

Abschlussbericht
GEO.Cool
Kühlung mit oberflächennaher Geothermie
- Möglichkeiten, Grenzen, Innovation -

von

Roland Koenigsdorff, Michael Bachseitz, Meinhard Ryba
Hochschule Biberach (HBC)
Institut für Gebäude- und Energiesysteme (IGE)

Yannick Reduth, Thomas Schmidt, Mathieu Riegger, Frederik Janzen
Steinbeis Forschungsinstitut für solare
und zukunftsfähige thermische Energiesysteme (Solites)

Christian Moormann, Patrik Buhmann
Universität Stuttgart
Institut für Geotechnik (IGS)

Jürgen Braun, Giulia Giannelli
Universität Stuttgart
Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS)

Ingrid Stober, Jens C. Grimmer, Kirsten Drüppel
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Angewandte Geologie, Abteilung Geothermie (AGW-AG)

Philipp Blum, Hagen Steger, Paul Fleuchhaus, Carolin Tissen, Daniel Schweizer
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW-IG)

Detlev Doherr, Cäcilia Schallwig
Hochschule Offenburg

Förderkennzeichen: L7517003 - 17009

Laufzeit: 23.01.2017 – 30.09.2019

Die Arbeiten dieses Projekts wurden mit Mitteln
des Landes Baden-Württemberg durchgeführt.

Oktober 2020



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Inhalt

1	Zusammenfassung zum Gesamtprojekt.....	3
1.1	Motivation und Hintergrund.....	3
1.2	Zusammenarbeit innerhalb des Vorhabens und mit anderen Stellen.....	4
1.3	Übersicht über die Ergebnisse des Verbundvorhabens und deren Beitrag zu den Zielen des Förderprogramms des Zuwendungsgebers.....	5
1.4	Konzept zum Ergebnis- und Forschungstransfer	12
2	Schlussberichte der Teilprojekte	14
2.1	AP 1a: Bedarfe (HBC, FKZ: L75 17003)	14
2.2	AP 1b: Dynamische Simulationsrechnungen zur Erdwärmesondenanlage (Solites, FKZ: L75 17006).....	23
2.3	AP 2: Systemtechnik und Planung von Anlagen zur Kühlung mit oberflächennaher Geothermie (HBC, FKZ: L75 17003).....	44
2.4	AP 3: Analyse von Best-Practice-Beispielen (IGS, FKZ: L75 17008; HBC, FKZ: L75 17003)	68
2.5	AP 4a: Quantifizierung der Energieströme und des thermischen Verhaltens während der Kühlphase eines Gebäudes bei Verwendung einer Doppel-U- bzw. vier Koaxialerdwärmesonden am Feldstandort BauGrund Süd in Bad Wurzach (VEGAS, FKZ: L75 17007).....	75
2.6	AP 4b: Einfluss der Gesteinszusammensetzung auf die Wasserchemie und damit auf geothermische Nutzungssysteme, Beispiel: Gesteine des Schwarzwaldes (KIT/AGW-AG, FKZ: L75 17004).....	94
2.7	AP 4c: Wärmeübergang in der Strömungs- und Temperaturgrenzschicht zwischen Boden und bodenberührendem Bauteil (IGS, FKZ: L75 17008).....	98
2.8	AP 4d: Verfahren zur vereinfachten Berücksichtigung von Grundwasserströmungen durch Verwendung effektiver Wärmeleitfähigkeiten (Solites, FKZ: L75 17006)	109
2.9	AP 5: Genehmigungspraxis und Grenzwerte (KIT/AGW-IG, FKZ: L75 17005).....	125
2.10	AP 6a: Synopse und Transfer der Ergebnisse (HBC & Partner).....	137
2.11	AP 6b: Informations- und Management-Werkzeug für das Projekt (HS OG, FKZ: L75 17009).....	139

1 Zusammenfassung zum Gesamtprojekt

1.1 Motivation und Hintergrund

Neben dem Einsatz von oberflächennahen geothermischen Quellensystemen zur Wärmege-
winnung ist der Einsatz zu Kühlzwecken, d. h. der Wärmeeintrag in den Untergrund, inzwi-
schen ebenfalls sehr verbreitet. Jedoch liegt der Fokus der bisherigen Untersuchungen, Pub-
likationen, Regeln usw. zur oberflächennahen Geothermie überwiegend auf dem Einsatzfeld
Wärmeentzug. Beispielsweise beziehen sich die Untersuchungen zum Frostverhalten von
Erdwärmesonden (EWS) naturgemäß ausschließlich sowie die umfangreichen Feldtests von
erdgekoppelten Wärmepumpen des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE na-
hezu ausschließlich auf den Heizbetrieb (Wärmeentzug).

Gegenüber dem Heizbetrieb weist jedoch der Kühlbetrieb, d. h. Wärmeeintrag, sehr häufig
große energetische Vorteile durch die Möglichkeit der direkten geothermischen Kühlung
ohne den Einsatz einer Kältemaschine auf. Der kombinierte Heiz-Kühlbetrieb von oberflä-
chennahen geothermischen Quellenanlagen ist in der Regel sowohl energetisch, ökologisch
als auch ökonomisch die vorteilhafteste Betriebsweise, weil dieselbe Anlage für zwei Zwecke
genutzt wird und weil Wärmeentzug und Wärmeeintrag den Untergrund zumindest teilweise
wechselseitig regenerieren.

Wärmeentzug und Wärmeeintrag sind für den Untergrund und die darin betriebenen Anla-
gen jedoch unterschiedliche, asymmetrische Betriebsfälle. Während beim Wärmeentzug
z. B. das Erreichen des Frostbereichs in bestimmten Fällen einen kritischen Betriebszustand
darstellt und die Abkühlung des Untergrunds bis an diesen Punkt häufig unkritisch ist, ist die
Temperaturerhöhung beim Wärmeeintrag mitunter wesentlich schneller kritisch. So ist für
eine direkte geothermische Kühlung der nutzbare Temperaturbereich im Untergrund i. d. R.
anlagentechnisch stärker eingeschränkt als im Heizbetrieb, bei dem das Temperaturniveau
durch die Wärmepumpe auf das Nutztemperaturniveau angehoben wird. Diese Aspekte sind
insbesondere in Gegenden bedeutsam, in denen aufgrund natürlicher Bedingungen oder
anthropogener Einflüsse erhöhte Untergrundtemperaturen auftreten. Ebenso ist eine mögli-
che Beeinträchtigung der hydrogeologischen Verhältnisse durch den Wärmeeintrag (Tempe-
raturerhöhung) häufig anders zu beurteilen als eine Temperaturabsenkung durch Wärme-
entzug.

Schließlich sind die Kältetechnik (Kälteerzeugung, -verteilung, -nutzung und Rückkühlung)
und die Geothermie/Geologie traditionell zunächst getrennte Fachgebiete und Gewerke.
Ökologisch und ökonomisch vorteilhafte Lösungen der Kühlung mittels oberflächennaher
Geothermie erfordern jedoch eine genaue und enge Abstimmung der Anforderungen der
Teilsysteme beider Bereiche aufeinander. Gerade bei der energieeffizientesten Lösung, der
direkten geothermischen Kühlung, sind die Schnittstellen zwischen gebäude- bzw. nutzersei-
tiger Anlagentechnik und der Geothermieanlage besonders sorgfältig zu planen, auszuführen
und zu betreiben. Bereits um 1 K veränderte Betriebstemperaturen können dort die Kälte-
leistung und die Anlageneffizienz spürbar beeinflussen.

Dies bedeutet zunächst, dass für eine optimale Kühlung mittels oberflächennaher Geothermie die Schnittstellen zwischen den Anlagen und Gewerken interdisziplinär und systemübergreifend abgestimmt werden müssen. Darüber hinaus existieren für einen optimierten Kühlbetrieb gegenüber dem Heizbetrieb auf beiden Seiten z. T. veränderte Systemanforderungen. Beispiele hierfür sind die Bedeutung der Optimierung des geothermischen Wärmeübertragers sowie die Adaption von Kühlregistern in raumluftechnischen und anderen Kühlanlagen. Im Zusammenhang mit einem Heizbetrieb und anderen Wärme- und Kälteerzeugern ergeben sich darüber hinaus vielfältige Kombinationsmöglichkeiten. Diese sind einerseits eine Herausforderung an Planung, Ausführung und Betrieb. Sie bieten andererseits aber auch die Chance für Innovationen im Sinne von Verbesserungen bislang üblicher Systemtechnologien sowie ggf. für neue Anwendungsfälle und Systemkombinationen. Ein Beispiel hierfür ist die Möglichkeit einer hybriden Rückkühlung von Kälteanlagen, bei der die Abfuhr der anfallenden Abwärme in einem bestimmten Verhältnis auf die Außenluft und den Untergrund aufgeteilt wird.

1.2 Zusammenarbeit innerhalb des Vorhabens und mit anderen Stellen

Im durchgeführten Verbundvorhaben arbeiteten zum einen die Fachgebiete Geologie/Geothermie sowie Anlagen- und Systemtechnik von geothermischer Kältegewinnung und Kältenutzung der Projektpartner interdisziplinär zusammen, um den aktuellen Wissensstand der Kühlung mittels oberflächennaher Geothermie fachübergreifend zu erfassen, zu bewerten und die genannten Schnittstellenprobleme zu bearbeiten. Zum anderen wurden aus dieser interdisziplinären Betrachtungsweise ganzheitliche Hinweise zur Optimierung des geothermischen Kühlpotenzials sowie Anstöße für technische und planerische Innovationen für die Praxis entwickelt und in diese transferiert.

Die Zuordnung der einzelnen Arbeitspakete zu den bearbeitenden Institutionen sowie die Kooperation und Vernetzung im Projektverbund können der folgenden Übersicht (Tabelle 1) entnommen werden. Jeder der Projektpartner bearbeitet ein oder mehrere Arbeitspakete bzw. Teil-Arbeitspakete verantwortlich. Lediglich in AP 3 erfolgte eine Zusammenarbeit zwischen HBC und Uni Stuttgart, IGS unter Federführung des IGS; ebenso arbeiteten in AP 6a alle Projektpartner unter Federführung der HBC zusammen. Durch Letzteres und die regelmäßigen Workshops waren ein kontinuierlicher Informationsaustausch und eine abgestimmte Zusammenarbeit gewährleistet. Weiterhin brachten die Projektpartner Erkenntnisse und Ergebnisse aus anderen Arbeiten und Projekten in das Vorhaben mit ein.

