

ForschungsVerbund Sonnenenergie

Workshop Wärmespeicherung

28. – 29.05.2001 in Köln

Herausgeber:
Bernhard Milow, DLR
Gerd Stadermann, FVS



FVS **Workshop 2001**

Veranstalter Wasserstoffspeicherung:
ZSW Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung

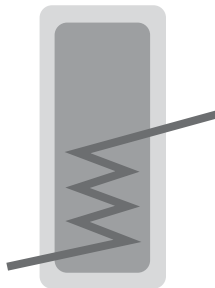
Veranstalter Wärmespeicherung:
DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Workshop Wärmespeicherung

- 4 Langzeitwärmespeicherung mit einem
neuartigen Speicherkonzept
Dipl.-Ing. Jürgen Bühl
- 14 Langzeit-Wärmespeicher für solare Nahwärme
Thomas Schmidt
- 32 Regenerative Wärmespeicherung bei hohen Temperaturen,
Anwendungen aus der Gießereitechnik
Prof. Dr. Ernst P. Warnke
- 36 Regeneratoren als Hochtemperaturspeicher – Industrielle
Anwendungen
Prof. Dr. Christian Streuber
- 49 Latentwärmespeicherung:
Neue Materialien und Materialkonzepte
Dr. Harald Mehling
- 65 Thermische Energiespeicherung mit Phasenwechsel
im Bereich von 150 bis 400 °C
Dipl.-Ing. Frieder Graeter
- 76 Teilnehmer
- 82 Standorte der Mitgliedsinstitute
- 83 Anschriften der Mitgliedsinstitute
- 84 Impressum

Workshop Wärmespeicherung

28. – 29.05.2001 in Köln





Dipl.-Ing. Jürgen Bühl
TU Ilmenau Fakultät für
Maschinenbau, Ilmenau
juergen.buehl@
mb.tu-ilmenau.de

Langzeitwärmespeicherung mit einem neuartigen Speicherkonzept für solar- gestützte Nahwärmesysteme

Im Rahmen des Förderprogramms „Solarthermie 2000 – TP 3: Solare Nahwärme-Begleitforschung“ wurde in einem Verbundprojekt zwischen der TU Ilmenau, der Fakultät für Maschinenbau (Fachgebiet Thermo- und Fluidodynamik) und der Firma VKA, Verbundwerkstoff- und Kunststoffanwendungstechnik GmbH, Schönbrunn, ein 300 m³ GFK-Pilotspeicher am Standort Ilmenau entwickelt, errichtet und messtechnisch begleitet.

0. Vorbemerkungen:

Die bisher vorliegenden Erkenntnisse und Ergebnisse zum Einsatz von Solarenergie zur Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung in Deutschland und weiteren sich intensiv mit der Anwendung der Solarthermie beschäftigenden Ländern Europas zeigen, daß die erfolgreiche Realisierung von Solaranlagen auch zur Heizungsunterstützung (Deckungsanteil bis max. 70%) in Nahwärmesystemen abhängig ist von der Verfügbarkeit technisch und wirtschaftlich akzeptabler Lösungen für den dazu nötigen Langzeit-speicher, um die zeitliche Verschiebung der Verfügbarkeit der thermischen Solarenergie zum Bedarfszeitraum in der Heizperiode zu realisieren.

Aus der Erkenntnis der aktuellen Situation heraus wurden Informationen über die sich zur Zeit im Einsatz, in der Realisierung oder in der Entwicklung befindenden Lösungen für künstliche saisonale Warmwasserwärmespeicher in

Deutschland, Schweden, Schweiz und anderen Ländern zusammengetragen, analysiert und auf der Basis zugänglicher Daten zusammengefasst.

Kennzeichnend für die bisherige Speicherentwicklung sind aufwändige Herstellung, einschließlich der Isolierung, aufwändiger Feuchtigkeitsschutz der Isolierung und/oder des ganzen Speichers, hohe Kosten für Erdaushub, relativ hohe Kosten pro m³-Speichervolumen (Wasseräquivalent) und hohe Speicherverluste.

Im Ergebnis dieser Recherche wurde die Entwicklungsrichtung für einen Langzeitwärmespeicher eingegrenzt auf folgende Zielstellung:

- Modularer Aufbau
- Endmontage vor Ort auf der Baustelle
- Möglichkeit, aus den Modulen Speicher mit verschiedenem Rauminhalt (ca. 100 bis ca. 6000 m³) zu fertigen
- Einsatz von Faserverbundwerkstoffen, Wandaufbau aus einer Außenschicht GFK, Kern aus PUR-Schaum, Innenschicht aus GFK, Sandwichstruktur
- Unempfindlichkeit des eingesetzten Materials gegen Korrosion
- Boden wahlweise isoliert oder unisoliert zur Nutzung des Wärmespeichervermögens des darunter liegenden Erdreiches
- Nach innen führende Anschlussleitungen aus Nichtmetall, zur Vermeidung von Wärmebrücken
- Aufstellung wahlweise komplett oberirdisch, in Gebäude integriert, ganz oder teilweise im Erdreich eingegraben
- Grenznutzungsdauer > 25-30 Jahre
- Die Geometrie wird durch Forderungen der Statik, eines optimalen A/V-Wertes und der Erreichung einer guten Temperaturschichtung bestimmt

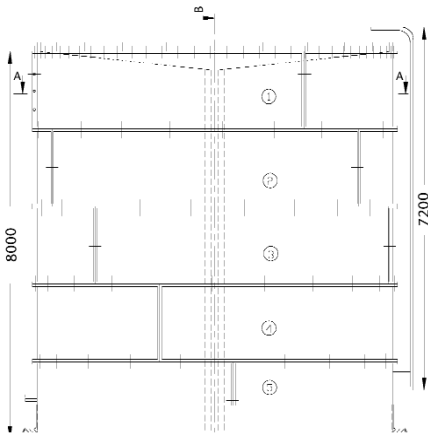


Abb. 1

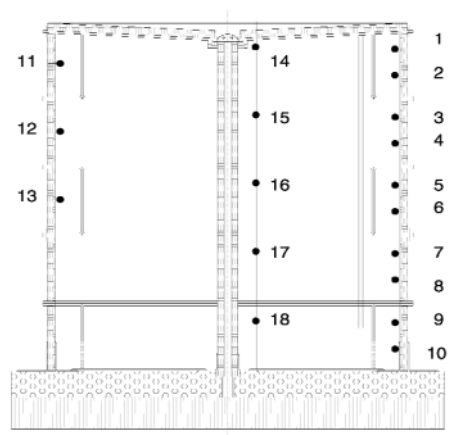


Abb. 2

1. 300 m³ Pilotspeicher Schortetal

Abbildung 1
Frontansicht des
300 m³ GFK-Speichers
1. Generation

Abbildung 2
300 m³ Pilotspeicher
Schnittbild, Anordnung
der Temperaturmessstellen
(TSP1 = 1, TSP18 = 18)

Am Standort Schortetal Ilmenau wurde 1997 ein 300 m³ Pilotspeicher der 1. Generation aus GFK-Verbundmaterial errichtet, der folgende Kennwerte besitzt:

- modularer Aufbau
- Wandaufbau aus einer Außenschicht GFK (ca. 6-10 mm), Kern aus 150 mm PUR-Hartschaum, Innenschicht aus GFK (ca. 6-10 mm)
- Flachdach mit gleichem Querschnitt
- Mittelstütze aus GFK mit innenliegender Dachentwässerung
- Mannloch mit wärmeisoliertem Deckel im Dach
- Inspektionsleitern außen und innen
- Boden nicht isoliert
- Verschiedene Belademöglichkeiten (Schichtenbeladung, 2 Wärmepumpen bis 60°C, eine 35 kW Flüssiggasbrennwerttherme für Beladung über 60°C)

Der Wandaufbau des 300 m³ GFK-Pilotspeichers besteht aus einer Sandwichkonstruktion wie aus Abb. 5 ersichtlich ist. Die GFK Wandung ist je nach Wandhöhe zw. 6 und 10 mm stark. Die PUR-Schaumisolation ist in der Seitenwand und im Dach 150 mm dick.



Abb. 3



Abb. 4

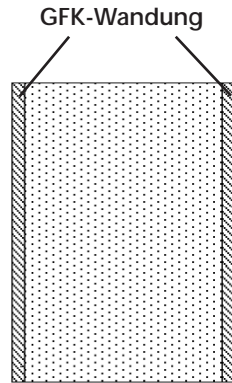


Abb. 5

Abbildung 3
300 m³ Pilotspeicher
am Standort Schortetal,
Montage vor Ort aus
vorgefertigten Segmenten

1.1 Prüfung des verwendeten GFK-Materials

- Wärmeleitfähigkeitsmessungen der Wandbauteile ergaben eine Gesamtwärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,033$ bis $0,055$ W/Km
- An einem 1,5 m² Musterspeicher wurde das Material im Zeitraum 09/1996 bis 06/1997 bei einer Maximaltemperatur von 95°C erfolgreich erprobt.

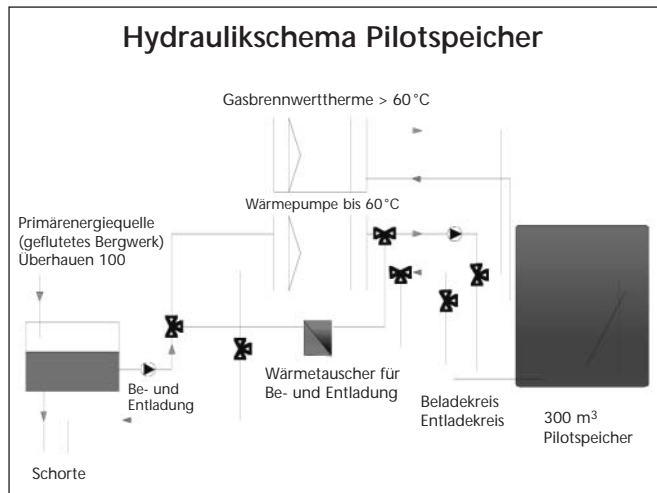
Abbildung 4
300 m³ Pilotspeicher
am Standort Schortetal

Abbildung 5:
Wandaufbau des
Speichers im Schnittbild

1.2 Aufheizung des 300 m³ Pilotspeichers

Ab 11.01.99 wurde die Aufheizung des Speichers mit Hilfe von 2 Wärmepumpen zunächst bis 60°C durchgeführt. Da oberhalb dieser Temperatur eine zu schlechte Arbeitszahl erreicht wird, erfolgte eine Aufrüstung mit einer 35 kW Gasbrennwerttherme (Flüssiggas) – die ab einer Temperatur von > 60°C eingesetzt wurde (siehe Abb. 6). Gleichzeitig wurde ein Entladekreis installiert, der über einen vorhandenen Wärmetauscher die gezielte Lastsimulation erlaubt.

Abbildung 6
Beladekreis und
Entladekreis am
300 m³ Pilotspeicher



Am 30.03.99 wurde die Beladung bei einer maximalen Temperatur von 78,5 °C beendet. Es war keine weitere Aufheizung durch die eingeschränkte Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf möglich. Die internen Regelalgorithmen der eingesetzten Brennwerttherme führten zum Abbruch der weiteren Aufheizung.

1.3 Abkühlphase des Speichers zur Ermittlung der Speicherzeitkonstanten

Im Zeitraum vom 30.03 bis zum 31.08.99 wurde zur Ermittlung der Speicherzeitkonstante der Speicher ohne Last (nur Wärmeverluste des Speichers) abgekühlt.

Abb.7 zeigt die Abkühlkurve:

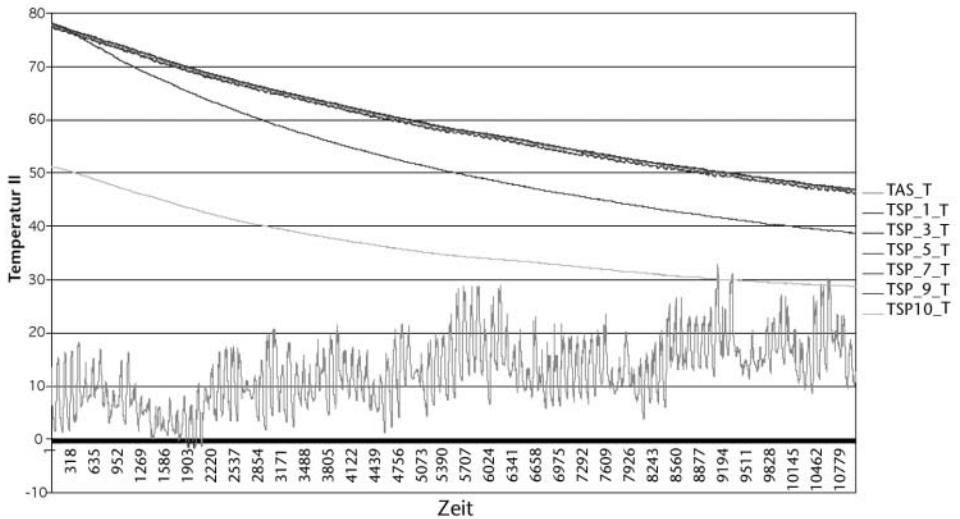


Abbildung 7
 Abkühlkurve 300 m³
 GFK-Pilotspeicher
 Schortetal

k-Wertbestimmung des 300 m³ GFK-Pilotspeichers Schortetal

Abkühlphase: Beginn 30.03.99, Ende 31.08.99

Bestimmung der Speicherzeitkonstante aus der aufgenommenen Trendkurve:

$\tau = 154$ Tage aus Trendkurve entnommen

$T_i = 74,7 \text{ }^\circ\text{C}$ (gemittelt)

$T_a = 12,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (Mittelwert)

$V_{\text{Wasser}} = 237 \text{ m}^3$

$A_{\text{Mantel}} = 262 \text{ m}^2$

$\rho C_p = 4,113 \text{ MJ/ m}^3\text{K}$

$$\tau = \frac{V\rho C_p}{kA}$$

$k = 0,282 \text{ W/m}^2\text{K}$

Der entgegen den Erwartungen aus den TRNSYS-Berechnungen um 15 % höhere K-Wert von 0,282 W/m²K ist auf eine defekte Schichtenbeladevorrichtung, damit geringer Temperaturschichtung, auf den Einfluss des nicht isolierten Speicherbodens (mit 42 m² Fläche und den damit verbundenen Ausgleichsvorgängen in den ersten Betriebsjahren) und der Ausführung der Dachkonstruktion mit erhöhten Wärmeverlusten zurückzuführen.

Während der Abkühlphase wurden Thermokameraaufnahmen angefertigt, deren Ergebnis nur die Stege der GFK-Segmente als „Wärmebrücken“ darstellt, die Wandsegmente bilden auf Grund der guten Isolation mit 150 mm PUR-Hartschaum mit einem $\lambda = 0,03 \text{ W/Km}$ eine gute Barriere gegen Wärmeverluste.

Hier sind noch Potentiale in der Weiterentwicklung der GFK-Speichertechnologie vorhanden und werden mit dem GFK Speicher neuer Technologie (siehe Anhang) ausgenutzt.

Anhang

GFK-Langzeitwärmespeicherkonzept; Weiterentwicklung zum GFK-Speicher „Neuer Technologie“ A. Nilius

Im Rahmen des Förderprogramms „Solarthermie 2000 – TP 3: Solare Nahwärme-Begleitforschung“ wurde im Rahmen eines Verbundprojektes zwischen der TU Ilmenau, der Fakultät für Maschinenbau, Fachgebiet Thermo- und Fluid-dynamik, und der Firma VKA Verbundwerkstoff- und Kunststoffanwendungstechnik GmbH, Schönbrunn, das GFK-Langzeitwärmespeicherkonzept weiterentwickelt zum Speicher „Neuer Technologie“.

1. 20 m³ Speicher „Neuer Technologie“

Die Entwicklung des GFK-Speichers „Neuer Technologie“ erfolgte aus den Erkenntnissen, die mit der Errichtung und dem 3-jährigen Testbetrieb des 300 m³ Pilotspeichers gewonnen wurden und besitzt folgende zusätzliche Vorteile gegenüber dem 1. Konzept:

- Die Speichersegmente sind senkrecht stehend angeordnet
- Eine Verschraubung der einzelnen Segmente entfällt
- Die Montage wird erleichtert und verkürzt
- Glasfaserseile mit Spannvorrichtung, angeordnet in definierten Höhen, umfassen die Segmente und dienen zur Aufnahme der Kräfte
- Die Technologie ist vereinfacht, da die Segmente geometrisch einfacher aufgebaut sind
- Es ist für Speichergößen von 100 bis 6.000 m³ nur ein Formwerkzeug notwendig
- Verbesserter K-Wert, durch Isolation des Bodens, Gestaltung der Fugen und des Daches
- Kostenreduzierung

2. Aufbau

Mit den folgenden Abbildungen soll der Aufbau des GFK-Speichers „Neuer Technologie“ dargestellt werden.

Abbildung 1

Einzelsegment bestehend aus GFK-Platten (6 bis 10 mm), dazwischen 150 mm PU-Hartschaum eingeschäumt, oder als Plattenmaterial möglich



Abbildung 2

Die Einzelsegmente des 20 m³ GFK-Speichers sind aufgerichtet und werden mit Hilfe der Montagehilfen für die Dauer der Montage zusammengehalten.



Abb. 2

Abbildung 3

20 m³ GFK-Speicher fertiggestellt, Isolation der Anschlussleitungen fehlt noch



Abb. 3

3. Aufheizung

Der 20 m³ Speicher ist gekoppelt an eine 30 m³ Solaranlage, kann aber auch über die vorhandene Heizungsanlage beladen werden. Ein Datenlogger mit entsprechenden Temperaturfühlern und Durchflussmessgeräten ist zur Aufnahme der Messdaten installiert.

Während des laufenden Versuchsbetriebes wird der K-Wert des Speichers ermittelt. Das Versuchsprogramm dient außerdem zum Test ausgewählter Schichtenladeeinrichtungen und zur Dokumentation des zu erreichenden Schichtungseffektes bei verschiedenen Lastfällen.

Durch die Kopplung mit einer Solaranlage und Einbindung als Heizungsunterstützung wird der Speicher unter realen Bedingungen betrieben. Die Messergebnisse können nach Versuchsfortschritt zur Verfügung gestellt werden.

