

Saisonale Wärmespeicher: neue Pilotanlagen im Programm Solarthermie2000plus und Forschungsperspektiven

D. Mangold, Th. Schmidt
Solites – Steinbeis Forschungsinstitut für solare
und zukunftsfähige thermische Energiesysteme
Nobelstr. 15, 70569 Stuttgart
Tel.: +49-711 / 673 2000 0; Fax: +49-711 / 673 2000 99
E-Mail: info@solites.de; www.solites.de

1. Einleitung

Die Entwicklung von Techniken zur saisonalen Wärmespeicherung begann in Deutschland mit dem Bau eines Forschungsspeichers im Jahr 1984 (Hahne, 2000). Durch das Forschungs- und Demonstrationsprogramm Solarthermie-2000 konnten in den Jahren 1995 bis 2002 acht Pilotanlagen zur solarthermischen saisonalen Wärmespeicherung realisiert und wissenschaftlich-technisch begleitet werden. Der saisonale Wärmespeicher nimmt hierbei die durch große Kollektorflächen vorwiegend in den Sommermonaten gewonnene Solarenergie auf und speichert diese bis zur Heizsaison.

Durch das wissenschaftlich-technische Begleitprogramm wurde die Dimensionierung der Kollektorfläche und des Speichervolumens vorgegeben und die Planung und Realisierung der Pilotanlagen begleitet. Durch das daran anschließende umfangreiche Messprogramm konnte die Funktion von allen realisierten Speicherkonzepten nachgewiesen werden.

Seit Februar 2004 wird das Forschungs- und Demonstrationsprogramm unter dem Namen Solarthermie2000plus durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) fortgesetzt. Dies ermöglicht nun nach der für Pilotanlagen dieser Größe notwendigen jahrelangen Projektentwicklung den Bau weiterer saisonaler Wärmespeicher: im Jahr 2006 werden die saisonalen Wärmespeicher in München gebaut und in Crailsheim begonnen. Im Jahr 2007 wird ein Speicher in Eggenstein-Leopoldshafen folgen. Weitere Projekte sind in Planung.

Solites führt unter anderem die wissenschaftlich-technische Programmbegleitung für alle Anlagen mit saisonalem Wärmespeicher durch, deren Realisierung mit Fördermitteln von Solarthermie2000plus erfolgt. Die Pilotprojekte, die saisonale Wärmespeicher meist in ein Nahwärmenetz einkoppeln, werden in Zusammenarbeit mit den beteiligten Forschungspartnern und Planern entwickelt. Hierbei werden mehrere technische Schwerpunkte parallel verfolgt: neben den Techniken zur saisonalen Wärmespeicherung sind dies hauptsächlich die technologische Weiterentwicklung großer solarthermischer Kollektorfelder, die Integration des Solarsystems und des Wärmespeichers in das restliche Energieerzeugungssystem, Niedertemperatur-Nahwärmenetze, Technologien zur Reduzierung der Netzurücklaufemperatur und zur Erhöhung des solaren Nutzwärmeertrages bei hoher Netzurücklaufemperatur und Methoden zur Qualitätssicherung und praxisgerechten Umsetzung der Anforderungen dieser innovativen Techniken. Ziel ist hierbei, eine gleichzeitige Effizienzerhöhung bei sinkenden Investitionskosten der solar unterstützten Nahwärmesysteme mit saisonalem Wärmespeicher zu erreichen, um die Wirtschaftlichkeit der genutzten Solarwärme Schritt für Schritt zu verbessern, bis in einigen Jahren die Wirtschaftlichkeit der saisonalen Wärmespeicherung von Solarwärme erreicht werden kann.

Im folgenden werden die Entwicklungen der saisonalen Wärmespeicher, die durch die mit Unterstützung von Solarthermie-2000 begleiteten acht Pilotanlagen entstanden sind, zusammengefasst und hieraus die Entwicklungen der aktuellen Speicherkonzepte für die Projekte in München und in Crailsheim abgeleitet. Eine Projektion dieser Entwicklungen in die Zukunft zeigt die Forschungsperspektiven auf.

2. Der Technologiefortschritt in den letzten 10 Jahren

Eine der Hauptaufgaben der ersten beiden Pilotanlagen mit saisonalem Wärmespeicher, die Ende 1996 in **Friedrichshafen und Hamburg** in Betrieb gingen, war der Nachweis, dass eine saisonale Wärmespeicherung von Solarwärme im Siedlungsmaßstab umsetzbar ist und funktioniert. Diesen Nachweis konnten beide Anlagen vollständig erbringen, auch wenn der Nutzwärmeertrag der Speicher geringer als erwartet ist. Die Ursachen hierfür sind:

1. Die Netzurücklauftemperatur, auf die der Speicher auskühlen kann, ist durchschnittlich bis über 15 K höher als erwartet. Dies reduziert die maximal nutzbare, gespeicherte Wärmemenge, und die Wärmeverluste durch den ungedämmten Speicherboden sind deutlich höher als geplant.
2. Die Dämmwirkung der in beiden Projekten eingesetzten Mineralfaser nimmt bei höheren Temperaturen (40 bis 90 °C) aufgrund der durch den Einbau im Erdreich verursachten geringen Feuchte wesentlich stärker zu als zum Planungszeitpunkt bekannt war. Hierzu zeigt der Beitrag von F. Ochs genaue Werte.
3. Die Temperaturschichtung in den Speichern ist geringer als die mit den damals vorhandenen Rechenmodellen berechnete. Dadurch reduziert sich die nutzbare Temperatur im Deckenbereich und erhöht sich die Temperatur und damit der Wärmeverlust im ungedämmten Bodenbereich.

