

Langzeit-Wärmespeicher für solare unterstützte Nahwärmesysteme

F. Ochs,, W. Heidemann, H. Müller-Steinhagen
 University of Stuttgart, Institute for Thermodynamics and Thermal Engineering (ITW)
 Pfaffenwaldring 6, D-70550 Stuttgart
 Tel. +49 711 685 63278, Fax: +49 711 685 63242
 Email: ochs@itw.uni-stuttgart.de

1) Solar unterstützte Nahwärme mit saisonaler Wärmespeicherung

Saisonale Speicherung von Solarenergie oder von Wärme von z.B. Biogasanlagen bietet großes Potential in zukünftigen Energiesystemen fossile Brennstoffe zu substituieren. Im Vergleich zu Speichern in kleinen dezentralen Systemen sind sowohl die spezifischen Kosten als auch die spezifischen Wärmeverluste von großen Langzeit-Wärmespeichern in solar unterstützten Nahwärmesystemen (vgl. Bild 1) niedriger.

Für die saisonale Wärmespeicherung existieren verschiedene Konzepte, die in Bild 2 aufgeführt sind. Die Entscheidung für einen bestimmten Speichertyp hängt im Wesentlichen von den

geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen im Untergrund des jeweiligen Standortes ab. Nur Behälter-Wärmespeicher und Erdbecken-Wärmespeicher können nahezu standortunabhängig gebaut werden. Die Dimensionen ausgeführter erdvergrabener Behälter- und Erdbecken-Wärmespeicher variieren

zwischen 100 m³ bis über 10 000 m³. Die größten ausgeführten Projekte sind der Heißwasser-Wärmespeicher in Friedrichshafen (D) mit 12 000 m³ und der Erdbecken-Wärmespeicher in Marstal (DK) mit 10 000 m³ (Benner et al., Bodmann et al. und Ochs et al.).

Erdbecken-Wärmespeicher werden nach ihrem Speichermedium unterteilt in (i) Kies-Wasser-Wärmespeicher, (ii) Erdreich- bzw. Sand-Wasser-Wärmespeicher oder (iii) Heißwasser-Wärmespeicher. In Bezug auf Wärmekapazität sowie Be- und Entladeleistung ist ein Heißwasser-Wärmespeicher gegenüber Kies- bzw. Erdreich-Wasser- Wärmespeicher vorteilhaft. Diese haben jedoch Vorteile, wenn statische Gründe im Vordergrund stehen, wie beim Kies-Wasser-Wärmespeicher (8000 m³) in Chemnitz, auf dem eine Straße und ein Parkplatz gebaut wurden.

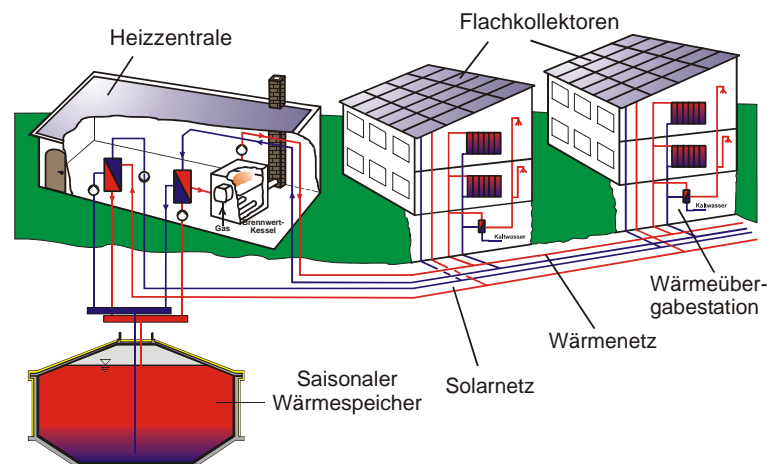


Bild 1: Schematischer Aufbau und Komponenten eines solar unterstützten Nahwärmesystems (Quelle: ITW)

