

# Effektive Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung von erdvergrabenen Hochtemperatur-Langzeit-Wärmespeichern

F. Ochs<sup>1)</sup>, H. Heidemann<sup>1)</sup>, H. Müller-Steinhagen<sup>1) 2)</sup>

<sup>1)</sup> Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik

Pfaffenwaldring 6, 70569 Stuttgart, Germany

Fon ++49 711 685 3278 – Email [ochs@itw.uni-stuttgart.de](mailto:ochs@itw.uni-stuttgart.de)

<sup>2)</sup> DLR Stuttgart, Institut für Technische Thermodynamik

## 1. Einleitung

Am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik werden im Rahmen des vom BMU geförderten Projekts „Weiterentwicklung der Erdbecken-Wärmespeichertechnologie“ in Zusammenarbeit mit den Ingenieurbüros PKI und Lichtenfels im Außenlabor verschiedene Konzepte und Bauweisen für Erdbecken-Wärmespeicher mit Auslegungstemperaturen bis 95 °C getestet. Ziel ist die Entwicklung eines energieeffizienten und dabei kostengünstigen Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeichers für die saisonale Wärmespeicherung, vor allem in Verbindung mit Solarwärmesystemen (vgl. /01/ und /02/).

Geeignete Materialien für Wärmedämmung, Abdichtung und Dampfsperre werden sowohl im Innenlabor zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit und des Diffusionswiderstandes als auch in zwei Außenlaboren (siehe Bild 1) hinsichtlich Verarbeitbarkeit und Praxistauglichkeit getestet. Verschiedene Wandaufbauten werden im Betrieb kontinuierlich vermessen. Die Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit zur Ermittlung der Wärmeverluste von Boden- und Wanddämmung sowie der Abdeckung im Betrieb ist Gegenstand dieser Arbeit. Aus den Messergebnissen lassen sich Empfehlungen für optimierte Wandaufbauten erdvergrabener Wärmespeicher ableiten.



Bild 1: Außenlabor mit Forschungspeicher am ITW; oben Labor 1: Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeicher mit aufschwimmender Abdeckung, Labor 2 Kies-Wasser-Wärmespeicher; unten Labor 1 nach Rückbau

## 2. Wärmedämmung erdvergrabener Wärmespeicher

Bei den meisten der bisher ausgeführten Pilotanlagen zur solar unterstützten Nahwärmeversorgung mit erdvergrabenen Langzeit-Wärmespeicher sind die Wärmeverluste höher als geplant. Ein Teil der Wärmeverluste lässt sich durch veränderte Temperaturverläufe (mittlere Speichertemperatur) aufgrund von geänderten Lasten oder Systemkonfigurationen gegenüber dem Planungsstand erklären. Schlechtere Temperaturschichtung und dadurch höhere Verluste im meist ungedämmten Bodenbereich verursachen zusätzliche Wärmeverluste. Sehr oft bewirken nur unzulänglich bekannte Stoffwerte (Wärmeleitfähigkeit der eingesetzten Dämmung und des umgebenden Erdreichs, Wasserdampfdiffusionswiderstand der Abdichtung) und Randbedingungen (Grundwasserstand, Grundwasserfluss) eine

deutlich Unterschätzung der Wärmeverluste bei der Planung. Zudem ist die Qualität des Wandaufbaus in Bezug auf Schutz vor (Grund-)Wassereintrag teilweise unzureichend. Tabelle 1 fasst die Wärmeverluste zum Planungsstand und die tatsächlich gemessenen Verluste einiger realisierter Wärmespeicher zusammen:

Tabelle 1: Wärmeverluste erdvergrabener Wärmespeicher – Vergleich von Planungs- und Messdaten für ausgewählte Projekte							
Behälterspeicher				Erdbecken-Wärmespeicher			
		Messung	Faktor			Messung	Faktor
		MWh/a				MWh/a	
Friedrichshafen	/03/	320-360	1.46-1.64	Stuttgart	/04/	27	n.V.
Hamburg	/03/	360-430	3.79-4.53	Chemnitz <sup>1)</sup>	/05/	n.V.	1.44
Hannover	/03/	90 - 100	1.29-1.43	Steinfurt <sup>2)</sup>	/03/	70 – 90	n.V.

1) Hochgerechnet aus Werten von 8 Wochen

2) incl. Anschlussleitung

n.V.: nicht verfügbar

Die Daten in Tabelle 1 zeigen, dass es Optimierungsbedarf bezüglich des Designs und vor allem bezüglich des Wandaufbaus von erdvergrabenen Wärmespeichern gibt. Die Minimierung der Wärmeverluste bei gleichzeitiger Reduzierung der Kosten erfordert einen Wandaufbau, der zum einen gewährleistet, dass die Dämmung vor Wasser- und Wasserdampfeintrag von außen und innen geschützt ist und zum anderen ein Austrocknen im Falle einer Durchfeuchtung der Dämmung erlaubt.

