

Weiterentwicklung der Erdbecken-Wärmespeichertechnologie

F. Ochs¹⁾, W. Heidemann¹⁾, H. Müller-Steinhagen^{1) 2)}

¹⁾ Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik
Pfaffenwaldring 6, 70569 Stuttgart, Germany

Fon ++49 711 685 6 3278 – Email ochs@itw.uni-stuttgart.de

²⁾ DLR Stuttgart, Institut für Technische Thermodynamik

1. Einleitung

Saisonale Speicherung von Solarenergie oder von Abwärme von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen bietet großes Potential in zukünftigen Energiesystemen fossile Brennstoffe zu substituieren. Die spezifischen Kosten und auch die spezifischen Wärmeverluste von großen Langzeit-Wärmespeichern in solar unterstützten Nahwärmesystemen sind niedriger im Vergleich zu denen von kleinen dezentralen Systemen. Die Dimensionen ausgeführter Behälter- und Erdbecken-Wärmespeicher (Erdsonden- und Aquifer- Wärmespeicher werden hier nicht betrachtet) 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 (vgl. z.B. [01] und [02]).

2. Erfahrungen aus Pilot- und Forschungsprojekten

Erdbecken-Wärmespeicher werden in eine Grube im Erdreich gebaut. Auch die Mehrzahl der bisher realisierten Behälter-Wärmespeicher (BS) wurde aus Platz- und

Tabelle 1: Wärmeverluste (Q_{mess}) realisierter Forschungs- und Pilotprojekte (Messwerte nach [01] bis [08])

	Jahr	Volumen [m ³]	Q_{mess} [MWh/a]	$Q_{\text{mess}}^{1)}$ [kWh/(m ² K a)]	$T_{\text{av}}-T_a$ [K]
Behälter-Wärmespeicher					
Hamburg	1996	4 500	360 – 430	5.7	42
Friedrichshafen	1996	12 000	320 – 360	2.5	49
Hannover	2000	2 750	90 – 100	2.5	33
Erdbecken-Wärmespeicher					
Stuttgart (KW) ²⁾	1985	1 050	27	0.4	8
Steinfurt (KW) ³⁾	1999	1 500	70 – 90	2.7	26
Marstal (HW) ⁴⁾	2003	10 000	338	0.6	22

1) Wärmeverluste bezogen auf die Hüllfläche und die mittlere Temperaturdifferenz zwischen Speicher (T_{av}) und Umgebung (T_a), 2) 462 h Simulation, mit Wärmepumpe, $T_{\text{av}} = 17^\circ\text{C}$, 3) incl. Anschlussleitung, 4) Daten hochgerechnet von 6 Monaten aus [02]

architektonischen Gründen ganz oder partiell vergraben gebaut. Erdbecken-Wärmespeicher werden je nach Speichertyp bzw. Speichermedium unterteilt in (i) Kies-Wasser-Wärmespeicher (KW), (ii) Erdreich- bzw. Sand-Wasser-Wärmespeicher (EW bzw. SW) oder (iii) Heißwasser-Wärmespeicher (HW). In Bezug auf Wärmekapazität und Betriebsverhalten ist der Heißwasser-

Wärmespeicher gegenüber den andern beiden Typen vorteilhaft. Kies- und Erdreich-Wasser- Wärmespeicher haben Vorteile, wenn statische Gründe im Vordergrund stehen, wie beim Kies-Wasser-Wärmespeicher in Chemnitz ([05]), auf dem eine Strasse und ein Parkplatz gebaut wurden. Eine statisch vergleichbare Abdeckung von Heißwasser-Wärmespeichern erfordert nicht unerheblichen technischen und finanziellen Aufwand (vgl. [14], [15] und [16]).

Bis heute wurden über 10 Forschungs- und Pilotprojekte mit (Langzeit-) Wärmespeicher realisiert, durch die gezeigt werden konnte, dass derartige Systeme technisch machbar sind (neben den in Tabelle 1 genannten, u.a. Vaulruz (1983) 3 500 m³ EW, Rottweil (1994) 600 m³ BS, Ottrupgaard (1995) 1 500 m³ HW, Chemnitz (1997) 8 000 m³ KW, Egenhausen (1997) 300 m³ EW, Marstal (1999) 3 500 m³ SW, vgl. [06], [07], [09] und [10]). Weitere Projekte befinden sich in der Bau- ([11]) oder Planungsphase ([12]).

Bis auf den mit Ton abgedichteten Speicher in Ottrupgaard sind alle Speicher frei von größeren Leckagen. Bei der Mehrzahl der bisher ausgeführten Pilotanlagen zur solar unterstützten Nahwärmeversorgung mit vergrabenen Langzeit-Wärmespeicher sind die Wärmeverluste höher als bei der Planung berechnet. Ein Teil der Wärmeverluste lässt sich durch veränderte Temperaturverläufe (mittlere Speichertemperatur) aufgrund geänderter Lasten oder Systemkonfigurationen gegenüber dem Planungsstand erklären. Geringere Temperaturschichtung verursacht zusätzliche Verluste. Höhere Wärmeverluste im meist ungedämmten Bodenbereich aufgrund höherer Rücklauf und somit Speicherbodentemperaturen sind auch als Ursache zu nennen.

