

# Saisonale Wärmespeicher – aktuelle Speichertechnologien und Entwicklungen bei Heißwasser-Wärmespeichern

S. Raab<sup>1)</sup>, T. Schmidt<sup>1)</sup>, M. Benner<sup>1)</sup>, W. Heidemann<sup>1)</sup>, H. Müller-Steinhagen<sup>1)2)</sup>

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

Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 6, D-70550 Stuttgart

Tel.: 0711-685-3229, Fax: 0711-685-3242

Email: raab@itw.uni-stuttgart.de, Internet: www.itw.uni-stuttgart.de

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

## Kurzfassung

Langzeit-Wärmespeicher können in vielen Anwendungsbereichen sinnvoll eingesetzt werden, um Energieeinsparungen bzw. Ertragssteigerungen zu erzielen. In Verbindung mit solarthermischen Großanlagen beispielsweise kann im Wohnungsbau über 50 % der bei konventioneller Wärmeversorgung notwendigen fossilen Energiemenge eingespart werden. Der Heißwasser-Wärmespeicher ist der aus thermischer und baulicher Sicht am vielseitigsten einsetzbare Speichertyp. Dieser Bericht gibt einen Überblick über die in Deutschland im Rahmen verschiedener Forschungsvorhaben gebauten großen saisonalen Heißwasser-Wärmespeicher mit Speichertemperaturen zwischen 30 °C und 95 °C und die hieraus gewonnenen Erfahrungen.

## Einführung

Die Entwicklung von Speichertypen zur saisonalen Wärmespeicherung wird am ITW seit 1984 kontinuierlich durchgeführt. Basierend auf früheren Forschungsvorhaben wurden die in Bild 1 dargestellten Speichertypen konzipiert. Neben dem Speichermedium Wasser kann auch eine Mischung aus Kies und Wasser sowie der natürliche Untergrund zur Wärmespeicherung verwendet werden. 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 [1,2,3]. Nahezu unabhängig von geologischen Standortbedingungen lässt sich der hier besprochene Heißwasser-Wärmespeicher einsetzen.

Da es sich derzeit bei allen Speicherbauwerken noch um Pilotanlagen handelt, musste in vielen Bereichen Neuland betreten werden. Die Technik der Langzeit-Wärmespeicherung befindet sich noch in der Entwicklungsphase. Es existiert bisher kein Standardkonzept, die Wärmespeicher müssen für den jeweiligen Standort individuell geplant werden und sind darum meist Bestandteil von Forschungs- und Entwicklungsprojekten.

Bei der Auswahl der Baumaterialien müssen vielerlei Eigenschaften berücksichtigt werden. Für viele Materialien ist die härteste Anforderung, in einem Langzeit-Wärmespeicher gleich-

zeitig hoher Temperatur- (bis 95 °C) und Feuchtebelastung (Wasserspeicher) bei hohem Druck (im Erdreich) ausgesetzt zu sein. Zusätzlich müssen die eingesetzten Materialien eine Lebensdauer von 30 bis 50 Jahren garantieren.

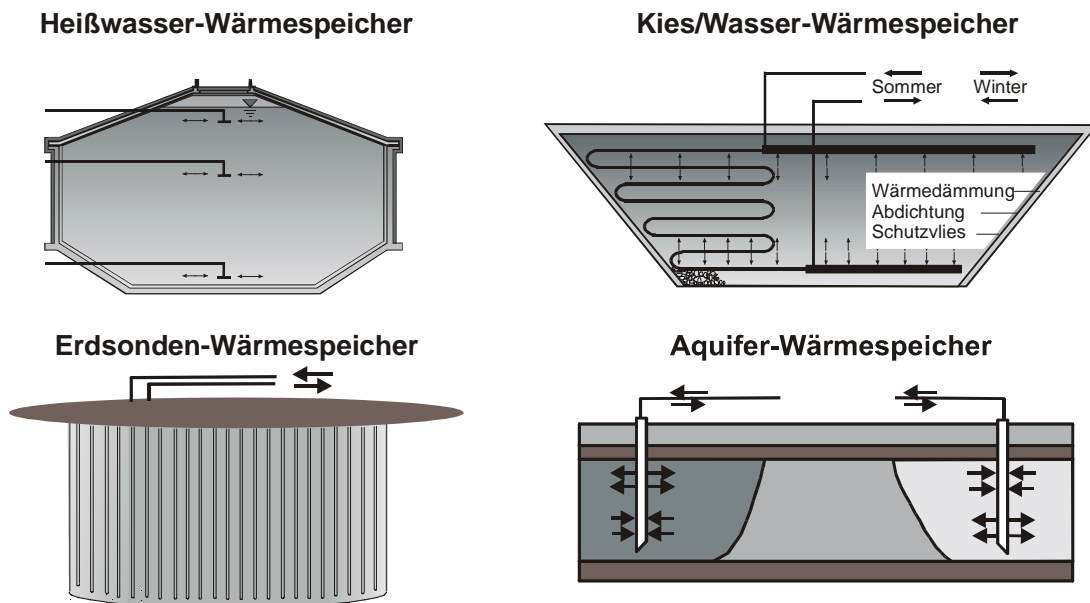


Bild 1: Langzeit-Wärmespeichertypen [1,3]

## Heißwasser-Wärmespeicher

Die universellsten Einsatzmöglichkeiten aller im Bild 1 dargestellten Langzeit-Wärmespeichertypen eröffnen sich dem Heißwasser-Wärmespeicher. Er kann unabhängig von der Geologie und auch in kleiner Baugröße eingesetzt werden. Reine Wasserspeicher benötigen eine Tragkonstruktion, die in der Regel nicht natürlich vorliegt (Stollen, Kavernen, etc.). Große Behälter zur saisonalen Wärmespeicherung werden derzeit aus Stahlbeton hergestellt und teilweise in das Erdreich eingebaut bzw. in die Landschaft des Baugebiets integriert. Falls die Wasserdichtigkeit nicht durch spezielle Betonmischungen gewährleistet ist, muss eine zusätzliche Auskleidung des Speichers erfolgen. Die Speicher werden drucklos im Temperaturbereich von 30 bis 95°C betrieben. Da handelsübliche Kunststoffe für Temperaturen über 80°C in der Regel keine ausreichende Zeitstandfestigkeit aufweisen, wurden die ersten in Deutschland erstellten Speicher mit Edelstahlblech ausgekleidet.