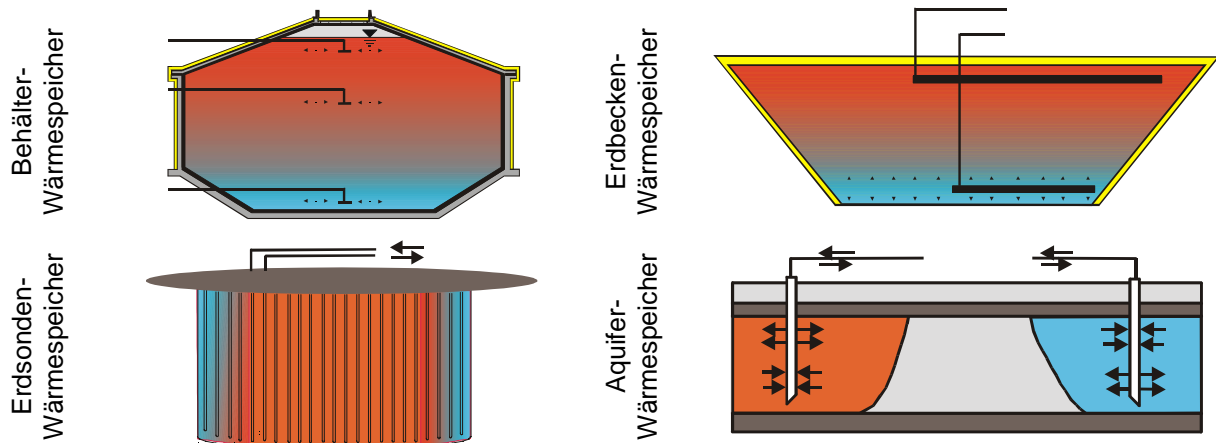


Bild 2: Typen von Langzeit-Wärmespeichern (Quelle: ITW)

Eine statisch vergleichbare Abdeckung von Heißwasser-Wärmespeichern erfordert einen nicht unerheblichen technischen und finanziellen Aufwand. Auch beim aktuellsten Projekt, der solar unterstützten Wärmeversorgung in Eggenstein-Leopoldshafen, wurde aus statischen und finanziellen Gründen ein Kies-Wasser-Wärmespeicher (4500 m³) favorisiert, da sich der Speicher unter einem Schulhof befindet. In Tabelle 1 sind einige der über 30 Behälter- und Erdbecken-Wärmespeichern, welche in den letzten 30 Jahren realisiert wurden aufgelistet.

Eine Vielzahl der Pilot- und Forschungsspeicher wies Leckagen bei Inbetriebnahme auf, welche aber zumeist durch Sanierung behoben werden konnten. Bis auf den mit Ton abgedichteten Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeicher in Ottrupgaard (DK) sind alle sich in Betrieb befindlichen Speicher frei von größeren Leckagen.

Bei der Mehrzahl der bisher ausgeführten Pilotanlagen zur solar unterstützten Nahwärmeversorgung mit vergrabenen Langzeit-Wärmespeichern sind die Wärmeverluste höher als bei der Planung berechnet. Die Gründe dafür sind:

- Höhere mittlere Speichertemperatur als prognostiziert aufgrund geänderter Lasten oder Systemkonfigurationen.
- Geringere Temperaturschichtung gegenüber dem Planungsstand.
- Höherer Rücklauf- und somit Speicherbodentemperaturen verursachen im meist ungedämmten Bodenbereich höhere Wärmeverluste
- Die Wärmeleitfähigkeit der eingesetzten Wärmedämmung wurden bei der Planung auf Basis der DIN 4108 (Referenztemperatur 10°C) als konstant angenommen. Die Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung erhöht sich im Betrieb durch hohe Temperaturen. Mit zunehmendem Wassergehalt der Wärmedämmung ist eine signifikante Zunahme der Wärmeleitfähigkeit festzustellen.

Tabelle 1: Auswahl von Projekten mit erdvergrabenem Langzeit-Wärmespeicher, gemessene Verluste (\dot{Q}_{meas}) Vergleich von Auslegungs- bzw. Simulationswerten mit gemessenen Werten

