

DER ERDSONDEN-WÄRMESPEICHER IN CRAILSHEIM

D. Bauer¹⁾, W. Heidemann¹⁾, H. Müller-Steinhagen^{1), 2)}

¹⁾ Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik

Pfaffenwaldring 6, D-70550 Stuttgart

Tel.: +49-(0)711-685-69445, Fax: +49-(0)711-685-63503

E-mail: bauer@itw.uni-stuttgart.de

www.itw.uni-stuttgart.de/sun

²⁾ DLR Stuttgart, Institut für Technische Thermodynamik

1 Einleitung

Als wichtiger Teil der vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) im Rahmen des Energieforschungsprogramms Solarthermie2000plus [1] geförderten solar unterstützten Nahwärmeversorgung in Crailsheim entsteht dort zurzeit ein Erdsonden-Wärmespeicher. Dieser wird der saisonalen Speicherung von solar erzeugter Wärme dienen und dadurch den angestrebten hohen solaren Deckungsanteil von 50% des Gesamtwärmebedarfs ermöglichen.

Im Folgenden wird detailliert auf die Funktionsweise und Planung dieses Erdsonden-Wärmespeichers sowie auf das Monitoring des Speicherbetriebs eingegangen.

2 Das solar unterstützte Nahwärmesystem in Crailsheim

Auf einem ehemaligen Militärgelände entsteht in Crailsheim das Neubaugebiet ‚Hirtenwiesen II‘. Neben einem schon errichteten Gymnasium und einer Sporthalle sollen dort dem Bebauungsplan der Stadt Crailsheim zufolge etwa 260 Wohneinheiten – überwiegend Einfamilien- und Reihenhäuser – gebaut und über ein Nahwärmenetz mit Wärme zur Raumheizung und Trinkwarmwasserbereitung versorgt werden. Der zu erwartende Gesamtwärmebedarf des Nahwärmenetzes von 4100 MWh/a [2] soll zur Hälfte solar gedeckt werden.

Dazu wurde ein Konzept ausgearbeitet [3], welches eine zweigeteilte Solaranlage in Kombination mit einem Erdsonden-Wärmespeicher vorsieht:

- Der erste Anlagenteil besteht aus Kollektorfeldern auf ehemaligen Kasernengebäuden (CBE-Gebäude, siehe Abbildung 1) mit bisher zweimal 400 m², weiteren Kollektorfeldern auf dem Gymnasium und der Sporthalle (530 bzw. 220 m²), einem 100 m³ großen Pufferspeicher und einer Heizzentrale, über welche die Solaranlage an das Nahwärmenetz angeschlossen ist.

- Der zweite Anlagenteil ist ein überwiegend saisonal betriebener Anlagenteil bestehend aus ca. 5000 m² Kollektorfläche auf einem Lärmschutzwall, dem Erdsonden-Wärmespeicher, einem weiteren Pufferspeicher mit 480 m³ Volumen und einer separaten Heizzentrale.

Die Aufteilung in zwei Anlagenteile mit separaten Pufferspeichern und Heizzentralen war durch die große Entfernung zwischen den Kollektorflächen nötig geworden. Beide Anlagenteile sind durch eine ca. 300 m lange Leitung miteinander verbunden und so dimensioniert, dass möglichst wenig Wärme zwischen ihnen transferiert werden muss, um Wärmeverluste beim Durchströmen der Verbindungsleitung zu minimieren. Abbildung 1 zeigt die Verschaltung der Komponenten.

