

**FFG store4grid**

Bericht

## **Stand der Technik erdvergrabener Wärmespeicher**

Fabian Ochs, 15.12.2013

Der Bericht basiert auf dem Abschlussbericht zum Vorhaben „Weiterentwicklung der Erdbecken-Wärmespeichertechnologie“ FKZ 0329607 E, (BMU und PTJ), Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart und wurde mit Informationen aus folgenden aktuellen Projekten ergänzt:

- Vorhaben aus Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Förderkennzeichen 0329607K, 0329607Q (Institut für Gebäude- und Solartechnik – IGS, Uni Braunschweig), 0329607P (ITW, Uni Stuttgart), 0329607N (Solites)
- EU Projekt Einstein
- EU Projekt Sunstore4
- EU Projekt SDH Take off
- EU Projekt solar-district-heating.eu

siehe auch [www.saisonalspeicher.de](http://www.saisonalspeicher.de)

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Solar unterstützte Nahwärme mit Langzeit-Wärmespeicher</b>	<b>4</b>
1.1	Speichertypen	5
1.2	Speichermedium: Kies-Wasser vs. Heißwasser	8
<b>2</b>	<b>Stand der Technik erdvergrabener Wärmespeicher</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>Konstruktion von Wärmespeichern</b>	<b>16</b>
3.1	Geometrie	16
3.2	Erdbau, Tiefbau, Spezialtiefbau	18
3.3	Wandaufbau	20
3.4	Abdeckung	21
<b>4</b>	<b>Materialien</b>	<b>27</b>
4.1	Wärmedämmung	28
4.2	Abdichtung	34
4.2.1	Stahl, Edelstahl	35
4.2.2	Mineralische Dichtungsbahn	36
4.2.3	Bituminöse Abdichtungen, Asphaltbeton	38
4.2.4	Kunststoffdichtungsbahnen	38
4.2.5	Alterung von Kunststoffdichtungsbahnen	45
<b>5</b>	<b>Wirtschaftlichkeit</b>	<b>46</b>
<b>6</b>	<b>Systemkonzepte von Nahwärmesystemen mit Langzeit-Wärmespeicher und Wärmepumpe</b>	<b>49</b>
<b>7</b>	<b>Entscheidungs-Entwicklung</b>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Schlussfolgerung</b>	<b>55</b>

# 1 Solar unterstützte Nahwärme mit Langzeit-Wärmespeicher

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, wie in Bild 1 dargestellt, sind niedriger im Vergleich zu denen von kleinen dezentralen Systemen.

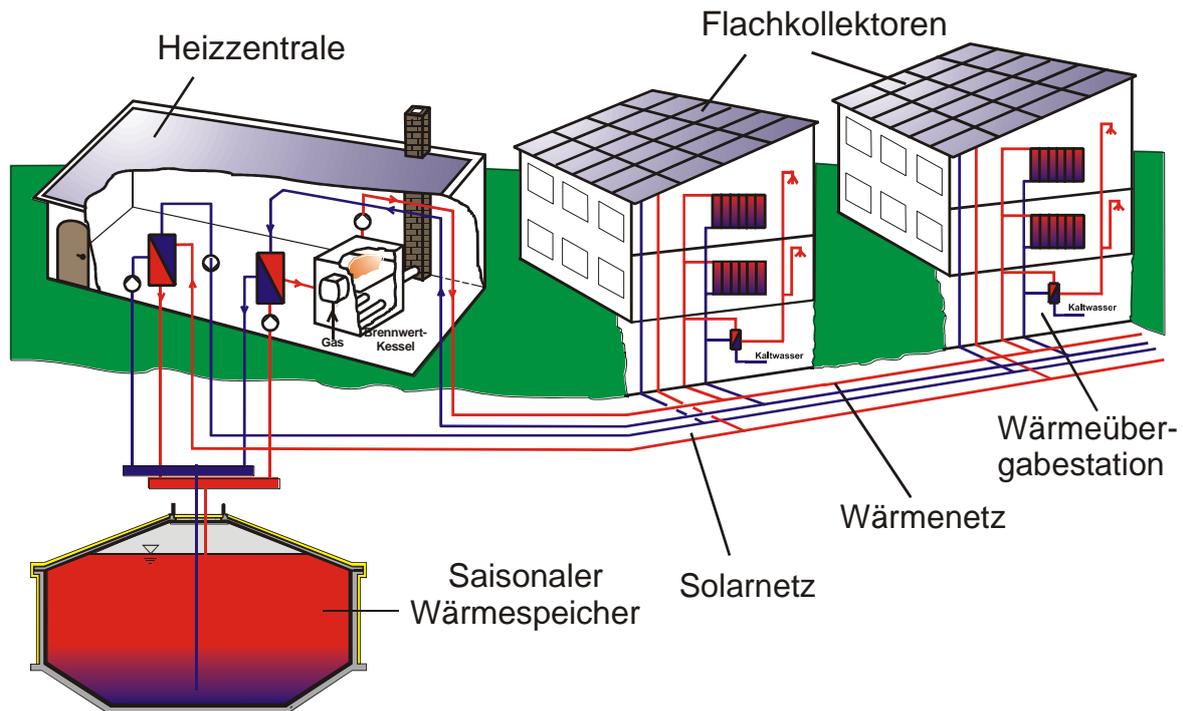
Tabelle 1: Vergleich von Kennzahlen verschiedener Solarsysteme (Erfahrungswerte)

System	Trinkwasser	Trinkwasser + Raumheizung	Nahwärme mit Kurzzeit-Wärmespeicher	Nahwärme mit saisonalem Wärmespeicher
minimale Systemgröße	-	-	> 30 - 40 Whg.	> 100 - 150 Whg.
Kollektorfläche	1.0-1.5 $m^2_{FK}/Person$	3 – 4 $m^2_{FK}/Person$	0.8 – 1.2 $m^2_{FK}/Person$	0.14 – 0.2 $m^2_{FC}/m^2$ Wohnfläche
Speichervolumen	50 – 100 $l/m^2_{FK}$	150 – 300 $l/m^2_{FK}$	50 – 100 $l/m^2_{FK}$	1.4 – 2.1 $m^3/m^2_{FK}$
Solarer Deckungsanteil	10 %	15-20 %	15-20 %	40 - 60 %

Hohe solare Deckungsanteile (> 50%) können nur mit Langzeit- bzw. mit saisonaler Wärmespeicherung erreicht werden. Die Wirtschaftlichkeit solcher Anlagen mit großen Wärmespeichern nimmt dagegen mit der Speichergröße aufgrund der geringeren Zyklenzahl ab (saisonale Speicherung: Zyklenzahl = 1, siehe auch Abschnitt 3.1). Im Folgenden wird unter Langzeit-Wärmespeicherung große Wärmespeicher zusammengefasst, welche Zyklenzahlen kleiner 100 aufweisen.

Je geringer die Zyklenzahl desto entscheidender wird die graue Energie (vgl. [320]). Insbesondere bei saisonalen Wärmespeichern ist dies entsprechend bei der Planung zu berücksichtigen.

Es gibt eine Vielzahl von Systemkonfigurationen, welche im Rahmen dieses Berichts nicht erwähnt und erklärt werden können, welche jedoch Design und Ausführung des Langzeit-Wärmespeichers beeinflussen. Entscheidend ist z.B. ob im System eine Wärmepumpe und/oder ein zusätzlicher Pufferspeicher vorhanden sind. Auch die Ausführung des Wärmenetzes (4- oder 3-Leiternetz) sowie die konventionelle Haustechnik haben über die Rücklauftemperatur Einfluss auf den Langzeit-Wärmespeicher.



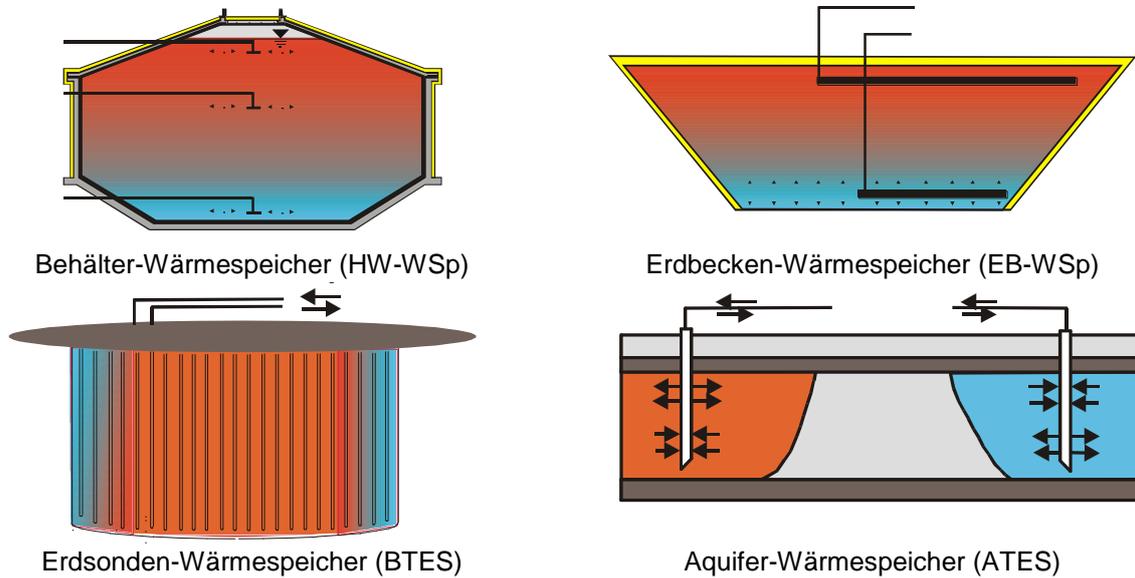
**Bild 1: Schematischer Aufbau und Komponenten eines solar unterstützten Nahwärmenetzes (Quelle: ITW)**

Langzeit-Wärmespeicher können also nicht unabhängig vom Heizsystem betrachtet werden. Jedoch kann eine Optimierung hinsichtlich Schichtung, Wärmeverluste und Kosten durch eine detaillierte systemunabhängige Betrachtung des Speichers erfolgen. Für eine abschließende Beurteilung muss jedoch wieder das System z.B. durch transiente Jahressimulationen Berücksichtigung finden. Eine detaillierte Beschreibung möglicher und realisierter Systemkonzepte finden sich in z.B. in [4], [5] und [6]. Systemkonzepte mit Wärmepumpe werden später in Abschnitt 6 diskutiert.

## 1.1 Speichertypen

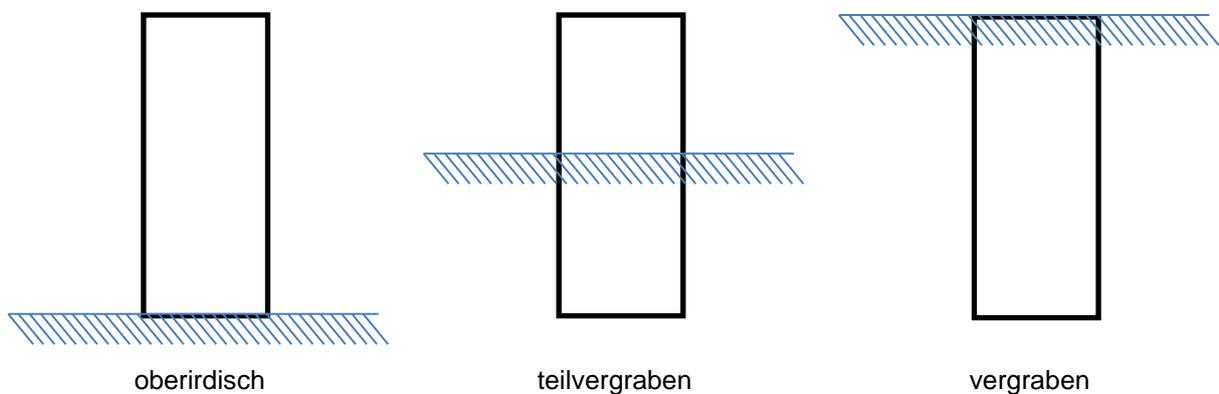
In Bild 2 sind die vier Langzeit-Wärmespeichertypen dargestellt. Als fünfter Typ könnte noch der Kavernen-Wärmespeicher (CTES) genannt werden. Da in

Deutschland noch keine Projekte mit Langzeit-Kavernenspeicher ausgeführt wurden, wird dieser in der Regel nicht mit aufgezählt.



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

Erdbecken-Wärmespeicher werden in eine Grube im Erdreich gebaut. Auch die Mehrzahl der bisher realisierten Behälter-Wärmespeicher (BS) wurde aus Platz- und architektonischen Gründen ganz oder partiell vergraben gebaut. Sowohl aus bauphysikalischer als auch i.d.R. aus wirtschaftlicher Sicht sind oberirdisch gebaute Wärmespeicher vorteilhaft.



**Bild 3: Bauformen von Behälter-Wärmespeichern**

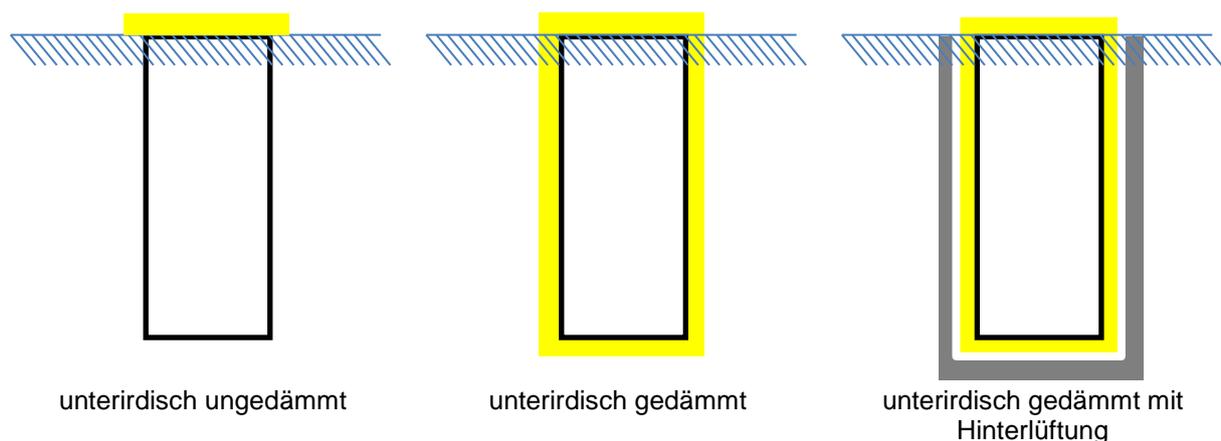
Oberirdische (stehende) Behälter sind Stand-der-Technik und werden in

- Stahl
- Beton,
- GFK oder

oder als Kombination gebaut. Die Größe von oberirdisch (stehenden) Behältern ist im Vergleich zu Erdbecken-Wärmespeichern limitiert, jedoch mit der Größenordnung 50 000 m<sup>3</sup> nicht der Grund unterirdisch zu bauen. Vielmehr sind hier maßgeblich ästhetische bzw. städtebauliche/architektonische Gründe zu nennen.

Wärmespeicher, die über GOK gebaut wurden, wie der 34 500 m<sup>3</sup> Stahltank in Linz [96], [97] oder die beiden Druckbehafteten Speicher (10 bar) mit je 560 m<sup>3</sup> in Wien [424] sind aus optischen Gründen für solar unterstützte Nahwärmesysteme keine wirkliche Alternative. Innerhalb von Wohnsiedlungen muss angestrebt werden, die Speicher möglichst wenig sichtbar zu bauen.

Häufig werden unterirdische Wärmespeicher nicht gegen das Erdreich gedämmt. Aus bauphysikalischer Sicht ist eine hinterlüftete Wärmedämmung zu empfehlen, um eine Feuchteanreicherung in der Wärmedämmung zu verhindern (vgl. Abschnitt 3.3). Dies ist bei vergrabenen Behältern theoretisch möglich jedoch i.d.R. aus wirtschaftlichen Gründen nicht vertretbar (eine Ausnahme bildet der Multifunktions-Wärmespeicher in Hamburg, welcher in die Baugrube des ursprünglichen Speichers neu aufgebaut wurde, vgl. [321]).

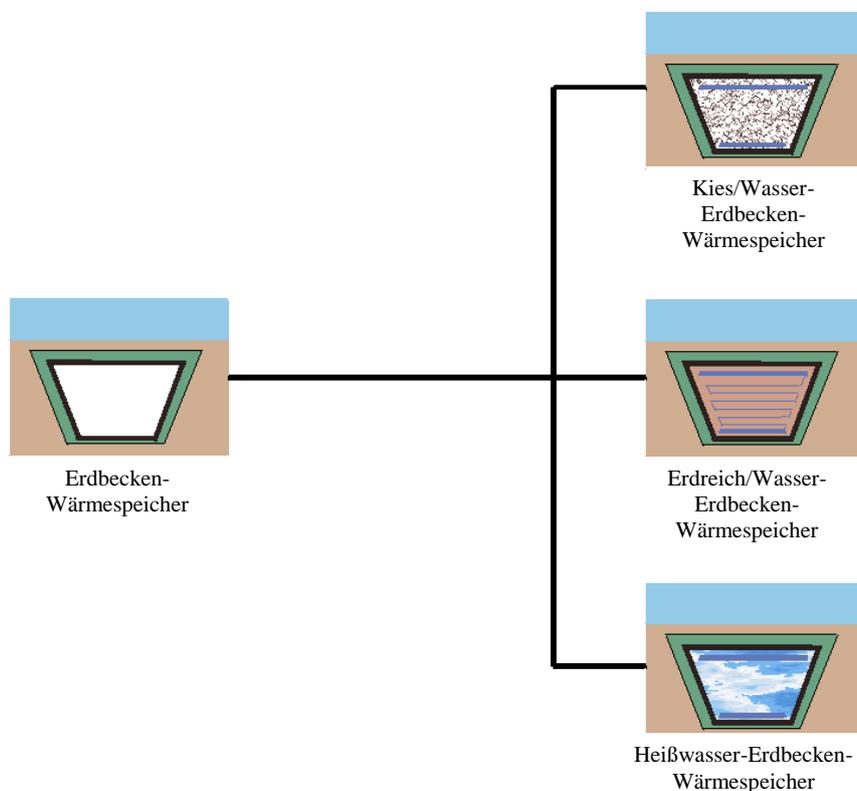


**Bild 4: Bauformen von Behälter-Wärmespeichern**

## 1.2 Speichermedium: Kies-Wasser vs. Heißwasser

Es werden entsprechend des Speichermediums zusätzlich die im Bild 5 dargestellten drei Typen von Erdbecken-Wärmespeichern unterschieden.

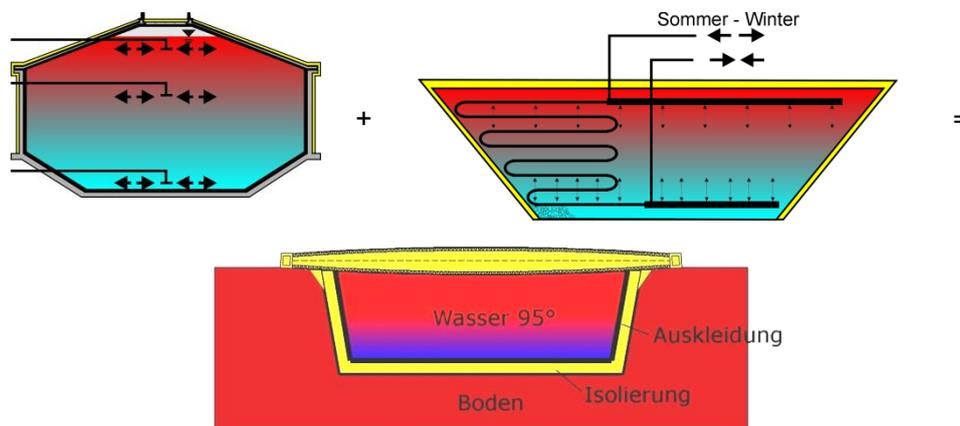
- Kies/Wasser-Erdbecken-Wärmespeicher (KW), bei dem Kies als statisches und wärmespeicherndes Medium eingesetzt wird,
- Erdreich/Wasser-Erdbecken-Wärmespeicher (EW), bei dem das ausgehobene Erdreich als statisches und wärmespeicherndes Medium eingesetzt wird und
- Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeicher (HW), bei dem reines Wasser als Wärmespeichermedium eingesetzt wird, das durch eine Abdeckung nach oben abgeschlossen wird.



**Bild 5: Einteilung der Erdbecken-Wärmespeicher nach dem Speichermedium (Quelle: PKi)**

Kieswasser- bzw. Erdreich-Wärmespeicher bieten den Vorteil einer relativ günstigen Bauweise und eignen sich für große Wärmespeicher, wenn Befahrbarkeit gewährleistet sein muss. Nachteilig erweist sich die geringere spezifische Wärmespeicherkapazität, die geringere Schichtung und die praktisch nicht vorhandene Zugänglichkeit und somit schwierige Wartbarkeit.

Mit dem Konzept des Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeichers (vgl. Bild 6) werden die Vorteile der beiden Langzeit-Wärmespeichertypen Behälterspeicher und Kies-Wasser-Wärmespeicher ausgenutzt: Die einfachere und kostengünstigere Bauweise eines Erdbecken-Wärmespeichers sowie die Vorteile der 50 % höheren Wärmekapazität sowie der guten Betriebseigenschaften und der Möglichkeit der Wartung durch das reine Wasservolumen. Demgegenüber steht die aufwändigere Abdeckung (siehe Abschnitt Schwimmende Abdeckung bzw. Freitragende Abdeckung).



**Bild 6: Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeicher (Quelle ITW, Lichtenfels)**

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 [4], auf dem eine Straße und ein Parkplatz gebaut wurden. Eine statisch vergleichbare Abdeckung von Heißwasser-Wärmespeichern erfordert nicht unerheblichen technischen und finanziellen Aufwand (vgl. Kapitel 3.4). Vor- und Nachteile von Kies-Wasser- und Heißwasser-Wärmespeichern sind in Tabelle 2 zusammengefasst:

**Tabelle 2: Vor- und Nachteile von Kies-Wasser- und Heißwasser-Wärmespeichern**

Heißwasser-Wärmespeicher	Kies-Wasser –Wärmespeicher
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Wärmekapazität</li> <li>+ Be- und Entladeverhalten (Dynamik)</li> <li>+ Temperaturschichtung</li> <li>+ Wartung/Sanierung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Statik (Verkehrslast nahezu unbegrenzt)</li> <li>+ einfache Abdeckung</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- technisch aufwändige Abdeckung</li> <li>- Sicherheit (Havarie)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Wärmekapazität (50% von Wasser)</li> <li>- Beladesystem (indirekte Beladung)</li> <li>- Be- und Entladeverhalten (Träge, Puffervolumen)</li> <li>- Wartung/Sanierung nicht möglich</li> </ul>

Der Vorteil eines Kies-Wasser-Erdbecken-Wärmespeichers, keine weiteren statischen Maßnahmen für die Abdeckung und Böschungssicherung zu benötigen, entfällt beim Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeicher. Für die Abdeckung bleiben drei Möglichkeiten:

1. schwimmende bzw. aufschwimmende Abdeckung
2. freitragende Abdeckung
3. abgestützte Abdeckung

Konzepte für die schwimmende bzw. die aufschwimmende Abdeckung sowie für eine freitragende Abdeckung sowie die Vor- und Nachteile der jeweiligen Varianten werden in Abschnitt 3.4 Abdeckung beschrieben.

## **2 Stand der Technik erdvergrabener Wärmespeicher**

In den letzten 30 Jahren wurden Forschungs- und Pilot-Wärmespeicher jeden Typs in verschiedenen Größen realisiert. Die Dimensionen ausgeführter Behälter- und Erdbecken-Wärmespeicher (Erdsonden- und Aquifer-Wärmespeicher werden hier nicht weiter betrachtet) variieren zwischen 100 m<sup>3</sup> bis über 10 000 m<sup>3</sup>. Die größten ausgeführten Projekte sind der Heißwasser-Wärmespeicher in Friedrichshafen (D) mit 12 000 m<sup>3</sup> sowie die beiden Erdbecken-Wärmespeicher in Marstal (DK) mit 10 000 m<sup>3</sup> bzw. 75 000 m<sup>3</sup>, vgl. Tabelle 3.

Hier erfolgt eine Zusammenfassung eines der wesentlichen Details zum Stand der Technik von Behälter- und Erdbecken-Wärmespeichern. Detaillierte Information ist in [1] zu finden.

International sind über 30 Projekte dokumentiert, wobei sich die Mehrzahl in Europa und dort in Deutschland und in den skandinavischen Ländern befinden, vgl. [4], bis [34]. Durch diese konnte gezeigt werden, dass derartige Systeme technisch machbar sind. Einige Projekte, wie Crailsheim [54], [55], [56], Eggenstein [95] oder Hamburg [322] sind noch Gegenstand aktueller Untersuchungen.