Ort	Land	Datum	V [m^3]	A [m^2]	A/V [m^{-1}]	ΔT_{av} [$^{\circ}C$]	\dot{Q}_{meas} [$MWh a^{-1}$]	$\dot{Q}_{\text{meas}} / \dot{Q}_{\text{design}}$ [-]
Behälter-Wärmespeicher								
Studsvik	S	1978	800	550	0.69	n/a	n/a	1.07-1.3
Lombohov	S	1980	10 000	1750	0.18	n/a	250	3
Särö	S	1989	640	n/a	n/a	n/a	n/a	3
Hamburg	D	1996	4 500	1 650	0.37	42	360 – 430	3.8-4.5
Friedrichshafen	D	1996	12 000	2 796	0.23	49	320 – 360	1.5-1.6
Ilmenau ⁺⁾	D	1998	300	262	1.14	n/a	n/a	1.2
Hannover	D	2000	2 750	1 135	0.41	33	90 – 100	1.3-1.4
Erdbecken-Wärmespeicher								
Stuttgart (GW) ^{§)}	D	1985	1 050	835	0.84	8	27	<1
Malung (HW)	S	1989	1 000	n/a	n/a	n/a	n/a	1.5
Chemnitz (GW) ^{x)}	D	1997	8 000	3 375	0.42	n/a	n/a	1.4
Steinfurt (GW) ^{§)}	D	1999	1 500	1 305	0.87	26	70 – 90	n/a
Marstal (HW) ^{†)}	DK	2003	10 000	5 600	0.56	22	338	n/a

^{#)} Differenz aus durchschnittlicher Speicher- und Umgebungstemperatur $\Delta T_{av} = T_{m,s} - T_{m,a}$

⁺⁾ Extrapolation von 5 Monaten

^{§)} 462 h Simulation, Betrieb mit Wärmepumpe

^{x)} Extrapolation von 8 Wochen, Betrieb bis 2006

^{†)} 6 Monate Betrieb

^{§)} incl. Anschlussleitungen

n/a nicht verfügbar

2) Bauweise von Behälter- und Erdbecken-Wärmespeichern

Die Bauweisen von Behälter-Wärmespeichern und von Erdbecken-Wärmespeichern unterscheiden sich nur wenig. Der Wandaufbau bei Erdbecken-Wärmespeichern wird ohne weitere statische Maßnahmen direkt auf die Böschungen aufgebracht. Um Eindringen von Oberflächenwasser in die Wärmedämmung zu verhindern wird die Böschung mit einer Drainagematte abgedeckt. Darauf folgt der eigentliche Wandaufbau bestehend aus Schutzvlies, äußerer Abdichtung, Wärmedämmung, (Dampfsperre) und Abdichtungsbahn (vgl. Bild 3). Auch die Mehrzahl der bisher realisierten Behälter-Wärmespeicher wurde aus Platzgründen sowie aufgrund architektonischer bzw. optischer Argumente ganz oder teilweise vergraben gebaut.

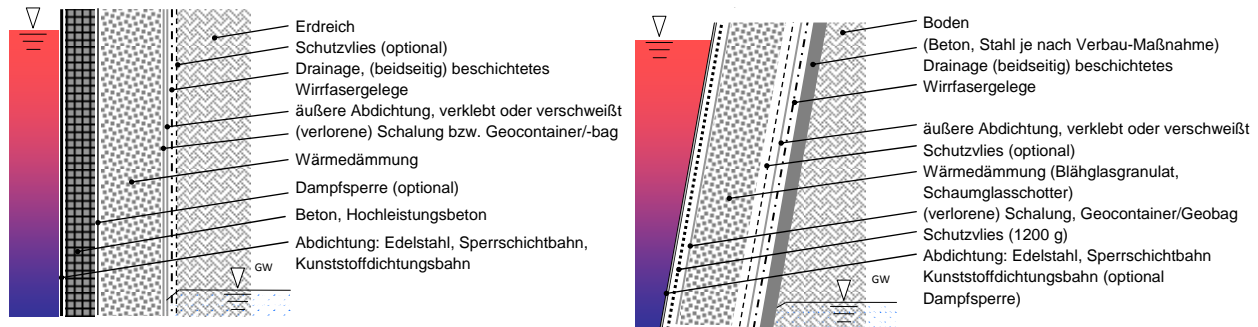


Bild 3: links: Wandaufbau eines Behälter-Wärmespeichers, Wärmedämmung außen; rechts: Wandaufbau eines Erdbecken-Wärmespeichers, Wärmedämmung innen, GW: Grundwasser (Quelle: ITW)

Die Entwicklung des Wandaufbaus ist eine komplexe bauphysikalische und thermodynamische Aufgabenstellung. Es muss gewährleistet sein, dass die Wärmedämmung vor Wasser- und Wasserdampfeintrag von Außen, vom umgebenden feuchten oder nassen Erdreich, und von Innen, durch Diffusionsvorgänge, geschützt ist. Zudem muss das Austrocknen der Baufeuchte oder feucht eingebauter Wärmedämmung ermöglicht werden. Nur mit einem qualitativ hochwertigen Wandaufbau kann garantiert werden, dass die Wärmedämmung über einen geforderten Zeitraum von mindestens 30 Jahren nicht aufgrund von Durchfeuchtung degradiert.

