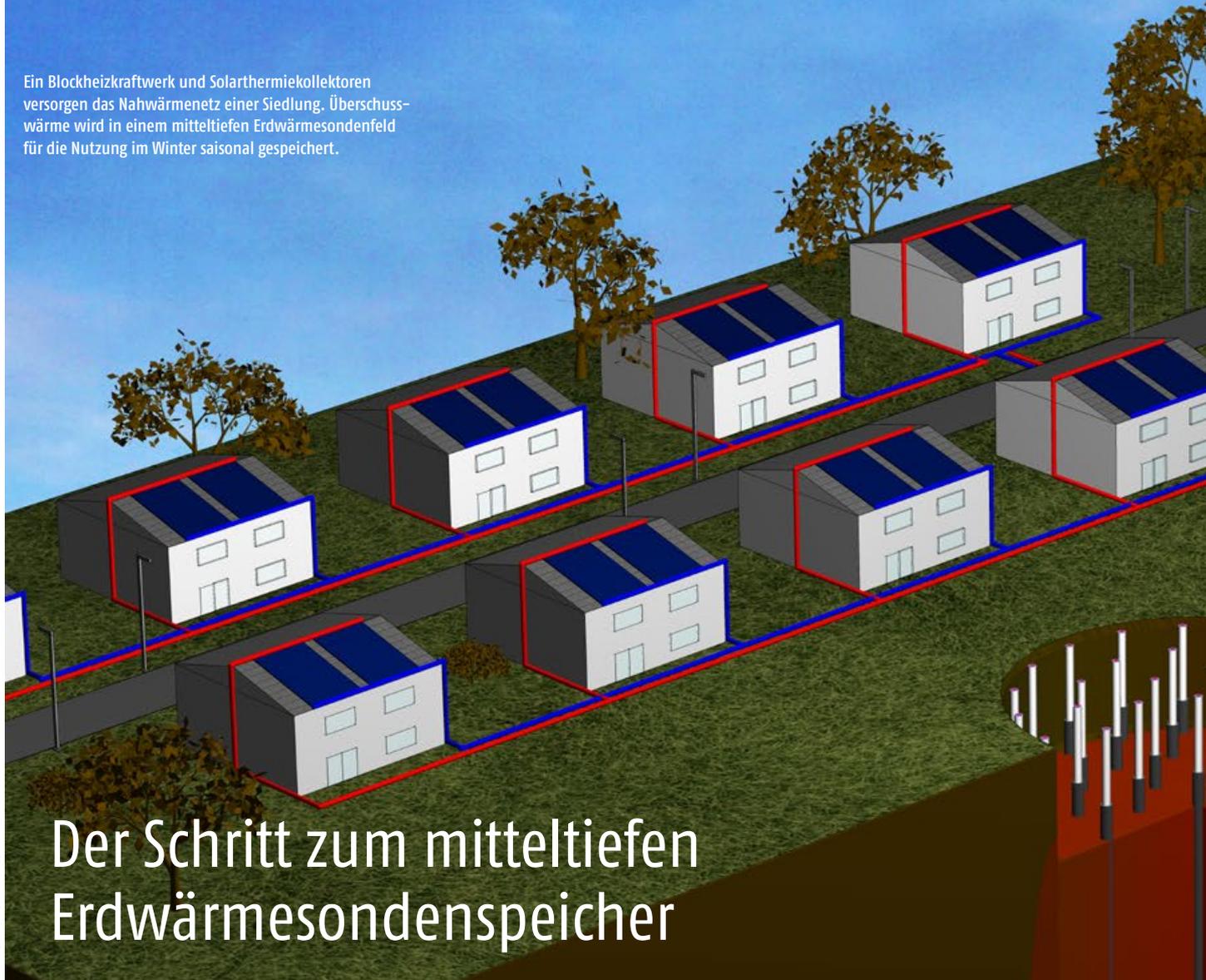


Ein Blockheizkraftwerk und Solarthermiekollektoren versorgen das Nahwärmenetz einer Siedlung. Überschusswärme wird in einem mitteltiefen Erdwärmesondenfeld für die Nutzung im Winter saisonal gespeichert.



