

# Thermische Energiespeicher als sektorenübergreifende Querschnittstechnologie

## Der Beitrag thermischer Energiespeicher zur Energiewende

Zum Gelingen der Energiewende sind eine deutliche Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien sowie eine effizientere Nutzung der Energie notwendig, damit die von der Bundesregierung im Energiekonzept formulierten Ziele erreicht werden können. Thermische Energiespeicher können hier als sektorenübergreifende Querschnittstechnologie auf drei Ebenen Beiträge leisten:

1. Sie dienen der **Speicherung von solar erzeugter Wärme**. Diese wird im Gebäudebereich mittels Solarkollektoren auf niedrigem Temperaturniveau für die Raumheizung und zur Bereitstellung von Warmwasser erzeugt. Dezentrale Wasserspeicher für einzelne Gebäude dienen dem Ausgleich kurzzeitiger Fluktuationen und in begrenztem Umfang der Langzeitspeicherung. Für Quartiere werden große Speicher, in denen ebenfalls Wasser oder das Erdreich als kostengünstiges Speichermedium genutzt wird, auch heute schon für den Ausgleich saisonaler Schwankungen und damit zur Erhöhung des solaren Deckungsanteils eingesetzt. Für die solarthermische Stromerzeugung mittels konzentrierender Spiegelsysteme sind Wärmespeicher auf Flüssigsalzbasis in kommerziellen Anlagen in Spanien und den USA im Einsatz. Viele tausend Tonnen Speichermedium nehmen hier die solar erzeugte Hochtemperaturwärme auf, um sie in den Abendstunden dem konventionellen Kraftwerksteil wieder für die Stromerzeugung zur Verfügung zu stellen und damit regelbaren erneuerbaren Strom ins Netz zu speisen.
2. Die vermehrte Nutzung erneuerbaren Stroms erfordert die **Flexibilisierung** herkömmlicher Prozesse. Dies trifft auf konventionelle Kohlekraftwerke ebenso zu wie auf effiziente Kraft-Wärmegekoppelte Kraftwerke, in denen Wärmespeicher einen strom- oder netzgeführten Betrieb ermöglichen können. Druckluftspeicherkraftwerke können bei adiabater Fahrweise durch Integration eines thermischen Energiespeichers stundenweise zur effizienten Stromspeicherung genutzt werden. Zunehmende Bedeutung wird zukünftig auch sogenannten Power-to-Heat-Konzepten zuge-

schrieben, in denen fluktuierend anfallender Strom in Wärme umgewandelt wird. Im Nieder-temperaturbereich kann hierbei sehr kostengünstig negative Regelenergie bereitgestellt werden. Aber auch Anwendungen im Hochtemperaturbereich zur speichergestützten Hybridisierung bisher gasbefuerter Thermoprozesse in der Industrie werden an Bedeutung gewinnen.

3. Ein dritter Einsatzbereich thermischer Energiespeicher ist die **Effizienzsteigerung industrieller Prozesse** durch die Nutzung fluktuierend anfallender Abwärme. Einem klassischen Anwendungsfall stellen Batchprozesse der energieintensiven Industrien wie der Metall- oder Glaserzeugung oder -verarbeitung dar. Basierend auf einer genauen Prozessanalyse können thermische Energiespeicher eine Re-Integration der Wärme in den Prozess ermöglichen oder zur kontinuierlichen Erzeugung von Strom oder Kälte beitragen. So vielfältig die industriellen Prozesse in Bezug auf Wärmeträgerfluide, Temperaturniveau, Leistungsniveau und Speicherkapazität sind, so divers sind die Anforderungen an die dafür notwendigen thermischen Speichertechnologien.

Im erstgenannten Bereich der Speicherung solarthermisch erzeugter Wärme haben sensible thermische Energiespeicher teilweise bereits ihren Weg in die Anwendung gefunden und sind kommerziell verfügbar. Im Bereich der Kraftwerkstechnik und in der industriellen Prozesstechnik stehen erste technologische Lösungen im Hochtemperaturbereich zur Verfügung und werden in Pilotprojekten gemeinsam mit der Industrie im Anwendungsumfeld getestet. Bis auf ganz wenige Beispiele sind kommerzielle Produkte hier jedoch noch nicht am Markt. Der Weg bis zum Einsatz thermischer Energiespeicher als standardisierte, kostenoptimierte Komponente, die von Anfang an in der Planung verfahrenstechnischer Prozesse mit berücksichtigt werden kann, ist noch weit.



