

Warm-Up

Tidian Baerens, Dieter Behrendt, Elisa Dunkelberg, Lars Holstenkamp,
Julika Weiß

Obertägige Erfolgsfaktoren bei mitteltiefen Geothermieprojekten

Arbeitspapier des BMWK-Projektes „Warm-Up – Geothermie für die
Wärmewende: Flankierung des Rollouts der mitteltiefen Geothermie in
Deutschland“



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Impressum

Autor*innen:

Baerens, Tidian (IÖW); Behrendt, Dieter (ECOLOG); Dunkelberg, Elisa (IÖW); Holstenkamp, Lars (ECOLOG); Weiß, Julika (IÖW)

Herausgeber:

Institut für ökologische
Wirtschaftsforschung (IÖW)
Potsdamer Str. 105, 10785 Berlin
www.ioew.de

ECOLOG-Institut für sozial-ökologische
Forschung und Bildung gGmbH
Wichernstraße 34, 21335 Lüneburg
www.ecolog-institut.de

Dr. Julika Weiß
Telefon: +49 30 884594 - 0
E-Mail: julika.weiss@ioew.de

Dr. Lars Holstenkamp
Telefon: +49 4131 8985957
E-Mail: lars.holstenkamp@ecolog-institut.de

Der vorliegende Beitrag entstand im Rahmen des Arbeitspakets 2 des Forschungsprojekts „Warm-Up – Geothermie für die Wärmewende: Flankierung des Rollouts der mitteltiefen Geothermie in Deutschland“. Das Projekt mit der Forschungskennziffer (FKZ) 03EE4049 wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms gefördert. Das Projekt wird vom ECOLOG-Institut und dem Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) gemeinsam mit der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) und dem Leibniz-Institut für angewandte Geophysik (LIAG) durchgeführt.

Wir danken den Expert*innen, welche uns für Interviews zur Verfügung standen, herzlich für den vertrauensvollen und wertvollen Austausch im Rahmen der Berichterstellung.

Berlin/Lüneburg, Oktober 2024

Inhalt

1	Einleitung	5
1.1	Hintergrund	5
1.2	Zielstellung der vorliegenden Untersuchung.....	5
1.3	Stand des Wissens	6
1.4	Methodisches Vorgehen.....	7
2	Technisch-wirtschaftliche Faktoren der Wärmeabnahme.....	8
2.1	Relevanz der Abnahmeseite	8
2.2	(Technische) Eigenschaften von Wärmenetzen	8
2.3	Struktur der netzgebundenen Wärmeerzeugung.....	11
2.4	Struktur und Eigenschaften der Abnehmenden	13
2.4.1	<i>Gebäude</i>	13
2.4.2	<i>Industrielle- und gewerbliche Abnehmende</i>	14
2.4.3	<i>Einzelabnehmende</i>	17
2.5	Anschlussbereitschaft von potenziellen Abnehmenden	17
2.6	Entwicklung der Wärmeabnahme.....	19
2.7	Besondere Herausforderungen neuer Wärmenetze	20
3	Politisch-gesellschaftliche Faktoren.....	21
3.1	Politisch-rechtlicher Rahmen.....	21
3.1.1	<i>Rechtliche Möglichkeit von Geothermieprojekten</i>	22
3.1.2	<i>Politisches Risiko standortoffener Endlagersuche für radioaktive Abfälle</i>	22
3.1.3	<i>Finanzielle Entschädigung bei Schäden am Eigentum</i>	23
3.1.4	<i>Subventionen sowie energiewirtschaftliche und umweltökonomische Instrumente</i>	23
3.2	Planungs- und Genehmigungsrisiken.....	24
3.2.1	<i>Bergrecht</i>	25
3.2.2	<i>Gewerberecht und Energierecht</i>	26
3.2.3	<i>Baurecht</i>	26
3.2.4	<i>Weitere relevante Rechtsvorschriften im Planungs- und Genehmigungsrecht</i>	27
3.3	Akzeptanz und Kooperation von Akteur*innen	28
3.3.1	<i>Akzeptanzdreieck</i>	28
3.3.2	<i>Faktoren der politischen und gesellschaftlichen Akzeptanz</i>	28
3.3.3	<i>Kommunale Zusammenarbeit (gemeinsame Projekte)</i>	31
4	Wirtschaftlichkeit und Finanzierbarkeit.....	31

4.1	Wirtschaftlichkeit	31
4.2	Finanzierbarkeit.....	33
5	Fazit	33
	Literatur	36

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Evolution der Wärmeversorgung.....	10
Tabelle 2:	Beispielhafte Wirtschaftszweige und Prozesse	16

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Nettowärmeerzeugung der Fernwärme/-kälteversorger sowie Einspeisung von Industrie und Sonstigen nach Energieträgern	11
Abbildung 2:	Branchen und Prozesse	15

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Der Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energien, der Ausbau der erneuerbaren Energien und damit das Erreichen von Versorgungssicherheit und Klimaschutz sind Ziele der Bundesregierung. Neben dem weiteren Ausbau etablierter erneuerbarer Energien wie Wind- und Solarenergie rückt die Geothermie für die Wärmeversorgung stärker in den Fokus. Notwendig ist ein schneller Hochlauf der Geothermie bzw. eine deutlich stärkere Sensibilisierung für die Potenziale der Geothermie, auch für die Dekarbonisierung der Wärmenetze.

Geothermie ist grundlastfähig, aber trotz großer Potenziale liegt der Anteil genutzter Erdwärme bislang bei nur rund 1,5 Prozent des gesamten Wärmebedarfs in Deutschland (Moeck et al. 2022). Betrachtet man den Anteil der Erdwärme aus tiefer Geothermie, so liegt dieser bei lediglich 0,1 Prozent (AGEB 2022a). Doch Erdwärme ist nicht nur klimafreundlich, sondern kann als heimische Energiequelle Importe fossiler Energieträger mehr und mehr ersetzen und damit Wertschöpfung in Deutschland schaffen.

Die vom Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) ausgearbeitete Metastudie für eine „Nationale Erdwärmestrategie“ macht Angaben dazu, wie und in welchem Umfang Geothermie für eine nachhaltige, preisstabile und versorgungssichere Abdeckung des Wärmebedarfs in Deutschland („Wärmewende“) genutzt werden kann (Moeck 2022): Die „oberflächennahe Geothermie“ mit Einsatz erdgekoppelter Wärmepumpen sowie die „tiefe Geothermie“ können demnach unter Einsatz etablierter Technologien zukünftig bis zu 42 Prozent der Wärme für den Bereich Raumwärme und Warmwasser abdecken. Allein die hydrothermale Tiefengeothermie bietet laut Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie (Fraunhofer IEG) ein Marktpotenzial in Deutschland von weit über 300 TWh Jahresarbeit bzw. 70 GW installierte Leistung. Das entspricht ca. 25 Prozent des Gesamtwärmebedarfs. Hinzu kommen die Potenziale der petrothermalen Geothermie, der großen saisonalen Untergrundwärmespeicher (> 500 TWh/a) sowie der Oberflächennahen Geothermie (Bracke et al. 2022).

Im November 2022 startete das Forschungsprojekt Warm-Up „Geothermie für die Wärmewende: Flankierung des Rollouts der mitteltiefen Geothermie in Deutschland“. Damit begleiten die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), das LIAG, das Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) und das ECOLOG-Institut für sozial-ökologische Forschung und Bildung die Erdwärmekampagne „Geothermie für die Wärmewende“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Das Projekt „Warm-Up“ zielt auf den Roll-Out der mitteltiefen, hydrothermalen Geothermie (Fördertemperaturen von ca. 40 bis 70 °C) im Bereich der Wärmenutzung. Als mitteltiefe Geothermieprojekte werden diejenigen bezeichnet, deren Bohrungen eine Teufe von ca. 400 – 2.000 Metern haben. Solche Projekte können aufgrund der geringeren Tiefe und damit geringeren Temperaturen im Vergleich zu den tiefen Geothermieprojekten (mehr als 2.000 Meter Bohrteufe) ausschließlich Wärme liefern und sind nicht für den Betrieb von Kraftwerken zur Stromerzeugung geeignet.

1.2 Zielstellung der vorliegenden Untersuchung

Um einen „Hochlauf“ der mitteltiefen Geothermie zu erreichen bzw. diesen zu unterstützen, ist es im Rahmen des Forschungsprojektes „Warm-Up“ notwendig zu ermitteln, welche Faktoren ein mitteltiefes Geothermieprojekt in der Planung, in der Umsetzung und im Betrieb fördern,

hemmen oder verhindern können. Im Folgenden werden diese als „Einflussfaktoren“ oder kurz „Faktoren“ bezeichnet. In der Literatur zur Geothermie werden solche Einflussfaktoren durchaus genannt, zumeist aber nur cursorisch, unsystematisch und/oder nicht näher eingeordnet in das vorhandene Wissen zu Einflussfaktoren auf (Erneuerbare-)Energien-Projekte allgemein. Im vorliegenden Arbeitspapier wird daher eine Systematisierung der Einflussfaktoren auf die Umsetzung mitteltiefer Geothermieprojekte vorgenommen, und die einzelnen Faktoren werden näher erläutert.

Im Fokus stehen in diesem Arbeitspapier diejenigen Faktoren, die die Strukturen oberhalb der Erdoberfläche betreffen. Erfolgs- wie Misserfolgskriterien für mitteltiefe Geothermieprojekte können in Faktoren oberhalb und unterhalb der Erdoberfläche getrennt werden, in der Geologie als obertägig und untertägig benannt. Alle Faktoren müssen im Zusammenspiel nicht nur einen wirtschaftlichen Anlagenbetrieb ermöglichen, sondern auch dazu führen, dass ein entsprechendes Projekt initiiert und umgesetzt wird. Dabei sind Ziele des Umweltschutzes sowie soziale Ziele einzuhalten. Es ist möglich, dass der Projektverlauf durch einen Faktor nicht nur erschwert bzw. verzögert wird, sondern jeder dieser Faktoren kann zu einem K.o.-Faktor werden.

Die untertägigen Faktoren werden in diesem Arbeitspapier nur insoweit betrachtet, wie sie mit obertägigen Faktoren interagieren. Das geologisch-technische Potenzial, der unterirdische Teil eines Geothermieprojekts, wird in anderen Bausteinen und eigenen Veröffentlichungen im Warm-Up-Projekt behandelt. Einige der Faktoren des geologisch-technischen Potenzials sind bereits in der „Erstellungshilfe für eine Projektskizze zur Explorationsförderung des BMWK“ der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2023) enthalten.

1.3 Stand des Wissens

Zur Beschreibung und Analyse von Faktoren sowie deren Wechselwirkungen, insbesondere unter Einschluss der obertägigen Faktoren, liegen nur wenige Veröffentlichungen vor. Für tiefegeothermische Wärmeprojekte werden z. B. Hemmnisse und Erfolgsfaktoren benannt (Colmenar-Santos et al. 2018; Palomo et al. 2022). Dabei werden jedoch nur wenig differenzierende, eher allgemeine Faktoren wie „Economic/Financial“, „Normative“, „Technical“, „Cultural/Social“, „Lack of knowledge“, „Others“, „Big offers gas sector“ aufgeführt. Oft betont werden Fragen der Wirtschaftlichkeit und Finanzierbarkeit angesichts des Fündigkeitsrisikos und der hohen Anfangsinvestitionen. Daher gab und gibt es mehrere geologische Studien zur Quantifizierung des Fündigkeitsrisikos (z. B. Zimmermann et al. 2019; Korn et al. 2016; Wolfram und Franz 2016).¹ Weitere sozio-ökonomische Faktoren werden selten und eher kurz abgehandelt: Bauer et al. (2014a) sehen das wesentliche Hemmnis für die Verbreitung der geothermischen Wärmenutzung in fehlender (projektbezogener sozialer) Akzeptanz; auch in dieser Veröffentlichung ohne Differenzierung in akzeptanzbestimmende Einzelfaktoren. Sandrock et al. (2020b) untersuchen die Hemmnisse umfassender, behandeln jedes für sich aber ebenfalls nur knapp. Die vergleichende Fallanalyse beschränkt sich zudem auf bereits umgesetzte Vorhaben. Mbah und Krohn (2021) untersuchen mit dem Schwerpunkt Kommunikation

¹ Vgl. auch die Forschungsprojekte „GeotIS I und II“, https://www.geotis.de/homepage/project_history, und das noch laufende Projekt „Mesotherm: Erkundung und Erschließung hydrothermalen Reservoirs der mitteltiefen Geothermie – ein Beitrag zur Wärmewende in Norddeutschland“, <https://www.leibniz-liag.de/forschung/projekte/drittmittelprojekte/mesotherm.html>.

und Partizipation als Grundlage von Projektakzeptanz die Fallbeispiele der Geothermieprojekte in der Gemeinde Stauf in Baden-Württemberg und in der Stadt St. Gallen in der Schweiz.

Die wesentlichen Erfolgsfaktoren haben auch Eingang in Analysen zur Bestimmung des geothermischen Potenzials eines Standortes gefunden. Hierzu wurde das Konzept der „play types“ (Fündigkeitstypen) aus der Kohlenwasserstoffindustrie, das zur Charakterisierung von Rohstofflagerstätten entwickelt worden war, auf die Geothermie übertragen. Das Play-Type-Konzept beruht einerseits auf der Einteilung des Untergrunds nach Wärmetransportmechanismen und geologischen Einflussfaktoren auf die Reservoirqualität. Es beschreibt geologische Anordnungen bestehend aus der Wärmequelle, dem Wärme-Migrationsweg, den Wärme- oder Fluid-Speicherbedingungen. So können ähnliche geologische Strukturen von geothermischen Feldern verglichen und einem Fündigkeitstyp zugeordnet werden. Andererseits werden die technisch-ökonomischen Möglichkeiten der Nutzung, untertägig wie obertägig, betrachtet (LIAG o. J.). Das Play-Type-Konzept benennt „Bedarf“, „Infrastruktur“ und „Zugänglichkeit“ als Entscheidungsebenen mit dem Ziel der Rentabilität sowie „Erlaubnisfeld“, „Play“ und „Geosystem“ als Entscheidungsebenen mit dem Ziel der Skalierbarkeit. Politische und gesellschaftliche Faktoren für den Aufbau von Geothermieanlagen waren ursprünglich nicht Gegenstand des Konzepts, obwohl viele Projekte zum Aufbau von Erneuerbare-Energien-Anlagen, nicht nur in der Geothermie, in den vergangenen Jahrzehnten durch solche Faktoren erst möglich wurden bzw. verzögert wurden oder vereinzelt scheiterten. Infolgedessen wurde das Play-Type-Konzept von Moeck et al. (2022) von der geologisch-technisch-wirtschaftlichen Betrachtung ausgeweitet auf alle Bewertungsfaktoren in der Entscheidung für die Umsetzung eines Geothermieprojekts. Neu ist hier der Einbezug gesellschaftlicher Faktoren. Ergebnis sind die „gesellschaftlich-technische Fokuspypamide“ für den obertägigen Teil eines Geothermieprojekts sowie die „geologisch-technische Fokuspypamide“ für den untertägigen Teil. Auch hier ist zu konstatieren, dass gerade die obertägigen Faktoren einer weiteren Differenzierung bedürfen.

1.4 Methodisches Vorgehen

Die nachfolgenden Ausführungen basieren auf einer Literaturanalyse. Die vorstehenden Quellen dienen dabei als Ausgangspunkt und wurden insbesondere mittels weiterer Literatur zu erneuerbaren Energien vertieft, soweit dies möglich und zulässig war. Zudem wurde auf graue Literatur zurückgegriffen, sofern keine wissenschaftlichen Quellen identifiziert wurden.

Erkenntnisse zu geothermie-spezifischen Aspekten der Abnahmeseite konnten im Zuge der Auswertung der Literatur insbesondere zu den Themen Nachverdichtung, der Erweiterung und der Transformation bestehender Wärmenetze sowie zum Neubau von Wärmenetzen nur begrenzt ermittelt werden. Deshalb wurden in einem zweiten Schritt leitfadengestützte Fachgespräche mit Akteuren aus dem Bereich Geothermie (Wissenschaft, Verbände und Planer) durchgeführt. Die Interviews wurden verwendet, um die literaturbasierten Einschätzungen zu verifizieren und zu ergänzen. Dort, wo durch die Interviewpartner neue, nicht bereits in der Literatur gefundene Aspekte genannt wurden, ist das im Text entsprechend vermerkt.

Im Folgenden werden die ermittelten potenzialbezogenen oberirdischen Faktoren aufgeführt, getrennt nach den technisch-wirtschaftlichen Faktoren der Wärmeabnahme (Kapitel 2) und den politisch-gesellschaftlichen Faktoren (Kapitel 3), d. h. politisch-rechtliche Rahmensetzun-

gen, planungs- und genehmigungsrechtliche Gegebenheiten sowie Akzeptanz und Kooperation von Akteur*innen. Anschließend erfolgt eine kurze Beschreibung des Faktors „Wirtschaftlichkeit und Finanzierbarkeit“ (Kapitel 4).

2 Technisch-wirtschaftliche Faktoren der Wärmeabnahme

2.1 Relevanz der Abnahmeseite

Die Realisierbarkeit eines Geothermie-Projekts ist maßgeblich von der Abnahmeseite abhängig. Abnehmer sind in der Regel Wärmenetze mit den angeschlossenen Gebäuden als Endverbraucher. Zu Letzteren zählen sowohl Wohn- als auch Nichtwohngebäude, einschließlich Großabnehmer aus Industrie und Gewerbe. Die technischen Eigenschaften und das Temperaturniveau von Wärmenetzen können sich sowohl bei bestehenden als auch bei neuen Netzen unterscheiden, was einen maßgeblichen Einfluss auf die Effizienz der geothermischen Nutzung hat. Die Abnahmeseite ist jedoch auch relevant, da eine ausreichende Wärmenachfrage notwendig ist und die Endverbraucher*innen bereit sein müssen, sich an ein Wärmenetz anzuschließen oder die Wärme in Einzelfällen direkt abzunehmen. Ebenso kann es entscheidend sein, ob ein potenzieller Betreiber eines neu zu errichtenden Wärmenetzes vorhanden ist (siehe Kapitel 3.3). Letztlich kann ein geothermisches Vorhaben nur erfolgreich sein, wenn die Abnahmeseite von vornherein mitgedacht und einbezogen wird. Für die Frage, ob ein Wärmenetz geeignet ist, um Wärme aus mitteltiefer Geothermie aufzunehmen, sind die folgenden Kriterien von Bedeutung:

- (Technische) Eigenschaften des Wärmenetzes, insbesondere die Systemtemperaturen,
- Struktur der (bisherigen) Wärmeerzeugung und weitere vorhandene erneuerbare Energien (EE) und Abwärmequellen,
- Struktur und Eigenschaften der Abnehmenden,
- Anschlussbereitschaft von (weiteren) potenziellen Abnehmenden und
- die Entwicklung der Wärmeabnahme.

2.2 (Technische) Eigenschaften von Wärmenetzen

Eigenschaften von Wärmenetzen, die für die Einbindung von Geothermie relevant sind, sind insbesondere

- die Vor- und Rücklauftemperatur (bestimmt durch Anlagenalter und Abnehmerstruktur),
- ihre Größe (bzw. Länge und Durchmesser),
- ihr Sanierungsbedarf sowie
- die hydraulischen Eigenschaften.