Der Schritt zum mitteltiefen Erdwärmesondenpeicher

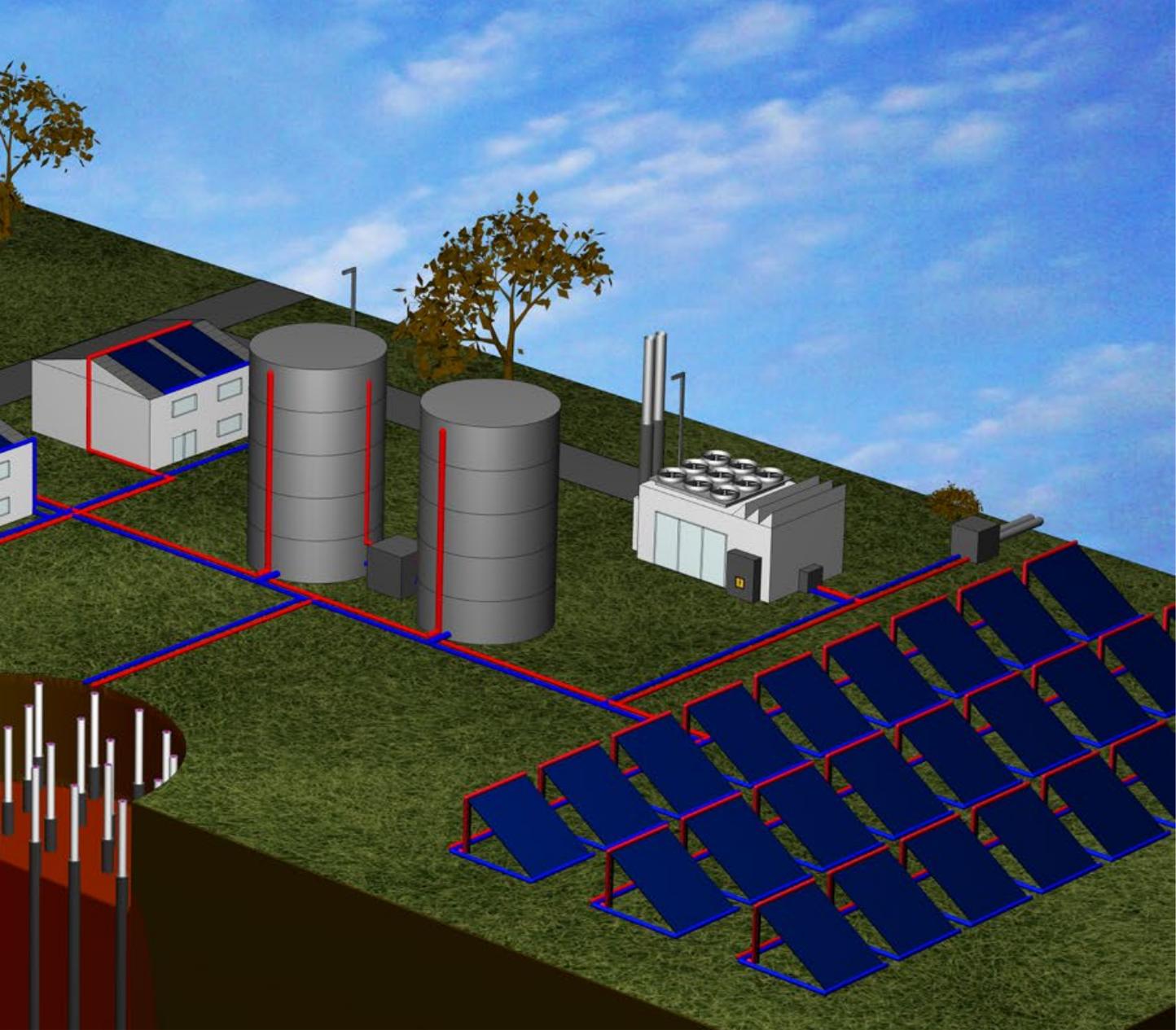
Schulte, Weisch, Formhals, Sass

Mitteltiefe Erdwärmesondenpeicher können einen entscheidenden Beitrag zur erfolgreichen Wärmewende leisten und bieten zahlreiche Vorteile gegenüber anderen Systemen. So kann im Gegensatz zu oberflächennahen Erdwärmesonden speichern eine nachteilige Beeinflussung des Grundwassers gering gehalten werden. Hohe Temperaturniveaus und große Speicherkapazitäten bei gleichzeitig geringem Platzbedarf ermöglichen die grundlastfähige Nutzung fluktuierender und erneuerbarer Wärmequellen in urbanen Nahwärmenetzen.

Die Energiewende hat sich in der Vergangenheit auf die erneuerbare Erzeugung von Elektrizität konzentriert. Trotz enormer Anstrengungen im Stromsektor bleibt Deutschland jedoch hinter seinen damit verknüpften Klimaschutzziele zurück [1]. Denn mehr als die Hälfte des deutschen Endenergieverbrauchs entfällt auf die Bereitstellung von Wärme. Vor allem im Bereich der Haushalte ist der Anteil von Raumwärme und Warmwasser am Endenergieverbrauch mit mehr als 80 % be-

sonders groß [2]. Dieser Energiebedarf wird nach wie vor hauptsächlich durch die Verbrennung fossiler Primärenergieträger gedeckt. So verursacht der Wärmesektor in Haushalten, Industrie und Gewerbe insgesamt etwa 40 % der CO₂-Emissionen. Um die nationalen Klimaschutzziele zu erreichen, muss die erforderliche Reduktion der Treibhausgasemissionen auf den Wärmesektor ausgeweitet werden. Dazu schreibt die Energieeinsparverordnung eine Verringerung des flächenspezifischen

Heizwärmebedarfs bei energetischer Sanierung und im Neubau vor, welcher durch verbesserte Dämmung erreicht werden kann. Darüber hinaus kann der Einsatz moderner Heiztechnik – wie beispielsweise der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) – zu einer Steigerung der Energie- und Emissionseffizienz beitragen. Eine erfolgreiche Wärmewende muss jedoch auch die Erzeugung in den Blick nehmen und erneuerbare Energien für die Bereitstellung von Wärme stärker nutzen [3, 4].



Der deutsche Wärmebedarf unterliegt jahreszeitlich bedingt einer stark ausgeprägten Saisonalität: Etwa zwei Drittel des jährlichen Wärmeverbrauchs entfallen auf die Monate Oktober bis April [5]. Eine effiziente KWK ist somit auf diesen Zeitraum beschränkt. Die wärmegeführten Blockheizkraftwerke können in den Sommermonaten nicht unter Volllast betrieben werden, da es keine Abnehmer für die Wärme gibt. Auch die Effizienz der nahe-

kann eine Solarthermieanlage zwar im Sommer signifikante Wärmeüberschüsse erzielen, aber dennoch den winterlichen Wärmebedarf nicht decken.

