

Saisonale Wärmespeicher in solar unterstützten Nahwärmenetzen Erfahrungen aus dem Programm Solarthermie-2000

D. Mangold¹⁾, Th. Schmidt¹⁾, H. Müller-Steinhagen^{1) 2)}

¹⁾Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)

Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 6, D-70550 Stuttgart

Tel.: 0711/685-3279, Fax: 0711/685-3242

mangold@itw.uni-stuttgart.de, www.itw.uni-stuttgart.de/sun

²⁾Institut für Technische Thermodynamik (ITT), DLR Stuttgart

1. Einführung

Systeme zur saisonalen Wärmespeicherung werden am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart seit 1984 entwickelt. 1993 begann das damalige Bundesforschungsministerium durch das Energieforschungsprogramm Solarthermie-2000 unter anderem die Technik der saisonalen oder auch Langzeit-Wärmespeicherung einschließlich des technischen Systems zur Nutzung der gespeicherten Wärme weiterentwickeln zu lassen und in Pilotanlagen zu verwirklichen. Bild 1 zeigt die beiden ersten Pilotanlagen, die im Rahmen von Solarthermie-2000 1996 gebaut wurden.



Bild 1: Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit Langzeit-Wärmespeicher in Hamburg (linkes Bild: Siedlung) und Friedrichshafen (rechtes Bild: Bau des Heißwasser-Wärmespeichers)

Seit 1998 ist das Energieforschungsprogramm am Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) angesiedelt. Die Arbeitsgruppe „Solar unterstützte Nahwärme“ des ITW führt die wissenschaftlich-technische Programmbegeleitung des Teilprogramms 3 „Solar unterstützte Nahwärme und Langzeit-Wärmespeicher“ in Zusammenarbeit mit einem Netzwerk von Wissenschaftlern und Praktikern aus dem gesamten Bundesgebiet durch und leitet den nationalen Arbeitskreis Langzeit-Wärmespeicher.

Acht Anlagen mit Langzeit-Wärmespeicher, die im Rahmen des Teilprogramms begleitet

werden, sind in Betrieb /1,2/. Zwei neue Anlagen in München und Crailsheim sind in Vorbereitung und mehrere Projekte befinden sich in der Konzeptphase.

Das öffentliche Interesse an solar unterstützten Nahwärmeanlagen und Langzeit-Wärmespeichern steigt seit zwei Jahren spürbar und das Wissen über diese Technik hat mittlerweile Eingang in die Zielbranchen (Städte, Stadtwerke, Bauträger und Planungsbüros) gefunden. Auch das europäische Ausland beginnt, Interesse an dieser Technologie zu zeigen. So berät das ITW beispielsweise den Bau des neuen dänischen Langzeit-Wärmespeichers auf der Insel Aerö und es liegen erste Anfragen aus Italien, Frankreich und Spanien vor.

2. Langzeit-Wärmespeicher

Langzeit-Wärmespeicher dienen zur Speicherung von Wärme oder auch Kälte über mehrere Monate. Die Wärmespeicherung wird um so effizienter, je kleiner die Wärmeverluste des Speichers in Relation zur gespeicherten Wärmemenge sind. Da die Wärme im Speichervolumen gespeichert wird und die Wärmeverluste durch die wärmeübertragende Oberfläche des Speichers bedingt sind, ist ein kleines Oberflächen/Volumen-Verhältnis, das als A/V-Verhältnis bezeichnet wird, ausschlaggebend für ein effizientes Speichersystem. Dies ist bei Speichergrößen ab ca. 1000 m³ und einer geeigneten Bauform gegeben.

Im Programm Solarthermie-2000 soll mit einem in eine solar unterstützte Nahwärmeversorgung eingebundenen Langzeit-Wärmespeicher ein solarer Deckungsanteil von 50 % und mehr am Gesamtwärmebedarf einer größeren Wohnsiedlung (mehr als 100 Wohnungen) erreicht werden. Bild 2 zeigt ein Anlagenschema mit unterschiedlichen Möglichkeiten zur Einbindung des Nahwärmenetzes in die Gebäudetechnik.

