

## **Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeicher mit freitragender Abdeckung für solare Nahwärmesysteme**

F. Ochs<sup>1)</sup>, A. Lichtenfels<sup>2)</sup>, H. Koch<sup>3)</sup>, W. Heidemann<sup>1)</sup>, H. Müller-Steinhagen<sup>1) 4)</sup>

<sup>1)</sup>Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)

Pfaffenwaldring 6, D-70550 Stuttgart

Tel. +49 711 685 63278, Fax: +49 711 685 63242

Email: [ochs@itw.uni-stuttgart.de](mailto:ochs@itw.uni-stuttgart.de)

<sup>2)</sup>Ingenieurbüro Lichtenfels, Kelttern

<sup>3)</sup>Pfeil & Koch ingenieurgesellschaft, Stuttgart

<sup>4)</sup>DLR Stuttgart, Institut für Technische Thermodynamik (ITT)

Saisonale Wärmespeicher – Heißwasser-Wärmespeicher – solar unterstützte  
Nahwärme – freitragende/selbsttragende Abdeckung

### **Abstract**

Für saisonale Wärmespeicherung, z.B. in solar unterstützten Nahwärmesystemen, bieten Heißwasser-Wärmespeicher 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 der Abdeckung oder Zugänglichkeit des Speichers gefordert, ist die Konstruktion von Heißwasser-Wärmespeichern mit schwimmender Abdeckung nicht mehr möglich. Begeh- und 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 Rüstturms zu sehen. Zudem befindet sich die Wärmedämmung auf der Außenseite, wodurch hohe Temperaturgradienten und somit hohe Spannungen im Beton auftreten können. Eine freitragende Sandwichkonstruktion bestehend aus Ultrahochleistungsbeton mit PUR-Kern bietet die Möglichkeit, die Abdeckung von Behälter- und Erdbecken- Wärmespeichern ohne Rüstturm bei signifikant reduziertem Material- und somit Primärenergieeinsatz auszuführen. Die technische Machbarkeit wird im Außenlaborversuch bestätigt.

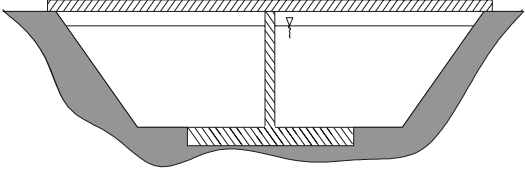
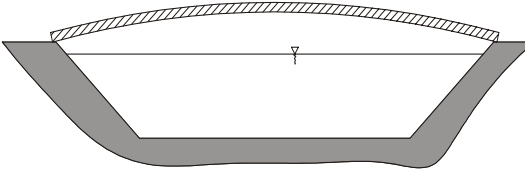
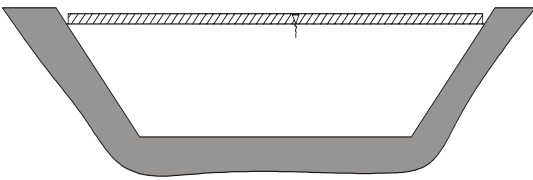
## **1 Einleitung**

Die saisonale Speicherung von Solarenergie oder von Abwärme aus Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen wird einen wesentlichen Beitrag dazu leisten, fossile Brennstoffe in zukünftigen Energiesystemen zu substituieren. Die spezifischen Kosten und auch die spezifischen Wärmeverluste von großen Langzeit-Wärmespeichern in solar unterstützten Nahwärmesystemen sind niedriger als die kleinerer Speicher in dezentralen Systemen. Die Dimensionen von bisher im Rahmen von Forschungs- und Pilotprojekten ausgeführten Behälter- und Erdbecken-Wärmespeichern reichen von einigen 100 m<sup>3</sup> bis über 10 000 m<sup>3</sup>. Erdbecken-Wärmespeicher werden je nach Speichertyp bzw. Speichermedium in Kies-Wasser-, Erdreich-Wasser- oder Heißwasser-Wärmespeicher unterteilt. In Bezug auf Wärmekapazität und Betriebsverhalten ist der Heißwasser-Wärmespeicher gegenüber den andern Typen vorteilhaft. Ist kein Kies am Standort vorhanden, sind in der Regel Heißwasser-Wärmespeicher wirtschaftlicher als Kies-Wasser-Wärmespeicher. Kies- und Erdreich-Wasser- Wärmespeicher haben Vorteile, wenn statische Gründe im Vordergrund stehen. So wurde in Chemnitz auf dem Kies-Wasser- Wärmespeicher eine Strasse und ein Parkplatz gebaut [1].