Für einen effizienten Einsatz dieser Technologien werden deshalb saisonale thermische Speicher benötigt, welche Wärmeüberschüsse im Sommer aufnehmen und im Winter bereitstellen können. Wegen der großen Energiemengen, die es zu speichern gilt, sind entsprechend große Kapazitäten notwendig. Hinzu kommt, dass die thermischen Verluste mit abnehmender Speichergröße und zunehmender Speicherdauer wachsen. Somit kommen für saisonale Wärmespeicherung vor allem

großskalige, in Nahwärmenetze eingebundene Lösungen infrage. Durch die angestrebte Vernetzung von Verbraucher, Erzeuger und Speicher thermischer Energie, ergänzt um mögliche Sektorkopplungen, ergeben sich dabei zahlreiche Synergie- und Skaleneffekte. Neben dem saisonalen Ausgleich von Wärmeangebot und -nachfrage bieten sich auch die Vorteile einer gleichmäßigeren und energieeffizienteren Auslastung von KWK-Anlagen

» **Geschlossene geothermische Systeme eignen sich in besonderem Maße für die sensible Wärmespeicherung im dicht besiedelten urbanen Raum.** «

liegenden regenerativen Wärmequelle, der Solarthermie, ist von der Saisonalität des Wärmebedarfs betroffen: Der mittlere solare Wärmeertrag ist im Sommer um ein Vielfaches größer als im Winter [6]. So

sowie die Einspeisung regenerativer Energien oder industrieller Abwärme an [5]. Die für saisonale Wärmespeicherung erforderlichen großen Kapazitäten lassen sich mit thermochemischen und Latent-

wärmespeichern wegen hoher spezifischer Kosten kaum verwirklichen. Sensible Wärmespeicher weisen zwar geringere Energiedichten auf, zeichnen sich dafür jedoch durch niedrigere spezifische Kosten und eine verhältnismäßig leichte technische Umsetzbarkeit aus: Ein sensibler Wärmespeicher wird durch eine gezielte Temperaturänderung des Speichermediums be- oder entladen. Die Kapa-

zität hängt somit von der Größe und den Be- und Entladetemperaturen des Speichers ab.

Geothermische Wärmespeicherung

Trotz der hohen spezifischen Wärmekapazität von Wasser haben oberflächige Speichertanks einen erheblichen Platzbedarf und werden deshalb gewöhnlich nur für kurzzeitige Wärmespeicherung eingesetzt.

Geschlossene geothermische Systeme eignen sich hingegen in besonderem Maße für sensible Wärmespeicherung im dicht besiedelten urbanen Raum: Engständige Erdwärmesondenfelder können ohne den Platzbedarf eines entsprechenden Wassertanks an der Oberfläche die für eine saisonale Wärmespeicherung ausreichende Speicherkapazität bereitstellen, indem sie große Volumina des Untergrunds erschließen. Während der Sommermonate wird Überschusswärme in den Untergrund übertragen, indem erhitztes Wasser durch die Erdwärmesonden (EWS) zirkuliert wird. Der sich einstellende laterale Temperaturgradient bedingt einen konduktiven Wärmetransport vom Fluid über die Sondenrohre und die Hinterfüllung in die umgebende Gebirgsformation, die zugleich das Wärmespeichermedium darstellt. Das Sondenfluid wird beim Durchgang durch die Sonden unter Abgabe von Wärme abgekühlt, während sich der Untergrund sukzessive erwärmt. Im Winterbetrieb wird der Mechanismus umgekehrt: Kühles Wasser wird durch die Sonden gepumpt. Der sich einstellende laterale Temperaturgradient führt zu einem konduktiven Transport von thermischer Energie vom vergleichsweise wärmeren umliegenden Gestein hin zum Sondenfluid. Das Fluid erwärmt sich beim Durchgang durch die Sonden. Die zugeführte Wärme wird dem Fluid an der Oberfläche über Wärmeübertrager bzw. Wärmepumpen wieder entzogen und steht für Heizzwecke zur Verfügung.

Zwar kommt EWS-Speichern zugute, dass der konduktive Wärmetransport nur langsam das Gestein durchdringt, thermische Speicherverluste sind aber dennoch unvermeidlich. Da ein EWS-Speicher allenfalls an der Erdoberfläche thermisch isoliert werden kann, muss das Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis deshalb möglichst gering gehalten werden. Aus diesem Grund werden EWS für saisonale Speicherung gewöhnlich in kompakten Anordnungen errichtet, sodass sich eine zylinderförmige Geometrie ergibt.

