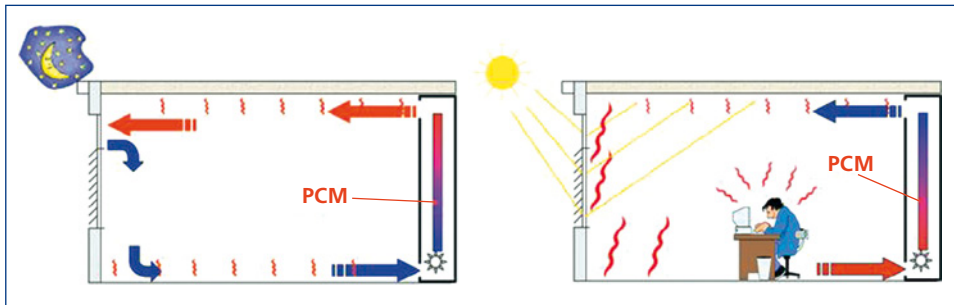
Der Idee der passiven Kühlung mit PCM geht eine Rückbesinnung auf die Vergangenheit voraus. So steht nachts bekanntlich ausreichend »Kälte« zur Verfügung. In Gebäuden in Massivbauweise kann diese durch Nachtlüftung und Speicherung in den Wänden, wie oben beschrieben, genutzt werden. Die Wände fungieren als sensibler Wärmespeicher, der mit kostenloser Kälte (»free cooling«) in der Nacht beladen und am Tag entladen wird. Die geringe spezifische Speicherkapazität des Baumaterials wird dabei durch dessen große Masse kompensiert. Eine massive Bausubstanz erlaubt somit eine passive Kühlung ohne aktive Kälteerzeugung.

Im Fall von Leichtbauten, wie z. B. moderne Bürogebäude, kann die Speicherung latenter Wärme in PCM als Ersatz der fehlenden massiven Wände dienen. Ein System zur passiven Kühlung mit PCM verwendet das PCM als Kältespeicher und Luft als Wärmeträger. Abbildung 64 illustriert dieses Funktionsprinzip. Die durch Sonneneinstrahlung und interne Quellen am Tag in den Raum eingebrachte Wärme wird im PCM gespeichert und in der Nacht an die kühle Umgebung abgegeben.

Das vorgeschlagene Prinzip mit Luft als Wärmeträgermedium lässt sich grundsätzlich auf zwei Arten umsetzen. So kann die erforderliche Luftbewegung zum einen durch freie Konvektion erreicht werden. Systeme mit freier Konvektion nutzen PCM-Speicherelemente für Wände bzw. Decken oder Wand- bzw. Deckenputz, dem PCM beigemischt ist. Andererseits kann auch erzwungene Konvektion der Luft für den Transport der Wärme zum PCM sinnvoll sein (s. Abb. 65). In diesem Fall sind Ventilatoren in Verbindung mit Speicherelementen für Decke, Wände oder Fußboden zu installieren bzw. separate Speicher, die beispielsweise direkt in die Klimaanlage integriert werden.



■ **Abb. 64:** Prinzip der passiven Kühlung eines Raums mit PCM: Tagsüber Einspeicherung der Wärme im PCM; nachts Abgabe der Wärme an die Umgebung

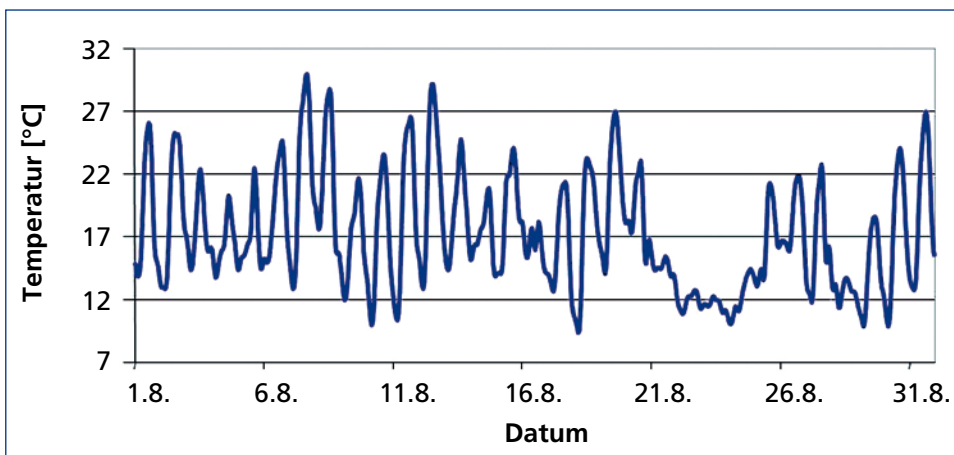


■ **Abb. 65:** System mit erzwungener Konvektion

## Auslegung

Wie bei jeder anderen PCM-Anwendung muss die Phasenwechseltemperatur  $T_{ph}$  des PCMs zum Temperaturbereich der Anwendung passen.  $T_{ph}$  muss einerseits ausreichend niedriger als die tagsüber erreichte Raumtemperatur sein, um ein Beladen des Speichers, d.h. ein Aufschmelzen des PCMs für einen Phasenwechsel von fest nach flüssig, zu gewährleisten. Andererseits muss  $T_{ph}$  ausreichend höher als die nächtliche Umgebungstemperatur sein, damit eine vollständige Entladung des Speichers, d.h. die Kristallisation des PCMs, gelingt. Systeme zur passiven Kühlung mit PCM benötigen folglich ein Klima, das hinreichend hohe Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht zeigt. Die Auslegung solcher Systeme hängt damit stark vom jeweiligen Standort ab und soll für das kontinentale Klima in Europa exemplarisch veranschaulicht werden. Zur Abschätzung, in welchem Bereich die Phasenwechseltemperatur des PCMs zu liegen hat, zeigt Abbildung 66 die Variation der Außentemperatur in München für den Monat August des Testreferenzjahres Try0112.

Für den Standort München ist sinnvollerweise ein PCM mit einer Schmelztemperatur von ca. 20°C auszuwählen. Für den Einsatz in Südeuropa müsste der Schmelzpunkt des PCMs dementsprechend höher liegen. Nordeuropa fällt aufgrund des fehlenden Kühlungsbedarfs aus der Betrachtung hinaus. Zur passiven Kühlung mit PCM sind für Europa demnach Materialien mit einem Schmelzpunkt im Bereich zwischen 20°C bis 30°C zu verwenden. Nachfolgende Tabelle



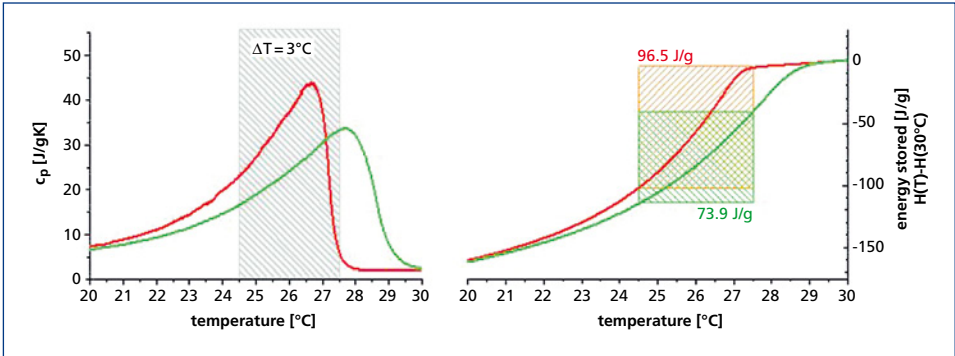
■ **Abb. 66:** Außentemperaturen, München, August Try0112

listet eine Auswahl kommerziell erhältlicher PCMs in diesem Temperaturbereich auf. Die Daten basieren auf Angaben der jeweiligen Hersteller. Sofern bekannt, ist neben einer fixen Schmelztemperatur auch der Bereich angegeben, innerhalb dessen das Material schmilzt.

Schmelzpunkt in °C (Schmelzbereich)	Schmelzenthalpie in J/g	Bezeichnung	Anbieter	Basis-Material
20	175	PCM-20	Autarkis	Salzhydrat
20	180	PureTemp 20	PureTemp	Fettsäure
21	125	ClimSel C21	Climator	Salzhydrat
21 (18–23)	134	RT 21	Rubitherm	Paraffin
21	175	TH20	Teap Energy	Salzhydrat
24 (22–28)	158	DELTA-COOL 24	Dörken	Salzhydrat
24	151	ClimSel C24	Climator	Salzhydrat
25	185	PureTemp 25	PureTemp	Fettsäure
27 (25–28)	179	RT 27	Rubitherm	Paraffin
28 (26–30)	188	DELTA-COOL 28	Dörken	Salzhydrat
28 (27–28)	245	RT 28 HC	Rubitherm	Paraffin
28	162	ClimSel C28	Climator	Salzhydrat
29 (27–31)	169	RT 31	Rubitherm	Paraffin

■ **Abb.67:** Auswahl kommerziell erhältlicher Materialien im Temperaturbereich 20 °C bis 30 °C

Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass der Temperaturunterschied zwischen Tag und Nacht in den meisten Fällen 10 °C nicht übersteigt und oftmals einige Grad Celsius weniger beträgt. Der Schmelzbereich des PCMs ist daher exakt zu bestimmen. Kommerzielle PCM-Produkte enthalten oft Zusatzstoffe bzw. sind Verbundmaterialien. Für diese Materialien ist ein verbreiteter Schmelzbereich anstelle eines sprunghaften Anstiegs der Enthalpie zu erwarten. Zur thermischen Charakterisierung ist die Veränderung der Enthalpie mit der Temperatur  $h(T)$



■ **Abb.68:** Auswirkung eines Messfehlers auf die Speicherdichte; spezifische Wärmekapazität (links) und Enthalpiekurve (rechts)

(»Enthalpiekurve«) mit hoher Genauigkeit zu messen. Wie bereits ein geringer Fehler des ermittelten Schmelzbereichs zu einer signifikanten Abweichung in der Speicherkapazität führen kann, ist in Abbildung 68 verdeutlicht.

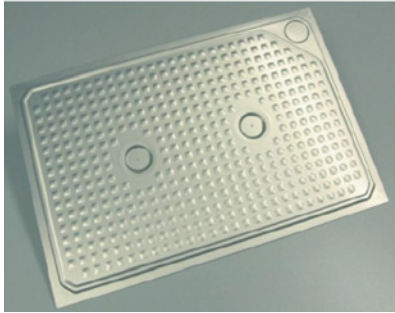
Folgende Annahmen wurden gemacht: Bei einer maximalen Tagestemperatur von 30 °C und einer minimalen Nachttemperatur von 20 °C sowie einer gewünschten Raumtemperatur von 25 °C ergibt sich für den Wärmeübergang Luft-PCM eine Temperaturdifferenz von  $\Delta T = 5$  °C. Aufgrund des niedrigen Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Luft und PCM beträgt das »effektive«  $\Delta T$  weniger als 5 °C, für Abb. 68 wurde  $\Delta T = 3$  °C gesetzt. Gezeigt sind jeweils zwei Kurven, wobei die rote Kurve als die der Auslegung des Speichers zugrunde liegende betrachtet werden soll. Im linken Diagramm ist die spezifische Wärmespeicherkapazität  $c_p$  gegen die Temperatur aufgetragen, im rechten die daraus durch Integration bestimmte Enthalpiekurve  $h(T)$ . Für die rote Kurve ergibt sich eine Wärmespeicherfähigkeit von 96,5 J/g, sofern Wärme zwischen 24,5 °C und 27,5 °C ein- und ausgespeichert wird. Wenn das verwendete PCM in Wirklichkeit aber durch die grüne Kurve charakterisiert wird, deren Schmelzbereich ca. 1 °C höher liegt, beträgt die Wärmespeicherfähigkeit im gewählten Temperaturintervall nur 73,9 J/g. Ein Fehler von 1 °C in der Temperatur verursacht hier eine Erniedrigung der nutzbaren Wärmespeicherfähigkeit um ca. 23 %.

Es ist sowohl von Vorteil als auch von Nachteil, dass der Phasenübergang eines PCMs bei einer festen Temperatur stattfindet. Einerseits erlaubt die feste Phasenwechseltemperatur das gezielte Auswählen des optimalen PCMs für eine bestimmte Anwendung. Andererseits treten Schwierigkeiten auf, falls die Anwendungstemperatur sich nicht über den gesamten angenommenen Bereich bewegt, da in diesem Fall das wiederholte Schmelzen und Kristallisieren des PCMs ausbleiben kann. Liegt die Anwendungstemperatur dauerhaft zu niedrig, so verbleibt das PCM im festen Zustand und speichert nur sensible Wärme ein und aus. Die dann genutzte Wärmekapazität des PCMs ist weitaus geringer als die angenommene, welche den Phasenwechsel mit berücksichtigt. Entsprechend liegt für eine zu hohe Anwendungstemperatur das PCM dauerhaft flüssig vor. Wie in Abbildung 66 zu erkennen ist, kann es im August an einzelnen Tagen zu relativ hohen Nachttemperaturen kommen. Fällt die Temperatur nur für kurze Zeit oder gar nicht unter die Phasenwechseltemperatur des PCMs, so wird dieses nur teilweise oder gar nicht kristallisieren. Die Folge für ein System passiver Kühlung mit PCM ist eine reduzierte Wärmeaufnahme des PCM-Speichers am darauf folgenden Tag, da aufgrund des nur teilweisen oder gar nicht möglichen Aufschmelzens ein Großteil der Wärmekapazität nicht zur Verfügung steht.

### Beispiel

Ein realisiertes Beispiel für passive Raumkühlung mit PCM findet sich im Rahmen des PCM-Demoprojekts ([www.pcm-demo.info](http://www.pcm-demo.info), Projektende im November 2010). Im Besprechungsraum des Physikalischen Instituts der Uni Würzburg wurden hinterlüftete Kühldecken mit PCM (Metallbehälter mit DELTA-COOL 24 (vgl. Abb. 67, Abb. 69)) installiert. Der Raum besitzt eine Grundfläche von 45 m<sup>2</sup>, wobei die effektive PCM-Fläche etwa 25 m<sup>2</sup> beträgt, was im Fall des installierten PCMs mit einem Gesamtgewicht von 180 kg einer Flächenbelegung von 7,2 kg/m<sup>2</sup> entspricht. Die spezifische Speicherkapazität des PCMs inkl. Metallbehälter betrug 44 Wh/kg, sodass insgesamt 180 kg × 44 Wh/kg = 7 920 Wh gespeichert werden konnten. Fünf bis maximal 15 Personen nutzten den Raum unregelmäßig.

Die Regelung der Lüftungsanlage arbeitet in zwei Betriebsmodi. Tagsüber wird der Besprechungsraum im Umluftbetrieb mit einem Volumenstrom von 300 m<sup>3</sup>/h gekühlt. Nachts wird



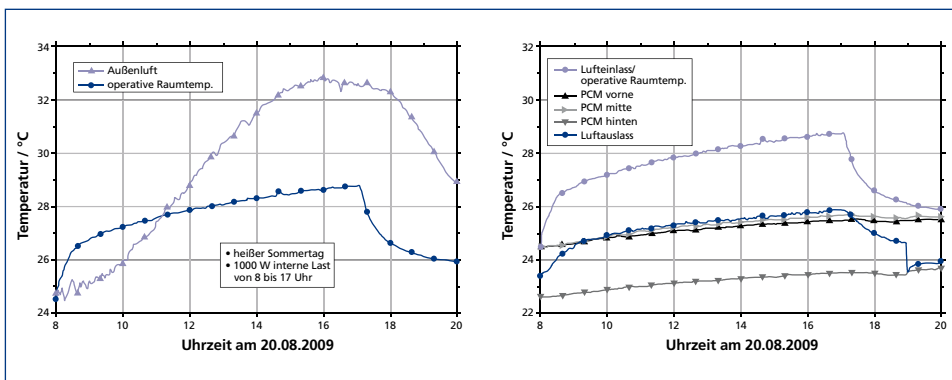
**Abb. 69:** Metallbehälter mit DELTA-COOL 24 (links) [24]; abgehängte Decke des Besprechungsraums mit PCM-Behältern (rechts)

das PCM im Regenerationsbetrieb mit einem Volumenstrom von 600 m<sup>3</sup>/h wieder verfestigt. Zur Untersuchung des sommerlichen Kühlbetriebs wurden Messungen mit einer konstanten internen Heizlast von 1000 W zwischen 8 und 17 Uhr durchgeführt.

In Abbildung 70 sind die Temperaturen von Raumluft und Außenluft im Besprechungsraum für einen heißen Sommertag und 1000 W interne Heizleistung dargestellt. Bei hohen Außentemperaturen von über 32 °C ergeben sich maximale Raumtemperaturen von 29 °C. Ebenfalls gemessen werden die Temperaturen des PCMs, die im vorderen und mittleren Bereich Maximalwerte bis 26 °C und im hinteren bis 24 °C erreichen. Die Temperaturdifferenz zwischen Lufteinlass und -auslass beträgt 2 bis 3 °C (vgl. Abb. 70 rechts).

Die Kühlleistung über die Luft betrug während der Heizphase 225 bis 300 W. Insgesamt konnte eine Wärmemenge von 2700 Wh übertragen werden. Dazu addierte sich durch Konvektion und Strahlung über die Gipskartonbauplatte der abgehängten Deckenkonstruktion übertragene Kühlleistung. Diese lag während des Heizbetriebs bei 400 bis 500 W. Zusammen ergab sich eine Kühlleistung von 700 bis 800 W und eine aufsummierte Kühlenergie von 7400 Wh.

Die nächtliche Regeneration des PCMs sollte durch direkte Einbringung der kühlen Außenluft in den Zwischenraum der abgehängten Deckenkonstruktion erfolgen. Aus baukonstruktiven



**Abb. 70:** Temperaturverläufe im Besprechungsraum; Außen- und Raumtemperatur (links), Raumtemperatur und PCM-Temperaturen (rechts) [24]

Gründen konnte die kühle Nachtluft jedoch nur in den Raum eingeleitet werden, wo sie sich zu einem gewissen Grad mit der wärmeren Raumluft vermischte. Auf diese Weise wurde die Regeneration erschwert und eine Rückkühlung des PCMs war bei einer Außenlufttemperatur von 16 °C nur auf Werte zwischen 22 °C und 24 °C möglich.

Steckbrief	
Speichertechnologie	Latent
Einsatzbereich	Klimatisierung, dezentral, stationär
Temperatur	Kälte bei ca. 24 °C bis 28 °C
Speicherkapazität	180 kg × 44 Wh/kg = 7 920 Wh
Kühlleistung	700–800 W
Dauer	Laden von 8–17 Uhr, Entladen von 21–5 Uhr
Speicherzyklen	1/Tag
Ökonomische Bewertung	insgesamt 8 000 Euro inkl. Lüftungsanlage 80 Euro pro m <sup>2</sup> PCM-Behälter

### 5.2.2 Latentwärmespeicher zur Rückkühlung einer Absorptionskältemaschine

Latentwärmespeicher zeichnen sich durch die Nutzung des Phasenüberganges des Speichermaterials aus. Dadurch kann Wärme annähernd isotherm bei hoher Speicherdichte gespeichert werden, was platzsparende Speicher ermöglicht. Bis auf wenige Ausnahmen wird zur Wärmespeicherung der Phasenwechsel zwischen fester und flüssiger Phase genutzt. Dies bietet besonders bei der konstruktiven Umsetzung der Speicher Vorteile, da die auftretende Volumenänderung gering bleibt. Durch die Korrosivität von Salzen und deren Hygroskopie müssen geeignete Materialien für Speicherhülle und Wärmetauscher ausgewählt werden. Nachteilig ist die geringe Wärmeleitfähigkeit der PCMs in der festen Phase, wodurch mehr Aufwand für eine gute Wärmeankopplung betrieben werden muss.

Beim Direktkontaktsystem wird ein mit PCM gefüllter Behälter direkt (ohne Wärmetauscher) mit dem Wärmeträgermedium durchströmt. Dazu muss ein Stoffpaar gefunden werden, bei dem das PCM unlöslich im Wärmeträgermedium bleibt. Zudem muss verhindert werden, dass Teile des PCM in das Hydrauliksystem gespült werden. Die größte Herausforderung ist eine gute Durchströmung während des festen Zustandes des PCM sicherzustellen, z. B. durch gezielte Strömungskanäle oder poröse Kristallisation, da sonst die Wärmeanbindung beim Aufschmelzen zu gering ist.

Durch die technischen Schwierigkeiten von Direktkontaktsystemen sind diese bisher noch Gegenstand der Forschung.

Eine andere Möglichkeit sind PCM-Slurries, bei denen PCM in ein Wärmeträgerfluid emulgiert bzw. mikroverkapseltes PCM in ein Trägerfluid gemischt wird. Dies wird in Kapitel 5.2.3 näher beschrieben.



Ein weiteres System mit hoher Wärmeleitfähigkeit bietet die Verwendung einer Trägermatrix (z. B. Graphit), bei dem das PCM in die Poren eingebracht wird. Dabei kann das flüssige PCM entweder in die fertige Matrix eingebracht werden, oder es wird ein Gemisch aus PCM und einem Material, das die Wärmeleitfähigkeit verbessert, hergestellt. Die Wärmeleitfähigkeit des Verbundmaterials kann um den Faktor 50 bis 120 höher sein, als das Ausgangs-PCM. Dieses Material wird dann um einen Wärmeübertrager angeordnet, wodurch entweder Wärmeübertragerfläche gespart oder die Leistung des Speichers deutlich erhöht werden kann.

In einem geringen Temperaturbereich um den Phasenwechsel erreichen Latentwärmespeicher ein Vielfaches der Speicherkapazität von sensiblen Wärmespeichern. Beste Einsatzgebiete sind deshalb Systeme, die bei konstantem Temperaturniveau arbeiten, wie z. B. Verdampfungsprozesse oder Heiz- und Kühlanwendungen. Der häufigste Vertreter in der Kältetechnik ist der Eisspeicher, welcher den Phasenwechsel von Wasser bei 0 °C nutzt. Wärmekissen (Taschenwärmer) sind ebenfalls sehr verbreitet und verwenden als PCM Natriumacetat-Trihydrat mit einem Schmelzbereich bei etwa 58 °C.

Bei den Wärmekissen wird zudem der Effekt der Unterkühlung genutzt. Das Kissen muss auf über 58 °C erhitzt werden, um das PCM aufzuschmelzen (Beladung) und kann im flüssigen Zustand auf etwa –10 °C abgekühlt werden, ohne dass eine Kristallisation und somit ungewollte Entladung stattfindet. Durch das Knicken des Metallplättchens werden Kristalle freigesetzt, welche die Kristallisation (Entladung) starten. Diese kann gezielt genutzt werden, um die Entladung (Wärmeabgabe beim Erstarren) des Speichers zu steuern, wobei die Verfahren zur Auslösung der Kristallisation (Bsp.: Coldfinger, Impfkristalle) bisher nur vereinzelt eingesetzt werden. Zur Vermeidung der Unterkühlung können Keimbildner eingebracht werden, an denen bevorzugt das Kristallwachstum beginnt.

Die Auslegung der aktiven Speicher erfolgt in erster Linie durch die Auswahl geeigneter PCMs, wobei die Phasenwechseltemperatur nahe der Nutzttemperatur liegen sollte. Durch die Isothermie bei der Wärmespeicherung sind geringe Anforderungen an die Systemregelung gestellt. Allerdings wird die Messung des Ladezustandes erschwert und muss über andere Methoden wie die Temperaturmessung erfolgen. In der Heizungstechnik konkurrieren Latentwärmespeicher mit herkömmlichen Wasserspeichern und müssen um wirtschaftlich zu sein, genau auf die Anwendung angepasst sein. Durch die geringe Wärmeleitfähigkeit im flüssigen und besonders im festen Zustand sind große Wärmetauscherflächen nötig, die beispielsweise mit Rippen erreicht werden. Auch die oben erwähnten Alternativen wie Direktkontaktsysteme, verkapselte PCM oder Verbundmaterialien sind denkbar. Umgesetzte Speicher sind weitestgehend Versuchs- und Demonstrationsanlagen.

Als ausführliches Beispiel soll ein Niedertemperaturspeicher mit Speichermaterial Calciumchlorid-Hexahydrat dienen. Dieser wurde im Rahmen des vom ZAE Bayern durchgeführten und vom BMU geförderten Forschungsprojektes »Komponenten- und Systementwicklung: Solares Heizen und Kühlen mit Absorptionskältemaschine und Latentwärmespeicher« mit dem Förderkennzeichen 03296050 entwickelt.

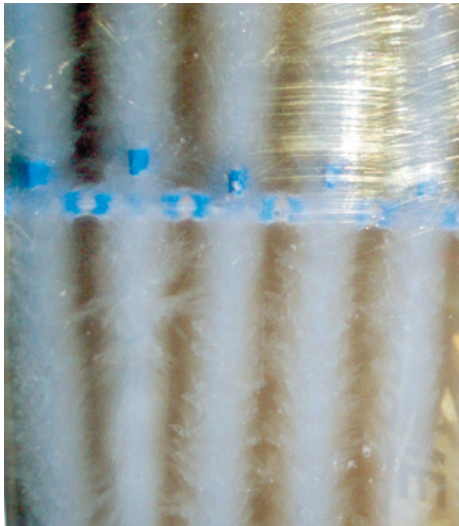


Steckbrief	
Speichertechnologie	latent
Einsatzbereich	Effizienzsteigerung, dezentral, stationär
Temperatur	18 °C – 40 °C, 29 °C ± 1 °C Phasenwechseltemperatur
Nahezu konstante Leistung über gesamte Kapazität	
Außenmaße ohne Anbauten	B × L × H: 1,2 m × 0,87 m × 1,7 m
Größen	1 m³ und 1,5 m³ Speichereinheit (Speicherangaben für $\Delta T = 36\text{ °C} - 22\text{ °C}$ )
Speicherkapazität	ca. 80 kWh (1 m³) bzw. ca. 120 kWh (1,5 m³)
Lade-/Entladeleistung (3 m³/h und $\Delta T = 7\text{ K}$ ):	ca. 14 kW (1 m³)
Nutzungsgrad	96 % (21 °C Umgebung)
Zyklen	1/d
Zyklenstabilität	> 600 (bisher keine Alterung festgestellt)

Als Speichermaterial wurde ein Salzhydrat ( $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) mit einem Phasenwechsel bei ca. 29 °C gewählt. Das PCM weist eine hohe Speicherdichte von 192 kJ/kg und 288 kJ/L (bei  $\Delta T = 14\text{ K}$  um den Schmelzpunkt) auf. Beim Erstarren tritt eine Unterkühlung von ca. 5 K auf. Der Speicher wurde aufgrund der Anwendung mit 80 kWh (1000 l Speichermaterial) und 120 kWh (1500 l Speichermaterial) konstruiert und weist eine geringe Grädigkeit durch die hohe Wärmetauscherfläche auf. Damit erlaubt er hohe Leistungen für Be- und Entladung auch bei geringen Vorlauftemperaturen und eignet sich für Niedertemperaturanwendungen.

Abbildung 71 rechts zeigt den innerhalb eines solaren Kühlsystems verbauten Latentwärmespeicher. Es handelt sich um einen 1,5 m³ großen Speicher, der die Leistung des Klimagerätes an heißen Tagen aufrecht erhalten soll. In Abbildung 71 links sind die wachsenden Kristalle am Wärmetauscher während der Auskühlung des Speichers abgebildet. Der Speicher ist zum gezeigten Zeitpunkt teilentladen. Bis zur vollständigen Entladung werden die Kristalle weiterwachsen, sodass alles Speichermaterial erstarrt ist.