Mit dem Bau des Kies-Wasser-Wärmespeichers in **Steinfurt-Borghorst** im Jahr 1998 wurde zum einen die Notwendigkeit einer niedrigen Netzurücklauftemperatur konsequent in die Praxis umgesetzt. Das Nahwärmenetz erreicht leistungsgemittelte Netzurücklauftemperaturen von rund 35 °C. Zum anderen wurde erstmals ein robuster, feuchteunempfindlicher und schütffähiger Dämmstoff verwendet: Blähglasgranulat. Im Juni 2000 führte ein Ausfall beider Drainagepumpen des Speichers zu einer völligen Flutung der Wanddämmung. Aufgrund der guten Drainagewirkung der Blähglasgranulatschüttung und der Feuchteunempfindlichkeit der Dämmkugeln konnte die Dämmung innerhalb von rund zwei Jahren wieder austrocknen und ein grundlegendes Bauprinzip für das Wärmedämmsystem von im Erdreich vergrabenen Wärmespeichern war gefunden: es muss havariesicher sein.

Auch im Abdichtsystem zeigt sich dieser Ansatz: während der Kies-Wasser-Wärmespeicher in Chemnitz, der zwei Jahre vor dem Speicher in Steinfurt-Borghorst geplant wurde, eine einlagige Abdichtfolie besitzt, wurde in Steinfurt-Borghorst eine zweilagige Abdichtfolie aus PP eingebaut. Das zwischen den beiden Folienlagen erzeugte geringe Vakuum wurde während der Bauphase durch Löcher in der Abdichtbahn mehrmals zerstört. Diese konnten dann repariert werden – auch hier zeigt sich das Prinzip der Havariesicherheit.

Zur Reduzierung der spezifischen Baukosten der ersten Behälterspeicher in Friedrichshafen und Hamburg durch den Verzicht auf die teure Edelstahlauskleidung wurde währenddessen an der Universität Stuttgart ein neuartiger Hochleistungsbeton entwickelt, der auch bei hohen Temperaturen wasserdicht bleibt. Im Behälterspeicher in **Hannover-Kronsberg** wurde im Jahr 2000 dieser Beton eingesetzt. Es zeigte sich jedoch, dass zur Sicherstellung der Dichtheit eine Rissbreitenbeschränkung notwendig ist, die eine sehr hohe und dadurch kostenintensive Bewehrung des Betons erfordert – die geplante Kostenreduktion konnte nicht erzielt werden.

In **Rostock** wurde im Jahr 2000 erstmals ein Aquifer-Wärmespeicher erschlossen, der im oberflächennahen Bereich bis in 30 m Tiefe Solarwärme auf einem Temperaturniveau bis maximal 50 °C speichert. Durch eine konsequent umgesetzte Niedertemperatur-Haustechnik – die Radiatoren-Raumheizung ist auf eine Vorlauftemperatur von 45 °C ausgelegt – und den Einsatz einer Wärmepumpe, die auf einen Pufferspeicher mit 30 m³ arbeitet, konnte diese Anlage im Jahr 2002 erstmals den geplanten solaren Deckungsanteil von 50 % des jährlichen Gesamtwärmebedarfs erzielen.

Der Aquifer-Wärmespeicher funktioniert zuverlässig. In den letzten beiden Jahren hat sich der Gehalt an organischen Substanzen im Speicherhorizont zwar nicht besorgniserregend, aber doch leicht erhöht. Dies wird in den folgenden Monaten detailliert untersucht.

Der Erdsonden-Wärmespeicher in **Neckarsulm** ist in beiden realisierten Ausbaustufen aus Polybuten-Doppel-U-Rohr-Erdwärmesonden gebaut. Dieses im Vergleich zu sonstigen Sonden aus PE sehr teure Sondenmaterial war das zum damaligen Zeitpunkt einzig verfügbare, das dem notwendigen Innendruck bei der gegebenen Temperaturbelastung bis 95 °C dauerhaft standhält und schweißbar ist, um den Sondenfuß herstellen zu können. In der ersten Ausbaustufe besteht die Wärmedämmung, die in rund 2 bis 3 m Tiefe auf dem Speicherhorizont liegt, aus direkt im Erdreich liegenden, extrudierten Polystyrol-Hartschaumplatten (XPS). Messungen an dieser Wärmedämmung, die während den Bohrarbeiten zur zweiten Ausbaustufe durchgeführt werden konnten, zeigten, dass das XPS entgegen der Herstelleraussage aufgrund der Temperaturbelastung von dauerhaft über 50 °C stark durchfeuchtet ist. Die Dämmwirkung ist dadurch deutlich reduziert. In der zweiten Ausbaustufe wurden die XPS-Platten daher in Dichtbahnen eingeschweißt. Diese Ausführung stellte sich jedoch als sehr kostenintensiv dar.

Eine Übersicht der Pilotanlagen zeigt Tabelle 1. Zu jedem Speicher sind umfangreiche, detaillierte Ergebnisse dokumentiert – z.B. in den Forschungsberichten der wissenschaftlich-technischen Projektbegleitung (Benner, 2004; Mangold, 2005a).