Langzeit-Wärmespeicher für solare Nahwärme

Einführung

T. Schmidt ¹⁾
D. Mangold ¹⁾
M. Benner ¹⁾
W. Heidemann ¹⁾
H. Müller-Steinhagen ¹⁾²⁾

¹⁾ Institut für
Thermodynamik und
Wärmetechnik (ITW),
Universität Stuttgart
schmidt@itw.uni-stuttgart.de

²⁾ Institut für Technische
Thermodynamik (ITT),
DLR Stuttgart

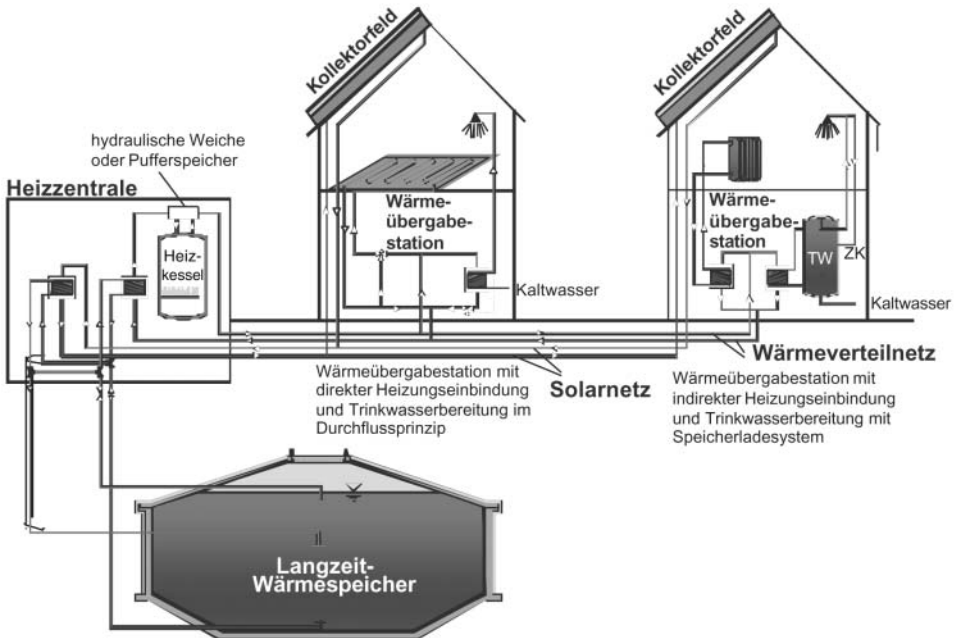
Solarthermische Großanlagen bieten im Wohnungsbau die derzeit kostengünstigste Möglichkeit, Solarenergie zur Trinkwasserbereitung und Raumheizungsunterstützung zu nutzen. Durch die Einbindung von Langzeit-Wärmespeichern kann über 50 % der bei konventioneller Wärmeversorgung notwendigen fossilen Energiemenge eingespart werden. Das Forschungsprogramm Solarthermie-2000 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) fördert im Teilprogramm 3 solar unterstützte Nahwärmesysteme mit und ohne Langzeit-Wärmespeicher. Innerhalb des Programms mit einer Laufzeit von 1993 bis 2002 sind mittlerweile sieben Anlagen mit Langzeit-Wärmespeicher verwirklicht, denen vier solare Nahwärmeeinrichtungen mit Kurzzeit-Wärmespeicher vorausgingen. Alle Anlagen werden im Rahmen der wissenschaftlich-technischen Programmbegleitung, die für das Teilprogramm 3 durchgeführt wird, detailliert vermessen und untersucht.

Solar unterstützte Nahwärmesysteme mit Langzeit-Wärmespeicher

Diese Systeme versorgen größere Wohnsiedlungen mit mindestens 100 Wohneinheiten. Die zeitliche Verschiebung zwischen Solarstrahlungsangebot im Sommer und maximalem Wärmebedarf im Winter wird über die saisonale Wärmespeicherung ausgeglichen. Die deutschen Pilotanlagen sind auf solare Deckungsanteile von 40 bis 60 % des Gesamtwärmebedarfs ausgelegt.

Abb. 1 zeigt das Schema einer solar unterstützten Nahwärmeverorgung mit Langzeit-Wärmespeicher. Die von den Sonnenkollektoren gewonnene Wärme wird über das Solarnetz zur Heizzentrale transportiert und bei Bedarf direkt an die Gebäude verteilt. Die Kollektoren sind auf den Dächern der Wohngebäude montiert, der saisonale Wärmespeicher ist in das Gelände der Siedlung integriert. Die im Sommer anfallende Überschusswärme wird in den saisonalen Wärmespeicher eingespeist und im Herbst und Winter zur Heizung und Trinkwassererwärmung genutzt.

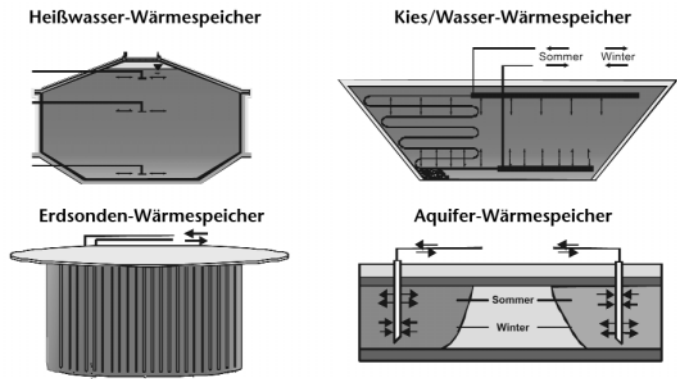
Abbildung 1
Solar unterstützte Nahwärmeverorgung mit Langzeit-Wärmespeicher in Friedrichshafen



Langzeit-Wärmespeicher

Die Entwicklung von Speichertypen zur saisonalen Wärmespeicherung wird am ITW seit 1984 kontinuierlich fortgeführt. Basierend auf früheren Forschungsvorhaben wurden nachfolgende Speichertypen (*siehe Abb. 2*) konzipiert. Die Entscheidung für einen bestimmten Speichertyp hängt im wesentlichen von den örtlichen Gegebenheiten, dem Volumen und insbesondere von den geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen im Untergrund des jeweiligen Standortes ab.

Abbildung 2
Langzeit-Wärmespeichertypen



Heißwasser-Wärmespeicher

Die vielseitigsten Einsatzbereiche eröffnen sich dem Heißwasser-Wärmespeicher. Er kann unabhängig von der Geologie und auch in kleiner Baugröße, z.B. als Wärmespeicher für einen Zeitraum von Tagen bzw. Wochen, eingesetzt werden. Die wassergefüllte Tragkonstruktion aus z.B. Stahlbeton ist teilweise im Erdreich eingebaut. Die Wärmedämmung ist zumindest im Bereich des Deckels und der Seitenwände angebracht. Die wasserdichte Auskleidung des Speichers ist in den ersten Pilotspeichern (Projekte in Rottweil, Hamburg

und Friedrichshafen) aus Edelstahlblech ausgeführt. In Hannover kommt eine neuartige Betonmischung zum Einsatz, deren Wasserdampfdurchlässigkeit so gering ist, dass auf eine zusätzliche Auskleidung verzichtet werden kann.

Die Speicher werden drucklos im Temperaturbereich von 30 bis 95 °C betrieben. Die Ladewechseleinrichtungen, d.h. die Vorrichtungen zur Be- und Entladung, sind als Prallteller ausgeführt, um eine Durchmischung des Speicherinhaltes zu verhindern. Sie sind mindestens oben und unten im Behälter anzubringen, ggf. auch in einer mittleren Ebene, um unabhängig voneinander zeitgleich auf unterschiedlichem Temperaturniveau Be- und Entladen zu können.

Eine Alternative zur beschriebenen Betonkonstruktion stellen Behälter aus glasfaserverstärkten Kunststoffen dar, deren Entwicklung die TU Ilmenau zusammen mit einem Industriepartner betreibt. Ein Pilotspeicher mit dieser Bauweise ist seit 1998 erfolgreich in Betrieb. *Tabelle 1* gibt einen Überblick über die gebauten Speicher und die zugehörigen Baukosten.

Projekt	Speicher- volumen	Baukosten	auf das Nutzvolumen bezogene Baukosten
Rottweil '95	600 m ³	531.871 DM	886 DM/m ³
Friedrichshafen '96	12.000 m ³	2.643.582 DM	220 DM/m ³
Hamburg '96	4.500 m ³	1.878.500 DM	417 DM/m ³
Ilmenau '97/98	300 m ³	274.500 DM	915 DM/m ³
Hannover*, '00	2.750 m ³	1.300.000 DM	473 DM/m ³

Tabelle 1

*Baukosten von Heiß-
wasser-Wärmespeichern
(o. Planung u. MwSt),*

**: Angabe IGS Universität
Braunschweig*

Die Querschnitte durch die Wärmespeicher, eine Darstellung der jeweiligen Wandaufbauten sowie die Kostenanteile der einzelnen Gewerke an den Gesamtkosten sind in *Abb. 3* angegeben.

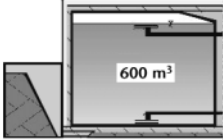
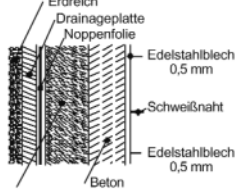
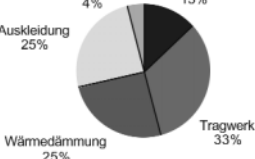
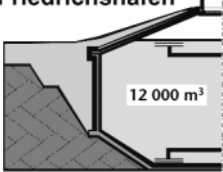
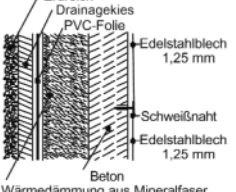
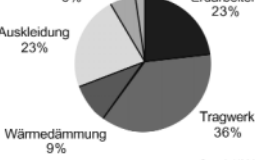
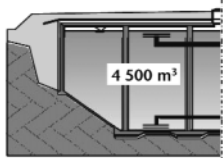
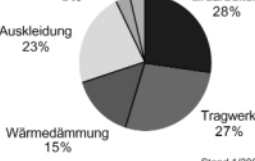
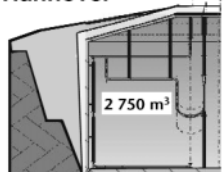
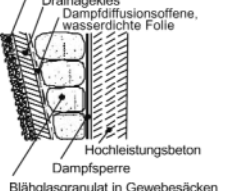
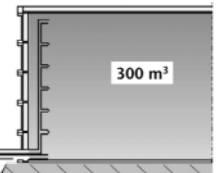
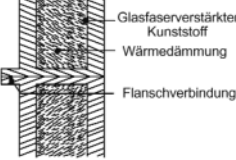
<p>Rottweil</p>  <p>600 m³</p>	 <p>Wärmedämmverbundsystem</p>	 <p>Stand 12/1996</p>
<p>Friedrichshafen</p>  <p>12 000 m³</p>	 <p>Wärmedämmung aus Mineralfaser</p>	 <p>Stand 1/2001</p>
<p>Hamburg</p>  <p>4 500 m³</p>	<p>Die Wandaufbauten in Hamburg und in Friedrichshafen sind identisch ausgeführt.</p>	 <p>Stand 1/2001</p>
<p>Hannover</p>  <p>2 750 m³</p>		<p>Eine detaillierte Kostenabrechnung liegt derzeit noch nicht vor.</p> <p>Erdarbeiten und Tragwerk bestimmen die Gesamtkosten jedoch maßgeblich.</p>
<p>Ilmenau</p>  <p>300 m³</p>		<p>Eine Kostenaufteilung ist hier nicht durchführbar, da Tragwerk, Wärmedämmung sowie Auskleidung eine Einheit darstellen und Erdarbeiten infolge der oberirdischen Aufstellung nicht notwendig waren.</p>

Abbildung 3

Querschnitt durch die Wärmespeicher Rottweil, Friedrichshafen, Hamburg, Hannover und Ilmenau, sowie Darstellung der jeweiligen Wandaufbauten und Kostenanteile

Kies/Wasser-Wärmespeicher

Eine mit wasserdichter Kunststoffolie ausgekleidete Grube wird mit einem Kies/Wasser-Gemisch als Speichermedium gefüllt. Der Speicher ist seitlich und oben, bei geeigneter Druckfestigkeit des Dämmstoffes auch unten wärmege-dämmt. Die Ein- und Ausspeicherung der Wärme erfolgt über direkten Wasseraustausch oder indirekt über Rohr-schlangen. Eine statische Tragkonstruktion ist nicht not-wendig, da die auftretenden Lasten über den Kies an die Seitenwände und den Boden abgetragen werden. Derzeitig eingesetzte Abdichtfolien begrenzen die Maximaltempera-turen auf ca. 90 °C. Bedingt durch die geringere Wärmeka-pazität des Kies/Wasser-Gemisches im Vergleich zu Wasser muss das Speichervolumen ca. 50 % größer gewählt werden, um die gleiche Wärmemenge wie in einem Heißwasser-Wärmespeicher speichern zu können.

Projekt	Speicher-volumen	Baukosten	auf das Nutzvolumen bezogene Baukosten
Chemnitz '97	8.000 m ³	1.230.408 DM	230 DM/m ³ WÄ
Steinfurt '99	1.500 m ³	794.358 DM	794 DM/m ³ WÄ

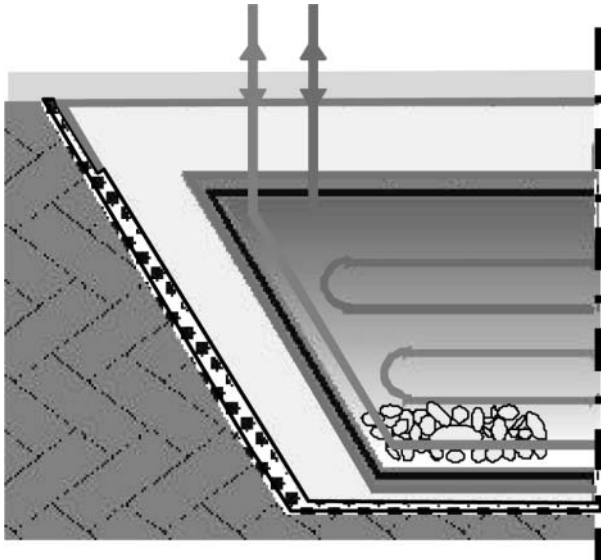
Tabelle 2

*Baukosten von Kies/
Wasser-Wärmespeichern
(o. Planung u. MwSt)*

Speicher dieser Art sind am ITW der Universität Stuttgart seit 1985 sowie in Chemnitz, Augsburg und Steinfurt-Borghorst in Betrieb. *Tab.2* zeigt die Baukosten realisierter Kies/Wasser-Wärmespeicher, in *Abb. 4* ist ein Schnitt durch den Speicher in Steinfurt-Borghorst dargestellt. Die Wärme-dämmung besteht bei diesem Speicher aus Blähglas-Granulat, die Auskleidung wurde mit einer zweilagigen

Polypropylen-Folie (PP) ausgeführt. Zwischen den beiden PP-Lagen ermöglicht ein Vakuum eine Dichtigkeitskontrolle der Auskleidung.

Abbildung 4
Querschnitt durch
den Speicher in
Steinfurt-Borghorst



Erdsonden-Wärmespeicher

Beim Erdsonden-Wärmespeicher wird die Wärme direkt im Erdreich gespeichert. Über Erdwärmesonden wird die Wärme in den Untergrund ein- bzw. aus diesem ausgespeichert.

Abb. 5 zeigt verschiedene Typen von Erdwärmesonden sowie einen vertikalen Schnitt durch eine Erdwärmesonden-Bohrung. Geeignete Untergründe für Speicher dieser Art sind wassergesättigte Tone bzw. Tonsteine mit keiner oder nur geringer Grundwasserbewegung.

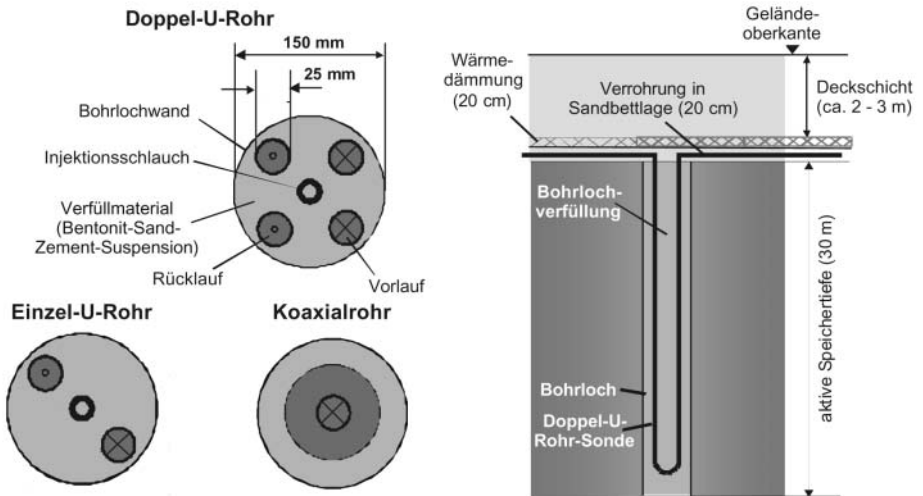


Abbildung 5

Aufbau von Erdwärmesonden (Bemaßungswerte: Speicher in Neckarsulm)

Typische Werte für Bohrloch-Durchmesser liegen bei 100 – 200 mm, Abstände zwischen zwei Bohrlöchern bei 1,5 – 3 m, Bohrlochtiefen bei 20 – 100 m. Aufgrund seiner Bauweise kann dieser Speichertyp nur zur Oberfläche hin wärmege-dämmt werden. Aufgrund der dadurch bedingten höheren Wärmeverluste zu den Seiten bzw. nach unten hin sind nur große Speicher (> 50 000 m³) dieses Typs sinnvoll, bei denen kleine Oberflächen/Volumen-Verhältnisse erreicht werden können. Maximale Speichertemperaturen liegen bei ca. 80 °C, begrenzt durch die Lebensdauer des Erdwärmesonden-Materials. Durch die geringere Wärmekapazität des Speichermediums gegenüber Wasser und aufgrund einer geringeren Temperaturspreizung im Betrieb, müssen Wärmespeicher dieser Bauart im Vergleich zu Heißwasser-Wärmespeichern ein etwa 3 bis 5 mal größeres Volumen besitzen. Vorteil dieses Speichertyps ist der im Vergleich zum Heißwasser-Wärmespeicher geringere Bauaufwand sowie ein möglicher modularer Aufbau bzw. eine sich dem Baufort-

schrift eines Wohngebietes anpassende Speichergröße. Ein Speicher dieser Bauart ist in Neckarsulm in Betrieb. Er wird im Jahr 2001 auf ein Volumen von 63.360 m³ ausgebaut (2. Ausbaustufe). *Tab.3* zeigt die Baukosten der ersten Ausbaustufe.

Tabelle 3

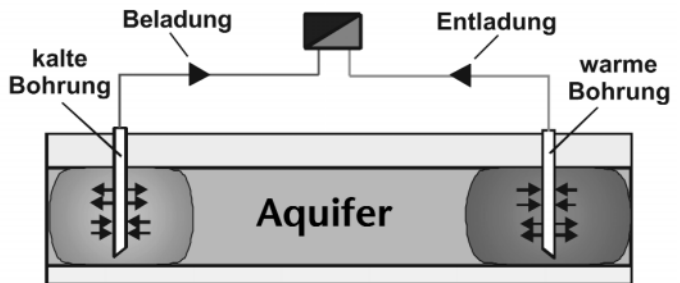
Baukosten des Erdsonden-Wärmespeichers in Neckarsulm (o. Planung u. MwSt)

Projekt	Speicher-volumen	Baukosten	auf das Nutzvolumen bezogene Baukosten
Neckarsulm '97+'98	20.160 m ³	908.369 DM	182 DM/m ³ WÄ

Aquifer-Wärmespeicher

Beim Aquifer-Wärmespeicher werden natürlich vorkommende, nach oben und unten abgeschlossene Grundwasserschichten zur Wärmespeicherung genutzt (*siehe Abb. 6*).

