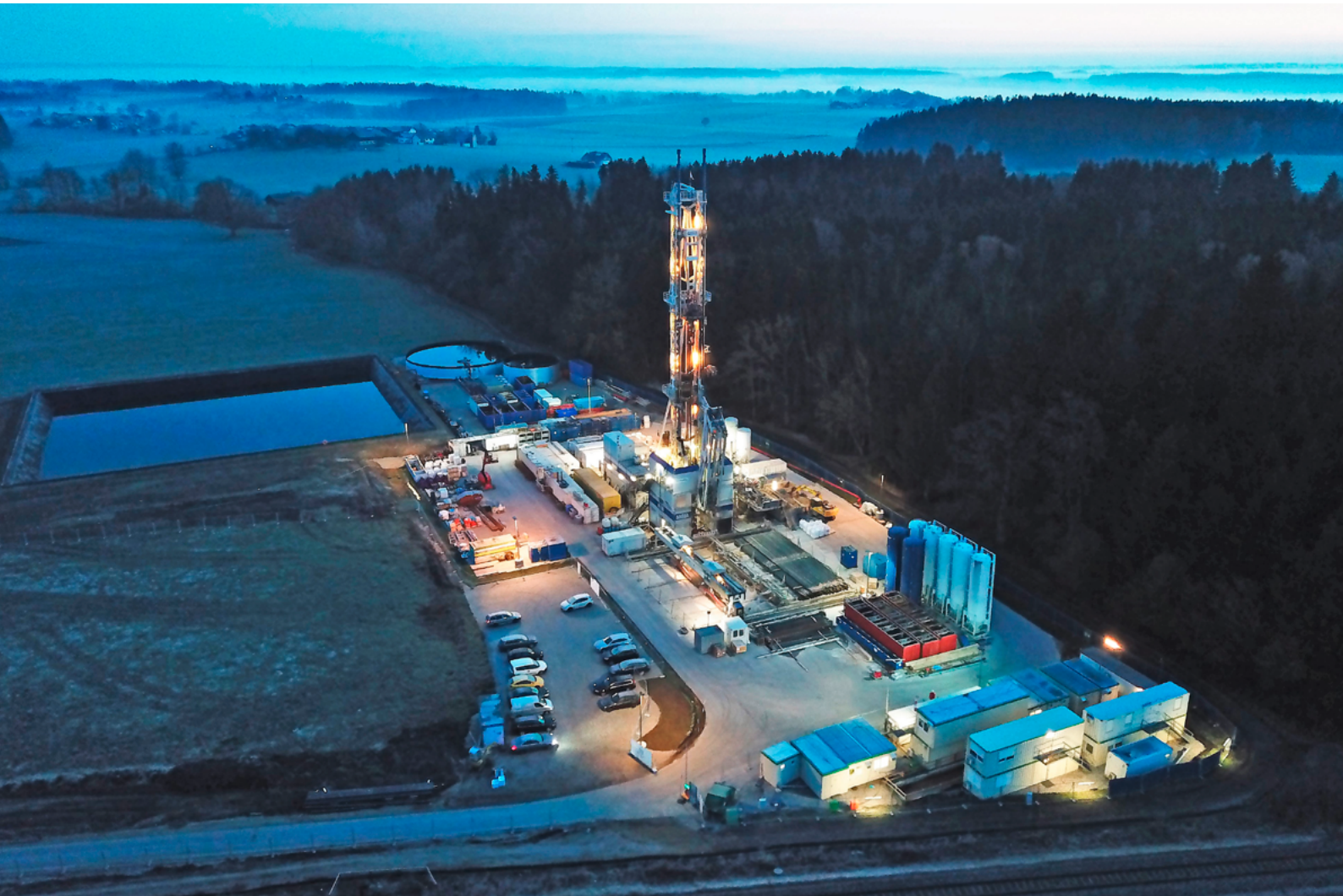




Bundesverband
Geothermie



Stand der Forschung und Forschungsbedarf in der Geothermie

Oktober 2023

Bundesverband Geothermie e. V. | www.geothermie.de

Inhalt

1. Vorbemerkung	.....01
2. Mitteltiefe und Tiefe Geothermie	.....02
2.1 Überregionale Vorerkundung	.....03
2.2 Regionale Besonderheiten der Vorerkundung	.....04
2.2.1 Süddeutsches Molassebecken	.....04
2.2.2 Oberrheingraben	.....05
2.2.3 Norddeutsches Becken und angrenzende Regionen	.....05
2.2.4 Mitteltiefe Geothermie und kleinere Beckenstrukturen	.....06
2.3 Projektbezogene Standorterkundung	.....06
2.3.1 Geophysikalische Standorterkundung	.....07
2.3.2 Hydrogeologische Bedingungen	.....07
2.4 Reservoirerschließung	.....08
2.4.1 Bohr- und Messtechnik	.....08
2.4.2 Reservoir-Verbesserung	.....09
2.5 Fördertechnik und Reservoirmanagement	.....09
2.5.1 Fördertechnik	.....09
2.5.2 Betriebsoptimierung	.....10
2.5.3 Reservoirmanagement	.....10
2.6 Energiebereitstellung und stoffliche Nutzung	.....11
2.6.1 Stromerzeugung	.....11
2.6.2 Wärmebereitstellung	.....11
2.6.3 Prozesswärme	.....12
2.6.4 Kältebereitstellung	.....12
2.6.5 Stoffliche Nutzung	.....12
2.7 Tiefe Erdwärmesonden und <i>Closed Loop</i> Systeme	.....13
2.7.1 Mitteltiefe und Tiefe Erdwärmesonden	.....13
2.7.2 <i>Closed Loop</i> Systeme (Mehrlochsysteme)	.....13
2.7.3 Nutzung von Bergbauinfrastruktur	.....14
3. Oberflächennahe Geothermie	.....15
3.1 Kostenreduktion	.....15
3.2 Effizienzsteigerung	.....16
3.3 Erweiterung der Einsatzbereiche	.....17
3.4 Grundwasserschutz	.....17
4. Wärmeverteilnetze	.....18
5. Energiespeicher im Untergrund	.....19
5.1 Energiespeicherung zur Klimatisierung	.....19
5.1.1 Wärme-/Kälte-Speicher im oberflächennahen Untergrund	.....19
5.1.2 Wärme-/Kälte-Speicher im tieferen Untergrund	.....20
5.2 Energiespeicherung zur Rückverstromung (Carnotbatterien)	.....20
6. Umwelteinwirkungen, Nachhaltigkeit und Akzeptanz	.....22
7. Ausblick	.....22

1. Vorbemerkung

Geothermische Energie (Geothermie, Erdwärme) ist die unterhalb der Oberfläche der festen Erde gespeicherte Wärmeenergie. Diese Energie ist nach menschlichen Maßstäben unerschöpflich (Nachhaltigkeit). Die Definition ist unabhängig von der Herkunft dieser Energie und schließt somit auch im oberflächennahen Untergrund verfügbare Solarenergie und in Wärmespeichern eingespicherte Energie ein.

Die Ressource Erdwärme kann auf unterschiedliche Weise genutzt werden. Mit der **Oberflächennahen Geothermie**, die die Erdwärme in den obersten 400 Metern bis zu einer Temperatur von ca. 20 °C nutzt, kann Wärme und Kälte gewonnen sowie gespeichert werden. Ab Tiefen von 400 m wird grundsätzlich von Tiefer Geothermie gesprochen. Es hat sich jedoch bewährt, einen Tiefenbereich in dem der Einsatz von Wärmepumpen in der Regel noch nötig ist, unter dem Begriff **Mitteltiefe Geothermie** gesondert zu behandeln. Die Mitteltiefe Geothermie nutzt die Wärme bis in Tiefen von bis zu 1.500 m in einem Temperaturbereich bis 60 °C. Für ihre direkte Nutzung ist meist eine Temperaturerhöhung mittels Wärmepumpen erforderlich. Dieser Bereich ist auch für die Einspeicherung von Überschusswärme von größerem Interesse. Bei der **Tiefen Geothermie** kann die Wärme meist direkt, also ohne Wärmepumpe genutzt werden. Die Energiebereitstellung erfolgt in der Regel über die Fluidförderung. Realisiert wird meist ein Thermalwasserkreislauf bestehend aus mindestens einer Förder- und einer Injektionsbohrung als Basiselement einer hydrothermalen Nutzung (geothermische Dublette). Angetrieben wird der Thermalwasserkreislauf durch eine Förderpumpe und (falls nötig) durch zusätzliche Injektionspumpen. Der natürliche Thermosiphon-Effekt reicht als Antrieb nicht aus und trägt nur untergeordnet zur Aufrechterhaltung des Thermalwasserkreislaufs bei. Alternative Arbeitsmittel (anstelle des Thermalwassers) für diesen Kreislauf sind in Diskussion. Bei der Tiefen Geothermie kann neben Wärme ab einem Temperaturniveau von ca. 100 °C durch thermische Kraftwerke zusätzlich Strom produziert werden.

Erdwärme ist eine verlässliche immer verfügbare Energiequelle. Mit aktuellen Technologien und bei gegenwärtigen Marktbedingungen ist die hydrothermale Geothermie zur Wärmenutzung marktfähig. Aktuell sind in Deutschland über 40 Heiz- und Kraftwerke sowie kombinierte Heizkraftwerke (KWK) in Betrieb. Im Bereich der oberflächennahen Geothermie sind rund 470.000 Anlagen installiert. Zukünftig soll verstärkt die Nutzung zur Wärme- und Kälteversorgung ausgebaut sowie saisonale Wärmespeicherung initiiert werden. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) hat dazu Ende 2022 ein Papier (Eckpunkte für eine Erdwärmekampagne - Geothermie für die Wärmewende¹) vorgelegt und konkret acht Maßnahmen angekündigt. Obwohl Forschung und Entwicklung nicht explizit genannt werden, kann man dennoch davon ausgehen, dass zukünftige Forschungsprojekte sich an diesem Eckpunktepapier orientieren werden.

Forschungsprojekte sollen in erster Linie dazu beitragen, den dafür geeigneten geologischen Untergrund detaillierter zu erkunden, innovative Ansätze zur Energiebereitstellung zu fördern, Risiken und Kosten zu reduzieren, Speichermöglichkeiten zu schaffen sowie Bekanntheit und Akzeptanz dieser Form von erneuerbarer Energie zu steigern. Im Schwerpunkt Geothermie hat das BMWK im Jahr 2022 110 laufende Vorhaben mit rund 18,6 Millionen Euro gefördert. 2022 hat das BMWK zudem 22 Forschungsprojekte mit einem Fördermittelansatz von rund 20,7 Millionen Euro neu bewilligt.²

Der aktuelle Stand der Forschung und der Forschungsbedarf für die verschiedenen Anwendungsfelder werden im Folgenden mit Begründungen dargestellt.

1 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2022), Eckpunkte für eine Erdwärmekampagne – Geothermie für die Wärmewende. ↗

2 In diesem Bericht lässt es sich nicht vermeiden in größerem Umfang Fachbegriffe aus der Geothermie und angrenzender wissenschaftlicher Disziplinen zu verwenden. Eine jeweilige Erläuterung würde den Rahmen dieses Berichtes sprengen. Es wird daher generell auf das Lexikon der Geothermie verwiesen, das der Bundesverband Geothermie (BVG) herausgibt. Dort sind die Begriffe meist erläutert: www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie.html ↗

2. Mitteltiefe und Tiefe Geothermie

Definitionsgemäß wird ab 400 m Tiefe von Tiefer Geothermie gesprochen. Mitteltiefe Geothermie deckt den Temperaturbereich bis 60 °C ab, was Tiefen bis zu 1.500 m entspricht. Tiefengeothermische Anlagen nutzen die im Untergrund bis über 5.000 m Tiefe vorhandene Wärme (Temperaturen über 60 °C bis 200 °C) zur Bereitstellung von Wärme und/oder zur Erzeugung von Strom. Zusätzlich zeigt ein aktuelles Projekt in München auch die Möglichkeit der Kältebereitstellung durch die Tiefe Geothermie mittels Sorptionskältemaschinen auf, was international schon länger genutzt wird. Bei der hydrothermalen Erdwärmennutzung wird im Untergrund vorhandenes Thermalwasser über Bohrungen zu Tage gefördert, meist in Wärmetauschern durch Wärmeabgabe an ein Arbeitsmittel oder in einen Sekundärkreislauf abgekühlt und anschließend wieder in das geothermische Reservoir zurückgeleitet (Thermalwasserkreislauf). In der Tiefen Geothermie wurden in den letzten beiden Jahrzehnten, nicht zuletzt durch öffentlich geförderte Forschung, wichtige Fortschritte erzielt, beispielsweise bei der Erkundung und der Reservoirerschließung, wodurch es heute möglich ist, an verschiedenen Standorten erfolgreich Nutzwärme bereitzustellen und/oder Strom zu erzeugen. Das Energieforschungsprogramm der Bundesregierung, das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), das Gebäudeenergiegesetz (GEG), die Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) und die Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW) bilden dafür den politischen Rahmen. Zusätzlich zu weiteren Fördermaßnahmen existieren auch Förderprogramme der EU und auf Länderebene.

Neben der direkten lokalen Nutzung des Thermalwassers zu balneologischen Zwecken und zur Gebäudeheizung, welche in Deutschland an ca. 170 Standorten erfolgt, stellt die Beschickung von Wärmenetzen heute die vorrangige Nutzung tiefer geothermischer Reservoirs dar. Über 40 Anlagen mit einer installierten thermischen Leistung von ca. 451 MW stellten (2021) rund 1.800 GWh (6,5 PJ) Wärmeenergie bereit. Die Wärmemenge der bestehenden Anlagen könnte bei einer besser angepassten Abnehmerstruktur doppelt so hoch sein. Durch Hochtemperatur-Wärmepumpen (z. B. extern beheizt durch Müllverbrennung) könnten auch leichter erschließbare flachere Horizonte hydrothermal genutzt werden.

