



Bundesverband
Geothermie



Stand der Forschung und Forschungsbedarf in der Geothermie

Dezember 2020

Inhalt

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

Stand der Forschung und Forschungsbedarf in der Geothermie | Dezember 2020

1. Vorbemerkung

Geothermische Energie (Geothermie, Erdwärme) ist die unterhalb der Oberfläche der festen Erde gespeicherte Wärmeenergie. Diese Wärme ist nach menschlichen Maßstäben unerschöpflich (Nachhaltigkeit).

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. Mit der Tiefen Geothermie erfolgt die Energiebereitstellung in der Regel über die Fluidförderung. Realisiert wird meist ein Thermalwasserkreislauf durch eine geothermische Dublette bestehend aus einer Förder- und einer Injektionsbohrung. Angetrieben wird der Thermalwasserkreislauf durch eine Förderpumpe und (falls nötig) durch zusätzliche Injektionspumpen. Der Thermosyphon-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 auch ab einem Temperaturniveau von ca. 100 °C durch ein thermisches Kraftwerk Strom produziert werden. Ab Temperaturen von 60 °C, d. h. ab Tiefen von 1.000–1.500 m, ist eine direkte Nutzung der Erdwärme ohne Temperaturanhebung (Wärmepumpen,

Wärmetransformatoren) möglich. Häufig wird der Zwischenbereich zwischen 400 m und 1.500 m mit Temperaturen von 20–60 °C als Mitteltiefe Geothermie bezeichnet; dieser Bereich ist besonders für die Energiespeicherung von größerem Interesse.

Erdwärme ist eine verlässliche Energiequelle. Mit aktuellen Technologien ist die hydrothermale Geothermie zur Wärmenutzung marktfähig. Aktuell sind in Deutschland knapp 40 Heiz- und Kraftwerke sowie kombinierte Heizkraftwerke (KWK) in Betrieb. Im Bereich der Oberflächennahen Geothermie sind rund 420.000 Anlagen installiert. Zukünftig soll verstärkt die Nutzung zur Wärme- und Kälteversorgung ausgebaut werden sowie saisonale Wärmespeicherung initiiert werden. Forschungsprojekte sollen in erster Linie dazu beitragen, innovative Ansätze 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 BMWi im Jahr 2019 94 laufende Vorhaben mit rund 13,2 Millionen Euro gefördert. 2019 hat das BMWi zudem 25 Forschungsprojekte mit einem Fördermittelansatz von rund 24,1 Millionen Euro neu bewilligt.

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

2. Tiefe Geothermie

Tiefengeothermische Anlagen nutzen die im Untergrund in etwa 1.500 m bis 5.000 m Tiefe vorhandene Wärme (Temperaturen über 60 °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. Definitionsgemäß wird ab 400 m Tiefe von Tiefer Geothermie gesprochen. Bei der hydrothermalen Erdwärmennutzung wird im Untergrund vorhandenes Thermalwasser über Bohrungen zu Tage gefördert, meist in Wärmetauschern durch Wärmeabgabe an ein Arbeitsmittel abgekühlt und anschließend wieder in das geothermische Reservoir zurückgeleitet (Thermalwasserkreislauf). In der Tiefen Geothermie wurden in den letzten 15 Jahren, 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 Gebäude-Energien-Gesetz (GEG), die Bundesförderung Effiziente Gebäude (BEG) und die Bundesförderung Effiziente Wärmenetze (BEW) bilden dafür den politischen Rahmen.

Neben der direkten lokalen Nutzung des Thermalwassers zu balneologischen Zwecken und zur Gebäudeheizung, welche in Deutschland an mehr als 160 Standorten erfolgt, stellt die Belieferung von Fernwärmenetzen heute die vorrangige Nutzung tiefer geothermischer Reservoirs dar. 24 Anlagen mit einer installierten thermischen Leistung von mehr als 400 MW stellten (2018) rund 1.500 GWh (5,4 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 10 Standorten, wobei überwiegend ein- und zweistufige ORC (*Organic Rankine Cycle*)-Kraftwerke oder Kalina-Anlagen zum Einsatz kommen. Die Stromerzeugung stellt an den meisten Standorten eine Ergänzung zur nicht über-

all ausreichend möglichen Wärmebereitstellung dar, d. h. diese Kraftwerke sind wärmegeführt. Eine reine Stromerzeugung ist nur an 3 Standorten realisiert. Die elektrische Anlagenkapazität beläuft sich momentan auf ca. 43 MW_{el} und erzeugt (2018) etwa 166 GWh (0,57 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 langfristiger 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 gewonnen 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 einen zukünftig deutlich stärkeren Ausbau der Tiefen Geothermie. Das wird von der Branche forciert und auch politisch 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 mit 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.

