

Thermische Energiespeicher – Neueste Entwicklungen und Anwendungen

Kurzfassung

Beim Verbrauch fossiler Brennstoffe bestehen erhebliche Einsparpotenziale durch diese Maßnahmen:

- Erhöhung der Effizienz thermischer Prozesse
- verstärkte Abwärmenutzung industrieller Prozesswärme
- vermehrter Einsatz erneuerbarer Energie zur Wärmeerzeugung (bisher etwa nur 4%)
- deutlicher Ausbau von KWK-Anlagen.

Die Verfügbarkeit einer effizienten und wirtschaftlichen Wärmespeichertechnologie ist dabei der Schlüssel, diese Potenziale zu erschließen.

Ziel der Arbeiten ist es, für unterschiedliche Anwendungsgebiete und Betriebsbedingungen (Temperatur/Prozessparameter/Leistung/Kapazität) effiziente und wirtschaftliche Wärmespeicher zu entwickeln und industrielle Partner bei der kommerziellen Umsetzung zu unterstützen. Oberstes Ziel ist Kostensenkung, da die bisher verfügbaren Wärmespeicher für eine breite Anwendung noch deutlich zu teuer sind.

Feststoff-Regeneratorspeicher als zentraler Speicher für die Netzstabilisierung

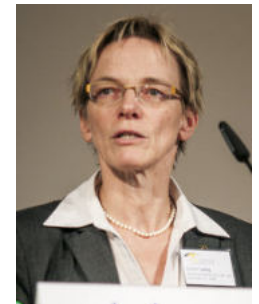
Bei einem Feststoff-Regeneratorspeicher wird die Energie vom Wärmeträgerfluid im direkten Kontakt vom Heißgas an ein festes Speichermedium übertragen. Dieser Speichertyp wird unter anderem für den Einsatz in adiabaten Druckluftspeichern (*Abbildung 1*) als zentraler Speicher für die Netzstabilisierung ent-

wickelt. Vorteile dieser Technologie sind der Verzicht auf einen metallischen Wärmeübertrager und das Potenzial, große spezifische Wärmeübertragungsflächen zu realisieren und damit günstige Entladecharakteristiken zu erhalten. Allerdings muss das entwickelte Speicherdesign hinreichend flexibel sein, um an unterschiedliche Spezifikationen und Betriebsbedingungen angepasst werden zu können. Aus diesem Grund werden spezielle Formsteine mit spezifisch angepasstem Design sowie Schüttungen aus keramischen Materialien und aus Natursteinen betrachtet.

Die Verwendung von Schüttungen als Speicherinventar weist gegenüber Formsteinen ein erhebliches Kostensenkungspotenzial auf. Allerdings sind hier technische Risiken hinsichtlich Druckverlust, Strömungsverhalten und thermo-mechanischen Belastungen für Inventar- und Isolationsmaterial in der Speicherauslegung zu berücksichtigen. Machbarkeit und Performance ausgewählter Inventaranordnungen sowie die Validierung der entwickelten Auslegungswerkzeuge werden am Teststand „HOTREG“ des DLR in Stuttgart untersucht (*Abbildung 2*) [1, 2].

Latentwärmespeicher

Latentwärmespeicher nutzen die Schmelzwärme eines Stoffes und können so große Wärmemengen in einem schmalen Temperaturbereich speichern. Sie sind daher besonders für die effiziente Speicherung von Wärme oder Kälte geeignet, wenn zwischen Beladung und Entladung nur eine geringe Tempe-