Stoffwerte, wie der Wasserdampfdiffusionswiderstand der Abdichtung oder die Wärmeleitfähigkeit der eingesetzten Wärmedämmung wurden auf Basis der DIN 4108 (Referenztemperatur 10°C, [13]) als konstant angenommen. Wie unten gezeigt wird, erhöht sich jedoch die Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung signifikant mit zunehmendem Wassergehalt der Wärmedämmung. Der Effekt ist bei hohen Temperaturen (ab 40 °C) noch ausgeprägter.

Feuchtigkeit kann durch Diffusionsvorgänge sowohl vom Speichermedium als auch von außen, vom umgebenden feuchten oder nassen Erdreich, in die Wärmedämmung eindringen. Die Qualität der Wandaufbauten ist teilweise unzureichend ausgeführt um über die Lebensdauer des Speichers Schutz vor Grund- oder Oberflächeneintrag zu gewährleisten (vgl. [14]). Veränderte Randbedingungen gegenüber dem Planungsstand können in einer Unterschätzung der Wärmeverluste resultieren. Beim Heißwasser-Wärmespeicher in Hamburg kam es vermutlich durch unvorhersehbare Schwankungen des Grundwasserstands oder Grundwasserflusses zu einer Durchfeuchtung der Wärmedämmung, wodurch die Wärmeverluste deutlich über den Planungswerten liegen.

3. Innenlaborversuche

3.1. Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen

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 spielt dann zusätzlich eine wichtige Rolle bei der Auswahl einer geeigneten Wärmedämmung und entsprechender Einbaumaßnahmen. Schüttfähige Dämmstoffe wie Blähglasgranulat oder Schaumglasschotter bieten dabei die meisten Vorteile.

Messwerte der Wärmeleitfähigkeit von für die Anwendung in LZWSP geeigneten (schüttfähigen) Dämmstoffen sind nicht verfügbar und müssen somit bestimmt werden. Der Einfluss von Feuchtigkeit und Temperatur ist bisher nur ungenügend untersucht worden. Im Rahmen von Innenlaborun-

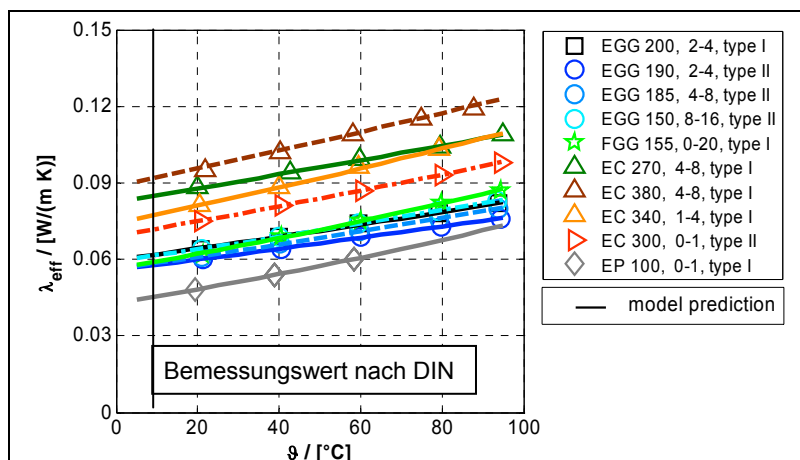


Bild 1: Effektive Wärmeleitfähigkeit (λ_{eff}) in Abhängigkeit der Temperatur (T) von trockenen Dämmstoffschüttungen: Blähglasgranulat (EGG), Blähton (EC), Schaumglasschotter (FGG) oder Perlite (EP)

tersuchungen mit einer modifizierten Zwei-Platten-Apparatur wurde die effektive Wärmeleitfähigkeit (λ_{eff}) von schüttfähigen Dämmstoffen in Abhängigkeit der Temperatur (ϑ) und des Wassergehalts (u) gemessen.

Bei allen untersuchten Schüttungen wurde im trockenen Zustand eine Zunahme der effektiven Wärmeleitfähigkeit mit steigender Temperatur festgestellt. Wie in Bild 1 zu sehen ist, nimmt die effektive Wärmeleitfähigkeit bei einer Temperaturerhöhung von 20 auf 80 °C um 20 bis 40 % zu. Die effektive Wärmeleitfähigkeit von derzeit verfügbarer Wärmedämmung unter Feuchteinfluss bei hohen Temperaturen (60 bis 80 °C) ist um bis zu fünfmal höher als der Bemessungswert nach DIN ([13]), wie in Bild 2 am Bsp. Blähglasgranulat und Steinwolle gezeigt wird. Aufgrund der hohen (offenen) Porosität der untersuchten Dämmstoffschüttungen ist die Wasseraufnahme relativ hoch. Die Werte der freien Wassersättigung (u_{fs}) liegen zwischen 300 und 550 kg/m³ für die untersuchten Schüttungen und bei 850 kg/m³ für die untersuchte Steinwolle.