Sinnvollerweise wird die Wärme aus Geothermieanlagen in den Vorlauf eines Wärmenetzes eingebunden (AGFW 2023). Daher bestimmt insbesondere die Vorlauftemperatur des Wärmenetzes darüber, wie effizient eine Nutzung ist. In der Regel gilt: Hat der Vorlauf eines Wärmenetzes eine höhere Temperatur als die Wärmequelle, so ist eine Temperaturanhebung mittels Wärmepumpe erforderlich. Je größer die Temperaturdifferenz, desto weniger effizient ist die Nutzung bzw. desto mehr Strom muss für die Temperaturerhöhung eingesetzt werden,

was wiederum die Wirtschaftlichkeit beeinflusst. Die maximalen Fördertemperaturen bei bestehenden Anlagen der mitteltiefen und tiefen Geothermie, die derzeit in Deutschland in Betrieb sind, rangieren zwischen 37 und 165 °C. Ihre thermischen Leistungen liegen zwischen 0,15 und 40 MW_{th} (Agemar et al. 2018). Die Temperaturen bei der mitteltiefen Geothermie (400 bis 2.000 Meter) sind regional sehr unterschiedlich. Im Oberrheingraben liegen sie in 1.000 Meter Teufe zwischen 10 und 100 °C (Bracke et al. 2022). In mitteltiefen Reservoiren des Norddeutschen Beckens sind bei einem mittleren geothermischen Gradienten von etwa 3 K/100 m in 2.000 Meter Tiefe Temperaturen von bis zu 70 °C zu erwarten, wobei das Beispiel Neustadt-Glewe in Mecklenburg-Vorpommern zeigt, dass schon bei einer Teufe von 2.500 Meter Fördertemperaturen von bis zu 100 °C möglich sind. An Standorten mit geothermischen Anomalien (Hotspots) können in der gleichen Teufe auch höhere Temperaturen herrschen.

Typische Vorlauftemperaturen von Bestandswärmenetzen liegen zwischen 80 °C und 120 °C. Aufgrund der Temperaturanforderung der Netze ist deshalb häufig der Einsatz von Wärmepumpen zur Temperaturerhöhung notwendig. In einigen Fällen ist es alternativ möglich, die mitteltiefe Geothermie direkt – also ohne einen Temperaturhub – in den Rücklauf eines Wärmenetzes einzubinden, um dessen Temperatur anzuheben und so die Effizienz des Wärmenetzes zu erhöhen. In diesem Fall muss der Vorlauf des Wärmenetzes durch einen alternativen Wärmeerzeuger erwärmt werden, welcher mit einer derartigen Rücklaufanhebung kompatibel sein sollte (Blockheizkraftwerke - BHKWs könnten hier laut einem Interviewpartner eine Ausnahme darstellen, da sie mit einer Rücklaufanhebung möglicherweise nicht kompatibel sind). Über den Rücklauf eines Wärmenetzes lassen sich zudem etwa ein Neubaugebiet oder alternative Abnehmende mit passenden Temperaturanforderungen, zum Beispiel Schwimmbäder, mit Wärme versorgen (AGFW 2023). Die Potenziale dieser Art der Kaskadierung der Wärmeabnahme zur Effizienzsteigerung des Systems werden in Kapitel 2.4.2 näher beschrieben.

Die Betriebstemperaturen des Wärmenetzes hängen neben den Temperaturanforderungen der Endverbraucher (siehe Kapitel 2.4) unter anderem von dessen Alter ab (siehe Tabelle 1). Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurden Fernwärmesysteme zunächst mit Dampf als Wärmeträger gebaut (1. Generation). Im Laufe des Jahrhunderts wurde erst das Medium Dampf durch Wasser ersetzt (2. Generation), und etwa ab den 80er Jahren wurde die Temperatur auf unter 100 °C gesenkt (3. Generation). Für eine effiziente Nutzung erneuerbarer Wärmequellen rücken seit einigen Jahren Niedertemperaturwärmenetze mit Vorlauftemperaturen unter 70 °C in den Vordergrund der Diskussion (4. Generation). Alle vier Generationen von Wärmenetzen werden noch heute in Europa genutzt (Systeme der ersten Generation allerdings nicht in Deutschland), wobei ältere Systeme oft mit neueren erweitert wurden (Averfalk et al. 2021). Für die Einbindung der mitteltiefen Geothermie sollte es sich laut einem Interviewpartner in jedem Fall um Heißwassernetze, das heißt um Netze ab der zweiten Generation, handeln.

Tabelle 1: Evolution der Wärmeversorgung

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Wirtz et al. (2022)

Wärmeträger	Wasserdampf	Überhitztes Wasser	Heißes Wasser	Niedrig temperiertes Wasser	(5. Generation)
Versorgungstemperatur	Ca. 200 °C	Ca. 140 °C	Ca. 90 °C	Ca. 60 °C	< 60 °C
Technologie	Dampfsysteme: Dampfleiter in Betonkanälen	Unter Druck stehendes Heißwasser	Vorge-dämmte Rohre. Industrielle, kompakte Übergabestationen	Geringer Energiebedarf. Smart-Energy: Optimale Interaktion von Energiequellen, -verteilung und -verbrauch	Bidirektional: Wärme- und Kälteversorgung. Nahezu verlustfrei. (Un-gedämmte) Plastikrohre. Modular erweiterbar
Zeitraum	1880 – 1930	1930 – 1980	1980 – 2010	2010 – 2040	Ab 2020

Ob und in welchem Umfang (mitteltiefe) Geothermie in Wärmenetze integriert werden kann, hängt auch von der Abnahmemenge, also der Größe des Wärmenetzes bzw. der durch das Netz geleiteten Wärmemenge insgesamt, ab. Größere Wärmenetze können auch größere Mengen an Wärme aufnehmen und transportieren. Wärmenetze sind sehr unterschiedlich groß: Es gibt Wärmenetze mit über 2.000 km Länge wie das Verbundnetz in Berlin, es gibt aber auch Wärmenetze, die nur wenige Gebäude mit Wärme versorgen (siehe z. B. BKartA 2012; Dunkelberg et al. 2021). Das Bundeskartellamt (BKartA 2012) unterscheidet auf der Grundlage der Netzlänge vier Gruppen von Wärmenetzen:

- Großnetze mit einer Länge von mehr als 100 km,
- Mittelnetze mit einer Länge von 10 bis 100 km,
- Kleine Netze mit einer Länge von 1 bis 10 km und
- Kleinstnetze mit einer Länge von weniger als 1 km.

Allerdings entfällt auf vergleichsweise große Wärmenetze von mehr als 100 km Netzlänge der weitaus größte Anteil der an Privatkund*innen abgegebenen Wärmemenge (BKartA 2012). Insbesondere größere Netze könnten sich aufgrund der entsprechend höheren nachgefragten Wärmemenge besonders gut für die Einbindung großer Mengen geothermischer Wärme eignen. Kleine und Kleinstnetze dagegen versorgen eventuell nicht genügend Abnehmende, um die gesamte Wärme aus einer geothermischen Quelle auszunutzen, was wiederum die Wirtschaftlichkeit der geothermischen Anlagen beeinträchtigen würde. Einzelne Großabnehmende (Ankerkunden) können hier wiederum die geringere Anzahl an Abnehmenden kompensieren.

Zuletzt kann der durch geothermische Faktoren beeinflusste Standort bzw. Einspeisepunkt der geothermischen Anlage eine notwendige Optimierung der hydraulischen Eigenschaften des Wärmenetzes nach sich ziehen. Dies betrifft etwa Anpassungen bei der Fließgeschwindigkeit oder gar der Fließrichtung. Je größer der Anteil geothermischer Wärme, welcher in das bestehende Gesamtsystem eingebunden werden soll, desto wahrscheinlicher sind derartige Anpassungen in der Hydraulik des Wärmenetzes, was wiederum die für die Integration nötigen Investitionen erhöht (AGFW 2023).

2.3 Struktur der netzgebundenen Wärmeerzeugung

Wärme in Bestandswärmenetzen wird aktuell überwiegend mit fossilen Brennstoffen, in erster Linie mit Erdgas und in vielen Wärmenetzen mit Stein- und Braunkohle, erzeugt. Dazu kommen die Verbrennung nicht biogener Abfälle und die Einbindung von Abwärme in die Wärmenetze (siehe Abbildung 1). Ein kleiner Teil der Wärmeerzeugung entfällt auf Mineralöl und sonstige Brennstoffe. Der Anteil der Erneuerbaren an der Fernwärme in Deutschland lag laut Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) im Jahr 2023 bei 19,9 %, was einem Anstieg von etwa 12 % seit dem Jahr 2010 entspricht. Darin enthalten sind vor allem Biomasse und biogene Siedlungsabfälle. Auf die erneuerbaren Wärmequellen Geothermie und Solarthermie entfielen zusammen lediglich 1,2 % (BDEW 2024a).

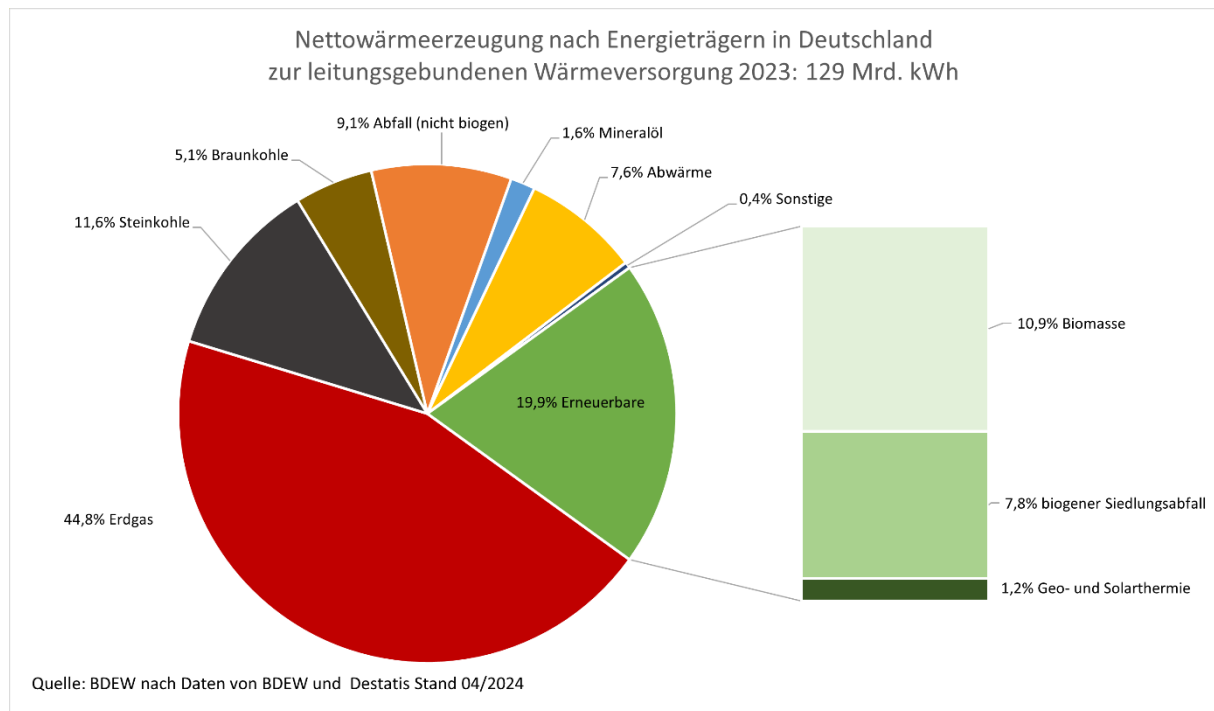


Abbildung 1: Nettowärmeerzeugung der Fernwärme/-kälteversorger sowie Einspeisung von Industrie und Sonstigen nach Energieträgern

Das 2024 in Kraft getretene Gesetz zur Wärmeplanung und Dekarbonisierung von Wärmenetzen (WPG) verpflichtet Wärmenetzbetreibende den durchschnittlichen Anteil erneuerbarer Energien und Abwärme bis 2030 auf 30 % zu erhöhen und bis 2040 auf 80 % (§ 29 WPG). Als Wärmequellen für die Dekarbonisierung kommen tiefe, mitteltiefe und oberflächennahe Geothermie, Wärme aus Oberflächengewässern, Solarthermie, Wärme aus der Müllverbrennung,

Biomasse, Abwärme sowie Power-to-Heat (PtH) und Power-to-Gas (PtG) in Frage (Engelmann et al. 2021). Die jeweiligen Potenziale und teilweise auch die Kosten fallen dabei für die unterschiedlichen Technologien lokal sehr unterschiedlich hoch aus, sodass sich für jedes Versorgungsgebiet ein anderer optimaler Erzeugermix ergibt. Der Erzeugermix muss darüber hinaus die notwendige Versorgungssicherheit berücksichtigen, etwa durch weitere Erzeugereinheiten.

Ob und in welchem Umfang Wärme aus mitteltiefer Geothermie in Wärmenetze eingebunden werden kann, hängt also auch damit zusammen, mit welchen anderen Technologien die Geothermie in Konkurrenz steht.

Die Eignung von Wärmeerzeugern für eine bestimmte Anwendung ist maßgeblich von deren Kostenstruktur abhängig. Diese umfasst sowohl die Investitions- als auch die verbrauchs- und betriebsgebundenen Kosten der Wärmeversorgung. Einige Technologien, wie Wärmepumpen, weisen hohe betriebs- und verbrauchsgebundene Kosten auf. Die Wärmeerzeugung mittels mitteltiefer Geothermie ist dagegen in der Regel mit hohen (leistungsspezifischen) Investitionskosten verbunden, die durch die aufwändige Bohrung verursacht werden. Demgegenüber stehen vergleichsweise geringe laufende Kosten, insbesondere, wenn eine Direkteinspeisung der Wärme in ein Wärmenetz ohne Zwischenschaltung einer Wärmepumpe möglich ist. Folglich eignet sich die mitteltiefe Geothermie mit höheren Fördertemperaturen in besonderem Maße für die Grundlastversorgung, also für die Deckung des ganzjährig anfallenden Wärmebedarfs. Aus ökonomischen Erwägungen sollte sie daher möglichst auch im Sommer zum Einsatz kommen.

Die Höhe der Investitionskosten wird bei der tiefen und mitteltiefen Geothermie unter anderem durch die geologischen Gegebenheiten beeinflusst (Sandrock et al. 2020a). Die Betriebsdauer pro Jahr hat hingegen keinen (nennenswerten) Einfluss auf die Höhe der Investitionskosten. Je mehr Wärme eine Anlage jedoch über ihre Lebensdauer bereitstellt, desto geringer fallen die Investitionskosten für die Höhe der Wärmegestehungskosten ins Gewicht. Andersherum fallen die Investitionskosten umso mehr ins Gewicht, je geringer die Volllaststunden einer konkreten Anlage sind. Da die leistungsspezifischen Investitionskosten der erneuerbaren Wärmeerzeuger und auch die Betriebskosten pro Kilowattstunde unterschiedlich hoch sind, reagieren die Wärmegestehungskosten der Erzeugertypen unterschiedlich sensitiv auf eine Veränderung der Betriebs- bzw. Volllaststunden. Im Zuge der Erstellung von Machbarkeitsstudien zur Integration von (mittel-)tiefer Geothermie in Wärmenetze ist daher zu prüfen, wie sich die Wärmeerzeugungsprofile und Wärmegestehungskosten verschiedener lokal verfügbarer Wärmequellen zueinander verhalten (Dunkelberg et al. 2020; Sandrock et al. 2020a).

Aus dem Zusammenhang von Volllaststunden und den Wärmegestehungskosten ergibt sich eine Einsatzreihenfolge der Erzeugungsanlagen innerhalb eines Wärmenetzes, wobei auch andere Einflussfaktoren wie die CO₂-Emissionen und technologische Aspekte eine Rolle spielen (Dunkelberg et al. 2020). Die Wärmeerzeugung muss dabei zu jedem Zeitpunkt im Jahr den jeweiligen nachgefragten Wärmebedarf decken. Dementsprechend muss der Erzeugerpark für das Wärmenetz für die Maximallast in der Heizperiode im Winter ausgelegt werden. In den Sommer- und in den Übergangsmonaten ist der Wärmeverbrauch gering und wird zumindest im Sommer ausschließlich durch den Verbrauch an Warmwasser und Prozesswärme bestimmt. Dies führt dazu, dass nur wenige Wärmeerzeuger ganzjährig laufen und die Grundlast bereitstellen. Zugleich können die meisten erneuerbaren Wärme- und Abwärmequellen das ganze Jahr über Wärme liefern, sodass es im Sommer zu einem Überschuss an Wärme

kommt. Beispielsweise kann die Bereitstellung der Grundlast in einem Wärmenetz durch Abwärme einer Müllverbrennungsanlage die Wirtschaftlichkeit der tiefen Geothermie negativ beeinflussen (Sandrock et al. 2020a). Teils gravierender verstärkt der Einsatz von Solarthermie, die überwiegend im Sommerhalbjahr Wärme produziert, dieses Ungleichgewicht zwischen Erzeugung und Verbrauch. Weniger Konkurrenzen bestehen dagegen zu Technologien wie Biomasse, Biogas oder Wasserstoff, welche sich aufgrund der höheren Reaktionsgeschwindigkeit der Anlagen (z. B. BHKW) auch zur Deckung der Spitzenlast eignen. Dennoch ist es bei größeren Wärmenetzen sinnvoll und notwendig, eine Vielzahl verschiedener Technologien einzubinden, auch wenn diese auf den ersten Blick in Konkurrenz zueinanderstehen. Dies zeigt der Dekarbonisierungsfahrplan für das Berliner Verbundwärmenetz (siehe z. B. Vattenfall Wärme Berlin AG 2023).

Eine saisonale Konkurrenz von erneuerbaren Wärme- und Abwärmequellen lässt sich in einem vollständig dekarbonisierten Fernwärmemix nicht vermeiden. Einige Wärmeerzeuger müssen daher entweder im Sommer ihren Betrieb einstellen oder sie können Wärme in einen Langzeitwärmespeicher bzw. saisonalen Wärmespeicher einspeisen, um die Nutzung eines Teils der Wärme in der Heizperiode zu ermöglichen. In der zukünftigen, netzgebundenen Wärmeversorgung spielen daher Langfrist- bzw. saisonale Wärmespeicher eine wichtige Rolle, da sie eine partielle, zeitliche Verschiebung von Wärmemengen ermöglichen (Sandrock et al. 2020a). Zugleich impliziert die Anschaffung eines Wärmespeichers zusätzliche Investitionskosten sowie Wärmeverluste, die mit der Speicherung einhergehen. Beides muss in der Gesamtsystembetrachtung berücksichtigt werden. Das Vorhandensein von saisonalen Wärmespeichern bzw. die Möglichkeit, solche Wärmespeicher zu errichten, kann als ein Erfolgsfaktor für die Einbindung von Geothermie in Wärmenetze betrachtet werden.

Es sollte zudem beachtet werden, dass für einen möglichen Betriebsausfall oder für jährlich anfallende Wartungsarbeiten Redundanzanlagen vorhanden sein sollten, welche die Wärmeerzeugung der Geothermieanlage kurzzeitig übernehmen können.

2.4 Struktur und Eigenschaften der Abnehmenden

Die an Wärmenetze angebotenen Abnehmenden sind in der Regel heterogen, von Wohngebäuden über Nichtwohngebäude hin zu industriellen Verbrauchern. Von den im Jahr 2023 von Kund*innen abgenommenen 115 Mrd. kWh Fernwärme entfielen 38 Mrd. kWh auf die Industrie, 51 Mrd. kWh auf private Haushalte einschließlich der Wohnungsgesellschaften und 25 Mrd. kWh auf sonstige Abnehmer*innen (BDEW 2024b).

2.4.1 Gebäude

Von entscheidender Bedeutung für die Effizienz der Nutzung der Wärmequellen sind die Temperaturanforderungen der Abnehmenden, die wiederum die Vorlauftemperatur der Wärmenetze bestimmen. Je geringer die Temperaturanforderung der Abnehmenden ist, umso geringer kann die Vorlauftemperatur des Wärmenetzes sein und umso effizienter können insbesondere Wärmequellen mit vergleichsweise geringer Temperatur genutzt werden. Die Temperaturanforderung der Abnehmenden hängt vor allem vom Baualter und dem energetischen Zustand der Gebäude ab, die sich meist bedingen. So weisen unsanierte Bestandsgebäude teils Temperaturanforderungen von über 75 °C auf, wohingegen energetisch sanierte Gebäude oder Neubauten mit 60 °C oder sogar geringeren Temperaturen zurechtkommen (Dunkelberg et al. 2020). Bei industriellen Abnehmenden beeinflussen die Art des Produktionsprozesses und die Umsetzung von Effizienzmaßnahmen im Prozess die Höhe der Wärmenachfrage und

damit auch die Wärmedichte, so dass hier andere Kenngrößen eine Rolle spielen als in reinen Wohngebieten (siehe Kapitel 2.4.2).

