

Stand und Forschungsbedarf in der Geothermie

Positionspapier des Bundesverbandes Geothermie e. V. (BVG) zum 7. Energieforschungsprogramm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi)

1. Einleitung	2
Tiefe Geothermie.....	3
2. Standorterkundung.....	4
2.1 Geophysikalische Standorterkundung	5
2.2 Hydrogeologische Bedingungen.....	6
3. Erschließung	6
3.1 Bohr- und Messtechnik.....	6
3.2 Reservoir-Stimulation	7
4. Reservoirmanagement	8
4.1 Betriebsoptimierung	8
4.2 Reservoirmodelle	8
5. Fluidförderung und Energiebereitstellung	9
5.1 Fluidförderung	9
5.2 Stromerzeugung.....	9
5.3 Wärmebereitstellung	9
5.4 Stoffliche Nutzung	10
6. Regionale Aspekte	11
6.1 Süddeutsches Molassebecken.....	11
6.2 Oberrheingraben	11
6.3 Norddeutsches Becken einschließlich Münsterländer Bucht.....	12
Oberflächennahen Geothermie	13
7. Kostenreduktion	13
7.1 Effizienzsteigerung.....	14
7.2 Erweiterung der Einsatzfelder	15
8. Grundwasserschutz.....	16
9. Wärme- und Kältespeicher im Untergrund.....	17
9.1 Speicher im oberflächennahen Untergrund	17
9.2 Speicher im tieferen Untergrund.....	18
10. Ausblick	19

1. Einleitung

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

Diese Ressource kann auf drei im Wesentlichen unterschiedlichen Wegen genutzt werden. Mit der tiefen Geothermie, die über Bohrungen von mehr als 400 Meter erfolgt, kann neben Wärme unter bestimmten Voraussetzungen auch Strom produziert werden. Bei der oberflächennahen Geothermie, die die Erdwärme in den obersten 400 Metern nutzt, kann Wärme und Kälte entzogen sowie gespeichert werden..

Im Folgenden finden Sie eine kompakte Darstellung des aktuellen Standes und Forschungsbedarfs für die verschiedenen Anwendungsfelder mit ausführlicheren Begründungen.

Tiefe Geothermie

Tiefengeothermische Anlagen nutzen die im Untergrund in etwa 2000 bis 5000 m Tiefe vorhandene Wärme (Temperaturen über 60 °C) zur Bereitstellung von Wärme und/oder zur Erzeugung von Strom. Definitionsgemäß wird ab 400 m Tiefe von Tiefengeothermie gesprochen. Es wird Thermalwasser über tiefe Bohrungen zu Tage gefördert, meist über Tage in Wärmetauschern abgekühlt und in das geothermische Reservoir zurückgeleitet (Thermalwasserzirkulation). In der tiefen Geothermie wurden in den letzten 10 Jahren, nicht zuletzt durch öffentlich geförderte Forschung, wichtige Fortschritte erzielt, beispielsweise in der Erkundung und der Reservoirerschließung, wodurch es heute möglich ist, an verschiedenen Standorten erfolgreich Gebrauchswärme bereitzustellen und/oder Strom zu erzeugen. Das Energieforschungsprogramm der Bundesregierung, das EEG und das Marktanzreizprogramm bilden dafür den Rahmen.

Neben der direkten lokalen Nutzung des Thermalwassers zu balneologischen Zwecken und zur Gebäudeheizung, welche an mehr als 160 Standorten erfolgt, stellt die Belieferung von Fernwärmenetzen heute die vorrangige Nutzung tiefer geothermischer Reservoirs in Deutschland dar. 23 Anlagen mit einer installierten thermischen Leistung von mehr als 330 MW stellten 2016 rund 2,9 PJ (815 GWh) Wärmeenergie bereit.

Die Nutzung der geothermischen Energie zur Wandlung in Strom erfolgt zurzeit an 8 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 Wärmebereitstellung dar, d. h. die Kraftwerke sind wärmegeführt. Eine reine Stromerzeugung ist nur an 3 Standorten realisiert. Die elektrische Anlagenkapazität beläuft sich momentan auf ca. 40 MW_{el} und stellte 2016 etwa 174 GWh bereit.