DLR

Doerte Laing
doerte.laing@dlr.de

Dr. Rainer Tamme
rainer.tamme@dlr.de

Dr. Antje Wörner
antje.woerner@dlr.de

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

Dr. Peter Schossig
peter.schossig@ise.fraunhofer.de

ZAE Bayern
Dr. Andreas Hauer
hauer@muc.zae-bayern.de

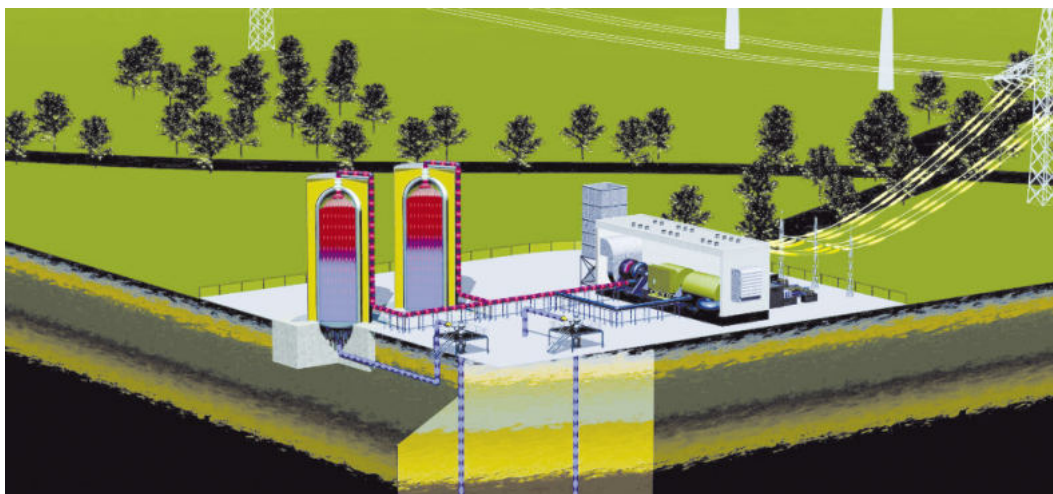


Abbildung 1
Schematische Darstellung eines adiabaten Druckluftspeichers
(Quelle: RWE Power AG)



Abbildung 2
HOTREG Feststoff-Speicher-Testanlage des DLR

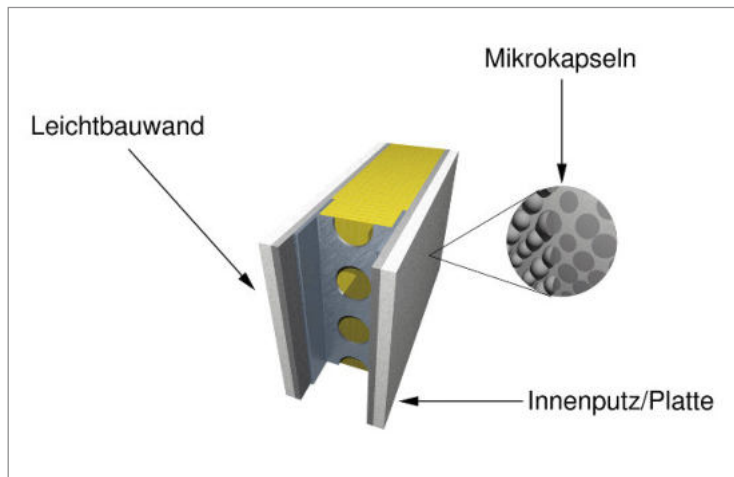


Abbildung 3
Schematische Darstellung einer mit PCM versehen Leichtbaustruktur mit Paraffinmikrokapseln in Baustoffen



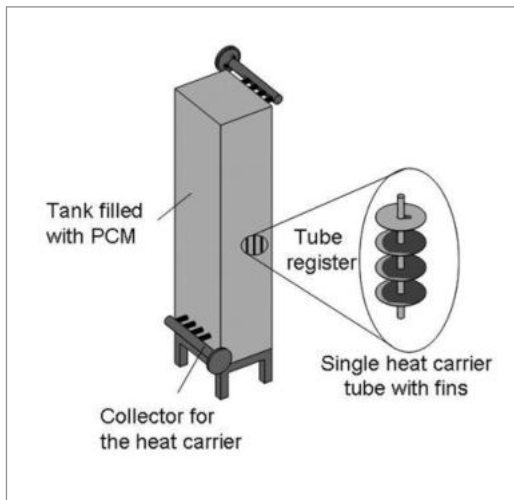
Abbildung 4
In Wärmeträgerfluiden verteilte Latentwärmespeicher

raturdifferenz genutzt werden kann oder wenn die Wärme über ein zweiphasiges Medium wie z. B. Wasser/Dampf transportiert wird.

Ein wesentliches Problem bei der technischen Umsetzung der Latentwärmespeicherung liegt im unzureichenden Wärmetransport zwischen dem Speichermedium und dem Wärmeträgerfluid aufgrund der niedrigen Wärmeleitfähigkeit der Speichermedien. Zur Überwindung der Wärmetransportlimitierung wurden unterschiedliche Strategien entwickelt, die im Folgenden dargestellt werden.