Tabelle 1: Zuordnung der einzelnen Arbeitspakete zu den bearbeitenden Institutionen

	HS Biberach	Solites	Uni S- IGS	Uni S-VEGAS	KIT/AGW-AG	KIT/AGW-IG	HS Offenburg
AP 1: Bedarfe und Systemaspekte							
AP 1a: Bedarfe							
AP 1b: Dynamische Simulationsrechnungen zur Erdwärmesondenanlage							
AP 2: Systemtechnik und Planung von Anlagen zur Kühlung mit oberflächennaher Geothermie							
AP 3: Analyse von Best-Practice-Beispielen							
AP 4: Thermisches und hydrogeologisches Verhalten des Untergrunds							
AP 4a: Quantifizierung der Energieströme und des thermischen Verhaltens Bad Wurzach							
AP 4b: Einfluss der Gesteinszusammensetzung auf die Wasserchemie und damit auf geothermische Nutzungssysteme							
AP 4c: Wärmeübergang in der Strömungs- und Temperaturgrenzschicht zwischen Boden und bodenberührendem Bauteil							
AP 4d: Verfahren zur vereinfachten Berücksichtigung von Grundwasserströmungen durch Verwendung effektiver Wärmeleitfähigkeiten							
AP 5: Genehmigungspraxis und Grenzwerte							
AP 6: Synopse, Innovationspotenzial und Transfer							
AP 6a: Synopse und Transfer der Ergebnisse							
AP 6b: Informations- und Management-Werkzeug für das Projekt							

Die Kooperation und Koordination der Arbeiten erfolgte innerhalb des vom Land Baden-Württemberg finanzierten Landesforschungszentrums Geothermie (LFZG), wobei der LFZG-Partner Hochschule Biberach als direkter Projektkoordinator fungierte. Unterstützt wurde die Kooperation mit einem Informations- und Management- Werkzeug auf Serverbasis, welches die nach Arbeitspaketen strukturierten Aufgabenbereiche online zugänglich machte und den Kooperationspartnern einen direkten Zugriff auf die Daten, Unterlagen und Ausarbeitungen ermöglichte. In den turnusgemäßen Sitzungen des Wissenschaftlichen Beirats des LFZG wurde über das Projekt berichtet.

1.3 Übersicht über die Ergebnisse des Verbundvorhabens und deren Beitrag zu den Zielen des Förderprogramms des Zuwendungsgebers

In den nächsten Abschnitten werden getrennt nach Arbeitspaketen die jeweiligen Ergebnisse sowie deren Beitrag zu den Klimaschutzzielen der Landesregierung (Förderprogramm BWPLUS) zusammengefasst. Zu folgenden Zielen wurden Beiträge erarbeitet:

- Steigerung der Energieeffizienz der Kühlung und Kältebereitstellung:
AP 1, AP 2, AP 3, AP 4c und AP 4d
- Nutzung regenerativer Energien zur Kühlung und Kältebereitstellung:
AP 1, AP 2, AP 4a, AP 4c und AP 4d
- Begrenzung der thermischen Belastung des Untergrunds und des Grundwassers:
AP 2 und AP 5
- Minimierung der Schäden und Risiken durch den Eingriff in den Untergrund:
AP 4b

1.3.1 AP 1a: Bedarfe (HBC, FKZ: L75 17003)

Es wurden die Potenziale für die oberflächennahe Geothermie bei der Kältebereitstellung in den Sektoren GHD, Industrie, Haushalte und Verkehr anhand des Endenergieverbrauchs in Deutschland für das Jahr 2017 analysiert. Der Stromeinsatz für Kälteanwendungen liegt hier insgesamt bei ca. der Hälfte des Stromeinsatzes für Wärmeanwendungen. Für den Einsatz von Geothermie zur Kühlung eignen sich Anwendungen bei der Klimakälte in den Sektoren GHD, Industrie und Haushalte und bei der Prozesskälte in den Sektoren GHD und Industrie. In diesen Bereichen wurden im Jahr 2017 zusammen 65 % (123,3 PJ) der Endenergie für Kälteanwendungen umgesetzt. Es zeigt sich, dass in den unterschiedlichen Industriezweigen mit einer Vielzahl von Produktionsprozessen Prozesskälte in allen erdenklichen Leistungsklassen auf ganz unterschiedlichen Temperaturniveaus benötigt wird.

Deshalb wurden zudem für ausgesuchte Kälteanwendungen im produzierenden Gewerbe und der Industrie die Bandbreiten für die dort vorkommenden Temperaturniveaus der Kälteanwendungen recherchiert und in Bezug zur Grundwasser-/ungestörten Erdoberflächentemperatur gesetzt. Damit ist es möglich, Einsatzbereiche der direkten geothermischen Kühlung oder der maschinellen Kühlung mit Rückkühlung über die ONG festzulegen.

1.3.2 AP 1b: Dynamische Simulationsrechnungen zur Erdwärmesondenanlage (Solites, FKZ: L75 17006)

Die Nutzung oberflächennaher Geothermie mit Erdwärmesonden eignet sich sowohl zur regenerativen Wärme- als auch zur Kältebereitstellung. Zur Beurteilung eines energetisch effizienten und wirtschaftlichen Betriebs ist die Kenntnis des Einflusses verschiedener Parameter auf das Betriebsverhalten der Erdwärmesondenanlage im wechselnden Heiz- und Kühlbetrieb notwendig. In früheren Arbeiten lag der Fokus überwiegend entweder auf dem reinen Heiz- oder dem reinen Kühlbetrieb. In diesem Arbeitspunkt wurde mit Hilfe einer Simulationsstudie der Einfluss und die Sensitivität verschiedener Parameter auf die Effizienz von Erdwärmesondenanlagen und die Untergrundverhältnisse für den wechselnden Heiz- und Kühlbetrieb im langfristigen Anlagenbetrieb untersucht. Untersucht wurden Parameter innerhalb und außerhalb der Erdwärmesonden sowie den Erdwärmesonden durch das Versorgungssystem aufgeprägte Systemparameter.

Die Simulationsergebnisse zeigen, im Vergleich zu den Ergebnissen bisheriger Untersuchungen für den reinen Heizbetrieb, einen ähnlichen Einfluss der Parameter innerhalb der Erdwärmesonde für den wechselnden Heiz- und Kühlbetrieb. Besonders starke Auswirkungen auf den verbleibenden Energiebedarf zur Kühlung des betrachteten Bürogebäudes zeigen Parameterkonfigurationen, die zu einer Reduzierung der direkten geothermischen Kühlung und damit zu einer vermehrten Kompressionskühlung führen. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn die Austrittstemperaturen aus den Erdwärmesonden zu hoch für eine direkte geothermische Kühlung werden. Als optimaler Abstand zwischen den Erdwärmesonden hat sich im betrachteten Fall für den wechselnden Heiz- und Kühlbetrieb ein Abstand von 4 m ergeben. Dabei ist für einen möglichst geringen verbleibenden Energieverbrauch zur Heizung und Kühlung eine gedrungene Anordnung der Erdwärmesonden einer linienförmigen Anord-

nung vorzuziehen. Ebenso ist ein möglichst ausgeglichenes Verhältnis von Heiz- und Kühllasten vorteilhaft.

1.3.3 AP 2: Systemtechnik und Planung von Anlagen zur Kühlung mit oberflächennaher Geothermie (HBC, FKZ: L75 17003)

In diesem Arbeitspaket wurden zunächst die grundsätzlichen Besonderheiten der geothermischen Kühlung zusammengetragen. Thematisiert werden die Temperaturverhältnisse und empfohlenen Temperaturänderungen im Untergrund, die Besonderheiten bei Systemen mit thermischer Rückwirkung (Speichereffekt), die Ermittlung der geothermieseitigen Lasten inklusive einer Methode zur Charakterisierung des Lastverlaufs sowie die Anforderungen an die Auslegung von Wärmeübertragern.

Daraus wurden konkrete Hinweise für die Planung, den Betrieb und die Effizienzbewertung von Anlagen zur geothermischen Kühlung erarbeitet, welche in [Bachseitz2020] und [Ryba2020] zu finden sind.

Als exemplarischer Anwendungsfall wurden eine Rechenzentrums Kühlung untersucht und konkrete Vorschläge für die Anlagentechnik mit unterschiedlichen Kühlmöglichkeiten erarbeitet (siehe auch [Schelkle2018]).

Zudem wurde eine Methode bzw. ein Werkzeug zur Abschätzung des geothermischen Kühlpotenzials von Erdwärmesondenanlagen entwickelt und als Excel-Anwendung umgesetzt.

1.3.4 AP 3: Analyse von Best-Practice-Beispielen (IGS, FKZ: L75 17008; HBC, FKZ: L75 17003)

Durch die langjährige Bearbeitung zahlreicher Geothermieprojekte steht den Teilnehmern dieses Verbundprojektes eine Vielzahl unterschiedlicher Messdaten verschiedener Geothermieanlagen zur Verfügung. Der intensive Austausch über die Erfahrungen bei der Ausrüstung von Anlagen mit Messtechnik sowie der Messdatenerhebung hat gezeigt, dass an den jeweiligen Forschungseinrichtungen die unterschiedlichsten Methoden und Herangehensweisen zum Monitoring von Geothermieanlagen bestehen.

In einem ersten Schritt wurden die vorhandenen Messdaten gesichtet und so strukturiert, dass diese nun für alle Teilnehmer des Verbundprojektes "lesbar" zur Verfügung stehen. Hierdurch wurde ein großer Datenpool geschaffen, der z. B. für die Validierung von numerischen Berechnungen genutzt werden kann.

In einem zweiten Schritt wurde ein Vorschlag zur Ausrüstung von Erdwärmesondenanlagen mit Messtechnik erarbeitet. Dieser kann zu Beginn eines Projektes als Leitfaden zur Anordnung und Auswahl von Messinstrumenten dienen und beschäftigt sich darüber hinaus auch mit einer strukturierten Dokumentation des Erdwärmesondenprojektes.

1.3.5 AP 4a: Quantifizierung der Energieströme und des thermischen Verhaltens während der Kühlphase eines Gebäudes bei Verwendung einer Doppel-U- bzw. vier Koaxialerdwärmesonden am Feldstandort Baugrund Süd in Bad Wurzach (VEGAS, FKZ: L75 17007)

Eine Nutzung sowohl zur Kälte- als auch Wärmeversorgung ist die Voraussetzung für einen optimierten Einsatz erdgekoppelter Wärmepumpen.

Passive Kühlung oder „natural cooling“ mit Erdwärmesonden (EWS) ist leicht zu realisieren und erfolgt „passiv“ durch eine Kühlstation, häufig mit einem Plattenwärmetauscher, mit deren Hilfe Wärme auf den Solekreislauf der Sonden übertragen wird. Letztlich beruht das passive Kühlen nur auf einer Regelung, die die Kühlprimärpumpe einschaltet, ohne dass der Verdichter der Wärmepumpe angetrieben wird. Solange die Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Bodentemperatur groß genug ist, kann die Raumwärme direkt (passiv) an das Erdreich abgegeben werden. Bei dieser Betriebsweise regeneriert sich der Untergrund schneller als bei ausschließlichem Heizeinsatz.

Ein Beispiel für solch einen Betrieb ist die oberflächennahe Geothermieanlage auf dem Gelände der Firma BauGrund Süd. Die Anlage besteht aus einer 190 m langen Doppel-U-Erdwärmesonde sowie vier in Reihe geschalteten 23 m langen Koaxialsonden und wird gemischt betrieben: im Winter wird mit Hilfe einer Wärmepumpe geheizt während im Sommer „passiv“ gekühlt wird. Von April 2011 bis heute stehen Datensätze eines Monitoringsystems auf dem Gelände der Firma BauGrund Süd zur Verfügung. Dieses Monitoringsystem wurde im April 2011 im Rahmen des Projekts „Geomatrix.bw“ aufgebaut und auch nach dem Projektende im März 2014 wurden und werden weiterhin Anlagedaten erfasst.