**Tabelle 3: Pilot- und Forschungs-Langzeit-Wärmespeicher Behälter- und Erdbecken , Datum der Inbetriebnahme, Volumen Fläche, Verhältnis von Höhe (h) zu Durchmesser (d), Böschungswinkel und Oberfläche (A)-Volumen (V) Verhältnis**

Name	Land	Literatur	Datum	V [m <sup>3</sup> ]	A [m <sup>2</sup> ]	h/d [-]	β [°]	A/V [1/m]
<b>Behälter-WSp</b>								
Studsvik <sup>†)</sup>	S	[7],[35],[8]	1978	800	550	6.0/12.6	38	0.69
Lombohov	S	[7],[8],[36]	1980	10 000	1 750	12.0/32.4	90	0.18
Särö	S	[9], [10], [37]	1989	640	n/a	n/a	90	n/a
Rottweil	D	[38]	1994	600	289	5.0/13.0	90	0.48
Lisse	NL	[11],[12],[13]	1994	1 000	n/a	n/a	n/a	n/a
Hamburg	D	[4],[39],[40]	1996	4 500	1 650	10.7/25.7	90	0.37
Friedrichshafen <sup>†)</sup>	D	[4],[41],[42],[43],[44]	1996	12 000	2 796	19.4/32.4	90	0.23
Ilmenau <sup>†)</sup>	D	[45],[46],[385]	1998	300	262	8.0/7.2	90	1.14
Hannover <sup>†)</sup>	D	[4],[40],[41],[43],[47],[48]	2000	2 750	1 135	11.1/19.0	90	0.41
Attenkriechen <sup>*</sup> )	D	[5],[49],[50],[51]	2001	500	350	8.0/8.9	90	0.7
Crailsheim <sup>3)</sup>	D	[52][53],[54],[55],[56]	2006	480	362	14.5/6.3	90	0.75
München <sup>3) †)</sup>	D	[54],[56]	2006	6 000	1 800	16.1/24.6	90	0.30
Hamburg <sup>6)</sup>	D	[322]	2010	4 000	1660	11.5/23	90	0.34
Hamburg <sup>7)</sup>	D	[425]	2013	2 000	-	-	90	-

Name	Land	Literatur	Datum	V [m <sup>3</sup> ]	A [m <sup>2</sup> ]	h/d [-]	β [°]	A/V [1/m]
Erdbecken-WSp								
Wales (HW)	UK	[57]	1977	100	260	n/a	n/a	26
Vaulruz (SW)	CH	[13],[58]	1983	3 500	4 600	4.6/29.6	n/a	1.3
Lyngby (HW)	DK	[59],[60]	1983	540	n/a	4.3/10.3	n/a	n/a
Stuttgart (GW)	D	[61],[62],[63],[64],[65]	1985	1 050	835	3.7/17.5	45	0.84
Berlin (HW)	D	[66],[67],[68],[69]	1986	170	n/a	3.05/7.4	34	n/a
Meyrin (SW)	CH	[20]	1986	20 000	n/a	n/a	n/a	n/a
Växjö (HW)	S	[9]	1987	1 000	n/a	n/a	n/a	n/a
Malung (HW)	S	[9],[70]	1989	1 000	n/a	4.0/7.0	n/a	n/a
Hoerby (HW)	DK	[71],[72],[73]	1990	500	n/a	n/a	90	n/a
Herlev <sup>1)</sup> (HW)	DK	[74]	1991	3 000	1 630	6/26.25	90	0.54
Lyngby (SW) <sup>4)</sup>	DK	[74],[75]	1991	500	n/a	n/a	n/a	n/a
Sjökulla (HW)	FN	[76],[77]	1993	195	n/a	2.7/11.7	34	n/a
Otrupgaard (HW)	DK	[30],[8],[74],[78]	1995	1 500	1 400	5.0/16.0	27	0.93
Marstal (SW)	DK	[14],[30],[79],[80],[81]	1999	3 500	1 850	7/22.15	34	0.53
Chemnitz (GW) <sup>2)</sup>	D	[82],[83],[84],[85]	1997	8 000	3 375	7.0/39.0	90	0.42
Egenhausen (SW)	D	[19],[86]	1997	300	115	4.0/8.7	60	1.2
Augsburg (GW)	D	[87],[88],[89],[90]	1997	6 500	n/a	n/a	90	n/a
Steinfurt (GW)	D	[40],[89],[90],[91] [92]	1999	1 500	1 305	4.0/24.25	50	0.87
Lyngby (HW) <sup>4)</sup>	DK	[31],[32]	2002	500	n/a	n/a	n/a	n/a
Marstal (HW)	DK	[14],[93],[94]	2003	10 000	5 600	6.5/40.25	27	0.56
Eggenstein (GW) <sup>3)</sup>	D	[95], [323], [324], [325]	2007	4500	1964	8/27.7	35	0.44
Marstal II (HW) <sup>5)</sup>	DK	[319]	2012	75 000	20 800	16/65	25	0.28

1) Tubberupvaenge

2) Betrieb in 2006 eingestellt

3) Bau/Fertigstellung in 2007

4) Ersterbauung 1991, wiedererbaut 2002

5) Sunstore 4 (fp7)

6) Sanierung/Neubau Multifunktionsspeicher Bramfeld

7) Energiebunker

n/a nicht Verfügbar

†) Zylindrische Geometrie mit Pyramidenstumpf an Boden/Decke

Bis auf den mit Ton abgedichteten Speicher in Ottrupgaard sind alle noch in Betrieb befindlichen Langzeit-Wärmespeicher frei von größeren Leckagen. Jedoch wies die Mehrzahl der Pilot- und Forschungsspeicher Leckagen bei der Inbetriebnahme auf, welche durch Sanierung behoben werden konnten.

Bei der Mehrzahl der bisher ausgeführten Pilotanlagen zur solar unterstützten Nahwärmeversorgung mit vergrabenen Langzeit-Wärmespeicher sind die Wärmeverluste höher als bei der Planung berechnet (vgl. Tabelle 4). 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, [338]) bei bisherigen Auslegungen als konstant angenommen. Wie in [2] 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. Über die Lebensdauer des Speichers kann dieser nicht ausreichend Schutz vor Grund- oder Oberflächenwassereintrag bieten (vgl. Kapitel 3.3). Veränderte Randbedingungen gegenüber dem Planungsstand können in einer Unterschätzung der Wärmeverluste resultieren. Beim Heißwasser-Wärmespeicher in Hamburg [4], [39], [40] kam es vermutlich durch unvorhersehbare Schwankungen des Grundwasserstands oder Grundwasserflusses zu einer Durchfeuchtung der

Wärmedämmung, wodurch die Wärmeverluste deutlich über den Planungswerten liegen.

**Tabelle 4: Wärmeverluste ( $Q_{\text{mess}}$ ) realisierter Forschungs- und Pilotprojekte**

	Jahr	Volumen [m]	$Q_{\text{mess}}$ [MWh/a]	$Q_{\text{mess}}^{1)}$ [kWh/(m <sup>2</sup> K a)]	$T_{\text{av}} - T_{\text{a}}$ [K]	Referenz
<b>Behälter-Wärmespeicher</b>						
Hamburg	1996	4 500	360 – 430	5.7	42	[4],[39],[40]
Friedrichshafen	1996	12 000	320 – 360	2.5	49	[4],[41],[42],[43],[44]
Hannover	2000	2 750	90 – 100	2.5	33	[4],[40],[41],[43],[47],[48]
Hamburg	2010	4 000	240 - 360	4.6	65	[322]
<b>Erdbecken-Wärmespeicher</b>						
Stuttgart (KW) <sup>2)</sup>	1985	1 050	27	0.4	8	[61],[62],[63],[64],[65]
Steinfurt (KW) <sup>3)</sup>	1999	1 500	70 – 90	2.7	26	[4],[40],[89],[90],[91]
Marstal (HW) <sup>4)</sup>	2003	10 000	338	0.6	22	[14],[93],[94]
1) Wärmeverluste bezogen auf die Hüllfläche und die mittlere Temperaturdifferenz zwischen Speicher ( $T_{\text{av}}$ ) und Umgebung ( $T_{\text{a}}$ ), 2) 462 h Simulation, mit Wärmepumpe, $T_{\text{av}} = 17 \text{ °C}$ , 3) incl. Anschlussleitung, 4) Daten hochgerechnet von 6 Monaten aus [14]						

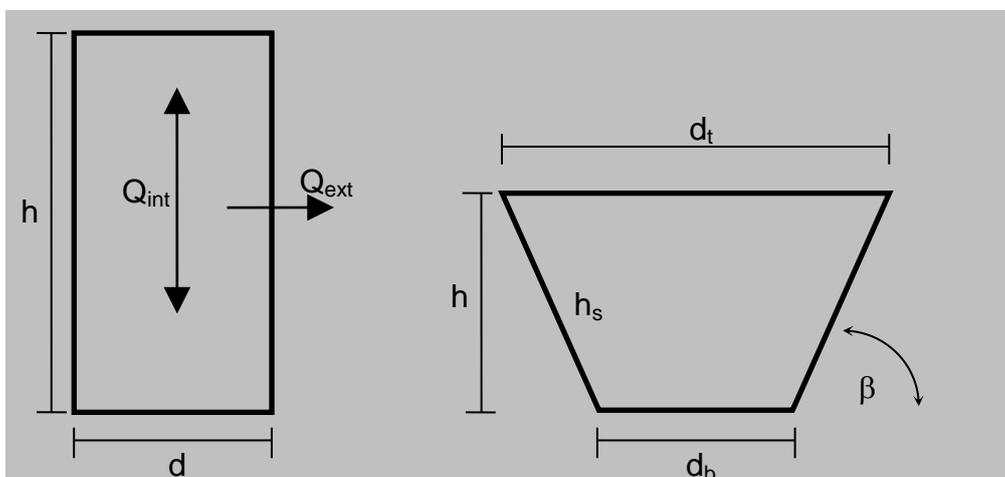
Die Daten in Tabelle 4 zeigen, dass es Optimierungsbedarf bezüglich des Designs und vor allem bezüglich des Wandaufbaus von erdvergrabenen Wärmespeichern im Hinblick auf die Wärmeverluste gibt. Die Minimierung der Wärmeverluste bei gleichzeitiger Reduzierung der Kosten erfordert einen Wandaufbau, der 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.

### 3 Konstruktion von 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.

#### 3.1 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 Quader, 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 ( $Q_{\text{int}}$ ) infolge der Temperaturschichtung im Speicher und in äußere Wärmeverluste ( $Q_{\text{ext}}$ ) über die Speicheroberfläche (siehe Bild 7). 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.



**Bild 7: Geometrie eines Wärmespeichers**

Je nach Betriebsweise (Puffer oder Langzeit-Wärmespeicher) überwiegen die inneren oder die äußeren Wärmeverluste. Auf Basis von Messungen und Simulationen wurden von verschiedenen Autoren h/d-Verhältnisse zwischen 1 und 10 vorgeschlagen ([98] bis [107]). Ein Wert um drei scheint am praktikabelsten [108].

Für saisonale Wärmespeicher ist aus energetischer Sicht ein h/d-Verhältnis von eins anzustreben wie Werte aus der Praxis zeigen (vgl. Tabelle 5). Jedoch wurden aus ökonomischen Gesichtspunkten auch Speicher mit energetisch ungünstigerer Geometrie ausgeführt (z.B. Wärmespeicher in Hannover).

**Tabelle 5: Zyklenzahl und energetisch optimale Geometrie, Höhe-zu-Durchmesser (h/d)-Verhältnis von Wärmespeichern**

	Zyklen/a	h/d
<b>Pufferspeicher</b>	260 bis 280	≈ 3.0
<b>Saisonaler Wärmespeicher</b>	1.2 bis 1.6	≈ 1.0

Obwohl die Praxis zeigt, dass h/d-Verhältnisse von 1 für saisonale Wärmespeicher angestrebt werden sollten, wurden aufgrund von geophysikalischen Einschränkungen, wie Grundwasser oder Felsschichten wurden jedoch häufig geringere h/d-Verhältnisse realisiert, wie z.B. in Hamburg (h/d≈0.4), Friedrichshafen (h/d≈0.6) oder Hannover (h/d≈0.7), vergleiche auch Tabelle 3. Insbesondere wurden die sehr großen Erdbecken-Wärmespeicher (vgl. Tabelle 6) wie der 10 000 m<sup>3</sup> Erdbecken-Wärmespeicher in Wolfsburg und auch der 30 000 m<sup>3</sup> in Mannheim mit sehr flachen Böschungswinkeln geplant was zu geringen h/d-Verhältnissen und sehr großen Oberflächen führt. Die maximale Bautiefe wird häufig durch das Grundwasserniveau begrenzt (vgl. z.B. Wärmespeicher in Marstal, bzw. Abschnitt 5 zur Wirtschaftlichkeit).

**Tabelle 6: Volumen  $V$ , Höhe  $h$ , Böschungswinkel  $\beta$  und Oberfläche  $A$  großer Erdbecken-Wärmespeicher**

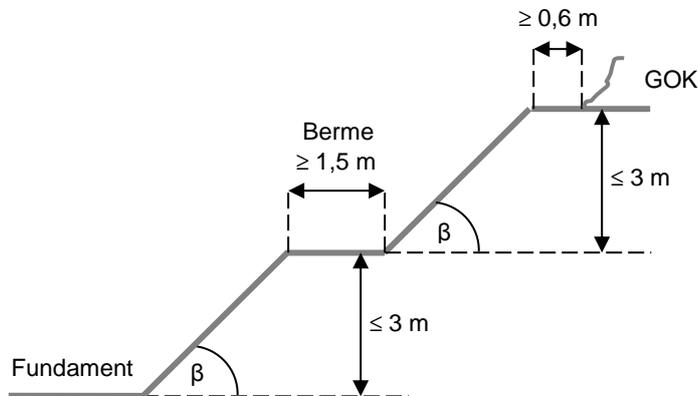
Projekt		Mannheim	Wolfsburg	Marstal I	Marstal II
Quelle		[110],[111][112]	[113]	[93]	
Volumen $V$	[m <sup>3</sup> ]	30 000	10 000	10 000	75 000
Steigung	[-]	1/1.3	1/2	1/2	1/2
Böschungswinkel $\beta$	[°]	38	27	27	27
Höhe $h$	[m]	15	8	6.5	16
Oberfläche $A$	[m <sup>2</sup> ]	75 x 50	51 x 51	65 x 42	113 x 88
A/V - Verhältnis #	[1/m]	0.3	0.5	0.6	0.3
h/d - Verhältnis *	[-]	0.70	0.23	0.18	0.25

# aspect ratio

\* Verhältnis Höhe (h) zu mittlerem Durchmesser  $d_m=(d_t+d_b)/2$

### 3.2 Erdbau, Tiefbau, Spezialtiefbau

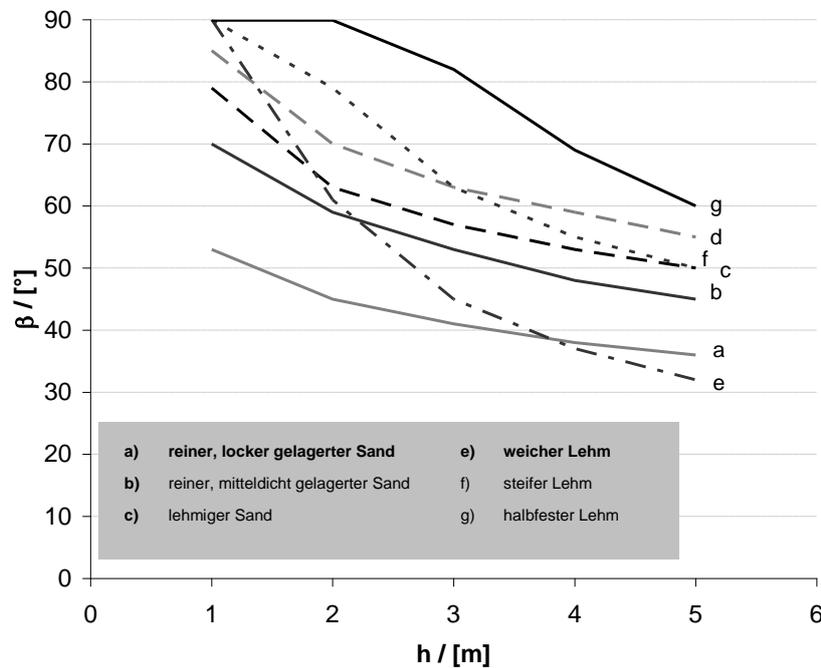
In Abhängigkeit von Bodentyp und Bodenklasse sowie Baugrubentiefe (h) kann die Grube mit einem maximalen Böschungswinkel  $\beta$  natürlich geböschet werden (Eigenstandfestigkeit).



**Bild 8: Baugruben mit einer Tiefe von mehr als 5 m müssen mit einer 1.5 m breiten Berme ausgeführt werden.**

Bei größeren Wärmespeichern ( $h > 5$  m) reduziert sich der maximal mögliche Böschungswinkel auf bis zu 30° (vgl. Bild 9). 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.



**Bild 9: Eigenstandfestigkeit verschiedener Bodenarten in Abhängigkeit des Böschungswinkels  $\beta$  und der Baugrubentiefe (h), aus [114], vgl. z.B. [115], [116]**

Bei Anwesenheit von Grundwasser bzw. Schichtenwasser (permanent oder temporär) können nur drei Verbauarten zur Anwendung kommen (siehe Tabelle 7).

**Tabelle 7: Verbauarten, Eignung bei Grundwasser**

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

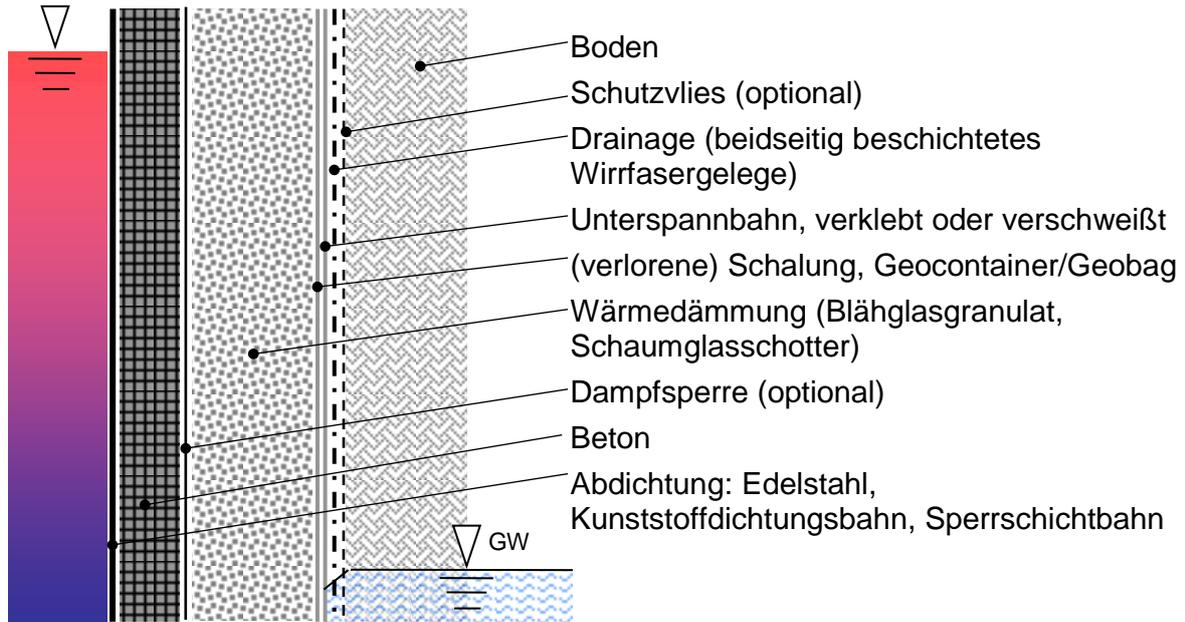
Im Falle von permanent anstehendem Grundwasser muss zusätzlich eine kostenintensive Unterwasserbetonsohle oder HDI-Sohle<sup>1</sup> in Betracht gezogen werden (vgl. [114]). Ohne Grundwasser bietet sich ggf. eine Bodenvernagelung an.

<sup>1</sup> Hochdruckinjektionssohle

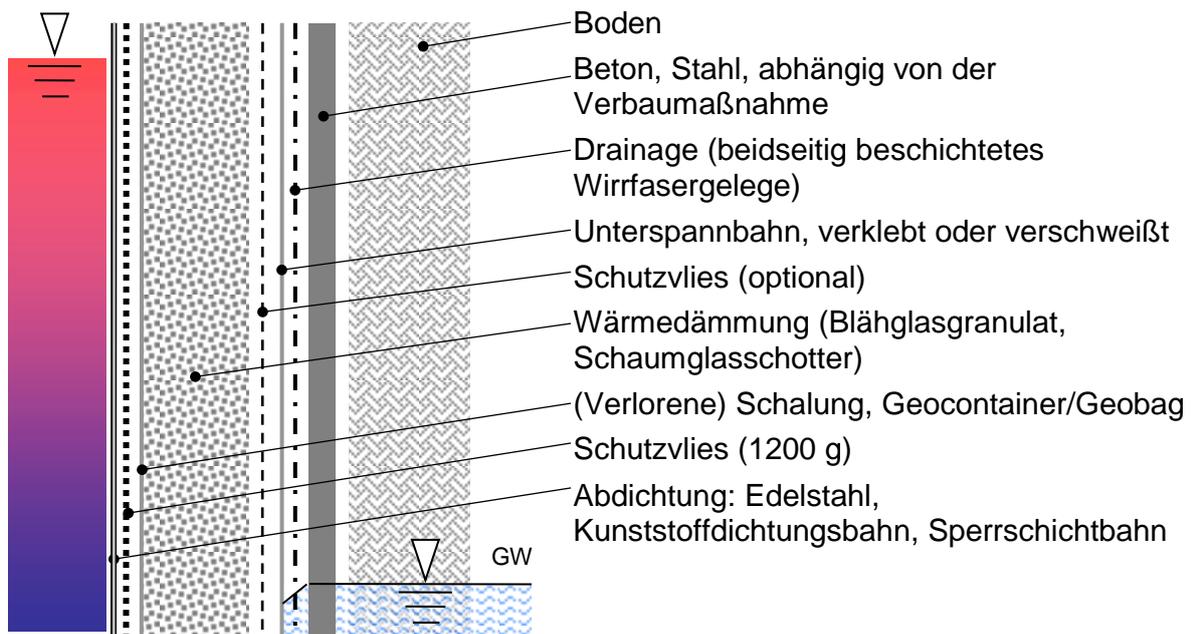
### 3.3 Wandaufbau

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 10 ein möglicher Wandaufbau mit außen liegender Wärmedämmung an einer vertikalen Böschung dargestellt. Im Falle von Erdbecken-Wärmespeichern befindet sich die Wärmedämmung innen, wie in Bild 11 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 [2] im Detail beschrieben wird, kann durchfeuchtete Wärmedämmung im Falle von zum Erdreich wasserdampfdiffusionsoffenem Wandaufbau z.B. durch eine diffusionsoffene aber wasserdicht verschweißte Unterspannbahn wieder austrocknen, wodurch die Wärmeleitfähigkeit wieder auf den ursprünglichen Wert sinken kann.



**Bild 10: Wandaufbau eines Behälter- Wärmespeichers mit Wärmedämmung außen mit äußerer Abdichtung für Anwendung in Grundwasser (GW)**



**Bild 11: Wandaufbau, Wärmedämmung innen bei Erdbecken-Wärmespeichern**

### 3.4 Abdeckung

In Bezug auf Wärmekapazität und Betriebsverhalten ist der Heißwasser-Wärmespeicher gegenüber den andern Typen vorteilhaft (siehe Kapitel 1.2). 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.

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 oder durch Fertigteile ausgeführt werden. Beispiele für Ortbetonbauweise sind die Wärmespeicherprojekten in Friedrichshafen [4], Hannover [6] und Crailsheim [54], [55]. Der Pufferspeicher in Crailsheim und beim aktuellen Projekt des 5 700 m<sup>3</sup> Wärmespeichers in München [54], [55] wurden Fertigteile verwendet. 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.

**Abgestützte tragende Abdeckung:**

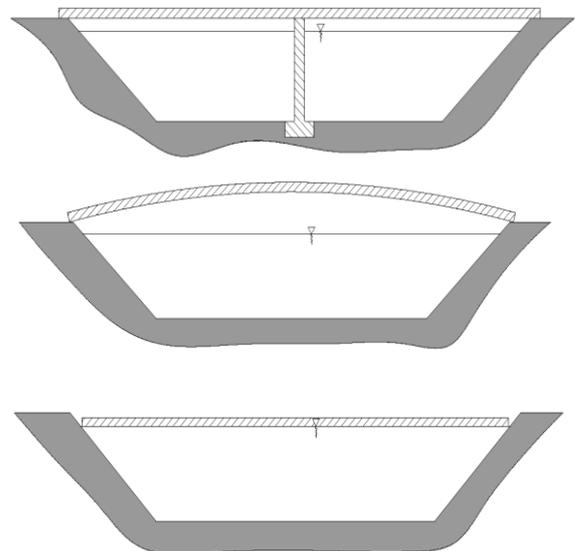
- Durchdringung der Abdichtung am Beckenboden
- hohe Last auf Säule(n)
- Wärmebrücke an Decke und Boden

**Selbsttragende Abdeckung:**

- aufwändige (teure) Konstruktion
- relativ hoher Aufbau (Stich)
- begrenzte Speichergröße (Oberfläche)

**Schwimmende Abdeckung:**

- einfache (kostengünstige) Konstruktion
- Speichergröße nahezu beliebig (bei aufschwimmender Abdeckung)
- eingeschränkte Begehbarkeit bzw. Befahrbarkeit
- Zugänglichkeit (Wartung/Sanierung)



**Bild 12: Arten von Abdeckungen**

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, muss die Dicke des Betonquerschnitts minimiert werden, da andernfalls sehr viel Bewehrung notwendig wäre. Stark bewehrter Beton ist entsprechend teurer. 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 zufriedenstellend gelöst werden. Beim Projekt mit schwimmender Abdeckung beim Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeicher in Marstal (DK, 2003 [14]) traten Undichtigkeiten bei einer Personenlochdurchführung auf. Zudem muss die damals ausgeführte Konstruktion in Bezug auf Regen- und Kondensatableitung optimiert werden. Das aktuellste Projekt mit schwimmender Abdeckung in Marstall [319] wurde eine verbesserte Variante einer schwimmenden Abdeckung ausgeführt. Betriebserfahrungen sind noch nicht vorhanden.