Die Entwicklung von Projekten zur Nutzung geothermischer Energie für die Wärmebereitstellung ist an folgende 4 Kriterien geknüpft:

1. es müssen geeignete geologische Bedingungen vorhanden sein,
2. es besteht ein ausreichender und langfristig planbarer Wärmeabsatz sowie die Möglichkeit zum Anschluss an ein Wärmeverteilnetz,
3. die Projektfinanzierung ist mit den hohen Anfangsinvestitionen, der langen Umsetzungsdauer und der langen Projektlaufzeit darstellbar,
4. es kann die Akzeptanz der lokalen Bevölkerung 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 Untergrundes, insbesondere mit dem Ziel der Wärmebereitstellung, befinden sich daher gegenwärtig in der Planung. Dabei wird zukünftig die Wärmeversorgung in Ballungsgebieten (auch Quartieren) stärker in den Fokus gelangen („Wärmewende“).

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

2. Standorterkundung

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 poroelastische Gesteinseigenschaften) für eine noch größere Anzahl von Standorten benötigt. Eine verlässliche Prognose beinhaltet dabei:

- die Erhebung qualitativ hochwertiger Daten durch die Kombination aus etablierten und neuen Erkundungsmethoden,
- die Einbindung der Interpretation vorhandener Informationen,
- die Bewertung der Eignung des Untergrundes 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 3-dimensional abgebildet werden (Konzeptionelles Modell, THMC-Modellierung).

Die verlässliche Charakterisierung des Untergrundes, des geothermischen Fluides 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 standort-spezifischen Explorations- und Charakterisierungsmaßnahmen zu minimieren und auch erst später vorliegenden Betriebserfahrungen vorzugreifen.

Zur Erhebung geologischer Daten sind heute verschiedene Erkundungsmethoden verfügbar, welche zur Beantwortung unterschiedlicher Fragestellungen eingesetzt werden können. 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, die aus der natürlich vorhandenen geothermischen Energie oder aus gespeicherter Wärme gedeckt werden kann. 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 Sektionen), erforderlich.

Methodenspezifisch ergibt sich folgendes Bild:

2.1 Geophysikalische Standorterkundung

Bei der geophysikalischen Erkundung geothermischer Reservoirstrukturen kommt in Deutschland der Reflexionsseismik eine herausragende Rolle zu. So konnten z. B. im Bayerischen Molassebecken höffige Bereiche mit erhöhter Klüftung durch eine Analyse der seismischen Geschwindigkeiten und weiterer Attribute nachgewiesen werden. In Sandsteinreservoirs 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 kristallinen Untergrundes, stellt die Erkundung tektonischer Störungssysteme dar, die wasserführend sein können. Zu diesem Zweck wurde bereits beispielhaft eine 3D reflexionsseismische Vermessung im Raum Schneeberg durchgeführt. Methodische Entwicklungen dienen hierbei zur verbesserten seismischen Abbildung steilstehender Untergrundstrukturen. Von besonderem Interesse sind Störungssysteme mit hydraulischen Wegsamkeiten.

Generell wäre eine großräumige projektunabhängige tiefenseismische Erkundung geothermisch höffiger Regionen im Stile früherer Großprojekte (z. B. DEKORP - Deutsches Kontinentales Reflexionsseismisches Programm 1984-1997) mit Beteiligung der relevanten geowissenschaftlichen Forschungsinstitutionen wünschenswert. Derartige geophysikalische Untersuchungen wären dann im Zusammenhang mit einem entsprechenden öffentlich geförderten Bohrprogramm zu sehen. Zeichnen sich dabei Lokationen potenzieller geothermischer Anlagen ab, können gezielte weiterführende regionale oder lokale, also projektbezogene, Untersuchungen angesetzt werden.