Zur Reduzierung der Wärmeverluste wird am meist zylindrischen Behälter eine außenliegende Wärmedämmung (mindestens 20 bis 30 cm Dämmstoff der WLG 040) angebracht, die mindestens den Bereich des Deckels und der Speicherwände umfasst. Bei hinreichender Druckfestigkeit des Dämmwerkstoffs kann Sie auch unter dem Speicher montiert werden. Als Dämmstoffe kommen je nach Temperaturbereich Glas- oder Mineralfaser, Schaumglas, Schaumglasschotter oder Blähglasgranulat zum Einsatz. Die Dämmschicht muss in der Regel gegen Feuchtigkeit geschützt werden.

Die Ladewechseinrichtungen sind mit Pralltellern ausgeführt, um eine Durchmischung des

Speicherinhaltes zu verhindern. Sie sind mindestens oben und unten im Behälter anzu- bringen, möglichst auch in einer mittleren Ebene, um zeitgleich be- und entladen zu können.

## Pilotanlagen mit Heißwasser-Wärmespeichern in Deutschland

Im Rahmen des am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) durchgeführten Forschungsvorhabens *Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit und ohne Langzeit- Wärmespeicher* [2, 3] wurden verschiedene Pilotprojekte realisiert. Der erste größere Heiß- wasser-Wärmespeicher mit einem Stahlbeton-Tragwerk (Wasservolumen 600 m<sup>3</sup>) wurde 1995 als Vorstufe für größere Speicher in Rottweil gebaut. Die ersten Pilotanlagen zur sola- ren Nahwärmeversorgung mit saisonalen Heißwasser-Wärmespeichern wurden im Herbst 1996 in Friedrichshafen (12 000 m<sup>3</sup>) und in Hamburg (4 500 m<sup>3</sup>) in Betrieb genommen. Der neueste Speicher wurde im Jahr 2000 in Hannover-Kronsberg (2 750 m<sup>3</sup>) errichtet.

### Projekt Rottweil

In diesem Pilotvorhaben [4] wurde in Verbindung mit einem Blockheizkraftwerk und einem Nahwärmenetz im Jahre 1995 ein 600 m<sup>3</sup> großer, teilweise oberirdischer Wärmespeicher als Kurzzeit-Wärmespeicher im Auftrag der Stadtwerke Rottweil errichtet. Das Baukonzept sollte auch auf größere Wärmespeicher (Langzeit-Wärmespeicher) übertragbar sein. Bild 2 zeigt schematisch einen vertikalen Schnitt durch den Speicher mit den wichtigsten Abmessungen.

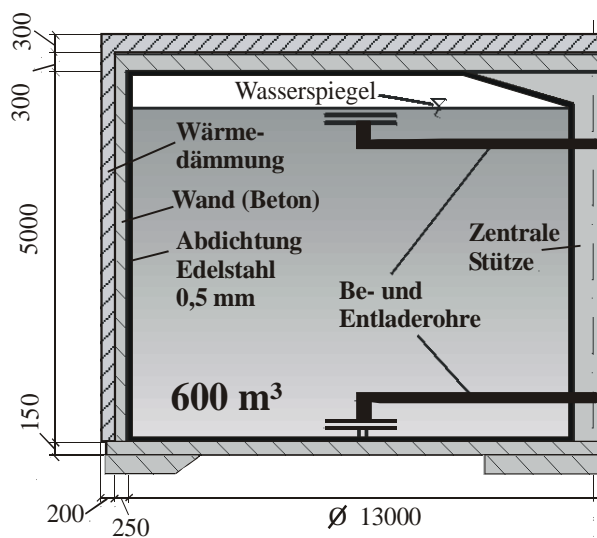


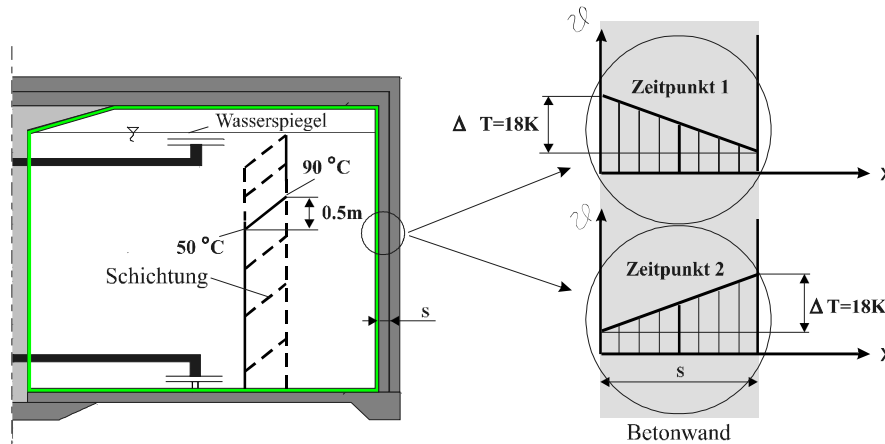
Bild 2: Querschnitt des Speicherbehälters in Rottweil (Abmessungen in mm)

Die wichtigsten Konstruktionsdaten sind:

- kreiszylindrische Form bei 13 m Innendurchmesser und 5 m lichter Höhe,
- maximale Auslegungstemperatur von 95 °C,
- Wärmedämmung aus Mineralwolle (WLG 040) an Wänden (Dicke: 20 cm) und Decke (Dicke: 30 cm),
- der Baukörper ist halb im Erdreich eingegraben, der Aushub angeschüttet,
- die Betondecke wird von einer zentralen Stütze und der Seitenwand getragen,
- die Wasserdichtigkeit wird durch eine Auskleidung aus Edelstahlblech erreicht.