*Abbildung 6
Aufbau eines Aquifer-Wärmespeichers*



Über eine Brunnenbohrung („kalte Bohrung“) wird dem Speicher Grundwasser entnommen, dieses über einen Wärmeübertrager erwärmt und über eine weitere Bohrung („warme Bohrung“) wieder in den Untergrund eingeleitet.

Die Ausspeicherung erfolgt durch eine Umkehrung der Durchströmungsrichtung.

Aquifer-Wärmespeicher stellen sehr hohe Anforderungen an die geologischen Verhältnisse des jeweiligen Standortes bezüglich hydraulischer Durchlässigkeit, Grundwasserfließgeschwindigkeit, biologischer und chemischer Zusammensetzung des Grundwassers etc.. Sie können nicht zur Umgebung hin wärmegeklärt werden. Wie beim Erdsonden-Wärmespeicher sind Speicher mit hoher Temperatur deshalb nur bei großen Speichern zu empfehlen.

Bei Temperaturen oberhalb 50 °C kann es je nach örtlichen Gegebenheiten zu biologischen und geochemischen Veränderungen des Grundwassers kommen. Dies kann gegebenenfalls zu Ablagerungen an Wärmeübertragern und den Brunnenfiltern führen, wodurch es im Extremfall zu einem Erliegen der Förderfähigkeit der Brunnen kommen kann. Um dies zu verhindern, muss in solchen Fällen eine geeignete Wasseraufbereitung während des Betriebs erfolgen.

Aquifer-Wärmespeicher sind in Berlin (Reichstagsgebäude) und in Rostock in Betrieb. *Tab.4* zeigt die Baukosten des Wärmespeichers in Rostock.

Projekt	Speicher- volumen	Baukosten	auf das Nutzvolumen bezogene Baukosten
Rostock '99	20.000 m ³	335.260 DM	66 DM/m ³ WÄ

Tabelle 4

*Baukosten des Aquifer-
Wärmespeichers
in Rostock
(o. Planung u. MwSt)*

Übersicht

Tab. 5 fasst die wichtigsten Daten der Speichertypen zusammen

Heißwasser-Wärmespeicher	Kies/Wasser-Wärmespeicher	Erdsonden-Wärmespeicher	Aquifer-Wärmespeicher
Speicheraufbau			
Wärmedämmter, wasser-gefüllter, ins Erdreich eingrabener Behälter mit Tragwerkskonstruktion meist aus Stahlbeton	Wärmedämmtes, zum Erdreich hin mittels Kunststoffolie abgedichtetes Kies/Wasser-Gemisch	vertikale Erdwärmesonden in wasser-gesättigtem Erdreich	Verfilterte Brunnen in natürlich vorkommenden, möglichst nach oben und unten abgeschlossenen Grundwasserschichten
Anforderungen an den Standort			
gut stehender Boden, Bodenklasse II-III, möglichst kein Grundwasser, 5 bis 15 m Tiefe	gut stehender Boden, Bodenklasse II-III, möglichst kein Grundwasser, 5 bis 15 m Tiefe	gut bohrbarer Boden, Bodenklasse I-III, Grundwasser günstig, geringe Durchlässigkeit ($k_f < 10^{-10}$ m/s), geringe Fließgeschwindigkeit (< 1 m/a), 20 bis 100 m tief	abgeschlossen nach oben und unten durch dichte Schicht, hohe Porosität, Grundwasser und hohe Durchlässigkeit ($k_f < 10^{-4}$ m/s) notwendig; geringe Fließgeschw., 20 bis 50 m mächtig
Speichermedium			
Wasser	Kies/Wasser-Gemisch	Formation im Untergrund, bevorzugt wassergesättigt	Wassergesättigte Formation im Untergrund
Speicherkapazität			
60 bis 80 kWh/m ³	30 bis 50 kWh/m ³	15 bis 30 kWh/m ³	30 bis 40 kWh/m ³
Speichervolumen für 1 m³ Wasseräquivalent			
1 m ³	1,3 bis 2 m ³	3 bis 5 m ³	2 bis 3 m ³
Erwartete Baukosten für einen Speicher mit 10.000m³ Wasseräquivalent, bezogen auf 1m³ Wasseräquivalent (inkl. Planung, ohne MwSt.)			
180 bis 220 DM/m ³	160 bis 200 DM/m ³	160 bis 200 DM/m ³	140 bis 180 DM/m ³
Realisierte Projekte (Standort, Speichervolumen, Betrieb seit)			
Hamburg, 4.500 m ³ '96 Friedrichshafen, 12.000 m ³ '96 Hannover, 2.700 m ³ '00	Stuttgart, 1.050 m ³ , '85 Chemnitz 8.000 m ³ , '95-99 Augsburg 6.500 m ³ , '96 Steinfurt, 1.500 m ³ , '99	Neckarsulm, 63.360 m ³ , '98	Berlin, keine Angabe, '99 Rostock, 20.000 m ³ , '00

Pilotanlagen zur solar unterstützten Nahwärmeversorgung mit Langzeit-Wärmespeicher in Deutschland

Im Rahmen des am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) durchgeführten Forschungsvorhabens Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit und ohne Langzeit-Wärmespeicher [2, 3] wurden verschiedene Pilotprojekte realisiert.

Die ersten Pilotanlagen zur solaren Nahwärmeversorgung mit Langzeit-Wärmespeicher wurden im Herbst 1996 (Hamburg, Friedrichshafen) und im Januar 1999 (Neckarsulm) in Betrieb genommen. In *Tab. 6* sind die wichtigsten Daten der drei Projekte zusammengestellt:

Table 6
*Technische Daten der Pilotanlagen in Hamburg, Friedrichshafen und Neckarsulm (MFH: Mehrfamilienhaus, *: mit TRNSYS berechnete Werte für langfristigen Betrieb)*

	Hamburg	Friedrichshafen	Neckarsulm II
Versorgungsgebiet	124 Einfamilienreihenhäuser	570 Wohneinheiten in 8 MFH	6 MFH, Schule, Altenwohnheim, Ladenzentrum
Beheizte Wohn-/ Nutzfläche in m ³	14.800	39.500	20.000
Solaranlage			
Kollektorfläche in m ³	3.000	5.600	2.700
Speichertyp	Heißwasser	Heißwasser	Erdsonden
Speichervolumen in m ³	4.500	12.000	20.000
Gesamtwärmebedarf ab Heizzentrale in MWh/a*	1.610	4.106	1.663
Nutzwärmelieferung Solarsystem in MWh/a*	789	1.915	832
Solarer Deckungsanteil in %*	49	47	50
Kosten Solarsystem in Mio. DM	4,3	6,3	2,9
Solarer Wärmepreis in Pf/kWh (ohne Förderung, ohne MWSt., inkl. Planung)	50,2	31,1	33,7

Tabelle 7

Technische Daten der Pilotanlagen in Steinfurt, Chemnitz, Rostock und Hannover

(EFH: Einfamilienhaus, MFH: Mehrfamilienhaus, WE: Wohneinheit, VR: Vakuumröhre, BA: Bauabschnitt)

1: Angaben TU Chemnitz;

2: Angaben IGS, Uni

Braunschweig,

*: mit TRNSYS berechnete

Werte für langfristigen

Betrieb

Die Langzeit-Wärmespeicherung über Erdwärmesonden direkt im Erdreich wurde in einem Vorprojekt erforscht [4]. Der 1997 in Neckarsulm gebaute Pilotspeicher mit einem Volumen von ca. 4.300 m³ bestätigte die Forschungsergebnisse. Der erste Bauabschnitt des Speichers (1. BA, 20.000 m³) wurde 1998 gebaut. Im Jahr 2001 wird der zweite Bauabschnitt des Wärmespeichers gebaut. Das gesamte Volumen beträgt dann 63.360 m³. Im August 1998 ging die Pilotanlage in Steinfurt-Borghorst in Betrieb. Sie wurde im Rahmen des Projektes „50 Solarsiedlungen in Nordrhein-Westfalen“ errichtet und versorgt 42 Wohneinheiten in 15 Einfamilien- und 7 Mehrfamilienhäusern mit Wärme (siehe Tab. 7). Als Langzeit-Wärmespeicher kommt hier ein Kies/Wasser-Wärmespeicher zum Einsatz, der über Rohrschlangen indirekt be- bzw. entladen wird.

	Steinfurt	Chemnitz ¹ 1. BA	Rostock	Hannover ²
Versorgungsgebiet	42 WE in 15 EFH und 7 MFH	Bürogebäude	108 WE in MFH	106 WE
Beheizte Wohn-/ Nutzfläche in m ³	3.800	4.680	7.000	7.365
Solaranlage Kollektorfläche in m ³ Speichertyp Speichervolumen in m ³	510 Kies/Wasser 1.500	540 VR Kies/Wasser 8.000	1.000 Aquifer 20.000	1.350 Heißwasser 2.750
Gesamtwärmebedarf ab Heizzentrale in MWh/a*	325	1. BA: 573	497	694
Nutzwärmelieferung Solarsystem in MWh/a*	110	1. BA: 169	307	269
Solarer Deckungsanteil in %*	34	1. BA: 30	62	39
Kosten Solarsystem in Mio. DM	1,0	1. + 2. BA: 2,8	2,4	2,4
Solarer Wärmepreis in Pf/kWh (ohne Förderung, ohne MWSt., inkl. Planung)	82,8	1. + 2. BA: 47	49,9	81

Die Gebäude in Steinfurt sind mit Fußbodenheizungen ausgestattet, wodurch niedrige Betriebstemperaturen ermöglicht werden. Das Wärmeverteilnetz wird in der Heizzeit auf dem niedrigen Temperaturniveau der Heizungen betrieben, um die Netzverluste zu reduzieren und möglichst niedrige Netzrücklauftemperaturen zu erzielen. Sind zur Trinkwassererwärmung höhere Temperaturen erforderlich, so werden diese über Nachheizungen in den Gebäuden ermöglicht.

In Chemnitz wurde im Rahmen einer notwendigen Boden-sanierung 1996 ein Kies/Wasser-Wärmespeicher gebaut, der für eine Maximaltemperatur von 85 °C ausgelegt ist und direkt be- und entladen wird. Der Speicher ist bei einem solaren Deckungsanteil von 42 % für einen jährlichen Wärmebedarf von 1.200 MWh/a ausgelegt. Mit den Kollektorf lächen des ersten Bauabschnitts wird der Speicher seit dem Frühjahr 2000 beladen.

In Rostock ging im Frühjahr 2000 die erste solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit einem Aquifer-Wärmespeicher in Betrieb. Die Anlage versorgt ein großes Mehrfamilienhaus mit 108 Wohneinheiten. Der Speicher liegt in einer Tiefe von ca. 15 bis 30 Meter und wird, um die Wärmeverluste zu reduzieren und auf eine Wasseraufbereitung verzichten zu können, auf niedrigem Temperaturniveau betrieben (max. 50 °C). Um trotzdem einen hohen Speichernutzungsgrad zu gewährleisten, ist eine Wärmepumpe in die Wärmeversorgung integriert. Zur Wärmeverteilung wurde ein Nieder-temperatur-Heizsystem (VL/RL: 50/30) mit Radiatoren realisiert, um niedrige Betriebstemperaturen zu gewährleisten und damit günstige Betriebsbedingungen für die Solaranlage und die Wärmepumpe zu garantieren.

In Hannover befindet sich die derzeit neueste Anlage. Als Wärmespeicher wurde hier ein Heißwasser-Wärmespeicher aus einem neuartigen Hochleistungsbeton verwirklicht. Dieses Material besitzt eine genügend hohe Wasserdampfdichtigkeit, um auf eine innere Auskleidung aus Edelstahlblech verzichten zu können. Weiterhin wurde hier als Neuerung eine zusätzliche, in der Höhe variable Beladetasche in mittlerer Speicherhöhe angebracht. Hiermit kann das Schichtungsverhalten im Speicher verbessert werden und ein gleichzeitiges Ein- und Ausspeichern wird ermöglicht. Die Anlage ging im Juni 2000 in Betrieb.

Zusammenfassung und Ausblick

Mit der heute bekannten Technik kommen für saisonale Wärmespeicher in solar unterstützten Systemen aus Kostengründen und wegen der Wärmeverluste nur große Speicher in Frage, die entsprechend große Wärmeabnehmer versorgen. Dem Nachteil einer hohen Anfangsinvestition stehen als Vorteile hohe Einsparungen an fossiler Primärenergie und eine Reduktion der CO₂-Emissionen gegenüber, ein erklärtes Ziel der Enquete Kommission des Bundestages zum Schutz der Erdatmosphäre.

Bei allen Speichertypen, insbesondere bei Aquifer- und Erdwärmesonden-Wärmespeichern, ist eine hydrogeologische Voruntersuchung des Speicherstandortes unbedingt erforderlich. Geklärt werden müssen unter anderem die Schichtenabfolge, Lage und Neigung des Grundwasserspiegels, hydraulische Durchlässigkeit des Untergrunds, Strömungsgeschwindigkeit und -richtung des Grundwassers.

Da es sich derzeit bei allen Speicherbauwerken noch um Pilotanlagen handelt, muss in vielen Bereichen Neuland

betreten werden. Die Technik der Langzeit-Wärmespeicherung befindet sich noch in der Entwicklungsphase. Es existiert kein Standardkonzept, die Wärmespeicher müssen für den jeweiligen Standort individuell geplant werden und sind darum oft Bestandteil eines Forschungs- und Entwicklungsprojektes.

Bei der Auswahl des Speicher- oder Baumaterials müssen vielerlei Eigenschaften berücksichtigt werden. Für viele Materialien ist die schwierigste Anforderung, dass sie in einem Langzeit-Wärmespeicher gleichzeitig hoher Temperatur- (bis 95 °C) und Feuchtbelastung (Wasserspeicher) bei hohem Druck (im Erdreich) ausgesetzt sind. Zusätzlich müssen die eingesetzten Materialien eine Lebensdauer von 30 bis 50 Jahren versprechen.

Weitere Forschungsarbeiten sowie der Bau von Pilotanlagen werden Bautechnik, Baumaterialien sowie Aufbau der Wärmespeicher weiter verändern und die Baukosten senken. Dies hat die Vergangenheit bewiesen, indem durch jedes realisierte Projekt die praktischen Erfahrungen erweitert wurden sowie die mit diesem Wissen konfrontierten Betreiber national wie international verbesserte Systeme errichten konnten.

Literatur

- [1] Hahne, E. et. al.:
Solare Nahwärme – Ein Leitfaden für die Praxis,
BINE-Informationspaket,
TÜV-Verlag, Köln, 1998, ISBN 3-8249-0470-5

- [2] Guigas, M.; Kübler, R.; Lutz, A.; Schulz, M.;
Fisch, N.; Hahne, E.:
Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit und
ohne Langzeitwärmespeicher, Forschungsbericht,
ITW, Universität Stuttgart, 1995, ISBN 3-9802243-9-2

- [3] Benner, M.; Mahler, B.; Mangold, D.; Schmidt, T.;
Schulz, M.; Seiwald, H.; Hahne, E.:
Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit und
ohne Langzeit-Wärmespeicher, Forschungsbericht
zum BMFT-Vorhaben 0329606C, ITW, Universität
Stuttgart, Nov. 1999, ISBN-Nr.: 3-9805274-0-9

- [4] Seiwald, H.; Kübler, R.; Fisch, N.; Hahne, E.:
Saisonale Wärmespeicherung mit vertikalen
Erdsonden im Temperaturbereich von 40 bis 80 °C,
Forschungsbericht, ITW, Universität Stuttgart, 1995

- [5] Mangold, D.; Hahne, E.:
Technische Erfahrungen aus den solar unterstützten
Nahwärmeeinrichtungen des Förderprogramms
Solarthermie-2000, 10. Symposium thermische
Solarenergie, OTTI, Tagungsband, S. 106-113,
Kloster Banz, 2000

- [6] Schmidt, T.; Mangold, D.; Benner, M.;
Müller-Steinhagen, H.:
Saisonale Wärmespeicherung in Verbindung mit

solaren Nahwärmesystemen,
Tagungsband S. 140-149; OTTI, Informationsforum
Geothermie in der Praxis, Passau, 29.-30. Juni 2000

- [7] Benner, M.; Heidemann, W.; Hahne, E. und
Müller-Steinhagen, H.:
Entwicklungen bei Langzeit-Wärmespeichern:
Erfahrungen aus den in Deutschland realisierten
Anlagen, Fachkonferenz der VDI-Gesellschaft
Energietechnik, Fortschrittliche Energiewandlung
und -anwendung, Schwerpunkt: Dezentrale
Energietechnik, Speichersysteme, Ruhr-Universität
Bochum, 13.-14. März 2001

Dieser Bericht stellt im wesentlichen eine Zusammenfassung der Veröffentlichungen [6] und [7] dar. Das dem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 0329606 S gefördert. Die Autoren danken für die Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.



Regenerative Wärmespeicherung bei hohen Temperaturen

1. Ausgangssituation

Prof. Ernst P. Warnke
Siempelkamp Guss- und
Anlagentechnik Holding
GmbH & Co
ernst.warnke@
siempelkamp.com

In der Gießerei Siempelkamp, wie auch bei vielen anderen Gießereien, ist bisher keine Möglichkeit vorgesehen, die Abwärme nach dem Vergießen des Flüssigmaterials energetisch zu nutzen. Zur Erschmelzung von einer Tonne Gusseisen sind ca. 640 KWh erforderlich. Das Gusseisen wird in Induktionstiegelöfen bei einer Temperatur von ca. 1400 °C erschmolzen. Bei einer Jahresproduktion von ca. 50.000 t Flüssigisen sind hierfür ca. 32 GWh aufzubringen.

Der Wärmeinhalt der Gesamtflüssigisenmenge beträgt ca. 14 GWh, der nach dem Vergießen in die Formen im Prinzip wieder genutzt werden könnte. Die Wärme wird in die Umgebung über Wärmeleitung und Wärmestrahlung abgegeben. Dabei sinken die Temperaturen von hohen Temperaturen langsam asymptotisch auf das Niveau der Umgebungstemperatur ab.

Als Beispiel sei hier die Abkühlkurve einer Kokillenoberfläche bei einem CASTOR-Abguss gezeigt. Dabei werden in drei Abschnitten zu je ca. 45 h unterschiedliche Temperaturniveaus erreicht [Abb. 1 Abkühlkurve].

Wenn es gelingt, einen gewissen Bruchteil dieser Energie zu speichern und nach Bedarf zu nutzen, wird ein großer Beitrag zur Energieeinsparung und zum Umweltschutz geleistet.