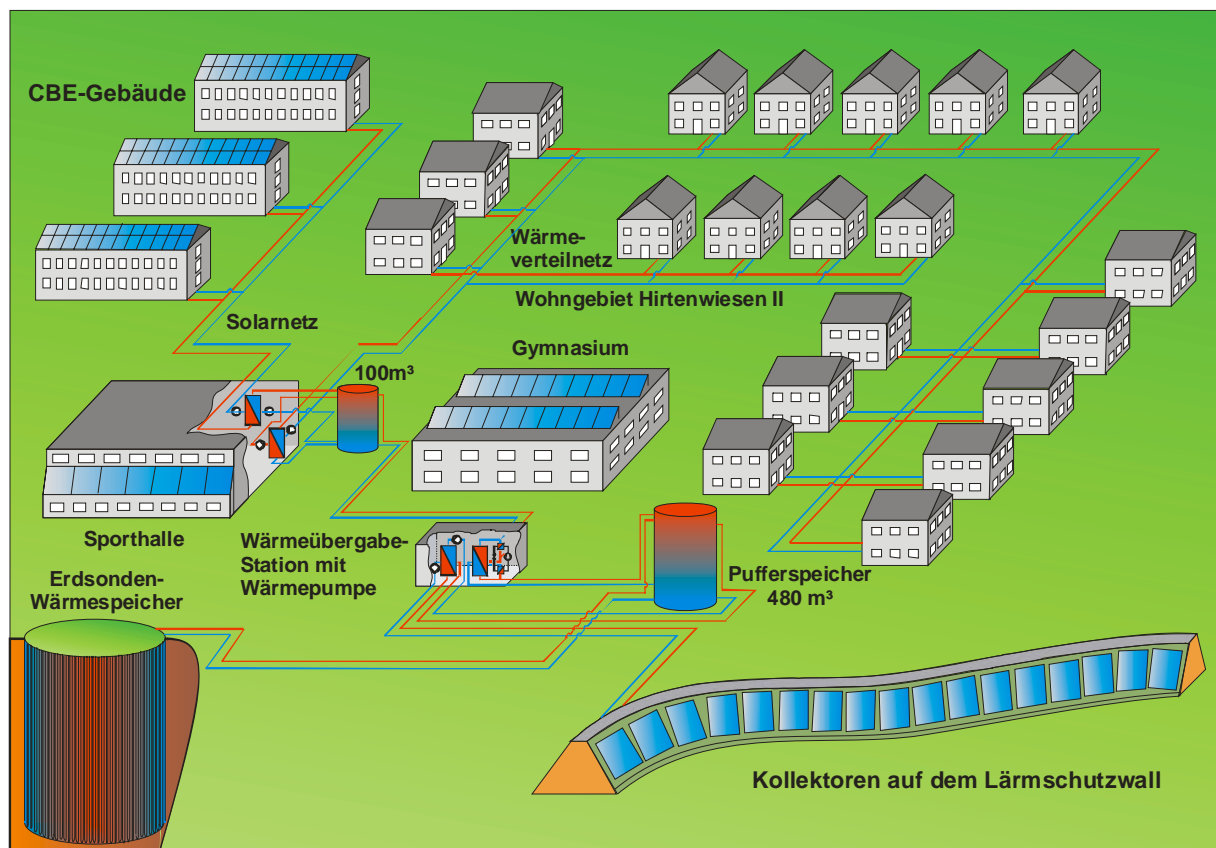


Abbildung 1: Verschaltung der Komponenten des solar unterstützten Nahwärmesystems

3 Funktionsweise des Erdsonden-Wärmespeichers

Der Erdsonden-Wärmespeicher dient dazu, die Diskrepanz zwischen hohem Solarstrahlungsangebot und damit hohen Wärmegewinnen der Kollektoren im Sommer und dem zeitlich versetzten Wärmebedarf des Nahwärmenetzes zur Raumheizung im Winter auszugleichen. Dazu wird der Erdsonden-Wärmespeicher

durch die Kollektorflächen auf dem Lärmschutzwall im Sommer beladen. Die maximale Beladeleistung des Erdsonden-Wärmespeichers liegt unter der maximalen Wärmeleistung der Kollektoren, so dass diese nicht zeitgleich eingebracht werden kann. Durch den 480 m³ Pufferspeicher des zweiten Anlagenteils kann die hohe Kollektorleistung am Tag aufgenommen und über 24 Stunden verteilt an den Erdsonden-Wärmespeicher abgegeben werden.

Im Herbst erfolgt die Entladung des Erdsonden-Wärmespeichers bei ausreichend hohen Speichertemperaturen direkt. Sinkt die Speichertemperatur unter die Rücklauftemperatur des Nahwärmenetzes, kann der Speicher durch zwei Kompressions-Wärmepumpenmodule mit jeweils 92 kW Antriebsleistung weiter entladen werden. Der Antrieb der ersten Wärmepumpe erfolgt elektrisch, der Antrieb der zweiten Wärmepumpe ist mit Rapsöl geplant. Simulationsrechnungen [3] ergaben eine optimale Einbindung der Wärmepumpen zwischen den beiden Pufferspeichern (Abbildung 2). Die Wärmepumpen können den Pufferspeicher des zweiten Anlagenteils bis auf eine Temperatur von 10°C abkühlen. Durch den Wärmepumpeneinsatz kann das Temperaturniveau des Erdsonden-Wärmespeichers im Mittel gesenkt werden. Dies ermöglicht eine Verringerung der Wärmeverluste des Speichers.