Die Speicherung von Wärme aus Verbrennungsprozessen der KWK oder aus Solarthermie unterscheidet sich vom sonst üblichen „ausgeglichenen Betrieb“, bei dem das Reservoir im Untergrund zum Zweck oberflächiger Kühlung erwärmt wird, durch höhere Temperaturen bei der Einspeicherung. Ein Teil der im Sommer zugeführten Wärme verbleibt zunächst als Wärmeverlust auch nach der Entzugsphase im Untergrund. Diese Wärmeverluste führen zu einer sukzessiven Erwärmung der Speicherformation, die über die Regene-

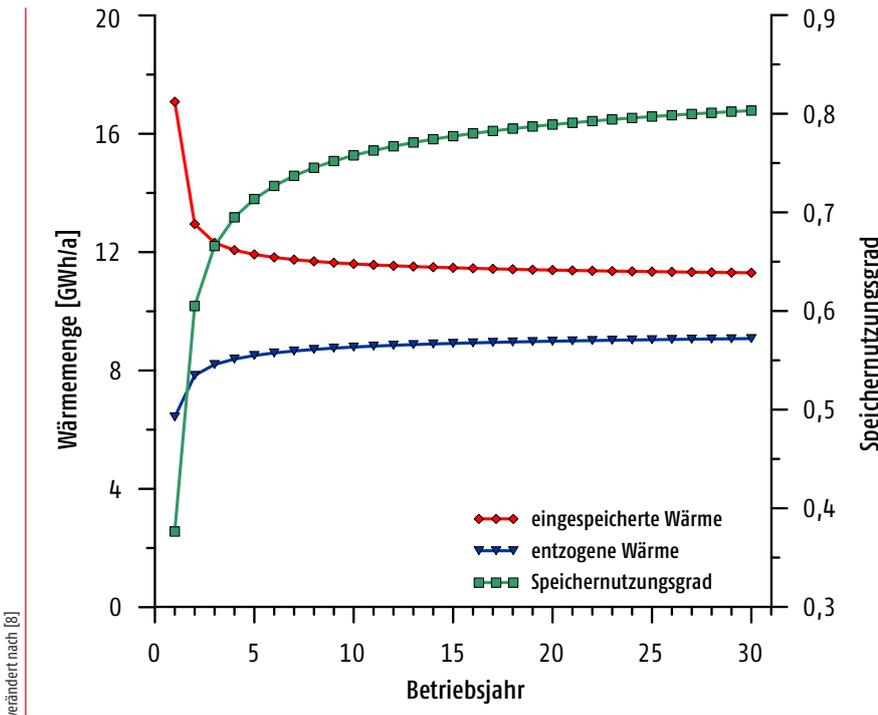


Abb. 1 – Ergebnisse der Simulation eines mitteltiefen EWS-Speichers (37 Sonden, 500 m, Sondenabstand 5 m).

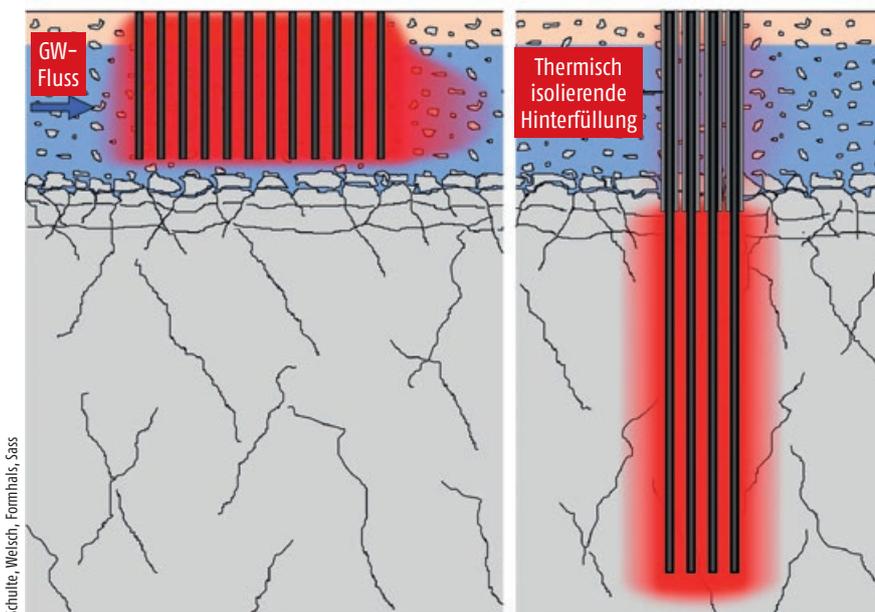


Abb. 2 – Schemazeichnung eines oberflächennahen (links) und eines mitteltiefen (rechts) EWS-Speichers. In mitteltiefen Systemen wird die Wärmespeicherung auf die tiefer liegende Formation beschränkt und oberflächennahe Grundwasservorkommen vor thermischer Beeinflussung geschützt.

rierung eines ausgeglichenen Betriebs deutlich hinausgeht. Dies spiegelt sich auch in einem fortschreitenden Anstieg der Temperaturen am Sondenauslass wider: Es wird immer weniger Wärme im Sommer in den Untergrund eingespeichert, wohingegen immer mehr Wärme während der Wintermonate entzogen werden kann. Dies führt zu einem signifikanten Anstieg des Speichernutzungsgrades mit der Zeit, also dem Verhältnis aus entzogener zu eingespeicherter Wärmemenge (Abb. 1). Zusätzlich bedeutet die dauerhafte Erwärmung des Speicherreservoirs jedoch auch eine höhere Quelltemperatur für nachgeschaltete Wärmepumpensysteme. Diese können somit höhere Leistungszahlen erreichen und auch konventionelle Heizungssysteme mit höheren Vorlauftemperaturen bedienen [7].