Da die Vorlauftemperatur eines Wärmenetzes nur dann gesenkt werden kann, wenn entweder alle Abnehmenden entsprechend geringe Vorlauftemperaturen aufweisen oder einzelne Abnehmende dezentral eine Temperaturerhöhung (etwa über Wärmepumpen) vornehmen, beeinflusst auch die Anzahl und der Grad der Unterschiedlichkeit der Abnehmenden, was etwa Eigentumsstruktur und Baualter anbelangt, die Nutzbarkeit einzelner Wärmequellen bzw. die zeitliche Komponente einer gegebenenfalls erforderlichen Temperaturabsenkung im Wärmenetz.

Entscheidend für die Frage, ob sich ein Wärmenetz finanziell lohnt oder nicht, ist die Wärmedichte oder Wärmeanschlussdichte. Bei der Wärmedichte gibt es unterschiedliche Kennzahlen, die den Wärmeverbrauch oder die Anschlussleistung eines Gebietes zur Fläche des Versorgungsgebietes, der Grundfläche oder der Trassenlänge ins Verhältnis setzen. So ergibt sich die Wärmedichte etwa aus der Wärmemenge, die pro Grundfläche eines Gebäudes oder auch pro Trassenmeter Wärmeleitung nachgefragt wird (Riechel und Koziol 2022). Je höher die Wärmedichte, umso eher lohnen sich die Investitionen in ein Wärmenetz, da sich die Investitionen letztlich durch den Verkauf der Wärme amortisieren. Somit ist diese Größe vor allem für die Erweiterung oder den Neubau von Wärmenetzen relevant, wenn neue Investitionen getätigt werden müssen. Die Wärmedichte wird beeinflusst durch den spezifischen Wärmeverbrauch der Gebäude in Kilowattstunden pro Quadratmeter Wohnfläche, die Größe und die Größenverhältnisse des Gebäudes sowie die Bebauungsdichte. Der spezifische Wärmeverbrauch ergibt sich neben der Geometrie und Lage des Gebäudes vor allem aus dem Baualter und dem energetischen Sanierungszustand eines Gebäudes (Cischinsky und Diefenbach 2018; Diefenbach et al. 2010).

Wärmenetze können tendenziell eher in dicht besiedelten Gebieten mit Mehrfamilienhäusern als in reinen Ein- und Zweifamilienhausgebieten wirtschaftlich betrieben werden, da die Wärmedichte hier in der Regel höher ist. Zugleich sind pauschale Aussagen zur Wirtschaftlichkeit von Wärmenetzen schwer zu treffen, da die Investitionskosten je Meter Trasse in hochverdichteten Räumen teils deutlich höher sind als in ländlichen Räumen (Dunkelberg et al. 2018).

Die Bundesregierung hat sich zum Ziel gesetzt, durch neue Förderprogramme die Sanierung von Bestandwohngebäuden und dadurch eine Reduktion des Gesamtenergieverbrauchs zu erreichen. Dies hätte zur Folge, dass sich die Wärmeabnahme entsprechend verringert, was in der Planung und beim Betrieb eines Wärmenetzes berücksichtigt werden sollte (mehr zur Entwicklung der Wärmeabnahme in Kapitel 2.6).

2.4.2 Industrielle- und gewerbliche Abnehmende

Bei industriellen Abnehmenden beeinflussen die Art des Produktionsprozesses und die Umsetzung von Effizienzmaßnahmen im Produktionsprozess die Höhe der Wärmenachfrage, so dass hier andere Kenngrößen eine Rolle spielen als in Wohngebieten. Die deutsche Industrie benötigte im Jahr 2021 1.861 PJ bzw. 517 TWh an Wärme, wovon über 90 Prozent für industrielle Prozesse verwendet wurde (AGEB 2022b). Diese Prozesse finden teilweise auf Temperaturniveaus statt, die Geothermie als Wärmequelle durchaus zu decken vermag.

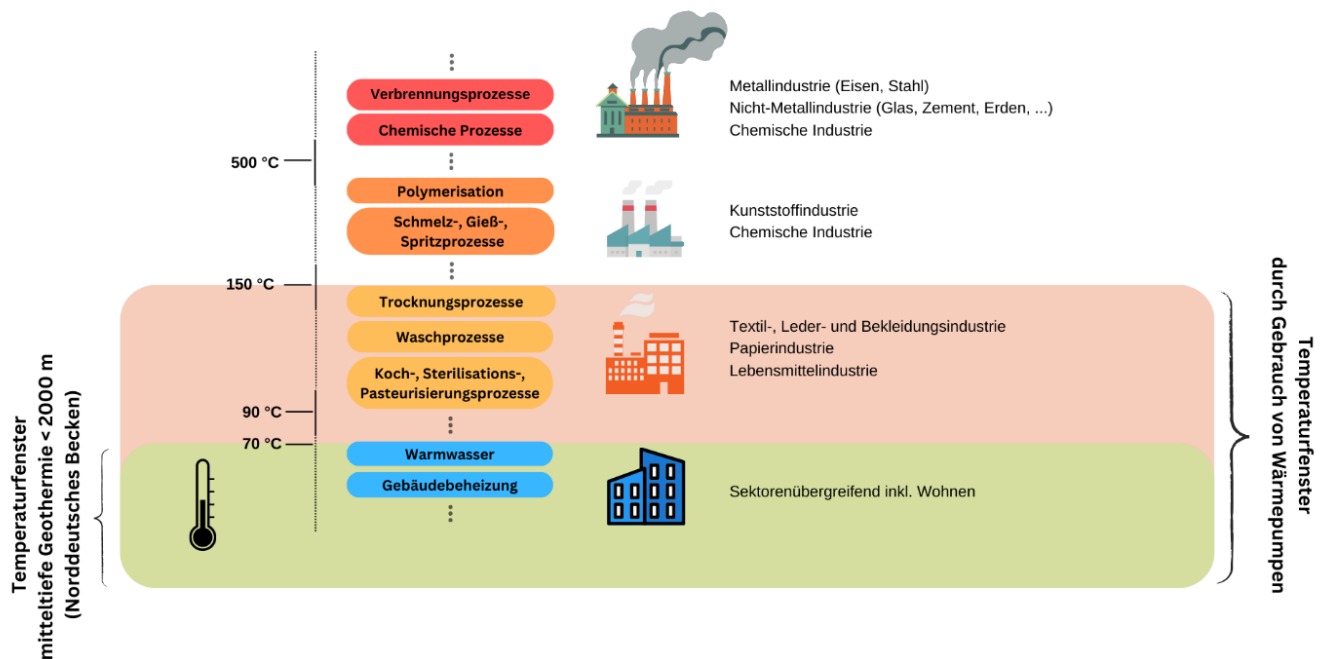


Abbildung 2: Branchen und Prozesse

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Dunkelberg et al. (2023)

Generell gilt: Umso höher die gewonnene Temperatur aus der Geothermieanlage, desto vielfältiger sind die Branchen und Prozesse, die ohne eine zusätzliche exergetische Aufwertung durch thermodynamische Wandler wie Wärmepumpen versorgt werden können. Zugleich erhöht deren Weiterentwicklung das Potenzial für die industrielle Nutzung von Erdwärme. Wärmepumpen für ein Temperaturniveau von bis zu 100 °C sind mittlerweile kommerziell erhältlich und selbst Temperaturen bis 150 °C können durch einige Prototypen erreicht werden (Arpagaus et al. 2018). Wie in Abbildung 2 verdeutlicht wird, bieten sich daher für die Nutzung geothermischer Wärme bis zu einem Horizont von 2.000 m vor allem Industrien an, die unter Temperaturen von unter 150 °C operieren. Bei tieferen Horizonten können auch Branchen mit Temperaturanforderungen von bis zu 180 °C direkt versorgt werden, was der maximalen Förder Temperatur der tiefen Geothermie entspricht (Bracke et al. 2022).

Tabelle 2 skizziert beispielhaft Wirtschaftszweige und relevante Prozesse, welche aufgrund ihrer Temperaturniveaus für eine Nutzung von geothermischer Wärme in Frage kommen. Hierzu gehört unter anderem die Lebensmittelindustrie, in der Koch-, Sterilisations- und Pasteurisierungsprozesse eine wichtige Rolle einnehmen, die in einem Temperaturbereich von unter 150 °C stattfinden. Denkbar sind auch Anwendungen in der Fischzucht oder beim Betrieb von Gewächshäusern und anderen landwirtschaftlichen Anlagen, wie Trocknungsanlagen (Frisch et al. 2010; LfU 2016; Lassacher et al. 2018). Dies zeigt das Beispiel Kirchweidach², wo vor der Reinjektion des Thermalwassers der Rücklauf des Wärmenetzes ein Gewächshaus versorgt. Weitere Prozesse, die ein für Geothermie geeignetes Temperaturniveau besitzen, sind Bleich-, Wasch- und Trocknungsprozesse. Diese finden sich vornehmlich

² <https://geoenergie-kirchweidach.de/kirchweidach/>

in der Textil-, Leder- und Bekleidungsindustrie sowie in der Papierindustrie und operieren bei Temperaturen von unter 100 °C. Dabei sind hier weder die beispielhaft erwähnten Prozesse noch die Nutzung von Erdwärme im Allgemeinen einem bestimmten Wirtschaftszweig vorbehalten. So finden sich zum Beispiel auch in der sonst für Hochtemperaturprozesse bekannten Chemieindustrie Destillationsprozesse, die ebenfalls Temperaturen unter 150 °C benötigen (Ortner et al. 2020). Auch in Gewerbebetrieben wie Waschanlagen, bei der Holz Trocknung in Sägewerken, bei der Galvanisierung von Metall oder in Trockenkammern von Lackieranlagen kann die Wärme aus Geothermie eingesetzt werden (Brueckner et al. 2016; Frisch et al. 2013).

Tabelle 2: Beispielhafte Wirtschaftszweige und Prozesse

Quelle: Vereinfacht auf Basis von Stark et al. (2020) und Dunkelberg et al. (2023)

Wirtschaftszweig	Prozesse unter 150 °C
Lebensmittelindustrie	Koch-, Sterilisations- und Pasteurisierungsprozesse
Landwirtschaft	Fischzucht, Trocknungsanlagen, Gewächshäuser
Chemische Industrie	Entlacken, Destillieren, Galvanisieren
Textil-, Leder-, Bekleidungs- und Papierindustrie	Bleich, Wasch- und Trocknungsprozesse

In Zukunft wird die die Bereitstellung von klimaneutral gewonnener Wärme für industrielle und gewerbliche Prozesse eine zentrale Bedeutung innehaben. In einer durch das Bundeswirtschaftsministerium in Auftrag gegebenen Studie zur energiewirtschaftlichen Entwicklung in Deutschland prognostiziert das Beratungsunternehmen Prognos für das Jahr 2050 einen Prozesswärmebedarf der Industrie von 1.410 PJ bzw. 154 PJ für den Raumwärme- und Warmwasserbereich. Im Vergleich zu den von Prognos für das Jahr 2020 angenommenen Werten ist dies ein Rückgang von lediglich 14 Prozent (Kemmler et al. 2020). Im Hinblick auf die verschiedenen Branchen beschreiben die Autor*innen zwar einen teilweisen Rückgang der Produktionsmengen beispielsweise im Fahrzeugbau, der Zement- und Glasindustrie als auch in der Papierindustrie. Diese Entwicklungen werden allerdings zum Teil kompensiert durch die angenommene Zunahme an Produktionsmengen in der Grundstoffchemie und der Metallindustrie, insbesondere aber auch in der Ernährungs- und Tabakbranche, wobei Letztere für die industriellen Nutzung von geothermischer Energie besonders geeignet wäre (Kemmler et al. 2020).

Aus Effizienzgründen ist bei der Nutzbarmachung von geothermischer Wärme – wenn technisch umsetzbar – eine Kaskadierung von Temperaturniveaus zu empfehlen. Dabei werden Anwendungen mit unterschiedlichen Temperaturniveaus hintereinandergeschaltet, um die Temperatur des Heizwassers stufenweise herabzusenken. Dies führt zu einer größtmöglichen Temperaturspreizung und einer maximalen technisch genutzten Auskühlung. Im Falle von sehr hohen Fördertemperaturen kann das nach einem industriellen Prozess genutzte und abgekühlte Heizwasser für weitere Prozesse auf niedrigerem Temperaturniveau genutzt werden

oder ein angeschlossenes Fernwärmenetz mit Restwärme für die Gebäudebeheizung versorgen. Im Falle von niedrigeren Fördertemperaturen wie im Bereich der mitteltiefen Geothermie ist allenfalls die gewerbliche Nutzung des Rücklaufs eines Wärmenetzes, beispielsweise in Schwimmbädern, der Fischzucht oder in Gewächshäusern, denkbar, wobei zu beachten ist, dass gewisse Temperaturen bei der Wiedereinspeisung in das geothermische Reservoir nicht unterschritten werden dürfen. Eine vielfältige Nutzung der Geothermie erhöht so im besten Fall die Rentabilität der Anlage (LfU 2016; Lassacher et al. 2018).

2.4.3 Einzelabnehmende

Neben bzw. ergänzend zu Wärmenetzen können auch Einzelabnehmende mit hohem Wärmeverbrauch (Ankerkunden) Geothermie abnehmen. Dieses Konzept ist im Bereich der Solarthermie bereits bekannt. Dabei handelt es sich meist um Wärmeabnehmende mit hohen Wärmebedarfen, vor allem aus Industrie und Gewerbe mit einem Bedarf an Prozesswärme. Allerdings stellte sich im Rahmen der Expert*innen-Interviews heraus, dass das hohe finanzielle Risiko der Erschließung und der hohe Bedarf an Know-how während des Betriebs, Projekte von Einzelabnehmern eher unwahrscheinlich machen. Vorstellbar sei das genannte Szenario eher für den Bereich von Erdsonden, da hier ein weitaus geringeres Erschließungsrisiko besteht.

Laut einem Interviewpartner empfehlen sich stattdessen gebündelte Abnahmestrukturen, die über ein Wärmenetz miteinander verbunden sind: Verfügen die individuellen Abnehmenden bereits über dezentrale Versorgungssysteme, können diese nach der Erschließung der Geothermie-Quelle zur Deckung der Spitzenlast oder als Redundanzanlagen genutzt werden, während die Geothermie fortan die Grundlast deckt. Des Weiteren können einzelne große Abnehmende eine Schlüsselrolle bei der Erweiterung oder beim Neubau von Wärmenetzen spielen, um eine ausreichende Wärmenachfrage und Wärmeabnahmedichte zu erhalten (siehe Kapitel 2.7.)

2.5 Anschlussbereitschaft von potenziellen Abnehmenden

Sofern Nachverdichtung, Erweiterung oder der Neubau eines Wärmenetzes angestrebt wird, muss bei den potenziellen Abnehmenden eine Anschlussbereitschaft vorhanden sein. Dies ist entscheidend für die Machbarkeit eines jeden netzgebundenen Wärmekonzeptes. Die Anschlussbereitschaft ergibt sich aus den Bedürfnissen der Abnehmenden, wird aber auch durch die Marktbedingungen und regulativen Rahmenbedingungen beeinflusst, siehe Kapitel 3. Wärmeabnehmende stellen dabei keine homogene Gruppe dar, sondern unterscheiden sich anhand ihrer Präferenzen und Bedürfnisse. Allerdings eint sie ein besonders hohes Interesse an der Wirtschaftlichkeit der gewählten Wärmeversorgung (Köhler et al. 2024; Dunkelberg et al. 2018). Dabei ist für die Endnutzer*innen vor allem der Wärmepreis bzw. der Blick auf die Heizkostenabrechnung das relevanteste Kriterium (Böhnisch et al. 2006; Schröder et al. 2018).

In der Wahrnehmung der Nutzer*innen können hohe Investitionskosten, gerade bei neuen, innovativen Technologien und Organisationsformen durchaus abschreckend wirken (Clausen et al. 2012; Dunkelberg et al. 2018) und auch ein Finanzierungshemmnis darstellen. Um diesem Hemmnis zu begegnen stellt der Bund Förderungen bereit, die die Investitionskosten reduzieren. Fördermittel werden für gebäudeindividuelle Versorgungsanlagen (inkl. Fernwärmeanschlüsse) über die Bundesförderung effiziente Gebäude (BEG) bereitgestellt, für Wärmenetze über die Bundesförderung effiziente Wärmenetze (BEW). Die BEW ist demnach für die

Wärmnetzbetreibern relevant, reduziert letztlich aber auch die Wärmegestehungskosten innerhalb des Wärmenetzes und damit den Wärmepreis, den die Kund*innen zahlen müssen. Im Zuge der BEW wird für Wärmepumpen, die in ein Wärmenetz eingebunden sind, zudem eine Betriebsförderung vergeben, sofern ein Transformationsplan für ein bestehendes Wärmenetz vorliegt. Somit tragen Förderungen deutlich zur Senkung der zu tätigen Investitionskosten und damit der Wärmegestehungskosten bei. Bisher war die Bereitschaft auf erneuerbare Wärmeversorgungsoptionen oder zu Wärmenetzen zu wechseln aufgrund günstiger Brennstoffkosten für fossile Energieträger zu gering, um die Ziele im Gebäudesektor zu erreichen. Eine höhere CO₂-Bepreisung wird diesem Hemmnis voraussichtlich über die bereits genannten Rahmenbedingungen hinaus noch weiter entgegenwirken (Agora Energiewende 2021; Expertenrat für Klimafragen 2023).

Weitere Entscheidungskriterien stellen die Preisstabilität bzw. Preisbindung, die Nachvollziehbarkeit von Kosten und die Versorgungssicherheit dar. Insgesamt kann sich die Auslagerung von Wartung und Instandhaltung der Wärmeerzeugung auf den Netzbetreiber positiv auf die Anschlussbereitschaft auswirken, wenn dies nicht den Wärmepreis erhöht. Im vermietenden Wohngebäudesegment haben ökonomische Aspekte eine besondere Bedeutung, da hier das Gebot der Kostenneutralität nach Wärmelieferverordnung gilt. Somit müssen Vermieter*innen im Falle eines Heizungswechsels nachweisen, dass für die Mietenden keine Kostennachteile zu der bisherigen Technologie entstehen. Dies führt wegen der geringen Gaspreise nach wie vor zu enormen Hemmnissen bei der Nachverdichtung und Erweiterung von Wärmenetzen. Diesem und weiteren bereits genannten Hemmnissen soll aktuell durch eine Überarbeitung der Wärmelieferverordnung (WärmeLV) begegnet werden. Misstrauen und Abhängigkeit von einem als Monopolist agierenden Fernwärmebetreiber können die Anschlussbereitschaft bei potenziellen Wärmeabnehmenden mindern (Böhnisch et al. 2006; Clausen et al. 2012). Auch diesem Hemmnis soll momentan mit einer Novelle der Verordnung über Allgemeine Bedingungen für die Versorgung mit Fernwärme (AVBFernwärmeV) begegnet werden, welche die Transparenz und den Verbraucherschutz in Sachen Fernwärmeversorgung steigern soll.³

Neben der Wirtschaftlichkeit spielten in der Vergangenheit auch Aspekte wie Klimaschutz und Versorgungssicherheit eine wichtige Rolle (Clausen et al. 2012). Eine Mehrzahlungsbereitschaft für erneuerbare Energien war in der Vergangenheit jedoch nur bedingt festzustellen: In einer Befragung zur Anschlussbereitschaft an ein innovatives Mehrleiternetz stellte sich heraus, dass zwar eine gewisse Mehrzahlungsbereitschaft für einmalige Investitionen besteht, jedoch nicht für konstant erhöhte Wärmepreise (Schröder et al. 2018).