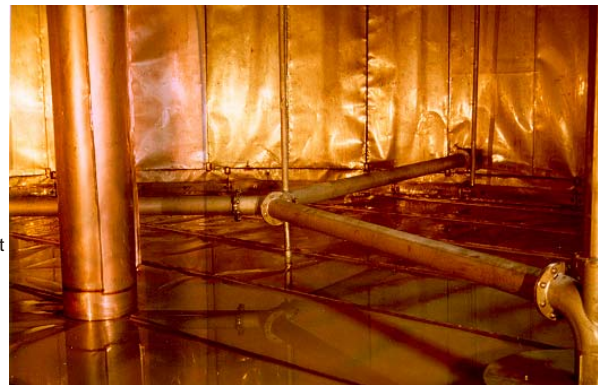
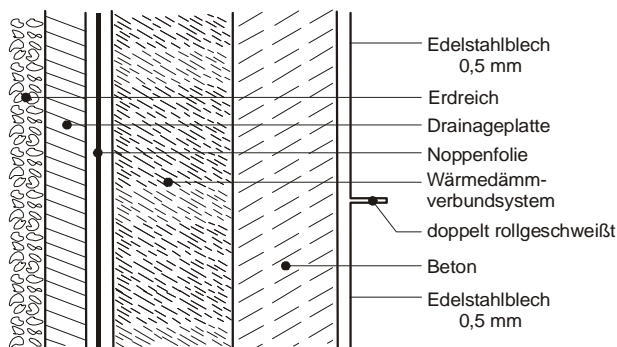
Bei der Konstruktion des Betonkörpers muss berücksichtigt werden, dass neben den statischen Lasten (inkl. Verkehrslasten) auch Lasten durch die Temperaturbeanspruchung auftreten. Die theoretisch zu erreichende Temperaturdifferenz über die Speicherwand (d.h. der maximale Temperaturunterschied zwischen Innen- und Außenseite) beträgt bei den realisierten Kurzzeit-Wärmespeichern bis zu +18 K bzw. -18 K, je nach Bauteildicke und Betrieb des Wärmespeichers. Bei Langzeit-Wärmespeichern konnte dieser hohe Temperaturunter-

schied nicht gemessen werden, bei der Bemessung ist daher von geringeren Werten auszugehen. Die Temperaturunterschiede sind wechselnd, d.h. die wärmere oder kältere Stelle kann sowohl innen als auch außen auftreten. Die Temperaturen im Inneren eines Wärmespeichers ändern sich durch Be- oder Entladevorgänge sehr schnell (in 1-2 Stunden) von 50 °C auf ca. 90 °C und umgekehrt. Entlang der Wandhöhe treten ebenfalls Temperaturunterschiede durch das geschichtete Speicherwasser auf. Über eine Höhe von etwa 0,5 bis 1 m gibt es bei Kurzzeit-Wärmespeichern je nach Bauform und Betriebsweise Temperaturunterschiede von bis zu 40 K. Bei den Langzeit-Wärmespeichern in Hamburg und Friedrichshafen konnten bislang max. Temperaturdifferenzen von 25 K über einen Meter Höhe gemessen werden. Eine Darstellung der Temperaturlastfälle, die in der Wand auftreten können, zeigt Bild 3 am Beispiel des Wärmespeichers in Rottweil.



**Bild 3:** Darstellung der Temperaturlastfälle der Speicherwand (Projekt Rottweil)

Die Auskleidung des Behälters in Rottweil besteht aus einem 0,5 mm (stellenweise 1,25 mm) dicken Edelstahlblech (austenitischer Chrom-Nickelstahl) im Innern des Behälters (siehe Bild 4).



**Bild 4:** Wandaufbau und Innenauskleidung (Projekt Rottweil [4])

Im Wesentlichen wurden die Blechbahnen mittels 3 cm breiter Falze durch ein Widerstandsschweißverfahren größtenteils automatisch mit zwei parallel verlaufenden Rollnähten verbunden. So kann durch Einbringen eines Gases zwischen den beiden Nähten die Dichtheit der Schweißverbindungen einfach überprüft werden. Erwähnt seien die Kreuzungspunkte

von drei Falzen für die Rollnähte, sogenannte T-Stöße, die sich im oberen und unteren Bereich der Wand bei Zusammentreffen von senkrecht und waagrecht verlaufenden Blechbahnen ergeben und die nur sehr unzureichend kontrolliert werden konnten.

Da der Wärmespeicher in Rottweil im oberen Bereich nicht angeschüttet wurde und deshalb teilweise sichtbar bleibt und einen Außenputz erhalten sollte, wurde für die Wand ein auf dem Bausektor übliches Wärmedämmverbundsystem eingesetzt. Die Steinlamellenplatten mit einer Stärke von 20 cm wurden mittels Baukleber an der Betonwand befestigt (siehe Bild 5). Die Wärmedämmung wurde mit einer Armierung aus Glasfasergewebe und einer wasserabweisenden Mörtelschicht gegen eindringendes Wasser geschützt. Durch eine Noppenfolie und eine vorgestellte Drainplatte wird eventuell auftretendes Niederschlagswasser drainiert. Im Deckenbereich besteht die Dämmschicht aus einer 15 cm starken Schicht Mineralwolle und einer 15 cm starken Schicht aus extrudiertem Polystyrol.



