

CLIMATE CHANGE

33/2025

Abschlussbericht

Umweltwirkungen und umweltverträglicher Ausbau der oberflächennahen Geothermie

von:

Andreas Dahmke, Frank Dethlefsen, Malte Schwanebeck, Jens Olaf Delfs, Bo Wang, Christof Beyer, Sebastian Bauer, Ralf Köber, Sönke Böhm, Johannes Nordbeck, Klas Lüders, Götz Hornbruch
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Institut für Geowissenschaften, Kiel

Kathrin Menberg, Carolin Tissen
Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Karlsruhe

Kai-Justin Radmann, Carsten Hansen, Anton Schneider
Consulaqua Hamburg Beratungsgesellschaft mbH, Hamburg

Hans-Hermann Richnow, Carsten Vogt
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, Leipzig

Christian Maaß
HIC Hamburg Institut Consulting GmbH, Hamburg

Herausgeber:

Umweltbundesamt

CLIMATE CHANGE 33/2025

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl (FKZ) 3716 43 104 2
FB001636

Abschlussbericht

Umweltwirkungen und umweltverträglicher Ausbau der oberflächennahen Geothermie

von

Andreas Dahmke, Frank Dethlefsen, Malte Schwanebeck,
Jens Olaf Delfs, Bo Wang, Christof Beyer, Sebastian
Bauer, Ralf Köber, Sönke Böhm, Johannes Nordbeck, Klas
Lüders, Götz Hornbruch
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Institut für Geowis-
sensschaften, Kiel

Kathrin Menberg, Carolin Tissen
Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Angewandte
Geowissenschaften, Karlsruhe

Kai-Justin Radmann, Carsten Hansen, Anton Schneider
Consulaqua Hamburg Beratungsgesellschaft mbH, Hamburg

Hans-Hermann Richnow, Carsten Vogt
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, Leipzig

Christian Maaß
HIC Hamburg Institut Consulting GmbH, Hamburg

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU),
Institut für Geowissenschaften
Andreas Dahmke (Autor Kapitel 1, 2, 3, 4 & 5), Frank Dethlefsen, Malte Schwanebeck,
Jens Olaf Delfs, Bo Wang, Christof Beyer, Sebastian Bauer (Autoren Kapitel 1)
Ralf Köber, Klas Lüders, Sönke Bohm, Tessa Strutz, Johannes Nordbeck, Götz Hornbruch
(Autor*innen: Kapitel 3)
Ludewig-Meyn-Str. 10
24118 Kiel

Consulaqua Hamburg Beratungsgesellschaft mbH
Kai-Justin Radmann, Carsten Hansen, Anton Schneider (Autoren Kapitel 2)
Ausschläger Elbdeich 2
20539 Hamburg

in Zusammenarbeit mit

Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Angewandte Geowissenschaften
Kathrin Menberg (Autorin Kapitel 1 & 2), Carolin Tissen (Autorin Kapitel 1)
Kaiserstr. 12
76131 Karlsruhe

HIC Hamburg Institut Consulting GmbH
Christian Maaß (Autor Kapitel 4)
Paul-Neumann-Platz 5
22765 Hamburg

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ
Hans Hermann Richnow, Carsten Vogt (Autoren Kapitel 3)
Permoserstr. 15
04316 Leipzig

Abschlussdatum:

November 2023

Redaktion:

Fachgebiet V 1.3 Erneuerbare Energien
Christiane Lohse (a. D.), Dr. Andreas Bertram, Stefan Rother

Dessau-Roßlau, Mai 2025

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Umweltwirkungen und umweltverträglicher Ausbau der oberflächennahen Geothermie

Für den wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Erfolg der klimaneutralen Transformation der Wärmeversorgung (Heizen und Kühlen) gelten neben der oberflächennahen Geothermie hochkapazitäre Wärmespeicher als ein wichtiger Schlüssel, um die fluktuierenden Energiedargebote und -bedarfe effektiv und effizient nutzen zu können. Ein entsprechender Wärmespeicherbedarf existiert insbesondere für urbane Räume mit hohen Wärmebedarfsdichten und Nah- bzw. Fernwärmenetzpotentialen, die allerdings i. d. R. ein geringes Dargebot freier Flächen aufweisen, so dass untertägige Wärmespeichersysteme mit unterschiedlichen Energiedichten und Temperaturspannbreiten dort eine besondere Rolle spielen.

In der Studie wird daher das nationale Ausbaupotential oberflächennaher Geothermie- sowie (Hochtemperatur-)UTES-Anlagen behandelt und in den Kontext von Referenz- und Zielszenarien für das deutsche Energiesystem eingeordnet. Vor dem Hintergrund zu erwartender induzierter und „natürlicher“ Temperaturveränderungen im oberflächennahen geologischen Untergrund einschließlich der Grundwasserleiter leitet sich ein beträchtlicher potenzieller Handlungsbedarf im Hinblick auf ein untertägiges Wärmemanagement ab. Mit Hilfe des sog. ANGUS-Konzepts zur untertägigen, prozessorientierten und quantitativen Raumplanung werden Bewirtschaftungsansätze mit multiplen Nutzungsoptionen und ihren thermischen, hydraulischen, geomechanischen und (mikro-)biologischen Auswirkungen aufgezeigt. Aufbauend auf diesen generellen Ansatz behandelt die Studie die betrieblich-thermischen Charakteristika und Nachhaltigkeitsaspekte von herkömmlichen oberflächennahen Geothermie- sowie von UTES-Anlagen und betrachtet detailliert potenzielle positive und negative Umwelt- und Klimawirkungen. Auf der empirischen Grundlage von Labor- und Feldversuchen sowie der einschlägigen Literatur werden temperaturinduzierte Konzentrationsänderungen der im Grundwasser gelösten Komponenten, die vergleichsweise gering ausfallen, ebenso thematisiert wie mögliche Auswirkungen auf das Aquiferbiom. Eine rechtliche Einordnung bewertet insbesondere die potenzielle Bedeutung von oberflächennaher Geothermie und UTES für die Transformation der Wärmeversorgung, woraus zum einen Anregungen zum Hochlauf von (Hochtemperatur-)UTES-Anlagen formuliert werden. Zum anderen wird aus rechtlicher Perspektive skizziert, wie durch geeignete Planungs- und Monitoringmaßnahmen der oberflächennahe geologische Untergrund sowohl für die Wasserver- und -entsorgung als auch zur Wärmever- und -entsorgung im Sinne eines optimierten Klima- und Umweltschutzes genutzt werden kann.

Abstract: Environmental impacts and environmentally compatible expansion of near-surface geothermal energy

For the economic and social success of the climate-neutral transformation of the heat supply (heating and cooling), in addition to near-surface geothermal energy, high-capacity heat storage is considered an important key to being able to use the fluctuating energy supply and demand effectively and efficiently. A corresponding heat storage requirement exists in particular for urban areas with high heat demand densities and local and district heating network potentials, which, however, generally have a low availability of free space, so that underground heat storage systems with different energy densities and temperature ranges play a special role there.

The study therefore deals with the national expansion potential of near-surface geothermal and (high-temperature) UTES plants and contextualizes it in reference and target scenarios for the German energy system. Against the background of expected induced and “natural” temperature changes in the near-surface subsoil, including the aquifers, a considerable potential need for ac-

tion with regard to underground heat management is derived. With the help of the so-called AN-GUS concept for underground, process-oriented and quantitative spatial planning, management approaches with multiple utilization options and their thermal, hydraulic, geomechanical and (micro-)biological effects are shown. Based on this general approach, the study deals with the operational-thermal characteristics and sustainability aspects of conventional near-surface geothermal and UTES plants and considers potential positive and negative environmental and climate impacts in detail. On the empirical basis of laboratory and field tests and the relevant literature, temperature-induced changes in the concentration of the components dissolved in the groundwater, which are comparatively small, are discussed, as are possible effects on the aquifer biome. A legal classification assesses in particular the potential significance of near-surface geothermal energy and UTES for the transformation of the heat supply, from which suggestions for the ramp-up of (high-temperature) UTES plants are formulated. On the other hand, it outlines from a legal perspective how the near-surface subsoil can be used for water supply and disposal as well as for heat supply and disposal in terms of optimized climate and environmental protection through suitable planning and monitoring measures.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	14
Tabellenverzeichnis.....	21
Abkürzungsverzeichnis.....	24
Zusammenfassung.....	30
Summary	39
1 Einschätzung des räumlichen Ausbaupotenzials oberflächennaher Geothermie bzw. oberflächennaher geologischer saisonale Wärmespeicher in Deutschland	48
1.1 Der Wärmebedarf des zukünftigen Gebäudebestands und die erwartete Bedeutung der oberflächennahen Geothermie bei der Bedarfsdeckung	52
1.1.1 Aktuelle Situation im Gebäudebestand	54
1.1.2 Szenarien zum zukünftigen Wärmebedarf (Heizen und Kühlen) und Technologiemix zur Wärmeversorgung des Gebäudebestands.....	57
1.2 Darstellung und Prognose der thermischen Veränderungen des geologischen Untergrunds in den kommenden Dekaden	70
1.2.1 Thermische Veränderungen des geologischen Untergrunds in urbanen Gebieten	71
1.2.1.1 Bisherige räumliche Ausdehnung der thermischen Veränderungen in urbanen Gebieten	71
1.2.1.2 Ursachen für die thermischen Veränderungen im urbanen geologischen Untergrund	74
1.2.2 Prognosen zu thermischen Veränderungen im geologischen Untergrund durch den Klimawandel.....	78
1.2.2.1 Darstellung der thermischen Veränderungen in den vergangenen Jahrzehnten außerhalb urbaner Gebiete	78
1.2.2.2 Bisherige zeitliche Entwicklung der thermischen Veränderungen in urbanen Gebieten	78
1.2.2.3 Vereinfachte Prognose der zu erwartenden Erwärmung in den kommenden Jahrzehnten	80
1.3 Datengrundlagen zur räumlichen Verteilung von Wärmebedarfen (Heizen und Kühlen) sowie Ableitung von Bedarf und grundsätzlichen Ausbaumöglichkeiten von oGT und UTES	83
1.3.1 Räumliche Daten zum Wärmebedarf (Heizen und Kühlen) von Gebäuden	83
1.3.2 Sichtung der geowissenschaftlichen Datengrundlage für einen ersten Quantifizierungsansatz der Ausbaumöglichkeiten von oGT- und UTES-Anlagen.....	88
1.3.3 Definition der zur Ableitung von Potenzialen der oGT- und UTES-Anlagen relevanten Parameter sowie eine Einschätzung ihrer Verfügbarkeit.....	97

1.3.4	Umfrage zur Ergänzung der Datensichtung durch Experteneinschätzungen	100
1.4	Ableitung des Raumbedarfs zur thermischen Nutzung und Bewirtschaftung des geologischen Untergrunds	101
1.4.1	Konzepte und Definitionen zur Ableitung des Raumbedarfs	101
1.4.1.1	Bedarf einer Raumplanung des geologischen Untergrunds	101
1.4.1.2	Das ANGUS-Konzept für eine quantitative und prozessorientierte Raumplanung des geologischen Untergrunds	103
1.4.1.3	Umsetzungsansätze des ANGUS-Konzepts zur quantitativen Raumplanung des geologischen Untergrunds	106
1.4.2	Parametrisierungsgrundlagen für die thermische Raumwirkung	109
1.4.2.1	Werte der hydraulischen Parameter	110
1.4.2.2	Thermische und geomechanische Parameterwerte	111
1.4.3.1	Beschreibung des exemplarischen Standorts	114
1.4.3.2	Raumbedarf EWS-Anlagen	115
1.4.3.3	Raumbedarf WWA	119
1.4.4	Ableitung bzw. Berechnung des unter- und obertägigen Raumbedarfs oberflächennaher UTES-Anlagen anhand numerischer Szenariensimulationen	123
1.4.4.1	Raumbedarf in Abhängigkeit von Betriebsführung und Geologie	125
1.4.4.2	Untertägiger Raumbedarf von (HT-)UTES-Anlagen in Abhängigkeit des unterschiedlichen urbanen Wärmebedarfs	136
1.4.4.3	Illustration der thermischen Raumbeanspruchung von Wärmespeichern für ein städtisches Viertel im norddeutschen Raum	143
1.5	Abschätzung und GIS-Visualisierung des untertägigen Raumbedarfs von UTES-Anlagen in Relation zu Wärmebedarfsdichten anhand des Bundeslands Schleswig-Holstein	152
1.5.1	Ableitung des untertägigen Raumbedarfs von (HT-)UTES-Anlagen mit detailliert untersetztem Betriebsszenario an einem Beispielstandort	161
1.5.2	Auswirkungen der thermischen Sanierung auf die thermisch-räumlichen (HT-)UTES-Auswirkungen	164
1.5.3	Ableitung des untertägigen Raumbedarfs von oGT-Anlagen (Wärmeentzug mittels EWS und WWA) an einem Beispielstandort	166
1.6	Restriktionszonen für den Ausbau der oberflächennahen Geothermie	169
1.6.1	Übersicht zur aktuellen Festlegung von Restriktionszonen aufgrund obertägiger Bebauung und untertägiger Infrastruktur	171
1.6.2	Aktuelle Festlegung von Restriktionszonen bei bestehender Grundwassernutzung zur Wasserversorgung	174
1.6.3	Restriktionszonen aufgrund (hydro-)geologischer Gegebenheiten und Altlasten	178

1.6.4	GIS-basierte Darstellung der Wirkung aktueller Restriktionskriterien zum Ausbaupotenzial von oGT- und UTES-Anlagen anhand städtischer Beispielszenarien ..	183
1.6.4.1	Nationale Studien zur Flächenverfügbarkeit für EWS-Anlagen in urbanen Gebieten in Deutschland	183
1.6.4.2	Visualisierung der Flächenverfügbarkeit für EWS-Anlagen anhand eines Stadtteils in Schleswig-Holstein	186
1.7	Managementanforderungen und Verfügbarkeit von Planungsunterlagen	191
2	Identifikation der ausbaufähigen geothermischen Heiz- und Kühlsysteme unter Berücksichtigung der Minimierung ihrer Antriebsenergie	196
2.1	Energieeffizienz geothermischer Systeme	196
2.1.1	Einführung zu Erdwärmeanlage	196
2.1.2	Beschreibung der Anlagentypen zur Nutzung der oberflächennahen Erdwärme	196
2.1.2.1	Wärmequellenanlage	198
2.1.2.2	Wärmepumpenanlage	199
2.1.2.3	Wärmenutzungsanlage	200
2.1.2.4	Kennzahlen zur Beschreibung der Energieeffizienz von Erdwärmeanlagen	200
2.1.3	Energieeffizienz von Erdwärmeanlagen	202
2.1.4	Ertüchtigungsmaßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz	206
2.1.4.1	Ertüchtigungsmaßnahmen der Wärmenutzungsanlage	206
2.1.4.2	Ertüchtigungsmaßnahmen an der Wärmepumpe	207
2.1.4.3	Digitalisierung und Smart-Grid-Schnittstelle	207
2.2	Hybride Wärmeversorgungskonzepte	207
2.2.1	Hybride Systeme	207
2.2.2	Hybrides Wärmeversorgungskonzept am Beispiel Hamburg-Wilhelmsburg	208
2.3	Geothermische Heiz- und Kühlsysteme	210
2.3.1	Energieeffizienz geothermischer Systeme in Kombination mit Wärmepumpen	210
2.3.1.1	Berechnungsmethodik	212
2.3.1.2	Erdwärmesonden (EWS)	213
2.3.1.3	Wasser-Wasser-Anlage (WWA)	217
2.3.1.4	(Hochtemperatur-)Aquifer-Wärmespeicher ((HT-)ATES)	221
2.3.1.5	(Hochtemperatur-)Erdwärmesondenspeicher ((HT-)BTES)	228
2.3.2	Technologievergleich	231
2.3.2.1	Energieeffizienz	231
2.3.2.2	Leistung und untertägiger Raumbedarf	232

2.3.2.3	CO ₂ -Emissionen.....	236
2.3.2.4	Synopse.....	237
2.3.3	Eingesetzte Kältemittel in erdgekoppelten Wärmepumpen	241
2.3.4	Auswirkungen der neuen F-Gas-Verordnung 517/2014.....	243
2.4	Nachhaltiges thermisches Ressourcenmanagement	246
3	Dokumentation der Umweltwirkungen und des Klimaschutzbeitrags oberflächennaher, geothermischer, sensibler und latenter Wärmespeichersysteme.....	251
3.1	Klimaschutzbeitrag und Umweltwirkungen oberflächennaher Geothermie und von UTES-Systemen.....	251
3.1.1	Klimaschutzbeitrag oberflächennaher Geothermie und von UTES-Systemen	251
3.1.2	Umweltauswirkungen von UTES-Systemen im Vergleich zu denen alternativer regenerativer Energieversorgungssysteme	258
3.1.3	Temperaturabhängige Veränderung der gelösten Hauptkomponentenkonzentrationen – Überblick.....	261
3.1.4	Thermisch induzierte Konzentrationsänderungen gelöster Hauptkomponenten im „Grundwasser“ in Laborexperimenten.....	263
3.1.4.1	Mineralbildung und -lösung.....	266
3.1.4.2	Thermische Auswirkungen auf Sorption und Ionentausch.....	270
3.1.4.3	Temperaturabhängige Freisetzung organischer Substanz und Auswirkung auf Redoxprozesse in Laborexperimenten	270
3.1.5	Temperaturabhängige Veränderungen der gelösten Spurenstoffe in Laborversuchen.....	273
3.1.5.1	Mobilisierung und Demobilisierung von Spurenkomponenten in Laborversuchen...	276
3.1.5.2	Temperaturabhängige Reversibilität der Spurenkomponentenkonzentrationen.....	277
3.1.6	Thermisch induzierte Konzentrationsänderungen von gelösten Hauptinhaltsstoffen und Spurenstoffen bei einem zyklischen HT-ATES-Feldversuch.....	279
3.1.6.1	Gelöste Haupt und Spurenstoffkonzentrationen im zyklischen HT-ATES-Feldversuch.....	281
3.1.6.2	Redoxverhältnisse im zyklischen HT-ATES-Feldversuch	282
3.1.6.3	Mineralfällungsprozesse am Wärmetauscher	283
3.1.7	Temperaturbedingte Auswirkungen auf mikrobielle Gemeinschaften (einschließlich pathogener Keime) in Aquifersedimenten	287
3.1.7.1	Temperaturbedingte Beeinflussung des Aquifermikrobioms durch ATES – Stand des Wissens.....	287
3.1.7.2	Pathogene Keime (Viren und Mikroorganismen)	294

3.1.8	Ausführliche Darstellung temperaturbedingter Auswirkungen auf die Fauna urbaner Grundwasserleiter.....	296
3.1.8.1	Charakterisierung des Lebensraums „Grundwasser“ und räumliche Verteilung und Vorkommen der Meio- und Makrofauna	297
3.1.8.2	Einflussfaktoren auf die Grundwasser-Fauna und deren Ökosystemdienstleistungen	303
3.1.8.3	Zustand der Grundwasserfauna in urbanen Gebieten	307
4	Rechtliche Steuerung der thermischen Nutzung des urbanen Untergrunds – Konfliktbewältigung beim Ausbau von oberflächennaher Geothermie und Aquifer-Wärmespeichern in Ballungsräumen	310
4.1	Notwendigkeit einer thermischen Untergrund-Bewirtschaftung aus naturwissenschaftlich-juristischer Perspektive	310
4.2	Die potenzielle Bedeutung der thermischen Untergrundnutzung für Klimaschutz und -anpassung	311
4.2.1	Anforderungen des künftigen Energiesystems an den Wärmemarkt	311
4.2.2	Integration lokal verfügbarer Wärmequellen durch Wärmespeicher	312
4.2.3	Technologien zur thermischen Nutzung des geologischen Untergrunds.....	313
4.2.3.1	Klassifikationskriterium „offene“ und „geschlossene“ Anlagen.....	314
4.2.4	Klassifikationskriterium „Wärmentzug bzw. Wärmeeinspeisung“ und „Wärmespeicher“	314
4.2.5	Weitere saisonale untertägige und obertägige Wärmespeichertechnologien	315
4.2.6	Klimaschutzpotenziale der thermischen Untergrundnutzung.....	315
4.2.6.1	Effizienz.....	315
4.2.6.2	Flexibilität	317
4.2.6.3	Wärmeversorgung (Heizen und Kühlen) und Klimaanpassung	317
4.2.7	Reale Entwicklungen.....	318
4.2.7.1	Dezentrale Wärmepumpen	318
4.2.7.2	Wärmeversorgung zu Kühlzwecken	319
4.2.7.3	Saisonale Wärmespeicher	319
4.3	Thermische Bewirtschaftung des geologischen Untergrunds als planerische Aufgabe	320
4.3.1	Energie und Trinkwassernutzung.....	320
4.3.2	Konflikte zwischen thermischen Nutzungen bzw. Auswirkungen	323
4.3.3	Thermische Untergrundbewirtschaftung als wasserwirtschaftliche Optimierungsaufgabe	324
4.4	Regulatorische und planerische Herausforderungen	324

4.4.1	Integrierter Ansatz	324
4.4.2	Systemischer Ansatz	325
4.4.3	Dreidimensionaler Ansatz	326
4.4.4	Datenverfügbarkeit	326
4.5	Steuerungsprogramm und -praxis des geltenden Rechts	326
4.5.1	Wasserrecht	326
4.5.1.1	Bewirtschaftungspläne und Maßnahmenpläne für Flussgebietseinheiten	327
4.5.1.2	Besondere Bewirtschaftungspläne	327
4.5.1.3	Einzelfallentscheidungen	330
4.5.2	Bergrecht	331
4.5.3	Raumplanung	331
4.5.4	Ergebnis	332
4.6	Perspektiven zur Weiterentwicklung der Planungspraxis und des Rechtsrahmens	333
4.6.1	Teilräumliche, thematische Bewirtschaftungspläne zur thermischen Untergrundnutzung	333
4.6.2	Verbesserung der Datengrundlage	334
4.6.3	Verzahnung mit der kommunalen Wärmeplanung	335
5	Hochlaufpotenziale und -limitierungen oberflächennaher Geothermie und oberflächennaher saisonaler Wärmespeicher	337
5.1	Zusammenfassung	337
5.2	Ausgangssituation	339
5.3	Hochlaufperspektiven und Maßnahmen	340
	Quellenverzeichnis	348

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Historischer und aktueller Wärmebedarf (Heizen und Kühlen) des Gebäudebestands sowie Klimaschutzziel für 2020 und zukünftiger Wärmebedarf im Jahr 2050 laut den gesichteten Referenzszenarien	58
Abbildung 1.2:	Historischer und aktueller Wärmebedarf (Heizen und Kühlen) des Gebäudebestands sowie Klimaschutzziel für 2020 und zukünftiger Wärmebedarf im Jahr 2050 laut den gesichteten Zielszenarien	61
Abbildung 1.3:	2D-Isothermen der Jahresdurchschnittstemperatur des Grundwassers in verschiedenen deutschen Städten	72
Abbildung 1.4:	Temperatur-Tiefenprofile im geologischen Untergrund Berlins	73
Abbildung 1.5:	Schematische Darstellung der verschiedenen anthropogenen Wärmequellen im urbanen geologischen Untergrund	75
Abbildung 1.6:	Untertägige Temperaturprofile im Bereich von zwei Tiefgaragen und eines Freizeitbades in Süddeutschland sowie einer Fernwärmeleitung in Österreich	76
Abbildung 1.7:	Modellierte Entwicklung der Grundwassertemperaturen mit dem Klimawandel im Bereich des Oberrheingrabens außerhalb urbaner Gebiete	81
Abbildung 1.8:	Beispiele von Geodaten zu Wärmebedarfsdichten auf Ebene eines Bundeslands und eines Stadtteils in einer Großstadt	85
Abbildung 1.9:	Lockergesteinsmächtigkeit unter deutschen Großstädten in hydrogeologischen Großräumen Deutschlands	91
Abbildung 1.10:	Abgeleitete UTES-Nutzungspotenziale des oberflächennahen geologischen Untergrunds der Großstädte Deutschlands bezogen auf den Wärmebedarf des Jahres 2019 bzw. auf den prognostizierten Wärmebedarf des Jahres 2050	94
Abbildung 1.11:	Einordnung der in dieser Studie verwendeten Durchlässigkeitsbeiwerte (k_f -Werte) in die Durchlässigkeitswert-Verteilung der oberflächennahen Grundwasserleiter Schleswig-Holsteins	111
Abbildung 1.12:	Einordnung der bei den numerischen Simulationen in dieser Studie verwendeten Werte für die Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität in die Spannbreite dieser Parameter in natürlichen Gesteinen	112
Abbildung 1.13:	Thermische Auswirkungsräume einer 100 m langen Erdwärmesonde für vier Szenarien 5 – 8 als Änderung der Hintergrundtemperatur ΔT nach 100 Tagen	117

Abbildung 1.14:	Thermische Auswirkungsräume einer 17 m langen Erdwärmesonde für vier Szenarien 5 – 8 als Änderung der Hintergrundtemperatur ΔT nach 100 Tagen	118
Abbildung 1.15:	Thermische Auswirkungsräume in einem 31 m mächtigen Aquifer für drei verschiedene analytische Lösungen als Änderung der Hintergrundtemperatur ΔT nach 100 Tagen...	120
Abbildung 1.16:	Thermische Auswirkungsräume in einem 13 m mächtigen Aquifer für drei verschiedene analytische Lösungen als Änderung der Hintergrundtemperatur ΔT nach 100 Tagen...	121
Abbildung 1.17:	Seitenansicht einer Brunnendublette eines (HT-)ATES im glazigenen Untergrund einschließlich der Betriebsrandbedingungen bei Beladung und Entladung.....	127
Abbildung 1.18:	Seitenansicht des (HT-)BTES bestehend aus Doppel-U-Sonden bei Beladung und Entladung.....	128
Abbildung 1.19:	Thermische Auswirkungsräume der (HT-)ATES-Anlage, dargestellt als Temperaturänderung ΔT gegenüber der Hintergrundtemperatur im Basisfall im 15. Betriebsjahr (Ausschnitte des Modellgebiets)	129
Abbildung 1.20:	Thermische Auswirkungsräume des (HT-)BTES-Basis Szenarios als Änderung der Hintergrundtemperatur ΔT im 15. Betriebsjahr (Ausschnitte des Modellgebiets)	130
Abbildung 1.21:	Zeitliche Entwicklung der thermischen Auswirkungsräume über den 20-jährigen Simulationszeitraum als prozentualer Anteil am Referenzvolumen ($1 \text{ km}^2 \cdot 100 \text{ m}$) für (HT-)ATES- und (HT-)BTES-Anlagen im Basisfall.....	131
Abbildung 1.22:	Thermische Auswirkungsräume im Basisfall der generischen Szenariensimulationen im 15. Betriebsjahr für Absoluttemperaturen bis zur Beladungstemperatur von 70°C als Volumenanteil vom Referenzvolumen für den (HT-)ATES, den (HT-)ATES im Speicheraquifer und für den (HT-)BTES.....	135
Abbildung 1.23:	Abhängigkeit zwischen gespeicherter Wärme, dem zugeordneten jährlichen städtischen Wärmebedarf pro km^2 Stadtfläche und damit verbundenen thermischen Nutzungs- und Auswirkungsräumen in % des Referenzvolumens für durch die Pumprate skalierte ATES und durch die Sondenanzahl skalierte BTES	142
Abbildung 1.24:	Untertägige räumliche Ausdehnung einer ATES-Anlage im Kontext des städtischen Viertels in Form des Wärmeversorgungsbeitrags und der thermischen Auswirkungsräume (20°C , 25°C , 30°C) nach 30 simulierten Betriebsjahren	147

Abbildung 1.25:	Untertägige räumliche Ausdehnung einer BTES-Anlage im Kontext des städtischen Viertels in Form des Wärmeversorgungsbeitrags und der thermischen Auswirkungsräume (20 °C, 25 °C, 30 °C) nach 30 simulierten Betriebsjahren	148
Abbildung 1.26:	Energieflussdiagramme der Speicheroptionen ATES-Anlage und BTES-Anlage bei Vernachlässigung von Verteilverlusten und derzeitigem Wärmebedarf sowie jeweils bei zukünftiger Halbierung des Heizwärmebedarfs	150
Abbildung 1.27:	Aktueller jährlicher Wärmebedarf zum Heizen (Raumwärme und Warmwasser) von Gebäuden je km ² in Schleswig-Holstein	153
Abbildung 1.28:	Histogramm des abgeschätzten Wärmebedarfs pro km ² in Schleswig-Holstein.....	154
Abbildung 1.29:	Histogramm des abgeschätzten Wärmebedarfs pro km ² in Kiel	154
Abbildung 1.30:	Stark „konservatives“ Szenario zum Raumbedarf von (HT-)ATES-Anlagen	156
Abbildung 1.31:	Konservatives Szenario zum Raumbedarf von (HT-)ATES Anlagen.....	157
Abbildung 1.32:	„Plausibleres bis optimistisches“ Szenario zum Raumbedarf von (HT-)ATES-Anlagen.....	158
Abbildung 1.33:	Szenario zum zukünftigen Raumbedarf von (HT-)ATES-Anlagen unter Berücksichtigung einer thermischen Sanierung des Gebäudebestandes, d. h. -50 % zum aktuellen Wärmebedarf	159
Abbildung 1.34:	Szenario zum Raumbedarf von (HT-)BTES-Anlagen	160
Abbildung 1.35:	Gegenwärtige (2018) Wärmebedarfsdichten von Wohngebäuden im Stadtteil	162
Abbildung 1.36:	Anteil der simulierten (HT-)BTES-Anlage an der Deckung des Wärmebedarfs der Wohngebäude und resultierender Nutzungs- und Auswirkungsraum nach 30 Jahren Betrieb	163
Abbildung 1.37:	Anteil des HT-ATES an der Deckung des Wärmebedarfs der Wohngebäude und resultierender Nutzungs- und Auswirkungsraum nach 15 Jahren Betrieb.....	164
Abbildung 1.38:	Angenommene bzw. prognostizierte Wärmebedarfsdichten von Wohngebäuden im Stadtteil im Jahr 2050 und Anteil des (HT-)BTES an der Deckung des zukünftigen Wärmebedarfs der Wohngebäude sowie resultierender Nutzungs- und Auswirkungsraum nach 30 Jahren Betrieb.....	166
Abbildung 1.39:	Wärmebedarfsdichten (MWh/(ha · a)) im Stadtquartier vor und nach energetischer Sanierung der Wohngebäude.....	167

Abbildung 1.40:	Thermische Auswirkungsräume (1-K-Abkühlung) durch EWS und WWA sowie jeweils gedeckter Wärmebedarf pro Hektar	168
Abbildung 1.41:	Altlasten-(Verdachts-)Flächen in den Städten Berlin und Hamburg	181
Abbildung 1.42:	Häufigkeitsverteilung der Flächengrößen von Grundwasserschäden in der Stadt Hamburg	182
Abbildung 1.43:	Restriktionsflächen aufgrund obertägiger Bebauung und untertägiger Infrastruktur im Bestand und potenziell geeignete Flächen für Bohrungen in einem Stadtteil in Schleswig-Holstein	187
Abbildung 1.44:	Restriktionszonen zur Verhinderung von Nutzungskonflikten in einem Trinkwassergewinnungsgebiet	188
Abbildung 1.45:	Dreidimensionale Darstellung von Restriktionen zur potenziellen Verhinderung angenommener Konflikte zwischen vorhandener Grundwassernutzung zur Wasserversorgung und thermisch genutzten Untergrundvolumina	189
Abbildung 2.1:	Spezifizierung der Anlagentypen zur Nutzung der oberflächennahen Erdwärme	197
Abbildung 2.2:	Schematische Darstellung einer Wärmepumpenanlage mit den Bilanzgrenzen für die Ermittlung der Arbeitszahl	201
Abbildung 2.3:	Jahresarbeitszahlen von Elektro-Wärmepumpen in Feldtests	202
Abbildung 2.4:	Arbeitszahlen von Erdwärmesonden, Erdwärmekollektoren und Grundwasserbrunnen	203
Abbildung 2.5:	Vergleich der COP-Werte von Sole-Wasser- und Wasser-Wasser-Wärmepumpen nach DIN EN 15411	205
Abbildung 2.6:	Konzeptioneller Aufbau des synergetischen Energiequartiers Hamburg-Wilhelmsburg	210
Abbildung 2.7:	Horizontaler und vertikaler Modellaufbau	214
Abbildung 2.8:	Entwicklung der Jahresarbeitszahl eines geothermischen Systems (EWS mit Wärmepumpe) bei variierenden Grundwasser-Abstandsgeschwindigkeiten	216
Abbildung 2.9:	EWS mit Wärmepumpe: Abhängigkeit der Jahresarbeitszahlen von variierenden Entzugsleistungen und Wärmesenkentemperaturen (10. Betriebsjahr der Anlage) ..	217
Abbildung 2.10:	Wasser-Wasser-Anlage: Prinzipskizze und Parametrisierung des geologischen Untergrunds (Basisvariante)	219
Abbildung 2.11:	Entwicklung der Jahresarbeitszahl eines geothermischen Systems (Wasser-Wasser-Anlage und Wärmepumpe) bei unterschiedlichen Grundwasser-Abstandsgeschwindigkeiten	220

Abbildung 2.12:	Entwicklung der Jahresarbeitszahl eines geothermischen Systems (Wasser-Wasser-Anlage und Wärmepumpe) bei variierenden Grundwasser-Abstandsgeschwindigkeiten	221
Abbildung 2.13:	Jahresarbeitszahlen der Nutzungsvariante (HT-)ATES bei einer Vorlauftemperatur von 42,6 °C und einer Rücklauftemperatur von 30 °C für die hydraulisch-thermischen Szenarien.....	224
Abbildung 2.14:	Jahresarbeitszahlen der Nutzungsvariante (HT-)ATES bei einer Vorlauftemperatur von 42,6 °C und einer Rücklauftemperatur von 30 °C für variierende Abstandsgeschwindigkeiten im Grundwasserleiter	225
Abbildung 2.15:	Jahresarbeitszahlen der Nutzungsvariante (HT-)ATES bei einer Vorlauftemperatur von 42,6 °C und einer Rücklauftemperatur von 30 °C für variierende hydrogeologische Eigenschaften des Grundwasserleiters	226
Abbildung 2.16:	Jahresarbeitszahlen eines (HT-)ATES bei variierenden Vor- und Rücklauftemperaturen eines Heizsystems (10. Betriebsjahr der Anlage).....	227
Abbildung 2.17:	Jahresarbeitszahlen der Nutzungsvariante (HT-)BTES in den betrieblich-thermischen Szenarien	229
Abbildung 2.18:	Jahresarbeitszahlen der Nutzungsvariante (HT-)BTES mit variierendem hydrogeologischen Aufbau und unterschiedlichen Sondenlängen	230
Abbildung 2.19:	Jahresarbeitszahlen der Nutzungsvariante (HT-)BTES bei variierenden Vorlauftemperaturen der Wärmesenke (10. Betriebsjahr der Anlage).....	231
Abbildung 2.20:	Exemplarische Darstellung des Raumbedarfs einer Wasser-Wasser-Anlage anhand der horizontalen Ausbreitung der Kältefahne und der vertikalen Ausbreitung im Grundwasserleiter nach 10 Jahren Betriebszeit (Basisvariante)	233
Abbildung 2.21:	Verhältnis zwischen Jahresarbeitszahl und Leistung im Betrieb sowie spezifischem Raumbedarf (Wärmemenge) der Technologien	235
Abbildung 2.22:	Grafische Darstellung der CO ₂ -Emissionsfaktoren der Technologien	237
Abbildung 2.23:	Verwendete Kältemittel in dezentralen und Industriewärmepumpen.....	242
Abbildung 3.1:	Zusammenstellung der Ablaufkonzentrationen von Lockersedimenten	264
Abbildung 3.2:	Relative und absolute Konzentrationsänderungen aus Säulenversuchen mit unterschiedlichen sandigen, pleistozänen, glazialen und jungtertiären Lockersedimenten.....	264

Abbildung 3.3:	In Durchflusssäulenversuchen mit vier norddeutschen Aquifersedimenten gemessene Ca-Konzentrationsänderungen im Vergleich zu für die jeweiligen Ausgangswasserzusammensetzungen simulierten Ca-Konzentrationsänderungen durch Kalzit-Ausfällungen, jeweils aufgetragen gegenüber den Kalzit-SIs des Ausgangswassers bei Zieltemperatur.....	267
Abbildung 3.4:	Verhältnis von freigesetztem bzw. gelöstem sedimentärem C _{org} -Gehalt in Säulenversuchen.....	271
Abbildung 3.5:	Gegenüberstellung von Nitratreduktionsraten erster Ordnung aus Säulenversuchen mit unterschiedlichen natürlichen Sedimenten und teilweise angereicherter „Grundwässer“ ...	272
Abbildung 3.6:	Zusammenstellung über sich in Abhängigkeit der Temperatur in unterschiedlichen Laborversuchen eingestellten Spurenelementkonzentrationen, sortiert nach der Mediankonzentration bei den 60- – 70-°C-Laborversuchen ..	275
Abbildung 3.7:	Auf die Ausgangskonzentration bei 10 °C normierte Konzentrationsänderungen von Spurenkomponenten bei einem Temperaturanstieg von 10 °C auf 60 °C bzw. auf 70 °C	275
Abbildung 3.8:	Mittlere Reversibilität der Konzentrationsänderungen von Spurenkomponenten bei einwöchiger Erwärmung auf 25 °C, 40 °C und 70 °C und anschließender Rückkühlung auf 10 °C in Laborversuchen mit einem pleistozänen und einem miozänen Sand für ein Szenario eines advektiven Transports in einen zuvor nicht erwärmten Abstrom sowie für die Abkühlung eines zuvor erwärmten Bereichs	279
Abbildung 3.9:	Aufsicht auf das Feldversuchs- und Monitorfeld des HT-ATES-Versuchs <i>TestUM</i>	280
Abbildung 3.10:	Vereinfachter geologischer Aufbau und Ausstattung des HT-ATES-Versuchs auf dem Testfeld <i>TestUM</i>	281
Abbildung 3.11:	Temperaturverteilung und Si-Konzentrationen mit Strömungsfeldern während der verschiedenen Stadien der thermischen Beladung und Entladung innerhalb des 1. Zyklus in einem vertikalen Querschnitt vom „warmen“ bis zum „kalten“ Brunnen des HT-ATES-Versuchs	284
Abbildung 3.12:	Zeitreihen der abstromigen Messstellen auf der zentralen Transekte in Fließrichtung für die Temperatur und die gelösten Silizium-, Kalium-, Vanadium- und Selenkonzentrationen	285
Abbildung 3.13:	Verteilung der Nitrat-Konzentrationen während der verschiedenen Stadien der thermischen Beladung und Entladung innerhalb des 1. Zyklus in einem vertikalen	

	Querschnitt vom „warmen“ bis zum „kalten“ Brunnen des HT-ATES-Versuchs	286
Abbildung 3.14:	Anpassung von Mikroorganismen an verschiedene Temperaturbereiche.....	288
Abbildung 3.15:	Ausbildung spezifischer mikrobieller Gemeinschaften bei Inkubation von Aquifersedimenten bei 12 °C, 25 °C, 37 °C, 45 °C oder 60 °C mit und ohne Acetatzugabe	290
Abbildung 3.16:	Mineralisierung von C-markiertem Acetat unter anoxischen, sulfatreduzierenden Bedingungen durch mikrobielle Gemeinschaften eines mit Kohlenwasserstoffen kontaminierten Aquifers	292
Abbildung 3.17:	Exemplarische Skizzen der typischen Meio- und Makrofauna des Grundwassers	298
Abbildung 3.18:	Übersicht über die Lage von in bisherigen Studien auf Grundwasserfauna beprobten Standorten in Deutschland ...	300
Abbildung 3.19:	Temperatur-Dosis-Wirkungs-Beziehungen für zwei Grundwasserinvertebraten	304
Abbildung 3.20:	Klassifizierung der Grundwasserfauna in Karlsruhe nach dem Schema von Griebler et al. (2014)	308
Abbildung 4.1:	Absatzentwicklung Wärmepumpen in Deutschland 2001 – 2020 nach Wärmepumpen-Typen.....	319
Abbildung 4.2:	Schematische hydrogeologische und wasserwirtschaftliche Standortbeurteilung für den Bau von Erdwärmesonden auf der Grundlage von hydrogeologischen Karten, der Wasser- und Heilquellenschutzgebiete sowie der Einzugsbereiche von Mineralwassergewinnungen	329
Abbildung 4.3:	Energieplankarte der Stadt Zürich als Beispiel einer kommunalen Wärmeplanung (Heizen und Kühlen) unter Berücksichtigung nachhaltiger Wärmequellen und Wärmenetze	335
Abbildung 5.1:	Nationale Verteilung von Publikationen zur thermischen Aktivierung von Verkehrsflächen und Gebäudefassaden	344

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1:	Annahmen zum zukünftigen Gebäudebestand in den gesichteten Referenzszenarien	57
Tabelle 1.2:	Annahmen zum zukünftigen Gebäudebestand in den gesichteten Zielszenarien	60
Tabelle 1.3:	Wärmebereitstellung, Anteil am Wärmebedarf des zukünftigen Gebäudebestands, Umweltwärmebedarf, JAZ und Elektrizitätsbedarf von Wärmepumpen im Jahr 2050 laut den gesichteten Zielszenarien	63
Tabelle 1.4:	Berechnete Wärmeeinträge in den geologischen Untergrund durch städtische Infrastruktur und modellierte Wärmeverluste einer angenommenen UTES-Anlage	77
Tabelle 1.5:	Räumlich differenzierte Datensätze zum Wärmebedarf der Bundesländer, Ergebnisse der Sichtung von Wärmekatastern in Energieatlanten und Geo-Portalen der Bundesländer	86
Tabelle 1.6:	Ableitung der Untergrundvolumina von Grundwasserleitern, Geringleitern und Festgesteinen an den Beispielstädten Hamburg und Hannover	92
Tabelle 1.7:	Wärmebedarfe, Bedarfsprognosen sowie geschätzte Wärme-Speicherbedarfe für das Jahr 2050 für Berlin, Hamburg und München	93
Tabelle 1.8:	Abgeleitete Wärmespeicherkapazität und theoretischer Wärmebedarf pro Einwohner und Jahr für die Beispielstädte Hamburg und Hannover	95
Tabelle 1.9:	Verfügbarkeit einiger für oGT- und UTES-Anlagen relevanter geowissenschaftlicher Fachdaten in den Geo-Portalen der SGD	99
Tabelle 1.10:	Thermische und hydraulische Parameter des exemplarischen Standorts	115
Tabelle 1.11:	Randbedingungen und Parameter für Erdwärmesondenszenarien	116
Tabelle 1.12:	Angenommene Parameter und thermische Auswirkungsräume für die Berechnungsszenarien von Erdwärmesonden	119
Tabelle 1.13:	Berechnungsszenarien für die Wasser-Wasser-Anlage („Grundwasserwärmepumpe“) und Auswertungsansatz	119
Tabelle 1.14:	Angenommene Parameter und thermische Auswirkungsräume für die Berechnungsszenarien von Wasser-Wasser-Anlagen	122
Tabelle 1.15:	Parametrisierung des glazigenen Untergrunds im (HT-)ATES-Szenario	126
Tabelle 1.16:	Parametrisierung des glazigenen Untergrunds sowie der geotechnischen Materialien im (HT-)BTES-Szenario	128

Tabelle 1.17:	Simulierte Speichercharakteristiken und damit verbundener untertägiger Raumbedarf für den Basisfall des ATES-Szenarios sowie betrachtete Varianten der Betriebsführung und geologischer Bedingungen im 15. Betriebsjahr.....	138
Tabelle 1.18:	Simulierte Speichercharakteristiken und damit verbundener untertägiger Raumbedarf für den Basisfall des BTES-Szenarios sowie betrachtete Varianten der Betriebsführung und geologischer Bedingungen im 15. Betriebsjahr.....	140
Tabelle 1.19:	Speichercharakteristiken und damit verbundener thermischer Raumbedarf für die ATES- und BTES-Systeme nach 15 und 30 Betriebsjahren	145
Tabelle 1.20:	Restriktionszonen für Bohrungen zur Nutzung der oberflächennahen Geothermie, (im Wesentlichen von EWS) aufgrund vorhandener obertägiger Bebauung und untertägiger Infrastruktur	172
Tabelle 1.21:	Restriktionszonen aufgrund bereits vorhandener Grundwassernutzung	175
Tabelle 1.22:	Besondere (hydro-)geologische Gegebenheiten, die in den Leitfäden der Bundesländer für die Nutzung der oGT berücksichtigt werden.....	179
Tabelle 1.23:	Kennzahlen zu Altlasten in Deutschland	181
Tabelle 1.24:	Flächenanteile und Anzahl möglicher Bohrungen bei kombinierter Berücksichtigung verschiedener Restriktionszonen am Beispiel eines Stadtteils in Schleswig-Holstein.....	187
Tabelle 2.1:	Parametrisierung des „geologischen Untergrunds“ und Szenarienkonfiguration in den numerischen Simulationen ...	214
Tabelle 2.2:	Parametervariation der Modellszenarien bei der Nutzungsvariante (HT-)ATES	223
Tabelle 2.3:	Parametervariation der Modellszenarien bei der Nutzungsvariante (HT-)BTES.....	229
Tabelle 2.4:	Vergleich des Raumbedarfs einer geothermischen Wärmegewinnung und einer untertägigen Wärmespeicherung	234
Tabelle 2.5:	CO ₂ -Emissionsfaktoren der Technologien	236
Tabelle 2.6:	Vergleich der Technologien nach bevorzugtem Einsatzgebiet sowie Stärken und Schwächen/Risiken	238
Tabelle 2.7:	Prozentuale Reduzierung der HFKW-Quoten.....	244
Tabelle 2.8:	Auswirkungen einer Nutzung geothermischer Heiz- und Kühlsysteme auf die Nachhaltigkeitsdimensionen.....	249

Tabelle 3.1:	Abschätzung eingesparter nationaler CO ₂ -Emissionen durch die Nutzung von UTES-Systemen unter Annahme einer Versorgung von 66 % der Bevölkerung Deutschlands 257
Tabelle 3.2:	Zusammenfassung der temperaturinduzierten Konzentrationsänderungen bei gelösten Hauptkomponenten in Laborversuchen in den Temperaturbereichen 10 °C auf 60 °C bzw. 70 °C 265
Tabelle 3.3:	Zyklen beim Betrieb des HT-ATES-Versuchs auf dem Testfeld <i>TestUM</i> (2021/2022) 281
Tabelle 3.4:	Verbreitung der Grundwasserfauna nach Aquifer-Typen 301
Tabelle 4.1:	Überblick zur Effizienz unterschiedlicher „konventioneller“ Technologien zur Wärmeerzeugung auf Basis von Elektrizität und bezogen auf durchschnittlicher Gebäudeheizung.....316

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
Abb.	Abbildung
Abschn.	Abschnitt
AG	Arbeitsgruppe
ANGUS	Zwei sukzessive Forschungsvorhaben unter Koordination der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel mit dem Akronym für „Auswirkung der Nutzung des Untergrunds als thermischer, elektrischer oder stofflicher Speicher“ und den Vorhaben „ANGUS+“: 2012 – 2016, Förderung BMBF (FKZ 03EK3022A); „ANGUS II“: 2017 – 2021, Förderung BMWi (FKZ 03ET6122A).
AR4 / AR5	4. bzw. 5. Sachstandsbericht des IPCC („Assessment Report“)
ARGE	Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e. V.
ATES	Aquifer-Wärmespeicher (Aquifer Thermal Energy Storage). Konzept, bei dem ein Grundwasserleiter in einem offenen System für UTES genutzt wird. Unterschieden wird Niedertemperatur-ATES (NT-ATES) mit maximalen Einspeichertemperaturen von i. d. R. 25 °C von Hochtemperatur-ATES (HT-ATES) mit Einspeichertemperaturen von > 25 °C.
AZ	Arbeitszahl
BB	Brandenburg
BE	Berlin
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BTES	Bohrlochsonden-Wärmespeicher (Borehole Thermal Energy Storage). Konzept, bei dem eine geologische Formation (i. d. R. ein Grundwassergeringleiter) in einem geschlossenen System für UTES genutzt wird. Unterschieden wird Niedertemperatur-BTES (NT-BTES) mit maximalen Einspeichertemperaturen von i. d. R. 25 °C von Hochtemperatur-BTES (HT-BTES) mit Einspeichertemperaturen von > 25 °C.
BW	Baden-Württemberg
BY	Bayern
CAH	Consulaqua Hamburg Beratungsgesellschaft mbH
CAU	Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Abkürzung	Erläuterung
CCS	CO ₂ -Abscheidung und -Speicherung (Carbon Capture and Storage)
CFU	Kolonieformende Einheit(en) (Colony Forming Unit(s))
CKW	Chlorkohlenwasserstoffe
COP	Wirkungsgrad von Wärmepumpen (Coefficient of Performance)
C_{org.}	Organischer Kohlenstoff
DANord	Digitaler Atlas Nord
DIC	Gelöster anorganischer Kohlenstoff (Dissolved Inorganic Carbon)
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DOC	Gelöster organischer Kohlenstoff (Dissolved Organic Carbon)
EBF	Energiebezugsfläche
Einw.	Einwohner
EnEV	Energieeinsparverordnung
ESG	Energieeffizienzstrategie Gebäude. Strategiepapier der Bundesregierung für die „Energiewende“ im Gebäudebereich.
ESRI	Environmental Systems Research Institute
EU	Europäische Union
EWS	Erdwärmesonde
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
F&E	Forschung und Entwicklung
FKW	Fluorkohlenwasserstoffe
FKZ	Förderkennzeichen
FLS	Finite Linienquelle (Finite Line Source)
Fraunhofer IEE	Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik, Kassel
Fraunhofer ISE	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg im Breisgau
GEG	Gebäudeenergiegesetz (Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden)
GEWS	Geologischer Eis-Wärme-Speicher
GFZ	Deutsches GeoForschungszentrum Helmholtz-Zentrum Potsdam
GIS	Geographisches Informationssystem. Rechnergestützte Umsetzung einer räumlich verorteten Erfassung, Bearbeitung, Organisation, Analyse und Präsentation von Geodaten.

Abkürzung	Erläuterung
Gl.	Gleichung
gml	Geography Markup Language
GOK	Geländeoberkante
GW	Grundwasser
GWL	Grundwasserleiter
GWP	Treibhauspotenzial (Global Warming Potential)
HB	Bremen
HE	Hessen
HFCKW	Teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe
HFKW	Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe
HH	Hamburg
HT- / (HT-)	Hochtemperatur, z. B. Hochtemperatur-ATES (HT-ATES bzw. (HT-ATES)). Die Verwendung ohne Klammer bedeutet spezifisch die Hochtemperaturtechnologie, die Verwendung ohne Klammer umfasst Hochtemperatur und Niedertemperatur.
HWL	Hauptwasserleiter
IPCC	„Weltklimarat“ (Intergovernmental Panel on Climate Change)
ISONG	Informationssystem oberflächennahe Geothermie Baden-Württemberg
IW3	Integrierte WärmeWende Wilhelmsburg. Im 7. Energieforschungsprogramm des BMWi/BMWK im Rahmen der „Reallabore der Energiewende“ gefördertes Forschungs- und Entwicklungsprojekt.
J	Ja
JAZ	Jahresarbeitszahl(en). Verhältnis zwischen erzeugter Wärme und zugeführter Elektrizität in einer Wärmepumpe über die Dauer eines Jahres als Maß der Effizienz eines wärmepumpenbasierten Heizsystems.
KGE	Kompetenzzentrum Geo-Energie der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz (Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung)
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
LCA	Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment)

Abkürzung	Erläuterung
LFKS	Langfrist- und Klimaszenarien. Vom BMWi geförderte Projekte „Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau Erneuerbarer Energien in Deutschland“ sowie „Auswirkungen der Klimaschutzziele und diesbezüglicher Maßnahmen auf den Energiesektor und den Ausbau der erneuerbaren Energien“.
LTES	Langzeit-Wärmespeicher (Long-Term Thermal Energy Storage)
LUBW	Landesamt für Umwelt Baden-Württemberg
LWWP	Luft-Wasser-Wärmepumpe
MFLS	Beweglicher finiter Linienquellenansatz (Moving Finite Line Source)
MIS	Schleswig-Holsteinisches Metainformationssystem
MV	Mecklenburg-Vorpommern
N	Nein
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NECP	Integrierter Nationaler Energie- und Klimaplan (National Energy and Climate Plan)
NGO	Nichtregierungsorganisation (Non-Governmental Organisation)
NI	Niedersachsen
NMDS	Nichtmetrische multidimensionale Skalierung
NPOC	Nicht ausblasbarer organischer Kohlenstoff (Non-Purgeable Organic Carbon)
NT-ATES	Niedertemperatur-ATES
NT-BTES	Niedertemperatur-BTES
NW	Nordrhein-Westfalen
OBKS	Obere Braunkohlesande
oGT	Oberflächennahe Geothermie. Technologie zum Entzug sowie zur Speicherung von Wärme in der vorliegenden Studie in bis zu 400 m Tiefe unter Geländeoberfläche.
OGT	Oberer Glimmerton
OGWL	Oberer Grundwasserleiter
ORG	Oberrhingraben
POM	Partikelförmiges organisches Material (Particulate Organic Matter)
PtG	Power-to-Gas
PV	Photovoltaik
PVT	Hybridkollektor: Kombination aus Photovoltaik und Solarthermie

Abkürzung	Erläuterung
REMod-D	Nationales Energiesystemmodell mit Fokus auf sektorübergreifende Systementwicklung (Fraunhofer ISE)
RCP	Repräsentativer Konzentrationspfad (Representative Concentration Pathway)
RF	Rintheimer Feld
ROG	Raumordnungsgesetz
RP	Rheinland-Pfalz
RWL	Rinnenwasserleiter
SAT	Surface Air Temperature
SCOPE	Sektorenübergreifende Einsatz- und Ausbauoptimierung für Analysen des zukünftigen Energieversorgungssystems (Fraunhofer IEE)
SGD	Staatliche Geologische Dienste der deutschen Bundesländer
SH	Schleswig-Holstein
shp	Shapefile. Datenformat für vektorielle Geodaten.
SL	Saarland
SN	Sachsen
SPF	Seasonal Performance Factor (Jahresarbeits- bzw. Heizzahl)
ST	Sachsen-Anhalt
T	Temperatur
Tab.	Tabelle
TES	Thermal Energy Storage
TIC	Anorganischer Kohlenstoff (Total Inorganic Carbon)
TH	Thüringen
THMCB-Auswirkungen	Veränderung thermischer, hydraulischer, (geo-)mechanischer, (geo-)chemischer und/oder (mikro-)biologischer Parameter durch eine (im Rahmen der vorliegenden Studie) Bewirtschaftung des untertägigen Raumes
TRL	Technologie-Reifegrad (Technology Readiness Level)
UBA	Umweltbundesamt
UBEM	Urbanes Gebäude-Energiemodell (Urban Building Energy Model)
UBKS	Untere Braunkohlesande
UFZ	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, Leipzig

Abkürzung	Erläuterung
u. GOK	Unter Geländeoberkante
UGWL	Unterer Grundwasserleiter
USEM	Urbanes Energiesystemmodell (Urban Scale Energy Model)
UTES	Untertägiger Wärmespeicherung (Underground Thermal Energy Storage). Konzept, bei dem obertägig (oder geothermal) gewonnene Wärme im Untergrund gespeichert wird. Diese Speicherung ist zumeist saisonal.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vol.	Volumetrisch
WFS	Web Feature Service. Zugriffsverfahren auf Geodaten in einem GIS.
WHG	Wasserhaushaltsgesetz (Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts)
WMS	Web Map Service
WP	Wärmepumpe
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie
WSG	Wasserschutzgebiet
WST	Wärmesenkentemperatur
WWA	Wasser-Wasser-Anlage(n). Technologie der oGT, welches als offenes System betrieben wird.

Zusammenfassung

Die thermische Nutzung des oberflächennahen geologischen Untergrunds (< 400 m unter Geländeoberkante (u. GOK)) stellt als Wärmequelle und/oder aktiv betriebene Wärmespeicher (sogenannte UTES-Anlagen (Underground-Thermal-Energy-Storage-Anlagen)) im Rahmen einer klimaneutralen Wärmeversorgung eine bedeutende Option dar. Darüber hinaus bieten untertägige saisonale Wärmespeicher systemisch eine Reihe von Vorteilen im Hinblick auf ein auf erneuerbaren Energiequellen basierendes Energieversorgungssystem. Entsprechende Wärmespeicher stellen so u. a. hochkapazitive Senken für ein fluktuierendes Stromdargebot dar, sie ermöglichen die effiziente Nutzung saisonal fluktuierender Wärmequellen und erhöhen damit deren Resilienz gegenüber längerfristigen, ungünstigen Wettersituationen oder geopolitisch kritischen Veränderungen z. B. im Hinblick auf den Import anderer Energieträger. Saisonale Wärmespeicher sind so auch potentiell wichtige Technologien im Hinblick auf die Klimawandelanpassung.

Vor diesem Hintergrund ergaben sich in dieser Studie unter Nutzung bisher noch unveröffentlichter Ergebnisse aus anderen Forschungsvorhaben (ANGUS+, ANGUS II, TestUM-Aquifer, TestUM II) folgende Ergebnisse und Aussagen.

In **Kapitel 1** wird das nationale und insbesondere norddeutsche Ausbaupotential oberflächennaher Geothermieranlagen (oGT-Anlagen) und (Hochtemperatur-)UTES-Anlagen ((HT-)UTES-Anlagen) vor dem Hintergrund aktueller Studien zur klimagerechten Transformation der Wärmeversorgung und den thermischen Veränderungen des urbanen geologischen Untergrunds behandelt. Die Anfangs- und Rahmenbedingungen lassen sich kurz wie folgt zusammenfassen. Den ausgewerteten Studien zufolge betrug der **Wärmebedarf des Gebäudebestands** für Raumwärme und die Warmwasserbereitstellung in Deutschland im Jahr 2018 rund 754 TWh, der Bedarf zum Kühlen 10 TWh, was 19 % der gesamten nationalen Treibhausgasemissionen entsprach. **Referenzszenarien** für das Jahr 2050 deuten für ein „Weiter-wie-bisher“ auf einen geringeren Wärmebedarf zum Heizen von Räumen und für die Warmwasserbereitung in Höhe von 598 – 470 TWh, gleichzeitig jedoch auch einen auf 21 – 75 TWh steigenden Energiebedarf zur Kühlung von Gebäuden hin. Klimaschutzgerechte **Zielszenarien** für das Jahr 2050 definieren einen insgesamt deutlich geringeren Wärmebedarf im Gebäudebestand in Höhe von nur noch 524 – 247 TWh (-31 % – -67 %). Für den Kühlbedarf zeigen die Zielszenarien gleichzeitig einen Verbleib auf heutigem Niveau oder aber auch einen Anstieg auf bis zu 70 TWh (+600 %).

Wärmepumpen wird dabei insbesondere bei der dezentralen Wärmeversorgung von Einzelgebäuden in allen Zielszenarien ein hoher Anteil am zukünftigen Technologiemarkt zugesprochen (6 – 17 Mio. Anlagen, 51 – 226 TWh jährlicher Wärmebereitstellung und somit ein Anteil von 14 % – 79 % des Wärmebedarfs). **Geothermische Wärmepumpen** sollen dabei eine wichtige Rolle übernehmen; der genaue Anteil im Jahr 2050 ist jedoch stark von den jeweils in den Energiesystemmodellen hinterlegten zukünftig erreichbaren Jahresarbeitszahlen und den Investitionskosten abhängig. Der Kühlbedarf wird in den Zielszenarien bzw. in den Energiesystemmodellen über den Einsatz von Elektrizität in herkömmlichen Klimaanlagen gedeckt; geothermische Wärmepumpen-Systeme zur Kühlung von Gebäuden finden bisher keine Berücksichtigung. Über **Wärmenetze** wird laut der gesichteten Zielszenarien insbesondere in Gebieten mit hohem Wärmebedarfsdichten wie Städten zukünftig ein größerer Anteil des noch verbleibenden Wärmebedarfs des Gebäudebestands bereitgestellt werden (81 – 91 TWh bzw. 20 % – 24 % des Wärmebedarfs). **Zentralen, saisonalen Groß-Wärmespeichern** wird in Wärmenetzen zwar eine wichtige, derzeit jedoch nicht systematisch untersuchte und noch zu quantifizierende Rolle zur Integration erneuerbarer Energiequellen und zur Sektorenkopplung zugesprochen.

Das Thema „saisonale Wärmespeicher“ erscheint noch als der „blinde Fleck“ bei Studien und Konzepten zu optimierten Transformationspfaden der Energieversorgung und insbesondere zur Wärmeversorgung, was aufgrund der vielfachen potentiellen systemischen Vorteile saisonaler Wärmespeicher verwundert. Deshalb empfehlen die Autoren dieser Studie, saisonale Wärmespeicher (z. B. UTES-Anlagen) sowohl in numerischen Szenarienanalysen für Transformationskonzepte grundsätzlich zu berücksichtigen als auch hinsichtlich der vielfachen Fragen zur Wirtschaftlichkeit, ihrer Betriebscharakteristik und den Umweltauswirkungen saisonale Wärmespeicher verstärkt zu untersuchen. Obwohl die Datenlage bisher noch auf relativ wenigen Einzeluntersuchungen basiert, kann davon ausgegangen werden, dass bereits heute eine flächendeckende signifikante Erhöhung der Grundwassertemperatur im oberflächennahen urbanen geologischen Untergrund in Deutschland um bis zu 6 K (mit lokalen Spitzenwerten von bis zu 30 °C) festzustellen ist. Diese Temperaturen, die z. T. auf unkontrollierte Wärmeeinträge aus Gebäudekellern und anderen baulichen Infrastrukturelementen ohne Wärmeversorgungscharakter zurückzuführen sind, überschreiten schon heute u. a. die bestehenden Temperaturgrenzwerte für oGT signifikant. Hier besteht Diskussionsbedarf, inwieweit einerseits bestimmte Wärmeeinträge offenbar nicht kontrolliert werden, während andererseits die kontrollierte Nutzung des oberflächennahen geologischen Untergrunds als Wärmespeicher und -quelle relativ restriktiv gehandhabt wird. Dieser Diskussionsbedarf wird sich zukünftig verschärfen, da der durchschnittliche Temperaturanstieg in urbanen oberflächennahen Grundwasservorkommen auf 0,2 – 1,0 °C pro Dekade liegt und ein weiterer Temperaturanstieg in urbanen Gebieten von 6 – 13 K in den kommenden einhundert Jahren plausibel erscheint.

Vor dem Hintergrund der zu erwartenden signifikanten Temperaturveränderungen in oberflächennahen Grundwasserleitern (GWL) in urbanen Gebieten (auch unabhängig von oGT- und UTES-Anlagen) erscheint daher ein großräumiges thermisches Management des geologischen Untergrunds und die Erfassung aller signifikanten untertägigen Wärmequellen und -flüsse essentiell. Bei einer intensivierten thermischen Nutzung des urbanen geologischen Untergrunds mit oGT, insbesondere UTES-Anlagen, ist ein entsprechendes thermisches Management mit kontinuierlichem Monitoring und Prognose in Abhängigkeit von städtebaulichen Maßnahmen und der Klimaentwicklung notwendig.

Die Umsetzung entsprechender thermisch-hydraulischer Managementansätze ist derzeit allerdings durch die Verfügbarkeit belastbarer numerischer 3D- bzw. 4D-Modelle sowie eine hinreichende Datenbasis eingeschränkt. Vor dem Hintergrund, dass nach einer ersten Sichtung geologischer Daten des oberflächennahen geologischen Untergrunds der deutschen Großstädte ein strategisch relevantes Potential für die geothermische Nutzung und insbesondere für saisonale Wärmespeicherungen besteht, ist dringender Handlungsbedarf bei der Weiterentwicklung und Anwendung von Simulationsprogrammen und der Datenverfügbarkeit zu konstatieren. Vielversprechend sind in diesem Kontext die Ansätze der Stadt München. Regulativ ist zudem der derzeit signifikant transiente Zustand der thermischen Entwicklung des geologischen Untergrunds zu berücksichtigen. Übergeordnet noch wichtiger ist allerdings, dass Bewirtschaftungskonzepte, die auf der Erfassung der zeitlich dynamischen und durch Nutzungen induzierten Raumwirkung basieren, z. B. in gesetzlichen und untergesetzlichen Regelwerken i. d. R. nicht verankert sind. Einen ersten generellen Ansatz für eine entsprechende Raumplanung und -bewirtschaftung des geologischen Untergrunds stellt das in dieser Studie verwendete sogenannte **ANGUS-Konzept** dar. Dieses allgemeine Konzept ermöglicht über die Definition und Berechnung räumlicher und zeitlicher Beanspruchungen des geologischen Untergrunds und damit einhergehender thermischer, hydraulischer, mechanischer, chemischer und biologischer Auswirkungen eine Planung

und Bewirtschaftung mit multiplen Nutzungsoptionen. Für die praxisnahe Umsetzung des AN-GUS-Konzepts oder eines vergleichbaren Konzepts zur Raumplanung des geologischen Untergrunds sind allerdings umfangreiche sowohl regulatorische als auch technische Voraussetzungen zu schaffen. Insgesamt ist festzustellen, dass erprobte analytische und numerische Simulationsmodelle zur Verfügung stehen, um in Abhängigkeit der geologischen Randbedingungen und der aus dem Wärmebedarf und dem Wärmedargebot abgeleiteten Betriebsparametern thermische und hydraulische Auswirkungen von Erdwärmesonden- (EWS-), Wasser-Wasser-Anlagen- (WWA-) und UTES-Systemen räumlich und zeitlich belastbar zu prognostizieren.

Die untertägigen Nutzungsräume unterscheiden sich nur unwesentlich zwischen den Speicheroptionen (HT-)ATES und (HT-)BTES (Borehole Thermal Energy Storage) und umfassen je nach erforderlicher Speicherkapazität, Betriebsparametern und geologischen Gegebenheiten weniger als 1 % des oberflächennahen geologischen Untergrunds, der in dieser Studie auf ein Volumen von $1 \text{ km}^2 \cdot 100 \text{ m}$ bezogen wird. Die thermischen Auswirkungsräume sind bei (HT-)ATES-Anlagen je nach betrachtetem Schwellenwert der Temperaturänderungen (hier: zwischen 1 K und 10 K) mindestens im einstelligen Prozentbereich des nutzbaren Untergrundraums zu erwarten. Insbesondere in Stadtzentren mit hohen Wärmebedarfen können auch größere Anteile des geologischen Untergrunds um einige zehn Prozent von Temperaturänderungen betroffen sein. Im Vergleich dazu werden bei (HT-)BTES etwa um einen Faktor 5 geringere Auswirkungsräume prognostiziert.

Durch den Betrieb größerer Wärmerspeichersysteme (großskalige Einzel-(HT-)BTES-Anlagen oder (HT-)ATES-Dublettenverbünde), die möglichst quartiersübergreifend hohe Stadtflächenanteile versorgen, lassen sich die benötigten Raumanteile bei beiden Speicheroptionen deutlich reduzieren. Dies ist im Wesentlichen in prozentual geringeren Wärmeverlusten größerer Speicher gegenüber kleinen Einzelspeichern begründet. (HT-)BTES-Systeme zeigen jedoch auch bereits bei kleineren Systemgrößen hohe Rückgewinnungsgrade und eignen sich somit grundsätzlich auch für Wärmeversorgungssysteme bei geringeren Bedarfen.

Die räumliche Dimension der Wärmefelder im geologischen Untergrund unterliegt einer zeitlichen Ausbreitungsdynamik und führt zu einem kontinuierlichen Wachstum insbesondere der von geringfügigen Temperaturänderungen (z. B. 1 K) betroffenen Räumen. Die thermischen Auswirkungen sollten daher ggf. über ein Wärmemonitoring und -management kontrolliert werden.

Ein erstes, GIS-basiertes methodisches Konzept zur Visualisierung der großräumigen thermischen Beeinflussung des oberflächennahen geologischen Untergrunds durch Anlagen zur Nutzung der oberflächennahen Geothermie in Abhängigkeit von obertägigen Wärmebedarfsdichten deutet darauf hin, dass zumindest in Bundesländern mit ähnlichen quartären und tertiären Sedimenten wie Schleswig-Holstein selbst bei signifikanter thermischer Nutzung des oberflächennahen geologischen Raums als Wärmespeicher die thermischen Auswirkungen auf den Gesamt-raum verhältnismäßig klein sein werden. Für die urbanen Ballungsräumen mit hohen Wärmebedarfsdichten ist allerdings davon auszugehen, dass in dem hier definierten maximalen Wärmespeicherraum ($\text{km}^2 \cdot 100 \text{ m}$ in den obersten 400 m u. GOK) Temperaturerhöhungen i. d. R. auf Werte $< 25 \text{ }^\circ\text{C}$ auftreten können. Zudem zeigen die Szenarienuntersuchungen, dass eine Reihe technologischer Maßnahmen (Auswahl und Optimierung von (HT-)ATES und (HT-)BTES, Reduktion des Wärmebedarfs durch thermische Sanierung des Gebäudebestandes etc.) getroffen werden kann, um im Rahmen eines thermischen Managements des geologischen Untergrunds Temperaturzielwerte einzuhalten.

Die Auswertung der bisherigen Leitfäden, Normen etc. lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- ▶ Bisher werden Restriktionszonen in der Hauptsache allein für die oGT und hier für EWS und deren Nutzung definiert und sind ihrer aktuellen Definition nach geeignet, die Nutzung von EWS für ein zukünftiges Wärmeversorgungssystemen in urbanen Gebieten einzuschränken.
- ▶ Die jeweils im Rahmen eines Genehmigungsprozesses für oGT-Anlagen zu beachtenden Restriktionen in Form von Abständen, Schutzzonen und Bohrtiefenbeschränkungen variieren dabei je nach Bundesland.
- ▶ Restriktionskriterien für UTES-Anlagen ergeben sich aus den meisten Leitfäden der Bundesländer eher implizit, so dass eine Abschätzung, ob und inwieweit der Ausbau von UTES-Anlagen durch die aktuellen Regelwerke limitiert wird, kaum belastbar zu treffen ist.

Deutlich wird bei der Auswertung der entsprechenden Leitfäden, dass mit den aktuellen gesetzlichen und untergesetzlichen Regelwerken der Grundwassernutzung prioritär eine nachhaltige Trinkwasserversorgung sichergestellt werden soll. Aufgrund dieser Prioritätensetzung und wahrscheinlich aufgrund der nicht immer hinreichenden Kenntnis der hydrogeologischen Eigenschaften des oberflächennahen Untergrunds werden z. T. eher pauschal und nicht immer transparent und evidenzbasiert Restriktionskriterien definiert, die in ihrer aktuellen Auslegung den Ausbau von oGT- und UTES-Anlagen und damit gegebenenfalls die klimaneutrale Transformation der Wärmeversorgung limitieren können.

Im Hinblick auf die potentielle Bedeutung von oGT- und UTES-Anlagen für eine klimaneutrale und sichere Wärmeversorgung erscheint deshalb eine zeitnahe fachliche und politische Entscheidung darüber unabdingbar, ob bzw. nach welchen Kriterien die Nutzung des Grundwassers zur Wärmeversorgung gleichrangig zur Trinkwasserversorgung für das Allgemeinwohl gestellt werden sollte.

Die wesentlichen Fragestellungen und Themenbereiche des **Kapitels 2** behandeln die betrieblich-thermischen Charakteristika herkömmlicher oGT- und UTES-Anlagen u. a. im Vergleich zu anderen Wärmeversorgungskonzepten mit Wärmepumpen. Der Untersuchungsansatz basiert dabei im Wesentlichen auf Literaturrecherchen und (semi-)generischen numerischen Szenarien, und die Ergebnisse lassen sich folgend zusammenfassen:

- ▶ Die hydrogeologischen Eigenschaften des geologischen Untergrunds haben einen deutlichen Einfluss auf Art und energetische Effizienz von Wärmegewinnungs- und Speichersystemen. Vor allem die Einbindung der Wärmegewinnungs- bzw. Speichertechnologie in das Heizsystem wirkt sich aber auf die Energieeffizienz aus.
- ▶ Die Energieeffizienz eines mit Unterstützung einer Wärmepumpe betriebenen geothermischen Heizsystems wird über die Jahresarbeitszahl (JAZ) erfasst. Als Kenngröße gibt sie das Verhältnis zwischen der dem geologischen Untergrund entzogenen geothermischen Energie und der zur Erfüllung der Heizlast zugeführten elektrischen Energie über die Dauer eines Jahres wieder.
- ▶ Für alle untersuchten Wärmegewinnungs- und Speichertechnologien (EWS, WWA, Hochtemperatur-Aquifer-Wärmespeicher (HT-ATES) und Erdwärmesondenspeicher (BTES)) gilt,

dass eine hohe Energieeffizienz erst durch niedrige Wärmesenkentemperaturen (z. B. Vorlauftemperaturen einer Heizung) erreicht werden kann, da dann der von der elektrisch betriebenen Wärmepumpe zu leistende Temperaturhub vergleichsweise gering ist.

- Technologiespezifisch sind bei niedrigen Wärmesenkentemperaturen von ca. 42,6 °C Jahresarbeitszahlen von 3,5 bis 4,5 (EWS, WWA) bzw. um 6,0 bei BTES-Systemen erreichbar. Höhere Wärmesenkentemperaturen führen zu deutlich geringeren Jahresarbeitszahlen. So liegen sie bei Wärmesenkentemperaturen von 75 °C unter 3,0. Bei hohen Wärmesenkentemperaturen (> 75 °C) erreichten nur noch HT-ATES-Systeme hohe JAZ von über 5,5, bei geeigneten Untergrundbedingungen sogar noch deutlich darüber hinaus.

Des Weiteren werden in Kapitel 2 die Nachhaltigkeitsaspekte von EWS, WWA, HT-ATES- und HT-BTES-Anlagen aus Sicht der Praxis diskutiert. Die wichtigsten Ergebnisse lassen sich wie folgt skizzieren:

- Neben der Jahresarbeitszahl ist der spezifische CO₂-Emissionsfaktor eine weitere wichtige Kennzahl für die ökologische Bewertung der Technologien. Mit dem spezifischen CO₂-Emissionsfaktor g CO₂ / kWh wird die Menge an CO₂ angegeben, die bei der Wärmeerzeugung anfällt. Mit einem CO₂-Emissionsfaktor von 20 g CO₂ / kWh unterschreitet der HT-ATES den CO₂-Emissionsfaktor von Erdgas (202 g CO₂ / kWh) um etwa das Zehnfache.
- Unter thermischer Nachhaltigkeit einer geothermischen Nutzung des geologischen Untergrunds wird eine Sicherstellung des Anlagenbetriebs verstanden, indem pro Heizperiode nur die Wärmemenge dem Bodenkörper über die Erdwärmeträger entnommen werden kann, welche diesem während des Jahres durch natürliche thermische Regeneration wieder zuströmt. Die thermische Nachhaltigkeit umfasst jedoch nicht die ökonomischen und sozialen Aspekte einer verstärkten geothermischen Nutzung des geologischen Untergrunds. Eine (verstärkte) Nutzung geothermischer Systeme für die Wärmeversorgung hat neben Umweltauswirkungen (Nachhaltigkeitsdimension Ökologie) auch soziale und ökonomische Auswirkungen.
- Die ökologische Dimension ist vor allem durch die Temperaturänderungen im geologischen Untergrund, den Beitrag zu Dekarbonisierung und Klimaschutz und ein geringes Risiko havariebedingter Stoffausträge aus Sonden und Wärmepumpen geprägt. Ökonomische Auswirkungen betreffen die Transformationskosten – für den Bau der geothermischen Systeme sowie für den Wechsel hin zu niederthermale Wärmetransport- und Heizsystemen, um die Systemeffizienz zu erhöhen und den Elektrizitätsanteil an der Wärmeerzeugung so weit wie möglich zu mindern. Eine auf geothermischen Systemen basierende Wärmeversorgung lässt zwar eine höhere Preisstabilität gegenüber der von fluktuierenden Rohstoffmärkten abhängenden konventionellen Wärmeerzeugung erwarten, im Vergleich zu konventionellen Systemen ist jedoch von höheren Kosten auszugehen. Solche Kosten sind – je nach staatlicher Förderung – individuell zu tragen und fallen kurzfristig an, während der positive Effekt eines Beitrags zum Klimaschutz immateriell ist, der Allgemeinheit zugutekommt und erst langfristig zu sehen sein wird. Die allgemeine Klimaschutzteilhabe leitet bereits zur sozialen Dimension einer übergeordneten Nachhaltigkeitsbetrachtung über. Hierzu können ebenfalls die

oberirdische Flächenschonung und die im Vergleich zu Luft-Wärmepumpensystemen geringe Sichtbarkeit der geothermischen Systeme im Stadtbild genannt werden.

Im **Kapitel 3** werden das Thema Nachhaltigkeit und die potenziellen positiven und negativen Umweltauswirkungen von EWS, WWA, HT-ATES und HT-BTES ausführlich dargestellt.

Wie bereits in Kapitel 1 angerissen, sind insbesondere saisonale Wärmespeicher wie UTES-Systeme bisher i. d. R. nicht Teil der gesamtsystemischen Betrachtung zukünftiger Energieversorgungsszenarien auf Basis hinreichend komplexer und belastbarer Energiesystemmodelle und können deswegen auch nicht bezüglich ihrer gesamtsystemischen Bedeutung bei der Transformation des Energiesystems bewertet werden. Es wird daher empfohlen, saisonale Wärmespeicher wie UTES-Systeme in Energiesystemmodellen mit ihren technischen und ökonomischen Parametern zu berücksichtigen sowie die Transparenz der Energiesystemmodelle und Szenarien hinsichtlich ihrer Eingangsgrößen, Randbedingungen, Algorithmen und Ausgangsgrößen zu erhöhen, um Szenarienanalyse, Reproduktion und -Variation zu erleichtern.

Das Dekarbonisierungspotenzial des Wärmesektors mit Hilfe von UTES-Systemen ist in erster Linie davon abhängig, wieviel CO₂-neutrale Wärmequellen mit einem saisonalen Speicherbedarf für die Bedarfs- und die Angebotsseite für die zukünftige Wärmeversorgung (Heizen und Kühlen) zur Verfügung stehen. Die aus den geologischen Gegebenheiten begründete Speicherkapazität der UTES-Systeme stellt für viele Städte keine prioritäre Limitierung dar.

Die solarthermische Nutzung der aktuell als verfügbar bewerteten Dachflächen (ca. 25 % – 30 % der Gesamtdachfläche) – ggf. auch der PV-Anlagen zur Wärmeversorgung – in Kombination mit UTES-Systemen kann im urbanen Bereich ca. 10 % – 15 % des jährlichen Wärmebedarfs decken; die vollständige solarthermische Nutzung der Dachflächen und/oder die Einbeziehung anderer (häufig vorhandener) Wärmequellen in Kombination mit UTES-Systemen ermöglicht nach ersten stark vereinfachten Szenarienanalysen eine Wärmedeckung von bis zu 30 % im urbanen Bereich. Sie kann insbesondere im nichturbanen Bereich durch die Erschließung von Freiflächen für die solarthermische Wärmeerzeugung weiter gesteigert werden, ebenso durch Einbindung CO₂-neutraler Wärmequellen wie der tiefen Geothermie.

Das Fehlen einer anerkannten quantitativen und vergleichenden Bewertung zu den Umweltauswirkungen regenerativer Energieversorgungstechnologien macht auch die entsprechende Einordnung von UTES-Anlagen schwierig bis unmöglich. Möglicherweise kann die spezifische Ermittlung quantitativer Umweltkosten einen Lösungsansatz darstellen, allerdings war dies nicht im Rahmen dieser Studie umsetzbar. Zudem ist auch dieser Ansatz stark von der Wahl der manchmal noch unsicheren Randbedingungen abhängig, wie z. B. die angeblich hohen Umweltkosten für die oberflächennahe konventionelle Geothermie zeigt, was im Wesentlichen aus der Wahl des Strommixes für die Wärmepumpe resultiert. Gerade vor dem Hintergrund des politisch beschlossenen Ausstiegs aus der Nutzung fossiler Energieträger und dem Ausbau der regenerativen Energieversorgungssysteme erscheint es unerlässlich, ein entsprechendes Bewertungskonzept zu entwickeln.

Vergleicht man die innerhalb dieser Studie thematisierten räumlich und zeitlich begrenzten thermischen, hydraulischen und mikrobiologischen Auswirkungen von UTES-Anlagen mit i. d. R. qualitativ bekannten möglichen Umweltauswirkungen anderer erneuerbarer Energieversorgungstechnologien, erscheint es zumindest wahrscheinlich, dass eine verstärkte Nutzung von UTES-Systemen beispielsweise den Nutzungsdruck auf die Landoberflächen verringern und die Biodiversität erhöhen kann. Lediglich ist lokal prognostizierbar und zeitlich begrenzt von Verän-

derungen des Grundwasserkörpers (Hydrochemie, Aquiferbiom und – falls vorhanden – Grundwasserfauna) und möglicherweise von Hebungen und Senkungen der Geländeoberfläche auszugehen. Selbst für die potentiellen und zeitlich begrenzten hydrochemischen und mikrobiologischen Veränderungen ist die empirische Datenlage nur für wenige Grundwasserleitertypen (pleistozäne glazigene norddeutsche Grundwasserleiter und jungtertiäre fluviatil-marine gebildete GWL) halbwegs belastbar.

Vermutete temperaturinduzierte, nachhaltige Konzentrationsänderungen der im Grundwasser gelösten Komponenten gelten als ein wichtiges Gegenargument im Hinblick auf eine verstärkte Nutzung insbesondere von HT-ATES-Anlagen, obwohl der thermische Auswirkungsraum, bezogen auf das Gesamtvolumen von Grundwasserleitern, i. d. R. vergleichsweise gering ist (vgl. Abschn. 1.4). Bei der raumunabhängigen, allein hydrochemischen Bewertung bisheriger Daten aus Laborexperimenten ist festzustellen, dass eine Reihe hydrodynamischer Prozesse, die die Konzentrationen gelöster Komponenten stark beeinflussen können, experimentell nicht berücksichtigt werden. Neuere Publikationen zeigen zwar, dass mittels Laborexperimenten die initialen gelösten Konzentrationen in ATES-Feldanwendungen gut prognostiziert werden, allerdings sind einfache Laborexperiment-Anordnungen (Batch-Versuche, „1D“-Säulenversuche) prinzipiell kaum geeignet, die hochgradig zeitlich-räumlich transienten hydrochemischen Veränderungen zu beschreiben. Deswegen besteht generell ein großer Bedarf an experimentellen Felddaten von (HT-)ATES-Anlagen in unterschiedlichen Grundwasserleitern, um einen belastbaren Datensatz u. a. für Genehmigungsbehörden als Referenz zur Verfügung zu stellen.

Ein erster HT-ATES-Pilotversuch bestätigt diese Aussage und zeigt, dass die räumlich-zeitliche Verteilung von Konzentrationsveränderungen der gelösten Hauptkomponenten bei HT-ATES-Anlagen stark variierend ist und sowohl durch die Strömungs- bzw. Transportprozesse als auch durch die temperaturabhängigen Gesteins-Wasser-Wechselwirkungen kontrolliert wird. Sowohl die hydraulischen Beladungs- und Entladungsprozesse, der dichtegetriebene vertikale Transport des injizierten Wassers als auch die Grundwassergrundströmung beeinflussen das Strömungsbild je nach Betriebsstatus der HT-ATES-Anlage. Auch erscheinen diese hydrochemischen Grundwasserveränderungen übergeordnet, d. h. über längere Zeiträume, nicht besonders bedeutend und werden i. d. R. durch die jeweiligen Strömungsprozesse überprägt. Die zeitlich-räumlich hoch transiente Grundwassertransport-Prozess-Geometrie im Feldversuch im Nahbereich des „warmen“ Brunnens war im Nachhinein erwartbar, wurde vorher jedoch nie entsprechend anhand hydrochemischer Parameter beschrieben. Eine übergeordnete Fragestellung, die sich aus diesen Transportmustern ergibt, ist u. a., ob grenzwertbasierte Bewertungsansätze bei entsprechend transienten Konzentrationsmustern sinnvoll bzw. zielführend sind. Nach Ansicht der Autoren spricht vor dem Hintergrund der beobachteten hydrochemischen Transportmuster eher viel für emissionsbasierte Bewertungskonzepte im weiteren Abstrom, um das Monitoring und die Bewertung handhabbar zu halten. Zudem verdeutlicht dieser Versuch, dass die z. T. auch förderpolitisch selbst verursachte relativ geringe Kenntnis zu den hydrochemischen und mikrobiologischen Auswirkungen von HT-ATES-Anlagen (und eigentlich auch HT-BTES-Anlagen) kein Grund sein dürfen, diese UTES-Technologie nicht ergebnisoffen zu verfolgen.

Als erstes Fazit im Hinblick der Auswirkungen von HT-UTES Anlagen auf das Aquiferbiom ist festzustellen, dass die Ergebnisse der bisherigen Laborversuche und insbesondere die Ergebnisse der HT-ATES-Feldversuche nicht darauf hinweisen, dass im Rahmen eines HT-ATES-Betriebs ein großräumiger Kollaps des Aquiferbioms und seiner Ökosystemfunktionen zu erwarten ist. Stattdessen wurde eine schnelle Adaption des Aquiferbioms an die veränderten Temperaturbedingungen beobachtet. Auch die räumliche Ausdehnung der thermischen Beeinflussung ist zu-

friedenstellend prognostizierbar, wobei aufgrund fehlender Daten unklar bleibt, welche Auswirkungen eine temporäre zyklische, aber langfristige Erwärmung (> 14 Tage) des Aquifers auf Temperaturen zwischen 45 °C und 70 °C auf mikrobielle Ökosystemleistungen hat.

Das zweite Fazit bzgl. der Aquiferbiom-Veränderungen ist, dass analog zu den noch ungeklärten hydrochemischen Fragestellungen auch aus mikrobiologischer Sicht ein großer Bedarf an Labor- und Feldexperimenten besteht. Nur großskalige Feldstudien mit realistischen Betriebsbedingungen und mit unterschiedlichen Sedimentbeschaffenheiten (z. B. höhere C_{org} -Werte, Karbonatsättigung, hoher Anteil reaktive Fe(II/III)-Festphasen) können die berechtigterweise z. B. durch die Wasserwirtschaft eingeforderten Daten generieren und bereitstellen. Gleichzeitig ist heute jedoch auch bereits als gesichert anzunehmen, dass die Grundwasser-Volumina von HT-ATES-Anlagen mit entsprechenden temporär hohen Temperaturen z. B. $> 30\text{ °C}$ i. d. R., bezogen auf die Gesamtvolumina von Grundwasserleitern, auch bei einem Hochlauf von HT-UTES-Anlagen klein bis sehr klein sein werden. Zu untersuchen ist in diesem Kontext weiterhin, ob bzw. welche Arten des Aquiferbioms in der Ausspeicherungsphase wieder in Areale am „warmen“ Brunnen einwandern können. Forschungsbedarf besteht zudem, ob und zu welchem Anteil bestimmte Arten auch aktiv mit dem Grundwasserstrom bei der Einspeisephase in kühlere Bereiche ausweichen können.

Die Ausbreitung von Viren und humanpathogenen Mikroorganismen im Zuge von ATES-Maßnahmen ist sowohl in Labor- als auch in Felduntersuchungen wenig erforscht. Bisherige Daten schließen ein Wachstum humanpathogener Mikroorganismen bei moderaten Temperaturen (bis ca. 40 °C), die bei HT-ATES-Anlagen temporär einen beträchtlich untertägigen Raum einnehmen, nicht aus. Nach den bisherigen (wenigen) Laborversuchen ist jedoch anzunehmen, dass Krankheitserreger durch höhere Temperaturen ($> 45\text{ °C}$) inaktiviert werden. Aktuell wird daher davon ausgegangen, dass die Vermehrung pathogener Keime durch (HT-)Anlagen kein prioritäres Risiko darstellt, wohl auch weil pristine, also weitgehend unbeeinflusste, Grundwasserleiter generell wenige pathogene Keime aufweisen sollten.

Die Diskussion zur thermischen Auswirkung auf die Grundwasserfauna wurde in der Hauptsache anhand einer Literaturecherche durchgeführt. Bezieht man die in der Literatur genannten Kriterien für das Auftreten von Grundwasserfauna auf Standortkriterien von HT-ATES-Anlagen, dann ergeben sich nur wenige Überschneidungen. I. d. R. sollten HT-ATES-Anlagen allein aus Gründen der thermischen „Dämmung“ in tiefere, gespannte bzw. halbgespannte Grundwasserleiter (deutlich unterhalb 20 m u. GOK) platziert werden, die zudem in der Regel anaerob sind und nur noch sehr eingeschränkt mit terrestrischen und aquatischen Ökosystemen an der Oberfläche wechselwirken. Weiterhin ist, wie bereits ausgeführt, der untertägige thermisch relevante Raumbedarf von HT-ATES-Anlagen selbst bei einem potenziell hohen Ausbaugrad zum Gesamtvolumen von Grundwasserleitern relativ klein, so dass sich dadurch nur in Ausnahmefällen eine bedeutende Konkurrenzsituationen ergeben sollte. Für diese seltenen Fälle wäre es möglich, zunächst den Nachweis einer schützenswerten Grundwasserfauna zu führen, um dann, wie auch bei anderen Ökosystemen, eine Abwägung bzgl. einer Nutzung zu treffen. Eine kategorische Beschränkung der thermischen Nutzung oberflächennaher Grundwasserleiter zum Schutz einer möglicherweise gar nicht vorhandenen Grundwasserfauna erscheint vor dem Hintergrund der potentiellen Bedeutung saisonaler untertägiger Wärmespeicher zur Wärmeversorgung problematisch.

In **Kapitel 4** werden die Ergebnisse der Kapitel 1 – 3 aus rechtlicher Sicht übergeordnet im Hinblick auf ihre potenzielle Bedeutung auf die Transformation der Wärmeversorgung bewertet. Insgesamt hat die Studie danach gezeigt, dass die vielfältigen Potenziale der thermischen Unter-

grundnutzung für eine effiziente Energiewende noch stärker genutzt werden können und sollten. Das Gewässerschutzrecht bietet prinzipiell einen geeigneten Rahmen, um den dabei auftretenden Herausforderungen gerecht zu werden, allerdings werden die Möglichkeiten hierfür bislang nicht genutzt.

Durch eine übergreifende integrierte, dreidimensionale Planung der thermischen Untergrundnutzung auf kommunaler Ebene können insbesondere im Verbund mit der kommunalen Wärmeplanung große Effizienzgewinne für die Energiewende unter Beachtung der wasserrechtlichen Regelungen erzielt werden.

Für die Wasserbehörden in Städten wird die Aufgabe der Grundwasserbewirtschaftung mit dem Hinzutreten der thermischen Nutzungsansprüche somit grundlegend neu definiert. Für umweltpolitisch ambitionierte Wasserbehörden gilt es, ihr Mindset von einer Konzentration auf ein flächendeckend möglichst hohes Schutzniveau für die Trinkwasservorsorge in Richtung einer optimierten integrierten Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen unter Einbeziehung des Klimaschutzes und der Klimaanpassung zu verändern.

Das Wasserrecht ist in besonderer Weise für eine planerische Steuerung der Untergrundnutzung prädestiniert. Anders als im Immissionsschutzrecht oder im Bauordnungsrecht, wo für Vorhabenträger bei Einhaltung der gesetzlichen Anforderungen ein Genehmigungsanspruch statuiert ist, steht im Gewässerschutzrecht das Bewirtschaftungsermessen der zuständigen Behörde im Vordergrund. Diese hat den Auftrag, den Schutz und die Nutzung der natürlichen Ressource durch eine vorsorgende Bewirtschaftung im Sinne des Gemeinwohls zu optimieren. Sie kann auf fachlicher Grundlage zur Erreichung der gesetzlichen Bewirtschaftungsziele Nutzungskonzepte entwickeln und auf dieser Grundlage bestimmte Nutzungen ausschließen oder beschränken. Wie oben dargelegt wurde, hat sie dabei auch gemäß § 6 Abs. 1 Wasserhaushaltsgesetz (WHG) die Ziele des Klimaschutzes und der Klimaanpassung zu berücksichtigen.

Entsprechend der planerischen Grundkonzeption des Wasserrechts finden sich im geltenden Recht und der wasserrechtlichen Praxis diverse instrumentelle Ansätze zur planerischen Steuerung von Grundwassernutzungen. Bereits vom instrumentellen Ansatz her eignen sich diese Instrumente jedoch nicht, um auf kommunaler Ebene vergleichsweise kleinräumige Nutzungen des Grundwassers zu optimieren.

Im Ergebnis bietet somit lediglich das Wasserrecht einen angemessenen rechtlichen Rahmen, um das eingangs beschriebene planerische Ziel einer integrierten, systematischen, dreidimensionalen Bewirtschaftung der thermischen und hydraulischen Grundwasserressourcen bewältigen zu können. Die bestehenden Planungsansätze in der wasserwirtschaftlichen Praxis werden dem oben formulierten Anspruch an eine integrative Planung unter Einschluss einer übergreifend optimierten (und somit auch thermischen) Nutzung des geologischen Untergrunds jedoch noch nicht gerecht.

In **Kapitel 5** werden vor dem Hintergrund der Ergebnisse und Empfehlungen des Kapitels 4 Randbedingungen und Anfangsbedingungen definiert sowie Anregungen zum Hochlauf von HT-UTES-Anlagen formuliert.

Summary

The thermal exploitation of the near-surface geological subsurface (< 400 m below ground level) represents an important option as a heat source and/or as actively operated heat storage facilities (so-called underground thermal energy storage facilities (UTES)) as part of a carbon-neutral heat supply. In addition, underground seasonal heat storage facilities offer a number of systemic advantages with regard to an energy supply system based on renewable energy sources. Among other things, such heat storage facilities represent high-capacity sinks for a fluctuating electricity supply, they enable the efficient use of seasonally fluctuating heat sources and thus increase their resilience to longer-term, unfavourable weather situations or geopolitically critical changes, e. g. with regard to the import of other energy sources. Seasonal heat storage systems are therefore also potentially important technologies in terms of climate change adaptation.

Against this background, the following results and statements were obtained in this study using previously unpublished results from other research projects (ANGUS+, ANGUS II, TestUM-Aquifer, TestUM II).

Chapter 1 deals with the national and in particular northern German expansion potential of near-surface geothermal plants (German: "oberflächennahe Geothermie" oGT) and (high-temperature) UTES plants ((HT-)UTES plants) in the context of current studies on the climate-friendly transformation of the heat supply and the thermal changes of the urban geological subsurface. The initial and general conditions can be briefly summarized as follows. According to the studies analyzed, the **heat demand of the building stock** for space heating and hot water supply in Germany in 2018 was around 754 TWh, while the demand for cooling was 10 TWh, which corresponded to 19 % of total national greenhouse gas emissions. **Reference scenarios** for the year 2050 indicate a "**business-as-usual**" scenario with a lower heat demand for heating rooms and hot water amounting to 598 – 470 TWh, but at the same time an increase in energy demand for cooling buildings to 21 – 75 TWh. Climate-friendly **target scenarios** for the year 2050 define a significantly lower overall heating demand in existing buildings of only 524 – 247 TWh (-31 % – 67 %). At the same time, the target scenarios show cooling demand remaining at today's level or increasing to up to 70 TWh (+600 %).

Heat pumps are attributed a high share of the future technology mix in all target scenarios, particularly in the decentralized heat supply of individual buildings (6 – 17 million systems, 51 – 226 TWh of annual heat supply and thus a share of 14 % – 79 % of the heat demand). Geothermal heat pumps are expected to play an important role here; however, the exact share in the year 2050 is heavily dependent on the future achievable annual coefficients of performance and investment costs specified in energy system models. In the target scenarios and energy system models, cooling requirements are covered by the use of electricity in conventional air conditioning systems; geothermal heat pump systems for cooling buildings have not yet been taken into account. According to the target scenarios examined, a larger proportion of the remaining heat demand of the building stock will be provided via heating networks in the future (81 – 91 TWh or 20 % – 24 % of the heat demand), particularly in areas with high heat demand densities such as cities. Although central, seasonal large-scale heat storage systems are considered to play an important role in heating networks for the integration of renewable energy sources and sector coupling, this role has not yet been systematically investigated and is yet to be quantified.

The topic of "seasonal heat storage" still appears to be the "blind spot" in studies and concepts for optimized transformation paths of the energy supply and especially of the heat supply, which is surprising given the multiple potential systemic advantages of seasonal heat storage. The authors of this study therefore recommend that seasonal heat storage systems (e. g. UTES systems)

be taken into account in numerical scenario analyses for transformation concepts and that seasonal heat storage systems be investigated more intensively with regard to the many questions of economic efficiency, their operating characteristics and their environmental impact. Although the data available to date is still based on relatively few individual studies, it can be assumed that a significant increase in groundwater temperature of up to 6 K (with local peaks of up to 30 °C) can already be observed in the near-surface urban geological subsurface in Germany. These temperatures, which are partly due to uncontrolled heat inflows from building basements and other structural infrastructure elements without heat supply character, already significantly exceed the existing temperature limits for near-surface geothermal energy use. There is a need to discuss the extent to which, on the one hand, certain heat inputs are apparently uncontrolled, while, on the other hand, the controlled use of the near-surface geological subsurface as a heat reservoir and source is handled relatively restrictively. This need for discussion will intensify in the future, as the average temperature rise in urban near-surface groundwater resources is 0.2 – 1.0 °C per decade and a further temperature rise in urban areas of 6 – 13 K in the next one hundred years seems plausible.

In view of the significant temperature changes to be expected in near-surface aquifers in urban areas (also independent of near-surface geothermal energy systems and UTES systems), large-scale thermal management of the geological subsurface and the recording of all significant underground heat sources and flows would therefore appear to be essential. In the case of intensified thermal use of the urban geological subsurface with near-surface geothermal energy systems, in particular UTES systems, appropriate thermal management with continuous monitoring and forecasting is necessary depending on urban development measures and climate development.

However, the implementation of corresponding thermal-hydraulic management approaches is currently limited by the availability of reliable numerical 3D or 4D models and a sufficient database. In light of the fact that, according to an initial review of geological data of the near-surface geological subsurface of major German cities, there is a strategically relevant potential for geothermal use and in particular for seasonal heat storage, there is an urgent need for action in the further development and application of simulation programs and data availability. The approaches of the City of Munich are promising in this context. The current significantly transient state of the thermal development of the geological subsurface must also be taken into account as a regulatory factor. Even more important, however, is the fact that management concepts based on the determination of the temporally dynamic spatial effects induced by usage are generally not anchored in statutory and sub-statutory regulations. The so-called **ANGUS concept** used in this study represents an initial general approach for appropriate spatial planning and management of the geological subsurface. This general concept enables a planning and management with multiple utilization options through the definition and calculation of spatial and temporal strains on the geological subsurface and the associated thermal, hydraulic, mechanical, chemical and biological effects. For the practical implementation of the ANGUS concept or a comparable concept for spatial planning of the geological subsurface, however, extensive regulatory and technical requirements must be created. Overall, it should be noted that reliable and tested analytical and numerical simulation models are available for predicting the thermal and hydraulic effects of geothermal heat probes, water-to-water systems and UTES systems in a spatially and temporally reliable manner, depending on the geological boundary conditions and the operating parameters derived from the heat demand and the heat supply.

The underground utilization spaces differ only insignificantly between the storage options (HT-)ATES and (HT-)BTES (Borehole Thermal Energy Storage) and, depending on the required

storage capacity, operating parameters and geological conditions, comprise less than 1 % of the near-surface geological subsurface, which in this study is based on a volume of $1 \text{ km}^2 \cdot 100 \text{ m}$. The thermal impact spaces for (HT-)ATES systems are expected to be at least in the single-digit percentage range of the usable underground space, depending on the threshold value of the temperature changes taken into account (here: between 1 K and 10 K). Particularly in city centers with high heat requirements, larger proportions of the geological subsurface can also be affected by temperature changes of several tens of percent. In comparison, (HT-)BTES are predicted to have an impact area that is around a factor of 5 smaller.

The operation of larger heat storage systems (large-scale individual (HT-)BTES systems or (HT-)ATES doublet networks), which supply high proportions of urban areas across districts wherever possible, can significantly reduce the proportion of space required for both storage options. This is mainly due to smaller percentage heat losses of larger storage tanks compared to small individual storage tanks. However, (HT-)BTES systems also show high recovery rates even with smaller system sizes and are therefore generally also suitable for heat supply systems with lower requirements.

The spatial dimensions of the heat fields in the geological subsurface are subject to temporal propagation dynamics and lead to continuous growth, particularly in areas affected by minor temperature changes (e. g. 1 K). The thermal effects should therefore be controlled by means of heat monitoring and management.

An initial, GIS-based methodological concept for visualizing the large-scale thermal influence of the near-surface geological subsurface by plants for the use of near-surface geothermal energy as a function of heat demand densities above ground indicates that, at least in federal states with similar Quaternary and Tertiary sediments such as Schleswig-Holstein, the thermal effects on the overall area will be relatively small even if the near-surface geological space is used considerably for heat storage. For urban agglomerations with high heat demand densities, however, it can be assumed that in the maximum heat storage area defined here ($\text{km}^2 \cdot 100 \text{ m}$ in the uppermost 400 m below ground level), temperature increases can generally occur to values $< 25^\circ \text{C}$. In addition, the scenario studies show that a number of technological measures (selection and optimization of (HT-)ATES and (HT-)BTES, reduction of heat demand through thermal refurbishment of existing buildings, etc.) can be taken to comply with temperature targets as part of thermal management of the geological subsurface.

The evaluation of previous guidelines, standards, etc. can be summarized as follows:

- ▶ To date, in Germany, restriction zones have mainly been defined solely for near-surface geothermal energy uses and here for geothermal heat probes and their use and, according to their current definition, are suitable for restricting the use of geothermal heat probes for a future heat supply system in urban areas.
- ▶ The restrictions in the form of distances, protection zones and drilling depth restrictions to be observed as part of the approval process for near-surface geothermal energy systems vary depending on the federal state.
- ▶ Restriction criteria for UTES facilities tend to be implicit in most of the guidelines issued by the federal states, meaning that it is almost impossible to make a reliable assessment of whether and to what extent the expansion of UTES facilities is limited by the current regulations.

When evaluating the relevant guidelines, it becomes clear that the current German statutory and sub-statutory regulations on groundwater use are primarily intended to ensure a sustainable drinking water supply. Due to this prioritization and probably due to the insufficient knowledge of the hydrogeological properties of the near-surface underground, in some cases rather general and not always transparent and evidence-based restriction criteria are defined, which in their current interpretation can limit the expansion of sub-surface geothermal energy systems and UTES plants and thus possibly the climate-neutral transformation of the heat supply.

In view of the potential importance of near-surface geothermal energy plants and UTES plants for a climate-neutral and secure heat supply, a swift technical and political decision on whether and according to which criteria the use of groundwater for heat supply should be placed on an equal footing with drinking water supply for the common good would therefore appear to be essential.

The main questions and topics in **Chapter 2** deal with the operational-thermal characteristics of conventional near-surface geothermal energy systems and UTES systems in comparison to other heat supply concepts with heat pumps, among others. The study approach is essentially based on literature research and (semi-)generic numerical scenarios, and the results can be summarized as follows:

- ▶ The hydrogeological properties of the geological subsurface have a significant influence on the type and energy efficiency of heat recovery systems and heat storage systems. Above all, however, the integration of the heat recovery or storage technology into the heating system has an impact on energy efficiency.
- ▶ The energy efficiency of a geothermal heating system operated with the support of a heat pump is measured using the seasonal performance factor. As a parameter, it reflects the ratio between the geothermal energy extracted from the geological subsurface and the electrical energy supplied to meet the heating load over the course of a year.
- ▶ For all heat extraction and storage technologies investigated (geothermal heat probes, water-to-water systems, high-temperature aquifer thermal energy storage (HT-ATES) and borehole thermal energy storage (BTES) systems), high energy efficiency can only be achieved with low heat sink temperatures (e. g. inflow temperatures of a heating system), as the temperature lift to be provided by the electrically operated heat pump is then comparatively low.

Depending on the technology, annual coefficients of performance of 3.5 to 4.5 (geothermal heat probes, water-to-water systems) or around 6.0 (BTES systems) can be achieved at low heat sink temperatures of approx. 42.6 °C. Higher heat sink temperatures lead to significantly lower seasonal performance factors. At heat sink temperatures of 75 °C, for example, they are below 3.0. At high heat sink temperatures (> 75 °C), only HT-ATES systems achieve high seasonal performance factors of over 5.5, and even significantly higher under suitable subsurface conditions.

Furthermore, Chapter 2 discusses the sustainability aspects of geothermal heat probes, water-to-water systems, HT-ATES and HT-BTES systems from a practical perspective. The most important results can be outlined as follows.

- ▶ Alongside the seasonal performance factor, the specific CO₂ emission factor is another important indicator for the ecological assessment of technologies. The specific CO₂ emission factor g CO₂ / kWh indicates the amount of CO₂ produced during heat generation. With a CO₂ emission factor of 20 g CO₂ / kWh, the HT-ATES is around ten times lower than the CO₂ emission factor of natural gas (202 g CO₂ / kWh).
- ▶ Thermal sustainability of geothermal use of the geological subsurface is understood to mean ensuring plant operation by only being able to extract the amount of heat from the ground body via the geothermal heat transfer medium per heating period that flows back into it during the year through natural thermal regeneration. However, thermal sustainability does not include the economic and social aspects of increased geothermal use of the geological subsurface. The (increased) use of geothermal systems for heat supply has social and economic effects as well as environmental effects (sustainability dimension ecology).
- ▶ The ecological dimension is primarily characterized by the temperature changes in the geological subsurface, the contribution to decarbonization and climate protection and a low risk of accident-related substance emissions from probes and heat pumps. Economic impacts relate to the transformation costs – for the construction of geothermal systems and for switching to low-thermal heat transport and heating systems in order to increase system efficiency and reduce the share of electricity in heat generation as much as possible. Although a heat supply based on geothermal systems can be expected to offer greater price stability compared to conventional heat generation, which is dependent on fluctuating commodity markets, higher costs are to be expected compared to conventional systems. Depending on state funding, such costs are borne individually and are incurred in the short term, while the positive effect of a contribution to climate protection is immaterial, benefits the general public and will only be seen in the long term. The general participation in climate protection already leads to the social dimension of an overarching consideration of sustainability. The above-ground conservation of ground space and the low visibility of geothermal systems in the cityscape compared to air source heat pump systems can also be mentioned here.

Chapter 3 presents the topic of sustainability and the potential positive and negative environmental impacts of geothermal heat probes, water-to-water systems, HT-ATES systems and HT-BTES systems in more detail.

As already outlined in Chapter 1, seasonal heat storage systems – such as UTES systems in particular – have not generally been part of the overall systemic consideration of future energy supply scenarios on the basis of sufficiently complex and robust energy system models and therefore cannot be evaluated in terms of their overall systemic significance in the transformation of the energy system. It is therefore recommended to consider seasonal heat storage systems such as UTES systems in energy system models with their technical and economic parameters and to increase the transparency of energy system models and scenarios with regard to their input variables, boundary conditions, algorithms and output variables in order to facilitate scenario analysis, reproduction and variation.

The decarbonization potential of the heating sector with the help of UTES systems is primarily dependent on how many CO₂-neutral heat sources with a seasonal storage requirement are available for the demand and supply side of the future heat system (heating and cooling). The

storage capacity of the UTES systems, which is based on the geological conditions, is not a priority limitation for many cities.

The solar thermal use of the roof areas currently assessed as available (approx. 25 % – 30 % of the total roof area) – possibly also PV systems for heat supply – in combination with UTES systems can cover approx. 10 % – 15 % of the annual heat demand in urban areas; according to initial, highly simplified scenario analyses, the complete solar thermal use of roof areas and/or the incorporation of other (often existing) heat sources in combination with UTES systems enables heat coverage of up to 30 % in urban areas. This can be further increased, particularly in rural areas, by developing open spaces for solar thermal heat generation, as well as by integrating CO₂-neutral heat sources such as deep geothermal energy.

The lack of a widely acknowledged quantitative and comparative assessment of the environmental impact of renewable energy supply technologies also makes it difficult or even impossible to classify UTES systems accordingly. It is possible that the specific determination of quantitative environmental costs could represent a solution, but this was not implementable within the scope of this study. In addition, this approach is also heavily dependent on the choice of the sometimes still uncertain boundary conditions, as shown, for example, by the allegedly high environmental costs for near-surface conventional geothermal energy systems, which essentially results from the choice of the electricity mix for the heat pump. Particularly in light of the political decision in Germany to phase out the use of fossil fuels and the expansion of renewable energy supply systems, it seems essential to develop an appropriate evaluation concept.

If the spatially and temporally limited thermal, hydraulic and microbiological impacts of UTES systems discussed in this study are compared with the generally qualitatively well-known potential environmental impacts of other renewable energy supply technologies, it seems at least likely that an increased use of UTES systems can, for example, reduce the utilization pressure on land surfaces and increase biodiversity. Only locally predictable and temporary changes to the groundwater body (hydrochemistry, aquifer biome and - if present - groundwater fauna) and possibly uplift and subsidence of the ground surface can be assumed. Even for the potential and temporally limited hydrochemical and microbiological changes, the available empirical data is only reasonably reliable for a few aquifer types (Pleistocene glacial aquifers in northern Germany and Young Tertiary fluvial-marine formed aquifers).

Presumed temperature-induced, sustained changes in the concentration of dissolved components in groundwater are considered an important counter-argument with regard to the increased use of HT-ATES systems in particular, although the thermal impact space, in relation to the total volume of aquifers, is generally comparatively small (see section 1.4). In the space-independent, solely hydrochemical evaluation of previous data from laboratory experiments, it can be seen that a number of hydrodynamic processes, which can strongly influence the concentrations of dissolved components, are not taken into account experimentally. Although recent publications show that initial dissolved concentrations in ATES field applications can be predicted quite well using laboratory experiments, simple laboratory experiment set-ups (batch experiments, "1D" column experiments) are in principle hardly suitable for describing the highly temporally and spatially transient hydrochemical changes. For this reason, there is generally a great need for experimental field data from (HT-)ATES plants in different aquifers in order to provide a reliable data set as a reference for licensing authorities, among others.

A first HT-ATES pilot test confirms this statement and shows that the spatio-temporal distribution of concentration changes of the dissolved main components in HT-ATES systems is highly

variable and is controlled both by the flow or transport processes and by the temperature-dependent rock-water interactions. Both the hydraulic loading and unloading processes, the density-driven vertical transport of the injected water and the groundwater base flow all influence the flow pattern depending on the operating status of the HT-ATES system. These hydrochemical groundwater changes do not appear to be particularly significant over longer periods of time and are generally influenced by the respective flow processes. The temporally and spatially highly transient groundwater transport process geometry in the field test in the vicinity of the "warm" well was expected in retrospect, but had never been described before on the basis of hydrochemical parameters. An overarching question arising from these transport patterns is, among other things, whether limit value-based assessment approaches are useful or expedient for corresponding transient concentration patterns.

In the authors' view, against the background of the observed hydrochemical transport patterns, there is a strong case for emission-based assessment concepts in the wider outflow in order to keep monitoring and assessment manageable. In addition, this experiment makes it clear that the relatively limited knowledge of the hydrochemical and microbiological effects of HT-ATES plants (and in fact HT-BTES plants, too), which is partly due to funding policy itself, should not be a reason not to pursue this UTES technology in an open-minded manner.

The first conclusion with regard to the effects of HT-UTES systems on the aquifer biome is that the results of the previous laboratory tests and in particular the results of the HT-ATES field tests do not indicate that a large-scale collapse of the aquifer biome and its ecosystem functions is to be expected in the context of HT-ATES operation. Instead, a rapid adaptation of the aquifer biome to the changed temperature conditions was observed. The spatial extent of the thermal influence can also be predicted satisfactorily, although it remains unclear due to a lack of data what effects a temporary cyclical but long-term warming (> 14 days) of the aquifer to temperatures between $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ has on microbial ecosystem services.

The second conclusion regarding the aquifer biome changes is that, analogous to the still unresolved hydrochemical issues, there is also a great need for laboratory and field experiments in terms of microbiology. Only large-scale field studies with realistic operating conditions and with different sediment characteristics (e. g. higher C_{org} values, carbonate saturation, high proportion of reactive Fe(II/III) solid phases) can generate and provide the data justifiably demanded by the water industry, for example. At the same time, however, it is already safe to assume that the groundwater volumes of HT-ATES systems with corresponding temporarily high temperatures, e. g. $> 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, will generally be small or even very small in relation to the total volumes of aquifers, even when HT-UTES systems are ramped up. In this context, it is also necessary to investigate whether and which species of the aquifer biome can migrate back into areas of the "warm" well during the storage phase. There is also a need for research into whether and to what extent certain species can also actively migrate with the groundwater flow to cooler areas during the injection phase.

The spread of viruses and human pathogenic microorganisms in the course of ATES measures has been little researched in both laboratory and field studies. Previous data do not rule out the growth of human pathogenic microorganisms at moderate temperatures (up to approx. $40\text{ }^{\circ}\text{C}$), which temporarily occupy a considerable underground space in HT-ATES systems. According to the (few) laboratory tests to date, however, it can be assumed that pathogens are inactivated by higher temperatures ($> 45\text{ }^{\circ}\text{C}$). It is therefore currently assumed that the propagation of pathogenic germs by (HT) systems does not represent a priority risk, probably also because pristine, i. e. largely unaffected, aquifers should generally have few pathogenic germs.

The discussion of the thermal impact on groundwater fauna was mainly based on a literature search. If the criteria for the occurrence of groundwater fauna mentioned in the literature are related to the siting criteria of HT-ATES plants, there are only a few overlaps. As a rule, HT-ATES systems should be located in deeper, confined or semi-confined aquifers (well below 20 m below ground level) for reasons of thermal "insulation" alone, which are also generally anaerobic and interact with terrestrial and aquatic ecosystems on the surface only to a very limited extent. Furthermore, as already mentioned, the underground thermally relevant space requirement of HT-ATES plants is relatively small, even with a potentially high degree of expansion in relation to the total volume of aquifers, so that this should only result in significant competition situations only in exceptional cases. In these rare cases, it would be possible to first provide evidence of groundwater fauna worthy of protection and then, as with other ecosystems, to weigh up the options for use. A categorical restriction on the thermal use of near-surface aquifers to protect a groundwater fauna that may not even exist appears problematic in view of the potential importance of seasonal underground heat reservoirs for heat supply.

In **Chapter 4**, the results of Chapters 1 – 3 are evaluated from a legal perspective with regard to their potential significance for the transformation of the heat supply. Altogether, the study has shown that the diverse potential of underground thermal use for an efficient energy transition can and should be exploited to an even greater extent. In principle, water protection legislation offers a suitable framework for meeting the challenges that arise, but the opportunities for this have not yet been exploited.

Comprehensive, integrated, three-dimensional planning of underground thermal utilization at the municipal level, especially in conjunction with municipal heat planning, can achieve major efficiency gains for the energy transition while complying with water law regulations.

With the addition of thermal utilization requirements, the task of groundwater management is thus being fundamentally redefined for water authorities in cities. For environmentally ambitious water authorities, it is important to change their mindset from a focus on the highest possible level of protection for drinking water provision across the board to an optimized, integrated management of groundwater resources, including climate protection and climate adaptation.

Water regulations are particularly predestined for the planning control of subsoil use. In contrast to immission control regulations or building regulations, where project developers are entitled to approval if they comply with the statutory requirements, water protection law focuses on the management discretion of the competent authority. This authority has the task of optimizing the protection and use of the natural resource through precautionary management in the interests of the common good. It can develop utilization concepts on a technical basis to achieve the statutory management objectives and exclude or restrict certain uses on this basis. As outlined above, it must also take into account the objectives of climate protection and climate adaptation in accordance with § 6 Section 1 of the German Water Resources Act (Wasserhaushaltsgesetz, WHG).

In accordance with the basic planning concept of water regulations, various instrumental approaches for the planning control of groundwater use can be found in current legislation and water law practice. However, in terms of their instrumental approach alone, these legal tools are not suitable for optimizing comparatively small-scale groundwater use at the municipal level.

As a result, only water legislation provides an appropriate legal framework for achieving the planning objective of integrated, systematic, three-dimensional management of thermal and hydraulic groundwater resources described above. However, the existing planning approaches in

water management practice do not yet meet the above-mentioned requirement for integrative planning including an overall optimized (and thus also thermal) use of the geological subsurface.

Against the background of the results and recommendations of Chapter 4, **Chapter 5** defines boundary conditions and initial conditions and formulates suggestions for the ramp-up of HT-UTES plants.

1 Einschätzung des räumlichen Ausbaupotenzials oberflächennaher Geothermie bzw. oberflächennaher geologischer saisonale Wärmespeicher in Deutschland

Um die potenzielle Bedeutung und die Auswirkungen der oberflächennahen Geothermie (i. w. S.) in Deutschland bewerten zu können, ist es unumgänglich, den Status-Quo der Transformation der Wärmeversorgung anhand einer Literaturrecherche zu skizzieren und zu diskutieren. Danach stellt sich die derzeitige Situation wie folgt dar.

Der Endenergieverbrauch für das Heizen (Raumwärme und Warmwasser) und die Kühlung bzw. Klimatisierung von Gebäuden in Deutschland summierte sich im Jahr 2018 auf insgesamt 764 TWh. Dies entsprach rund 31 % des gesamten nationalen Endenergieverbrauchs des Jahres (BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2020a). Trotz der – gemessen am gesamten Endenergiebedarf – großen Bedeutung der Wärmeversorgung von Gebäuden wurden laut Umweltbundesamt (UBA) im Jahr 2020 lediglich rund 15,2 % der Wärmeversorgung in Deutschland nach aktueller Definition „regenerativ“ erzeugt.

Allerdings ist auch dieser Wert noch kritisch im Hinblick auf den Klima- und Umweltschutz zu sehen, da rund 70 % des regenerativen Anteils bei der Wärmeversorgung auf die Verbrennung fester Biomasse (UBA, 2021a) entfällt. Gerade negative Umwelteinflüsse der Biomassenutzung sind seit Langem bekannt; so wiesen beispielsweise bereits Trimble et al. (1984) auf Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion, Bodendegradation, Nährstoffabreicherung in Böden, Verschlechterung der (Grund-)wasserqualität und die Freisetzung von Luftschadstoffen wie z. B. Feinstaub und Kohlenstoffdioxid (CO₂) hin. Zudem wären bei einem Ausbau der Biomasse als Energiequelle mit Verdrängungseffekten in schutzwürdige Gebiete mit Folgen wie Konversion von Wäldern, Drainage von Moorböden, Umbruch von Grünland und artenreichen Habitaten usw. zu rechnen sowie Nachteile für die Biodiversität zu befürchten (Jering et al., 2013). Das Ausbaupotenzial der festen Biomasse zur Wärmeversorgung ist daher in überregionalen Systembetrachtungen sehr klein bzw. wird wahrscheinlich noch schrumpfen. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, wie eine regenerative Wärmeversorgung in Zukunft aussehen kann.

Eine zukünftige potentielle und bedeutende Quelle regenerativ erzeugter Wärme ist und bleibt die tiefe Geothermie. Für eine Beschreibung der Technologie einschließlich ihrer Herausforderungen wird auf Bauer et al. (2014) verwiesen. Zu betonen ist jedoch, dass auch bei regional generell geeigneten geologischen Randbedingungen ein Fündigkeits- und ein damit verbundenes finanzielles Risiko bestehen; bisweilen treten zudem Akzeptanzprobleme auf (Jolie et al., 2021). Gleichwohl erscheint ein Ausbau der tiefen Geothermie national wie auch global unumgänglich, wird jedoch allein aufgrund geologischer Randbedingungen nur einen Teil einer kostengünstigen Wärmeversorgung leisten können. Aufgrund des saisonal fluktuierenden Wärmebedarfs wird zunehmend diskutiert, ob und gegebenenfalls wie eine Kopplung der tiefen Geothermie mit saisonalen Wärmespeichern zu Effizienzsteigerungen führt (Russell und Gurgenci, 2014). Auch hier besteht dringender Bedarf an Betriebserfahrungen mit Demonstrationsanlagen, um zu den regulatorischen, den betrieblichen und den wirtschaftlichen Fragestellungen aussagefähiger zu werden (vgl. z. B. aktuelles BMWK-Reallaborvorhaben „IW3“).

Ein weiterer bedeutender Teil der zukünftigen regenerativen Wärmeversorgung kann theoretisch durch die Solarthermie auf verschiedenen Größenskalen geleistet werden (Schabbach und Leibbrandt, 2014), wenn das Problem der saisonalen Wärmespeicherung hinreichend gelöst

wird (Tschopp et al., 2020). Wie groß der Anteil eines solarthermisch-saisonalen Speichersystems an einer zukünftigen urbanen Wärmeversorgung sein wird, wird zudem stark davon abhängen, ob und wie es gelingt, die urbanen Flächen (Dächer, Fassaden, Plätze, Straßen etc.) als Wärmetauscher-Oberflächen zu aktivieren und zu nutzen. Dies erscheint in Zukunft in vielen urbanen Gebieten geboten, um einerseits genügend exergetisch effiziente Umweltwärmequellen zum Heizen zur Verfügung stellen zu können und andererseits auch der intensivierten Bildung von „Heat Islands“ und untergeordnet „Cold Islands“ mit ihren jeweiligen negativen Auswirkungen auf Gesundheit, Produktivität und Allgemeinwohl begegnen zu können. Leider stehen Forschungsansätze zu solchen „Thermal-Sponge-Cities“-Konzepten weltweit trotz des potentiell hohen und dringenden Bedarfs erst am Anfang.

In vielen Studien zu zukünftigen klimaneutralen Wärmeversorgungssystemen wird die große Bedeutung von „Power-to-Heat“-Ansätzen insbesondere mit der intensiven Nutzung von Wärmepumpen herausgestellt. Nach diesen Ansätzen erfolgt die Wärmeversorgung auf Basis klimaneutral erzeugter elektrischer Energie, die mit anderen Wärmequellen über Wärmepumpen gekoppelt sind und so vergleichsweise energieeffizient die notwendigen Temperaturniveaus zur Wärmeversorgung sicherstellen. Als Faustregel gilt, dass eine hohe Energieeffizienz erreicht werden kann, wenn der Temperaturunterschied zwischen der primären Wärmequelle und der Zieltemperatur kleiner als 20 K ist. Dies lässt sich beispielsweise durch die Senkung der Zieltemperatur u. a. durch thermische Dämmmaßnahmen und/oder die geeignete Wahl primärer klimaneutraler Wärmequellen erreichen.

Während sogenannte Wasser-Wasser-Anlagen (WWA) Grundwasser (GW) als primäre Wärmequelle nutzen und in Studien zur klimaneutralen Transformation der Wärmeversorgung vergleichsweise wenig betrachtet werden, werden für die beiden Systeme Luft-Wasser-Wärmepumpen (LWWP) sowie Erdwärmesonden (EWS) in manchen Studien größenordnungsmäßig ähnlich große Anteile für das Jahr 2050 prognostiziert (Hecking et al., 2017; Gerhardt, Sandau, et al., 2017; Purr et al., 2019). Im Unterschied dazu rechneten Sterchele et al. (2020) mit einem geringen Anteil von < 5 % EWS und einem großen Anteil von ca. 50 % für Luft-Wasser-Systeme in der Wärmeversorgung von Gebäuden für das Jahr 2050. Jochum et al. (2017) prognostizierten sogar einen Anteil von 73 % – 99 % für Luft-Wasser-Wärmepumpensysteme für das Jahr 2050. Die Gründe für die unterschiedliche Bewertung der primären Wärmequellen (z. B. Luft, Grundwasser, „Erdwärme“, nicht einheitlich definierte „Umweltwärme“) sind u. a. divergierende Einschätzungen zur Kostenentwicklung spezifischer Systeme, zu deren zukünftigen regulatorischen Limitierungen, deren Leistungspotenzialen und deren Umsetzbarkeit in urbanen Gebieten (Verfügbarkeit von Bohrpunkten, Einbindungspotenzial in Nah- und Fernwärmenetze etc.) (vgl. z. B. Bracke et al. (2015)). Relativ wenig wird in bisherigen Studien der systemische Effekt einer stark von elektrischer Energie abhängigen zukünftigen Wärmeversorgung und den dabei verwendeten primären Wärmequellen auf die gesamte Transformation der Energieversorgung diskutiert (vgl. Brown et al. (2018)). Absehbar ist jedoch, dass eine verstärkt auf „Power-to-Heat“-Ansätzen basierende Wärmeversorgung (Heizen und Kühlen) den Bedarf regenerativ erzeugter Elektrizität insgesamt signifikant erhöhen wird. Dies gilt insbesondere gerade in den Wintermonaten und kann bei typischen windarmen, aber sehr kalten und andauernden Hochdrucklagen eine Herausforderung darstellen. Andererseits bietet die elektrizitätsbasierte Wärmeversorgung theoretisch das Potential, ausgleichend auf die Netzstabilität bei fluktuierendem regenerativen Elektrizitätsdargebot zu wirken, insbesondere wenn Wärmespeichersysteme genutzt werden. Weiterer Forschungsbedarf besteht allerdings im Hinblick auf systemische Modellanalysen zu den Fragen, welche Art von Wärmespeicher (insbesondere Kapazität und Leistung) bei welchem regenerativen Ausbaupfad und ortsspezifischen Gegebenheiten sowohl eine hohe Effektivität

und Effizienz des gesamten Energieversorgungssystems als auch eine hohe Resilienz bzw. Robustheit z. B. gegenüber zukünftigen extremen Wettersituationen aufweist.

Vor diesem Hintergrund ist es ein Problem, dass das Konzept der saisonalen Wärmespeicherung (Underground Thermal Energy Storage, UTES) als Teil der oberflächennahen Geothermie (oGT) i. w. S., vor allem in Form von Aquifer-Wärmespeichern (Aquifer Thermal Energy Storage, ATES) oder Erdsonden-Wärmespeichern (Borehole Thermal Energy Storage, BTES), in den aktuellen nationalen Studien zur Transformation der Wärmeversorgung keine oder keine relevante Beachtung erfährt, auch wenn der UTES-Technologie global ein großes Anwendungspotenzial zugeschrieben wird (Bloemendal et al., 2015) und sie in den Niederlanden in Form von Niedertemperatur-ATES-Anlagen (NT-ATES-Anlagen), d. h. mit Einspeisetemperaturen $< 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, als Stand der Technik angesehen werden kann.

Bis zum Jahr 2018 wurden beispielsweise in den Niederlanden 2500 ATES-Anlagen, in Schweden 220 ATES-Anlagen und in Dänemark 55 ATES-Anlagen meist im sogenannten Niedertemperaturbetriebsbereich zur Wärmeversorgung betrieben (Fleuchaus et al., 2018). In Deutschland hingegen ist die Anzahl der ATES-Anlagen niedriger. Beispielsweise existierten solche Anlagen in Berlin (Reichstag), Neubrandenburg, Rostock und Bonn, wobei aktuell nur die letzten beiden genutzt werden (Fleuchaus et al., 2021).

Die Nutzung von BTES-Anlagen ist stärker verbreitet. BTES-Anlagen in Deutschland wurden z. B. in Neckarsulm, Crailsheim und Attenkirchen errichtet, weitere befinden sich in Schweden (Luleå, Emmaboda, Annenberg), Dänemark (Brædstrup), Finnland (Kerava), Tschechien (Pavlov), den Niederlanden (Groningen), Belgien (Mol), Kanada (Drake Landing) sowie der Schweiz (Wollerau, Root Lucerne, Suurstoffi, Oberfeld, Blatten Belap) (Kallesøe et al., 2019). Zumeist mit dem Ziel einer Effizienzsteigerung von UTES-Systemen sowie der Möglichkeit, Abwärme von z. B. Industrie- oder Müllverbrennungsanlagen zu nutzen, rückten dabei zuletzt Hochtemperatur-Aquifer- bzw. Erdsonden-Wärmespeicher (HT-ATES bzw. HT-BTES) in aktuellen Forschungsvorhaben national (Degenhart et al., 2019) und international (Kallesøe et al., 2019) in den Fokus.

Über die Gründe der Nichtberücksichtigung von UTES in den eingangs zitierten Studien zur Transformation des Wärmeversorgungssystems sowie auch in der praktischen Anwendung in Deutschland kann hier nur spekuliert werden. Als Hemmnisse in der Etablierung von ATES-Systemen nannten Fleuchaus et al. (2018) im Wesentlichen folgende Punkte:

- ▶ mangelndes Bewusstsein für und Misstrauen in die Technologie,
- ▶ vermeintlich hohe Investitionskosten,
- ▶ politische bzw. genehmigungsrechtliche Hürden,
- ▶ zu geringes Know-How in den Anfangs- und Wachstumsphasen der ATES-Entwicklung,
- ▶ Knappheit des untertägigen Raums in urbanen Gebieten während der Hochlaufphase dieser Technologie.

In Diskussionen in Fortbildungskursen des Kompetenzzentrums Geo-Energie (KGE) der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU) sowie in einer im Rahmen der vorliegenden Studie durchgeführten Umfrage wurden als Gründe häufig genannt:

- ▶ mangelnde thermische Leistung von EWS-Anlagen, um die Wärmeversorgung in urbanen Gebieten mit hohem Wärmebedarf zu sichern,
- ▶ genehmigungsrechtliche Unklarheiten z. B. im Hinblick auf Grundwasserschutz bei EWS-, WWA- und UTES-Systemen sowie unterschiedliche Regelungen in den Bundesländern,
- ▶ unklare bzw. geringe wirtschaftliche Rentabilität von oGT-Systemen (i. w. S.) wegen (angeblich) unsicheren sowie unbekannten geologischen Randbedingungen,
- ▶ fehlende Daten zu zeitlich hoch aufgelösten (z. B. stündlich bis minütlich variierenden) Wärmebedarfen sowie fehlende Wärmequellen für einen wirtschaftlichen Betrieb von UTES-Systemen,
- ▶ Unkenntnis bezüglich der thermischen Leistungspotenziale von UTES-Anlagen z. B. bei Planern/Ingenieuren, Klimaschutzkoordinatoren und Behördenvertretern.

Aus Sicht der Autoren der vorliegenden Studie ist die geringe Wahrnehmung insbesondere von UTES-Systemen bei Konzepten zur Transformation der Wärmeversorgungssystemen besonders auf das Fehlen einer fachübergreifenden Informationsbasis bzgl. folgender übergreifender Themenbereiche zurückzuführen:

- a) systematische Einschätzung des bundesweiten Ausbaupotenzials für oGT- einschließlich UTES-Anlagen im Rahmen einer klimaneutralen Transformation der Wärmeversorgung
 - i) unter Berücksichtigung übergeordneter Klimaschutzzielsetzungen sowie
 - ii) unter Berücksichtigung geologischer Randbedingungen,
- b) Verfügbarkeit von Konzepten und Methoden zur Abschätzung untertägiger hydraulischer, thermischer, hydrochemischer und mikrobieller Raumwirkungen von oGT- und UTES-Anlagen im Falle bestimmter Ausbauszenarien,
- c) Abschätzung potenzieller Ausbaulimitierungen und Nutzungseinschränkung von oGT- und UTES-Anlagen durch bestehende Infrastruktur, geologische und anthropogene Randbedingungen und die aktuellen untergesetzlichen und gesetzlichen Regelwerke.

Um diesbezüglich eine belastbare Diskussionsbasis aufzubauen, wurden folgende konkrete Fragestellungen innerhalb des Kapitels 1 der vorliegenden Studie in Abstimmung mit dem UBA bearbeitet:

- ▶ Was sind die derzeitigen Szenarien und Konzepte zur klimagerechten Transformation der Wärmeversorgung, und von welchen Energiemengen für die Wärmeversorgung ist zukünftig auszugehen?
- ▶ Wie stellen sich die aktuellen und die prognostizierten thermischen Veränderungen des urbanen geologischen Untergrunds aufgrund von Klimawandel, Städtebau bzw. städtischer Infrastruktur dar?
- ▶ Wie ist die Datenlage zur räumlichen und zeitlichen Verteilung von Wärmebedarfen, welche geologischen Randbedingungen für oGT- bzw. UTES-Potenziale bestehen insbesondere in

deutschen Großstädten, wie ist der Datenstand zum oberflächennahen geologischen Untergrund für weitergehende Bewertungen und Planungen für oGT- bzw. UTES-Anlagen, und was sind sich daraus ergebende untertägige Raumbedarfe für UTES?

- ▶ Welche Ansätze kann ein Konzept zur quantitativen Ableitung des Raumbedarfs für eine Nutzung des geologischen Untergrunds beinhalten, und wie stellt sich der untertägige Raumbedarf oberflächennaher EWS-, WWA- und UTES-Systemen bei realitätsnahen Betriebsszenarien auf Basis analytischer bzw. numerischer Modelle dar?
- ▶ Welche Erkenntnisse hinsichtlich der Ausbaumöglichkeiten lassen sich durch eine GIS-gestützte Visualisierung des Raumbedarfs von oGT bzw. UTES in Relation zu Wärmebedarfsdaten gewinnen?
- ▶ Wie werden aktuell Restriktionszonen für den Ausbau der oGT von Behördenseite in den Bundesländern definiert, und was bedeutet diese Vorgehensweise für das Ausbaupotenzial von oGT einschließlich UTES?
- ▶ Wie sind die Anforderungen und die Verfügbarkeit von Planungsunterlagen für den Ausbau von oGT einschließlich UTES?
- ▶ Was sind zusammenfassend die abzuleitenden Maßnahmen für den Ausbau von oGT und UTES?

1.1 Der Wärmebedarf des zukünftigen Gebäudebestands und die erwartete Bedeutung der oberflächennahen Geothermie bei der Bedarfsdeckung

Der zukünftige Raumbedarf von Anlagen zur Nutzung der oGT ist unmittelbar mit dem Wärmebedarf zum Heizen und Kühlen des zukünftigen Gebäudebestands gekoppelt:

- ▶ Der baulich-energetische Zustand des Gebäudebestands bedingt die Effizienz und damit die erwartete Anzahl geothermisch betriebener Wärmepumpen zur dezentralen Wärmebereitstellung in Einzelgebäuden oder Gebäudekomplexen.
- ▶ Der erwartete Technologiemix zur regenerativen Deckung des zukünftigen Wärmebedarfs in Wärmenetzen zur zentralen Versorgung mehrerer Gebäude beeinflusst zudem den Bedarf an UTES-Anlagen zur saisonalen Wärmespeicherung.

Außer vom baulichen und technischen Zustand der Gebäude sind der zukünftige Wärmebedarf zum Heizen und Kühlen und der erwartete Technologiemix zur Bedarfsdeckung von demographischen und sozio-ökonomischen Entwicklungen sowie von politischen Vorgaben und Fördermaßnahmen und von den unmittelbaren Auswirkungen des fortschreitenden Klimawandels abhängig. Szenarien-Studien berücksichtigen diese Einflussfaktoren in Energiesystemmodellen und zeigen mögliche Transformationskorridore in Abhängigkeit von Klimaschutzzielen auf.

In Abschnitt 1.1.1 wird zunächst die aktuelle Situation bzgl. des Wärmebedarfs (Heizen und Kühlen), bzgl. des aktuellen Einsatzes geothermischer Wärmepumpen und saisonaler Wärmespeicher und bzgl. der Klimaschutzziele im Gebäudesektor beschrieben. Anschließend wird in Abschnitt 1.1.2 ein Überblick zu Szenarien zum zukünftigen Wärmebedarf (Heizen und Kühlen)

im Gebäudebestand und zum jeweils erwarteten zukünftigen Technologiemarkt zur Bedarfsdeckung gegeben. Dazu wurden gesichtet:

- ▶ **Referenzszenarien** der „Energieeffizienzstrategie Gebäude“ (ESG) (BMWi, 2015), der „Langfrist- und Klimaszenarien“ (LFKS) (Pfluger et al., 2017b) und des „Integrierten Nationalen Energie- und Klimaplan“ (NECP) (BMWi, 2020b) sowie
- ▶ **Zielszenarien** der ESG, der LFKS und aus weiteren Studien (Gerhardt et al., 2015; Ausfelder et al., 2017; Bürger et al., 2017; Gerhardt et al., 2017; Jochum et al., 2017; Hecking et al., 2017; Gils et al., 2018; Purr et al., 2019; Sterchele et al., 2020).

Die Zusammenfassung der Szenarien soll die erwartete Entwicklung des Wärmebedarfs und die mögliche Bedeutung von oGT-Anlagen (inkl. UTES) bei der zukünftigen Wärmeversorgung einordnen, um im weiteren Verlauf dieser Studie den möglichen zukünftigen Raumbedarf im Verhältnis zum verfügbaren Ausbaupotenzial einzuschätzen (vgl. Abschn. 1.3).

Das Spektrum an Einflussfaktoren, welches die weitere Entwicklung des Wärmebedarfs zum Heizen und Kühlen im Gebäudesektor in den kommenden 25 – 30 Jahren bestimmt, wird in den gesichteten Szenarien zur Entwicklung des deutschen Energiesystems meist bis 2050 abgebildet; in jüngeren Studien wird Klimaneutralität inzwischen oftmals für das Jahr 2045 angenommen.

Die Randbedingungen bzgl. des zukünftigen Wärmebedarfs im Gebäudesektor sind dabei:

- ▶ die weitere Entwicklung der beheizten Wohn- und Nutzfläche
 - Bevölkerungsentwicklung (Anzahl, Alter, Wohnort)
 - Wohnflächenbedarf pro Person (Lebensstile)
 - Nutzflächenbedarf (Anzahl von Erwerbstätigen je Branche)
 - Neubau- und Abrissraten
- ▶ die weitere Entwicklung der Energieeffizienz im Gebäudebestand
 - ökonomische bzw. volkswirtschaftliche Aspekte (Energie- und CO₂-Preise, Einkommen, BIP)
 - politische Anreize und Maßnahmen (Förderprogramme, Steuern, Verbote)
 - technologische Weiterentwicklung (Anlageneffizienz, Technologie- und Materialkosten)
 - energetische Sanierungsraten und -tiefen im Bestand (Teilsanierung, Vollsanierung)
 - energetische Standards im Neubau
- ▶ die weiteren Auswirkungen des Klimawandels (Summe der Heiz- und Kühlgradtage).

Disruptive Entwicklungen (Gils et al., 2018) wie z. B. die COVID-19-Pandemie mit ihren Auswirkungen auf den Endenergieverbrauch, auf die Volkswirtschaft und auf energiepolitische Entscheidungen werden bisher in den Szenarien nicht berücksichtigt (BMWi, 2020b).

Beim zukünftigen Technologiemix zur Wärmeversorgung (Heizen und Kühlen) von Gebäuden unterscheiden die gesichteten Szenarien-Studien meist zwei Bereiche:

- ▶ dezentrale Einzelgebäudeversorgung (Öl-/Gaskessel, Holz-/Pelletofen, Wärmepumpe) und
- ▶ zentrale Versorgung über Netze (Gas-, Fernwärme-, Nahwärme-, Quartierswärmenetz).

In den Modellen entscheiden dabei die Kosten der Installation bzw. des Wechsels der Wärmeversorgungsart und die resultierenden Kosten der Wärmeversorgung (€/MWh) auf Basis von Geodaten zu lokalen Wärmebedarfsdichten (GWh/km²) über die Aufteilung der Versorgung im Wärmesektor in diese beiden Teilbereiche (Pflüger et al., 2017a).

Diese Zweiteilung der zukünftigen Wärmeversorgung ergibt sich entsprechend auch in dieser Studie bei der Auswertung der gesichteten Szenarien. Anzumerken ist jedoch, dass die bisher in den Modellen unberücksichtigten UTES-Anlagen neben ihrer möglichen Funktion als saisonale Großwärmespeicher in Wärmenetzen auch zum Heizen und Kühlen von Einzelgebäuden und Gebäudekomplexen eingesetzt werden können (Fleuchaus et al., 2018; Fleuchaus et al., 2021) (vgl. Kap. 2).

1.1.1 Aktuelle Situation im Gebäudebestand

Wärmebedarf (Heizen und Kühlen)

Der Endenergieverbrauch für das Heizen im Gebäudebestand (Raumwärme und Warmwasser) summierte sich im Jahr 2018 auf insgesamt 754 TWh, wobei 627 TWh für das Heizen von Räumen und 127 TWh für die Bereitstellung von Warmwasser genutzt wurden (BMW, 2020a). Der Endenergieverbrauch zur Kühlung und zur Klimatisierung von Gebäuden wird für 2018 mit rund 10 TWh beziffert. Seit 2008 ist dieser Verbrauch im Anwendungsbereich Kühlen von rund 8 TWh um 25 % angestiegen, wohingegen der Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser im selben Zeitraum um rund 15 % sank.

Geothermische Wärmepumpen zur dezentralen Versorgung von Einzelgebäuden

Im Jahr 2016 waren bereits rund 710.000 Wärmepumpen im Gebäudebestand in Deutschland installiert; davon nutzten etwa 300.000 die oberflächennahe Geothermie zum Entzug von Umweltwärme. Der Begriff „Umweltwärme“ wird in der Literatur nicht einheitlich verwendet; hier umfasst er primäre Wärmequellen wie z. B. Wärme aus der Luft, dem Grundwasser und dem Erdreich. Nicht aktuell ist die erfasste Anzahl der eingesetzten „reversiblen“ Wärmepumpen, die neben Wärme zum Heizen auch „Kälte“ (also Wärme zum Kühlen) bereitstellen können. Im Jahr 2013 hatten diese einen Marktanteil von ca. 2 % und wurden zu 95 % mit Umweltwärme aus Umgebungsluft betrieben (Born et al., 2017).

Geothermische Wärmepumpen-Anlagen bieten gegenüber der Nutzung von Außenluft oder Oberflächengewässern als Umweltwärmequelle den Vorteil, dass sie ab einer Nutzungstiefe von etwa 15 m eine kontinuierliche Bereitstellung von Wärme auf einem nahezu gleichmäßigen Temperaturniveau ohne saisonale Einflüsse ermöglichen, wohingegen die Temperatur anderer möglicher Umweltwärmequellen saisonalen Schwankungen unterliegen kann (Born et al., 2017). Dadurch kann insbesondere bei sehr niedrigen Lufttemperaturen im Winter und einem demzufolge erhöhten Heizbedarf eine höhere Effizienz in Form einer besseren Jahresarbeitszahl (JAZ) und somit auch ein geringerer Elektrizitätsbedarf (bezogen auf die Wärmeleistung) erreicht werden. Werden jedoch sehr hohe Leistungen benötigt, kann dies bei Nutzung von Erdwärmesonden-Anlagen zur Bereitstellung von Umweltwärme zur Vereisung im Umfeld von Sonden führen. Mit Wasser-Wasser-Anlagen kann dies vermieden werden (zu möglichen Leistungen und

Jahresarbeitszahlen unterschiedlicher geothermischer Wärmepumpen-Anlagen vgl. Abschn. 2.3).

Im Jahr 2020 wurden in Deutschland etwa 120.000 Wärmepumpen neu installiert. Davon waren rund 20.500 (17 %) „erdgekoppelte“ Anlagen, welche die oberflächennahe Geothermie nutzen (BWP – Bundesverband Wärmepumpe e. V., 2021). Im Jahr 2019 belief sich die Anzahl der in Deutschland installierten Wärmepumpen auf rund 1,2 Mio. Anlagen (BMW, 2021). Insgesamt wurden damit nur 3,2 % des Wohngebäudebestands mit Wärmepumpen beheizt. Seit 2010 wurden jedoch in rund 40 % der neu gebauten Wohngebäude Wärmepumpen als Haupt-Wärmeerzeuger installiert (Cischinsky und Diefenbach, 2018). Der Elektrizitätsverbrauch durch Wärmepumpen stieg in der Folge auf 6,3 TWh im Jahr 2019. Mit diesem wurden rund 21 TWh Wärme bereitgestellt (Annahme: JAZ von 3,3) (BMW, 2021).

Saisonale Wärmespeicher in Wärmenetzen zur Versorgung mehrerer Gebäude

Mittels Wärmenetzen wurden im Jahr 2019 insgesamt 71 TWh Wärme an die jeweils angeschlossenen Wohn- und Nichtwohngebäude geliefert. Erzeugt wurde die eingespeiste Wärme überwiegend aus der Verbrennung von Kohle, Gas und Abfall in Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (KWK-Anlagen) (AGFW – Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V., 2020). Der Anteil der erneuerbaren Energien in Wärmenetzen lag bei ca. 14 % (überwiegend Verbrennung von fester Biomasse, biogenem Abfall und Biogas) (Engelmann et al., 2021). Fernwärme war im Jahr 2016 bei 6,4 % der Wohngebäude die Haupt-Wärmeversorgungsart (Cischinsky und Diefenbach, 2018). Allgemein ist die verfügbare Datenlage zum derzeitigen Versorgungsbeitrag der Wärmenetze jedoch unzureichend (Engelmann et al., 2021).

Saisonale Wärmespeicher sind in den existierenden Wärmenetzen in Deutschland bisher so gut wie nicht im Einsatz, obwohl sie z. B. in Dänemark in Form von Erdbeckenspeichern in ländlichen Nahwärmenetzen realisiert und inzwischen auch in Modellen zur Transformation der Fernwärme in Deutschland berücksichtigt werden (Gerhardt et al., 2021). Dies wird u. a. auf den großen obertägigen Flächenbedarf derartiger Speicher zurückgeführt, der im Kontext städtischer Fernwärmenetze in Deutschland ein Umsetzungshemmnis darstellen kann (Pehnt et al., 2017; Stadler et al., 2020). Untertägige geothermische Energiespeicher (UTES) können in diesem Zusammenhang eine Lösung anbieten, da sie zentrale und saisonale Großwärmespeicher mit geringem Flächenbedarf darstellen können (vgl. Abschn. 1.4).

Für solche zentralen, geologischen Hochtemperatur-Wärmespeicher in Wärmenetzen wird die saisonale Speicherung von Abwärme aus Industrie-, KWK- und Abfallverbrennungsanlagen und Wärme aus Solarthermieranlagen als Einsatzgebiet gesehen (Wesselink et al., 2018; Kallesøe et al., 2019; Fleuchaus et al., 2021). Durch hohe Temperaturen bei der Einspeicherung ist bei der Ausspeicherung der notwendige Temperaturhub auf das Temperaturniveau des Vorlaufs der zu versorgenden Wärmesenke (z. B. ein bestehendes Fernwärmenetz mit > 95 °C Vorlauf) nicht zu hoch. So könnten Großwärmepumpen, die solch einen Wärmespeicher eventuell noch unterstützen müssen, effizienter betrieben werden (vgl. auch Abschn. 1.4).

Klimaschutzziele im Gebäudesektor

Aufgrund des aktuell von fossilen Energieträgern (Öl und Gas) dominierten Energiemixes wurden im Jahr 2018 durch die gebäuderelevanten Endenergieverbräuche für die Bereitstellung von Raumwärme, Warmwasser und Kühlung insgesamt 158 Mio. t CO₂ emittiert (BMW, 2020a), was 18,5 % der deutschen Gesamtemissionen (856 Mio. t CO₂-Äquivalente) darstellte (UBA, 2021b).

Im Jahr 2021 lag der Anteil der CO₂-Emissionen des Gebäudesektors an den deutschen Gesamtemissionen bei 15 % (BMWSB – Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023).

Im Kontext des globalen Klimaschutzes sah der deutsche „Klimaschutzplan 2050“ (BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2016) bisher vor, die landesweiten Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 um 80 % – 95 % im Vergleich zu 1990 zu senken. Es wurden zudem Zwischenziele für die Sektoren Energie, Gebäude, Verkehr, Industrie und Landwirtschaft vorgegeben und anschließend im „Bundes-Klimaschutzgesetz“ festgeschrieben (Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG), o. J.).

Aufgrund eines Urteils des Bundesverfassungsgerichts (BVerfG – Bundesverfassungsgericht, 2021) musste das Klimaschutzgesetz (Deutscher Bundestag, 2021) jedoch angepasst werden, und das nationale Klimaschutzziel wurde auf das Erreichen von „Netto-Treibhausgasneutralität“ (97 % weniger Emissionen und Aufnahme der Restemissionen in Senken) im Jahr 2045 angehoben. Auch die Sektor-Zwischenziele werden in diesem Rahmen verschärft. Für den Gebäudesektor wird eine Minderung der Emissionen auf 67 Mio. t CO₂-Äquivalente im Jahr 2030 vorgesehen.

Schon zur Erreichung der ursprünglichen Klimaschutzziele der Bundesregierung (BMW und BMU, 2010), wurde im „Klimaschutzplan 2050“ (BMU, 2016) bereits ein zumindest „nahezu klima-neutraler“ Gebäudebestand mit einem „sehr geringen“ Energiebedarf, der dann mittels „hoher Anteile“ erneuerbarer Energien versorgt werden soll, angestrebt. Laut „Klimaschutzprogramm 2030“ (Bundesregierung, 2019) sollten hierzu zum einen der energetische Standard bei Neubauten weiter angehoben und zum anderen mehr finanzielle Anreize für die noch intensivere energetische Sanierung von Bestandsgebäuden und für den Wechsel zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen in der Wärmeversorgung geschaffen werden. Dies wird auch in einer aktuellen Publikation des Umweltbundesamts (Rother et al., 2020) weiterhin gefordert.

Demgegenüber stehen Argumente der Bauforschung (Walberg und Gniechwitz, 2019) und der Wohnungswirtschaft (Michalski et al., 2021), die in den vergangenen zwanzig Jahren im Neubau eine zu starke Steigerung der Baukosten aufgrund der Vorgaben bzgl. energetischer Standards sehen. Für den gegenwärtigen Gebäudebestand werden zudem unverhältnismäßig hohe Kosten für intensivere energetische Sanierungen im Vergleich zu den damit erreichbaren CO₂-Einsparungen angemahnt. Dies würde letztendlich zu einem Anstieg der Mieten führen. Laut einer Stellungnahme der Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen (Walberg, 2021) zur „Bauwende“ sollte der Fokus im Gebäudebestand daher anstatt auf der intensiven energetischen Sanierung von Einzelgebäuden eher auf einer verhältnismäßig moderaten Sanierung ganzer Quartiere bei gleichzeitig vollständiger Deckung des dort verbleibenden höheren Wärmebedarfs zum Heizen und Kühlen aus erneuerbaren Energiequellen (wenn möglich über Quartiers- oder Nahwärmenetze) liegen. Durch eine solche Betrachtungsweise eingesparte Mittel für nicht durchgeführte thermische Sanierungen zur Erreichung sehr hoher energetischer Standards könnten z. B. in die oberflächennahe Geothermie und/oder in oberflächennahe Wärmespeicher investiert werden und so ggf. höhere CO₂-Einsparungen erreichen. Diese notwendigerweise gesamtsystemische Betrachtung konnte aufgrund ihres Umfangs nicht Teil dieser Studie sein.

Im „Integrierten Nationalen Energie- und Klimaplan“ (NECP) (BMW, 2020b), den die deutsche Bundesregierung der EU vorlegte, wird für das Jahr 2025 eine Deckung von 20,5 % und für das Jahr 2030 von 27 % des Wärmebedarfs aus erneuerbaren Energiequellen angestrebt. Als Teil dessen soll der Anteil erneuerbarer Energien in Wärmenetzen auf 30 % im Jahr 2030 steigen.

Der zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Studie aktuelle „Monitoring-Bericht zur Energiewende“ (BMWi, 2021) zeigt, dass das Zwischenziel einer Reduktion des Wärmebedarfs (Heizen und Kühlen) im Gebäudebereich um 20 % aus dem ursprünglichen „Energiekonzept“ (BMWi und BMU, 2010) mit einem bisherigen Rückgang von nur 10,9 % (Stand 2019) deutlich verfehlt wurde. Auch der bundesweite Anteil der erneuerbaren Energien an der Wärmebedarfsdeckung erreichte nur knapp die für 2020 avisierten 14 % erfüllen (Stand 2019: 14,7 %) und basierte dabei überwiegend auf der Verbrennung fester Biomasse.

1.1.2 Szenarien zum zukünftigen Wärmebedarf (Heizen und Kühlen) und Technologiemix zur Wärmeversorgung des Gebäudebestands

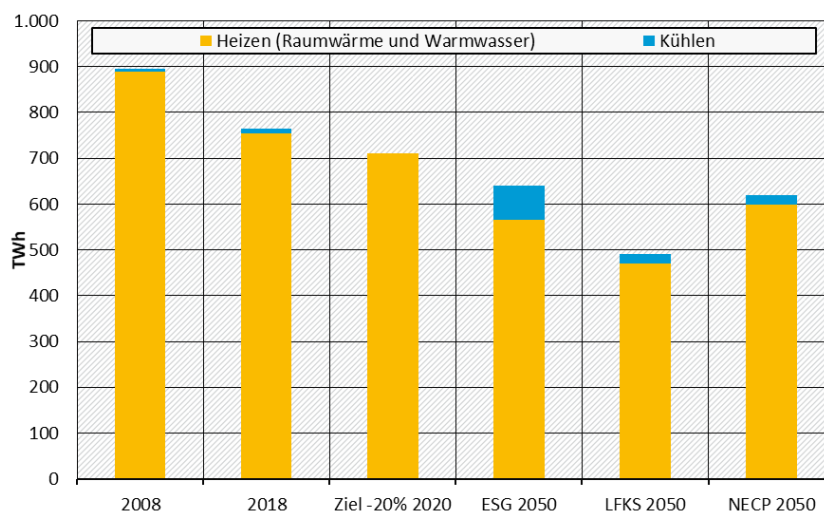
In den gesichteten **Referenzszenarien** (s. o. oder Tab. 1.1 und Abb. 1.1), welche abbilden, wie sich das Energiesystem und der daraus resultierende Wärmebedarf zum Heizen und Kühlen des Gebäudebestands bei einem „Weiter-wie-bisher“ entwickeln könnten, werden die oben genannten Einflussfaktoren wie folgt berücksichtigt, und es ergeben sich die folgenden Wärmebedarfe.

Tabelle 1.1: Annahmen zum zukünftigen Gebäudebestand in den gesichteten Referenzszenarien

Referenzszenario	Bevölkerung 2050 [Mio.]	Wohnfläche 2050 [m ²]	Sanierungs-raten [%/a]	Klimawandel-Effekt	Weiteres
ESG	74,1	4,0 Mrd.	1,1 bis 1,2	berücksichtigt	bis 2050 steigende Öl-, Gas- und CO ₂ -Preise
LFKS	74,0	4,8 Mrd.	0,8 bis 2,2	-	bis 2050 steigende Öl-, Gas- und CO ₂ -Preise
NECP	79,0	4,3 Mrd.	1,1 bis 1,4	berücksichtigt	bis 2050 steigende Öl-, Gas- und CO ₂ -Preise

Quelle: Referenzszenarien aus „Energieeffizienzstrategie Gebäude“ (ESG) (BMWi, 2015), „Langfrist- und Klimaszenarien“ (LFKS) (Pfluger et al., 2017b), „Integrierter Nationaler Energie- und Klimaplan“ (NECP) (BMWi, 2020b).

Abbildung 1.1: Historischer und aktueller Wärmebedarf (Heizen und Kühlen) des Gebäudebestands sowie Klimaschutzziel für 2020 und zukünftiger Wärmebedarf im Jahr 2050 laut den gesichteten Referenzszenarien



Der Wert zum Kühlen im Referenzszenario der ESG enthält den Elektrizitätsbedarf für Lüftung und Haustechnik.

Quelle: Referenzszenarien aus „Energieeffizienzstrategie Gebäude“ (ESG) (BMWi, 2015), „Langfrist- und Klimaszenarien“ (LFKS) (Pfluger et al., 2017b), „Integrierter Nationaler Energie- und Klimaplan“ (NECP) (BMWi, 2020b).

Die erneuerbare Wärmeversorgung mittels Biomasse, Solarthermie und aus Umweltwärmequellen erreicht in den Referenzszenarien im Jahr 2050 Anteile von 45 % (BMWi, 2015) bzw. nur 27 % (Pfluger et al., 2017b). Der verbleibende Anteil am Wärmebedarf (Heizen und Kühlen) wird in diesen Szenarien weiterhin mit fossilen Energieträgern (Heizöl und Erdgas) und mittels Elektrizität gedeckt.

Zwischenfazit 1.1 (I)

Der **Wärmebedarf des Gebäudebestands** für Raumwärme und die Warmwasserbereitstellung betrug in Deutschland im Jahr 2018 rund 754 TWh, der Bedarf zum Kühlen 10 TWh. Der Gebäudesektor trägt mit seinem Energiebedarf aufgrund der aktuell fossil dominierten Energieversorgung mit rund 15 % – 19 % zu den gesamten Treibhausgasemissionen bei. Aus Klimaschutzgründen soll der zukünftige Wärmebedarf des Gebäudebestands gesenkt und der verbleibende Bedarf mittels erneuerbarer Energiequellen versorgt werden, um zur Klimaneutralität des Energiesystems beizutragen.

Die gesichteten **Referenzszenarien** zeigen bei einem energiepolitischen „Weiter-wie-bisher“ für das Jahr 2050 zwar einen geringeren Wärmebedarf des Gebäudesektors zum Heizen von Räumen und für die Warmwasserbereitung in Höhe von 598 – 470 TWh, gleichzeitig aber auch einen auf 21 – 75 TWh steigenden Energiebedarf zur Kühlung von Gebäuden. Bei Betrachtung des gesamten Energiesystems mit allen Sektoren werden selbst die inzwischen veralteten Klimaschutzziele (80 % – 95 % Reduktion der Treibhausgasemissionen) in diesen Szenarien nicht erreicht, da weiterhin ein Großteil des Wärmebedarfs aus nicht-erneuerbaren Energiequellen gedeckt wird.

Die gesichteten **Zielszenarien** erreichen definitionsgemäß die jeweils politisch definierten Klimaschutzziele. In den Energiesystemmodellen werden dafür notwendige Maßnahmen und Technologien zur weiteren Steigerung der Energieeffizienz im Gebäudesektor oder zur stärkeren

Nutzung von erneuerbaren Energiequellen zur Wärmebereitstellung bei gleichzeitiger Minimierung der volkswirtschaftlichen Kosten abgebildet. Die Zielszenarien stellen so mögliche Lösungsräume für das Erreichen der Klimaschutzziele dar, allerdings ohne alle Technologien bzw. Technologiekombinationen (wie z. B. saisonale Wärmespeicher) zu betrachten. Methodisch stellt dieser Umstand ein gewisses Problem dar, da so bisher nicht berücksichtigte Technologien quasi nur im Hinblick auf den Residualwärmebedarf bewertet werden können. Im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit und auch Sinnhaftigkeit des Einsatzes kann dies zu irreführenden und/oder nicht belastbaren Ergebnisse führen. So kann z. B. die Effektivität und Effizienz von Solarthermianlagen eng durch die Leistungsdaten gekoppelter saisonaler Wärmespeicher kontrolliert sein, die in den gesichteten Zielszenarien jedoch nicht betrachtet wurden. Aus Kapazitätsgründen konnten solche Betrachtungen jedoch nicht im Rahmen der vorliegenden Studie durchgeführt werden. Die nachfolgenden Darstellungen geben also „nur“ den Rahmen der bisherigen Transformationspfade der Wärmeversorgung zur Einordnung der potenziellen zukünftigen Bedeutung von oGT und/oder UTES-Anlagen wieder.

Danach werden zum Beispiel in der „Energieeffizienzstrategie Gebäude“ (BMWi, 2015) die zwei Zielszenarien **„Effizienz“** und **„Erneuerbare Energien“** dargestellt, die überwiegend die gleichen Rahmenbedingungen wie das Referenzszenario der Studie aufweisen (Tab. 1.2). Es wurde jedoch abweichend angenommen, dass im Gebäudebestand sowohl mehr als auch effizienter (bezogen auf den verbleibenden Wärmeverbrauch pro m²) energetisch saniert wird. Es ergibt sich so im Zielszenario „Erneuerbare Energien“ für das Jahr 2050 ein noch verbleibender Wärmebedarf von 524 TWh, während im Zielszenario „Effizienz“ nur noch 365 TWh Wärme benötigt werden (Abb. 1.2). Gleichzeitig steigt der Kühlbedarf bis 2050 auf 54 TWh im Zielszenario „Effizienz“ und auf 70 TWh im Szenario „Erneuerbare Energien“.

Dieser 2050 noch verbleibende gebäuderelevante Gesamtenergiebedarf kann im Zielszenario „Erneuerbare Energien“ zu 50 % aus erneuerbaren Energiequellen (Biomasse, Solarthermie, Umweltwärmequellen) gedeckt werden. Im Zielszenario „Effizienz“ sind es hingegen nur 33 %. Unter der zusätzlichen, sehr pauschalen Annahme einer Dekarbonisierung der Elektrizitäts- und Fernwärmeerzeugung würden sich die CO₂-Emissionen des Gebäudesektors dadurch um 81 % („Effizienz“) bzw. 82 % („Erneuerbare Energien“) verringern. Da der Gebäudesektor in der ESG jedoch nicht im Kontext des gesamten Energiesystems betrachtet wurde, wird dort keine Aussage zur Erreichung der übergeordneten, alle Sektoren umfassenden nationalen Klimaschutzziele (80 % – 95 % CO₂-Emissionsreduktion laut „Klimaschutzplan 2050“) gemacht.

Die zwei Zielszenarien **„Dämmung 11 cm“** und **„Dämmung 17 cm“** aus Gerhardt et al. (2015) hingegen haben jeweils explizit den Rückgang der gesamten nationalen Treibhausgasemissionen um 80 % bis 2050 zum Ziel. Dies wurde unter der Bedingung der kostenoptimierten Interaktion zwischen den Sektoren Wärme, Elektrizität und Verkehr im deutschen Energiesystem im Kontext des europäischen Gesamtenergiesystems modelliert. Die Zielszenarien unterscheiden sich in den angenommenen Dämmstärken für Außenwände und Dächer sowie der Wärmeschutzverglasung.

Tabelle 1.2: Annahmen zum zukünftigen Gebäudebestand in den gesichteten Zielszenarien

Zielszenario	Ziel [CO ₂ -Äqu.]	Bevölkerung 2050 [Mio.]	Wohnfläche 2050 [m ²]	Sanierungsrate [%/a]	Klimawandel- Effekt
„Effizienz“	-	74,1	4,0 Mrd.	2,0	berücksichtigt
„Erneuerbare Energien“	-	74,1	4,0 Mrd.	1,3 für EFH 1,5 für MFH	berücksichtigt
„Dämmung 11 cm“	-80 %	74,5	3,5 Mrd.	2,0	berücksichtigt
„Dämmung 17 cm“	-80 %	74,5	3,5 Mrd.	2,0	berücksichtigt
„Basisszenario“	-80 %	74,0	4,8 Mrd.	1,6 – 3,5 je Gebäudetyp	-
„Sensitivität 1 & 2“	-83 %	73,0	4,1 Mrd.	abhängig vom Sanierungsniveau	berücksichtigt
„Green Ee2“	-95 %	71,9	3,55 Mrd.	2,6	berücksichtigt
„Green Supreme“	-95 %	71,9	2,96 Mrd.	2,8	berücksichtigt

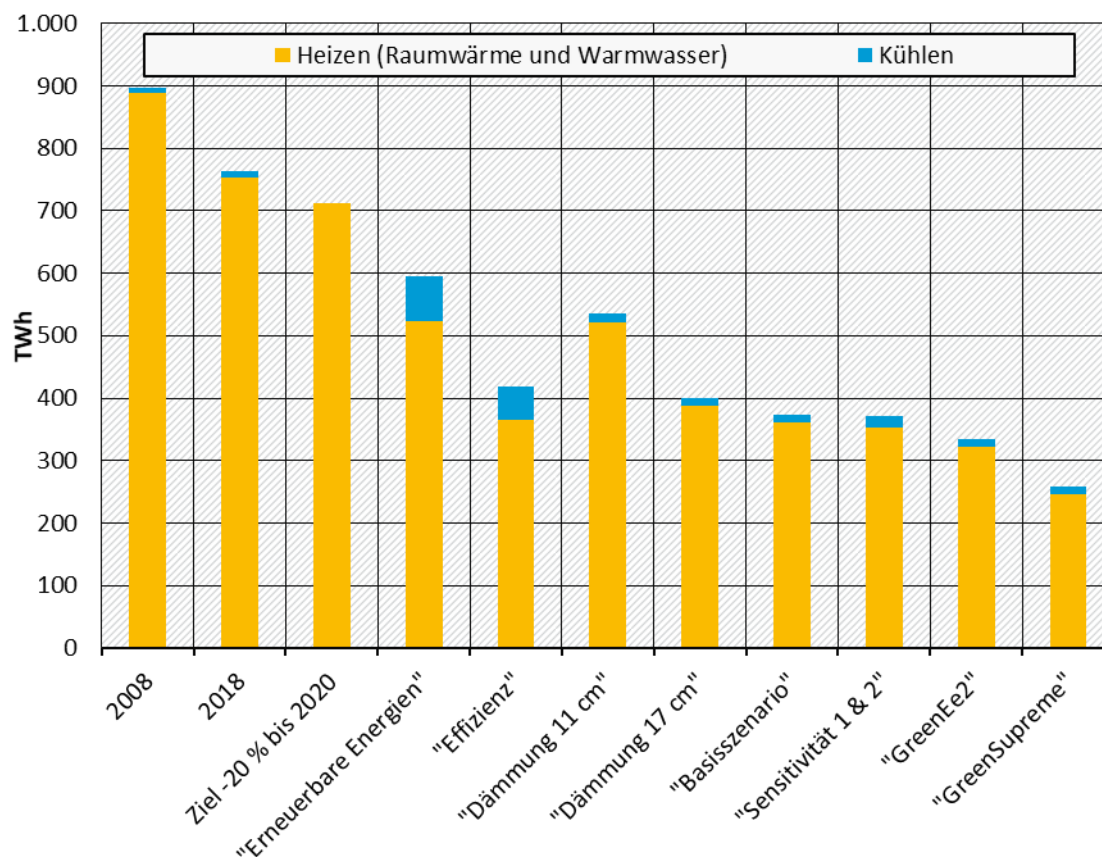
Quelle: Zielszenarien „Effizienz“ und „Erneuerbare Energien“ aus der „Energieeffizienzstrategie Gebäude“ (BMWi, 2015), „Dämmung 11 cm“ und „Dämmung 17 cm“ aus „Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr“ (Gerhardt et al., 2015), „Basisszenario“ aus den „Langfrist- und Klimaszenarien“ (LFKS) (Pfluger et al., 2017b), „Sensitivität 1 & 2“ aus „Klimaneutraler Gebäudebestand“ (Bürger et al., 2017), „GreenEe2“ und „Green Supreme“ aus der „RESCUE-Studie“ (Purr et al., 2019).

In den „Langfrist- und Klimaszenarien“ (LFKS) (Pfluger et al., 2017b) entspricht das sogenannte **„Basisszenario“** einem Zielszenario. Die nationalen Treibhausgasemissionen werden auch hier bis 2050 um 80 % gesenkt. In diesem Zielszenario werden zwar wie in den anderen Studien Annahmen zur Entwicklung der Bevölkerung, der Wohnfläche und den Sanierungsraten getroffen (Tab. 1.1), direkte Auswirkungen des Klimawandels werden hier jedoch nicht berücksichtigt.

Die Studie des Umweltbundesamts zum „klimaneutralen Gebäudebestand“ (Bürger et al., 2017) hingegen nimmt explizit zwei Einflüsse des Klimawandels (Anstieg von Außentemperatur und solarer Einstrahlung) als Sensitivität für die weitere Entwicklung des Wärme- und Kältebedarfs bis 2050 in den Fokus. Eine zweite untersuchte Sensitivität stellt die Nutzung effizienterer Elektrogeräte mit weniger Abwärme in Gebäuden dar. Diese beiden Sensitivitäten werden im Zielszenario **„Sensitivität 1 & 2“** kombiniert betrachtet.

In einer weiteren Studie des Umweltbundesamts (Purr et al., 2019) wurde im Kontext des europäischen Gesamtenergiesystems und unter Berücksichtigung einer Kostenminimierung die mögliche Entwicklung des gesamten deutschen Energiesystems modelliert. Im Zielszenario **„Green Ee2“** sinkt der Wärmebedarf durch die kurzfristigere Nutzung aller Energieeffizienzpotenziale des Gebäudesektors auf nur noch 323 TWh im Jahr 2050. Im noch ambitionierteren Zielszenario **„Green Supreme“**, in dem neben Energie- und Materialeffizienz auch ein früherer Ausstieg aus der Kohleverstromung sowie umfassende Lebensstiländerungen in der Bevölkerung einen Einfluss haben, verbleibt ein Wärmebedarf von sogar nur noch 247 TWh.

Abbildung 1.2: Historischer und aktueller Wärmebedarf (Heizen und Kühlen) des Gebäudebestands sowie Klimaschutzziel für 2020 und zukünftiger Wärmebedarf im Jahr 2050 laut den gesichteten Zielszenarien



Wert zum Heizen in Zielszenario „Sensitivität 1 & 2“ entspricht Endenergiebedarf inkl. Lüftung und Beleuchtung. Wert zur Kühlung in Zielszenario „Erneuerbare Energien“ und „Effizienz“ inkl. Elektrizitätsbedarf für Lüftung und Haustechnik. Quelle: Zielszenarien „Erneuerbare Energien“ und „Effizienz“ aus der „Energieeffizienzstrategie Gebäude“ (BMW, 2015), „Dämmung 11 cm“ und „Dämmung 17 cm“ aus „Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr“ (Gerhardt et al., 2015), „Basisszenario“ aus den „Langfrist- und Klimaszenarien“ (LFKS) (Pfluger et al., 2017b), „Sensitivität 1 & 2“ aus „Klimaneutraler Gebäudebestand“ (Bürger et al., 2017), „Green Ee2“ und „Green Supreme“ aus der „RESCUE-Studie“ (Purr et al., 2019).

Zusätzlich zur Annahme eines sehr ambitionierten Emissionsreduktionsziels (-95 %) wurden in den Szenarien „**Green Ee2**“ und „**Green Supreme**“ zusätzliche Aspekte aufgegriffen:

- ▶ die vollständig erneuerbare Bereitstellung des 2050 noch verbleibenden Energiebedarfs aller Sektoren ohne die energetische Nutzung von Anbaubiomasse und ohne CO₂-Speicherung im Industriesektor sowie
- ▶ die Minimierung des Ressourcenverbrauchs (Sand, Kies, Holz, Metallerze, Minerale und Fläche) bei den notwendigen Sanierungs- und Baumaßnahmen für einen „klimaneutralen Gebäudebestand“.

Im Gebäudesektor wurden dabei in den Zielszenarien neben den notwendigen Annahmen zur Bevölkerungs- und Wohnflächenentwicklung sowie zu den Sanierungsraten (Tab. 1.2) auch erhöhte Anteile von Mehrfamilienhäusern und Holzbauten im Neubau, die Nutzung alternativer

Dämmstoffe sowie ein minimierter Flächenverbrauch durch eine geringere Ausweisung von Neubaugebieten berücksichtigt.

In allen Zielszenarien der UBA-Studie wird gleichzeitig davon ausgegangen, dass der Kühlbedarf zur Klimatisierung von Gebäuden trotz eines im Gebäudemodell hinterlegten Anstiegs der durchschnittlichen Außentemperatur um 1 °C bis 2050 aufgrund der Nutzung von effizienteren Haushaltsgeräten, die weniger Abwärme erzeugen, und aufgrund effizienterer Klimaanlage sowie natürlicher Lüftungs- und Kühlsysteme annähernd auf heutigem Niveau (11 TWh) verbleibt.

In Folge der inzwischen weiter verschärften nationalen Klimaschutzziele beleuchten aktuelle Zielszenarien die Möglichkeiten zur Erreichung von „**Klimaneutralität**“ in allen Sektoren im Jahr 2050 (Dambeck et al., 2020) bzw. bereits 2045 (Dambeck et al., 2021). Tatsächlich wird in diesen Zielszenarien jedoch auch nur eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 95 % erreicht. Die überwiegend in den Sektoren „Landwirtschaft“ und „Industrie“ verbleibenden Treibhausgasemissionen müssten dann mittels CO₂-Speicherung in geeigneten geologischen Formationen oder in anderen Senken kompensiert werden.