Eine im Jahr 2024 erschienene und europaweit durchgeführte Studie des Fraunhofer Instituts für System- und Innovationsforschung (ISI) hat zudem ergeben, dass auch die gesellschaftlichen Rahmenbedingungen in welchen ein Wärmenetzprojekt vorangetrieben wird, entscheidend sind für die subjektive Wahrnehmung von Wärmenetzen. Hierzu zählt insbesondere das Vertrauen in Institutionen und politische Entscheidungsträger*innen, welches mit einer positiven Wahrnehmung von Wärmenetzen korreliert. Es zeigte sich auch, dass Nutzer*innen von Fernwärme diese positiver wahrnehmen als Nicht-Nutzer*innen (Billerbeck et al. 2024). Die Studie weist zudem daraufhin, dass die Anschlussbereitschaft an ein Wärmenetz auch von

³ <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/verordnung-zur-anderung-der-verordnung-uber-allgemeine-bedingun-gen-fur-die-versorgung-mit-fernwar-me.html>

den jeweiligen Beteiligungsstrukturen abhängt. So werden Wärmenetze positiver wahrgenommen, welche im Sinne des Gemeinwohls betrieben werden, etwa durch die Beteiligung der Kommune oder einer Genossenschaft bzw. Energiegemeinschaft (Billerbeck et al. 2024).

Im Zusammenhang mit der Anschlussbereitschaft ist auch die Verfügbarkeit von alternativen, gebäudeindividuellen Wärmeversorgungsstechnologien sowie (zukünftig) das Ergebnis der kommunalen Wärmeplanung in einer Kommune zu nennen, da diese den Entscheidungsraum der Gebäudeeigentümer*innen maßgeblich beeinflussen. Mit den Änderungen der Rahmenbedingungen im Gebäudeenergiegesetz (GEG) und im Gesetz für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze (WPG) soll so die Wahl der Wärmeversorgung stärker als bislang beeinflusst werden, dahingehend, dass klimaneutrale Lösungen zum Zuge kommen. Im Falle eines Heizungswechsels müssen die Gebäudeeigentümer*innen Wärmeversorgungsoptionen wählen, die den Anforderungen des GEG gerecht werden. Dies können Wärmepumpen oder andere gebäudeindividuelle Erneuerbare-Energien-Lösungen sein oder ein Fernwärmeanschluss, wobei die Verantwortung zur Dekarbonisierung in diesem Fall beim Wärmenetzbetreibenden liegt. Ob sich ein*e Abnehmer*in an ein Wärmenetz anschließen lässt, hängt dabei auch davon ab, ob und wie effizient gebäudeindividuelle Wärmepumpen genutzt werden können und ob eine Gasnetz-Infrastruktur vorliegt oder nicht. Mit dem WPG sind die Kommunen in Deutschland verpflichtet bis zum Jahr 2026, bzw. 2028 für kleinere Kommunen, kommunale Wärmepläne zu erstellen. Die Wärmeplanung umfasst eine Untersuchung der aktuellen Wärmeversorgungs-Infrastruktur, des Gebäudebestands und seines energetischen Zustands sowie der lokalen Potenziale an erneuerbaren Energien und Abwärme. Auf dieser Grundlage sind anhand von Szenario-Analysen gebietsbezogene Ziele für die zukünftige Wärmeversorgung und die energetische Gebäudesanierung zu entwickeln, was wiederum Planungssicherheit schafft.

2023 berichteten Kommunen, dass sie in den vergangenen Monaten deutlich häufiger Anfragen bekamen, ob perspektivisch ein Wärmenetz für die Wärmeversorgung in einem Gebiet zur Verfügung stehen wird (Dunkelberg und Weiß 2023). Dies ist auf die oben beschriebenen Aspekte wie die geplante Verschärfung der Rahmenbedingungen sowie die zwischenzeitlich höheren Gaspreise zurückzuführen. Grundsätzlich haben Kommunen aber auch die Möglichkeit, durch entsprechende Satzungen einen Anschluss- und Benutzungszwang zu erwirken, um dadurch dem Risiko einer geringen Anschlussdichte entgegenzuwirken (§ 16 EEWärmeG). Es ist abzuwarten, inwiefern das Instrument im Zuge der Wärmeplanung häufiger zum Einsatz kommen wird als bislang.

2.6 Entwicklung der Wärmeabnahme

Da die Wirtschaftlichkeit einer Geothermieanlage von der Abnahmemenge abhängt, ist deren zukünftige Entwicklung zentral für den langfristigen Erfolg einer Versorgungslösung. Durch die für die Klimaneutralität notwendige energetische Gebäudesanierung wird zwar angestrebt, dass der Verbrauch der angeschlossenen Endverbraucher*innen sinkt. Nach Einschätzung des BuVEG ist die Sanierungsquote im deutschen Gebäudebestand im Jahr 2023 jedoch weit aus geringer als für die Erreichung der Klimaziele notwendig (BuVEG 2024; Kopernikus-Projekt Ariadne 2021). Allerdings sollte erwähnt werden, dass Sanierungsraten zum jetzigen Zeitpunkt nicht vollumfassend und zuverlässig erhoben werden (Rein 2016; Klimaschutz- und Energieagentur Niedersachsen 2024). Zugleich sehen viele Wärmepläne bzw. Klimaschutzpläne und -konzepte eine Ausweitung von Wärmenetzen vor. Dies kann sowohl durch eine

Nachverdichtung in Gebieten mit Fernwärmeinfrastrukturen, eine Erweiterung der bestehenden Netze in angrenzende Gebiete oder durch den Neubau von Netzinfrastrukturen erfolgen (s. z. B. Riechel und Koziol 2022). In der Summe ist im Zuge einer Machbarkeitsstudie zur Integration von Geothermie in Wärmenetze zu prüfen, wie sich die Wärmenachfrage im vorgesehenen Versorgungsgebiet entwickeln wird. Denn Veränderungen in der Nachfrage haben Anpassungsbedarfe der Wärmeerzeugung und der Wärmegestehungskosten zur Folge. Auf der anderen Seite müssen Wärmenetzbetreiber ihren Erzeugerpark so gestalten, dass die Wärmenachfrage möglichst kostengünstig und klimaneutral gedeckt wird.

2.7 Besondere Herausforderungen neuer Wärmenetze

Bei Wärmenetzen, die neu errichtet werden, gelten im Prinzip die gleichen Eignungskriterien für die Einbindung der Geothermie wie bei den Bestandswärmenetzen. Allerdings müssen neue Wärmenetze gemäß WPG mindestens 65 Prozent Wärme aus Erneuerbaren Energien und Abwärme transportieren und haben damit höhere Anforderungen. Außerdem spielt die Anschlussbereitschaft (siehe Kapitel 2.5) eine noch größere Rolle, da sich die Investitionskosten in ein neues Wärmenetz nur dann amortisieren können, wenn eine möglichst hohe Anschlussdichte erreicht wird.

In Bestandsgebieten ist die Errichtung neuer Wärmenetze eine große Herausforderung. Dies gilt insbesondere dann, wenn eine heterogene Eigentumsstruktur vorliegt, sodass diverse Eigentümer*innen davon überzeugt werden müssen, sich an das Wärmenetz anzuschließen. Hemmnisse bestehen auch dadurch, dass das Alter der installierten Wärmeerzeuger eine große Bandbreite aufweist. Dies führt dazu, dass sich die Gebäude erst nach und nach, unter Umständen über einen langen Zeitraum hinweg, an das neue Wärmenetz anschließen. Daher empfehlen Dunkelberg et al. (2022) den Keimzellenansatz. Dieser sieht vor, Quartierswärmenetze rund um Keimzellen bzw. Ankerkunden zu initiieren, die einen hohen Wärmeverbrauch aufweisen und somit zur ökonomischen Machbarkeit eines neuen Wärmenetzes beitragen können. Geeignete Keimzellen sind etwa öffentliche Gebäude wie Schulen und Verwaltungsgebäude oder auch Gebäude von Wohnungsbaugesellschaften. Auch gewerbliche oder industrielle Abnehmer können Keimzellen sein (Dunkelberg et al. 2022). Das Vorhandensein solcher Keimzellen ist somit ein Erfolgsfaktor für die Realisierung neuer Wärmenetze. Für Wohnungsbaugesellschaften und -genossenschaften können neue Wärmenetze ebenfalls attraktiv sein, da teilweise ganze Blöcke durch ihre Gebäude dominiert werden und vergleichbare Baualter und Heizungsalter vorliegen. Diese Homogenität bezüglich Eigentumsstruktur und Heizungsalter sind Erfolgsfaktoren für die Realisierung neuer Wärmenetze.

Das Vorhandensein einer Gasinfrastruktur kann als Hemmnis für neue Wärmenetze gelten, da Gebäudeeigentümer*innen hier eine (für lange Zeit) kostengünstige Alternative hatten. Inzwischen ist zu erwarten, dass dieses Hemmnis aufgrund der zu erwartenden hohen Preise durch den CO₂-Preis sowie die Nutzungspflicht Erneuerbarer Energien bei neuen Heizungen an Relevanz verlieren wird, da die Abnehmenden zunehmend Alternativen zum Gas nachfragen (müssen).

In Neubaugebieten ist die Implementierung von neuen Wärmenetzen einfacher, da erstens, alle Gebäude mehr oder weniger zum gleichen Zeitpunkt eine neue Heizung benötigen und zweitens, Kommunen mehr Möglichkeiten der Steuerung haben. So besteht etwa die Möglichkeit über städtebauliche Verträge den Anschluss an ein Wärmenetz festzulegen (vgl. Dunkelberg et al. 2021).

Bei neuen Wärmenetzen besteht die Möglichkeit, sie von vornherein so zu planen, dass eine geringe Vorlauftemperatur im Wärmenetz erreicht wird. Neue Wärmenetze sollten mindestens Niedertemperaturwärmenetze sein, um eine effiziente Einbindung der Erneuerbaren und von Abwärme zu erreichen. Dies adressiert auch die Bundesförderung Effiziente Wärmenetze (BEW), die für die Realisierung von Wärmenetzen und die Dekarbonisierung von Bestandswärmenetzen von großer Relevanz ist. Darüber hinaus gibt es Kalte Wärmenetze, die dadurch gekennzeichnet sind, dass eine Temperaturerhöhung auf Heizniveau erst dezentral an den Gebäuden über den Einsatz von Wärmepumpen erfolgt.

Eine weitere beachtliche Hürde beim Aus- oder Neubau von Wärmenetzen für die Einbindung der (mitteltiefen) Geothermie ist die zeitliche Dimension. Einerseits sollte die erfolgreiche Ermittlung der Fündigkeit abgeschlossen und eine ausreichende Wärmenachfrage sichergestellt sein, bevor mit der Errichtung eines neuen Wärmenetzes begonnen wird. Gleichzeitig dauert die Planung und Umsetzung eines Netzes lange, so dass sich die Erschließung verzögert, wenn nicht parallel zur Prüfung der Quelle schon mit der Netzplanung begonnen wird. Diese Kombination aus Risikofaktoren kann ein Hemmnis für den Ausbau der mitteltiefen Geothermie in Regionen darstellen, in denen nicht bereits die nötige Wärmenetzinfrastruktur vorliegt. Das Beispiel der Gemeinde Grünwald in Bayern zeigt jedoch, dass der Wärmenetz aus- bzw. -neubau und die Erschließung parallel erfolgen kann. Zudem kann es helfen, wenn, wie am Projektstandort Graben-Neudorf⁴, Investitionssicherheit besteht, etwa durch eine mögliche Stromerzeugung (Anmerkung aus Interview).

3 Politisch-gesellschaftliche Faktoren

Das Potenzial für den Aufbau weiterer Geothermieanlagen resultiert politisch und gesellschaftlich einerseits aus dem politisch gesetzten rechtlichen Rahmen, auf EU-Ebene sowie auf der Bundes- und Landesebene (Kapitel 3.1 und 3.2). Andererseits ist die Bereitschaft von Akteur*innen, diesen Rahmen zu nutzen bzw. ein Geothermieprojekt vor Ort zu akzeptieren, relevant (Kapitel 3.3).

Viele der Faktoren unterliegen im Zeitablauf Veränderungen, die den Prozess zum Aufbau einer Geothermieanlage erschweren können, zumal der Zeitbedarf mehrere Jahre umfasst, in denen sich auf der politischen und der gesellschaftlichen Ebene Vor- oder Nachteile für ein Projekt ergeben können.

3.1 Politisch-rechtlicher Rahmen

Die Politik (EU, Bund, Bundesland) und die durch sie verabschiedeten Gesetze und untergesetzlichen Bestimmungen können entscheidend für ein Geothermieprojekt sein, bezogen auf die grundsätzliche Möglichkeit zum Aufbau von Anlagen, sowie für deren Wirtschaftlichkeit. Der politische Rahmen kann dabei günstig bis ungünstig sein, aber er ist veränderbar, etwa durch Lobbyarbeit.

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) vernachlässigte aufgrund seiner Ausrichtung auf die Stromerzeugung den Wärmesektor beim Klimaschutz in Deutschland, prioritär waren der Ausbau von Wind- und Solarenergie, zu Beginn auch der Bioenergie. Erst das im Jahr 2021

⁴ <https://www.deutsche-erdwaerme.de/graben-neudorf/>

vom Bundeskabinett verabschiedete Bundes-Klimaschutzgesetz orientierte auf eine Minderung der CO₂-Emissionen im Gebäudesektor bis 2030 um mehr als zwei Drittel gegenüber 1990. Zentrale Treiber der Geothermie sind darüber hinaus vor allem das aus 2020 stammende Gebäudeenergiegesetz (GEG) und seine bis Ende 2023 beschlossenen Novellen; das GEG führte das Energieeinspargesetz (EnEG), die Energieeinsparverordnung (EnEV) und das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) zusammen. Ab 2024 gilt, dass spätestens ab Juli 2028 jede neu eingebaute Heizung zu mindestens 65 Prozent mit erneuerbaren Energien betrieben werden muss. Darüber hinaus wurde das Wärmeplanungsgesetz (WPG) Ende 2023 verabschiedet, das ebenfalls ab Anfang 2024 gilt. Das WPG verpflichtet die Kommunen zu einer sogenannten „kommunalen Wärmeplanung (KWP)“. Ziel der KWP ist es, für die Kommune zu bestimmen, welche Gebiete über ein Wärmenetz erschlossen werden sollen. Die Wärme soll dabei bis 2045 treibhausgasneutral sein. Auch die Betreiber*innen von bestehenden Wärmenetzen werden im WPG verpflichtet, sogenannte Transformationspläne zu entwickeln, um dieses übergeordnete Ziel zu erreichen. Da die Geothermie einen Teil dieser Wärme bereitstellen kann, war und ist dies ein Anstoß für den Ausbau dieser Technologie.

3.1.1 Rechtliche Möglichkeit von Geothermieprojekten

Ermöglicht werden mitteltiefe Geothermieprojekte vor allem durch das Bergrecht (siehe auch 3.2.1), ein altes Recht, welches grundsätzlich die Nutzung des tieferen Untergrundes durch Unternehmen erlaubt. Begrenzt werden die Möglichkeiten zur Einrichtung einer Geothermieanlage insbesondere durch das Naturschutzrecht, einschließlich Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz (UVPG), sowie das Planungsrecht (Kapitel 3.2.3), unter Umständen durch die damit vielfach verbundene Bürgerbeteiligung (Mbah und Krohn 2021; Wesche et al. 2017).

Das politische Risiko einer Verhinderung von Geothermieranlagen durch den Rechtsrahmen ist geringer als etwa für die Windkraft, da das Bergrecht den Rahmen bildet und die vergleichsweise geringen Umweltwirkungen von Geothermieranlagen eine Verhinderung von Projekten durch Immissionsschutzgesetz und Naturschutzgesetz eher selten sein werden: zum einen, weil der Standort der Anlage bei gegebenem untertägigen Gewinnungsfeld meist flexibel gewählt werden kann, abhängig von den Kosten der sogenannten „abgelenkten Bohrungen“, mit denen Schutzgebiete umgangen werden können. Zum anderen, weil ein Standort in der Nähe von Abnehmenden, also in Siedlungsgebieten, notwendig ist, wodurch Schutzgebiete seltener berührt werden.

3.1.2 Politisches Risiko standortoffener Endlagersuche für radioaktive Abfälle

Das Standortauswahlgesetz (StandAG) vom 5. Mai 2017 regelt das mehrstufige Verfahren für die Suche nach einem Endlager für langlebige wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle. Dieses Gesetz kann in Regionen mit geologischem Potenzial für ein Endlager zu einem Quasi-Verbot von mitteltiefer und tiefer Geothermie führen bzw. zu einer unter Umständen langwierigen Klärung, ob ein geothermisches Projekt möglich ist (BMUV Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz o.J.).

Die Relevanz dieses Risiko-Faktors ist jedoch nur in Norddeutschland hoch, nicht in den geothermischen Potenzialgebieten des Molasse-Beckens und der Oberrheinebene, in denen mehrere Tausend Meter mächtige Sedimente über dem Grundgebirge liegen. Sedimentschichten sind aufgrund ihrer Wasserführung nicht für die Endlagerung geeignet, auch die in ihnen vorkommenden für die Endlagerung in Frage kommenden Tonschichten wurden für diese beiden Gebiete praktisch ausgeschlossen (BGR 2007).

In den norddeutschen geothermischen Potenzialgebieten kann das Vorhandensein von Salzstöcken mit der Nutzung als Endlager für langlebige wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle konkurrieren. Endlager sind unter Umständen an die Nutzung von in Norddeutschland vorhandenen Salzstöcken gebunden, und das Potenzial der Geothermie ist in der Nähe von Salzstöcken höher, da durch die Hebung der Salzstöcke geologische Schichten mit höheren Temperaturen aufsteigen.

3.1.3 Finanzielle Entschädigung bei Schäden am Eigentum

Wichtig für die Akzeptanz eines Geothermieprojektes bei Unternehmen und Bürger*innen (siehe 3.3) ist die rechtliche und finanzielle Sicherheit bezogen auf durch die Bohrung oder den Betrieb etwaig ausgelöste Infrastruktur- oder Gebäudeschäden (Mbah und Krohn 2021). Grundsätzlich haften der Bergbauunternehmer und der Inhaber der Bergbauberechtigung gesamtschuldnerisch und verschuldensunabhängig für Sach- und Personenschäden, die durch einen Bergbaubetrieb verursacht werden (§§ 114-117 Bundesberggesetz, BBergG) (auch zum Folgenden: Delzig 2024). Im Einwirkungsbereich eines Bergbaubetriebs wird im Schadensfall vermutet, dass die Schäden durch den Bergbaubetrieb verursacht worden sind. Diese „Bergschadensvermutung“ (§ 120 BBergG) wurde 2016 u. a. auf den Bohrlochbergbau sowie auf Hebungen und Erschütterungen ausgeweitet und damit auf Geothermiebohrungen und geothermische Anlagen (Guckelberger 2017). Die finanzielle Entschädigung im Schadensfall erfolgt über Versicherungen, die in der Regel von den Bergbehörden verlangt werden.

Für den Insolvenzfall ist das Ausfallrisiko für die Geschädigten zum einen durch die gesamtschuldnerische Haftung von Bergbauunternehmer und Inhaber der Bergbauberechtigung einschließlich Rechtnachfolgern reduziert. Zum anderen könnte die Ersatzpflicht der Bergschadensausfallkasse greifen. Alternativ zum Bergschadensrecht könnten weitere Anspruchsgrundlagen bestehen, etwa eine deliktische Haftung gemäß § 823 Bürgerliches Gesetzbuch (BGB). Die Darlegungs- und Beweislast liegt hier aber bei den Geschädigten. Zudem bestehen die Schadensersatzpflicht nur bei schuldhaften und rechtswidrigen Schädigungen von Personen oder Sachen.

Es besteht damit ein Zusammenhang zwischen den haftungsrechtlichen Regelungen und dem Wissen in der lokalen Bevölkerung darüber sowie der sozialen projektbezogenen Akzeptanz. Auch vor dem Hintergrund einer möglichen Haftung für Schäden am Eigentum spielt die Vertrauenswürdigkeit der Projektakteur*innen eine Rolle. Die Prämien für abzuschließende Versicherungen sind bei der Wirtschaftlichkeit zu berücksichtigen. Nicht versicherbare potenzielle Schäden stellen ein Risiko für den Erfolg von Projekten dar.