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 Untergrundtemperaturen und hydraulische Parameter, die die Grundlage für die Wirtschaftlichkeit der Anlagen sind.

Tiefbohrungen, hauptsächlich abgeteuft zur Aufsuchung und Förderung von Rohstoffen, sind zurzeit hierfür die wichtigste Informationsquelle. Zwar gibt es in der Bundesrepublik mehrere zehntausend derartige Bohrungen, sie sind aber regional sehr ungleichmäßig verteilt und konzentrieren sich hauptsächlich in heutige oder ehemalige Fördergebiete von Erdöl, Erdgas und Kohle. Viele dieser Bohrungen wurden bereits in den 1930er bis 1970er Jahren niedergebracht, und die damals durchgeführten Bohrlochmessungen entsprechen nicht dem heutigen Stand der Technik. Dasselbe gilt auch für viele seismische Messungen, die im Rahmen der Erkundung von Kohlenwasserstoffen und Kohle durchgeführt wurden. Die vorhandenen Informationen sind über das Informationssystem GeotIS des Leibniz-Instituts für Angewandte Geophysik (LIAG) verfügbar, reichen aber für eine konkrete Planung (Machbarkeitsstudie) in den meisten Fällen nicht aus.

Der Mangel an relevanten Untergrundinformationen – insbesondere auch zusammenhängend und konzessionsübergreifend – führt zu Unsicherheiten bei der Einschätzung des Fündigkeitsrisikos, was ein starkes Hemmnis bei der Realisierung tiefegeothermischer Projekte ist. Eine Verbesserung der Situation wird durch das neue Geologiedatengesetz (GeolDG) erwartet, durch das zumindest langfristig der Zugang auch zu bisher vertraulichen Daten der Kohlenwasserstoffindustrie und des Bergbaus gesichert wird.

Ein öffentlich gefördertes langfristiges projektunabhängiges Erkundungsprogramm für relevante geothermische Reservoirformationen in Gebieten mit unzureichenden Untergrundinformationen ist unbedingt erforderlich. Planung und Durchführung des Programms sollte gemeinsam von den relevanten geowissenschaftlichen Forschungsinstitutionen 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 Standorte 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.

Ein solches Erkundungsprogramm dient zusätzlich zum Kompetenzerhalt in den Explorationsgeowissenschaften.

FORSCHUNGSBEDARF

1. Durchführung eines öffentlich geförderten Bohrprogramms an verschiedenen, geothermisch relevanten Lokationen mit entsprechender Standort-Vorerkundung. Dabei sollten auch die Sedimentbecken untersucht werden, in denen bisher keine oder nur unzureichende seismische Messungen vorliegen.
2. Durchführung von geophysikalischen Messungen und hydraulischen Tests in diesen Bohrungen, um verlässliche Untergrunddaten zu erhalten. Hierbei sollten auch moderne Verfahren wie z. B. Bohrloch-NMR oder Glasfasermethoden eingesetzt werden.
3. Durchführung von großräumigen seismischen Messungen (2D und 3D) zur Erkundung geothermisch hoffiger 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 energie-wirtschaftlichen Rahmenbedingungen (Investitionsbereitschaft, angemessene Wärmepreise, vorhandene Infrastruktur) hat sich die Geothermie in verschiedenen Regionen unterschiedlich entwickelt. Entsprechend leitet sich ein regional differenzierter Forschungsbedarf ab.