3) Wärmedämmung

Bis auf den Aquifer-Wärmespeicher werden alle in Bild 2 genannten Speichertypen mit Wärmedämmung versehen, um die Wärmeverluste zu reduzieren. Der Erdsonden-Wärmespeicher kann nur im Deckelbereich gedämmt werden. Bei Behälter- und Erdbecken-Wärmespeichern werden der Deckel und die Seitenwände gedämmt. Bodendämmung wurde bei früheren Projekten nicht eingebaut, wird aber heute empfohlen.

Der Markt stellt eine Vielzahl von Dämmstoffen bereit. Diese Marktentwicklung wurde spätestens durch die EnEV im Jahre 2002 hervorgerufen. Die Auswahl der am Markt erhältlichen Dämmstoffe, die für den Einsatz in Erdbecken-Wärmespeichern geeignet sind, ist dennoch gering. Die Anforderungen unterscheiden sich u.a. erheblich von den Anforderungen an Dämmstoffe für das Bauwesen.

Die geforderten Eigenschaften unterscheiden sich je nach System und Einsatzort (Boden, Wand, Abdeckung) im Erdbecken-Wärmespeicher, wobei folgende Eigenschaften vom Material zwingend erfüllt werden müssen:

- Temperaturbeständigkeit kurzfristig bis 100 °C, permanent 80 bis 90 °C
- Langzeit- bzw. Alterungsbeständigkeit
- Druckbeständigkeit (auch bei Feuchtebelastung und hohen Temperaturen)
- Beständig sowie unempfindlich gegen Wasser- und Wasserdampf (Hydrolyse)

Zudem sind gute Trocknungseigenschaften, Unempfindlichkeit gegenüber Mikroorganismen und Nagern sowie gute Verarbeitbarkeit von Vorteil. Natürlich sollte das Material „umweltverträglich“ sein. Die Kosten der einzelnen Materialien müssen im eingebauten Zustand verglichen werden. Dabei ist auch der gesamte Aufbau der Wärmedämmung, der Statik, der Speicherabdichtung sowie der Installation zu berücksichtigen. Die Wärmedämmung muss nicht nur möglichst kosteneffektiv eingebracht werden, sondern dabei auch trocken und schadensfrei bleiben. Vor allem bei großen Speichern kann das Einbringen der Wärmedämmung mehrere Wochen dauern. Der Schutz vor Witterungseinflüssen beim Einbau spielt somit zusätzlich eine wichtige Rolle bei der Auswahl einer geeigneten Wärmedämmung und der entsprechenden Einbaumaßnahme.

Dämmstoffe werden als Platten oder als Schüttgut gefertigt. Platten werden durch Kleben oder Schrauben befestigt. Es wird im Gegensatz zu schüttfähigen Dämmstoffen kein Behälter bzw. keine Schalung benötigt, um die Wärmedämmung zu montieren. Jedoch gelingt gerade bei unebenem Untergrund, wie er bei Erdbecken-Wärmespeichern vorzufinden ist, ein zwickel- und wärmebrückenfreier Einbau nur unter erheblichem Aufwand.

Schüttfähige Dämmstoffe wie Blähglasgranulat oder Schaumglasschotter bieten diesbezüglich überwiegend Vorteile. Das Einbringen schüttfähiger Wärmedämmung durch Einblasen aus dem Silo-LKW ist sehr effektiv und auch über weitere Entfernungen möglich (vgl. Bild 4). Mit zunehmender Förderentfernung reduziert sich jedoch die Fördermenge und die Staubentwicklung (durch Reibung im Schlauch) nimmt zu. Das direkte Abkippen der Wärmedämmung ist, wenn möglich, zu favorisieren.



