

Speicherung für Hochtemperaturwärme

Dr. Rainer Tamme
DLR
rainer.tamme@dlr.de

Dr. Thomas Nunez
Fraunhofer ISE
tomas.nunez@ise.fraunhofer.de

Dr. Joachim Götsche
Solar-Institut Jülich -
FH Aachen
goettsche@sj.fh-aachen.de

Eine verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien, intensive Abwärmenutzung sowie ein konsequenter Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung sind nur mit der Bereitstellung technisch und wirtschaftlich attraktiver Wärmespeicher realisierbar. Dazu ist eine hocheffiziente Speichertechnologie notwendig, um die zeitliche und räumliche Inkongruenz von Angebot und Nachfrage auszugleichen und die Realisierung eines integrierten energieeffizienten Gesamtprozesses zu ermöglichen.

Thermische Energiespeicher – Schlüsselkomponente zur rationellen Energienutzung im Bereich Prozesswärme und Kraftwerkstechnik

Die Effizienz der Energienutzung bei industriellen Prozessen und im Bereich Kraftwerkstechnik kann durch den Einsatz von thermischen Speichersystemen deutlich gesteigert werden. Die Integration von Speichersystemen kann unterschiedliche Zielsetzungen verfolgen:

- Bei zyklischen Prozessabläufen kann Energie, die sonst am Ende eines Zyklus verloren gehen würde, gespeichert werden, um dann im nachfolgenden Zyklus wieder genutzt zu werden.
- Besteht in einem System eine zeitliche Verschiebung zwischen dem Angebot und dem Bedarf an thermischer Energie, so können Speicher diese zeitliche Differenz zwischen Erzeuger und Verbraucher ausgleichen.
- Bei Prozessen mit ausgeprägten zeitlichen Lastspitzen können Systemkomponenten für ein mittleres Leistungsniveau dimensioniert werden, der Speicher wird in Phasen mit hohem Leistungsbedarf entladen, während bei Unterschreitung der durchschnittlichen Leistung Energie zwischengespeichert wird.

Die optimale Ausnutzung der Systemkomponenten vermeidet Teillastverluste und reduziert Investitionskosten. Die Belastung des Systems durch thermische Wechsellast wird reduziert, wodurch die Lebensdauer der Komponenten erhöht wird.

- Bei Systemen, deren zeitliche Auslastung kurzfristigen Schwankungen unterliegt, die nicht vorausbestimmt werden können, bieten sich Speicher zur Reduzierung von Anfahrzeiten an. Gespeicherte Energie wird genutzt, um die Komponenten auf Betriebstemperatur zu halten und damit die Dynamik und Effizienz des Systems zu verbessern.

Die Bereitstellung einer effizienten und wirtschaftlichen Wärmespeichertechnik erfordert die Anpassung an periphere Komponenten, Prozessparameter und eine optimale Systemintegration.

Es ist ein charakteristisches Merkmal thermischer Energiespeicher, dass aufgrund stark variierender Anforderungsprofile jeweils spezifische, optimale Lösungen hinsichtlich Effizienz und Wirtschaftlichkeit gefunden werden müssen. Das hat zur Konsequenz, dass es nicht den einen optimalen Wärmespeicher für alle Anwendungen gibt. Entsprechend erfordert dieses Arbeitsgebiet den Umgang mit einem breiten Spektrum an Speichertechnologien, Materialien und Methoden.

Übergeordnete Entwicklungsziele auf dem Gebiet Speichertechnik sind die Reduktion der spezifischen Investitionskosten und die Erhöhung von Effizienz und Zuverlässigkeit. Dabei stehen Materialaspekte, Auslegungsfragen und Systemintegration gleichermaßen im Fokus der Forschungsaktivitäten.