2.2.1 Süddeutsches Molassebecken

Tiefengeothermische Anlagen im Süddeutschen Molassebecken haben bereits eine gewisse Marktreife erreicht, so dass hier der Schwerpunkt auf projektbegleitende Maßnahmen zur Langzeitbeobachtung, Betriebsoptimierung und Kostenreduktion gelegt werden sollte. Auf Basis des erreichten Stands der Technik bestehender Geothermieprojekte sollte ein Schwerpunkt die Entwicklung geothermischer Komponenten bilden. Die bereits vorhandene Datenlage durch bestehende Geothermieprojekte liefert gute Voraussetzungen für weitere Forschungsarbeiten, z. B. zum Wärmetransport im Reservoir mit Auswirkungen auf die Hydrochemie.

Die Anreize durch das MAP haben wesentlich zur Entwicklung beigetragen, und so ist das MAP oder Nachfolgeprogramme eine wichtige Voraussetzung für die Entwicklung weiterer Projekte.

FORSCHUNGSBEDARF:

1. Weiterentwicklung der seismischen Reservoircharakterisierung wie z. B. der Nachweis höffiger Bereiche mit erhöhter Klüftung durch eine Analyse der seismischen Geschwindigkeiten und weiterer Attribute.
2. Besseres Verständnis der Störungssysteme dazu Messung des Spannungsfeldes in Tiefbohrungen.
3. Untersuchung des Einflusses des lokalen Spannungsfeldes auf Störungssysteme inkl. geomechanischer Modellierung und Untersuchung der hydraulischen Eigenschaften, z. B. durch in situ Spannungsmessungen kombiniert mit gezielten hydraulischen Tests. Ziel ist ein besseres mechanisch-hydraulische Verständnis der Störun-

gen als ein weiterer Schritt in Hinblick auf eine Abschätzung des mikroseismischen Risikos und dessen hydromechanische Ursachen.

4. Regionale Entwicklung der Verkarstung und Dolomitisierung (Faziesanalyse); Weiterentwicklung der seismischen Faziesansprache durch gezielte Anpassung von Multiattribut-Verfahren unter Einschluss von »machine learning«.

2.2.2 Oberrheingraben

Die Entwicklung tiefengeothermischer Anlagen im Oberrheingraben geht im Vergleich zum Molassebecken langsamer voran, obwohl auch hier eine gewisse Marktreife erreicht wurde. Hindernisse sind auch die teilweise unzureichende Akzeptanz, meist hervorgerufen durch das Auftreten von mikroseismischen Ereignissen.

FORSCHUNGSBEDARF:

1. Verbesserung der Kenntnis der natürlichen und erzwungenen Thermalwasserströme.
2. Nutzung aktiver und passiver seismischer Verfahren zum Monitoring der Störungsaktivierung; Stichworte sind »full-waveform inversion« und »reverse time processing«.
3. Erfassung von seismischen Gefährdungsbereichen im urbanen Raum durch oberflächennahe Erkundung (Mikrozonierung).
4. Wie bei 2.2.1 (Molassebecken) Messung des Spannungsfeldes, Untersuchung des Einflusses auf vorhandene Störungssysteme einschließlich geomechanischer Modellierung.
5. Entwicklung prognostischer Ampelsystem zur Realisierung eines aus seismologischer Sicht kontrollierten Betriebs.

2.2.3 Norddeutsches Becken und angrenzende Regionen

Obwohl das Norddeutsche Becken prinzipiell über das größte geothermische Potenzial verfügt, sind tiefengeothermische Anlagen bisher nur an einzelnen Standorten mit bekannter Geologie und vorhandenen Heiznetzen realisiert worden. Für eine weiträumigere geothermische Entwicklung im Norddeutschen Beckens 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. Aufgrund der häufig nachgewiesenen Abnahme von Porosität und Permeabilität mit der Tiefe sollte auch die Nutzung flacherer Sandsteinlagen (Temperaturanpassung durch Wärmepumpen) in Betracht gezogen werden, wie es z. B. in Dänemark praktiziert wird.

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.