**DLR**

Dr. Antje Wörner  
antje.woerner@dlr.de

**Fraunhofer ISE**

Dr. Thomas Fluri  
thomas.fluri@ise.fraunhofer.de

Stefan Gschwander  
stefan.gschwander@ise.fraunhofer.de

**ISFH**

Jan Steinweg  
steinweg@isfh.de

**GFZ**

Stefan Kranz  
stefan.kranz@gfz-potsdam.de

**ZAE Bayern**

Dr. Stefan Hiebler  
hiebler@muc.zae-bayern.de

## Das „Entwicklungsdreieck“ thermischer Energiespeicher

Es kann zwischen drei grundlegenden Arten thermischer Energiespeicherung unterschieden werden:

(1) **Sensible Speicher** nehmen Wärme mittels einer Temperaturänderung des meist flüssigen oder festen Speichermaterials auf. Die Speicherkapazität hängt damit von der Wärmekapazität des Materials, dessen Masse und der nutzbaren Temperaturdifferenz ab.

(2) Durchläuft das Speichermaterial einen Phasenwechsel – meist von fest nach flüssig – so spricht man von **Latentwärmespeichern**. Damit kann eine größere Wärmemenge auf dem konstanten Temperaturniveau des Phasenwechsels zur Verfügung gestellt werden.

(3) **Thermochemische Speicher** nutzen die Enthalpieänderung einer physikalischen Umwandlung (Sorption) oder einer chemischen Reaktion zur Speicherung. Die Energie kann dadurch beliebig lange verlustfrei gespeichert und bei Bedarf auf einem anderen (evtl. auch höheren) Temperaturniveau wieder freigesetzt werden.

- Aus dem Prozess lassen sich die Anforderungen an einen thermischen Energiespeicher in Bezug auf Wärmeträgerfluid, Temperaturniveau, Be- und Entladecharakteristik, Zyklenzahl und Speicherdauer ableiten. Die thermische und bei thermochemischen Speichern auch stoffliche **Integration des Speichers in den Prozess** ist von

Beginn der Entwicklung an zu berücksichtigen, um maximale Funktionalität und besten Nutzen zu erreichen.

- Maßgeblich bestimmend für die Eigenschaften des thermischen Energiespeichers ist das verwendete **Speichermaterial**. Physikalische, chemische oder thermodynamische Eigenschaften bestimmen die maximal erreichbare Speicherdichte und die im Speicher realisierbaren Funktionalitäten. Hohe Zyklenstabilität ist eine wesentliche Voraussetzung. Je weniger Zyklen ein Speicher im Prozess durchläuft – je größer also die Speicherdauer ist – desto weniger kostenintensiv darf das Speichermaterial sein.
- Durch das **Speicherkonzept** wird die Leistung des Speichers in Bezug auf die zu übertragende Wärmemenge bestimmt. Das Wärmeträgerfluid kann dabei direkt durch das Speichermaterial geleitet werden oder aber die Wärme über einen Wärmeübertrager indirekt eingekoppelt werden. Das Speicherdesign gewährleistet das gewünschte thermische Verhalten des Speichers und erfüllt die jeweils spezifischen Prozessanforderungen. Im Rahmen des Entwicklungsprozesses funktionsoptimierter und kostengünstiger Speicherlösungen müssen diese drei Eckpfeiler permanent im Austausch stehen.

## Saisonale Speicherung

Der saisonalen Wärmespeicherung im Niedertemperaturbereich kommt große Bedeutung zu, soll die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser im

Abbildung 1  
Entwicklungsdreieck  
thermischer  
Energiespeicher



Wesentlichen aus regenerativen Quellen erfolgen. Technische Lösungen existieren in Form großer Behälter- oder Erdbecken- sowie Erdsondenspeicher, die in Pilotprojekten in Deutschland und Dänemark zur Wärmeversorgung von Quartieren mittels Nahwärmenetzen seit den 1990er Jahren eingesetzt werden. Ein hohes Verhältnis von Volumen zu Oberfläche reduziert Verluste und ermöglicht vergleichsweise niedrige Speicherkosten.

