

■ Thermische Speicher

- Wärmespeicher für die Hausenergieversorgung
- Speicherung für Hochtemperaturwärme

Wärmespeicher für die Hausenergieversorgung

Peter Schossig
Fraunhofer ISE
schossig@ise.fraunhofer.de

Dr. Christian Dötsch
Fraunhofer UMSICHT
christian.doetsch@umsicht.fraunhofer.de

Harald Drück
ITW
drueck@itw.uni-stuttgart.de

Dr. Joachim Götsche
Solar-Institut Jülich
goetsche@sij.fh-aachen.de

Dr. Ernst Huenges
GFZ
huenges@gfz-potsdam.de

Dr. Frank Kabus
GTN
Geothermie
Neubrandenburg GmbH
gtn@gtn-online.de

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

1. Einleitung

Gerade bei der Nutzung regenerativer Energiequellen für die Hausenergieversorgung stimmen Angebot und Bedarf der benötigten Energie zeitlich oft nicht überein. Durch die Nutzung thermischer Energiespeicher lassen sich jedoch die Deckungsraten regenerativer Energien deutlich steigern und damit Ressourcen schonen. Da nach wie vor der größte Teil des Energieverbrauchs in Haushalten für den Bereich der Raumwärme und Brauchwasserbereitung verwendet werden muss, ist das Einsparpotenzial durch thermische Energiespeicherung beträchtlich.

2. Techniken

Je nachdem welche Zeitspanne durch den Speicher überbrückt (Saisonal- oder Kurzzeitspeicher) und auf welchem Temperaturniveau die Energie gespeichert werden soll, kommen unterschiedliche Speichertechniken zum Einsatz. Während für die saisonale Wärmespeicherung in der Regel große Wasserspeicher bzw. Aquifere oder Erdsondenspeicher eingesetzt werden, kommen für Kurzzeitspeicher auch andere Speichertechniken in Frage, die nicht nur die Wärmekapazität eines Materials nutzen. Während im Temperaturbereich der Trinkwassererwärmung und Raumheizung klassische Wasserspeicher den bei weitem größten Teil des Marktes decken, kommen für den stark wachsenden Markt der Kältespeicherung für die Raumklimatisierung zunehmend Alternativen wie Phasenwechselmaterialien als Latentwärmespeicher in die Anwendung.

2.1 Warmwasserspeicher für Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung

Ein Speicher, wie er in Deutschland im Allgemeinen in Verbindung mit einer Solaranlage eingesetzt wird, ist in *Abb. 1* dargestellt. Als Speichermedium dient Trinkwasser. Die Sonnenenergie

wird dem Trinkwasser durch den Kollektorkreislauf mittels eines Wärmeträgerfluids (Gemisch aus Wasser und Frostschutzmittel) über den unteren Wärmeübertrager zugeführt. Da der jährliche Warmwasserbedarf nicht vollständig solar gedeckt werden kann, befindet sich im oberen Bereich des Speichers (Bereitschaftsvolumen) ein elektrischer Heizstab oder ein zweiter Wärmeübertrager.

Die zur Charakterisierung des thermischen Verhaltens von Warmwasserspeichern dienenden Kenngrößen werden in *Abb. 1* vorgestellt:

Die **Wärmekapazität** des gesamten Speichers **2** gibt an, welche Wärmemenge der Speicher beim üblichen Betrieb je Grad Temperaturänderung des Speichermediums aufnehmen bzw. abgeben kann.

Die **Wärmeverlustrate** **1** gibt den vom Speicher an die Umgebung übertragenen Wärmestrom an bezogen auf ein Grad Temperaturdifferenz zwischen Speichermedium und Umgebung. Insbesondere bei relativ kleinen Speichern, wie sie im Ein- und Zweifamilienhaus eingesetzt werden, wird die Wärmeverlustrate maßgeblich durch die am Speicher vorhandenen Wärmebrücken (z. B. Anschlüsse, Tauchhülsen) bestimmt. Ein gut wärmegeprägter Speicher zeichnet sich daher nicht nur durch eine möglichst dicke Dämmung mit einem schlecht wärmeleitenden Material aus, sondern auch dadurch, dass die Dämmung keine signifikanten Wärmebrücken aufweist.