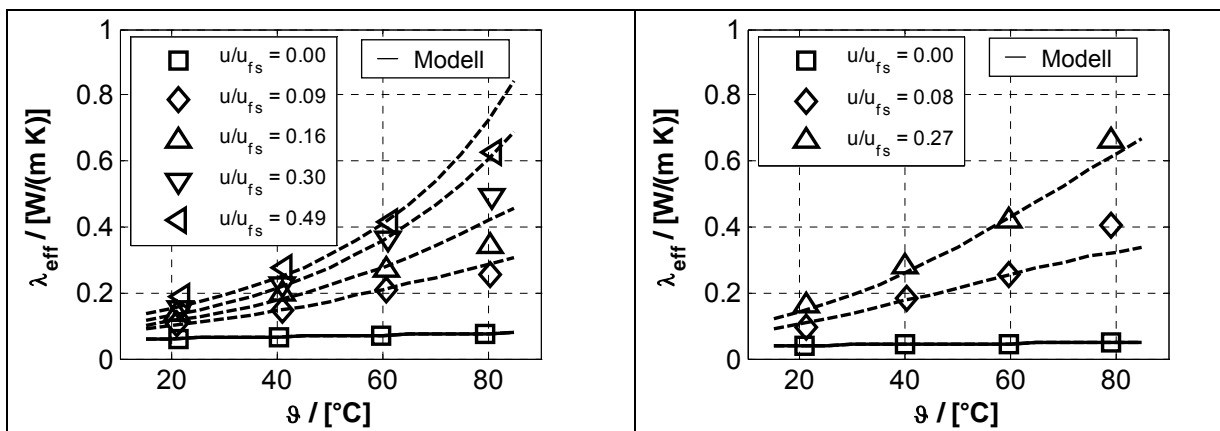


Bild 2: Effektive Wärmeleitfähigkeit (λ_{eff}) in Abhängigkeit der Temperatur (ϑ) und des normierten Wassergehalts (u/u_{fs}) von Blähglasgranulat 4-8 mm und druckfester Steinwolle

Auf Basis der Messwerte wurde ein Modell entwickelt, das die Beschreibung der Wärmeleitfähigkeit als Funktion des Wassergehalts und der Temperatur ermöglicht. Der Vergleich der Modellwerte mit Messwerten liefert eine gute Übereinstimmung (siehe Bild 2). Durch transiente Simulationsrechnung können darauf aufbauend die tatsächlichen Wärmeverluste im Betrieb bestimmt werden.

3.2. Wasserdampfdiffusion

Polymere und elastomere Abdichtungsbahnen bieten keine 100%ige Wasserdampfdichtigkeit. Der Diffusionswiderstand von Kunststoffdichtungsbahnen wurde mit einer neu entwickelten Permeationsmess-Apparatur als Funktion der Temperatur bestimmt. Aufgrund der hohen Dampfpartialdruckdifferenz nimmt die Wasserdampfdurchlässigkeitsrate (WVTR) exponentiell mit steigender Temperatur zu (vgl. Bild 3). Ohne zusätzliche Dampfsperre würden bei 90 °C durch eine EPDM-Bahn mit 1.5 mm Stärke ca. 40 g/(m² d) diffundie-

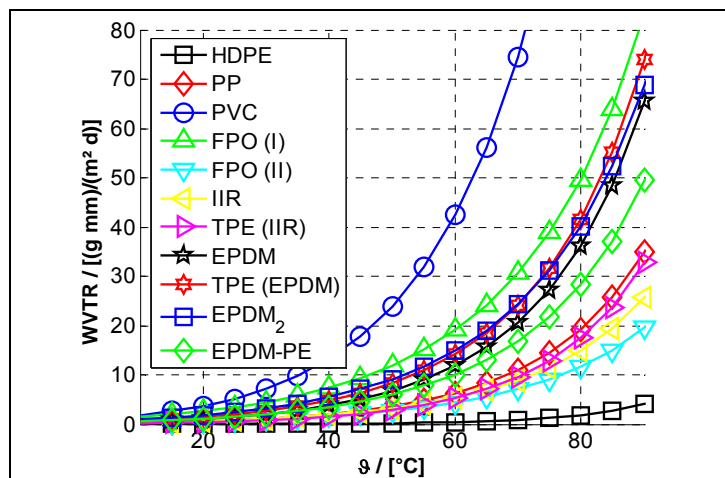


Bild 3: Wasserdampfdurchlässigkeitsrate (WVTR) bei isothermer Diffusion (100% vs. 0%r.F) für Polymere (HDPE, PP, PVC), Elastomere (EPDM, IIR), flexible Polyolefine (FPO) und thermoplastische Elastomere (TPE)

ren (Wasser gegen trockene Dämmung). Auch im Falle einer 2 mm starken PP-Bahn wäre die Menge, die am Tag durch einen Quadratmeter diffundieren würde mit ca. 18 g noch sehr hoch. Folglich sollte zumindest bei erdvergrabenen Wärmespeichern eine Kunststoffdichtungsbahn immer in Kombination mit einer Dampfsperre bzw. als Verbundfolie (Al oder VA) eingesetzt werden. Weitere Messergebnisse zu den Innenlaborversuchen sind in [16] und [17] dokumentiert.

