

Sichere Erschließung tiefer Erdwärmequellen als Beitrag zur Wärmewende



GFZ
Prof. Dr. Hannes Hofmann
hannes.hofmann@gfz-potsdam.de

KIT
Prof. Dr. Thomas Kohl
thomas.kohl@kit.edu

UFZ
Dr. Haibing Shao
haibing.shao@ufz.de

Einleitung

Der Endenergiebedarf für Wärme und Kälte ist in Deutschland etwa doppelt so hoch wie für Elektrizität (AGGE-Stat, 2022). Während die erneuerbaren Energien mit ~41 % schon einen bedeutenden Anteil am Elektrizitätsmix ausmachen, liegt er im Wärmesektor im Jahr 2021 bei nur ~16.5 % (AGGE-Stat, 2022). Den Hauptanteil am erneuerbaren Wärmemix liefert mit 86 % die Biomasse, gefolgt von der oberflächennahen Geothermie und Umweltwärme mit 9 % und der Solarthermie mit 4.2 %. Die tiefe Geothermie hat einen Anteil von nur 0.8 % an der erneuerbaren Wärmeversorgung (AGGE-Stat, 2022).

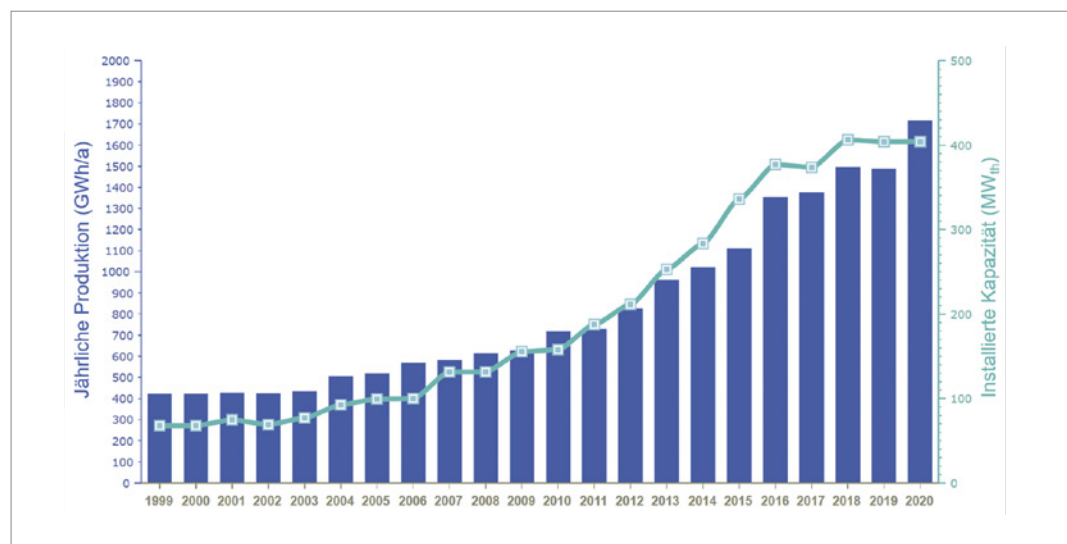
Von tiefer Geothermie spricht man in Deutschland ab einer Tiefe von 400 m. Die eingesetzte Technologie zur Nutzung der im tiefen Untergrund gespeicherten Wärme hängt von den geologischen Gegebenheiten ab und kann in Mitteleuropa über drei Arten gewonnen werden:

1. In typischen hydrothermalen Systemen in Deutschland wird ~35 bis 180 °C heißes Wasser über ~1 bis 5 km tiefe Bohrlöcher aus geeigneten porösen und durchlässigen Gesteinsschichten gefördert. Das an der Oberfläche genutzte und abgekühlte Wasser wird anschließend über Injektionsbohrungen wieder in den Untergrund zurückgeführt. Hydrothermale Systeme werden in Deutschland seit Jahren sicher und zuverlässig genutzt.