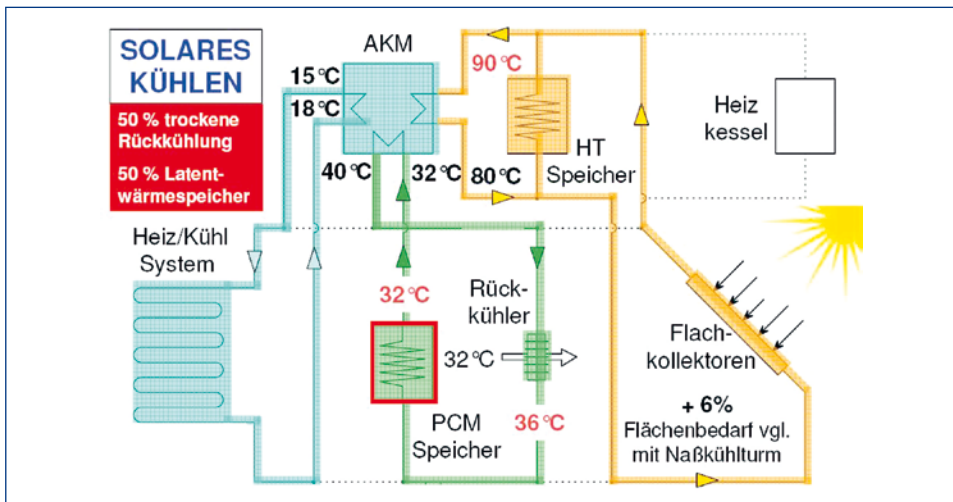
Der Speicher wurde für solare Klimatisierungssysteme mit thermischen Kältemaschinen (Sorptionskältemaschinen) entwickelt. Am Beispiel eines Absorbers mit Stoffpaar Wasser/wässrige Lithiumbromidlösung wird das Funktionsprinzip erklärt. Dabei fungiert das Wasser als Kältemittel und die wässrige LiBr-Lösung als Lösungsmittel. Analog zu konventionellen Kompressionskältemaschinen wird ein Kaltdampfprozess genutzt, um bei Temperaturen unterhalb der Lufttemperatur (typischerweise 12 °C) Kältemittel zu verdampfen. Die benötigte Verdampfungsenthalpie wird der Raumluft entzogen und diese damit gekühlt. Während bei konventionellen Kompressionskältemaschinen ein Gasverdichter verwendet wird, arbeiten Absorptionskältemaschinen mit einem so genannten thermischen Verdichter, bei dem der Gasverdichter durch einen Lösungskreis mit Pumpe ersetzt wird. Der im Verdampfer entstandene Kältemitteldampf wird dabei vor der Druckerhöhung im Absorber in einem Lösungsmittel gelöst. Eine Druckerhöhung der Flüssigkeit mittels Pumpe ersetzt dann die energieaufwendige Gasverdichtung. Auf hohem Druckniveau wird das Wasser aus dem Lösungsmittel durch Wärmezufuhr (solar erwärmtes Wasser) bei einer Temperatur von ca. 85 °C ausgetrieben. Der heiße Kältemitteldampf wird im Kondensator kondensiert und anschließend über eine Drossel entspannt und



■ **Abb. 71:** Teilkristallisierter Latentwärmespeicher (links), 120 kWh Speicher im solaren Klimatisierungssystem (rechts)

im Verdampfer wieder verdampft. Damit wird der Kältemittelkreislauf geschlossen. Der Lösungskreislauf wird durch entspannen des kältemittelfreien Lösungsmittels geschlossen und kann im Absorber bei niedrigem Druck erneut Kältemittel aufnehmen. In diesem Kreislauf müssen sowohl der Kondensator als auch der Absorber, deren Temperatur etwas über der Umgebungstemperatur liegen, rückgekühlt werden.

Allen Sorptionskältemaschinentypen gemein ist deren sensibles Verhalten bei veränderten Rückkühlbedingungen. Da der Absorptionsprozess die anfälligste Stelle des Kältekreislaufes ist, stellt sich der Betriebspunkt der Maschine auf das anliegende Druckniveau, welches durch die Rückkühltemperatur bestimmt wird, ein. Während beispielsweise bei sonst gleichen Bedingungen eine Temperaturänderung von 1 °C bei Verdampfer bzw. Generator die Kälteleistung um 3,6 % bzw. 3,9 % verringert, führt diese Temperaturänderung beim Absorber/Kondensator zu einer doppelt so großen Minderung der Kälteleistung. Zur Sicherung der Rückkühlung werden deshalb Nasskühltürme verwendet. Für Anlagen mit Nennkälteleistungen unter 50 kW erlauben die Nachteile der Nasskühltürme (aufwendige Wasseraufbereitung, Legionellenbildung, hoher Pumpaufwand) keinen wirtschaftlichen Betrieb mehr. Greift man auf trockene Rückkühler zurück, können bei hohen Außentemperaturen, wo Spitzenleistungen der Anlagen gefordert sind, die nötigen Temperaturen zur Rückkühlung nicht mehr gehalten werden, was einen Einbruch der Kälteleistung nach sich führt. Durch einen zugeschalteten Latentwärmespeicher mit Phasenwechseltemperatur bei 29 °C kann eine geringe Rückkühltemperatur und somit eine hohe Anlagenperformance gehalten werden. Dabei wird die Abwärme der Kältemaschine im PCM-Speicher tagsüber gespeichert und kann nachts bei niedrigen Außentemperaturen über den trockenen Rückkühler an die Umgebung abgeführt werden. Während der Wintermonate, wenn kein Kühlbedarf sondern Heizbedarf vorliegt, kann im Latentwärmespeicher Niedertemperaturwärme zum Heizen mit Flächenheizung gespeichert werden. Dabei steigt im Vergleich zu sensiblen Wasserspeichern der Wirkungsgrad der thermischen Kollektoren, da über den gesamten Speicherbereich eine geringe Vorlauftemperatur gehalten werden kann. Der solare Deckungsgrad wird zusätzlich durch geringe Wärmeverluste des Speichers erhöht.



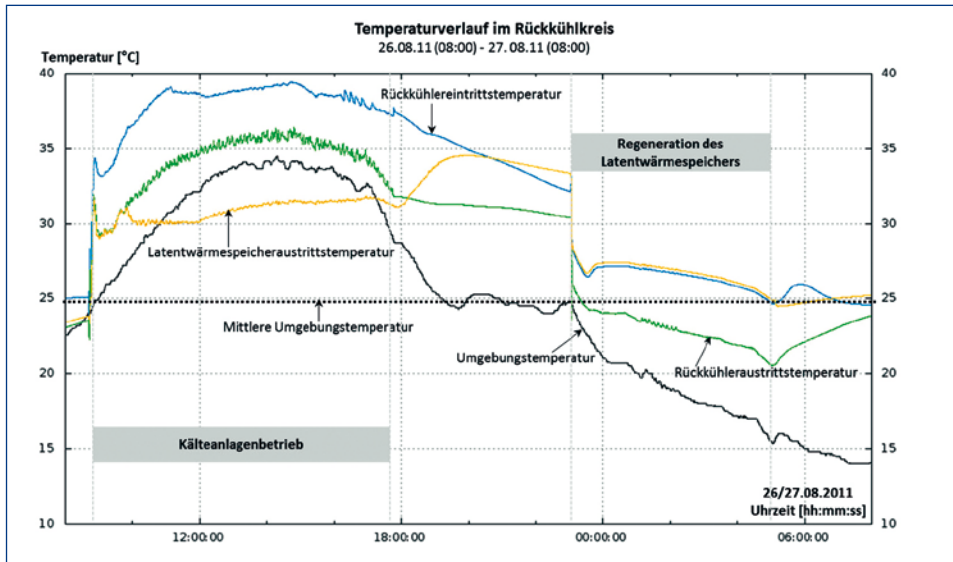
■ **Abb. 72:** Systemschaubild der am ZAE Bayern in Garching installierten solaren Klimatisierung mit trockener Rückkühlung und Latentwärmespeicher

Die seit 2007 im Betrieb befindliche solare Klimatisierung am ZAE Bayern in Garching (vgl. Abb. 72) weist ein 57 m<sup>2</sup> Flachkollektorfeld auf, das einen sensiblen Pufferspeicher speist. Die Absorptionskältemaschine (AKM) mit 10 kW Nennkälteleistung (Auslegung auf 50 % der Nennlast) arbeitet mit dem Stoffpaar LiBr/Wasser und wird rein solar betrieben. Als Backup steht eine Brunnenwasserkühlung zur Verfügung. Der Rückkühlkreis wird mit ca. 3 m<sup>3</sup>/h betrieben und ist auf 24 kW mit 40°C/32°C ausgelegt. Die hohe Temperaturspreizung am Kondensator/Absorber erlaubt geringe Volumenströme und somit auch geringe Rohrdurchmesser und Pumpaufwand. Im Nennbetrieb sollen Rückkühler und Latentwärmespeicher jeweils die Hälfte der Abwärme aufnehmen. Der Latentwärmespeicher ist mit dem Rückkühlwerk seriell verschaltet. Ein Regelhubventil am Bypass des Latentwärmespeichers regelt den Volumenstrom so, dass die Eintrittstemperatur der Absorptionskältemaschine auf 32°C gehalten wird.

Die Kühlung als auch die Beheizung des Gebäudes erfolgt über Deckensegel. Bei vorhandenen solaren Überschüssen wird Niedertemperaturwärme im Latentwärmespeicher gepuffert, zudem kann der Pufferspeicher mit Temperaturen > 50°C beladen werden. Das System schafft im Jahresdurchschnitt solare Deckungsraten von 69 % im Kühlbetrieb, während im Heizbetrieb solare Deckungsraten von 36 %, bedingt durch die Auslegung der Solarkollektoren auf den Kühlbetrieb, erreicht werden. Der Latentwärmespeicher ist seit 2007 Teil des Systems und zeigt keine Stabilitätsprobleme innerhalb von ca. 600 gefahrenen Zyklen.

In Abbildung 73 sind die Temperaturen im Rückkühlkreis während des Kühlbetriebes eines heißen Sommertages dargestellt. Die Grafik erläutert das Funktionsprinzip. Zwischen 9:00 Uhr und 17:30 Uhr wird die Kältemaschine betrieben, von 23:00 Uhr bis 5:00 Uhr des Folgetages erfolgt die Entladung des Latentwärmespeichers.

Bereits um 10:00 Uhr, bei einer Außentemperatur von 27°C, kann der Rückkühler nicht mehr die gesamte Abwärme umsetzen. Durch den nachgeschalteten Latentwärmespeicher wird die Rücklauftemperatur zum Absorber/Kondensator (Latentwärmespeicher-Austrittstemperatur) unter 32°C gehalten. Auch bei Außentemperaturen um 34°C bleibt die Rücklauftemperatur konstant niedrig und liegt sogar um 4 K unter ihr. Die Abwärme der AKM wird etwa zu jeweils



■ **Abb. 73:** Temperaturverlauf im Rückkühlkreis der solaren Klimatisierung am ZAE Bayern in Garching

50 % auf Rückkühler und Latentwärmespeicher aufgeteilt. Der Latentwärmespeicher wird vollständig beladen, d. h. der gesamte latente Bereich wird genutzt. Die gespeicherte Energie wird bei der Entladung ab 23:00 Uhr über den Rückkühler abgegeben, dabei ist die Unterkühlung zu Beginn zu sehen. Um 4:30 Uhr ist die gesamte latente Wärme des Speichers abgeführt, aus regelungstechnischen Gründen wird der Speicher bis 5:00 Uhr auf 21 °C sensibel abgekühlt.

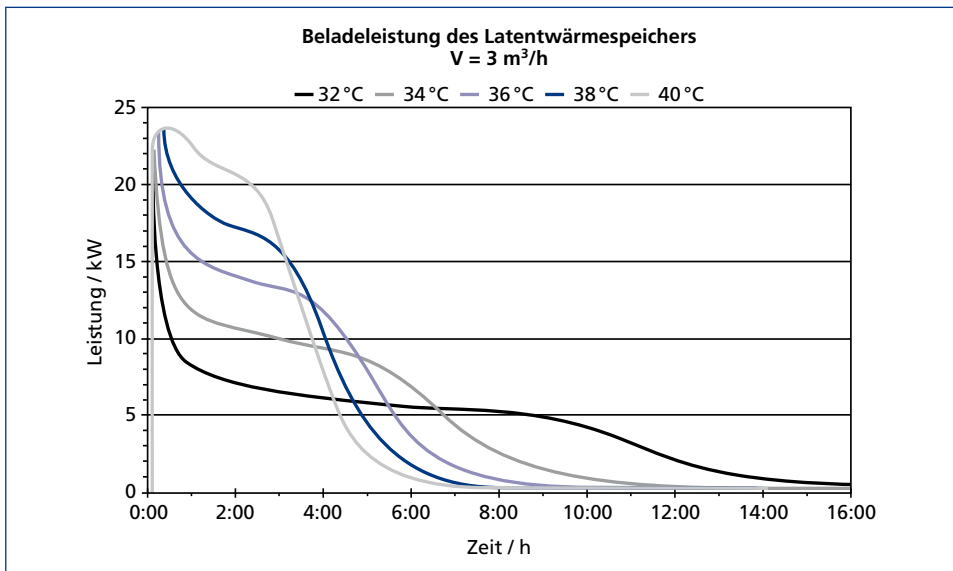
Die Performance des 1 m<sup>3</sup>-Speichers auf dem Teststand ist in Abbildung 74 und Abbildung 75 dargestellt. Der Speicher ist zu Beginn der Beladung auf 18 °C ausgekühlt.

In Abbildung 74 ist der Auslegungsfall des Speichers mit 36 °C Eintrittstemperatur und einem Volumenstrom von 3 m<sup>3</sup>/h gezeigt. Die geforderten 12 kW (50 % der gesamten Abwärmeleistung) werden im Mittel um 2 kW übertroffen. Bei 32 °C Vorlauftemperatur (3 K über Phasenwechseltemperatur) und einem Volumenstrom von 3 m<sup>3</sup>/h kann eine Leistung von im Mittel 6 kW über 8 Stunden gehalten werden. Dieses Plateau entsteht durch die nahezu gleichbleibende Temperatur beim Phasenwechsel. Bei einer Vorlauftemperatur von 40 °C kann die Leistung auf ca. 21 kW gesteigert werden.

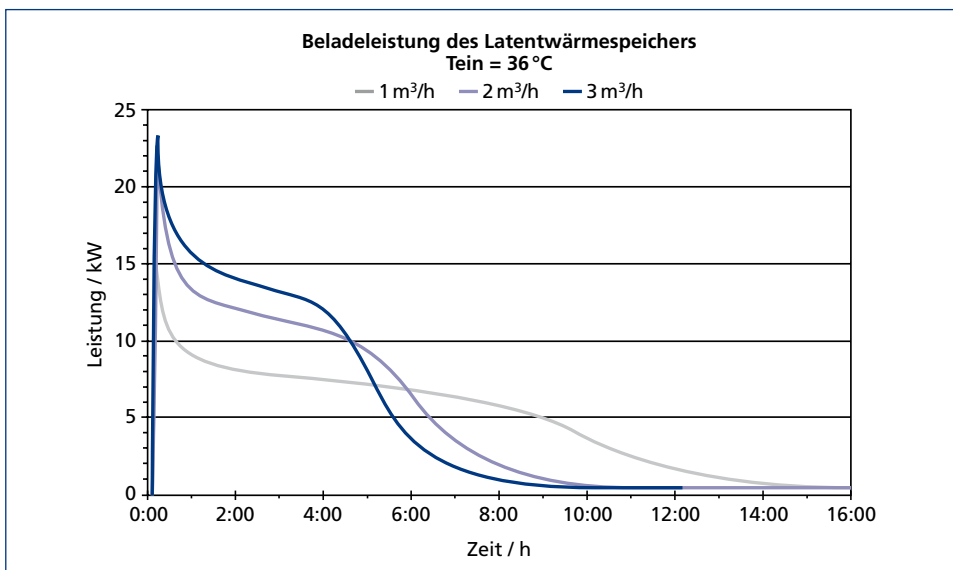
Bei 36 °C Vorlauftemperatur kann mit einem Volumenstrom von 1 m<sup>3</sup>/h eine Leistung von im Mittel 7 kW über 8 Stunden gehalten werden. Die Leistung kann bei einer Volumenstromerhöhung auf 3 m<sup>3</sup>/h um 100 % gesteigert werden.

Innerhalb des Projektes wurden 4 Pilotspeicher in solare Klimatisierungssysteme verbaut. Bei der Firma LINDNER AG Arnstorf in Graz (AT), bei der Firma SOLID Automation in Reutlingen, in der Anlage der CRNS/PROMES in Perpignan (FR) sowie am ZAE Bayern in Garching. Diese Systeme wurden seit Anfang 2011 mit den Speichern ausgestattet, am ZAE Bayern bereits in 2007.

Erste Messwerte der Anlagen zeigen, dass durch den Latentwärmespeicher die Kälteleistung auch bei hohen Außentemperaturen konstant gehalten werden kann. Ein genaues Monitoring der Anlagen ist für die nächsten Heiz- und Kühlperioden geplant. Der Speicher wird weiterhin bis zur Kleinserienreife weiterentwickelt, um anschließend kommerziell verfügbar zu sein.



**Abb. 74:** Leistungskurven des 1000 l-Speichers bei verschiedenen Eintrittstemperaturen



**Abb. 75:** Leistungskurven des 1000 l-Speichers bei verschiedenen Volumenströmen

## 5.2.3 PCM-Slurries

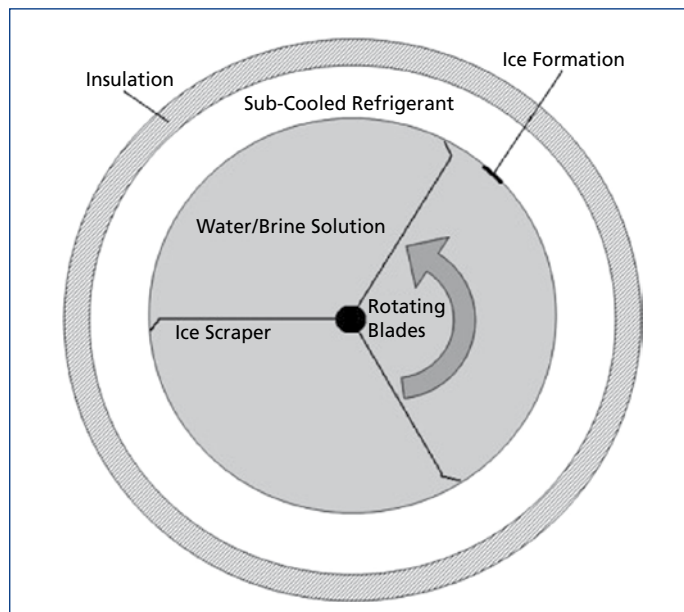
PCM-Slurries (engl. slurry: Brei, Schlamm) sind breiige Flüssigkeiten in denen ein PCM (Phasenwechselmaterial) in einem Trägerfluid dispergiert ist. Im Unterschied zu stationären PCMs, welche bspw. in Tanks gelagert werden, sind PCM-Slurries flüssig und somit pumpbar. Daher können sie vom Speichertank direkt zum Verbraucher gepumpt werden, ohne dass ein zusätzliches Wärmeträgerfluid diese Aufgabe übernehmen muss. Gegenüber sensiblen Wärmespeichermedien wie bspw. Wasser besteht der Vorteil einer hohen Enthalpie in einem schmalen

Temperaturintervall in dem der Phasenwechsel stattfindet. Dadurch kann im Fall von PCM-Slurries der Massenstrom gegenüber sensiblen Wärmespeichermedien reduziert werden, womit man eine Verkleinerung sowohl der Systemkomponenten (z.B. Wärmeübertrager, Speichertank) als auch eine Reduzierung der benötigten Pumpleistung erreicht. Neben dem bei PCMs bekanntem Vorteil des sog. »Load Shifting«, besteht der weitere Vorteil, dass die Temperatur des PCM-Slurries während des Transports trotz Wärmeverlusten konstant bleibt.

Der wohl bekannteste Vertreter von PCM-Slurries sind Eis-Slurries, auf die im Folgenden näher eingegangen wird. Von den diversen kommerziellen Anwendungen, in denen Eis-Slurry zum Einsatz kommt, werden einige vorgestellt. Daneben gibt es noch PCM-Slurries mit mikrokapselten PCM (bspw. mit Paraffinen), aber auch Emulsionen und Clathrate. An diesen PCM-Slurries wird zurzeit noch intensiv geforscht, um sie zur Marktreife zu führen.

Eis-Slurries bestehen i. d. R. aus einer Lösung aus Wasser plus Zusätzen (üblicherweise Alkohole oder Salze), mit welchen sich der Gefrierpunkt nach Bedarf absenken lässt. Der große Vorteil von Eis-Slurries gegenüber anderen PCM-Slurries besteht darin, dass Trägerfluid und PCM aus dem gleichen Material bestehen (gilt allerdings nur bei purem Wasser, da bei Lösungen nur das Wasser ausgefrieret). Weitere mit Wasser verbundene Vorteile sind die hohe Schmelzenthalpie (334 kJ/kg), die hohe Wärmekapazität (4,2 kJ/kg K), die Umweltverträglichkeit, die geringe Viskosität sowie die geringen Anschaffungskosten. Die bislang kommerziell erhältlichen Anlagen zur Eis-Slurry Herstellung beruhen auf drei verschiedenen Ansätzen:

- SSISG (Scraped Surface Ice Slurry Generator), Eis-Slurry-Erzeuger, bei dem die Oberfläche vom Wärmeübertrager periodisch von einem mechanischen Schaber abgeschabt wird, um das gebildete Eis abzutragen und so die Wärmeübertragerfläche wieder frei zu bekommen. Dabei ist das einfachste System zur Herstellung von Eis-Slurry nach dem SSISG-Prinzip ein hohlwandiger Zylinder in dessen Wand ein Kältemittel verdampft, während im Innenraum die Lösung zur Eis-Slurry-Herstellung fließt. Durch die ans Kältemittel abgegebene Wärme bildet sich an den Wänden des Wärmeübertragers eine Eisschicht, welche periodisch abge-



■ **Abb. 76:** Horizontaler Querschnitt eines Scraped Surface Ice Slurry Generators (SSISG) [25]

schabt wird und durch den vertikalen Lösungsstrom abtransportiert wird. Abbildung 76 zeigt den schematischen horizontalen Querschnitt eines solchen Eis-Slurry-Erzeugers.

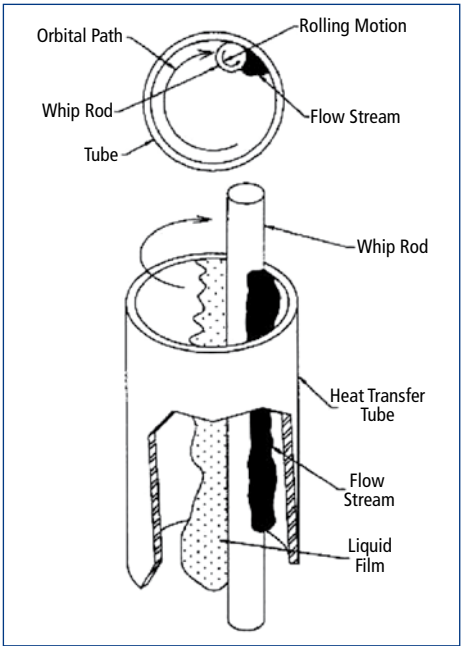
- EISG (evaporative ice slurry generator), Eis-Slurry-Erzeuger, in dem Eis-Slurry in einem Vakuumbehälter hergestellt wird. Im Vakuumbehälter befindet sich pures Wasser oder eine Wasserlösung. Die Luft im Vakuumbehälter wird so lange evakuiert bis sich der Druck knapp unter dem des Tripelpunktes von Wasser befindet (6,11 mbar für pures Wasser). Die treibende Kraft des Prozesses ist der unterschiedliche Sättigungsdruck zwischen Wasser bei der herrschenden Temperatur und dem aktuellen Druck im Vakuumbehälter. Um diesen Unterschied auszugleichen verdampft Wasser, wobei sich der Rest der im Vakuumbehälter befindlichen Lösung abkühlt. Nimmt man an, dass der Prozess adiabatisch abläuft, so bilden sich für jedes kg verdampftes Wasser (Verdampfungsenthalpie 2 500 kJ/kg) etwa 7,5 kg Eis (Schmelzenthalpie 334 kJ/kg). Dabei muss die Menge an verdampftem Wasser entweder im Vakuumbehälter selbst kondensiert werden oder aber aus dem Behälter gepumpt und in einem externen Kondensator kondensiert werden. Erstere Methode erfordert ein großes Volumen der Wärmeübertragerfläche des im Vakuumbehälter befindlichen Kondensators, letztere Methode erfordert einen hohen Pumpaufwand aufgrund des großen Volumens an Wasserdampf.
- Sononukleation von unterkühlter Lösung. Hierbei wird die Lösung in einem Wärmeübertrager unterkühlt, d.h. die Temperatur wird unter den Schmelzpunkt abgesenkt, was einen metastabilen thermodynamischen Zustand darstellt. Anschließend wird die Nukleation durch Ultraschall ausgelöst. Dieses Verfahren wird vor allem in Japan angewendet und setzt voraus, dass keine Nukleationskeime den Unterkühlungsprozess beeinflussen. Deshalb wird die aus dem Tank angesaugte Lösung oftmals vor dem Eintritt in den Wärmeübertrager erhitzt um etwaige Nukleationskeime zu zerstören.

Die aktuelle Forschung befasst sich mit alternativen Herstellungsmethoden, welche weniger parasitäre Energie benötigen sollen. Die beiden verheißungsvollsten Ansätze sollen hier kurz vorgestellt werden. Der sog. HSISG (Hydro scraped ice slurry generator) bei welchem Eis-Slurry direkt im Wärmeübertrager (bspw. Plattenwärmeübertrager) erzeugt werden soll und das entstandene Eis-Slurry durch den Flüssigkeitsstrom aus dem Wärmeübertrager gespült wird. Beim sog. Fluidized Bed Eis-Slurry-Erzeuger befinden sich Partikel (bspw. kleine Stahlkugeln) im Fluid, um das an den Wänden des Wärmeübertragers entstehende Eis abzutragen<sup>1</sup>. Unabhängig von der Herstellungsmethode sind die größten Herausforderungen die Unterkühlung der eingesetzten Lösungen sowie das Einfrieren von Wärmeübertragerflächen, was eine effiziente Wärmeübertragung verhindert.

Kommen wir nun zu einigen konkreten Anwendungsbeispielen, welche teilweise auf den vorgestellten Herstellungsmethoden beruhen. ORE (Orbital Rod Evaporator) der Firma Ice Sinergy Inc. ist eine Art Zwitterssystem, in dem sowohl mechanische Arbeit als auch der Lösungsfluss von Bedeutung sind. Grundlage des ORE ist ein Rohrbündelwärmeübertrager, in dem im Mantel das flüssige Kältemittel verdampft und in den einzelnen Röhren die Wasserlösung fließt (s. Abb. 77). Dabei befindet sich in jedem Rohr ein Stab, der sich kontinuierlich dreht. Es dient aber nicht dazu, das sich bildende Eis abzuschaben wie beim SSISG, sondern um einen turbulenten Strom im Rohr zu erzeugen. So bildet sich zum einen ein Flüssigkeitsfilm an den Wänden, der verhindert, dass der Stab mit der Wand in Kontakt kommt. Zum anderen wird durch

<sup>1</sup> Pronk, P., Fluidized Bed Heat Exchangers to Prevent Fouling in Ice Slurry Systems and Industrial Crystallizers, Ph. D. Thesis, TU Delft, (2006).