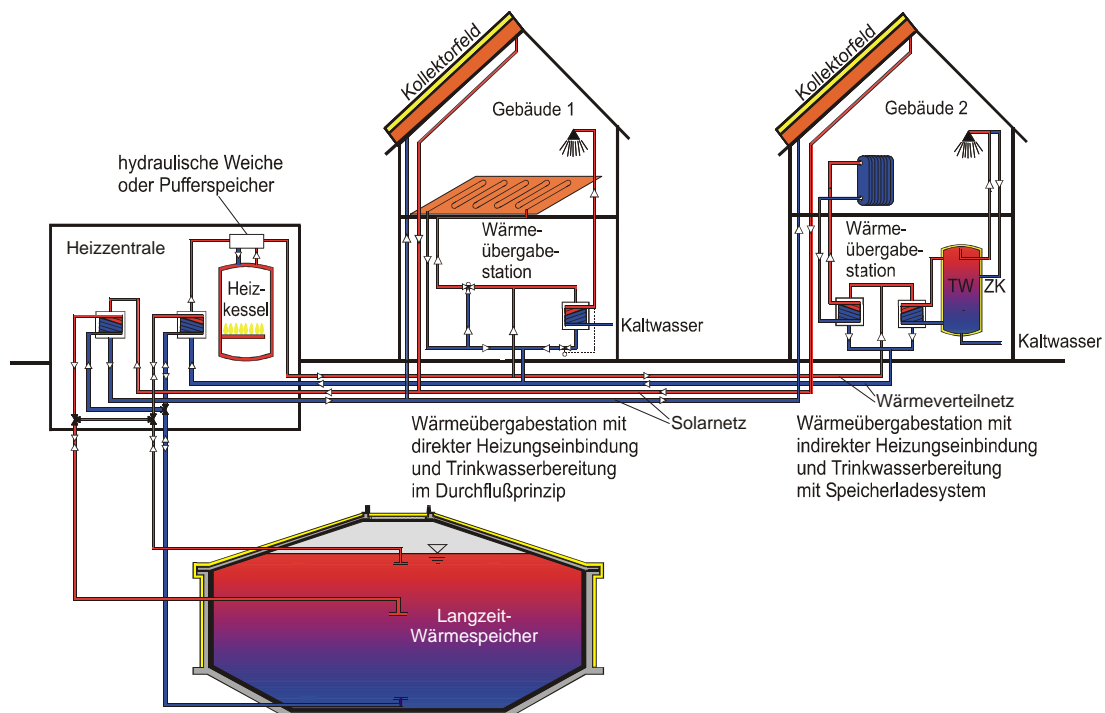


Bild 2: Anlagenschema für solar unterstützte Nahwärmesysteme mit Langzeit-Wärmespeicher (TW: Trinkwasserspeicher, ZK: Zirkulation)

Die von den Sonnenkollektoren gewonnene Wärme wird über das Solarnetz zur Heizzentrale transportiert und bei Bedarf direkt an die Gebäude verteilt. Die Kollektoren sind auf ausgewählten Dächern der Wohngebäude montiert, der saisonale Wärmespeicher ist in den Untergrund eingebaut. Das über das Wärmeverteilnetz gelieferte Heizwasser versorgt die Heizung und Trinkwassererwärmung der Gebäude. Die Wärmeerzeugung in der Heizzentrale verwendet die im Langzeit-Wärmespeicher gespeicherte Solarwärme und heizt bei Bedarf konventionell, z.B. mit einem Gasbrennwertkessel nach. Die Auslegung und Planung solar unterstützter Nahwärmearbeiten ist detailliert in /1/ beschrieben.

In Deutschland sind derzeit die in Bild 3 dargestellten Langzeit-Wärmespeichertypen im Einsatz. Die Entscheidung für einen bestimmten Speichertyp hängt im wesentlichen von den örtlichen Gegebenheiten und insbesondere von den geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen im Untergrund des jeweiligen Standortes ab. Die Bautechnik und die bisherigen Entwicklungen werden im folgenden für jeden Bautyp getrennt dargestellt.