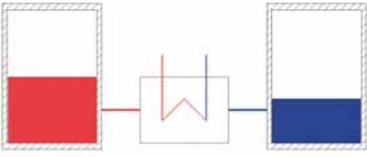
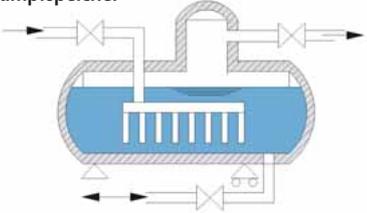
Speicherkonzept	Prinzip	Typische Speichermedien	Verfügbarkeit
Fluidspeicher 	Speicherung sensibler Wärme in flüssigem Speichermedium	Thermoöl Druckwasser Flüssigsalz	Umfangreiche Betriebserfahrung im konventionellen Bereich und Solarkraftwerken
Feststoffspeicher 	Festes Speichermedium mit integriertem Wärmeübertrager	Beton	Praxisnahe Erprobung in Kombination mit Solarkollektoren
Dampfspeicher 	Speicherung sensibler Wärme in Druckwasser, Phasenwechsel bei Be- und Entladung	Druckwasser	Umfangreiche Betriebserfahrung im konventionellen Bereich
Latentwärmespeicher 	Isotherme Speicherung in einem Medium mit Phasenwechsel während der Be- und Entladung	Technische Salze	Experimente im Labormaßstab, ab 2007 praxisnahe Erprobung in Kombination mit Solarkollektoren

Abbildung 1
Übersicht thermischer Speicherkonzepte für Temperaturen > 100 °C

Speicherkonzepte

Dampfspeicher nutzen die Speicherfähigkeit von flüssigem Wasser, um sensible Wärme zu speichern. Dabei wird der Dampfspeicher durch Zufuhr von Dampf beladen, der im Druckvolumen kondensiert wird (Abb. 1). Die Wassertemperatur im Speicher entspricht der Siedetemperatur. Der Speicher gibt bei der Entladung Sattdampf ab, wobei der Druck abfällt. Dominanter Kostenfaktor ist der Druckbehälter. Charakteristisch für Dampfspeicher ist die schnelle Verfügbarkeit der gespeicherten Energie. Daher sind diese Systeme als Pufferspeicher zur Abdeckung von Leistungsspitzen geeignet. Als Energiespeicher sind sie nur sehr eingeschränkt verwendbar, da eine Bereitstellung von Wärme auf gleich bleibendem Temperatur- bzw. Druckniveau nicht möglich ist.

Für den Temperaturbereich > 100 °C kann Wasser unter Umgebungsdruck nicht mehr als Speichermedium eingesetzt werden, so dass unterschiedliche direkte und indirekte Speicherverfahren und Konzepte, wie in Abb. 1 dargestellt, herangezogen werden müssen [1].

Fluidspeicher nutzen ein flüssiges Medium zur Speicherung sensibler Wärme. Das Arbeitsmedium der Solarkollektoren kann direkt gespeichert werden oder die Energie wird an ein flüssiges Speichermedium übertragen. Voraussetzung ist, dass der Siedepunkt des Speichermediums oberhalb der maximalen Betriebstemperatur der Solarkollektoren liegt. Hier bieten sich Thermoöle bzw. Wasser unter entsprechendem Druck an. Bei Thermoöl sind Investitionskosten, Sicherheits- und Umweltaspekte zu beachten.



Abbildung 2
Feststoffspeicher vor
Anbringen der Isolation

Die Kosten können durch den Einsatz eines Eintank-Schichtspeichersystems reduziert werden. Grundsätzlich ist auch Flüssigsalz als Medium geeignet. Hier ist der Fokus aber eher auf den Temperaturbereich über 300 °C für den Einsatz in solarthermischen Kraftwerken gerichtet.