Zwischenfazit 1.1 (II)

Bezüglich der Auswertung der **Zielszenarien** ergibt sich die methodische Problemstellung, dass insbesondere UTES-Anlagen als Technologie bisher in systemischen Untersuchungen nicht berücksichtigt worden sind. Im Rahmen dieser Studie konnte nicht überprüft werden, ob und gegebenenfalls welche Auswirkungen die Nichtberücksichtigung dieser Technologie auf die favorisierten Transformationspfade bzw. die Residualwärmebedarfe hat.

Unter dieser Prämisse ergeben die Zielszenarien für das Jahr 2050 einen insgesamt deutlich geringeren Wärmebedarf für Raumwärme und Warmwasser im zukünftigen Gebäudebestand in Höhe von nur noch 524 – 247 TWh (-31 % – -67 % im Vergleich zum Wärmebedarf im Jahr 2018) bei jeweils unterschiedlichen Annahmen bzgl. der zukünftigen Rahmenbedingungen und bei Erreichen unterschiedlich ambitionierter Klimaschutzziele (-80 % – -95 % Treibhausgasemissionen), die jedoch den aktuellen Klimaschutz-Zielvorgaben („Klimaneutralität“) nicht mehr genügen.

Für den Endenergiebedarf zur Kühlung zeigt sich in den Zielszenarien abhängig von den getroffenen Annahmen, dass er, überwiegend in Form von Elektrizität, auf heutigem Niveau verbleiben (2018: 10 TWh) oder auf 13 – 70 TWh (inkl. Bedarf für Lüftung) ansteigen könnte (+30 – +600 %).

Den größten Einfluss auf die Ausprägung des zukünftigen Wärmebedarfs (Heizen und Kühlen) zeigt dabei in den Zielszenarien der Faktor „energetische Sanierung von Bestandsgebäuden“. Allerdings erscheint die Diskussion zur Effizienz von Energieeffizienzstandards im Neubau und Sanierungsmaßnahmen im Bestand sowohl im Hinblick auf die Kosten als auch im Hinblick auf die real erzielbare CO₂-Emissionsreduktion bei der Nutzung der Gebäude nicht abgeschlossen.

Neben der reinen Senkung des Wärmedarfs zum Heizen und Kühlen durch Effizienzmaßnahmen ist jedoch zusätzlich auch **eine vollständige Versorgung des verbleibenden Wärmebedarfs (Heizen und Kühlen) aus erneuerbaren Energiequellen notwendig**, um das inzwischen angestrebte Klimaschutzziel „Klimaneutralität im Jahr 2045“ überhaupt erreichen zu können.

Wärmepumpen wird bei der Deckung des zukünftigen noch verbleibenden Wärmebedarfs zum Heizen und Kühlen von Gebäuden bei gleichzeitiger Einhaltung der nationalen Klimaschutzziele laut den gesichteten Zielszenarien (Tab. 1.2, Abb. 1.2) und auch in Zielszenarien weiterer Studien (Hecking et al., 2017; Gerhardt et al., 2017; Gerbert et al., 2018; Robinius et al., 2019)

insbesondere bei der dezentralen Versorgung von Einzelgebäuden eine wichtige bis dominierende Rolle zugesprochen (Tab. 1.3).

Diese partielle Elektrifizierung der Wärmeversorgung als Teil der Sektorenkopplung (Ausfelder et al., 2017) in Kombination mit der Nutzung von Umweltwärmequellen zum Entzug von Wärme (aus Luft, Oberflächengewässern, Boden und Grundwasser, aber **nicht** aus UTES-Anlagen) stellt bei den erwarteten politischen und ökonomischen Rahmenbedingungen meist die effizienteste und systemkostenoptimale Lösung dar (Gerhardt, Sandau, et al., 2017; Lohse und Wagener-Lohse, 2018).

Der nicht mittels Wärmepumpen gedeckte Anteil des zukünftigen Wärmebedarfs (Heizen und Kühlen) wird in den gesichteten Zielszenarien aus anderen regenerativen Wärmequellen (meist Biomasse, weniger Solarthermie oder tiefe Geothermie, zum Teil Verbrennung synthetischer Gase aus erneuerbarer Elektrizität, Abfallverbrennung und Nutzung nicht vermeidbarer Abwärme), aber auch weiterhin mittels fossiler Energieträger (Heizöl, Erdgas) gedeckt, wobei zum Teil sehr pauschal eine komplette „Dekarbonisierung“ der Fernwärme angenommen wird (BMW, 2015); Pfluger et al., 2017b; Purrr et al., 2019).

Tabelle 1.3: Wärmebereitstellung, Anteil am Wärmebedarf des zukünftigen Gebäudebestands, Umweltwärmebedarf, JAZ und Elektrizitätsbedarf von Wärmepumpen im Jahr 2050 laut den gesichteten Zielszenarien

Zielszenario	Wärmebereitstellung durch WP [TWh]	Anteil von WP am Wärmebedarf [%]	Umweltwärmebedarf für WP [TWh]	JAZ von WP [-]	Elektrizitätsbedarf für WP [TWh]
„Effizienz“	51	14	41	5,1	10
„Erneuerbare Energien“	118	23	94	4,9	24
„Basisszenario“	88	24	60	3,1	28
„Green Supreme“	184	75	138 – 143	4,0 – 4,5	41 – 46
„Green Ee2“	226	79	169 – 176	4,0 – 4,5	50 – 57

WP: Wärmepumpen.

Quelle: Zielszenarien „Effizienz“ und „Erneuerbare Energien“ aus der „Energieeffizienzstrategie Gebäude“ (BMW, 2015), „Basisszenario“ aus den „Langfrist- und Klimaszenarien“ (Pfluger et al., 2017b), „Green Ee2“ und „Green Supreme“ aus der „RESCUE-Studie“ (Purrr et al., 2019).

Durch eine gesteigerte und effizientere Nutzung von Umweltwärme mittels Wärmepumpen könnte neben dem Ersatz von Heizöl und Erdgas auch die Nutzung von Biomasse in der Wärmeversorgung des Gebäudesektors reduziert werden. Diese Ressourcen könnten dann vorzugsweise eher zur Prozesswärmeerzeugung im Industriesektor verwendet werden, um die Klimaschutzziele in allen Sektoren erreichen zu können (Purrr et al., 2019).

Voraussetzungen zum effizienten Einsatz von Wärmepumpen

Als Voraussetzungen für den effizienten und ressourcenschonenden Einsatz von Wärmepumpen bei gleichzeitiger Erreichung der sektorübergreifenden Klimaschutzziele werden i. d. R. folgende Kriterien genannt:

- ▶ CO₂-freie oder zumindest emissionsarme Elektrizitätserzeugung aus erneuerbaren Energiequellen (Engelmann et al., 2021) zur Deckung des zusätzlichen Elektrizitätsbedarfs von Wärmepumpen (Tab. 1.3),
- ▶ Senkung des Wärmebedarfs durch energetische Sanierungsmaßnahmen insbesondere für Bestandsgebäude (Gerhardt et al., 2017), um den zusätzlichen Elektrizitätsbedarf durch Wärmepumpen möglichst gering zu halten,
- ▶ Absenkung der Vorlauftemperatur in den Heizungsanlagen im Bestand (Lohse und Schuberth, 2018; Lohse und Schuberth, 2019), um einen möglichst geringen Temperaturunterschied zwischen den relativ kühlen Umweltwärmequellen und den Wärmesenken zu erreichen.

So sind in thermisch unsanierten Bestandsgebäuden die vorhandenen Heizungsanlagen im Gegensatz zum Neubau noch überwiegend auf Vorlauftemperaturen von > 65 °C ausgelegt (Gerhardt et al., 2015; Palzer, 2016), im Altbau von vor 1978 sogar noch auf 70 – 90 °C (Jochum et al., 2017).

Um dies zu erreichen, ist i. d. R. ein kostenintensiver Austausch der Wärmeübertragungstechnik, nämlich den Ersatz alter Heizkörper (Radiatoren) durch Niedertemperatur-Radiatoren (Gerhardt et al., 2017) oder Flächenheizungen mit Vorlauftemperaturen von weniger als 45 °C notwendig.

Die genannten Kriterien verdeutlichen, warum neben der Sanierungsrate auch die Sanierungstiefe für das Ausbaupotenzial und die Effizienz von Wärmepumpen wichtig ist. Durch effektive thermische Sanierungsmaßnahmen an Fenstern, Dach und Außenwand kann neben einem reduzierten spezifischen Wärmebedarf (kWh/m²) auch eine Reduktion der notwendigen Vorlauftemperatur in der Heizungsanlage zur Raumheizung erreicht werden (Gerhardt et al., 2015; Gerhardt et al., 2017).

Kaum diskutiert wird bisher die potentielle Alternative, dass die Temperatur der Wärmequelle für die Wärmepumpe erhöht werden könnte, wenn entsprechende saisonale Wärmespeichersysteme (z. B. UTES-Systeme) genutzt würden. Im Gegensatz zu den bisher meist allein betrachteten Umweltwärmequellen (z. B. Außenluft, oberflächennahes „Erdreich“, Eisspeicher), die ein nur bedingt zu beeinflussendes und im Durchschnitt recht konstantes Temperaturniveau aufweisen, können mit solchen Systemen bei ähnlichen Jahresarbeitszahlen Vorlauftemperaturen von > 65 °C erreicht werden (vgl. Kap. 2).

Die Bedeutung geothermisch betriebener Wärmepumpen in Zielszenarien

Ein Vergleich von Zielszenarien durch Gerhardt et al. (2017) zeigte, dass bereits im Jahr 2030 ein Mindestbestand von etwa 6 – 8 Mio. Wärmepumpen in Deutschland notwendig sein könnte, um eine 95%ige Reduktion der nationalen Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 erreichen zu können.

Geothermische Wärmepumpen zum Entzug von Wärme nehmen in allen dort verglichenen Zielszenarien eine wichtige Rolle ein. Insgesamt müssten im Jahr 2050 laut der dort verglichenen Zielszenarien schließlich 10 – 17 Mio. überwiegend geothermisch betriebene Wärmepumpen ca. 35 % – 65 % des verbleibenden Endenergiebedarfs für Raumwärme und Warmwasser bereitstellen.

Es wird jedoch auch auf die aktuell vorhandenen (und je nach Bundesland variierenden) genehmigungsrechtlichen Hürden für die notwendigen Bohrungen hingewiesen, die das Ausbaupotenzial für geothermische Wärmepumpen-Anlagen aus Sicht der Autoren „unnötig einschränken“ (vgl. Abschn. 1.6 zum Thema „Restriktionszonen“).

In einer weiteren Studie (Hecking et al., 2017) wurde ebenfalls aufgezeigt, dass in Zielszenarien mit einem hohen Elektrifizierungsgrad im Wärmesektor und mit Elektrizität aus überwiegend erneuerbaren Energiequellen im Jahr 2050 bis zu 17 Mio. Wärmepumpen in Deutschland zum Einsatz kommen könnten. In Szenarien mit einem breiteren Technologiemix und mit einer geringeren Rückkopplung auf den Elektrizitätssektor würden 2050 immer noch rund 6,5 Mio. Wärmepumpen benötigt werden. Dabei könnten geothermische Wärmepumpen-Anlagen je nach betrachtetem Zielszenario in den dann effizienteren Bestandswohngebäuden einen Technologieanteil von 12 % – 19 % bei Ein- und Zweifamilienhäusern und von 6 % – 12 % in Mehrfamilienhäusern darstellen. Im Neubau von Ein- und Zweifamilienhäusern könnte der Anteil derartiger geothermischer Wärmepumpen im Jahr 2050 sogar 20 % – 25 % erreichen.

In Jochum et al. (2017) erreicht die Summe der durch Wärmepumpen bereitgestellten Endenergie in Gebäuden je nach Szenario 122 – 143 TWh. Geothermisch betriebenen Wärmepumpen würden jedoch nur 17 % der dann neu installierten Wärmepumpen darstellen, obwohl in der GIS-basierten Potenzial-Analyse der Studie von einer zukünftigen Entwicklung der JAZ von EWS-Anlagen zwischen 4,77 und 4,96 im Jahr 2030 und zwischen 5,64 und 6,05 im Jahr 2050 und hohen Ausbaupotenzialen zur Deckung von 50 % – 77 % des verbleibenden Wärmebedarfs einzelner Bundesländer im Jahr 2050 ausgegangen wird.

Auch laut Szenario-Analysen zur Sektorenkopplung (Ausfelder et al., 2017) dominieren in fast allen Zielszenarien (Treibhausgasminderungsziele von -60 % – -90 %) Luft-Wärmepumpen, außer im Szenario mit dem Ziel einer Minderung der Emissionen um 90 %, wo sogenannte „Erdreich“-Wärmepumpen den Wärmepumpenanteil an der Wärmeversorgung dominieren.

Gerhardt et al. (2017) stellen fest, dass je nach Annahmen im Zielszenario und aufgrund der im jeweils genutzten Energiesystemmodell implementierten Effizienz (als JAZ), Kosten oder dem Zeitpunkt des maximalen Elektrizitätsbedarfs im Winter entweder den Luft-Wärmepumpen oder den geothermisch betriebenen Wärmepumpen der Vorzug bei der energiesystemdienlichen Bereitstellung von Wärme zur Deckung des 2050 noch verbleibenden Wärmebedarfs des Gebäudebestands gegeben wird.

Annahmen zu zukünftigen JAZ und Investitionskosten unterschiedlicher Wärmepumpen-Technologien, die in den jeweils genutzten Energiesystemmodellen implementiert wurden, wirken sich also erheblich auf die daraus abgeleiteten Aussagen zur zukünftigen Bedeutung geothermischer Wärmepumpen aus.

In Gils et al. (2018) wurden daher die häufig genutzten Energiesystemmodelle „REMod-D“ des Fraunhofer ISE und „SCOPE“ des Fraunhofer IEE diesbezüglich einander gegenübergestellt. Bei gleichen Eingangsdaten und Randbedingungen wurde der jeweils für 2030 und 2050 modellierte Technologiemix zur Wärmeerzeugung verglichen.

Im Zielszenario mit einer Emissionsreduktion um 80 % bis 2050 zeigte sich in beiden Modellen die zukünftige Bedeutung von Wärmepumpen bei der Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser. Bei der installierten Leistung der eingesetzten Wärmepumpentechnologien unterscheiden sich die Ergebnisse der beiden Modelle jedoch deutlich (REMod-D: 125 GW_{th} davon 84 % Luft-Wärmepumpen; SCOPE: 150 GW_{th}, davon 83 % geothermische Wärmepumpen).

Dies begründet sich in den jeweils in den beiden Modellen hinterlegten Anlageneffizienzen und Investitionskosten. Im Modell „SCOPE“ werden die Investitionskosten für geothermische Wärmepumpen im Vergleich zu Luft-Wärmepumpen sowohl für das Jahr 2030 als auch für 2050 niedriger als im Modell „REMod-D“ eingeschätzt. Auch die in den beiden Modellen jeweils hinterlegten technologiespezifischen JAZ unterscheiden sich. So wird für das Jahr 2050 im Modell „REMod-D“ für geothermische Wärmepumpen eine JAZ von 3,78 angenommen, während das Modell „SCOPE“ für 2050 eine JAZ von 4,60 für derartige Systeme annimmt. Bei den Luft-Wärmepumpen ist der Unterschied in den JAZ für das Jahr 2050 zwischen den Modellen hingegen geringer (REMod-D: 3,42; SCOPE: 3,90). Dies hat in Kombination mit dem geringeren Investitionskostenunterschied zur Folge, dass in Szenarien, die mit dem Energiesystemmodell „SCOPE“ gerechnet werden, ein deutlich höherer Anteil geothermischer Wärmepumpen im Technologiemarkt zur Wärmebereitstellung für das Jahr 2050 modelliert wird.

In Sterchele et al. (2020) hingegen wurde das Modell „REMod-D“ genutzt, und es dominieren in den Zielszenarien Luft-Wärmepumpen, während die dort „Erdreich“-Wärmepumpen genannten geothermischen Anlagen jeweils weniger als 5 % an der zukünftigen Wärmeversorgung im Jahr 2050 darstellen. Dies liegt wahrscheinlich in den für 2050 angenommenen Investitionskosten begründet, die für Luft-Wärmepumpen mit 640 €/kWh hinterlegt sind, während für die EWS-Wärmepumpen 1.162 €/kWh angenommen werden (siehe Anlagen der Studie von Sterchele et al. (2020)). Im Unterschied zu den nach Umweltwärmequelle differenzierten Investitionskosten wird jedoch in der Studie eine durchschnittliche Jahresarbeitszahl von nur 3,4 für Wärmepumpen im Allgemeinen genannt, ohne dabei auf die Unterschiede von Außenluft- und geothermischen Wärmepumpen einzugehen.

Zwischenfazit 1.1 (III)

Wärmepumpen wird in Zielszenarien zur Klimaschutzzielkonformen Deckung des zukünftig geringeren Wärmebedarfs im überwiegend vollsanierten, energieeffizienten Gebäudebestand ein hoher Anteil am zukünftigen Technologiemarkt zugesprochen (6 – 17 Mio. Anlagen, 51 – 226 TWh Wärmebereitstellung bzw. 14 % – 79 % Deckung des verbleibenden Wärmebedarfs), insbesondere bei der dezentralen Wärmeversorgung von Einzelgebäuden.

Geothermische Wärmepumpen werden laut der betrachteten Zielszenarien im zukünftigen Energiesystem einen gewissen Anteil der Wärmeversorgung übernehmen, da sie im Vergleich zu anderen Wärmepumpen-Anlagen beim reinen Entzug von Wärme aktuell bereits höhere und damit bessere Jahresarbeitszahlen erreichen und somit einem geringeren zusätzlichen Elektrizitätsbedarf haben.

Annahmen zu zukünftigen Jahresarbeitszahlen und Investitionskosten der unterschiedlichen Wärmepumpen-Technologien, die in den Energiesystemmodellen implementiert wurden, wirken sich jedoch erheblich auf die daraus abgeleiteten Aussagen zum zukünftigen Anteil geothermischer Wärmepumpen-Anlagen am Technologiemarkt aus.

Der in den Zielszenarien erwartete Anstieg des Energiebedarfs zur Gebäudekühlung wird darin über den Einsatz von Klimaanlage gedeckt. Geothermische Wärmepumpen, die zur aktiven Kühlung eingesetzt werden können, oder auch geothermische Systeme zur passiven Kühlung von Gebäuden (vgl. Schüppler et al. (2019)) werden in den gesichteten Szenarien bzw. in den dort genutzten Energiesystemmodellen jedoch nicht berücksichtigt.

Insgesamt deuten die z. T. sehr unterschiedlichen Szenarien zum zukünftigen Marktanteil der jeweiligen Wärmepumpensysteme darauf hin, dass bei den Annahmen zu den prognose-sensitiven Parametern wie der JAZ, aber auch zu Kosten noch beträchtliche Unsicherheiten bestehen.

Problematisch ist, dass UTES-Systeme im Vergleich zu Luft- und/oder sogenannte „Erdreich“-Wärmepumpen bezogen auf gleiche Zieltemperaturen in den vorliegenden Studien kaum oder nicht berücksichtigt wurden.

Anzuregen ist nach der vorliegenden Literaturrecherche, auch Szenarien- und Sensitivitätsanalysen bzgl. der statistischen Belastbarkeit des jeweiligen Szenarios sowie Optimierungsanalysen im Hinblick auf Wirtschaftlichkeit und Klimaschutz von real zu erreichenden thermischen Gebäudedämmstandards und den jeweiligen Wärmepumpensystemen durchzuführen.

Ebenfalls hilfreich bis notwendig erscheint eine gesamtsystemische Betrachtung der Bedeutung und Wirkung unterschiedlicher Wärmepumpensysteme im Kontext zukünftig zu erwartender Wetterextreme, die zukünftige Wärmeversorgungssysteme aufgrund ihrer engen Kopplung mit dem regenerativen Elektrizitätsmarkt vor ernstzunehmende Herausforderungen stellen können.

Neben Wärmepumpen für die dezentrale Wärmeversorgung von Einzelgebäuden nehmen **Wärmenetze** bzw. die zentrale, leitungsgebundene Wärmeversorgung mehrerer Gebäude in Zielszenarien hohe Anteile an der Deckung des zukünftigen Wärmebedarfs ein.

Insbesondere in Städten und anderen Gebieten mit hohen Wärmebedarfsdichten (GWh/km^2) können Wärmenetze, welche dort zum Teil auch bereits vorhanden sind und zukünftig weiter ausgebaut bzw. nachverdichtet werden könnten, eine effizientere und ökonomisch sinnvollere Lösung als die Einzelgebäudeversorgung darstellen (Gerhardt et al., 2015).

In diesen städtischen Wärmenetzen könnten dann wiederum **zentrale Groß-Wärmepumpen**, die als Umweltwärmquelle auch die oberflächennahe Geothermie nutzen können, einen Anteil an der Wärmebereitstellung übernehmen (BMW, 2015; Bürger et al., 2017; Gerhardt et al., 2017; Purr et al., 2019). Denn wie auch bei der Elektrizitätserzeugung für den Betrieb dezentraler Wärmepumpen ist die klimaneutrale Bereitstellung der Wärme, die zukünftig in Wärmenetze eingespeist wird, entscheidend (z. B. aus tiefer Geothermie, Solarthermie, Abfallverbrennung und Abwärme aus Industrieprozessen oder aus der Verbrennung synthetisch erzeugter Gase), um die sektor-übergreifenden nationalen Klimaschutzziele erreichen zu können.

Laut dem Zielszenario der „Langfrist- und Klimaszenarien“ (Pfluger et al., 2017b) könnten über Fern- und Nahwärmenetze im Jahr 2050 insgesamt 81 TWh Wärme bereitgestellt und damit 22 % des in dem Szenario verbleibenden Wärmebedarfs des gesamten Gebäudebestands gedeckt werden, wobei 58 TWh davon in „urbanen“ Fernwärmenetzen verortet wären.

Auch laut den aktuellen Zielszenarien des UBA (Purr et al., 2019) könnten Wärmenetze im Jahr 2050 insbesondere in „Ballungsgebieten“ eine wichtige Wärmeversorgungsoption darstellen, da hier dezentrale Wärmepumpen oft nur schwer realisiert werden können. Über Wärmenetze könnten im Jahr 2050 dann 56 – 91 TWh Wärme für das Heizen und den Warmwasserbedarf im zukünftigen Gebäudebestand bereitgestellt werden, was dann rund 20 % – 24 % des noch verbleibenden Wärmebedarfs darstellen würde.

Zentrale Wärmespeicher werden zukünftig als elementare Bausteine in urbanen Fernwärme- und ländlichen Nahwärmenetzen benötigt, wenn der Wärmebedarf der daran angeschlossenen Gebäude überwiegend aus lokal verfügbaren erneuerbaren Wärmequellen gedeckt werden soll.

Aufgrund der Saisonalität des Raumwärmebedarfs und auch einiger regenerativer Wärmequellen (insbesondere Solarthermie) oder der kontinuierlichen Bereitstellung von Wärme auch in den Sommermonaten (z. B. Abwärme) kann es zu einem saisonalen Speicherbedarf kommen.

Bei der Nutzung von „Power-to-Heat“-Anlagen oder Groß-Wärmepumpen als Wärmequelle in Zeiten der Überproduktion von Elektrizität bieten Wärmespeicher zusätzlich eine Möglichkeit zur Umsetzung der Sektorenkopplung (Gerhardt et al., 2021). Insbesondere im Sommer können mit zentralen Wärmespeichern „überschüssige“ Elektrizität z. B. aus Photovoltaikanlagen oder Wärme aus der tiefen Geothermie gespeichert und dann später in den Wintermonaten zum Heizen genutzt werden (BMW, 2015; Thamling et al., 2015; Ausfelder et al., 2017; Schüwer, 2017; Purr et al., 2019; Stadler et al., 2020; Maaß et al., 2021). Diese wärmenetzgebundenen, zentralen Wärmespeicher müssten dann zukünftig also oft als **saisonale Groß-Wärmespeicher** umgesetzt werden, da bei der Speicherung in verhältnismäßig großen Speichereinheiten geringere Wärmeverluste auftreten sollten. Die Be- und Entladung dieser zentralen, saisonalen Groß-Wärmespeicher auf dem nötigen Temperaturniveau könnte dann wiederum mittels Groß-Wärmepumpen erfolgen (BMW, 2015; Thamling et al., 2015).

Da aber der Bedarf für derartige Speicher im Kontext von Wärmenetzen bisher meist nur verbalisiert, aber kaum quantifiziert wird, besteht hier noch ein grundsätzlicher **Forschungsbedarf** (Engelmann et al., 2021; Gerhardt et al., 2021; Hecking et al., 2017).

Die Studie von Henning und Palzer (2015) nannte bisher als eine der wenigen konkrete Zahlen zur wahrscheinlich benötigten Kapazität zentraler und dezentraler Wärmespeicher im Jahr 2050. Dezentrale „kleine“ Wärmespeicher werden in der Modellierung der Szenarien in Kombination mit Wärmepumpen und/oder Solarthermieanlagen in Einzelgebäuden eingesetzt. Für diese Wärmespeichertypen ergeben die Szenarien einen Kapazitätsbedarf zwischen 450 GWh und 590 GWh bis zum Jahr 2050. Für große, zentrale Wärmespeicher in Wärmenetzen wird ein Bedarf von 400 – 750 GWh gesehen, um Wärme aus KWK-, Solarthermie- und „Power-to-Heat“-Anlagen zu speichern. Diese zentralen Groß-Wärmespeicher würden laut den Zielszenarien der Studie jedoch nicht unbedingt als saisonale Speicher betrieben werden, sondern eher zwei- bis dreimal in der Woche be- und entladen werden. Sie würden also eher als Kurzzeitspeicher agieren. Im Zielszenario der Studie mit einer Emissionsreduktion um 85 % zeigt sich, dass bis zum Jahr 2030 zunächst eher dezentrale Wärmespeicher in Einzelgebäuden benötigt werden und erst ab 2025 vermehrt Speicherkapazität in Form zentraler Wärmespeicher installiert werden müsste.

Eine weitere Studie (Ausfelder et al., 2017) bestätigt, dass zentrale thermische Speicher in Wärmenetzen bei Treibhausgasemissionsreduktionen sowohl um 60 % als auch um 90 % erst nach dem Jahr 2025 in größerem Umfang zum Einsatz kommen würden, dann aber bis zum Jahr 2050 Kapazitäten von 1200 GWh (im Szenario einer Treibhausgasemissionsreduktion um 60 %) bis zu 2000 GWh (im Szenario einer Treibhausgasemissionsreduktion um 90 %) benötigt werden könnten.

Nur Brown et al. (2018) zeigen bisher den Vorteil zentraler, saisonaler Wärmespeicher in urbanen Wärmenetzen als Teil der europäischen Sektorenkopplung zum Ausgleich saisonaler und wetterbedingter Erzeugungsschwankungen und zur Senkung der Energiesystemkosten.

Zentrale, saisonale Groß-Wärmespeicher als Bestandteil von Wärmenetzen finden also aktuell in Zielszenarien und Energiesystemmodellen kaum Berücksichtigung bzw. werden dort nur als allgemeine, „zentrale“ und/oder „große“ Wärmespeicher in Wärmenetzen (Palzer, 2016; Gils et al., 2018; Sterchele et al., 2020), jedoch nicht unbedingt als „saisonale“ Wärmespeicher abgebildet.

Saisonale Wärmespeicher sind auch in der Praxis in den bereits existierenden Wärmenetzen in Deutschland bisher so gut wie nicht im Einsatz, obwohl sie z. B. in Dänemark in Form von Erdbeckenspeichern in ländlichen Nahwärmenetzen realisiert werden. Dies wird u. a. auf den großen obertägigen Flächenbedarf derartiger Speicher zurückgeführt, der im Kontext städtischer Fernwärmenetze in Deutschland ein Umsetzungshemmnis darstellen kann (Pehnt et al., 2017; Stadler et al., 2020).

In aktuellen Machbarkeitsstudien und Konzepten zur „urbanen Wärmewende“, welche einzelne Städte mit existierenden Wärmenetzen und nicht das gesamte Energiesystem im Fokus haben, werden zentrale, saisonale geothermische Wärmespeicher jedoch bereits als Bausteine in zukünftigen Wärmenetzen aufgegriffen (Sandrock et al., 2016; Maaß und Sandrock, 2017).

Das frühere Förderprogramm „Wärmenetze 4.0“, das durch die „Bundesförderung für effiziente Wärmenetze“ (BEW) abgelöst wurde, setzt zudem saisonale Großwärmespeicher als Bedingung zur Förderung neuer, erneuerbar betriebener Wärmenetze voraus (BMJ – Bundesministerium der Justiz, 2019).

Zwischenfazit 1.1 (IV)

Über zusätzliche oder nachverdichtete **Wärmenetze** könnte in Gebieten mit hohem Wärmebedarfsdichten laut den gesichteten Zielszenarien zukünftig ein größerer Anteil (20 % – 24 % bzw. 81 – 91 TWh) des 2050 noch verbleibenden Wärmebedarfs des Gebäudebestands z. B. mittels Wärme aus tiefer Geothermie, Solarthermie oder aus anderen Umweltwärmequellen mit Hilfe von Groß-Wärmepumpen oder aus industrieller Abwärme bereitgestellt werden.

Zentralen, saisonalen Groß-Wärmespeichern wird insbesondere in städtischen Wärmenetzen eine entscheidende Rolle bei der zukünftigen Integration lokal verfügbarer erneuerbarer Wärmequellen zugesprochen. Zudem wird die Nutzung in Kombination mit „Power-to-Heat“-Anlagen und Groß-Wärmepumpen als Option zur Sektorenkopplung angesehen.

Aufgrund der knappen Ressource „Fläche“ insbesondere in Städten bieten sich untertägige, **geothermische Energiespeicher (UTES)** als eine Variante von zentralen, saisonalen Groß-Wärmespeichern an, da sie relativ große Speicherkapazitäten bei geringem obertägigen Flächenbedarf bereitstellen können.

Diese qualitativen Aussagen, die aktuell oft in Studien zur Umsetzung der „Wärmewende“ in Städten aufgegriffen werden, sind bisher jedoch in den bundesweiten Energiesystemmodellen wenig oder nicht quantitativ hinterlegt, was die Implementierung von **Wertebereichen für Jahresarbeitszahlen oder Leistungen, Kapazitäten, Effizienz und Kosten sowie Flächen- und Raumbedarf untertägiger zentraler geothermischen Groß-Wärmespeichern (ATES oder BTES) in den Energiesystemmodellen notwendig** erscheinen lässt, um deren Vorteile gegenüber anderen zentralen, saisonalen Groß-Wärmespeichern im Kontext von Wärmenetzen abbilden zu können.

Der Einsatz von UTES zur saisonalen Kühlung, eventuell auch mehrerer Gebäude in einem Quartier über ein „Kältenetz“ anstatt mittels herkömmlicher Klimaanlage unter Einsatz von Elektrizität, wird in Zielszenarien zum deutschen Energiesystem bisher ebenfalls nicht aufgegriffen.

Resümee 1.1

Aufgrund der großen Bedeutung des Gebäudesektors existiert eine relativ große Anzahl an Studien zu den potentiellen Transformationspfaden und Zielsetzungen einer zukünftigen klimaneutralen

Wärmeversorgung, die Referenzszenarien und Zielszenarien auf Basis bekannter Technologien skizzieren. Die Ergebnisse dieser Studien lassen sich wie folgt skizzieren.

Referenzszenarien zeigen selbst für ein „Weiter-wie-bisher“ bei der „Energiewende“ für den Gebäudebestand des Jahres 2050 einen geringeren Wärmebedarf, gleichzeitig aber auch einen steigenden Energiebedarf zur Raumkühlung. Die nationalen Klimaschutzziele werden in diesen Szenarien jedoch nicht erreicht. **Zielszenarien**, welche die jeweils vorgegeben Klimaschutzziele erreichen, zeigen für das Jahr 2050 einen insgesamt deutlich geringeren Wärmebedarf im Gebäudebestand in Höhe von nur noch 524 – 247 TWh (-31 % – -67 %). Für den Kühlbedarf zeigen die Zielszenarien gleichzeitig einen Verbleib auf heutigem Niveau oder aber auch einen Anstieg auf bis zu 70 TWh (+600 %). Um die aktuell angestrebte „Klimaneutralität“ im Jahr 2045 erreichen zu können, ist jedoch zusätzlich auch eine vollständige Versorgung des verbleibenden Wärmebedarfs (Heizen und Kühlen) aus erneuerbaren Energiequellen notwendig.

Wärmepumpen wird insbesondere bei der dezentralen Wärmeversorgung von Einzelgebäuden in allen Zielszenarien ein hoher Anteil am zukünftigen Technologiemarkt zugesprochen (6 – 17 Mio. Anlagen, 51 – 226 TWh Wärmebereitstellung und somit ein Anteil von 14 % – 79 %).

Geothermische Wärmepumpen werden dabei eine wichtige Rolle übernehmen; der genaue Anteil im Jahr 2050 ist jedoch stark von den jeweils in den Energiesystemmodellen hinterlegten zukünftig erreichbaren Jahresarbeitszahlen und den Investitionskosten abhängig. Der Kühlbedarf wird in den Zielszenarien bzw. den Energiesystemmodellen über den Einsatz von Elektrizität in herkömmlichen Klimaanlageanlagen gedeckt; geothermische Wärmepumpen-Systeme zur Kühlung von Gebäuden finden jedoch bisher keine Berücksichtigung.

Über **Wärmenetze** wird laut den gesichteten Zielszenarien insbesondere in Gebieten mit hohem Wärmebedarfsdichten wie Städten zukünftig ein größerer Anteil des noch verbleibenden Wärmebedarfs des Gebäudebestands bereitgestellt werden (81 – 91 TWh bzw. 20 % – 24 %). **Zentralen, saisonalen Groß-Wärmespeichern** wird in Wärmenetzen eine wichtige, jedoch derzeit nicht systematisch untersuchte und quantifizierte Rolle zur Integration erneuerbarer Energiequellen und zur Sektorenkopplung zugesprochen.

Empfohlen wird daher, saisonale Wärmespeicher (z. B. UTES-Anlagen) zukünftig bei Studien zu optimierten Transformationspfaden zu berücksichtigen. Aufgrund der damit energieeffizient darstellbaren höheren Zieltemperatur wird auch nochmals die Frage zu bewerten sein, welcher Grad der thermischen Gebäudedämmung wirtschaftlich und als Klimaschutzoption zukünftig optimal ist.

Wenig systemisch untersucht ist zudem, wie robust und resilient zukünftige Wärmeversorgungssysteme gegenüber Wetterextremen sind bzw. welche Wechselwirkungen sich zwischen zukünftigen Wärmeversorgungssystemen und den Folgen des absehbaren Klimawandels gerade in urbanen Gebieten ergeben. Hier besteht dringender Forschungsbedarf.

1.2 Darstellung und Prognose der thermischen Veränderungen des geologischen Untergrunds in den kommenden Dekaden

Die Bewertung, in welcher Weise die breite Umsetzung von oGT-Technologien thermisch den oberflächennahen untertägigen urbanen Raum verändern könnte, ist nur auf Basis der heute bereits stattfindenden thermischen Veränderungen in Grundwasserkörpern sinnvoll und möglich. Treiber für diese Veränderungen sind nach heutiger Erkenntnis der Klimawandel und häufiger

noch bedeutender die städtebaulichen Spezifika bei der unmittelbaren und mittelbaren Nutzung des oberflächennahen geologischen Untergrunds.

Gleichzeitig ist aufgrund der ablaufenden und der zu erwartenden thermischen Veränderungen des Untergrunds zu fragen,

- ▶ inwieweit regulatorisch und städtebaulich Vorkehrungen gegenüber unkontrollierten Temperaturveränderungen im geologischen Untergrund getroffen werden müssen,
- ▶ inwiefern z. B. durch den großräumig kontrollierten Betrieb von oGT-Systemen und/oder die Steuerung der thermischen Emissionen ober- und untertägiger Infrastrukturelemente (Straßen, Gebäude, Kanalisationen etc.) die thermische Entwicklung des urbanen geologischen Untergrunds umgesetzt werden könnte und
- ▶ welche regulatorischen Vorgaben bzgl. genehmigungsfähiger Temperaturveränderungen vor dem Hintergrund „natürlicher“ sich signifikant verändernder Untergrundtemperaturen mit deutlicher räumlicher Heterogenität zielführend sind.

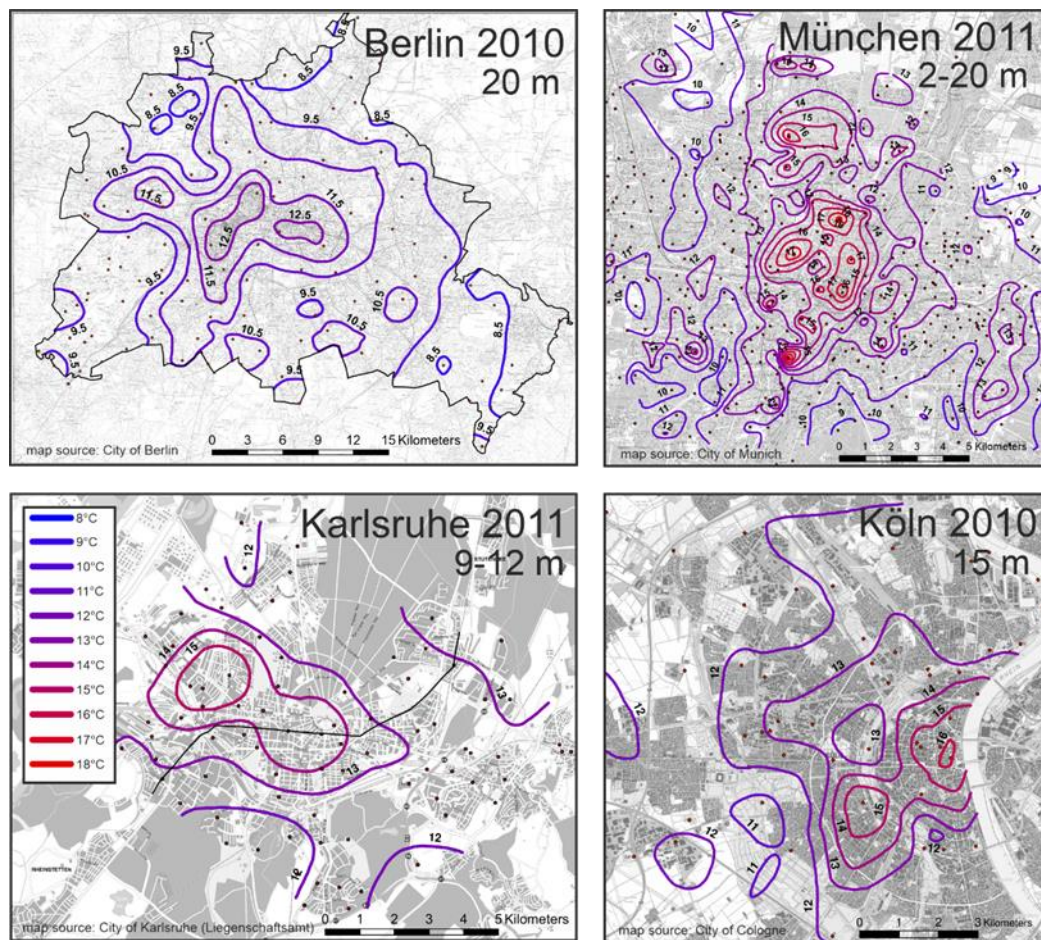
1.2.1 Thermische Veränderungen des geologischen Untergrunds in urbanen Gebieten

1.2.1.1 Bisherige räumliche Ausdehnung der thermischen Veränderungen in urbanen Gebieten

Aufgrund des langfristigen thermischen Gleichgewichts zwischen Atmosphäre und geologischem Untergrund bzw. Grundwasser entsprechen unbeeinflusste Grundwassertemperaturen in Tiefen unterhalb 20 m üblicherweise dem Jahresdurchschnitt den mittleren Lufttemperaturen (Taylor und Stefan, 2009). Ähnlich denen als „urbane Wärmeinseln“ bezeichneten mikroklimatischen Veränderungen in der städtischen Atmosphäre sind aus vielen Metropolen weltweit erhöhte Temperaturen im städtischen geologischen Untergrund bzw. Grundwasser bekannt, z. B. aus Tokyo (Taniguchi et al., 2005), London (Headon et al., 2009), Paris (Hemmerle et al., 2019), Berlin (Menberg et al., 2013a) und Moskau (Lokoshchenko und Korneva, 2015). Aber auch in Großstädten, beispielsweise Oberhausen (Müller et al., 2014), Karlsruhe (Menberg et al., 2013b), Basel (Epting et al., 2013) und Lyon (Attard et al., 2016) wurden weit verbreitet Grundwassertemperaturen gemessen, die im Bereich der dicht bebauten Innenstädte im Durchschnitt 2 – 6 °C über den im unbebauten Umland dokumentierten Temperaturen liegen (Abb. 1.3).

Dabei erscheint ein positiver Zusammenhang zwischen der Stadtgröße bzw. der Einwohnerzahl und dem Grad der Erwärmung des urbanen Grundwassers zu bestehen (Menberg et al., 2013a). Tissen et al. (2019) haben anhand von Grundwassertemperaturen von über 10.000 Messstellen in Mitteleuropa gezeigt, dass ebenfalls ein Zusammenhang zwischen Flächennutzung und Grundwassertemperatur besteht. Die höchsten Temperaturen (bis zu 7 °C Differenz zu unbeeinflussten Hintergrundwerten) traten dabei vor allem in der Nähe von Industriegebieten, Fabrikkomplexen und Innenstadtbereichen auf. Eine detaillierte Untersuchung der thermischen Verhältnisse im oberflächennahen geologischen Untergrund mehrerer deutscher Städte hat zudem gezeigt, dass neben den großflächigen Erwärmungen um ca. 2 – 5 °C besonders im sehr oberflächennahen Bereich von wenigen Metern Tiefe punktuelle Anomalien mit Absoluttemperaturen von bis zu 30 °C auftreten können (Menberg et al., 2013a).

Abbildung 1.3: 2D-Isothermen der Jahresdurchschnittstemperatur des Grundwassers in verschiedenen deutschen Städten



Die angegebene Tiefenlage der Isothermen bezieht auf die Geländeoberkante.

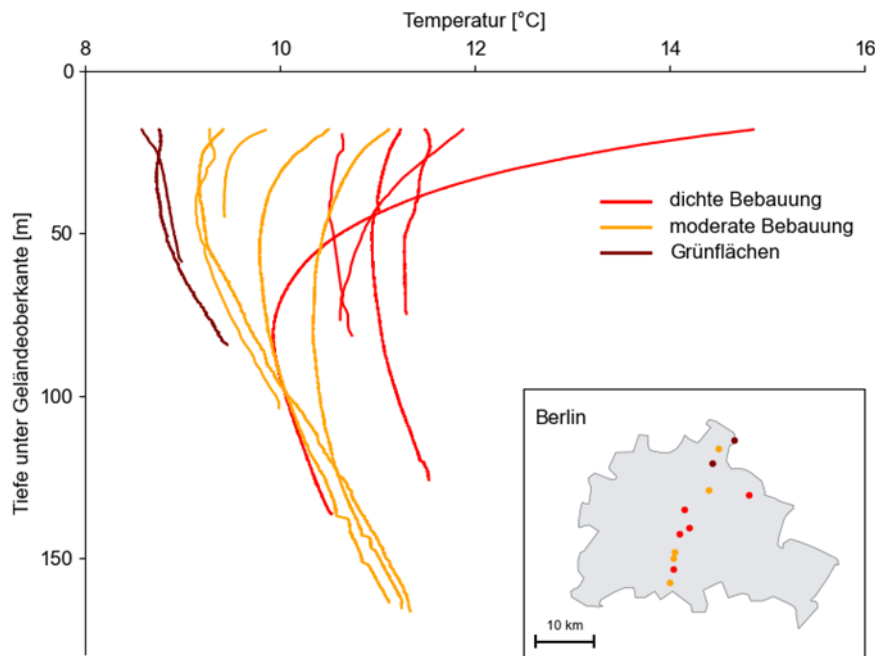
Quelle: Überarbeitet nach Menberg et al. (2013a).

Neben der heterogenen Erwärmung des oberflächennahen Grundwassers (Abb. 1.3) erstrecken sich die urbanen Temperaturanomalien auch in Bereiche des geologischen Untergrunds bis über 100 m Tiefe (Abb. 1.4) (Henning und Limberg, 2012; Blum et al., 2021). Im Bereich unterhalb von 150 m ist der erwartete Temperaturanstieg mit zunehmender Tiefe in Form des geothermischen Gradienten von ca. 2 – 3 °C je 100 m Tiefe zu erkennen. Oberhalb von 100 m zeigen jedoch vor allem die Profile in den bebauten Bereichen deutlich erhöhte Temperaturen. Die Steigung der Temperaturprofile mit höheren Temperaturen in flachen Tiefen weisen dabei auf einen erheblichen Wärmeeintrag von der Oberfläche hin (Bayer et al., 2019). Auch in Messstellen am Stadtrand zeigt sich eine Abflachung der Temperaturprofile im oberflächennahen Bereich, der auf die atmosphärische Erwärmung durch den Klimawandel in den vergangenen Jahrzehnten in diesen Bereichen zurückzuführen ist (Beltrami et al., 2006).

Ähnliche lokale Beobachtungen der Temperaturanomalien über die Tiefe des städtischen geologischen Untergrunds wurden auch in anderen Städten weltweit gemacht, z. B. in Winnipeg (Ferguson und Woodbury, 2004) und einigen japanischen Städten (Benz et al., 2018; Taniguchi et al., 2005). Diese Beobachtungen lassen darauf schließen, dass die Wärmeanomalien in den meisten Städten eine deutlich größere Tiefe erreichen, als in Abb. 1.3 dargestellt. Da allerdings die meisten Grundwassermessstellen in Städten dazu ausgelegt wurden, die Standhöhe des oberflächennahen Grundwassers zu überwachen, fehlen flächendeckende tiefe Grundwasserpegel, um eine

genauere Dokumentation der Wärmeausbreitung über die Tiefe zu erlauben. Im Sinne eines zukünftig möglicherweise notwendigen thermisch-hydraulischen Raummanagements zur nachhaltigen und optimierten Bewirtschaftung des geologischen Untergrunds besteht hier in vielen Kommunen Handlungsbedarf.

Abbildung 1.4: Temperatur-Tiefenprofile im geologischen Untergrund Berlins



Die Karte zeigt die ungefähre Lage der Messstellen innerhalb der Stadt Berlin. Die Farben der Profile geben die Art und Dichte der städtischen Bebauung im näheren Umfeld der Messstellen wieder.

Quelle: Überarbeitet nach Blum et al. (2021).

Die urbanen Wärmeanomalien weisen durch ihre laterale und vertikale Ausdehnung sowie die thermischen Eigenschaften des Grundwassers und des geologischen Untergrunds auf eine große Menge an gespeicherter thermischer Energie hin. Einige Studien haben diese thermische Energie daher ins Verhältnis mit dem Wärmebedarf der Städte gesetzt um zu ermitteln, inwieweit sich dieser über geothermische Anlagen decken ließe. Einfache energetische Wärmebilanzen deuten darauf hin, dass z. B. die im oberflächennahen Grundwasserleiter von Köln gespeicherte thermische Energie den Wärmebedarf der Stadt für 1,5 Jahre und in Karlsruhe für 3 Jahre decken könnte (Benz et al., 2015). Auch für Basel ergaben thermisch-hydraulische Modellierungen des geologischen Untergrunds, dass der Energieinhalt im Grundwasserleiter und der jährliche städtische Heizbedarf in der gleichen Größenordnung liegen (Müller et al., 2018).

Bei genaueren Vergleichen unter Berücksichtigung von anlagentechnischen und Nachhaltigkeitsaspekten hat sich jedoch gezeigt, dass die thermische Energie im oberflächennahen geologischen Untergrund bei reinem Wärmeentzug in vielen Fällen nicht ausreicht, um den städtischen Wärmebedarf vollständig zu decken (Bayer et al., 2019). Quantifizierungs- und Modellierungsansätze für eine kombinierte Nutzung des geologischen Untergrunds zum Heizen und Kühlen bzw. zur Speicherung thermischer Energie sind auf Stadtebene bisher jedoch nicht beschrieben worden.

Vor dem Hintergrund, dass einerseits über das Jahr gemittelt der aktuelle unkontrollierte Wärmefluss von der urbanen Oberfläche in den oberflächennahen geologischen Untergrund i. d. R.

nicht ausreicht, um den hohen Wärmebedarfsdichten im urbanen Raum zu entsprechen, andererseits jedoch in den Sommermonaten zunehmend hohe und z. T. sogar gesundheitsgefährdende Temperaturen in urbanen Räumen auftreten, wäre in diesem Kontext wichtig, dass die thermisch beeinflussten untertägigen Räume sowohl in 3D als auch in ihrer zeitlichen Dynamik zukünftig erfasst werden, um so die Wärmespeicherkapazität und damit auch Wärmeversorgungskapazität (Heizen und Kühlen) des geologischen Untergrunds belastbar und kontinuierlich bewerten zu können.

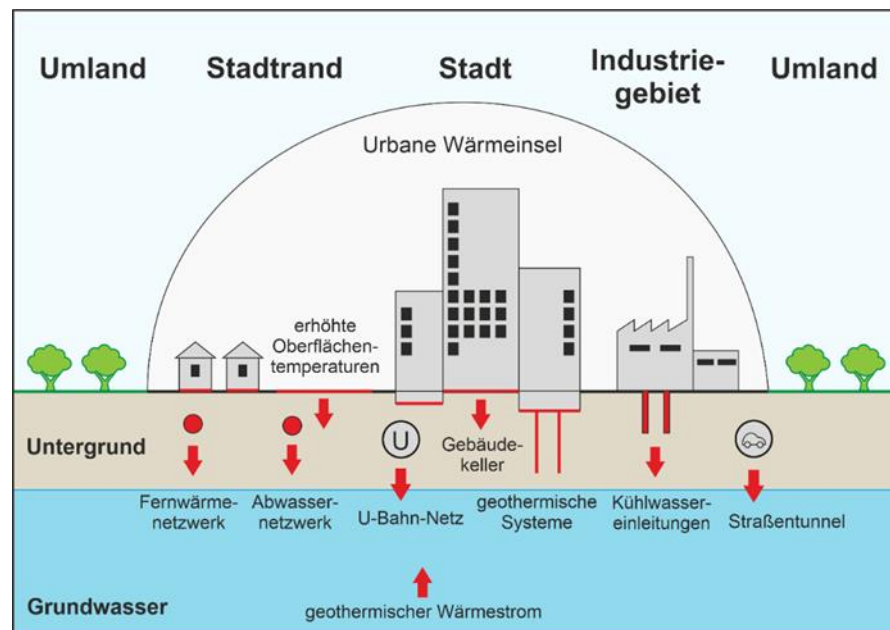
1.2.1.2 Ursachen für die thermischen Veränderungen im urbanen geologischen Untergrund

Die große Ausdehnung der Temperaturerhöhung in urbanen Gebieten ist darauf zurückzuführen, dass es im urbanen geologischen Untergrund eine Vielzahl an dicht verteilten Wärmequellen gibt, z. B. in Form städtischer Infrastrukturen, die Wärme an den umgebenden Untergrund bzw. das Grundwasser abgeben (Abb. 1.5).

Besonders hervorzuheben sind dabei die flächenhaften thermischen Einträge durch beheizte Gebäudekeller und erhöhte Temperaturen auf dunklen, künstlichen Oberflächenbelägen wie z. B. Asphalt. Letztere können im Jahresdurchschnitt bis zu 5 °C wärmer sein als natürliche Oberflächen wie Gras oder Sand und damit zu einer Erhöhung des oberflächennahen geologischen Untergrunds führen (Dědeček et al., 2012; Taylor und Stefan, 2009). Durch die dichte Bebauung besonders im Bereich der Innenstädte spielt der konduktive Wärmeeintrag aus Gebäudekellern, die in vielen Fällen eine höhere Jahresdurchschnittstemperatur als der umgebende geologische Untergrund aufweisen, hier ebenfalls eine entscheidende Rolle. Die exemplarische Quantifizierung dieser beiden Wärmeeinträge mit Hilfe analytischer Simulationen in den Städten Köln und Karlsruhe hat gezeigt, dass diese in Bezug auf die Stadtfläche um ein Vielfaches größer ist als der natürliche geothermische Wärmestrom oder der Effekt des Klimawandels (Menberg et al., 2013b; Benz et al., 2015). Dementsprechend werden die thermischen Bedingungen im oberflächennahen geologischen Untergrund maßgeblich durch städtebauliche Aktivitäten (i. w. S.) bestimmt.

Im Hinblick auf die derzeitige Diskussion zum Schutz von GWL gegenüber Temperaturveränderungen durch UTES-Systeme stellt sich daher die Frage, ob konsequenterweise zukünftig alle städtebaulichen Aktivitäten im Hinblick auf ihr thermisches Emissions- bzw. Immissionsverhalten zu bewerten sind. Auf dieser Basis wäre dann auch zu entscheiden, ob und gegebenenfalls wie diese bisher unkontrollierten Wärmeflüsse z. B. durch die kontrollierte „thermische Aktivierung“ solcher Flächen, d. h. durch einen thermischen Anschluss an saisonale UTES-Systeme, zu nutzen sein könnten.

Abbildung 1.5: Schematische Darstellung der verschiedenen anthropogenen Wärmequellen im urbanen geologischen Untergrund

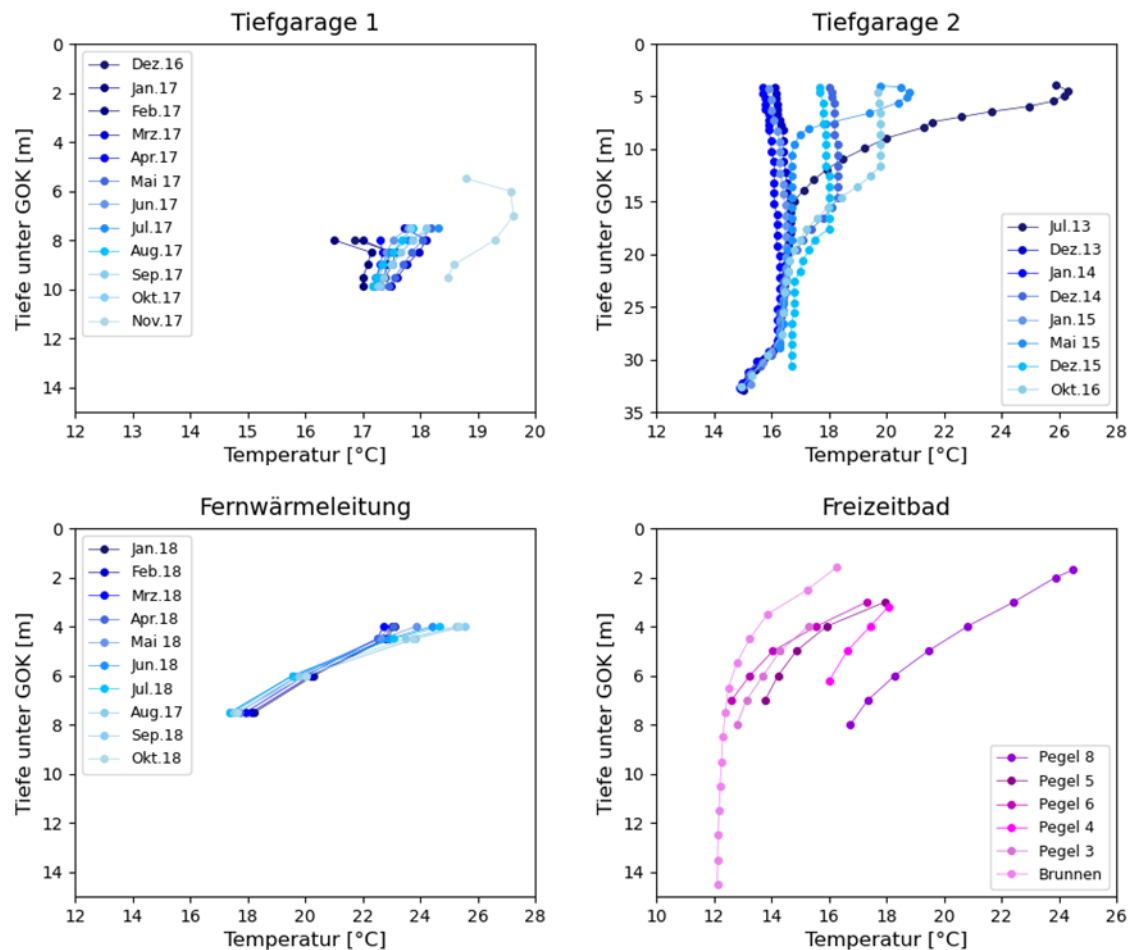


Neben der aktiven thermischen Nutzung des Untergrunds durch geothermische Anlagen und Kühlwassereinleitung bestehen in bebauten Gebieten weitere mögliche Wärmequellen.

Quelle: Überarbeitet nach Menberg et al. (2013a).

Hinzu kommen noch weitere nur bedingt nutzbare Wärmequellen, die sehr lokal auftretende Temperaturanomalien bis zu 30 °C verursachen. So wurden innerhalb urbaner untertägiger Wärmeinseln im geologischen Untergrund unter anderem Leckagen aus Schwimmbecken, schadhafte Isolierungen untertägiger Fernwärmeleitungen sowie thermische Effekte bei der Aushärtung von Beton untertägiger Baustellen identifiziert (Menberg et al., 2013a).

In Abb. 1.6 sind beispielhafte Temperaturdaten aus Grundwasserpegeln neben zwei Tiefgaragen, einem Freizeitbad und einer Fernwärmeleitung dargestellt. Die hohen absoluten Temperaturen bis zu 26 °C und die in den Temperatur-Tiefenprofilen beobachteten hohen thermischen Gradienten deuten hier auf einen erheblichen lokalen Wärmeeintrag in den geologischen Untergrund hin, durch den z. B. die maximal zulässigen Einspeisetemperaturen von 20 °C deutlich überschritten werden (Koenigsdorff et al., 2020).

Abbildung 1.6: Untertägige Temperaturprofile im Bereich von zwei Tiefgaragen und eines Freizeitbades in Süddeutschland sowie einer Fernwärmeleitung in Österreich

Für die Standorte der Tiefgaragen und der Fernwärmeleitung sind Temperatur-Tiefenprofile zu verschiedenen Stichtagsmessungen gezeigt. Bei dem Freizeitbad nimmt die Entfernung zur Wärmequelle mit zunehmender Pegelnummer ab. „Brunnen“ kennzeichnet eine Referenzmessung.

Quelle: Verändert nach Koenigsdorff et al. (2020).

Für die in Abb. 1.5 aufgeführten Wärmequellen wurden in wissenschaftlichen Studien für verschiedene Städte (Karlsruhe, Köln, Osaka) Wärmestromdichten basierend auf hydrogeologischen Daten berechnet. Die höchsten Wärmestromdichten ergeben sich dabei für den Wärmeeintrag aus Gebäudekellern ($0,32 - 3,61 \text{ W/m}^2$) und erhöhte Oberflächentemperaturen ($0,21 - 0,28 \text{ W/m}^2$) (Benz et al., 2015; Benz et al., 2018). Im Vergleich dazu sind die natürlichen Wärmeströme im Bereich von Mitteleuropa wie z. B. der geothermische Wärmestrom ($0,06 - 0,08 \text{ W/m}^2$) (Čermák und Rybach, 1979) oder der Wärmeeintrag durch die Klimaerwärmung ($0,25 - 0,75 \text{ W/m}^2$) (Beltrami et al., 2006) verhältnismäßig gering, so dass die thermischen Bedingungen im geologischen Untergrund bebauter Gebiete maßgeblich von städtischer Infrastruktur bestimmt werden.

Durch die Verschneidung der Wärmestromdichten mit Flächennutzungsplänen lässt sich der absolute Wärmeeintrag aus städtischer Infrastruktur in das Grundwasser in städtischen Gebieten bestimmen. Für Karlsruhe und den linksrheinischen Teil Kölns ergeben sich so Einträge von $2,2 \pm 1,4 \text{ PJ}$, bzw. $1,0 \pm 0,3 \text{ PJ}$ ($555,6 \pm 388,9 \text{ GWh}$ bzw. $277,8 \pm 83,3 \text{ GWh}$), wobei die höheren

Wärmeeinträge in Karlsruhe durch einen größeren Temperaturgradienten aufgrund eines geringeren Flurabstands begründet sind. Auf ein Referenzvolumen mit einer Volumenoberfläche von 1 km^2 bezogen, ergibt sich rechnerisch durch diese Wärmeeinträge eine ähnliche thermische Beeinflussung wie durch die Wärmeverluste aus UTES-Systemen (Tab. 1.4).

Tabelle 1.4: Berechnete Wärmeeinträge in den geologischen Untergrund durch städtische Infrastruktur und modellierte Wärmeverluste einer angenommenen UTES-Anlage

	Wärmeeintrag aus städtischer Infrastruktur [GWh/(km ² · a)]	Wärmebedarf [GWh/(km ² · a)]	Speicherverluste [GWh/(km ² · a)] ATES	Speicherverluste [GWh/(km ² · a)] BTES
Karlsruhe	$9,4 \pm 6,4$			
Köln	$3,4 \pm 1,1$			
Basisfall		20	2,7	0,7
100 m ³ /h bzw. 1600 Sonden		100	5,9	2,1
Städtisches Viertel in Norddeutschland*		27,5	0,9	0,5

Die Werte für den Wärmeeintrag wurden aus Benz et al. (2015) entnommen und auf 1 km^2 normiert. Die angegebenen Werte für die Speicherverluste einer UTES-Anlage stammen aus den entsprechenden Szenarien der in Abschnitt 1.4 beschriebenen Modellierungen zum Raumbedarf bei verschiedenen Betriebsszenarien.

* vgl. Abschn. 1.4.

Zwischenfazit 1.2.1

Obwohl die Datenlage noch auf Einzeluntersuchungen basiert, kann davon ausgegangen werden, dass heute bereits eine flächendeckende signifikante Erhöhung der Grundwassertemperatur im urbanen geologischen Untergrund besteht. Untersuchungen unter Städten in Deutschland haben flächenhafte Erhöhungen um bis zu 6 °C (mit lokalen Spitzenwerten von bis zu 30 °C) festgestellt. Diese Temperaturen überschreiten z. T. die bestehenden Grenzwerte für oGT signifikant.

Die Ausdehnung dieser thermischen Anomalien in die Tiefe beträgt dabei bis über 100 m . Durch die geringe Dichte an tiefen Messstellen sind bisher solche Daten jedoch nur sehr lokal vorhanden, so dass genaue Abschätzungen zur Größe des thermisch betroffenen Volumens des geologischen Untergrunds nur vereinzelt bekannt sind. Studien haben jedoch mit Hilfe physikalischer Modellierungen gezeigt, dass die im städtischen geologischen Untergrund verfügbare thermische Energie in der gleichen Größenordnung liegt wie der städtische Wärmebedarf. Allerdings fehlen für eine strategische thermische Nutzung des geologischen Untergrunds neben Quantifizierungs- und Modellansätzen für eine energetische Speicherung auch konkrete Strategien für eine Kopplung bzw. Integration mit der städtischen Energieplanung. Hier besteht Handlungsbedarf, auch um gegebenenfalls die unkontrollierte Temperaturveränderung in urbanen Grundwasservorkommen durch ein untertägiges Wärmemanagement, d. h. einen gezielten Wärmentzug bzw. Wärmeeintrag, großräumig in einem gewünschten Temperaturbereich zu halten.

Die Bedeutung der Wärmeeinträge durch erhöhte Oberflächentemperaturen auf versiegelten Flächen und Wärmeverluste aus Gebäudekellern ergibt sich auch aus einem Vergleich mit den derzeit

numerisch ermittelten potentiellen Wärmeverlusten von UTES-Anlagen. Danach liegt der aus diesen Wärmequellen verursachte Wärmeeintrag in das städtische Grundwasser, auf ein bestimmtes Referenzvolumen bezogen, in der gleichen Größenordnung wie die Wärmeverluste aus einem UTES-System.

1.2.2 Prognosen zu thermischen Veränderungen im geologischen Untergrund durch den Klimawandel

1.2.2.1 Darstellung der thermischen Veränderungen in den vergangenen Jahrzehnten außerhalb urbaner Gebiete

Die thermische Kopplung zwischen Luft- bzw. Landoberflächentemperaturen und oberflächennahen Grundwassertemperaturen wurde bereits auf verschiedenen räumlichen Skalen von einzelnen Standorten bis hin zum globalen Niveau untersucht und nachgewiesen (Taylor und Stefan, 2009; Benz et al., 2017). Dementsprechend konnten in Zeitreihen historischer Grundwassertemperaturen beispielsweise in der Schweiz großräumige atmosphärische Oszillationsmuster (Figura et al., 2011) und in deutschen Aquiferen Korrelationen zu sprunghaften Anstiegen in der Lufttemperatur entdeckt werden (Menberg et al., 2014). Aus diesen Studien geht hervor, dass auch in anthropogen unbeeinflussten Gebieten die Temperaturen im oberflächennahen Grundwasser mit der Erwärmung der Atmosphäre ansteigen, wenn auch mit einer gewissen Verzögerung und thermischen Dämpfung aufgrund der thermischen Diffusivität des Untergrundmaterials.

Zeitreihen von Grundwassertemperaturen, die eine detaillierte statistische Auswertung erlauben, sind, besonders im Vergleich zu Wetterdaten, aufgrund der benötigten Messdichte und -Genauigkeit eher selten (Watts et al., 2015). Eine Analyse von Zeitreihen von Grundwassertemperaturen in 227 Pegeln in Österreich zwischen 1994 und 2013 ergab einen mittleren Anstieg von $0,4 \pm 0,4$ °C pro Dekade in Waldgebieten bzw. $0,3 \pm 0,5$ °C unter landwirtschaftlich genutzten Flächen (Benz et al., 2018). Die große Variation in den Werten wird von den Autoren mit topographischen Effekten, lokalen Wärmequellen und -senken, Grundwasserfluss und hydraulischen Wechselbeziehungen mit Oberflächengewässern erklärt. Grundwassermessstellen in Baden-Württemberg der Landesanstalt für Umwelt (LUBW) zeigen ähnliche Trends mit Anstiegen zwischen $-0,5$ °C und $0,6$ °C mit einem Mittelwert von $0,3$ °C pro Dekade für nicht bebaute Gebiete, wobei die negativen Werte vermutlich auf den hydraulischen Einfluss von Oberflächengewässern oder einzelne Datenlücken, bzw. Messfehler zurückzuführen sind (Schlegel, 2020). Der Vergleich oberflächennaher Grundwassertemperaturen im ländlichen Bereich von Karlsruhe zwischen 1977 und 2011 ergab eine durchschnittliche Erwärmung von ca. 1 °C, was einem Anstieg von $0,3$ °C pro Dekade entspricht (Menberg et al., 2013b).

1.2.2.2 Bisherige zeitliche Entwicklung der thermischen Veränderungen in urbanen Gebieten

Aufgrund des hohen Messaufwands für räumlich verteilte Wiederholungsmessungen sind zeitlich aufgelöste Temperaturdaten auf Stadtebene bisher nicht standardmäßig vorhanden, so dass großflächige Temperaturänderungen bisher nur für wenige Städte über die Zeit dokumentiert wurden (Henning und Limberg, 2012; Jung, 2013; Menberg et al., 2013b). Entsprechende Temperaturveränderungen im urbanen geologischen Untergrund sind aber u. a. in folgenden Studien nachgewiesen.

In Berlin wurde an zwei Pegeln in 20 m Tiefe u. GOK in den Bezirken Neukölln und Steglitz ein kontinuierlicher Anstieg der Grundwassertemperaturen seit 1985 beobachtet (Henning und Limberg, 2012). Eine genauere tiefendifferenzierte Betrachtung von Temperatur-Tiefenprofilen

in der Messstelle in Steglitz deutet darauf hin, dass die Temperaturen dabei bis in 50 m Tiefe eine gleichmäßige Erwärmung von ca. 0,2 °C pro Dekade zeigen. Henning und Limberg (2012) führen diese Erwärmung auf die fortschreitende bauliche Entwicklung sowie die allgemeinen klimatischen Veränderungen zurück. Ebenso gehen sie davon aus, dass die Erwärmung auch in tieferen Bereichen weiter fortschreiten wird.

Die in Berlin beobachteten Trends sind konsistent mit Daten aus einem Randbezirk Kölns, wo Temperaturdaten aus drei Messstellen über fünfzig Jahre (1960 – 2010) einen durchschnittlichen Anstieg zwischen 0,2 – 0,5 °C pro Dekade (Jung, 2013) aufwiesen.

Ein Vergleich von Grundwassertemperaturen in Karlsruhe aus den Jahren 1977 und 2011 zeigte eine Erwärmung von ca. 2 °C im Bereich eines zwischenzeitlich erschlossenen Wohngebiets. Dies entspricht einem Anstieg von 0,6 °C pro Dekade. In einer Untersuchung von Temperaturzeitreihen in weiteren Messpegeln in verschiedenen bebauten Gebieten in Baden-Württemberg wurde eine mittlere Erwärmung von 0,5 °C pro Dekade festgestellt, wobei die stärksten Anstiege zwischen 0,7 °C und 1,0 °C pro Dekade auch hier im Bereich neu entstandener Gebäude bzw. Wohngebiete auftraten (Schlegel, 2020). Die in den Städten beobachteten Temperaturanstiege zwischen 0,2 °C und 1,0 °C pro Dekade liegen dabei leicht über der in ländlichen bzw. unbebauten Gebieten beobachteten Erwärmung (-0,5 – 0,6 °C, vgl. Abschn. 1.6.2.1), während das absolute Temperaturniveau im städtischen Bereich ca. 2 – 5 °C höher liegt.

Während die maximal gemessenen Temperaturen im Grundwasser in Karlsruhe in den Jahren 1977 und 2011 mit 15 °C zu beiden Zeitpunkten ähnlich sind, hat sich der thermisch beeinflusste Raum im Untergrund augenscheinlich nach der Bewertung der Grundwasserisothermen erheblich ausgebreitet (Menberg et al., 2013a), obwohl konkrete Daten zur Volumenveränderung dafür noch nicht ermittelt wurden. Trotzdem lassen sich, wie bereits oben beschrieben, die konduktiven Wärmeeinträge ins Grundwasser für beide Zeitpunkte quantifizieren. Ein Vergleich anhand der Daten aus Karlsruhe ergab eine Zunahme der Wärmeeinträge von baulichen Infrastrukturelementen mit erhöhten Oberflächentemperaturen und Gebäudekellern um 36 % bzw. 18 %, welche die tragende Rolle dieser Prozesse bei der Entstehung und Ausdehnung der urbanen Wärmeinseln im geologischen Untergrund spielen.

Diese Zusammenhänge zwischen Prozessen der Stadtentwicklung und thermischen Veränderungen im geologischen Untergrund unter bebauten Gebieten können ebenfalls mit numerischen Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodellierungen nachvollzogen werden (Zhu et al., 2015). Diese können beispielsweise Aufschluss über den Beginn der Erwärmung des städtischen Grundwassers geben. Die lokale Temperaturentwicklung im Sinne von Temperatur-Tiefenprofilen (vgl. Abb. 1.4 und 1.6) ist jedoch aufgrund der zeitlichen und räumlichen Heterogenität der thermischen Prozesse im städtischen Bereich mit bestehenden Messnetzen häufig nicht hinreichend genau nachzubilden (Zhu et al., 2015).

Um diese kleinräumige Temperaturverteilung belastbar prognostisch bewerten zu können, werden zukünftig im Rahmen übergeordneter Forschungsvorhaben standortspezifische Monitoring- und Modellentwicklungen notwendig sein. Eine Fragestellung sollte dabei sein, welche Standardabweichung für die Temperatur in nicht hinreichend bekannten natürlichen heterogenen Systemen mit variierenden hydraulischen Verhältnissen belastbar angenommen werden kann, um auf dieser Basis auch sinnvolle Temperaturgrenzwerte in oberflächennahen kleinräumigen Systemen ableiten zu können.

1.2.2.3 Vereinfachte Prognose der zu erwartenden Erwärmung in den kommenden Jahrzehnten

Wissenschaftliche Publikationen über die zukünftige Entwicklung von Grundwassertemperaturen aufgrund klimatischer Veränderungen existieren bisher kaum. Lediglich eine Studie aus der Schweiz befasste sich bisher mit der Entwicklung von Temperaturen in Grundwasser aus Uferfiltration und ermittelte, basierend auf der Erwärmung des Flusswassers mit Hilfe empirischer Vorhersagemodelle, einen wahrscheinlichen Temperaturanstieg zwischen 1,1 °C und 3,8 °C Erwärmung bis zum Jahr 2100 (Figura et al., 2015), was auch im Rahmen der Prognosen für den Anstieg der Temperatur in der Atmosphäre liegt.

In der vorliegenden Studie wurde daher eine vereinfachte Prognose für zukünftige Grundwassertemperaturen in Aquiferen erarbeitet, die nicht hydraulisch von Fließgewässern beeinflusst werden und thermisch nur über konduktiven Wärmetransport an die Atmosphäre gekoppelt sind. In diesem Fall, d. h., wenn der advective Wärmetransport vernachlässigbar ist bzw. Grundwasserneubildung gleichmäßig über das Jahr verteilt stattfindet, kann die thermische Veränderung im geologischen Untergrund mit dem eindimensionalen analytischen Wärmetransportmodell aus Menberg et al. (2014) dargestellt werden. Ausgehend von prognostizierten zukünftigen Temperaturänderungen in der Atmosphäre kann so über eine Vorwärtsmodellierung die Entwicklung der zukünftigen Grundwassertemperaturen abgeschätzt werden.

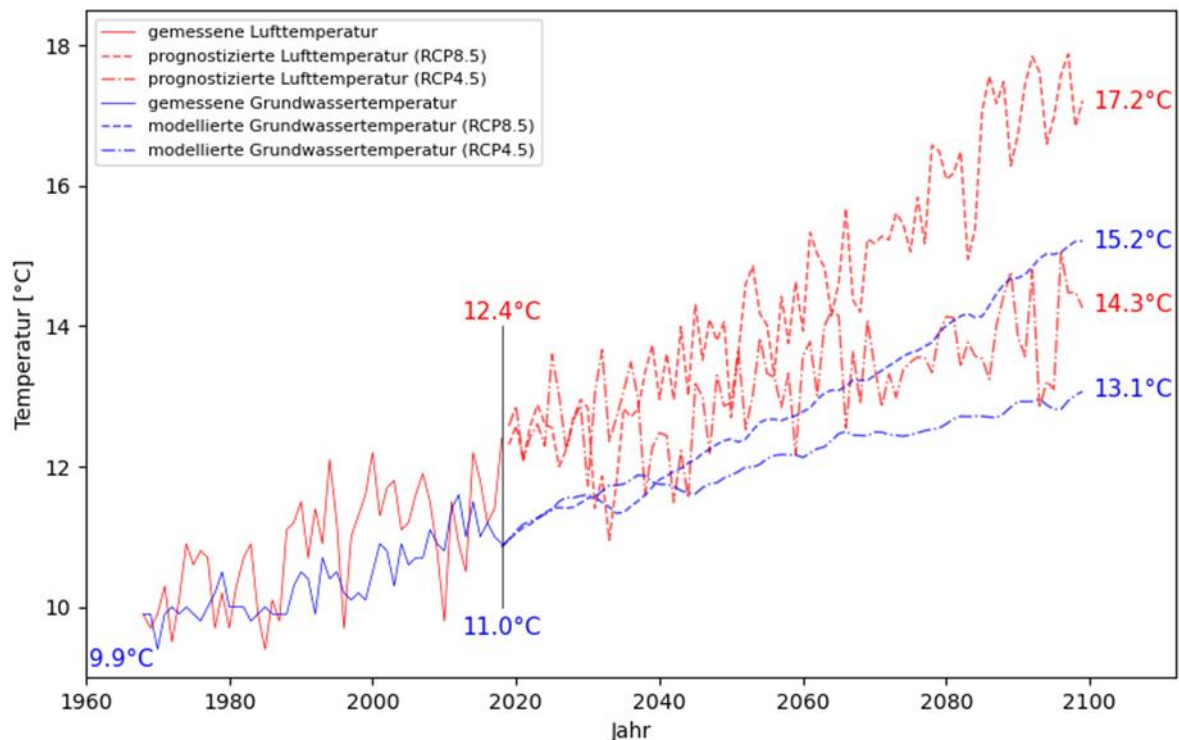
Als Referenzstandort wurde eine Grundwassermessstelle in einem großen Waldgebiet im Oberrheingraben gewählt, von der detaillierte historische Daten zu Flurabstand und Temperaturen aus den vergangenen fünfzig Jahren vorhanden sind. Die Messstelle ist 39 m tief und zwischen 10 m und 38 m in einem 60 m mächtigen sandig-kiesigen Grundwasserleiter verfiltriert. Das langjährige Mittel des Flurabstands beträgt ca. 7 m, wobei kein Trend über die Zeit erkennbar ist (Menberg et al., 2014). In einer vergangenen Arbeit wurde bereits gezeigt, dass gemessene Grundwassertemperaturen innerhalb des von Modellen mit unterschiedlichen Parameterannahmen gebildeten Bereichs liegen und somit der eindimensionale konduktive Ansatz zur Wärmetransportmodellierung in erster Näherung zu einer guten Übereinstimmung mit gemessenen Grundwassertemperaturen führt (Menberg et al., 2014). Auf Grundlage der historischen Daten wurde in dieser Studie zuerst die thermische Diffusivität mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate kalibriert. Als Datengrundlage für die Berücksichtigung des Klimawandels wurden prognostizierte Jahresdurchschnittstemperaturen in 2 m Höhe („Surface Air Temperature“, SAT) am Standort der Messstelle aus dem „NEX-GDDP-CMIP5“-Datensatz der NASA herangezogen (NCCS – NASA Center for Climate Simulation, 2024).

Um die Bandbreite der zukünftigen Entwicklung möglichst sinnvoll abzudecken, wurden hier die Szenarien „RCP4.5“ (RCP = Representative Concentration Pathway) und „RCP8.5“ als Eingangsdaten der Modellierung gewählt. Im Szenario „RCP4.5“ wird davon ausgegangen, dass sich die Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre bei ca. 650 ppm CO₂-Äquivalent stabilisiert, was einer durchschnittlichen globalen Erwärmung von ca. 2,6 °C bis zum Jahr 2100 im Vergleich zum vorindustriellen Zustand entspräche. „RCP8.5“ entspricht einem „Weiter-wie-gewohnt“-Szenario mit steigenden Treibhausgasemissionen (ca. 1370 ppm CO₂-Äquivalent im Jahr 2100), so dass die globalen Temperaturen bis zum Jahr 2100 durchschnittlich um ca. 4,8 °C ansteigen würden.

Die Ergebnisse dieses Ansatzes zeigen generell, dass die Grundwassertemperaturen aufgrund des geringen Flurabstands mit einer Verzögerung von wenigen Jahren auf thermische Änderungen an der Oberfläche reagieren. Die thermische Diffusivität der ungesättigten Zone im Bereich von $1,6 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ beschreibt die zeitliche Dämpfung der thermischen Signale. Für beide Klimaszenarien ergibt sich ein signifikant ansteigender Trend in den Grundwassertemperaturen, der

die Entwicklung der vergangenen Jahrzehnte fortführt (Abb. 1.7). Dabei ergeben sich im optimistischen Szenario („RCP4.5“) im Jahr 2100 Grundwassertemperaturen von ca. 13 °C, was einem Anstieg von 3 °C im Vergleich zum Mittelwert der Referenzperiode 1968 – 2018 entspricht. Das „Weiter-wie-gewohnt“-Szenario dagegen führt zu durchschnittlichen Lufttemperaturen im Bereich von 17 °C und Grundwassertemperaturen von 15 °C (+5 °C) in ländlichen Gebieten.

Abbildung 1.7: Modellierte Entwicklung der Grundwassertemperaturen mit dem Klimawandel im Bereich des Oberrheingraben außerhalb urbaner Gebiete



Datenquellen: gemessene Lufttemperaturen: Deutscher Wetterdienst; prognostizierte Lufttemperaturen: „NEX-GDDP-CMIP5“-Datensatz der NASA zu RCP4.5 und RCP8.5 (ACCESS1-0 Model); Grundwassertemperaturen (1968 – 2018): Grundwasserdatenbank des Landesamts für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW).

Während diese Abschätzung unter ausschließlicher Berücksichtigung des Klimawandels für den ländlichen Raum gemacht wurde, kommen in städtischen Gebieten weitere Faktoren hinzu, die die zukünftige Entwicklung der Temperaturen in oberflächennahen GWL mitbeeinflussen werden. Neben den in Abschnitt 1.6.2.2 beschriebenen Temperaturanstiegen im Bereich neuer Gebäude und Wohngebiete sind hier vor allem stadtklimatische Prozesse, insbesondere der Effekt der urbanen Wärmeinsel, zu nennen. Derzeit besteht schon eine Temperaturdifferenz im Bereich von 3,5 °C bis 4,5 °C in der durchschnittlichen Lufttemperatur zwischen urbanen Gebieten und ihrer Umgebung (u. a. Henning und Limberg (2012)).

Der Unterschied soll pro Dekade noch zwischen 0,1 °C und maximal 1° C zunehmen, so dass für das Jahr 2050 ein Unterschied von bis zu 7 °C zwischen urbanen Gebieten und ihrer Umgebung anzunehmen ist; bezogen auf das Beispiel ergibt sich also für das „Weiter-wie-gewohnt“-Szenario eine durchschnittliche Lufttemperatur in urbanen Räumen von 21 – 24 °C. Dies würde dann in erster Näherung und unter der Annahme, dass zwischen den durchschnittlichen Luft- und Grundwassertemperaturen eine Differenz von 2 °C liegt, durchschnittlichen Grundwassertemperaturen von 19 – 22 °C entsprechen.

Obwohl bei diesen Werten beachtet werden muss, dass der verwendete ortsspezifische und auf vereinfacht betrachteten physikalischen Prozessen basierende Ansatz mit einer Reihe von Unsicherheiten behaftet ist, deuten die prognostizierten durchschnittlichen Temperaturveränderungen im urbanen geologischen Untergrund auf einen zumindest konzeptionellen und regulativen Handlungsbedarf zur Kontrolle der Temperaturentwicklung im urbanen geologischen Untergrund hin. Dies gilt insbesondere, wenn die intensivierten thermischen Nutzungen (zum Kühlen und Heizen) des geologischen Untergrunds als auch eine veränderte bauliche Nutzung des geologischen Untergrunds (z. B. durch Tiefgründungen, untertägige Bauten und Transportwege) zusätzlich einen signifikanten Temperatureffekt verursachen.

Resümee 1.2

Obwohl die Datenlage noch auf Einzeluntersuchungen basiert, kann davon ausgegangen werden, dass bereits heute eine flächendeckende signifikante Erhöhung der Grundwassertemperatur im urbanen geologischen Untergrund in Deutschland um bis zu 6 °C (mit lokalen Spitzenwerten von bis zu 30 °C) festzustellen ist. Diese Temperaturen überschreiten z. T. die bestehenden Grenzwerte für oGT signifikant.

Der durchschnittliche Temperaturanstieg in urbanen oberflächennahen Grundwasservorkommen liegt bei 0,2 – 1,0 °C pro Dekade. Außerhalb urbaner Gebiete wurden im Vergleich dazu Temperaturanstiege in oberflächennahen GWL zwischen -0,5 °C und 0,6 °C beobachtet. Die Hauptursachen für den stärkeren Temperaturanstieg im urbanen geologischen Untergrund sind aktuell unkontrollierte Wärmeeinträge aus Gebäudekellern und andere städtische Infrastrukturelementen, die **nicht** unmittelbar der Wärmeversorgung dienen.

Ortsspezifische und belastbare Prognosen zur zukünftigen Temperaturentwicklung der GWL in urbanen Gebieten für die kommenden Dekaden in Abhängigkeit städtebaulicher Entwicklungen existieren derzeit nicht. Temperaturprognosen für die Atmosphäre deuten allerdings darauf hin, dass die durchschnittliche Lufttemperatur in Städten in den kommenden Dekaden bis zum Jahr 2100 um 5 – 10 °C höher sein werden als die jeweilige nicht-urbane Umgebungstemperatur, für die ein Anstieg von 1 – 3 °C anzunehmen ist. Geht man weiter davon aus, dass zukünftig weiterhin die GWL-Temperaturen zeitlich verzögert dem Jahresmittel der Lufttemperatur entsprechen, dann erscheint ein weiterer Temperaturanstieg in urbanen Gebieten von 6 – 13 °C in den kommenden einhundert Jahren plausibel.

Prognosen, was ein intensivierter Wärmeeintrag von oGT und insbesondere von UTES als zusätzliche Wärmequellen bedeuten würde, existieren derzeit nicht. Erste und sicherlich noch nicht verallgemeinerbare Abschätzungen auf Basis der in dieser Studie dargestellten Szenarienanalysen deuten darauf hin, dass die thermischen Veränderungen durch städtische Infrastruktur und durch die Wärmeverluste aus UTES-Anlagen, bezogen auf eine oberirdische Fläche von z. B. einem Quadratkilometer, in der gleichen Größenordnung liegen.

Vor dem Hintergrund der zu erwartenden signifikanten Temperaturveränderungen in oberflächennahen GWL in urbanen Gebieten (auch unabhängig von oGT-Anlagen) erscheint ein großräumiges thermisches Management des geologischen Untergrunds und die Erfassung **aller** signifikanten untertägigen Wärmequellen und -flüsse essentiell.

Bei einer intensivierten thermischen Nutzung des urbanen geologischen Untergrunds mit oGT, insbesondere UTES-Anlagen, ist ein entsprechendes thermisches Management mit kontinuierlichem Monitoring und Prognose in Abhängigkeit von städtebaulichen Maßnahmen und der Klimaent-

wicklung notwendig. Dies gilt insbesondere für eine wirtschaftlich optimierte thermische Bewirtschaftung des geologischen Untergrunds, aber auch im Hinblick auf potenzielle Umweltauswirkungen der zukünftig verstärkten Wärmeflüsse in den geologischen Untergrund.

Die Umsetzung entsprechender thermisch-hydraulischer Managementansätze ist derzeit allerdings durch die Anwendbarkeit belastbarer numerischer 3D- bzw. 4D-Modelle sowie eine hinreichende Datenbasis eingeschränkt. Hier besteht dringender Handlungsbedarf bei der Weiterentwicklung von Simulationsprogrammen und der Datenverfügbarkeit.

Regulativ ist der derzeit signifikant transiente Zustand der thermischen Entwicklung des geologischen Untergrunds zu berücksichtigen. Konkret ist zeitnah auch im Kontext der Ergebnisse aus Kapitel 3 zu diskutieren, inwieweit eine Festlegung auf eine Delta-1-K-Grenze mittelfristig vor dem Hintergrund der laufenden Erwärmung des geologischen Untergrunds sowie der Heterogenität der Temperaturverteilung zielführend ist.

1.3 Datengrundlagen zur räumlichen Verteilung von Wärmebedarfen (Heizen und Kühlen) sowie Ableitung von Bedarf und grundsätzlichen Ausbaumöglichkeiten von oGT und UTES

Obwohl eine thermische Nutzung des oberflächennahen geologischen Untergrunds mittels oGT-Anlagen zum Wärmeentzug zunehmend stärker Berücksichtigung findet, wird ein Bedarf an und die Möglichkeiten von saisonaler Wärmespeicherung im geologischen Untergrund (saisonale (HT-)UTES-Anlagen) zumeist, wie bereits dargestellt, nicht oder nur sehr eingeschränkt im Portfolio von Maßnahmen zur Energiesystemtransformation berücksichtigt. Für eine Ersteinschätzung des Bedarfs und der Möglichkeiten oberflächennaher geothermischer Nutzungen und insbesondere von (HT-)UTES-Anlagen ist es vor diesem Hintergrund erforderlich, einleitend die verfügbare Datenbasis aufzuzeigen. In Abschnitt 1.3.1 wird daher die räumliche Datenlage zu gegenwärtigen Wärme- und Kältebedarfen von Gebäuden in Form von Wärmekatastern und deren öffentliche Verfügbarkeit zusammengestellt, da diese Hinweise auf den ortskonkreten Ausbaubedarf von oGT und (HT-)UTES-Anlagen bieten können. Abschnitt 1.3.2 dokumentiert die Sichtung öffentlich verfügbarer geologischer Daten, die bereits einen ersten Überblick für die Möglichkeit der Nutzung von oGT bzw. UTES in offenen oder geschlossenen Systemen bieten und aus denen sich auch quantitativ erste Orientierungswerte für Nutzungsoptionen ableiten lassen. Diese erste Datensichtung wird in Abschnitt 1.3.3 untersetzt, indem für eine thermische Nutzung des geologischen Untergrunds relevante Parameter des oberflächennahen geologischen Untergrunds benannt und hinsichtlich Bedeutsamkeit und Verfügbarkeit eingeordnet werden. Eine Befragung verschiedener Akteure sollte unter anderem dazu dienen, den weiteren, nicht öffentlichen Datenbestand sowie Datenbedarfe aufzuzeigen (Abschn. 1.3.4).

1.3.1 Räumliche Daten zum Wärmebedarf (Heizen und Kühlen) von Gebäuden

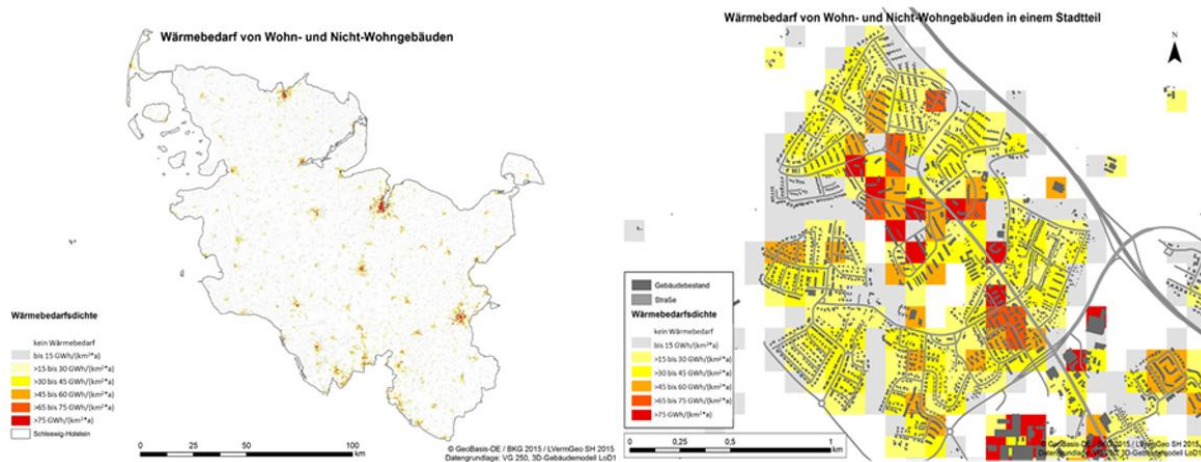
Die Einschätzung von Ausbaumöglichkeiten der oGT-Anlagen (einschließlich UTES-Anlagen) zu Heiz- und Kühlzwecken erfolgte in dieser Studie anhand von Wärmekatastern (bzw. -atlanten oder -plänen) und lässt sich im methodischen Vorgehen wie folgt skizzieren.

- Der gewählte Fokus der Datensichtung lag auf **Geodaten zum Heiz- und Kühlbedarf von Wohn- und Nicht-Wohngebäuden**, da derartige Datensätze für eine räumliche, GIS-basierte Abschätzung des Ausbaupotenzials der oGT essentiell sind. Darauf aufbauend kann, zum Beispiel in der Kombination mit Geodaten zur potenziellen Wärmeentzugsleistung oder

mittels Simulationen, der mögliche Deckungsanteil der oGT am Gesamtwärmebedarf eines definierten Gebiets geschätzt werden (Tissen et al., 2019a). Dabei ist die Verortung des aktuellen und zukünftigen Wärmebedarfs im Verhältnis zur Lage von Räumen, die für die Nutzung der oGT geeignet sind, entscheidend, da zum Beispiel die Bohrungen für ein EWS-Feld in räumlicher Nähe zum Wärmebedarf abgeteuft werden sollten (Bracke et al., 2015; Miocic und Krecher, 2022).

- ▶ Informationen zu **Wärmebedarfsdichten** (z. B. als $\text{MWh}/(\text{ha} \cdot \text{a})$ oder $\text{GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$) wurden als erste Anhaltspunkte zur Eignung eines Gebiets zur Versorgung mittels eines Wärmenetzes gewertet, das dann im Sinne einer „Wärmewende“ idealerweise komplett oder zumindest teilweise erneuerbar betrieben (z. B. mittels tiefer Geothermie, Solarthermie, Abwärme oder Großwärmepumpen) und insbesondere durch saisonale UTES-Anlagen unterstützt werden könnte. Auch können UTES-Anlagen unter Umständen in dort bereits vorhandene Wärmenetze eingebunden werden. Grundsätzlich sind hohe Wärmebedarfsdichten, die Schwellenwerte von z. B. $15 \text{ GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ oder $30 \text{ GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ (Hausladen und Hamacher, 2012; MELUR – Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein, 2014; Hertle et al., 2015) übertreffen, Indikatoren für die Ausweisung potenzieller Wärmenetzgebiete, in denen wiederum saisonale UTES-Anlagen bei der Integration von Wärmequellen unterstützen können (vgl. z. B. Abb. 1.8).
- ▶ **Wärmekataster** ermöglichen für ein bestimmtes Gebiet die Kombination von Geodaten zum jährlichem Wärmebedarf zum Heizen und gegebenenfalls Kühlen (Raumwärme, Warmwasser, Prozesswärme) von privaten Haushalten, Gewerbe und Industrie mit weiteren Geodaten, z. B. von Standorten mit bereits vorhandenen Wärmeerzeugungsanlagen, zur Lage existierender Wärme-Energieinfrastrukturen (Leitungen von Wärme- und Gasnetzen) und zu Gebieten mit Potenzialen für die Wärmebereitstellung aus erneuerbaren Energiequellen (Abwärme, Biomasse, Solarthermie, Geothermie).

Abbildung 1.8: Beispiele von Geodaten zu Wärmebedarfsdichten auf Ebene eines Bundeslands und eines Stadtteils in einer Großstadt



Links: Beispiel von Geodaten zu Wärmebedarfsdichten auf Ebene eines Bundeslands (Einheit: GWh/(km² · a)), rechts: Beispiel von Geodaten zu Wärmebedarfsdichten auf Ebene eines Stadtteils in einer Großstadt (Kachelgröße: 1 ha).

Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. Datengrundlage: Walberg et al., 2012; BKG – Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2021; LVermGeo SH – Landesamt für Vermessung und Geoinformation Schleswig-Holstein, 2021

Die Datenverfügbarkeit von Wärmekatastern stellt sich wie folgt dar.

Ein (kommerzielles) deutschlandweites Wärmekataster wird von der Firma Ifeu angeboten (Institut für Energie- und Umweltforschung gGmbH Heidelberg et al., 2019), das in einer früheren Version bereits für die Einschätzung des Ausbaupotenzials der oberflächennahen Geothermie sowie der tiefen Geothermie in Wärmenetzen genutzt wurde (Jochum et al., 2017). Aus zwei europäischen Forschungsprojekten sind zusätzlich Geodaten zu Wärmebedarfsdichten auf europäischer Ebene (inkl. Deutschland) über Geo-Portale einsehbar. Dort finden sich auch Geodaten zu Kältebedarfsdichten (EUF – Europa-Universität Flensburg et al., 2018; Kranz et al., 2019).

Auf Ebene der Bundesländer sind derartige Geodaten bzw. Wärmekataster meist in einen übergeordneten „Energieatlas“ eingebunden. Diese werden online über Geo-Portale von Landesbehörden öffentlich einsehbar bereitgestellt und sind zum Teil auch als GIS-kompatible Datensätze und Dienste nutzbar. Tabelle 1.5 zeigt eine Übersicht veröffentlichter Geodaten zu Wärmebedarfsdichten und Wärmebedarfsdichten (Heizen) auf Ebene der Bundesländer. Daten zum Wärmebedarf zu Kühlzwecken sind aktuell nicht entsprechend aufbereitet verfügbar.

Tabelle 1.5: Räumlich differenzierte Datensätze zum Wärmebedarf der Bundesländer, Ergebnisse der Sichtung von Wärmekatastern in Energieatlanten und Geo-Portalen der Bundesländer

Ergebnisse der Sichtung von Wärmekatastern in Energieatlanten und Geo-Portalen der Bundesländer

Bundesland	Wärmebedarf (räumliche Aggregation) <i>Einheit</i>	Wärmebedarfsdichte (räumliche Aggregation) <i>Einheit</i>	zeitliche Auflösung	Verfügbarkeit (Datenformat)	Quelle
Baden-Württemberg	-	nur Wohngebäude (Baublock bis Ortslage) <i>MWh/ha</i> <i>kWh/m² Wohnfläche</i>	jährlich	einsehbar im Geo-Portal	LUBW, 2021
Bayern	-	-	-	-	-
Berlin	Wohn- und Nicht-Wohngebäude* (PLZ-Gebiet bis Stadtbezirk) <i>GWh</i>		jährlich	als Geo-Dienst (WMS, WFS)	SWEB, 2021
Brandenburg	-	-	-	-	-
Bremen	Wohn- und Nicht-Wohngebäude (Einzelgebäude) <i>kWh</i>	Wohn- und Nicht-Wohngebäude (100 · 100 m) <i>„niedrig“ bis „hoch“</i>	jährlich	-	wesernetz, 2021
Hamburg	Wohn- und Nicht-Wohngebäude unsaniert, saniert (Gebäudecluster bis Baublock) <i>MWh</i>	Wohn- und Nicht-Wohngebäude unsaniert, saniert (Gebäudecluster bis Baublock) <i>kWh/m² Nutzfläche</i>	jährlich	als Geo-Dienst (WMS) als Download (shp, gml)	LGV, 2021
Hessen	-	-	-	-	-
Mecklenburg-Vorpommern	-	-	-	-	-
Niedersachsen	-	-	-	-	-
Nordrhein-Westfalen	Wohn- und Nicht-Wohngebäude (Gemeinde bis Regierungsbezirk) <i>GWh</i>	Wohn- und Nicht-Wohngebäude (100 · 100 m) <i>kWh/ha</i>	jährlich	einsehbar im Geo-Portal	LANUV, 2021
Rheinland-Pfalz	-	-	-	-	-
Saarland	Wohngebäude Trend 2025, 2030 Nicht-Wohngebäude (Quartiere) <i>kWh</i>	Wohn- und Nicht-Wohngebäude (Quartiere) <i>kWh/m² EBF</i>	jährlich	als Download (shp, gml)	LVGL, 2021
Sachsen	-	-	-	-	-
Sachsen-Anhalt	-	-	-	-	-

Bundesland	Wärmebedarf (räumliche Aggregation) <i>Einheit</i>	Wärmebedarfsdichte (räumliche Aggregation) <i>Einheit</i>	zeitliche Auflösung	Verfügbarkeit (Datenformat)	Quelle
Schleswig-Holstein	-	Sektoren „Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistung“ (km ²) TJ	-	einsehbar im Geo-Portal**	EUf et al., 2021
Schleswig-Holstein	Wohn- und Nicht-wohngebäude (Gemeindeebene) MWh/a	Wohn- und Nicht-wohngebäude (100 · 100 m) MWh/ha	jährlich	Einsehbar im Digitalen Atlas Nord und als Download	Daten aus Schwanebeck et al. (2021) im DANord und MIS
Thüringen	-	-	-	-	-

* Verbrauchsdaten Fernwärme und Gas des Energieversorgers, ** Geo-Portal des Forschungsprojekts „Wärmeplan.SH“.

EBF = Energiebezugsfläche.

DANord: Digitaler Atlas Nord – <https://danord.gdi-sh.de/viewer/resources/apps/Waerme/index.html?lang=de#/>; MIS: Schleswig-Holsteinisches Metainformationssystem – <https://sh-mis.gdi-sh.de/catalog/?lang=de#/datasets/iso/28c41f71-0118-4114-8bd2-30380c3b6101>.

Innerhalb der Bundesländer existieren zum Teil auf Landkreisebene weitere regionale Wärme-kataster, die zum Teil sogar einen höheren Detaillierungsgrad als die landesweiten Wärmekataster aufweisen (siehe z. B. Landkreise Plön (2018) und Dithmarschen (Gottschick et al., 2017) in Schleswig-Holstein).

Für die konkrete Dimensionierung von EWS- oder WWA-Wärmepumpen zur Einzelgebäude- oder Quartiersversorgung und die Einschätzung des resultierenden Raumbedarfs der Anlagen oder Systeme müssen jedoch zeitlich höher aufgelöste Daten zum Wärme- und Kältebedarf vorliegen (monatlich, täglich, stündlich anstatt jährlich, vgl. Kap. 1). Dies ist auch bei Einbindung einer UTES-Anlage in einem Wärmenetz der Fall, wobei hier neben dem Bedarf der an das Netz angeschlossenen Gebäude auch Daten zu den in das Netz einspeisenden Wärmeerzeugungsanlagen berücksichtigt werden müssen. Liegen hierzu keine gemessenen Verbrauchs- oder Einspeisedaten in Form von Lastgängen vor, können diese derzeit nur abgeschätzt werden. Zwar können mit Hilfe von GIS-basierten Modellen und Geodaten zum Gebäudebestand diese Abschätzungen verbessert werden (vgl. Abschn. 1.3.1 sowie Nouvel et al. (2017) und Popovski et al. (2019)), wünschenswert bis notwendig erscheint allerdings zukünftig eine Handhabe zur Offenlegung dieser prinzipiell bereits vorhandenen Datenbestände, um Transformationspfade der Wärmeversorgung zukünftig transparent und nachvollziehbar zu gestalten (Maaß, 2020).

Für die Einschätzung des Ausbaupotenzials und die vorausschauende Dimensionierung von oGT-Anlagen und -Systemen ist es zudem relevant, die zukünftige Entwicklung des jeweiligen Wärme- und Kältebedarfs, den die Anlagen oder Systeme versorgen sollen, zu berücksichtigen (vgl. Abschn. 1.1.2). Faktoren wie die energetische Sanierung von Gebäuden oder die Veränderungen der jährlichen Heiz- und Kühlgradtage aufgrund des Klimawandels können im Nutzungszeitraum der oGT-Anlagen Einfluss auf den zu versorgenden Wärme- und Kältebedarf haben und letztendlich auch den untertägigen Raumbedarf der Anlagen und Systeme beeinflussen. Solche Geodaten zum zukünftigen Wärmebedarf sind bisher nur in zwei Bundesländern verfügbar.

Gebiete ohne Gebäudebestand und damit ohne Wärme- oder Kältebedarf bieten aktuell auch keinen Ausbaubedarf für UTES- oder sonstige oGT-Anlagen, unabhängig von der eventuell dafür ge-

eigneten Geologie. Eine Einschätzung des zukünftigen zusätzlichen Ausbaubedarfs für oGT-Anlagen durch Neubau ließe sich allerdings nur bei Kenntnis geplanter Baugebiete und der weiteren baulichen Entwicklung von Siedlungen und Städten umsetzen und räumlich darstellen.

Zwischenfazit 1.3.1

Daten zu Parametern des Wärmebedarfs von Gebäuden (Heizen und Kühlen) sind für die Einschätzung des Ausbaubedarfs der oGT sowie für die konkrete Dimensionierung von EWS- und WWA-Wärmepumpensystemen sowie UTES-Anlagen und die Abschätzung des resultierenden Raumbedarfs hoch relevant, jedoch leider nur bedingt öffentlich verfügbar. Die Situation lässt sich folgend zusammenfassen.

Die Bundesländer stellen zum Teil räumlich differenzierte Datensätze (Geodaten) zum gegenwärtigen jährlichen Wärmebedarf der Wohn- und Nicht-Wohngebäude in ihren online zugänglichen Geo-Portalen in Form von Energieatlanten und Wärmekatastern zur Einsicht oder auch zur weiteren Verwendung bereit. Oft sind diese Daten auch als Wärmebedarfsdichten, bezogen auf unterschiedliche Gebietseinheiten, aufbereitet. Geodaten zum Kühlungsbedarf des Gebäudebestands konnten im Rahmen der durchgeführten Sichtung in keinem Bundesland identifiziert werden.

Für eine erste großräumige Einschätzung des Ausbaubedarfs von oGT- und UTES-Anlagen sind die z. T. veröffentlichten Geodaten zum jährlichen Wärmebedarf oder zur Wärmebedarfsdichte als Indikator verwendbar. Zur konkreten Dimensionierung und Abschätzung des Raumbedarfs einzelner oGT-Anlagen oder ganzer -Systeme werden zeitlich höher aufgelöste Daten zum Wärme- und Kältebedarf (monatlich, täglich, stündlich) der zu versorgenden Gebäude benötigt.

Wünschenswert bis notwendig erscheint allerdings künftig eine Handhabe zur Offenlegung dieser prinzipiell bereits vorhandenen Datenbestände, um Transformationspfade der Wärmeversorgung zukünftig transparent und nachvollziehbar zu gestalten.

1.3.2 Sichtung der geowissenschaftlichen Datengrundlage für einen ersten Quantifizierungsansatz der Ausbaumöglichkeiten von oGT- und UTES-Anlagen

Für die Einschätzung von Nutzungsmöglichkeiten des oberflächennahen geologischen Untergrunds für oGT und UTES wurden geologische Karten, beispielsweise der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR, 2020), für einen ersten Überblick über die grundlegende Verteilung geologischer Einheiten verwendet. Darauf aufbauend war es erforderlich, den Überblick an geologischen Daten über den Tiefenbereich der obersten 100er-Meter zusammenzustellen, da dieser für die in der vorliegenden Studie diskutierten Untergrundnutzungen relevant war. Dabei legte die vorliegende Studie mangels einer frei verfügbaren bundesweiten Geodatengrundlage zum Wärmebedarf den Fokus auf die Betrachtung von (Groß-)Städten mit mehr als 100.000 Einwohnern, da sich diese im Allgemeinen durch eine hohe (Wohn-)Bebauungsdichte sowie eine hohe Wärmebedarfsdichte (Heizung und wahrscheinlich auch Kühlung) (vgl. Abschn. 1.3.1) auszeichneten.

Die Staatlichen Geologischen Dienste (SGD) der Bundesländer bieten über ihre Geo-Portale verschiedene Informationen zum geologischen Untergrund an, die in der Mehrheit der Länder auch die Einsicht in für die Öffentlichkeit freigegebene Bohrprofile beinhalten:

- Freigegebene Bohrprofile über Online-Geo-Portale einsehbar:

Bayern², Berlin³, Bremen⁵, Hamburg⁶, Mecklenburg-Vorpommern⁸, Niedersachsen⁹, Nordrhein-Westfalen¹⁰, Sachsen¹³, Sachsen-Anhalt¹⁴, Thüringen¹⁶

► Keine Bohrprofile über online-Geo-Portale einsehbar:

Baden-Württemberg¹, Brandenburg⁴, Hessen⁷, Rheinland-Pfalz¹¹, Saarland¹², Schleswig-Holstein¹⁵

Geo-Portale der SGD: ¹LGRB – Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, Regierungspräsidium Freiburg, 2022; ²LfU – Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2022; ³SenStadtBauWohn – Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Bauen und Wohnen Berlin, 2022; ⁴LBGR – Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg, 2022; ⁵GDfB – Geologischer Dienst für Bremen, 2022; ⁶GLA – Geologisches Landesamt Hamburg, 2022; ⁷HLNUG – Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, 2022; ⁸LUNG – Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, 2022; ⁹LBEG – Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen, 2022; ¹⁰GD NRW – Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen, 2022; ¹¹LGB-RLP – Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz, 2022; ¹²LVGL – Landesamt für Vermessung, Geoinformation und Landesentwicklung Saarland, 2022; ¹³LfULG – Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 2022; ¹⁴LAGB – Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt, 2022; ¹⁵MELUND – Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung des Landes Schleswig-Holstein, 2022; ¹⁶TLUBN – Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz Freistaat Thüringen, 2022

Hamburg, Berlin und Niedersachsen sowie z. T. Brandenburg bieten (hydro-)geologische Profilschnitte als abgeleitete Informationen an, welche Informationen über die räumliche Verbreitung geologischer Formationen vermitteln. Für Bundesländer, welche diese Informationen über den geologischen Untergrund nicht online bereitstellten, wurden beispielsweise analoge geologische Karten, wissenschaftliche Veröffentlichungen, Veröffentlichungen von Wasserversorgern und ähnliche Quellen nutzbarer geologischer Informationen zur Abschätzung des Ausbaupotenzials der oGT-Systeme verwendet.

Für eine erste Einschätzung der Nutzbarkeit des oberflächennahen geologischen Untergrunds wurde in dieser Studie definiert, welche geologischen Formationen sich für welche thermischen Untergrundnutzungen eignen können. Dabei wurde als Prämisse angenommen, dass sich Lockergesteins-Grundwasserleiter grundsätzlich für offene Systeme wie WWA-, EWS- und ATES-Anlagen eignen können. Für geschlossene Systeme wie EWS- und BTES-Anlagen können Lockergesteins-Geringleiter geeignet sein; eine Anwendung dieser Technologien in Grundwasserleitern ist grundsätzlich möglich, wurde in der vorliegenden Studie jedoch nicht schwerpunktmäßig untersucht. Festgesteine wurden in der vorliegenden Studie ebenso nicht explizit betrachtet, jedoch wurde angenommen, dass es in diesen grundsätzlich (außerhalb von z. B. Karstgebieten) möglich sein kann, geschlossene Systeme einzurichten.

Eine erste Sichtung der genannten geologischen Informationen verdeutlichte, welche der oben definierten Großstädte von Lockergesteinen bzw. von Festgesteinen unterlagert sind. Eine Sortierung der 81 Großstädte Deutschlands (destatis – Statistisches Bundesamt, 2019) nach Mächtigkeit des oberflächennahen Lockergesteins unter Geländeoberkante (u. GOK) zeigte, dass der geologische Untergrund von 40 % der Großstädte durch Lockergestein und von 60 % durch Festgestein dominiert wird. Mit dem skizzierten Vorgehen ergibt sich folgende Einteilung, wobei manche Städte wie z. B. Leipzig nicht aufgeführt wurden, weil sie nach der in dieser Studie verwendeten Methodik nicht erfasst wurden:

► Mächtigkeit Lockergesteine > 100 m u. GOK:

Augsburg, Berlin, Bremen, Bremerhaven, Darmstadt, Düsseldorf, Hamburg, Heidelberg*, Karlsruhe, Kiel, Köln, Krefeld, Lübeck, Ludwigshafen am Rhein, Mannheim, Mönchengladbach, Moers, München, Neuss, Oldenburg, Potsdam, Rostock

► Mächtigkeit Lockergesteine zwischen 50 m und 100 m u. GOK:

Bergisch-Gladbach, Dresden*, Frankfurt am Main, Freiburg im Breisgau, Leipzig*, Leverkusen, Mainz, Offenbach am Main, Osnabrück, Wiesbaden*

► Mächtigkeit Lockergesteine < 50 m u. GOK:

Aachen, Bielefeld, Bochum, Bonn, Bottrop, Braunschweig, Chemnitz*, Cottbus*, Dortmund, Duisburg, Erfurt, Erlangen, Essen, Fürth, Gelsenkirchen, Göttingen, Gütersloh, Hagen, Halle an der Saale, Hamm, Hannover, Heilbronn, Herne, Hildesheim, Ingolstadt, Jena, Kassel, Koblenz*, Mülheim an der Ruhr, Magdeburg, Münster, Nürnberg, Oberhausen, Paderborn, Pforzheim*, Recklinghausen, Regensburg, Remscheid, Reutlingen*, Saarbrücken, Salzgitter, Siegen, Solingen, Stuttgart, Trier*, Ulm*, Wolfsburg, Wuppertal, Würzburg

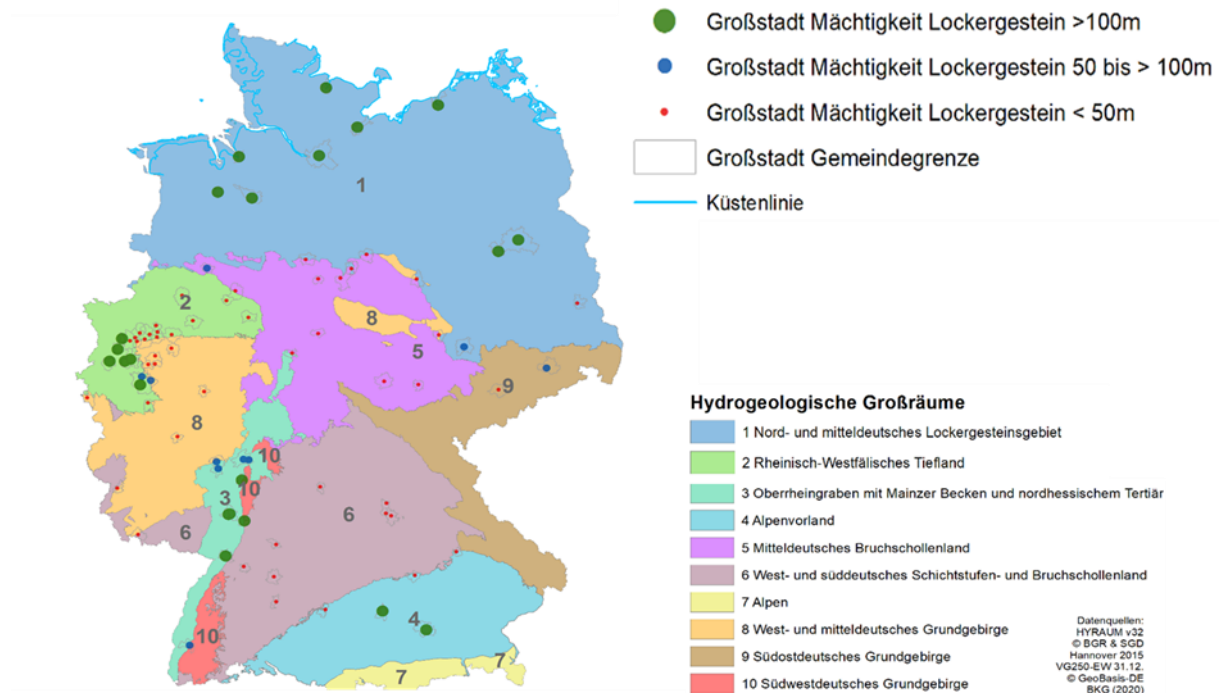
* Datenlage aufgrund der öffentlich verfügbaren Informationen unklar.

Großstädte mit einem zumindest größtenteils aus Lockergesteinen des Tertiärs und Quartärs bestehenden oberflächennahen geologischen Untergrund verteilen sich über die Norddeutsche und Mitteldeutsche Tiefebene, die Bayrische Molasse, den Oberrheingraben sowie in die Niederrheinische Bucht (Abb. 1.9). In den übrigen Landesteilen stehen Festgesteine mit tendenziell geringer ergiebigen Grundwasserleitern, sieht man von Karstgebieten ab, an.

Für Lockergesteins-Grundwasserleiter wurde in dieser Studie angenommen, dass eine ATES-Nutzung grundsätzlich möglich ist. Entsprechend wurde für Grundwassergeringleiter im Lockergestein sowie für Festgesteine eine mögliche BTES-Nutzung angenommen. Die Methodik wurde bewusst sehr einfach gewählt und vernachlässigte zahlreiche Faktoren, die für die Prognose tatsächlicher Speicherpotenziale zu berücksichtigen wären. Der vorgestellte Ansatz besteht aus vier Schritten, die im Rahmen der vorliegenden Studie für jede Großstadt Deutschlands umgesetzt wurden:

- Schätzung eines Untergrundvolumens, in dem die Nutzung als ATES oder BTES nach erster Betrachtung denkbar ist,
- Schätzung des derzeitigen Wärmebedarfs in deutschen Großstädten unter der vereinfachten Annahme, dass dieser dem saisonalen Wärme-Speicherbedarf entspricht,
- Prognose des Wärme-(Speicher-)Bedarfs für das Jahr 2050, welche auf dem derzeitigen Wärmebedarf aufbaut,
- beispielhafte Berechnung des zur saisonalen Speicherung einer bestimmten Wärmeenergie nötigen Untergrundvolumens.

Abbildung 1.9: Lockergesteinsmächtigkeit unter deutschen Großstädten in hydrogeologischen Großräumen Deutschlands



Quellen: Kartenhintergrund: Ad-hoc-Arbeitsgruppe Hydrogeologie (2016), Stadtlokalationen: (BKG, 2021); Klassifizierung Städte: Eigene Daten, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Für die Ableitung eines für eine ATES- und BTES-Nutzung vermuteten Untergrundvolumens wurden für jede Großstadt zunächst Bohrprofile und/oder geologische Profilschnitte eingesehen. Öffentlich einsehbare Bohrprofile und geologische Schnitte erstreckten sich zumeist in Tiefen bis ca. 100 – 200 m Tiefe u. GOK. Geologische Formationen des Untergrunds wurden so zusammengefasst, dass für jede Stadt maximal vier verschiedene geologische Einheiten mit Mächtigkeiten von Lockergesteins-Grundwasserleitern, -Geringleitern und Festgesteinen beschrieben wurden. War aus den geologischen Daten deutlich, dass sich eine geologische Einheit lateral nur über Teile der Stadt erstreckt, wurde die Mächtigkeit der Einheit mit einem Faktor < 1 belegt und eine sogenannte „lateral normierte Mächtigkeit“ abgeleitet. Diese ergab als Produkt mit der jeweiligen Stadtfläche (destatis – Statistisches Bundesamt, 2019) das für die geologischen Einheiten abgeleitete Volumen (Tab. 1.6).

Tabelle 1.6: Ableitung der Untergrundvolumina von Grundwasserleitern, Geringleitern und Festgesteinen an den Beispielsstädten Hamburg und Hannover

Stadt	Art der Formation	Betrachteter Teufenbereich [m u. GOK]	Mächtigkeit Teufenbereich [m]	Faktor zur lateralen Verbreitung unter der Stadt	„lateral normierte“ Mächtigkeit der Einheit [m]	Stadtfläche [km ²]	Volumen Grundwasserleiter im Lockergestein [km ³]	Volumen Grundwasser-Geringleiter im Lockergestein [km ³]	Volumen Grundwasser-Geringleiter im Festgestein [km ³]
Hamburg	Saale-glaziale Sande	0–100	100	0,8	80	755	60,4		
	Saale-glaziale Geschiebemergel	0–100	100	0,2	20	755		15,1	
	Elster-glaziale Rinnenwasserleiter und tertiäre Braunkohlesande	100–200	100	0,1	10	755	7,6		
	Elster-glaziale Geschiebemergel und Tone sowie tertiäre Tone	100–200	100	0,9	90	755		68,0	
Hannover	Weichsel- und Saale-glaziale Sande	0–20	20	0,7	14	204	2,9		
	kretazischer Tonstein	0–20	20	0,3	6	204			1,2
	kretazischer Tonstein	20–200	180	1,0	180	204			36,8

Als zweiter Schritt wurden derzeitige Wärmebedarfe der Großstädte geschätzt, um nicht auf kostenpflichtige Daten aus ifeu et al. (2019) zurückgreifen zu müssen. Zur Schätzung der derzeitigen Wärmebedarfe wurde der deutschlandweite Endenergieverbrauch für Wärmeanwendungen in Gebäuden (Raumwärme- und Warmwasser in Wohngebäuden und gewerblichen Gebäuden) verwendet, welcher sich im Jahr 2017 auf insgesamt 830 TWh summierte BMWi (2019a). Für Ende des Jahres 2018 meldete das Statistische Bundesamt (destatis – Statistisches Bundesamt, 2019) eine Einwohnerzahl von 83 Millionen, woraus sich ein durchschnittlicher Pro-Kopf-Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser („Wärmebedarf“) von 10 MWh pro Jahr errechnete. Die geschätzten aktuellen Wärmebedarfe der Großstädte ergaben sich aus dem Produkt dieses durchschnittlichen Pro-Kopf-Wärmebedarfs mit der Einwohnerzahl der jeweiligen Stadt. Tab. 1.7 zeigt, dass diese sehr grobe Schätzung jedenfalls in der Größenordnung zutreffend ist.

Für Prognosen der städtischen Wärmebedarfe im Jahr 2050 gaben verschiedene Quellen (Gerhardt et al., 2015; BMWi, 2015; Bürger et al., 2017; Pfluger et al., 2017b; Purr et al., 2019) eine Spannweite zwischen 63 % und 33 % des Wärmebedarfs von 2017 an; hier wurde ein Anteil von 50 % in Bezug auf den derzeitigen Wärmebedarf angenommen.

Eine Ableitung des Verhältnisses von Wärmebedarf und Wärme-Speicherbedarf existiert in der Literatur bislang nicht. Als saisonale Wärme-Speicherbedarfe wurden daher sehr konservativ im

Hinblick auf die Abschätzung des Speicherbedarfs die jährlichen Wärmebedarfe angenommen. Mit dieser Annahme werden Speicherbedarfe voraussichtlich deutlich überschätzt, da die zukünftige Wärmeversorgung nicht allein über die saisonalen Wärmespeicher erfolgen, sondern zu einem bedeutenden Teil auch über direkte Wärmeeinspeisungen erfolgen wird (Tab. 1.7).

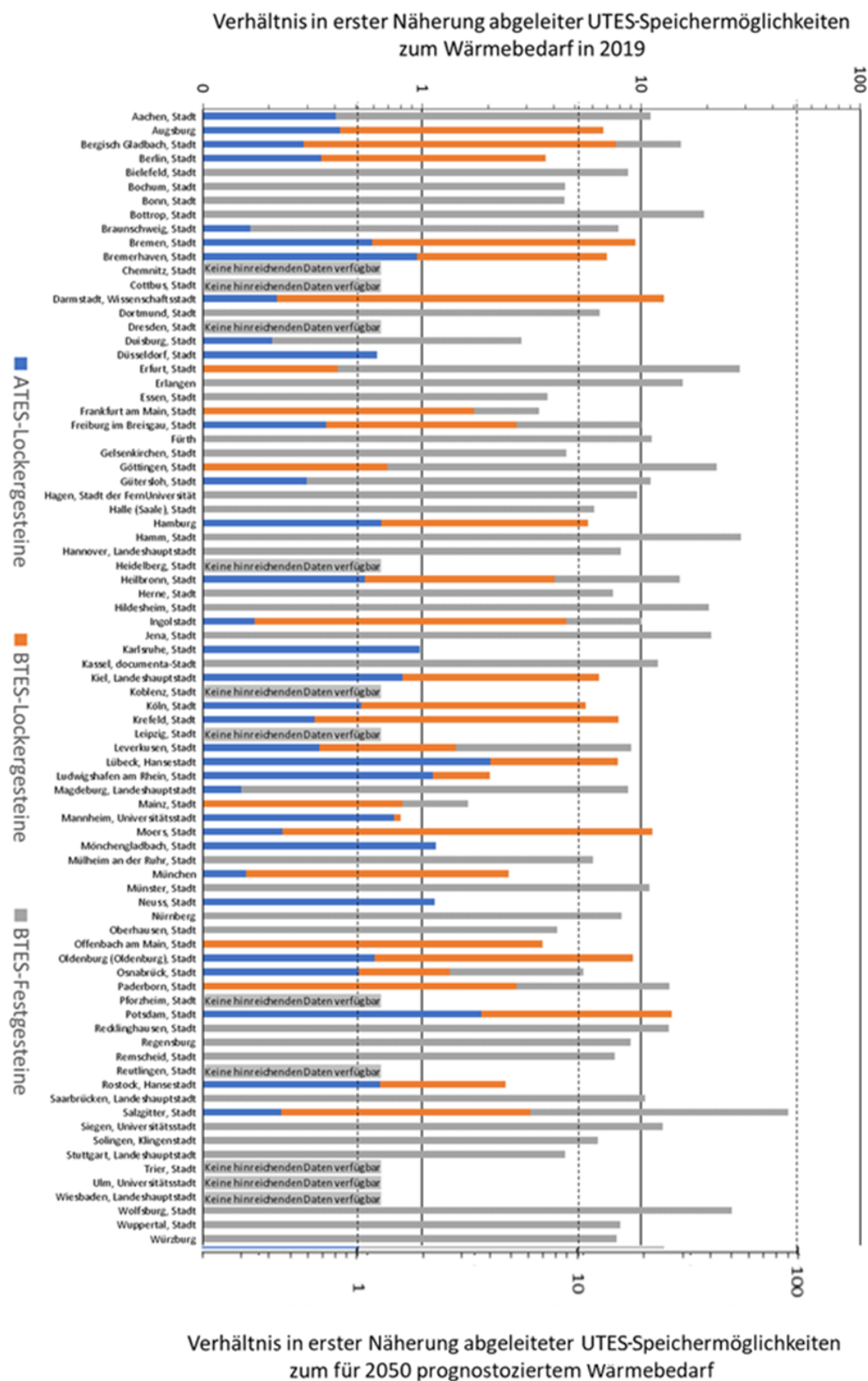
Tabelle 1.7: Wärmebedarfe, Bedarfsprognosen sowie geschätzte Wärme-Speicherbedarfe für das Jahr 2050 für Berlin, Hamburg und München

Stadt	Publizierte jährliche Wärmebedarfe [TWh/a]	Einwohner [Mio.]	Städtischer Wärmebedarf bei 10 MWh/Einw. [TWh/a]	Prognose des jährlichen Wärme- (Speicher-)Bedarfs für 2050 [TWh/a]
Berlin	27,7 ¹	3,64	36,4	18,2
Hamburg	19,8 ²	1,84	18,4	9,2
München	14,9 ³	1,47	14,7	7,4

Aktuelle Wärmebedarfe für ¹Berlin aus 2017 (SWEB – Senatsverwaltung für Wirtschaft, Energie und Betriebe Berlin, 2021), ²Hamburg aus 2013 (Walberg, 2016), ³München aus dem Jahr 2015 (Kenkmann et al., 2017). Wärmebedarfe für 2050 prognostiziert zu im Mittel 50 % der aktuellen Wärmebedarfe. Wärmebedarfe zur Kühlung sind nicht berücksichtigt.
Quelle: Walberg, 2016; Kenkmann et al., 2017; SWEB, 2021.

Als vierter und letzter Schritt dieses Orientierungsansatzes wurde die Beziehung zwischen den im geologischen Untergrund möglicherweise als Wärmespeicher nutzbaren Volumina (Tab. 1.6) mit den prognostizierten Wärme-Speicherbedarfen für das Jahr 2050 (Tab. 1.7) hergestellt. Dafür wurden bereits an dieser Stelle Ergebnisse numerischer Simulationen für beispielhafte ATES- und BTES-Typbeispiele verwendet, die in Abschnitt 1.4.4 im Detail vorgestellt werden. In den hier verwendeten ATES- und BTES-Speicherszenarien wird Wärme saisonal gespeichert, und eine Wärmeenergie von 2,4 GWh (ATES) bzw. 3,0 GWh (BTES) ist aus dem jeweiligen untertägigen Speicher entnehmbar. Diese Szenarien berücksichtigten eine Einspeichertemperatur in den geologischen Untergrund von 70 °C und eine Rücklauftemperatur in den geologischen Untergrund nach Wärmeentzug von 30 °C. In den Simulationen wurde unter anderem das Untergrundvolumen berechnet, in dem sich die Temperatur des geologischen Untergrunds durch eine saisonale Wärmespeicherung um mindestens 1 °C gegenüber der natürlichen Hintergrundtemperatur verändert, was als Gesamtgröße des Speichers verstanden wird. Dieser im Hinblick auf die Volumenabschätzung sehr konservative Ansatz wurde gewählt, um das untertägig verfügbare thermische Speichervolumen nicht zu überschätzen bzw. möglichst die Obergrenze des verfügbaren Speichervolumens anzugeben. Ein solcher Typspeicher benötigt danach als ATES-Variante ein Volumen von rund 14 Mio. m³ bzw. 0,014 km³ und als BTES-Variante ein Volumen von ca. 2,7 Mio. m³ bzw. 0,0027 km³. Mit den zuvor abgeleiteten verfügbaren Volumina für mögliche ATES- und BTES-Anwendungen ließ sich auf die speicherbare Wärme mit derartigen Typspeichern schließen; dies geschah zunächst in den jeweiligen geologischen Einheiten und anschließend in Summe für jede Großstadt (Abb. 1.10). Diese speicherbare Wärme ist in Tabelle 1.8 beispielhaft für Hamburg (nur Lockergesteine) und Hannover (Locker- und Festgesteine) abgebildet und wird mit den für das Jahr 2050 prognostizierten Wärme-Speicherbedarfen in den jeweiligen Städten verglichen.

Abbildung 1.10: Abgeleitete UTES-Nutzungspotenziale des oberflächennahen geologischen Untergrunds der Großstädte Deutschlands bezogen auf den Wärmebedarf des Jahres 2019 bzw. auf den prognostizierten Wärmebedarf des Jahres 2050



Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Als Ergebnis zeigt sich für jede Großstadt Deutschlands das Verhältnis der abgeleiteten im oberflächennahen geologischen Untergrund speicherbaren Wärmeenergie (gegliedert nach den Systemen ATES-Lockergestein, BTES-Lockergestein und BTES-Festgestein) zu den aktuellen sowie den für das Jahr 2050 prognostizierten Wärmebedarfen. Bedingt durch den gewählten Berechnungsansatz verfügt jede Großstadt bei Nutzung zumindest einer der betrachteten drei Systeme über genügend nutzbares Volumen im oberflächennahen geologischen Untergrund, welche eine Wärmespeicherung in der Größenordnung des jährlichen Wärmebedarfs weit übersteigt. Bisweilen übersteigt das BTES-Potenzial deutlich das ATES-Potenzial, und eine alleinige ATES-Nutzung könnte räumlichen Limitierungen unterliegen. Dies verdeutlicht, dass der oberflächennahe geologische Untergrund eine sehr große Wärme-Speichermöglichkeit aufweisen kann und daher für die Einrichtung saisonaler Wärmespeicher eine zumindest in quantitativer Hinsicht diskussionswürdige Option darstellt.

Tabelle 1.8: Abgeleitete Wärmespeicherkapazität und theoretischer Wärmebedarf pro Einwohner und Jahr für die Beispielstädte Hamburg und Hannover

Stadt	Einwohner	Speichertyp	Untergrundvolumen [km ³]	Geschätzte speicherbare Wärmeenergie [GWh]	Geschätzte speicherbare Wärmeenergie pro Einwohner [MWh/Einw.]	Geschätzter Anteil saisonal speicherbarer Wärmeenergie am Wärmebedarf
Hamburg	1.841.179	ATES-Lockergestein	68	12.000	6,5	65 %
		BTES-Lockergestein	83	94.000	51	500 %
		BTES-Festgestein	0	0	0	0 %
Hannover	538.068	ATES-Lockergestein	2.9	500	0,9	9 %
		BTES-Lockergestein	0	0	0	0 %
		BTES-Festgestein	38	43.000	80	800 %

Das für den Speicherbetrieb notwendige Wärmedargebot wurde nicht betrachtet.

Der vorgestellte Ansatz wies eine Reihe von Vereinfachungen auf, so dass die angegebenen Daten nur eine grobe Orientierung darstellen können. Zunächst sind die groben Vereinfachungen bei der Dokumentation der oberflächennahen Geologie und der Ableitung von Wärmebedarfen und Wärme-Speicherbedarfen zu nennen. Weiterhin nicht berücksichtigt wurden beispielsweise wichtige Aspekte (u. a. Limitierungen beim Wärmedargebot, ortsspezifische geologische Gegebenheiten, Restriktionszonen), die zu einer Verminderung der dargestellten Speicherpotenziale führen können und u. a. in späteren Abschnitten (u. a. Abschn. 1.3.3, 1.4.4, 1.6 sowie Kapitel 2 und 3) der vorliegenden Studie diskutiert werden.

Andererseits blieben aber bei der vorliegenden Abschätzung die Wärmespeicherpotenziale in größeren Tiefen unberücksichtigt, wie auch die hier getroffenen Festlegungen bei der Ableitung der durch UTES-Anlagen beeinflussten untertägigen Räume eher zu einer Überschätzung des Raumbedarfs führen. Zu nennen sind z. B. der restriktive Ansatz, einen Temperaturunterschied > 1 °C zur Abgrenzung der Auswirkung einer UTES-Anlage zu setzen oder das „Überlappen“ der thermisch beeinflussten Räume von UTES-Anlagen auszuschließen.

Aufgrund dieser methodisch bedingten Unsicherheiten ist festzuhalten, dass eine auf Stadtebene detaillierter durchgeführte Potenzialberechnung für die Nutzung des geologischen Untergrunds

für geothermische Zwecke zu signifikant anderen Wärmespeicherpotenzialen führen kann, als hier dargestellt ist.

Trotzdem kann aber festgehalten werden, dass die Größenordnung der Wärmespeicherpotenziale im oberflächennahen geologischen Untergrund der deutschen Großstädte, bezogen auf deren jährlichen Wärmebedarf, relevant ist. Um diese Wärmespeicherpotenziale belastbarer bewerten und gegebenenfalls nutzen zu können, wird es relativ kurzfristig regulatorische Vorgaben an die Kommunen, deren Verwaltung häufig schon heute an der Grenze zur Überlastung steht, bedürfen, um diese Bewertungen ortsspezifisch und auch nach standardisierenden Ansätzen durchzuführen. In diesem Kontext sollten auch Konzeptentwicklungen zur Darstellung des regenerativen und in der Regel fluktuierenden Wärmedargebots zum Betrieb der UTES-Systeme durchgeführt werden.

Zwischenfazit 1.3.2

Eine erste Schätzung des theoretischen Potenzials für ATES und BTES in (groß-)städtischen geologischen Untergründen wurde unter der Annahme einfacher geologischer Verhältnisse mit Daten im Wesentlichen der Geo-Portale der SGD durchgeführt. ATES- und BTES-Betriebsbedingungen wurden gemäß Typszenarien (Abschnitt 1.4.4) zu Grunde gelegt. Weiterhin wurde der gesamte städtische geologische Untergrund bis in Tiefen von 100 – 200 m einbezogen; nicht berücksichtigt wurden technische Einschränkungen (z. B. Bebauung), regulatorische Restriktionen (z. B. wegen anderer Untergrundnutzung oder aufgrund des Grundwasser- oder Naturschutzes), ökonomische Betrachtungen und die Verfügbarkeit klimaneutraler Wärmequellen.

Andererseits wurden auch bewusst sehr konservative Annahmen für die Potenzialableitung gewählt: Es wurden keine größeren Tiefen als 100 – 200 m betrachtet, als Grundlage der Bemessung für den thermischen Auswirkungsraum wurde ein geringer Wert von $\Delta 1\text{ °C}$ gewählt, und es wurden keine Synergien durch Überschneidungen von Auswirkungsräumen zugelassen.

In Summe zeigte sich keine generelle räumliche Limitierung der UTES-Nutzung durch geologische Gegebenheiten; der gesamte zur Verfügung stehende UTES-Speicherraum lag in der Regel um den Faktor 1 – 10 oberhalb des aktuellen und für das Jahr 2050 prognostizierten Wärmebedarfs. Der Großteil der UTES-Systeme kann bzw. muss allerdings durch (HT-)BTES-Systeme realisiert werden, während für (HT-)ATES-Systeme allein bei der thermischen Nutzung des geologischen Untergrunds in vielen Großstädten räumliche Limitierungen bestehen können.

Für eine belastbarere Potenzialschätzung für oGT bzw. UTES wäre eine detailliertere Berücksichtigung der geologischen Randbedingungen nötig. Dies zeigt die Notwendigkeit zur Sichtung, Bewertung und Darstellung der Potenziale durch die BGR bzw. die SGD und die zuständigen Umwelt- bzw. Wasserbehörden auf.

Bedarf besteht zudem bei der Identifikation und gegebenenfalls auch bei der Neunutzung und/oder beim Aufbau von i. d. R. fluktuierenden Wärmequellen in verschiedenen Temperaturbereichen, um die Wärmespeicher zum Heizen und Kühlen im relevanten Ausmaß betreiben zu können.

1.3.3 Definition der zur Ableitung von Potenzialen der oGT- und UTES-Anlagen relevanten Parameter sowie eine Einschätzung ihrer Verfügbarkeit

Für den Weg von groben Orientierungswerten für geothermische Nutzungsmöglichkeiten zu einer Potenzialschätzung der thermischen Nutzung des oberflächennahen geologischen Untergrunds im Kontext von Raum- bzw. Stadtplanung oder im Rahmen einer Energiesystemplanung auf Stadtebene ist eine genauere Inaugenscheinnahme der regionalen oder lokalen Eigenschaften geologischer Formationen erforderlich. Eine solche detailliert unterlegte Potenzialschätzung war und konnte nicht die Aufgabe der vorliegenden Studie sein, sondern ist zukünftig durch die jeweils zuständigen Fachbehörden durchzuführen.

Aus Sicht der Autoren der vorliegenden Studie sind als Grundlage folgende hydrogeologische Informationen relevant bzw. essentiell:

- ▶ Vorliegen eines geologischen und hydrogeologischen 3D-Modells des oberflächennahen geologischen Untergrunds und dessen (Basis-)Parametrisierung
 - Zur nachhaltigen thermischen Bewirtschaftung des oberflächennahen geologischen Untergrunds sind groß- und kleinräumige Strukturen und Volumina der potenziell nutzbaren Grundwasserleiter und der potenziell nutzbaren bindigen Formationen essenzielle Planungsunterlagen für UTES-Einzelanlagen, aber auch für ein übergreifendes thermisches hydraulisches Management, um eine optimierte und geordnete energetische Dimensionierung bzw. den Betrieb von oGT- und UTES-Anlagen gewährleisten zu können (vgl. u. a. Bloemendal und Hartog (2018)).
 - Bezüglich der hydrogeologischen Standardparameter sind ortsspezifisch der Flurabstand, die horizontale Permeabilität der Grundwasserleiter und Grundwassergering- bzw. Grundwassernichtleiter sowie die schichtspezifischen hydraulischen Gradienten zu erfassen, um daraus u. a. die für den Betrieb von oGT- und UTES-Anlagen wichtigen Abstandsgeschwindigkeiten etc. (vgl. Bloemendal und Hartog (2018) sowie Bloemendal und Olsthoorn (2018)) bestimmen zu können. Gerade für den urbanen Bereich mit i. d. R. verschiedenen und z. T. auch nicht vollständig bekannten Eingriffen in das Druckregime der Grundwasserleiter kann es auch notwendig sein, die zeitlich-räumliche Stationarität der hydraulischen Gradienten und der Temperaturverteilung zu erfassen.

Ein Bedarf an **hydrogeologischen Sonderuntersuchungen** wird bei der Dimensionierung von **(HT-)ATES-Einzelanlagen** insbesondere im Hinblick auf das **Verhältnis von horizontaler zu vertikaler Permeabilität** gesehen, da durch diesen Wert die Entwicklung thermisch induzierter Konvektionszellen in der Grundwasserströmung und damit die Konzeption und die Effizienz von (HT-)ATES-Anlagen relevant beeinflusst wird. Zu diskutieren ist, ob die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität stets schichtspezifisch zu messen sind, da diese Messung u. a. aufgrund ihrer Sensitivität gegenüber dem Wassergehalt und auch der Lagerungsdichte gerade bei der Beprobung von Grundwasserleitern fehleranfällig und die „normale“ Variabilität in typischen quarzreichen Grundwasserleitern gering ist. Notwendig können solche Messungen allerdings in stark $C_{org.}$ -haltigen Sedimenten sein.

- Existenz eines hinreichend räumlich und zeitlich aufgelösten hydrogeochemischen, mikrobiologischen und faunistischen Datensatzes zur Bewertung der Umweltauswirkungen von oGT- und UTES-Anlagen
 - Informationen zum **Redox-Zustand der Sedimente (E_H und pH)** und zum **Lösungsinhalt des Grundwasserkörpers** (mindestens Hauptkomponenten einschließlich $Fe_{(gel.)}$ und $Mn_{(gel.)}$) gelten als essentiell zur Bewertung der Betriebsführung von WWA- und ATES-Anlagen und den Umweltwirkungen von oGT- und UTES-Anlagen. Allerdings befindet sich die Diskussionen zum stofflichen Umfang (einschließlich Spurenstoffen) und der notwendigen zeitlichen Auflösung solcher hydrochemischen Datensätze noch am Anfang. Entsprechendes gilt für die Charakterisierung des Aquiferbioms und der Aquiferfauna. Derzeit sollte sie bei der Planung von Einzelanlagen mit einer relevanten Wärmeleistung eingeplant werden.
 - Ergebnisse zu geochemischen Festphasen-Untersuchungen für typische quarzreiche tertiäre und quartäre Aquifere können möglicherweise im Hinblick auf den Karbonatgehalt und/oder den mobilisierbaren Fe/Mn-Gehalt bzgl. Aussagen zum Betriebsverhalten von (HT-)ATES- und WWA-Systemen hilfreich sein, allerdings fehlen aktuell hierzu noch fundierte Untersuchungen weitgehend. Aus laufenden bzw. in Vorbereitung befindlichen Forschungsvorhaben (vgl. z. B. BMBF-Forschungsprogramm „Geo:N“) sind allerdings in den kommenden Jahren Ergebnisse dazu zu erwarten. Dringender Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der temperaturabhängigen Reaktivität von stark $C_{org.}$ -haltigen Sedimenten z. B. im Hinblick auf Gasbildung etc. Derzeit sollten solche Sedimente zumindest nicht bei der Planung von (HT-)ATES- und (HT-)BTES-Anlagen berücksichtigt werden.
 - Wichtig ist auch das Vorliegen eines Altlastenkatasters, da die Wirkung einer Temperaturveränderung, d. h. Temperaturerhöhung oder Temperatursenkung, auf organischen und/oder anorganischen Altlasten bisher nicht belastbar bewertet werden kann und sowohl für den „Quell-“ als auch für den Fahnenbereich Gegenstand aktueller Forschung ist. Die Dringlichkeit, hier zeitnah und stoffklassenspezifisch zu belastbaren Ergebnissen zu kommen, ergibt sich aus dem Umstand, dass gerade in urbanen Bereichen ein relativ großer Teil des oberflächennahen untertägigen Raumes Kontaminationen aufweist. Derzeit muss zumindest das Vorliegen eines Schadstoff-Quellbereichs als Ausschlusskriterium für thermische Nutzungen gelten, wenn nicht Schadstoffsanierung und Wärmespeicherung kontrolliert quasi als Sanierungskonzept gekoppelt werden.
 - **Essenziell ist weiterhin ein Kataster zur Bohrbarkeit und zu Bohrrisiken**, das z. B. Bereiche oder Regionen, in denen beispielsweise quellfähige Anhydrite, artesische Grundwasserleiter oder andere Gegebenheiten existieren, identifiziert und zumindest technische oder ökonomische Herausforderungen bei Bohraktivitäten kennzeichnet.

Die Überprüfung der Verfügbarkeit einiger der genannten Parameter in öffentlich zugänglichen geologischen Datenbeständen (Abschn. 1.3.2) erfolgte in einem zweiten Schritt (Tab. 1.9). Dabei wurde jedoch lediglich die Verfügbarkeit der Daten auf den Geo-Portalen der SGD recherchiert;

es wurden keine Werte von Fachdaten zusammengetragen oder gar bewertet. Die Datenkenntnis der SGD selbst ist den Autoren der vorliegenden Studie weitgehend unbekannt. Eine vergleichbare Zusammenstellung bieten Bucher et al. (2018); die Datenlage wird zum Teil aufgrund inzwischen erfolgter inhaltlicher Ergänzungen auf den Geo-Portalen, aber auch durch dort zusätzlich verwendete Quellen unterschiedlich eingeschätzt.

Die Darstellung der Daten auf den Geo-Portalen erfolgte als Punktdaten oder in Kartenform. Die Daten sind jedoch in der Regel nicht frei zugänglich in Datenformaten verfügbar, die in ein GIS eingepflegt werden könnten (z. B. ESRI-Shapefile, WFS-Dienste), um dort mit weiteren Daten im Rahmen einer Potenzialanalyse oder Projektplanung verschnitten werden zu können.

Tabelle 1.9: Verfügbarkeit einiger für oGT- und UTES-Anlagen relevanter geowissenschaftlicher Fachdaten in den Geo-Portalen der SGD

Bundesland	Bohrpunktkarte mit Bohrprofilen, Schichtenverzeichnissen	Verbreitung u. Mächtigkeit potenzieller Nutzformationen	Bohrbarkeit und Bohrrisiken	Flurabstand	Permeabilität von Grundwasserleitern	Grundwassergradient und deren Stationarität	Wärmeleitfähigkeit der Gesteine	Grundwasserbeschaffenheit (z.B. O ₂ , Fe ₂ gelöst, DIC)
Baden-Württemberg ¹	N	z. T.	J	N	z. T.	N	J	z. T.
Bayern ²	J	z. T.	J	N	z. T.	z. T.	J	J
Berlin ³	J	J	N	J	N	z. T.	J	z. T.
Brandenburg ⁴	N	z. T.	J	N	N	N	J	z. T.
Bremen ⁵	J	z. T.	J	J	N	z. T.	J	z. T.
Hamburg ⁶	J	J	N	J	N	z. T.	N	N
Hessen ⁷	N	N	J	N	z. T.	N	N	N
Mecklenburg-Vorpommern ⁸	J	N	J	J	N	z. T.	J	N
Niedersachsen ⁹	J	J.	J	J	J	N	J	z. T.
Nordrhein-Westfalen ¹⁰	J	N	J	N	z. T.	N	N	z. T.
Rheinland-Pfalz ¹¹	N	N	N	N	N	N	J	N
Saarland ¹²	N	N	J	N	N	N	N	N
Sachsen ¹³	J	z. T.	N	J	z. T.	z. T.	J	N
Sachsen-Anhalt ¹⁴	J	N	J	N	N	N	N	N
Schleswig-Holstein ¹⁵	N	z. T.	N	N	N	N	J	z. T.
Thüringen ¹⁶	J	N	J	J	z. T.	z. T.	J	N

J: Ja; N: Nein; z.T.: zum Teil (Es sind Informationen verfügbar, die für einen Teil der relevanten geologischen Formationen oder der nötigen Einzelparameter verfügbar sind.).

Datenquelle: ¹⁻¹⁶ Geo-Portale der SGD (vgl. Abschn. 1.3.2).

Zwischenfazit 1.3.3

Neben Informationen zu geologischen Strukturen und der Verbreitung geologischer Formationen, die für die Nutzung der oGT in Frage kommen können, sind hydraulische Parameter bedeutsam, da diese im Wesentlichen die Dimensionierung einer geothermischen Anlage und die Größe des entstehenden Auswirkungsraums bestimmen. Thermische Parameter sind eher für geschlossene Systeme (EWS, BTES) relevant. Zusätzlich können chemische (und ggf. auch mikrobielle) Parameter, die durch Temperaturveränderungen im geologischen Untergrund beeinflusst werden, aus technischen oder genehmigungsrechtlichen Gründen relevant sein. (Geo-)mechanische Parameter werden als weniger relevant angesehen und daher hier nicht näher betrachtet.

Veröffentlichte Daten beziehen sich oft auf Grundwasserleiter, die zur Trinkwasserversorgung genutzt werden. Daten zu anderen geologischen Formationen, die beispielsweise für oGT und UTES geeignet sein könnten, fehlen in der Regel, genauso wie Grundwassergradienten, Grundwasser-Abstandsgeschwindigkeiten sowie Intern-Strukturen geologischer Formationen. Auch bezüglich des hydrogeochemischen, mikrobiologischen und faunistischen Untersuchungsstands mit Ausnahmen der meist vorhandenen Altlastenkataster besteht bis auf einige Ausnahmen noch großer Erkundungs- und Monitoringbedarf. Hier macht sich bemerkbar, dass der oberflächennahe geologische Untergrund trotz seiner potentiellen großen Bedeutung für die Wasserversorgung selten Gegenstand einer umfassenden Erkundung gewesen ist.

Die Stadtstaaten sind hinsichtlich der Aufbereitung geologischer Daten in Form von Strukturmodellen und numerischen Strömungssimulationen dabei i. d. R. deutlich besser aufgestellt als die Flächenländer. Dies lässt vermuten, dass der Bedarf an diesen Informationen bislang insbesondere im (groß-)städtischen Bereich vorhanden gewesen und die verfügbare Datendichte dort hinreichend groß ist, um diese Modelle zu erstellen.

Obwohl im Rahmen dieser Studie nur ein erster Überblick über die öffentlich zugänglichen relevanten Informationen zu den für eine thermische Nutzung wichtigen Parametern erarbeitet werden konnte, deutet sich an, dass für eine großräumige Nutzung des oberflächennahen geologischen Untergrunds als thermischer Speicher zeitnah häufig noch eine Erkundung und/oder Aufarbeitung bestehender nicht veröffentlichter Datenbestände notwendig sein wird. Die Erarbeitung hinreichend parametrisierter 3D-Modelle des urbanen geologischen Untergrunds im Hinblick auf wasserwirtschaftliche Aspekte u. a. im Kontext der Klimawandeladaptation erscheint dringend angeraten. Nach Ansicht der Autoren dieser Studie besteht hier zeitnaher bundesweiter Handlungsbedarf, um den oberflächennahen geologischen Untergrund zukünftig nachhaltig für die Wasser- und Wärmeversorgung nutzen zu können.

1.3.4 Umfrage zur Ergänzung der Datensichtung durch Experteneinschätzungen

Zusätzlich zu den oben skizzierten Recherchen wurden Umfragen mit dem Ziel konzipiert, Experteneinschätzungen über die Existenz weiterer Daten sowie über zusätzliche Aspekte zur thermischen Nutzung des geologischen Untergrunds einzuholen. Die Fragen bildeten Gesichtspunkte der Genehmigungs- bzw. Planungsbedingungen, Planungsunterlagen, Perspektiven sowie eines Weiterbildungsbedarfs ab. Der Rücklauf dieser Fragebögen war aus verschiedenen Gründen allerdings gering, so dass kein repräsentatives Meinungs- bzw. Bewertungsbild gewonnen werden konnte. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Befragten auf deutlich unterschiedliche Erfahrungen beispielsweise hinsichtlich der Kenntnis zu Wärme- und Kühlbedarfen (Klimaschutzmanager) und zu erfolgten Wärmeversorgungsinstallationen (Ingenieurbüros)

zurückgreifen konnten. Zudem deuten die Antworten an, dass die thermische Nutzung des geologischen Untergrunds in der Vergangenheit nur bei einem Teil der Akteure Relevanz besessen hat. Andererseits wurde eine große Übereinstimmung bei den Bedarfen zur Einbindung der thermischen Nutzung des geologischen Untergrunds in die Raum- bzw. Stadtplanung sowie für einen Weiterbildungsbedarf festgestellt. Dies zeigt auf, dass die befragten Akteure ein deutliches Entwicklungspotenzial bei der Technologie erwarten sowie die Anwendung fördern und sich daran beteiligen möchten.

Resümee 1.3

Die erste Sichtung geologischer Daten des oberflächennahen geologischen Untergrunds macht deutlich, dass er ein strategisch relevantes Potential für die geothermische Nutzung und insbesondere für saisonale Wärmespeicherungen, verglichen mit Wärmebedarfen und Wärme-Speicherbedarfen von Großstädten, aufweist. **Die potenzielle Kapazität der saisonalen Wärmespeicher wird nach diesen ersten Abschätzungen i. d. R. nicht von den geologischen Gegebenheiten bestimmt, sondern von der Verfügbarkeit regenerativer Wärmequellen und der Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems.**

Um die Wärmeversorgungspotentiale von oGT und insbesondere UTES-Anlagen nachhaltig und umweltverträglich in zukünftigen klimaneutralen Wärmeversorgungskonzepten berücksichtigen zu können, wird es jedoch notwendig sein, hinreichend parametrisierte großräumige 3D-Modelle des oberflächennahen geologischen Untergrunds nutzen zu können. Hier sind aktuell noch große Unterschiede in der Verfügbarkeit, dem Umfang und der Güte entsprechender Geo-Informationen zwischen einzelnen Bundesländern und Kommunen festzustellen. Eingeschränkt gilt dies auch für die online einsehbaren „Wärmekataster“ bzw. „-atlanten“ oder „-pläne“ als Teil von „Energieatlanten“ der Bundesländer. Hilfreich wären zudem räumlich aufbereitete Informationen zum Kühlbedarf Ebene der Bundesländer.

Wenn oGT- und insbesondere UTES-Anlagen ein relevanter Teil der zukünftigen Wärmeversorgung werden sollen, besteht zeitnaher Handlungsbedarf, um zumindest für Gebiete mit hohen Wärmebedarfsdichten für den oberflächennahen geologischen Untergrund einen Erkundungsstand zu erzielen, der eine belastbare Bewertung des Wärmespeicherpotenzials erlaubt. Zu denken wäre daran, dies verpflichtend im Kontext der Energieplanung von Kommunen vorzugeben. Zu bedenken ist dabei, dass eine verbesserte Erkundung des oberflächennahen geologischen Untergrunds auch im Kontext der Adaption an den Klimawandel z. B. beim „Sponge-City“-Konzept in vielen Städten unumgänglich werden wird.

1.4 Ableitung des Raumbedarfs zur thermischen Nutzung und Bewirtschaftung des geologischen Untergrunds

1.4.1 Konzepte und Definitionen zur Ableitung des Raumbedarfs

1.4.1.1 Bedarf einer Raumplanung des geologischen Untergrunds

Der Ansatz einer Raumplanung für den geologischen Untergrund z. B. als Ergänzung und/oder Ersatz des Bundesbergrechts ist seit Jahren Gegenstand einer geowissenschaftlich-rechtlichen Diskussion (Charissé und Lohse, 2009; Ewer, 2011; Bödecker et al., 2012; Ewer et al., 2013; Erbguth, 2014; Kahnt et al., 2015; Schulze et al., 2015; Keimeyer et al., 2018). Als potenzielle Vorteile einer entsprechenden Raumplanung des geologischen Untergrunds gelten u. a. eine

stärkere gesellschaftliche Partizipation und eine verbesserte Akzeptanz und damit eine belastbare Planbarkeit und eine optimierte technische und ökologische Effektivität und Effizienz bei der Nutzung des geologischen Untergrunds (Weyer, 2013; Bovet, 2014; Schulze et al., 2015). Des Weiteren könnte eine Raumplanung des geologischen Untergrunds dazu beitragen, geologisch geeignete Räume für Zwecke der Energiewende zu sichern (EM MV – Ministerium für Energie, Infrastruktur und Landesentwicklung Mecklenburg-Vorpommern, 2016; MILI SH – Ministerium für Inneres, ländliche Räume und Integration Schleswig-Holstein, 2018). Allerdings wird auch kritisch diskutiert, ob aufgrund der häufig nicht hinreichenden Kenntnis der physikochemischen Eigenschaften und der räumlichen Strukturen der Gesteinseinheiten Potenzialkarten oder -räume zu Nutzungsoptionen nicht angemessener und leichter umzusetzen wären als quantifizierende Ansätze zur Prognose der untertägigen Raumbeanspruchung (Liebsch-Dörschner, 2014; Penn-Bressel, 2014). Hinzu kommt, dass numerische Modellprogramme zur Prognose der untertägigen Raumbeanspruchung für bestimmte Nutzungsoptionen sich häufig erst in der Entwicklung befinden und Anwendern nicht als validierte und leicht umzusetzende Modelle zur Verfügung stehen.

Deshalb und da eine Speicherung von Kohlenstoffdioxid im tiefen geologischen Untergrund in Deutschland lange nicht angestrebt wurde, ist die Umsetzung einer Raumordnung für tiefere geologischen Einheiten (Definition siehe SGD – Staatliche Geologische Dienste Deutschlands und BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2015)) national weitgehend auf der Diskussionsebene stehengeblieben, und neuere Untersuchungen u. a. aus dem ANGUS-Verbundvorhaben deuten darauf hin, dass der Raumbedarf für untertägige Massenspeicher im Rahmen der Energiesystemtransformation tatsächlich i. d. R. klein, relativ zu dem untertägigen Raumdarlehen, sein wird (Pfeiffer et al., 2016; Pfeiffer et al., 2017; Pfeiffer und Bauer, 2019; Gasanzade et al., 2021). Deswegen erscheint eine flächendeckende und quantitative Raumplanung bei den derzeit absehbaren Nutzungsoptionen des tiefen geologischen Untergrunds zumindest im Rahmen der Energiespeicherung derzeit nicht zielführend.

Ganz anders kann sich allerdings der untertägige Raumbedarf und damit die Notwendigkeit einer Raumplanung für den oberflächennahen geologischen Untergrund insbesondere unterhalb urbaner Gebiete darstellen (Edelenbos et al., 1998; Monnikhof et al., 1998; Bobylev und Sterling, 2016; Delmastro et al., 2016; Hou et al., 2016; Admiraal und Cornaro, 2016). Durch numerische Simulationsrechnungen gestützte Untersuchungen von Bloemendal et al. (2018) im Hinblick auf die Raumwirkung von ATES-Anlagen zeigen, dass eine effiziente Nutzung oberflächennaher geothermische Anlagen und/oder untertägige, saisonaler Wärmespeicher zur Wärmeversorgung zukünftig allein aus Effektivitäts- und Effizienzgründen nur mit einer langfristigen und quantitativen Raumplanung einschließlich eines untertägigen Wärmemanagements zu gewährleisten sein wird.

Zu berücksichtigen sind in den oberflächennahen geologischen Einheiten zudem noch potenzielle räumliche Konkurrenzen mit anderen Nutzungsoptionen bzw. räumliche Überschneidungen mit potenziellen Restriktionszonen. Bei räumlichen Nutzungskonkurrenzen nimmt insbesondere die Grundwasserbewirtschaftung zur Wasserversorgung eine wichtige Rolle ein, die nach geltendem Recht mit dem Schutzzonenkonzept bereits Raumbeanspruchungen im geologischen Untergrund definiert und damit auch Restriktionen gegenüber anderen unter- und/oder oberirdischen Nutzungsoptionen festlegen kann. Weitere potenzielle Restriktionszonen gegenüber anderen Nutzungsoptionen des geologischen Untergrunds bilden gerade in urbanen Gebieten u. a. untertägige Räume, die durch Altlasten verunreinigt sind. Aber auch das Vorkommen von Gesteinsformationen, bei denen beispielsweise Veränderungen der Untergrundbewirtschaftung

signifikante geomechanische und/oder geochemische Risiken induzieren können, stellen potenzielle Restriktionszonen für eine Nutzung des geologischen Untergrunds dar.

Die Vorteile und z. T. auch der essentielle Bedarf einer quantitativen Raumplanung und eines prozessorientierten, thermischen Managementsystems für den oberflächennahen geologischen Untergrund urbaner Gebiete wurde insbesondere in den Niederlanden erkannt und beschrieben, was beispielsweise in einer Handreichung zur Entwicklung städtischer Masterpläne für diesen Zweck mündete (Arcadis N. V. et al., 2011). Mittlerweile wurde durch die in den Niederlanden erzielten Erfahrungen darüber hinaus ein Optimierungsbedarf für eine zu starre Planung des untertägigen Raums identifiziert, insbesondere da in den Masterplänen Abstände zwischen Einzelanlagen so festgeschrieben wurden, dass gegenseitige Auswirkungen auf Kosten der Gesamtsystemeffizienz minimiert wurden (Bloemendal et al., 2018). Ergänzende Konzepte sehen vor, dass, anstatt pauschale genehmigungsrechtliche Vorgaben umzusetzen, sich Nutzer z. B. auf Quartiersebene über die jeweiligen Nutzungsbedarfe der Untergrundspeicher untereinander einigen, wobei zwar gegebenenfalls geringfügige Effizienzeinbußen für Einzelanlagen entstehen, das thermische Speicherpotenzial der untertägigen Formationen jedoch insgesamt besser ausgenutzt wird (Bloemendal et al., 2014). Diese Erkenntnis impliziert, dass Auswirkungen der thermischen Untergrundnutzung quantitativ zu definieren sind, um möglichst eine optimale Untergrundnutzung zu ermöglichen.

Das Bewirtschaften des geologischen Untergrunds war jüngst auch bereits Gegenstand von Befassungen im Inland. So hatte beispielsweise das vom BMWK geförderte Projekt „GEO.KW“ (Zosseder et al., 2022) das Ziel, das Management der Energieressource Grundwasser am Beispiel der Stadt München zu optimieren, um Energieeinsparungen zu erzielen und somit den Primärenergiebedarf zu senken.

Zwischenfazit 1.4.1-I

Die multiple Bewirtschaftung des oberflächennahen geologischen Untergrunds wird gerade in urbanen Gebieten zukünftig eine vorsorgende quantifizierende Raumplanung des geologischen Untergrunds und ein Managementsystem zu den Wärmequellen im geologischen Untergrund notwendig machen. Ohne entsprechende Ansätze wird weder die unkontrollierte Erwärmung des geologischen Untergrunds u. a. über urbane Wärmeinseln, noch eine relevante und effektive saisonale Wärmespeicherung über entsprechende untertägige Speicher zu realisieren sein. Allerdings fehlen dafür derzeit noch sowohl die rechtlichen Rahmenbedingungen als auch allgemein akzeptierte und praktikable Konzepte sowie validierte numerische Modellprogramme.

1.4.1.2 Das ANGUS-Konzept für eine quantitative und prozessorientierte Raumplanung des geologischen Untergrunds

Ein weiterführendes und allgemeines Konzept für eine quantitative und prozessorientierte Raumplanung wurde im Rahmen des UBA-Vorhabens „Sicherheit und Umweltverträglichkeit der CO₂-Speicherung“ (Großmann et al., 2011) entwickelt und im Rahmen der BMBF- und BMWi-finanzierten Projekte ANGUS+ (Görke et al., 2017) und ANGUS II (u. a. Bauer et al., 2021) verfeinert bzw. exemplarisch umgesetzt. Eine allgemeine Beschreibung und die Notwendigkeit ist Bauer et al. (2017) bzw. Kabuth et al. (2017) beschrieben; exemplarische Anwendungen für CO₂ bzw. Wasserstoff sind in Benisch und Bauer (2013) und Pfeiffer et al. (2017) im Wesentlichen am Beispiel hydraulischer Auswirkungen dargestellt. Dieses Konzept bildet wie auch in der vorliegenden Studie u. a. die Basis der Studie „Umweltverträgliche Nutzung geothermischer Wärmespeicher – Ermittlung und Bewertung thermischer Veränderungen im Grundwasser, thermische

Bewirtschaftung des Grundwassers, Handlungsempfehlungen“ Hiester et al. (2022), die ebenfalls die Raumwirkung untertägiger thermischer Wärmespeicher behandelt.

In dem im weiteren Text als „ANGUS-Konzept“ bezeichneten Ansatz, der auch die konzeptionelle Grundlage zur Abschätzung der Raumbeanspruchung und der Auswirkung von UTES-Anlagen bzw. geothermischen Anlagen bildet, wird zunächst zwischen unmittelbaren und/oder mittelbaren **betriebsbedingten Auswirkungen** bei einer Nutzung des geologischen Untergrunds unterschieden, um daraus auch mess- und überprüfbare Parameter z. B. für Prüf- oder Schwellenwerten abzuleiten. Die Definition der Raumbeanspruchung ist dabei wie folgt:

- ▶ **Thermische Auswirkungen (T)** werden durch die Veränderung der Temperatur eines Wärme- oder Kältefeldes im Umfeld einer Nutzung beschrieben.
- ▶ **Hydraulische Auswirkungen (H)** sind durch eine Änderung der räumlichen und zeitlichen Druckverteilung des Grundwassers zu beschreiben. In oberflächennahen geologischen Einheiten ist dies i. d. R. das Grundwasser, welches hinsichtlich Strömungsrichtung und -geschwindigkeit entweder direkt (bspw. durch Grundwasserförderung oder -injektion) oder indirekt (bspw. durch temperaturinduzierte Veränderung der Wasserviskosität) beeinflusst werden kann.
- ▶ **(Geo-)Mechanische Auswirkungen (M)** sind durch die Veränderung des Spannungszustands des Gesteins und die dadurch gegebenenfalls ausgelösten Lageveränderungen im Locker- oder Festgestein, beispielsweise durch eine Injektion von Grundwasser verursacht, definiert.
- ▶ **(Geo-)Chemische Auswirkungen (C)** sind durch die Aktivitätsveränderungen (vereinfacht: Konzentrationsveränderungen) der im Grundwasser gelösten chemischen Spezies charakterisiert und stehen in Wechselwirkung mit der Festphase bzw. Gasphase oder anderen Flüssigkeiten im geologischen Untergrund (z. B. Öle). Je nach Prozess können diese reversibel (bspw. im Falle von (De-)Sorptionsvorgängen) oder praktisch irreversibel (bspw. bei Ausgasungen aus dem Grundwasser in die ungesättigte Bodenzone) sein.
- ▶ **(Mikro-)Biologische Auswirkungen (B)** werden durch Adaption der im geologischen Untergrund existierenden biologischen Populationen beschrieben. Diese kann dort zu einer Veränderung ihrer Funktionen im Ökosystem (z. B. im Grundwasser) führen.

Um diesen THMCB-Auswirkungen, die in der Regel untereinander gekoppelt sind, einen notwendigen Raumbezug zu geben, wird im ANGUS-Konzept zwischen folgenden drei Raumbeanspruchungen bei einer Nutzung des geologischen Untergrunds differenziert:

- ▶ Der **Nutzungsraum** ist definiert als der direkt wirtschaftlich genutzte Teil des geologischen Untergrunds und kann sich je nach Erschließungsart z. B. über Bohrungen bis zur Erdoberfläche erstrecken. In Abhängigkeit von der Art der Nutzung ist der Nutzungsraum i. d. R. zeitlich und räumlich instationär, wobei bei UTES-Anlagen zwischen verschiedenen Betriebsphasen unterschieden werden kann (s. u.). Die räumliche Abgrenzung zum Auswirkungsraum ergibt sich aus den technischen Randbedingungen, mit denen eine effektive Nutzung des geologischen Untergrunds realisiert werden soll.

- ▶ Der **Auswirkungsraum** wird als der untertägige Raum definiert, in dem durch eine Nutzung thermische, hydraulische, mechanische, chemische und/oder biologische Auswirkungen auftreten, die jedoch nicht unbedingt noch einer effektiven bzw. wirtschaftlichen Nutzung zur Verfügung stehen. Beispielsweise ist im Nutzungsraum gespeicherte Wärme aus dem Anteil des Auswirkungsraums, der nicht dem Nutzungsraum entspricht, nicht mehr wirtschaftlich rückholbar. Der Auswirkungsraum ist im Volumen daher immer größer als der Nutzungsraum oder zumindest gleich dem Nutzungsraum und ist je nach Nutzungsbetrieb auch räumlich und zeitlich instationär. Die Abgrenzung des Auswirkungsraums zur unbeeinflussten Umgebung (s. a. unten, „Monitoringraum“) erfolgt über zu definierende Grenzwerte für die Auswirkungsarten. Die Grenzwerte sollten in jedem Fall die geogene oder bisher „natürliche“ Variabilität von Zielparametern im geologischen Untergrund bzw. die Nachweisgrenzen von Messverfahren übersteigen; wenn vorhanden, könnten anerkannte „Unbedenklichkeitsschwellenwerte“ als Referenzen herangezogen werden.
- ▶ Der **Monitoringraum** beschreibt den für die Beobachtung bzw. die Überwachung einer Nutzung notwendigen Raum. Der Monitoringraum umfasst den Nutzungsraum, den Auswirkungsraum und die per Definition durch die Nutzung unbeeinflusste Umgebung. Er endet räumlich in einem Abstand zum Auswirkungsraum, der es erlaubt, den Übergang zu geogenen Hintergrundwerten zu erfassen bzw. maximal an der Grenze zu Auswirkungsräumen weiterer Nutzungen des geologischen Untergrunds oder der durch die Nachweisgrenze der Messgeräte gegebenen Werte.

Zur zeitlichen Einordnung der THMCB-Auswirkungen spezifisch bezüglich einer UTES-Nutzung im geologischen Untergrund wird im ANGUS-Konzept folgende Klassifikation in Zeitphasen, die aber nicht für alle Prozesse gleichermaßen wichtig sind, vorgeschlagen, um daraus gegebenenfalls auch daran orientierte spezifische Anforderungen u. a. an das Monitoring abzuleiten:

- ▶ eine **Prä-Initialphase**, in der der Ausgangszustand für die THMCB-Parameter möglichst statistisch signifikant zu erfassen ist,
- ▶ eine **Initialbetriebsphase**, in der der Speicherraum kontinuierlich oder diskontinuierlich thermisch aufgebaut wird und sein Raumbedarf deutlich instationär ist sowie u. a. hydrochemische und biologische Veränderungen gegenüber dem Ausgangszustand besonders signifikant sein können,
- ▶ eine **Betriebsphase (i. e. S.)**, in der der Wärme- oder Kältespeicher mit Ein- und Ausspeichervorgängen zur Wärme- oder Kälteversorgung kontinuierlich oder diskontinuierlich genutzt wird, wobei sein Raumbedarf innerhalb bestimmter Grenzen quasi-stationär bzw. nur leicht instationär ist,
- ▶ eine **Post-Betriebsphase**, in der der Speicherraum thermisch nicht mehr genutzt wird und die THMCB-Auswirkungen kontinuierlich abklingen, bis sich stationäre Zustände bei den THMCB-Parametern einstellen.

Zwischenfazit 1.4.1-II

Das universell einsetzbare ANGUS-Konzept bietet durch die Definition räumlicher und zeitlicher Beanspruchungen des geologischen Untergrunds und damit einhergehender thermischer, hydraulischer, mechanischer, chemischer und biologischer Auswirkungen eine quantitative Komponente für eine Raumplanung des geologischen Untergrunds für verschiedene Nutzungsoptionen wie auch für eine multiple Bewirtschaftung. Es erweitert und vereinheitlicht damit konzeptionell bestehende Ansätze zur Raumnutzung des geologischen Untergrunds (z. B. aus dem Grundwasserschutz) und greift mit der Definition eines Auswirkungsraums Ideen aus den regulatorischen Vorgaben für obertägige Anlagen auf.

1.4.1.3 Umsetzungsansätze des ANGUS-Konzepts zur quantitativen Raumplanung des geologischen Untergrunds

Für eine Umsetzung des ANGUS-Konzepts in realen geologischen Formationen sind derzeit noch eine Reihe von Vorarbeiten durchzuführen bzw. regulatorische Entscheidungen zu treffen. Diese lassen sich wie folgt skizzieren:

- ▶ Festlegung von Schwellen- und/oder Grenzwerten für THMCB-Auswirkungsparameter zur Definition der genutzten bzw. beeinflussten Volumina im geologischen Untergrund.
 - Die Abgrenzung zwischen Nutzungs- und Auswirkungsraum ist im Wesentlichen durch die Betriebsführung der Nutzung definiert und demzufolge keine statische Größe. Die Ausdehnung des Nutzungsraums ist daher zukünftig über die Regulierung des Betriebs der Untergrundnutzung festzulegen, wie es entsprechend bei Anlagen an der Erdoberfläche allein über die Abgrenzung des Betriebsgeländes Standard ist. Weiterhin sollten sich Grenz- bzw. Schwellenwerte im Nutzungsraum, analog zu denen von Industrieanlagen an der Landoberfläche, durchaus von ansonsten im Schutzgut Grundwasser anzuwendenden Werten unterscheiden.
 - Eine standortunabhängige und nutzungsunabhängige Definition von Grenz- oder Schwellenwerten im Auswirkungsraum sowie dessen Abgrenzung zum Monitoringraum erscheint aus verschiedenen Gründen jedoch problematischer. Regulatorisch könnten aus anderen gesetzlichen und untergesetzlichen Regelwerken für bestimmte Auswirkungen zwar potenziell Grenzwerte abgeleitet werden, jedoch sind z. B. physikochemische Zustandsgrößen wie thermodynamische „Gleichgewichtskonstanten“ von Druck- und Temperaturbedingungen abhängig; die Erwärmung eines Wassers führt dadurch beispielsweise zu einer Verstärkung der Autoprotolyse des Wassers und damit zu mehr gelösten H^+ - und OH^- -Ionen. Da der pH-Wert über die gelösten H^+ -Ionen definiert ist, bedeutet dies auch ohne ein Vorliegen weiterer chemischer Prozesse eine Verringerung des pH-Wertes. Es wäre zu diskutieren, inwiefern derartige Prozesse in entsprechenden Regelwerken bei der Definition von Grenzwerten berücksichtigt werden können.
 - Auf Basis der (bisher noch wenigen) Daten zur Variabilität von THMCB-Auswirkungen durch Temperaturveränderungen werden im ANGUS-Konzept daher standortspezifische empirische und z. T. experimentelle Ansätze verfolgt, bei denen die „natürliche“ Varianz der geogenen und biogenen Anfangs- und Randbedingungen bei der Festlegung von

Grenzwerten zur räumlichen Trennung von Auswirkungsraum und Monitoringraum heranzuziehen ist.