Mitteltiefe EWS-Speicher

Es gibt bereits mehrere EWS-Speicher in Deutschland, in denen die Speicherung solarer Wärme erfolgreich erprobt wird [9–11]. Die EWS dieser Speicher reichen nicht tiefer als 100 m. Das Konzept ist jedoch nicht auf beliebige Standorte über-

wasserwirtschaftlich relevante Grundwasservorkommen nicht direkt belastet, da die Speicherung im Liegenden der Grundwasserleiter erfolgt. Dadurch ist eine erhebliche Leistungssteigerung der geothermischen Anlagen möglich, da die Nutzung tiefer liegender Formationen es erlaubt, ein wesentlich höheres Temperaturniveau für die Einspeicherung vorzusehen, als dies in oberflächennahen Anlagen realisiert werden dürfte. Darüber hinaus verringert sich durch die mit der Tiefe abnehmende Permeabilität die Gefahr, dass Grundwasserfluss Wärme aus dem Speicher austrägt und zu Speichereffizienzverlusten führt.

Mitteltiefe EWS-Speicher unterscheiden sich von oberflächennahen Systemen durch ihre deutlich schlankere Geometrie. Letztere weisen in der Regel ein relativ ausgeglichenes Verhältnis von Durchmesser des Sondenfeldes zu Sondenlänge auf, wohingegen die Sondenlänge bei mitteltiefen Systemen ein Vielfaches des Felddurchmessers beträgt. Meist werden für mitteltiefe Erdwärmesonden koaxiale Rohre statt der üblichen Doppel-U Rohre verwendet, da sie mit einem Außenrohr

Reservoir beschränkt, während wasserwirtschaftlich relevante Aquifere vor kritischer Erwärmung geschützt werden [14].

Leistung mitteltiefer EWS-Speicher

Bisher wurden in Deutschland noch keine mitteltiefen EWS-Speicher gebaut. Ergebnisse einer numerischen Simulationsstudie [8] zeigen jedoch, dass die Kapazität eines EWS-Speichers mit zunehmender Sondenlänge und Sondenanzahl annähernd linear ansteigt (Abb. 3a & b). Je nach Speichergröße variieren die jährlich umgesetzten Wärmemengen von mehreren hundert MWh bis zu über 15 GWh im größten betrachteten Speicher mit 37 Sonden und einer Sondenlänge von 1.000 m, was bereits dem jährlichen Wärmebedarf eines kleinen Quartiers entspricht. Mit zunehmender Speichertiefe steigt auch die natürliche Untergrundtemperatur an, was Wärmeverluste reduziert und sich damit positiv auf den Speichernutzungsgrad auswirkt. Ein weiterer wesentlicher Effekt in EWS-Speichern ist die thermische Interaktion benachbarter Sonden. Wärme, die von einer bestimmten EWS in den Unter-

» Die Nutzung tiefer liegender Formationen erlaubt es, ein wesentlich höheres Temperaturniveau für die Einspeicherung vorzusehen, als dies in oberflächennahen Anlagen realisiert werden dürfte. «

tragbar, denn die geringe Tiefe kann Nachteile mit sich bringen: Typischerweise liegen oberflächennahe EWS vollständig im Bereich der Aquifere, die auch zur Trinkwassergewinnung genutzt werden. Der Eintrag erheblicher Wärmemengen auf hohem Temperaturniveau kann einen nachteiligen Einfluss auf die Grundwasserchemie und -biologie haben. Da dieser Einfluss bisher jedoch nur unzureichend erforscht ist [12], gibt es in den Bundesländern keine einheitliche Genehmigungspraxis bei der maximal zulässigen Grundwassererwärmung an der Grundstücksgrenze [13]. Dieser Nutzungskonflikt wird dazu führen, dass erhebliche Restriktionen im Hinblick auf die Größe der EWS-Speicher, ihren Betrieb und das Temperaturniveau der Einspeicherung zu erwarten sind. Das ist nicht im Sinne einer emissionsarmen und grundlastfähigen Wärmeversorgung. Ein Ausweg aus diesem Dilemma kann die Verlagerung der saisonalen Wärmespeicherung in den mitteltiefen Untergrund sein. Dabei werden

aus Stahl dem Gebirgsdruck besser standhalten können [7]. Darüber hinaus haben sie aufgrund eines größeren Strömungsquerschnitts einen geringeren Druckverlust. Zwar durchteufen die EWS immer noch die kritischen Aquifere nahe der Oberfläche, doch die größere Sondenlänge erlaubt es, den oberen Abschnitt der Bohrlöcher thermisch zu isolieren, während ausreichend thermisch aktive Wärmetauscherfläche im Liegenden verbleibt (Abb. 2). Die thermische Isolierung im oberen Bohrlochabschnitt kann durch einen größeren Bohrl Lochdurchmesser und eine entsprechend dickere Hinterfüllung mit gering wärmeleitenden Verfüllbaustoffen erreicht werden. Durch die resultierende Erhöhung des Bohrlochwiderstands wird der Wärmeaustausch in dem betreffenden Abschnitt deutlich verringert. Dies wirkt sich zum einen positiv auf die Speicherverluste im oberflächennahen Bereich aus und steigert somit die Leistungsfähigkeit des Systems. Zum anderen wird die Wärmespeicherung auf das tiefer liegende