2. Bei Gesteinsschichten mit hoher Temperatur, aber geringer Durchlässigkeit spricht man von petrothermalen Systemen. Das Potenzial dieser Systeme ist um Größenordnungen höher als das der hydrothermalen Systeme, jedoch befinden sich die notwendigen Technologien zur wirtschaftlichen Nutzung petrothormaler Geothermie noch in der Forschungs- und Entwicklungsphase.
3. Aktuell kann die Wärme aus undurchlässigen Gesteinsschichten meist nur über tiefe Erdwärmesonden gewonnen werden. Dabei wird ein Arbeitsmedium durch ein geschlossenes Bohrloch geleitet um dem Gestein konduktiv die Wärme zu entziehen. Dieser Prozess ist jedoch wenig effizient und die Energieausbeute ist relativ gering für den relativ hohen technischen und finanziellen Aufwand von Tiefbohrungen. Der Vorteil dieser Systeme ist, dass es kein Fündigkeitsrisiko gibt.

Neben dem Ziel der Dekarbonisierung hat auch der politische und gesellschaftliche Wille hin zu einer stärkeren Energieunabhängigkeit an Bedeutung gewonnen. Beide Faktoren erfordern eine disruptive Transformation des Wärmesektors. Hier berichten wir über den Stand der tiefen Geothermie in Deutschland, zeigen den potenziellen Beitrag der tiefen Geothermie zur Wärmewende auf und diskutieren notwendige Entwicklungen für einen signifikanten Beitrag der tiefen Geothermie zur Wärmewende.

Abbildung 1
Tiefengeothermische Anlagen:
Entwicklung der installierten thermischen Kapazität und der jährlichen Wärmeproduktion zwischen 2000 und 2020
(Quelle: nach Geotis, 2022)