*Bild 5: Aufbau der Wärmedämmung an der Wand (Projekt Rottweil)*

In den ersten Betriebsjahren gab es vor allem Probleme mit der Dichtigkeit der Edelstahlauskleidung. Diese konnte erst nach mehreren Versuchen dicht ausgebildet werden. Bei der Leckageüberwachung zeigte sich ein großer Nachteil: durch die Falze waren nicht alle Schweißverbindungen optisch zu begutachten. Eine Überprüfung war nicht zu 100 % möglich, insbesondere nicht an den T-Stößen. Durch weitere Dichtheitsüberprüfungen und Nachbesserungen an den Schweißnähten konnte die Leckrate zwar deutlich reduziert werden, ein Farbeindring-Prüfverfahren brachte im Frühjahr 1997 jedoch unzählige Poren im unteren Bereich des Speichers zu Tage, die eine Erneuerung des Edelstahlblechs im

gesamten Bodenbereich notwendig machte. Hierbei wurde dickeres Blech überlappend verschweißt. Seit dieser Sanierung ist der Wärmespeicher dicht.

Das Konzept des Rottweiler Wärmespeichers wurde zusammen mit einem Kreis von Experten weiterentwickelt und auch in den Pilotprojekten zur solar unterstützten Nahwärmeversorgung in Hamburg und Friedrichshafen eingesetzt. Aus den genannten Gründen wurde für die Behälter in Hamburg und Friedrichshafen ein anderes Schweißverfahren sowie ein dickeres Blech für die Auskleidung eingesetzt. Die Bleche wurden überlappend angeordnet. Die Schweißverbindungen waren somit alle sichtbar und konnten mit einem Farbeindringverfahren geprüft werden.

### Projekt Friedrichshafen-Wiggenhausen

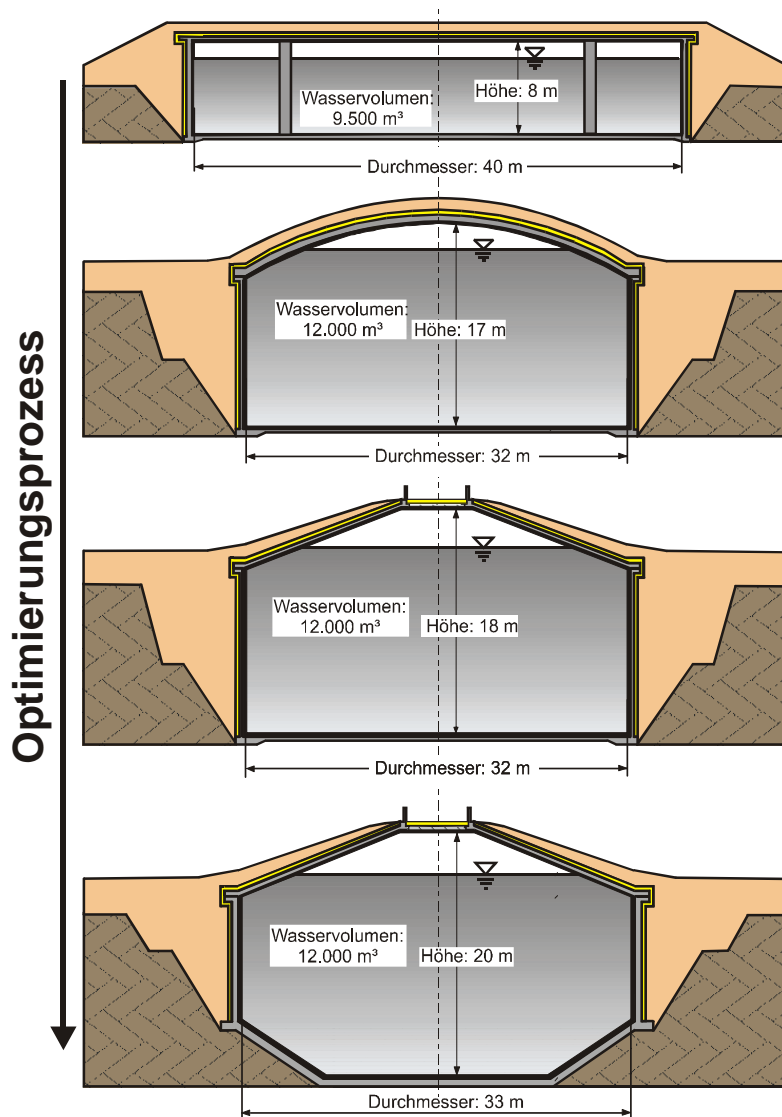


Bild 6: Entwicklungsstufen des Speicherentwurfs [3]

keine mehrfach gekrümmten Flächen auftreten, um den Bauablauf zu vereinfachen (Schalungsarbeiten, Aufbringen der Wärmedämmung). Bild 6 zeigt schematisch die ver-

Die Planung des Wärmespeichers in Friedrichshafen wurde vom Büro Schlaich, Bergermann und Partner, Stuttgart mit Unterstützung des Instituts für Konstruktion und Entwurf II der Universität Stuttgart durchgeführt. Die Optimierung des Speichers erfolgte in erster Linie unter dem Gesichtspunkt der Reduzierung der Baukosten. Wesentliche Ansatzpunkte hierbei waren die Einbautiefe des Speichers in das Erdreich, die zulässige Höhe über dem ursprünglichen Geländeniveau sowie der Böschungswinkel der Baugrube. Konstruktive Details, wie z.B. die Übergänge von der Seitenwand zum Boden bzw. Deckel wurden so optimiert, dass die auftretenden Lasten mit möglichst geringem Bewehrungsaufwand abgetragen werden können. Weiterhin wurden die Beton-Oberflächen so gewählt, dass

schiedenen Entwicklungsphasen des Speichers bis zum ausgeführten Entwurf.

Bemerkenswert ist, dass die realisierte Variante nicht nur bezüglich der Baukosten ein Optimum darstellt, sondern aufgrund ihrer geometrischen Ähnlichkeit zur Kugelform auch thermisch sehr günstige Verhältnisse liefert. So beträgt das Oberflächen/Volumenverhältnis des Speichers 0,233 1/m gegenüber 0,211 1/m bei einer Kugel mit gleichem Volumen.