Latentwärmespeicher für Gebäudeklimatisierung

Eine Möglichkeit die Wärmeübertragung in Latentwärmespeicher zu verbessern ist, die Übertragerfläche dadurch zu vergrößern, dass die Phasenwechselmaterialien in winzige Kapseln verpackt werden. Dies ermöglicht auch gleichzeitig das Einbringen des Speichermaterials in verschiedene Werkstoffe, wie z. B. Baustoffe, welche dann, durch die gezielt im Raum-



temperaturbereich erhöhte Wärmespeicherkapazität, den thermischen Komfort erhöhen und Energie für Gebäudeklimatisierung sparen, da sie die Raumtemperaturschwankungen stabilisieren (Abbildung 3).

Ebenso können diese Mikrokapeln Wärmeträgerfluiden beigemischt werden, um selektiv die Wärmespeicherfähigkeit eines Fluids im gewünschten Temperaturbereich signifikant zu erhöhen, aber gleichzeitig gute Leistungsdichten zu erzielen (Abbildung 4). Insbesondere bei Kältespeichern, die üblicherweise mit kleinen Temperaturspreizungen arbeiten, ist es möglich, die Speicherfähigkeit um ca. den Faktor 4 zu erhöhen. Im Idealfall kann bei Bestandsanlagen diese Verbesserung nur durch den Austausch des Fluids erfolgen, wobei eine erhöhte Viskosität berücksichtigt werden muss. Gegenstand der Forschung ist es, auf die Verkapselung in den Fluiden zu verzichten und organische PCMs lediglich in Wasser zu emulgieren, um die Herstellungskosten zu senken und die Speicherfähigkeit weiter zu verbessern.

Hochtemperatur-Latentwärmespeicher für die Kraftwerkstechnik

Als wirtschaftlich und technisch machbare Lösung für Hochtemperatur-Latentwärmespeicher wurde ein Rippenrohrkonzept identifiziert, dessen Leistungsfähigkeit erfolgreich in verschiedenen Labor- und Pilotversuchen im Maßstab 5–500 kW in vier verschiedenen Temperaturbereichen zwischen 142–305 °C demonstriert werden konnte [3].

Den derzeit größten Hochtemperatur-Latentwärmespeicher mit 700 kWh Speicherkapazität zeigt *Abbildung 5*. Dieser Latentwärmespeicher wurde vom DLR im Rahmen eines BMU-geförderten Projektes für den Einsatz in solarthermischen Kraftwerken mit solarer Direktverdampfung entwickelt. Er beinhaltet 14 t Natriumnitrat. Der Phasenwechsel findet bei 305 °C statt, was gut zum Dampfturbinenprozess bei ca.



Abbildung 5
700 kWh Latentwärme-Pilotspeicher im Wasser/Dampfkreislauf

100 bar passt. Der Speicher wurde in einem speziellen Testloop auf dem Gelände des Kraftwerks Litoral von Endesa in Carboneras (Spanien) im Zeitraum 2010–2011 in 2950 Betriebsstunden und 95 Zyklen erfolgreich betrieben [4].

Prinzip eines neuen Latentwärmespeichersystems

Ein neues Konzept eines Hochtemperatur-Latentwärmespeichers mit einem Schneckenwärmetauscher wird im Labormaßstab beim Fraunhofer ISE untersucht. Der Vorteil hierbei ist, dass Salzgranulat bzw. Flüssigsalz in preiswerten Behältern in nahezu unbegrenzter Menge separat vom Wärmetauscher aufbewahrt werden können. Das PCM wird zum Aufschmelzen bzw. Erstarren zum Schneckenwärmetauscher transportiert und dort aufgeschmolzen bzw. kristallisiert. Die Anforderungen an die erforderliche Be- und Entladeleistung allein bestimmen die Dimensionierung des Wärmetauschers.

Die Machbarkeit wurde mit einem über Öl temperierten 5 kW-Prototyp mit Beladung einer eutektischen Mischung von $\text{KNO}_3/\text{NaNO}_3$ mit einer Schmelztemperatur von 225 °C nachgewiesen (Abbildung 6). Bei der Kristallisation bei einem Massenstrom von 150 kg/h wurde Granulat mit einer Dichte von 950 kg/m³ erzeugt. Die Parameter des Prozesses, wie z. B. Drehgeschwindigkeit der Schrauben, Massenströme, usw. müssen noch optimiert werden. Weitere

