

Potenziale und Grenzen von Aquiferspeichern in der Fernwärme in Deutschland

Benjamin Köhler¹, Irina Ganai¹, Aseel Al-Aghbari¹, Simon Freitag²

¹Öko-Institut e.V., Merzhauser Straße 173, DE-79117 Freiburg

Tel.: +49-761-452 95-295, E-Mail: b.koehler@oeko.de, Internet: www.oeko.de

²Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Schloßgarten 5, DE-91054 Erlangen

Einleitung

Der Gebäudesektor (Raumwärme und Warmwasser) hatte 2023 einen Anteil von rund 31 % am gesamten Endenergieverbrauch Deutschlands (Umweltbundesamt (UBA) 2025). Die Energie wird nach wie vor insbesondere durch fossile Energieträger bereitgestellt. Zur Erreichung der Klimaschutzziele ist die Senkung des Endenergieverbrauchs ein wichtiger Baustein. Darüber hinaus ist die emissionsfreie Wärmeerzeugung essenziell. Hierfür spielen die breite Anwendung von Wärmepumpen und der Ausbau der leitungsgebundenen Wärmeversorgung eine zentrale Rolle (Thamling et al. 2022). Durch Fernwärmesysteme können der Wärme- und Stromsektor effizient gekoppelt sowie erneuerbare Energien und Abwärme in großem Maßstab integriert werden (Guelpa und Verda 2019; Schmidt et al. 2018; Li et al. 2017). Eine große Herausforderung für die Transformation von Fernwärmesystemen ist die saisonale Schwankung zwischen dem Angebot an erneuerbarer Wärme und überschüssiger unvermeidbarer Abwärme hauptsächlich im Sommer sowie dem hohen Wärmebedarf im Winter (Guelpa und Verda 2019). Für den Ausgleich der saisonalen Schwankungen ist die saisonale Wärmespeicherung eine vielversprechende Option, die bislang in Deutschland noch vergleichsweise wenig eingesetzt wird. Überschüssige Wärme, die im Sommer erzeugt wird, kann gespeichert und in der Heizperiode genutzt werden. Eine Möglichkeit zur saisonalen Speicherung bietet der Einsatz von Aquiferspeichern.

Die vorgestellten Ergebnisse sind im BMBF-geförderten Projekt „Optimierte Integration thermischer Aquiferspeicher in Fernwärmesysteme“ (OptInAquifer) entstanden. Projektpartner sind das Hamburg Institut (Koordination), das Öko-Institut, die Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg und die Geothermie Neubrandenburg GmbH (GTN). Darüber hinaus ist in jeder geothermischen Region Deutschlands ein Praxispartner eingebunden: die Stadtwerke Augsburg (Süddeutsches Molassebecken), die badenovaWÄRMEPLUS GmbH & Co. KG (Freiburg; Oberrheingraben) und die Hamburger Energiewerke (Norddeutsches Becken). Die Fernwärmesysteme unterscheiden sich sowohl hinsichtlich des Wärmebedarfs als auch der Wärmeerzeugung. In dem Projekt wird der mögliche Beitrag von Hochtemperatur-Aquiferspeichern (HT-ATES – Aquifer Thermal Energy Storage) für große urbane Wärmesysteme im Zuge der Transformation der Wärmenetze bewertet. Durch die integrale Betrachtung von geologischen, technischen,

energiewirtschaftlichen und genehmigungsrechtlichen Aspekten werden die Möglichkeiten und Grenzen von ATEs ganzheitlich untersucht. Ziel ist es, thermische Energiespeichersysteme zu entwickeln, die den Anforderungen des Fernwärmesystems gerecht werden, indem sie vor allem die erforderliche Vorlauftemperatur jederzeit bereitstellen.

In diesem Beitrag fokussieren wir auf die Analyse des Bedarfs an und die Potenziale von saisonaler Wärmespeicherung in Aquiferen in Fernwärmesystemen in den drei geothermischen Regionen Oberrheingraben, Süddeutsches Molassebecken und Norddeutsches Becken. In den drei geothermischen Regionen ist der tiefe Untergrund potenziell am geeignetsten für die Umsetzung von Aquiferspeichern.

Methodisches Vorgehen

Zunächst werden drei reale Fernwärmesysteme detailliert untersucht. Für die Bewertung der Aquiferspeicher werden zukünftige Wärmebedarfe und Wärmeerzeugungsanlagen unter Berücksichtigung des energiewirtschaftlichen Rahmens in einem betriebswirtschaftlichen Modell einsatzoptimiert. Darüber hinaus werden in einer umfassenden Analyse der Untergrundverhältnisse die Chancen und Potenziale für die Speicherung von Wärme in Aquiferen bei hohen Temperaturen von bis zu 90°C untersucht. Da 90°C oft nicht ausreichen, um in Fernwärmesysteme einzuspeisen, werden Lösungen entwickelt, um die Temperatur mit Hochtemperatur-Wärmepumpen effizient auf das benötigte Niveau anzuheben. Die Ergebnisse aus der Analyse des Untergrundes und der Speicherkonstellationen werden bei der betriebswirtschaftlichen Einsatzoptimierung berücksichtigt. Das Vorgehen ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

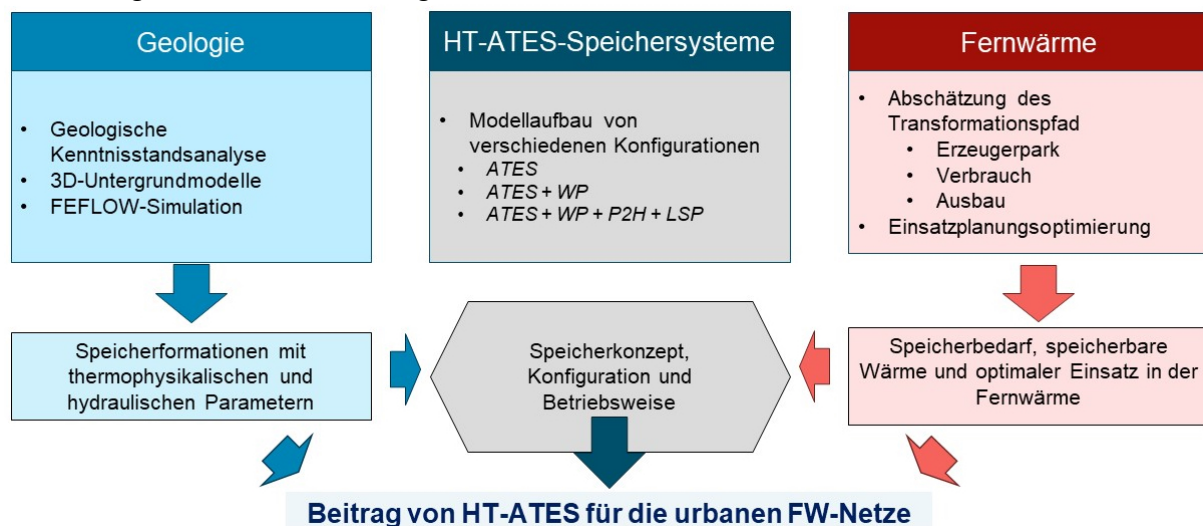


Abbildung 1: Schematische Darstellung des methodischen Vorgehens; Quelle: Eigene Darstellung der Autor*innen