Die Innenauskleidung besteht aus 1,25 mm starken Edelstahlblechen. Die Bleche wurden als Platten auf die Baustelle geliefert und dort überlappend verschweißt (siehe Bild 7).



*Bild 7: Aufbau der Speicherwand und Speicher im Bau (Projekt Friedrichshafen)*

Die Edelstahlbleche sind mit Hilfe von Bolzen an der Rückseite der Bleche an der Wand befestigt. Die Schweißnähte wurden nach ihrer Fertigstellung abschnittsweise mit dem Farbdringverfahren oder dem Vakuum-Verfahren zweifach geprüft. Die Dichtigkeit der Edelstahlauskleidung wurde unabhängig von der Prüfung durch die Auskleidungsfirma zusätzlich durch kontrolliertes Befüllen des Speichers mit Wasser überprüft. Die Prüfung und der anschließende Betrieb ergaben, dass die Auskleidung auf Antrieb wasserdicht war.

Die Be- und Entladeleitungen wurden in Friedrichshafen an der Speicherdecke herausgeführt, um eine Entleerung des Speichers bei einer eventuellen Undichtigkeit an der Durchführung zu vermeiden. Durch diese Rohrleitungsführung ergaben sich zahlreiche Verbindungsstellen oberhalb des Wasserspiegels, was während der Inbetriebnahmephase zu Problemen durch eindringende Luft führte. Nach längerem Stillstand mussten die Leitungen entlüftet werden, da die Speicherpumpe nicht selbstansaugend ist. Durch zusätzliche Dichtungen an den Rohrverbindungen sowie eine Anhebung des Wasserspiegels im Speicher konnte dieses Problem jedoch gelöst werden. Die Betriebserfahrung von Hamburg zeigt, dass auch horizontal durch die Speicherwand verlegte Leitungen praktikabel sind und diese Lösung zukünftig realisiert werden sollte.

Der Wärmespeicher in Friedrichshafen wurde im Oktober 1996 mit Trinkwasser (11 °C) befüllt. In Bild 8 ist die gute Temperaturschichtung im Wärmespeicher in den ersten Betriebsjahren erkennbar. Die niedrigste Temperatur nach dem ersten Speicherzyklus stellte sich Anfang März 1998 mit etwa 43 °C ein. Die Differenz zur Temperatur bei der Befüllung (11 °C) repräsentiert die Wärmemenge, die in der Aufheizphase eingespeichert werden

muss, um den Wärmespeicher auf Betriebstemperatur zu bringen, die sogenannte "Anfangsinvestition". Die höchsten Speichertemperaturen lagen 1998 bei etwa 80 °C im oberen Speicherbereich.

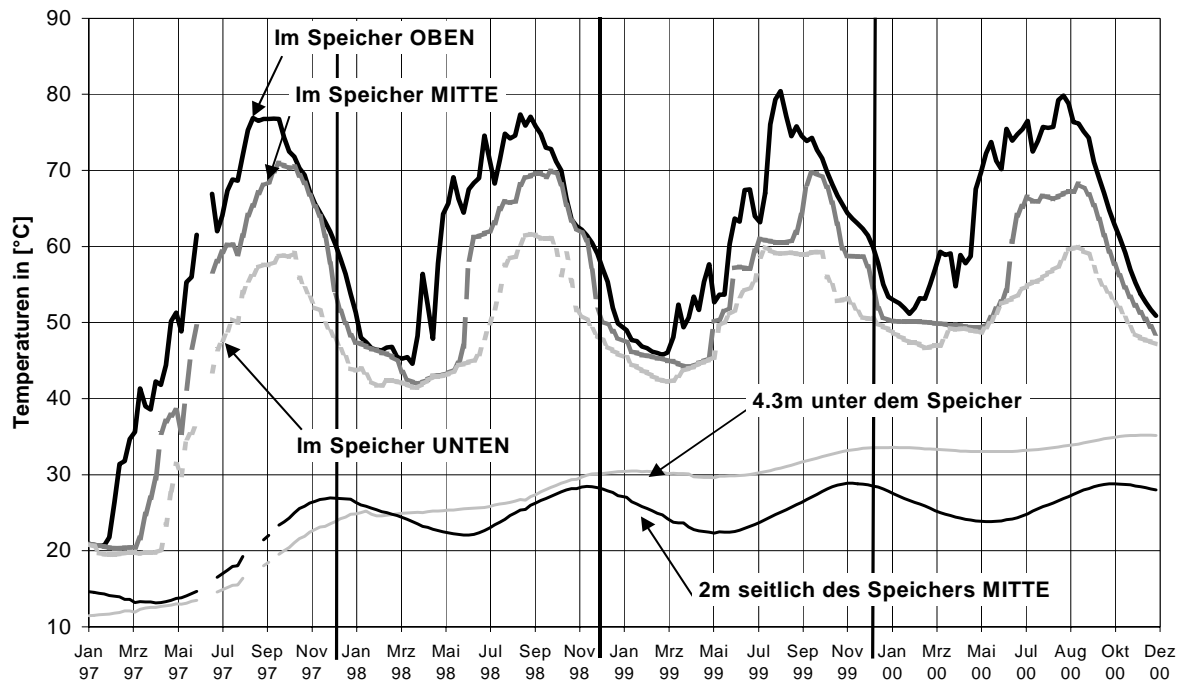


Bild 8: Verlauf der Speichertemperaturen in den ersten vier Betriebsjahren (Projekt Friedrichshafen)

Bild 8 zeigt weiterhin den Temperaturverlauf im Erdreich, unterhalb und seitlich des Speichers. Der Temperaturverlauf seitlich des Speichers zeigt, neben dem Anstieg auf ein höheres Niveau, einen sinusförmigen Verlauf, der von der jahreszeitlichen Schwankung der Speichertemperatur herrührt. Die Temperatur 4,3 m unterhalb des Speichers nimmt Jahr für Jahr zu, wodurch verdeutlicht wird, dass der Speicher noch keinen stationären Betriebszustand erreicht hat.