Am ITW, Uni Stuttgart, 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 (vgl. Abschlussbericht FKZ 0329607 E [2]). Diese Ausführungsvariante erfordert flexible Abdichtungsmaterialien, wodurch weitere technische Probleme entstehen, welche noch nicht zufriedenstellend 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. Abschlussbericht FKZ 0329607 E [2]). Schwimmende Abdeckungen, die auf dem Wasser installiert werden, können im

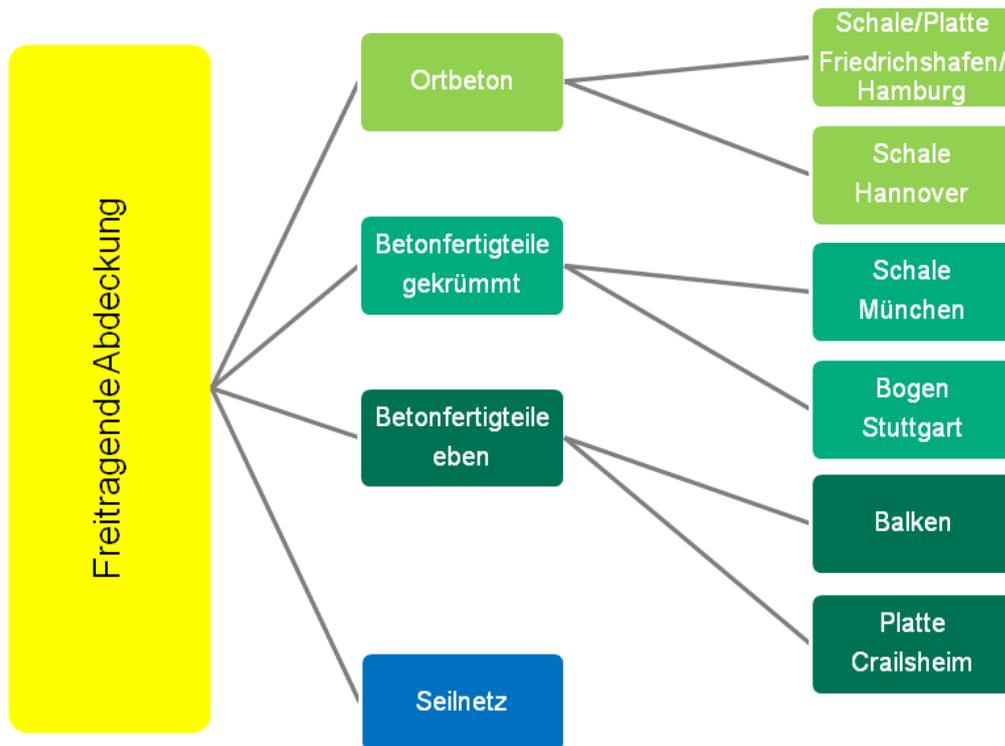
Gegensatz dazu mit Verbundfolien gefertigt werden (z.B. Verbund aus HDPE oder PP und Aluminium).

In Tabelle 8 ist eine Auswahl ausgeführter Abdeckungen von Forschungs- und Pilot-Wärmespeichern aufgelistet. Weitere alternative Bauformen und Details von schwimmenden Abdeckungen sind in [8] und in [117] zu finden. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass, wenn keine besonderen 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.

**Tabelle 8: Ausgeführte Abdeckungen von Forschungs- und Pilot- Langzeit-Wärmespeichern, Referenzen, siehe Tabelle 6 bzw. [118], [119], [120], [121], [122]**

Abdeckung	Projekt	V [m <sup>3</sup> ]	Land	Jahr	Bemerkung
Freitragende Abdeckung	Växjö	1 000	S	1987	Erdbecken
	Särö	640	S	1989	Stahlbehälter in Grube (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.)
	München	6 000	D	2006	Betonbehälter, vorgespannt
	Hamburg	4 000	D	2010	Stahlbehälter
Abgestützte Abdeckung	Rottweil	600	D	1994	Betonbehälter, 1 Säule
	Hamburg	4 500	D	1996	Betonbehälter, 6 Säulen
Schwimmende Abdeckung	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, gelagert auf 2 Querstreben, 4 Säulen
	Jülich	2 500	D	1996	Erdbecken, modular, 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
	Marstall	75 000	DK	2012	Erdbecken, auf Wasser Installation

Kostenreduktionspotential ergibt sich im Falle einer selbsttragenden Abdeckung mit möglichst, die ohne Baugerüst und Rüstturm aufgebaut werden kann (vgl. Abschlussbericht FKZ 0329607 E [2]). Eine dem Kies-Wasser-Wärmespeicher statisch vergleichbare Abdeckung für Heißwasser-Wärmespeicher erfordert jedoch einen nicht unerheblichen technischen und finanziellen Aufwand. Einen Überblick über technische Möglichkeiten gibt folgende Grafik:



**Bild 13: Übersicht über Arten von freitragenden Abdeckungen (Quelle: Lichtenfels)**

## 4 Materialien

Die Materialien, welche für den Bau von Erdbecken-Wärmespeichern eingesetzt werden, kommen mit der Ausnahme der Wärmedämmung hauptsächlich aus dem Deponie-, Straßen- oder Tunnelbau. Die so genannten Geokunststoffe (geosynthetics), wie Abdichtungsbahnen (Geomembranen), Geogitter, Geovlies und Geotextilien haben im Allgemeinen eine oder mehrere der folgenden Funktionen:

- Trennung,
- Filterung,
- Drainage,
- Bewehrung,
- Schutz und
- Abdichtung.

Eine umfangreiche Beschreibung der verschiedenen Geotextilien sowie deren mögliche Anwendungsgebiete ist in [123] gegeben. Beim Einsatz von Geokunststoffen muss, wie bei der Auswahl der Wärmedämmung und der Abdichtung, auf Einsatzgrenzen bezüglich (Dauer-)Temperaturbeständigkeit und Heißwasserverträglichkeit geachtet werden.

Eine detaillierte Untersuchung von Materialien für den Bau von Erdbecken-Wärmespeichern erfolgte bereits im Rahmen der sogenannten Mannheim-Studie [110]. Der Autor kam zum Ergebnis, dass keine geeigneten Materialien zu vertretbaren Kosten verfügbar sind. Weiterentwicklungen im Bereich der Dämmstoffe und vor allem bei den polymeren Werkstoffen machen jedoch eine Neubewertung notwendig.

Im Folgenden wird näher auf die wesentlichen Komponenten des Wandaufbaus, die Abdichtung und die Wärmedämmung, eingegangen. Im Vordergrund stehen dabei deren Qualität und die Eignung für den Einsatz in Langzeit-Wärmespeichern.

## 4.1 Wärmedämmung

Die Kenntnisse und Erfahrungen die im Laufe des Projekts bezüglich der Wärmedämmung gewonnen wurden, lassen sich gleichermaßen auf die Technologie der Erdbecken-Wärmespeicher (EB WSp) und der Behälter-Wärmespeicher (HW WSp) übertragen. Auch der Erdsonden-Wärmespeicher in Neckarsulm [125] und der Hybridspeicher in Attenkirchen [49], [50] sind nach oben hin wärmegeklämt. Der Erdsonden-Wärmespeicher in Crailsheim [54], [55], [56] wird ebenfalls im oberen Bereich mit Wärmedämmung gebaut. Somit lassen sich die Ergebnisse zumindest partiell auch auf die Erdsonden-Wärmespeichertechnologie übertragen. Nur Aquifer-Wärmespeicher (ATES), vgl. [126], [127] bzw. Rostock [128], Berlin [129] oder Neubrandenburg [130] und Kavernenspeicher (CTES) können aufgrund ihrer Bauart nicht wärmegeklämt werden (vgl. Tabelle 9).

**Tabelle 9: Einsatz von Wärmedämmung bei den unterschiedlichen Langzeit-Wärmespeichertechnologien**

	<b>Deckel</b>	<b>Wand</b>	<b>Boden</b>
HW-WSp	ja	ja	empfohlen
EB-WSp	ja	empfohlen	empfohlen
BTES	ja	nein	nein
ATES	nein	nein	nein
CTES	nein	nein	nein

Der Markt stellt eine Vielzahl von Dämmstoffen bereit. Der Boom 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 erheblich von den Anforderungen an Dämmstoffe für das Bauwesen.

Folgende Eigenschaften müssen vom Material erfüllt werden.

- Temperaturbeständigkeit kurzfristig bis 100 °C<sup>2</sup>, permanent bis 95 °C
- Langzeitbeständigkeit
- Druckbeständigkeit (auch bei Feuchtebelastung und hohen Temperaturen)

---

<sup>2</sup> Bei Wärmespeichern mit technischer Druckhaltung können auch höhere Temperaturen vorliegen, wie z.B. in Crailsheim mit 108 °C bei 3 bar.

- Beständigkeit sowie Unempfindlichkeit gegen Wasser und Wasserdampf (Hydrolyse)

Folgende Eigenschaften sind außerdem von Vorteil:

- gute Trocknungseigenschaften
- unempfindlich gegenüber Mikroorganismen und Nager
- gute Verarbeitbarkeit
- geringe Wärmeleitfähigkeit im trockenen sowie feuchten Zustand
- geringe spezifische Kosten
- „umweltschonend“

Die Kosten der einzelnen Materialien müssen im eingebauten Zustand verglichen werden. Dabei ist auch der gesamte Aufbau der Dämmung, Statik, Speicherabdichtung sowie Installation zu berücksichtigen. Zum Beispiel erfordert eine feuchteempfindliche Dämmung einen anderen Aufbau (z.B. Dampfsperre) als eine Dämmung, die unempfindlich gegenüber Feuchte ist. Bei einer mechanisch sehr stabilen aber vergleichsweise teureren Dämmung kann evtl. auf Schutzvliese verzichtet werden, somit kann der Gesamtaufbau mit dem teureren Dämmstoff trotz höherer spezifischer Dämmstoffkosten die wirtschaftlichste Variante sein.

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.

Die geforderten Eigenschaften unterscheiden sich je nach Einsatzort im Erdbecken-Wärmespeicher.

An die Bodendämmung werden die höchsten Anforderungen bezüglich Druckbeständigkeit dafür die geringsten bezüglich Temperaturbeständigkeit, gestellt. Dagegen muss die Dämmung der Abdeckung nur geringe Lasten abtragen können (abhängig vom Grad der Nutzung: Begehbarkeit, Befahrbarkeit), wird aber mit der höchsten Temperatur und mit der höchsten Dampfbelastung beaufschlagt.

Die Schichtdicke der Dämmung der Seitenwände sollte nach oben hin zunehmen, da im oberen Speicherbereich die höchsten Temperaturen vorzufinden sind. Die bezüglich Kosten und Wärmeverlusten optimale Wandstärke kann nur durch detaillierte transiente Berechnungen bestimmt werden, da diese stark von den Randbedingungen abhängt.

Die Verwendung einer Dämmstoffart für alle Bereiche hat den Vorteil, dass durch den Bedarf an größeren Mengen, ein geringerer spezifischer Preis erzielt werden kann. Gegen die Verwendung eines Dämmstoffs spricht, dass überall Kompromisse eingegangen werden müssen. Es gibt keinen „perfekten“ Dämmstoff.

Tabelle 10 fasst eine Auswahl am Markt erhältlicher Dämmstoffe mit jeweils den wichtigsten Eigenschaften, wie Lieferform (S: Schüttgut, P: Platte, V: Vlies, M: Matte, O: Ortschaum), Wärmeleitfähigkeit (WLF), Kosten, hygroskopische Eigenschaften und Druckfestigkeit, sowie Dauergebrauchstemperatur ( $T_{max}$ ) zusammen. Als geeignet erweisen sich unter einer großen Auswahl nur fünf Dämmstoffe, wie die Bewertung in Tabelle 10 zeigt.

**Tabelle 10: Übersicht der gängigen Dämmstoffe (S: Schüttgut, P: Platte, V: Vlies, M: Matte, O: Ortschaum)**

Dämmstoff	Typ	WLF <sub>tr,10</sub> / [W/(m K)]	Kosten / [€/m <sup>3</sup> ] <sup>2)</sup>	hygr./ druckf. <sup>5)</sup>	T <sub>max</sub> / [°C]	Wertung	Quelle
natürlich, anorganisch							
Blähton	S	0.08 – 1.2 <sup>3)</sup>	140 – 190	ja/ja	750	bedingt geeignet	[132]
Perlite	S	0.045 – 0.07 <sup>3)</sup>	140	ja/ bedingt	100	ungeeignet	[131]
Naturbims	S	0.06 – 0.08 <sup>3)</sup>	170	ja/bedingt	n/a	ungeeignet	[132]
Vermikulite	S	0.06 – 0.07 <sup>3)</sup>	90	stark/bedingt	n/a	ungeeignet	[132]
natürlich, organisch <sup>1)</sup>							
Zellulosefaser	S	0.04-0.045	50-75	ja/nein	n/a	ungeeignet	[132]
Holzwoolleichtbauplatte	P	0.09	390	ja/nein	n/a	ungeeignet	[132]
Baumwolle	S/P	0.04	180	ja/nein	n/a	ungeeignet	[132]
Hanfaser	S/V/M	0.04 – 0.08 <sup>3)</sup>	120/135/390	ja/nein	n/a	ungeeignet	[132]
Schafwolle	V	0.04	85	ja/nein	n/a	ungeeignet	[132]
synthetisch, organisch							
EPS <sup>4)</sup>	P	0.04	150-210	nein/bedingt	< 85	ungeeignet	[131]
XPS <sup>4)</sup>	P	0.04	270	nein/bedingt	< 75	ungeeignet	[131]
PUR/PIR	P/O	0.025-0.03	180-260	nein/bedingt	<110	geeignet	[131]
Polyesterfaser	M	0.035-0.045	150	nein/nein	n/a	ungeeignet	[131]
Keramikfaser	P	0.035-0.045	150	nein/ja	n/a	ungeeignet	[131]
Ultratect	P	n/a	> 1000	ja/ja	210	ungeeignet	[408]
Elastomerdämmung	P	0.04	140	nein/nein	100	ungeeignet	[420]
synthetisch anorganisch							
Blähglasgranulat	S	0.06 - 0.09	80-140	nein/ja	700	geeignet	[131]
Schaumglasschotter	S	0.06-0.08	70-85	nein/ja	450	geeignet	[131]
Foamglas	P	0.04	350-400	nein/ja	400	geeignet	[132]
Mineralwolle (Steinwolle)	P/M	0.04	160	bedingt/bedingt	250	bedingt geeignet	[131]
Kalziumsilikat	P	0.05-0.065	800	n/a	n/a	ungeeignet	[132]
Schaumbeton	P/O	0.04 – 0.2	<100	nein/ja	1700	geeignet	[423]
Sonstige							
VIP (Vakuumdämmung)	P	0.004	>2000	nein/nein	60	bedingt geeignet	[131]

1) Auswahl

2) Schätzung, Stand 2004, ohne MwSt., ohne Lieferung

3) Je nach Rohdichte / Körnung

4) Perimeterdämmung

5) hydr.: hygrische Eignung, druckf.: ausreichende Druckfestigkeit

Folgende Dämmstoffe wurden detaillierter untersucht (siehe dazu auch [2], [3])

#### Schüttgut

- Expandierte Perlite (Perlite)
- Blähglasgranulat (Poraver, Liaver)
- Schaumglasschotter (Millicell, Misapor, Technopor)
- Blähton- Schüttung (Leca, Liapor)

#### Platten

- Schaumglas (Foamglas)
- Mineral-/Steinwolle (Rockwool)
- Polyurethan-Hartschaum (PUR/PIR) (Puren, Bauder)
- Expandierter Polystyrol-Partikelschaum (EPS) (Ursa, BASF)
- Extrudierter Polystyrol-Hartschaumstoff (XPS) (DOW, Steinbacher)

In Bild 14 sind einige Dämmstoffschüttungen dargestellt.



EGG 2-4 Typ I – 200 kg/m<sup>3</sup>



EGG 2-4 Typ II – 190 kg/m<sup>3</sup>



EGG 4-8 Typ II – 185 kg/m<sup>3</sup>



EGG 8-16 Typ II 150 kg/m<sup>3</sup>



EP 1 – 100 kg/m<sup>3</sup>



ECG 4-8 Typ I – 270 kg/m<sup>3</sup>



ECG 4-8 Typ I - 380 kg/m<sup>3</sup>



ECG 1-4 Typ I - 340 kg/m<sup>3</sup>



ECG 1 Typ II 300 kg/m<sup>3</sup>



FGG 0-20 Typ I – 155 kg/m<sup>3</sup>



FGG 0-30 Typ I – 160 kg/m<sup>3</sup>



FGG 0-60 Typ I – 150 kg/m<sup>3</sup>



FGG 0-90 Typ I – 150 kg/m<sup>3</sup>



FGG 10/50 Typ II – 195 kg/m<sup>3</sup>



FGG 10/50 Typ III – 185 kg/m<sup>3</sup>

**Bild 14: Untersuchte Dämmstoffschüttungen mit Korngrößenverteilung und Schüttdichte; EGG: Blähglasgranulat, EP: Perlite, ECG: Blähton, FGG Schaumglasschotter**

Blähgas und Schaumglas werden zu weit über 95% aus recyceltem Glas hergestellt, wodurch beide Materialien als umweltfreundliche Materialien eingestuft werden können (vgl. [134], [135]). Für die verschiedenen Speicherbereiche (Deckel, Boden, Wand) werden folgende Dämmstoffe empfohlen:

**Tabelle 11: Empfohlene Dämmstoffe**

Abdeckung	Blähglasgranulat, Schaumglasschotter, Blähton, PUR/PIR, Steinwolle
Seitenwand	Blähglasgranulat, Schaumglasschotter, Blähton, PUR/PIR
Boden	Schaumglasschotter, Schaumglasplatten (hohe Anforderung an Untergrund, mech. Beanspruchung kann zu Kantenbrüchen und Plattenrissen führen), Blähglasgranulat, Blähton

## 4.2 Abdichtung

Abdichtungsbahnen, die in Erdbecken-Wärmespeichern eingesetzt werden, müssen folgende Kriterien erfüllen:

**Tabelle 12: Anforderungen an die Abdichtung**

<b>zwingend erforderlich</b>	<b>Bemerkung</b>
Wasserdicht	
Temperaturbeständig	max. 95 °C, Dauer 90 °C
Hydrolysebeständig	Wasserkontakt
Langzeitstabil	mind. 20 bis 30 Jahre
Schweißbar	Heißluft oder Heizkeil, Extrusion
Verfügbar	auch in klein(er)en Mengen
<b>erwünscht</b>	<b>Bemerkung</b>
Wasserdampfdicht	< 0.001 g/m <sup>2</sup> d bei 95 °C
Verarbeitbar	bei allen Außenbedingungen
Robust	(Weiter-) Reißfestigkeit, Reißdehnung, Durchstoßfestigkeit
Kostengünstig	Kosten für montierte und Leckage geprüfte Abdichtung
Sanierbar	Schweißbar auch nach Einsatz

Tabelle 13 zeigt, dass die Mehrzahl der ausgeführten Behälterspeicher mit Edelstahl, dagegen die Mehrheit der Erdbecken-Wärmespeicher mit Kunststoffdichtungsbahn (KDB) abgedichtet wurde.

**Tabelle 13: Abdichtungen realisierter (saisonaler) Behälter- und Erdbecken-Wärmespeicher, Forschungs- und Pilotprojekte**

	Behälter (12)	Erdbecken (21)
Edelstahl (10)	7	4
KDB/Polymer (16)	3	14
Andere, wie Ton, Bentonit, HL-/WU-Beton (5)	2	3

#### 4.2.1 Stahl, Edelstahl

Stahl und Edelstahl (VA), als Folie oder Blech, wird im Behälterbau eingesetzt. Die Vorteile sind absolute Wasser- und Wasserdampfdiffusionsdichtigkeit sowie uneingeschränkte Heißwasserverträglichkeit. Die Temperaturbeständigkeit und Langzeitbeständigkeit ist polymeren Abdichtungsbahnen überlegen. Nachteilig sind jedoch die hohen Kosten sowie die Gefahr der Oxidation. Durch die geringe Bahnbreite bzw. Plattengröße von 1.5 m sind im Vergleich zu Polymerbahnen viele Schweißnähte auszuführen. Demgegenüber sind einige Polymerbahnen in 5 bzw. 6 m Breite erhältlich.

Um Oxidation zu vermeiden, müssen die Schweißnähte passiviert werden. Für das Fügen stehen zwei Verfahren zur Verfügung.

Rollnahtschweißverfahren

Merkmal: Dicke der Bahn: 0.5 mm, Kosten für installierten qm: 40-50 €<sup>3</sup>

Schutzgasschweißverfahren

Merkmal: Dicke der Bahn: ~2 mm, Kosten für installierten qm: >100 €

Die Abdichtung des Behälter-Wärmespeichers in Rottweil wurde mit dem Rollnahtschweißverfahren ausgeführt. Aufgrund der schlechten Erfahrungen bezüglich Dichtigkeit, siehe Kapitel Leckagen, wurden zumindest in Deutschland alle weiteren Wärmespeicher mit dem Schutzgasschweißverfahren ausgeführt. Die

---

<sup>3</sup> Aufgrund der stark steigenden Edelstahlpreise können die Kosten deutlich nach oben variieren

Schweißnähte werden mit dem Farbeindringverfahren bzw. mit der Saugglocke geprüft.

#### 4.2.2 Mineralische Dichtungsbahn

Als mineralische Abdichtung sind neben verdichtetem Ton (vgl. Erdbecken-Wärmespeicher in Ottrupgaard und Berlin) Natriumbentonit bzw. Calciumbentonit erhältlich.

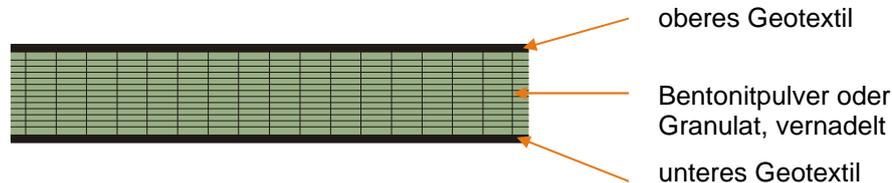
Der Markt stellt eine Vielzahl an Bentonitmatten bzw. geosynthetischen Tondichtungsbahnen (GTB) bereit. Eine Auswahl an Produkten und Herstellern ist in Tabelle 14 dargestellt:

**Tabelle 14: Auswahl am Markt erhältlicher Bentonitmatten**

Hersteller	Produkt	Aufbau	Verbund
Naue	Bentofix	Geotextil/Bändchengewebe / pulverisierter bzw. granulierter natürlicher Natriumbentonit / Vliesstoff	vernadelt
Huesker	NaBento	Geotextil / pulverisierter natürlicher bzw. (natriumaktivierter) Calcium-Bentonit / Geotextil	vernäht
CETCO	Bentomat	Vliesstoff / granulierter natürlicher Natrium-Bentonit / Gewebe	vernadelt
CETCO	Claymax	Kunststoffolie / granulierter natürlicher Natrium-Bentonit	verklebt/ verklebt + vernäht
GSE	gundseal	Kunststoffolie / granulierter natürlicher Natrium-Bentonit	verklebt
Rawell	FraDimat	Geotextil / vorhydratisierter, polymymermodifizierter natürlicher Natrium- bzw, natriumaktivierter Calcium-Bentonit	verklebt
Laviosa	Geobent	Geotextil / granulierter bzw. pulverisierter natürlicher Natriumbentonit oder natriumaktivierter Calciumbenonit / Geotextil	verklebt/ verklebt + vernäht
Linteco	Linbento	Gewebe-Vlies / natürlicher Natriumbentonit oder natriumaktivierter Calciumbenonit / Vliesstoff	thermisch/ mechanisch

Hinter dem Namen Bentofix der Firma Naue verbirgt sich eine Reihe von Produkten. Für die Abdichtung eines Erdbecken-Wärmespeichers ist die BFG5000 am besten geeignet. Diese wird durch spezielle temperaturbehandelte Widerhakennadeln vernadelt. Die BFG5000 kann dadurch hohe Scherkräfte in verschiedene Richtungen aufnehmen, weshalb sich die BFG5000 besonders gut zum Einbau in steilen Böschungen eignet [419]. Zudem ist das untere Trägergeotextil der BFG5000 in sich

selbst vernäht. Das obere Geotextil ist zusätzlich zur eigentlichen Bentonitpulverschicht in der Matte noch mit weiterem Bentonitpulver angereichert.



**Bild 15: Aufbau der Bentonitmatte BFG5000 von Naue**

Dieser Aspekt wirkt sich positiv auf die Dichtungseigenschaften aus. Die Matten können ohne Einstreuen von zusätzlichem Bentonitpulver überlappend verlegt werden. In Tabelle 15 sind die wichtigsten technischen Daten der BFG5000 zusammengefasst.

**Tabelle 15: Technische Daten von BFG5000 [419]**

Technische Daten	Wert	Einheit
Flächengewicht gesamt	5500	g/m <sup>2</sup>
Flächengewicht Deckvliesstoff	300	g/m <sup>2</sup>
Flächengewicht Bentonitlage	5000	g/m <sup>2</sup>
Flächengewicht Trägergeotextil	200	g/m <sup>2</sup>
Schichtdicke gesamt	7	Mm
Höchstzugkraft mg	20	KN/m
Höchstzugkraft cmd	11	KN/m
Dehnung bei Bruch	10	%
Dehnung bei Bruch cmd	5	%
Verbundfestigkeit (DIN 10319)	60	N/(10 cm)
Verbundfestigkeit (ASTM D 6496)	360	N/m
Stempeldruckkraft	2500	N
kf-Wert (DIN 18130)	5E-11	m/s
Permittivität (ASTM D 5887)	5E-9	1/s
Index Flux	5E-9	m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> s)
Wasseraufnahme (DIN 18132, nach 24h)	600	%
Quellvolumen	25	ml/2g
Fluid Loss	18	l
Wassergehalt nach 5h bei 105 °C	15	%
Montmorillonitgehalt	90	%
Methylenblauerbrauch	300	mg/g
Rollenbreite	5	m
Rollenlänge	40	m
Überlappungsbereich	30	cm

Der Vorteil von Bentonitbahnen ist, dass diese als breite Bahnen erhältlich sind, die überlappt verlegt werden. Somit ist keine Verschweißung notwendig. Zudem sind

Bentonitbahnen umweltfreundlich. Jedoch überwiegen die Nachteile. Es ist eine Auflast z.B. durch Kies oder Sand notwendig, wodurch der Einsatz für Heißwasser-Wärmespeicher nicht möglich ist. Die Wasser- und Wasserdampfdurchlässigkeit ist für den Einsatz als innere Abdichtebene zu hoch. Als äußere Abdichtung gegen Grundwasser ist der Einsatz jedoch denkbar, vgl. Kapitel 3.3.