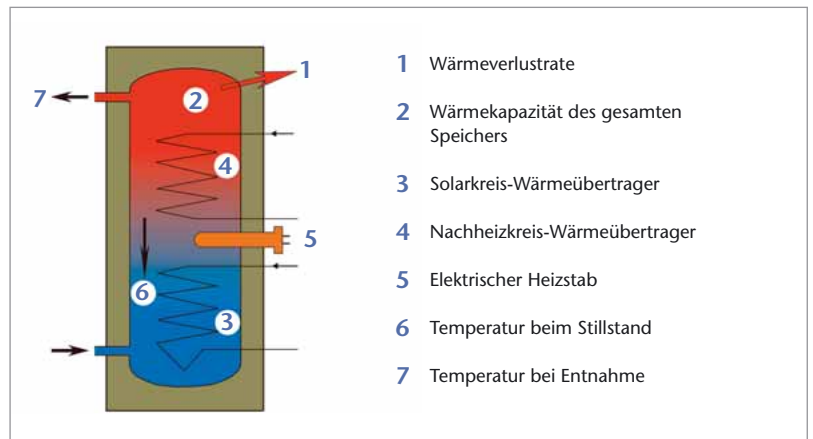
Die wichtigste Größe zur Beschreibung des thermischen Verhaltens des **Solarkreis-Wärmeübertragers** **3** ist sein Wärmeübertragungsvermögen. Dieses ist neben dem Wärmeübertrager selbst, auch vom Massenstrom durch den Wärmeübertrager und der Temperaturdifferenz zwischen Wärmeübertrager und Speicher sowie von der Temperatur abhängig. Sinnvoll dimensionierte Solarkreis-Wärmeübertrager weisen bei typischen Betriebsbedingungen pro Quadratmeter

angeschlossener Kollektorfläche ein Wärmeübertragungsvermögen von ca. 60 bis 80 Watt pro Grad auf.

Die wichtigste Größe neben dem Wärmeübertragungsvermögen des **Nachheizkreis-Wärmeübertragers 4** ist die vertikale Position seines unteren Anschlusses. Diese Größe liefert Informationen zur Versorgungssicherheit mit warmem Wasser, da durch sie das maximal zur Verfügung stehenden Bereitschaftsvolumen vorgegeben wird.

Bei Verwendung eines **elektrischen Heizstabs 5** ist zusätzlich zu seiner Heizleistung ebenfalls seine vertikale Position innerhalb des Speichers relevant, da durch diese das bei elektrischer Beheizung maximal zur Verfügung stehende Bereitschaftsvolumen und damit die Versorgungssicherheit vorgegeben wird.

Eine gute **Temperaturschichtung bei der Entnahme 6** ist wichtig, damit dem Speicher möglichst viel Wasser mit einer konstanten hohen Temperatur entnommen werden kann. Ein Abbau der Temperaturschichtung bei der Entnahme findet durch Vermischungen mit dem von unten nachströmenden kalten Wasser statt. Um diese Vermischungen zu reduzieren, sollte der in den Speicher eintretende kalte Wasserstrahl durch ein Prallblech „beruhigt“ werden. Die Temperaturschichtung bei der Entnahme kann, durch eine so genannte Schichtungskennzahl quantifiziert werden.



Der Abbau der **Temperaturschichtung im Stillstand 7** wird durch die effektive vertikale Wärmeleitfähigkeit beschrieben. Gründe dafür, dass sich die Temperaturschichtung in einem ruhenden Speicher abbaut, sind Wärmeleitungseffekte im Wasser und in der Behälterwand sowie auftretende Konvektionsströmungen.

Abbildung 1 Warmwasserspeicher einer Solaranlage zur Trinkwassererwärmung

• **Solare Kombispeicher**

Soll die Solarenergie zusätzlich zur Trinkwassererwärmung noch zur Unterstützung der Heizung genutzt werden, kommen solare Kombianlagen zum Einsatz. Diese Anlagen unterscheiden sich durch den eingesetzten Speicher und die Funktionen die von diesem Speicher übernommen werden [1]. In **Abb. 2** ist exemplarisch der prinzipielle Aufbau einer solaren Kombianlage dargestellt.