Forschungsbedarf:

- Reflexionsseismische Auflösung zur Detektion z. T. 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.
- Ermittlung petrophysikalischer Parameter (z. B. Porosität) durch P- und S-Wellenerkundung als Eingangsparameter für poroelastische Modellierungen.
- 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.
- Entwicklung von ‚joint inversion‘ Technologien zur Kombination verschiedener geophysikalischer Methoden.
- Genauere und kleinräumige Fazies- und Diagnosemodelle und zeitliche Entwicklung des Porenraums.
- Seismische Abbildung von Schüttungsrinnen im Norddeutschen Becken.

2.2 Hydrogeologische Bedingungen

Fluide und ihre natürliche und erzwungene Strömung spielen neben der Temperatur für die energetische Nutzung des unterirdischen Raumes die entscheidende Rolle. Geothermische Fluide stellen aufgrund ihrer komplexen chemischen Zusammensetzung sowie der Gas- und Feststoffgehalte oft enorme Herausforderungen an die Materialwahl, die Anlagengestaltung und Betriebsführung dar. 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 und operativen Strategien zur Vermeidung von Ausfällungen sowie die Entwicklung von Additiven und Betriebsstrategien zur kontrollierten Mineralfällung.

Forschungsbedarf:

- Erweiterung der Datenbasis thermophysikalischer Eigenschaften (z. B. Dichte, Viskosität und Wärmekapazität) geothermischer Fluide als Eingabeparameter entsprechender THMC-Modelle, also von Modellen, die Temperatur, Hydraulik, Mechanik und Chemie gekoppelt berücksichtigen.
- Prognose der Durchlässigkeit (Permeabilität) einschließlich der Veränderung bei Reinjektion.
- Entwicklung von Inhibitoren und anderen Formen des Korrosions- und Scalingschutzes.
- Errichtung und Betrieb von Demonstrationsanlagen.

3. Erschließung

3.1 Bohr- und Messtechnik

Die Kosten für die Niederbringung der Bohrungen stellen den Großteil der Anfangsinvestitionen tiefegeothermischer 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 ähnlichen Standorten zu erwarten. Im Hinblick auf die Erschließung geothermischer Standorte in städtischen Gebieten sind jedoch auch steigende Anforderungen an den Betriebsablauf und die Lärmemissionen gestellt, wodurch z. T. auch mit steigenden Kosten zu rechnen ist.

Forschungsbedarf:

- Erschließung weiterer Kostensenkungspotenziale.

- Erhöhung der Bohrgeschwindigkeit bei geringerem Bohrrisiko.
- Anpassung von weiteren Tools der KW-Industrie für die Geothermie.

3.2 Reservoir-Stimulation

Um die Entwicklung tiefengeothermischer Standorte, insbesondere im Norddeutschen Becken, voranzutreiben, sind weitere Aktivitäten zur hydraulischen Reservoir-Stimulation notwendig, bei welcher der Anschluss der Bohrung an Reservoir-Schichten mit hoher Permeabilität beispielsweise durch künstliche Risse verbessert wird und so eine wirtschaftliche Nutzung erreicht werden kann.

Vor allem aber sind Erschließungsmethoden für hydraulisch dichte Tiefengesteine („Hot-Dry-Rock“- bzw. „Engineered oder Enhanced“- Geothermal Systems) 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 von Rissflächen hydraulisch erschlossen, z. B. durch 2 jeweils 1.000 m lange Horizontalstrecken mit 20 bis 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-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, sodass 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.

Forschungsbedarf:

- Demonstrationsprojekte mit dieser Technik im Kristallin und in dichten Sedimentgesteinen sowohl für die Direktwärmenutzung (Tiefenbereich: 2000 – 4000 m) als auch für die Stromerzeugung (Tiefenbereich: 3000 – 5000 m).
- Gewährleistung möglichst gleichförmiger hydraulischer Durchlässigkeit der erzeugten Risse, damit das gesamte Rissystem zur Wärmeabfuhr beiträgt.
- Entwicklung und Erprobung von Alternativen, wie Multilateralbohrungen.