Die Nutzung der geothermischen Energie zur Wandlung in Strom erfolgt zurzeit an zehn Standorten, wobei über-

wiegend ein- und zweistufige ORC (*organic rankine cycle*)-Kraftwerke oder eine Kalina-Anlage zum Einsatz kommen. Die Stromerzeugung stellt an den meisten Standorten eine Ergänzung zur oft nicht ganzjährig ausreichend nachgefragten Wärmebereitstellung dar, d. h. diese Kraftwerke sind wärmegeführt. Eine reine Stromerzeugung ist nur an einigen wenigen Standorten realisiert. Die elektrische Anlagenkapazität beläuft sich momentan auf ca. 46 MW_{el} und erzeugt (2021) etwa 207 GWh (0,75 PJ) Strom.

Die erfolgreiche Entwicklung von Projekten zur Nutzung geothermischer Energie für die Wärmebereitstellung ist u. a. an folgende Kriterien geknüpft:

1. Es müssen geeignete geologische Bedingungen vorhanden sein.
2. Es bestehen ein ausreichender und langfristig planbarer Wärmeabsatz sowie die Möglichkeit zum Anschluss an ein Wärmeverteilnetz.
3. Das Wärmeprojekt kann langfristig und flexibel entwickelt werden.
4. Die Projektfinanzierung ist trotz der hohen Anfangsinvestitionen, der langen Umsetzungsdauer und der langen Projektlaufzeit darstellbar.
5. Eine ausreichende Akzeptanz in der lokalen Bevölkerung kann durch frühzeitige Information und Beteiligung sichergestellt werden.

Das bestehende Potenzial, die kontinuierliche Verfügbarkeit der Wärmequelle, die vielseitigen Nutzungsoptionen, die positive Ökobilanz bei entsprechendem Nutzungskonzept und die technische Beherrschbarkeit der Umweltauswirkungen sind Gründe für den intensivierten Ausbau der Tiefen Geothermie in der Zukunft. Das wird von der Branche forciert und auch politisch im Bund und in den Ländern unterstützt. Weitere Projekte zur energetischen Nutzung des Untergrunds, insbesondere mit dem Ziel der Wärmebereitstellung, befinden sich daher gegenwärtig in der Planung. Zusätzlich bietet der mögliche Transport der Wärme über längere Strecken (bis ca. 50 km) mit gut isolierenden Verbundleitungen eine attraktive Möglichkeit, Ballungsgebiete durch getrennte, auseinander liegende Geothermie-Anlagen zu versorgen. Dabei wird zukünftig die Wärmeversorgung in Ballungsgebieten (auch Quartieren) und die Energiespeicherung stärker in den Fokus gelangen (»Wärmewende«). Wichtig ist die (öffentlich geförderte) Errichtung von Demonstrationsanlagen, die

unterschiedliche geologische Strukturen erschließen; dadurch ergibt sich auch eine Verbesserung der Validierung und Kalibrierung von Modellrechnungen. Dies alles führt dazu, dass die geothermische Wärmeversorgung in den nun anliegenden Wärmeplanungen der Kommunen³ an vielen Stellen eine entscheidende Rolle spielt.

Die Weiterentwicklung des Technologiefeldes Geothermie ist nicht auf den nationalen Markt beschränkt, sondern bietet ein weites Betätigungsfeld auch im internationalen Kontext.

2.1 Überregionale Vorerkundung

Voraussetzung für die Planung tiefegeothermischer Projekte ist eine gute Basis an Untergrunddaten. Es geht dabei nicht nur um Tiefenlage und Mächtigkeit geothermischer Reservoirs, sondern auch um verlässliche Angaben zur Störungsverläufen, Faziesverteilungen, Untergrundtemperaturen und hydraulischen sowie hydrochemischen Parametern, die die Grundlage für die Wirtschaftlichkeit der Anlagen sind. Das trifft sowohl für die Mitteltiefe wie auch für die Tiefe Geothermie zu.

Tiefbohrungen, hauptsächlich abgeteuft zur Aufsuchung und Förderung von Rohstoffen, sind hierfür zurzeit die wichtigste Informationsquelle. Zwar gibt es in Deutschland mehrere zehntausend derartige Bohrungen, sie sind aber regional sehr ungleichmäßig verteilt und konzentrieren sich hauptsächlich in heutigen oder ehemaligen Fördergebieten von Erdöl, Erdgas und Kohle. Viele dieser Bohrungen wurden bereits in den 1930er bis 1980er Jahren niedergebracht. Die damals durchgeführten Bohrlochmessungen, hydraulischen Tests und hydrochemischen Analysen entsprechen oft nicht mehr dem heutigen Stand der Technik, liefern aber trotzdem unerlässliche Erstinformationen, wie geophysikalische, hydraulische und hydrochemische Daten sowie die Tiefenlage und Lithologie der erbohrten Formationen. Mangelnde oder veraltete Datenqualität haben auch viele seismische Messungen, die im Rahmen der Erkundung von Kohlenwasserstoffen und Kohle durchgeführt wurden. Diese Daten müssen häufig zunächst nachdigitalisiert werden. Die vorhande-

nen Geo-Informationen sind weitgehend über das Informationssystem GeotIS des Leibniz-Instituts für Angewandte Geophysik (LIAG)⁴ verfügbar, reichen aber für eine konkrete Planung (Machbarkeitsstudie) in den meisten Fällen nicht aus.

Der bereichsweise Mangel an detaillierten Untergrundinformationen - insbesondere auch zusammenhängend und konzessionsübergreifend - führt zu Unsicherheiten bei der Einschätzung des Fündigkeitsrisikos sowie bei der Erstellung eines fundierten Reservoirmanagements, was ein Hemmnis bei der Realisierung tiefegeothermischer Projekte ist. Durch das neue Geologiedatengesetz (GeolDG)⁵ sollte zumindest langfristig der Zugang auch zu bisher vertraulichen Daten der Kohlenwasserstoffindustrie und des Bergbaus, wie seismische Sektionen, hydraulische und hydrochemische Daten sowie Bohrlochmessungen, gesichert sein.

Ein öffentlich gefördertes, langfristiges, projektunabhängiges Erkundungsprogramm für relevante geothermische Reservoirinformationen in Gebieten mit unzureichenden Untergrundinformationen ist unbedingt erforderlich. Dies betrifft insbesondere Regionen, in denen bislang keine oder kaum geothermische Erkundungen stattfanden, oder potenziell geothermisch interessante Horizonte, die bislang kaum Beachtung fanden. Planung und Durchführung des Programms sollte gemeinsam von den relevanten geowissenschaftlichen Forschungsinstitutionen, den Geologischen Diensten der Länder und der Industrie durchgeführt werden. Frühere Großprojekte (z. B. DEKORP - Deutsches Kontinentales Reflexionsseismisches Programm 1984-1997) haben zu einem erheblichen geowissenschaftlichen Erkenntnisgewinn geführt. Ausgehend von Regionen/Standorten mit guter Prognose sollten auch weniger bekannte Regionen untersucht werden. Zeichnen sich dabei Lokationen potenzieller geothermischer Nutzung ab, können gezielte weiterführende, also projektbezogene, Untersuchungen angesetzt werden. Ein derartiges Bohr- und Erkundungsprogramm kann einen erheblichen Beitrag zur Kosten- und Risikominimierung in späteren Projekten leisten.

3 Entwurf eines Gesetzes für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze (Kabinettdfassung vom 16.08.2023) [↗](#)

4 www.geotis.de/ [↗](#)

5 Gesetz zur staatlichen geologischen Landesaufnahme sowie zur Übermittlung, Sicherung und öffentlichen Bereitstellung geologischer Daten und zur Verfügungstellung geologischer Daten zur Erfüllung öffentlicher Aufgaben (Geologiedatengesetz - GeolDG) vom 19. Juni 2020 [↗](#)

Ein solches Erkundungsprogramm dient zusätzlich dem Kompetenzerhalt in den Explorationsgeowissenschaften, der durch den Niedergang der Kohlenwasserstoffwirtschaft gefährdet erscheint.

FORSCHUNGSBEDARF:

1. Durchführung eines öffentlich geförderten Bohrprogramms an verschiedenen, geothermisch relevanten Lokationen mit entsprechender Standort-Vorerkundung. Dabei sollten auch weitere potenzielle Regionen untersucht werden, in denen bisher keine oder nur unzureichende Untergrunddaten vorliegen.
2. Durchführung von geophysikalischen Messungen, Untersuchungen der Lithologie (ggf. mit Kerngewinnung in Bohrungen) und hydraulischen Tests in allen geothermisch potenziell interessanten Horizonten, um verlässliche Untergrunddaten zu erhalten. Hierbei sollten auch moderne Verfahren wie z. B. Bohrloch-NMR oder Glasfasermessmethoden eingesetzt werden.
3. Durchführung von großräumigen seismischen Messungen (2D und 3D) zur Erkundung geothermisch häufiger Regionen, auch um die 1D-Daten der Bohrungen auf ein größeres Gebiet zu übertragen.

2.2 Regionale Besonderheiten der Vorerkundung

Bedingt durch den verlässlichen Kenntnisstand der geologischen Gegebenheiten sowie die energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen (Investitionsbereitschaft, angemessene Wärmepreise, vorhandene Infrastruktur) hat sich die Geothermie in verschiedenen Regionen unterschiedlich entwickelt. Entsprechend leitet sich ein regional differenzierter Forschungsbedarf für die drei klassischen Geothermierregionen (Süddeutsches Molassebecken, Oberrheingraben und Norddeutsches Becken), aber insbesondere für weitere Beckenstrukturen ab.

2.2.1 Süddeutsches Molassebecken

Tiefengeothermische Anlagen, die den Oberjura-Aquifer des Süddeutschen Molassebeckens nutzen, haben im Großraums München sowie im östlichen Molassebecken bereits Marktreife erreicht, so dass hier der Schwerpunkt auf projektbegleitende Maßnahmen zur Langzeitbeobachtung, Betriebsoptimierung und Kostenreduktion gelegt werden sollte. Auf Basis des erreichten

Standes der Technik bestehender Geothermieprojekte sollte die Entwicklung geothermischer Komponenten einen weiteren Schwerpunkt bilden. Die bereits vorhandene Datenlage, auch durch eine Vielzahl bestehender Geothermieprojekte, liefert gute Voraussetzungen für weitere Forschungsarbeiten, z. B. zum Wärmetransport im Reservoir mit Auswirkungen auf die Hydrochemie.

Im Gegensatz zum in Süddeutschland primär genutzten Aquifer der Weißjura-Gruppe sind andere Aquifere, wie beispielsweise der Obere Muschelkalk oder tertiäre Sandsteine, im Molassebecken noch wenig erkundet. Hier bedarf es weiterreichender Erkundungen, wie sie z. B. auch im Oberrheingraben vorgesehen sind. Aber auch der Oberjura außerhalb der beiden oben genannten Bereiche bedarf einer weitergehenden Exploration hinsichtlich seines geothermischen Potenzials.

Die Anreize durch das Marktanreizprogramm (MAP) haben wesentlich zur Entwicklung beigetragen. Somit sind das MAP bzw. Nachfolgeprogramme eine wichtige Voraussetzung für die Entwicklung weiterer Projekte.

FORSCHUNGSBEDARF:

1. Weiterentwicklung der seismischen Reservoircharakterisierung, z. B. durch moderne Methoden wie *multi-attribute machine-learning processes* oder *prestack (AVO) inversion*.
2. Besseres Verständnis der Spannungszustände im tiefen Untergrund, v.a. in Störungssystemen, z. B. durch Messung der Spannungsverhältnisse in Tiefbohrungen zur Kalibrierung geomechanischer Modellierungen.
3. Untersuchung des Einflusses von Temperaturveränderungen durch langjährige Erdwärmenutzung und des lokalen Spannungsfeldes auf Störungssysteme inkl. numerischer Modellierung und Untersuchung der hydraulischen Eigenschaften, z. B. durch in-situ Spannungsmessungen kombiniert mit gezielten hydraulischen Tests. Ziel ist ein besseres thermo-mechanisch-hydraulisches Verständnis der Entstehung von induzierter Seismizität.
4. Untersuchung der thermisch-hydraulischen Interaktion benachbarter Geothermieprojekte mittels belastbarer thermo-hydraulischer Modelle (projektübergreifendes Reservoirmanagement).
5. Weiterentwicklung von Stimulationsmaßnahmen und Verbesserung des hydraulischen Verständnisses von Zuflusszonen: Isolierte Säurestimulation mittels Packersysteme, um hydraulisch wenig aktive Bereiche gezielt zu verbessern und die flächige Anbindung an

das Reservoir herzustellen, sowie Überprüfung der Effizienz mittels hydraulischer Tests.

6. Erkundung weiterer potenzieller Reservoirinformationen unter Verwendung moderner geophysikalischer Verfahren.

2.2.2 Oberrheingraben

Die Entwicklung tiefegeothermischer Anlagen im Oberrheingraben geht im Vergleich zum Molassebecken immer noch langsamer voran, obwohl auch hier eine gewisse Marktreife erreicht wurde und das Interesse stetig steigt. Hindernisse sind auch die teilweise unzureichende Akzeptanz, teilweise hervorgerufen durch das Auftreten von mikroseismischen Ereignissen besonders in den Nachbarländern und deren Instrumentalisierung durch Bürgerinitiativen.