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. Laborexperimente zur Gewinnung thermophysikalischer Eigenschaften (z. B. Dichte, Viskosität und Wärmekapazität) geothermischer Fluide sowie über Minerallöslichkeiten zur Gewinnung standort-unabhängiger Modellparameter, die bei der THMC-Modellierung für realistische Fällungs- und Zementationsprognosen benötigt werden.
3. Kompilation der relevanten Daten für geklüftete Sandsteine und Karbonatgesteine des Devons und Karbons im nordwestlichen Raum und Einpflege in das Geothermische Informationssystem.

4. Entwicklung eines angepassten Konzeptes für seismische Explorationsmethoden auf tiefliegende Sand- und Karbonatgesteine.
5. Ausweisung von möglichen Vorzugsgebieten/ Pilotstandorten.

2.3 Projektbezogene Standort-Vorerkundung

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 eine noch größere Anzahl von Standorten benötigt. 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*).

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 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 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 weiterentwickelt werden müsste.

Methodenspezifisch ergibt sich folgendes Bild:

2.3.1 Geophysikalische Standorterkundung

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

Eine Herausforderung für die Geophysik im Vorfeld einer geothermischen Nutzung, auch des kristal-

linen Untergrundes, stellt die Erkundung tektonischer Störungssysteme dar, die wasserführend sein können (Porosität). Von besonderem Interesse sind Störungssysteme mit hydraulischen Wegsamkeiten (Permeabilität).

FORSCHUNGSBEDARF:

1. Anpassung modernster Akquisitions-Techniken der Seismik, wie *split-sweep*, Nodes als Aufnehmer, Permanentregistrierung etc., an die geothermischen Gegebenheiten insbesondere in urbanen Räumen; Ausschöpfung neuer Möglichkeiten der Messgeometrie.
2. 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).
3. Ermittlung petrophysikalischer Parameter (z. B. Porosität) durch P- und S-Wellenerkundung als Eingangsparameter für poroelastische Modellierungen.
4. Passive seismische Methoden auch mit Nutzung faseroptischer Aufnehmer (DAS).
5. 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.
6. Entwicklung von *joint inversion*-Technologien zur Kombination verschiedener geophysikalischer Methoden.
7. Genauere und kleinräumige Fazies- und Diagenesemodelle und zeitliche Entwicklung des Porenraums.
8. 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. Geothermische Fluide sind aufgrund ihrer komplexen chemischen Zusammensetzung und der Gas- und Feststoffgehalte oft enorme Herausforderungen für die Materialwahl, die Anlagengestaltung und Betriebsführung. Die für die Planung benötigten Daten umfassen für den im Betrieb relevanten Druck- und Temperaturbereich Informationen zur Fluidzusammensetzung, 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 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 Kopplung von Temperatur, Hydraulik, Mechanik und Chemie).
2. Isotopenuntersuchungen an Fluiden zur Bestimmung des Alters, der Paläotemperaturen und anderer Eigenschaften wie Compartmentbildung.
3. Simulation und Prognosemodell für die Entstehung von Ausfällungen (lokal, zeitlich, mengenmäßig) auf Basis von Geologie, Messdaten und Betriebsweise.
4. Entwicklung von Inhibitoren und anderen Formen des Korrosions- und Scalingschutzes.
5. Entwicklung von Maßnahmen und Anlagenkomponenten zur Beseitigung von Scaling im Betrieb.

2.4 Reservoirerschließung

Tiefengeothermische Reservoirs müssen durch Bohrungen erschlossen werden. Standard ist eine Bohrungsdublette bestehend aus einer Förder- und einer Injektionsbohrung. Da das Bohren der kostenintensivste Teil bei der Errichtung einer geothermischen Anlage ist, ist hier 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. Automatisierung und Verringerung des Personalbedarfs.
4. Erhöhung der Bohrgeschwindigkeit bei geringerem Bohrrisiko.
5. Ganzheitliche Entwicklung von Bohranlagen inklusive 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.

2.4.2 Reservoir-Verbesserung

Um die Entwicklung tiefergeothermischer 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 verbessert wird und so eine wirtschaftliche Nutzung erreicht werden kann (hydraulische Stimulation).