Aus naturwissenschaftlicher und technischer Sicht erscheint dieser Ansatz sinnvoll, erfordert allerdings eine hinreichende Kenntnis des geologischen Untergrunds und ist im Hinblick auf die regulative Funktionsfähigkeit weder an realistischen Praxisbeispielen erprobt, noch verwaltungsrechtlich auf seine Umsetzbarkeit geprüft.

► Entwicklung von Ablaufplänen und numerischen Modellansätzen.

Eine sowohl aus ökonomischen als auch aus ökologischen Gründen notwendige quantitative Raumplanung des geologischen Untergrunds auf der Skala urbaner Gebiete stellt unter regulatorischen Aspekten weitgehend Neuland dar. Es bedarf noch der Erarbeitung eines rechtlichen Rahmens einschließlich einer Einigung mit den verantwortlichen Akteuren (vgl. Kap. 4), um eine entsprechende Raumplanung verwaltungstechnisch unter Zuhilfenahme numerischer Modellansätze umzusetzen. Folgende Aspekte sind dabei u. a. zu berücksichtigen:

- Eine notwendige Prämisse muss zukünftig sein, dass der Raumbezug einer Nutzung tatsächlich als dreidimensionaler Körper mit einer zeitlichen Dynamik beschrieben wird. Dies wird z. B. im Hinblick auf die gesetzlichen und untergesetzlichen Regelwerke zum Grundwasserschutz, die bisher 2D-Ansätze verfolgen und z. T. stark vereinfachend den 3D-Raumbezug der Grundwassernutzung (und des Grundwasserschutzes) an die Landoberfläche projizieren (Pseudo-3D), Anpassungen notwendig machen.
- Da die Volumina der Raumbeanspruchung spezifischer Nutzungen auch stark von den obertägigen Betriebs-/Nutzungsszenarien, wie oben bereits skizziert, abhängig sind, sind auch die zukünftig zu erwartenden Veränderungen der Nutzungsszenarien für einen als prognostizierbar anzusehenden Zeitraum bei der Raumplanung des geologischen Untergrunds zu berücksichtigen. Bezogen auf die thermische Nutzung des oberflächennahen geologischen Untergrunds könnte dies z. B. folgende Planungsschritte bedeuten:
 - Analyse des bisherigen, des aktuellen und des zukünftigen Wärme- und Kälte-Speicherbedarfs im Hinblick auf die notwendige Speicherkapazität und die notwendige Speicherleistung (Ein- und Ausspeicherraten),
 - Erfassung und Analyse der alternativ bestehenden und/oder potenziellen Nutzungsoptionen im betrachteten geologischen Untergrund, dessen Erkundungsstatus ein belastbares geologisches 3D-Modell und idealerweise auch eine belastbare Parametrisierung der nutzungsinduzierten Prozesse ermöglicht,
 - numerische Simulation der Nutzungs-, Auswirkungs- und Monitoringräume zur Prognose der Vereinbarkeit und/oder Nutzungskonkurrenz thermischer Wärmespeicher mit anderen Nutzungsoptionen,
 - verwaltungsrechtliche bzw. gesellschaftspolitische Entscheidung, ob und gegebenenfalls unter welchen Auflagen multiple Nutzungen im oberflächennahen geologischen Untergrund ermöglicht werden, was eine Priorisierung bestimmter Nutzungen beinhalten kann,

- Festlegung von Monitoringkonzepten zur Kontrolle der betriebsbedingten Auswirkungen und geeigneten Interventionsmaßnahmen, falls der Betrieb eines thermischen Speichers z. B. durch einen Unfall gestört ist oder nicht in dem festgelegten Rahmen abläuft.
- Essenzielle Werkzeuge für eine quantitative Raumplanung des geologischen Untergrunds werden numerische Modellprogramme bilden, die die relevanten THMCB-Prozesse belastbar prognostizieren können. Prinzipiell stehen für einzelne Nutzungsarten des geologischen Untergrunds (insbesondere zur Grundwassernutzung für die Trinkwassergewinnung) zwar bereits bewährte numerische Modellprogramme für die betriebliche Steuerung und Auswirkungsprognosen zur Verfügung, allerdings befinden sich numerische THMCB-Modellprogramme zur Prognose und Bewertung der oben skizzierten multiplen Nutzungsansätze wie OpenGeoSys (vgl. Kolditz et al. (2012)) erst in der Entwicklungsphase. Dies limitiert die Umsetzung des ANGUS-Konzepts auf der für die regenerative Wärmeversorgung relevanten Skala von Quartieren, Stadtteilen oder sogar Großstädten derzeit noch signifikant.
- Die Entwicklung hinreichend komplexer, bedienerfreundlicher und belastbarer numerischer Programme besitzt daher eine sehr hohe Priorität, wenn die Vorteile einer nachhaltigen Nutzung des geologischen Untergrunds zukünftig z. B. im Rahmen der Transformation der Wärmeversorgung umgesetzt werden sollen.
- Parallel und gleichrangig zur Entwicklung entsprechender Modellprogramme ist zukünftig der Aufbau hinreichend parametrisierter geologischer 3D-Strukturmodelle, prioritär für städtische Bereiche, für die Umsetzung des ANGUS-Konzepts unerlässlich.

Zwischenfazit 1.4.1-III

Aus ökonomischen und auch ökologischen Gründen erscheint eine Raumplanung des geologischen Untergrunds zumindest bei einem hohen multiplen Nutzungsbedarf (z. B. in urbanen Gebieten) essentiell. Allerdings sind dafür noch in nicht unbeträchtlichem Maße die regulatorischen und technischen Voraussetzungen zu schaffen. Für den regulatorischen Bereich bedeutet dies, gesetzliche und untergesetzliche Regelungen zu schaffen, die eine quantitative 3D-orientierte Raumplanung für zeitlich und räumlich instationäre nutzungsinduzierte Prozesse im geologischen Untergrund ermöglichen. Im technischen Bereich gilt es, belastbare und praktikable numerische Modelle zur Quantifizierung des nutzungsbedingten Raumbedarfs zu entwickeln und neben geologischen Strukturmodellen auch die Parametrisierung der geologischen Einheiten für THMCB-Prozesse weiter als hoheitliche Aufgabe zu verfolgen, um den geologischen Untergrund als Wirtschaftsraum nachhaltig nutzen zu können.

Resümee 1.4.1

Der Bedarf an saisonalen untertägigen Wärme- und Kältespeichern macht gerade in urbanen Gebieten mit hohem Heiz- und Kühlbedarf eine quantifizierende und dreidimensionale Raumplanung für die Bewirtschaftung des geologischen Untergrunds aus ökonomischen und auch ökologischen Gründen notwendig.

Allerdings sind solche Konzepte, die auf die zeitliche und durch Nutzungen induzierte Raumwirkung abzielen, z. B. in gesetzlichen und untergesetzlichen Regelwerken, i. d. R. noch nicht Basis einer nachhaltigen und optimierten Bewirtschaftung und damit zum Schutz des geologischen Untergrunds wirksam, was multiple Nutzungen gerade in urbanen Gebieten mit hohem Nutzungsdruck erschwert.

Einen ersten generellen Ansatz für eine entsprechende Raumplanung und -bewirtschaftung des geologischen Untergrunds stellt das sogenannte ANGUS-Konzept dar. Dieses allgemeine Konzept ermöglicht über die Definition und Berechnung räumlicher und zeitlicher Beanspruchungen des geologischen Untergrunds und damit einhergehender thermischer, hydraulischer, mechanischer, chemischer und biologischer Auswirkungen eine Planung und Bewirtschaftung mit multiplen Nutzungsoptionen.

In dieser Studie bildet das ANGUS-Konzept die Grundlage, um die durch oGT- und UTES-Anlagen induzierten thermischen, hydraulischen, hydrochemischen und mikrobiologischen Auswirkungen in Abhängigkeit ihrer Betriebsmodi zu quantifizieren.

Für die praxisnahe Umsetzung dieses oder eines vergleichbaren Konzepts sind allerdings umfangreiche sowohl regulatorische als auch technische Voraussetzungen zu schaffen. Zu nennen sind in diesem Kontext eine Vereinheitlichung und grundlegende Modifikation des gesetzlichen und untergesetzlichen Regelwerks zu Nutzungsoptionen des geologischen Untergrunds sowie auch die Entwicklung numerischer Modellprogramme und Datenbanken zur Digitalisierung und prozessbezogenen Parametrisierung des untertägigen Wirtschafts- und Lebensraums.

Je nach Erkundungs- und Bewirtschaftungsstatus in urbanen Gebieten kann die Umsetzung einer entsprechenden Raumplanung in einzelnen urbanen Gebieten eine beträchtliche Investition an Arbeit und Kapital bedeuten, deren Rendite allerdings in einem Verhältnis zu alternativen Kosten für die Transformation der Wärmeversorgung und zur Erhöhung der Resilienz urbaner Gebiete gegenüber den Folgen des Klimawandels zu stellen ist.

1.4.2 Parametrisierungsgrundlagen für die thermische Raumwirkung

Die thermischen Auswirkungen von oGT- und UTES-Anlagen können nur in Abhängigkeit von den Betriebsmodi der Anlagen und den geologischen Randbedingungen quantifiziert werden. In der vorliegenden Studie wurden aufgrund der vorhandenen Kenntnisse der beteiligten Arbeitsgruppen zu den geologischen Verhältnissen ihrer jeweiligen Heimatregionen entsprechende als dafür repräsentativ angesehene geologische Verhältnisse ausgewählt.

Die numerischen Simulationen zum Wärmeentzug mit oGT-Anlagen (KIT) wurden basierend auf geologischen Daten des „Rintheimer Feldes“ (RF) durchgeführt (Jank, 2013) (Abschn. 1.4.3). Geologisch befindet sich das RF auf der Grabenrandscholle des Oberrheingrabens (ORG), dessen Füllung aus tertiären und quartären Sedimenten besteht.

Die Szenarienanalysen zu UTES-Anlagen (Abschn. 1.4.4) basieren auf Geodaten von norddeutschen (schleswig-holsteinischen) quartären und tertiären Sedimenten. Der oberflächennahe geologische Untergrund Schleswig-Holsteins weist regional ausgebildete tertiäre Grundwasserleiter (Obere bzw. Untere Braunkohlensande (OBKS bzw. UBKS)) auf, die von kleinräumig heterogenen, glazigenen, pleistozänen Ablagerungen (z. B. Hauptwasserleiter (HWL)), die bisweilen mehrere hundert Meter tief (Rinnenwasserleiter (RLW)) in den präglazialen Untergrund einschneiden, überlagert sind. Der in numerischen Simulationen zu UTES verwendete Wertebereich zu hydraulischen Parametern stammt im Wesentlichen aus Pumpversuchen in den UBKS (Liebau, 1985).

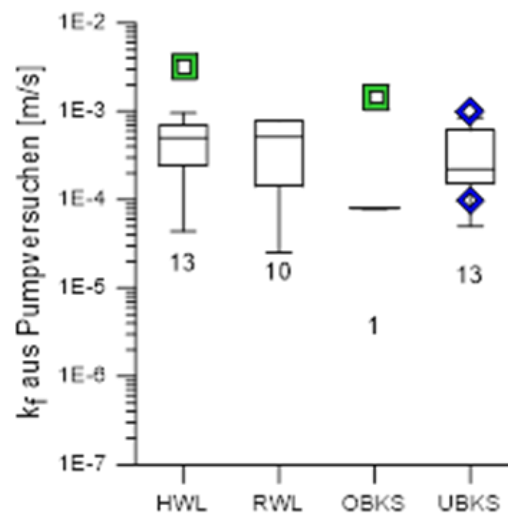
1.4.2.1 Werte der hydraulischen Parameter

Die in den Wärmespeicherszenarien gewählten horizontalen hydraulischen Durchlässigkeiten der UBKS liegen innerhalb der Spannweite typischer hydraulischer Durchlässigkeitsbeiwerte in Schleswig-Holstein (Abb. 1.11). Ebenfalls aus Pumpversuchen wurden Werte zum hydraulischen Speicherkoeffizienten abgeleitet, der für den (halb-)gespannten HWL um $S = 10^{-3}$ liegt (Agster et al., 2014). Da das thermische Speicherverhalten und die Raumbeanspruchung nicht auf den Speicherkoeffizient sensitiv sind (vgl. Heldt et al. (2023)), wird dieser im weiteren Verlauf der Studie zwar in den Simulationen verwendet, jedoch nicht näher betrachtet und diskutiert. Weitere hydraulische Kennwerte wie effektive Porositäten, Dispersivitäten etc. von Aquiferen Norddeutschlands sind nach Kenntnis der Autoren dieser Studie bisher nicht veröffentlicht, so dass bei diesen Parametern auf Aquifer-Analogue (Dethlefsen et al., 2014) zurückgegriffen wurde.

Pleistozäne Geschiebemergel im südöstlichen Schleswig-Holstein weisen k_f -Werte zwischen $< 10^{-9}$ m/s und $6 \cdot 10^{-11}$ m/s für schluffige oder tonige Fazies und zwischen $8 \cdot 10^{-7}$ m/s und $3 \cdot 10^{-9}$ m/s für sandige Fazies auf (Agster, 1996; Otto et al., 2001; Agster, 2010), so dass in den Simulationen zu den UTES-Anlagen ein Wert 10^{-8} m/s gewählt wurde. Messdaten für vertikale Durchlässigkeitsbeiwerte ($k_{f\text{-vert}}$) miozäner Grundwassergeringleiter Schleswig-Holsteins sind nicht verfügbar; andernorts in Norddeutschland wurden für den Oberen Glimmerton (OGT) und den Hamburger Ton $2 \cdot 10^{-8}$ bis $2 \cdot 10^{-11}$ m/s geschätzt (Schwerdtfeger, 1985; Wüstenhagen et al., 1991, Agster, 1996), wobei in Agster u. a. (2014) eher von 10^{-9} m/s ausgegangen wird.

Im Vergleich zu den norddeutschen quartären und tertiären Ablagerungen sind die hydraulischen Durchlässigkeiten der mehr kiesigen Rheinterrasse des Rintheimer Feldes, wie nach geologischen Bildungsbedingungen zu erwarten, höher (Abb. 1.11).

Abbildung 1.11: Einordnung der in dieser Studie verwendeten Durchlässigkeitsbeiwerte (k_f -Werte) in die Durchlässigkeitswert-Verteilung der oberflächennahen Grundwasserleiter Schleswig-Holsteins



Box-Whisker-Plot: „Whisker“ zeigen Minima und Maxima, Boxen zeigt 25 % und 75 % Quartile, gegeben ist die Anzahl der Datenpunkte pro Datensatz. GWL: Grundwasserleiter; HWL: Hauptwasserleiter; RWL: Rinnenwasserleiter; OBKS: Obere Braunkohlensande; UBKS: Untere Braunkohlensande.

Markierungen: ■ Werte aus Jank (2013) zur Verwendung in Simulationen zum Wärmeentzug in Abschnitt 1.4.3

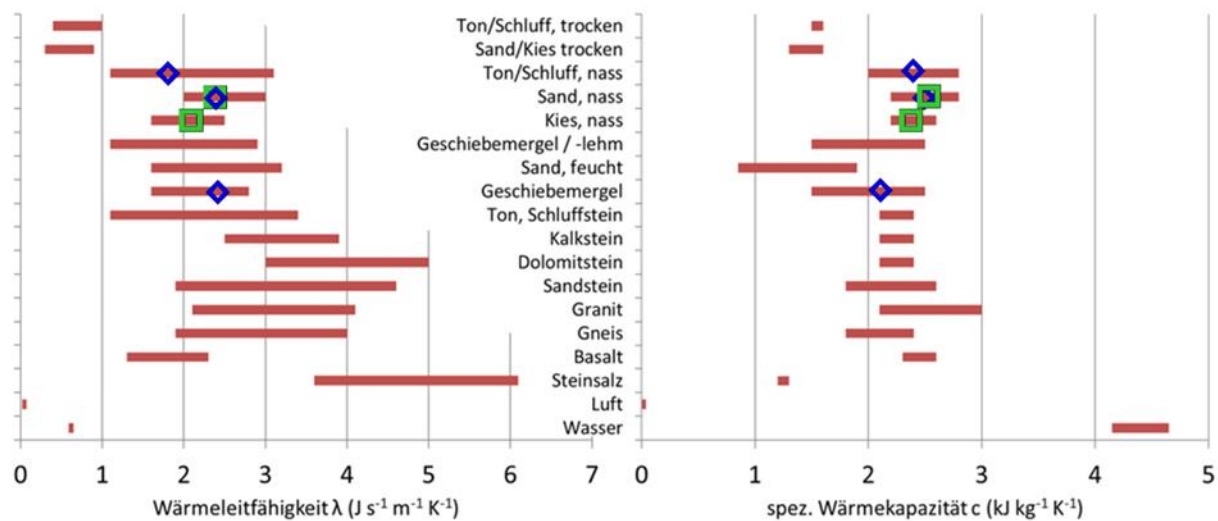
◆ Werte aus Liebau (1985) zur Verwendung in Simulationen zur Wärmespeicherung in Abschnitt 1.4.4

Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, mit Daten von Agster (2010) für Box-Whisker-Plots.

1.4.2.2 Thermische und geomechanische Parameterwerte

Literaturdaten deuten auf eine relativ große Spannweite der Werte zur Wärmeleitfähigkeit und zur spezifischen Wärmekapazität in Sedimenten (Abb. 1.12). Ein wesentlicher Grund dafür dürfte sein, dass methodische, wichtige Messeinflüsse wie z. B. der Wassergehalt und/oder nachgeordnet die mit Korn-Korn-Kontakten korrelierte Packungsdichte schwer zu kontrollieren sind.

Abbildung 1.12: Einordnung der bei den numerischen Simulationen in dieser Studie verwendeten Werte für die Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität in die Spannweite dieser Parameter in natürlichen Gesteinen



Markierungen: ■ Werte zur Verwendung in Simulationen zum Wärmeentzug in Abschnitt 1.4.3

◆ Werte zur Verwendung in Simulationen zur Wärmespeicherung in Abschnitt 1.4.4

Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. Datenbalken mit Daten aus VDI 4640 Blatt 1 (VDI – Verein Deutscher Ingenieure e. V., 2000); Markierungen: eigene Daten, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Um zu ortsspezifischen Aussagen zu gelangen, wären neben einer belastbaren Kenntnis der geologischen Strukturen und der Bestimmung von Parametern wie der vertikalen hydraulischen Durchlässigkeit allerdings auch geostatistisch fundiertere Datensätze zu diesen hydraulischen und thermischen Parametern wünschenswert, um z. B. über den Ansatz der Korrelationslängen thermische und hydraulische Anisotropien auch mit generischen und semi-generischen Untersuchungsansätzen besser fassen zu können.

Resümee 1.4.2

Es existiert eine hinreichende Anzahl von Werten hydraulischer und thermischer Kennparameter norddeutscher Grundwasserleiter und Grundwassergeringleiter, um für diese Studie in erster Näherung realitätsnahe generische Szenarienanalysen zum untertägigen Raumbedarf von oGT- und UTES-Anlagen durchzuführen.

1.4.3 Ableitung des untertägigen Raumbedarfs bei Wärmeentzug durch oGT-Anlagen (EWS- und Wasser-Wasser-Anlagen)

Die Nutzung des geologischen Untergrunds zum Wärmentzug durch oGT-Anlagen ist mittel- und langfristig mit Veränderungen der thermischen Verhältnisse im Umfeld der Nutzung verbunden. Zur Bewertung der von thermischen Auswirkungen betroffenen Raumvolumina durch einen Ausbau von oGT-Anlagen stehen generell analytische Simulationsansätze zur Verfügung, mit denen in dieser Studie für verschiedene Betriebsszenarien exemplarische Raumbedarfe berechnet wurden.

Dafür wurden jeweils als „typisch“ angenommene Systemkonfigurationen (z. B. Sondenlänge, Brunnentiefe) und (hydro-)geologische Bedingungen (z. B. thermische Entzugsleistung, natürliche Grundwasserströmung) definiert und anhand eines Wärmeversorgungsbedarfs (simulierte

Zeit: 100 Tage) eines Wohngebiets im Oberrheingraben, dessen oberflächennaher geologischer Untergrund durch fluviatile Ablagerungen geprägt wird (bis ca. 150 m Tiefe), simuliert. Der natürliche geothermische Wärmestrom wird aufgrund der Fokussierung auf oberflächennahe Systeme nicht berücksichtigt.

Da bei reinem Wärmeentzug keine aktive thermische oder hydraulische Bewirtschaftung des geologischen Untergrunds im Sinne einer Einspeisung und Rückgewinnung stattfindet, ist entsprechend dem ANGUS-Konzept kein Nutzungsraum für Wärmeentzug definiert. Die Quantifizierung des Raumbedarfs erfolgte daher in Form thermischer und hydraulischer Auswirkungsräume, deren Raumanteil auf ein definiertes untertägliches Referenzvolumen im urbanen Untergrund bezogen wird. Das definierte Referenzvolumen soll analog zu den UTES-Szenariensimulationen eine Grundfläche von 1 km^2 und eine Mächtigkeit von 100 m besitzen. Die Abgrenzung des thermischen Auswirkungsrums vom Monitoringraum bzw. vom thermisch unbeeinflussten Raum erfolgte dabei anhand der Delta-1K-Isotherme.

Für reinen Wärmeentzug wurden einzelne Sonden (bzw. Brunnen innerhalb von Anlagen mit mehreren Sonden) bzw. Brunnen für einen langfristigen Erhalt der Entzugsleistung so angelegt, dass keine gegenseitige thermische Beeinflussung der einzelnen Sonden bzw. Brunnen stattfindet. Die Quantifizierung des Raumbedarfs der Sonden- bzw. Brunnenfelder erfolgt daher hier anhand der thermischen und hydraulischen Auswirkungsräume für einzelne Sonden bzw. Brunnen, die in einem zweiten Schritt mit der Gesamtzahl an installierten Sonden bzw. Brunnen der oGT-Anlagen multipliziert werden.

Die Berechnung des Temperaturfelds um eine EWS erfolgte im Fall von rein konduktivem Wärmetransport im geologischen Untergrund (ohne natürliches Grundwasserfließen) unter der Annahme eines kontinuierlichen Wärmeentzugs über die gesamte Sondenlänge mittels der analytischen Lösung der finiten Linienquelle (FLS) (Stauffer et al., 2014). Der Einfluss von Grundwasserströmung auf die Ausdehnung des Temperaturfelds kann durch den konduktiv-advektiven Wärmetransport beschrieben und mit dem Berechnungsansatz, dem beweglichen finiten Linienquellenansatz (Moving Finite Line Source (MFLS)), berechnet werden (ebd.). Der MFLS-Ansatz geht ebenfalls von einer kontinuierlichen Entzugsleistung sowie einer konstanten Bodentemperatur aus (ebd.).

Für die Berechnung der thermischen Beeinflussung durch WWA wurden ebenfalls verschiedene analytische Berechnungsansätze verwendet. Der Berechnungsansatz von Guimerà et al. (2007) geht von einem horizontalen konduktiven Wärmetransport aus. Im Ansatz von Avdonin (1964) werden auch axiale Einflüsse, also der Wärmeaustausch mit angrenzenden Schichten, berücksichtigt, indem der konduktive Wärmetransport in vertikaler und horizontaler Richtung in die Berechnung miteinfließt. Beide Ansätze gehen von einer kontinuierlichen Punktquelle für den Wärmetransport aus und vernachlässigen natürliche Grundwasserströmung. Die Berechnung der Wärmefahne aufgrund konduktiven und advektiven Wärmetransports wurde mit dem analytischen Ansatz von Kinzelbach (1987) durchgeführt.

Im Falle rein konduktiven Wärmetransports wird der thermische Auswirkungsraum mit Hilfe des Radius r der 1-K-Isotherme und der Länge l der EWS unter Verwendung der Zylinderformel $V_a = \pi \cdot r^2 \cdot l$ berechnet. Beim konduktiv-advektiven Wärmetransport gleicht der thermisch beeinflusste Raum von Sonden bzw. Brunnen einem Ellipsoid. Jeweils die Hälfte der maximalen Länge und Breite der 1-K-Isotherme der Temperaturfahne entspricht den horizontalen (x, y) Halbachsen des Ellipsoids. Die Hälfte der EWS-Länge l bildet die vertikale Halbachse, so dass mit $V_a = 4/3 \cdot \pi \cdot x \cdot y \cdot l/2$ der thermische Auswirkungsraum bei Grundwasserströmung abgeschätzt werden kann.

Basis für die Abschätzung des hydraulischen Auswirkungsraums ist die Bestimmung der Dimension des Absenktrichters um einen Förderbrunnen einer WWA-Anlage. Der äußerste Einflussbereich der Absenkung des Grundwassers, auch Reichweite R genannt, wurde nach der Methode von Sichardt (1928) berechnet:

$$R = 300 \cdot s \cdot \sqrt{k_f}$$

Die Absenkung des Wasserpegels s im Brunnen eines ungespannten Grundwasserkörpers kann generell rekursiv aus der Brunnenformel nach Dupuit-Thiem ermittelt werden:

$$Q = \pi \cdot k_f \cdot \frac{s \cdot (2 \cdot m - s)}{\ln R - \ln r}$$

Die Brunnenformel beschreibt den Wasserzufluss zu einem vollkommenen Einzelbrunnen bzw. die Entnahmemenge. In Abhängigkeit von der Entnahmemenge Q , der Aquifermächtigkeit m , der hydraulischen Leitfähigkeit k_f und dem Brunnendurchmesser r kann so die Absenkung bzw. Reichweite des hydraulisch beeinflussten Raums berechnet werden. Für die Bestimmung des Volumens des hydraulischen Auswirkungsraums wurde wieder eine zylindrische Ausdehnung als Näherung für die Dimension des Absenktrichters angenommen. Hierbei entspricht die Reichweite dem Radius und die Absenkung im Absenktrichter der Zylinderhöhe.

1.4.3.1 Beschreibung des exemplarischen Standorts

Das exemplarische Wohngebiet umfasst 0,13 km² und 31 Mehrfamilienhäuser mit ca. 2500 Einwohnern und einem jährlichen Wärmebedarf von 10 GWh (bzw. 4,8 GWh für den Fall, dass eine energetische Sanierung stattgefunden hat). Für das Wohngebiet wurde eine Lage auf der Grabenrandscholle des ORG angenommen, dessen Füllung aus quartären und tertiären Sedimenten besteht. Zudem wurde angenommen, dass sich der Aquifer im nördlichen Teil des Wohngebiets aus einem Oberen (OGWL) und einem Unteren (UGWL) Grundwasserleiter zusammensetzt, wie es im Oberrheingraben oft der Fall ist. In solchen Fällen unterliegen Gebiete entsprechend dem „Informationssystem für oberflächennahe Geothermie Baden-Württemberg“ (ISONG) (LGRB – Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, Regierungspräsidium Freiburg, 2022) einer Bohrtiefenbeschränkung entsprechend der Grenze zwischen OGWL und UGWL, die dem Schutz des unteren Aquifers als Trinkwasserressource dient.

Für den OGWL am exemplarischen Standort wurde eine typische Zusammensetzung aus Kies und Sand sowie eine Mächtigkeit von 13 m angenommen. Der 18 m mächtige UGWL sollte aus pliozänen fluviatilen und limnischen Sedimenten (z. B. Sand und Silt) aufgebaut und auf den nördlichen Bereich des Wohngebiets beschränkt sein. Entsprechend war die Aquifermächtigkeit im Norden (31 m) dann höher als im Süden (13 m). Zum Liegenden hin waren die Grundwasserleiter jeweils durch tertiäre Sedimentgesteine wie Mergel- und Sandsteine begrenzt. Alle angenommenen hydrogeologischen Parameter für die Quantifizierung der untertägigen Auswirkungsräume sind in Tabelle 1.10 aufgeführt.

Tabelle 1.10: Thermische und hydraulische Parameter des exemplarischen Standorts

Parameter	Wert	Einheit
Mächtigkeit Oberer Grundwasserleiter (OGWL)	13	m
Mächtigkeit Unterer Grundwasserleiter (UGWL)	18	m
vol. Wärmekapazität des Aquifers	$2,8 \cdot 10^6$	J/(m ³ · K)
vol. Wärmekapazität tertiäres Sedimentgestein	$2,3 \cdot 10^6$	J/(m ³ · K)
vol. Wärmekapazität Wasser	$4,2 \cdot 10^6$	J/(m ³ · K)
Wärmeleitfähigkeit Aquifer	2,1	W/(m · K)
Wärmeleitfähigkeit tertiäres Sedimentgestein	2,4	W/(m · K)
hydraulische Leitfähigkeit OGWL	$3,5 \cdot 10^{-3}$	m/s
hydraulische Leitfähigkeit OGWL + UGWL	$1,7 \cdot 10^{-3}$	m/s
Porosität OGWL	20	%
Porosität OGWL + UGWL	14	%
Abstandsgeschwindigkeit OGWL	$3,5 \cdot 10^{-6}$	m/s
Abstandsgeschwindigkeit OGWL + UGWL	$1,8 \cdot 10^{-6}$	m/s
longitudinale Dispersivität	3,4	m
transversale Dispersivität	0,3	m
Retardation	2,0	-
Gradient	0,001	-
Pumprate	0,0002	m ³ /s
Brunnenradius	0,3	M
Simulationsdauer	100	Tage

1.4.3.2 Raumbedarf EWS-Anlagen

1.4.3.2.1 Szenarienbeschreibung für angenommenen EWS-Betrieb

Zur Berechnung des thermischen Auswirkungsraums von EWS wurden zwei unterschiedliche Sondenlängen (17 m, 100 m), Entzugsleistungen (60 W/m, 100 W/m) und Grundwasserfließgeschwindigkeiten in verschiedenen Szenarien kombiniert. Zudem wurde die Ausdehnung des Temperaturfelds um die EWS mit zwei verschiedenen analytischen Ansätzen (FLS, MFLS) entsprechend der dominierenden Wärmetransportprozesse berechnet. Die Kombination der Eingabeparameter und Berechnungsmethoden sind in acht verschiedenen Szenarien in Tabelle 1.11 aufgelistet.

Da bis zu einer Sondenlänge von 100 m und einer Leistung von bis 0,2 MW (vgl. Abschn. 4.5.2) keine bergbaurechtliche Genehmigung notwendig ist (BBergG, o. J.) und dies in der Praxis häufig ein Entscheidungskriterium darstellt, wurde dies als maximale Sondenlänge definiert. Die gewählte kürzere Sondenlänge von 17 m entspricht der angenommenen Grenze zwischen OGWL

und UWGL bzw. der dadurch entstehenden Bohrtiefenbeschränkung laut ISONG (LGRB, Regierungspräsidium Freiburg, 2022). Die Wärmeentzugsleistung von 60 W/m entspricht den Angaben von ISONG (ebd.). Unter der Annahme von Grundwasserfluss sind erhöhte Entzugsleistungen von 100 W/m möglich (Selcuk, 2011). Für die Szenarien *EWS 3* und *EWS 4* wurde die mittlere Grundwasserfließgeschwindigkeit des gesamten Aquifers und für die Szenarien *EWS 7* und *EWS 8* die des Oberen Aquifers verwendet (Tab. 1.10, Tab. 1.11).

Tabelle 1.11: Randbedingungen und Parameter für Erdwärmesondenszenarien

Szenario	EWS-Länge [m]	Entzugsleistung [W/m]	Grundwasserfließgeschwindigkeit [m/s]	Methode *
<i>EWS 1</i>	100	60	0	FLS
<i>EWS 2</i>	100	100	0	FLS
<i>EWS 3</i>	100	60	$1,76 \cdot 10^{-6}$	MFLS
<i>EWS 4</i>	100	100	$1,76 \cdot 10^{-6}$	MFLS
<i>EWS 5</i>	17	60	0	FLS
<i>EWS 6</i>	17	100	0	FLS
<i>EWS 7</i>	17	60	$3,5 \cdot 10^{-6}$	MFLS
<i>EWS 8</i>	17	100	$3,5 \cdot 10^{-6}$	MFLS

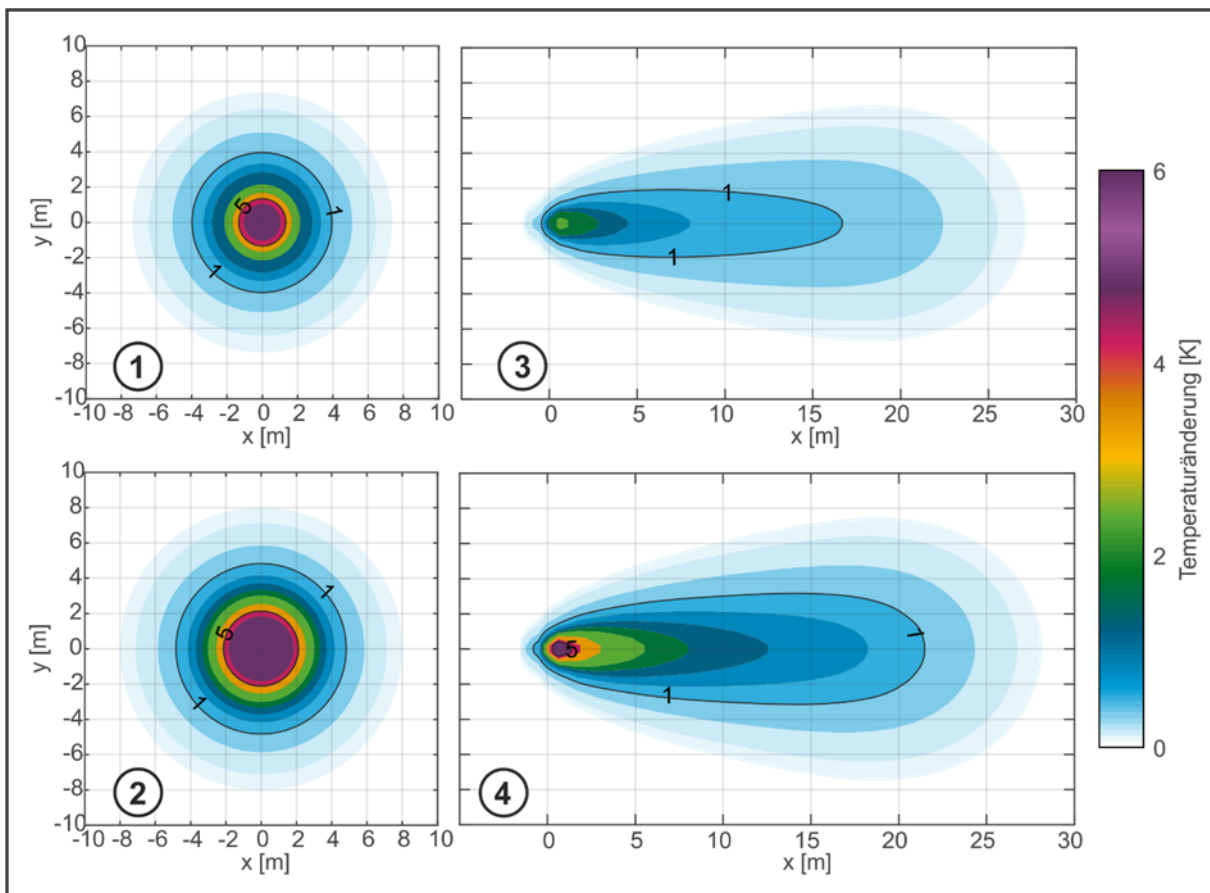
Variationen in Sondenlänge, Entzugsleistung sowie Grundwasserfließgeschwindigkeit in acht Szenarien. Das Temperaturfeld wird mittels der finiten Linienquelle (FLS) und der beweglichen finiten Linienquelle (MFLS) berechnet.

* Stauffer et al., 2014.

1.4.3.2.2 Thermischer Auswirkungsraum von EWS

Im Fall des rein konduktiven Wärmetransports (Szenarien *EWS 1, 2, 5, 6*) bildet sich ein radialer Bereich mit erhöhten Grundwassertemperaturen um die EWS aus (Abb. 1.13 und 1.14). Im Nahbereich der EWS beträgt die Temperaturdifferenz zum ungestörten Untergrund 6 K. Bei einem Radius von 3,9 m und 4,7 m ist diese Temperaturdifferenz auf 1 K gesunken. Bei gleicher Entzugsleistung, aber verkürzter Sondenlänge (*EWS 1* zu *EWS 5* sowie *EWS 2* zu *EWS 6*) sind die Radien des Auswirkungsraums identisch. Eine Erhöhung der Entzugsleistung von 60 W/m auf 100 W/m führt zu einer Vergrößerung des Radius um 21 %. Das Volumen des Auswirkungsraums steigt mit der Entzugsleistung und der EWS-Länge an. Für die Entzugsleistung von 100 W/m und die Standard EWS-Länge von 100 m (*EWS 2*) ist der Auswirkungsraum um den Faktor 8,6 größer als für die verkürzte EWS und eine Entzugsleistung von 60 W/m (*EWS 5*).

Abbildung 1.13: Thermische Auswirkungsräume einer 100 m langen Erdwärmesonde für vier Szenarien 5 – 8 als Änderung der Hintergrundtemperatur ΔT nach 100 Tagen

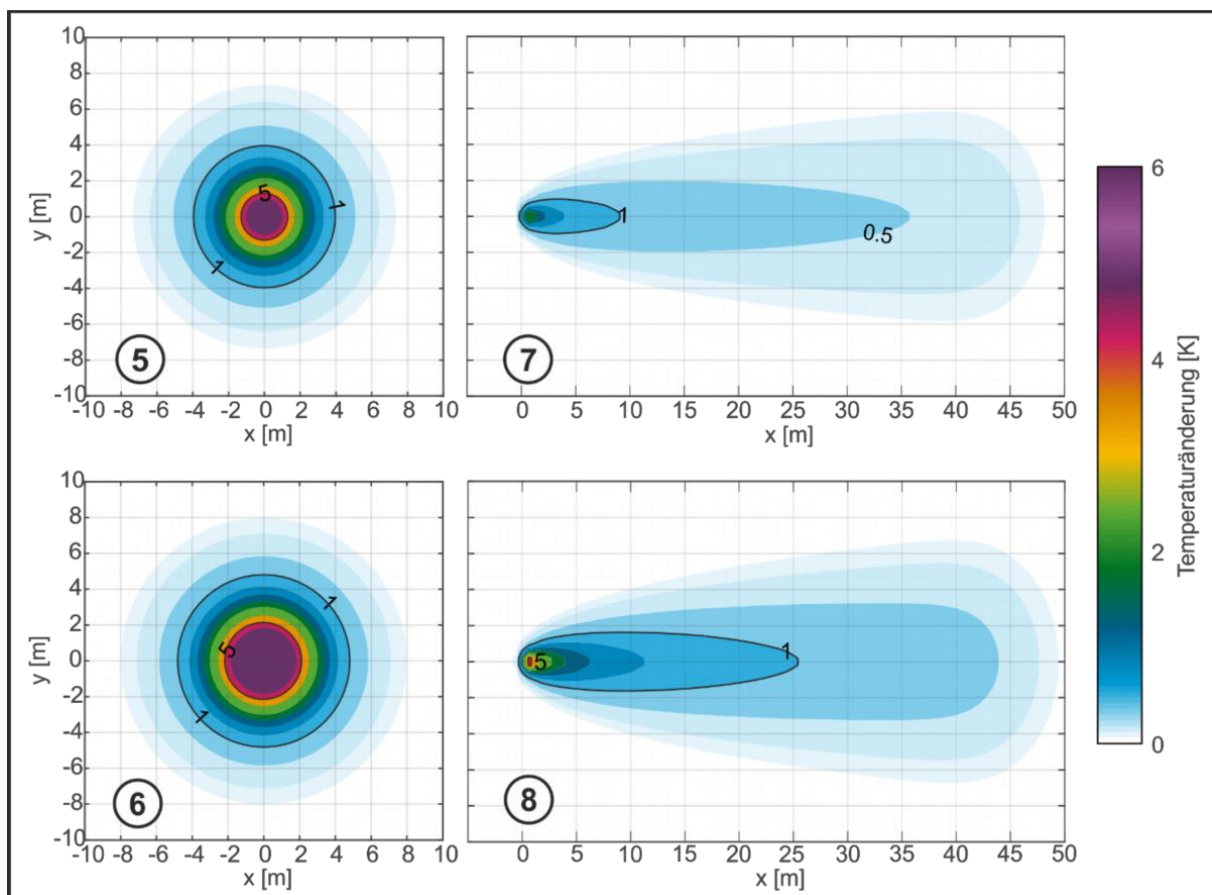


Szenarien 1 und 2 zeigen den Auswirkungsraum bei rein konduktivem Wärmetransport für Entzugsleistungen von 60 W/m (Szenario 1) und 100 W/m (Szenario 2). Szenarien 3 und 4 haben die gleichen Input-Parameter wie Szenarien 1 und 2, berücksichtigen jedoch auch den advektiven Wärmetransport (vgl. Tab. 1.11).

Quelle: Eigene Darstellung, Karlsruher Institut für Technologie.

Im Fall des konduktiv-advektiven Wärmetransports (Szenarien EWS 3, 4, 7, 8) bildet sich eine Temperaturfahne in Grundwasserfließrichtung aus (Abb. 1.13 und 1.14). Im Nahbereich der EWS beträgt die Temperaturdifferenz zum thermisch unbeeinflussten geologischen Untergrund 2 – 6 K. Bei einer Fahnenlänge von 8,5 – 25,3 m ist diese Temperaturdifferenz auf 1 K gesunken. Mit Zunahme der Grundwasserfließgeschwindigkeit (im angegebenen Rahmen) bleibt die Fahnenlänge konstant, lediglich die Breite der Fahne nimmt für hohe Geschwindigkeiten ab, wodurch auch der Raumbedarf sinkt (Abb. 1.15). Bei einer Erhöhung der Entzugsleistung von 60 W/m auf 100 W/m vergrößert sich die Ausdehnung der Temperaturfahne, und das Volumen nimmt um 112 % (EWS 3 zu EWS 4) und 597 % (EWS 7 zu EWS 8) zu. Die Länge der EWS hat nur für sehr kurze (z. B. 10 m) EWS einen Einfluss auf die Dimension der Temperaturfahne und den Raumbedarf (Abb. 1.15). Eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit führt zu einer Verkürzung der Temperaturfahne bei ähnlicher Breite, so dass das Volumen des Auswirkungsraumes und der Raumbedarf insgesamt sinken (Abb. 1.15).

Abbildung 1.14: Thermische Auswirkungsräume einer 17 m langen Erdwärmesonde für vier Szenarien 5 – 8 als Änderung der Hintergrundtemperatur ΔT nach 100 Tagen



Szenarien 5 und 6 zeigen den Auswirkungsbereich bei rein konduktivem Wärmetransport für Entzugsleistungen von 60 W/m (Szenario 5) und 100 W/m (Szenario 6). Szenarien 7 und 8 haben die gleichen Input-Parameter wie Szenarien 5 und 6, berücksichtigen jedoch auch den advektiven Wärmetransport (vgl. Tab. 1.11).

Quelle: Eigene Darstellung, Karlsruher Institut für Technologie.

Basierend auf den berechneten Temperaturfeldern für einzelne Sonden wurden die thermischen Auswirkungsräume für einzelne EWS sowie für EWS-Felder abgeleitet. Bei einem EWS-Abstand von 10 m (UMBW – Umweltministerium Baden-Württemberg, 2005) können auf der frei verfügbaren Fläche des exemplarischen Wohngebiets maximal 974 EWS installiert werden (Tissen et al., 2019a). Die frei verfügbare Fläche entspricht der Grundfläche des Wohngebiets abzüglich der Gebäude- und Garagenfläche und beträgt ca. 70 % der Gesamtfläche des Quartiers. Der gesamte Auswirkungsbereich entspricht somit dem Produkt des thermisch beeinflussten Volumens einer Sonde und der Sondenanzahl von 974 (Tab. 1.12), bezogen auf das Referenzvolumen vom 1 km² auf 100 m.

Aufgrund der unterschiedlichen Sondenlänge und Entzugsleistung ergeben sich für jedes Szenario unterschiedliche Wärmemengen, die für die Deckung des Wärmebedarfs (unsaniert: 10 GWh; saniert: 4,8 GWh) des Wohngebiets herangezogen werden könnten (Tab. 1.12). Berücksichtigt man alle 974 installierten EWS, beträgt der thermische Auswirkungsbereich zwischen 0,8 % und 6,7 % des Referenzvolumens, wobei längere EWS und/oder höhere Entzugsleistungen einen größeren Volumenanteil beanspruchen, aber auch einen größeren Wärmeentzug erzielen, der in den Szenarien *EWS 1, 2 und 4* den Wärmebedarf des unsanierten Wohngebiets decken könnte.

Tabelle 1.12: Angenommene Parameter und thermische Auswirkungsräume für die Berechnungsszenarien von Erdwärmesonden

Szenario	Sondenlänge [m]	Entzugsrate [W/m]	Wärme-transport	Wärme-menge [GWh]	Volumen je Sonden [m³]	Volumenan-teil ^a [%]
EWS 1	100	60	konduktiv	13,3	4724	4,6
EWS 2	100	100	konduktiv	18,6	6921	6,7
EWS 3	100	60	konduktiv und advektiv	9,2	3140	3,1
EWS 4	100	100	konduktiv und advektiv	15,4	6673	6,5
EWS 5	17	60	konduktiv	2,3	803	0,8
EWS 6	17	100	konduktiv	3,2	1177	1,1
EWS 7	17	60	konduktiv und advektiv	2,0	92	0,1
EWS 8	17	100	konduktiv und advektiv	3,4	643	0,6

^a Thermischer Auswirkungsraum der 1-K-Isotherme bezogen auf Referenzvolumen von 1 km² · 100 m bei 974 EWS

1.4.3.3 Raumbedarf WWA

1.4.3.3.1 Szenarienbeschreibung für WWA

Für die Brunnen der WWA wurden jeweils eine Brunnentiefe bis zur Basis des OGWL bzw. UGWL (im nördlichen Teil des Wohngebiets) und eine Verfilterung über die gesamte Aquifermächtigkeit angenommen. Mit diesen Annahmen ist die genutzte grundwassererfüllte Mächtigkeit für die Berechnung des Temperaturfelds einer WWA im nördlichen Teil des exemplarischen Wohngebiets größer. Wie auch zuvor bei EWS setzen sich die Szenarien aus den unterschiedlichen Aquifermächtigkeiten (13 m bzw. 31 m), den entsprechenden Grundwasserfließgeschwindigkeiten der verschiedenen Aquifere (Tab. 1.10) und verschiedenen analytischen Berechnungsansätzen für konduktiven sowie konduktiv-advektiven Wärmetransport zusammen (Tab. 1.13).

Tabelle 1.13: Berechnungsszenarien für die Wasser-Wasser-Anlage („Grundwasserwärmepumpe“) und Auswertungsansatz

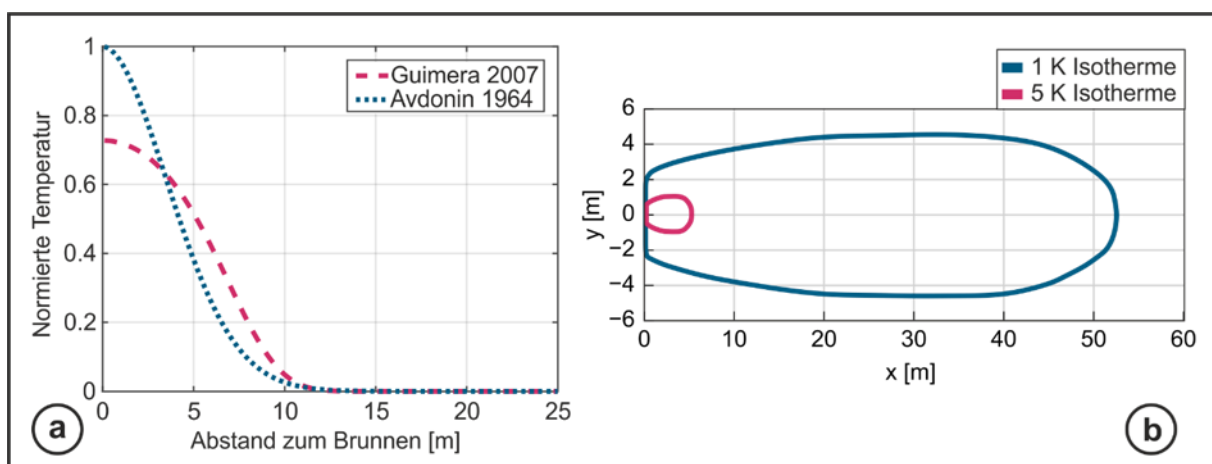
Szenario	Aquifermächtigkeit [m]	Abstandgeschwindigkeit [m/s]	Methode
WWA 1	31	0	Guimera 2007 *
WWA 2	31	0	Avdonin 1964 **
WWA 3	31	$1,76 \cdot 10^{-6}$	Kinzelbach 1987 ***
WWA 4	13	0	Guimera 2007 *
WWA 5	13	0	Avdonin 1964 **
WWA 6	13	$3,5 \cdot 10^{-6}$	Kinzelbach 1987 ***

* Guimera et al., 2007; ** Avdonin, 1964; *** Kinzelbach, 1987.

1.4.3.3.2 Thermischer Auswirkungsraum von WWA

Im Fall des rein konduktiven Wärmetransports (Szenarien WWA 1, 2, 4, 5) variiert die Ausdehnung der 1-K-Isotherme für die beiden analytischen Ansätze um 1,4 m (WWA 1 zu WWA 2) und 2,5 m (WWA 4 zu WWA 5) (Abb. 1.15 und 1.16). Bei einer Reduzierung der genutzten Aquifermächtigkeit (WWA 1 zu WWA 4 und WWA 2 zu WWA 5) um 18 m vergrößert sich der Abstand zum Brunnen um 3,5 m bzw. 2,4 m. Im Fall des konduktiv-advectiven Wärmetransports (WWA 3, 6) bildet sich eine Temperaturfahne in Grundwasserfließrichtung aus (Abb. 1.15 und 1.16). Bei einer Fahnenlänge von 51,5 m und 75,0 m ist diese Temperaturdifferenz auf 1 K gesunken.

Abbildung 1.15: Thermische Auswirkungsräume in einem 31 m mächtigen Aquifer für drei verschiedene analytische Lösungen als Änderung der Hintergrundtemperatur ΔT nach 100 Tagen

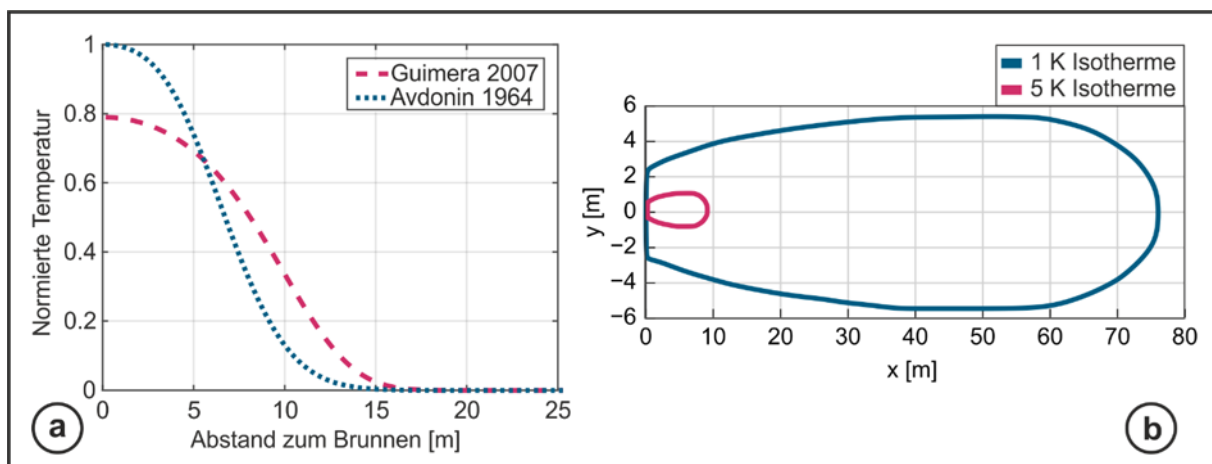


Betrachtete analytische Lösungen vgl. Tab. 1.13.

a) Temperaturabnahme des reinjizierten Wassers in den Aquifer in Abhängigkeit zur Entfernung vom Reinjektionsbrunnen, basierend auf den analytischen Ansätzen von Guimera et al. (2007) (WWA 1) und Avdonin (1964) (WWA 2) und unter Annahme konduktiven Wärmetransports in einem Aquifer mit einer Mächtigkeit von 31 m. b) Temperaturfahnen berechnet nach Kinzelbach (1987) (Szenario 3) unter Berücksichtigung konduktiv-advectiven Wärmetransports und einer Aquifermächtigkeit von 31 m.

Quelle: Eigene Darstellung, Karlsruher Institut für Technologie.

Abbildung 1.16: Thermische Auswirkungsräume in einem 13 m mächtigen Aquifer für drei verschiedene analytische Lösungen als Änderung der Hintergrundtemperatur ΔT nach 100 Tagen



Betrachtete analytische Lösungen vgl. Tab. 1.13.

a) Temperaturabnahme des reinjizierten Wassers in den Aquifer in Abhängigkeit zur Entfernung vom Reinjektionsbrunnen, basierend auf den analytischen Ansätzen von Guimera et al. (2007) (Szenario 4) und Avdonin (1964) (Szenario 5) und unter Annahme konduktiven Wärmetransports in einem Aquifer mit einer Mächtigkeit von 13 m. b) Temperaturfahnen berechnet nach Kinzelbach (1987) (Szenario 6) unter Berücksichtigung konduktiv-advektiven Wärmetransports und einer Aquifermächtigkeit von 13 m.

Quelle: Eigene Darstellung, Karlsruher Institut für Technologie.

Das Volumen des thermischen Auswirkungsraums einer WWA wurde, wie zuvor beschrieben, mit Hilfe einer radialen oder elliptischen Ausdehnung des thermisch beeinflussten Bereichs und dessen Tiefe berechnet. Das Gesamtvolumen des Auswirkungsraums ist wieder das Produkt des Auswirkungsraums eines Brunnes und der Anzahl der installierten Brunnen im Wohngebiet. Der Abstand zwischen zwei Reinjektionsbrunnen ist durch die Ausdehnung der 1-K-Isotherme der Temperaturfahne unter konduktiv-advektivem Wärmetransport definiert. Unter Berücksichtigung dieses Abstandskriteriums können auf den frei verfügbaren Flächen im Wohngebiet 185 (bei Nutzung der gesamten Aquifermächtigkeit, OGWL + UGWL) bzw. 133 Brunnen (bei Nutzung des OGWL) installiert werden. Für alle 185 bzw. 133 installierten Reinjektionsbrunnen liegt der Anteil der thermischen Auswirkungsraums zwischen 0,5 % und 1,4 % am Referenzvolumen (Tab. 1.14).

Tabelle 1.14: Angenommene Parameter und thermische Auswirkungsräume für die Berechnungsszenarien von Wasser-Wasser-Anlagen

Szenario	Aquifer-mächtigkeit [m]	Wärmetransport	Wärmemenge [GWh]	Volumen [m ³]	Anzahl Brunnen	Volumenanteil ^a [%]
WWA 1	31	konduktiv	11,0	6709	185	1,2
WWA 2	31	konduktiv	11,0	4637	185	0,9
WWA 3	31	konduktiv und advektiv	11,0	7523	185	1,4
WWA 4	13	konduktiv	7,6	5687	133	0,8
WWA 5	13	konduktiv	7,6	3532	133	0,5
WWA 6	13	konduktiv und advektiv	7,6	5360	133	0,7

^a Thermischer Auswirkungsraum der 1-K-Isotherme bezogen auf Referenzvolumen von 1 km² · 100 m bei der jeweiligen Anzahl an Brunnen

1.4.3.3 Hydraulischer Auswirkungsraum von WWA

Die hydraulischen Auswirkungsräume werden für WWA über die Absenkung in den Entnahmefrünnen abgeschätzt. Bei der hydraulischen Nutzung des OGWL und UGWL und unter Annahme eines Brunnenradius von 20 cm sowie einer über das Jahr gemittelten Pumprate von 0,2 l/s beträgt die Absenkung des Grundwasserspiegels im Brunnen 0,1 cm und die Reichweite 14,4 cm. Wird lediglich der OWGL genutzt, ist der hydraulische Auswirkungsraum größer und hat eine Absenkung von 0,2 cm sowie eine Reichweite von 35,9 cm. Aufgrund dieser kleinen Ausmaße des Absenkungstrichters sind sowohl das Volumen des hydraulischen Auswirkungsraums eines einzelnen Brunnens (77 cm³ bzw. 816 cm³ je nach genutztem Aquifer) als auch der hydraulische Auswirkungsraum bei 185 bzw. 133 Brunnen mit 0,01 m³ bzw. 0,11 m³ sehr klein. Aufgrund dieses sehr geringen absoluten Volumens des hydraulischen Auswirkungsraums wurde auf einen Vergleich mit dem Referenzvolumen verzichtet.

Resümee 1.4.3

Wichtig im Hinblick auf ein untertägiges Raummanagement ist, dass für die thermisch beeinflussten Volumina auch deren räumliche Struktur, hier definiert als thermischer Auswirkungsraum beim Betrieb einzelner und mehrerer Erdwärmesonden (EWS) bzw. von Wasser-Wasser-Anlagen (WWA), mittels verschiedener analytischer Ansätze berechnet und prognostiziert werden kann.

Anhand von acht Szenarien wurden exemplarisch für ein Wohngebiet die Berechnungsparameter für die EWS (Sondenzlänge, thermische Entzugsrate und Grundwasserfließgeschwindigkeit) variiert. Für WWA wurden in sechs Szenarien verschiedene Aquifermächtigkeiten und Grundwasserfließgeschwindigkeiten betrachtet sowie verschiedene Berechnungsansätze berücksichtigt.

Je nach dominierendem Wärmetransport und hydrogeologischen Verhältnissen variieren die Volumina im geologischen Untergrund, die um mehr als 1 K thermisch verändert sind, je EWS in diesen Szenarienberechnungen zwischen 92 und 6921 m³ und je Brunnen einer WWA zwischen 3532 m³

und 7523 m³. In dem betrachteten Wohngebiet könnten unter Einhaltung der benötigten Abstände zwischen den Sonden bzw. Brunnen sowie zu Gebäuden und anderer Infrastruktur insgesamt 974 EWS bzw. maximal 185 Brunnen installiert werden.

Bezogen auf das in dieser Studie definierte Referenzvolumen von 0,1 km³ liegt der thermische Auswirkungsraum (hier als $\Delta T = 1$ K festgelegt) der EWS-Anlagen zwischen 0,1 % und 6,7 %. Die Größe bzw. das Volumen des thermischen Auswirkungsraums nehmen dabei naturgemäß mit der gewonnenen Wärmemenge zu. Bei WWA ist der Volumenanteil des thermischen Auswirkungsraums mit 0,5 % – 1,4 % generell geringer. Eine Deckung des Wärmebedarfs des Wohngebiets ist in dem angegebenen Beispiel dabei mit EWS ab ca. 3 % Volumenanteil des thermischen Auswirkungsraums, mit WWA bereits ab ca. 0,9 % möglich.

Diese exemplarischen Szenarien verdeutlichen, dass thermische und hydraulische Auswirkungen im untertägigen Raum von oGT-Anlagen im bestimmungsgemäßen Betrieb relativ einfach berechnet werden können und die Raumwirkung (für die gerechneten Szenarien) klein ist.

Genereller erscheint es sinnvoll, für bestehende und zukünftige oGT-Anlagen die betriebsbedingten Raumwirkungen zu erfassen und als Basis für ein untertägiges Raummanagement einschließlich eines übergeordneten Monitoringkonzeptes zu verwenden.

1.4.4 Ableitung bzw. Berechnung des unter- und obertägigen Raumbedarfs oberflächennaher UTES-Anlagen anhand numerischer Szenariensimulationen

Entsprechend der Zielsetzungen bei der Berechnung der untertägigen Raumwirkung von oGT-Anlagen wurden auch für (HT-)UTES-Anlagen umfangreiche numerische Szenariensimulationen durchgeführt.

Die Vorgehensweise hierzu umfasste drei Schritte:

1. Quantifizierung des Raumbedarfs für Wärmespeicher ((HT-)ATES, (HT-)BTES) in Abhängigkeit der Betriebsführung (z. B. Speichertemperaturniveau, Pumprate) und der geologischen Gegebenheiten (z. B. Speichermächtigkeit, hydraulische und thermische Leitfähigkeit, natürliche Grundwasserströmung). Dazu wurden generische Szenariensimulationen mit schematisierten Beladungs- und Entladungszyklen numerisch simuliert, deren Referenz ein sogenannte „Basisszenario“ zur Deckung eines mittleren städtischen Wärmebedarfs war.
2. Quantifizierung der thermisch beanspruchten Volumenanteile des geologischen Untergrunds in Abhängigkeit des Wärmebedarfs städtischer Quartiere auf Basis der Ergebnisse des ersten Schritts.
3. Illustration des Konzepts und der Ergebnisse anhand eines detaillierten und spezifischen Versorgungsszenarios für ein städtisches Viertel im norddeutschen Raum einschließlich der Visualisierung der thermisch beanspruchten Untergrundvolumina.

Die hierzu durchgeführten Szenariensimulationen basieren auf folgenden grundlegenden Annahmen und Randbedingungen:

- Die Speicherszenarien ((HT-)ATES bzw. (HT-)BTES) werden exemplarisch für den norddeutschen Raum untersucht, welcher oberflächennah (bis auf ca. 400 m Tiefe) und stark vereinfachend wesentlich durch eine Wechselfolge glazigener Sedimente (i. d. R. ein Wechsel von Grundwasserleiter und Grundwassergeringleiter) geprägt ist.

- Der Speicherbetrieb wird in der generischen Szenarienstudie (Schritte 1 und 2) ohne Berücksichtigung klimatisch bedingter Variationen zwischen einzelnen Jahren oder langzeitlicher Trends über einen Zeitraum von 20 Jahren, für das detaillierte Versorgungsszenario (Schritt 3) über insgesamt 30 Jahre simuliert.
- Der Raumbedarf der Speicher in Form der Nutzungs- und Auswirkungsräume wird entsprechend beim oGT-Raumwirkungsansatz als Anteil an einem gedanklichen Referenzvolumen im urbanen geologischen Untergrund veranschaulicht. Dieses besitzt eine Grundfläche von 1 km² und 100 m Mächtigkeit und liegt je nach geologischer Situation und Speichertyp in unterschiedlicher Tiefe, jedoch innerhalb der obersten 400 m u. GOK.
- Das Temperaturniveau der Wärmesenke (z. B. eines Fernwärmenetzes) sowie Nutzungskonflikte (z. B. mit städtischer Bebauung) werden hier noch nicht berücksichtigt und erst in den folgenden Abschnitten ausführlich betrachtet.

Folgende Kennzahlen werden zur Quantifizierung des Raumbedarfs für die Wärmespeicherung bestimmt und ausgewertet:

- Der **thermische Nutzungsraum** wird für die betrachteten Technologieoptionen getrennt ermittelt. Für eine ATES-Anlage wird dieser wie folgt definiert:

$$\text{Therm. Nutzungsraum}_{\text{ATES}}[\text{m}^3] = \frac{\text{Im Jahr gespeicherte Wärme [GWh]}}{\text{Temperaturspreizung [K]} \cdot \text{Volumetrische Wärmekapazität [GWh/K/m}^3]} \quad (1)$$

wobei die Temperaturspreizung der Differenz der Injektionstemperaturen bei Beladung und Entladung entspricht. Bei einer ATES-Anlage befindet sich bei Beladung die Injektionstemperatur am „wärmeren Brunnen“ und bei Entladung am „kälteren“.

Für eine BTES-Anlage wurde der thermische Nutzungsraum folgendermaßen definiert:

$$\text{Therm. Nutzungsraum}_{\text{BTES}}[\text{m}^3] = \text{Sondenabstand}^2[\text{m}^2] \cdot \text{Sondenanzahl} \cdot \text{Sondenlänge}[\text{m}] \quad (2)$$

wobei angenommen wird, dass die Sonden äquidistant in einem quadratischen Sondenfeld angeordnet sind.

- Für die Technologieoption des ATES wird zusätzlich der **hydraulische Nutzungsraum** folgendermaßen berechnet:

$$\text{Hydr. Nutzungsraum}_{\text{ATES}}[\text{m}^3] = \frac{\text{Injizierte Wassermenge}[\text{m}^3]}{\text{Porosität}} \cdot \text{Brunnenanzahl} \quad (3)$$

- Die **thermischen Auswirkungsräume** für Temperaturerhöhungen ΔT von **1, 5 und 10 K** werden aus den berechneten Temperaturfeldern durch Volumenintegration bestimmt:

$$\text{Therm. Auswirkungsraum}_{\text{BTES}}[\text{m}^3] = \int_{\text{Untergrund}} s(\vec{x}) dV$$

$$s(\vec{x}) = \begin{cases} 1, & \text{für } T(\vec{x}, t) - T_{\text{Hintergrund}} > \Delta T \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (4)$$

Eine Veränderung um ein Kelvin entspricht dabei in etwa der langjährigen Detektionsgenauigkeit der thermischen Speicherauswirkungen, eine Temperaturveränderung um fünf Kelvin in etwa den bereits bestehenden untertägigen großräumigen Temperaturveränderungen z. B. im Kontext urbaner Wärmeinseleffekte (s. a. Abschn. 1.2.1).

Die Szenariensimulationen zur Bestimmung der Temperaturfelder und Energieumsätze wurden mit dem wissenschaftlichen Open-Source-Finite-Elemente-Code OpenGeoSys durchgeführt (vgl. Kolditz und Bauer (2004), Kolditz et al. (2012), Bilke et al. (2019)), welcher seit vielen Jahren für umweltwissenschaftliche Fragestellungen unter anderem zur Simulation thermisch-hydraulisch gekoppelter Strömungs- und Wärmetransportprozesse im geologischen Untergrund im Kontext oberflächennaher und tiefer Geothermie und Wärmespeicherung eingesetzt wird (z. B. Watanabe et al. (2010), Boockmeyer und Bauer (2016), Hein et al. (2016), Nordbeck et al. (2020)). Für die hier vorgestellten Szenariensimulationen von (HT-)ATES-Anlagen wurde ein sequentiell-iteratives Operator-Trennungs-Schema zur Kopplung zwischen nicht-isothermer Grundwasserströmung (d. h. unter Berücksichtigung der nichtlinearen Temperaturabhängigkeiten von Wasserdichte und Wasserviskosität) und Wärmetransport angewandt.

Erdwärmesonden werden in den Szenariensimulationen des (HT-)BTES gemäß einem Ansatz nach Eskilson und Claesson (1988) berechnet und über thermische Widerstände an den geologischen Untergrund gekoppelt (Diersch, 2013). Strömungs- und Transportgleichungen werden jeweils mit dem Standard-Galerkin-Verfahren und einem impliziten Zeitschrittschema gelöst (Wang et al., 2009). Insgesamt wurden in dieser Studie ausschließlich bewährte und ausführlich getestete Simulationswerkzeuge (Kolditz et al., 2016; Kolditz et al., 2018) verwendet, die dem neuesten Stand entsprechen und teilweise über die ANGUS-Projekte entwickelt wurden.

1.4.4.1 Raumbedarf in Abhängigkeit von Betriebsführung und Geologie

1.4.4.1.1 Szenarienbeschreibung

Der untertägige Raumbedarf saisonaler (HT-)ATES- und (HT-)BTES-Anlagen erfolgte exemplarisch mittels generischer Szenariensimulationen. Angenommen und quantifiziert wurde ein langjähriger Betrieb solcher Systeme für den norddeutschen geologischen Untergrund.

Die Abhängigkeit von Parametern der Betriebsführungen und geologischen Gegebenheiten auf die untertägige thermische Raumwirkung wurde für folgende Szenarien betrachtet.

Für den sogenannten (HT-)ATES- und (HT-)BTES-Basisfall wurde angenommen, dass die Speicher bezüglich Kapazität und Speicherraten für einen Wärmebedarf eines städtischen Quartiers mit 20 GWh pro Jahr und pro km² Fläche (in etwas Stadtrandlage, z. B. Möller et al. (2018)) ausgelegt sind, in dem der Wärmeversorgungsbeitrag der Speicher jeweils 25 % des Gesamtwärmebedarfs betragen soll. Der überwiegende Anteil von 75 % wird aus anderen (hier nicht definierten) Wärmequellen ohne geologische Speicherung gedeckt. Die Wärmespeicher sind im Basisfall-Szenario auf die Bereitstellung einer Wärmemenge von ca. 5 GWh/(km² · a) dimensioniert.

Die Spanne der Parametervariationen beim jährlichen Wärmebedarf wurde in den anderen Szenarien so gewählt, dass der Gesamtwärmebedarf bis zu 100 GWh/(km² · a) betragen kann, was derzeit typisch für Stadtzentren ist und wovon entsprechend 25 GWh/(km² · a) zwischenzeitlich gespeichert werden müssten.

Für geologische Speicher ist charakteristisch, dass sie saisonal und relativ gleichmäßig betrieben werden. Entsprechend wird für die generische Szenarienstudie vereinfachend angenommen, dass die Speicher jeweils für ein halbes Jahr unterbrechungsfrei be- bzw. entladen werden. In diesem Abschnitt werden jedoch noch keine spezifischen Annahmen hinsichtlich der obertägigen Systemkomponenten und Anlagen (z. B. Art der regenerativen Wärmequellen bzw. Wärmesenken, Einsatz von Wärmepumpen, etc.) getroffen (vgl. hierzu Kap. 2 und 3).

Im Fall der ATES-Szenarien wird eine einzelne Brunnendublette simuliert. Als Speicherschicht wurde eine gut durchlässige Sandschicht von 20 m Mächtigkeit in einer Tiefe von 110 m (obere

Schichtgrenze) unter der Landoberfläche innerhalb einer glazigenen Wechselfolge aus Sanden und Geschiebemergeln, wie sie typisch für den oberflächennahen Untergrund im norddeutschen Raum ist (Abb. 1.17, Tab. 1.15), angenommen. Das Modellgebiet hat eine Ausdehnung von 2500 m und 1000 m in horizontaler sowie 205 m in vertikaler Richtung. Der Abstand zwischen „warmem“ und „kaltem“ Brunnen der Brunnendublette beträgt 300 m, so dass thermische Beeinflussungen zwischen den Brunnen ausgeschlossen sind. Die Hintergrundtemperatur im Aquifer beträgt aufgrund der Tiefenlage 13 °C. Die horizontale hydraulische Permeabilität beträgt $1,5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$, was bei dieser Temperatur einer hydraulischen Durchlässigkeit von $1,1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ entspricht und am oberen Ende der Spannweite der im Norddeutschen Becken gefundenen Werte liegt (Abschn. 1.4.2). Es wird eine geringe Hintergrundströmung des Grundwassers mit einer Abstandsgeschwindigkeit von 36 m/a berücksichtigt. Diese Parameterzusammenstellung kann als repräsentativ für einen Standort im Norddeutschen Becken angesehen werden.

Die Beladung des ATES erfolgt jeweils über ein halbes Jahr. Die Injektionstemperatur T_I beträgt im Basisfall der generischen Szenariostudie konstant 70 °C bei einer Pumprate Q von 30 m³/h. Die anschließende halbjährige Entladung erfolgt bei gleicher Pumprate und mit einer Temperatur im Anlagenrücklauf T_E von 13 °C (d. h. bei der angenommenen Hintergrundtemperatur des Aquifers). Die dabei dem Speicher zugeführten (gespeicherten) bzw. wieder entnommenen (rückgewonnenen) Wärmemengen H_I und H_E [GWh] ergeben sich durch

$$H_{I/E} = \int_{\text{Speicherzeit}} c_{V,w} Q (T_{I/E} - T_{\text{Hintergrund}}) dt \quad (5)$$

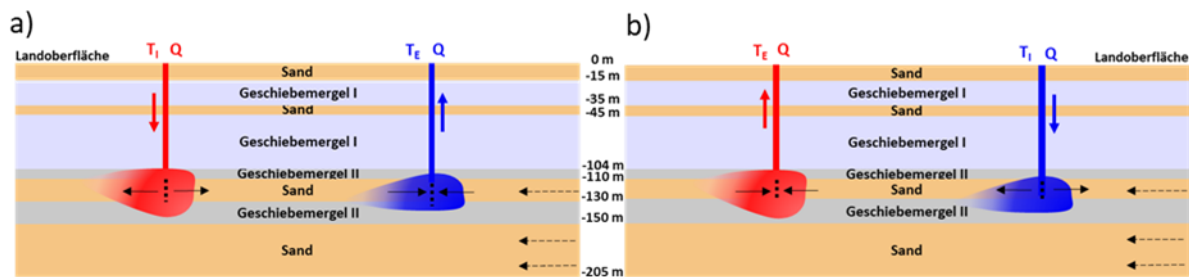
wobei $c_{V,w}$ [MJ/m³/K] für die volumetrische Wärmekapazität von Wasser steht.

Tabelle 1.15: Parametrisierung des glazigenen Untergrunds im (HT-)ATES-Szenario

Formation	vol. Wärme- kapazität ^a [MJ/(m ³ · K)]	Wärme- leitfähigkeit ^a [W/(m · K)]	Permeabilität ^b horizontal [m ²]	Permeabilität ^b vertikal [m ²]	Porosität ^d [-]
Geschiebemergel I	2,1	2,4	- ^c	- ^c	0,15
Geschiebemergel II	2,4	1,8	- ^c	- ^c	0,43
Sand	2,5	2,4	$1,5 \cdot 10^{-10}$	$1,5 \cdot 10^{-11}$	0,28
Datenzeile	0,00	0,00		0,00	0,00
Ergebnis	0,00	0,00		0,00	0,00

^a VDI (2010); ^b Liebau (1985); ^c als hydraulisch undurchlässig simuliert; ^d Fetter (2001)

Abbildung 1.17: Seitenansicht einer Brunnendublette eines (HT-)ATES im glazigenen Untergrund einschließlich der Betriebsrandbedingungen bei Beladung und Entladung



a) Beladung, b) Entladung.

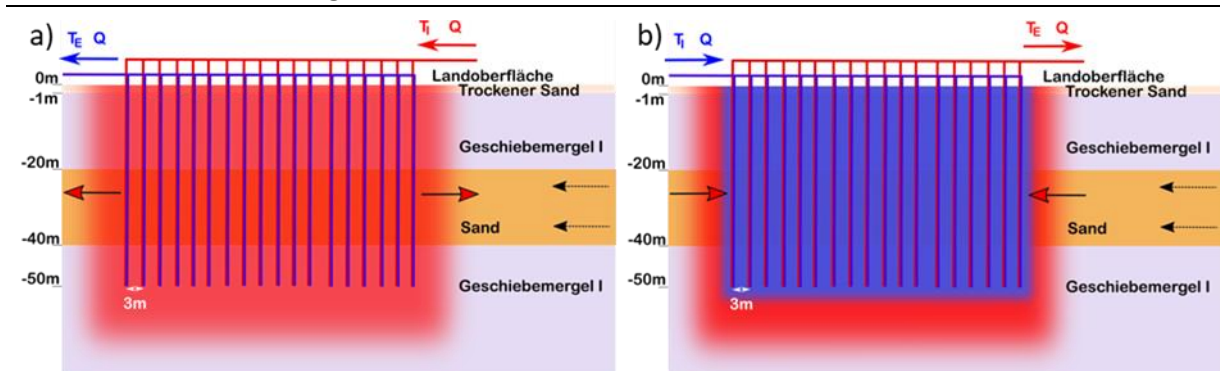
Die Pfeile zeigen die während des Betriebs herrschenden Strömungsrichtungen an, die gestrichelten Pfeile in den unteren beiden Sandschichten die Hintergrundströmung des Grundwassers.

Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Auch im Fall des (HT-)BTES wurde ein einzelnes System angenommen, das aus $18 \cdot 18 = 324$ Doppel-U-Sonden mit einer Länge von je 50 m besteht, die in einem regelmäßigen Raster mit quadratischer Grundfläche und im Abstand von jeweils 3 m zueinander angeordnet sind. Die (HT-)BTES-Anlage soll sich oberflächennah in einer 150 m mächtigen Geschiebemergelschicht befinden (Abb. 1.18 (die in den Geschiebemergel eingelagerte Sandschicht wird nur in Szenarienvarianten zum Einfluss einer partiellen Durchströmung berücksichtigt), Tab. 1.16), so dass keine thermischen Verluste über die Speicherunterkante innerhalb des Betrachtungszeitraums auftreten. Die (HT-)BTES-Anlage soll weiterhin mit einer einen Meter mächtigen Isolationschicht bedeckt sein, deren Parametrisierung einem trockenen Sand entspricht, um Wärmeverluste in die Atmosphäre zu reduzieren. Das Modellgebiet hat eine Ausdehnung von jeweils 360 m in horizontaler und 151 m in vertikaler Richtung. Für die Szenarienvarianten mit partieller Durchströmung wurde die horizontale Ausdehnung verdoppelt. Die Temperatur auf der Oberseite der Isolation entspricht mit 10°C der Jahresdurchschnittstemperatur, die auch als Temperatur des ungestörten geologischen Untergrunds (Anfangstemperatur) gesetzt wird und aufgrund der geänderten Tiefenlage um drei Kelvin geringer als die Hintergrundtemperatur im Fall des (HT-)ATES ist. Der Jahresgang der Lufttemperatur wird für die langjährigen Betrachtungen vernachlässigt.

Die Beladetemperatur des Wärmeträgerfluids liegt im Basisfall wie auch beim (HT-)ATES bei 70°C , die Rücklaufetemperatur nach Wärmeentnahme bei Entladung bei der Hintergrundtemperatur von 10°C . Die Erdwärmesonden werden parallel betrieben und die zugeführten bzw. entnommenen Wärmemengen H_I und H_E wie im Fall des (HT-)ATES gemäß Gleichung 5 berechnet. Die Speicherformation wird im Basisfall nicht von Grundwasser durchströmt; Einflüsse einer lokalen Grundwasserströmung werden in Szenarien anhand einer zusätzlichen in den Geschiebemergel eingelagerten Sandschicht (Oberkante bei 21 m Tiefe unter Landoberfläche) näher untersucht (Abb. 1.18).

Es kann auch hier davon ausgegangen werden, dass ein derartiger oder vergleichbarer Speicherstandort unter einem norddeutschen Stadtbereich anzutreffen ist, wobei die betrachteten thermischen und hydraulischen Parameterspannen charakteristisch für die glazigenen Sedimente des Norddeutschen Beckens sind.

Abbildung 1.18: Seitenansicht des (HT-)BTES bestehend aus Doppel-U-Sonden bei Beladung und Entladung

a) Beladung, b) Entladung.

Die in den Geschiebemergel eingelagerte Sandschicht wird nur in den Szenarien zur GW-Abstandsgeschwindigkeit berücksichtigt.

Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Tabelle 1.16: Parametrisierung des glazigenen Untergrunds sowie der geotechnischen Materialien im (HT-)BTES-Szenario.

Formation / Material	vol. Wärme- kapazität ^a [MJ/(m ³ · K)]	Wärme- leitfähigkeit ^a [W/(m · K)]	Porosität ^b [-]
Geschiebemergel I	2,1	2,4	0,15
Sand	2,5	2,4	0,28
Bohrlochzement (12 cm Durchmesser)	- ^c	2,3	- ^c
Sand (Isolation)	2,1	0,4	0,28

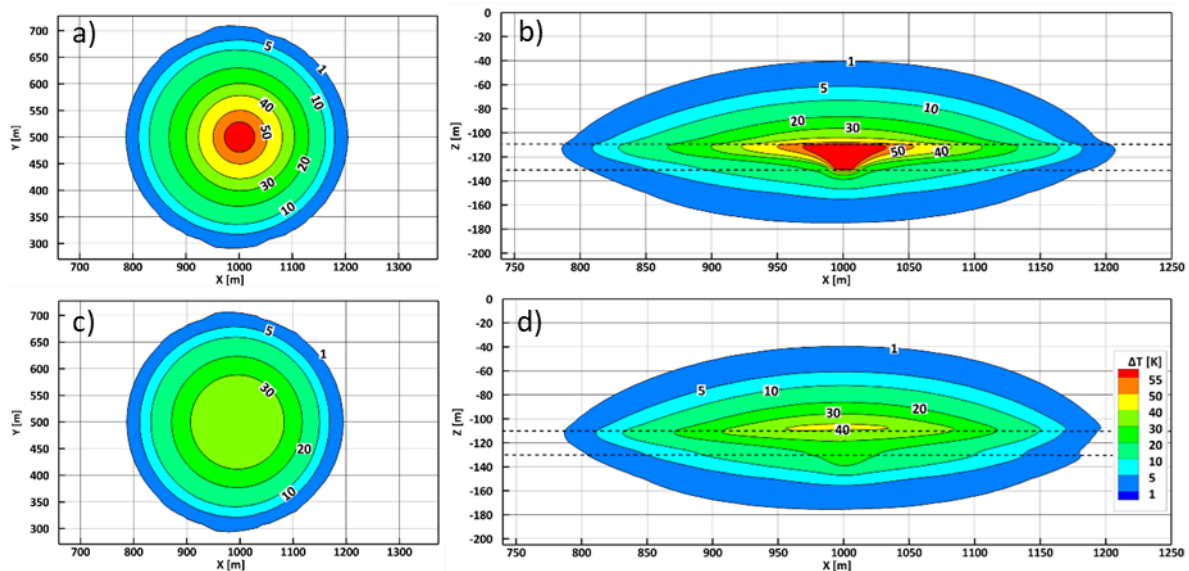
^a VDI (2010); ^b Fetter (2001) ^c unbestimmt, da stationäres Sondenmodell.

1.4.4.1.2 Nutzungs- und Auswirkungsräume für (HT-)ATES- und (HT-)BTES-Anlagen

Der Basisfall des (HT-)ATES-Szenarios wurde, wie oben erläutert, auf die jährliche Bereitstellung einer Wärmemenge H_E von in etwa $5 \text{ GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ aus dem Speicher ausgelegt. Hierzu werden pro Jahr insgesamt $H_I = 7,5 \text{ GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ Wärme eingespeichert, um die Wärmeverluste zu kompensieren. Die Rückgewinnung der Wärme bei Entladung des Speichers erfüllt diese Anforderungen in den ersten Betriebsjahren mit ca. $3,6 \text{ GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ noch nicht, da die thermischen Verluste aufgrund der hohen Wärmegradienten im geologischen Untergrund vergleichsweise hoch sind. Mit zunehmender Betriebszeit und Entwicklung der Temperaturfelder um den Speicher verringern sich die Gradienten, und der Anteil der zurückförderbaren Wärmemenge nimmt zu und erreicht im 15. Betriebsjahr mit $4,8 \text{ GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ nahezu die Wärmespeicheranforderung von $5 \text{ GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$. Die Speichereffizienz, d. h. der Anteil der im Nutzungszyklus rückholbaren Wärme, beträgt damit ca. 64 %. Ein solcher zeitlicher Einschwingvorgang ist typisch für den Betrieb von (HT-)ATES-Anlagen. Der damit verbundene untertägige hydraulische Nutzungsraum an den beiden Brunnen beträgt ca. 960.000 m^3 , der thermische Nutzungsraum

umfasst ca. 190.000 m^3 . Bezieht man diese Räume auf das Referenzvolumen mit einem Quadratkilometer Grundfläche und 100 m Mächtigkeit ergibt sich ein Nutzungsraumbedarf für die Wärmeversorgung von nur knapp 0,96 % bzw. 0,19 % des Referenzvolumens.

Abbildung 1.19: Thermische Auswirkungsräume der (HT-)ATES-Anlage, dargestellt als Temperaturänderung ΔT gegenüber der Hintergrundtemperatur im Basisfall im 15. Betriebsjahr (Ausschnitte des Modellgebiets)



a) Horizontalschnitt an der Obergrenze der Speicherschicht und b) Vertikalschnitt im Zentrum des Speichers parallel zur Fließrichtung der Hintergrundströmung des Grundwassers, jeweils nach der Beladung; c) entsprechender Horizontal- und d) Vertikalschnitt nach der Entladung. Die gestrichelten Linien der Vertikalschnitte kennzeichnen die Ober- und Untergrenze der Speicherschicht.

Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

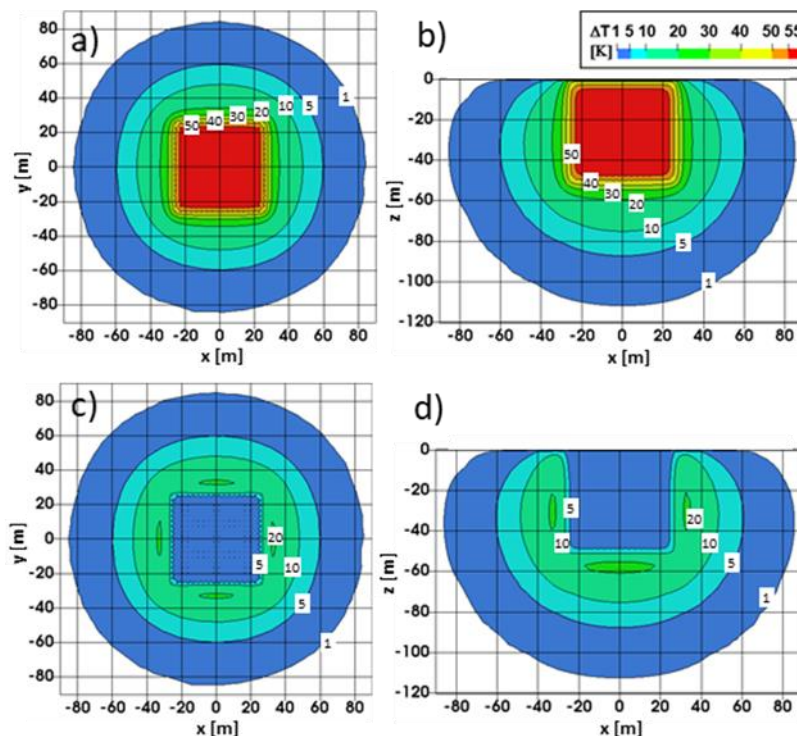
Abb. 1.19 zeigt die Wärmeverteilung im Horizontal- und Vertikalschnitt durch den Speicher im 15. Betriebsjahr jeweils zum Ende der Be- und Entladungsphasen als Temperaturänderung ΔT gegenüber der Hintergrundtemperatur und kennzeichnet so die thermischen Auswirkungsräume des Speicherbetriebs. Das Temperaturfeld in einem (HT-)ATES wird wesentlich durch den Auftrieb erwärmten Wassers (freie Konvektion) am „wärmeren“ Brunnen in der Speicherformation geprägt. Dieser bewirkt, dass Wärmeverluste und somit die Auswirkungsräume vertikal vorwiegend in die hangenden Geschiebemergelformationen erfolgen. Da sich die simulierte (HT-)ATES-Anlage in ca. 120 m Tiefe befindet, erreichen die speicherinduzierten Temperaturänderungen im Betrachtungszeitraum nicht die Geländeoberfläche. Bei in geringeren Tiefen liegenden Speichern können jedoch Wechselwirkungen mit den oberflächennahen saisonal beeinflussten Temperaturfeldern und der Atmosphäre auftreten. Dies führt zu einer Stabilisierung des Auswirkungsraums in vertikale Richtung und kann langfristig sowohl mit erhöhten als auch verringerten Wärmeverlusten verbunden sein. Auf Grund der starken Variabilität der geologischen und thermischen Gegebenheiten im oberflächennahen geologischen Untergrund sind diese Effekte mit dem hier verwendeten generischen Ansatz nicht allgemein zu quantifizieren, sondern sollten im Einzelfall abgeschätzt werden.

Die thermischen Auswirkungsräume gehen deutlich über die Nutzungsräume hinaus. Nach 15 Betriebsjahren zeigen rund $10,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ bzw. 10,6 % des Untergrundvolumens eine Temperaturerhöhung um mehr als 1 K. Betrachtet man Temperaturänderungen um mehr als 5 K oder

10 K, so betragen die entsprechenden Auswirkungsräume $5,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ bzw. $3,0 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, was 5,2 % bzw. 3,0 % des Referenzvolumens entspricht.

Im Basisfall der BTES-Szenarien werden $5,5 \text{ GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ Wärme eingespeichert, von denen im 15. Betriebsjahr rund $4,8 \text{ GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ zurückgewonnen werden können. Dies entspricht einer Speichereffizienz von ca. 88 %, und der BTES-Speicher erfüllt in etwa die Anforderung der Bereitstellung von 25 % eines Wärmebedarfs von $20 \text{ GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$. Der untertägige thermische Nutzungsraum beträgt ungefähr 150.000 m^3 , bestimmt durch die Abmessungen des Sondenfeldes, was in etwa 0,15 % des in dieser Studie definierten Referenzvolumens entspricht.

Abbildung 1.20: Thermische Auswirkungsräume des (HT-)BTES-Basiszenarios als Änderung der Hintergrundtemperatur ΔT im 15. Betriebsjahr (Ausschnitte des Modellgebiets)



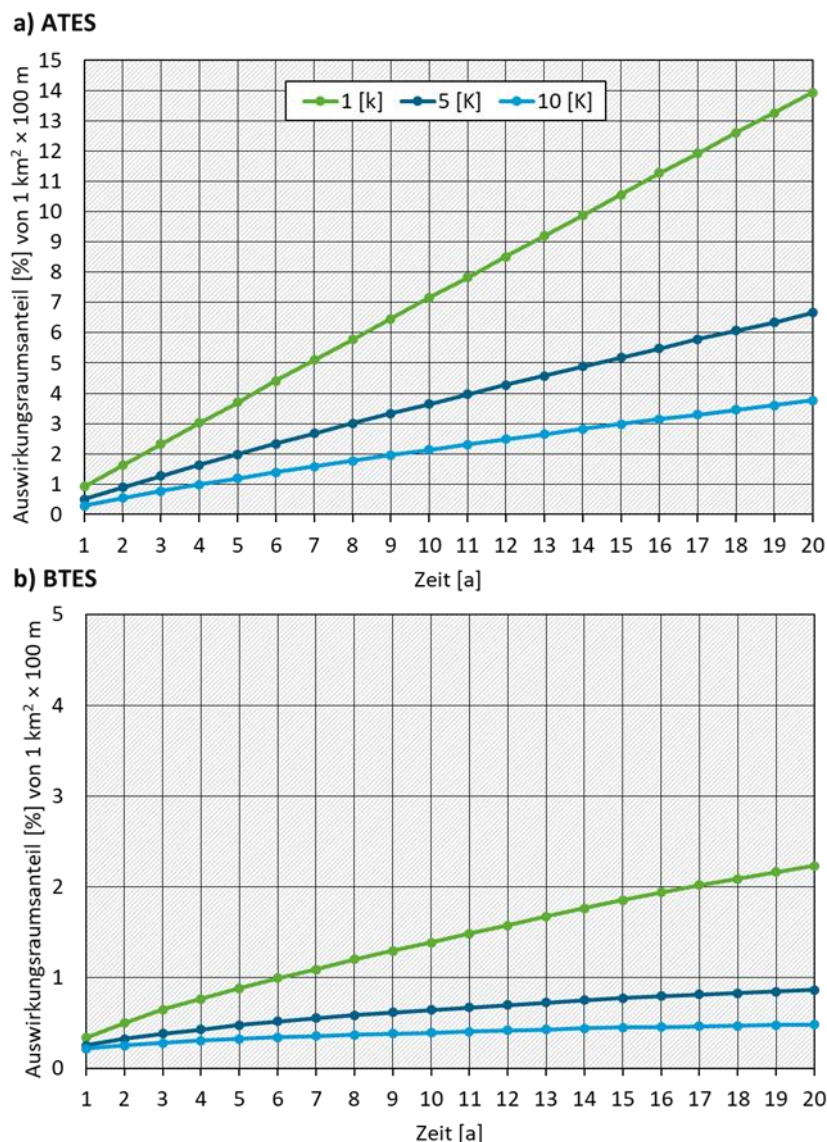
a) Horizontalschnitt an der Obergrenze der Speicherschicht und b) Vertikalschnitt im Zentrum des Speichers, jeweils nach der Beladung; c) entsprechender Horizontal- und d) Vertikalschnitt nach der Entladung.

Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Temperaturerhöhungen größer 20 K treten nach 15 Betriebsjahren nur in Abständen von weniger als 10 m um den Speicher auf und dann auch nur am Ende der Beladung. Die thermischen Auswirkungsräume im geologischen Untergrund betragen nach 15 Betriebsjahren rund $1,9 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ bzw. 1,9 % des Referenzvolumens für $\Delta T > 1 \text{ K}$ ($\Delta T > 5 \text{ K}$: 770.000 m^3 bzw. 0,8 %; $\Delta T > 10 \text{ K}$: 450.000 m^3 bzw. 0,5 %).

Der Vergleich zwischen (HT-)ATES- und (HT-)BTES-Anlagen zeigt, dass bei gleicher Anforderung hinsichtlich der rückholbaren Wärme ähnliche Volumina als thermische Nutzungsräume beansprucht werden. Die thermischen Auswirkungsräume einer (HT-)BTES-Anlage sind hingegen im Vergleich zum (HT-)ATES-Speicher um ca. einen Faktor 5 bis 7 geringer, was durch die niedrigeren Wärmeverluste und damit höhere Effizienz des (HT-)BTES-Systems begründet ist. Im hier betrachteten Basiszenario besteht daher zwischen den beiden Speicheroptionen ein signifikanter Unterschied bezüglich der Größe ihrer thermischen Auswirkungsräume.

Abbildung 1.21: Zeitliche Entwicklung der thermischen Auswirkungsräume über den 20-jährigen Simulationszeitraum als prozentualer Anteil am Referenzvolumen ($1 \text{ km}^2 \cdot 100 \text{ m}$) für (HT-)ATES- und (HT-)BTES-Anlagen im Basisfall



Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Während die Nutzungsräume beider Systeme über den Betriebszeitraum aufgrund der als zeitlich konstant angenommenen Betriebsparameter zeitlich konstant bleiben, führt der kontinuierliche Verlust von Wärme aus den Speichern zu einer kontinuierlichen Ausdehnung der thermischen Auswirkungsräume im betrachteten Zeitraum (Abb. 1.21). Im Fall der (HT-)ATES-Anlage wachsen die thermischen Auswirkungsräume nahezu linear mit der Anzahl der Speicherzyklen an, während für den (HT-)BTES insbesondere die 5-Kelvin- und 10-Kelvin-Auswirkungsräume nach ca. 10 Betriebsjahren eine erkennbare Abnahme der Ausbreitungsdynamik zeigen. So nimmt der um mehr als 1 K erwärmte Anteil des Referenzvolumens zwischen dem 10. und 20. Betriebsjahr noch um ca. 60 % zu, der um 5 K erwärmte Anteil dagegen lediglich um ca. 30 %. Auch in der Postbetriebsphase erfolgt eine weitere Ausbreitung der im geologischen Untergrund verbliebenen Wärme, wobei lokale Temperaturmaxima durch Wärmeleitung mit der Zeit abklingen und die zeitliche Dynamik aufgrund der geringer werdenden Gradienten abnimmt. Die thermischen Auswirkungen sollten somit langfristig über ein Wärmemonitoring und

ggf. durch ein aktives Temperaturmanagement des geologischen Untergrunds kontrolliert werden.

1.4.4.1.3 Einfluss der Betriebsführung

1.4.4.1.3.1 (HT-)ATES-Anlagen

Die Speicherkapazität einer (HT-)ATES-Anlage und somit auch der betriebsbedingte Raumbedarf wird maßgeblich durch Betriebsführungsgrößen wie die Pumprate, die Beladungs- oder die Rücklauftemperatur am „kalten“ Brunnen beeinflusst. Der Einfluss dieser Parameter wurde deshalb durch Variation des Basisfalls untersucht. Die resultierenden Speichercharakteristiken und der Raumbedarf für diese Varianten sind in Tabelle 1.17 zusammengefasst. Zur besseren Vergleichbarkeit der Szenarien untereinander und mit dem Basisfall wurden die in Tabelle 1.17 aufgeführten Nutzungs- und Auswirkungsräume (in Prozent des Referenzvolumens) zusätzlich auf die jeweils rückgeführten Wärmemengen normiert und somit in der Einheit Raumbedarf in Prozent des Referenzvolumens pro entnommener GWh/(km² · a) angegeben. Grundsätzlich zeigt sich in diesen Szenariensimulationen:

- ▶ Speicherbare und rückholbare Wärmemengen steigen proportional zur Pumprate der (HT-)ATES-Anlage, während weiterhin die thermische Speichereffizienz mit der Pumprate ansteigt, wenn auch in geringem Maße. Absolut nehmen die Nutzungs- und Auswirkungsräume mit der Pumprate zu, da das Speichervolumen erhöht wird. Aufgrund der steigenden Speichereffizienz reduziert sich der pro zurückgewonnener Wärme (GWh/(km² · a)) von einer Temperaturänderungen betroffene Auswirkungsraum.
- ▶ Eine Reduktion der Beladungstemperatur begünstigt energetisch grundsätzlich die thermische Rückgewinnung aufgrund der geringeren induzierten thermischen Gradienten, einer reduzierten thermischen Konvektion und der damit jeweils verbundenen geringeren Wärmeverluste. Entsprechend nehmen die Volumina der thermischen Auswirkungsräume sowohl absolut als auch pro GWh/(km² · a) ausgespeicherter Wärme ab. Zu berücksichtigen ist dabei jedoch grundsätzlich die Verminderung der Speicherkapazität der (HT-)ATES-Anlage, so dass zur Bereitstellung einer bestimmten Wärmemenge insgesamt größere Wärmespeicher (z. B. durch Steigerung der Pumprate oder multiple Dubletten) mit höherem Installationsaufwand sowie, je nach Temperaturniveau der Wärmesenke, gegebenenfalls auch Wärmepumpen zur Gewährleistung der minimalen Abnahmetemperaturen nötig sein können.

Ein Anheben der Rücklauftemperatur über die Hintergrundtemperatur des geologischen Untergrunds reduziert ebenfalls generell die Kapazität des Wärmespeichers, da sich die nutzbare Temperaturdifferenz verringert. Zudem treten dann zusätzliche Wärmeverluste am „kalten“ Brunnen der Dublette auf, was die Effizienz der Anlage senkt und zu größeren thermischen Auswirkungsräumen führt. Trotzdem kann ein Anheben der Rücklauftemperatur bei spezifischen Randbedingungen und spezifischen Anforderungen einer (HT-)ATES-Anlage sinnvoll sein, allerdings wurden solche „Spezialfälle“ innerhalb dieser Studie nicht behandelt.

1.4.4.1.3.2 (HT-)BTES-Anlagen

Für (HT-)BTES-Anlagen wurden gegenüber dem Basisfall zusätzliche Varianten der Sondenanzahl und -länge sowie der Beladungs- und Entladungstemperatur des Systems betrachtet (Tab. 1.18):

- ▶ Analog zur Pumprate bei (HT-)ATES lässt sich die Speicherkapazität von (HT-)BTES durch Installation zusätzlicher Sonden steigern, wobei mit zunehmender Sondenanzahl auch die Effizienz des Speichers durch günstigere Oberflächen-Volumen-Verhältnisse und damit reduzierte Wärmeverluste zunimmt. Insgesamt skalieren auch die thermischen Nutzungs- und Auswirkungsräume mit der Speichergröße. Aufgrund der Effizienzsteigerungen bei größeren Systemen reduzieren sich die Auswirkungsräume pro rückgewonnener Wärme ($\text{GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$) deutlich.
- ▶ Die Änderung der Sondenlänge entspricht einer Änderung der Speichermächtigkeit. Je nach horizontaler Dimension des Sondenfelds führt dies zu einer Verbesserung oder Verschlechterung des Oberfläche-Volumen-Verhältnisses der (HT-)BTES-Anlage, wobei sich die thermischen Auswirkungsräume pro $\text{GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ im geologischen Untergrund jedoch nur geringfügig ändern. Bei vorgegebener Speicherkapazität des Systems erlaubt eine Verlängerung der Sonden eine Reduktion der Sondenanzahl und somit der Dimension des Sondenfelds und der obertägigen Raumbeanspruchung bei entsprechenden geologischen Gegebenheiten.
- ▶ Eine Reduktion der Beladungstemperatur reduziert die Speicherkapazität des Systems, führt jedoch auch zu geringeren Temperaturen in der Speicherumgebung und damit zu kleineren Auswirkungsräumen. Da Speicher jedoch auf einen gewissen Wärmebedarf ausgelegt werden, muss diese geringere Speicherkapazität durch den Bau größerer oder mehrerer Speicher wiederum kompensiert werden, wodurch sich die Raumwirkungen ebenfalls erhöhen. Wie Tabelle 1.18 zeigt, ist eine Verringerung der Sondenanzahl mit einer Verringerung der thermischen Rückgewinnung verbunden. Größere Systeme sind daher effizienter und mit einem geringeren Auswirkungsraum verbunden als mehrere kleinere Systeme mit derselben Speicherkapazität.
- ▶ Das Anheben der Entladungstemperatur reduziert ebenfalls die Speicherkapazität des Systems. Aufgrund des ganzjährig höheren Temperaturniveaus im Speicher gegenüber der Hintergrundtemperatur nehmen zudem die Wärmeverluste zu, was insgesamt zu – absolut sowie bezogen auf $\text{GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ – größeren Auswirkungsräumen und einer verringerten Speichereffizienz führt.

1.4.4.1.4 Einfluss geologischer Randbedingungen

Neben den zuvor betrachteten Betriebsparametern der UTES-Anlagen wurde auch der Einfluss relevanter thermisch-hydraulischer Eigenschaften des geologischen Untergrunds auf Speichercharakteristik und Raumwirkung untersucht.

1.4.4.1.4.1 (HT-)ATES-Anlagen

Bei den (HT-)ATES-Szenarien umfasst dies Varianten der Hintergrund-Fließgeschwindigkeit des Grundwassers, die Mächtigkeit der Speicherschicht sowie deren hydraulische Leitfähigkeit (vgl. Tab. 1.17). Grundsätzlich sind folgende generelle Ergebnisse festzuhalten:

- ▶ Eine höhere Grundwasserfließgeschwindigkeit führt zu größeren advektiven Wärmeverlusten und somit zu abnehmender Speichereffizienz. Dies ist mit einer Zunahme der Auswirkungsräume sowohl absolut als auch pro rückgeförderter Einheit Wärme ($\text{GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$) verbunden.
- ▶ Eine größere Speichermächtigkeit führt bei gleichbleibender Pumprate zu einer Verstärkung der dichtegetriebenen Konvektion, welche zu höheren Wärmeverlusten aus dem Speicher in hangende Schichten und zu einer deutlich reduzierten Wärmerückgewinnung durch Förderung kälteren Wassers aus dem unteren Bereich der Speicherschicht führt. Eine größere Speichermächtigkeit führt so zu deutlich größeren thermischen Auswirkungsräumen. Geringere Mächtigkeiten (in Relation zu den Betriebsmodi) wirken sich dagegen verringernd auf die thermische Raumwirkung aus.
- ▶ Eine geringere Permeabilität der Speicherschicht insbesondere in vertikaler Richtung (ebenso wie eine geringere Speichermächtigkeit oder Filterstrecke) erhöht die thermische Rückgewinnung und verringert die thermische Raumbeanspruchung erheblich – sowohl absolut als auch pro $\text{GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ –, da geringere dichtegetriebene Konvektion auftritt. Allerdings führt eine geringere Permeabilität oder Mächtigkeit zu einer stärkeren Druckabsenkung am Entnahmebrunnen, wodurch die Pumprate gegebenenfalls limitiert wird.
- ▶ Die hydraulischen Auswirkungsräume in Tabelle 1.17 wurden abweichend von den thermischen Auswirkungsräumen nicht durch numerische Simulation, sondern mit der Brunnenformel von Theis bestimmt und umfassen für die Druckerhöhung von 100 Pa einige Referenzvolumina (2,6 für den Basisfall). Die Ergebnisse zeigen, wie weitreichend geringfügige Druckerhöhungen in Entfernungen von mehreren Kilometern auftreten können. Diese werden allerdings sehr stark von den natürlichen Gegebenheiten (z. B. Grundwasserströmung, geologische Schichtung, hydraulische Begrenzungen) mitbestimmt.

1.4.4.1.4.2 (HT-)BTES-Anlagen

Für (HT-)BTES-Anlagen wurden zusätzliche Varianten der thermischen Leitfähigkeit sowie des Auftretens einer grundwasserführenden Sandschicht im Speicher mit unterschiedlichen Durchströmungsgeschwindigkeiten (vgl. Abb. 1.18) betrachtet:

- ▶ Eine Zunahme der Wärmeleitfähigkeit der Speicherschicht erhöht sowohl die gespeicherte als auch die rückholbare Wärmemenge von (HT-)BTES-Anlagen bei gleichbleibender Effizienz. Aufgrund des stärkeren konduktiven Wärmetransports vergrößern sich jedoch auch die thermischen Auswirkungsräume absolut und pro rückgeförderter $\text{GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ geringfügig.
- ▶ Ähnlich wie eine erhöhte Hintergrundströmung bei (HT-)ATES-Anlagen erhöht eine grundwasserführende Zwischenschicht die advektiven Wärmeverluste aus dem Speicher. Diese steigen mit der Durchströmungsgeschwindigkeit an und reduzieren somit die Speichereffizienz. Als Folge zeigen sich erheblich vergrößerte thermische Auswirkungsräume gegenüber dem Basisfall.

1.4.4.1.5 Räumlicher Anteil bestimmter Temperaturniveaus in UTES-Anlagen

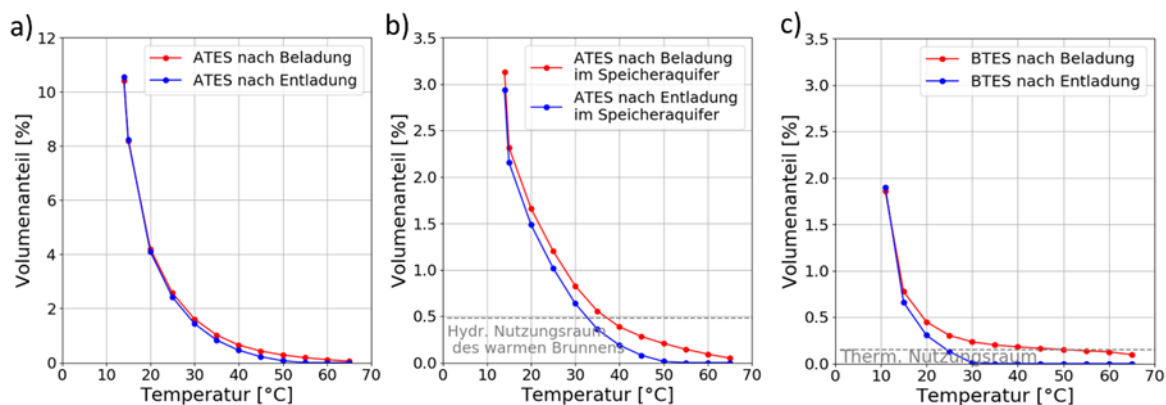
Wichtig z. B. im Hinblick auf die Bewertung der Temperatursauswirkungen auf hydrochemische und/oder mikrobiologische Prozesse sind Angaben, welches untertägige Raumvolumen mit welcher Temperatur während eines UTES-Betriebs beaufschlagt wird. In Abbildung 1.22 ist dies für die (HT-)ATES- und (HT-)BTES-Basiszenarien (15. Betriebsjahr), bezogen auf das in dieser Studie betrachtete Referenzvolumen ($1 \text{ km}^2 \cdot 100 \text{ m}$), für Temperaturniveaus bis zu einer angenommenen Einspeisetemperatur von 70°C dargestellt.

Für (HT-)ATES-Anlagen wurde zudem berechnet, welche Volumina mit einem entsprechenden Temperaturniveau des thermisch beanspruchten Referenzvolumens im Speicheraquifer und welche im i. d. R. abdeckenden (hangenden) Grundwassergeringleiter liegen. Nach der Beladung entspricht der hydraulische Nutzungsraum des „warmen“ Brunnens dem im Speicheraquifer auf über 38°C ($\Delta T = 25 \text{ K}$) erwärmten Volumen. Nach der Entladung ist noch ein Anteil von $0,07\%$ des Referenzvolumens wärmer als 50°C , wobei sich dieser Bereich außerhalb des Speicheraquifers im hangenden Grundwassergeringleiter befindet (Abb. 1.19). Im Speicheraquifer ist noch ein Anteil von $0,08\%$ des Referenzvolumens wärmer als 45°C .

Bei der Speicheroption der (HT-)BTES-Anlage entspricht der thermische Nutzungsraum im Basis-Szenario dem auf 50°C ($\Delta T = 40 \text{ K}$) erwärmten Untergrundvolumen. Nach der Entladung ist noch ein Bereich von $0,007\%$ des Referenzvolumens wärmer als 30°C und befindet sich außerhalb der Nähe des Speichers (Abb. 1.20).

Generell zeigen die Szenarienanalysen, dass der Anteil der höheren Temperaturen (z. B. $> 30^\circ\text{C}$) auch bei Einspeisetemperaturen von 70°C einen relativ kleinen Anteil an dem thermisch beeinflussten Referenzvolumen einnehmen.

Abbildung 1.22: Thermische Auswirkungsräume im Basisfall der generischen Szenariensimulationen im 15. Betriebsjahr für Absoluttemperaturen bis zur Beladungstemperatur von 70°C als Volumenanteil vom Referenzvolumen für den (HT-)ATES, den (HT-)ATES im Speicheraquifer und für den (HT-)BTES



a) (HT-)ATES; b) (HT-)ATES im Speicheraquifer; c) (HT-)BTES

Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Zwischenfazit 1.4.4-I

Ebenso wie die oGT-Anlagen lassen sich die thermischen Auswirkungen von (HT-)UTES-Anlagen auf den oberflächennahen geologischen Untergrund, in diesem Fall mit bestehenden numerischen Modellansätzen, quantifizieren.

Als erstes Zwischenfazit lässt sich festhalten, dass in dieser Studie durchgeführte Szenariensimulationen zeigen, dass für die angenommenen (HT-)UTES-Anlagen (eine (HT-)ATES-Dublette bzw. eine 324-Sonden-(HT-)BTES-Anlage) und bezogen auf ein hier definiertes Referenzvolumen ($1 \text{ km}^2 \cdot 100 \text{ m}$) nur relativ geringe Volumenanteile des geologischen Untergrunds zur saisonalen Wärmespeicherung (z. B. im sogenannten Basisszenario: $5 \text{ GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$) benötigt werden. Betrachtet man den räumlichen Anteil der verschiedenen Temperaturniveaus bei UTES-Anlagen, dann zeigt sich, dass höhere Temperaturen (z. B. $> 30 \text{ °C}$) selbst bei Einspeichertemperaturen von 70 °C räumlich noch einen wesentlich geringeren Anteil ausmachen. Allerdings ist dabei zu berücksichtigen, dass aufgrund des Wärmeverlusts von (HT-)UTES-Anlagen die thermische Raumwirkung mit der Zeit (prognostizierbar) zunimmt, wenn keine hydraulischen und/oder thermischen Gegenmaßnahmen getroffen werden.

Ein Vergleich zwischen den Basisszenarien der (HT-)ATES- und (HT-)BTES-Anlagen ergibt für den (HT-)ATES-Speicher bei vergleichbarer Wärmespeicherung eine um den Faktor 5 bis 7 höhere thermische Raumbeanspruchung.

Die Speichereffizienz (d. h. der Anteil zurückgewinnbarer Wärme) und damit auch die Raumbeanspruchung hängt von den grundlegenden System- und Betriebsparametern ab. Insbesondere höhere Pumpraten ((HT-)ATES-Anlagen) und größere Sondenfelder ((HT-)BTES-Anlagen) reduzieren durch Effizienzsteigerungen die thermischen Raumwirkungen (bezogen auf die gespeicherte Wärmemenge).

1.4.4.2 Untertägiger Raumbedarf von (HT-)UTES-Anlagen in Abhängigkeit des unterschiedlichen urbanen Wärmebedarfs

Die für die Basisszenarien betrachteten (HT-)ATES- und (HT-)BTES-Systeme erlauben für die oben genannten Speichergrößen und unter den oben genannten Betriebsrandbedingungen eine Wärmerückgewinnung von ca. $5 \text{ GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ und die Bereitstellung von 25 % eines angenommenen Gesamtwärmebedarfs von $20 \text{ GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$. Dieser variiert räumlich jedoch regional sowie auf der Stadtskala je nach Bebauungsdichte und Flächennutzung erheblich, weshalb z. B. insbesondere in Zentrumslagen bei verstärktem Einsatz geologischen Speicher lokal durchaus deutlich höhere Wärmebedarfe und somit höhere Anforderungen an die Kapazität der Speicher zu erwarten sind.

Im Fall einer (HT-)ATES-Anlage kann ein deutlich höherer Wärmebedarf z. B. über Verbünde mehrerer Dubletten realisiert werden. Bei neutraler Anordnung (d. h. ohne gegenseitige thermische Abschirmung der Dubletten) würde dies einen Anstieg der Gesamt-Nutzungs- und Auswirkungsräume proportional zu den zu bedienenden Wärmebedarfen bedeuten. So wären z. B. bei einem Wärmespeicherbedarf von $25 \text{ GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ (entspricht einem Anteil von 25 % bei einer angenommenen Gesamtwärmeversorgung von $100 \text{ GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$) fünf dem Basisfall entsprechende (HT-)ATES-Dubletten (d. h. mit einer Pumprate von $30 \text{ m}^3/\text{h}$ bei einer Speichertemperatur von 70 °C) erforderlich, wodurch ca. 50 % des Referenzvolumens um mehr als 1 K erwärmt würden. In der Praxis würden Brunnen in (HT-)ATES-Verbünden jedoch nach Möglichkeit synergetisch positioniert, so dass durch gegenseitige Dämmung und damit reduzierte laterale

Wärmeverluste die thermische Rückgewinnung deutlich höher und die thermischen Auswirkungsräume entsprechend deutlich kleiner sind als bei unabhängigen Einzeldubletten. Mit dem im folgenden Abschnitt vorgestellten Beispielszenario für ein städtisches Viertel in Norddeutschland wird der Fall eines solchen Mehrdubletten-System illustriert und ausgewertet.

Weiterhin kann, wie in den generischen Szenariensimulationen des vorherigen Abschnitts gezeigt, die Speicherkapazität und damit der zu bedienende Wärmebedarf auch (in Abhängigkeit von den geologischen Randbedingungen) durch Skalierung der Größe eines einzelnen Speichers angepasst werden. Für (HT-)ATES lässt sich die Speichergröße z. B. über die durchschnittliche Pumprate der Brunnendublette steuern (s. Tab. 1.17). Abb. 1.23a zeigt den aus den Szenariensimulationen abgeleiteten Zusammenhang zwischen dem (zu 25 % aus dem Wärmespeicher bedienten) Wärmebedarf und den thermischen Nutzungs- sowie Auswirkungsräumen nach 15 Betriebsjahren für ein breites Spektrum von Wärmebedarfsgrößen bis auf nahezu $100 \text{ GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$. Im Vergleich zum Betrieb mehrerer unabhängiger Einzelanlagen ergeben sich bei einem über die Pumprate skalierten (HT-)ATES deutlich geringere thermische Auswirkungsräume. So ergibt sich bei einer Erhöhung des Wärmebedarfs gegenüber dem Basisfall um den Faktor 5 (d. h. von $20 \text{ GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ auf $100 \text{ GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$) durch Verringerung des Oberflächen-Volumen-Verhältnisses des Speichers und eine damit verbesserte Effizienz nur ein um den Faktor 2,1 vergrößerter thermischer Auswirkungsraum.

Im Fall einer (HT-)BTES-Anlage ist die Skalierung der Speicherkapazität über die Größe des Sondenfelds möglich (Abb. 1.23b). Bei einem Wärmebedarf von $100 \text{ GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ und 25 % Abdeckung aus dem BTES wird eine Systemgröße von ca. 1600 50-m-Sonden für die saisonale Speicherung benötigt (Tab. 1.18). Wie auch beim (HT-)ATES wird der Anteil des thermisch beeinflussten geologischen Untergrunds durch die Skalierung des Speichers (hier durch Erhöhung der Sondenanzahl) aufgrund eines günstigeren Speicheroberflächen-Volumen-Verhältnisses gegenüber dem Betrieb von nicht interagierenden und dem Basisfall entsprechenden Einzel-Systemen deutlich reduziert. Die Zunahme des thermischen Auswirkungsraums um den Faktor 2,4 ist im Vergleich zum Faktor 5 bei unabhängigen Einzelsystemen nur in etwa halb so groß.

Tabelle 1.17: Simulierte Speichercharakteristiken und damit verbundener untertägiger Raumbedarf für den Basisfall des ATES-Szenarios sowie betrachtete Varianten der Betriebsführung und geologischer Bedingungen im 15. Betriebsjahr

		Gespeicherte Wärme H_i [GWh]	Entnommene Wärme H_e [GWh]	Thermische Rückgewinnung [%]	Wärmebedarfsdeckung pro 1 km ² (25 % über Speicher) [GWh/a]	Hydraulischer Nutzungsraum [%] von $100 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ insges. / pro GWh entn. Wärme	Thermischer Nutzungsraum [%] von $100 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ insges. / pro GWh entn. Wärme	Thermischer Auswirkungs- raum [%] von $100 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ insgesamt / pro GWh entn. Wärme			Hydraulischer Auswirkungs- raum [%] von $100 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ insgesamt/ pro GWh entn. Wärme		
								1 K	5 K	10 K	100 Pa	500 Pa	1000 Pa
Basisfall ^a		7,5	4,8	64	19	0,96	0,19	11	5,2	3,0	260	9,1	1,2
						0,20	0,04	2,2	1,1	0,62	54	1,9	0,26
Pumprate [m ³ /h]	15	3,8	2,0	54	8,2	0,48	0,09	7,1	3,3	1,7	67	1,2	0,04
						0,23	0,05	3,5	1,6	0,84	33	0,60	0,02
	60	15	11	73	44	1,9	0,38	15	7,9	4,7	1100	43	9,1
						0,17	0,03	1,4	0,72	0,43	96	4,0	0,83
	100	25	20	79	79	3,2	0,63	20	11	6,5	2800	120	29
						0,16	0,03	1,0	0,54	0,33	144	6,3	1,5
	120	30	24	80	96	3,8	0,76	23	12	7,2	3900	170	43
						0,16	0,03	0,94	0,49	0,30	160	7,4	1,8
Beladungstemperatur [°C]		30	2,4	2,0	83	8,0	0,96	3,1	0,73	0,11	260	9,1	1,2
							0,48	1,5	0,36	0,06	130	4,5	0,62

	50	5,1	3,7	74	15	0,96	0,20	6,6	2,69	1,3	260	9,1	1,2
						0,26	0,05	1,8	0,72	0,34	69	2,4	0,33
Temperatur am „kalten“ Brunnen [°C]	18	7,0	4,1	59	16	0,96	0,19	12	5,2	3,0	260	9,1	1,2
						0,23	0,05	2,9	1,3	0,73	63	2,2	0,30
	30	5,6	2,4	43	9,6	0,96	0,20	14	6,1	3,3	260	9,1	1,2
						0,40	0,08	5,7	2,5	1,4	110	3,8	0,51
Grundwasserabstands- geschwindigkeit [m/a]	36	7,5	4,5	60	18	0,96	0,19	12	5,6	3,1	260	9,1	1,2
						0,21	0,04	2,6	1,2	0,69	57	2,0	0,27
	72	7,5	3,9	52	16	0,96	0,19	14	6,4	3,3	260	9,1	1,2
						0,24	0,05	3,6	1,6	0,85	66	2,3	0,31
Speichermächtigkeit [m]	10	7,5	5,8	77	23	0,96	0,19	7,6	3,4	1,9	1100	43	9,1
						0,16	0,03	1,3	0,58	0,32	180	7,5	1,6
	40	7,5	3,2	43	13	0,96	0,19	16	7,6	4,2	67	1,2	0,04
						0,29	0,06	4,8	2,4	1,3	21	0,38	0,01
Permeabilität horiz. / vertik. [m ²]	$1,5 \cdot 10^{-11}$					0,96	0,19	5,2	2,3	1,28	4900	850	260
	$1,5 \cdot 10^{-12}$	7,5	6,3	84	25	0,15	0,03	0,82	0,36	0,20	780	130	41
	$1,5 \cdot 10^{-12}$					0,96	0,19	4,8	2,1	1,1	2100	1300	990
	$1,5 \cdot 10^{-13}$	7,5	6,5	86	26	0,15	0,03	0,75	0,32	0,18	330	200	150

Für Nutzungs- und Auswirkungsräume ist der Raumanteil in % an einem Referenzvolumen von 1 km² · 100 m jeweils für den Speicher sowie normiert pro zurückgewonnener GWh/(km² · a) Wärme angegeben.

a) Pumprate: 30 m³/h, Beladungstemperatur: 70 °C, Temperatur am „kalten“ Brunnen: 13 °C, Grundwasserabstandsgeschwindigkeit: 3,6 m/a, Speichermächtigkeit: 20 m, Permeabilität: $1,5 \cdot 10^{-10}$ m² / $1,5 \cdot 10^{-11}$ m².

Tabelle 1.18: Simulierte Speichercharakteristiken und damit verbundener untertägiger Raumbedarf für den Basisfall des BTES-Szenarios sowie betrachtete Varianten der Betriebsführung und geologischer Bedingungen im 15. Betriebsjahr

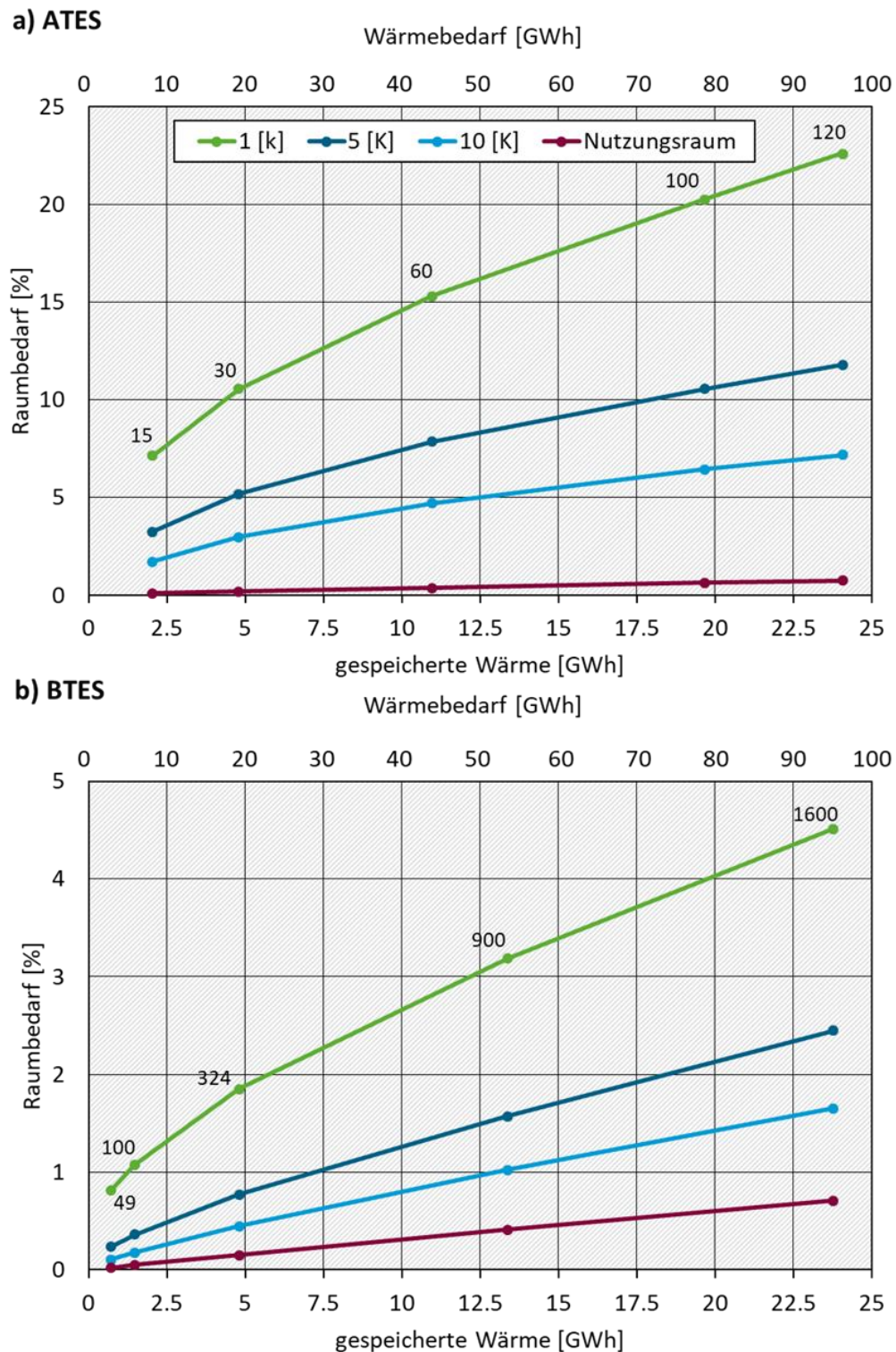
		Gespeicherte Wärme H_i [GWh]	Entnommene Wärme H_E [GWh]	Thermische Rückgewinnung [%]	Wärmebedarfsdeckung pro 1 km ² (25 % über Speicher) [GWh/(km ² · a)]	Thermischer Nutzungsraum [%] von 100 · 10 ⁶ m ³ insges. / pro GWh/(km ² · a) entn. Wärme	Thermischer Auswirkungs- raum [%] von 100 · 10 ⁶ m ³ insgesamt / pro GWh/(km ² · a) entn. Wärme		
							1 K	5 K	10 K
Basisfall ^a		5,5	4,8	88,10	19,20	0,15	1,9	0,77	0,45
						0,03	0,34	0,14	0,08
Sondenanzahl [-]	49	0,92	0,7	77	2,8	0,02	0,81	0,24	0,10
						0,02	0,88	0,26	0,11
	100	1,8	1,5	83	5,9	0,05	1,1	0,36	0,18
						0,03	0,61	0,20	0,10
	900	15	13	91	53	0,41	3,2	1,6	1,0
						0,03	0,22	0,11	0,07
	1600	26	24	92	95	0,71	4,5	2,4	1,6
						0,03	0,17	0,09	0,06
Beladungs- temperatur [°C]	30	1,8	1,6	88	6,5	0,15	1,1	0,30	0,18
						0,08	0,58	0,16	0,10
	50	3,7	3,2	88	13	0,15	1,5	0,57	0,30
						0,04	0,42	0,15	0,08
Entladungs- temperatur [°C]	18	4,8	4,1	85	16	0,15	2,3	1,0	0,59
						0,04	0,48	0,20	0,12
	30	3,9	3	78	12	0,15	2,7	1,2	0,73
						0,05	0,69	0,31	0,19
Sondenlänge [m]	20	2,4	1,9	79	7,6	0,06	1,02	0,36	0,19
						0,02	0,43	0,15	0,08

	100	10	9,5	92	38	0,29	3,2	1,5	0,90
						0,03	0,31	0,14	0,09
Wärmeleitfähigkeit [W/(m · K)]	1,8	5,0	4,5	89	18	0,15	1,5	0,68	0,41
						0,03	0,30	0,14	0,08
	3	5,6	5,0	89	20	0,15	2,4	0,98	0,56
						0,03	0,42	0,17	0,10
Grundwasserabstandsgeschwindigkeit [m/a]	0	5,7	5,0	89	20	0,15	1,8	0,76	0,44
						0,03	0,32	0,13	0,08
	36	6,1	5,1	84	21	0,15	2,8	1,17	0,64
						0,02	0,46	0,19	0,10
	72	6,5	5,1	78	20	0,15	4,2	1,70	0,84
						0,02	0,65	0,26	0,13

Für Nutzungs- und Auswirkungsräume ist der Raumanteil in % an einem Referenzvolumen von 1 km² · 100 m jeweils für den Speicher sowie normiert pro zurückgewonnener GWh/(km² · a) Wärme angegeben.

^{a)} Beladungstemperatur: 70 °C, Sondenanzahl: 324, Sondenlänge: 50 m, Wärmeleitfähigkeit: 2,4 W/(m · K), Grundwasserabstandsgeschwindigkeit: 0 m/a (ohne Aquiferzwichenschicht).

Abbildung 1.23: Abhängigkeit zwischen gespeicherter Wärme, dem zugeordneten jährlichen städtischen Wärmebedarf pro km² Stadtfläche und damit verbundenen thermischen Nutzungs- und Auswirkungsräumen in % des Referenzvolumens für durch die Pumprate skalierte ATES und durch die Sondenanzahl skalierte BTES



Untere Achse: gespeicherte Wärme; obere Achse: jährlicher städtischer Wärmebedarf pro km² Stadtfläche (bei Annahme eines Beitrags durch Wärmespeicher von 25 %). Referenzvolumen: 1 km² · 100 m. Die Zahlenangaben entsprechen der jeweiligen Pumprate der ATES-Anlage (m³/h) bzw. der Sondenanzahl der BTES-Anlage.

Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Zwischenfazit 1.4.4-II

Eine Skalierung der Speicherkapazitäten von (HT-)ATES und (HT-)BTES-Systemen ist möglich und erlaubt die Anpassung der Speicherkapazität an unterschiedliche Wärmebedarfe städtischer Quartiere. Dabei bringen großvolumige Anlagen mit hoher Speicherkapazität durch günstigere Oberflächen-Volumen-Verhältnisse und dadurch reduzierte thermische Verluste insgesamt geringere Raumanforderungen mit sich als mehrere kleinskalige Einzelsysteme.

Die Größenordnung der thermischen Nutzungsräume für Wärmebedarfe bis 100 GWh/(km² · a) liegen für (HT-)ATES (bei Skalierung über die Pumprate) unter 1 % des Referenzvolumens im geologischen Untergrund, die Auswirkungsräume mit Temperaturänderungen von mehr als 1 K unter 25 %. Für (HT-)BTES ergeben sich ebenfalls thermische Nutzungsräume unter 1 %, die thermischen Auswirkungsräume bleiben jedoch unter 5 % des Referenzvolumens. Somit sind signifikante Beiträge zur städtischen Wärmeversorgung auch bei hohen Wärmebedarfen unter Nutzung und Beeinflussung verhältnismäßig geringer Anteile des geologischen Untergrunds darstellbar.

1.4.4.3 Illustration der thermischen Raumbeanspruchung von Wärmespeichern für ein städtisches Viertel im norddeutschen Raum

Das in der generischen Szenarienstudie verwendete Konzept zur Abschätzung der Raumbeanspruchung durch (HT-)ATES und (HT-)BTES im geologischen Untergrund wird im Folgenden auf ein hypothetisches, aber ortskonkret spezifiziertes Beispiel der durch regenerative Energie gestützten Wärmeversorgung eines Stadtteils übertragen und illustriert so die Anwendbarkeit der Vorgehensweise für detaillierte Versorgungsszenarien.

1.4.4.3.1 Szenarienbeschreibung

Als Beispielraum für die Ermittlung des Raumbedarfs der Wärmespeicher dient ein städtisches Viertel im norddeutschen Raum mit einer Fläche von ca. 7,7 km² und rund 11.500 Haushalten mit knapp 20.000 Einwohnern. Die Flächennutzung im Stadtteil ist gemischt mit hohen Anteilen an Grünflächen und Wohnbebauung sowie gewerblichen Nutzungsflächen. Die in diesem Szenario zur Speicherung zur Verfügung stehende Wärmemenge ergibt sich im Unterschied zu den Sensitivitätsuntersuchungen aus einer detaillierten Bilanzierung des Jahresgangs des täglichen Wärmebedarfs für Raumheizung und Warmwasserbereitung des Stadtteils mit dem Jahresgang der täglich zur regenerativen Wärmeversorgung zur Verfügung stehenden Wärmemenge. Der Gebäudewärmebedarf wurde auf Grundlage eines 3D-Gebäudemodells des Stadtteils und der täglichen Außentemperaturdaten exemplarisch für das Jahr 2018 mit 212 GWh/a bzw. 27,5 GWh/(km² · a) abgeschätzt und liegt damit rund ein Drittel über dem im Basisfall zuvor angenommene Wärmebedarf (20 GWh/(km² · a)). Für die zur Speicherung zur Verfügung stehende Wärmemenge und ihren zeitlichen Verlauf wurden zwei wesentliche Wärmequellen angenommen:

- **Solarthermie:** Es werden sämtliche geeigneten Dach- und Freiflächen im Stadtteil (insgesamt ca. 170.000 m²) durch solarthermische Anlagen genutzt. Auf Grundlage der täglichen Globalstrahlungsdaten für den Standort im Jahr 2018 wurde so das jährliche solarthermische Potential mit 49 GWh/a bzw. 6,4 GWh/(km² · a) abgeschätzt.
- **Abwärme:** Zusätzlich zum solarthermischen Ertrag wird Abwärme (z. B. industrielle Abwärme, Müllverbrennungsanlage) als zeitlich konstante Wärmequelle mit 24 GWh/a bzw. 3,1 GWh/(km² · a) berücksichtigt.

Durch Bilanzierung der zeitlich aufgelösten Wärmequellen mit dem Wärmebedarf ergibt sich eine Zeitreihe des aus Solarthermie und Abwärme zusammengesetzten Wärmeüberschusses von 35 GWh/a (entspricht $4,6 \text{ GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$), der zur Speicherung in den Wärmespeichern zur Verfügung steht. Dabei werden maximale Wärmeeinspeisungen von bis zu 38 MWh/Tag erreicht. Im Unterschied zu den generischen Szenarien der Basisfälle wird hier auch die zeitliche Variabilität von Wärmeangebot und -bedarf auf der Jahresskala explizit berücksichtigt.

Für die Speicherung der Überschusswärme werden sowohl ein (HT-)ATES- als auch ein (HT-)BTES-System über einen Zeitraum von 30 Betriebsjahren betrachtet, wobei eine mögliche Veränderung von Wärmeangebot und -bedarf über diesen Zeitraum nicht berücksichtigt wurde. Zur Gewährleistung realistischer Einspeicherlastgänge wurden diese unter Annahme eines in die Systeme integrierten Pufferspeichers mit über fünf Tage gemittelten Raten simuliert. Die Speicherschichten und der geologische Untergrund entsprechen den Annahmen in den generischen Szenarien (Abb. 1.17 und 1.18).

Die Wärmespeicher wurden auf die Speicherung der zur Verfügung stehenden Überschusswärme ausgelegt und damit nicht auf die Bereitstellung eines vorgegebenen Anteils am Gesamtwärmebedarf. Dazu wurde die Größe des ATES gegenüber dem Basisfall auf sechs Dubletten (d. h. 12 Brunnen mit einer Filterstrecke von jeweils 20 m) erhöht. Diese sind in zwei Reihen mit Abständen von jeweils 100 m zwischen den „warmen“ bzw. „kalten“ Brunnen und von 300 m zwischen dem „warmen“ und „kalten“ Brunnen einer Dublette angeordnet. Dadurch werden die thermisch-hydraulischen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Brunnendubletten berücksichtigt, und ein thermischer Kurzschluss wird vermieden. Die simulierten Pumpraten betragen während der Beladung in Abhängigkeit der zu speichernden Wärmemenge pro Dublette zwischen $0 \text{ m}^3/\text{h}$ und $45 \text{ m}^3/\text{h}$. Als Entnahmepumprate wird die mittlere Pumprate aus der Beladungsphase in Höhe von $38 \text{ m}^3/\text{h}$ angesetzt. Die Rücklauftemperatur nach Wärmeentnahme beträgt wie im Basisfall der generischen Studie 13°C (Hintergrundtemperatur).

Auch für das BTES-System wurde die Größe des Speichers an die geforderte Einspeisemenge angepasst. Notwendig sind dazu 2116 Sonden, die in einem Raster von 46 mal 46 Sonden angeordnet sind. Der Sondenbetrieb wurde als parallel und mit einer Beladung mit einer konstanten Temperaturspreizung zwischen Rück- und Vorlauf von 5 K mit zeitlich variabler Fließrate simuliert, bei Entladung dagegen mit konstanter Fließrate und variabler Temperaturspreizung.

1.4.4.3.2 Speichercharakteristik und Raumbedarf

Von den gespeicherten 35 GWh/a Überschusswärme können im 15. Betriebsjahr des ATES insgesamt 28 GWh/a zurückgewonnen werden. Die thermische Rückgewinnung des ATES beträgt somit rund 80 % (Tab. 1.19) und übertrifft damit deutlich den Wert von 65 % aus der generischen Szenarienstudie im Basisfall. Die Rückgewinnung steigt während der restlichen Betriebszeit bis zum 30. Jahr der Simulation um weitere 3 % an. Die Gründe für die höhere Speichereffizienz sind synergetische thermische Wechselwirkungen zwischen den „warmen“ Brunnen des ATES-Verbunds, welche laterale Wärmeverluste gegenüber einzelnen Dubletten reduzieren.

Insgesamt kann die ATES-Anlage ca. 14 % der im Stadtviertel benötigten Wärme saisonal speichern. Die thermischen Nutzungsräume beanspruchen 0,12 % des zugeordneten Referenzvolumens (hier bezogen auf das Stadtviertel, d. h. $7,7 \text{ km}^2 \cdot 100 \text{ m}$). Die thermische Raumbeanspruchung im 15. Betriebsjahr mit Temperaturänderungen ΔT um mehr als 1 K beträgt nur etwa 3,3 % (bzw. 0,9 % pro $\text{GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$) zurückgewonnener Wärme. Im 30. Betriebsjahr erhöhen sich diese Anteile durch Ausbreitung der Temperaturfelder auf 5,3 % (bzw. 1,4 % pro $\text{GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$). Diese Werte sind deutlich niedriger als die im Basisfall der synthetischen Szenarienstudie ermittelte Raumbeanspruchung. Dies liegt zum einen daran, dass, bezogen auf eine

Einheitsfläche von 1 km^2 , aufgrund des beschränkten Wärmeangebots aus Solarthermie und Abwärme mit $4,6 \text{ GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ Beladung und $3,8 \text{ GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ Rückgewinnung nur etwa 75 % der Wärmemenge gespeichert wurde (vgl. Tab. 1.17). Zum anderen zeigen diese Ergebnisse jedoch die Möglichkeit einer deutlichen Verringerung der thermischen Raumwirkung bei synergetischem Betrieb multipler Brunnendubletten in einem großskaligen ATES-System.

Tabelle 1.19: Speichercharakteristiken und damit verbundener thermischer Raumbedarf für die ATES- und BTES-Systeme nach 15 und 30 Betriebsjahren

		ATES		BTES	
		15. Jahr	30. Jahr	15. Jahr	30. Jahr
Gespeicherte Wärme H_i [$\text{GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$]		4,6	4,6	4,6	4,6
Entnommene Wärme H_e [$\text{GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$]		3,7	3,8	4,1	4,1
Thermische Rückgewinnung [%]		80	83	89	89
Wärmebedarfsdeckung über Speicher [%]		13	14	15	15
Thermischer Nutzungsraum [%]		0,12	0,12	0,12	0,12
Thermischer Auswirkungsraum [%]	1 K	3,20	5,30	0,68	1,03
		0,89	1,40	0,17	0,25
	5 K	1,60	2,60	0,38	0,49
		0,44	0,67	0,09	0,12
	10 K	1,00	1,50	0,26	0,31
		0,27	0,40	0,06	0,08

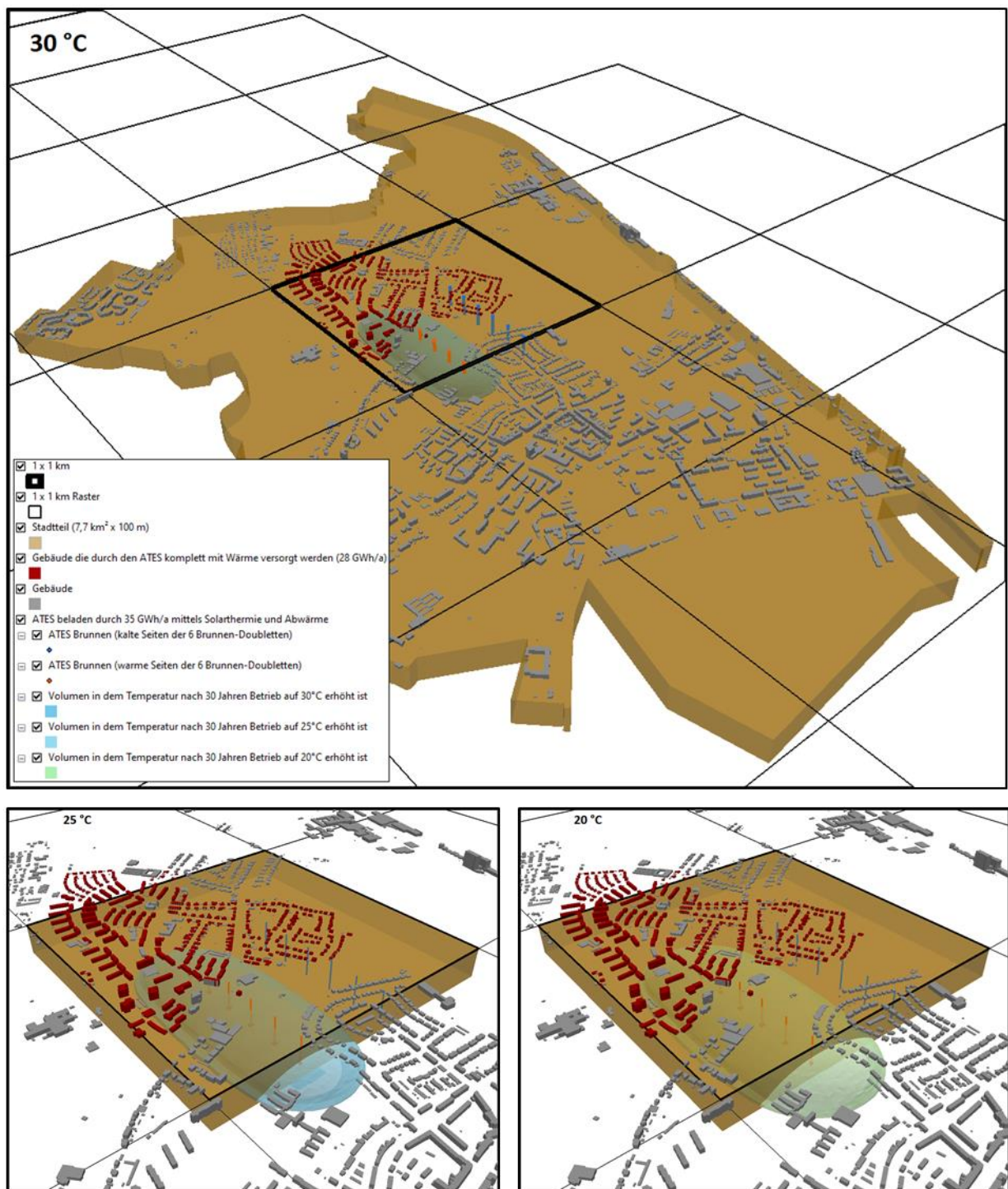
Zur besseren Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der generischen Szenarienstudie sind die Wärmemengen auf eine Einheitsfläche von 1 km^2 normiert. Für die thermischen Nutzungs- und Auswirkungsräume ist der Raumanteil in % an einem Referenzvolumen von $1 \text{ km}^2 \cdot 100 \text{ m}$ jeweils für den Speicher sowie normiert pro zurückgewonnener $\text{GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ Wärme angegeben.

Für das (HT-)BTES-System beträgt die thermische Rückgewinnung sowohl im 15. als auch im 30. Betriebsjahr rund $31,1 \text{ GWh/a}$ bzw. 89 %. Die Speichereffizienz ist somit ähnlich hoch wie in der generischen Szenarienstudie (88 % im Basisfall, 92 % im 1600-Sonden-Speicher). Die (HT-)BTES-Anlage kann so ca. 15 % und damit einen geringfügig höheren Anteil des Wärmebedarfs des Stadtviertels für den vorgegebenen zeitlichen Verlauf der Wärmequellen und Wärmesenken speichern. Der thermische Nutzungsraum beansprucht wie beim (HT-)ATES 0,12 % des zugeordneten Referenzvolumens. Der Auswirkungsraum für $\Delta T > 1 \text{ K}$ umfasst nach 15 Jahren 0,68 % (bzw. 0,17 % pro $\text{GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$) und vergrößert sich nach 30 Jahren auf ca. 1 % (bzw. 0,25 % pro $\text{GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$). Wie beim ATES bleibt damit der Raumbedarf deutlich unter den Werten des Basisfalls.

Die Abbildungen 1.24 und 1.25 veranschaulichen den Beitrag der Speicher zur Wärmeversorgung der Gebäude im städtischen Viertel sowie die unterschiedlichen Raumwirkungen der

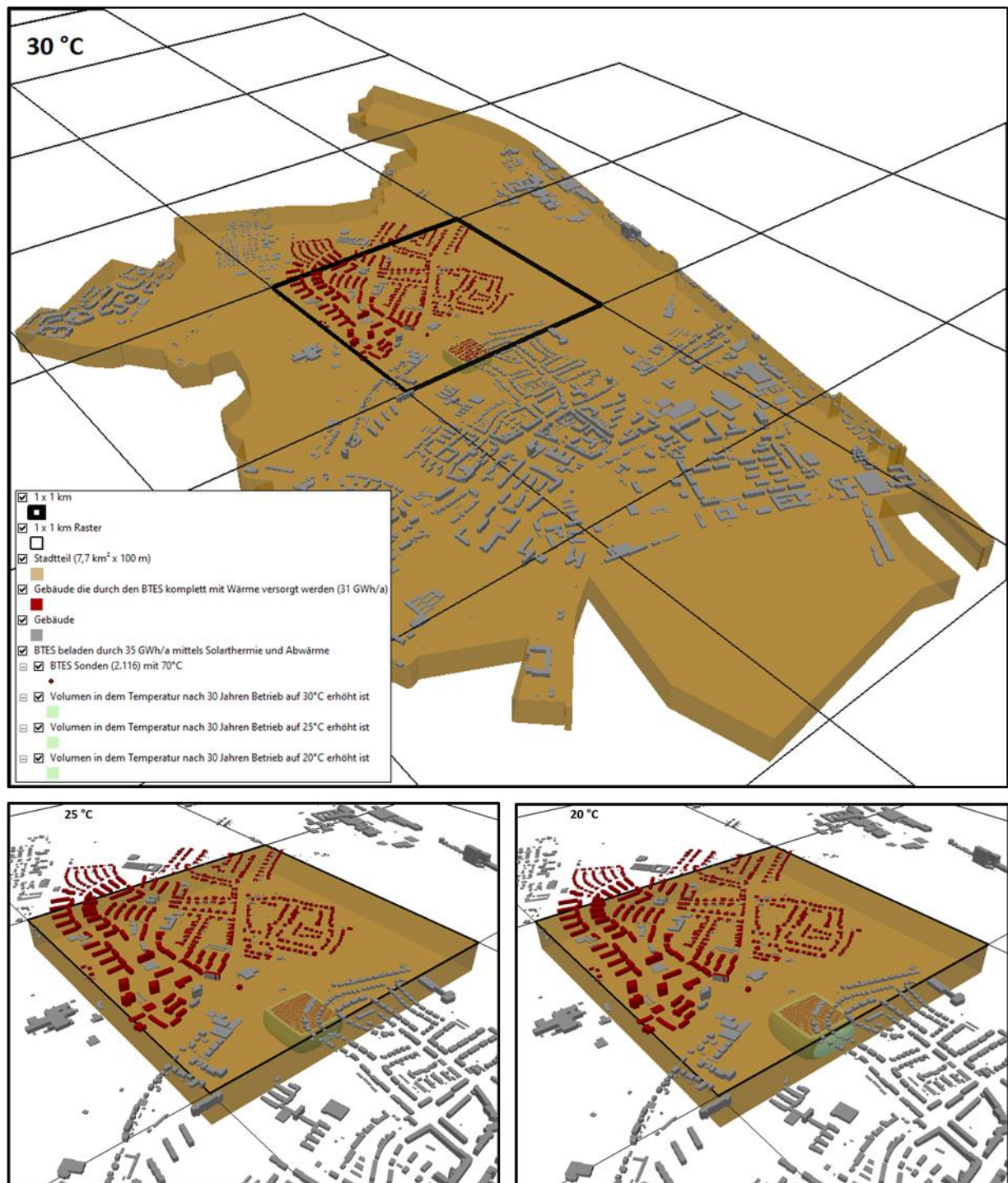
(HT-)ATES-Anlage und der (HT-)BTES-Anlage, indem die Auswirkungsräume für die Absoluttemperaturen von 20 °C, 25 °C und 30 °C verglichen werden. Bei insgesamt sehr ähnlichen thermischen Nutzungsräumen an den Installationen beider Systeme (Tab. 1.19; die vertikale Dimension des (HT-)BTES-Systems ist um das 2,5-fache größer als die des (HT-)ATES-Systems) zeigt sich eine ungefähr um den Faktor 8 geringere Raumbeanspruchung durch thermische Auswirkungen der (HT-)BTES-Anlage gegenüber einer (HT-)ATES-Anlage. Der Unterschied zwischen den beiden Speicheroptionen ist etwas geringer, aber in ähnlicher Größenordnung wie in der generischen Szenarienstudie, wo dieser ca. einen Faktor 10 in den Auswirkungsräumen für die Absoluttemperaturen beträgt. Der größte der betrachteten Auswirkungsräume ist der für die 20-°C-Absoluttemperatur und umfasst im Fall des (HT-)ATES 2,5 % des Referenzvolumens für das städtische Viertel ($7,7 \text{ km}^2 \cdot 100 \text{ m}$) und im Fall des (HT-)BTES 0,31 %. Werden die Auswirkungsräume der Großspeicher auf ein Einheitsquadrat (1 km^2) bezogen, so sind dies 19 % im Fall des (HT-)ATES und 2,4 % im Fall des (HT-)BTES.

Abbildung 1.24: Untertägige räumliche Ausdehnung einer ATEs-Anlage im Kontext des städtischen Viertels in Form des Wärmeversorgungsbeitrags und der thermischen Auswirkungsräume (20 °C, 25 °C, 30 °C) nach 30 simulierten Betriebsjahren



Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Abbildung 1.25: Untertägige räumliche Ausdehnung einer BTES-Anlage im Kontext des städtischen Viertels in Form des Wärmeversorgungsbeitrags und der thermischen Auswirkungsräume (20 °C, 25 °C, 30 °C) nach 30 simulierten Betriebsjahren



Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

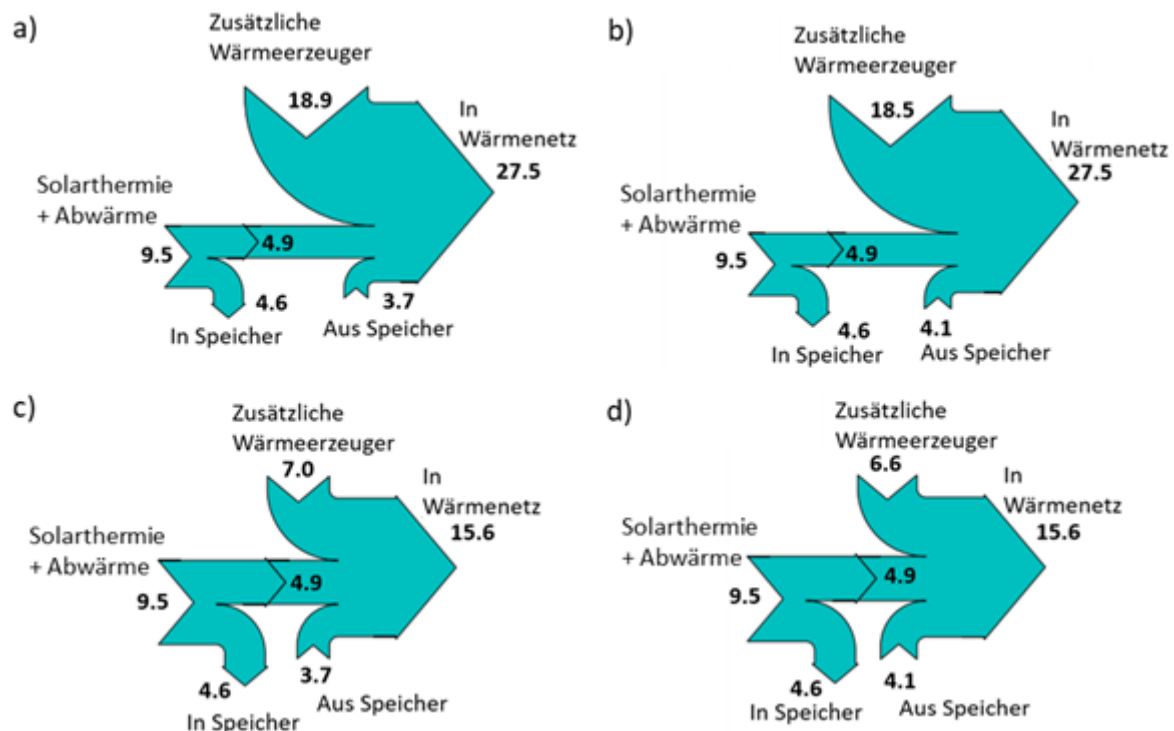
1.4.4.3.3 Zukünftiges Potential von UTES-Systemen bei Änderung des Wärmebedarfs (Heizung) im Beispielfviertel

Die Wärmebedarfsdeckung über die (HT-)UTES-Speicher (Tab. 1.19) für das Beispielfviertel liegt beim jährlichen solarthermischen Potential von $6,4 \text{ GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ und dem zusätzlich angenommenen Abwärmepotential von $3,1 \text{ GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ bei bis zu 15 %. Wichtig zur Bewertung von (HT-)UTES-Systemen ist die Frage, welche Bedeutung solche Systeme z. B. bei einer zukünftigen Abnahme des Wärmebedarfs und/oder eines verringerten Wärmedangebotes bisher vorhandener Wärmequellen, wie beispielsweise Müllverbrennungsanlagen, besitzen. Derzeit ist vom jährlichen Wärmebedarf von $27,5 \text{ GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ der überwiegende Anteil von knapp $19 \text{ GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ über zusätzliche Wärmeerzeuger (z. B. KWK, Gas) zur Verfügung zu stellen (Abb. 1.26a und 1.26b).

Bei einer zukünftigen Reduktion des Wärmebedarfs z. B. aufgrund verbesserter Gebäudedämmung würde sich die Wärmeeinspeicherung erhöhen, da weniger Wärme aus Solarthermie oder aus den Abwärmequellen genutzt würde. Der zeitliche Verlauf des Speicherbetriebs (z. B. der Übergang zwischen Einspeicherung und Entnahme im Frühjahr und Herbst) wird davon allerdings nur unwesentlich beeinflusst, so dass eine erste Einschätzung der resultierenden Erhöhung des Deckungsgrads des Wärmesystems aus den Speichern ohne zusätzliche Simulationen getroffen werden kann. Abb. 1.26c und 1.26d zeigen die sich so bei gleichem Speicherbetrieb und unter Annahme einer zukünftigen Heizwärmebedarfsreduktionen um 50 % ergebenden Energieumsätze. Dabei wäre eine Reduktion der durch zusätzliche Wärmeerzeuger aufzubringende Energie auf ca. $7 \text{ GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ im Fall des (HT-)ATES und auf $6,6 \text{ GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ im Fall des (HT-)BTES-Systems möglich. Die Wärmebedarfsdeckung über ein (HT-)ATES-System oder ein (HT-)BTES-System beträgt dann 24 % bzw. 26 %. Die (HT-)UTES-Systeme ermöglichen so, dass insgesamt über 60 % des Wärmebedarfs über die hier betrachteten Wärmequellen ohne weitere Maßnahmen gedeckt werden könnten.

Abbildung 1.26: Energieflussdiagramme der Speicheroptionen ATES-Anlage und BTES-Anlage bei Vernachlässigung von Verteilverlusten und derzeitigem Wärmebedarf sowie jeweils bei zukünftiger Halbierung des Heizwärmebedarfs

a) ATES-Anlage bei derzeitigem Wärmebedarf; b) BTES-Anlage bei derzeitigem Wärmebedarf; c) ATES-Anlage bei zukünftiger Halbierung des Heizwärmebedarfs; d) BTES-Anlage bei zukünftiger Halbierung des Heizwärmebedarfs



Die Energieflüsse (GWh/(km² · a)) basieren auf den Simulationsergebnissen im 15. Betriebsjahr.

Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Zwischenfazit 1.4.4-III

Die Ergebnisse der detaillierten Szenariensimulationen des Betriebs großskaliger (HT-)ATES- und (HT-)BTES-Systeme für den Beispielraum eines Stadtviertels in Norddeutschland zeigen insgesamt geringere thermische Raumbeanspruchungen als die eher klein- bis mittelskaligen (HT-)UTES-Systeme der generischen Szenarien und verdeutlichen den Vorteil insbesondere großer (HT-)ATES-Systeme hinsichtlich Speichereffizienz und thermischer Auswirkungen auf den geologischen Untergrund.

Durch die Speicher lässt sich das Wärmeangebot aus Solarthermie und anderen Wärmequellen optimiert bis vollständig ausschöpfen. Bei zukünftig steigendem Angebot können die Speicher auch größere Anteile der städtischen Wärmeversorgung bedienen und ggf. eine vollständig regenerative Wärmeversorgung ermöglichen. Gleiches gilt bei langfristiger Abnahme des Wärmebedarfs durch energetische Sanierung und Änderungen im Gebäudebestand.

Entsprechend dimensionierte (HT-)UTES-Systeme bieten den nötigen Spielraum zur Anpassung des Betriebs an sich ändernde energetische Randbedingungen und können so ein entscheidendes Instrument zur Flexibilisierung im sich wandelnden Wärmeversorgungssystemen städtischer Räume sein und damit eine Schlüsselfunktion in der Verknüpfung von Wärmeversorgern und -verbrauchern einnehmen.

Resümee 1.4.4

Es stehen erprobte analytische und numerische Modelle zur Verfügung, um in Abhängigkeit von den geologischen Randbedingungen und von den aus dem Wärmebedarf und dem Wärmedargebot abgeleiteten Betriebsparametern thermische und hydraulische Auswirkungen von EWS-, WWA- und UTES-Systemen räumlich und zeitlich belastbar zu prognostizieren. Die Ergebnisse dieser generischen Szenarienstudie stellen robuste und konservative Abschätzungen der zu erwartenden Obergrenzen des Raumbedarfs geologischer Hochtemperaturspeicher für die städtische Wärmeversorgung dar.

Die untertägigen Nutzungsräume unterscheiden sich nur unwesentlich zwischen den Speicheroptionen (HT-)ATES und (HT-)BTES und umfassen je nach erforderlicher Speicherkapazität, Betriebsparametern und geologischen Gegebenheiten weniger als 1 % des oberflächennahen geologischen Untergrunds, der in dieser Studie auf ein Volumen von $1 \text{ km}^2 \cdot 100 \text{ m}$ bezogen wird.

Die thermischen Auswirkungsräume sind bei (HT-)ATES-Anlagen je nach betrachtetem Schwellenwert der Temperaturänderungen (hier zwischen 1 K und 10 K) mindestens im einstelligen Prozentbereich des nutzbaren Untergrundraums zu erwarten. Insbesondere in Stadtzentren mit hohen Wärmebedarfen können auch größere Anteile des geologischen Untergrunds um einige zehn Prozent von Temperaturänderungen betroffen sein. Im Vergleich dazu sind bei (HT-)BTES etwa um einen Faktor 5 geringere Auswirkungsräume zu erwarten.

Durch den Betrieb größerer Speichersysteme (großskalige Einzel-(HT-)BTES-Anlagen oder (HT-)ATES-Dublettenverbünde), die möglichst quartiersübergreifend hohe Stadtflächenanteile versorgen, lassen sich die benötigten Raumanteile bei beiden Speicheroptionen deutlich reduzieren. Dies ist im Wesentlichen in prozentual geringeren Wärmeverlusten größerer Speicher gegenüber kleinen Einzelspeichern begründet. (HT-)BTES-Systeme zeigen jedoch auch bereits bei kleineren Systemgrößen hohe Rückgewinnungsgrade und eignen sich somit grundsätzlich auch für Wärmeversorgungssysteme bei geringeren Bedarfen.

Die Dimension der Wärmefelder im geologischen Untergrund unterliegt einer zeitlichen Ausbreitungsdynamik und führt zu einem kontinuierlichen Wachstum insbesondere der von geringfügigen Temperaturänderungen (z. B. 1 K) betroffenen Räume. Die thermischen Auswirkungen sollten somit ggf. über ein Wärmemonitoring und -management kontrolliert werden.

Vor dem Hintergrund der gesamten Ergebnisse des Abschnitts 1.4 lassen sich folgende übergeordnete Punkte ableiten:

Eine vordringliche Zielsetzung sollte die Entwicklung und Anwendung eines statistisch bzw. empirisch abgesicherten „Baukastensystems“ zumindest für die (Vor-)Planungsphase von EWS-, WWA- und UTES-Systemen sein, um praktikabel und schnell die zeitlichen Raumwirkungen dieser Wärme(speicher)-Systeme im geologischen Untergrund semi-quantitativ bewerten zu können.

Die in dieser Studie erstellten analytischen und numerischen Szenarioanalysen bilden dabei eine erste Datenbasis, um die Auswirkungen geologischer Randbedingungen (u. a. Mächtigkeit des Aquifers, Permeabilität etc.) und der Betriebsführung (Einspeichertemperatur, -rate etc.) bei ober- und untertägigen Planungskonzepten zur Wärmeversorgung abschätzbar zu machen.

Eine übergeordnete Zielsetzung muss die Entwicklung und Anwendung von Managementwerkzeugen zur großräumigen thermischen und hydraulischen Bewirtschaftung des geologischen Untergrunds sein. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf einen Schutz des Grundwassers zur Trinkwasserversorgung.

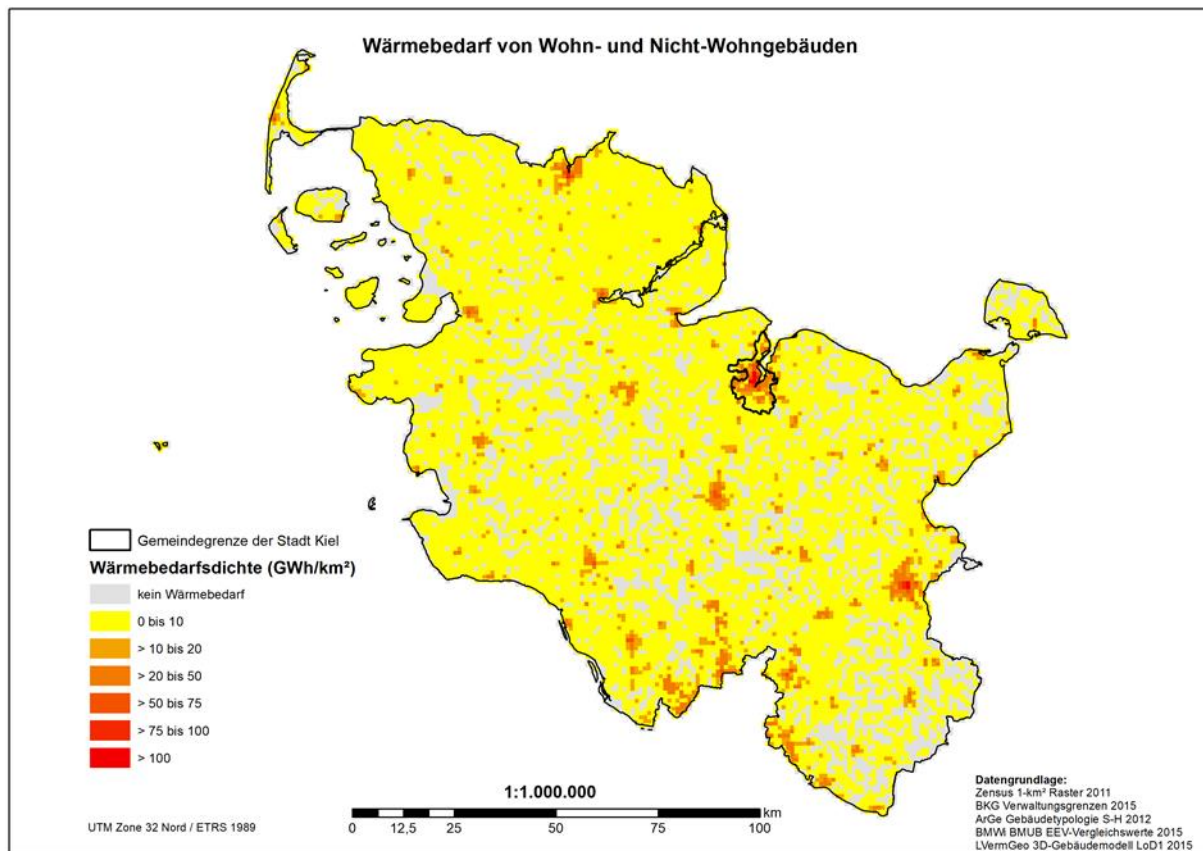
1.5 Abschätzung und GIS-Visualisierung des untertägigen Raumbedarfs von UTES-Anlagen in Relation zu Wärmebedarfsdichten anhand des Bundeslands Schleswig-Holstein

Ob und gegebenenfalls in welcher Weise oGT- und UTES-Anlagen bei einem flächendeckenden Einsatz thermische Auswirkungen auf den oberflächennahen Untergrund besitzen, ist im Wesentlichen davon abhängig, welche Wärmebedarfsdichten (hier: Heizen und Warmwasserbereitung) zu bedienen sind. Für eine Gesamtbewertung der potenziellen thermischen Auswirkungen ist es deshalb notwendig, auch verschiedene Raumskalen (hier: Bundesland Schleswig-Holstein, Stadtteil-Skala, Stadtquartier-Skala) zu betrachten.

Im Rahmen dieser Studie wurde diese Themenstellung exemplarisch anhand von (HT-)UTES-Anlagen, die einen thermisch wesentlich stärkeren Impact auf den oberflächennahen Untergrund bewirken (können), bearbeitet.

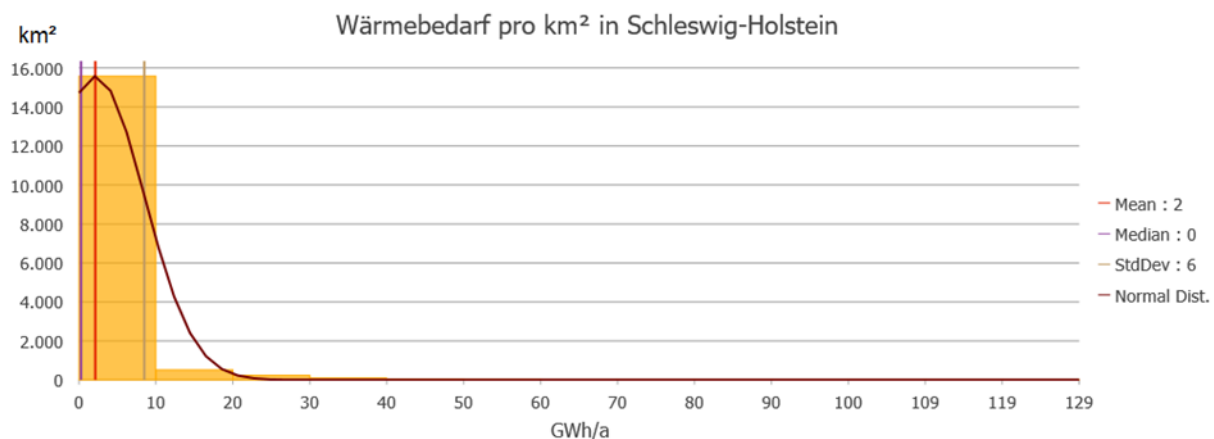
Datengrundlage für die Visualisierung des untertägigen Raumbedarfs von UTES-Anlagen auf Landesebene ist der räumlich differenzierte Wärmebedarf zum Heizen (Raumwärme und Warmwasser) für den Gebäudebestand (Wohn- und Nichtwohngebäude) im Bundesland Schleswig-Holstein (Abb. 1.27). Dieser Geodatensatz wurde im Rahmen des Forschungsprojekts „ANGUS II“ auf Basis von 3D-Gebäudemodellen, Geodaten des Zensus 2011 und einer regionalen Gebäudetypologie GIS-basiert abgeschätzt und verortet (Schwanebeck et al., 2021).

Abbildung 1.27: Aktueller jährlicher Wärmebedarf zum Heizen (Raumwärme und Warmwasser) von Gebäuden je km² in Schleswig-Holstein



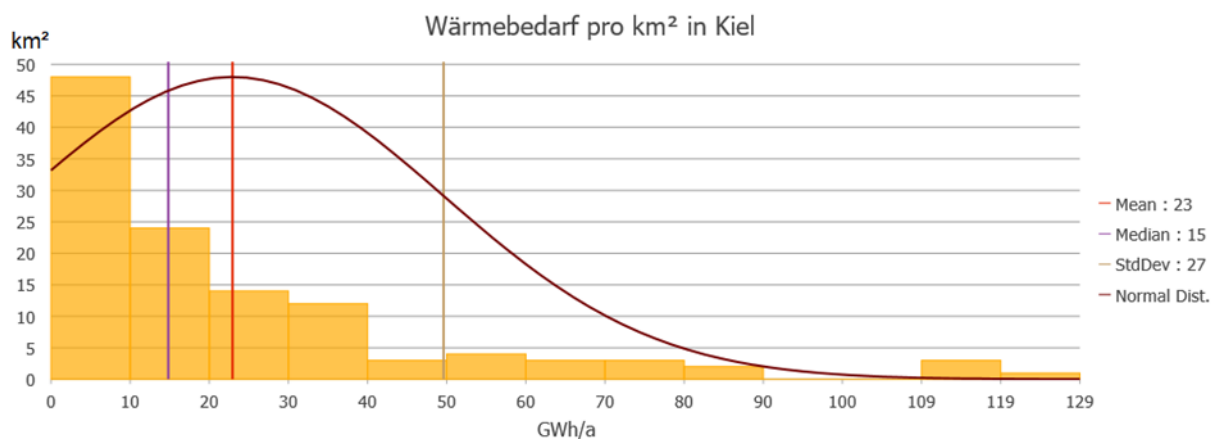
Quelle: Schwanebeck et al. (2021).

Insgesamt wurde ein jährlicher Wärmebedarf von 35.033 GWh ermittelt, der sich jedoch räumlich unterschiedlich im Gebiet des Bundeslandes verteilt bzw. konzentriert. Abbildung 1.28 zeigt, dass im verhältnismäßig dünn besiedelten Flächenland Schleswig-Holstein im Mittel jährlich nur rund 2 GWh pro km² vom Gebäudebestand zum Heizen benötigt werden. In 98 % der betrachteten Fläche (16.505 km²) fällt jährlich weniger als 20 GWh/km² Wärmebedarf an. Dieser Schwellenwert wurde bereits in Abschnitt 1.4.4 als typisch für Stadtrandlagen eingeführt und dort auch als Grundlage zur Dimensionierung der generischen (HT-)UTES-Anlagentypen verwendet.