FORSCHUNGSBEDARF:

1. Verbesserung der Kenntnis der natürlichen und durch Pumpen induzierten Thermalwasserströme.
2. Weiterentwicklung reflexionsseismischer Techniken zur Erkundung der Feinstruktur im Reservoirhorizont wie z. B. zwischengelagerte Tonschichten sowie reduzierte Porosität/Permeabilität durch Zementation des Porenraums, auch unter Verwendung angepasster elektromagnetischer Verfahren.
3. Nutzung aktiver und passiver seismischer Verfahren zum Monitoring der Störungsaktivierung; Stichworte sind ›full-waveform inversion‹ und ›reverse time processing‹.
4. Erfassung von seismischen Gefährdungsbereichen im urbanen Raum durch oberflächennahe Erkundung (Mikrozonierung, Einwirkungsbereiche).
5. Messung des Spannungsfeldes, Untersuchung des Einflusses auf vorhandene Störungssysteme einschließlich geomechanischer Modellierung.
6. Entwicklung prognostischer Ampelsysteme zur Realisierung eines aus seismologischer Sicht ›kontrollierten Betriebs‹.
7. Hydrochemie und Gasgehalt der Tiefenwässer: Vermeidung/Minimierung von *scaling* und Korrosion.
8. Großfläche Bestimmung von Stoffgehalten der Thermalwässer (Stichwort: Koproduktion)

2.2.3 Norddeutsches Becken und angrenzende Regionen

Obwohl das Norddeutsche Becken prinzipiell über das größte geothermische Potenzial verfügt, sind tiefegeothermische Anlagen bisher nur an einzelnen Standorten mit bekannter Geologie und vorhandenen Heiznetzen realisiert worden. Für eine weiträumigere geothermische Entwicklung im Norddeutschen Becken und angrenzenden Gebieten (z. B. in NRW) sind noch grundlegende Forschungsfragen zur Reduzierung von Fündigkeitsrisiken, wie z. B. der Zementation des Porenraums, zu lösen. Die Zementation des Porenraums kann unter den gegebenen Bedingungen von Druck, Temperatur und Salzgehalt nicht belastbar prognostiziert werden, da die hierfür erforderlichen standortunabhängigen thermodynamischen Daten nicht vorhanden sind. Modellrechnungen und Abschätzungen beruhen vielfach nicht auf regional belastbaren Labordaten und sind insofern als spekulativ einzustufen. Weitere Forschungsfragen ergeben sich zur Vermeidung von unkontrollierten Ausfällungen im Reservoir sowie zur hydraulisch dauerhaften Reservoirnutzung mit Demonstration an geeigneten Anlagen.

Weitere potenzielle geothermische Gebiete und Horizonte, die bisher noch nicht untersucht wurden, sind geklüftete Sandsteine und Karbonatgesteine im Devon und Karbon in Nordwest-Europa. Höffige Gebiete liegen in Nordrhein-Westfalen und im westlichen Niedersachsen und reichen weit in die Nachbarländer. Hier liegt umfangreiches Datenmaterial des Steinkohlebergbaus vor. Neuerdings werden auch Tertiäre Sandsteine, die häufig wenig erkundet sind, interessant.

FORSCHUNGSBEDARF:

1. Weiterentwicklung reflexionsseismischer Techniken zur Erkundung der Feinstruktur im Reservoirhorizont wie z. B. zwischengelagerte Tonschichten sowie reduzierte Porosität/Permeabilität durch Zementation des Porenraums, auch unter Verwendung angepasster elektromagnetischer Verfahren. Kartierung von Schüttungsrinnen aus dem skandinavischen Hochland in das Sedimentbecken.
2. Entwicklung eines angepassten Konzeptes für seismische Explorationsmethoden auf tiefliegende Sand- und Karbonatgesteine.
3. Laborexperimente zur Gewinnung thermophysikalischer Eigenschaften (z. B. Dichte, Viskosität und Wärmekapazität) geothermischer Fluide sowie über Minerallöslichkeiten zur Gewinnung standortunabhängiger

Modellparameter, die bei der THMC-Modellierung für realistische Fällungs- und Zementationsprognosen benötigt werden.

4. Erarbeitung von Daten zu den hochsalinen Thermalwässern und den sich daraus ergebenden Herausforderungen bei der thermischen Nutzung
5. Kompilation der relevanten Daten für geklüftete Sandsteine und Karbonatgesteine des Devons und Karbons im nordwestlichen Raum und Einpflege in das Geothermische Informationssystem.

2.2.4 Mitteltiefe Geothermie und kleinere Beckenstrukturen

Bisher konzentrierten sich die hydrogeothermischen Projekte auf die drei großen Beckenstrukturen in Deutschland, da dort Aquifere in größerer Tiefe mit hohen Temperaturen vorhanden sind. Durch den Einsatz von (Groß-)Wärmepumpen geraten aber in Zukunft auch Aquifere in mitteltiefer Lage in den Fokus, und damit bisher nicht explorierte flachere, kleine Becken wie z. B. das Thüringer Becken, das Saar-Nahe-Becken, das Kraichgau-Becken oder Gebiete in Nordbayern

Aber auch innerhalb der großen Beckenstrukturen muss das Augenmerk verstärkt auf die Mitteltiefe Geothermie gelegt werden. Im Norddeutschen Becken nimmt im Allgemeinen die Porosität und Permeabilität mit der Tiefe ab. Deshalb sollte auch die Nutzung flacherer Sandsteinlagen in Betracht gezogen werden, die dann niedrigere Temperaturen, aber eine größere Permeabilität haben, wie es z. B. in Dänemark praktiziert wird und wie es im erfolgreichen Projekt Schwerin verwirklicht wurde. Insbesondere im nördlichen Oberrheingraben sowie im Molassebecken kommen ebenfalls tertiäre Reservoirs als mitteltiefe geothermische Nutzhorizonte in Frage.

FORSCHUNGSBEDARF:

1. Durchführung eines angepassten Explorationsprogramms für flachere Beckenstrukturen, durch 2D und 3D seismische Erkundung.
2. Einbeziehung bisher nicht oder wenig explorierter Regionen oder geologischer Strukturen
3. Durchführung eines öffentlich geförderten Bohrprogramms für Mitteltiefe Geothermie an verschiedenen, geothermisch relevanten Lokationen mit entsprechender Standort-Vorerkundung.

2.3 Projektbezogene Standort-erkundung

Um den Ausbau verlässlicher, effizienter und wirtschaftlicher geothermischer Anlagen voranzutreiben, wird die belastbare Prognose der geologischen Gegebenheiten (lokale Geologie, chemische und physikalische Fluideigenschaften sowie mechanisch-hydraulische und poroelastischen Gesteinseigenschaften) für größere Gebiete benötigt, um dann geeignete Standorte für eine Detailerkundung auszuwählen. Eine verlässliche Prognose beinhaltet dabei:

1. Die Erhebung qualitativ hochwertiger Daten durch die Kombination aus etablierten und neuen Erkundungsmethoden.
2. Die Einbindung der Interpretation vorhandener Informationen, beispielsweise aus der überregionalen Vorerkundung.
3. Die Bewertung der Eignung des Untergrunds zur langfristigen Nutzung für den jeweiligen Anwendungsfall mit geeigneten Modellierungswerkzeugen, die eine Gesamtsystembetrachtung ermöglichen. Dazu sollten die hydraulisch-mechanischen und die thermisch-chemischen Kopplungen berücksichtigt und die ablaufenden Prozesse dreidimensional abgebildet werden (Konzeptionelles Modell, THMC-Modellierung).
4. Einbeziehung der Nachbarstandorte und deren Produktionsgeschichte (*history match*). Systematische Erarbeitung und Pflege einer Lernkurve.

Die verlässliche Charakterisierung des Untergrunds, des geothermischen Fluids und der im Betrieb ablaufenden Prozesse ist wesentlicher Bestandteil der erfolgreichen Projektplanung und -Realisierung, angefangen bei der Standortbewertung über die Bohrplanung bis hin zur Festlegung der Parameter für die Betriebsführung. Je früher die benötigten Daten zur Verfügung stehen, desto einfacher (d. h. schneller und kostengünstiger) können notwendige Anpassungen in der Anlagengestaltung und der Planung der Betriebsführung vorgenommen werden. Aufgrund der Fülle der benötigten Daten und der vielfältigen Standortcharakteristiken gehen die Bestrebungen dahin, systematische Datenkataloge zu erstellen und öffentlich zugänglich zu machen, um so die standortspezifischen Explorations- und Charakterisierungsmaßnahmen zu minimieren und auch erst später vorliegenden Betriebserfahrungen vorzugreifen.

Zur Erhebung geologischer Daten sind heute verschiedene Erkundungsmethoden verfügbar. Insbesondere hat die

integrierte Anwendung verschiedener Explorationsmethoden gezeigt, dass die Qualität der erhobenen Daten deutlich gesteigert werden kann. Urbane Räume kommen zunehmend in den Fokus, weil sie einen großen Bedarf an erneuerbarer Wärmebereitstellung haben, der aus der natürlich vorhandenen geothermischen Energie gedeckt werden kann oder aus gespeicherter Wärme gesichert werden könnte. Dafür sind die Entwicklung spezieller, für urbane Bereiche geeigneter Explorationsstrategien sowie ein einfacher öffentlicher Zugang zu bestehenden Daten, auch aus der Exploration der Kohlenwasserstoffindustrie des vergangenen Jahrhunderts (z. B. Bohrergebnisse, seismische Messungen), erforderlich. Die durch das neue Geologiedatengesetz erreichte Verfügbarkeit muss effektiv für die Nutzer umgesetzt werden. Notwendig ist ein Onlinezugriff, z. B. über das Geothermische Informationssystem GeotIS des LIAG, das hierzu befugt und in Zusammenarbeit mit den Geologischen Diensten der Länder weiterentwickelt werden müsste.

Methodenspezifisch ergibt sich folgendes Bild:

2.3.1 Geophysikalische Standorterkundung

Im Rahmen des geothermischen Eckpunktepapiers des BMWK sollen in einer Explorationskampagne für die Mitteltiefe und Tiefe Geothermie mindestens 100 Standorte mit erwartetem gutem geothermischem Potenzial und nutzbarer Infrastruktur als Demonstrationsprojekte erschließungsfähig qualifiziert werden. Untersucht werden diese Möglichkeiten auch im Projekt WarmUp.

Bei der geophysikalischen Erkundung geothermischer Reservoirstrukturen kommt in Deutschland der dreidimensionalen Reflexionsseismik eine herausragende Rolle zu. So konnten z. B. im den Karbonaten der Weißjura-Gruppe des Molassebeckens höfliche Bereiche mit erhöhter Klüftung/Porosität durch eine Analyse der seismischen Geschwindigkeiten und weiterer Attribute nachgewiesen werden. In Sandsteinreservoirn ergeben sich hingegen noch Probleme z. B. durch lokale Zementation des Porenraums oder geringmächtige hydraulisch undurchlässige Lagen aus Tonstein, die mit anzupassenden reflexionsseismischen Verfahren detektiert werden müssen.

Eine Herausforderung für die Geophysik im Vorfeld einer geothermischen Nutzung, auch des kristallinen Untergrundes, stellt die Erkundung tektonischer Störungssysteme dar, die wasserführend jedoch aber dennoch dicht sein können (Porosität). Von besonderem Interesse sind große Störungssysteme mit hydraulischen Wegsamkeiten (Permeabilität).

FORSCHUNGSBEDARF:

1. Datensicherung und Aktivierung einer Lernkurve im Rahmen des >100 Projekte Programms<; Aufbau entsprechender öffentlich zugänglicher Datenbanken.
2. Anpassung modernster Akquisitions-Techniken der Seismik, wie *split-sweep*, *Nodes* ev. mit MEMS als Aufnehmer, Permanentregistrierung etc., an die geothermischen Gegebenheiten insbesondere in urbanen Räumen; Ausschöpfung neuer Möglichkeiten der Messgeometrie. Entwicklung analoger Methoden zur Unterdrückung von Umwelt Noise.
3. Reflexionsseismische Auflösung zur Detektion teils kleinräumiger Strukturen innerhalb des Reservoirhorizontes wie z. B. lokale Zementation des Porenraums oder, gemessen an der seismischen Wellenlänge, geringmächtiger hydraulisch undurchlässiger Lagen aus Tonstein. Lösungsansätze ergeben sich durch zusätzliche Verwendung von Scherwellen, die Untersuchung seismischer Anisotropie und weiterer Attribute sowie einer >full-waveform inversion< (FWI).
4. Ermittlung petrophysikalischer Parameter (z. B. Porosität) durch P- und S-Wellenerkundung als Eingangsparameter für poroelastische Modellierungen.
5. Passive seismische Methoden auch mit Nutzung faseroptischer Aufnehmer (DAS).
6. Weitere methodische Arbeiten zur Detektion hydraulischer Wegsamkeiten innerhalb von Störungssystemen. Dabei ist eine Kombination von Elektromagnetik und Reflexionsseismik denkbar, wobei die reflexionsseismisch erfassten Strukturelemente als Nebenbedingungen (*constraints*) in die Auswertung der Elektromagnetik einfließen. Mineralisierte Fluide innerhalb des Störungssystems würden sich hierbei durch erhöhte elektrische Leitfähigkeit abzeichnen.
7. Entwicklung von >joint inversion< Technologien zur gemeinsamen Bearbeitung und Auswertung verschiedener geophysikalischer Methoden.
8. Genauere und kleinräumige Fazies- und Diagenesemodelle und zeitliche Entwicklung des Porenraums.
9. Seismische Abbildung von glazialen Schüttungsrinnen im Norddeutschen Becken.