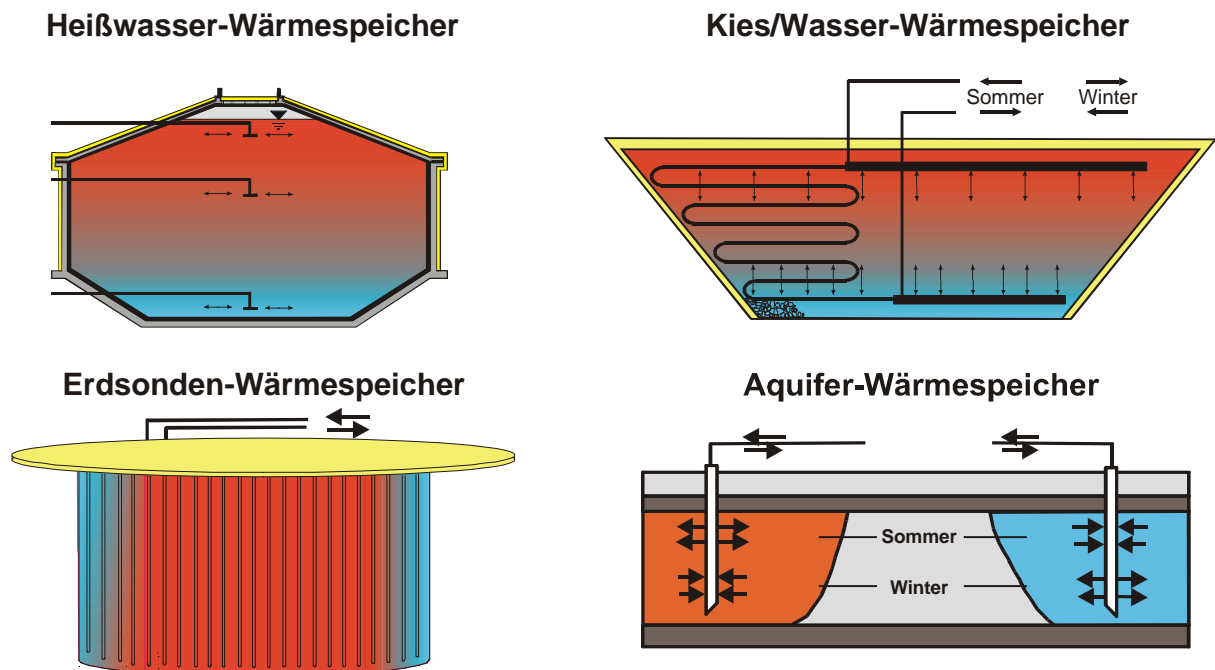


Bild 3: Bauarten von Langzeit-Wärmespeichern

2.1 Heißwasser-Wärmespeicher

Die vielseitigsten Einsatzbereiche eröffnen sich dem Heißwasser-Wärmespeicher. Er kann unabhängig von der Geologie und auch in kleiner Baugröße, z.B. als Wärmespeicher für einen Zeitraum von Tagen bzw. Wochen, eingesetzt werden. Die wassergefüllte Tragkonstruktion aus z.B. Stahlbeton ist teilweise im Erdreich eingebaut. Die Wärmedämmung ist zumindest im Bereich des Deckels und der Seitenwände angebracht. Die wasserdichte Auskleidung des Speichers ist in den ersten Pilotspeichern (Projekte in Rottweil, Hamburg und Friedrichshafen) aus Edelstahlblech ausgeführt /3/.

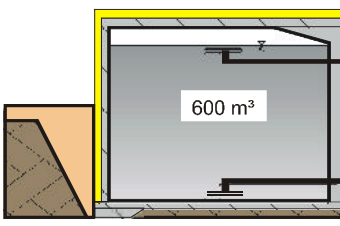
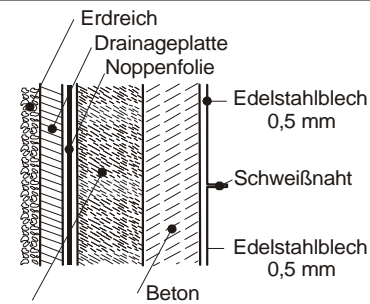
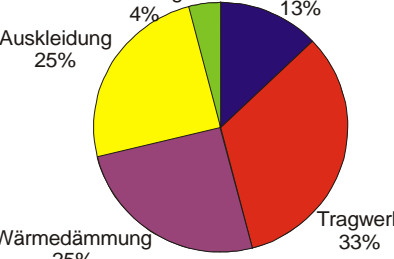
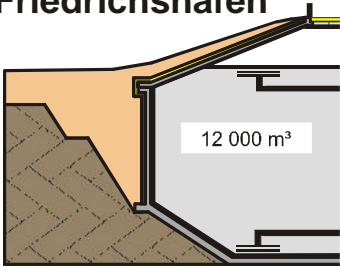
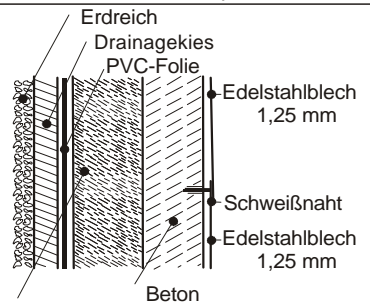
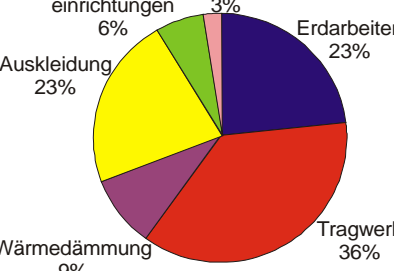
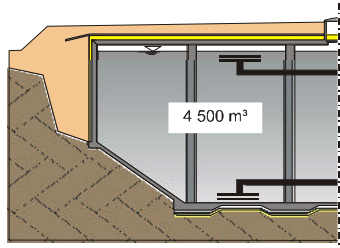
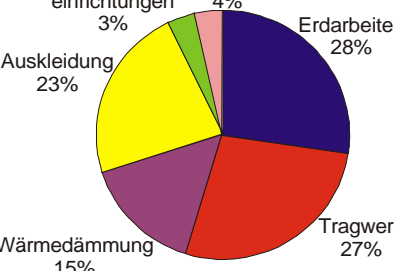
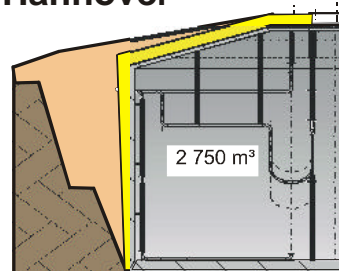
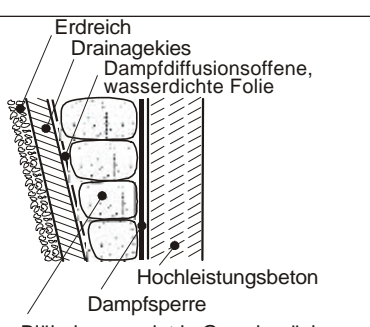
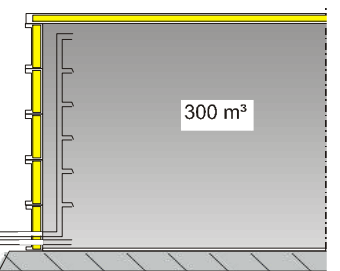
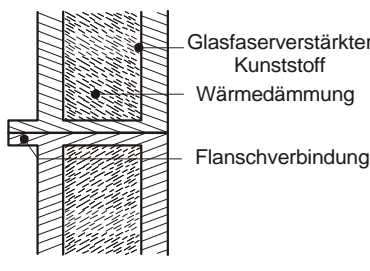
<p>Rottweil</p>  <p>600 m³</p>	 <p>Wärmedämmverbundsystem</p>	 <p>Stand 12/1996</p>
<p>Friedrichshafen</p>  <p>12 000 m³</p>	 <p>Wärmedämmung aus Mineralfaser</p>	 <p>Stand 1/2001</p>
<p>Hamburg</p>  <p>4 500 m³</p>	<p>Die Wandaufbauten in Hamburg und in Friedrichshafen sind identisch ausgeführt.</p>	 <p>Stand 1/2001</p>
<p>Hannover</p>  <p>2 750 m³</p>		<p>Eine detaillierte Kostenabrechnung liegt derzeit noch nicht vor.</p> <p>Erdarbeiten und Tragwerk bestimmen die Gesamtkosten jedoch maßgeblich.</p>
<p>Ilmenau</p>  <p>300 m³</p>		<p>Eine Kostenaufteilung ist hier nicht durchführbar, da Tragwerk, Wärmedämmung sowie Auskleidung eine Einheit darstellen und Erdarbeiten infolge der oberirdischen Aufstellung nicht notwendig waren.</p>