Für die Abschätzung der Potenziale und Grenzen von Aquiferspeichern in Fernwärmenetzen, die in den drei geothermischen Regionen liegen, werden auf Basis der ganzheitlichen Betrachtung (Untergrundverhältnisse, Konzeptionierung der Speichersysteme, Einsatzoptimierung im Fernwärmesystem) der drei realen Fernwärmesysteme Typnetze definiert. Hierfür werden zunächst aktuelle und potenzielle Fernwärmegebiete, deren Wärmenachfrage, sowie die dort vorhandenen

Wärmepotenziale durch eine GIS-Analyse identifiziert. Hieraus werden regional hochaufgelöst Bedarfe für die saisonale Wärmespeicherung abgeleitet. Bei der Analyse wird auf zentrale Untergrundparameter fokussiert, da detaillierte Untergrundinformationen in Deutschland nicht flächendeckend vorliegen. Die relevanten Parameter sind in Tabelle 1 aufgelistet. Die verwendeten bzw. ermittelten Speicherpotenziale basieren auf (Frick et al. 2022, 2023) (Norddeutsches Becken) sowie (Regierungspräsidium Freiburg – Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) et al. 2013) (Oberrheingraben).

Tabelle 1: Zentrale Parameter und Kurzbeschreibungen für die Ermittlung der Speicherpotenziale in tiefen Aquiferen

Parameter	Beschreibung	Quellen
Packing Correction Factor (F_p)	Berücksichtigt die Abstände zwischen den Brunnen/Bohrungen, um Überlappungen im ATES zu vermeiden	Annahmen aus (Frick et al. 2022) zu thermischer Beeinflussung benachbarter Bohrlöcher
Reservoir Thickness (H)	Die vertikale Dicke/Mächtigkeit der geologischen Schicht, die für die Speicherung oder den Entzug von Wärme genutzt werden könnte	Geologisches 3D-Modell, seismische und bohrlochtechnische Korrelationen sowie Fazies- und lithologische Modelle
Effective reservoir volume (V_A)	Volumen des nutzbaren Reservoirs für die Wärmeentnahme/-speicherung	berechnet auf der Grundlage der Daten des geologischen Modells (Mächtigkeit, Sandsteinanteil) nach folgender Formel: $V_A = 0,5 * A * H * F_p$
Temperatur (T)	Temperaturverteilung in unterschiedlichen Tiefen	Thermische 3D-Modelle (z. B. CEBS, GeotIS, regionale Temperatur-Datensätze) und Bohrlochdaten
Gesteinsdichte (ρ) und Porosität (Φ)	Dichte und relativer Porenvolumenanteil des Reservoirgesteins	Gemessen an entnommen Bohrproben oder aus verfügbarer Literatur

Für die Ermittlung der Speicherpotenziale im Süddeutschen Molassebecken wurde der Methodik von Frick et al. (2022) gefolgt. Die hierfür benötigten Basisdaten wurden einerseits öffentlich zugänglichen Quellen entnommen, andererseits selbst erhoben. Die Tiefenlagen der relevanten Horizonte sind zum größten Teil über das 3D-Portal des Bayerischen Landesamt für Umwelt (BLfU) erhältlich (Bayerisches Landesamt für

Umwelt (BLfU) 2025). In einem Gebiet mit einer Fläche von circa 1.600 km² im Raum Augsburg stehen zusätzlich Seismikdaten des BLfU zur Verfügung, welche im Rahmen des Projektes interpretiert und zur Bestimmung der Horizonttiefenlagen dienen. Über diese Informationen lassen sich wiederum die Horizontmächtigkeiten und damit das Reservoirvolumen ableiten. Es ist jedoch zu erwähnen, dass die Tiefenlageninformationen nicht in allen Bereichen des Bayerischen Molassebeckens bekannt bzw. verfügbar sind, weshalb in diesen Bereichen diese interpoliert und mit entsprechendem Hinweis für die fehlende Datenlage versehen werden. Daten zur Temperatur im Untergrund in bestimmten Tiefen (250, 500, 750, 1.000, 1.500, 2.000, 2.500, 3.000, 3.500, 4.000, 4.500 m u. NN) werden ebenfalls vom BLfU bereitgestellt, wobei hier dasselbe, eben beschriebene Problem besteht. In Bereichen mit hinterlegten Daten kann darüber ein geothermischer Gradient ermittelt werden, welcher für die Berechnung der Temperatur des jeweiligen Horizonts herangezogen wird. In Regionen ohne Temperaturdaten wird stattdessen der aus allen verfügbaren Daten gemittelte geothermische Gradient verwendet. Die petrophysikalischen Kennwerte für die in Frage kommenden Reservoirgesteine wurden entweder selbst an vom BLfU zur Verfügung gestellten Bohrkernen ermittelt, vom Labor des BLfU bestimmt, oder bereits veröffentlichten Publikationen (s. Beichel et al. 2014; Bohnsack et al. 2020; Koch et al. 2006; Füchtbauer 1964; Homuth et al. 2014; Kronmüller und Kronmüller 1987) entnommen. Da hier eine grobe Potentialeinschätzung durchgeführt werden soll, wird für die potenziellen Speicherhorizonte der jeweilige Mittelwert für die Heat-In-Place (HIP)-Berechnung verwendet. Auf Basis des Bayerischen Geothermieatlas wurde entschieden, sich auf die Bausteinschichten und den Oberen Malm (Oberer Jura) als potenzielle Speicherhorizonte zu fokussieren, da diese vielversprechende Mächtigkeiten und petrophysikalische Eigenschaften aufweisen und vor allem letzterer Horizont bereits vielfach als geothermischer Zielhorizont herangezogen wurde. Weitere Horizonte könnten sich aufgrund ihrer Mächtigkeit, Tiefenlage und petrophysikalischen Eigenschaften für die Nutzung als ATES-Speicher eignen, schwanken jedoch stark in Mächtigkeit und Durchlässigkeit (Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie (StmWi) (2022), und Referenzen darin), sodass diese in dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden. Für die Berechnung des HIP sowie Heat-Storage-Potential (HSP) gelten folgende Annahmen und Bedingungen, die bis auf die petrophysikalischen Horizonteigenschaften (Porosität, spezifische Wärmekapazität, Gesteinsdichte) und die Horizonttiefe, welche auf 400-1500 m u. GOK festgelegt wurde, identisch zu Frick et al. (2022) und dort ausführlich beschrieben sind. HIP wird anschließend über folgende Formel berechnet:

$$HIP = A * H * c_A(T_R - T_I) = V_A c_A(T_R - T_I)$$

wobei A (m²) die Fläche des Reservoirs, H (m) der Mächtigkeit des Reservoirs, V_A (m³) dem effektiven Reservoirvolumen, c_A (J/m³K) der volumetrischen Wärmekapazität, T_R (K) der ungestörten Reservoirtemperatur, und T_I (K) der Injektionstemperatur entsprechen. Die volumetrische Wärmekapazität ergibt sich aus folgender Gleichung:

$$c_A = \phi \rho_W c_W + (1 - \phi) \rho_S c_S$$

mit Φ (-) als Porosität, ρ_w (kg/m³) als Wasserdichte, c_w (J/kgK) als spezifische Wärmekapazität des Wassers, ρ_s (kg/m³) als Gesteinsdichte, und c_s (J/kgK) als spezifische Wärmekapazität des Festgesteins.

Der HSP lässt sich über folgende Formel berechnen:

$$HSP = 0,5V_A c_A (T_R - T_I) F_r F_p$$

wobei F_r (-) dem Wiedergewinnungsfaktor und F_p (-) dem Korrekturfaktor für die Packungsdichte entsprechen. Der Faktor 0,5 ergibt sich aus der Annahme, dass maximal die Hälfte der Reservoirmächtigkeit für den Speichereinsatz nutzbar ist. Die verwendeten Werte sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: Parameter und zugehörige Werte für die Bausteinschichten (BSS) und den Oberen Jura (OJ), welche für die Berechnung des HIP und des HSP verwendet wurden.

Parameter (Symbol)	Einheit	HIP (BSS/OJ)	HSP (BSS/OJ)
Reservoirfläche (A)	m ²	500 x 500	
Reservoirmächtigkeit (H)	m	>10, <20, falls >20 =>20	
Reservoirvolumen (V_A)	m ³	AH	$0.5AHF_p$
Porosität (Φ)	-	0.22/0.03	
Dichte Wasser (ρ_w)	kg/m ³	1000	
Dichte Feststoff (ρ_s)	kg/m ³	2739/2655	
Spez. Wärmekapazität Wasser (c_w)	J/kgK	4180	
Spez. Wärmekapazität Feststoff (c_s)	J/kgK	909/761	
Vol. Wärmekapazität (c_A)	MJ/m ³ K	2.86/2.09	
Reservoirtemperatur (T_R)	K	$38 < T_R$	$T_R < 90$
Injektionstemperatur (T_I)	K	8	90
Korrekturfaktor für Packungsdichte (F_r)	-	-	0.8
Wiedergewinnungsfaktor (F_p)	-	-	0.7

Ergebnisse

Der Fokus dieses Beitrags liegt auf der Abschätzung der Potenziale in den drei geothermischen Regionen. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Typnetzdefinition und GIS-Analysen vorgestellt.

Für die Abschätzung des Potenzials in allen existierenden und potenziellen Fernwärmenetzen in den drei großen geothermischen Regionen werden zunächst Typnetze definiert. Die Typisierung erfolgt anhand der 2050 erwarteten Wärmenachfrage in den in Manz et al. (2024) identifizierten Wärmenetzen. In den drei geothermischen Regionen wurden insgesamt 573 potenzielle Wärmenetzgebiete identifiziert. Hiervon liegen 130 im Süddeutschen Molassebecken, 260 im Norddeutschen Becken und 183 im Oberrheingraben. Die potenziell durch Wärmenetze bereitgestellte Wärmenachfrage in diesen Netzen beträgt insgesamt rund 74 TWh pro Jahr. Für die Typisierung wurden fünf Größenklassen definiert, die in Tabelle 3 zusammengefasst sind.

Tabelle 3: Definierte Fernwärme-Typen und deren Häufigkeit und Größe in den drei geothermischen Regionen Deutschlands; Quelle: eigene Darstellung basierend auf (Manz et al. 2024)

Typ	Größe [GWh/a]	Anzahl	Durch Wärmenetz bereitgestellte Wärme [GWh/a]	Mittlere Wärmenachfrage je Wärmenetz [GWh/a]
5: sehr groß	>3.000	4	30.250	7.562
4: groß	1.000-3.000	8	13.423	1.678
3: mittel-groß	250-1.000	21	11.568	550
2: mittel-klein	100-250	45	6.558	145
1: klein	<100	495	12.480	25

Die mittlere Wärmenachfrage der definierten Typnetze bewegt sich größtenteils in der gleichen Größenordnung wie die in Saad et al. (2024) definierten Fallbeispiele: „Großberg“ mit einer Wärmenachfrage von 1.650 GWh/a im Jahr 2045 entspricht dem Typ „4: groß“, „Mittelberg“ mit einer Wärmenachfrage von 280 GWh/a im Jahr 2045 ist im Bereich der mittleren Typen 2 und 3 und „Landberg“ mit einer Wärmenachfrage von 45 GWh/a im Jahr 2045 entspricht dem Typ 1: klein. In Saad et al. (2024) ist kein Beispiel für ein sehr großes Netz enthalten, womit der Typ „5: sehr groß“ keine Entsprechung hat. Die Lage der Typnetze ist in Abbildung 2 dargestellt.