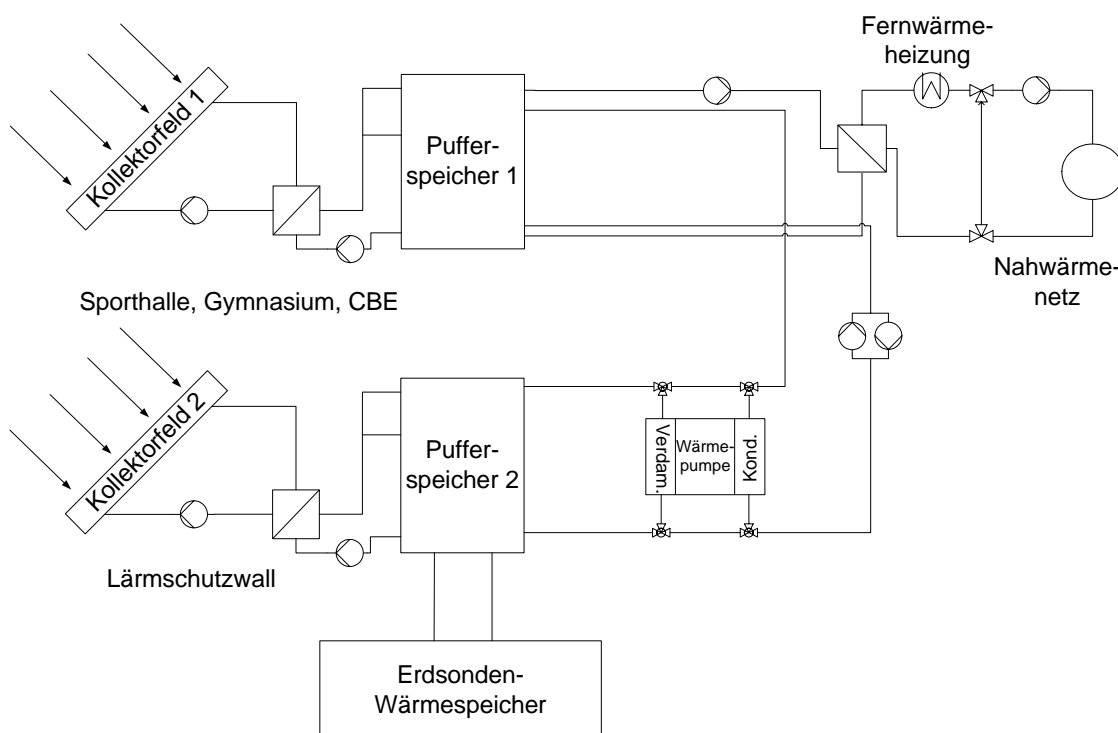


Abbildung 2: Anbindung des Erdsonden-Wärmespeichers an das solar unterstützte Nahwärmesystem

Beladen wird der Erdsonden-Wärmespeicher in den Monaten April bis September, entladen von Oktober bis März. Die höchsten über das Speichervolumen gemittelten Temperaturen von 53°C erreicht der Erdsonden-Wärmespeicher im September. Im März treten die tiefsten mittleren Speichertemperaturen von 22°C auf. Durch den Wärmepumpeneinsatz von Januar bis März können die im Sommer und Herbst auftretenden Wärmeverluste des Speichers teilweise rückgewonnen werden. Am ITW der Universität Stuttgart durchgeführte Simulationen prognostizieren einen Speichernutzungsgrad (Verhältnis von jährlich aus- zu eingespeicherter Energiemenge) im eingeschwungenen Zustand (d.h. nachdem sich nach einigen Jahren ein quasistationärer Zustand eingestellt hat) von 73%. Die jährlich eingespeicherte Energiemenge wird ca. 1140 MWh betragen. Abbildung 3 zeigt den Verlauf der Be- und Entladewärmemengen, Wärmeverluste und Wärmerückgewinne und die mittlere Speichertemperatur über ein Jahr.