Oberflächentemperaturen Kokille CASTOR V19

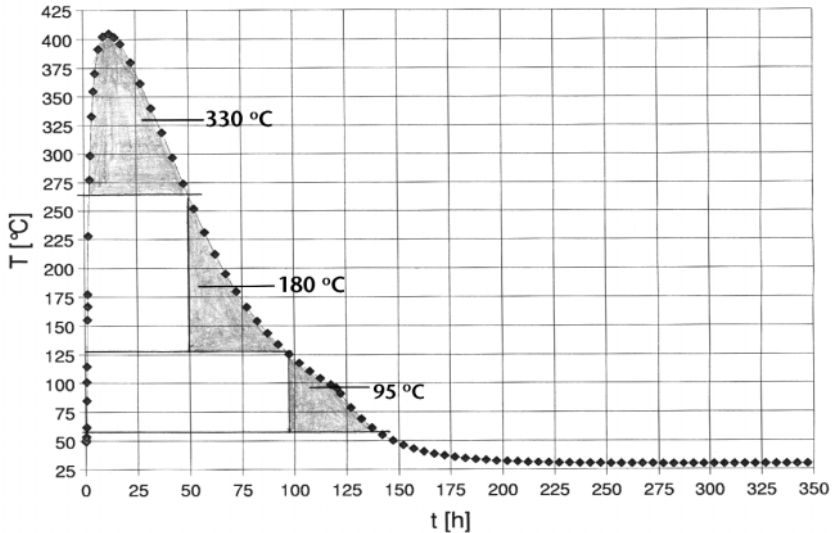


Abbildung 1
Abkühlkurve

2. Ziel eines Forschungsvorhabens

Das Vorhaben sollte in zwei Teile gegliedert sein:

A) Theoretische Vorarbeiten

- Erfassen von Basisdaten
- Wärmebilanzen, theoretische Abwärme
- Speichermedien
- Speicherkonzepte
- Design und Engineering von Wärmeübertragungsmechanismen, Speicherung und Nutzung der Gießwärme, Wirtschaftlichkeitsanalysen

B) Umsetzung in der Gießerei

- Ausführung, Versuche, Messungen und Dokumentation
- Übertragung auf andere Gießereien / andere Metalle

In den zwei Teilvorhaben werden in Zusammenarbeit der beteiligten Partner Konzepte erarbeitet, die unter den Gesichtspunkten der Ökonomie, Ökologie und unter Einbeziehung des Umweltgedankens verfolgt und umgesetzt werden.

Ziel des Vorhabens ist es, die Rückgewinnung von Energie attraktiv zu machen, möglichst wirtschaftlich zu gestalten und insgesamt Energie einzusparen, die in der Gießerei für verschiedene Prozesse in jedem Fall aufgewendet werden müssen.

Die Nutzung der rückgewonnenen Energie ist für folgende Vorgänge denkbar:

- Vorwärmung von Kokillen
- Trocknung von Kernen und Formen
- Vorwärmen von Einsatzstoffen
- Vorwärmen von Luft zum Betreiben von Erdgasbrennen
- Trocknung von lackierten Flächen

Die Abwärme kann neben der Abführung von Wärme aus Formen und Kokillen auch von Teilen stammen, die bei sehr hoher Temperatur (Heißausleeren) ausgeformt werden.

3. Erwarteter Erfolg

Ein großer Beitrag zur Energieeinsparung ist gegeben, wenn diese Rückgewinnung der Gießwärme bei allen in Frage kommenden Gießereien angewandt wird. Die wirtschaftlichen und wettbewerblichen Vorteile werden sich gegenüber dem europäischen bzw. weltweiten Wettbewerb nach kurzer Zeit einstellen.

4. Verbundpartner

Als Partner sind geplant:

- Verein Deutscher Gießereifachleute
- Institut für Gießertechnik
- TU Bergakademie Freiberg
- DLR, Institut für Thermodynamik UNI Stuttgart
- Siempelkamp Giesserei GmbH & Co. KG
- IWT Uni Stuttgart



Regeneratoren als Hochtemperaturspeicher – Industrielle Anwendungen

Prof. Dr.-Ing.
Christian Streuber
Fachhochschule Wiesbaden,
Fachbereich Maschinenbau
streuber@maschinenbau.
fh-wiesbaden.de

1. Einleitung

Regeneratoren sind diskontinuierlich arbeitende Wärmeübertrager bzw. Wärmetauscher. Sie werden im industriellen Bereich im Wesentlichen bei hohen Temperaturen eingesetzt. Zu einem kontinuierlichen Betrieb sind mindestens zwei Regeneratoren notwendig. Diese Regeneratoren können als Wärmespeicher und dann auch einzeln eingesetzt werden. Im Folgenden wird erläutert, wie Regeneratoren in der Industrie eingesetzt werden und wie eine Übertragung auf das Gebiet Speicherung ermöglicht werden könnte.

2. Regeneratoreinsatz / Anwendungen

In der Regel werden Regeneratoren anstelle von Wärmeübertragern in der Industrie eingesetzt, wo aus Materialgründen ein metallischer Wärmeübertrager nicht mehr betrieben werden kann. Kennzeichen für den Regeneratoreinsatz sind somit häufig in mehrfacher Kombination:

- Hohe Temperaturen
- Hohe Drücke bzw. Druckdifferenzen zwischen den beiden Fluiden
- Große Fluidströme

Folgende Beispiele können als Regeneratoren genannt werden:

- Winderhitzer am Hochofen zur Heißwinderzeugung

- (Brennluft bzw. Sauerstoff zur Reaktion im Hochofen;
hohe Temperatur und hoher Druck)
- Regenerator an einer Glaswanne zur Brennluft-Vorwärmung
 - Regenerator am Koksofen
 - Luftvorwärmung im Kraftwerk (Ljungström)

Die Technologie der Regeneratoren ist dabei bekannt und entspricht dem Stand der Technik. Aus den Industriebereichen erkennt man, dass es sich im Wesentlichen um einen Einsatz in der Schwerindustrie handelt.

Kleine Regeneratoren werden häufiger auch in sogenannten Regeneratorbrennern eingesetzt. Eine regenerative Nachverbrennung von Schadstoffen wird durchgeführt, da dabei die Temperaturen hoher Abgase direkt wieder zur Vorwärmung ausgenutzt werden können.

Ein typisches Beispiel eines Winderhitzers mit außenstehendem Brennschacht ist in *Abb. 1* dargestellt.

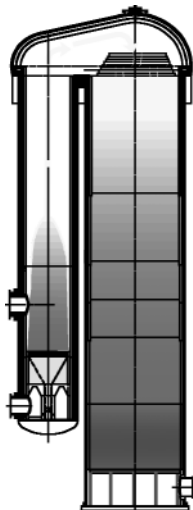


Abbildung 1
Winderhitzer mit
außenstehendem
Brennschacht [1]

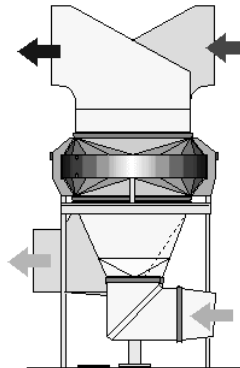
Einige Daten zu Winderhitzeranlagen sind in *Tab. 1* zusammengefasst.

Tabelle 1
Typische
Winderhitzerdaten

	Einheit	ROGESA Dillingen Hochofen 5	Thyssen Krupp Stahl AG, Schwelgern Hochofen 2
Prozesslufttemperatur	°C	1.350	1.350
Prozessluftdruck	bar absolut	6,5	5,5
Heißwindmenge	Nm ³ /h	280.000	480.000
Kuppeltemperatur	°C	1.450	1.450
Brenngasvorwärmung	°C	220	200
Brennluftvorwärmung	°C	550	200

Ein Beispiel für einen Glasschmelzofen mit Regenerator ist in *Abb.2* dargestellt.

Abbildung 2
Glasschmelzofen [2]

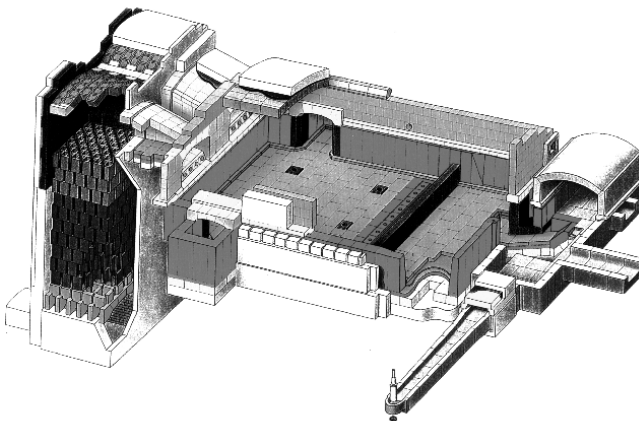


Vergleichend sind einige Daten von verschiedenen Regeneratortypen in *Tab. 2* zusammengestellt, bei denen insbesondere auf die Besatz- bzw. Speicherdaten Wert gelegt wurde.

	Einheit	Winderhitzer am Hochofen Prozessluft- erzeugung	Regenerator an einer Glas- wanne Brenn- luftvorwärmung
Anzahl Regeneratoren	-	3	2
Besatzgewicht je Regenerator	t	3.260	175
Besatzvolumen je Regenerator	m ³	2.000	180
Heißluftmenge	Nm ³ /h	300.000	100.000
Heißlufttemperatur	°C	1.300	1.350
Kaltlufttemperatur	°C	200	20
Kaltluftdruck	bar absolut	5	1
Leistung	GJ/h MW	500 140	19 5,3
Spezifische Anlagenkosten	DM/kW	650	660

*Tabelle 2
Besatz- und
Speicherdaten zu
Regeneratoren*

Insbesondere zur Brennluftvorwärmung werden sehr häufig rotierende Wärmeübertragermassen eingesetzt (Ljungström-Wärmeübertrager). Hierzu ist ein Beispiel in *Abb. 3* (Rotor System der Firma Rothemühle) in einer Prinzipskizze dargestellt.



*Abbildung 3
Ljungström-
Wärmeübertrager [3]*

Regeneratoren werden in der Industrie selten als Wärmespeicher eingesetzt. So kann man mit Hilfe eines Regenerators jedoch bei Batchprozessen mit diskontinuierlich anfallender Wärme hoher Temperatur die Abwärme recht gut nutzen. Ebenso gibt es Temperaturpuffer bei sehr wechselnden Abgastemperaturen zum Temperatenausgleich.

Insgesamt wurde in verschiedenen Studien und Forschungsvorhaben Untersuchungen durchgeführt, deren Ergebnis ist, dass Regeneratoren auch in der solaren Kraftwerkstechnik als Speicher eingesetzt werden können. Dies bietet sich insbesondere bei Solarturmkraftwerken an, um eine Zeitspanne nach Sonnenuntergang oder bei Wolken zu überbrücken. Prinzipiell ist eine Überbrückung der gesamten Nacht denkbar, aber zum jetzigen Zeitpunkt sicherlich nicht sinnvoll im Sinne der hohen Investitionskosten.

3. Regeneratorbetrieb

Die Einsatztemperaturen bei Regeneratoren sind unterschiedlich. Hochtemperatur sei hier so definiert als eine Temperatur größer 500 °C. Die Grenzen sind jedoch fließend. Die maximale Temperatur bei Regeneratoren liegt zur Zeit in der Größenordnung von 1500 °C.

Die Einsatztemperaturen am Austritt eines Rekuperators oder Regenerators werden in *Tab. 3* zusammengefasst.

Tabelle 3
Austrittstemperaturen an
Rekuperatoren /
Regeneratoren

Bauart	Austrittstemperatur zum Beispiel Brennluft
Stahl – Rekuperator	700 °C
Keramischer Rekuperator	1.000 °C
Regenerator (keramisch)	1.300 °C

In *Abb. 4* ist der Energieverbrauch verschiedener Prozessanlagen in Abhängigkeit von der Prozesstemperatur aufgetragen [4]. Man kann ersehen, dass ca. 2/3 der Gesamtenergie auf den Bereich Hochtemperatur entfällt. Insbesondere der Prozesstemperaturbereich 1200 °C bis 1500 °C ist dabei von besonderer Bedeutung. Gerade dieser Bereich wird durch Regeneratoren abgedeckt (zum Beispiel in der Stahlindustrie). Insofern kommt der Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet durchaus Bedeutung zu, jedoch ist gerade der Schwerindustriebereich in der Regel relativ konservativ, insbesondere wenn es funktionierende, bewährte Technologien gibt.

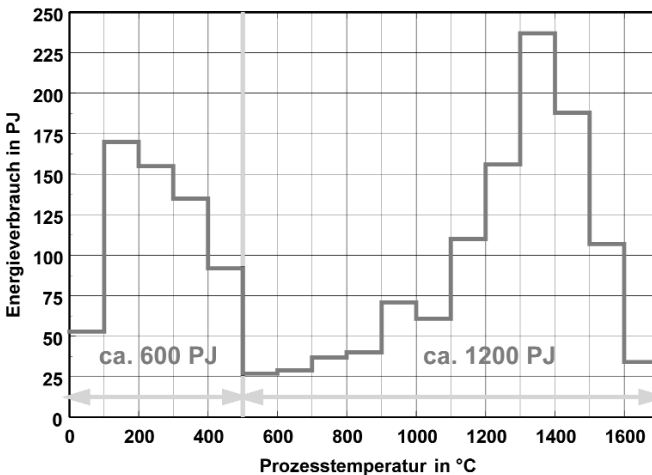
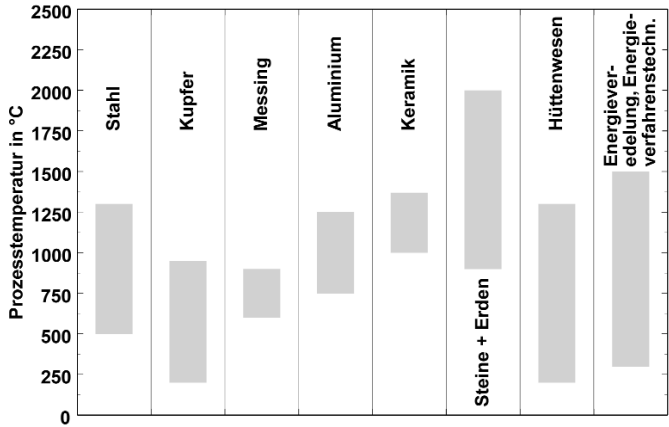


Abbildung 4
Energieverbrauch von
Prozessanlagen, nach [4]

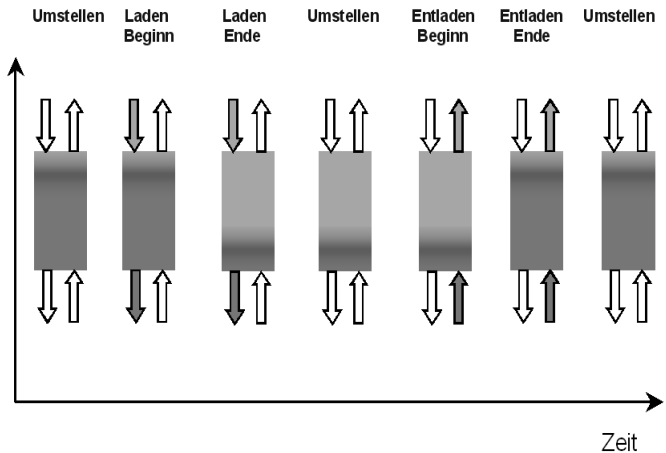
In *Abb. 5* sind die Prozesstemperaturen nach Industriebereichen aufgliedert. Es ist ersichtlich, dass es sich hier um meist traditionelle Industriebereiche handelt.

Abbildung 5
 Prozesstemperatur für
 ausgewählte Prozesse
 in verschiedenen
 Industriebetrieben
 nach [4]



Der Ablauf eines Regeneratorzyklus ist in *Abb. 6* näher erläutert. Um zum Beispiel kontinuierliche Heißluftmengen und Heißlufttemperaturen erzielen zu können, wird dieser angegebene Zyklus immer wieder von mindestens zwei Regeneratoren im Wechsel wiederholt.

Abbildung 6
 Regeneratorzyklus



4. Regeneratorauslegung

In der Regel werden Regeneratoren als modifizierte Wärmeübertrager ausgelegt. Das zeitliche Verhalten eines Regenerators wird über einen „korrigierten“ k-Wert des sogenannten Besatzes (Speichermaterial) berücksichtigt. Diese Berechnungsart ist jedoch nur bei kontinuierlichem Betrieb mehrerer Regeneratoren möglich. Ein Regeneratorbesatz wird durch folgende Parameter beschrieben:

- Spezifische (freie) durchströmte Fläche
- Spezifische Oberfläche
- Spezifisches Wärmespeichervermögen
- Effektive Wanddicke
- Effektiver Strömungskanaldurchmesser

In *Abb. 7* ist aufgezeigt, wie durch die Veränderung der Wanddicke und des Rasterabstandes die spezifische Heizfläche beeinflusst werden kann. Dabei wird von runden Kanälen, die auf einem Raster aus gleichseitigen Dreiecken aufgebaut sind, ausgegangen. Es gilt also: Kanaldurchmesser gleich Rasterabstand minus Wanddicke.

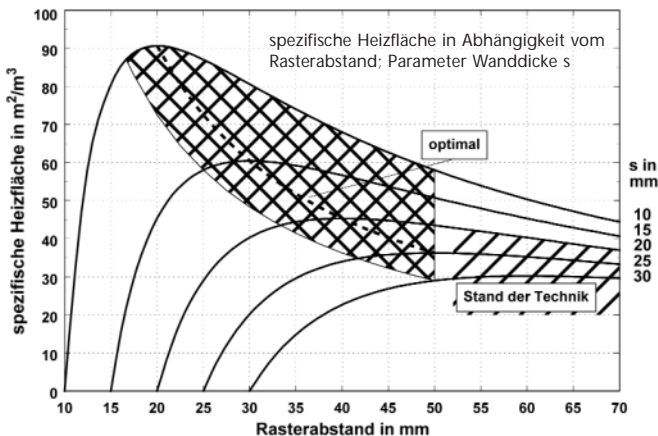


Abbildung 7
Optimierte
Besatzgeometrien [5]

Kleine Kanaldurchmesser mit geringen Wanddicken sind zu empfehlen. Bei der industriellen Anwendung ist jedoch auf die Verunreinigungen des Gases zu achten. Bei Staub beladenen Gasen kann der Kanaldurchmesser nicht zu klein gewählt werden. Bei keramischem Material für Hochtemperaturanwendungen ist bei einer minimalen Wanddicke von ca. 10 mm oft eine Grenze.

5. Bewertung von Regeneratoren

Vorteile von Regeneratoren sind:

- Hohe Temperaturen sind leicht erreichbar.
Keramisches Material ist einsetzbar
- Hohe Drücke sind möglich
- Beladen und Entladen kann bei sehr unterschiedlichen Drücken geschehen, Druckwechsel sind also möglich. Dazu ist jedoch immer eine vom Druck abhängige Zeit für diese Druckwechsel nötig
- Regeneratoren können als Wärmespeicher eingesetzt werden
- Sie sind in der Industrie Stand der Technik

Welche Nachteile ergeben sich?