Bild 4: Einbringen der Wärmedämmung in HDPE-Sperrschichtbahn-Kammern sowie der Bodendämmung durch Einblasen aus dem Silo-LKW (Kies-Wasser-Wärmespeicher in Eggenstein, Quelle: ITW)



Bild 6: Blähglasgranulat in Membran-Schalung, Außenlaborversuche am ITW (Quelle ITW) und Projekt SNAB, München-Ackermannbogen (Quelle Solites)

Abhängig von Dämmstoff, Betriebsweise des Wärmespeichers und den örtlichen Randbedingungen wird die Wärmedämmung bis zu 1 m stark ausgeführt. Die Schichtdicke der Dämmung sollte von unten nach oben zunehmen, da im oberen

Speicherbereich die höchsten Temperaturen auftreten. Für die exakte Dimensionierung sollten transiente Berechnungen unter Berücksichtigung der Systemparameter (Temperaturverläufe) und der lokalen Gegebenheiten

(Umgebungs- und Erdreichtemperaturen) sowie temperatur- und feuchteabhängiger

Stoffwerte (vgl. Ochs et al.) durchgeführt werden. Die Temperaturabhängigkeit der effektiven Wärmeleitfähigkeit verschiedener Dämmstoffschüttungen ist in Bild 5 dargestellt. Bei den dabei untersuchten Schüttungen lässt sich ein linearer Anstieg der Wärmeleitfähigkeit mit der Temperatur beobachten. Die Zunahme beträgt rund 30 % bei einer Temperaturerhöhung von 20 °C auf 80 °C. Die niedrigste Wärmeleitfähigkeit wurde bei Blähperliten festgestellt. Diese weisen jedoch die geringste Druckbeständigkeit auf und sind bei Feuchte weniger geeignet. Unter den druckbeständigen Materialien haben Blähglasgranulate die niedrigste Wärmeleitfähigkeit.

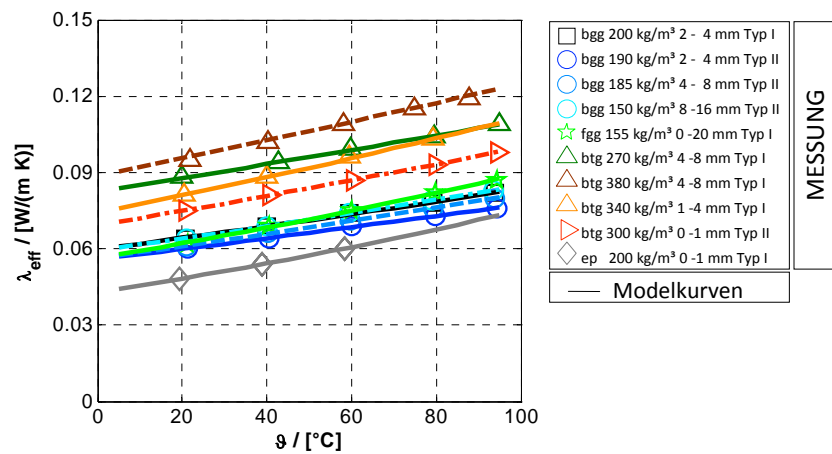


Bild 5: Mess- und Modellwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit (λ_{eff}) trockener schüttfähiger Dämmstoffe als Funktion der Temperatur (ϑ); Blähglasgranulat (bgg), Blähton-Schüttung (btg), Schaumglasschotter (sgs), expandierte Perlite (ep) (Mesdaten ITW)

4) Abdeckung von Heißwasser Wärmespeichern

Heißwasser-Wärmespeicher bieten im Vergleich zu Kies-Wasser-Wärmespeichern Vorteile bezüglich ihrer Speicherkapazität und ihres Betriebsverhaltens. Durch das geringere Volumen und da keine Kosten für Kies anfallen sind auch die Kosten für einen Heißwasser-Wärmespeicher geringer, wenn dieser mit einer kostengünstigen schwimmenden Abdeckung gebaut wird. Wird jedoch uneingeschränkte Begeh- und Befahrbarkeit oder Zugänglichkeit, z.B. für Wartungszwecke gefordert, ist die Konstruktion von Heißwasser-Wärmespeichern mit schwimmender Abdeckung nicht mehr möglich.

Begeh- bzw. befahrbare frei- bzw. selbsttragende Abdeckungen wurden als vorgespannte Schalen bereits in einigen Pilotprojekten erfolgreich ausgeführt. Nachteilig sind der hohe Materialaufwand sowie die Notwendigkeit eines teuren aber für den Aufbau erforderlichen Gerüstturms. Zudem befindet sich die Wärmedämmung außen, wodurch hohe Temperaturgradienten und somit hohe Spannungen im Beton auftreten können.

Eine freitragende Sandwich-Konstruktion aus Hochleistungsbeton und PU-Kern bietet die Möglichkeit, die Abdeckung von Behälter- und Erdbecken-Wärmespeichern ohne Rüstturm bei signifikant reduziertem Material- und somit Primärenergieeinsatz auszuführen. Die technische Machbarkeit wurde im Außenlaborversuch am ITW bestätigt.