Tabelle 2 fasst den Technologiefortschritt der letzten 10 Jahre für die Behälter-, Erdbecken- und Erdsonden-Wärmespeicher zusammen und zeigt die derzeitigen Entwicklungslinien auf. Aquifer-Wärmespeicher wurden kaum mehr für eine solarthermische Wärmespeicherung angefragt. Seit rund zwei Jahren steigt jedoch das Interesse an Aquifer-Wärmespeichern zur Speicherung von Abwärme aus Gebäuden oder aus der Stromerzeugung.

Zur Weiterentwicklung der Erdbecken-Wärmespeichertechnologie wird auf den Beitrag von F. Ochs verwiesen, der einen Teil der Ergebnisse des gleichnamigen Forschungsvorhabens vorstellt.

		Hamburg ¹	Friedrichshafen ¹ Planung im Endausbau (Stand)	Neckarsulm ¹ Phase I (Phase II)	Steinfurt ¹	Chemnitz ² (1. BA)
Jahr der Inbetriebnahme		1996	1996	1997 (2001)	1998	2000
Versorgungsgebiet		124 RH	Endausbau: 570 WE in MFH (390)	6 MFH, Einkaufszentrum, Schule, Sporthalle, Altenheim etc.	42 WE in 22 EFH und kleinen MFH	Planung: Bürogebäude, Hotel und Einkaufszentrum
Beheizte Wohn- / Nutzfläche	m ²	14 800	39 500 (33 000)	(25 000)	3 800	4 680
Kollektorfläche (Apertur)	m ²	3 000 FK	5 600 FK (4 050)	2 700 FK (5 260)	510 FK	540 VRK
Speichervolumen	m ³	4 500 HWWS	12 000 HWWS	100 HWWS + 20 000 EWS (200 + 63 300)	1 500 KWWS	8 000 KWWS
Gesamtwärmebedarf	MWh/a	1 610	4 106 (3 000)	1 663 (2 200)	325	1. BA: 573
Nutzwärmelieferung Solarsystem*	MWh/a	789	1 915	832	110	1. BA: 169
Solarer Deckungsanteil*	%	49	47	50	34	1. BA: 30
Kosten Solarsystem (ohne Förderung)	Mio. Euro	2,2	3,2	3,5	0,5	1. und 2. BA: 1,4
Solare Wärmekosten* (o. MwSt. u. Förderung, inkl. Planung)	Ct./kWh	25,7	15,9	26,5	42,3	1. und 2. BA: 24,0
		Rostock³	Hannover⁴	Attenkirchen⁵	München (in Realisierung)	Crailsheim (in Realisierung, 1.BA)
Jahr der Inbetriebnahme		2000	2000	2002	2006	2006
Versorgungsgebiet		108 WE in MFH	106 WE in MFH	30 EFH	300 WE in MFH	260 WE in EFH, DH u. RH, Schule, Sporthalle
Beheizte Wohn- / Nutzfläche	m ²	7 000	7 365	6 200	24 800	40 000
Kollektorfläche (Apertur)	m ²	1 000 FK	1 350 FK	800 FK	2 900 FK	7 300 FK
Speichervolumen	m ³	30 HWWS 20 000 AWS	2 750 HWWS	500 HWWS + 9 350 EWS	5 700 HWWS	480 + 100 HWWS + 37 500 EWS
Gesamtwärmebedarf	MWh/a	497	694	487	2 300	4 100
Nutzwärmelieferung Solarsystem*	MWh/a	307	269	378	1 080 ⁵	2 050 ¹
Solarer Deckungsanteil*	%	62 ³	39	55 [#]	47 ⁵	50 ¹
Kosten Solarsystem (ohne Förderung)	Mio. Euro	0,7	1,2	0,76	2,9	4,5
Solare Wärmekosten* (o. MwSt. u. Förderung, inkl. Planung)	Ct./kWh	25,5	41,4	19,0	24,0	19,0
*: Berechnete Werte für den langfristigen Betrieb, #: Primärenergieeinsparung 1: Angaben ITW Universität Stuttgart, 2: Angaben TU Chemnitz, 3: Angaben GTN Neubrandenburg, 4: Angaben IGS Universität Braunschweig, 5: Angaben ZAE Bayern WE: Wohneinheit, EFH: Einfamilienhaus, DH: Doppelhaus, RH: Reihenhaus, MFH Mehrfamilienhaus, BA: Bauabschnitt FK: Flachkollektor, VRK: Vakuum-Röhren-Kollektor HWWS: Heißwasser-Wärmespeicher, KWWS: Kies/Wasser-Wärmespeicher, EWS: Erdsonden-Wärmespeicher, AWS: Aquifer-Wärmespeicher						

Tabelle 1: Übersicht der Pilotanlagen aus Solarthermie-2000 und Solarthermie2000plus

Behälter-Wärmespeicher

	Erste Generation	Zweite Generation	Dritte Generation
Speicherkonstruktion	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
Wärmedämmung	Mineralfaser	Blähglasgranulat in Gewebesäcken	Boden: Schaumglasschotter; Wand und Dach: Blähglasgranulat in Membranschalung
Schutz der Wärmedämmung	konventionell: Mineralfaser und Abdichtbahn	Dampfsperre, Wärmedämmung und diffusionsoffene Dichtbahn	dampfdiffusionsoffene „Dachdämmkonstruktion im Erdreich“, havariesicher
Be- und Entladesystem	obere und untere Tasse	zusätzlich mittlere Tasse	Schichtbeladesystem, Tassen mit automatischer Höhenregulierung
Pilotprojekte	Friedrichshafen und Hamburg (1995)	Hannover (2000)	München und Crailsheim (2005/ 2006)