Die Peripherie mit zum Beispiel Rohrleitungen und Armaturen ist teuer. In der Regel werden bei zwei Regeneratoren mindestens benötigt:

- 2 Armaturen, hoher Druck und hohe Temperatur
- 4 bis 5 weitere Armaturen, hoher Druck und mittlere Temperatur

Aus obigen Gründen sind daher Regeneratoren als Wärmespeicher nur bei großen Leistungen bzw. großen Kapazitäten sinnvoll einsetzbar.

6. Einsatzgebiete / Stand der Forschung

Will man eine Gasturbine in Zusammenhang mit der Nutzung fester Brennstoffe, deren Abgase eventuell noch stark verschmutzt sind, einsetzen, so bietet sich als Zwischenglied eine Regeneratoranlage an. So kann zum Beispiel Holz oder Holzabfall in einer Brennkammer verbrannt werden und die Energie dennoch in einer Gasturbine bei hohem Druck und hoher Temperatur genutzt werden. Als Bindeglied ist eine Regeneratoranlage mit Druckwechseln nötig.

Insgesamt kann eine Regeneratoranlage zur Abwärmenutzung hoher oder sehr wechselnder Temperatur eingesetzt werden.

Verschiedene Projekte in Zusammenarbeit mit dem DLR wurden durchgeführt. Der Einsatz eines Regenerators bei einem solarthermischen Kraftwerk ist möglich.

Der Stand der Forschung ist zur Zeit wie folgt:

- Besatzsteine mit veränderten Geometrien sind möglich, kleinere Kanaldurchmesser und damit höhere spezifische Heizflächen sind produzierbar
- Besatzmaterialien mit Latenteanteil (Salzkeramik) wurden im Pilotmaßstab gefertigt und verifiziert. Ein Einsatz in einer Demonstrationsanlage konnte bisher nicht erreicht werden. Durch die Salzkeramik ist eine bessere Nutzung des Besatzvolumens und / oder eine höhere Leistung möglich
- Besatzmaterialien aus Pellets bzw. Kugeln können produziert werden. Diese werden zum Beispiel in Regeneratorbrennern eingesetzt

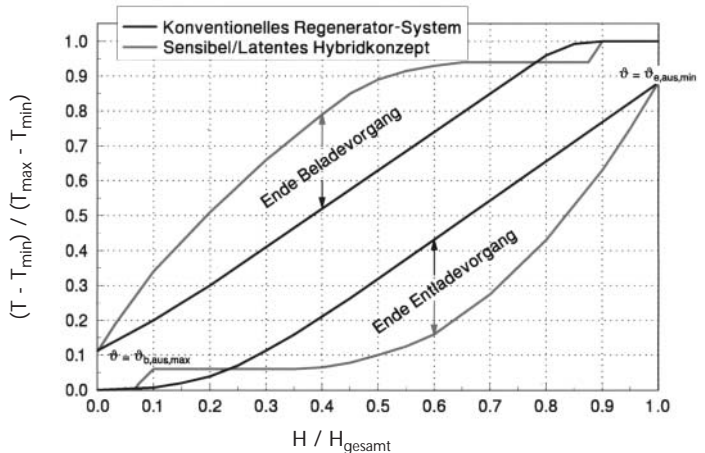
Folgende Besatzsteine aus *Tab. 4* mit veränderten Geometrien wurden gefertigt:

Tabelle 4
Besatzsteine veränderter Geometrien

Typ	Spezifische Heizfläche in m ² /m ³	Hydraulischer Durchmesser bzw. Kugeldurchmesser in mm
Wabenkörper	300	9
Wabenkörper	450	6
Wabenkörper	225	12
Formsteine	90	10
Raschigringe	300	8
Kugeln / Pellets	150	25
Kugeln / Pellets	500	6

In *Abb. 8* ist für einen Regenerator aufgetragen, wie die Temperaturverläufe am Anfang und Ende des Beladevorganges sind. Verglichen wurden Besatzsteine aus reiner konventioneller Keramik und Salzkeramik, jedoch nur in einer oberen und unteren Zone. Dadurch kann erreicht werden, dass die Temperaturspreizung, damit das Speichervermögen, erheblich höher ist, wenn nur ein kleiner Anteil von Salzkeramik eingesetzt wird.

Abbildung 8
Temperaturverläufe im Besatzmaterial, Vergleich bei rein sensiblem Besatz und Hybridbesatz [5]



7. Ausblick / Forschungsansätze

Bei den Anwendungsfeldern für optimierte Regeneratoren ergeben sich zwei Leistungsklassen von einigen Hundert MW sowie einigen MW. Diese sind mit Beispielen in *Tab. 5* erfasst:

Anwendung	Leistung in MW _{thermisch}	Maximale Temperatur in °C
Winderhitzeranlage	30 – 300	1.300 – 1.500
Koksofen	10 – 100	1.050 – 1.200
Solarturmkraftwerk	100 – 300	700 – 800
Wärmerückgewinnung	5 – 7	1.200 – 1.500
Brennluftvorwärmung	0,3 – 5	1.250 – 1.350
Reststoffnutzung	5	1.050

Tabelle 5
Anwendungsfelder
optimierter
Regeneratoren

Welche Entwicklungsmöglichkeiten bestehen und wo ist noch Entwicklungsbedarf?

- Überprüfung kostengünstiger Materialien auf Tauglichkeit für den Regeneratoreinsatz, wie zum Beispiel Lochziegel. Dazu sind die Druckfließeigenschaften, die Temperaturbeständigkeit und die Temperaturwechselbeständigkeit näher für den veränderten Einsatz zu untersuchen
- Entwicklung kostengünstiger Armaturen für hohen Druck und hohe Temperatur
- Untersuchung und Test der Einsatzmöglichkeit natürlich gebrochener Steine als Haufwerk
- Demonstrationsanlagen insbesondere für Hybridmaterial wie Salzkeramik

Insgesamt ist ein hohes Nutzungspotential vorhanden. Im industriellen Bereich hat man es jedoch mit eher konservativen Bereichen zu tun, die eine bewährte Technologie in der Regel ungern aufgeben oder modifizieren. Für völlig neue Anwendungen, wie die Solarthermie, bietet sich eine neue Technologie an. Große Bereiche der Anwendungen sind durch den industriellen Einsatz der Regeneratoren bereits heute verifiziert.

Literatur

- [1] Interne Präsentationsunterlagen, Didier-M&P Energietechnik GmbH, Mainz-Kastel, 2001
- [2] Interne Präsentationsunterlagen, VRD, Wiesbaden, 2001
- [3] Rothemühle, entnommen aus: www.rothemuhle.de
- [4] Ermittlung des Anwendungspotenzials für Klein-Regeneratoren mit latentem Wärmespeichermaterial in der Industrie, Betriebsforschungsinstitut, Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Bericht V 5.45.011, 1996
- [5] Forschungsberichte Verbundprojekt Hochtemperaturwärmespeicher, (HTWS), Projekt - Nr. 0328846 DLR Stuttgart und Didier-Werke AG, 1995

Latentwärmespeicherung: „Neue Materialien und Materialkonzepte“

1. Einleitung

Latentwärmespeicherung mittels Phasenwechselmaterialien (engl. PCM) ist ein seit einigen Jahrzehnten untersuchtes Forschungsgebiet. Trotz der unübersehbaren Vorteile dieses Speicherverfahrens steckt die industrielle Umsetzung größtenteils noch in den Kinderschuhen. Sieht man von Kältespeichern ab, so gibt es weltweit nur etwa ein bis zwei Dutzend Unternehmen, die sich mit der Produktion von PCM-Produkten beschäftigen.

Harald Mehling
ZAE Bayern, Abteilung
„Energieumwandlung
und -speicherung“
Garching
Harald_Mehling@
ph.tum.de

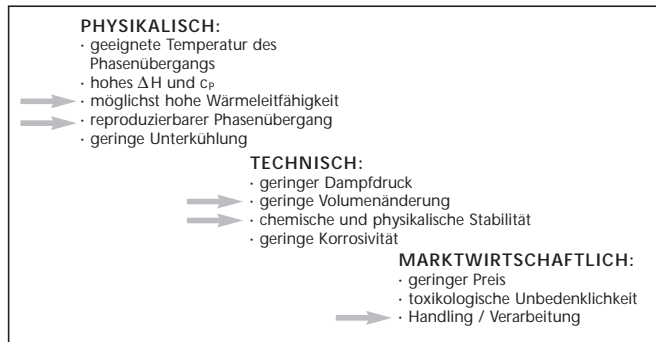
Einer der wesentlichen Gründe hierfür dürfte in den F&E-Strategien der Forschungsinstitute und der Firmen liegen. Bisher wurden vor allem Speziallösungen für einzelne Problemstellungen, d.h. Nischenmärkte, entwickelt, wodurch es möglich war, PCM-spezifische, technische Probleme im Gesamtsystem zu lösen. Dieser Ansatz in der Produktentwicklung hat allerdings einen gravierenden Nachteil: die Entwicklung kann nicht auf ein anderes Produkt übertragen werden. Gelingt es, die technischen Probleme der PCM unabhängig von den anderweitigen Eigenschaften eines angestrebten Produktes zu lösen, so kann das PCM als Zwischenprodukt vertrieben werden und somit, mit geringerem Aufwand an F&E, in weiteren Produkten eingesetzt werden. Dieser Ansatz in der Produktentwicklung ist somit zunächst mit einem signifikanten Mehraufwand bei der Entwicklung der PCM verbunden; dieser Mehraufwand zahlt sich dann allerdings langfristig aus. Seit etwa 10 Jahren werden diese Aspekte verstärkt berücksichtigt und resultieren mittlerweile in einer Reihe von PCM-Zwischenprodukten, die für die Weiterverarbeitung erhältlich sind.

Diese Entwicklung und die zur Zeit erhältlichen Produkte werden im vorliegenden Text beschrieben.

3. Anforderungen an PCM

Abb. 1 listet die wesentlichen Anforderungen an ein PCM auf. Bezüglich der physikalischen Anforderungen gilt prinzipiell natürlich der geeignete Schmelzpunkt als erstes Kriterium.

Abbildung 1
Physikalische, technische
und marktwirtschaftliche
Anforderungen an
ein PCM



Des weiteren wird eine hohe Schmelzenthalpie ΔH und Wärmekapazität c_p generell gefordert. Hier gibt es auch schon für viele Anwendungen geeignete Materialien. Diese haben meist auch gute technische Eigenschaften bezüglich Dampfdruck; beim Korrosionsverhalten existieren meist gangbare Lösungswege. Wesentliche Schwachpunkte der PCM sind ihre

- geringe Wärmeleitfähigkeit
- die teils fehlende Reproduzierbarkeit des Phasenübergangs
- die Volumenänderung beim Phasenübergang
- die Langzeitstabilität sowie
- die Handhabbarkeit in der Verarbeitung

4. Lange bekannte PCM

Nahezu alle PCM-Produkte basieren auf drei PCM-Klassen.

- Eutektische Salz-Wasser-Lösungen für $T < 0\text{ °C}$
- Paraffine für $0\text{ °C} < T < 150\text{ °C}$
- Salzhydrate für $0\text{ °C} < T < 130\text{ °C}$

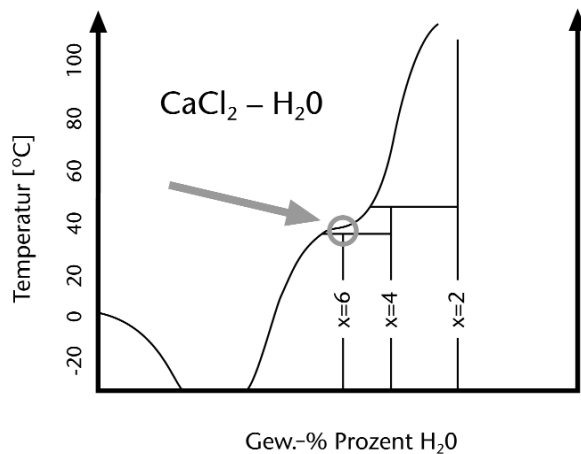
Die erste Gruppe, eutektische Salzlösungen, ist lange bekannt und wird in großem Umfang eingesetzt; allerdings nicht zur Wärme-, sondern zur Kältespeicherung. Die zweite Gruppe, Paraffine, hat nur wenige technische Probleme. Da Paraffine auf einem einzigen Stoff basieren, separieren sie nicht und sind zyklenstabil. Da Paraffine chemisch gesehen reaktions-träge Stoffe sind, sind sie generell nicht toxisch und zeigen keine Korrosion an Metallen. Allerdings besitzt sie meist nur Schmelzenthalpien von 200 kJ/kg bei Dichten von 0,7 bis 0,9 kg/L. Ihre volumenspezifische Schmelzenthalpie liegt somit unter 200 kJ/l. Deshalb wird für die Wärmespeicherung im Temperaturbereich von 0 °C bis etwa 130 °C meist die dritte Gruppe, Salzhydrate, bevorzugt. Auch sie haben Schmelzenthalpien von etwa 200kJ/kg, allerdings verglichen mit den Paraffinen wesentlich höhere Dichten von 1,4 bis 1,6 kg/l. Die bekanntesten Salzhydrate, vor allem wegen ihres niedrigen Preises, sind:

- $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ bei 27 °C
- $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ bei 32 °C
- $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ bei 35 °C
- $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ bei 48 °C
- $\text{NaCH}_3\text{COO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ bei 58 °C

All diese Salzhydrate besitzen allerdings einen gravierenden Nachteil: sie schmelzen nicht kongruent, d.h. es bilden sich beim Aufschmelzen mehrere Phasen, die sich aufgrund ihrer

unterschiedlichen Dichte räumlich trennen. Soll das Material wieder verfestigt werden, gelingt dies in der Regel nur unvollständig. Ein gutes Beispiel ist $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ mit einem Schmelzpunkt von 27°C . Wie Abb. 2 zeigt, geht das Hexahydrat bei der Erwärmung nicht direkt in die flüssige Phase des $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ über, sondern bildet zunächst $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ und eine flüssige Phase mit mehr Wasser (Pfeil). Das $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ setzt sich aufgrund seiner höheren Dichte als Bodensatz ab. Damit sich die flüssige Phase beim Abkühlen wieder komplett in $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ umwandelt, muss zunächst dieser Bodensatz aufgelöst werden. Dieser Vorgang benötigt allerdings Zeit und auch höhere Temperaturen, da der Schmelzpunkt von $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ höher ist als der von $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

Abbildung 2
Phasendiagramm
eines nicht kongruent
schmelzenden PCMs am
Beispiel des $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
(nach Lane et al.)



Es gibt im wesentlichen drei bekannte Verfahren, um das Bilden eines Bodensatzes zu umgehen:

- Mikroverkapselung des Salzhydrats
- Umrühren des Salzhydrats sowie
- Zugabe von zusätzlichem Wasser

Das heißt, es gibt technische Möglichkeiten, das Problem der Separation beim Zyklieren zu umgehen. Die meisten bis heute durchgeführten Entwicklungen von Speichern beruhen auf diesem Ansatz. Ein Beispiel ist der Speicher, der in Zusammenarbeit der DLR mit der Alfred Schneider GmbH entwickelt wurde (Abb. 3).

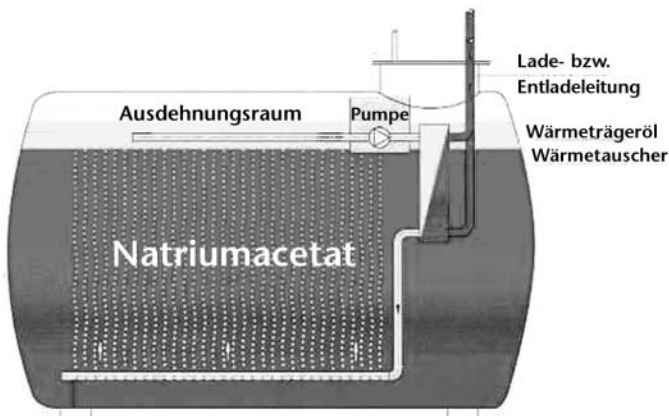
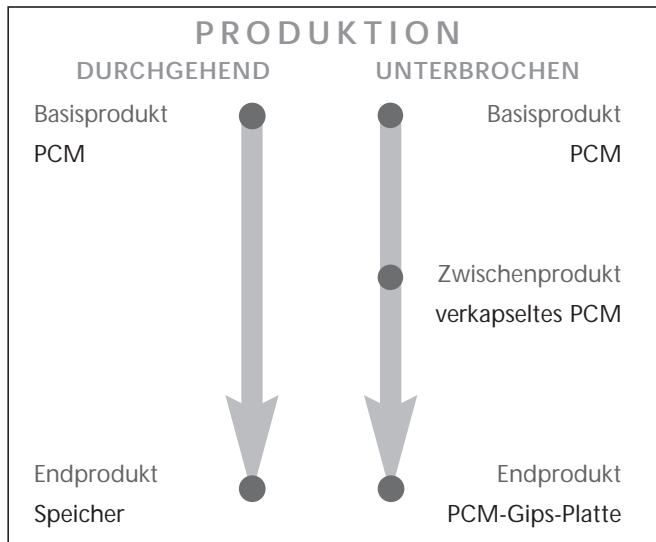


Abbildung 3
Latentwärmespeicher
auf Basis von Natrium-
acetat trihydrat. Durch
Zusatz von Wasser und
durch Umwälzen des
PCM wird Separation
verhindert

Um das Separieren zu verhindern, wird dem PCM etwas Wasser hinzugefügt. Durch das Versprühen des Wärmeträgeröls und seinen direkten Kontakt zum Speichermedium werden des weiteren vergleichsweise hohe Leistungen erzielt. Dieses Verfahren, PCM-spezifische Probleme (hier Separation und geringe Wärmeleitfähigkeit) im Gesamtsystem zu lösen, hat allerdings einen gravierenden Nachteil: es kommt zu keiner Marktverbreiterung. Im Falle des DLR / Schneider-Speichers kann, wie gesagt, das PCM nur durch das zusätzliche Wasser und das Umpumpen verwendet werden. Passive Systeme ohne Pumpe oder kleinere Systeme, bei denen eine Pumpe aus Platzgründen nicht verwendet werden kann, können dieses PCM nicht nutzen.

Gelingt es jedoch, die Probleme des PCM zu lösen, so kann dieses als Zwischenprodukt vertrieben werden und somit, mit geringerem Aufwand an F&E, in den unterschiedlichsten Produkten eingesetzt werden (Abb. 4 rechts). Dieses Vorgehen ist also zunächst mit einem signifikanten Mehraufwand verbunden, der sich dann allerdings langfristig auszahlt. Analoges gilt natürlich auch für die Herstellung und Vermarktung von Zwischenprodukten wie etwa mikroverkapseltem PCM.

Abbildung 4
 Vermarktungsstrategien.
 Links: durchgehender Entwicklungsstrang; es genügt, wenn das PCM im Endprodukt funktioniert.
 Rechts: unterbrochener Entwicklungsstrang; das PCM muß unabhängig vom Endprodukt funktionsfähig sein; der Entwicklungsaufwand für das PCM steigt, seine Marktfähigkeit allerdings auch



Seit etwa 10 Jahren werden diese Aspekte verstärkt bei der Entwicklung von PCM-Produkten und PCM-Zwischenprodukten berücksichtigt.