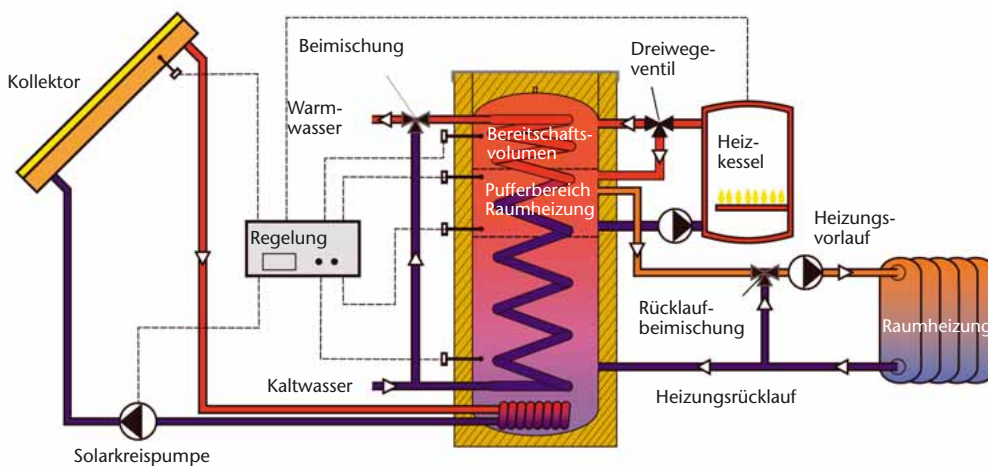


Abbildung 2 Prinzipieller Aufbau einer solaren Kombianlage (mit Pufferfunktion für den Heizkessel)

Die Charakterisierung des thermischen Verhaltens von Kombispeichern erfolgt ebenfalls auf der Basis der im vorangegangenen Abschnitt erläuterten Kenngrößen [2].

- **Prüfung von Warmwasserspeichern**

Zur Prüfung von Warmwasserspeichern für Solaranlagen existiert seit einigen Jahren die europäische Vornorm ENV 12977-3. Bei der thermischen Prüfung von Warmwasserspeichern werden Kenngrößen ermittelt, die eine detaillierte Charakterisierung des thermischen Verhaltens des Speichers ermöglichen.

Die Kenntnis dieser Eigenschaften bzw. entsprechender thermischer Kenngrößen ist besonders wichtig

- für den Vergleich und die Bewertung von Speichern
- um für einen bestimmten Anwendungsfall einen geeigneten Speicher auswählen zu können
- zur thermischen Leistungsprüfung von Solaranlagen auf der Basis von Komponententests nach ENV 12977-2

2.2 Saisonale Wärme- und Kältespeicherung

Sommerliche Wärmequellen für die winterliche Heizung sind z. B. Solarenergie und Abwärme, vor allem aus der Kraft-Wärme-Kopplung, Kondensationswärme von Kältemaschinen und aus der Abluft. Als winterliche Kältequellen für die sommerliche Kühlung können z. B. Außenluft (Zuluft), Oberflächenwasser oder auch „Abkälte“ aus Wärmepumpen genutzt werden.

Darüber hinaus ist die Verbindung von sommerlichen Wärme- mit winterlichen Kältequellen zu einer gekoppelten Wärme- und Kältespeicherung möglich sowie ökologisch und ökonomisch erstrebenswert.