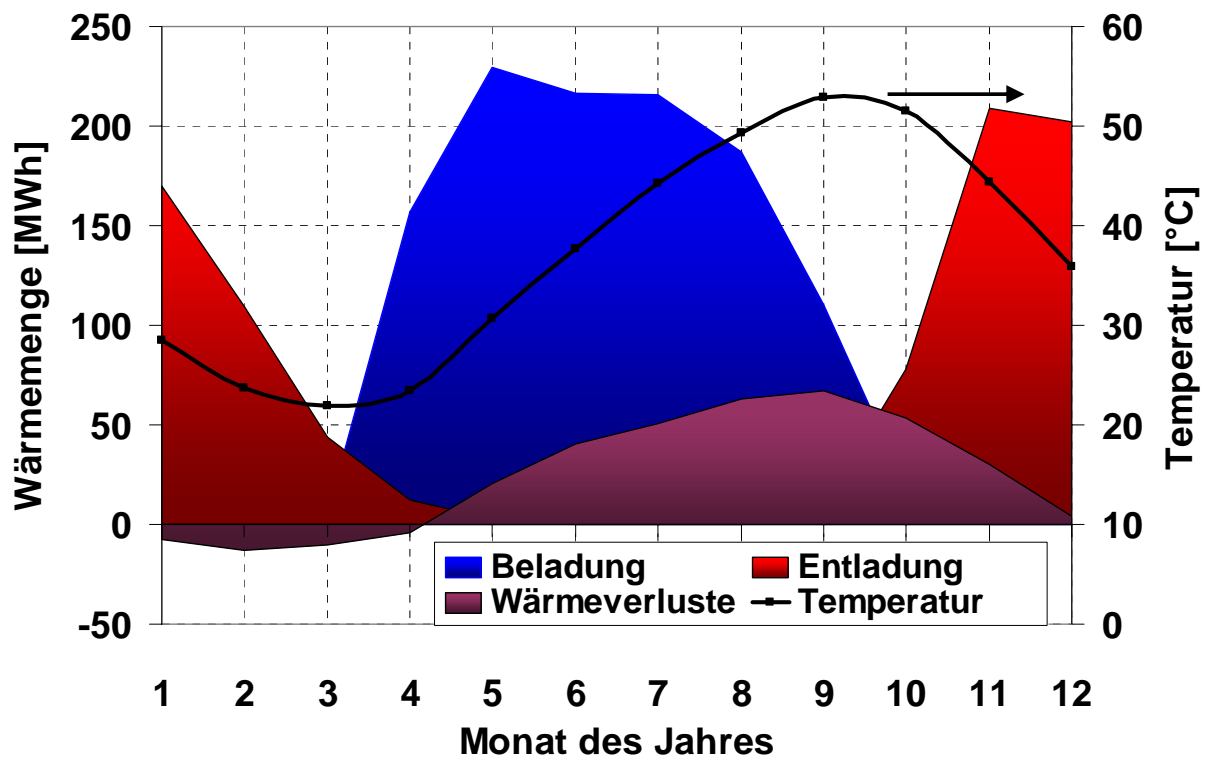


Abbildung 3: Berechnete Belade-, Entlade- und Verlustwärmemengen sowie mittlere Temperatur des Erdsonden-Wärmespeichers im Jahresverlauf

4 Voruntersuchungen zur Geologie und Hydrogeologie

Vor der Planung des Speichers musste sichergestellt werden, dass der örtliche Untergrund für einen Erdsonden-Wärmespeicher geeignet ist. Dazu wurden sowohl geologische als auch hydrogeologische Untersuchungen vor Ort durchgeführt. Die

Untersuchung der Bohrkerne einer 100 m tiefen Kernlochbohrung zeigt folgende geologische Formationen:

0 – 4,5 m	Gipskeuper mit Grenzdolomit
4,5 – 22 m	Lettenkeuper
22 – 92 m	Oberer Muschelkalk

Zur Erfassung der Grundwassersituation wurden ein hydrogeologisches Dreieck abgeteuft und Pumpversuche durchgeführt. Diese ergaben einen zumindest zweischichtigen Aquifer mit Transmissivitäten von 0,1 bis $0,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$. Diese sehr niedrigen Werte machen den Untergrund für einen Erdsonden-Wärmespeicher geeignet. Deutliche Wasserführungen konnten im und auf dem Grenzdolomit nachgewiesen werden. Dieser oberflächennahe Grundwasserleiter kann durch bautechnische Maßnahmen, wie in Kapitel 5 gezeigt wird, von der Wärmespeicherung weitgehend ausgeschlossen werden, so dass er sich nicht negativ auf die Effizienz des Speichers auswirkt.

Die volumetrische Wärmekapazität des Bodens wurde im Bereich von 0 bis 80 m zu $2405 \text{ kJ}/(\text{m}^3\text{K})$ bestimmt. Ein vom ZAE BAYERN durchgeführter Thermal Response Test ergab eine Wärmeleitfähigkeit von $2,46 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ (0 – 80 m) und $1,95 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ (0 – 22 m).

5 Technische Realisierung des Speichers

Die Planung der technischen Realisierung des Erdsonden-Wärmespeichers erfolgte durch die EWS GmbH, Lichtenau, unter der technisch-wirtschaftlichen Programmbegleitung von Solites, Stuttgart. Unter Zuhilfenahme von Simulationen des ITW der Universität Stuttgart ergab sich eine unter thermischen sowie ökonomischen Gesichtspunkten optimierte Speichergestaltung unter Verwendung von 80 Erdwärmesonden, die auf einer kreisrunden Fläche von 30 m Durchmesser im Rechteckraster mit drei Metern Abstand angeordnet werden (Abbildung 4). Zur Verwendung kommen Doppel-U-Rohrsonden der Dimension $4 \times (32 \times 2,9 \text{ mm})$. Aufgrund des bei Pumpversuchen im Vorfeld festgestellten Aquifers in ca. 65 bis 100 m Tiefe wird die Sondenlänge auf 55 m begrenzt. Damit ergibt sich ein Speichervolumen von ca. 39000 m^3 .

Das Abteufen der Bohrungen erfolgt in zwei Schritten: Zunächst wird die Bohrung bis in fünf Meter Tiefe mit erweitertem Durchmesser niedergebracht und eine Stützverrohrung eingebaut. Anschließend wird die Bohrung mit ca. 120 mm Durchmesser im Im-Loch-Hammer-Bohrverfahren mit reiner Luftspülung bis auf 55 m abgeteuft. Die Stützverrohrung der oberen fünf Meter verbleibt im Boden und dient als Abschottung der Erdwärmesonde vom Wasser führenden Grenzdolomit. Um

Wärmeverluste an das oberflächennahe Grundwasser zu vermeiden, wird das Stützrohr später mit einem Dämmmaterial ($\lambda = 0,1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) verpresst. Der thermisch aktive Teil der Erdwärmesonde von 5 bis 55 m Tiefe wird mit einem gut wärmeleitenden Verpressmaterial ($\lambda > 2 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) von unten nach oben verpresst.