Abbildung 1.28: Histogramm des abgeschätzten Wärmebedarfs pro km² in Schleswig-Holstein

Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Höchste Wärmebedarfsdichten wurden erwartungsgemäß in den dicht bebauten Stadtgebieten des Bundeslands verortet (Abb. 1.27). Das Beispiel der Landeshauptstadt Kiel zeigt, dass der mittlere Wärmebedarf in Städten mehr als zehnmal so hoch wie im Mittel des Bundeslandes sein kann, wobei die baulich hoch verdichteten Stadtkerne diesen Wert dominieren (Abb. 1.29).

Abbildung 1.29: Histogramm des abgeschätzten Wärmebedarfs pro km² in Kiel

Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Im westlichen Zentrum der Stadt Kiel, die insgesamt bereits 8 % des Gesamtwärmebedarfs des Bundeslands darstellt, wurden die höchsten Wärmebedarfsdichten (max. 129 GWh/(km² · a)) verortet. In solchen dicht bebauten urbanen Gebieten stellen Wärmenetze aktuell und auch zukünftig eine sinnvolle Wärmeversorgungsoption dar (vgl. Abschn. 1.3), die bei stärkerer Integration erneuerbarer Wärmequellen einen saisonalen Wärmespeicherbedarf, z. B. über UTES-Anlagen, aufweisen können. Aber auch in Stadtrandlagen und ländlichen Gebieten mit geringeren Wärmebedarfsdichten kann unter Umständen über Wärmenetze und saisonale Wärmespeicher, also potentiell auch wieder UTES-Anlagen, ein Großteil des lokalen Wärmebedarfs aus den vor Ort verfügbaren regenerativen Wärmequellen gedeckt werden.

Je nach genutztem UTES-Typ, der Betriebsweise und -dauer sowie dem betrachteten Schwellenwert der Temperaturerhöhung zur Definition des Raumbedarfs ergibt sich untertäglich ein thermisch beeinflusster Nutzungs- und Auswirkungsraum.

In dieser Studie wurde zunächst ein Szenario betrachtet, das den thermischen Raumbedarf von UTES-Anlagen konservativ im Sinne einer Überschätzung betrachtet. In diesem Szenario wird von einer 85 %igen Deckung des abgeschätzten jährlichen Wärmebedarfs über die UTES-Anlagen (jeweils für eine km^2 -Rasterzelle) ausgegangen. Dieser sehr hohe und möglicherweise auch unrealistisch hohe Wert des UTES-Anteils an der Wärmeversorgung ergibt sich aus der sehr konservativen Annahme, dass allein die Warmwasserbereitung durch direkt vor Ort verfügbare Wärmequellen zeitweise bereitgestellt wird.

Eine weitere sehr stark vereinfachende Annahme musste bei diesem Studienansatz im Hinblick auf die oberflächennahen geologischen Strukturen in Schleswig-Holstein getroffen werden. Mangels eines großräumigen 3D-Untergrundmodells im Hinblick auf die oberflächennahen geologischen Strukturen sowie die hydrogeologischen und hydrochemischen Gegebenheiten wurde bei der Modellierung der UTES-Anlagen und ihres thermischen Raumbedarfs entsprechend Abschnitt 1.4 (Abb. 1.17 und 1.18) eine typische glazigene Wechsellagerung von Grundwasserleitern und Grundwassergeringleiten angenommen.

Weiterhin wurde in diesem konservativen Szenario (Abb. 1.30) die Grenze von 1-K-Temperaturveränderung als thermischer Auswirkungsraum definiert.

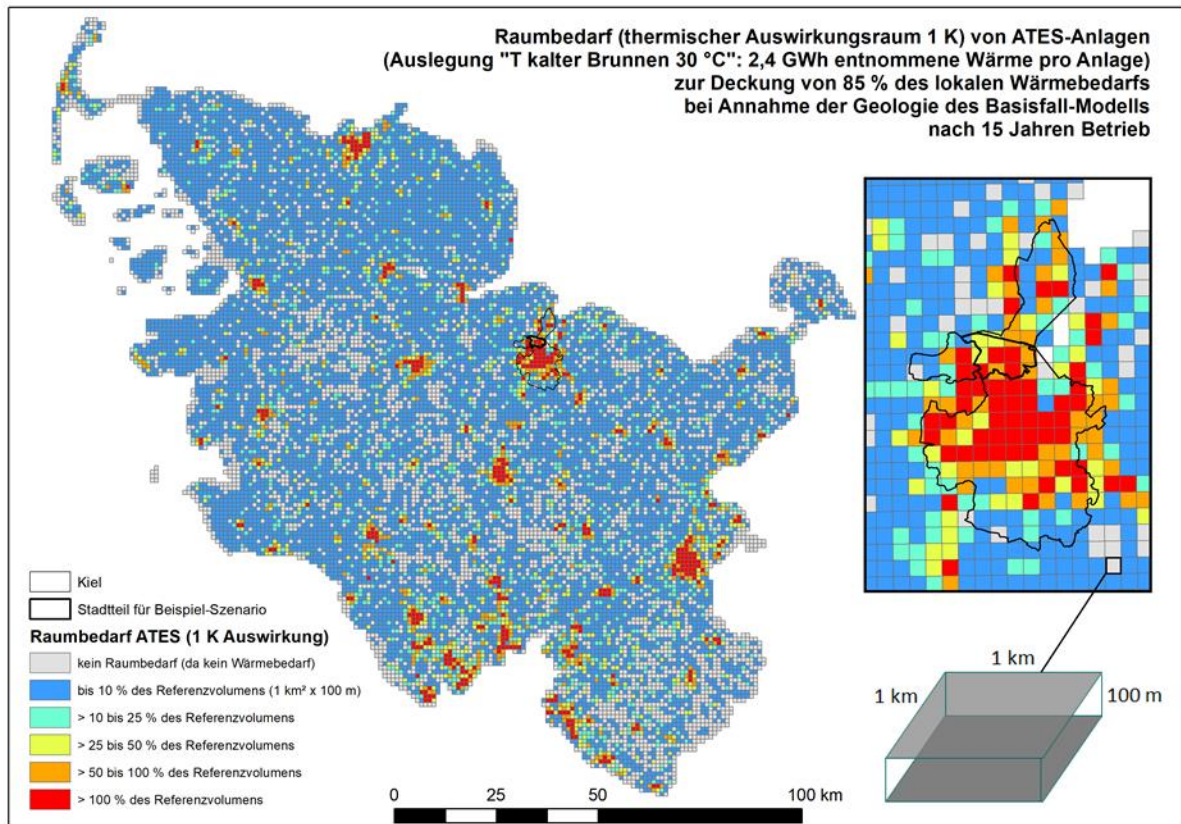
Auf Grundlage der in Abschnitt 1.4 abgeleiteten Raumwirkung von UTES-Anlagen im Hinblick auf einen bestimmten Wärmeversorgungsbetrag (hier: zur Deckung von 85 % des Wärmebedarfs) konnte der aufsummierte prozentuale Anteil des anlagentypspezifischen Raumbedarfs nach 15 Jahren Betrieb (bezogen jeweils auf ein „Referenzvolumen“ ($1 \text{ km} \cdot 1 \text{ km} \cdot 100 \text{ m}$ Teufe in den oberen 400 m des geologischen Untergrunds)) für das gesamte Bundesland dargestellt werden. Entsprechend Tabellen 1.17 und 1.18 (Abschn. 1.4) war dabei wieder die (konservative) Annahme, dass dafür die thermisch stärker raumwirkenden (HT-)ATES-Anlagen mit „neutraler“ Anordnung im geologischen Untergrund ohne gegenseitige thermische Beeinflussung der Brunnen-Dubletten verwendet werden.

Als (HT-)ATES-Anlagenkonfigurationen wurde zunächst eine (HT-)ATES-Anlage mit einer Rücklauftemperatur von 30°C am „kalten“ Brunnen und einer daraus resultierenden ausspeicherbaren Wärmemenge von 2,4 GWh im 15. Betriebsjahr angenommen. Pro notwendiger Anlage dieses ATES-Typs sind nach 15 Jahren 13,6 % des jeweiligen Referenzvolumens um mehr als 1 K erwärmt (vgl. Tab. 1.17 in Abschn. 1.4.4). Es zeigt sich, dass selbst bei diesen sehr konservativen, aber auch stark vereinfachenden Annahmen der Großteil der Fläche Schleswig-Holsteins nicht oder nur gering thermisch beeinflusst wird. Allerdings stellt sich in den städtischen Gebieten, in denen meist mehrere dieser (HT-)ATES-Anlagen nötig wären, die Konstellation vollständig anders dar. Hier wäre für einen bedeutenderen Teil der definierten Referenzvolumina je 1 km^2 zu mehr als 100 % eine Temperaturerhöhung größer 1 K zu erwarten.

Jedoch zeigen sich hier auch die Grenzen des gewählten Ansatzes. Beispielsweise wäre mit (HT-)ATES-Anlagen, die mit einer Rücklauftemperatur von 13°C betrieben werden (Abb. 1.31), im 15. Betriebsjahr eine Ausspeicherung von 4,8 GWh je Anlage möglich. Das heißt, bei einem derartigen Anlagenbetrieb würden nur noch 10,6 % des jeweiligen Referenzvolumens um 1 K erwärmt (vgl. Tab. 1.17 in Abschn. 1.4.4). Entsprechend geringer ist die Anzahl der 1 km^2 -Rasterzellen, in denen mehr als 100 % des Referenzvolumens thermisch beeinflusst wären (rund 0,2 % der Fläche des Bundeslandes). In 90 % der Fläche wären so nur max. 10 % des Referenzvolumens durch eine Temperaturerhöhung um min. 1 K beeinflusst. Unter dieser Annahme beschränken sich die thermisch stark beeinflussten Bereiche nur noch auf urbane Gebiete mit hohen Wärmebedarfsdichten.

Abbildung 1.30: Stark „konservatives“ Szenario zum Raumbedarf von (HT-)ATES-Anlagen

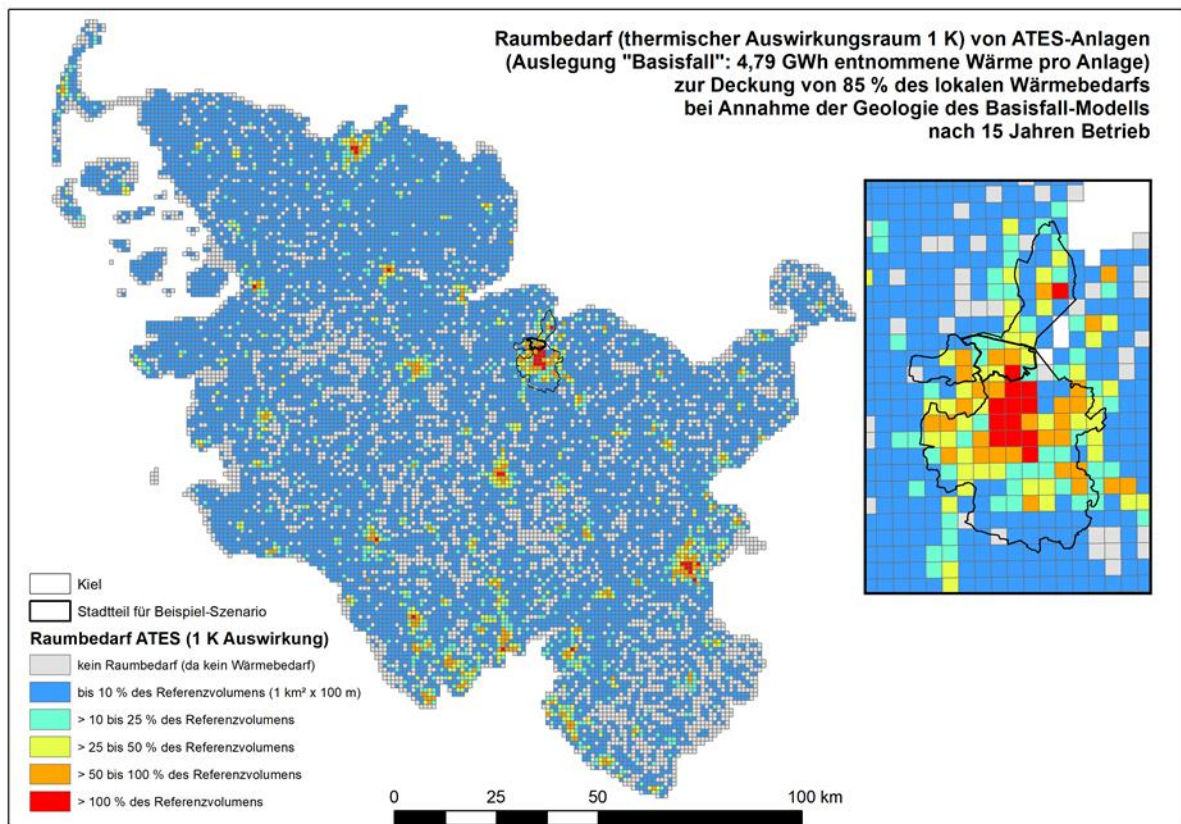
Jährliche Wärmebedarfsdeckung durch (HT)-ATES-Anlagen: 85 %, Grenze Auswirkungsraum: ≤ 10 K



Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Abbildung 1.31: Konservatives Szenario zum Raumbedarf von (HT-)ATES Anlagen

Jährliche Wärmebedarfsdeckung durch (HT)-ATES-Anlagen: 85 %, Grenze Auswirkungsraum: ≤ 10 K, Rücklauf-temperatur 13°C statt 30°C

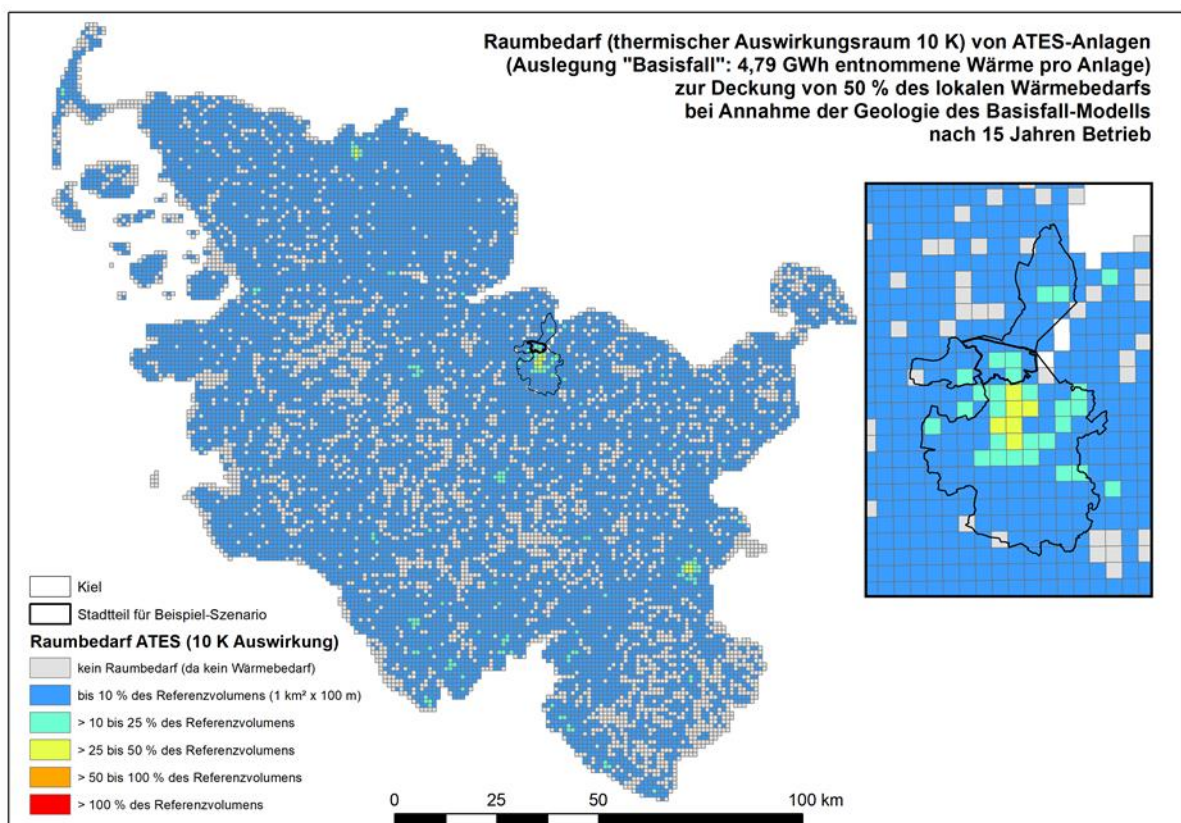


Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Für ein „plausibleres bis optimistisches“ Szenario wurde angenommen, dass anstatt von 85 % nur 50 % des jeweils in einem Quadratkilometer verorteten Wärmebedarfs des Gebäudebestands über die (HT-)UTES-Anlagen gedeckt werden soll. Zusätzlich wurde die Schwelle zur Definition des thermischen Auswirkungsraums von 1 K auf 10 K Temperaturerhöhung geändert, was für urbane Räume nicht unrealistisch erscheint, wenn man die „natürliche“ thermische Heterogenität aufgrund untertägiger urbaner Wärmeinseln einerseits und die geringen hydrochemischen und mikrobiologischen Auswirkungen bis zu einer Absoluttemperatur von 25 °C berücksichtigt (vgl. Kap. 3). Auch in diesem Szenario wurden wieder (HT-)ATES-Anlagen mit einer Rücklaufftemperatur von 13 °C am „kalten“ Brunnen, die im 15. Betriebsjahr 4,8 GWh ausspeichern können, angenommen. In dieser Konstellation werden je benötigter (HT-)ATES-Anlage nur noch knapp 3,0 % des jeweiligen Referenzvolumens beeinflusst, und in 97 % der Fläche Schleswig-Holsteins werden nur maximal 5 % des Referenzvolumens (wieder $\text{km}^2 \cdot 100 \text{ m}$) beeinflusst (Abb. 1.32). Im Maximum, also in den urbanen Zentren, werden 40 % eines Referenzvolumens durch die Auswirkungsräume der dort genutzten (HT-)ATES-Anlagen thermisch beeinflusst. Letztendlich belegt dieses Szenario auch wieder im Wesentlichen, dass neben den angenommenen ATES-Betriebsbedingungen auch regulatorische Randbedingungen die Darstellung der thermischen Auswirkungen entscheidend beeinflussen.

Abbildung 1.32: „Plausibleres bis optimistisches“ Szenario zum Raumbedarf von (HT-)ATES-Anlagen

Jährliche Wärmebedarfsdeckung durch (HT-)ATES-Anlagen: 50 %, Grenze Auswirkungsraum: $\leq 10 \text{ K}$



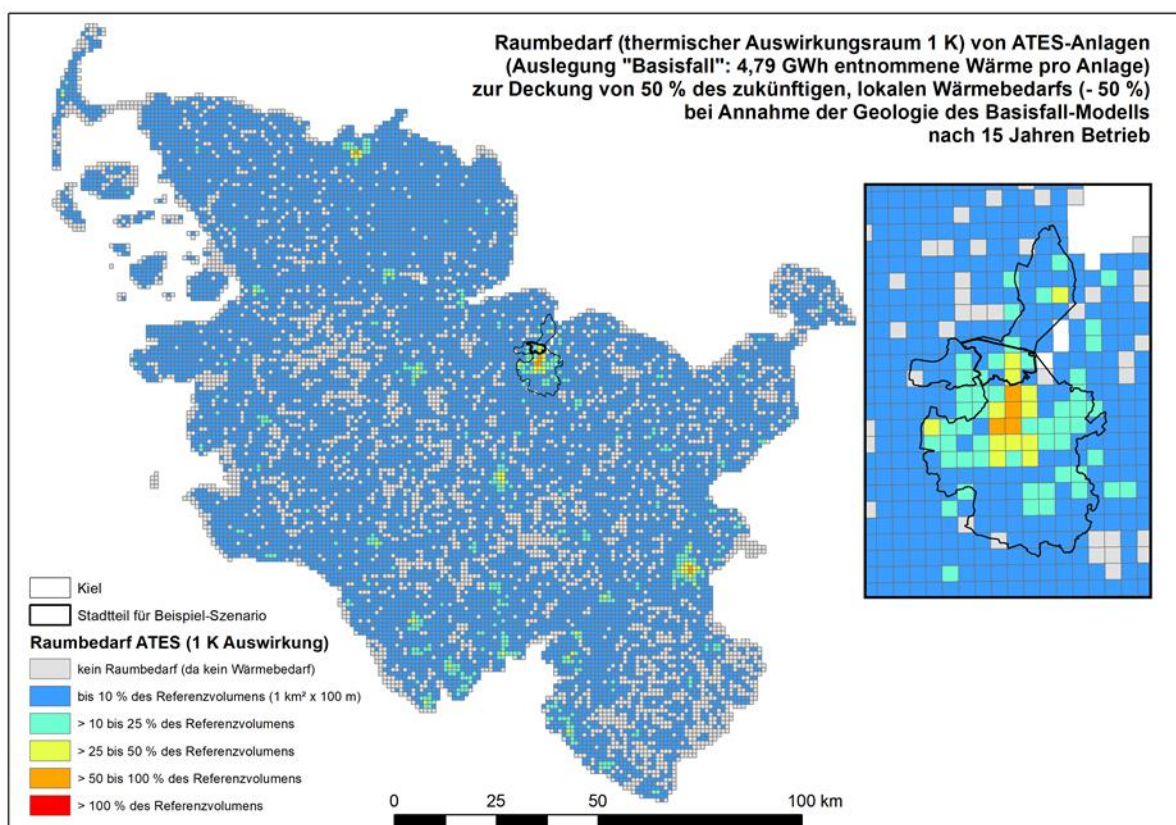
Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Ein weiteres Szenario betrachtete den zukünftig geringeren Wärmebedarfs der Gebäude durch energetische Sanierungsmaßnahmen und Effekte des Klimawandels (Abschn. 1.2). Die thermische Auswirkungsräume von (HT-)ATES-Anlagen würden zukünftig geringer ausfallen, wenn die Betriebsweise jeweils so angepasst wird, dass weiterhin nur 50 % des verbleibenden Wärmebedarfs aus den Speichern gedeckt werden (Abb. 1.34). Bei gleichbleibender Betriebsweise könnte ansonsten ein höherer prozentualer Anteil am Wärmebedarf gedeckt werden.

Als ein letztes Szenario wurde der Raumbedarf bei Nutzung von (HT-)BTES-Anlagen anstatt von (HT-)ATES-Anlagen zur Deckung von 50 % des Wärmebedarfs untersucht. Angenommen wurde hier, dass die (HT-)BTES-Anlagen in der Auslegung „Basisfall“ (vgl. Tab. 1.18 in Abschn. 1.4.4) im 15. Betriebsjahr 4,8 GWh auszuspeichern vermögen. Wird der thermische Auswirkungsraum erneut über die 10-K-Tempererhöhung definiert, und es ergibt sich aufgrund des relativ geringen Raumbedarfs von (HT-)BTES-Anlagen, dass je benötigter (HT-)BTES-Anlage nur 0,45 % des jeweiligen Referenzvolumens beeinflusst wird. In 98 % der Fläche Schleswig-Holsteins würde dann weniger als 1 % des jeweiligen untertägigen Referenzvolumens um mindestens 10 K (also auf ca. 20 – 25 °C Absoluttemperatur) erwärmt (Abb. 1.33).

Abbildung 1.33: Szenario zum zukünftigen Raumbedarf von (HT-)ATES-Anlagen unter Berücksichtigung einer thermischen Sanierung des Gebäudebestandes, d. h. -50 % zum aktuellen Wärmebedarf

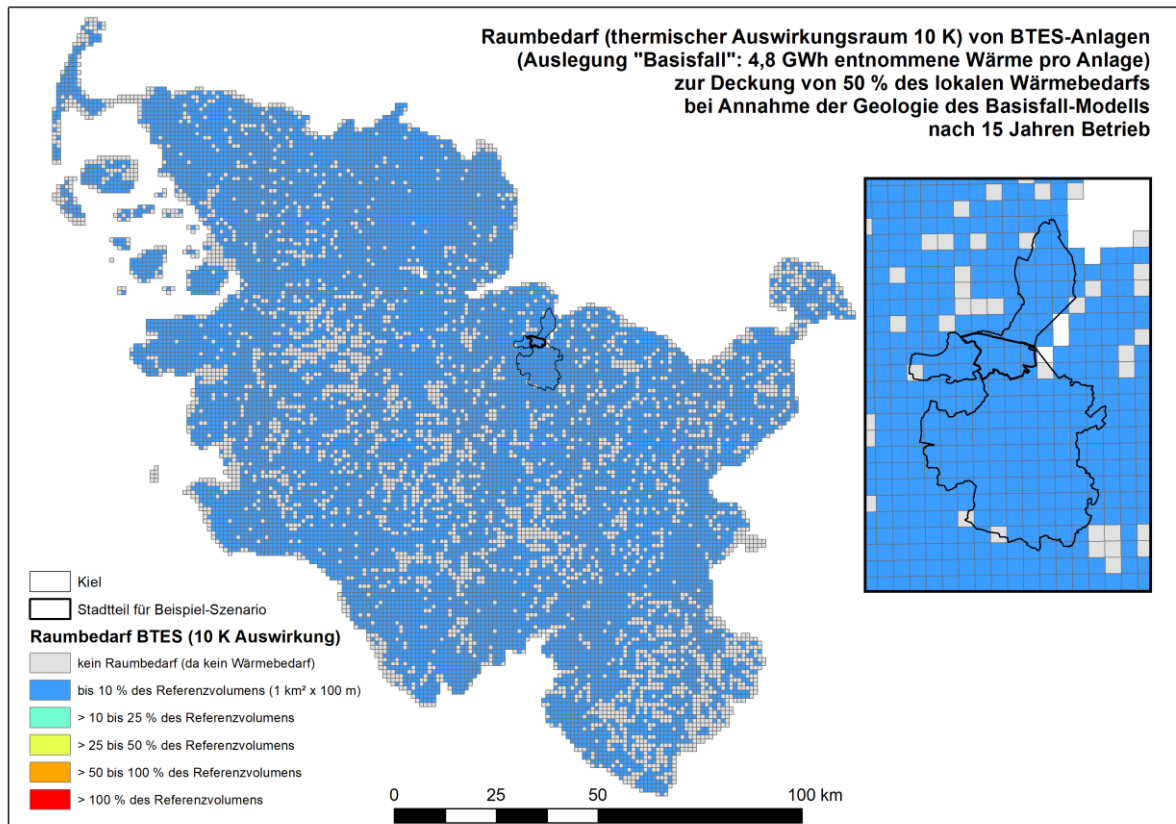
Jährliche Wärmebedarfsdeckung durch (HT)-ATES-Anlagen: 50 %, Grenze Auswirkungsraum: ≤ 10 K



Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Abbildung 1.34: Szenario zum Raumbedarf von (HT-)BTES-Anlagen

Jährliche Wärmebedarfsdeckung durch (HT-)BTES-Anlagen: 50 %, Grenze Auswirkungsraum: ≤ 10 K



Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Zwischenfazit 1.5.1

Ein erstes, GIS-basiertes methodisches Konzept zur Visualisierung der großräumigen thermischen Beeinflussung des oberflächennahen geologischen Untergrunds durch Anlagen zur Nutzung der oberflächennahen Geothermie in Abhängigkeit von obertägigen Wärmebedarfsdichten ist vorhanden. Es wurde am Beispiel von UTES-Anlagen für Schleswig-Holstein umgesetzt, da für dieses Bundesland für die Autoren dieser Studie die besten Vorarbeiten bestanden. Ob und inwieweit die ersten übergeordneten Ergebnisse dieses Konzepts auf andere Bundesländer übertragbar ist, konnte im Rahmen dieser Studie allerdings nicht untersucht werden. Hier besteht zweifellos weiterer Untersuchungsbedarf.

Erste, aufgrund der fehlenden Kenntnis der tatsächlichen geologischen Strukturen noch nicht endgültig in der räumlichen Zuordnung und auch in den aufsummierten Ergebnissen belastbare Ergebnisse deuten darauf hin, dass zumindest für Bundesländer mit ähnlichen quartären und tertiären Sedimenten selbst bei signifikanter thermischer Nutzung des oberflächennahen geologischen Raums als Wärmespeicher die thermischen Auswirkungen auf den Gesamttraum verhältnismäßig klein sein werden. In den urbanen Ballungsräumen mit hohen Wärmebedarfsdichten ist allerdings davon auszugehen, dass in dem hier definierten maximalen Wärmespeicherraum ($\text{km}^2 \cdot 100 \text{ m}$ in den obersten 400 m u. GOK) Temperaturerhöhungen i. d. R. auf Werte $< 25^\circ \text{C}$ auftreten können. Zudem zeigen die Szenarienuntersuchungen, dass eine Reihe technologischer Maßnahmen (Auswahl und Optimierung von (HT-)ATES und (HT-)BTES, Reduktion des Wärmebedarfs durch thermi-

sche Sanierung des Gebäudebestandes etc.) getroffen werden kann, um im Rahmen eines thermischen Managements des geologischen Untergrunds Temperaturzielwerte einzuhalten. Anhand der Szenarienuntersuchungen mit unterschiedlichen Temperaturdefinitionen der thermischen Auswirkungsräume wird allerdings auch deutlich, wie sehr die potentielle Nutzung von (HT-)UTES-Anlagen im urbanen Raum auch von (zukünftigen) regulatorischen Festlegungen abhängig sein wird.

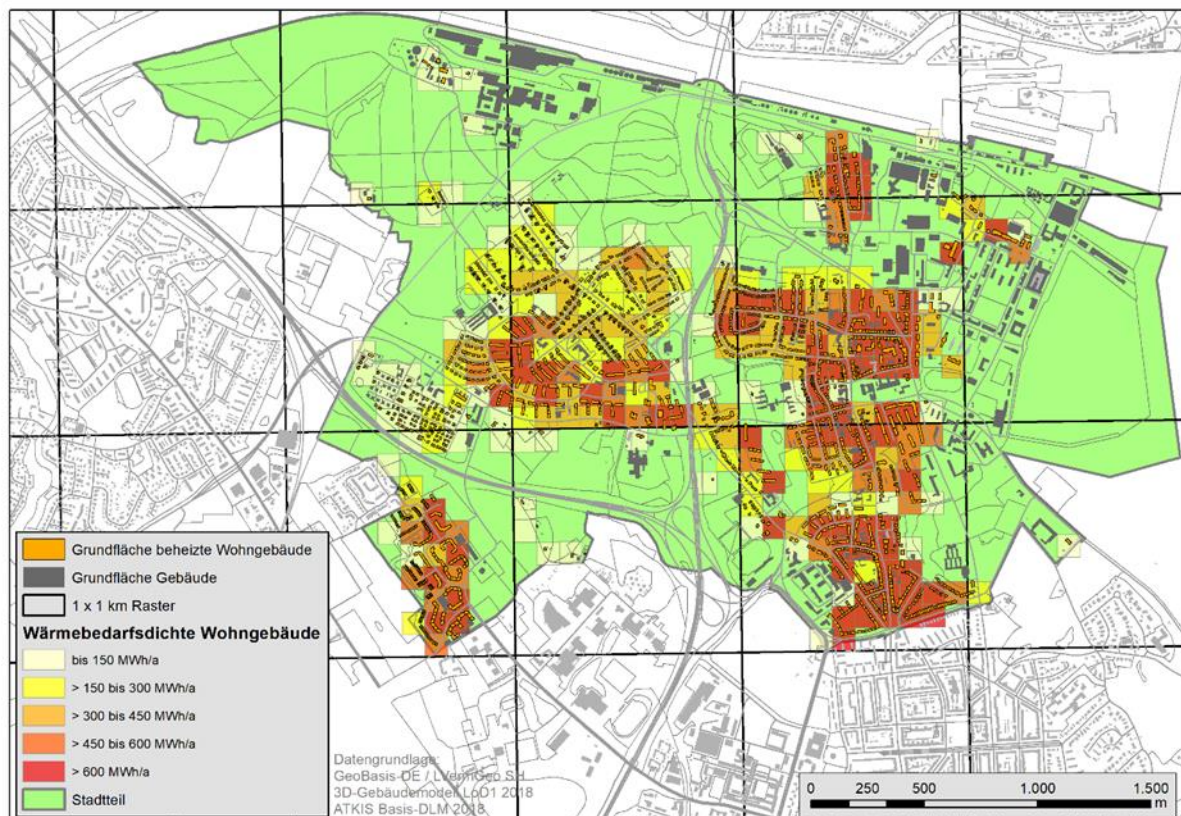
Zukünftig zu berücksichtigen sind neben den thermischen Veränderungen durch UTES-Anlagen (oder auch durch EWS- und WWA-Anlagen) Veränderungen der Grundwassertemperaturen aufgrund von Wärmeeinträgen über bauliche Infrastrukturen und aufgrund des Klimawandels (vgl. Abschn. 1.6), insbesondere auf der Ebene von Städten, Stadtteilen und Stadtquartieren.

1.5.1 Ableitung des untertägigen Raumbedarfs von (HT-)UTES-Anlagen mit detailliert untersetztem Betriebsszenario an einem Beispielstandort

Die untertägigen thermische Raumauswirkungen von (HT-)UTES-Anlagen werden von den jeweiligen Betriebsmodi (vgl. Abschn. 1.4) bestimmt, was aber auf der Raumskala Schleswig-Holsteins in dieser Studie nicht berücksichtigt werden konnte. Um eine realitätsnahe Vorstellung zu entwickeln, wie sich die thermischen untertägigen Raumauswirkungen auf Stadtviertelskala auswirken, wurde dies am Beispiel eines Stadtteils im Norden der Stadt Kiel (s. Abb. 1.24 und 1.25) mit einem detaillierter parametrisierten Betriebsszenario (vgl. Abschn. 1.4) untersucht und visualisiert.

Der betrachtete Stadtteil (772 ha) ist unterschiedlich dicht und gemischt bebaut. Es finden sich Wohngebäude (Einfamilien- und Mehrfamilienhäuser) sowie Nicht-Wohngebäude (Gewerbe- und Industriegebäude) aus verschiedenen Bauperioden (von „vor 1919“ bis „nach 2009“) und in unterschiedlichen Sanierungszuständen. Für den Gebäudebestand des Jahres 2018 wurde ein Gesamtwärmebedarf zum Heizen (Raumwärme und Warmwasser) von 212 GWh/a abgeschätzt (Schwanebeck et al., 2021). Der gegenwärtige Wärmebedarf der Wohngebäude (133 GWh/a) im Stadtteil ergibt dabei die in Abb. 1.35 dargestellten Wärmebedarfsdichte pro Hektar ($\text{MWh}/(\text{ha} \cdot \text{a})$). Zudem wurden ein außentemperaturabhängiges Lastprofil des jährlichen Wärmebedarfs der Gebäude im Stadtteil in täglicher Auflösung erstellt und auch die zeitliche Variabilität bzw. Verfügbarkeit von Wärmequellen (Solarthermie und Abwärme) berücksichtigt.

Für die in diesem städtischen Beispielszenario betrachtete (HT-)ATES-Anlage wurden zudem in der Modellierung die Brunnen der Doubletten so positioniert, dass thermische Synergieeffekte ausgenutzt und der Raumbedarf im Vergleich zur Nutzung einzelner Doubletten verringert werden konnte (vgl. Abschn. 1.4 und Nordbeck et al. (2020)). Die simulierten Wärmespeicher sind zentral in ein idealisiertes Wärmenetz (ohne Berücksichtigung von Wärmeverlusten über die Wärmenetzleitungen) eingebunden. Sie werden jeweils saisonal (überwiegend im Sommerhalbjahr) mit überschüssiger Wärme aus dezentral verorteten Solarthermieranlagen und einer Abwärmequelle beladen und speisen überwiegend im Winterhalbjahr, unterstützt durch eine Wärmepumpe, in das Wärmenetz ein. Es wurde angenommen, dass alle Wohngebäude im Stadtteil an das Wärmenetz angeschlossen sind.

Abbildung 1.35: Gegenwärtige (2018) Wärmebedarfsdichten von Wohngebäuden im Stadtteil

Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Unter Annahme dieses Wärmeversorgungssystems wurde sowohl eine (HT-)ATES-Anlage mit sechs Brunnen-Doubletten als auch eine (HT-)BTES-Anlage mit 2116 Erdwärmesonden modelliert (Abschn. 1.4). In den Betriebsszenarien der Speicher wurden über einen Zeitraum von 30 Jahren jährlich 35 GWh Wärme in die Speicherformation ((HT-)ATES) bzw. den oberflächennahen Untergrund ((HT-)BTES) eingebracht.

Abb. 1.36 stellt die resultierenden thermischen Nutzungs- und Auswirkungsräume des (HT-)BTES im Verhältnis zum Stadtgebiet bzw. zu den Wärmebedarfsdichten der Wohngebäude, die mit den jährlich aus dem Speicher zurückgewonnenen 31 GWh gegenwärtig komplett mit Wärme versorgt werden könnten, dar. Dies entspräche einer Deckung von 15 % des jährlichen Gesamtwärmebedarfs aller Gebäude des Beispielstandorts.

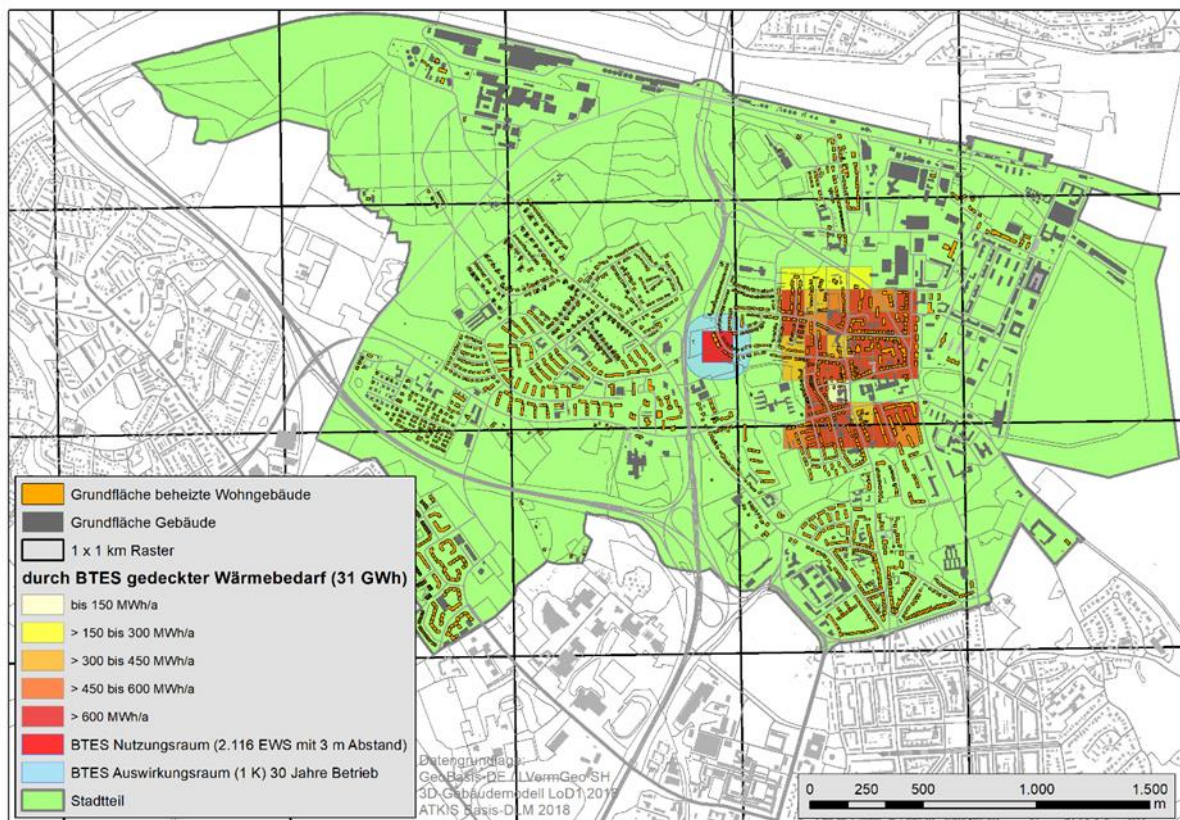
Für den (HT-)ATES visualisiert Abbildung 1.37 den resultierenden thermischen Nutzungs- und Auswirkungsraum der „warmen“ Seite der Brunnen-Doubletten nach 15 Jahren Betrieb im Verhältnis zum Stadtgebiet bzw. zu den Wärmebedarfsdichten der Wohngebäude, die mit den 28 GWh, die jährlich aus dem Speicher zurückgewonnen werden, gegenwärtig versorgt werden könnten. Dies entspräche einer Deckung von 13 % des jährlichen Gesamtwärmebedarfs aller Gebäude im Stadtteil.

Zur Veranschaulichung, wie sich die Proportionen zwischen Speichergröße und wärmeversorgtem Wohnraum in diesem Szenario gestalten, sind in den Abbildungen 1.36 und 1.37 zudem die Flächen der (HT-)BTES-Anlage und (HT-)ATES-Anlage und der damit rechnerisch allein damit versorgten Gebäude dargestellt. Da bei diesen Projektionen der Volumina in eine Fläche die Darstellung sehr stark von den angenommenen geologischen Randbedingungen (z. B. Mächtigkeiten

des Grundwasserleiters bzw. Grundwassergeringleiters) abhängt, sind solche Darstellungen allerdings nicht verallgemeinerbar, sondern vermitteln nur einen Eindruck möglicher Verhältnisse. Richtigerweise sollten eigentlich die Volumina verglichen und dann auch entsprechend dreidimensional dargestellt werden, was im Rahmen dieser Studie jedoch noch nicht umgesetzt werden konnte.

Abbildung 1.36: Anteil der simulierten (HT-)BTES-Anlage an der Deckung des Wärmebedarfs der Wohngebäude und resultierender Nutzungs- und Auswirkungsraum nach 30 Jahren Betrieb

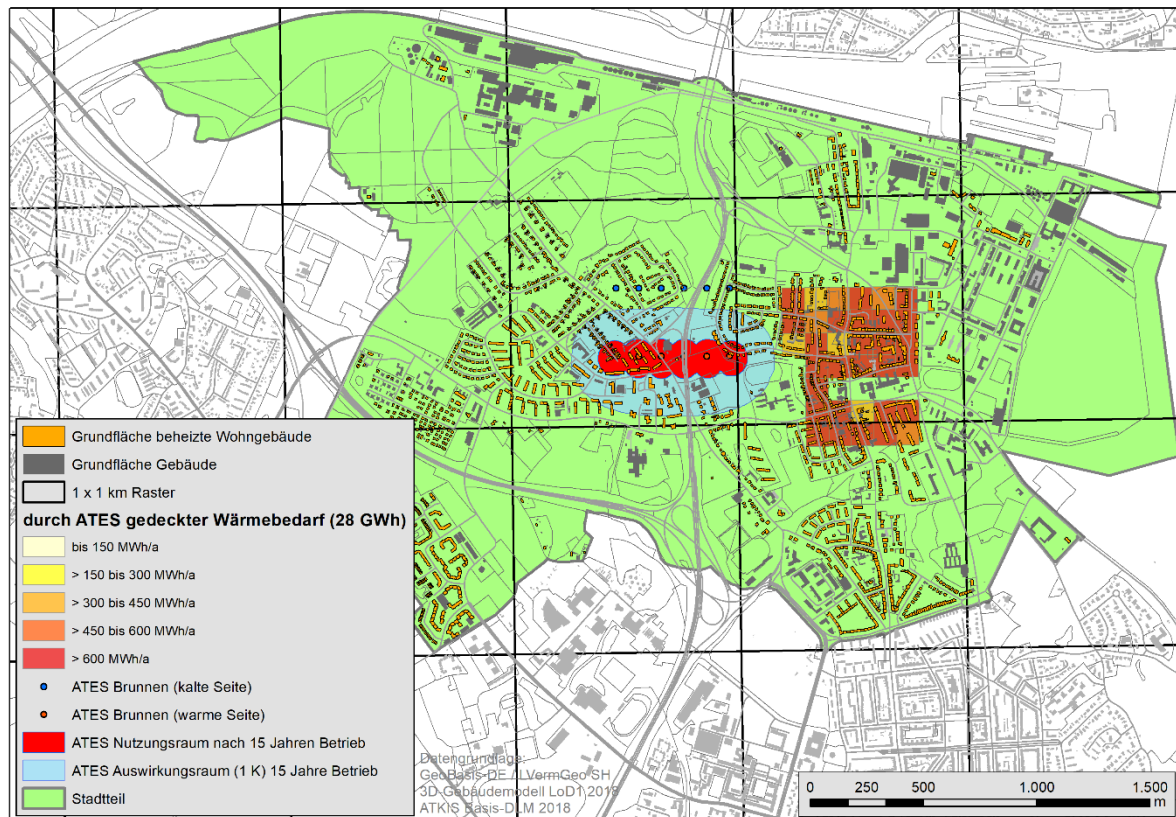
Darstellung als Projektion des untertägigen Volumens an die Geländeoberkante



Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Abbildung 1.37: Anteil des HT-ATES an der Deckung des Wärmebedarfs der Wohngebäude und resultierender Nutzungs- und Auswirkungsraum nach 15 Jahren Betrieb

Darstellung als Projektion des untertägigen Volumens an die Geländeoberkante



Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

1.5.2 Auswirkungen der thermischen Sanierung auf die thermisch-räumlichen (HT-)UTES-Auswirkungen

Um einen Eindruck davon zu bekommen, welchen Einfluss thermische Gebäudesanierungen auf die Proportionen zwischen entsprechend wärmeversorgtem Gebäudebestand und der thermisch-räumlichen Ausdehnung von (HT-)UTES-Anlagen besitzen, wurde diese Fragestellung auch auf Stadtteilskala bearbeitet und visualisiert. Bezüglich der zukünftigen Wärmebedarfsdichten im Stadtteil und daraus resultierenden veränderten Anteilen der Wärmespeicher an der Deckung des Gesamtbedarfs wurde angenommen, dass der jährliche Wärmebedarf für die Bereitstellung von Raumwärme in den Gebäuden durch energetische Sanierungsmaßnahmen bis zum Jahr 2050 um 50 % sinken wird, während der Anteil des Wärmebedarfs für die Bereitstellung von Warmwasser im Stadtteil konstant bleibt (vgl. Abschn. 1.1.2).

Der jährliche Gesamtwärmebedarf im Stadtteil würde so von 212 GWh auf 120 GWh sinken. Für den Wärmebedarf der Wohngebäude im Stadtteil bedeutet dies, dass deren Gesamtwärmebedarf von 133 GWh im Jahr 2018 auf rund 78 GWh im Jahr 2050 sinken würde (Abb. 1.38).

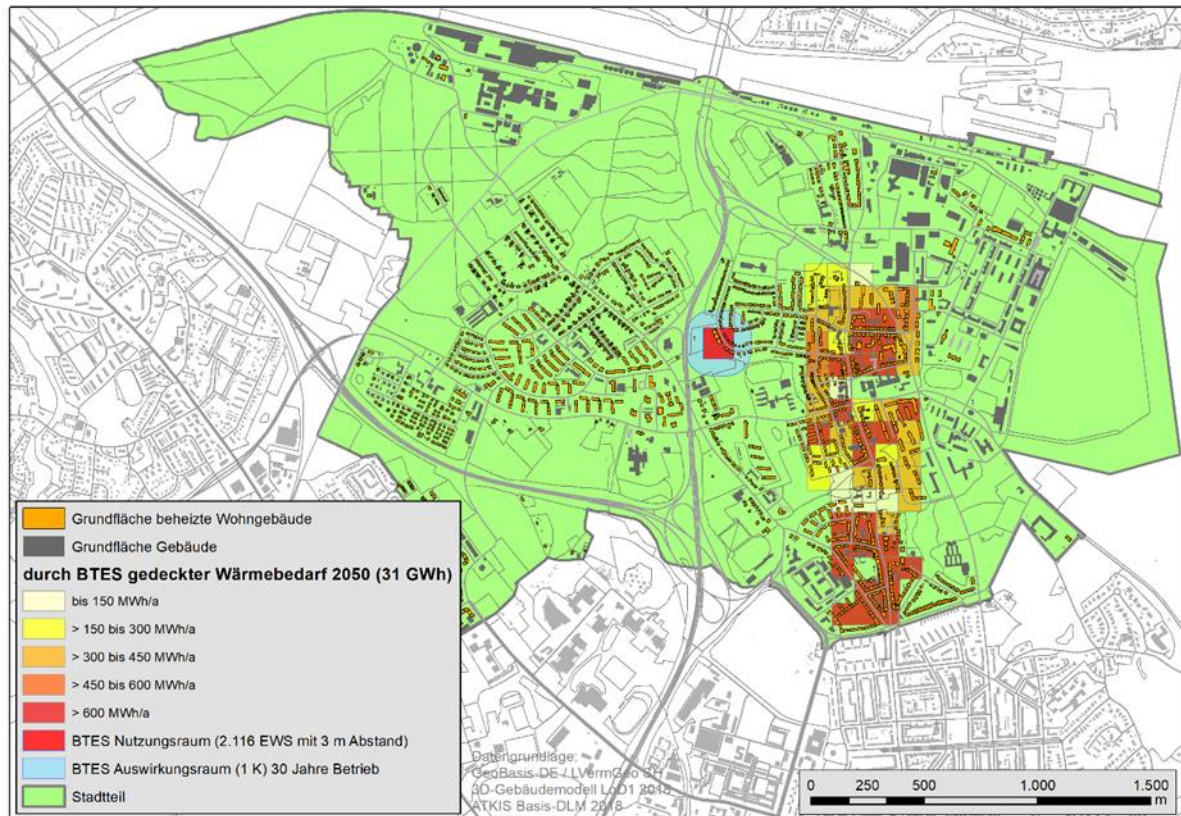
Bei einem gleichbleibenden Wärmeversorgungskonzept würden auch im Jahr 2050 noch 35 GWh jährlich saisonal in (HT-)UTES-Anlagen eingespeichert werden. Bei Einbindung eines (HT-)BTES in das idealisierte Wärmenetz würden bei gleichbleibender Speicherkonfiguration

und gleichem Speicherbetrieb weiterhin 31 GWh pro Jahr ausgespeichert und im Falle der Nutzung eines (HT-)ATES weiterhin 28 GWh/a. Entsprechend würde sich der Anteil der jeweiligen (HT-)UTES-Anlage an der jährlichen Deckung des Wärmebedarfs im Jahr 2050 bei Nutzung eines (HT-)BTES auf 26 % und im Fall eines (HT-)ATES auf 23 % erhöhen. Es könnte also eine größere Fläche (genauer: mehr Wohngebäude) im Stadtteil des Beispielstandorts mit gleichem Speichervolumen wärmeversorgt werden (Abb. 1.38).

Insgesamt machen die Szenarien deutlich, dass eine belastbare Prognose der thermischen Raumwirkung von (HT-)UTES-Anlagen auf Stadtteilskala sehr stark an die angenommenen bzw. prognostizierten spezifischen Randbedingungen gekoppelt ist. Trotz dieser grundsätzlichen und nicht überraschenden Einschränkung verdeutlichen diese exemplarischen Szenarien jedoch auch, dass es weitgehend eine Frage des untertägigen thermischen Managements und des zukünftigen übergeordneten Wärmeversorgungskonzepts ist, welche thermischen Auswirkungen potentiell auftreten können. Mit einer intensiven Verringerung des Wärmebedarfs und der Nutzung „externer“ Energiequellen (i. d. R. weiterer Ausbau von Windenergie- und PV-Anlagen) lassen sich der Bedarf an UTES-Anlagen und gegebenenfalls auch an oGT-Anlagen sowie damit auch die thermischen Auswirkungen stark verringern. Falls jedoch die urbane Umweltwärme auch vor dem Hintergrund der zunehmenden Problematik von „Urban Heat Islands“ und der temporären Überwärmung der Städte saisonal stärker genutzt werden soll, dann zeigen die Szenarien (für die betrachteten geologischen Randbedingungen), dass eine hybride Bewirtschaftung des geologischen Untergrunds zur Wasser- und Wärmeversorgung selbst in urbanen Zentren mit hohen Wärmebedarfsdichten möglich erscheint. Räumlich stehen große Wärmespeicherkapazitäten zu Verfügung, um den Ausbau anderer Energiequellen nicht zu überfordern sowie eine gewisse urbane Resilienz gegenüber Extremwetterereignissen zu erreichen.

Abbildung 1.38: Angenommene bzw. prognostizierte Wärmebedarfsdichten von Wohngebäuden im Stadtteil im Jahr 2050 und Anteil des (HT-)BTES an der Deckung des zukünftigen Wärmebedarfs der Wohngebäude sowie resultierender Nutzungs- und Auswirkungsraum nach 30 Jahren Betrieb

Darstellung als Projektion des untertägigen Volumens an die Geländeoberkante



Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

1.5.3 Ableitung des untertägigen Raumbedarfs von oGT-Anlagen (Wärmeentzug mittels EWS und WWA) an einem Beispielstandort

Analog zur Visualisierung des untertägigen Raumbedarfs von (HT-)UTES-Anlagen kann auch für oGT-Anlagen zum Wärmeentzug der Raumbedarf bei möglichst hohen Anteilen an der Wärmebedarfsdeckung anhand konkreter Beispiele berechnet werden. Betrachtet wurde ein rund 13 ha großes Stadtquartier, das mit mehrgeschossigen Mehrfamilien- und Hochhäusern mit Baujahren zwischen 1950 und 1970 bebaut ist (vgl. Abschn. 1.4 und Tissen et al., 2019a).

Abbildung 1.39 visualisiert den jährlichen Gesamtwärmebedarf der Wohngebäude im Quartier (Raumwärme- und Warmwasserbedarf: 10 GWh für den ursprünglichen gesamten Bauzustand, 5 GWh nach kompletter energetischer Sanierung) pro Hektar als Wärmebedarfsdichte ($\text{MWh}/(\text{ha} \cdot \text{a})$).

Wie in Abschnitt 1.4 und von Tissen et al. (2019a) detaillierter beschrieben, wurde für das Beispiel untersucht, ob und zu welchem Anteil eine Deckung des Wärmebedarfs der Wohngebäude mittels Wärmepumpen vor und nach energetischer Sanierung und bei ausschließlicher Nutzung der oberflächennahen Geothermie auf der Fläche bzw. im Volumen des Stadtquartiers möglich ist.

Dabei wurde eine maximale Ausnutzung der verfügbaren Fläche zur Abteufung von Bohrungen für EWS- und WWA-Systeme angenommen. Bohrungen unterhalb von Gebäudegrundflächen wurden ausgeschlossen und Abstände von 2 m zu Gebäuden und von 10 m zu anderen EWS-Bohrungen angesetzt. Für Reinjektionsbrunnen von WWA wurde die Einhaltung eines Abstands zu anderen Reinjektionsbrunnen entsprechend der Ausdehnung der 1-K-Abkühlung-Isotherme der jeweils aus dem Betriebsszenario resultierenden Temperaturfahnen vorausgesetzt.

Abbildung 1.39: Wärmebedarfsdichten (MWh/(ha · a)) im Stadtquartier vor und nach energetischer Sanierung der Wohngebäude



Links: Wärmebedarfsdichten im Stadtquartier vor energetischer Sanierung der Wohngebäude; rechts: Wärmebedarfsdichten im Stadtquartier nach energetischer Sanierung der Wohngebäude.

Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. Datengrundlage: Tissen et al. (2019a).

Aus den genannten räumlichen Einschränkungen resultierte, dass 974 Bohrungen für EWS und 133 Bohrungen für WWA-Reinjektionsbrunnen mit einer Filterlänge von 13 m bei Nutzung nur des oberen zweier vorhandener Aquifere in dem Stadtquartier möglich wären. Bei Nutzung beider Aquifere wären 185 Bohrungen für Reinjektionsbrunnen mit einer Filterlänge von 31 m auf der verfügbaren Fläche möglich.

Bei der Abschätzung der möglichen Wärmebereitstellung durch die installierbaren EWS- und WWA-Systeme wurden jeweils zwei Modellierungsansätze genutzt und damit unterschiedliche Betriebsmodi bzgl. Sondenlänge, Filterlänge, Grundwasserfluss und Entzugsleistung modelliert (Tissen et al., 2019a).

In Abbildung 1.40 ist exemplarisch der resultierenden Raumbedarf (der thermische Auswirkungsraum der 1-K-Abkühlung) von zwei der 14 Betriebsszenarien (links: 974 EWS mit einer

Länge von 100 m und 60 W/m Wärmeentzugsleistung ohne Berücksichtigung von Grundwasserfluss; rechts: 133 Reinjektionsbrunnen von WWA mit einer Filterlänge von 13 m) visualisiert.

Bei Nutzung der oberflächennahen Geothermie mittels der in Abbildung 1.40 visualisierten 974 EWS-Systeme mit einem „Coefficient of Performance“ (COP) von 4 ließen sich laut Tissen et al. (2019a) jährlich rund 13 GWh Wärme bereitstellen, was den Wärmebedarf des Stadtquartiers nach energetischer Sanierung der Wohngebäude zu rund 260 % decken würde.

Abbildung 1.40: Thermische Auswirkungsräume (1-K-Abkühlung) durch EWS und WWA sowie jeweils gedeckter Wärmebedarf pro Hektar

Darstellung als Projektion des untertägigen Volumens an die Geländeoberkante



Links: thermische Auswirkungsräume durch EWS; rechts: thermische Auswirkungsräume durch WWA.

Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. Datengrundlage: Tissen et al. (2019a).

Bei Nutzung der oberflächennahen Geothermie mittels der in Abbildung 1.40 visualisierten 13 WWA-Systeme (ebenfalls mit einem COP von 4) ließen sich jährlich insgesamt maximal rund 6 GWh ($133 \cdot 43.730 \text{ kWh/a}$ bei einer Pumpflussrate von 0,2 l/s) Wärme bereitstellen, was den jährlichen Wärmebedarf des Stadtquartiers nach energetischer Sanierung der Wohngebäude immer noch zu etwa 120 % decken würde.

Unter den gleichen Einschränkungen wie bei den Beispielen zur untertägigen thermischen Raumwirkung von (HT-)UTES-Anlagen zeigen die Beispielszenarien für oGT-Anlagen erstens, dass auch mit einem reinem Wärmeentzug eine Wärmeversorgung innerhalb der Grenzen eines Wohnviertels energetisch darstellbar und der dadurch thermisch beeinflusste Raum quantitativ

beschreibbar ist. Aufgrund der geringeren Entzugsleistung von oGT-Anlagen wird auch an diesem Beispiel deutlich, dass die bohrtechnischen Eingriffe in den geologischen Untergrund größer sind.

Resümee 1.5

Es stehen numerische Simulationswerkzeuge zur Verfügung, um thermische Nutzungs- und Auswirkungsräume von UTES-, EWS- und WWA-Anlagen für plausible Betriebsszenarien in ihrer zeitlich-räumlichen Dynamik abzubilden, GIS-basiert zu visualisieren und als Planungsgrundlage zu verwenden.

Essenziell sind hierfür zum einen hinreichend räumliche aufgelöste, parametrisierte und belastbare geologische und hydrogeologische 3D-Modelle zur realitätsnahen Abbildung geologischer Randbedingungen.

Zudem besteht jedoch auch ein essenzieller Bedarf an hinreichend zeitlich aufgelösten Wärme-Lastgängen und Erzeugungsprofilen insbesondere zur Simulation des Betriebs von UTES-Anlagen als Bestandteil komplexer Wärmeversorgungssysteme (Kühlen und Heizen) und deren Einbindung in zukünftige kommunale Energieversorgungssysteme.

Der modelltechnisch nächste (große) Schritt muss die großräumige Simulation natürlicher, städtebaulich bedingter und durch EWS-, WWA- und UTES-Systeme induzierter untertägiger Wärmeströme in Abhängigkeit von Wärmebedarfsdichten (Heizen und Kühlen) und deren zeitlicher Veränderungen (saisonal und als zeitlicher Trend über Dekaden) sein, um eine nachhaltige und klimawandeladaptive Wärmeversorgung von Städten zu erreichen.

Derzeit ungeklärt ist, ob der dafür zur Verfügung stehende untertägige Raum in urbanen Gebieten unter den aktuell bestehenden **Restriktionen** eine derartige klimaneutrale und klimawandeladaptive Bewirtschaftung des geologischen Untergrunds zulässt.

1.6 Restriktionszonen für den Ausbau der oberflächennahen Geothermie

In 15 Bundesländern (außer Bremen) stellen Leitfäden zur Nutzung der oberflächennahen Geothermie (oGT) eine Handlungsgrundlage für Behörden, Planungsbüros und Bohrunternehmen bei der Genehmigung und beim Bau von Anlagen zur Nutzung der oGT dar (UMBW, 2005; Naumann et al., 2008; Grünert et al., 2009; LLUR – Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Landes des Landes Schleswig-Holstein, 2011; LAGB – Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt, 2012; Ast et al., 2012; BWP et al., 2012; TLVwA – Thüringer Landesverwaltungsamt, 2013; LfULG – Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 2014; Obst et al., 2015; BUE – Behörde für Umwelt und Energie, 2016; Rumohr und Hoffmann, 2019; LANUV – Landesamt für Naturschutz Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, 2019; MUEEF – Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz, 2020; SenUVK – Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin, 2022).

Die detaillierte Sichtung dieser 15 Leitfäden zeigte, dass bei der behördlichen Genehmigung von Anlagen zur Nutzung der oGT unterschiedliche Arten von Restriktionen mit unterschiedlichem Zweck eine Rolle spielen. Diese haben überwiegend einen räumlichen Bezug, schränken das vorhandene Ausbaupotenzial der oGT- bzw. UTES-Anlagen ein und werden daher im Folgenden unter dem Begriff „Restriktionszonen“ zusammengefasst und diskutiert.

Dies betrifft sowohl die obertägige Fläche, die zum Abteufen von Bohrungen z. B. für Erdwärmesonden oder für den Bau von Brunnen zur Verfügung steht, als auch das untertägig verfügbare Volumen zur thermischen Nutzung durch Entzug oder Speicherung von Wärme, das durch die aktuell genehmigungsfähige Tiefe der geplanten Bohrungen limitiert werden kann.

Die Sichtung der von den jeweils zuständigen Landesbehörden herausgegebenen Leitfäden sowie von Merkblättern und Arbeitshilfen zu diesen Leitfäden ergab, dass der Fokus dieser Unterlagen meist auf der Planung und Genehmigung von EWS-Anlagen (mit einer Leistung < 30 kW) zum Entzug von Wärme mittels Wärmepumpen liegt. Die Fokussierung auf die Genehmigung von EWS-Anlagen in den Leitfäden ist vermutlich zum einen durch die hohe Anzahl bereits existierender Systeme dieses Anlagentyps begründet, zum anderen kam es bei diesen Systemen in der Vergangenheit zu Schadensfällen, welche die Notwendigkeit behördlicher Regulierung aufgezeigt haben (Fleuchaus und Blum, 2017).

Die meisten der im Folgenden diskutierten Restriktionszonen gelten allerdings nicht allein für EWS- bzw. WWA-Systeme zum Entzug von Wärme. In der VDI-Richtlinie zu „unterirdischen, thermischen Energiespeichern“ (VDI, 2001b) wird beispielsweise erläutert, dass für ATES-Anlagen bei Genehmigungsverfahren prinzipiell dieselben Aspekte des Genehmigungsrechts laut VDI 4640 Blatt 1 gelten wie bei Anlagen zum reinen Entzug von Wärme. Danach wären viele Restriktionsgründe für EWS- und WWA-Systeme (z. B. bezüglich des Durchteufens sensibler Bereiche des geologischen Untergrunds) in ähnlicher Weise auch für den Bau und Betrieb von Anlagen zur Wärmespeicherung zu berücksichtigen.

Allerdings wäre aus Sicht der Autoren dieser Studie zukünftig eine Unterscheidung bzw. eine Präzisierung der Restriktionen bzgl. der verschiedenen thermischen Nutzungssysteme wünschenswert. Beispielsweise weisen EWS- und BTES-Anlagen ähnliche Bauweisen auf, unterscheiden sich aber deutlich in ihrem geologischen Einsatzbereich (EWS bevorzugt in Grundwasserleitern, BTES-Anlagen bevorzugt in Grundwassergeringleitern), ihren Funktionsweisen (und damit z. B. im Hinblick auf empfehlenswerte Bohrabstände und/oder die betriebsbedingten Temperaturbereiche) und ihren thermischen Auswirkungsräumen. Die Forderung in den Leitfäden, mindestens bei Anlagen mit Leistungen z. B. > 30 kW numerische Simulationen zu den großräumigen thermischen, hydraulischen, hydrochemischen und mikrobiologischen Auswirkungen des Anlagenbetriebs auf den geologischen Untergrund durchzuführen, deutet auch bereits in diese Richtung. Anzuregen ist in diesem Kontext, dass nicht allein die Leistung einer Anlage herangezogen werden sollte, sondern die akkumulierte Leistung pro Volumeneinheit des (oberflächennahen) geologischen Untergrunds. Damit würde dem Umstand Rechnung getragen, dass die Raumwirkung pro Leistungseinheit je nach Anlagentyp sehr unterschiedlich sein kann und auch die Akkumulation vieler „kleiner“ Anlagen mit unterschiedlichen Eigentumsverhältnissen und Nutzungsprofilen kaum prognostisch zu bewerten ist.

Neben den in den Leitfäden behandelten Restriktionszonen ergeben sich aktuell im Rahmen der deutschlandweiten Suche nach einem Standort für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle zudem temporär weitere Restriktionszonen für die Nutzung der oGT im Allgemeinen (BASE – Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung, 2021). Zur Sicherung möglicher Endlagerstandorte in einer Tiefe zwischen 300 m und 1500 m u. GOK müssen aktuell Bohrungen und geplante untertägige Nutzungen mit einer Teufe von mehr als 100 m dahingehend überprüft werden, ob sie in den inzwischen identifizierten „Teilgebieten“ (BGE – Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, 2020) Veränderungen verursachen könnten, welche die Eignung des jeweiligen Teilgebiets als möglicher Endlager-Standort beeinträchtigen können, so dass die Genehmigung daher derzeit nicht möglich ist. Da die klimaneutrale Transformation der Wärmeversorgung und

damit möglicherweise der Bau und Betrieb der oGT- und UTES-Anlagen auch zeitkritisch ist, regen die Verfasser dieser Studie an, das Endlagersuchgesetz in der Weise zu modifizieren, dass der Bau und Betrieb von oGT- und UTES-Anlagen in Regionen mit Wärmebedarfsdichten z. B. $> 20 \text{ GWh}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ Vorrang bekommt. In der Regel ist bei solchen Wärmebedarfsdichten eine hohe Besiedlung gegeben, die den Bau von Endlagern für radioaktive Stoffe in diesen Gebieten unwahrscheinlich erscheinen lässt.

1.6.1 Übersicht zur aktuellen Festlegung von Restriktionszonen aufgrund obertägiger Bebauung und untertägiger Infrastruktur

Die Sichtung der Leitfäden zur Nutzung der oGT hat gezeigt, dass bei der Genehmigung geothermischer Anlagen Restriktionen aufgrund bereits vorhandener obertägiger Bebauung (Gebäude und Grundstücksgrenzen) und untertägiger Infrastruktur (bereits existierende Anlagen zur Nutzung der oGT, Versorgungsleitungen) zum Tragen kommen können. Vorrangiger Zweck dieser in den Leitfäden über Abstände definierten Restriktionszonen ist es, eine angenommene nachteilige Beeinträchtigung bestehender Infrastrukturen durch Bau und Betrieb (Schäden an Gebäuden, Leitungen usw.) und eine gegenseitige thermische Beeinflussung benachbarter Anlagen zur Nutzung der oGT zu verhindern. Weiterhin werden über einzuhaltende Abstände zu Grundstücksgrenzen gesetzliche Rahmenbedingungen aus dem Bergrecht bzgl. der Bewilligung einer Gewinnung bergfreier Bodenschätze als Restriktionszonen wiedergegeben (Hähnlein et al., 2011).

Tabelle 1.20 gibt einen Überblick über die in den Leitfäden aufgeführten Restriktionen für Bohrungen zur Nutzung der oGT und die jeweils zu berücksichtigenden Abstände. Die Leitfäden orientieren sich dabei überwiegend an den Vorgaben aus den verschiedenen Blättern der Richtlinie Nr. 4640 des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI), die jedoch inzwischen, meist nach Veröffentlichung der Leitfäden, überarbeitet wurden (VDI, 2001a; VDI, 2001b; VDI, 2004; VDI, 2010; VDI, 2019). Die in den Blättern der Richtlinie ursprünglich genannten Abstände wurden allerdings in den einzelnen Leitfäden der Bundesländer bereits in unterschiedlichem Maß umgesetzt.

Eine explizit fachliche Begründung für die jeweils angesetzten Abstände findet sich weder in den Leitfäden noch in der VDI-Richtlinie. Dies gilt sowohl für den angesetzten minimalen Abstand zwischen einzelnen Sonden einer Anlage, der im Blatt 2 der VDI 4640 für Berechnungsbeispiele zur Planung und Auslegung pauschal mit 6 m angenommen wurde (VDI, 2019), als auch für den jeweils notwendigen Abstand zu Sonden anderer EWS-Anlagen auf benachbarten Grundstücken.

Allein einige wenige Modellierungs- und Monitoring-Arbeiten lassen auf eine nur noch geringe thermische Beeinflussung ($< 1 \text{ K}$) benachbarter EWS-Anlagen bei einem Abstand von 7 m oder 10 m schließen; diese Werte gelten aber nur für die in den Arbeiten jeweils modellierten bzw. beobachteten spezifischen Anwendungsfälle (Stober und Bucher, 2014).

Tabelle 1.20: Restriktionszonen für Bohrungen zur Nutzung der oberflächennahen Geothermie, (im Wesentlichen von EWS) aufgrund vorhandener obertägiger Bebauung und untertägiger Infrastruktur

Abstände [m] laut Leitfäden der Bundesländer

Bundesland	zu anderen EWS innerhalb einer Anlage	zu anderen EWS auf Nachbargrundstück	zur Grundstücksgrenze	zu Gebäuden	zu untertägigen Leitungen
laut VDI 4640	2001^a: 5 – 6 2019^b: 6	10^c	-	2^c	2001^a: 0,7 2019^b: 1
Baden-Württemberg	10	-	-	-	-
Bayern	6	-	3	-	0,7
Berlin	6	10	-	2	1 ^d
Brandenburg	5 – 6	-	-	1 – 3	-
Bremen	-	-	5*	-	-
Hamburg	5 – 6	-	5	-	3 ^e
Hessen	5 – 6	10	5	-	-
Mecklenburg-Vorpommern	5 – 6	-	5	-	-
Niedersachsen	5 – 6	-	5	-	-
Nordrhein-Westfalen	6	6	3	-	-
Rheinland-Pfalz	6	-	-	-	-
Saarland	5	-	5	2	3 ^e
Sachsen	5 – 6	-	5	-	-
Sachsen-Anhalt	6	-	5	-	0,7
Schleswig-Holstein	5 – 6	10	5 – 6	-	-
Thüringen	5 – 6	-	5	-	-

a) VDI 4640 Blatt 2, 2001 (VDI, 2001a), b) VDI 4640 Blatt 2, 2019 (VDI, 2019), c) VDI 4640 Blatt 1, 2010 (VDI, 2010), d) gilt für Leitungen allgemein, spezielle Mindestabstände zu Fernwärme- und Abwasserleitungen laut Vorgaben Betreiber, e) nur zu Fernwärmeleitungen.

* in Bremen laut dem Antrag auf Erlaubnis zur Errichtung einer Erdwärmegewinnungsanlage.

Die in vielen Leitfäden genannten Abstände von Bohrungen zu Grundstücksgrenzen (Tab. 1.20) sind in der VDI-Richtlinie nicht konkret beziffert; sie werden in den Leitfäden meist aus dem notwendigen Abstand zwischen zwei Sonden (5 – 6 m) abgeleitet. Hähnlein et al. (2011) sehen diese grundstücksbezogene Betrachtungsweise vor allem in Hinblick auf den Ausschluss einer thermischen Beeinflussung von Nachbargrundstücken kritisch, da diese die Nutzung bzw. den

Ausbau der oGT in dicht bebauten städtischen Gebieten sowie in Neubaugebieten mit kleinen Parzellen erschweren kann.

Zusätzlich werden in den Leitfäden Abstände von Bohrungen zu Gebäuden und Leitungen empfohlen bzw. vorgegeben (Tab. 1.20). Diese Restriktionszonen sollen laut VDI-Richtlinie 4640 Blatt 2 (VDI, 2019) die Standfestigkeit von Gebäuden sichern sowie eine thermische Beeinflussung von Ver- und Entsorgungsleitungen verhindern. Wird der empfohlene Abstand unterschritten, soll eine thermische Dämmung der entsprechenden Leitungsabschnitte vorgenommen werden.

Die bisher diskutierten Restriktionszonen in Form von Abständen werden in den Leitfäden der Bundesländer nur bzgl. Bohrungen für EWS-Anlagen zum reinen Entzug von Wärme definiert. Entsprechende Abstandregelungen bzgl. Bohrungen bzw. Brunnen für offene Systeme (z. B. für WWA) zum Heizen und Kühlen werden in den Leitfäden nicht explizit genannt. Die Leitfäden einiger Bundesländer treffen jedoch zu dieser Nutzungsart der oGT textliche Aussagen bezüglich weiterer Restriktionen, die nicht über Abstände definiert werden (geeignete Grundwasserbeschaffenheit, ausreichender Grundwasserzufluss) (Grünert et al., 2009; Ast et al., 2012; (LANUV, 2019).

Abstandsregelungen explizit für Bohrungen für untertägige thermische Energiespeicher (UTES-Anlagen) als Nutzungsart der oberflächennahen Geothermie finden sich in den Leitfäden hingegen nicht.

Wie bereits ausgeführt, besteht hier Handlungsbedarf bezüglich anlagentypspezifischer Leitfäden. Für BTES-Anlagen können beispielsweise geringere Abstände als die, die in den bisherigen Leitfäden für EWS innerhalb einer Anlage angegeben werden, sogar gewünscht sein, um Wärmeverluste in den umgebenden geologischen Untergrund zu minimieren.

Entsprechender Handlungsbedarf besteht bzgl. Leitfäden zur Planung, zum Bau und zum Monitoring von ATES-Anlagen. Erste Ansätze zur Definition von Restriktionszonen für solche Anlagen können aus den Hinweisen für WWA-Systeme in den Leitfäden abgeleitet werden, allerdings wird dies in den Leitfäden nicht explizit aufgegriffen.

Zwischenfazit 1.6.1

In den Leitfäden der Bundesländer zur Nutzung der oberflächennahen Geothermie sind Restriktionszonen aufgrund bereits vorhandener oberirdiger Bebauung und unterirdiger Infrastruktur in unterschiedlichem Umfang und in sehr unterschiedlicher Ausprägung über einzuhaltende Abstände definiert. Diese umfassen überwiegend Abstände zu anderen Sonden und EWS-Anlagen, zu Grundstücksgrenzen, zu Gebäuden und zu Leitungen.

Die in den Leitfäden genannten Abstände basieren überwiegend auf den Angaben in den Blättern der VDI-Richtlinie 4640, wobei die jeweiligen konkreten Ausprägungen in Metern dort nicht begründet werden und in den jeweiligen Leitfäden der Bundesländer variieren.

Generell liegt der Fokus der Leitfäden zur Nutzung der oberflächennahen Geothermie aktuell überwiegend auf der Regelung der Genehmigung geschlossener Einzelanlagen zum reinen Entzug von Wärme. Für die genehmigungsfähige Planung größerer Verbundsysteme und von Anlagen zur untertägigen thermischen Energiespeicherung (UTES) können dadurch Widersprüche entstehen.

Daher wäre aus Sicht der Autoren dieser Studie zukünftig eine Unterscheidung bzw. eine Präzisierung der Restriktionen bezüglich der verschiedenen thermischen Nutzungssysteme (z. B. EWS-System, WWA-System, BTES-System, ATES-System) wünschenswert.

Die Forderung in den Leitfäden, mindestens bei thermischen Anlagen mit bestimmten Leistungen (z. B. > 30 kW) numerische Simulationen zu den großräumigen thermischen, hydraulischen, hydrochemischen und mikrobiologischen Auswirkungen des Anlagenbetriebs auf den geologischen Untergrund durchzuführen, deutet auch bereits in diese Richtung.

Anzuregen ist in diesem Kontext, dass nicht allein die Leistung einer Anlage herangezogen werden sollte, sondern die akkumulierte Leistung pro Volumeneinheit des (oberflächennahen) geologischen Untergrunds. Damit würde dem Umstand Rechnung getragen, dass die Raumwirkung pro Leistungseinheit abhängig vom Anlagentyp sehr unterschiedlich sein kann und auch die Akkumulation vieler „kleiner“ Anlagen mit unterschiedlichen Eigentumsverhältnissen und Nutzungsprofilen kaum prognostisch zu bewerten ist.

1.6.2 Aktuelle Festlegung von Restriktionszonen bei bestehender Grundwassernutzung zur Wasserversorgung

Die gesichteten Leitfäden der Bundesländer zur Nutzung der oGT nennen neben Abständen zu bereits existierender obertägiger Bebauung und untertägiger Infrastruktur (vgl. Abschn. 1.6.1) insbesondere auch Aspekte des Grundwasserschutzes als Restriktionen für die Genehmigung von Anlagen. Diese Restriktionen werden in den Leitfäden über Wasserschutzgebietszonen und über Abstände zu Anlagen der Wasserentnahme als Restriktionszonen definiert und verortet.

Tabelle 1.21 stellt den in den jeweiligen Leitfäden benannten genehmigungsrechtlichen Status Quo bzgl. dieser Restriktionszonen in den Bundesländern dar. Ziel und Zweck dieser Restriktionen ist laut den Leitfäden der Schutz der Grundwasserressourcen und die Erhaltung des natürlichen bzw. aktuellen Zustands des Grundwassers insbesondere in schutzwürdigen Gebieten für die Trinkwasser-, Mineralwasser-, Brauchwasser- und Heilquellennutzung.

Es geht dabei zumeist darum, den Eintrag wassergefährdender Stoffe im Fall einer Leckage aus EWS-Anlagen in das anderweitig genutzte Grundwasser zu verhindern (Struß et al., 2020), aber auch bakteriologische Beeinträchtigungen durch Entnahme und Wiedereinleitung von Grundwasser bei Nutzung offener Systeme werden angeführt (LANUV, 2019). Zudem sollen Änderungen der hydraulischen Verhältnisse vermieden werden, da es dadurch u. a. zum Austreten artesisch gespannten Grundwassers, zum Versiegen von Quellen und zur Änderung der chemischen Zusammensetzung des jeweiligen Grundwassers kommen könnte.

Die Leitfäden berufen sich zur Begründung dieser Restriktionszonen, in denen insbesondere Bohrungen für die Installation von EWS nicht oder nur bedingt genehmigungsfähig sind, auf die rechtlichen Vorgaben im Bereich des Wasserrechts (u. a. Wasserhaushaltsgesetz, Wassergesetz des jeweiligen Bundeslands, Rechtsverordnungen für Wasser- und Heilquellenschutzgebiete, Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen) (LAWA – Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, 2019).

Zusätzlich wird im Blatt 1 der VDI-Richtlinie 4640, auf welche sich die Leitfäden oftmals beziehen, darauf hingewiesen, dass die Versorgung der Bevölkerung mit Trinkwasser uneingeschränkten Vorrang vor der thermischen Gewässernutzung haben soll (VDI, 2001b). Insbesondere die Schutzzonen I und II ausgewiesener Wasserschutzgebiete (WSG) soll en daher laut den Leitfäden von der Nutzung der oGT freigehalten werden (Tab. 1.21), um den Schutz von Trinkwasser sicherzustellen. In der Schutzzone III ist in einigen Bundesländern nach Prüfung des Einzelfalls eine Genehmigung unter bestimmten Umständen möglich (DVGW – Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., 2013; LAWA, 2019).

In den jeweiligen Verordnungen zu den ausgewiesenen Wasserschutzgebieten können sich jedoch Festlegungen zur Zulässigkeit in den einzelnen WSG-Zonen finden, die von den Aussagen im Leitfaden des jeweiligen Bundeslands abweichen und die bei der Genehmigung ausschlaggebend sind (Kübert et al., 2009).

In den Leitfäden der Bundesländer Brandenburg, Hamburg und Schleswig-Holstein werden zusätzlich für Trinkwassergewinnungsgebiete ohne ausgewiesene Wasserschutzgebietszonen pauschale Abstände von oGT zur Wasserentnahmestelle genannt. Damit werden zusätzliche Restriktionszonen definiert, innerhalb derer eine Genehmigung von Bohrungen zur Nutzung der oGT generell unzulässig oder nur nach einer Einzelfallprüfung möglich ist (Tab. 1.21).

Generell erscheint eine bundesländerübergreifende Vereinheitlichung der regulativen Ansätze zur Prüfung der Genehmigungsfähigkeit von oGT- und UTES-Anlagen wünschenswert. Aktuell sind der Ablauf des wasserrechtlichen Prüfschemas und der Umfang des Antrags zur Genehmigung entsprechender Anlagen von den Anforderungen der im jeweiligen Bundesland bzw. Landkreis zuständigen Genehmigungsbehörde abhängig (Kübert et al., 2009).

Tabelle 1.21: Restriktionszonen aufgrund bereits vorhandener Grundwassernutzung

Zulässigkeit von Anlagen zur Nutzung der oGT (insbesondere EWS) laut Leitfäden der Bundesländer

Bundesland	Nicht zulässig in ...	Bedingt zulässig (Einzelfallprüfung) in ...
Baden-Württemberg	- Wasser- und Quellenschutzgebiet Zone I bis III/IIIA - Abstand entsprechend 50 Tage Fließzeit im Zustrom von sensiblen Grundwassernutzungen und -vorkommen ohne Schutzgebiet	- Wasser- und Quellenschutzgebiet Zone I bis III/IIIA wenn Nutzung im Geringleiter bzw. außerhalb des genutzten GW-Leiters stattfinden soll, Zone III B
Bayern	- Wasser- und Quellenschutzgebiet Zone I bis II	- Wasser- und Quellenschutzgebiet Zone III B und III/2
Berlin	- Wasserschutzgebiet	/
Brandenburg	- Wasserschutzgebiet Zone I und II	- Wasserschutzgebiet Zone III A - Wasserschutzgebiet Zone III und Wasser- und Mineralwasser-Gewinnungsgebiet bis 1000 m Entfernung von der Wasserfassung im Einzugsgebiet
Bremen	- <i>kein Leitfaden vorhanden</i>	- <i>kein Leitfaden vorhanden</i>
Hamburg	- Wasserschutzgebiet Zonen I und II - Umkreis 100 m um Brunnen der Trinkwasserversorgung und Trinkwassernotbrunnen - Umkreis ab 100 m bis 1000 m um Trinkwasserbrunnen, wenn die Nutzung im Trinkwasser-Nutzhorizont stattfinden soll - Umkreis ab 100 m bis 500 m um Trinkwassernotbrunnen, wenn die Nutzung im Trinkwasser-Nutzhorizont stattfinden soll - tiefe Grundwasserleiter und Rinnenwasserkörper	- Umkreis ab 100 m bis 1000 m um Trinkwasserbrunnen und bis 500 m um Trinkwassernotbrunnen, wenn der Nutzhorizont durch Deckschicht vom Trinkwasserhorizont geschützt ist - Umkreis ab 1000 m bis 2000 m um Trinkwasserbrunnen und ab 500 m bis 1000 m um Trinkwassernotbrunnen, bei Verwendung nicht-wassergefährdender Stoffe oder Kaliumcarbonat und Bohrung entsprechend Anforderungen der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt

Bundesland	Nicht zulässig in ...	Bedingt zulässig (Einzelfallprüfung) in ...
Hessen	- Wasserschutzgebiet Zone I, II, III und IIIA - Heilquellenschutzgebiet Zone I, II, III, III/1 und A	- Wasserschutzgebiet Zone IIIB - Heilquellenschutzgebiet Zone III/2 und B
Mecklenburg-Vorpommern	- Trinkwasserschutzgebiet Zone I und II	- Wasserschutzgebiet - Trinkwasserschutz bzw. Vorbehaltsgebiet - Heilquellenschutzgebiet - Einzugsgebiet öffentliche Trinkwasserversorgung - Einzugsgebiet von staatlich anerkannten Heilquellen ohne Schutzgebiet
Niedersachsen	- Trinkwasserschutzgebiete Zone I und II (bei Erschließung GW-Leiter) - Heilquellenschutzgebiete Zone I, II, und A	- Trinkwasserschutzgebiete Zone III, III A, III B - Trinkwasserschutzgebiet im Verfahren - Trinkwassergewinnungsgebiet - Vorranggebiete Trinkwassergewinnung gemäß Landesraumordnungsprogramm - Heilquellenschutzgebiet Zone III, III/1, III/2 und B
Nordrhein-Westfalen	- Wasser- und Heilquellen-schutzgebiet Zone I, II, III A	- Wasserschutzgebiet Zone III B
Rheinland-Pfalz	- Schutzzone I, II, II S, III, III A, III/1, III/2, A von festgesetzten bzw. im Verfahren befindlichen Trinkwasser- und Heilquellenschutzgebieten^a - Innerer Schutzbereich von Mineralwassergewinnungen	- Abgegrenzter äußerer Schutzbereich für genutzte Mineralwassergewinnungen - Umgebung von aktiv genutzten Wasserfassungen mit Wasserrecht ohne Schutzgebiet
Saarland	- Gebiet mit wichtiger wasserwirtschaftlich konkurrierender Nutzung	- Gebiet zur Trinkwassernotversorgung oder Mineralwassergewinnung
Sachsen	- <i>kein pauschaler Ausschluss von Gebieten</i>	- Wasserschutzgebiet - Gebiet mit geballten bzw. herausragenden Gewässerbenutzungen, z. B. Mineralwassergewinnung
Sachsen-Anhalt	- Trinkwasserschutzgebiet Zone I und II	- Trinkwasserschutzzone III und Heilwasserschutzgebiet Zone B - Einzugsgebiet von Mineralwasserfassungen
Schleswig-Holstein	- Umkreis von 100 m um Brunnen der öffentlichen Trinkwasserversorgung - Wasserschutzgebietszone II	- bis zu 1 km Entfernung im Anstrom der Wassergewinnungsanlage, wenn die Nutzung nicht im Stockwerk der Grundwasserförderung stattfinden soll und 5 m Trennschicht vorhanden sind - mehr als 1 km Entfernung im Anstrom der Wassergewinnungsanlage im Stockwerk der Grundwasserförderung

Bundesland	Nicht zulässig in ...	Bedingt zulässig (Einzelfallprüfung) in ...
Thüringen	- Wasser- und Heilquellenschutzgebiet Zone I und II	- Wasser- und Heilquellenschutzgebiet Zone III oder undifferenziert

^{a)} Die zuständige Wasserbehörde kann jedoch eine Ausnahme zulassen, wenn der jeweilige Schutzzweck nicht beeinträchtigt wird (MUEEF, 2020).

Zusätzlich zu den flächenbezogenen Restriktionen in Wasserschutzgebieten und den horizontalen Abstandsregelungen in Wassergewinnungsgebieten gibt es in mehreren Bundesländern auch Restriktionen in Bezug auf die thermisch nutzbare Tiefe. Diese lokalen oder regionalen Bohrtiefenbeschränkungen dienen in den meisten Fällen dem Schutz tiefer liegender Grundwasserleiter, die durch Grundwassergeringleiter hydraulisch von den überlagernden Aquiferen getrennt sind.

So dürfen laut dem Leitfaden Schleswig-Holsteins in einem Abstand von 1000 m im Anstrom um Trinkwasserbrunnen bis maximal 5 m oberhalb eines Trinkwassernutzhorizonts Bohrungen abgeteuft werden, wenn ein überlagernder Geringleiter vorhanden ist. In Baden-Württemberg ist die Bohrtiefe in weiten Bereichen des Bundeslands auf die Mächtigkeit des obersten Grundwasserstockwerks beschränkt, auch wenn keine Trinkwassernutzung stattfindet, d. h. auch außerhalb der Wasserschutzgebiete Zonen I, II und III. Durch einen Landtagsbeschluss ist in Bayern die Bohrtiefe über ein Verbot des Durchteufens hydraulisch wirksamer Stockwerks-Trennschichten weiträumig beschränkt. In Berlin ist das Durchteufen des Rupeltons, der die Grenzschicht zwischen dem weniger und dem stärker salzhaltigen Grundwasser darstellt, untersagt.

Auch für die Restriktionszonen bei bereits vorhandener Grundwassernutzung gilt, dass sich die Aussagen in den Leitfäden überwiegend auf EWS-Anlagen beziehen. Auf offene Systeme wie WWA und ATES-Anlagen wird hingegen bzgl. dieser Restriktionszonen in fast allen Leitfäden nicht explizit eingegangen. Einzig der aktuelle Leitfaden des Landesamts für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz in Nordrhein-Westfalen (LANUV, 2019) nennt einen notwendigen Abstand von 1000 m im Abstrom zu anderen Grundwassernutzungen und zudem Temperaturgrenzen für den obersten Grundwasserleiter als mögliche Restriktionen für die Genehmigung von UTES-Anlagen.

Zwischenfazit 1.6.2

Um potenziellen bzw. angenommenen Konflikten bei der stofflichen und thermischen Nutzung der Ressource Grundwasser bzw. einer potenziellen Beeinträchtigung von Trinkwasser entgegenzuwirken, wird laut den Leitfäden der Bundesländer zur Nutzung der oberflächennahen Geothermie in bestimmten Restriktionszonen mit bereits vorhandener Grundwassernutzung zur Wasserversorgung (insbesondere in den Zonen I und II von Wasserschutzgebieten) eine thermische Nutzung (insbesondere mittels EWS) als unzulässig oder nur bedingt zulässig angesehen.

Diese flächenhafte, zweidimensionale Definition von Restriktionszonen zum Schutz des Grundwassers kann einen Ausbau von oGT-Anlagen und gegebenenfalls von UTES-Anlagen durch die zweidimensionale Betrachtung des dreidimensionalen Nutzungsraums im geologischen Untergrund gerade in urbanen Gebieten möglicherweise unnötig stark limitieren. Entsprechendes gilt auch für die Festlegung eines pauschalen und hydrogeologisch nur bedingt nachvollziehbaren Abstands von oGT- bzw. gegebenenfalls UTES-Anlagen zu Entnahmebrunnen in Gebieten außerhalb von Wasserschutzgebieten. Nach Ansicht der Autoren dieser Studie sollten die Bewirtschaftung des geologischen Untergrunds und die Ausweisung von Restriktionszonen zukünftig und gerade bei tatsächlichen

und/oder vermeintlichen Nutzungskonkurrenzen z. B. im urbanen Gebieten anhand prozessbezogener 3D-Modelle erfolgen.

Einen ersten Ansatz in Richtung einer 3D-Bewirtschaftung stellen Bohrtiefenbeschränkungen in Grundwasserdeckschichten zum angenommenen Schutz liegender Grundwasserleiter dar. Allerdings fehlen hier bis auf wenige Ausnahmen Untersuchungen, ob es einen Einfluss fachgerechter und nicht-fachgerechter Bohrungen z. B. für EWS-Systeme auf das Leckageverhalten von Deckschichten unter verschiedenen Randbedingungen gibt und wie groß dieser gegebenenfalls ist. Zu dieser wie auch anderen bisherigen Festlegungen (z. B. pauschal festgelegte radiale Abstände zu Trinkwasserentnahmeanlagen) besteht weiterer Forschungs- und Handlungsbedarf, um eine naturwissenschaftlich-technisch basierte Entscheidungsbasis zu schaffen.

Wünschenswert wäre zudem, dass zwischen Bundesländern sowie zum Teil innerhalb der Bundesländer Restriktionszonen einheitlich definiert werden.

1.6.3 Restriktionszonen aufgrund (hydro-)geologischer Gegebenheiten und Altlasten

In den gesichteten Leitfäden der Bundesländer werden neben den Restriktionszonen aufgrund bereits vorhandener obertägiger Bebauung, untertägiger Infrastrukturen und Grundwassernutzung zusätzlich weitere Restriktionszonen aufgeführt, die im Zusammenhang mit besonderen regionalen oder lokalen (hydro-)geologischen oder anthropogen verursachten Gegebenheiten stehen (Tab. 1.22). Diese stellen oft besondere Ansprüche an das Qualitätsmanagement während der Bau- bzw. Bohrarbeiten und können so den technischen und wirtschaftlichen Aufwand erheblich erhöhen.

Tabelle 1.22: Besondere (hydro-)geologische Gegebenheiten, die in den Leitfäden der Bundesländer für die Nutzung der oGT berücksichtigt werden

Auflistung der in den Leitfäden (vgl. Abschn. 1.6 für Referenzen) aufgeführten Restriktionszonen sowie Auflistung der jeweiligen Bundesländer, in denen diese genannt sind.

× = Ausschlussgebiete; ○ = Einzelfallprüfung bzw. Ausnahmen möglich; – = mit Auflagen möglich; kein Symbol = nicht im Leitfaden berücksichtigt

Restriktionszone	Leitfäden der Bundesländer															
	BB	BE	BW	BY	HB	HE	HH	MV	NI	NW	RP	SH	SL	SN	ST	TH
Altlast- und Altlastverdachts-Flächen, schädliche Bodenveränderung, Grundwasserschäden	○		○	○		○	○	○	○	○ ^c	× ^a	○	○	○	○	○
hochdurchlässige Grundwasserleiter ¹			○	×		○			○	○	– ^a		○	○		○
Artesische Grundwasserverhältnisse	○	×	○	○		○		○	○	○	○	–	○	×	○	○
Hydrochemische Aspekte ²	○		○ ^b			○		○	–	○	○	–			○	○
Rutschungsgebiete			○							○ ^c	–		○			
Vorkommen quellfähiger Gesteine/Gebirge ³			○						×	○	○	×			○	
Vorkommen wasserlöslicher Gesteine/Gebirge ⁴			○			○		○	○						○	
Bergbaugebiete und Bergbaufolgelandschaften	○							–	○	○	○		○	○	○	○
Zonen tektonischer Auflockerung			○											○		
Gasführung im geologischen Untergrund			○			○				○	–		○			
Küstenschutz- / Überschwemmungs-Gebiete								○								

Abkürzungen der Bundesländernamen: BB = Brandenburg, BE = Berlin, BW = Baden-Württemberg, BY = Bayern, HB = Bremen, HE = Hessen, HH = Hamburg, MV = Mecklenburg-Vorpommern, NI = Niedersachsen, NW = Nordrhein-Westfalen, RP = Rheinland-Pfalz, SH = Schleswig-Holstein, SL = Saarland, SN = Sachsen, ST = Sachsen-Anhalt, TH = Thüringen

^a) im Leitfaden RPL (2012) genannt, in RPL (2020) entfallen

^b) für offene Systeme genannt

^c) für Erdwärmekollektoren und offene Systeme (Brunnenanlagen) genannt (LANUV – Landesamt für Naturschutz Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, 2019)

¹) sehr gute bzw. hochdurchlässige Grundwasserleiter, insbesondere Karst- und Kluftgrundwasserleiter, kf-Werte > 10⁻² m/s

²) insbesondere erhöhte Gehalte an gelöstem Eisen und Mangan, aber auch Vorkommen von gelöstem Kohlendioxid und Methan sowie Grundwasserversalzung und Salzwasseraufstieg

³) insbesondere Anhydrit-führende Schichten (z. B. im Gipskeuper) sowie Schichten mit quellfähigen Tonmineralen

⁴) insbesondere Steinsalz

Abhängig vom Bundesland ist die Wirkung solcher Restriktionszonen für die Genehmigung geothermischer Anlagen ebenfalls sehr unterschiedlich geregelt; die Regelungen beinhalten Ausschlussgebiete, Bohrtiefenbeschränkungen (z. B. aufgrund der Tiefenlage besonders sensibler geologischer Einheiten), Einzelfallprüfungen und verschärfte technische Auflagen.

Die in den jeweiligen Leitfäden benannten Restriktionen richten sich dabei teilweise nach dem Vorkommen der jeweiligen geologischen Besonderheiten (siehe z. B. Rutschungsgebiete und

Bergbaugebiete), werden jedoch im Genehmigungsverfahren unterschiedlich bewertet (vgl. z. B. artesische Grundwasservorkommen). In einigen Bereichen Baden-Württembergs und Bayerns wird beispielsweise der sogenannte „Sulfatspiegel“, also die oberste Tiefenlage von Sulfatgestein-führendem Gebirge (z. B. Gips und Anhydrit), zur Beschränkung der genehmigungsfähigen Tiefe herangezogen. In Baden-Württemberg sind die Zielsetzungen dieser Restriktionen zusammen mit erforderlichen Anforderungen an die Qualitätssicherung von Erdwärmesonden in den „Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden“ (UM – Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2018) unabhängig vom Leitfaden des Bundeslands beschrieben.

Diese unterschiedlichen Bewertungsweisen sowie die Auswahl an berücksichtigten Restriktionen (Tab. 1.22) stellen, wie bereits in den vorherigen Abschnitten beschrieben, ein uneinheitliches Vorgehen in Bezug auf die Genehmigung von Anlagen zur Nutzung der oGT in den Bundesländern dar.

Bewertung von Altlasten als Restriktionskriterium für die thermische Nutzung des oberflächennahen geologischen Untergrunds

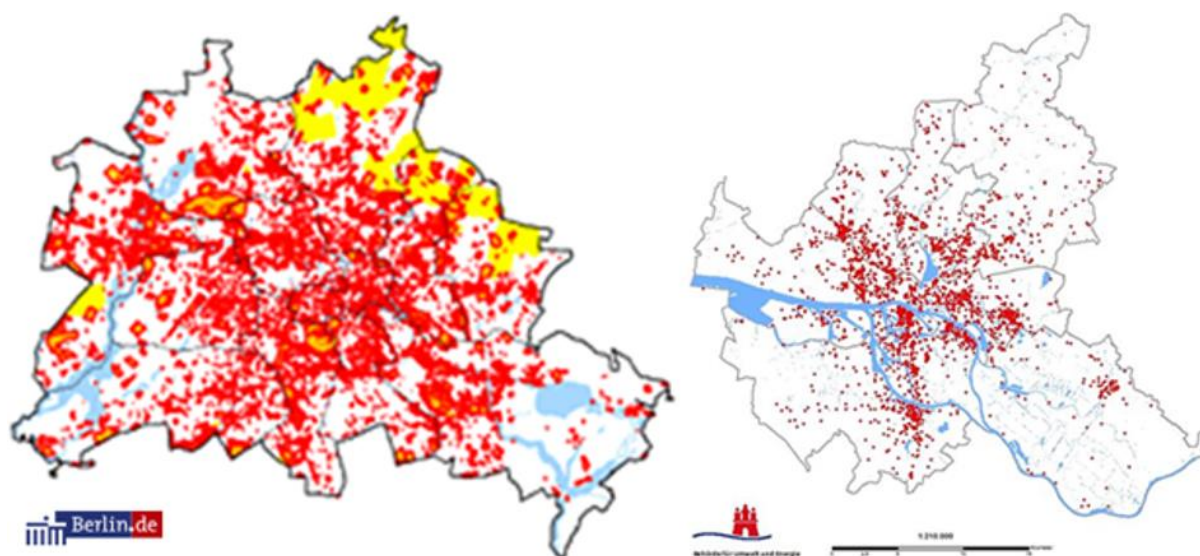
Altlasten-(Verdachts-)Flächen beschränken sich nicht allein auf Industrieanlagen oder Großstädte, dennoch treten Altlasten wesentlich häufiger in städtischen Bereichen auf (Abb. 1.41). Insgesamt gilt das Vorhandensein von Altlasten-(Verdachts-)Flächen als Restriktionskriterium, da Temperaturveränderungen im Bereich einer Altlast deren Eigenschaften wie z. B. ihr Emissionsverhalten verändern könnten (vgl. Kap. 3) was auch im Hinblick auf die rechtliche Verantwortung bzgl. der Sanierungspflichtigkeit von Belang sein kann. Der Datenstand zu Altlasten-(Verdachts-)Flächen ist dabei relativ gut, da diese Flächen (eigentlich Volumina) in Landkreisen und Bundesländern systematisch erfasst werden (Tab. 1.23). Die räumliche Ausdehnung von Altlasten-(Verdachts-)Flächen ist den zuständigen Behörden über die jeweiligen Grundstücke bekannt; genaue Flächenangaben (z. B. in m²) sind jedoch nach Kenntnis der Autoren dieser Studie nicht öffentlich verfügbar. Auch ist nicht abschätzbar, inwieweit die Altlastvolumina in den einzelnen Städten bzw. Kommunen bekannt sind und idealerweise noch in primäre bzw. sekundäre Schadstoffquellbereiche und Fahnenbereiche zeitabhängig unterteilt werden können. Deswegen ließ sich der Anteil der Schadstoffbelastungen an den jeweiligen Stadtflächen bzw. eines untätigen Referenzvolumens im Rahmen der vorliegenden Studie nur für einzelne Beispiele ohne Anspruch auf Repräsentanz berechnen.

Tabelle 1.23: Kennzahlen zu Altlasten in Deutschland

Status	Anzahl
Altlastverdächtige Flächen	263.950
Altlastverdächtige Altablagerungen	66.999
Altlastverdächtige Altstandorte	196.968
Gefährdungsabschätzung abgeschlossen	123.973
Altlasten	19.228
Altlasten in der Sanierung	5.342
Sanierung abgeschlossen	36.060
Altlasten in der Überwachung	6.022

Für eine länderspezifische Aufstellung siehe Originalquelle.

Quelle: LABO (ALA) – Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz, Ausschuss „Altlasten“, 2019.

Abbildung 1.41: Altlasten-(Verdachts-)Flächen in den Städten Berlin und Hamburg

Links: Berlin, rechts: Hamburg. Punktmarkierungen nicht großenskaliert.

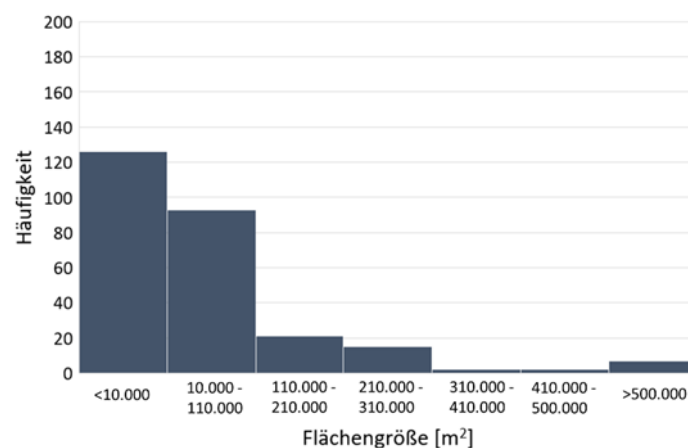
Quellen: SenUVK, 2020; GLA, 2022.

Altlasten-(Verdachts-)Flächen bezeichnen zunächst nur die ungesättigte Bodenzone („Boden“ i. e. S.) (BBodSchG, o. J.). Eine davon ausgehende Kontamination des Grundwassers ist möglich, aber nicht zwingend. Damit sind Altlasten-(Verdachts-)Flächen und Flächen, unter denen ein Grundwasserschaden vorliegt, nicht identisch, obwohl ein kausaler Zusammenhang vorliegen kann. In Hamburg sind beispielsweise 266 Nutzungsbeschränkungen für die oGT aufgrund von Grundwasserschäden veröffentlicht, die sich auf insgesamt 18,7 km² oder 2,5 % der Stadtfläche belaufen (BUKEA – Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft Hamburg, 2016). Die Grundwasserschäden weisen im Median eine Fläche von rund 11.800 m² auf, sieben Flächen belaufen sich auf > 500.000 m² (Abb. 1.42). Tiefenangaben und gegebenenfalls auch Informationen zu den Volumina der Grundwasserkontaminationen liegen in Hamburg nicht öffentlich vor, sind den zuständigen Behörden jedoch bekannt.

Mit Grundwasserschäden in Höhe von ca. 2,5 % der Stadtfläche zusätzlich zu einer aufgrund der öffentlichen Datenlage im Rahmen der vorliegenden Studie nicht quantifizierbaren Größe von Altlasten-(Verdachts-)Flächen wird deutlich, dass Grundwasserschäden und mögliche Altlasten einen relevanten Flächenanteil von Städten einnehmen können und bei Berücksichtigung als Restriktionszone in urbanen Gebieten einen erheblichen Einfluss auf das Ausbaupotenzial der oberflächennahen Geothermie haben können.

Da die geothermische Nutzung innerhalb von Altlasten-(Verdachts-)Flächen und bei Grundwasserschäden in den Leitfäden der meisten Bundesländer einer Einzelfallprüfung unterliegt (Tab. 1.22), können aktuell keine Aussagen darüber getroffen werden, inwieweit die untertägige thermische Nutzung dadurch jeweils konkret in der Praxis eingeschränkt wird. Allerdings besteht in dieser Hinsicht Handlungsbedarf seitens der Kommunen, um das Restriktionspotenzial von Altlasten-(Verdachts-)Flächen und Grundwasserschadensfällen räumlich und im Hinblick auf die stoffliche Zusammensetzung besser bewerten zu können.

Abbildung 1.42: Häufigkeitsverteilung der Flächengrößen von Grundwasserschäden in der Stadt Hamburg



Quelle: Eigene Darstellung Christian-Albrechts-Universität zu Kiel mit öffentlichen Daten aus dem Geoportal Hamburg (BU-KEA, 2016).

Konkret bedeutet dies, dass erstens zeitlich dynamische 3D-Modelle der Grundwasserschadensfälle bzw. der Altlasten erarbeitet werden müssen, um gegebenenfalls tiefenbezogene Restriktionsräume zu definieren bzw. eine thermische Nutzung des oberflächennahen geologischen Untergrunds zu ermöglichen.

Zudem sollte anhand des stofflichen Inventars und der stofflichen Verteilung einer Altlast bzw. eines Grundwasserschadensfalls zukünftig eine Bewertung dahingehend möglich sein, ob eine Kombination aus thermischer Nutzung und aktiven und/oder passiven Sanierungs- und Sicherungsmaßnahmen möglich und sinnvoll ist, um diese untertägigen Räume unterhalb urbaner Gebiete einer Nutzung für das Allgemeinwohl zuzuführen. Einschränkend ist allerdings festzustellen, dass bzgl. des Kombinationspotenzials einer thermischen Nutzung des oberflächennahen Untergrunds und einer Schadstoffsanierung erst wenige stoffspezifische bzw. sanierungstechnologische Untersuchungen (vgl. Kap. 3) existieren und man international wie national noch weit davon entfernt ist, diese Konzepte als erprobte Standardverfahren bezeichnen zu können. Dies gilt sowohl für die Auswirkungen neuer thermischer Veränderungen bei laufenden Sanierungsverfahren als auch bei der Planung neuer hybrider Anlagen, die sowohl zur Sanierung als auch zur Wärmeversorgung bzw. Wärmespeicherung genutzt werden können.

Offen ist und bleibt zudem die Frage, wie diese Nutzungsänderung rechtlich einzuordnen ist. Hier besteht Klärungs- und gegebenenfalls auch rechtlicher Handlungsbedarf, um zeitnah zu Lösungen im Hinblick auf die Transformation der Wärmeversorgung zu kommen.

Zwischenfazit 1.6.3

Übereinstimmend werden in den Leitfäden Altlasten-(Verdachts-)Flächen und Grundwasserkontaminationen als Restriktionskriterium für eine oberflächennahe thermische Nutzung des geologischen Untergrunds bewertet. Altlasten- und Altlastenverdachtsflächen sowie Grundwasserkontaminationen sind in Kommunen und Städten mittlerweile i. d. R. relativ gut erfasst und können gerade im urbanen Bereich einen signifikanten Flächenanteil umfassen, der den Ausbau und Betrieb von oGT- und UTES-Anlagen zukünftig bei der pauschalen Beibehaltung als Restriktionskriterium limitieren kann.

Auch bei der Bewertung von Altlastenstandorten und Grundwasserkontaminationen wird erneut die Notwendigkeit einer dreidimensionalen und zeitlich dynamischen Betrachtung und Bewirtschaftung des geologischen Untergrunds deutlich, um eine räumlich differenziertere Nutzung des geologischen Untergrunds gerade in urbanen Gebieten gegebenenfalls zu ermöglichen.

Zudem sollte anhand des stofflichen Inventars und der stofflichen Verteilung einer Altlast bzw. eines Grundwasserschadensfalls zukünftig eine Bewertung möglich sein, ob eine Kombination von thermischer Nutzung und aktiven und/oder passiven Sanierungs- und Sicherungsmaßnahmen möglich und sinnvoll ist, um diese untertägigen Räume unterhalb urbaner Gebiete einer Nutzung durch das Allgemeinwohl zuzuführen. Einschränkend ist allerdings festzustellen, dass bzgl. des Kombinationspotenzials einer thermischen Nutzung des oberflächennahen geologischen Untergrunds und einer Schadstoffsanierung bisher nur wenige stoffspezifische bzw. sanierungstechnologische Untersuchungen (vgl. Kap. 3) existieren und man international wie national noch weit davon entfernt ist, diese Konzepte als erprobte Standardverfahren bezeichnen zu können.

Offen ist und bleibt überdies die Frage, wie diese Nutzungsänderung rechtlich einzuordnen ist. Hier besteht Klärungs- und gegebenenfalls auch rechtlicher Handlungsbedarf, um zeitnah zu Lösungen im Hinblick auf die Transformation der Wärmeversorgung zu kommen.

1.6.4 GIS-basierte Darstellung der Wirkung aktueller Restriktionskriterien zum Ausbaupotenzial von oGT- und UTES-Anlagen anhand städtischer Beispielszenarien

1.6.4.1 Nationale Studien zur Flächenverfügbarkeit für EWS-Anlagen in urbanen Gebieten in Deutschland

Ob und inwieweit die aktuellen Restriktionskriterien den Ausbau von oGT- bzw. UTES-Anlagen limitieren, ist stark von den ortsspezifischen Gegebenheiten abhängig und konnte im Rahmen dieser Studie nicht repräsentativ erfasst werden. Allerdings kann bezüglich derartiger Studien zum Ausbaupotenzial und Wärmeversorgungsbeitrag der oGT für Deutschland auf eine Reihe von Vorarbeiten zurückgegriffen werden. Dabei liegt der Fokus überwiegend auf der Nutzung von Erdwärmesonden zum Entzug von Wärme mit Hilfe von Wärmepumpen zur Deckung des aktuellen Wärmebedarfs von Gebäuden.

In der Studie von Jochum et al. (2017) zur „Ableitung eines Korridors für den Ausbau der erneuerbaren Wärme im Gebäudebereich“ wurde mittels einer GIS-basierten Analyse für 224 exemplarische Baublöcke aus Städten in allen Bundesländern die dort theoretisch mögliche Anzahl von

EWS-Bohrungen ermittelt. Die dafür verfügbare Fläche bzw. der verfügbare Raum ergab sich durch folgende Restriktionen:

- ▶ Abstände (entsprechend VDI 4640) zwischen EWS je nach Länge 5 m oder 6 m, zu Gebäuden 2 m, zu Grundstücksgrenzen je nach Bundesland 3 m bis 6 m,
- ▶ Ausschlussflächen: alle Zonen von Wasserschutzgebieten, bebaute Flächen (u. a. Gebäude, Wege, Einfahrten, Parkplätze, Spielplätze), Flächen mit Baumbestand,
- ▶ lokale Bohrtiefenbeschränkungen.

Die Ergebnisse für die Beispiel-Baublöcke wurden dann abhängig von der Bebauungsdichte auf die rund 3 Mio. Baublöcke in Deutschland hochskaliert. Im Vergleich der Bundesländer ergaben sich so Deckungsanteile von oGT-Anlagen am Wärmebedarf des zukünftigen Gebäudebestands im Jahr 2050 von 59 % in Bayern bis 77 % in Sachsen-Anhalt.

Für das Bundesland Nordrhein-Westfalen wurde das Ausbaupotenzial von EWS unter Berücksichtigung von vier Restriktionszonen-Kategorien abgeschätzt (Bracke et al., 2015):

- ▶ Abstandsvorgaben zur Verhinderung der thermischen Beeinflussung zwischen einzelnen Sonden bzw. EWS-Anlagen entsprechend VDI 4640 (6 m bzw. 10 m),
- ▶ Ausschlussgebiete: Wasserschutzgebietszonen I und II; Szenario A: auch in Zone III Ausschluss, Szenario B: Bohrtiefenbegrenzung von 40 m in den Zonen III a, b und c; Gebäude, Verkehrs- und Gewässerflächen,
- ▶ Gebiete mit eingeschränkter Rentabilität: sehr schlecht wärmeleitende, trockene Lockersedimente als Folge von lokaler Grundwasserabsenkung aufgrund von Bergbau oder speziellen geologische Bedingungen,
- ▶ Gebiete mit „kritischen“ hydrogeologischen Situationen, die einer Einzelfallprüfung bedürfen: z. B. Heilquellen ohne ausgewiesene Schutzgebiete, Altlastenflächen und oberflächennaher Alt-Bergbau.

In Summe ergibt sich in dieser Studie für Nordrhein-Westfalen eine Ausschlussfläche von 1166 km², was rund 8 % der für die Ausbaupotenzialanalyse berücksichtigten Fläche (alle bebauten Flurstücke) entspricht. Durch eine pauschale Tiefenbegrenzung von 40 m in Gebieten mit „kritischen“ hydrogeologischen Situationen könnte jedoch auch in diesen zunächst komplett ausgeschlossenen Gebieten in den meisten Anwendungsfällen eine Installation geothermischer Anlagen genehmigt werden. Diese Restriktionsflächen wurden daher in einem zweiten, alternativen Szenario B dem Ausbaupotenzial noch zugerechnet. Es ergab sich so ein potentieller maximaler Deckungsanteil der oGT am gegenwärtigen Wärmebedarf des Gebäudebestands von 57 %, der in den einzelnen Gemeinden des Bundeslands zwischen 7 % und 97 % variiert.

Für Baden-Württemberg quantifiziert eine Studie (Miocic und Krecher, 2022) den möglichen Beitrag der oGT (in Form von EWS-Wärmepumpen) zur Deckung des Wärmebedarfs des sanierten Gebäudebestands auf Baublockebene im gesamten Bundesland. Es wurden dabei die folgenden Restriktionen berücksichtigt:

- ▶ Abstand von 3 m zu Gebäuden,

- ▶ ungeeignete Flächennutzung (Gebäudegrundfläche, Verkehrsflächen, Oberflächengewässer),
- ▶ regionale Bohrtiefenbeschränkungen aufgrund hydrogeologischer Besonderheiten,
- ▶ regionale Vorgaben zu Restriktionen in Wasserschutzgebieten.

Es ergibt sich in der Summe ein technisches Potenzial von 33,5 TWh, welches je nach Sanierungsszenario den Wärmebedarf der Gebäude zu 44 % – 93 % aller Baublöcke komplett decken könnte.

Für das Gebiet der Stadt Ludwigsburg in Baden-Württemberg schätzten Schiel et al. (2016) mit Hilfe einer GIS-basierten Analyse den Wärmeversorgungsbeitrag geothermisch mittels EWS betriebener Wärmepumpen ein. Als Restriktionszonen wurden hier betrachtet:

- ▶ Ein Abstand von 6 m zwischen einzelnen Sonden (anstatt von 10 m laut Leitfaden des Bundeslands) und ein Abstand von 3 m zu Gebäudegrundrissen,
- ▶ eine räumlich variable Bohrtiefenbeschränkung (1 m bis 200 m) zum Schutz eines Aquifers.

Für die Stadt Ludwigsburg ergibt sich so, dass in 40 % der betrachteten Flächen der dort jeweils vorhandene Wärmebedarf der Gebäude mittels EWS-Wärmepumpen-Systemen komplett gedeckt werden könnte.

Am Beispiel eines Stadtquartiers in der baden-württembergischen Stadt Karlsruhe mit Block- und Hochhausbebauung und verhältnismäßig vielen Freiflächen zeigten Tissen et al. (2019a) für drei Nutzungsarten der oGT (EWS, WWA und Kollektoren) das Ausbaupotenzial zum Betrieb von Wärmepumpen zur Wärmeversorgung des energetisch unsanierten und sanierten Gebäudebestands unter Berücksichtigung folgender Restriktionen:

- ▶ Abstand von 10 m zwischen einzelnen EWS und von 2 m zum Gebäudegrundriss,
- ▶ Bohrtiefenbeschränkung (17 m) in einem Teilgebiet zum Schutz eines tieferen von zwei Aquiferen,
- ▶ Abstände zwischen Brunnen offener Systeme entsprechend der maximalen Ausdehnung der 1-K-Kältefahne benachbarter Brunnen.

Für die offenen Systeme (WWA) galt zudem aufgrund rechtlicher Empfehlungen die Einschränkung, dass eine maximale Temperaturdifferenz von 6 K durch Entzug und Wiedereinleitung nicht überschritten werden durfte. Bei Berücksichtigung der Bohrtiefenbeschränkung konnten je nach betrachtetem Szenario und je nach angenommener Nutzungsart der oGT 16 % – 124 % des Wärmebedarfs des Gebäudebestands gedeckt werden.

In Hegger et al. (2014) und dem Vorgängerprojekt (Hegger et al., 2012) wurde für verschiedene „energetische Stadtraumtypen“ bzw. Stadtgebiete neben anderen Kennwerten die theoretisch mögliche Anzahl von EWS-Bohrungen pro ha Nettobauland ermittelt. Dabei wurden folgende Restriktionszonen berücksichtigt:

- ▶ Ausschlussgebiete: bebaute bzw. versiegelte Flächen und Flächen mit Baumbestand,
- ▶ Abstand von 7 m zwischen einzelnen EWS und ein Abstand von 3,5 m zu Gebäuden und Grundstücksgrenzen.

Zwischenfazit 1.6.4-I

Die Studien mit GIS-basierten Analysen zeigen, dass auch unter Berücksichtigung der aktuellen Restriktionskriterien die Abschätzung des oGT-Ausbaupotenzials für EWS-Wärmepumpen-Systeme einen signifikanten, aber stark variablen Anteil zur Deckung des regionalen und lokalen Wärmebedarfs des Gebäudebestands leisten kann.

Der Schwerpunkt der GIS-basierten Analysen liegt bisher auf der Ermittlung der obertägigen Fläche, die nach Abzug von Restriktionszonen zur Installation der geothermischen Anlagen (Abteufung von Bohrungen) für den Bau und Betrieb von EWS-Anlagen Verfügung steht. Ansatzweise wird auch der thermisch nutzbare Raum im geologischen Untergrund und dessen Einschränkung durch Restriktionen in Form von Bohrtiefenbeschränkungen dreidimensional betrachtet, die thermische und hydrodynamische Raumwirkung i. d. R. jedoch nicht berücksichtigt.

Für den i. d. R. geringeren spezifischen ober- sowie untertägigen Flächen- und Raumbedarf (bezogen auf die thermische Leistung) von WWA- und UTES-Systemen existieren allerdings nur wenige entsprechende Studien, die untersuchen, ob bzw. inwieweit die Umsetzung dieser Systeme durch aktuelle Restriktionskriterien signifikant beeinflusst werden.

Aufgrund des Zeitdrucks bei der klimaneutralen Transformation der Wärmeversorgungssysteme besteht Handlungsbedarf, um entsprechend dem Ansatz für EWS-Anlagen repräsentative Aussagen zu erhalten. Hierbei sollte auch das zukünftig sich verändernde Heizlastprofil (Heizen und Kühlen) berücksichtigt werden.

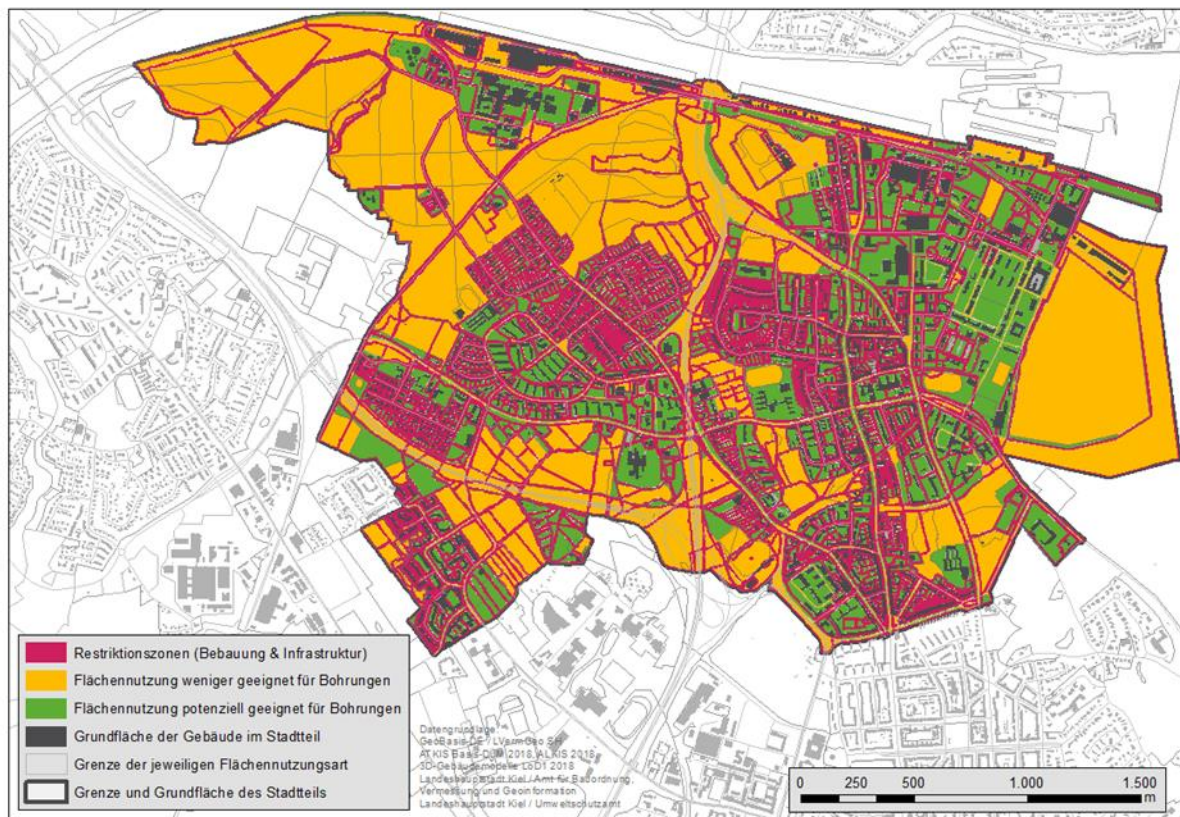
1.6.4.2 Visualisierung der Flächenverfügbarkeit für EWS-Anlagen anhand eines Stadtteils in Schleswig-Holstein

Zur bildlichen Darstellung der oben skizzierten Restriktionen für die oGT wurden in dieser Studie ergänzende (nicht verallgemeinerbare) Szenarienuntersuchungen am Beispiel eines Stadtteils in Schleswig-Holstein durchgeführt, für den auch bereits die untertägigen Raumauswirkungen berechnet wurden (vgl. Abschn. 1.4 und 1.5). Betrachtet wurden Auswirkungen der oben diskutierten Restriktionen aufgrund bereits vorhandener obertägiger Bebauung und untertägiger Infrastruktur und anderen Grundwassernutzungen anhand eines städtischen Beispiels und mit einem generischen Flächenbezug. Als thermische Systeme der oGT wurden EWS-Anlagen gewählt, da diese obertägig den höchsten Flächenbedarf haben und daher als konservativer Ansatz zu sehen sind.

Für ein erstes Szenario sind in Abbildung 1.43 die Restriktionsflächen bzgl. vorhandener obertägiger Bebauung und untertägiger Infrastruktur unter Verwendung der im Leitfaden des Bundeslands vorgegebenen Abstände (Tab. 1.20) und auf Basis typischerweise verfügbarer Geodaten (Gebäudegrundflächen, Flurstücksgrenzen, Standorte von bereits existierenden EWS-Anlagen, Flächennutzung) dargestellt.

Unter diesen Annahmen, nach Abzug der bundeslandspezifischen Abstände (6 m zu Grundstücksgrenzen, 10 m zu bereits vorhandenen EWS-Anlagen, vgl. Tab. 1.20) und unter Berücksichtigung der aktuellen Flächennutzung, die Bohrungen für oder eine Installation geothermischer Anlagen nach aktueller Lage erschwert (Gebäude-, Straßen-, Wald-, Gewässer-, Hafen-, Sport- und Erholungsflächen), können auf noch 140 ha (18 %) des 772 ha großen Stadtteils theoretisch rund 39.000 Bohrungen für EWS mit einer Länge von mehr als 50 m abgeteuft werden (Tab. 1.24).

Abbildung 1.43: Restriktionsflächen aufgrund obertägiger Bebauung und untertägiger Infrastruktur im Bestand und potenziell geeignete Flächen für Bohrungen in einem Stadtteil in Schleswig-Holstein



Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Auf 352 ha (46 %) ist aktuell die Flächennutzung hingegen für das Abteufen von Bohrungen als weniger geeignet oder als problematisch einzuschätzen; 280 ha (36 %) werden aufgrund der hier berücksichtigten Restriktionszonen komplett ausgeschlossen (fast ausschließlich aufgrund des 6-m-Abstands zu Grundstücksgrenzen, da im Stadtteil aktuell nur zehn vorhandene EWS-Anlagen verortet sind).

Tabelle 1.24: Flächenanteile und Anzahl möglicher Bohrungen bei kombinierter Berücksichtigung verschiedener Restriktionszonen am Beispiel eines Stadtteils in Schleswig-Holstein

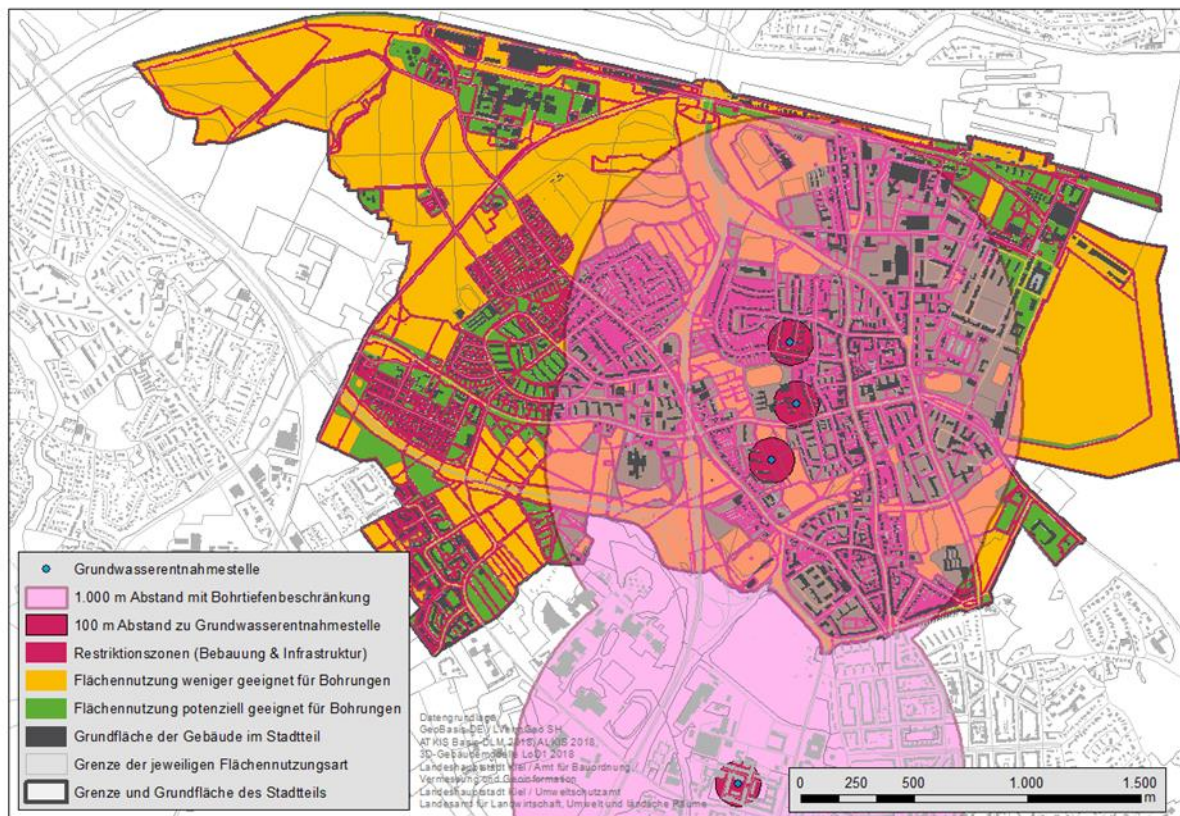
Stadtteil in Kiel mit 772 ha Gesamtfläche Berücksichtigte Restriktionszonen	durch Restriktionszonen ausgeschlossene Fläche [ha] / [%]	Fläche mit weniger geeigneter Flächennutzung [ha] / [%]	Fläche mit geeigneter Flächennutzung [ha] / [%]	Anzahl möglicher Bohrungen (mit 6 m Abstand) in der geeigneten Flächennutzung
Abstände: 6 m zu Grundstücksgrenzen, 10 m zu anderen Anlagen,	280 / 36	352 / 46	140 / 18	38.958
+ 100 m Abstand zu Trinkwasserentnahme	285 / 37	349 / 45	138 / 18	38.305

Aufbauend auf dem oben beschriebenen Szenario wurde in einem zweiten Szenario untersucht, welche Auswirkungen die vorhandene Grundwassernutzung auf das lokale Ausbaupotenzial der oGT unter Annahme der im Bundesland aktuell gültigen Restriktionskriterien hat (Abb. 1.44).

In dem betrachteten Stadtteil sind drei Entnahmefrünnen für Trinkwasser in einem Trinkwassergewinnungsgebiet ohne Wasserschutzgebietszonen verortet (Abb. 1.44). Es werden daher zusätzlich die im Bundesland bei neuen Bohrungen zu berücksichtigenden Abstände von 100 m zu Entnahmefrünnen und die Bohrtiefenbeschränkung in Umkreis von 1000 m um Entnahmefrünnen dargestellt (entsprechend des Leitfadens für Schleswig-Holstein, vgl. Tab. 1.21).

Die theoretisch zur Verfügung stehende Fläche zur Abteufung von Bohrungen für die Nutzung der EWS-Systeme wird durch den nötigen 100-m-Abstand zu Trinkwasserentnahmefrünnen weiter eingeschränkt, wenn auch in verhältnismäßig geringem Maße (Tab. 1.24).

Abbildung 1.44: Restriktionszonen zur Verhinderung von Nutzungskonflikten in einem Trinkwassergewinnungsgebiet

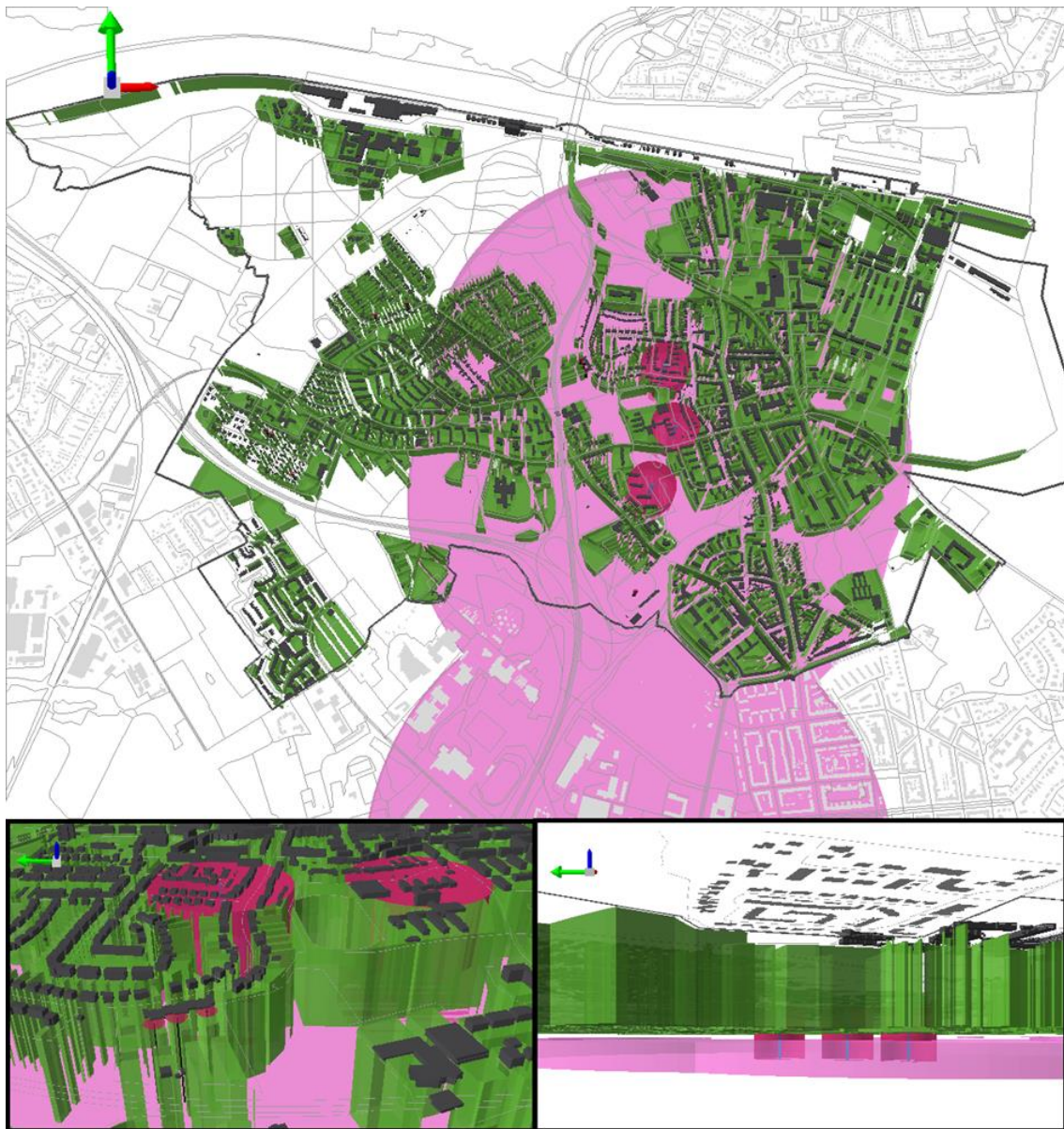


Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

In der Restriktionszone des 1000-m-Abstands (Abb. 1.44) ist eine Nutzung der EWS-Systeme nur über Bohrungen, die oberhalb des zur Trinkwasserversorgung genutzten Horizonts und dessen Deckschicht enden, möglich (Tab. 1.21). Im hier dargestellten Szenario befindet sich der zur Trinkwassergewinnung genutzte Horizont jedoch in einer Tiefe von 125 m – 200 m. Daher sollten bei einer räumlichen, dreidimensionalen Betrachtung (Abb. 1.45) im 1000-m-Umkreis um die Trinkwasserentnahmefrünnen weiterhin bis zu 100 m lange EWS genehmigt und installiert werden können.

Gleichzeitig macht Abbildung 1.45 jedoch auch deutlich, dass bei einer oberflächennäheren Lage des bewirtschafteten Grundwasserleiters die Verfügbarkeit der obertägigen Flächen zum Ausbau von EWS-Anlagen stark limitiert wäre, ohne dass eine quantifizierende hydrogeologische Begründung (z. B. hydraulischer Einzugsbereich des Trinkwasserentnahmebrunnens und thermische Beeinflussung) gegeben ist. Wie bereits vorher diskutiert, besteht regulativer Handlungsbedarf (z. B. durch die Vorgabe numerischer Bewirtschaftungsmodelle), wenn dem oberflächennahen geologischen Untergrund eine größere Bedeutung bei der Transformation der Wärmeversorgung zukommen soll.

Abbildung 1.45: Dreidimensionale Darstellung von Restriktionen zur potenziellen Verhinderung angenommener Konflikte zwischen vorhandener Grundwassernutzung zur Wasserversorgung und thermisch genutzten Untergrundvolumina



Unten links: Blick auf Stadtteil von West nach Ost; unten rechts: Blick von schräg unten von West nach Ost (Trinkwasserbrunnen in blau, 100 m Abstand um Trinkwasserbrunnen als roter Zylinder, 1000 m Abstand zu Trinkwasserbrunnen im Trinkwassernutzungshorizont mit Mächtigkeit 75 m als hellrosa Schreibe in 125 m Tiefe)

Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Zwischenfazit 1.6.4-II

Anhand einer Szenarienuntersuchung für ein urbanes Gebiet in Schleswig-Holstein wurde das Ausbaupotenzial von EWS-Systemen unter Berücksichtigung der aktuellen Restriktionskriterien abgeschätzt. Es zeigt sich an dem Beispielszenario, dass die von den aktuellen Restriktionskriterien betroffenen obertägigen Flächen einen großen Anteil an der Gesamtfläche einnehmen und somit das Ausbaupotenzial der oberflächennahen Geothermie (in Form von für Bohrungen nutzbarer Fläche und thermisch nutzbarem Untergrundvolumen) begrenzen können.

Zu prüfen ist daher, ob die aktuellen Restriktionskriterien auch zukünftig beibehalten werden können und müssen.

So stellt sich die Frage, ob der vorgegebene Abstand zu Grundstücksgrenzen, der den größten Einfluss auf das Ausbaupotenzial hat, bei einer großräumig angelegten Transformation der Wärmeversorgung zukünftig in allen Fällen wirklich sinnvoll ist oder alternativ nicht anhand numerischer Managementmodelle grundstücksübergreifende Lösungen anzustreben sind.

Das gewählte Szenario zeigte auch, dass eine fachlich detailliert ausdifferenzierte und mit Geodaten hinterlegte dreidimensionale Betrachtung des Potenzials (inkl. Bohrtiefenbeschränkungen in Wassergewinnungsgebieten ohne Schutzzonen) eine partielle thermische Nutzung des Untergrundvolumens bei gleichzeitiger Gewinnung von Grundwasser am selben Standort ermöglichen kann.

Grundlage für solch eine optimierte Nutzung des geologischen Untergrunds muss eine ortsspezifische Fachplanung sein. Für eine mögliche Feinplanung des zukünftigen Ausbaus der oberflächennahen Geothermie auf kommunaler Ebene wäre daher eine frühzeitige und vorausschauende Ausweisung von Ausschluss-, vor allem aber auch von technologiespezifischen Potenzialgebieten bzw. Potenzialräumen zu Nutzung von oGT-Anlagen (vgl. z. B. Bloemendal et al. (2018)

) unter zusätzlicher Berücksichtigung des lokalen Wärmebedarfs (Heizen und Kühlen) anzustreben.

Hierzu bedarf es zukünftig der Entwicklung und Anwendung gekoppelter Prognosemodelle (z. B. in Form „digitaler Zwillinge“ für die verschiedenen Sektoren und Kompartimente), welche sowohl die fortschreitenden Veränderungen der städtebaulichen Infrastruktur (u. a. energetische Sanierung, Neubau und Nachverdichtung, Mobilitätswende, Klimawandeladaptionsmaßnahmen, demografische Veränderungen etc.) als auch die hydraulische und thermische Nutzung des geologischen Untergrunds erfassen und berücksichtigen. Solche gekoppelten digitalen Zwillinge sollten zukünftig die Basis für eine kommunale Wärmeplanung sein (vgl. auch Maaß (2020)).

Resümee 1.6

Die Auswertung der bisherigen Leitfäden, Normen etc. lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Bisher werden Restriktionszonen in der Hauptsache allein für die oberflächennahe Geothermie (oGT) und hier für EWS und deren Nutzung definiert und sind ihrer aktuellen Definition nach geeignet, die Nutzung von EWS für ein zukünftiges Wärmeversorgungssystemen in urbanen Gebieten einzuschränken.
- Die jeweils im Rahmen eines Genehmigungsprozesses für oGT-Anlagen zu beachtenden Restriktionen in Form von Abständen, Schutzzonen und Bohrtiefenbeschränkungen variieren dabei je nach Bundesland.

- Restriktionskriterien für UTES-Anlagen ergeben sich aus den meisten Leitfäden der Bundesländer eher implizit, so dass eine Abschätzung, ob und inwieweit der Ausbau von UTES-Anlagen durch die aktuellen Regelwerke limitiert wird, kaum belastbar zu treffen ist.

Deutlich wird bei der Auswertung der entsprechenden Leitfäden, dass mit den aktuellen gesetzlichen und untergesetzlichen Regelwerken der Grundwassernutzung prioritär eine nachhaltige Trinkwasserversorgung sichergestellt werden soll. Aufgrund dieser Prioritätensetzung und wahrscheinlich aufgrund der nicht immer hinreichenden Kenntnis der hydrogeologischen Eigenschaften des oberflächennahen Untergrunds werden z. T. eher pauschal und nicht immer transparent und evidenzbasiert Restriktionskriterien definiert, die in ihrer aktuellen Auslegung den Ausbau von oGT- und UTES-Anlagen und damit gegebenenfalls die klimaneutrale Transformation der Wärmeversorgung limitieren können.

Im Hinblick auf die potentielle Bedeutung von oGT- und UTES-Anlagen für eine klimaneutrale und sichere Wärmeversorgung erscheint deshalb eine zeitnahe fachliche und politische Entscheidung darüber unabdingbar, ob für das Allgemeinwohl unter bestimmten Voraussetzungen die Nutzung des Grundwassers zur Wärmeversorgung gleichrangig zur Trinkwasserversorgung gestellt werden sollte.

Als Kriterium für eine entsprechende Gleichstellung könnte z. B. der jeweilige spezifische Nutzungsgrad, also Trinkwasserversorgung oder Wärmeversorgung, bezogen auf ein untertägliches Referenzvolumen beispielsweise eines Stadtteils, bzw. deren Eignung herangezogen werden.

In diesem Kontext ist auch zu hinterfragen, in welchem Maß bzw. unter welchen Randbedingungen eine wasserwirtschaftliche und thermische Nutzung eines oberflächennahen geologischen Untergrundraums wirklich negative Auswirkungen nach sich zieht bzw. sogar ausschließt. Allerdings besteht zur sachgerechten Bewertung dieser Fragestellung sowohl hinsichtlich des bestimmungsgemäßen Betriebs (also unvermeidbare Auswirkungen z. B. bzgl. Hydrochemie und/oder des Aquiferbioms (vgl. Kap. 3)) bzw. des nicht-bestimmungsgemäßen Betriebs von oGT- bzw. UTES-Anlagen (z. B. Leckagen aufgrund unsachgemäßen/fehlerhaften Bohrlochausbaus) z. T. dringender Forschungsbedarf.

Dringender Forschungsbedarf besteht auch hinsichtlich des stoffspezifischen thermischen Nutzungspotentials von Altlasten und Grundwasserschadensfällen, die bisher pauschal als Restriktionskriterium zur thermischen Nutzung definiert sind. Auch erst auf Basis entsprechender Forschungsergebnisse kann bewertet werden, ob z. B. eine Verpflichtung zur standortspezifischen Prüfung der thermischen Nutzbarkeit beispielsweise von Grundschadensfällen sinnvoll sein kann.

Unverzichtbar wird zur Einordnung und Nutzung der Forschungsergebnisse sein, dass insgesamt ein numerischer quantifizierender ortsspezifischer Ansatz zur großräumigen und hybriden Bewirtschaftung des oberflächennahen geologischen Untergrunds (z. B. Wärme- und Wasserversorgung) zukünftig zumindest für urbane bzw. industrielle Gebiete ab einer bestimmten Wärmebedarfsdichte (idealerweise Heizen und Kühlen) aufgebaut und als Entscheidungsgrundlage verwendet wird.

1.7 Managementanforderungen und Verfügbarkeit von Planungsunterlagen

Hinsichtlich der Fragestellung, ob zeitnah für oGT- und UTES-Anlagen großräumige numerische Modelle zur hybriden Bewirtschaftung des geologischen Untergrunds erarbeitet und betrieben

werden können, ist die Existenz und Verfügbarkeit von in Umfang und Qualität hinreichenden Geodaten wesentlich.

Wie bereits in Abschnitt 1.3 dargestellt, konnte im Rahmen dieser Studie lediglich eine erste diesbezüglich orientierende Internetrecherche ohne Anspruch auf Vollständigkeit durchgeführt werden. Trotzdem indizieren die Ergebnisse der Recherche (Tab. 1.25), die im Folgenden kurz skizziert und zusammengefasst werden, dass die Kenntnis zum Aufbau und den Eigenschaften des oberflächennahen geologischen Untergrunds gerade in urbanen Gebieten möglicherweise häufig nicht hinreichend oder zumindest nicht hinreichend verfügbar ist. Wesentlich wäre daher,

- ▶ dass die Darstellung der Daten auf den Geo-Portalen nicht mehr wie aktuell i. d. R. zweidimensional als Punktdaten oder in Kartenform erfolgt, sondern in Form hinreichend parametrisierter und belastbarer 3D-Strukturmodelle.
- ▶ Diese sollten in Datenformaten verfügbar sein, die in ein Geografisches Informationssystem (GIS) eingepflegt werden könnten (z. B. ESRI-Shapefile, WFS), um dort mit weiteren Daten z. B. im Rahmen einer Stadtplanung verschnitten werden zu können. Die SGD von Niedersachsen und (mit Einschränkungen) von Nordrhein-Westfalen zeigen auf ihren Portalen, wie solche Vorgaben umgesetzt werden können.
- ▶ dass in Geo-Portalen der Kommunen und/oder der SGD u. a. sowohl ein geostatistischer Überblick als auch ortskonkrete Fachdaten mit im Folgenden genannten geologischen, thermischen, hydrogeologischen, hydrochemischen, mikrobiologischen und faunistischen Parametern bereitgestellt werden.

Zu nennen wären hier u. a.:

- a) hinreichende 3D-Erfassung und Beschreibung der vorkommenden Faziestypen (sedimentologische geochemische Parameter wie Korngrößenverteilung, Packungsdichte, C_{org} -Gehalt, Austauschkapazität etc.) und Erfassung der aktuellen Temperaturverteilung,
- b) ortskonkrete Angabe und geostatistische Beschreibung (Verteilung; Mittelwerte, Medianwerte, Standardabweichungen, Korrelationslängen etc.) horizontaler hydraulischer und thermischer Parameter wie Permeabilitäten (horizontal und vertikal) sowie der entsprechenden Speicherkoeffizienten, ortskonkrete Angabe und geostatistische Beschreibung der Abstandgeschwindigkeiten einschließlich der zeitlichen Veränderung des hydraulischen Gradienten und der ortskonkreten Veränderung der Porosität,
- c) ortskonkrete Angabe und geostatistische Beschreibung des hydrochemischen, mikrobiologischen und faunistischen Status Quos, soweit möglich als ortskonkrete Angaben und geostatistische Beschreibungen und in Abhängigkeit von der Temperatur,
- d) ortskonkrete Angaben über Altlastenverdachtsflächen, Altlasten, Grundwasserschadensfälle (stoffliche Zusammensetzung, räumlicher Umfang und zeitliches Verhalten) und gegebenenfalls von den dort bisher erfolgten Sanierungs- und Sicherungsmaßnahmen,
- e) ortskonkrete und zeitliche Angaben zu Maßnahmen mit mittelbarem thermischen, hydraulischen und stofflichen Einfluss auf den oberflächennahen geologischen Untergrund (z. B. Entsiegelungs- oder Versiegelungsmaßnahmen, thermisch aktivierte Tiefgründungen, Veränderungen des hydraulischen Gradienten durch Pumpmaßnahmen bzw. Infiltrationsmaßnahmen).

Solche Grundlagen für eine notwendige hybride Bewirtschaftung des oberflächennahen geologischen Untergrunds konnten nach der ersten Internetrecherche für die drei Stadtstaaten Berlin, Bremen und Hamburg in Ansätzen gefunden werden (vgl. Tab. 1.25). Dort existieren für die Bewirtschaftung des geologischen Untergrunds dreidimensionale geologische Strukturmodelle sowie Grundwasser-Strömungsmodelle auf der Stadtskala, die als Basis für Planungs- und Bewirtschaftungsmodelle für oGT- und UTES-Anlagen verwendet werden können. Eine Aussage über deren Parametrisierungsgüte (vgl. Punkte a – e) ist jedoch nicht möglich.

Auch können für einzelne Städte geologische Strukturmodelle und Grundwasser-Strömungsmodelle vorliegen, welche nicht von den landesweit tätigen SGD auf den jeweiligen Internetauftritten aufgeführt sind. Dies kann auch damit begründet sein, dass solche Modelle von privaten Nutzern wie Stadtwerken erstellt wurden und keine öffentliche Verwendung beabsichtigt ist.

Tabelle 1.25: Existenz strukturgeologischer und hydrogeologischer Modelle in den Bundesländern als Basis für die nachhaltige wasserwirtschaftliche und thermische Bewirtschaftung des oberflächennahen geologischen Untergrunds

Bundesland	Landesweites, oberflächennahes geologisches 3D-Strukturmodell	Landesweites, oberflächennahes Grundwasser-Strömungsmodell
Baden-Württemberg	(Nein); fokussiert auf den tiefen geologischen Untergrund	Nein
Bayern	(Nein); für Teilräume fertiggestellt, berücksichtigte geologische Formationen unklar	Nein
Berlin	Ja; tertiäre und quartäre Formationen	(Ja); Hauptwasserleiter (z. T. mehr) für die Gebiete Urstromtal, Pankowtal und Teltow
Brandenburg	Nein	Nein
Bremen	Ja; tertiäre und quartäre Formationen	Ja; tertiäre und quartäre Formationen
Hamburg	Ja; tertiäre und quartäre Formationen	Ja; tertiäre und quartäre Formationen
Hessen	Nein; nur für den tiefen Untergrund	Nein
Mecklenburg-Vorpommern	Nein	(Ja); für den oberen, flächenhaft verbreiteten (Haupt-)Wasserleiter
Niedersachsen	Oberflächennahe Modelle mit quartären und tertiären Formationen in Teilbereichen. Landesweites Modell; nur für den tiefen geologischen Untergrund bis Basis Quartär.	Nein; nur lokale Modelle
Nordrhein-Westfalen	(Ja); für Formationen des Präquartär, zusätzlich Detailmodelle (z. B. Dortmund, Krefeld)	Nein
Rheinland-Pfalz	Nein; nur im Oberrheingraben	(Ja); nur großräumiges Modell für die geothermische Bewertung
Saarland	(Ja); im Rahmen des Grundwasser-Strömungsmodells	(Nein); nur mit Fokus auf die Themenverbindung zum Bergbau

Bundesland	Landesweites, oberflächennahes geologisches 3D-Strukturmodell	Landesweites, oberflächennahes Grundwasser-Strömungsmodell
Sachsen	(Ja); für etwa die Hälfte des Landesgebietes fertig	(Nein); im Aufbau, für Dresden, Leipzig und Chemnitz fertig
Sachsen-Anhalt	Nein	Nein
Schleswig-Holstein	Nein; nur für den tiefen geologischen Untergrund	Nein; nur in wenigen Gebieten
Thüringen	(Ja); Detailmodell Thüringer Becken (Quartär und Präquartär), Übersichtsmodell mit Randbereichen für Präquartär	Nein; nur in Landesteilen

Ja/Nein in Klammern zeigt Einschränkungen in den existierenden Modellen hinsichtlich ihrer Verbreitung oder hinsichtlich der in den Modellen erfassten geologischen Formationen. (Ja) deutet an, dass diese Modelle im Sinne einer Potenzialabschätzung für die geothermische Nutzung des oberflächennahen geologischen Untergrunds nutzbar sein könnten; (Nein) vermutet, dass dies nicht der Fall ist.

Resümee 1.7

Nach der in dieser Studie durchgeführten Internetrecherche deutet sich an, dass die für eine nachhaltige wasserwirtschaftliche und thermische Bewirtschaftung des oberflächennahen geologischen Untergrunds notwendigen großräumigen 3D-Geomodelle zumindest nicht öffentlich „leicht“ verfügbar sind. Dies gilt auch für die darauf aufbauenden hydrogeologischen Modelle mit einer entsprechenden hinreichenden und belastbaren Parametrisierung für den urbanen Raum mit hohen Wärmebedarfsdichten.

Ob und gegebenenfalls in welcher Qualität die Modelle und Geodaten unveröffentlicht und/oder als firmeninterne Planungsinstrumente (z. B. von Stadtwerken) existieren, konnte im Rahmen dieser Studie nicht ermittelt werden.

Da die zeitnahe großräumige und auch nachhaltige Umsetzung von oGT- und UTES-Anlagen in wesentlichen Teilen von entsprechenden parametrisierten 3D-Modellen abhängt, besteht übergeordneter regulativer Handlungsbedarf, den aktuellen Kenntnis- und Bearbeitungsstand zur potenziellen thermischen Nutzung des geologischen Untergrunds z. B. im Rahmen zukünftiger klimaneutraler Wärmeversorgungskonzepte abzufragen bzw. die Metadateien dazu öffentlich verfügbar zu machen.

Vor dem Hintergrund der Bedeutung von oGT- und UTES-Systemen ist gegebenenfalls auch darüber zu diskutieren, ob bei prinzipiell bzgl. einer thermischen Nutzung geeigneten geologischen Randbedingungen nicht auch eine Verpflichtung zur Erarbeitung und Vorhaltung entsprechender parametrisierter Modelle ins Auge gefasst werden sollte. Damit kann und sollte erstens auch dem Phänomen begegnet werden, dass potenziell „vermeintliche“ Schutzkriterien für die Trinkwassergewinnung aufgrund einer nicht hinreichenden Kenntnis des geologischen Untergrunds pauschal und unangemessen scharf definiert werden. Zudem erfordert der Klimawandel in vielen Städten eine Anpassung der Wasserinfrastrukturen, so dass die Erarbeitung entsprechender Modelle mittelfristig häufig ansteht. Allerdings sind diese wahrscheinlich in einigen bis vielen Kommunen noch zu erbringenden Arbeiten zeitkritisch und werden möglicherweise auch Feldarbeiten wie Erkundungsbohrungen u. Ä. erfordern, wenn die Erkundung des oberflächennahen untertägigen Umwelt- und Wirtschaftsraums in den vergangenen Jahrzehnten nicht entsprechend verfolgt wurde.

Die Empfehlung ist daher, dass eine belastbare und quantitative Ableitung von Nutzungspotenzialen von oGT- und UTES-Anlagen in Form von mit numerischen Modellen gestützten Fachplanungen (z. B. Definition von Potenzialräumen für verschiedene priorisierte Entwicklungspfade) durch die Wasserbehörden und die SGD zeitnah und mit Schwerpunktsetzung auf Gebiete mit hohen Wärmebedarfsdichten erfolgen sollte. Dabei sind die verschiedenen Nutzungstechnologien (EWS (wofür es länderübergreifend gute Ansätze gibt), WWA, ATES, BTES, aber auch In-situ-Eisspeichersysteme, thermische Kavernen-Anlagen etc.) zu berücksichtigen.

Sinnvollerweise sind solche Ansätze mit Konzepten zu „blau-grünen“ Wasserinfrastrukturen und Konzepten zur Regulierung des Stadtklimas bei Extremwetterereignissen zu kombinieren.

2 Identifikation der ausbaufähigen geothermischen Heiz- und Kühlsysteme unter Berücksichtigung der Minimierung ihrer Antriebsenergie

2.1 Energieeffizienz geothermischer Systeme

Im folgenden Abschnitt erfolgt die Darlegung des Kenntnisstands zur Energieeffizienz geothermischer Systeme insbesondere in Kombination mit Wärmepumpen. Ziel ist es, technische sowie das Ressourcenmanagement betreffende Ertüchtigungsmaßnahmen aufzuführen, welche die Energieeffizienz positiv beeinflussen.

2.1.1 Einführung zu Erdwärmeanlage

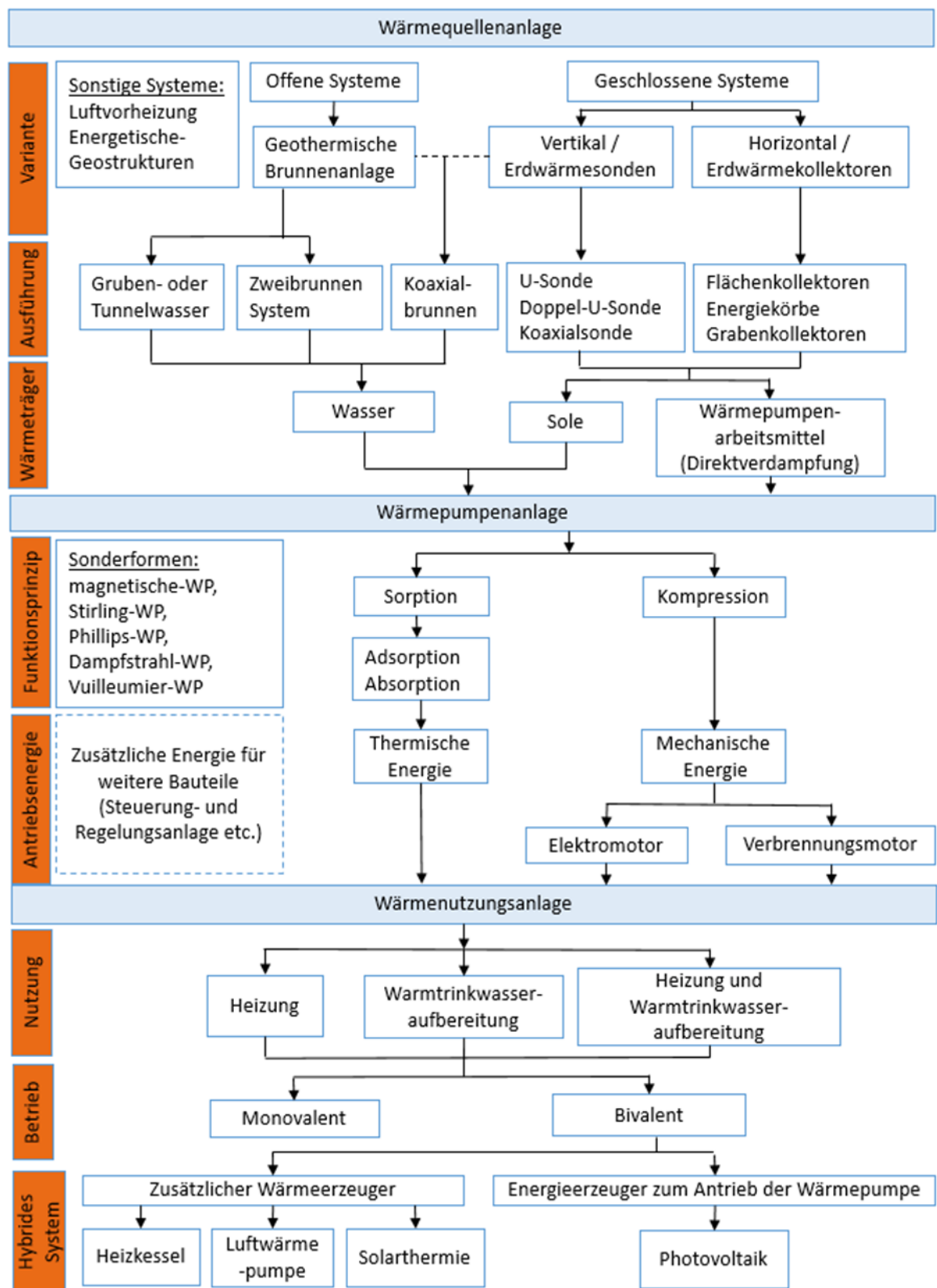
Erdwärmeanlagen werden zur Nutzung von Erdwärme eingesetzt. Je nach Gewinnungstiefe wird zwischen oberflächennaher Geothermie (bis 100 m), mitteltiefer (bis 1000 m) (Bundesverband Geothermie e. V., 2022) und tiefer Geothermie (über 1000 m) unterschieden. Für die Nutzung oberflächennaher Erdwärme gibt es verschiedene Verfahren, Techniken und Konzepte, auf welche im Folgenden eingegangen wird.

2.1.2 Beschreibung der Anlagentypen zur Nutzung der oberflächennahen Erdwärme

Erdwärmeanlagen zur Nutzung der oberflächennahen Geothermie zur Heizung und Kühlung von Gebäuden können in drei wesentliche Anlagenteile gegliedert werden:

- ▶ Wärmequellenanlage,
- ▶ Wärmepumpenanlage,
- ▶ Wärmenutzungsanlage.

In der Wärmequellenanlage wird über ein Trägermedium die im Boden vorhandene Wärmeenergie zur Wärmepumpenanlage geleitet. Dort wird die im Trägermedium gespeicherte Wärme aufgenommen und nach Zufuhr von Antriebsenergie auf das höhere Temperaturniveau der Wärmenutzungsanlage „gepumpt“. Abbildung 2.1 gibt eine Übersicht zur Spezifizierung der gebräuchlichsten oberflächennahen Erdwärmeanlagen.

Abbildung 2.1: Spezifizierung der Anlagentypen zur Nutzung der oberflächennahen Erdwärme

Quelle: Eigene Darstellung, Consulaqua Hamburg Beratungsgesellschaft mbH.

2.1.2.1 Wärmequellenanlage

Wärmequellenanlagen können grundlegend in offene und geschlossene Systeme unterteilt werden.

In offenen Systemen bildet Grundwasser das Wärmeträgermedium. Dieses wird bei Dubletten-systemen (WWA bzw. Zweibrunnensysteme) über einen Entnahmefrühnen gefördert, die Wärme über eine Wärmepumpe entzogen und das abgekühlte Wasser über einen Schluckbrunnen wieder in den geologischen Untergrund eingeleitet (Stober und Bucher, 2014). Je nach Gegebenheit können auch anfallendes Gruben- oder Tunnelwasser genutzt werden (anfallendes Grubenwasser z. B. in Bergwerken).

In geschlossenen Systemen zirkuliert ein Wärmeträgermedium, ohne dass es zu einer Mischung mit dem Grundwasser kommt. Geschlossene Systeme können in Vertikal- bzw. Erdwärmesonden und Horizontal- bzw. Erdwärmekollektoren unterteilt werden. Letztere sind nicht auf ein geeignetes Grundwasservorkommen angewiesen und können die Wärme direkt aus dem Boden beziehen. Als Wärmeträgermedium werden meist Flüssigkeiten verwendet, welche als „Sole“ bezeichnet werden (Wasser-Sole-Anlagen). Solen bestehen aus Wasser mit unterschiedlichen Stoffzusätzen, die den Gefrierpunkt absenken (Stober und Bucher, 2014).

Als Wärmeträgermedium kann alternativ direkt ein Wärmepumpenarbeitsmittel, auch Kältemittel genannt, verwendet werden. Diese Arbeitsmittel verdampfen bereits bei den Temperaturen im Erdreich. Bei diesem Vorgang wird dem Boden Wärme entzogen, welche in latenter Form in das Arbeitsmittel übergeht. Diese Systeme werden als Direktverdampfung bezeichnet. Synonyme hierfür sind Erdwärmesonden mit Phasenwechsel, Gravitationswärmerohr, Thermosyphon oder Heat Pipe. Wegen seines geringen Gefährdungspotentials wird hierbei vermehrt CO₂ als Arbeitsmittel genutzt. Solche Systeme werden als **CO₂-Sonden** bezeichnet (Stober und Bucher, 2014).

Vertikale Systeme bzw. Erdwärmesonden bestehen aus Rohren, welche vertikal in den Boden eingebacht werden. In ihnen zirkuliert ein Wärmeträger und nimmt die Bodenwärme auf. Es wird zwischen der Ausführung als (Doppel-)U-Rohrsonde und Koaxialrohrsonde unterschieden.

- ▶ **U-Rohrsonden** sind, wie der Name bereits ausdrückt, U-förmig gebogen. Das Wärmeträgermedium strömt auf der einen Seite hinab und wird am unteren Ende umgeleitet, so dass es auf der anderen Seite wieder hinauf strömt. Dabei findet ein Wärmeaustausch zwischen Wärmeträgermedium und Boden statt.
- ▶ In **Doppel-U-Rohrsonden** werden zwei voneinander unabhängige U-Rohrsonden in einem Bohrloch verlegt.
- ▶ **Koaxialsonden** bestehen aus zwei ineinander liegenden Rohren. Im Heizzyklus strömt das kühle Wärmeträgermedium im außenliegenden Rohr nach unten, wärmt sich dabei auf und steigt im Innenrohr wieder nach oben. Soll stattdessen gekühlt werden, wird dieser Kreislauf umgekehrt.

Neben diesen vertikalen Systemen stehen die **horizontalen Systeme bzw. Erdwärme-kollektoren**. Bei diesen werden Rohrleitungen in geringer Tiefe flächig verlegt. Das Wärmeträgermedium nimmt dabei die Wärme aus den obersten Bodenschichten auf. Im Gegensatz zu vertikalen Systemen sind hier die Energieeinträge durch Sonneneinstrahlung entscheidend. Daher kann die genutzte Fläche meist auch nicht überbaut werden (Stober und Bucher, 2014).

Neben einer einfachen mäandrierenden Verlegung der Wärmeübertragrohre gibt es weitere Bauformen, welche den benötigten Flächenbedarf minimieren:

- ▶ In **Grabenkollektoren** werden die Rohre an den Seitenwänden eines Grabens angebracht (Kaltschmitt et al., 2013).
- ▶ In **Energiekörben** (auch Erdwärmekörbe genannt) werden die Rohrleitungen spiralförmig gewickelt und im Boden verlegt (Kaltschmitt et al., 2013).

In jedem Fall müssen die Rohrleitungen unterhalb der Frostgrenze und oberhalb der Eindringtiefe der sommerlichen solaren Regeneration verlegt sein (Stober und Bucher, 2014).

Neben diesen Varianten gibt es noch weitere Möglichkeiten, die Erdwärme zu nutzen:

- ▶ In **Luftvorheizungen/-kühlung** wird die Zuluft über im Erdreich verlegte Rohre geleitet. Dabei nimmt sie die Bodenwärme auf, und es können die Temperaturspitzen im Sommer und Winter gebrochen werden.
- ▶ **Energetische Geostrukturen**, auch erdberührte Bauteile genannt, sind Fundamentelemente, welche mit Leitungen ausgestattet sind. Durch die Zirkulation eines Wärmeträgers in diesen Leitungen kann zusätzlich zur statischen Funktion auch ein Wärmetausch mit dem angrenzenden Boden erfolgen. Beispiele für solche Elemente sind Gründungspfähle (Energiepfähle), Schlitzwände, Boden- oder Fundamentplatten.

2.1.2.2 Wärmepumpenanlage

Eine Wärmepumpe dient dazu, thermische Energie auf dem niedrigen Temperaturniveau der Wärmequelle aufzunehmen und durch Zufuhr von Antriebsenergie auf dem höheren Niveau der Wärmesenke wieder abzugeben. Dabei wird ein Arbeitsmittel oder auch Kältemittel genutzt (Kaltschmitt et al., 2013). Grundsätzlich kann zwischen Sorptions- und Kompressionswärmepumpen unterschieden werden.

In **Kompressionswärmepumpen** wird ein gegebenenfalls durch eine Druckverringerung flüssig gehaltenes Kältemittel in den sogenannten Verdampfer geleitet. Dort wird es durch die Temperatur der Wärmequelle erwärmt und geht in einen gasförmigen Aggregatzustand über. Durch einen Verdichter wird der Druck des gasförmigen Arbeitsmittels angehoben, wodurch ein Temperaturanstieg erfolgt. Im sogenannten Verflüssiger kann das Arbeitsmittel dann auf dem Temperaturniveau der Wärmesenke kondensieren. Die freiwerdende Kondensationswärme geht auf das Wasser der Wärmesenke über. Anschließend verringert eine Drosseleinrichtung den Druck, und das flüssige Arbeitsmittel kann zurück zum Verdampfer geleitet werden. Die mechanische Energie, welche zum Antrieb des Verdichters benötigt wird, kann entweder über einen Elektromotor oder einen Verbrennungsmotor bereitgestellt werden. Bei Verbrennungsmotoren wird dabei meist Gas als Energieträger genutzt, weswegen diese auch als Gasmotorwärmepumpen bezeichnet werden.

Der Kreislauf in **Sorptionswärmepumpen** ist ähnlich wie in Kompressionswärmepumpen, nur dass hier die Druckveränderung nicht durch einen Verdichter erzeugt wird, sondern über Sorptionsprozesse. Um die Sorptionsprozesse umzukehren, wird eine Hitzezufuhr benötigt. Die Antriebsenergie bei Sorptionswärmepumpen ist also **thermisch** und nicht mechanisch wie bei Kompressionswärmepumpen. Es wird zwischen **Ad- und Absorptionswärmepumpen** unterschieden. Der Unterschied besteht in dem Sorptionsprozess: In Absorptionswärmepumpen wird

das Kältemittel von einem flüssigen Medium absorbiert, während es in Adsorptionswärmepumpen an der Oberfläche eines Feststoffes adsorbiert wird.

2.1.2.3 Wärmenutzungsanlage

Für die weitere Ausarbeitung ist das angestrebte Temperaturniveau der Wärmesenke eine maßgebliche Randbedingung. Je nachdem, ob die geförderte Wärme zum Heizen, zur Warmtrinkwasseraufbereitung, für beides oder zum Kühlen genutzt werden soll, ist dieses Temperaturniveau unterschiedlich.

Weiter kann unterschieden werden, ob die Erdwärmeanlage der einzige Wärmeerzeuger ist (**monovalentes System**) oder ob weitere im Haus verbaute Anlagen zur Wärmebereitstellung oder zum Antrieb der Wärmepumpe genutzt werden (**bivalentes System**).

Bei bivalenten Systemen können zur Wärmebereitstellung Heizkessel, Luftwärmepumpen oder solarthermische Anlagen betrieben werden. Diese Anlagen müssen berücksichtigt werden, da sich dadurch ein Einfluss auf die Vollbenutzungsstunden und ggf. die Jahresarbeitszahl ergibt.

2.1.2.4 Kennzahlen zur Beschreibung der Energieeffizienz von Erdwärmeanlagen

2.1.2.4.1 Coefficient of Performance

Die **Leistungszahl** (Coefficient of Performance, **COP**) ist eine wichtige Kennzahl zur Beschreibung der Effizienz elektrisch betriebener Kompressionswärmepumpen. In einer idealisierten, verlustfreien Wärmepumpe kann die Leistung durch den Carnot-Prozess beschrieben werden. Dabei ergibt sich der maximal erreichbare COP direkt aus den Temperaturen (in Kelvin) der Wärmesenke und -quelle (Born et al., 2017):

$$COP_{Carnot} = \frac{T_{Wärmesenke}}{T_{Wärmesenke} - T_{Wärmequelle}}$$

Je geringer die Differenz zwischen Wärmequelle und -senke ist, desto höher ist der COP. Je höher der COP liegt, desto effizienter ist die Wärmepumpe.

Der unter realen Bedingungen gemessene COP ergibt sich aus dem Verhältnis der elektrischen Leistung (in kW), welche zum Betrieb der Wärmepumpe benötigt wird, zur abgegebenen Wärmemenge (in kW). Der COP für elektrisch betriebene Kompressionswärmepumpen wird auf Testständen nach den Vorgaben der europäischen Norm 14511 (Vorläufernorm EN 255) ermittelt. Dabei werden auch die Antriebsleistung der Wärmepumpe, die Leistungsaufnahme der Wärmepumpen-Regelung und Hilfsenergie, die zum Ausgleich der internen Druckverluste benötigt wird, betrachtet.

Die Norm gibt folgende Betriebspunkte vor:

- Sole/Wasser: B0/W35,
- Wasser/Wasser: W10/W35.

Die vordere Zahl steht für die Temperatur der Wärmequelle (in °C), die hintere für die Vorlauftemperatur des Wärmeverteilsystems (in °C).