4. Konstruktion von Erdbecken-Wärmespeichern

Das Design von erdvergrabenen Wärmespeichern muss verbessert werden, wie die Erfahrungen und Messergebnisse der Pilotanlagen zeigen. Vor allem bezüglich des Wandaufbaus und der eingesetzten Materialien besteht Optimierungsbedarf. Die Minimierung der Wärmeverluste bei gleichzeitiger Reduzierung der Baukosten erfordert Optimierungsschritte sowohl beim Wärmespeicherbau als auch beim (Spezial-) Tiefbau und Erdbau.

4.1. Erdbau - Geometrie

Einen nicht unerheblichen Anteil an den Speicherkosten macht der Erdbau aus. Die Geometrie des Wärmespeichers und der Bauablauf bedingen die Form der Baugrube. Erdvergrabene Wärmespeicher werden entweder als Zylinder, als (umgekehrter) Pyramiden- oder Kegelstumpf oder als Mischform ausgeführt. Es muss bei der Entwicklung und Konstruktion von Wärmespeichern sowohl die Minimierung der Baukosten, als auch die Minimierung der Wärmeverluste Berücksichtigung finden. Die Verluste teilen sich auf in (exergetische) innere Verluste (Q_i) infolge der Temperaturschichtung im Speicher und in äußere Wärmeverluste (Q_A) über die Speicher-oberfläche (siehe Bild 4). Für die Exergieverluste ist neben dem Speichermedium das h/d -Verhältnis ausschlaggebend. Die äußeren Wärmeverluste können durch ein geringes A/V -Verhältnis und durch geeignete Wärmedämmmaßnahmen minimiert werden. Je nach Betriebsweise (Puffer oder Langzeit-Wärmespeicher) überwiegen die inneren oder die äußeren Wärmeverluste. Für saisonale Wärmespeicher ist aus energetischer Sicht ein h/d -Verhältnis von eins anzustreben wie Werte aus der Praxis zeigen (vgl. Tabelle 2). Jedoch wurden aus ökonomischen Gesichtspunkten auch energetisch ungünstigere Geometrien ausgeführt (z.B. Wärmespeicher in Hannover).

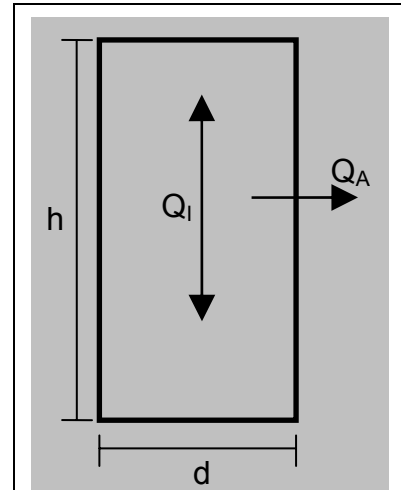


Bild 4: Geometrie eines Wärmespeichers

Tabelle 2: Zyklenzahl- und energetisch optimale Geometrie von Wärmespeichern

Pufferspeicher	260 bis 280 Zyklen/a	$h/d \approx 3.0$
Saisonaler Wärmespeicher	1.2 bis 1.6 Zyklen/a	$h/d \approx 1.0$

Für die Exergieverluste ist neben dem Speichermedium das h/d -Verhältnis ausschlaggebend. Die äußeren Wärmeverluste können durch ein geringes A/V -Verhältnis und durch geeignete Wärmedämmmaßnahmen minimiert werden. Je nach Betriebsweise (Puffer oder Langzeit-Wärmespeicher) überwiegen die inneren oder die äußeren Wärmeverluste. Für saisonale Wärmespeicher ist aus energetischer Sicht ein h/d -Verhältnis von eins anzustreben wie Werte aus der Praxis zeigen (vgl. Tabelle 2). Jedoch wurden aus ökonomischen Gesichtspunkten auch energetisch ungünstigere Geometrien ausgeführt (z.B. Wärmespeicher in Hannover).

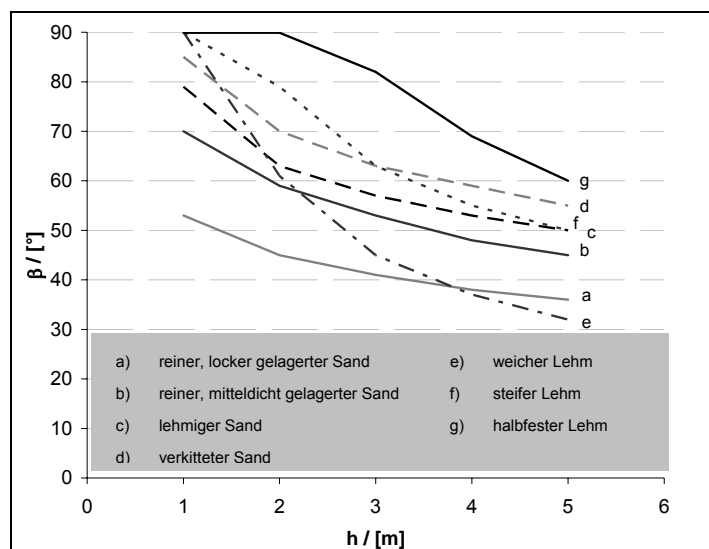


Bild 5: Eigenstandfestigkeit verschiedener Bodenarten in Abhängigkeit des Böschungswinkels (β) und der Baugrubentiefe (h), aus [18]