5. Neue PCM-Materialien

Auf dem Gebiet der PCM-Materialien gibt es zwei wesentliche Neuerungen, die im Folgenden kurz beschrieben werden sollen.

Eutektische Mischungen von Salzhydraten: Merck KGaA

Im Bereich der technischen Chemikalien der Merck KGaA wurde vor mehr als 10 Jahren eine Gruppe gegründet, die sich auf die Entwicklung von Salzhydraten als PCM spezialisiert hat. Wesentliche Entwicklungsziele waren

- hohe Zyklenstabilität der PCM
- keine Phasentrennung
- höhere Anzahl an Schmelztemperaturen durch Verwendung von Mehrkomponentensystemen sowie zu deren Entwicklung notwendige
- Berechnung der Phasendiagramme

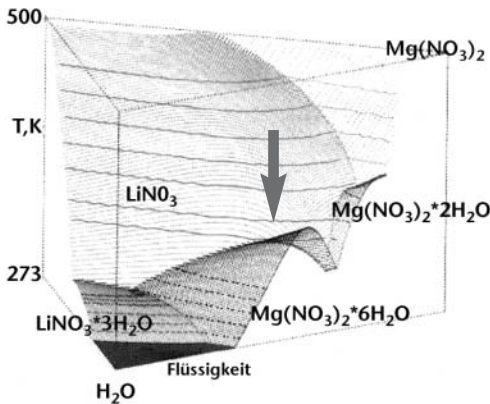


Abbildung 5
Phasendiagramm
des Systems LiNO_3 -
 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ - H_2O .
Der Pfeil markiert die
Zusammensetzung
des neuen PCM mit
Schmelzpunkt 72 °C

Abb. 5 zeigt ein Phasendiagramm eines solchen Mehrkomponentensystems. $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ist ein seit langem bekanntes PCM-Material mit Schmelzpunkt bei 89 °C und kongruent schmelzend (Lane). Zur Entwicklung eines Latentwärmespeichers für Kraftfahrzeuge wurde jedoch ein Schmelzpunkt bei etwa 70 °C gewünscht. Dies gelang durch Zusetzen von LiNO_3 ; der Schmelzpunkt wurde auf 72 °C gesenkt (Pfeil).

Das so erhaltene PCM zeigt geringe Unterkühlung und eine hohe Zyklenstabilität. Selbst nach 10.000 getesteten Zyklen zeigte das Material keine Veränderungen in seinen Eigenschaften.

Mittlerweile hat die Merck KGaA ihre Aktivitäten auch auf andere Temperaturbereiche ausgedehnt. *Tab. 1* zeigt den aktuellen Stand der Entwicklungsarbeiten.

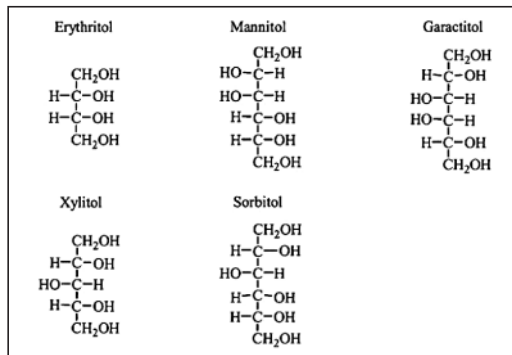
Tabelle 1
PCM der Merck KGaA

Schmelzpunkt [°C]	Schmelzenthalpie [kJ/kg]	Stand
72	168	Produkt
27	221	in Entwicklung
55	168	in Entwicklung
67	157	in Entwicklung

Zuckeralkohole: Mitsubishi Chemical

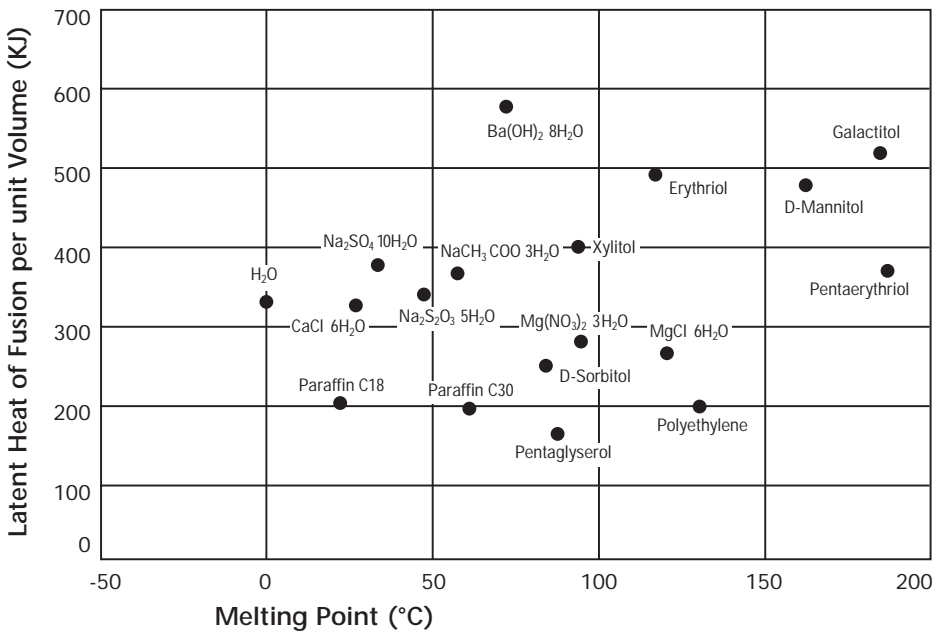
Eine weitere, wichtige Neuerung im Bereich der PCM-Materialien sind die sogenannten Zuckeralkohole (Kakiuchi et al. 1998). Diese werden zur Zeit von Mitsubishi Chemical entwickelt. *Abb. 6* zeigt die chem. Formeln einiger Zuckeralkohole.

Abbildung 6
Chemische Formeln
einiger Zuckeralkohole
(Kakiuchi et al. 1998)



Da die Zuckeralkohole Einkomponentensysteme sind, zeigen auch sie keine Separation. Aufgrund ihrer chemischen Eigenschaften ist auch Korrosion mit Metallen nicht zu befürchten. Wie *Abb. 7* zeigt, haben sie außerordentlich hohe Energiedichten. Ihre Schmelzpunkte machen sie für Temperaturen, die für Warmwasserspeicher zu hoch sind, äußerst interessant.

*Abbildung 7
Energiedichten und Schmelzpunkte einiger Zuckeralkohole im Vergleich mit bereits bekannten PCM (Kakiuchi et al. 1998)*



6. Neue PCM-Verbundmaterialien

Eine weitere, strategisch wichtige Entwicklungstendenz sind die mehr und mehr verfügbaren PCM-Verbundmaterialien. Sie bringen die in *Abb. 4* dargestellten Vorteile eines Zwischenproduktes voll zur Geltung.

Zielsetzung

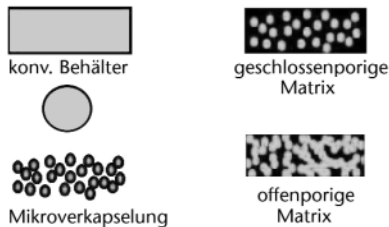
Die Zielsetzung eines PCM-Zwischenprodukts lässt sich einfach beschreiben: man möchte Speichermodule, die wie ein Ziegelstein zu handhaben sind, jedoch mit wesentlich besserer Wärmespeicherfähigkeit. Das Zwischenprodukt soll also den folgenden Anforderungen genügen:

- chemische und physikalische Stabilität
- Zyklusstabilität
- bessere Handhabung
- keine äußere Volumenänderung
- erhöhter Wärmetransport

Kurzum, ein „rundum Sorglospaket“, das schon alle technischen Probleme in sich gelöst hat und somit sehr leicht weiter zu verarbeiten ist.

Abb. 8 zeigt unterschiedliche Ansätze der Verkapselung von PCM, mit denen geeignete Zwischenprodukte hergestellt werden können. Der erste, jemals realisierte und auch einfachste Ansatz ist die Makroverkapselung. Schon 1948 wurde dieser Ansatz zum ersten Mal verwendet, als Dr. Maria Telkes das erste mit PCM geheizte Solarhaus, das sogenannte „Dover house“ konstruierte und baute (Lane et al.). Es enthielt 21 Tonnen Glaubersalz, verteilt auf 5-Gallonen-Kanistern (je 19 Liter), die normalerweise für Insektizide verwendet werden.

Abbildung 8
Ansätze zur Verkapselung
vom PCM, um geeignete
Zwischenprodukte
zu erhalten



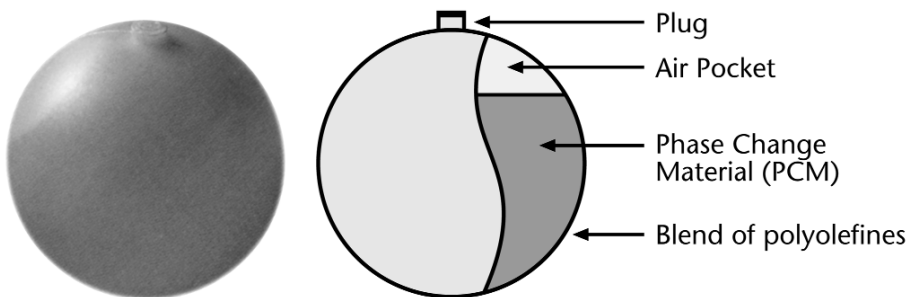
Ähnlich, jedoch in wesentlich kleineren Dimensionen, ist die sogenannte Mikroverkapselung. Sie ist ein physikalischer oder chemischer Prozess, bei dem kleine, flüssige oder feste Teilchen von 1 bis 100 µm Durchmesser mit einer festen Hülle umgeben werden (E. Jahns). Weitere Ansätze zur Verkapselung ist das Einbringen des PCM in eine Matrixstruktur mit offenen oder auch geschlossenen Poren.

Im Folgenden sollen nun einige wichtige Beispiele von Zwischenprodukten beschrieben werden.

Makroverkapselte PCM für Kältespeicher: Cristopia / Mitsubishi Chemical

Eines der besten Beispiele für eine Makroverkapselung stellen die mit PCM gefüllten Kunststoffkugeln der Firma Cristopia / Frankreich dar.

Abbildung 9
Aussehen und Aufbau
der mit PCM gefüllten
Kunststoffkugeln der
Firma Cristopia
(Cristopia website)

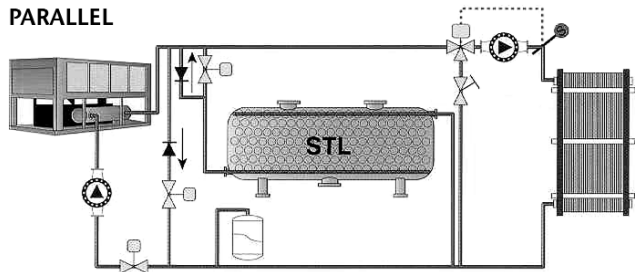


Diese Kugeln (Abb. 9) mit etwa 8 cm Durchmesser stellen separate PCM-Speichermodule dar, die leicht industriell herzustellen und weiter zu verarbeiten sind.

Zur Weiterverarbeitung werden die Kugeln als Schüttung in einen für die vorliegende Anwendung dimensionierten Stahltank eingebracht (Abb. 10). Das Wärmeträgerfluid

wird dann durch den Stahltank gepumpt und nimmt über die Oberfläche der Kugeln den Wärmeaustausch mit dem PCM vor.

Abbildung 10
Stahltank mit Schüttung
aus PCM-Kugeln in
einem Kältekreislauf
(Cristopia website)



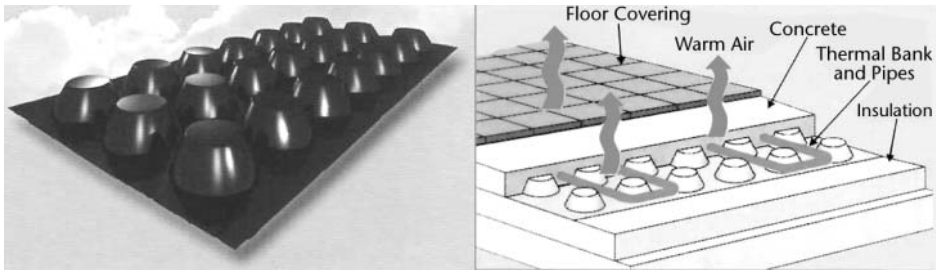
Bisher wurden von diesem System weltweit mehr als 300 Speicher mit Speichervolumen von 1,5 m³ bis 2000 m³ realisiert. Vor allem der modulare Aufbau sowie die einfache Handhabung sind die Vorteile dieses Systems.

PCM-Matten mit 27 °C Phasenübergang: TEAP / Luwa BV

Immer noch Makroverkapselung, jedoch schon etwas kleiner, benutzen die PCM-Produkte in Mattenform der Firma TEAP/ Australien (*Abb. 11*). Auch hier sind die wesentlichen Charakteristika

- Makroverkapselung von $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
- Fließbandproduktion der Matten
- modularer Aufbau
- leichte Verarbeitung

Die momentanen Anwendungen liegen vor allem in Fußbodenheizungen. *Abb. 11* zeigt schematisch den Aufbau eines solchen Systems. Aufgrund der einfachen Handha-



bung und Bearbeitung der Matten, z.B. durch Schneiden, sind jedoch viele andere Einsatzmöglichkeiten denkbar. Die Entwicklung neuer Produkte auf Basis der PCM-Matten ist somit mit relativ geringem Aufwand verbunden.

*Abbildung 11
Matten mit PCM der
Firma TEAP (links).
Rechts, schematischer
Aufbau einer Fußboden-
heizung bei Verwendung
der PCM-Matten der
Firma TEAP
(TEAP website)*

Auslaufsichere Verbundwerkstoffe: Rubitherm Produkte

Einen sehr großen Schritt in Richtung Zwischenprodukte hat die Firma Rubitherm GmbH / Hamburg in den letzten Jahren vollzogen. Aufbauend auf die schon seit Jahren existierenden PCM auf Paraffinbasis wurden neue Zwischenprodukte entwickelt. All diese Zwischenprodukte basieren auf einem gemeinsamen Ansatz (Abb. 12). Ein offenporiges Matrixmaterial (Granulate, Faserplatten, etc.) wird zunächst mit Paraffin infiltriert.

Durch Zugabe einer speziellen Substanz wird anschließend ein Netzwerk innerhalb des Paraffins aufgebaut, welches dessen Fließfähigkeit unterdrückt, d.h. das Paraffin bindet. Vorteile des Systems sind

- keine „flüssige“ Phase
- reduzierte Volumenänderung
- einfache Handhabung

Abbildung 12
 Prinzipieller Ansatz der
 Firma Rubitherm GmbH
 zur Herstellung von
 PCM-Zwischenprodukten
 auf Paraffinbasis
 (Rubitherm GmbH
 website)

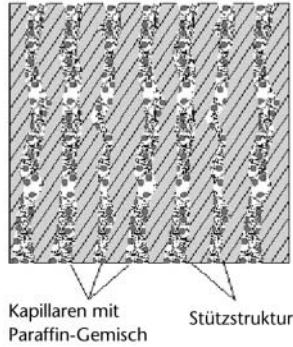
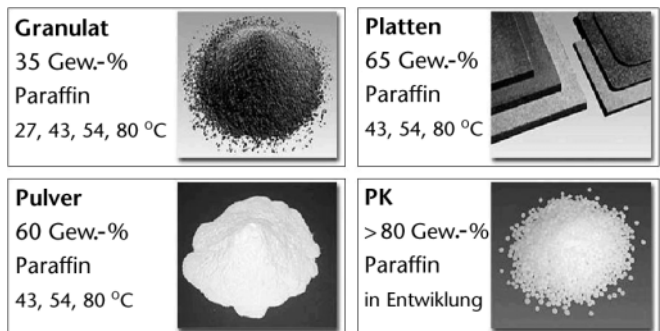


Abb. 13 zeigt die bisher entwickelten Zwischenprodukte. Als Matrixmaterial wurden hierbei ein Granulat aus Ton-erde, Platten aus Holzfaser sowie Pulver auf Silikatbasis verwendet. Diese werden mittlerweile in vielfältigen Anwendungen eingesetzt, so z.B. das Granulat als Schüttgut in Fußbodenheizungen, die Platten aus Holzfaser in Pizza-Warmhalteplatten und das Silikatpulver aufgrund seiner hohen Fließfähigkeit in Komfort-Therapieprodukten.

Abbildung 13
 Zwischenprodukte
 der Rubitherm GmbH
 auf Paraffinbasis



Das letzte, in Abb. 13 gezeigte Zwischenprodukt, das sogenannte PK, besitzt kein Matrixmaterial und kann somit extrudiert werden.

100-fach erhöhte Wärmeleitfähigkeit: SGL CARBON GmbH / ZAE Bayern

Eine Entwicklung in Richtung Verbesserung des Wärmetransports ist ein Verbundmaterial zwischen PCM und einer Graphitmatrix (Abb. 14). Dieses vor wenigen Jahren am ZAE Bayern entwickelte Material wird mittlerweile bei der SGL CARBON GmbH im Technikummaßstab produziert. Es besteht aus einer offenenporigen Graphitmatrix mit etwa 90 Vol.-% Poren. Volumenanteile von bis zu 85 % des PCM sind, je nach PCM, realisierbar. Hieraus ergibt sich eine Speicherdichte, die nur etwa 10-15 % unter der des reinen PCM liegt. Die Wärmeleitfähigkeit des Verbundmaterials liegt bei etwa 25 W/(mK), nahezu unabhängig vom verwendeten PCM, und somit bis zu einem Faktor 100 über der des reinen PCM. Hohe Wärme- und Kälteleistungen sowie hohe Zyklenzahlen wie sie zur Rentabilität eines PCM-Speichers in vielen Fällen notwendig sind, werden hierdurch möglich. Da die Graphitmatrix schon Zwischenprodukt bei der Herstellung von Graphitfolien ist, kann die Zeit zur Umsetzung in ein Produkt verkürzt werden.

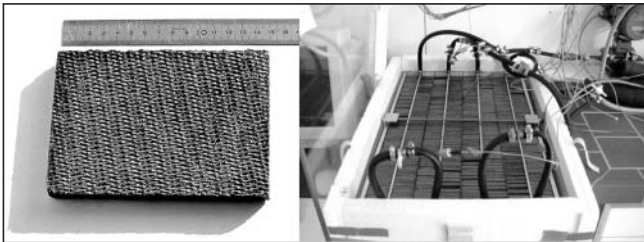


Abb. 14 (rechts) zeigt den ersten Laborspeicher, der auf Basis des neuen Verbundmaterials gebaut und getestet wurde. Bei einem Volumen von 56 l und einer Wärmeübertragerfläche von 0,7 m² zeigte er Heizleistungen von etwa 10 kW bei 40 °C Temperaturdifferenz.