2.3.2 Hydrogeologische Bedingungen

Fluide und ihre natürliche und erzwungene Strömung spielen neben der Temperatur für die energetische Nutzung des Untergrundes die entscheidende Rolle (Permeabilität, Hydrochemie). Geothermische Fluide sind aufgrund ihrer komplexen chemischen Zusammensetzung und der Gas- und Feststoffgehalte oft enorme Herausforderungen für die Materialwahl, die Anlagengestaltung und Betriebsfüh-

Die für die Planung benötigten Daten umfassen für den im Betrieb relevanten Druck- und Temperaturbereich Informationen zur Fluidzusammensetzung (Hydrochemie, Gasgehalte) und deren Temperatur- und Druckabhängigkeit, Fluid-Gesteins- und Fluid-Material-Wechselwirkungen sowie thermophysikalische Stoffeigenschaften, um standortspezifische Aussagen zur Entwicklung und Vermeidung von Korrosion oder *scaling* (Ausfällungen) ableiten zu können. Zur Verhinderung dieser Betriebsrisiken gehören die Identifizierung geeigneter Materialien und Beschichtungen zum Schutz vor Korrosion, die Entwicklung von Inhibitoren oder vergleichbarer Maßnahmen und operativen Strategien zur Vermeidung von Ausfällungen oder Korrosion sowie die Entwicklung von Additiven und Betriebsstrategien zur kontrollierten Mineral-Fällung. Die Zusammensetzung von Inhibitoren bei bestehenden Anlagen sollte zugänglich gemacht werden.

FORSCHUNGSBEDARF:

1. Erweiterung der Datenbasis thermophysikalischer Eigenschaften (z. B. Dichte, Viskosität und Wärmekapazität) geothermischer Fluide als Eingabeparameter entsprechender THMC-Modelle (vollständige numerische Kopplung von Temperatur, Hydraulik, Mechanik und Chemie).
2. Erweiterung der Datenbasis hydrochemischer Analysen sowie Gasgehalte von Fluiden, um Rückschlüsse auf *Scaling*- und Korrosionspotenzial abzuschätzen und bspw. auch Rückschlüsse auf die Lagerstätten-temperatur (Geothermometer) zu ermöglichen.
3. Isotopenuntersuchungen an Fluiden zur Bestimmung des Alters, der Paläotemperaturen und anderer Eigenschaften wie Compartmentbildung.
4. Simulation und Prognosemodell für die Entstehung von Ausfällungen (lokal, zeitlich, mengenmäßig) auf Basis von Geologie und Betriebsweise. Weiterentwicklung von Inhibitoren und anderen Formen des Korrosions- und *Scalings*schutzes.
5. Entwicklung von Maßnahmen und Anlagenkomponenten zur Beseitigung von *scaling* im Betrieb. Ordnungsgemäße Entsorgung von *scalings* und Filterrückständen.

2.4 Reservoirerschließung

Tiefengeothermische Reservoirs müssen durch Bohrungen erschlossen werden. Standardelement ist eine Bohrungsdublette bestehend aus einer Förder- und einer Injektionsbohrung. Da das Bohren der kostenintensivste Teil bei der Errichtung einer geothermischen Anlage ist, sind Bohrtechniken primär bei der Kostenreduktion und der Erforschung von Alternativen anzusetzen.

2.4.1 Bohr- und Messtechnik

Die Kosten für die Bohrungen stellen den Großteil der Anfangsinvestitionen tiefengeothermischer Anlagen dar. Aufgrund von Weiterentwicklungen und Anpassungen in der Bohrtechnik und Bohrablaufplanung konnten bereits, insbesondere an Standorten mit bekannter Geologie, erhebliche Zeit- und damit auch Kosteneinsparungen erzielt werden. Mit steigender Erfahrung bei der bohrtechnischen Erschließung geothermischer Reservoirs ist eine Kostendegression an vergleichbaren Standorten zu erwarten. Im Hinblick auf die im Rahmen der Wärmewende erforderlichen ortsnahe Erschließung geothermischer Standorte in städtischen Gebieten werden steigende Anforderungen an den Betriebsablauf, die Lärmemissionen und alle umweltrelevanten Aspekte gestellt. Derzeit werden Projekte an einigen urbanen Standorten wegen nicht geeigneter Bohranlagen und -techniken oder durch einen erheblichen zusätzlichen Kostenaufwand behindert.

FORSCHUNGSBEDARF:

1. Erschließung weiterer Kostensenkungspotenziale.
2. Entwicklung eines Bohrrisikomanagements mit vorbereiteten Maßnahmen für den Risikofall.
3. Verringerung des Personalbedarfs durch Automatisierung.
4. Erhöhung der Bohrgeschwindigkeit bei geringerem Bohrrisiko.
5. Ganzheitliche Entwicklung von Bohranlagen inkl. der erforderlichen Peripherie für urbane Bohrprojekte im Rahmen der Wärmewende.
6. Entwicklung neuer Tools für die Analyse von Geothermie-Bohrungen im Betrieb.
7. Anpassung von weiteren Tools der KW-Industrie für die Geothermie.
8. Forschung zur Langzeitstabilität und -integrität von Geothermiebohrungen und Weiterentwicklung des Bohrdesign zur Erhöhung der Lebensdauer.

9. Entwicklung von Bohrungen mit hoher horizontaler Reichweite durch Adaption von Extended Reach Drilling (ERD) Technologie aus der KW-Industrie.

2.4.2 Reservoir-Verbesserung

Um die Entwicklung tiefengeothermischer Standorte, insbesondere im Norddeutschen Becken, voranzutreiben, sind weitere Aktivitäten zur hydraulischen Reservoirverbesserung notwendig, durch die der Anschluss der Bohrung an Reservoirschichten mit hoher Permeabilität beispielsweise durch künstliche Risse oder Weitung bereits vorhandener Risse (auch unter Einsatz von chemischem Lösungspotenzial) verbessert wird und so eine wirtschaftliche Nutzung erreicht werden kann (hydraulische Stimulation).

Hierfür sind vor allem Erschließungsmethoden für hydraulisch dichte Tiefengesteine (enhanced geothermal systems) für den Einsatz bei hydrothermalen Systemen weiter voranzutreiben. Erfolgversprechend ist vor allem das Multiriss-Konzept. Dabei werden undurchlässige Bereiche (z. B. Tonstein oder Kristallingestein) zwischen parallelen Horizontal-Bohrlochstrecken durch eine definierte Anzahl kleinerer Rissflächen hydraulisch erschlossen, z. B. durch zwei jeweils 1.000 m lange Horizontalstrecken mit 20 - 40 hydraulisch erzeugten Rissen, die jeweils nur eine Fläche von einigen hundert m² haben. Durch die große Anzahl an Rissen können die erforderlichen hohen Thermalwasserfließraten mit vertretbaren Pumpleistungen realisiert werden. Die zur Erzeugung der Risse notwendigen Hochtemperatur-Multipackersysteme sind mittlerweile verfügbar, außerdem ist die Richtbohrtechnik zu einem Standard-Verfahren ausgereift. Durch die vergleichsweise geringe Fläche der Einzelrisse ist das seismische Risiko gering, so dass dieses Verfahren auch zur Wärmeversorgung (bzw. Kraft-Wärme-Kopplung) im urbanen Raum geeignet scheint.

Zur Eingrenzung von spürbarer Seismizität müssen bereits vor und während des Bohrvorgangs entsprechende Daten für die geomechanischen Betrachtungen erhoben werden (Monitoring), und dies nicht nur in den Reservoirhorizonten.

Neben der mechanischen Reservoirverbesserung kann auch eine chemische Reinigung der Bohrung und bohrlochnaher Reservoirbereiche insgesamt zu einer Verbesserung der hydraulischen Eigenschaften führen (chemische Stimulation).

Eine Alternative zu den Stimulationsmaßnahmen kann eine größere Zahl kleiner Lateralbohrungen sein.

FORSCHUNGSBEDARF:

1. Demonstrationsprojekte der Multirisstechnik im Kristallin und in dichten Sedimentgesteinen sowohl für die Direktwärmenutzung (Tiefenbereich: 2.000–4.000 m) als auch für die Stromerzeugung (Tiefenbereich: 3.000–5.000 m).
2. Gewährleistung möglichst gleichförmiger hydraulischer Durchlässigkeit und somit Durchströmung der erzeugten Risse, damit das gesamte Rissystem zur Wärmegewinnung beiträgt.
3. Weiterentwicklung der Wirksamkeit chemischer Maßnahmen zur Reservoir-Verbesserung abhängig von der Gesteins- und Reservoircharakteristik.
4. Entwicklung und Erprobung von Multilateralbohrungen und für die KW-Industrie entwickelten bohrtechnischen Stimulationsverfahren wie z. B. *radial jet drilling* und *fishbone drilling*.

2.5 Fördertechnik und Reservoirmanagement

2.5.1 Fördertechnik

Bisher kommen zur Fluidförderung meist Pumpen aus der Erdölförderung zum Einsatz, deren Einsatzbedingungen (z. B. Temperatur, Fließrate, Fluidzusammensetzung und Betriebsführung) deutlich von denen einer Geothermieanlage abweichen können (bspw. Temperatur, Förderrate). Effizienz und Betriebsdauer können dadurch deutlich reduziert sein. Technische Entwicklungen zeigen aber, dass es möglich ist, Tiefpumpen hinsichtlich Materialwahl, Lagergestaltung und Sensorik auf die speziellen Anforderungen in geothermischen Anwendungen anzupassen. Dies gilt sowohl für Tauchpumpen als auch für Gestängepumpen.

FORSCHUNGSBEDARF:

1. Weiterentwicklung zur Verbesserung von Verlässlichkeit und Effizienz der zur Fluidförderung genutzten Tiefpumpen (Tauchpumpen und Gestängepumpen) für unterschiedliche Standortbedingungen.
2. Technische Neuentwicklung von Pumpenkomponenten für ein Geothermie-Gesamtaggregat, insbesondere bzgl. Dichtungen, Sensorik und Leistungskomponenten, die bisher im Langzeitbetrieb störungsanfällig waren.
3. Entwicklung von Methoden zur Beherrschung von scaling in Pumpenkomponenten.

4. Entwicklung herstellerunabhängig kombinierbarer Pumpenkomponenten.
5. Weiterentwicklung der Wartungs- und Reparatur- bzw. Austauschfreundlichkeit der Pumpen.
6. Monitoring der Fluidförderung und der Fluidparameter u. a. mit Tracer-Experimenten.
7. Entwicklung von Methoden zur Überwachung des Langzeitverhaltens der Bohrlochkomplettierungen und der Bohrungsintegrität zum absoluten Grundwasserschutz.

2.5.2 Betriebsoptimierung

Für die Betriebsoptimierung geothermischer Standorte, die mit dem gegenwärtigen Kenntnisstand bereits gut erschließbar sind, ist die Entwicklung geeigneter Monitoring-Konzepte ein zentrales Thema. Geothermische Systeme sind während des Betriebs aufgrund der im Untergrund und im Übertagesystem ablaufenden Prozesse ständigen Veränderungen unterworfen. Die Beobachtung der Systemparameter ist daher unverzichtbar, um negative Entwicklungen frühzeitig zu erkennen und entsprechende Gegenmaßnahmen einleiten zu können. Verbesserte Monitoring- und Wartungsstrategien stellen für Anlagenbetreiber vor allem bei den häufig von *scaling* betroffenen Thermalwasserpumpen und Wärmeüberträgern eine große wirtschaftliche Optimierungsmöglichkeit dar.

FORSCHUNGSBEDARF:

1. Weiterentwicklung geeigneter Monitoring-Konzepte, Verbesserung des Monitorings seismischer Ereignisse. Erprobung von Wellenfeldmethoden. Monitoring in dicht besiedelten städtischen Bereichen.
2. *Benchmarking* unterschiedlicher Modellierungstechniken.
3. Messungen des Stressfeldes und THM-Modellierung
4. Charakterisierung und Zonierung des oberflächennahen Raumes zur seismischen Gefährdungsabschätzung (Mikrozonierung, Einfluss der obersten Schichten auf seismische Wellen).
5. Entwicklung adaptiver Ampelsysteme mit prognostischen Elementen.
6. Definition und Erprobung der seismologischen »Einwirkungsbereiche« im Sinne des novellierten Berggesetzes.
7. Erforschung von Kurzschlussmechanismen, deren Modellierung und mögliches Monitoring zur Früherkennung.
8. Weiterentwicklung und Optimierung von Monitoring- und Wartungsstrategien kritischer Komponenten

wie der Thermalwasserpumpe oder der Wärmeüberträger.

9. Methoden der digitalen Abstimmung zwischen Erzeugung und Verbrauch von Wärme.

2.5.3 Reservoirmanagement

Das Reservoirmanagement kann auf verschiedenen Skalen betrachtet werden. Im Projektmaßstab stellt die modelltechnische Betrachtung des Betriebs ein wichtiges Werkzeug dar, um eine schädigende Betriebsführung bereits im Vorfeld zu detektieren und zu vermeiden. Von besonderem Interesse sind dabei für manche Geothermieanlagen permeabilitäts-reduzierende Prozesse im Untergrund, die, wenn überhaupt, nur sehr aufwendig rückgängig zu machen sind. Heutige Reservoirmodelle können bei Verfügbarkeit der Gesteinsparameter und der wichtigsten thermophysikalischen Stoffdaten thermische, hydraulische, mechanische und chemische Prozesse im Untergrund gekoppelt abbilden (THMC-Modellierung). Mit der Weiterentwicklung der Modelle mit zugänglichen, verlässlichen Modellparametern sind eine breitere Anwendung und eine Verbesserung der Langzeitproduktion geothermischer Anlagen zu erwarten.