Im Rahmen von „GEO.Cool“ wurde das Überwachungssystem überprüft, der Datenfernzugriff wiederhergestellt und die alten sowie aktuellen Datensätze intensiv bearbeitet, um die Verwendung der Daten durch Dritte zu ermöglichen. Das ermöglichte die Berechnung der Entnahmeenergie vom Boden im Heizbetrieb und der zugeführten Energie im Kühlbetrieb sowie die Beobachtung der Reaktion des Aquifers auf die gemischte Betriebsweise (Heizen/passives Kühlen) der Geothermieanlage über die letzten 9 Jahre. Anhand der vorhandenen Daten wurde die Quantifizierung der Energieströme der Wärmepumpenanlage ermöglicht. Die Ergebnisse zeigen die Effizienz eines gekoppelten Betriebs (Heizen/passives Kühlen): Die Untergrundtemperatur blieb im Laufe der Jahre stabil und der COP der Wärmepumpe hoch. Das bedeutet, dass das System gut dimensioniert ist und der Untergrund im Laufe eines Jahres regeneriert.

1.3.6 AP 4b: Einfluss der Gesteinszusammensetzung auf die Wasserchemie und damit auf geothermische Nutzungssysteme, Beispiel: Gesteine des Schwarzwaldes (KIT/AGW-AG, FKZ: L75 17004)

Die Ergebnisse aus AP4b zeigen, dass durch Fluid-Gesteins-Wechselwirkungen Ionen aus granitischen Gesteinen gelöst werden. Die Analyse dieser Wässer zeigt aber auch, dass selbst bei sehr großen Oberflächen, die durch eine Pulverisierung der Gesteine erreicht wurde, und bei Temperaturen von 70 °C, was deutlich höheren Temperaturen entspricht als sie normalerweise im Zusammenhang mit Erdwärmesonden auftreten, keine Gefährdung für eingebaute Erdwärmesonden hinsichtlich Betonaggressivität in granitischen Umgebungen ausgeht.

1.3.7 AP 4c: Wärmeübergang in der Strömungs- und Temperaturgrenzschicht zwischen Boden und bodenberührendem Bauteil (IGS, FKZ: L75 17008)

Um mit einem Wärmeübertrager im Untergrund effizient zu kühlen, ist die eingetragene Wärme möglichst schnell vom Ort des Energieeintrags abzuführen. In diesem Zusammenhang bieten sich Erdwärmesonden an, die sich in strömendem Grundwasser befinden.

Wenn ein Fluid über eine temperierte Oberfläche strömt stellen sich sogenannte Grenzschichteffekte ein, die in der Disziplin der Wärmeübertragung durch sogenannte Nußelt-Korrelationen beschrieben werden. In der oberflächennahen Geothermie werden diese Grenzschichteffekte am Übergang von erdgekoppelten Wärmeübertragern zum Aquifer bis dato vernachlässigt.

Im Zuge der Adaption eines Versuchstandes am Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart wurden erste Versuchsreihen durchgeführt, um einen möglichen Wärmeübergang von einer Erdwärmesonde auf den Aquifer beschreibbar zu machen. Hierdurch wurde die Grundlage für weiterführende Untersuchungen zur Beschreibung des Wärmetransportes von Geothermieabsorbern in strömendem Grundwasser gelegt.

1.3.8 AP 4d: Verfahren zur vereinfachten Berücksichtigung von Grundwasserströmungen durch Verwendung effektiver Wärmeleitfähigkeiten (Solites, FKZ: L75 17006)

Für die Durchführung mehrjähriger systemweiter Simulationsrechnungen zur Systemdimensionierung bzw. Systemoptimierung von Erdwärmesonden ist die Verwendung detaillierter FEM Modelle für den Untergrund wegen langer Rechenzeiten nicht praktikabel. Einfache Auslegungsprogramme wie EED, GEO-HAND^{light}, etc. berücksichtigen in der Regel keine Grundwasserbewegung im Untergrund. Die fehlende hinreichende Möglichkeit bzw. das Ausbleiben einer detaillierten Berücksichtigung von Grundwasserbewegungen soll durch die Verwendung von effektiven Wärmeleitfähigkeiten für die Beschreibung des Untergrunds kompensiert werden. Ein vereinfachtes FEFLOW-Simulations-Modell steht dabei stellvertretend für zahlreiche andere Rechenprogramme für Erdwärmesonden (EWS), die keine detail-

lierte Berücksichtigung von Grundwasserflüssen erlauben. Demgegenüber steht ein FEFLOW-Simulations-Modell das einen Grundwasserleiter einbezieht. Beide Modelle werden mit demselben EWS-Feld und dem kombinierten Heiz- und Kühlbetrieb beaufschlagt. Als Vergleichsparameter beider Modelle wird die entzogene und eingetragene Wärmemenge pro Jahr herangezogen.

Es hat sich gezeigt, dass die Ergebnisse des angewandten Verfahrens, im Falle einer geringen Filtergeschwindigkeit, besser sein können als bei der Ignorierung der Grundwasserströmung, da die Jahressummen aus eingetragenen und entzogenen Wärmemengen eine höhere Übereinstimmung zeigen. Mit steigender Intensität der Grundwasserfließbewegung divergieren die Ergebnisse zwischen einer Berechnung mit detaillierter Betrachtung des Untergrunds und eines vereinfachten Untergrundmodells. Mit dem gewählten Vorgehen konnte die ermittelte effektive Wärmeleitfähigkeit jedoch nicht so bestimmt werden, dass sie generell als hinreichender Parameter für die Vorhersage von zu erwartenden Wärmeeinspeise- und Entzugsmengen herangezogen werden kann. Als ein maßgeblicher Faktor für die Konsistenz der Ergebnisse aus TRT und Langzeitsimulation konnte die maximale zeitliche Größe eines Berechnungsschrittes identifiziert werden. Die maximale Zeitschrittweite bestimmt die Genauigkeit der Ergebnisse auf Kosten der Rechenzeit und konnte daher nicht beliebig verkleinert werden. Die Verwendung eines Parameteridentifikationsverfahrens als Alternative zum TRT zur Bestimmung von geeigneten Werten für eine effektive Wärmeleitfähigkeit für diesen Anwendungsfall, war aufgrund des erheblichen Rechenaufwandes noch nicht möglich.

1.3.9 AP 5: Genehmigungspraxis und Grenzwerte (KIT/AGW-IG, FKZ: L75 17005)

Im urbanen Bereich ist die Grundwassertemperatur im Vergleich zum ländlichen Bereich um 3 – 7 K erhöht (Menberg et al. 2013a, b). Untersuchungen in AP 5b haben allerdings gezeigt, dass die erhöhten Temperaturen weniger auf die geothermische Nutzung des Untergrundes, als vielmehr auf weitere anthropogene Wärmequellen wie die städtische Bebauung oder die Infrastruktur im urbanen Untergrund (z. B. Fernwärme- und Abwasserleitungen) zurückzuführen sind (Menberg et al., 2013b, Tissen et al., 2019). Trotz des erheblichen Einflusses werden diese Wärmequellen in den Genehmigungsrichtlinien nicht berücksichtigt.

Untersuchungen der Grundwasserfauna im Karlsruher Stadtgebiet (Schweikert, 2014) haben zudem gezeigt, dass kein direkter Zusammenhang zwischen der vorherrschenden Grundwasserfauna und der thermischen Beeinflussung des Grundwassers besteht. Deshalb empfehlen wir eine Differenzierung zwischen Gebieten, in denen noch natürliche Grundwasserbedingungen mit einer intakten Grundwasserfauna vorliegen und Gebieten, in denen das Grundwasser bereits unnatürlich und anthropogen beeinflusst ist.

1.3.10 AP 6a: Synopse und Transfer der Ergebnisse (HBC & Partner)

Die Ergebnisse und Erfahrungen aus den einzelnen Arbeitspaketen wurden in zwei Workshops vorgestellt und die Querbezüge der einzelnen Themen diskutiert. Ein Workshop befasste sich schwerpunktmäßig mit dem Entwurf der Konfiguration einer standardisierten Messtechnik für ONG-Anlagen, in den die Erfahrungen der Projektpartner aus verschiedenen Monitoringprojekten einfließen (s. AP 3).

Neben den Erfahrungen aus den Monitoringprojekten wurden die wesentlichen Aspekte und Hinweise für die Planung, den Betrieb und die Effizienzbewertung von ONG-Anlagen zur (direkten) Kühlung zusammengetragen, diskutiert und in den Planungshinweisen [Bachseitz2020] und Empfehlungen zur Effizienzbewertung [Ryba2020] dokumentiert.

Aus dem Erfahrungsaustausch der Projektpartner ergab sich auch der Bedarf einer Möglichkeit, das geothermische (Kühl-)Potenzial einer Erdwärmesondenanlage abschätzen zu können, woraufhin eine Methode (s. AP 2) entwickelt und zunächst in einer Excel-Anwendung umgesetzt wurde. Es ist vorgesehen diese im Projektnachgang in die Auslegungssoftware GEO-HAND^{light} (Programmbeschreibung siehe [Koenigsdoeff2011]) zu integrieren.

1.3.11 AP 6b: Informations- und Management-Werkzeug für das Projekt (HS OG, FKZ: L75 17009)

Komplexe Forschungsprojekte mit unterschiedlichen Arbeitspaketen und mehreren Forschungspartnern benötigen spezielle digitale Unterstützung, um die Teilergebnisse zu kommunizieren, die strukturierten Abläufe der miteinander verzahnten Forschungstätigkeiten zu kommunizieren und aufeinander abzustimmen. Damit können die Projektarbeiten gefördert, strukturiert und zur kollaborativen Arbeit der einzelnen Projektpartner genutzt werden.

Es hat sich gezeigt, dass es zwar kommerzielle Software-Lösungen für diese Art der Projektbegleitung und -unterstützung gibt, diese aber in jedem Falle auf das jeweilige Forschungsprojekt angepasst werden müssen ("Customizing"). Dieses bezieht sich nicht so sehr auf die Funktionalität, die wie in einem Baukastensystem zusammengefügt werden kann, sondern eher in der Strukturierung des Forschungsvorhabens in Arbeitspakete, Aspekte und Aufgaben der einzelnen Forschungspartner. Diese Aufgabe ist aber von immenser Bedeutung für die Nutzbarkeit und die Effektivität eines solchen Systems, sodass profundes Fachwissen über die geplanten Forschungstätigkeiten einerseits, aber andererseits auch detaillierte Informationen über die Projektplanungen der Forschungspartner verfügbar sein muss.

Neben der Systeminstallation und Anpassung waren die Partnerschulungen und das Systemhandling wichtige Schritte, um den Einsatz des Groupware-Servers für das Forschungsprojekt zur kollaborativen Nutzung durch die Projektpartner erfolgreich gestalten zu können.