Bei **Feststoffspeichern** wird die Energie zwischen dem Arbeitsmedium der Kollektoren bzw. des Prozesses und einem festen Speichermedium übertragen. Der Wärmeübertrager ist dabei in das Speichermedium integriert. Wesentlich für eine wirtschaftliche Auslegung ist die Wahl eines kostengünstigen Speichermediums, das im Hinblick auf die erforderliche Wärmeübertragerfläche jedoch auch eine möglichst hohe Wärmeleitfähigkeit aufweisen sollte. In Hinblick auf Fertigungsaspekte eignet sich hier temperaturbeständiger Beton, der eine einfache Integration des Wärmeübertragers ermöglicht. *Abb. 2* zeigt einen Feststoffspeicher (vor Anbringen der äußeren Isolation) der gegenwärtig in Kombination mit Rinnenkollektoren bei Temperaturen bis zu 390 °C erprobt wird [2].

Neue Entwicklungen – Latentspeichermedien mit hoher Leitfähigkeit

Für die effiziente Speicherung von Wärme oder Kälte sind Latentwärmespeicher besonders geeignet, da sie eine Phasenumwandlung z. B. fest/flüssig (schmelzen) eines Phasenwechselmaterials (engl. „Phase Change Material“ - PCM)

ausnutzen und hierdurch große Wärmemengen in einem schmalen Temperaturbereich speichern können. Gegenüber konventionellen sensiblen Wärmespeichern sind mit PCM-Speichern hohe Energiedichten bei weitgehend konstanter Betriebstemperatur realisierbar. So kann bei einer Temperaturänderung von 10 Grad im Vergleich zur konventionellen Wärmespeicherung mittels fühlbarer Wärme beim Schmelzvorgang eine 10 bis 20-fach höhere Wärmespeicherdichte erzielt werden, wodurch Menge an Speichermedium und Baugröße der Behälter signifikant reduziert werden können. Wegen dieser Vorteile wurden in den letzten Jahren verstärkte Anstrengungen für eine technische Realisierung von Latentwärmespeichern gemacht.

Das wesentliche Problem bei der technischen Umsetzung der Latentwärmespeicherung liegt in dem unzureichenden Wärmetransport zwischen dem Speichermedium und dem Wärmeträgerfluid. Hauptgrund hierfür ist die niedrige Wärmeleitfähigkeit der organischen oder anorganischen Speichermedien (typischerweise 0.5-1 W/m·K). Zum Erreichen einer ausreichend hohen Wärmestromdichte bzw. Lade- und Entladeleistung werden daher entweder sehr große, unwirtschaftliche Wärmeübertragerflächen oder Speichermedien mit erheblich höherer Wärmeleitfähigkeit benötigt (*Abb. 3*). Zur Überwindung der Wärmetransportlimitierung werden derzeit zwei Strategien in der angewandten Forschung vorangetrieben:

- Mikroverkapselung der Speichermedien (Paraffine als PCM und organische Verkapselung, die aber nur unterhalb von 100 °C einsetzbar sind), um eine sehr hohe spezifische Oberfläche zu erzielen sowie
- Entwicklung hochleitfähiger Verbundmaterialien, wobei das Latentmaterial mit einer extrem gut wärmeleitenden Matrix zu einem neuen Verbundmaterial umgesetzt wird.

Die spezifischen Vorteile von Latentwärmespeichern können besonders in Verbindung mit Anwendungen genutzt werden, bei denen auch das Wärmeträgerfluid oder das Prozessmedium zweiphasig betrieben wird. Für den Bereich Prozesswärme und Kraftwerkstechnik nimmt das System Wasser/Dampf eine dominierende Rolle ein. Grundsätzlich sind Salzsysteme als Latent-