Aufgrund von Verschmutzungen, aber vor allem aufgrund von Temperatur- und Feuchteinflüssen können die Wärmedämmeigenschaften eines Wandaufbaus erheblich abnehmen. Die Wärmedämmung muss nicht nur möglichst kosteneffektiv eingebracht werden, sondern dabei auch trocken und schadensfrei bleiben. Vor allem bei großen Wärmespeichern kann das Einbringen der Wärmedämmung mehrere Tage dauern. Der Schutz vor Witterungseinflüssen spielt dann zusätzlich eine wichtige Rolle bei der Auswahl einer geeigneten Einbaumaßnahme.



Bild 2: Einbauvarianten für schüttfähige Wärmedämmung, von links nach rechts: Einblasen der Dämmung aus einem Silo-LKW, vorgefertigte Schalungselemente beim Einbau, Einblasen der Dämmung in Geocontainer, Jute-Membranschalung

Als geeignet erweisen sich für große Wärmespeicher speziell schüttfähige und druckbeständige Dämmstoffe. Das Einbringen von rieselfähiger Wärmedämmung durch Schütten oder Einblasen ist im Vergleich zum Anbringen von Plattenmaterial speziell bei großen Speichervolumina und somit großen Böschungslängen wesentlich effektiver und kostengünstiger. Durch den schnellen Installationsprozess kann das Risiko einer Durchfeuchtung durch Niederschlag minimiert werden. Tabelle 2 fasst die wichtigsten Eigenschaften von einigen für den Einsatz von Wärmespeichern geeigneten Dämmstoffschüttungen zusammen.

Tabelle 2: Thermophysikalische Eigenschaften von Dämmstoffschüttungen (vgl. /06/)

Eigenschaft		Einheit	BGG Typ I	BGG Typ II	BGG Typ II	SGS <sup>4)</sup>	BTG Typ I	BTG Typ II
Körnung	d	mm	2-4	2-4	4-8	0-90	4-8	1-4
Dichte	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	200	190	185	150	270	300
Porosität	$\Psi$	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	0.92	0.93	0.93	0.94	0.90	0.89
WLF10 <sup>1)</sup>	$\lambda$	W/(m K)	0.070	0.080	0.080	0.06	0.100	0.08
WLF10 <sub>mess</sub> <sup>2)</sup>	$\lambda$	W/(m K)	0.065	0.060	0.060	0.065	0.090	0.075
WLF80 <sub>mess</sub> <sup>2)</sup>	$\lambda$	W/(m K)	0.080	0.075	0.080	0.090	0.105	0.095
Freie Sättigung <sup>3)</sup>	$u_{fs}$	kg/m <sup>3</sup> <sup>4)</sup>	550	510	500	460	300	235

BGG: Blähglasgranulat

BTG: Blähtongranulat

SGS: Schaumglasschotter

WLF: Wärmeleitfähigkeit

1) Herstellerangabe

2) Eigene Messung, Zwei-Platten-Apparatur in Anlehnung an DIN 52612 bei 10°C bzw. bei 80 °C, vgl. /09/

3) Abtropfgewicht in Anlehnung an DIN EN 13755 /10/

 4) Messwerte der Wärmeleitfähigkeit für 0-20 mm, unverdichtet WLF<sub>0-90</sub>= 0.08 W/(m K)

### 3. Messung und Modellierung der effektiven Wärmeleitfähigkeit

Mit Hilfe von Messwerten für die Wärmeleitfähigkeit wurde ein Modell für die effektive Wärmeleitfähigkeit von schüttfähigen Dämmstoffen als Funktion des Wassergehalts und der Temperatur aufgestellt. Der Einfluss der Feuchte auf die Wärmeleitfähigkeit hängt primär von der Porenstruktur des Materials ab (vgl. /06/). In Bild 3 sind beispielhaft Mess- und Modellwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Temperatur (T) und des Wassergehalts (u) von Blähglasgranulat und Blähton mit einer Körnung von 4-8 mm dargestellt. Die Modellwerte wurden in Anlehnung an das von Krischer (/07/) entwickelte Schichtenmodell berechnet (vgl. /02/). Das Modell wurde um eine Schicht erweitert, um den Anteil der geschlossenen und somit von der Feuchte unbeeinflussten Poren berücksichtigen zu können.