■ **Abb. 77:** Schema für ein Rohr des ORE (Orbital Rod Evaporator)



■ **Abb. 78:** Mit Eis-Slurry gekühltes Gebäude in Seoul, Korea

den turbulenten Strom die Wärmeübertragung verbessert. In dem Flüssigkeitsfilm bilden sich Eiskristalle, die von der im Rohr vertikal strömenden Flüssigkeit mitgerissen werden.

Der ORE kommt z. B. in einem thermischen Energiespeicher (TES) in Seoul, Korea zum Einsatz, wo ein Gebäude mit 39 Stockwerken und einer Gesamtfläche von 260 260 m<sup>2</sup> zu 100 % anhand von Eis-Slurry klimatisiert wird (s. Abb. 78). Der Peak-Verbrauch liegt dabei bei 36,3 MW und pro Tag werden 308 MWh Kühleistung benötigt. Die installierte Anlage erlaubt es, Load Shifting zu betreiben, den Eis-Slurry-Speicher also während der Nacht zu günstigeren Energiepreisen aufzuladen. Die Kosten für den TES betrugen 5 300 000 \$, jedes Jahr werden Betriebskosten in Höhe von 524 000 \$ eingespart.

Steckbrief: ORE-Anlage in Seoul	
Speichertechnologie	latent
Einsatzbereich	Klimatisierung (Effizienzsteigerung), zentral, stationär
Temperatur	Raumklima um 20 °C
Speicherkapazität	>308 MWh
Peakleistung	36,3 MW
Dauer	Entladen: 8:00 bis 18:00 Uhr, Beladen: Off-Peak (20:00 bis 8:00 Uhr)
Speicherzyklen	1/Tag
Ökonomische Bewertung	Anschaffungskosten: 5 300 000 \$ Einsparung der Betriebskosten pro Jahr: 524 000 \$

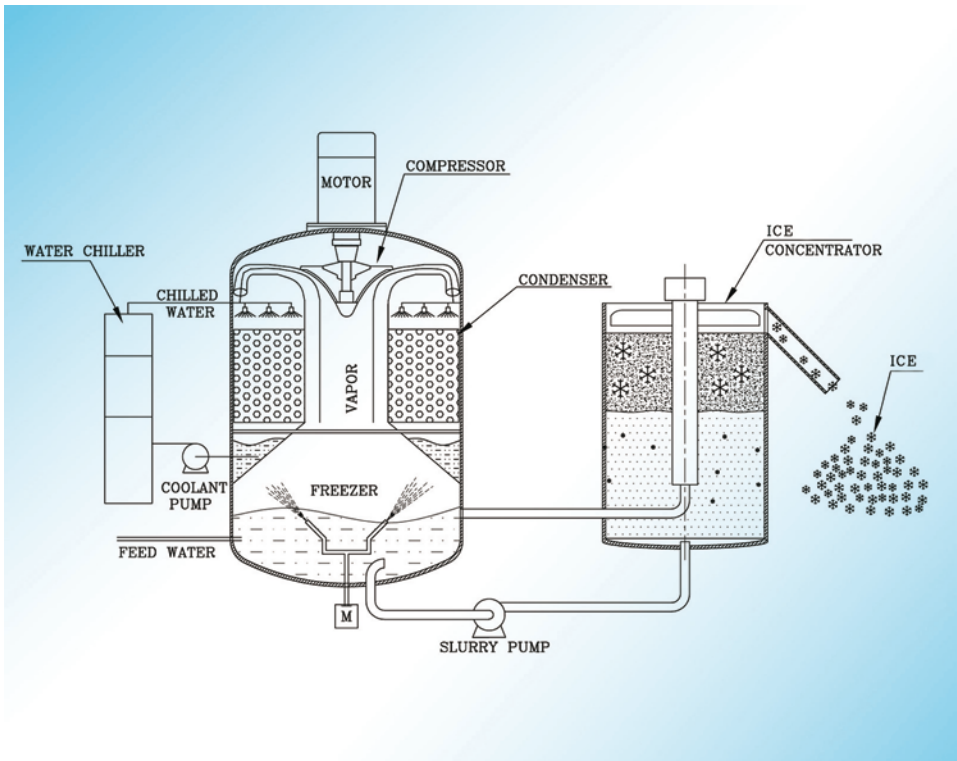




■ **Abb. 79:** Anlage zur Erzeugung von Eis-Slurry, Brauerei Zipf



■ **Abb. 80:** Eis-Slurry, Brauerei Zipf



■ **Abb. 81:** Schema VIM (Vacuum Ice Maker)



■ **Abb. 82:** Mponeng Mine, AngloGold Ashanti, Südafrika



■ **Abb. 83:** Förderband mit Eis-Slurry

In der Brauerei Zipf sind zwei Eis-Slurry-Erzeuger von je 230 kW installiert, die nach dem SSISG-Prinzip funktionieren (s. Abb. 79 und Abb. 80). Dabei wird ein Alkohol-Wasser-Gemisch verwendet. Das erzeugte Eis-Slurry wird in einem zylindrischen Tank mit integriertem Rührwerk gespeichert. Dabei beträgt die Speicherkapazität 2800 kWh respektive 28 kWh/m<sup>3</sup>. Die Eisproduktion erfolgt in der Nacht bei günstigem Energietarif. Durch die Installation der Eis-Slurry-Anlage konnte die Menge an Ammoniak, das als Kältemittel verwendet wird, um 80 % reduziert werden. Der Stromverbrauch von Kompressoren und Nebenantrieben konnte um insgesamt 22 % gesenkt werden.

Die Firma IDE Technologies Ltd. hat einen Eis-Slurry-Erzeuger entwickelt, der auf dem Prinzip des EISG beruht, dem sog. Vacuum Ice Maker (VIM). Neben der Entsalzung von Wasser (Ausgefrieren von reinem Wasser) findet der VIM auch in Bergwerken Anwendung, in denen Eis-Slurry zur Kühlung der Stollen verwendet wird. Eine solche Anlage ist schematisch in Abbildung 81 dargestellt. Hervorzuheben beim Design sind zum einen die Düsen unten im Vakuumbehälter, durch die die Wasseroberfläche vergrößert und somit der Prozess beschleunigt wird. Zum anderen sind beim VIM Kompressor sowie Kondensator im Vakuumbehälter selbst integriert.

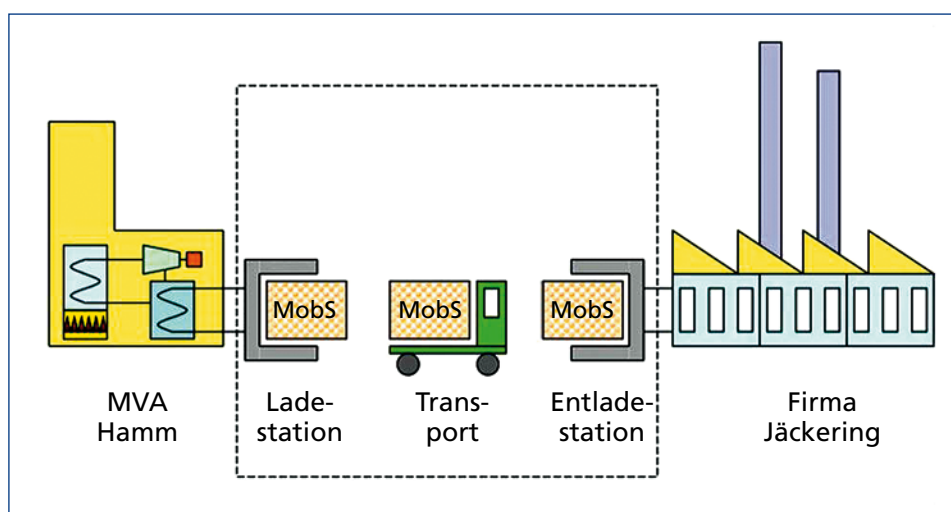
In der Mponeng Mine der Firma AngloGold in Ashanti, Südafrika, kommen 9 Anlagen des Typs Vim 850 zum Einsatz, die eine gesamte Kühlleistung von 27 MW liefern. Jede einzelne Anlage kann dabei eine maximale Kühlleistung von 3,5 MW bereitstellen bei einem Massenanteil von 75 % Eis im Eis-Slurry. Dabei beträgt der COP (Coefficient of Performance) einer Anlage ungefähr 3,5. Das Eis-Slurry wird über Förderbänder (s. Abb. 83) zu den verschiedenen Ebenen der Mine geleitet. Damit werden die einzelnen Stollen gekühlt.

## 5.3 Thermochemische Speichersysteme

### 5.3.1 Mobiler Adsorptionsspeicher zur Nutzung industrieller Abwärme

Steckbrief: Mobiler Sorptionsspeicher zur Nutzung industrieller Abwärme	
Speichertechnologie	Thermochemisch (AdsorptionsZeolith/Wasser)
Einsatzbereich	Mobiler, dezentraler Speicher zur Steigerung der Energieeffizienz
Temperatur	Wärmespeicher bis zu 300 °C (Heiz- und Prozesswärme)
Kapazität/Leistung/Dauer	Hochleistungs- und Hochkapazitätsspeicher mit >300 Zyklen pro Jahr
<b>Größen</b>	
Speicherkapazität	200–308 kWh/t (bei 135 °C bzw. 250 °C Ladetemperatur) 2,4–3,7 MWh pro Container (bei 135 °C bzw. 250 °C Ladetemperatur)
Lade-/Entladeleistung	270–780 kW (pro Container) bei 135 °C bzw. 250 °C Ladetemperatur
Nutzungsgrad	0,9
Speicherzyklen in Anwendung	300–1 000 pro Jahr
Ökonomische Bewertung	Ab einer Auslastung von 60 % des Speichers über das Jahr

Neben der diskontinuierlichen zeitlichen Verfügbarkeit stellt oft die zu überbrückende Distanz zwischen Energiequelle und Abnehmer ein großes Hindernis bei der Nutzung von Abwärme dar. Derartige Probleme treten z. B. bei der Nutzung von Abwärme aus BHKWs, die mit Biogas betrieben werden oder bei Anlagen zur thermischen Behandlung von Abfall auf. Hier fehlen oft Wärmeverbraucher in unmittelbarer Nähe. Diese Abwärme bietet prinzipiell ein großes Potenzial zur Steigerung der Energieeffizienz solcher Anlagen. Allerdings ist das Verhältnis der Distanz zum



■ **Abb. 84:** Schematische Darstellung des mobilen Wärmespeichers

Wärmeabnehmer zur umgesetzten Energiemenge ungünstig, so rechnet sich die Errichtung eines Leitungssystems selbst bei kontinuierlicher Verfügbarkeit der Wärmequelle oft wirtschaftlich nicht. In dieser Situation kann ein Distributionssystem auf der Basis per LKW transportierter Speichereinheiten für thermische Energie sinnvoll sein (s. Abb. 84). Der vorliegende Beitrag untersucht die Frage nach den notwendigen Randbedingungen für ein derartiges Konzept.

Da für den Transport gespeicherter thermischer Energie eine hohe Speicherkapazität entscheidend ist, werden als Speichertechnologie für die mobilen Energie-Transporteinheiten neben Latentwärmespeicher Adsorptionsprozesse diskutiert. Diese verfügen theoretisch über höhere Energiespeicherdichten und thermische Leistung als sensible und latente Wärmespeicher.

### Machbarkeitsstudie

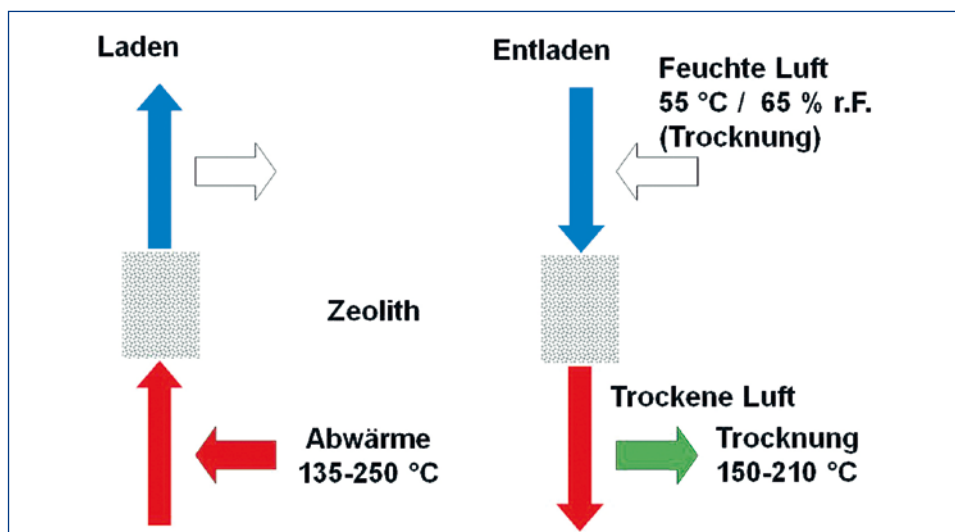
Eine Studie wurde für die Nutzung industrieller Abwärmequellen durch einen mobilen Adsorptionsspeicher durchgeführt. Die Ergebnisse lassen sich aber auch auf andere Einsatzgebiete erweitern. Für eine konkrete Anwendung im Bereich der Abwärmenutzung – eine Müllverbrennungsanlage – wurden detaillierte Potenzialstudien durchgeführt.

In der Müllverbrennungsanlage stand Abwärme bei 150 °C zur Verfügung. Verschiedene Heiz-, Klimatisierungs- und Trocknungsanwendungen wurden als mögliche Wärmeabnehmer in Betracht gezogen. Detailliert wurde ein industrieller Trocknungsprozess betrachtet.

Ziel dieser Untersuchung war es, die Bedingungen zu identifizieren, unter denen ein Betrieb wirtschaftlich interessant ist. Daher wurden die Investitions- und Betriebskosten abgeschätzt, um letztendlich den effektiven Wärmepreis pro MWh zu bestimmen.

### Adsorptionsprozess

Bei dem mobilen Wärmespeicher auf Sorptionsbasis wird das Stoffpaar Zeolith/Wasserdampf unter Umgebungsdruck zum Speichern und Pumpen von Wärme verwendet. Das System basiert auf dem Prinzip, das in Kapitel 4.2.3 erläutert wurde. Abbildung 85 zeigt den Prozess unter den betrachteten Bedingungen.



■ **Abb. 85:** Temperaturen beim Laden und Entladen

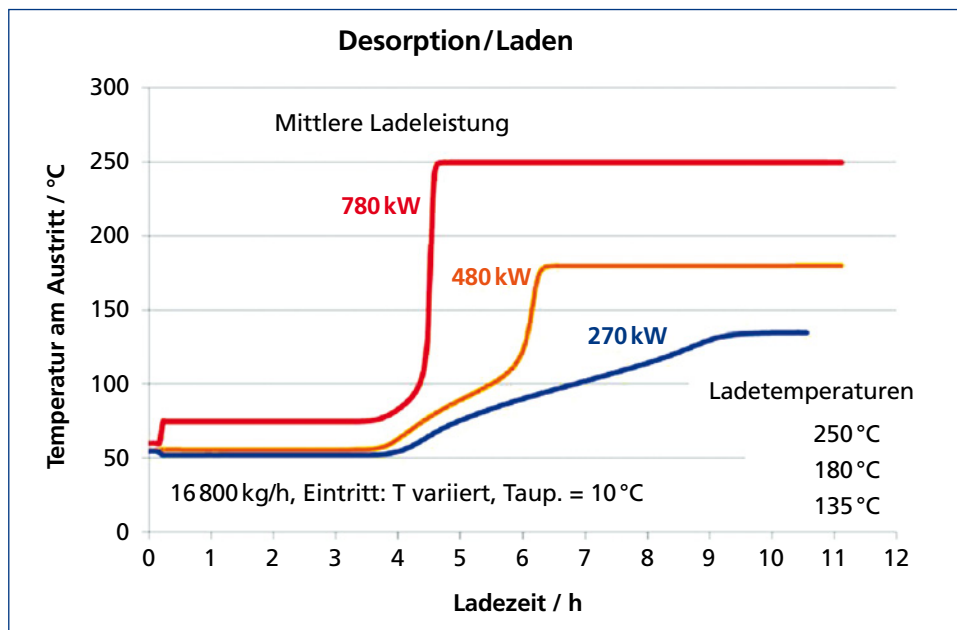
Die Ladetemperatur variiert zwischen 135 °C und 250 °C, während die Luft zum Entladen aus einem Trocknungsprozess kommt und daher mit 65 °C und einer relativen Feuchte von ca. 65 % sehr feucht und warm ist. Unter diesen Bedingungen kann mit Entladetemperaturen zwischen 150 °C und 210 °C gerechnet werden.

Im Diagramm in Abbildung 86 ist für drei idealisierte Fälle (Ladetemperatur 135 °C, 180 °C und 250 °C) die Lufttemperatur am Austritt des Zeolith-Speichers während des Ladevorgangs über der Zeit simuliert worden. Solange der Speicher geladen wird, ist die Temperatur am Austritt niedrig (50 ... 70 °C). Wenn der Speicher voll ist, steigt die Temperatur am Austritt auf die Eintrittstemperatur an. Dann wird der Ladevorgang beendet. Der Luftmassenstrom ist bei allen drei Ladetemperaturen gleich (16 800 kg/m<sup>3</sup>). Das Maß für die Feuchtigkeit ist der Taupunkt, der in allen drei Fällen bei 10 °C liegt.

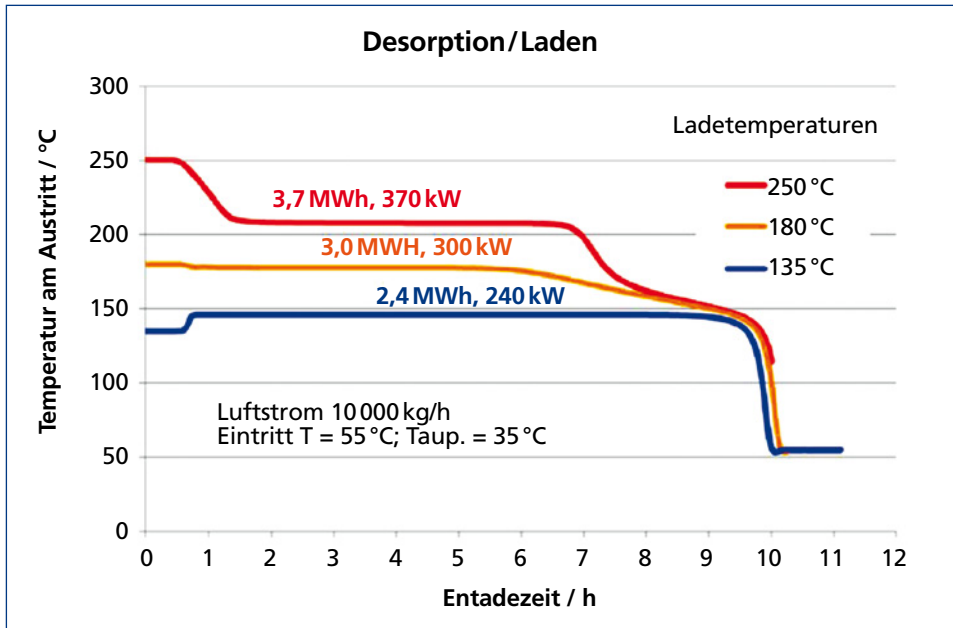
Erkennbar ist, dass hohe Ladetemperaturen zu hohen mittleren Ladeleistungen und zu kurzen Ladezeiten führen. Eine Ladetemperatur von 250 °C ist vorteilhaft, da neben der hohen Ladeleistung auch der Ladeverlauf günstig ist. Die Beladung endet mit einem abrupten Temperaturanstieg. Die hohe Ladeleistung kann fast über den gesamten Verlauf realisiert werden.

Eine Ladetemperatur von 135 °C ist grenzwertig niedrig, da bereits nach der Hälfte der Zeit die Temperatur am Austritt ansteigt. Damit wird die aktuelle Ladeleistung kleiner und der Ladevorgang länger. Die Knicke im Ladeverlauf, die in der 180 °C Kurve und schwächer in der 135 °C Kurve erkennbar sind, sind durch die speziellen Sorptionsgleichgewichte von Zeolith 13X bedingt. Diese simulierten Daten werden in der Praxis wohl nicht erreicht.

Abbildung 87 zeigt ein Diagramm, das die Lufttemperatur am Austritt des Zeolith-Speichers während des Entladevorgangs über der Zeit zeigt. Die drei Linien zeigen jeweils das Ergebnis, das sich nach einer der vorher beschriebenen Ladevorgänge einstellt.



■ **Abb. 86:** Ladeverhalten bei verschiedenen Temperaturen



■ **Abb. 87:** Entladeverhalten bei verschiedenen Ladetemperaturen

Während der ersten Stunde bewegt sich die Luftaustrittstemperatur von der noch gespeicherten Ladetemperatur auf eine Haltetemperatur zu. Diese liegt bei der 135 °C Ladetemperatur-Kurve tatsächlich über der Ladetemperatur – zumindest theoretisch. Zum Ende des Entladevorgangs fallen alle drei Kurven steil ab. Dieser Entladeverlauf ist prinzipiell günstig. Die unterschiedlichen Ladetemperaturen zeigen sich bei der Entladung in unterschiedlichen Temperaurniveaus, unterschiedlich abgelieferten Energiemengen und unterschiedlichen Leistungen. Die Entladezeit wird dagegen nicht von der Ladetemperatur beeinflusst. Aus logistischen Gründen ist es vorteilhaft, dass die Lade- und Entladezeit annähernd identisch ist.

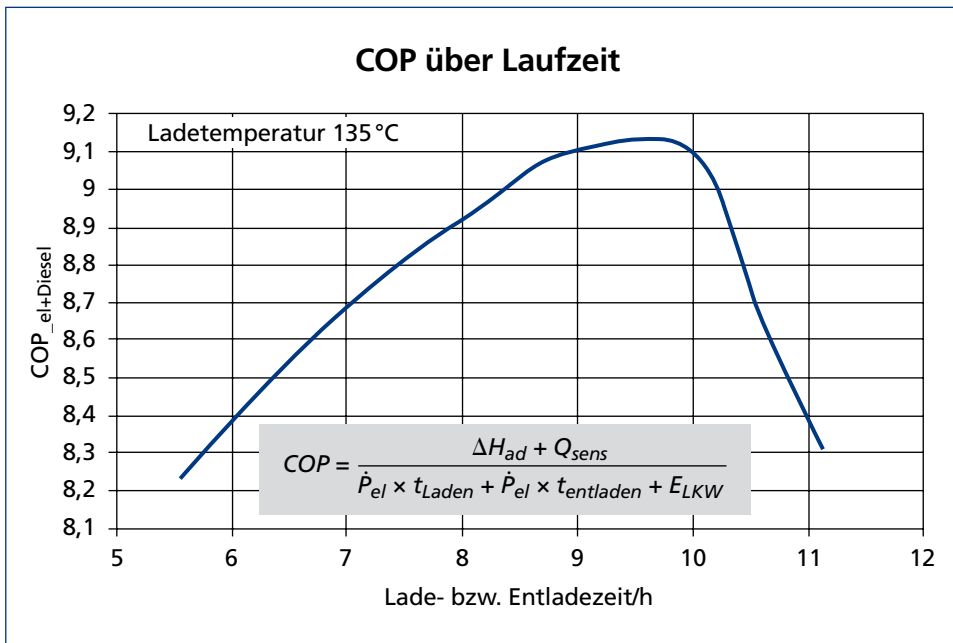
Bei niedrigen Ladetemperaturen (135 °C) verringert sich die Ladeleistung zum Ende des Ladevorgangs, er steigt zunächst mit der Zeit an und beginnt steil zu fallen, wenn der Speicher fast voll ist. Der COP des gesamten Prozesses aus Laden, Transportieren und Entladen als Funktion der Zeit liefert eine gute Aussage, ab wann es sich nicht mehr lohnt, den Ladevorgang fortzusetzen. Der Verlauf des COP ist in Abbildung 88 dargestellt.

Der COP berechnet sich als das Verhältnis der Adsorptionswärme  $\Delta H_{ad}$  und der sensiblen Wärme  $Q_{sens}$ , die mit dem Speicher transportiert werden, zum benötigten Strombedarf  $P_{el}$  für die Ventilatoren beim Laden und Entladen sowie dem Kraftstoff für den LKW. Die Bewertung des Kraftstoffes, gleichrangig mit Strom, ist thermodynamisch nicht korrekt, das ermittelte Ergebnis ist daher etwas schlechter, als das thermodynamisch korrekte.

Ein erreichter Wert für den COP von über 9 ist sehr gut. Damit beträgt der Hilfsenergie-Anteil ca. 10 % der transportierten Wärme.

### Ergebnisse: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

In der Machbarkeitsstudie wurde basierend auf dem simulierten De- und Adsorptionsprozess und den konkreten Bedingungen der realen Anwendung ein möglicher Wärmepreis eines



■ **Abb. 88:** Zeitliches Verhalten des Wärmeverhältnisses (COP)

solchen Speichers berechnet. In Abbildung 89 werden die Randbedingungen dieser Berechnung aufgeführt.

Die angegebene Speicherkapazität von knapp 3 MWh kann bei einer Ladetemperatur von 250 °C erreicht werden. Die Auslastung des Systems, entscheidend für die Wirtschaftlichkeit, liegt mit mehr als 5 000 Stunden bei knapp über 60 %. Nur ein Verbraucher mit ganzjährigem Wärmebedarf kann für eine so hohe Auslastung sorgen. Darüber hinaus tragen kurze Umschlagzeiten und geringe Distanzen zu einer Reduktion der Personal- und Hilfsenergiekosten bei.

Das Ergebnis der Berechnung lautet: Wenn alle Randbedingungen stimmen, kann ein Wärmegestehungspreis von ca. 50 €/MWh erreicht werden.

Es wurde eine Sensitivitätsuntersuchung im obigen Beispiel durchgeführt, um den Einfluss einzelner Parameter auf die Wirtschaftlichkeit zu analysieren. Die Ergebnisse sind in Abbildung 90 dargestellt.

Die Entfernung zwischen Abwärmequelle und Verbraucher hat einen linearen Einfluss auf den Energiepreis. Wird die Transportstrecke verdoppelt, so steigen die Wärmegestehungskosten von 50 €/MWh auf knapp 70 €/MWh. Ähnlich starken Einfluss haben die Personalkosten. Steigen sie von 30 auf 42 €/h an, so steigen die Wärmegestehungskosten auf 55 €/MWh. Stärkeren und nichtlinearen Einfluss haben die Auslastung und der Energieinhalt des Speichers. Sinkt die Auslastung von 5 256 h im Jahr (60 % des Jahres Betrieb) auf 3 154 h ab, so steigen die Kosten für die transportierte für eine Megawattstunde auf knapp 70 €.