1.4 Konzept zum Ergebnis- und Forschungstransfer

1.4.1 Veröffentlichung der Ergebnisse

Für alle Arbeitspakete erfolgte und erfolgt zukünftig die Veröffentlichung der Ergebnisse auf den in der Wissenschaft üblichen Wegen:

- wissenschaftliche Veröffentlichungen
- Vorträge auf Konferenzen und wissenschaftlichen Tagungen (Statuskolloquien, Geothermie- und Wärmepumpen-/Kältetechnik-Konferenzen).

Die einzelnen Beiträge der Projektpartner sind in den folgenden Abschnitten des Kapitels 2 (Schlussberichte der Teilprojekte) aufgeführt.

Ebenso sollen die Ergebnisse auch der weiteren (Fach-)Öffentlichkeit bekannt gemacht werden durch:

- Verbreitung durch Vorträge/Beiträge in Workshops und Tagungen für Planer, Behörden usw.
- Weiterbildungsveranstaltungen für Genehmigungsbehörden, Fachplaner, Geologen usw. bzw. Planerschulungen
- Einbringen der Untersuchungsergebnisse, recherchierten Erfahrungen und erarbeiteten Empfehlungen in die Erarbeitung technischer Richtlinien (z. B. VDI-Richtlinie, VDMA-Arbeitsblatt)
- Veröffentlichung eines Leitfadens
- Lehrveranstaltungen an den Hochschulen.

1.4.2 Nutzen und praktische Verwertbarkeit der Ergebnisse, Ergebnis- und Forschungstransfer

Für den wechselseitigen Einsatz von Erdwärmesonden (EWS) zum Heizen und Kühlen wurden geeignete Konfigurationen von EWS-Feldern ermittelt, welche eine hohe Effizienz der Erdwärmesondenanlage ermöglichen. Diese fließen direkt in die Planungspraxis derartiger Anlagen ein.

Es wurden Untersuchungen zu den Kälte-/Kühlbedarfen und den für die direkte Kühlung über ONG geeigneten Temperaturniveaus durchgeführt sowie spezielle Anforderungen an die Anlagen- und Systemtechnik und Planung von Anlagen zur Kühlung mit ONG ausgearbeitet. Diese wurden in Planungshinweisen [Bachseitz2020] und Empfehlungen für die Effizienzbewertung [Ryba2020] zusammengeführt, welche eine direkte Hilfestellung für Planer und Betreiber darstellen.

Die in AP 4a untersuchte ONG-Anlage zeigt die praktische Vorgehensweise für das Monitoring einer ONG-Anlage. Sie dient für zukünftige Projekte als Best-Practice-Beispiel.

Die Untersuchungen zum Einfluss der Gesteinszusammensetzung auf die Wasserchemie zeigen keine Gefährdung für eingebaute Erdwärmesonden hinsichtlich Betonaggressivität in granitischen Umgebungen und stellen damit einen wichtigen Beitrag zur Minimierung der Schäden und Risiken durch den Eingriff in den Untergrund dar.

Es wurde die Grundlage für weiterführende Untersuchungen zur Beschreibung des Wärmetransportes von Geothermieabsorbern in strömendem Grundwasser gelegt. Da der Wärmeübergang den Temperaturunterschied zur Wärmesenke wesentlich beeinflusst, ist dies ein kritischer Punkt, der über den Einsatz einer direkten geothermischen Kühlung entscheidet. Hier sind weitere Untersuchungen notwendig.

Die Untersuchungen der Verwendung einer effektiven Wärmeleitfähigkeit über die gesamte Bohrlochlänge an Stelle einer detaillierten Betrachtung jeder einzelnen Bodenschicht mit ggf. vorhandenem Grundwasserfluss bilden eine wichtige Grundlage zur Weiterentwicklung von Programmen, z. B. EED und GEO-HAND^{light}, welche bislang keine Grundwasserströmung berücksichtigen. Da mit dem gewählten Vorgehen die ermittelte effektive Wärmeleitfähigkeit jedoch nicht so bestimmt werden konnte, dass sie generell als hinreichender Parameter für die Vorhersage von zu erwartenden Wärmeeinspeise- und Entzugsmengen herangezogen werden kann, besteht hier weiter ein Forschungsbedarf.

Die Analyse und Übersicht über die Regelungen der Bundesländer zur thermischen Nutzung des Untergrundes sowie die erarbeiteten Vorschläge für die Nutzung von ONG als Wärmesenke insbesondere in bereits durch anthropogene Wärmequellen belasteten Regionen (Wärmeinseln) bilden eine Diskussionsgrundlage für Genehmigungsbehörden. Die gewonnenen Erkenntnisse helfen bei der Entwicklung von einheitlichen Maßstäben für eine Umweltbewertung oberflächennaher geothermischer Systeme.

Die Erfahrungen zur softwareunterstützten Zusammenarbeit fließen direkt in die Planung und Durchführung künftiger Verbundforschungsprojekte ein und dienen damit der Effizienzsteigerung und Qualitätsverbesserung.

2 Schlussberichte der Teilprojekte

2.1 AP 1a: Bedarfe (HBC, FKZ: L75 17003)

2.1.1 Abstract zu den Forschungsergebnissen AP 1a

In diesem Arbeitspaket wird eine Übersicht über Kühlbedarfe verschiedener Branchen und deren Temperaturniveaus mit Einordnung der Einsetzbarkeit der ONG zur direkten Kühlung oder maschinellen Kühlung mit Rückkühlung über die ONG gegeben.

Es werden die Potenziale für die oberflächennahe Geothermie bei der Kältebereitstellung in den Sektoren GHD, Industrie, Haushalte und Verkehr anhand des Endenergieverbrauchs in Deutschland für das Jahr 2017 analysiert.

Es zeigt sich, dass in den unterschiedlichen Industriezweigen mit einer Vielzahl von Produktionsprozessen Prozesskälte in allen erdenklichen Leistungsklassen auf ganz unterschiedlichen Temperaturniveaus benötigt wird.

Es werden für ausgesuchte Kälteanwendungen im produzierenden Gewerbe und der Industrie die Bandbreiten für die dort vorkommenden Temperaturniveaus der Kälteanwendungen dargestellt und in Bezug zur Grundwasser-/ungestörten Erdoberflächentemperatur gesetzt. Damit ist es möglich, Einsatzbereiche der direkten geothermischen Kühlung oder der maschinellen Kühlung mit Rückkühlung über die ONG festzulegen.

Zudem werden Hinweise gegeben, wie von Seiten des Nutzers und der Anlagentechnik eine direkte geothermische Kühlung ermöglicht werden kann.

2.1.2 Motivation und Hintergründe

In der Zukunft ist auch in Deutschland und insbesondere in Baden-Württemberg von einem zunehmenden Kältebedarf insbesondere zur Klimatisierung aufgrund des Klimawandels auszugehen. Die Analyse des Endenergieverbrauchs in Deutschland für das Jahr 2017 auf Basis der Anwendungsbilanzen des AG-Energiebilanzen e. V. [AGEB2019] zeigt, dass in den Sektoren Industrie, GHD, Haushalte und Verkehr 2,1 % (228,6 PJ) des Endenergieverbrauchs auf Kälteanwendungen entfallen. Dem stehen 53,4 % (4.919,5 PJ) des Endenergieverbrauchs für Wärmeanwendungen und 39,0 % (3.588,4 PJ) für mechanische Energieanwendungen gegenüber. Der Endenergieeinsatz für Wärmeanwendungen beträgt mehr als das 20-fache des Endenergieeinsatzes für Kälteanwendungen.

Während der Anteil von Strom am Endenergieverbrauch für die Wärmebereitstellung nur 9,0 % beträgt, beträgt der Stromanteil am Endenergieverbrauch bei der Kältebereitstellung jedoch 97,3 %. Der Stromeinsatz für Kälteanwendungen liegt somit insgesamt bei ca. der Hälfte des Stromeinsatzes für Wärmeanwendungen. Am Stromverbrauch in den Sektoren Industrie, GHD, Haushalte und Verkehr haben Kälteanwendungen einen Anteil von 11,9 %, der in etwa gleichauf mit den Anteilen für Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) von 10,9 % und für Beleuchtung von 13,3 % sowie hinter den Anteilen des Stromver-

brauchs für mechanische Energieanwendungen (40,1 %) und für Wärmeanwendungen (23,8 %) liegt.

Neben der regenerativen Stromerzeugung aus Sonne und Wind als zentralem Baustein der Energiewende sind weitere Bausteine die Sektorenkopplung und die möglichst effiziente Energienutzung. Bei den beiden letzteren Bausteinen kann oberflächennahe Geothermie (ONG) zum Einsatz kommen. Durch den mit der ONG einhergehenden Einsatz von Wärmetransformatoren als Wärmepumpe bzw. Kältemaschine ergibt sich eine Kopplung zwischen Strommarkt und Wärme- oder/und Kältemarkt. Je nach Art der ONG und den geologischen Voraussetzungen können durch die ONG auch Speichermöglichkeiten für thermische Energie erschlossen werden.

Im Verbundprojekt GEO.Cool lag der Fokus auf dem Aspekt des Einsatzes von ONG zur Effizienzsteigerung bei Kälteanwendungen mit einem Schwerpunkt auf der direkten geothermischen Kühlung als einer besonders effizienten Art der Kältebereitstellung. Entsprechend sind als Ergebnis von AP 1a Potenziale für den Einsatz von ONG zur Kältebereitstellung in den Sektoren Industrie, GHD, Haushalte und Verkehr dargestellt.

2.1.3 Aufgabenstellung

In diesem Arbeitspaket sollen die wesentlich in Art und Charakteristik unterschiedlichen verbraucherseitigen Kältebedarfe in Gebäuden, Gewerbe, Industrie usw. (z. B. Raumkühlung, Serverkühlung usw.), wie sie in der Kälteanlagenbranche erhoben und klassifiziert sind, systematisch im Hinblick auf die grundsätzlichen Möglichkeiten und erreichbaren Effizienzen des Einsatzes oberflächennaher Geothermie analysiert werden. Dafür werden die Einsatzmöglichkeiten der geothermischen Kühlung abhängig von Leistungsklasse und Lastgang des jeweiligen Kältebedarfs sowie vom benötigten Temperaturniveau bei konventioneller Kältebereitstellung und -nutzung qualitativ bewertet. Ebenso sollen nutzer- und nutzeranlagenseitige Beeinflussungsmöglichkeiten der resultierenden geothermieseitigen Lastprofile dargestellt werden.

2.1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Eine umfassende Zusammenstellung von Kältebedarfen mit Angaben zum Temperaturniveau und Lastverlauf ist derzeit nicht vorhanden. Die Erhebung und Zusammenführung derartiger Informationen ist Bestandteil von aktuellen Forschungsprojekten, welche während der und über die Laufzeit dieses Vorhabens hinaus bearbeitet werden. Beispielhaft sei hier das Projekt "synGHD – Synthetische Lastprofile für eine effiziente Versorgungsplanung für Nicht-Wohngebäude" genannt, welches synthetische Lastprofile für den Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistung (GHD) als Grundlage für Planungsprozesse zum Ziel hat.

2.1.5 Ausführliche Darstellung der Ergebnisse AP 1a

Potenziale für ONG bei der Kältebereitstellung in den Sektoren GHD, Industrie, Haushalte und Verkehr

Die folgende Abbildung 1 visualisiert die Anteile des Endenergieeinsatzes für Kälteanwendungen in den Sektoren GHD, Industrie, Haushalte und Verkehr und in welchen Bereichen der Einsatz einer geothermischen Kühlung von der Kälteanwendung her grundsätzlich möglich ist.