Zur saisonalen Speicherung steht zum einen der bekannte Heißwasser-Behälterspeicher zur Verfügung, der oftmals wegen des benötigten großen Volumens als in den Erdboden eingelassener, druckloser Stahlbetonspeicher, zum

Teil mit einer wasserundurchlässigen Auskleidung, ausgeführt wird. Systemgrößen bis zu 12.000 m³ (Solarprojekt Friedrichshafen) wurden bereits gefertigt. Daneben kommen auch Stahltanks und neuerdings GFK-Behälter¹ (50 bis 6.000 m³) zum Einsatz. Zum anderen sind sogenannte Erdbeckenspeichereine kostengünstige Alternative. Hier werden große Gruben mit wasserdichten Folien ausgelegt, anschließend mit einer Kies-Wasser-Mischung gefüllt und seitlich sowie oben wärmegeklämt. Wie bei allen bisher beschriebenen Speichervarianten ist hier besonderer Wert auf die Ladewechsel-einrichtung zu legen, um eine gute Temperaturschichtung zu erzielen.

Außerdem nutzt der Mensch schon seit Urzeiten das thermische Speichervermögen des Erdbodens. Große Speichervolumina können sehr kostengünstig hergestellt werden, da man bei der unterirdischen Speicherung entweder

- direkt das in natürlichen Hohlräumen (Poren, Kavernen, Klüften) vorhandene Wasser als Energieträger verwendet,
- Hohlräume mit spezifisch geringem Aufwand erstellt oder ausschließlich
- auf indirektem Wege (z. B. über moderne Erdsonden) den festen Boden als Speichermedium verwendet.

Neben den notwendigen Speichervolumina bestimmen Temperaturniveaus, bauliche und geologische Randbedingungen und Anforderungen an die Umweltverträglichkeit des Systems die Auswahl des konkret geeigneten Verfahrens.

- **Aquiferspeicher**

Bei günstigen geologischen Bedingungen und vor allem für großformatige Energiesysteme sind Aquiferspeicher zu favorisieren. Wärme- oder Kälte-träger ist hier direkt das Grundwasser und die Speicherung erfolgt im Grundwasser sowie im porösen Gestein. Derartige Speicher bestehen aus zwei Bohrungen bzw. Bohrungsgruppen, die den gleichen Grundwasserleiter (Aquifer) erschließen. Sie werden in der Regel in einem Abstand von 50 bis 300 m angeordnet, um die gegenseitige