4.2. Verbaumaßnahmen

In Abhängigkeit von Bodentyp und Bodenklasse sowie Baugrubentiefe (h) kann die Grube mit einem maximalen Böschungswinkel (β) natürlich geböschet werden (Eigenstandfestigkeit). Bei größeren Wärmespeichern ($h > 5$ m) reduziert sich der maximal mögliche Böschungswinkel auf bis zu 30° (vgl. Bild 5). Dies führt zu ungünstigen h/d- und A/V-Verhältnissen. Durch geeignete Verbaumaßnahmen kann der maximal mögliche Böschungswinkel vergrößert werden. Durch die meisten Verbaumaßnahmen werden senkrechte Böschungen möglich. Bei Anwesenheit von Grundwasser bzw. Schichtenwasser (permanent oder temporär) können nur drei Ver-

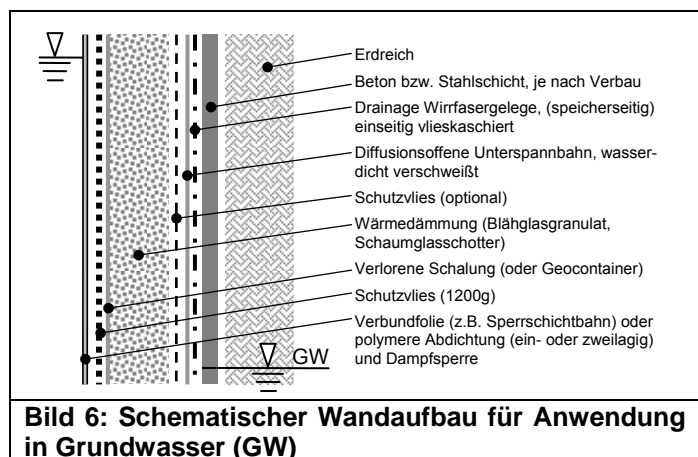
oberhalb des Grundwassers (bzw. nach dessen Absenkung)	Mit Grundwasser
<ul style="list-style-type: none"> • Natürliche Böschung • Trägerbohlwand • Bodenvernagelung 	<ul style="list-style-type: none"> • überschnittene Bohrpfahlwand • Schlitzwand • Spundwand

bauarten zur Anwendung kommen (siehe Tabelle 3). Im Falle von permanent anstehendem Grundwasser muss zusätzlich eine kostenintensive Unterwasserbetonsohle oder HDI-Sohle in Betracht gezogen werden (vgl. [18]). Ohne Grundwasser bietet sich eine Bodenvernagelung an, wie Sie zur Herstellung der Außenlabor-Versuchsspeicher am ITW angewandt wurde (vgl. [16]).

4.3. Speicherhülle

Die Speicherhülle erfüllt mehrere Aufgaben. Der Wandaufbau muss dicht gegenüber dem Wärmespeichermedium sein (wasser- und wasserdampfdicht), der Verlust der gespeicherten fühlbaren Wärme soll effektiv reduziert werden und das Eindringen von Feuchtigkeit aus dem Erdreich in die Wärmedämmung soll verhindert werden. Zusätzlich soll der Wandaufbau sicher vor Versagen durch z.B. Vandalismus oder Nagetiere sein. Durch zusätzliche Schutzvliese kann Schaden an den einzelnen funktionellen Schichten bei der Konstruktion verhindert werden. Notwendige Durchführungen durch die Abdichtung für z.B. (Schicht-) Beladeeinheit und Mess- und Regelungstechnik sind kritische Punkte und somit auf ein Minimum zu beschränken.

Schematisch ist in Bild 6 ein möglicher Wandaufbau an einer vertikalen Böschung dargestellt. Die Komplexität entsteht dadurch, dass der Wandaufbau zum einen gewährleisten muss, dass die Wärmedämmung vor Wasser- und Wasserdampfeintrag von Außen und Innen geschützt ist, aber zum anderen ein Austrocknen im Falle einer Durchfeuchtung der Wärmedämmung erlaubt. Bereits bei Anlieferung der Dämmstoffe auf die Baustelle ist mit zumindest geringem Wassergehalt zu rechnen wie die Erfahrung zeigt. Wie in [19] beschrieben ist, kann durchfeuchtete Wärmedämmung im Falle von zum Erdreich wasserdampfdiffusionsoffenem Wandaufbau z.B. durch eine diffusionsoffene aber wasserdicht verschweißte Unterspannbahn wieder austrocknen, wodurch die Wärmeleitfähigkeit auf den ursprünglichen Wert sinken kann.