4. Reservoirmanagement

4.1 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.

Forschungsbedarf:

- Weiterentwicklung geeigneter Monitoring-Konzepte, Verbesserung des Monitorings seismischer Ereignisse. Erprobung von Wellenfeldmethoden. Monitoring in dicht besiedelten Bereichen, wie dem Stadtgebiet von München.
- Benchmarking unterschiedlicher Modellierungstechniken.
- Charakterisierung und Zonierung des oberflächennahen Raumes zur seismischen Gefährdungsabschätzung (Mikrozonierung, Einfluss der obersten Schichten auf seismische Wellen).
- Definition und Erprobung der seismologischen ‚Einwirkungsbereiche‘ im Sinne des novellierten Berggesetzes.

4.2 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 aufwändig rückgängig zu machen sind. Heutige Reservoirmodelle können bei Verfügbarkeit der Gesteinsparameter und der wichtigsten thermophysikalischen Stoffdaten thermische, hydraulische und mechanische 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:

- Weiterentwicklung der Reservoirmodelle in Bezug auf Kopplung mit hydro- und geochemischen Prozessen (THMC-Modellierung).
- Benchmarking der unterschiedlichen, angebotenen Modellierungstechniken.

5. Fluidförderung und Energiebereitstellung

5.1 Fluidförderung

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 Standfestigkeit können dadurch bedingt 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:

- Weiterentwicklung zur Verbesserung von Verlässlichkeit und Effizienz der zur Fluidförderung genutzten Tiefpumpen (Tauchpumpen und Gestängepumpen) für verschiedene Standortbedingungen.

5.2 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 spielen die Wahl des Arbeitsmittels, die Verschaltung des Kraftwerkskreislaufs, die Prozessparameter sowie die Dimensionierung der Wärmeübertragungsflächen (insbesondere bei der Wärmeabfuhr) eine wesentliche Rolle. Wärmeübertragen spielen an verschiedenen Stellen des Thermalwasserkreislaufs eine Rolle.

Forschungsbedarf:

- Weiterentwicklung im Bereich der Turbinen- und Anlagenwirkungsgrade insbesondere mit Blick auf variable Betriebsbedingungen, welche typischerweise bei der kombinierten oder gekoppelten Bereitstellung von Strom und Wärme.
- Optimierung des Einsatzes zwangsbelüfteten Kühlsysteme.
- Optimierung der Wärmeauskopplung im kombinierten Strom-Wärmebetrieb, jahreszeitliche Anpassung.
- Werkstoffkundliche Untersuchungen und Verbesserungen insbesondere im Bereich Wärmeübertrager.

5.3 Wärmebereitstellung

Für Anlagen mit Wärmebereitstellung ist die Einbindung in das Energieversorgungssystem und die Wärmebedarfsstruktur entscheidend dafür, in welchem Umfang die geothermische Ressource genutzt werden kann. Geeignete Strategien im Hinblick auf

die Realisierung angepasster Wärmeverteilsysteme müssen den Neubau von dezentralen Niedertemperatur-Wärmenetzen und Kältenetzen und die Modifikation von (zentralen) Bestandsnetzen einbeziehen. Die Betriebstemperaturen in konventionellen Wärmeverteilsystemen sind dabei meist zu hoch, um das Reservoir an einem geothermischen Standort umfänglich auszulasten. 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.

Forschungsbedarf:

- Entwicklungen zur Anpassung der Wärmeverteilsysteme an Abnehmer und Quellen.
- Steigerung des Wärmeanteils von derzeit dem 5-fachen des Stromanteils (bestehende Anlagen) auf das 10-fache, durch Erschließung weiterer, auch alternativer Nutzungspotenziale.

5.4 Stoffliche Nutzung

Die zunehmende Verknappung von Rohstoffen (Beispiel Lithium) lässt die stoffliche Nutzung des Mineralbestandes der geförderten Thermalsole sowie geförderter Grubenwässer wirtschaftlich interessant werden. Durch die Nutzung der Sole kann die Wirtschaftlichkeit von Geothermieprojekten, insbesondere im Norddeutschen Becken, verbessert werden. Dabei muss der Umgang mit eventuell mitgeführtem radioaktivem Material einschließlich Beseitigung von Rückständen und kontaminierten Anlagenteilen besonders beachtet werden.