Jahr		1997	1998	1999	2000
Wärmelieferung in den Speicherkreis	MWh	1 080	946	880	936
Wärmelieferung aus dem Speicherkreis	MWh	475	620	478	612
Wärmeinhalt im Speicher (geg. 1.1.97)	MWh	343	344	386	358
Speicherkreisverluste	MWh	357	325	359	353

Tabelle 1: Gemessene Bilanz des Speichers in den ersten vier Betriebsjahren

Eine große Abweichung gegenüber den vorausgerechneten Werten liegt bei den Speicher-verlusten vor. Hier ist man von 200 MWh im dritten Betriebsjahr bei einem abfallenden Verlauf mit den Betriebsjahren ausgegangen. Wie die gemessenen Daten aus Tabelle 1 zeigen, liegen die Verluste insgesamt deutlich über dem Wert der Planung. Die Ursache für diesen Umstand ist derzeit noch nicht vollständig geklärt. Vermutet wird jedoch eine partielle Durchfeuchtung der Wärmedämmung und eine daraus resultierende reduzierte Dämmwir-



kung sowie zusätzliche Wärmeverluste durch ungedämmte, um den Speicher herum angeordnete Revisionschächte.

### Projekt Hamburg-Bramfeld

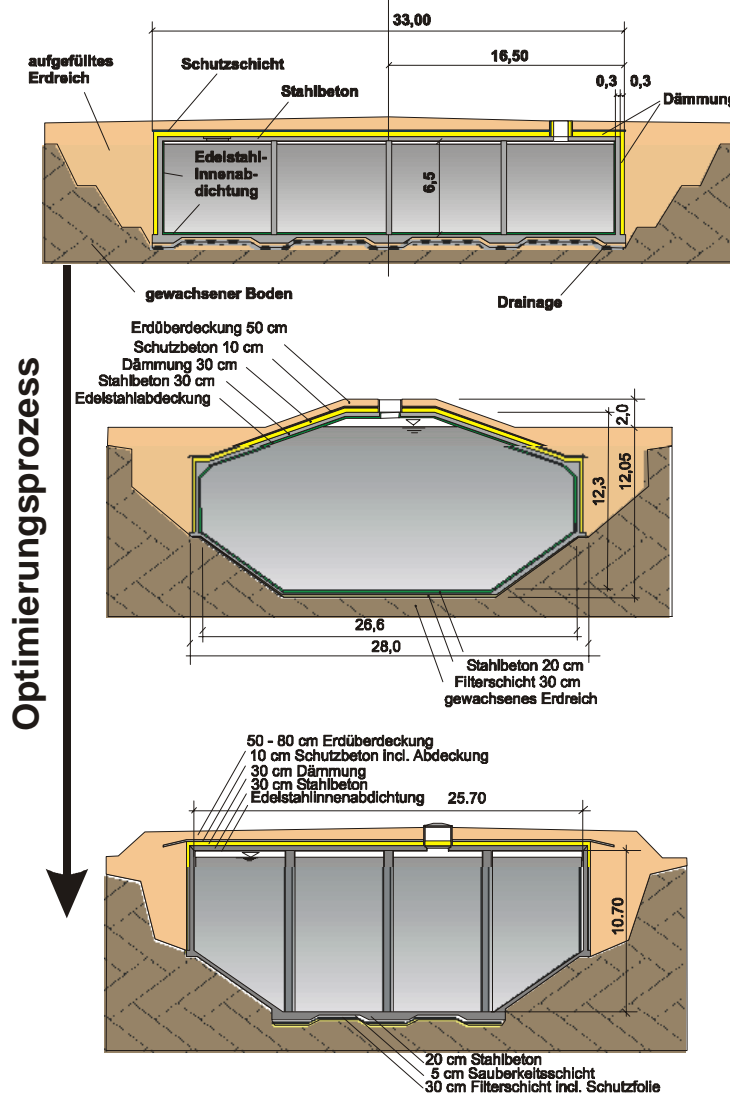


Bild 9: Speichervarianten Projekt Hamburg [3]

deoberkante herausragen durfte. In der zweiten Ausschreibung wurden zwei Speichervarianten alternativ ausgeschrieben. In Bild 9 ist die ursprüngliche Speichergeometrie den beiden neuen Speichervarianten gegenübergestellt. Die untere Variante aus Bild 9 mit einem Volumen von 4 500 m<sup>3</sup> hat sich dabei als die kostengünstigste herausgestellt und wurde verwirklicht.

### Projekt Hannover-Kronsberg

Der Wärmespeicher in Hannover hat ein Volumen von 2 750 m<sup>3</sup> und wurde von der Planungsgemeinschaft Reineck und Lichtenfels in Stuttgart geplant. Die Konstruktion basiert im Wesentlichen auf den Speichern in Friedrichshafen und Hamburg, jedoch mit einigen be-

Der Bau des Wärmespeichers in Hamburg wurde im März 1995 ausgeschrieben. Die eingereichten Angebote lagen um 50 bis 100 % über den vorausgegangenen Kostenschätzungen. Das günstigste Angebot war mit 2,25 Mio. DM ca. 600 TDM teurer als die Kostenschätzung des ITW vom September 1994.

Im Mai 1995 fand in Hamburg ein Arbeitstreffen des Expertenkreises Langzeit-Wärmespeicher statt, an dem die Speicherkonstruktion kritisch überprüft wurde. In der Folge wurde die erste Ausschreibung aufgehoben und der Speicherentwurf nochmals überarbeitet. Dabei wurde insbesondere die Speichergeometrie geändert, um Aushub und Betonmasse einzusparen. In Verhandlungen mit der Hamburger Umweltbehörde wurde außerdem erreicht, dass der Speicher entgegen der ursprünglichen Vorgabe 2 m über die ursprüngliche Gelände-

deutenden Neuerungen. So kommt ein sogenannter Hochleistungsbeton zum Einsatz, der neben der statischen Festigkeit auch wasserdampfdicht genug ist, um auf die aufwendige und teure Edelstahlauskleidung der bisherigen Speicherkonstruktionen verzichten zu können. Die etwa sieben mal höhere Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl im Vergleich zu Normalbeton wurde durch eine Zugabe von Silicastaub und einem veränderten Wasser-Zement-Verhältnis erreicht. Die Leckrate wird hierdurch auf einen Wert von ca.  $4 \text{ l/a} \cdot \text{m}^2$  Speicheroberfläche reduziert.