5. Außenlabor

Aufbauend auf den Innenlabor-Ergebnissen werden im Rahmen von Außenlaborversuchen seit 2003 am ITW verschiedene Konzepte und Bauweisen von Erdbecken-Wärmespeichern untersucht. Der Wandaufbau, im Speziellen die Wärmedämmung und die Abdichtung stehen dabei im Vordergrund (vgl. [14], [16] und [19]). Verschiedene Verfahren



Bild 7: Bau der Außenlabore, Einblasen der Wärmedämmung aus Silo-LKW in eine Membranschalung

und Bausweisen die Wärmedämmung einzubauen wurden getestet. Eine viel versprechende Variante ist das Einblasen von Dämmung in eine Membranschalung (vgl. Bild 7). Zusätzlich wurden verschiedene Konzepte für Kies-, Erdreich- und Heißwasser- Wärmespeicher entwickelt und im Außenlaborversuch umgesetzt, wie z.B. kontrollierte Durchlässigkeit, Abdichtung mit Bentonitmatten für KW-Wärmespeicher (experimentelle Untersuchung in [20]), oder EW- Wärmespeicher mit direkter Beladung, Entwicklung einer Wasserwegsamkeit (theoretisch untersucht in [21], Außenlaborversuch vgl. [22]). Varianten für Heißwasser-Wärmespeicher mit entweder freitragender oder schwimmender Abdeckung werden aktuell im Außenlaborversuch aufgebaut und untersucht. Mit Ergebnissen ist Anfang 2007 zu rechnen.

6. Kosten

Die Kosten eines erdvergrabenen Langzeit-Wärmespeichers hängen neben der Bauart (Behälter bzw. Erdbecken, einlagige bzw. zweilagige Abdichtung, teilweise bzw. komplett wärmegeklämmt) stark von der Speichergröße und vom Standort ab. Am Beispiel eines Heißwasser- Wärmespeichers mit einem Volumen von 5000 m³ in einem Gebiet mit Bodenklasse 3 bis 4, nichtbindiger Boden mit hohem Grundwasserstand werden die Kosten als Funktion des h/d-Verhältnisses berechnet. Aufgrund der Bodenverhältnisse kann nur mit flachem Böschungswinkel von 30° bis 40° geböscht werden. Durch das anstehende Grundwasser bietet sich eine Lösung mit Verbau an, wodurch sich zudem energetisch günstigere vertikale Böschungen realisieren lassen. Für das Beispiel wird eine überschnittene Bohrpfahlwand gewählt. Das Wasservolumen soll (i) mit einer freitragenden Sandwichkonstruktion und alternativ (ii) mit einem schwimmenden Deckel abgedeckt werden (vgl. Annahmen Tabelle 4).

Tabelle 4: Annahmen für die Kostenrechnung		
Position	Kosten	Bemerkung
Bohrpfahlwand	330 €/m ²	überschnittene Bohrpfähle, Ø 90 cm
Unterwasserbetonsohle	200 €/m ²	1 m Schichtdicke
Erdaushub	20 €/m ³	Unterwasseraushub inkl. Entsorgung
Wärmedämmung (WD)	150 €/m ³	inkl. Einbau, Schalung, Drainage und Unterspannbahn, 0.5 m Wand-WD, 0.3 m Boden-WD, $\lambda_{\text{eff}} = 0.08 \text{ W/(m K)}$
Abdichtung	50 €/m ²	einlagig, geprüfte Schweißnähte inkl. Schutzvlies
Abdeckung inkl. Wärmedämmung (WD)	(i) 400 €/m ²	Freitragende Abdeckung, HL-Beton-PUR-Sandwich, 0.36 m WD, $U = 0.08 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$
	(ii) 200 €/m ²	Schwimmende Abdeckung, begehbar, 1.0 m WD mit $U = 0.08 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$
Beladesystem	20 000 €	Schichtbeladeeinheit (PP)
Druckhaltung	30 000 €	nur für schwimmende Abdeckung

Unter den genannten Annahmen ergeben sich für das kostenoptimale h/d-Verhältnis von 0.4 für Variante (i) bzw. 0.7 für Variante (ii) Gesamtkosten in Höhe von ca. 140 bzw. 155 €/m³. In Bild 8 sind die Kosten als Funktion des h/d-Verhältnisses dargestellt.