Forschungsbedarf:

- vergleichende Betrachtung vorliegender Soleanalysen,
- wirtschaftliche Separation der Mineralstoffe aus der Sole und Weiterbearbeitung,
- Einfluss der Mineralabreicherung auf Scalingeffekte,
- Einfluss der Mineralabreicherung auf Ausfällung im Reservoir.
- Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit.

6. Regionale Aspekte

Bedingt durch den verlässlichen Kenntnisstand der geologischen Gegebenheiten sowie die energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen (Investitionsbereitschaft, hohe Wärmepreise, vorhandene Infrastruktur) hat sich die Geothermie in verschiedenen Regionen unterschiedlich entwickelt. Entsprechend leitet sich ein regionaler Forschungsbedarf ab.

6.1 Süddeutsches Molassebecken

Tiefengeothermische Anlagen im Süddeutschen Molassebecken haben heute bereits eine gewisse Marktreife erreicht, sodass hier der Schwerpunkt auf projektbegleitende Maßnahmen zur Langzeitbeobachtung, Betriebsoptimierung und Kostenreduktion gelegt werden sollte. Zusätzlich liefert die bereits vorhandene Datenlage gute Voraussetzungen für weitere Forschungsarbeiten. Die Anreize durch das MAP haben wesentlich zur Entwicklung beigetragen und sind eine wichtige Voraussetzung für die Entwicklung weiterer Projekte.

Forschungsbedarf:

- Weiterentwicklung der seismischen Reservoircharakterisierung wie z. B. der Nachweis höffiger Bereiche mit erhöhter Klüftung durch eine Analyse der seismischen Geschwindigkeiten und weiterer Attribute.
- Besseres Verständnis der Störungssysteme.
- Untersuchung des Einflusses des lokalen Spannungsfeldes auf Störungssysteme.
- Tektonische Entwicklung (Genese) zur Abschätzung der Durchlässigkeit von Störungen.
- Regionale Entwicklung der Dolomitisierung.

6.2 Oberrheingraben

Die Entwicklung tiefengeothermischer Anlagen im Oberrheingraben geht im Vergleich zum Molassebecken langsamer voran, obwohl auch hier teilweise eine gewisse Marktreife erreicht wurde. Hindernisse ergeben sich teilweise aufgrund unzureichender Akzeptanz durch das Auftreten von Mikroseismizität.

Forschungsbedarf:

- Verbesserung der Kenntnisse der natürlichen und erzwungenen Thermalwasserströme sowie der damit verbundenen mikroseismischen Aktivitäten.
- Erfassung von seismischen Gefährdungsbereichen im urbanen Raum durch oberflächennahe Erkundung (Mikrozonierung).

6.3 Norddeutsches Becken einschließlich Münsterländer Bucht

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. Für eine weiträumigere Entwicklung des Norddeutschen Beckens sind zunächst 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 verfügbar sind. Modellrechnungen und Abschätzungen beruhen vielfach nicht auf 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 Horizonte, die bisher noch nicht untersucht wurden, sind geklüftete Sandsteine und Karbonatgesteine des Devon und Karbon im nordwestlichen Raum.