#### **4.2.3 Bituminöse Abdichtungen, Asphaltbeton**

Erfahrungen mit bituminösen Abdichtungen gibt es aus dem Flachdachbau sowie den Disziplinen Talsperrenbau, Pumpspeicherkraftwerk- sowie Trinkwasserbehälterbau. Jedoch ist ein Einsatz bei hohen Temperaturen nicht möglich. Ebenso ist Asphaltbeton trotz einiger Vorteile (viskoelastisches Material, geringeres Risiko der Rissbildung bei Setzungen, Wirtschaftlichkeit) als Abdichtungsmaterial von Wärmespeichern nicht möglich, da Diffusionsdichtigkeit sowie die Langzeittemperaturbeständigkeit bei Heißwasserkontakt nicht gegeben ist.

#### **4.2.4 Kunststoffdichtungsbahnen**

Die Auswahl am Markt erhältlicher Polymere ist kaum überschaubar. Die Anzahl von polymeren Materialien, die für Abdichtungsbahnen geeignet sind, ist wesentlich geringer. Dennoch kann eine Vollständigkeit der Auflistung nicht erreicht werden. Die folgend genannten Materialien erfüllen nicht alle die geforderten Kriterien, stellen aber dennoch Alternativen dar, bzw. wurden bereits in Erdbecken-Wärmespeichern mangels besserer Alternativen eingesetzt.

Zusätzlich zur inneren Abdichtung werden auch Regenschutzfolien und Abdichtungen gegen Oberflächen- und Schichtenwasser bzw. Grundwasser benötigt. Dafür geeignete Bahnen sind diffusionsoffen und dennoch wasserdicht (sogenannte Unterspannbahnen). Diese werden auch in diesem Kapitel genannt.

Wie bereits erwähnt, gibt es keine absolut dampfdichte polymere Abdichtungsbahn. Somit muss eine Abdichtung stets aus einer Kombination aus wasserdicht verschweißter Bahn und dampfdicht überlappend verlegter, mit Aluminium oder

Edelstahl beschichteter oder kaschierter Bahn sein. Schweißbare Verbundfolien stellen die konsequente Weiterentwicklung dar.

**Tabelle 16: Vergleich flexibler Kunststoffdichtungsbahnen**

EIGENSCHAFTEN	HDPE	LLDPE	PVC	EPDM	EIA	CSPE-R	FPP	GCL
<b>CHEMISCHE EXPOSITION</b>	Sehr gut	Gut	Befriedigend	Gut	Sehr gut	Sehr gut (wenn vernetzt)	Sehr gut	Befriedigend
<b>KOHLENWASSERSTOFF EXPOSITION</b>	Gut	Gut	Befriedigend	Gut	Sehr gut	Gut (wenn vernetzt)	Gut	Schwach
<b>BEWITTERUNG (UV EXPOSITION)</b>	Excellent	Befriedigend	Schwach	Sehr gut	Sehr gut	Sehr gut (wenn vernetzt)	Sehr gut	Schwach
<b>THERMISCHE STABILITÄT</b>	Schwach	Schwach	Gut	Sehr gut	Gut	Sehr gut	Gut - Sehr gut (wenn verstärkt)	Gut
<b>ZUGBELASTUNG</b>	Gut	Gut	Gut	Gut	Sehr gut	Sehr gut	Gut - Sehr gut (wenn verstärkt)	Gut
<b>EINAXIALES DEHNUNGSVERMÖGEN</b>	Sehr gut	Sehr gut	Gut	Gut	Befriedigend	Gut	Sehr gut	Befriedigend
<b>MULTIAXIALES DEHNUNGSVERMÖGEN</b>	Schwach	Sehr gut	Sehr gut	Gut	Befriedigend	Gut	Sehr gut	Befriedigend
<b>DURCHSCHLAGFESTIGKEIT</b>	Befriedigend	Sehr gut	Sehr gut	Gut	Sehr gut	Gut	Gut	Gut
<b>ROBUSTHEIT BEI INSTALLATION</b>	Befriedigend	Befriedigend	Sehr gut	Sehr gut	Gut	Gut	Sehr gut	Gut
<b>FÜGE VERFAHREN</b>	Thermisch / Sehr gut	Thermisch / Sehr gut	Thermisch oder mit Lösungsmittel Fügbar / Gut	Klebeband / Good	Thermisch / Sehr gut	Thermisch oder mit Lösungsmittel Fügbar / Gut	Thermisch / Sehr gut	Überlappung
<b>SANIERBARKEIT</b>	Gut	Gut	Gut	Gut	Gut	Schwach - Klebstoffe notwendig	Sehr gut	n/a
<b>SPANNUNGSRISSBILDUNG</b>	Befriedigend	Gut	Tritt nicht auf	Tritt nicht auf	Tritt nicht auf	Tritt nicht auf	Tritt nicht auf	Tritt nicht auf
<b>ANPASSUNGSFÄHIGKEIT (INSTALLATION)</b>	Befriedigend	Sehr gut	Gut	Gut	Gut	Gut	Sehr gut	n/a
<b>KOSTEN PRO ROLLE</b>	Niedrig	Niedrig / Mittel	Mittel	Mittel / Hoch	Hoch	Hoch	Mittel	Mittel

n/a= not available

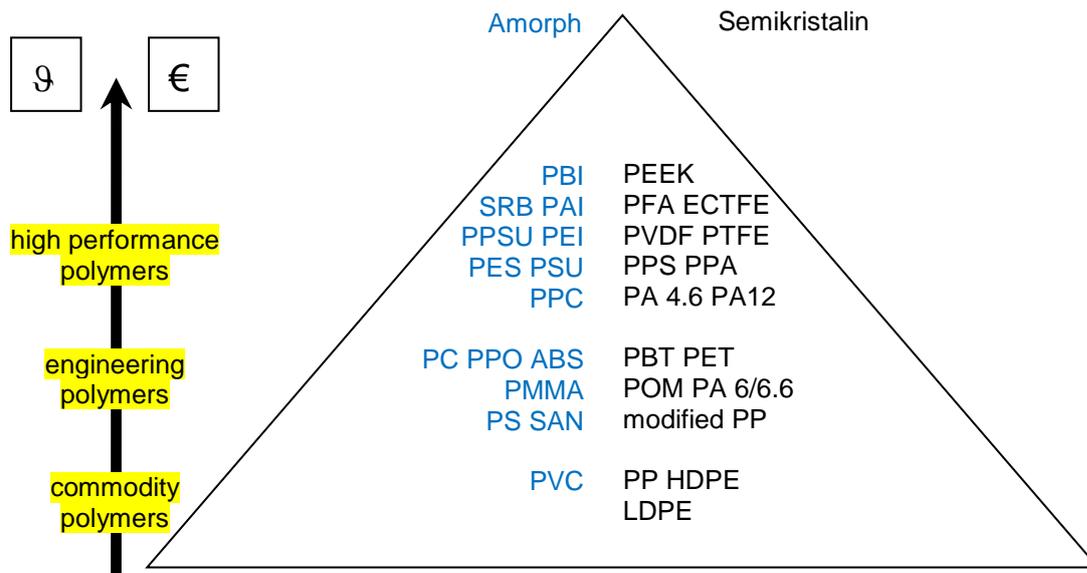
Da es keine Abdichtungsbahnen gibt, die speziell für den Einsatz in Wärmespeichern entwickelt wurden, muss auf Materialien, die in anderen Bereichen eingesetzt werden zurückgegriffen werden. Vor allem die hohen Ansprüche bezüglich Temperaturbeständigkeit werden in der Regel bei den eingesetzten Materialien verwandter Technologien und Sektoren nicht erfüllt.

**Tabelle 17: Verwandte Technologien**

Bereich	Material	Methode	Quelle
Solarteich	Ton, Bentonit, HDPE, PP, XR-5	Schweißmethoden	[133],[136],[137],[138],[139],[140],[141],[142]
Deponiebau	HDPE, PP	Schweißmethoden, Leckageprüfung	[143],[144],[145],[146]
Tunnelbau	HDPE, PP	Schweißmethoden	[147]
Rückhaltebecken, Pool, Teich	HDPE, PP, PVC, FPO, TPE, Elastomere, Bentonit	Schweißmethoden, Leckageprüfung, Abdeckung	[148],[149],[150],[151]
Dammbau	HDPE, PP	Schweißmethoden, Leckageprüfung	[152],[154]
Kanal	Ton, Bentonit, PVC, HDPE, PP	Leckageprüfung	[153]
Flachdach	Elastomere Membranen, FPO, TPE, PVC	Schweißmethoden, Leckageprüfung, Dampfsperre	[155],[156]
Auffangbecken, Chemiebehälterbau	HDPE, PP, FPO	Schweißmethoden, Leckageprüfung	[391]
Gas und Dampfspeicher	Elastomere Membranen	vorgefertigte Bahnen, Dampfsperre	[392]
Membran Dächer	Fluorpolymere (ETFE)	Abdeckung	[393]
Korrosionsschutz	Elastomere	Dampfsperre	[157]
Rohrleitung	PIB, PEX, HMPE, PE-RT	-	[158],[159]

Polyester und PC sind nicht hydrolysebeständig. Technische Kunststoffe, wie PSU oder PA scheiden aufgrund der sehr hohen Kosten aus. Höherwertige Fluorpolymere wie PTFE, PFA, THV sind noch temperaturbeständiger oder chemikalienbeständiger, sind aber entsprechend sehr teuer. Die Preise von technischen Kunststoffen liegen teilweise deutlich über den Preisen von Edelstahl.

Eigenschaften von Kunststoffen sind z.B. in [160] zu finden.



**Bild 16: Polymer Performance Pyramide**

Eine Auswahl mit Einschränkungen geeigneter polymerer Abdichtungsbahnen ist in Tabelle 18 gegeben.

**Tabelle 18: Auswahl an Kunststoffdichtungsbahnen**

Kunststoff	Hersteller	max. Temperatur	Bemerkung
<b>Kautschuk</b>			
Butyl (IIR)	Saarnova, Trelleborg, Contitech	bis ~ 70 °C	Plane (bis 2500 m <sup>2</sup> vorkonfektioniert) Kombination aus EPDM und IIR denkbar, eingeschränkt schweißbar, gute Langzeitbeständigkeit, max. Dauergebrauchstemperatur ausreichend, geringer Diffusionswiderstand
EPDM	Saarnova, Trelleborg, Contitech	95 °C, aber unbestätigt	
<b>TPE</b>			
Santoprene	AES	> 95 °C, aber unbestätigt	flexibel, ggf. gute Langzeitbeständigkeit, max. Dauergebrauchstemperatur ausreichend, geringer Diffusionswiderstand
Trefsin	AES		
<b>FPO</b>			
MPG	Sarnafil	~ 80 °C	flexibel, nicht überschaubare Vielfalt an TPE/ FPO am Markt, geringe Langzeitbeständigkeit, geringe max. Dauergebrauchstemperatur geringer Diffusionswiderstand
Lucobit	BASF		
Extrapol	Schedetal		
<b>Flurpolymer</b>			
ETFE	Nowofol/ Dupont	> 150 °C	ggf. ohne DS möglich, kaum verschweißbar, hohe max. Dauergebrauchstemperatur, Verarbeitung auf der Baustelle schwierig, Kosten
PVDF	Symalit	150 °C	wie ETFE, aber geringere Festigkeit
<b>Polyolefine</b>			
PP	GSE, Basell	100 °C (140 °C)	Langzeitbeständigkeit und max. Dauergebrauchstemperatur ggf. ausreichend Eigenschaften durch Compoundierung (und Vernetzung) anpassbar mittlerer Diffusionswiderstand, DS notwendig
PEHD	GSE, Agru	70 – 80 °C (90- 120 °C)	
PE-RT	n/a	n/a	Langzeitbeständigkeit und max. Dauergebrauchstemperatur ggf. höher, kaum Erfahrung, ggf. beschleunigte Alterung an Schweißverbindung
PE-X	n/a	120	Langzeitbeständigkeit und max. Dauergebrauchstemperatur ggf. höher, Erfahrungen im Rohrbau Verarbeitbarkeit, Verschweißbarkeit, stark eingeschränkt ggf. ohne DS möglich nachträgliche Vernetzung ggf. möglich
<b>Sonstige</b>			
XR-5 (PVC + Elvaloy)	Seaman	95 °C Herstellerangabe	1000 m <sup>2</sup> Plane vorkonfektionierbar, Langzeitbeständigkeit und max. Dauergebrauchstemperatur ggf. ausreichend geringer Diffusionswiderstand: DS notwendig, Probleme in El Paso Solar Pond
<b>Spritzkunststoff</b>			kein geeignetes Produkt gefunden

DS: Dampfsperre, TPE: Thermoplastische Elastomere, FPO: Flexible Polyolefine

Weitere Elastomere wie SBR, CIIR, HIIR, BIIR haben ähnliche mechanische und physikalische Eigenschaften wie Butyl, sind aber dampfdiffusionsoffener. Epoxid oder Polyester Harz ist eine weitere Alternative. Polyester Harz wurde als GFK-Sandwich im Forschungsspeicher in Ilmenau eingesetzt [45].

Elastomere zeigen generell ein besseres Alterungsverhalten und lassen höhere Dauergebrauchstemperaturen zu als Polyolefine. Jedoch ist ihr Einsatz als Abdichtung erdvergrabener Langzeit-Wärmespeicher nur begrenzt möglich, da keine uneingeschränkte Schweißbarkeit gegeben ist. Ein großer Vorteil ist die sehr hohe Dehnbarkeit (Reißdehnung). Dadurch ist das Material sehr biegsam und flexibel. Dies ermöglicht die Vorfertigung großer Planen (bis zu 5000 m<sup>2</sup>), die zusammengerollt (vgl. Bild 17) auf die Baustelle geliefert werden. Flexible Bahnen werden im Speziellen für die aufschwimmende Abdeckung benötigt. Nachteilig ist die geringe Diffusionsdichtigkeit von Polymeren (vgl. Abschlussbericht FKZ 0329607 E).



**Bild 17: EPDM im Außenlabor: Links, Lieferung als vorgefertigte Plane, Mitte: ausbreiten im Außenlabor, rechts Fügerand mit dem das Verschweißen ermöglicht wird.**

In Tabelle 20 ist abschließend eine Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile von Edelstahlabdichtung (VA) und Kunststoffdichtungsbahn (KDB) gegeben. Sperrschichtbahnen haben die Vor- und Nachteile der jeweiligen KDB, sind jedoch wasserdampfdicht. Der Preis einer Sperrschichtbahn liegt deutlich über der entsprechenden Kunststoffdichtungsbahn. Drei Verbundfolien wurden untersucht, vgl. Tabelle 19.

**Tabelle 19: Verbundfolien**

PE-PA-AI-PA	Wipak	eingeschränkte Verschweißbarkeit, Verarbeitung auf der Baustelle schwierig, Alterungsverhalten ungenügend (Delaminierung)
PP-AI-PP	Féron	Sperrschichtbahn, verschweißbar, geringe Robustheit, UV-Beständigkeit ungenügend
PEHD-AI- PEHD	Agru	Sperrschichtbahn, verschweißbar, gute Eignung,

Generell muss festgehalten werden, dass gegenwärtig keine vollständig geeigneten Abdichtungsmaterialien verfügbar sind. Derzeit müssen bezüglich Alterung und maximaler Dauergebrauchstemperatur Einschränkungen hingenommen werden.

**Tabelle 20: Gegenüberstellung VA und KDB**

VA	KDB	Sperrschichtbahn
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Temperaturbeständigkeit</li> <li>+ Alterungsbeständigkeit</li> <li>+ Diffusionsdichtigkeit</li> <li>+ Robustheit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Lieferform (5 – 7m Bahn)</li> <li>+ Schweißverfahren/ Schweißgeschwindigkeit</li> <li>+ Leckageprüfung</li> <li>+ Kosten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Diffusionsdichtigkeit</li> <li>+ Schweißverfahren/ Schweißgeschwindigkeit</li> <li>+ Robustheit</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Korrosion (Passivierung)</li> <li>- Schweißverfahren</li> <li>- Lieferform (Platte)</li> <li>- Untergrundbeschaffenheit</li> <li>- Preis</li> <li>- (Primärenergieeinsatz)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperaturbeständigkeit</li> <li>- Alterungsbeständigkeit</li> <li>- Diffusionsdichtigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperaturbeständigkeit</li> <li>- Alterungsbeständigkeit</li> <li>- Kosten</li> <li>- Lieferform (1.5 m Bahn)</li> </ul>

#### 4.2.5 Alterung von Kunststoffdichtungsbahnen

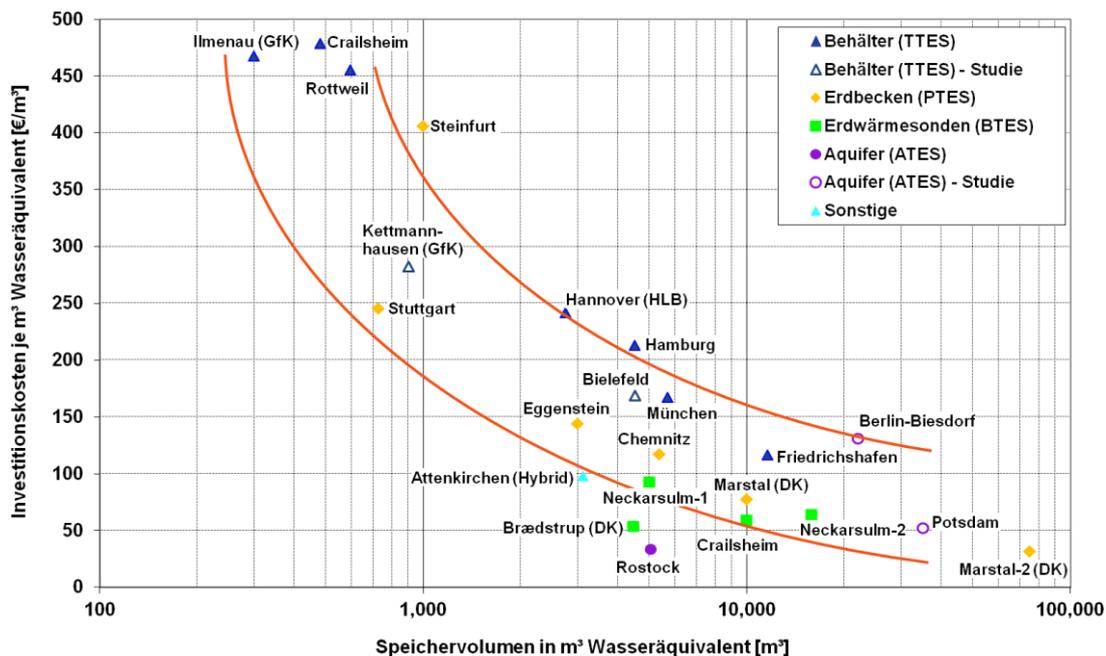
Polymere wurden bereits in vielen Forschungs- und Pilotprojekten eingesetzt (vgl. Kapitel 2). Die Erfahrungen aus den Pilotprojekten reichen jedoch nicht aus, um verlässliche Aussagen über die Lebensdauer treffen zu können. Zum einen ist durch die geringe Anzahl der Projekte die Datenbasis sehr gering und zum anderen werden unter realen Bedingungen längere Beobachtungsperioden benötigt, um belastbare Aussagen treffen zu können. Einige der älteren Pilot- und Forschungsprojekte sind nicht mehr in Betrieb (Studsvik, Lambohov, Stuttgart, Berlin, Chemnitz). Bei anderen ist das Temperaturniveau niedriger, als bei neuen Projekten gefordert (z.B. Steinfurt, Marstal (SW)).

Die Nutzungsdauer von polymeren Abdichtungen ist stark abhängig vom umgebenden Medium (Wasser/Luft) und von der Temperatur. Systematische

Untersuchungen zur Ermittlung der Lebensdauer polymerer und elastomerer Abdichtungsbahnen für den Einsatz in Wärmespeichern wurden bislang nicht durchgeführt. Bisherige Untersuchungen [110] bis [170] wurden unter ungeeigneten bzw. nur bedingt geeigneten Auslagerungsbedingungen (Temperatur, Medium, Dauer) durchgeführt. Eine Übertragbarkeit bzw. Vergleichbarkeit ist somit nicht bzw. nur eingeschränkt gegeben. Zudem wurden jeweils nur einzelne Materialien untersucht. Die Ergebnisse lassen jedoch erkennen, dass für die untersuchten polymeren Materialien unter den geforderten Bedingungen (Temperatur, Medium: Wasser/Luft) eine Lebensdauer von über 20 Jahren nicht in jedem Fall gewährleistet werden kann.

## 5 Wirtschaftlichkeit

Die Investitionskosten bisher realisierter Großwärmespeicher sind als Funktion des Speichervolumens in Bild 18 zusammengefasst.



**Bild 18: Investitionskosten bisher realisierter Großwärmespeicher als Funktion des Speichervolumens (Quelle: Solites)**

Für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit ist die Einbindung des Wärmespeichers in das System entscheidend. Der wirtschaftlich optimale Speichernutzungsgrad und somit das erforderliche Wärmedämmniveau hängt von der Zyklenzahl und vom

Temperaturniveau (max., min.) und damit vom System ab. Der Speichernutzungsgrad sollte jedoch in der Größenordnung von größer als 80% liegen.

Für eine überschlägige Beurteilung der Wirtschaftlichkeit z.B. auf Basis der Annuitätenmethode werden folgende Annahmen getroffen:

Der Wärmespeicher wird auf eine max. Speichertemperatur von 90 °C beladen und bis auf eine minimale Speichertemperatur von 40 °C entladen. Die spezifische Wärmespeicherkapazität je Zyklus beträgt somit 58 kWh/m<sup>3</sup>WÄ. Der Wärmespeicher wird mit einer Zyklenzahl von 1 betrieben, d.h. der Wärmespeicher wird jährlich einmal be- und entladen (vgl. Kapitel 3.1).

Folgende Kosten werden angenommen:

**Tabelle 21: Annahmen für die Kostenrechnung (Speicher mit 10 000 m<sup>3</sup>)**

Position	Kosten	Bemerkung
Bohrpfahlwand	330 €/m <sup>2</sup>	überschnittene Bohrpfähle, Ø 90 cm
Betonbehälter	250 €/m <sup>2</sup>	Oberirdischer Betonbehälter
Unterwasserbetonsohle	200 €/m <sup>2</sup>	1 m Schichtdicke
Erdaushub	12 €/m <sup>3</sup> 20 €/m <sup>3</sup>	Erdaushub inkl. Entsorgung Unterwasseraushub inkl. Entsorgung
Wärmedämmung (WD) inkl. Einbau, Schalung, Drainage und Unterspannbahn	150 €/m <sup>3</sup>	Wand-WD (z.B. 0.5 m SGS $\lambda_{\text{eff}} = 0.08 \text{ W}/(\text{m K})$ )
	100 €/m <sup>3</sup>	Boden-WD (z.B. 0.5 m SGS $\lambda_{\text{eff}} = 0.08 \text{ W}/(\text{m K})$ )
	150 €/m <sup>3</sup>	Blähglas $\lambda_{\text{eff}} = 0.06 \text{ W}/(\text{m K})$
	250 €/m <sup>3</sup> 400 €/m <sup>3</sup>	Mineralwolle $\lambda_{\text{eff}} = 0.04 \text{ W}/(\text{m K})$ Schaumglas $\lambda_{\text{eff}} = 0.04 \text{ W}/(\text{m K})$
Abdichtung	50 €/m <sup>2</sup>	HDPE einlagig, geprüfte Schweißnähte, Schutzvlies VA
	100 €/m <sup>2</sup>	
Abdeckung inkl. Wärmedämmung (WD)	(i) 400 €/m <sup>2</sup>	Freitragende Abdeckung, HL-Beton-PUR-Sandwich, 0.36 m WD, $U = 0.08 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$
	(ii) 200 €/m <sup>2</sup>	Schwimmende Abdeckung, begehbar, 1.0 m WD mit $U = 0.08 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$
Beladesystem	20 000 €	Schichtbeladeeinheit (PP)
Druckhaltung	30 000 €	nur für schwimmende Abdeckung
Baustelleneinrichtung	50 000 €	-

Abhängig vom Standort und der entsprechend notwendigen Verbau-Maßnahme (insbesondere abhängig vom Grundwasserniveau) können die Kosten für den Erdbau stark variieren.

Die Energiepreisentwicklung sowie der Zinssatz gehen als Randbedingungen in die Berechnung ein. Eine belastbare Prognose ist nicht möglich. Eine gute (eher konservative) Annahme ist der aktuelle Energiepreis (z.B. Wärmepreis von 0.09 €/kWh). Als Zinssatz (Realzins) scheint ein Wert von 3 % angemessen. Für die Beurteilung des Restwerts ist die Annahme der Nutzungsdauer erforderlich (je nach Bauart und verwendeter Materialien z.B. 20 a bis 50 a; bei polymerer Abdichtung stark abhängig von den maximalen Temperaturen, vgl. Abschnitt 4.2.5).

Der Betrachtungszeitraum beträgt 20 a. Damit ergibt sich ein Annuitätenfaktor von 6.8 %.

Es werden beispielhaft zwei Fälle untersucht:

<b>Tabelle 22: Vereinfachte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung</b>		
Volumen	5000 m <sup>3</sup>	5000 m <sup>3</sup>
Geometrie	Zylinder, oberirdisch	Erdbecken: Kegelstumpf (35 °)
Höhe	18.5 m	11 m
Durchmesser	18.5 m	22 m
Konstruktion	Beton + Edelstahl	HDPE
Wärmedämmung	25 cm Mineralwolle Wand, Foamglas Bodendämmung	50 cm Blähglas, 25 cm Schaumglasschotter Boden
Abdeckung	Freitragend	Schwimmend
A/V	0.32	0.5
Spez. Kosten	155 €/m <sup>3</sup>	128 €/m <sup>3</sup>
Nutzungsdauer	50 a	40 a
Wärmepreis	0.13 €/kWh	0.12 €/kWh

Der sich ergebende Wärmepreis liegt mit 0.13 €/kWh bzw. 0.12 €/kWh deutlich über dem zu erwartendem mittleren Wärmepreis von 0.09 €/kWh. Kosten für Solarenergie wären hier noch zum sich ergebenden Wärmepreis zu addieren. Selbst unter günstigsten Annahmen ist ein saisonaler Betrieb (Zyklenzahl gleich 1) wirtschaftlich

nicht darstellbar.