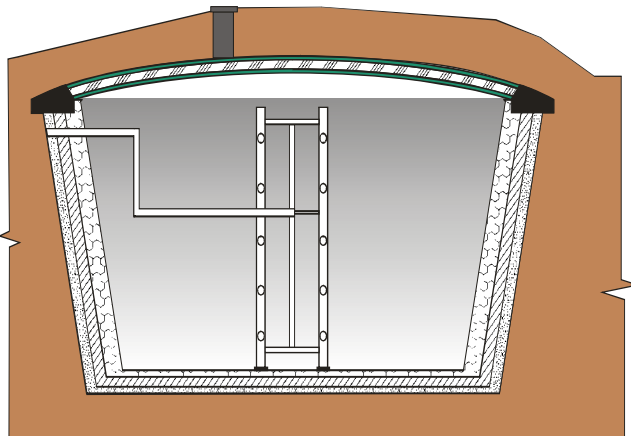


Bild 6: Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeicher mit freitragender Abdeckung, Tonnendach aus Hochleistungsbeton-Sandwichelementen, Außenlabor-Forschungsspeicher am ITW

5) Schlussfolgerungen

Bis heute wurden international über 30 Forschungs- und Pilotprojekte mit (Langzeit-) Wärmespeicher realisiert, durch die gezeigt werden konnte, dass derartige Systeme technisch machbar sind.

Dennoch stellt der Wandaufbau eines erdvergrabenen Wärmespeichers hinsichtlich Wärme- und Feuchtetransport eine komplexe bauphysikalische und thermodynamische Aufgabenstellung dar: Nur mit einem qualitativ hochwertigen

Wandaufbau kann garantiert werden, dass die Wärmedämmung über einen geforderten Zeitraum von mindestens 30 Jahren nicht aufgrund von Durchfeuchtung durch Diffusion vom Speichermedium und vom umgebenden feuchten Erdreich degradiert.

Heißwasser-Wärmespeicher bieten mehr Vorteile als Kies-Wasser-Wärmespeicher, die Abdeckung von Heißwasser-Wärmespeichern ist jedoch technisch und finanziell aufwändiger. Das vorgestellte Sandwichkonzept erlaubt eine wirtschaftliche Konstruktion einer freitragenden Abdeckung ohne Rüstturm. Im Vergleich zu konventioneller Technik wird dabei eine signifikante Verringerung des Material- und Primärenergieeinsatzes bei der Herstellung der Fertigteile ermöglicht. Die technische Machbarkeit im Außenlaborversuch wurde anhand eines Tonnendachs (~100 m²) am ITW demonstriert. Die Ergebnisse sind auf eine Abdeckung in Form eines Kuppeldachs übertragbar. Die Dauerstandfestigkeit und das thermische Verhalten im Betrieb muss noch gezeigt werden.

Literatur

M. Benner, M. Bodmann, D. Mangold, J. Nußbicker, S. Raab, T. Schmid, H. Seiwald, Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit und ohne Langzeit-Wärmespeicher, Forschungsbericht zum BMBF-Vorhaben, November 1998 bis Januar 2003, ISBN: 3-9805274-2-5, 2004.

M. Bodmann, D. Mangold, J. Nußbicker, S. Raab, A. Schenke, T. Schmidt, Solar unterstützte Nahwärme und Langzeit-Wärmespeicher, Forschungsbericht zum BMWA / BMU-Vorhaben (Februar 2003 bis Mai 2005), Stuttgart, 2006.

F. Ochs, W. Heidemann, H. Müller-Steinhagen, Weiterentwicklung der Erdbecken-Wärmespeichertechnologie, PtJ Statusseminar Thermische Energiespeicher, 2.+ 3. November 2006, Freiburg.

F. Ochs et al., Modelling and Measurement of the Effective Thermal Conductivity of the Insulation of Buried Heat Stores as a Function of Temperature and Moisture Content, Heat and Mass Transfer (2007), doi:10.1016/j.ijheatandmasstransfer.2007.05.005.

D. Mangold et al., Saisonale Wärmespeicher: Neue Pilotanlagen im Programm Solarthermie2000plus und Forschungsperspektiven, Proc. PtJ Statusseminar Thermische Energiespeicherung - mehr Energieeffizienz zum Heizen und Kühlen, Freiburg, 2006.