Hierfür sind vor allem Erschließungsmethoden für hydraulisch dichte Tiefengesteine (*Hot-Dry-Rock*- bzw. *Engineered* oder *Enhanced Geothermal Systems*) für den Einsatz bei hydrothermalen Systemen weiter voran zu treiben. 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. Durch die große Anzahl an Rissen können die erforderlichen hohen Thermalwasserfließraten mit vertretbaren Pumpleistungen realisiert werden. Die zur Erzeugung der Risse notwendigen Hochtemperatur-Multipacker-systeme 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.

Allerdings müssen zur Eingrenzung von spürbarer Seismizität bereits während des Bohrvorgangs entsprechende Daten für die geomechanischen Betrachtungen erhoben werden, 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 Multirissstechnik 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 Wärmeabfuhr 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. 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 herstellerunabhängig kombinierbarer Pumpenkomponenten.
4. Monitoring der Fluidförderung und der Fluidparameter u. a. mit Tracer-Experimenten.
5. Entwicklung von Methoden zur Überwachung des Langzeitverhaltens der Bohrlochkompletierungen 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. Charakterisierung und Zonierung des oberflächennahen Raumes zur seismischen Gefährdungsabschätzung (Mikrozonierung, Einfluss der obersten Schichten auf seismische Wellen).
4. Entwicklung adaptiver Ampelsysteme mit prognostischen Elementen.
5. Definition und Erprobung der seismologischen Einwirkungsbereiche im Sinne des novellierten Berggesetzes.
6. Erforschung von Kurzschlussmechanismen, deren Modellierung und mögliches Monitoring zur Früherkennung.

7. Weiterentwicklung und Optimierung von Monitoring- und Wartungsstrategien kritischer Komponenten wie der Thermalwasserpumpe oder der Wärmeüberträger.

2.5.3 Reservoirmodelle

Die modelltechnische Betrachtung des Betriebs stellt im Rahmen der Betriebsoptimierung, insbesondere aber auch bei der Planung ein wichtiges Werkzeug dar, um eine schädigende Betriebsführung bereits im Vorfeld zu detektieren und zu vermeiden. Von besonderem Interesse sind dabei 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 ist eine breitere Anwendung und eine Verbesserung der Planbarkeit geothermischer Anlagen zu erwarten.

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.

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 ist 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 zwangsbelüfteter Kühlsysteme.
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 (Kapitel 4) und unter möglicher Einbeziehung von Energiespeichern im Untergrund (Kapitel 5) entwickelt werden. Da die Temperaturen direkt genutzter Wärmereservoirs die hohen Betriebstemperaturen in konventionellen Wärmenetzen meist nicht erreichen, sollte überprüft werden, ob weiter zu entwickelnde Hochtemperatur-Wärmepumpen eingesetzt werden können. Dies würde auch die Einsatzmöglichkeiten der Mitteltiefen Geothermie wesentlich erweitern.

Aus geologischen Gründen, aber auch aus baurechtlichen / 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.
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 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 Kompressionskälte-

maschinen erzeugt. Eine attraktive Alternative stellt die Kälteerzeugung mittels Sorptionskältemaschinen dar, welche einen signifikant geringeren Strombedarf aufweisen. Absorptions- und Adsorptionskältemaschinen benötigen normalerweise eine Wärmequellen-temperatur 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 Planungs- und Betriebstools zur Bewertung und Optimierung der Wirtschaftlichkeit von geothermischen Fernkältenetzen.
3. Untersuchung und Bewertung der Möglichkeiten für eine effiziente und flexible gemeinsame Strom-, Wärme- und Kältebereitstellung.

2.6.4 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 mitgefördertem 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.

FORSCHUNGSBEDARF:

1. Kompilation vorhandener Soleanalysen hinsichtlich stofflicher Nutzung.
2. Wirtschaftliche Separation (Extraktion) der Mineralstoffe aus der Sole und Weiterbearbeitung.
3. Separation der nicht löslichen Gase (NCG) aus dem Thermalwasser.
4. Einfluss der Mineralabreicherung auf Scalingeffekte und Ausfällung 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 tiefen Geothermie aber selten. Ein Vorteil geschlossener Systeme ist eine weitgehende Unabhängigkeit von den geologischen und hydrogeologischen Untergrundverhältnissen, da keine 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) und Arnsberg (NRW).