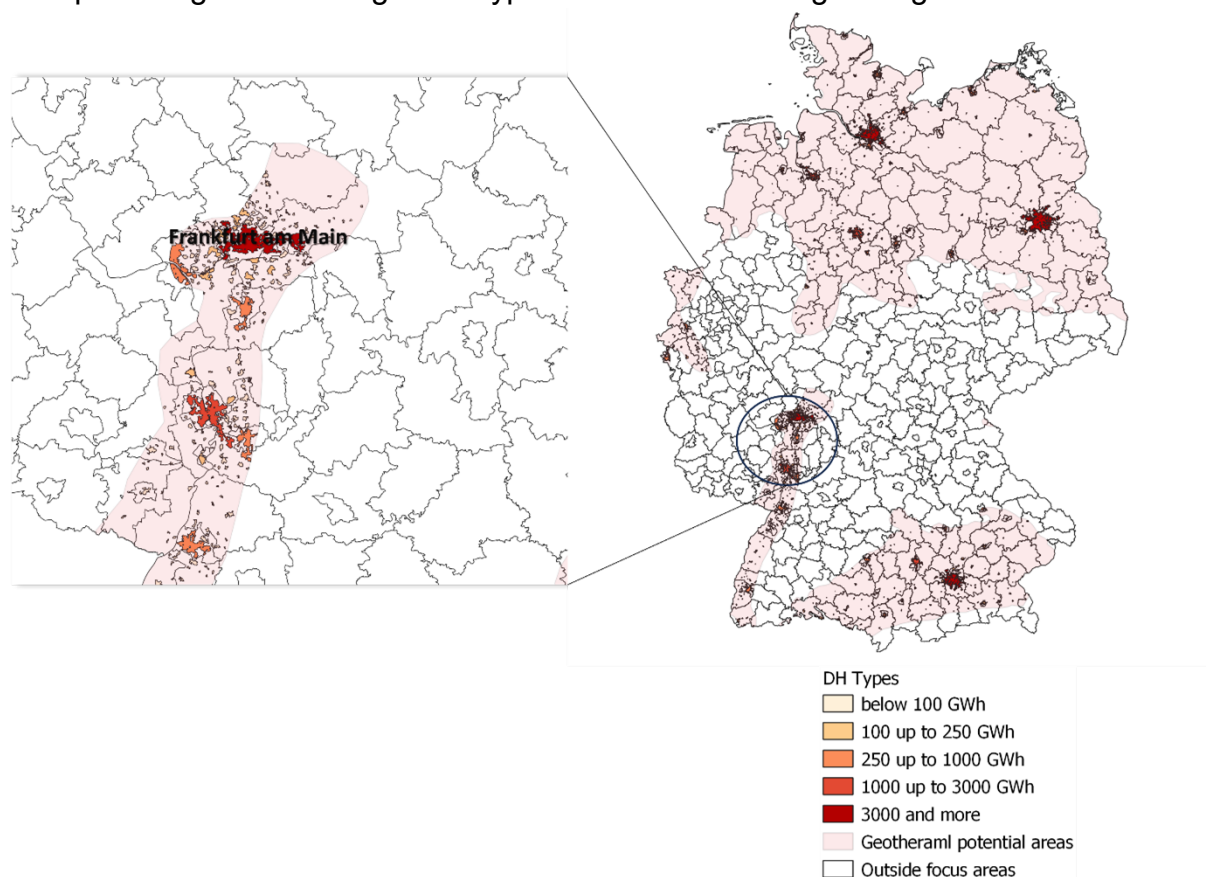


Abbildung 2: Lage der definierten Typnetze in Deutschland; Quelle: eigen Darstellung basierend auf (Manz et al. 2024)

Neben der Wärmenachfrage in den Typnetzen sind die verfügbaren erneuerbaren Wärmepotenziale sowie die Potenziale unvermeidbarer Abwärme ein wichtiger Faktor für den Bedarf an saisonaler Wärmespeicherung. Die Potenziale von Freiflächen-Solarthermie, Oberflächengewässern, hydrothermaler Geothermie, Müllverbrennung, Abwärme aus Kläranlagen sowie industrieller Abwärme sind in Abbildung 3 dargestellt.

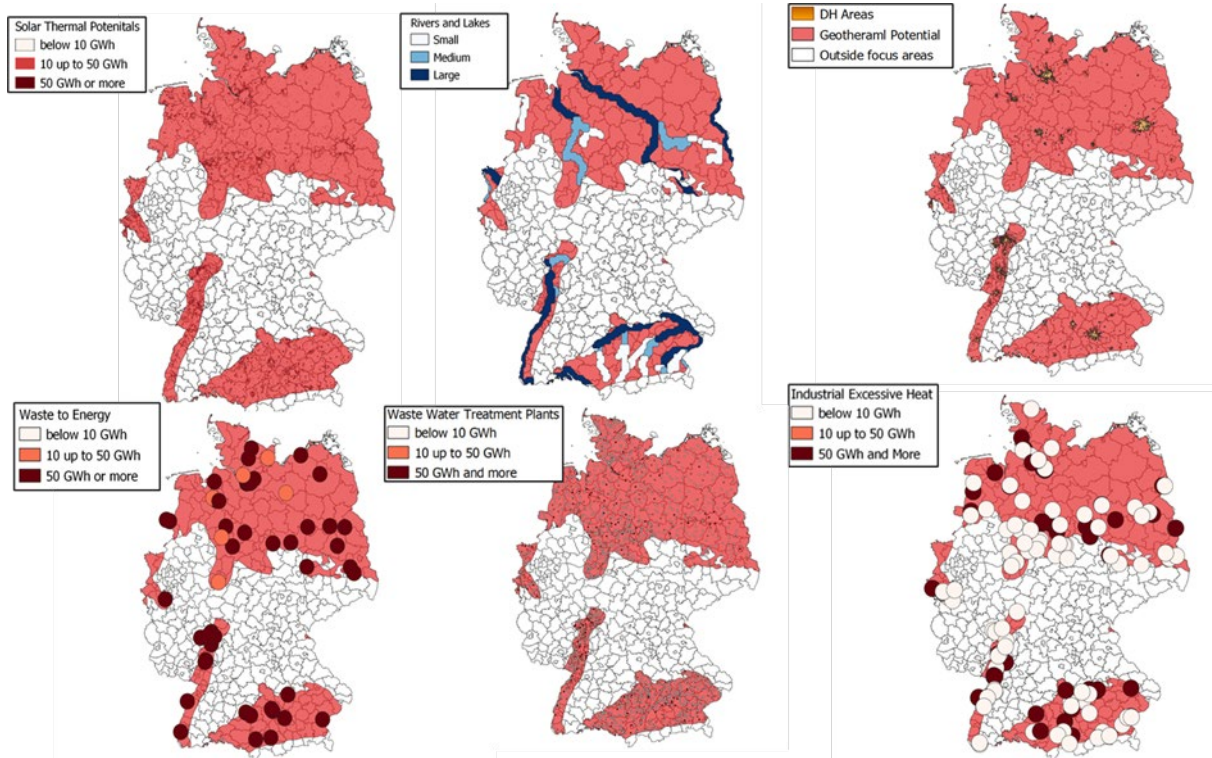


Abbildung 3: Potenziale erneuerbarer Wärme und unvermeidbarer Abwärme in den identifizierten potenziellen Wärmenetzgebieten; Quelle: Eigene Darstellung basierend auf (Manz et al. 2024) und (Mueller 2019)

Die Potenziale sowie die grundlegendenden Annahmen für die Ermittlung der entsprechenden Potenziale (insbesondere Entfernung zu den Wärmenetzgebieten) sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 4: Maximale Entfernung und gesamtes technisches Potenzial erneuerbarer Wärme und unvermeidbarer Abwärme; Eigene Berechnung basierend auf (Manz et al. 2024) und (Mueller 2019).