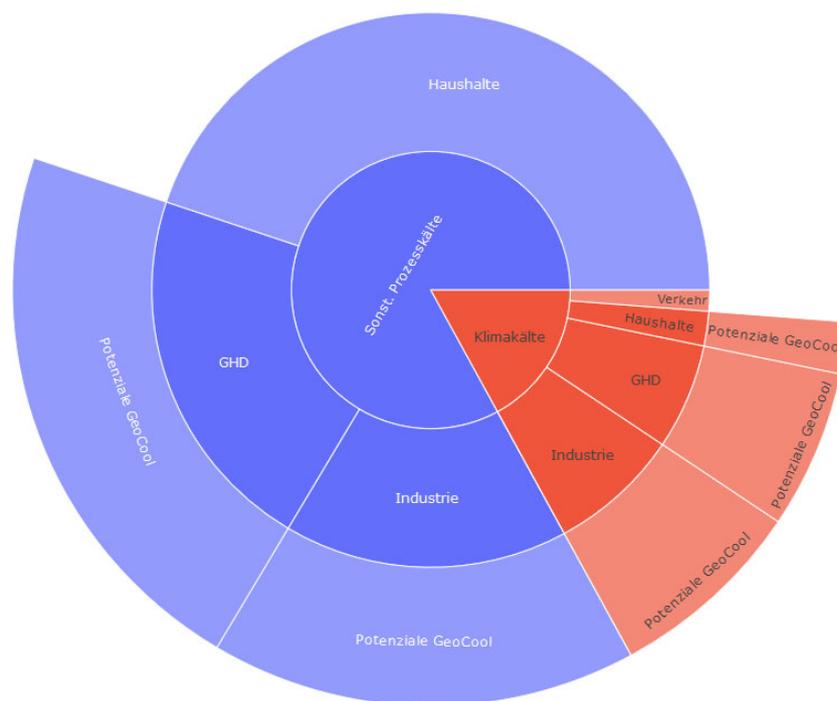


Abbildung 1: Visualisierung der Anteile des Endenergieeinsatzes für Kälteanwendungen in den Sektoren GHD, Industrie, Haushalte und Verkehr für das Jahr 2017 in Deutschland

Beim Endenergieeinsatz für Prozesskälte in Haushalten handelt es sich nahezu ausschließlich um Strom für Kühlschränke und Gefriertruhen. Der Einsatz einer geothermischen Kühlung ist hier, wie bei den Kälteanwendungen im Verkehrssektor, nicht möglich. Für den Einsatz von Geothermie zur Kühlung verbleiben damit Anwendungsmöglichkeiten bei der Klimakälte in den Sektoren GHD, Industrie und Haushalte und bei der Prozesskälte in den Sektoren GHD und Industrie. In diesen Bereichen wurden im Jahr 2017 zusammen 65 % (123,3 PJ) der Endenergie für Kälteanwendungen umgesetzt.

Während im Sektor Haushalte eine mögliche Anwendung für ONG zur Kühlung nur in der Raumkonditionierung liegt, umfassen die Sektoren GHD und Industrie eine Vielzahl von verschiedenen Nutzungen und unterschiedlichste Prozessanwendungen, in denen ONG zur Kühlung potenziell Anwendung finden kann. Grundsätzlich besteht ein hohes Anwendungs-

tenzial für die geothermische Kühlung in den beiden Sektoren im Bereich der Klimakälte, da hier i. d. R. vergleichsweise kleine Kühlleistungen abgefordert werden. Die Zieltemperaturen liegen i. d. R. im Bereich der üblichen Raumtemperaturen, die für den Aufenthalt von Personen geeignet sind.

Anders gelagert ist dies bei den Kälteanwendungen in Prozessen von Gewerbe und Industrie. Die folgende Abbildung 2 enthält eine Visualisierung der Anteile des Endenergiebedarfes für Kälteanwendungen in den unterschiedlichen Industriezweigen gemäß [ISI2019].

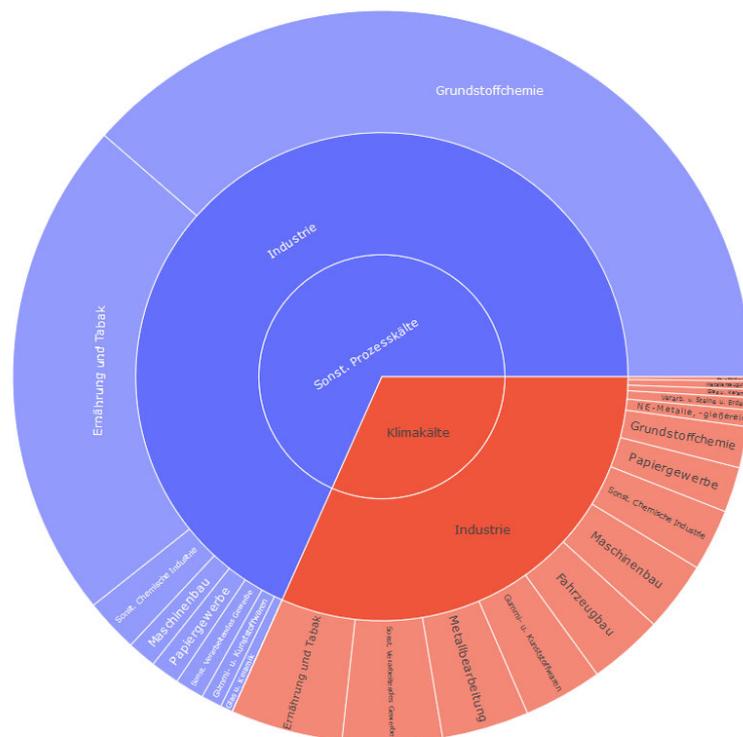


Abbildung 2: Visualisierung der Anteile des Endenergieeinsatzes für Kälteanwendungen in unterschiedlichen Industriezweigen für das Jahr 2017 in Deutschland

Es wird deutlich, dass in den unterschiedlichen Industriezweigen mit einer Vielzahl von Produktionsprozessen Prozesskälte in allen erdenklichen Leistungsklassen auf ganz unterschiedlichen Temperaturniveaus benötigt wird. Zusätzlich weisen die Bedarfslastgänge je nach Art des Prozesses unterschiedliche zeitliche Verläufe auf. In Bezug auf möglichst einen Einsatz der effizienten direkten geothermischen Kühlung spielt das Temperaturniveau der Kälteanwendung eine entscheidende Rolle. Für eine vollständige Abdeckung eines Kühlprozesses mittels direkter geothermischer Kühlung muss die Zieltemperatur des Prozesses oberhalb der Temperatur der Senke bei Belastung liegen. In der Abbildung 3 auf Seite 19 sind unter anderem für ausgesuchte Kälteanwendungen im produzierenden Gewerbe und der Industrie

Bandbreiten für die dort vorkommenden Temperaturniveaus der Kälteanwendungen angegeben und in Bezug zur Grundwasser-/ungestörten Erdreichtemperatur gesetzt.

Durch die gesetzlichen Grenzwerte für die Temperaturen beim Einbringen thermischer Energie in den Untergrund einerseits (siehe AP 5) und durch die jeweils am Standort vorliegenden geologischen Gegebenheiten (z. B. Grundwassertemperatur, Ergiebigkeit, ungestörte Erdreichtemperatur, Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds, Fläche) ergeben sich die Leistungsgrenzen für den möglichen Einsatz von ONG am jeweiligen Standort, den es gilt durch eine Potenzialanalyse zu ermitteln (Potenzialanalyse siehe Abschnitt „Methode/Werkzeug zur Abschätzung des geothermischen Kühlpotenzials von Erdwärmesondenanlagen“).

Nach Kenntnis des geothermischen Potenzials vor Ort lassen sich gewerbliche Produktionsprozesse und Industrieprozesse auf einen möglichen Einsatz von ONG zur Energiebedarfsdeckung analysieren. Ein methodischer Ansatz zur Analyse von verfahrenstechnischen Prozessen ist die Pinch-Analyse. Bei der Pinch-Analyse werden die (thermisch-energetischen) Prozesse entsprechend ihrer Temperatur getrennt nach warmen Strömen, bei denen Wärme abgegeben (ggf. aktiv entzogen) wird, und kalten Strömen, bei denen Wärme zugeführt wird, über der zugeführten Leistung nach dem Temperaturniveau geordnet dargestellt. Eigentliches Ziel der Pinch-Analyse ist es, ein optimiertes Wärmeübertragernetzwerk zwischen den warmen und kalten Strömen zur Minimierung des Energieeinsatzes zu planen. Aus der Pinch-Analyse ergeben sich aber auch für die einzelnen Teilprozesse die nach der Optimierung der Wärmerückgewinnung im Prozess ggf. noch verbleibenden Bedarfsleistungen für eine Wärmezufuhr (Heizleistung) und für einen erforderlichen Wärmeentzug (Kühlleistung) mit dem jeweiligen Temperaturniveau. In Verbindung mit der Potenzialermittlung zu dem vor Ort vorliegenden geothermischen Potenzial lässt sich mit den Ergebnissen der Pinch-Analyse ein optimierter Einsatz der Geothermie sowohl für Heizen und Kühlen Planen. Eine Beschreibung der Pinch-Analyse findet sich unter anderen in [Brunner2017].

Kältebedarfsermittlung

Der maximale nutzungsseitige Kälteleistungsbedarf der zu kühlenden Räume, Anlagen, Prozesse etc. kann meist mit etablierten Verfahren ermittelt werden, z. B. Kühllastberechnung, Herstellerangaben bei zu kühlenden Maschinen/Prozessen, ggf. Simulation. Für die Geothermieanlage ist jedoch das daraus resultierende geothermische Lastprofil des Wärmeeintragsmaßgebend. Dieses umfasst im Optimalfall einen kompletten zeitlichen Verlauf der Leistung über ein ganzes Betriebsjahr (z. B. aus Messungen oder einer Simulation in Stundenschritten), zumindest aber die auftretenden Spitzenleistungen, deren Dauer sowie die monatlichen und jährlichen Energiemengen (z. B. für Auslegungsprogramme wie EED und GEO-HAND^{light} [Koenigsdorff2011]). Das geothermieseitige Lastprofil lässt sich jedoch häufig nicht in einer „statischen“ Bedarfsermittlung in einem Schritt festlegen, sondern entwickelt sich erst iterativ im Planungsprozess.

Ausgangspunkt ist dafür – neben den benötigten Leistungen – das Nutztemperaturniveau der betreffenden Kälteanwendung. In Abbildung 3 ist eine Reihe von Kälteanwendungen samt den Bereichen der zugehörigen Nutztemperaturniveaus dargestellt. Ebenfalls gekennzeichnet ist der typische Bereich der ungestörten Untergrund-/Grundwassertemperatur. Voraussetzung für eine direkte geothermische Kühlung ohne den Einsatz einer Kältemaschine ist, dass das Nutztemperaturniveau hinreichend weit oberhalb der Untergrundtemperatur liegt, besonders bei geothermischen Systemen mit thermischer Rückwirkung (s. o.).