¹ Behälter aus glasfaserverstärktem Kunststoff

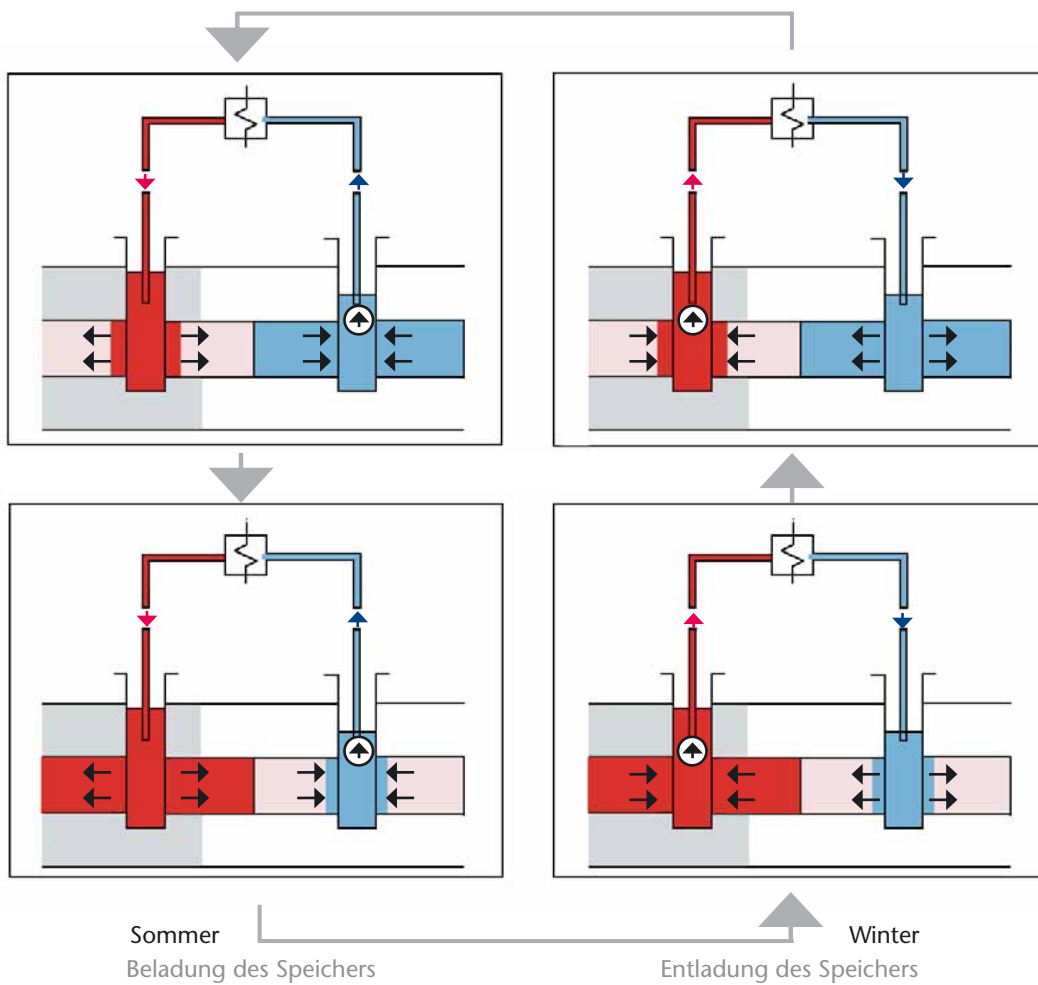


Abbildung 3
Schema der Gestaltung
und der Funktion eines
Aquiferspeichers

thermische Beeinflussung auszuschließen. Beide Bohrungen sind mit Pumpen sowie einem Injektionsstrang ausgestattet, die das Durchströmen der Anlage in beiden Richtungen erlauben. Typische Tiefen von Aquiferspeichern beginnen bei 100 m. Bei Einlagerungstemperaturen größer 50 °C müssen in der Regel Maßnahmen zur Stabilisierung der Wasserqualität ergriffen werden.

Das aus der kalten Bohrung entnommene Wasser wird im Sommer mit Wärme beladen und in die warme Bohrung injiziert, wo sich im Aquifer eine Wärmeblase bildet. Im Winter wird diese Wärmeblase dann mit umgekehrter Strömungsrichtung abgefördert. Im einfachsten Fall erfolgt die Regeneration mit Umgebungskälte, idealerweise wird die gespeicherte Wärme über Wärmetauscher oder Wärmepumpen aber genutzt und der Speicher auf diese Weise für den nächsten Zyklus abgekühlt.

• Erdsondenspeicher

Bei dieser Art der Speicherung wird nicht das Grundwasser direkt als Wärmeträger genutzt, sondern in bis zu 100 m tiefe Bohrungen werden langgestreckte U-Rohrförmige bzw. koaxiale Wärmetauscher eingebracht, in denen ein Wärmeträger zirkuliert. Zwischen den Bohrungen eines Feldes ist ein Abstand von 1,5 bis 3 m einzuhalten. Der Wärmetransport an das Erdreich bzw. vom Erdreich erfolgt durch Wärmeleitung. Dies macht das Betriebsverhalten der Systeme träge und hat zur Folge, dass Spitzenlasten bei Be- und Entladung durch separate Pufferspeicher ausgeglichen werden müssen. Bei der Konzipierung der Speichergeometrie müssen zur Verlustminimierung die Berandungsflächen möglichst klein gehalten werden. Auch kann bei höheren Speichertemperaturen eine an der Oberfläche angebrachte Wärmedämmung gleichen Zwecken dienen.

2.3 Luftdurchströmte Steinspeicher

Als weitere Variante der solaren Heizungsunterstützung kommen luftdurchströmte Steinspeicher in Frage. *Abb. 4* stellt ein einfaches System eines über Luftkollektoren gespeisten Wandspeichers dar. Die auf dem Dach montierten Luftkollektoren erwärmen über einen Ventilator einen kaminförmigen Kiesspeicher. Derartig einfache und kostengünstige Systeme sind insbesondere für Entwicklungsländer interessant.