Eine weitere Neuerung ist eine dritte Beladetasche im mittleren Bereich des Speichers (siehe Bild 10). Hierdurch kann zum einen der Speicher zeitgleich be- und entladen werden, zum anderen können niedrigere Beladetemperaturen, wie sie beispielsweise zeitweise bei Solaranlagen vorkommen, im mittleren Speicherbereich eingeschichtet werden, ohne Bereiche mit höherer Temperatur im oberen Speicherbereich zu zerstören.

Als Wärmedämmung wurde temperatur- und druckbeständiges Blähglasgranulat eingesetzt, das als lose Schüttung in große Säcke eingefüllt wurde ( $\lambda=0,067 \text{ W/mK}$ ). Die Dämmstärke beträgt 70 cm auf der Decke und 70 bis 30 cm über die Speicherhöhe abfallend an den Seitenwänden (siehe Bild 11).

Die erwartete Kostenreduktion durch den möglichen Verzicht auf eine innere Auskleidung in der Größenordnung von 15 % [5] konnte bei diesem Projekt aufgrund verschiedener Umstände nicht erreicht werden. In erster Linie sind hier der starke Zeitdruck (das Projekt sollte bis zum Beginn der EXPO 2000 fertiggestellt sein), die Auswahl einer Baufirma ohne öffentliche Ausschreibung sowie erst während des Tiefbaus festgestellte ungünstige Bodenverhältnisse unterhalb drei Meter unter Geländeoberkante (GOK) zu nennen.

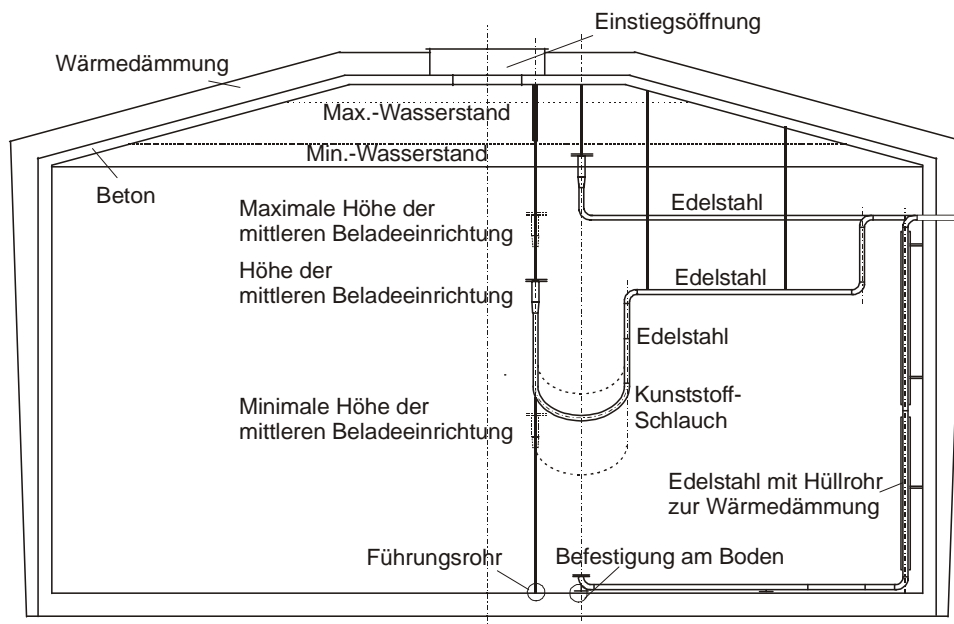


Bild 10: Wärmespeicher in Hannover-Kronsberg

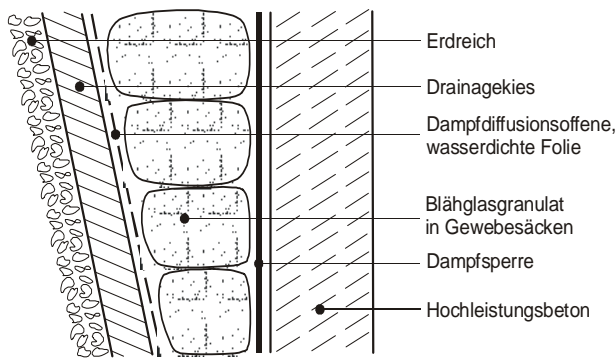


Bild 11: Wandaufbau und Speicher im Bau (Projekt Hannover-Kronsberg)

## Kosten

In Tabelle 2 sind die Baukosten der oben aufgeführten Wärmespeicher angegeben. Wie der Tabelle entnommen werden kann, sind niedrige volumenbezogene Kosten nur bei sehr großen Betonspeichern erreichbar.