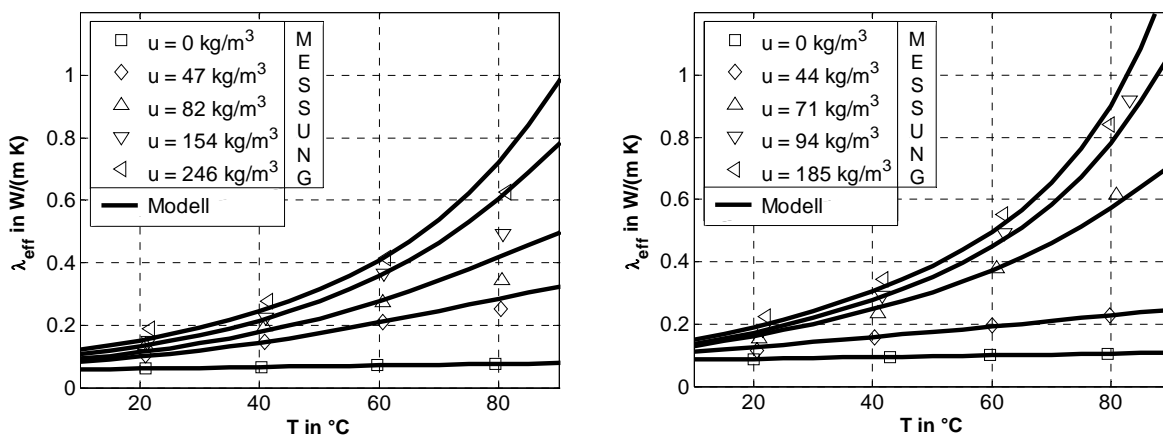


Bild 3: Mess- und Modellwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Temperatur (T) und des Wassergehalts (u) von Blähglasgranulat und Blähton (Körnung von 4-8 mm), Modellkurven berechnet mit einem Schichtenmodell in Anlehnung an /07/

Zu erkennen ist der exponentielle Anstieg der effektiven Wärmeleitfähigkeit bei höheren Wassergehalten bedingt durch Porendiffusion. Die Werte übersteigen bei Temperaturen über 60 °C und Stofffeuchten von ca. 200 kg/m<sup>3</sup> (entspricht etwa 20 Vol.%) den Bemessungswert von 0.08 W/(m K) nach DIN 4108 (/06/) um das Fünffache, bei 80 °C sogar um das Zehnfache.

#### 4. Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung im Betrieb

Die Außenlabore und die dazugehörige Heizzentrale sind mit umfangreicher Messtechnik versehen. Durch die Erfassung der Speicher-, Dämmstoff- und Erdreichtemperaturen sowie der Wärmeströme durch die Wärmedämmung, können die Wärmeverluste im Betrieb bestimmt und daraus die Wärmeleitfähigkeit der Dämmstoffschicht berechnet werden.

Am Beispiel eines Zeitraums von sechs Monaten mit unterschiedlichen Heiz- und Kühlzyklen soll der Einfluss der Durchfeuchtung der Dämmung auf die Wärmeverluste gezeigt werden (vgl. Bild 4).