Erdbecken-Wärmespeicher

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

Erdsonden-Wärmespeicher

	Erste Generation	Zweite Generation
Speicherkonstruktion	Doppel-U-Rohr-Erdwärmesonden aus Polybuten in rechteckigem Grundriss, parallel erweiterbar	Doppel-U-Rohr-Erdwärmesonden aus PEX in kreisförmigem Grundriss, konzentrisch erweiterbar
Wärmedämmung	XPS-Dämmplatten	Schaumglasschotter
Schutz der Wärmedämmung	konventionelle Abdichtbahn	dampfdiffusionsoffene Dichtbahn
hydraulische Verbindung	Sonden mit Horizontalverrohrung verschweißt, 10 Schächte mit Verteilern	Sonden mit unterschiedlichen Schenkellängen, 1 zentraler Schacht, minimierte Verbindungen mit Pressfittingen
Pilotprojekte	Neckarsulm (1997/ 2001), Attenkirchen (2002)	Crailsheim (2007)

Tabelle 2: Übersicht der Technologieentwicklung der saisonalen Wärmespeicher

3. Die neuen Pilotanlagen in München und Crailsheim

Die Entwicklung der Pilotprojekte zur solaren Nahwärme mit saisonalem Wärmespeicher in München und in Crailsheim begann im Jahr 2000. Wie Tabelle 2 zu entnehmen ist, wird in beiden Projekten jeweils die nächste Generation der Wärmespeicher umgesetzt. Während in München ein großer Behälterspeicher aus Betonfertigteilen erstellt wird, wurde in Crailsheim schon im Jahr 2004 ein Pufferspeicher mit 100 m³ in völlig neuartiger Bauweise erstellt. Im Jahr 2007 wird das System in Crailsheim durch den Bau des Erdsonden-Wärmespeichers komplettiert. Im Folgenden werden die Speicherkonzepte dieser Pilotanlagen vorgestellt. Detaillierte Informationen sind z.B. in Mangold (2006) zu finden.

3.1. Die solare Nahwärme am Ackermannbogen (SNAB) in München

Die Entwicklung des Speicherkonzeptes für das Pilotprojekt SNAB bezog alle vier Speichertypen Behälter-, Erdbecken-, Erdsonden- und Aquifer-Wärmespeicher ein. Aufgrund der geologischen Randbedingungen, der Anforderungen des Wärmeversorgungssystems und den Wünschen des Bauherrn wurde letztendlich ein Behälterspeicher mit 5.700 m³ Wasserinhalt zur Ausführungsplanung empfohlen.

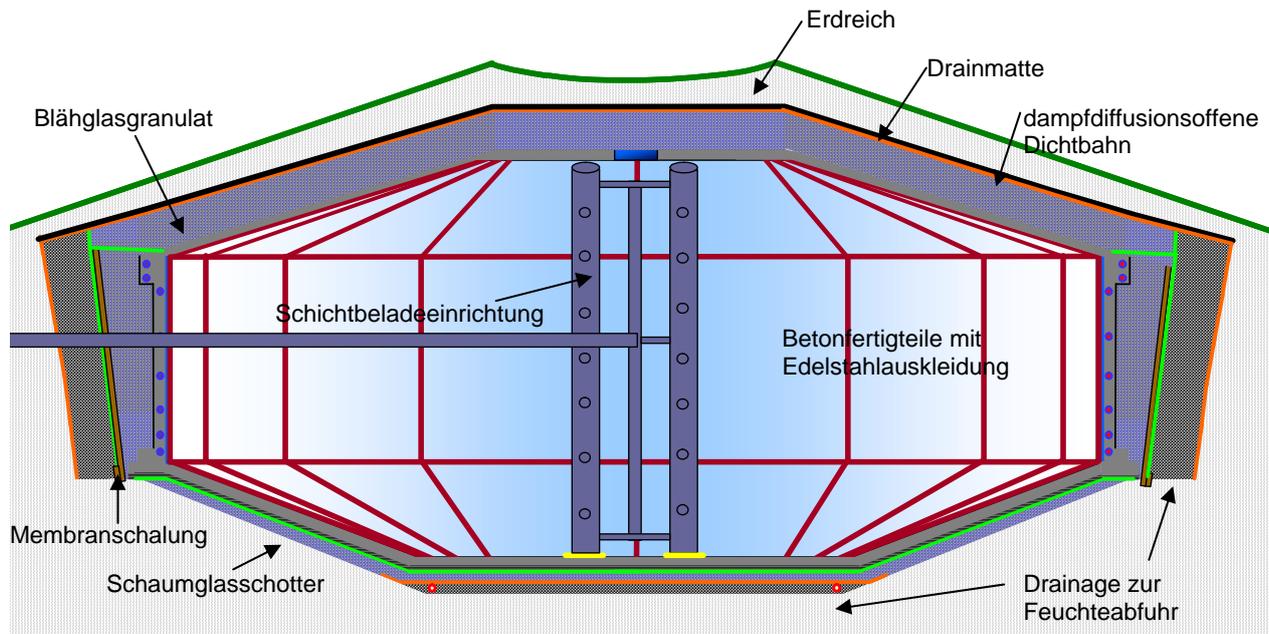


Bild 1: Querschnitt durch den Behälterspeicher in München (5.700 m³)