3.1.4 Subventionen sowie energiewirtschaftliche und umweltökonomische Instrumente

Das Potenzial für geothermische Projekte ist abhängig von der potenziellen Wirtschaftlichkeit eines Projektes. Erfolgsfaktoren sind daher sowohl finanzielle Unterstützungen des Staates, etwa in Form von Zuschüssen, zinsgünstigen Darlehen, Bürgschaften (Sandrock et al. 2020b) oder steuerlichen Vergünstigungen, durch staatliche Rahmenseetzungen auf der Absatzseite (energiewirtschaftliche Instrumente wie Einspeisetarife, Auktionen oder Quoten). Weiterhin können Instrumente zur Internalisierung externer Effekte, etwa negativer Umweltwirkungen durch Schadstoffemissionen (umweltökonomische Instrumente), ggf. auch durch Informationsbereitstellung zur Beseitigung von Informationsmängeln, die Geothermie positiv beeinflussen. Mit Blick auf die finanzielle Unterstützung sind in der Geothermie-Branche Bürgschaften oder bedingt rückzahlbare Kredite der öffentlichen Hand zur Absicherung des Fündigkeitsrisikos

und die Zuschüsse im Rahmen der „Bundesförderung für effiziente Wärmenetze BEW“ des „Bundesamts für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA)“ von besonderer Bedeutung. Zu nennen ist darüber hinaus die indirekt fördernde Wirkung der CO₂-Bepreisung, die die Wettbewerbsposition für Erneuerbare-Energien-Anlagen im Vergleich etwa zu erdgas-basierten Technologien verbessert. Geothermie kann auch durch wissens- und damit bewusstseinsbildende Instrumente gefördert werden (Mbah und Krohn 2021; Baumgärtner 2010), da die Möglichkeiten der Geothermie abseits der oberflächennahen Techniken in der Öffentlichkeit und in politischen Gremien eher unzureichend bekannt sind. Diese informatorischen Instrumente dienen dazu, Informationsmängel – hier u. a. Qualitätsunkennntnis und Unsicherheit – zu verringern (Fritsch 2018).

Die Bereitstellung finanzieller Unterstützungsmaßnahmen hängt regelmäßig von der Bereitschaft einzelner Akteur*innen (v. a. bei Bürgschaften) und dem Vorhandensein ausreichender Haushaltsmittel ab. Hier kommt es mithin regelmäßig zu Schwankungen in der Verfügbarkeit, sowohl zeitlich als auch mit Blick auf den Standort (v. a. bei Landesprogrammen). Bei den energiewirtschaftlichen und umweltökonomischen Instrumenten trifft dies auf die konkrete Ausgestaltung bzw. Höhe der Anreize ebenfalls zu. Systemwechsel sind dagegen wegen der vorhandenen Pfadabhängigkeiten und Lock-in-Effekte seltener.

Staatliche Fördermaßnahmen wie Subventionen sowie energiewirtschaftliche und umweltökonomische Instrumente sind insbesondere für die Markteinführung und -durchdringung der Geothermie unter Umständen entscheidend und damit ein Erfolgsfaktor, analog zu anderen innovativen Technologien, die sich gegen die Konkurrenz der vorhandenen Technologien durchsetzen mussten und müssen. Die Maßnahmen helfen, Lock-in-Effekte zu überwinden, fördern die Kostendegression neuer Technologien und helfen, Marktversagen zu überwinden, etwa bei der Absicherung des Fündigkeitsrisikos (Bracke et al. 2022).

3.2 Planungs- und Genehmigungsrisiken

Die Planung und Umsetzung eines Geothermieprojektes berührt bis zur Fertigstellung der Anlagen inklusive der Einbindung in Wärmenetze verschiedene Rechtsgebiete, die aufgrund der möglichen Vielzahl von berührten Schutzgütern ein Risiko für die Planung einer Anlage darstellen (Sandrock et al. 2020b). Die Rechtsgebiete ergeben sich aus den Genehmigungsstufen des Bergrechts (Erlaubnisfeld, Betriebsplan/Rahmenbetriebsplan), des Gewerbe- und Energierechts, des Bauplanungsrechts und anderer relevanter Rechtsvorschriften. Die Rechtsgebiete werden in dieser Reihenfolge betrachtet, weil dies ungefähr der zeitlichen Abfolge eines Geothermieprojektes entspricht.

Die Vielzahl von berührten Rechtsgebieten führt zu einem vergleichsweise aufwändigen Genehmigungsverfahren, eines der Gründe für den hohen Zeitbedarf von Geothermieprojekten von der Planung bis zur Fertigstellung. Der Bundesverband Geothermie e. V. (BVG) veröffentlichte daher im Juni 2023 ein Papier mit Vorschlägen für Anpassungen im Genehmigungsrecht (BVG 2023). Ende Juni 2024 wurde vom Bundeswirtschaftsministerium (BMWK) ein neues Gesetz für die Energiewirtschaft im Entwurf vorgestellt, das „Gesetz zur Beschleunigung der Genehmigung von Geothermieranlagen, Wärmepumpen sowie Wärmespeichern“ (GeoWG). Ziel des Entwurfs ist der Abbau von „genehmigungsrechtliche(n) Hemmnisse(n) bei der Erschließung der Geothermie sowie dem Ausbau von Wärmepumpen und Wärmespeichern“. Geändert werden sollen in diesem Artikelgesetz das Bundesnaturschutzgesetz, das Bundesberggesetz, das Wasserhaushaltsgesetz und die Verwaltungsgerichtsordnung. Zielrichtung ist dabei, die Genehmigungsphase zu beschleunigen und zu vereinfachen (unter anderem durch

Digitalisierung), relevante rechtliche Sachverhalte zu konkretisieren, Einspruchsmöglichkeiten einzuschränken und den Gerichtsweg zu verkürzen (BMWK 2024).

3.2.1 Bergrecht

Geothermianlagen sind im Vergleich zu anderen Anlagen erneuerbarer Energien wesentlich komplexer und damit die Genehmigungsverfahren aufwändiger. Daher erfolgt insbesondere für tiefere Bohrungen ein Genehmigungsverfahren nach Bergrecht (BBergG), das eine Bündelung verschiedener Rechtsgebiete, unter Umständen im Rahmen eines Planfeststellungsverfahrens nach Verwaltungsverfahrensgesetz (VVerfG), vornimmt, inklusive der dort in besonderen Fällen vorgesehenen Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP §§ 15 bis 27 sowie 31).

Bergrecht ist in den meisten Bundesländern anzuwenden, wenn die Gewinnung und die Nutzung der Erdwärme nicht auf ein und demselben Grundstück stattfindet und nicht im direkten Zusammenhang mit der baulichen Nutzung steht, z. B. der Beheizung eines Gebäudes oder sonstige städtebauliche Nutzung (§ 4 Abs. 2 BBergG) (HLNUG 2019).

Das bergrechtliche Genehmigungsverfahren berücksichtigt Anforderungen wie Betriebssicherheit, Arbeitsschutz, Schutz der Oberfläche, Vermeidung gemeinschädlicher Einwirkungen (Immissionsschutz) und der Schutz der Lagerstätte. Berücksichtigt werden auch Planungen zur ordnungsgemäßen Wiedernutzbarmachung der von der Rohstoffgewinnung in Anspruch genommenen Fläche sowie der Belange des Naturschutzes und der Landschaftspflege, sowie des Denkmalschutzes. Teil der Bündelungswirkung sind auch Genehmigungen nach Wasserrecht und, wenn notwendig, die Rodungserlaubnis nach Waldrecht. Dabei sind die Bergämter gleichzeitig Überwachungsbehörde (Erdwärme Chiemgau GmbH o.J.).

Nützlich für die Umsetzung von Geothermieprojekten aus Sicht der Projektierenden ist in diesem Zusammenhang, dass die Nutzung der Erdwärme ein sogenannter „bergfreier“ Bodenschatz und somit dem Grundeigentum entzogen ist, so dass keine Verhandlungen mit Grundeigentümern stattfinden müssen, mit Ausnahme des Standortes der Anlage (HLNUG 2019).

Für Geothermievorhaben mit Bohrungen, die zur Gewinnung und Aufsuchung von Bodenschätzen tiefer als 1.000 Meter niedergebracht werden, gilt eine zwingende Umweltverträglichkeitsvorprüfung (UVP-Vorprüfung), deren Ergebnisse zu dokumentieren und zu veröffentlichen sind. Der Gesetzesgeber gibt dem bisherigen Bergrechtsverfahren somit einen Rechtsrahmen zur Folgenbeurteilung, ob das Vorhaben erhebliche nachteilige Auswirkungen auf die Oberfläche haben kann, gemäß den Kriterien nach Anlage 2 UVPG. Sind keine nachteiligen Auswirkungen zu erwarten, gilt weiterhin das Hauptbetriebsplanverfahren (s. o.). Anderenfalls bestünde eine UVP-Pflicht mit entsprechendem Rahmenbetriebsplan (§ 52 Abs. 2a BBergG) zur Zulassung über ein Planfeststellungsverfahren (§§ 57a und 57b BBergG), mit den entsprechenden Auswirkungen auf die Verfahrenslänge.

Im Genehmigungsverfahren zu berücksichtigen ist darüber hinaus der ehemalige und aktuelle Rohstoffabbau mit eventuell vorhandenen Schächten, Stollen des Bergbaus, Abbaugebieten im Tagebau und damit zusammenhängender möglicher Grundwasserabsenkung.

Ist eine geothermische Nutzung des Untergrunds geplant, erfolgt zunächst auf Antrag eines Unternehmens die Erteilung der Aufsuchungserlaubnis für ein bestimmtes Gebiet, das sogenannte Erlaubnisfeld. Anschließend erfolgt das Betriebsplanverfahren nach BBergG, welches alle Arbeiten, von der Einrichtung eines Bohrplatzes bis zur fertigen Geothermianlage, regelt. Der Betriebsplan muss vom Unternehmen bei der Bergbehörde oder den Regierungspräsidien

als Überwachungsbehörde eingereicht werden. Die Zulassung des Betriebsplans nach Bergrecht bündelt, wie oben erwähnt, alle weiteren notwendigen Genehmigungen in Abstimmung mit den zuständigen Fachbehörden.

Die bergrechtliche Genehmigung einer geothermischen Anlage ist zentraler Erfolgsfaktor für den Ausbau der Geothermie, weil es sicherstellt, dass die Nutzung der geothermischen Ressourcen umweltverträglich und rechtlich zulässig ist. Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens ist bei Bohrteufen von über 1.000 Metern eine Beteiligung der Bürger*innen vorgesehen, was akzeptanzfördernd sein kann; die Beteiligung von Bürger*innen kann aber auch den Prozess verlangsamen und damit zu Kosten führen. Die Bündelung der verschiedenen Rechtsgebiete im Genehmigungsverfahren führt in der Regel zu einem deutlich geringeren zeitlichen und damit auch finanziellen Aufwand im Vergleich zur getrennten Genehmigung einer Anlagenplanung in mehreren Rechtsgebieten. Trotz allem sind die Genehmigungsverfahren zeitlich vielfach so aufwändig, dass es Mitte 2024 gesetzgeberische Bestrebungen zur Beschleunigung der mit geothermischen Anlagen verbundenen Genehmigungsverfahren gab (s.o.).

3.2.2 Gewerberecht und Energierecht

Geothermische Anlagen bedürfen, wenn sie zur Erzeugung von Wärme dienen, grundsätzlich einer gewerberechtlichen Genehmigung nach der Gewerbeordnung (GewO). Weitere Anforderungen ergeben sich aus der Regulierung des Fernwärmesektors und, soweit in den Anlagen Strom erzeugt wird, aus dem Energiewirtschaftsgesetz (EnWG). Bei hydrothermalen Geothermieprojekten wird im Allgemeinen der Anlagenbetreiber identisch sein mit dem Betreiber des Nah- bzw. Fernwärmenetzes oder einen langfristigen Abnahmevertrag abschließen. Zu beachten sind in diesem Kontext derzeit insbesondere die Verordnung über allgemeine Bedingungen für die Versorgung mit Fernwärme (AVBFernwärmeV) sowie die Fernwärme- oder Fernkälte-Verbrauchserfassungs- und -Abrechnungsverordnung (FFVAV). Änderungen im Rechtsrahmen für den Betrieb von Wärmenetzen haben damit unmittelbar Auswirkungen auch auf die Wärme liefernden Geothermieanlagen.

3.2.3 Baurecht

Das Planungsrecht nach Baugesetzbuch (BauGB) steht außerhalb des Berggesetzes und ist damit ein weiterer wichtiger Faktor für die Nutzung geothermischer Potenziale. Sollen Geothermieanlagen errichtet werden, so muss das Planungsrecht dies für das zu nutzende Grundstück erlauben: Im Flächennutzungsplan sowie im Bebauungsplan der Standortgemeinde muss eine gewerbliche Nutzung möglich sein, unter Umständen durch eine Änderung der vorgesehenen Flächennutzung in der Bauleitplanung. Auch darf das Grundstück nicht in einer Hochwasser- oder Lawinenzone liegen.

Steht die für Bau- wie Planungsrecht zuständige Gemeinde der Errichtung einer Geothermieanlage entgegen, so kann sie eine Aufhebung des Verwaltungsaktes der bergrechtlichen Genehmigungen im Rahmen einer gemeindlichen Anfechtungsklage begehren (§ 42 I 1. Alt. VwGO) und eine Gegenplanung durchführen.

Wird eine Geothermieanlage im Außenbereich einer Siedlung geplant, so gibt es bislang keine spezielle Privilegierung, wie dies beispielsweise für Windkraftanlagen der Fall ist, aber es liegt eine Privilegierung als Elektrizitäts- und/oder Wärmeversorgungsanlage bzw. ortsgebundener gewerblicher Betrieb nach Wesen und Gegenstand vor (§ 35 Abs. 1 Nr. 3 BauGB; zu notwendigen Änderungen im BauGB siehe BVG Bundesverband Geothermie e. V. 2023). Auch aus

der erforderlichen Nähe zu Wärmeabnehmenden kann eine Ortsgebundenheit des Anlagenstandortes abgeleitet werden.

Sind für den Bau einer Geothermieanlage Änderungen im Planungsrecht erforderlich, etwa die Änderung eines Wohngebietes in ein Gewerbegebiet, so kann sich das auch auf die übergeordnete regionalplanerische Ebene auswirken, weil der Regionalplan entsprechend geändert werden muss. In einem solchen Fall wird ein Zielabweichungsverfahren nach regionaler Raumordnung erforderlich: Gegenstand der Prüfung in einem solchen Verfahren sind die Klimafunktion, der Grundwasserstand, der naturnahe Zustand von Gewässern, die Vegetation und Fauna, insbesondere der Bestand bedrohter Tier- und Pflanzenarten, sowie, ob markante Reliefformen und charakteristische Landschaftsbilder beeinträchtigt werden.

Vorgesehen ist im Planungsrecht wie im Zielabweichungsverfahren nach regionaler Raumordnung eine Beteiligung der Öffentlichkeit, die Akzeptanz, aber auch Widerstand mit entsprechenden Verzögerungen im Genehmigungsprozess hervorrufen kann.

Die geringe Störfunktion von Geothermieanlagen sowie die ortsnahe Anbindung an Nah- oder Fernwärmenetze führt vielfach zu einem Standort im Innenbereich einer Siedlung und unterliegt damit vielfach nur der Baugenehmigungspflicht, welche im Rahmen des Betriebsplanverfahrens erteilt wird. Ist der Standort der Anlage nicht im Innenbereich einer Siedlung, so ist eine Baugenehmigung in Gewerbegebieten unschwer zu erreichen, ansonsten muss unter Umständen eine Änderung im Planungsrecht erfolgen, d. h. der Flächennutzungsplan bzw. der Bebauungsplan muss durch die Gemeinde entsprechend der angestrebten Nutzung angepasst werden.

Das Baurecht selbst ist damit weniger relevant als Erfolgsfaktor für die Ermöglichung einer geothermischen Anlage, relevant ist hier insbesondere, ob der Gemeinde- bzw. Stadtrat notwendigen Änderungen im Flächennutzungsplan bzw. Bebauungsplan zustimmt. Es ist somit abhängig vom politischen Willen der Kommune. Fehlt der politische Wille, so kann ein geplantes Projekt scheitern bzw. es kann zu Verzögerungen kommen.

3.2.4 Weitere relevante Rechtsvorschriften im Planungs- und Genehmigungsrecht

In seltenen Fällen, etwa bei geplanter Nutzung grenzüberschreitender Grundwasservorkommen, kann die Planung einer Geothermieanlage zur Anwendung weiterer Rechtsvorschriften führen. Dies kann entweder den Abschluss bilateraler Staatsverträge nach sich ziehen, wie in einer Quelle aus Österreich erwähnt wird (Krasznai 2022), oder es ist eine Genehmigung aus dem Nachbarland einzuholen, wie im Fall eines im Grenzgebiet von Deutschland und der Schweiz geplanten Geothermieprojekts des „Schweizer Wärmeverbund Riehen“. Notwendig war in diesem Fall die Erlaubnis des Landesamtes für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) im Regierungspräsidium Freiburg (RP) zur Aufsuchung von Erdwärme in Grenzach-Wyhlen (Kreis Lörrach) (Regierungspräsidium Freiburg 2021).

Zukünftige Änderungen des Gesetzesrahmens können diesen zentralen Faktor positiv oder negativ beeinflussen und damit den Ausbau der Geothermie bzw. den Aufbau von Geothermieprojekten.

3.3 Akzeptanz und Kooperation von Akteur*innen

3.3.1 Akzeptanzdreieck

Akzeptanz kann in drei Ebenen unterteilt werden: die soziopolitische Akzeptanz, die Marktakzeptanz und die lokale Akzeptanz (Wüstenhagen et al. 2007). Die soziopolitische Ebene umfasst die grundsätzliche Akzeptanz bzw. allgemeine Zustimmung von Politik und Gesellschaft zum Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland. Die Marktebene betrifft die Akzeptanz von Kraftwerksprojekten erneuerbarer Energien durch Investor*innen, involvierte Unternehmen sowie Konsument*innen von Strom, Wärme und Kälte aus erneuerbaren Energien (siehe Kapitel 2.5). Die lokale Akzeptanz bezieht sich auf die Zustimmung bzw. Ablehnung von Erneuerbare-Energien-Kraftwerksprojekten bezogen auf Planung und Errichtung einer Anlage im Umfeld des Wohnortes durch lokale Anspruchsgruppen, insbesondere Anwohner*innen sowie lokale Entscheidungsträger*innen (Bauer et al. 2014b).

Die soziopolitische Akzeptanz bezieht sich auf die allgemeine Akzeptanz der erneuerbaren Energien in Deutschland, d. h. die gesellschaftliche Zustimmung zum Ausbau erneuerbarer Energien im Rahmen der Energiewende. Eine repräsentative Akzeptanzumfrage im Jahr 2023 der Agentur für Erneuerbare Energien (AEE), die vom Meinungsforschungsinstitut YouGov durchgeführt wurde, zeigte eine Zustimmung von 81 Prozent der deutschen Bevölkerung zum Ausbau der erneuerbaren Energien. Bezogen auf die Geothermie gab es immerhin eine Zustimmung für Anlagen in der Umgebung des eigenen Wohnortes von 51 Prozent; Befragte mit vorhandenen entsprechenden Anlagen vor Ort stimmten sogar mit 67 Prozent zu (AEE 2023). Dabei fällt auf, dass dieser Wert gegenüber der Befragung im Vorjahr deutlich höher liegt (40 Prozent und 57 Prozent), die Vorerfahrungen mit der Technologie noch auf einen recht kleinen Kreis beschränkt sind, solche Vorerfahrungen aber offensichtlich die Bewertung der Technologie positiv beeinflussen können.