2.4 Phasenwechselspeicher für die Klimatisierung

Aufgrund steigender Komfortansprüche und veränderter Architektur ist der Energiebedarf für Gebäude-Klimatisierung in Europa stark steigend. Da hier die Spitzenlasten der benötigten Kälteerzeugung mit den ohnehin ausgeprägten Spitzen des Stromnetzes zusammen fallen und die Kälteerzeugung nachts in der Regel aufgrund tieferer Temperaturen deutlich effizienter erfolgt, bewirkt ein 12 Stundenpeicher bereits eine signifikante Reduktion des Energieverbrauchs. Während bei der Speicherung von Wärme in

der Regel große Temperaturspreizungen in Kauf genommen werden können, ist bei Anwendungen der Klimatechnik meist nur ein sehr enges Temperaturband nutzbar. Dies macht die Nutzung von Phasenwechselmaterialien, die in einem geringen Temperaturbereich große Mengen an Wärme speichern können, attraktiv.

Eine passive Speicheranwendung ist dabei das Einbringen von mikroverkapselten Paraffinen mit einem Schmelzbereich zwischen 24 °C und 26 °C in Baustoffe. Steigt die Raumtemperatur über 24 °C an, beginnt das Paraffin zu schmelzen und nimmt dabei große Mengen an Wärme auf, sodass der Raum deutlich kühler bleibt. Durch eine ausreichende Lüftung nachts kann das Material wieder entladen werden, so dass im Idealfall eine Lüftung ausreicht und auf aktive Kälteerzeugung verzichtet werden kann. *Abb. 5* zeigt den schematischen Aufbau einer Leichtbauwand mit in den Putz integrierten mikroverkapselten Latentwärmespeichern und den gemessenen Temperaturverlauf der Wandoberflächentemperaturen in identischen Räumen mit und ohne diesen Additiven im Putz.