Im großräumigen Maßstab sind insbesondere thermisch-hydraulisch-mechanische Wechselwirkungen mit Nachbarbohrungen und -projekten zu benennen. Hier gilt es mittels geeigneter Modellansätze die Beeinflussungen (ggf. auch über Konzessionsfeldesgrenzen hinaus) vorherzusagen und somit eine optimierte und rechtssichere Planung zu ermöglichen. Mit der zunehmenden Verdichtung der geothermischen Nutzung eines regionalen Aquifers gewinnt das großräumige Reservoirmanagement an Bedeutung und erlaubt zudem eine optimale Erschließung der geothermischen Ressource eines Feldes (zusammenhängenden Reservoir). Hierfür sind auch die lokalen Behörden mit einzubeziehen.

Im Betrieb muss der Grundwasserschutz aller durchteuften Aquifere gewährleistet sein. Für die Dauerhaftigkeit der Nutzung müssen Veränderungen im Förderhorizont, wie mikrobielle Aktivität, thermisch und chemische Alteration, frühzeitig erkannt werden.

FORSCHUNGSBEDARF:

1. Weiterentwicklung der Reservoirmodelle in Bezug auf Kopplung mit hydro- und geochemischen Prozessen (THMC-Modellierung).
2. Prognose der hydraulischen Durchlässigkeit (Permeabilität) einschließlich der Veränderung bei Reinjektion.

3. Benchmarking der unterschiedlichen Modellierungstechniken.
4. Entwicklung optimaler Monitoringverfahren zum Schutz der durchteuften Aquifere.
5. Entwicklung von Monitoring- und Prognosetools zur Veränderung im Nutzungshorizont, z. B. hinsichtlich mikrobieller, thermischer und chemischer Änderungen.
6. Entwicklung von großräumigen gekoppelten und prognosefähigen Reservoirmanagementmodellen und Methoden zur automatisierten Integration von statischen und dynamischen Daten.

2.6 Energiebereitstellung und stoffliche Nutzung

Tiefe Geothermie kann Wärme sowohl zur direkten Nutzung als auch zur Stromerzeugung bereitstellen. Darüber hinaus ist eine stoffliche Nutzung, beispielsweise die Extraktion von Lithium zur Batterieherstellung, denkbar.

2.6.1 Stromerzeugung

Bei Stromerzeugungsanlagen ist die Anpassung des Kraftwerkskreislaufs an die Wärmequelle sowie die am Standort realisierbare Wärmesenke (Kühlanlage) ein wichtiges Effizienz-Kriterium. Im Hinblick auf die Wärmesenke kommen an den meisten Standorten dabei zwangsbelüftete Kühlsysteme zum Einsatz (Nasskühlturm oder trockengekühlte Kondensatoren). Bei der Anpassung sind die Wahl des Arbeitsmittels, die Verschaltung des Kraftwerkskreislaufs, die Prozessparameter sowie die Dimensionierung der Wärmeübertragungsflächen (insbesondere bei der Wärmeabfuhr) von zentraler Bedeutung. Wärmeüberträger spielen an verschiedenen Stellen des Thermalwasserkreislaufs eine wichtige Rolle.

FORSCHUNGSBEDARF:

1. Weiterentwicklung im Bereich der Turbinen- und Anlagenwirkungsgrade für umweltfreundliche *low-GWP (global warming potential)* Arbeitsmedien, insbesondere mit Blick auf variable Betriebsbedingungen, die typischerweise bei der kombinierten oder gekoppelten Bereitstellung von Strom und Wärme vorliegen.
2. Optimierung des Einsatzes zwangsbelüfteten Kühlsysteme auch im Hinblick auf die Lärmemissionen
Optimierung der Durchströmung der Kühlanlage auch in Bezug auf die Strömungsrichtung.

3. Optimierung der Wärmeauskopplung im kombinierten Strom-Wärme-Betrieb, jahreszeitliche Anpassung.
4. Entwicklung modulartiger Bauweisen von Stromerzeugungsanlagen unter Berücksichtigung von Wärmeausbau-Zeitbedarf (angepasste Brückenlösungen).
5. Wirkungsgradverbesserung/technische Lösungen für Stromerzeugung mit Schwerpunkt »Sommerbetrieb«.
6. Werkstoffkundliche Untersuchungen und Verbesserungen insbesondere im Bereich Wärmeüberträger.

2.6.2 Wärmebereitstellung

Für Anlagen mit Wärmebereitstellung ist die Einbindung in das Wärmeversorgungssystem und die Wärmebedarfsstruktur entscheidend dafür, in welchem Umfang die geothermische Ressource genutzt werden kann. Deshalb müssen geeignete Strategien zur Einspeisung in angepassten Wärmeverteilungssystemen und unter möglicher Einbeziehung von Energiespeichern im Untergrund entwickelt werden. Da die Temperaturen direkt genutzter Wärmereservoirs die hohen Betriebstemperaturen in oft älteren Wärmenetzen meist nicht erreichen, sollte überprüft werden, ob, falls ein Umbau des Wärmenetzes nicht möglich ist, weiter zu entwickelnde Hochtemperatur- und Großwärmepumpen eingesetzt werden können. Dies würde auch die Einsatzmöglichkeiten der Mitteltiefen Geothermie wesentlich erweitern, aber auch helfen unterschiedliche Wärmenetze miteinander zu koppeln.

Aus geologischen Gründen, aber auch aus baurechtlichen und genehmigungstechnischen Vorgaben sowie Flächenknappheit im urbanen Raum, kann es erforderlich sein, die Geothermiebohrungen in einiger Entfernung vom Wärmenetz abzuteufen. Zur Netzanbindung muss ein Wärmetransport auch über größere Leitungsentfernungen verlustarm sein.

FORSCHUNGSBEDARF:

1. Entwicklung von markttauglichen Hochtemperatur- und Großwärmepumpen bis hin zu mehreren hundert MW.
2. Verringerung der Wärmeverluste beim Wärmetransport; Kostenreduzierung bei der Isolation.
3. Bessere Nutzung der bei der Stromproduktion anfallenden Abwärme zur Steigerung des Wärmeanteils von derzeit dem 5-fachen des Stromanteils (bestehende Anlagen) auf das 10-fache durch Erschießung weiterer, auch alternativer Nutzungspotenziale.

2.6.3 Prozesswärme

Die Erschließung lokaler erneuerbarer Wärmepotenziale ist für die meisten Unternehmen absolutes Neuland. Mit der Tiefen Geothermie und der solaren Prozesswärme rücken mittlerweile zwei Technologien verstärkt auch für die industrielle Anwendung in Mitteleuropa in den Fokus. In der Novelle der Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft (EEW)⁶ wird Geothermie als neuer Fördergegenstand aufgenommen.

FORSCHUNGSBEDARF:

1. (Einheitliches) Konzept für Machbarkeitsstudien für geothermische Prozesswärme (Temperaturen bis 180 °C).
2. Weiterentwicklung und Praxiserprobung von Höchsttemperatur-Wärmepumpen mit offenen oder geschlossenen Prozessen und Wärmetransformatoren mit Temperaturen auch über 180 °C.
3. Weiterentwicklung, Optimierung und Praxiserprobung von speziell auf industriellen Prozesswärmebedarf (i. d. R. Prozessdampf) zugeschnittenen Wärmepumpenschaltungen.

2.6.4 Kältebereitstellung

In den letzten Jahren ist der Kältebedarf von Gebäuden vor allem in Großstädten stark gestiegen und wird aufgrund der zu erwartenden Häufung von längeren Hitzeperioden in den nächsten Jahrzehnten weiter zunehmen. Aktuell wird die benötigte Kälte häufig durch stromintensive Kompressionskältemaschinen erzeugt. Eine attraktive Alternative stellt die Kälteerzeugung mittels Sorptionskältemaschinen oder Kältetransformatoren dar, welche einen signifikant geringeren Strombedarf aufweisen. Absorptions- und Adsorptionskältemaschinen benötigen normalerweise eine Wärmequellentemperatur von ca. 70-150 °C, die in vielen Regionen in Deutschland durch die Tiefe Geothermie bereitgestellt werden kann.

Zusätzlich tritt die Kältenachfrage vorrangig in Monaten mit geringem Fernwärmebedarf auf. Somit kann die Kältebereitstellung mittels Sorptionskältemaschinen die Volllaststunden, und damit die Wirtschaftlichkeit, eines Geothermieprojektes deutlich erhöhen. Basierend auf bereits kommerziell etablierten Sorptionskältemaschinen besteht für die Anwendung in der Geothermie noch ein großes Optimierungspotenzial durch angepasste innovative Anlagenkonzepte zur Steigerung der Effizienz und Wirtschaftlichkeit.

FORSCHUNGSBEDARF:

1. Identifikation von effizienten Anlagenkonzepten in Abhängigkeit der Thermalwassertemperatur sowie der benötigten Kühltemperatur.
2. Entwicklung von intelligenten Planung- und Betriebstools zur Bewertung und Optimierung der Wirtschaftlichkeit von geothermischen Fernkältenetzen.
3. Gemeinsame Nutzung eines Netzes als Wärme- und Kältenetz.
4. Untersuchung und Bewertung der Möglichkeiten für eine effiziente und flexible gemeinsame Strom-, Wärme- und Kältebereitstellung.

2.6.5 Stoffliche Nutzung

Die zunehmende Verknappung von Rohstoffen (Beispiel Lithium) lässt die stoffliche Nutzung des Mineralbestands der geförderten Thermalsole sowie geförderter Grubenwässer wirtschaftlich interessant werden. Die Nutzung der Sole kann die Wirtschaftlichkeit von Geothermieprojekten, insbesondere im Oberrheingraben und im Norddeutschen Becken, verbessern. Dabei muss der Umgang mit eventuell mitgeförderten radioaktivem Material einschließlich Beseitigung von Rückständen und kontaminierten Anlagenteilen besonders beachtet werden. Interessante Stoffe für eine zusätzliche Nutzung können sowohl gelöste Feststoffe oder Gase als auch die stoffliche Feststofffracht sein.

Aus ökologischen Gründen gewinnt die Rohstoffgewinnung, auch von seltenen oder kritischen Rohstoffen aus wässrigen Lösungen gegenüber dem klassischen Feststoff-Bergbau immer mehr an Bedeutung. Geothermische Wässer enthalten in der Regel eine Vielzahl gelöster Stoffe, deren Nutzbarkeit im Einzelnen zu untersuchen ist. Ob eine Extraktion dann wirtschaftlich Sinn macht, hängt vorwiegend von den jeweiligen Marktbedingungen ab und kann sich im Lauf der Zeit schnell ändern. In jedem Fall ist es sinnvoll, ausreichende Informationen vorzuhalten.

Im Falle der Nutzung geothermischer Wässer kann auch die notwendige Systemenergie komplett geothermische bereitgestellt werden, so dass die Rohstoffgewinnung insgesamt nicht nur keine Klimagase verursacht, sondern auch keinen externen Energiebedarf hat (*zero carbon technology*).

FORSCHUNGSBEDARF:

1. Kompilation vorhandener Soleanalysen hinsichtlich stofflicher Nutzung.
2. Wirtschaftliche (industrielle) Separation (Extraktion)

verschiedener Mineralstoffe aus der Sole und Weiterbearbeitung.

3. Separation der nicht löslichen Gase (NCG) aus dem Thermalwasser.
4. Einfluss der Mineralanreicherung auf Scalingeffekte und Ausfällung oder Lösungseffekten im Reservoir.
5. Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit und zum Langzeitverhalten (Nachhaltigkeit).

2.7 Tiefe Erdwärmesonden und Closed Loop Systeme

Geschlossene Wärmetauschersysteme sind bei der Oberflächennahen Geothermie technischer Standard (U- bzw. Doppel-U- oder Koaxialsonden), bei der Tiefe Geothermie aber selten. Ein Vorteil geschlossener Systeme ist eine geringere Abhängigkeit von den geologischen und hydrogeologischen Untergrundverhältnissen, da keine ausreichend große Wasserwegsamkeiten im Untergrund vorhanden sein müssen.

2.7.1 Mitteltiefe und Tiefe Erdwärmesonden

Mitteltiefe Erdwärmesonden mit weniger als 1.000 m Tiefe erscheinen attraktiv, da der vertikale Temperaturgradient ausgenutzt werden kann und die Bohrkosten für diesen Tieferbereich noch vergleichsweise günstig sind. Ein Beispiel ist die Mitteltiefe Erdwärmesonde in Heubach (Hessen) mit 770 m Bohrtiefe und einer thermischen Leistung von 90 kW. Wie bei der Oberflächennahen Geothermie ist zwar eine Wärmepumpe erforderlich, sie hat aber aufgrund der höheren Temperatur der Wärmetauscherflüssigkeit eine Jahresarbeitszahl von über 5.