	Maximale Entfernung zum Wärmenetz [km]	Gesamtes technisches Potenzial [GWh/a]
Freiflächen-Solarthermie	0,2	17.024
Oberflächengewässer (Flüsse und Seen)	5	275.327
Hydrothermale Geothermie	15	407.816
Müllverbrennung	20	166.000
Kläranlagen	2	23.480
Industrielle Abwärme	20	15.327

Bei den angegebenen Potenzialen ist zu beachten, dass die identifizierten Potenziale teilweise auch in mehreren Wärmenetzgebieten genutzt werden könnten.

Eine Festlegung darauf, in welchem Wärmenetzgebiet die Potenziale (oder Teile davon) genutzt werden, erfolgt nicht, wodurch einzelne Potenziale auch mehrfach in die Gesamtsumme einfließen.

Die größten technischen Potenziale gibt es für die Nutzung tiefer Geothermie, wobei basierend auf Manz et al. (2024) das nutzbare Potenzial nur etwa 7 % des gesamten Potenzials beträgt und mit rund 26.219 GWh/a in den identifizierten Wärmenetzen deutlich niedriger als das gesamte technische Potenzial in diesen Netzen ist.

Für die saisonale Wärmespeicherung in tiefen Aquiferen werden im weiteren Verlauf in erster Linie nicht bzw. schlecht regelbare Wärmeerzeuger/ -potenziale sowie Wärmequellen berücksichtigt, die ganzjährig bzw. insbesondere im Sommer zur Verfügung stehen. Dies sind: Freiflächen-Solarthermie, Hydrothermale Geothermie, Müllverbrennung, Kläranlagen und industrielle Abwärme. Die jeweiligen gesamten Potenziale sind in Abbildung 4 der durch Fernwärme gedeckten Wärmenachfragen je Typnetz gegenübergestellt (Summen).

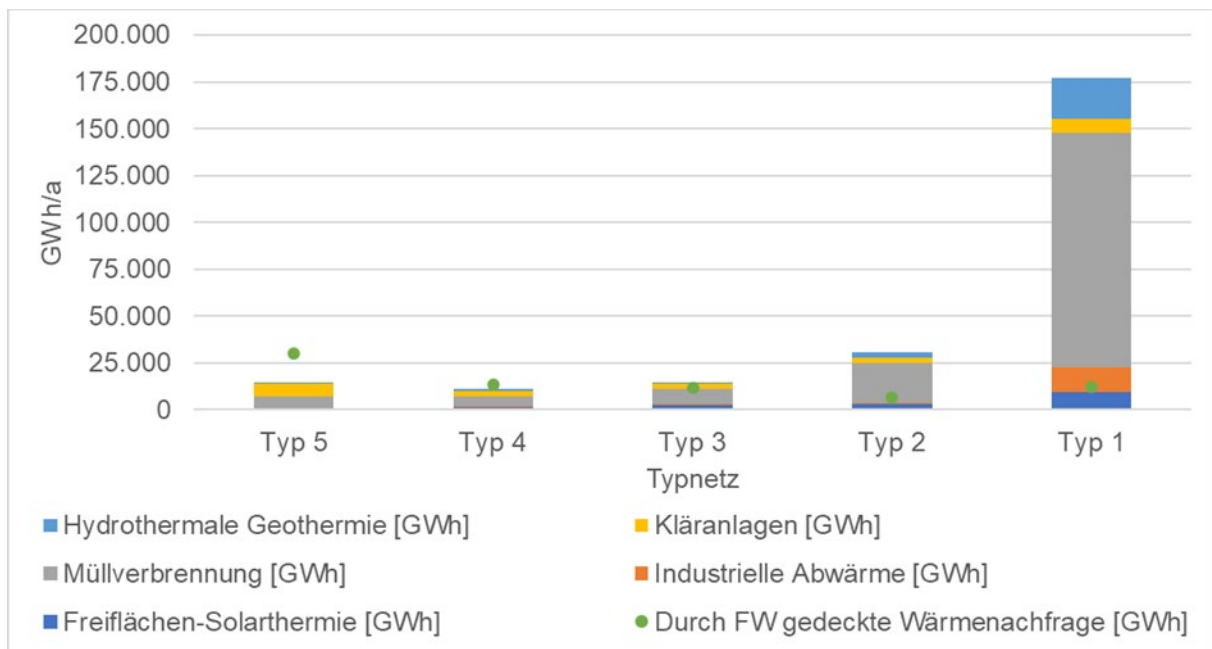


Abbildung 4: Gesamte Wärmepotenziale für die saisonale Speicherung sowie die durch Fernwärme gedeckte Wärmenachfrage in den fünf betrachteten Typnetzen; Eigene Darstellung basierend auf (Manz et al. 2024; Mueller 2019).

In den größeren Typnetzen (Typ 4 und 5) übersteigt die durch Fernwärme gedeckte Wärmenachfrage die für die saisonale Wärmespeicherung verfügbaren Potenziale. Die saisonalen Wärmespeicherpotenziale sind daher insbesondere durch die Höhe der Wärmeerzeugungspotenziale limitiert. In kleineren Netzen (Typen 1–3) sind die Wärmeerzeugungspotenziale höher als die durch Fernwärme gedeckten Wärmenachfragen. Die maximalen saisonalen Wärmespeicherpotenziale bzw. -bedarfe sind in diesen Typnetzen daher im Mittel durch die Wärmenachfrage limitiert. In den Einzelnetzen unterscheiden sich allerdings die Bedingungen teils deutlich. So gibt es viele Netze, in denen die Wärmenachfrage deutlich höher ist als die Summe aller berücksichtigten Potenziale. In diesen Fällen ist das Speicherpotenzial primär durch das Wärmeangebot beschränkt.

Da die für die Ermittlung der Speicherpotenziale notwendigen Daten nicht flächendeckend für die geothermischen Regionen vorliegen, werden bei den weiteren Betrachtungen nur diejenigen Wärmenetzgebiete berücksichtigt, für die auch ausreichend Untergrunddaten zur Verfügung stehen. Die Speicherpotenziale sind basierend auf den oben aufgeführten Quellen und Parametern bestimmt worden. Da saisonale Wärmespeicher möglichst nah an dem Wärmenetze realisiert werden sollten, in die sie eingebunden sind, wurde für die Ermittlung der Potenziale in den identifizierten Wärmenetzen eine maximale Entfernung des Speichers vom Wärmenetz von 0,2 km festgelegt.