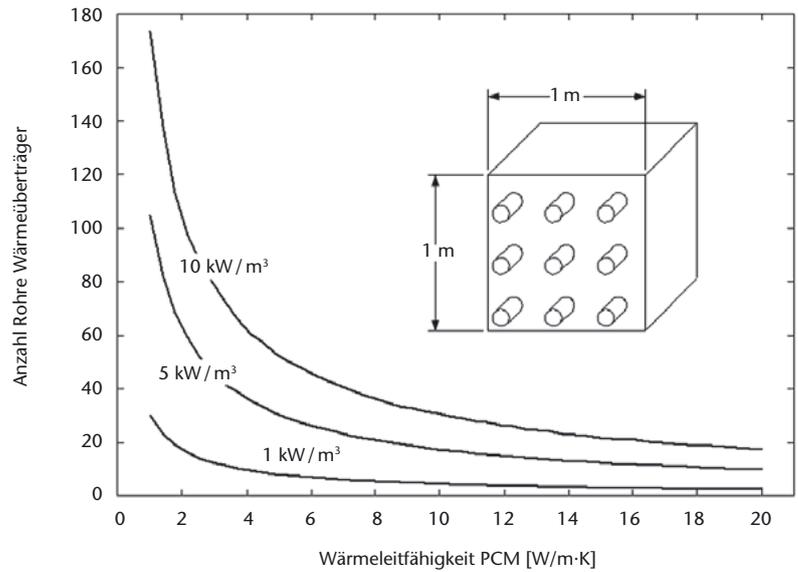
speichermedien besonders geeignet. Dabei kann mit binären Nitratsalzen wie z. B. mit den Systemen $\text{KNO}_3\text{-NaNO}_3$ und $\text{KNO}_3\text{-LiNO}_3$ der relevante Temperaturbereich zwischen 120°C und 300°C abgedeckt werden.

Im Rahmen aktueller Projekte mit Partnern aus Industrie und Forschung (z. B. DLR und SGL Technologies) werden Verbundmaterialien auf der Basis von Salz und expandiertem Graphit als Matrix entwickelt [2,3]. Expandierter Graphit ist ein auf Naturgraphit basierendes Sekundärprodukt, das für zahlreiche technische Anwendungen zum Einsatz kommt. Für die Anwendung als Wärmespeichermaterial wird seine hohe Wärmeleitfähigkeit und Porosität genutzt (Abb. 4). Dadurch lassen sich Wärmespeicher mit hoher Lade- und Entladeleistung bei deutlich gesenkten Kosten realisieren. Die derzeit entwickelten Salz/Graphit-Verbundmaterialien mit Massenanteilen von ca. 15% Graphit decken einen Temperaturbereich $120\text{-}300^\circ\text{C}$ ab. Sie werden durch Infiltrationstechnik oder durch Verpressen hergestellt (Abb. 5). Die hierfür ermittelten Werte für die Wärmeleitfähigkeit liegen im Bereich von $4\text{-}15\text{ W/m}\cdot\text{K}$. Damit steht erstmalig ein Speichermedium zur Verfügung, das die Realisierung wirtschaftlicher Latentspeichersysteme für höhere Temperaturen ermöglicht.

Vergleich der Speicherkonzepte

Für eine qualitative Bewertung der unterschiedlichen Speichertypen ist als Referenzfall eine solare Prozesswärmanlage gewählt worden, die Dampf bei 140°C und einem Druck von $3,6\text{ bar}$ zur Versorgung eines isothermen Prozesses bereitstellen soll. Der hierfür auszulegende Speicher soll eine geforderte thermische Leistung von 100 kW für die Dauer von einer Stunde zur Verfügung stellen können. Für die Auslegung sind zwei Betriebsfälle für den Solarkollektor gewählt worden:

- Fall 1: die Solarkollektoren stellen Sattdampf bei 160°C am Austritt zur Verfügung
- Fall 2: die Solarkollektoren stellen Sattdampf bei 200°C am Austritt zur Verfügung



Das Ergebnis der Berechnungen ist in Tab. 1 zusammengestellt. In beiden Fällen erfordert der Latentwärmespeicher das geringste Speicher- und Behältervolumen, wobei der Vorteil für den Fall 1 mit geringer Temperaturdifferenz zwischen Kollektorausstritt und Prozessbedarf besonders gravierend ist.