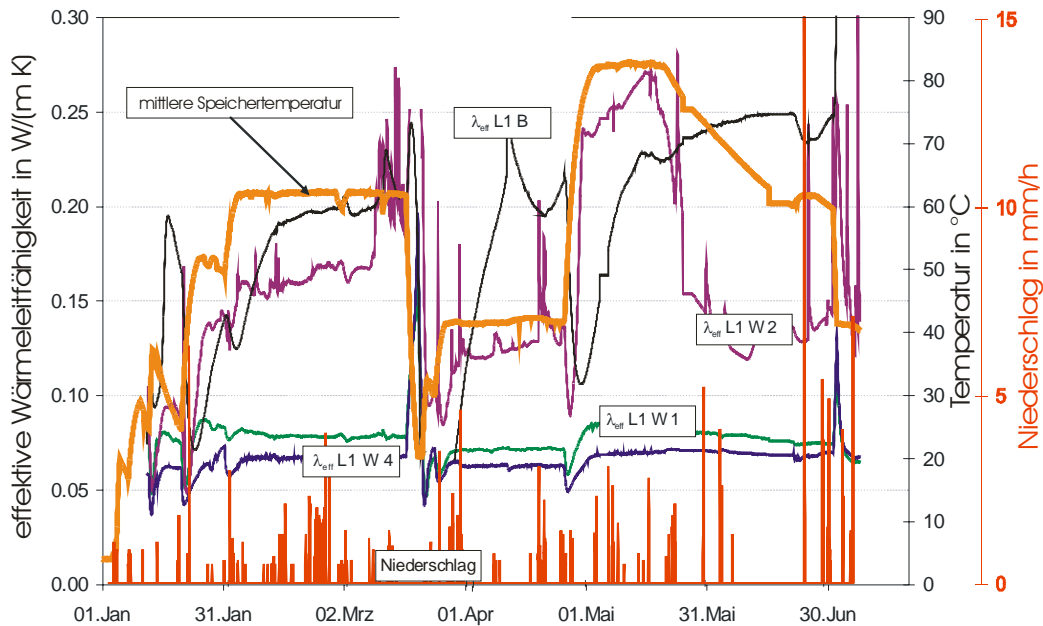


Bild 4: Effektive Wärmeleitfähigkeit von Bodendämmung ( L1 B) und Wanddämmung (L1 W1, L1 W2 und L1 W4) im Betrieb, Einfluss der Durchfeuchtung bei Regen

Die effektive Wärmeleitfähigkeit nimmt im Außenlabor, wie erwartet, mit steigender (Speichermittel-)Temperatur zu. Deutlich zu erkennen ist, dass bei Regenspitzen die effektive Wärmeleitfähigkeit von Boden (B) und Nord-Wand (W2) zunimmt, wohingegen die mit einer Spritzbetonschicht versehene Süd- (W4) und Westböschung (W1) unbeeinflusst bleiben. Der Effekt tritt deutlicher bei hohen Speichertemperaturen auf. Im Böschungsbereich (W2) kann die Dämmung wieder schnell austrocknen – die effektive Wärmeleitfähigkeit sinkt wieder deutlich ab. Die Bodendämmung bleibt aber aufgrund der unzureichenden Drainage über den gesamten Zeitraum feucht (vgl. Bild 5, rechts).



Bild 5: Die Durchfeuchtung der Nordwand (W2), sowie des Bodens (B) nach dem Rückbau

Die Anhand der Auswertung der Messwerte getroffenen Aussagen konnten durch den Rückbau bestätigt werden, wie in Bild 5 gezeigt wird. In Bild 5 sind die im Außenlabor gemessenen Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit aus Bild 4 über der Dämmstoffmitteltemperatur aufgetragen. Die Werte in Bild 5 zeigen erhebliche Schwankungen aufgrund von transienten Effekten und variablem Wassergehalt der Dämmstoffe. Trends sind dennoch gut zu erkennen.

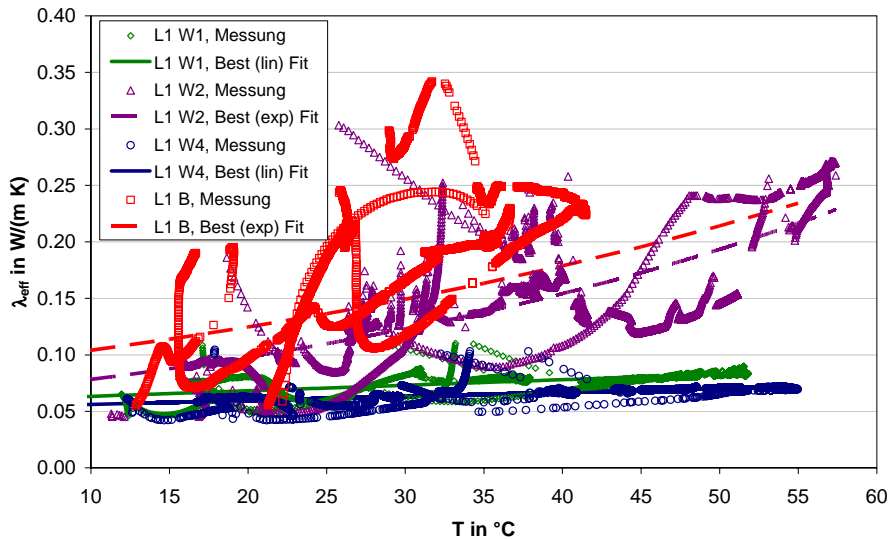


Bild 5: Effektive Wärmeleitfähigkeit von Bodendämmung und Wanddämmung im Betrieb als Funktion der Dämmstoffmitteltemperatur

Der Vergleich der berechneten Werte für die Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht im Außenlabor mit den im Innenlabor experimentell bestimmten Werten lässt Aussagen über den Wassergehalt des Dämmstoffs und somit über die Funktionalität der Abdichtung zu.