Bild 4: Querschnitt durch die Heißwasser-Wärmespeicher sowie Darstellung der jeweiligen Wandaufbauten und Kostenanteile

In Hannover kommt eine neuartige Betonmischung zum Einsatz, deren Wasserdampfdurchlässigkeit so gering ist, dass auf eine zusätzliche Auskleidung verzichtet werden kann /4/. Die Speicher werden drucklos im Temperaturbereich von 30 bis 95 °C betrieben. Die Ladewechseinrichtungen, d.h. die Vorrichtungen zur Be- und Entladung, sind als Prallteller ausgeführt, um eine Durchmischung des Speicherinhaltes zu verhindern. Sie sind mindestens oben, unten und in einer mittleren Ebene im Behälter anzubringen, um unabhängig voneinander zeitgleich auf unterschiedlichem Temperaturniveau Be- und Entladen zu können.

Eine Alternative zur beschriebenen Betonkonstruktion stellen Behälter aus glasfaserverstärkten Kunststoffen dar, deren Entwicklung die TU Ilmenau zusammen mit einem Industriepartner betreibt. Ein Pilotspeicher mit dieser Bautechnik ist seit 1998 erfolgreich in Betrieb. Die Querschnitte durch die Wärmespeicher, eine Darstellung der jeweiligen Wandaufbauten sowie die Kostenanteile der einzelnen Gewerke an den Gesamtkosten sind in Bild 4 angegeben.

2.2 Kies/Wasser-Wärmespeicher

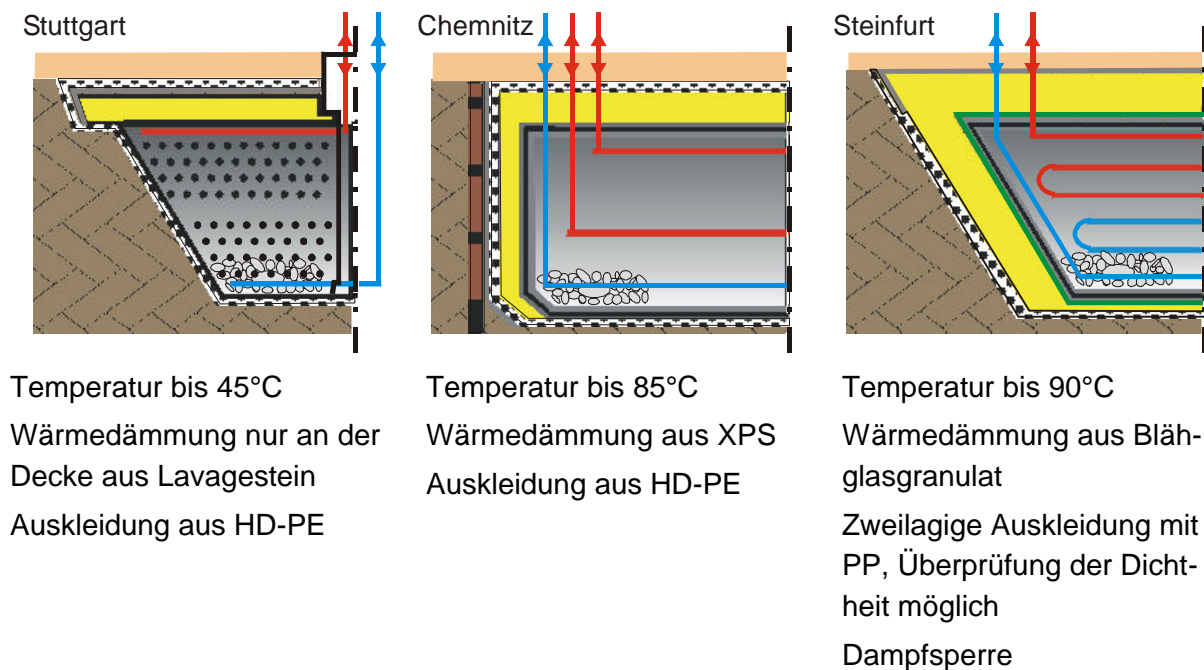


Bild 5: Schnitt durch die Kies-Wasser-Wärmespeicher mit Angabe der Entwicklungsschritte