## **6 Systemkonzepte von Nahwärmesystemen mit Langzeit-Wärmespeicher und Wärmepumpe**

Nach [328] kann durch die Integration einer Wärmepumpe (WP) in ein solar unterstütztes Nahwärmesystem (SUN) mit saisonaler Wärmespeicherung die energetische Effizienz der Gesamtanlage gesteigert werden. Es ergeben sich mehrere synergetische Effekte:

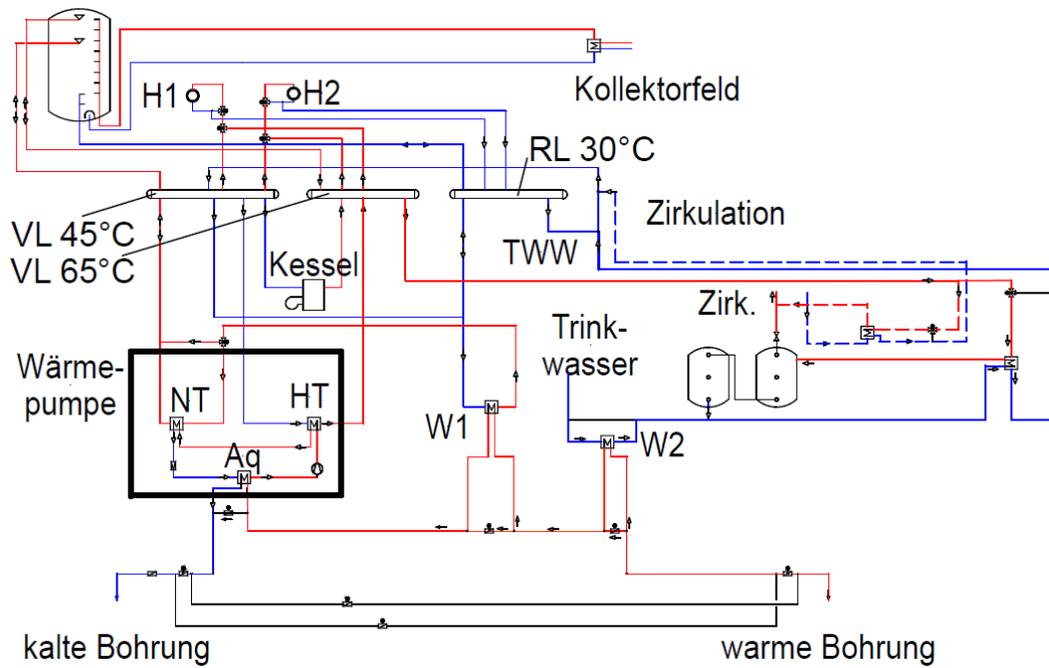
Im Vergleich zu herkömmlichen erdgekoppelten Wärmepumpen steht der WP in einem solar unterstützten Nahwärmesystem ein höheres Temperaturniveau als Wärmequelle zur Verfügung. Es können dadurch höhere Jahresarbeitszahlen erreicht werden. Gleichzeitig kann der Langzeit-Wärmespeicher durch den Betrieb mit WP auf ein niedrigeres Temperaturniveau abgekühlt werden. Dadurch wird die Speicherkapazität erhöht und der Wärmespeicher kann kleiner ausgeführt werden. Durch die Integration einer WP wird das mittlere Temperaturniveau des Wärmespeichers verringert. Damit verringern sich die Wärmeverluste und durch die niedrigeren Systemtemperaturen kann der spezifische Ertrag der Kollektoren steigen.

Im der folgenden Tabelle sind Nahwärmesystem mit Wärmepumpe zusammengefasst.

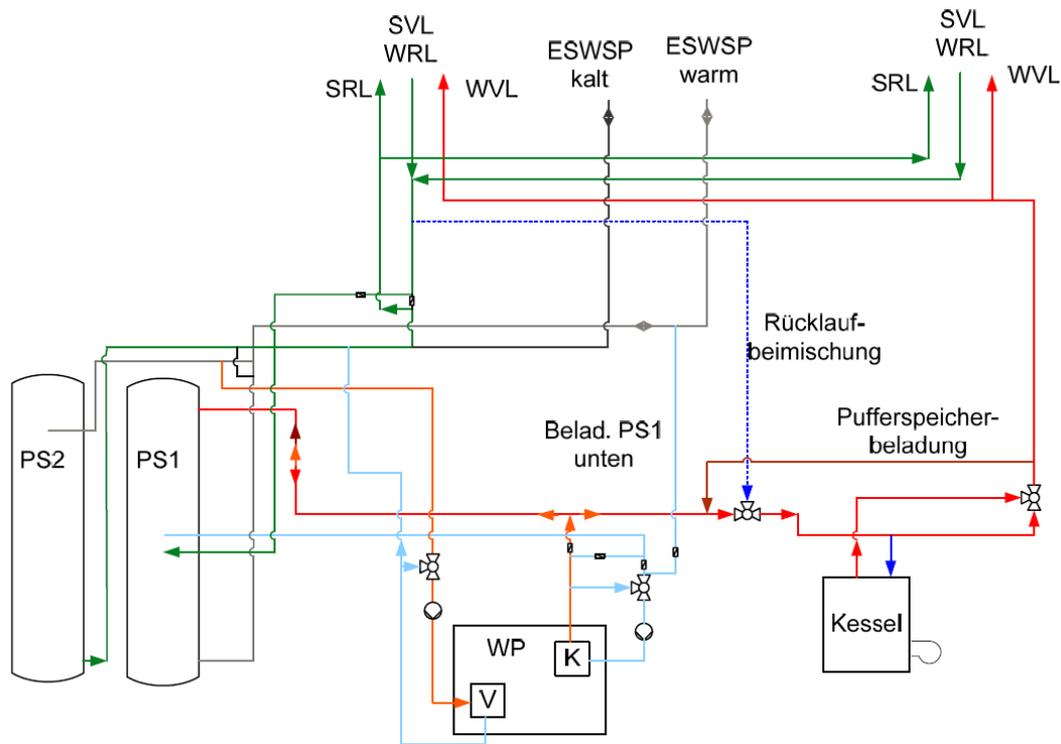
Tabelle 23: Nahwärmesystem mit Wärmepumpe

	Speicher	Wärmepumpe	Hydraulik	Bemerkung
Neckarsulm	EWS	Kompression	EWS-Puffer	Nachgerüstet (+ BHKW!?!)
Crailsheim	EWS		gr. Puffer – kl. Puffer	
Attenkirchen	hybrid (HWS+EWS)	Kompression	EWS-Wasserspeicher	
Rostock	Aquifer	Kompression	Aquifer-Puffer/Netz	WP notwendig aufgrund geringen Temperaturniveaus
München	HWS	Absorptions-WP		Austreiber WP mit Fernwärme
Eggenstein-Leopoldshafen	EBWS (Kies-Wasser)	Kompression	LZWSp-Puffer	
Marstal SunStore4	Erdbecken-Wsp mit schwimmender Abdeckung	Kompression	LZWSp-Puffer-Netz	„smart grid“

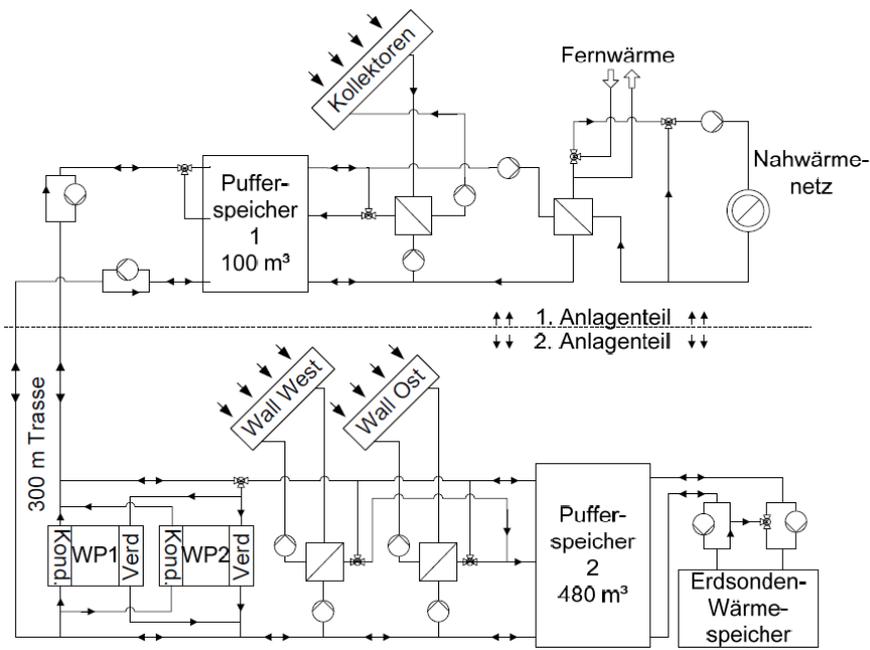
Für eine Auswahl von Projekten (Rostock, Neckarsulm, Crailsheim, Attenkirchen, Eggenstein, München und Marstal) werden im Folgenden die Anlageschemata dargestellt. Im Detail kann sich die Einbindung der Wärmepumpe stark unterscheiden. Das Prinzip ist jedoch bei allen Systemen gleich. Die Wärmepumpe wird zwischen Langzeit-Wärmespeicher und Netz (bzw. Pufferspeicher) geschaltet ohne zusätzliche Quelle Umweltwärme zu nutzen. Der Nutzen ist also ausschließlich ein höherer Ertrag der thermischen Solaranlage, welcher dem zusätzlichen Verbrauch, dem Strom der Wärmepumpe (Primärenergie) gegenübersteht.



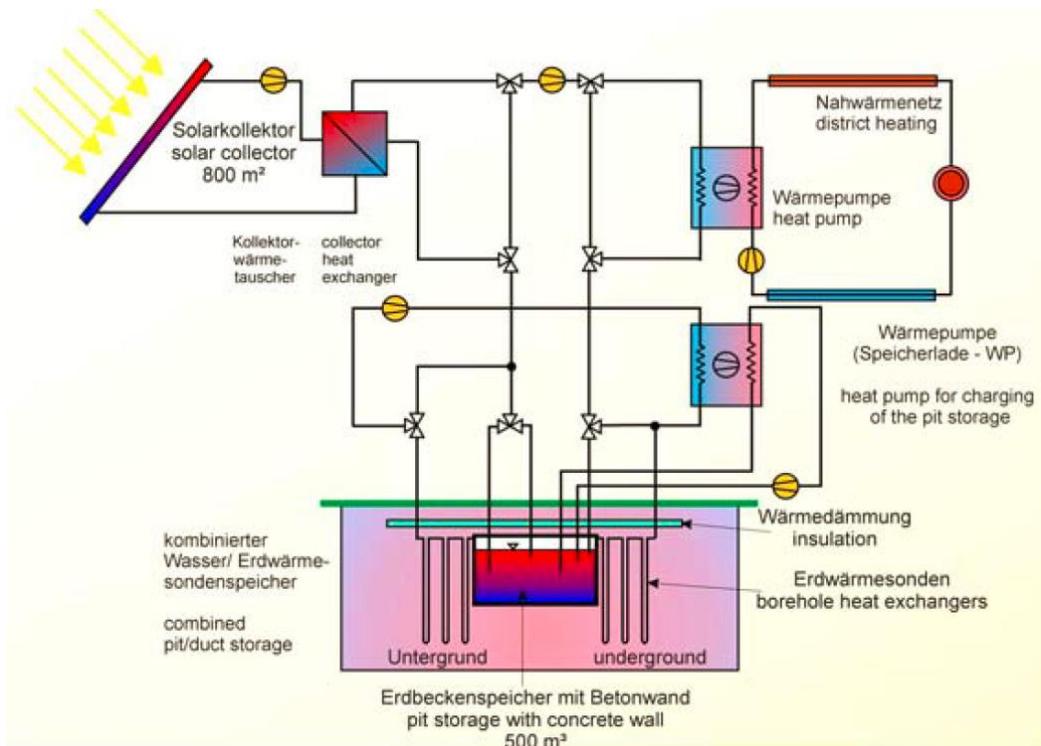
**Bild 19: Anlagenschema des solar unterstützten Nahwärmesystems in Rostock (Quelle: ITW)**



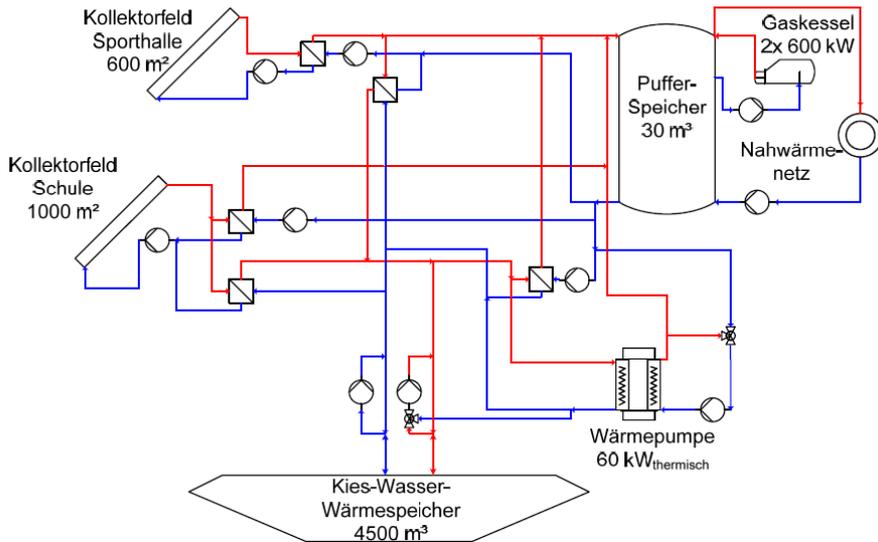
**Bild 20: Anlagenschema des solar unterstützten Nahwärmesystems in Neckarsulm (Quelle: ITW)**



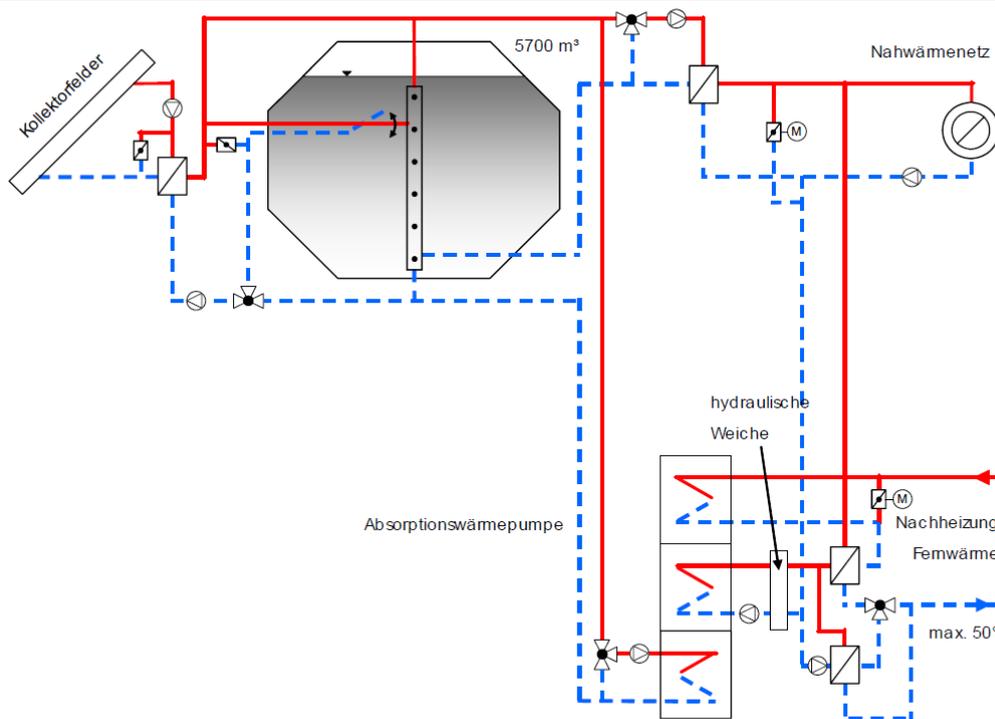
**Bild 21: Anlagenschema des solar unterstützten Nahwärmesystems in Crailsheim (Quelle: ITW)**



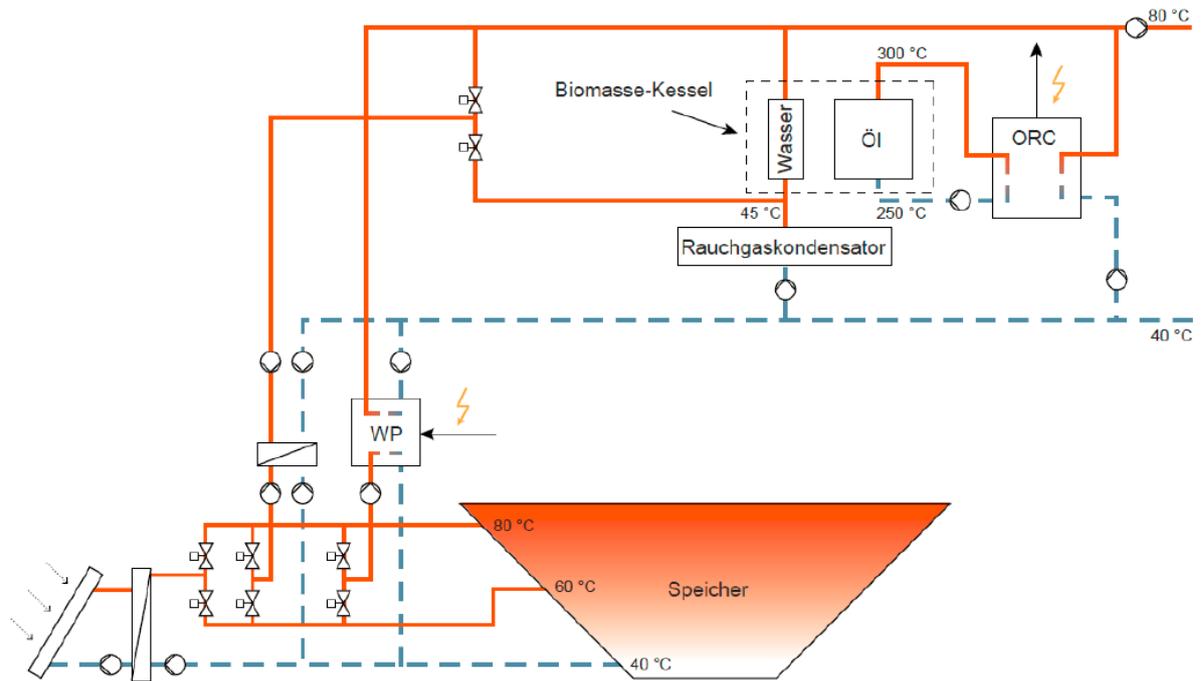
**Bild 22: Anlagenschema des solar unterstützten Nahwärmesystems in Attenkirchen (Quelle: ITW)**



**Bild 23: Anlagenschema des solar unterstützten Nahwärmesystems in Eggenstein (Quelle: ITW)**



**Bild 24: Anlagenschema des solar unterstützten Nahwärmesystems in München (Quelle: ITW)**



**Bild 25: Anlagenschema des solar unterstützten Nahwärmesystems in Marstal (Quelle: solites)**

In [327], [328], [338], [340], [344], [346] finden sich weitere Aspekte zu Wärmepumpensystemen in Verbindung mit Langzeit-Wärmespeichern.

## 7 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

In [320] ist die Technologieentwicklung von Langzeit-Wärmespeichern folgendermaßen zusammengefasst:

Tabelle 24: Behälter-Wärmespeicher

	<b>Erste Generation</b>	<b>Zweite Generation</b>	<b>Dritte Generation</b>
Speicher-konstruktion	Ortbetonbehälter; Wand und Dach gedämmt	Ortbetonbehälter; Wand und Dach gedämmt	Ortbetonbehälter oder vorgespannte Fertigteilkonstruktion; ggf. unter Innendruck; Boden, Wand und Dach gedämmt
Abdichtung	Edelstahlblech, verschweißt	Hochleistungsbeton (HLB)	Edelstahl- oder Schwarzstahlblech, auf Fertigteilen vormontiert und verschweißt
Wärme-dämmung	Mineralfaser	Blähglasgranulat in Gewebesäcken	Boden: Schaumglas-schotter; Wand und Dach: Blähglasgranulat in Membranschalung
Schutz der Wärme-dämmung	konventionell: Mineralfaser und Abdichtbahn	Dampfsperre, Wärmedämmung und diffusionsoffene Dichtbahn	dampfdiffusionsoffene „Dachdämmkonstruktion im Erdreich“, havariesicher
Be- und Entlade-system	obere und untere Tasse	zusätzlich mittlere Tasse	Schichtbeladesystem, Tassen mit automatischer Höhenregulierung
Pilotprojekte	Friedrichshafen und Hamburg (1995)	Hannover (2000)	München und Crailsheim (2004 - 2007)

Tabelle 25: Erdbecken-Wärmespeicher

	Erste Generation	Zweite Generation	Dritte Generation
Speicher- konstruktion	Kiesgefüllte Grube mit Berliner Verbau	Kiesgefüllte Grube, natürlich gebösch	Wassergefüllte Grube mit schwimmendem oder freitragendem Dach, alternativ siehe zweite Generation
Abdichtung	einlagige HDPE-Kunststoffolie, verschweißt	Zwei Lagen PP-Kunststoffolie mit Vakuumkontrolle, verschweißt	Verbundfolie Alu-Kunststoff, verschweißt, Vakuumkontrolle über Wärmedämmung
Wärmedämmung	XPS-Dämmplatten	Blähglasgranulat in Gewebesäcken	Blähglasgranulat in Membranschalung bzw. Kammern
Schutz der Wärmedämmung	konventionelle Abdichtbahn	konventionelle Abdichtbahn	dampfdiffusionsoffene „Dachdämmkonstruktion im Erdreich“, havariesicher, alternativ wasserdichte Kammern
Be- und Entladesystem	direkt	Rohrregister in mehreren Ebenen	Schichtbeladesystem, ggf. mit Brunnen
Pilotprojekte	Chemnitz (1996)	Steinfurt-Borghorst (1998)	ITW-Labor (2005), Eggenstein-Leopoldshafen (2007)

Langzeit-Wärmespeicher sind technisch machbar jedoch insofern diese als saisonale Wärmespeicher betreiben werden wirtschaftlich kaum darstellbar. Die „dänische Philosophie“ sieht die Lösung in riesigen Speichern (Größenordnung 100 000 m<sup>3</sup>) in sehr günstiger Bauweise d.h. ohne Wärmedämmung gegen das Erdreich. Für „Rest-Europa“ stellen aus wirtschaftlicher und energetischer Sicht Multifunktionsspeicher (siehe Projekt Hamburg) eher eine erfolgsversprechende Lösung dar. Als Lösung für Nahwärme- und kleinere Fernwärmesysteme empfiehlt sich ein Heißwasser-Wärmespeicher (mit dem Standort und dem System angepasstem h/d und A/V-

Verhältnis), der als Multifunktionsspeicher (Puffer + Woche bzw. Monatsspeicher) betrieben wird und ausgeführt wird entweder als

⇒ Behälter (Stahltank, Beton mit Stahlauskleidung) sofern er oberirdisch gebaut werden kann oder

⇒ Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeicher mit

⇒ Freitragender Abdeckung (bei kleinerem Speichervolumen) oder

⇒ Schwimmender Abdeckung (bei großem Speichervolumen)

Optimierte Baukonzepte dafür werden in einem nachfolgenden Bericht untersucht.

## Literatur

- [1] Ochs F., State of the Art of Seasonal Thermal Energy Storage, Report, ITW Uni Stuttgart, Stuttgart, 2007.
- [2] Ochs F., Abschlussbericht zum Vorhaben „Weiterentwicklung der Erdbecken-Wärmespeichertechnologie“ FKZ 0329607 E, BMU, 2008.
- [3] Ochs F., “Modelling Large-scale Thermal Energy Stores” at Institute of Thermodynamics and Thermal Engineering (ITW), University of Stuttgart, Shaker Verlag ISBN 978-3-8322-8834-1, 2010.
- [4] Benner M., Mahler B., Mangold D., Schmidt T., Schulz M., Seiwald H., Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit und ohne Langzeit-Wärmespeicher, Forschungsbericht zum BMBF-Vorhaben 0329606 S, September 1994 bis Oktober 1998, ISBN: 3-9805274, Stuttgart, 1999.
- [5] 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, Stuttgart, 2004.
- [6] 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.
- [7] Gustafson G., Heat Storage in Caverns, Tanks and Pits, An Overview of Swedish Experiences, Proc. of the third International Conference on Energy Storage for Building Heating and Cooling, Enerstock Conference, p.525 – 531, Toronto, Canada, 1985.
- [8] Heller A., Floating lid constructions for large pit water heat storage, Megastock 1997, volume 1, p. 503–508, 1997.
- [9] Dalenbäck J. O., Solar Heating with Seasonal Storage – Some Aspects of the Design and Evaluation of Systems with Water Storage, Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, 1993.
- [10] Raab S., Simulation, Wirtschaftlichkeit und Auslegung solar unterstützter Nahwärmesysteme mit Heißwasser-Wärmespeicher, Diss., Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW), Universität Stuttgart, Cuvillier Verlag, ISBN 3-86727-049-X, 2006.
- [11] Dahlenbäck J. O., Notes Neckarsulm Workshop 1998, European Large Scale Solar Heating Network, Thermie B – Contract No DIS/1164/97, Göteborg, Sweden, 1998.
- [12] Bokhoven T. P., Van Dam J., Kratz P., Recent experience with large solar thermal systems in The Netherlands, Solar Energy, Volume 71, Number 5, November 2001, p. 347-352(6), Elsevier Science, 2001.
- [13] IEA Task XIV, Advanced Active Solar Systems, Working Group “Large Solar Energy Systems”, Final IEA report, No. T.14.LS.1, Delft, 1996.
- [14] Sørensen P. A., Final Technical Report, Solar Thermal and Long Term Heat Storage for District Heating Systems, Sunstore 2, Marstal, DK, 2005.
- [15] Hahne E., Benner M., Mangold D., Schmidt T., Schulz M. E, Solare

Nahwärme - Ein Leitfadens für die Praxis, Fachinformationszentrum Karlsruhe (BINE), TÜV-Verlag, Köln, 1998.