Tiefe Erdwärmesonden erscheinen als attraktive Möglichkeit, nicht fündige Geothermie- oder Erdölbohrungen nachzunutzen. Es existieren allerdings nur wenige belastbare Betriebsergebnisse.

FORSCHUNGSBEDARF:

1. Nachweis und Optimierung der Wirtschaftlichkeit.
2. 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; Entwicklung von »mitwachsenden« Erdwärmetauschersystemen zur Reduktion der Erstinvestition.

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, so dass ein untertägiger geschlossener Wärmeträgerkreislauf realisiert wird. Modellrechnungen haben allerdings wie bei Tiefen Erdwärmesonden eine lediglich geringe thermische Leistung ergeben.

Ein Unternehmen bietet als Weiterentwicklung ein *Closed Loop* System mit mehreren parallelen Horizontalsträngen an. Ein Demonstrationsprojekt wurde 2019 in Kanada realisiert, es liegen aber bisher keine Betriebsergebnisse vor.

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.

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.

Auch viele andere Anlagen wie Tiefbohrungen der Kohlenwasserstoff-Industrie können geothermisch nachgenutzt werden, insbesondere im Wärmemarkt, 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. Der gesetzliche Rahmen für die Energieeffizienz derartiger Anlagen ist das Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (EEWärmeG), das für Sole-Wasser-Wärmepumpen bei Neubauten eine Jahresarbeitszahl von mindestens 4 (3,8 bei zusätzlicher Warmwasserbereitung) vorschreibt.

In Deutschland sind derzeit mehr als 400.000 oberflächennahe Erdwärmeeinrichtungen mit einer Leistung von 4.400 MW installiert. Pro Jahr stellen sie rund 6.600 GWh Heizenergie bereit (Stand 2018). Eine Studie der Umweltbehörde NRW (LANUV) zeigt, dass in NRW 56 % des Wärmebedarfs durch oberflächennahe Geothermie gedeckt werden kann.

Heute werden in Deutschland fast 20 % der Neubauten 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. Auch im gewerblichen Wärmemarkt wird die oberflächennahe Geothermie vermehrt eingesetzt, z. B. für die Klimatisierung von Bürohäusern und Einkaufszentren. Der Wärmeentzug kann zur Reduzierung der Untergrundtemperatur in städtischen Wärmeinseln beitragen.

Mangelhafte und ungenügende Qualität (d. h. handwerkliche Fehler) bei der Planung und Errichtung erdgekoppelter Wärmequellenanlagen haben die Technologie unnötig und ungerechtfertigt in Misskredit gebracht. Die Branche ist daher derzeit dabei, die notwendigen Qualitätsstandards weiter zu entwickeln und dafür zu sorgen, dass diese in der Praxis auch sicher umgesetzt werden.

3.1 Kostenreduktion

Oberflächennahe Geothermie ist bei der Einrichtung teurer als andere Heizsysteme wie z. B. Erdgas. Die deutlich geringeren Betriebskosten führen zwar zu einer Amortisation der Mehrkosten nach ca. 10 Jahren, dennoch schrecken viele Interessenten vor der Mehrausgabe für oberflächennahe Geothermie zurück. 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 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 Bohrergebnissen 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 Grundwasserverhältnisse, 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 vereinheitlichte öffentlich zugängliche Untergrundinformationen zur Dimensionierung von Erdwärmesonden. Bei unzureichender Bohrdatendichte sollte der Einsatz geophysikalischer Messungen zur Verbesserung der Datenbasis erprobt werden.

3.2 Effizienzsteigerung

Mit der Nutzung der Oberflächennahen Geothermie in Kombination der Wärmepumpentechnologie steht für die Wärmebereitstellung eine sehr gute Systemlösung zur Verfügung. Diese Technik muss für weitere Einsatzbereiche (Wärme- und Kälteerzeugung) weiterentwickelt werden. Dies gilt insbesondere für die Nutzung der Wärmepumpentechnologie im Gebäudebestand. Alternative Lösungen zur Flächenheizung, wie etwas zwangsbelüftete Konvektoren, sind zu entwickeln und zu erproben.