## **2 Abdeckungsvarianten – Stand der Technik**

Eine dem Kies-Wasser-Wärmespeicher statisch vergleichbare Abdeckung für Heißwasser-Wärmespeicher erfordert einen nicht unerheblichen technischen und finanziellen Aufwand. Abdeckungen von Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeichern können entweder als schwimmende Abdeckung, als abgestützte Abdeckung oder als freitragende Abdeckung ausgeführt werden. Vor- und Nachteile der jeweiligen Variante werden in Tabelle 1 zusammengefasst.

**Tabelle 1: Prinzipielle Arten von Abdeckungen für Heißwasser-Wärmespeichern (Behälter oder Erdbecken), Vor- und Nachteile**

<b>Abgestützte Abdeckung</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Abdeckung ist begehbar/befahrbar</li> <li>+ Speicher ist zugänglich/wartbar</li> <li>+ nahezu beliebige Speichergröße/Oberfläche</li> <li>- Durchführung durch Abdichtung am Boden/Decke</li> <li>- Wärmebrücke</li> <li>- aufwändiges Fundament notwendig aufgrund hoher Last</li> </ul>	
<b>Selbsttragende/freitragende Abdeckung</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Abdeckung ist begehbar/befahrbar</li> <li>+ Speicher ist zugänglich/wartbar</li> <li>- aufwändige und teure Konstruktion</li> <li>- relative hoher Aufbau</li> <li>- begrenztes Speichervolumen/-oberfläche</li> </ul>	
<b>Aufschwimmende/Schwimmende Abdeckung</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ einfache und kostengünstige Konstruktion</li> <li>+ nahezu unbegrenzte Speichergröße/Oberfläche (für aufschwimmende Abdeckung)</li> <li>- begrenzte Begehbarkeit/keine Befahrbarkeit</li> <li>- limitierte(r) Zugang/Wartbarkeit des Speichers</li> <li>- komplizierte Konstruktion des Be- und Entladesystems (für aufschwimmende Abdeckung)</li> </ul>	

Hauptnachteil bei abgestützten Abdeckungen ist die Notwendigkeit von zusätzlichen Durchführungen durch die Abdichtungen im Boden- und im Deckelbereich. Die Gefahr von Undichtigkeiten steigt dadurch. Zudem wird aufgrund der hohen Last auf den Säulen ein stabiles Fundament benötigt. Werden die Säulen nicht wärmegeklämt, stellen diese Wärmebrücken dar. In zwei Pilotprojekten solar unterstützter Nahwärmesysteme (Rottweil [2] und Hamburg [3]), wurde eine abgestützte Abdeckung realisiert, vgl. Tabelle 2.

Eine selbsttragende starre Abdeckung bietet gegenüber der schwimmenden Abdeckung den großen Vorteil, dass im Revisionsfall ohne zusätzliche Maßnahmen ein Zutritt zum Speicherinneren erfolgen kann. Selbsttragende Abdeckungen können entweder in Ortbetonbauweise erfolgen, wie bei den Wärmespeicherprojekten in

Friedrichshafen [3], Hannover [4] und Crailsheim [5], oder durch Fertigteile, wie beim Pufferspeicher in Crailsheim und beim aktuellen Projekt des 6000 m<sup>3</sup> Wärmespeichers in München [5]. Nachteilig bei beiden Varianten ist die Notwendigkeit eines Baugerüsts bzw. eines Rüstturms bei der Konstruktion. Dies ist zum Einen mit Kosten verbunden, zum Anderen wird ein Fundament benötigt, welches während der Bauphase die gesamte Last der Abdeckung trägt. Erst wenn die Elemente miteinander verbunden und vorgespannt werden, trägt sich die Abdeckung selbst. Technisch kompliziert ist zudem die Anbringung der Wärmedämmung. Als Varianten sind die innen liegende und die außen liegende Wärmedämmung möglich. Bei außen liegender Wärmedämmung sind aufgrund der hohen Temperaturgradienten sehr hohe Anforderungen an die Qualität des Betons zu stellen. Um die Rissbildung zu limitieren, ist der Einsatz eines stark bewehrten und somit teuren Betons notwendig. Im Falle der innen liegenden Wärmedämmung sind technisch schwierige Lösungen für die wärmbrückenfreie (hängende) Befestigung der Wärmedämmung (und der Abdichtung) zu entwickeln. Die Abdeckungen ausgeführter Behälter-Wärmespeicher sind ausnahmslos mit außen liegender Wärmedämmung realisiert worden.