Ausreichend Daten für eine Erstabschätzung der Speicherpotenziale liegen für 410 Wärmenetzgebiete vor. Hiervor liegen 100 im Süddeutschen Molassebecken, 229 im Norddeutschen Becken und 81 im Oberrheingraben. In 272 dieser Wärmenetzgebiete gibt es basierend auf den verfügbaren Daten kein Speicherpotenzial in tiefen Aquiferen. Dies gilt für 92 Wärmenetzgebiete im Süddeutschen Molassebecken, 120 im Norddeutschen Becken und 60 im Oberrheingraben. In 138 Wärmenetzgebieten wurde ein Potenzial für die saisonale Wärmespeicherung in tiefen Aquiferen identifiziert, insbesondere im Norddeutschen Becken und im Oberrheingraben. Das gesamte ermittelte Speicherpotenzial beträgt rund 1.229 TWh. Hiervon entfallen 12 TWh auf das Süddeutsche Molassebecken, 550 TWh auf das Norddeutsche Becken und 667 TWh auf den Oberrheingraben. Die Speicherpotenziale und verfügbaren Wärmepotenziale für die saisonale Speicherung je Region sind in Abbildung 5 dargestellt.

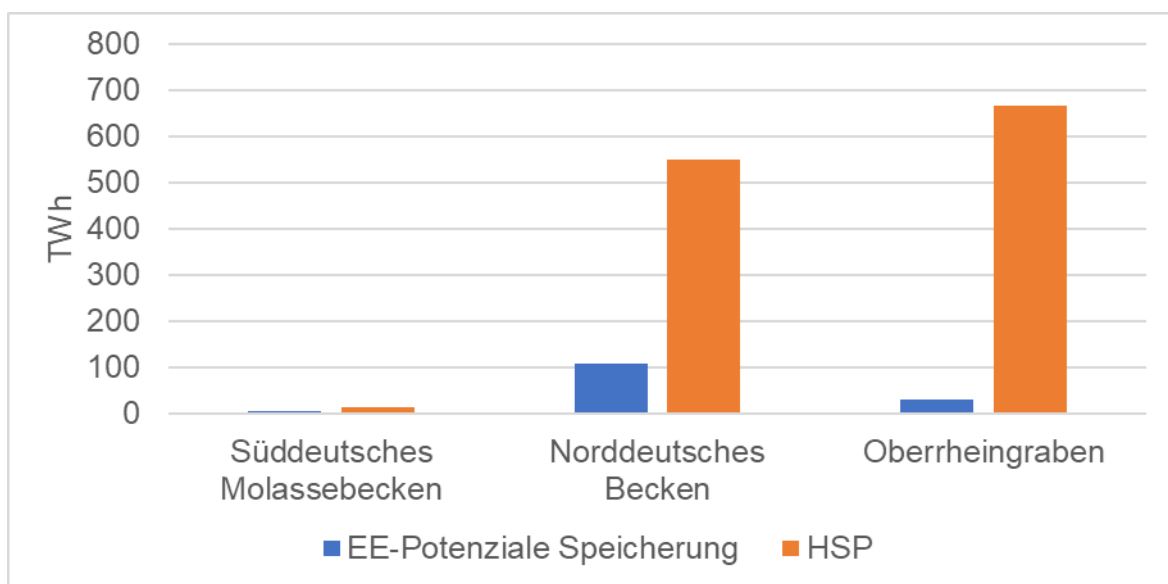


Abbildung 5: Speicherpotenziale und verfügbaren Wärmepotenziale für die saisonale Speicherung je Region; eigene Berechnung

Speicherpotenziale liegen in den betrachteten Regionen insbesondere in kleinen bis mittleren Wärmenetzen vor (Typ 1 bis 3) in großen Netzen (Typen 4 und 5) gibt es nur wenige Potenziale und diese liegen bis auf eine Ausnahme im Norddeutschen Becken. Die Potenziale je Netztyp in den Regionen sind in Abbildung 6 (Süddeutsches Molassebecken), Abbildung 7 (Norddeutsches Becken) und Abbildung 8 (Oberrheingraben) dargestellt. Die detaillierte Betrachtung zeigt deutlich, dass die

saisonalen Speicherpotenziale in Aquiferen – wenn die geologischen Voraussetzungen im Untergrund günstig sind – die für die saisonale Speicherung berücksichtigen Wärmeerzeugungspotenziale um ein Vielfaches übersteigen. Einzige Ausnahme ist der Wärmenetztyp 4 im Süddeutschen Molassebecken.

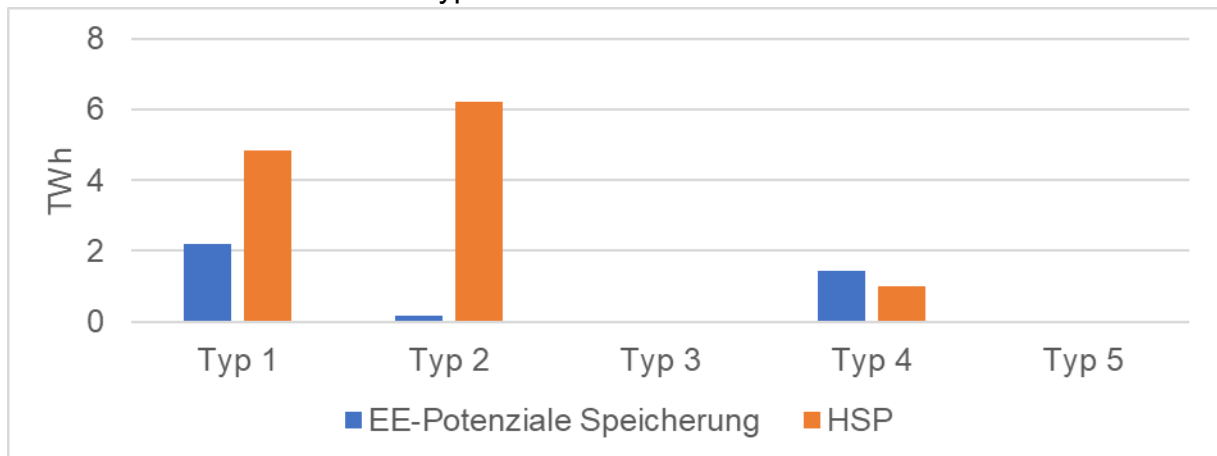


Abbildung 6: Speicherpotenziale und verfügbaren Wärmepotenziale für die saisonale Speicherung je Netztyp im Süddeutschen Molassebecken; eigene Berechnung