In Tabelle 3 werden die Außenlabormesswerte (Werte der Ausgleichskurven) und die Modellwerte vergleichend gegenübergestellt. Die Modellwerte wurden mit dem jeweiligen Wassergehalt der Dämmung, der nach dem Rückbau der Außenlabors bestimmt wurde, berechnet.

Tabelle 3: Vergleich der Modellwerte mit Außenlabor Messwerten (Werte der Ausgleichskurve aus Bild 6) bei unterschiedlichen Dämmstoffmitteltemperaturen (20, 35, 50 °C)

Ort <sup>1)</sup>	Dämmstoff	Wassergehalt (Messung) kg/m <sup>3</sup>	Außenlabormessung			Modell (basierend auf Innenlabormessung)		
			W/(m K)			W/(m K)		
			20 °C	35 °C	50 °C	20 °C	35 °C	50 °C
Westwand (W1)	BGG 2-4	0	0.07	0.08	0.08	0.06	0.07	0.07
Nordwand (W2)	BGG 2-4	145	0.10	0.14	0.19	0.13	0.19	0.26
Südwand (W4)	BGG 2-4	0	0.06	0.06	0.07	0.06	0.07	0.07
Boden (B)	BGG 2-4	383	0.13	0.21	<sup>2)</sup>	0.19	0.26	0.36

1) Ostwand, keine Sensoren vorhanden, Abdeckung, Sensoren ausgefallen

2) max. Mitteltemperatur  $T_m = (T_{\text{Speicher}} + T_{\text{Boden}})/2$  am Boden 40 °C

Der Vergleich der mittels Wärmestrommessplatten und Dämmstofftemperaturen ermittelten Werte der Wärmeleitfähigkeit der Dämmung im Außenlabor 1 (vgl. Bild 1) mit den mit Hilfe des erweiterten Schichtenmodells berechneten Werten zeigt, dass

- auch geringe Feuchtigkeit (<10 Vol%) zu einer signifikanten Zunahme der Wärmeleitfähigkeit führt (hier: Faktor 4),
- die gemessenen Werte der Wärmeleitfähigkeit gut mit den berechneten Werten übereinstimmen, somit auch das „Erweiterte Schichtenmodell“ zur Berechnung der Temperatur- und Feuchteabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von schüttfähigen Dämmstoffen geeignet ist und
- die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Dämmung von erdvergrabenen Wärmespeichern mittels Wärmestrommessplatten geeignet ist, um Aussagen über den Zustand der Dämmung zu treffen.

## 5. Schlussfolgerungen

Es ist offensichtlich, dass die Berechnung der Wärmeverluste (und somit die Auslegung der Dämmstärke) mit den in der DIN 4108 /08/ angegebenen Bemessungswerten (Messung bei 10°C) zu deutlichen Fehlern führen kann. Im Vergleich zu den Hersteller- bzw. DIN- Angaben ergeben sich im realen Betrieb Werte für die effektive Wärmeleitfähigkeit und somit für die Wärmeverluste, die um den Faktor 4 -10 höher sein können (siehe auch /02/).

Bei der Einbringung der Dämmung sowie beim späteren Betrieb muss darauf geachtet werden, dass die Dämmung trocken bleibt, da die Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Stofffeuchte vor allem bei hohen Temperaturen signifikant zunimmt.

**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.**

- /01/ Ochs F., et al., Außenlaborversuche zur Entwicklung kostengünstiger Erdbecken-Wärmespeicher für Solarwärme, OTTI, 15. Symposium „Thermische Solarenergie“, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 2005.
- /02/ Ochs F., Sachstandsbericht zum Projekt „Weiterentwicklung der Erdbecken-Wärmespeichertechnologie“, 2005.
- /03/ Benner M., et al., Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit und ohne Langzeit-Wärmespeicher, Forschungsbericht zum BMBF-Vorhaben, November 1998 bis Januar 2003, ISBN-Nr. 3-9805274-2-5, 2004.
- /04/ Giebe, R., Ein Kies/Wasser-Wärmespeicher in Praxis und Theorie, Dissertation, Universität Stuttgart, 1989.
- /05/ Urbanek, T., Berechnung des thermischen Verhaltens von Kies-Wasser-Speichern, Dissertation, TU Chemnitz, 2003.
- /06/ Ochs F. et al., Bestimmung der feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen, OTTI, 14. Symposium Thermische Solarenergie, Kloster Banz, 2004.
- /07/ Krischer, O; Kast, W, Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik, Springer, Berlin, 1992.
- /08/ DIN 4108, Teil 4, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden.
- /09/ DIN 52612, Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät.
- /10/ DIN EN 13755, Bestimmung der Wasseraufnahme unter atmosphärischem Druck