Forschungsbedarf:

- Weiterentwicklung reflexionsseismischer Techniken zur Erkundung der Feinstruktur im Reservoirhorizont wie z. B. zwischengelagerte Tonschichten sowie reduzierte Porosität/Permeabilität durch Zementation des Porenraums. Kartierung von Schüttungsrinnen des skandinavischen Hochlandes.
- Laborexperimente zur Gewinnung thermophysikalischer Eigenschaften (z. B. Dichte, Viskosität und Wärmekapazität) von geothermischen Fluiden sowie über Minerallöslichkeiten im Falle komplexerer Mischungen zur Gewinnung standortunabhängiger Modellparameter, die in den gängigsten THMC-Rechencodes für realistische Fällungs- und Zementationsprognosen vorkommen.
- Errichtung von Demonstrationsanlagen, die unterschiedliche Geologien erschließen; dadurch Verbesserung der Validierung und Kalibrierung von Modellrechnungen.
- Kompilation der relevanten Daten für geklüftete Sandsteine und Karbonatgesteine des Devon und Karbon im nordwestlichen Raum und Einpflege in das Geothermische Informationssystem.
- Entwicklung eines angepassten Konzeptes für seismischen Explorationsmethoden auf tiefliegende Sand- und Karbonatgesteine in Nordwestdeutschland.

Ausweisung von möglichen Vorzugsgebietene/Pilotstandorten.

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 350.000 oberflächennahe Erdwärmeeinrichtungen installiert. Pro Jahr stellen sie rund 24.000 GWh Heizenergie bereit (Stand 2016).

Heute werden fast 20 % der Neubauten mit Erdwärme-Heizsystemen ausgestattet. Als Wärmequellen werden dabei über 50 % 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. Allerdings ist der Einsatz im industriellen und gewerblichen Wärmemarkt aufgrund des niedrigen Temperaturniveaus auf spezielle Anwendungen begrenzt.

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

7. 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 Energie ab. Dies gilt insbesondere bei Bestandsbauten, weil z. B. bei einer geplanten Ablösung der Öl- oder Gasheizung durch Wärmepumpe und Erdwärmesonden weitere Anpassungen an der Heizung wegen der verringerten Vorlauftemperatur erforderlich 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 rationalisierter Wärmeleitfähigkeiten verbessert werden, z. B. auch 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. artesisches Grundwasserverhältnisse, quelfähige Gesteine und sulfathaltige Grundwässer.

Forschungsbedarf:

- Entwicklung von Optimierungsverfahren zur Positionierung und Verteilung von an den entsprechenden Untergrund angepassten Sondenfeldern.
- 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.
- Verbesserte und vereinheitlichte öffentlich zugängliche Untergrundinformationen zur Dimensionierung von Erdwärmesonden. Bei unzureichender Bohrdatendichte sollte der Einsatz geophysikalischer Messungen zur Verbesserung der Datenbasis erprobt werden.

7.1 Effizienzsteigerung

Mit der Nutzung der oberflächennahen Geothermie in Kombination mit der Wärmepumpentechnologie steht für die Wärmebereitstellung eine sehr gute Systemlösung zur Verfügung. Diese innovative Technik muss für weitere Einsatzbereiche (Wärme- und Kälteerzeugung) weiterentwickelt werden. Dies gilt insbesondere für die Nutzung der Wärmepumpentechnologie im Gebäudebestand.

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 Potenzial). Zur Diskussion stehen neben dem heute vor allem eingesetzten R134a (GWP 1300) u. a. auch Trifluoressigsäuren (TFA), Fluorwasserstoff (HF) und Kohlenstoffdioxid (CO₂). Allerdings sind die Umwelteffekte bei Trifluoressigsäuren (TFA) und Fluorwasserstoff (HF) noch nicht endgültig geklärt. Die ersten Wärmepumpen mit Kohlenstoffdioxid (CO₂) als Kältemittel sind bereits im Einsatz und erweitern den Temperaturbereich bis auf 95 °C.

Forschungsbedarf:

- Zur Steigerung der Effizienz der Wärmepumpe sollen auch Kompressoren mit geregelter (zweistufiger/stufenloser) Drehzahl, Economiser sowie Kondensat-kühlung weiterentwickelt werden.
- Die Entwicklung der Absorptionswärmepumpen, auch der Gaswärmepumpe, sollte in die Wirtschaftlichkeit führen.