grund eingebracht wird, diffundiert von der Sonde weg in das umliegende Gestein. Teile dieser Wärme geraten damit zwangsläufig auch in den Einzugsbereich benachbarter Sonden und steigern deren Effizienz. Der Speichernutzungsgrad steigt also sowohl mit zunehmender Sondenlänge als auch mit zunehmender Sondenanzahl deutlich an (Abb. 3c). Im besten Falle werden unter den in der Studie [8] vorgegebenen Fluidtemperaturen Speichernutzungsgrade von über 80 % erreicht. Die mittlere spezifische Entzugsleistung pro Meter EWS steigt ebenfalls mit zunehmender Sondenanzahl kontinuierlich an, wohingegen eine EWS-Länge zwischen 300 und 400 m ein Optimum aufzeigt (Abb. 3d). Einen ebenfalls entscheidenden Einfluss auf die Eigenschaften eines geothermischen Speichers hat der radiale Abstand zwischen den EWS. Während geringe Abstände zwischen den Sonden das Speichervolumen und damit die Kapazität des Speichers begrenzen, bedingen zu große Sondenabstände eine verringerte thermi-

sche Interaktion benachbarter Sonden. Beides hat eine negative Beeinflussung des Speichernutzungsgrades und der spezifischen Entzugsleistung zur Folge. Für typische Festgesteine hat sich ein Sondenabstand von etwa 5 bis 6 m als ideal erwiesen [8].

Neben der Speichergeometrie sind es vor allem die geologischen Randbedingungen, die das Betriebsverhalten eines EWS-Speichers maßgeblich beeinflussen können. Auf konduktivem Wärmetransport basierend, stellt die EWS-Speicherung ein relativ träges Wärmespeicherprinzip dar. Die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes hat einen großen Einfluss auf die Be- und Entladeleistung des Speichers und damit auch auf dessen Gesamtkapazität. Demgegenüber hat die spezifische Wärmekapazität der Speicherformation nur einen untergeordneten Einfluss auf das Speicherverhalten. Grundwasserfluss in der Speicherformation führt zu advektivem Wärmeaustausch aus dem Speicher und damit zu einer erheblichen Beeinträchtigung des Speicherverhaltens. Geringe Grundwasserfließgeschwindigkeiten von unter einem Meter pro Jahr sind hingegen als unkritisch zu bewerten [8].

Ökologisches und ökonomisches Potenzial mitteltiefer EWS-Speicher

Neben den technischen und thermodynamischen Leistungsmerkmalen mitteltiefer EWS-Speicher sind vor allem die ökologischen und ökonomischen Implikationen entscheidend für den erfolgreichen Einsatz in Nahwärmenetzen. Ob eine signifikante Reduktion der Treibhausgasemissionen zu wirtschaftlichen Bedingungen möglich ist, hängt von den Investitions- und Betriebskosten ab. Lebenszykluskostenrechnungen und Ökobilanzierungen können diese Zusammenhänge quantifizieren und Aufschluss darüber geben, zu welchem Gesteinspreis thermische Energie für ein Nahwärmenetz erzeugt werden kann und wie hoch die CO₂-Einsparungen sind. Annahmen über die Entwicklung des Energiepreises und der Zusammensetzung des Strommix sowie die Verfügbarkeit von Subventionen für KWK, thermische Speicher und Solarkollektoren haben einen deutlichen Einfluss auf das Ergebnis. Abbildung 4 setzt unter progressiv-prognostischen Rahmenbedingungen die Wärmegestehungskosten und das Treibhauspotenzial

eines Nahwärmenetzes in Relation, welches aus verschiedenen Systemkombinationen von Blockheizkraftwerken, Solarthermiekollektoren und EWS-Speichern unterschiedlicher Größe gespeist wird [15]. Das betrachtete System muss jährlich 25 GWh thermische Energie bereitstellen, was dem Wärmebedarf eines Quartiers entspricht. Zur Deckung von Spitzenlasten ist das Nahwärmenetz auf einen Gaskessel angewiesen. Je nach Systemkombination können jedoch der Anteil des Gaskessels an der Deckung des Wärmebedarfs und das Treibhauspotenzial stark verringert werden. Bei Pareto-optimaler Auslegung kann der zusätzliche Einsatz von Solarthermiekollektoren zu vergleichbaren Gesteinskosten die Emissionen gegenüber einer alleinigen Wärmeerzeugung aus Blockheizkraftwerk und Gaskessel um ein Viertel senken. Die größte Treibhauspotenzialreduktion wird jedoch erzielt, wenn der Großteil der Wärme durch Solarthermiekollektoren gewonnen und saisonal gespeichert wird. Ein Blockheizkraftwerk wird nur noch zur Deckung des Eigenbedarfs an Strom betrieben. Diese Systemkombination halbiert das Treibhauspotenzial gegenüber