Tiefe Erdwärmesonden nutzen einen ähnlichen Tiefenbereich wie die hydrothermale Geothermie, sind aber an keine tiefen wasserführenden Horizonte gebunden. Die thermische Leistung und die erreichbare Temperatur der Wärmeträgerflüssigkeit sind allerdings gering, da die dem Untergrund entnommene Wärmeenergie im Wesentlichen durch Wärmeleitung des Gesteins der Bohrung zufließen muss. Daher werden meist nur bestehende Bohrungen als Tiefe Erdwärmesonden genutzt, wie z. B. in Weggis (Schweiz), Prenzlau (MV), Arnsberg (NRW) und Eden (Cornwall, UK)

Tiefe Erdwärmesonden erscheinen als attraktive Möglichkeit, nicht fündiger Geothermie- oder Kohlenwasserstoff-

bohrungen nachzunutzen, soweit die Bohrungsintegrität dies zulässt und sie noch nicht verfüllt sind. Es existieren allerdings nur wenige belastbare Betriebsergebnisse.

FORSCHUNGSBEDARF:

1. Nachweis und Optimierung der Wirtschaftlichkeit.
2. Weiterentwicklung der Isolations-Liner (Verbundstoff- oder Vakuum-Liner)
3. Weiterentwicklung mitteltiefer Erdwärmesysteme zur Versorgung größerer (Bestands-) Objekte und Infrastrukturen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass Großprojekte mit multiplen Abnehmern oftmals über viele Jahre entwickelt werden, was die Entwicklung von mitwachsenden Erdwärmetauschersystemen zur Reduktion der Erstinvestition erforderlich macht.
4. Erarbeitung eines Kriterienkatalogs hinsichtlich der Eignung ehemaliger Kohlenwasserstoff- oder Geothermiebohrungen zur Nachnutzung als Tiefe Erdwärmesonden.

2.7.2 Closed Loop Systeme (Mehrlochsysteme)

Closed loop Systeme sind eine Weiterentwicklung der Tiefen Erdwärmesonde. Hierbei werden 2 Bohrungen durch eine horizontale Bohrung verbunden oder auf andere Art zusammengeführt, so dass ein untertägiger geschlossener Wärmeträgerkreislauf realisiert wird. Modellrechnungen haben allerdings wie bei Tiefen Erdwärmesonden eine vergleichsweise geringere thermische Leistung ergeben.

Derzeit wird als Weiterentwicklung ein *Closed Loop* System mit mehreren parallelen Horizontalsträngen angeboten. Ein Demonstrationsprojekt wurde 2019 in Kanada realisiert, es liegen aber bisher keine Betriebsergebnisse vor. Zu beachten ist immer die Relation zwischen Leistung und Gesamtbohrlochlänge.

FORSCHUNGSBEDARF:

1. Demonstrationsvorhaben zur Gewinnung belastbarer Betriebsergebnisse für *Closed loop* Systeme.
2. Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zur Nachnutzung nichtfündiger Bohrungen.
3. Verstärkte Untersuchung und Bewertung der möglichen Nutzung von CO₂ als Wärmeträger.
4. Wissenschaftliche Erarbeitung ökonomischer Parameter.

2.7.3 Nutzung von Bergbauinfrastruktur

Sowohl stillgelegter als auch noch bestehender Bergbau auf Kohle, Kohlenwasserstoffe und andere Bodenschätze stellt grundsätzlich Infrastruktur zur Verfügung, die geothermisch genutzt werden kann. Sie stellt oft einen kostengünstigen, weil vorab finanzierten Zugang zu tieferliegenden und damit wärmeren Schichten dar. Eine Sonderrolle spielt in diesem Zusammenhang die sogenannte Grubenwassernutzung. Das Grubenwasser muss ohnehin in großen Pumpenanlagen zutage gefördert werden, was ein Bestandteil der ‚Ewigkeitsaufgaben‘ des Bergbaus ist. Für eine Geothermienutzung entfallen somit die Kosten für die Bohrungen für die Thermalwasserförderung. Andererseits sind auch Anlagen (siehe Mark 51’7, Bochum oder Heeren, NL) denkbar wo das durch das bergmännisch aufgelockerte Grubengebäude als wasser-durchlässige Schicht durch Bohrungen erschlossen und so genutzt wird oder es können tiefe Erdwärmesonden ohne zusätzlich Bohrungen in das Grubengebäude eingestellt werden.

Auch viele andere Bergbauanlagen wie Tiefbohrungen der Kohlenwasserstoff-Industrie können im Wärmemarkt geothermisch nachgenutzt werden, falls sie nicht verfüllt wurden und technische Integrität aufweisen; sie liegen aber meist fernab vom Verbraucher. Dies gilt auch für Projekte zur Wärmespeicherung.

FORSCHUNGSBEDARF:

1. Erfassung vorhandener Bergbau-Infrastruktur im Hinblick auf geothermische Nutzung
2. Entwicklung von Pilotprojekten in verschiedenen Bergbauregionen
3. Einbindung der Geothermienutzung in die Bergbaunachsorge (Bergrecht).
4. Hydrochemie im Altbergbau: Auswirkungen auf untertägige einzubringende Anlagen: Ausfällungen, Korrosion.

3. Oberflächennahe Geothermie

Oberflächennahe Erdwärme (erdgekoppelte Wärmepumpen) wird bereits heute in einer Vielzahl von Anlagen genutzt. Das große technische und geologische Potenzial dieses Verfahrens ist in Deutschland aber bei weitem noch nicht ausgeschöpft.

In Deutschland sind derzeit mehr als 470.000 oberflächennahe Geothermieanlagen mit einer Gesamtleistung von 4.700 MW installiert. Pro Jahr stellen sie rund 10 TWh thermischer Energie bereit. Eine Studie der Umweltbehörde NRW (LANUV) zeigt, dass in NRW 56 % des Wärmebedarf durch Oberflächennahe Geothermie gedeckt werden kann.

Heute werden in Deutschland knapp 10 % der neugebauten Wohngebäude mit Erdwärme-Heizsystemen ausgestattet. Als Wärmequellen werden dabei meist Erdwärmesonden installiert. Der Rest verteilt sich auf andere Systeme (Grundwasseranlagen, Erdwärmekollektoren usw.). Vor allem im Bereich des Niedrig- und Passivhausbaus - und hier insbesondere bei der Klimatisierung (d. h. Heizung im Winter und Kühlung im Sommer) - ist diese Technologie technisch und wirtschaftlich bestens geeignet, z. B. auch in Kombination mit Solarthermie oder Photovoltaik. Auch im gewerblichen Wärmemarkt wird die Oberflächennahe Geothermie vermehrt eingesetzt, z. B. für die Klimatisierung von Bürogebäuden und Einkaufszentren. Der Wärmeentzug kann zur Reduzierung der Untergrundtemperatur in städtischen Wärmeinseln beitragen.

Insbesondere mehrere Erdwärmesonden auf engem Raum (Erdwärmesondenfelder) können zudem im Sommer zur Klimatisierung von Gebäuden beitragen. Die sommerliche Wärme wird dabei in den Untergrund abgeführt, sodass die Anlage dann in den Wintermonaten auf einem höheren Temperaturniveau starten kann. Dadurch steigt die Effizienz des Systems. Entsprechend können auch Brunnenanlagen ausgelegt werden und so zur Heizung und sommerlichen Kühlung beitragen.

Werden Erdsonden sehr eng gebaut (Abstand ca. 5 m), so können diese als geothermischer Speicher dienen. In derartige Anlagen können hohe (Überschuss-) Temperaturen bspw. aus der Solarthermie im Sommer eingelagert werden und stehen so im Winter für Heizzwecke zur Verfügung (geothermischer Speicher).

Die ersten Phasenwechsellösungen arbeiten mit CO₂ als Wärmeträgermedium und zeigen höhere Jahresarbeitszahlen (JAZ) als EWS oder Brunnensysteme, wobei letztere meist höhere JAZ erreichen als EWS. Die Technologie sollte jedoch noch weiter erforscht werden.

3.1 Kostenreduktion

Durch den verbindlichen Beschluss zur Einführung CO₂-neutraler Heizsysteme ist für die Oberflächennahe Geothermie der Konkurrenzdruck der billigen Gasheizung entfallen, jetzt steht die Oberflächennahe Geothermie hauptsächlich in Konkurrenz zur Luftwärmepumpe, die zwar einen schlechteren COP aufweist, aber geringere Anfangsinvestitionen erfordert.

Hauptziel der Anstrengungen zur Kostensenkung ist es, die Wärmewende wirtschaftlich und sozialverträglich zu gestalten. Dies gilt besonders bei Bestandsbauten, weil z. B. bei einer geplanten Ablösung der Öl- oder Gasheizung durch Wärmepumpe und Erdwärmesonden weitere Anpassungen an der Heizung wegen der erforderlichen geringen Vorlauftemperatur notwendig sind. Darüber hinaus sind weitere Kostensteigerungen absehbar, da zum Schutz des Grundwassers gesetzliche Forderungen nach einer Zementationskontrolle der Erdwärmebohrungen zu erwarten sind.

Neuere Kartenwerke der Geologischen Dienste der Bundesländer ermöglichen es, die effektive Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes für vorgegebene Tiefenbereiche an der gewünschten Lokation abzuleiten. Diese Karten basieren auf der Interpolation von Bohrerergebnissen sowie Tabellenwerten für die Wärmeleitfähigkeit der angetroffenen Gesteine. Zur Verbesserung der Aussagegenauigkeit sollte die Datenbasis regionalisierter Wärmeleitfähigkeiten erweitert werden, z. B. unter Verwendung von Ergebnissen von *enhanced thermal response tests*. Diese Kartenwerke sollten auch Auskunft geben über geologische Risiken bei Installation und Betrieb von Erdwärmesonden, z. B. artesischen Grundwasserverhältnissen, quellfähige Gesteine und sulfathaltige Grundwässer.

FORSCHUNGSBEDARF:

1. Entwicklung von Optimierungsverfahren zur Positionierung und Verteilung von Sondenfeldern, angepasst an die entsprechenden Untergrundbedingungen.
2. Kostensenkung durch Verbesserung der Bohrverfahren: Entwicklung von Technologien, die schneller, kostengünstiger und speziell auf die Bedürfnisse der Geothermie abgestimmt sind; Verfahren mit geringerem Energiebedarf für die Bohrtechnik und deren Hilfsaggregate sowie emissionsarme, d. h. schmierölfreie, Bohrwerkzeuge.
3. Verbesserte und bundesweit vereinheitlichte öffentlich zugängliche Untergrundinformationen zur Dimensionierung von Erdwärmesonden und Sondenfeldern, z. B. im Rahmen einer kommunalen Wärmeplanung, wie in einigen Bundesländern bereits vorhanden. Bei unzureichender Bohrdatendichte sollte der Einsatz geophysikalischer Messungen zur Verbesserung der Datenbasis erprobt werden.
4. Neue Konzepte für Sonden und Kollektoren kombiniert mit kosteneffizienten Einbringverfahren.
5. Weiterentwicklung der Technologie von Sondenfeldern auch für mitteltiefe Erdwärmesonden zur Einspeicherung von in den Sommermonaten anfallender Überschusswärme.
6. Weiterentwicklung von Kontroll- und Qualitätssicherungsmaßnahmen (z. B. Kontrolle der Hinterfüllung, geophysikalische Messung und Auswertung).
7. Weiterentwicklung der Technologie von Phasenwechsellsonden.

3.2 Effizienzsteigerung

Mit der Nutzung der Oberflächennahen Geothermie in Kombination mit der Wärmepumpentechnologie steht für die Wärmebereitstellung eine sehr gute Systemlösung zur Verfügung. Diese Technik muss für weitere Einsatzbereiche (Prozesswärme- und Kälteerzeugung) weiterentwickelt werden. Dies gilt insbesondere für die Nutzung der Wärmepumpentechnologie im Gebäudebestand. Alternative Lösungen zur Flächenheizung, wie etwa zwangsbelüftete Konvektoren, sind zu entwickeln und zu erproben. Eine Kombination der Wärmepumpentechnologie mit PV-Anlagen zur CO₂-neutralen Bereitstellung des Stromanteils an der gelieferten Heizwärme und die Einbindung von Wärmepumpensystemen in smarte und intelligente Netze/Systeme sind weitere Maßnahmen zur Dekarbonisierung des Wärmemarktes.

Die Effizienz ist der Schlüssel zu einer weiteren Verbreitung der Oberflächennahen Geothermie. Für das Heizsystem sollte bei Neubauten eine Jahresarbeitszahl von 5 angestrebt werden. Hierzu sind Verbesserungen an den Wärmepumpen sowie eine möglichst hohe Soletemperatur erforderlich.

Schwerpunkte der Entwicklung bei den Kompressions-Wärmepumpen waren die eingesetzten Kältemittel mit dem Ziel eines möglichst geringen GWP (global warming potential). Zur Diskussion stehen neben dem heute vor allem eingesetzten Mittel R134a (GWP 1300) alternative Arbeitsmittel. Die ersten Wärmepumpen mit CO₂ als Kältemittel sind bereits im Einsatz und erhöhen den Temperaturbereich bis auf 95 °C.

FORSCHUNGSBEDARF:

1. Weiterentwicklung von Kompressoren mit geregelter (zweistufig/stufenlos) Drehzahl, Economiser sowie Kondensatkühlung zur Effizienzsteigerung der Wärmepumpe.
2. Weiterentwicklung von Absorptionswärmepumpen, auch der Gaswärmepumpe, zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit.
3. Entwicklung alternativer Wärmeentzugsarbeitsmittel (CO₂) bzw. Weiterentwicklung der Direktverdampfungsverfahren (heat pipes) auf der Basis von nicht-wassergefährdenden Arbeitsmedien.
4. Erhöhung der Leistungsfähigkeit von Erdwärmesonden durch Verbesserung der Komplettierung und der verwendeten Materialien.
5. Untersuchung neuartiger Wärmetauscher wie z. B. Energiespundwänden.
6. Untersuchung der Wärmepumpensysteme in Hinblick auf den Einsatz in Bestandgebäuden.
7. Einbindung von Wärmepumpensystemen in smarte und intelligente Netze: digitale Rückkopplung zwischen Verbrauch und Bereitstellung.
8. Untersuchungen bei der Heizungsinfrastruktur von Heizkörpern mit erzwungener Ventilation.
9. Nutzung von Wärmetransformatoren bei Wärmequellen mit höheren Temperaturen.