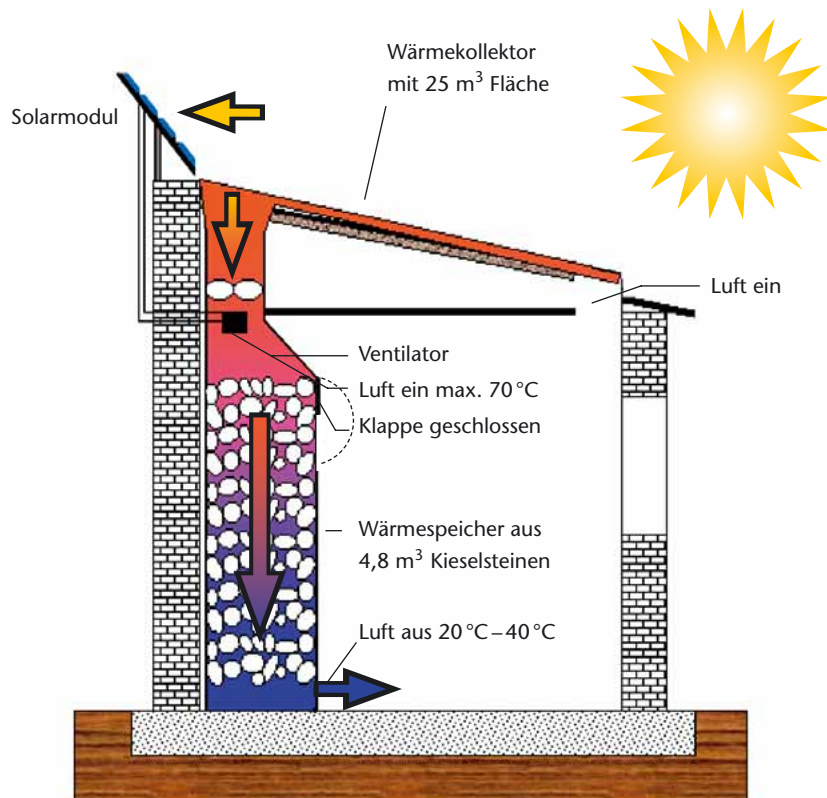


Abbildung 4
Solare Luftheizung mit
Steinspeicher

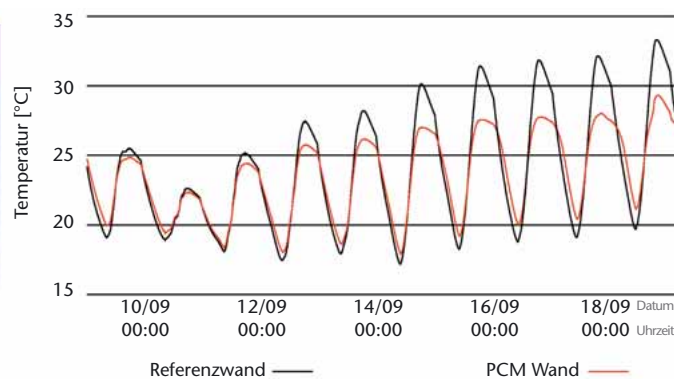
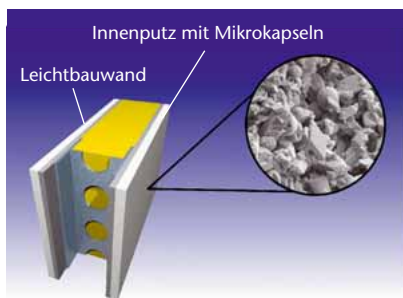


Abbildung 5
Schematische Darstellung von PCM-Mikrokapselfüllung in Putz und gemessener Verlauf der Wandtemperaturen in zwei Räumen mit Leichtbauwänden mit und ohne Phasenwechselmaterialien in Putz

Eine weitere Alternative stellt das Einbringen dieser Mikrokapselfüllung in Wärmeträgerfluide dar. Dadurch kann in einem gewünschten Temperaturband die Speicherkapazität dieser Fluide deutlich erhöht werden, was kompaktere Speicher ermöglicht und – da für die gleiche Leistung wesentlich geringere Massenströme benötigt werden – geringere Rohrdurchmesser oder verringerte Pumpleistungen erlaubt.

3. Zusammenfassung

Um die Nutzung regenerativer Energiequellen im Gebäudebereich zu erhöhen, sind aufgrund des zeitlichen Versatzes von Angebot und Bedarf thermische Speicher unabdingbar. Da ungefähr ein Drittel des deutschen Primärenergiebedarfs für Raumtemperierung und Warmwasserbereitung verwendet wird, kommt thermischen Speichern eine bedeutende Rolle bei der Erreichung der Ziele in der Klimapolitik zu.

Je nach Dauer und Temperaturniveau der gewünschten Speicherung kommen die unterschiedlichsten Materialien und Konzepte zum Einsatz, vom klassischen Warmwasserspeicher über Stein-, Erd-, und Aquiferspeicher bis hin zu neuartigen Phasenwechselmaterialien als Latentwärmespeicher.

Literatur

[1] H. Drück, E. Hahne,
Der Speicher – das Herz der Kombianlage
Untertitel: Kombispeicher für Ein- und Zweifamilienhäuser, Tagungsband

„Solares Heizen ,99“, Seiten 23 - 32,
Solar Promotion GmbH, München, 1999,
ISBN 3-934349-04-8

- [2] Drück, H., Hahne E.
Kombispeicher auf dem Prüfstand
Tagungsband zum achten Symposium
Thermische Solarenergie,
Seiten 90 - 94, OTTI-Technologie-Kolleg,
Regensburg, Juni 1998
- [3] Kabus, F.; Hoffmann, F.; Möllmann, G.:
Aquifer Storage of Waste Heat Arising from
a Gas and Steam Cogeneration Plant –
Concept and First Operating Experience“,
Proc. of World Geothermal Congress 2005,
Antalya/Turkey, 2005
- [4] Kabus, F. ; Bartels, J.:
Speicherung von Wärme und Kälte in
Grundwasserleitern. KI Luft- und Kältetechnik,
Hüthig-Verlag Heidelberg, 6/2004, S.
170-175
- [5] Schossig, P.
Henning, H.-M.; Haussmann, T.
Microencapsulated Phase Change Materials
integrated into Construction Materials
“Eurosun 2004“, Freiburg, Proceedings
2-413 - 2-421
- [6] Gschwander, S., Schossig, P.
Mikroverkapselte Phasenwechselmaterialien
in Fluiden zur Erhöhung der Wärmekapazität,
OTTI-Energie-Kolleg 14. Symposium
Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein,
Germany, 14.5.2004, pp. 348-353

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.