Bei diesen Speichern dient ein Gemisch aus Kies (auch Sand bzw. Erdreich) und Wasser als Speichermedium. Die maximal erreichbaren Speichertemperaturen sind durch die Temperaturfestigkeit der Abdichtungsfolien derzeit auf ca. 90 °C begrenzt. Vorteilhaft ist, daß im Vergleich zu einem Wasserspeicher keine tragende Deckenkonstruktion erforderlich ist. Die Speicher werden in der Regel seitlich und oben wärmegeklämt und je nach Speichervolumen und -tiefe auch am Boden. Die Be- und Entladung der Speicher erfolgt bei kleineren Volumen in der Regel indirekt über in die Kiesfüllung eingelegte Kunststoff-Rohrschlangen. Der Ladewechsel bei einem Kies-Wasser-Wärmespeicher kann auch mittels direktem Wasseraustausch erfolgen. Bei beiden Varianten ist darauf zu achten, daß die Temperatur-

schichtung im Speicher unterstützt wird. Bedingt durch den Kiesanteil von etwa 60 bis 70 Vol.% und der gegenüber Wasser geringeren Wärmekapazität des Kieses muß ein Kies-Wasser-Wärmespeicher im Vergleich zu einem reinen Wasserspeicher ein um etwa 50 % größeres Bauvolumen aufweisen, um dieselbe Wärmemenge speichern zu können (gleiche Temperaturdifferenz vorausgesetzt). In Bild 5 sind die realisierten Speicher im Schnitt dargestellt.

Beim Kies-Wasser-Wärmespeicher ergeben sich gegenüber einem Wasserspeicher besondere Kostenvorteile, wenn am Speicherstandort Kies im Untergrund vorliegt, der (in gereinigtem Zustand) wieder als Speichermedium eingebaut werden kann. Ist dies nicht der Fall, kann alternativ zum Kies auch Erdreich als Wärmespeichermedium verwendet werden. Dieses wird mit Wasser gesättigt, um die Wärmekapazität und, bei indirekten Ladewechselsystemen, den Wärmeübergangskoeffizienten zu erhöhen. Der Erdreich-Wasser-Wärmespeicher kann von Aufbau und Funktionsweise mit dem nachfolgend beschriebenen Erdsonden-Wärmespeicher verglichen werden, wobei die Wärmeübertragerrohre horizontal in einem künstlich wassergesättigten Untergrund angeordnet sind.

2.3 Erdsonden-Wärmespeicher

Als Speichermedium dienen hier das Erdreich bzw. die Gesteinsschichten im natürlichen Untergrund. Die Wärmeübertragung in den Untergrund bzw. aus dem Untergrund heraus erfolgt über U-Rohr-förmige oder koaxiale Wärmeübertragerrohre, die Erdwärmesonden, die in senkrechte Bohrlöcher (Durchmesser 100 bis 200 mm) eingebracht werden (Bild 6).

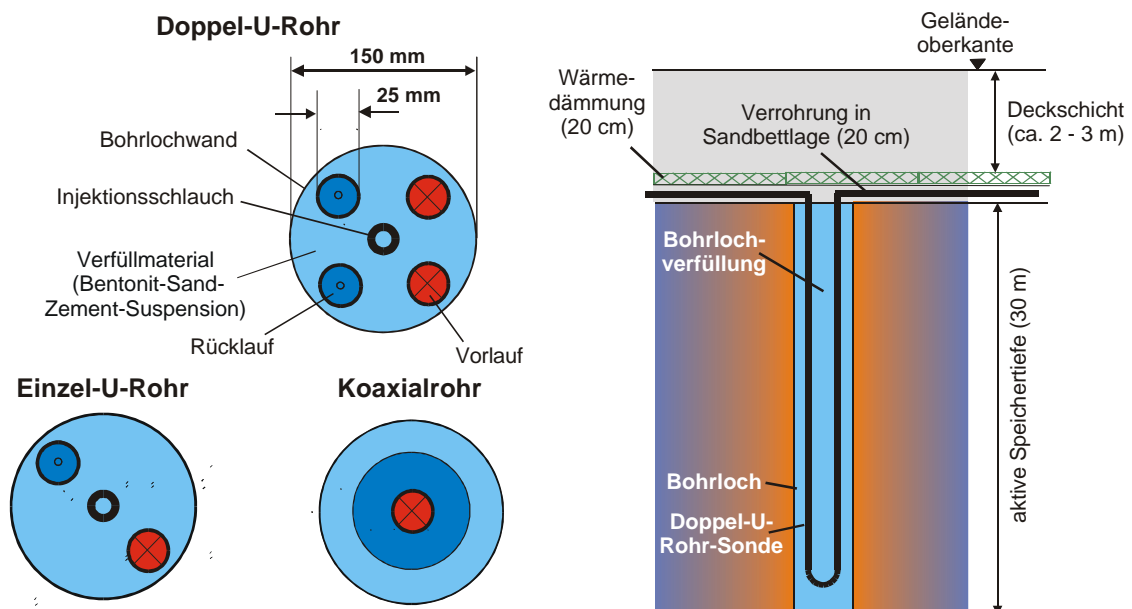


Bild 6: Aufbau von Erdwärmesonden (Bemaßungswerte: Speicher in Neckarsulm)