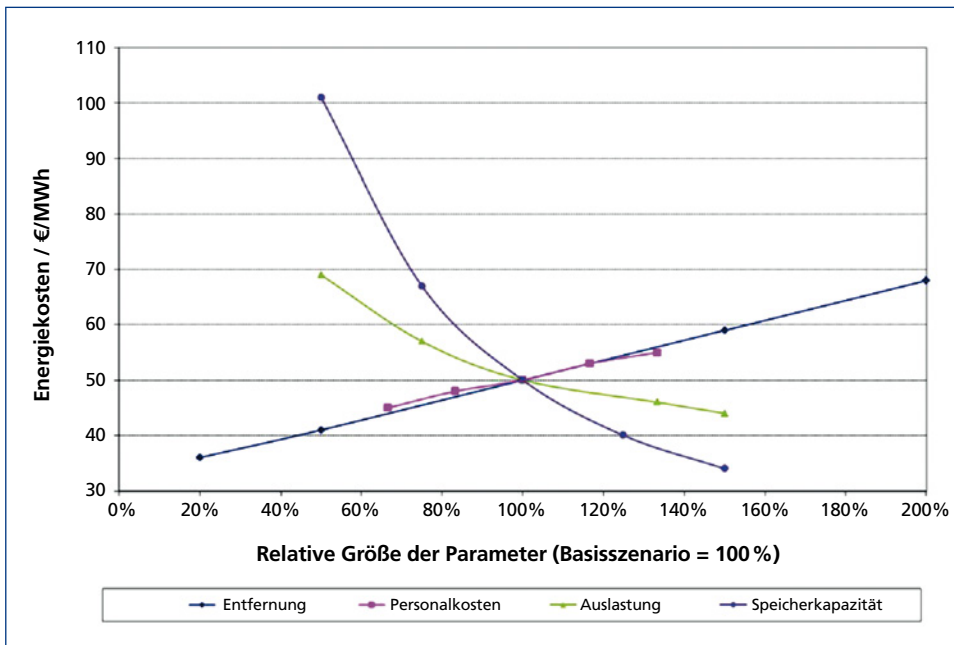
Noch größeren Einfluss hat die Speicherkapazität. Wird sie durch ein ungünstiges Speicherdesign oder Betriebsbedingungen von 3 auf 1,5 MWh reduziert, so steigen die Kosten umgekehrt proportional auf 100 €/MWh.



Speicher	
Energiedichte [kWh/t]	270
Zeolithmasse trocken [t]	12,0
Energieinhalt Speicher [MWh]	2,91
Speicher Wirkungsgrad	0,9
Ladezeit des Speichers [h]	5,0
Kosten	
Anzahl Speicher	3
Investkosten pro Speicher inkl. Zeolith [€]	96 600
Investkosten Ladestation [€]	105 000
Sattelzugmaschine	50 000
Personalkosten [€/h]	30
Hilfsenergiepreis [€/MWh]	130
Abwärmepreis [€/MWh]	0
Dieselpreis [€/l]	1,5
Randbedingungen	
Einfache Entfernung [km]	10
Betriebszeit pro Jahr [h/a]	5 256
Hilfsenergiebedarf pro Speicherzyklus [MWh]	0,136
Durchschnittsgeschwindigkeit [km/h]	25
Dieserverbrauch Sattelzugmaschine [l/100 km]	55
Umschlagzeit pro Zyklus [h]	0,5
Finanzierung	
Zinssatz [%]	6
Betrachtungszeitraum [a]	15
Instandhaltung [%]	1,5
Preissteigerungsrate Personalkosten [%/a]	2
Preissteigerungsrate Hilfsenergie [%/a]	5
Jährlich transportierte Energiemenge [MWh]	3 056
Anzahl der Speicherzyklen pro Jahr	1 051

■ **Abb. 89:** Randbedingungen der Wirtschaftlichkeitsberechnung





■ **Abb. 90:** Abhängigkeiten der Energiekosten

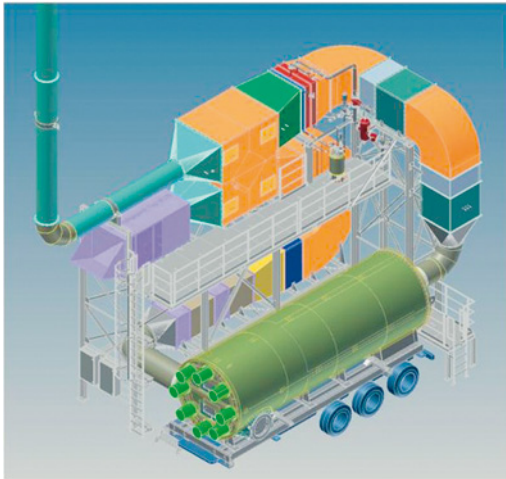
Als Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung lässt sich festhalten, dass ein ganzjähriger Betrieb des Speichers für eine gute Auslastung, ein großer Energieinhalt des Speichers sowie kurze Umschlag-, und Transportzeiten notwendig sind, um einen im Vergleich zu konventionellen Energieträgern konkurrenzfähigen Energiepreis bieten zu können.

### Pilotanlage bei der Müllverbrennung Hamm

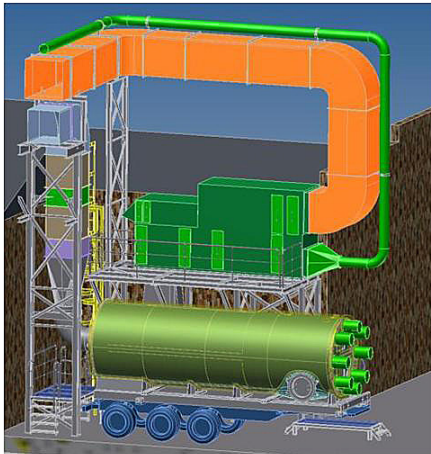
In Hamm/Nordrhein-Westfalen wurde eine Ladestation bei der Müllverbrennungsanlage aufgebaut und in Betrieb genommen (Abb. 91). Die Wärme wird an einer Stelle entnommen, dadurch reduziert sich die Stromproduktion um ca. 10 %, die Abwärme ist mit einem Preis von ca. 4 €/MWh zu zahlen. Die Abwärme steht praktisch rund um die Uhr zur Verfügung. Der von der Fa. Hoffmeier konstruierte, mobile Speicherbehälter kann nun Abwärme aus der thermischen Müllverwertung zu einem Trocknungsprozess der Fa. Jäckering über eine Distanz von ca. 7 km transportieren.

Die transportierte Wärme wird in einen Trocknungsprozess eingespeist. Die feuchte Luft aus dem Trocknungsprozess wird direkt in den Zeolith-Container geleitet. Damit kann der Speicher optimal entladen werden. Die Entladestation ist in Abbildung 92 gezeigt.

Abbildung 93 zeigt den mobilen Speicher isoliert und mit Zeolith befüllt. Im Behälter befinden sich 14 t Zeolith vom Typ 13X (im desorbierten Zustand). Der Container ist 8,35 m lang, 2,49 m breit und 2,85 m hoch. Das Gewicht des gesamten Containers mit desorbiertem Zeolith liegt bei 24,32 t. Der Container wird mit einer Wechselbrücke transportiert. Das Gewicht des gesamten Sattelzugs liegt dann bei ca. 40 t.



■ **Abb.91:** Ladestation bei der Müllverbrennung Hamm (3-D Skizze und ausgeführte Anlage)



■ **Abb.92:** Entladestation bei der Fa. Jäckering (3-D Skizze und ausgeführte Anlage)

■ **Abb.93:** Mobiler Adsorptionsspeicher isoliert und mit Zeolith befüllt



### 5.3.2 Kälte speichern und Klimatisieren mit Salzlösungen

<b>Steckbrief: Kälte speichern und Klimatisieren mit Salzlösungen</b>	
Speichertechnologie	Thermochemisch (Absorptions LiCl/Wasser)
Einsatzbereich	Stationärer, dezentraler Speicher zur Nutzung von Solarthermie und Abwärme zur Raumklimatisierung
Temperatur	Kältespeicher 10–18°C (Raumklimatisierung)
Kapazität/Leistung/Dauer	Hoch-Kapazitätsspeicher mit flexibler Leistung, 100–300 Zyklen pro Jahr
<b>Größen</b>	
Speicherkapazität	120–150 kWh/t (bei ca. 80°C Ladetemperatur)
Lade-/Entladeleistung	8–10 kW
Nutzungsgrad	0,9
Speicherzyklen in Anwendung	100–150 pro Jahr
Ökonomische Bewertung	Versuchs- und Testanlage

In großen Gebäuden wie Büros, Warenhäusern, Kongresszentren, Theatern lässt sich ein behagliches Raumklima meist nur mit raumluftechnischen Anlagen zuverlässig gewährleisten. Oft übersteigt der Primärenergiebedarf für die Klimatisierung den für die Heizung, denn nach wie vor beherrschen elektrisch betriebene Kompressionskältemaschinen den Markt. Sie belasten das Stromnetz gerade zu Spitzenlastzeiten durch ihren hohen Leistungsbedarf.

Wärmegetriebene Verfahren zur Klimatisierung stellen eine energieeffiziente Alternative dar. Sie nutzen die Abwärme von Blockheizkraftwerken, Überschusswärme aus Fernwärmenetzen oder aber die Sonnenenergie, wozu die effiziente Speicherung dieser Wärme freilich eine notwendige Voraussetzung ist. Vielfach ist das Temperaturniveau der verfügbaren Wärmequelle relativ niedrig. Zu den Systemen, die dann eingesetzt werden können, gehören die offenen Sorptionsanlagen.

Offene Sorptionsanlagen klimatisieren Gebäude über die Lüftungsanlage. Mit festen oder flüssigen Sorbentien entfeuchten sie zunächst die Zuluft. Die dabei frei werdende Wärme wird abgeführt. Eine gezielte Wiederbefeuchtung der Luft vor Eintritt in die Lüftungsanlage des Gebäudes senkt die Temperatur durch Verdunstungskühlung. Vorteil offener Sorptionssysteme ist, dass nicht nur die Temperatur, sondern auch die Luftfeuchte den Behaglichkeitsanforderungen angepasst werden kann. Niedertemperaturwärme trocknet die bei dem Prozess mit Feuchte beladenen Sorbentien wieder. Dies geschieht überwiegend kontinuierlich während der Klimatisierung.

Die Entkopplung von Wärmebedarf und Klimatisierung durch einen Speicher würde in vielen Fällen die Nutzbarkeit der Wärmequellen deutlich verbessern: Ein Speicher ermöglicht Versorgungssicherheit auch mit diskontinuierlich anfallender Abwärme, erlaubt den Einsatz von Sonnenenergie für den Nachtbetrieb oder an trüben Tagen. Sie kann durch den Transport des Speichermediums auch verbraucherfern anfallende Wärme für die Kälteversorgung erschließen.

Das ZAE Bayern hat ein speicherfähiges offenes Sorptionssystem zur Luftentfeuchtung und -kühlung entwickelt. In dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unterstützten Forschungsprojekt verwenden die Wissenschaftler eine konzentrierte Salzlösung als flüssiges Sorbens. Dies ermöglicht die verlustfreie Speicherung von Klimatisierungsenergie mit hoher Dichte. Das Verfahren eignet sich für zahlreiche Niedertemperatur-Wärmequellen.

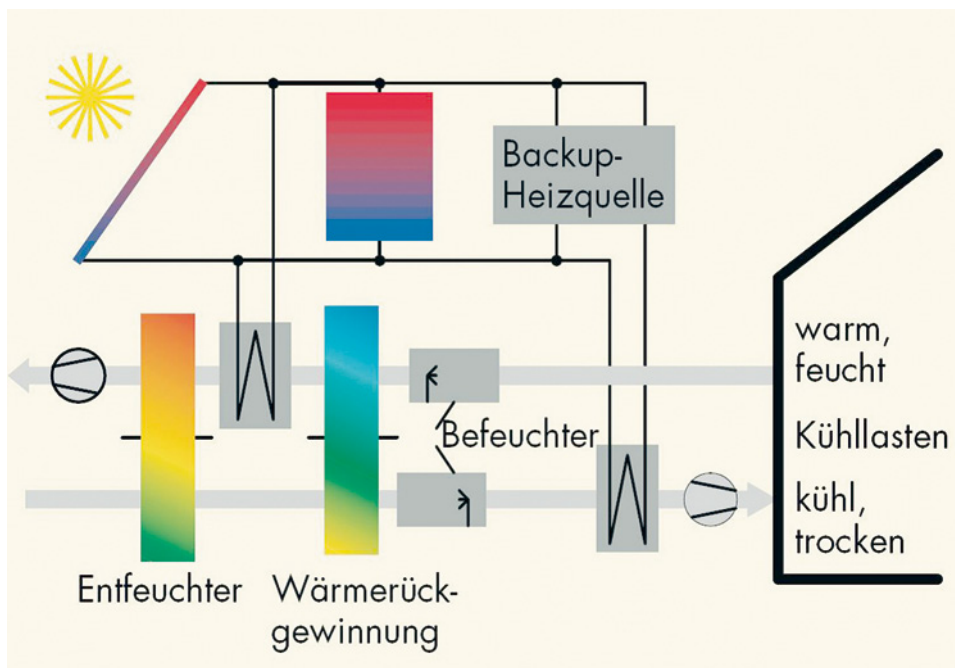
Wie sich das System in der Praxis bewährt, zeigt eine Demonstrationsanlage in einem Münchner Jazzklub. Die bauliche Situation erforderte ein ungewöhnliches Anlagenkonzept.

### Klimatisierung durch offene Sorptionsspeicher

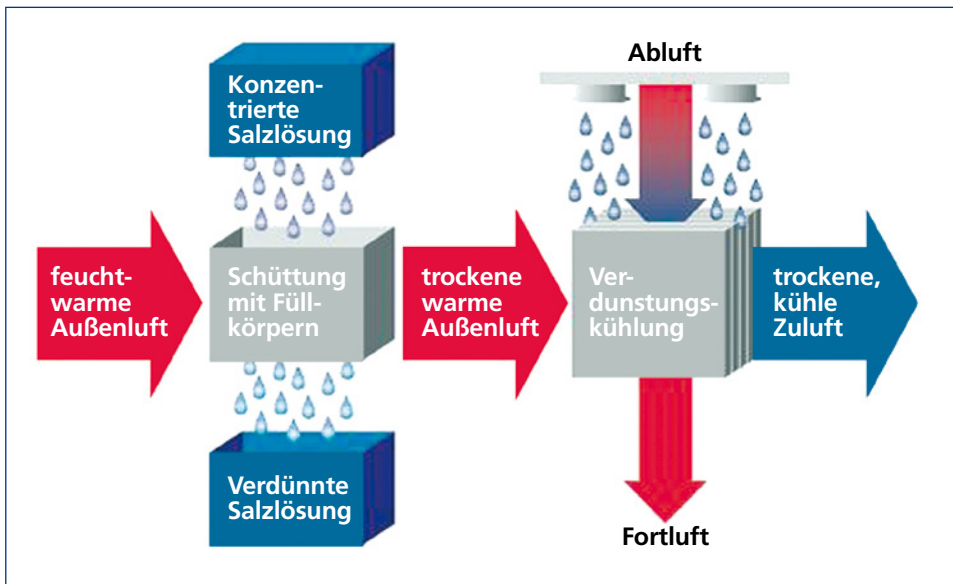
Bei offenen Verfahren steht die zugrunde liegende thermochemische Reaktion in direktem Kontakt mit der Atmosphäre. Im Unterschied zu geschlossenen Systemen stellen sie nicht nur Kälte bereit, sie konditionieren sowohl die Temperatur als auch die Feuchte der Luft, die als Wärme- und Stofftransportmedium dient.

Betrachtet man nur Systeme, die zur Klimatisierung eingesetzt werden und dabei keinen Speichereffekt haben, verwendet das am weitesten verbreitete offene Verfahren feste Sorbentien in Sorptionsrotoren (Abb. 94). Die Sektoren des Rotors durchlaufen mit einer langsamen Drehung abwechselnd die Zuluftseite, auf der die angesaugte Außenluft entfeuchtet wird und die Abluftseite, auf der das angelagerte Wasser unter Zufuhr von warmer Luft wieder desorbiert wird.

Das Sorptionsrad koppelt Entfeuchtung und Regeneration unmittelbar aneinander. Deshalb muss auch gleichzeitig regeneriert werden, wenn entfeuchtete Luft zur Klimatisierung benötigt wird. Eine Pufferung oder Speicherung ist nicht möglich. Ein weiterer prinzipbedingter Nachteil ist die mögliche Übertragung von Gerüchen aus der Fortluft in die Zuluft.



■ **Abb. 94:** Sorptionsrotor für solare Klimatisierung



■ **Abb. 95:** Klimatisieren mit Salzlösung

Verunreinigungen können sich an den großen Oberflächen der Sorbentien anlagern und gelangen nach einer halben Drehung wieder in den Zuluftstrom, wo sie desorbiert und ins Gebäude zurückgelangen können.

Verfahren mit flüssigen Sorptionsmitteln vermeiden diese Nachteile, da Zuluft und Abluft voneinander getrennt sind. Sie arbeiten aber nach dem gleichen Prinzip: Außenluft wird sorptiv entfeuchtet und durch Verdunsten von Wasser gekühlt. Die zentrale Einheit ist der Absorber. Hier wird ein flüssiges Sorbens auf gekühlten Kontaktflächen verrieselt, an denen die Luft vorbeigeführt wird (Abb. 95). Das Sorbens – üblicherweise eine konzentrierte wässrige Lithiumchloridlösung – nimmt die Luftfeuchte auf, wodurch die Salzkonzentration sinkt. Ein indirekter Verdunstungskühler führt die freiverdende Sorptionswärme an die Abluft ab, sodass die Zuluft gleichzeitig entfeuchtet und gekühlt wird.

Das jetzt verdünnte Sorbens wird in einem Tank gesammelt und anschließend wieder aufkonzentriert, indem es in einem luftdurchströmten Regenerator auf 60 bis 80°C erwärmt wird. Wärmerückgewinnung aus der Luft und dem Sorbens erhöht dabei den Wirkungsgrad.

Durch getrennte Lagerung von verdünntem und konzentriertem Sorbens wird Energie gespeichert. Mit Lithiumchloridlösung erreicht ein spezieller, intern gekühlter Absorber eine Energiespeicherdichte von bis zu 280 kWh/m<sup>3</sup>, ohne das Entfeuchtungspotenzial der konzentrierten Lösung zu reduzieren.

Weltweit sind die Erfahrungen mit flüssigen Sorbentien bei der Kältespeicherung und Gebäudeklimatisierung noch gering. Ein Forschungsprojekt des ZAE Bayern sollte das Potenzial der Technik für dieses Einsatzgebiet weiter ausloten und verbesserte Systemlösungen anbieten. In einem ersten Schritt wird die Effizienz zentraler Komponenten wie Absorber und Regenerator optimiert, die in früheren Arbeiten, gemeinsam mit Industriepartnern, entwickelt wurden. Ein besonderes Augenmerk galt dabei der Speicherkapazität des Gesamtsystems.

Mehrere Leistungstests am Absorber und am Verdunstungskühler unter kontrollierten Versuchsbedingungen erzielten eine Energiespeicherdichte zwischen 120 und 150 kWh/m<sup>3</sup>. Dies ist deutlich größer als die eines Eisspeichers, der 50 bis 70 kWh/m<sup>3</sup> erreicht. Die spezifische Leistung war für einen Prototyp akzeptabel, kann aber noch deutlich verbessert werden. Analysen deuteten darauf hin, dass nur ca. 30 % der Bruttoaustauschfläche tatsächlich wirksam sind. Im Labor wurden in früheren Versuchen an Einzelflächen bis zu 90 % erreicht. Verbesserungen in der Konstruktion und der Fertigung sollen künftig die aktive Fläche auf 70 % erhöhen.

### Demonstrationsanlage – Kimatisierung eines Jazzklubs

Mit einer Demonstrationsanlage zur Kühlung eines Münchner Jazzklubs sollten Betriebserfahrungen unter realen Bedingungen gesammelt und gleichzeitig die Praxistauglichkeit der Technologie aufgezeigt werden. Daher wurde nicht nur eine umfangreiche Mess- und Steuertechnik installiert, sondern auch Wert auf eine automatische Funktionsweise, um den Betrieb ohne Fachpersonal zu ermöglichen, gelegt.

Der Jazzclub verfügte bereits über eine Lüftungsanlage. Deren Luftkanäle reichen zwar aus, um den hygienisch nötigen Luftwechsel zu liefern, sie sind jedoch zu klein, um die erforderliche Kühlleistung abzuführen. Hierfür müsste die umgewälzte Luftmenge etwa viermal größer sein. Ein offenes Sorptionssystem im üblichen Sinn ließ sich deshalb nicht einsetzen.

Um den Aufwand gering zu halten, wurde ein spezieller Anlagenaufbau realisiert, der statt konditionierter Luft kaltes Wasser liefert. Dieses lässt sich über vergleichsweise kleine Leitungen transportieren, die problemlos nachträglich installiert werden konnten. Aus architektonischen Gründen und um die Umbaukosten gering zu halten, kühlt das System nicht über Kühlflächen, sondern über insgesamt acht Umluftkühler. Sechs befinden sich im Jazzklub, zwei in einer angrenzenden Küche.

### Funktionsweise

Den Aufbau des Sorptionssystems zeigt Abb.96: Ein Teil der Gebäudeabluft wird in einem Absorber mit konzentrierter wässriger Lithiumchloridlösung (LiCl-H<sub>2</sub>O) entfeuchtet. Der Absorber wird dabei gekühlt, um eine Aufheizung durch die Absorptionswärme zu vermeiden. Das Kühlwasser liefert ein indirekter Verdunstungskühler (VK1).

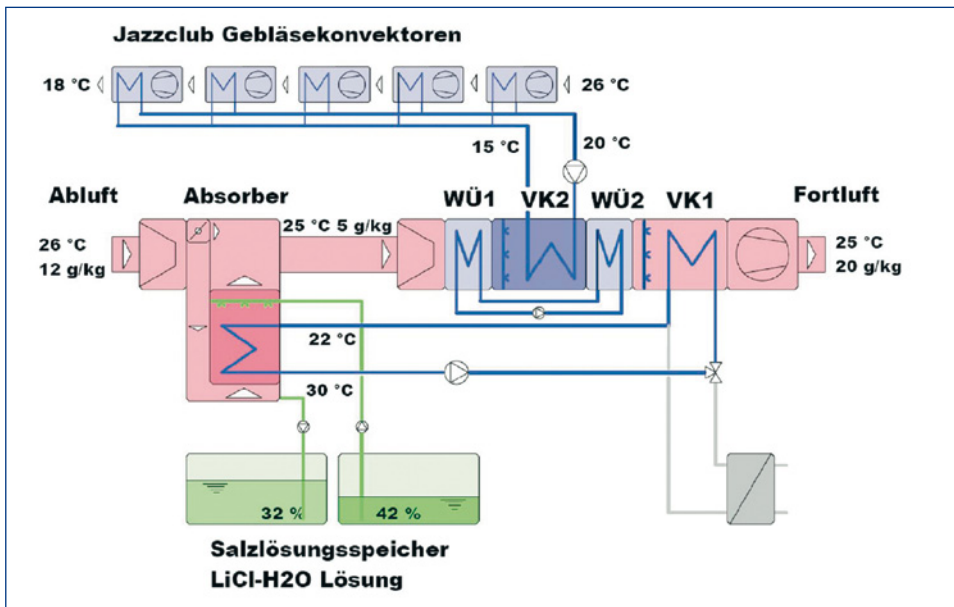
Die trockene Luft kühlt anschließend in einem Kreislaufverbundsystem ab, das aus zwei Wärmeübertragern (WÜ1 und WÜ2) besteht. In einem indirekten Verdunstungskühler (VK2) wird Leitungswasser in die trockene Luft und über einen Wärmeübertrager versprüht. Das Wasser verdunstet, kühlt dabei die Luft und diese wiederum das Kühlwasser im Wärmeübertrager (VK2). Das Kühlwasser wird den Umluftkühlern im Jazzklub zugeleitet und nimmt dort Wärme aus dem Raum auf.

Nachdem die kühle und noch relativ trockene Luft im Wärmeübertrager WÜ2 und im Verdunstungskühler VK2 genutzt wurde, um den Wärmeübertrager WÜ1 und den Absorber zu kühlen, wird sie warm und sehr feucht wieder der Fortluft zugemischt.

### Laden des Kältespeichers

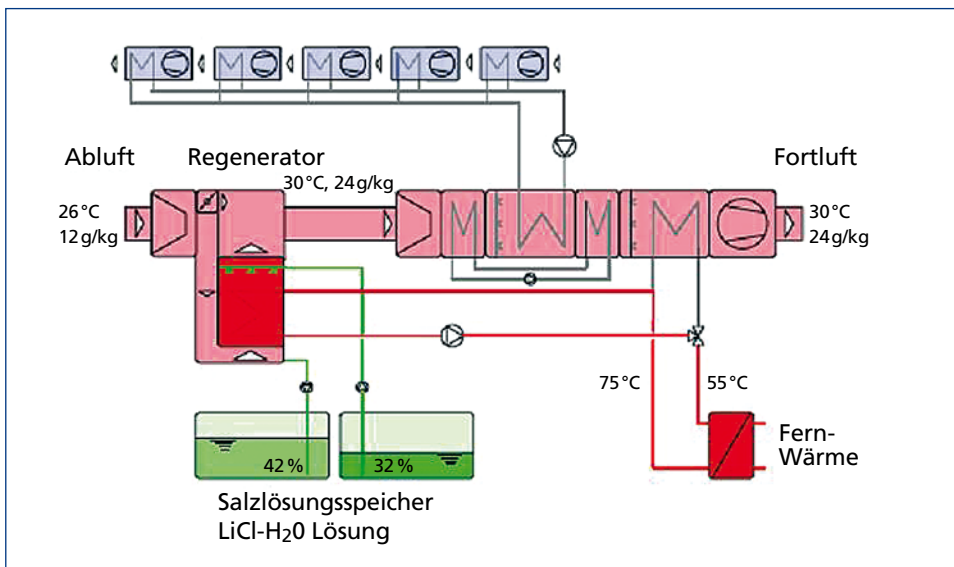
Während der Kühlung wird dem Absorber kontinuierlich Salzlösung aus einem Vorratstank zugeführt. Die beim Kühlprozess stark verdünnte und damit »verbrauchte« Lösung wird in einem zweiten Tank gespeichert. Damit sie wieder für die Luftentfeuchtung eingesetzt werden kann, muss sie wieder aufkonzentriert werden.





■ **Abb. 96:** Die Anlage im Kühlbetrieb

Zur Regeneration der Salzlösung wird wiederum Luft aus der Abluft des Gebäudes durch das Gerät geleitet, das vorher als Absorber arbeitete (Abb. 97). Es wird jedoch mit Fernwärme beheizt und wirkt dadurch als Regenerator. Wasser verdunstet dabei aus der Salzlösung und wird an die Fortluft abgegeben.



■ **Abb. 97:** Regeneration der Salzlösung

■ **Abb.98:** »Kältespeicherung« ohne Wärmedämmung



Für den Test der Komponenten ist die Systemkonfiguration zwar vorteilhaft, die Anlagenkomponenten arbeiten aber unter ungünstigeren thermodynamischen Bedingungen. Konventionelle Kompressions- oder Absorptionskältemaschinen stellen kaltes Wasser kostengünstiger bereit. Der Anlagenaufbau kann deshalb unter wirtschaftlichen Aspekten nicht zum Nachbau empfohlen werden.