2.1.2.4.2 Heizzahl

Bei Sorptionswärmepumpen und gasmotorisch betriebenen Kompressionswärmepumpen wird die Antriebsleistung durch thermische Energie bereitgestellt. Zur Beschreibung der Effizienz wird daher die abgegebene Wärmeleistung mit dem Energieinhalt des eingesetzten Energieträgers ins Verhältnis gesetzt. Dieses Verhältnis wird **Heizzahl** genannt; über ein Jahr gerechnet ergibt sich die **Jahresheizzahl**.

Diese Kennzahl ist zwar ähnlich der Leistungszahl, kann aber nicht direkt mit ihr verglichen werden. Um eine Vergleichbarkeit herzustellen, muss die Leistungszahl mit dem primärenergetischen Wirkungsgrad der Elektrizitätserzeugung und -verteilung verrechnet werden. Dieser liegt in der Regel zwischen 35 % und 45 % (ASUE – Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e. V., 2017).

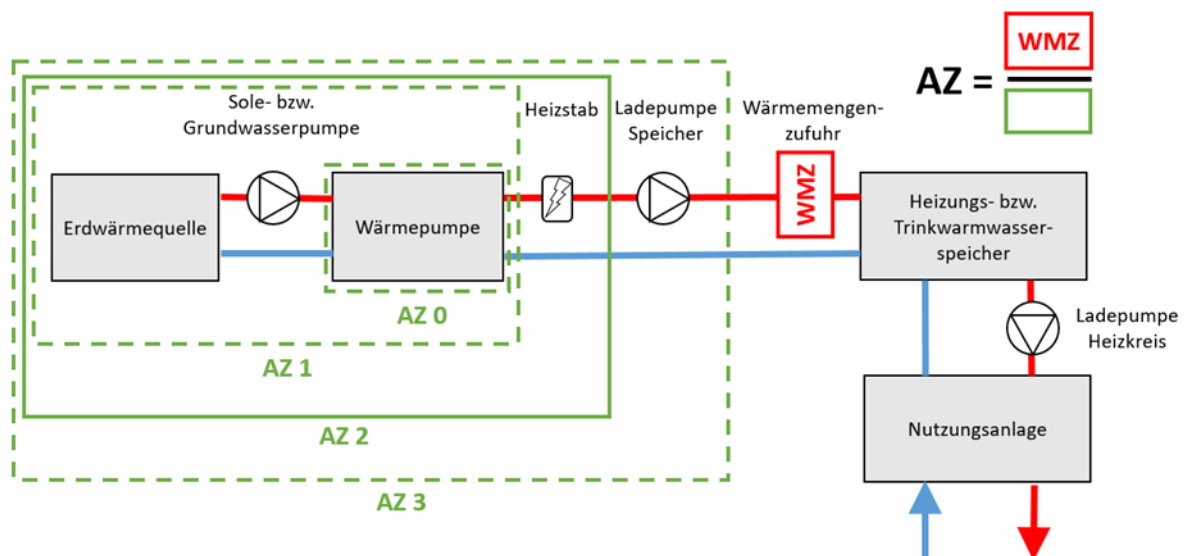
Im englischen Sprachraum wird für die Leistungszahl und die Heizzahl der neutrale Begriff COP und für die Jahresarbeits- bzw. Heizzahl der Begriff SPF (Seasonal Performance Factor) verwendet.

2.1.2.4.3 Jahresarbeitszahl

Um eine Aussage über die Effizienz des Gesamtsystems treffen zu können, wird die **Arbeitszahl (AZ)** verwendet. Sie ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen der Summe aus bereitgestellter Nutzwärme und der Summe der eingesetzten Antriebsenergie innerhalb eines bestimmten Zeitraums. Auf ein gesamtes Jahr bezogen, ergibt sich die **Jahresarbeitszahl (JAZ)**. Diese ist nicht nur von der Anlage selbst, sondern auch von äußeren Bedingungen wie etwa dem Klima und dem Nutzerverhalten beeinflusst.

Je nachdem, welche Bilanzgrenzen für das System angesetzt werden, sind die Input- als auch Output-Energien unterschiedlich. In der Literatur werden dabei verschiedene Bilanzgrenzen definiert. Eine Übersicht hierzu gibt Abbildung 2.2.

Abbildung 2.2: Schematische Darstellung einer Wärmepumpenanlage mit den Bilanzgrenzen für die Ermittlung der Arbeitszahl



Quelle: Miara et al., 2011.

Für die weitere Ausarbeitung wird die Bilanzgrenze „AZ 2“ betrachtet. Diese hat sich in der Fachöffentlichkeit durchgesetzt (Born et al., 2017). Dabei werden folgende Energieverbräuche berücksichtigt:

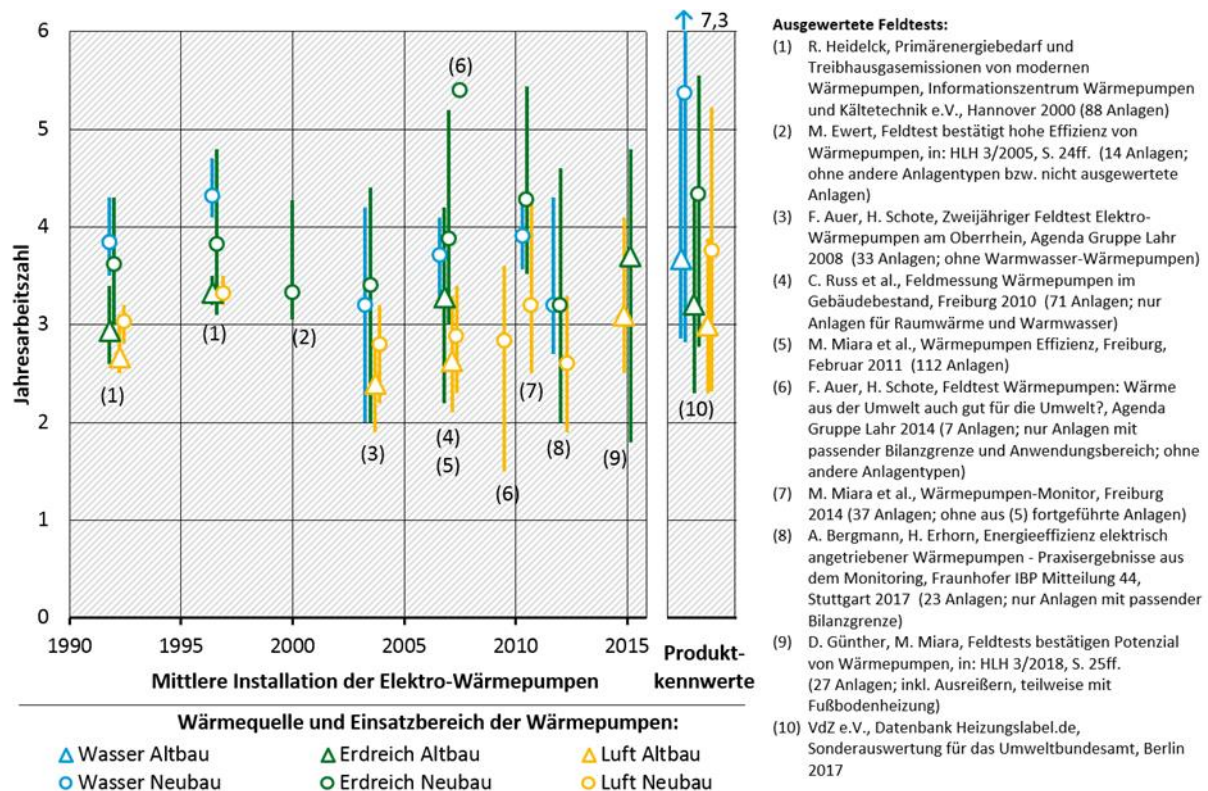
- ▶ der Energieverbrauch der Sole- bzw. Grundwasserpumpe,
- ▶ bei Kompressionswärmepumpen der Elektronenenergieverbrauch durch den Verdichter und für weitere Bauteile wie etwa Steuerungs- und Regelungsanlagen,
- ▶ bei Sorptionswärmepumpen der Energiegehalt des eingesetzten Energieträgers sowie der Energieverbrauch für weitere Bauteile wie etwa Steuerungs- und Regelungsanlagen,
- ▶ der elektrische Energieverbrauch des Heizstabs.

Die Bilanzierungsgrenze der Wärmemengenzufuhr liegt vor der Speicheranlage. Alle weiteren genannten Arbeitszahlen beziehen sich ohne nähere Bezeichnung auf die Bilanzgrenze „AZ 2“.

2.1.3 Energieeffizienz von Erdwärmeanlagen

Die Energieeffizienz von Wärmequellenanlagen kann anhand kompilierter Jahresarbeitszahlen aus der Literatur (Russ et al., 2010; Miara et al., 2011; Günther et al., 2014) für Erdwärmekollektoren, Erdwärmesonden und Wasser-Wasser-Anlagen abgeleitet werden (Abb. 2.3). Auch wenn die Daten aus unterschiedlichen Messzeiträumen und somit verschiedenen klimatischen Bedingungen stammen und keine Differenzierung nach hybriden und monovalenten Anlagen getroffen wurde, können anhand des Vergleichs Tendenzen aufgezeigt werden.

Abbildung 2.3: Jahresarbeitszahlen von Elektro-Wärmepumpen in Feldtests

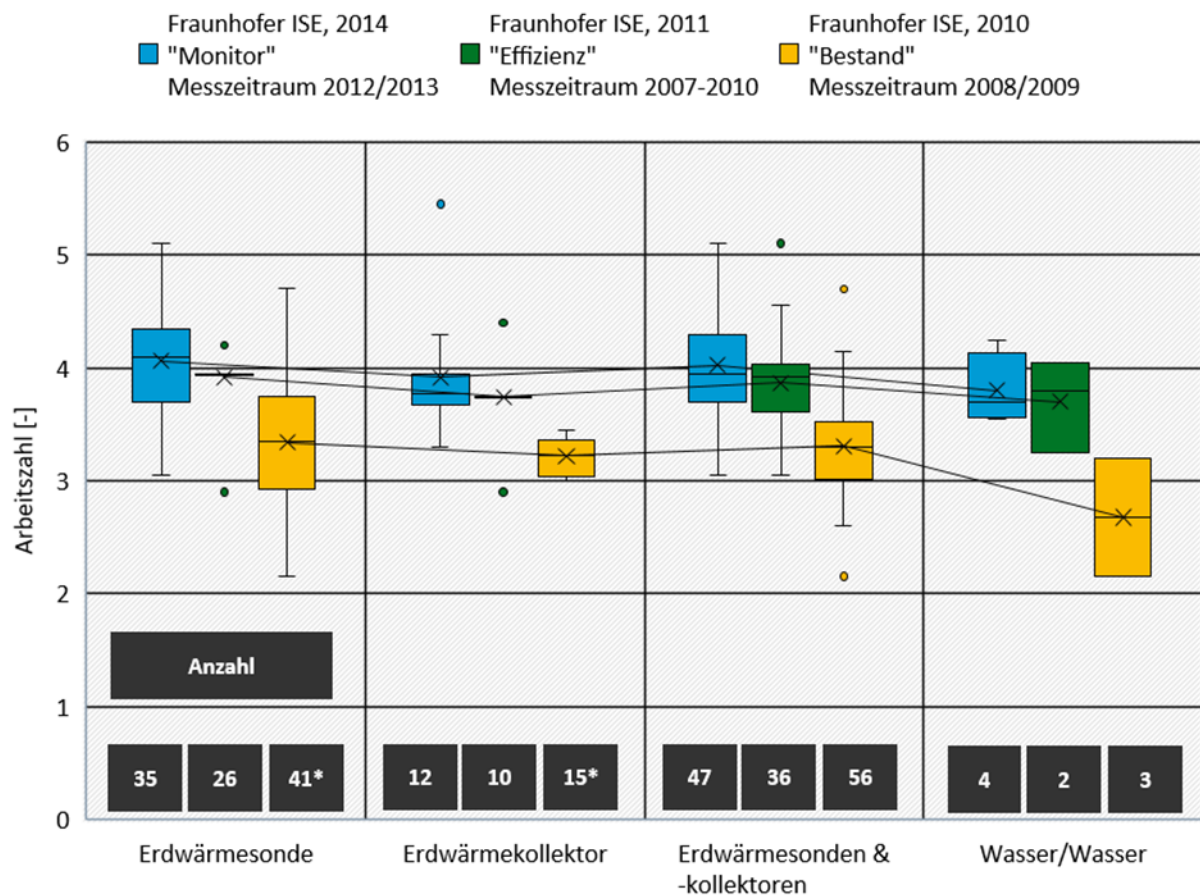


Quelle: Lohse und Schubert, 2019.

Mit Ausnahme einzelner Ausreißer weisen Erdwärmeanlagen überwiegend Jahresarbeitszahlen zwischen 3,0 und 4,4 auf. Lediglich die wenigen untersuchten älteren Wasser-Wasser-Bestandsanlagen zeigen im Mittel Jahresarbeitszahlen von unter 3,0.

Am häufigsten wurden in allen Studien Erdwärmesonden untersucht, gefolgt von Wärmekollektoren. Dabei zeigt sich, dass Sondensysteme im Schnitt geringfügig bessere Arbeitszahlen erreichten als Erdwärmekollektoren (Abb. 2.4).

Abbildung 2.4: Arbeitszahlen von Erdwärmesonden, Erdwärmekollektoren und Grundwasserbrunnen



*Es wurden nur die Mittel- sowie Maximal- und Minimalwerte angegeben.

Quelle: Fraunhofer ISE, 2014; Fraunhofer ISE, 2011; Fraunhofer ISE, 2010

Quelle: Miara et al., 2011.

Da horizontale Systeme bzw. Erdwärmekollektoren durch oberirdische Bedingungen wie Temperatur, Regen und Sonneneinstrahlung beeinflusst werden, sind sie höheren Schwankungen ausgesetzt. Dies führt dazu, dass die Solentemperatur in den späten Sommermonaten ein Maximum und in den Wintermonaten ein Minimum erreicht. Dadurch ist die Effizienz in den Sommer- und Herbstmonaten zwar besonders hoch, über das gesamte Jahr betrachtet erreichen vertikale Sondensysteme jedoch meist besser Ergebnisse (Miara et al., 2011; Günther et al., 2014).

In der Rubrik „Bestand“ wurden Anlagen in Bestandsgebäuden zusammengefasst, die einen im Vergleich zu den anderen Rubriken schlechteren energetischen Ausbauzustand aufweisen. Sowohl für Erdwärmekollektoren als auch für Erdwärmesonden weisen diese Anlagen im Mittel Jahresarbeitszahlen unter 3,5 auf. In den übrigen Anlagen liegen die Mittelwerte um 4,0. Dies

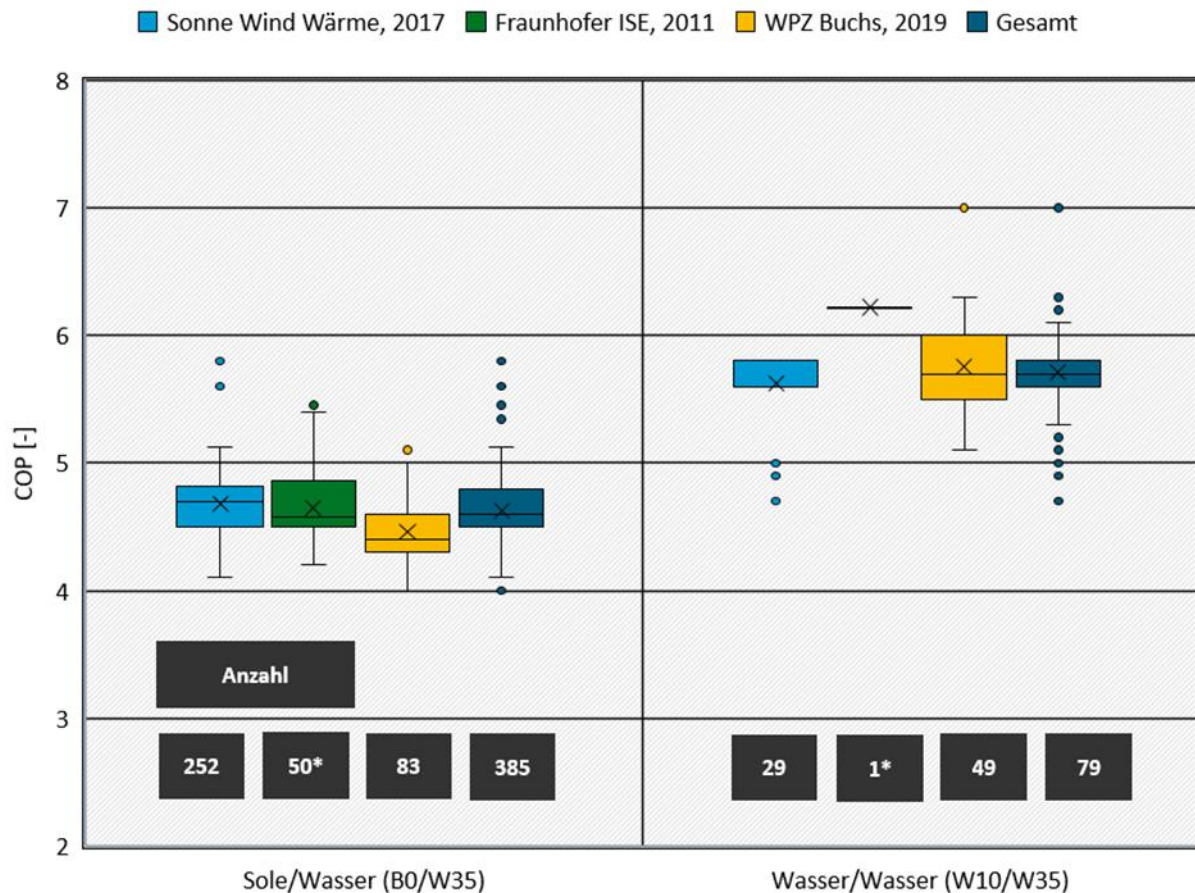
verdeutlicht den starken Einfluss des Wärmeverteilsystems und des bautechnischen Energiestandards eines Gebäudes auf die Effizienz der Erdwärmeanlage. In Bestandsgebäuden muss daher abgewogen werden, ob eine Erdwärmeanlage energetisch sinnvoll ist. Häufig ist dies erst nach einer wärmetechnischen Sanierung der Fall (Russ et al., 2010). Nach Lohse und Schubert (2018) ist der Einsatz hocheffizienter Erdwärmeanlagen bei geeigneten Randbedingungen (62 % der Gebäude haben Passivhausstandard erreicht, und 38 % sind vollständig renoviert entsprechend EnEV -25 %) der kosteneffektivste Weg, um Treibhausgasreduktionen von 90 % zu erreichen.

Allgemein kann dennoch gesagt werden, dass Wasser-Wasser-Anlagen besonders gute Voraussetzungen für eine hohe energetische Effizienz der Wärmepumpe bieten. Dies liegt einerseits an der relativ konstanten Temperatur des Grundwassers und andererseits an den geringen Wärmeverlusten durch die unmittelbare Nutzung des Grundwassers (Miara et al., 2011; Kaltschmitt et al., 2013; Stober und Bucher, 2014). Dennoch ist ersichtlich, dass diese Potentiale im Feld nicht immer erreicht werden können.

Das in den obigen Grafiken nicht aufgeführte Direktverdampfungsverfahren erreicht häufig 10 % – 15 % höhere Arbeitszahlen als Sole-Wasser-Systeme (Kaltschmitt et al., 2013). Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass kein Wärmetausch zwischen Arbeitsmittel und Kältemittel erfolgen muss, wodurch geringere Temperaturverluste anfallen. Zusätzlich entfällt der Energieverbrauch durch den Betrieb der Kältemittelpumpe. Auch in den Messungen in Günther et al. (2014) waren unter den drei Anlagen mit der höchsten Jahresarbeitszahl eine mit Direktverdampfung und eine mit CO₂-Sonde. Dabei konnte jedoch kein direkter Zusammenhang zwischen diesen Technologien und den hohen JAZ geschlossen werden.

Eine Übersicht der Effizienz von am Markt verfügbaren elektrischen Wärmepumpen wird in Abbildung 2.5 gegeben, in der die COP-Werte unterschiedlicher Quellen einander gegenübergestellt werden. Dabei können die Ergebnisse einer Prüfstelle (Wärmepumpen-Testzentrum Buchs, WPZ), die Herstellerangaben (aus der Produktdatenbank des Fachmagazins „Sonne Wind Wärme“) und die Werte real verbauter Wärmepumpen (aus dem Monitoring-Programm des Fraunhofer ISE) verglichen werden.

Dabei ist zu beachten, dass bei den Werten in der Quelle (Miara et al., 2011) die Wasser-Wasser-Anlage sowie 16 der Sole-Wasser-Anlagen mit der veralteten Norm DIN EN 255 bestimmt wurden. Um eine Vergleichbarkeit mit Messungen anhand der aktuellen Norm DIN EN 14511 herzustellen, wurden diese Werte um 8 % erhöht (Born et al., 2017).

Abbildung 2.5: Vergleich der COP-Werte von Sole-Wasser- und Wasser-Wasser-Wärmepumpen nach DIN EN 15411

*Die Wasser/Wasser-WP, sowie 16 der Sole/Wasser-WP wurden mit DIN EN 255 angegeben. Diese wurden um 8% erhöht um eine Vergleichbarkeit mit den Messergebnissen der DIN EN 14511 herzustellen (GZB, 2017).

Quelle: Sonne Wind Wärme, 2019; Fraunhofer ISE, 2011; WPZ Buchs, 2019

Quelle: Miara et al., 2011.

Bei Sole-Wasser-Anlagen liegen die Messwerte des WPZ im Schnitt etwas niedriger. Die Werte aus der Produktdatenbank des Magazins „Sonne Wind & Wärme“ sind in etwa gleich hoch wie bei der Auswertung des Fraunhofer ISE. Bei einer Zusammenfassung aller Anlagen ergibt sich ein durchschnittlicher COP von 4,6.

Bei den Wasser-Wasser-Anlagen ist der durchschnittliche COP der Produktdatenbank des Magazins „Sonne Wind & Wärme“ und der des WPZ etwa auf gleicher Höhe, während er bei den Daten des Monitoring-Programms des Fraunhofer ISE deutlich höher liegt. Dabei ist zu beachten, dass bei der Auswertung des Fraunhofer ISE nur eine Anlage ausgewertet werden konnte. Zusammengefasst ergibt sich ein Schnitt von 5,7.

Zwar kann prinzipiell für Sole-Wasser- und Wasser-Wasser-Systeme dieselbe Wärmepumpe verwendet werden, für die Berechnung der COP-Werte nach DIN-Norm werden jedoch unterschiedliche Betriebspunkte genutzt. Bei Wasser-Wasser-Anlagen ist die Quelltemperatur auf 10 °C festgesetzt, bei Sole-Wasser-Anlagen liegt sie bei 0 °C (Abb. 2.5). Dadurch ist eine Vergleichbarkeit zwischen den COP-Werten der beiden Wärmeträgermedien nicht möglich.

Der Grund für die verschiedenen Betriebspunkte ergibt sich aus den real vorkommenden Quelltemperaturen: Bei Wasser-Wasser-Anlagen bildet 10 °C die relativ konstante Temperatur des

Grundwassers ab. Darin zeigt sich auch das große Potential der geothermischen Brunnenanlagen: Das Temperaturniveau des Grundwassers bleibt kontinuierlich recht hoch, wodurch der Temperaturhub sinkt und die Anlage effektiver ist. Hinzu kommen die geringeren Wärmetauscherverluste, da das Trägermedium unmittelbar genutzt wird. Der Betriebspunkt von 0 °C wurde für die Messung des COP einer Sole-Wasser-Anlage gewählt, da dies theoretisch die niedrigste Temperatur ist, bevor ein Einfrieren des Bodens erfolgen kann.

Elektrische Kompressionswärmepumpen sind in Deutschland die am häufigsten genutzte Ausführungsart (Kaltschmitt et al., 2013; Born et al., 2017). Dagegen sind gasmotorische Kompressionswärmepumpen zur Beheizung von Wohngebäuden eine große Ausnahme. Dies liegt daran, dass sie erst ab recht hoher Wärmeleistung rentabel werden. Gleiches gilt für gasmotorische betriebene Absorptionswärmepumpen (ASUE, 2013). Diese Anlagen könnten jedoch insbesondere bei der Sanierung eine große Bedeutung haben, da hier höhere Wärmebedarfe und häufig Gasinfrastrukturen vorhanden sind (Born et al., 2017).

2.1.4 Ertüchtigungsmaßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz

Es besteht die Möglichkeit, eine Effizienzsteigerung von 10 % – 50 % zu erreichen. Dies kann durch eine Optimierung der Auslegung und Installation des Wärmepumpensystems erfolgen. Zusätzlich ist eine fortlaufende Überwachung der Energieeffizienz erforderlich (vgl. Lohse und Schuberth (2019)).

2.1.4.1 Ertüchtigungsmaßnahmen der Wärmenutzungsanlage

Nach dem Carnot-Prinzip sollten eine möglichst hohe Quelltemperatur und eine möglichst niedrige Senkentemperatur erreicht werden, um eine optimale Effizienz zu erzielen. Die Bauweise der Wärmepumpe und auch das eingesetzte Kältemittel spielen im Verhältnis dazu nur eine untergeordnete Rolle (Kaltschmitt et al., 2013).

Die Quelltemperatur kann meist nicht beeinflusst werden. Optimierungsmaßnahmen müssen daher auf Seite der Senke – an der Vorlauftemperatur der Heizungsanlage – erfolgen. Diese kann durch eine bessere Dämmung und dadurch einen geringen Heizwärmebedarf erzielt werden. Insbesondere im Gebäudebestand ist der Einbau einer Wärmepumpe typischerweise erst nach einer wärmetechnischen Sanierung sinnvoll (Russ et al., 2010; Lohse und Schuberth, 2019). Abgesehen von der Effizienzsteigerung der Wärmepumpenanlage durch eine bessere Dämmung muss eine Reduktion des Energiebedarfs das vorrangige Verbesserungsziel sein (Miara et al., 2011). Andererseits kann auch durch eine Flächenvergrößerung des Wärmeübergabesystems eine Verringerung der Vorlauftemperatur erfolgen (Russ et al., 2010). Dies wird meist durch Fußbodenheizungen erzielt. Flächenaktive Wandheizungen können allerdings mit noch geringeren Temperaturen betrieben werden (Miara et al., 2011; Stober und Bucher, 2014). Ein guter hydraulischer Abgleich verringert zusätzlich die benötigte Vorlauftemperatur (Stober und Bucher, 2014).

Häufig ist es aus energetischer Sicht sinnvoll, mittels der Wärmepumpenanlage neben der Heizungsanlage auch die Warmtrinkwasseraufbereitung zu betreiben. Paradoxe Weise wird dadurch die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpenanlage verringert. Dies hat zwei Gründe:

1. Es werden zwei Temperaturniveaus benötigt. Dabei ist der benötigte Temperaturhub bei der Warmtrinkwasseraufbereitung wesentlich höher als bei der Heizungsanlage, was anteilig die Jahresarbeitszahl verschlechtert (Stober und Bucher, 2014).
2. Die Wärmepumpenanlage muss ganzjährig betrieben werden. Dadurch verringert sich die Regenerationszeit des geologischen Untergrunds (ebd.).

Wird jedoch die Jahresarbeitszahl des gesamten Systems verglichen, ergeben sich häufig deutlich günstigere Ergebnisse als mit herkömmlichen Methoden der Warmtrinkwasseraufbereitung. Auch die Art des Speicherkonzepts des Heizkreises hat Einfluss auf die Effizienz. In der Ausarbeitung von Miara et al. (2011) ergab sich, dass Anlagen ohne Speicher die höchsten Arbeitszahlen aufwiesen, knapp gefolgt von Anlagen mit Pufferspeichern. Anlagen mit Kombispeicher schnitten deutlich schlechter ab.

Eine bedarfsgerechte Auslegung der Wärmepumpenanlage und des Heizsystems ist in jedem Fall entscheidend für die Effizienz. Dabei müssen auch die Steuerungs- und Regelungsparameter sowie die Betriebsweise den Einsatzbedingungen der Wärmepumpe entsprechen (Russ et al., 2010). Konkret bedeutet dies eine Abstimmung der Ladepumpe (Transport des erwärmten Wassers in den Heizkreis/Speicher) mit dem Betrieb der Wärmepumpe und einer Funktionsprüfung aller Bauteile im hydraulischen Kreis (Miara et al., 2011). Auch die Beladestrategie des Warmwasserspeichers sollte bestimmt und kontrolliert werden. Zudem sollten komplexe Speichersysteme vermieden werden (Stober und Bucher, 2014).

2.1.4.2 Ertüchtigungsmaßnahmen an der Wärmepumpe

Durch frequenzgeregelter Verdichter (Inverter) zur Leistungsmodulation können weitere Effizienzsteigerungen erzielt werden. Sie sind zwar eine neue Entwicklung auf dem Wärmepumpenmarkt, werden aber voraussichtlich bald von vielen Wärmepumpenherstellern vertrieben (Born et al., 2017).

Neben dem Verdichter gibt es auch Energiesparpotenzial in weiteren Bauteilen. So sind zukünftig Effizienzsteigerungen durch eine Optimierung des Kältekreislaufs zu erwarten (Born et al., 2017). Auch durch die Einbringungen hocheffizienter Sole- und Grundwasserpumpen können die Jahresarbeitszahlen noch weiter verbessert werden (Günther et al., 2014).

2.1.4.3 Digitalisierung und Smart-Grid-Schnittstelle

Für eine möglichst energetisch sinnvolle Nutzung von Wärmepumpen bietet es sich an, diese dann zu betreiben, wenn es Überschuss an regenerativer Elektrizität gibt. Durch eine Smart-Grid-Schnittstelle könnte ein Energieversorger die Wärmepumpen steuern und genau in diesen Phasen betreiben. Dies würde auch die Kopplung des Elektrizitäts- und des Wärmesektors optimieren. Zwar ist diese Technologie theoretisch durch das SG-Ready-Label bereits am Markt etabliert, wird in der Praxis jedoch noch nicht umgesetzt (Born et al., 2017).

Daneben ist auch eine kleinräumige, hausinterne Verknüpfung zwischen einer Photovoltaikanlage und einer Wärmepumpe sinnvoll. Dies ist weit verbreitet: So werden bereits 20 % – 30 % der Wärmepumpenanlagen in Neubauten mit einer Photovoltaikanlage gekoppelt (ebd.).

Ein weiterer Trend liegt in der Digitalisierung im Handwerk und in Smart-Home-Konzepten. Durch die automatische Erfassung von Betriebsdaten kann der Heizungsbetrieb optimiert werden. Dies kann manuell durch Fachfirmen erfolgen oder mittels intelligenter Algorithmen automatisiert geschehen (ebd.).

2.2 Hybride Wärmeversorgungskonzepte

2.2.1 Hybride Systeme

Zur Nutzung erneuerbarer Wärmequellen (z. B. Erdwärme, Grundwasser, Außenluft, Abwasserwärme) ist der Einsatz von Wärmepumpen nötig, um die notwendigen Vorlauftemperaturen der

Heizsysteme zu erzielen. Dabei werden in der Praxis hauptsächlich elektrizitätsbetriebene Wärmepumpen eingesetzt.

Werden im Rahmen eines Wärmepumpensystems verschiedene Wärmequellen miteinander kombiniert, wird von einem hybriden System gesprochen. Durch den Einsatz verschiedener Wärmequellen können die Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpen deutlich verbessert werden. Der Beitrag zur CO₂-Reduktion hängt allerdings davon ab, welche weiteren Wärmequellen im hybriden System erschlossen werden.

► Speicherung überschüssiger Solarwärme in e-Tanks in Berlin:

In Berlin wurden im Rahmen einer energetischen Sanierung von 84 Wohnungen e-Tanks zur Speicherung überschüssiger Solarwärme gebaut. Die Speicherung der überschüssigen Solarwärme erfolgt in einem 400 m³ großen Erdspeicher und kann den Wärmepumpen als Wärmequelle dienen. Dieses System trägt zu einer Ertragssteigerung der Solarwärme auf 700 kWh/m² bei und führt zu einer JAZ-Erhöhung der Wärmepumpe auf 5,5. Auf diese Weise konnte eine Reduktion des Heizenergiebedarfs von anfänglich jährlich 175 kWh/m² auf jährlich 23 kWh/m² erreicht werden.

► Nutzung von Abwasserwärme (STAWAG Energie GmbH in Aachen):

In Aachen nutzt ein Projekt der STAWAG Energie GmbH Abwasser als Wärmequelle, um 163 Wohnungen mit Wärme zu versorgen. Der kommunale Abwasserkanal besitzt ganzjährig eine Temperatur von 15 °C und versorgt zwei zweistufige Wärmepumpen (Heizleistung von 60 W/m²). Als zusätzliche Niedertemperaturquelle werden Luftwärmepumpen eingesetzt, um die Wärme der Abluft aus den Bädern verwerten zu können. Insgesamt erreicht das Heizsystem eine JAZ von 3,6.

► Einspeicherung von überschüssiger Wärme aus Solarthermie oder Industrieabwärme im Sommer und Ausspeicherung mit Einsatz einer Wärmepumpe im Winter (vgl. Abschn. 2.3.1.4):

Durch den Einsatz eines HT-ATES können bei niedrigen Vorlauftemperaturen sehr hohe JAZ (> 20) erzielt werden, die bei einer konventionellen Kombination einer Umweltwärmequelle mit einer Wärmepumpe nicht erreichbar sind. Aus Sicht der Autoren handelt es sich bei einem HT-ATES um ein hybrides System, da im Grundwasserleiter Wärme aus unterschiedlichen Quellen gespeichert und im Bedarfsfall die im Grundwasser gespeicherte Wärme mit Hilfe einer Wärmepumpe im Winter zum Heizen genutzt wird.

Ein komplexes hybrides System zur Wärmeversorgung eines Hamburger Stadtteils wird im folgenden Kapitel vorgestellt.

2.2.2 Hybrides Wärmeversorgungskonzept am Beispiel Hamburg-Wilhelmsburg

Die Wärmeversorgung basiert in Deutschland noch immer weitgehend auf fossilen Energieträgern. Da mehr als die Hälfte des deutschen Gesamtenergiebedarfs für das Bereitstellen von Wärme für Gebäude sowie für Gewerbe und Industrie benötigt wird, kann eine Dekarbonisierung der Wärmeversorgung einen bedeutenden Beitrag zum Gelingen der Energiewende leisten.

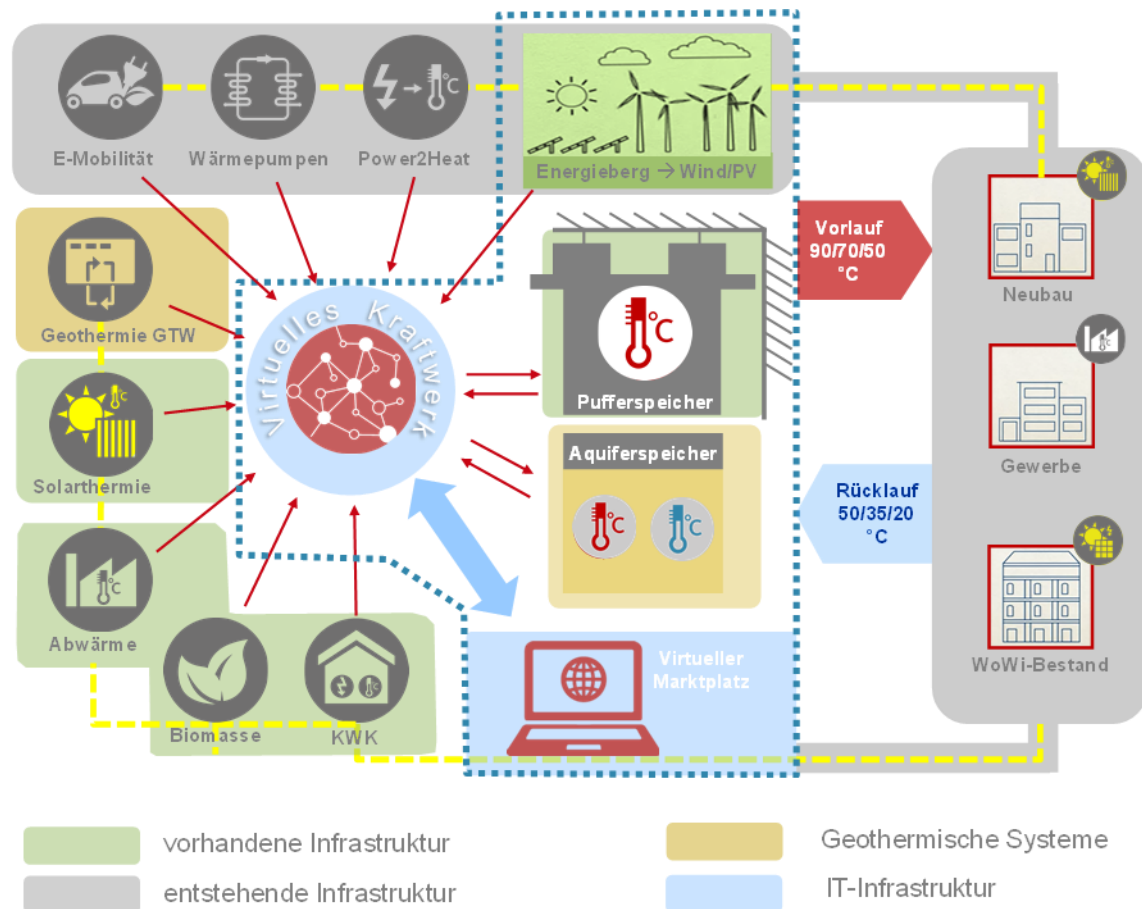
Die benötigten Wärmemengen und CO₂-Einsparpotenziale sind im urbanen Raum zwar groß, das Herstellen und Verteilen regenerativer Wärme ist hier aber aufgrund der hohen Kosten für die benötigten Flächen, Infrastrukturen und Erzeugungsanlagen bislang nur schwer umsetzbar. Neue Erzeugungs- und Speichertechnologien im Zusammenspiel mit einer intelligenten Sektorenkopplung und einer innovativen Vermarktung können die Grundlage für eine nachhaltige Transformation der Wärme- und Kälteversorgung bilden. Am Beispiel des Hamburger Stadtteils Wilhelmsburg, eines stark wachsenden Stadtquartiers, soll diese Transformation im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK; vormals Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BWMi)) geförderten Reallabors „IW³ – Integrierte Wärmewende Wilhelmsburg“ demonstriert werden.

Ein gewachsenes städtisches Wärmesystem soll ausgebaut und gleichzeitig nachhaltig transformiert werden. Erzeugungsseite, Systemintegration und Marktseite greifen ganzheitlich ineinander. Bestehende und neue regenerative Erzeuger sowie Wärmespeicher werden miteinander kombiniert und in ein virtuelles Kraftwerk integriert. Ein innovativer Wärmemarktplatz bietet die Möglichkeit, Energie aus unterschiedlichen Quellen und von verschiedenen Anbietern transparent, automatisiert und effizient zu handeln. Die Sektoren Wärme, Elektrizität und Mobilität werden intelligent miteinander gekoppelt (Abb. 2.6). Damit soll perspektivisch eine energieeffiziente und CO₂-neutrale Versorgung des Elbinsel-Standteils Wilhelmsburg erreicht werden.

Einige Komponenten der sektorgekoppelten Netze sind bereits vorhanden. Hierzu gehören der „Energieberg“, eine alte Deponie mit Elektrizitätserzeugung aus Windenergie und Photovoltaik sowie KWK- und Biomassekraftwerke. Mit dem „Energiebunker“, einem umgebauten Bunker mit großen Photovoltaik- und Solarthermieflächen und einem Kurzzeit-Wärmespeicher, steht bereits ein „Nukleus“ für diese Transformation bereit.

Zentraler Bestandteil des Transformationskonzepts wird die geothermische Nutzung des geologischen Untergrunds sein. Über eine Bohrungsdublette sollen aus einem Sandsteinhorizont (Rhät-Sandsteine des oberen Keuper) in ca. 3.500 m Tiefe Thermalwässer aufgeschlossen, eine geothermische Zirkulation etabliert und die gewonnene Wärme in das Nahwärmenetz eingespeist werden. Ein virtuelles Kraftwerk verknüpft die vorhandenen Wärmeerzeugungsanlagen und erstellt anhand von Wärmeabsatz- und Bedarfsprognosen optimierte Anlageneinsatz- und -fahrpläne. Über einen zu entwickelnden offenen Wärmemarktplatz sollen Wärmemengen aus verschiedenen Quellen und von verschiedenen Anbietern transparent, hochautomatisiert und effizient gehandelt werden. Zusätzlich war vorgesehen, durch den Bau eines ergänzenden Aquifer-Wärmespeichers (HT-ATES) in miozänen Sanden in einer Teufe von ca. 250 m, überschüssige Wärme aus unterschiedlichen Quellen saisonal zwischenspeichern und bei Bedarf flexibel auszuspeichern und in Kombination mit elektrisch betriebenen Wärmepumpen in das Netz übertragen zu können. Der HT-ATES wurde im Rahmen von IW3 auf Grund der Wärmeerzeugungsraten der mitteltiefen Geothermie, die geringer ausfielen, als ursprünglich gedacht, nicht umgesetzt.

Das Reallabor in Hamburg-Wilhelmsburg, einem Stadtteil mit zukünftig fast 70.000 Einwohnern, soll als Leuchtturmprojekt für einen nachhaltigen Umbau hin zu einer dekarbonisierten Wärme- und Energieversorgung eines urbanen Raums Strahlkraft über Hamburg hinaus entwickeln. Die hier angewandten Technologien und Verfahren können in Zukunft als Blaupause für Quartiere und Städte in ganz Deutschland herangezogen werden. Dies gilt vor allem mit Blick auf Entwicklung der Potenziale, die in der Einbindung und Nutzung geothermischer Systeme liegen. Hierzu ist es wichtig, sowohl Betriebserfahrungen für die einzelnen Anlagen als auch für das Zusammenspiel der Anlagen zu sammeln und dies hinsichtlich Energieeffizienz zu optimieren.

Abbildung 2.6: Konzeptioneller Aufbau des synergetischen Energiequartiers Hamburg-Wilhelmsburg

Quelle: Eigene Darstellung, Consulaqua Hamburg Beratungsgesellschaft mbH und Hamburg Energie GmbH.

2.3 Geothermische Heiz- und Kühlsysteme

2.3.1 Energieeffizienz geothermischer Systeme in Kombination mit Wärmepumpen

Die Bewertung der Effizienz eines geothermischen Heizsystems erfolgt über das Verhältnis zwischen der gewonnenen Umweltwärme zur eingesetzten Energie, die zur Nutzung der Umweltwärme benötigt wird, etwa für den Betrieb der Wärmepumpe. Der Coefficient of Performance (COP) beschreibt dieses Verhältnis als Momentaufnahme, die Jahresarbeitszahl (JAZ) bildet dieses Verhältnis über die Laufzeit eines Jahres ab. Insbesondere die JAZ ist von einer Vielzahl von Einflussfaktoren abhängig. Diese können grob in folgenden Kategorien eingeordnet werden:

- ▶ obertägige Umweltbedingungen (Temperaturverläufe, Windgeschwindigkeiten, Sonnenstunden etc.),
- ▶ Untergrundverhältnisse (Schichtaufbau, Werte der hydrogeologischen Parameter Grundwasserfließgeschwindigkeit, Temperaturen, Wärmeleitfähigkeit etc.),
- ▶ Gebäude- und Nutzungseigenschaften (Temperaturen im Heizkreislauf, Dämmung, Nutzerverhalten, Anlagenkonfiguration etc.).

Der Wert der JAZ hängt damit von mehreren Prozessen ab und kann daher nur ungenau über statische Verfahren berechnet werden. Durch eine dynamische Modellierung der JAZ wurden diese Abhängigkeiten in mehreren Studien berücksichtigt. Dabei wurde in Bezug auf die Variabilität der Einflussfaktoren meist eine der oben genannten Kategorien in den Fokus gestellt. Zur Bewertung der Effizienz einer Heizungsanlage sollte die JAZ genutzt werden, da der COP lediglich die Effizienz (Wirkungsgrad) der Wärmepumpe und nicht des gesamten Heizbetriebs beschreibt. Ein Vergleich der Umweltbelastung von Wärmepumpenanlagen über die JAZ kann allerdings nur unter der Bedingung erfolgen, dass die Elektrizität bzw. der Brennstoff zum Betrieb der Anlage in gleicher Weise erzeugt und bereitgestellt wurde.

Ausgewählte Literatur zur dynamischen Berechnung des COP und der JAZ

In Atam et al. (2015) erfolgte ein Vergleich von Steuerungsverfahren eines hybriden Heizsystems mit Erdwärmepumpe. Hierbei wurden dynamische, nichtlineare, prädiktionsbasierte und lineare Steuerungsverfahren untersucht und verglichen. Optimierungsziel war die Minimierung des Energieverbrauchs. Dabei wurde die Erdwärmepumpe bzw. der geologische Untergrund durch ein Emulator-Modell mittels Finite-Volumen-Methode simuliert.

In Figueroa et al. (2020) wurde der Mehrwert der Einbeziehung von dynamischen Bohrfeldmodellen in die Regelung eines hybriden geothermalen Systems untersucht. Dabei wurden vier Modellierungsstrategien betrachtet, bei denen der COP in variierenden Komplexitäten dynamisch berechnet wurde. Eine detaillierte Modellierung des geologischen Untergrunds und somit eine dynamische Berechnung des COP führte dabei zu einem gleichmäßigeren und effizienteren Betrieb der geothermischen Anlage.

In Marti et al. (2009) ist dargelegt, wie Wärmepumpen in die Software POLYSON 4, einem Programm zur Simulation von Heizungssystemen, integriert werden können. Dabei werden die Quelltemperaturen im Erdreich bzw. in einer Erdwärmesonde dynamisch durch ein Zeitschrittverfahren ermittelt. Aus den Quelltemperaturen werden über indirekte lineare Interpolationen der aus der Literatur stammenden COP-Werte Gütegrade für die Wärmepumpe berechnet.

In vielen der Studien wurde ein Fokus auf eine optimale Auslegung der Anlagenkomponenten oder der Steuerung bei vorgegebenen Untergrundverhältnissen gelegt. Ein Vergleich von JAZ in Abhängigkeit verschiedener Untergrundverhältnisse und Wärmequellenanlagen konnte dabei in keiner der gesichteten Studie gefunden werden.

Im Rahmen der vorliegenden Studie werden Wirkungsgrade und die Entwicklung von Jahresarbeitszahlen dynamisch berechnet, um die Entwicklung der JAZ in Abhängigkeit der hydrogeologischen Randbedingungen in Kombination mit verschiedenen Wärmequellenanlagen abschätzen zu können. Folgenden geothermische Systeme werden betrachtet:

- ▶ Erdwärmesonden (EWS),
- ▶ Wasser-Wasser-Anlagen (WWA),
- ▶ (Hochtemperatur-)Erdwärmesondenspeicher ((HT-)BTES),
- ▶ (Hochtemperatur-)Aquifer-Wärmepeicher ((HT-)ATES).

Die Temperaturentwicklungen in den Erdwärmeanlagen werden mit Hilfe halbgenerischer Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodelle berechnet. Die Erstellung und Nutzung

eines generischen Modells zur Berechnung der EWS erfolgte durch Fa. Consulaqua Hamburg Beratungsgesellschaft mbH (Abschn. 2.3.1.2). Für die Berechnung der Entwicklung der JAZ bei den Technologien WWA, (HT-)ATES und (HT-)BTES wurden die Modellierungsergebnisse der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel verwendet (vgl. Abschn. 1.4.3). Während bei den Technologien EWS und WWA die geothermische Energiegewinnung direkt aus dem geologischen Untergrund erfolgt, wird bei (HT-)BTES und (HT-)ATES in regelmäßigen Abständen Wärme in den geologischen Untergrund eingebracht, gespeichert und bei Bedarf ausgespeichert. Bei den Technologien (oberflächennahe) EWS und WWA handelt es sich natürliche Speichersysteme, die im Wesentlichen als Entzugssysteme betrieben werden, während es sich bei den Technologien (HT-)ATES und (HT-)BTES um aktiv betriebene Speichersysteme handelt. Deshalb lassen sich die JAZ von EWS und WWA nur bedingt mit den JAZ von (HT-)ATES und (HT-)BTES vergleichen. Dennoch kann ein Vergleich der JAZ dieser Technologien sinnvoll sein, z. B. wenn entschieden werden muss, ob eine weitere Umweltwärmequelle (z. B. Solarthermie oder Abwärme aus Industrieanlagen) erschlossen bzw. eingebunden werden soll. Zusätzlich kann mit Hilfe eines Vergleichs der JAZ die Eignung der jeweiligen Technologie zur Wärmeversorgung von Gebieten mit unterschiedlichen Wärmebedarfsdichten untersucht werden. Diese Vergleiche sind allerdings nur zulässig, wenn für die Gewinnung der eingespeicherten Wärme kein relevanter Elektrizitätsbedarf vorliegt oder überschüssige Wärme zur Verfügung steht. Die Erhöhung der Kosten durch zusätzliche Installationen sind bei diesem Variantenvergleich nicht Gegenstand der Bewertungsmatrix.

2.3.1.1 Berechnungsmethodik

Um die langfristige Entwicklung der Energieeffizienten bewerten zu können, wurden die Jahresarbeitszahlen geothermischer Wärmepumpensysteme berechnet. Die Berechnung der JAZ wird exemplarisch für die typischerweise zur Beheizung von Ein- und Mehrfamilienhäusern eingesetzte Kombination aus Erdwärmesonden und Wärmepumpen beschrieben. Für die anderen Technologien (WWA, (HT-)BTES, (HT-)ATES) erfolgt die Berechnung nach dem gleichen Prinzip, auf technologiespezifische Abweichungen im Rechengang wird in den jeweiligen Abschnitten eingegangen.

Die Berechnung der JAZ erfolgt über die folgenden Schritte:

1. Numerische Simulation der Temperaturentwicklung im geologischen Untergrund und im Wärmeträgerfluid mittels Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodellen über 10 Jahre
2. Berechnung des theoretischen COP-Wertes über den Carnot-Ansatz
3. Umrechnung der idealen in reale COP-Werte
4. Berechnung der thermischen und elektrischen Arbeit im Jahresgang
5. Berechnung der JAZ über den Simulationszeitraum (10 Jahre)
6. Berechnung und Vergleich von Szenarien mit veränderten Randbedingungen

Der Modellaufbau und die numerischen Simulationen in Schritt 1 sowie die Variation der Randbedingungen in Schritt 6 unterscheiden sich zwischen den betrachteten Technologien. Eine detaillierte Beschreibung diesbezüglich erfolgt in den entsprechenden Textabschnitten. Die Schritte 2 bis 5 sind für alle Technologien gleich. Das detaillierte Vorgehen ist nachfolgen beschrieben.

Für einen idealen, verlustfreien Wärmepumpenprozess („Carnot-Prozess“) ergibt sich der COP aus dem Temperaturverhältnis zwischen Wärmequelle und Wärmesenke:

$$COP_{ideal} = \frac{T_{Wärmesenke} [^{\circ}K]}{\Delta T_{Wärmesenke-Wärmequelle} [^{\circ}K]}$$

Die numerische Simulation des geologischen Untergrunds liefert die Temperatur der Wärmequelle. Die Temperatur der Wärmesenke wird mit $T_{Wärmesenke} = 42,6$ K angenommen. Hieraus kann die Temperaturdifferenz $\Delta T_{Wärmesenke-Wärmequelle}$ und somit auch der ideale COP für jeden Zeitschritt der Simulation ermittelt werden.

Die in der Praxis tatsächlich technisch erreichbaren Leistungszahlen liegen bei 40 % – 60 % der idealen Carnot-Leistungszahl. Für alle Berechnungen wurde von einem mittleren Wert von 50 % ausgegangen:

$$COP_{real} = 0,5 \cdot COP_{ideal}$$

Die in dieser Studie durchgeführten Modellrechnungen geben die Temperatur der Wärmequelle für jeden Zeitschritt aus, so dass für jeden Zeitschritt der theoretische und der technisch erreichbare COP berechnet werden kann.

Die thermische Arbeit $W_{thermisch}$ wird für jeden Zeitschritt aus der Temperaturdifferenz der Wärmequellenanlage und der Pumprate berechnet.

Die elektrische Arbeit wird auf Basis des technisch erreichbaren COPs ermittelt.

$$W_{elektrisch} = \frac{W_{thermisch}}{COP_{real}}$$

Danach werden für jedes Betriebsjahr die geleistete thermische und elektrische Arbeit bilanziert und die Jahresarbeitszahl ermittelt. Bei der Berechnung der JAZ wurde der Energiebedarf für Peripherieaggregate (z. B. Pumpen zur Förderung von Wasser oder Sole) nicht in der Energiebilanz berücksichtigt. Hierzu wäre eine detaillierte Auslegung der jeweiligen technischen Anlage erforderlich. Verglichen mit dem Energiebedarf der Wärmepumpe kann der Bedarf für Peripherieaggregate aber in erster Näherung vernachlässigt werden.

Im Anschluss erfolgt die Ermittlung der Jahresarbeitszahl für die einzelnen Betriebsjahre der Anlage über folgende Bilanzierung:

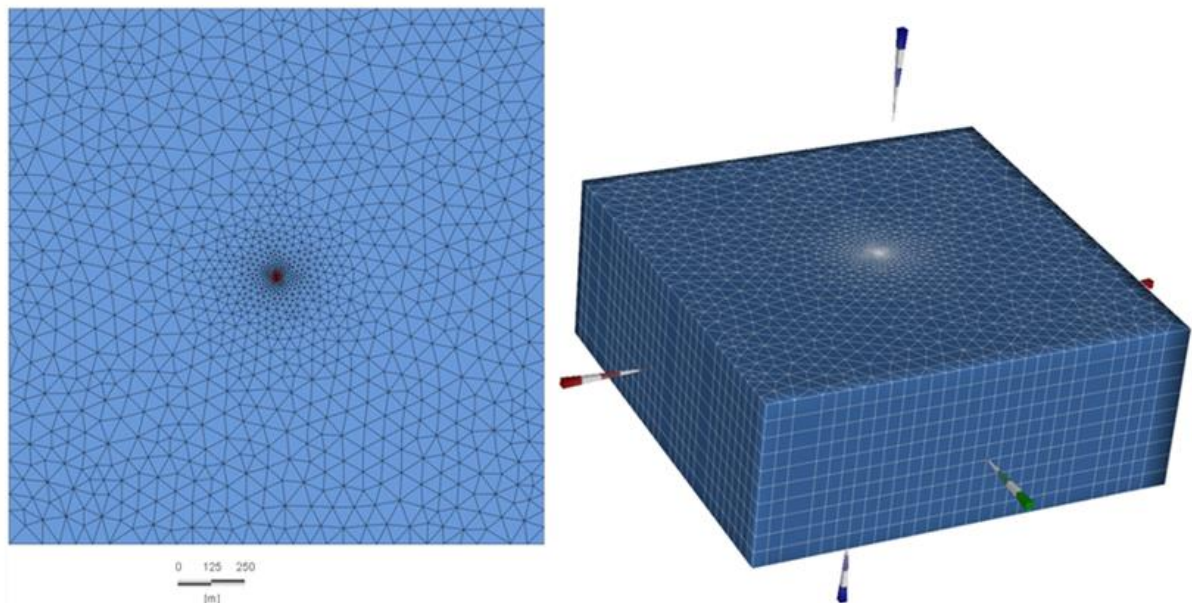
$$JAZ = \frac{\sum W_{thermisch} [kWh/Jahr]}{\sum W_{elektrisch} [kWh/Jahr]}$$

2.3.1.2 Erdwärmesonden (EWS)

Ziel der numerischen Modellrechnungen ist es, die Entwicklung der Jahresarbeitszahl des Gesamtsystems aus einer Erdwärmesonde unter Berücksichtigung des Heizlastgangs zu berechnen. Für die Simulationen wurde ein konzeptionelles dreidimensionales numerisches Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodell mit dem Finite-Elemente-Modell FEFLOW 7.1 aufgebaut. Das verwendete Modell (vgl. Abb. 2.7) weist eine Kantenlänge von 1000 m · 1000 m und Mächtigkeit von 100 m auf. Alle intrinsischen hydraulisch-thermischen Eigenschaften (kr-

Werte, Porositäten, Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, Zustromtemperatur des Grundwassers an den Modellrändern) sind homogen und isotrop verteilt (Anfangstemperatur des Grundwassers: 10 °C; effektive Porosität: 0,3; volumetrische Wärmekapazität des Wassers: 4,2 MJ/(m³ · K); volumetrische Wärmekapazität des Bodens: 2,52 MJ/(m³ · K); Wärmeleitfähigkeit des Wassers: 0,65 J/(m · s · K); Wärmeleitfähigkeit des Bodens: 3,0; longitudinale Dispersivität: 0,5 m; transversale Dispersivität: 0,5).

Abbildung 2.7: Horizontaler und vertikaler Modellaufbau



Screenshot des verwendeten Modells.

Quelle: Eigene Darstellung, Consulaqua Hamburg Beratungsgesellschaft mbH.

Der hydraulische Gradient und damit die Grundwasserströmung werden über Randbedingungen an den westlichen und östlichen Modellrändern vorgegeben. Die Sonde ist über die gesamte Mächtigkeit der grundwasserdurchströmten Schicht ausgebaut. Mit dem Modell wird der Wärmezug aus dem geologischen Untergrund und die Entwicklung der Ein- und Austrittstemperaturen für unterschiedliche Untergrundverhältnisse über jeweils zehn Heizperioden berechnet. In verschiedenen Szenarien wurden die Grundwasser-Strömungsgeschwindigkeit (Abstandsgeschwindigkeit) und die Entzugsleistung der Sonde variiert (Tab. 2.1).

Tabelle 2.1: Parametrisierung des „geologischen Untergrunds“ und Szenarienkonfiguration in den numerischen Simulationen

Modell	Lithologie	Typ	K _f -Wert [m/s]	Hydraulischer Gradient [%]	Abstandsgeschwindigkeit [m/a]	Maximale Entzugsleistung [kW]
Variation der Strömungsgeschwindigkeit						
Basis	Mittelsand	GW-Leiter	1,0 · 10 ⁻⁴	0,15	1,6	1,0
02	Mittelsand	GW-Leiter	1,0 · 10 ⁻⁴	2,5	26	1,0
03	Mittelsand	GW-Leiter	1,0 · 10 ⁻⁴	10	105	1,0
04	Mittelsand	GW-Leiter	1,0 · 10 ⁻⁴	20	210	1,0

Modell	Lithologie	Typ	K _r -Wert [m/s]	Hydraulischer Gradient [‰]	Abstands- geschwindigkeit [m/a]	Maximale Entzugsleistung [kW]
Variation der Entzugsleistung						
05	Mittelsand	GW-Leiter	$1,0 \cdot 10^{-4}$	0,15	1,6	0,5
06	Mittelsand	GW-Leiter	$1,0 \cdot 10^{-4}$	0,15	1,6	2,0
07	Mittelsand	GW-Leiter	$1,0 \cdot 10^{-4}$	0,15	1,6	2,5
08	Mittelsand	GW-Leiter	$1,0 \cdot 10^{-4}$	0,15	1,6	3,0

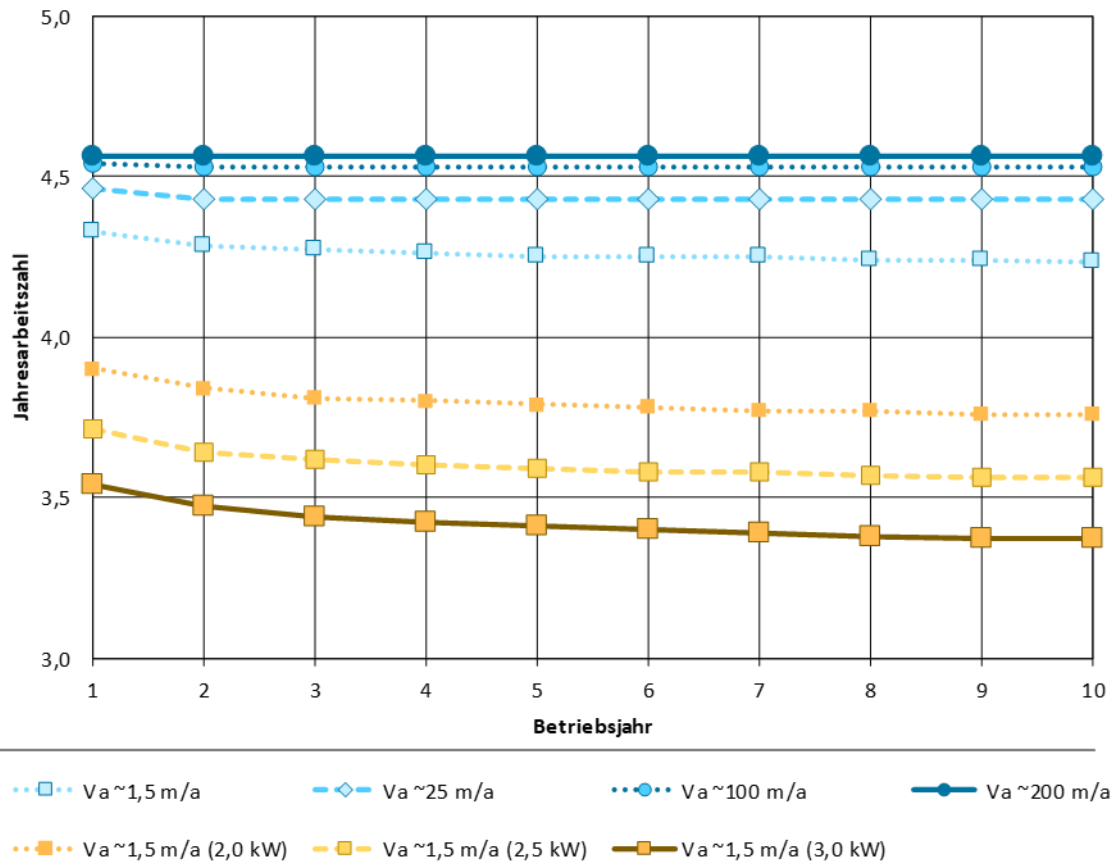
Abbildung 2.8 zeigt die berechnete Entwicklung der Jahresarbeitszahlen für die sich hinsichtlich der Grundwasser-Abstandsgeschwindigkeiten unterscheidenden Modellszenarien. Hierbei wurde für alle Modellrechnungen eine konstante Wärmesenktemperatur (WST) von 42,6 °C festgelegt.

Grundsätzlich hat eine Variation der Grundwasserabstandsgeschwindigkeit nur einen geringen Einfluss auf die JAZ einer Wärmepumpe. In allen Szenarien liegen die anhand von generischen Modellen abgeleiteten Jahresarbeitszahlen zwischen 4,2 und 4,6. Damit spiegeln sie die gemessenen Jahresarbeitszahlen realer EWS-Anlagen wider (vgl. Abb. 2.4).

Die höchsten Jahresarbeitszahlen treten bei hohen Abstandsgeschwindigkeiten auf, da hierdurch eine schnelle Regeneration bzw. eine schnelle Wärmenachlieferung gewährleistet wird. Der Effekt ist jedoch insgesamt gering, da auch bei nahezu stagnierenden Grundwässern noch Jahresarbeitszahlen von über 4 erreicht werden. Im Unterschied zu Szenarien mit höheren Abstandsgeschwindigkeiten, die spätestens im zweiten Betriebsjahr konstante JAZ-Werte aufweisen, nehmen die Jahresarbeitszahlen im Lauf des Betriebs bei stagnierenden Verhältnissen langsam ab.

Abbildung 2.8: Entwicklung der Jahresarbeitszahl eines geothermischen Systems (EWS mit Wärmepumpe) bei variierenden Grundwasser-Abstandsgeschwindigkeiten

Soweit nicht anders angegeben, liegt die Entzugsleistung der EWS bei 1 kW; in drei Szenarien wurden höhere Entzugsleistungen von 2,0 kW, 2,5 kW und 3,0 kW untersucht.

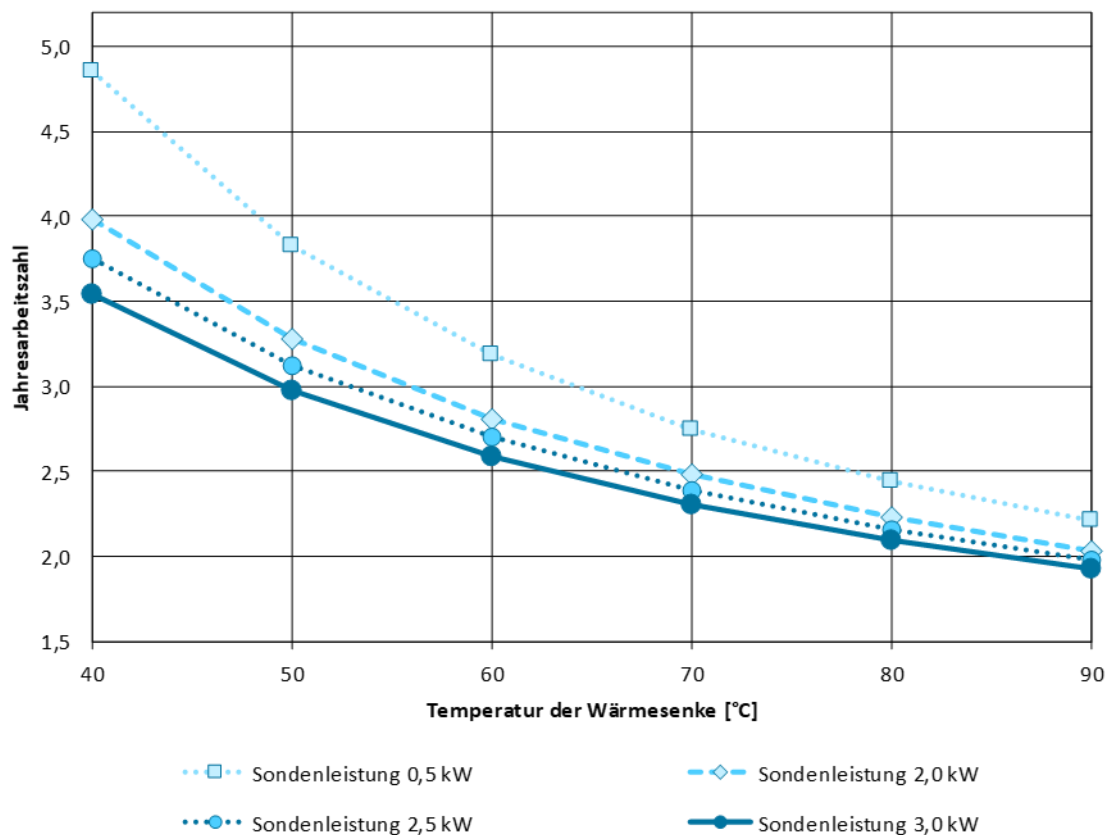


v_a : Grundwasser-Abstandsgeschwindigkeit

Quelle: Eigene Darstellung, Consulaqua Hamburg Beratungsgesellschaft mbH.

Die Leistung der Erdwärmesonden wurden anschließend zwischen 0 kW in den Sommermonaten und maximal 3 kW im Winter variiert. Eine höhere Wärmeleistung ließ sich mit einer einzelnen EWS innerhalb dieser Grundwasserleiter nicht erzielen, da bei einer höheren Heizlast die Grundwassertemperaturen im Nahbereich der EWS weit unter den Gefrierpunkt absanken. Ein solches Einfrieren hätte in der Realität zu einem Ausfall der EWS geführt. Die Ergebnisse der Modellrechnungen zeigen, dass höhere Leistungen der Erdwärmesonden bei nahezu stagnierenden Grundwasser-Abstandsgeschwindigkeiten zu niedrigeren Jahresarbeitszahlen führen.

In einer weiteren Betrachtung wurden bei den Modellszenarien 05 bis 08 (vgl. Tab. 2.1) die Temperatur der Wärmesenke variiert. Die Ergebnisse dieser Berechnung sind in Abbildung 2.9 grafisch dargestellt. Es wurde jeweils der Wert der JAZ nach 10 Jahren Betrieb gewählt.

Abbildung 2.9: EWS mit Wärmepumpe: Abhängigkeit der Jahresarbeitszahlen von variierenden Entzugsleistungen und Wärmesenkentemperaturen (10. Betriebsjahr der Anlage)

Quelle: Eigene Darstellung, Consulaqua Hamburg Beratungsgesellschaft mbH.

Die Jahresarbeitszahlen eines Systems aus einer Erdwärmesonde und einer Wärmepumpe hängen erheblich von dem benötigten Temperaturhub ab, welchen die Wärmepumpe erbringen muss. Da die Quelltemperatur recht konstant zwischen 9 °C und 13 °C liegt, ist eine Effizienzsteigerung hauptsächlich über eine Senkung der Temperatur der Wärmesenke möglich. Hohe Wärmesenkentemperaturen bedingen niedrige Jahresarbeitszahlen. So fallen die JAZ von 3,5 – 4,9 bei 40 °C auf 1,9 – 2,2 bei 90 °C.

Eine Variation der Entzugsleistung hat insbesondere bei niedrigen Wärmesenkentemperaturen große Auswirkungen. So variiert die JAZ bei einer Wärmesenkentemperatur von 40 °C je nach Entzugsleistung zwischen 3,5 (Entzugsleistung 3 kW) und 4,9 (Entzugsleistung 0,5 kW). Bei höheren Wärmesenkentemperaturen spielt auch die Entzugsleistung der EWS kaum noch eine Rolle für die Entwicklung des JAZ.

2.3.1.3 Wasser-Wasser-Anlage (WWA)

Bei einer Wasser-Wasser-Anlage erfolgt eine Entnahme von Grundwasser über einen Brunnen. Der geförderte Grundwasservolumenstrom wird über Wärmetauscher und -pumpe um 4 °C abgekühlt und anschließend über einen Infiltrationsbrunnen wieder in den Grundwasserleiter eingeleitet.

Grundlage für die Szenarienmodellierung verschiedener Varianten einer Wasser-Wasser-Anlage ist die in Abbildung 2.10 dargestellte Basisvariante. Der Abstand der Brunnen beträgt 80 m; beide Brunnen sind vollständig über die Mächtigkeit des Grundwasserleiters verfiltert.

In Modellszenarien wurde die Grundwasser-Abstandsgeschwindigkeit (v_a) innerhalb der energetisch genutzten Grobsandschicht zwischen 0 m/a (Basisvariante) und 72 m/a (Varianten 1 bis 4) variiert, und die Auswirkungen auf die Entwicklung der Jahresarbeitszahlen einer angeschlossenen Wärmepumpenanlage wurden berechnet. Hierbei wurde durchgehend eine Vorlauftemperatur der Wärmesenke von 42,6 °C angesetzt. Es wurde jeweils der zyklische Betrieb mit einer neunmonatigen Entnahme von konstant 20 m³/h und einer dreimonatigen Ruhephase über eine Dauer von 10 Jahren berechnet. Die benötigte Leistung der Grundwasserpumpe und die im Wärmetauscher entstehenden Wärmeverluste wurden vernachlässigt.

Beispielrechnung zur Leistung der Grundwasserpumpe:

Abschätzung des Leistungsbedarfs der Grundwasserpumpe (Worst-Case):

$$P_{Pumpe} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta} = \frac{1 \frac{kg}{l} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 20 \frac{m^3}{h} \cdot 30 m}{0,7} = 2,3 kW$$

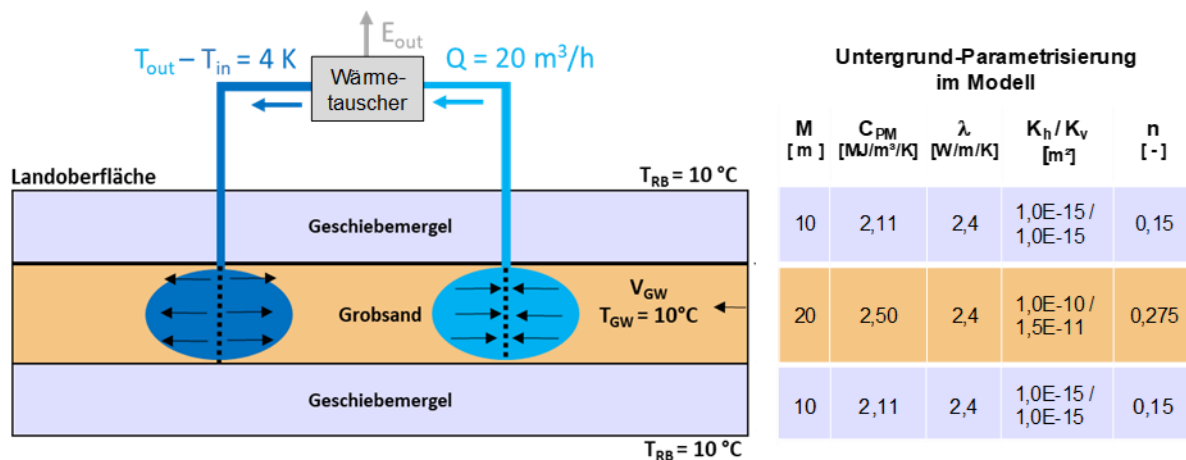
Abschätzung der aus der Grundwasserabkühlung gewinnbaren Leistung:

$$P_{Abkühlung} = c \cdot \rho \cdot Q \cdot \Delta T = 4,19 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot 1 \frac{kg}{l} \cdot 20 \frac{m^3}{h} \cdot 4 K = 93 kW$$

mit

P_{Pumpe} :	Leistungsbedarf Grundwasserpumpe [kW]
$P_{Abkühlung}$:	Leistung aus Abkühlung des Grundwasser [kW]
ρ :	Dichte des Fördermediums [kg/l]
g :	Fallbeschleunigung [m/s ²]
Q :	Förderstrom [m ³ /h]
H :	Förderhöhe [m]
η :	Wirkungsgrad [-]
c :	Spezifische Wärmekapazität [kJ/(kg · K)]
ΔT :	Temperaturänderung = $T_{in} - T_{out}$ [K]

Der Anteil der benötigten Leistung für die Grundwasserpumpe an der gewinnbaren Leistung beträgt $P_{Pumpe}/P_{Abkühlung} = 2,3 kW / 93 kW = 2,5 \%$.

Abbildung 2.10: Wasser-Wasser-Anlage: Prinzipskizze und Parametrisierung des geologischen Untergrunds (Basisvariante)

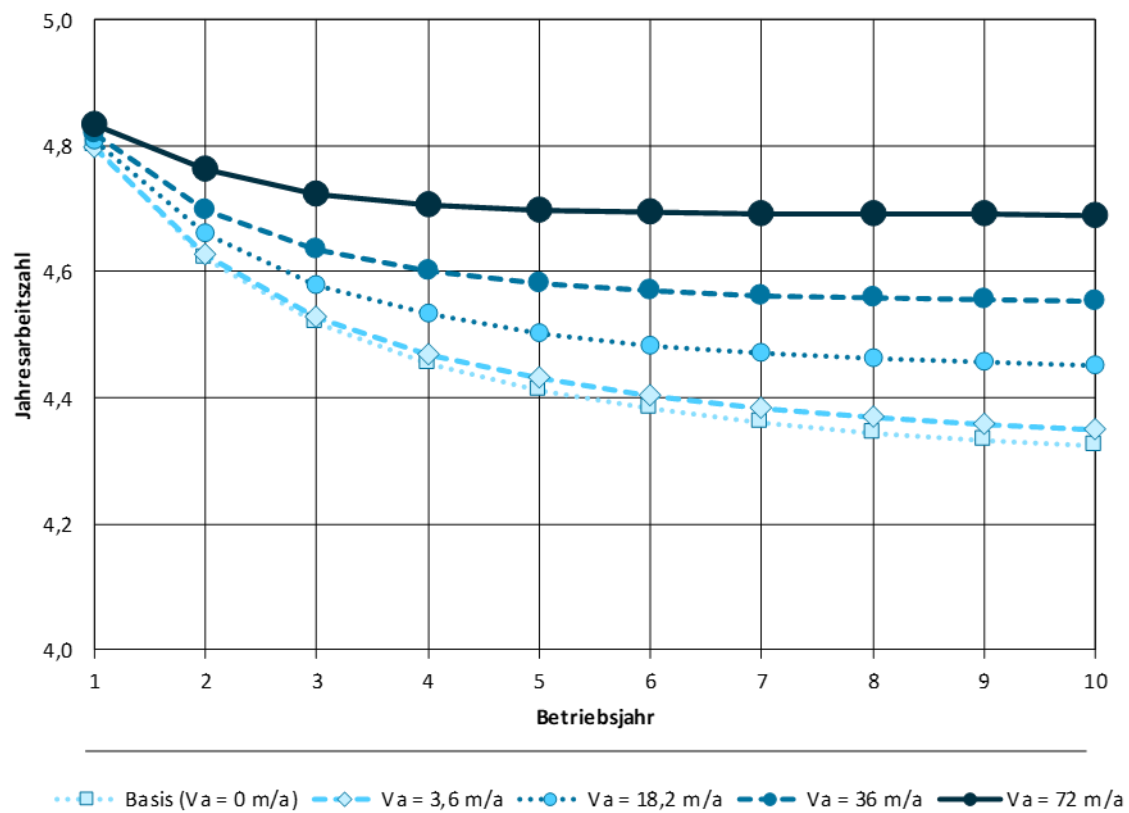
M: Mächtigkeit; C_{PM}: Wärmekapazität; λ: Wärmeleitfähigkeit; K_h / K_v: horizontale und vertikale intrinsische Permeabilität, n: effektive Porosität.

Quelle: Eigene Darstellung, Consulaqua Hamburg Beratungsgesellschaft mbH.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Grundwasser-Abstandsgeschwindigkeit nur in geringem Maß auf die Jahresarbeitszahl auswirkt (Abb. 2.11). Mit einem Wert von 4,35 ist die JAZ in der Basisvariante ($v_a = 0$ m/a) nach 10 Jahren am geringsten, bei der Variante mit der höchsten Abstandsgeschwindigkeit ($v_a = 72$ m/a) ist die JAZ mit 4,69 am größten. Mit Jahresarbeitszahlen zwischen 4,3 und 4,7 liegen die berechneten Werte knapp oberhalb der Spanne gemessener Jahresarbeitszahlen realer Wasser-Wasser-Anlagen (vgl. Abb. 2.4).

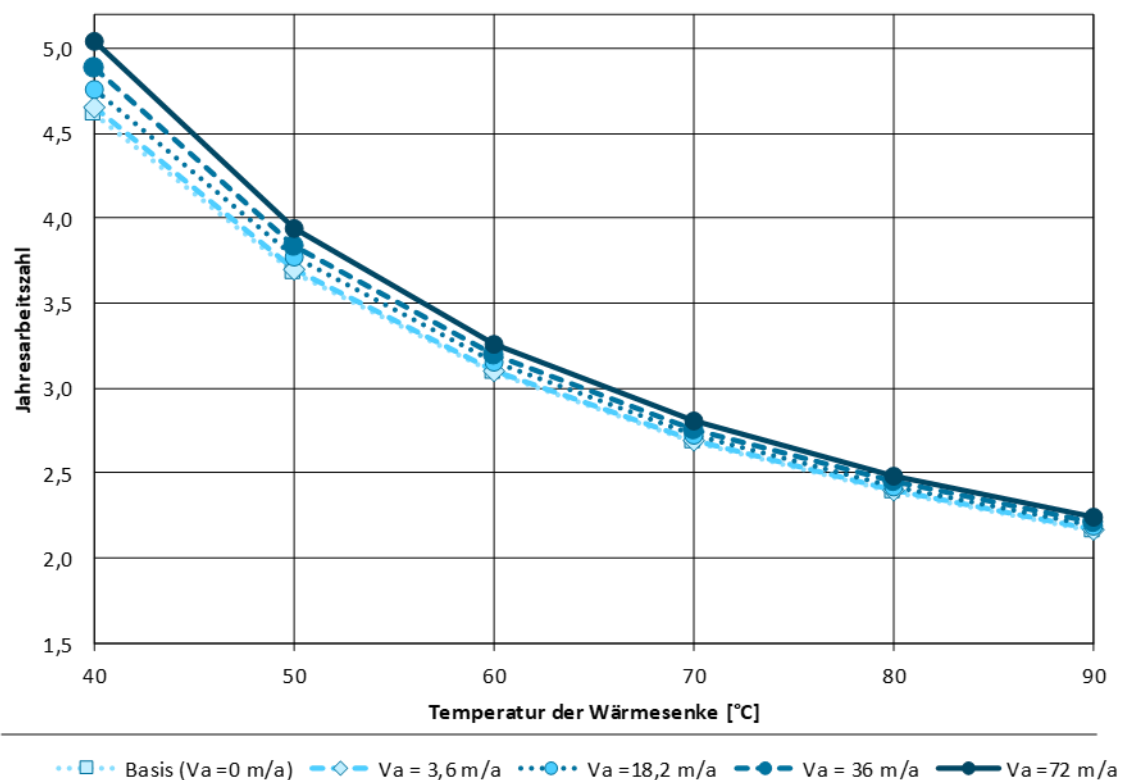
Auch bei dieser Technologie wirken sich Temperaturänderungen auf der Wärmesenkenseite stark auf die JAZ aus (Abb. 2.12). Während bei Wärmesenkentemperaturen von 40 °C Jahresarbeitszahlen zwischen 4,5 und 5,0 erreicht werden, sinken die Jahresarbeitszahlen mit zunehmender Wärmesenkentemperatur ab und liegen bei 80 – 90 °C nur noch ca. halb so hoch.

Abbildung 2.11: Entwicklung der Jahresarbeitszahl eines geothermischen Systems (Wasser-Wasser-Anlage und Wärmepumpe) bei unterschiedlichen Grundwasser-Abstandsge-schwindigkeiten



Quelle: Eigene Darstellung, Consulaqua Hamburg Beratungsgesellschaft mbH.

Abbildung 2.12: Entwicklung der Jahresarbeitszahl eines geothermischen Systems (Wasser-Wasser-Anlage und Wärmepumpe) bei variierenden Grundwasser-Abstandsgeschwindigkeiten



Quelle: Eigene Darstellung, Consulaqua Hamburg Beratungsgesellschaft mbH.

2.3.1.4 (Hochtemperatur-)Aquifer-Wärmespeicher ((HT-)ATES)

(Hochtemperatur-)Aquiferwärmespeicher ((HT-)ATES) dienen der saisonalen Speicherung von Wärme. Sie zeichnen sich im Hinblick auf die Betriebsparameter (Einspeicherraten, Einspeichertemperaturen und -zeiträume) durch eine hohe Flexibilität aus. Daher gibt es zahlreiche Möglichkeiten, wie ein (HT-)ATES betrieben werden kann.

In dem zunächst beschriebenen Basismodell eines (HT-)ATES-Betriebs erfolgt die Einspeicherung 70 °C warmen Wassers mit einer Infiltrationsrate von 30 m³/h über ein halbes Jahr (182,5 Tage) in einen Grundwasserleiter mit einer Ausgangstemperatur von 13 °C. Im Anschluss an die Einspeicherung erfolgt eine sechsmonatige Ausspeicherphase. Wärmeverluste und die Mischung mit dem nachströmenden kalten Grundwasser führen im Verlauf der Rückförderung zu einer Temperaturabnahme. Diese vermindert sich aber mit zunehmender Betriebsdauer des Speichers. Dieser Wechsel zwischen Ein- und Ausspeicherung wurde über 20 Jahre modelliert. Die Vorgehensweise bei der Modellierung des (HT-)ATES wurde ausführlich in Abschnitt 1.4.4 beschrieben.

Die Berechnung der Jahresarbeitszahlen für den Betrieb eines (HT-)ATES erfolgt zunächst ebenfalls für eine Vorlauftemperatur der Wärmesenke von 42,6 °C. Im Unterschied zu den vorhergehend beschriebenen Systemen muss beim Betrieb des (HT-)ATES jedoch nicht nur die Vorlauftemperatur des Heizsystems, sondern auch seine Rücklauftemperatur berücksichtigt werden. In der Basisvariante des (HT-)ATES beträgt die Einspeichertemperatur konstant 70 °C, so dass die Ausspeichertemperaturen über einen längeren Zeitraum größer als 42,6 °C sind. In dieser Phase

erfolgt eine Direkteinspeisung der Wärme in den Rücklauf der Wärmesenke, solange die Ausspeichertemperatur größer ist als dessen Rücklauftemperatur. Im Basismodell wird eine Rücklauftemperatur von 30 °C gewählt, so dass das Ausspeicherwasser aus dem (HT-)ATES nach der Wärmeübertragung in den Rücklauf des Heizsystems noch eine Temperatur von 30 °C hat. Um dieses Wasser vor der Einleitung in den Hilfsbrunnen wieder auf die Grundwassertemperatur von 13 °C abzukühlen, ist der Betrieb einer Wärmepumpe ausfolgenden Gründen sinnvoll:

► Wasserrechtliche Anforderungen

Auch wenn es noch keinen regulatorischen Rahmen für den Betrieb eines (HT-)ATES gibt, ist derzeit davon auszugehen, dass für die Wiedereinleitung des Grundwassers in den Hilfsbrunnen nahezu die natürliche Grundwassertemperatur eingestellt werden muss. Im Fallbeispiel beträgt die Grundwassertemperatur 13 °C.

► Speicherleistung und Effizienz

Wenn das Einleitwasser nicht abgekühlt wird, bildet sich ein sekundärer Aquiferwärmespeicher im Bereich des Hilfsbrunnens. Durch die stetige Erwärmung des Wassers im Bereich des Hilfsbrunnens verringert sich einerseits die Einspeicherleistung des (HT-)ATES für den Produktionsbrunnen (Verringerung der Temperaturdifferenz), andererseits erhöhen sich insgesamt die Wärmeverluste des Systems durch den ungewollten Betrieb eines zweiten Speichers.

Für die Berechnung der JAZ des Gesamtsystems müssen daher sowohl die Phase der Direkteinspeisung der Wärme ohne Temperaturanhebung durch eine Wärmepumpe als auch die Phase der kontinuierlichen Abkühlung des Wassers auf die zulässige Einleittemperatur durch eine Wärmepumpe berücksichtigt werden. Die JAZ für den (HT-)ATES berechnet sich wie folgt:

$$JAZ = \frac{\sum \text{thermische Arbeit}_{gesamt} [kWh/Jahr]}{\sum \text{elektrische Arbeit} [kWh/Jahr]}$$

mit

$$\sum \text{thermische Arbeit}_{gesamt} = \sum \text{direkt eingespeiste Wärme} + \sum \text{thermische Arbeit aus Wärmepumpe}$$

Der COP zur Berechnung der notwendigen elektrischen Energie zum Betrieb der Wärmepumpe berechnet sich, wie in Abschnitt 2.3.1.1 beschrieben, aus dem Carnot-Prozess unter der Annahme eines Wirkungsgrads der Wärmepumpe von 50 %. Für die Berechnung der JAZ des Gesamtsystems sind sowohl die direkt eingespeiste Wärmemenge als auch die aus der Abkühlung mittels Wärmepumpe stammende Wärme zu bilanzieren.

Um die Effizienz eines (HT-)ATES in Abhängigkeit von der Betriebsweise und den Untergrundverhältnissen zu quantifizieren, wurden einschließlich eines Basisszenarios 12 Szenarien berechnet (vgl. Tab. 2.2), in denen hydraulisch und thermische Betriebsparameter (Szenarien Q15, G45, T30, T50), die regionale Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers (Szenarien VGW0,

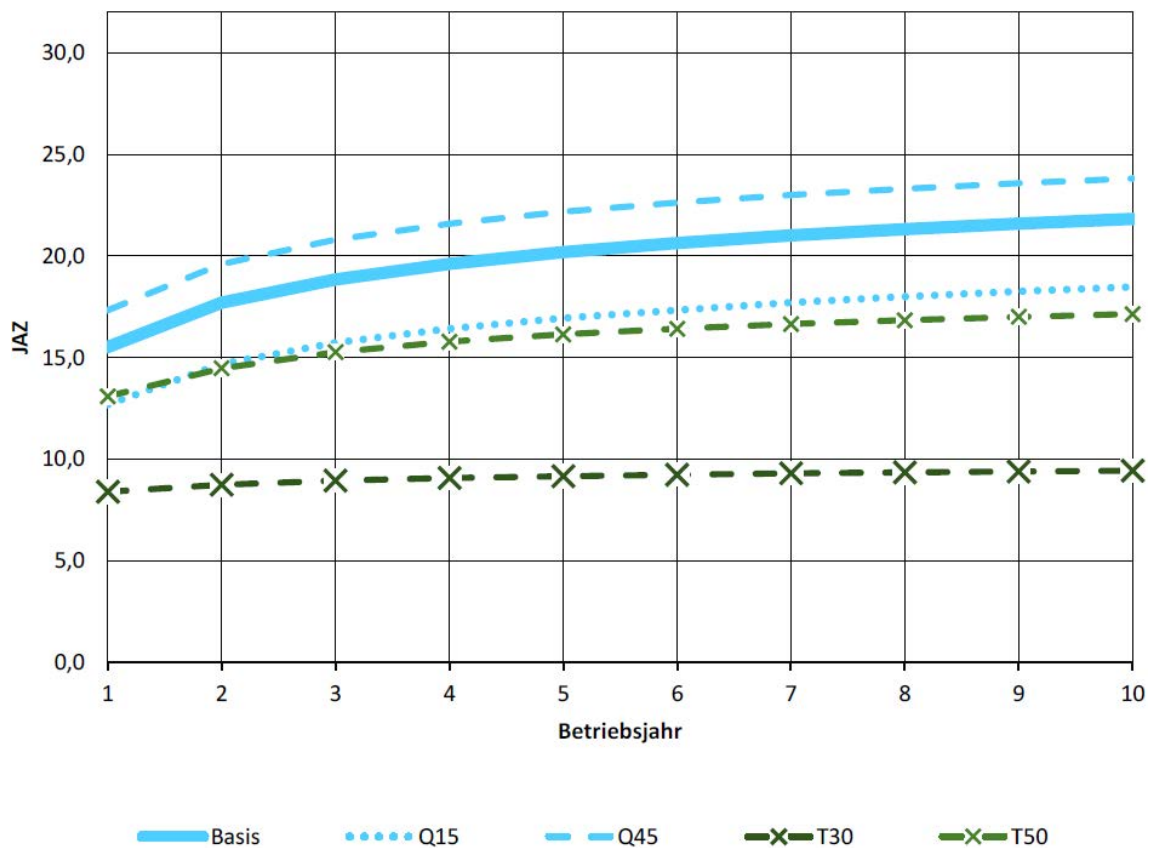
VGW10, VGW20) sowie hydrogeologische Kenngrößen des geologischen Untergrunds (Szenarien M10, M40; K11_11, K11_12) variiert wurden. Ebenso wurden auch die Auswirkungen unterschiedlicher Vor- und Rücklauftemperaturen des Heizsystems auf die JAZ des (HT-)ATES untersucht. Die Entwicklung der JAZ über einen Betriebszeitraum von 10 Jahren ist für die untersuchten Szenarien in den Abbildungen 2.13 – 2.16 dargestellt.

Tabelle 2.2: Parametervariation der Modellszenarien bei der Nutzungsvariante (HT-)ATES

Szenario	Q [m ³ /h]	T _{in} [°C]	vGW [m/a]	M [m]	K _h [m ²]	K _v [m ²]
Basis	30	70	3,6	20	1.5 · 10 ⁻¹⁰	1.5 · 10 ⁻¹¹
Q15	15	70	3,6	20	1.5 · 10 ⁻¹⁰	1.5 · 10 ⁻¹¹
Q45	45	70	3,6	20	1.5 · 10 ⁻¹⁰	1.5 · 10 ⁻¹¹
T30	30	30	3,6	20	1.5 · 10 ⁻¹⁰	1.5 · 10 ⁻¹¹
T50	30	50	3,6	20	1.5 · 10 ⁻¹⁰	1.5 · 10 ⁻¹¹
VGW0	30	70	0,0	20	1.5 · 10 ⁻¹⁰	1.5 · 10 ⁻¹¹
VGW10	30	70	36,4	20	1.5 · 10 ⁻¹⁰	1.5 · 10 ⁻¹¹
VGW20	30	70	72,3	20	1.5 · 10 ⁻¹⁰	1.5 · 10 ⁻¹¹
M10	30	70	3,6	10	1.5 · 10 ⁻¹⁰	1.5 · 10 ⁻¹¹
M40	30	70	3,6	40	1.5 · 10 ⁻¹⁰	1.5 · 10 ⁻¹¹
K11_11	30	70	3,6	20	1.5 · 10⁻¹¹	1.5 · 10⁻¹¹
K11_12	30	70	3,6	20	1.5 · 10⁻¹¹	1.5 · 10⁻¹²

Abkürzungen: Q: Ein- und Auspeicherrate; T_{in}: Einspeichertemperatur; v_{GW}: Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers; M: Mächtigkeit des Grundwasserleiters, K_h, K_v: horizontale und vertikale intrinsische Permeabilität des Grundwasserleiters. Variierte Parameter sind fett markiert.

Abbildung 2.13: Jahresarbeitszahlen der Nutzungsvariante (HT-)ATES bei einer Vorlauftemperatur von 42,6 °C und einer Rücklauftemperatur von 30 °C für die hydraulisch-thermischen Szenarien



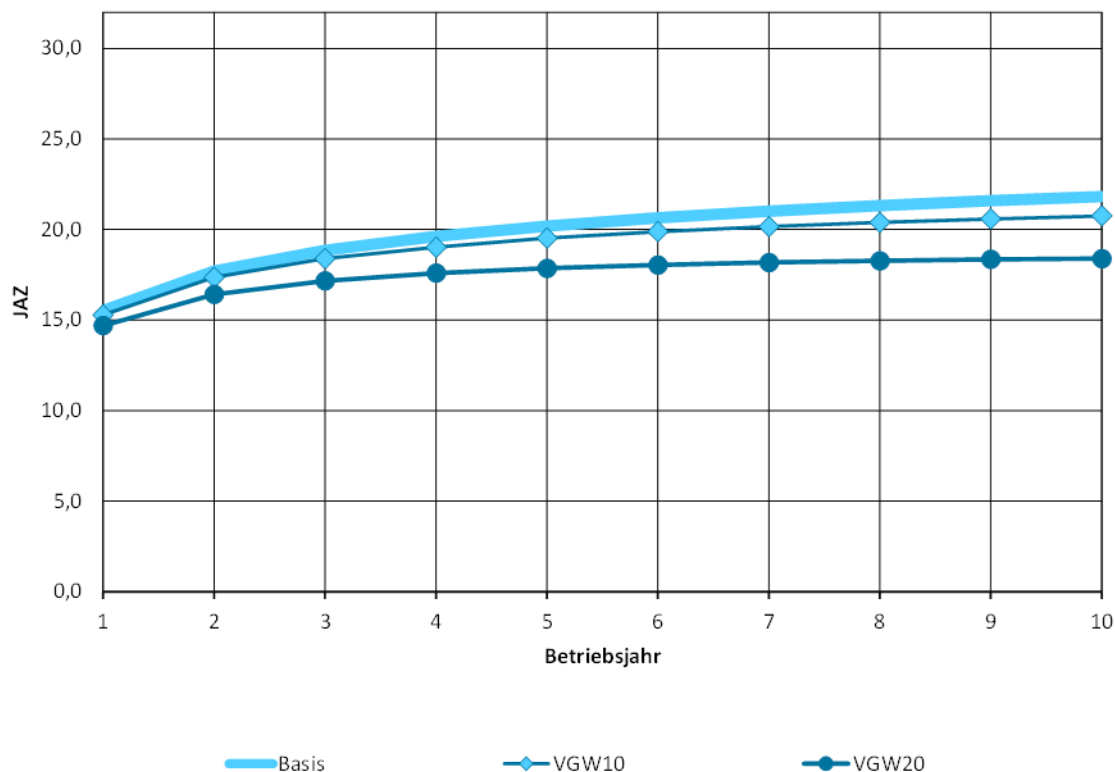
Quelle: Eigene Darstellung, Consulaqua Hamburg Beratungsgesellschaft mbH.

In nahezu allen Szenarien verbessern sich die JAZ im Laufe der Betriebszeit des (HT-)ATES stetig und nähern sich einem szenarienspezifischen Maximalwert an. In den ersten Jahren des Speicherbetriebs verbleibt ein vergleichsweise hoher Anteil der eingeleiteten Wärme im geologischen Untergrund, da das zunächst kalte Feststoffgerüst des Grundwasserleiters erwärmt werden muss. Die zunächst geringe Wärmerückgewinnung im Speicherbetrieb bedingt einen verringerten Anteil der direkt in den Rücklauf einleitbaren Wassermenge. Die stetige Verbesserung der JAZ ist auf die zunehmend geringere Temperaturabnahme bei der Rückgewinnung der zuvor eingespeicherten Wärme und dem damit verbundenen höheren Anteil der direkt in den Rücklauf einleitbaren Wärme zurückzuführen. Mit anhaltendem Speicherbetrieb wird der geologische Untergrund im Umfeld des Speichers zunehmend erwärmt, der jährliche Wärmeverlust nimmt ab, und der Anteil der rückgewonnenen Wärmemenge steigt. Im Basisszenario mit einer Einspeichertemperatur von 70 °C und einer Ein- und Ausspeicherrate von 30 m³/h steigt die JAZ von ca. 16 im ersten Jahr auf ca. 22 im zehnten Betriebsjahr.

Niedrigere Ein- und Ausspeicherraten (Szenario Q15) haben niedrigere JAZ zur Folge (ca. 19 nach 10 Betriebsjahren), da bei kleineren Förderraten das Verhältnis zwischen eingespeichertem Volumen und der Oberfläche, über die der Wärmeverlust stattfindet, kleiner und ungünstiger ist als bei größeren Einspeichervolumina und dadurch wiederum die direkt einleitbare Wärmemenge in den Rücklauf des Heizsystems reduziert wird. Eine höhere Ein- und Ausspeicherrate führt zu einer wesentlichen Erhöhung der JAZ (ca. 24 nach 10 Betriebsjahren bei Variante Q45).

Je niedriger die Einspeichertemperatur ist, desto geringer sind auch die Ausspeichertemperaturen und die damit erzielbaren Jahresarbeitszahlen. Verglichen mit einer JAZ von ca. 22 im Basisszenario werden bei gleicher Rate und einer Einspeichertemperatur von 50 °C immerhin noch JAZ von ca. 17, bei einer Einspeicherung von 30 °C jedoch nur noch von ca. 9 erreicht. Niedrigere Einspeichertemperaturen führen zu geringeren Verlusten und einem schnelleren Erreichen eines konstanten Speicherbetriebs mit konstanten Jahresarbeitszahlen.

Abbildung 2.14: Jahresarbeitszahlen der Nutzungsvariante (HT-)ATES bei einer Vorlauftemperatur von 42,6 °C und einer Rücklauftemperatur von 30 °C für variierende Abstandsgeschwindigkeiten im Grundwasserleiter

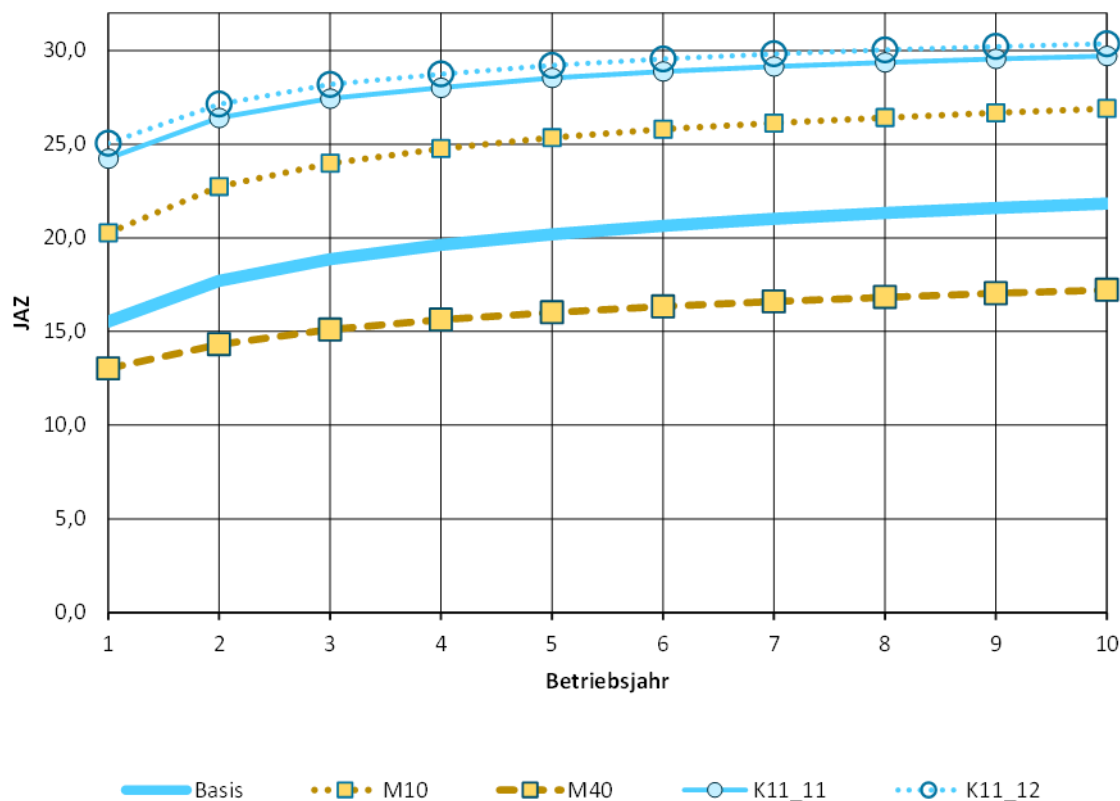


Quelle: Eigene Darstellung, Consulaqua Hamburg Beratungsgesellschaft mbH.

Abbildung 2.15 zeigt die Entwicklung der Wirkungsgrade des (HT-)ATES in Abhängigkeit von variierenden Abstandsgeschwindigkeiten und entsprechend variierenden Abstandsgeschwindigkeiten im Grundwasserleiter. Die hierbei ausgewerteten Abstandsgeschwindigkeiten von 0,0 m/a (Basisszenario), 36,4 m/a (Szenario VGW10) und 72,3 m/a (Szenario VGW20) sind verhältnismäßig gering und liegen in Bereichen, wie sie insbesondere im norddeutschen Tiefland vorliegen. Diese wurden ausgewählt, da für solche Gebiete angenommen wird, dass eine Umsetzung von (HT-)ATES-Systemen eher möglich ist. Dahingegen ist in Gebieten mit hohen Abstandsgeschwindigkeiten eine Umsetzung mit den bisher betrachteten (HT-)ATES-Konfigurationen eher unwahrscheinlich, da die eingespeicherte Wärme abfließen und daher nur bedingt gespeichert werden kann. Ob und inwieweit modifizierte (HT-)ATES-Anlagenkonfigurationen, z. B. Trennung der Injektions- und Extraktionsbrunnen auf der „warmen“ Seite, auch die Nutzung von Grundwasserleitern mit hohen Abstandsgeschwindigkeiten möglich machen würde, ist zukünftig zu prüfen.

Die in dieser Studie betrachtete Änderung des Grundwassergradienten und die daraus resultierenden geänderten Grundwasserabstandsgeschwindigkeiten führen zu nur geringen Änderungen in den Jahresarbeitszahlen. Im Basisszenario liegen mit Abstandsgeschwindigkeiten von unter 5 m/a nahezu stagnierende Verhältnisse vor. Einer Erhöhung der regionalen Gradienten führt zu etwas höheren Wärmeverlusten und niedrigeren Temperaturen bei der Ausspeicherung. Die JAZ nimmt ab, da die direkt in den Rücklauf einleitbare Wärmemenge abnimmt. Selbst bei einer für den norddeutschen Raum relativ hohen Abstandsgeschwindigkeit von ca. 75 m/a beträgt die JAZ immer noch ca. 18 gegenüber 22 beim Basisszenario.

Abbildung 2.15: Jahresarbeitszahlen der Nutzungsvariante (HT-)ATES bei einer Vorlauftemperatur von 42,6 °C und einer Rücklauftemperatur von 30 °C für variierende hydrogeologische Eigenschaften des Grundwasserleiters



Quelle: Eigene Darstellung, Consulaqua Hamburg Beratungsgesellschaft mbH.

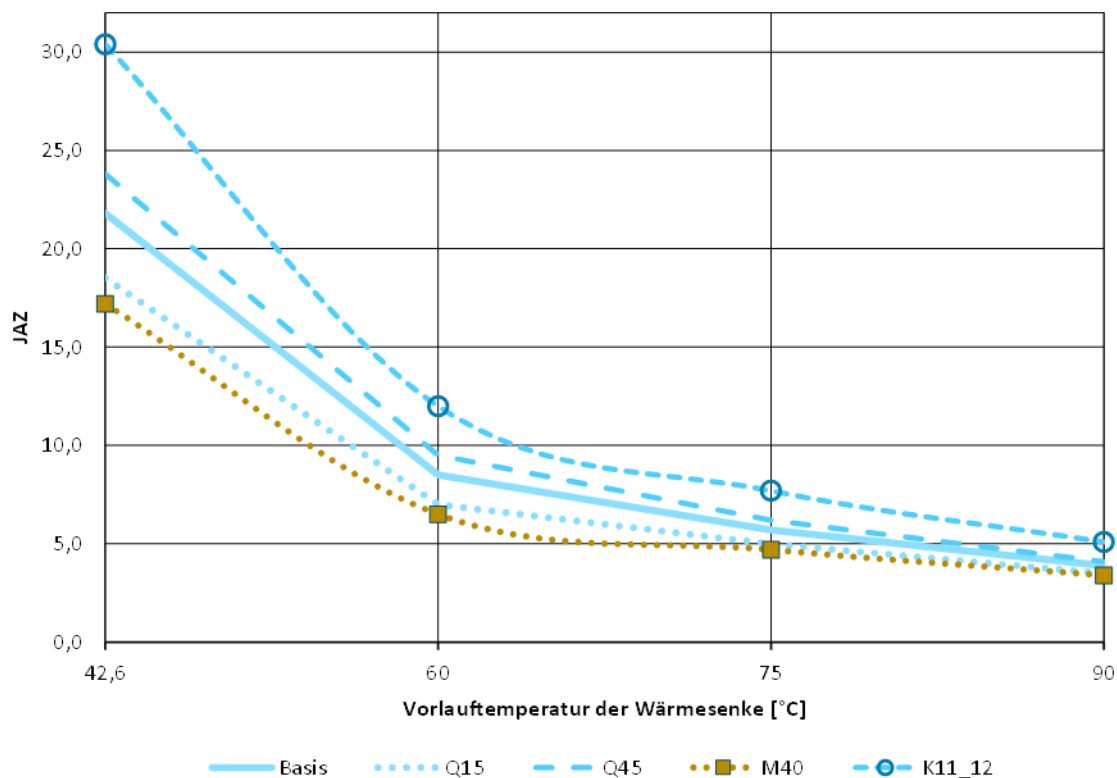
Im Gegensatz zur regionalen Grundwasserströmung im hier zugrunde gelegten Bereich haben die hydrogeologischen Eigenschaften der Speicherformation einen hohen Einfluss auf die zu erzielenden JAZ. Der Aufbau des geologischen Untergrunds ist zusammen mit der Filterstellung der Brunnen entscheidend für die Ausbildung des Wärmespeichers und die damit verbundenen Wärmeverluste. Mit 20 m weist die Speicherformation im Basisszenario eine vergleichsweise geringe Mächtigkeit auf, die eher als Untergrenze für eine Aquifer-Wärmespeicherung anzusehen ist. Hinsichtlich der JAZ des Gesamtsystems ist eine geringe Mächtigkeit jedoch als günstig zu bewerten. So erreicht der Speicher nach 10 Jahren in einer 40 m mächtigen Speicherformation eine JAZ von 17 gegenüber ca. 22 im Basisszenario. Bei einer nur 10 m mächtigen Speicherformation (Szenario M10) wird eine JAZ von ca. 27 erreicht. In den energetisch besten Szenarien werden im Dauerbetrieb des Speichers JAZ von ca. 30 und darüber hinaus erreicht (Szenarien K11_11 und K11_12). Gegenüber dem Basisszenario ist in diesen Szenarien die hydraulische

Permeabilität der Speicherschicht reduziert. Während eine verminderte horizontale Permeabilität eine höhere Auswirkung hat, spielt das Verhältnis zwischen horizontaler und vertikaler Permeabilität – zumindest bei einem geringmächtigen Speicherhorizont – nur eine untergeordnete Rolle.

Im Folgenden wird der Einfluss variierender Vor- und Rücklauftemperaturen auf ausgewählte hydrodynamisch-thermische und hydrogeologische Szenarien untersucht. Es wurden die Vor- und Rücklauftemperaturen wie folgt variiert:

- ▶ Vorlauftemperatur: 42,6 °C, Rücklauftemperatur: 30 °C,
- ▶ Vorlauftemperatur: 60,0 °C, Rücklauftemperatur: 45 °C,
- ▶ Vorlauftemperatur: 75,0 °C, Rücklauftemperatur: 45 °C,
- ▶ Vorlauftemperatur: 90,0 °C, Rücklauftemperatur: 55 °C.

Abbildung 2.16: Jahresarbeitszahlen eines (HT-)ATES bei variierenden Vor- und Rücklauftemperaturen eines Heizsystems (10. Betriebsjahr der Anlage)



Quelle: Eigene Darstellung, Consulaqua Hamburg Beratungsgesellschaft mbH.

Verglichen mit dem Einfluss betrieblicher und hydrogeologischer Randbedingungen auf die zu erzielenden Wirkungsgrade wirken sich verminderte Vor- und Rücklauftemperaturen des Heizsystems deutlich stärker aus (Abb. 2.16). Je höher die Vor- und Rücklauftemperaturen des Heizsystems sind, desto weniger stark wird der Einfluss der hydrogeologischen Parameter auf

die JAZ. Die Grafik zeigt, dass (HT-)ATES somit vor allem in modernen Wärmenetzen mit gut gedämmtem Wohnungsbestand und entsprechend niedrigeren Vor- und Rücklauftemperaturen der Heizungen effizient eingesetzt werden können. Im günstigsten Fall können dann durch die Direkteinspeicherung der Wärme in den Rücklauftemperaturen sehr hohe JAZ von über 30 erzielt werden.

2.3.1.5 (Hochtemperatur-)Erdwärmesondenspeicher ((HT-)BTES)

Die Vorgehensweise bei der Modellierung eines (Hochtemperatur-)Erdwärmesondenspeichers ((HT-)BTES) mit den variierenden Werten für die wesentlichen Untergrundparameter wurde ausführlich in Abschnitt 1.4.4 beschrieben. Die Nutzung des geologischen Untergrunds erfolgt in diesem Fall durch ein Erdsondenfeld mit einem quadratischen Grundriss und 10 · 10 Doppel-U-Sonden mit einer Länge von jeweils 50 m in der Speicherformation. Das Sondenfeld befindet sich in einer mächtigen Geschiebemergelschicht ohne Grundwasserströmung.

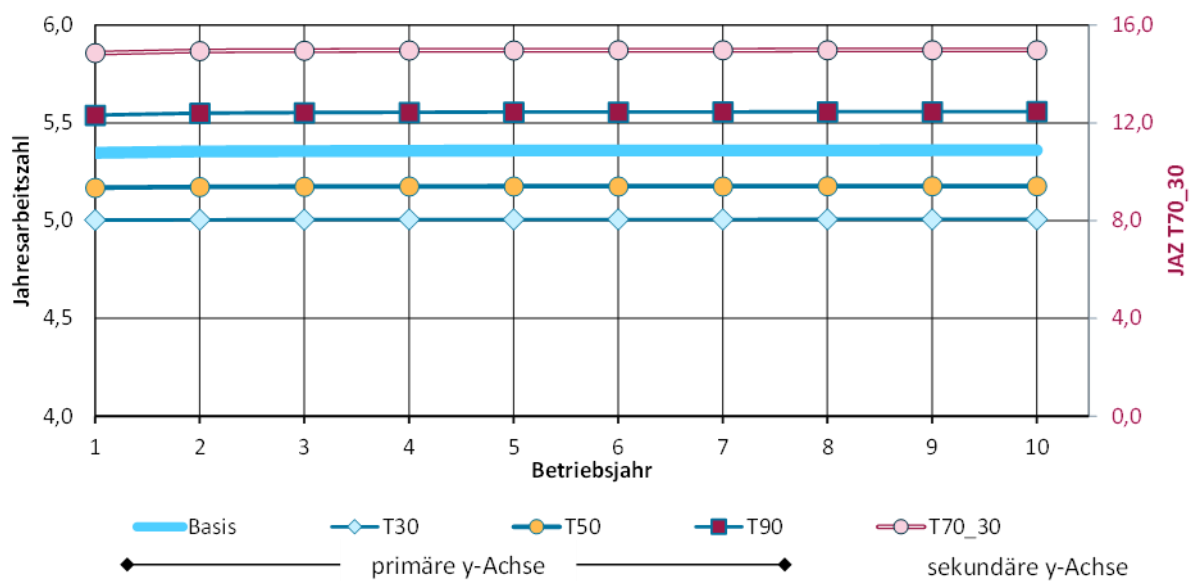
Wie beim (HT-)ATES wird dem geologischen Untergrund im Wechsel über sechs Monate Wärme zugeführt und anschließend über sechs Monate wieder entzogen. Die Infiltration und Entnahme erfolgt über ein geschlossenes System mit einer Pumprate von ca. 150 m³/h. Die Einspeichertemperatur beträgt im Basisszenario 70 °C. Die Grundwassertemperatur innerhalb des Sondenfelds wird mit 10 °C angenommen. Nach sechs Monaten erfolgen die Entnahme der gespeicherten Wärme und die Nutzung durch eine Wärmepumpe. Die Wärmesenkentemperatur beträgt konstant 42,6 °C. Für die Modellrechnungen wird weiterhin die Wärmepumpe mit einer konstanten Rücklauftemperatur von 10 °C betrieben. Die Ausspeichertemperatur aus dem (HT-)BTES nimmt in Folge der stetigen Abkühlung des geologischen Untergrunds und in Folge der konstanten Rücklauftemperatur (10 °C) von ca. 15 °C auf ca. 11 °C ab.

Einschließlich eines Basisszenarios wurden 10 Szenarien berechnet (vgl. Tab. 2.3 sowie Abb. 2.17 – 2.19), in denen betriebliche Parameter (Szenarien T30, T50, T90 und T70_30), die Sondenlänge als baulicher Parameter (Szenarien SL20, SL100) sowie die Untergrundeigenschaften variiert wurden. Bei den weiteren Szenarien wurde der Einfluss der Grundwasserströmung in einer in den Geschiebemergel eingelagerten, unterschiedlich mächtigen Sandschicht untersucht.

Tabelle 2.3: Parametervariation der Modellszenarien bei der Nutzungsvariante (HT-)BTES

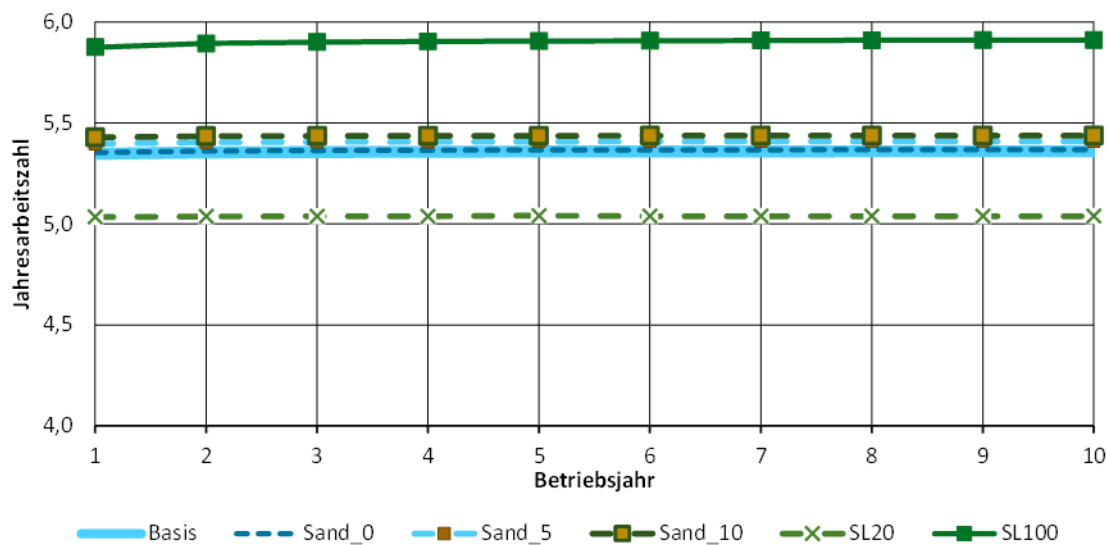
Szenario	Einspeicher-temperatur [°C]	WP-Rücklauf-temperatur [°C]	Mächtigkeit der Sandschicht [m]	Sondenlänge [m]
Basis	70	10	1,0	50
T30	30	10	1,0	50
T50	50	10	1,0	50
T90	90	10	1,0	50
T70_30	70	30	1,0	50
Sand_0	70	10	0,0	50
Sand_5	70	10	5,0	50
Sand_10	70	10	10	50
SL20	70	10	1,0	20
SL100	70	10	1,0	100

Varierte Parameter sind fett markiert.

Abbildung 2.17: Jahresarbeitszahlen der Nutzungsvariante (HT-)BTES in den betrieblich-thermischen Szenarien

Quelle: Eigene Darstellung, Consulaqua Hamburg Beratungsgesellschaft mbH.

Abbildung 2.18: Jahresarbeitszahlen der Nutzungsvariante (HT-)BTES mit variierendem hydrogeologischen Aufbau und unterschiedlichen Sondenlängen



Quelle: Eigene Darstellung, Consulaqua Hamburg Beratungsgesellschaft mbH.

In den meisten Modellszenarien liegen die Jahresarbeitszahlen zwischen 5,0 und 5,6. Deutlich höhere Jahresarbeitszahlen von ca. 15 werden in der Variante erreicht, in der der Rücklauf aus dem Sondenpeicher auf nur 30° C abgekühlt wird. Damit verringert sich der von der Wärmetemperatur zu leistende Temperaturhub um 20 °C gegenüber den anderen Szenarien.

Im Unterschied zur Wärmespeicherung in einem (HT-)ATES-System erreichen die Jahresarbeitszahlen bereits im ersten Betriebsjahr nahezu das Niveau eines langjährigen Dauerbetriebs. Ein mehrjähriges Einfahren des Speichers ist nicht erforderlich.

Je höher die Einspeichertemperaturen sind, desto höher sind auch die erzielbaren Jahresarbeitszahlen, wobei die Spanne mit einer JAZ von ca. 5,0 bei einer Einspeicherung mit 30 °C (Szenario T30) und einer JAZ von 5,6 bei einer Einspeichertemperatur von 90 °C vergleichsweise gering ist. Die Effizienz des Gesamtsystems ist damit relativ wenig abhängig von Temperaturschwankungen bei der Einspeicherung.

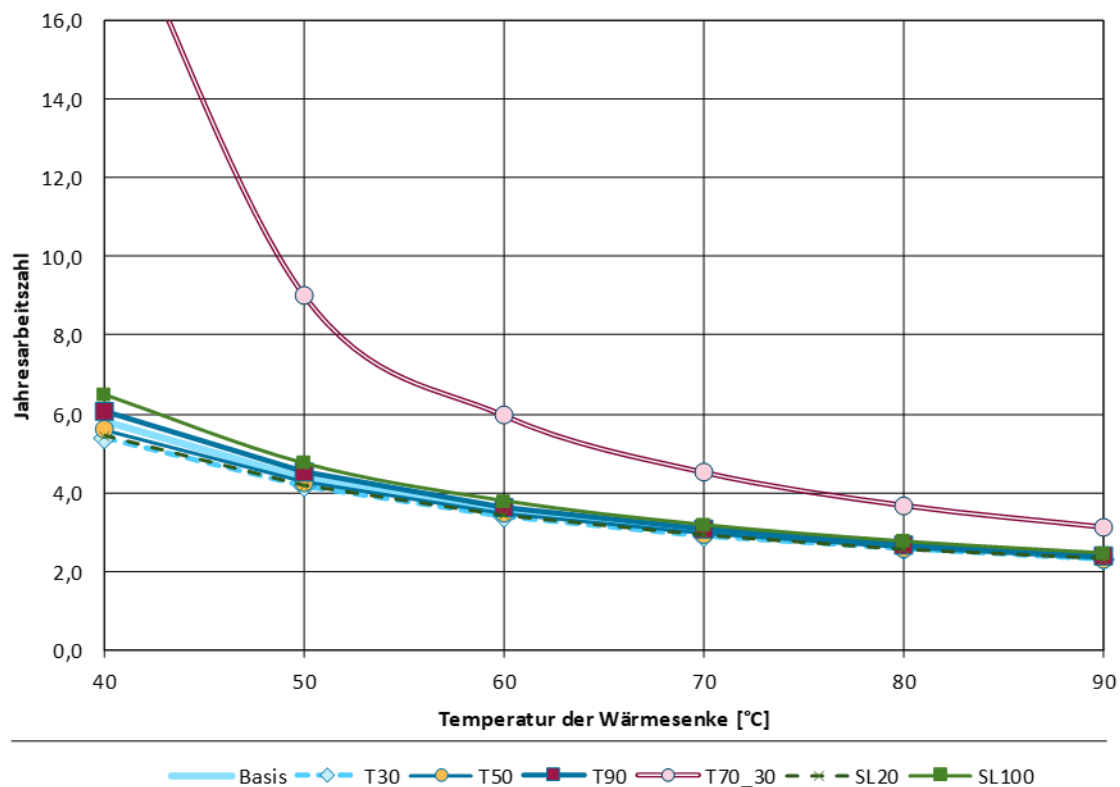
Auch der Einfluss einer Grundwasserströmung in einer unterschiedlich mächtigen Sandlage in einem ansonsten als Grundwasserhemmer wirkenden Geschiebemergel hat keine relevanten Auswirkungen auf die Jahresarbeitszahl des Systems. Die Abweichungen gegenüber der Basisvariante liegen bei weniger als 2 %.

Weitaus größeren Einfluss auf die Jahresarbeitszahlen hat erwartungsgemäß die Sondenlänge und das damit thermisch beeinflusste Untergrundvolumen. Niedrigere Sondenlängen führen zu geringeren Jahresarbeitszahlen, da weniger Wärme gespeichert und rückgewonnen werden kann und entsprechend übers Jahr mehr Arbeit durch die Wärmepumpe geleistet werden muss. Größere Sondenlängen können dagegen die Systemeffizienz erhöhen.

Auch bei dieser Technologie hängen die Jahresarbeitszahlen stark von der Temperatur der Wärmesenke ab. Je niedriger ihre Temperatur ist, desto höher sind die erzielbaren Jahresarbeitszahlen. Bei Temperaturen über 60 °C mindert sich die JAZ in den meisten Szenarien auf unter 4,0, bei Temperaturen über 80 °C auf JAZ von unter 3,0. Mit zunehmender Wärmesenkentemperatur nimmt auch die Spannbreite zwischen den untersuchten Szenarien ab.

Bei hohen Wärmesenkentemperaturen, wie sie beispielsweise für die Einspeisung in ein Fernwärmesystem erforderlich sind, sind (HT-)BTES-Systeme weniger effizient. Während in nahezu allen (HT-)ATES-Szenarien bei einer Wärmesenkentemperatur von 90 °C Jahresarbeitszahlen zwischen 4 und 6 erreicht werden, liegen bei einem (HT-)BTES die JAZ bei dieser Wärmesenkentemperatur meist unter 2,5. Lediglich das Szenario mit einer höheren Rücklauftemperatur der Wärmepumpe von 30 °C erreicht eine JAZ von knapp über 3,0.

Abbildung 2.19: Jahresarbeitszahlen der Nutzungsvariante (HT-)BTES bei variierenden Vorlauftemperaturen der Wärmesenke (10. Betriebsjahr der Anlage)



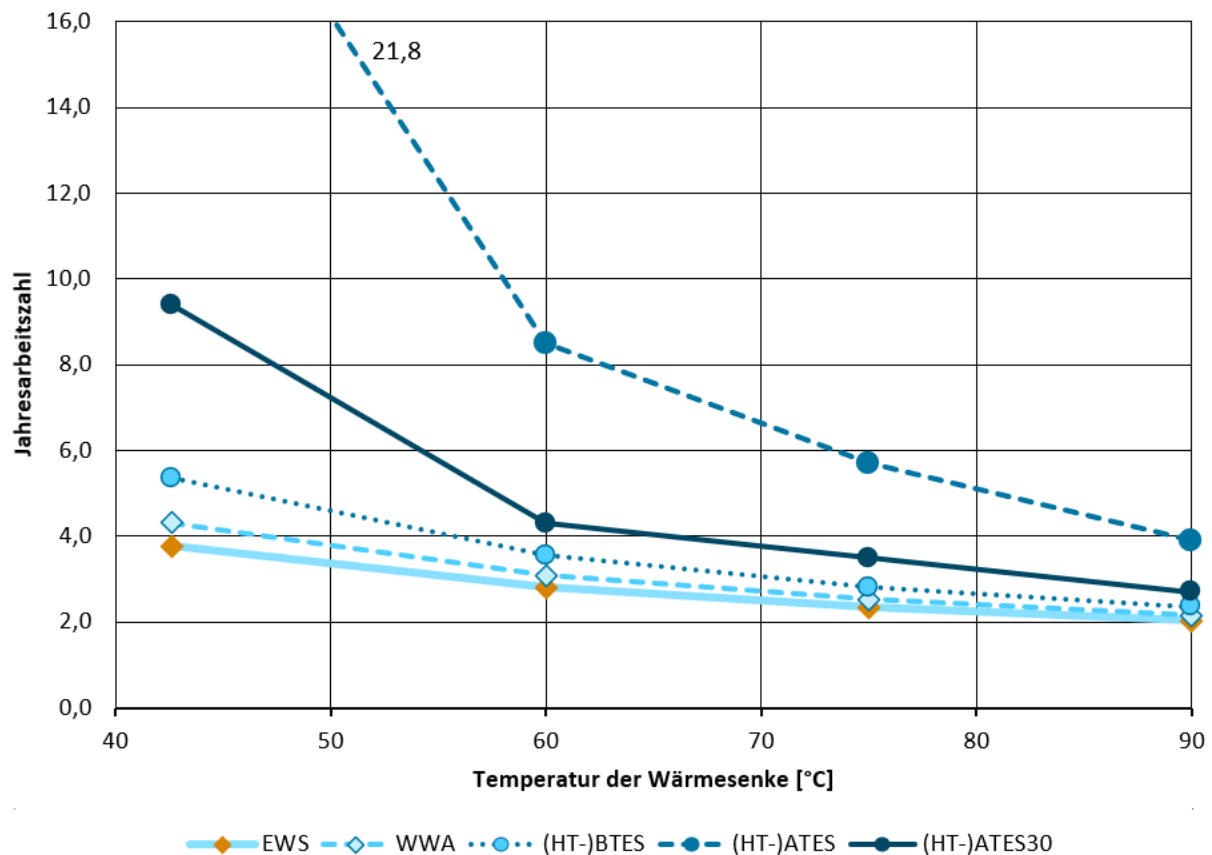
Quelle: Eigene Darstellung, Consulaqua Hamburg Beratungsgesellschaft mbH.

2.3.2 Technologievergleich

2.3.2.1 Energieeffizienz

Für eine vergleichende Bewertung der Effizienz der untersuchten Technologien (EWS, WWA, (HT-)BTES, (HT-)ATES) werden in Abbildung 2.20 die Jahresarbeitszahlen der Technologien unter Berücksichtigung variierender Vor- bzw. Rücklauftemperaturen grafisch dargestellt. Bei diesem Vergleich muss beachtet werden, dass für die Systeme EWS und (HT-)BTES teilweise andere Eingangsparameter verwendet wurden als für die Berechnung der WWA- und (HT-)ATES-Systeme.

Abbildung 2.20: Jahresarbeitszahlen der Technologien bei variierenden Vor- und Rücklauf-temperaturen eines Heizsystems (10. Betriebsjahr der Anlage)



Quelle: Eigene Darstellung, Consulaqua Hamburg Beratungsgesellschaft mbH.

Auch bei hohen Vor- und Rücklauftemperaturen des Heizsystems (zwischen 60 °C und 90 °C) liegen die JAZ des (HT-)ATES noch zwischen Werten von ca. 4 und 8 und sind damit mehr als doppelt so hoch, wie bei den anderen Technologien. Durch die beim (HT-)ATES bestehende Möglichkeit, Wärme direkt in den Rücklauf einzuspeichern, können bei niedrigen Vor- und Rücklauf-temperaturen sogar sehr hohe JAZ von über 20 erzielt werden.

2.3.2.2 Leistung und untertägiger Raumbedarf

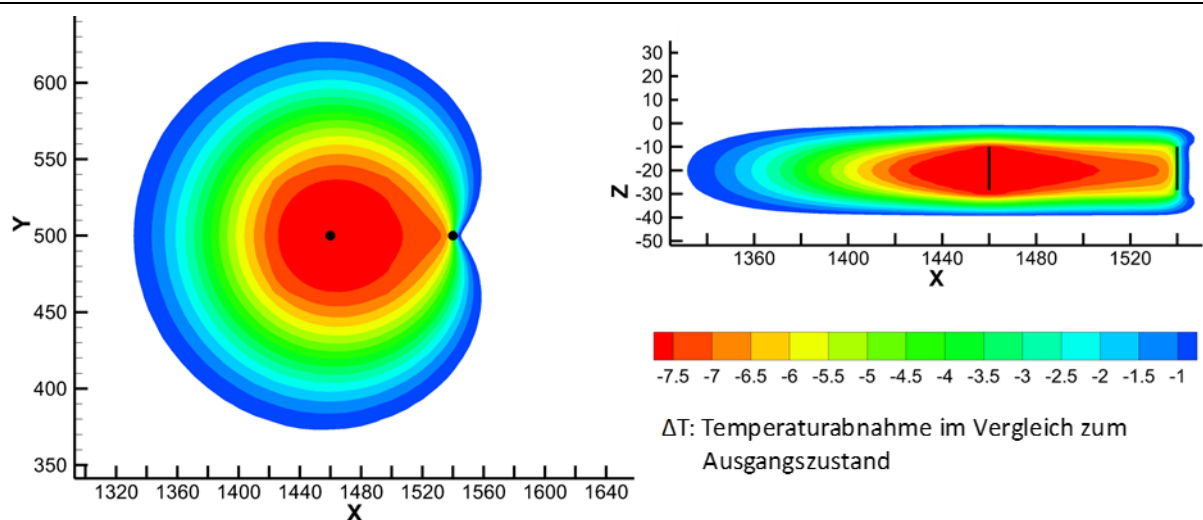
Für die Erarbeitung von Empfehlungen für die Einsatzgebiete der Technologien sind neben den zu erzielenden JAZ auch die zu erzielenden Leistungen und die damit verbundenen Umweltauswirkungen relevant. Als wesentliche Umweltauswirkung zusätzlich zur Klimawirksamkeit wird hier die Temperaturänderung des untertägigen Raums berechnet und bewertet. Die maximale räumliche Umweltwirkung wird durch den untertägigen Raum definiert, der durch den Einsatz der Technologie eine Temperaturänderung von $> 1\text{ °C}$ gegenüber der Ausgangstemperatur erfährt. Im Zuge der Modellrechnungen wurden für jede Variante neben der Jahresarbeitszahl auch die Entzugsleistung und der Raumbedarf ermittelt. Dabei gilt die konservative und restriktive Annahme, dass bei einer Temperaturänderung von unter 1 °C keine negativen Auswirkungen auf die Umwelt entstehen und dass keine Beeinflussung weiterer, eventuell zukünftig errichteter Erdwärmennutzungsanlagen besteht. Im Zuge der Modellrechnungen wurden für jede Variante neben der Jahresarbeitszahl auch die Entzugsleistung und der Raumbedarf ermittelt.

Exemplarisch wird die Raumbedarfsermittlung anhand der Basisvariante der Wasser-Wasser-Anlage beschrieben. Abbildung 2.21 zeigt die horizontale und vertikale Ausbreitung der Kältefahne im Grundwasserleiter nach einer Betriebszeit von 10 Jahren. Der horizontale Radius des Bereichs mit einem Temperaturanstieg um $> 1\text{ °C}$ beträgt ca. 125 m. Die Kältefahne hat sich auch innerhalb der schlecht wasserleitenden Geschiebemergelschicht ausgebreitet und weist eine Gesamtmächtigkeit von 37 m auf. Über die Zylinderformel kann das temperaturbeeinflusste Volumen damit näherungsweise auf ca. 1,82 Mio. m^3 berechnet werden. Für die anderen Technologien wurde der Raumbedarf gleichermaßen ermittelt (vgl. Abschn. 1.4).

Die Entzugsleistung errechnet sich aus der Entnahmerate ($20\text{ m}^3/\text{h}$ in der Basisvariante der Wasser-Wasser-Anlage), der Temperaturdifferenz zwischen dem geförderten und dem abgekühlten und wieder infiltrierten Wasser sowie der Wärmekapazität des Wassers (ca. $4,2\text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$). Bei einer Temperaturdifferenz von 4 °C beträgt die Leistung der Wasser-Wasser-Anlage konstant ca. 93 kW.

Für die Basisvarianten aller vier Technologien zur geothermischen Wärmergewinnung und untertägigen Wärmespeicherung sind die wesentlichen Ergebnisse der Modellrechnungen in Tabelle 2.4 zusammengefasst.

Abbildung 2.20: Exemplarische Darstellung des Raumbedarfs einer Wasser-Wasser-Anlage anhand der horizontalen Ausbreitung der Kältefahne und der vertikalen Ausbreitung im Grundwasserleiter nach 10 Jahren Betriebszeit (Basisvariante)



Linke Teilabbildung: Horizontale Ausbreitung der Kältefahne. Rechte Teilabbildung: Vertikale Ausbreitung der Kältefahne.

Quelle: Eigene Darstellung, Consulaqua Hamburg Beratungsgesellschaft mbH.

Tabelle 2.4: Vergleich des Raumbedarfs einer geothermischen Wärmegewinnung und einer untertägigen Wärmespeicherung

Betrachtung der Basisszenarien der verschiedenen Technologien

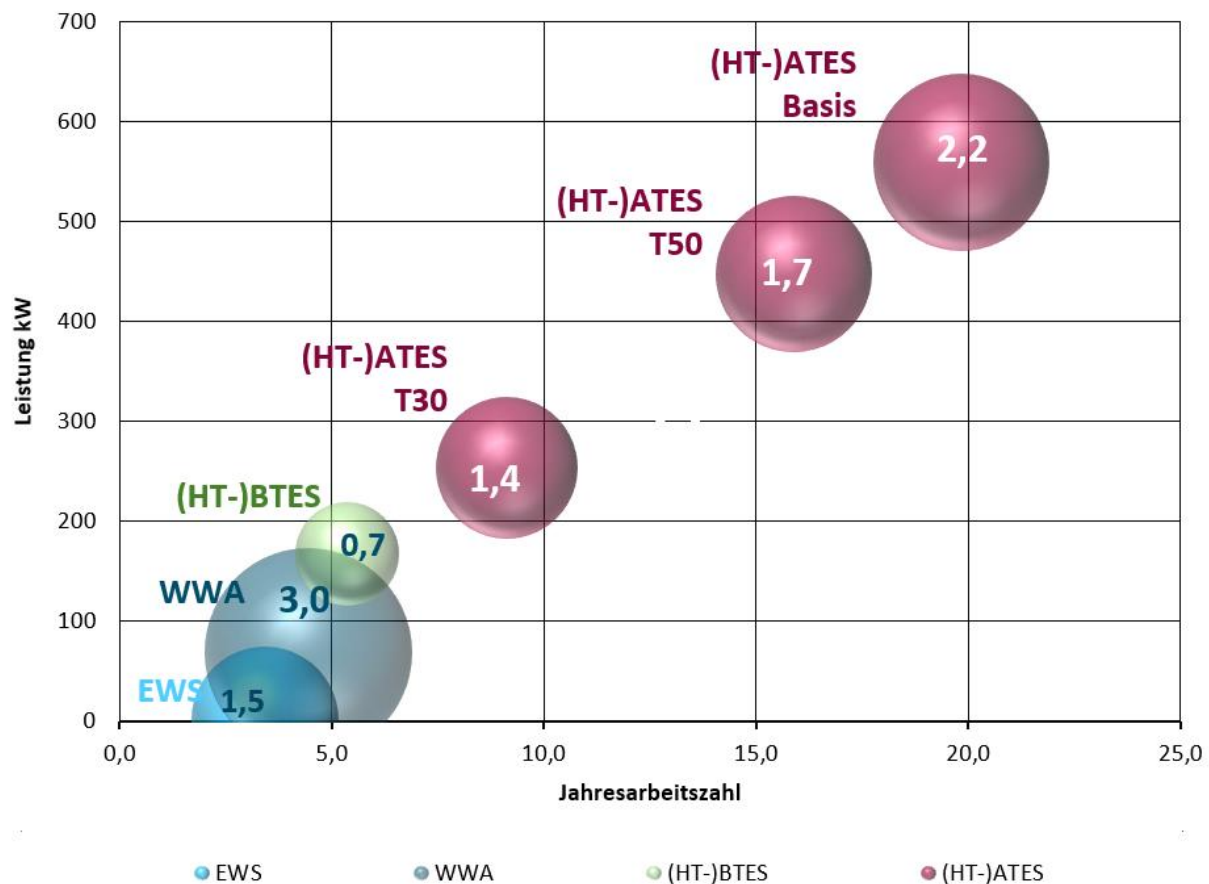
Parameter	EWS (2 kW)	WWA	(HT-)BTES	(HT-)ATES
Gewonnene Wärmemenge [MWh/a]	9	604	1466	5093
Leistung [kW], Jahresmittelwert	1,08	69,0	167,3	581
Leistung [kW], Mittelwert im Betrieb	1,44	93,0	335	1162
Raumbedarf (+1 °C Isotherme) [Mio. m ³]	0,01	1,82	1,09	10,56
Auswirkungsradius (+1 °C Isotherme) [m]	8	125	64	211
JAZ [-] (Mittelwert über 10 Jahre)	3,42	4,45	5,36	19,83
Betriebszeit [Tage/Jahr]	271	271	183	183
Spezifischer Raumbedarf (Wärmemenge) [m ³ /kWh]	1,49	3,00	0,74	2,15

Geothermische Wärmegewinnung: EWS, WWA; untertägige Wärmespeicherung: (HT-)BTES, (HT-)ATES.

Abbildung 2.21 zeigt für die Basisvarianten der verschiedenen Technologien sowie drei (HT-)ATES-Szenarien das Verhältnis zwischen den Jahresarbeitszahlen und der Leistung. Ergänzend ist zudem der Raumbedarf als wesentliche Umweltauswirkung der Technologien dargestellt. Um die Raumbedarfe der Technologien miteinander vergleichen zu können, ist jeweils der spezifische Raumbedarf für die gewinnbare Wärmemenge (Wärmemengen aus Direkteinspeisung und Wärmepumpenbetrieb) dargestellt.

Die in den Basisszenarien der untersuchten Technologien erzielten Leistungen und Jahresarbeitszahlen unterscheiden sich erheblich. Während eine Erdwärmesonde im Betrieb eine geringe durchschnittliche Leistung von nur 1,44 kW hat, stellt der (HT-)ATES in der Ausspeicherphase im Durchschnitt 559,5 kW bereit.

Beim (HT-)ATES entscheidet vor allem die Einspeichertemperatur über die Leistung und die zu erzielende Jahresarbeitszahl. Höhere Einspeichertemperaturen führen erwartungsgemäß zu höheren Jahresarbeitszahlen und höheren Leistungen. Gleichzeitig nimmt jedoch der spezifische Raumbedarf leicht zu. Während bei einer Einspeichertemperatur von 30 °C je kWh ca. 1,4 m³ des untertägigen Raums eine Temperaturveränderung von > 1 °C erfahren, wird bei einer Einspeichertemperatur von 50 °C etwas mehr Raum benötigt (1,7 m³/kWh). Die Basisvariante weist mit ihrer Einspeichertemperatur von 70 °C mit 2,2 m³/kWh den größten Raumbedarf auf.

Abbildung 2.21: Verhältnis zwischen Jahresarbeitszahl und Leistung im Betrieb sowie spezifischem Raumbedarf (Wärmemenge) der Technologien

Die Zahlenangaben in den Kreisen geben den spezifischen Raumbedarf in m^3/kWh an; die Kreisfläche ist hierzu äquivalent.
 Quelle: Eigene Darstellung, Consulaqua Hamburg Beratungsgesellschaft mbH.

Hohe Einspeichertemperaturen sind bei (HT-)ATES-Systemen somit energetisch günstiger, da größere Wärmemengen direkt in den Rücklauf des Heizsystems eingespeichert werden können und dadurch weniger Elektrizität für den Betrieb von Wärmepumpen benötigt wird. Es wird allerdings ein etwas größerer Raum beansprucht.

Das (HT-)BTES-Basisszenario basiert auf einer thermischen Regeneration des Sondenfelds auf einem Temperaturniveau im eingeleiteten Fluid von $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Es kann direkt nur mit dem (HT-)ATES-Basisszenario verglichen werden, in dem ebenfalls $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ heißes Wasser infiltriert wird. Gegenüber dem (HT-)ATES-Basisszenario weist der (HT-)BTES eine niedrigere Jahresarbeitszahl auf, sein spezifischer Raumbedarf ist jedoch mit $0,7\text{ m}^3/\text{kWh}$ deutlich geringer, da die Wärmeausbreitung im Wesentlichen auf das Sondennahfeld beschränkt bleibt. Das untersuchte (HT-)BTES-System befindet sich in einer grundwasserhemmenden Schicht und unterscheidet sich in den Untergrundverhältnissen diametral von einem an einen Grundwasserleiter gebundenen (HT-)ATES-System.

Bei den reinen Wärmeentzugstechnologien weist die Wasser-Wasser-Anlage im Vergleich zur Erdwärmesonde die bei Weitem höhere Leistung auf (WWA: 93 kW ; EWS: $1,5\text{ kW}$). Entsprechend der höheren JAZ ist die WWA auch energetisch günstiger. Der spezifische Raumbedarf der WWA ist mit $3,0\text{ m}^3/\text{kWh}$ jedoch doppelt so hoch, da die Temperaturabsenkung verglichen mit der EWS gering und der hydraulisch-thermisch beeinflusste Raum entsprechend größer ist.

2.3.2.3 CO₂-Emissionen

Neben der Jahresarbeitszahl ist der spezifische CO₂-Emissionsfaktor eine wichtige Kennzahl für die ökologische Bewertung der Technologien. Mit dem spezifischen CO₂-Emissionsfaktor g CO₂ / kWh wird die Menge an CO₂ angegeben, die bei der Wärmeerzeugung anfällt. Die spezifischen CO₂-Emissionsfaktoren für die Technologien wurden wie folgt berechnet:

$$CO_2\text{-Emissionsfaktor} \left[\frac{g}{kWh} \right] = \frac{\sum \text{elektrische Arbeit} [kWh/a] \cdot CO_2\text{Emissionsfaktor Strommix} \left[\frac{g}{kWh} \right]}{\sum \text{thermische Arbeit} [kWh/a]}$$

Alle Technologien erfordern den Einsatz einer elektrizitätsbetriebenen Wärmepumpe. Für die benötigte Elektrizität wurde ein CO₂-Emissionsfaktor von 401 g/kWh angesetzt. Dieser Wert entspricht dem deutschen Elektrizitätsmix des Jahres 2019 (Icha und Kuhs, 2020). Für die Speichertechnologien (HT-)BTES und (HT-)ATES wird davon ausgegangen, dass industrielle Abwärme oder Solarthermie zur Verfügung stehen, die hier mit einem Emissionsfaktor von 0 g/kWh bewertet werden.

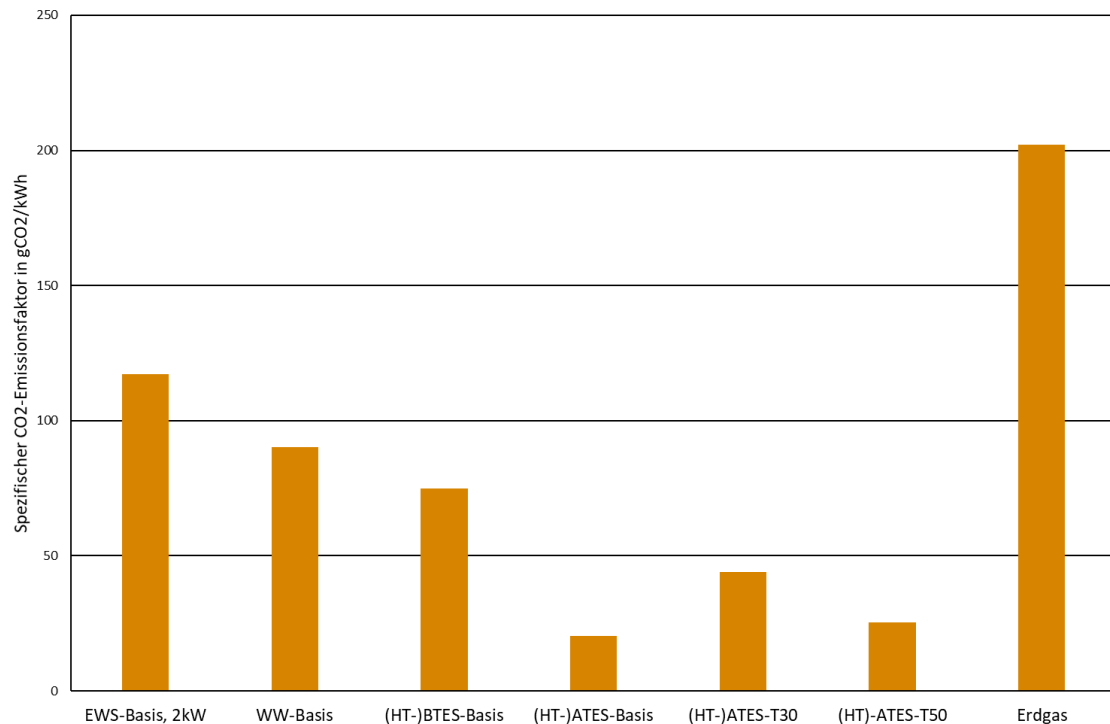
Tabelle 2.5: CO₂-Emissionsfaktoren der Technologien

Parameter	EWS (Basis- szenario)	WWA (Basis- szenario)	(HT-)BTES (Basis- szenario)	(HT-)ATES (Basis- szenario)	(HT-)ATES (Szenario T30)	(HT-)ATES (Szenario T50)
Thermische Arbeit (erzeugte Wärme- menge) [MWh/a]	9	604	1.466	5.093	2.258	4.022
Leistung (Jahresmittelwert) [kW]	1,08	69,00	167,32	581	258	459
Elektrische Arbeit (eingesetzte Elektrizitätsmenge) [MWh/a]	2,77	135,83	273,46	263	248	252
CO ₂ -Emissionsfaktor dt. Strommix* [g/kWh]	401	401	401	401	401	401
Mittlere CO ₂ -Emissionen in einem Betriebsjahr [kg/a]	1.109	54.468	109.656	105.084	99.448	101.052
JAZ (Mittelwert über 10 Jahre)	3,42	4,45	5,36	19,83	9,11	15,89
CO ₂ -Emissionsfaktor [g/kWh]	117	90	75	21	44	25

*) Quelle: UBA, 2020.

Abbildung 2.22 veranschaulicht die verschiedenen CO₂-Emissionsfaktoren der Technologien. Als Vergleichswert wurde der CO₂-Emissionsfaktor von Erdgas in Höhe von 202 g/kWh (Icha und Kuhs, 2020) in die Grafik aufgenommen. Die dargestellten Werte hängen sehr stark von der Entwicklung des Emissionsfaktors für den sogenannten deutschen Strommix ab. Zukünftig ist mit einem steigenden Anteil Elektrizität aus erneuerbaren Quellen zu rechnen, so dass für die Zukunft stark sinkenden CO₂-Emissionsfaktoren bei den in Tabelle 2.5 aufgelisteten Technologien zu erwarten sind.

Abbildung 2.22: Grafische Darstellung der CO₂-Emissionsfaktoren der Technologien



Quelle: Eigene Darstellung, Consulaqua Hamburg Beratungsgesellschaft mbH.

2.3.2.4 Synopse

Für eine zusammenfassende, auf der Basis der Modellergebnisse erfolgende Bewertung müssen drei Aspekte berücksichtigt werden:

- ▶ Für die Varianten (HT-)BTES sowie (HT-)ATES müssen überschüssige Wärmemengen zur Verfügung stehen. Der hierfür benötigte Energiebedarf wurde bei der Berechnung der JAZ nicht berücksichtigt.
- ▶ Die Leistungscharakteristika der Technologien EWS und WWA können somit nicht direkt mit denen der Technologien (HT-)BTES und (HT-)ATES verglichen werden.
- ▶ Die Modellierung des Speichertechnologien (HT-)BTES und (HT-)ATES zeigt, dass die Entzugsleistung über ein Betriebsjahr nicht konstant ist und entsprechende technische Anlagen oder Verbraucher installiert werden müssen, die mit diesen Leistungsschwankungen zurechtkommen.

Im Folgenden werden die reinen Entzugstechnologien (EWS, WWA) und die Wärmespeichertechnologien ((HT-)BTES, (HT-)ATES) miteinander verglichen. In Tabelle 2.6 ist ein zusammenfassender Vergleich der Technologien in Abhängigkeit von den Untergrundeigenschaften dargestellt, und entsprechende Einsatzgebiete werden abgeleitet. Die Ableitung der bevorzugten Einsatzgebiete erfolgt dabei aus einer gemeinsamen Betrachtung der erforderlichen spezifischen Raumbedarfe und der erzielbaren JAZ.

Tabelle 2.6: Vergleich der Technologien nach bevorzugtem Einsatzgebiet sowie Stärken und Schwächen/Risiken

	Gut durchlässiger Grundwasserleiter	Grundwasserstauer oder -hemmer
Technologie	(HT-)ATES¹	(HT-)BTES¹
Stärken und Schwächen/Risiken	+ Hohe Leistungen (bis zu 10 MW) mit einer Brunnendublette erzielbar + Große Wärmemengen speicherbar + Effizient (hohe JAZ von > 20) erreichbar) + Auch bei hohen Wärmesenkenteperaturen noch effizient (z. B. JAZ ca. 5 bei 90 °C Vorlauftemperatur) + Geringe Beeinflussung des geologischen Untergrunds durch Bohrtätigkeit. + Geringer oberirdischer Platzbedarf + Steuerbar (Förderrate, Beladungstemperatur) + Skalierbar (Anzahl Brunnendubletten) + Niedriger spezifischer Raumbedarf (2,2 m³/kWh)	+ Hohe Leistungen durch den Bau vieler Erdsonden erzielbar (z. B. 100 Erdsonden à 50 m für eine Leistung von ca. 200 kW) ± Mittlere bis geringe Speicherkapazität ± Effizient: hohe JAZ erreichbar nur bei niedrigen Wärmesenkenteperaturen - Sondenfelder führen zu einer stärkeren Beeinflussung des geologischen Untergrunds + Erhöhter oberirdischer Platzbedarf + Steuerbar (Durchflussrate, Beladungstemperatur) + Skalierbar (Anzahl Sonden) - Bei Sondenfeldern stärkere Verletzung des geologischen Untergrunds (Durchteufen von Dichtschichten) - potentielle Leckagen und Fluidaustritte in Grundwasserleiter
Einsatz	Versorgung von Gebäudekomplexen bis hin zu Fernwärmenetzen	Versorgung gut gedämmter Gebäude und Gebäudekomplexe
Technologie	WWA²	WWA²
Stärken und Schwächen/Risiken	+ höhere Entzugsleistungen im Vergleich zu EWS möglich ± Effizient nur bei niedrigen Wärmesenkenteperaturen + Entzugsleistung steuerbar (Förderrate) + Geringer oberirdischer Platzbedarf - Erhöhter untertägiger Raumbedarf - Brunnenalterungsrisiko und mögliche Ergiebigkeitsverluste in Abhängigkeit von der Grundwasserbeschaffenheit	(Einsatz nicht möglich.)
Einsatz	Versorgung von Einfamilienhäusern bis zu Gebäudekomplexen	
Technologie	EWS³	EWS³

	Gut durchlässiger Grundwasserleiter	Grundwasserstauer oder -hemmer
Stärken und Schwächen/Risiken	- Geringe und begrenzte Entzugsleistung der Einzelanlage („Einfrieren“) ± Effizienz nur bei niedrigen Wärmesenktemperaturen + Unabhängig von der Grundwasserbeschaffenheit - Bei Sondenfeldern stärkere Verletzung des geologischen Untergrunds (Durchteufen von Dichtschichten) - Leckagen und Fluidaustritte in Grundwasserleiter	- Geringe und begrenzte Entzugsleistung der Einzelanlage („Einfrieren“) - Nur minimale natürliche Regenerierung durch den Grundwasseranstrom + Unabhängig von der Grundwasserbeschaffenheit - Bei Sondenfeldern stärkere Verletzung des geologischen Untergrunds (Durchteufen von Dichtschichten) - Keine Gefährdung von Grundwasserleitern durch Leckagen und Fluidaustritte
Einsatz	Versorgung von Einfamilienhäusern bis zu Gebäudekomplexen	Versorgung von Einfamilienhäusern bis zu Gebäudekomplexen

+ = Stärken; - = Schwächen/Risiken

¹⁾ überschüssige Wärme vorhanden, Wärmespeicherung bzw. Renaturierung; ²⁾ keine überschüssige Wärme vorhanden;

³⁾ reine Wärmeentzugsanlagen

2.3.2.4.1 Reine Wärmeentzugsanlagen (EWS, WWA)

Der Vergleich der Basisvarianten zeigt, dass Wasser-Wasser-Anlagen bei geeigneten hydrogeologischen Randbedingungen (Vorhandensein eines nutzbaren Wasserleiters) Erdwärmesonden sowohl im Hinblick auf die erzielbare Leistung als auch auf die erzielbaren Jahresarbeitszahlen überlegen sind (Abb. 2.21). Die Beschaffenheit des Grundwassers kann bei WWA jedoch zu Brunnenalterung führen, die langfristig die Ergiebigkeit der Brunnen vermindert. Insbesondere höhere Eisenkonzentrationen können zu Verockerungen in der Anlage und den Brunnen führen. Demgegenüber sind EWS von der Grundwasserbeschaffenheit unabhängig. Entsprechend ihrer Leistungscharakteristik sind EWS bei der Versorgung kleinerer Wohneinheiten (Einfamilienhäuser) und nur bei niedrigen Wärmesenktemperaturen zu empfehlen. Über Sondenfelder sind die Entzugsleistungen prinzipiell skalierbar, jedoch steigen damit die mit dem Eingriff in den geologischen Untergrund verbundenen Risiken (u. a. Durchteufen von Dichtschichten, hydraulische Kurzschlüsse). Aufgrund des relativ hohen technischen Aufwands sollte im Hinblick auf die Umweltauswirkungen die Möglichkeit des Einsatzes anderer Technologien für die Wärmeerzeugung geprüft werden (z. B. Luftwärmepumpen).

WWA eignen sich aufgrund der höheren erzielbaren Entzugsleistungen zur Versorgung größerer Wohneinheiten. Eingriffe in den geologischen Untergrund sind nur auf die Brunnenbohrungen beschränkt; der hydraulisch-thermische Auswirkungsraum ist im Verhältnis zur entzogenen Wärmemenge größer als bei EWS-Systemen. Die erzielbaren Jahresarbeitszahlen liegen höher als bei EWS, jedoch verringern sie sich bei beiden Technologien deutlich bei hohen Wärmesenktemperaturen (vgl. Abb. 2.9 und Abb. 2.12). Bei geeigneten geologischen Randbedingungen kann mit dieser Technologie ein guter Beitrag zur Wärmewende geleistet werden.

2.3.2.4.2 Anlagen zur Wärmespeicherung ((HT-)BTES, (HT-)ATES)

Sollen überschüssige Wärmemengen im geologischen Untergrund eingespeichert werden, so sind im Bereich von Grundwasserleitern (HT-)ATES-Systeme gegenüber (HT-)BTES-Systemen im Hinblick auf die zu erzielende Leistung wie auch im Hinblick auf den Wirkungsgrad bzw. die Jahresarbeitszahl überlegen. Dies gilt besonders für den Fall höherer Vor- und Rücklauftemperaturen des Heizsystems. Sollte jedoch kein geeigneter Aquifer für die Installation eines (HT-)ATES

vorliegen, so stellt die Technologie (HT-)BTES eine gute Möglichkeit für eine klima- und umweltschonende Wärmeversorgung dar, sofern die Wärmesenkentemperaturen maximal im Bereich zwischen 40 °C und 50 °C liegen. Aufgrund der höheren Bohrungsdichte zur Erstellung der Sonden sind damit jedoch deutlich stärkere Eingriffe in den geologischen Untergrund verbunden. Analog zu den EWS bei den Wärmeentzugsanlagen sind auch (HT-)BTES-Systeme aufgrund der gekapselten Zirkulation des Wärmeträgerfluids unabhängig von der Grundwasserbeschaffenheit. In (HT-)ATES-Systemen besteht in Abhängigkeit von den Betriebstemperaturen und der Wasserbeschaffenheit die Gefahr von Brunnenalterungsprozessen, die zu Ergiebigkeitsminderungen führen können.

Zwischenfazit 2.3.2

Die hydrogeologischen Eigenschaften des geologischen Untergrunds haben einen deutlichen Einfluss auf Art und energetische Effizienz von Wärmegewinnungs- und Speichersystemen. Vor allem die Einbindung der Wärmegewinnungs- bzw. Speichertechnologie in das Heizsystem wirkt sich aber auf die Energieeffizienz aus.

Die Energieeffizienz eines mit Unterstützung einer Wärmepumpe betriebenen geothermischen Heizsystems wird über die Jahresarbeitszahl (JAZ) erfasst. Als Kenngröße gibt sie das Verhältnis zwischen der dem geologischen Untergrund entzogenen geothermischen Energie und der zur Erfüllung der Heizlast zugeführten elektrischen Energie über die Dauer eines Jahres wieder.

Für alle untersuchten Wärmegewinnungs- und Speichertechnologien (Erdwärmesonden (EWS), Wasser-Wasser-Anlagen (WWA), (Hochtemperatur-)Aquifer-Wärmespeicher ((HT-)ATES) und (Hochtemperatur-)Erdwärmesondenspeicher ((HT-)BTES)) gilt, dass eine hohe Energieeffizienz erst durch niedrige Wärmesenkentemperaturen (z. B. Vorlauftemperaturen einer Heizung) erreicht werden kann, da dann der von der elektrisch betriebenen Wärmepumpe zu leistende Temperaturhub vergleichsweise gering ist.

Technologiespezifisch sind bei niedrigen Wärmesenkentemperaturen von ca. 42,6 °C Jahresarbeitszahlen von 3,5 bis 4,5 (EWS, WWA) bzw. um 6,0 bei (HT-)BTES-Systemen erreichbar. Höhere Wärmesenkentemperaturen führen zu deutlich geringeren Jahresarbeitszahlen. So liegen sie bei Wärmesenkentemperaturen von 75 °C unter 3,0. Bei hohen Wärmesenkentemperaturen (> 75 °C) erreichten nur noch (HT-)ATES-Systeme hohe JAZ von über 5,5, bei geeigneten Untergrundbedingungen sogar noch deutlich darüber hinaus.

Neben der Jahresarbeitszahl ist der spezifische CO₂-Emissionsfaktor eine weitere wichtige Kennzahl für die ökologische Bewertung der Technologien. Mit dem spezifischen CO₂-Emissionsfaktor g CO₂ / kWh wird die Menge an CO₂ angegeben, die bei der Wärmeerzeugung anfällt. Mit einem CO₂-Emissionsfaktor von 20 g CO₂ / kWh unterschreitet der (HT-)ATES den CO₂-Emissionsfaktor von Erdgas (202 g CO₂ / kWh) um etwa das Zehnfache.

Im Bereich von Grundwasserleitern können (HT-)ATES-Systeme einen relevanten Beitrag zu einer Wärmewende leisten, wenn überschüssige Wärme zum Beispiel aus der Industrie zur Verfügung steht und saisonal gespeichert werden kann. Sie lassen sich aufgrund hoher Ausspeichertemperaturen mit einer hohen Energieeffizienz und niedrigen CO₂-Emissionsfaktoren auch in Fernwärmenetze integrieren, während die anderen Systeme eher für die Versorgung von Einzelgebäuden und Gebäudekomplexen geeignet sind.

Eine integrale planerische Betrachtung von Untergrundaufbau, Brunnenbau und den gewählten Betriebsparametern des Speichers bietet erhebliches Optimierungspotenzial. Hohe Einspeichertemperaturen verbinden eine hohe Energieeffizienz mit einem vergleichsweise geringen spezifischen Raumbedarf für die Wärmespeicherung.

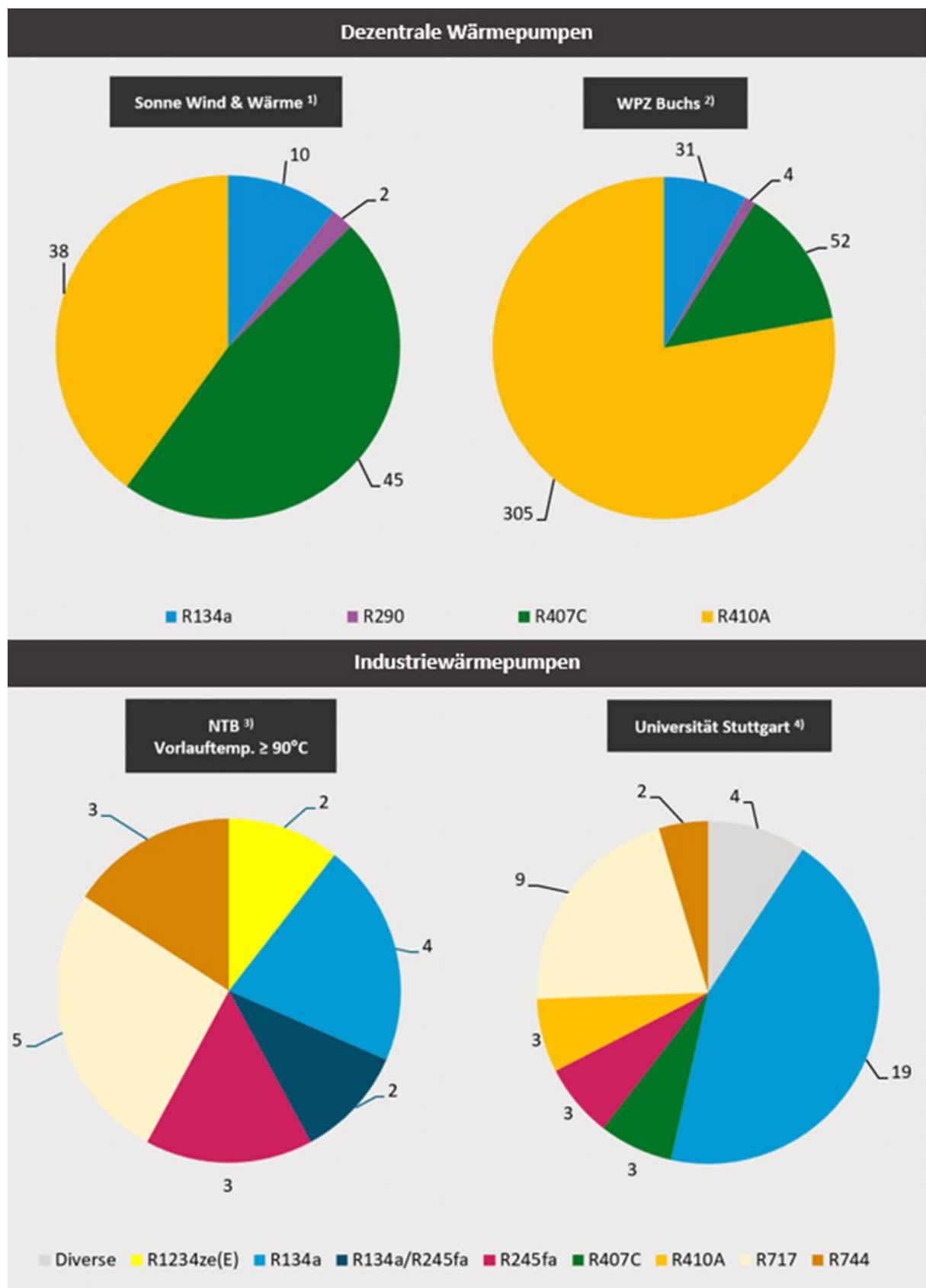
2.3.3 Eingesetzte Kältemittel in erdgekoppelten Wärmepumpen

Um als Kältemittel genutzt werden zu können, muss ein Stoff grundlegende thermodynamische Eigenschaften besitzen. Er muss auf dem Temperaturniveau der Wärmequelle verdampfen und sich bei technisch realisierbaren Drücken wieder verflüssigen. Zusätzliche Anforderungen ergeben sich aus wirtschaftlichen und technischen Aspekten: eine gute volumetrische Kälteleistung, leichte bzw. kostengünstige Herstellung, chemische Stabilität, schwere Entflammbarkeit, keine/geringe Toxizität und Korrosivität.

Voll- und teilhalogenierte Flurchlorkohlenwasserstoffe (FCKW und HFCKW) erfüllen zwar einen großen Teil dieser Anforderungen, wurden jedoch aufgrund ihrer Schädlichkeit für die Ozonschicht der Erde durch das Montreal-Protokoll und der nationalen Gesetze eingeschränkt bzw. verboten. Derzeit ersetzen voll- und teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (FKW und HFKW) die FCKWs. Sie beinhalten jedoch ein hohes Treibhauspotential (Global Warming Potential, GWP) und sind daher klimaschädlich. Obwohl sich die Kältemittel innerhalb der Wärmepumpe prinzipiell in einem geschlossenen System befinden, gelangt durch Leckagen sowie unsachgemäße Entsorgung dennoch ein nicht unwesentlicher Anteil dieser Stoffe in die Umwelt (LfU, 2015). Daher wurden Einschränkungen für den Einsatz dieser Stoffe in den Änderungen des Montreal-Protokolls festgelegt. Die Verpflichtungen aus diesen Änderungen des Montreal-Protokolls wurden zunächst durch die F-Gas-Verordnung über bestimmte fluorierte Treibhausgase umgesetzt (Verordnung (EG) Nr. 842/2006). Diese wurde ab 01.01.2015 durch die neue F-Gase-Verordnung über fluorierte Treibhausgase ersetzt (Verordnung (EU) Nr. 517/2014).

Als Überblick zu den in Wärmepumpen eingesetzten Kältemitteln wurden in Abbildung 2.24 verschiedene Marktübersichten von Wärmepumpen zusammengefasst und die verwendeten Kältemittel dargestellt. Für dezentrale Wärmepumpen, also kleinere Baugrößen zur Beheizung von Ein- und Mehrfamilienhäusern, wurden die Prüfungen des WPZ – Wärmepumpen-Testzentrum Buchs (2019) und die Produktdatenbank des Fachjournals Sonne Wind & Wärme (2019) ausgewertet. Für Industriewärmepumpen wurden in Studien der Interstaatlichen Hochschule für Technik Buchs (Arpagaus, 2018) sowie der Universität Stuttgart (Wolf et al., 2014) zusammengestellte Marktübersichten genutzt.

Abbildung 2.23: Verwendete Kältemittel in dezentralen und Industriewärmepumpen



Quelle: Wolf et al., 2014; Arpagaus, 2018; WPZ, 2019; Sonne Wind & Wärme, 2019.

Wie in Born et al. (2017) aufgeführt und in Abbildung 2.23 veranschaulicht, stammen die derzeit genutzten Kältemittel großteils aus der Stoffgruppe der fluorierten Kohlenwasserstoffe. Dabei finden bei erdgekoppelten Wärmepumpen Gemische aus HFKW-haltigen Substanzen wie R410A und R407C sowie ungemischte Kältemittel wie R134a Anwendung. Klimaverträglichere Kältemittel wie R290 (Propan) bilden die Ausnahme. Bei Industriewärmepumpen gibt es eine größere Varianz der verwendeten Kältemittel. Häufig verwendet werden HFKW-haltige Kältemittel wie R134a sowie die klimaverträglichen Kältemittel Ammoniak R717 (Ammoniak / NH_3) und R744 (Kohlenstoffdioxid / CO_2). Ein Grund für die zunehmende Verwendung klimafreundlicher Kältemittel bei Industriewärmepumpen ist, dass die notwendigen Sicherheitsvorkehrungen für den Einsatz dieser Stoffe (NH_3 ist giftig, und CO_2 kann nur unter Hochdruck genutzt werden) in großen Anlagen technisch einfacher umgesetzt werden können.

2.3.4 Auswirkungen der neuen F-Gas-Verordnung 517/2014

Das Ziel der neuen F-Gasverordnung 517/2014 ist „der Umweltschutz durch Minderung der Emissionen von fluorierten Treibhausgasen“ (Verordnung (EU) Nr. 517/2014, ABl L 150/199, Kapitel 1, Artikel 1). Sie gilt seit dem 01.01.2015 und hebt die Verordnung (EG) Nr. 842/2006 über bestimmte fluorierte Treibhausgase auf. Neben der Emissionsminderung verfolgt sie das Ziel, auf alternative Kühl- und Kältemittel umzustellen. Dazu regelt die Verordnung folgende Aspekte:

- ▶ Verwendung, Emissionsbegrenzung, Rückgewinnung und Zerstörung von F-Gasen,
- ▶ Auflagen für das Inverkehrbringen bestimmter F-Gas-enthaltender Erzeugnisse und Einrichtungen,
- ▶ Auflagen zu bestimmten F-Gasen,
- ▶ Mengengrenzung für das Inverkehrbringen von HFKWs.

In der aktuellen F-Gas-Verordnung 517/2014 werden in Anhang III („Verbote des Inverkehrbringens gemäß Artikel 11 Absatz 1“) bestimmte Anlagenarten aufgelistet, für die der Einsatz HFKW-haltiger Kältemittel eingeschränkt wird. Wärmepumpen werden hier nicht gesondert aufgeführt. Für sie gilt somit nur das allgemeine Verbot des Inverkehrbringens von Kälteanlagen mit Kältemitteln, deren GWP über 2500 liegt. Für diese Kältemittel gilt seit dem 01.01.2020 auch ein Nachfüllverbot. Je nach Kältemittelfüllmenge und Systemtyp müssen zusätzlich Verpflichtungen in Bezug auf die Zertifizierung des Personals, Leckageprävention, Dichtheitskontrollen und die Rückgewinnung von F-Gasen erfüllt werden.

Die maßgebliche Einflussnahme der F-Gas-Verordnung 517/2014 auf die verwendeten Kältemittel in erdgekoppelten Wärmepumpen ergibt sich jedoch durch das sogenannte „Phase-Down“. Damit ist ein Verfahren gemeint, das stufenweise die Einfuhr und das Inverkehrbringen von HFKW, FKW und Schwefelhexafluorid (SF_6) reduziert. Umgesetzt wird dies durch ein Quotensystem. Dabei werden Produzenten und Importeuren jedes Jahr Quoten in Form von CO_2 -Äquivalenten der HFKW zugewiesen, welche sie auf dem EU-Markt umsetzen dürfen. Diese jährlichen Quoten werden stufenweisen gesenkt (vgl. Tab. 2.7). Dabei wurde zunächst der Jahresdurchschnitt der im Zeitraum 2009 – 2012 in der Europäischen Union in Verkehr gebrachten Gesamtmenge als Grundlage angesetzt. Ab 2018 werden von dieser Menge zusätzlich die Mengen der CO_2 -Äquivalente abgezogen, die durch §2 (29) von dem Quotensystem ausgeschlossen sind (z. B. zur Zerstörung eingeführte Stoffe). Dadurch verringern sich die zur Verfügung gestellten Quoten zusätzlich.