3.3 Erweiterung der Einsatzbereiche

Zurzeit liegt der Haupteinsatzbereich erdgekoppelter Wärmepumpen bei der Versorgung neu errichteter kleiner bis mittlere Wohneinheiten sowie beim Heizen und Kühlen von Bürogebäuden und Einkaufszentren. Allerdings hat auch die Versorgung (Heizen und Kühlen) von ganzen Neubausiedlungen durch oberflächennahe Geothermie in den letzten Jahren zugenommen und sollte ausgebaut werden.

Ein bedeutendes Erweiterungspotenzial liegt bei Bestandsbauten. Hier liegt die Vorlauftemperatur der Heizung häufig bei über 80 °C. Solche Temperaturen sind mit modernen Hochtemperaturwärmepumpen erreichbar, allerdings liegt die Leistungszahl COP bei einer Temperaturerhöhung von 10 °C auf 85 °C lediglich bei 2,5. Durch eine Kaskadierung (Hintereinanderschaltung) kleinerer Wärmepumpen lassen sich hier bessere COP erreichen. Erweiterungspotenziale liegen z. B. bei geothermischen Komponenten für Nahwärmenetze einschließlich Speicher sowie in der Schaffung neuer Anwendungen wie z. B. der Weichenheizung oder der Enteisung von Bahnsteigen und Brücken (Verkehrssicherheit).

FORSCHUNGSBEDARF:

1. Einbindung in Niedertemperaturnetze (kalte Nahwärme) und deren Nutzung zur Wärme- und Kältespeicherung.
2. Methoden zur Regelung und Steuerung komplexer Niedertemperaturnetze mit mehreren Wärmequellen (z. B. Agrothermie), integrierten Wärmespeichern und eingebundenen Wärmeerzeugern und Erneuerbaren Stromquellen.
3. Einbindung weiterer Energieerzeuger (z. B. Biomasse-BHKW, Stirling-Motoren, Solarwärme) und zugehörigen Demonstrationsvorhaben.
4. Effizienzsteigerung bei Hochtemperatur-Wärmepumpen beispielsweise durch Kaskadierung.

3.4 Grundwasserschutz

Die erfreuliche Tendenz zur verstärkten Nutzung erdgekoppelter Wärmepumpenanlagen kann zu Risiken für die Grundwasserqualität führen, wenn Grundwasserdeckschichten oder Trennschichten zwischen unterschiedlichen Grundwasserleitern durchbohrt werden. Zwar muss

der ungenutzte Ringraum der Bohrung nach Installation der Erdwärmesonde mit einem Spezialzement verfüllt werden, bei unsachgemäßer Ausführung der Verfüllarbeiten können aber Wasserwegsamkeiten innerhalb oder am Rande der Bohrung möglich sein. Darüber hinaus ist das Verfüllmaterial bei Betrieb der Erdwärmesonde durch wiederholte Frost-/Tauwechselzyklen thermisch hoch belastet und die Frost-/Tauwechselbeständigkeit ist nicht bei allen Verfüllbaustoffen gesichert. Erdwärmesonden, Verfüllung sowie das umgebende Erdreich müssen hydraulisch als Einheit betrachtet werden (Systemdurchlässigkeit). Die Anforderung, dass die Systemdurchlässigkeit nicht geringer sein darf als die hydraulische Durchlässigkeit des ungestörten Untergrundes, gilt auch nach Rückbau der Erdwärmesonde.

Langfristig spielen Temperaturänderungen des Grundwassers eine große Rolle. Dies gilt insbesondere für die sich der allgemeinen Erwärmung durch den Klimawandel überlagernde Erwärmung durch Wärmeeintrag in den Untergrund durch Überbauung im urbanen Raum (Versiegelung des Bodens, Erhöhung der Albedo). Wärmeentzug durch Geothermienutzung kann dieser Entwicklung entgegenwirken. Bei Nutzung zum Heizen und Kühlen ist großflächig und über längere Zeit zumindest auf einen Ausgleich zwischen Wärmeeintrag und Wärmeabtrag hinzuwirken.

FORSCHUNGSBEDARF:

1. Weiterentwicklung von Prüfverfahren zur Frost-/Tauwechselbeständigkeit des Verfüllmaterials unter Einbeziehung des Langzeitverhaltens und des geologischen Untergrundes.
2. Weiterentwicklung bereits existierender geophysikalischer Verfahren zum Nachweis der sachgerechten Verfüllung des Bohrlochs, um eine flächendeckende, auch stockwerkübergreifende Anwendung zu ermöglichen.
3. Untersuchung des Langzeitverhaltens der Systemdurchlässigkeit von Erdwärmesonden in unterschiedlichen geologischen Situationen.
4. Weiterentwicklung alternativer Sondenkonzepte wie der 'Schlauchsonde'.
5. Untersuchung, Monitoring und Management der Langzeit-Temperaturänderungen des oberflächennahen Grundwassers bei geothermischer Nutzung des Untergrundes, insbesondere auch wenn eine sommerliche Kühlung betrieben wird.

4. Wärmeverteilnetze

Während bei der Verteilung von Strom aus geothermischen Kraftwerken kein Forschungsbedarf besteht, muss die Wärmeverteilung in urbanen Gebieten auch in kleineren Quartieren ein Forschungsthema sein. Dies gilt sowohl für den Umbau bestehender Wärmenetze als auch für das Design und den Bau neuer Netze. Ziel ist eine vollständige Dekarbonisierung der Gebäude-Wärmeversorgung. Dieser Forschung kommt im Hinblick die angestrebte Verdopplung bis Verdreifachung der leitungsgebundenen Wärmeversorgung in Städten eine besondere Bedeutung zu.

In konventionellen Wärmenetzen sind die Betriebstemperaturen oft zu hoch, um vollständig durch Tiefe Geothermie abgedeckt zu werden. Sofern technisch möglich, sollten Bestandsnetze daher mit niedrigeren Temperaturen betrieben werden. Ist dies in der Hauptverteilung nicht möglich, sollte die Möglichkeit der thermischen Abkoppelung von Unterverteilsystemen geprüft werden.

Seit einiger Zeit existieren auch (kleinere) Netze auf der Basis Oberflächennaher Geothermie teils mit zentralen, teils mit dezentralen Wärmepumpensystemen (kalte Nahwärmenetze einschließlich Erdeisspeicher). Für die Transformation und das Erreichen von Treibhausgasneutralität in der Wärmeversorgung sind die Etablierung und der forcierte Ausbau von Wärmenetzen der 4. und 5. Generation unabdingbar.

Die Herausforderung besteht darin, Netze für niedrige Vorlauftemperaturen (sog. exergetische Netze) und multiple Einspeisepunkte verschiedener Energiequellen - erneuerbare Energiequellen, saisonalen Wärmespeicher, industrieller Abwärme einschl. Abwärme von Rechenzentren und Elektrolyseanlagen, Müllverbrennung - auszuliegen bzw. bestehende Wärmenetze entsprechend umzubauen. Moderne Netze der 4. Generation (Temperaturen von ca. 45-70 °C) setzen neben einem optimierten Zusammenspiel einer möglichst verlustarmen Wärmeverteilung von den Energiequellen zu den Verbrauchern auch einen niedrigen Gebäudewärmebedarf auf der Abnehmerseite voraus. Erste Projekte führen diese Entwicklung mit der Errichtung von Wärmenetzen einer 5. Generation fort. Diese Wärmenetze sind gekennzeichnet durch ein sehr niedriges Temperaturniveau von 5-25 °C und insbesondere durch einen bidirektionalen Wärmefluss zwischen Energiequelle/Wärmequelle und Ener-

gieverbraucher/Wärmeverbrauch. Zukunftsfähig werden solche Wärmenetze der 5. Generation dadurch, dass sie durch ihren modularen Aufbau von Beginn an erweiterbar konzipiert sind.

Diese kalten Netze haben naturgemäß sehr geringe (oder gar negative) Wärmeverluste in den Zuleitungen und sind meist sowohl zum Wärmen als auch zum Kühlen geeignet.

FORSCHUNGSBEDARF:

1. Erarbeitung von Möglichkeiten des Umbaus bestehender Hochtemperaturnetze zu Niedertemperaturnetzen (exergetische Netze); Anpassung der Wärmeverteilnetze an Abnehmer und Quellen.
2. Untersuchung zur Wärmeregeneration kalter Nahwärmenetze, z. B. durch optimierende Einbindung von saisonalen Wärmespeichern und/oder zur Auslegung von latenten Eisspeichern in Abhängigkeit von den thermischen Eigenschaften des Untergrundes.
3. Erweiterung der geowissenschaftlichen Datengrundlage und Erarbeitung planerischer Ansätze zur thermischen Bewirtschaftung des Untergrunds als Voraussetzung für eine rechtliche Steuerung der Nutzung des geologischen Untergrunds zur Wärmespeicherung und netzgebundenen Wärmeversorgung.
4. Weiterentwicklung von Erdwärme- und Flächenkollektoren einschließlich Sonderformen (wie Erdkörben, Grabenkollektoren etc.) zum Einsatz als Gruppen in kalten Nahwärmenetzen und zum Umbau von Bestandsnetzen. Untersuchung von Möglichkeiten der Agrogeothermie.
5. Entwicklung von Konzepten für eine schrittweise modulare Erweiterung von Niedertemperaturnetzen und ihre Auslegung für bidirektionalen Wärmefluss, einschließlich der Bedeutung der Zuleitungen.
6. Untersuchung der Möglichkeit, lokale Netze durch längere Wärmeverbundleitungen zu verbinden, einschließlich eines gemeinsamen oder abgestimmten Managements.

5. Energiespeicher im Untergrund

Kurzzeitige oder saisonale Unterschiede von (regenerativer) Energiebereitstellung und Energiebedarf müssen durch Speicher ausgeglichen werden. Es handelt sich hierbei meistens um Wärmeenergie, die in jedem nutzungsrelevanten Tiefenbereich gespeichert werden kann. Eine besonders effektive Wärmespeicherung ist durch Ausnutzung latenter Wärme bei Phasenwechsel (Phasenwechselspeicher, z. B. fest-flüssig) oder bei Adsorptionsspeichern möglich, weil im Temperaturbereich der Schmelze oder der Eisbildung oder bei Adsorptionsprozessen viel Wärmeenergie bei konstanter Temperatur ein- bzw. ausgespeichert werden kann. Der Wirkungsgrad nachgeschalteter Wärmepumpen oder Rückverstromungsanlagen bleibt infolge der konstanten Temperatur unverändert gut.

5.1 Energiespeicherung zur Klimatisierung

Der Nutzung des Untergrunds für die Klimatisierung wird zukünftig eine wachsende Bedeutung erhalten. Die geothermische Klimatisierung ist Stand der Technik bei Industrie- und Bürogebäuden oder Einkaufszentren, ein steigender Bedarf ergibt sich bei der Kühlung von Rechenzentren. Zusätzlich zu Erdwärmesonden und Brunnenystem kommen thermisch aktivierte Betonbauteile, z. B. Energiepfähle, zum Einsatz. Mit fortschreitendem Klimawandel werden auch zunehmend mehr Wohnungen klimatisiert, wie dies in andern Klimazonen seit langem üblich ist.

Ein erfolgreiches Management der Wärme im oberflächennahen Untergrund ist nur dann nachhaltig, wenn das Grundwasser besonders im Bereich der Trinkwasserschutzgebiete auch temperaturmäßig langfristig geschützt wird. Darüber hinaus sind jedoch auch der allgemeine Grundwasserschutz sowie der Schutz von Grundwasservorranggebieten zu berücksichtigen. Dazu müssen neue Konzepte und Technologien entwickelt werden. Ein Wärme-Kälte-Management kann z. B. auch bei der Sanierung von Altbauten genutzt werden, in diesem Fall ist häufig die Temperatur im Untergrund bereits durch die Bebauung und Versiegelung der Umgebung der Gebäude erhöht (städtische Wärmeinseln). Die saisonale Wärmespeicherung ist sowohl im oberflächennahen als auch im tieferen Untergrund möglich und führt zu einer Effizienzerhöhung des Gesamtsystems.

Geothermische Wärmespeicher gehören zu den kostengünstigsten Energiespeichern. Sie können eine erhebliche Rolle im *>demand site management<* und somit bei der Sektorenkopplung spielen. Eine klare Trennung zwischen Nutzung zum Heizen oder Kühlen und Speichern ist oft nicht mehr gegeben, besonders in urbanen Gebieten.

Speicher größerer Kapazität sind immer Untergrundspeicher und nicht Speicher in technischen Konstruktionen wie Behältern oder Wannen.

5.1.1 Wärme-/Kälte-Speicher im oberflächennahen Untergrund

Im oberflächennahen Untergrund erfolgt die Wärmeeinspeisung bzw. -rückgewinnung im Allgemeinen mit Erdwärmesonden, jedoch sind grundwasserbasierte Systeme, also Aquiferspeicher, auch in geringen Tiefen möglich. In den Niederlanden gibt es bereits über 2.000 derartige Anlagen, meist Aquiferspeicher.