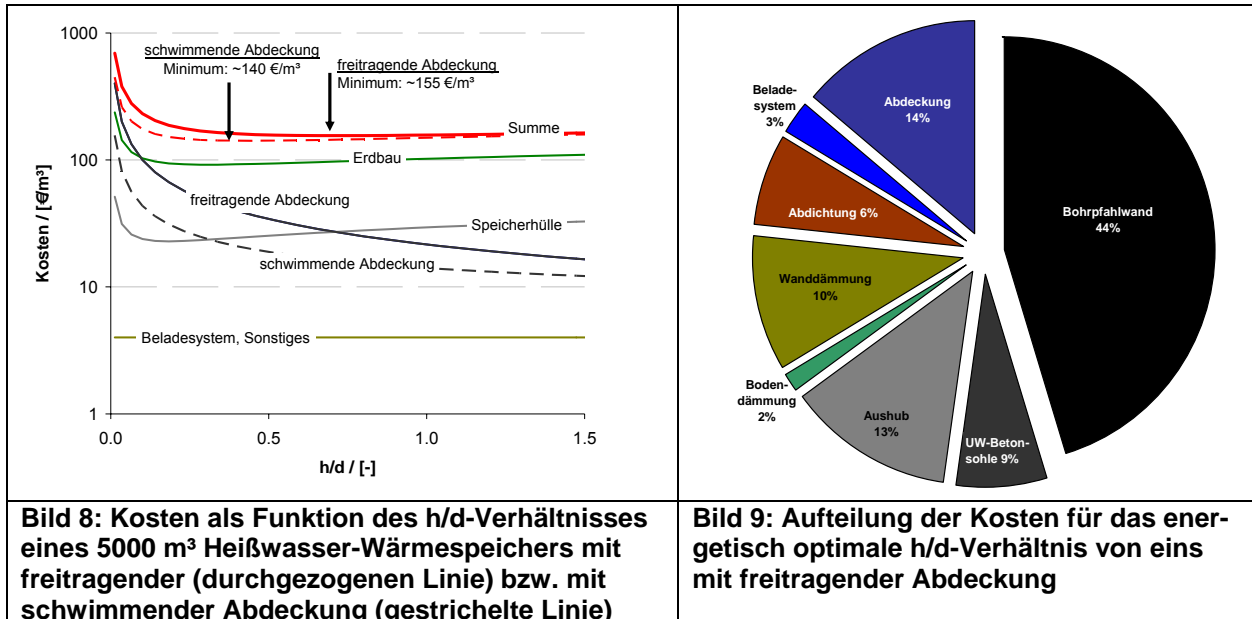


Bild 8: Kosten als Funktion des h/d-Verhältnisses eines 5000 m³ Heißwasser-Wärmespeichers mit freitragender (durchgezogenen Linie) bzw. mit schwimmender Abdeckung (gestrichelte Linie)

Bild 9: Aufteilung der Kosten für das energetisch optimale h/d-Verhältnis von eins mit freitragender Abdeckung

Für das energetisch optimale h/d-Verhältnis von 1 summieren sich die Kosten auf ca. 155 €/m³ für beide Varianten unter den oben genannten Annahmen bzw. Vereinfachungen. Die exakten Summen können nur durch Ausschreibung ermittelt werden.

Festzuhalten gilt, dass die Kosten von erdvergrabenen Wärmespeichern bei nicht-bindigen Böden mit Grundwasser wesentlich durch den (Spezial-)Tiefbau und Erdbau (> 60%) und nicht durch den eigentlichen Speicherbau bestimmt werden (vgl. Bild 9). Für einen Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeicher mit einem Volumen von 10 000 m³ (Standort mit bindigem Boden ohne Grundwasser) mit einer schwimmenden Abdeckung können Kosten in Höhe von 70 bis 80 €/m³ erreicht werden. Dabei wird von einer Reduzierung der Kosten des Erdbaus auf unter 15 €/m³ ausgegangen. Weiterhin wird angenommen, dass die Kosten der Speicherhülle von ca. 100 €/m² Speicherfläche für einen 5000 m³ Speicher auf 80 €/m² reduziert werden können.

7. Schlussfolgerungen

Um mehr (solar unterstützte Nahwärme-) Systeme mit Langzeit-Wärmespeicher realisieren zu können, müssen die Baukosten von Behälter- und Erdbecken-Wärmespeichern reduziert werden. Langzeit-Wärmespeicher müssen jedoch nicht nur kostengünstiger, sondern auch betriebssicherer und energieeffizienter werden. Je größer das Volumen des Speichers ist, desto unbedeutender sind die Wärmeverluste über die Speicherhülle. Zumindest in Deutschland liegt der kurz- bis mittelfristige Bedarf derzeit eher bei Wärmespeichern im Bereich zwischen 500 m³ und 10 000 m³, als bei Speichern mit einem Volumen größer 10 000 oder 100 000 m³. Die Minimierung der Wärmeverluste durch die Speicherhülle durch die Optimierung des Wandaufbaus ist somit von großer Bedeutung bei der Entwicklung und Konstruktion neuer Behälter- und Erdbecken-Wärmespeicher.

Durch Verbaumaßnahmen wird die Anzahl möglicher Speicherstandorte vergrößert (Bauen in Grundwasser). Zudem wird eine energetisch optimierte Geometrie möglich. Der Unterschied zwischen Erdbecken- und Behälter-Wärmespeicher verschwindet durch den Einsatz von Verbaumaßnahmen. Die komplexe bauphysikalische und thermodynamische Aufgabenstellung hinsichtlich Wärme- und Feuchtetransport z.B.

Durchfeuchtung der Wärmedämmung durch Diffusion ist für beide Speichertypen identisch: 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.