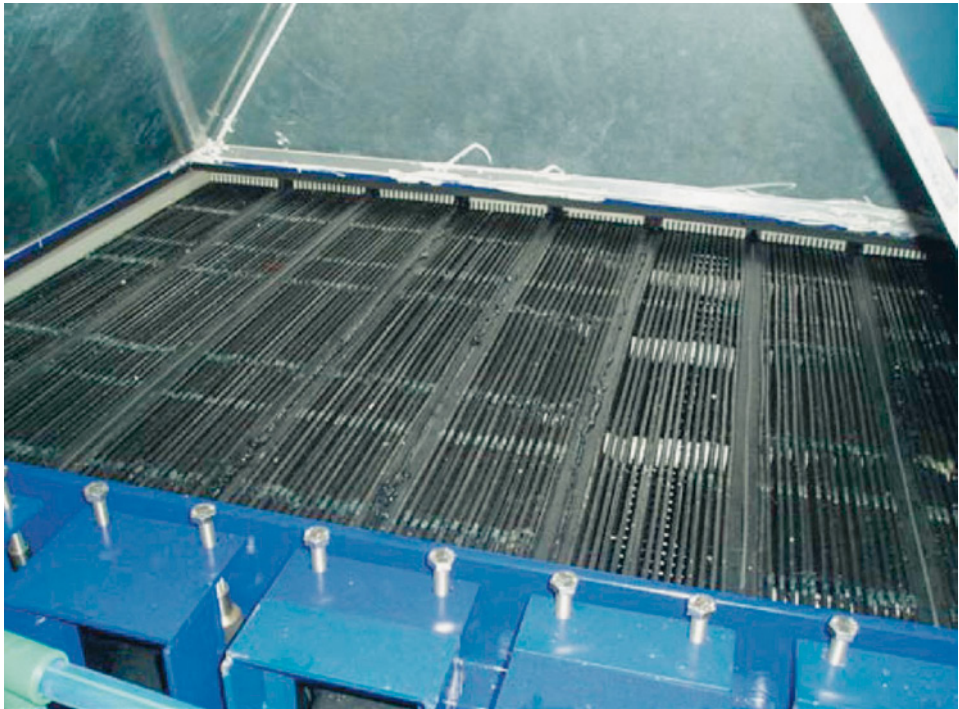
### Low-flow-Technik für hohe Speicherkapazität

Je stärker die Salzlösung bei der Absorption verdünnt werden kann umso größer ist die nutzbare Energiedichte des Speichers. Eine möglichst starke Verdünnung erreichten die Forscher mit der so genannten »low-flow« Sorptionstechnik. Dabei verteilt sich in dem Absorber (Abb. 99) ein sehr kleiner Salzlösungsstrom gleichmäßig über eine große Austauschfläche. In dem Forschungsprojekt konnte ein Massenverhältnis von Salzlösungsstrom und Luftstrom zwischen 0,025 und 0,012 erreichen werden. Dies ist ca. 50 Mal kleiner als in kommerziellen Anlagen üblich.

### Auslegung der Versuchsanlage

Die Kühlung wurde auf eine Belegung des Jazzklubs mit ca. 100 Personen ausgelegt. Hinzu kommt die Bühnenbeleuchtung, die mit 20 kW abgeschätzt wurde. Den Ventilationskühlbedarf deckt bereits die Lüftungsanlage. Die konkreten Werte der Auslegung sind in Abbildung 100 zusammengefasst.





■ **Abb. 99:** Austauschflächen im geöffneten Absorber

Beim Einschalten wird die volle Kühlleistung nach etwa 15 Minuten erreicht, da die Befeuchter zunächst geflutet werden müssen. Falls erforderlich, wird die Luft vor dem Verdunstungskühler durch den Absorber entfeuchtet. Die Umluftkühlanlage kann nur betrieben werden, wenn die Lüftungsanlage des Gebäudes in Betrieb ist, da die Wärme über die Lüftungsanlage an die Umgebung abgegeben wird. Es ist vorgesehen, die Lüftung automatisch einzuschalten, wenn die Kühlung benötigt wird.

### Diskussion der Versuchsergebnisse

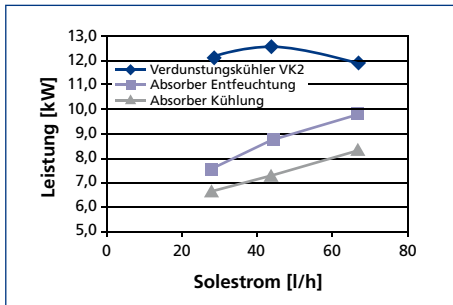
Abbildung 101 und 102 zeigen die Ergebnisse verschiedener Experimente. Dabei wurden in Abbildung 101 die thermische Leistung des Verdunstungskühlers (Abbildung 96 VK2) und die Entfeuchtungs- und Kühlungsleistung des Absorbers beim Entladen des »Kältespeichers« bestimmt. Für eine Anwendung bei der die Luftentfeuchtung tatsächlich genutzt werden kann – was für diese Speichertechnologie das eigentlich sinnvolle wäre – könnte die angegebene Entfeuchtungsleistung genutzt werden.

Abbildung 102 zeigt den so genannten Aktivierungsfaktor, der die aktiv genutzte bezogen auf die gesamte Austauschfläche angibt. Hier zeigt sich, dass gegenüber dem für die Auslegung angenommenen Verhältnis von 50 %, noch Optimierungspotenzial besteht. Würde man einen Aktivierungsfaktor von 60 % erreichen, könnte man eine fast doppelt so hohe Entfeuchtungsleistung realisieren bzw. den Speicher nur halb so groß bauen müssen.

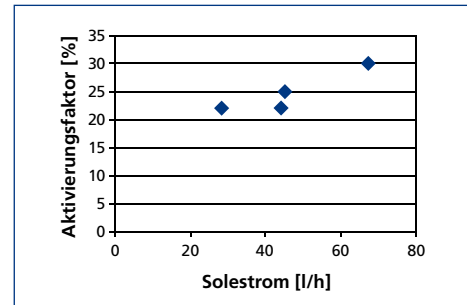
In Abbildung 101 bzw. 102 ist zu sehen, dass mit steigendem Solestrom auch die Leistung bzw. der Aktivierungsfaktor ansteigt. Gleichzeitig nimmt allerdings die erreichte Speicherkapa-

<b>Absorber</b>		
Luftvolumenstrom	4000	m³/h
Kühlwasservolumenstrom	2,8	m³/h
Solevolumenstrom	0,1	m³/h
Luftfeuchte am Eintritt	12,0	g/kg
Luftfeuchte am Austritt	5,7	g/kg
Kühlwassertemperatur am Eintritt	21,4	°C
Kühlwassertemperatur am Austritt	28,4	°C
Entfeuchtungsleistung bei Eintrittsfeuchte 12 g/kg	21	kW
<b>Indirekter Verdunstungskühler VK2</b>		
Luftvolumenstrom	4000	m³/h
Kühlwasservolumenstrom	2,6	m³/h
Sprühwasservolumenstrom	0,5	m³/h
Luftfeuchte am Eintritt	5,6	g/kg
Kühlwassertemperatur am Eintritt	19,7	°C
Kühlwassertemperatur am Austritt	14,4	°C
Kühlleistung	16	kW
<b>Umluftkühler in Jazzklub und Küche</b>		
Raumtemperatur	26	°C
Luftvolumenstrom maximal 8 × 950	7 600	m³/h
Wasservolumenstrom 8 × 0,325	2,6	m³/h
Kühlwassertemperatur am Eintritt	14,4	°C
Kühlwassertemperatur am Austritt	19,7	°C
Kühlleistung	16	kW
<b>Regenerator</b>		
Luftvolumenstrom	1 000	m³/h
Heizwasservolumenstrom	2,8	m³/h
Heizwassertemperatur am Eintritt	75	°C
Heizwassertemperatur am Austritt	64	°C
Regenerationsleistung	40	kW
<b>Speicher</b>		
Speichervolumen verdünnte Lösung	1,4	m³
Kühldauer bei 100 % Kühlleistung	9	h
Energiespeicherdichte	120	kWh/m³

■ **Abb. 100:** Auslegungsdaten des Absorptionssystems



**Abb. 101:** Entfeuchtungsleistung am Absorber, Kühlleistung des Verdunstungskühlers VK2



**Abb. 102:** Aktivierung der Austauschfläche des Absorbers als Funktion des Solestromes

azität ab. Es gilt daher, wie bei den meisten Speichertechnologien ein Optimum zwischen Speicherkapazität und Leistung bezogen auf die jeweilige Anwendung zu identifizieren.

## Fazit

Bei der neu entwickelten Absorber-Regenerator-Einheit wurde bewusst auf preisgünstige Ausgangsmaterialien gesetzt. Durch den Low-Flow-Absorber konnte eine deutlich höhere Speicherdichte als zuvor erreicht werden. Der signifikant höhere Verdünnungsgrad der Salzlösung im Anlagenbetrieb führt in der Praxis zu einer Energiedichte zwischen 120 und 150 kWh/m<sup>3</sup>, sie ist damit etwa doppelt so groß, wie die von Eisspeichern. In Laborversuchen wurden sogar bis zu 200 kWh/m<sup>3</sup> erreicht.

Die neue Technik wird in einem Münchner Jazzklub erprobt und sorgt dort, von Fernwärme angetrieben, für angenehme Raumtemperaturen. Aufgrund der baulichen Ausgangssituation konnten wesentliche Vorteile der sorptiven Klimatisierung nicht genutzt werden. So musste statt einer Klimatisierung über die Lüftung ein geschlossenes Kaltwassersystem mit Konvektionskühlern installiert werden. Daher findet keine Konditionierung der Luftfeuchte statt. Zudem arbeiten die Komponenten nicht mit dem Wirkungsgrad, der mit einem Zuluftsystem zu erreichen wäre. Dass sich die Anlage trotz dieser Erschwernisse bewährt hat, zeigt das Potenzial der Technologie auf. Sie hat sich mittlerweile als verlässlich erwiesen, sodass die Fernbedienung an die Betreiber ausgehändigt werden konnte. Die Anlage wird aber weiterhin vom ZAE Bayern betreut, um Erfahrungen über einen längeren Betriebszeitraum zu sammeln. Sie steht als Versuchsanlage für neue Austauschflächen für Absorber oder Verdunstungskühler zur Verfügung. Darüber hinaus dient sie als Demonstrationsobjekt für Architekten, Planer und potenzielle Anwender sowie als Exkursionsziel von Studenten.

Die Klimatisierung mit flüssigen Sorptionsmitteln ist aufwendiger als mit Sorptionsrädern. Sie weist aber entscheidende Vorteile auf, die ihren Einsatz in vielen Fällen attraktiv macht: Sie erreicht höhere Gesamtwirkungsgrade und die benötigten Regenerationstemperaturen liegen niedriger. Weniger als 80 °C genügen für die Regeneration verbrauchter Lösung. Zu- und Abluftstrom sind vollständig entkoppelt, wodurch die Übertragung von Schadstoffen oder Gerüchen ausgeschlossen ist. Vor allem kann das System effizient und verlustfrei Klimatisierungsenergie speichern.

### 5.3.3 Adsorptionsspeicher in einem Geschirrspüler

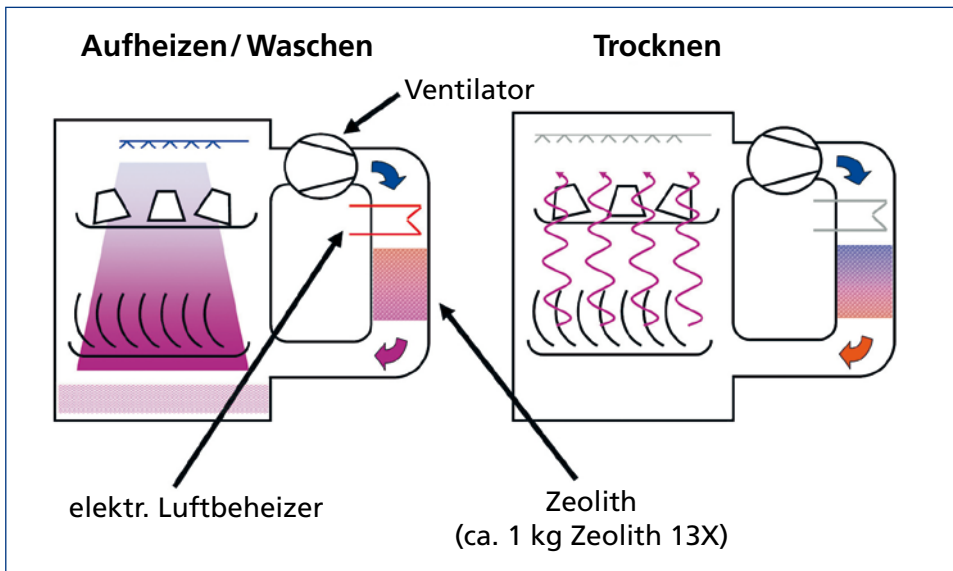
<b>Steckbrief: Adsorptionsspeicher in einem Geschirrspüler</b>	
Speichertechnologie	Thermochemisch (Adsorption Zeolith/Wasser)
Einsatzbereich	Stationärer, dezentraler Speicher zur effizienten Nutzung von Elektrizität für Spülwassererwärmung und Geschirrtrocknung
Temperatur	Wärmespeicher zur Trocknung mit heißer, trockener Luft
Kapazität/Leistung/Dauer	Kurzzeitspeicher (45 Minuten), ca. 200 Zyklen pro Jahr
<b>Größen</b>	
Speicherkapazität	180–200 kWh/m <sup>3</sup> (bei ca. 280–300 °C Ladetemperatur) und hohem Wassergehalt in der Luft beim Entladen
Lade-/Entladeleistung	2/1 kW
Nutzungsgrad	0,85 bzw. 1,44 (unter Berücksichtigung des Wärmepumpeneffekts)
Speicherzyklen in Anwendung	ca. 200 pro Jahr
Ökonomische Bewertung	Kommerziell erhältliches Massenprodukt

Der Geschirrspüler mit integriertem Adsorptionsspeicher ermöglicht eine energetische Effizienzsteigerung gegenüber konventionellen Geschirrspülern. Durch eine bessere Nutzung und Speicherung der elektrisch erzeugten Heizenergie, die zum Aufwärmen des Spülwassers benötigt wird, kann über den gesamten Spülzyklus elektrische Energie eingespart werden.

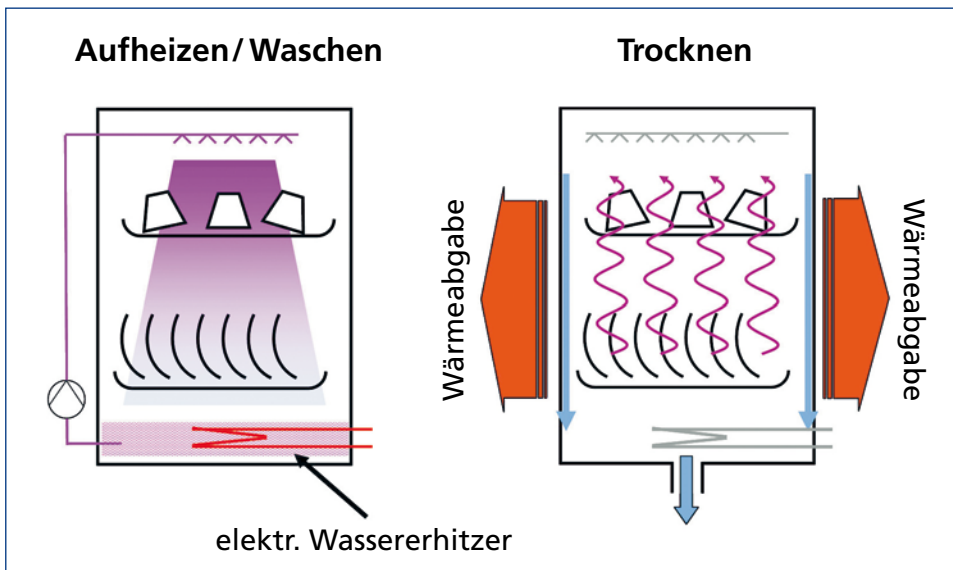
Im folgendem wird das Funktionsprinzip eines Geschirrspülers mit einem Zeolith-Speicher beschrieben. Der Adsorptionsspeicher wird beladen während das Spülwasser aufgeheizt wird. Luft aus dem Spülraum wird elektrisch erhitzt und durchströmt anschließend das Zeolith-Festbett (Abb. 103). Das dampfförmige Wasser aus dem Adsorptionsspeicher wird ausgetrieben und kondensiert daraufhin im Geschirrspüler. Bei diesem Vorgang überträgt der Wasserdampf die Kondensationswärme an das Spülwasser im Geschirrspüler und erwärmt dieses. Das Laden des Speichers dauert ungefähr 20 Minuten bei einer Ladeleistung von 2 kW.

Während des Trocknungsvorgangs des Geschirrs nach der eigentlichen Spülphase kommt der Adsorptionsspeicher wieder zum Einsatz. Die feuchte Luft aus dem Spülraum strömt in den Speicher und das Speichermaterial (Zeolith) nimmt die Feuchtigkeit auf. Hierbei wird die Adsorptionswärme des Speichers freigesetzt. Die Temperaturerhöhung auf Grund der eingebrachten Wärme unterstützt zusätzlich den Trocknungsvorgang im Spülraum. Nach ca. 25 Minuten ist das Geschirr trocken und der gesamte Spülvorgang ist beendet. Während der Entladung des Speichers hat dieser eine Leistung von 1 kW abgegeben.

Beim Trockenvorgang in herkömmlichen Geschirrspülern wird das Geschirr nach dem Spülen mit frischem Wasser aufgeheizt, um danach durch Verdunstung des Wassers auf dem heißen Geschirr getrocknet zu werden (Abb. 104). Das verdunstete Wasser kondensiert anschließend an der Außenwand des Spülers und wird daraufhin abgepumpt.



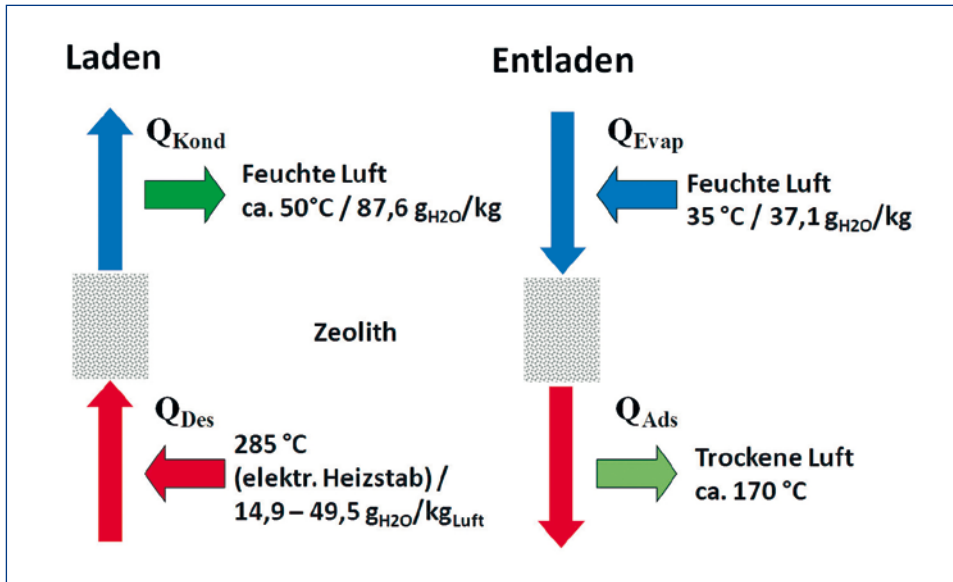
■ **Abb. 103:** Spül- und Trockenvorgang eines Geschirrspülers mit Adsorptionsspeicher [26]



■ **Abb. 104:** Spül- und Trockenvorgang eines konventionellen Geschirrspülers [26]

## Der Speicherprozess

Der thermochemische Speicherprozess (Laden und Entladen, d.h. De- und Adsorption) mit dem Stoffpaar Zeolith/Wasser muss dem Spülprozess angepasst werden. Die Ladetemperatur wurde mit 285 °C angenommen. Die Temperatur des Spülwassers steigt während der Desorption von 20 °C auf 40 °C. Im Spülraum kann von einer relativen Luftfeuchtigkeit von 100 % ausgegangen werden. Damit ergibt sich ein absoluter Wassergehalt der Luft von 14,9 bzw.



■ **Abb. 105:** Offener Adsorptionsspeicher im Geschirrspüler

49,5 g  $\text{H}_2\text{O}/\text{kg}_{\text{Luft}}$  (was einem Taupunkt von 20–40 °C entspricht). Unter diesen Bedingungen kann eine Restbeladung von 0,04 kg  $\text{H}_2\text{O}/\text{kg}_{\text{Zeo}}$  des Zeoliths erreicht werden.

Beim Entladen, der Adsorption, beträgt die Wassertemperatur 35 °C, ebenfalls bei 100 % relativer Feuchte. Damit kann das Zeolith vollständig mit Wasserdampf beladen werden, was einer Beladung von 0,32 kg  $\text{H}_2\text{O}/\text{kg}_{\text{Zeo}}$  entspricht. Unter diesen Prozessbedingungen können 88 % der maximalen Beladungskapazität von Zeolith erschlossen werden. Abbildung 105 zeigt schematisch den Lade- und Entladeprozess.

### Nutzungsgrad, Speicherkapazität und Wärmepumpeneffekt

Der Nutzungsgrad des Speichers lässt sich nach Abbildung 105 (Beispiel: Offener Adsorptionsspeicher, Kapitel 4.2) bestimmen. Er ist definiert als

$$\text{COP}_{\text{th}} = Q_{\text{Ads}}/Q_{\text{Des}}$$

wobei in dieser speziellen Anwendung auch die Kondensationswärme während des Ladens genutzt wird, was insgesamt zu  $\text{COP}_{\text{th}} = (Q_{\text{Kond}} + Q_{\text{Ads}})/Q_{\text{Des}}$  führt. Beschränkt man sich aber auf die Speicherung alleine, gilt der erste Ansatz. Die Verdampfungswärme  $Q_{\text{Evap}}$  wird als »gegeben« in den Gleichungen nicht berücksichtigt. Die Wärmemengen sind bezogen auf die Masse Adsorbens. Sie können ebenfalls aus den Gleichgewichten berechnet werden. Damit kann ein theoretisch erreichbarer Nutzungsgrad  $\text{COP}_{\text{th}}$  auf der Basis der Adsorptionsgleichgewichte [27] bestimmt werden.

Die Desorptionswärme setzt sich zusammen aus  $Q_{\text{Des}} = Q_{\text{Bind}} + Q_{\text{Kond}} + Q_{\text{SensDes}}$ . Die Adsorptionswärme setzt sich analog zusammen aus  $Q_{\text{Ads}} = Q_{\text{Bind}} + Q_{\text{Kond}} + Q_{\text{SensAds}}$ . Dabei unterscheiden sich  $Q_{\text{SensDes}}$  und  $Q_{\text{SensAds}}$  durch die Wärmeverluste zwischen Laden und Entladen. Die einzelnen Terme sind bestimmt durch die Temperatur und den Wassergehalt der Luft (oder den Wasserdampfpartialdruck) und die daraus resultierende Wasserbeladung des Zeoliths.

Für den oben beschriebenen Zyklus ergeben sich dann aus der theoretischen Abschätzung folgende Größen [26]

- $Q_{\text{Bind}} = 200 \text{ kJ/kg}_{\text{Sorb}}$
- $Q_{\text{Kond}} = 722 \text{ kJ/kg}_{\text{Sorb}}$
- $Q_{\text{SensDes}} = 292 \text{ kJ/kg}_{\text{Sorb}}$

Von der sensiblen Wärme des Zeolith geht im Speicherzyklus ein gewisser Teil durch Abkühlung verloren. Unter der Annahme, dass das Bett von 285°C auf 50°C abkühlt, könnte nur noch  $Q_{\text{SensAds}} = 18 \text{ kJ/kg}_{\text{Sorb}}$  genutzt werden. Ohne Wärmeverluste wäre der Nutzungsgrad bei 100 %.

Somit ergibt sich für den Nutzungsgrad

$$\text{COP}_{\text{th}} = Q_{\text{Ads}}/Q_{\text{Des}} = 0,77$$

Die Speicherkapazität ist definiert als

$$\rho_Q = \frac{(Q_{\text{Kond}} + Q_{\text{Bind}} + Q_{\text{SensAds}}) \cdot m_{\text{sorb}}}{V_{\text{sorb}}} = (Q_{\text{Kond}} + Q_{\text{Bind}} + Q_{\text{SensAds}}) \cdot \rho_{\text{sorb}}$$

wobei  $m_{\text{sorb}}$  die Masse,  $V_{\text{sorb}}$  das Volumen und  $\rho_{\text{sorb}}$  die Dichte des Adsorbens sind. Die Speicherkapazität (oder Energiespeicherdichte)  $\rho_Q$  kann analog zur Bestimmung des Nutzungsgrades für eine experimentell ermittelte Dichte  $\rho_{\text{sorb}}$  des Adsorbens berechnet werden. Für Zeolith liegt diese bei ca. 700 kg/m<sup>3</sup>.

Somit ergibt sich für die Speicherkapazität

$$\rho_Q = 658 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} = 183 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$$

Aufgrund der Tatsache, dass im Betrieb des Speichers die Kondensationswärme während des Ladens für das Aufheizen des Spülwassers genutzt wird, wird sie im Folgenden in die Berechnung des Nutzungsgrades einbezogen. Damit kann durch den so genannten »Wärmepumpeneffekt«, der bei Sorptionsspeichern eine Rolle spielen kann, ein Nutzungsgrad über 100 erreicht werden. Wie oben gezeigt ergibt sich in dieser Betrachtung für den Nutzungsgrad [26]

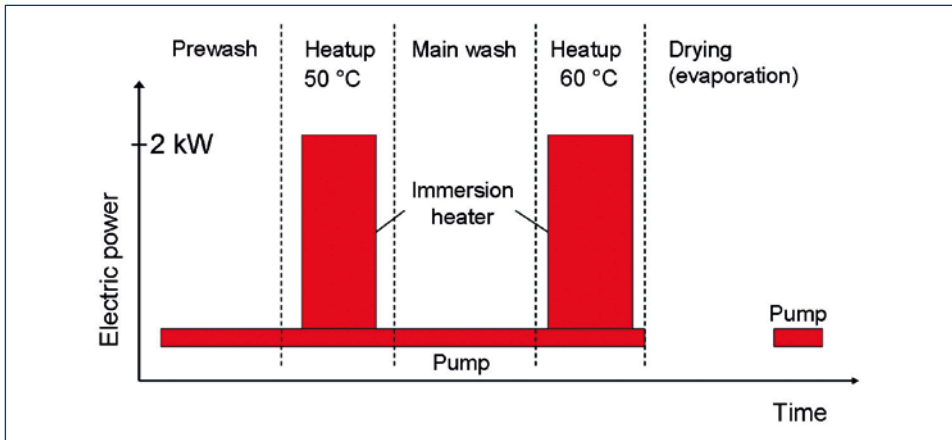
$$\text{COP}_{\text{th}} = (Q_{\text{Kond}} + Q_{\text{Ads}})/Q_{\text{Des}} = Q_{\text{Kond}} + Q_{\text{Bind}} + Q_{\text{Kond}} + Q_{\text{SensAds}}/Q_{\text{Des}} = 1,37$$

Falls die sensiblen Verluste vernachlässigt werden können, ergibt sich der maximal erreichbare Nutzungsgrad zu  $\text{COP}_{\text{th}} = 1,6$ .