Das Sondenfeld wird zur hydraulischen Anbindung in vier gleich große Sektoren unterteilt, in welchen jeweils die Erdwärmesonden in gleicher Art und Weise angeschlossen werden. Die Anbindung der Erdwärmesonden erfolgt in einem zentralen Schacht, in dem der Verteiler untergebracht ist. Von dort aus werden jeweils zwei Erdwärmesonden seriell durchflossen. Eine der beiden Erdwärmesonden ist dabei in einem inneren Kreis (Radius 0 bis 9 m) angeordnet, die andere im äußeren Kreis (Radius ca. 9 bis 15 m) (Abbildung 4). Zur Beladung wird zuerst die innere Erdwärmesonde durchflossen, zur Entladung zuerst die Erdwärmesonde des äußeren Kreises. Dies ermöglicht ein horizontal radialsymmetrisch um die Speicherachse geschichtetes Temperaturprofil des Speichers (Abbildung 5).

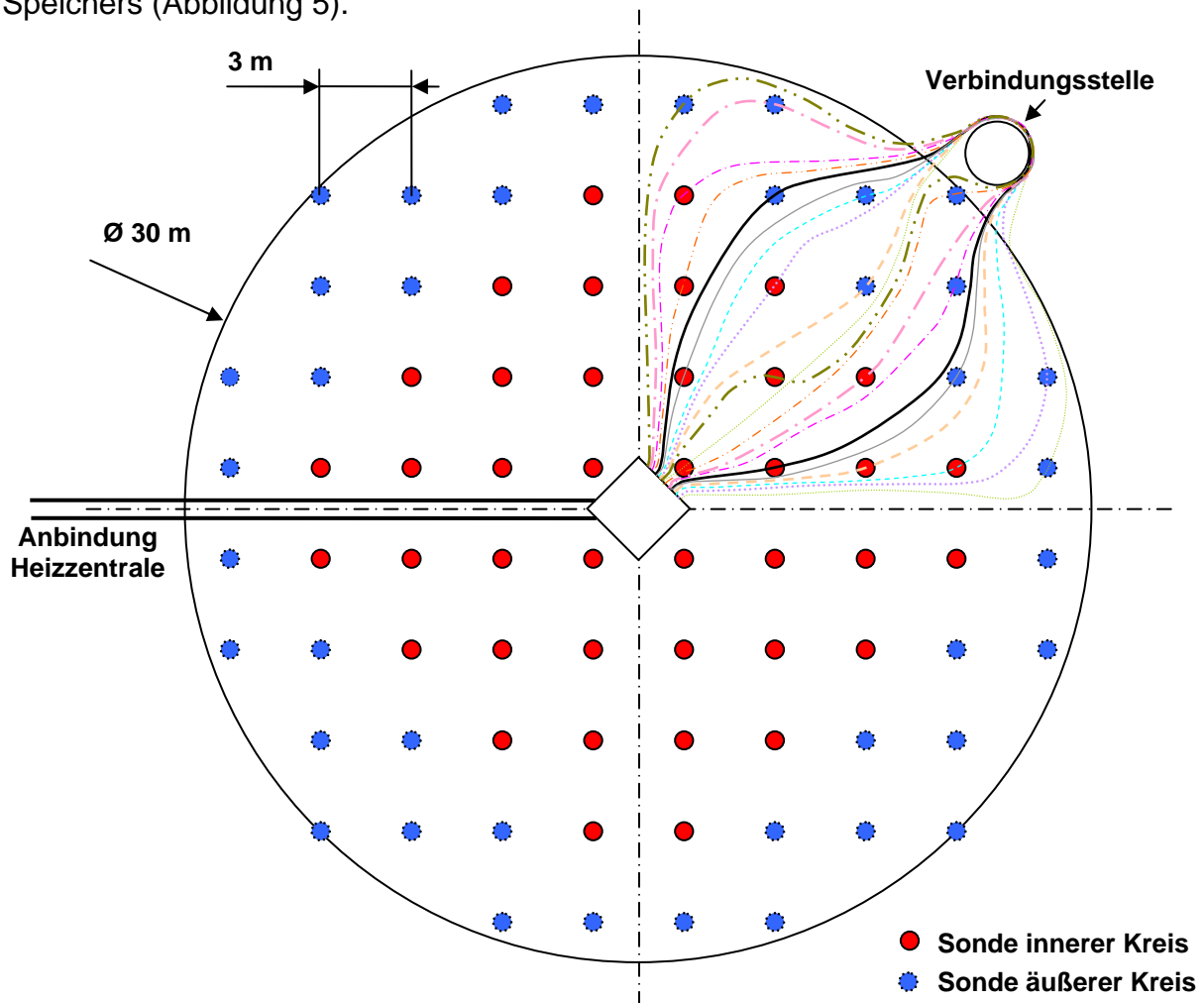


Abbildung 4: Sondenanordnung und -verschaltung (zur Übersichtlichkeit nur in einem von vier symmetrischen Bereichen dargestellt); Quelle: EWS GmbH