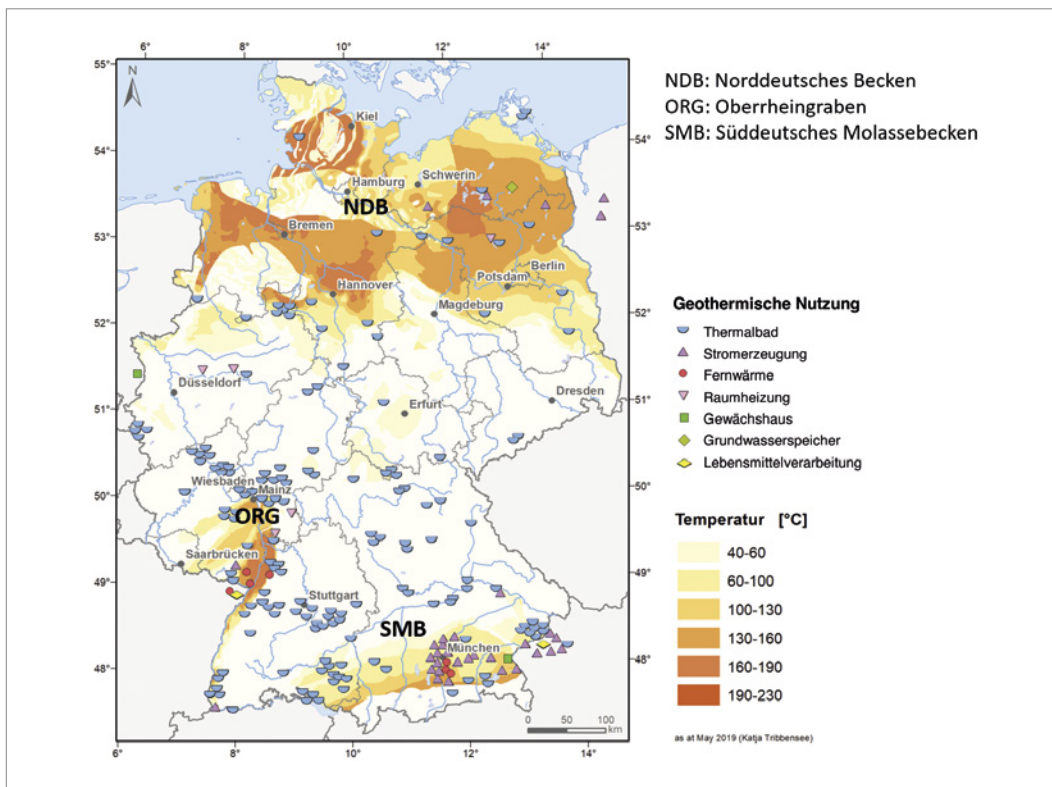


Abbildung 2

Übersichtskarte tiefer Geothermieprojekte 2019.

Die geothermische Nutzung konzentriert sich in Deutschland auf das Süddeutsche Molassebecken, den Oberrheingraben und das Norddeutsche Becken

(Quelle: nach Moeck et al., 2019)

Weiterführende Informationen zu diesen Themen können dem gemeinsamen Strategiepapier von sechs Einrichtungen der Fraunhofer-Gesellschaft und der Helmholtz-Gemeinschaft „Roadmap tiefe Geothermie für Deutschland“ entnommen werden (Bracke und Huenges, 2022).

Stand der tiefen Geothermie in Deutschland

Im europäischen Vergleich ist Deutschland hinter Island, der Türkei, Italien und Frankreich der fünftgrößte Produzent tiefergeothermischer Energie (EGEC, 2020). Insgesamt werden aktuell in Deutschland 42 geothermische Anlagen sicher und zuverlässig betrieben – davon 30 Heizwerke (Wärme), 3 Kraftwerke (Strom) und 9 Heizkraftwerke (Wärme und Strom) (BVG, 2022). Die installierte Wärmeleistung beträgt 350 MW und die installierte elektrische Leistung liegt bei 47 MW (BVG, 2022). Das entspricht etwa 0.1% des gesamten Wärmemix und etwa 0.8% der erneuerbaren Wärme. Wir gehen davon aus, dass sich der begonnene Ausbau der tiefen Geothermie der letzten 20 Jahre (► *Abbildung 1*) in den kommenden Jahren deutlich beschleunigen wird, da sich aktuell 4 Anlagen im Bau und 34 weitere Anlagen in Planung befinden (BVG, 2022). Tiefe Geothermie wird außerdem genutzt um 178

Thermalbäder mit einer zusätzlich installierten Leistung von 57 MWt zu betreiben. Insgesamt wurden im Jahr 2020 1.717 GWh Wärme aus tiefer Geothermie bereitgestellt, wovon 475 GWh auf Thermalbäder entfallen (Geotiss, 2022).

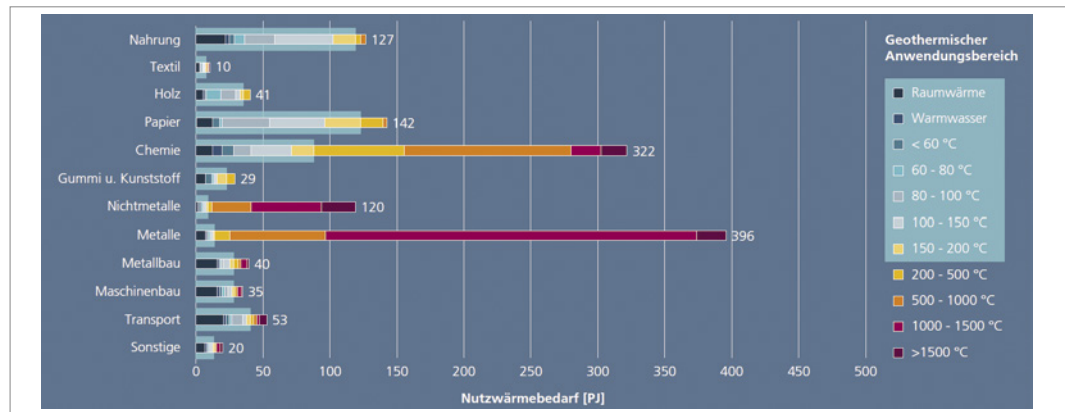
Die Eignung einer Region zur wirtschaftlichen Nutzung von Erdwärme hängt stark von den geologischen Gegebenheiten ab. In Deutschland weisen besonders die folgenden Regionen (► *Abbildung 2*) ein hohes Nutzungspotenzial auf:

Das Süddeutsche Molassebecken ist das bisher am häufigsten geothermisch genutzte Gebiet Deutschlands. Die meisten geothermischen Anlagen konzentrieren sich im Großraum München, wo die tiefe Geothermie auch in Zukunft eine entscheidende Rolle in der Wärmewende spielen wird (Moeck et al., 2019).

Im Oberrheingraben in Südwestdeutschland gibt es die höchsten geothermischen Gradienten in Deutschland. Daher steht diese Region ebenfalls im Fokus für aktuell neu geplante Projekte (Frey et al., 2022).

Das Norddeutsche Becken birgt aufgrund seiner Größe das höchste geothermische Potenzial in Deutschland. Bisher konnte es aufgrund seiner komplizierteren geologischen Verhältnisse jedoch nur in geringem Maße genutzt werden (Frick et al., 2022).

Abbildung 3
**Nutzwärmebedarf und erforderliche
 Temperaturniveaus
 verschiedener
 Industrien und
 geothermischer
 Anwendungsbereiche**
 (Quelle: Bracke und
 Huenges, 2022)



Potenzieller Beitrag der tiefen Geothermie zur Wärmewende in Deutschland

Das hydrothermale Potenzial, also das Potenzial der tiefen Erdwärme, welches mit heutiger Technik erschlossen werden kann, wird auf 300 TWh/a (220–430 TWh/a) geschätzt (Bracke und Huenges, 2022). Das entspricht einer installierten thermischen Leistung von 70 GW oder nahezu 25 % des deutschen Wärmebedarfs.

Dieses Potenzial beinhaltet noch nicht das zusätzliche Potenzial von Energiespeicherung (Schill et al., 2022), Grubenwassernutzung, oberflächennaher Geothermie und petrothermalen Systemen. Ambitionierte Entwicklungsziele für die tiefe Geothermie wären eine Deckung von 5–10 % des Wärmebedarfs in 2030 (~100 TWh/a) und ~20–25 % des Wärmebedarfs in 2040 (~300 TWh/a) (Bracke und Huenges, 2022).

Notwendige Entwicklungen für einen signifikanten Beitrag der tiefen Geothermie zur Wärmewende

Neben den oben genannten ambitionierten Zielen gibt es eine Vielzahl von Maßnahmen, die ergriffen werden können um den Ausbau der tiefen Geothermie zu beschleunigen, u. a.:

- Durch eine detaillierte Erkundung des Untergrundes kann das Fündigkeitsrisiko deutlich gesenkt, Investitionsentscheidungen vereinfacht und die Entwicklung eines Geothermiestandortes beschleunigt werden. Große Teile des geologischen Untergrundes in Deutschland sind nicht ausreichend geothermisch erkundet. Da sich der Wärmebedarf auf urbane Räume und Industriezentren konzentriert, kann ein Explorationsprogramm mit Fokus auf die Ballungszentren

erheblich zur Verringerung des Fündigkeitsrisikos beitragen. Das Erkundungsprogramm sollte in wissenschaftlich begleitete Demonstrationsprojekte münden.

