

Saisonale Wärmespeicher im urbanen Umfeld

Dr. Ulrich Liebenthal* und Anne Zimmer
 Strategie & Systemplanung und Energiewirtschaft
 Wärme Hamburg GmbH
 Hamburg, Deutschland
 *ulrich.liebenthal@waerme.hamburg

Kurzfassung – Saisonale Wärmespeicherung kommt eine Schlüsselrolle bei der Dekarbonisierung der Fernwärme zu, da sie die Nutzung ganzjährig anfallender Abwärme auch im bedarfsintensiven Winter ermöglicht. Aquiferwärmespeicher bieten durch geringen Platzbedarf und große Speicherkapazitäten vor allem im urbanen Raum großes Potenzial. Dennoch ist die Technologie, die Wärme in geologischen Formationen speichert und mit Hilfe einer Wärmepumpe zurückgewinnt, bisher wenig erprobt. Besondere Herausforderungen stellen die Fündigkeitsabschätzung, die Integration ins Fernwärmesystem und die ökonomische Bewertung dar.

Stichworte – Saisonale Wärmespeicher, Abwärmenutzung, Fernwärme, Aquiferspeicher

I. EINLEITUNG

Vor dem Hintergrund der notwendigen Dekarbonisierung befinden sich zahlreiche Fernwärmenetze in oder kurz vor signifikanten Umbaumaßnahmen. So müssen im Fernwärmenetz der Stadt Hamburg bis spätestens 2030 zwei Kohlekraftwerke außer Betrieb genommen und durch eine Vielzahl klimaschonender Technologien und Wärmequellen ersetzt werden. Speziell im Hinblick auf Abwärmequellen bietet Hamburg ein großes Potenzial. Sowohl die lokal ansässige Metallindustrie als auch Abfallverwertungsanlagen erzeugen unvermeidbare Abwärme, die eine elementare Säule der künftigen Wärmeversorgung darstellen können. Diese Abwärmequellen haben allerdings gemeinsam, dass die Abwärme in der Regel ganzjährig anfällt. Dem entgegen steht ein volatiler und vor allem stark saisonal abhängiger Wärmebedarf für die Fernwärme.

In **ABBILDUNG 1** ist der prognostizierte Wärmebedarf als synthetische Dauerlinie für das Jahr 2030 dargestellt.

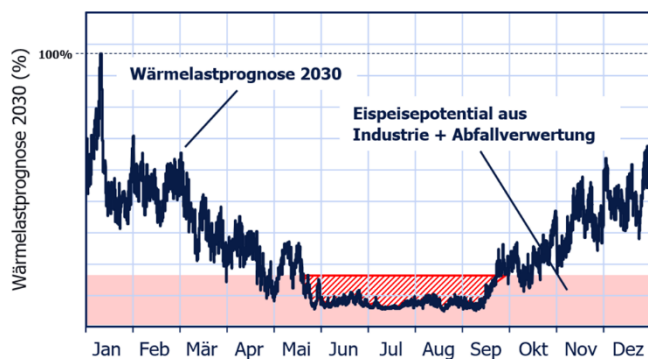


ABBILDUNG 1: PROGNOSE DER SYNTHETISCHEN WÄRMELASTKURVE IM FW-NETZ DER WÄRME HAMBURG 2030 OHNE ZUSÄTZLICHE SPEICHER (QUELLE: SYSTEMPLANUNG WH).

Daran wird deutlich, dass das mittelfristig verfügbare Einspeisepotenzial die Aufnahmefähigkeit des Wärmenetzes in den Monaten Mai bis Mitte September zum Teil deutlich übersteigt.

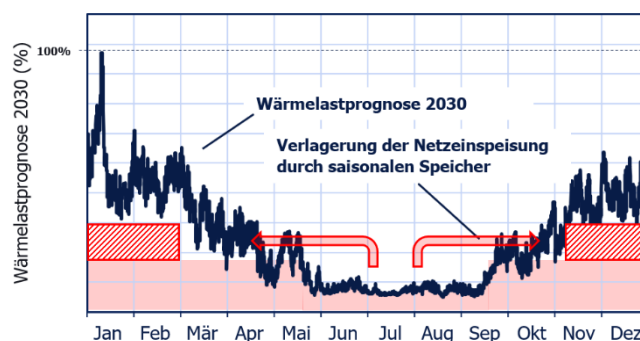


ABBILDUNG 2: VERLAGERUNG DES EINSPEISEPOTENZIALS AUS INDUSTRIE UND ABFALLVERWERTUNG IN DIE HEIZPERIODE DURCH SAISONALE SPEICHER.