Schwimmende Abdeckungen wurden theoretisch und experimentell in mehreren Pilot- und Forschungsspeichern sowie in einigen Studien untersucht. Dabei wurden sowohl Langzeit-Wärmespeicher mit modularer schwimmender Abdeckung als auch mit auf dem Wasser aufgebauter Variante ausgeführt. Bei der modularen schwimmenden Abdeckung traten Probleme jeweils im Randbereich auf. Auch die Problematik der Wärmebrücken zwischen den Elementen konnte bisher nicht zufrieden stellend gelöst werden. Beim aktuellste Projekt mit schwimmender Abdeckung (Marstal (DK), 2003 [6]) traten Undichtigkeiten bei einer Durchführung auf. Zudem muss die damals ausgeführte Konstruktion in Bezug auf Regen- und Kondensatableitung optimiert werden (vgl. [8]).

Am ITW wurde die schwimmende Abdeckung als Variante „aufschwimmende Abdeckung“ im Rahmen von Außenlaborversuchen untersucht. Dabei wird die Abdeckung im leeren Becken installiert und schwimmt beim Befüllen des Speichers an der Oberfläche. Jedoch erfordert diese Ausführungsvariante flexible Abdichtungsmaterialien, wodurch weitere technische Probleme entstehen, welche noch nicht zufrieden stellend gelöst sind. Zum Einen ist die (Dauer-)

Temperaturbeständigkeit der flexiblen Kunststoffdichtungsbahnen nicht hinreichend untersucht. Zum Anderen ist die geforderte Diffusionsdichtigkeit von derzeit verfügbaren flexiblen Abdichtungsmaterialien noch nicht gegeben (vgl. [7], [8] und [9]). Schwimmende Abdeckungen, die auf dem Wasser installiert werden, können im Gegensatz dazu mit Verbundfolien ausgeführt werden (z.B. Verbund aus HDPE oder PP und Aluminium).

In Tabelle 2 ist eine Auswahl ausgeführter Abdeckungen von Forschungs- und Pilot-Wärmespeichern aufgelistet. Weitere alternative Bauformen und Details von schwimmenden Abdeckungen sind in [10] und [11] zu finden. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass, wenn keine besondere statischen Ansprüche gestellt werden, die schwimmende Abdeckung vorzuziehen ist. Jedoch sind auch hier Details, wie z.B. Niveauregelung, Kondensatableitung oder Erdüberschüttung, noch zu optimieren. Wenn Befahrbarkeit oder uneingeschränkter Zugang zum Speicherinneren für z.B. Wartung gefordert wird, kommt die schwimmende Abdeckung nicht in Frage.

Das Ziel zukünftiger Entwicklungen ist die Herstellung einer selbsttragenden Abdeckung mit möglichst geringem Materialaufwand, die ohne Baugerüst und Rüstturm aufgebaut werden kann und dabei gegenüber bisherigen Projekten vergleichbare oder geringere Kosten aufweist.





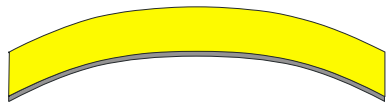
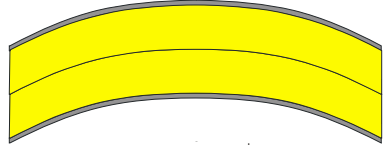
**Tabelle 2: Ausgeführte Abdeckungen von Forschungs- und Pilot- Langzeit-Wärmespeichern**