- Geothermieprojekte benötigen eine hohe Anfangsinvestition bei relativ geringen laufenden Kosten. 8–9 von 10 Geothermiebohrungen sind wirtschaftlich nutzbar. Dennoch kann eine einzige unwirtschaftliche Bohrung einen lokalen Wärmeversorger bereits gefährden. Eine Fündigkeitsversicherung, die zunächst alle Kosten (Exploration, Bohrung, etc.) im Falle einer Nicht-Fündigkeit erstattet, würde daher die hohe Eintrittsbarriere der Anfangsinvestitionen verbunden mit dem Fündigkeitsrisiko, verringern.
- Wärmepumpen bis 80 °C sind eine in der Industrie etablierte Technologie. Bis 100 °C sind sie als kommerzielle Schlüsseltechnologie verfügbar. Wärmepumpen bis 140 °C sind im Prototypstatus und >140 °C sind die Entwicklungen im Laborstatus (Bracke und Huenges, 2022). Sie sind ein unverzichtbarer Baustein um Lagerstätten mit geringen Temperaturen nutzbar zu machen. Durch eine Erhöhung der Temperaturen von Wärmepumpen ist zudem eine Erweiterung des industriellen Anwendungsbereichs der Geothermie möglich. Bis 2030 sollte die industrielle Fertigung von Großwärmepumpen in der Leistungsklasse bis 50 MW anlaufen (Bracke und Huenges, 2022).
- Neben geeigneten geologischen Bedingungen bilden Wärmenetze eine weitere Grundlage für einen flächendeckenden Ausbau tiefer Geothermie. Die meisten vorhandenen Wärmenetze sind Hochtemperaturnetze. Ein Ausbau der Wärmenetzinfrastruktur, eine Absenkung der Temperaturen der Wärmenetze und eine gleichzeitige Klimatisierung im Neubaubereich und Sanierung von Bestandsimmobilien ermöglichen eine ökonomischere und effizientere Integration der tiefen Geothermie in die städtische Wärmeversorgung.

- Neben einer Vielzahl von geeigneten Tiefbohranlagen benötigt ein signifikanter Ausbau der tiefen Geothermie auch eine Vielzahl von Fachkräften. Pro GW installierter Leistung werden etwa 5.000 bis 10.000 Arbeitsplätze geschaffen (Bracke und Huenges, 2022). Entsprechend müssen die vorhandenen Ausbildungsmöglichkeiten erweitert werden.
- Zusätzlich ist eine weitere geothermische Technologieentwicklung insbesondere im Bereich der Erkundung (Digitalisierung, Geophysik, Erkundung neuer Lagerstättentypen), Erschließung (Entwicklung neuer Lagerstättentypen und Tauschergeometrien, Bohranlagen) und Produktion (Entwicklung und Anpassung von Förderpumpensystemen an Reservoirbedingungen) notwendig. Ein besseres Prozessverständnis muss dabei die Grundlage für Erkundung, Erschließung und Nutzung geothermischer Lagerstätten bilden. Diese Entwicklungen können durch die Nutzung großskaliger Forschungsinfrastruktur wie dem In-Situ Geothermielabor Groß Schönebeck (Blöcher et al., 2016) im Norddeutschen Becken und dem geplanten geothermischen Untertage-labor GeoLaB (Schätzler et al., 2020) im Oberrheingraben fundamental vorangetrieben werden. Solche Forschungslabore bieten als Dialogplattformen auch Möglichkeiten für partizipative Projekte zur Einbindung gesellschaftlicher Akteure.

Eine Skalierung der installierten Kapazität von 0.4 auf 70 GW (Faktor 175) erfordert industrielle Planungs- und Fertigungsprozesse. Mit geschätzten Kosten von ~2-2.5 Mrd. EUR pro GW installierter Wärmeleistung (~100 Tiefbohrungen) ergibt sich eine Investition von 140–175 Mrd. EUR (~7.000 Tiefbohrungen mit obertätiger Infrastruktur) (Bracke und Huenges, 2022).