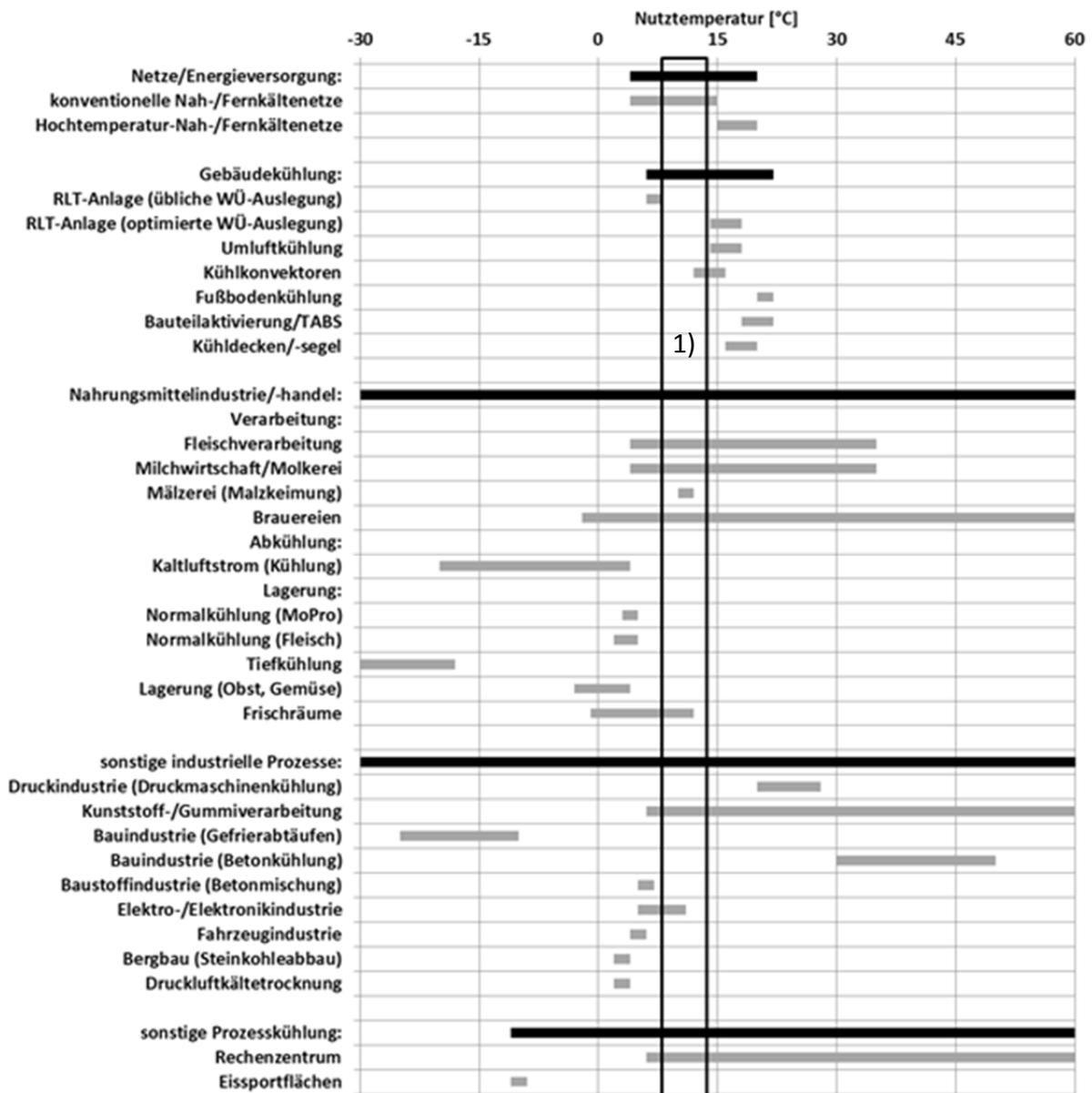


Abbildung 3: Nutztemperaturniveaus von Kühlanwendungen mit 1) Bereich der ungestörten Untergrund-/Grundwassertemperatur

Deshalb muss in einem ersten Iterationsschritt die nutzungsseitige Anlagentechnik teilweise (soweit möglich) für die direkte geothermische Kühlung speziell angepasst werden. Dies betrifft zum einen direkt das Temperaturniveau des Kühlwassers an den einzelnen Verbrauchern. Beispielsweise müssen die Wärmeübertrager von Kühlregistern in RLT-Anlagen oder Umluftkühlgeräten für höhere Vorlauftemperaturen (s. Tabelle 2) größer dimensioniert werden (s. a. folgender Abschnitt). Zum anderen müssen ggf. nutzungsseitige Massenströme angepasst werden, um beispielsweise kleinere Temperaturspreizungen zu ermöglichen. Flächenkühlsysteme wie Fußbodenkühlung oder Thermoaktive Bauteilsysteme (TABS) werden ohnehin mit einem höheren Temperaturniveau und kleinen Spreizungen betrieben, sodass diese Systeme besonders für eine direkte geothermische Kühlung geeignet sind.

Tabelle 2: Nutztemperaturniveaus in der Gebäudeklimatisierung [Koenigsdorff2013]

Standard-Kaltwassertemperaturen in der Klimatisierung (mit Entfeuchtung)	ca. 6 - 8 °C
auf direkte geothermische Kühlung ausgelegt (Verzicht auf gezielte Entfeuchtung):	
RLT-Anlagen und Umluftkühlgeräte (z. B. Raumkühlung, EDV-Kühlung)	14 - 18 °C
ohne besondere Auslegung für direkte geothermische Kühlung geeignet:	
Thermoaktive Bauteilsysteme (TABS)	18 - 22 °C
Kühldecken	16 - 20 °C

Darüber hinaus ist bei der Ermittlung der Kühllastprofile darauf zu achten, dass diese realistisch sind. Maximal erforderliche Kälteleistungen und auch Kühlenergiebedarfe sind häufig mit Sicherheitszuschlägen versehen. Insbesondere bei geothermischen Systemen mit thermischer Rückwirkung sind über das Übliche hinausgehende Genauigkeitsanforderungen an die Planung der Nutzungsanlagen und Anlagentechnik gestellt. Analoges gilt dann auch für die Ermittlung der Heizlast und Heizbedarfe für den Heizbetrieb. Sind die geothermieseitigen Heiz- und Kühlbedarfe in einer ähnlichen Größenordnung (d. h. die Energiebilanz ist saisonal mehr oder weniger ausgeglichen), können Abweichungen davon im Extremfall zu einer ungewollten Verschiebung der Jahresbilanz mit negativen Auswirkungen (z. B. Erwärmung statt Abkühlung des Untergrunds) führen. Da die nutzungsseitigen Bedarfe jedoch stets Schwankungen unterworfen sind, sollte auch die Schwankungsbreite bereits in der Grundlagenermittlung aufgezeigt werden, um diese in den weiteren iterativen Schritten des Planungsprozesses zu berücksichtigen.

2.1.6 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Zum Zeitpunkt der Berichtslegung sind den Autoren keine weiteren Arbeiten auf diesem Gebiet bekannt geworden.

2.1.7 Veröffentlichung der Ergebnisse, Ergebnis- und Forschungstransfer

Tagungsbeiträge:

R. Koenigsdorff: Kombinierte Heiz- und Kühl-Konzepte für Nichtwohngebäude mit oberflächennaher Geothermie, 28. Zittauer Energieseminar, Görlitz, 27. November 2018.

M. Bachseitz, R. Koenigsdorff: *Kühlung mit oberflächennaher Geothermie – Möglichkeiten und Grenzen*. 27. C.A.R.M.E.N.-Symposium "Energie- & Ressourcenwende: Impulse aus dem ländlichen Raum", Straubing, 01.-02. Juli 2019.

M. Bachseitz, M. Ryba, R. Koenigsdorff: *Einfluss der Lastprofilcharakteristik auf das geothermische Potenzial von Erdwärmesonden*. eingereicht und angenommen für GeoTHERM 2021 (ursprünglich für ausgefallene GeoTHERM 2020 vorgesehen)

Veröffentlichungen:

R. Koenigsdorff, M. Ryba, M. Bachseitz: *Geo.COOL - Kühlung mit oberflächennaher Geothermie*. bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau 02/2020, Bonn: wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, 2020, ISSN 1611-1478, S. 58-65

M. Bachseitz, M. Ryba, R. Koenigsdorff: *Einfluss der Lastprofilcharakteristik auf das geothermische Potenzial von Erdwärmesonden*. vorgesehen für Tagungsband zur GeoTHERM 2021 (ursprünglich für ausgefallene GeoTHERM 2020 vorgesehen)

2.1.8 Literatur

[AGEB2019] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (Hrsg.): *Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2013 bis 2017*. Berlin: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB), 2019,

https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=8&archiv=5&year=2019 (10.09.2019)

[Brunner2017] F. Brunner, P. Krummenacher: *Einführung in die Prozessintegration mit der Pinch-Methode - Handbuch für die Analyse von kontinuierlichen Prozessen und Batch-Prozessen - Zweite Auflage 2017*. Energie Schweiz - Bundesamt für Energie, 2017. Download unter <https://www.energieschweiz.ch/search/de-ch/?s=Pinch>

[Koenigsdorff2011] R. Koenigsdorff: *Oberflächennahe Geothermie für Gebäude – Grundlagen und Anwendungen zukunftsfähiger Heizung und Kühlung*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2011, ISBN 978-3-8167-8271-1

[Koenigsdorff2013] R. Koenigsdorff: *Gebäudeklimatisierung mit oberflächennaher Geothermie*. bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, Sonderheft Geothermie 2014, Bonn: wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, 2013, ISSN 1611-1478, S. 30-37

[ISI2019] Fraunhofer ISI: *Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2013 bis 2017 - Studie für die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB) - Entwurf*. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI), https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=8&archiv=5&year=2019 (10.09.2019)

2.2 AP 1b: Dynamische Simulationsrechnungen zur Erdwärmesondenanlage (Solites, FKZ: L75 17006)

2.2.1 Abstract zu den Forschungsergebnissen AP 1b

Um den Einfluss verschiedener Parameter auf die Effizienz einer Erdwärmesondenanlage im wechselnden Heiz- und Kühlbetrieb und auf die Untergrundverhältnisse im langfristigen Anlagenbetrieb zu ermitteln, wurden theoretische Untersuchungen mit Hilfe von dynamischen Simulationsrechnungen durchgeführt. Ziel hierbei war es, die Sensitivität verschiedener Einflussparameter aufzuzeigen und Rückschlüsse auf Dimensionierungsempfehlungen abzuleiten. Untersucht wurden dabei Parameter innerhalb und außerhalb der Erdwärmesonde sowie Systemparameter.