Abdeckung	Projekt	V [m <sup>3</sup> ]	Land	Jahr	Bemerkung
Freitragende Abdeckung	Växjö	1 000	S	1987	Erdbecken
	Särö	640	S	1989	Stahlbehälter in Erdbecken (Wickelfalz)
	Malung	1 000	S	1989	Erdbecken
	Friedrichshafen	12 000	D	1996	Betonbehälter, vorgespannt
	Herlev	3 000	DK	1991	Erdbecken
	Sjökulla	195	FN	1993	Erdbecken
	Hannover	2 750	D	2000	Betonbehälter, vorgespannt
	Attenkirchen	500	D	2001	Betonbehälter, vorgespannt (als Puffer für Erdsonden-Wärmesp.)
Abgestützte Abdeckung	München	6 000	D	2006	Betonbehälter, vorgespannt
	Rottweil	600	D	1994	Betonbehälter, 1 Säule
Schwimmende Abdeckung	Hamburg	4 500	D	1996	Betonbehälter, 6 Säulen
	Wales	100	UK	1977	Erdbecken, auf Wasser Installation
	Studsvik	800	S	1978	Betonbehälter, modularer Aufbau
	Lombohov	10 000	S	1980	Betonbehälter, modularer Aufbau
	Lyngby	540	DK	1983	modularer Aufbau
	Mannheim	30 000	D	1983	Studie, modularer Aufbau
	Wolfsburg	10 000	D	1984	Studie, auf Wasser Installation
	Hjortekaer	50 000	Dk	1984	Studie, k.A.
	Berlin	170	D	1986	Erdbecken, modularer Aufbau
	Ottrupgaard	1 500	DK	1995	Erdbecken, modularer Aufbau, zusätzlich gelagert auf 2 Querstreben / 4 Säulen
	Jülich	2 500	D	1996	Erdbecken, modularer Aufbau, 1:10 Model
	Lyngby	500	DK	2002	Erdbecken, auf Wasser Installation
	Marstal	10 000	DK	2003	Erdbecken, auf Wasser Installation
	Stuttgart	150	D	2005	Erdbecken, aufschwimmende Abdeckung, Außenlaborversuch

### 3 Selbsttragende Sandwich Abdeckung

#### 3.1 Fertigung der Fertigteile

Diese Abdeckung wird aus Fertigteilen als Sandwich aus Ultra-Hochleistungs-Feinkornbeton (HL-Beton) und PUR hergestellt, wodurch aufgrund der vielfach höheren Festigkeit sehr dünne Bauteile mit nur wenigen Zentimeter Dicke hergestellt werden können (vgl. [12] und [13]). Hochleistungsbeton für den Einsatz in Behälter-Wärmespeichern wurde in [12] detailliert untersucht. Ein Behälter aus Hochleistungsbeton wurde erstmalig im Jahr 2000 in Hannover umgesetzt [4]. Somit konnte auf Erfahrungen aus diesen Projekten zurückgegriffen werden. Die Produktion der Fertigteile ist schematisch in Bild 1 dargestellt.

1	Produktion Teil 1		4	Fertigung Teil 2	
2	Drehen um 180°		5	Biegen auf Modell	
3	Biegen auf Modell		6	Verklebung beider Teile	

**Bild 1: Schematische Darstellung der Produktion eines Fertigteils bestehend aus Hochleistungsbeton (HL-Beton) und PUR Kern**

### 3.2 Vorversuche

Als Vorversuch wurde ein 20 cm breites Sandwichelement in einem Betonfertigteilwerk gefertigt, siehe Bild 2.



**Bild 2: Prototyp des Sandwich Fertigteils, gefertigt aus 2 Teilen mit je 2 cm HL-Beton und 16 cm PUR-Dämmung**

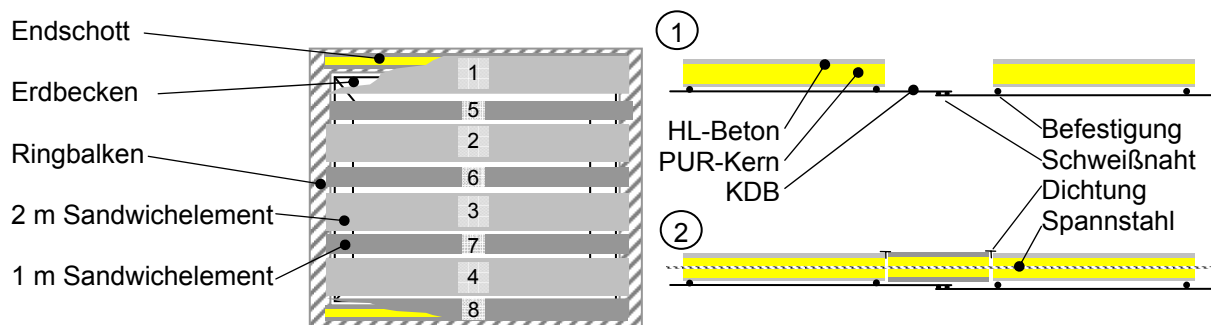
### 3.3 Außenlaborversuch - Aufbau der Abdeckung