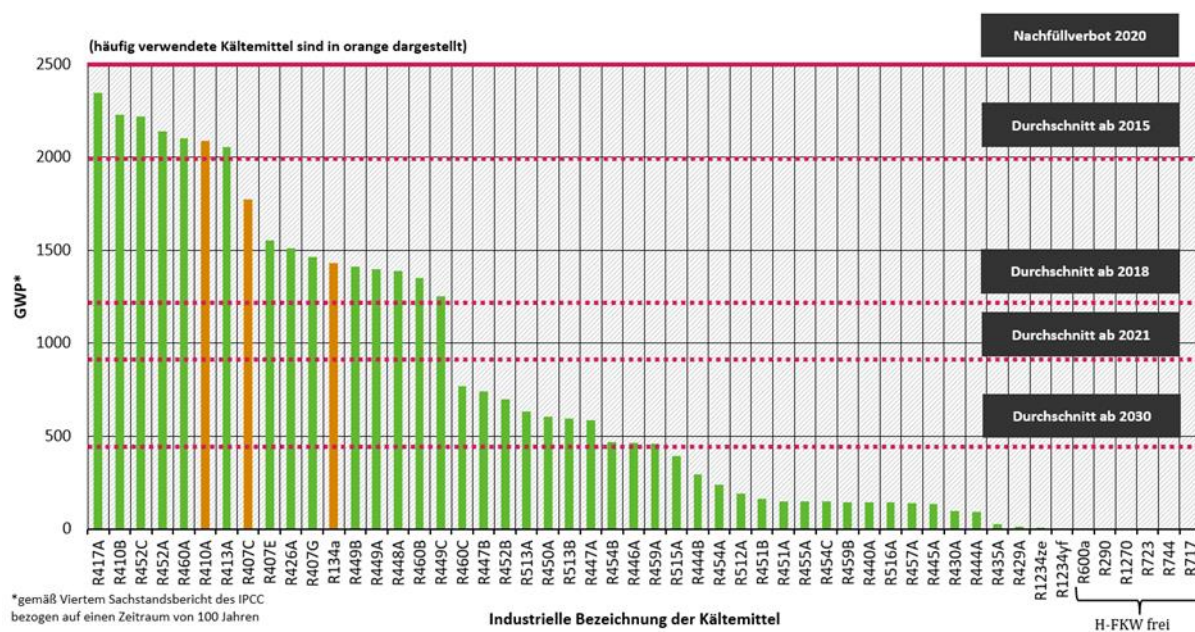
Tabelle 2.7: Prozentuale Reduzierung der HFKW-Quoten

Prozentsätze für die Höchstmenge und die entsprechenden Quoten für das Inverkehrbringen von teilfluorierten Kohlenwasserstoffen

Jahre	Gesamtwirtschaft	Nichtbefreite Nutzung (geschätzt)
2015	100 %	100 %
2016 – 2017	93 %	93 %
2018 – 2020	63 %	~ 58 %
2021 – 2023	45 %	~ 40 %
2024 – 2026	31 %	~ 26 %
2027 – 2029	24 %	~ 19 %
2030	21 %	~ 16 %

Quelle: EIA – Environmental Investigation Agency, 2015.

Die Auswirkung dieser Maßnahmen auf die verwendeten Kältemittel sind in Abbildung 2.25 dargestellt.

Abbildung 2.25: GWP-Werte ausgewählter Kältemittel für Wärmepumpen in erdgekoppelten Systemen

Quelle: GWP der Kältemittel: UBA, 2024; durchschnittlicher GWP: Martens, 2018.

Es zeigt sich, dass bereits im Jahr 2018 das GWP der häufig eingesetzten Kältemittel R310A, R407C und R134a (orange gefärbte Säulen) über dem durchschnittlichen GWP liegt. Durch die fortlaufende Quotenreduzierung wird dieser Durchschnitt weiter sinken und voraussichtlich im Jahr 2030 – zum Ende des Phase-Downs – seinen Tiefpunkt mit einem GWP von unter 500 erreichen. Obwohl die GWP-Werte der meisten HFKW-haltigen Kältemittel deutlich über diesem Wert liegen, gibt es HFKW-haltige Kältemittel, deren GWP niedriger als 500 ist. Dabei sind insbesondere die teilfluorierten Kohlenwasserstoffe R1234ze bzw. R1234yf und Gemische daraus zu

nennen. Nicht-HFKW-haltige Substanzen wie R723 (Dimethylether) und natürliche Kältemittel wie R600a (Butan), R290 (Propan), R1270 (Propen), R744 (Kohlendioxid) und R717 (Ammoniak) haben ebenfalls einen deutlich niedrigeren GWP-Wert als 500.

In Tabelle 2.8 werden für derzeit häufig verwendete Kältemittel Substitute aufgeführt, welche einen GWP im Bereich des voraussichtlichen durchschnittlichen GWP-Werts von < 500 ab dem Jahr 2030 aufweisen.

Tabelle 2.8: Mögliche Substitute für derzeit häufig verwendete Kältemittel

Kältemittel	Substitut	Stoffgruppe	GWP (IPCC AR4)	Sicherheitsgruppe
R134a (GWP 1430)	R450A	HFKW-Gemisch	604	A1
R134a (GWP 1430)	F456A	HFKW-Gemisch	687	A1
R134a (GWP 1430)	R513A	HFKW-Gemisch	631	A1
R134a (GWP 1430)	R515B	HFKW-Gemisch	293	A1
R134a (GWP 1430)	R1234yf	HFO	4	A2L
R134a (GWP 1430)	R1234ze E	HFO	7	A2L
R134a (GWP 1430)	R444A	HFKW-Gemisch	92	A2L
R134a (GWP 1430)	R516A	HFKW-Gemisch	142	A2L
R134a (GWP 1430)	R600a	Butan	40	A3
R134a (GWP 1430)	R744	Kohlendioxid	1	A1
R407C (GWP 1810)	R449C	HFKW-Gemisch	1251	A1
R407C (GWP 1810)	R260	Propan	3	A3
R407C (GWP 1810)	R1270	Propen	2	A3
R407C (GWP 1810)	R723	Dimethylether	1	B2
R407C (GWP 1810)	R717	Ammoniak	0	B2L
R410A (GWP 2088)	R452B	HFKW-Gemisch	698	A2L
R410A (GWP 2088)	R454B	HFKW-Gemisch	466	A2L
R410A (GWP 2088)	R459A	HFKW-Gemisch	460	A2L
R410A (GWP 2088)	R463A	HFKW-Gemisch	1494	A1
R410A (GWP 2088)	R466A	HFKW-Gemisch	733	A1
R410A (GWP 2088)	R32	Difluormethan	675	A2L

Quelle: Bitzer Kühlmaschinenbau GmbH, 2018.

Durch die F-Gas-Verordnung 517/2014 verändern sich die Kältemittel in Wärmepumpen in Richtung klimaverträglicherer Alternativen. Diese besitzen jedoch nachteilige sicherheitsrelevante Eigenschaften. So sind R290, R600a und R1270 leicht entflammbar, R717 und R723 sind giftig, und R744 kann nur mittels Hochdrucks betrieben werden.

2.4 Nachhaltiges thermisches Ressourcenmanagement

Um das Ziel der Bundesregierung, die nationalen Treibhausgasemissionen um 95 % bis zum Jahr 2050 zu senken, zu erreichen, ist eine nachhaltige Wärmeversorgung durch einen klimaneutralen Gebäudebestand unabdingbar. Hierbei spielt zukünftig der Einsatz von Wärmepumpen in Kombination mit Geothermie als zentrale Wärmeversorgungstechnologie eine wichtige Rolle (vgl. Lohse und Wagener-Lohse (2018)). Der Planungsprozess sowie technologische Innovationen von Wärmepumpensystemen sollen dazu beitragen, mögliche negative Umweltauswirkungen auf die Umweltmedien Wasser, Boden und Luft zu reduzieren. Um eine möglichst nachhaltige Nutzung gewährleisten zu können, wird im Folgenden auf die ökologischen, ökonomischen und sozialen Anforderungen eingegangen, welche bei Bau und Betrieb berücksichtigt werden müssen.

Nachhaltigkeit im allgemeinen Sinne wird definiert als eine Entwicklung, welche die Bedürfnisse der gegenwärtigen Generation befriedigt, ohne die Möglichkeiten zukünftiger Generationen zu beeinträchtigen (WCED – World Commission on Environment and Development, 1987)). Durch die Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des Deutschen Bundestags (1998) wurden die zu befriedigenden Bedürfnisse in einem Drei-Säulen-Modell konkretisiert, das neben der ökologischen Dimension einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung auch die ökonomische sowie die soziale Dimension berücksichtigt. Das Prinzip der Nachhaltigkeit soll generell sicherstellen, dass ein System in seinen wesentlichen Eigenschaften langfristig erhalten bleibt.

Bezogen auf eine geothermische Nutzung des geologischen Untergrunds wird unter der thermischen Nachhaltigkeit eine Sicherstellung des Anlagenbetriebs verstanden. Pro Heizperiode soll nur die Wärmemenge dem Boden über die Erdwärmeanlage entnommen werden, welche diesem während des Jahres durch natürliche thermische Regeneration wieder zufließt (Stober und Bucher, 2014). Sinngemäß kann diese Definition auch auf die untertägige Wärmespeicherung angewendet werden. Ein Speichersystem wäre dann als nachhaltig anzusehen, wenn sich langfristig ein- und ausgespeicherte Wärmemengen ausgleichen. Dies würde eine vollständige Rückgewinnung der eingespeicherten Wärme erfordern, die aufgrund unvermeidlicher Speicherverluste jedoch nicht erreicht werden kann. Auch würde eine rein auf die Wärmebilanz ausgerichtete Bewertung die sozialen und ökologischen Nachhaltigkeitsdimensionen nicht berücksichtigen. Anhand der Modellergebnisse zur Nutzung geothermischer Heiz- und Kühlsysteme (Abschn. 2.3) können die Umweltaspekte bzw. Umweltwirkungen für die untersuchten Technologien getrennt bewertet werden (Tab. 2.9). In Tabelle 2.10 sind die Umweltaspekte einer Nutzung oberflächennaher geothermischer Systeme den Nachhaltigkeitsdimensionen gegenübergestellt. Dabei muss beachtet werden, dass die betrachteten Technologien (EWS, WWA, (HT-)BTES, (HT)-ATES) unterschiedliche Einsatzbereiche haben, bedingt durch die Menge an Wärme, welche sie bereitstellen können, den untertägigen Raumbedarf, welchen sie erfordern, und insbesondere in den offenen Systemen aufgrund hydrogeologischer Voraussetzungen.

Tabelle 2.9: Umweltaspekte und -auswirkungen geothermischer Technologien

Technologie	Temperatur- änderung Boden / Grundwasser	Dauerhafte Systemeffizienz	CO ₂ -Entstehung Antriebsenergie	Flächen- und unter- tägiger Raumbedarf
EWS	++ lokale Abkühlung des geologischen Unter- grunds	± effizient nur bei niedriger Wärmesen- kentemperatur und geringer Entzugsleistung	± durch geringe JAZ relativ hoher Anteil an Antriebsenergie für Wärmepumpen nötig	++ geringer oberirdi- scher Flächenbedarf ++ geringer Raum- bedarf
WWA	++ Abkühlung des geologischen Unter- grunds	+ mittlere Entzugs- leistungen und JAZ (erzielbar)	± durch geringe JAZ relativ hoher Anteil an Antriebsenergie für Wärmepumpen nötig	++ geringer oberirdi- scher Flächenbedarf ++ geringer Raum- bedarf
(HT-)BTES	± geringfügige Erwärmung des geologischen Untergrunds	+ Mittlere bis hohe Entzugsleistungen und JAZ erzielbar	Durch mittlere bis hohe JAZ mittlerer Anteil an Antriebs- energie nötig	++ geringer oberirdi- scher Flächenbedarf ++ geringer Raumbe- darf
(HT-)ATES	- Erwärmung des ge- ologischen Untergrunds wegen Wärmeverlusten	++ sehr hohe Entzugsleistungen und JAZ erzielbar	++ geringer Anteil an Antriebsenergie nötig	++ geringer oberirdi- scher Flächenbedarf ++ geringer Raum- bedarf

Temperaturänderungen Boden und Grundwasser

Durch Wärmeentzug oder -Einspeicherung ausgelöste Temperaturänderungen in Boden und/oder Grundwasser können sich auf die natürlichen Funktionen des Bodens und des Grundwasserleiters auswirken (vgl. Kap. 3). Reine Wärmegewinnungstechnologien (EWS, WWA) können der oberflächennahen Erwärmung des Grundwassers im urbanen Umfeld lokal entgegenwirken. Wärmespeichertechnologien führen dagegen lokal und zeitweise zu hohen Untergrundtemperaturen und u. U. entsprechend starken Auswirkungen auf die Grundwasserfauna. Im Nahfeld der Speicher können temperaturabhängige hydrochemische Reaktionen zeitweise zu einer Änderung der Grundwasserbeschaffenheit führen. Diese Änderung ist jedoch im Wesentlichen reversibel.

Nachhaltige Energieeffizienz

Bezüglich der ökologischen Folgenabschätzung der Wärmepumpen stehen Effizienzanforderungen im Vordergrund, um eine möglichst emissionsfreie Wärmeversorgung für die Transformation des Energiesystems gewährleisten zu können (Lohse und Schubert, 2019). Im Vergleich zu Luft-Wärmepumpen erlauben geothermische Systeme (EWS, WWA) bereits bei reinen Wärmeentzugstechnologien um 30 % – 50 % höhere Jahresarbeitszahlen (vgl. Abschn. 2.1.3). Die Kombination aus hybriden Systemen und Wärmepumpen (vgl. Abschn. 2.2) bietet die Möglichkeit einer Optimierung der Energieeffizienz von Wärmepumpensystemen im Gebäudebestand (Lohse und Schubert, 2018). Beispielsweise können Solarwärme und Erdwärme der Wärmepumpe als Wärmequelle dienen (ebd.).

Wärmespeichertechnologien erlauben noch weitaus höhere Jahresarbeitszahlen und können damit für größere Versorgungssysteme im Verbund mit weiteren Erzeugern zu einer Entkopplung von Elektrizitäts- und Wärmebedarf führen. Bei den Technologien (HT-)ATES und (HT-)BTES

wird die in den geologischen Untergrund eingebrachte Wärme nicht wieder vollständig zurückgefördert. Für eine weitreichende Etablierung dieser Technologien sollten anhand von Betriebserfahrungen Strategien entwickelt werden, um Wärmeverluste zu minimieren.

CO₂-Entstehung Antriebsenergie

Neben der Effizienz des Gesamtsystems bestimmt vor allem die Herkunft der für den Antrieb von hydraulischen Pumpen und Wärmepumpen verwendeten Elektrizität die ökonomischen und ökologischen Auswirkungen einer geothermischen Nutzung des geologischen Untergrunds. In dem GreenEe-Szenario aus dem Projekt „Ressourcenschonendes und treibhausgasneutrales Deutschland (RTD)“ wird bezüglich der Emissionsfreiheit der Einsatz von Elektrowärmepumpen empfohlen (Lohse und Schuberth, 2018). Für eine hohe ökologische Nachhaltigkeit ist Elektrizität aus regenerativen Quellen zu beziehen, um die Treibhausgasbilanz der Geothermieranlagen zu verbessern (ebd.). Entsprechend der höheren erreichbaren Jahresarbeitszahlen benötigen geothermische Systeme geringere Elektrizitätsmengen und bedingen geringere CO₂-Emissionen je erzeugter Wärmeeinheit als Luft-Wärmepumpen. Modellrechnungen zeigen, dass geothermischen Technologien je nach technischer Einbindung unterschiedliche Anteile an Antriebsenergie für Wärmepumpen bei der Wärmeerzeugung benötigen. Insbesondere (HT-)ATES-Systeme können aufgrund erreichbarer JAZ von > 10 einen wirkungsvollen Beitrag zur Dekarbonisierung leisten. Für die ökonomischen und sozialen Aspekte sind demgegenüber die Elektrizitätskosten entscheidend. Indirekt wirken sich damit effiziente Systeme mit hohen Jahresarbeitszahlen auf die Versorgungskosten aus.

Treibhausgaspotential der Arbeitsmittel und Umweltwirkung der Wärmeträgermittel

Nachgelagerte ökologische Auswirkungen können bei Havarien auftreten. Eine große Anzahl der eingesetzten Arbeitsmittel in Wärmepumpen bzw. der Zirkulationsfluide in Sonden sind wassergefährdend, so dass Leckagen zu einer Kontamination von Umweltmedien (Boden, Luft, Grundwasser) führen können (Töpfner und Fritzer, 2007; Quaschnig, 2010). In Erdwärmesonden und Erdwärmekollektoren zirkuliert üblicherweise ein Wärmeträgermittel, welches aus einer frostsicheren Mischung aus Frostschutzkonzentrat auf Glykolbasis und Wasser besteht. Frostschutzmittel, die als wassergefährdend eingestuft werden oder das Gefahrenpotential der Wassergefährdungsklasse 1 überschreiten, dürfen nicht eingesetzt werden. Erdwärmesonden, welche sich in Mineralwassereinzugsgebieten, Mineralquellen oder Wasserschutzgebieten von Zone III befinden, sollten nur mit Wasser betrieben werden (Lohse und Schuberth, 2018). Die Empfehlung des Umweltbundesamts sieht die Verwendung klimafreundlicher Alternativen und natürlicher Kältemittel wie CO₂ und Propan vor. Zunehmend kommen Arbeitsmittel in Wärmepumpen zum Einsatz, die nur ein geringes Treibhausgaspotenzial aufweisen. Durch die F-Gas-Verordnung erfolgt eine Regelung des Inverkehrbringens und der Verwendung fluorierter Treibhausgase. Bis zum Jahr 2030 soll eine schrittweise Reduktion des F-Gas-Einsatzes um 79 % erreicht werden (Lohse und Wagener-Lohse, 2018). Damit kann die CO₂-emissionsmindernde Wirkung einer geothermischen Wärmeversorgung mit einem verminderten Risiko einer havariebedingten Freisetzung treibhausgaswirksamer Arbeitsmittel kombiniert werden.

Flächenbedarf

In Deutschland ist pro Einwohner ein kontinuierlicher Anstieg der Flächeninanspruchnahme bei gleichzeitiger Abnahme der Siedlungsdichte zu beobachten. Die Folgen der steigenden Flächeninanspruchnahme sind vor allem in einer Bedrohung der biologischen Vielfalt und Lebensqualität breiter Bevölkerungsschichten zu beobachten (Bock et al., 2008). Die Nachhaltigkeitsstrategie des Bundes zielt u. a. auf eine Minderung der Flächeninanspruchnahme durch Verkehr und Bebauung, eine Entsiegelung bebauter Bereiche, den Erhalt der Schutzfunktionen des Bodens

und eine effizientere Nutzung der beanspruchten Flächen ab (ebd.). Grundsätzlich zeichnen sich alle berücksichtigten Technologien durch einen sehr geringen Flächenbedarf aus, da die Abschlussbauwerke der Brunnen und Sonden sowie die Rohrleitungen untertägig ausgebaut werden können. Bei Erdwärmesonden und Wasser-Wasser-Anlagen kann von einem geringen Flächenbedarf ausgegangen werden, da diese z. B. in Siedlungs- und Verkehrsflächen integriert werden können. Demgegenüber weisen Erdwärmekollektoren einen weitaus höheren Flächenbedarf auf (ca. 15 – 30 m²/kW Heizleistung (Töpfner und Fritzer, 2007)). Sie können damit indirekt zu einem Schutz von Freiflächen vor Versiegelung führen und sich positiv auf die Biodiversität und die Grundwasserneubildung im urbanen Bereich auswirken. Kosten für den Flächenbedarf sind jedoch Teil der Systemkosten.

Insbesondere der Einsatz von Speichertechnologien wie die in den Abschnitten 2.3.1.4 und 2.3.1.5 beschriebenen (HT-)BTES- und (HT-)ATES-Systeme führt zu einer erheblichen Flächenschonung, da der oberirdische Flächenverbrauch minimal ist, zumal Brunnen bzw. Sonden auch unterflur ausgeführt werden können.

Tabelle 2.8: Auswirkungen einer Nutzung geothermischer Heiz- und Kühlsysteme auf die Nachhaltigkeitsdimensionen

Umweltaspekte / -Wirkungen	Auswirkungen bezogen auf die Nachhaltigkeitsdimension Ökologie	Auswirkungen bezogen auf die Nachhaltigkeitsdimension Ökonomie	Auswirkungen bezogen auf die Nachhaltigkeitsdimension Soziales
Temperaturänderungen Boden / Grundwasser	Biodiversität, Bodenfunktionen, Fauna GWL, temperaturinduzierte Änderung der Grundwasserbeschaffenheit	Vermeidung von Leistungseinbußen ökosystemarer Dienstleistungen	
Dauerhafte Systemeffizienz	Vermeidung von CO ₂ -Emissionen, Klimaschutz	Kostenentwicklung, Minderung des Elektrizitätsanteils an der Wärmebereitstellung (Heizkosten)	
CO ₂ -Entstehung Antriebsenergie	Treibhauspotenzial Elektrizitätserzeugungsmix	Stromgestehungskosten und -umlagen im Erzeugungsmix	Teilhabe an Klimaschutzwirkung
Umweltwirkungen der Arbeitsmittel	Treibhauswirkung, Wassergefährdung	Höhere Kosten bei Substitution treibhauswirksamer Mittel	Teilhabe an Klimaschutzwirkung
Flächenbedarf a) Kollektoren b) EWS / Brunnen	Schutz vor Versiegelung, Erhöhung GW-Neubildung, Biodiversität	Kosten für Freiflächen bei Kollektoren, sehr geringer Flächenbedarf bei EWS / Brunnen	Geringe Eingriffe in das Stadt- und Landschaftsbild

Resümee 2.4

Unter thermischer Nachhaltigkeit einer geothermischen Nutzung des geologischen Untergrunds wird eine Sicherstellung des Anlagenbetriebs verstanden, indem pro Heizperiode nur die Wärmemenge dem Bodenkörper über die Erdwärmeträger entnommen werden kann, welche diesem während des Jahres durch natürliche thermische Regeneration wieder zufließt. Die thermische Nachhaltigkeit umfasst jedoch nicht die ökonomischen und sozialen Aspekte einer verstärkten geothermischen Nutzung des geologischen Untergrunds. Eine (verstärkte) Nutzung geothermischer

Systeme für die Wärmeversorgung hat neben Umweltauswirkungen (Nachhaltigkeitsdimension Ökologie) auch soziale und ökonomische Auswirkungen.

Die ökologische Dimension ist vor allem durch die Temperaturänderungen im geologischen Untergrund, den Beitrag zu Dekarbonisierung und Klimaschutz und ein geringes Risiko havariebedingter Stoffausträge aus Sonden und Wärmepumpen geprägt. Ökonomische Auswirkungen betreffen die Transformationskosten – für den Bau der geothermischen Systeme sowie für den Wechsel hin zu niederthermalen Wärmetransport- und Heizsystemen, um die Systemeffizienz zu erhöhen und den Elektrizitätsanteil an der Wärmeerzeugung so weit wie möglich zu mindern. Eine auf geothermischen Systemen basierende Wärmeversorgung lässt zwar eine höhere Preisstabilität gegenüber der von fluktuierenden Rohstoffmärkten abhängenden konventionellen Wärmeerzeugung erwarten, im Vergleich zu konventionellen Systemen ist jedoch von höheren Kosten auszugehen. Solche Kosten sind – je nach staatlicher Förderung – individuell zu tragen und fallen kurzfristig an, während der positive Effekt eines Beitrags zum Klimaschutz immateriell ist, der Allgemeinheit zugutekommt und erst langfristig zu sehen sein wird. Die allgemeine Klimaschutzteilhabe leitet bereits zur sozialen Dimension einer übergeordneten Nachhaltigkeitsbetrachtung über. Hierzu können ebenfalls die oberirdische Flächenschonung und die im Vergleich zu Luft-Wärmepumpensystemen geringe Sichtbarkeit der geothermischen Systeme im Stadtbild genannt werden.

3 Dokumentation der Umweltwirkungen und des Klimaschutzbeitrags oberflächennaher, geothermischer, sensibler und latenter Wärmespeichersysteme

3.1 Klimaschutzbeitrag und Umweltwirkungen oberflächennaher Geothermie und von UTES-Systemen

3.1.1 Klimaschutzbeitrag oberflächennaher Geothermie und von UTES-Systemen

Ob und inwieweit saisonale Wärmespeicher mit geeigneten Ein- und Ausspeicherraten einen nationalen bzw. sogar globalen Beitrag zum Klimaschutz leisten können, ist aufgrund einer mangelnden Anzahl belastbarer und systemischer Studien zu dieser Thematik bisher wenig belegt. So existieren zwar eine Reihe gesamtsystemischer Studien auf Basis von Energiesystemmodellen zur Quantifizierung des Klimaschutzbeitrags im Kontext möglicher Transformationspfade des Wärmeversorgungssystems (vgl. z. B. Nitsch et al. (2012), Schlesinger et al. (2014), BMWi (2015), Gerhardt et al. (2015), Repenning et al. (2015), Bürger et al. (2017), Hecking et al. (2017), Gerhardt et al. (2017)), die sich u. a. hinsichtlich

- ▶ ihrer Fragestellung und Methodik (z. B. Erreichung einer vorgegebenen THG-Emissionsminderung bis zum Zieljahr),
- ▶ ihres Betrachtungsraumes (von der lokalen Ebene hin bis zur internationalen Betrachtung),
- ▶ der berücksichtigten Sektoren (z. B. nur Wärme oder aber Elektrizität und Wärme),
- ▶ ihrer zeitlichen und räumlichen Auflösung,
- ▶ ihrer Eingangsparameter und Randbedingungen und

letztendlich ihrer Ergebnisse unterscheiden.

Interessanterweise werden in einer Reihe der oben genannten Szenarienstudien saisonale Wärmespeicher in unterschiedlichem Umfang für das nationale Energiesystem sogar thematisiert, jedoch in der Szenarienanalyse nicht weiter ausgeführt. Hochkapazitive saisonale Wärmespeicher wie UTES-Systeme spielen in den Szenarien keine Rolle, da sie nicht als Eingangsgrößen Teil der gesamtsystemischen Betrachtung werden. So werden z. B. in Bürger et al. (2017) zentrale und geologische Wärmespeicher zwar ausdrücklich beschrieben (S. 80ff), in den entwickelten Zielbildern für das Jahr 2050 sind sie dann jedoch nicht näher spezifiziert. Ebenfalls finden in Henning und Palzer (2015) zentrale Wärmespeicher Berücksichtigung (S. 37), allerdings wird dort nicht beschrieben, um welche Technologie es sich in der Betrachtung handelt. In jener Studie wird angenommen, dass netzgekoppelte „große zentrale Wärmespeicher im Mittel zwei- bis dreimal pro Woche be- und entladen werden, also nicht als saisonale Langzeitspeicher fungieren“; eine Betrachtung saisonaler Speicher findet dort somit nicht statt.

Die Studie von Brown et al. (2018) ist die einzige den Autoren bekannte, die sich systemisch mit Langzeit-Wärmespeichern (Long-Term Thermal Energy Storage, LTES) u. a. in Deutschland beschäftigt. Als zentrales Ergebnis zeigt die Studie die Möglichkeit eines saisonalen Lade-/Entladezyklus von Wärmespeichern. Zudem wird gezeigt, dass LTES in bestimmten Regionen zu niedrigen Raumwärmepreisen beitragen kann. Gesamtsystemisch betrachtet zeigt sich, dass mit

zunehmender Durchdringung von saisonalen Speichern der Nutzen von Transmission abnimmt („All-Flex-Central scenario“).

Über die Gründe, warum UTES-Systeme in den meisten bisherigen gesamtsystemischen Szenarienanalysen keine Berücksichtigung fanden, kann nur spekuliert werden. Nicht repräsentative Gespräche mit Entwicklern und Anwendern entsprechender komplexer Energiesystemmodelle ergaben folgende Gründe:

- ▶ Unkenntnis über die Leistungsmerkmale saisonaler UTES-Systeme,
- ▶ Skepsis bzgl. Umsetzbarkeit von UTES-Systemen aufgrund angenommener und bestehender regulatorischer Restriktionen,
- ▶ Fragen bzgl. der nationalen Umsetzbarkeit aufgrund unterschiedlicher Verhältnisse,
- ▶ allgemeine und nicht unterlegte Zweifel an der Wirtschaftlichkeit von UTES-Systemen im Vergleich zu einem intensivierten Ausbau alternativer Energieversorgungssysteme (Elektrizität),
- ▶ Unsicherheiten/Fragen bzgl. der numerischen Integrierbarkeit solcher UTES-Systeme in bestehende Energiesystemmodelle.

Ein Teil dieser Vorbehalte wird u. a. in dieser Studie (vgl. Kap. 1) eingehend diskutiert, bzw. es konnten zwischenzeitlich sogar Lösungsansätze aufgezeigt werden, so dass eine systemische Gesamtbetrachtung von UTES-Anlagen bei Szenarienanalysen zur Energiesystemtransformation heute machbar und notwendig erscheint. Allerdings war eine entsprechende gesamtsystemische Betrachtung zu UTES-Systemen im Rahmen dieser Studie nicht möglich, so dass deshalb im Folgenden nur einzelne lokale Szenarien betrachtet bzw. untersucht werden.

Zwischenfazit 3.1.1-I

Saisonale Wärmespeicher wie UTES-Systeme sind bisher i. d. R. nicht Teil der gesamtsystemischen Betrachtung zukünftiger Energieversorgungsszenarien auf Basis hinreichend komplexer und belastbarer Energiesystemmodelle.

Es wird daher empfohlen, saisonale Wärmespeicher wie UTES-Systeme in Energiesystemmodellen mit ihren technischen und ökonomischen Parametern zu berücksichtigen sowie die Transparenz der Energiesystemmodelle und Szenarien hinsichtlich ihrer Eingangsgrößen, Randbedingungen, Algorithmen und Ausgangsgrößen zu erhöhen, um Szenarienanalyse, Reproduktion und -Variation zu erleichtern.

Um trotz des Fehlens belastbarer gesamtsystemischer Szenarienanalysen zumindest zu einer Abschätzung des potentiellen Beitrags von UTES-Systemen zu kommen, wurden in dieser Studie die wenigen verfügbaren lokalen Studien analysiert. Die allgemeinen Randbedingungen für den Bedarf des Einsatzes von UTES-Systemen lassen sich dabei wie folgt skizzieren.

In den in Abschnitt 1.1.2 analysierten Zielszenarien der Energiesystemmodellierungen ergibt sich eine Wärmemenge von bis zu 146 TWh/a im Jahr 2050, die weiterhin CO₂-Emissionen in der Wärme- und Kältebereitstellung für den Gebäudebereich induziert. Im Hinblick auf die Zielsetzung einer vollständigen Dekarbonisierung der Wärmeversorgung zum Heizen und Kühlen für den Gebäudebereich besteht also auch zukünftig noch ein deutlicher Bedarf, entweder

- ▶ zusätzlich saisonale Umweltwärmequellen (u. a. durch den Ausbau solarthermischer Anlagen, die thermische Aktivierung von Gebäudefassaden und Straßen, die Abwärmenutzung von Kläranlagen bzw. Kanalisationssystemen etc.) in Kombination mit UTES-Systemen

und/oder

- ▶ Sektorkopplungen für den Wärmebereich auf Basis zusätzlicher erneuerbar erzeugter elektrischer Energie, ggf. in Kombination mit chemischer Speicherung,

zu nutzen.

Grundsätzlich wäre auch eine stärkere Nutzung von Biomasse zu Heizzwecken in Betracht zu ziehen, allerdings ist das Potenzial nachhaltig erzeugter Biomasse sehr beschränkt (vgl. Mathiesen (2021)) und auch Sachverständigenrat für Umweltfragen (2011, S. 114), auch da die Biomasse weiteren Nutzungskonkurrenzen (Nutzung als Nahrungs- und Futtermittel, stoffliche Nutzung, andere energetische Nutzung) unterworfen ist.

Für die Nutzung von UTES-Systemen werden in den Studien folgende begünstigende Faktoren genannt:

- ▶ Ausreichend hoher Wärmebedarf (MWh/a) sowie Nachfragedichte (MWh/km² pro Jahr), die aus dem UTES-System bedient werden soll,
- ▶ Vorhandensein von Wärmenetzen (gegebenenfalls unterschiedlicher Größe und unterschiedlicher Betriebseigenschaften), die Wärmequellen, -senken und UTES-Systeme miteinander verbinden, sowie
- ▶ Vorhandensein einer lokalen kontinuierlichen und diskontinuierlichen bisher ungenutzten Wärmequelle (z. B. Ab- bzw. Überschusswärme, auch diskontinuierliche erneuerbare Wärmeherzeugung), die über das Wärmenetz in das UTES-System einspeichern kann.

Der „Klimaschutzbeitrag“ von UTES-Systemen stellt sich nach den wenigen und nicht repräsentativen Studien wie folgt dar:

- a) In einer Untersuchung für die Hamburger Behörde für Umwelt und Energie (Sandrock et al., 2016) mit der Zielsetzung, das kohlebefeuerte Heizkraftwerk Wedel durch klimafreundlichere Technologien zu ersetzen, wurde in einem der vorgestellten Szenarien der Einsatz eines ATES-Speichers betrachtet, um vorhandene Wärmequellen (u. a. industrielle Abwärme, Nutzung der in einer Abfallverbrennungsanlage anfallenden Wärme, Nutzung von Solarthermie) ganzjährig nutzen zu können. Die zu ersetzende Wärmenachfrage macht mit 1500 GWh/a etwa ein Drittel der Wärmenachfrage des Gesamtsystems aus. In Szenario 6 („Kombi Aquifer“) werden 2269 GWh/a mit Hilfe der neu erschlossenen Wärmequellen erzeugt. Der ATES-Speicher trägt mit 270 GWh/a zur Wärmeversorgung bei, was 18 % des Wärmebedarfs entspricht.
- b) Innerhalb des ANGUS-II-Forschungsvorhaben (vgl. Abschn. 1.4 in dieser Studie) wurde in einem generischen Ansatz für ein städtisches Viertel im norddeutschen Raum numerisch simuliert, wie es unter Einbeziehung unterschiedlicher UTES-Technologien mit Wärme versorgt werden könnte. Die gerechneten Szenarien unterscheiden sich hinsichtlich der zum Einsatz kommenden Speichertechnologie (BTES bzw. ATES) sowie dem Betrachtungshorizont (15 Jahre bzw. 30 Jahre).

Die jährliche Wärmenachfrage des betrachteten Systems beträgt 212 GWh. Bei Nutzung aller aus heutiger Sicht für solarthermische Anwendungen nutzbaren Dachflächen (33 % aller Dachflächen des Quartiers) als Teil des Wärmeversorgungssystems des Quartiers ergibt sich für die simulierten Szenarien eine Spanne von 20 – GWh/a an Wärmeenergie, die dem ATES- bzw. BTES-Speicher entnommen werden. Dies entspricht einem Anteil von 9,3 % – 10,2 % der jährlichen Wärmenachfrage des Quartiers.

Weitere Szenarien, in denen neben der solarthermisch erzeugten Wärme auch industrielle Abwärme zur Verfügung steht, erreichen eine jährliche Wärmebereitstellung von 28 – 31 GWh aus UTES-Systemen (13,2 % – 14,8 % der jährlichen Wärmenachfrage).

- c) In der gleichen ANGUS-II-Studie wurde ein weiteres Szenario untersucht (vgl. Abschn. 1.4 in dieser Studie), in dem ein UTES-System (ATES bzw. BTES) so ausgelegt ist, dass daraus 25 % des jährlichen Gesamtwärmebedarfs gedeckt werden könnte. Im Vergleich zu den anderen gerechneten Szenarien ist dies ein hoher Anteil, der jedoch dann erreicht werden könnte, wenn neben der solarthermischen Nutzung aller Dachflächen und der Nutzung einer Abwärmequelle weitere Wärmequellen erschlossen würden, beispielsweise durch die thermische Aktivierung zusätzlicher Flächen.
- d) Für die zukünftige Wärmeversorgung der Stadt Kiel (Beer et al., 2017) mit der Zielsetzung, im Jahr 2050 Klimaneutralität zu erreichen, liefert ein nicht näher spezifizierter UTES-Speicher im betrachteten System 160 GWh/a und wird aus Überschusswärme aus einem Gasmotorenkraftwerk, der Müllverbrennungsanlage, Heizkraftwerken und Großwärmepumpen gespeist. Bei einer Wärmenachfrage von 1100 GWh/a entspricht dies einem Anteil von 14,5 %.

Nach diesen wenigen ersten lokalen Studien kann von einem potenziellen Beitrag von UTES-Systemen von ca. 10 % – 25 % der Wärmeversorgung in urbanen Gebieten ausgegangen werden, was ein substantieller, aber eben auch nicht ein sehr großer Beitrag wäre. Zudem besteht ein gewisser Widerspruch bei diesen Projektionen zu realen UTES-Anwendungen insbesondere in den Niederlanden wie auch den saisonalen obertägigen Wärmespeichersystemen in Dänemark. So existieren in den Niederlanden bereits mehr als 3000 ATES-Systeme, jedoch ganz überwiegend mit Einspeichertemperaturen von unter 25 °C (Henning und Palzer, 2015). Die für Ende 2018 genannten 2368 ATES-Anlagen produzierten 1112 GWh_{th} pro Jahr, wobei die Gesamtnachfrage nach Wärme (Heizen und Kühlen) 284 TWh im Jahr 2015 betrug (Mathiesen, 2021).

Analysiert man die zitierten Studien und Szenarien hinsichtlich der Limitierungen der UTES-Systeme bei der Wärmeversorgung, dann zeigt sich, dass mit Hilfe der Speicheroption das Wärmedargebot saisonal verschoben werden kann und dass das Leistungsprofil und letztendlich die Kapazität von UTES-Systemen in erster Linie durch die saisonal zur Einspeicherung stehende Wärmeenergie bestimmt wird. Mit anderen Worten: die Limitierung von UTES-Systemen liegt in den zitierten Studien im Wesentlichen auf dem saisonal einzuspeichernden Wärmedargebot und nicht in kapazitären Beschränkungen bzw. in der Leistung der UTES-Systeme, die durch technische Ansätze (wie Wärmespeichererkaskaden) zudem zu verbessern wären. Die Klimaschutzwirkung von UTES-Systemen ist daher zu allererst von dem Aufbau bzw. von der Erschließung weiterer z. T. saisonaler Wärmequellen in urbanen und auch nichturbanen Gebieten, insbesondere als Wärme-Wärme-Systeme, abhängig.

Abschätzungen (ohne Berücksichtigung von Leitungsverlusten etc.) aus den in Abschnitt 1.4 näher beschriebenen Szenarien aus der ANGUS-II-Studie zeigen beispielsweise für den urbanen Raum, dass mit einer Verdopplung des solarthermischen Ertrags UTES-Systeme einen Anteil zwischen 22,8 % und 26,9 % an der jährlichen Wärmeversorgung sichern könnten. Bei einer

Verdreifachung des solarthermischen Ertrags, was de facto die fast vollständige Nutzung der heute verfügbaren Dachflächen bedeutet, wurde in den Szenarien ein Deckungsanteil der Wärmeversorgung durch UTES-Systeme von 34,2 % bis 38,3 % errechnet.

Die Frage nach dem Klimaschutzpotenzial von UTES-Systemen besteht daher aus dem Fragenkomplex, wieviel Wärmequellen mit einem saisonalen Speicherbedarf für die Nachfrage- und die Angebotsseite in spezifischen zukünftigen klimaneutralen Wärmeversorgungsszenarien notwendig sein werden. Dies konnte im Rahmen dieser Studie nicht belastbar und repräsentativ mittels numerischer Modelle systemisch abgebildet werden, so dass nur folgende bestenfalls orientierende Abschätzungen gemacht werden können. Grundsätzlich ist das Einsparpotenzial an CO₂-Emissionen durch UTES-Systeme abhängig vom Niveau des Wärmebedarfs, dem Anteil der Bedarfsdeckung mit Hilfe der UTES-Systemen und den auf der Erzeugungsseite zu ersetzenden Energieträgern und ihren CO₂-Emissionen. Im Folgenden wird angenommen, dass treibhausgasneutrale Quellen für die Speicherung im geologischen Untergrund erschlossen werden können.

- Mittels Ausbaus der Solarthermie (ggf. in Kombination mit Photovoltaik) auf aktuell geeigneten Dachflächen und Nutzung saisonaler UTES-Systeme in urbanen Gebieten können 10 % – 15 % des dortigen jährlichen Wärmebedarfs gedeckt werden.

Allein für die in Abschnitt 1.3 genannten Großstädte, in denen 29 % der Bevölkerung Deutschlands leben, ergibt sich so eine Energiemenge von 36,2 TWh/a aus UTES-Speichern, sofern der Verbrauch gleichbleibt. Je nachdem, ob der Verbrauch bis zum Jahr 2050 sinkt und es zu einer Energieträgersubstitution durch synthetisches Methan kommt, errechnet sich eine Ersparnis an Emissionen von 3,6 – 8,7 Mt CO₂ jährlich.

Geht man darüber hinaus stark vereinfachend davon aus, dass zwei Drittel der Bevölkerung mit Hilfe von Wärmesystemen inkl. UTES-Speicher versorgt werden, da auch z. B. kleinere Städte auf diese Art wärmeversorgt werden, ergibt sich bei gleichbleibendem Wärmebedarf bei einer angenommenen Wärmebedarfsdeckung von 15 % aus UTES-Systemen eine Energiemenge von 82,4 TWh/a aus solchen Systemen. Die Ersparnis an CO₂-Emissionen beträgt dann 7,3 – 19,8 Mt jährlich, abhängig von Verbrauchshöhe und substituierten Energieträgern.

Diese erste Abschätzung zeigt, dass UTES-Systeme zwar substanziell zu einer Reduktion von CO₂-Emissionen im Wärmebereich beitragen können, der angenommene Beitrag jedoch bei Weitem nicht für eine zukünftige klimaneutrale Wärmeversorgung ausreicht. Insofern bedarf es weiterergender Maßnahmen sowohl auf der Bedarfs- als auch auf der Erzeugungsseite. Diese werden technologie- und ortsspezifisch ggf. weitere Speicherbedarfe mit sich bringen.

- Der konsequente Ausbau (80 % – 100 % Nutzung der vorhandenen Dachflächen) der Solarthermie (ggf. in Kombination mit Photovoltaik) und die Nutzung vorhandener, aber bisher zur Wärmeversorgung nicht genutzter Wärmequellen in Verbindung mit UTES-Systemen kann eine jährliche Wärmebedarfsdeckung von 30 % – 40 % in urbanen Gebieten ermöglichen.

Für die in Abschnitt 1.3 genannten Großstädte, für die ein UTES-Potenzial abgeschätzt wurde, ergibt sich eine Wärmemenge von 72,4 – 96,5 TWh/a aus UTES-Systemen, sofern der Verbrauch nicht sinkt. Abhängig von der Nachfragehöhe und von den zu substituierenden Energieträgern ergibt sich eine Ersparnis an Treibhausgasemissionen i. H. v. 7,3 – 23,1 Mt/a.

Gelingt es, zwei Drittel der Bevölkerung mit Hilfe solcher Systeme mit Wärme zu versorgen (Annahme: Wärmebedarfsdeckung 30 %– 40 %), ergibt sich eine Wärmemenge von 164,7 – 219,7 TWh/a aus UTES-Systemen. Die mögliche Einsparung an CO₂-Emissionen beträgt 16,2 – 52,7 Mt jährlich.

- Da darüber hinaus in nichturbanen Gebieten grundsätzlich mehr Flächen für die Installation von Freiflächen-PV(T)-Anlagen vorhanden sind und genutzt werden könnten als in urbanen Gebieten, können dort deutlich höhere Anteile an der Wärmebedarfsdeckung mit Hilfe regenerativer Wärmequellen und saisonaler Speicher (z. B. UTES) als im urbanen Raum erreicht werden. Dies kann einen substanziellen Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele und auch zur Reduktion der Importabhängigkeit bei fossilen Energieträgern darstellen und bedarf einer Lösung möglicher Zielkonflikte hinsichtlich damit verbundener ökonomischer Fragestellungen, anderer Flächennutzungsarten sowie Raumplanung bzw. Regulatorik.

Konkrete numerische Szenarienanalysen zum Beitrag von UTES-Systemen an der Wärmeversorgungsdeckung unter der Annahme zusätzlicher relevanter saisonaler (u. a. Solarthermie-Anlagen aus dem Stadtumland) und nichtsaisonaler Wärmequellen (u. a. Wärmeversorgung aus der „tiefen“ Geothermie) bei saisonalen Wärmebedarfsveränderungen standen nicht für eine Auswertung zur Verfügung. Bzgl. dieser Aufgabenstellung besteht Handlungsbedarf, um an Beispielen mit ortsspezifischen Randbedingungen das systemische und wirtschaftliche Potenzial von UTES-Anlagen bewerten zu können. Extrapoliert man in einer sehr groben Näherung den Effekt der Vergrößerung des Solarthermie-Eintrags auf die Erschließung weiterer nachhaltiger Wärmequellen, dann sollten im Idealfall durch UTES-Systeme Deckungsbeiträge von 60 % – 80 % möglich sein, was de facto einer vollständigen Wärmeeigenversorgung von Städten entsprechen würde. Unter o. g. Annahmen errechnet sich für einen Deckungsbeitrag von 60 % allein für die Großstädte mit UTES-Potenzial eine Energiemenge von 144,7 TWh/a aus UTES-Systemen, sofern der Bedarf nicht sinkt. Abhängig davon, wie sich der Wärmebedarf ggf. verändert und ob nur noch synthetisches Methan und Wasserstoff als chemische Energieträger zur Wärmeversorgung zum Einsatz kommen, errechnet sich eine Ersparnis von 14,3 – 34,7 Mt CO₂ pro Jahr. Werden gar 66 % der Bevölkerung mit solchen Systemen wärmeversorgt (bei 60 % Wärmebedarfsdeckung), ergibt eine Ersparnis der jährlichen CO₂-Emissionen zwischen 32,5 Mt/a und 79,0 Mt/a.

In Tabelle 3.1 werden die möglichen Einsparungen an CO₂-Emissionen in Abhängigkeit vom UTES-Anteil an der Wärmeversorgung und von weiteren Parametern zusammengefasst. Die THG-Emissionsreduktion wird auch davon abhängen, wie sich Wärmenachfrage und -Produktion

zukünftig entwickeln. Es bleibt zu klären, wie sich Wärmedämmung auf der einen Seite und Energieträgersubstitution auf der anderen Seite zueinander verhalten werden. Die angestrebte Minderung der Treibhausgasemissionen um 95 % gegenüber denen des Jahres 1990 bedeutet im Maximalfall ein nationales Emissionsbudget von ca. 60 Mt CO₂-Äquivalente (vgl. Benndorf et al. (2014), S. 37f) im Jahr 2050; die mit der Nutzung von UTES-Systemen möglichen THG-Emissionseinsparungen könnten signifikant dazu beitragen, diesen Zielwert nicht zu überschreiten.

Stemmle et al. (2021) führen eine erste Abschätzung der mit dem Einsatz von ATES-Systemen einhergehenden CO₂-Emissionen in Form einer Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment, LCA) durch. Es zeigt sich, dass unter den getroffenen Annahmen und bei Einsatz des heutigen Energiemixes bis zu 74 % der CO₂-Emissionen beim Heizen und bis zu 59 % beim Kühlen vermieden werden können. Für das Jahr 2050 wird eine Emissionsreduktion durch ATES-Anlagen in Höhe von 97 % genannt, getrieben vom überwiegend auf erneuerbaren Quellen basierenden Energiemix.

Tabelle 3.1: Abschätzung eingesparter nationaler CO₂-Emissionen durch die Nutzung von UTES-Systemen unter Annahme einer Versorgung von 66 % der Bevölkerung Deutschlands

Anteil Deckung des Wärmebedarfs mit Hilfe von UTES-Systemen	Energiemenge aus UTES*; Annahme: heutige Wärmenachfrage	Energiemenge aus UTES*; Annahme: halbierte Wärmenachfrage ggü. heute	CO ₂ -Einsparung; Annahme: heutige Wärmenachfrage, heutiger Energieträgermix	CO ₂ -Einsparung; Annahme: halbierte Wärmenachfrage, Einsatz synthetischen Methans
15 %	82 TWh/a	41 TWh/a	19,8 Mt/a	8,1 Mt/a
30 % – 40 %	165 – 220 TWh/a	82 – 110 TWh/a	39,5 – 52,7 Mt/a	16,2 – 21,7 Mt/a
60 %	330 TWh/a	165 TWh/a	79,0 Mt/a	32,5 Mt/a

Eigene Berechnung basierend auf Jührich (2016).

* Annahme: THG-neutral erzeugt und im UTES gespeichert. Wärme brutto, d.h. ohne Berücksichtigung der eingesetzten elektrischen Energie.

Als Teilmenge der in Tabelle 3.1 dargestellten Wärmemengen und dort nicht explizit genannt ergibt sich nur für die Großstädte eine durch UTES-Systeme bereitgestellte Energiemenge von 18 TWh/a im Falle eines geringen Deckungsbeitrags am Wärmebedarf. Sollte diese Energiemenge nicht mit Hilfe von UTES-Systemen, sondern durch andere THG-neutrale Quellen erzeugt werden, so würde damit ein massiver Bedarf zusätzlich genutzter Flächen einhergehen. Pro jährlich benötigter Terrawattstunde würden beispielsweise etwa mehr als 500 MW Windenergieanlagen (Annahme: 3 MW pro Anlage, 1800 Jahresvolllaststundenäquivalente) oder ca. 160 MW Biogasanlagen (Annahme: 7000 Jahresvolllaststundenäquivalente) benötigt, was mit einem Flächenbedarf von ca. 175 km² (Windenergie, Annahme: 8,6 MW/km²) bzw. ca. 400 – 550 km² (Energiemais; Annahme zum Biogas: 2500 m³/kW, 7000 – 10.000 m³/ha) einhergeht. Allein für die Wärmeversorgung der Großstädte in Deutschland errechnen sich so Flächenbedarfe für zusätzliche Windenergieanlagen von mehr als 3100 km² oder für zusätzliche Anbauflächen für Energiemais von mehr als 6800 km².

Zudem zeigen sich beim Vergleich der eingesetzten WP-Technologie substanzielle Einsparpotenziale: aufgrund der deutlich höheren JAZ bei (HT-)ATES-Systemen ggü. LWWP können Einsparungen i. H. v. mehreren TWh pro Jahr erzielt werden (Elektrizitätsbedarf LWWP (JAZ: 2,5, 70 °C-Senke): 7,2 TWh/a; Elektrizitätsbedarf HT-ATES (JAZ: 6,8, 70 °C-Senke): 2,7 TWh/a). Zu damit verbundenen Umweltwirkungen besteht weiterer Forschungsbedarf.

Wenig beachtet wird in der aktuellen Diskussion zudem, dass aufgrund der prognostizierten Klimaentwicklung auch in deutschen Städten Vorkehrungen getroffen werden müssen, um sie in Ihrer Gesamtheit – und nicht nur die Innenräume von Gebäuden – hitzeresilient zu gestalten. Ob und in welcher Weise UTES-Systeme in Kombination mit „thermisch aktivierten“ Städten bei solchen Zielsetzungen eine tragende Technologie sein können, stellt dringlichen Forschungsbedarf

dar, da damit auch andere Strategien bei der Dämmung von Gebäuden, beim Bau von Straßen und Plätzen und bei der Konzeption der zukünftigen Wärmeversorgungssysteme verbunden wären.

Zwischenfazit 3.1.1-II

Das Dekarbonisierungspotenzial des Wärmesektors mit Hilfe von UTES-Systemen ist in erster Linie davon abhängig, wieviel CO_{2äquiv.}-neutrale Wärmequellen mit einem saisonalen Speicherbedarf für die Bedarfs- und die Angebotsseite für die zukünftige Wärmeversorgung (Heizen und Kühlen) zur Verfügung stehen. Die aus den geologischen Gegebenheiten begründete Speicherkapazität der UTES-Systeme stellt für viele Städte (vgl. Abschn. 1.3) keine prioritäre Limitierung dar.

Die solarthermische Nutzung der aktuell als verfügbar bewerteten Dachflächen (ca. 25 % – 30 % der Gesamtdachfläche) – ggf. auch der PV-Anlagen zur Wärmeversorgung – in Kombination mit UTES-Systemen kann im urbanen Bereich ca. 10 % – 15 % des jährlichen Wärmebedarfs decken; die vollständige solarthermische Nutzung der Dachflächen und/oder die Einbeziehung anderer (häufig vorhandener) Wärmequellen in Kombination mit UTES-Systemen ermöglicht nach ersten stark vereinfachten Szenarienanalysen eine Wärmedeckung von bis zu 30 % im urbanen Bereich. Die Wärmedeckung mit UTES-Systemen kann insbesondere im nichturbanen Bereich durch die Erschließung von Freiflächen für die solarthermische Wärmeerzeugung weiter gesteigert werden, ebenso durch Einbindung CO₂-neutraler Wärmequellen wie der tiefen Geothermie.

3.1.2 Umweltauswirkungen von UTES-Systemen im Vergleich zu denen alternativer regenerativer Energieversorgungssysteme

Durch die Integration von UTES-Anlagen innerhalb des in Entwicklung und Aufbau befindlichen zukünftigen Energieversorgungssystems können prinzipiell signifikante Anteile der bisher durch die Nutzung fossiler Energieträger verursachten Klimaschäden und weiterer verbundener Umweltbelastungen durch eine effizientere Einbindung erneuerbarer Energien erheblich verringert werden. Neben den allgemein anerkannten Klima- und Umweltauswirkungen der fossilen Energieträger bestehen jedoch auch für erneuerbare Energien verschiedene Umweltauswirkungen mit unterschiedlichem Belastungspotential. Durch den politischen Ausstieg aus den auf fossilen Energiequellen basierenden Energieversorgungssystemen bis zum Jahr 2040 bzw. bis zum Jahr 2045 ist ein entsprechender Vergleich aber eigentlich überholt.

Vor diesem Hintergrund ist die Frage eher bedeutend, ob bzw. wie sich durch eine signifikante UTES-Nutzung negative Umweltauswirkungen alternativer regenerativer Energieversorgungssysteme verringern ließen. Leider existiert nach Kenntnis der Autoren kein entsprechender quantitativer Vergleich oder gar eine Priorisierung der negativen Umweltauswirkungen bei der (gesteigerten) Nutzung von Biomasse für Biogasanlagen, Windenergieanlagen (on- oder off-shore), PV- und/oder Solarthermieranlagen, Wasserkraftwerken, H₂-Produktion und „Tiefer“ Geothermie. Im Rahmen dieser Studie war ein entsprechender fundierter Vergleich auch nicht zu erarbeiten. Allerdings sehen die Autoren dieser Studie hierfür dringenden Bedarf, da eine entsprechende vergleichende Bewertung ein zumindest regionales wichtiges Kriterium für den Ausbaupfad der erneuerbaren Energien ist. Zudem führt eine monoperspektivische – also nicht vergleichende – Bewertung einzelner Technologien bzw. Konzepte intrinsisch zu einer Überbewertung technologiespezifischer Risiken. Deswegen wird ein entsprechender quantifizierender Vergleich z. B. in Form integrierter Umweltkosten (z. B. Bünger und Matthey (2018), Bünger und

Matthey (2020)) dringend angeraten. Bezüglich der Vorteile für die Umwelt bei der verstärkten Nutzung von UTES-Anlagen sind folgende Punkte zu nennen:

- ▶ Verminderung des Nutzungsdrucks der Landoberfläche und damit dort potentieller Schutz von Ökosystemen, Biodiversität etc.,
- ▶ potenzieller Schutz von Oberflächengewässern und urbanen Gebieten vor thermischen Veränderungen aufgrund der thermischen Pufferwirkung von UTES-Anlagen,
- ▶ effizientere Nutzung thermischer und elektrischer „Überschuss“-Energie durch Nutzung saisonaler Wärmespeicher,
- ▶ Steigerung der Resilienz der Energieversorgung gegenüber Wetterextremen und/oder politischen Krisensituationen ohne fossile Energiequellen (einschließlich der zugehörigen Verbrennungsanlagen),
- ▶ emissionsarme bzw. emissionsfreie Wärmequellen in Hinblick auf das Schutzgut Atmosphäre.

Als potentiell negative Umweltauswirkungen werden für UTES- Anlagen insbesondere Risiken für das Grundwasser im Hinblick auf negative Veränderungen der hydrochemischen Zusammensetzung und negative Veränderungen im Hinblick auf das Grundwasserbiom aufgeführt. Ob bzw. inwieweit diese Befürchtungen und Besorgnisse qualitativ und quantitativ belastbar sind, ist aufgrund einer fehlenden empirischen Datenbasis kaum hinreichend sicher zu bewerten (vgl. Abschn. 3.2).

Zwischenfazit 3.1.2

Das Fehlen einer anerkannten quantitativen und vergleichenden Bewertung zu den Umweltauswirkungen regenerativer Energieversorgungstechnologien macht auch die entsprechende Einordnung von UTES-Anlagen schwierig bis unmöglich. Möglicherweise kann die spezifische Ermittlung quantitativer Umweltkosten (Bünger und Matthey, 2018; Bünger und Matthey, 2020) einen Lösungsansatz darstellen, allerdings war dies nicht im Rahmen dieser Studie umsetzbar. Zudem ist auch dieser Ansatz stark von der Wahl der manchmal noch unsicheren Randbedingungen abhängig, wie z. B. die angeblich hohen Umweltkosten für die oberflächennahe konventionelle Geothermie zeigt, was im Wesentlichen aus der Wahl des Strommixes für die Wärmepumpe resultiert.

Gerade vor dem Hintergrund des politisch beschlossenen Ausstiegs aus der Nutzung fossiler Energieträger und dem Ausbau der regenerativen Energieversorgungssysteme erscheint es unerlässlich, ein entsprechendes Bewertungskonzept zu entwickeln.

Vergleicht man die innerhalb dieser Studie thematisierten räumlich und zeitlich begrenzten thermischen, hydraulischen und mikrobiologischen Auswirkungen von UTES-Anlagen mit i. d. R. qualitativ bekannten möglichen Umweltauswirkungen anderer erneuerbarer Energieversorgungstechnologien, erscheint es zumindest wahrscheinlich, dass eine verstärkte Nutzung von UTES-Systemen beispielsweise den Nutzungsdruck auf die Landoberflächen verringern und die Biodiversität erhöhen kann. Lediglich ist lokal prognostizierbar und zeitlich begrenzt von Veränderungen des Grundwasserkörpers (Hydrochemie, Aquiferbiom und – falls vorhanden – Grundwasserfauna) und möglicherweise von Hebungen und Senkungen der Geländeoberfläche auszugehen. Selbst für die potentiellen und zeitlich begrenzten hydrochemischen und mikrobiologischen Veränderungen ist die

empirische Datenlage nur für wenige Grundwasserleitertypen (pleistozäne glazigene norddeutsche Grundwasserleiter und jungtertiäre fluviatil-marin gebildete Grundwasserleiter) halbwegs belastbar (vgl. Abschn. 3.2).

Ein wesentlicher Einwand gegen den Bau und den Betrieb von UTES-Anlagen, insbesondere HT-UTES-Anlagen, sind allgemeine Befürchtungen im Sinne des „Vorsorge-“ oder „Besorgnis-Prinzips“, dass sich die hydrochemische Grundwasserzusammensetzung sowie das Grundwasserleiterbiom irreversibel und großräumig verändern. Auf die thermische Raumwirkung von UTES-Anlagen in Abhängigkeit von Wärmebedarfsdichten wurde bereits im Abschnitt 1 ausführlich eingegangen, so dass zumindest konzeptionelle und numerische bzw. analytische Ansätze existieren, um diesen Punkt konkret ortsspezifisch bewerten zu können bzw. Abwägungen zwischen Wärmeversorgung und Wasserversorgung zu treffen.

Komplexer ist die Bewertung des thermischen Einflusses auf die Grundwasserqualität. Zunächst führt nicht jede Temperaturveränderung im Grundwasser zu (messbaren) hydrochemischen Veränderungen, und zudem sind erhebliche Temperaturveränderungen zumindest in oberflächennahen Grundwasserleitern „natürlichen“ Ursprungs (vgl. Abschn. 1.2). Leider ist eine halbwegs empirisch gesicherte, experimentelle Datenlage zur Frage, welche Temperaturveränderung auf welchem Temperaturniveau in welchen Grundwasserleitertypen signifikante hydrochemische Veränderungen in der Grundwasserzusammensetzung bewirkt, nur auf wenige Grundwasserleitertypen (i. d. R. jungtertiäre und pleistozäne quarzreiche Sande aus Norddeutschland und den Niederlanden) beschränkt. Und selbst diese experimentellen Labordaten entstammen häufig „Batch-Versuchen“ oder einfachen Durchflusssäulenversuchen, die die stark transienten hydro-dynamischen und thermischen Bedingungen in zyklischen HT-ATES-Versuchen nur wenig abbilden. Vernachlässigt wird bei diesen Laboruntersuchungen z. B., dass

- ▶ in Großteilen dasselbe Wasservolumen zwischen den Brunnen zyklisch ausgetauscht wird und die Sedimente in Brunnennähe („warmer“ und „kalter“ Brunnen) in den Infiltrations- und Extraktionsphasen sowohl durch das thermisch genutzte Wasser als auch durch thermisch gering verändertes bis unverändertes Grundwasser durchströmt werden,
- ▶ die Strömungs- und Temperaturmuster als auch die damit verbundenen hydrochemischen Prozesse stark transient sind, z. B. aufgrund vertikaler Dichteströmung,
- ▶ potentiell signifikante Ent- und Begasungs- sowie Ausfällungsprozesse an oberirdischen Wärmetauschern auftreten,
- ▶ (bisher nur schwer quantifizierbare) Zumischungsprozesse aufgrund der Grundwassergrundströmung auftreten (können),
- ▶ das in Kontakt stehende Sediment sich über die Betriebszeit in seiner hydrogeochemischen Reaktivität und Zusammensetzung verändert bzw. verändern kann.

Diese Aufzählung bedeutet nicht, dass die bisher experimentellen Labordaten zur Veränderung hydrogeochemischer Grundwassersysteme fraglich oder gar wertlos sind. Wie gezeigt (z. B. Lüders et al. (2021)), können auf Basis solcher Labordaten belastbare hydrochemische Prognosen zum (initialen) Betrieb von (HT-)ATES-Anlagen erstellt werden.

Allerdings ist z. B. die Ableitung von Betriebs- und Monitoringkonzepten und/oder belastbaren und sinnvollen Grenzwerten auf alleiniger Basis entsprechender Labordaten problematisch. Bis

auf den später vorgestellten HT-ATES-Pilotversuch am Teststandort *TestUM* bei Wittstock/Dosse, der pleistozäne, glaziale Sedimente repräsentiert, fehlen – trotz des hohen Potentials von UTES-Systemen – schlicht belastbare empirische Grundlagen, die eine sachgerechte Bewertung von (HT-)ATES-Systemen unter hydrogeochemischen Aspekten sowohl im Hinblick auf Ihre Umweltauswirkungen als auch im Hinblick auf die Bedeutung der hydrogeochemischen Randbedingungen im Betrieb erlauben. Deswegen erscheint es problematisch, auf der aktuellen empirischen Grundlage weitreichende und allgemeine regulative Vorgaben zu entwickeln.

Hierzu besteht dringender Handlungs- und Untersuchungsbedarf, denn Unkenntnis aufgrund eines häufig sehr restriktiv ausgelegten Vorsorgegebots darf zukünftig keinen Grund darstellen, die Potentiale von UTES-Systemen bei einer klimaneutralen Wärmeversorgung nicht nutzen zu können. Vorgeschlagen wird, zumindest für typische und (national) repräsentative oberflächennahe Porengrundwasserleiter entsprechende HT-ATES-Systeme (soweit nicht bereits im BMBF-Vorhaben „TestUM“ bzw. „TestUM-II“ realisiert) als Pilotanlagen aufzubauen, um so belastbare Daten aus Feldexperimenten zu gewinnen.

Das größte Wissensdefizit besteht dabei bzgl. der hydrochemischen Auswirkungen eines HT-ATES-Betriebs in C_{org} -reichen in der Regel anaeroben Aquiferen, die u. a. eine signifikante Gasentwicklung bei einer Temperaturerhöhung aufweisen, wie erste, eher orientierende Untersuchungen entsprechender Sedimente zeigen. In diesem Kontext ist zu diskutieren, ob bzw. inwieweit wegen des juristisch unbestimmten Charakters des „Verschlechterungsverbots“ Veränderungen eines hydrochemischen „Status quos“ von Grundwasserleitern per se als problematisch angesehen werden sollten.

3.1.3 Temperaturabhängige Veränderung der gelösten Hauptkomponentenkonzentrationen – Überblick

Hauptkomponenten der Grundwasserinhaltsstoffe, zu denen in erster Linie die gelösten Komponenten Kalzium, Magnesium, Natrium, Kalium, Silizium, TIC (Total Inorganic Carbon, anorganischer Kohlenstoff), Sulfat, Chlorid und DOC (Dissolved Organic Carbon, organischer Kohlenstoff), teilweise auch Nitrat, Mangan und Eisen zählen, können durch Abkühlung oder Erwärmung des Grundwassers unter gewissen Standortbedingungen zu Beeinträchtigungen im technischen Betrieb geothermischer Systeme oder hinsichtlich der Grundwasserqualität führen. Temperaturbedingte Konzentrationsänderungen können v. a. durch Minerallösungen und -fällungen, Sorption/Desorption und Redoxprozesse auftreten.

Eine Temperaturabhängigkeit von Minerallösung und -fällung, Sorption und Redox-Prozessen wird für gleichgewichtsgesteuerte Prozesse durch die Reaktionsenthalpie (ΔH_r) beschrieben oder kann anhand der Temperaturabhängigkeit von Gleichgewichtskonstanten mittels analytischer Gleichungen der Form $K = a \cdot q \cdot b \cdot T^q \cdot c/T$ oder $\log K = a + bT + c/T + d \log T + e/T^2$ berechnet werden (Helgeson, 1967; Helgeson, 1969; Helgeson et al., 1978; Holm et al., 1987).

Für kinetisch gesteuerte Prozesse hängt die Temperaturabhängigkeit von der Aktivierungsenergie (E_a) ab, mit der sich anhand der Arrhenius-Gleichung Ratenkonstanten für unterschiedliche Temperaturen berechnen lassen. Für Einzelmineralphasen sind diese Parameter verhältnismäßig gut untersucht und verfügbar. Eine Zusammenstellung über relevante Aktivierungsenergien ist z. B. bei Jesušek (2012) zu finden. ΔH_r -Werte sowie die Parametrisierung analytischer Ansätze zur Berechnung temperaturabhängiger Gleichgewichtskonstanten geläufiger Prozesse sind zum einen in den Datenbasen geochemischer Simulationsprogramme wie z. B. Phreeqc (Parkhurst und Appelo, 2013) vorhanden, wurden zum anderen auch darüber hinaus bereits für geothermisch relevante Fragestellungen z. B. von Holm et al. (1987) und

Bonte et al. (2014) und zusammengestellt. Anhand dieser Datengrundlagen lassen sich Einzelprozesse, wenn sie in erster Linie von der Grundwasserzusammensetzung abhängen – wie z. B. die Karbonatfällung oder die Gasphasenbildung –, relativ gut durch Simulationen prognostizieren.

Prognosen der komplexen Wechselwirkungen zwischen den in Sedimenten vorliegenden Mineralgemischen und im Grundwasser gelösten Spezies als Funktion der Temperatur werden jedoch auch in absehbarer Zukunft nicht auf Basis umfänglicher numerischer Simulation möglich sein. Gründe hierfür bestehen v. a. in einer nicht hinreichenden Parametrisierbarkeit hinsichtlich (1) Mineralbestand und geochemischer Oberflächenbelegung, (2) Bestimmung effektiver spezifischer reaktiver Oberflächen, (3) Selektivitätskoeffizienten bei der Austauschbelegung, (4) Monokinetikparameter und auch Unsicherheiten bei den thermodynamischen Daten. Um also durch Temperaturveränderungen verursachte geochemische Auswirkungen standortspezifisch prognostizieren zu können, müssen auf Stichproben gestützte experimentelle Untersuchungen mit Sediment und Grundwasser vom betreffenden Standort durchgeführt werden.

Während sich frühere Untersuchungen geochemischer Auswirkungen geothermischer Anlagen weitgehend auf die Ausfällungen von Karbonat-, Eisen- und Manganmineralen im Bereich der Wärmetauscher und Bohrlöcher fokussierten (Hooghart und Posthumus, 1990; Jenne et al., 1992), wurden in den vergangenen 10 – 15 Jahren zunehmend auch Auswirkungen auf die Grundwasserqualität der genutzten Aquifere anhand einfacher Laborexperimente untersucht (Arning et al., 2006; Bonte et al., 2011; Jesušek, 2012; Bonte et al., 2013a; Bonte, 2013c; Jesušek et al., 2013a; Lüders et al., 2016; Griebler et al., 2016; Lüders et al., 2020).

Zwischenfazit 3.2.1

Temperaturabhängige Veränderungen der gelösten Hauptkomponentenkonzentrationen – Überblick

Vermutete temperaturinduzierte Konzentrationsänderungen der im Grundwasser gelösten Komponenten gelten als ein wichtiges Argument im Hinblick auf eine verstärkte Nutzung insbesondere von HT-ATES-Anlagen, obwohl der thermische Auswirkungsraum, bezogen auf das Gesamtvolumen von Grundwasserleitern, i. d. R. vergleichsweise gering ist (vgl. Abschn. 1.4). Bei der raumunabhängigen, allein hydrochemischen Bewertung bisheriger Daten aus Laborexperimenten ist festzustellen, dass eine Reihe hydrodynamischer Prozesse, die die Konzentrationen gelöster Komponenten stark beeinflussen können, experimentell nicht berücksichtigt werden. Lüders et al. (2021) zeigen zwar, dass mittels Laborexperimenten die initialen gelösten Konzentrationen in ATES-Feldanwendungen gut prognostiziert werden, allerdings sind einfache Laborexperiment-Anordnungen (Batch-Versuche, „1D“-Säulenversuche) nicht geeignet, die hochgradig zeitlich-räumlich transienten hydrochemischen Veränderungen zu beschreiben. Deswegen besteht ein großer Bedarf an experimentellen Felddaten von (HT-)ATES-Anlagen in unterschiedlichen Grundwasserleitern, um einen belastbaren Datensatz u. a. für Genehmigungsbehörden als Referenz zur Verfügung zu stellen. Da dort das größte Datendefizit besteht, sollten dabei salinare Grundwasserleiter und Grundwasserleiter mit erhöhtem C_{org} -Gehalt, also mit i. d. R. anoxischen Redoxbedingungen, sowie Untersuchungen im saisonalen ATES-Betrieb in den bisher auf kürzeren Zeitskalen betrachteten quarzreichen pleistozänen und quartären Lockersedimenten im Vordergrund stehen.

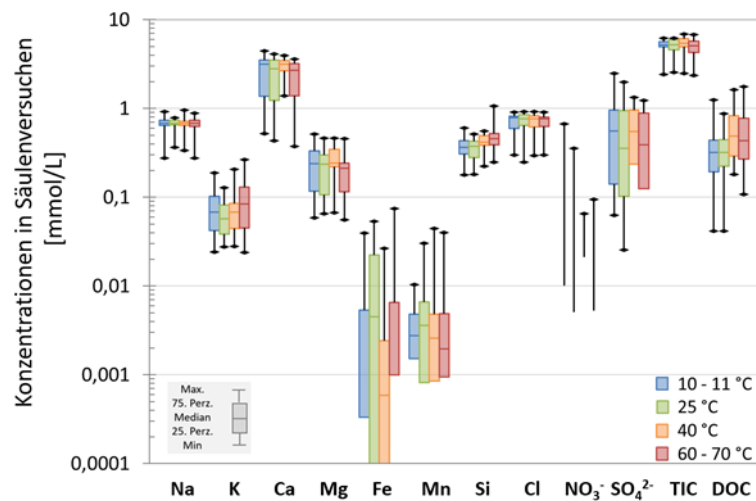
3.1.4 Thermisch induzierte Konzentrationsänderungen gelöster Hauptkomponenten im „Grundwasser“ in Laborexperimenten

Zum grundsätzlichen Prozessverständnis der hydrogeochemischen Gesteins-Wasser-Wechselbeziehungen sind einfache Durchfluss-Säulenversuche hilfreich. In Abbildung 3.1 sind Ablaufkonzentrationen von auf 10 – 70 °C temperierten Säulenversuchen mit unterschiedlichen sandigen Lockersedimenten (pleistozäne, glaziale bzw. jungtertiären GWL) von Bonte et al., (2013b), Jesušek et al. (2013a), Lüders et al., (2016) und Lüders et al. (2020) aufgetragen. Wie oben beschrieben, sind solche Säulenversuche nur bedingt auf die wesentlich komplexeren Prozesse in zyklisch betriebenen ATEs-Systemen zu übertragen. Deswegen können die in den Säulenversuchen beobachteten Prozesse sowohl innerhalb eines thermisch genutzten Aquifers als auch innerhalb der technischen Anlagen (Wärmetauscher, Rohrleitungen, Bohrlöcher, Abscheider) ablaufen.

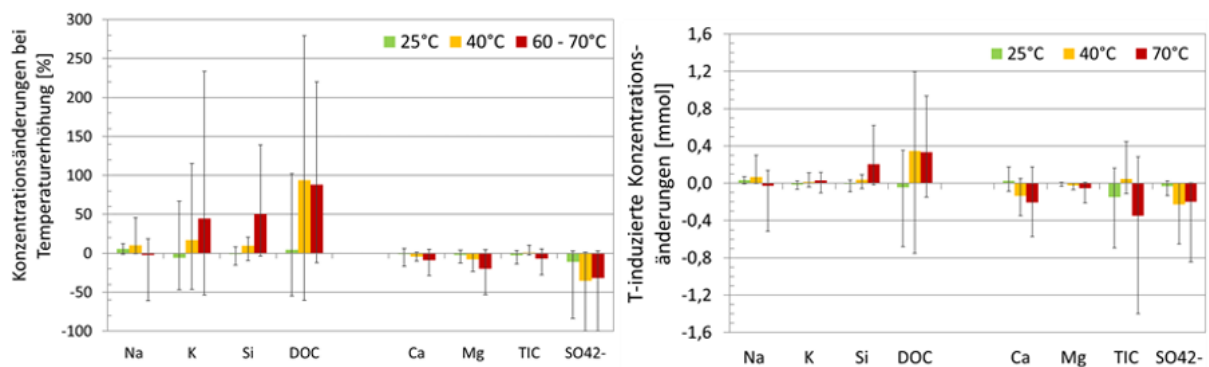
Die Aufarbeitung und die Zusammenstellung dieser Säulen-Laborexperimente lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- ▶ Die Temperatureinflüsse auf die gelösten Hauptkomponenten sind i. d. R. kleiner als die natürliche hydrogeochemische Variabilität der untersuchten Sedimente und in den absoluten Konzentrationsveränderungen verhältnismäßig moderat (vgl. Tab. 3.2 und Abb. 3.1).
- ▶ Allein für die gelösten Hauptkomponenten Kalium, Silizium und gelösten organischen Kohlenstoff (DOC) ist eine positive Korrelation zwischen höheren Temperaturen und einer Konzentrationserhöhung zu erkennen.
- ▶ DOC weist mit etwas weniger als einer Verdoppelung die höchsten Konzentrationsanstiege verglichen zur 10 °C-Referenz auf (vgl. Tab. 3.2 und Abb. 3.2).
- ▶ Die größten Veränderungen sind bei einzelnen Sedimenten mit +270 % (1,2 mM) bei DOC und -1.4 mmol/l (28 %) bei TIC moderat.

Diese Zusammenfassung der Säulenversuche mit Grundwasserleitorsedimenten verdeutlicht nochmals, dass bei der Auswirkungsbewertung die temperaturinduzierten Änderungen auch in Relation zu den hydrogeochemischen Heterogenitäten eines betreffenden Standorts gesetzt werden sollten. Solche lokalen hydrogeochemischen Heterogenitäten können lateral – jedoch noch vielmehr vertikal – bereits im Maßstab von Metern in einem Umfang variieren, der auch über die Variabilität der hier betrachteten Sedimente deutlich hinausgehen kann. Ein ähnliches Bild zeigte sich auch im Rahmen des Feldversuchs *TestUM*, bei dem die natürliche Variabilität der gelösten Hauptkomponenten über eine Fläche von 80 m · 40 m und einer Tiefe von 7 – 13 m u. GOK in einer vergleichbaren Größenordnung lag wie die Auswirkungen einer Temperaturerhöhung bis 80 °C auf deren Konzentrationen. Abweichend überwogen hier bei Silizium und Kalium Temperatureffekte die natürliche Variabilität.

Abbildung 3.1: Zusammenstellung der Ablaufkonzentrationen von Lockersedimenten

Zusammenstellung der Ablaufkonzentrationen von auf 10 – 70 °C temperierten Säulenversuchen mit unterschiedlichen sandigen Lockersedimenten von Bonte et al. (2013b), Jesušek et al. (2013a), Lüders et al., (2016), Lüders et al. (2020). Lediglich bei den gelösten Hauptkomponenten K, Si und DOC tritt eine (schwache) positive Korrelation zwischen der gelösten Konzentration und dem Temperaturanstieg auf, ansonst überprägt die natürliche Variabilität der gelösten Konzentration den potenziellen Temperatureffekt.

Abbildung 3.2: Relative und absolute Konzentrationsänderungen aus Säulenversuchen mit unterschiedlichen sandigen, pleistozänen, glazialen und jungtertiären Lockersedimenten

Links: relative Konzentrationsänderungen gegenüber Versuchen mit den jeweiligen Sedimenten bei 10 °C bzw. 11 °C; rechts: absolute Konzentrationsänderungen. Aus den auf 10 – 70 °C temperierten Säulenversuchen mit unterschiedlichen sandigen Lockersedimenten von Bonte et al. (2013b), Jesušek et al. (2013a), Lüders et al., (2016), Lüders et al. (2020).

Tabelle 3.2: Zusammenfassung der temperaturinduzierten Konzentrationsänderungen bei gelösten Hauptkomponenten in Laborversuchen in den Temperaturbereichen 10 °C auf 60 °C bzw. 70 °C

Hauptkomponente	Mittlere Änderung [%]	Mittlere Änderung [mmol/l]	Max. Änderung [%]	Max. Änderung [mmol/l]	Prozess	Literatur (Prozesszuordnung)
Na	-2	-0,03	19	0,14	Desorption, Na-Feldspat-Lösung*	Lüders et al., 2020
K	44	0,03	233	0,12	Desorption, Kali-Feldspat-Lösung	Bonte et al., 2013b; Jesušek et al., 2013a; Lüders et al., 2020
Si	50	0,20	139	0,62	Lösung von amorphem SiO ₂ , Silikat-lösung	Bonte et al., 2013b; Jesušek et al., 2013a; Lüders et al., 2020
DOC/NPOC	88	0,33	220	0,93	Desorption, Fermentation Umbau bzw. Mineralisierung organischer Substanz	Bonte et al., 2013b; Jesušek et al., 2013a; Lüders et al., 2020
Ca	-9	-0,21	-29	-0,57	Karbonatfällung, Sorption	Lüders et al., 2020
Mg	-20	-0,05	-53	-0,21	Sorption, Karbonatfällung	Jesušek et al., 2013a; Lüders et al., 2020
TIC	-7	-0,35	-28	-1,40	Karbonatfällung, Mineralisierung organischer Substanz	Jesušek et al., 2013a; Lüders et al., 2020
SO ₄ ²⁻	-32	-0,20	-100	-0,84	Sulfatreduktion	Bonte et al., 2013c; Jesušek et al., 2013a; Lüders et al., 2020
NO ₃ ⁻					Nitratreduktion	Jesušek et al., 2013a; Willms, 2017; Kuhr, 2018
Cl ⁻					Keine signifikante Änderungen	

Temperaturbereich 10 °C auf 60 °C: Bonte et al., 2013b; Temperaturbereich 10 °C auf 70 °C: alle anderen.

*) unveröffentlicht.

Zwischenfazit 3.2.2**Konzentrationsänderungen der gelösten Hauptkomponenten nach Laborexperimenten**

Im Hinblick auf thermisch induzierte Veränderungen der gelösten Hauptkomponenten liegen empirisch belastbare Daten bisher im Wesentlichen aus Laborexperimenten mit Sedimenten aus pleistozänen, glazialen bzw. jung-tertiären Grundwasserleitern mit gering mineralisierten Grundwässern vor. Die Temperatureinflüsse auf die gelösten Hauptkomponenten sind in diesen Grundwasserleitersedimenten verhältnismäßig moderat und treten, bezogen auf die Konzentrationen bei 10 °C, am deutlichsten für Kalium, Silizium und gelösten organischen Kohlenstoff (DOC) auf. Insgesamt ist die natürliche Variabilität der gelösten Hauptkomponentenkonzentrationen größer als der Temperatureinfluss. Da diese Variabilität auch kleinräumig in Grundwasserleitern auftreten (vgl. Abschn. 3.2.4), erscheint es sinnvoll, diese natürliche Variabilität als Referenzmaßstab für thermische induzierte Veränderungen gelöster Konzentrationen in Betracht zu ziehen.

3.1.4.1 Mineralbildung und -lösung

Die in Tabelle 3.2 vorgenommenen Prozesszuordnungen (nach Laborexperimenten) lassen sich wie folgt untersetzen.

Mineralausfällungen von Karbonaten sowie Eisen- und Mang(hydr)oxiden im Bereich von Brunnen, Rohrleitungen und Wärmetauschern sowie daraus resultierende Leistungseinbußen sind eingehend beschrieben; ihre Minimierung bzw. Vermeidung wird jedoch noch immer als wichtige Aufgabe im Rahmen der Planung und des Betriebs von ATES-Anlagen angesehen (Hooghart und Posthumus, 1990; Jenne et al., 1992; Kallesøe et al., 2019).

Auswirkungsanalysen von Minerallösungsprozessen, die bisher nur in Laborexperimenten untersucht wurden (u. a. Arning et al. (2006), Bonte et al. (2013b), Jesušek et al. (2013a), Lüders et al. (2020)), innerhalb der Speicherformation – z. B. hinsichtlich Permeabilitäts- oder Stabilitätsänderungen –, sind bisher nicht durchgeführt worden. Aufgrund erster Abschätzungen von Porositätsänderungen wird jedoch i. d. R. von vernachlässigbaren Auswirkungen ausgegangen. Über das Verhalten anderer Hydroxide, Sulfate und Phosphate ist bisher wenig bekannt (Jesušek, 2012).

Das „Verhalten“ bzw. die Eigenschaften der Mineralklassen lassen sich bei den Lösungs- und Fällungsprozessen wie folgt skizzieren:

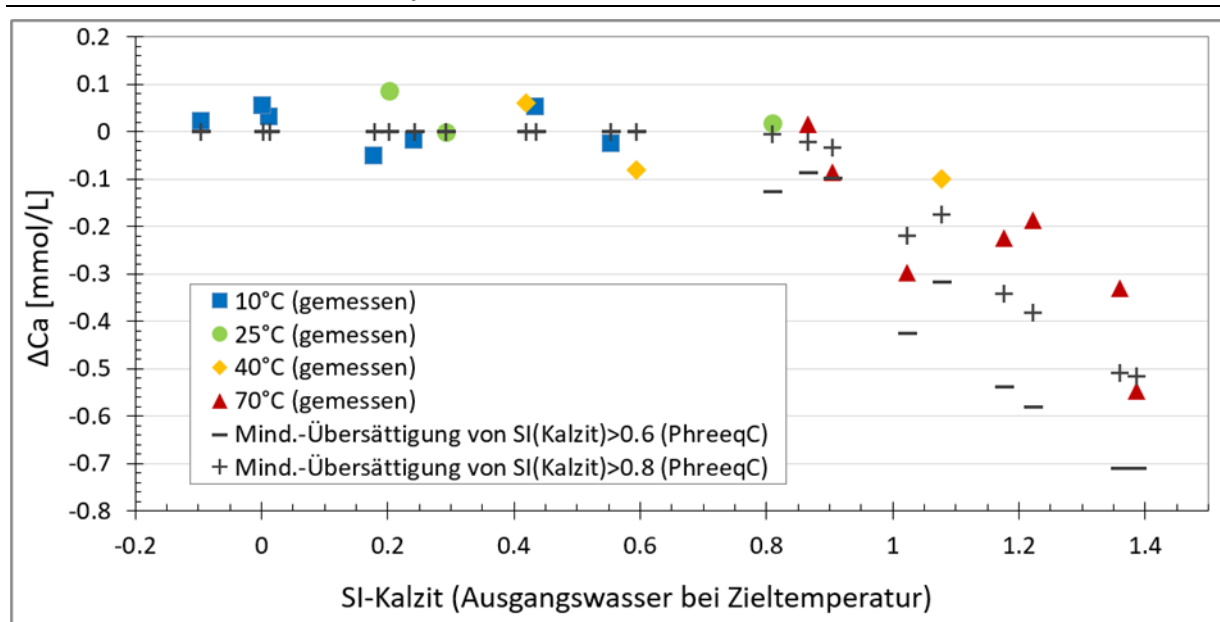
► Karbonate

Bei einer Temperaturerhöhung im Zuge einer Wärmespeicherung nehmen die Löslichkeiten von Karbonaten generell ab (z. B. Coudrain-Ribstein et al. (1998), Jesušek (2012)). Entscheidend für das Ausmaß einer Karbonatfällung und die Ausfällungsraten sind der pH-Wert, der CO₂-Partialdruck, die Ionenstärke und die sich aus der chemischen Zusammensetzung des Grundwassers ergebene Sättigung beispielsweise gegenüber Kalzit (Gutjahr et al., 1996; Wisotzky, 2011). Eine Ausgasung von CO₂ führt hierbei zu einer weiteren Steigerung der Übersättigung (z. B. Appelo und Postma (2005)).

Der Beginn der Karbonatfällung bei ansteigenden Temperaturen wird in natürlichen Gesteins-Wasser-Systemen i. d. R. erst ab einer leichten Übersättigung ablaufen. Für Kalzit tritt z. B. eine messbare Kalzitfällung erst bei einer Kalzit-Übersättigung > 0,6 auf (vgl. Abb. 3.3)

auf. Als Grund dafür wird z. B. die Gegenwart von Fällungsinhibitoren wie beispielsweise organische Säuren, Phosphat oder Mn^{2+} (Inskee und Bloom, 1986; Dromgoole und Walter, 1990) diskutiert, aber auch kinetische Ursachen wie z. B. die Überwindung einer bestimmten Aktivierungsenergie u. a. kommen als Ursachen in Betracht (z. B. Griffioen und Appelo, 1993). Unter Annahme solcher „Mindestübersättigungen“ lassen sich die zu erwartenden Karbonat-Ausfällungen mit Hilfe thermodynamischer Modellprogramme berechnen, so dass belastbare Prognosen und experimentell bestätigte Prognosen (Daten nicht gezeigt) zur Menge der Karbonatfällung bei bestimmten Temperaturen im Bereich des „warmen“ ATES-Brunnens möglich ist.

Abbildung 3.3: In Durchflusssäulenversuchen mit vier norddeutschen Aquifersedimenten gemessene Ca-Konzentrationsänderungen im Vergleich zu für die jeweiligen Ausgangswasserzusammensetzungen simulierten Ca-Konzentrationsänderungen durch Kalzit-Ausfällungen, jeweils aufgetragen gegenüber den Kalzit-SIs des Ausgangswassers bei Zieltemperatur



Farbige Markierungen: In Durchflusssäulenversuchen mit vier norddeutschen Aquifersedimenten gemessene Ca-Konzentrationsänderungen. Schwarze Markierungen: Für die jeweiligen Ausgangswasserzusammensetzungen simulierten Ca-Konzentrationsänderungen durch Kalzit-Ausfällungen.

Für die hydrochemischen Berechnung der Kalzit-SIs sowie die simulierten Ca-Konzentrationsänderungen wurde das Programm PhreeqC v3.73 (Parkhurst und Appelo, 2013) verwendet, wobei die für eine Kalzit-Ausfällung benötigte Mindestübersättigung einmal auf 0.6 (Minus-Symbol) und einmal auf 0.8 (Plus-Symbol) gesetzt wurde.

Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

► Eisen(III)- und Mangan(IV)ausfällungen

Eisen(III)- und Mangan(IV)ausfällungen können v. a. durch Vermischung von Wässern unterschiedlicher Eh-pH-Bedingungen, Sauerstoffzutritt, pH-Wert-Erhöhung oder CO_2 -Ausgasung eintreten. Diese Prozesse sind aus dem Betrieb von ATES-Anlagen bekannt und können v. a. im Brunnenbereich auftreten (Andersson, 1990; Jenne et al., 1992; Andersson und Sellberg, 1992). Als mögliche Gründe für Eisen(III)- und Mangan(IV)ausfällungen werden diskutiert:

- Übermäßige Grundwasserabsenkung während der Extraktionsphase am „warmen“ Brunnen, so dass es zu einem Zutritt atmosphärischen Sauerstoffs und zudem zu einer verstärkten Druckentlastung kommen kann, welche eine CO₂-Ausgasung und damit eine pH-Wert-Erhöhung begünstigt.
- Eine vertikale Vermischung von Grundwässern mit unterschiedlichen Eh-pH-Bedingungen (z. B. suboxische und oxische Grundwässer). Prinzipiell lässt sich durch eine tiefenhorizontierte Grundwasserbeprobung im Rahmen der Erkundung das Potential für solche Vermischung abschätzen; die vertikale Vermischung selbst ist aufgrund von Dichteströmungen kaum zu verhindern.

Ergebnisse von Laborexperimenten deuten zudem darauf hin, dass sich durch die mit steigenden Temperaturen erhöhte Freisetzung von offenbar leichter oxidierbarem DOC die Redoxverhältnisse weiter in den anoxischen Bereich entwickeln. Dies begünstigt in den Laborexperimenten die Auflösung von Fe(III)- und Mn(IV)-Mineralphasen, die dann als Oxidationsmittel wirken (Bonte et al., 2013c; Jesušek et al., 2013a). Ungeklärt ist allerdings, ob bzw. unter welchen Randbedingungen dieser vermutete Prozess tatsächlich in zyklischen ATES-Feldversuchen auftritt.

Es existiert keine hinreichende Anzahl von Feldversuchsdaten zur Frage, wie groß das Nachlieferungspotenzial von DOC bei einem zyklischen ATES-Versuch ist und wieviel gelöste Oxidationsmittel z. B. vom Grundwasser des „kalten“ Brunnens oder während der Extraktionsphase aus der Umgebung der „warmen“ Brunnen nachgeliefert werden. Mit anderen Worten: ob sich der thermische Nutzungsraum bei ATES-Anlagen nach einer initialen Phase mit reduzierenden Bedingungen mittelfristig wieder in Richtung suboxische oder gar oxische Redoxbedingungen entwickelt, ist derzeit nicht prinzipiell und erst recht nicht orts-spezifisch zu beantworten.

Hierzu besteht dringender Forschungsbedarf, da aktuell hohe gelöste Fe²⁺- bzw. Mn²⁺-Konzentrationen als Ausschlusskriterium für ATES-Anlagen gelten. Plausibel erscheint allerdings auch die Annahme, dass das zwischen „kaltem“ und „warmen“ Brunnen zyklisch ausgetauschte Grundwasser die DOC- und Fe(III/II) bzw. Mn(IV/II) mittelfristig eluiert, so dass sich die Fe(III)- bzw. Mn(IV)-Fällungsproblematik nur auf eine initiale und mit technischen Mitteln zudem zu verkürzende Betriebsphase beschränken könnte.

► Silikate

Bei einer Temperaturerhöhung im Zuge einer Wärmespeicherung nehmen die Löslichkeiten von Silikaten, Quarz und amorphem SiO₂ bis zu Temperaturen von 250 °C generell zu (z. B. Fleming und Crerar (1982) und Jesušek (2012)), sind jedoch mit Ausnahme der Lösung von amorphem SiO₂ in den absoluten Konzentrationen um Größenordnungen kleiner. Holm et al. (1987) beobachteten bei einem Feldversuch mit Temperaturen von 55 °C bis 115 °C ansteigende Si- und K-Konzentrationen und schließen aufgrund von Gleichgewichtsberechnungen auf eine Lösung von amorphem Quarz und auf Ionenaustauschprozesse als Ursache des

Anstiegs der K-Konzentration. Auch Arning et al. (2006) konnten bei der Temperierung natürlicher Sedimente und Grundwässer auf 2 – 50 °C mit ansteigenden Temperaturen einen Anstieg der Si- und K-Konzentrationen bis zu Faktor 2,5 feststellen und führen dies auf die Lösung von K-haltigen Silikatmineralen zurück. Bonte et al. (2013b) schließen aus dem Verhältnis der ansteigenden K- und Si-Konzentrationen in Durchflusssäulenversuchen bei 60 °C auf eine inkongruente Kalifeldspatlösung, aber auch die Lösung von amorphem SiO₂ wird als mögliche Ursache des Anstiegs der Si-Konzentration in Betracht gezogen.

Auswirkungen

In ATES-Anlagen sind Versinterung und Verockerung, wie in der VDI-Richtlinie 4640 (VDI, 2019) beschrieben, in erster Linie im Bereich des Wärmetauschers zu erwarten; hierfür werden u. a. in der VDI-Richtlinie und bei Holm et al. (1987) technische Lösungen dargelegt. Wird das geförderte Wasser beispielsweise chemisch modifiziert, um eine Karbonatfällung im Leitungs- und Brunnensystem zu verhindern, so ist durch eine Abkühlung des injizierten Wassers während der Speicherung mit einer Karbonatlösung zu rechnen (Holm et al., 1987). Wird hingegen auf technische Maßnahmen zur Reduzierung einer Karbonatübersättigung verzichtet, so erwarten Palmer und Cherry (1984) bei einer Erwärmung des Wassers die Ausfällungen von Karbonaten vorzugsweise bereits im Leitungssystem oder, falls die Ausfällungen in Suspension verbleiben, direkt im Übergang von Injektionsbrunnen zu Aquifer. Zudem kann ein Wärmeentzug aus gefördertem, zuvor erhitztem Wasser auch zu Silikatausfällungen im Leitungssystem und im Injektionsbrunnen führen, sofern zuvor Silikate oder amorphes SiO₂ im Aquifer soweit gelöst wurden, dass es bei einer Abkühlung zu einer für eine Fällung ausreichenden Übersättigung kommt (Gunnarsson und Arnórsson, 2005).

Auch bei dieser Zusammenfassung ist zu berücksichtigen, dass die Prozesse der Versinterung und Verockerung sowie die dazu passenden Gegenmaßnahmen bisher in der Literatur i. d. R. anhand einzelner z. T. auch nur unzureichend dokumentierter Einzelfälle beschrieben sind. Es fehlen statistisch belastbare Fallzusammenstellungen, die die Ableitung evidenzbasierter Bewertungskriterien und Interventionsmaßnahmen möglich machen.

Zwischenfazit 3.2.2.1

Prognose der Mineralbildung und -lösung in HT-ATES-Anlagen auf Basis von Laborexperimenten

Mineralausfällungen von Karbonaten sowie Eisen- und Mang(hydr)oxiden im Bereich von Brunnen, Rohrleitungen und Wärmetauschern sowie daraus resultierende Leistungseinbußen sind zwar eingehend beschrieben, deren weitgehende Vermeidung wird jedoch noch immer als wichtige Aufgabe im Rahmen der Planung und des Betriebs von UTES-Anlagen angesehen (Kallesøe et al., 2019). Bzgl. der Prognose von Karbonatausfällungen in Abhängigkeit von der Temperatur wurden zwischenzeitlich erste numerische und experimentelle Ansätze entwickelt, allerdings fehlen weiter empirisch belastbare Datensätze, die ein Konzept zur Priorisierung von Technologien zur Vermeidung bzw. der Karbonatfällung für unterschiedliche Grundwässer und ATES-Betriebsbedingungen erlauben würden.

Ob suboxische Grundwässer mit hohen Fe²⁺- und Mn²⁺-Konzentrationen wegen des Risikos der Ausfällung von Fe(III)- und Mn(IV)-Phasen generell nicht für (HT-)ATES-Anlagen geeignet sind, erscheint zumindest diskussionswürdig. Plausibel wäre auch, dass sich im zyklischen ATES-Langzeitbetrieb, anders als in den einfachen und meist nur relativ kurzfristig betriebenen Laborversuchen, die thermischen Nutzungsräume nach einer initialen Phase mit niedrigen Redox-Werten wieder in

Richtung oxischerer Redoxverhältnisse entwickeln. Auch in dieser Frage besteht ebenfalls noch Bedarf an belastbaren Daten von ATES-Systemen im Langzeitbetrieb.

Auswirkungsanalysen von Minerallösungsprozessen innerhalb der Speicherformation z. B. hinsichtlich Permeabilitäts- oder Stabilitätsänderungen wurden bisher nicht durchgeführt; aufgrund erster Abschätzungen von Porositätsänderungen wird jedoch i. d. R. von vernachlässigbaren Auswirkungen ausgegangen. Insgesamt erscheint die empirische Datenlage zur Prognose untertägiger und oberirdischer Mineralfällungen aktuell noch nicht so belastbar, dass allgemeingültige, aber konkrete Regelungen zur Vermeidung bzw. zur Sanierung entsprechender Ablagerungen getroffen werden können.

3.1.4.2 Thermische Auswirkungen auf Sorption und Ionentausch

Von temperaturabhängigen Sorptions- und Ionentausch-Prozessen sind alle kationischen und anionischen Hauptkomponenten betroffen. In Laborstudien konnte eine schnelle Sorption zweiwertiger und eine schnelle Desorption einwertiger Kationen nachgewiesen werden (z. B. Griebler et al. (2015), Griebler et al. (2016), Holm et al. (1987), Lüders et al. (2020)). Teilweise können diese Prozesse jedoch auch von Minerallösungs- oder -fällungsprozessen überlagert werden (z. B. Bonte et al., 2013b). Möglicherweise sind auch die von Griebler et al. (2015) und Griebler et al. (2016) dokumentierten geringfügigen Konzentrationsanstiege von Nitrat, Nitrit und Ammonium bei Temperaturen über 30 °C auf Desorptionsprozesse zurückzuführen.

Während Desorptionsprozesse bei den Spurenelementen und Schwermetallen einen wesentlichen Faktor für die Bewertung geochemischer Veränderungen im Zuge von Temperaturänderungen darstellen, sind Änderungen infolge von Sorptionsprozessen bei den Hauptkomponenten im Allgemeinen vergleichsweise von untergeordneter Bedeutung.

3.1.4.3 Temperaturabhängige Freisetzung organischer Substanz und Auswirkung auf Redoxprozesse in Laborexperimenten

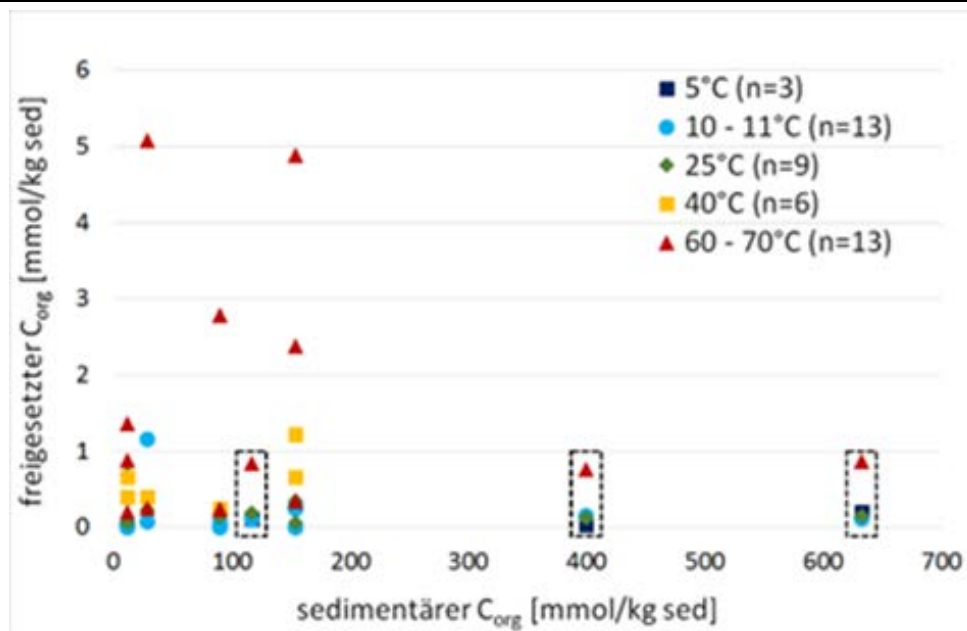
► Organische Substanz

Wie bereits beschrieben, kommt es bei den meisten bisherigen Laborstudien mit einem Temperaturanstieg zu einem deutlich erkennbaren, aber trotzdem moderaten Anstieg der DOC-Konzentration, wobei es bei Temperaturen bis 25 °C maximal zu einer Verdopplung und im Temperaturbereich 40 – 70 °C in maximalen Fällen zu einer Verdrei- bis zu Vervierfachung kommt (Brons et al., 1991; Bonte et al., 2013b; Bonte et al., 2013c; Jesušek et al., 2013a; Lüders et al., 2020; Abb. 3.4). Das sedimentspezifische Ausmaß des DOC-Anstiegs korreliert nach den bisherigen Untersuchungen jedoch nicht mit der sedimentären C_{org} -Konzentration, sondern ist vermutlich abhängig von dessen Art und Bindungsform. Die DOC-Anstiege können Folge zum einen einer verstärkten abiotischen Desorption und Diffusion (z. B. Xu und Saiers (2010)) oder zum anderen eines verstärkten mikrobiellen Umsatzes von sedimentärem C_{org} sein, wobei bisher ungeklärt ist, ob die in Lösung gehende DOC-Fraktion bioverfügbar ist oder nur nicht-weiterverwertbare Umwandlungsprodukte mikrobieller Aktivität darstellt (z. B. Robador et al. (2010)).

Wichtig ist jedoch auch, dass in Elutionsversuchen (z. B. Säulenversuchen) mit den jungtertiären und pleistozänen glazialen, eher C_{org} -armen Grundwasserleitersedimenten die DOC-

Anstiege nach der initialen Erwärmung relativ zügig zurückgehen, wobei sich die DOC-Konzentrationen bereits innerhalb der ersten zehn durchgesetzten Porenvolumina halbierten und auch im weiteren Verlauf anhaltend rückläufig zeigten (z. B. Bonte et al. (2013c), Lüders et al. (2020), Abb. 3.4). Wie oben bereits diskutiert, ist dieser Befund bisher bei der Prognose der Redoxentwicklung in den Nutzungsräumen zyklisch betriebener (HT-)ATES-Systeme schwer einzuordnen. Aktuell wird aufgrund der bisherigen zeitlich kurzen und mit geringem Wasseraustausch betriebenen Laborexperimente mehrheitlich davon ausgegangen, dass die Nutzungsräume von HT-ATES-Systemen eher reduzierende Redoxverhältnisse entwickeln.

Abbildung 3.4: Verhältnis von freigesetztem bzw. gelöstem sedimentärem C_{org} -Gehalt in Säulenversuchen



Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. Die Daten entstammen den im *Angus+*-Projekt durchgeführten Versuchen sowie, schwarz umrahmt, Bonte et al. (2013).

► Auswirkung von Temperaturveränderungen auf Redoxprozesse in Sedimenten

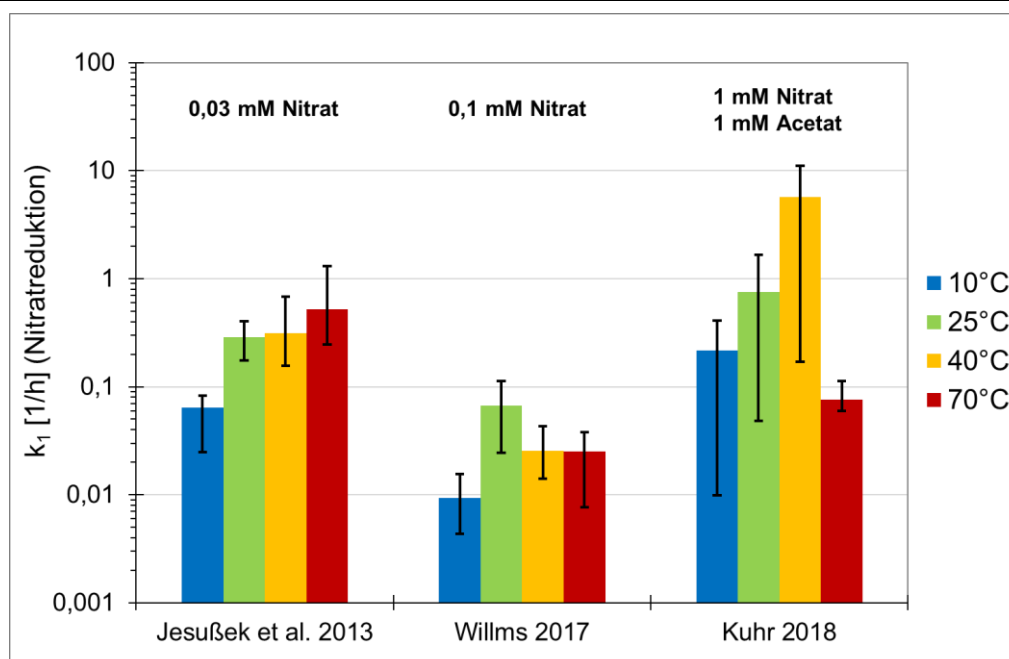
Durch die verbesserte C_{org} -Verfügbarkeit sowie das mit der DOC-Freisetzung einhergehende Absinken des Redoxpotentials können Reduktionsreaktionen wie z. B. Sulfat- oder Nitratreduktion, natürlicher Schadstoffabbau oder eine reduktive Auflösung von Eisen(hydr-)oxiden nach den vorliegenden Laborexperimenten zumindest initial beschleunigt und verstärkt werden. Damit sind eine Reihe potenzieller Folgeprozesse gekoppelt, z. B.:

- Freisetzung von Schwermetallen oder Metalloiden wie Arsen, die häufig an Eisen(III)(hydr-)oxide gebunden oder in diese mit eingebaut sind, besteht durch eine reduktive Lösung dieser Mineralphasen,
- potenziell bevorzugter Abbau von Kohlenwasserstoffen (CKW) (in Abhängigkeit von der Temperatur),
- potenziell erhöhte Abbauraten von NO_3^- (s. Abb. 3.5),

- potenziell erhöhte Abbauraten von SO_4^{2-} mit gelöstem HS^- oder S^{2-} -Festphasenbildung.

Ortsspezifisch können also sowohl positive (z. B. gesteigerter Schadstoffabbau) oder negative (z. B. Freisetzung von Schwermetallen) Auswirkungen aus einer erhöhten C_{org} -Verfügbarkeit bei höheren Temperaturen resultieren. Die Laborexperimente (Bonte et al., 2013c; Jesušek et al., 2013a) deuten jedoch auch darauf hin, dass das zeitliche Einsetzen einer NO_3^- -Reduktion bzw. einer SO_4^{2-} -Reduktion nicht nur von der Temperatur, sondern auch stark von offenbar z. T. unbekannten experimentellen Randbedingungen abhängig ist (vgl. Abb. 3.5), was eine Prognose für ATES-Feldversuche weiter erschwert.

Abbildung 3.5: Gegenüberstellung von Nitratreduktionsraten erster Ordnung aus Säulenversuchen mit unterschiedlichen natürlichen Sedimenten und teilweise angereicherter „Grundwässer“



Quellen: Jesušek et al., 2013a; Willms, 2017; Kuhr, 2018.

Die meisten bisherigen experimentellen hydrogeochemischen ATES-Untersuchungen wurden bisher mit Wasser aus anaeroben Grundwasserleitern durchgeführt, da diese aktuell als primärer Zielhorizont für ATES-Anlagen betrachtet werden (Bonte et al., 2013; Lüders et al., 2016; Lüders et al., 2020) und zumindest in Norddeutschland volumenmäßig auch eher den Regelfall darstellen. Deswegen liegen nur wenige experimentelle Daten zum Temperatureinfluss auf Konzentrationen gelösten Sauerstoffs und damit gekoppelte Prozesse (z. B. Mineralisierung organischer Substanz) vor. Aufgrund einer abnehmenden O_2 -Löslichkeit, zunehmender DOC-Freisetzung und Metabolisierung sowie des beschleunigten mikrobiellen Umsatzes bis ca. 40 °C ist zumindest initial von einer gesteigerten Sauerstoffzehrung mit zunehmender Temperatur auszugehen, die zu einem Übergang von aeroben zu anaeroben Bedingungen führen kann (Brons et al., 1991; Griebler et al., 2016). Ob bzw. unter welchen Umständen diese O_2 -Zehrung im langfristigen ATES-Zyklus anhält, ist aufgrund fehlender Daten bisher ungeklärt.

In Laborexperimenten mit relativ $C_{org.}$ -armen typischen Grundwasserleiter-Sedimenten von (Jesušek et al., 2013b) erfolgte der Nachweis von **Methan** erst nach Zugabe von Acetat als zusätzlichem Substrat und auch nur bei 25 °C, nicht jedoch bei den weiteren untersuchten Temperaturen (10 °C, 40 °C und 70 °C). Bei Bonte et al. (2013c) war die Methanbildung auf einen Temperaturbereich von 25 °C bis 40 °C beschränkt, erfolgte allerdings auch ohne die Zugabe eines zusätzlichen Substrats. In Kreislaufversuchen von Kempermann (2015) und Lüders et al. (2020) wurde Methan bei 25 °C in einem von vier und bei 70 °C bei zwei von vier Sedimenten gebildet. Sofern keine externe leicht mineralisierbare Substanz zugesetzt wurde, trat Methan nur in vergleichsweise niedrigen Konzentrationen von maximal 50 µg/L auf. Auch diese Befunde unterstreichen, dass die Übertragbarkeit der Laborversuche aufgrund ihrer intrinsischen Inkonsistenzen (unterschiedlicher experimenteller Ansatz, unterschiedliche Sedimente und Wässer etc.) auf Feldversuche aktuell noch problematisch ist. Erst recht stellt sich die Frage, ob die Laborversuche aktuell geeignet sind, weitreichende Empfehlungen zum Einsatz von ATES-Anlagen, die möglicherweise bei der „Wärmewende“ eine sehr wichtige Funktion bekommen können, zu geben.

Zwischenfazit 3.2.2.3

Thermisch induzierte Freisetzung gelöster organischer Substanz und Veränderung der Redoxprozesse

Den Laborexperimenten zufolge führt eine Temperaturerhöhung in den meisten untersuchten, $C_{org.}$ -armen und quarzreichen Sedimenten initial zu einer Verstärkung der DOC-Freisetzung, die unmittelbar nach dem Temperaturanstieg am stärksten ist und mit zunehmender Dauer und zunehmender Elution zurückgeht. Die Dynamik dieses Prozesses ist stark vom Sediment abhängig, lässt sich in Laborversuchen jedoch nicht mit dem $C_{org.}$ -Gesamtgehalt korrelieren. Durch die (initiale) DOC-Freisetzung beeinflusst, kommt es zumindest initial in den Laborexperimenten nach einer Temperaturerhöhung auch zu einer Verringerung des Redoxpotentials, wodurch Reduktionsprozesse wie z. B. Sauerstoffzehrung, Nitrat-, Sulfat-, Eisenreduktion oder Methanogenese in Abhängigkeit der Standortbedingungen, wieder zumindest initial begünstigt werden können.

Ob und inwieweit die daraus auch für Feldversuche abgeleitete Verringerung des Redoxzustands langfristig Bestand hat, ist derzeit aufgrund fehlender Felddaten zum langfristigen (HT-)Betrieb ungeklärt. Vor diesem Hintergrund ist es auch müßig, über langfristige Folgen einer (reduktiven) Redoxveränderung zu spekulieren. Dies gilt erst recht, da auch die Raumwirkung einer entsprechenden Redoxveränderung nicht bekannt ist bzw. aufgrund fehlender Feldversuche nicht bekannt sein.

Eine erste Abschätzung der Redoxraumwirkung bei zyklischen HT-ATES-Anlagen ist möglich, wenn man annimmt, dass die DOC-Freisetzung sedimentspezifisch eng mit dem Ausmaß der Temperaturerhöhung zusammenhängt, worauf die Laborversuche i. d. R. hindeuten. Selbst unter der weiteren – bisher nicht belegten – Annahme, dass sich langfristig reduzierende Verhältnisse einstellen, sollte die Raumwirkung eher auf den sogenannten thermischen Nutzungsbereich beschränkt sein, d. h. sie wird in der Regel klein sein.

3.1.5 Temperaturabhängige Veränderungen der gelösten Spurenstoffe in Laborversuchen

Für die Betrachtung temperaturabhängiger Konzentrationsänderungen von gelösten Spurenelementen und Schwermetallen wurden Ergebnisse aus Laborversuchen sowie bisher unveröffentlichte Ergebnisse des Feldversuchsprojekts *TestUM* berücksichtigt (vgl. Abb. 3.6 und 3.7). Die bisherigen Laborversuche von Bonte et al. (2013b) und Lüders et al. (2020) zeigen zum einen,

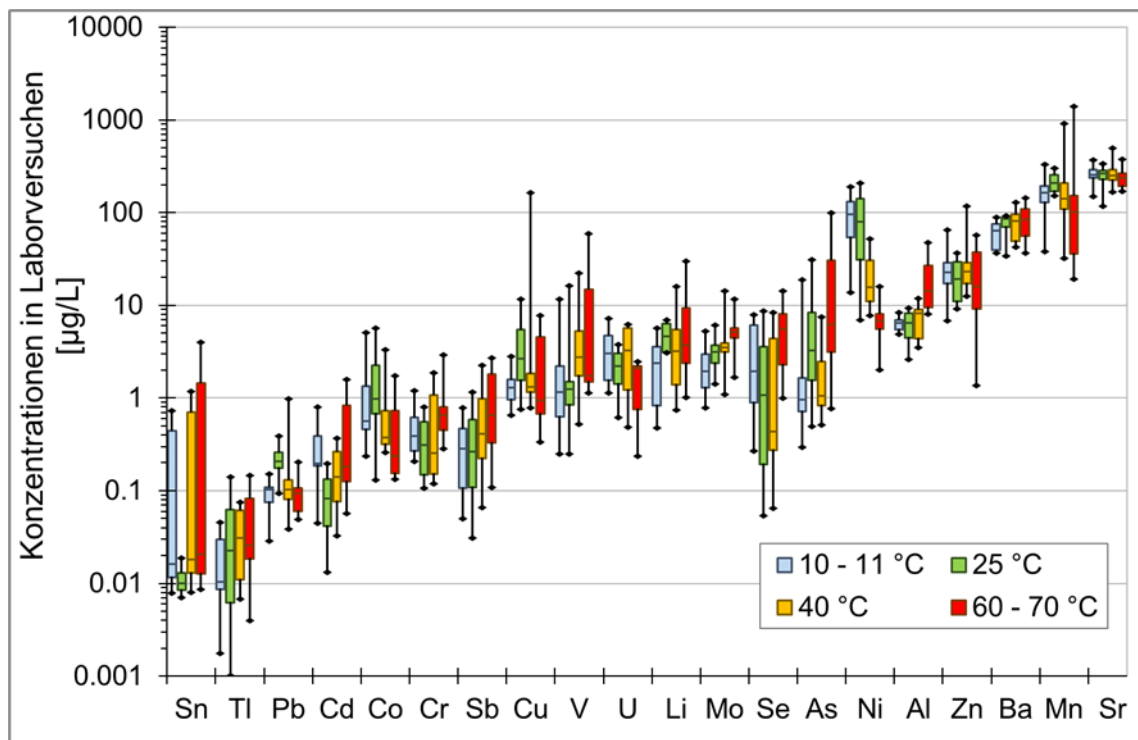
dass die Schwankungsbreite der temperaturinduzierten Änderungen bei den Spurenkomponenten tendenziell größer ist als bei den Hauptkomponenten, und verdeutlichen die sehr ausgeprägte Standortvariabilität und die Notwendigkeit standortspezifischer Voruntersuchungen, zum anderen zeigen sie, dass sich die verschiedenen Spurenkomponenten hinsichtlich ihrer Mobilisierungs- und Demobilisierungsverhalten deutlich unterscheiden.

Während die gelösten Konzentrationen einiger Spurenkomponenten wie z. B. As, V und Sb tendenziell ansteigen, kommt es bei anderen wie Ni, U und Co eher zu einer Konzentrationsabnahme in der wässrigen Phase. Am häufigsten und mit den größten relativen Änderungen wurden bisher in den Laboruntersuchungen Konzentrationsanstiege bei Arsen festgestellt. Normiert auf Referenzkonzentrationen bei 10 °C verdoppeln bis verzwanzigfachen sich die durch Temperaturanstiege auf 60 °C bzw. 70 °C verursachten gelösten As-Konzentrationen (Abb. 3.7). Die absoluten gelösten As-Konzentrationen der untersuchten Sedimente bei 60 °C bzw. 70 °C liegen zwischen 0,8 µg/L und 100 µg/L (Median: 6 µg/L) (vgl. als Referenz: Trinkwasser-Grenzwert für As: 10 µg/L). Bei allen anderen gelösten Komponenten wurden in den Laborversuchen im Mittel bisher geringere relative Änderungen ermittelt (vgl. Abb. 3.6).

Zur Priorisierung der untersuchten Komponenten hinsichtlich ihrer Relevanz bei der Erkundung potenzieller ATEs-Standorte auf Grundlage der bisher vorliegenden fünf Studien unterteilen Lüders et al. (2020) diese in folgende fünf Gruppen:

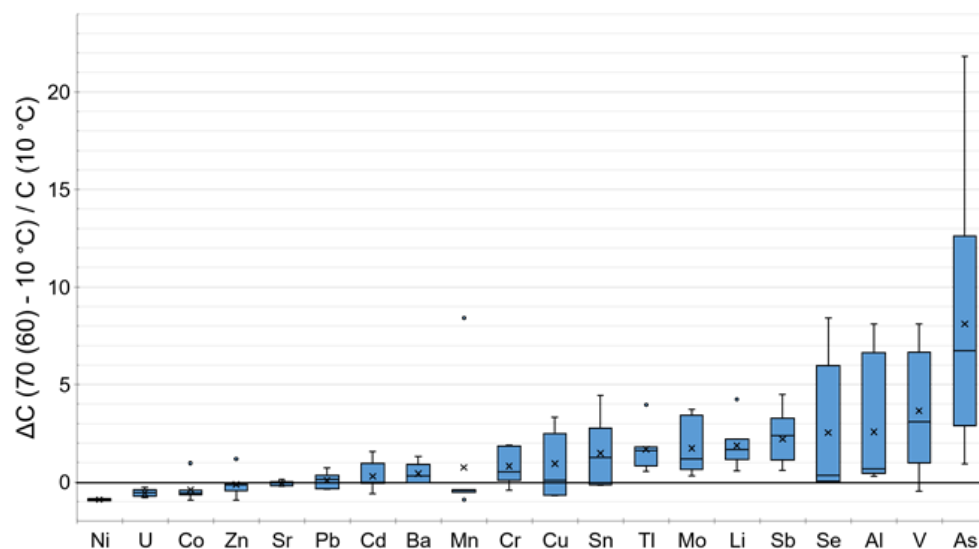
- ▶ Gruppe 1: Deutlicher Konzentrationsanstieg in den meisten Sedimenten: As
- ▶ Gruppe 2: Konzentrationsanstiege in einigen Sedimenten: V, Mn, Mo
- ▶ Gruppe 3: Teilweise Konzentrationsanstiege in einem begrenzten Ausmaß:
B, F, Cr, Co, Sb, Ba, Tl, U
- ▶ Gruppe 4: Abnehmende Konzentrationen oder unbeeinflusst: Al, Ni, Cu, Zn, Se, Cd, Hg, Pb
- ▶ Gruppe 5: Elemente, für die keine Grundwassergrenzwerte vorliegen:
Li, Be, P, Sc, Ga, Sr, Sn, La, Eu, Ho, Yb, Th

Abbildung 3.6: Zusammenstellung über sich in Abhängigkeit der Temperatur in unterschiedlichen Laborversuchen eingestellten Spurenelementkonzentrationen, sortiert nach der Mediankonzentration bei den 60 – 70 °C-Laborversuchen



Datengrundlage: Untersuchungen von Bonte et al. (2013b, drei Sedimente, Säulenversuche), Lüders et al. (2020, 4 Sedimente, Kreislaufversuche) und Lüders et al. (2021, 3 Sedimente, Batchversuche).

Abbildung 3.7: Auf die Ausgangskonzentration bei 10 °C normierte Konzentrationsänderungen von Spurenelementen bei einem Temperaturanstieg von 10 °C auf 60 °C bzw. auf 70 °C



Datengrundlage: Temperaturanstieg von 10 °C auf 60 °C: Bonte et al. (2013b; drei Sedimente, Säulenversuche); Temperaturanstieg auf 70 °C: Lüders et al. (2020; 4 Sedimente, Kreislaufversuche); Lüders et al. (2021; 3 Sedimente, Batchversuche).

Zwischenfazit 3.2.3**Temperaturabhängige gelöste Spurenkomponentenkonzentrationen in Laborversuchen**

Für die Bewertung von Temperaturänderungen im geologischen Untergrund spielt die temperaturabhängige Mobilisierung bzw. Demobilisierung von Spurenkomponenten und Schwermetallen in die wässrige Phase eine bedeutende Rolle. Innerhalb der wenigen bisher erfolgten Laboruntersuchungen führten Temperaturanstiege bei einigen Elementen regelmäßig zu Konzentrationsanstiegen (As, V, Mo, Mn) und bei anderen Elementen häufig zu Konzentrationsabnahmen (Ni, U, Co). Bei der Komponente Arsen treten Konzentrationsanstiege in der wässrigen Phase am häufigsten und deutlichsten auf. Insgesamt deuten die (wenigen) Laboruntersuchungen darauf hin, dass die kleinräumige, ortsspezifische Variabilität der temperaturabhängigen Mobilisierungs- und Demobilisierungsprozesse ausgeprägter ist als bei den Hauptkomponenten. Entsprechend sind die relativen temperaturabhängigen Konzentrationsveränderungen bei vielen Spurenkomponenten und Schwermetallkomponenten wesentlich höher als bei den Hauptkomponenten. Diese Beobachtung deutet darauf hin, dass die Anreicherung der leicht mobilisierbaren Spurenkomponenten in der Festphase mit postsedimentären Prozessen (u. a. Anreicherung von Fe(III)- und Mn(IV)-Oxidhydraten im Schwankungsbereich des Grundwasserspiegels) in Verbindung steht, was z. B. bei der Bewertung einzelner experimentell ermittelter mobilisierbarer Maximalkonzentration zu berücksichtigen ist.

Vor diesem Hintergrund fehlt noch ein Konzept, ob bei einer experimentellen Ermittlung der temperaturinduzierten Mobilisierung von Spurenkomponenten in die wässrige Phase maximale Konzentrationen und/oder für den Sedimenttyp „repräsentative“ mobilisierbare Konzentrationen einer Spurenkomponente zu ermitteln sind.

3.1.5.1 Mobilisierung und Demobilisierung von Spurenkomponenten in Laborversuchen

Bezüglich der die Mobilisierung bzw. die Demobilisierung von Spurenkomponenten kontrollierenden Prozesse haben sich bereits frühere Arbeiten v. a. mit den Temperatúrauswirkungen auf das Verhalten monomineralischer Systeme und die Parametrisierung von Oberflächenkomplexierungsmodellen fokussiert (z. B. Kersten und Vlasova (2009)). Bei ATES-Anwendungen handelt es sich jedoch um zeitlich und räumlich hochtransiente Transportprozesse in wesentlich komplexeren Multikomponentensystemen mit unterschiedlichen involvierten Mineralphasen, deren Oberflächencharakterisierung weitgehend unbekannt ist. Da daher eine auf messbaren und abschätzbaren Größen gestützte Modellprognose mit den heutigen Mitteln nicht zielführend sein kann, zielten die wenigen existierenden neueren Studien v. a. auf eine experimentelle Erhebung einer empirischen Bewertungsgrundlage mittels methodisch unterschiedlich angelegter Laborversuche im Bereich 10 – 70 °C (Bonte et al., 2013a; Lüders et al., 2020; Lüders et al., 2021) und auf Auswirkungsanalysen geothermischer Feldanwendungen bis 40 °C (García-Gil et al., 2016; Saito et al., 2016). Zusammenfassend lassen diese Untersuchungen, die sich in der Hauptsache auf quarzarme und C_{org} -arme Sande beziehen, auf folgende Prozesse mit steigender Temperatur schließen, wobei die wesentlichen Schlussfolgerungen aus Laborversuchen abgeleitet sind:

- Präferenzielle Desorption von Oxoanionen (z. B. Arsenat, Arsenit, Vandanat, Selenat, Senelit, Molybdat, Antimonat) durch die Verringerung sorptiver Kräfte infolge einer Verringerung des isoelektrischen Punkts und negativer Enthalpien für Oberflächenkomplexierungsreaktionen (Kersten und Vlasova, 2009; Bonte et al., 2014).

- ▶ Entsprechende Gründe führen ebenso zu einer präferenziellen Sorption von Kationen wie z. B. Ni^{2+} und Co^{2+} .
- ▶ Präferenzielle Sorption zweiwertiger Ionen (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+}) gegenüber der Sorption einwertiger Ionen (K^+ , Na^+) aufgrund geringerer Sorptionsenthalpien einwertiger Kationen im Vergleich zu Kationen mit Mehrfachladungen.
- ▶ Freisetzung von Spurenkomponenten, die an Fe- und Mn-(Hydr-)Oxide sorbiert oder in deren Mineralgitter eingebaut sind, durch reduktive Auflösung dieser Mineralphasen als mögliche Folge temperaturinduzierter verstärkter DOC-Freisetzung und Verringerung des Redoxpotentials.
- ▶ Auflösung spezifischer Mineralphasen, was bisher allerdings ausschließlich als mögliche Begründung für anhaltend erhöhte Bariumkonzentrationen diskutiert wurde (Lüders et al., 2020).

Da bei den meisten Spurenelementen der Großteil der Freisetzung vergleichsweise schnell innerhalb der initialen Betriebsphase erfolgt, gehen Lüders et al. (2020) von einem begrenzten, durch Temperaturerhöhungen eluierbaren Pool aus, dessen Größe für die meisten Komponenten mit steigender Temperatur zunimmt.

Bonte et al. (2013b) und Lüders et al. (2020) stimmen darin überein, dass keine Korrelation zwischen dem temperaturinduzierten Freisetzungsverhalten von Spurenelementen und quantifizierbarer Sedimentcharakteristika wie dem Gehalt an Gesamteisen oder an amorphen Eisenphasen besteht. Auf Grundlage des aktuellen Kenntnisstands ist also davon auszugehen, dass sich eine Prognose über die an einem möglichen UTES-Standort zu erwartenden Änderungen der Spurenelementkonzentrationen nicht anhand einer kurzfristig durchzuführenden etablierten Festphasencharakterisierung treffen lässt, sondern experimentell mit temperaturvariablen Versuchen charakterisiert werden muss.

3.1.5.2 Temperaturabhängige Reversibilität der Spurenkomponentenkonzentrationen

Die Reversibilität der Konzentrationsänderungen von Spurenelementen im Zuge von Temperaturwechseln spielt für ihr Verhalten in folgenden Bereichen und Betriebsphasen eine wesentliche Rolle:

- ▶ im Abstrom des „warmen“ Bereichs, wenn z. B. durch eine Temperaturerhöhung freigesetzte Spurenelemente advektiv in den mit Umgebungstemperaturen vorliegenden Abstrom transportiert und dort infolge einer Abkühlung wieder festgelegt werden (v. a. ATES-Systeme),
- ▶ innerhalb möglicher Konvektionszellen im Nutzungsraum des „warmen“ Brunnens von HT-ATES-Anlagen,
- ▶ im „kalten“ Bereich von ATES-Systemen, wenn abgekühltes Wasser mit veränderten Konzentrationen wieder injiziert wird,
- ▶ im Bereich von BTES-Feldern beim Wechsel von Betriebsphasen (Einspeicherung/Ausspeicherung),

- ▶ nach Ende der Betriebsphase, wenn sich die ursprünglichen Bedingungen wiedereinstellen (ATES- und BTES-Systeme).

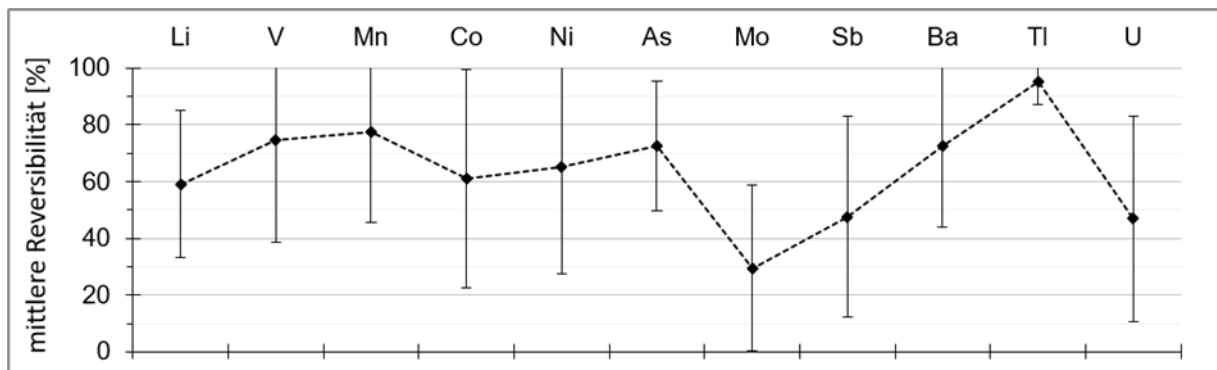
Obwohl sowohl Saito et al. (2016) als auch van Breukelen und Bonte (2016) auf den Bedarf an entsprechenden experimentellen Reversibilitätsuntersuchungen hinwiesen, liegt bisher lediglich eine einzige solche Laborarbeit mit natürlichen Sedimenten für einen pleistozänen und einen miozänen Sand vor, die sich auf die initiale Erwärmung und die darauf folgende erste Abkühlung beschränkt (Lüders et al., 2020; vgl. Abb. 3.12). Zu den Auswirkungen eines zyklischen Langzeitbetriebs sowie zum Verhalten bindiger Sedimente gibt es bisher keine experimentellen Untersuchungen, wobei Heiz-Kühl-Zyklen zumindest innerhalb einer Modellsimulation (unter vereinfachenden Annahmen) für ein ATES-System abgebildet wurden (Bonte et al., 2014).

Die experimentellen Reversibilitätsuntersuchungen von Lüders et al. (2020) erfolgten mit einem pleistozänen und einem miozänen Sand für Erwärmungen auf 25 °C, 40 °C und 70 °C zum einen für ein Szenario eines advektiven Transports in einen zuvor nicht erwärmten Abstrom, zum anderen für die Abkühlung eines zuvor erwärmten Bereichs (Abb. 3.8). Es zeigte sich dabei, dass der Einfluss der Temperatur, des Sediments sowie des Umstands, ob ein Sediment zuvor bereits erwärmt wurde oder nicht, sich im Vergleich zu den Unterschieden zwischen den betrachteten Spurenelementen nur geringfügig auf die Reversibilitäten bei den beiden untersuchten Sedimenten auswirkte. Die über die Versuchsvarianten gemittelten Reversibilitäten lagen zwischen 30 % für Molybdän und 95 % für Thallium (Arsen: 73 % $\pm$ 23 %). Als mögliche Ursachen für die unvollständigen Reversibilitäten erscheinen folgende Erklärungen als naheliegend:

- ▶ partielle Lösung von Mangan- und Eisen(hydr-)oxiden bei erhöhten Temperaturen,
- ▶ thermisch verstärkte Alterung von Eisen(hydr-)oxiden mit verbundener Abnahme der Sorptionskapazität (Ford et al., 1997),
- ▶ stärkere Verhinderung der Einstellung eines Sorptionsgleichgewichts bei niedrigen Temperaturen durch langsamere Sorptionskinetik (würde bei einer Feldanwendung mit längeren Kontaktzeiten zu höheren Reversibilitäten führen).

Aus den von Lüders et al. (2020) quantifizierten Reversibilitäten (vgl. Abb. 3.8) wird deutlich, dass sich Auswirkungsprognosen, die wie z. B. bei Bonte et al. (2014) von einer vollständigen Reversibilität ausgehen, möglicherweise zu optimistische Ergebnisse liefern. Inwieweit die Reversibilität anderer Sedimente variieren kann, sollte Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein.

Abbildung 3.8: Mittlere Reversibilität der Konzentrationsänderungen von Spurenkomponenten bei einwöchiger Erwärmung auf 25 °C, 40 °C und 70 °C und anschließender Rückkühlung auf 10 °C in Laborversuchen mit einem pleistozänen und einem miozänen Sand für ein Szenario eines advektiven Transports in einen zuvor nicht erwärmten Abstrom sowie für die Abkühlung eines zuvor erwärmten Bereichs



Quelle: Lüders et al., 2020.

Zwischenfazit 3.2.3.1 und 3.2.3.2

Demobilisierungsreaktion gelöster Spurenstoffe in Laborversuchen

Die bisher in Laborversuchen ermittelten Reversibilitäten (Wiederfestlegung) von 30 % – 95 % für Änderungen in Spurenelementkonzentrationen erlauben eine erste und hydrodynamisch vereinfachte Abschätzung zum Emissionsverhalten von HT-ATES-Anlagen bzw. zu ihren hydrochemischen Auswirkungsräumen, führen bei Abkühlung im Abstrom eines erwärmten Bereichs oder nach Beendigung des Betriebs zu einer sukzessiven Wiederherstellung der ursprünglichen Spurenelementkonzentrationen und verdeutlichen die Möglichkeit der aktiven Kühlung als Gegenmaßnahme für den Fall von Konzentrationsänderungen in einem nicht vorgesehenen Ausmaß.

Allerdings stützen sich die bisher bekannten temperaturabhängigen Reversibilitäten auf eine einzelne Laborstudie, so dass hier weiterer Untersuchungsbedarf v. a. hinsichtlich der Übertragbarkeit auf andere Sedimente mit andern Mineral- und $C_{org.}$ -Zusammensetzungen (und damit anderen Sorptionseigenschaften) sowie auf hydrodynamisch komplexere Feldbedingungen einschließlich einem zyklischen HT-ATES-Betrieb besteht. Thermisch induzierte Konzentrationsänderungen von gelösten Hauptinhaltsstoffen und Spurenstoffen bei einem zyklischen HT-ATES-Feldversuch

3.1.6 Thermisch induzierte Konzentrationsänderungen von gelösten Hauptinhaltsstoffen und Spurenstoffen bei einem zyklischen HT-ATES-Feldversuch

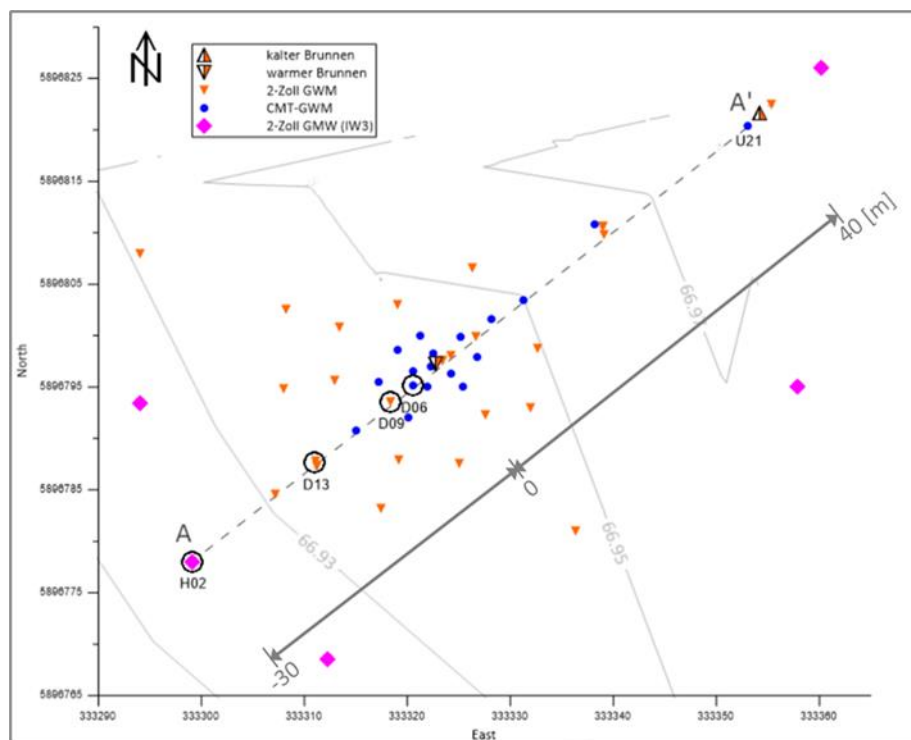
Nach Kenntnis der Autoren wurden erst bei *einem* HT-ATES-Feldversuch im Pilotmaßstab die hydrochemischen Auswirkungen eines zyklischen Betriebs untersucht, wobei die Ergebnisse eines Vorversuchs (Kurzzeitinjektion) bereits veröffentlicht worden sind (u. a. Lüders et al., 2021). Die Ergebnisse des Hauptfeldversuchs befinden sich erst in der Veröffentlichung. Dieser Versuch wurden von der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (Arbeitsgruppe (AG) Bauer und AG Dahmke) und dem UFZ (AG Dietrich, AG Richnow/Vogt) in den Jahren 2019 bis 2023 im Rahmen des BMBF-Vorhabens „TestUM-Aquifer“ bzw. „TestUM-II“ auf dem Testfeld *TestUM* nahe der Stadt Wittstock/Dosse durchgeführt (Abb. 3.9). Bei den Sedimenten des Testfelds handelt es sich um glazigene Wechselfolgen von Geschiebemergel bzw. Geschiebelehm und quarzreichen, $C_{org.}$ -armen Sandersedimenten, die in den obersten 10 – 15 m weitgehend entkalkt sind.

Der in mehreren Phasen durchgeführten HT-ATES-Feldversuch (Abb. 3.9, Abb. 3.10, Tab. 3.3) wurde allein im Hinblick auf Forschungsfragen betrieben und war auf die Untersuchung hydraulischer, thermischer, hydrochemischer und mikrobiologischer Prozesse ausgelegt. Mit ihm sollten weder eine besondere thermische Rückholeffizienz noch ein saisonaler Betrieb simuliert werden. Im Rahmen des Forschungsvorhabens waren für die letztgenannten Kriterien nicht die finanziellen Mittel für den Aufbau und Betrieb eines entsprechend großen, d. h. für einen saisonalen Betrieb geeigneten, Testfelds vorhanden. Dies ist gerade im Hinblick auf die Interpretation von Prozessen zu beachten, die möglicherweise kinetisch limitiert sind (z. B. Adaption des Aquiferbioms als Funktion der Temperatur und Zeit).

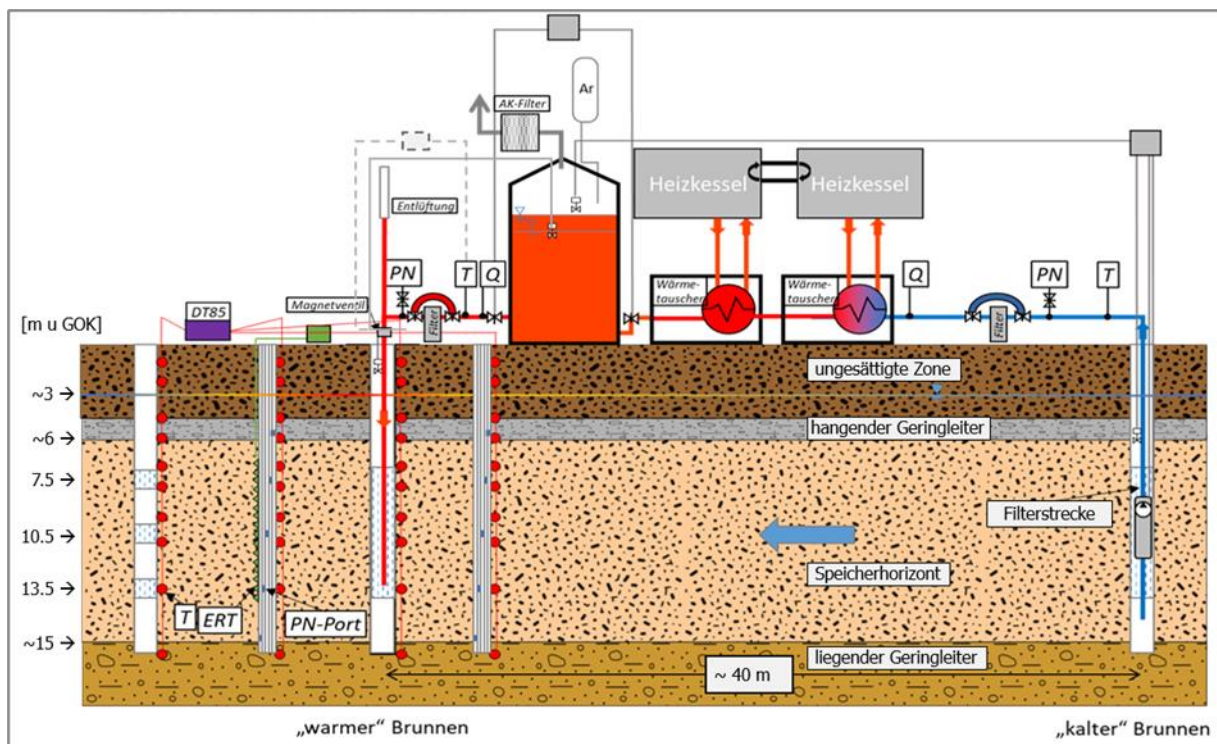
Eine genaue Beschreibung der hydraulischen und thermischen Randbedingungen der jeweiligen Versuchsphasen befindet sich Vorbereitung (Christian-Albrechts-Universität zu Kiel; Nordbeck et al. in prep., Köber et al., in prep.).

Neben dem dynamischen Wechsel zwischen infiltrierenden und exfiltrierenden Bedingungen am „warmen“ Brunnen steuert insbesondere die Ausbildung dichtegetriebener Konvektionszellen bis zu einem Abstand von ca. 10 m um den Brunnen während der Beladungsphase das geochemische Verhalten. Hierbei steigt das injizierte 70 °C warme Wasser in bzw. in der Nähe des Ringraums auf, wobei die höchsten Temperaturen in etwa in Höhe der Oberkante des Filterbereichs anzutreffen sind. In ca. 6 – 10 m Abstand wird das sich abkühlende Wasser wieder vertikal nach unten transportiert.

Abbildung 3.9: Aufsicht auf das Feldversuchs- und Monitorfeld des HT-ATES-Versuchs *TestUM*



Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Abbildung 3.10: Vereinfachter geologischer Aufbau und Ausstattung des HT-ATES-Versuchs auf dem Testfeld *TestUM*

Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Tabelle 3.3: Zyklen beim Betrieb des HT-ATES-Versuchs auf dem Testfeld *TestUM* (2021/2022)

Phase	Beladung	Speicherung	Rück-gewinnung	Ruhe-periode	Zyklen	Dauer
I	14 d	21 d	14 d	7 d	3	5,5 Mon.
IIa	14 d	–	14 d	–	3	3 Mon.
IIb	22 h	–	22 h	–	5	10 d

3.1.6.1 Gelöste Haupt und Spurenstoffkonzentrationen im zyklischen HT-ATES-Feldversuch

Der oben skizzierte HT-ATES-Feldversuch zeigt eindrucksvoll, dass das zeitlich und räumlich stark transiente 3D-hydrogeochemische Konzentrationsmuster der gelösten Haupt- und Spurenkomponenten stark durch die wechselnden hydraulischen und damit auch thermischen Bedingungen im brunnennahen Bereich bestimmt wird. Zu unterscheiden davon sind die relativ „konstanten“ hydraulischen und thermischen Bedingungen im weiteren Abstrom.

Innerhalb des hydraulisch bewirtschafteten Bereichs verhalten sich verschiedene temperatur-sensitive Haupt- und Spurenelemente wie z. B. Silizium, Kalium, Vanadium, Selen (s. Abb. 3.11 und 3.12) zwar prinzipiell vergleichbar mit den temperaturabhängigen Konzentrationsveränderungen zu den Laborstudien. Aufgrund der hydraulisch intensiven Bewirtschaftung und den daraus resultierenden sehr unterschiedlichen Strömungs- und Temperaturmustern kommt es auch bei den gelösten Konzentrationen der Haupt- und Spurenkomponenten zeitlich dynamisch und kleinräumig zu großen Unterschieden. Die zeitlichen Konzentrationsveränderungen lagen unter

den Betriebsbedingungen des skizzierten HT-ATES-Feldversuchsentsprechend den Temperaturveränderungen im Bereich weniger Tage, wie sie im Wechsel zwischen Be- und Entladung auftreten. Die Abbildungen 3.11 und 3.12 verdeutlichen allerdings auch, dass Zu- und Durchmischungsprozesse die jeweiligen gelösten Konzentrationen der Haupt- und Spurenkomponenten deutlich beeinflussen können.

Dies mag zum Teil an der Konzeption des dargestellten Feldversuchs liegen, in dem relativ große Mengen des thermisch veränderten Grundwassers im geologischen Untergrund verbleiben und andererseits „frisches“, d. h. thermisch unverändertes, Grundwasser gefördert wird. Leider gibt es nach Kenntnis der Autoren weltweit keine experimentellen Felddaten, die den Einfluss solcher hydrochemischer Zu- und Durchmischungsprozesse in Abhängigkeit zur Konzeption einer (HT-)Anlage, ihren hydrogeologischen Randbedingungen und ihrer Betriebsführung belastbar beschreiben würden. Möglicherweise werden diese hydrochemischen und z. T. auch thermischen Zumischungs- und Durchmischungsprozesse mit zunehmender Zyklenzahl zu einem etwas homogenen Bild der Konzentrationsverteilungen führen, aber ebendies ist aufgrund der zeitlichen und finanziellen Beschränkungen „normaler“ Forschungsvorhaben bisher nicht gezeigt worden. Hinzu kommt, dass das Verhalten von thermisch eluierbaren Pools der Haupt- und Spurenkomponenten weder in ihrer Größe, noch in ihrem Freisetzungsverhalten in einem zyklischen Feld-betrieb aktuell prognostiziert werden können. Auch hier sind eher abnehmende Veränderungen der gelösten Haupt- und Spurenstoffkonzentrationen zu erwarten, worauf erste Ergebnisse (nicht gezeigt) des oben skizzierten Feldversuchs deuten.

Im weiteren Abstrom des hydraulisch/thermisch bewirtschafteten und durch konvektiv dichtegetriebenen Strömung beeinflussten Bereichs (z. B. Abb. 3.12: 15 m (D13)) verlaufen die thermischen und hydrogeochemischen Auswirkungen deutlich gedämpfter, wobei nicht mehr zwischen den einzelnen Be- und Entladungsphasen zu unterscheiden ist und die maximalen Temperaturen in dem Feldversuch zwischen 18 °C und 23 °C variierten.

Im weiteren Abstrom in einem Abstand von 30 m vom „warmen“ Brunnen wurden über den gesamten Monitoringzeitraum von über 550 Tagen mit 11 unterschiedlich langen thermischen Einspeisezyklen keine thermischen und hydrogeochemischen Veränderungen im Hinblick auf die Baseline-Messungen nachgewiesen. Die Frage bleibt allerdings aufgrund der beschränkten Feldversuchslaufzeit weiterhin, ob eine langsame Ausbreitungsfront der thermisch mobilisierten Haupt- und Spurenkomponenten fortschreitet bzw. wie groß diese komponentenspezifische Retardationskoeffizienten unter Feldbedingungen sind. Hierzu sind weitere Felduntersuchungen notwendig.

3.1.6.2 Redoxverhältnisse im zyklischen HT-ATES-Feldversuch

Im Gegensatz zu einer Reihe von Laborversuchen (Brons et al., 1991; Bonte et al., 2013c; Jesušek et al., 2013a; Lüders et al., 2020) stellten sich im zyklischen HT-ATES-Feldversuch keine signifikant anaeroben Verhältnisse ein. Ebenso wurden nur geringfügig ansteigende NPOC-Konzentrationen (um 1 mg/L) während der zyklischen Temperaturerhöhungen festgestellt. Im Feldversuch blieben die EH-Werte im Mittel sowie Nitrat- (s. Abb. 3.13) und Sulfatkonzentrationen während der Betriebsphase weitgehend unverändert oder stiegen vereinzelt an. Die Sauerstoffkonzentrationen blieben im direkten Nahbereich des „warmen“ Brunnens weitgehend konstant und nahmen lediglich im direkten Abstrom um 2 – 3 mg/L ab. Die von anderen Autoren (Brons et al., 1991; Bonte et al., 2013; Jesušek et al., 2013a; Lüders et al., 2020) aus Laborversuchen abgeleitete Veränderung des Redoxpotentials in Richtung zu anaeroben bzw. reduzierenden Verhältnissen konnte zumindest in diesem Feldversuch also nicht bestätigt werden.

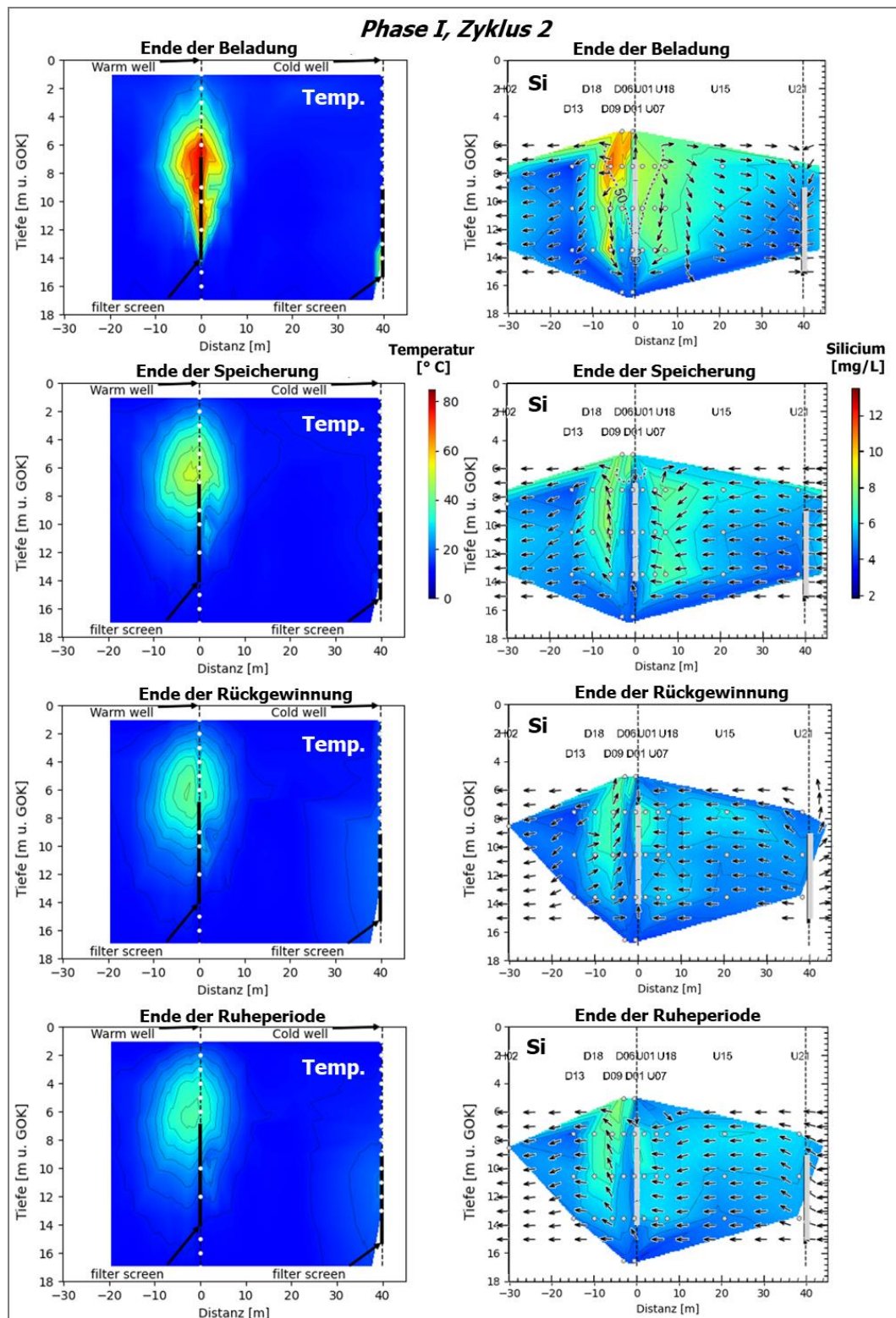
Über die Gründe, warum sich die Ergebnisse zur Veränderung der Redox-Verhältnisse zwischen den Laborversuchen und dem Feldversuch unterscheiden, kann hier nur spekuliert werden. Eine Erklärung für die in Laborversuchen i. d. R. wesentlich ausgeprägtere Mobilisierung organischen Kohlenstoffs könnte eine bessere Zugänglichkeit infolge der Sedimenthomogenisierung sein. Aber auch besondere Standortgegebenheiten, z. B. geringe Mengen thermisch gut mobilisierbarer $C_{org.}$ -Mengen, beim Feldversuch sind nicht auszuschließen. Auch bei dieser Fragestellung fehlt derzeit eine belastbare empirische Datenbasis, die es erlauben würde, allgemeingültige Aussagen zu den langfristigen Auswirkungen von HT-ATES oder gar Empfehlungen bzgl. eines in dieser Hinsicht optimierten HT-ATES-Betriebs zu geben.

3.1.6.3 Mineralfällungsprozesse am Wärmetauscher

Probenahmen direkt an den Brunnenköpfen des jeweiligen Extraktions- bzw. Infiltrationsbrunnens („warmer“ bzw. „kalter“ Brunnen) im zyklischen Pumpbetrieb zeigten mit maximalen Konzentrationsabnahmen von Calcium und Silizium zwischen jeweiliger Extraktion und Infiltration von < 2 % – und damit im Rahmen der Messungenauigkeit – keine Hinweise auf temperaturinduzierte Ausfällungen von Karbonaten und Silikaten bzw. amorphen Siliziumphasen in den oberirdischen Installationen. Allerdings zeigten bräunliche Verfärbungen in den installierten obertägigen Edelstahlfiltern Hydroxid-Ausfällungen an, welche aufgrund meistens unterhalb der Bestimmungsgrenze verbleibender Eisen- und Mangan-Konzentrationen jedoch nicht analytisch untermauert werden konnten.

Zu berücksichtigen ist bei diesen Feldergebnissen jedoch, dass das Grundwasser am Standort vergleichsweise gering mineralisiert ist, relativ geringe gelöste Fe- und Mn-Konzentrationen aufweist und oberflächennah Calcit-untersättigt ist. Damit ist der Standort zwar repräsentativ für oberflächennahe pleistozäne, glazigene (norddeutsche) Grundwasserleiter. Für $C_{org.}$ - und karbonatreiche Grundwasserleiter können sich abweichende Befunde ergeben, die im Hinblick auf einen potenziellen Hochlauf dieser Technologie auch dringend benötigt werden.

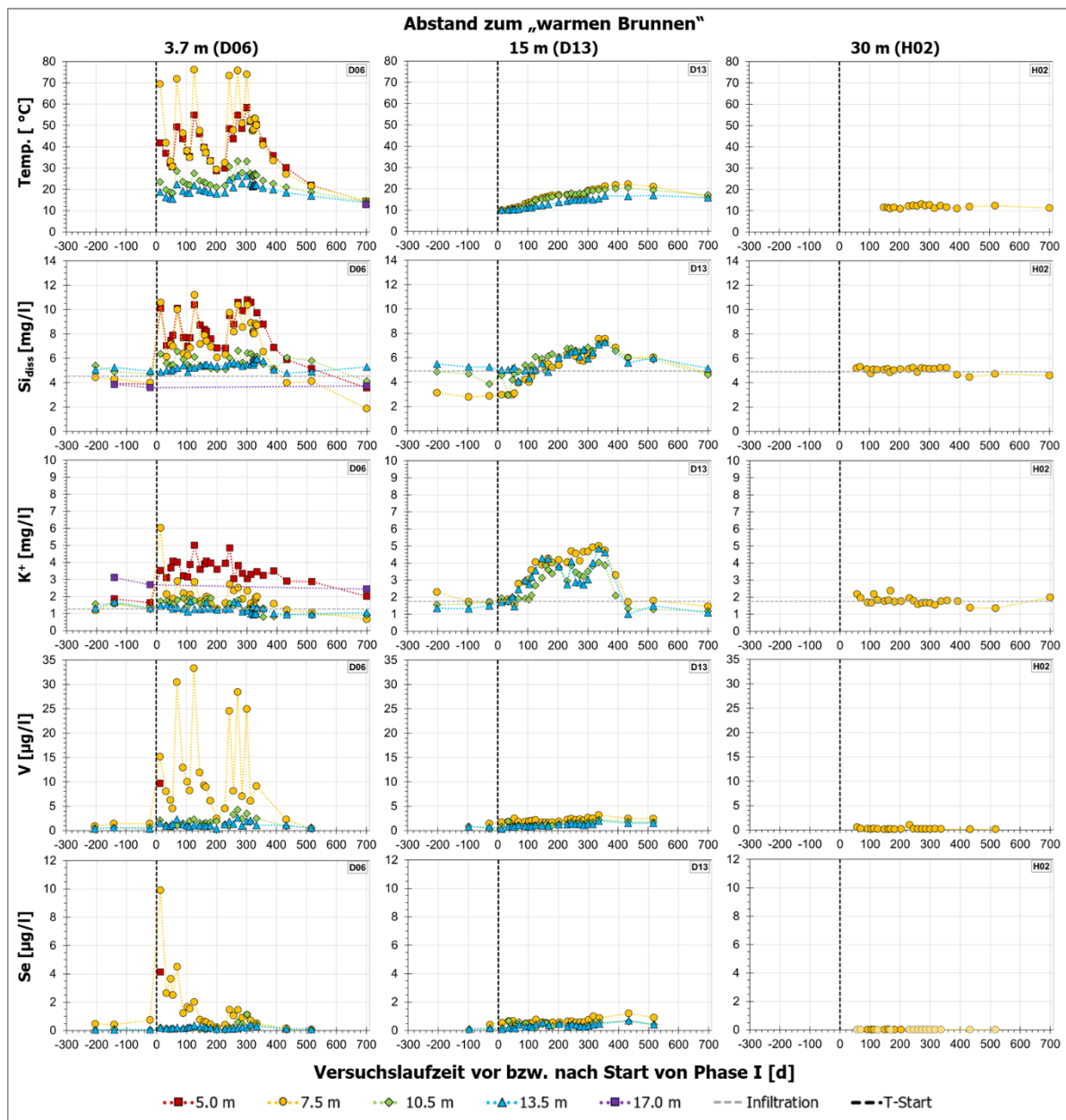
Abbildung 3.11: Temperaturverteilung und Si-Konzentrationen mit Strömungsfeldern während der verschiedenen Stadien der thermischen Beladung und Entladung innerhalb des 1. Zyklus in einem vertikalen Querschnitt vom „warmen“ bis zum „kalten“ Brunnen des HT-ATES-Versuchs



Dargestellt ist ein 2D-Querschnitt aus einer 3D linearen Interpolation der Messdaten.

Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

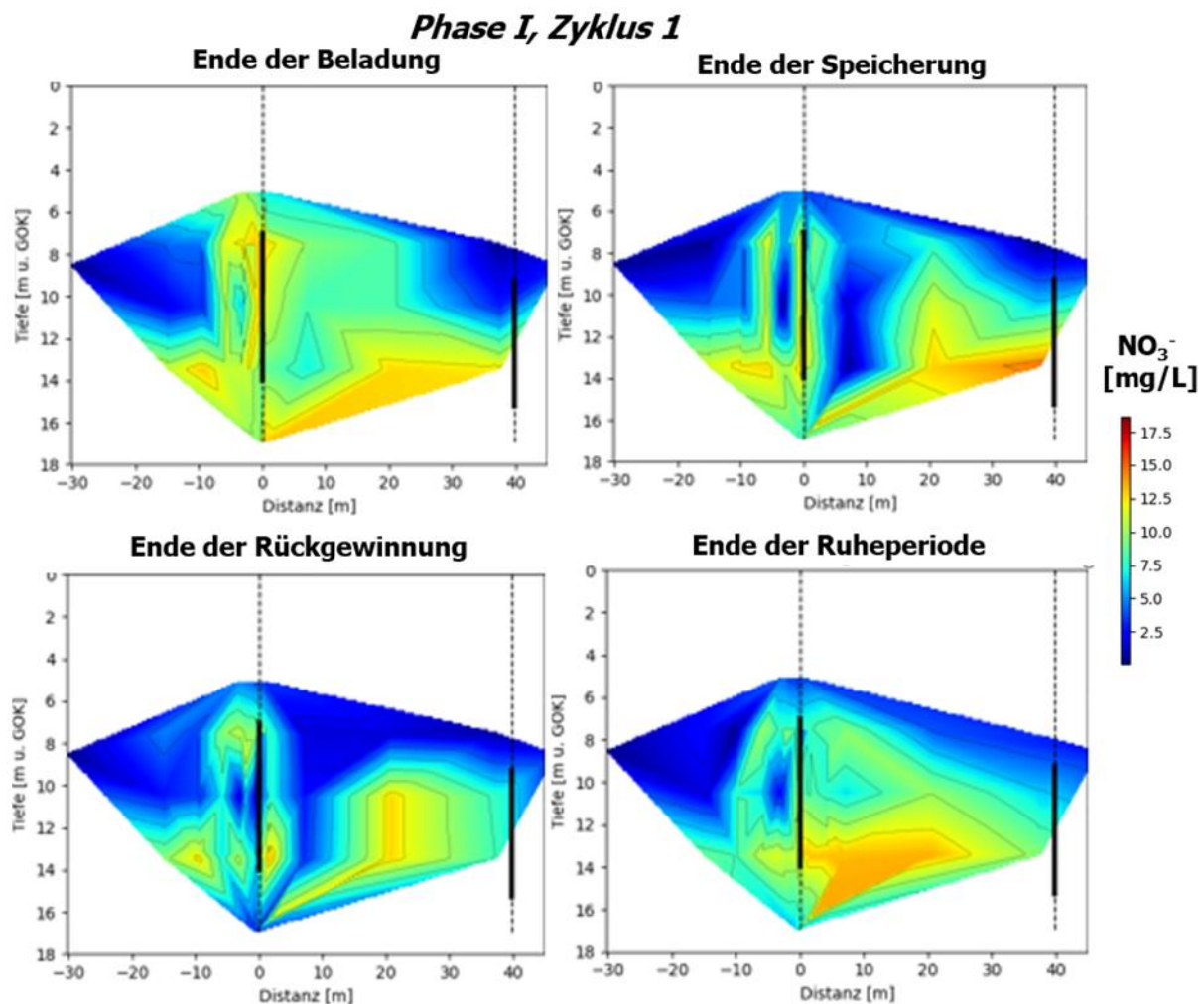
Abbildung 3.12: Zeitreihen der abstromigen Messstellen auf der zentralen Transekte in Fließrichtung für die Temperatur und die gelösten Silizium-, Kalium-, Vanadium- und Selenkonzentrationen



Alle Messstellen liegen nach numerischen Tracer-Modellierungen im zeitlichen Einflussbereich des HT-ATES-Versuchs. Fließrichtung: vgl. Lageplan (Abb. 3.9).

Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Abbildung 3.13: Verteilung der Nitrat-Konzentrationen während der verschiedenen Stadien der thermischen Beladung und Entladung innerhalb des 1. Zyklus in einem vertikalen Querschnitt vom „warmen“ bis zum „kalten“ Brunnen des HT-ATES-Versuchs



Dargestellt ist ein 2D-Querschnitt aus einer 3D linearen Interpolation der Messdaten.

Quelle: Eigene Darstellung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Resümee 3.2.4

Temperaturabhängige Konzentrationsänderungen von Haupt- und Spurenkomponenten im Feldversuch

Die räumlich-zeitliche Verteilung von Konzentrationsveränderungen der gelösten Hauptkomponenten bei HT-ATES-Anlagen ist stark variierend und wird sowohl durch die Strömungs- bzw. Transportprozesse als auch durch die temperaturabhängigen Gesteins-Wasser-Wechselwirkungen kontrolliert. Sowohl die hydraulischen Beladungs- und Entladungsprozesse, der dichtegetriebene vertikale Transport des injizierten Wassers als auch die Grundwassergrundströmung beeinflussen das Strömungsbild je nach Betriebsstatus der HT-ATES-Anlage. Auch erscheinen diese hydro-chemischen Grundwassereränderungen übergeordnet, d. h. über längere Zeiträume, nicht besonders bedeutend und werden i. d. R. durch die jeweiligen Strömungsprozesse überprägt.

Die zeitlich-räumlich hoch transiente Grundwassertransport-Prozess-Geometrie im Feldversuch im Nahbereich des „warmen“ Brunnens war im Nachhinein erwartbar, wurde vorher jedoch nie entsprechend anhand hydrochemischer Parameter beschrieben. Eine übergeordnete Fragestellung, die sich aus diesen Transportmustern ergibt, ist u. a., ob grenzwertbasierte Bewertungsansätze bei entsprechend transienten Konzentrationsmustern sinnvoll bzw. zielführend sind. Nach Ansicht der Autoren spricht vor dem Hintergrund der beobachteten Transportmuster eher viel für emissionsbasierte Bewertungskonzepte im weiteren Abstrom, um das Monitoring und die Bewertung handhabbar zu halten. Ebenso stellt sich die Frage, in welchem Maße die zuvor beschriebenen Laborversuche geeignet sind, als Basis für eine Prognose der langfristigen räumlich-zeitlichen hydrochemischen Entwicklung im Bereich eines HT-ATES zu dienen. Einzelne Prozesse wie die Karbonatfällung oder die SiO₂-Lösung sowie die Abschätzung von Maximalkonzentrationen im Bereich der höchsten Temperaturen erscheinen gut durch Laborversuche abgebildet zu werden, während z. B. vertikale Vermischungsprozesse und damit verbundene Fe(III)-Fällungs- oder Lösungsprozesse oder auch nur die Ausbildung von Redoxzonen im zyklischen Betrieb noch nicht vollständig verstanden sind.

Eine übergeordnete Schlussfolgerung ist daher, dass schlicht mehr hinreichend hydraulisch, thermisch, hydrochemisch und mikrobiologisch dokumentierte Feldversuche notwendig sind, um belastbare Empfehlungen zum umweltgerechten, aber auch wirtschaftlichen Betrieb dieser potentiell für die Transformation der Wärmeversorgung wichtigen Technologie geben zu können. Oder anders ausgedrückt: Die förderpolitisch selbst verursachte relativ geringe Kenntnis zu den hydrochemischen und mikrobiologischen Auswirkungen von HT-ATES-Anlagen dürfen kein Grund sein, diese Technologie nicht ergebnisoffen zu verfolgen.

3.1.7 Temperaturbedingte Auswirkungen auf mikrobielle Gemeinschaften (einschließlich pathogener Keime) in Aquifersedimenten

3.1.7.1 Temperaturbedingte Beeinflussung des Aquifermikrobioms durch ATES – Stand des Wissens

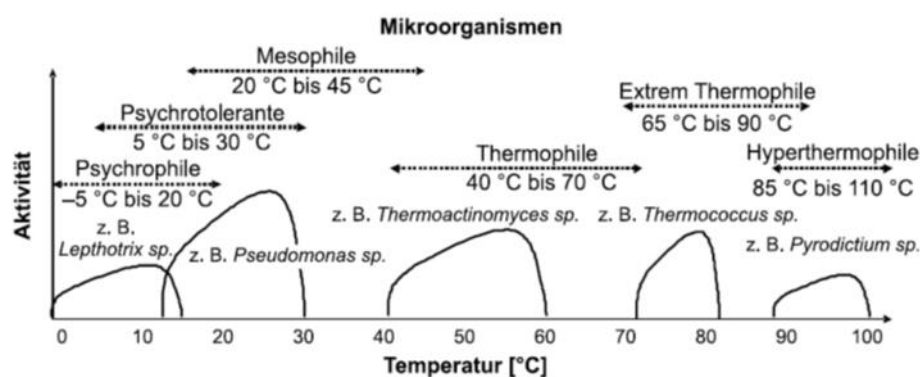
Wesentliche Diskussionspunkte bzgl. der Akzeptanz von (HT-)UTES-Anlagen, insbesondere von HT-Anlagen, sind Fragen zur temperaturabhängigen Veränderung des Aquiferbioms und der damit einhergehenden Veränderung seiner Ökosystemdienstleistungen sowie die Temperature Auswirkungen auf pathogene Keime in Grundwasserleitern.

Ein (sehr kurzer) Überblick zum Stand des Wissens bzgl. der Bedeutung des Bioms des geologischen Untergrunds lässt sich in aller Kürze wie folgt skizzieren:

- Der geologische Untergrund ist in der Tiefe bis zu einer Temperatur von etwa 120 °C, der Temperaturobergrenze des Lebens (Colman et al., 2017), von Mikroorganismen besiedelt (Gold, 1992; Goldschneider et al., 2006; Griebler und Lüders, 2009; Edwards et al., 2012; Counts et al., 2016; Colman et al., 2017; McMahon und Parnell, 2018); das Ökosystem des tieferen geologischen Untergrunds erhält sich – aufgrund des fehlenden Sonnenlichts – im Wesentlichen aus chemosynthetischen Reaktionen. Lebensgemeinschaften aus oberflächennahen Aquiferen betreiben heterotrophe oder lithoautotrophe Energiestoffwechsel und bestehen überwiegend aus Prokaryoten (Eubakterien und Archaeen) und in geringerer Anzahl aus Protisten, Pilzen sowie niederen und höheren Tieren (s. Abschn. 3.2.6 zur Zusammensetzung der Fauna) (Goldschneider et al., 2006; Griebler und Lüders, 2009).

- Der Lebensraum höherer, eukaryontischer Organismen ist im Wesentlichen auf aerobe Zonen in oberflächennahen Aquiferen beschränkt. Etwa 40 % aller auf der Erde vorkommenden Prokaryoten leben im terrestrischen Untergrund (Whitman et al., 1998; Edwards et al., 2012). Die Zusammensetzung (Biodiversität) dieses enorm großen genetischen Pools ist wenig untersucht – wie auch die Frage, ob und in welcher Form die autochthonen Mikroorganismen von Aquiferen an die konstanten physikochemischen Bedingungen angepasst sind, die in Aquiferen vorherrschen (Goldschneider et al., 2006; Griebler und Lüders, 2009). Bekannt ist, dass Mikroorganismen Kreisläufe und/oder Umsetzungen biologisch wichtiger Elemente im geologischen Untergrund katalysieren, wie z. B. Stickstoff, Schwefel, Phosphor, Kohlenstoff und zahlreiche Metalle (Ehrlich, 1998). Neben dem Vorhandensein eines unbekannten, für den Menschen potentiell nützliche Funktionen enthaltenden Genpools ist die Bereitstellung qualitativ guten Grundwassers für die Trinkwasserproduktion eine weitere wichtige Ökosystemleistung von Grundwasserlebensgemeinschaften.
- Potentiell toxische anorganische Verbindungen (z. B. Nitrat, Ammonium) oder gelöste organische Verbindungen einschließlich organischer Schadstoffe im Grundwasserleiter werden im Wesentlichen durch Mikroorganismen abgebaut (Goldschneider et al., 2006; Griebler und Lüders, 2009; Griebler und Avramov, 2015). Zusammenfassend sind die Abreicherung organischer und anorganischer Stoffe und die Rückhaltung pathogener Mikroorganismen die wichtigsten Ökosystemleistungen des Aquifermikrobioms.
- Die Temperatur ist ein wichtiges Kriterium zur Klassifizierung der Aktivität von Mikroorganismen: psychrophile Organismen sind zwischen -5 °C und 20 °C aktiv, psychrotolerante zwischen 5 °C und 30 °C , mesophile zwischen 20 °C und 45 °C , thermophile zwischen 40 °C und 70 °C sowie extrem thermophile und hyperthermophile zwischen 65 °C und 120 °C (Briellmann et al., 2011) (Abb. 3.14). Die verschiedenen Mikroorganismen sind an Temperaturspannen von jeweils 25 – 30 K angepasst.