Für ein erfolgreiches Geothermieprojekt ist die Akzeptanz des Marktes ein entscheidender Faktor. Dabei geht es um die Zustimmung der Energieversorgungsunternehmen am Standort, insbesondere, wenn diese bereits Wärmenetze betreiben, in der die geplante Geothermieanlage als einer der Energielieferanten eingebunden werden muss oder soll. Die Zustimmung der Energieversorgungsunternehmen ist aus Wirtschaftlichkeitsgründen wiederum abhängig von der Anschlussbereitschaft der Endkund*innen an das vorhandene oder noch zu verlegende Fern- bzw. Nahwärmenetz (siehe Kapitel 2.5).

Für alle Investor*innen, seien sie kommunal oder privatwirtschaftlich, kann es entscheidend für die Umsetzung eines Geothermieprojektes sein, dass die ansässige Bevölkerung sowie die Kommunalpolitik und -verwaltung keinen Widerstand entwickeln. Lokaler Widerstand kann Projekte bereits in der Planungsphase oder in der Umsetzung entweder entscheidend beeinträchtigen bzw. verzögern oder verhindern. Dies belegt die Geschichte einiger Projekte erneuerbarer Energien, insbesondere bekannt aus der Windkraft, zunehmend aber auch bei großen Freiflächensolaranlagen. Widerstand ist auch aus Projekten der Geothermie bekannt, insbesondere von Tiefengeothermie-Projekten im Oberrheingraben (Flechtner et al. 2019; Sandrock et al. 2020b), überwiegend bestimmt durch die Angst vor durch das Projekt ausgelösten seismischen Aktivitäten.

3.3.2 Faktoren der politischen und gesellschaftlichen Akzeptanz

Ob sich ein*e Akteur*in der Politik, der kommunalen Verwaltung, des Marktes oder der Einwohner*innen vor Ort für oder gegen ein Projekt entscheidet, resultiert aus der Ausprägung

eines Faktors sowie auf der akteurspezifischen Wahrnehmung dieses Faktors, abhängig von Interessen und Motiven. Die Faktoren können jeweils einzeln oder gebündelt Entscheidungsgrundlage für oder gegen ein Projekt sein. Eine Technologie wird im Allgemeinen dann eher akzeptiert, wenn (Holstenkamp 2018):

- eine Einsicht in die Notwendigkeit und die Akzeptabilität der Folgen besteht;
- dass Vorhaben einen wahrnehmbaren Nutzen für die betreffende Person oder dieser Person Nahestehende hat;
- sich die Person mit dem Vorhaben identifiziert;
- die Person bei der Umsetzung merkt, dass sie etwas bewirken kann (Selbstwirksamkeit des eigenen Handelns);
- Verfahren und Verteilung als fair empfunden werden.

Wichtig in der projektbezogenen Argumentation vor Ort ist der Bezug eines Projektes zur Energiewende und damit dem Ausbau von erneuerbaren Energien. In jedem Fall muss die CO₂-Neutralität eines Projektes gewährleistet sein (Bonafin et al. 2019; Bleicher und Gross 2015; Halwachs et al. 2017). Spätestens durch den Angriffskrieg Russlands auf die Ukraine im Jahr 2022 spielen in der Bevölkerung wie bei den Energieversorgungsunternehmen und Kommunen zwei weitere Aspekte im Rahmen des Ausbaus erneuerbarer Energien auf der politischen Basis der Energiewende eine große Rolle: die Unabhängigkeit von Importen fossiler Energie sowie die gleichzeitige Versorgungssicherheit bezogen auf Energie. Grundsätzlich sind diese Faktoren bekannt: Demski et al. (2014) untersuchten z. B. Einstellungen der Bevölkerung zur Energiesicherheit und zum Klimawandel im Vereinigten Königreich. All diese Punkte betreffen die Einsicht in die Notwendigkeit von Geothermieanlagen.

Mögliche negative Folgen eines Geothermieprojektes für die Anwohner*innen stehen im Zentrum der Literatur zur Akzeptanz der Geothermie. Zu den potenziellen Folgen einer Bohrung und des Betriebs einer Geothermieanlage gehören vor allem materielle Schäden, insbesondere die haftungsrelevanten Schäden an Gebäuden oder Infrastrukturen, die entweder durch Erschütterungen bzw. Erdbeben oder durch Hebungen bzw. Senkungen des Bodens verursacht werden können (Mbah und Krohn 2021). Kubota et al. (2013) untersuchten die Akzeptanz von Akteur*innen (öffentliche Verwaltung, Unternehmen) in Japan und stellten fest, dass vor allem die untertägigen Risiken (Grundwasser, induzierte Seismik) zu Ablehnung, v. a. Nicht-Genehmigung durch die Behörden, führen (zu Gebäude- bzw. Infrastrukturschäden: Chavot et al. 2018; Heumann und Huenges 2017; am Beispiel Staufen: Goldscheider und Bechtel 2009). Hauptmerkmal für die Zustimmung ist das seismische Risiko. Auch Manzella et al. (2018) verweisen auf Erdbebenauslösung als größtes Akzeptanzrisiko. Eine weitere Technologiefolge eines geothermischen Projektes können Umweltschäden sein. Bleicher und Gross (2015) sowie Benighaus & Bleicher (2019) fanden mithilfe von Fokusgruppen heraus, dass Geothermie weniger als erneuerbare Energie, sondern als sich noch entwickelnde Technik (Kraftwerkstechnik) wahrgenommen wird, die Umweltschäden (v. a. Grundwasserschädigung) verursachen kann. Die Umweltschäden können eine Gewässerverschmutzung bzw. eine Grundwasserverschmutzung beinhalten. Dabei sind die Ängste vor einer Grundwasserverschmutzung vielfach verbunden mit der Angst um die Sauberkeit des Trinkwassers (Mbah und Krohn 2021; Dowd et al. 2011; Manzella et al. 2018; Baumgärtner 2010; Chavot et al. 2018). Mbah und Krohn (2021) sowie Fernández Fuentes et al. (2022) untersuchten darüber hinaus mögliche Umweltschäden durch Radioaktivität und Lärm, ebenfalls Argumente von Akteur*innen des Widerstands. Mbah und Krohn (2021) verweisen zudem auf Waldrodung als

möglichen Umweltschaden, der durch eine Geothermieanlage entstehen kann. Dies verweist auf den Umstand, dass, wie bei allen Bauvorhaben, die Vornutzung der Flächen relevant sein kann. Für den Erfolg eines Geothermieprojektes ist schließlich die nachgewiesene Nachhaltigkeit von Geothermie im Vergleich zu konventioneller Energietechnik wichtig (Reddy et al. 2020), etwa in Form einer Lebenszyklusanalyse von Geothermieanlagen im Vergleich mit anderen Energiegewinnungstechniken (Zuffi et al. 2022).

Ein weiterer Faktor für ein geplantes geothermisches Projekt mit Akzeptanzrelevanz kann der Nutzen bzw. der Mehrwert für die Gemeinde bzw. deren Bürger*innen sein. Knoblauch et al. (2019) untersuchten die Zustimmung zu Geothermieprojekten in Deutschland und der Schweiz, basierend auf möglichen Vorteilen. Positive Effekte können finanzielle Vorteile für den Gemeindehaushalt bzw. die Ortsgemeinschaft sein (Mbah und Krohn 2021; Barich et al. 2021; Fernández Fuentes et al. 2022). Finanzielle Vorteile können der Ortsgemeinschaft insgesamt bzw. einzelnen Bürger*innen entstehen, wenn sie als Mitglieder der Betreibergesellschaft, etwa einer Genossenschaft, an den wirtschaftlichen Erfolgen der Gesellschaft partizipieren bzw. die Wärme zu einem günstigen Preis abgegeben wird (Barich et al. 2021; Chavot et al. 2018). Hier kommt möglicherweise auch die Selbstwirksamkeit zum Tragen, wenn die Mitglieder der Gemeinschaft zum Erfolg des Projektes beitragen. Bei Geothermievorhaben sind die Beispiele für direkte Beteiligungen von Bürger*innen allerdings angesichts der notwendigen Investitionsvolumina und Investitionsrisiken selten.

Auch eine kostengünstige Wärmeversorgung (Kapitel 2.5) kann als ein wahrnehmbarer Nutzen wahrgenommen werden. Umgekehrt wäre eine Steigerung der Energiekosten eine wirtschaftliche Folge einer Geothermieanlage, die sich negativ auf die Akzeptanz bei den Bürger*innen, aber auch bei Politik und in der kommunalen Verwaltung auswirken kann („bezahlbare Wärme“). Wichtig ist auch, dass weitere Kosten, z. B. für den Hausanschluss an das Wärmenetz, nicht übermäßig hoch sind: Diese dürfen zum Beispiel nicht die Kosten einer neuen Heizung/Heizungsanlage übersteigen (Mbah und Krohn 2021; Barich et al. 2021; Bleicher und Gross 2015; Ruppert et al. 2003).

Entscheidend für die Akzeptanz einer Veränderung vor Ort (in diesem Fall eine Geothermieanlage) ist die soziale Stimmung im Dorf, im Quartier oder im Stadtteil. Dies gilt vor allem für den Fall einer notwendigen „hohen Akzeptanz“ für die umfassende Veränderung einer kleinen Gebietseinheit, also einer Zustimmung und Aktivität von Bürger*innen, die sich beispielsweise in der Gründung einer Genossenschaft sowie Mitgliedschaft in dieser bzw. in einer hohen Anschlussquote an ein Wärmenetz zeigt. Beispielhaft hierfür sind Wärmeversorgungsprojekte in dörflichen Kontexten, z. B. das Bioenergiedorf Jühnde. Hier waren gute Beziehungen zwischen Gruppierungen (Landwirte – sonstige Berufsgruppen, Eingesessene – Zugezogene), die mittels Interviews und Beobachtung von Gruppenprozessen ermittelt wurden, günstig; wichtig war auch eine gute Identifizierung mit dem Dorf (Ruppert et al. 2003; Eigner-Thiel, 2005; Barich et al. 2021; Chavot et al. 2018; Baumgärtner 2010). Die soziale Stimmung als Akzeptanzfaktor ist bislang im Zusammenhang mit der Errichtung von Geothermieanlagen nicht erforscht.

Aus Projekten der Windkraft oder großer Freiflächensolaranlagen ist bekannt, dass bei Durchführung dieser Projekte durch Investor*innen, die nicht aus dem Ort oder der Region stammen, Aspekte der Souveränität und Selbstbestimmung einer Gemeinde bzw. deren Bewohner*innen wichtig für die Akzeptanz sein können. Ein*e Investor*in aus der Region oder sogar der eigenen Gemeinde bzw. ein Unternehmen aus der Gemeinde haben in der Regel eine höhere

Akzeptanz bei Umsetzung von Projekten erneuerbarer Energien (Chavot et al. 2018; Bleicher und David 2015). Für die Geothermie sind solche Aspekte noch nicht erforscht. Ein Projekt wie eine Geothermieanlage sollte demnach passend zum lokalen/regionalen Kontext (auch lokale Kultur) sein, das bedeutet, möglichst weitgehend basierend auf gemeinsamen, eigenen Entschlüssen für die Energiewende (Chavot et al. 2018; Halwachs et al. 2017, 37).

Die politische wie gesellschaftliche Akzeptanz ist ein Erfolgsfaktor für ein Geothermieprojekt und kann, insbesondere durch zu späte oder mangelhafte Kommunikation der Investoren und Behörden, ein Geothermieprojekt verhindern oder insoweit verlängern, dass die Wirtschaftlichkeit gefährdet ist oder nicht mehr gegeben. Eine gut aufgebaute Kommunikationsstrategie und ihre entsprechenden Maßnahmen sind ein entscheidender Erfolgsfaktor für ein Geothermieprojekt. Dabei muss die Kommunikation in der Frühphase des Projekts beginnen und dies mindestens bis zur Inbetriebnahme begleiten. Wichtig sind Transparenz, Offenheit und Ehrlichkeit in der Kommunikation (Mbah und Krohn 2021; Claus et al. 2013).

3.3.3 Kommunale Zusammenarbeit (gemeinsame Projekte)

Ein Erfolgsfaktor für eine mitteltiefe Geothermieanlage kann sein, wenn mehrere Kommunen in der Planung und Umsetzung in Form interkommunaler Kooperation zusammenarbeiten (Mbah und Krohn 2021) – dies insbesondere aufgrund des hohen Investitionsbedarfs, den solche Projekte erfordern. Eine Zusammenarbeit mehrerer Kommunen kann auch bezogen auf planungsrechtliche Fragen eines Geothermieprojektes sinnvoll sein, beispielsweise bei Überschreitung von Gemeindegrenzen.

Die Zusammenarbeit kann auf der Ebene der Politik und Verwaltung mehrerer Kommunen erfolgen, wie in den drei Gemeinden Aschheim, Feldkirchen und Kirchheim bei München, die seit 2009 ein gemeinsames Geothermieprojekt führen. Oder mehrere kommunale Energieversorgungsunternehmen (Stadt- bzw. Landwerke) kooperieren, wie beispielsweise die Stadtwerke München (SWM) mit sechs Geothermieanlagen und die Erdwärme Grünwald (EWG) mit zwei Anlagen: beide Energieversorgungsunternehmen speisen in ein Fernwärmenetz ein. Zehn Städte und Kommunen im Landkreis Karlsruhe gründeten im Sommer 2023 zur Nutzung von Tiefengeothermie und Aufbau eines Wärmenetzes eine gemeinsame Gesellschaft, die PEG Regionaler Wärmeverbund GmbH & Co. KG (SWR Südwestrundfunk 2023).

Werden keine Gemeindegrenzen durch ein Geothermieprojekt berührt, so ist keine Kooperation mit einer Nachbarkommune notwendig und diese würde den Prozess verkomplizieren. Eine Kommune bzw. ein kommunales Unternehmen sollte jedoch auch dann prüfen, ob nicht ein gemeindeübergreifendes Wärmenetz möglich ist.

4 Wirtschaftlichkeit und Finanzierbarkeit

4.1 Wirtschaftlichkeit

Notwendig für den Projekterfolg ist die (prognostizierte) Wirtschaftlichkeit einer Geothermieanlage (Mbah und Krohn 2021; Barich et al. 2021; Bleicher und Gross 2015; Ruppert et al. 2003). Wirtschaftlichkeit bezeichnet grundsätzlich die Beziehung zwischen einem Handlungsergebnis und dem dafür erforderlichen Mitteleinsatz (Weber 2018). Ob eine Geothermieanlage wirtschaftlich ist bzw. werden kann, hängt von den untertägigen Gegebenheiten und den obergägigen Faktoren ab. Jeder der in den Kapiteln 2 und 3 aufgeführten Faktoren kann die Wirtschaftlichkeit einer Geothermieanlage beeinflussen und unter Umständen entscheidend für die

Realisierung einer geothermischen Anlage sein. Die Prognose der Wirtschaftlichkeit ist wiederum entscheidend für die Finanzierbarkeit (Kapitel 4.2): Anlagen sind nur dann finanzierbar, wenn sie die Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit und ggf. weitere Anforderungen potenzieller Kapitalgeber*innen erfüllen.

Gefährdet wird die Wirtschaftlichkeit einer geothermischen Anlage zum einen durch Kostensteigerungen, etwa durch politisch beschlossene neue Auflagen, welche die Baukosten erhöhen oder die zu Zeitverzögerungen im Projektablauf führen, wie durch Veränderungen im Planungsrecht oder bei den rechtlichen Regelungen zur Genehmigung solcher Anlagen. Zeitverzögerungen und damit Kostensteigerungen können auch durch Akzeptanzprobleme entstehen, etwa, wenn gegen die Errichtung der Anlage Klage(n) eingereicht wird (werden). Zum anderen kann eine fehlende Marktakzeptanz bei den potenziellen Kund*innen dazu führen, dass die benötigte Anschlussquote nicht erreicht wird. Fixe Kosten für die notwendigen Infrastrukturen können dann möglicherweise nicht ausreichend gedeckt werden.

Darüber hinaus spielt bei der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit im Rahmen der Investitionsentscheidungen der Anlagenbetreiber*innen regelmäßig das Verhältnis von wirtschaftlichen Chancen (Rendite) und Gefahren (Risiko) eine wesentliche Rolle. Im Allgemeinen gilt: Je höher das Risiko, desto höher die erwartete Rendite. Ein zentrales wirtschaftliches Risiko bei offenen geothermischen Systemen ist die Fündigkeit, also die Frage, ob ein ausreichend mächtiger und durchlässiger Aquifer auf dem erwarteten Temperaturniveau im geologischen Zielhorizont angetroffen wird. Dabei ist die Risikowahrnehmung durch die Entscheider*innen zentral. Alle Maßnahmen zur Verringerung des Risikos, z. B. Fündigkeitsversicherungen, alternative Zielhorizonte als Fall-Back-Option oder Maßnahmen zur Verbesserung der Informationslage an einem konkreten Standort, wirken sich grundsätzlich positiv auf die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit aus. Sie gehen allerdings üblicherweise auch mit Kosten einher, sodass eine Abwägung von Zugewinnen an Sicherheit vs. Verringerung der erwarteten Rendite vorgenommen werden muss. Auch hier kommen daher die Risikopräferenzen der Entscheider*innen zum Tragen.

Nach Erkenntnissen der Verfasser*innen liegen zu den in der Praxis genutzten Investitionsrechenverfahren bzw. Verfahren zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit bei Geothermieanlagen keine empirischen Befunde vor. Sie dürften sich aber nicht grundlegend von denen im Energiesektor allgemein unterscheiden. Im Projekt „Aquiferspeicher“ (Degenhart et al. 2019) kamen in den Fallanalysen, die zusammen mit Praxisakteur*innen durchgeführt wurden, sowohl Berechnungen zu den spezifischen Kosten der geothermischen Speicheranlagen als auch Investitionsrechenverfahren, also Zahlungsstrombetrachtungen, zur Anwendung. Im Allgemeinen dürften die Renditeanforderungen internationaler Investor*innen oder börsennotierter Unternehmen höher sein als diejenigen kommunaler Energieversorgungsunternehmen. Zugleich unterscheiden sich Risikotragfähigkeit und Wahrnehmung der Risiken.

Wirtschaftlichkeit ist damit ein wesentlicher Faktor für die Umsetzbarkeit eines Projektes. Sie hängt mit den meisten der zuvor genannten Faktoren zusammen. Für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit muss ein angemessenes Rendite-Risiko-Verhältnis bestehen, wobei die Bewertung dessen, was als „angemessen“ gesehen wird, von der bewertenden Person und deren Präferenzen abhängt.

4.2 *Finanzierbarkeit*

Ebenfalls entscheidend für die Durchführung eines geothermischen Projekts ist die Finanzierbarkeit der Investitionen (Sandrock et al. 2020b). Üblicherweise wird hier, insbesondere im deutschen kommunalen Kontext, die Finanzierbarkeit durch Banken („bankability“) in den Blick genommen (Lüdeke-Freund et al. 2012; Yudha et al. 2022). Allgemeiner gefasst kann darunter eine Bewertung durch potenzielle (externe) Kapitalgeber*innen verstanden werden, die dafür sorgt, dass der notwendige Finanzbedarf gedeckt werden kann. Im weitesten Sinne würde dies auch die Versicherbarkeit, also eine positive Beurteilung durch potenzielle Versicherungsgeber*innen, beinhalten.

Gerade für externe Kapitalgeber*innen, insbesondere kreditgebende Banken, spielt die Sicherheit der Rückzahlungen eine zentrale Rolle, damit die Fündigkeitserwartung, mögliche Absicherungen dieses Risikos, aber auch die Sicherheit der Erlösseite (Anzahl der Anschlussnehmer*innen) (Böttcher 2014). Zur Beurteilung der Erfolgswahrscheinlichkeit für Kapitalgeber*innen sind sogenannte „Probability of Success“-Studien (POS-Studien) üblich, mit deren Hilfe eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für ein gewähltes Erfolgskriterium bestimmt wird. Für Banken spielt beispielsweise der Schuldendienstdeckungsgrad (debt service coverage ratio) eine Rolle (Randle 2005).