Eine Kombination der Wärmepumpentechnologie mit PV-Anlagen zur CO₂-neutralen Bereitstellung von 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 R134a (GWP 1300) u. a. Hydrofluorolefine (HFO), Fluorwasserstoff (HF) und Kohlenstoffdioxid (CO₂). Allerdings sind die Umwelteffekte bei HFO (v. a. durch die teilweise Zersetzung zu Trifluoressigsäure (TFA) und HF) noch nicht endgültig geklärt. 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 nichtwassergefährdenden 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.
8. Untersuchungen bei der Heizungsinfrastruktur von Heizkörpern mit erzwungener Ventilation.
9. Untersuchung der Wärmepumpensysteme u. a. in Hinblick auf den Einsatz in Bestandsgebäuden.
10. 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. 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 Temperaturspreizung von 10 °C auf 85 °C lediglich bei 2,5.

Erweiterungspotenziale liegen z. B. bei geothermischen Komponenten für Nahwärmenetze einschließlich Speicher sowie bei 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.
3. Einbindung weiterer Energieerzeuger (z. B. Biomasse-BHKW, Stirling-Motoren, Solarwärme) und Demonstrationsvorhaben dazu.
4. Effizienzsteigerung bei Hochtemperatur-Wärmepumpen.

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 die 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). Wärmeentzug durch Geothermienutzung kann dieser Entwicklung entgegenwirken. Bei Nutzung zum Heizen und Kühlen ist großflächig und über längere Zeit auf einen Ausgleich zwischen Wärmeeintrag und Wärmeaustrag 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 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.

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.

In konventionellen Wärmenetzen sind die Betriebstemperaturen meist 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 Abkopplung 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). 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, saisonale Wärmespeicher, industrielle Abwärme, Müllverbrennung - auszulegen 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 Energieverbraucher / Wärmeverbrauch. Zukunftsfähig werden solche Wärmenetze der 5. Generation dadurch,

dass sie durch ihren modularen Aufbau von Beginn an erweiterbar konzipiert sind.

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 (siehe Kapitel 5) und/oder zur Auslegung von 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 in kalten Nahwärmenetzen und zum Umbau von Bestandsnetzen. Untersuchung von Möglichkeiten der Agrargeothermie.
- 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 (z. B. fest-flüssig) möglich, weil im Temperaturbereich der Schmelze oder der Eisbildung viel Wärmeenergie bei konstanter Temperatur ein- bzw. ausgespeichert werden kann. Der Wirkungsgrad nachgeschalteter Wärmepumpen oder Rückverstromungsanlagen bleibt infolge der konstanten Temperatur unverändert

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 kommen thermisch aktivierte Betonbauteile, z. B. Energiepfähle, zum Einsatz. Mit fortschreitendem Klimawandel werden auch zunehmend mehr Wohnungen klimatisiert, wie dies in anderen Klimazonen seit langem üblich ist.

Ein erfolgreiches Management der Wärme im Untergrund ist nur dann nachhaltig, wenn das Grundwasser besonders im Bereich der Trinkwasserschutzgebiete auch temperaturmäßig langfristig geschützt wird. 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 erhöht. 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.

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 Anlagen, sowohl Erdsonden- als auch 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 gespeicherter 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 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 Veränderungen 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 unter anderem in Aquiferspeichern möglich. Geeignete Aquifere sind z. B. Sandstein oder Kalkstein, in deren Poren- und/oder Klufträumen sich Grundwasser befindet und bewegen kann. Da Aquiferspeicher 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 2 Standorten realisiert, während in anderen Ländern weit mehr Anlagen in Betrieb sind. Neben Aquifern 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, ist noch immenser Forschungsbedarf erforderlich. Hier ist sowohl eine Modellentwicklung, Simulation, Evaluierung von Technik, Geologie, Hydrochemie, Umwelt und Wirtschaftlichkeit sowie Herstellung und Anwendung erster Pilotanlagen dringend erforderlich.