Der Zwischenraum zwischen dem Wärmeübertrager und der Bohrlochwand muß durch ein geeignetes Verfüllmaterial, z. B. eine Bentonit-Sand-Zement-Wasser-Mischung, ausgefüllt werden. Typische Bohrtiefen liegen zwischen 20 und 100 m, der Bohrlochabstand beträgt zwischen 1,5 und 3 m. Der Wärmetransport innerhalb des Speichers erfolgt durch Wärme-

leitung. Aus diesem Grund ist die abführbare Wärmeleistung begrenzt und Spitzenlasten müssen über einen Pufferspeicher im System ausgeglichen werden.

Erdsonden-Wärmespeicher können nur zur Oberfläche hin mit einer um einige Meter über den Speicherrand horizontal hinausragenden Wärmedämmung versehen werden. Daher können die Wärmeverluste bei kleinem Speichervolumen (bis ca. 50.000 m³) auch im sogenannten eingeschwungenen Zustand bis zu 50 % betragen. Selbstverständlich sollten durch eine geeignete Planung der Geometrie die Speicherberandungsflächen möglichst klein gehalten werden. Weiterhin ist zu beachten, daß sich der Speichernutzungsgrad aufgrund der starken Wechselwirkungen mit dem umgebenden Untergrund erst allmählich erhöht: In den ersten 5 Betriebsjahren ist teilweise mit deutlich höheren Wärmeverlusten zu rechnen als später im eingeschwungenen Betriebszustand.

Gut geeignete geologische Formationen für Erdsonden-Wärmespeicher sind wassergesättigte Tone bzw. Tonsteine, da diese eine hohe Wärmekapazität aufweisen, gleichzeitig jedoch sehr dicht sind und somit Grundwasserbewegungen weitgehend unterbinden. Die Vorteile des Erdsonden-Wärmespeichers liegen, besonders gegenüber Heißwasser-Wärmespeichern, im relativ geringen Bauaufwand und der einfachen Erweiterbarkeit des Speichers.

Durch die geringere Wärmekapazität des Speichermediums gegenüber Wasser und aufgrund einer geringeren Temperaturspreizung im Betrieb müssen Wärmespeicher dieser Bauart im Vergleich zu Heißwasser-Wärmespeichern ein etwa 3 bis 5 mal größeres Volumen besitzen.

2.4 Aquifer-Wärmespeicher

Beim Aquifer-Wärmespeicher werden natürlich vorkommende, nach oben und unten abgeschlossene Grundwasserschichten zur Wärmespeicherung genutzt (siehe Bild 7). Über eine Brunnenbohrung („kalte Bohrung“) wird dem Speicher Grundwasser entnommen, dieses über einen Wärmeübertrager erwärmt und über eine weitere Bohrung („warme Bohrung“) wieder in den Untergrund eingeleitet. Die Ausspeicherung erfolgt durch eine Umkehrung der Durchströmungsrichtung.

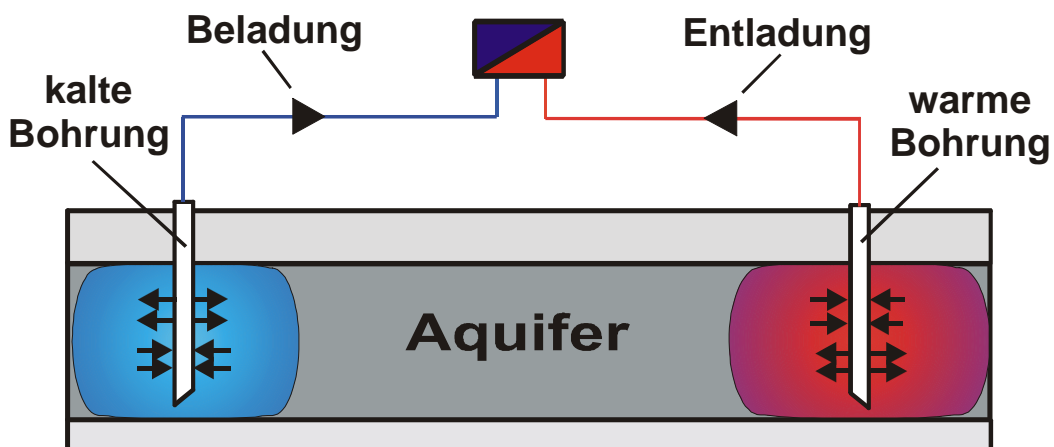


Bild 7: Aufbau eines Aquifer-Wärmespeichers

Aquifer-Wärmespeicher stellen sehr hohe Anforderungen an die geologischen Verhältnisse

des jeweiligen Standortes bezüglich hydraulischer Durchlässigkeit, Grundwasserfließgeschwindigkeit, biologischer und chemischer Zusammensetzung des Grundwassers etc.. Sie können nicht zur Umgebung hin wärmedämmend werden. Wie beim Erdsonden-Wärmespeicher sind Speicher mit hoher Temperatur deshalb nur bei einem großen Speichervolumen zu empfehlen.