Das ZAE hat in einem Pilotspeicher, der in Attenkirchen seit 2002 in Betrieb ist, die Vorteile beider Speicher kombiniert (*Abbildung 2*): Ein 500 m<sup>3</sup> großer Erdbeckenspeicher ist dabei von 90 Erdsonden mit einer Tiefe von 30 m umgeben. Die gesamte Speicherkapazität beträgt 165 MWh. Der Speicher wird über ein Kollektorfeld beladen und mittels Wärmepumpe entladen. Der träge Erdsondenspeicher wird dabei zur Langzeitspeicherung genutzt, während der Wasserspeicher zur Leistungsanpassung dient. Verluste aus dem Wasserspeicher werden vom umgebenden Erdreich aufgenommen und können über den Wärmeübertrager des Erdsondenspeichers genutzt werden.

Demgegenüber nutzen Aquiferspeicher abgeschlossene unterirdische Wasserreservoirs und tauschen zur Be- und Entladung Wärme über einen Wärmeübertrager zwischen einem sogenannten kalten und einem warmen Brunnen aus.

Vom GFZ wird seit Anfang 2016 eine Erkundungsbohrung in Berlin Charlottenburg bis in eine Tiefe von 530 Metern, also bis weit unter die Trinkwasserschichten, durchgeführt. Gesteinsproben und Bohrkern werden wissenschaftlich im Labor untersucht, um Betriebssicherheit und Grundwasserschutz zu gewährleisten. Mit verlässlichen Nutzungskonzepten wollen die Forscher zum Ausbau dieser umweltfreundlichen Technologie zur Bereitstellung der Wärmeversorgung insbesondere in Quartieren oder Ballungsräumen beitragen.

Einen alternativen Ansatz zum kurzfristigen Ausgleich von Fluktuationen in der Solareinspeisung verfolgt das ISFH. Dort werden in einer sogenannten Bauteilaktivierung Teile des Gebäudes – hier z. B. die Betondecken – als Wärmespeicher eingesetzt. Damit wurde in einem seit Anfang 2015 betriebenen Experimentalgebäude das Volumen des Wasser-Pufferspeichers auf 1.000 Liter reduziert und gleichzeitig der Solarertrag sowie der solare Deckungsanteil erhöht. Eine Simulationsstudie am ISFH zeigt, dass in Bestandsgebäuden auch über vorhandene Radiatoren, Fußboden- oder Wandheizungen die Gebäudemasse als Speicher aktiviert werden kann. Das Prinzip der Nutzung vorhandener Speichermassen



Abbildung 2  
Erdbeckenspeicher  
des Projekts  
„Solare Nahwärme  
Attenkirchen“

kann auch auf andere volatile regenerative Quellen (z. B. Wind- oder Sonnenstrom mit Wärmepumpe) angewandt werden. Damit kann ein erhebliches Lastverschiebungspotenzial über einen Zeitraum von vielen Stunden bis einigen Tagen kostengünstig und aufgrund des niedrigen Temperaturniveaus mit geringen Verlusten erschlossen werden.

### Hochtemperatur-Speicher für industrielle Prozesse und die Kraftwerkstechnik

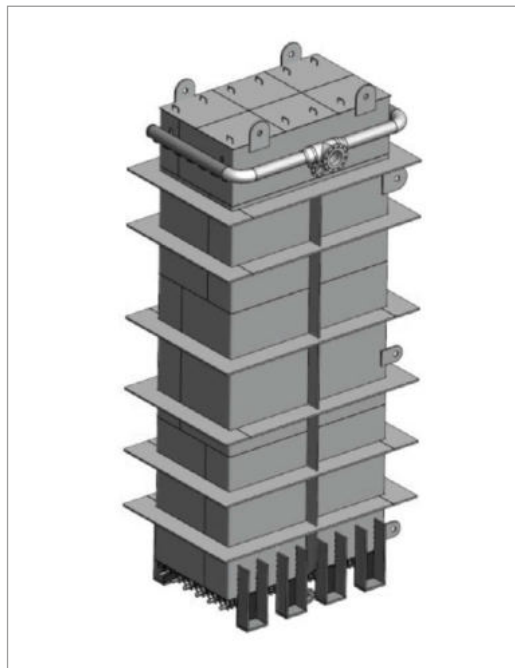
Im Hochtemperaturbereich sind nur ganz wenige Speicher im industriellen Einsatz: zum Beispiel Cowper-Speicher in der Stahlindustrie oder Ruths-Speicher für Dampf.