Fazit

Tiefe Geothermie hat das Potenzial mit heutiger Technologie mittelfristig ~25 % des deutschen Wärmebedarfs zu decken. Bisher liegt der Anteil der 42 tiefen Geothermieranlagen am Wärmemix bei ~0.1 %. Für einen signifikanten Beitrag zur Wärmewende sind ein fokussiertes Erkundungsprogramm, eine Fündigkeitsversicherung, eine Weiterentwicklung von Großwärmepumpen, die Transformation kommunaler Wärmenetze, umfangreiche Fachkräfteausbildung und gezielte Technologieentwicklung für eine nachhaltige Nutzung geothermischer Ressourcen notwendig.

Die Entwicklung disruptiver Technologien erfordert zudem einen intensiven offenen Dialog zu deren Chancen und Risiken, insbesondere mit der lokalen Bevölkerung. Tiefe Geothermie bietet keine kurzfristige Lösung für die Wärmewende, sondern zeigt mit einem potenziell bedeutenden Beitrag zu einem klimaneutralen unabhängigen Wärmemix eine langfristige Perspektive auf.

Referenzen

- AGEE-Stat (2022). Erneuerbare Energien in Deutschland. Daten zur Entwicklung im Jahr 2021. Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik, Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/erneuerbare-energien-in-deutschland-2021>
- Blöcher, G., Reinsch, T., Henniges, J., Milsch, H., Regenspurg, S., Kummerow, J., Francke, H., Kranz, S., Saadat, A., Zimmermann, G. (2016). Hydraulic history and current state of the deep geothermal reservoir Groß Schönebeck. *Geothermics* 63:27-43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.07.008>
- Bracke, R. und Huenges, E. (Hrsg.) (2022). Roadmap Tiefe Geothermie für Deutschland. <https://doi.org/10.24406/ieg-n-645792>
- BVG (2022). Geothermie in Zahlen. Bundesverband Geothermie. <https://www.geothermie.de/geothermie/geothermie-in-zahlen.html>
- EGEC (2021). 2020 EGEC Geothermal Market Report. European Geothermal Energy Council. <https://www.egec.org/media-publications/egec-geothermal-market-report-2020/>
- Frey, M., Bär, K., Stober, I., Reinecker, J., van der Vaart, J., Sass, I. (2022). Assessment of deep geothermal research and development in the Upper Rhine Graben. *Geothermal Energy* 10(18). <https://doi.org/10.1186/s40517-022-00226-2>
- Frick, M., Kranz, S., Norden, B., Bruhn, D., Fuchs, S. (2022). Geothermal resources and ATES potential of Mesozoic reservoirs in the North German Basin. *Energies* 15 (1980). <https://doi.org/10.3390/en15061980>
- GeotIS (2022). Geothermal Information System. <http://doi.org/10.17616/R3M89J>
- Moeck, I.S., Düssel, M., Weber, J., Schintgen, T., Wolfgramm, M. (2019). Geothermal play typing in Germany, case study Molasse Basin: a modern concept to categorise geothermal resources related to crustal permeability. *Netherlands Journal of Geosciences* 98(e14). <https://doi.org/10.1017/njg.2019.12>
- Schätzler, K., Bremer, J., Schill, E., Kohl, T., Kühn, M., Kolditz, O., Sass, I. (2020). GeoLaB – Das geowissenschaftliche Zukunftsprojekt für Deutschland. Mining Report Glückauf, Dezember 2020. <https://mining-report.de/geolab-das-geowissenschaftliche-zukunftsprojekt-fuer-deutschland/>
- Schill, E., Waczowicz, S., Bracke, R., Sass, I., Rink, K. (2022). Wärmenetz-gekoppelte Speicherung im tiefen Untergrund. Jahrestagung 2022 des Forschungsverbands Erneuerbare Energien, Berlin, 12–13 Oktober 2022; S.96–101)