Die Abdeckung des Außenlabor-Erdbecken-Wärmespeichers wird aus je vier 1 m und 2 m breiten Sandwichelementen hergestellt, welche analog zum Prototyp hergestellt werden. Jedoch werden die beiden Einzelteile der Sandwichelemente mit unterschiedlichen PUR Dicken hergestellt, um die Spannungen in der PUR Schicht des unteren Teils zu reduzieren. Die Biegung des oberen Teils ist unkritischer, da die PUR Schicht auf Druck beansprucht wird.

Die Fertigteile werden mit Autokranen mittels Vakuumhebezeug auf dem Speicher abgesetzt (vgl. Bild 5) und dort durch das Verschweißen einer Kunststoffdichtungsbahn (KDB) wasser- und wasserdampfdicht verbunden.



Die Abdeckung des Außenlabor-Wärmespeichers besteht aus 10 Elementen, je vier Stück 1 m und 2 m breite Teile sowie 2 Endschotts. Der Bauablauf ist schematisch in Bild 3 dargestellt. Ein wesentlicher Bestandteil des Konzepts ist, dass der Aufbau der Abdeckung inklusive Abdichtungsarbeiten ohne Baugerüst und Rüstturm erfolgen kann. Die Schweißarbeiten erfolgen von oben. Die Abdichtung des Beckens wird mit der Abdichtung der Abdeckung am Beckenrand verbunden.



**Bild 3: Schematischer Bauablauf der Abdeckung bestehend aus 2 Endschotts sowie je vier 2 m breiten und 1 m breiten Elementen, Elemente aus Hochleistungsbeton (HL-Beton) mit Kunststoffdichtungsbahn (KDB)**

Die Kunststoffdichtungsbahn zwischen den 2 m breiten Elementen wird von oben verschweißt. Anschließend werden die 1 m breiten Elemente dazwischen gesetzt. Zuletzt werden die Elemente über Spannstahlelemente verbunden. Die Fugen werden dabei mit EPDM abgedichtet. In Bild 4 ist der Außenlabor Erdbecken-Wärmespeicher mit dem 1. Sandwichelement gezeigt.



**Bild 4: Montage des 1. Fertigteils auf dem Außenlabor Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeicher am ITW**

Das Tonnendach kann erdüberschüttet und begrünt werden. Das Betreten der Decke oder das Befahren mit leichten Fahrzeugen ist möglich.

Ein Element der Abdeckung ist an zwei Stellen mit Temperatursensoren und Wärmestrommessplatten versehen. Messergebnisse bezüglich des thermischen Verhaltens werden in Kürze verfügbar sein.

#### 4 Schlussfolgerungen

Heißwasser-Wärmespeicher bieten im Vergleich zu Kies-Wasser-Wärmespeicher überwiegend Vorteile. Heißwasser-Wärmespeicher können mit frei- bzw. selbsttragenden, mit abgestützten oder mit schwimmenden Abdeckungen gebaut werden. Selbsttragende Abdeckungen sind vorteilhaft bezüglich Begehrbarkeit der Abdeckung und Zugänglichkeit und somit Wartbarkeit des Speichers. Die Konstruktion ist jedoch aufwändig und teuer. Wenn Befahrbarkeit bzw. uneingeschränkte Begehrbarkeit zwingend erforderlich ist, gibt es zum Einsatz einer selbsttragenden Abdeckung keine Alternativen. Da Langzeit-Wärmespeicher in der Regel in oder in der Nähe von Wohnsiedlungen gebaut werden, wird Begehrbarkeit und Befahrbarkeit jedoch häufig ein wichtiges Kriterium sein.



**Bild 5: Autokran beim Heben eines Sandwichelements mittels Vakuumhebezeug**

Durch das Sandwichkonzept ist eine wirtschaftliche Konstruktion einer freitragenden Abdeckung ohne Rüstturm möglich. Im Vergleich zu konventioneller Technik kann der Materialeinsatz stark verringert werden, wodurch auch der Primärenergieeinsatz

bei der Herstellung der Fertigteile reduziert werden kann. Für den Prototyp wird mit Kosten von rund 400 €/m<sup>2</sup> gerechnet.