- [16] Lottner V., Status of seasonal thermal energy storage in Germany, Proc. Terrastock 2000, 8th International Conference on Thermal Energy Storage, Stuttgart, ISBN: 3-9805274-1-7, Vol.1 p 53-60, 2000.
- [17] Mangold D., Benner M., Schmidt T., Langzeit-Wärmespeicher und solare Nahwärme, Bine Informationsdienst, Profiinfo, 1/01, 2001.
- [18] Mangold D., Schmidt T., Lottner V., Seasonal Thermal Energy Storage in Germany, Proc. FUTURESTOCK 2003, 9th International Conference on Thermal Energy Storage, Institute of Heat Engineering, Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland, 2003.
- [19] Pfeil M., Hahne E., Lottner V., Schulz M., Solare Nahwärme und Saisonale Wärmespeicherung – Stand der Technik, Forschungsverband Sonnenenergie „Themen 97/98“, Köln, 1998.
- [20] Hadorn J.-C., Guide to Seasonal Heat Storage, SIA Documentation D 028 in the series Planning Energy and Buildings, Switzerland 1988.
- [21] Boysen A., IEA Task VII, Central Solar Heating Plant with Seasonal Storage, preliminary design for ten countries, SHC programme IEA, ISBN: 91-540-4371-9, 1984.
- [22] Bankston C. A., IEA Task VII, Central Solar Heating Plant with Seasonal Storage, evaluation of concepts, SHC programme IEA, report #T.t.2.B., 1986.
- [23] Boysen A., IEA Task VII, Central Solar Heating Plant with Seasonal Storage, Status Report, Stockholm, ISBN: 91-540-5201-7, 1990.
- [24] Lehtmets M., Parameter Study of Solar Heating System With Seasonal Ground Storage in Moraine, Report 51, Swedish Geotechnical Institute, Lonköping, 1995.
- [25] Fisch M. N., Guigas M., Dalenbäck J. O., Large-Scale Solar District Heating Status and Future in Europe, Proc. EuroSun'96, p. 157-170, Freiburg, 1996.
- [26] Fisch M. N., M. Guigas, J.O. Dalenbäck, A Review of Large-Scale Solar Heating Systems in Europe, Solar Energy Vol. 63, No. 6, p. 355-366, 1998.
- [27] Mahler B., Ganzheitliche Optimierung von solaren Nahwärmesystemen mit Langzeit-Wärmespeicher, Diss., Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2004.
- [28] Hadorn J.-C., Status of the Seasonal Storage in Switzerland, 7th International Conference on thermal Energy Storage, Megastock 1997, Sapporo, Japan, p. 967- 972, 1997.
- [29] Hadorn J.-C., A review of seasonal storage in Switzerland, Programme de recherche et programme P+D. Stockage de chaleur. Rapport annuel 1997, 115-120 avec annexe), 1997.
- [30] Heller A., Development of Seasonal Storage in Denmark: Status of Storage Programme 1997-2000, Proc. Terrastock 2000, p. 47-52., Stuttgart, 2000.
- [31] Heller A., Wesenberg C., Hansen A., Udvikling af flydende lagkonstruktioner til damvarmelagre, Loesning i tyndpladestål, Rapport, BYG DTU R-033, ISBN: 87-7877-093-9, Lyngby, DK, 2002.

- [32] Duer K., Udvikling af flydende lagkonstruktioner til damvarmelagre, Loesning i tyndpladestål, Slutrapport, DTU ISSN 1396-4011, Institut for Bygninger og Energi (IBE), Lyngby, DK 2000.
- [33] Boysen A., Central solar heating plants with seasonal storage, Stockholm: Swedish Council for Building Research, Stockholm, Sweden, 1985.
- [34] Boysen A., Central Solar Heating Plants with Seasonal Storage – An International Feasibility Study, Proc. of the Third International Conference on Energy Storage for Building Heating and Cooling, Enerstock Conference, p.364 – 374, Toronto, Canada, 1985.
- [35] Roseen R., Perers B., A solar heating plant in Studsvik, Design and first year operational performance, Swedish Council for Building Research, D21:1980, 1980.
- [36] Norbäck K., Hallenberg J., A Swedish group solar heating plant with seasonal storage, technical-economic description of the Lambohov project, Swedish Council for Building Research, 790746-8:1980, Sweden, 1980.
- [37] Dalenbäck J. O., A new solar heating plant with seasonal storage – the Särö project, Proc. Thermastock, 5th International Conference on Thermal Energy Storage, Scheveningen, The Netherlands, 1991.
- [38] Hirt N., Benner M., Pilotvorhaben Erdbecken-Heißwasserwärmespeicher in Rottweil, Forschungsbereich zum BMBF Vorhaben 0329383A, Stadtwerke Rottweil, 1997.
- [39] Schulz M., Fisch M. N., Ebel M., Central Solar Heating Plant with Seasonal Storage in Hamburg-Bramfeld, Status and Experience from the Construction Phase, Proc. EuroSun96, p. 357-362, Freiburg, 1996.
- [40] Bodmann M., Fisch M. N., Betriebserfahrungen der solar unterstützten Nahwärmeversorgung in Hannover, Steinfurt und Hamburg, Proc. OTTI, 13. Symposium Thermische Solarenergie, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 2003.
- [41] Reineck K. H., Lichtenfels A., Entwurf und Bemessung von Heißwasser-Wärmespeichern aus Konstruktionsbeton, Bautechnische Studie für das BMFT-Vorhaben „Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit und ohne Langzeit-Wärmespeicher“, Stuttgart, 1997.
- [42] Lichtenfels A., Reineck K. H., The design and construction of the concrete hot water tank in Friedrichshafen for the seasonal storage of solar energy. p. 257 - 262 in Proc. Vol. 1, 8th Int. Conference on Thermal Energy Storage, TERRASTOCK 2000, August 20 - Sept. 1, Stuttgart, Germany, 2000.
- [43] Jooß M., Dichtheit von Heißwasser-Langzeitspeichern aus Hochleistungsbeton, Diss., Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, 2001.
- [44] Raab S., Mangold D., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Solar assisted district heating system with seasonal hot water heat store in Friedrichshafen (Germany), Proc. of EuroSun 2004 – The 5th ISES Europe Solar Conference, 20-23 June 2004, Freiburg, 2004.
- [45] Bühl J., Langzeitwärmespeicherung mit einem neuartigen Speicherkonzept, FVS Workshopband: Wärmespeicherung 28. –29.05.2001, Köln, 2001.
- [46] Nilius A., Bühl J., Durchführung eines Messprogramms an dem 300 m<sup>3</sup> GFK-

Pilotspeicher und Untersuchungen zur Optimierung des Wärmespeicherkonzeptes, Forschungsbericht – Abschlussbericht – Verbundprojekt Solarthermie - 2000, Teilprojekt 3: Solare Nahwärme – Begleitforschung: Förderkennzeichen: 0329606Q/0, Ilmenau, 2003.

- [47] Lichtenfels A., Reineck K. H., High performance concrete hot-water tanks for the seasonal storage of solar energy. p. 263 - 266 in Proc. Vol. 1, 8th Int. Conference on Thermal Energy Storage, TERRASTOCK 2000, August 20 - Sept. 1, Stuttgart, Germany, 2000.
- [48] Schlosser M., Solar unterstützte Nahwärmeversorgung Hanover Kronsberg, OTTI, 16. Symposium „Thermische Solarenergie“, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 2006.
- [49] Reuß M., Solare Nahwärmeversorgung Attenkirchen, 7. Internationales Symposium für Sonnenenergienutzung SOLAR 2004, p. 111 – 120, Gleisdorf, Österreich, 2004.
- [50] Reuß M., Solar District Heating with Seasonal Heat Storage in Attenkirchen, Proc. ISES Solar World Congress 2003, Göteborg, Schweden, ISBN: 91-631-4740-8 (CD), 2003.
- [51] Reuß M., Müller J. P., Erdwärmesonden zur thermischen Energiespeicherung im Untergrund, Tiefbau 8/2001, p. 538-535, Erich Schmidt Verlag, München, 2001.
- [52] Raab S., Mangold D., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Solar assisted district heating system in Crailsheim (Germany), Proc. of Solar World Congress, Orlando, 06.-12.08.2005, Orlando, USA, 2005.
- [53] Bauer D., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Solar unterstützte Nahwärmeversorgung in Crailsheim, Proc. Gleisdorf Solar, Gleisdorf, 2006.
- [54] Mangold D., Die neuen Pilotprojekte mit Langzeit-Wärmespeicher, OTTI, 16. Symposium Thermische Solarenergie, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 2006.
- [55] Mangold D., Saisonale Wärmespeicher: Neue Pilotanlagen im Programm Solarthermie2000plus und Forschungsperspektiven, Proc. PtJ Statusseminar Thermische Energiespeicherung - mehr Energieeffizienz zum Heizen und Kühlen, Freiburg, 2006.
- [56] Schmidt T., Mangold D., New Steps in seasonal thermal storage in Germany, Ecostock 2006, Richard Stockton College of New Jersey, USA, 2006.
- [57] Todd R. W., A Solar Heating System with Interseasonal Storage, National Centre for Alternative Technology, Wales, UK, 1978.
- [58] Hadorn J.-C., The Vaulruz Project – Experimental Results, Proc. of the third International Conference on Energy Storage for Building Heating and Cooling, Enerstock Conference, p. 456-460, Toronto, Canada, 1985.
- [59] Hansen K. K., Hansen P. N., Ussing V., Seasonal Heat Storage in Underground Warm Water Stores, Construction and Testing of a 500 m<sup>3</sup> Store, Technical University of Denmark, Report No 134, Lyngby, DK, 1983.
- [60] Hansen K. K., Hansen P. N., Ussing V., Stratified operation of a 500 m<sup>3</sup> test pit, Proc. of the Enerstock Conference, Toronto, Canada, 1985.
- [61] Giebe R., Ein Kies/Wasser-Wärmespeicher in Praxis und Theorie, Diss., Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW), Universität Stuttgart,

- Stuttgart, 1989.
- [62] Hahne E., Fisch M. N., Giebe R., Hornberger M., Kübler R., Daniels H., Beiträge zum Fachkolloquium Aquifer-Wärmespeicher Pilotprojekt, ITW, Uni Stuttgart, Stuttgart, 1987.
- [63] Vogt J., Auswertung der gemessenen Verluste des Aquifer-Wärmespeichers, diploma thesis, ITW, Universität Stuttgart, Stuttgart, 1987.
- [64] Hahne E., The ITW Solar Heating System: An Oldtimer Fully In Action, Solar Energy Vol. 69, No. 6, p. 469–493, Elsevier, 2000.
- [65] Hahne E., Fisch M. N., Giebe R., Hornberger M., Zukunftsorientierte Wärmeversorgungssysteme für Institute der Energietechnik der Universität Stuttgart, Forschungsbericht zum BMBF-Vorhaben 03E8187A, Forschungsinstitut für Wärmetechnik e.V., Stuttgart, 1989.
- [66] Voigt B., Mierke T., Modellversuch und Detailuntersuchungen für einen drucklosen Langzeitwärmespeicher, Bundesministerium für Forschung und Technologie, Forschungsbericht 03E-4502-A, Berlin, 1988.
- [67] Voigt B., Mierke T., Long-term heat storage in Berlin (West), Final project results and economical aspects, Proc. Jiggastock 1988, V1. p. 185-188, Versailles, France, 1988.
- [68] Voigt B., Ruhnau R., Schilf L., Long Term Heat Accumulator in Berlin (West Germany). Storage Construction, First Results and Further Development, Proc. of the third International Conference on Energy Storage for Building Heating and Cooling, Enerstock Conference, p.623 – 629, Toronto, Canada, 1985.
- [69] Seefeld D., Timm H., Großspeicherabdeckung durch vsi-Elemente, Technical Report BMFT-FB-T 86-007, Bundesministerium für Forschung und Technologie, Berlin, 1986.
- [70] Zinko H., Hahn T., The high temperatures (95 °C) water pit storage of Malung, Proc. Calorstock '94, 6th International Conference on Thermal Energy Storage, Finland, 1994.
- [71] Wesenberg C. Skitseprojekt, Sol til sommerstop i eksisterende halmvarmeværk - Forsøgsanlæg, Sketch, Solar for existing straw heating plants - Pilot plant, Nellesmann Consultants, Denmark, 1990.
- [72] Wesenberg C., Undersøgelse og udbedring af varmeakkumuleringstank udført i beton (Hørby-tanken), 1990-1993, Investigation and Reconstruction of Thermal Storage Tank in Concrete (Hoerby Storage), Nellesmann Consultants, Aalborg, Denmark, 1993.
- [73] Pedersen V. P., Målinger og evaluering af varmeakkumuleringstank i Hørby, Measurements and evaluation of thermal storage tank in Hoerby, Nr. 92-10, Cenergia Energy Consultants, Thermal Insulation, Laboratory, Technical Highschool of Denmark and Folkecentret for VE, Ballerup, Denmark, 1992.
- [74] Heller A., Pit Water Storage Ottrupgaard - A follow-up, Proc. Terrastock 2000, p. 267-274, Stuttgart, 2000.
- [75] Ussing V., Forsøgborehulslager og ombygning af damvarmelager til gruslager, Bore Hole Storage and Reconstruction of Pit Water Storage to Gravel Storage, nr. 219, Thermal Insulation Laboratory, Technical Highschool

of Denmark, Building 118, DTU, 2800 Lyngby, 1991.

- [76] Ritola J. H., Sjökölla High Temperature Pit Store With Membrane Lining, Finland, 1994.
- [77] Ritola J. H., Sjökölla high temperature pit store with membrane liner, VTT Communities and Infrastructure, Rock and Environmental Engineering, Final report. 3 Finland, 1995, (in Finnish).
- [78] Duer K., Svendsen S., Construction of a Seasonal Heat Storage based on a Pit with Clay Membrane, Proc. ISES Solar World Congress, Budapest, Hungary, 1993.
- [79] Maureschat G., Heller A., Modelforsøg: Varmetransport og effektafgivelse i grus. Experiments with heat transfer in gravel materials. Special Topics, SR-9716, Department of Buildings and Energy, Technical University of Denmark, 1999.
- [80] Holm L., Experiences and results from Marstal district heating plant, Proc. International Congress Energy and the Environment 2000, 17th Scientific Conference on Energy and Environment, Opatija, Croatia, Vol.1 p. 157-164, 2000.
- [81] Holm L., The Solar Energy Plant at Marstal, News from DBDH, DK, 2000.
- [82] Urbaneck T., Berechnung des thermischen Verhaltens von Kies-Wasser-Speichern, Diss. (2003), TU Chemnitz, Shaker Verlag, ISBN: 3-8322-2762, Aachen, 2004.
- [83] Urbaneck T., Schirmer U., Central solar heating plant with gravel water storage in Chemnitz (Germany), Proc. Terrastock 2000, p. 275-278, Stuttgart, 2000.
- [84] Pfeil M., Hornberger M., Hahne E., Seasonal Storage of Solar Energy in the Solaris Technology Park in Chemnitz, Proc. EuroSun06, p. 315-319, Freiburg, 2006.
- [85] Urbaneck T., Platzer B., Schirmer U., Advanced monitoring of gravel water storage, Proc. Futurestock 2003, 9th International Conference on Thermal Energy Storage, Warsaw, Institute of Heat Engineering, Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland, 2003.
- [86] Koch H., Hahne E., Seasonal Storage of Solar Energy for an Apartment/Office Building, Megastock '97, 7th International Conference on Thermal Energy Storage, Sapporo, Japan, 1997.
- [87] Hausladen G., Pertler H., Landesamt für Umweltschutz (LFU) Augsburg/Germany – Solare Langzeitwärmespeicherung mittels Großkollektoranlage mit Kies-Wasser-Speicher, Proc. DGS, 11. Internationales Sonnenforum, p. 568-574, Köln, 1998.
- [88] Bayrisches Landesamt für Umweltschutz, Energiekonzept des Landesamts für Umweltschutz, LfU-1/1-E92/2002, Ausstellung Erneuerbare Energien, Augsburg, Germany, 2003.
- [89] Reuß M., Saisonale Wärmespeicherung im Untergrund - eine Lösung für die effiziente Wärmenutzung auch bei Biogas?, Proc., Biogasmärkte der Zukunft, C.A.R.M.E.N. e.V., p. 40 - 50, Straubing, Germany, 2003.

- [90] Pfeil M., Koch H., Benner M., The third generation of long-term gravel-water storage - Steinfurt-Borghorst, Proc. Terrastock 2000, p. 275-278, Stuttgart, Germany, 2000.
- [91] Pfeil M., Koch H., Saisonaler Kies/Wasser-Wärmespeicher der 3. Generation für die Solarsiedlung Steinfurt Borghorst, Proc. OTTI, 10. Symposium „Thermische Solarenergie“, p. 59-63, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 1999.
- [92] Pfeil M., Kies/Wasser-Wärmespeicher: Langzeitwärmespeicherung ökologisch und kostengünstig, Proc. Otti-Profiforum Oberflächennahe Geothermie, Garching, Germany, 2004.
- [93] 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, DK, 2004.
- [94] Sørensen P. A., PlanEnergi, Application for PSO R&D 2007 programme, Demonstration of heat pump and long term heat storage as a regulation unit in the electricity system, submitted to Energinet.dk, 2006.
- [95] Pfeil & Koch Ingenieurgesellschaft (PKi), Solare Nahwärme für das Schulzentrum Eggenstein-Leopoldshafen, Vorhabensbeschreibung zur Fördermittelbeantragung beim Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Stuttgart, 2005.
- [96] Gimmelsberger J., Efficient Energy Supply (Electricity and District Heat) for the City of Linz, Linz Strom AG, 9. Symposium Energyinnovation, Producing more with less: Efficiency in Power Generation, Energy Efficiency In IPPC Installations, European Conference, Vienna, 2004.
- [97] Hedbäck A. J. W., Short Term Heat Storage System References, Sweden, 2005.
- [98] Lavan Z., Thompson J., Experimental study of thermally stratified hot water storage tanks, Solar Energy, 1977, 19(5), p. 519-524, Elsevier 1977.
- [99] Sharp M. K., Loehrke R. I., Stratified versus well-mixed sensible heat storage in a solar space heating system. ASME 78-HT-49, p. 1-7, 1978.
- [100] Abdoly, Rapp, Theoretical and experimental studies of stratified thermocline storage of hot water, Energy Conversion and Management 22, p. 275-285, 1982.
- [101] Cole R. L., Bellinger F. O., Thermally stratified tanks, ASHRAE Transactions 88, Part 2(1), p. 1005-1017, 1982.
- [102] Ismail K. A. R., Carrocci L. R., Performance and economical analysis of stratified storage tanks, Proc. Jigastock, 4th international conference on energy storage for building heating and cooling, Versailles, Vol. 2, p. 753-756, Versailles, France, 1988.
- [103] Cotter M. A., Charles M. E., Transient cooling of petroleum by natural convection in cylindrical storage tanks 2: Effect of heat transfer coefficient, aspect ratio, and temperature-dependent viscosity. International Journal of Heat and Mass Transfer 36, p. 2175-2182, Elsevier, 1993.
- [104] Al-Najem N. M., Al-Marafie A., Ezuddin K. Y., Analytical and experimental investigation of thermal stratification in storage tanks, International Journal of Energy Research 17, 77-88, 1993.

- [105] Hahne E., Chen Y., Numerical study of flow and heat transfer characteristics in hotwater stores, Solar Energy 64, 9-18, Elsevier, 1998.
- [106] Matrawy K. K., Farkas I., Buzás J., Optimum selection of the aspect ratio of solar storage tank. Proc. EuroSun'96, p. 251-255, Freiburg, 1996.
- [107] Nelson J. E. B., Balakrishnan A. R., Murthy S. S., Experiments on stratified chilled water tanks. International Journal of Refrigeration 22, p. 216-234, 1999.
- [108] Cabezza L., Castell A., Medrano M., Project Report: Dimensionless parameters used to characterize water tank stratification, A Report of IEA SHC - Task 32, Advanced storage concepts for solar and low energy buildings, 2006.
- [109] Panthaloorkaran V., CFD-Assisted Characterization and Design of Hot Water Seasonal Heat Stores, Thesis, Institute for Thermodynamics and Thermal Engineering (ITW), University of Stuttgart, Stuttgart, 2006.
- [110] Geipel W., Planung, Bau und Erprobung eines wärmegeämmten Erdbecken-Versuchswärmespeichers mit 30000m<sup>3</sup> Inhalt zur Aufnahme von Warmwasser mit mindestens 90 °C, Forschungsbericht BMFT-T 83-020, Bundesministerium für Forschung und Technologie, Stadtwerke Mannheim AG (SMA), Mannheim ,1983.
- [111] Geipel W., Bau des ersten Erdbeckenwärmespeichers in Mannheim, Brennstoff-Wärme-Kraft 31, p. 56-61, Germany, 1979.
- [112] Geipel W., Warum der Erdbecken-Warmwasserspeicher in Mannheim nicht gebaut wurde, Fernwärme international 11, p.52–59, Germany, 1982.
- [113] Stickrodt J., Breuer W., Langzeitwärmespeicher Prototyp Wolfsburg, Stufe 1 – Planungsphase, Technical Report BMFT-FB-T 84-100, Bundesministerium für Forschung und Technologie, 1984.
- [114] Tziggilis C., Beurteilung der Verfahren des Spezialtiefbaus zur Kostenreduktion von Langzeit-Wärmespeichern, Diplomarbeit am IGS und ITW mit Fa. Züblin Spezialtiefbau GmbH Stuttgart, Stuttgart. 2005.
- [115] Schnell W., Verfahrenstechnik zur Sicherung von Baugruben, 2. Auflage, Teubner Verlag, 1995.
- [116] Eichler K. (editor), Spezialtiefbau, Erkundung und Ausführung – Technik und Umwelt – Methoden und Auswirkungen – Baustoffe und Verfahren, second Edition, expert verlag, Band 566, ISBN: 3-8169-2040-3, Renningen, 2002.
- [117] Bader M., Entwicklung einer schwimmenden Abdeckung zur Abdichtung und Wärmedämmung kostengünstiger Erdbecken-Wärmespeicher für die saisonale Wärmespeicherung, diploma thesis, ITW Uni Stuttgart, Stuttgart, 2004.
- [118] Liegl V., Konstruktive Optimierung der schwimmenden Abdeckung eines Erdbeckenwärmespeichers, Diplomarbeit, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Fachhochschule Aachen, Abteilung Jülich, 1996.
- [119] Braxein A., Späte F., Friedel J., Solarthermie 2000, Teilprogramm 3: Solare Nahwärme Solar-Campus Jülich, Machbarkeitstudie des saisonalen Wärmespeichers, In Statusbericht 98 Solarunterstützte Nahwärmeversorgung, Saisonale Wärmespeicherung, p.178–188, Jülich,

- Germany, 1998.
- [120] Braxein A., Braheim C., Final Report, Vorhaben 0329606 H, Solarthermie-2000, Teilprogramm 3: Solare Nahwärme. Solar Campus Jülich, Machbarkeitsuntersuchung des saisonalen Wärmespeichers, Aachen, 1996.
- [121] Meliß M., Säte F., The Solar Heating System with Seasonal Storage at the Solar Campus Jülich, Solar Energy Vol. 69, No. 6, p. 525-533, Elsevier, 2000.
- [122] Grydehoj H., Ulbjerg F., District heating – a precondition for efficient use of solar heating, News from DBDH, DK, 2005.
- [123] Rüegger R., Hufenus R., Bauen mit Geokunststoffen, Ein Handbuch für den Geokunststoffanwender, Schweizerischer Verband für Geokunststoffe, ISBN: 3-9522774-01, Switzerland, 2003.
- [124] Nußbicker J., Mangold D., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Solar Assisted District Heating System With Duct Thermal Energy Store In Neckarsulm-Amorbach (Germany), Proc. ISES Solar World Congress 2003, Göteborg (Schweden), ISBN: 91-631-4740-8 (CD), 2003.
- [125] Nußbicker J., Mangold D., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Solar assisted district heating system with seasonal duct heat store in Neckarsulm-Amorbach (Germany), Proc. EuroSun2004, 14. Internationales Sonnenforum, Freiburg i. Br., Volume 1, p. 509-517, ISBN: 3-9809656-0-0 (Vol. 1-3), 2004.
- [126] Harasim A., Weissenbach B., Entwicklung eines Aquifer-Wärmespeichers Phase I, Band I, Gesamtdarstellung der Ergebnisse, BMTF Vorhaben T 82-032, Ottobrun, 1982.
- [127] Sanner B. (Editor), High Temperature Underground Thermal Energy Storage – State of the art and Prospects. A review within ECES Annex 12 of the International Energy Agency IEA. Giessener Geologische Schriften Nr. 67, Lenz-Verlag, Giessen, ISSN 0340-0654, 1999.
- [128] Schmidt T., Kabus F., Müller-Steinhagen H., The Central Solar Heating Plant with Aquifer Thermal Energy Store in Rostock, Germany, Proc. Terrastock 2000, p. 275-278, Stuttgart, Germany, 2000.
- [129] Köhler S., Wärme- und Kälteversorgung der Parlamentsbauten im Berliner Spreebogen mit Aquiferspeicher, Proc. PtJ Statusseminar Thermische Energiespeicherung - mehr Energieeffizienz zum Heizen und Kühlen, Freiburg, Germany, 2006.
- [130] Kabus F., Saisonale Speicherung von Überschusswärme aus einem Heizkraftwerk in einen Aquifer in Neubrandenburg, Proc. PtJ Statusseminar Thermische Energiespeicherung - mehr Energieeffizienz zum Heizen und Kühlen, Freiburg, Germany, 2006.
- [131] Stumpp H., Thermische Charakterisierung von Dämmstoffen, Studienarbeit am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart, Stuttgart, 2003.
- [132] Vogeley J., Voormann F., Straub A., Dämmstoffe, Produktdatenblätter, Semesterarbeit, [www.ift.uni-karlsruhe.de/BuP/download/SemesterarbeitDaemmstoffe.pdf](http://www.ift.uni-karlsruhe.de/BuP/download/SemesterarbeitDaemmstoffe.pdf), 2003.
- [133] Neal W. E. J., Thermal Energy Storage, Phys. Technol., Vol. 12, 1981, Great Britain, 1981.