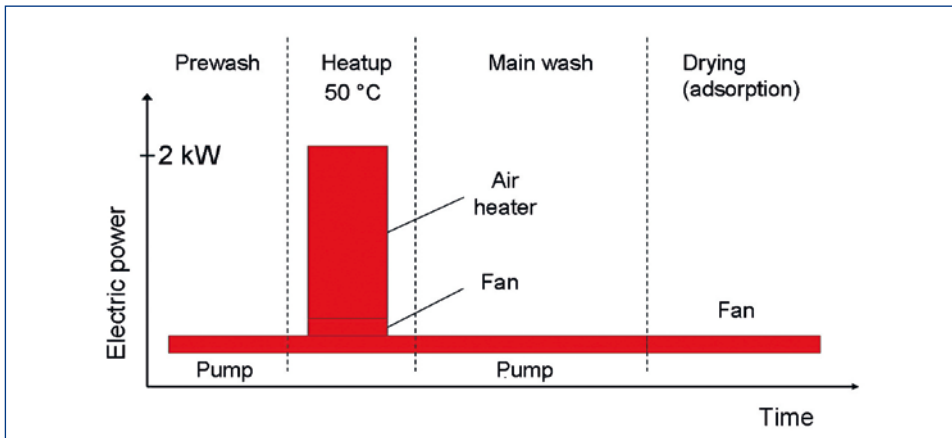
## Geschirrspüler mit Adsorptionsspeicher

Im realen Geschirrspüler mit integriertem Zeolith-Speicher wird ein Nutzungsgrad (inkl. Wärmepumpeneffekt) von  $\text{COP}_{\text{th}} = 1,44$  erreicht. Damit fallen die Wärmeverluste etwas geringer als angesetzt aus, sind aber durchaus vorhanden. Da der Sorptionsspeicher für seinen Betrieb noch ein Gebläse benötigt, ergibt sich eine Energieeinsparung des Spülers mit Speicher gegenüber dem konventionellen Speicher von 23 %.

Die Abbildungen 106 und 107 zeigen den jeweiligen Stromverbrauch beider Geräte über die Zeit. Der konventionelle Geschirrspüler benötigt zweimal elektrische Energie: zum Aufheizen und zum Trocknen. Der Aufheizvorgang für die Geschirrtrocknung eines konventionellen



■ **Abb. 106:** Elektrischer Energiebedarf eines konventionellen Geschirrspülers [26]



■ **Abb. 107:** Elektrischer Energiebedarf eines Geschirrspülers mit Adsorptionsspeicher [26]

Geschirrspülers wird in einem Geschirrspüler mit Adsorptionsspeicher nicht mehr benötigt. Während des Trocknungsvorgangs wird nur noch ein geringer Energiebedarf für den Lüfter der Adsorptionstrocknung beansprucht.

Die hier beschriebenen Entwicklungen wurden im Auftrag der Bosch-Siemens-Hausgeräte GmbH vom ZAE Bayern durchgeführt.

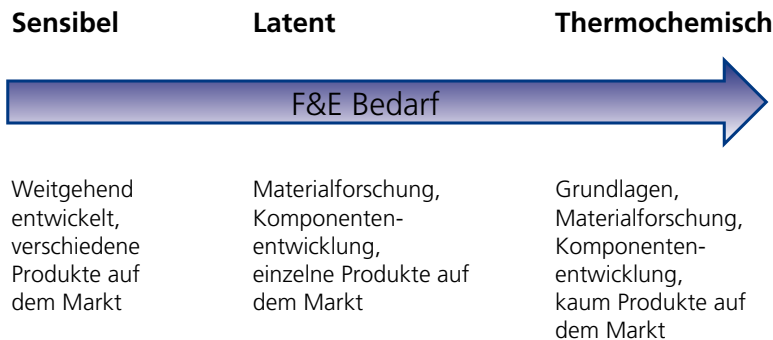




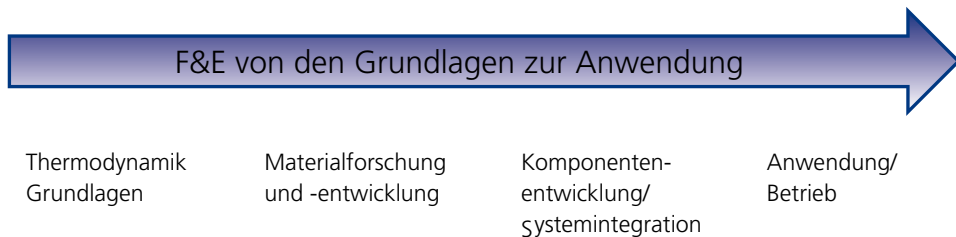
## 6 Stand der Forschung und Entwicklung

Die verschiedenen Arten thermische Energie zu speichern – sensibel, latent und thermochemisch – sind unterschiedlich weit entwickelt. Während sensible Wärmespeicher, wie Warmwasserspeicher oder Erdwärmesonden, z. T. kommerziell erhältliche Produkte sind, befinden sich Latentwärmespeicher und thermochemische Speicher noch weitgehend im Entwicklungsstadium.

### Forschung und Entwicklung thermischer Energiespeicher



Im Allgemeinen lassen sich die F&E-Aktivitäten auf dem Gebiet der thermischen Energiespeicher nach ihrem Entwicklungsstand auf dem Weg von den Grundlagen zur tatsächlichen Anwendung einteilen.



#### Thermodynamische Grundlagen

Aktuell wurden die thermodynamischen Grundlagen und dabei vor allem die Frage nach den theoretischen Grenzen der Speicherkapazität in Abhängigkeit der Lade- und Entladetemperatur, in einer internationalen Arbeitsgruppe der Internationalen Energieagentur (IEA) untersucht. Die Ergebnisse dieser Arbeitsgruppe finden sich weitgehend im Kapitel 4.4. beschrieben. Teile dieser Ergebnisse basieren auf Überlegungen von Sizmann aus dem Jahre 1989.

#### Materialforschung und -entwicklung

Bei den sensiblen thermischen Energiespeichern findet Materialforschung kaum in Bezug auf das Speichermaterial selbst statt. Das am meisten genutzte Medium ist hier Wasser. Allerdings müssen bei den Speichern, die den Untergrund nutzen, in einem so genannten »Thermal Response Test« die thermischen Eigenschaften des jeweiligen Untergrunds experimentell vermes-



■ **Abb. 108:** Thermal-Response-Test Messung an der Bohrung (ZAE Bayern)



■ **Abb. 109:** Asbest-Abfall und Verglasungsprozess

sen werden [28], [29]. Materialforschung bezieht sich in diesem Bereich mehr auf die Speicherbehälter und ihre Einsatzfähigkeit für Langzeitspeicherung oder die Isolation dieser Behälter. Abbildung 108 zeigt eine mobile TRT-Einheit des ZAE Bayern bei der Messung vor Ort.

Lediglich im Hochtemperatur-Bereich über 500 °C wird momentan an preisgünstigen Materialien geforscht, die auch über eine hinreichend gute spezifische Wärmekapazität verfügen [30], [31]. An der Universität von Perpignan, Frankreich, werden asbesthaltige Abfälle, die kostenpflichtig entsorgt werden müssen, nach einen Verglasungsprozess auf ihre Eignung als Speichermaterial bei hohen Temperaturen untersucht. Ein solches Material ist für Preise unter 10 €/t verfügbar. Abb. 109 zeigt das Rohmaterial und den Verglasungsprozess [32].



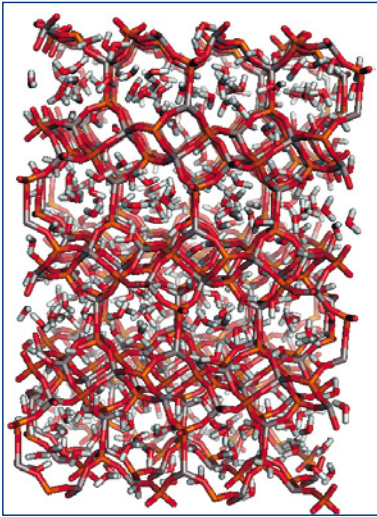
■ **Abb. 110:** HOTREG Feststoff-Speicher-Testanlage des DLR [33]

Am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt wurde ein Teststand für Hochtemperatur-Speichermaterialien aufgebaut (HOTREG). Hier werden vor allem Feststoff-Regeneratorspeicher, die Energie im direkten Kontakt mit Heißgas an ein festes Speichermedium übertragen, untersucht. Dieser Speichertyp wird unter anderem für den Einsatz in adiabaten Druckluftspeichern angedacht. Abb. 110 zeigt den Hochtemperatur-Teststand am DLR [33].

Zahlreiche Forschungsinstitute und Universitäten im In- und Ausland beschäftigen sich momentan mit Materialforschung und -entwicklung auf dem Gebiet der Phasen-Wechsel-Materialien. Dabei steht die Suche nach Materialien mit einer möglichst hohen Schmelzenthalpie bei einer für die jeweilige Anwendung optimalen Schmelztemperatur im Mittelpunkt [34], [35], [36], [37]. Besonders intensiv wird im Bereich der Behaglichkeitsgrenzen für Wohn- und Bürogebäude nach geeigneten Speichermaterialien gesucht. Je nachdem, ob der Speicher zum Kühlen oder Heizen eingesetzt werden soll, liegt die gewünschten Schmelztemperaturen zwischen 18 und 26 °C. Für die Nutzung industrieller Abwärme oder für solarthermische Kraftwerke wird auch an PCMs mit deutlich höheren Schmelztemperaturen von 100 bis über 400 °C geforscht [38].

Weitere untersuchte Fragestellungen betreffen den Effekt der Unterkühlung einzelner Materialklassen und die Auslösung der Kristallisation, wenn die Temperatur des Materials bereits deutlich unterhalb der Schmelztemperatur liegt [39]. Gegenwärtig werden auch PCMs untersucht, die im »geschmolzenen« Zustand nicht wirklich flüssig sind. Diese so genannten »formstabilen« PCMs haben vor allem Vorteile beim Einsatz im Gebäudebereich [40], [41]. Weiterhin sind auch fest-fest Phasenübergänge Gegenstand der Forschung [42].

Im Bereich thermochemischer Speichermaterialien konzentrieren sich die Forschungsaktivitäten auf Stoffpaare mit möglichst hohen Reaktions- bzw. Sorptionsenthalpien bei den durch die konkreten Anwendungen vorgegebenen Temperaturen. Neben der Optimierung von Zeoli-



■ **Abb. 111:** Kristallstruktur von Metal-Organic Framework Cu-BTC HKUST-1, wie sie in der Monte-Carlo-Simulation genutzt wird

then für Speicheranwendungen [43], werden bei den Adsorbentien vor allem die Materialklassen der AlPos, Sapos und MOFs [44], [45] betrachtet (siehe auch Kapitel 4.5.4). Abb. 111 zeigt die Struktur eines Aluminophosphats [46].

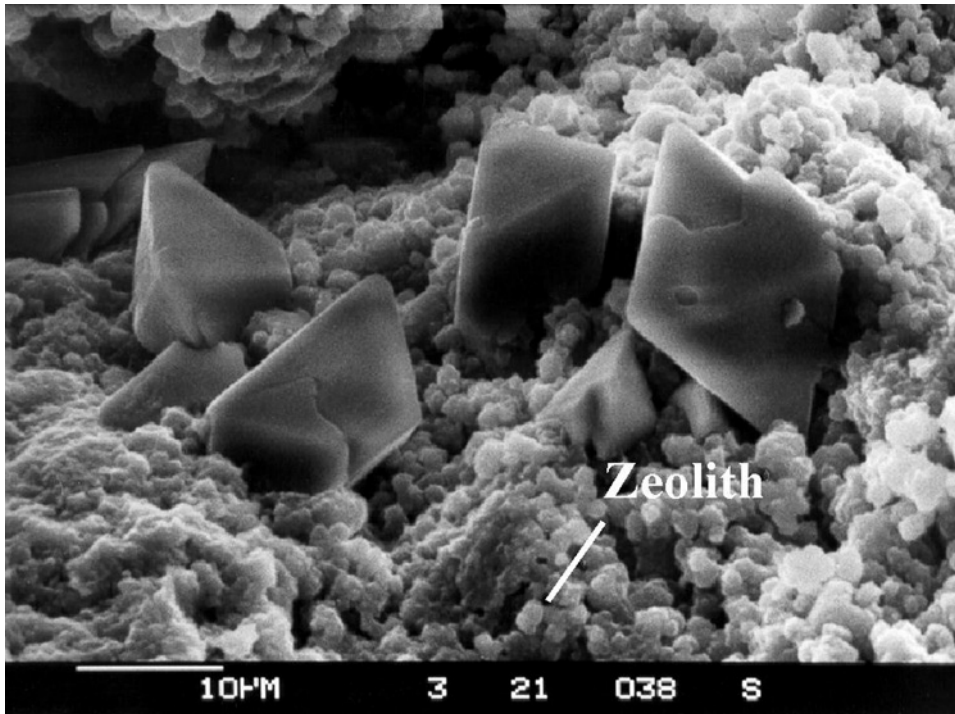
Untersucht werden hier die Adsorptionsgleichgewichte und die Struktur der Adsorbentien. Zurzeit werden aber auch weitere chemische Reaktionen vor allem im Hinblick auf ihren Einsatz zur saisonalen Speicherung solarer Wärme und im Hochtemperaturbereich untersucht [47], [48]. Für denselben Einsatz sind auch so genannte Kompositmaterialien, Verbindungen fester und flüssiger Sorbentien, z. B. Silicagel mit Lithiumchlorid, Gegenstand laufender F&E-Aktivitäten [49].

Weitere Fragestellungen betreffen in diesem Bereich die hydrothermale Stabilität von Adsorbentien und ganz allgemein die Zyklfestigkeit thermochemischer Speichermaterialien. Abb. 112 zeigt Schwefelkristalle an der Oberfläche eines aufgebrochenen Zeolith-Kristalls. Das Adsorbens wurde über 500 Zyklen mit schwefelhaltiger Luft beaufschlagt. Die Zeolithstruktur wurde teilweise zerstört, wodurch das Material seine Adsorptionseigenschaften änderte [11].

Hier sind die Mechanismen der Alterung noch weitgehend unklar [50]. Für einzelne Materialien, für deren Herstellung z. B. teure Templates verwendet werden müssen, werden alternative Herstellungsverfahren gesucht.

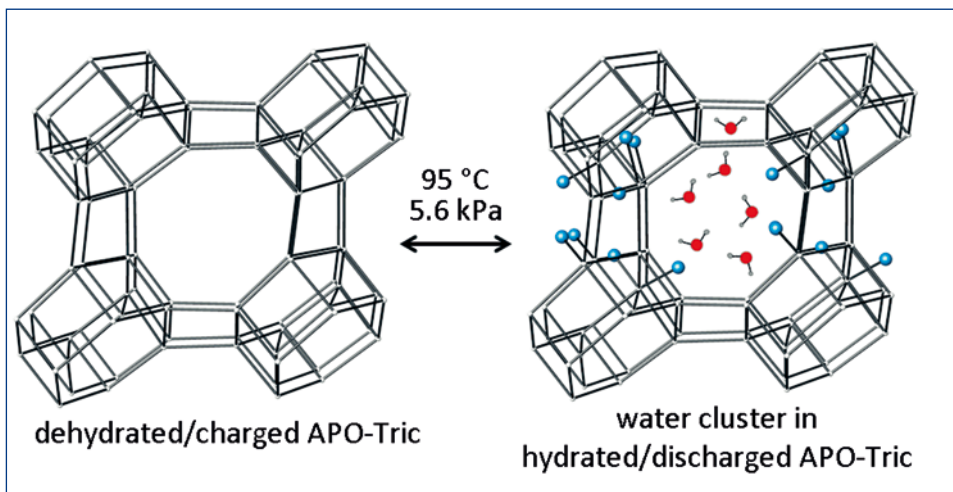
Im Rahmen des Technology Networks der internationalen Energieagentur (IEA) hat sich eine Arbeitsgruppe mit dem Titel »Compact Thermal Energy Storage: Material Development and System Integration« (Task42/Annex 24 SHC ECES) gebildet [51]. In verschiedenen vorangegangenen Aktivitäten wurde festgestellt, dass das größte Hindernis bei der Realisierung hocheffizienter und kompakter Speicherlösungen, das Fehlen innovativer Speichermaterialien mit höheren Speicherkapazitäten und bezahlbaren Herstellungskosten ist. Weltweit arbeitet eine Reihe von Forschergruppen entweder an Materialien oder an Speicheranwendungen. In der Regel sind diese Aktivitäten allerdings nicht ausreichend koordiniert. Ziel der Arbeitsgruppe der IEA ist es, interdisziplinäre Zusammenarbeit von Experten auf dem Gebiet der Materialforschung und Speicher-Spezialisten zu fördern.





■ **Abb. 112:** Schwefelkristalle auf gealtertem Zeolith

So wurde etwa im Rahmen dieser Aktivität ein aussichtsreicher Adsorbens-Kandidat, mit der Bezeichnung »APO-Tric«, in Bezug auf die Wasseraufnahme, die Adsorptionswärme und die hydrothermale Stabilität, am National Institute of Chemistry in Slowenien entwickelt (siehe Abb. 113) [52].



■ **Abb. 113:** Struktur des Adsorbens APO-Tric

## Speicherkomponenten und -systeme

Bei der Forschung und Entwicklung von Speicherkomponenten und -systemen im Bereich sensibler Speicher liegt der Fokus auf innovativen Konzepten zur Isolation und zur Temperaturschichtung im Speicher [53], [54]. Laufende Forschungsaktivitäten beziehen sich hier auch auf Langzeitstabilität und -dichtigkeit der Speicherbehälter [20].

Bei den Latentwärmespeichern zielen die Forschungsaktivitäten hauptsächlich auf Verbesserungen des Wärmetransports und damit der erreichbaren thermischen Leistung beim Laden und Entladen. Hier sollen durch den Einsatz von Kompositmaterialien (z. B. Paraffin in einer Matrix aus expandiertem Graphit) [55], [56], [57], makro- oder mikroverkapseltem PCM [58], Direktkontaktsystemen (das Wärmeträgermedium ist in direktem Kontakt mit dem PCM) [59] oder verbesserten Wärmeübertrager-Geometrien Verbesserungen erzielt werden. Abb. 114 zeigt einen Wärmeübertrager mit einer Graphitmatrix, die mit einem Salzhydrat getränkt wurde.

Untersuchte Speichersysteme umfassen sowohl passive (z. B. Passive Cooling in Gebäuden) und aktive (siehe Beispiel: SolCool) als auch stationäre und mobile Speicher. Wobei letztere zur Nutzung industrieller Abwärme bereits in Pilotanlagen vermessen werden [60]. Für den Einsatz als Kältespeicher werden auch PCM-Slurries (neben Eis-Slurries) untersucht. Parallel wird an geeigneten Simulationsprogrammen gearbeitet, um das Verhalten entwickelter Latentwärmespeicher in konkreten Anwendungen abbilden zu können [61].

Im Mittelpunkt der Forschungsaktivitäten zu thermochemischen Speichern stehen geeignete Reaktordesigns. Hier soll die thermische Leistung optimiert und gleichzeitig eventuell notwendige Hilfsenergien (wie Pumpen und Gebläse) minimiert werden [62], [63], [64].

In den Niederlanden wird ein Adsorptionsreaktor mit Zeolith zur saisonalen Speicherung solarthermischer Wärme entwickelt. Für einen optimalen Wärme- und Stoffaustausch wurden Zeolithpellets direkt auf Kupferrohre geklebt. Dieser Ansatz soll kostengünstig und einfach zu realisieren sein [65].



■ **Abb. 114:** Wärmeübertrager mit Graphitmatrix und Natriumacetat als Phasenwechselmaterial.

Vor allem in geschlossenen, luftfreien Systemen ist der Stoff- und Wärmeaustausch problematisch und muss durch geeignete konstruktive Maßnahmen verbessert werden [66]. Auch hier wird daran gearbeitet die verschiedenen thermochemischen Speicher zu modellieren, um konkrete Einsatzpotenziale voraussagen zu können.

## Speicheranwendungen

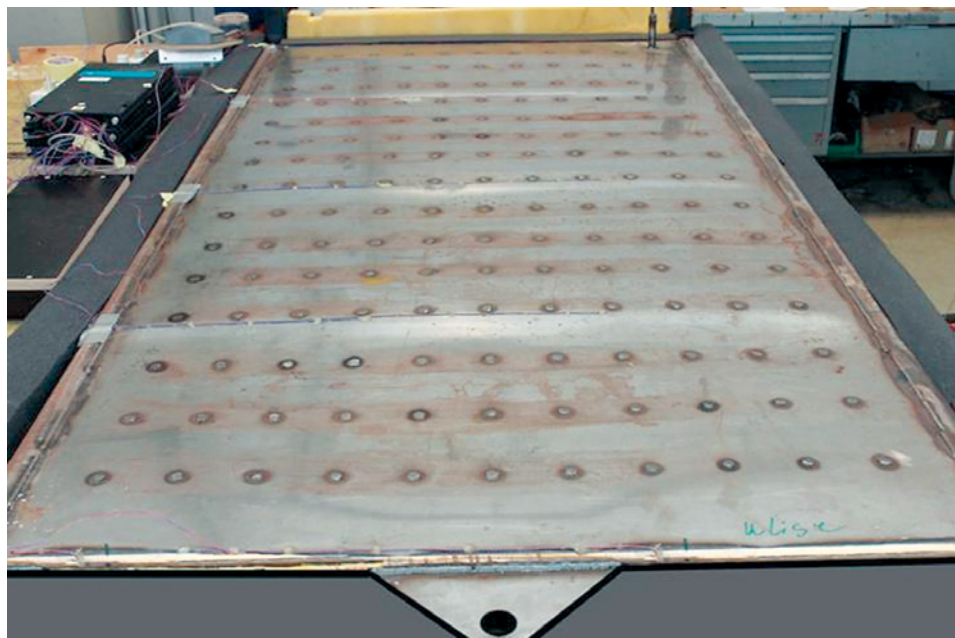
Praktisch alle möglichen Anwendungsbereiche thermischer Energiespeicher wurden und werden untersucht. Man kann die meisten Anwendungen in zwei Kategorien unterteilen: Steigerung der Energieeffizienz und Integration erneuerbarer Energien.

Bei der Integration erneuerbarer Energien steht die Nutzung der Solarthermie sicher an der Spitze der Forschungsthemen. Dabei spielt die Nutzung solarer Wärme für den Gebäudebereich die Hauptrolle. Die schwierigste Aufgabe, nämlich die saisonale Speicherung solarer Wärme, sei es durch sensible, latente oder thermochemische Speichersysteme, wird dabei momentan von zahlreichen Forschungsinstitutionen bearbeitet [20], [21], [67], [68] [69].

An der DTU (Danish Technical University) wird an einem latenten Langzeitspeicher geforscht, der die Schmelzwärme im unterkühlten Zustand bis zur aktiven Auslösung der Kristallisation (durch punktuelle Abkühlung mit einem Peltier-Element) aufbewahren soll. Ein Bild der Speichereinheit mit integriertem Wärmeübertrager zeigt Abbildung 115 [67].

Aber auch im Bereich der solarthermischen Kraftwerke können Speicher den entscheidenden Vorteil vor photovoltaischen Kraftwerken bieten. Die dafür nötigen Hochtemperatur-Speicher basieren auch auf sensiblen, latenten und thermochemischen Speichersystemen [70].

Zur Steigerung der Energieeffizienz wird vor allem die Nutzung industrieller Abwärme als aussichtsreiches Anwendungsgebiet betrachtet. Stationäre Systeme (sensibel oder latent) werden



■ **Abb. 115:** Einheit zur Langzeitspeicherung (mit Natriumacetat gefüllt)





■ **Abb. 116:** Mobiler Sorptionsspeicher an der Ladestation

zur Nutzung der Abwärme von Batchprozessen untersucht. Momentan laufen Forschungsvorhaben zu mobilen Speichersystemen – latent und thermochemisch –, die Abwärme zu anderen Verbrauchern (z. T. zur Gebäudeheizung oder anderen Industrieprozessen) transportieren können [71]. Abbildung 116 zeigt den mobilen Adsorptionsspeicher mit Zeolith an der Ladestation der Müllverbrennungsanlage [72].

In Deutschland etabliert sich in letzter Zeit unter dem Zeichen der Energiewende und dem damit dramatisch ansteigenden Anteil erneuerbaren Stroms ein weiteres Anwendungsfeld, bei dem thermische Energiespeicher zum Lastausgleich in elektrischen Netzen eingesetzt werden. Dabei wird Strom aus Photovoltaik oder Windrädern zu Peak-Zeiten mit hoher Effizienz in Wärme oder Kälte umgewandelt, gespeichert und in Zeiten niedriger Verfügbarkeit an erneuerbarem Strom zur Deckung des Wärme- und Kältebedarfs wieder zur Verfügung gestellt. Es ist zu beachten, dass diese Anwendung kein klassischer Energiespeicher ist, bei dem die gleiche Energieform geladen und entladen wird. Hierbei wird tatsächlich Elektrizität in thermische Energie umgewandelt und auch beim Entladen keine elektrische sondern nur thermische Energie wieder bereitgestellt.

---

## 7 Nachwort

### 7.1 Mit thermischen Energiespeichern ist es wie mit Handschuhen ...

... sie müssen passen!

In diesem Buch wurden die Möglichkeiten der Speicherung thermischer Energie aufgeführt. All diese Möglichkeiten mit ihren sehr verschiedenen Eigenschaften müssen zu der tatsächlichen Anwendung, in der der Speicher zum Einsatz kommen soll, passen. Dann und nur dann können sich thermische Energiespeicher auf dem Markt behaupten.

Die Eigenschaften thermischer Energiespeicher, wie sie in den Kapiteln 2.3 bis 2.6 diskutiert wurden, hängen sehr stark von den Bedingungen ab, die die Anwendung bestimmt. Die Speicherkapazität wird durch die zur Verfügung stehende Ladetemperatur und die vom Energiesystem geforderte Entladetemperatur bestimmt. Diese beiden von der Anwendung vorgegebenen Temperaturen beeinflussen auch die erreichbare Lade- und Entladeleistung eines Speichers. Der Nutzungsgrad eines sensiblen Speichers oder eines Speichers mit Phasen-Wechsel-Materialien nimmt mit steigender Speicherdauer aufgrund der thermischen Verluste ab. Die Dauer wird durch die Anwendung festgelegt. Bei thermochemischen Speichern hängt der Nutzungsgrad zwar nicht von der Dauer der Speicherung, wohl aber von den Umgebungsbedingungen beim Laden und Entladen ab. Auch die sind durch eine konkrete Anwendung gesetzt.

Damit ist es nicht möglich, thermische Energiespeichertechnologien zu vergleichen, ohne sich auf eine spezielle Anwendung zu beziehen. Der Satz »Latentwärmespeicher sind besser als sensible Wärmespeicher« ist falsch. Es gibt Anwendungsfälle, da sind Latentwärmespeicher besser, aber es gibt auch Fälle in denen sensible Wärmespeicher überlegen sind. Es kommt eben darauf an ...

Besonders deutlich tritt diese Besonderheit thermischer Energiespeicher bei der Materialforschung zu Tage. Es ist nicht korrekt, eine bestimmte Speicherkapazität – Energie pro Masse oder Volumen, die in einem Speicher gespeichert wird – einem bestimmten Speichermaterial zuzuordnen: Speicherkapazität ist keine Materialeigenschaft. Damit kann man nicht sagen: »Das Paraffin Oktadekan hat eine Speicherkapazität von 300 kJ/kg und ist damit besser als Calciumchlorid Hexahydrat«. Für einen solchen Vergleich sind bereits viele Angaben, die durch die Anwendung festgelegt werden notwendig, wie z. B. die Temperaturen, die im PCM erreicht werden. Diese hängen allerdings wiederum vom Speicherdesign, anderen Stoffeigenschaften, wie der Wärmeleitfähigkeit und den in der Anwendung angelegten Temperaturen ab. Vergleichen können wir z. B. die Schmelzenthalpien (bei Oktadekan 245 kJ/kg und bei Calciumchlorid Hexahydrat 171 kJ/kg), da sie Materialeigenschaften sind. Allerdings lässt sich aus diesem Wert noch nicht ablesen, welches PCM in der Anwendung besser ist.