Die Verbesserung oder Neuentwicklung von geeigneten Abdichtungs- und Wärmedämmmaterialien bzw. die Demonstration der Langzeitbeständigkeit der am Markt erhältlichen Materialien bleibt die Hauptaufgabe für die Zukunft. Ohne eine systematische Untersuchung zum Alterungsverhalten von (polymeren) Abdichtungsmaterialien bei hohen Temperaturen können keine verlässlichen Aussagen zum Langzeitverhalten von erdvergrabenen Wärmespeichern getroffen werden.

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördert. Die Autoren danken für die Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Literatur

- [01] Raab, S. et al. (2004), Solar assisted district heating system with seasonal hot water heat store in Friedrichshafen (Germany), Proceedings of EuroSun 2004 – The 5th ISES Europe Solar Conference, Freiburg.
- [02] Final Technical Report, (2005), Solar Thermal and Long Term Heat Storage for District Heating Systems, Sunstore 2, Marstal.
- [03] Giebe, R., (1989), Ein Kies/Wasser-Wärmespeicher in Praxis und Theorie, Dis., ITW, Universität Stuttgart.
- [04] Benner, M. et al., (1999), Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit und ohne Langzeitwärmespeicher, Forschungsbericht zum BMFT-Vorhaben 0329606C, ISBN-Nr. 3-9805274-0-9, ITW, Universität Stuttgart.
- [05] Urbanek, T., (2003), Berechnung des thermischen Verhaltens von Kies-Wasser-Speichern, Dissertation, TU Chemnitz.
- [06] Benner, M. et al., (2003), Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit und ohne Langzeit-Wärmespeicher (Nov. 98 bis Jan. 03). Forschungsbericht zum BMWi-Vorhaben 0329606 S, ITW, Universität Stuttgart.
- [07] Bodmann, M. et al., (2006), Solar unterstützte Nahwärme und Langzeit-Wärmespeicher, Forschungsbericht zum BMWA / BMU-Vorhaben (Februar 2003 bis Mai 2005), Stuttgart.
- [08] Schlosser M., Solar unterstützte Nahwärmeversorgung Hannover Kronsberg, OTTI, 16. Symposium „Thermische Solarenergie“, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 2006.
- [09] Hadorn, J.-C., (1988), Guide to Seasonal Heat Storage, SIA Documentation D 028 in the series Planning Energy and Buildings.
- [10] Pfeil, M., Hahne et al. (1998), Solare Nahwärme und Saisonale Wärmespeicherung – Stand der Technik, Forschungsverband Sonnenenergie „Themen 97/98“, Köln.
- [11] Mangold D., (2006) Die neuen Pilotprojekte mit Langzeit-Wärmespeicher, OTTI, 16. Symposium Thermische Solarenergie, Kloster Banz, Bad Staffelstein.
- [12] Pfeil & Koch Ingenieurgesellschaft, (2005), Solare Nahwärme für das Schulzentrum Eggenstein-Leopoldshafen, Vorhabensbeschreibung zur Fördermittelbeantragung beim BMU, Stuttgart.
- [13] DIN 4108, Teil 4, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden.
- [14] Ochs F. et al., (2005), Außenlaborversuche zur Entwicklung kostengünstiger Erdbecken-Wärmespeicher für Solarwärme, OTTI, 15. Symposium „Thermische Solarenergie“, Kloster Banz, Bad Staffelstein.
- [15] Bader M. (2004), Entwicklung einer schwimmenden Abdeckung zur Abdichtung und Wärmedämmung kostengünstiger EBWSp für die saisonale Wärmespeicherung, Studienarbeit, ITW Uni Stuttgart, Stuttgart.
- [16] Ochs F., (2005), Sachstandsbericht zum Projekt „Weiterentwicklung der Erdbecken-Wärmespeichertechnologie“, Stuttgart.
- [17] Ochs F. et al., (2004), Bestimmung der feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen, OTTI, 14. Symposium Thermische Solarenergie, Kloster Banz.
- [18] Tzigilis, C. (2005), Beurteilung der Verfahren des Spezialtiefbaus zur Kostenreduktion von Langzeit-Wärmespeichern, Diplomarbeit am IGS und ITW mit Fa. Züblin Spezialtiefbau GmbH Stuttgart, Stuttgart.
- [19] Ochs, F. et al., (2006) Effektive Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung von erdvergrabenen Hochtemperatur-Langzeit-Wärmespeichern, OTTI, 16. Symposium Thermische Solarenergie, Kloster Banz.
- [20] Brellocks J., (2004), Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts von Bentonitmatten, Studienarbeit, ITW, Universität Stuttgart, Stuttgart.
- [21] Kiedaisch, J., (2002), Entwicklung einer Wasserwegsamkeit durch Geokunststoffe oder Kies für einer Erdreich/Wasser-Wärmespeicher, Diplomarbeit, ITW, Universität Stuttgart, Stuttgart.
- [22] Ochs, F. et al., (2006), Erdreich/Wasser-Erdbecken-Wärmespeicher mit direktem Beladesystem, OTTI, 16. Symposium Thermische Solarenergie, Kloster Banz, Bad Staffelstein.