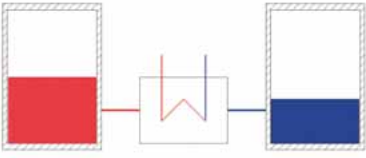

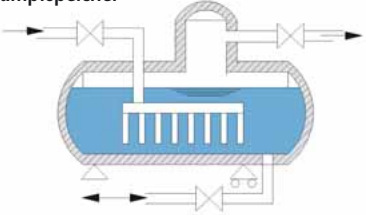

Speicherkonzept	Prinzip	Typische Speichermedien	Verfügbarkeit
Fluidspeicher 	Speicherung sensibler Wärme in flüssigem Speichermedium	Thermoöl Druckwasser Flüssigsalz	Umfangreiche Betriebserfahrung im konventionellen Bereich und Solarkraftwerken
Feststoffspeicher 	Festes Speichermedium mit integriertem 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 Speicherungsverfahren 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-

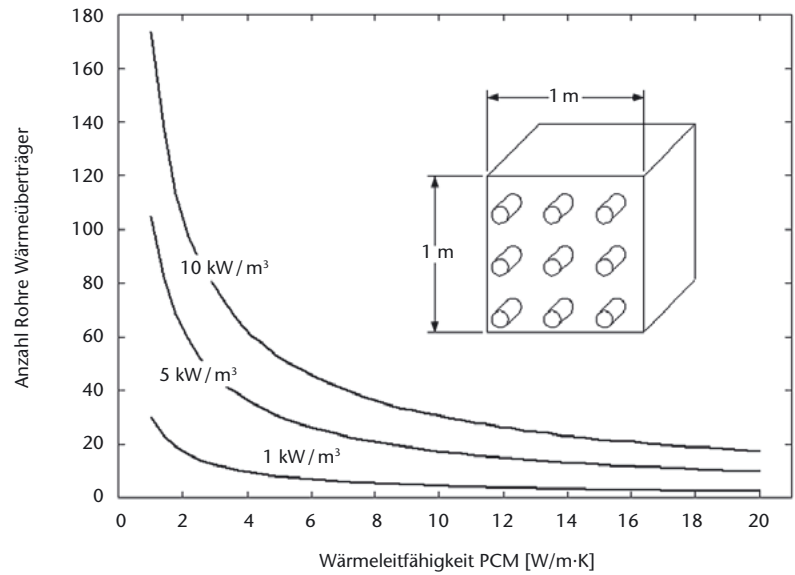
speichermedien besonders geeignet. Dabei kann mit binären Nitratsalzen wie z. B. mit den Systemen $\text{KNO}_3\text{-NaNO}_3$ und $\text{KNO}_3\text{-LiNO}_3$ der relevante Temperaturbereich zwischen 120°C und 300°C abgedeckt werden.

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-Verschmelzungen 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

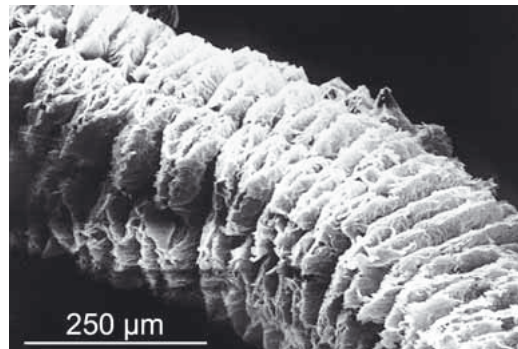


Abbildung 4 Mikrostruktur von expandiertem Graphit



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.