Die Speicherung von Solarwärme im Untergrund zur Versorgung von öffentlichen und privaten Gebäuden ist bereits an einigen Lokationen realisiert. In Crailsheim und Neckarsulm erfolgt die Wärmeversorgung von Siedlungen durch in Sondenfeldern gespeicherte Solarwärme, in Brædstrup (DK) ist ein derartiges System in das lokale Wärmenetz integriert.

Zum Speichern von Wärme im oberflächennahen Bereich ist hauptsächlich ein Untergrund mit geringer hydraulischer Durchlässigkeit (z. B. Ton) geeignet. Dadurch wird ein Abstrom der gespeicherten Wärme mit dem Grundwasserfluss verhindert, es erfolgt auch keine Erwärmung des oberflächennahen Grundwassers.

FORSCHUNGSBEDARF:

1. Entwicklung von Methoden zur Beurteilung möglicher Beeinträchtigungen der Grundwasserqualität. Entwicklung verbesserter geophysikalischer Erkundung, auch im urbanen Raum, zur Beurteilung der Eignung einer Lokation (Verbreitung nicht-wasserführender Schichten). Entwicklung verbesserter und für Planer anwendbaren Modellierungsverfahren zur Auslegung von Erdsondenfeldern zur Wärmespeicherung und Wärmerückgewinnung.
2. Untersuchung möglicher temperaturbedingter Ver-

änderungen der mikrobiellen Aktivität und der damit zusammenhängenden chemischen Reaktionen im Grundwasserleiter bei Aquiferspeichern. Die für die verlässliche Planung benötigten Daten sind bislang nur für wenige Gebiete vorhanden.

3. Erarbeitung von größerflächigen Betrachtungen, die Speicherung einbeziehen und ein urbanes Management der Untergrundtemperaturen ermöglichen (*urban thermal islands*).
4. Entwicklung von Methoden zum Monitoring von Wärme- und Fluidbewegung im Speicher und der Umgebung durch geophysikalische Methoden und thermische Sondensysteme.

5.1.2 Wärme-/Kälte-Speicher im tieferen Untergrund

Für den tieferen Untergrund ist die Speicherung von Wärme/Kälte u. a. in Aquiferspeichern möglich. Geeignete Aquifere sind z. B. Sandstein oder Kalkstein, in deren Poren- und/oder Klufträumen sich Grundwasser befindet und bewegen kann. Da tiefe Aquiferspeicher (ATES) mit Kapazitäten von bis mindestens 10 GWh (36 TJ) ausgeführt werden können, ist eine saisonale Speicherung auch größerer Mengen thermischer Energie möglich. Aquifer-Kältespeicher nutzen die niedrigen Umgebungsbedingungen im Winter für die Kältebereitstellung in den Sommermonaten. Aquiferspeicher sind in Deutschland bislang erst an zwei Standorten realisiert, während in anderen Ländern weit mehr Anlagen in Betrieb sind. Neben Aquiferen können z. B. auch Salzkavernen oder geflutete Bergwerke für Wärmespeicher geeignet sein. Für den Bereich der zukünftigen Nah- und Fernwärmeversorgung mittels Geothermie/Wärmespeicherung könnte auch die Kombination mit Groß- und Hochtemperaturwärmepumpen sinnvoll sein.

Für saisonale geothermische Speichersysteme als Komponente der Wärmewende, d. h. über den reinen Teststatus hinaus sowie für tiefere geothermische Aquifere, besteht noch größerer Forschungsbedarf. Insbesondere bei Hoch-Temperatur Aquiferspeichern, die mit über 100 °C betrieben werden. Hier ist sowohl eine Modellentwicklung, Simulation, Evaluierung von Technik, Geologie, Hydrochemie, Auswirkungen hinsichtlich Bohrungsintegrität, Umwelt und Wirtschaftlichkeit sowie Herstellung und Anwendung erster Pilotanlagen dringend erforderlich.

Werden ATES in mittleren Tiefen errichtet und mit Temperaturen deutlich unter 100 °C gefahren, so haben diese

Systeme den entscheidenden Vorteil, dass sie sich unterhalb von nutzbarem Grundwasser befinden und nutzbares oder als Trinkwasser genutztes Grundwasser nicht beeinträchtigen.

FORSCHUNGSBEDARF:

1. Errichtung von Demonstrationsanlagen für ATES in mittleren Tiefen, die weit unterhalb von 100 °C betrieben werden. Einspeicherung von sommerlicher Überschusswärme aus beliebigen Energieträgern, winterliche Nutzung zur Gebäudeheizung unter Nutzung von Hochtemperatur-Wärmepumpen.
2. Entwicklung und Simulation von Modellen und Varianten zur saisonalen Tiefenspeicherung (Tiefen bis ca. 4.000 m).
3. Entwicklung eines Masterplans Tiefenspeicherung als Komponente der Wärmewende.
4. Entwicklung der Realisierungsbedingung hinsichtlich aller Aspekte der Energiespeicherung, Schaffung der Rahmenbedingungen.
5. Entwicklung und Realisierung von Pilotprojekten zur Saisonalen Tiefenspeicherung (für Tiefen bis zu ca. 4.000 m).
6. Installation von Demonstrationsanlagen als Informationsbasis für weitere Projekte und zur Akzeptanzsteigerung.
7. Weiterentwicklung im Bereich der System- und Betriebsoptimierung.
8. Erprobung der Wärmespeicherung in Kombination mit Groß- und Hochtemperaturwärmepumpen sowie anderen Energieträgern.

5.2 Energiespeicherung zur Rückverstromung (Carnotbatterien)

Das fluktuierende Angebot regenerativen Stroms erfordert geeignete Speichertechniken. Als Speicherort sind Salzstrukturen besonders interessant, da durch die bereits reichlich vorhandenen Salzkavernen große Speichervolumina realisiert werden können; außerdem sind in Norddeutschland, der Region mit besonders hoher Erzeugung von Windstrom, eine Vielzahl nutzbarer Salzstrukturen vorhanden. Solche Speicherkraftwerke sind schwarzstartfähig, können also ohne zusätzliche externe elektrische Energie anlaufen und so zum Aufbau des Stromnetzbetriebes nach

einem großflächigen Blackout beitragen. Bereits realisierte, geplante oder diskutierte Speicheroptionen sind:

Druckluftenergiespeicher (*CAES - compressed air energy storage*): in Huntorf (Niedersachsen) sind seit 1978 zwei Salzkavernen so ausgebaut, dass bei einem Überangebot an Strom Druckluft erzeugt und bei bis zu 72 bar (7,2 MPa) gespeichert werden kann. Bei Bedarf können damit über ein Turbinenkraftwerk für einen Zeitraum von zwei Stunden 320 MW elektrischer Energie bereitgestellt werden. Allerdings wird die bei Kompression freiwerdende Wärmeenergie abgeführt und muss bei der Rückverstromung durch Verbrennung von Erdgas wieder zugeführt werden, um ein Einfrieren der Turbinen zu verhindern. Es ist geplant, statt Erdgas regenerativ erzeugten Wasserstoff einzusetzen und so die CO₂ - Bilanz zu verbessern. Die Zwischenspeicherung der Wärmeenergie und ihr Einsatz bei der Rückverstromung (ACAES - adiabatic CAES) ist Gegenstand von Forschungsvorhaben.

Redox-Flow-Akkus: Die Stromspeicherung/-rückgewinnung erfolgt durch Oxidation/Reduktion zweier voneinander getrennter Elektrolytflüssigkeiten. In Jemgum (Ostfriesland) ist eine Pilotanlage mit Salzwasser als Elektrolyt in zwei Salzkavernen und einer Kapazität von 700 MWh (2,5 GJ) geplant.

Flüssigsalz-Latentwärmespeicher: Zur kontinuierlichen Stromproduktion bei solaren Großkraftwerken werden von der DLR Latentwärmespeicher in oberirdischen Containern untersucht, die mit speziellen (teuren) Salzgemischen befüllt sind und die bei Temperaturen von 500-600 °C betrieben werden. Ein sehr hohes Speicherpotenzial ist in oberflächennahen natürlichen Salzstrukturen gegeben. Steinsalz (Natriumchlorid) hat einen Schmelzpunkt bei 801 °C und eine hohe Schmelzenthalpie von 520 J·g⁻¹, dadurch ergibt sich ein hoher thermodynamischer Wirkungsgrad bei der Rückverstromung. Die technischen Herausforderungen bei der Ein-/Auspeicherung der Wärmeenergie sind hoch, ihre Untersuchung erscheint aber durch das hohe Speicherpotenzial norddeutscher Salzstrukturen gerechtfertigt.

Reversibler ORC/Wärmepumpe: Dieses innovative Anlagenkonzept kombiniert den ORC- und Wärmepumpenprozess mit einem Heißwasserspeicher. Bei überschüssigem Strom wird das Temperaturniveau der Wärmequelle (z. B. Geothermie) durch die Wärmepumpe angehoben und in einem unterirdischen Heißwasserspeicher bei einem Temperaturniveau von 100-200 °C gespeichert. Bei

Bedarf wird die gespeicherte Wärme mittels ORC wieder in Strom umgewandelt. Erste Arbeiten zeigen das hohe Potenzial einer Kopplung dieses Systems mit Geothermie für eine umweltfreundliche Energiespeicherung und Stromerzeugung.

FORSCHUNGSBEDARF:

- 1.** Weiterentwicklung geophysikalischer Verfahren zur Erkundung des inneren Aufbaus von speicherrelevanten Salzstrukturen.
- 2.** Bestimmung physikalischer Parameter von Steinsalz bei Druck- (CAES) und Temperaturbelastung (Latentwärmespeicher).
- 3.** Entwicklung von Methoden zur schnellen Speicherung und Entnahme von Kompressionswärme im Untergrund (CAES).
- 4.** Entwicklung technischer Verfahren zur schnellen Ein- und Ausspeisung von Wärmeenergie bei hohen Temperaturen (Latentwärmespeicher).

6. Umwelteinwirkungen, Nachhaltigkeit und Akzeptanz

Geothermie ist eine Erneuerbare Energie. Ihre Nutzung ist nachhaltig, umweltfreundlich und bietet ein großes Potenzial zur Senkung von Treibhausgasemissionen besonders im Wärmemarkt. Dennoch ist auch die Geothermie, wie jede Technologie, nicht vollkommen frei von Umwelteinwirkungen und Risiken, z. B. durch eine teilweise erhöhte Mikroseismizität bei ein paar Projekten der Tiefengeothermie. Mangelnde Sachaufklärung, aber auch eine fehlerhafte Handhabung kann zur Entstehung von Ängsten in der Bevölkerung führen, die dann teilweise durch Interessengruppen genutzt und verstärkt werden. Auf diesen Gebieten besteht Forschungsbedarf, um Strategien und Formate zu entwickeln, wie Umwelteinwirkungen sachlich eingeordnet werden können und unbegründete Ängste abgebaut werden. Diese Strategien sollten so ausgearbeitet und dargestellt werden, dass sie flächendeckend anwendbar sind.

7. Ausblick

Das vorliegende Positionspapier wurde vom Bundesverband Geothermie 2023 erstellt, um den im Eckpunkte-Papier des BMWK geforderten weiteren Ausbau der Geothermie durch bedarfsgerechte Forschungs- und Entwicklungsarbeiten voranzubringen. Es fasst den Stand der Forschung in der Tiefen und Oberflächennahen Geothermie zusammen und stellt stichwortartig den aktuellen Forschungsbedarf dar. Die klassische Unterscheidung zwischen Oberflächennaher und Tiefer Geothermie wurde beibehalten, wobei ein weiterer Schwerpunkt auf die Mitteltiefe Geothermie gelegt wurde.

FORSCHUNGSBEDARF:

1. Weiterentwicklung der seismologischen Überwachung, prognostische Ampelsysteme, Mikrozonierung, Einwirkungsbereiche.
2. Umgang mit natürlichen radioaktiven Nebenprodukten.
3. Havariemanagement (Bohrungsintegrität).
4. Schallschutz bei Kühlanlagen. Entwicklung alternativer Durchströmungskonzepte.
5. Soziopsychologische Aspekte der Akzeptanz: Identifikation sozialer Akzeptanzfaktoren und Strategieentwicklung zur Ansprache der einzelnen Stakeholdergruppen unter Berücksichtigung des regionalen Kontexts.
6. Entwicklung und Bewertung von Instrumenten zur Information, Kommunikation und Beteiligung: Pressearbeit, Broschüren, Infoveranstaltungen, Infostände, Web-Auftritt, Soziale Netze, TV- und Radio-Beiträge, Bürgerräte, Lobby in Gemeinderäten und Weiteres.

Das Papier ist eine Aktualisierung eines Positionspapiers des Bundesverbandes Geothermie aus dem Jahr 2020. Die Aktualisierung entstand durch die Mitarbeit von Rüdiger Schulz, Horst Rüter, Reinhard Kirsch sowie Guido Blöcher, Klaus Dorsch, Thomas Jahrfeld, Ingrid Stober und weitere KollegInnen des Fachausschusses Wissenschaft und Bildung.

Es ist ein sogenanntes »lebendes Dokument« und soll kontinuierlich durch aktuelle Entwicklungen ergänzt werden.

Impressum

Herausgeber: Bundesverband Geothermie e. V.
Albrechtstraße 22 ■ 10117 Berlin
Tel: 030.200 954 950 ■ Fax: 030.200 954 959
www.geothermie.de ■ info@geothermie.de

Gestaltung & Layout: susann.piesnack@gmail.com
Titelbild: H. Anger's Söhne Bohr- und Brunnenbaugesellschaft mbH