Abbildung 3.14: Anpassung von Mikroorganismen an verschiedene Temperaturbereiche



Quelle: Briellmann et al., 2011 (modifiziert).

- Mikroorganismen können prinzipiell in einem Temperaturbereich aktiv sein, der von weit unterhalb des Gefrierpunkts (Price und Sowers, 2004) bis ca. 120 °C reicht (Abb. 3.14). Aufgrund des in Abbildung 3.14 skizzierten Vorhandenseins von Mikroorganismen, die nur in bestimmten Temperaturfenstern aktiv sind, können bei Temperaturunterschieden

> 40 K (gegenüber den natürlichen Bedingungen), wie sie für HT-ATES-Systeme typisch sind, nur an höhere Temperaturen angepasste (thermophile) Mikroorganismen aktiv sein, die bei natürlichen Temperaturen inaktiv sind. Grundsätzlich stellt sich die Frage, ob diese thermophilen oder extrem thermophile Organismen in der autochthonen Mikroorganismengemeinschaft vorhanden sind und, wenn ja, welche das sind und welche Stoffwechselleistungen sie zu leisten imstande sind.

Die Temperaturen in Grundwasserleitern Mitteleuropas liegen natürlicherweise im Bereich des durchschnittlichen Jahresmittels. Die aktive Mikroorganismenflora ist an diesen Temperaturbereich angepasst; höhere Temperaturen treten in unseren Breiten nur gelegentlich in urbanen oberflächennahen Abschnitten oder im Bereich natürlicher Wärmequellen auf (Figura et al., 2011; Tissen et al., 2019). In tropischen Arealen sind die Temperaturen in natürlichen, nicht hydrothermal beeinflussten Grundwasserleitern deutlich höher; es ist anzunehmen, dass die autochthonen mikrobiellen Gemeinschaften an höhere Temperaturen angepasst sind; entsprechende Studien gibt es dazu nach Kenntnis der Autoren dieser Studie nicht. Gesamtbiozöten aus Grundwasserleitern unserer Breiten enthalten auch Organismen, die bei weitaus höheren Temperaturen als der Durchschnittstemperatur des jeweiligen Aquifers ihr Optimum haben (mesophile und thermophile Organismen, vgl. Abb. 3.14), wie Labor- und Feldstudien zeigen (Briellmann et al., 2009; Briellmann et al., 2011; Bonte et al., 2013c; Griebler et al., 2016; Lienen et al., 2017; Metze et al., 2021).

Es ist allerdings wenig untersucht, wie sich Temperaturerhöhungen mittel- und langfristig auf die Biodiversität und die Funktionalität von Grundwasserlebensgemeinschaften auswirken. Modellstudien (Lienen et al., 2017; Metze, 2019; Metze et al., 2021) legen nahe: Je weiter sich die Temperatur von der In-situ-Temperatur entfernt, desto stärker wird die funktionelle Redundanz der mikrobiellen Gemeinschaft abnehmen und somit die Fähigkeit, Ökosystemleistungen auszuüben; je höher die Biodiversität der mikrobiellen Gemeinschaft ist, desto besser wird sie Temperaturerhöhungen funktionell abpuffern können. Die Aktivitätsraten von Mikroorganismen erhöhen sich generell mit der Temperatur (Price und Sowers, 2004; Metze et al., 2021), wie es die Arrhenius-Gleichung nahelegt; dies gilt für alle in Abbildung 3.14 skizzierten Mikroorganismen typen bis zu einer Optimumtemperatur, nach deren Überschreiten die Aktivitätsraten schnell abfallen und der Stoffwechsel zum Erliegen kommt. Ferner werden sich temperaturbedingt die geochemischen Randbedingungen des Aquifers verändern (Griebler et al., 2016), was wiederum die Aktivitäten von Grundwasserlebensgemeinschaften beeinflusst.

Im Zuge moderater Temperaturerhöhungen – wie sie für NT-ATES-Systeme typisch sind (Temperaturerhöhungen auf maximal 30 °C), die aber auch in großen erwärmten Volumina von HT-ATES-Anlagen auftreten – veränderte sich in den bisher durchgeführten Laborstudien die Biodiversität natürlicher mikrobieller Aquiferlebensgemeinschaften nur geringfügig; in der Mehrzahl der Studien erhöhte sich die Biodiversität sogar leicht (Briellmann et al., 2011; Bonte et al., 2013; Westphal et al., 2017; Metze, 2019), wie es auch in einer Feldstudie beobachtet wurde (Briellmann et al., 2009). Die Ergebnisse dieser Studien legen nahe, dass sich bei Temperaturerhöhungen bis 30 °C die Biodiversität der mikrobiellen Gemeinschaft des Aquifers kaum verändert und Ökosystemleistungen nicht wesentlich verändert werden.

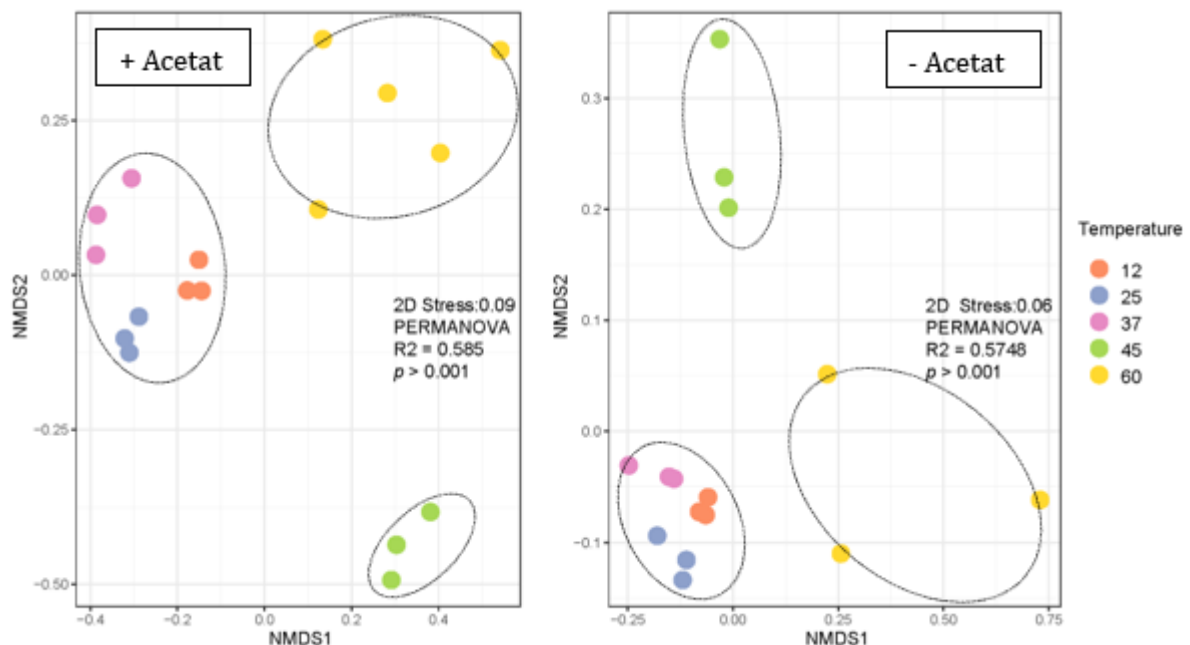
Ein anderes Szenario ergibt sich für Temperaturerhöhungen, wie sie für die brunnennahe Bereiche von HT-ATES-Anlagen temporär typisch sind (45 – 80 °C). Bei Temperaturen oberhalb 45 °C sollten sich – aufgrund der relativ engen Temperaturfenster von psychrophilen, psychrotoleranten und mesophilen Prokaryoten in mitteleuropäischen Grundwasserleitern (Abb. 3.14) – thermophile Mikroorganismengemeinschaften ausbilden.

Ergebnisse zur temperaturabhängigen Veränderung des Aquiferbioms in Laborversuchen

Ergebnisse von Laborversuchen, in denen Aquiferlebensgemeinschaften bei Temperaturen $\geq 45^\circ\text{C}$ inkubiert wurden (Briellmann et al., 2011; Bonte et al., 2013c; Griebler et al., 2016; Lienen et al., 2017; Metze et al., 2021) (Abb. 3.15), belegen die Ausbildung thermophiler Mikroorganismengemeinschaften. Bei Temperaturen $\geq 60^\circ\text{C}$ dominierten, abhängig von den hydrochemischen Randbedingungen, typische thermophile Spezies, darunter Fermentierer (Bonte et al., 2013c), Sulfatreduzierer (Bonte et al., 2013c; Lienen et al., 2017; Westphal et al., 2017), Methanogene (Westphal et al., 2017) und Aerobe (Metze et al., 2021).

Metze (2019) und Metze et al. (2021) stellten im Rahmen des Projekts TestUM-Aquifer zudem fest, dass sich die Biodiversität in Aquifersedimentmikrokosmen, die bei Temperaturen $\geq 45^\circ\text{C}$ aerob inkubiert wurden, signifikant verringerte; zudem unterschieden sich die Zusammensetzungen der bei Temperaturen $\geq 45^\circ\text{C}$ inkubierten mikrobiellen Gemeinschaften deutlich von denen, die bei Temperaturen $\leq 37^\circ\text{C}$ inkubiert wurden (Abb. 3.15). Bei 60°C dominierten thermophile Organismen. Bin Hudari et al. (2020) wiesen in einer Laborstudie im Rahmen des Projekts ANGUS II in Sedimenten eines kohlenwasserstoffkontaminierten Aquifers ebenfalls aktive aerobe thermophile Organismen nach Inkubation bei 60°C nach. Die in diesen Studien nachgewiesenen thermophilen Spezies waren überwiegend Gram-positive Mikroorganismen, die resistente Dauerformen ausbilden (Endosporen) und somit bei niedrigen Temperaturen überdauern können.

Abbildung 3.15: Ausbildung spezifischer mikrobieller Gemeinschaften bei Inkubation von Aquifer-sedimenten bei 12°C , 25°C , 37°C , 45°C oder 60°C mit und ohne Acetatzugabe



Links: Mit Acetatzugabe; rechts: ohne Acetatzugabe. Zweidimensionale nichtmetrische multidimensionale Skalierung (NMDS-Plot)). Einzelpunkte gleicher Farbe sind Replikate. Je weiter die Gemeinschaften im Plot voneinander entfernt sind, desto größer sind die Unterschiede in der Zusammensetzung.

Quelle: Nach Metze (2019), modifiziert.

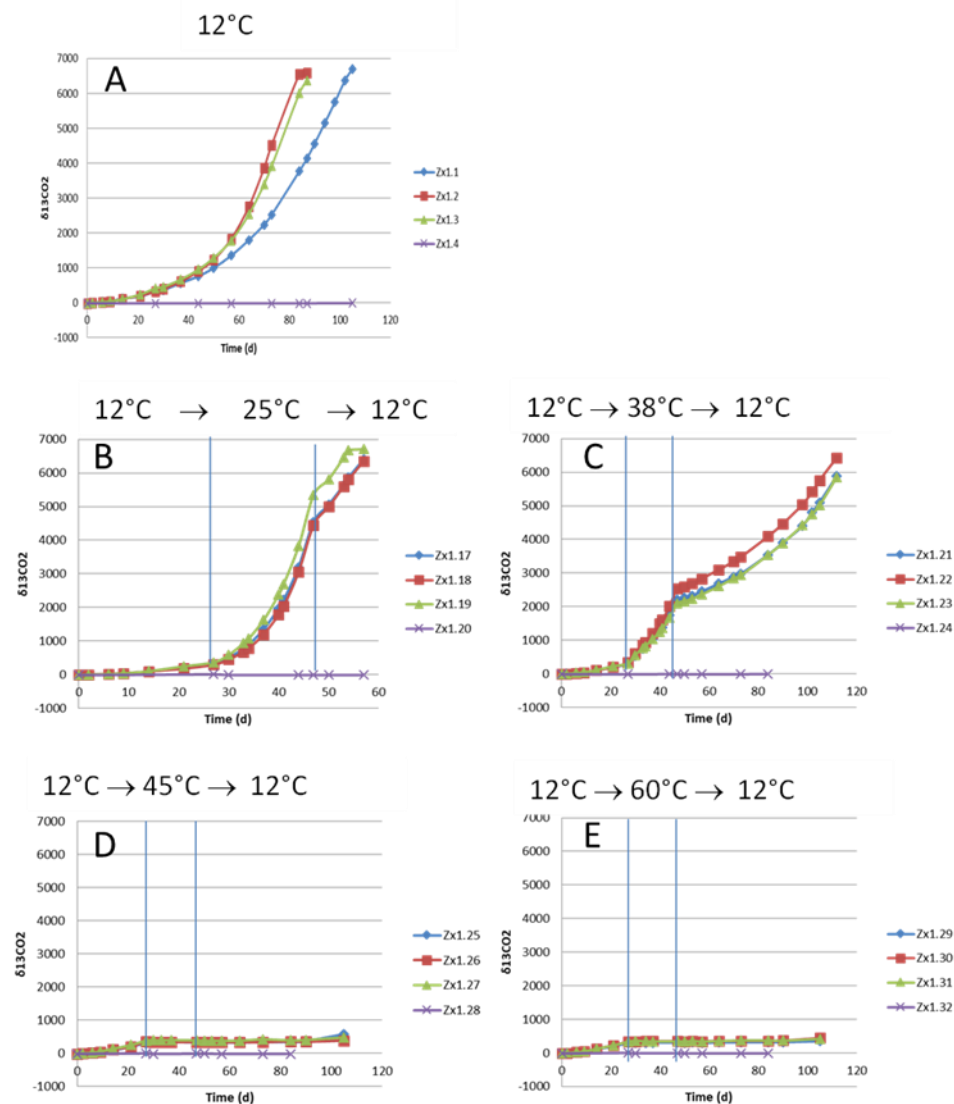
Die Temperaturobergrenze von Aquiferlebensgemeinschaften ist kaum untersucht. In Laborstudien bei 60 – 70°C inkubierte Aqufermikrobiome waren durchgehend aktiv (Bonte et al., 2013c; Lienen et al., 2017; Westphal et al., 2017; Metze, 2019); bei 80°C inkubierte Sedimente waren

nicht mehr stoffwechselaktiv (Metze, 2019; Bin Hudari et al., 2020; Bell et al., 2022). In einer aktuellen Studie wurden in auf 80 °C erhitzten Sedimenten aktive fermentierende sporenbildende Prokaryoten nachgewiesen (Bell et al., 2022). In einer aktuellen Studie im Rahmen von ANGUS II mit Aquifersediment eines mit Kohlenwasserstoffen kontaminierten Standorts waren acetatoxidierende Sulfatreduzierer allerdings nur bis zu einer Temperatur von 45 °C aktiv; Sulfatreduktion bei Temperaturen > 45 °C konnte nicht nachgewiesen werden (Bin Hudari et al., 2020). Die bei 45 °C aktiven Sulfatreduzierer gehören einer endosporenbildenden taxonomischen Gruppe an (Genus *Desulfotomaculum*) (Bin Hudari et al., 2022).

Die Laborexperiment-Ergebnisse indizieren, dass sich in den Kernzonen von HT-ATES-Speichern bei Temperaturen temporär von > 40 °C bis 80 °C aktive thermophile oder hyperthermophile Mikroorganismengemeinschaften ausbilden können, in denen endosporenbildende Organismen dominieren, und dass die Temperaturobergrenze mikrobieller Gemeinschaften aus oberflächennahen Aquiferen (bis 20 m Tiefe) zwischen 70 °C und 80 °C liegt. Ob diese Temperaturobergrenze für oberflächennahe Aquifere universell gültig ist und auch für mikrobielle Gemeinschaften aus tieferen Aquiferen gilt, wäre zu prüfen; mikrobielle Gemeinschaften tieferer Aquifersedimente sind höheren Temperaturen ausgesetzt als oberflächennahe Gemeinschaften (aufgrund des Einflusses des Wärmestroms aus dem Erdinneren: in 1000 m Tiefe beträgt die durchschnittliche Temperatur etwa 40 °C, im Gegensatz zu ca. 10 °C in 50 m Tiefe (Bundesverband Boden e. V., 2023), so dass zu erwarten ist, dass sich Biome aus oberflächennahen und tieferen Aquiferen prinzipiell in ihrem Temperaturverhalten unterscheiden.

Im Rahmen des Projekts ANGUS II wurde in Laborversuchen die thermische Resilienz mikrobieller Gemeinschaften untersucht, die Temperaturwechseln ausgesetzt waren, wie sie typischerweise für die thermische Bewirtschaftung von Aquiferen angenommen werden können. Aktive anaerobe mikrobielle Gemeinschaften aus kohlenwasserstoffkontaminierten Sedimenten wurden durch eine dreiwöchige Inkubation bei 45 °C oder 60 °C inaktiviert und waren nicht mehr in der Lage, Acetat zu mineralisieren (Abb. 3.16) (Bin Hudari et al., 2022).

Abbildung 3.16: Mineralisierung von C-markiertem Acetat unter anoxischen, sulfatreduzierenden Bedingungen durch mikrobielle Gemeinschaften eines mit Kohlenwasserstoffen kontaminierten Aquifers



Die Mineralisierungsraten steigen an bei temporärer Erhöhung der Temperatur von 12 °C auf 25 °C (B) oder 38 °C (C). Im Gegensatz dazu wird die Mineralisierung durch 45 °C (D) oder 60 °C (E) vollständig gehemmt und bleibt nach Rückführung auf 12 °C gehemmt; dies weist darauf hin, dass Teile der mikrobiellen Gemeinschaft durch Temperaturen ≥ 45 °C inaktiviert werden.

Quelle: Nach Bin Hudari et al. (2022).

Ergebnisse zur temperaturabhängigen Veränderung des Aquiferbioms in HT-ATES-Feldversuchen

Die Ergebnisse der obig zitierten Laborstudien sind wichtig, lassen sich jedoch methodisch bedingt nicht vollständig auf In-situ-Bedingungen übertragen. Neben den zuvor geschilderten und aus Laborversuchen bekannten Effekten von Temperaturveränderungen unterscheiden sich HT-Feldversuche insbesondere durch ihre wechselnden hydrodynamischen und hydrochemischen Randbedingungen (vgl. Abschn. 3.2.1ff). Systematische Untersuchungen zur Struktur und Funktion von Aquiferbiomen unter thermischem Stress müssen daher auch unter In-situ-Bedingungen durchgeführt werden, um die Aussagekraft der Laborergebnisse im Hinblick auf die Prognose von Feldversuchen zu verifizieren. Biodiversitätsanalysen von Proben aus einer tiefen

geothermischen Anlage in einem salinen Aquifer zeigen z. B., dass sich bei erhöhten Temperaturen unterschiedliche thermophile Gemeinschaften entwickeln (Lerm et al., 2013; Würdemann et al., 2014; Westphal et al., 2016). Räumlich und zeitlich aufgelöste detaillierte Sukzessionsmuster sowie Stoffwechsellpotentiale von aquiferassoziierten Mikrobiomen wurden allerdings im Rahmen des Betriebs von HT-ATES-Operationen bisher nicht untersucht.

In einem ersten Pilotversuch im Rahmen des Projekts TestUM-Aquifer beobachteten Keller et al. (2021), dass sich die Zusammensetzung einer mikrobiellen Gemeinschaft eines Aquifers durch die kurzzeitige (5 Tage) Injektion 75 °C heißen Wassers nicht veränderte, die Gemeinschaft also resilient gegenüber kurzzeitigem (≤ 5 Tage) thermischen Stress war.

In einer zweiten Projektphase (s. bzgl. der Feldversuchsdurchführung Abschn. 3.2.4) wurde das Verhalten des Aquifermikrobioms gegenüber länger andauerndem thermischen Stress in einer HT-ATES-Simulation untersucht, bei der auf 80 °C erwärmtes Wasser in jeweils drei Zyklen in den Aquifer injiziert und (nach jeweils 14 Tagen) extrahiert wurde. Bei Temperaturerhöhungen > 40 °C – 80 °C nahm die Häufigkeit thermophiler Eubakterien stark zu, die hauptsächlich wenig untersuchten Mitgliedern des Stamms Firmicutes angehören (Keller et al., o. J.). Die Ergebnisse legen nahe, dass diese Organismen unter natürlichen Bedingungen als inaktive, aber lebensfähige Sporen in geringen Häufigkeiten vorhanden sind und sich unter Wärmeeinfluss schnell vermehren, indem sie temperaturbedingt vermehrt gelöste organische Stoffe als Kohlenstoff- und Energiequellen verwenden.

Während die bisherigen Daten belegen, dass thermophile Mikroorganismen dauerhaft außerhalb des von ihnen für aktiven Metabolismus benötigten Temperaturbereichs lebensfähig sein können (typischerweise durch thermoresistente Dauerformen wie Endosporen), ist unklar, welche mesophilen, psychrophilen oder psychrotoleranten Spezies aus oberflächennahen Grundwasserleitern gemäßiger Breiten längere Inkubationen von Temperaturen ≥ 45 °C überstehen können, die typischerweise in Nutzungszonen von ATES-Systemen auftreten.

Zwischenfazit 3.2.5.1

Temperaturbedingte Veränderungen des Aquiferbioms in Laborversuchen und Feldversuchen

Die Temperatur ist ein wichtiges Kriterium zur Klassifizierung der Aktivität von Mikroorganismen; mikrobielle Aktivität ist möglich bei Minusgraden bis ca. +120 °C, wobei verschiedene Mikroorganismen an Temperaturfenster von jeweils ca. 25 – 30 K angepasst sind. In Laborexperimenten veränderte sich die Biodiversität von Grundwasserlebensgemeinschaften bei Temperaturerhöhungen von 10 °C bis ca. 30 °C kaum. In **Laborversuchen** nahmen die Raten mikrobieller Aktivität bis zu einer Temperatur von ca. 35 °C stetig zu. Im Temperaturbereich 45 °C – 70 °C bildeten sich aerobe und anaerobe thermophile mikrobielle Gemeinschaften aus; insbesondere endosporenbildende Mikroorganismen dominieren bei höheren Temperaturen. Während die bisherigen **Felddaten** belegen, dass thermophile Mikroorganismen dauerhaft außerhalb des von ihnen für aktiven Metabolismus benötigten Temperaturbereichs lebensfähig sein können (typischerweise durch thermoresistente Dauerformen wie Endosporen), ist unklar, welche mesophilen, psychrophilen oder psychrotoleranten Spezies aus oberflächennahen Grundwasserleitern gemäßiger Breiten längere Inkubationen von Temperaturen ≥ 45 °C überstehen können.

Hohe Temperaturen und die damit verbundenen mikrobiellen Auswirkungen treten nur im direkten Zentrum eines (HT-)Speichers auf und sind somit räumlich begrenzt. In Aquiferbereichen außerhalb des thermischen Auswirkungsbereichs bleibt die Mikrobiologie unverändert. Durch Grundwassernachstrom während des ATES-Betriebs bei den Extraktionsphasen (am „warmen“ Brunnen)

ist davon auszugehen, dass auch während des ATES-Betriebs immer wieder planktische Mikroorganismen in den thermisch bewirtschafteten untertägigen Raum eingetragen werden. Es ist weiterhin zu erwarten, dass sich spätestens nach Abschalten des ATES-Speichers die ursprünglichen Aquiferbiomzustände sukzessive wieder einstellen werden.

Welche Konsequenzen eine temporäre zyklische, aber langfristige Erwärmung des Aquifers auf Temperaturen zwischen 45 °C und 70 °C auf mikrobielle Ökosystemleistungen hat, ist unklar.

Als erstes Fazit ist festzustellen, dass die Ergebnisse der bisherigen Laborversuche und insbesondere der HT-ATES-Feldversuche nicht darauf hinweisen, dass im Rahmen von HT-ATES-Betrieben ein großräumiger Kollaps des Aquiferbioms und seiner Ökosystemfunktionen zu erwarten ist. Stattdessen wurde eine schnelle Adaption des Aquiferbioms an die veränderten Temperaturbedingungen beobachtet. Auch die räumliche Ausdehnung der thermischen Beeinflussung ist zufriedenstellend prognostizierbar, wobei unklar bleibt, welche Auswirkungen eine temporäre zyklische, aber langfristige Erwärmung (> 14 Tage) des Aquifers auf Temperaturen zwischen 45 °C und 70 °C auf mikrobielle Ökosystemleistungen hat.

Das zweite Fazit ist, dass analog zu den noch ungeklärten hydrochemischen Fragestellungen auch aus mikrobiologischer Sicht ein großer Bedarf an Labor- und Feldexperimenten besteht. Nur großskalige Feldstudien mit realistischen Betriebsbedingungen und mit unterschiedlichen Sedimentbeschaffenheiten (z. B. höhere $C_{org.}$ -Werte, Karbonatsättigung, hohe Anteil reaktive Fe(II/III)-Festphasen) können die berechtigterweise z. B. durch die Wasserwirtschaft eingeforderten Daten generieren und bereitstellen.

3.1.7.2 Pathogene Keime (Viren und Mikroorganismen)

Grundwasser kann prinzipiell durch humanpathogene Protozoen, Prokaryoten oder Viren über verunreinigtes Sickerwasser aus der ungesättigten Zone kontaminiert werden (Powell et al., 2003; Pandey et al., 2014; Seidel et al., 2016). Es wurden coliforme Bakterien (*Escherichia coli*, andere Enterococci), Pseudomonaden, Salmonellen, Legionellen, Staphylococci, Campylobacter, Amöben, Noroviren, Hepatitis A oder Norwalk-Viren (Pitkänen, 2013; Pandey et al., 2014; Seidel et al., 2016; García-Gil et al., 2018) in Grundwasserhabitaten nachgewiesen. Der Transport und das Überleben dieser humanpathogenen Mikroorganismen im Grundwasser hängen von vielen Faktoren ab wie z. B. dem pH-Wert, dem DOC (gelöste organische Verbindungen), der Salzkonzentration oder der Konkurrenz zu anderen Mikroorganismen (García-Gil et al., 2018). Die Temperatur ist ein weiterer kritischer Parameter. Humanpathogene Organismen sind in der Regel an die Körpertemperatur des Menschen angepasst (García-Gil et al., 2018) und vermehren sich bei diesen Temperaturen optimal. Pathogene Keime können allerdings in der Umwelt bei niedrigeren Temperaturen längere Zeiträume überleben (Brielmann et al., 2011). Viele pathogene Keime gelten als wenig resistent bei höheren Temperaturen und sterben ab, was man sich in der Autoklavierung zunutze macht. Nur pathogene Sporenbildner können erhöhte Temperaturen über längere Zeiträume in der Regel überdauern, weil die Sporen hitzeresistent sind.

Die Resilienz pathogener Keime bei Temperaturwechseln, wie sie in ATES oder HT-ATES Konzepten zu erwarten sind, ist kaum untersucht.

Im Einflussbereich eines ATES-Systems wurden Fäkalbakterien (*E. coli*, Enterokokken) in Anzahlen bis 120 CFU (kolonieformende Einheiten, colony forming units) pro 100 ml nachgewiesen, während diese Bakterien in nichttemperierten Aquiferzonen nicht nachweisbar waren; die maximale Temperatur betrug 28 °C (Bonte et al., 2011). Im Gegensatz dazu wurden in einem ATES-

System bei Temperaturen bis 16,3 °C keine erhöhten Zellzahlen von coliformen Bakterien nachgewiesen (Brielmann et al., 2009). In einer Feldstudie wurde eine signifikante Reduzierung der Zellzahlen von coliformen Bakterien (einschließlich *Escherichia coli*), *Staphylococcus aureus*, *Enterococcus faecalis*, *Pseudomonas aeruginosa* und *Clostridium perfringens* in höhertemperierten Bereichen (27 °C verglichen mit 17 °C Hintergrundtemperatur) eines oberflächennahen urbanen Aquifers in Saragossa (Spanien) beobachtet (García-Gil et al., 2018); die Autoren vermuten, dass zahlreiche Organismen einen Hitzeschock durch Kontakt mit bis zu 60 °C heißer Wärmeaustauscherflüssigkeit erlitten. Bei Wassertemperaturen oberhalb von 45 °C ist generell mit der Inaktivierung bekannter humanpathogener Keime zu rechnen, da diese Temperatur oberhalb ihres metabolischen Temperaturlimits liegt. Bei HT-ATES-Temperaturen ≥ 75 °C sollten Humanpathogene innerhalb kurzer Zeit pasteurisiert werden (García-Gil et al., 2018).

Insgesamt deutet der aktuelle Untersuchungsstand darauf hin, dass pathogene Keime insbesondere bei HT-ATES-Anlagen eher pasteurisiert werden als dass eine Vermehrung zu befürchten ist. Da zudem bei einem zyklischen Betrieb die Grundwassermassen zum großen Teil im Kreislauf zwischen dem „warmen“ und dem „kalten“ Brunnen geführt und dabei immer wieder erhitzt werden, sollte dieser Pasteurisierungseffekt langfristig bestehen bleiben. Allerdings beschränkt der geringe Untersuchungsstand (gerade in Feldversuchen) zur Thematik „pathogene Keime“ belastbare und allgemeingültige Aussagen.

Zwischenfazit 3.2.5.2

Pathogene Keime beim HT-ATES-Betrieb

Die Ausbreitung von Viren und humanpathogenen Mikroorganismen im Zuge von ATES-Maßnahmen ist sowohl in Labor- als auch in Felduntersuchungen wenig erforscht. Bisherige Daten schließen ein Wachstum humanpathogener Mikroorganismen bei moderaten Temperaturen (bis ca. 40 °C), die bei HT-ATES-Anlagen temporär einen beträchtlich untertägigen Raum einnehmen, nicht aus. Nach den bisherigen (wenigen) Laborversuchen ist aber anzunehmen, dass Krankheitserreger durch höhere Temperaturen (> 45 °C) inaktiviert werden. Aktuell wird daher davon ausgegangen, dass die Vermehrung pathogener Keime durch (HT-)Anlagen kein prioritäres Risiko darstellt, wohl auch weil pristine – also weitgehend unbeeinflusste – Grundwasserleiter generell wenige pathogene Keime aufweisen sollten. Eine einfache Übertragung der Laborergebnisse auf einen HT-ATES-Feldbetrieb erscheint aufgrund der dort herrschenden wesentlich komplexeren thermischen, hydrodynamischen und hydrochemischen Randbedingungen derzeit nicht möglich. Es fehlen auch hier belastbare Daten zu dieser Thematik aus HT-ATES-Feldversuchen u. a. aus entsprechend kontaminierten Grundwasserleitern. Dieser Bedarf gilt eingeschränkt auch für den „Abstrom“ von HT-BTES-Anlagen.

Resümee 3.2.5

Bei einer thermischen Bewirtschaftung eines Grundwasserleiters durch HT-ATES-Systeme ist die Auswirkung immer lokal begrenzt und i. d. R. bzgl. der räumlichen Auswirkung gut prognostizierbar. Im Nutzungsraum eines HT-ATES-Systems treten hohe zeitliche und räumliche Temperaturveränderungen und wechselnde hydrodynamische sowie hydrochemische Verhältnisse auf, wobei die von Injektionstemperatur bis Temperaturen weit unterhalb 40 °C reichen. Dabei ist zu erwarten, dass unter mesophilen Bedingungen (Temperaturen ≤ 40 °C) mikrobielle Prozesse mit steigenden Temperaturen temporär schneller ablaufen, überwiegend ausgeführt von Organismen des aktiven nativen Mikrobioms. Elektronenakzeptoren oder Donatoren können deshalb infolge hoher metabolischer Raten gezehrt werden. Bei Temperaturen oberhalb 45 °C können mikrobiell katalysierte Prozesse temporär oder dauerhaft gehemmt werden aufgrund der notwendigen Anpassung des

Mikrobioms an thermophile oder hyperthermophile Bedingungen. Die biogeochemischen Auswirkungen sind auf die unmittelbare Zone erhöhter Temperaturen im Nutzungsraum beschränkt, so dass eine weiträumige Beeinträchtigung von Ökosystemleistungen nicht zu erwarten ist. Leicht erhöhte Temperaturen im Auswirkungsraum (1 – 5 K), die z. B. im Bereich natürlicher Temperaturschwankungen in oberflächennahen Sedimenten liegen, sollten nach den bisherigen Labor- und Feldversuchen Struktur und Funktion des Aquiferbioms nicht negativ beeinflussen.

Insgesamt sind die Auswirkungen einer saisonalen Temperaturspeicherung auf das Aquifermikrobiom mit wechselnden Temperaturbedingungen bis zum Gefrierpunkt bzw. unterhalb des Gefrierpunkts bei hohem Wärmeentzug kaum untersucht. Auch hierzu besteht Forschungsbedarf, z. B. im Kontext mit geologischen Eishöhlen, aber auch beim Ausbau und einer intensiven Bewirtschaftung herkömmlicher Erdwärmesondenanlagen, da die Auswirkungen solcher Temperaturveränderungen auf psychrophile und psychrotolerante Aquiferbiome wenig bekannt sind. Insgesamt ist bei einer Absenkung der Temperatur bis zum Gefrierpunkt bzw. auch darunter mit einer Verlangsamung biogeochemischer Prozesse zu rechnen; die Prozesse sollten aber nicht zum Erliegen kommen (Price und Sowers, 2004).

Bei einer langfristigen thermischen Bewirtschaftung eines Aquifers ist davon auszugehen, dass sich ein an die thermischen und geochemischen Bedingungen angepasstes, lokal begrenztes aktives Mikrobiom ausbilden wird. Nach Aufgabe des Wärme- oder Kältespeichers wird das natürliche, an tiefere Temperaturen angepasste Aquifermikrobiom den Nutzungsraum mittel- oder langfristig wiederbesiedeln, eingetragen über den natürlichen Grundwasserfluss; die Dauer der Wiederbesiedlungsphase wird von den hydrogeologischen Gegebenheiten des Standorts abhängen. Aufgrund des vergleichsweise geringen Raumbedarfs solch thermischer Bewirtschaftung, bezogen auf die insgesamt zur Verfügung stehenden Grundwasserleitervolumina, sollten nach derzeitigem Stand keine großvolumigen und nachhaltigen negativen Veränderungen des Aquiferbioms zu befürchten sein. Diese Einschätzung muss allerdings empirisch, insbesondere mittels Feldversuchen wesentlich stärker abgesichert werden, wie auch die räumlich-zeitlich transienten Prozesse der temperaturabhängigen Veränderungen des Aquiferbioms weiter verstanden werden müssen. Des Weiteren ist auch die Summationswirkung mehrerer UTES bei räumlicher Nähe zu berücksichtigen.

3.1.8 Ausführliche Darstellung temperaturbedingter Auswirkungen auf die Fauna urbaner Grundwasserleiter

Bzgl. der Umweltauswirkungen von HT-ATES-Anlagen und eingeschränkt auch von HT-BTES-Anlagen in Grundwasserleitern wird in den vergangenen Jahren insbesondere das Thema der Grundwasserfauna intensiv und z. T. auch kontrovers aus unterschiedlichen fachlichen Perspektiven diskutiert. Eine ausführliche Darstellung der Thematik aus eher biologischer und ökosystemarer Perspektive wird u. a. von Hiester et al. (2022) gegeben. Allerdings ergeben sich im Hinblick auf die Zielsetzung einer klimaneutralen Wärmeversorgung und auch aus hydrogeologischer Perspektive Aspekte und Fragen, ob und gegebenenfalls wie der Schutz der Grundwasserfauna mit dem Hochlauf und dem Betrieb saisonaler Wärmespeicher kombinierbar ist bzw. sich überhaupt generell widerspricht. Da das Thema der Grundwasserfauna auch im Bereich der Wasserwirtschaft bzw. des allgemeinen Grundwasserschutzes i. d. R. kein Allgemeingut ist, wird im Folgenden der Stand des Wissens zu diesem Thema sehr kurz skizziert, um auf dieser Basis Konsequenzen für den Bau und Betrieb von HT-ATES-Anlagen abzuleiten.

3.1.8.1 Charakterisierung des Lebensraums „Grundwasser“ und räumliche Verteilung und Vorkommen der Meio- und Makrofauna

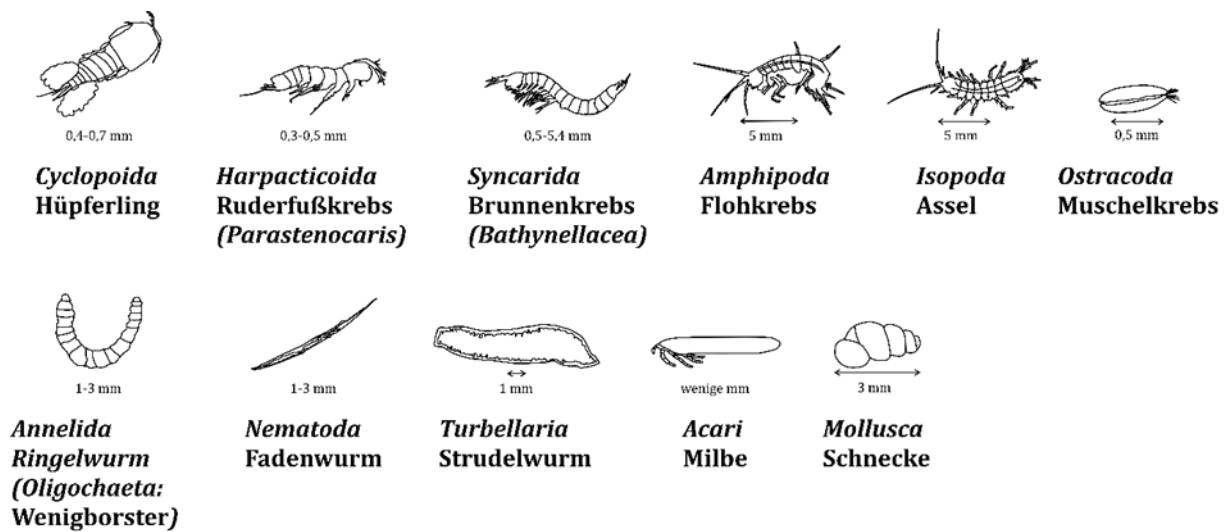
Die Meio- und Makrofauna des Lebensraums Grundwasser wird Stygofauna genannt; sie setzt sich aus einer Vielzahl taxonomischer Gruppen zusammen, die einzellige oder mehrzellige Organismen beinhalten (Schmidt und Hahn, 2012). Stygofauna wird in drei Gruppen unterteilt: (i) stygoxene Arten, (ii) stygophile Arten und (iii) stygobionte Arten (Gutjahr et al., 2013). Stygoxene und stygophile Arten kommen hauptsächlich in Oberflächengewässern vor, können jedoch in oberflächennahe Grundwasserzonen eingetragen werden oder einwandern. Während stygoxene Arten die Bedingungen im Grundwasser nicht dauerhaft ertragen können, sind stygophile Arten in der Lage, länger im oberflächennahen Grundwasser zu überdauern; diese Zonen sind durch höhere Einträge an gelöstem organischen oder kolloidalem Kohlenstoff, Nährstoffen und Sauerstoff charakterisiert.

Stygobionte Arten sind obligate Grundwasserbewohner und kommen überwiegend in nicht genauer definierten „tieferen“ Grundwasserleitern vor, die durch geringe Substrat-, Nährstoff- und Sauerstoffkonzentrationen gekennzeichnet sind. Die meisten dieser Organismen sind an den Lebensraum Grundwasser angepasst, der durch konstante Temperaturen, Dunkelheit, räumliche Enge sowie geringe Sauerstoff- und Nährstoff-Konzentrationen gekennzeichnet ist. Anpassungen sind z. B. niedrige Stoffwechselraten, Langlebigkeit, Verlust von Augen und Pigmenten und schlanke Körperformen (Preuß und Schminke, 2004; Schmidt und Hahn, 2012; Griebler et al., 2014). Stygobionten sind zudem an die typischen Temperaturen der Grundwasserzonen ihres Habitats angepasst und kalt stenotherm (Briellmann et al., 2009).

Weltweit wird die Zahl an stygobionten Arten im Grundwasser auf ca. 50.000 bis 100.000 geschätzt (Griebler et al., 2014). Die Grundwasserfauna in Zentral- und Nordeuropa besteht aus nur wenigen stygobionten und endemischen Arten und ist generell artenarm; die meisten vielzelligen Arten starben während der letzten Kaltzeiten aus (Hahn und Fuchs, 2009). In dem von Gletscherbildung unbeeinflussten Südeuropa, in dem entsprechend der höheren Jahresmitteltemperatur auch eine höhere Grundwassertemperatur vorherrscht, soll hingegen die Biodiversität der Grundwasserfauna weitaus höher sein (Hahn und Fuchs, 2009).

Nach Griebler et al. (2014) bestehen die Organismengemeinschaften im Grundwasser vornehmlich aus stygobionten Invertebraten, hauptsächlich vertreten durch Crustaceen, aber auch andere Stämme (vgl. Abb. 3.17) (Humphreys, 2006). Unterteilen lässt sich diese Gemeinschaft in drei Großgruppen (Berkhoff, 2010):

- ▶ Crustacea: Cyclopoida, Harpacticoida, Ostracoda, Amphipoda, Syncarida, Isopoda, Copepoda;
- ▶ Annelida: Polychaeta, Oligochaeta;
- ▶ Sonstige: Nematoda, Platyhelminthes (Turbellaria), Acari, Tardigrada, Rotatoria, Insecta, Mollusca, Arthropoda, Pisces, Caudata, Protista und Funghi.

Abbildung 3.17: Exemplarische Skizzen der typischen Meio- und Makrofauna des Grundwassers

Quelle: Verändert nach Koch et al. (2020).

Auch die Lebensweise von Grundwasserorganismen ist an die extremen Lebensbedingungen des Grundwassers angepasst. Grundwasser-Mikroorganismen können auf Gesteins- oder Mineraloberflächen leben (benthisch) und sich auf dieser entweder mobil bewegen (vagil) oder festsitzen (sessil: Biofilme aus Mikroorganismen). Andere Grundwasserlebewesen wie auch die Meio- und Makrofauna hingegen können schwebend im Grundwasser leben (planktonisch) und passiv transportiert werden. Im Gegensatz zu Mikroorganismen können Grundwassertiere auch aktiv schwimmen und sich durch das Sediment wühlen (Hunkeler et al., 2006).

Bedingt durch das meist knappe Nahrungsangebot weist der Lebensraum Grundwasser eine kurze Nahrungskette mit einer nur geringen Anzahl an Räubern auf. Die Nahrungskette wird dabei von Destruenten dominiert. Die Nahrung der Grundwasserlebewesen (Detritus, gelöste organische Substanzen und Nährstoffe) wird hauptsächlich von der Oberfläche über kleine Klüfte und Kanäle lokal eingetragen, zum Teil sedimentiert und über die Detritus-fressende Fauna und Mikroorganismen (Basis der organismischen Nahrungskette) (Griebler et al., 2014) dem Nährstoffkreislauf zugeführt. Detritus-Fresser durchwühlen zudem Sedimente und regen durch diese Bioturbation den mikrobiellen Metabolismus an, was die Zersetzung organischen Materials beschleunigt und zur Bildung gelösten organischen Kohlenstoffs für Denitrifikationsprozesse führt (Gibert und Deharveng, 2002; Gibert et al., 2009). Die mehrzelligen Tiere im Grundwasser ernähren sich vorwiegend von Detritus und festsitzenden Mikroorganismen (Biofilmen) und anderen Invertebraten (Griebler et al., 2014).

Viele Arten der Grundwasserfauna sind nach aktuellem Untersuchungsstand endemisch, d. h. sie kommen nur lokal oder regional begrenzt vor, und zeichnen sich durch das Vorhandensein einiger weniger Abstammungslinien aus, was eine Überrepräsentation von Haupt-Taxa und die Unterrepräsentation anderer Taxa zur Folge hat. Darüber hinaus handelt es sich bei Grundwasserarten oft um Relikte früherer Zeiten und Habitate (Gibert und Deharveng, 2002). In der letzten Kaltzeit beispielsweise kam es in Europa zu einer Aufteilung in zwei Gebiete, was eine bis heute bestehende Verteilung vieler Arten entsprechend der vorzeitlichen Einzugsgebiete der heutigen Flüsse zur Folge hat. In den vergletscherten Gebieten und Vorländern im Norden bzw. in den Alpen und einigen Mittelgebirgen verarmte die Fauna, während sie außerhalb der vergletscherten Gebiete erhalten geblieben sein soll (Fuchs, 2007).

Dies spiegelt sich in der Einteilung nach Stygo-Regionen in Deutschland folgendermaßen wider (Griebler et al., 2014):

► Norddeutsches Tiefland:

Im Norddeutschen Tiefland fehlt die Grundwasser-Fauna fast vollständig angeblich aufgrund sehr feiner Sedimente (feinsandig mit engen Porenzwischenräumen) und niedriger Sauerstoffkonzentrationen. Lediglich die Taxa *Copepoda*, *Cyclopoida*, welche nur eine geringe Körpergröße von < 0,5 mm besitzen, sind vorhanden.

► Zentrales Mittelgebirge:

Die Grundwasser-Gemeinschaften der zentralen Mittelgebirge bestehen im Wesentlichen aus stygophilen nacheiszeitlichen Wiederbesiedlern wie *Cyclopoida*, *Annelida*, *Ampipoda*.

► Südwestliche Mittelgebirge:

Die südwestlichen Mittelgebirge beherbergen vornehmlich Crustaceen wie *Amphipoda*, *Isopoda*, *Cyclopoida*.

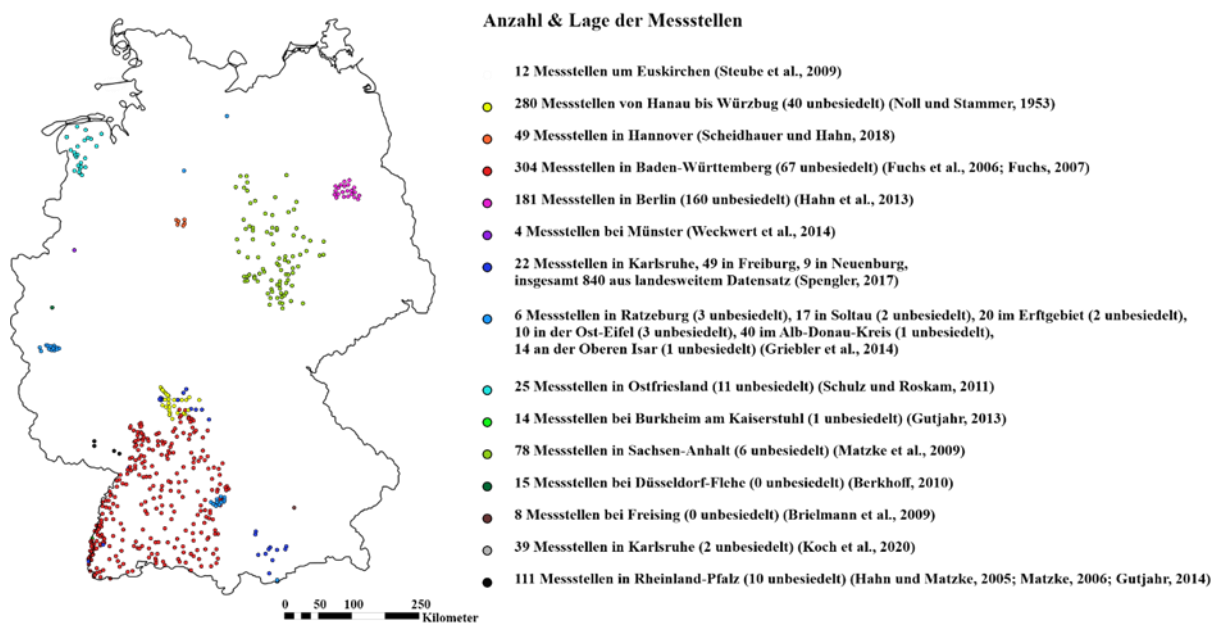
► Nord-Alpen:

Auch die Nord-Alpen besitzen aufgrund des eiszeitlichen Einflusses nur ein ausgedünntes Artenspektrum (*Amphipoda*, *Isopoda*, *Cyclopoida*).

Abbildung 3.18 zeigt eine Übersicht über die Lage der in verschiedenen Studien in Deutschland auf Grundwasserfauna beprobten Standorte. Auffallend ist eine Häufung der Standorte in den Bundesländern Baden-Württemberg und Sachsen-Anhalt, in denen einzelne Standorte Bestandteil eines dauerhaften Grundwasserfauna-Monitorings der entsprechenden Landesanstalten sind. Im Norden und Westen der Bundesrepublik finden sich in den gesichteten Studien hingegen nur vereinzelte Untersuchungsstandorte, die eine repräsentative Einschätzung des Status der Grundwasserfauna in diesen weiten Bereichen erschweren.

Beachtenswert ist ebenfalls die in einigen Studien angegebene Anzahl der Messstellen, in denen keine Grundwassertiere gefunden wurden. Besonders hoch ist diese Anzahl in der Stadt Berlin, wo von 181 untersuchten Pegeln lediglich in 21 lebende Grundwassertiere angetroffen wurden (Hahn et al., 2013). Die nicht besiedelten Pegel wiesen dabei im Durchschnitt niedrigere Gehalte an gelöstem Sauerstoff, erhöhte Grundwassertemperaturen und eine tiefere Lage der Filterstrecke auf. Daneben finden sich faunenfreie Messstellen öfters in den geologischen Bereichen der Geschiebemergel und Grundmoränenablagerungen sowie in dicht bebauten urbanen Gebieten.

Abbildung 3.18: Übersicht über die Lage von in bisherigen Studien auf Grundwasserfauna beprobten Standorten in Deutschland



Quelle: Eigene Darstellung, Karlsruher Institut für Technologie.

Datengrundlage: siehe angegebene Studien in der Legende der Abbildung.

Zumindest aus hydrogeologischer Sicht verwundert es, dass die Grundwasserfauna in Norddeutschland fast vollständig fehlen soll. So bestehen die großräumigen zum Teil hydraulisch gut durchlässigen und sehr ergiebigen glazigenen norddeutschen Grundwasserleiter häufig eben nicht aus Feinsanden, sondern aus Mittelsanden bis zu Kiesen mit einer hinreichenden Porosität für eine Grundwasserfauna. Zudem sind manche der oberflächennahen Grundwasserleiter in Norddeutschland im Hangenden auch aerob, und große Teile Norddeutschlands waren zumindest in der Weichsel-Kaltzeit nicht vergletschert. Möglicherweise ist die Beprobungsdichte nicht ausreichend, um dazu belastbare Aussage zu treffen.

Prinzipiell soll eine Grundwasserfauna in allen Aquifer-Typen auftreten können (Humphreys, 2008). Voraussetzung ist neben ausreichenden Konzentrationen an gelöstem Sauerstoff ($> 1 \text{ mg/L}$) und dem Vorhandensein von Nahrung (d. h. organischem Material) das Vorhandensein eines vernetzten Porenraums, passend für die Biologie einer jeweiligen Spezies. Potentielle Aquifer-Typen mit einer nachgewiesenen Besiedlung durch Grundwasserlebewesen sind: Epikarst, klassischer Kalk-Karst: Stygobionte Vertebraten (Fische und Salamander), Pseudokarst (meist Sandstein, Lava oder Laterit): Stygobionte Vertebraten (Fische und Salamander) (Humphreys, 2006), Kluft-Gesteine und besonders alluviale Aquifere.

Das Auftreten der Fauna ist dabei meistens an die Oberfläche subterrainer Ökosysteme gebunden. Nach Fuchs (2007) nimmt die Stetigkeit der Besiedlung, die Artenzahl sowie die Abundanz und Diversität angeblich aufgrund des „mit zunehmender Tiefe insbesondere unterhalb einer Tiefe von 20 m als Folge des geringer werdenden hydraulischen Austauschs markant ab“.

Tabelle 3.4: Verbreitung der Grundwasserfauna nach Aquifer-Typen

Aquifer-Typ	Fauna
Poren- /Lockergestein (Hahn und Fuchs, 2009; Hahn et al., 2013; Griebler et al., 2014; Spengler, 2017)	Crustacea • Cyclopoida • Amphipoda • Isopoda • Ostracoda • Harpacticoida • Syncarida Annelida • Oligochaeta • Polychaeta Nematoda Acari Tardigrada Insecta Gastropoda Mikroturbellaria
Karst (Hahn und Fuchs, 2009)	Crustacea • Cyclopoida • Amphipoda • Isopoda Annelida • Oligochaeta
Kluft (Hahn und Fuchs, 2009; Griebler et al., 2014)	Crustacea • Cyclopoida • Amphipoda Annelida • Oligochaeta Nematoda Acari Tardigrada
Kompakt (Hahn und Fuchs, 2009)	Crustacea • Cyclopoida • Amphipoda • Isopoda Annelida Oligochaeta

Wie Tabelle 3.4 zu entnehmen ist, ähneln die Grundwasser-Gemeinschaften in Poren-Grundwasserleitern mehr der von Karst-Grundwasserleitern als von Kluft- und sogenannten Kompakt-Grundwasserleitern, womit wahrscheinlich Grundwassergeringleiter gemeint sind. Sowohl Karst- als auch Poren-/Lockergesteins-Grundwasserleiter sollen nach Vorstellung der jeweiligen Autoren beides sogenannte „offene“ Systeme sein, welche in engem Kontakt mit Oberflächenwasser stehen, was aus hydrogeologischer Sicht zumindest nicht der Regelfall ist (Hahn und Fuchs, 2009).

Das Vorhandensein von Grundwassertieren soll stark von biogeografischen und hydrogeologischen Faktoren abhängig sein, was der Grund dafür sein soll, dass der Anteil an endemischen Arten, also solcher Arten, die nur in bestimmten Gebieten vorkommen, hoch sein soll (Griebler et

al., 2014). Folgende Grundwasser-Bewohner des Unterstamms der Krebstiere (*Crustacea*) besitzen dennoch eine weite Verbreitung. *Niphargus rhenorhodanensis* (*Amphipoda*) kommt ubiquitär in West-Europa vor und kann alle Aquifer-Typen besiedeln (Dole-Olivier et al., 2009). Auch der Brunnenkrebs (*Bathynellacea*) ist ubiquitär fast überall auf der Erde, aber ausschließlich im Grundwasser, vorhanden (Preuß und Schminke, 2004). Ebenso ist die als stygobiont geltende Art *Diacyclops languidoides* (*Cyclopoida*) eine Artgruppe, die im Grundwasser Deutschlands und ganz Europas weit verbreitet und häufig ist (zusammenfassende Literaturangabe ist Matzke et al. (2009) zu entnehmen).

Zwischenfazit 3.2.6.1

Charakterisierung und räumliche Verteilung der Grundwasserverteilung

Das Vorhandensein der Meio- und Makrofauna des Grundwassers soll stark von biogeographischen und hydrogeologischen Faktoren abhängig sein. Prinzipiell können Grundwassertiere in allen Aquifer-Typen auftreten, vorausgesetzt ein hinreichend großer Porenraum, Nahrung (d. h. Detritus) und Sauerstoff ($> 1 \text{ mg/L}$) sind vorhanden. Karst- und Poren-/Lockergesteins-Grundwasserleiter können beispielsweise eine große Häufigkeit und einen großen taxonomischen Reichtum an Grundwasserfauna besitzen. Der Lebensraum Grundwasser ist zudem stark vom terrestrischen und aquatischen Ökosystem der Oberfläche abhängig, weshalb das Auftreten von Grundwasserorganismen meist an die Oberfläche subterranean Ökosysteme gebunden ist. Die Besiedlung der Aquifere nimmt dabei unterhalb einer Tiefe von 20 m zusammen mit der Konzentration an gelöstem Sauerstoff markant ab. Bisherige Studien zum Vorkommen und der räumlichen Verteilung der Grundwasserfauna fokussierten meist auf Poren- und Karst-Grundwasserleiter; die Grundwasserfauna in Aquitarden und Kluft-Grundwasserleitern ist bislang kaum untersucht worden.

Der geographische Überblick über die bislang in Deutschland durchgeführten Beprobungen und Untersuchungen zur Grundwasserfauna weist große regionale Unterschiede auf. Ebenfalls fällt auf, dass der Anteil an angetroffenen, unbesiedelten Messstellen in Norddeutschland sowie in Berlin signifikant erhöht ist, was unter anderem auf niedrige Sauerstoffkonzentrationen zurückzuführen ist. Dies verdeutlicht, dass ein lokales Vorkommen oder die Abwesenheit von Grundwasserfauna nur durch standortspezifische Untersuchungen nachgewiesen werden kann.

Bezieht man die oben genannte Kriterien für das Auftreten von Grundwasserfauna auf Standortkriterien von HT-ATES-Anlagen, dann ergeben sich nur wenige Überschneidungen.

In der Regel sollten HT-ATES-Anlagen allein aus Gründen der thermischen „Dämmung“ in tiefere, gespannte bzw. halbgespannte Grundwasserleiter (deutlich unterhalb 20 m u. GOK) platziert werden, die zudem in der Regel anaerob sind und nur noch sehr eingeschränkt mit terrestrischen und aquatischen Ökosystemen an der Oberfläche wechselwirken. Weiterhin ist der untertägige thermisch relevante Raumbedarf von HT-ATES-Anlagen selbst bei einem potenziell hohen Ausbaugrad zum Gesamtvolumen von Grundwasserleitern relativ klein, so dass sich dadurch nur in Ausnahmefällen eine bedeutende Konkurrenzsituationen ergeben sollte. Für diese seltenen Fälle wäre es möglich, zunächst den Nachweis einer schützenswerten Grundwasserfauna zu führen, um dann, wie auch bei anderen Ökosystemen, eine Abwägung bzgl. einer Nutzung zu treffen. Eine kategorische Beschränkung der thermischen Nutzung von oberflächennahen Grundwasserleitern zum Schutz einer möglicherweise gar nicht vorhandenen Grundwasserfauna erscheint vor dem Hintergrund der potentiellen Bedeutung saisonaler untertägiger Wärmespeicher zur Wärmeversorgung problematisch.

3.1.8.2 Einflussfaktoren auf die Grundwasser-Fauna und deren Ökosystemdienstleistungen

Die Zusammensetzung der Grundwasser-Lebensgemeinschaften wird hauptsächlich durch drei Faktoren einschneidend beeinflusst (Humphreys, 2009):

► Größe des Lebensraums:

Die Größe des verfügbaren Lebensraums wird durch das vorhandene Porensystem definiert.

► Sauerstoffgehalt:

Der Gehalt an gelöstem Sauerstoff ist ein limitierender Faktor für das Vorhandensein von Fauna (Es gilt eine untere dauerhafte Toleranzgrenze für Invertebraten: 0,5 – 1 mg/L) (Hahn, 2006).

► Nahrungsangebot:

Das Nahrungsangebot im Grundwasser besteht aus Detritus (POM = particulate organic matter, partikelförmiges organisches Material) (Griebler et al., 2014) sowie Bakterien und ist beschränkt und limitiert durch den hydrologischen Austausch mit der Oberfläche (Hahn, 2006).

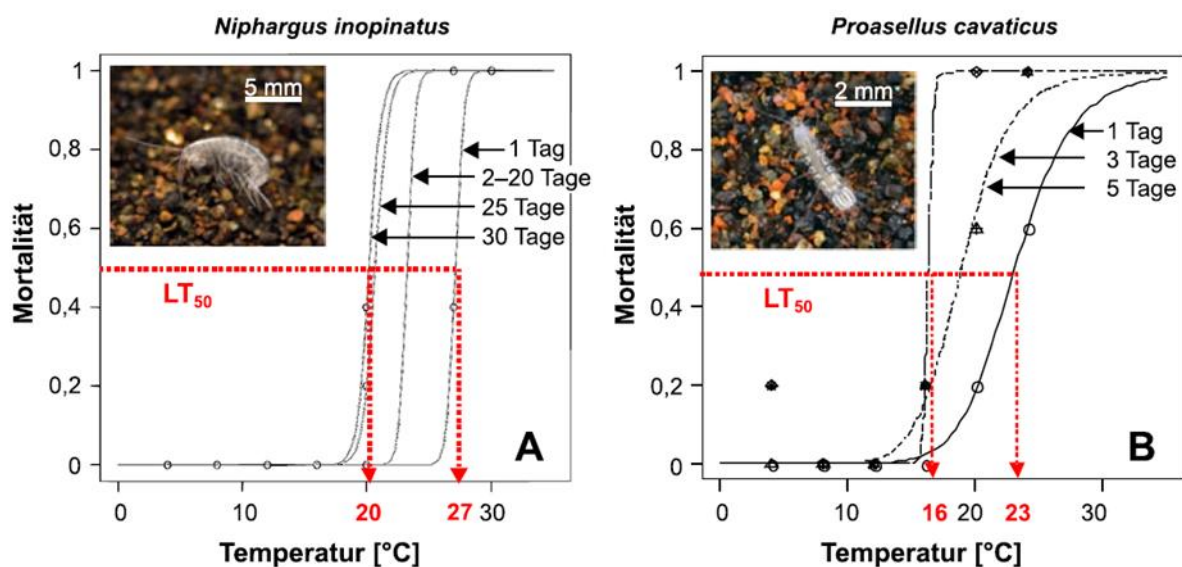
Des Weiteren sollen folgende Faktoren die Grundwasserfauna (wie auch die Mikrobiologie, s. Abschn. 3.2.5) beeinflussen: Sedimentdurchlässigkeit, Strömungsgeschwindigkeit des Grundwassers, Mineralogie, Verfügbarkeit von Elektronendonatoren (organischem Kohlenstoff) sowie Elektronenakzeptoren (Sauerstoff, Nitrat, Sulfat, Eisenoxide), pH-Wert und Salzgehalt (Griebler et al., 2014).

Temperaturveränderungen gehören ebenfalls zu den externen Einflüssen, auf die Grundwasserökosysteme sensitiv reagieren, da die Temperatur eine Schlüsselfunktion bei hydrogeochemischen und biologischen Prozessen spielt und Grundwasserökosysteme mehr oder weniger isotherm sind (Briellmann et al., 2009). Das Temperaturregime beeinflusst nicht nur die mikrobielle Aktivität (vgl. Abschn. 3.2.5), sondern auch den Metabolismus der Meiofauna (Brunke und Gonser, 1997), da zum Beispiel die Konzentration an Nährstoffen und toxischen Metallen pH- und temperaturabhängig ist. Eine Temperaturerhöhung wirkt sich im Allgemeinen verbessernd auf die metabolische Aktivität aus, eine Temperaturerniedrigung hingegen reduzierend (Griebler et al., 2016). Die durch Temperaturerhöhungen gesteigerte physiologische Aktivität macht sich vor allem in der Bewegungsaktivität und im Sauerstoffverbrauch von Individuen bemerkbar. Im Vergleich zu Kontrollgruppen in Laborversuchen zeigte sich in Studien von Issartel et al. (2005) jedoch auch eine erhöhte Mortalität ab einem artspezifischen Temperatur-Grenzwert. Weiterhin können geochemische Prozesse aufgrund starker Temperaturänderungen zu einer Verringerung der Sauerstoffsättigung im Grundwasser führen (Stumm und Morgan, 1996). Besonders der Gehalt an gelöstem Sauerstoff ist für die Grundwasserfauna essentiell, da eine Verringerung der Sauerstoffkonzentration als Resultat einer Temperaturerhöhung Aquifere unbewohnbar für Organismen machen kann (Riedel, 2019).

Die direkten Reaktionen der Gemeinschaften im Grundwasser auf Temperaturveränderungen sind bisher nur vereinzelt untersucht worden und kaum verstanden (Briellmann et al., 2009; Castaño-Sánchez et al., 2020). Briellmann et al. (2011) untersuchten in Laborexperimenten eine *Amphipoda* und eine *Isopoda*, wobei die Temperatur, die einer letalen Dosis von 50 % nach 24 h

entspricht, bei ersterer 27,1 °C und bei zweiter 23,0 °C betrug. Mit zunehmender Dauer der Wärmebelastung sinken die entsprechenden „letalen“ Temperaturen jedoch schnell ab, so dass eine Temperatur von über 20 °C für beide Arten als kritisch gesehen wird (Abb. 3.19) (Briellmann et al., 2011). Zu ähnlichen Ergebnissen kam eine Studie mit zwei *Amphipoda*, in der die Tiere Temperaturen bis 28 °C ausgesetzt wurden, mit Überlebenszeiten zwischen 0,3 Tagen und 1,6 Tagen, je nach Art und Akklimatisierungsniveau. Untersuchungen an *Isopoda* kommen zu ähnlichen Ergebnissen und geben eine Überlebensrate von 95 % für verschiedenen Spezies zwischen 11,0 °C und 11,8 °C bzw. 14,0 °C und 16,6 °C an (Mermillod-Blondin et al., 2013). Eine aktuelle Studie beleuchtet Temperatur- und Salinitätstoleranzen von drei Crustaceen aus verschiedenen australischen Aquiferen in Laborexperimenten bis 30 °C. Zwei der untersuchten Arten (*Cyclopoida* und *Harpacticoida*) weisen eine fünfzigprozentige Mortalität bei ca. 25 °C (bzw. Temperaturdifferenz von 7 K) auf, während die untersuchten *Syncarida* bis 30 °C nur eine Mortalitätsrate von 40 % aufwiesen (Castaño-Sánchez et al., 2020). Die maximale Temperatur, bei der ein Überleben von Stygobionten möglich ist, richtet sich nach dem tödlichen Temperaturgrenzwert für Metazoen, der bei circa 50 °C liegt. Dies ist übereinstimmend mit Funden von Nematoden in tiefen Minen bei 48 °C (Fišer et al., 2014).

Abbildung 3.19: Temperatur-Dosis-Wirkungs-Beziehungen für zwei Grundwasserinvertebraten



Quelle: Briellmann et al., 2011.

Um die Temperaturpräferenzen der Grundwasserfauna genauer zu bestimmen, können anstelle der Überlebensraten aus Laborexperimenten bei ausreichender Datengrundlage auch sogenannte Temperaturumschlagpunkte aus Felddaten statisch bestimmt werden (Spengler, 2017). Eine entsprechende Untersuchung an 13 Arten der Stygo-Region „Südwestliche Mittelgebirge“ hat ergeben, dass sieben Arten von erhöhten Grundwassertemperaturen über 14 °C profitieren, während das Vorkommen der anderen Arten an eher niedrigere Temperaturen gebunden ist.

Im Vergleich zu der Wärmetoleranz gibt es wenige Studien, die sich mit der Kältetoleranz der Grundwasserfauna befassen. Laut Karaman (1976) liegt die untere Temperaturgrenze, bei der Stygobionten überleben können, bei 2 °C. In Laborexperimenten wurden allerdings auch Überlebensraten von 50 % bei Temperaturen von -2 °C zwischen 1 und 60 Tagen beobachtet (Issartel et al., 2005).

Insgesamt wurden in den oben aufgeführten Studien 23 verschiedene Arten auf ihre Temperaturtoleranz untersucht. Gemessen an der oben im Abschnitt aufgeführten Artenvielfalt repräsentiert dies nur einen sehr geringen Anteil, wobei der Fokus der Studien auf Arten (z. B. *Amphipoda*, *Cyclopoida* usw.) liegt, denen wichtige Ökosystemleistungen zugeordnet werden.

Ein weiteres und vor allem bei Mikroorganismen beobachtetes Phänomen ist eine temperaturbedingte Verschiebung der Gemeinschaften, bei der temperaturtolerantere Spezies bestehende Gemeinschaften kälteliebender Spezies bei andauernder Wärmebelastung ersetzen können. Grundwasser-Lebensräume beherbergen meist psychrophile (kälteliebende, Wachstumsoptima zwischen 10 °C und 20 °C) und psychrotolerante Mikroorganismen, die bei einer Temperaturerhöhung durch mesophile Populationen (Wachstumsoptima: 20 – 40 °C (Briellmann et al., 2011)) ersetzt werden (Briellmann et al., 2009). Dieses Phänomen wäre auch bei Grundwassertieren möglich, da sich, wie Abbildung 3.19 zeigt, die Temperatur-Toleranzen einzelner Spezies stark unterscheiden können. Schlussendlich können Veränderungen der Grundwasser- bzw. Aquifer-Temperatur um 5 K dazu führen, dass biologisch induzierte Prozesse potenziell stimuliert (gesteigerte Aktivität) oder gestört (Dormanz, Tod, Auswanderung) werden (Griebler et al., 2016).

Änderungen in der Abundanz der Grundwasserfauna oder deren Zusammensetzung ziehen auch mögliche Änderungen in Ökosystemleistungen nach sich. Unter Ökosystemleistungen versteht man Dienstleistungen, die von einem natürlichen Ökosystem erbracht und vom Menschen genutzt werden, um sein Wohlergehen zu gewährleisten (Avramov et al., 2010). In Deutschland werden beispielsweise 70 % des Trinkwasserbedarfs direkt oder indirekt durch die Entnahme von Grundwasser gedeckt. Grundwasserökosysteme sind für zahlreiche Dienstleistungen verantwortlich, die dabei helfen, sauberes (Trink-)Wasser bereitzustellen (Griebler und Avramov, 2015). Grundwasserfauna stimuliert direkt diese biologische Selbstreinigung des Grundwassers, indem sie entstandene Biofilme abgrast und somit einen wichtigen Beitrag im Kohlenstoffumsatz leistet. Darüber hinaus durchwühlt und lockert die größere Grundwasserfauna auf der Suche nach Nahrung aktiv das Substrat (Bioturbation) (Avramov et al., 2010).

Amphipoden sind Beispiele für solche Spezies, da sie als Anzeiger für gesunde Ökosysteme gelten. Sie reagieren besonders sensitiv auf sich ändernde Umweltbedingungen wie beispielsweise auf den Eintrag von Schadstoffen (Korbel und Hose, 2010) und Temperaturerhöhungen (Briellmann et al., 2011; Spengler, 2017). Laborversuche haben gezeigt, dass sich stygobionte Amphipoden aktiv bewegen und dabei eine Migrationsgeschwindigkeit zwischen $1,7 \cdot 10^4$ und $3,5 \cdot 10^4$ m pro Jahr zurücklegen können (Smith et al., 2016). Aufgrund ihrer Größe und langgestreckten Körperform durchwühlen Amphipoden aktiv das Substrat und bauen durch ihre Fraß-Tätigkeit Organik ab (Boulton et al., 2008). Ein weiteres Beispiel sind Isopoden (*Phreatoicidae*), die verunreinigenden Mikroben verzehren und dabei Partikel aufnehmen und verdauen. Experimentell bestimmte Verbrauchsdaten ergaben, dass Populationen dieser Tiere 7 – 28 Tonnen Sediment pro Hektar und Jahr aufarbeiten und dabei 120 – 650 Gramm organischen Kohlenstoff pro Hektar und Jahr assimilieren können (Fenwick et al., 2004). Ein Beweis für diese Fraßaktivität ist der Nachweis von *E. coli* und coliformen Bakterien im Darm von Isopoden (Sinton, 1984). Die Wichtigkeit der Funktion einzelner Spezies für die Dienstleistung des gesamten Ökosystems wird von verschiedenen Studien unterschiedlich bewertet. Zum einen wird davon ausgegangen, dass sich die ökologischen Funktionen von Spezies überlappen und beim Aussterben einer Spezies die Ökosystemfunktion aufrechterhalten wird, da ihre Aufgabe von einer anderen Spezies übernommen wird (Ehrlich und Ehrlich, 1981).

Ein Kritikpunkt dieser Theorien sowie an den oben genannten Studien zur Grundwasserfauna ist die häufige Durchführung von Experimenten in synthetischen Umgebungen und mit wenigen Spezies. Experimente unter natürlichen Bedingungen in einem Grundwasserleiter sind besser

geeignet, um den Charakter natürlicher, offener, komplexer und artenreicher Ökosysteme abbilden zu können. Grundsätzlich stellt sich in diesem Zusammenhang auch die Frage, ob Grundwassertiere überhaupt großflächig im Grundwasser leben oder nur in Messstellen, was eine lokal beschränkte Funktion im Hinblick auf Ökosystemdienstleistung zur Folge haben könnte. Laut Hahn und Gutjahr (2014) sind Grundwassertiere nicht „gleichmäßig über das Grundwasser verteilt, sondern faunafreie Bereiche wechseln kleinräumig mit Zonen mit mehr oder weniger dichter Besiedlung“. Eine Beprobung spiegelt dementsprechend nur einen kleinen Bereich des Lebensraums wider, der schon in einem Meter Entfernung ein komplett anders Bild zeigen kann. Ebenso stellen Grundwassermessstellen nur einen punktuellen Zugang zum Lebensraum Grundwasser dar. Der Sumpf einer Messstelle ist dabei ein – mit Sauerstoff (bei sehr flachen Messstellen < 10 m) und Nahrung angereicherter – Hohlraum im Aquifer, der für Tiere einen äußerst attraktiven Lebensraum darstellt und zur Einwanderung von Tieren aus dem Grundwasser in die Messstelle führen kann (Hahn und Gutjahr, 2014).

Ein weiterer kritischer Aspekt ist die Art der Beprobung, die entscheidend für die Bewertung und Interpretation der faunistischen Ergebnisse ist. Eine einfache und kostengünstige Beprobung mit Hilfe eines Netzsammlers ist eine zufriedenstellende Methode für die faunistische Beprobung von Grundwassermessstellen. Allerdings ist sie nicht repräsentativ für den gesamten Aquifer, da lediglich das Standwasser einer Messstelle mit der zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Fauna beprobt wird. Alternativ kann eine Messstelle vor der eigentlichen Beprobung ausgepumpt werden und die Probennahme im nachströmenden Grundwasser erfolgen. Studien zeigen, dass es zwischen beiden Methoden keine signifikanten Unterschiede in den gemessenen hydrochemischen Parametern des Standwassers und des Grundwassers gibt (Hahn und Matzke, 2005). Auch die beprobte Grundwasserfauna scheint innerhalb der Messstelle und im Aquifer, bezogen auf die Faunengemeinschaften, ähnlich zu sein. Grundwassermessstellen enthalten lediglich eine größere Anzahl an Individuen pro Liter Wasser, verursacht durch Filtrationseffekte (Hahn und Matzke, 2005). Für eine repräsentative und vergleichbare Beprobung benötigt es zukünftig eine umfassendere und definierte Standardmethode zum Sammeln von Grundwassertieren.

Zwischenfazit 3.2.6.2

Temperaturabhängige Veränderungen der Grundwasserfauna und deren Ökosystemdienstleistungen

Die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Zusammensetzung der Grundwasser-Lebensgemeinschaften sind die Größe des Porenraums, der Sauerstoffgehalt, sowie das Nahrungsangebot.

Im Hinblick auf geothermische Nutzung und den Faktor Temperatur lässt sich auf Grundlage der vorliegenden Studien sagen, dass verschiedenen Arten der Grundwasserfauna sehr unterschiedlich auf Temperaturänderungen reagieren und speziesabhängige Temperatur-Präferenzen sowie Wärme-, bzw. Kältetoleranzen besitzen. Aufgrund von Labor- sowie Geländeuntersuchungen ist davon auszugehen, dass die Grundwasserfauna wichtige Ökosystemleistungen (z. B. Abgrasen von Biofilmen, Abbau von organischen Schadstoffen usw.) in manchen oberflächennahen und aeroben Grundwasserleitern erfüllen kann.

Betrachtet man die Erfordernisse einer möglichst hohen Ausspeichertemperaturen bei der Wärmeversorgung, so wird deutlich, dass hohe Einspeichertemperaturen bis zu 80 °C zu einem Absterben der an dem Ort der Einspeicherung existierenden Grundwasserfauna führen werden. Allerdings sind, wie bereits ausgeführt, die Volumina mit entsprechenden, temporär hohen Temperaturen i. d. R. auf die Gesamtvolumina von Grundwasserleitern klein bis sehr klein. Unklar ist zudem,

ob bzw. welche Arten in der Ausspeicherungsphase wieder in Areale am „warmen“ Brunnen einwandern können. Forschungsbedarf besteht zudem, ob und zu welchem Anteil bestimmte Arten auch aktiv mit dem Grundwasserstrom bei der Einspeisephase in kühlere Bereiche ausweichen können. In diesem Kontext stellt sich auch die Frage, wie durch HT-ATES-Anlagen in oberflächennahen aeroben Grundwasserleitern mit nicht-endemischer Grundwasserfauna die Ökosystemdienstleistungen verändert werden. Zur Durchführung eines entsprechenden Feldversuchs sind allerdings noch methodische Ansätze weiter zu entwickeln, z. B. inwiefern die häufig in Grundwassermessstellen beprobte Fauna repräsentativ für den gesamten Aquifer ist.

3.1.8.3 Zustand der Grundwasserfauna in urbanen Gebieten

Der Bedarf an saisonalen untertägigen Wärmespeichern ist eng mit hohen Wärmebedarfsdichten korreliert, d. h., dass er i. d. R. für urbane Gebiete besonders hoch ist. Deswegen ist die Zusammensetzung der Grundwasserfauna in urbanen Gebieten von besonderem Interesse. In einer der wenigen Arbeiten zu dieser Thematik wurden am KIT die ökologischen Bedingungen in einem anthropogen beeinflussten Aquifer bewertet. Dafür wurden 39 Grundwassermessstellen im Stadtgebiet Karlsruhe und in einem Wasserschutzgebiet in einem Waldgebiet nördlich von Karlsruhe untersucht. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Daten zur Grundwasserfauna sowie den thermischen und chemisch-physikalischen Eigenschaften des Grundwassers erhoben (Schweikert, 2014), neu aufbereitet und visualisiert (Koch et al., 2020).

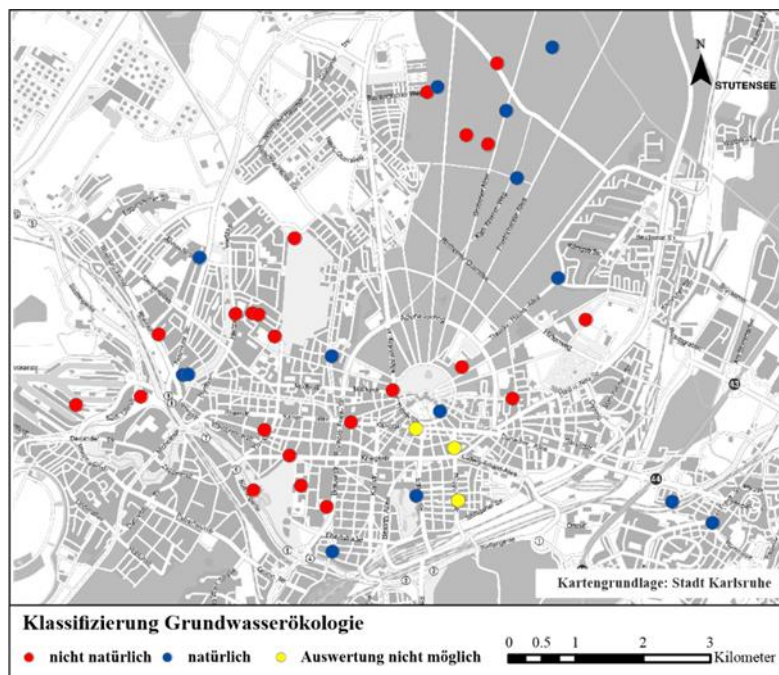
In der Studie sind deutliche Unterschiede in der räumlichen Verteilung abiotischer Grundwassercharakteristika und bestimmter Grundwasserspezies innerhalb des Untersuchungsgebiets festgestellt worden. Das Grundwasser des Waldgebiets zeigt niedrigere Grundwassertemperaturen und Nitratgehalte sowie höhere Gehalte an gelöstem Sauerstoff. Zudem unterscheidet sich der faunistische Artenbestand innerhalb der Pegel im Stadt- und im Waldgebiet signifikant. Beispielsweise wurde eine größere Anzahl an Crustaceen in Pegeln des Waldgebiets gefunden. Im Gegensatz dazu sind größere Individuen-Mengen der Gattung *Parastenocaris* sowie Nematoden und Oligochäten ein Charakteristikum der Pegel im urbanen Raum. Diese Spezies zählen zu den Arten, die unter „widrigen“ Lebensbedingungen häufiger auftreten können. Nematoden kommen laut Hahn et al. (2013) an Standorten mit ungünstigen Lebensbedingungen – wie niedrigen Sauerstoffgehalten, hohen Anteilen an Feinsubstrat und Schadstoffbelastungen – vor. Auch in der Karlsruher Studie sind Individuen der Gattung *Parastenocaris*, Oligochäten und Nematoden in städtischen Pegeln mit erhöhter Grundwassertemperatur und erhöhten Nitratgehalten vorzufinden. Selbst in stark erwärmten Pegeln mit einer Grundwassertemperatur von ca. 18 °C wurden zahlreiche Grundwassertiere angetroffen, die möglicherweise an wärmere Temperaturen angepasst sind (*Parastenocaris* Toleranz bis > 20 °C (Fuchs et al., 2006)). Eine Korrelation zwischen der Anzahl der in den Grundwassermessstellen angetroffenen Grundwassertieren und der Grundwassertemperatur besteht in dem Untersuchungsgebiet jedoch nicht. Ebenso wenig korreliert die Anzahl der Grundwassertiere mit dem pH-Wert sowie dem Nitrat- und Eisengehalt. Dafür besteht eine Korrelation mit dem Gehalt an Detritus und Ocker und eine signifikante Korrelation zwischen der Anzahl an Taxa und dem Sauerstoffgehalt (Spearman-Korrelations-Koeffizient: $\rho = 0.53$).

Mit Hilfe eines im Auftrag des Umweltbundesamts entwickelten Bewertungsschemas wurden zudem der ökologische Zustand des Grundwasserökosystems bewertet und die Messstellen klassifiziert (Griebler et al., 2014). Die Anwendung des Klassifikationsschemas ergab, dass nur die Hälfte der Grundwassermessstellen im Waldgebiet einen guten bis sehr guten ökologischen Zustand besitzen. Im Stadtgebiet besaßen sieben Messstellen diesen guten bis sehr guten Zustand (Abb. 3.20), während 18 Messstellen keinen sehr guten Zustand aufwiesen.

Die Ergebnisse zeigen keine eindeutige räumliche Verteilung des ökologischen Zustands des Grundwassers, bezogen auf Landnutzung und anthropogene Einflüsse. Allerdings fällt auf, dass der Anteil der Messstellen, die keinen guten bis sehr guten ökologischen Zustand aufweisen, in der Mehrzahl in urbanen Gebieten liegen.

Nach diesen Ergebnissen erscheint es fraglich, ob das Bewertungsschema für den hochkomplexen Einsatz in einem urbanen Untersuchungsgebiet geeignet ist. Basierend auf den existierenden, auf thermische Veränderungen nicht angepassten Bewertungsschemata, nicht standardisierten Entnahmeverfahren und der generell sehr überschaubaren Anzahl an Grundwassertieren pro Messstelle sind übertragbare Aussagen zur Beeinflussung der Grundwasserfauna durch thermische oder andere Effekte aktuell leider empirisch nur bedingt gesichert. Im Hinblick auf die thermische Nutzung des oberflächennahen Untergrunds in urbanen Gebieten wäre es hilfreich, wenn zunächst belastbare Basis- bzw. Referenzdatensätze zur Zusammensetzung und räumlichen Verteilung im Rahmen hinreichend groß angelegter und wiederholt stattfindender Messkampagnen in verschiedenen Städten erarbeitet würden.

Abbildung 3.20: Klassifizierung der Grundwasserfauna in Karlsruhe nach dem Schema von Griebler et al. (2014)



Quelle: Eigene Darstellung, Karlsruher Institut für Technologie. Datenquellen: Schweikert, 2014; Koch et al., 2020.

Zwischenfazit 3.2.6.3

Grundwasserfauna in urbanen Gebieten

Die Untersuchung der Grundwasserökologie im Raum Karlsruhe an urbanen sowie anthropogen unbeeinflussten Messstellen hat erstens gezeigt, dass generelle Aussagen über Zusammenhänge zwischen faunistischen und anderen Grundwasserparametern (z. B. der Temperatur) in diesen offenbar hochkomplexen bzw. aktuell nur bedingt bekannten Systemen schwierig sind. Zweitens deuten die Daten darauf hin, dass bereits heute die Randbedingungen urbaner Gebiete die faunistische Zusammensetzung in oberflächennahen Grundwasserleitern deutlich beeinflusst. Ob bzw. inwieweit z. B. HT-ATES-Anlagen mit einem relativ zum Grundwasserleitervolumen kleinen thermischen Auswirkungsraum unter diesen Randbedingungen einen ökologischen Schaden und/oder

eine Einschränkung der faunistischen Ökodienstleistungen verursachen, sollte in einem geeigneten Forschungsvorhaben verfolgt werden. Derzeit existiert keine hinreichend belastbare Datengrundlage für eine entsprechende quantitative Prognose bzw. Bewertung, um eine belastbare Abwägung zwischen energetischen Nutzen und faunistischen Risiken von HT-ATES-Anlagen in urbanen Gebieten treffen zu können.

Entsprechende Prognosen und Bewertungen erfordern weiterhin methodisch standardisierte Beprobungs-, Analyse- und Auswertungsverfahren und eine flächendeckende und belastbare Kartierung der aktuellen faunistischen Besiedlung oberflächennaher Grundwasserleiter in urbanen Gebieten.

Resümee 3.2.6

Temperaturbedingte Auswirkungen auf die Fauna oberflächennaher Grundwasserleiter

Die Auswirkungen einer thermischen Bewirtschaftung von Grundwasserleitern auf die dort lebende Grundwasserfauna, die häufig endemisch sein soll, ist ein bedeutender Diskussionspunkt bzgl. der Akzeptanz saisonaler untertätiger Wärmespeicher.

Vergleicht man die Randbedingungen für die Existenz einer Grundwasserfauna und die (bevorzugten) Randbedingungen für HT-UTES-Anlagen, insbesondere HT-ATES-Anlagen, stellt sich allerdings die Frage, ob die angenommene Konkurrenzsituation tatsächlich, selbst bei einem Hochlauf entsprechender untertätiger saisonaler Wärmespeicher, wirklich bedeutend sein wird.

So scheiden Karstgebiete und Kluftgrundwasserleiter als Standorte für ATES-Anlagen weitgehend aus, so dass eine etwaige Konkurrenz allein bei Porengrundwasserleitern besteht. In Porengrundwasserleitern ist die Grundwasserfauna an sehr oberflächennahe (i. d. R. < 20 m u. GOK) gebunden, da dort essentielle Randbedingungen wie ein O₂-Gehalt von > 0,5 – 1 mg/L ein entsprechendes Nährstoffangebot, das häufig von der Geländeoberfläche nachgeliefert wird, erfüllt wird.

ATES-

Anlagen hingegen benötigen eine hydraulisch möglichst geringdurchlässige Deckschicht und sollten deutlich tiefer als 20 m u. GOK in dann meist anaerobe Grundwasserleiter positioniert werden, um einen Wärmeverslust an die Geländeoberfläche zu minimieren. Erschwert wird eine übergeordnete Regelung zur Lösung der (vermeintlichen) Konkurrenzsituation zudem durch deutliche Wissens-

defizite. Als wichtige Punkte sind die räumliche Verbreitung der (insbesondere endemischen) Grundwasserfauna in Deutschland, die quantitative Bedeutung der Grundwasserfauna als Ökosystemdienstleister und die Frage nach langfristigen und irreversiblen Auswirkungen von HT-ATES-Anlagen auf die Grundwasserfauna zu nennen. Ähnlich wie bei den zuvor skizzierten offenen hydrochemischen und mikrobiologischen Fragestellungen fehlt auch bei dem Thema „Thermische Auswirkungen auf die Grundwasserfauna“ ein hinreichend belastbare empirische Datenbasis, die die Ableitung übergeordneter Regelungen erlauben würde.

Erst auf solcher Basis wird eine fundierte und dringend notwendige Diskussion und schlussendlich Abwägung möglich sein, z. B. inwiefern eine alternative Nutzung anderer Ökosysteme zur Wärmeversorgung (z. B. Anbau von Mais zur Biogasgewinnung etc.) unter ökosystemaren oder anderen Gesichtspunkten weniger kritisch ist.

4 Rechtliche Steuerung der thermischen Nutzung des urbanen Untergrunds – Konfliktbewältigung beim Ausbau von oberflächennaher Geothermie und Aquifer-Wärmespeichern in Ballungsräumen

4.1 Notwendigkeit einer thermischen Untergrund-Bewirtschaftung aus naturwissenschaftlich-juristischer Perspektive

Der Klimawandel bringt insbesondere für Städte in Deutschland große Herausforderungen mit sich. Zum einen bedarf es eines entschlossenen, schnellen Umbaus der Wärmeversorgung von fossilen auf erneuerbare Energien, um die ambitionierten Klimaziele für den Wärmesektor zu erfüllen. Zum anderen steigt in Mitteleuropa das Risiko heißerer und längerer Hitzeperioden als auch seltener, aber dann ausgeprägter Kälteperioden, was gesundheitliche Risiken für die Bevölkerung birgt und auch die Wärmeversorgung (Heizen und Kühlen) vor neue und große Herausforderungen stellt (vgl. Kap. 1).

Für diese Handlungsfelder ist die Nutzung des geologischen Untergrunds als thermischer Speicher relevant, der bislang noch selten zur Wärme- und Kälteerzeugung oder -speicherung genutzt wird. Heute produzieren mehr als 21 Millionen Heizkessel in Deutschland Wärme für Heizungen und Warmwasser; weit über 90 % davon werden mit Erdgas, Heizöl oder Kohle befeuert. Diese werden zukünftig im Rahmen der klimaneutralen Transformation der Wärmeversorgung (Heizen und Kühlen) ganz überwiegend durch Wärmepumpen ersetzt werden. Gleichzeitig steigt mit der Zunahme der Außentemperatur im Zuge des Klimawandels der Kühlungsbedarf von Gebäuden, insbesondere in Städten (vgl. u.a. Abschn. 1.1).

Die riesige Menge der zu substituierenden Brennstoffe stellt das Energiesystem vor erhebliche Herausforderungen. Die jährlich für Gebäudewärme in Deutschland eingesetzte Energiemenge ist beispielsweise deutlich größer als die Energiemenge, die in der gesamten Stein- und Braunkohle enthalten ist, die in Deutschland im Durchschnitt der vergangenen zehn Jahre verbrannt wurde. Sie entspricht etwa dem Sechsfachen der Produktion aller gut 21.000 durchschnittlichen Windenergieanlagen in Deutschland im Jahr 2019 (132 TWh).

Wenn zukünftig ein relevanter Teil dieser Energie dem oberflächennahen geologischen Untergrund, insbesondere dem Grundwasser in Städten, entnommen oder dort gespeichert werden soll, wird schnell klar, dass der rechtliche Steuerungsbedarf steigt. Das gilt nicht nur für den Entzug großer Wärmemengen aus dem oberflächennahen Untergrund mit Wärmepumpen, sondern auch für die Zuführung von Wärme auf verschiedenen Temperaturniveaus in den geologischen Untergrund, um diese dort saisonal zu speichern und/oder um Gebäude und Produktionsprozesse z. B. in den zunehmend heißeren Sommern zu kühlen.

Dass der rechtliche Steuerungsbedarf bisher nicht als besonderes Problem gesehen worden ist, hat verschiedene Ursachen. Zum einen wird der geologische Untergrund bisher nur eingeschränkt thermisch bewirtschaftet, weil konventionelle Wärmeversorgungstechnologien aufgrund der niedrigen Preise fossiler Energieträger wirtschaftlicher gewesen bzw. als wirtschaftlicher angesehen worden sind. Zum anderen erschien die thermische Nutzung des geologischen Untergrunds mit reinen Wärmeentzugstechnologien i. d. R. nur für Gebiete mit geringen oder bestenfalls mittleren Wärmebedarfsdichten (vgl. Kap. 2), z. B. für Neubaugebiete in urbanen Randlagen, geeignet. Ein weiterer wesentlicher Grund ist, dass die vielfachen rechtlichen Restriktionen (vgl. Kap. 1) und z. T. auch behördliche Vorbehalte von vornherein den Bau größerer

thermischer Entzugsanlagen wie Erdwärmesonden oder Wasser-Wasser-Anlagen (WWA-Systeme) oder den saisonaler untertägiger Wärmespeicher limitierten.

Ob und wie der rechtliche Rahmen weiterentwickelt werden muss, um die Potenziale des geologischen Untergrunds für den Klimaschutz und die Anpassung an den Klimawandel zu heben und um die dabei entstehenden Konflikte sinnvoll zu regeln, ist daher bzw. trotzdem bisher kaum untersucht worden und steht im Mittelpunkt der anschließenden Ausführungen.

Konkret sind aus rechtlicher Perspektive folgende Fragen, die unter naturwissenschaftlich-technischer Perspektive bereits in den Abschnitten 1 – 3 dieser Studie behandelt worden sind, zu erörtern:

1. Wie ist die Notwendigkeit und Angemessenheit einer thermischen Untergrundbewirtschaftung im zukünftigen Energieversorgungssystem zu bewerten?
2. Welche potenziellen negativen Auswirkungen und Nutzungskonkurrenzen sind bei der thermischen Untergrundbewirtschaftung zu berücksichtigen?
3. Welche regulatorischen Herausforderungen existieren, um eine optimierte Bewirtschaftung des geologischen Untergrunds z. B. im Hinblick auf eine kombinierte Wasser- und Wärmeversorgung zu sichern?

Aufbauend auf diese Analysen werden folgende Fragenkomplexe behandelt:

4. Welche Steuerungsmechanismen zur thermischen Bewirtschaftung stehen nach geltendem Recht zur Verfügung? Wie können die bestehenden Steuerungsmechanismen weiterentwickelt werden?

4.2 Die potenzielle Bedeutung der thermischen Untergrundnutzung für Klimaschutz und -anpassung

4.2.1 Anforderungen des künftigen Energiesystems an den Wärmemarkt

Auch zukünftig wird es für die Bereitstellung von Wärme (Heizen und Kühlen) für Gebäude und Industrie einen erheblichen Bedarf geben. Verschiedene Energieszenarien (Abb. 1.1 und 1.2; ausführliche Beschreibung vgl. Abschn. 1.1.2) gehen davon aus, dass der Wärmebedarf in den kommenden drei Jahrzehnten insgesamt um 12 % – 67 % verringert werden kann, was anspruchsvoll erscheint, da in den vergangenen zehn Jahren trotz erheblicher Förderung praktisch keine Verringerung des Wärmebedarfs erreicht werden konnte (vgl. Stede et al. (2020)).

Die zukünftige Wärmeversorgung wird in großem Umfang abhängig von der Nutzung der lokal verfügbaren erneuerbaren Wärme sein. Anders als erneuerbare Elektrizität, die prinzipiell überall innerhalb des europäischen Elektrizitätsnetzverbundes erzeugt und relativ kostengünstig zu nahezu jedem Gebäude transportiert werden kann, ist Wärmeenergie nicht über lange Distanzen zu vertretbaren Kosten zu transportieren. Bislang konnten die Energieträger Erdgas und Heizöl einfach und kostengünstig an den Ort des Wärmebedarfs transportiert werden. Um das von der EU und der Bundesregierung avisierte Ziel der Klimaneutralität zu erreichen, fallen Erdöl und Erdgas für die Gebäudeheizung jedoch weg. Sie können in absehbarer Zeit auch nicht durch klimaneutrale, leicht transportierbare Wärmeträger mit hoher Energiedichte ersetzt werden: Nachhaltige Biomasse steht nicht im erforderlichen Umfang dem Wärmemarkt zur Verfügung und wird daher auch zukünftig nur eine ergänzende Rolle in der Wärmeversorgung spielen; eine vergleichende Übersicht über verschiedener Energie- und Klimaschutzszenarien zur Rolle der Biomasse im Wärmesystem wird in Möhring et al. (2022) für das Bundesamt für Naturschutz

(BfN) vorgenommen. Das gleiche gilt – mindestens für die kommenden ein bis zwei Jahrzehnte (vgl. Wietschel et al. (2021)) – für synthetische Brennstoffe; diese werden zudem auf absehbare Zeit zu teuer bleiben, um als Rückgrat einer sozialverträglichen Wärmewende zu dienen (vgl. hierzu näher Agora Verkehrswende et al. (2018) und Maaß (2020)).

Als externer, von außerhalb der Region importierter Energieträger steht dem Wärmemarkt künftig vor allem Elektrizität zur Verfügung. Das Dargebot an erneuerbarer Elektrizität ist jedoch quantitativ begrenzt und fluktuiert stark. Eine wesentliche Aufgabe des Wärmemarkts besteht daher zukünftig darin, das fluktuierende erneuerbare Elektrizitätsdargebot möglichst effizient zu nutzen und möglichst wenig auf Elektrizität aus absehbar knappen bzw. teuren (fossilen oder synthetischen) Brennstoffen zurückzugreifen. Hieraus folgt, dass mit der begrenzten und fluktuierenden verfügbaren Elektrizitätsmenge in den Städten die jeweils lokal verfügbaren Wärmepotenziale (Heizen und Kühlen) möglichst effizient gehoben werden müssen.

4.2.2 Integration lokal verfügbarer Wärmequellen durch Wärmespeicher

Lokal stehen in den Städten abhängig von den jeweiligen geografischen, geologischen und sozio-ökonomischen Gegebenheiten unterschiedliche Wärmequellen zur Verfügung. Diese korrelieren jedoch saisonal meist nicht mit dem Wärmebedarf. Zudem stehen die Wärmequellen häufig auch nicht auf dem erforderlichen Temperaturniveau zur Verfügung. Insbesondere gilt dies für Solarthermie (vgl. Maaß et al. (2015), S. 78), industrielle Abwärme und tiefe Geothermie. Auch die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), das bisherige Rückgrat der Fernwärme, muss sich zunehmend am Elektrizitätsmarkt orientieren: Die Anlagen produzieren nicht mehr unbedingt dann, wenn Wärme benötigt, sondern, wenn nicht ausreichend Elektrizität aus Windenergie- und Photovoltaik-Anlagen erzeugt wird. Im aktuellen Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz (Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung; KWKG) ist die jährliche förderfähige Leistung von KWK-Anlagen auf 3500 Stunden begrenzt; mit weiter wachsenden Anteilen der fluktuierenden erneuerbaren Energien an der Elektrizitätsproduktion wird die Nutzungsdauer der KWK-Anlagen weiter sinken, womit sich auch die Wärmeproduktion von KWK-Anlagen weiter vom Wärmebedarf entfernen wird.

Die wichtigste, weil ubiquitär und zeitlich sowie quantitativ nahezu unbegrenzt zur Verfügung stehende natürliche Wärmequelle ist die Umweltwärme, also die in der Außenluft, im oberflächennahen und tieferen geologischen Untergrund und im Medium Wasser (Oberflächenwasser, Grundwasser, Abwasser etc.) „natürlich“ vorhandene Wärme (§ 3 Abs. 1 Nr. 30 GEG (Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden; Gebäudeenergiegesetz)). Während die in der Außenluft und in Oberflächengewässern vorhandene Wärme saisonal stark schwankt und in der Heizperiode weniger Wärme zur Verfügung steht als im Sommerhalbjahr, ist die im geologischen Untergrund vorhandene Temperatur zumindest in unbebauten Gebieten ab einer Tiefe von 10 m bis 20 m saisonal weitgehend konstant.

Die Nutzung der Umweltwärme ist voraussichtlich die zukünftige Standardmethode zur dezentralen Bereitstellung von Gebäudewärme (weiterführend vgl. z. B. Langenheld et al. (2018)). Ausgehend vom derzeitigen Bestand von rund einer Million Anlagen werden nach einem aktuellen Szenario bereits in zehn Jahren rund sechs Millionen Heizungswärmepumpen in Betrieb sein und bis zum Jahr 2050 die dezentralen fossilen Heizkessel weitgehend ersetzt haben (vgl. Dambach et al. (2020)). Auch für die Dekarbonisierung der Fernwärmenetze werden in Deutschland Wärmepumpen – wie bereits heute in den skandinavischen Ländern – voraussichtlich eine große Rolle spielen. Insgesamt sollen Wärmepumpen im Jahr 2050 nach einer Modellierung des

Fraunhofer ISE zwischen 65 % und 90 % der Wärme für Heizung und Warmwasser in Gebäuden bereitstellen (vgl. Henning und Palzer (2015)).

Auch die Wärme aus den anderen o. g. Quellen (elektrizitätsgeführte KWK, industrielle Abwärme, tiefe Geothermie, Solarthermie) gilt es zukünftig konsequent zu nutzen. Jede Kilowattstunde Wärme, die direkt aus diesen Quellen und somit ohne hohen Elektrizitätsverbrauch erzeugt werden kann, verringert den Ausbaubedarf für erneuerbare Elektrizitätserzeugung und -verteilung. Um diese Wärmequellen zu nutzen, muss die außerhalb der Heizperiode anfallende Wärme aus diesen Quellen mit saisonalen Speichern in die Heizperiode „gerettet“ werden. Das erforderliche Speichervolumen geht dabei weit über die in Fernwärmesystemen üblichen Pufferspeicher hinaus und kann mit obertägigen Speichern in verdichteten urbanen Räumen mangels verfügbarer Fläche und aufgrund zu hoher Kosten nicht befriedigt werden.

Damit rückt der geologische oberflächennahe Untergrund als zentrales Modul der städtischen Wärmeversorgung in den Fokus des Interesses: zu bestimmten räumlichen Anteilen muss er sowohl als Wärmequelle als auch als saisonalen Wärmespeicher genutzt werden und ermöglicht so einen wesentlich effizienteren Einsatz von Wärmepumpen.

Aufgrund der geologischen Verhältnisse sind allerdings nicht alle Regionen gleichermaßen zur Errichtung von UTES-Anlagen geeignet. Für oberflächennahe ATES-Anlagen und WWA-Systeme eignen sich bevorzugt tertiäre und quartäre Sedimente, während BTES-Anlagen in bindigen Sedimenten und Festgesteinen errichtet werden können. EWS-Anlagen können sowohl in bindigen als auch gut durchlässigen Gesteinen betrieben werden, wobei die höheren Effizienzen in hydraulisch gut durchlässigen Gesteinen erreicht werden.

Zur Abschätzung, welche saisonalen Wärmespeicher nach den geologischen Randbedingungen in den deutschen Großstädten aufgebaut werden könnten, wurden aus den öffentlich verfügbaren Geodaten UTES-Potenziale grob abgeschätzt und in Beziehung zu den jeweiligen erwarteten Wärmebedarfen gesetzt (vgl. Abb. 1.10). Es zeigt sich, dass die geologischen Verhältnisse für die Mehrheit der betrachteten Großstädte nach dieser ersten groben Abschätzung i. d. R. nicht limitierend für den Aufbau saisonaler Wärmespeicher sein würden.

Dies bedeutet, dass unter rein energetischen Gesichtspunkten die Verfügbarkeit klimaneutraler, in ihrem Bestand sicherer und vom Temperaturniveau geeigneter Wärmequellen i. d. R. der „Flaschenhals“ für den Ausbau saisonaler Wärmespeichersysteme sind. Oder anders ausgedrückt: Erst saisonale UTES-Anlagen ermöglichen eine sinnvolle Dimensionierung von PVT- (Hybrid aus Photovoltaik- und Solarthermieanlage) und/oder solarthermischen Anlagen auf den für die nationalen Klimabedingungen entscheidenden winterlichen Wärmebedarf. Sogar relativ zeitnah (z. B. innerhalb der kommenden sechs bis acht Jahre) umsetzbar erscheinen mit solchen Systemen national Wärmebedarfsdeckungen bis über 220 TWh/a, je nachdem, welche Flächen mit Solarthermie- oder PVT-Anlagen genutzt und mit saisonalen Wärmespeichern und gegebenenfalls (Groß-)Wärmepumpen betrieben werden können. Diese Abschätzungen belegen einerseits das Potenzial entsprechender saisonaler Wärmespeichersysteme, deuten andererseits aber auch auf die weiteren regulativen Herausforderungen, z. B. um geeignete Flächen zur Ernte der „Wärmeenergie“ ausweisen zu können bzw. Bewirtschaftungsmodelle mit kleinteiligen und wechselnden Konsumenten/Produzenten-Strukturen zu entwickeln.

4.2.3 Technologien zur thermischen Nutzung des geologischen Untergrunds

Aktuell existiert bereits eine Reihe erprobter Technologien (TRL 8 – 9) für die thermische Nutzung des geologischen Untergrunds, die sich nach ihrer Funktion und Wirkungsweise – was auch im Hinblick auf eine rechtliche Bewertung von Interesse ist – wie folgt untergliedern lassen.

4.2.3.1 Klassifikationskriterium „offene“ und „geschlossene“ Anlagen

Ein häufig angewendetes Klassifikationskriterium ist, ob die thermische Nutzung des geologischen Untergrunds auf einer Förderung (offene Systeme) oder einer Nichtförderung von Grundwasser basiert.

Bei den als geschlossen bezeichneten Technologien besitzt das Wärmeträgerfluid keinen direkten Kontakt zum Gestein und Grundwasser, sondern zirkuliert durch in den geologischen Untergrund eingebrachte U-Rohre oder andere Rohrgeometrien (z. B. als Helix) und equilibriert sich thermisch mit der Gesteinstemperatur. Im oberirdischen Teil der Anlage wird dem Wärmeträgerfluid Wärme entzogen (z. B. zum Heizen) oder Wärme zugeführt (z. B. zum Kühlen von Gebäuden). Das bekannteste Beispiel für geschlossene Anlagen sind die sogenannten Erdwärmesonden, von denen in Deutschland 20.000 Anlagen allein im Jahr 2020 neu installiert wurden. Weitere geschlossene Systeme sind u. a. BTES-Anlagen sowie auch in der Entwicklung befindliche Technologien wie Geologische Eis-Wärme-Speicher (GEWS-Anlagen) oder z. T. auch Kavernenwärmespeicher. Bei der rechtlichen Bewertung solcher geschlossenen Anlagen ist zu beachten, dass sie i. d. R. eine große Anzahl an Bohrungen (bzw. genauer: eine große Menge an Bohrm Metern) benötigen, um einen hinreichenden Wärmeaustausch mit dem Gestein und dem Grundwasser sicherzustellen.

Als offene untertägige Wärmespeichersysteme werden Anlagen bezeichnet, in denen das Grundwasser als Wärmeträgerfluid genutzt und gefördert und nach thermischer Nutzung wieder injiziert wird. In diesem Fall wird dem Grundwasser in der Regel oberirdisch über Wärmetauscher Wärme entzogen oder zugeführt und dann über einen zweiten Brunnen mit erniedrigter oder erhöhter Temperatur wird injiziert. Bekannte offene Anlagensysteme sind u. a. WWA-Systeme oder ATES-Anlagen. Auch Kavernenwärmespeichersysteme können hydraulisch „offen“ betrieben werden. In der Regel weisen offene Systeme höhere Leistungsdaten als geschlossene Systeme auf, benötigen allerdings auch einen größeren untertägigen Raum (vgl. Kap. 1 und 2).

4.2.4 Klassifikationskriterium „Wärmentzug bzw. Wärmeeinspeisung“ und „Wärmespeicher“

Als ein weiteres Klassifikationskriterium gilt, ob der Betrieb untertägiger Anlagen allein einen Wärmentzug bzw. allein eine Zufuhr bezwecken soll oder ob die aktiv zugegebene Wärme über längere Zeiträume und zum größten Teil rückholbar gespeichert wird. Bei den oberflächennahen Entzugssystemen werden die natürlichen (und bebauungsbedingten unkontrollierten) Wärme flüsse von der Erdoberfläche und dem Erdinneren genutzt, während bei den Wärmespeichersystemen aktiv Wärme eingebracht und entnommen werden kann, was höhere Temperaturen und damit Energiedichten bei relativ geringerem Raumbedarf ermöglicht.

Typische thermische reine Entzugssysteme sind EWS- oder WWA-Anlagen, die zu Heizzwecken genutzt werden. Im Falle einer Nutzung zur Kühlung fungieren sie als Zufuhrsysteme, da in diesen Fällen Wärme dem geologischen Untergrund eben nur entnommen oder zugeführt werden soll. Vorzugweise werden sowohl WWA-Systeme wie auch EWS in hydraulisch permeable Schichten gebaut, da der Zustrom des Grundwassers sowohl eine bessere Wärmezufuhr als auch einen besseren Abtransport bedingt. Verbunden mit solchen Systemen sind i. d. R. thermisch veränderte Abstromfahnen, insbesondere wenn der thermische Lastbetrieb nicht ausgeglichen ist.

Bei untertägigen Wärmespeichersystemen wird meist saisonale „Überschusswärme“ über geschlossene (BTES-Anlagen) oder offene Systeme (ATES-Anlagen) in den geologischen Untergrund gebracht, um sie dann bei einem erhöhten oberirdischen Wärmebedarf zu entziehen.

Während ATES-Anlagen auch hydraulisch permeable Schichten, also i. d. R. Grundwasserleiter, mit möglichst geringen Abstandsgeschwindigkeiten nutzen, werden BTES-Anlagen vorzugsweise in Grundwassergeringleiter gebaut, damit die eingebrachte Wärme nicht ungenutzt wegströmt bzw. die abströmende Wärme das Grundwasser thermisch nicht verändert. Mit ATES- und BTES-Anlagen können auch wesentlich höhere Ein- und Ausspeichertemperaturen realisiert werden. Technisch machbar, aber aufgrund aktueller regulativer Beschränkungen wenig umgesetzt, sind Einspeichertemperaturen von 80 °C (und mehr) mit resultierenden Ausspeichertemperaturen von bis zu 60 °C.

4.2.5 Weitere saisonale untertägige und obertägige Wärmespeichertechnologien

Momentan in der Entwicklung befinden sich weitere saisonale untertägige Wärmespeichertechnologien wie z. B. Kavernenwärmespeicher für Festgesteine oder GEWS-Anlagen, in denen der geologische Untergrund vereist wird, um die dadurch frei werdende Latentwärme zu nutzen (Heizen), bzw. der Latentenergiebedarf zum Auftauen des vereisten Bereichs zu Kühlzwecken genutzt werden soll. Da sich diese Technologien erst in der Konzeptions- bzw. Erprobungsphase befinden, lässt sich derzeit keine nähere Bewertung abgeben.

Eine mögliche Alternative zu den vorgestellten untertägigen Technologien können obertägige saisonale Wärmespeicheranlagen wie Erdbeckenspeicher und Eiswärmespeicher darstellen. Bei der Abwägung sind der obertägige Flächen- bzw. Volumenbedarf sowie die angestrebte Gebäudevorraufemperatur und im Falle der Erdbeckenspeicher auch ökologische Aspekte und der relativ hohe Wärmeverlust im Winter zu berücksichtigen. Belastbare Untersuchungen, unter welchen Randbedingungen welche saisonalen Wärmespeicher unter den genannten Aspekten und wirtschaftlich einen optimierten Lösungsansatz bilden, existieren bisher allerdings nicht.

4.2.6 Klimaschutzpotenziale der thermischen Untergrundnutzung

Die thermische Nutzung des geologischen Untergrunds als Wärmequelle ist nicht alternativlos; insbesondere steht auch die Umgebungsluft als ubiquitäre Wärmequelle für Wärmepumpen zur Verfügung, allerdings nicht als Wärmespeicher. Zudem bietet die thermische Nutzung des geologischen Untergrunds gegenüber Luft-Wärmepumpen wesentliche Vorteile für das Energiesystem, auf die im Folgenden eingegangen wird.

4.2.6.1 Effizienz

Wie bereits oben beschrieben, übersteigt der aktuelle Wärmebedarf die zur Verfügung stehende Menge an Elektrizität aus erneuerbaren Energiequellen um ein Vielfaches. Es bedarf daher einer möglichst effizienten Nutzung der Elektrizität im Wärmemarkt, um ausreichend Wärme auf Basis erneuerbarer Elektrizität erzeugen zu können.

Tabelle 4.1: Überblick zur Effizienz unterschiedlicher „konventioneller“ Technologien zur Wärmeerzeugung auf Basis von Elektrizität und bezogen auf durchschnittlicher Gebäudeheizung

Effizienzvorteile von Wärmepumpen gegenüber anderer elektrizitätsbasierter Wärmeerzeugung

Aus einer kWh Elektrizität werden bei Anwendung dieser Technologie...	...ungefähr so viele kWh Wärme	
Synthetisches Methan ^a (Brennwert-Heizung)	0,5 – 0,6	
Wasserstoff (Verbrennung) ^b	0,7 – 0,75	
Elektrizität-direkt	0,95	
Luft-Wärmepumpe ^c	Stark abhängig von gebäude-seitigen und natürlichen Voraussetzungen und Planung / Wartung	Neubau: 3,1 Bestand: 3,1
Erdwärmesonde mit Wärmepumpe		Neubau: 4,1 Bestand: 3,7
Wasser-Wasser-Anlagen mit Wärmepumpe		Neubau: 3,7 Bestand: 3,2

a) Die Werte für synthetisches Methan und Wasserstoff sind einer aktuellen Studie des Fraunhofer IEE entnommen und beziehen sich auf den Wirkungsgrad als Heizwert H_u (Gerhardt et al., 2020). b) Hier wurde eine Verbrennung von Wasserstoff mit unterstelltem Wirkungsgrad von 100 % angenommen, auch Verluste der Transportkette wurden nicht berücksichtigt; bei einer Brennstoffzellen-Heizung mit gleichzeitiger Elektrizitätserzeugung entstehen andere Wirkungsgrade (vgl. Agora Verkehrswende et al. (2018), S. 13). c) Die Werte für Wärmepumpen sind Mittelwerte aus mehreren Feldtest-Reihen des Fraunhofer ISE mit zahlreichen Anlagen in Neubauten und Bestandsgebäuden (Quellen: Miara et al., 2011; Henning und Palzer, 2015; Günther et al., 2020).

Aus Tab. 4.1 geht hervor, dass Wärmepumpen generell gegenüber der Nutzung von Power-to-Gas-Technologien (PtG-Technologien: Wasserstoff und synthetisches Methan) die Elektrizität um ein Vielfaches effizienter in Wärme umwandeln (mindestens 600 % höhere Effizienz). Innerhalb der Wärmepumpen-Technologie weisen die Wärmepumpen, die als Quelltemperatur die Wärme des oberflächennahen geologischen Untergrunds nutzen (i. d. R. 10 – 15 °C), gegenüber mit Luftwärme betriebenen Wärmepumpen einen Effizienz-Vorteil von 20 % – 25 % auf; dies ist allerdings abhängig von den Zieltemperaturen und den Wetterbedingungen. Ein wesentlicher Grund dafür ist, dass Luft-Wärmepumpensysteme gerade an kalten Tagen mit hohem Heizbedarf nur eine geringe Quelltemperatur aus der Luft nutzen können und deswegen relativ viel elektrische Energie benötigt wird, während das Wärmedargebot aus den konventionellen EWS- und WWA-Anlagen lange relativ konstant höhere Temperaturen auch an kalten Tagen zur Verfügung stellt.

Diese höhere Effizienz wirkt angesichts der deutlich höheren Effizienz-Unterschiede gegenüber PtG relativ klein. Übersetzt in eingesparte Elektrizität sind die Auswirkungen jedoch erheblich. Geht man beispielsweise von einer künftigen Wärmeproduktion durch Wärmepumpen in Höhe von 113 TWh/a aus, wie in dem vom Fraunhofer ISE in einer Beispielrechnung zugrunde gelegten Szenario dargestellt (Gerhardt et al., 2020, S. 15), so würde bei einer um 25 % geringeren Effizienz der Wärmepumpen der Elektrizitätsbedarf um ca. 28 TWh steigen. Dies entspricht rechnerisch der jährlich produzierten Elektrizitätsmenge von rund 5185 Onshore-Windenergieanlagen (mit je 3 MW Leistung und 1800 Jahresvollaststundenäquivalenten) oder etwa knapp eines Fünftels der heute durch Windenergieanlagen in Deutschland produzierten Elektrizität. Mit anderen Worten: Würde man auf die konventionelle thermische Nutzung des geologischen Unter-

grunds durch Wärmepumpen (also EWS- und WWA-Systeme) zugunsten von Luft-Wärmepumpen verzichten, induzierte dies – nach heutigem Stand der Technik – einen zusätzlichen Ausbaubedarf für erneuerbare Elektrizität in der Größenordnung von 15 GW an Windenergieanlagen; das entspricht dem gesamten kumulierten Windenergie-Zubau der Jahre 2014 bis 2018.

Noch größere Einsparpotenziale auf der Elektrizitätsseite lassen sich aber bei der Nutzung von HT-UTES- und insbesondere HT-ATES-Systemen erreichen (Abb. 2.20). Bei relativ niedrigeren Temperaturen bei der Wärmesenke $< 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, d. h. z. B. einer niedrigen Vorlauftemperatur im Wärmenetz, lassen sich Jahresarbeitszahlen > 8 und in besonderen Konfigurationen $>> 8$ erreichen. Mit entsprechenden Jahresarbeitszahlen lässt sich auch der Elektrizitätsbedarf im Winter bei sogenannten „Dunkelflaute“-Konstellationen relevant vermindern, was insgesamt die energetische Versorgungssicherheit signifikant verbessern kann, ohne noch einen zusätzlichen Zubau an Windenergieanlagen zu benötigen.

4.2.6.2 Flexibilität

Das zukünftige Energiesystem ist durch die große Bedeutung der fluktuierenden Elektrizitätserzeugung aus Windenergie und Photovoltaik von einer möglichst flexiblen Nachfrageseite abhängig. In diesem Zusammenhang können Aquifer-Wärmespeicher eine wichtige Rolle spielen. In einem klimaneutralen Energiesystem wird die installierte Leistung sowohl der Windenergie- als auch der Photovoltaikanlagen um ein Vielfaches über der heutigen maximalen Elektrizitätsabnahme liegen (vgl. Ausbaubedarf im Szenarienvergleich für 80-%-Reduktionsszenarien in IWES (2015)). Insbesondere wird es im Sommer an sonnigen Tagen mit hoher PV-Elektrizitätsproduktion bei gleichzeitig niedrigen Wärmelasten lange Zeiträume geben, in denen viel Elektrizität zu niedrigen Kosten zur Verfügung steht. Saisonale Wärmespeicher bieten gegenüber der Speicherung von Elektrizität oder gar der Umwandlung der Elektrizität in Wasserstoff erhebliche Kostenvorteile (vgl. Sterner und Thema (2017)). Wärmespeicher bieten sich damit insgesamt als kostengünstige Flexibilitätsoption für das zukünftige Energiesystem besonders an. Innerhalb der Wärmespeicher hat die Speicherung von Wärme im geologischen Untergrund eine besondere Bedeutung, weil damit große Wärmemengen in unmittelbarer räumlicher Verfügbarkeit von Städten gespeichert werden können, ohne dass damit relevanter Platz an der Erdoberfläche benötigt wird.

4.2.6.3 Wärmeversorgung (Heizen und Kühlen) und Klimaanpassung

Nicht minder herausfordernd sind die Anforderungen an Städte zur Anpassung an weiter steigende Temperaturen. Mit den Temperaturen steigt der Kältebedarf für Gebäude. Diesen zusätzlichen Energiebedarf gilt es so zu decken, dass er klimaneutral erzeugt wird und möglichst nicht zur weiteren Erhitzung der Außenluft in den Städten beiträgt.

Bereits heute ist der Effekt „urbaner Hitzeinseln“ für die Gesundheit der Stadtbevölkerung relevant: Aufgrund der dichten Bebauung von Städten akkumuliert sich die sommerliche Wärmestrahlung in Gebäuden und versiegelten Flächen. Selbst ein Ausbau der urbanen Flächen, auf denen durch Evapotranspirationseffekte eine kühlende natürliche Verdunstung stattfindet, wird gerade bei sommerlichen Hitzeperioden allein unter stadtklimatischen Aspekten bedingt effektiv sein, da dadurch auch die innerstädtische Luftfeuchtigkeit erhöht werden kann, was gerade bei Temperaturen $> 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen kann.

Selbst wenn es gelingen sollte, den globalen mittleren Temperaturanstieg auf $1,5\text{ }^{\circ}\text{C} - 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ zu begrenzen, ist für Deutschland mit einem weiteren, unvermeidbaren Anstieg der Temperaturen zu rechnen, der sich besonders auf die deutschen Großstädte wegen des Hitzeinsel-Effekts auswirken wird. Derzeit besteht bereits eine Temperaturdifferenz im Bereich von $3,5\text{ }^{\circ}\text{C} - 4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ in der

durchschnittlichen Lufttemperatur zwischen urbanen Gebieten und ihrer Umgebung (vgl. Henning Limberg (2012)). Der Unterschied soll pro Dekade noch zwischen 0,1 °C und max. 1 °C zunehmen, so dass für das Jahr 2050 ein Unterschied von bis zu 7 °C zwischen urbanen Gebieten und ihrer Umgebung anzunehmen ist. Es entsteht ein zusätzlicher Bedarf an Kühlung für Gebäude.

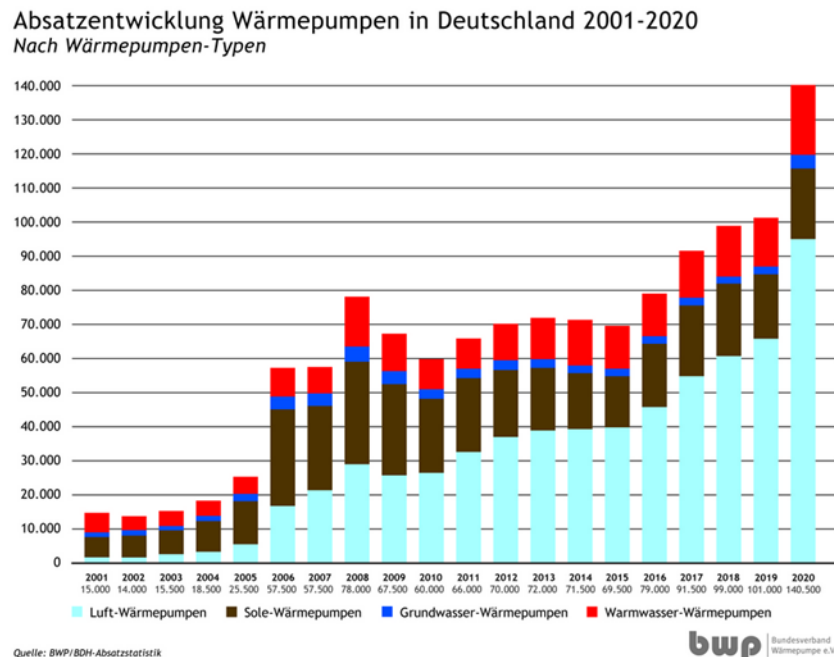
Der energieintensive Betrieb von Klimaanlage stellt nicht nur ein Problem für den Klimaschutz dar, sondern auch für die Klimaanpassung, weil die Klimageräte die den Gebäuden entzogene Wärme an die Außenluft abgeben. Demgegenüber kann die thermische Aktivierung des geologischen Untergrunds eine Pufferfunktion übernehmen: Die im Sommer den Gebäuden und gegebenenfalls dem Stadtklima entzogene Wärme kann in tieferen Untergrundschichten gespeichert werden, ohne das Stadtklima im Sommer weiter aufzuheizen, wodurch im Idealfall sogar die Stadt signifikant gekühlt werden kann. Im Winter kann diese Wärme dem geologischen Untergrund wieder entzogen werden, um damit auf effiziente und nachhaltige Art und Weise die Gebäude zu erwärmen. Aktuelle in der Erprobung befindliche In-situ-Technologien wie GEWS, bei denen Grundwasserleiter gezielt vereist werden, ermöglichen zukünftig möglicherweise vollkommen neue Kühlungsansätze, die neben einer energetisch günstigen Senkung der oberirdischen Temperatur gleichzeitig auch die Luftfeuchtigkeit zu senken vermögen.

4.2.7 Reale Entwicklungen

Die Anforderungen des Energiesystems der Zukunft hinsichtlich Effizienz und Flexibilität sowie die vorhandenen Potenziale der thermischen Untergrundnutzung spiegeln sich nicht in der realen Entwicklung des Wärmemarkts (Heizen und Kühlen) wider.

4.2.7.1 Dezentrale Wärmepumpen

Bei den dezentralen Wärmepumpen in Gebäuden geht der Trend der vergangenen Jahre stark in Richtung Luft-Wärmepumpen. Während in den ersten Jahren des Markthochlaufs Wärmepumpen mit Nutzung des geologischen Untergrunds im Vordergrund gestanden haben, decken heute Luft-Wärmepumpen ca. drei Viertel des Markts für Wärmepumpen zur Gebäudeheizung (vgl. Abb. 4.1).

Abbildung 4.1: Absatzentwicklung Wärmepumpen in Deutschland 2001 – 2020 nach Wärmepumpen-Typen

Der Bereich Warmwasser-Wärmepumpen betrifft Wärmepumpen, welche die Innenraumluft zur Erzeugung von Warmwasser nutzen.

Quelle: BWP, 2021.

Innerhalb des Segments der Untergrund-Wärmequellen haben Wärmesonden einen Anteil von ca. 80 %, Grundwasser-Wärmepumpen haben einen Marktanteil von ca. 20 %.

4.2.7.2 Wärmeversorgung zu Kühlzwecken

In den vergangenen Jahren war eine Zunahme beim Absatz konventioneller Klimaanlage auf jährlich ca. 220.000 Stück in Deutschland zu verzeichnen (vgl. dena (2019), S. 26; mobile Einzelgeräte, beispielsweise aus dem Baumarkt, werden in der Statistik nicht erfasst.), also rund der doppelten Menge an insgesamt abgesetzten Wärmepumpen und der zehnfachen Menge erdgebundener Wärmepumpen, die besonders effizient im passiven Betrieb Kälte zur Verfügung stellen können.

4.2.7.3 Saisonale Wärmespeicher

Saisonale Hochtemperatur-Wärmespeicher mit Temperaturen von über 80 °C finden sich vereinzelt bisher vor allem in Dänemark als Erdbecken-Wärmespeicher für Wärmenetze, insbesondere in Kombination mit großen Solarthermie-Anlagen. Anlagen, die im engeren Sinne den geologischen Untergrund bzw. das Grundwasser als Wärmespeicher verwenden, sind in Wärmenetzen bislang nur sehr selten vorhanden. Wesentlicher Grund hierfür sind die noch unzureichenden wirtschaftlichen Rahmenbedingungen (vgl. Schmuck (2017)), jedoch im Fall von Aquifer-Wärmespeichern in Deutschland auch die komplexe Rechtslage und unklare Zuständigkeits- und Verfahrensfragen.

4.3 Thermische Bewirtschaftung des geologischen Untergrunds als planerische Aufgabe

Aus rechtlicher Sicht stellt sich die Frage, wie die beschriebenen Vorteile der Nutzung des geologischen Untergrunds zur Wärmeversorgung im Einklang mit anderen Schutzgütern gehoben werden können. Aus regulatorischer Sicht geht es um die Identifikation geeigneter Mechanismen einer gemeinwohlorientierten Optimierung der Nutzung der Ressourcen Wasser und Boden bzw. des geologischen Untergrunds.

Bislang ist die thermische Nutzung des geologischen Untergrunds noch kein Massenphänomen. Je stärker jedoch die oben dargestellten Technologien genutzt werden, umso mehr realisieren sich auch Nutzungskonflikte. Die regulatorische Herausforderung geht über die Auflösung von Nutzungskonflikten noch hinaus: Um die oben beschriebenen Effizienzgewinne sowie Klimaanpassungsvorteile von Wärmepumpen zu heben, die den geologischen Untergrund zur Wärmegegewinnung nutzen, bedarf es eines massiven Umsteuerns bei der Bewirtschaftung des städtischen geologischen Untergrunds. Ohne erhebliche regulatorische oder planerische Eingriffe dürfte sich der Trend fortsetzen, dass die Wärmewende ganz überwiegend durch die Installation von Wärmepumpen vollzogen wird, die Umgebungsluft als Wärmequelle nutzen. Zudem dürften Wärmespeicher im städtischen geologischen Untergrund weiterhin eher eine Ausnahmeerscheinung bleiben.

Es bedarf daher eines rechtlichen und planerischen Instrumentariums, um die Potenziale dieser Techniken für den Klimaschutz bei möglichst niedrigen volkswirtschaftlichen Kosten zu heben und um die dabei möglichen Nutzungskonflikte zu minimieren und zu bewältigen.

Um den regulatorischen Bedarf näher zu determinieren, werden im Folgenden die relevanten Konflikte herausgearbeitet, die durch thermische Untergrundnutzung entstehen können. Diese beziehen sich sowohl auf Konflikte der thermischen Nutzung mit anderen, nicht-thermischen Untergrundnutzungen – insbesondere der Trinkwassergewinnung – als auch auf Konflikte zwischen unterschiedlichen thermischen Nutzungen des urbanen geologischen Untergrunds.

4.3.1 Energie und Trinkwassernutzung

Im städtischen Kontext sind verschiedene Konflikte der thermischen Nutzung mit anderen Nutzungsansprüchen an den geologischen Untergrund denkbar. Aus praktischer Sicht am relevantesten ist der potenzielle, empirisch jedoch bisher nicht sicher belegte Konflikt mit der Trinkwassergewinnung aus Grundwasservorkommen. Diese genießt traditionell eine vorrangige Bedeutung unter den verschiedenen Nutzungen von Grundwasser (vgl. Reinhardt (2019)).

Gleichwohl hat die Nutzung von Grund- und Oberflächenwasser zur Trinkwassergewinnung auch im bisherigen Energiesystem niemals einen flächendeckenden und absoluten Vorrang vor energiebezogenen Nutzungen eingenommen. Zahlreiche teils gravierende energiebedingte Wassernutzungen wurden und werden jedoch traditionell akzeptiert (siehe hierzu Bormann et al., 2019):

- Für den Anbau von Biomasse zum Zweck der Energieerzeugung wurden 2019 rund 2,37 Millionen Hektar (in der Regel in intensiver Landwirtschaft) bewirtschaftet, was 14,2 % der gesamten landwirtschaftlich genutzten Fläche entsprach (Deutscher Bundestag, 2020). Die vorhandenen Grundwasserressourcen werden durch die regelmäßig intensive Bewirtschaftung dieser Flächen insbesondere beim Anbau von Mais nicht unerheblich beeinträchtigt. In mehr als einem Viertel der Bundesrepublik ist der Zustand des Grundwassers aufgrund von

Nitratkonzentration > 50 mg/l schlecht (Barthel et al., 2020), was die Nutzung vieler Grundwasserleiter für die Trinkwassernutzung erheblich gefährdet und in der Vergangenheit zu einer Verurteilung der Bundesrepublik Deutschland wegen Verletzung der Nitratrichtlinie geführt hatte (EuGH – Gerichtshof der Europäischen Union, 2018), ohne dass sich seitdem die Situation grundlegend geändert hätte.

- Für den Braunkohletagebau wird das Grundwasser in den Braunkohlerevieren großflächig abgesenkt. Auch für den inzwischen eingestellten Steinkohlebergbau mussten weitgehende wasserwirtschaftliche Veränderungen vorgenommen werden, die teils sogar auf unbestimmte Zeit fortgesetzt werden müssen.
- Für die Kühlung thermischer Kraftwerke werden große Mengen Oberflächenwasser oder Grundwasser entnommen.
- Die bisherige Wärmeversorgung basiert in großem Umfang auf der Nutzung von Heizöl. Der Transport von Erdöl mit Supertankern stellt eine erhebliche Gefahr für Europas Küstengewässer dar und hat weltweit bereits mehrfach zu Havarien mit katastrophalen Auswirkungen für die Meere geführt. Auch die Verteilung von Erdöl mit Pipelines oder Lkw sowie die Lagerung in Tanks stellen nahezu flächendeckend in Deutschland erhebliche Risiken für Oberflächengewässer und das Grundwasser dar.

Die Förderung von Grundwasser allein zur thermischen Nutzung (sowie ggf. das Wiedereinbringen des Wassers) wird im Vergleich zu diesen tradierten energetischen Wassernutzungen bzw. -gefährdungen in der wasserwirtschaftlichen Zulassungspraxis bisher noch eher kritisch behandelt, was sich in den oben dargestellten Zahlen zur Entwicklung von Wärmepumpen und den Schwierigkeiten bei der Zulassung von Aquifer-Wärmespeichern widerspiegelt.

Fraglich ist, ob und wie sich für die Wasserwirtschaft akzeptable Wege finden, um eine relevante Ausweitung der thermischen Untergrund- und Grundwassernutzung zum Zweck der Energiewende zu ermöglichen. Dass dies selbst unter Wahrung eines „strengen“ wasserrechtlichen Maßstabs möglich ist, zeigen die Niederlande, wo bereits mehr als ein Viertel des insgesamt geförderten Grundwassers zur thermischen Nutzung gefördert (und nach Entnahme eines Teils der Wärme mit verringerter Temperatur wieder in den Grundwasserleiter injiziert) wird. Wichtig ist dabei, dass sich der räumliche Bedarf nach einer thermischen Nutzung des geologischen Untergrunds auf die Städte konzentriert und somit auf eine relativ geringe Landoberfläche (vgl. Kap. 1). Selbst bei einem intensiven Ausbau von oGT- und/oder UTES-Anlagen wird der weitaus größte Teil der Grundwasserleiter in Deutschland der Trinkwasserversorgung ohne thermische Beeinflussung zur Verfügung stehen. Berechnungen anhand von Szenarienanalysen lassen darauf schließen, dass nur in Ballungszentren mit hohem Wärmebedarf (d. h. ca. < 100 GWh/(km² · a)) der geologische Untergrund eine bedeutende bis dominierende (z. B. > ca. 25 Vol.-% des oberflächennahen geologischen Untergrunds) thermische Nutzung gegenüber der Nutzung zur Trinkwasserversorgung zu erwarten sein wird (vgl. Kap. 1).

Des Weiteren schließen sich Trinkwassernutzung und thermische Bewirtschaftung nicht von vornherein aus (vgl. Kap. 1 und 3). Dies gilt sowohl für die reine Wärmegewinnung, also der Verringerung der Grundwassertemperatur, als auch für die Einspeicherung und Entnahme von Wärme in Grundwasserleitern, also zyklische Temperaturveränderungen mit einer bedeutenden Temperaturspreizung von mehreren 10 K.

Experimentelle Daten zum Einfluss von Temperaturänderungen auf die hydrochemische Zusammensetzung bestimmter typischer Grundwasserleiter belegen, dass sich die hydrochemische Zusammensetzung bei Temperaturen von 25 °C i. d. R. nur „wenig“ und innerhalb der üblichen hydrochemischen Varianz eines Grundwasserleiters verändert (vgl. Kap. 3). Aktuelle Geländeversuche bestätigen diese Ergebnisse, obwohl ihre Anzahl, Zeitdauer und Durchführung noch keine abschließenden Aussagen erlauben. Aufgrund dieser Daten erscheint im Regelbetrieb eine Überschneidung der Nutzungs- und insbesondere der Auswirkungsräume zur thermischen Nutzung und zur Grundwassergewinnung in einem gewissen thermischen Rahmen naturwissenschaftlich-technisch möglich (vgl. Kap. 3). Wichtig ist die nun numerisch und experimentell belegte Beobachtung (vgl. Kap. 1 und 3), dass sich auch bei Einspeichertemperaturen von 80 °C bei ATES-Anlagen die hohe thermische Wirkung auf relativ geringe und räumlich gut prognostizierbare untertägige Volumina erstreckt. Der weitaus „größte“, aber in Relation zum oberflächennahen Gesamtvolumen geringe Anteil wird nur moderat mit Temperaturen < 35 °C beeinflusst, was nach dem heutigen, aber noch nicht abschließenden Kenntnisstand nur geringe hydrochemische und mikrobiologische Auswirkungen verursacht.

Einschränkend ist allerdings auch festzustellen, dass die Datenlage zu hydrochemischen und insbesondere zu mikrobiologischen Auswirkungen bei einem zyklischen ATES-Betrieb aktuell noch nicht ausreichend abgesichert ist, um eine „sichere“ Temperaturspanne für eine Bewirtschaftung verschiedener Grundwasserleitertypen anzugeben. Aufgrund aktuell laufender Forschungsarbeiten wird absehbar zeitnah eine erste Datenbasis erstellt werden (vgl. Kap. 3), um evidenzbasiert Entscheidungen zu Regeln bzgl. prognostizierbarer und verantwortbarer Betriebsmodi von ATES-Anlagen zu definieren.

Die im Mai 2022 gewonnenen und noch nicht publizierten Ergebnisse eines mehrzyklischen HT-ATES-Feldversuchs (Einspeisetemperatur: 80 °C) zeigen, dass

- ▶ die hydrochemischen Auswirkungen wie prognostiziert nur auf ein kleines Volumen beschränkt bleiben und insbesondere durch vertikale durch Dichteströmung kontrollierte Durchmischungsprozesse dominiert sind,
- ▶ die temperaturabhängigen Freisetzungsprozesse zum Großteil reversibel sind,
- ▶ die temperaturabhängige Adaption des (planktischen) Aquiferbioms wesentlich schneller als in Laborversuchen verläuft und ebenfalls bei sinkenden Temperaturen in seiner Zusammensetzung reversibel ist und
- ▶ bei bisherigen Prognosen die starken vertikalen Strömungsprozesse während der Infiltration des ca. 80 °C heißen Wassers in Form einer dichtegetriebenen Konvektionszelle, die zu verstärkten vertikalen hydrochemischen und wahrscheinlich auch mikrobiologischen Mischungsprozessen innerhalb des Aquifers führen, unterschätzt worden sind.

Die (weltweit) ersten Feldversuche dieser Art deuten darauf hin, dass selbst für die untertägigen Räume, in denen eine zeitlich parallele Nutzung derselben Grundwasserleiter für die Trinkwassergewinnung und die Wärmegewinnung oder -speicherung vorgenommen wird, nach jetzigem wissenschaftlichen Kenntnisstand nach einer Beendigung der thermischen Nutzung einer späteren Trinkwassergewinnung nicht entgegenstehen.

Jedoch fehlt noch eine breite Datenbasis, um empirisch belastbare und verallgemeinerbare Aussagen für verschiedene Aquifer-Typen (z. B. Aquifere mit erhöhtem C_{org}- oder Karbonat-Anteil)

und HT-ATES-Brunnentypen treffen zu können. Hier besteht weiterhin dringender Forschungsbedarf, bzw. der Mangel an empirisch gesicherter Erkenntnis steht einem Hochlauf dieser Technologie derzeit noch entgegen.

Dies ist auch unter dem Aspekt bedauerlich, dass bei der thermischen Nutzung des Grundwassers bzw. des geförderten Rohwassers prinzipiell sogar eine „Verbesserung“ (nach heutiger regulatorischer Auffassung) der Grundwasser- bzw. Trinkwasserqualität erreicht werden kann. So wäre es bei einer vorhandenen Trinkwassernutzung aus energiewirtschaftlicher und wasserwirtschaftlicher Sicht naheliegend, gefördertes Trinkwasser vor der Übergabe an das Wasser-Netz Wärme zu entziehen, um die Wärme energetisch zu nutzen und möglicherweise gleichzeitig der Keimbildung im Trinkwasser vorzubeugen, die nach bisher verbreiteten Annahmen, die sich noch in der Diskussion befinden, allein durch höhere Wassertemperaturen begünstigt werden soll.

4.3.2 Konflikte zwischen thermischen Nutzungen bzw. Auswirkungen

Eine weitere Bewirtschaftungsaufgabe ergibt sich zukünftig aus möglichen Nutzungskonkurrenzen unterschiedlicher thermischer Wärmespeicheranlagen. Bereits mittelfristig erscheinen konkurrierende energetische Nutzungen als ein wichtiges Feld für Nutzungskonflikte bei der thermischen Nutzung des geologischen Untergrunds. Durch die dichte Bebauung in Städten und die natürliche Ausbreitungsdynamik von (thermisch verändertem) Grundwasser, aber auch durch die rein konduktive Wärmeausbreitung können Konflikte zwischen mehreren (potenziellen) Nutzern ein und desselben Grundwasserleiters entstehen (vgl. Kap. 1). Wenn beispielsweise ein Nutzer einen größeren Aquifer-Wärmespeicher errichten will, ist dieses Projekt strukturell inkompatibel mit Projekten zum Entzug von Wärme aus demselben Grundwasserleiter in unmittelbarer Nähe (nach Definition dieser Studie im sogenannten Nutzungsraum). Dem Wärmespeicher könnte dadurch eingespeicherte Wärme unkontrolliert „gestohlen“ werden, was seine Funktionsfähigkeit oder zumindest seine Effizienz in Frage stellte. Andere Beispiele für potenzielle Nutzungskonflikte sind die räumliche Überschneidung untertägiger Wärmespeicher mit stark differierenden mittleren Speichertemperaturen oder die Errichtung einer Brunnenanlage mit hohen Wasserförder- oder injektionsraten. In beiden Fällen könnte die Effizienz oder sogar die Funktionsfähigkeit eines bestehenden oder in Planung befindlichen untertägigen Wärmespeichers beeinträchtigt werden.

Schon heute führt der ungesteuerte Eintrag von Wärme in den geologischen Untergrund durch bauliche Nutzungen zu potenziellen thermischen Belastungen des geologischen Untergrunds (vgl. Kap. 1). Andererseits kann die thermische Bewirtschaftung des geologischen Untergrunds auch thermische Wechselwirkungen mit benachbarten Kellergeschossen von Gebäuden bedingen. Insgesamt wird der geologische Untergrund insbesondere in Städten bereits heute vielfältig genutzt, was das thermische Nutzungspotenzial des geologischen Untergrunds lokal beeinträchtigen oder zumindest modifizieren kann. Hierzu gehören bauliche Infrastrukturen wie U-Bahn-Schächte, Leitungen oder auch Gebäude mit mehreren Kellergeschossen (z. B. Tiefgaragen). Perspektivisch entstehen weitere Nutzungsmöglichkeiten des geologischen Untergrunds, die ggf. lokal in einen Wettbewerb mit einer thermischen Nutzung treten können (Bödecker et al., 2012; die dort genannten Speicher-Nutzungen für Wasserstoff, synthetisches Methan, Druckluft oder CO₂-Speicher (CCS) dürften jedoch typischerweise nicht in urbanen Verdichtungsräumen angewendet werden; vgl. auch Kap. 1).

4.3.3 Thermische Untergrundbewirtschaftung als wasserwirtschaftliche Optimierungsaufgabe

Aus alledem ergibt sich, dass die thermische Nutzung des geologischen Untergrunds zukünftig eine wichtige Rolle in der Planung der Bodennutzung und der Wasserbewirtschaftung einzunehmen hat. Mit dem Klimaschutz tritt insbesondere für die zuständigen Wasserbehörden ein Nutzungsanspruch von überragender Bedeutung auf den Plan, der in einigen Bundesländern Verfassungsrang genießt. So heißt es beispielsweise in der Präambel der Hamburgischen Landesverfassung: „Die natürlichen Lebensgrundlagen stehen unter dem besonderen Schutz des Staates. Insbesondere nimmt die Freie und Hansestadt Hamburg ihre Verantwortung für die Begrenzung der Erderwärmung wahr“ (*Verfassung der Freien und Hansestadt Hamburg. Vom 6. Juni 1952 (HmbBL I 100-a), zuletzt geändert am 3. Juli 2012 (HmbGVBl. S. 253), 2012*).

Der Klimaschutz und die Bewältigung von dessen Folgen gilt es in der Bewirtschaftung des Grundwassers angemessen und in integrativer Weise zu berücksichtigen. Gemäß § 6 Abs. 1 Satz 2 WHG (Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts; Wasserhaushaltsgesetz) hat die nachhaltige Gewässerbewirtschaftung „ein hohes Schutzniveau für die Umwelt insgesamt zu gewährleisten; dabei sind mögliche Verlagerungen nachteiliger Auswirkungen von einem Schutzgut auf ein anderes sowie die Erfordernisse des Klimaschutzes zu berücksichtigen.“ Gemäß § 6 Abs. 1 Satz 1 Nr. 5 WHG gehört zu den Zielen einer nachhaltigen Wasserbewirtschaftung insbesondere auch, „möglichen Folgen des Klimawandels vorzubeugen“.

Damit werden die beiden wesentlichen Vorteile der thermischen Grundwasserbewirtschaftung als Ziel der Wasserwirtschaft definiert: sowohl der Klimaschutz als auch die Anpassung an den Klimawandel. Das zitierte Erfordernis, ein hohes Schutzniveau für die Umwelt insgesamt zu gewährleisten und mögliche Verlagerungen auf andere Schutzgüter zu berücksichtigen, lässt sich mit Blick auf die Nutzung des geologischen Untergrunds zur Wärmeerzeugung und -speicherung konkret herunterbrechen: Verzichtet man hierauf, führt dies – wie oben dargelegt – zu einem erheblichen Ausbaubedarf der Elektrizitätserzeugungskapazitäten erneuerbarer Energien und der Elektrizitätsnetze, was jeweils erhebliche Auswirkungen auf diverse Umweltschutzgüter hat (vgl. Kap. 3).

Für die Wasserbehörden in Städten wird die Aufgabe der Grundwasserbewirtschaftung mit dem Hinzutreten der thermischen Nutzungsansprüche somit grundlegend neu definiert. Für umweltpolitisch ambitionierte Wasserbehörden gilt es, ihr Mindset von einer Konzentration auf ein flächendeckend möglichst hohes Schutzniveau für die Trinkwasservorsorge in Richtung einer optimierten integrierten Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen unter Einbeziehung des Klimaschutzes und der Klimaanpassung zu verändern.

4.4 Regulatorische und planerische Herausforderungen

Bei der Integration des Klimaschutzes und der Klimaanpassung in die Bewirtschaftung des geologischen Untergrunds sind mehrere fachliche Herausforderungen zu bewältigen, die im Folgenden näher untersucht werden.

4.4.1 Integrierter Ansatz

Die planerische Bewältigung verschiedener, teilweise konfligierender Nutzungen in einem einheitlichen Bewirtschaftungskonzept erfordert einen vorsorgenden, integrativen Planungsansatz. Ziel ist die langfristige Optimierung des Gemeinwohls im Sinne einer übergreifenden Bewirt-

schaftungsplanung, mit der die Grundwasserressourcen für die Trinkwassergewinnung geschützt werden und zugleich ein wichtiger Beitrag für den Klimaschutz und die Anpassung an den Klimawandel geleistet wird.

Hierzu bedarf es einer übergreifenden Planung insbesondere für die Ballungsgebiete, die einen hohen Bedarf sowohl an Trinkwasser als auch an Wärme aufweisen. Eine fallweise, reaktive Entscheidung auf eingehende Zulassungsanträge ohne übergeordnetes Bewirtschaftungskonzept, bei dem ggf. ein nachträglicher Ausgleich konkurrierender Nutzungen gemäß § 22 WHG versucht wird, greift erkennbar zu kurz.

Sinnvoll erscheint ein planerisches Vorgehen, bei dem noch konsequenter als bisher eine räumlich dreidimensionale Zuweisung prioritärer Grundwasser-Nutzungen verfolgt wird. Grundwasserleiter und Grundwassergeringleiter in ihrer Funktion als Grundwasserschutzschicht, die für die Realisierung einer effizienten, klimaneutralen Wärmeversorgung eine erhebliche Bedeutung haben und zugleich auf absehbare Zeit nicht für eine Trinkwassernutzung in Frage kommen, sollten gezielt zur Ermöglichung einer optimierten thermischen Nutzung entwickelt werden, während etwa in Gebieten mit geringem Wärmebedarf, aber mit potenzieller Bedeutung für die Trinkwassergewinnung, andere Nutzungen einschließlich der thermischen ausgeschlossen werden sollten.

4.4.2 Systemischer Ansatz

Eine effiziente Ordnung der thermischen Nutzung des geologischen Untergrunds muss systembezogen planen, nicht anlagenbezogen. Deshalb würde es beispielsweise nicht ausreichen, in einem integrierten Bewirtschaftungsplan lediglich spezielle fachliche Anforderungen aufzustellen, die Anlagen als Voraussetzung für die Erteilung einer wasserrechtlichen Erlaubnis zu erfüllen haben (z. B. maximale Temperaturabsenkung, maximale Einleitungstemperatur etc.). Eine effiziente Nutzung des geologischen Untergrunds zu Zwecken der Wärmeversorgung verlangt ein systematisches Vorgehen, bei dem eine Optimierung des Zusammenspiels verschiedener thermischer Nutzungen im Vordergrund steht.

Konkret heißt dies zum Beispiel, dass die aktuell vorherrschende thermische Nutzung des geologischen Untergrunds allein mit Erdwärmesonden-Wärmepumpen in vielen verdichteten Gebieten keine optimale Nutzung darstellt, sondern dass erst im Verbund mit anderen Technologien eine effiziente Nutzung der thermischen Untergrundressourcen erfolgt. Vor diesem Hintergrund geht es zumindest in urbanen Gebieten mit hohen und zudem stark variierenden Wärmeanforderungsprofilen darum, nicht einzelne oGT- oder UTES-Anlagen genehmigungsrechtlich zu betrachten, sondern möglichst effiziente Systeme aus verschiedenen Anlagen mit ihren potentiellen Wechselwirkungen und unterschiedlichen Systemfunktionen (Kühlen und Heizen in verschiedenen Temperaturbereichen) planerisch zu ermöglichen. In der Regel sollte solch ein systemischer Ansatz auf der Grundlage geeigneter numerischer Simulationen erfolgen, die auch die Grundlage für die Bewirtschaftung des geologischen Untergrunds für eine nachhaltige Wärme- und Wasserversorgung im Sinne des Allgemeinwohls bilden (siehe hierzu näher das ANGUS-Konzept, mit dem ein quantifizierendes untertägiges Management für multiple Nutzungen ermöglicht werden soll und das auf der Definition unterschiedlicher untertägiger Räume beruht (Nutzungsraum, Auswirkungsraum, Monitoringraum) (vgl. Kap. 1)).

4.4.3 Dreidimensionaler Ansatz

Während bei oberirdischen Planungsprozessen im Wesentlichen aktuell eine zweidimensionale Betrachtung im Vordergrund steht, die z. B. in Bebauungsplänen auf zweidimensionalen Plankarten abgebildet wird, geht es bei der untertägigen Bewirtschaftung von Grundwasserressourcen um eine dreidimensionale Planung. In einem Plangebiet verlaufen in der Regel mehrere Grundwasserleiter in verschiedenen Geschossen unter- bzw. übereinander, getrennt durch unterschiedlich mächtige andere geologische Formationen.

Bei der Planung der (auch thermischen) Nutzung des geologischen Untergrunds sind daher die unterschiedlichen Nutzungsmöglichkeiten der verschiedenen Grundwasserleiter in drei Dimensionen zu berücksichtigen (vgl. Kap. 1).

4.4.4 Datenverfügbarkeit

Der oben formulierte Anspruch einer integrierten, systematischen, dreidimensionalen Planung der maßgeblichen Nutzungen des geologischen Untergrunds – insbesondere der thermischen und hydraulischen Nutzung des urbanen Grundwassers – bedarf einer sorgfältigen Vorbereitung und einer soliden Datenbasis, die sowohl die zu bewirtschaftenden geologischen Untergrundstrukturen hinreichend darstellt als auch deren biophysikochemische und hydraulisch-thermische Eigenschaften belastbar abbildet. Insbesondere ist eine möglichst genaue Kenntnis über den dreidimensionalen Aufbau des geologischen Untergrunds sowie der zeitlichen Dynamik der Strömungen, Stofftransporte und Wärmeausbreitung im geologischen Untergrund nötig, wie sie am besten durch numerische Grundwassermodelle simuliert werden können. Entsprechende geologische und hydrogeologische Modelle sind zwar schon in einigen, jedoch längst noch nicht allen Großstädten in Deutschland vorhanden. Zeitnah besteht der Bedarf, auch modelltechnisch die hydraulischen und thermischen Transportprozesse großräumig und unter Berücksichtigung zahlreicher zeitlich dynamischer Wärmesenken und Wärmequellen abzubilden.

4.5 Steuerungsprogramm und -praxis des geltenden Rechts

Im Folgenden wird untersucht, inwieweit der bestehende Rechtsrahmen bzw. die umweltrechtliche Planungs- und Zulassungspraxis den beschriebenen Steuerungsauftrag einer integrativen Untergrundnutzung erfüllt. Des Weiteren wird untersucht, ob und inwieweit das geltende Recht Grenzen für die Integration der thermischen Nutzung in eine integrierte Untergrundbewirtschaftung setzt.

4.5.1 Wasserrecht

Das Wasserrecht ist in besonderer Weise für eine planerische Steuerung der Untergrundnutzung prädestiniert. Anders als im Immissionsschutzrecht oder im Bauordnungsrecht, wo für Vorhabensträger bei Einhaltung der gesetzlichen Anforderungen ein Genehmigungsanspruch statuiert ist, steht im Gewässerschutzrecht das Bewirtschaftungsermessen der zuständigen Behörde im Vordergrund. Diese hat den Auftrag, den Schutz und die Nutzung der natürlichen Ressource durch eine vorsorgende Bewirtschaftung im Sinne des Gemeinwohls zu optimieren. Sie kann auf fachlicher Grundlage zur Erreichung der gesetzlichen Bewirtschaftungsziele Nutzungskonzepte entwickeln und auf dieser Grundlage bestimmte Nutzungen ausschließen oder beschränken. Wie oben dargelegt, hat sie dabei auch gemäß § 6 Abs. 1 WHG die Ziele des Klimaschutzes und der Klimaanpassung zu berücksichtigen.

Entsprechend der planerischen Grundkonzeption des Wasserrechts finden sich im geltenden Recht und der wasserrechtlichen Praxis diverse instrumentelle Ansätze zur planerischen Steuerung von Grundwassernutzungen. Diese werden im Folgenden dargestellt und dahingehend untersucht, inwieweit sie die thermische Nutzung des geologischen Untergrunds regeln oder zumindest dazu geeignet sind.

4.5.1.1 Bewirtschaftungspläne und Maßnahmenpläne für Flussgebietseinheiten

Gemäß Artikel 13 der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) EU 2000/60/EG haben die Mitgliedstaaten sicherzustellen, dass für alle Flussgebietseinheiten Bewirtschaftungspläne aufgestellt werden; gemäß Artikel 11 WRRL sind darüber hinaus Maßnahmenpläne für die Flussgebietseinheiten aufzustellen.

Bereits vom instrumentellen Ansatz her eignen sich diese Instrumente jedoch nicht, um auf kommunaler Ebene vergleichsweise kleinräumige Nutzungen des Grundwassers zu optimieren. Hierzu ist bereits der Maßstab der Flussgebietseinheiten deutlich zu groß.

In den Bewirtschaftungsplänen und Maßnahmenprogrammen können jedoch Grundsätze aufgestellt werden, die in nachgelagerten Verfahren zu beachten sind. Artikel 11 WRRL enthält sogar eine spezielle Regelung, auf deren Grundlage die thermische Nutzung des Grundwassers privilegiert werden kann. Nach Artikel 11 Absatz 1 WRRL müssen die Mitgliedstaaten dafür Sorge tragen, dass für alle Flussgebietseinheiten Maßnahmenprogramme aufgestellt werden. Diese enthalten gemäß Absatz 2 dieser Vorschrift mindestens die in Absatz 3 näher aufgeführten „grundlegenden Maßnahmen“, gegebenenfalls auch „ergänzende Maßnahmen“. Bei der Aufzählung der grundlegenden Maßnahmen heißt es in Artikel 11 Absatz 3 Buchstabe j) WRRL:

„das Verbot einer direkten Einleitung von Schadstoffen in das Grundwasser nach Maßgabe der nachstehenden Vorschriften: [...] Die Mitgliedstaaten können gestatten, dass geothermisch genutztes Wasser in den Grundwasserleiter, aus dem es stammt, wiedereingeleitet wird.“

Im Anschluss hieran werden weitere Ausnahmemöglichkeiten zum Verbot der Einleitung von Schadstoffen in das Grundwasser aufgeführt, z. B. für die Einspeicherung von Gas oder Erdöl in untertägige Speicher. Während die Ausnahme für geothermisch genutztes Wasser mit keinen Bedingungen verknüpft ist, sind die anderen Ausnahmemöglichkeiten jeweils an spezielle Bedingungen geknüpft und an die übergreifende Anforderung, dass *„derartige Einleitungen das Erreichen der für den betreffenden Grundwasserkörper festgelegten Umweltziele nicht gefährden.“* Im Umkehrschluss heißt dies, dass die WRRL den Mitgliedstaaten erlaubt, die thermische Nutzung von Grundwasser selbst dann zu gestatten, wenn damit die Einleitung von Schadstoffen in das Grundwasser verbunden wäre – was in der Praxis nur selten der Fall sein dürfte.

Bewirtschaftungs- oder Maßnahmenpläne für Flussgebietseinheiten sind somit zwar keine geeigneten Steuerungsinstrumente für die lokale Steuerung thermischer Untergrundnutzungen, jedoch ergibt sich aus den rechtlichen Grundlagen dieser Instrumente auch kein Hindernis für eine entsprechende Bewirtschaftung auf nachgelagerten Ebenen, insbesondere in den unteren Wasserbehörden, die üblicherweise auf der Ebene der Kreise und kreisfreien Städte angesiedelt sind.

4.5.1.2 Besondere Bewirtschaftungspläne

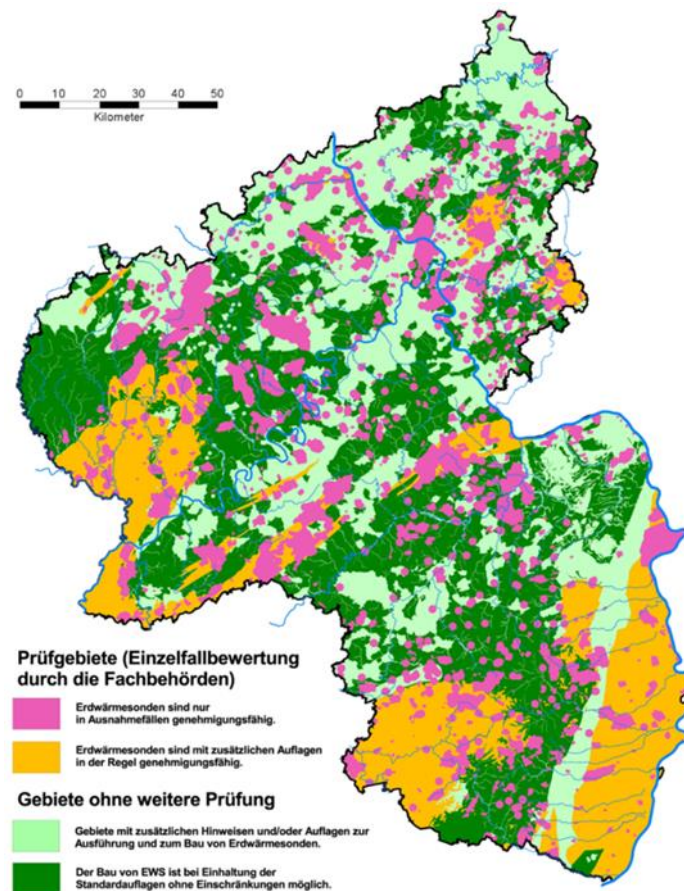
Die WRRL ermöglicht es den Wasserbehörden, neben den Maßnahmenprogrammen und Bewirtschaftungsplänen auch weitere Maßnahmen zu erlauben. In Anhang VII Buchstabe A Ziffer 8 WRRL heißt es, dass die Bewirtschaftungspläne ein *„Verzeichnis etwaiger detaillierterer Pro-*

gramme und Bewirtschaftungspläne für Flussgebietseinheiten, in denen besondere Teileinzugsgebiete, Sektoren, Problembereiche oder Gewässertypen behandelt werden, sowie eine Zusammenfassung ihrer Inhalte“ enthalten sollen. Die WRRL setzt damit voraus, dass es für bestimmte Gebiete und für bestimmte Probleme lokale, themenbezogene Bewirtschaftungspläne geben kann. Entsprechend regelt § 83 Abs. 3 WHG: „Der Bewirtschaftungsplan kann durch detailliertere Programme und Bewirtschaftungspläne für Teileinzugsgebiete, für bestimmte Sektoren und Aspekte der Gewässerbewirtschaftung sowie für bestimmte Gewässertypen ergänzt werden.“

Entsprechende sektorale und lokale Bewirtschaftungspläne als ermessenslenkende Vorschriften gibt es verschiedene. Als Aufgabe der Daseinsvorsorge (§ 50 WHG) ist die Vorsorge für die öffentliche Wasserversorgung eine der wesentlichen Aufgaben aller Wasserbehörden. Zu diesem Zweck werden regional und lokal häufig langfristig orientierte Pläne erstellt (vgl. z. B. Bürgerschaft der Freien und Hansestadt Hamburg (2016)). Bei der Zulassung von Vorhaben orientieren sich die Wasserbehörden im Rahmen der Ermessensausübung an diesen Plänen, um die Trinkwasservorräte zu schützen. Im genannten Hamburger Bericht ist beispielsweise die Rede davon, dass gezielt die Entnahme von Grundwasser zu anderen Zwecken als der Trinkwasserversorgung verringert wurde, um die Versalzung von Grundwasserleitern aufzuhalten. Die energetische Nutzung von Grundwasserleitern wird in diesen Plänen regelmäßig nicht thematisiert.

Für Teilbereiche der energetischen Nutzung des geologischen Untergrunds existieren mittlerweile praktisch flächendeckend zweidimensionale Karten, die bei der wasserrechtlichen Bewilligung bestimmter Anlagen zur geothermischen Nutzung des geologischen Untergrunds ermessenslenkend sind. Beispielhaft kann auf die Karte von Rheinland-Pfalz aus einem Leitfaden zur Genehmigung von Erdwärmesonden bis 30 kW verwiesen werden (vgl. Abb. 4.2).

Abbildung 4.2: Schematische hydrogeologische und wasserwirtschaftliche Standortbeurteilung für den Bau von Erdwärmesonden auf der Grundlage von hydrogeologischen Karten, der Wasser- und Heilquellenschutzgebiete sowie der Einzugsbereiche von Mineralwassergewinnungen



Stand: 2011.

Quelle: MULEWF, 2012.

Die Errichtung einer Erdwärmesonde erfüllt dem Leitfaden zufolge grundsätzlich einen Benutzungstatbestand nach § 9 WHG, so dass eine Erlaubnis nach § 8 Abs. 1 WHG erforderlich ist. Es handele sich bei der Errichtung einer Erdwärmesonde um eine Maßnahme, die in der Regel geeignet sei, dauernd oder in einem nicht unerheblichen Ausmaß nachteilige Veränderungen der (physikalischen, chemischen oder biologischen) Wasserbeschaffenheit herbeizuführen. Mögliche nachteilige Auswirkungen auf die Beschaffenheit des Grundwassers seien insbesondere Verunreinigungen aus dem Bohrvorgang, bei Leckagen sowie bei der nicht ordnungsgemäßen Außerbetriebnahme. Durch Bohrungen könne zudem ein hydraulischer „Kurzschluss“ voneinander getrennter Grundwasserleiter eintreten mit der Gefahr, dass hydraulische und hydrochemische Veränderungen im Gewässer erfolgen. Bei einer ungenügenden Verpressung des Bohrlochs könne dauerhaft potenziell verschmutztes Oberflächenwasser in die Tiefe eindringen und das Grundwasser erreichen. Aus den genannten Gründen werden Erdwärmesonden auf der Basis dieses Leitfadens, der als ermessenslenkende Verwaltungsvorschrift zu bewerten ist, in einer Reihe von Gebieten ausgeschlossen bzw. nur in Ausnahmefällen genehmigt. In anderen Gebieten ist eine Einzelfallbetrachtung erforderlich, wieder in anderen sind Erdwärmesonden mit Standardauflagen oder besonderen Auflagen ohne Einzelfallprüfung zulässig.

Bewertet man Pläne wie diesen an den oben aufgestellten Maßstäben, so genügen sie, unabhängig von der Einordnung der genannten Restriktionskriterien (vgl. Kap. 1), nicht den Ansprüchen an eine integrierte planerische Bewirtschaftung des geologischen Untergrunds. Zwar ist positiv anzuerkennen, dass der Versuch gemacht wird, zumindest in Teilbereichen des Plangebiets die Zulassung von Erdwärmesonden zu ermöglichen und insgesamt Rechtssicherheit herzustellen. Für eine integrierte Planung einer optimierten Untergrundbewirtschaftung taugen entsprechende Pläne jedoch nicht. Bereits die Einschränkung des Geltungsbereichs auf kleine Anlagen einer einzelnen Technologie (z. B. EWS-Anlagen bis 30 kW) verhindert eine systemische Planung lokaler saisonaler Wärmespeicher. Ebenso ist die Planung zweidimensional und ermöglicht somit keine Bewirtschaftung unterschiedlicher Geschosse von Grundwasserleitern. Im Ergebnis führen entsprechende Pläne somit dazu, dass in vielen Gebieten Erdwärmesonden pauschal unzulässig sind, während sie in anderen Gebieten pauschal mit Standard-Auflagen zulässig sind. Selbst in letzterem Fall ist dies aus energiewirtschaftlicher Sicht nicht immer positiv zu beurteilen, weil durch den Betrieb von Erdwärmesonden lokal ggf. deutlich sinnvollere thermische Nutzungen des geologischen Untergrunds insbesondere mit größeren ATES-Anlagen behindert werden können.

4.5.1.3 Einzelfallentscheidungen

Während Anträge auf Zulassung von Erdwärmesonden auf der Basis oben beschriebener Leitfäden beschieden werden, beruht die Zulassung offener Systeme wie WWA-Systeme und ATES-Anlagen mangels ermessenslenkender strategischer Planungen auf Einzelfallprüfungen (vgl. zum Folgenden in Degenhart et al. (2019)). Gemäß § 12 Abs. 1 WHG sind die Erlaubnis und die Bewilligung zu versagen, wenn

- „1. schädliche, auch durch Nebenbestimmungen nicht vermeidbare oder nicht ausgleichbare Gewässeränderungen zu erwarten sind oder*
- 2. andere Anforderungen nach öffentlich-rechtlichen Vorschriften nicht erfüllt werden.“*

Liegen keine solchen zwingenden Versagensgründe vor, steht gemäß § 12 Abs. 2 WHG die Erteilung der Erlaubnis und der Bewilligung im pflichtgemäßen Ermessen (Bewirtschaftungsermessen) der zuständigen Behörde. Dabei wird das wasserwirtschaftliche Ermessen durch den Bewirtschaftungsauftrag (§ 6 WHG – Bewirtschaftungsgrundsätze) und seinen Konkretisierungen in den Bewirtschaftungszielen (§§ 27, 28, 44, 47 WHG) sowie durch das Maßnahmenprogramm (§ 82 WHG) gelenkt.

Gemäß § 47 Abs. 1 WHG ist das Grundwasser so zu bewirtschaften, dass

- „1. eine Verschlechterung seines mengenmäßigen und seines chemischen Zustands vermieden wird;*
- 2. alle signifikanten und anhaltenden Trends ansteigender Schadstoffkonzentrationen auf Grund der Auswirkungen menschlicher Tätigkeiten umgekehrt werden;*
- 3. ein guter mengenmäßiger und ein guter chemischer Zustand erhalten oder erreicht werden; [...]“*

Absatz 3 regelt, dass für Ausnahmen von den Bewirtschaftungszielen die Regelungen gemäß § 31 Absatz 1, 2 Satz 1 und Absatz 3 entsprechend gelten. Für die Bewirtschaftungsziele nach Absatz 1 Nummer 3 gilt darüber hinaus § 30 entsprechend mit der Maßgabe, dass nach Satz 1 Nummer 4 der bestmögliche mengenmäßige und chemische Zustand des Grundwassers zu erreichen ist. Die folgende Ausnahmenvorschrift des § 31 Abs. 2 Nr. 2 WHG gilt somit auch für Grundwasser:

„Wird bei einem [...] Gewässer der gute ökologische Zustand nicht erreicht oder verschlechtert sich sein Zustand, verstößt dies nicht gegen die Bewirtschaftungsziele nach den §§ 27 und 30, wenn [...]“

die Gründe für die Veränderung von übergeordnetem öffentlichen Interesse sind oder wenn der Nutzen der neuen Veränderung für die Gesundheit oder Sicherheit des Menschen oder für die nachhaltige Entwicklung größer ist als der Nutzen, den die Erreichung der Bewirtschaftungsziele für die Umwelt und die Allgemeinheit hat.“

Selbst wenn sich durch eine ATES-Anlage im Einzelfall der chemische Zustand eines Grundwasserleiters verschlechtern sollte, kann die Anlage dennoch genehmigt werden, wenn der energie- und klimapolitische Nutzen der Anlage als Grund übergeordneten öffentlichen Interesses oder ihr Nutzen für die nachhaltige Entwicklung höher bewertet wird als die Verfehlung des Bewirtschaftungsziels.

Eine zusätzliche Begrenzung der Ermessensausübung wird z. T. noch daraus abgeleitet, dass ein Vorrang der öffentlichen Wasserversorgung in dem Sinne bestehe, dass durch die Ermessensausübung die öffentliche Wasserversorgung nicht gefährdet werden dürfe (Reinhardt, 2019, S. 37). Auch wenn man dieser Ansicht folgt, dürfte sich angesichts der prognostizierbaren, i. d. R. überschaubar geringen und lokalen Auswirkungen von ATES-Anlagen in den seltensten Fällen hieraus ein Hindernis für eine wasserrechtliche Erlaubnis ergeben.

In aller Regel dürften für Anträge zur Errichtung von WWA-Systemen sowie von ATES-Anlagen somit keine zwingenden Versagensgründe vorliegen, so dass das wasserwirtschaftliche Ermessen eröffnet ist. Bei der Ermessensausübung ist bisweilen eine Tendenz zu einer stärkeren Bewertung der wasserwirtschaftlichen Vorsorge gegenüber energiewirtschaftlichen Ansprüchen zur thermischen Nutzung des Grundwassers erkennbar.

4.5.2 Bergrecht

Neben dem Wasserrecht ist für geothermische Anlagen grundsätzlich auch das Bergrecht anwendbar (vgl. hierzu ausführlich in Degenhart et al. (2019)). In der Verwaltungspraxis hat sich eine pragmatische Abgrenzung der Zuständigkeit durchgesetzt, wie sie beispielsweise im Bayerischen Energieatlas dargestellt wird: Geht die Bohrung tiefer als 100 m, oder ist die thermische Leistung der Anlage größer als 0,2 MW, muss eine Genehmigung bei der zuständigen Bergbehörde beantragt werden (StMWi – Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie, 2022).

Für eine integrierte, systematische und für das Allgemeinwohl optimierende Planung der thermischen Nutzung des geologischen Untergrunds im Einklang mit der Trinkwasservorsorge bietet das Bergrecht jedoch schlechte Voraussetzungen. Prinzipiell erfolgt die Vergabe von Nutzungsrechten für den untertägigen Raum weitgehend antragsbezogen nach dem „Windhundprinzip“ und unter Vergabe von Exklusivität. Mit steigenden Nutzungsintensitäten, -konkurrenzen und -unverträglichkeiten ist diese auf eine maximierte Ausbeutung einzelner Anlagen bezogene Vergabelogik jedoch kaum geeignet, eine nachhaltige und nutzungsoptimierte, geordnete Entwicklung des untertägigen Raums sicherzustellen. Ob die thermische Nutzung des geologischen Untergrunds weiterhin vom Bergrecht umfasst sein sollte, sollte daher an anderer Stelle rechtspolitisch vertieft untersucht werden. Ein rechtlicher Anknüpfungspunkt für die oben herausgearbeiteten Anforderungen an ein kohärentes Planungsverfahren für eine optimierte Nutzung der thermischen Potenziale des geologischen Untergrunds lässt sich im Bergrecht jedenfalls nicht finden.