Die Simulationsergebnisse zeigen, im Vergleich zu den Ergebnissen bisheriger Untersuchungen für den reinen Heizbetrieb, einen ähnlichen Einfluss der Parameter innerhalb der Erdwärmesonde für den wechselnden Heiz- und Kühlbetrieb. Besonders starke Auswirkungen auf den Rest-Energiebedarf zur Kühlung des betrachteten Bürogebäudes zeigen Parameterkonfigurationen, die zu einer Reduzierung der direkten geothermischen Kühlung und damit zu einer vermehrten Kompressionskühlung führen. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn die Austrittstemperaturen aus den Erdwärmesonden zu hoch für eine direkte geothermische Kühlung werden. Als optimaler Abstand zwischen den Erdwärmesonden hat sich im betrachteten Fall für den wechselnden Heiz- und Kühlbetrieb ein Abstand von 4 m ergeben. Dabei ist für einen möglichst geringen verbleibenden Energieverbrauch zur Heizung und Kühlung eine gedrungene Anordnung der Erdwärmesonden einer linienförmigen Anordnung vorzuziehen. Ebenso ist ein möglichst ausgeglichenes Verhältnis von Heiz- und Kühllasten vorteilhaft.

2.2.2 Motivation und Hintergründe

Die Nutzung oberflächennaher Geothermie mit Erdwärmesonden (EWS) eignet sich sowohl zur regenerativen Wärme- als auch zur Kältebereitstellung. Zur Beurteilung eines energetisch effizienten und wirtschaftlichen Betriebs ist die Kenntnis des Einflusses verschiedener Parameter auf das Betriebsverhalten der Erdwärmesondenanlage im wechselnden Heiz- und Kühlbetrieb notwendig. In früheren Arbeiten lag der Fokus überwiegend entweder auf dem reinen Heiz- oder dem reinen Kühlbetrieb. In dieser Arbeit wurde mit Hilfe einer Simulationsstudie der Einfluss verschiedener Parameter auf die Effizienz von Erdwärmesondenanlagen und die Untergrundverhältnisse für den wechselnden Heiz- und Kühlbetrieb im langfristigen Anlagenbetrieb untersucht.

2.2.3 Aufgabenstellung

Der Einfluss der wesentlichen Parameter auf die Effizienz einer Erdwärmesondenanlage und die Untergrundverhältnisse im langfristigen Anlagenbetrieb soll für den Anwendungsfall des wechselnden Heiz- und Kühlbetriebs mit Hilfe von dynamischen Simulationsrechnungen ermittelt werden. Ziel ist, die Sensitivität verschiedener Einflussparameter aufzuzeigen und Dimensionierungsempfehlungen abzuleiten.

2.2.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Grundlagen zur Oberflächennahen Geothermie, zu Aufbau und Einflussfaktoren von Erdwärmesonden und zu möglichen Anwendungen im Gebäudesektor sind z.B. in (Koenigsdorff R., 2011) beschrieben. In (Luo et al., 2015) wird beispielhaft die messtechnische Evaluierung einer erdgekoppelten Wärmepumpenanlage im kombinierten Heiz- und Kühlbetrieb diskutiert. Die Ergebnisse beziehen sich dabei lediglich auf eine individuelle Projektlösung und sind nicht allgemeingültig.

Grundlegende Zusammenhänge zum Einfluss von Parametern innerhalb einer Erdwärmesonde wurden z.B. von (Eskilson, 1987), (Han and Yu, 2016), (Li et al., 2014), sowie von (Zhang et al., 2015) und (Zhou et al., 2016) untersucht. (Casasso und Sethi, 2014), (Noorollahi et al., 2018) und (Griebler et al., 2014) haben sich u.a. mit den Eigenschaften und Einflüssen unterschiedlicher Arbeitsmedien befasst. Mit Auswirkungen verschiedener Parameter außerhalb der Erdwärmesonde haben sich (Claesson und Eskilson 1987), (Zhang et al., 2015) und (Sauer et al., 2008) beschäftigt. Die gegenseitige Beeinflussung von Erdwärmesonden bei verschiedenen Sondenanordnungen haben (Sauer et al., 2008) und (Gultekin et al., 2017) betrachtet. (Häfner et al., 2015) untersuchten den Einfluss unterschiedlicher Abstände zwischen Erdwärmesonden bei einem wechselnden Heiz- und Kühlbetrieb.

2.2.5 Methodik

Die Fragestellungen wurden mit Hilfe von dynamischen Simulationsrechnungen untersucht. Abbildung 4 zeigt den Umfang des hierfür erstellten Simulationsmodells. Es umfasst den Untergrundteil der Erdwärmesondenanlage sowie eine Wärmepumpenanlage, die bei Bedarf auch zur Kühlung eingesetzt werden kann. An der Schnittstelle zum Gebäude werden über eine Lastdatei zeitlich hoch aufgelöste Gebäudelastdaten eingebunden. Diese repräsentieren ein Typgebäude (Bürogebäude) und wurden von der Hochschule Biberach durch Simulationsrechnungen erlangt und zur Verfügung gestellt (s. AP 3).

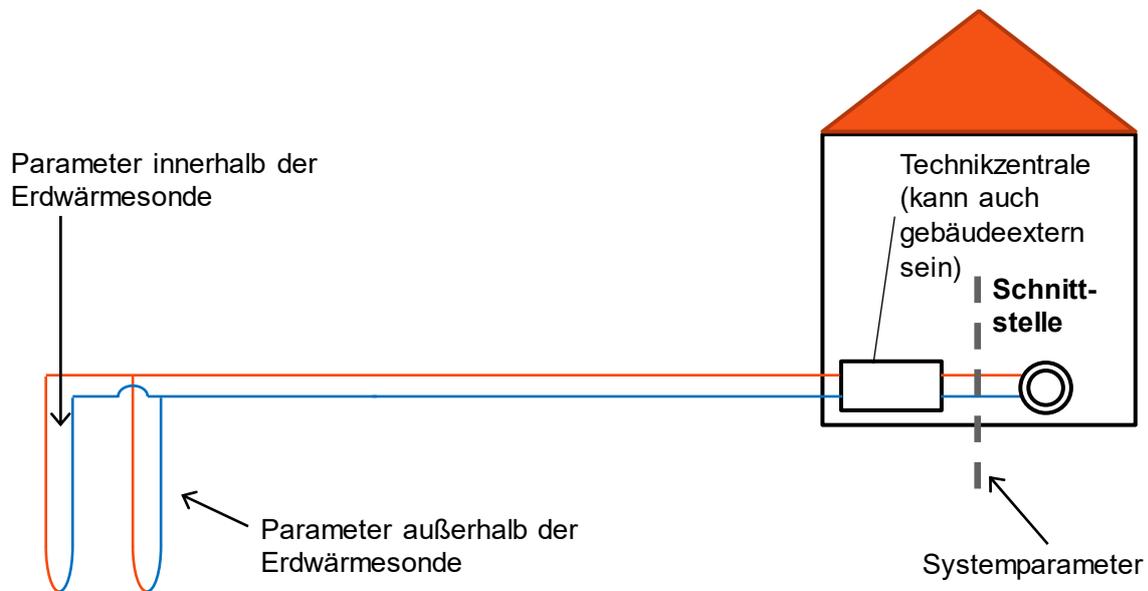


Abbildung 4: Schema des Simulationsmodells und Einflussparameter

Die Wärmepumpe bzw. Kältemaschine im verwendeten dynamischen Simulationsmodell wurde als idealisiertes Carnot-Modell mit festen externen Gütegraden (im Heizfall: 0,5; im Kühlfall: 0,4) abgebildet.

Neben dem Heizbetrieb mit der Wärmepumpe und dem Kühlbetrieb mit der Kältemaschine wurde bei allen untersuchten Varianten auch die direkte Kühlung eingesetzt, solange die Temperaturen im Erdreich dies zulassen (im betrachteten Fall: bis zu einer Erdsonden-Austrittstemperatur von 19 °C).

Als Plattform für die dynamischen Simulationsrechnungen wurde das Simulationsprogramm TRNSYS (TRNSYS, 2018) verwendet. Die Erdwärmesondenfelder werden im erstellten dynamischen Simulationsmodell mit Hilfe eines angepassten Komponentenmodells (TRNSYS Type 346 SBM: Superposition Borehole Model (Pahud D., 2012)) abgebildet. Als Grundlage zur Auswahl des Erdwärmesondenmodells erfolgte ein Vergleich verschiedener für TRNSYS verfügbarer Modelle, siehe Tabelle 3. Die für die Parameterstudie durchgeführten Anpassungen des Type 346 sind in den Kommentaren in der Tabelle aufgeführt und detailliert in (Janzen F., 2019) dokumentiert.

Tabelle 3: Vergleich verschiedener für TRNSYS verfügbarer Erdwärmesonden-Simulationsmodelle (in Anlehnung an (Janzen F., 2019))

Verfügbare Parameter		EWS: Type 451	DST: Type 557	SBM: Type 346
Innerhalb der Sonde	Durchmesser Bohrloch/Sondenrohr	Ja/Ja	Ja/Ja	Ja/Ja
	Arbeitsmedium	Instationär	Stationär	Stationär*
	Verfüllmaterial	Instationär	Stationär	Stationär
	Erdwärmesondentiefe	Ja	Ja	Ja
	Sondenart	2-U	1-U 2-U Koaxial	1-U 2-U** Koaxial
Außerhalb der Sonde	Bohrlochanordnung frei wählbar	Nein	Nein	Ja
	Abstand zwischen Bohrlöchern	Nein (nur Einzel-EWS)	Ja	Ja
	Mehrere Unterschichten	Ja	Ja	Ja
	Frei wählbare Untergrundparameter	Ja	Ja	Ja
Nutzerfreundlichkeit	Platzierung	2	1	3
Rechenzeit	Platzierung	1	2	3
Eignung	Platzierung	3	2	1

*: Die Abbildung des instationären Verhaltens erfolgt im Systemsimulationsmodell in Anlehnung an (Pärisch et al., 2015) mit Hilfe eines Vorschaltrohrs

** : Integration des Multipole-Berechnungsverfahrens zur Ermittlung von Bohrlochwiderständen gemäß (Bennet et al., 1987) im Modell, so dass Parameteruntersuchungen nun einfacher und weniger fehleranfällig möglich sind.

Mit dem fertiggestellten und geprüften Systemsimulationsmodell wurde eine Referenzkonfiguration mit folgenden Eigenschaften definiert, siehe auch Abbildung 5 und Abbildung 6:

- Erdwärmesonden: Doppel-U EWS, DN 32x2,9, 150 mm Bohrlochdurchmesser, 100 m tief
- Sondenanordnung: 2 x 5 Stück in Rechteckanordnung mit 4 m Bohrlochabstand
- Wärmeleitfähigkeit von Verfüllbaustoff und Untergrund: 1,5 und 2,0 W/(m K)
- Lastdaten als Randbedingung für das Modell: 23,8 MWh Kühlbedarf und 39,4 MWh Heizwärmebedarf, Zeitschrittweite 15 Minuten
- Maximale Heizlast: 46 kW
- Maximale Kühllast: 80 kW
- Maximale Sondenbelastung im Heizfall: 39 W/m
- Maximale Sondenbelastung im Kühlfall: 83 W/m

- Gesamte jährliche entzogene Wärmeenergie: 31,0 MWh
- Gesamte jährliche eingetragene Wärmeenergie: 25,6 MWh.