Bei der Finanzierbarkeit zeigt sich mithin eine wesentliche Schnittstelle zwischen ober- und untertägigen Faktoren: Ob ein Projekt finanzbar ist, hängt in der mitteltiefen Geothermie wesentlich davon ab, wie das Fündigkeitsrisiko von unterschiedlichen Beteiligten wahrgenommen wird. Öffentliche Unterstützungsleistungen zur Verteilung von Risiken können hier ggf. ansetzen und Finanzierungen ermöglichen.

5 **Fazit**

Die mitteltiefe hydrothermale Geothermie birgt in Deutschland das Potenzial, einen relevanten Beitrag zur Wärmewende zu leisten. Dennoch deckt sie gegenwärtig weniger als 0,5 Prozent des gesamten deutschen Wärmebedarfs. Das durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderte Projekt „Warm-Up“ verfolgt daher das Ziel, den Rollout der mitteltiefen hydrothermalen Geothermie wissenschaftlich zu begleiten und zu unterstützen. Ziel des vorliegenden Arbeitspapiers war es zu klären, welche obertägigen Einflussfaktoren für die Nutzung und Einbindung der mitteltiefen Geothermie in die leitungsgebundene Wärmeversorgung entscheidend sind.

Von Bedeutung für erfolgreiche Geothermieprojekte sind zunächst die Rahmenbedingungen auf der Abnahmeseite. Dazu zählt unter anderem die Nachfrage nach geothermischer Wärme sowie die Existenz eines geeigneten Verteilnetzes, welches die geothermische Wärme wirtschaftlich rentabel zu den Abnehmenden transportieren kann. Daneben sind jedoch auch politische, rechtliche und gesellschaftliche Faktoren sowie die Finanzierung des Geothermieprojekts relevant für den Erfolg eines solchen Projekts.

Die zentralen abnahmeseitigen Erfolgsfaktoren sind:

Infrastruktur:

- Die Existenz eines Wärmenetzes / Möglichkeiten eines Netz-Neubaus,
- die Eigenschaften des Wärmenetzes (z. B. Größe und Temperaturniveau) und
- die Struktur der netzgebundenen Wärmeversorgung (z. B. ergänzende vs. konkurrierende Wärmeerzeugungstechnologien).

Abnahme:

- Die Struktur und die Eigenschaften der Abnehmenden (z. B. nachgefragte Temperaturen, saisonale Schwankungen),
- die Anschlussbereitschaft der Abnehmenden und
- die Entwicklung der Wärmeabnahme.

Neben diesen Aspekten wird die Erfolgswahrscheinlichkeit eines Geothermieprojektes zu einem erheblichen Teil von den sozio-politischen Rahmenbedingungen bestimmt, die teilweise auch Einfluss auf die Abnahme haben. Hierzu zählen zunächst die politischen Rahmenbedingungen, welche zurzeit vor allem durch die von der Bundesregierung gesteckten Ziele für eine klimaneutrale Wärmeversorgung und der damit einhergehenden Gesetzgebung bestimmt werden. Besonders hervorzuheben sind hier das Gebäudeenergiegesetz (GEG) und das Gesetz zur Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Fernwärme (WPG). Da die Wirtschaftlichkeit maßgeblich über den Erfolg eines Geothermieprojektes entscheidet, sind im Bereich der politischen Rahmenbedingungen auch staatliche Förderprogramme sowie die Entwicklung des CO₂-Preises als Erfolgsfaktoren zu nennen.

Vor der Durchführung eines Geothermieprojektes sollten zudem Fragen in Bezug auf die Haftung im Schadensfall, den Genehmigungsprozess und alle weiteren rechtlichen Voraussetzungen beachtet werden, welche für die erfolgreiche Durchführung eines Geothermieprojektes erfüllt sein sollten. So befinden sich Projekte ab einer Teufe von 400 Metern im Bereich des Bergrechtes und damit alle Projekte der mitteltiefen Geothermie. Die bergrechtliche Genehmigung eines Geothermieprojektes ist daher zwingend. In Gebieten, welche laut Standortauswahlgesetz für ein Endlager radioaktiver Abfälle in Frage kommen, müssen die Planer eines Geothermieprojektes eine Genehmigung für die Durchführung eines geothermischen Projekts einholen.

Schlussendlich kann ein Geothermieprojekt nur dann gelingen, wenn die hierfür nötige Akzeptanz vorhanden ist. Diese bezieht sich sowohl auf die allgemeine Akzeptanz gegenüber dem Ausbau erneuerbaren Energien (soziopolitische Akzeptanz) sowie die Akzeptanz gegenüber der Anlage selbst, inklusive des Wärmenetzes. Akzeptanz bezieht sich dabei auf mehrere Akteursgruppen: Zum einen muss die kommunale Politik und Verwaltung dem Projekt zustimmen oder ein solches initiieren, zum anderen ist die Bereitschaft von Energieversorgungsunternehmen notwendig, Geothermieprojekte inklusive des unter Umständen notwendigen Neu- bzw. Ausbaus von Wärmenetzen anzustoßen. Neben dem Willen der Bevölkerung, sich an ein Wärmenetz anzuschließen und die geförderte Wärme abzunehmen, ist auch die Akzeptanz hinsichtlich Planung und des Baus der Anlagen im eigenen Umfeld ein wichtiger Erfolgsfaktor. Akzeptiert werden muss das Projekt darüber hinaus von weiteren lokalen bzw. regionalen Stakeholdern, etwa von Umweltverbänden. Akzeptanzrelevant sind Risiken (z. B. Seismizität) und der gesellschaftliche Nutzen, welcher solch kostenintensive Projekte rechtfertigt sowie der wahrgenommene und tatsächliche individuelle Nutzen der Bürger*innen. Wichtig für Akzeptanz von allen Beteiligten ist ein hohes Maß an Transparenz und eine frühzeitige und gute Kommunikation zwischen allen Beteiligten sowie mit den Bürger*innen.

Ein weiterer zentraler Erfolgsfaktor für die Förderung von Wärme aus der mitteltiefen Geothermie ist die Wirtschaftlichkeit, welche sich aus der Vielzahl der beschriebenen Faktoren ergibt, die sich wiederum gegenseitig beeinflussen. So können etwa neu beschlossene Auflagen zu einer zeitlichen Verzögerung des Projektes und somit zu Kostensteigerungen und einem Ak-

zeptanzverlust in der Bevölkerung führen. Letzterer wiederum erhöht möglicherweise den Aufwand im Bereich der Öffentlichkeitsarbeit, was die Wirtschaftlichkeit des Projektes weiter gefährdet. Letztendlich entscheidet die prognostizierte Wirtschaftlichkeit auch über die Finanzierbarkeit durch externe Kapitalgeber, in der Regel durch Bankkredite („bankability“), und kann somit zu einem K.o.-Faktor werden.

Das vorliegende Arbeitspapier leistet einen Beitrag zur bestehenden Literatur und erweitert diese. Während z. B. die projektbezogene bzw. lokale Akzeptanz von Geothermieprojekten bereits näher untersucht wurde, hat der Bereich der Marktakzeptanz bisher weniger Beachtung gefunden. Durch die hier vorgenommene Untersuchung der Abnahmeseite und der sich daraus ergebenden Implikationen für die Wirtschaftlichkeit leistet das Arbeitspapier eine wertvolle Ergänzung zum aktuellen Diskurs.

Da sich jedoch die Rahmenbedingungen für Geothermieprojekte regional zum Teil erheblich unterscheiden, sollen in einem nächsten Schritt Untersuchungen an ausgewählten Standorten durchgeführt werden, um die Ergebnisse auf andere vergleichbare Standorte übertragen zu können. Darüber hinaus soll die Rolle der kommunalen Wärmeplanung und der anstehenden Transformation der Fernwärmeversorgung und deren Konkretisierung in Transformationsplänen der Energieversorgungsunternehmen als „Möglichkeitsfenster“ für neue Geothermieprojekte untersucht werden. Dabei spielt insbesondere die Unterstützung der kommunalen Akteure bei einzelnen Prozessschritten, wie der Ermittlung geologischer und wirtschaftlicher Potenziale, sowie die Sensibilisierung und Akzeptanz der mitteltiefen Geothermie bei Planungsbüros und weiteren Dienstleistern der kommunalen Wärmeplanung eine Rolle.

Literatur

- AEE [Agentur für Erneuerbare Energien] (2023): Erneuerbare Energien in Deutschland: Zwischen Akzeptanz und Unsicherheit. <https://www.unendlich-viel-energie.de/erneuerbare-energien-in-deutschland-zwischen-akzeptanz-und-unsicherheit>.
- AGEB [Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.] (2022a): Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland. Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken. Dezember. https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2023/01/AGEB_21p2_V3_20221222.pdf.
- AGEB [Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.] (2022b): Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland. Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken. Dezember. https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2023/01/AGEB_21p2_V3_20221222.pdf.
- Agemar, Thorsten, Evelyn Suchi und Inga Moeck (2018): Die Rolle der tiefen Geothermie bei der Wärmewende. Wie Deutschland 60 % erneuerbare Wärme bis 2050 schaffen könnte. Positionspapier. LIAG (Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik). https://www.leibniz-liag.de/fileadmin/user_upload/s4/downloads/positionspapier_waermewende.pdf.
- AGFW [Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.] (2023): Praxisleitfaden Tiefengeothermie. Hg. v. Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V. Juni.
- Agora Energiewende (2021): Ein Gebäudekonsens für Klimaneutralität. 10 Eckpunkte wie wir bezahlbaren Wohnraum und Klimaneutralität 2045 zusammen erreichen. Berlin. https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_02_Gebaeudekonsens/A-EW_217_Gebaeudekonsens_WEB.pdf.
- Arpagaus, Cordin, Frédéric Bless, Michael Uhlmann, Jürg Schiffmann und Stefan S Bertsch (2018): High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials. *Energy* 152: 985–1010.
- Averfalk, H., T. Benakopoulos, I. Best, F. Dammel, C. Engel, R. Geyer, O. Gudmundsson, K. Lygnerud, N. Nord, J. Oltmanns, et al. (2021): Low-Temperature District Heating Implementation Guidebook. Final Report. <https://publica.fraunhofer.de/handle/publica/301176>.
- Barich, Amel, Alicja W. Stokłosa, Jan Hildebrand, Ottó Eliasson, Tamás Medgyes, Gauthier Quinonez, Ana C. Casillas und Isabel Fernandez (2021): Social License to Operate in Geothermal Energy. *Energies* 15, Nr. 1 (26. Dezember): 139.
- Bauer, Mathias, Willi Freeden, Hans Jacobi und Thomas Neu, Hrsg. (2014a): *Handbuch Tiefe Geothermie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-54511-5>.
- Bauer, Mathias, Willi Freeden, Hans Jacobi und Thomas Neu (2014b): *Energiewirtschaft 2014: Fakten und Chancen der Tiefen Geothermie*. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Spektrum.
- Baumgärtner, Norbert (2010): Public Relations: Geothermie erfolgreich kommuniziert. *GTE* Nummer 2: 14–17.
- BDEW (2024a): Nettowärmeerzeugung der Fernwärme-/kälteversorger nach Energieträgern in Deutschland. April. https://www.bdew.de/media/documents/Nettowaermeerz_D_2023_online_o_jaehrlich_FS_04042024.pdf.
- BDEW (2024b): Fernwärmeverwendung nach Abnehmern in Deutschland. April. <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/fernwaermeverwendung-nach-abnehmern/>.
- Benighaus, C. und A. Bleicher (2019): Neither risky technology nor renewable electricity: Contested frames in the development of geothermal energy in Germany. *Energy Research & Social Science* 47 (Januar): 46–55.
- BGR, Hrsg. [Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe] (2007): Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Downloads/Charakterisierung_Wirtsgesteine_geotech_Barrieren/1_Tongestein/2007-04-00_BGR_Tonstudie2007.pdf;jsessionid=BF8460BC8BDF022F1195C5097B03D3BC.internet001?__blob=publicationFile&v=6.
- BGR [Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe] (2023): Warm-Up: Geothermie für die Wärmewende: Flankierung des Rollouts der Mitteltiefen Geothermie in Deutschland -

- Erstellungshilfe für eine Projektskizze zur Explorations-förderung des BMWK. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Nutzung_tieferer_Untergrund_CO2Speicherung/Downloads/Warm-Up_Erstellungshilfe_Projektskizze_Explorationsfoerderung.pdf?__blob=publicationFile&v=8.
- Billerbeck, Anna, Barbara Breitschopf, Sabine Preuß, Jenny Winkler, Mario Ragwitz und Dogan Keles (2024): Perception of district heating in Europe: A deep dive into influencing factors and the role of regulation. *Energy Policy* 184 (Januar): 113860.
- BKartA [Bundeskartellamt] (2012): Sektoruntersuchung Fernwärme. Abschlussbericht gemäß § 32e GWB - August 2012. Bonn. <https://www.bundeskartellamt.de/SharedDocs/Publikation/DE/Sektoruntersuchungen/Sektoruntersuchung%20Fernwaerme%20-%20Abschlussbericht.pdf>.
- Bleicher, Alena und Martin David (2015): Keine Angst vor der Öffentlichkeit – Beteiligungen im Rahmen der Energie- und Rohstoffgewinnung in Deutschland. Veranstaltung: Bergbau, Energie und Rohstoffe, Freiberg. https://www.ufz.de/export/data/2/93154_Bleicher%20David_2015_Bergbau_Energie_Rohstoffe.pdf.
- Bleicher, Alena und Matthias Gross (2015): User motivation, energy prosumers, and regional diversity: sociological notes on using shallow geothermal energy. *Geothermal Energy* 3, Nr. 1 (Dezember): 12.
- BMUV [Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz] (o.J.): Das Standortauswahlgesetz. <https://www.bmuv.de/themen/nukleare-sicherheit/endlagerung/standortauswahlverfahren-endlager/das-standortauswahlgesetz>.
- BMWK [Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz] (2024): *Entwurf eines Gesetzes zur Beschleunigung von Genehmigungsverfahren für Geothermieanlagen, Wärmepumpen und Wärmespeichern sowie weiterer rechtlicher Rahmenbedingungen*. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Gesetz/20240628-entwurf-beschleunigung-genehmigungsverfahren-geowg.pdf?__blob=publicationFile&v=6.
- Böhnisch, Helmut, Jürgen Deuschle, Michael Nast und Dr. Uwe Pfenning (2006): Nahwärmeversorgung und Erneuerbare Energien im Gebäudebestand- Initiierung von Pilotprojekten in Baden-Württemberg, Hemmnisanalyse und Untersuchung der Einsatzbereiche. Endbericht. Stuttgart: Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoff-Forschung; Universität Stuttgart; Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt.
- Bonafin, J., C. Pietra, A. Bonzanini und P. Bombarda (2019): CO2 emissions from geothermal power plants: evaluation of technical solutions for CO2 reinjection. Veranstaltung: European Geothermal Congress, Den Haag.
- Böttcher, Jörg, Hrsg. (2014): *Geothermie-Vorhaben: tiefe Geothermie: Recht, Technik und Finanzierung*. München: Oldenbourg-Verl.
- Bracke, R, E Huenges, D Acksel, F Amann, J Bremer, D Bruhn, M Budt, G Bussmann, J-U Görke und G Grün (2022): Roadmap Tiefe Geothermie für Deutschland I Handlungsempfehlungen für Politik, Wirtschaft und Wissenschaft für eine erfolgreiche Wärmewende.
- Bruceckner, Sarah, Rene Arbter, Martin Pehnt und Eberhard Laevemann (2016): Industrial waste heat potential in Germany a bottom-up analysis. *Energy Efficiency*. 1–13.
- BuVEG (2024): Sanierungsquote im Sinkflug. Prognose für 2024: weiter schwach (9. April). <https://www.presseportal.de/pm/129349/5752698>.
- BVG [Bundesverband Geothermie e.V.] (2023): Klimaneutrale Wärme aus Geothermie 2045. Vorschläge für eine Anpassung der gesetzlichen Rahmenbedingungen für den Ausbau der Nutzung der Geothermie im Rahmen der Energie- und Wärmewende. Update: Genehmigungsrecht. https://www.geothermie.de/fileadmin/user_upload/Verband/Politische_Position/20230615_BVG_Synopse.pdf.
- Chavot, Philippe, Christine Heimlich, Anne Masseran, Yeny Serrano, Jean Zoungrana und Cyrille Bodin (2018): Social shaping of deep geothermal projects in Alsace: politics, stakeholder attitudes and local democracy. *Geothermal Energy* 6, Nr. 1: 26.
- Cischinsky, Holger und Nikolaus Diefenbach (2018): Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016. Datenerhebung zu den energetischen Merkmalen und Modernisierungsraten im deutschen und hessischen Wohngebäudebestand. Darmstadt: IWU [Institut für Wohnen und Umwelt]. https://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/Endbericht_Datenerhebung_Wohngeb%C3%A4udebestand_2016.pdf.

- Claus, Frank, Julia Hampe, Lena Hinzke, Klemens Lühr, Andreas Paust, Anna Renkamp und Andrea Versteyl (2013): Mehr Transparenz und Bürgerbeteiligung. Prozessschritte und Empfehlungen am Beispiel von Fernstraßen, Industrieanlagen und Kraftwerken. Gütersloh: Bertelsmann-Stiftung. https://www.bertelsmann-stiftung.de/fileadmin/files/Mehr_Transparenz_und_Buergerbeteiligung.pdf.
- Clausen, Jens, Wiebke Winter und Cora Kettemann (2012): Akzeptanz von Nahwärmenetzen. Teilbericht zu AP7 im Rahmen des Projektes „Möglichkeiten und Grenzen von Nahwärmenetzen in ländlich strukturierten Gebieten unter Einbeziehung regenerativer Wärmequellen – Vernetzung von dezentralen Kraft- und Wärmeerzeugungs-Systemen unter Berücksichtigung von Langzeitwärmespeicherung. Teilbericht. Hannover: Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit. <http://www.borderstep.de>.
- Colmenar-Santos, Antonio, Elisabet Palomo-Torrejón, Enrique Rosales-Asensio und David Borge-Diez (2018): Measures to remove geothermal energy barriers in the European Union. *Energies* 11, Nr. 11: 3202.
- Degenhart, Heinrich, Lars Holstenkamp, Anne Kathrin Kohrs, Philipp Neidig, Oliver Opel und Thomas Schomerus [DOI: 10.2314/KXP:1698626150] (2019): Aquiferspeicher - Entwicklung der Einsatzfelder für mitteltiefe Aquiferwärmespeicher in Norddeutschland unter wirtschaftlich/finanziellen, geologisch/technischen, umweltchemischen und rechtlich/förderpolitischen Aspekten: Schlussbericht zum Forschungsvorhaben: Laufzeit: 01.04.2016-30.06.2019Application/pdf. Leuphana Universität Lüneburg. <https://www.tib.eu/suchen/id/TIBKAT:1698626150/>.
- Delzig, Laura (2024): Haftung für Schäden infolge der Aufsuchung und Gewinnung von Erdwärme – Ein Überblick. *Geothermische Energie*, Nr. 109. https://www.geothermie.de/fileadmin/user_upload/Bibliothek/Fachzeitschrift/GTE_109_Langfassung_Haftung_fuer_Schaeden_infolge_der_Aufsuchung_und_Gewinnung_von_Erdwaerme_Delzig.pdf.
- Demski, Christina, Wouter Poortinga und Nick Pidgeon (2014): Exploring public perceptions of energy security risks in the UK. *Energy Policy* 66 (März): 369–378.
- Diefenbach, Dr. Nikolaus, Dr. Holger Cischinsky, Markus Rodenfels und Dr. Klaus-Dieter Clausnitzer (2010): Datenbasis Gebäudebestand. Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand. Darmstadt: IWU [Institut für Wohnen und Umwelt], BEI [Bremer Energie Institut]. http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/klima_altbau/Endbericht_Datenbasis.pdf.
- Dowd, Anne-Maree, Naomi Boughen, Peta Ashworth und Simone Carr-Cornish (2011): Geothermal technology in Australia: Investigating social acceptance. *Energy Policy* 39, Nr. 10 (Oktober): 6301–6307.
- Dunkelberg, Elisa, Yanik Acker, Tidian Baerens, Sebastian Blömer und Julika Weiß [Beauftragt durch das Land Berlin, vertreten durch die Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klima- und Umweltschutz;] (2023): Bestimmung des Potenzials von Abwärme in Berlin - Abschlussbericht. <https://www.ifeu.de/publikation/bestimmung-des-potenzials-von-abwaerme-in-berlin>.
- Dunkelberg, Elisa, Alexander Deisböck, Benjamin Herrmann, Steven Salecki, Tino Mitzinger, Johannes Röder, Pablo Thier, Timo Wassermann und Bernd Hirschl (2020): Fernwärme klimaneutral transformieren. Eine Bewertung der Handlungsoptionen am Beispiel Berlin Nord-Neukölln. Berlin.
- Dunkelberg, Elisa, Swantje Gährs, Julika Weiß und Steven Salecki (2018): Wirtschaftlichkeit von Mehrleiter-Wärmenetzen - Ökonomische Bewertung von Mehrleiter-Wärmenetzen zur Nutzung von Niedertemperaturwärme. https://www.ioew.de/fileadmin/user_upload/BILDER_und_Downloaddateien/Publikationen/2018/IOEW-SR_215_Wirtschaftlichkeit_Mehrleiter-W%C3%A4rmenetze.pdf.
- Dunkelberg, Elisa, Juliane Kaspers, Charlotta Maiworm, Lukas Torliene und Barbara von Gayling-Westphal [IÖW; BBH] (2022): Öffentliche Gebäude als Keimzellen für klimaneutrale Quartierswärme. Arbeitsbericht. https://www.urbane-waermewende.de/fileadmin/urbane_waermewende/Publikationen_und_Vortr%C3%A4ge/Dunkelberg_et_al_2022_Oeffentliche_Gebaeude_als_Keimzellen_fuer_klimaneutrale_Quartierswaerme.pdf.