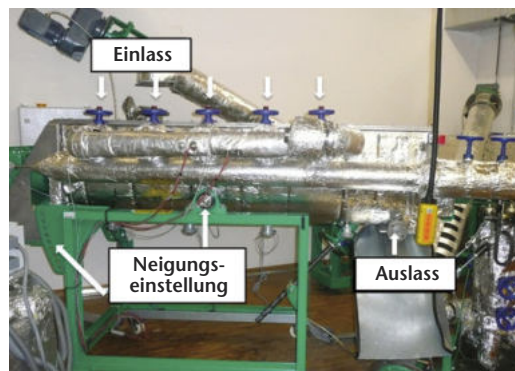
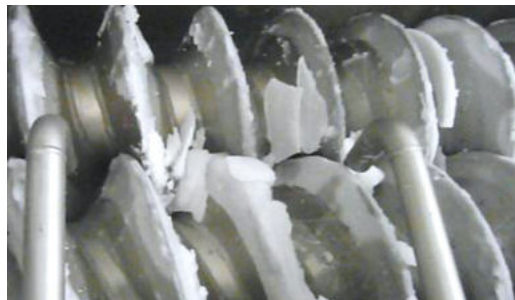


Abbildung 6
10 kW Prototyp eines Latentwärmespeichers mit Schnecken-Wärmetauscher im Thermoölkreislauf (oben) und Kristallisationsprozess in der Doppelschnecke (unten)



Entwicklungsarbeiten zielen auf eine direkte Dampfbeheizung und eine Hochskalierung des Konzeptes.

Speicherkonzepte mit Nutzung der Reaktionswärme

Bei der thermochemischen Energiespeicherung wird die Reaktionswärme eines reversiblen Sorptionsprozesses oder einer chemischen Reaktion in Form chemischer Energie gespeichert. Sie hat das Potenzial, deutlich höhere Speicherdichten als sensible Speicher oder Latentwärmespeicher zu realisieren. Eine verlustfreie Langzeitspeicherung der Einzelkomponenten ist möglich. Sie ist zur Wärmetransformation geeignet, indem thermische Energie bei höherer Temperatur als die Ladetemperatur ausgekoppelt werden kann. Thermochemische Speicher können in einen sehr großen Temperaturbereich bis 1000 °C eingesetzt

werden. Eine Entkopplung von Speicherkapazität und Ladeleistung ist möglich, die Speichermaterialien sind kostengünstig.

Abwärmenutzung durch mobile Wärmespeicher

Ein mobiler Sorptionsspeicher mit dem Stoffpaar Zeolith/Wasserdampf wurde am ZAE Bayern untersucht. Das System soll industrielle Abwärme aufnehmen können und an einem anderen Ort wieder Prozesswärme bereitstellen können. Wärme und Wasserdampf werden jeweils in einem Luftstrom durch ein Zeolithfestbett geblasen.

Um das volle Potenzial eines Adsorptionsspeichers mit Zeolith nutzen zu können, sollten sowohl Ladetemperaturen von 150–300 °C als auch hohe Wassergehalte beim Entladen zur Verfügung stehen. Damit sind vor allem industrielle Trocknungsprozesse auf der Nutzerseite geeignete Anwendungen. Hier können offene Sorptionsspeicher auch ihre Fähigkeit, trockene Luft bereitzustellen, ausspielen. Mobile Wärmespeicher müssen, um wirtschaftlich arbeiten zu können, mit hohen jährlichen Zyklenzahlen eingesetzt werden. Damit können sie nur im industriellen Umfeld in ganzjährigen Anwendungen betrieben werden.

Ein Pilotspeicher mit 13 t Zeolith und einer maximalen Speicherkapazität von ca. 3 MWh bei einer maximalen thermischen Leistung von ca. 1 MW wurde zusammen mit der Firma Hoffmeier aufgebaut. Er nimmt Wärme der Müllverbrennungsanlage Hamm auf und speist sie in eine 7 km entfernte Polypropylen-Trocknung ein. Die Ladetemperatur liegt mit 130–150 °C an der unteren Grenze. Beim Entladen können allerdings aufgrund der hohen Luftfeuchtigkeiten aus dem Trocknungsprozess Temperaturen von 170–180 °C erreicht werden (Abbildung 7). Der mobile Sorptionsspeicher ist seit Herbst 2012 auf der Straße (Abbildung 8) und wird momentan im Testbetrieb vermessen.