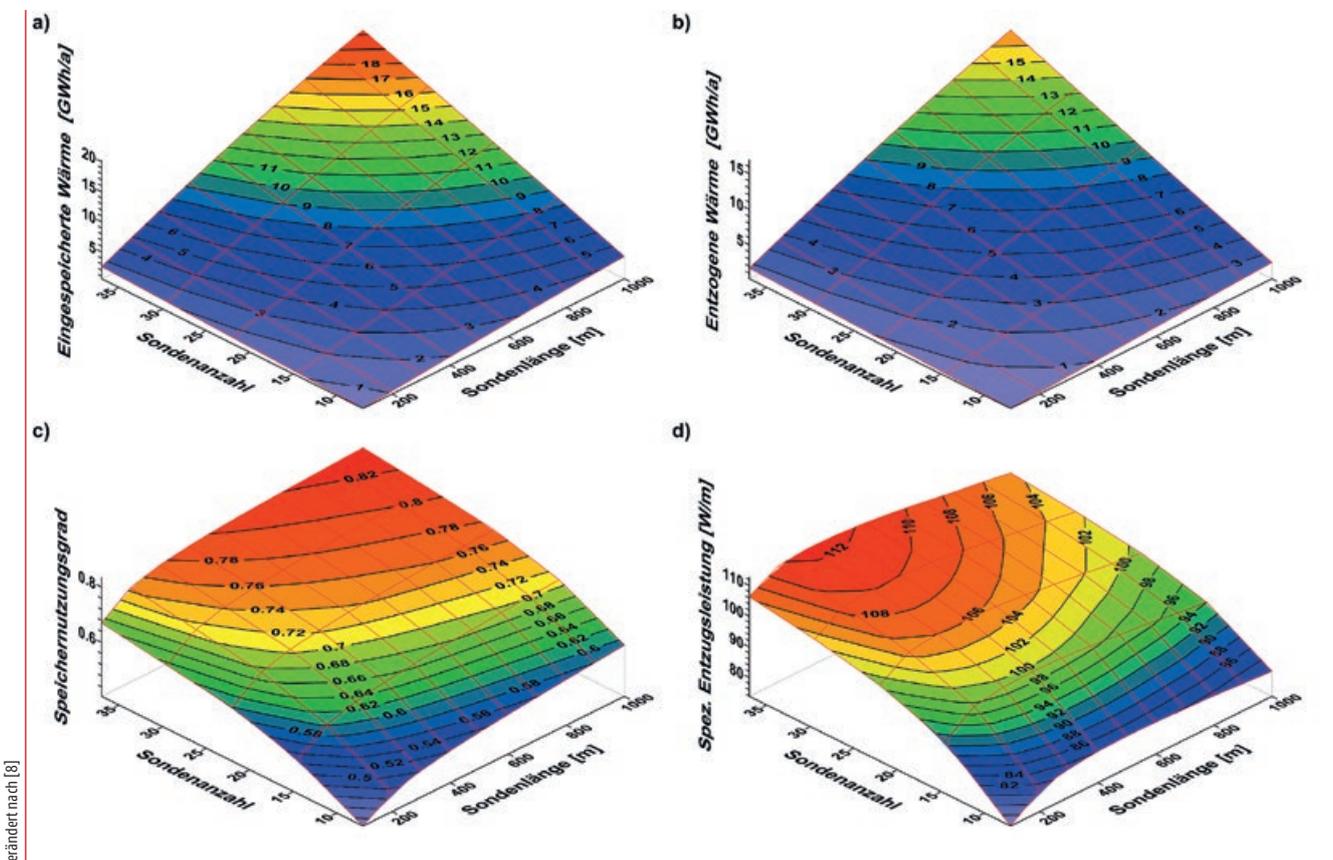


Abb. 3 – (a) Eingespeicherte, (b) entzogene Wärme, (c) Speichernutzungsgrad und (d) mittlere spezifische Entzugsleistung in Abhängigkeit von Sondenanzahl und Sondenlänge im 30. Betriebsjahr und für einen Sondenabstand von 5 m.

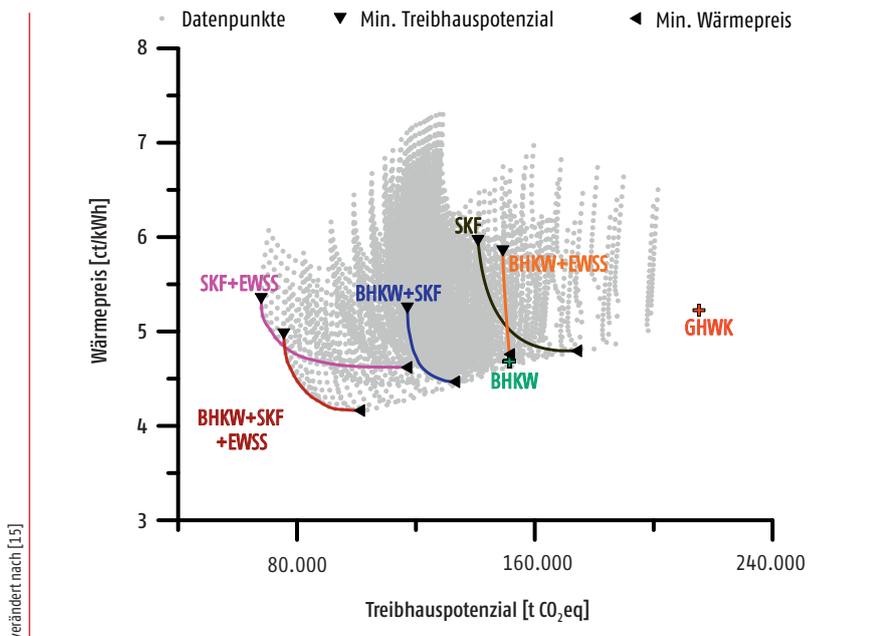


Abb. 4 – Gegenüberstellung von Wärmegestehungspreis und Treibhauspotenzial unterschiedlicher Wärmeerzeugungskombinationen für ein Nahwärmenetz; alle Systeme beinhalten einen GHKW für Spitzenlasten. Linien stellen Pareto-optimale Systeme dar; Abkürzungen: GHKW = Gas-Heißwasserkessel (Referenzszenario), BHKW = Blockheizkraftwerk, SKF = Solarkollektorfeld, EWSS = Erdwärmesondenspeicher

einer alleinigen Wärmeerzeugung aus Blockheizkraftwerk und Gaskessel. Ein preisoptimiertes System dieser Art ermöglicht sogar eine zusätzliche Kostenreduktion und stellt damit die wirtschaftlichste Lösung bei gleichzeitig beträchtlichen Reduktion der Emissionen dar.