Durch den Einsatz großskaliger saisonaler Wärmespeicher kann das ungenutzte Abwärmepotenzial aus den Sommermonaten in die Heizperiode verlagert werden und damit zur Steigerung des Anteils an CO₂-neutraler Wärme im Fernwärmesystem beitragen (vgl. **ABBILDUNG 2**). Speziell im urbanen Umfeld mit limitiertem Platzangebot stellen großskalige Wärmespeicher jedoch eine besondere Herausforderung dar.

II. VERFÜGBARE TECHNOLOGIEN SAISONALER SPEICHER

Saisonale Speicher sollten neben der Eigenschaft, Wärme über mehrere Monate mit erträglichen Verlusten speichern zu können, auch über eine hohe Speicherkapazität verfügen. Sollten zum Beispiel 10 MW_{th} saisonal gespeichert werden, so bedarf es bei einer Einspeisedauer von 90 Tagen eine Speicherkapazität von > 20 GWh. Diese Speicherkapazität entspräche einem äquivalenten atmosphärischen Warmwasservolumen von > 400.000 m³. Diese Dimensionen sind im urbanen Erscheinungsbild gemäß der Verdeutlichung in **ABBILDUNG 3** nicht umsetzbar.

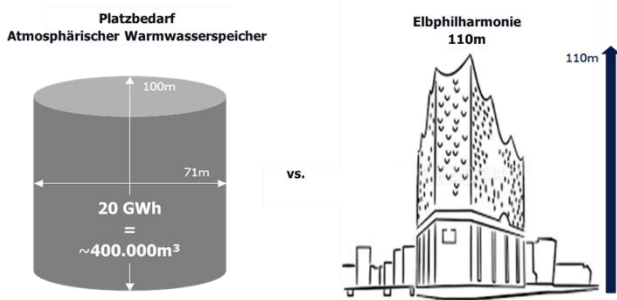


ABBILDUNG 3: VERANSCHAULICHUNG DES PLATZBEDARFS EINES GROßSKALIGEN ATMOSPHÄRISCHEN WARMWASSERSPEICHERS.

Aus diesem Grund eignen sich im urbanen Umfeld vor allem Speicherlösungen, bei denen der Großteil der Speicherkapazität untertägig angeordnet ist. Dazu zählen

- Behälterwärmespeicher (in den Untergrund eingelassen),
- Erdbeckenwärmespeicher,
- Erdsondenwärmespeicher und
- Aquiferwärmespeicher.

Behälterwärmespeicher und Erdbeckenwärmespeicher sollten möglichst 2 m oberhalb des Grundwasserspiegels liegen. Bei flach vorliegendem Grundwasser (wie z.B. in der Region Hamburg) ist zur Erreichung großer Speicherkapazitäten eine entsprechend große Fläche erforderlich. Erdsonden-Wärmespeicher werden in einer Tiefe von 30-100 m verbaut. In diesen Tiefen sind Nutzungskonflikte mit der Trinkwassergewinnung zu erwarten. Diese Technologie ist somit aus genehmigungsrechtlicher Sicht kritisch zu bewerten. Bei Aquiferwärmespeichern liegt das gesamte Speichervolumen untertägig. Als Speichermedium können unterschiedliche geologische Formationen genutzt werden, sodass trinkwasserrelevante Nutzungskonflikte umgangen werden können.

III. AQUIFERWÄRMESPEICHER

A. Aufbau und Funktionsweise

Das grundlegende Funktionsprinzip eines Aquiferwärmespeichers im Zusammenspiel mit einem Wärmenetz ist in ABBILDUNG 4 abgebildet. Ein Aquiferwärmespeicher besteht aus mindestens einer Brunnendublette, die sich in Produktionsbrunnen und Hilfsbrunnen untergliedert. Obertägig wird die Wärme mit Hilfe eines Sekundärwasserkreises, Wärmeübertragern und mindestens einer Kaltdampfkomppressionswärmepumpe (im Folgenden Wärmepumpe genannt) auf das Fernwärmewasser übertragen. Die Funktionsweise lässt sich anhand des Ein- und Ausspeicherzyklus erläutern.