4.5.3 Raumplanung

Grundsätzlich bietet das Raumplanungsrecht die Möglichkeit, auch die Nutzungen des geologischen Untergrunds zu regeln. Der Bedarf nach einer untertägigen Raumplanung ist bereits in

verschiedenen Untersuchungen herausgearbeitet worden (vgl. Erbguth (2011), Bödecker et al. (2012), Schulze et al. (2015), Bartel und Janssen (2016)). Grundsätzlich können untertägige Vorhaben nach der gegenwärtigen Rechtslage auch raumordnungsrechtlich gesteuert werden. Allerdings wird die Steuerungskraft der Raumordnung für den geologischen Untergrund bereits durch das Bergrecht begrenzt. Wegen des Charakters der bergrechtlichen Zulassung als gebundene Entscheidung sind nur raumordnerische Ziele im Sinne des § 3 Abs. 1 Nr. 2 Raumordnungsgesetz (ROG) im bergrechtlichen Genehmigungsverfahren beachtlich, nicht jedoch die lediglich im Rahmen von Abwägungs- und Ermessensentscheidungen zu würdigenden Grundsätze (§ 4 Abs. 2 ROG). Insbesondere die raumordnerische Festsetzung von Vorbehaltsgebieten, die dem Ziel einer vorsorgenden planerischen Ordnung untertägiger Nutzungen dienen können, würde im Fall des Konflikts mit bergrechtlichen Zulassungsverfahren somit ins Leere laufen (vgl. Schulze et al. (2015)). Auch finden sich für eine stockwerksweise Nutzung gegenwärtig keine gesetzlichen Voraussetzungen im Bergrecht, weshalb eine Modifizierung des bergrechtlichen Feldbegriffs angeregt wurde (vgl. Schulze et al. (2015)).

In der raumordnerischen Praxis finden sich lediglich einzelne Beispiele, in denen die thermische Nutzung des geologischen Untergrunds durch Festsetzungen ausgeschlossen wird. Für die Landesplanung Hessens wurde eine spezielle kartographische Darstellung von Nutzungskonflikten für die Tiefengeothermie erarbeitet, in der Ausschlussgebiete für Tiefengeothermie (z. B. in Trinkwasserschutzgebieten) ausgewiesen werden (vgl. Schulze et al. (2015)). Eine solche Ausschlussplanung ist jedoch weit entfernt von der beschriebenen Steuerungsaufgabe.

Vor allem dürfte jedoch die mangelnde Steuerungsschärfe des Raumordnungsrechts im Verhältnis verschiedener kleinräumiger Wassernutzungen gegen eine Eignung der Raumplanung zur übergreifenden, systematischen Steuerung der thermischen und hydraulischen Nutzung des Grundwassers liegen. Diese Steuerung ist Kernaufgabe der wasserrechtlichen Bewirtschaftungsplanung. Zudem dürften sich die kleinräumigen Nutzungsabgrenzungen kaum mit dem groben Maßstab der Regionalplanung bewältigen lassen können.

4.5.4 Ergebnis

Im Ergebnis bietet somit lediglich das Wasserrecht einen angemessenen rechtlichen Rahmen, um das eingangs beschriebene planerische Ziel einer integrierten, systematischen, dreidimensionalen Bewirtschaftung der thermischen und hydraulischen Grundwasserressourcen bewältigen zu können. Die bestehenden Planungsansätze in der wasserwirtschaftlichen Praxis werden dem oben formulierten Anspruch an eine integrative Planung unter Einschluss einer übergreifend optimierten (und somit auch thermischen) Nutzung des geologischen Untergrunds jedoch noch nicht gerecht.

Während sich in Bezug auf kleinere Erdwärmesonden eine teils kontraproduktive behördliche Genehmigungspraxis etabliert hat, die auf keiner systematischen, dreidimensionalen und übergreifenden Planung beruht, werden in Bezug auf alle anderen Anlagen zur thermischen Nutzung des geologischen Untergrunds uneinheitliche Einzelfallentscheidungen getroffen. In der Praxis besteht eine erhebliche Unsicherheit sowie eine zurückhaltende bis ablehnende Haltung von Wasserbehörden gegenüber oGT- und UTES-Anlagen mit Blick auf etwaige bzw. angebliche Risiken für eine spätere Trinkwassergewinnung. Dies war lange Zeit insofern nachvollziehbar, als relativ wenige wissenschaftliche Untersuchungen zu den hydraulischen, thermischen, hydrochemischen und mikrobiologischen Auswirkungen signifikanter, zyklischer Temperaturveränderungen im geologischen Untergrund vorlagen. Aktuell wird diese Wissenslücke allerdings durch eine Reihe von Feldergebnissen zu HT-UTES zunehmend geschlossen, ohne dass sich die bisher vermuteten schädlichen Auswirkungen bestätigt haben.

4.6 Perspektiven zur Weiterentwicklung der Planungspraxis und des Rechtsrahmens

Um die eingangs beschriebenen Ziele für die Energiewende im Einklang mit einer vorsorgenden Gewässerschutzpolitik betreiben zu können, sollten die bestehenden Möglichkeiten des Rechtsrahmens ausgenutzt werden. Im Folgenden wird ein Ansatz entwickelt, wie

- a) eine solche fachliche Planung im Rahmen der lokalen Grundwasserbewirtschaftung aussehen könnte,
- b) wie die Datengrundlage und Einzelfallentscheidungen verbessert werden können, solange noch keine entsprechenden Pläne bestehen, und
- c) welche Schnittstellen zum neuen Instrument der kommunalen Wärmeplanung dabei geschaffen und genutzt werden sollten.

4.6.1 Teilräumliche, thematische Bewirtschaftungspläne zur thermischen Untergrundnutzung

Wie bereits oben dargelegt, eröffnet das Wasserrecht gemäß § 83 Abs. 3 WHG die Möglichkeit, den Bewirtschaftungsplan für jede Flussgebietseinheit durch detailliertere Programme und Bewirtschaftungspläne für Teileinzugsgebiete, für bestimmte Sektoren und Aspekte der Gewässerbewirtschaftung sowie für bestimmte Gewässertypen zu ergänzen. Vorgeschlagen wird hier, auf lokaler und regionaler Ebene in den Ballungszentren jeweils räumlich begrenzte, z. B. von Wärmebedarfsdichten abhängige, thematische Bewirtschaftungspläne zu erarbeiten, mit denen die thermische Untergrundnutzung geregelt wird und die für die spätere Ermessensausübung im Fall konkreter Zulassungsanträge eine hohe Bindungswirkung entfalten.

Im Bereich der Oberflächengewässer sind derartige Pläne, mit denen die thermische Nutzung insbesondere von Flusswasser geregelt wird, bereits weit verbreitet. Entsprechende Wärmelastpläne gibt es insbesondere für die großen Flüsse mit Kraftwerksstandorten, von denen Wärmeinträge in die Flüsse ausgehen (Rhein, Neckar, Donau, Elbe). Die darin enthaltenen Festlegungen sind als Vorgaben im Rahmen des Ermessens zu berücksichtigen. Rechtliche Grundlage bildet das wasserwirtschaftliche Bewirtschaftungsermessen. Das – soweit ersichtlich – aktuellste Beispiel ist der Wärmelastplan Tideelbe (Hirschhäuser et al., 2008). Dieser wurde ursprünglich im Zuge der Planungen zahlreicher Atomkraftwerke im Jahr 1973 beschlossen und im Jahr 2009 anlässlich des Genehmigungsverfahrens für das Kraftwerk Moorburg fortentwickelt. Als Ziele formuliert der Wärmelastplan Tideelbe insbesondere eine Balance verschiedener Ansprüche an das Gewässer: Ökologie/Ökonomie und ein gutes ökologisches Potenzial. Dabei galt es, insbesondere dem Problem der sommerlichen Sauerstoffknappheit in der Elbe zu begegnen. Ziel des Plans war zudem eine Bewirtschaftung der Kühlwasserentnahme einschließlich einer „Bevorratung“ von Kapazitäten für zukünftige weitere Nutzungen.

Auf der Grundlage eines hydraulisch-ökologischen Modells ist für potenzielle Einleiter von Wärme im Vorwege abzusehen, wie oft sie die Wärmeeinträge voraussichtlich drosseln müssen oder unterlassen müssen. Zum Inhalt des Wärmelastplans zählen konkrete Orientierungs-/Grenzwerte z. B. für Einleitungstemperatur, Wassertemperatur, das Delta T und den Sauerstoffgehalt.

Mit ähnlichem Ziel sollten auch für die thermische Bewirtschaftung des Grundwassers ermessenslenkende Pläne entwickelt werden. Mögliche Inhalte für einen thermischen Grundwasser-Bewirtschaftungsplan sind fachlich zu entwickeln. Dabei sollte insbesondere über folgende Ansätze nachgedacht werden:

- ▶ Definition nachhaltiger Ziele und Grundsätze zur Bewirtschaftung des oberflächennahen geologischen Untergrunds insbesondere in Gebieten mit einer hohen Wärmebedarfsdichte, z. B. vorausschauende Planung im Sinne einer Systemoptimierung beispielsweise auf Basis numerischer Simulationen mit holistischer Aussagekraft,
- ▶ Festlegung und rechtliche Verankerung von Prinzipien zur Definition untertägiger Nutzungs- und Auswirkungsräume bei multiplen Bewirtschaftungsszenarien,
- ▶ Ableitung konkreter quantitativ raumbezogener absoluter und/oder relativer thermischer, hydraulischer, hydrochemischer, mikrobiologischer und faunistischer Grenz-/Orientierungswerte und in diesem Rahmen Definition prognosegestützter Monitoringansätze,
- ▶ bedarfsorientierte Festsetzung untertägiger Priorisierungszonen für die Trinkwassernutzung sowie die thermische Nutzung,
- ▶ Definition von Kriterien für die gleichzeitige hydraulische und thermische Nutzung von untertägigen Räumen,
- ▶ bedarfs- und leistungsorientierte Priorisierung von UTES-Anlagen mit Großwärmepumpen gegenüber dezentralen kleinteiligen gemischten Wärmepumpensystemen in bestimmten Grundwasserleitern und Vorrang für Anlagen, die in Wärmenetze eingebunden sind,
- ▶ kein Bestandsschutz für dezentrale untertägige Anlagen gegenüber zentralen untertägigen Wärmespeichern.

4.6.2 Verbesserung der Datengrundlage

Solange noch kein entsprechender Bewirtschaftungsplan besteht, müssen die Wasserbehörden weiter auf Grundlage von Einzelfallanträgen entscheiden. Allerdings können sie in diesem Fall dafür sorgen, dass ihre Entscheidung auf einer möglichst guten Datengrundlage basiert und dass erste Schritte zur Grundlagenschaffung für eine fundierte Bewirtschaftungsplanung gegangen werden.

Eine mögliche Forderung der Wasserbehörde gegenüber Antragstellern könnte darin bestehen, einen Nachweis der Auswirkungen mit einem hydraulischen Modell und experimentellen hydrochemischen und mikrobiologischen Untersuchungen nach dem Stand der Technik als Voraussetzung für die Erteilung einer Erlaubnis vorzulegen.

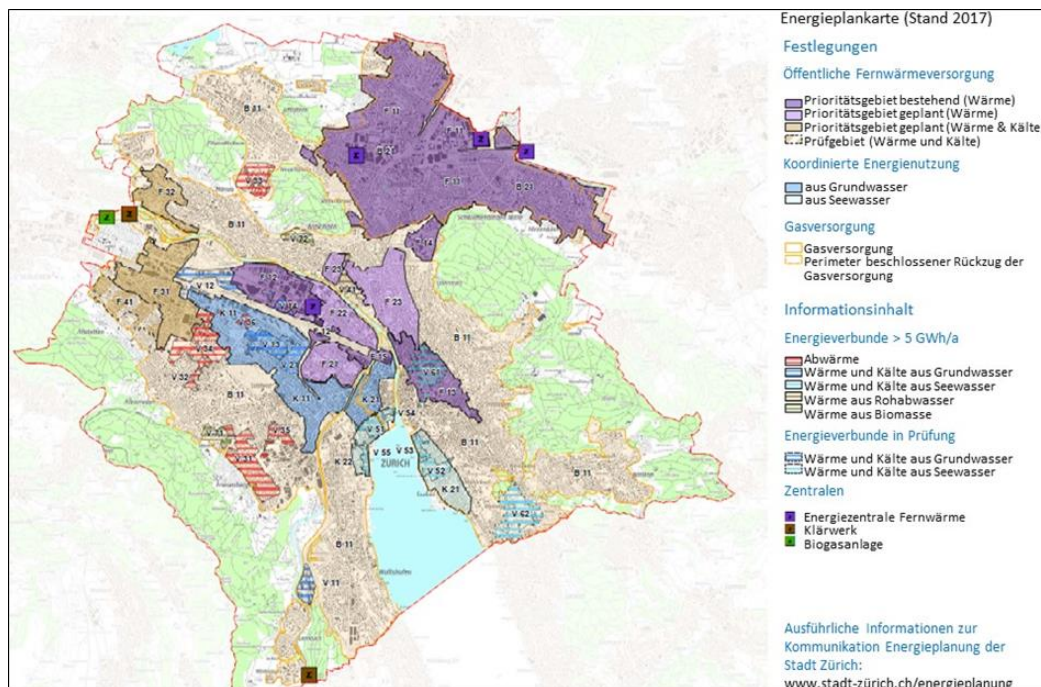
Mittelfristig erscheint es unumgänglich, dass ab bestimmten, noch zu definierenden Wärmebedarfsdichten Städte und Gemeinden verpflichtet werden, 3D-Modelle des oberflächennahen geologischen Untergrunds (i. d. R. < 400 m u. GOK), soweit noch nicht vorhanden, zu erarbeiten und im Rahmen der Wärmeversorgungsplanung gemeinsam mit wasserwirtschaftlichen Bewirtschaftungsmodellen zu Verfügung zu stellen. Zu dem 3D-Modell des geologischen Untergrunds ist, soweit noch nicht hinreichend vorhanden, sukzessive eine Datenbank zu den wichtigsten thermischen, hydraulischen, hydrogeochemischen, mikrobiologischen und faunistischen Parametern aufzubauen, um eine umweltgerechte und klimagerechte Bewirtschaftung gewährleisten zu können.

4.6.3 Verzahnung mit der kommunalen Wärmeplanung

Die thermische Nutzung des geologischen Untergrunds ist inhaltlich eng mit der Planung der Wärmeversorgung von Kommunen verbunden. Aktuell bildet sich nach Baden-Württemberg, das als erstes Bundesland eine verbindliche Wärmeplanung für größere Kommunen eingeführt hat, der Rechtsrahmen für eine neue Fachplanung zur kommunalen Wärmeplanung heraus (weiterführend vgl. Maaß (2020), S. 22ff).

Die Wärmeplanung hat auf kommunaler Ebene das Ziel, einen möglichst kosteneffizienten Weg zur klimaneutralen Wärmeversorgung räumlich differenziert aufzuzeigen und die hierfür notwendige Wärmeversorgung festzusetzen. Am Beispiel der Energieplankarte Zürichs kann dies gut verdeutlicht werden (Abb. 4.3).

Abbildung 4.3: Energieplankarte der Stadt Zürich als Beispiel einer kommunalen Wärmeplanung (Heizen und Kühlen) unter Berücksichtigung nachhaltiger Wärmequellen und Wärmenetze



Quelle: Stadt Zürich, 2017.

Erkennbar sind insbesondere die angestrebten netzgebundenen Versorgungslösungen, jedoch auch die Gebiete, die zukünftig ohne Wärmenetz bleiben werden.

Die Festlegung solcher energetischer Entwicklungsziele verdeutlicht die erheblichen inhaltlichen Rückkopplungen, die es zwischen einem kommunalen Wärmeplan und einem Plan zur lokalen thermischen Grundwassernutzung bzw. Nutzung des geologischen Untergrunds geben muss. Beide Pläne können und sollen sich gegenseitig beeinflussen:

- Dort, wo aus Gründen der Trinkwasservorsorge nachweisbar keine oder nur stark eingeschränkte thermische Nutzungen des geologischen Untergrunds in Frage kommen, sollte im Wärmeplan prioritär netzgebundene Wärmeversorgung oder, sofern diese nicht sinnvoll ist, die Wärmeversorgung mit dezentralen Luft-Wärmepumpen, ggf. ergänzt um Spitzenlastkessel, geplant werden.

- Wo hingegen eine thermische Grundwassernutzung unproblematisch ist, sollten ggf. die ineffizienteren Luft-Wärmepumpen ausgeschlossen werden.

Des Weiteren könnte es sinnvoll sein, den Wärmeplan mit folgenden Festsetzungen im thermischen Grundwassernutzungsplan umzusetzen:

- Priorisierungsgebiete für UTES-Wärmespeicher mit Großwärmepumpen gegenüber dezentralen Wärmepumpen: Wo UTES-Anlagen errichtet werden, dürfen dezentrale EWS- und WWA-Systeme nur so errichtet und betrieben werden, wie es der Funktionsfähigkeit der UTES-Anlage nicht schadet und anders garantiert wird, dass die dort leicht zu „erntende“ Umweltwärme in anderen Wärmequellen- und -senken genutzt wird.
- Prioritätsgebiete Wärmenetze: In mit Fernwärme versorgten Gebieten werden kleinteilige dezentrale BTES- und ATES-Anlagen nicht zugelassen. Erlaubt werden lediglich Anlagen, die der Fernwärme dienen.
- Prioritätsgebiete für Oberflächenwasser-Wärmepumpen: In Gebieten, in denen das Oberflächenwasser für dezentrale Wärmepumpen hinreichend wirtschaftlich und energetisch effizient genutzt werden kann, können aus Gründen des Grundwasserschutzes ggf. BTES-Anlagen und Grundwasser-Wärmepumpen leichter ausgeschlossen werden.

Resümee 4

Die Studie (Kap. 1 – 3) hat gezeigt, dass die vielfältigen Potenziale der thermischen Untergrundnutzung für eine effiziente Energiewende noch stärker genutzt werden können und sollten. Das Gewässerschutzrecht bietet prinzipiell einen geeigneten Rahmen, um den dabei auftretenden Herausforderungen gerecht zu werden, allerdings werden die Möglichkeiten hierfür bislang nicht genutzt.

Durch eine übergreifende integrierte, dreidimensionale Planung der thermischen Untergrundnutzung auf kommunaler Ebene können insbesondere im Verbund mit der kommunalen Wärmeplanung große Effizienzgewinne für die Energiewende unter Beachtung der wasserrechtlichen Regelungen erzielt werden.

5 Hochlaufpotenziale und -limitierungen oberflächennaher Geothermie und oberflächennaher saisonaler Wärmespeicher

5.1 Zusammenfassung

Die Nutzung des oberflächennahen geologischen Untergrunds als Wärmequelle und Wärmespeicher in Verbindung mit (Groß-)Wärmepumpensystemen kann (nach ersten Schätzungen) in den kommenden 4 – 5 Jahren jährlich 100 – 300 TWh_{th} (ca. 13 % – 40 %) für die aktuell benötigte Wärmeversorgung zur Verfügung stellen. Zudem unterstützen oberflächennahe Wärmespeicher und die mittlere und tiefe Geothermie systemisch die beschleunigte Transformation des nationalen Energiesystems und können signifikante nationale Maßnahmenkomponenten zur Anpassung an den Klimawandel sein. Die geringen hydrochemischen und mikrobiologischen Umweltauswirkungen entsprechender Wärmeversorgungssysteme sind nach bisherigen Forschungsergebnissen auf relativ kleine untertägige Räume begrenzt und zudem gut prognostizierbar. Eine hybride Nutzung des geologischen Untergrunds zur Wasserversorgung und Wärmeversorgung ist bei entsprechender und notwendiger Raum- und Betriebsplanung in urbanen Gebieten möglich.

Die zeitnahe Erprobung und Umsetzung dieser Wärmeversorgungssysteme drängen im Hinblick auf

- ▶ den schnellen Ausstieg aus der Wärmeversorgung mit fossilen Energieträgern,
- ▶ den Aufbau klimawandelresilienter, sicherer und kostengünstiger Wärmeversorgungssysteme sowie
- ▶ die Erschließung und den Ausbau relevanter internationaler Marktanteile im Hinblick auf die internationale Nachfrage nach von fossilen Energiequellen unabhängigen Wärmeversorgungssystemen (weltweit geschätzt ein Marktvolumen von mehreren 100 Milliarden bis > 1 Billion Euro in den kommenden 10 Jahren).

Um den Hochlauf dieser Wärmeversorgungstechnologien zu gestalten, sind folgende Maßnahmen notwendig:

- ▶ kurzfristig (Aufnahme der Tätigkeiten möglichst umgehend), zur schnellen Umsetzung von Referenzsystemen:
 - Verpflichtung zur Berücksichtigung dieser Technologien bei Wärme-/Kälte-Planungen,
 - Festlegung auf systemisch prioritäre und schnell umzusetzenden geothermische Versorgungssysteme (z. B. Solarthermie/PVT (Freiflächenanlage), saisonaler ATES, Großwärmepumpe, vorhandenes Wärmenetz) als Förderkriterien,
 - Einführung einer bundesweiten zeitlich beschränkten Experimentierklausel,
 - Zusicherung der Kostenübernahme für zusätzliche Erkundungs- und Monitoringmaßnahmen in den kommenden 2 Jahren,

- Übernahme des betrieblichen Ausfallrisikos der Wärmeversorgungssysteme aufgrund des bisher nicht hinreichend bekannten (betrieblichen) Langzeitverhaltens,
 - Ankündigung eines zweiten Reallabor-Förderprogramms mit Schwerpunkt „Klimaneutrale, regenerative Wärmeversorgung“,
 - Ankündigung eines Grün- bzw. Weißbuchs zum „Nationalen/europäischen Wirtschaftspotenzial zur international wettbewerbsfähigen Umsetzung geothermisch gestützter Wärmeversorgungssysteme“ und Einbeziehung des Finanz- und Versicherungsektors,
 - Presseinitiative mit Wasser- und Energieversorgerverbänden (etc.) zur thermischen und wasserwirtschaftlichen Nutzung des geologischen Untergrunds.
- mittelfristig (innerhalb der kommenden 12 Monate):
- Verpflichtung/Aufforderung für landesspezifische 3D-GIS-gestützte Planung geothermisch basierter Wärmeversorgungssysteme (u. a. zur Festlegung systemisch optimierter Umsetzungskorridore),
 - gesetzliche/untergesetzliche Modifikation des bestehenden Rechtsrahmens insbesondere im Planungs-, Bau- und Wasserecht, um regulatorische Grundlagen zur zeitnahen Genehmigung geothermisch gestützter Wärmeversorgungssysteme zu schaffen,
 - Ausschreibung geothermisch gestützter Reallabore in urbanen Gebieten (Fokus auf Festgestein und kontaminierte untertägige Räume sowie sehr zügiger Maßnahmenbeginn),
 - Aufstockung bestehender bzw. Initiierung von F&E-Vorhaben (z. B. BMBF) zu UTES-Systemen zur Erarbeitung einer naturwissenschaftlich-technischen Basis für regulatorisch relevante Fragestellungen,
 - Initiierung einer europäischen Wirtschaftsförderstrategie zum Aufbau wettbewerbsfähiger Produktionsketten für die notwendigen Systemmodule geothermisch gestützter Wärmeversorgungssysteme im Hard- und Softwarebereich (Sensor-System, Digitale Zwillinge, Geografische Informationssysteme etc.),
 - Informationsinitiative mit Verbänden, NGOs etc. über geothermisch gestützte Wärmeversorgungssysteme.

Ohne diese und möglicherweise noch zusätzliche Maßnahmen erscheint ein aktuell schwieriger und daher sehr ambitionierter Hochlauf kaum möglich, was unter anderem auch die Folge einer in Relation zu anderen Energiesektoren geringen F&E-Förderung in den vergangenen Jahren ist.

Aufgrund des hohen Marktpotentials und der Notwendigkeiten zur sehr zeitnahen Umsetzung sollte eine schnelle Einbindung hinreichend leistungsstarker Firmen für den Hochlauf jedoch gelingen, wenn politisch entsprechende Voraussetzungen geschaffen werden.

Entscheidend wird es zudem sein, wie die, bezogen auf die Gesamtthematik und in den Zielsetzungen relativ divers aufgestellte, nationale Forschungsinfrastruktur (u. a. Fraunhofer IEG,

Fraunhofer ISE, Helmholtz-Institute KIT, GFZ (Deutsches GeoForschungZentrum Helmholtz-Zentrum Potsdam), UFZ (Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, Leipzig) und viele engagierte Hochschulen etc.) eingebunden werden können bzw. ob und wie potenziell zukünftig solche Institutionen den essentiellen F&E-Transfer befördern werden.

5.2 Ausgangssituation

Wärmepumpengestützte Systeme werden das Rückgrat einer klimaneutralen und sozialverträglichen Wärmeversorgung bilden. Im Hinblick auf den Hochlauf dieser Systeme ist allerdings frühzeitig dafür Sorge zu tragen, dass die dafür notwendigen Wärmequellen klimaneutral, langfristig wirtschaftlich und versorgungssicher sind sowie systemische Vorteile für die gesamte Energiesystemtransformation bieten.

Verglichen mit Luft-Wärmepumpensystemen erfüllen Wärmepumpensysteme, die die Wärme aus oberflächennahen geologischen Schichten, dem Grundwasser oder oberirdischen Gewässern entnehmen, die oben genannten Kriterien wesentlich effektiver und effizienter. Erst diese ermöglichen die Umsetzung einer klimaneutralen und sicheren Transformation der Wärmeversorgung. Dies gilt insbesondere, wenn die Wärmequellen aktiv als Wärmespeicher bewirtschaftet werden. Folgende Vorteile sind u. a. maßgeblich:

- ▶ signifikant höhere Leistung und JAZ und damit geringerer Druck auf die Elektrizitätserzeugung und die -Übertragungs- und -Verteilnetze,
- ▶ Potential zur Sektorenkopplung und Stabilisierung des Elektrizitätsnetzes,
- ▶ höhere Versorgungssicherheit insbesondere bei Wetterextremen (Kühlen und Heizen) und bessere Kostenprognose,
- ▶ Potential zur Regulierung des Stadtklimas (Kühlen und Heizen),
- ▶ geringere Lärmemissionen,
- ▶ größeres wirtschaftliches Partizipationspotenzial an der Wärmeversorgung (z. B. Aufhebung von Konsumenten-/Produzenten-Trennung),
- ▶ hohe Kopplungspotenziale hydrologischer und thermischer Schwammstadtansätze als essentielle (urbane) Anpassungsmaßnahme an den Klimawandel.

Nur wenig berücksichtigt sind in der nationalen/europäischen Diskussion die globalen Wirtschafts- und Wertschöpfungspotentiale, die sich in der in den kommenden Dekaden weltweit notwendigen Transformation der Wärmeversorgungssysteme (Kühlen und Heizen) aufgrund nicht vermeidbarer Klimawandelanpassungsmaßnahmen und auch aufgrund der Verteuerung fossiler Energieträger im Gebäudebereich ergeben werden. Nach ersten sehr groben und nicht hinreichend belegten Abschätzungen kann von einem europäischen Marktvolumen von mehreren 100 Milliarden Euro und global von einem Marktvolumen von weit über 1 Billion Euro ausgegangen werden, wenn das völkerrechtsverbindliche Pariser Klimaschutzübereinkommen ernsthaft realisiert bzw. die Abkehr von fossilen Rohstoffen aufgrund der einseitigen negativen Abhängigkeiten beschleunigt verfolgt wird.

Vor diesem Hintergrund erscheint eine konsequente strategische nationale/europäische Aufstellung zur Sicherung der damit verbundenen Wertschöpfungspotenziale, aber auch zur Sicherung der zeitnahen Umsetzung der Transformation angeraten.

5.3 Hochlaufperspektiven und Maßnahmen

Die Ausbaupotenziale der oberflächennahen Geothermie und der untertägigen saisonalen Wärmespeicher lassen überschlägig Wärmeversorgungskapazitäten von ca. 100 TWh/a bis maximal 300 TWh/a in den kommenden 4 – 5 Jahren als umsetzbar erscheinen, wenn aktuell und in der hinreichenden Breite politisch die entsprechenden regulatorischen und technologischen Voraussetzungen geschaffen werden.

Folgende Punkte sind dabei vorrangig und z. T. parallel zu verfolgen:

- a) Bundeseinheitliche Vorgaben zur Planung:
 - ▶ Priorisierung der verfügbaren Technologie (oGT-, WWA-, UTES-Anlagen) in Abhängigkeit von den Wärmebedarfsdichten, technologiespezifischen Leistungspotenzialen und Effizienzen,
 - ▶ bundesweite Potentialanalyse auf GIS-Basis unter Berücksichtigung
 - der räumlichen Verteilung der Wärmebedarfsdichten (idealerweise energetische und exergetische Betrachtung sowie mit Projektion des thermischen Sanierungsfortschritts),
 - der vorhandenen bzw. in den kommenden 2 – 4 Jahren zu errichtenden klimaneutralen Wärmequellen (vorrangig Heizen) (z. B. Kläranlagen, PVT/Solarthermie auf Freifläche/Dach/Fassade, Oberflächengewässer, Müllverbrennungsanlagen und langfristige Industrieanlagen etc.),
 - der bestehenden und kurzfristig zu errichtenden Wärmenetze (in Abhängigkeit von Wärmebedarfsdichten),
 - des thermisch nutzbaren geologischen oberflächennahen Untergrunds (Wärmeentzug und Wärmespeicherung inkl. Abschätzung der thermischen Raumwirkung).
- b) Modifikation der gesetzlichen und untergesetzlichen Rahmenbedingungen zu den Themenfeldern
 - ▶ Datenverfügbarkeit (reale Wärmebedarfsdaten, Betriebsdaten zumindest für den öffentlichen Betrieb, geologische Daten), um die derzeit meist verwendeten Proxy-Daten validieren zu können,
 - ▶ Regelung und Priorisierung des Wärmenetzausbaus in Abhängigkeit von Wärmebedarfsdichten,
 - ▶ oberirdische und untertägige 3D-Raumplanung (auf verschiedenen Raumskalen) unter energetischen Aspekten,

- ▶ Erweiterung des Wasserrechts zum Schutz des Grundwassers und des Oberflächenwassers zur Wasserversorgung und zur Wärmeversorgung unter Berücksichtigung des Klima- und Umweltschutzes sowie der Versorgungssicherheit,
- ▶ untergesetzlich/bundeseinheitlich und/oder länderspezifisch: Vereinfachung der Genehmigungsfähigkeit von Anlagen zur thermischen Nutzung des oberflächennahen geologischen Untergrunds (idealerweise mit länderübergreifend abgestimmten Kriterien, insbesondere Verpflichtung zu großräumigen thermisch-hydrologischen Bewirtschaftungsmodellen des oberflächennahen geologischen Untergrunds in Abhängigkeit von Wärmebedarfsdichten, Gebäudebestand und Umwelt- und Klimaschutzaspekten).

Als Fragestellungen sind zu nennen:

- ▶ Definition nachhaltiger Ziele und Grundsätze zur Bewirtschaftung des oberflächennahen geologischen Untergrunds insbesondere in Gebieten mit einer hohen Wärmebedarfsdichte, z. B. vorausschauende Planung im Sinne einer Systemoptimierung beispielsweise auf Basis numerischer Simulationen mit holistischer Aussagekraft,
- ▶ Festlegung und rechtliche Verankerung von Prinzipien zur Definition untertägiger Nutzungs- und Auswirkungsräume bei multiplen Bewirtschaftungsszenarien,
- ▶ Ableitung konkreter quantitativ raumbezogener absoluter und/oder relativer thermischer, hydraulischer, hydrochemischer, mikrobiologischer und faunistischer Grenz-/Orientierungswerte und in diesem Rahmen Definition prognosegestützter Monitoringansätze,
- ▶ bedarfsorientierte Festsetzung untertägiger Priorisierungszonen für die Trinkwassernutzung sowie die thermische Nutzung,
- ▶ Definition von Kriterien für die gleichzeitige hydraulische und thermische Nutzung untertägiger Räume,
- ▶ bedarfs- und leistungsorientierte Priorisierung von UTES-Anlagen mit Großwärmepumpen gegenüber dezentralen kleinteiligen gemischten Wärmepumpensystemen in bestimmten Grundwasserleitern und Vorrang für Anlagen, die in Wärmenetze eingebunden sind,
- ▶ kein Bestandsschutz für dezentrale untertägige Anlagen gegenüber zentralen untertägigen Wärmespeichern.

c) Technologische Entwicklungen und Erfordernisse / F&E-Transfer

Die Notwendigkeit zur Verringerung von Erdgasimporten unter der mittelfristigen Perspektive des vollständigen Ausstiegs aus einer mit fossilen Energieträgern betriebenen Wärmeversorgung macht ein paralleles Vorgehen notwendig.

Einerseits sind die schnell und sicher umzusetzenden Maßnahmen zum Aufbau von Wärmeversorgungssystemen mit geothermischen Komponenten (Entzug oder saisonaler Speicher) im TRL-Bereich 7 – 9 prioritär zu realisieren. Andererseits sind die essentiellen Entwicklungen von Systemkomponenten und Systemkopplungen mit niedrigeren TRL voranzutreiben. Bei beiden

Zielsetzungen ist zu berücksichtigen, dass diese Technologien und Systeme trotz ihres hohen energetischen Wärmeversorgungs- und Wertschöpfungspotenzials bisher nicht unbedingt im Fokus der Förderung gestanden haben. Dieser Rückstand ist daher möglichst zeitnah und pragmatisch zu kompensieren, wenn die skizzierten Potenziale möglichst schnell gehoben werden sollen.

Ferner ist zu berücksichtigen, dass weniger effektive und effiziente Technologien nur aufgrund ihrer aktuellen Verfügbarkeit den Hochlauf nicht dominieren dürfen, wenn die Gesamtperformance der Transformation nicht mittelfristig gefährdet werden soll. Deswegen sollte der Hochlauf sukzessive in Abhängigkeit von den Wärmebedarfsdichten und ortsspezifischen Faktoren geplant und unterstützt werden:

► **Priorität 1:**

oberflächennahe UTES-Anlagen (mit verschiedenen primären Wärmequellen) mit Großwärmepumpen mit Wärmenetz / leistungsstarke (d. h. mitteltiefe) EWS-Anlagen (Entzug) mit Großwärmepumpen und Wärmenetzen

► **Priorität 2:**

thermische bzw. systemische Ertüchtigung (z. B. Repowering, innovative Systemmodule etc.) dezentraler kleinteiliger gemischter Wärmepumpensysteme mit Wärmequellen in bestimmten Grundwasserleitern bzw. in oberflächennahen geologischen Schichten mit mittlerer aktiver thermischer saisonaler Bewirtschaftung/Speicherung

► **Priorität 3:**

Ausbau konventioneller dezentraler kleinteiliger gemischter Wärmepumpensysteme mit Wärmequellen in bestimmten Grundwasserleitern bzw. in oberflächennahen geologischen Schichten mit geringer aktiver thermischer saisonaler Bewirtschaftung/Speicherung.

Relativ schnell umzusetzen wären nach diesen Kriterien folgende Technologien:

- (saisonale) ATES-Anlagen (eingeschränkt WWA-Systeme) in quartären und tertiären Lockersedimenten sowie gegebenenfalls in hydraulisch gut permeablen mesozoischen Sedimenten,
- die (saisonale) thermische Speicherbewirtschaftung alter Stollensysteme,
- (saisonale) BTES- und leistungsstarke EWS-Anlagen (i. d. R. mit signifikanten geothermischen Gradienten) aufgrund ortsspezifischer günstiger geologischer Randbedingungen

in folgenden Kommunen, Gemeinden und Städten:

- Kleinstädte und ländliche Gemeinden idealerweise mit Wärmenetzen (aufgrund der Flächenverfügbarkeit für PVT- und solarthermische Freiflächenanlagen),
- Mittel- und Großstädte mit entsprechendem geologischen Untergrund und Wärmenetzen mit weiteren fluktuierenden und ungenutzten Wärme- bzw. Energiequellen wie Biogasanlagen, Kläranlagen, Redispatch-Elektrizität, nicht genutzter saisonaler Abwärme aus Müllverbrennungsanlagen etc.

Aufgrund der i. d. R. geringen Betriebserfahrung mit entsprechenden Systemen, der damit verbundenen nicht vollständigen/optimierten Reife einzelner Systemmodultechnologien, aber auch der Notwendigkeit zur Entwicklung neuartiger Systemmodule (u. a. Wärmespeicherkavernen, In-situ-Eiswärmespeicher etc.) ist der angestrebte Hochlauf mit verschiedenen staatlichen Maßnahmen (vgl. u. a. 8. Energieforschungsprogramm des BMWK) zu unterstützen, um Investitionshemmnisse zu mindern und F&E-Anreize zu setzen:

- ▶ Erprobung und mittel- bis langfristige finanzielle Absicherung von Demonstratoren:
 - Staatliche Beteiligung an betrieblichen und bisher aufgrund der kurzen Entwicklungszeit nicht erfassbaren betrieblichen Langzeitrissen (z. B. Clogging bei HT-ATES-Systemen),
 - staatliche Beteiligung z. B. über F&E-Vorhaben an zusätzlichem Erkundungs- und Monitoringaufwand,
 - Unterstützung weiterer Reallaborvorhaben mit Fokus auf die regenerative Wärmeversorgung u. a. zur thermischen Nutzung kontaminierter untertägiger urbaner Räume oder Entwicklung untertägiger großvolumiger Wasserspeicher (z. B. 5000-m³-Kavernen) zur thermischen und wasserwirtschaftlichen Nutzung urbaner Festgesteinsuntergründe oder In-situ-Eiswärmespeichersysteme (für z. B. Kühlhäuser, Rechenzentren etc.).

Technologienentwicklungen für Systemmodule im Rahmen staatlich unterstützter Transfervorhaben u. a. in den Bereichen:

- ▶ Entwicklung kosteneffizienter und sicherer Bohrverfahren

Begründung: Bohrkosten und nicht hinreichende Bohrungssicherheit (z. B. potenzielle Verschleppung von Kontaminanten) stellen in der aktuellen Praxis wirtschaftlich und regulatorisch ein wesentliches Hemmnis bei der Entscheidung für UTES-Anlagen dar. Technologische Fortschritte bieten ein großes globales Vermarktungspotenzial.
- ▶ Entwicklung/Optimierung temperaturflexibler Wärmepumpen-Systeme und temperaturrobuster hydraulischer Pumpensysteme

Begründung: Es besteht ein Optimierungsbedarf für (Groß-)Wärmepumpen im Hinblick auf Temperaturverläufe in der Ausspeicherphase bei saisonalen UTES-Systemen. Temperaturrobuste hydraulische Pumpsysteme stellen derzeit Nischenprodukte dar, fehlende Marktverfügbarkeit wirkt limitierend, aber im Hochlauf besteht großes Vermarktungspotenzial.
- ▶ Entwicklung und Markteinführung von thermisch aktivierten Fassaden, Gehwegen etc., PVT- und Solarthermie-Systemen

Begründung: Technologien zur thermischen Aktivierung („Wärmeernte“) von urbanen Oberflächen sind ein wesentlicher Schlüssel für zukünftige „Thermal Sponge Cities“ bzw. die thermische Wärmeselbstversorgung. Forschung hierzu wird (wie bei viele anderen Systemmodulen) von China bestimmt (Abb. 5.1).

Abbildung 5.1: Nationale Verteilung von Publikationen zur thermischen Aktivierung von Verkehrsflächen und Gebäudefassaden



Links: nationale Verteilung von Publikationen zur thermischen Aktivierung von Verkehrsflächen (n = 50 aktuelle relevante Publikationen). Rechts: nationale Verteilung von Publikationen zur thermischen Aktivierung von Gebäudefassaden (n = 25 aktuelle relevante Publikationen).

Quelle: Unpublizierte Ergebnisse aus Seminararbeit von Borgeest und Marlow, 2022 (Christian-Albrechts-Universität zu Kiel).

► Softwareentwicklung bzw. Entwicklung digitaler Zwillinge und „intelligenter“ 3D-GIS-Datenbanksysteme

Begründung: Numerische Modellierung in Form „digitaler Zwillinge“, Sensorik und Datenmanagement zur Steuerung und zum Monitoring komplexer und zeitlich/räumlich fluktuierender Wärmedargebote, -bedarfe und Wärmenetz- bzw. -speicherbewirtschaftung werden in urbanen Räumen mit hohen Wärmebedarfsdichten die Grundlage zukünftiger Wärmeverversorgungssysteme darstellen.

Die Entwicklung und Nutzung entsprechender Softwareplattformen für unterschiedliche digitale Zwillinge wie UBEM (Urbanes Gebäude-Energiemodell, Urban Building Energy Model) und USEM (Urbanes Energiesystemmodell, Urban Scale Energy Model) sind für die Nutzung entsprechender Systeme als auch für deren globale wirtschaftliche Nutzung von sehr hoher strategischer Bedeutung und bieten die Basis für die Vermarktung anderer innovativer Systemmodule.

► Umweltauswirkungen und Interventionsverfahren

Zukünftig werden prognosegestützte Betriebsgenehmigungen wahrscheinlich der Standard sein, da konventionelle belastbare Monitoringkonzepte i. d. R. aufgrund limitierter Anzahl von Monitorpegeln in der Praxis nicht realisierbar erscheinen. Für quarzsanddominierte Aquifere und bindige Sedimente existieren hierzu schon erste belastbare Prognosewerkzeuge im Hinblick auf Temperaturdynamik sowie die hydrochemischen und mikrobiologischen Veränderungen. Dringender Forschungsbedarf besteht jedoch noch u. a. für folgende Aspekte, die den Hochlauf von (HT-)ATES-Systemen limitieren können:

- temperaturabhängige Reaktivität C_{org} -reicher Sedimente einschließlich Gasentwicklung,
- hydrochemisches und mikrobiologisches Langzeitverhalten von HT-ATES-Anlagen,

- Konzepte zur Prognose hydraulischer, thermischer und hydrogeochemischer Vermischungsprozesse bei HT-ATES Anlagen („warme“ und „kalte“ Seite),
- hydrogeochemische und mikrobiologische Steady-State-Einstellung in der Postbetriebsphase,
- Entwicklung von Interventionsverfahren wie „Überpumpen“ und Injektion reaktiver geochemischer Substanzen und Animpfung mit Temperatur und standortangepassten Aquiferbiom.

► Qualitätssicherung und Fortbildungsstrategie

Es besteht eine Anwendungslimitierung und Fehleranfälligkeit der neuen Technologien beim Hochlauf aufgrund geringer Kenntnis bzw. Erfahrungen bei Ingenieurbüros und Genehmigungsbehörden.

Folgende Punkte sind im Hinblick auf den Hochlauf zu verfolgen:

- Fortbildungsstrategie unter konsequenter Nutzung der „digitalen“ Medien (gegebenenfalls Fortbildungsverpflichtung),
- schnelle Normungsverfahren in Kooperation mit Verbänden etc.,
- „standardisierte“ Genehmigungsverfahren.

d) Status Quo und zukünftiger Bedarf an Produktionskapazitäten in Planungs-, Dienstleistungs- und Zulieferbereichen

Die Verfügbarkeit von Dienstleistungs- und Produktionskapazitäten wie auch die Anfälligkeit von Lieferketten wurde bisher nur in nicht repräsentativen und überprüften Einzelgesprächen abgefragt. Folgenden Aussagen und Erkenntnisse bestehen zu den jeweiligen Themenbereichen:

► Bohrkapazitäten

Bisher gibt es keine belastbaren Aussagen zu national vorhandenen Bohrkapazitäten im oberflächennahen Bereich und deren Auslastung. Indikatoren, z. B. Wartezeiten von mehreren Monaten für Erkundungsbohrungen und starke Verteuerung der Bohrleistung (z. T. +30 % in einem Jahr), deuten auf eine hohe Auslastung hin, die angeblich wesentlich personalbedingt ist. Einfache Überschlagsrechnungen zeigen, dass ATES- bzw. WWA-Systeme um 2 – 3 Zehnerpotenzen weniger Bohrmeter bei gleicher Wärmeleistung benötigen, was im Hinblick auf die wahrscheinlich aktuell zu geringe Bohrkapazität beim Hochlauf relevant ist.

Derzeit in Klärung mit der Fa. Herrenknecht befindet sich die Frage, ob Wärmespeicherkavernen für Festgesteinsuntergründe mit modifizierten Bohrverfahren günstig und schnell zu erstellen sind. Allerdings sind solche Wärmespeicher auch erst am Anfang ihrer technologischen Entwicklung.

► Zulieferindustrie von EWS, hydraulischen Pumpen etc.

Zulieferindustrien finden sich hauptsächlich in Asien, zudem gibt es lange Wartezeiten (2 – 3 Monate für Standard-Systemkomponenten aufgrund verzögerter Lieferketten; Auslastung der Produktionskapazitäten unklar). Generell gibt es Angebotsdefizite von Systemkomponenten wie hydraulischen Pumpen etc. für den „höheren“ Temperaturbereich z. B. um 80 °C +/- 20 °C (HT-ATES-Anlagen) und 0 °C bis -25 °C (In-situ-Eiswärmespeicher).

► Wärmepumpen, Großwärmepumpen

Der Verband der Wärmepumpenhersteller ist angefragt und hat eine Antwort zu aktueller Produktionskapazität und potentielltem Produktionshochlauf zugesagt; die Produktion der Großwärmepumpen ist europäisch angeblich mit Fertigungszahlen eher auf Manufaktur-Niveau.

► PVT- und Solarthermie-Module

Nach Auskunft deutscher Importeure mit guten Kontakten zu chinesischen Produzenten ist die Produktion aktuell dort zu 85 % – 90 % ausgelastet. Eine signifikante Steigerung der Produktion (plus 20 % – 50 % der jetzigen Produktion) bedarf mindestens eines Vorlaufes von 6 – 8 Monaten, realistisch wohl eher von 12 Monaten.

► Wärmenetzplanung, Wärmenetzausbau

Der Eindruck von Planern ist, dass der Wärmenetzausbau aktuell durch regulative Hürden und Verzögerungen limitiert wird. Ob und inwieweit bei Wegfall dieser regulativen Limitierungen die nationalen Tiefbaukapazitäten und die Materiallieferketten wirklich hinreichend für einen Hochlauf wären, bleibt aktuell nicht zu bewerten.

► Sensorik und Betriebssoftware

Im Bereich der Sensorik zur optimierten Steuerung und Kontrolle komplexer „Thermal-Sponge-City“-Konzepte erscheint Deutschland durch internationale Konzerne wie Siemens prinzipiell gut aufgestellt.

Numerische Modelle in Form funktionaler numerischer Zwillinge existieren weder für die großräumige thermisch-hydrologische Bewirtschaftung des geologischen Untergrunds, noch im Hinblick auf die thermische Bewirtschaftung urbaner Oberflächen oder die auch damit verbundenen Stadtklimaentwicklungen.

Allerdings bieten internationale Firmen wie DHI oder Bentley bereits Softwareplattformen für den urbanen Bereich an, die eine Basis für die Entwicklung und Einbindung der oben skizzierten digitalen Zwillinge sein könnten.

► Ausbildungs- und Fortbildungsbedarf

Verbände, Hochschulen etc. bieten bereits aktuell Aus- und Fortbildungsprogramme an, die bei Bedarf hinreichend ausgebaut werden können.

e) Stakeholder und Gesellschaft

Der Hochlauf geothermisch gestützter Wärmeversorgungssysteme wird auch stark von der öffentlichen Akzeptanz anhängen. Die aktuelle russische Invasion in der Ukraine und alle damit verbundenen Konsequenzen haben wahrscheinlich das traditionell skeptische Meinungsbild hinsichtlich der wirtschaftlichen Nutzung des geologischen Untergrunds (bis auf die Grundwasserbewirtschaftung) verändert. Deshalb erscheint es angeraten, dass von politischer Seite ein hochrangiges Treffen mit Verbänden, Nichtregierungsorganisationen etc. zeitnah veranstaltet wird, um grundsätzliche Positionierungen abzufragen bzw. gemeinsame Zielsetzung herauszuarbeiten und frühzeitig und transparent in den Medien vorzustellen.

Quellenverzeichnis

- Ad-hoc-Arbeitsgruppe Hydrogeologie (Hrsg.) (2016): Regionale Hydrogeologie von Deutschland. Die Grundwasserleiter: Verbreitung, Gesteine, Lagerungsverhältnisse, Schutz und Bedeutung: Bd. A 163
- Admiraal, H. & Cornaro, A. (2016): Engaging decision makers for an urban underground future. Tunnelling and Underground Space Technology, 55, 221–223. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.08.009>
- AGFW – Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V. (2020): AGFW-Hauptbericht 2019. <https://www.agfw.de/energiwirtschaft-recht-politik/energiwende-politik/aktuelles-aus-dem-be-reich/newsdetail/agfw-hauptbericht-2019>
- Agster, G. (1996): Untersuchungsprogramm zur Ermittlung des nutzbaren Grundwasserdargebotes im schleswig-holsteinischen Nachbarraum zu Hamburg (Südost-Holstein)
- Agster, G. (2010): Untersuchungsprogramm zur Ermittlung des nutzbaren Grundwasserdargebotes im Raum Lübeck / Bad Segeberg
- Agster, G.; Fischer, E.; Otto, R. & Stoecker, K. (2014): Endbericht zum Untersuchungsprogramm zur Ermittlung des nutzbaren Grundwasserdargebotes im Raum Lübeck / Bad Segeberg. https://www.schleswig-holstein.de/DE/fachinhalte/G/grundwasser/Downloads/Luebeck/Bericht_UP.pdf?blob=publicationFile&v=1
- Andersson, O. (1990): Scaling and corrosion in subsurface thermal energy storage systems. In J. C. Hooghart & C. W. S. Posthumus (Hrsg.), Proceedings and Information No. 43. 48th technical meeting of the CHO-TNO, „Hydrochemistry and energy storage in aquifers“ (S. 53–72)
- Andersson, O. & Sellberg, B. (1992): Swedish ATES Applications: Experiences after Ten Years of Development. Aquifer Thermal Energy (Heat and Chill) Storage: Proceedings of the 27th intersociety energy conversion engineering conference, 1–7. <https://doi.org/10.4271/929153>
- Appelo, C. A. J. & Postma, D. (2005): Geochemistry, groundwater and pollution. <https://doi.org/10.1201/9781439833544>
- Arcadis N. V.; Ministerie van Infrastructuur en Milieu; TTE Consultants; Witteveen+Bos N. V.; TAUW B. V.; IF Technology B. V.; SKB – Stichting Kennisontwikkeling Kennisoverdracht Bodem & Agentschap NL (2011): Handreiking masterplannen bodemenergie. <https://www.soilpedia.nl/Bikiviki%20documenten/SKB%20Projecten/xx0168%20Handreiking%20Masterplannen%20Bodemenergie/Handreiking%20masterplannen%20bodemenergie%2020%20oktober%202011%20totaal.pdf>
- Arning, E.; Kölling, M.; Panteleit, B.; Reichling, J. & Schulz, H. D. (2006): Einfluss oberflächennaher Wärmegewinnung auf geochemische Prozesse im Grundwasserleiter. Grundwasser, 1, 27–39. <https://doi.org/10.1007/s00767-006-0116-0>
- Arpagaus, C. (2018): Hochtemperatur Wärmepumpen. Literaturstudie zum Stand der Technik, der Forschung, des Anwendungspotenzials und der Kältemittel. https://www.ost.ch/fileadmin/dateiliste/3_forschung_dienstleistung/institute/ies/projekte/projekte_tes/91_sccer-eip/literaturstudie_hochtemperatur_waermepumpen.pdf
- Ast, M.; Eckl, H.; Elbracht, J.; Fischer, K.; Fritz, J.; Henke-Jelit, S.; Jensen, H.; Pester, S. & Sbresny, J. (2012): Leitfaden Erdwärmenutzung in Niedersachsen. Rechtliche und technische Grundlagen (Nr. 24; GeoBerichte). http://www.umwelt.niedersachsen.de/download/6460/GeoBerichte_24_Leitfaden_Erdwaermenu...Niedersachsen_-_Rechtliche_und_technische_Grundlagen_Oktober_2012_.pdf
- ASUE – Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e. V. (2013): Gaswärmepumpen in Wohngebäuden. Grundlagen. https://asue.de/sites/default/files/asue/themen/gaswaermepumpe_kaelte/2014/broschueren/06_11_13_asue_gwp_grundlagen.pdf

ASUE – Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e. V. (2017): Marktübersicht Gaswärmepumpen 2017/2018. Gasmotorwärmepumpen, Gasklimageräte, Gassorptionswärmepumpen und -kälteanlagen. https://asue.de/sites/default/files/asue/themen/gaswaermepumpe_kaelte/2017/broschueren/ASUE_Marktuebersicht-Gaswaermepumpen_2017.pdf

Atam, E.; Patteeuw, D.; Antonov, S. P. & Helsen, L. (2015): Optimal Control Approaches for Analysis of Energy Use Minimization of Hybrid Ground-Coupled Heat Pump Systems. IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 24(No. 2). <https://doi.org/10.1109/TCST.2015.2445851>

Attard, G.; Rossier, Y.; Winiarski, T. & Eisenlohr, L. (2016): Deterministic modeling of the impact of underground structures on urban groundwater temperature. Science of The Total Environment, 572, 986–994. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.229>

Ausfelder, F.; Drake, F.-D.; Erlach, B.; Fishedick, M.; Henning, H.-M.; Kost, C.; Münch, W.; Pittel, K.; Rehtanz, C.; Sauer, J.; Schätzler, K.; Stephanos, C.; Themann, M.; Umbach, E.; Wagemann, K.; Wagner, H.-J. & Wagner, U. (2017): „Sektorkopplung“ – Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft). https://energiesysteme-zukunft.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/PDFs/ESYS_Analyse_Sektorkopplung.pdf

Avdonin, N. A. (1964): Some formulas for calculating the temperature field of a stratum subject to thermal injection. Neft’i Gaz, 7(3), 37–43

Avramov, M.; Schmidt, S. I.; Griebler, C.; Hahn, H. J. & Berkhoff, S. (2010): Dienstleistungen der Grundwasserökosysteme. Gewässer und Boden, 3(2), 74–80. <https://doi.org/10.3243/kwe2010.02.001>

Bartel, S. & Janssen, G. (2016): Raumplanung im Untergrund unter besonderer Berücksichtigung des Umweltschutzes. Natur und Recht, 38, 237 – 246 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10357-016-2992-0>

Barthel, E.; Burucker, G.; Gemershausen, L.; Hilliges, F.; Neumann, P.; Rückert, H.; Simon-O’Malley, S.; Steinmann, F.; Blondzik, K.; Ullrich, A.; Künitzer, A.; Mönnich, J.; Walther, F.; Kleber, S.; Birkenbihl, J.; van Beusekom, J.; Leujak, W.; Hanslik, M.; Reetz, M.; ... Kreins, P. (2020): Nitratbericht 2020. Gemeinsamer Bericht der Bundesministerien für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit sowie für Ernährung und Landwirtschaft. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Binnengewaesser/nitratbericht_2020_bf.pdf

BASE – Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (2021): Schutz möglicher Standorte. Regelungen zum Umgang mit Bergbauprojekten oder wasserrechtlichen Vorhaben beispielsweise zur Rohstoffgewinnung oder der Nutzung von Erdwärme im Rahmen des Standortauswahlgesetzes. https://www.endlagersuche-infoplattform.de/webs/Endlagersuche/DE/Endlagersuche/Schutz-moeglicher-Standorte/schutz-moeglicher-standorte_node.htm (aufgerufen am 26.05.2024)

Bauer, M.; Freeden, Willi; Jacobi, Hans & Neu, Thomas (2014): Handbuch Tiefe Geothermie. Prospektion, Exploration, Realisierung, Nutzung. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-54511-5>

Bauer, S.; Dahmke, A.; al Hagrey, S. A.; Aydin, M.; Beyer, C.; De Nil, D.; Delfs, J.-O.; Dethlefsen, F.; Djotsa, V.; Duttmann, R.; Ebert, M.; Erkus, E.; Fischer, S.; Gasanzade, F.; Gräber, M.; Hailemariam, H.; Hartmann, T.; Hornbruch, G.; Kabuth, A.; ... Wuttke, F. (2021): Verbundvorhaben ANGUS II: Auswirkungen der Nutzung des geologischen Untergrundes als thermischer, elektrischer oder stofflicher Speicher. Integration unterirdischer Speichertechnologien in die Energiesystemtransformation am Beispiel des Modellgebietes Schleswig-Holstein, Teilprojekt „Geologische Modellierung und Parametrisierung“. Schlussbericht. https://www.kge.uni-kiel.de/de/material/angus-ii-schlussbericht-1/at_download/file

Bauer, S.; Dahmke, A. & Kolditz, O. (2017): Subsurface energy storage: geological storage of renewable energy. Capacities, induced effects and implications. Environmental Earth Sciences, 76(20), 695, s12665-017-7007–7009. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7007-9>

- Bayer, P.; Attard, G.; Blum, P. & Menberg, K. (2019): The geothermal potential of cities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 106, 17–30. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.019>
- Beer, M.; Jahn, M.; Köster, H.; Hölting, F.; Lange, J.; Breitenstein, T.; Krüger, S.; Hohmeyer, O.; Steinwender, S.; Kovač, E.; Werth, M.; Hilpert, S.; Wingenbach, C. & Bohnet, M. (2017): Masterplan 100% Klimaschutz für die Landeshauptstadt Kiel. Endbericht. https://www.kiel.de/de/umwelt_verkehr/klimaschutz/_dokumente_masterplan/Endbericht_Masterplan_100_Prozent_Klimaschutz_Kiel.pdf
- Bell, E.; Rattray, J. E.; Sloan, K.; Sherry, A.; Pilloni, G. & Hubert, C. R. J. (2022): Hyperthermophilic endospores germinate and metabolize organic carbon in sediments heated to 80°C. *Environmental Microbiology*, 24(11), 5534–5545. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.16167>
- Beltrami, H.; Bourlon, E.; Kellman, L. & González-Rouco, J. F. (2006): Spatial patterns of ground heat gain in the Northern Hemisphere. *Geophysical Research Letters*, 33(6). <https://doi.org/10.1029/2006GL025676>
- Benisch, K. & Bauer, S. (2013): Short- and long-term regional pressure build-up during CO₂ injection and its applicability for site monitoring. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 19, 220–233. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2013.09.002>
- Benndorf, R.; Bernicke, M.; Bertram, A.; Butz, W.; Dettling, F.; Elsner, C.; Fee, E.; Gabler, C.; Galander, C.; Hargita, Y.; Herbener, R.; Hermann, T.; Jäger, F.; Kanthak, J.; Kessler, H.; Koch, Y.; Kuntze, D.; Lambrecht, M.; Lehmann, C.; ... Wolff, A. (2014): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. *Climate Change*, 07/2024. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/07_2014_climate_change_dt.pdf
- Benz, S. A.; Bayer, P. & Blum, P. (2017): Global patterns of shallow groundwater temperatures. *Environmental Research Letters*, 12(3), 034005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa5fb0>
- Benz, S. A.; Bayer, P.; Blum, P.; Hamamoto, H.; Arimoto, H. & Taniguchi, M. (2018): Comparing anthropogenic heat input and heat accumulation in the subsurface of Osaka, Japan. *Science of the Total Environment*, 643, 1127–1136. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.253>
- Benz, S. A.; Bayer, P.; Menberg, K.; Jung, S. & Blum, P. (2015): Spatial resolution of anthropogenic heat fluxes into urban aquifers. *Science of The Total Environment*, 524–525, 427–439. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.003>
- Berkhoff, S. (2010): Die Meiofauna des Interstitials und Grundwassers als Indikator für Oberflächenwasser-Grundwasser-Interaktionen im Bereich einer Uferfiltrationsanlage. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Naturwissenschaften, Fachbereich 7: Natur- und Umweltwissenschaften, Universität Koblenz-Landau. https://kola.opus.hbz-nrw.de/frontdoor/deliver/index/docId/388/file/dissertation_berkhoff_mai2009.pdf
- BGE – Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (2020): Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG. Stand 28.09.2020. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Zwischenbericht_Teilgebiete/Zwischenbericht_Teilgebiete_barrierefrei.pdf
- BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2020): Geologische Karten Deutschlands. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Sammlungen-Grundlagen/GG_geol_Info/Karten/Deutschland/deutschland_node.html (aufgerufen am 14.02.2020)
- Bilke, L.; Flemisch, B.; Kalbacher, T.; Kolditz, O.; Helmig, R. & Nagel, T. (2019): Development of Open-Source Porous Media Simulators: Principles and Experiences. *Transport in Porous Media*, 130(1), 337–361. <https://doi.org/10.1007/s11242-019-01310-1>

Bin Hudari, M. S.; Vogt, C. & Richnow, H.-H. (2020): Effect of temperature on acetate mineralization kinetics and microbial community composition in a hydrocarbon-affected microbial community during a shift from microoxic to sulfidogenic conditions. *Frontiers in Microbiology*, 17:11:606565.

<https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.606565>

Bin Hudari, M. S.; Vogt, C. & Richnow, H.-H. (2022): Sulfidic acetate mineralization at 45 °C by an aquifer microbial community: key players and effects of heat changes on activity and community structure. *Environmental Microbiology*, 2022(24(1)), 370–389. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.15852>

Bitzer Kühlmaschinenbau GmbH (2018): Kältemittel-Report 20 (A-500-20 DE). https://www.kaelteplaner.ch/wp-content/uploads/2019/11/K%C3%A4lletechnik_SSP_bitzer_kaeltemittelreport_20_d.pdf

BKG – Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (2021): Verwaltungsgebiete 1:250 000 mit Einwohnerzahlen (Ebenen), Stand 31.12.[2021] (VW250-EW 31.12.). <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/open-data/verwaltungsgebiete-1-250-000-mit-einwohnerzahlen-stand-31-12-vg250-ew-31-12.html>

Bloemendal, M. & Hartog, N. (2018): Analysis of the impact of storage conditions on the thermal recovery efficiency of low-temperature ATEs systems. *Geothermics*, 71C, 306–319.

<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.10.009>

Bloemendal, M.; Jaxa-Rozon, M. & Olsthoorn, T. (2018): Methods for planning ATEs systems. *Applied Energy*, 216, 534–577. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.068>

Bloemendal, M. & Olsthoorn, T. (2018): ATEs systems in aquifers with high ambient groundwater flow velocity. *Geothermics*, 75, 81–92. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.04.005>

Bloemendal, M.; Olsthoorn, T. & Boons, F. (2014): How to achieve optimal and sustainable use of the subsurface for Aquifer Thermal Energy Storage. *Energy Policy*, 66(621).

<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.11.034>

Bloemendal, M.; Olsthoorn, T. & van de Ven, F. (2015): Combining climatic and geo-hydrological preconditions as a method to determine world potential for aquifer thermal energy storage. *Science of The Total Environment*, 538, 621–633. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.084>

Blum, P.; Menberg, K.; Koch, F.; Benz, S. A.; Tissen, C.; Hemmerle, H. & Bayer, P. (2021): Is thermal use of groundwater a pollution? *Journal of Contaminant Hydrology*, 239, 103791.

<https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2021.103791>

BMJ – Bundesministerium der Justiz (2019): Bundesanzeiger. Bekanntmachung. Veröffentlicht am Dienstag, 24. Dezember 2019. BAnZ AT 24.12.2019 B1. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Förderbekanntmachung zu den Modellvorhaben Wärmenetzsysteme 4.0 – („Wärmenetze 4.0 – Bundesförderung effiziente Wärmenetze“) vom 11. Dezember 2019 (BAnZ AT 24.12.2019 B1; Bundesanzeiger). <https://www.bundesanzeiger.de/pub/publication/iWrOAbNtQ7qTa0GkMrh/content/iWrOAbNtQ7qTa0GkMrh/BAnz%20AT%2024.12.2019%20B1.pdf?inline>

BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2016): Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/klimaschutzplan-2050.pdf?__blob=publicationFile&v=1

BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2015): Energieeffizienzstrategie Gebäude. Wege zu einem nahezu klimaneutralen Gebäudebestand. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energieeffizienzstrategie-gebaeude-kurzfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=7

BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2019): Energieeffizienz in Zahlen. Entwicklungen und Trends in Deutschland 2019. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-2019.pdf?__blob=publicationFile&v=1

BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020a): Energieeffizienz in Zahlen. Entwicklungen und Trends in Deutschland 2020. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-2020.pdf?__blob=publicationFile&v=20

BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020b): Integrierter Nationaler Energie- und Klimaplan (NECP). https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/I/integrierter-nationaler-energie-klimaplan.pdf?__blob=publicationFile&v=1

BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2021): Die Energie der Zukunft. 8. Monitoring-Bericht zur Energiewende – Berichtsjahre 2018 und 2019. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/achter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft.pdf?__blob=publicationFile&v=14

BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie & BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiekonzept-2010.pdf?__blob=publicationFile&v=1

BMWSB – Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (2023): Gesetzentwurf der Bundesregierung. Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Gebäudeenergiegesetzes und zur Änderung der Heizkostenverordnung sowie zur Änderung der Kehr- und Überprüfungsordnung. https://www.bmwsb.bund.de/SharedDocs/gesetzgebungsverfahren/Webs/BMWSB/DE/Downloads/kabinettsfassung/geg-20230419.pdf?__blob=publicationFile&v=2

Bobylev, N. & Sterling, R. (2016): Urban underground space: A growing imperative: Perspectives and current research in planning and design for underground space use. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 55, 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.02.022>

Bock, S.; Zwicker-Schwarz, D.; Floeting, H.; Libbe, J. & Preuß, T. (2008): Wege zum nachhaltigen Flächenmanagement. Themen und Projekte des Förderschwerpunkts REFINA. Forschung für die Reduzierung der Flächeninanspruchnahme und ein nachhaltiges Flächenmanagement. <https://www.irbnet.de/daten/rswb/10089024166.pdf>

Bödecker, S.; Dahmke, A.; Fürst, M.; Hirschfeld, M.; Langer, A.; Liebreich, F.; Liebsch-Dörschner, T.; Löb, S.; von Nicolai, H.; Scholich, D.; Schünemann, M. & Yaramanci, U. (2012): Nutzungen im Untergrund vorsorgend steuern – für eine Raumordnung des Untergrundes (Nr. 91; Positionspapier aus der ARL). https://shop.arl-net.de/media/direct/pdf/pospaper_91.pdf

Bonte, M. (2013): Impacts of shallow geothermal energy on groundwater quality. A hydrochemical and geo-microbial study of the effects of ground source heat pumps and aquifer thermal energy storage. http://www.hydrology-amsterdam.nl/personalpages/PhDs/Bonte_PhD_thesis_2013.pdf

Bonte, M.; Stuyfzand, P. J.; van den Berg, G. A. & Hijnen, W. A. M. (2011): Effects of aquifer thermal energy storage on groundwater quality and the consequences for drinking water production: a case study from the Netherlands. *Water Science and Technology*, 2011(63(9)), 1922–1931. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.189>

Bonte, M.; van Breukelen, B. M. & Stuyfzand, P. J. (2013a): Environmental impacts of aquifer thermal energy storage investigated by field and laboratory experiments. *Journal of Water and Climate Change*, 4(2), 77–89. <https://doi.org/10.2166/wcc.2013.061>

Bonte, M.; van Breukelen, B. M. & Stuyfzand, P. J. (2013b): Temperature-induced impacts on groundwater quality and arsenic mobility in anoxic aquifer sediments used for both drinking water and shallow geothermal energy production. *Water Research*, 47(14), 5088–5100. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.05.049>

- Bonte, Matthijs; Röling, B. M.; Röling, W. F. M.; van der Wielen, P. W. J. J.; van Breukelen, B. M. & Stuyfzand, P. J. (2013c): Impacts of shallow geothermal energy production on redox processes and microbial communities. *Environmental Science & Technology*, 47, 14476–14484. <https://doi.org/10.1021/es4030244>
- Bonte, Matthijs; Stuyfzand, P. J. & Breukelen, B. M. van (2014): Reactive transport modeling of thermal column experiments to investigate the impacts of aquifer thermal energy storage on groundwater quality. *Environmental Science & Technology*, 48(20), 12099–12107. <https://doi.org/10.1021/es502477m>
- Boockmeyer, A. & Bauer, S. (2016): Efficient simulation of multiple borehole heat exchanger storage sites. *Environmental Earth Sciences*, 75(12), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5773-4>
- Bormann, H.; Gramlich, E.; Müller, F.; Schröder, M.; Vodegel, S. & Sievers, M. (2019): Keine Energie ohne Wasser. Zukunftsszenarien und Empfehlungen für die Weiterentwicklung der Wasserwirtschaft unter gravierend veränderten energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen. Abschlussbericht. https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-32804_01-Hauptbericht.pdf
- Born, H.; Schimpf-Willenbrink, S.; Lange, H.; Bussmann, G. & Bracke, R. (2017): Analyse des deutschen Wärmepumpenmarktes. Bestandsaufnahme und Trends. 2. Aktualisierung der Studie. https://www.ieg.fraunhofer.de/content/dam/ieg/deutsch/dokumente/veroeffentlichungen/Analyse_des_deutschen_Waermepumpenmarktes_2017.pdf
- Boulton, A. J.; Fenwick, G. D.; Hancock, P. J. & Harvey, M. S. (2008): Biodiversity, functional roles and ecosystem services of groundwater invertebrates. *Invertebrate Systematics*, 22(2), 103–116. <https://doi.org/10.1071/IS07024>
- Bovet, J. (2014): Notwendigkeit und Steuerungsmöglichkeiten einer unterirdischen Raumordnung. UPR Umwelt und Planungsrecht, Jg. 34(Nr. 11/12), 418–425. <https://orlis.difu.de/handle/difu/207462>
- Bracke, R.; Rocholl, W.; Schmidt, B.; Bussmann, G.; Eicker, T. & Kelz, B. (2015): Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW. Teil 4 – Geothermie (Nr. 40; LANUV-Fachbericht). https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/Fachbericht_40-Teil4-Geothermie_web.pdf
- Brielmann, H.; Griebler, C.; Schmidt, S. I.; Michel, R. & Lueders, T. (2009): Effects of thermal energy discharge on shallow groundwater ecosystems. *Federation of European Microbiological Societies Microbiology Ecology*, 68(3), 242–254. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2009.00674.x>
- Brielmann, H.; Lueders, T.; Schreglmann, K.; Ferraro, F.; Avramov, M.; Hammerl, V.; Blum, P.; Bayer, P. & Griebler, C. (2011): Oberflächennahe Geothermie und ihre potenziellen Auswirkungen auf Grundwasserökosysteme. *Grundwasser*, 16, 77–91. <https://doi.org/10.1007/s00767-011-0166-9>
- Brons, H. J.; Griffioen, J.; Appelo, C. A. J. & Zehnder, A. J. B. (1991): (Bio)geochemical reactions in aquifer material from a thermal energy storage site. *Water Research*, 25(6), 729–736. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(91\)90048-U](https://doi.org/10.1016/0043-1354(91)90048-U)
- Brown, T.; Schlachtberger, D.; Kies, A.; Schramm, S. & Greiner, M. (2018): Synergies of sector coupling and transmission reinforcement in a cost-optimised, highly renewable European energy system. *Energy*, 160, 720–739. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.222>
- Brunke, M. & Gonser, T. (1997): The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater. *Freshwater Biology*, 37(1), 1–33. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1997.00143.x>
- Bucher, A.; Görke, U.-J.; Vienken, T.; Kolditz, O. & Dietrich, P. (2018): Entwicklung von Methoden zur standort-optimierten geotechnischen Auslegung großflächiger Geothermiesysteme (1/2018; UFZ-Bericht). <https://hdl.handle.net/10419/174486>

BUE – Behörde für Umwelt und Energie (2016): Leitfaden zur Erdwärmenutzung in Hamburg. Wärmegewinnung aus Erdwärmesonden und -kollektoren mit einer Heizleistung von max. 30 kW. Ein Leitfaden für Planer, Ingenieure und Bauherren. <http://stuewa.cands.de/page/uploads/files/downloads/d-leitfaden-erdwaermenutzung.pdf>

BUKEA – Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft Hamburg (2016): Geodatensatz. Nutzungsbedingungen Geothermie. Erstellung: 14.04.2016. <https://metaver.de/trefferanzeige?cmd=doShow-Document&docuuiid=5F523113-5FD0-4273-842D-1559B66E7F4C>

Bundesberggesetz vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 4 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist. Abgerufen 2. März 2022, von <https://www.gesetze-im-internet.de/bbergg/BBergG.pdf>

Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG). Abgerufen 10. August 2021, von <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/>

Bundesregierung (2019): Klimaschutzprogramm 2030. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzprogramm-2030-1673578>

Bundesverband Boden e. V. (2023): Bodenwelten. Energie aus dem Boden. <https://www.bodenwelten.de/content/energie-aus-dem-boden>

Bundesverband Geothermie e. V. (2022): Bibliothek. Lexikon der Geothermie. Mitteltiefe Geothermie. <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/m/mitteltiefe-geothermie>

Bürger, B. & Matthey, A. (2018): Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten – Methodische Grundlagen (ISSN 2363-832X). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-11-12_methodenkonvention-3-0_methodische-grundlagen.pdf

Bürger, B. & Matthey, A. (2020): Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten – Kostensätze. Stand 12/2020 (ISSN 1862-4804). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-12-21_methodenkonvention_3_1_kostensaetze.pdf

Bürger, V.; Hesse, T.; Palzer, A.; Köhler, B.; Herkel, S.; Engelmann, P. & Quack, D. (2017): Klimaneutraler Gebäudebestand 2050. Energieeffizienzpotenziale und die Auswirkungen des Klimawandels auf den Gebäudebestand. Climate Change, 26/2017. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-11-06_climate-change_26-2017_klimaneutraler-gebaeudebestand-ii.pdf

Bürgerschaft der Freien und Hansestadt Hamburg (2016): Mitteilung des Senats an die Bürgerschaft. Statusbericht zur Trinkwasserversorgung in Hamburg (21/5404; Drucksache). https://buergerschaft-hh.de/parldok/dokument/53880/statusbericht_zur_trinkwasserversorgung_in_hamburg.pdf

BVerfG – Bundesverfassungsgericht (2021): Beschluss des Ersten Senats vom 24. März 2021 – 1 BvR 2656/18 –, Rn. 1-270. https://www.bundesverfassungsgericht.de/SharedDocs/Entscheidungen/DE/2021/03/rs20210324_1bvr265618.html

BWP – Bundesverband Wärmepumpe e. V. (2021): Positives Signal für den Klimaschutz: 40 Prozent Wachstum bei Wärmepumpe. Pressemitteilung [Webseite]. <https://www.waermepumpe.de/presse/pressemitteilungen/details/positives-signal-fuer-den-klimaschutz-40-prozent-wachstum-bei-waermepumpen/>

BWP – Bundesverband Wärmepumpe e. V.; StMUG – Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit; StMWIVT – Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie & LfU Bayern – Bayerisches Landesamt für Umwelt (2012): Leitfaden Erdwärmesonden in Bayern. https://www.stmwi.bayern.de/fileadmin/user_upload/stmwi/Energie/Rohstoffe/2021-10-20_Leitfaden_Erdwaermesonden.pdf

- Castaño-Sánchez, A.; Hose, G. C. & Reboleira, A. S. P. S. (2020): Salinity and temperature increase impact groundwater crustaceans. *Scientific reports*, 10(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69050-7>
- Čermák, V. & Rybach, L. (1979): Terrestrial Heat Flow in Europe. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-95357-6>
- Charissé, T. & Lohse, C. (2009): Geothermische Energieerzeugung und CO₂-Lagerung. Mögliche Nutzungskonkurrenz. Der Geothermiekongress 2009
- Cischinsky, H. & Diefenbach, N. (2018): Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016. Datenerhebung zu den energetischen Merkmalen und Modernisierungsraten im deutschen und hessischen Wohngebäudebestand. https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/2018_IWU_CischinskyEtDiefenbach_Datenerhebung-Wohngeb%C3%A4udebestand-2016.pdf
- Colman, D. R.; Poudel, S.; Stamps, B. W.; Boyd, E. S. & Spear, J. R. (2017): The deep, hot biosphere: Twenty-five years of retrospection. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017(114(27)), 6895–6903. <https://doi.org/10.1073/pnas.1701266114>
- Coudrain-Ribstein, A.; Gouze, P. & de Marsily, G. (1998): Temperature-carbon dioxide partial pressure trends in confined aquifers. *Chemical Geology*, 145(1–2), 73–89. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(97\)00161-7](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(97)00161-7)
- Counts, J. A.; Zeldes, B. M.; Lee, L. L.; Straub, C. T.; Adams, M. W. W. & Kelly, R. M. (2016): Physiological, metabolic and biotechnological features of extremely thermophilic microorganisms. *Wiley Interdisciplinary Reviews. Systems Biology and Medicine*, 9(3):10.1002/wsbm.1377. <https://doi.org/10.1002/wsbm.1377>
- Dambeck, H.; Ess, F.; Falkenberg, H.; Kemmler, A.; Kirchner, A.; Kreidelmeyer, S.; Koepp, M.; Lübbers, S.; Piésga, A.; Scheffer, S.; Spillmann, T.; Thamling, N.; Wünsch, A.; Wünsch, M.; Ziegenhagen, I.; Zimmer, W.; Blanck, R.; Böttcher, H.; Görz, W. K.; ... Lechtenböhmer, S. (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrales-deutschland-2045/>
- Dambeck, H.; Ess, F.; Falkenberg, H.; Kemmler, A.; Kirchner, A.; Kreidelmeyer, S.; Lübbers, S.; Piésga, A.; Scheffer, S.; Spillmann, T.; Thamling, N.; Wünsch, A.; Wünsch, M.; Ziegenhagen, I.; Zimmer, W.; Blanck, R.; Böttcher, H.; Görz, W. K.; Hennenberg, K.; ... Lechtenböhmer, S. (2020): Klimaneutrales Deutschland. In drei Schritten zu null Treibhausgasen bis 2050 über ein Zwischenziel von -65 % im Jahr 2030 als Teil des EU-Green Deals. https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2020/2020_10_KNDE/A-EW_195_KNDE_WEB.pdf
- Dědeček, P.; Šafanda, J. & Rajver, D. (2012): Detection and quantification of local anthropogenic and regional climatic transient signals in temperature logs from Czechia and Slovenia. *Climatic Change*, 113(3–4), 787–801. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0373-5>
- Degenhart, H.; Holstenkamp, L.; Kohrs, A. K.; Neidig, P.; Opel, O.; Schomerus, T.; Strodel, N.; Michalzik, D.; Weber, J.; Meisel, M.; Steffahn, J.; Porcello, K.; Schönebeck, J. & Kruck, O. (2019): Aquiferspeicher. Entwicklung der Einsatzfelder für mitteltiefe Aquiferwärmespeicher in Norddeutschland unter wirtschaftlich/finanziellen, geologisch/technischen, umweltchemischen und rechtlich/förderpolitischen Aspekten. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben. Laufzeit: 01.04.2016–30.06.2019 (Deutsch). <https://doi.org/10.2314/KXP:1698626150>
- Delmastro, C.; Lavagno, E. & Schranz, L. (2016): Underground urbanism: Master Plans and Sectorial Plans. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 55, 103–111. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.01.001>
- dena (2019): dena-Gebäudereport kompakt 2019. Statistiken und Analysen zur Effizienz im Gebäudebestand. https://www.geea.info/fileadmin/Downloads/Gebaeudereport/dena-GEBAEUDEREPORT_KOMPAKT_2019.pdf
- destatis – Statistisches Bundesamt (2019): Stadtflächen und Bevölkerung, Stand 31.12.2018. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Laender-Regionen/Regionales/Gemeindeverzeichnis/Administrativ/05-staedte.xlsx> (aufgerufen am 10.09.2020)

Dethlefsen, F.; Ebert, M. & Dahmke, A. (2014): A geological database for parameterization in numerical modeling of subsurface storage in northern Germany. *Environmental Earth Sciences*, 71 (5), 2227–2244

Deutscher Bundestag (1998): Konzept Nachhaltigkeit. Vom Leitbild zur Umsetzung. Abschlußbericht der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt. Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung“ (Bundestags-Drucksache 13/11200). <https://dserver.bundestag.de/btd/13/112/1311200.pdf>

Deutscher Bundestag (2020): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Stephan Protschka, Peter Felser, Franziska Gminder, Wilhelm von Gottberg und der Fraktion der AfD – Drucksache 19/18247 –. Landwirtschaftlicher Flächenverbrauch durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (19/18651; Drucksache). <https://dserver.bundestag.de/btd/19/186/1918651.pdf>

Deutscher Bundestag (2021): Gesetzentwurf der Bundesregierung. Entwurf eines Ersten Gesetzes zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes (19/30230; Drucksache). <https://dserver.bundestag.de/btd/19/302/1930230.pdf>

Diersch, H.-J. G. (2013): FEFLOW. Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-38739-5>

Dole-Olivier, M.-J.; Malard, F.; Martin, D.; Le Fébure, T. & Gibert, J. (2009): Relationships between environmental variables and groundwater biodiversity at the regional scale. *Freshwater Biology*, 54, 797–813. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02184.x>

Dromgoole, E. L. & Walter, L. M. (1990): Inhibition of calcite growth rates by Mn²⁺ in CaCl₂ solutions at 10, 25, and 50 °C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(11), 2991–3000. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90116-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90116-3)

DVGW – Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. (2013): DVGW-Information vom 23. Juli 2013 zu Erdwärmenutzung in Einzugsgebieten von Trinkwassergewinnungsanlagen. <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/wasser/ressourcen/dvgw-information-erdwaermenutzung2013.pdf>

Edelenbos, J.; Monnikhof, R.; Haasnoot, J.; van der Hoeven, F.; Horvat, E. & van der Krogt, R. (1998): Strategic study on the utilization of underground space in the Netherlands. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 13(2), 159–165. [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(98\)00043-1](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(98)00043-1)

Edwards, K. J.; Becker, K. & Colwell, F. (2012): The deep, dark energy biosphere: intraterrestrial life on Earth. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 40, 551–568. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-042711-105500>

Ehrlich, H. L. (1998): Geomicrobiology: its significance for geology. *Earth-Science Reviews*, 45(1–2), 45–60. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(98\)00034-8](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(98)00034-8)

Ehrlich, P. & Ehrlich, A. (1981): *Extinction: The causes and consequences of the disappearance of species*

EIA – Environmental Investigation Agency (2015): Handbuch zur EU-F-Gas-Verordnung: Seien Sie einen Schritt voraus, wenn Europa den Einsatz von HFKW stufenweise abbaut. <https://eia-international.org/wp-content/uploads/EIA-F-Gas-Regulation-Handbook-German.pdf>

EM MV – Ministerium für Energie, Infrastruktur und Landesentwicklung Mecklenburg-Vorpommern (2016): Landesraumentwicklungsprogramm Mecklenburg-Vorpommern. <https://www.regierung-mv.de/serviceassistenz/download?id=1576266>

- Engelmann, P.; Köhler, B.; Meyer, R.; Dengler, J.; Herkel, S.; Bürger, V.; Köhler, B.; Braungardt, S.; Hesse, T.; Sandrock, M.; Maaß, C. & Strodel, N. (2021): Systemische Herausforderung der Wärmewende. Abschlussbericht. Climate Change, 18/2021. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-04-26_cc_18-2021_waermewende.pdf
- Epting, J.; Händel, F. & Huggenberger, P. (2013): Thermal management of an unconsolidated shallow urban groundwater body. Hydrology and Earth System Sciences, 17(May 2013), 1851–1869. <https://doi.org/10.5194/hess-17-1851-2013>
- Erbguth, W. (2011): Unterirdische Raumordnung. Zur raumordnungsrechtlichen Steuerung untertägiger Vorhaben. Zeitschrift für Umweltrecht, 2011, Heft 3, 121 – 126
- Erbguth, W. (2014): Rechtliche Möglichkeiten einer unterirdischen Raumordnung. 30, 57–63. <https://doi.org/10.1127/agg/30/2014/57>
- Eskilson, P. & Claesson, J. (1988): Simulation model for thermally interacting heat extraction boreholes. Numerical Heat Transfer, 13:2, 149–165. <https://doi.org/10.1080/10407788808913609>
- EU – Europa-Universität Flensburg; HH – Halmstad University & AAU – Aalborg University (2018): Heat Roadmap Europe Pan-European Thermal Atlas, Peta version 4.3. <https://heatroadmap.eu/peta4/> (aufgerufen am 24.01.2020)
- EU – Europa-Universität Flensburg; HH – Halmstad University & AAU – Aalborg University (2021): Wärmeatlas Schleswig-Holstein 1.0. <https://www.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=f9d3e313d0e246dfba8f56516db9ae2b>
- EuGH – Gerichtshof der Europäischen Union (2018): Urteil des Gerichtshofs (Neunte Kammer). 21. Juni 2028. „Vertragsverletzung eines Mitgliedstaats – Richtlinie 91/676/EWG – Art. 5 Abs. 5 und 7 – Anhang II Teil A Nr. 1 bis 3 und 5 – Anhang III Nr. 1 Ziff. 1 bis 3 und Nr. 2 – Schutz der Gewässer vor Verunreinigung durch Nitrat aus landwirtschaftlichen Quellen – Unzulänglichkeit der geltenden Maßnahmen – Zusätzliche Maßnahmen oder verstärkte Aktionen – Fortschreibung des Aktionsprogramms – Begrenzung des Ausbringens – Ausgewogene Düngung – Zeiträume des Ausbringens – Fassungsvermögen von Behältern zur Lagerung von Dung – Ausbringen auf stark geneigten landwirtschaftlichen Flächen und auf gefrorenen oder schneebedeckten Böden“ (E-CLI:EU:C:2018:481, Rechtssache Rechtssache C-543/16). <https://curia.europa.eu/juris/document/document.jsf?text=&docid=203231&pageIndex=0&doclang=DE&mode=req&dir=&occ=first&part=1>
- Ewer, W. (2011): Zur Notwendigkeit der Schaffung eines Raumordnungsrechts für den Untergrund. Rechtsgutachten im Auftrag der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
- Ewer, W.; Behnsen, A. & Dahmke, A. (2013): Raumordnungsrecht für den geologischen Untergrund. Schleswig-Holsteinische Anzeigen (SchlHA) (Justizministerialblatt für Schleswig-Holstein), 2013(260), 89–94
- Fenwick, G. D.; Thorpe, H. R. & White, P. A. (2004): Groundwater systems. In Freshwaters of New Zealand (S. 29.1-29.18)
- Ferguson, G. & Woodbury, A. D. (2004): Subsurface heat flow in an urban environment. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 109(B2). <https://doi.org/10.1029/2003JB002715>
- Fetter, C. W. (2001): Applied hydrogeology (4. Aufl.)
- Figuerola, I. C.; Picard, D. & Helsen, L. (2020): Short-term modeling of hybrid geothermal systems for Model Predictive Control. Energy & Building, Volume 215. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109884>
- Figura, S.; Livingstone, D. M.; Hoehn, E. & Kipfer, R. (2011): Regime shift in groundwater temperature triggered by the Arctic Oscillation. Geophysical Research Letters, 38(23), 23401-. <https://doi.org/10.1029/2011GL049749>

- Figura, S.; Livingstone, D. M. & Kipfer, R. (2015): Forecasting Groundwater Temperature with Linear Regression Models Using Historical Data. *Ground Water*, 53(6), 943–954. <https://doi.org/10.1111/gwat.12289>
- Fišer, C.; Pipan, T. & Culver, D. C. (2014): The vertical extent of groundwater Metazoans: An ecological and evolutionary perspective. *BioScience*, 64(11), 971–979. <https://doi.org/10.1093/biosci/biu148>
- Fleming, B. A. & Crerar, D. A. (1982): Silicic acid ionization and calculation of silica solubility at elevated temperature and pH application to geothermal fluid processing and reinjection. *Geothermics*, 11(1), 15–29. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(82\)90004-9](https://doi.org/10.1016/0375-6505(82)90004-9)
- Fleuchaus, P. & Blum, P. (2017): Damage event analysis of vertical ground source heat pump systems in Germany. *Geothermal Energy*, 5(1), 10. <https://doi.org/10.1186/s40517-017-0067-y>
- Fleuchaus, P.; Godschalk, B.; Stober, I. & Blum, P. (2018): Worldwide application of aquifer thermal energy storage. A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 861–876. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.057>
- Fleuchaus, P.; Schüppler, S.; Stemmler, R.; Menberg, K. & Blum, P. (2021): Aquiferspeicher in Deutschland. *Grundwasser*, 26(2), 123–134. <https://doi.org/10.1007/s00767-021-00478-y>
- Ford, R. G.; Bertsch, P. M. & Farley, K. J. (1997): Changes in transition and heavy metal partitioning during hydrous iron oxide aging. *Environmental Science and Technology*, 31(7), 2028–2033. <https://doi.org/10.1021/es960824+>
- Fuchs, A. (2007): Erhebung und Beschreibung der Grundwasserfauna in Baden-Württemberg. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Naturwissenschaft. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Naturwissenschaften. https://kola.opus.hbz-nrw.de/frontdoor/deliver/index/docId/175/file/Dissertation_Fuchs_2007.pdf
- Fuchs, A.; Hahn, H. J. & Barufke, K. P. (2006): Grundwasser-Überwachungsprogramm. Erhebung und Beschreibung der Grundwasserfauna in Baden-Württemberg. https://pudi.lubw.de/detailswite/-/publications/77258-Erhebung_und_Beschreibung_der_Grundwasserfauna_in_Baden-Wuerttemberg.pdf
- García-Gil, A.; Gasco-Cavero, S. & Garrido, E. (2018): Decreased waterborne pathogenic bacteria in an urban aquifer related to intense shallow geothermal exploitation. *Science of the Total Environment*, 2018(633:765-671). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.245>
- García-Gil, Alejandro; Epting, J.; Garrido, E.; Vázquez-Suñé, E.; Lázaro, J. M.; Navarro, J. Á. S.; Huggenberger, P. & Calvo, M. Á. M. (2016): A city scale study on the effects of intensive groundwater heat pump systems on heavy metal contents in groundwater. *Science of the Total Environment*, 572, 1047–1058. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.010>
- Gasanzade, F.; Pfeiffer, W. T.; Witte, F.; Tuschy, I. & Bauer, S. (2021): Subsurface renewable energy storage capacity for hydrogen, methane and compressed air. A performance assessment study from the North German Basin. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149(111422). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111422>
- GD NRW – Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen (2022): Karten & Daten. https://www.gd.nrw.de/pr_kd.htm (aufgerufen am 01.07.2022)
- GDfB – Geologischer Dienst für Bremen (2022): Geodaten. <https://www.gdfb.de/geodaten/> (aufgerufen am 01.07.2022)
- Gerbert, P.; Herhold, P.; Burchardt, J.; Schönberger, S.; Rechenmacher, F.; Kirchner, A.; Kemmler, A. & Wunsch, M. (2018): Klimapfade für Deutschland. https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2018/Januar/Klimapfade_fuer_Deutschland_BDI-Studie_Klimapfade-fuer-Deutschland-BDI-Studie-12-01-2018.pdf

Gerhardt, N.; Bard, J.; Schmitz, R.; Beil, M.; Pfennig, M. & Kneiske, T. (2020): Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem: Fokus Gebäudewärme. Studie zum Einsatz von H₂ im zukünftigen Energiesystem mit dem besonderen Fokus auf die Gebäudeversorgung. https://www.iee.fraunhofer.de/content/dam/iee/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Studien-Reports/FraunhoferIEE_Kurzstudie_H2_Gebaeudewaerme_Final_20200529.pdf

Gerhardt, N. & Sandau, F. (2015): Wie hoch ist der Stromverbrauch in der Energiewende? Energiepolitische Zielszenarien 2050 – Rückwirkungen auf den Ausbaubedarf von Windenergie und Photovoltaik. Studie im Auftrag von Agora Energiewende. https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2015/Stromverbrauch_in_der_Energiewende/Agora_IWES_Szenarienvergleich_WEB.pdf

Gerhardt, N.; Sandau, F.; Becker, S.; Scholz, A.; Schumacher, P. & Schmidt, D. (2017): Wärmewende 2030. Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudesektor. https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2016/Sektoruebergreifende_EW/Waermewende-2030_WEB.pdf

Gerhardt, N.; Sandau, F.; Scholz, A.; Hahn, D. H.; Schumacher, P.; Sager, C.; Bergk, F.; Kämper, C.; Knörr, W.; Kräck, J.; Lambrecht, U.; Antoni, O.; Hilpert, J.; Merkel, K. & Müller, T. (2015): Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr. Analyse der Interaktion zwischen den Sektoren Strom, Wärme/Kälte und Verkehr in Deutschland in Hinblick auf steigende Anteile fluktuierender Erneuerbarer Energien im Strombereich unter Berücksichtigung der europäischen Entwicklung. Ableitung von optimalen strukturellen Entwicklungspfaden für den Verkehrs- und Wärmesektor. https://www.iee.fraunhofer.de/content/dam/iee/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Veroeffentlichungen/2015/Interaktion_EEStrom_Waerme_Verkehr_Endbericht.pdf

Gerhardt, N.; Zimmermann, B.; Ganai, I.; Pape, A.; Gíron, P.; Ghosh, D.; Dörre, E.; Kallert, A. & Yu, Y.-J. (2021): Transformationspfade der Fernwärme in Rückkopplung mit dem Energiesystem und notwendige Rahmenbedingungen. Teilbericht im Rahmen des Projektes Transformationspfade im Wärmesektor - Betriebs- und volkswirtschaftliche Betrachtung der Sektorkopplung mit dem Fokus Fernwärme mit hohen Anteilen konventioneller KWK-Erzeugung und Rückkopplung zum Gesamtenergieversorgungssystem. https://www.iee.fraunhofer.de/content/dam/iee/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Veroeffentlichungen/2019/2021_Jun_Bericht_Fraunhofer_IEE_Transformation_Waerme_2030_2050.pdf

Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz – BBodSchG). <https://www.gesetze-im-internet.de/bbodschg/> (aufgerufen am 17.03.2022)

Gibert, J.; Culver, D. C.; Dole-Olivier, M.-J.; Malard, F.; Christman, M. C. & Deharveng, L. (2009): Assessing and conserving groundwater biodiversity: synthesis and perspectives. *Freshwater Biology*, 54(4), 930–941. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02201.x>

Gibert, J. & Deharveng, L. (2002): Subterranean ecosystems: a truncated functional biodiversity. *BioScience*, 52(6), 473–481. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0473:SEATFB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0473:SEATFB]2.0.CO;2)

Gils, H.-C.; Sterchele, P.; Kost, C.; Brucker, L.; Janßen, T.; Krüger, C.; Schüwer, D.; Luhmann, H.-J.; Buddeke, M.; Klann, U.; Horst, J.; Flachsbarth, F.; Koch, M.; Jentsch, M.; Böttger, D.; Ganai, I.; Dierstein, C.; Hobbie, H. & Welsch, J. (2018): RegMex - Modellexperimente und -vergleiche zur Simulation von Wegen zu einer vollständig regenerativen Energieversorgung. Schlussbericht. https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7096/file/7096_RegMex.pdf

GLA – Geologisches Landesamt Hamburg (2022): Bohrdaten aus dem Hamburger Raum. Bohrdatenportal. <https://www.hamburg.de/bohrdaten/2725788/bohrdaten/> (aufgerufen 04.04.2024)

Gold, T. (1992): The deep, hot biosphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1992:89(13), 6045–6049

Goldschneider, N.; Hunkeler, D. & Rossi, P. (2006): Review: Microbial biocenoses in pristine aquifers and an assessment of investigative methods. *Hydrogeology Journal*, 2006(14(6)), 926–941.

<https://doi.org/10.1007/s10040-005-0009-9>

Görke, U.-J., Vienken, T., Kolditz, O., Dietrich, P., & Bauer, S. (Hrsg.) (2017): ANGUS+: Auswirkungen der Nutzung des geologischen Untergrundes als thermischer, elektrischer und stofflicher Speicher im Kontext der Energiewende – Dimensionierung, Risikoanalysen und Auswirkungsprognosen als Grundlagen einer zukünftigen Raumplanung des Untergrundes. <https://doi.org/10.2314/GBV:1000642933%0A>

Gottschick, M.; Klindworth, K.; Knoop, L.; Dietz, C.; Jahreis, L.; Hamadouche, K.-M.; Westphal, T.; Adwiraah, H.; Frerichs, F.; Claussen, J. & Broda, T. (2017): Klimaschutzteilkonzept integrierte Wärmenutzung in Kommunen im Kreis Dithmarschen. Dokumentation für den Kreis Dithmarschen. https://www.dithmarschen.de/fileadmin/bilder/kachelbilder/themen/umwelt/klimaschutz/bericht_ktk_dith_kreis_print_final.pdf

Griebler, C. & Avramov, M. (2015): Groundwater ecosystem services: a review. *Freshwater Science*, 34(1), 355–367. <https://doi.org/10.1086/679903>

Griebler, C. & Lüders, K. (2009): Microbial biodiversity in groundwater ecosystems. *Freshwater Biology*, 2009(54(4)), 649–677. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2008.02013.x>

Griebler, Christian; Briellmann, H.; Haberer, C. M.; Kaschuba, S.; Kellermann, C.; Stumpp, C.; Hegler, F.; Kuntz, D.; Walker-Hertkorn, S. & Lueders, T. (2016): Potential impacts of geothermal energy use and storage of heat on groundwater quality, biodiversity, and ecosystem processes. *Environmental Earth Sciences*, 75(20), 1391. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6207-z>

Griebler, Christian; Kellermann, C.; Kuntz, D.; Walker-Hertkorn, S.; Stumpp, C. & Hegler, F. (2015): Auswirkungen thermischer Veränderungen infolge der Nutzung oberflächennaher Geothermie auf die Beschaffenheit des Grundwassers und seiner Lebensgemeinschaften. Empfehlungen für eine umweltverträgliche Nutzung. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_54_2015_auswirkungen_thermischer_veraenderungen_infolge_der_nutzung_obenflaechennaher_geothermie_0.pdf

Griebler, Christian; Kellermann, C.; Steube, C.; Briellmann, H.; Stein, H.; Berkhoff, S.; Fuchs, A. & Hahn, H. J. (2014): Entwicklung biologischer Bewertungsmethoden und -kriterien für Grundwasserökosysteme (Abschlussbericht FKZ 3708 23 200). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/uba_bericht_grundwasser_web.pdf

Griffioen, J. & Appelo, C. A. J. (1993): Nature and extent of carbonate precipitation during aquifer thermal energy storage. *Applied Geochemistry*, 8(2), 161–176. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(93\)90032-C](https://doi.org/10.1016/0883-2927(93)90032-C)

Großmann, J.; Schilling, F. & Dahmke, A. (2011): Zusammenfassende Darstellung zur Sicherheit und Umweltverträglichkeit der CO₂-Speicherung. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes. FKZ 3708 49 112 2

Grünert, J.; Kenkmann, T.; Scheps, V.; Pawlitzky, M.; Scherf, B. & Ostin, A. (2009): Nutzung von Erdwärme in Brandenburg. Heizen und Kühlen mit oberflächennaher Geothermie: Ein Leitfaden für Bauherren, Planer und Fachhandwerker. 1. Auflage 2009. https://www.oberhavel.de/media/custom/2244_5967_1.PDF?1368510617

Guimerà, J.; Ortuño, F.; Ruiz, E.; Delos, A. & Pérez-Paricio, A. (2007, 05. – 01.06): Influence of ground-source heat pumps on groundwater. *Proceedings European Geothermal Congress 2007*. European Geothermal Congress, Unterhaching. <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/EGC/2007/250.pdf>

Gunnarsson, I. & Arnórsson, S. (2005): Impact of silica scaling on the efficiency of heat extraction from high-temperature geothermal fluids. *Geothermics*, 34(3), 320–329. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2005.02.002>

Günther, D.; Miara, M.; Langner, R.; Helmling, S. & Walper, J. (2014): „WP Monitor“. Feldmessung von Wärmepumpenanlagen. https://wp-monitoring.ise.fraunhofer.de/wp-monitor-plus/download/endbericht_wp_monitor.pdf

Günther, D.; Wapler, J.; Langner, R.; Helmling, S.; Miara, M.; Fischer, D.; Zimmermann, D.; Wolf, T. & Wille-Hausmann, B. (2020): Wärmepumpen in Bestandsgebäuden. Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt „WPsmart im Bestand“. Abschlussbericht. Felduntersuchung optimal abgestimmter Wärmepumpenheizungssysteme in Bestandsgebäuden beim Betrieb im konventionellen sowie im intelligenten Stromnetz (Smart Grid). Version 2.1 (Stand: 23.07.2020). https://wp-monitoring.ise.fraunhofer.de/wp-smart-im-bestand/download/Berichte/BMWi-03ET1272A-WPsmart_im_Bestand-Schlussbericht.pdf

Gutjahr, A.; Dabringhaus, H. & Lacmann, R. (1996): Studies of the growth and dissolution kinetics of the CaCO₃ polymorphs calcite and aragonite I. Growth and dissolution rates in water. *Journal of Crystal Growth*, 158(3), 296–309. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(95\)00446-7](https://doi.org/10.1016/0022-0248(95)00446-7)

Gutjahr, S.; Bork, J. & Hahn, H. J. (2013): Grundwasserfauna als Indikator für komplexe hydrogeologische Verhältnisse am westlichen Kaiserstuhl. *Grundwasser*, 18, 173–184. <https://doi.org/10.1007/s00767-013-0227-3>

Hahn, H. J. (2006): The GW-Fauna-Index: A first approach to a quantitative ecological assessment of groundwater habitats. *Limnologica*, 36(2), 119–137. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2006.02.001>

Hahn, H. J. & Fuchs, A. (2009): Distribution patterns of groundwater communities across aquifer types in southwestern Germany. *Freshwater Biology*, 54(4), 848–860. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2008.02132.x>

Hahn, H. J. & Gutjahr, S. (2014): Bioindikation im Grundwasser funktioniert. Erwiderung zum Kommentar von T. Scheytt zum Beitrag „Grundwasserfauna als Indikator für komplexe hydrogeologische Verhältnisse am westlichen Kaiserstuhl“ von Gutjahr, S., Bork, J. & Hahn, H. J. in *Grundwasser* 18(3), 173–184 (2013). *Grundwasser*, 19, 215–218. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00767-014-0266-4>

Hahn, H. J. & Matzke, D. (2005): A comparison of stygofauna communities inside and outside groundwater bores. *Limnologica*, 35(1–2), 31–44. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2004.09.002>

Hahn, H. J.; Matzke, D.; Kolberg, A. & Limberg, A. (2013): Untersuchungen zur Fauna des Berliner Grundwassers – erste Ergebnisse. *Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge*, 20 (2013), 1/2, 85–92. https://lbgr.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/BGB-1-2_13_Hahn_85-92.pdf

Hähnlein, S.; Blum, P. & Bayer, P. (2011): Oberflächennahe Geothermie – aktuelle rechtliche Situation in Deutschland. *Grundwasser*, 16(2), 69–75. <https://doi.org/10.1007/s00767-011-0162-0>

Hausladen, G. & Hamacher, T. (2012): Leitfaden Energienutzungsplan. https://web.archive.org/web/20130513060219/http://www.stmi.bayern.de/imperia/md/content/stmi/bauen/rechtundtechnikundbauplanung/staedtebau/veroeffentlichungen/oeko/leitfaden_enp.pdf

Headon, J.; Banks, D.; Waters, A. & Robinson, V. K. (2009): Regional distribution of ground temperature in the Chalk aquifer of London, UK. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 42(3), 313–323. <https://doi.org/10.1144/1470-9236/08-073>

Hecking, H.; Hennes, O.; Elberg, C.; Frings, C.; Hintermayer, M.; Lencz, D.; Wildgrube, T.; Oschatz, B.; Winiewska, B.; Mailach, B.; Holm, A. & Kagerer, F. (2017): Gebäudestudie. Szenarien für eine marktwirtschaftliche Klima- und Ressourcenschutzpolitik 2050 im Gebäudesektor. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Meldungen/dena_Gebaeudestudie.pdf

Hegger, M.; Dettmar, J.; Drebes, C.; Greiner, M.; Kern, T.; Meinberg, T.; Schulze, J.; Sieber, S.; Sylla, O. & Wagner, C. (2014): Energetische Stadtraumtypen. Strukturelle und energetische Kennwerte von Stadträumen

- Hegger, M.; Dettmar, J.; Martin, A.; Meinberg, T.; Boczek, B.; Drebes, C.; Greiner, M.; Hesse, U.; Kern, T.; Mahlke, D.; Najjar, A. A.; Schoch, C.; Schulze, J.; Sieber, S.; Stute, V.; Sylla, O.; Wurzbacher, S. & Zelmer, A. (2012): UrbanReNet. EnEff:Stadt – Verbundprojekt Netzoptimierung. Teilprojekt: Vernetzte regenerative Energiekonzepte im Siedlungs- und Landschaftsraum. Schlussbericht. https://www.researchgate.net/publication/311100248_UrbanReNet_I_-_Vernetzte_regenerative_Energiekonzepte_im_Siedlungs-_und_Landschaftsraum
- Hein, P.; Zhu, K.; Bucher, A.; Kolditz, O.; Pang, Z. & Shao, H. (2016): Quantification of exploitable shallow geothermal energy by using Borehole Heat Exchanger coupled Ground Source Heat Pump systems. *Energy Conversion and Management*, 127, 80–89. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.097>
- Heldt, S.; Wang, B. & Bauer, S. (2023): Parameter identification and range restriction through sensitivity analysis for a high-temperature heat injection test. *Geothermal Energy*, 11(1). <https://doi.org/10.1186/s40517-023-00255-5>
- Helgeson, H. C. (1969): Thermodynamics of hydrothermal systems at elevated temperatures and pressures. *American Journal of Science*, 267(7), 729–804. <https://doi.org/10.2475/ajs.267.7.729>
- Helgeson, Harold C. (1967): Thermodynamics of complex dissociation in aqueous solution at elevated temperatures. *The Journal of Physical Chemistry*, 71(10), 3121–3136. <https://doi.org/10.1021/j100869a002>
- Helgeson, Harold C.; Delany, J. M.; Nesbitt, H. W. & Bird, D. K. (1978): Summary and critique of the thermodynamic properties of rock-forming minerals. *American Journal of Science*, Vol. 278-A. http://dewcommunity.org/uploads/4/1/7/6/41765907/helgeson_et_al_1978.pdf
- Hemmerle, H.; Hale, S.; Dressel, I.; Benz, S. A.; Attard, G.; Blum, P. & Bayer, P. (2019): Estimation of Groundwater Temperatures in Paris, France. *Geofluids*, 2019(06/2019), 1–11. <https://doi.org/10.1155/2019/5246307>
- Henning, A. & Limberg, A. (2012): Veränderung des oberflächennahen Temperaturfeldes von Berlin durch Klimawandel und Urbanisierung. Variation of the subsoil temperature field in Berlin as a result of climate change and urbanization (19 (2012), 1; Brandenburg. geowiss. Beitr., S. 81–92). https://lbgr.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/BGB-1_12_Henning_81-92.pdf
- Henning, H.-M. & Palzer, A. (2015): Was kostet die Energiewende? Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050. [https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/Forschungsfelder/Energie-Rohstoffe/Fraunhofer-ISE_Transformation-Energiesystem-Deutschland_final_19_11%20\(1\).pdf](https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/Forschungsfelder/Energie-Rohstoffe/Fraunhofer-ISE_Transformation-Energiesystem-Deutschland_final_19_11%20(1).pdf)
- Hertle, V. H.; Pehnt, M.; Gugel, B.; Dingeldey, M. & Müller, K. (2015): Wärmewende in Kommunen. Leitfaden für den klimafreundlichen Umbau der Wärmeversorgung (Nr. 41; Heinrich-Böll-Stiftung Schriften zur Ökologie, S. 124). https://www.boell.de/sites/default/files/waermewende-in-kommunen_leitfaden.pdf?dimension1=division_oen
- Hiester, U.; Jungk, V.; Canzler, W.; Poetke, D. & Ulrich, K.-U. (2022): Umweltverträgliche Nutzung geothermischer Wärmespeicher. Ermittlung und Bewertung thermischer Veränderungen im Grundwasser, thermische Bewirtschaftung des Grundwassers, Handlungsempfehlungen. Texte, 113/2022. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_113-2022_umweltvertraegliche_nutzung_geothermischer_waermespeicher.pdf
- Hirschhäuser, T.; Altenhofen, D.; Bergemann, M.; Frost, D.; Gade, R.; Gaumert, T.; Rahlf, H.; Rebehn, V. & Schwartz, R. (2008): Sonderaufgabenbereich Tideelbe der Länder Hamburg, Niedersachsen, Schleswig-Holstein. Wärmelastplan für die Tideelbe. <https://www.kuestendaten.de/media/zdm/kuestendaten/publikationen/Datencontainer/P/08WaermelastplanTideelbe.pdf>

- HLNUG – Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (2022): GIS-Auskunftssysteme. <https://www.hlnug.de/themen/geografische-informationssysteme/gis-anwendungen/gis-auskunftssysteme>
- Holm, T. R.; Eisenreich, S. J.; Rosenberg, H. L. & Holm, N. P. (1987): Groundwater geochemistry of short-term aquifer thermal energy storage test cycles. *Water Resources Research*, 23(6), 1005–1019. <https://doi.org/10.1029/WR023i006p01005>
- Hooghart, J. C., & Posthumus, C. W. S. (Hrsg.) (1990): Hydrochemistry and energy storage in aquifers (No. 43; Proceedings and information). <https://publications.tno.nl/publication/34607537/uKxPB5/hydrochemistry-1990-no43.pdf>
- Hou, W.; Yang, L.; Deng, D.; Ye, J.; Clarke, K.; Yang, Z.; Zhuang, W.; Liu, J. & Huang, J. (2016): Assessing quality of urban underground spaces by coupling 3D geological models: The case study of Foshan city, South China. *Computers & Geosciences*, 89, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.07.016>
- Humphreys, W. F. (2009): Hydrogeology and groundwater ecology: Does each inform the other? *Hydrogeology Journal*, 17(1), 5–21. <https://doi.org/10.1007/s10040-008-0349-3>
- Humphreys, William F. (2006): Aquifers: the ultimate groundwater-dependent ecosystems. *Australian Journal of Botany*, 54(2), 115–132. <https://doi.org/10.1071/BT04151>
- Humphreys, William F. (2008): Rising from Down Under: developments in subterranean biodiversity in Australia from a groundwater fauna perspective. *Invertebrate Systematics*, 22(2), 85–101. <https://doi.org/10.1071/IS07016>
- Hunkeler, D.; Goldscheider, N.; Rossi, P. & Burn, C. (2006): Biozönosen im Grundwasser: Grundlagen und Methoden der Charakterisierung von mikrobiellen Gemeinschaften. Umwelt-Wissen, UW-0603-D. https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/wasser/uw-umwelt-wissen/biozoenosen_im_grundwasser.pdf.download.pdf/biozoenosen_im_grundwasser.pdf
- Icha, P. & Kuhs, G. (2020): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990–2019. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-04-01_climate-change_13-2020_strommix_2020_fin.pdf
- ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung gGmbH Heidelberg; Geomer GmbH & GEF Ingenieur AG (2019): Wärmeetlas. <https://www.ifeu.de/methoden-tools/modelle/waermeetlas/> (aufgerufen am 24.01.2020)
- Inskeep, W. P. & Bloom, P. R. (1986): Kinetics of calcite precipitation in the presence of water-soluble organic ligands. *Soil Science Society of America Journal*, 50(5), 1167–1172. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000050015x>
- Issartel, J.; Hervant, F.; Voituron, Y.; Renault, D. & Vernon, P. (2005): Behavioural, ventilatory and respiratory responses of epigean and hypogean crustaceans to different temperatures. *mistry and Physiology, Part A*(141), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2005.02.013>
- Jank, R. (2013): Integrales Quartiers-Energiekonzept Karlsruhe-Rintheim: Optimierungsmethoden, Praxiserfahrungen mit technischen Innovationen, Umsetzungsergebnisse. EnEff:Stadt. Schlussbericht. <https://doi.org/10.2314/GBV:790783096>
- Jenne, E. A.; Andersson, O. & Willemsen, A. (1992): Well, hydrology, and geochemistry problems encountered in ATEs systems and their solutions. In E. A. Jenne (Hrsg.), *Aquifer Thermal Energy (Heat and Chill) Storage: Proceedings of the 27th intersociety energy conversion engineering conference*. <https://doi.org/10.4271/929153>
- Jering, A.; Klatt, A.; Seven, J.; Ehlers, K.; Ostermeier, A.; Mönch, L.; Kristof, K.; Vollmer, C.; Purr, K.; Penn-Bressel, G.; Schulz, D.; Richter, S.; Schütze, G.; Wolf, M.; Burger, A.; Golde, M.; Pabst, J.; Herbener, R.; Wetzels, F.; ...

Volkgenannt, U. (2013): Globale Landflächen und Biomasse nachhaltig und ressourcenschonend nutzen. Langfassung (Positionen). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/globale_landflaechen_biomasse_bf_klein.pdf

Jesußek, A. (2012): Temperaturbedingte Auswirkungen unterirdischer Wärmespeicherung auf hydrogeochemische Sediment-Wasser-Wechselwirkungen in einem oberflächennahen Grundwasserleiter. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. <https://d-nb.info/1062975669/04>

Jesußek, A.; Grandel, S. & Dahmke, A. (2013a): Impacts of subsurface heat storage on aquifer hydrogeochemistry. *Environmental Earth Sciences*, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-2037-9>

Jesußek, A.; Köber, R.; Grandel, S. & Dahmke, A. (2013b): Aquifer heat storage: Sulphate reduction with acetate at increased temperatures. *Environmental Earth Sciences*, 69(5), 1763–1771. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-2009-0>

Jochum, P.; Lempik, J.; Böttcher, S.; Stelter, D.; Krenz, T.; Mellwig, P.; Pehnt, M.; von Oehsen, A.; Blömer, S. & Hertle, H. (2017): Ableitung eines Korridors für den Ausbau der erneuerbaren Wärme im Gebäudebereich. Endbericht. https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/BeuthHS_ifeu_Anlagenpotenzial_Endbericht_2017.pdf

Jolie, E.; Scott, S.; Faulds, J.; Chambefort, I.; Axelsson, G.; Gutiérrez-Negrín, L. C.; Regenspurg, S.; Ziegler, M.; Ayling, B.; Richter, A. & Zemedkun, M. T. (2021): Geological controls on geothermal resources for power generation. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(5), 324–339. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00154-y>

Juhrich, K. (2016): CO₂-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe. *Climate Change*, 27/2016. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/co2-emissionsfaktoren_fur_fossile_brennstoffe_korrektur.pdf

Jung, S. (2013): Wärmefluss in der urbanen Wärmeinsel Köln: M.Sc.-Arbeit

Kabuth, A.; Dahmke, A.; Beyer, C.; Bilke, L.; Dethlefsen, F.; Dietrich, P.; Duttmann, R.; Ebert, M.; Feeser, V.; Gorke, U. J.; Kober, R.; Rabbel, W.; Schanz, T.; Schäfer, D.; Würdemann, H. & Bauer, S. (2017): Energy storage in the geological subsurface: dimensioning, risk analysis and spatial planning: the ANGUS plus project. *Environmental Earth Sciences*, 76:23. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6319-5>

Kahnt, R.; Gabriel, A.; Seelig, C.; Freund, A. & Homilius, A. (2015): Unterirdische Raumplanung. Vorschläge des Umweltschutzes zur Verbesserung der über- und untertägigen Informationsgrundlagen, zur Ausgestaltung des Planungsinstrumentariums und zur nachhaltigen Lösung von Nutzungskonflikten. Teilvorhaben 1: Geologische Daten. Texte, 11/2015. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_11_2015_unterirdische_raumplanung_teil_1_geologische_daten.pdf

Kallesøe, A. J.; Vangkilde-Pedersen, T.; Nielsen, J. E.; Sørensen, P. A.; Bakema, G.; Drijver, B.; Pittens, bas; Buik, N.; Egermann, P.; Rey, C.; Maragna, C.; Hamm, V.; Guglielmetti, L.; Hahn, F.; Nardini, I.; Koornneef, J. & Dideriksen, K. (2019): Underground Thermal Energy Storage (UTES) – state-of-the-art, example cases and lessons learned. HEATSTORE project report, GEOTHERMICA - ERA NET Cofund Geothermal (D1.1; S. 130). https://www.heatstore.eu/documents/HEATSTORE_UTES%20State%20of%20the%20Art_WP1_D1.1_Final_2019.04.26.pdf

Kaltschmitt, M.; Streicher, W. & Wiese, A. (2013): Erneuerbare Energien. Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte (5. Auflage)

Karaman, G. S. (1976): Contribution to the knowledge of Amphipoda. 72: Four new Niphargus species from Italy, *N. duplus*, *N. stygocharis italicus*, *N. ruffoi* and *N. canui* (Gammaridae). *Vie et Milieu*, 26(1), 21–50

- Keimeyer, F.; Schulze, F.; Runge, K.; Kahnt, R.; Gabriel, A.; Janssen, G.; Bartel, S. & Schmitt, B. (2018): Unterirdische Raumplanung und nachhaltige Ressourcenbewirtschaftung am Beispiel von ausgewählten Regionen. Abschlussbericht. Texte, 27/2018. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-03-27_texte_27-2018_unterirdische-raumplanung.pdf
- Keller, N.-S.; Hornbruch, G.; Lüders, K.; Werban, U.; Vogt, C.; Kallies, R.; Dahmke, A. & Richnow, H.-H. (2021): Monitoring of the effects of a temporally limited heat stress on microbial communities in a shallow aquifer. *Science of the Total Environment*, 2021(781:146377). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146377>
- Keller, N.-S.; Lüders, K.; Hornbruch, G.; Nordbeck, J.; Bauer, S.; Dahmke, A.; Vogt, C. & Richnow, H.-H. (o. J.): Rapid growth of thermophilic bacteria during a high-temperature aquifer thermal energy storage (HT-ATES) field experiment. Manuskript eingereicht.
- Kempermann, A. (2015): Weiterentwicklung von Kreislaufversuchen zur Untersuchung des Temperatureinflusses auf die Geochemie unter anaeroben Bedingungen
- Kenkmann, T.; Hesse, T.; Hülsmann, F.; Timpe, C.; Hoppe, K.; Blanck, R.; Bürger, V.; Friedrich, A.; Sachs, A. & Winger, C. (2017): Klimaschutzziel und -strategie München 2050. Endbericht. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Klimaschutzziel-und-strategie-Muenchen-2050.pdf>
- Kersten, M. & Vlasova, N. (2009): Arsenite adsorption on goethite at elevated temperatures. *Applied Geochemistry*, 24, 32–43. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2008.10.004>
- Kinzelbach, W. (1987): Numerische Methoden zur Modellierung des Transports von Schadstoffen im Grundwasser
- Koch, F.; Menberg, K.; Schweikert, S.; Spengler, C.; Hahn, H. J. & Blum, P. (2020): Groundwater fauna in an urban area: natural or affected? *Hydrology and Earth System Sciences Discussion*, Preprint under review. <https://doi.org/10.5194/hess-2020-151>
- Koenigsdorff, R.; Bachseitz, M.; Ryba, M.; Reduth, Y.; Schmidt, T.; Riegger, M.; Janzen, F.; Moormann, C.; Buhmann, P.; Braun, J.; Giannelli, G.; Stober, I.; Grimmer, J. C.; Drüppel, K.; Blum, P.; Steger, H.; Fleuchhaus, P.; Tissen, C.; Schweizer, D.; ... Schallwig, C. (2020): GEO.Cool. Kühlung mit oberflächennaher Geothermie. Möglichkeiten, Grenzen, Innovation. Abschlussbericht (Schlussbericht Förderkennzeichen: L75 17003 bis 17009; Forschungsbericht BWPLUS). <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/10160-GEO.Cool.pdf>
- Kolditz, O. & Bauer, S. (2004): A process-oriented approach to computing multi-field problems in porous media. *Journal of Hydroinformatics*, 6, 225–244. <https://doi.org/10.2166/hydro.2004.0017>
- Kolditz, O.; Bauer, S.; Bilke, L.; Böttcher, N.; Delfs, J. O.; Fischer, T.; Görke, U. J.; Kalbacher, T.; Kosakowski, G.; McDermott, C. I.; Park, C. H.; Radu, F.; Rink, K.; Shao, H.; Shao, H. B.; Sun, F.; Sun, Y. Y.; Singh, A. K.; Taron, J.; ... Zehner, B. (2012): OpenGeoSys: an open-source initiative for numerical simulation of thermo-hydro-mechanical/chemical (THM/C) processes in porous media. *Environmental Earth Sciences*, 67(2), 589–599. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1546-x>
- Kolditz, O.; Görke, U.-J.; Shao, H.; Wang, W. & Bauer, S. (2016): Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical processes in fractured porous media: modelling and benchmarking. *Benchmarking initiatives*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-29224-3>
- Kolditz, O.; Nagel, T.; Shao, H.; Wang, W. & Bauer, S. (2018): Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical processes in fractured porous media: Modelling and Benchmarking. *From Benchmarking to Tutoring*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-68225-9>
- Korbel, K. L. & Hose, G. C. (2010): A tiered framework for assessing groundwater ecosystem health. *Hydrobiologia*, 661, 329–349 (2011). <https://doi.org/10.1007/s10750-010-0541-z>

Kranzl, L.; Fallahnejad, M.; Hasani, J.; Bernhard, T.; Houndole, L.; Dufils, A.; Hummel, M.; Müller, A.; Conforto, G.; Schmidinger, D.; Zambelli, P.; Garegnani, G.; Pezzutto, S.; Aydemir, A.; Schilling, D.; Neusel, L.; Fleiter, T.; Hunacek, D.; Zuber, L.; ... Odgaard, A. M. (2019): Hotmaps toolbox. <https://www.hotmaps.hevs.ch/map> (aufgerufen am 24.01.2020)

Kreis Plön (2018): Kreis Plön bringt kreisweites Wärmeplanungskataster auf den Weg. https://www.kreis-ploen.de/B%C3%BCrgerservice/Pressedienst/Kreis-Pl%C3%B6n-bringt-kreisweites-W%C3%A4rmeplanungskataster-auf-den-Weg.php?object=tx_3932.5.1&ModID=7&FID=2158.1897.1&NavID=2158.17&La=1&kat=2156.5&monat=201811

Kübert, M.; Walker-Hertkorn, S.; Blum, P.; Bayer, P. & Hähnlein, S. (2009): Praktische Hinweise zur Genehmigungspraxis der thermischen Nutzung des Untergrundes. Rahmenbedingungen, Entwicklungen, Perspektiven. bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, Sonderheft Oberflächennahe Geothermie, 8–13

Kuhr, L.-S. (2018): Einfluss erhöhter Temperaturen von bis zu 70 °C auf die Nitratreduktion im Grundwasser mit Acetat. Bachelorarbeit

LABO (ALA) – Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz, Ausschuss „Altlasten“ (2019): Bundesweite Kennzahlen zur Altlastenstatistik. <https://www.labo-deutschland.de/Veroeffentlichungen-Daten-Informationssysteme.html> (aufgerufen am 31.08.2019)

LAGB – Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt (2012): Erdwärmenutzung in Sachsen-Anhalt. Informationsbroschüre zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden. <https://www.geodaten.lagb.sachsen-anhalt.de/media/43>

LAGB – Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt (2022): Fachinformationssysteme Geologie. Landesbohrdatenbank Sachsen-Anhalt. <https://lagb.sachsen-anhalt.de/service/geofachinformation/landes-bohrdatenbank/>

Langenheld, A.; Mellwig, P.; Pehnt, M.; von Ohesen, A.; Blömer, S.; Lempik, J.; Werle, M.; Ganai, I.; Gerhardt, N.; Becker, S.; Schmidt, D.; Ladermann, A. & Linke, C. (2018): Wert der Effizienz im Gebäudesektor in Zeiten der Sektorenkopplung. Endbericht einer Studie vom Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu), dem Fraunhofer IEE und Consentec. https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2017/Heat_System_Benefit/143_Heat_System_benefits_WEB.pdf

LANUV – Landesamt für Naturschutz Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2019): Wasserwirtschaftliche Anforderungen an die Nutzung von oberflächennaher Erdwärme. LANUV-Arbeitsblatt 39. https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/4_arbeitsblaetter/LANUV_Arbeitsblatt_39.pdf

LANUV – Landesamt für Naturschutz Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2021): Energieatlas NRW. https://www.energieatlas.nrw.de/site/planungskarte_waerme (aufgerufen am 01.07.2021)

LAWA – Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (2019): Empfehlungen der LAWA für wasserwirtschaftliche Anforderungen an Erdwärmesonden und -kollektoren. https://www.lawa.de/documents/lawa-empfehlungen-anforderungen-erdwaermeanlagen_umlau- umk_2_1559634462.pdf

LBEG – Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen (2022): Karten, Daten und Publikationen. https://www.lbeg.niedersachsen.de/karten_daten_publicationen/karten_daten/

LBGR – Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg (2022): Geoportal. <http://www.geo.brandenburg.de/lbgr/bergbau> (aufgerufen am 01.07.2022)

Lerm, S.; Westphal, A.; Miethling-Graff, R.; Alawi, M.; Seibt, A.; Wolfgramm, M. & Würdemann, H. (2013): Thermal effects on microbial composition and microbiologically induced corrosion and mineral precipitation affecting operation of a geothermal plant in a deep saline aquifer. *Extremophiles*, 17(2), 311–327. <https://doi.org/10.1007/s00792-013-0518-8>

LfU – Bayerisches Landesamt für Umwelt (2015): Die neue EU F-Gase-Verordnung 2014. Grüne Kälte: Die F-Gase-Verordnung. https://www.umweltpakt.bayern.de/download/pdf/lfu_infoblatt_f_gase_verordnung_29012015.pdf

LfU – Bayerisches Landesamt für Umwelt (2022): UmweltAtlas Bayern. <https://www.lfu.bayern.de/umweltdaten/kartendienste/index.htm> (aufgerufen am 01.07.2022)

LfULG – Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2014): Informationsbroschüre zur Nutzung oberflächennaher Geothermie. <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/22374/documents/30364>

LfULG – Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2022): Daten und Produkte. Proben, Daten, Archivdokumente, Karten, 3D-Modelle und Stellungnahmen. <https://www.geologie.sachsen.de/produkte-26776.html>

LGB-RLP – Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (2022): Online-Karten. <https://www.lgb-rlp.de/karten-und-produkte/online-karten.html> (aufgerufen am 01.07.2022)

LGRB – Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, Regierungspräsidium Freiburg (2022): Informationssystem oberflächennahe Geothermie Baden-Württemberg (ISONG). <http://isong.lgrb-bw.de/> (aufgerufen am 01.07.2022)

LGRB – Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, Regierungspräsidium Freiburg (2022): Kartenviewer. <https://maps.lgrb-bw.de/> (aufgerufen am 01.07.2022)

LGV – Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung Hamburg (2021): Wärmekataster-Portal. <https://geoportal-hamburg.de/waermekataster/> (aufgerufen am 31.10.2021)

Liebau, C. (1985): Hydrogeologische Untersuchungen eines tiefen Grundwasserleiters im Gebiet von Kiel. Dissertation

Liesch-Dörschner, T. (2014): Ansatzpunkte für eine geologische Fachplanung. In F.-W. Wellmer (Hrsg.), Geoforum 2013 – „Raumordnung für den tiefen Untergrund Deutschlands“: Bd. Heft 30 (S. 65–70)

Lienen, T.; Lüders, K.; Halm, H.; Westphal, A.; Köber, R. & Westphal A. (2017): Effects of thermal energy storage on shallow aerobic aquifer systems: temporary increase in abundance and activity of sulfate-reducing and sulfur-oxidizing bacteria. Environmental Earth Sciences, 76, 261. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6575-z>

LLUR – Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Landes des Landes Schleswig-Holstein (2011): Leitfaden zur geothermischen Nutzung des oberflächennahen Untergrundes. Erdwärmekollektoren – Erdwärmesonden. Empfehlungen für Planer, Ingenieure und Bauherren (LLUR SH – Geologie und Boden: 18). https://www.schleswig-holstein.de/mm/downloads/LFU/Geologie/SH_Geothermieleitfaden_2011.pdf

Lohse, C. & Schuberth, J. (2018): Heizen mit geothermischen Wärmepumpensystemen. Beitrag für einen klimaneutralen Gebäudebestand. Beitrag „Der Geothermiekongress DGK 2018“ Essen, 27. – 29. November 2018. https://www.der-geothermiekongress.de/fileadmin/user_upload/DGK/DGK_2018/Tagungsband/F21.1_Lohse_et_al._DGK2018.pdf

Lohse, C. & Schuberth, J. (2019): Geothermische Wärme für Gebäude – Eine energie- und umweltpolitische Einordnung. Geothermische Energie, 91 / 2019/1

Lohse, C. & Wagener-Lohse, G. (2018): Sustainable heat pump systems in a transformed energy system based on renewables. Proceedings of the 31st International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, June 17th to 21st 2018, Guimarães, Portugal. 31st International

Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Guimarães

Lokoshchenko, M. A. & Korneva, I. (2015): Underground urban heat island below Moscow city. Urban Climate, 13, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.04.00>

LUBW – Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (2021): Energieatlas Baden-Württemberg. <https://www.energieatlas-bw.de/energieatlas> (aufgerufen am 31.10.2021)

Lüders, K.; Dahmke, A. & Köber, R. (2016, 23.11): Auswirkungen oberflächennaher Wärmespeicherung auf Spurenelement- und Schwermetallkonzentrationen im Grundwasser. Symposium zur Boden- und Grundwassersanierung, Frankfurt, Germany

Lüders, Klas; Dahmke, A.; Fiedler, M. & Köber, R. (2020): Temperature influence on mobilisation and (re)fixation of trace elements and heavy metals in column tests with aquifer sediments from 10 to 70 °C. Water Research, 169, 115266. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115266>

Lüders, Klas; Firmbach, L.; Ebert, M.; Dahmke, A.; Dietrich, P. & Köber, R. (2016): Gas-phase formation during thermal energy storage in near-surface aquifers: experimental and modelling results. Environmental Earth Sciences, 75(21), 1404. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6181-5>

Lüders, Klas; Hornbruch, G.; Zarrabi, N.; Heldt, S.; Dahmke, A. & Köber, R. (2021): Predictability of initial hydrochemical effects induced by short-term infiltration of ~75 °C hot water into a shallow glaciogenic aquifer. Water Research X, 13(December 2021, 100121), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2021.100121>

LUNG – Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (2022): Kartenportal Umwelt Mecklenburg-Vorpommern. <https://www.umweltkarten.mv-regierung.de/atlas/script/index.php>

LVerGeo SH – Landesamt für Vermessung und Geoinformation Schleswig-Holstein (2021): Geobasisdaten. http://www.schleswig-holstein.de/DE/Landesregierung/LVERMGEO/Service/serviceGeobasisdaten/geodatenService_Geobasisdaten_mehrLesen.html?jsessionid=DF93C88225106AEDB57D8AE547AE3696.delivery2-replication?nn=792c4aab-8a59-44b8-a07c-aadd245b76c

LVGL – Landesamt für Vermessung, Geoinformation und Landesentwicklung Saarland (2021): Wärmekataster Saarland. <https://geoportal.saarland.de/article/Waermekataster/>

LVGL – Landesamt für Vermessung, Geoinformation und Landesentwicklung Saarland (2022): Geoportal Saarland. <https://geoportal.saarland.de/>

Maaß, C. (2020): Wärmeplanung: Grundlagen einer neuen Fachplanung. Zeitschrift für Umweltrecht, 1/2020. <https://www.zur.nomos.de/archiv/2020/heft-1/>

Maaß, C.; Möhring, P.; Purkus, A.; Sandrock, M.; Freiburger, L. & Kleinertz, B. (2021): Grüne Fernwärme für Deutschland. Potenziale, Kosten, Umsetzung. Kurzstudie. https://www.bdew.de/media/original_images/200-bericht-kurzstudie-grune-fernwarmer.pdf

Maaß, C. & Sandrock, M. (2017): Erneuerbare Energien im Fernwärmenetz Hamburg. Teil 2: Transformationsstrategie Fernwärme. <https://www.hamburg-institut.com/projects/erneuerbare-energien-im-fernwaermenetz-hamburg/>

Maaß, C.; Sandrock, M. & Weyland, R. (2015): Solare Fernwärme im Planungs- und Umweltrecht: der Rechtsrahmen für große Freiflächen-Solaranlagen zur Wärmeerzeugung. Zeitschrift für Umweltrecht, 26(2015), 78 – 85

Martens, K. (2018): HFKW-Verbrauch in Deutschland. Informationsveranstaltung zur F-Gas-Verordnung

- Marti, J.; Witzig, A.; Huber, A. & Ochs, M. (2009): Simulation von Wärmepumpensystemen in POLYSON 4. Schlussbericht. <https://www.hetag.ch/download/Polysun4.pdf>
- Mathiesen, B. V. (2021): 2015 Final Heating & Cooling Demand in the Netherlands. https://heatroad-map.eu/wp-content/uploads/2018/11/HRE4-Country_presentation-Netherlands.pdf
- McMahon, S. & Parnell, J. (2018): The deep history of Earth's biomass. *Journal of the Geological Society*, 175, 716–720. <https://doi.org/10.1144/jgs2018-061>
- MELUND – Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung des Landes Schleswig-Holstein (2022): Landwirtschafts- und Umweltatlas. <https://umweltportal.schleswig-holstein.de/kar-tendienste>
- MELUR – Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein (2014): Die kommunale Wärmeplanung. https://www.schleswig-holstein.de/DE/Landesregierung/V/Service/Broschueren/Broschueren_V/Umwelt/pdf/FlyerKommunaleWaermeplanung.pdf?blob=publication-File&v=1
- Menberg, K.; Bayer, P.; Zosseder, K.; Rumohr, S. & Blum, P. (2013): Subsurface urban heat islands in German cities. *Science of The Total Environment*, 442, 123–133. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.10.043>
- Menberg, K.; Blum, P.; Kurylyk, B. L. & Bayer, P. (2014): Observed groundwater temperature response to recent climate change. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 4453–4466. <https://doi.org/10.5194/hess-18-4453-2014>
- Menberg, K.; Blum, P.; Schaffitel, A. & Bayer, P. (2013): Long-Term evolution of anthropogenic heat fluxes into a subsurface urban heat island. *Environmental Science & Technology*, 47(17), 9747–9755. <https://doi.org/10.1021/es401546u>
- Mermillod-Blondin, F.; Lefour, C.; Lalouette, L.; Renault, D.; Malard, F.; Simon, L. & Douady, C. J. (2013): Thermal tolerance breadths among groundwater crustaceans living in a thermally constant environment. *Journal of Experimental Biology*, 216(9), 1683–1694. <https://doi.org/10.1242/jeb.081232>
- Metze, D. (2019): The ecological effects of temperature management (heat storage) on natural microbial communities of a shallow aquifer. Master Thesis
- Metze, D.; Popp, D.; Schwab, L.; Keller, N.-S.; Nunes da Rocha, U.; Richnow, H.-H. & Vogt, C. (2021): Temperature management potentially affects carbon mineralization capacity and microbial community composition of a shallow aquifer. *FEMS Microbiology Ecology*, 2021:97:fiaa261. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiaa261>
- Miara, M.; Günther, D.; Kramer, T.; Oltersdorf, T. & Wapler, J. (2011): Wärmepumpen Effizienz. Messtechnische Untersuchung von Wärmepumpenanlagen zur Analyse und Bewertung der Anlagen im realen Betrieb. https://wp-monitoring.ise.fraunhofer.de/wp-effizienz/download/wp_effizienz_endbericht_langfassung.pdf
- Michalski, D.; Reiß, P. & Strauss, W.-C. (2021): Klimaschutz im Gebäudesektor. Neue Wege für die Wohnungswirtschaft. Impuls für das Strategieforum „Wohnungswirtschaft“ des Grünen Wirtschaftsdialogs. <https://repository.difu.de/jspui/bitstream/difu/580487/1/SV%20Klimaschutz%20im%20Gebauesektor%20GWD.pdf>
- MILI SH – Ministerium für Inneres, ländliche Räume und Integration Schleswig-Holstein (2018): Fortschreibung Landesentwicklungsplan Schleswig-Holstein. Entwurf 2018. – Fortschreibung. <https://bolapla-sh.de/file/c9fbd918-e32b-11e8-a5f7-0050569710bc/10428009-fe12-11e8-b6a2-0050569710bc>
- Miocic, J. M. & Krecher, M. (2022): Estimation of shallow geothermal potential to meet building heating demand on a regional scale. *Renewable Energy*, 185, 629–640. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.095>

- Möhring, P.; Maaß, C.; Sandrock, M.; Kromrey, V. & Vedel, D. (2022): Naturverträgliche Wärmewende. Ergebnisse des F+E-Projekts „Naturschutzaspekte bei zukünftigen Regelungen zur Wärme- und Kälteerzeugung“ (FKZ 3519 86 0400). <https://bfz.bsz-bw.de/frontdoor/deliver/index/docId/1099/file/Schrift642.pdf>
- Möller, B.; Wiechers, E.; Persson, U.; Gundahl, L. & Connolly, D. (2018): Heat Roadmap Europe: Identifying local heat demand and supply areas with a European thermal atlas. *Energy*, 158, 281–292. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.025>
- Monnikhof, R.; Edelenbos, J. & van der Krogt, R. (1998): How to determine the necessity for using underground space: an integral assessment method for strategic decision-making. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 13(2), 167–172. [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(98\)00044-3](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(98)00044-3)
- MUEEF – Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz (2020): Leitfaden zur Nutzung von oberflächennaher Geothermie mit Erdwärmesonden. Grundwasserschutz und Erlaubnisverfahren. 7. Fortschreibung. https://www.lgb-rlp.de/fileadmin/service/lgb_downloads/erdwaerme/erdwaerme_allgemein/leitfaden_erdwaerme_10112020.pdf (aufgerufen am 03.03.2024)
- MULEWF – Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz (2012): Leitfaden zur Nutzung von oberflächennaher Geothermie mit Erdwärmesonden. Grundwasserschutz – Standortbeurteilung – Wasserrechtliche Erlaubnis. https://www.lgb-rlp.de/fileadmin/service/lgb_downloads/erdwaerme/06_2012_leitfaden_erdwaerme.pdf (aufgerufen am 23.06.2022)
- Müller, M. H.; Huggenberger, P. & Epting, J. (2018): Combining monitoring and modelling tools as a basis for city-scale concepts for a sustainable thermal management of urban groundwater resources. *Science of The Total Environment*, 627, 1121–1136. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.250>
- Müller, N.; Kuttler, W. & Barlag, A.-B. (2014): Analysis of the subsurface urban heat island in Oberhausen, Germany. *Climate research*, 58(3), 247–256. <https://doi.org/10.3354/cr01195>
- Naumann, H.; Becker, L. & Streit, T. (2008): Leitfaden Erdwärmenutzung. https://www.energie-experten.org/fileadmin/Newsartikel/Inhalt_Download/Erdw%C3%A4rme/Erdwaerme_Saarland_Leitfaden_zur_Erdwaermenutzung_im_Saarland.pdf
- NCCS – NASA Center for Climate Simulation (2024): NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP). <https://www.nccs.nasa.gov/services/data-collections/land-based-products/nex-gddp>
- Nitsch, J.; Pregger, T.; Naegler, T.; Heide, D.; Luca de Tena, D.; Trieb, F.; Scholz, Y.; Nienhaus, K.; Gerhardt, N.; Sterner, M.; Trost, T.; von Oehsen, A.; Schwinn, R.; Pape, C.; Hahn, H.; Wickert, M. & Wenzel, B. (2012): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Schlussbericht. BMU - FKZ 03MAP146. <https://doi.org/10.24406/publica-1874>
- Nordbeck, J.; Delfs, J.-O.; Schwanebeck, M.; Beyer, C. & Bauer, S. (2020): High Temperature ATES: Thermal impact and efficiency assessment with numerical simulations. EGU2020-14085. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-14085>
- Nouvel, R.; Zirak, M.; Coors, V. & Eicker, U. (2017): The influence of data quality on urban heating demand modeling using 3D city models. *Computers, Environment and Urban Systems*, 64, 68–80. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2016.12.005>
- Obst, K.; Iffland, J.; Schwerdtfeger, B. & Brandes, J. (2015): Erdwärmesonden und Erdwärmekollektoren in Mecklenburg-Vorpommern. Leitfaden zur geothermischen Nutzung des oberflächennahen Untergrundes. 2. überarbeitete und erweiterte Auflage. https://www.lung.mv-regierung.de/static/LUNG/Dateien/fachinformationen/Geologie/leitfaden_ews_ewk_mv.pdf

- Otto, R.; Reum, R.; Scheer, W.; Angermann, H. & Wolters, W. (2001): Untersuchungsprogramm zur Ermittlung des nutzbaren Grundwasserdargebotes im schleswig-holsteinischen Nachbarraum zu Hamburg, Südwest-Holstein. Fachlicher Abschlussbericht zur Abschätzung der Grundwasserneubildungsrate im wasserwirtschaftlichen Planungsraum Südwest-Holstein. https://www.schleswig-holstein.de/DE/fachinhalte/G/grundwasser/Downloads/Suedwest/Bericht_LWH.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- Palmer, C. D. & Cherry, J. A. (1984): Geochemical reactions associated with low-temperature thermal energy storage in aquifers. *Canadian Geotechnical Journal*, 21(3), 475–488. <https://doi.org/10.1139/t84-051>
- Palzer, A. (2016): Sektorübergreifende Modellierung und Optimierung eines zukünftigen deutschen Energiesystems unter Berücksichtigung von Energieeffizienzmaßnahmen im Gebäudesektor. <https://doi.org/10.24406/publica-fhg-281042>
- Pandey, P. K.; Kass, P. H.; Soupir, M. L.; Biswas, S. & Singh, V. P. (2014): Contamination of water resources by pathogenic bacteria. *AMB Express*, 2014; 4: 51. <https://amb-express.springeropen.com/articles/10.1186/s13568-014-0051-x>
- Parkhurst, D. L. & Appelo, C. A. J. (2013): Description of input and examples for PHREEQC version 3--A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations (Book 6 (Modeling Techniques), Section A (Groundwater), Chapter 43; Techniques and Methods). <https://pubs.usgs.gov/tm/06/a43/pdf/tm6-A43.pdf>
- Pehnt, M.; Nast, M.; Götz, C.; Blömer, S.; Barckhausen, A.; Schröder, D.; Miljes, R.; Pottbäcker, C.; Breier, H.; Nabe, C.; Lindner, S. & Dannemann, B. (2017): Wärmenetzsysteme 4.0. Endbericht. Kurzstudie zur Umsetzung der Maßnahme „Modellvorhaben erneuerbare Energien in hocheffizienten Niedertemperaturwärmenetzen“. <https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/W%C3%A4rmenetze-4.0-Endbericht-final.pdf>
- Penn-Bressel, G. (2014): Unterirdische Raumplanung – Problemstellung aus Sicht des Umweltbundesamtes und ausgewählte Ergebnisse eines UFO-Plan-Forschungsvorhabens. *Geoforum 2013 – „Raumordnung für den tiefen Untergrund Deutschlands“*, Heft 30, 43–52. <https://doi.org/10.1127/agg/30/2014/43>
- Perner, J.; Unteutsch, M. & Lövenich, A. (2018): Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe. Fassung vom 19.03.2018. https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2017/Syn-Kost_2050/Agora_SynCost-Studie_WEB.pdf
- Pfeiffer, W. T.; al Hagrey, S. A.; Köhn, D.; Rabbal, W. & Bauer, S. (2016): Porous media hydrogen storage at a synthetic, heterogeneous field site: numerical simulation of storage operation and geophysical monitoring. *Environmental Earth Sciences*, 75, 315. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5958-x>
- Pfeiffer, W. T. & Bauer, S. (2019): Hydraulic effects during large-scale hydrogen storage in porous formations. In A. Ferrari & L. Laloui (Hrsg.), *Energy Geotechnics*. SEG-2018 (S. 276–283)
- Pfeiffer, W. T.; Beyer, C. & Bauer, S. (2017): Hydrogen storage in a heterogeneous sandstone formation: Dimensioning and induced hydraulic effects. *Petroleum Geoscience*, 23(3), 315–326. <https://doi.org/10.1144/petgeo2016-050>
- Pfluger, B.; Testeegen, B. & Franke, B. (2017a): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Modul 2: Modelle und Modellverbund. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/berichtsmodul-2-modelle-und-modellverbund.pdf?__blob=publicationFile&v=6
- Pfluger, B.; Testeegen, B. & Franke, B. (2017b): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Modul 3: Referenzszenario und Basisszenario. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/berichtsmodul-3-referenzszenario-und-basisszenario.pdf?__blob=publicationFile&v=4

- Pitkänen, T. (2013): Review of *Campylobacter* spp. in drinking and environmental waters. Invited review. *Journal of Microbiological Methods*, 95(1), 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2013.06.008>
- Popovski, E.; Aydemir, A.; Fleiter, T.; Bellstädt, D.; Büchele, R. & Steinbach, J. (2019): The role and costs of large-scale heat pumps in decarbonising existing district heating networks – A case study for the city of Herten in Germany. *Energy*, 180, 918–933. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.122>
- Powell, K. L.; Taylor, R. G.; Cronin, A. A.; Barrett, M. H.; Pedley, S.; Sellwood, J.; Trowsdale, S. A. & Lerner, D. N. (2003): Microbial contamination of two urban sandstone aquifers in the UK. *Water Research*, 37(2):339–52. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00280-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00280-4)
- Preuß, G. & Schminke, H. K. (2004): Grundwasser lebt! Ein globales Ökosystem. *Chemie in unserer Zeit*, 38(5), 340–347. <https://doi.org/10.1002/ciuz.200400307>
- Price, P. B. & Sowers, T. (2004): Temperature dependence of metabolic rates for microbial growth, maintenance, and survival. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(13):4631–6. <https://doi.org/10.1073/pnas.0400522101>
- Purr, K.; Günter, J.; Lehmann, H.; Nuss, P.; Adlunger, K.; Balzer, F.; Berger, J.; Bernicke, M.; Bertram, A.; Biewald, A.; Dettling, F.; Drosihn, D.; Fee, E.; Futterlieb, M.; Gromke, U.; Günther, D.; Hain, B.; Herbener, R.; Hofmeier, K.; ... Werlein, M. (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. RESCUE-Studie. *Climate Change*, 36/2019. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/rescue_studie_cc_36-2019_wege_in_eine_ressourcenschonende_treibhausgasneutralitaet_auflage2_juni-2021.pdf
- Quaschnig, V. (2010): Erneuerbare Energien und Klimaschutz: Hintergründe – Techniken – Anlagenplanung – Wirtschaftlichkeit (2., aktualisierte Aufl.)
- Reinhardt, M. (2019): Der Vorrang der öffentlichen Wasserversorgung. Einfach-gesetzliche und verfassungsrechtliche Grundlagen, normative Umsetzung im geltenden Recht und Auswirkungen auf kommunizierende Rechtsbereiche. Rechtsgutachten. <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/publikationen/dvgw-wasser-impuls-rechtsgutachten-vorrang-wasserversorgung-reinhardt.pdf>
- Repenning, J.; Emele, L.; Blanck, R.; Böttcher, H.; Dehoust, G.; Förster, H.; Greiner, B.; Harthan, R.; Henneberg, K.; Hermann, H.; Jörß, W.; Loreck, C.; Ludig, S.; Matthes, F. Chr.; Scheffler, M.; Schumacher, K.; Wiegmann, K.; Zell-Ziegler, C.; Braungardt, S.; ... Ziesing, H.-J. (2015): Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (S. 467). <https://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf>
- Riedel, T. (2019): Temperature-associated changes in groundwater quality. *Journal of Hydrology*, 527, 206–212. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.059>
- Robador, A.; Brüchert, V.; Steen, A. D. & Arnosti, C. (2010): Temperature induced decoupling of enzymatic hydrolysis and carbon remineralization in long-term incubations of Arctic and temperate sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(8), 2316–2326. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.01.022>
- Robinius, M.; Markewitz, P.; Lopion, P.; Kullmann, F.; Heuser, P.-M.; Syranidis, K.; Cerniauskas, S.; Reuß, M.; Ryberg, S.; Kotzur, L.; Caglayan, D.; Welder, L.; Linßen, J.; Grube, T.; Heinrichs, H.; Stenzel, P. & Stolten, D. (2019): Wege für die Energiewende. Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050 (Nr. 499; Schriften des Forschungszentrums Jülich; Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment). https://user.fz-juelich.de/record/877960/files/Energie_Umwelt_499.pdf
- Rother, S.; Schuberth, J.; Steinbrenner, J.; Bade, M.; Bertram, A.; Herda, I.; Herbstritt, C.; Lünenbürger, B.; Mohr, L.; Purr, K.; Rau, C.; von Schlippenbach, U.; Sieck, L. & Unnerstall, H. (2020): 13 Thesen für einen treibhausgasneutralen Gebäudebestand. Drängende Herausforderungen der Wärmewende (12/2020; Position).

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/pp_13thesen_treibhausgasneutraler_gebaeudestand_bf.pdf

Rumohr, S. & Hoffmann, M. (2019): Erdwärmenutzung in Hessen. Leitfaden für Erdwärmesondenanlagen zum Heizen und Kühlen. 6., überarbeitete Auflage. https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/geologie/erdwaerme/Leitfaden_Erdwaerme_6_Auflage_gesamt.pdf

Russ, C.; Platt, M.; Günther, D.; Kramer, T.; Dittmer, H.; Lechner, T. & Kurz, C. (2010): Feldmessung Wärmepumpen im Gebäudebestand. https://www.energiewende-erlangen.de/wp-content/uploads/2018/06/FHG_ISE_Feldmessung_von_W%C3%A4rmepumpen.pdf

Russell, H. & Gurgenci, H. (2014): Improving the performance of arid-zone geothermal power plants using seasonal heat storage. *Geothermics*, 51, 337–343. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.03.006>

Sachverständigenrat für Umweltfragen (2011): Wege zu 100% erneuerbaren Stromversorgung. Sondergutachten. https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02_Sondergutachten/2008_2012/2011_07_SG_Wege_zur_100_Prozent_erneuerbaren_Stromversorgung.pdf

Saito, T.; Hamamoto, S.; Ueki, T.; Ohkubo, S.; Moldrup, P.; Kawamoto, K. & Komatsu, T. (2016): Temperature change affected groundwater quality in a confined marine aquifer during long-term heating and cooling. *Water Research*, 94, 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.01.043>

Sandrock, M.; Maaß, C.; Weisleder, S.; Kaufmann, C.; Fuß, G.; Sørensen, P. A.; Laurberg Jensen, L. & Radmann, K. (2016): Erneuerbare Energien im Fernwärmenetz Hamburg. Teil 1: Handlungsoptionen für einen kurzfristigen Ersatz des Kraftwerks Wedel. Aktualisierte Fassung vom 07.12.2016. Gutachten im Auftrag der Behörde für Umwelt und Energie, Freie und Hansestadt Hamburg. https://www.hamburg-institut.com/wp-content/uploads/2021/07/Erneuerbare_Energien_im_Fernwaermenetz_Hamburg_Teil1.pdf

Schabbach, T. & Leibbrandt, P. (2014): Solarthermie. Wie Sonne zu Wärme wird

Schiel, K.; Baume, O.; Caruso, G. & Leopold, U. (2016): GIS-based modelling of shallow geothermal energy potential for CO₂ emission mitigation in urban areas. *Renewable Energy*, 86, 1023–1036. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.09.017>

Schlegel, B. (2020): Räumliche und zeitliche Veränderung der Grundwassertemperatur Baden-Württembergs. BSc.-Arbeit

Schlesinger, M.; Hofer, P.; Kemmler, A.; Kirchner, A.; Koziel, S.; Ley, A.; Piésga, A.; Seefeldt, F.; Straßburg, S.; Weinert, K.; Lindenberger, D.; Knaut, A.; Malischek, R.; Nick, S.; Panke, T.; Paulus, S.; Tode, C.; Wagner, J.; Lutz, C.; ... Ulrich, P. (2014): Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose. Endbericht. Projekt Nr. 57/12. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. https://www.prognos.com/sites/default/files/2021-01/140716_kurzfassung_42_seiten_energiereferenzprognose_2014.pdf

Schmidt, S. I. & Hahn, H. J. (2012): What is groundwater and what does it mean to fauna? An opinion. *Limnologia*, 42, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2011.08.002>

Schmuck, M. (2017): Wirtschaftliche Umsetzbarkeit saisonaler Wärmespeicher (R. Schach, Hrsg.; 1. Auflage)

Schulze, F.; Keimeyer, F.; Schöne, R.; Westphal, I.; Janssen, G.; Bartel, S. & Seiffert, S. (2015): Unterirdische Raumplanung. Vorschläge des Umweltschutzes zur Verbesserung der über- und untertägigen Informationsgrundlagen, zur Ausgestaltung des Planungsinstrumentariums und zur nachhaltigen Lösung von Nutzungskonflikten. Teilvorhaben 2: Bearbeitung rechtlicher und raumplanerischer Aspekte. Texte, 57/2015. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_57_2015_unterirdische_raumplanung_teil_2_planerische_und_rechtliche_aspekte.pdf

- Schüppler, S.; Fleuchaus, P. & Blum, P. (2019): Techno-economic and environmental analysis of an Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) in Germany. *Geothermal Energy*, 7(1), 11. <https://doi.org/10.1186/s40517-019-0127-6>
- Schüwer, D. (2017): Konversion der Wärmeversorgungsstrukturen. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 67 (2017), 21–25
- Schwanebeck, M.; Krüger, M. & Duttmann, R. (2021): Improving GIS-based heat demand modelling and mapping for residential buildings with census data sets at regional and sub-regional scales. *Energies*, 14(4), 1029. <https://doi.org/10.3390/en14041029>
- Schweikert, S. (2014): Untersuchung der Grundwasserökologie von Karlsruhe. Masterarbeit
- Schwerdtfeger, B. C. (1985): Geologisch-hydrogeologische Untersuchungen im Raum Nordheide (Lüneburger Heide). *Aquiferkennwerte, Hydrochemie, Beweissicherung*: Bd. C 39
- Seidel, M.; Jurzik, L.; Brettar, I.; Höfle, M. G. & Griebler, C. (2016): Microbial and viral pathogens in freshwater: current research aspects studied in Germany. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1384. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6189-x>
- Selcuk, E. (2011): Estimation of Heat Extraction Rates of GSHP Systems under Different Hydrogeological Conditions. Masterarbeit
- SenStadtBauWohn – Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Bauen und Wohnen Berlin (2022): Geoportal Berlin. <https://www.stadtentwicklung.berlin.de/geoinformation/fis-broker/>
- SenUVK – Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin (2020): Nachsorgender Bodenschutz / Altlasten. <https://www.berlin.de/sen/uvk/umwelt/bodenschutz-und-altlasten/nachsorgender-bodenschutz-altlasten/>
- SenUVK – Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin (2022): Erdwärmennutzung in Berlin. Merkblatt für Erdwärmesonden und Erdwärmekollektoren mit einer Heizleistung bis 30 kW außerhalb von Wasserschutzgebieten. Stand: Januar 2022. https://www.berlin.de/sen/uvk/_assets/umwelt/wasser-und-geologie/publikationen-und-merkblaetter/leitfaden_geothermie.pdf
- SGD – Staatliche Geologische Dienste Deutschlands & BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2015): Charakterisierung der Nutzungspotenziale des geologischen Untergrundes in Deutschland als Bewertungsgrundlage für unterirdische Raumnutzungen. Abschlussbericht. Erarbeitet für den Bund/Länder-Ausschuss Bodenforschung (BLA-GEO) (Informationen aus den Bund/Länder-Arbeitsgruppen der Staatlichen Geologischen Dienste, S. 31). https://www.bgr.bund.de/Infogeo/DE/Downloads/PK_NtU_Abschlussbericht_2015.zip
- Sichardt, W. (1928): Das Fassungsvermögen von Rohrburgen und seine Bedeutung für die Grundwasserabsenkung, insbesondere für größere Absenkungstiefen. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-29224-2>
- Sinton, L. W. (1984): The macroinvertebrates in a sewage-polluted aquifer. *Hydrobiologia*, 119, 161–169 (1984)
- Smith, R. J.; Paterson, J. S.; Launer, E.; Tobe, S. S.; Morello, E.; Leijes, R.; Marri, S. & Mitchell, J. G. (2016): Stygofauna enhance prokaryotic transport in groundwater ecosystems. *Scientific Reports*, 6, 1–7. <https://doi.org/10.1038/srep32738>
- Sonne Wind & Wärme (2019): Marktübersicht Erdwärmepumpen. <https://www.sonnewindwaerme.de/marktuebersicht/erdwaermepumpe> (aufgerufen am 12.03.2019)
- Spengler, C. (2017): Die Auswirkungen von anthropogenen Temperaturerhöhungen auf die Crustaceagemeinschaften im Grundwasser. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Naturwissenschaften, Fachbereich 7: Natur- und Umweltwissenschaften, Universität Koblenz-Landau.

https://kola.opus.hbz-nrw.de/frontdoor/deliver/index/docId/1554/file/Dissertation_CSpengler_angenommen_20122017.pdf

Stadler, I.; Kraft, A.; Bauer, T.; Faatz, R.; Grabowski, S.; Harms, G.; Herrmann, U.; Kleimaier, M.; Maximini, M.; Ritterbach, E.; Roth, T.; Kühne, J.; Paschen, I. & Kähler, L. (2020): Wärmespeicher in NRW. Thermische Speicher in Wärmenetzen sowie in Gewerbe- und Industrieanwendungen. <https://elib.dlr.de/138583/>

Stadt Zürich (2017): Energieplankarte der Stadt Zürich. https://www.stadt-zuerich.ch/content/dam/stzh/dib/Deutsch/Energieversorgung/Publikationen%20und%20Broschueren/Energieplankarte_2017.pdf (aufgerufen am 24.06.2022)

Stauffer, F.; Bayer, P.; Blum, P.; Milina Giraldo, N. & Kinzelbach, W. (2014): Thermal use of shallow groundwater (1st Edition). <https://doi.org/10.1201/b16239>

Stede, J.; Schütze, F. & Wietschel, J. (2020): Wärmemonitor 2019: Klimaziele bei Wohngebäuden trotz sinkender CO₂-Emissionen derzeit außer Reichweite. DIW Wochenbericht. https://doi.org/10.18723/DIW_WB:2020-40-1

Stemmle, R.; Blum, P.; Schüppler, S.; Fleuchaus, P.; Limoges, M.; Bayer, P. & Menberg, K. (2021): Greenhouse gas emissions of aquifer thermal energy storage (ATES). EGU General Assembly 2021, ÊGU21-5052. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-5052>

Sterchele, P.; Brandes, J.; Heilig, J.; Wrede, D.; Kost, C.; Schlegl, T.; Bett, A. & Henning, H.-M. (2020): Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem. Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen. <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE-Studie-Wege-zu-einem-klimaneutralen-Energiesystem.pdf>

Sterner, M. & Thema, M. (2017): Vergleich der Speichersysteme. In M. Sterner & M. Thema (Hrsg.), Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration. Vergleich der Speichersysteme. https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-662-48893-5_12.pdf. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48893-5>

StMWi – Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie (2022): Energie-Atlas Bayern. Geothermie, oberflächennahe Geothermie, Genehmigung. https://www.energieatlas.bayern.de/thema_geothermie/oberflaeche/genuehmigung.html

Stober, I. & Bucher, K. (2014): Geothermie. 2. Auflage. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-41763-4>

Struß, J.; Schäfer, D.; Dahmke, A. & Köber, R. (2020): Numerische Simulationen des Ausbreitungsverhaltens von Wärmeträgerfluid-Inhaltsstoffen aus Erdwärmesonden in Trinkwassereinzugsgebieten. Grundwasser, 25, 189–204. <https://doi.org/10.1007/s00767-020-00453-z>

Stumm, W. & Morgan, J. J. (1996): Aquatic chemistry: Chemical equilibrium and rates in natural waters (Third Edition)

SWEB – Senatsverwaltung für Wirtschaft, Energie und Betriebe Berlin (2021): Energieatlas Berlin. <https://energieatlas.berlin.de/>

Taniguchi, M.; Uemura, T. & Sakura, Y. (2005): Effects of urbanization and groundwater flow on subsurface temperature in three megacities in Japan. Journal of Geophysics and Engineering, 2(4), 320–325. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/2/4/S04>

Taylor, C. A. & Stefan, H. G. (2009): Shallow groundwater temperature response to climate change and urbanization. Journal of Hydrology, 375(3–4), 601–612. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.07.009>

Thamling, N.; Pehnt, M. & Kirchner, J. (2015): Hintergrundpapier zur Energieeffizienzstrategie Gebäude. https://www.prognos.com/sites/default/files/2021-01/20151220_prognos_hintergrundpapier_ees.pdf

Tissen, C.; Benz, S. A.; Menberg, K.; Bayer, P. & Blum, P. (2019): Groundwater temperature anomalies in central Europe. *Environmental Research Letters*, 14(10), 104012. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab4240>

Tissen, C.; Menberg, K.; Bayer, P. & Blum, P. (2019): Meeting the demand: geothermal heat supply rates for an urban quarter in Germany. *Geothermal Energy*, 7(1), 9. <https://doi.org/10.1186/s40517-019-0125-8>

TLUBN – Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz Freistaat Thüringen (2022): Daten, Karten und Archive. <https://tlubn.thueringen.de/geologie-bergbau/daten-karten-und-archive> (aufgerufen am 01.07.2022)

TLVwA – Thüringer Landesverwaltungsamt (2013): Nutzung oberflächennaher Geothermie. Arbeitshilfe zur wasserrechtlichen Beurteilung. Stand: Mai 2013. http://www.tlug-jena.de/geothermie/formulare/arbeits-hilfe_erdwaerme.pdf

Töpfner, C. & Fritzer, T. (2007): Oberflächennahe Geothermie. Heizen und Kühlen mit Energie aus dem Untergrund. Ein Überblick für Bauherren, Planer und Fachhandwerker in Bayern. https://www.stmwi.bayern.de/fileadmin/user_upload/stmwi/Energie/Rohstoffe/2021-10-20_Geothermie.pdf

Trimble, J. L.; Van Hook, R. I. & Gray Folger, A. (1984): Biomass for energy: the environmental issues. *Biomass*, 6(1–2), 3–13. [https://doi.org/10.1016/0144-4565\(84\)90003-9](https://doi.org/10.1016/0144-4565(84)90003-9)

Tschopp, D.; Tian, Z.; Berberich, M.; Fan, J.; Perers, B. & Furbo, S. (2020): Large-scale solar thermal systems in leading countries: A review and comparative study of Denmark, China, Germany and Austria. *Applied Energy*, 270, 114997. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114997>

UBA – Umweltbundesamt (2021a): Erneuerbare Energien in Zahlen. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#uberblick>

UBA – Umweltbundesamt (2021b): Treibhausgas-Emissionen in Deutschland. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland>

UBA – Umweltbundesamt (2024): Treibhauspotentiale (Global Warming Potential, GWP) ausgewählter Verbindungen und deren Gemische gemäß Viertem (AR4) und Fünftem (AR5) Sachstandsbericht des IPCC bezogen auf einen Zeitraum von 100 Jahren. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/10594/dokumente/2024-03_treibhauspotentiale_gwp_ar4_ar5_vo2024-573_homepage_deutsch.pdf

UM – Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2018): Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden (LQS EWS). Stand Dezember 2018. https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/5_Energie/Erneuerbare_Energien/Geothermie/LQS_EWS/190601-Leitlinien-Qualitaetssicherung-Erdwaermesonden.pdf

UMBW – Umweltministerium Baden-Württemberg (2005): Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden. 4. überarbeitete Neuauflage. https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Umwelt/050506-Leitfaden-Nutzung-von-Erdwaerme.pdf

van Breukelen, B. M. & Bonte, M. (2016): Comment on “Thermally released arsenic in porewater from sediments in the Cold Lake area of Alberta, Canada”. *Environmental Science & Technology*, 50(13), 7263–7264. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02106>

VDI – Verein Deutscher Ingenieure e. V. (2000): VDI 4640 Blatt 1. Thermische Nutzung des Untergrunds. Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte

VDI – Verein Deutscher Ingenieure e. V. (2001a): VDI 4640 Blatt 2. Thermische Nutzung des Untergrunds. Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen

VDI – Verein Deutscher Ingenieure e. V. (2001b): VDI 4640 Blatt 3. Thermische Nutzung des Untergrunds. Unterirdische Thermische Energiespeicher

VDI – Verein Deutscher Ingenieure e. V. (2004): VDI 4640 Blatt 4. Thermische Nutzung des Untergrunds. Direkte Nutzungen

VDI – Verein Deutscher Ingenieure e. V. (2010): VDI 4640 Blatt 1. Thermische Nutzung des Untergrunds. Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte

VDI – Verein Deutscher Ingenieure e. V. (2019): VDI 4640 Blatt 2. Thermische Nutzung des Untergrunds. Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen

Verfassung der Freien und Hansestadt Hamburg. Vom 6. Juni 1952 (HmbBL I 100-a), zuletzt geändert am 3. Juli 2012 (HmbGVBl. S. 253) (2012): <https://www.landesrecht-hamburg.de/bsha/document/jlr-VerfHARahmen>

Walberg, D. (2021): Stellungnahme zur öffentlichen Anhörung des Ausschusses für Bau, Wohnen, Stadtentwicklung und Kommunen zum Thema „Bauwende“. Ausschussdrucksache 19(24)276-A des Ausschusses für Bau, Wohnen, Stadtentwicklung und Kommunen des Deutschen Bundestags. <https://www.bundestag.de/resource/blob/820034/3282d6b250150c9320eb89a9a2d01bd5/Stellungnahme-SV-Walberg-data.pdf>

Walberg, D. & Gniechwitz, T. (2019): Auswirkungen energetischer Standards auf die Bauwerkskosten und die Energieeffizienz im Geschosswohnungsneubau in Deutschland (Nr. 78; Bauforschungsbericht). <https://arge-ev.de/arge-ev/publikationen/studien/>

Walberg, D.; Gniechwitz, T. & Schulze, T. (2012): Gebäudetypologie Schleswig-Holstein. Leitfaden für wirtschaftliche und energieeffiziente Sanierungen verschiedener Baualtersklassen (Nr. 47; Bauen in Schleswig-Holstein). https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/K/klimapakt/Downloads/LeitfadenGebaeuetypologie.pdf?__blob=publicationFile&v=1

Walberg, K. (2016): Solarthermie für Hamburg. Fachdialog

Wang, W.; Kosakowski, G. & Kolditz, O. (2009): A parallel finite element scheme for thermo-hydro-mechanical (THM) coupled problems in porous media. Computers & Geosciences, 35(8), 1631–1641. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.07.007>

Watanabe, N.; Wang, W.; McDermott, C.; Taniguchi, T. & Kolditz, O. (2010): Uncertainty analysis of thermo-hydro-mechanical coupled processes in heterogeneous porous media. Computational Mechanics, 45(4), 263–280. <https://doi.org/10.1007/s00466-009-0445-9>

Watts, G.; Battarbee, R. W.; Bloomfield, J. P.; Crossman, J.; Daccache, A.; Durance, I.; Elliott, J. A.; Garner, G.; Hannaford, J.; Hannah, D. M.; Hess, T.; Jackson, C. R.; Kay, A. L.; Kernan, M.; Knox, J.; Mackay, J.; Monteith, D. T.; Ormerod, S. J.; Rance, J.; ... Wilby, R. L. (2015): Climate change and water in the UK – past changes and future prospects. Progress in Physical Geography, 39(1), 6–28. <https://doi.org/10.1177/0309133314542957>

WCED – World Commission on Environment and Development (1987): Report of the World Commission on Environment and Development: Our common future. <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>

Wesernetz Bremen GmbH (2021): Der Wärmeatlas für das Land Bremen. <https://www.wesernetz.de/ueber-uns/kompetenzen/waermeatlas> (aufgerufen am 08.01.2021)

Wesselink, M.; Liu, W.; Koornneef, J. & van den Broek, M. (2018): Conceptual market potential framework of high temperature aquifer thermal energy storage - A case study in the Netherlands. Energy, 147, 477–489. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.072>

Westphal, A.; Kleybocker, A.; Jesußeck, A.; Lienen, T.; Köber, R. & Wurdemann, H. (2017): Aquifer heat storage: abundance and diversity of the microbial community with acetate at increased temperatures. Environmental Earth Sciences, 76(2). <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6356-0>

Westphal, Anke; Lerm, Stephanie; Miethling-Graff, Rona; Seibt, Andrea; Wolfgramm, Markus & Würdemann, Hilke (2016): Effects of plant downtime on the microbial community composition in the highly saline brine of a geothermal plant in the North German Basin. *Applied microbiology and biotechnology*, 100(7), 3277–3290. <https://doi.org/10.1007/s00253-015-7181-1>

Weyer, H. (2013): Legal framework for the coordination of competing uses of the underground in Germany. „Clean Energy Systems in the Subsurface: Production, Storage and Conversion“. Proceedings of the 3rd Sino-German Conference „Underground Storage of CO₂ and Energy“, Goslar, Germany, 21–23 May 2013, 21–28. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37849-2_2

Whitman, W. B.; Coleman, D. C. & Wiebe, W. J. (1998): Prokaryotes: The unseen majority. *PNAS*, 95 (12), 6578–6583. <https://doi.org/10.1073/pnas.95.12.6578>

Wietschel, M.; Zheng, L.; Arens, M.; Hebling, C.; Ranzmeyer, O.; Schaadt, A.; Hank, C.; Sternberg, A.; Herkel, S.; Kost, C.; Ragwitz, M.; Herrmann, U. & Pfluger, G. (2021): Metastudie Wasserstoff. Auswertung von Energiesystemstudien. Studie im Auftrag des Nationales Wasserstoffrats. https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2021/Metastudie_Wasserstoff_Abschlussbericht.pdf

Willms, B. (2017): Säulenversuche mit hohen Kontaktzeiten zur Vorhersage temperaturinduzierter geochemischer Änderungen im Kontext oberflächennaher Wärmespeicherung im Untergrund. Masterarbeit

Wisotzky, F. (2011): Angewandte Grundwasserchemie, Hydrogeologie und hydrogeochemische Modellierung. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Bd. 53, Nummer 9, S. 473). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Wolf, S.; Fahl, U.; Blesl, M.; Voß, A. & Jakobs, R. (2014): Analyse des Potenzials von Industrie-Wärmepumpen in Deutschland. Forschungsbericht. Endbericht. <https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIB-KAT:827777922?cHash=4a3eac3427b34b89dc53b1595fa0bc5c>

WPZ – Wärmepumpen-Testzentrum Buchs (2019): Prüfergebnisse Sole/Wasser- und Wasser/Wasser-Wärmepumpen. Ausgabe 14.11.2019

Würdemann, H.; Westphal, A.; Lerm, S.; Kleyböcker, A.; Teitz, S.; Kasina, M.; Miethling-Graff, R.; Seibt, A. & Wolfgramm, M. (2014): Influence of microbial processes on the operational reliability in a geothermal heat store. Results of long-term monitoring at a full scale plant and first studies in a bypass system. *Energy Procedia*, 59 (2014), 412–417. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.396>

Wüstenhagen, K.; Baermann, A.; Bruns, J.; Busse, R.; Geyh, M.; Schneider, W. & Wienberg, R. (1991): Glazial geprägter Glimmerton als Schadstoffbarriere im Elbtal des Hamburger Raumes. <https://www.schweizerbart.de/publications/detail/isbn/9783510962020/>

Xu, N. & Saiers, J. E. (2010): Temperature and hydrologic controls on dissolved organic matter mobilization and transport within a forest topsoil. *Environmental Science and Technology*, 44(14), 5423–5429. <https://doi.org/10.1021/es1002296>

Zhu, K.; Bayer, P.; Grathwohl, P. & Blum, P. (2015): Groundwater temperature evolution in the subsurface urban heat island of Cologne, Germany. *Hydrological Processes*, 29(6), 965–978. <https://doi.org/10.1002/hyp.10209>

Zosseder, K.; Böttcher, F.; Davis, K.; Haas, C.; Halilovic, S. & Hamacher, T. (2022): GEO.KW. Kopplung des geothermischen Speicherpotenzials mit den wechselnden Anforderungen des urbanen Energiebedarfs zur effizienten Nutzung der regenerativen Energiequelle Grundwasser für die dezentrale Kälte- und Wärmebereitstellung in der Stadt. Gemeinsamer Schlussbericht [Report]. https://www.cee.ed.tum.de/fileadmin/w00cbe/hydro/Pictures/pic_projects/Schlussbericht_GEOKW.pdf