Bild 1 zeigt einen Querschnitt durch den Speicher. Dieser besteht aus einem Kegelstumpf in einer rund 5 m tiefen Baugrube, der in Ort beton ausgeführt wird. Aufgrund der in den seitherigen Wärmespeichern gemessenen Wärmeverluste über die Bodenplatte, die jeweils deutlich über den erwarteten Werten liegen, erhält dieser Speicher eine Wärmedämmung des unteren Speicherbereiches aus Schaumglasschotter. Der auf dem Kegelstumpf ruhende, rund 10 m hohe Zylinder wird aus Betonfertigteilen, die auf der Speicherinnenseite eine Edelstahlauskleidung tragen, aufgestellt und vorgespannt. Hierauf wird ein weiterer Kegelstumpf aus Fertigteilen aufgebaut, die ebenso die Edelstahlauskleidung integrieren. Die Stöße der Edelstahlauskleidung werden von innen verschweißt. Die Speicherform ist dem A/V-Optimum einer Kugel angenähert. Die Speicherwände und der Speicherdeckel werden wie in Hannover mit Blähglasgranulat wärme-

gedämmt. Die Dämmstärke nimmt dabei vertikal von unten nach oben auf max. 70 cm zu. Die Wärmedämmung wird durch eine vertikale Drainage vor Erdfeuchtigkeit geschützt.

Im Vergleich zu den Bauweisen der ersten und zweiten Generation von Behälterspeichern sind die in München erwarteten Speicherbaukosten um ca. 20 % reduziert – bei gleichzeitig verbesserter Wärmedämmung des Speichers.

3.2. Die solare Nahwärme Hirtenwiesen 2 in Crailsheim

Im Jahr 2004 wurde in Crailsheim eine erste Ausbaustufe des solaren Nahwärmenetzes mit insgesamt 700 m² Kollektorfläche und einem 100 m³ großen Heißwasser-Pufferspeicher zur Kurzzeit-Wärmespeicherung in Betrieb genommen. Im Herbst 2006 wird ein weiterer Pufferspeicher mit 480 m³ fertig gestellt. Dieser dient zur Pufferung der täglichen, von den Kollektorflächen gelieferten Wärmemenge, die vorwiegend in den Erdsonden-Wärmespeicher eingespeichert wird. Hierdurch kann die maximale Beladeleistung des Erdsonden-Wärmespeichers deutlich unter der maximalen Wärmeleistung der Kollektorflächen gehalten werden. Dadurch ist trotz der Baukosten des 480 m³ großen Pufferspeichers eine bessere Wirtschaftlichkeit des Speichersystems erzielbar. Der Erdsonden-Wärmespeicher soll im Frühjahr 2007 gebaut werden.



Bild 2: Bau des 100 m³-Pufferspeichers in Crailsheim im Jahr 2004

Beide Pufferspeicher werden mit 3 bar Innendruck betrieben. Da dadurch kein Luftvolumen zur Aufnahme des Wasserausdehnungsvolumens im Speicherdeckenbereich möglich ist, kann die innere Auskleidung aus Schwarzstahl anstatt aus Edelstahl ausgeführt werden. Dieser neuartige Ansatz eines Druckspeichers bietet neben der reduzierten Korrosionsgefahr weitere Vorteile: Die Kollektorfelder können bis auf ca. 110 °C Vorlauftemperatur betrieben werden. Die Betriebserfahrungen der Anlagen in Hamburg und Friedrichshafen zeigen, dass dadurch bei außergewöhnlich strahlungsstarken Sommermonaten die Stagnationsgefahr im Solarkreis stark reduziert werden kann. Zum zweiten sind beide Pufferspeicher direkt ohne Wärmeübertrager in das Wärmeversorgungsnetz eingebunden und dienen zur Druckhaltung in diesem Netz. Durch diesen Mehrfachnutzen der beiden Speicher können

Investitionskosten für die Druckhaltung eingespart werden – wie auch durch den Verzicht auf die sonst zur Trennung der unterschiedlichen Druckniveaus notwendigen Wärmeübertrager. Dieser Verzicht spart nicht nur Investitionskosten ein, sondern erhöht gleichzeitig die Effizienz des Solarsystems, da die Solarkollektoren auf einem um die treibende Temperaturdifferenz der Wärmeübertrager (rund 3 K) niedrigerem Temperaturniveau betrieben werden können.