1) Einspeicherzyklus

Beim Einspeichern soll Wärme aus dem Fernheizwasservorlauf in den Speicher eingebracht werden. Dazu wird Sole (hochmineralisiertes Grundwasser) aus dem kalten Hilfsbrunnen gefördert und über einen Wärmeübertrager erhitzt. Zur Wärmeabgabe ist ein Sekundärwasserkreislauf vorgesehen, der das Fernheizwasser auch bei Leckagen im Wärmeübertrager vor Kontaminierung

mit der korrosiv wirkenden Sole schützt. Die warme Sole wird anschließend in den Produktionsbrunnen geleitet und die Wärme so im Grundwasser und Feststoffgerüst des Grundwasserleiters gespeichert. Untertägig bildet sich dabei eine Temperaturblase aus.

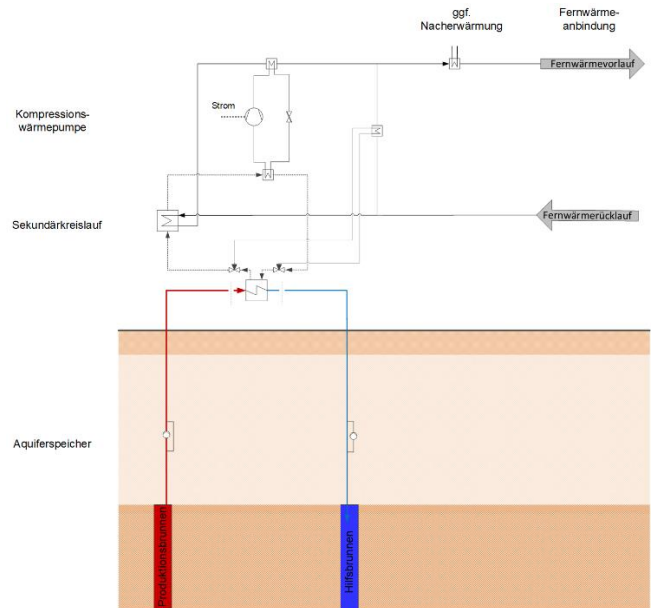


ABBILDUNG 4: TECHNISCHES FUNKTIONSPRINZIP EINES AQUIFERWÄRMESPEICHERS.

2) Ausspeicherzyklus

Im Einspeicherzyklus soll Wärme aus dem Aquiferwärmespeicher in das Wärmenetz eingebracht werden. Dazu wird Sole aus dem heißen Produktionsbrunnen gefördert und die Wärme wiederum über den Sekundärkreis an das Fernwärmewasser übertragen. Zur Kühlung der Sole ist (je nach Bohrtiefe und damit natürlicher Umgebungstemperatur des Hilfsbrunnens) der Rücklauf des Fernheizwassers nicht ausreichend. Aus diesem Grund wird der Sekundärkreis nicht nur mit dem Rücklauf des Fernheizwassers, sondern zusätzlich mit einer Wärmepumpe abgekühlt. Damit gelingt es, das Temperaturniveau im Hilfsbrunnen zu halten. Gleichzeitig wird die in der Wärmepumpe freigesetzte Wärme auf den vorgewärmten Fernheizwasserrücklauf übertragen und so das Temperaturniveau angehoben. Je nach geforderter Fernheizwasservorlaufstemperatur ist zusätzlich eine Nacherwärmung notwendig.

Die notwendige Antriebsleistung der Wärmepumpe hängt damit im Wesentlichen von der nötigen Kühlleistung und damit dem zu erreichenden Temperaturniveau des Hilfsbrunnens ab. Höhere natürliche Temperaturen in der Speicherschicht verringern die notwendige Antriebsleistung, verringern aber auch die Temperaturdifferenz zwischen dem Produktions- und Hilfsbrunnen. Von dieser hängt wiederum die Speicherkapazität ab. Niedrige Bodentemperaturen erfordern kleinere Bohrtiefen und damit geringere Baukosten. Aus diesem Zusammenhang ergibt sich bereits ein Konflikt bei der optimalen Temperatur des Hilfsbrunnens: Antriebsleistung der Wärmepumpe versus Bohrkosten.