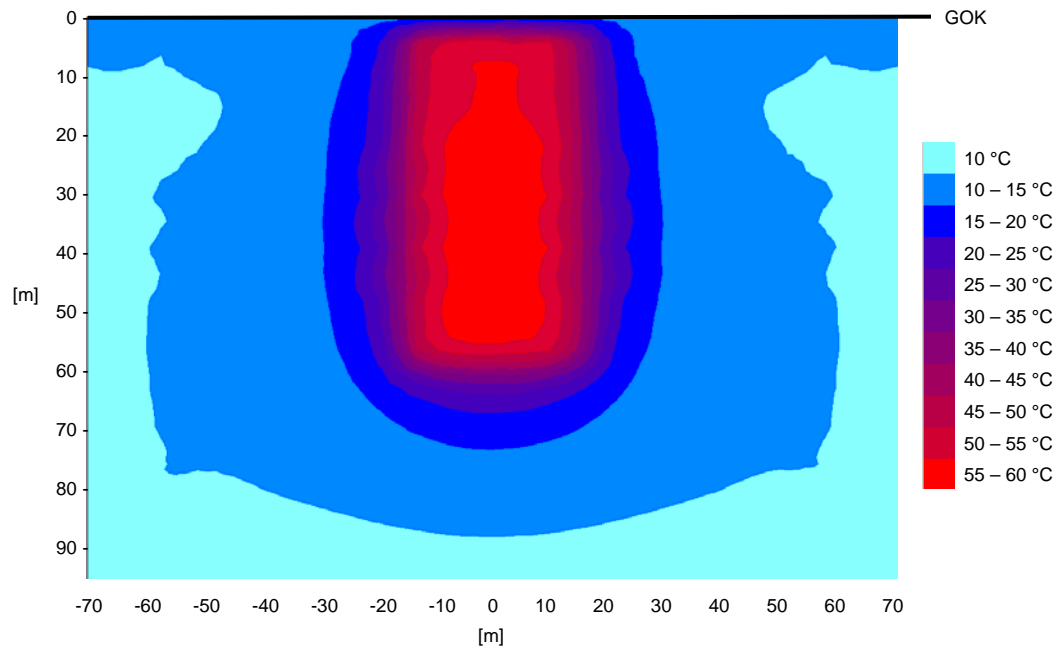


Abbildung 5: Temperaturprofil des Speichers bei maximaler Beladung (Ende 3. Quartal); TRNSYS-Simulation ITW

Um auf Durchflussregelventile verzichten und dennoch sicherstellen zu können, dass jeder Sondenkreis mit demselben Volumenstrom beaufschlagt wird, muss die Gesamtleitungslänge jedes Sondenkreises möglichst identisch sein. Dies wird erreicht, indem alle Sondenkreise um einen von vier Wendepunkten außerhalb des Sondenfeldes geführt werden (Abbildung 4). An diesen Wendepunkten erfolgt jeweils die Verbindung von zwei seriell geschalteten Erdwärmesonden. Dazu werden die Erdwärmesonden mit unterschiedlich langen Vor- und Rückläufen geliefert. Zum einen minimiert dies die Anzahl der Verbindungspunkte, zum anderen kann an den Verbindungsstellen der Speicher bei Bedarf später einfach erweitert werden.

Die Wahl der Sonden fiel auf Sonden aus PE-X. Dieses temperaturbeständige, hochdruckvernetzte Polyethylen zeichnet sich durch eine hohe Unempfindlichkeit gegenüber Spannungsrisbildung, Kerbeinbringung und thermischer Alterung aus. Neben der sichereren thermischen Beständigkeit gegenüber den zu erwartenden Beladetemperaturen im Vergleich zu ursprünglich ebenfalls in Erwägung gezogenen Sonden aus anderen Materialien (PB, PE-RT) [4] können die Sonden aus PE-X zur oberflächennahen horizontalen Anbindung aufgrund ihrer Unempfindlichkeit gegenüber Kerbeinbringung ohne Sandbett in Schaumglasschotter verlegt werden. Des Weiteren lassen sich U-Rohrsonden aus PE-X durch enge Biegeradien am Sondenfuß nahtlos, d. h. aus einem Rohr, fertigen. Die Sonden werden untereinander durch ein spezielles Schiebehülsensystem verbunden.