Wärme wird nicht nur über den Phasenwechsel gespeichert sondern zusätzlich durch die sensible Erwärmung. Diese wiederum wird von der Anwendung und den vorgegebenen Temperaturen bestimmt.

Neben den Speichereigenschaften hängt auch die Wirtschaftlichkeit von der Anwendung ab. In Kapitel 3.2. wurde bereits der Zusammenhang zwischen möglichen Investitionskosten und der Anzahl der Speicherzyklen pro Zeit erläutert. Einfluss auf die Amortisation eines thermi-

schen Energiespeichers hat auch der »Wert« der thermischen Energie, die er zur Verfügung stellt. So ist Kälte allgemein »wertvoller« als Heizwärme oder Wärme bei sehr hohen Temperaturen (z. B. bei solarthermischen Kraftwerken) deutlich teurer als Wärme zur Brauchwassererwärmung. Hier korreliert der Preis mit dem Exergiegehalt. Interessant können auch thermochemische Speichersysteme sein, wenn sie z. B. sowohl Wärme als auch Klimatisierung zur Verfügung stellen [11], womit sie letzten Endes die Zyklenzahl pro Jahr erhöhen.

Wirtschaftlich interessant können auch Speichersysteme sein, die sich eher auf einen »Zusatznutzen«, als auf die Energiespeicherung konzentrieren. Ein interessantes Beispiel dafür wäre das »selbst-kühlende Bierfass« [73]. Dabei handelt es sich um einen geschlossenen Adsorptionsspeicher, der in ein Bierfass integriert ist. Das Bier wird zusammen mit dem desorbierten Zeolith, also in geladenem Zustand, ausgeliefert. Bei Bedarf wird der Speicher entladen. Gemäß der Beschreibung in Kapitel 4.2.3 wird dabei im Verdampfer Wärme benötigt. Diese wird nun dem Bier entzogen, welches auf diese Weise gekühlt wird. Energetisch ist das System unsinnig, aber der Komfort, überall und zu jeder Zeit gekühltes Bier trinken zu können, macht es wirtschaftlich interessant.

Wie in diesem Buch gezeigt gibt es eine große Vielfalt an thermischen Energiespeichern. Es gibt kleine Speicher, wie den Zeolith-Speicher im Geschirrspüler (siehe Kapitel 5.3.3) mit einem Volumen von ca.  $0,001 \text{ m}^3$ , und es gibt große Speicher, wie den saisonalen Warmwasserspeicher am Ackermannbogen in München mit seinen  $6000 \text{ m}^3$  (siehe Kapitel 5.1.1). Speicher können kleine Wärmemengen von wenigen Wh aufnehmen, wie zum Beispiel ein PCM-Speicher zur Kühlung eines Laptops, oder sehr große, wie der Wärmespeicher im Untergrund des Deutschen Bundestages, der eine Speicherkapazität von mehreren GWh besitzt. Thermische Energiespeicher können Wärme oder Kälte über wenige Stunden, wie ein Pufferspeicher für eine solarthermische Warmwasseranlage, bis zu einem Jahr bei der saisonalen Speicherung (siehe Kapitel 5.1.1), speichern.

Mit dieser großen Variation an Eigenschaften besteht die Hoffnung, dass jede Anwendung ihren passenden Speicher findet.

## 7.2 Thermische Energiespeicher können die Welt retten ...

..., aber vielleicht nicht alleine!

Zunächst sieht es ja nicht gut aus: Installiert man einen Speicher in einem Energiesystem, wird man im Allgemeinen zunächst die Gesamteffizienz verschlechtern, da der Speicher in der Regel einen Nutzungsgrad unter 100 % hat. Dazu kommt noch, dass ein Energiespeicher Geld kostet. Er muss also Vorteile bieten, die diese beiden Punkte überwiegen. Und diese Vorteile haben Energiespeicher!

In jedem Energieszenario der Zukunft spielen erneuerbare Energien und Energieeffizienz eine große Rolle. Die Integration Erneuerbarer Energiequellen in unser Energiesystem und die Steigerung der Energieeffizienz sind ohne Energiespeicher nicht umsetzbar. Die globalen Szenarien der Internationalen Energieagentur setzen auf die Steigerung der Energieeffizienz und die Nutzung erneuerbarer Energiequellen um die globale Temperaturerhöhung auf 2 K zu begrenzen.

Auch national wird der Entwicklung von innovativen Energiespeichertechnologien aller höchste Priorität eingeräumt. In einer gemeinsamen Förderbekanntmachung haben das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und das Bundesministerium für Bildung und Forschung im Sommer 2011 das Thema Energiespeicher in den Fokus der Energieforschung gerückt.

Wir hoffen, dieses Buch kann seine Leser davon überzeugen, dass Energiespeicherung – hier im Besonderen die Speicherung thermischer Energie – ein spannendes Forschungsgebiet darstellt. Vielleicht können wir ja mit dem einen oder anderen unserer Leser in Zukunft als Kollegen zusammenarbeiten?



## 8 Zitierte Literatur und Abbildungsverzeichnis

### 8.1 Zitierte Literatur

- [1] Baehr, H. D.; Kabelac, S.: Thermodynamik. Grundlagen und technische Anwendungen. Berlin: Springer, 2006. 13. neu bearb. und erw. Aufl., ISBN 978-3-540-32513-0
- [2] Hauer, A.; Specht, M.; Sterner, M.: Energiespeicher. Steigerung der Energieeffizienz und Integration erneuerbarer Energien. In: ForschungsVerbund Erneuerbare Energien (FVEE), Berlin (Hrsg.): Forschung für das Zeitalter der erneuerbaren Energien. Jubiläumstagung des FVEE, 11.–12. Oktober 2010. 148 S., Tagungsband
- [3] Hauer, A.; Quinnell, J.; Lävemann, E.: Energy Storage Technologies. Characteristics, Comparison and Synergies. In: Stolten, D.; Scherer, V. (Hrsg.): Transition to Renewable Energy Systems. Weinheim: Wiley-VCH, 2013. 800 S., ISBN 978-3-527-33239-7
- [4] Electricity Storage Association, aufgerufen Oktober 2012, <http://www.electricitystorage.org/>
- [5] Deane, J. P.; Gallachoir, B.; McKeogh, E. J.: Techno-economic review of existing and new pumped hydro energy plant. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 14 (2010), no. 4, p. 1293–1302.
- [6] University of Arizona. The Arizona Research Institute for Solar Energy (AzRISE), Tucson (Hrsg.): Study of Compressed Air Energy Storage with Grid and Photovoltaic Energy Generation. August 2010.
- [7] Hauer, A.: Thermal Energy Storage. In: International Energy Agency (IEA), Paris (Hrsg.); International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi (Hrsg.): IEA-ETSAP and IRENA © Technology Policy Brief E17. (2012), E 17.
- [8] Specht, M.; Hauer, A.; Sterner, M.: Energiespeicher als Schlüsselemente im künftigen Energiesystem. In: Institut für Wissenschaftliche Veröffentlichungen (IWV), Lampertheim (Hrsg.): Energietechnologie Aktuell. Mai 2012
- [9] Tammé, R.: Solarstrom und Solarthermische Prozesse – Technologien zur Speicherung. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Institut für Technische Thermodynamik, Stuttgart (Hrsg.): Vortrag von der DECHEMA Jahrestagung 2010, 21.–23. Sept. 2010, Aachen
- [10] Sizmann, R.: Speicherung thermischer Energie. Eine Übersicht. In: BMFT Statusseminar: Thermische Energiespeicherung. Berichtsband. Stuttgart, 1989
- [11] Hauer, A.: Thermal Energy Storage with Zeolite for Heating and Cooling. In: Proceedings of the 7th International Sorption Heat Pump Conference ISHPC '02, Shanghai, China, 24.–27. September 2002
- [12] Curzon, F. L.; Ahlborn, B.: Efficiency of a Carnot Engine at Maximum Power Output. In: American Journal of Physics. Vol. 43 (1975), p. 22–24
- [13] Atkins, P. W.; Trapp, C. H.; De Paula, J.: Physikalische Chemie. Weinheim: Wiley-VCH, 2007. 4., vollst. überarb. Aufl., ISBN 978-3-527-31546-8, Tab. 2–7
- [14] Holleman, A. F.; Wiberg, E.; Wiberg, N.: Lehrbuch der Anorganischen Chemie. Berlin, New York: de Gruyter, 1995. 101., verb. und stark erw. Aufl., ISBN 3-11-012641-9, S. 1170
- [15] Ohle, A.: CO<sub>2</sub>-Abtrennung aus Gasströmen durch Absorption in Poly(methylidiglykol)amin. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2009. S. 47
- [16] Ochs, F.; Heidemann, W.; Müller-Steinhagen, H.: Langzeit-Wärmespeicher für solar unterstützte Nahwärmesysteme. In: 2. Internationale Speicherkonferenz Erneuerbare Energien – IRES II. Tagungsband. Bonn, 2007  
<http://www.itw.uni-stuttgart.de/abteilungen/rationelleEnergie/pdfdateien/07-09.pdf> (zuletzt abgerufen: 10.7.2013)

- [17] Kehrer, M.; Künzel, H. M.; Sedlbauer, K.: Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen. In: IBP-Mitteilungen. Jg. 28 (2001), Nr. 390  
[http://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/de/documents/ibp5\\_tcm45-29361.pdf](http://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/de/documents/ibp5_tcm45-29361.pdf) (zuletzt abgerufen: 10.7.2013)
- [18] Ochs, F.; Stumpp, H.; Mangold, D. [u. a.]: Bestimmung der feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen. 14. Symposium Thermische Solarenergie. Tagungsband. OTTI e.V., Regensburg, 2004  
<http://www.itw.uni-stuttgart.de/abteilungen/rationelleEnergie/pdfdateien/04-08.pdf> (zuletzt abgerufen: 10.7.2013)
- [19] Augsten, E.: Solarthermie – Speicherdämmung: Warm einpacken. In: Sonne Wind und Wärme. (2012), H. 6, S. 54 ff.
- [20] Mangold, D.; Miedaner, O.; Tziggili, E. P. [u. a.]: Technisch-wirtschaftliche Analyse und Weiterentwicklung der solaren Langzeit-Wärmespeicherung. Forschungsbericht zum BMU-Vorhaben. 2012, FKZ 0329607N
- [21] Dallmayer, W.; Kuckelkorn, J.; Radspieler, M. [u. a.]: Begleitforschung Solare Nahwärme Am Ackermannbogen in München – SNAB. Forschungsbericht. 2010, FKZ 0329607G
- [22] Beuth, W.; Reuß, M.; Schmidt, M. [u. a.]: Solare Nahwärmeversorgung Attenkirchen. Forschungsbericht. 2006, FKZ 0329607D
- [23] Beikircher, T.; Buttinger, F.; Demharter, M. [u. a.]: Superisolierter Heißwasser-Langzeitwärmespeicher. Forschungsbericht. 2013, FKZ 0325964A
- [24] Weinläder, H.: PCM-Demoprojekt : Entwicklung und praxisnaher Test der Performance von Gebäudekomponenten mit PCM in Demonstrationsobjekten. Abschlussbericht. 2011, FKZ 0327370U
- [25] MacPhee, D.; Dincer, I.: Performance assessment of some ice TES systems. In: International Journal of Thermal Sciences. Vol. 48 (2009), no. 12, p. 2288–2299
- [26] Hauer, A.; Fischer, F.: Open Adsorption System for an Energy Efficient Dishwasher. In: Chemie Ingenieur Technik. Jg. 82 (2011), H. 1–2
- [27] Hauer, A.: Beurteilung fester Adsorbentien in offenen Sorptionssystemen für energetische Anwendungen. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2002
- [28] Reuß, M.; Koenigsdorff, R.; Zorn, R.: Qualitätssicherung bei Erdwärmesonden und Erdreichkollektoren. Abschlussbericht. 2012, FKZ 0327453A
- [29] Reuß, M.; Pröll, M.; Koenigsdorff, R.: Qualitätssicherung bei Erdwärmesonden zum Heizen und Kühlen. In: Statusseminar EnOB 2009: Forschung für energieoptimiertes Bauen. Würzburg, 2009
- [30] Py, X.; Calvet, N.; Olivès, R.: Thermal storage for solar power plants based on low cost recycled material. In: EFFSTOCK, the 11th International Conference on Thermal Energy Storage, June 14–17. Proceedings. Stockholm, 2009
- [31] Tamme, R.; Laing, D.; Steinmann, W. D.: Advanced Thermal Energy Storage Technology for Parabolic Trough. In: Proceedings of the 2003 International Solar Energy Conference, Hawaii, 15–18 March. 2003
- [32] Py, X.; Calvet, N.; Olivès, R. [u. a.]: A. Meffre, Recycled material for sensible heat based thermal energy storage to be used in concentrated solarthermal powerplants. In: Journal of Solar Energy Engineering. Vol. 133 (2011), no. 3, 031008
- [33] Laing, D.; Tamme, R.; Wörner, A. [u. a.]: Thermische Energiespeicher – Neueste Entwicklungen und Anwendungen. In: Themenheft der FVEE-Jahrestagung: Zusammenarbeit von Forschung und Wirtschaft für erneuerbare Energien und Energieeffizienz. Berlin, 2012
- [34] Paksoy, H.: Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption. Fundamentals, Case Studies and Design. Berlin: Springer Netherland, 2007. ISBN 978-1-402-05288-0
- [35] Zalba, B.; Marin, J. M.; Cabeza, L. F. [u. a.]: Review on thermal energy storage with phase change materials, heat transfer analysis and applications. In: Applied Thermal Engineering. Vol. 23 (2003), no. 3, p. 251–283

- [36] Acem, Z.; Lopez, J.; Del Barrio, E. P.: KNO<sub>3</sub>/NaNO<sub>3</sub> – Graphite materials for thermal energy storage at high temperature: Part I. Elaboration methods and thermal properties. In: *Applied Thermal Engineering*. Vol. 30 (2010), no. 13, p. 1580–1585
- [37] Gschwander, S.; Schossig, P.: Phase Change Slurries as heat storage material for cooling applications. In: *Ecstock – 10th International Conference on Thermal Energy Storage*. 2006
- [38] Bauer, T.; Laing, D.; Kröner, U. [u. a.]: Sodium Nitrate for high temperature latent heat storage. In: *EFFSTOCK, the 11th International Conference on Thermal Energy Storage*, June 14–17. Stockholm, 2009
- [39] Günther, E.; Mehling, H.; Hiebler, S.: Modeling of subcooling and solidification of phase change materials. In: *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. Vol. 15 (2007), no. 8, p. 879–892
- [40] Alkan, C.; Günther, E.; Himpel, M. [u. a.]: Complexing blends of polyacrylic acid-polyethylene glycol and poly(ethylene-co-acrylic acid)-polyethylene glycol as shape stabilized phase change materials. In: *Energy Conversion and Management Journal*. Vol. 64 (2012), p. 364–370
- [41] Entwicklung neuartiger PCM, formstabiler PCM und PCM-Verbundmaterialien mit verbesserter Wärmeleitfähigkeit (ENFoVerM). Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung (ZAE Bayern) e. V., (2009–2013), FKZ 0327851D. Abschlussbericht noch nicht veröffentlicht.
- [42] Whitman, C. A.; Johnson, M. B.; White, M. A.: Characterization of thermal performance of a solid-solid phase change material, di-n-hexylammonium bromide, for potential integration in building materials. In: *Thermochimica Acta*. Vol. 531 (2012), p. 54–59
- [43] Schumann, K.; Brandt, A.; Unger, B. [u. a.]: Bindemittelfreie zeolithische Molekularsiebe der Typen LTA und FAU. In: *Chemie Ingenieur Technik*. Vol. 83 (2011), no. 12, p. 2237–2243
- [44] Henninger, S.; Schmidt, F.; Henning, H.-M.: Water adsorption characteristics of novel materials for heat transformation applications. In: *Applied Thermal Engineering*. Vol. 30 (2010), no. 13, p. 1692–1702
- [45] Jänchen, J.; Ackermann, D.; Weiler, E. [u. a.]: Calorimetric investigation on zeolites, AlPO<sub>4</sub>'s and CaCl<sub>2</sub> impregnated attapulgit for thermochemical storage of heat. In: *Thermochimica Acta*. Vol. 434 (2005), no. 1–2, p. 37–41
- [46] Henninger, S. K.; Schmidt, F. P.; Henning, H. M. [u. a.]: Characterisation and improvement of sorption materials with molecular modeling for the use in heat transformation applications. In: *Adsorption*. Vol. 17 (2011), no. 5, p. 833–843
- [47] van Essen, V. M.; Zondag, H. A.; Gores, J. C. [u. a.]: Characterization of MgSO<sub>4</sub> Hydrate for Thermochemical Seasonal Heat Storage. In: *Journal of Solar Energy Engineering*. Vol. 131 (2009), no. 4, p. 041014 1–7
- [48] Kato, Y.; Takahashi, R.; Sekiguchi, T. [u. a.]: Study on medium-temperature chemical heat storage using mixed hydroxides. In: *International Journal of Refrigeration*. Vol. 32 (2009), no. 4, p. 661–666
- [49] Gordeeva, L. G.; Aristov, Y. I.: Composites ›salt inside porous matrix‹ for adsorption heat transformation: a current state-of-the-art and new trends. In: *International Journal of Low-Carbon Technologies*. (2012), no. 0, p. 1–15
- [50] Storch, G.: Stabilität von Zeolithen in Wärmespeicheranwendungen. Dissertation, Technische Universität München, 2010
- [51] International Energy Agency (IEA). Solar Heating and Cooling programme (SHC). Task 42: <http://task42.iea-shc.org/>
- [52] Ristic, A.; Zabukovec Logar, N.; Henninger, S. K. [u. a.]: The Performance of Small-Pore Microporous Aluminophosphates in Low-Temperature Solar Energy Storage: The Structure-Property Relationship. In: *Advanced Functional Materials*. Vol. 22 (2012), no. 9, p. 1952–1957



- [53] Göppert, S.; Lohse, R.; Urbaneck, T. [u. a.]: Weiterentwicklung und Optimierung von Be- und Entladesystemen für Tank- und Erdbeckenspeicher. Solarthermie 2000plus. Forschungsbericht. 2009, FKZ 0329271A
- [54] Beikircher, T.; Buttinger, F.; Demharter, M. [u. a.]: Superisolierter Heißwasser-Langzeitwärmespeicher. Forschungsbericht zum BMU-Vorhaben. 2013, FKZ 0325964A
- [55] Verfahren/System zur Speicherung von Wärme oder Kälte in einem Speicherverbundmaterial, ein derartiges Speicherverbundmaterial und ein Verfahren zur Herstellung eines derartigen Speicherverbundmaterials. Patent EP 0 914 399 B1 (Anmeldung 2007). Patentinhaber: Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung (ZAE Bayern) e. V., Garching
- [56] Schmitt, R.; Öttinger, O.; Steinmann, W. D. [u. a.]: PCM-Graphite Latent Heat Storage Systems for Industrial Process Heat Recovery. In: *Advances in Science and Technology*. Vol. 74 (2010), p. 259–265
- [57] Öttinger O.: @SIGRA $\lambda$  PCM/Graphitverbund-Produkte für Hochleistungswärmespeicher. Vortrag vom ZAE Symposium, 4.–5.03.2004, München  
Vortragsfolien unter: <http://zae.uni-wuerzburg.de/files/04-oettinger.pdf> (zuletzt abgerufen: 10.7.2013)
- [58] Haussmann, T.; Schossig, P.: Baustoffe mit Phasenwechselmaterialien als Kältespeicher für energieeffiziente Gebäude. In: Forschungszentrum Jülich GmbH. Projektträger Jülich (PTJ) (Hrsg.); Fraunhofer Solar Building Innovation Center (SOBIC), Freiburg (Hrsg.): Statusseminar Thermische Energiespeicherung. 2.–3.11.2006. Block 3 – Latentspeicher. S. 171–179
- [59] Tamme, R.: Phase-Change Storage Systems. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Institut für Technische Thermodynamik, Stuttgart (Hrsg.): Vortrag vom Workshop on Thermal Storage Through Power Systems, USA, 2003
- [60] Dimaczek, G.: Mobiler Wärmespeicher zur Abwärmenutzung. ATZ Entwicklungszentrum, Sulzbach-Rosenberg (Hrsg.): Vortrag vom Wissenschaftstag Metropolregion Nürnberg, 2006
- [61] Rösler, F.; Brüggemann, D.: Numerical model of macroscopic latent heat thermal energy storage capsules. In: Innostock 2012. The 12th International conference on energy storage, Lleida, Spain, May 16th–18th. Proceedings. 2012, 497 S., ISBN 978-84-938793-3-4
- [62] Krönauer, A.; Lävemann, E.; Hauer, A.: Mobile Sorption Heat Storage in Industrial Waste Heat Recovery. In: Innostock 2012. The 12th International conference on energy storage, Lleida, Spain, May 16th–18th. Proceedings. 2012, 497 S., ISBN 978-84-938793-3-4
- [63] van Beek, T. J. J.; Rindt, C. C. M.; Zondag, H. A.: Performance analysis of an atmospheric packed bed thermo-chemical heat storage system. In: Innostock 2012. The 12th International conference on energy storage, Lleida, Spain, May 16th–18th. Proceedings. 2012, 497 S., ISBN 978-84-938793-3-4
- [64] Kerskes, H.; Mette, B.; Bertsch, F. [u. a.]: Chemical energy storage using reversible solid/gas-reactions (CWS) – results of the research project. In: *Energy Procedia*. Vol. 30 (2012), p. 294–304
- [65] Cuypers, R.; Maraz, N.; Eversdijk, J. [u. a.]: Development of a Seasonal Thermochemical Storage System. In: *Energy Procedia*, Vol. 30 (2012), pp. 207–214 (1st International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry 2012, San Francisco, USA, 9–11 July 2012)
- [66] Lass-Seyoum, A.; Blicher, M.; Borozdenko, D. [u. a.]: Transfer of Laboratory Results on Closed Sorption Thermo-Chemical Energy Storage to a Large-Scale Technical System. In: *Energy Procedia*. Vol. 30 (2012), p. 310–320
- [67] Furbo, S.; Andersen, E.; Chen, Z. [u. a.]: Development of a Seasonal Heat Storage based on Stable Supercooling of a Sodium Acetate Water Mixture. In: *Energy Procedia*. Vol. 30 (2012), p. 260–269
- [68] Kerskes, H.; Sommer, K.; Müller-Steinhagen, H.: MonoSorp – Ein integrales Konzept zur solarthermischen Gebäudeheizung mit Sorptionswärmespeicher. In: Tagungsband 18. Symposium Thermische Solarenergie. Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e. V. (OTTI), Regensburg, 2008. ISBN 978-3-934681-69-9, S. 55–59
- [69] Ferchaud, C.; Zondag, H. A.; de Boer, R. [u. a.]: Characterization of the sorption process in thermo-chemical materials for seasonal solar heat storage application. In: Innostock 2012. The 12th Interna-

- tional conference on energy storage, Lleida, Spain, May 16th–18th. Proceedings. 2012, 497 S., ISBN 978-84-938793-3-4
- [70] Pitz-Paal, R.: Solarthermische Kraftwerke – Integration von Strom und Brennstoffen in ein europäisches Verbundnetz. In: FVEE Themen. (2010), Nr. 2, S. 82–86  
[http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2010-2/th2010\\_11\\_06.pdf](http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2010-2/th2010_11_06.pdf) (zuletzt abgerufen: 10.7.2013)
- [71] Froese, F.: La therm's heat transport system. Poster 7. Internationale Konferenz und Ausstellung zur Speicherung Erneuerbarer Energien (IRES 2012), 12.–14. November 2012. Berlin
- [72] Laing, D.; Hauer, A.: Thermal Energy Storage for Energy Efficiency in the Industry: Examples of Applications in the Field. In: ENERGY STORAGE, International Summit for the Storage of Renewable Energies. Düsseldorf, 2013
- [73] Herstellerangaben der Firma Zeo-Tech GmbH: Das Selbstkühlende Bierfass »CoolKeg«. <http://www.zeo-tech.de/index.php/entwicklungen/mobile-kuehlung/selbstkuehlendes-bierfass-coolkeg> (zuletzt abgerufen: 10.7.2013)

## 8.2 Abbildungsverzeichnis

Alle hier nicht aufgeführten Abbildungen stammen von den Autoren oder vom ZAE Bayern. Die Zahlen verweisen auf die in Kap. 8.1 zitierten Literaturangaben.

- Abb. 1 Von Mazbln (Eigenes Werk) [CC BY-SA 3.0], via Wikimedia Commons
- Abb. 8 Heimathaus-Stadtmuseum Perg, Österreich
- Abb. 10 Nach [9]
- Abb. 26 Nach: VDI 4640 Blatt 1. 2010-06 Thermische Nutzung des Untergrunds – Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte. Berlin: Beuth-Verlag, 2010. S. 10
- Abb. 47 a) Knauf Insulation GmbH  
 b) Brillux GmbH & Co. KG  
 c) Vmadeira (Eigenes Werk) [CC BY-SA 3.0], via Wikimedia Commons  
 d) FK1954 (Eigenes Werk) [Public domain], via Wikimedia Commons
- Abb. 52 Grafik rechts: ITW, Universität Stuttgart
- Abb. 76 Siehe [25], Copyright © 2009 Published by Elsevier Masson SAS. All rights reserved.
- Abb. 77 College of Engineering, University of Wisconsin
- Abb. 78 IceSynergy, Inc.
- Abb. 79–80 Cofely Kältetechnik GmbH
- Abb. 81–83 IDE Technologies
- Abb. 110 Siehe [33]
- Abb. 111 Siehe [46]
- Abb. 113 Siehe [52]
- Abb. 115 Siehe [67]
- Abb. 116 Siehe [72]



## 9 Forschungsvorhaben der Bundesregierung

Im Folgenden wird eine Auswahl von Forschungsvorhaben zum Thema Wärmespeicher vorgestellt, die vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) oder Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert werden.

Einen umfassenden Überblick über die Projekte der Energieforschung bieten die Datenbanken »Forschungsjahrbuch Erneuerbare Energien« [www.forschungsjahrbuch.de](http://www.forschungsjahrbuch.de) und »Förderkatalog« [www.foerderkatalog.de](http://www.foerderkatalog.de).

Die Sortierung der Projekte erfolgt nach dem Förderkennzeichen (FKZ).

### 9.1 Laufende und kürzlich abgeschlossene Forschungsvorhaben

**KMU-innovativ – Verbundvorhaben Klimaschutz: Hochleistungs-Latentwärmespeicher mit Metallfaser-Wärmeleitstrukturen – Entwicklung optimierter Metallfaser-PCM-Strukturen und deren Implementierung in Basis-Speichereinheiten.**

Teilvorhaben 1.

Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM), Dresden

FKZ **01LY1019A**, Laufzeit 01.11.2010–31.12.2012

Teilvorhaben 2: Entwicklung optimierter PCM für den Einsatz in Metallfaserstrukturen.

Rubitherm Technologies GmbH, Berlin

FKZ **01LY1019B**, Laufzeit 01.11.2010–31.12.2012

Teilvorhaben 3.