Projekt	Speicher- volumen	Baukosten	auf das Nutzvolumen bezogene Baukosten
Rottweil	600 m <sup>3</sup>	531 871 DM	886 DM/m <sup>3</sup>
Friedrichshafen-Wiggenhausen	12 000 m <sup>3</sup>	2 668 432 DM	222 DM/m <sup>3</sup>
Hamburg-Bramfeld	4 500 m <sup>3</sup>	1 878 500 DM	417 DM/m <sup>3</sup>
Hannover-Kronsberg*	2 750 m <sup>3</sup>	1 300 000 DM	470 DM m <sup>3</sup>

Tabelle 2: Realisierte Baukosten (ohne Planung und MwSt)

\*: Angabe IGS Universität Braunschweig [5]

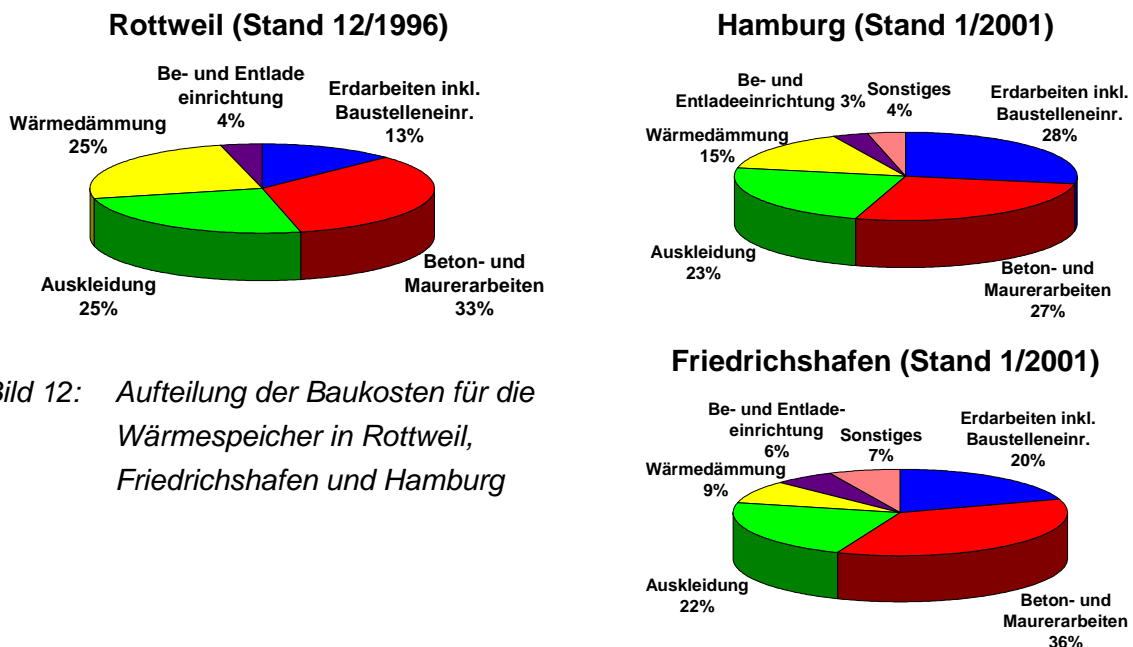


Bild 12: Aufteilung der Baukosten für die Wärmespeicher in Rottweil, Friedrichshafen und Hamburg

Die zugehörige Aufteilung der Baukosten auf die verschiedenen Gewerke können Bild 12 entnommen werden. Die Hauptkosten werden durch Erd- und Betonarbeiten verursacht

(40 % bis 60 % der Baukosten). Die Edelstahlauskleidung trägt mit etwa 20 % bis 25 % zu den Baukosten bei. In diesen Kosten sind die Anbindung des Speichers an die Heizzentrale und die Erdarbeiten zur Gestaltung des Geländes nicht enthalten.

## Ausblick

Wasserspeicher benötigen zur Zeit eine Tragkonstruktion, die in der Regel aus Stahlbeton gefertigt und zumindest teilweise im Erdreich eingebaut ist. Durch die Realisierung einiger Projekte wurden wichtige Erfahrungen für den Bau von größeren Wärmespeichern mit Beton-Tragwerk gesammelt.

Vielversprechende Ansätze für Alternativen zur beschriebenen Betonkonstruktion stellen Behälter aus glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) und Erdbecken-Wärmespeicher mit schwimmender oder abgestützter Deckenkonstruktion dar. Insbesondere Erdbecken-Wärmespeicher scheinen eine kostengünstige Alternative zu den Behälterbauwerken zu sein. In diesem Fall wird eine Grube errichtet, die meist die Form eines Kegel- oder Pyramidenstumpfes bzw. eines Quaders hat, und in die eine wasserdichte Kunststoff-Abdichtungsbahn eingebracht wird (HDPE oder PP). Die Seitenwände der Grube werden je nach Bodenfestigkeit standfest geböschet. Bei diesen beiden Speichertypen wird ein großes Potential zur Kostenreduktion gesehen.

## Literatur

- [1] T. Schmidt, D. Mangold, M. Benner, H. Müller-Steinhagen  
Saisonale Wärmespeicherung in Verbindung mit solaren Nahwärmesystemen;  
OTTI-Informationsforum „Geothermie in der Praxis“, Tagungsband S. 140-149, Passau, 2000
- [2] 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
- [3] M. Benner, B. Mahler, D. Mangold, T. Schmidt, M. Schulz, H. Seiwald, E. Hahne  
Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit und ohne Langzeit-Wärmespeicher;  
Forschungsbericht zum BMFT-Vorhaben 0329606C, ITW, Universität Stuttgart, 1999,  
ISBN-Nr.: 3-9805274-0-9
- [4] N. Hirt, M. Benner  
Pilotvorhaben Erdbecken-Heißwasserwärmespeicher in Rottweil;  
Forschungsbericht zum BMBF-Vorhaben 0329383A, Stadtwerke Rottweil, 1997,
- [5] M. Bodmann, M.N. Fisch  
Saisonale Speicher;  
AGFW Seminar Fernwärme und Solarenergienutzung, Potsdam, Oktober 2000.
- [6] Hahne, E. et. al.:  
Solare Nahwärme - Ein Leitfaden für die Praxis, BINE-Informationspaket,  
TÜV-Verlag, Köln, 1998, ISBN 3-8249-0470-5

*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 und Nordrhein-Westfalen, der Freien und Hansestadt Hamburg und der Stadt Friedrichshafen finanziert. Das am ITW durchgeführte wissenschaftliche Begleitprogramm wird im Rahmen des Vorhabens 0329606S aus Mitteln des BMWi finanziert. Die Autoren danken für die Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt bei den Autoren.*