Die horizontale Anbindung wird mittig in einer 40 cm starken Schicht aus Schaumglasschotter eingebettet um sowohl Wärmeverluste an die Umgebungsluft als auch an den oberflächennahen Grundwasserleiter im und auf dem Grenzdolomit sowie den thermischen Kurzschluss der Sondenleitungen untereinander zu minimieren. Durch eine wasserundurchlässige, wasserdampfdiffusionsoffene Folie, eine Drainageschicht und ein leichtes Gefälle wird die Wärmedämmung vor Feuchtigkeit geschützt. Nach oben wird der Aufbau durch eine ca. 2 m mächtige Erdüberdeckung abgeschlossen.

6 Messtechnik

Zur Anlagenregelung und für wissenschaftliche Untersuchungen wird das Temperaturprofil des Erdsonden-Wärmespeichers während des Betriebs kontinuierlich detailliert vermessen. Dazu dienen insgesamt 86 Temperatursensoren, die an neun vertikalen Messlanzen angebracht sind. Tabelle 1 zeigt die Anzahl und Positionierung der Temperatursensoren an den Messlanzen. Es werden an allen Messlanzen Temperaturen bis in 80 m Tiefe, d. h. bis 25 m unterhalb des aktiven Speichers erfasst. Die Anordnung der Messlanzen orientiert sich an der zu erwartenden Grundwasserfließrichtung im oberen Muschelkalk. Die Entfernung der Messlanzen von der Speichermitte erstreckt sich bis zum Doppelten des Speicherradius (Abbildung 6).

Tabelle 1: Anzahl und Position der Temperatursensoren an den Messlanzen

Bezeichnung Messlanze	Sensor-Position unter Speicheroberkante [m]												
	oberhalb WD*	unterhalb WD*	5	10	20	30	40	50	60	65	70	80	Summe
M1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12
M21	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12
M22	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12
M31	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12
M32	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12
M41	1	1		1		1		1		1		1	7
M42	1	1		1		1		1		1		1	7
M51		1		1		1		1		1		1	6
M52		1		1		1		1		1		1	6
Summe	7	9	5	9	5	9	5	9	5	9	5	9	86

*Wärmedämmung

Sechs weitere Sensoren erfassen die Temperaturen an zwei ausgewählten Erdwärmesonden um die Wärmeübertragungsleistung des thermisch aktiven Teils

der Erdwärmesonden sowie die Wärmeverluste des oberen gedämmten Sondenabschnitts zu bestimmen.