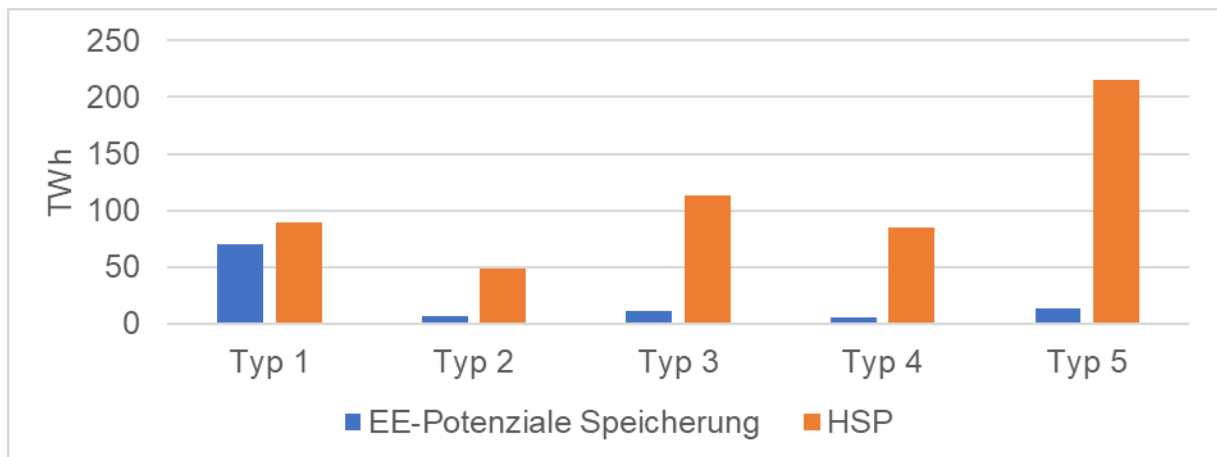


Abbildung 7: Speicherpotenziale und verfügbaren Wärmepotenziale für die saisonale Speicherung je Netztyp im Norddeutschen Becken; eigene Berechnung

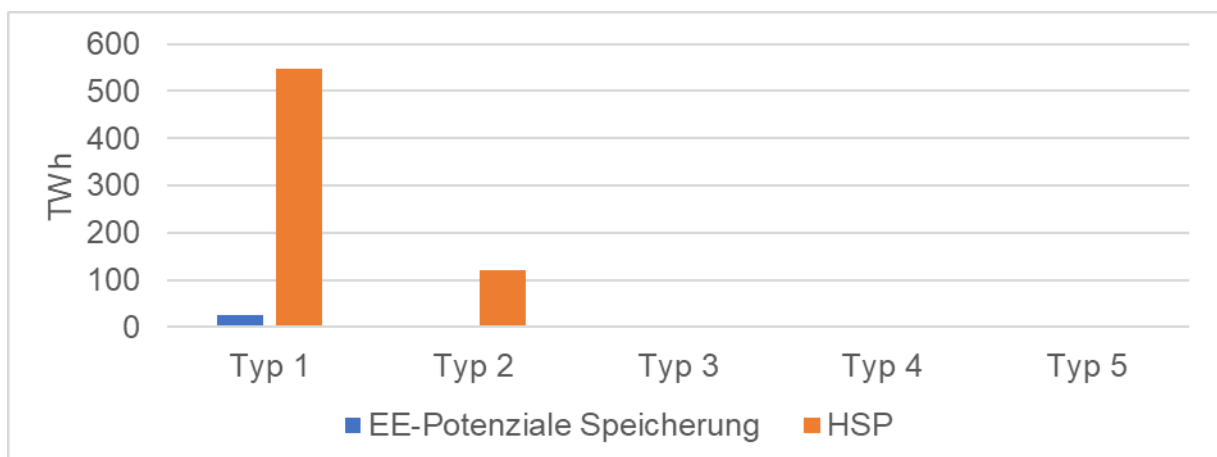


Abbildung 8: Speicherpotenziale und verfügbaren Wärmepotenziale für die saisonale Speicherung je je Netztyp im Oberrheingraben; eigene Berechnung

Zusammenfassung und nächste Schritte

Der Beitrag eines Aquiferspeichers ist stark vom Standort und der jeweiligen Struktur des verbundenen Fernwärmesystems abhängig. Zunächst ist das geologische Potenzial die zentrale Voraussetzung für den Einsatz von Aquiferspeichern. Das entsprechende Potenzial variiert zwischen den betrachteten Standorten. Darüber hinaus sind detaillierte Untergrunddaten für die Ermittlung von Speicherpotenzialen in tiefen Aquiferen nicht flächendeckend in der notwendigen Detailtiefe verfügbar. Die ermittelten Speicherpotenziale sind daher mit Unsicherheiten behaftet. Für die Potenzialermittlung von HT-ATES an einem spezifischen Standort sind detailliertere Untersuchungen notwendig. Unabhängig davon geben die Analysen einen guten Überblick über die Möglichkeiten von HT-ATES in potenziellen Fernwärmenetzen im Jahr 2045.

Auf Basis der vorgestellten Ergebnisse werden im Rahmen des Vorhabens OptInAquiFer weitere Analysen durchgeführt, um die Möglichkeiten und Grenzen von HT-ATES in der urbanen Fernwärme noch genauer zu beschreiben. Da die jährlichen Energiemengen der Wärmebereitstellung und -nachfrage nur eine Erstindikation für die Bedarfe und Potenziale saisonaler Wärmespeicherung darstellen, werden für die einzelnen Wärmepotenziale Wärmeerzeugungsprofile abgeleitet sowie für die definierten Typnetze Wärmenachfrageprofile entwickelt. Ein Abgleich der entsprechenden Profile ergibt ein besseres Bild der tatsächlichen Einsatzmöglichkeiten in den Typnetzen.

Darüber hinaus ist geplant für die Typnetze eine Einsatzoptimierung mit und ohne HT-ATES durchzuführen, um den Einfluss der Speicher auf den Betrieb der verschiedenen Wärmeerzeuger in den jeweiligen Typnetzen abzubilden und hieraus generalisierbare Aussagen abzuleiten. Die genannten Arbeiten werden bis Mitte 2025 abgeschlossen sein.

Danksagung:

Das diesem Beitrag zugrunde liegende Projekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03G0918B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Literaturverzeichnis

Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU) (Hg.) (2025): Geodaten des EU-Projekts GeoMol. Daten bereitgestellt durch das Bayerische Landesamt für Umwelt (BLfU) am 20.2.2025. Online verfügbar unter <https://www.3dportal.lfu.bayern.de/?view=7ac8269e-dde9-11ed-a73f-77e5adaeab39>, zuletzt geprüft am 11.04.2025.

Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie (StmWi) (Hg.) (2022): Bayerischer Geothermieatlas. Hydrothermale Energiegewinnung. Online verfügbar unter https://www.lfu.bayern.de/geologie/geothermie/geothermie_tief/geothermie_atlas/index.htm, zuletzt aktualisiert am 14.04.2025, zuletzt geprüft am 14.04.2025.

- Beichel, K.; Koch, R.; Wolfgramm, M. (2014): Die Analyse von Spülproben zur Lokalisierung von Zuflusszonen in Geothermiebohrungen. Beispiel der Bohrungen Gt Unterhaching 1/1a und 2. (Süddeutschland, Molassebecken, Malm). In: *Geologische Blätter* (64 (1-4)), S. 43–65.
- Bohnsack, D.; Potten, M.; Pfrang, D.; Wolpert, P.; Zosseder, K. (2020): Porosity–permeability relationship derived from Upper Jurassic carbonate rock cores to assess the regional hydraulic matrix properties of the Malm reservoir in the South German Molasse Basin. In: *Geotherm Energy* 8 (1). DOI: 10.1186/s40517-020-00166-9.
- Frick, Maximilian; Kranz, Stefan; Norden, Ben; Bruhn, David; Fuchs, Sven (2022): Geothermal Resources and ATES Potential of Mesozoic Reservoirs in the North German Basin. In: *Energies* 15 (6), S. 1980. DOI: 10.3390/en15061980.
- Frick, Maximilian; Kranz, Stefan; Norden, Ben; Bruhn, David; Fuchs, Sven (2023): Dataset to Geothermal Resources and ATES Potential of Mesozoic Reservoirs in the North German Basin. Unter Mitarbeit von Maximilian Frick, Stefan Kranz, Ben Norden, David Bruhn und Sven Fuchs.
- Füchtbauer, Hans (1964): Sedimentpetrographie der älteren Molasse nördlich der Alpen. Habilitationsschrift. In: *Eclogae Geologicae Helvetiae* (57), S. 156–298.
- Guelpa, E.; Verda, V. (2019): Thermal energy storage in district heating and cooling systems: A review. In: *Applied Energy* 252, S. 113474. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113474.
- Homuth, Sebastian; Götz, Annette E.; Sass, Ingo (2014): Lithofacies and depth dependency of thermo- and petrophysical rock parameters of the Upper Jurassic geothermal carbonate reservoirs of the Molasse Basin<BR. In: *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften* 165 (3), S. 469–486. DOI: 10.1127/1860-1804/2014/0074.
- Koch, A.; Jorand, R.; Vogt, C.; Arnold, J.; Mottaghy, D.; Pechinig, R. et al. (2006): Erstellung statistisch abgesicherter thermischer und hydraulischer Gesteinseigenschaften für den flachen und tiefen Untergrund in Deutschland: Phase 1-Westliche Molasse und nördlich angrenzendes Süddeutsches Schichtstufenland. BMU-Projekt FKZ 0329985 Endbericht 01.01.2005-31.10.2006. RWTH Aachen; Geophysica Beratungsgesellschaft mbH. Aachen. Online verfügbar unter http://www.geophysica.de/Forschung/Petrophysik_Abschluss_Phase_1.pdf, zuletzt geprüft am 14.04.2025.
- Kronmüller, R.; Kronmüller, K. (1987): Die Bausteinschichten - Sedimentologie und Diagenese eines Speichergesteins. In: *Erdöl-Erdgas-Kohle* (103), S. 61–66.
- Li, Y.; Rezgui, Y.; Zhu, H. (2017): District heating and cooling optimization and enhancement – Towards integration of renewables, storage and smart grid. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 72, S. 281–294. DOI: 10.1016/j.rser.2017.01.061.
- Manz, Pia; Billerbeck, Anna; Kök, Ali; Fallahnejad, Mostafa; Fleiter, Tobias; Kranzl, Lukas et al. (2024): Spatial analysis of renewable and excess heat potentials for climate-neutral district heating in Europe. In: *Renewable Energy* 224, S. 120111. DOI: 10.1016/j.renene.2024.120111.

Mueller, Andreas (2019): Restricted solar thermal energy open field energy potential for the EU28 + Switzerland, Norway and Iceland for the year 2012. Technische Universität Wien. Online verfügbar unter https://gitlab.com/hotmaps/potential/potential_solarthermal_collectors_open_field.

Regierungspräsidium Freiburg – Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB); Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB); BRGM Sièges; BRGM Centre scientifique et technique; Departement Umweltwissenschaften Universität Basel – Angewandte und Umweltgeologie (2013): Geodaten des EU-Projekts GeORG. Daten bereitgestellt durch das Regierungspräsidium Freiburg – Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) am 20.03.2025. Online verfügbar unter <https://www.geopotenzielle.eu>.

Saad, Noha; Thamling, Nils; Alkasabreh, Mohammad; Ochse, Susanne (2024): Wärmenetze: klimaneutral, wirtschaftlich und bezahlbar. Wie kann ein zukunftssicherer Business Case aussehen? Hg. v. Agora Energiewende. Prognos AG; GEF Ingenieur AG. Berlin, Leimen. Online verfügbar unter https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2023/2023-18_DE_Business_Case_Waermenetze/A-EW_335_Businesscase_Waermenetze_WEB.pdf, zuletzt geprüft am 05.04.2025.

Schmidt, T.; Pauschinger, T.; Sørensen, P. A.; Snijders, A.; Djebbar, R.; Boulter, R.; Thornton, J. (2018): Design Aspects for Large-scale Pit and Aquifer Thermal Energy Storage for District Heating and Cooling. In: *Energy Procedia* 149, S. 585–594. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.08.223.

Thamling, Nils; Rau, Dominik; Kemmler, Andreas; Sahnoun, Malek; Kulkarni, Purnima; Vu, Minh Phoung et al. (2022): Hintergrundpapier zur Gebäudestrategie Klimaneutralität 2045. Gutachten im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz. Prognos AG; FIW München; ITG Dresden; ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg; Öko-Institut e.V.; adelphi; Becker Büttner Held BBH; Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena); EY Law. Berlin, Basel, München, Freiburg, Heidelberg, Dresden. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Klimaschutz/gebaeudestrategie-klimaneutralitaet-2045.pdf?__blob=publicationFile&v=6, zuletzt geprüft am 06.12.2024.

Umweltbundesamt (UBA) (Hg.) (2025): Indikator: Energieverbrauch für Gebäude. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-energieverbrauch-fuer-gebaeude#die-wichtigsten-fakten>, zuletzt aktualisiert am 18.03.2025, zuletzt geprüft am 05.04.2025.