- Dunkelberg, Elisa und Julika Weiß (2023): Die Rolle von Kommunen in der Entwicklung und Umsetzung von Quartiersprojekten. Working Paper. Ein Beitrag aus Modul 3 Quartiere der Wissenschaftlichen Begleitforschung Energiewendebauen. https://www.ioew.de/fileadmin/user_upload/BILDER_und_Downloaddateien/Publikationen/2023/Die_Rolle_von_Kommunen_in_der_Entwicklung_und_Umsetzung_von_Quartiersprojekten_-_Working_Paper.pdf.
- Dunkelberg, Elisa, Julika Weiß, Christian Maaß, Paula Möhring und Alice Sakhel (2021): Entwicklung einer Wärmestrategie für das Land Berlin. Studie im Auftrag des Landes Berlin, vertreten durch die Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz; Berlin. https://www.berlin.de/sen/uvk/_assets/klimaschutz/klimaschutz-in-der-umsetzung/waermewende-im-land-berlin/entwicklung-waermestrategie-land-berlin.pdf.
- Eigner-Thiel, Dr. Swantje (2005): *Kollektives Engagement für die Nutzung erneuerbarer Energieträger: Motive, Mobilisierung und Auswirkungen am Beispiel des Aktionsforschungsprojekts ‚Das Bioenergie Dorf‘*. Bd. 1. Studien zur Umweltpsychologie. Hamburg.
- Engelmann, Peter, Benjamin Köhler, Robert Meyer, Jörg Dengler, Sebastian Henkel, Lea Kießling, Anneke Quast, Jessica Berneiser, Christian Bär, Philip Sterchele, et al. (2021): Systemische Herausforderung der Wärmewende. *Climate Change* 18/2021. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-04-26_cc_18-2021_waermewende.pdf.
- Erdwärme Chiemgau GmbH (o.J.): Wie verläuft der Genehmigungsprozess bei Geothermieanlagen? <https://www.geothermie-palling.de/wie-verlaeuft-der-genehmigungsprozess-bei-geothermieanlagen>.
- Expertenrat für Klimafragen (2023): Prüfbericht 2023 für die Sektoren Gebäude und Verkehr. Prüfung der den Maßnahmen zugrunde liegenden Annahmen gemäß § 12 Abs. 2 Bundes-Klimaschutzgesetz. Berlin. <https://www.expertenrat-klima.de>.
- Fernández Fuentes, Isabel, Amel Barich, Christina Baisch, Balazs Bodo, Ottó Elíasson, Gioia Falcone, Georgie Friederichs, Margarita de Gregorio, Jan Hildebrand, Anastasia Ioannou, et al. (2022): The CROWD THERMAL Project: Creating Public Acceptance of Geothermal Energy and Opportunities for Community Financing. *Energies* 15, Nr. 21 (7. November): 8310.
- Flechtner, Ferdinand, Markus Loewer und Maximilian Keim (2019): Bürgerentscheid gegen Geothermie - Fallstudie Puchheim. <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.21368.19204>.
- Frisch, Sabine, Martin Pehnt, Philipp Otter und M Nast (2010): Prozesswärme im Marktanzreizprogramm: Zwischenbericht zu Perspektivische Weiterentwicklung des Marktanzreizprogramms FKZ 03MAP123.[Online] Verfügbar unter: https://elib.dlr.de/82173/1/Prozessw%C3%A4rme_im_MAP.pdf. Heidelberg, Institut für Technische Thermodynamik am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Stuttgart.
- Frisch, Sabine, Martin Pehnt, Philipp Otter und Michael Nast (2013): Prozesswärme im Marktanzreizprogramm (MAP).
- Fritsch, Michael (2018): *Marktversagen und Wirtschaftspolitik: mikroökonomische Grundlagen staatlichen Handelns*. 10., überarbeitete und ergänzte Auflage. Vahlers Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. München: Verlag Franz Vahlen.
- Goldscheider, Nico und Timothy D. Bechtel (2009): Editors' message: The housing crisis from underground – damage to a historic town by geothermal drillings through anhydrite, Staufen, Germany. *Hydrogeology Journal* 17, Nr. 3: 491–493.
- Guckelberger, Annette (2017): Die Bergschadensvermutung gem. §120 BBergG. *Natur und Recht* 39, Nr. 2 (Februar): 88–93.
- Halwachs, Eva, Anne von Streit und Alisa Utz (2017): Akzeptanz der Energiewende im Oberland. Ergebnisse einer Passantenbefragung in ausgewählten Gemeinden der Modellregion Oberland. INOLA-Arbeitsbericht. München. https://energiewende-oberland.de/download/acrn7ig316vmides621q4h2vnok/INOLA_Arbeitsbericht_Nr6_2018-01-30neu.pdf.
- Heumann, Arnd und Ernst Huenges (2017): Technologiebericht 1.2 Tiefengeothermie. In: *Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)*, hg. v. Wuppertal Institut, Fraunhofer ISI, und IZES. Wuppertal; Karlsruhe; Saarbrücken: Wuppertal Institut, ISI, IZES. https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7042/file/7042_Tiefengeothermie.pdf.

- HLNUG [Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie] (2019): Erdwärmennutzung in Hessen. Leitfaden für Erdwärmesondenanlagen zum Heizen und Kühlen. 6., überarbeitete Auflage. Wiesbaden. https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/geologie/erdwaerme/Leitfaden_Erdwaerme_6._Auflage_gesamt.pdf.
- Holstenkamp, Lars (2018): Akzeptanz durch finanzielle Beteiligung? In: *Die Energiewende der Bürger stärken*, hg. v. Christian Lautermann, S. 271–288. Theorie der Unternehmung 67. Marburg: Metropolis-Verlag.
- Kemmler, Andreas, Almut Kirchner, Alex Auf der Maur, Florian Ess, Sven Kreidelmeyer, Alexander Piégsa, Thorsten Spillmann, Marco Wunsch und Inka Ziegenhagen [Prognos AG, Fraunhofer ISI, GWS, iinas] (2020): Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/klimagutachten.pdf?__blob=publicationFile&v=6.
- Klimaschutz- und Energieagentur Niedersachsen (2024): Stichwort: Sanierungsquote. *Gebäudebestand in Niedersachsen*. <https://www.klimaschutz-niedersachsen.de/themen/bauen-und-sanieren/stichwort-sanierungsrate.php>.
- Knoblauch, Theresa A.K., Evelina Trutnevite und Michael Stauffacher (2019): Siting deep geothermal energy: Acceptance of various risk and benefit scenarios in a Swiss-German cross-national study. *Energy Policy* 128 (Mai): 807–816.
- Köhler, Benjamin, Katja Hünecke, Corinna Fischer, Jessica Berneiser und Caren Herbstritt [Forschungskennzahl 3721 16 501 0] (2024): Akzeptanz der leitungsgebundenen Wärmeversorgung: Status quo in Deutschland und internationale Erfahrungen Teilbericht im Projekt: Sozio-technische und verhaltensbasierte Aspekte der Energieeffizienzsteigerung im Wärmesektor. *Climate Change* 14/2024. Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/14_2024_cc_akzeptanz_waermeversorgung_bf.pdf.
- Kopernikus-Projekt Ariadne (2021): Ariadne-Report: Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 - Szenarien und Pfade im Modellvergleich. Potsdam. <https://ariadneprojekt.de/publikation/deutschland-auf-dem-weg-zur-klimaneutralitaet-2045-szenarienreport/>.
- Korn, Ralf, Alexandra Kochendörfer, Bernhard Kübler und Johannes Leitner [Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik] (2016): Abschlussbericht zum Projekt: Charakterisierung und Weiterentwicklung integrativer Untersuchungsmethoden zur Quantifizierung des Fündigkeitsrisikos (GEOFÜND) als Verbundvorhaben innerhalb des 6. Energieforschungsprogramms : Teilprojekt: Entwicklung eines räumlich-statistischen Modells für die Schätzung von Konfidenzintervallen für die Erfolgswahrscheinlichkeit und Risikoanalyse (KIEW). Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM). <https://www.tib.eu/suchen/id/TIBKAT:88472879X/>.
- Krasznai, Reka (2022): Energie aus der Tiefe: rechtliche Grundlagen der Geothermie. <https://www.360ee.at/energie-aus-der-tiefe-rechtliche-grundlagen-der-geothermie/>.
- Kubota, Hiromi, Hiroki Hondo, Shunichi Hienuki und Hideshi Kaieda (2013): Determining barriers to developing geothermal power generation in Japan: Societal acceptance by stakeholders involved in hot springs. *Energy Policy* 61 (Oktober): 1079–1087.
- Lassacher, Simon, Simon Moser und Johannes Lindorfer (2018): Nutzung tiefer Geothermie in industriellen Prozessen.
- LfU [Bayerisches Landesamt für Umwelt] (2016): Erdwärme - die Energiequelle aus der Tiefe.
- LIAG [Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik] (o. J.): Projekt „Play Type“. Website: <https://www.leibniz-liag.de/forschung/projekte/drittmittelprojekte/playtype.html>.
- Lüdeke-Freund, Florian, Nina Hampl und Christoph Flink [publisher-place: Münchenpublisher: Oldenbourg Wissenschaftsverlag] (2012): Bankability von Photovoltaik-Projekten. In: *Solarvorhaben – Wirtschaftliche, technische und rechtliche Aspekte*, hg. v. Jörg Böttcher, S. 285–302. München: Oldenbourg. http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2067076.
- Manzella, Adele, Roberto Bonciani, Agnes Allansdottir, Serena Botteghi, Assunta Donato, Silvia Giamberini, Alessandro Lenzi, Marco Paci, Anna Pellizzone und Davide Scrocca (2018): Environmental and social aspects of geothermal energy in Italy. *Geothermics* 72 (März): 232–248.

- Mbah, Melanie und Judith Krohn (2021): Die Bedeutung von Kommunikation und Beteiligung in der Planung und Umsetzung von Geothermievorhaben – eine Fallstudie zu Stauf (D) und St. Gallen (CH). Öko-Institut Working Paper. Freiburg/Br., Darmstadt, Berlin: Öko-Institut e.V. www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/WP-Geothermievorhaben.pdf.
- Moock, Inga (2022): Metastudie zur nationalen Erdwärmestrategie: Ersatz fossiler Brennstoffe im Bereich Raumwärme und Warmwasser durch Geothermie als unverzichtbarer Bestandteil im Energiesektor Ökowärme bis 2045 - Entwicklung des Energiebedarfs für Raumwärme und Warmwasser gespiegelt mit Ausbaupfaden der Geothermie. Hannover: Leibniz-Institut für angewandte Geophysik. https://www.geothermie.de/fileadmin/user_upload/Downloads/Metastudie_Geothermie__LIAG_2022_.pdf.
- Moock, Inga, Tom Schintgen, Vladimir Shipilin und Mia Ozor (2022): Verbundprojekt PlayType: Katalogisierung geothermischer Provinzen nach dem Konzept der Fündigkeitstypen (play type) zum wirtschaftlichen Ausbau und zur Internationalisierung der deutschen Geothermie; Teilprojekt A: Vorlandbecken, Extensionszonen und Play-Type- Atlas – Endbericht.
- Ortner, Sara, Peter Mellwig, Sebastian Blömer, Nils Rettenmaier, Paula Möhring, Matthias Sandrock und Patrick Akram (2020): Berichtspflicht gemäß der Richtlinie (EU) 2018/2001 zum Potenzial der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen. Heidelberg, Hamburg. https://energy.ec.europa.eu/system/files/2021-03/de_ca_2020_de_a01_art_157_red_ii_report_germany_0.pdf.
- Palomo, Elisabet, Antonio Colmenar-Santos und Enrique Rosales-Asensio (2022): *Potential of Low-Medium Enthalpy Geothermal Energy: Hybridization and Application in Industry*. Green Energy and Technology. Cham: Springer International Publishing. <https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-95626-4>.
- Randle, James B. (2005): Financial modelling of geothermal projects. In: *Proceeding World Geothermal Congress*, S. 24–29. Antalya. <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2005/0410.pdf>.
- Reddy, Krishna R., Sanjeeta N. Ghimire, Emmanuelle Wemeyi, Roya Zanjani und Liang Zhao (2020): Life cycle sustainability assessment of geothermal heating and cooling system: UIC case study. Hg. v. J.S. McCartney und I. Tomac. *E3S Web of Conferences* 205: 07003.
- Regierungspräsidium Freiburg (2021): Regierungspräsidium erteilt dem Schweizer Wärmeverbund Riehen die Erlaubnis zur Aufsuchung von Erdwärme in Grenzach-Wyhlen (Kreis Lörrach). <https://rp.baden-wuerttemberg.de/rpf/service/presse/pressemitteilungen/artikel/regierungspraesidium-erteilt-dem-schweizer-waermeverbund-riehen-die-erlaubnis-zur-aufsuchung-von-erdwaerme-in-grenzach-wyhlen-kreis-loerrach/>.
- Rein, Stefan (2016): *Datenbasis zum Gebäudebestand: zur Notwendigkeit eines besseren Informationsstandes über die Wohn- und Nichtwohngebäude in Deutschland*. BBSR-Analysen kompakt 9/2016. Bonn: Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung.
- Riechel, Robert und Matthias Koziol (2022): Analyse der Potenziale zur Ausweitung der Wärmenetze im Land Berlin (BEK-Maßnahme E-13). Berlin.
- Ruppert, Hans, Christian Ahl, Walter Girschner, Wolfgang Krumbein, Rainer Marggraf, Konrad Scheffer und Peter Schmuck (2003): *Das Bioenergie-dorf – Voraussetzungen und Folgen einer eigenständigen Wärme- und Stromversorgung durch Biomasse für Landwirtschaft, Ökologie und Lebenskultur im ländlichen Raum. Endbericht der Phase I des gleichnamigen Forschungsprojekts des Interdisziplinären Zentrums für Nachhaltige Entwicklung der Georg-August-Universität Göttingen*. Göttingen.
- Sandrock, Dr. Matthias, Christian Maaß, S. Weisleder, H. Westholm, W. Schulz, G. Löschan, C. Baisch, H. Kreuter, D. Reyer, D. Mangold, et al. (2020a): Kommunalen Klimaschutz durch Verbesserung der Effizienz in der Fernwärmeversorgung mittels Nutzung von Niedertemperaturwärmequellen am Beispiel tiefegeothermischer Ressourcen. *Climate Change*.
- Sandrock, Matthias, Christian Maaß, Simona Weisleder, Hilmar Westholm, Wolfgang Schulz, Geraldine Löschan, Christina Baisch, Horst Kreuter, Dorothea Reyer und Dirk Mangold (2020b): Kommunalen Klimaschutz durch Verbesserung der Effizienz in der Fernwärmeversorgung mittels Nutzung von Niedertemperaturwärmequellen am Beispiel tiefegeothermischer Ressourcen: Abschlussbericht. *Climate Change*. Dessau-Roßlau: Umwelt-

- bundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_10_21_climate_change_31_2020_kommunaler_klimaschutz_durch_verbesserung_der_effizienz_abschlussb_0.pdf.
- Schröder, S., N. Bach und M. Weber (2018): Akzeptanz von LowExTra-Wärmenetzen. unveröffentlicht.
- Stark, Susanne, Felix Uthoff und John A. Millar (2020): Leitfaden zur Erschließung von Abwärmequellen für die Fernwärmeversorgung. AGFW, Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V. https://www.agfw.de/fileadmin/AGFW_News_Mediadateien/Energie-wende_Politik/agfwleitfaden_ansicht_es.pdf.
- SWR Südwestrundfunk (2023): Nachhaltig Wärme aus dem Oberrheingraben Auftakt in Bretten für regionalen Wärmeverbund. <https://www.swr.de/swraktuell/baden-wuerttemberg/karlsruhe/regionaler-waermeverbund-in-bretten-gegruendet-100.html>.
- Vattenfall Wärme Berlin AG (2023): Dekarbonisierungsfahrplan für die Wärmenetze der Vattenfall Wärme Berlin AG. Berlin. <https://xn--wrme-loa.vattenfall.de/binaries/content/assets/waermehaus/startseite/allgemein/dekarbonisierungsfahrplan---vattenfall-warme-berlin-ag.pdf>.
- Weber, Jürgen (2018): Wirtschaftlichkeit. Text. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/wirtschaftlichkeit-47252>. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. Website: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/wirtschaftlichkeit-47252/version-270518> (Zugriff: 22. August 2024).
- Wesche, Julius P., Elisabeth Dütschke und Nele Friedrichsen (2017): Entstehung innovativer Wärmenetze—Eine Analyse von sechs Fallbeispielen auf Basis der Multi-Level-Perspektive. Werkstattbericht im Projekt Transitionsgestaltung für nachhaltige Innovationen (TransNIK). Karlsruhe: Fraunhofer ISI. https://www.enbausea.de/fileadmin/user_upload/Downloads/Werkstattbericht_Nr_4_Nischenbericht_Innovative_Waermentetze.pdf.
- Wirtz, Marco, Thomas Schreiber und Dirk Müller (2022): Survey of 53 Fifth-Generation District Heating and Cooling (5GDHC) Networks in Germany. *Energy Technology* 10, Nr. 11 (November): 2200749.
- Wolfgramm, Markus und Matthias Franz (2016): Das geothermische Potenzial mesozoischer Sandsteine des Norddeutschen Beckens.
- Wüstenhagen, Rolf, Maarten Wolsink und Mary Jean Bürer (2007): Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept. *Energy Policy* 35, Nr. 5 (Mai): 2683–2691.
- Yudha, Satya Widya, Benny Tjahjono und Philip Longhurst (2022): Unearthing the dynamics of Indonesia's geothermal energy development. *Energies* 15, Nr. 14: 5009.
- Zimmermann, Jens, Ingmar Budach, Malte Metz, Gregor Barth, Matthias Franz, Peter Seibt und Markus Wolfgramm (2019): Reservoir prediction and risk assessment of hydrothermal reservoirs in the North German Basin – combining deep subsurface reservoir mapping with Monte-Carlo Simulation. Proceedings of the European Geothermal Congress 2019, Den Haag, The Netherlands, 11-14 June 2019 (Projekt GeoPoNDD). <https://europeangeothermalcongress.eu/wp-content/uploads/2019/07/221.pdf>.
- Zuffi, Claudio, Giampaolo Manfrida, Francesco Asdrubali und Lorenzo Talluri (2022): Life cycle assessment of geothermal power plants: A comparison with other energy conversion technologies. *Geothermics* 104 (September): 102434.