Abbildung 14
Neues PCM-Graphit-
Verbundmaterial (links).
Erster Laborspeicher aus
dem mit den Firmen
SGL CARBON GmbH
und Merck KGaA durch-
geführten und von der
BFS geförderten Verbund-
projekt ISOTEG (rechts)

Quellenverzeichnis

Cristopia website

<http://www.cristopia.com/english/products/indproducts.html>

Merck KGaA website

<http://www.merck-ti.de/>

Rubitherm GmbH website

<http://www.rubitherm.de/>

TEAP website

<http://www.teappcm.com/>

Kakiuchi et al., „A Study of Erythritol as Phase Change Material“, 2nd Workshop des Annex10
12 - 13 November 1998, Sofia, Bulgaria,
Final Proceedings

<http://www.ket.kth.se/avdelningar/ts/annex10/WS2.htm>

E. Jahns, „Microencapsulated Phase change material“,
4th Workshop des Annex10, 28 - 29 Oktober 1999,
Benediktbeuern, Deutschland, Final Proceedings

<http://www.ket.kth.se/avdelningar/ts/annex10/WS4.htm>

Alfred Schneider GmbH website

<http://www.alfredschneider.de/>

Lane et al., „Solar heat storage: Latent heat material
Vol. 1: Background and scientific principles“,
CRC Press 1983

Thermische Energiespeicherung mit Phasenwechsel im Bereich von 150 bis 400 °C

Einleitung

Thermische Energiespeicher (TES) mit Phasenwechselmaterial nutzen die Enthalpieänderung von Phasenwechseln fest-flüssig oder flüssig-gasförmig und weisen damit wesentlich höhere Energiedichten auf als Wärmekapazitätssysteme. Dadurch benötigen Latentsysteme wesentlich geringere Speichervolumen und Speichermasse. Die Anwendungsmöglichkeiten im Temperaturbereich zwischen 150 °C und 400 °C sind die Speicherung von Prozesswärme in industriellen Prozessen und in der Kraftwerkstechnik oder Elektrizitätserzeugung. Weitere Nutzungschancen liegen im Verkehrssektor oder Nischenbereichen bzw. Spezialanwendungen.

Betrachtet man TES mit sensiblen festen oder flüssigen Speichermaterialien im Vergleich zu TES mit Phasenwechselmaterialien (PCM = Phase Change Material) während der Aufheizphase von 150 °C auf 450 °C, so ergibt sich folgendes Bild (Abb. 1).

F. Graeter und
J. Rheinländer
Zentrum für
Sonnenenergie- und
Wasserstoff-Forschung
(ZSW), Stuttgart
frieder.graeter@zsw-bw.de

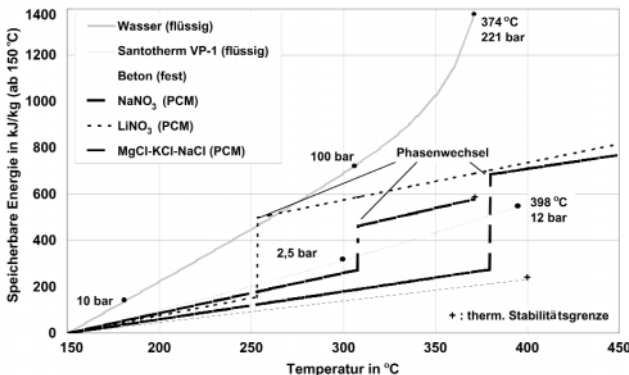


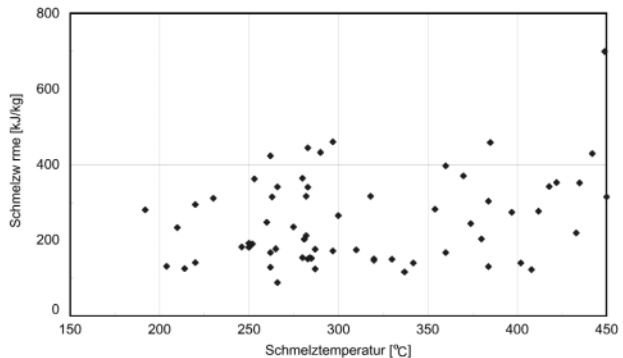
Abbildung 1
Vergleich der gewichts-
spezifischen Speicher-
kapazitäten verschiedener
Materialien zwischen
150 °C und 450 °C

Wasser ist prinzipiell ein hervorragendes Wärmespeichermedium. Wegen des über 100 °C stark ansteigenden Dampfdruckes werden jedoch die Behälterkosten sehr hoch. Beton ist den Salzen mit Phasenwechsel hinsichtlich der speicherbaren Energie zwar weit unterlegen, stellt aber als sehr einfaches und kostengünstiges Material eine Alternative dar. Ebenso verhält es sich mit dem synthetischen Thermoöl VP-1, dessen Speicherkapazität zwar an die von Phasenwechselmaterialien herankommt, das aber wiederum sehr teuer ist. PCM als Speichermedium reduziert das benötigte Speichervolumen und kann die Speicherkosten senken, wobei die Wahl des Speichertypen bzw. -materials aber wesentlich durch die Aufgabe des Speichers bestimmt wird und der Speicher im Gesamtprozess bewertet werden muss.

Materialien

Im Temperaturbereich zwischen 150 °C und 450 °C liegen die Schmelztemperaturen anorganischer Salze, vor allem von Nitrat- und Chloridsalzen und Alkalimetallhydroxiden. Der Temperaturbereich zwischen 150 °C und 450 °C ist durch diese PCM weitestgehend abgedeckt (Abb. 2).

Abbildung 2
Vergleich der Schmelzwärme verschiedener PCM zwischen 150 °C und 450 °C.
Angaben aus [1]



Allgemeine Anforderungen und Kriterien, die außer einer großen spezifischen Speicherkapazität in einem bestimmten

Temperaturbereich an die Auswahl geeigneter Phasenwechselmaterialien gestellt werden müssen, sind in *Tab. 1* aufgeführt.

Schmelzpunkt	Der Schmelzpunkt sollte möglichst nahe bei der Betriebstemperatur liegen bzw. sollte lediglich um die zur Wärmeübertragung erforderliche Temperaturdifferenz über der Temperatur der Nutzung liegen. Speichermedien mit Schmelzintervall sind aus exergetischen Gründen für die Wärmespeicherung ungünstig, da bei der Beladung Wärme höherer Qualität durch eine tiefere Entladetemperatur abgewertet wird
Schmelzwärme	Eine hohe Phasenumwandlungsenergie bestimmt die nutzbare Speicherenergie
Spezifische Wärme	Sie trägt im festen und flüssigen Bereich erheblich zur Speicherkapazität bei
Wärmeleitfähigkeit	Die Wärmeleitfähigkeit beeinflusst die Geschwindigkeit beim Be- und Entladen des Speichers
Thermischer Kontaktwiderstand	Guter thermischer Kontakt zwischen Wärmeübertragerfläche und Speichermedium gewährleistet gute Wärmeübertragungseigenschaften
Volumenänderung	Volumen- oder Dichteänderungen beeinflussen die Druckbeanspruchungen des Speicherbehälters
Reversibilität der Phasenumwandlung	Kongruent und eutektisch schmelzende Salze garantieren die vollständige Phasenumwandlung ohne Veränderung der chemischen Zusammensetzung und Reduktion der nutzbaren Latentwärme
Unterkühlung	Die Schmelze sollte am thermodynamischen Schmelzpunkt erstarren. Hohe Keimbildungsraten und Keimbildungsgeschwindigkeiten gewährleisten eine geringe Unterkühlungsneigung
Chemische Stabilität	Die Zersetzungsneigung des Speichermaterials bestimmt die Lebensdauer des Speichers
Korrosivität	Die Korrosion beeinflusst die Auswahl der Konstruktionswerkstoffe
Viskosität	Im Falle konvektiven Wärmetransports wirken sich niedrige Viskositätswerte günstig auf den Wärmeübergang aus
Dampfdruck	Der Dampfdruck bestimmt darüber, ob der Speicherbehälter ein Druckbehälter sein muss

Tabelle 1

Anforderungen und Kriterien bei der Materialauswahl

Wärmetransport

Ausgehend von der Speicherung mit indirekter Wärmeübertragung (ein Wärmeträger-Fluid überträgt die Energie durch eine Trennwand auf ein sekundäres Speichermedium), wird die Höhe des augenblicklichen Energieein- bzw. -austrags in den einzelnen Teilprozessen von verschiedenen Wärmetransportmechanismen bestimmt (*Abb. 3*). Im folgenden werden die Teilprozesse beim Be- und Entladen eines Phasenwechselspeichers beschrieben.

In der ersten Phase des Beladeprozesses wird das zunächst feste und unterkühlte Speichermaterial mit einer Temperatur größer als der Schmelztemperatur beaufschlagt und einem instationären Aufheizvorgang unterworfen. Dabei fließt die zugeführte Energie vollständig in den unterkühlten Festkörper ab und reicht nicht aus, um einen größeren Teil des Speichermaterials aufzuschmelzen, so dass in dem entstehenden engen Schmelzspalt die Wärme allein durch Leitung transportiert wird (Teilprozess I).

Infolge des Temperaturanstiegs im PCM (kleineres treibendes Temperaturgefälle) nimmt der Wärmestrom ab. Ab einer bestimmten Dicke der Randschicht, die den Schmelzpunkt des Speichermaterials überschritten hat, beginnt der eigentliche Aufschmelzvorgang. In diesem Teilprozess wird der Energieeintrag zunächst auch noch im flüssigen Speichermaterial durch Leitungsmechanismen geprägt. Nach und nach wird dieser Vorgang durch die einsetzende freie Konvektion überlagert (Teilprozess II).

Anschließend wird ein „quasistationärer Aufschmelzvorgang“ beobachtet (Teilprozess III), den ein nahezu konstanter Wärmestrom und eine gleichmäßige Aufschmelzrate charakterisieren. Letztere ist als die zeitliche Änderung des Quotienten aus der aufgeschmolzenen Masse m_l und der Gesamtmasse m_{ges} definiert. Nachdem das gesamte Speichermaterial aufgeschmolzen ist, wird es bis auf die gewünschte Temperatur überhitzt. Mit der Abnahme der treibenden Temperaturdifferenz nimmt gleichzeitig auch die natürliche Konvektion ab. Der zugeführte Wärmestrom kann nun auf einen stationären Endwert reduziert werden, der nur noch die Verluste des Speichers deckt (Teilprozess IV).

Der Entladevorgang lässt sich analog zu den Vorgängen während des vierten Teilprozesses beschreiben, nur mit

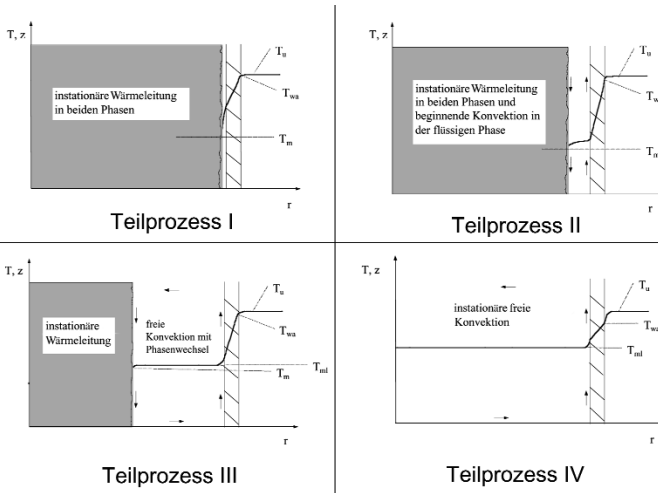


Abbildung 3
 Temperaturverteilungen
 und Verlauf der Phasengrenzflächen beim
 Beladen eines TES mit
 PCM durch indirekte
 Wärmeübertragung [2]

umgekehrten Vorzeichen für das Temperatur- und Strömungsfeld. Sobald das gesamte flüssige Speichermaterial die Schmelztemperatur erreicht hat, beginnt es an der Wärme übertragenden Fläche zu erstarren. Durch diese Schicht, mit einem hohen und stetig anwachsendem Wärmeleitwiderstand, muss die an der Phasengrenze frei werdende Schmelzenthalpie transportiert werden, so dass der Wärmestrom weiter abnimmt. Der Wärmetransport erfolgt in diesem Teilprozess ausschließlich über Leitung, da sich die flüssige Phase vollständig auf Schmelztemperatur befindet und dementsprechend keine Konvektion vorhanden ist. Im letzten Teilprozess wird das vollständig erstarrte Speichermaterial unterkühlt.

Diese grundsätzliche Beschreibung der Vorgänge ist weitgehend auch auf Systeme übertragbar, bei denen das Phasenwechselmaterial in Rohre, Zylinder, Quader, Kugeln und ähnliche Körper eingeschlossen wird, welche vom Wärmeträger umströmt werden.

Eine für die Nutzung des TES mit PCM wichtige Behinderung des Wärmetransports beruht auf der oft schlechten Wärmeleitfähigkeit der Salze, so dass der Entladevorgang sehr lange dauert.

Untersuchte Speicherkonzepte mit Phasenwechselmaterialien

Tabelle 2

Technische Daten der Teststände im wärmetechnischen Labor des ZSW

Im wärmetechnischen Labor des ZSW wurden zwei Teststände mit Wasser/Wasserdampf und synthetischem Thermoöl als Wärmeträgermedium zur Untersuchung von Speichern mit Phasenwechselmaterialien genutzt (Tab. 2).

Wärmeträgeröl-Anlage (WTÖA)		Hochdruck Wasser/Wasserdampf Versuchsanlage (HIPRESS)	
Max. Öltemperatur	400 °C	Temperaturbereich	100 – 450 °C
Max. Öldruck	16 bar	Druckbereich	30 – 160 bar
Öl Volumenstrom	0,3 – 10 °C	Massenstrom	175 – 350 kg/h
max. thermische Heizleistung (Beladen)	50 kW	Dampfbedingungen von 20 K Unterkühlung bis 10K Überhitzung. (für Massenströme zwischen 10-60 kg/h ist eine Überhitzung von 100K möglich)	
Max. Kühlleistung (Entladen)	100 kW		
Synthetisches Thermoöl: Diphenyl-Diphenyloxid			

Erste Experimente zur Quantifizierung der Wärmetransportvorgänge sind ab 1991 an vertikalen Doppelrohr-Testmodulen durchgeführt worden. Das Wärmeträger-Fluid (WT-Fluid) strömt durch das innere Wärmeüberträgerrohr und ist von Phasenwechselmaterial im Ringspalt umgeben. In einer weiteren Untersuchung wurde das Betriebsverhalten eines Rohrregister-Testmoduls untersucht (Abb. 4), bei dem in einem Hüllrohr sieben Wärmeüberträgerrohre angebracht sind, deren Rohrabstand so groß wie der Innendurchmesser eines Hüllrohres bei einem Doppelrohr-Moduls ist.

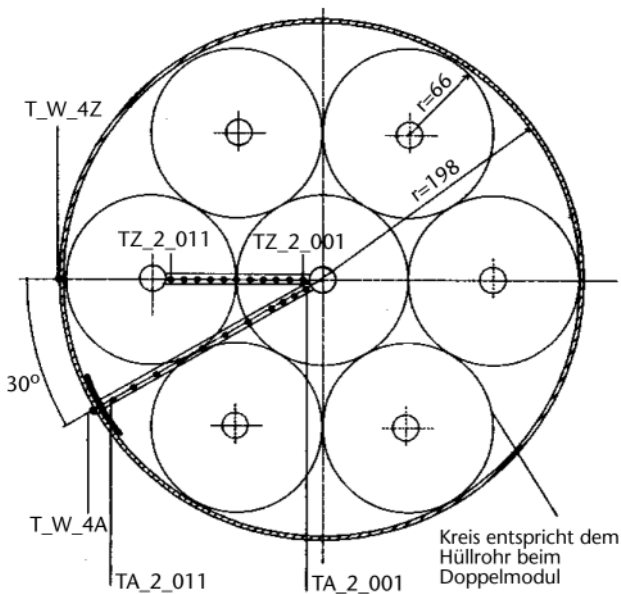


Abbildung 4
Rohrregister-Modul
im Querschnitt mit
Instrumentierung [2]

Der gemessene Wärmetransport eines Rohres des Rohrregisters stimmt dabei mit den Ergebnissen am Doppelrohr weitgehend überein, obwohl durch die Rohrregister-Anordnung das Speichervolumen um 30 % größer ist. Gleichzeitig können durch diese Anordnung, Stahlmasse und damit Behälterkosten eingespart werden.

Für die Integration eines Speichers in z.B. einem Parabolrinnen-Solkraftwerk muss die Konstruktion einfach bleiben und das PCM billig sein. Ein konventioneller Wärmeüberträger (wie oben beschrieben) und Alkalinitrate erfüllen diese Anforderungen.

Für ein modernes Solarkraftwerk (SEGS) könnte die Betriebscharakteristik für einen Speicher folgendermaßen aussehen (Abb. 5), wobei die Temperaturgrenzen vom gewählten Dampfprozess oder Anwendungsfall abhängen.

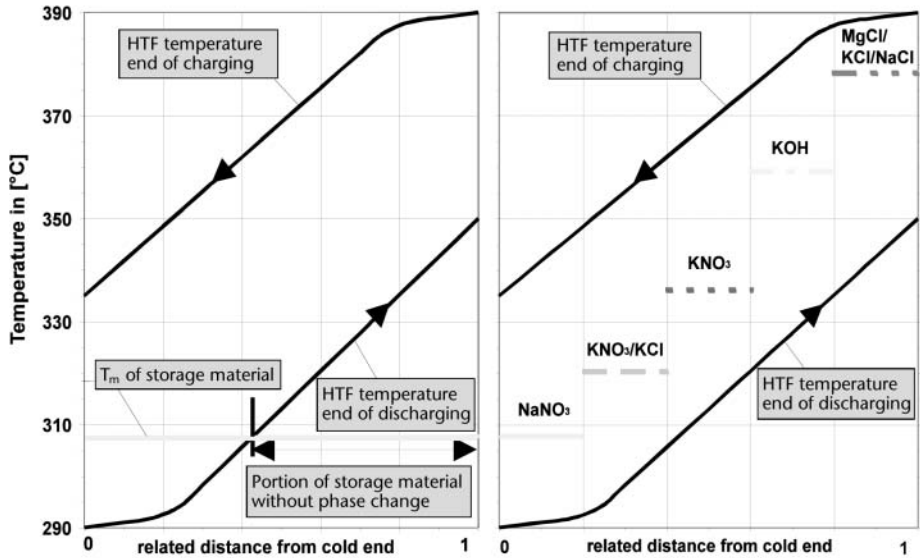


Abbildung 5

Prinzipielle Temperaturverteilung in einem thermischen Energiespeicher für ein Parabolrinnen-Solarkraftwerk [3]

Während des Beladens tritt das WT-Fluid mit konstant 390 °C in den TES und verlässt ihn mit mind. 290 °C und max. 335 °C. Während des Entladens beträgt die Temperatur des WT-Fluid max. 350 °C und darf 290 °C nicht unterschreiten. Mit nur einem PCM (z.B. NaNO_3 , $T_m=308$ °C), schmilzt oder erstarrt während des Be- und Entladens nur ein Teil des PCM und die Schmelzenthalpie wird nicht vollständig genutzt. Um den Gebrauch von PCM zu verbessern, kann ein Phasenwechselfpeicher aus unterschiedlichen PCM mit abnehmender Schmelztemperatur in Kaskadenschaltung eingesetzt werden.