Bei Temperaturen oberhalb 50°C kann es je nach örtlichen Gegebenheiten zu biologischen und geochemischen Veränderungen des Grundwassers kommen. Dies kann gegebenenfalls zu Ablagerungen an Wärmeübertragern und den Brunnenfiltern führen, wodurch es im Extremfall zu einem Erliegen der Förderfähigkeit der Brunnen kommen kann. Um dies zu verhindern, muß in solchen Fällen eine geeignete Wasseraufbereitung während des Betriebs erfolgen.

Solange keine aufwendige Wasseraufbereitung und -behandlung benötigt wird, läßt dieser Speichertyp die geringsten Investitionskosten von allen vorgestellten Langzeit-Wärmespeichern erwarten.

2.5 Zusammenfassung

Tabelle 1 faßt die wichtigsten Daten der unterschiedlichen Speichertypen zusammen. Grobe Richtwerte für einen solaren Deckungsanteil von rund 50 % können ebenfalls der Tabelle entnommen werden. Tabelle 2 führt die maßgeblich an der Weiterentwicklung der Speicherkonzepte beteiligten Institutionen auf.

Tabelle 1: Daten der unterschiedlichen Baukonzepte für Langzeit-Wärmespeicher

Heißwasser-Wärmespeicher	Kies-Wasser-Wärmespeicher	Erdsonden-Wärmespeicher	Aquifer-Wärmespeicher
Speicherkapazität			
60 bis 80 kWh/m ³	30 bis 50 kWh/m ³	15 bis 30 kWh/m ³	30 bis 40 kWh/m ³
Speichervolumen für 1 m³ Wasseräquivalent			
1 m ³	1,3 bis 2 m ³	3 bis 5 m ³	2 bis 3 m ³
Realisierte Projekte (Standort, Speichervolumen, Betrieb seit)			
Hamburg, 4.500 m ³ , 96 Friedrichshafen, 12.000 m ³ , 96 Hannover, 2.700 m ³ , 00	Stuttgart, 1.050 m ³ , 85 Chemnitz, 8.000 m ³ , 00 Augsburg, 6.500 m ³ , 96 Steinfurt, 1.500 m ³ , 99	Neckarsulm, 63.300 m ³ , 01	Berlin, k. A., 99 Rostock, 20.000 m ³ , 00
Richtwert des Speichervolumens je m² Kollektorfläche für einen solaren Deckungsanteil von 50 % (FK: Flachkollektor)			
1,5 bis 2,5 m ³ /m ² _{FK}	2,5 bis 4 m ³ /m ² _{FK}	8 bis 10 m ³ /m ² _{FK}	4 bis 6 m ³ /m ² _{FK}

Das benötigte Volumen für saisonale Wärmespeicher in Kombination mit solarthermischen Anlagen kann nur schwer abgeschätzt werden, da sich je nach Randbedingungen (Wärme-

bedarf, Deckungsanteil, Speichertyp und -geometrie, thermische und hydraulische Bodenparameter, etc.) relativ große Unterschiede ergeben. Daher sollte die Auslegung immer mit dynamisch rechnenden Simulationsprogrammen erfolgen (z. B. /5/).

Tabelle 2: An der Weiterentwicklung der Speicherkonzepte maßgeblich beteiligte Institutionen

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW), Stuttgart	
Projektentwicklung, Systemsimulation, energetische Optimierung und bautechnische Beratung	
Heißwasser-Wärmespeicher	Kies-Wasser-Wärmespeicher
Institut für Leichtbau, Konstruktion und Entwerfen, Uni Stuttgart	Pfeil und Koch Ingenieure, Stuttgart
Planungsgemeinschaft Reineck und Lichtenfels, Leonberg	Lehrstuhl für Technische Thermodynamik, TU Chemnitz
Ing.-Büro Lichtenfels, Keltern	
FG Thermo- und Fluidodynamik, TU Ilmenau	
Erdsonden-Wärmespeicher	Aquifer-Wärmespeicher
Zentrum für Angewandte Energieforschung, Abt. 4, Garching	Institut für angewandte Geowissenschaften, Gießen
Institut für angewandte Geowissenschaften, Gießen	Geothermie Neubrandenburg, Neubrandenburg
Steinbeis Transferzentrum EGS, Stuttgart	

3. Heutige und zukünftige Einsatzmöglichkeiten von Langzeit-Wärmespeichern

Durch die Vorgaben des Forschungsprogramms Solarthermie-2000 wurden Langzeit-Wärmespeicher seither bundesweit meist zur Wärmeversorgung von Wohnsiedlungen eingesetzt, die über ein solar unterstütztes Nahwärmenetz zu rund 35 bis 60 % des jährlichen Gesamtwärmebedarfs mit Solarwärme versorgt werden.