3) Geologische Voraussetzungen

Die grundlegende Voraussetzung für den Bau eines Aquiferwärmespeichers ist das Vorhandensein geeigneter wasserführender geologischer Formationen. In einem

Untersuchungsgebiet im Hamburger Raum zählen dazu zum Beispiel die oberen und unteren Braunkohlesande (150 – 300 m Tiefe). Die präferierte geologische Formation „Neuengammer Gassande“ (NGGS) wird in einer Tiefe von ca. 1.000 m erwartet. Flachere Grundwasserleiter sind zwar in den quartären und tertiären Lockergesteinsserien vorhanden, sind aber derzeit aus genehmigungsrechtlicher Sicht als kritisch einzustufen. Insbesondere für die Braunkohlesande sind unter regulatorischen Perspektiven Nutzungskonflikte mit der Trinkwassergewinnung zu erwarten. Bei den NGGS handelt es sich um eine speicherfähige, sandige, schwach diagenetisch verfestigte Schicht mit einer erwarteten Gesamtmächtigkeit von ca. 20 m. Das Grundwasser ist in dieser Tiefe stark versalzen und weist Temperaturen von ca. 40 – 45 °C auf.

Für die betriebliche Eignung eines Aquiferwärmespeichers sind vor allem folgende Eigenschaften mit den in TABELLE I dargestellten Einflüssen relevant.

TABELLE I: RELEVANTE SPEICHEREIGENSCHAFTEN.

Speichereigenschaft	Einfluss auf
Tiefenlage der Formation	Bohrkosten, Temperaturniveau
Temperaturniveau	Leistung und Verlust
Mächtigkeit der Formation	Ausbreitung, Speicherkapazität
Durchlässigkeitsbeiwert	Infiltrationsrate Speicherleistung bzw.
Porosität	Ausbreitung, Wärmerückgewinnung

Aus den abzusehenden Temperatur- und Druckzustandsänderungen, die die hochsalinaren Wässer des Aquifers im Betrieb durchlaufen, ergeben sich darüber hinaus geochemische Aspekte und Fragestellungen, die zum einen wissenschaftlicher Natur sind und zum anderen direkt den geplanten Betrieb beeinflussen. Speziell die Mineralausfällungen und die daraus abzuleitende Solekonditionierung verlangen besondere Aufmerksamkeit.

4) Betriebsperformance

In einem Simulationsmodell wurde der Betrieb eines Aquiferwärmespeichers, bestehend aus einer Brunnendublette, in der NGGS Formation analysiert. Dabei wurde angenommen, dass im jeweils 90-tägigen Zyklus eingespeichert, geruht, ausgespeichert und wieder geruht wird. In ABBILDUNG 5 ist die Wärmeleistung für zehn komplette Zyklen dargestellt. Es zeigt sich, dass die prognostizierten Verluste mit steigender Zyklenzahl abnehmen und sich eine Wärmerückgewinnungsrate von etwa 80 % einstellt. Die Verluste sind dabei auf drei Effekte zurückzuführen:

- Advektiver Wärmetransport: Aufwärmung des Gesteins, das vor Inbetriebnahme die natürliche Umgebungstemperatur aufweist.
- Konduktiver Wärmetransport: Wärmeableitung über das Gestein und die Sole
- Dispersiver Wärmetransport: Vermischung der eingeleiteten heißen Sole mit kälteren Wässern

Speziell die Verluste über den advektiven Wärmetransport nehmen mit steigender Zyklenzahl ab.

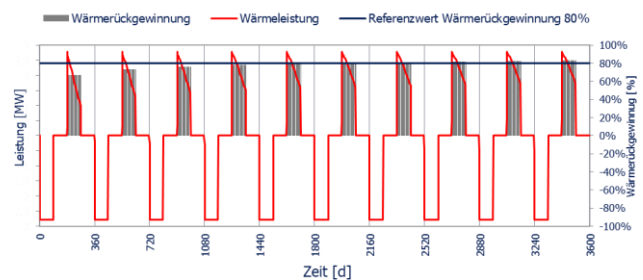


ABBILDUNG 5: SIMULIERTE PERFORMANCE IM 90-TÄGIGEN ZYKLUS.

B. Stand von Wissenschaft und Technik

Eine Übersicht über bestehende Aquiferwärmespeicherprojekte ist in TABELLE II dargestellt. In Deutschland sind bisher zwei Aquiferwärmespeicher realisiert worden [1]. Darüber hinaus wurden in Hamburg bereits erste Pilotversuche erfolgreich abgeschlossen [2], [3].

Die Gründe für die geringe Verbreitung dieser Technologie liegen neben dem fehlenden Bedarf (wirtschaftlich konnten entsprechende Speichersysteme bisher nicht mit der bedarfsgesteuerten Wärmeerzeugung in fossil befeuerten Heiz-(Kraft-)werken konkurrieren) auch im technischen und damit auch wirtschaftlichen Risiko.