- [134] Dücke E., Kaps Ch., Neue Entwicklungen bei der Herstellung von Blähgranulaten aus Altglas, Beitrag Recycling `99, Bauhaus-Universität Weimar, 1999.
- [135] Hurley J., A UK Market Survey for Foam Glass, Research and Development Final Report, GLA 0015, The Waste and Resources Action Programme, 2003.
- [136] Lu H., Swift A. H. P., Reconstruction and Operation of the El Paso Solar Pond with a Geosynthetic Clay Liner System, 1996 Solar Engineering-Proc. of ASME International Solar Energy Conference, J. Davidson and J. Chavez, eds., San Antonio, TX, 1996.
- [137] Swift A. H. P., Golding P., El Paso Solar Pond Test Project-Phase II, Final Report, Research and Laboratory Services Division, U.S. Department of Interior, 1992.
- [138] Lu H., Swift A. H. P., Hein H. D., Walton J.C., Advancements in Salinity Gradient Solar Pond Technology Based on Sixteen Years of Operational Experience, Journal of Solar Energy Engng. Journal of Solar Energy Engineering, V. 126, Issue 2, p. 759-767, 2004.
- [139] Cao J., Study on integrated heating technique of the Solar Pond, Proc. EuroSun 2004, p.151-160, Freiburg, Germany, 2004.
- [140] Weinberger H, The Physics of Solar Ponds, Solar Energy, 8(2), p. 45–56, Elsevier, 1964.
- [141] Jubran B. A., Al-Abdali H., Al-Hiddabi S., Al-Hinai H., Zurigat Y., Numerical modelling of convective layers in solar ponds, Solar Energy 77 (2004), p. 339–345, 2004.
- [142] Jaefarzadeh M. R., Thermal behavior of a small salinity-gradient solar pond with wall shading effect, Solar Energy 77 (2004), p. 281–290, Elsevier, 2004.
- [143] Koerner R. M., Designing With Geosynthetics, Fourth Edition. Prentice-Hall, International, ISBN: 0-13-726175-6, Upper Saddle River, NJ, 1998.
- [144] Stief K. (editor), Deponietechnik 1996, ISBN: 3 503 03294 4, Berlin, 1996.
- [145] Gallagher E. M. G., Needham A. D., Smith D. M., Experience with Geosynthetics Design and Construction of landfill Steepwall Lining Systems, Proc. Third European Geosynthetics Conference, Eurogeo3, p. 227-234, Munich, 2003.
- [146] Rollin A. L., Jacquelin T., Forget B., Saunier P., A guide to Detect Leaks on Installed Geomembranes, Proc. Third European Geosynthetics Conference, Eurogeo3, p.235-240, Munich, 2003.
- [147] Brummermann K., Schlütter A., New German Recommendations for Geomembrane Sealing Systems in Tunnel Construction, Proc. Third European Geosynthetics Conference Eurogeo3, p. 211-214, Munich, 2003.
- [148] Young G., Membrane liners and floating covers for existing open water storage basins: WHY? and HOW?, In 63rd Annual Water Industry Engineers and Operators Conference. Gutteridge Haskins & Davey Pty Ltd., 2000.
- [149] Talley D., Magin C., (editors) , Flexible-Membrane Covers and Linings for Potable-Water Reservoirs, American Water Works Association, Denver, 3.

edition, Denver, USA, 2000.

- [150] Roos K. F., Moser M. A., Martin A. G., Agstar charter farm program: Experience with five floating lagoon covers, In Fourth Biomass Conference of the Americas. US Environmental Protection Agency, 1999.
- [151] Peggs I. D., Nosko V., Razdorov P., Gavin P., Leak Monitoring for a Double Liner Separated by a Novel Conductive Geotextile, Proc. Third European Geosynthetics Conference, Eurogeo3, p.515-519, Munich, 2003.
- [152] Hsuan Y. G., Körner R. M., Lifetime Prediction of Polymeric Geomembranes used in new Dam Construction and Dam Rehabilitation, Proceedings Assoc. of State Dam Safety, Officials Conference, Lake Harmony, ,Pennsylvania, USA, 1998.
- [153] Schäfer P., Strobl Th., Hydrodynamic Loads on Geomembranes in Open Water Canals, Proc. Third European Geosynthetics Conference, Eurogeo3, p. 383-386, Munich, 2003.
- [154] Koerner R. M., Hsuan Y. G., Koerner G. R., Geomembrane Lifetime Prediction: Unexposed and Exposed Conditions, GRI White Paper #6, Geosynthetic Institute, Folsom, USA, 2005.
- [155] Fricklas R., Griffin C. W., Manual of Low-Slope Roof Systems, McGraw-Hill Professional, ISBN: 0-07-145828-X, 2006.
- [156] March F., Roy D., Flat Roofing: A Guide to Good Practice, RIBA Publications, ISBN: 0950791911, 1995.
- [157] Hanke A., Entwicklung von Gummierungsmaterial als Korrosionsschutz, Diss., Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2000.
- [158] Johansen W., PE-X Borehole heat Exchangers for High Temperature UTES Applications, Ecstock 2006, Richard Stockton College of New Jersey, USA, 2006.
- [159] Kramer E., Koppelman J., Dobrowsky J., Oxidation stability of crosslinked polyethylene, Isothermal DTA method, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Volume 35, Number 2, ISSN 1388-6150, p. 443-457, 1998.
- [160] Saechtling H., Oberbach K., Kunststoffaschenbuch, 28. Auflage, Hanser Verlag, ISBN: 3-446-21605-7, München, 2001.
- [161] Reddy D. V., Sitomer, G. R., Life Prediction of HDPE Geomembranes in Solid Waste Landfills, Annual Report, Center for Marine Structures and Geotechnique, Department of Ocean Engineering, Florida Atlantic University, Glades, USA, 1997.
- [162] Needham A. D., Gallagher E. M. G., Smith J. W. N., Prediction of the Long Term Generation of Defects in HDPE Liners, Proc, EuroGeo3, Volume II, p.507 ff., Munich, 2003.
- [163] Bartholomeo P., Astruc A., Massieu E., Lavaud S., Benneton J. P., Thermo-oxidative ageing of polypropylene geosynthetics monitored by thermal analysis and mechanical tensile tests, Proc. Third European Geosynthetics Conference, Eurogeo3, p.415-420, Munich, 2003.
- [164] Pedersen S., Nielsen U., Fastlæggelse af levetider for plastlinere til sæsonvarmelagre, (Estimation of lifetime for polymer liners for seasonal, thermal storage), Teknologisk Institut, Gregersvej, 2630 Taastrup, Denmark,

1999.

- [165] Pedersen S., Fastlæggelse af levetider for 2 HDPE plastlinere til sæsonvarmelagre, UVE-project, "Aktiveter vedrorende udvikling af plastlinere til sæsonvarmelagre", ENS. J. nr 51181/01-0065, Teknologisk Institut, Lyngby, DK, 2004.
- [166] Lopes M. d. G. A., Barroso M., Mechanical performance of HDPE geomembrane seams after sunlight exposure, Proc. Third European Geosynthetics Conference, Eurogeo3, p. 425 – 428, Munich, 2003.
- [167] Grosskurth K. P., Langzeituntersuchung an Heißwassergelagerten Kunststoff- und Elastomerdichtungsbahnen, BMFT Vorhaben 03E-8325 – A, Langzeituntersuchungen für den Langzeitwärmespeicher Prototyp Wolfsburg, Braunschweig, 1984.
- [168] Großkurth K. P., Langzeitmaterialuntersuchungen für den Langzeit-Wärmespeicher Prototyp Wolfsburg, BMFT-Forschungsbericht zum Vorhaben 03E-8325-A, Braunschweig, 1984.
- [169] Bohmayr W., Fa. Agru, Forschungsprojekt Eggenstein Solarer Wärmespeicher, Lebensdauerabschätzung CKW Sperrschichtbahnen, 2007.
- [170] Brown R. P., Butler T., Hawley S. W., Ageing of Rubber, Accelerated Heat Aging Test Results, Rapra Technology Limited, 2001.
- [171] Brellocks J., Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts von Bentonitmatten, Studienarbeit am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart, Stuttgart, 2004.
- [172] ITW, Universität Stuttgart, PKi, Pfeil und Koch Ingenieure, Antrag auf Förderung aus Solarthermie-2000, Teilprogramm 3 „Solar unterstützte Nahwärme“, Weiterentwicklung der Erdbecken-Wärmespeichertechnologie, Stuttgart, 2002.
- [173] West D., ZSW, Report, Improvement of the gravel-water-store (WP 3), Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoffforschung, Stuttgart, 2000.
- [174] Eggloffstein T., Der Einfluss des Ionenaustausches auf die Dichtwirkung von Bentonitmatten in Oberflächenabdichtungen von Deponien, Band 3, ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt, ISBN 3-9806840-1-6, 2000.
- [175] Rowe R., Geotextiles and Geomembranes, 18. Bericht, International Geosynthetics Society, ISSN 0266-1144, 2000.
- [176] Krischer O., Kast W., Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik, 3. Auflage, Springer-Verlag, ISBN: 3-540-08280-8, Heidelberg, 1992.
- [177] Wiese G., Wasserdampfdiffusion, Ein Beitrag zur praktischen Bauphysik, Teubner Studienskripte, ISBN 3-519-10066-5, Stuttgart, 1985.
- [178] Lutz P., Jenisch R., Klopfer H., Lehrbuch der Bauphysik, 5. überarbeitete Auflage, Teubner-Verlag, ISBN 3-519-45014-3, Wiesbaden, 2002.
- [179] Schirmer R., Die Diffusionswiderstandszahl von Wasserdampf-Luftgemischen und die Verdampfungsgeschwindigkeit, VDI Beiheft Verfahrenstechnik 6,170, 1938.
- [180] Andersson A.-C., Verification of calculation methods for moisture transport in

- porous building materials, Swedish Council for Building Research, D6:1985, Stockholm, 1985.
- [181] De Vries D. A, Heat transfer in Soils, Physics of Plant Environment, Van Wijk W.R. Ed. Amsterdam, North Holland Publishing, 1966.
- [182] VDI-Wärmeatlas, 9. Auflage, Springer Verlag, ISBN: 3-540-41201-8, 2002.
- [183] Sonntag D., Heinze D., Sättigungsdampfdruck- und Sättigungsdampfdichtetafeln für Wasser und Eis. (1. Aufl.), VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1982.
- [184] Künzel H. M., Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten, Diss., Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP), Holzkirchen, 1994.
- [185] Fischer H. M., Lehrbuch der Bauphysik, Teubner Verlag, ISBN 3-519-35014-9, Stuttgart, 1997.
- [186] Kaczmarek D., Barrierefolien für Vakuum-Isolationspaneele im Bauwesen, Proc. VIP-Bau: 2. Fachtagung "Erfahrungen aus der Praxis", Weimar, 2005.
- [187] Köhl M., Heck M., Noller K., Degradation of the efficiency of vacuum insulation panels by gas permeation through barrier films, 10 DBMC, International Conference on Durability of Building Materials and Components, Lyon, France, 2005.
- [188] Adam G., Jung J., Eine neue Methode zur Bestimmung der Diffusions- und Permeationskoeffizienten von Elastomeren“, Kautschuk Gummi Kunststoffe 43, p. 1067-1070, 1990.
- [189] Aluminium-Taschenbuch. Bd.2. Umformen von Aluminium, Verlag: Aluminium, Aluminium-Zentrale, ISBN 3870172428, Düsseldorf, 1999.
- [190] Berg C., Grundlagen der Wägetechnik – Begriffe, Messverfahren, Fehlereinflüsse, 2. Auflage, Sartorius AG, 1996.
- [191] Brandrup J., Immergut E. H., Polymer Handbook, Third Edition, A Wiley Interscience Publication, ISBN 0-471-81244-7, New York, 1989.
- [192] Cassidy P. E., Aminabhavi T. M., Water permeation through elastomers and plastics, Rubber chemistry and technology 56, p. 594-618, 1983.
- [193] Comyn J., Introduction to polymer permeability and the mathematics of diffusion, Polymer Permeability, Elsevier applied science publishers, 1985.
- [194] Crank J., The mathematics of diffusion, Oxford, Clarendon, 1975.
- [195] Domininghaus H., Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften, VDJ Verlag, ISBN 3-540-62659-X, 1998.
- [196] Gibbesch B., Schedlitzki D., Water Vapour Permeability of Organic Materials for Coatings, Rubber Linings and Equipment Components, PCE, Technology Publishing Company, 1996.
- [197] Gibson P. W., Effect of Temperature on Water Vapour Transport Through Polymer Membrane Laminates, Journal of Polymer Testing 19 (6), p. 673-691, 2000.
- [198] Halek G. W., Relationship between polymer structure and performance in

- food packaging applications, Food and Packaging interactions, ISBN 0-8412-1465-4, Hotchkiss, J.H. chapter 16, p 195-202, 1988.
- [199] Haxo H. E., Miedema J. A., Nelson N. A., Permeability of polymeric membrane lining materials for waste management facilities, Education Symposium, Migration of Gases, Liquids and Solids in Elastomers, 126th Meeting, Rubber Division, American Chemical Society, Denver, Colorado, 1984.
- [200] Hertlein J., Eigenschaftsprofile von Packstoffen und Verpackungen aus Kunststoff, Bauwelt 135, Nr. 4, p. 140 -150, 1995.
- [201] Hoffmann M., Krömer H., Kuhn R., Polymer Analytik: makromolekulare Strukturen physical. Methoden, Anwendungskriterien I und II, Georg Thieme Verlag, ISBN 3-13-519801-4, 1977.
- [202] Hopfenberg H. B. (editor), Permeability of Plastic films and Coatings to Gases, Vapors, and Liquids, Polymer Science and Technology, Volume 6, ISBN 0-306-36406-9, Plenum Press, New York, 1974.
- [203] Jamieson E. H. H., Windle A. H., Structure and oxygen barrier properties of metallized polymer film, Journal of Material Science, 18, Nr. 1, p. 64-80, 1983.
- [204] Massey L.K., Permeability Properties of Plastics and Elastomers – A Guide to Packaging and Barrier Materials, Second Edition, Volume 2. Plastic Design Library, 2003.
- [205] Mercea P., Muresan L., Mecea V., Permeation of gases through metallized polymer membranes, Journal of Membrane Science 24, p. 297-307, 1985.
- [206] Murray L., McCarry P., Effect of Test Conditions and PET Surface Treatment on Moisture Barrier of Multilayer Metallized Film Structures, Journal of Plastic Film & Sheeting, Vol. 19, 2003.
- [207] Osswald T. A., Menges G., Material science of polymers for engineers, 2. ed., ISBN 1-56990-348-4, Hanser, Munich, 2003.
- [208] Rogers C. E., Permeation of gases and vapours in polymers. Comyn, J. Polymer Permeability, London Elsevier, p. 11-73, 1985.
- [209] Roos K. F., Moser M. A., Martin A. G., Agstar charter farm program: Experience with five floating lagoon covers, In Fourth Biomass Conference of the Americas, US Environmental Protection Agency, 1999.
- [210] Salame M., Temple E. J., High nitrile copolymers for food and beverage packaging, Chemistry of food packaging, Americ. Chem. Soc., Coult, R. F., ISBN 08412-0205-2, p. 61-76, 1974.
- [211] Teichmann W., report, measurements by Fraunhofer Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung, (IVV), [www.ivv.fraunhofer.de](http://www.ivv.fraunhofer.de).
- [212] Visscher K., Medium-Term Solar Heat Storage in a Water Filled Bag Tank, 9th Conference on Solar Energy in High Latitudes, Northsun 2001, Leiden, The Netherlands, 2001.
- [213] Wilhelms C., Vajen K., Jordan U., Theoretische und experimentelle Untersuchungen großer kostengünstiger Speicher in Mehrkomponentenbauweise, Poster zum PTJ-Statusseminar, Freiburg, 2006,

Posterbeitrag.

- [214] Wilhelms C., Theoretische und experimentelle Untersuchung neuartiger Konzepte zur Warmwasserspeicherung für thermische Solaranlagen, Diplomarbeit, Kassel, 2005.
- [215] Zehner P., Experimentelle und theoretische Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit durchströmter Kugelschüttungen bei mäßigen und hohen Temperaturen, VDI-Forschungsheft 558, Karlsruhe, 1973.
- [216] Schlünder E.-U., Tsotsas E., Wärmeübertragung in Festbetten, durchmischten Schüttgütern und Wirbelschichten, ISBN 3-13-713001-8, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1988.
- [217] Zehndner H., Wärmedämmstoffe für hohe Temperaturen- Anforderungen für Wärmeleitfähigkeit und Temperaturbeständigkeit, wksb, Heft 25, 33. Jahrgang 1988, Ludwigshafen, 1988.
- [218] Cammerer W. F., Wärme- und Kälteschutz im Bauwesen und in der Industrie, 5. Auflage, ISBN 3-540-57426-3, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1995.
- [219] Großmann K., Neue Wege für das Ermitteln der effektiven Schüttgut-Wärmeleitfähigkeit und für die indirekte Gutfeuchtebestimmung, Fortschr. Ber. VDI Reihe 3 Nr. 314, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993.
- [220] Zeitler M. G., Allgemeingültiges Modell zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit poröser Stoffe und Stoffschichten, Diss., Universität Essen, 2000.
- [221] Benner M., Blähglasgranulat Liaver, Bestimmung von Richtwerten der effektiven Wärmeleitfähigkeit, ITW Universität Stuttgart, 1999.
- [222] Benner M., Interne Messdaten, Daten ITW, Uni Stuttgart, 2001.
- [223] Salmon D. R., Thermal conductivity of insulations using guarded hot plates, including recent developments and sources of reference materials, Meas. Sci. Technol. 12 R89-R98, 2001.
- [224] Salmon D. R., Williams R. G., Ronald P. T., Thermal Conductivity and Moisture Measurements on Masonry Materials, Insulation Materials: Testing and Applications: 4th Volume, ASTM STP 1426, A. O. Desjarlais and R. R. Zarr, Eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2002.
- [225] Kreis O., Untersuchung der feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen, Studienarbeit am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart, Stuttgart, 2005.
- [226] Liebchen R., Einfluss des Verdichtungsgrades auf die feuchte –und temperaturabhängige effektive Wärmeleitfähigkeit von schüttfähigen Dämmstoffen, Studienarbeit am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart, Stuttgart, 2007.
- [227] Dippon M., Beurteilung und Erprobung von Messverfahren für die Bestimmung des Wassergehalts von Dämmstoffen für Erdbecken-Wärmespeicher, Studienarbeit am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart, Stuttgart, 2005.

- [228] Ochs F., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Effective Thermal Conductivity of Moistened Insulation Materials as a Function of Temperature, International Journal of Heat and Mass Transfer, Elsevier, 2007.
- [229] Zweschper B., Ergebnisse der dreiaxialen Scherversuche an den Blähglasgranulaten, Bericht, IGS, Uni Stuttgart, 2005.
- [230] Knoche G., Koch M., Untersuchungen an unterschiedlichen Erdreichtypen für Erdbecken-Wärmespeicher, Interner Bericht, ISWA, Uni Stuttgart, Stuttgart, 2004.
- [231] Hens H., IEA Annex 24 Final Report Volume 1: Modelling, Acco Leuven, Belgium, 1996.
- [232] Hagentoft C.-E., Kalagasidis A. S., Adl-Zarrabi B., Roels S., Carmeliet C., Hens H., Grunewald J., Funk M., Becker R., Shamir D., Adan O., Brocken H., Kumaran K., Djebbar R., Assessment method of numerical prediction models for combined heat, air and moisture transfer in building components: benchmarks for one-dimensional cases, Journal of Thermal Envelope and Building Science, Vol. 27, p. 327-352, 2004.
- [233] Bomber M., Carmeliet J., Grunewald J., Holm A., Karagiozis A., Künzle H., Roels S., Position Paper on Material Characterisation and HAM Model Benchmark, 2002.
- [234] Cornick S., Results of the HAMSTAD Benchmarking Exercises Using hygIRC 1-D version 1.1, Research Report, Institute for Research in Construction, May 12, 2006, 93 pp. IRC-RR-222, 2006.
- [235] Sathyanarayanan R., Derome D., Rivard H., The Need for an Integrated Computer-based Tool to Support Building Envelope Design, eSim 2002, The Canadian conference on building energy simulation, September 11th - 13th, 2002.
- [236] Stefan J., Über das Gleichgewicht und die Bewegung, insbesondere die Diffusion von Gasgemengen, Sitzungsbericht der mathematischen naturwissenschaftlichen Klasse der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, Wien, 63, 2.Abt., 1871.
- [237] Glaser H., Temperatur- und Dampfdruckverlauf im einer homogenen Wand bei Feuchtigkeitsausscheidung, Kältetechnik 10, H.6, S.174-179, 1958.
- [238] Glaser H., Wasserdampfdiffusion durch hygroskopische Baustoffe im Hinblick auf die DIN 4108, Gesundheitsingenieur 107, H.2, S85-97, 1986.
- [239] Glaser H., Graphisches Verfahren zur Untersuchung von Diffusionsvorgängen, Kältetechnik, 11. Jahrgang, p. 345-349, 1959.
- [240] Luikov A. V., Heat and mass Transfer in capillary-porous bodies, Pergamon Press, Oxford, 1966.
- [241] Philip J. R., de Vries D. A., Moisture movement in porous media under temperature gradients, Eos Trans, AGU, 38(2), p. 222-232, 1957.
- [242] Gertis K., Werner H., Die Problematik der Porenanalyse von Baustoffen – Kritische Ansätze zu hygri-schen Interpretation des Porengefüges, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 258, 1976.
- [243] Gertis K., Kießl K., Feuchtetransport in Baustoffen, eine Literaturlauswertung zur rechnerischen Erfassung hygri-scher Transportphänomene,

Forschungsberichte aus dem Fachbereich Bauwesen der Universität Gesamthochschule-Essen, Heft 13, Essen, 1980.

- [244] Achtziger J., Messung der Wärmeleitfähigkeit von Schaumkunststoffen mit beliebigem Feuchtigkeitsgehalt, *Kunststoffe im Bau*, H. 23, p.19-22, 1971.
- [245] van Genuchten M.Th., A closed form equation for predicting hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 44, p. 892-898, 1980.
- [246] van Genuchten M.Th., A comparison of numerical solutions of the one-dimensional unsaturated-saturated flow and mass transport equations, *Advances in Water Resources* 5, p. 47-55, 1982.
- [247] Kießl K., Gertis K., Feuchtetransport in Baustoffen. Eine Literaturlauswertung zur rechnerischen Erfassung hygrischer Transportphänomene, *Forschungsberichte aus dem Fachbereich Bauwesen 13*, Universität Essen Gesamthochschule, 1980.
- [248] Kießl K., Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen, *Rechnerische Erfassung und Bauphysikalische Anwendung*, Dissertation, Essen, 1983.
- [249] Kießl K., Krus M., Messung von Wassergehalten und Feuchtetransportvorgängen in Baustoffen mittels kernmagnetischer Resonanz, *IBP-Mitteilung* 14, Nr. 148, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart, 1987.
- [250] Kießl K., Krus M., Kapillartransportkoeffizienten von Baustoffen aus NMR-Messungen, *IBP-Mitteilungen* 16, Nr. 175, Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Stuttgart, 1989.
- [251] Tsotsas E., Martin, H., Thermal conductivity of packed beds, *Chem. Eng. Process*, 22, p. 19-37, 1987.
- [252] Tsotsas E., Eine einfache empirische Gleichung zur Vorausberechnung der Porosität polydisperser Kugelschüttungen, *Chem.-Ing.-Tech.* 63, p. 495/496, 1991.
- [253] Häupl P., Stopp H., Feuchtetransport in Baustoffen und Bauwerksteilen, *Dissertation*, TU Dresden, Dresden, 1987.
- [254] Häupl P., Fechner H., *Hygric Material Properties of porous building materials*, TU Dresden, 2003.
- [255] Cary J. W., Taylor S. A., The Interaction of the Simultaneous Diffusions of Heat and Water Vapor, *Soil Science Society Am. Proc.*, Vol. 26, p. 413–416, 1962.
- [256] Cary J. W., Taylor S. A., Thermally Driven Liquid and Vapor Phase Transfer of Water and Energy in Soil, *Soil Science Society Am. Proc.*, Vol. 26, p. 417–420, 1962.
- [257] Jury W.A., Simultaneous Transport of Heat and Moisture Through a Medium Sand. Ph.D. Thesis, University of Wisconsin, Madison, WI, USA, 1973.
- [258] Milly P. C. D., The coupled transport of water and heat in a vertical soil column under atmospheric excitation, *Dissertation*, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 1980.
- [259] Milly P. C. D., Moisture and Heat transfer in hysteretic inhomogenous porous

- media: a matrix head-based formulation and a numerical model, *Water Resources Research*, 18(3), p. 489-498, 1982.
- [260] Hussein F., Feuchteverteilung in porösen Baustoffen aufgrund instationärer Wasserdampfdiffusion: eine neue Rechenmethode in Anlehnung an DIN 4108, Dissertation, Uni Dortmund, Dortmund, 1982.
- [261] Rode P. C., Combined Heat and moisture transfer in building constructions, Dissertation, Technical University of Denmark (DTU), 1990.
- [262] Garecht H., Porenstrukturmodelle für den Feuchtehaushalt von Baustoffen mit und ohne Salzbefrachtung und rechnerische Anwendung auf das Mauerwerk, Dissertation, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 1992.
- [263] Seerig A., Untersuchungen zum Energie- und Stofftransport in feuchten porösen Stoffen, Diss., Forschungsberichte VDI, Reihe 3 Nr. 304, Düsseldorf, 1993.
- [264] Krarti M., Claridge D. E., Kreider J. F., A Foundation Heat Transfer Algorithm for Detailed Building Energy Programs, *ASHRAE Transactions*, Vol. 100(2), p. 843–850, 1994.
- [265] Krus M., Feuchtetransport und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Messtechniken, Diss., Lehrstuhl Konstruktive Bauphysik, Uni Stuttgart, Stuttgart, 1995.
- [266] Pel L., Moisture transport in porous building materials, Dissertation, Technische Universität Eindhoven, 1995.
- [267] Lee M. S., Versuche und kritische Anmerkungen zu einigen Grundlagen der Feuchtespeicherung und des Feuchtetransports in Baustoffen, Dortmund 1996.
- [268] Grunewald J., Diffusiver und Konvektiver Stoff- und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen, Diss., Technische Universität Dresden, Dresden, 1997.
- [269] Descamps F., Continuum and discrete modelling of isothermal water and air transfer, Dissertation, KU Leuven, Leuven, Belgium, 1997.
- [270] Burch D. M., Chi J., MOIST – A PC program for predicting heat and moisture transfer in building envelopes, Release 3.0, NIST Special Publications 917, 1997.
- [271] Xu Y., Numerische Simulation der Eisbildung in kapillarporösen Baustoffen unter Berücksichtigung der gekoppelten Wärme- und Feuchteprozesse, Dissertation, TU Dresden, Dresden, 1998.
- [272] Brocken J. B. P., Moisture transport in brick masonry: the grey area between bricks, Dissertation, TU Eindhoven, Eindhoven, The Netherlands, 1998.
- [273] Bednar T., Beurteilung des feuchte- und wärmetechnischen Verhaltens von Bauteilen und Gebäuden, Weiterentwicklung der Meß- und Rechenverfahren, Diss., TU Wien, Wien, Austria, 2000.
- [274] Bednar T., Approximation of liquid moisture transport coefficient of porous building materials by suction and drying experiments. Demand on determination of drying curve, Proc. 6th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, Trondheim, Norway, 2002.