- Entwicklung alternativer Wärmeentzugsarbeitsmittel (CO₂) bzw. Weiterentwicklung der Direktverdampfungsverfahren (heat pipes) auf der Basis von nichtwassergefährdenden Arbeitsmedien.
- Erhöhung der Leistungsfähigkeit von Erdwärmesonden durch Verbesserung der Komplettierung und der verwendeten Materialien.
- Untersuchungen bei der Heizungsinfrastruktur von Heizkörpern mit erzwungener Ventilation.
- Untersuchung der Wärmepumpensysteme u. a. in Hinblick auf den Einsatz in Bestandgebäuden.
- Einbindung von Wärmepumpensystemen in smarte und intelligente Netze.

7.2 Erweiterung der Einsatzfelder

Zurzeit liegt der Haupteinsatzbereich erdgekoppelter Wärmepumpen bei der Versorgung neu errichteter kleiner bis mittlerer Wohneinheiten sowie beim Heizen und Kühlen von Bürogebäuden und Einkaufszentren. Erweiterungspotenziale liegen bei der Wärmeversorgung von Bestandsbauten (Vorlauftemperatur der Heizung > 50°C), bei geothermischen Komponenten für Nahwärmenetze sowie bei der Schaffung neuer Anwendungen wie z. B. der Weichenheizung.

Forschungsbedarf:

- Einbindung der Geothermie in Niedertemperaturnetze und deren Nutzung zur Wärme- und Kältespeicherung.
- Methoden zur Regelung und Steuerung komplexer Niedertemperaturnetze mit mehreren Wärmequellen (z. B. Agrothermie), integrierten Wärmespeichern und eingebundenen Wärmeerzeugern
- Einbindung weiterer Energieerzeuger (z. B. Biomasse-BHKW, Stirling-Motoren, Solarwärme) und Demonstrationsvorhaben dazu.
- 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.

8. Grundwasserschutz

Die erfreuliche Tendenz zu erdgekoppelten 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 Wasserdurchlässigkeiten 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.

Forschungsbedarf:

- Weiterentwicklung von Prüfverfahren zur Frost-/Tauwechselbeständigkeit des Verfüllmaterials unter Einbeziehung des Langzeitverhaltens und des geologischen Umfeldes.
- Weiterentwicklung von Prüfverfahren zum Nachweis der sachgerechten Verfüllung des Bohrlochs.
- Untersuchung des Langzeitverhaltens der Systemdurchlässigkeit von Erdwärmesonden in unterschiedlichen geologischen Situationen.
- Weiterentwicklung alternativer Sondenkonzepte wie der ‚Schlauchsonde‘.

9. Wärme- und Kältespeicher im Untergrund

Der Nutzung des Untergrundes für die Klimatisierung wird zukünftig eine wachsende Bedeutung erhalten. Ein erfolgreiches Management der Wärme im Untergrund ist nur dann nachhaltig, wenn auch das Trinkwasser langfristig geschützt wird. Dazu müssen neue Konzepte und Technologien entwickelt werden. Ein Wärme-Kälte-Management kann z. B. auch bei der Sanierung von Altlasten genutzt werden, in diesem Fall ist häufig die Temperatur im Untergrund bereits durch die Bebauung verändert.

Wie bei der Wärmegewinnung ist auch die saisonale Wärmespeicherung sowohl im oberflächennahen als auch im tieferen Untergrund möglich.

Geothermische Wärmespeicher gehören zu den kostengünstigsten Energiespeichern. Sie können eine erhebliche Rolle im ‚Demand site management‘ und somit bei der Sektorenkopplung spielen.

9.1 Speicher im oberflächennahen Untergrund

Im oberflächennahen Untergrund erfolgt die Wärmeeinspeisung bzw. -rückgewinnung im Allgemeinen mit Erdwärmesonden. Stand der Technik ist dies bei der Klimatisierung von Industrie- und Bürogebäuden oder Einkaufszentren. Zusätzlich zu Erdwärmesonden kommen thermisch aktivierte Betonbauteile, z. B. Energiepfähle zum Einsatz. 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 die lokale Wärmeversorgung 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 eventuell unzulässige Erwärmung des Grundwassers.