Eine effiziente Möglichkeit zur Dampfspeicherung besteht in der Nutzung von Latentwärmespeichern. Hier hat das DLR über Jahre hinweg ein Speicherkonzept mit berippten Rohren entwickelt (*Abbildung 3*). In den Druck beaufschlagten Rohren verdampft/kondensiert das Wärmeträgermedium (Wasser), während sich das als Phasenwechselmaterial eingesetzte Salz im Speichervolumen um die Rohre



Abbildung 3  
Beripptes Rohr für den  
Testspeicher

Abbildung 4  
**Schematische Darstellung des Latentwärmespeichers** (6 MW, 1.5 MWh), der am Heizkraftwerk der STEAG in Wellesweiler in den Anlagenbetrieb integriert werden wird



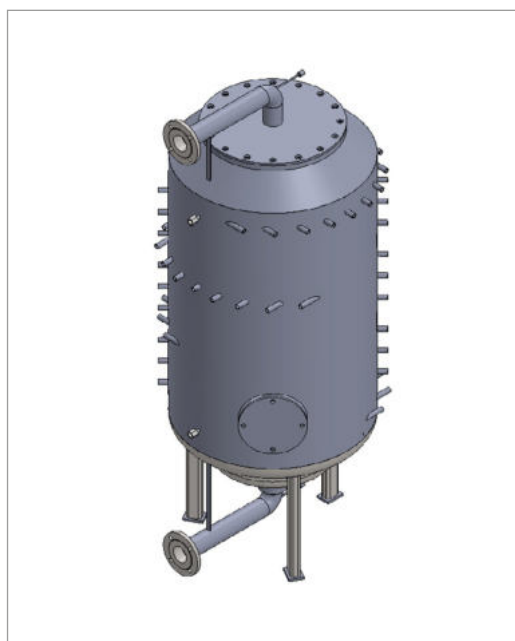
befindet. Zur Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit werden die Rohre mit speziell entwickelten extrudierten Rippen bestückt. Nachdem der weltgrößte Latentwärmespeicher mit einer Kapazität von 700 kWh 2011 erfolgreich in einem Dampfkraftwerk in Carboneras getestet wurde, befindet sich momentan ein Speicher zur Dampfbesicherung eines an ein Heizkraftwerk angeschlossenen industriellen Prozesses im Aufbau. Mit 850 Einzelrohren hat dieser eine Leistung von 6 MW, die er über einen Zeitraum von 15 Minuten abgibt. Damit kann ein Ersatz-Dampfkessel abgeschaltet werden, der bisher dauerhaft im Standby-Modus betrieben wird. Der Speicher wird im laufenden Betrieb in die Anlage integriert und danach getestet werden (Abbildung 4).

Abbildung 5  
**Hochtemperatur-Abwärmequelle** der Gießerei Heunisch



Ein weiteres Anwendungsbeispiel aus dem industriellen Umfeld ist die Nutzung der Abwärme eines Gießereiofens während dessen Stillstandszeiten zur Bereitstellung von Prozess- und Heizwärme sowie von Prozesskälte. Hier entwickelt das ZAE Bayern für die Gießerei Heunisch zusammen mit dem Anlagenbauer Küttner einen Hochtemperaturwärmespeicher, der in Verbindung mit einer Absorptionswärmepumpe eingesetzt wird (Abbildung 5). Dieser wird als druckloser Zweistoffspeicher für Einsatztemperaturen bis 300 °C ausgeführt (Abbildung 6). Ein kostengünstiges Feststoffspeichermaterial wird von einem flüssigen Wärmeträgerfluid (Thermoöl) durchströmt. Die Wärme kann im Direktkontakt ausgetauscht werden. Nach einer Erprobungsphase im Labor soll das Speichermodul im realen Betrieb getestet werden. Durch die Anlage zum Abwärmerecycling sollen bei der Gießerei Heunisch jährlich etwa 3000 MWh Primärenergie und 600 t CO<sub>2</sub> eingespart werden.