- [275] Carmeliet J., Roels S., Non-isothermal moisture flow in porous materials, Proc., 10. Bauklimatisches Symposium, Dresden, p. 221-230, Dresden, 1999.
- [276] Roels S., Carmeliet J., Hens H., A Mesh Adaptive Technique for the Simulation of Unsaturated Moisture Transfer in Open Porous Materials, Finite Elements: Techniques and Developments (Leuven), B.H.V. Topping (ed.), Civil-Comp Press, p. 103-110, Edingburgh, UK, 2000.
- [277] Roels S., Carmeliet J. and H. Hens, Modelling Unsaturated Moisture Transport in Heterogeneous Limestone, Transport in Porous Media, 52, p. 351-369, 2003.
- [278] Deru M., A model for ground coupled heat and moisture transfer from buildings, NREL/TP-550-33954, USA, 2003.
- [279] Deru M., Ground-Coupled Heat and Moisture Transfer From Buildings, Ph.D. Dissertation, Colorado State University, Fort Collins, CO, USA, 2001.
- [280] Ozaki A., A new potential model on combines heat and water transfer basd on thermodynamic energy, eSim 2002.
- [281] Ozaki A., Systematic Analysis Model on Combined Heat and Water Transfer Using Water Potential Based on Thermodynamics, Journal of Thermal Envelope and Building Science, 27, p. 95-122, 2003.
- [282] Mendes N., Philippi P. C., Lamberts R., A New Mathematical Method to Solve the Highly-Coupled Equations of Heat and Mass Transfer in Porous Media, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 54/3, p. 509-518, 2002.
- [283] Mendes N., Winkelmann F. C., Philippi P. C., Lamberts R., Moisture Effects on Conduction Loads, Energy & Buildings v. 35, n.7, p. 631-644, 2003.
- [284] Mendes N., Philippi P. C., A method for predicting heat and moisture transfer through multilayered walls based on temperature and moisture content gradients, International Journal of Heat and Mass Transfer 48, 37-51, 2005.
- [285] Janssen H., The influence of soil moisture transfer on building heat loss via the ground, Dissertation, KU Leuven, Leuven, Belgium, 2002.
- [286] Janssen H., Blocken B., Carmeliet J., Simulation of moisture and heat transfer in building components under atmospheric excitation: conservative modelling and numerical optimisation, Proc. 7th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, Reykjavík, Iceland, 2005.
- [287] Janssen H., Blocken B., Carmeliet J., Conservative Modelling of the Moisture and Heat Transfer in Building Components under Atmospheric Excitation, International Journal of Heat and Moisture Transfer, vol: 50, issue: 5-6, p. 1128-1140, Elsevier, 2007.
- [288] Whitaker S., Simultaneous heat, mass and momentum transfer in porous media: a theory of drying, Advances in Heat Transfer 13, p. 119-203, 1977.
- [289] Stuis M., Kratz W., Greubel D., Rechenmodelle und Simulationsversuche zur Beurteilung des feuchtetechnischen Verhaltens von Bauteilen Teil 1 & 2, wksb, Heft 23/24, 32. Jahrgang 1987, Ludwigshafen, 1987.
- [290] Celia M. A., Boulatas E. T., Rarba R. L., A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation, Water Resources Research 26 (1990), p. 1483-1496, 1990.

- [291] Hokoi S., Kumaran M. K., Experimental and analytical investigations of simultaneous heat and moisture transport through glass fiber insulation, J. Thermal Insul. And Bldg. Envs. Vol. 16, p. 263-292, 1993.
- [292] Vos M., Ashton G., Van Bogert J., Ensminger R., Heat and Moisture Diffusion in Magnetic Tape Packs, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 30, No.2 1994.
- [293] Szekeres A., Engelbrecht J., Coupling of Generalized Heat and Moisture Transfer, Periodica Politechnica, Ser. Mech. Eng. Vol. 44 No. 1, p. 161 – 170, 2000.
- [294] Trechsel H. R., The current perspective rules to prevent moisture problems in building envelopes & analytical methods and models and their limitations, Moisture Analysis and Condensation Control in Building Envelopes, ASTM Manual Philadelphia, USA, 2001.
- [295] Holm A., Krus M., Künzel H. M., Approximation der Feuchtespeicherfunktion aus einfach bestimmbar Kennwerten, IBP-Mitteilungen 406, 29 (2002), Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP), Stuttgart, 2002.
- [296] Qiu X., Haghghat F., Kumaran K., Modeling Moisture Accumulation in Multi-Layered Building Materials, Canadian conference on building energy simulation, Montreal, Canada, 2003.
- [297] Worch A., The behaviour of vapour transfer on building material surfaces: the vapour transfer resistance, Journal of the Envelope and Building Science 28, p. 187-199, 2004.
- [298] Janetti M. B., Entwicklung eines mathematischen Modells für den Wärme- und Feuchtetransport bei hohen Temperaturen, diploma thesis, ITW, University of Stuttgart and Politecnico di Milano, Stuttgart, 2006.
- [299] HiPTI – High Performance Thermal Insulation IEA/ECBCS Annex 39 Report, Study on VIP-components and Panels for Service Life Predictions of VIP in Building Applications (Subtask A), 1995.
- [300] von Smoluchowski M., Bericht über den II. Internationalen Kältekongress, Band 2, Wien, 1910.
- [301] Lichtenfels A., Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete for Shells, International Symposium on Ultra High Performance Concrete (UHPC), Kassel, 2004.
- [302] West D., Entwicklung eines direkten Be- und Entladesystems für einen Kies/Wasser-Wärmespeicher, Diplomarbeit, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart, Stuttgart, 1999.
- [303] Kiedaisch J., Entwicklung einer Wasserwegsamkeit durch Geokunststoffe oder Kies für einen Erdreich/Wasser-Wärmespeicher, Diplomarbeit, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart, Stuttgart, 2002.
- [304] Ergun. S., Fluid Flow through Packed Columns., Chem. Eng. Prog., 48(2):89-94, 1952.
- [305] Chang W., Experimentelle Untersuchung zur freien Konvektion an Rohren in einer Kies/Wasser-Schüttung, Diss., Universität Stuttgart, Stuttgart, 2001.

- [306] Schenke A., Drück H., Müller-Steinhagen H., Optimierung großer Solarer Kombianlagen in Theorie und Praxis, OTTI, 16. Symposium Thermische Solarenergie, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 2006.
- [307] Baehr H. D., Stephan K., Wärme- und Stoffübertragung, 2. Auflage, Springer Verlag, ISBN: 3-540-60374-3, Berlin, 1996.
- [308] Jamialahmadi, M. Müller-Steinhagen, H., Izadpanah, M.R., Pressure drop, gas hold-up and heat transfer during single and two-phase flow through porous, International Journal of Heat and Fluid Flow 26, 2005, p. 156 – 172, 2005.
- [309] Kling G., Versuche über den Wärmeaustausch in Rohren mit kugeligen und zylindrischen Füllungen, Chemie-Ing.-Techn., 31 (1959), pp. 705-710, 1959.
- [310] Ackermann D., Wärme- und Stoffübertragung bei der Kondensation eines turbulent strömenden Dampfes in Anwesenheit von Inertgas, Diss., Universität Stuttgart, Stuttgart, 1972.
- [311] ASHREA Handbook of Fundamentals. American Society of Heating Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Atlanta, GA, USA, 1997.
- [312] Beavers G. S., Sparrow, E. M.; Rodenz, D. E., Influence of bed size on the flow characteristics and porosity of randomly packed beds of sphere Trans. ASME., J. Applied Mechanics (1973), pp. 655-660, 1973.
- [313] McGeary R., Mechanical packing of spherical particles, J. of the American Ceramic Society, 44 (1961), pp. 513-522, 1961.
- [314] Faust T., Beck M., Pore Structure of Different LWAs, Summary 1999, Universität Leipzig, 1999.
- [315] Bouguerra A., Laurent J. P., Goual M. S., Queneudec M., The measurement of the thermal conductivity of solid aggregates using the transient plane source technique, J. Phys. D. Appl. Phys. 30 (1997), p. 2900-2904, UK, 1997.
- [316] Walz K. (editor), Merkblatt I für Leichtbeton und Stahlbeton mit geschlossenem Gefüge, Betonprüfung zur Überwachung der Leichtzuschlagherstellung, Betontechnische Berichte des Forschungsinstituts der Zementindustrie, 1974.
- [317] Quast U., Wärme- und Stoffübertragung in Gegenstrom-Kühltürmen unter Berücksichtigung von Nebel- und Sprühtropfenbildung, TH Darmstadt, Diss., Darmstadt, 1977.
- [318] Reid R. C., Prausnitz J. M., Poling B. E., The Properties of Gases and Liquids, McGraw-Hill Book Company Inc., Third Edition, , New York, USA 1977.
- [319] Schmidt T., Mangold D., Solar unterstützte Kraft-Wärme-Kopplung mit saisonalem Wärmespeicher - das dänische Pilotprojekt „SUNSTORE 4“, Otti 23. Symposium TSE, Bad Staffelstein, 2013.
- [320] Mangold D., Miedaner O., Tziggili E., Schmidt T., Unterberger M., Zeh B., Technisch-wirtschaftliche Analyse und Weiterentwicklung der solaren Langzeit-Wärmespeicherung : Forschungsbericht zum BMU-Vorhaben 0329607N ; wissenschaftlich-technische Programmbegleitung für Solarthermie2000plus ; Laufzeit: Dezember 2007 bis Februar 2011, Stuttgart, 2012.

- [321] Schlosser M., Wärmespeicher Hamburg-Bramfeld – Umbau, Inbetriebnahme und Monitoring, 22. Symposium Thermische Solarenergie  
Veranstalter: OTTI, 09.-11.05.2012
- [322] Fisch N., Schlosser M., Heuer M., Zargari M., Wissenschaftliche Begleitung und Sonderuntersuchungen der solar unterstützten Nahwärmeversorgungen Hamburg-Bramfeld, Hannover-Kronsberg und Steinfurt-Borghorst;  
Forschungsbericht (Teil 2) Multifunktionsspeicher Hamburg-Bramfeld und Einbindung regenerativer Niedertemperaturwärme Thomas-Mann-Straße, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 0329607Q, September 2008 bis Dezember 2012, 2013.
- [323] Ochs, F.; Nußbicker-Lux, J.; Marx, R.; Koch, H.; Heidemann, W.; Müller-Steinhagen, H.: Solar assisted district heating system with seasonal thermal energy storage in Eggenstein-Leopoldshafen. EuroSun 2008, Lissabon, 08.–10.10.2008.
- [324] Bauer, D.; Marx, R.; Nußbicker-Lux, J.; Ochs, F.; Drück, H.; Heidemann, W.: Forschungsbericht zum BMU-Vorhaben "Solarthermie2000plus: Wissenschaftlich-technische Begleitung des Förderprogramms Solarthermie2000plus zu solar unterstützter Nahwärme und Langzeit-Wärmespeicherung" FKZ 0329607P (Aug. 2008 bis Sep. 2012), 2013
- [325] Bauer, D.; Marx, R.; Nußbicker-Lux, J.; Ochs, F.; Heidemann, W.; Müller-Steinhagen, H.: German Central Solar Heating Plants with Seasonal Heat Storage. In: Solar Energy 84 (2010). S. 612-623.
- [326] Marx, R.; Bauer, D.; Drück, H.: Schüttfähige Dämmstoffe für Langzeit-Wärmespeicher - Erfahrungen und Planungsempfehlungen. 22. OTTI-Symposium thermische Solarenergie. Kloster Banz, Bad Staffelstein 09.-11.05.2012.
- [327] Marx, R.: Integration von Wärmepumpen in solare Nahwärmanlagen mit saisonaler Wärmespeicherung. Symposium "EnergieCampus" der Stiftung Energie & Klimaschutz Baden-Württemberg. Stuttgart 14.11.2012.
- [328] Marx, R.; Nußbicker-Lux, J.; Bauer, D.; Heidemann, W.: Integration von Wärmepumpen in solar unterstützte Nahwärmesysteme mit saisonaler Wärmespeicherung. 21. OTTI Symposium thermische Solarenergie. Kloster Banz, Bad Staffelstein 2011.
- [329] Zhang, S., Zheng, M., Wang, X., Wang, Z. Simulation on ground source heat pump system combined with seasonal air thermal energy storage, 2012
- [330] Pavlov, G.K., Olesen, B.W., Thermal energy storage-A review of concepts and systems for heating and cooling applications in buildings: Part 1- Seasonal storage in the ground, 2012
- [331] Zhang, S., Zheng, M.Y., Wang, X., Sun, H.L., Experimental study on air seasonal thermal storage in a ground source heat pump system in severe cold areas, 2011
- [332] Pavlov, G.K., Olesen, B.W., Seasonal ground solar thermal energy storage - Review of systems and applications, 2011
- [333] Zhang, W.-Y., Zheng, M.-Y., Wang, X., Numerical simulation and experimental verification of solar seasonal soil thermal storage, 2011
- [334] Socaciu, L.G., Seasonal sensible thermal energy storage solutions, 2011
- [335] Zhao, Y., Zhao, D., Wang, S., Huang, S., Fang, X., Research on solar energy underground seasonal storage device and its parameters measuring system, 2011
- [336] Di, B., Ma, C.-F., Zhang, G.-Y., Zhao, H.-T., Tang, Z.-W., Experimental study

- on a solar assisted heat pump system with seasonal underground energy storage for space heating, 2011
- [337] Yang, W., Chen, Z., Shi, M., Underground energy storage and release characteristics of ground source heat pump with seasonal energy storage, 2010

## Normen

- [338] DIN 4108 Teil 4, Thermal insulation and energy economy in buildings - Part 4: Hygrothermal design values, 2004.
- [339] DIN 52612, Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät, 1979.
- [340] DIN 52615, Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen, Testing of thermal insulation, determination of water vapour permeability of building and insulation materials, 1987.
- [341] DIN 52620, Bestimmung des Bezugsfeuchtegehalts von Baustoffen, 1991.
- [342] DIN 66133, Determination of the pore volume distribution and the specific surface area of solids by mercury intrusion, 1993.
- [343] DIN 66135, Micropore Analysis by Gas Adsorption, Part 4. Determination of pore size distribution according to the Horvath-Kawazoe and Saito-Foley method, 2001.
- [344] DIN EN 12087, Wärmedämmstoffe für das Bauwesen, Bestimmung der Wasseraufnahme bei langzeitigem Eintauchen, Thermal insulating products for building applications - Determination of long term water absorption by immersion, 1997.
- [345] DIN EN 13755, Bestimmung der Wasseraufnahme unter atmosphärischem Druck, Determination of water absorption and saturation coefficient, 2002.
- [346] DIN EN 13859-1, Abdichtungsbahnen - Definitionen und Eigenschaften von Unterdeck- und Unterspannbahnen - Teil 1: Unterdeck- und Unterspannbahnen für Dachdeckungen, 2005.
- [347] DIN EN 571-1, Zerstörungsfreie Prüfung - Eindringprüfung - Teil 1: Allgemeine Grundlagen; Non-destructive testing - Penetrant testing - Part 1: General principles, 1997.
- [348] EN 12664, Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät, Trockene und feuchte Produkte mit mittlerem und niedrigem Wärmedurchlasswiderstand, 2001.
- [349] EN 12939, Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät, Dicke Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand, 2000.
- [350] EN 13788, Hygrothermal Performance of building components and building elements – Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation – Calculation Methods.
- [351] CEN/TC89 WG10, Hygrothermal performance of building components and building elements – Assessment of moisture transfer by numerical simulation (prenormative text), 2003.
- [352] DIN EN 15026, Juli 2007. Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation; Deutsche Fassung EN 15026:2007
- [353] DIN EN ISO 12570, Bestimmung des Feuchtegehaltes durch Trocknen bei erhöhter Temperatur, März 2000.

- [354] DIN EN ISO 12571, Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften, April 2000.
- [355] DIN 51056, Bestimmung der freien Wassersättigung, 1959.
- [356] ASTM C 177, Guarded Hot Plate Method, 1993.
- [357] ASTM D 4279, Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Shipping Containers-Constant and Cycle Methods, 1995.
- [358] ASTM D3079, Standard Test Method for Water Vapor Transmission of Flexible Heat-Sealed Packages for Dry Products, 2003.
- [359] ASTM D814, Standard Test Method for Rubber Property- Vapor Transmission of Volatile Liquids, 2005.
- [360] ASTM E398, Standard Test Method for Water Vapor Transmission Rate of Sheet Materials Using Dynamic Relative Humidity Measurement, 2003.
- [361] ASTM E96, Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials, 2005.
- [362] ASTM F1249, Standard Test Method for Water Vapor Transmission Rate Through Plastic Film and Sheeting Using a Modulated Infrared Sensor, 1995.
- [363] ASTM F372, Standard Test Method for Water Vapor Transmission Rate of Flexible Barrier Materials Using an Infrared Detection Technique, 2003.
- [364] DIN 53122, Testing of plastics and elastomer films, paper, board and other sheet materials - Determination of water vapour transmission, 2001.
- [365] DIN EN ISO 7783-1, Paints and varnishes - Determination of water-vapour transmission rate, Part 1: Dish method for free films, 1996.
- [366] DIN EN ISO 7783-2, Paints and varnishes - Coating materials and coating systems for exterior masonry and concrete - Part 2: Determination and classification of water-vapour transmission rate (permeability), 1999.
- [367] EN 12086, Thermal insulating products for building applications - Determination of water vapour transmission properties, 1997.
- [368] EN ISO 12572, Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties, 2001.
- [369] ISO 15106, Plastics - Film and sheeting - Determination of water vapour transmission rate, 2003.
- [370] ISO 1663, Rigid cellular plastics - Determination of water vapour transmission properties, 1999.
- [371] ISO 2528, Sheet materials - Determination of water vapour transmission rate - Gravimetric (dish) method, 1995.
- [372] ISO 9932, Paper and board – Determination of water vapour transmission rate of sheet materials - Dynamic sweep and static gas methods, 1990.
- [373] JIS K 7225, Rigid cellular plastics - Determination of water vapour transmission properties, 2005.
- [374] JIS K-7129, Testing methods for water vapour transmission rate of plastic film and sheeting (instrument method), 1992.

- [375] JIS Z 0208, Testing methods for determination of the water vapour transmission rate of moisture-proof packaging materials (dish method), 1976.
- [376] TAPPI T523, Dynamic measurement of water vapor transfer through sheet materials.
- [377] TAPPI T557, Water vapour transmission rate through plastic film and sheeting using a modulated infrared sensor.
- [378] ASTM D 5887, Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter, ASTM International (USA), 2002.
- [379] DIN 18130 – 1, Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts – Teil 1: Laborversuche, Normenausschuss Bauwesen (NABau) im Deutschen Institut für Normung e.V., 1998.
- [380] DIN 1055 – 3, Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 3: Eigen- und Nutzlasten für Hochbauten, Action on structures – Part 3: Self-weight and imposed load in building, 2006.
- [381] DIN EN ISO 527-3, Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 3: Prüfbedingungen für Folien und Tafeln, 2003.
- [382] DIN EN ISO 527-2, Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen, <http://www.iso.org/iso/en/CatalogueDetailPage.CatalogueDetail?CSNUMBER=4593&scopelist=Plastics> - Determination of tensile properties - Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics, 1996.
- [383] DIN 12814 - Prüfung von Schweissverbindungen aus thermoplastischen Kunststoffen, Schälversuch, 1999.

## Internet

- [384] Züblin Spezialtiefbau GmbH, <http://www.Züblin.de>, 2006.
- [385] Product Information Haase, <http://www.haase.de>, <http://www.ichbin2.de>, 2006.
- [386] European Large Scale Solar Heating Network <http://www.enerma.cit.chalmers.se/cshp/>, 2006.
- [387] TRNSYS, A Transient System Simulation Program, Solar Energy Laboratory University of Wisconsin, Madison and Transsolar, Stuttgart, Germany, 2000.
- [388] Fluent, Fluent Computational Fluid Dynamics (CFD) Software & Services, <http://www.fluent.com>, 2006.
- [389] Ansys CFX, <http://www.waterloo.ansys.com/>, 2006.
- [390] Adina-T, <http://www.adina.com>, 2006.
- [391] Sarnafil, <http://www.sarnafil.com>, 2006.
- [392] Contitech, <http://www.contitech.com>, 2006.
- [393] Dyneon, Freestyle Membrane architecture, <http://www.dyneon.com>, 2006..
- [394] WUFI Software, <http://www.wufi.de>, Homepage des IBP Holzkirchen

- <http://www.hoki.ibp.fhg.de>, Simulationsprogramm WUFI, 2006.
- [395] Delphin Software, <http://gwtonline.de/produkt-shop/DELPHIN/>, 2006.
- [396] Moist, National Institute of Standards and Technology and the Virginia Polytechnic Institute and State University, [www.nist.gov](http://www.nist.gov), 2006..
- [397] Liapor, <http://www.liapor.de>, Homepage der Liapor GmbH, Hallerndorf-Pautzfeld, 2006.
- [398] Liaver, <http://www.liaver.de>, Homepage der Liapor GmbH, Ilmenau, 2006
- [399] Poraver, <http://www.poraver.de>, Homepage der Dennert Poraver GmbH, Schlüsselfeld, 2006.
- [400] Puren, <http://www.puren.com>, 2006.
- [401] Millcell, <http://www.schaumglasschotter.de> , Homepage der Millcell-Vogtland GmbH, Oelsnitz, 2006.
- [402] Taurus Instruments, <http://www.taurus-instruments.de>, Homepage der Taurus Instruments GmbH, Weimar, 2006.
- [403] Perlite, <http://www.perlite.de>, Homepage der Knauf Perlite GmbH, 2006.
- [404] Rockwool, <http://rockwool.de> , Homepage der Deutsche Rockwool GmbH, 2006.
- [405] Technical Information, Gas Permeability of Fluoropolymers, Atofina Chemicals, 2000.
- [406] Producer information, Agru, <http://www.agru.at>
- [407] Producer information, Basell Polyolefins, Polyethylen, Products and Properties, <http://www.basell.com>
- [408] Producer information, BASF, <https://worldaccount.basf.com/>
- [409] Producer information, Degussa, <http://www.degussa.de>
- [410] Producer information, Dow Chemicals, <http://www.dow.com/saran>
- [411] Producer information, Du Pont Dow Elastomers, <http://www.dupont.com>, 2003.
- [412] Producer information, GSE Lining Technology, Inc., <http://www.gseworld.com>, 2003.
- [413] Producer information, Hoechst, <http://www.hoechst.de>, Nowoflon, ET, <http://www.nowofol.de>
- [414] Producer information, Sarnafil International AG, <http://www.sarna.com> , 2003.
- [415] Producer information, technical data sheet, Alwitra, <http://www.alwitra.de>
- [416] Producer information, technical data sheet, Saarnova, <http://www.saarnova.de>
- [417] Producer information, Trelleborg, [www.trelleborg.com](http://www.trelleborg.com), Contitec, [www.contitec.de](http://www.contitec.de) , Goodyear, <http://www.goodyear.de>
- [418] Product Information Haase GFK-Technik GmbH, <http://www.haase.de>, <http://www.ichbin2.de>
- [419] Product Information, Naue, <http://www.naue.com>

- [420] Product Information, Armacell, <http://www.armacell.com>
- [421] Product Information, <http://www.labview.com>
- [422] Product Information, <http://www.nicolon.com>
- [423] [www.waermedaemstoffe.com](http://www.waermedaemstoffe.com)
- [424] [www.wien.gv.at/stadtentwicklung/energieplanung/erneuerbare/waermespeicher.html](http://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/energieplanung/erneuerbare/waermespeicher.html)
- [425] <http://www.iba-hamburg.de/erleben/ausstellungen/energiebunker.html>