Die technische Machbarkeit einer freitragenden Abdeckung wird derzeit im Außenlaborversuch am ITW gezeigt. Eine freitragende Sandwich-Abdeckung als Tonnendach wurde über einem Erdbecken mit einer Oberfläche von rund 100 m<sup>2</sup> gebaut. Die Dauerstandfestigkeit sowie das thermische Verhalten im Betrieb mit Temperaturen bis 95 °C bei gleichzeitig niedrigen Außentemperaturen muss noch nachgewiesen werden, wozu eine Monitoring des Forschungsspeichers durchgeführt wird.

Die Ergebnisse sind auf eine Abdeckung in Form eines Kuppeldachs übertragbar. Langzeit-Wärmespeicher mit freitragender Abdeckung mit einem Durchmesser von 25 m sind ohne Weiteres denkbar.

**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.**

Die Autoren bedanken sich bei der der Firma Weigold Bau-GmbH, der Firma Schwenk Zement KG und der Firma Paul Bauder GmbH & Co. KG.

## Literatur

- [1] Urbaneck T, Berechnung des thermischen Verhaltens von Kies-Wasser-Speichern, Dissertation, TU Chemnitz, 2003.
- [2] Benner M., Mahler B., Mangold D., Schmidt T., Schulz M., Seiwald H., Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit und ohne Langzeit-Wärmespeicher, Forschungsbericht zum BMBF-Vorhaben, 1994 bis 1998, ISBN: 3-9805274, 1999.
- [3] Benner M., Bodmann M., Mangold D., Nußbicker J., Raab S., Schmidt T., Seiwald H., Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit und ohne Langzeit-Wärmespeicher, Forschungsbericht zum BMBF-Vorhaben, November 1998 bis Januar 2003, ISBN: 3-9805274-2-5, 2004.
- [4] Bodmann M., Mangold D., Nußbicker J., Raab S., Schenke A., Schmidt T., Solar unterstützte Nahwärme und Langzeit-Wärmespeicher, Forschungsbericht zum BMWA / BMU-Vorhaben (Februar 2003 bis Mai 2005), Stuttgart, 2006.
- [5] Mangold D., Saisonale Wärmespeicher: Neue Pilotanlagen im Programm Solarthermie2000plus und Forschungsperspektiven, Proc. PtJ Statusseminar Thermische Energiespeicherung – mehr Energieeffizienz zum Heizen und Kühlen, Freiburg, 2006.
- [6] Sørensen P. A., PlanEnergi, SUNSTORE 2, Monitoring results from the project and construction of 10000 m<sup>3</sup> pit heat storage, Sunstore 2 Workshop, September 2004, Marstal, Aero, 2004.
- [7] Ochs F., Koch H., Lichtenfels A., Mangold D., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Außenlaborversuche zur Entwicklung kostengünstiger Erdbecken-Wärmespeicher für Solarwärme, OTTI, 15. Symposium „Thermische Solarenergie“, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 2005.
- [8] Ochs F., Sachstandsbericht zum Projekt „Weiterentwicklung der Erdbecken-Wärmespeichertechnologie“, Stuttgart, 2005.
- [9] Ochs F., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Effektive Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung von erdvergrabenen Hochtemperatur-Langzeit-Wärmespeichern, OTTI, 16. Symposium „Thermische Solarenergie“, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 2006.
- [10] Bader M., Entwicklung einer schwimmenden Abdeckung zur Abdichtung und Wärmedämmung kostengünstiger Erdbecken-Wärmespeicher für die saisonale Wärmespeicherung, Diplomarbeit, ITW Uni Stuttgart, Stuttgart, 2004.
- [11] Heller A., Floating lid constructions for large pit water heat storage, Megastock 1997, volume 1, p. 503–508, 1997.
- [12] Jooß M., Dichtheit von Heißwasser-Langzeitspeichern aus Hochleistungsbeton, Dis. IWB, Universität Stuttgart, 2001.
- [13] Lichtenfels A., Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete for Shells, International Symposium on Ultra High Performance Concrete (UHPC), Kassel, 2004.