Der 100 m³-Pufferspeicher ist aus Betonzylindern ähnlich den bekannten Abwasserrohren erstellt und vorgespannt. Bild 2 zeigt das Konstruktionsprinzip. Der 480 m³-Pufferspeicher

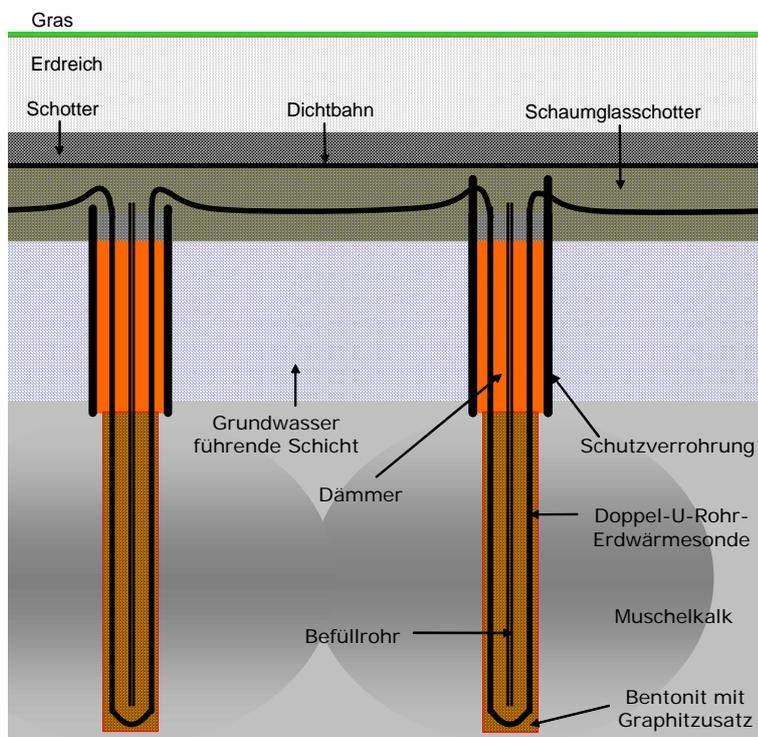
ist in Ortbeton mit Fertigschalungen erstellt, da aufgrund des größeren Innendurchmessers keine Fertigteile sinnvoll transportiert werden konnten.

Beide Speicher werden mit denselben Materialien wie der Speicher in München wärmege-dämmt. Im 100 m³-Pufferspeicher ist das Blähglasgranulat im Wandbereich noch in Gewebesäcken eingebaut, im 480 m³-Pufferspeicher wird eine Membranschalung eingesetzt. Der obere Speicherbereich steht jeweils frei und ist mit einer hinterlüfteten Verklei-dung witterungsgeschützt.

Um zu ermitteln, welche Typen von Langzeit-Wärmespeichern in Crailsheim anwendbar sind, wurden im Frühjahr 2003 geologische Untersuchungen durchgeführt. Im Untergrund bis zu einer Tiefe von 3 bis 4 m unter Geländeoberkante (GOK) sind deutliche Grundwasserströmungen anzutreffen. Weitere hydrogeologische Untersuchungen zeigten, dass der Untergrund in einer Tiefe von 4 bis 60 m unter GOK aufgrund einer sehr geringen Wasserführung sehr gut für einen Erdsonden-Wärmespeicher geeignet ist.

Der Erdsonden-Wärmespeicher wird durch 80 Bohrungen bzw. 4.800 Bohrmeter in einem kreisförmigen Bohrraster von 3 x 3 m erschlossen. Die maximale Bohrtiefe ist auf 60 m beschränkt, da eine darunter liegende wasserführende Schicht erhöhte Wärmeverluste verursachen würde. Der Erdsonden-Wärmespeicher soll auf Temperaturen von ca. 65 °C beladen und anschließend bis zum Ende der Heizperiode auf Temperaturen von ca. 20 °C entladen werden. Die maximalen Beladetemperaturen des Wassers in den Erdwärmesonden betragen über 90 °C.

Bild 3 zeigt das Konzept, die Erdsonden von einem erhöhten Wärmeverlust durch die Oberflächenwasser führende, obere Schicht zu schützen: Die ersten ca. 5 m des Bohrlochs werden mit einem größeren Durchmesser gebohrt. Als Schutzverrohrung wird ein Kunststoffrohr eingestellt, das im Bohrloch verbleibt. Nach Fertigstellung der Bohrung und dem Einbau der Doppel-U-Rohr-Erdwärmesonde wird das untere Bohrloch bis auf Höhe



der Schutzverrohrung verfüllt. Nach dem Abbinden dieser Verfüllung wird die Höhe der Schutzverrohrung mit einem Dämmer verfüllt. Die Horizontalverrohrung zur hydraulischen Verbindung der Erdwärmesonden wird mittig zwischen zwei Lagen Schaumglasschotter verlegt, um Wärmeverluste nach oben und unten zu reduzieren. Diese Wärmedämmung wird durch eine von oben wasserdichte, von unten dampfdiffusionsoffene Folie abgedichtet. Durch die Drainage auf dieser leicht geneigten Folienebene kann das versickernde Oberflächenwasser vom Speicher abfließen.

Bild 3: Vertikalschnitt durch den geplanten Erdsonden-Wärmespeicher in Crailsheim (nicht maßstäblich)

Ein wichtiges Ziel des Pilotprojektes in Crailsheim ist es, ein neues, im Vergleich zum Speicher in Neckarsulm kostengünstigeres Sondenmaterial einzusetzen, das der Temperaturbelastung, die durch die solarthermische Beladung des Speichers entsteht, dauerhaft standhält. In einer längeren Vorabklärungsphase mit möglichen Sondenlieferanten haben sich die beiden Materialien PEX und PE-RT als grundsätzlich geeignet erwiesen. Aufgrund der höheren Temperaturstandfestigkeit und der umfangreicheren Praxiserfahrung werden in Crailsheim nun PEX-Sonden eingesetzt.