Fazit

Um seine Klimaschutzziele zu erreichen, braucht Deutschland eine Wärmewende. Dazu müssen Nahwärmenetze ausgebaut und der Anteil der Wärmeerzeugung aus umweltfreundlicher KWK und erneuerbaren Energien unter wirtschaftlichen Rahmenbedingungen deutlich erhöht werden. Dies erfordert saisonale Wärmespeicher, welche im urbanen Raum die notwendigen Kapazitäten kostengünstig zur Verfügung stellen können. Mitteltiefe EWS-Speicher erfüllen diese Anforderungen. Sie können im Sommer überschüssige Wärme speichern und sie im Winter zu Heizzwecken wieder zur Verfügung stellen. Durch die Verlagerung der geothermischen Wärmespeicherung in tiefere Formationen wird dem Grundwasserschutz Rechnung getragen und der Nutzungskonflikt mit der Wasserwirtschaft gelöst. Um eine hohe Effizienz zu erzielen, muss ein EWS-Speicher jedoch so groß dimensioniert sein, dass die Speicherkapazität dem jährlichen Wärmebedarf eines Quartiers gleicht. Entsprechend ausgelegte Systeme stellen somit die Lösung dar, welche die

deutsche Wärmewende braucht: Mitteltiefe EWS-Speicher haben das Potenzial, zu einer signifikanten Reduktion von CO₂-Emissionen im Wärmesektor beizutragen.

Literatur

- [1] Bundesverband Erneuerbare Energien e. V. (2017): Aktualisierung der BEE-Prognose – Entwicklung der Erneuerbaren Energien bis 2020.
- [2] AG Energiebilanzen (2017): Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2013 bis 2016, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin.
- [3] K. L. Brockmann (2015): Deutschland braucht eine Wärmewende, Chancen, KfW Bankengruppe, S. 14–15.
- [4] N. A. Zeitler (2015): Fünf Hebel für die Wärmewende, Chancen, KfW Bankengruppe, S. 16–20.
- [5] V. Wesselak, T. Schabbach, T. Link, J. Fischer (2017): Thermische Energiesysteme, in: Handbuch Regenerative Energietechnik, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, S. 785–796.
- [6] M. Kaltschmitt, W. Streicher, A. Wiese (2013): Erneuerbare Energien : Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte, 5. ed., 931 S., Springer Vieweg, Berlin.
- [7] K. Bär, W. Rühaak, B. Welsch, D. Schulte, S. Homuth, I. Sass (2015): Seasonal High Temperature Heat Storage with Medium Deep Borehole Heat Exchangers, Energy Procedia, 76, S. 351–360.

[8] B. Welsch, W. Rühaak, D. O. Schulte, K. Bär, I. Sass (2016): Characteristics of medium deep borehole thermal energy storage, International Journal of Energy Research, 40, S. 1.855–1.868.

[9] E. Bollin, K. Huber, D. Mangold (2013): Solare Wärme für große Gebäude und Wohnsiedlungen, 159 S., Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

[10] P. Mielke, D. Bauer, S. Homuth, A. Götz, I. Sass (2014): Thermal effect of a borehole thermal energy store on the subsurface, Geothermal Energy, 2, S. 1–15.

[11] Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V. (2008): Tätigkeitsbericht 2008 – ZAE Bayern, Würzburg, 124 S.

[12] Umweltbundesamt [Hrsg.] (2015): C. Griebler, C. Kellermann, C. Stumpp, F. Hegler, D. Kuntz, S. Walker-Hertkorn: Auswirkungen thermischer Veränderungen infolge der Nutzung oberflächennaher Geothermie auf die Beschaffenheit des Grundwassers und seiner Lebensgemeinschaften – Empfehlungen für eine umweltverträgliche Nutzung, in: Texte 54/2015, S. 159.

[13] DGGV/DGGT [Hrsg.] (2015): I. Sass, D. Brehm, W. G. Coldewey, J. Dietrich, R. Klein, T. Kellner, B. Kirschbaum, C. Lehr, A. Marek, P. Mielke, L. Müller, B. Panteleit, S. Pohl, J. Porada, S. Schiessl, M. Wedewardt, D. Wesche (2015): Empfehlung Oberflächen-nahe Geothermie – Planung, Bau, Betrieb und Überwachung – EA Geothermie. 304 S., Ernst & Sohn, Berlin.

[14] D. O. Schulte, B. Welsch, A. Boockmeyer, W. Rühaak, K. Bär, S. Bauer, I. Sass (2016): Modeling Insulated Borehole Heat Exchangers, Environ Earth Sci, 74, S. 1–12.

[15] B. Welsch, L. Göllner-Völker, D. O. Schulte, K. Bär, I. Sass, L. Schebek (2018): Environmental and economic assessment of borehole thermal energy storage in district heating systems, Applied Energy, 216, S. 73–90.

Autoren

Dr. Daniel O. Schulte
 Bastian Welsch
 Julian Formhals
 Prof. Dr. Ingo Sass
 Technische Universität Darmstadt
 Institut für Angewandte Geowissenschaften
 Schnitzspahnstr. 9
 64287 Darmstadt
 Tel.: 06151 16-25675
 schulte@geo.tu-darmstadt.de
 www.geo.tu-darmstadt.de