Abbildung 6  
**Zweistoffspeicher** (schematische Darstellung)



Ein noch weiter in der Zukunft liegendes Ziel in der Entwicklung thermischer Energiespeicher für industrielle Anwendungen ist die Entkopplung von Leistung und Kapazität durch die Bewegung des Speichermaterials. Damit muss der eigentliche Speicher nur die notwendige Leistung zur Be- und Entladung bereitstellen können. Die Bevorratung des Speichermaterials im be- bzw. entladenen Zustand kann in beliebig großen, kostengünstigen Speicherbehältern erfolgen.

Beim Fraunhofer ISE werden derartige Ansätze in Form von Schneckenwärmeübertragern für Salz als Latentwärmespeichermaterial untersucht (Abbildung 7). Ein erster Funktionsnachweis im Labor konnte erbracht werden. Am DLR wird die thermochemische Wärmespeicherung mit Kalk für Temperaturen bis 600 °C in einem Wanderbettreaktor untersucht und wurde erstmalig im 10 kW-Maßstab erfolgreich im Laborreaktor nachgewiesen (Abbildung 8).



Abbildung 7  
**Schneckenwärmeübertrager zur Latentwärmespeicherung**  
(Fraunhofer ISE)

## Zusammenfassung

Vielfältige thermische Energiespeichertechnologien stehen für einen breiten, branchenübergreifenden Einsatz in der Industrie und für die Speicherung von solar erzeugter Wärme zur Verfügung. Für die Lösung der noch offenen wissenschaftlichen Fragestellungen ist die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Materialforschern und Ingenieuren notwendig. Gleichzeitig müssen die Endnutzer der Technologie von Anfang an eingebunden werden, um spezifisch angepasste Lösungen zu erarbeiten.

Für die saisonale Speicherung regenerativ erzeugter Niedertemperaturwärme im Gebäudebereich wurden bereits kostengünstige Speicherlösungen in Pilotprojekten zur Versorgung von Quartieren mit Nahwärme umgesetzt. Hier besteht der Forschungsbedarf im Wesentlichen in der Entwicklung standardisierter Planungs- und Bautechniken sowie in der Qualitätssicherung. Neuartige Ansätze zielen auf den Einsatz thermochemischer Systeme zur Langzeitspeicherung mit hoher Energiespeicherdichte.

Im industriellen Hochtemperaturbereich zeigt sich ein sehr diversifiziertes Bild in Bezug auf die Anforderungen an thermische Energiespeicher. Aktuell werden im Rahmen BMWi-geförderter Projekte Speicher für einen Einsatz im Temperaturbereich von 300 bis 350 °C auf Basis von Latentwärme sowie sensiblen Zweistoffsystemen (Fest – Flüssig) in Zusammen-

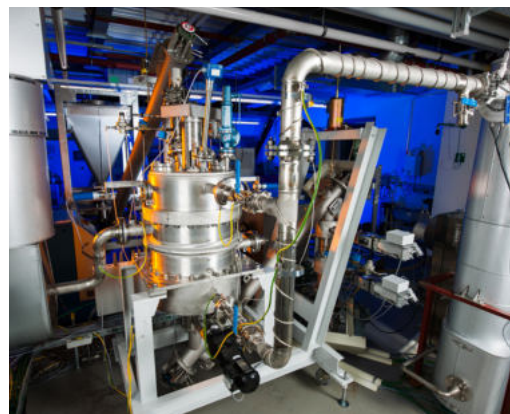


Abbildung 8  
**Wanderbettreaktor zur thermochemischen Wärmespeicherung mit Kalk**  
(DLR)

arbeit mit der Industrie entwickelt und im Anwendungsumfeld getestet. Die Realisierung derartiger Demonstrationsspeicher und deren Einsatz im industriellen Umfeld ist ein wichtiger Schritt in der Kommerzialisierung thermischer Speicher.

Neuere Ansätze zur Entkopplung von Leistung und Kapazität befinden sich noch in einem frühen Stadium der Entwicklung und werden im Labormaßstab untersucht.