FORSCHUNGSBEDARF:

1. Entwicklung und Simulation von Modellen und Varianten zur saisonalen Tiefspeicherung (Tiefen bis ca. 4.000 m).
2. Entwicklung eines Masterplans Tiefspeicherung als Komponente der Wärmewende.
3. Entwicklung der Realisierungsbedingung hinsichtlich aller Aspekte der Energiespeicherung, Schaffung der Rahmenbedingungen.
4. Entwicklung und Realisierung von Pilotprojekten zur saisonalen Tiefspeicherung (für Tiefen bis zu ca. 4.000 m).
5. Installation von Demonstrationsanlagen als Informationsbasis für weitere Projekte und zur Akzeptanzerhöhung.
6. Weiterentwicklung im Bereich der System- und Betriebsoptimierung.
7. Erprobung der Wärmespeicherung in Kombination mit Groß- und Hochtemperaturwärmepumpen sowie anderen Energieträgern.

5.2 Energiespeicherung zur Rückverstromung

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:

Druckluftspeicher (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 2 Stunden 320 MW elektrischer Energie bereitgestellt werden. Allerdings wird die bei

Kompression freierwerdende Wärmeenergie abgeführt und muss bei der Rückverstromung durch Verbrennung von Erdgas wieder zugeführt werden, um ein Einfrieren der Turbinen zu verhindern. Dadurch erhöht sich die elektrische Leistung auf 620 MW, der Wirkungsgrad beträgt aber nur ca. 40 %. Es ist geplant, statt Erdgas regenerativ erzeugten Wasserstoff einzusetzen und so die CO₂-Bilanz zu verbessern. Die Zwischenspeicherung der Wärmeenergie und ihren Einsatz bei der Rückverstromung (ACAES - *adiabatic* CAES) ist Gegenstand von Forschungsvorhaben, wurde aber bis jetzt nicht praktisch realisiert.

Redox-Flow Akkus: Die Stromspeicherung/-rückgewinnung erfolgt durch Oxidation/Reduktion zweier 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 bei 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 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 im 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 Auspeisung von Wärmeenergie bei hohen Temperaturen (Latentwärmespeicher).

6. Umwelteinwirkungen, Nachhaltigkeit und Akzeptanz

Geothermie ist eine Erneuerbare Energie. Ihre Nutzung ist nachhaltig, umweltfreundlich und hat ein großes Potenzial zur Senkung von Treibhausgasemissionen besonders im Wärmemarkt. Dennoch ist auch die Geothermie nicht ganz frei von Umwelteinwirkungen und Risiken, z. B. durch eine teilweise erhöhte Mikroseismizität. Auf diesen Gebieten besteht Forschungsbedarf.

FORSCHUNGSBEDARF:

1. Weiterentwicklung der seismologischen Überwachung, prognostische Ampelsysteme, Mikrozonierung.
2. Umgang mit natürlichen radioaktiven Nebenprodukten.
3. Havariemanagement (Bohrungsintegrität).
4. Schallschutz bei Kühlanlagen.
5. Soziopsychologische Aspekte der Akzeptanz.

7. Ausblick

Das vorliegende Positionspapier wurde vom Bundesverband Geothermie 2020 erstellt, um den erforderlichen 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, obwohl sich beide Nutzungsarten annähern, z. B. durch die Mitteltiefe Geothermie (bis ca. 1.000 m Tiefe) und die Nutzung flacherer Reservoirhorizonte (ca. 1.500 m Tiefe) unter Verwendung von Wärmepumpen für Anwendungen, die bisher durch die Tiefe Geothermie abgedeckt wurden. Gegenüber früheren Stellungnahmen wurde das Papier wesentlich durch die Kapitel 4 und 5 zur Verteilung und zur Speicherung von Wärme oder Kälte im Untergrund ergänzt.

Das Papier ist eine Aktualisierung eines Positionspapiers des Bundesverbandes Geothermie 2017. Die Aktualisierung entstand durch die Mitarbeit von David Bertermann, Dietfried Buss, Sebastian Dirner, Thomas Jahrfeld, Reinhard Kirsch, Thomas Kohl, Christiane Lohse, Horst Rüter, Christopher Schifflechner, Rüdiger Schulz, Ingrid Stober, Torsten Tischner, Friedemann Wenzel und weiteren KollegInnen.

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

Dezember 2020

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: Hans Engels