Abbildung 3 Einfluss der Wärmeleitfähigkeit von PCM-Medien auf die benötigte Zahl paralleler Wärmeübertragerrohre pro Quadratmeter Querschnittsfläche des Speichers bei unterschiedlichen Wärmeflussdichten

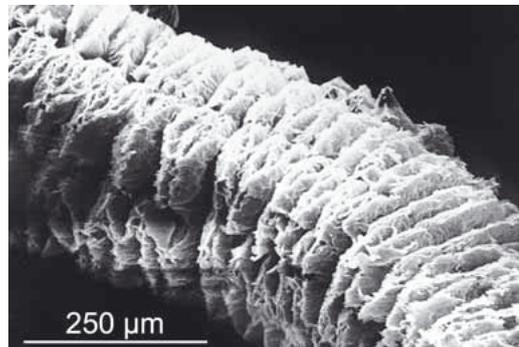


Abbildung 4 Mikrostruktur von expandiertem Graphit



Abbildung 5 Ausgewählte Formkörper von Latentmaterialien aus Salz/Graphit

Tabelle 1
 Vergleich unterschiedlicher Wärmespeicher für solare Prozesswärme

Speicherkonzept	Speichervolumen bei Kollektoraustrittstemperatur 160 °C	Speichervolumen bei Kollektoraustrittstemperatur 200 °C
Fluidspeicher, Thermoöl	11,0 m ³	3,3 m ³
Fluidspeicher, Druckwasser	8,8 m ³	2,9 m ³
Feststoffspeicher	13,5 m ³	4,2 m ³
Dampfspeicher	5,2 m ³	1,6 m ³
Latentwärmespeicher	0,8 m ³	0,7 m ³

Bei sensibler Wärmespeicherung sind die Speicherkosten näherungsweise proportional zum Speichervolumen. Daher werden Speichersysteme auf Basis sensibler Wärmespeicherung nur dann zu wirtschaftlich attraktiven Lösungen führen, wenn die zulässige Temperaturdifferenz zwischen Kollektoraustritt und benötigter Prozesstemperatur ausreichend groß ist.

Die Ergebnisse zeigen ferner, dass durch Einsatz von Latentwärmespeichern die Auslegungstemperatur des Kollektors herabgesenkt werden kann, was zu deutlich geringeren thermischen Verlusten und damit zu einer besseren Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems führt.

Fazit

Thermische Energiespeicher sind ein zentrales Element zum effektiven Energiemanagement im Bereich Prozesswärme und Kraftwerkstechnik, sie sind für solarthermische Anwendungen unverzichtbar. Ein charakteristisches Merkmal der Speichertechnologie sind die für die jeweiligen Anwendungen hochspezifischen Anforderungsprofile, die ein Portfolio an Speichertypen, Materialien und Methoden erfordern. Für den Bereich Dampferzeugung, Prozessdampf und Organic Rankine Cycle¹ haben Latentwärmespeicher gegenüber sensiblen Wärmespeichern extreme Vorteile.

Die Verfügbarkeit verschiedener Speicherkonzepte ermöglicht die Anpassung des Speichers an eine Vielzahl unterschiedlicher Einsatzgebiete und Betriebsparameter.

Literatur

- [1] Tamme, R., Laing, D., Steinmann, W.-D.: Thermal energy storage technologies for solar process heat applications, Proceedings of ESTEC 2005, 2nd European Solar Thermal Energy Conference, pp. 177-183
- [2] BMWA Verbundvorhaben „Temperatur- und druckstabile Prozessdampf-Speicherung und -Erzeugung durch neuartige Latentmaterial-Dampfspeichertechnik“ FKZ 0327360, Weitere Informationen unter www.dlr.de/tt/institut/abteilungen/thermischept/heat_st/
- [3] EU Projekt „Energy Storage for Direct Steam Solar Power Plants“, SES6-CT-2003-503526, Weitere Informationen unter www.dlr.de/tt/institut/abteilungen/thermischept/heat_st/

¹ Der „Organic Rankine Cycle“-Prozess (ORC) ist ein nicht-überhitzender thermodynamischer Zyklus, in dem eine organische Betriebsflüssigkeit Elektrizität erzeugt.