TABELLE II: ÜBERSICHT ÜBER MITTELTIEFE AQUIFER-WÄRMESPEICHER NACH [1].

	Neubrandenburg	Reichstag	BMW	Campus Leuphana	TU Berlin	Universität Utrecht	De Bruggen	Le Plaisir-Thiverval-Grignon
Ort	Neubrandenburg	Berlin	Dingolfing	Lüneburg	Berlin	Utrecht	Zwammerdam	Thiverval-Grignon
Land	Deutschland	Deutschland	Deutschland	Deutschland	Deutschland	Niederlande	Niederlande	Frankreich
Inbetriebnahme	2004	2000	Geplant	Geplant	Geplant	-	-	1987
Projektstatus	In Betrieb	In Betrieb	Geplant	Geplant	Geplant	Außer Betrieb	Außer Betrieb	Versuch abgeschlossen
Tiefe [m]	1.250	320	500-700	400-450	560	-	-	Ca. 500
Gesteins-schicht	Obere Postersandstein	Hettang Sandstein	Niederbayerischer Malm	Obereozän	-	-	-	-
Speicherkapazität [MWh]	12.000	-	115.000	10.000 (Duplette)	<=50.000	-	-	-
Natürliche Temperatur [°C]	55	19	-	20-25	-	-	-	-
Wärmeentnahme [MWh/a]	7.000	2.050	22.700	>1.700	-	-	-	-
Entnahmetemperatur [°C]	75-80	30-65	-	25-80	5-90	-	-	-

C. Herausforderungen und Risiken bei der Umsetzung

Bei bisher nicht erkundetem Untergrund stellt die Fündigkeit das größte Risiko dar. Dies lässt sich abschätzen in folgende Szenarien:

- Erwartete Formation ist nicht vorhanden
- Erwartete Formation liegt deutlich tiefer als angenommen
- Transmissivität bzw. Ergiebigkeit sind deutlich geringer als erwartet

Darüber hinaus besteht das Risiko wasserchemischer Reaktionen, die zu Ablagerungen und Korrosionen in den unterirdischen und oberirdischen Anlagenteilen führen können. Diesem Risiko lässt sich durch entsprechende Präventivmaßnahmen wie eingesetzte Materialien und Solekonditionierung begegnen.

Verlässliche Sicherheit über Vorhandensein, Tiefenlage und hydrogeologische Beschaffenheit der potenziellen Speicherschicht kann nur durch eine Erkundungsbohrung erlangt werden, die allerdings so hohe Kosten verursacht, dass es als sinnvoll erachtet werden kann, eine Erkundungsbohrung gleich als mögliche Brunnenbohrung zu konzipieren.

IV. AUSBLICK

Wärme Hamburg plant die Errichtung einer Demonstrationsanlage in industriellem Maßstab am Kraftwerksstandort Tiefstack. Der Aquiferwärmespeicher soll als integraler Bestandteil des Fernwärmesystems betrieben werden. Die dabei gesammelten Daten und Betriebserfahrungen dienen dabei sowohl der Validierung der vorherigen Untersuchungsergebnisse, als auch der Grundlage zur Optimierung der Speicherbewirtschaftung.

Speziell das Zusammenspiel unterschiedlicher technischer Disziplinen erfordert Kooperationen aus Wissenschaft und Industrie. Aus diesem Grund ist eine umfangreiche Begleitforschung in Bezug auf Systemsimulation und geochemische Untersuchungen geplant. Die Erkenntnisse aus diesem Großversuch können als Blaupause für andere Standorte dienen.

LITERATUR

- [1] L. Holstenkamp, J. Lauer, P. Neidig, O. Opel, J. Steffahn, N. Strodel, M. Vogel, H. Degenhart, D. Michalzik, T. Schomerus, J. Schönebeck und T. Növig, „Querschnittstudie Erfolgsfaktoren für mitteltiefe Aquiferwärmespeicher in Norddeutschland.“ 2016.
- [2] Consulaqua, Abschlussbericht zum Pilotversuch am Standort Dradenau, Hamburg, Februar 2018.
- [3] K. Radmann et al, „HAMBURG WASSER erprobt Aquiferspeicher,“ *bbr-Jahresmagazin 2017*, pp. S. 64- 69, 2017.