Die ersten Pilotanlagen zur Langzeit-Wärmespeicherung von Solarenergie haben teilweise hohe Kosten für die solar genutzte Wärme verursacht: Eine betriebswirtschaftliche Vollkostenrechnung nach VDI 2067, die die erfolgte Förderung der Pilotanlagen unberücksichtigt lässt, führt zu solaren Wärmekosten von bis zu 40 Cent/kWh. Durch ein Finanzierungskonzept und durch Fördermittel wurde in allen Anlagen sichergestellt, dass den Bewohnern für die genutzte Wärmemenge keine Mehrkosten im Vergleich zu einer konventionellen Wärmeversorgung entstehen.

Durch die Ergebnisse und Erfahrungen aus den ersten Pilotanlagen wurde die Systemtechnik zu kostengünstigeren und effizienteren Systemen weiterentwickelt. Dadurch wurde erreicht, dass in den beiden Pilotanlagen, die zur Zeit in München und Crailsheim in Planung sind, solare Wärmekosten von 16 bis 17 Cent/kWh erreicht werden können. Durch eine fortlaufende Weiterentwicklung der Systeme sollen in den nächsten Jahren solare Wärmekosten erreicht werden, die nur noch rund doppelt so hoch sind wie die derzeitigen Wärmeliefe-

rungskosten einer konventionellen Nahwärmeversorgung, die rund 4 bis 6 Cent/kWh betragen.

Neuere Untersuchungen zeigen, dass der Einsatz größerer Wärmespeicher zur Effizienzsteigerung von Holzhackschnitzel-Kesseln, zur Betriebsoptimierung von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen oder auch zur Kältespeicherung wie z.B. im Reichstag in Berlin unter ähnlichen wirtschaftlichen Bedingungen möglich ist wie bei den geplanten Pilotanlagen im Wohnungsbau.

4. Literatur

- /1/ Hahne, E. et. al.: Solare Nahwärme - Ein Leitfaden für die Praxis, BINE-Informationspaket, TÜV-Verlag, Köln, 1998, ISBN 3-8249-0470-5
- /2/ Mangold, D; Benner, M.; Schmidt, T.: Langzeit-Wärmespeicher und solare Nahwärme, BINE-Profiinfo 1/01, Bonn, 2001
- /3/ Benner M., Mahler B., Mangold D., Schmidt T., Schulz M., Seiwald H., Hahne E.: Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit und ohne Langzeit-Wärmespeicher; Forschungsbericht zum BMFT-Vorhaben 0329606C, ITW, Universität Stuttgart, Nov. 1999, ISBN 3-9805274-0-9
- /4/ Reineck, K.-H. et al: Dichte Heißwasser-Wärmespeicher aus Hochleistungsbeton, Forschungsbericht zum BMBF-Vorhaben 0329606J, Universität Stuttgart, Juni 2000
- /5/ TRNSYS: Transient System Simulation Program, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison und Transsolar, Stuttgart, 2002
- /6/ Guigas, M.; Kübler, R.; Lutz, A.; Schulz, M.; Fisch, N.; Hahne, E.: Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit und ohne Langzeitwärmespeicher, Forschungsbericht, ITW, Universität Stuttgart, 1995, ISBN 3-9802243-9-2
- /7/ Seiwald, H.; Kübler, R.; Fisch, N.; Hahne, E.: Saisonale Wärmespeicherung mit vertikalen Erdsonden im Temperaturbereich von 40 bis 80 °C, Forschungsbericht, ITW, Universität Stuttgart, 1995
- /8/ D. Mangold, W. Heidemann, E. Hahne, H. Müller-Steinhagen: Solar unterstützte Nahwärmesysteme mit Langzeit-Wärmespeicher - Erfahrungen aus dem Programm Solarthermie-2000, Fachkonferenz der VDI-Gesellschaft Energietechnik „Fortschrittliche Energiewandlung und -anwendung“, 13.-14. März 2001, Ruhr-Universität Bochum, VDI-Bericht 1594, S. 489-498
- /9/ M. Benner, W. Heidemann, E. Hahne, H. Müller-Steinhagen: Entwicklungen bei Langzeit-Wärmespeichern - Erfahrungen aus den in Deutschland realisierten Anlagen, Fachkonferenz der VDI-Gesellschaft Energietechnik „Fortschrittliche Energiewandlung und -anwendung“, 13.-14. März 2001, Ruhr-Universität Bochum, VDI-Bericht 1594, S. 499-510

Danksagung

Der Bau der beschriebenen solaren Großanlagen wurde aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) und des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi), mit Unterstützung der Länder Baden-Württemberg, Bayern und Nordrhein-Westfalen, der Freien und Hansestadt Hamburg und den Städten Friedrichshafen und Neckarsulm finanziert. Das am ITW durchgeführte wissenschaftliche Begleitprogramm wird im Rahmen des Vorhabens 0329606S vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert. Die Autoren danken dem BMWi für diese Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.