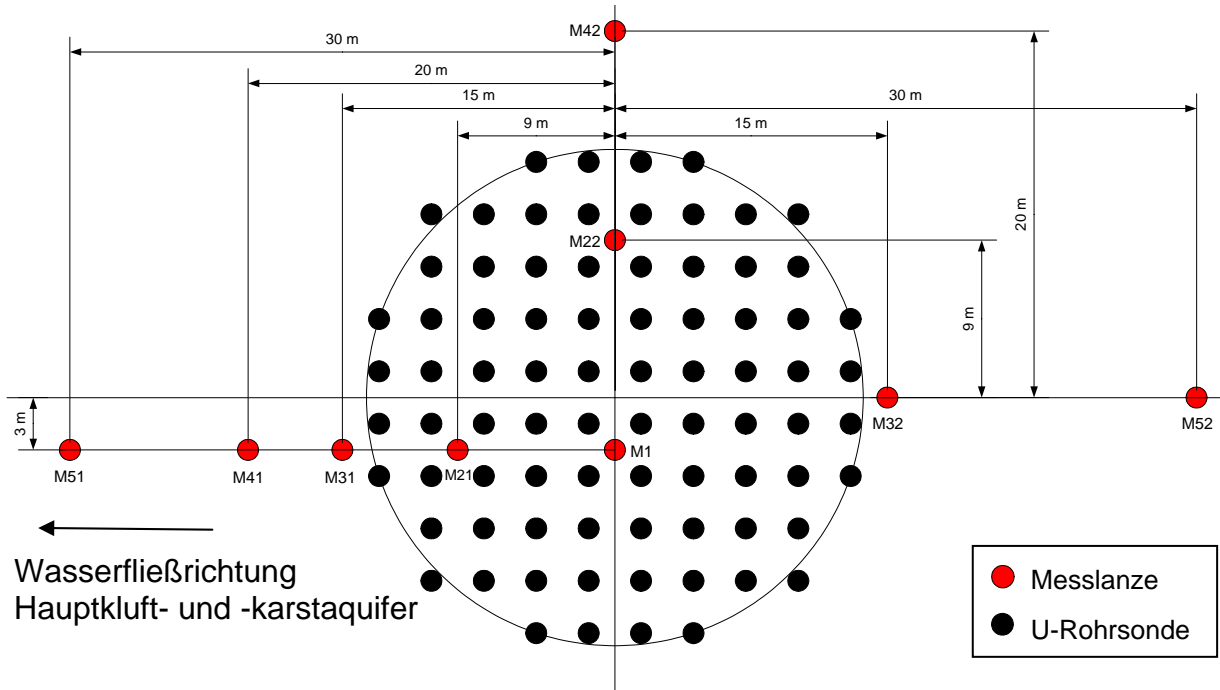


Abbildung 6: Position der Messlanzen im und um den Erdsonden-Wärmespeicher

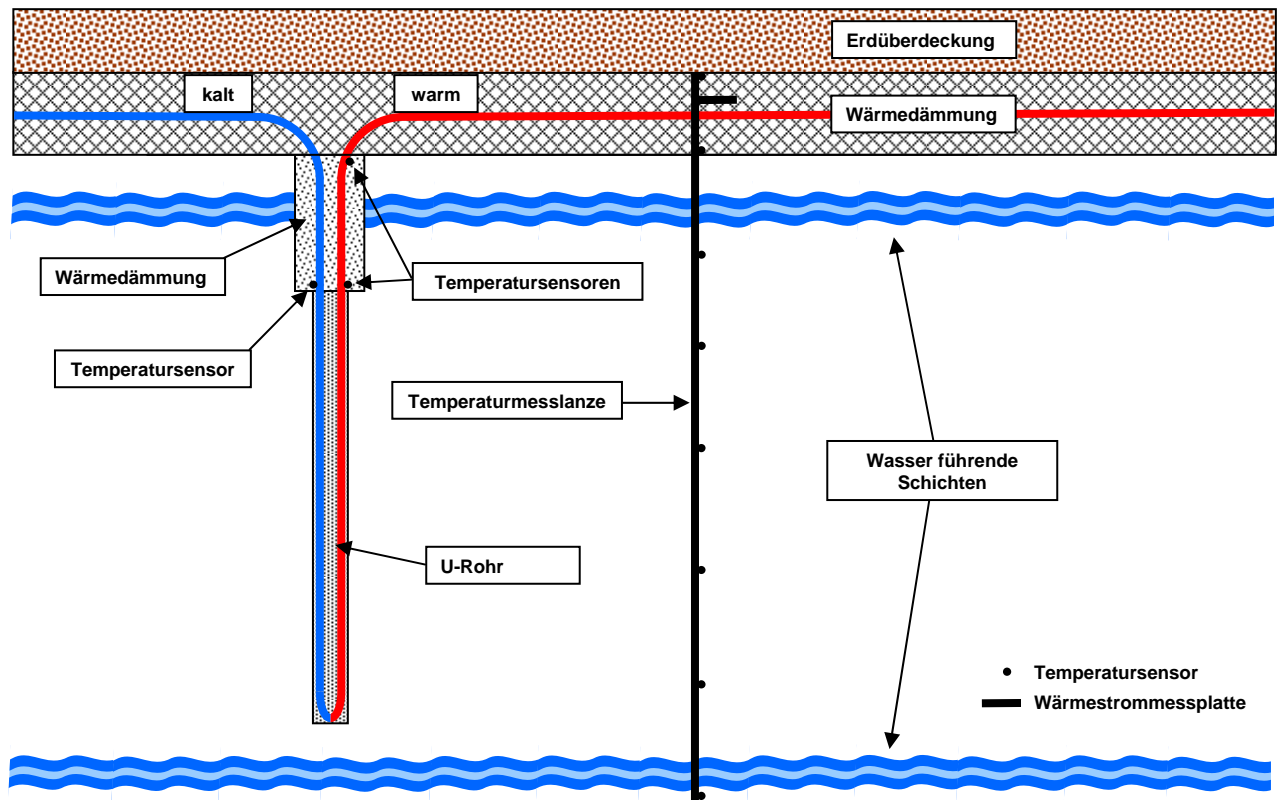


Abbildung 7: Messtechnik im vertikalen Speicherschnitt (nicht maßstabsgetreu)

Durch die Messung der Temperaturen im zentralen Verteiler-Vorlauf und -Rücklauf des ESWSp sowie in der Heizzentrale können die Verluste der Anbindeleitungen bestimmt werden. Mehrere Wärmestrommessplatten ergänzen die Vermessung des Erdsonden-Wärmespeichers zur Ermittlung der Wärmeverluste an die Umgebung (Abbildung 7).

Literatur

- [1] www.solarthermie2000plus.de
- [2] **S. Raab, D. Mangold, W. Heidemann, H. Müller-Steinhagen:**
Die solar unterstützte Nahwärmeversorgung in Crailsheim, 15. OTTI-Symposium thermische Solarenergie, 2005, Tagungsband S. 524-528
- [3] **M. Bodmann, D. Mangold, J. Nußbicker, S. Raab, A. Schenke, T. Schmidt:**
Solar unterstützte Nahwärme und Langzeit-Wärmespeicher (Februar 2003 bis Mai 2005), Forschungsbericht zum BMWA / BMU-Vorhaben 0329607F
- [4] **V. Liebel, M. Reuss:**
PE-X borehole heat exchanger for high temperature UTES applications, Proceedings of Tenth International Conference on Thermal Energy Storage, Ecstock, 2006

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördert. Die Autoren danken für die Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.