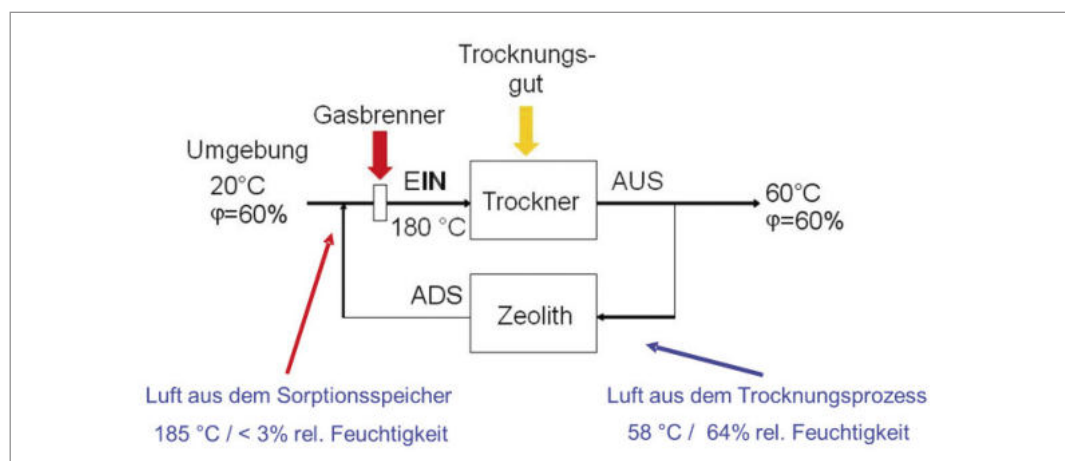


Abbildung 7
Schematische Darstellung des Entladevorgangs des mobile Zeolithspeichers

Thermochemische Speicher

Beim DLR werden drei unterschiedliche Reaktionssysteme für thermochemische Speicher für Anwendungen im Prozesswärme- und Kraftwerksbereich untersucht.

Das System $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{CaO}$ ist für den Betrieb im geschlossenen Kreislauf im Temperaturbereich 400–650 °C und Metalloxidsysteme vom Typ $\text{Me}_2\text{O}_3/\text{Me}_2\text{O}_3$ bzw. $\text{Me}_3\text{O}_4/\text{MeO}$ sind für einen Betrieb im offenen Kreislauf im Bereich 500–1000 °C geeignet.

Die Reaktion von CaCl_2 mit Wasserdampf läuft im Temperaturbereich von 100 bis 200 °C reversibel ab. Für das Upscaling vom Labor- in den Pilotmaßstab ist am DLR eine Testanlage aufgebaut worden [5], die mit unterschiedlichen Prozessgasen bis 1000 °C betrieben werden kann. *Abbildung 9* zeigt die 10 kW Versuchsanlage (oben), in der erfolgreich das System $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{CaO}$ in einem Reaktor (unten) demonstriert wurde.

Literaturübersicht

- [1] Zunft, S., Krüger, M., Marquardt, R., Buschsieweke, F., Moser, P., Bieber, M., Eichhorn Colombo, K., Niklasch, C., Mayer, P.-M., Klafki, M., Bannach, A., 2011, Adiabate Druckluftspeicher für die Elektrizitätsversorgung. In: Beckmann M., Hurtado A.: Kraftwerkstechnik – Sichere und nachhaltige Energieversorgung, Bd. 3 Seite 579-590, TK-Verlag Neuruppin, ISBN 978-3-935317-72-6.
- [2] Stahl, K., Zunft, S., Kessler, S., Siebert, M., 2011, Flexibilisierung von GuD-Kraftwerken durch den Einsatz von Hochtemperatur-Wärmespeichern. In: GuD-Kraftwerke im dynamischen Betrieb, Seite 147-156. VDI Wissensforum GmbH, ISBN 978-3-942980-80-7.
- [3] Laing, D., Bauer, T., Breidenbach, N., Hachmann, B., Johnson, M., 2012, Development of High Temperature Phase-Change-Material Storages. In: Proceedings Innostock 2012. Innostock 2012, 16.–18. Mai 2012, Lleida, Spanien. ISBN 978-84-938793-4-1
- [4] Laing, D., Bahl, C., Fiß, M., Hempel, M., Meyer-Grünefeldt, M., Eickhoff, Martin, Stückle, A., 2011, Test and evaluation of a thermal energy storage system for direct steam generation, SolarPACES 2011, Granada.
- [5] Schmidt, Patrick und Bouché, Martin und Linder, Marc und Wörner, Antje (2012) Pilot Plant Development of High Temperature Thermochemical Heat Storage. In: Proceedings of Innostock 2012. INNOSTOCK 2012, 15.–17. Mai 2012, Lleida, Spanien.



Abbildung 8
Mobiler Zeolithspeicher



Abbildung 9
Oben:
10 kW-Versuchsanlage des DLR zur Entwicklung von thermochemischen Wärmespeichern
Unten:
thermochemischer Reaktor