Forschungsbedarf:

- Das hohe Potential der Wärmespeicherung im oberflächennahen Bereich kann nur genutzt werden, wenn Beeinträchtigungen der Grundwasserqualität auszuschließen sind. Durch eine verbesserte geophysikalische Erkundung, z. B. auch im urbanen Raum, muss die Eignung einer Lokation (Verbreitung nicht-wasserführender Schichten) nachzuweisen sein. Für die Auslegung von Erdsondenfeldern zur Wärmespeicherung und -rückgewinnung sind verbesserte Modellierungsverfahren erforderlich, die für den Planer auch verfügbar sind.
- Bei der Nutzung des oberflächennahen Untergrunds als Aquiferspeicher werden zudem Informationen zu temperaturbedingten Veränderungen der mikrobiellen Aktivität und damit zusammenhängenden chemischen Reaktionen im Grundwasserleiter benötigt. Die für die verlässliche Planung benötigten Daten und Erfahrungen sind bislang nur für wenige Standorte/individuelle Gebiete vorhanden.
- Monitoring von Wärme und Fluidbewegung im Speicher und der Umgebung durch elektrische und thermische SONDENSYSTEME.

9.2 Speicher im tieferen Untergrund

Für den tieferen Untergrund ist die Speicherung von Wärme/Kälte in Aquiferspeichern möglich. Geeignete Aquifere sind z. B. Sandstein oder Kalkstein, in deren Poren- und/oder Kluftsräumen sich Grundwasser befindet und bewegen kann. Da Aquiferspeicher mit Kapazitäten von bis zu mindestens 10 GWh 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 3 Standorten realisiert, während in anderen Ländern weit mehr Anlagen, z. B. in den Niederlanden mit über 2000 Anlagen, realisiert worden sind. Neben Aquiferen können z. B. auch Salzkavernen Optionen für Wärmespeicher oder die Wärmespeicherung in gefluteten Bergwerken ein Option sein. Für den Bereich der zukünftigen Nah- und Fernwärmeversorgung mittels Geothermie/Wärmespeicherung könnte auch die Kombination mit Großwärmepumpen und Hochtemperaturwärmepumpen sinnvoll sein.

Forschungsbedarf:

- Weiterentwicklung im Bereich der System- und Betriebsoptimierung.
- Installation von Demonstrationsanlagen als Informationsbasis für weitere Projekte und zur Akzeptanzerhöhung.
- Wärmespeicherung in Kombination mit Groß- und Hochtemperaturwärmepumpen.

10. Ausblick

Das vorliegende Positionspapier wurde vom Bundesverband Geothermie im November 2017 erarbeitet, um den erforderlichen weiteren Ausbau der Geothermie durch bedarfsgerechte Forschungs- und Entwicklungsarbeiten voranzubringen. Es fasst den Stand der Forschung in der oberflächennahen und tiefen Geothermie zusammen und stellt stichwortartig den zukünftigen Forschungsbedarf dar. Die klassische Unterscheidung von oberflächennaher und tiefer Geothermie wurde beibehalten, obwohl sich beide Nutzungsarten annähern, z. B. durch die mitteltiefe Geothermie (bis ca. 1000 m Tiefe) und die Nutzung flacherer Reservoirhorizonte (ca. 1500 m Tiefe) unter Verwendung von Wärmepumpen. Gegenüber früheren Stellungnahmen wurde es wesentlich ergänzt durch die Speicherung von Wärme oder Kälte im Untergrund.

Das Papier entstand durch die Mitarbeit von Kemal Erbas, Sebastian Feige, Stephanie Frick, Hartwig von Hartmann, Ernst Huenges, Reinhard Jung, Reinhard Kirsch, Harald Milsch, Inga Moeck, Birgit Müller, Wolfgang Rabbel, Simona Regenspurg, Horst Rüter, Rüdiger Schulz und Josef Weber.

Er ist ein sogenanntes „lebendes Dokument“ und soll kontinuierlich durch aktuelle Entwicklungen ergänzt werden.