WätaS Wärmetauscher Sachsen GmbH, Abteilung Forschung und Entwicklung, Pobershau

FKZ **01LY1019C**, Laufzeit 01.11.2010–31.12.2012

**Verbundprojekt: Solarthermie2000plus: Hochtemperaturbeständige Dämmstoffe für Wärmespeicher in solarthermischen Anlagen (KES-HDST).**

BASF SE, Abt. GKT, Ludwigshafen am Rhein

FKZ **0325950B**, Laufzeit 01.01.2009–31.12.2011

**Superisolierter Heißwasser-Langzeitwärmespeicher.**

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern), Abt. 1 – Technik für Energiesysteme und Erneuerbare Energien, Garching

FKZ **0325964A**, Laufzeit 01.05.2010–31.10.2012

**Gesamtbetrachtung zu solaren saisonalen Wärmespeichern und mögliche multifunktionale Nutzungen.**

Solites Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme, Stuttgart

FKZ **0325976A**, Laufzeit 01.06.2011–30.11.2012

**Entwicklung eines thermochemischen Wärmespeichers für die Verbesserung der Energieeffizienz in einem Blockheizkraftwerk.**

ERK Eckrohrkessel GmbH, Berlin

FKZ **0327439B**, Laufzeit 01.07.2009–28.02.2013

**Verbundvorhaben chemische Wärmespeicherung mittels reversibler Feststoff-Gasreaktionen.**

Teilvorhaben: Verfahrenstechnik und Prozessentwicklung für Hochtemperaturreaktionen.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Technische Thermodynamik, Stuttgart

FKZ **0327468A**, Laufzeit 01.06.2008–30.06.2012

Teilvorhaben: Verfahrenstechnik und Prozessentwicklung für Niedertemperaturreaktionen.

Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik

FKZ **0327468B**, Laufzeit 01.06.2008–30.06.2012

**Energieoptimiertes Bauen, Verbundvorhaben PCM Zentral: Entwicklung und Demonstration eines Erdregisters mit Latentwärmespeicher.**

Teilprojekt: Monitoring und Systemoptimierung.

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg im Breisgau

FKZ **0327842A**, Laufzeit 01.02.2009–31.12.2013

Teilprojekt: Speicherkonzept und Betriebsüberwachung.

agn Niederberghaus & Partner GmbH, Ibbenbüren

FKZ **0327842B**, Laufzeit 01.02.2009–31.12.2013

Teilprojekt: Speicherentwicklung und Optimierung.

Emco Bau- und Klimatechnik GmbH & Co. KG, Lingen (Ems)

FKZ **0327842C**, 01.02.2009–31.12.2013

Teilprojekt: Speicher-Gebäudeintegration und Gebäudebetrieb.

Bau- und Liegenschaftsbetrieb des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf

FKZ **0327842D**, 01.02.2009–31.12.2013

**Verbundprojekt: NextSol: Neue Materialien zur exergieeffizienten Wärmespeicherung und -transformation für das solare Heizen und Kühlen.**

Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf – Lehrstuhl I: Bioanorganische Chemie und Katalyse

FKZ **0327851A**, Laufzeit 01.10.2009–30.04.2013

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg im Breisgau

FKZ **0327851B**, Laufzeit 01.07.2009–30.04.2013

ChemCon GmbH, Freiburg im Breisgau

FKZ **0327851C**, Laufzeit 01.11.2009–30.04.2013

**Flexibilisierung von Gas- und Dampfturbinenkraftwerken durch den Einsatz von Hochtemperatur-Wärmespeichern (FleGs).**

RWE Power Aktiengesellschaft, Forschung und Entwicklung, Neue Technologien, Essen

FKZ **0327882A**, 01.12.2009–31.12.2012

Hitachi Power Europe Service GmbH, Abteilung ASS, Duisburg

FKZ **0327882B**, Laufzeit 01.12.2009–31.12.2012

Paul Wurth Refractory & Engineering GmbH, Abteilung Winderhitzer, Wiesbaden

FKZ **0327882C**, Laufzeit 01.12.2009–31.12.2012

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Technische Thermodynamik, Stuttgart

FKZ **0327882D**, Laufzeit 01.12.2009–31.12.2012

**Verbundprojekt: Adiabate Druckluftspeicher für die Elektrizitätsversorgung (ADELE).**

Teilvorhaben: Druckbehälter des Hochtemperatur-Wärmespeichers

Ed. Züblin AG, Direktion Zentrale Technik, Stuttgart

FKZ **0327883C**, Laufzeit 01.12.2009–30.06.2013

**Komponenten- und Systementwicklung: Solares Heizen und Kühlen mit Absorptionskälteanlage und Latentwärmespeicher.**

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V. (ZAE Bayern), Abteilung 1 – Technik für Energiesysteme und Erneuerbare Energien, Garching

FKZ **0329605O**, Laufzeit 01.10.2009–30.09.2013

**Solarthermie2000plus: Technisch-wirtschaftliche Analyse und Weiterentwicklung der solaren Langzeit-Wärmespeicherung.**

Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme, Stuttgart

FKZ **0329607N**, Laufzeit 01.12.2007–28.02.2011

**Solarthermie2000plus: Wissenschaftlich technische Begleitung des Förderprogramms Solarthermie2000plus zu solar unterstützte Nahwärme und Langzeit-Wärmespeicherung.**

Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik

FKZ **0329607P**, Laufzeit 01.08.2008–30.09.2012

**Thermochemische Festphasen-Wärmespeicher mit optimierten Wärmeleiteigenschaften – SOLIDSTORE.**

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (UMSICHT), Oberhausen

FKZ **03EK3023**, Laufzeit 01.08.2012–31.07.2015

**Verbundvorhaben: Charakterisierung offenzelliger Metalle für energieeffiziente Technologien (COMET), Teilvorhaben: Metallische Schaum- und Faserstrukturen für Wärmeübertrager und Wärmespeicherung.**

WätaS Wärmetauscher Sachsen GmbH, Abteilung Forschung und Entwicklung, Pöbershau

FKZ **03ET1023B**, 01.06.2011–31.05.2014

**Verbundprojekt: Energieeffizientes Fahren 2014. 2. Projektphase (EFA2014/2). Teilvorhaben: Thermomanagement für Elektrofahrzeuge. Latentwärmespeicher.**

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V. (ZAE Bayern), Abteilung 1 – Technik für Energiesysteme und Erneuerbare Energien, Garching; FKZ **16N11950**, Laufzeit 01.04.2012–31.03.2014

**Umsetzung eines Nahwärmekonzeptes der Großen Kreisstadt Neuburg/Donau. Teilprojekt: Einsatz gruppenzentraler Wärmespeicher.**

Wärmeversorgung Neuburg GmbH, Neuburg a. d. Donau  
FKZ **3890122**, Laufzeit 31.01.2011–31.05.2015

## 9.2 Forschungsberichte

Bei den nachfolgend aufgeführten Forschungsberichten handelt es sich um eine Auswahl zum Thema Wärmespeicher.

Forschungsberichte aus dem naturwissenschaftlich-technischen Bereich werden zentral von der Technischen Informationsbibliothek (TIB) in Hannover gesammelt und können dort ausgeliehen werden.

In der Regel stehen die Forschungsberichte als pdf-Dokumente zum Download zur Verfügung. Sie können im OPAC der UB/TIB Hannover recherchiert werden: [www.tib.uni-hannover.de](http://www.tib.uni-hannover.de)

**Entwicklung eines neuartigen Speichersystems für Solaranlagen auf der Basis eines Latentwärmespeichermaterials. Schlussbericht.**

Forschungsinstitut für Chemie, Umwelt und Recycling, Freiberg  
2006. 86 S., FKZ **03I0312A**

**Netzwerk zur Überwindung grundlegender Probleme bei der Entwicklung hocheffizienter Latentwärmespeicher auf Basis anorganischer Speichermaterialien. LWSNet. Schlussbericht.**

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung (ZAE), Würzburg  
2008. 217 S., FKZ **03SF0307A-G**

**Sachbericht zum Leitprojekt Innovative PCM-Technologie im Themenfeld »Energieerzeugung und -speicherung für den dezentralen und mobilen Einsatz«.**

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung (ZAE), Garching  
2004. 21 S., FKZ **0327303A-N**

**Fachlicher Teil des gemeinsamen Abschlussberichtes des F/E-Themas: Innovative Wärmeübertragung und Wärmespeicherung. Das Forschungsthema ist Teil des Verbundvorhabens: »Heizen und Kühlen mit Niedrigexergie (LowEx)«.**

Clina Heiz- und Kühlelemente GmbH, Jöbnitz  
2008. 303 S., FKZ **0327370B-C**

**Aktive Latentspeichersysteme für Gebäude. Abschlussbericht zum Verbundforschungsvorhaben. Gemeinsamer Bericht aller Projektteilnehmer.**

BASF SE, Ludwigshafen  
2008. 122 S., FKZ **0327370G-K,S**

**Ummantelung von organischen und anorganischen Latentwärmespeichermaterialien (PCM-Ummantelung). Bericht des Projektes »PCM-Ummantelung«, durchgeführt im Rahmen des BMWi-Verbundvorhabens LowEx (Heizen und Kühlen mit Niedrigexergie).**

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung (ZAE), Würzburg  
2007. 9 S., FKZ **0327370L,M**

**Aktive Latentspeichersysteme für Gebäude – Messergebnisse aus den Demonstrationsvorhaben. Ergänzung zum gemeinsamen Abschlussbericht des Verbundforschungsvorhabens. Gemeinsamer Bericht der Projektteilnehmer Fraunhofer ISE und DAW.**

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg i. Br.  
2008. 39 S., FKZ **0327370G,J**

**Entwicklung eines Messverfahrens zur Bestimmung des thermischen Beladungsgrades von PCM-Paraffin-Speichern. Schlussbericht. Verbundprojekt Energie Optimierte Bauen (EnOB). Thematischer Verbund LowEx.**

Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Fakultät Mathematik, Naturwissenschaften und Informatik  
2008. 88 S., FKZ **0327370F**

**Entwicklung von Mikro-PCM-Emulsionen und ionischen Liquiden zur Wärme- und Kältespeicherung und Transport. Gemeinsamer Schlussbericht.**

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg i. Br.; Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (UMSICHT), Oberhausen; IoLiTec Ionic Liquids Technologies GmbH, Heilbronn; Rubitherm Technologies GmbH, Berlin

2007. 146 S., FKZ **0327384A-C**

**Rechnerunterstützte Entwicklung und Optimierung von Warmwasser-Wärmespeichern für solarthermische Anlagen. Forschungsbericht.**

Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)

2006. 131 S., FKZ **0329272A**

**Entwicklungslabor neue Phasenwechsel- und Sorptionsmaterialien für Wärmespeicherung und Wärmetransformation. Schlussbericht.**

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Abteilung Thermische Anlagen u. Gebäudetechnik, Freiburg i. Br.

2008. 25 S., FKZ **0329279A**

**Solarthermie2000plus: Untersuchung des Einflusses von Grundwasserströmung auf Erdsonden-Wärmespeicher. Abschlussbericht.**

Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)

2010. 297 S., FKZ **0329289A**

**Entwicklung, Charakterisierung und Testung innovativer mikro- und mesoporöser Speichermaterialien für die Transformation von Niedertemperaturwärme. Schlussbericht.**

Technische Fachhochschule Wildau

2007. 107 S., FKZ **0329525F**

**Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit Langzeitwärmespeicher. Wissenschaftlich-technische Begleitung der Pilotanlagen Hamburg-Bramfeld, Hannover-Kronsberg und Steinfurt-Borghorst. Forschungsbericht.**

Institut für Gebäude- und Solartechnik, Braunschweig

2010. 164 S., FKZ **0329607K,Q**

**Solar unterstützte Nahwärme und Langzeit-Wärmespeicher. Forschungsbericht.**

Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)

2008. 201 S., FKZ **0329607J**

**Weiterentwicklung der Erdbecken-Wärmespeichertechnologie. Abschlussbericht.**

Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)

2007. 295 S., FKZ **0329607E**

---

## 10 Weiterführende Literatur

Dieses Literaturverzeichnis weist auf Publikationen hin, die im Buchhandel oder bei den angegebenen Bezugsadressen erhältlich sind. Das Verzeichnis ist alphabetisch nach Autoren oder Herausgebern sortiert.

Für ausführliche Literaturrecherchen, z.B. nach unselbstständiger Literatur wie Zeitschriftenartikel oder Tagungsbeiträge, bietet das FIZ Karlsruhe fachspezifische Datenbanken an. Informationen über das Datenbankangebot (Literatur- und Faktendatenbanken), Preise und Konditionen für Recherchen sowie Suchmöglichkeiten per Internet senden wir gerne zu. Informationen hierzu sind auch erhältlich unter [www.fiz-karlsruhe.de](http://www.fiz-karlsruhe.de).

Bauer, D.:

**Zur thermischen Modellierung von Erdwärmesonden und Erdsonden-Wärmespeichern.** Universität Stuttgart (Hrsg.)

2012, 121 S., Diss., Webressource

*Zur thermischen Nutzung des Untergrunds für Heiz- und Kühlzwecke werden unter anderem Erdwärmesonden eingesetzt. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Weiterentwicklung der Modellierung thermischer Transportprozesse in und um Erdwärmesonden sowie mit der Anwendung der weiterentwickelten Modelle.*

Bukvic-Schäfer, A.:

**Lastmanagement. Nutzung der Thermischen Kapazität von Gebäuden als nicht-elektrischer Energiespeicher in elektrischen Versorgungsnetzen.**

Kassel: Kassel university press, 2008. 103 S., ISBN 978-3-89958-356-4, 28,00 Euro

Erneuerbare Energien und Energieeffizienz – Renewable Energies and Energy Efficiency. Bd. 5

*Durch die verstärkte Dezentralisierung der Stromerzeugung sowie eine verstärkte Integration von fluktuierenden regenerativen Energiequellen in das Versorgungssystem wird eine Änderung der bisherigen, nachfrageabhängigen Betriebsführung der Stromnetze notwendig. Eine Möglichkeit auf die veränderten Bedingungen zu reagieren, bietet die Flexibilisierung der Lastseite – das Lastmanagement. Dabei sind die Verbraucher, bei denen eine Möglichkeit der Speicherung der Nutzenergie möglich ist, besonders für das Lastmanagement geeignet.*

Hampel, M.:

**Rechnerunterstützte Entwicklung von Warmwasser-Wärmespeichern für Solaranlagen.**

Universität Stuttgart (Hrsg.)

2008, 125 S., Diss., Webressource

*Ziel dieser Arbeit ist es, die Ergebnisse numerischer Strömungssimulationen für die Beladung von solaren Warmwasserspeichern genauer zu betrachten. Dazu wurde eine Anlage zur Untersuchung von Einstromvorgängen in einen Warmwasserspeicher gebaut. Die Untersuchungen fanden mit Hilfe von Temperaturfühlern und den laser-optischen Systemen PIV und LIF statt. Mit dem Softwarepaket Fluent wurden Modelle erstellt und gerechnet, die diese Messungen simulieren sollen.*

Kohl, A.; Tüngeler, O. (Hrsg.):

**Weiterentwicklung eines Passivhauses zu einem Nullheizenergiehaus unter Verwendung von solaren Langzeitspeichern auf Grundlage standortspezifischer Witterungsbedingungen.**

Frankfurt: Examicus, 2008. 111 S., ISBN 978-3-86943-299-1, 64,20 Euro

*Ziel dieser Arbeit war es ein Passivhaus mit Solarenergie wärmetechnisch soweit zu unterstützen, dass auf einen zusätzlichen Einsatz fossiler Ressourcen verzichtet werden kann, und das Gebäude heizenergetisch autark ist. Da im Allgemeinen nur die langjährigen Mittelwerte der Jahressumme der Globalstrahlung bei der Simulation von gebäudetechnischen Anlagen zur Verfügung stehen, konnte eine Dimensionierung nur für einen durchschnittlichen Jahresverlauf erfolgen. Das Interesse bestand darin, zu ergründen wie ergiebig eine Solarthermieanlage unter extremen Witterungsbedingungen ist.*

Lohse, R.:

**Einfluss von Beladeeinrichtungen auf die thermische Schichtung in Warmwasserspeichern.**

Technische Universität Chemnitz (Hrsg.)

Aachen: Shaker, 2010. 162 S., zugl. Diss., ISBN 978-3-8322-9203-4, 48,80 Euro

Berichte aus der Energietechnik

*Der Aufbau und der Erhalt einer thermischen Schichtung in Warmwasserspeicher ist in solarthermischen Anlagen eine Grundlage für den effektiven Energieeinsatz und trägt zur Substitution von konventionellen*



Energieträgern bei. Eine entscheidende Rolle bei der Erfüllung dieser Aufgabe spielt dabei das Be- und Entladesystem des Speichers. Ausgehend von einer Ausgangsvariante und einem aus der Literatur bekannten Beladesystem werden mit Hilfe der numerischen Strömungssimulation (CFD) die Strömungen innerhalb und außerhalb des Beladesystems vorrangig für Speicher größer 20 m<sup>3</sup> intensiv untersucht.

Lohse, R.; Bühl, J.:

**Planungsleitfaden zur geschichteten Be- und Entladung thermischer Speicher in solarthermischen Anlagen.**

Technische Universität Chemnitz. Professur Technische Thermodynamik (Hrsg.); Technische Universität Ilmenau. Fachgebiet Thermo- und Magnetofluidynamik (Hrsg.)

2009, 35 S., Webressource

*In diesem Planungsleitfaden wird ein typischer Planungsablauf zur Auslegung von solchen Be- und Entladesystemen beschrieben. Er gibt wichtige Hinweise und Richtlinien für die Planung, Entwicklung und Auslegung von Be- und Entladesystemen. Andere Vorgehensweisen und Varianten werden damit aber nicht ausgeschlossen. Die Ausführungen beruhen im Wesentlichen auf dem Abschlussbericht zum Forschungsprojekt »Weiterentwicklung und Optimierung von Be- und Entladesystemen für Tank- und Erdbekenspeicher« innerhalb des Förderkonzeptes »Solarthermie 2000plus« und stellen eine Zusammenstellung der für die Planung solcher Systeme relevanten Ergebnisse dar.*

Neupert, U.; Euting, T.; Kretschmer, T. u. a.:

**Energiespeicher. Technische Grundlagen und energiewirtschaftliches Potenzial.**

Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2009. 213 S., ISBN 978-3-8167-7936-0, 29,00 Euro

*In diesem Buch werden die infrage kommenden Technologien zur Speicherung von Energie identifiziert, die Funktionsprinzipien erklärt, sowie der technische Stand und absehbare Weiterentwicklungen beschrieben. Aus den Eigenschaften der verschiedenen Technologien wird ihre Eignung für die unterschiedlichen Anwendungsbereiche abgeleitet.*

Nußbicker-Lux, J.:

**Simulation und Dimensionierung solar unterstützter Nahwärmesysteme mit Erdsonden-Wärmespeicher.**

Universität Stuttgart (Hrsg.)

2010, 142 S., Diss., Webressource

*Anlagen mit Erdwärmesonden erfahren zurzeit eine zunehmende Bedeutung. Für eine detaillierte Anlagenplanung, insbesondere von Erdsonden-Wärmespeichern (ESWSp), sind validierte Berechnungsmodelle des thermischen Verhaltens solcher Wärmespeicher unabdingbar. Daraus leitet sich das Ziel dieser Arbeit, die Validierung des Berechnungsmodells »Superposition Borehole Model« (SBM), ab. Erstmals wurde in dieser Arbeit das Berechnungsmodell zur Untersuchung des thermischen Verhaltens eines zweifach erweiterten Erdsonden-Wärmespeichers genutzt.*

Ochs, F.:

**Modelling Large-Scale Thermal Energy Stores.**

Aachen: Shaker, 2010. ca. 373 S., 1. Aufl., ISBN 978-3-8322-8834-1, 49,80 Euro

Berichte aus der Energietechnik

Rummich, E.:

**Energiespeicher. Grundlagen, Komponenten, Systeme und Anwendungen.**

Renningen: expert-Verlag, 2009. 234 S., ISBN 978-3-8169-2736-5, 39,80 Euro

*Aus dem Inhalt: »Luft als Speichermedium – Wasserstoff als Energieträger und seine Speicherung – Gasförmige Kohlenwasserstoffe und deren Speicherung – Speicherung von flüssigen und festen Energieträgern – Thermische Energiespeicherung – Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke – Federn als Energiespeicher – Schwungradspeicher – Elektrochemische Energiespeicherung – Energiespeicherung mit Kondensatoren – Supraleitende magnetische Energiespeicher (SMES)«*

Swiderek, S.:

**Simulation eines solar aktiven Erdwärmetauschers zur saisonalen Wärmespeicherung.**

Saarbrücken: VDM Verlag, 2008. 68 S., ISBN 978-3-8364-7724-6, 49,00 Euro

*Bei thermischen Solaranlagen zur Heizungsunterstützung wird die Kollektorfläche so angelegt, dass im Frühjahr und Herbst ausreichend Wärme für die Gebäudeheizung erzeugt werden kann. Im Sommer steht dadurch immer ein Überschuss an Wärme zur Verfügung, die nicht nutzbar ist und die die Anlagen stagnieren lässt. In diesem Buch wird ein auf SMILE basierendes Simulationsmodell eines kombinierten Erdwärmetauschers/Erdspeichers, der diese Überschusswärme aufnimmt, erstellt.*

## 10.1 BINE Informationsdienst

BINE Informationsdienst berichtet über Themen der Energieforschung: Dabei geht es um neue Materialien, Systeme und Komponenten, um innovative Konzepte und Methoden. Die drei Broschürenreihen mit Ergebnissen und Erfahrungen aus Forschungsprojekten (Projektinfo, Themeninfo und basisEnergie) richten sich an potenzielle Anwender, also an Entwickler, Planer, Berater, Investoren, Energieversorger und Nutzer.

Zum Thema »Wärmespeicher« sind folgende Titel erschienen, die kostenfrei angefordert werden können und auch als Download unter [www.bine.info](http://www.bine.info) zur Verfügung stehen.

- Sonnenenergie in der Erde speichern (BINE-Projektinfo 01/2013)
- Mit Sommersonne gegen Winterkälte (BINE-Projektinfo 02/2011)
- Latentwärmespeicher in Gebäuden (BINE-Themeninfo I/2009)
- Klimatisieren und Kälte speichern mit Salzlösungen (BINE-Projektinfo 02/2009)
- Kältespeicher optimiert Fernkältesystem (BINE-Projektinfo 12/08)
- Latentwärmespeicher liefert Prozessdampf (BINE-Projektinfo 09/08)
- Kältespeicher in großen Kältenetzen (BINE-Projektinfo 10/05)
- Latentwärmespeicher (BINE-Themeninfo IV/02)
- Wärme und Strom speichern (BINE-basisEnergieinfo 19)



---

## 11 Autoren



### **Dr. Andreas Hauer**

leitet die Garching Abteilung des Bayerischen Zentrums für Angewandte Energieforschung, ZAE Bayern. Nach seinem Physikstudium an der Ludwig-Maximilians-Universität und seiner Promotion an der TU Berlin leitete er viele Jahre die Gruppe »Wärmespeichersysteme« am ZAE Bayern. Seit über 10 Jahren ist er im Energiespeicherprogramm der Internationalen Energieagentur aktiv und ein im In- und Ausland anerkannter Experte für thermische Energiespeicherung.



### **Dr. Stefan Hieblers**

Arbeitsschwerpunkte sind Wärme- und Kältespeicher mit Phasenwechselmaterialien. Momentan arbeitet er als Leiter der Gruppe »Wärmespeichersysteme« am ZAE Bayern in Garching. Nach seinem Studium der Technischen Physik an der TU München hat er zum Thema »Kalorimetrische Messverfahren für Latentwärmespeichermaterialien« ebenfalls an der TU München promoviert.

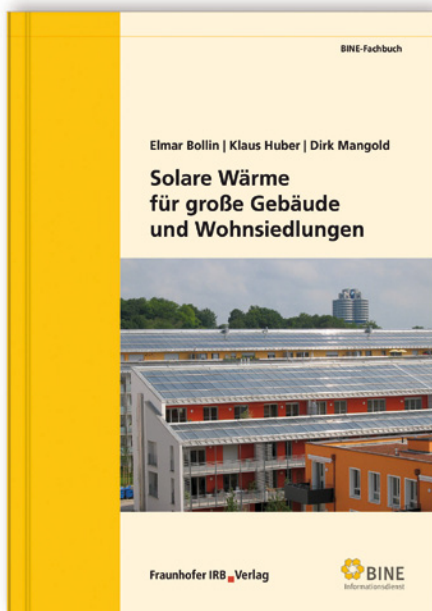


### **Manfred Reuß**

arbeitet im Bereich sensibler Wärmespeicherung. Nach Abschluss des Physikstudiums an der Ludwig-Maximilians-Universität München war er über 20 Jahre an der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik der TU-München in Weihenstephan im Bereich der Energieforschung tätig und leitet seit seinem Wechsel an das ZAE Bayern im Jahre 2001 die Arbeitsgruppe Solarthermie/Oberflächennahe Geothermie.

# Solare Wärme für große Gebäude und Wohnsiedlungen

Elmar Bollin | Klaus Huber | Dirk Mangold



2013, 159 Seiten, zahlr. farb. Abb., Kartoniert  
ISBN 978-3-8167-8752-5

In Mehrfamilienhäusern oder Siedlungen ist durch viele Verbraucher mit unterschiedlichen Lebensgewohnheiten die Wärmenachfrage gleichmäßiger als in Einfamilienhäusern. Einer solaren Wärmeversorgung kommt das sehr entgegen. Außerdem sinken bei Großanlagen die spezifischen Kosten.

Das BINE-Fachbuch richtet sich an Planer, Architekten, die Wohnungswirtschaft, kommunal Verantwortliche und Studierende.

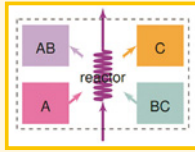
Kenntnisreich geben die Autoren einen Überblick über die System- und Anlagentechnik und die Wirtschaftlichkeit.

Schwerpunkte:

- Wärmenetze und große Kollektorfelder
- Planungshinweise
- Pilot- und Demonstrationsanlagen

**Fraunhofer IRB Verlag**  
Der Fachverlag zum Planen und Bauen

Nobelstraße 12 · 70569 Stuttgart · [www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)



Andreas Hauer | Stefan Hiebler | Manfred Reuß

# Wärmespeicher

5., vollständig überarbeitete Auflage

Wärmespeicher ermöglichen es, das Wärmeangebot im Zeitverlauf und in der Leistung dem Bedarf anzupassen. Erst durch effiziente Wärmespeicher lassen sich Abwärme oder solare Wärme wirtschaftlich nutzen.

Das BINE-Fachbuch stellt die verschiedenen Speichertechnologien vor und bietet Planern, Beratern und der Immobilienwirtschaft einen Überblick über unterschiedliche Speichermedien, -größen und -typen, Langzeit- und Hochtemperaturspeicher und die Wirtschaftlichkeit.

Das Autorenteam forscht am Bayerischen Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern). Dr. Andreas Hauer leitet die Garching-Abteilung des ZAE. Seit über 10 Jahren ist er im Energiespeicherprogramm der Internationalen Energieagentur aktiv. Arbeitsschwerpunkte von Stefan Hiebler sind Wärme- und Kältespeicher mit Phasenwechselmaterialien. Manfred Reuß arbeitet im Bereich sensibler Wärmespeicherung.

ISBN 978-3-8167-8366-4



9 783816 783664