In dem abgebildeten System sind die Schmelztemperaturen eines Systems von fünf verschiedenen PCM dargestellt (NaNO_3 , KNO_3/KCl , KNO_3 , KOH , $\text{MgCl}/\text{KCl}/\text{NaCl}$).

Die Vorteile einer solchen Kaskadenschaltung liegen nicht nur in der besseren Ausnutzung der Schmelzwärme des PCM, sondern es wird auch ein größerer Temperaturbereich abgedeckt, wie es für viele Einsatzmöglichkeiten zur Nutzung von Wärme in Industrieprozessen notwendig ist.

Im Wärmetechnischen Labor des ZSW ist ein solcher kaskadierter Latentwärmespeicher mit drei Doppelrohr-Testmodulen untersucht worden.

Die Module waren mit folgenden PCM befüllt (Tab. 3):

Tabelle 3
Physikalische Eigenschaften der verwendeten PCM im kaskadierten Speicher

Modul	PCM	Schmelztemperatur T_m [°C]	Schmelzwärme h_m [kJ/kg]
1	NaNO ₃	308	174
2	KNO ₃ /KCl4,5%wt	320	150
3	KNO ₃	336	116

Jedes Modul ist 2,5 m hoch und hat einen Innendurchmesser von $d=0,13$ m. Aufeinanderfolgende Be- und Entladezyklen zwischen 280 °C und 360 °C sind untersucht und die Temperaturverteilung im Salz sowie die Ein- und Austrittstemperaturen des WT-Fluid gemessen worden.

Abb. 6 zeigt die Temperaturverteilung im kaskadierten Phasenwechselfpeicher beim Beladen. Das PCM schmilzt um das innere Wärmeüberträgerrohr und dehnt sich nach oben aus, so dass die Wärme sowohl in radialer Richtung vom Wärmeüberträgerrohr zum PCM, als auch in axialer Richtung (Konvektion) übertragen wird. Durch diese Anordnung kann der Betrag der gespeicherten Latentenergie gesteigert werden.

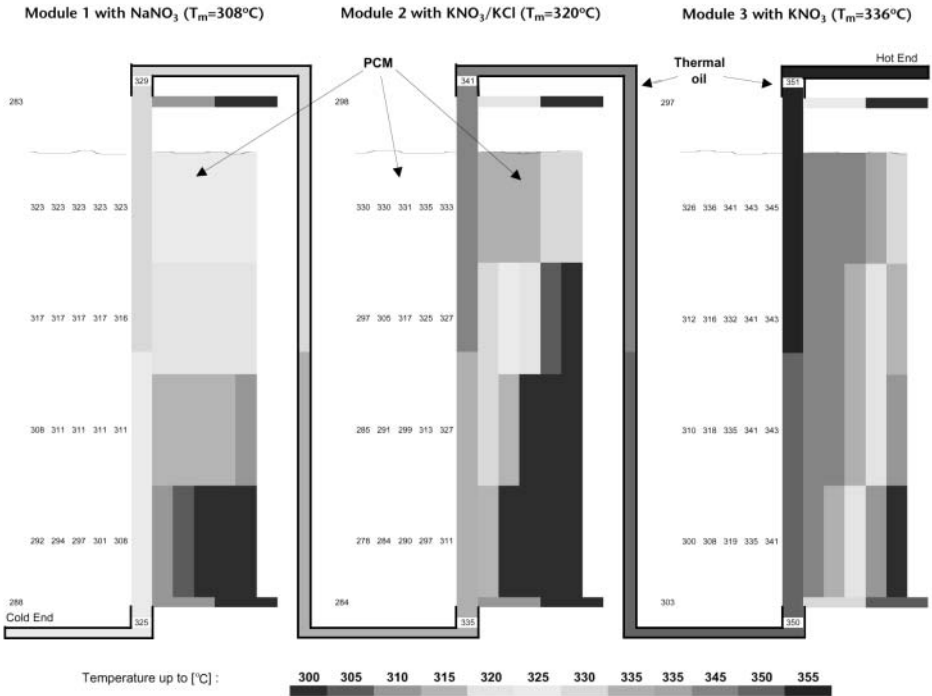


Abbildung 6
 Temperaturverteilung
 im kaskadierten
 Phasenwechselspeicher
 beim Beladen [3]

Ausblick

Der kaskadierte Phasenwechselspeicher ist ein vielversprechendes Konzept eines ökonomischen und kompakten thermischen Energiespeichers für Prozesswärme. In den Untersuchungen, die seit 1991 am ZSW durchgeführt worden sind, ist die Machbarkeit und die Zuverlässigkeit von Phasenwechselspeichern mit einigen Salzen nachgewiesen worden.

Weiterer F&E-Bedarf besteht in der Verbesserung des Wärmetransports, z.B. durch:

- die Optimierung von Geometrie und konstruktiven Elementen
- die Beeinflussung der Grenzflächeneigenschaften der Wärmeübertragungsflächen durch Oberflächenbeschichtung
- die Beeinflussung des Schmelz/Kristallisationsverhaltens des Materials durch Additive oder
- die Beeinflussung der thermo-physikalischen Eigenschaften (Wärmeleitfähigkeit) durch Dotierung und in analytischen und numerischen Untersuchungen zur Systemintegration von TES in typische Gesamtprozesse.

Literatur

- [1] Steiner, D.; Heine, D.; Heess, F. : Untersuchung von Mittel- und Hochtemperatur Latentwärmespeicher Materialien, Schlussbericht BMFT ET 4335, 1980
- [2] Hunold, D.: Zur Auslegung und Konstruktion von thermischen Energiespeichern mit einem fest/flüssig Phasenwechsel des Speichermaterials für Parabolrinnen-Solarkraftwerke, Fortschr.-Ber. VDI Reihe 6 Nr. 308, VDI Verlag, Düsseldorf, 1994
- [3] Michels, H.; Hahne, E.: Cascaded Latent Heat Storage for Process Heat, Proc. 8th Int. Symp. Solar Thermal Concentrating Technologies, Köln, Germany, 1996



FVS-Workshop Wärmespeicherung Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V, Köln Teilnehmer

Name	Anschrift	Vortrag abgedruckt
Adelt, Marius, Dr.	Ruhrgas AG, Abt. TAA, 46284 Dorsten Marius.adelt@ruhrgas.com	
Bertram, Alexa	Landschaftsverband Rheinland, 50663 Köln	
Bühl, Jürgen, Dipl.-Ing.	TU Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, 98684 Ilmenau juergen.buehl@mb.tu-ilmenau.de www.tu-ilmenau.de	Seite 40
Dibowski, Gerd	DLR, EN-SE, 51147 Köln, gerd.dibowski@dlr.de	
Drück, H., Dipl.Ing.	Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) 70550 Stuttgart drueck@itw.uni-stuttgart.de	
Eikmeier, Bernd	Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl NES, 44780 Bochum eikmeier@nes.ruhr-uni-boch.de	
Evers, Franz	Fa. Evers, 59846 Sundern	
Felderhoff, M.		

Name	Anschrift	Vortrag abgedruckt
Gräter, Friedrich	Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW), Baden-Württemberg, 70565 Stuttgart frieder.graeter@zsw-bw.de	Seite 101
Hauer, Andreas	ZAE Bayern (Zentrum für Angewandte Energieforschung), 80807 München andreas.hauer@physik.uni-muenchen.de	
Hennecke, Klaus, Dr.	DLR, EN-SE, 51147 Köln klaus.hennecke@dlr.de	
Henning, Hans-Martin, Dr.	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Fraunhofer ISE), 79110 Freiburg hans-martin.henning@ise.fhg.de	
Huhn, Robert	TU Dresden, Fak. Maschinenwesen, Inst.f.Energietechnik, 01062 Dresden rhuhn@metrs1.mw.tu.dresden	
Hüttmann, Matthias	solid GmbH, 90765 Fürth info@solid.de	
Jahns, Ekkehard, Dr.	BASF AG 67056 Ludwigshafen ekkehard.jahns@basf-ag.de	
Jakob, Uli	FH Stuttgart-Hochschule für Technik, 70174 Stuttgart jakob.fbp@fht-stuttgart.de	
Jänchen, Jochen, Dr.	FHTW Berlin, c/o ZeoSys GmbH, 12489 Berlin-Adlershof	
Kabus, Franz, Dr.	GTN Geothermie Neubrandenburg GmbH 17033 Neubrandenburg gtn@gtn-online.de	



Name	Anschrift	Vortrag abgedruckt
Kröll, Ulrich	Robert Bosch GmbH, Geschäftsbereich Thermotechnik, 73249 Werna Ulrich.kroell@de.bosch.com	
Krüger, Dirk	DLR, EN-SE, 51147 Köln dirk.krueger@dlr.de	
Lawitzka, Helmut, Dr.	BMW, Referat III A 6 , 53123 Bonn Lawitzka@bmw.bund.de	
Lottner, Volkmar, Dr.	Forschungszentrum Jülich, Projektkräger Jülich (PTJ), 52425 Jülich, v.lottner@fz-juelich.de	
Mehling, Harald	ZAE Bayern, 85748 Garching, Harald_Mehling@ph.tum.de http://www.zae-bayern.de	Seite 85
Milow, Bernhard	DLR, Programmbeauftragter Energie, 51147 Köln bernhard.milow@dlr.de	
Mittelbach, Walter	UFE-Solar, 13127 Berlin mittelbach@ufesolar.de	
Müller-Steinhagen, H., Prof. Dr.	DLR, ITT, 70569 Stuttgart, hans.mueller-steinhagen@dlr.de	
Nilius, Andreas	TU Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, 98684 Ilmenau juergen.buehl@mb.tu-ilmenau.de www.tu-ilmenau.de	

Name	Anschrift	Vortrag abgedruckt
Roeb, Martin	DLR, EN-SE, 51147 Köln martin.roeb@dlr.de	
Saadat, Ali, Dipl.-Ing.	GFZ GeoForschungsZentrum Potsdam, 14473 Potsdam saadat@gfz-potsdam.de	
Sattler, Christian	DLR, EN SE 51147 Köln christian.sattler@dlr.de	
Schäfer, Ingo, Dipl.-Ing.	Geologischer Dienst NRS 47803 Krefeld ingo.schaefer@gd.nrw.de	
Schmidt, Thomas	Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW), 70550 Stuttgart schmidt@itw.uni-stuttgart.de	Seite 50
Scholz, Sören	Rubitherm GmbH, 20457 Hamburg	
Schossig, Peter, Dipl.-Physiker	Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE (Fraunhofer ISE) 79110 Freiburg schossig@ise.fhg.de	
Stadermann, Gerd, Dr.	ForschungsVerbund Sonnenenergie, c/o HMI, 12489 Berlin fvs@hmi.de	
Streuber, Christian, Prof. Dr.-Ing.	Fachhochschule Wiesbaden, Fachbereich Maschinenbau 65428 Rüsselsheim streuber@maschinenbau.fh-wiesbaden.de	Seite 72

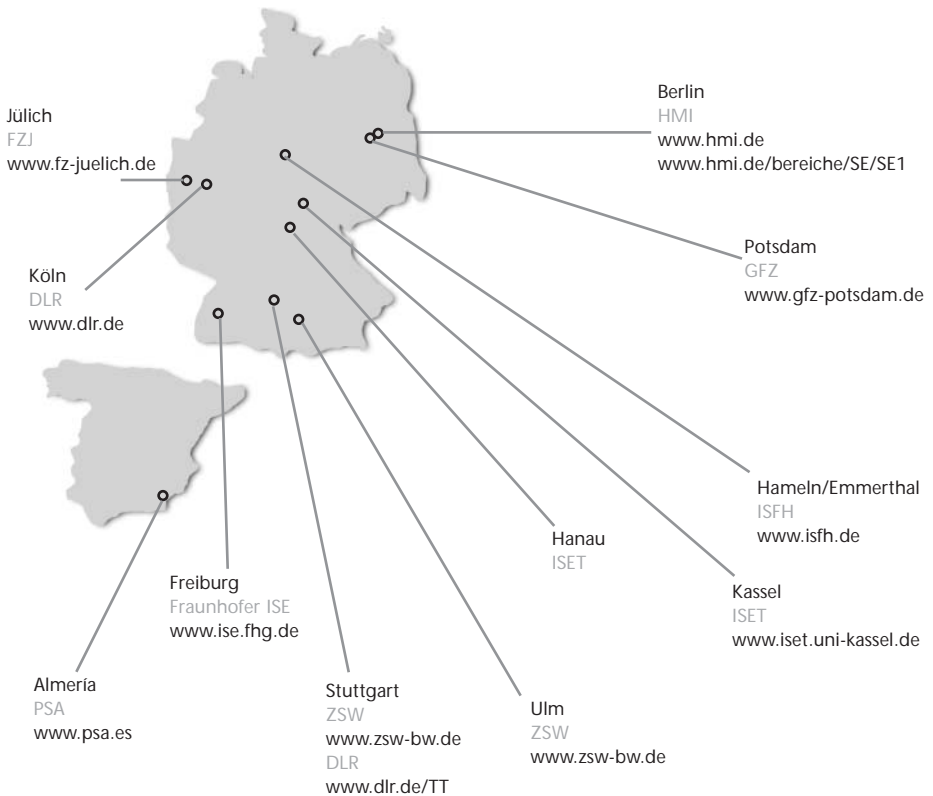


Name	Anschrift	Vortrag abgedruckt
Tamme, R., Dr.	DLR, ITT, 70569 Stuttgart Rainer.Tamme@dlr.de	
Vajen, Klaus	Universität Kassel; FB Maschinenbau Solar- und Anlagentechnik 34109 Kassel vajen@uni-kassel.de	
Warnke, Ernst P., Prof.	Siempelkamp Guss- und Anlagentechnik Holding GmbH & Co., 47803 Krefeld ernst.warnke@siempelkamp.com	Seite 68
Herzog, Thomas, Prof.	Technische Universität München, Entwerfen und Baukonstruktion II, 80333 München	

Standorte der Mitgliedsinstitute



FVS ForschungsVerbund
Sonnenenergie



ForschungsVerbund Sonnenenergie • Geschäftsstelle c/o Hahn-Meitner-Institut • Kekuléstraße 5 • D-12489 Berlin Telefon: (030) 670 53-338
Telefax: (030) 670 53-333 • E-Mail: fvs@hmi.de • www.FV-Sonnenenergie.de

Anschriften der Mitgliedsinstitute



DLR Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
Linder Höhe • D-51147 Köln
Telefon (0 22 03) 601-0
Telefax (0 22 03) 637-10
E-Mail: Pressestelle@dlr.de • www.dlr.de
Standort Stuttgart
Pfaffenwaldring 38-40
D-70569 Stuttgart
Telefon (0711) 68 62-0
Telefax (0711) 68 62-349
E-Mail: friedrich.alber@dlr.de



PSA Plataforma Solar de Almería
Apartado 39 • E-04200 Tabernas (Almería)
Telefon (0034) 950-38 79 48
Telefax (0034) 950-36 53 13
E-Mail: christoph.richter@psa.de
www.psa.es



FZJ Forschungszentrum Jülich GmbH
D-52425 Jülich
Telefon (0 24 61) 61-46 61
Telefax (0 24 61) 61-46 66
E-Mail: p.schaefer@fz-juelich.de
www.fz-juelich.de



Fraunhofer ISE
Fraunhofer-Institut
für Solare Energiesysteme ISE
Heidenhofstr. 2 • D-79110 Freiburg
Telefon (07 61) 45 88-0
Telefax (07 61) 45 88-100
E-Mail: k.schneid@ise.fhg.de
www.ise.fhg.de



GFZ GeoForschungsZentrum Potsdam
Stiftung des öffentlichen Rechts
Telegrafenberg • D-14473 Potsdam
Telefon (0331) 288-10 40
Telefax (0331) 288-10 44
E-Mail: ossing@gfz-potsdam.de
www.gfz-potsdam.de



HMI Hahn-Meitner-Institut Berlin GmbH
Glienicker Straße 100 • D-14109 Berlin
Telefon (030) 80 62-20 34
Telefax (030) 80 62-29 98
E-Mail: robertson@hmi.de • www.hmi.de

HMI

Institutsteil Adlershof • Abt. Photovoltaik
Kekuléstraße 5 • D-12489 Berlin
Telefon (030) 670 53-353
Telefax (030) 670 53-333
E-Mail: lips@hmi.de



ISFH Institut für Solarenergieforschung
GmbH Hameln/Emmerthal
Am Ohrberg 1 • D-31860 Emmerthal
Telefon (0 51 51) 9 99-0
Telefax (0 51 51) 9 99-400
E-Mail: info@isfh.de
www.isfh.de



ISET Institut für Solare Energiever-
sorgungstechnik Verein an der Universität
Gesamthochschule Kassel e.V.
Königstor 59 • D-34119 Kassel
Telefon (05 61) 72 94-0
Telefax (05 61) 72 94-100
E-Mail: mbox@iset.uni-kassel.de
www.iset.uni-kassel.de
Standort **Hanau**
Rodenbacher Chaussee 6 • D-63457 Hanau
Telefon (0 61 81) 58-27 01
Telefax (0 61 81) 58-27 02
E-Mail: hanau@iset.uni-kassel.de



ZSW Zentrum für Sonnenenergie- und
Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg
Gemeinnützige Stiftung
Heißbrühlstraße 21C • D-70565 Stuttgart
Telefon (07 11) 78 70-0
Telefax (07 11) 78 70-100
E-Mail: frietsch@zsw-bw.de
www.zsw.de

Geschäftsbereich Ulm

Helmholtzstraße 8 • D-89081 Ulm
Telefon (07 31) 95 30-0
Telefax (07 31) 95 30-666



FVS ForschungsVerbund Sonnenenergie
Geschäftsstelle
Kekuléstraße 5 • D-12489 Berlin
Telefon (030) 670 53-338
Telefax (030) 670 53-333
E-Mail: fvs@hmi.de
www.FV-Sonnenenergie.de

Impressum

FVS-Workshop Wasserstoffspeicherung, Günzburg
Veranstalter: ZSW Zentrum für Sonnenenergie-
und Wasserstoff-Forschung

FVS-Workshop Wärmespeicherung, Köln
Veranstalter: DLR Deutsches Zentrum für
Luft- und Raumfahrt e.V.

Herausgeber:

FVS ForschungsVerbund Sonnenenergie

Geschäftsstelle

c/o Hahn-Meitner-Institut

Kekuléstraße 5 • D-12489 Berlin

Telefon (030) 670 53-338

Telefax (030) 670 53-333

E-Mail: fvs@hmi.de

www.FV-Sonnenenergie.de

Redaktion:

Dr. Klaus Heidler

Solar Consulting

Satz und Layout:

peperoni Werbeagentur GmbH

Druck:

Druckhaus am Treptower Park

Am Treptower Park 28 – 30

12435 Berlin

ISSN: 0949-1082