4. Perspektiven

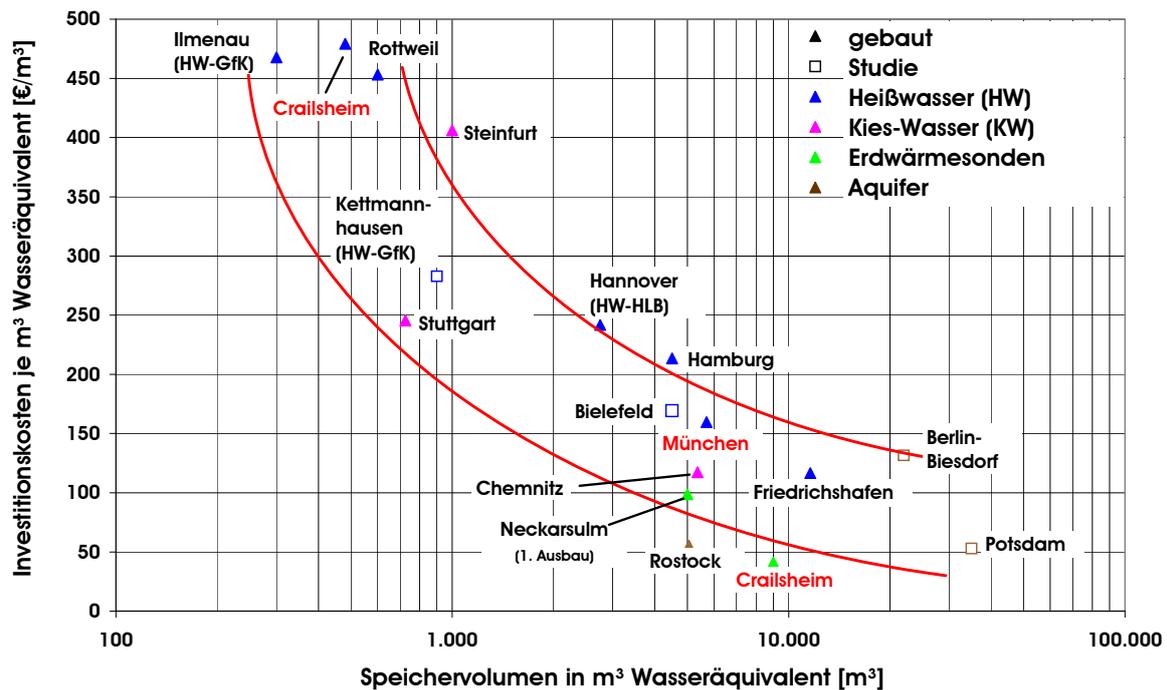


Bild 4: Spezifische Speicherbaukosten (ohne MwSt. und Planung) (GfK: Glasfaserverstärkter Kunststoff, HLB: Hochleistungsbeton)

Die neuen Wärmespeicher in Crailsheim zeigen, dass mit der Begleitforschung in Solarthermie2000plus deutliche Schritte zur Kostenreduktion von großen Wärmespeichern erzielbar sind. Bild 4 zeigt die spezifischen Speicherbaukosten der konzipierten und gebauten saisonalen Wärmespeicher. Hierbei sind die Speicherbaukosten auf das dem jeweiligen Speicher entsprechende, äquivalente Wasservolumen bezogen. Auffällig ist, dass die Pufferspeicher in Crailsheim im mittleren Kostenbereich liegen, obwohl diese Speicher deutlich höhere und dadurch kostenintensive Anforderungen durch den Innendruck von 3 bar haben. Werden die dadurch in der Anlagentechnik einsparbaren Kosten gegengerechnet, sind diese Speicher kostengünstiger als alle seither gebauten Behälterspeicher im selben Größensegment. Der Erdsonden-Wärmespeicher in Crailsheim wird einen neuen Bestwert der spezifischen Speicherbaukosten erzielen.

Der Behälterspeicher in München ist aufgrund der Baubedingungen vor Ort mit den Speichern in Hannover und Hamburg vergleichbar. Es zeigt sich, dass trotz einer höheren Speichereffizienz durch die Bodendämmung etc. um 20 % geringere Speicherbaukosten erzielt werden können.

Mit den ersten saisonalen Wärmespeichern, die innerhalb von Solarthermie-2000 realisiert wurden, konnten die Bauprinzipien für die vier Speichertechnologien Behälter-, Erdbecken-, Erdsonden- und Aquifer-Wärmespeicher entwickelt werden. Alle gebauten Speicher funktionieren zuverlässig, doch zeigte die wissenschaftlich-technische Begleitung auch die Aufgaben, für die optimierte Lösungen zu finden sind:

1. Die **Beanspruchung der eingesetzten Materialien und der statischen Konstruktion** durch bis zu 95 °C heißen Wasserdampf ist härter als noch vor vier Jahren gedacht. Hier zeigte auch das Forschungsvorhaben von F. Ochs, zu dem ein eigener Beitrag vorliegt, dass einige der von den Herstellern als geeignet empfohlenen Materialien als ungeeignet ausgeschlossen werden mussten. Materialien und Konstruktionen, die dieser Belastung dauerhaft standhalten, sind nicht kostengünstig.
2. Neben der Entwicklung großvolumiger Wärmespeicher über 1000 m³ Wasseräquivalent erfordert der Markt die Entwicklung von Bauprinzipien für **kleinere Speichervolumina** im Größenbereich von 30 bis 500 m³.
3. Die Pufferspeicher in Crailsheim zeigen, dass **großvolumige Druckspeicher** trotz höherer Baukosten zum einen durch Mehrfachnutzen kostengünstiger sind, zum anderen aber auch zu Betriebsvorteilen für die Solaranlage führen. Diese Speicher werden aufgrund ihrer höheren Betriebstemperaturen zur Integration in Bestandsgebäude oder Bestandsnetze zu einer besseren Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems führen, da die dort vorhandenen Wärmeverteilsysteme hohe Betriebstemperaturen aufweisen.
4. Die aktuellen Umsetzungserfahrungen insbesondere aus München zeigen, dass eine **Havariesicherheit** der gesamten Speicherkonstruktion gegeben sein muß, wenn der Speicher zuverlässig gebaut und sicher betrieben werden können soll.
5. Durch **Mehrfachnutzen von Wärmespeichern** kann deren Wirtschaftlichkeit deutlich erhöht werden. Die durch die seitherigen Pilotanlagen gesammelten Erfahrungen zeigen, dass die Zusammenführung unterschiedlicher Wärmeerzeuger im Speicher beherrscht werden kann und zusätzliche Effizienzsteigerungen erzielbar sind. So zeigt z.B. eine aktuelle Untersuchung in Mangold (2005b), dass eine Holzfeuerungsanlage zur Wärmeversorgung eines Nahwärmesystems durch den Einsatz eines Pufferspeichers wirtschaftlich optimiert werden kann.
6. Um z.B. wie in Crailsheim die Pufferspeicher direkt in des Wärmeversorgungssystem einkoppeln und als Druckhaltung nutzen zu können, ist ein **integraler Planungsprozess** notwendig, der den HLK-Planer mit dem Statiker, dem wissenschaftlich-technischen Programmbegleiter und dem Bauherrn zu einem Planungsteam vereint.
7. Die Baukosten können auch durch Materialeinsparung reduziert werden. Hierzu sind, wie z.B. die Behälterspeicher in München und Crailsheim zeigen, Konstruktionen notwendig, deren Statik weit über die bestehenden technischen Regeln hinausgeht. Hier ist umfangreicher **Wissenstransfer** notwendig, um die kostengünstigen Bauweisen auch in der Praxis – bei Prüfstatikern, Genehmigungsbehörden, Gutachtern etc. – verankern zu können.
8. **Unternehmen**, die Speicherbauwerke erstellen oder Materialien dafür liefern, sowie Planungsbüros, die diese Speicher planen, zeigen steigendes Interesse an saisonalen Wärmespeichern. So konnte z.B. in Crailsheim die Bauweise des Erdsonden-Wärmespeichers in enger Kooperation mit den beteiligten Planern und den möglichen Lieferfirmen entwickelt werden. Diese Entwicklung beinhaltete sogar Materialentwicklungen,

Tests dieser Materialien, eine Anpassung des Fertigungsablaufs etc.. Hier ist zu wünschen, dass diese Unternehmen zukünftig vermehrt Materialien anbieten werden, die den hohen Anforderungen eines erdvergrabenen Wärmespeichers auf hohem Temperaturniveau über die geplante Nutzungszeit von 40 bis 50 Jahren standhalten.

Die neuen Pilotspeicher in München und Crailsheim werden über den Sommer 2007 beladen, um in der Heizperiode 2007/2008 ihre Funktion erstmals beweisen können. Währenddessen wird dann schon der saisonale Wärmespeicher in Eggenstein-Leopoldshafen gebaut sein. Dieser Speicher wird wiederum eine Weiterentwicklung der seitherigen Speicherkonzepte darstellen. Weitere Speicher werden folgen, um Schritt für Schritt die Speichereffizienz innerhalb des Gesamtsystems erhöhen und die Speicherbaukosten reduzieren zu können.

5. Literatur

Hahne, E. (2000). The ITW solar heating system – an oldtimer fully in action. Elsevier, Solar Energy Vol. 69, No. 6, pp. 469-493

Benner M. (2004), et. al. Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit und ohne Langzeit-Wärmespeicher. Forschungsbericht zum BMWi-Vorhaben 0329606S, ITW, Universität Stuttgart, ISBN 3-9805274-2-5

Mangold, D. (2005a), et. al. Solar unterstützte Nahwärme und Langzeit-Wärmespeicher (Februar 2003 bis Mai 2005). Forschungsbericht zum Vorhaben 0329607F, z.B. unter www.solites.de

Mangold, D. (2005b). Kombination von Holzfeuerungen mit Kurz- und Langzeit-Wärmespeichern. 5. Stuttgarter Holzfeuerungs-Kolloquium 6.10.2005, IVD, Universität Stuttgart, Tagungsband

Mangold, D (2006). Die neuen Pilotprojekte mit solarthermischen saisonalen Wärmespeichern. OTTI Profiforum oberflächennahe Geothermie, 5. und 6.4.2006, Freising, Tagungsband

Danksagung

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit unter dem Förderkennzeichen 0329607L gefördert. Die Autoren danken für diese Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichtes liegt bei den Autoren.

Der Bau der Pilotprojekte wird gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, das Wirtschaftsministerium des Landes Baden-Württemberg, der Stadt Crailsheim und der Landeshauptstadt München.