Weitere wichtige Modellannahmen:

- Vorlauftemperatur Heizung = 35 °C (Annahme: entspricht Verflüssigungstemperatur der Wärmepumpe)
- Vorlauftemperatur der Wärmepumpe im Kühlfall = 10 °C
- Bei Kühlbedarf und Austrittstemperaturen von weniger als 19 °C aus dem Erdsondenfeld erfolgt eine direkte Kühlung.

Weitere Details zur Modellierung und zur nachfolgend erläuterten Parametervariation können (Janzen F., 2019) entnommen werden.

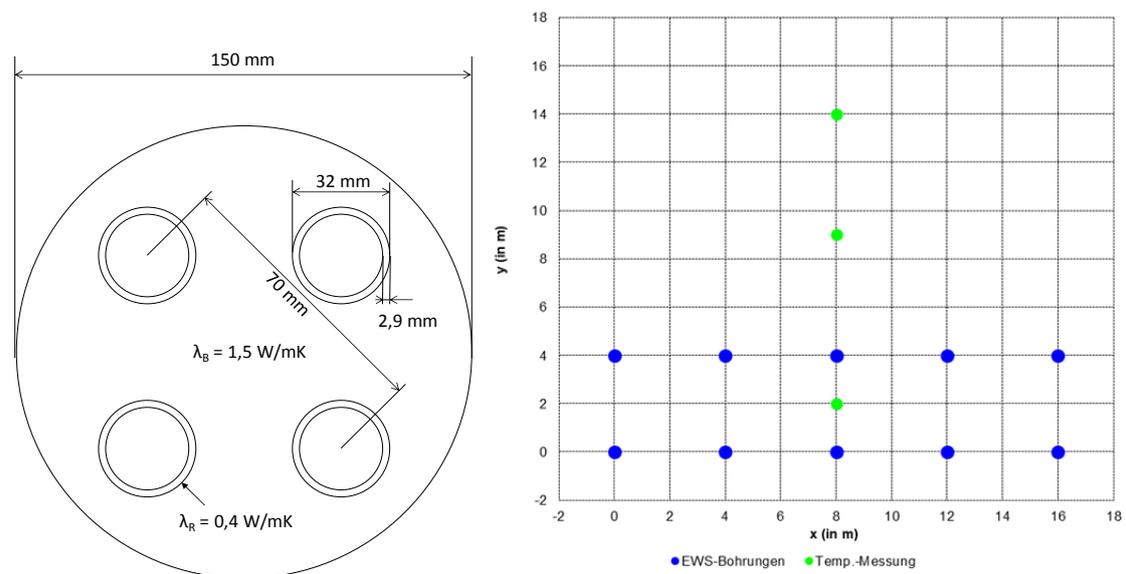


Abbildung 5: Aufbau der Erdwärmesonden und Sondenanordnung in der Referenzkonfiguration

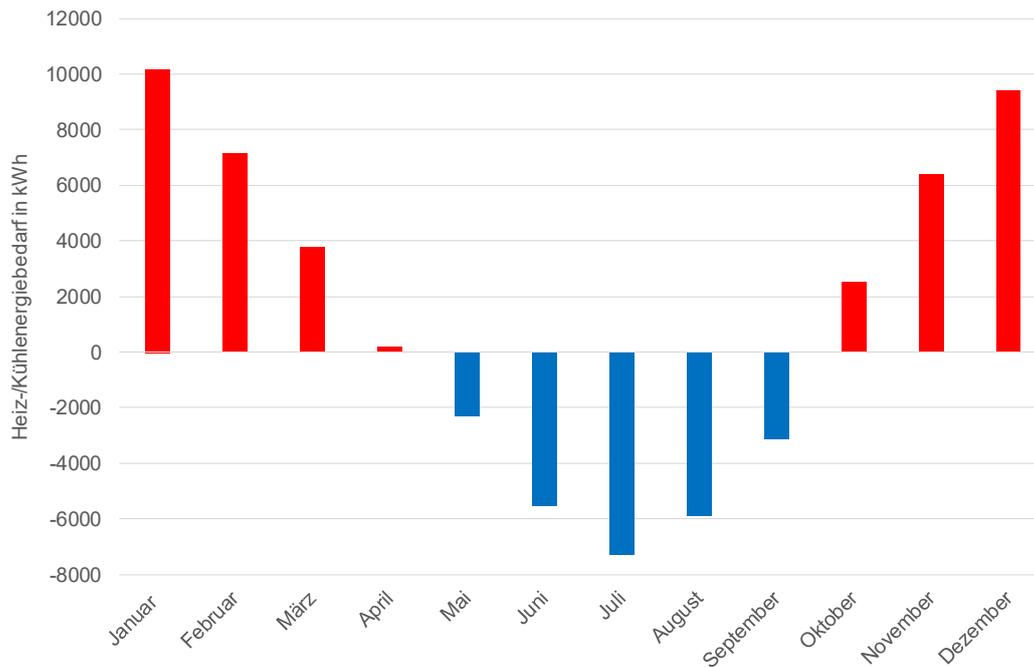


Abbildung 6: Monatlicher Verlauf von Wärme- und Kältebedarf in der Referenzkonfiguration

Als Vergleichs- und Bewertungskriterium für die Parametervariationen wird der verbleibende Gesamtenergiebedarf zur vollständigen Deckung des Wärme- und Kältebedarfs des versorgten Bürogebäudes verwendet. Er entspricht dem Strombedarf der Wärmepumpe für Heizung und Kühlung und dem daraus resultierenden Gesamtstrombedarf. Für den Wärmepumpen- und Kältemaschinenbetrieb wird der Strombedarf dabei separat aus den jeweils berechneten COPs ermittelt. Für den Betriebszustand der direkten Kühlung wird ein Strombedarf in Höhe von 5 % der in die Erdwärmesonden eingebrachten Leistung angesetzt. Sonstige Hilfsenergien für Umwälzpumpen etc. werden vernachlässigt. Um transiente Effekte in den ersten Betriebsjahren auszuschließen sind die Bedarfswerte für das zehnte Betriebsjahr dargestellt.

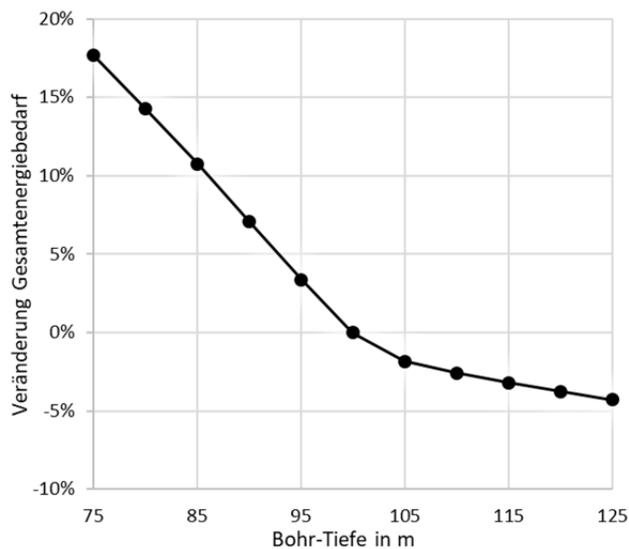
2.2.6 Ausführliche Darstellung der Ergebnisse AP 1b

Im Folgenden sind die Ergebnisse der oben beschriebenen Simulationsrechnungen zur Ermittlung des Einflusses verschiedener Parameter dargestellt. Die betrachteten Parameter sind:

- Parameter innerhalb der Erdwärmesonde
 - Bohrtiefe bzw. Erdwärmesonden-Länge
 - Schenkelabstand
 - Wärmeträgermedium
 - Wärmeträgermedium-Fließgeschwindigkeit
 - Wärmeleitfähigkeit der Verfüllung
 - Wärmeleitfähigkeit des Sondenmaterials
- Parameter außerhalb der Erdwärmesonde
 - Abstand der Erdwärmesonden
 - Anordnung der Erdwärmesonden
 - Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs
- Systemparameter
 - Verhältnis von Heiz- und Kühlbedarf
 - Maximale Heiz- und Kühlleistung.

Parameter innerhalb der Erdwärmesonde

Zur Betrachtung des Einflusses der **Erdwärmesonden-Länge** auf den Energiebedarf wurde die Tiefe der Erdwärmesonden variiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7 dargestellt. Der Gesamtenergiebedarf steigt bei einer Verringerung der Sonden-Tiefe von 100 m auf 75 m um 18 %. Der Energiebedarf zur Kühlung steigt um 86 % und der zum Heizen um 6 %. Die große Steigerung bei der Kühlung ist darauf zurückzuführen, dass die Temperaturen häufiger nicht mehr für eine direkte geothermische Kühlung ausreichen. Dabei steigt der Kühlbedarf anfangs um durchschnittlich 20 % je 5 m geringerer Bohrlochtiefe. Der Effekt vergrößert sich zunehmend mit geringer werdender Tiefe. Der Heizenergiebedarf steigt durchschnittlich um 1,2 % je 5 m. Auch hier nimmt der Effekt mit Verringerung der Tiefe zu. Der Energiebedarf zur Kühlung sinkt um maximal 25 %. Ab diesem Wert wird die Kühlung komplett über die direkte geothermische Kühlung abgedeckt. Bei Tiefen von 95 m und weniger unterschreitet die Einlasstemperatur in das Erdwärmesondenfeld die Grenze von -3 °C und es kann somit kein frostfreier Betrieb gewährleistet werden.

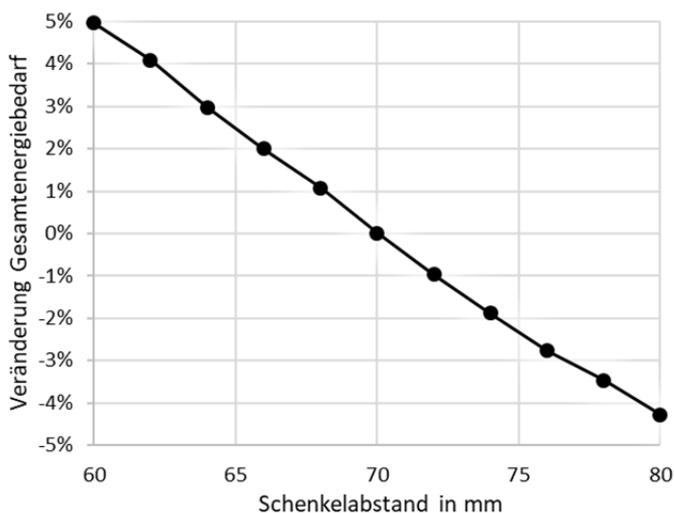


Tiefe der einzelnen Bohrungen in m	Veränderung Energiebedarf Heizen	Veränderung Energiebedarf Kühlen
75	6.1 %	65.9 %
80	4.6 %	54.0 %
85	3.3 %	42.5 %
90	2.0 %	30.3 %
95	1.0 %	16.1 %
100	0.0 %	0.0 %
105	-0.9 %	-15.6 %
110	-1.8 %	-24.7 %
115	-2.6 %	-25.3 %
120	-3.4 %	-25.2 %
125	-4.1 %	-25.2 %

Abbildung 7: Einfluss einer veränderten Bohrtiefe auf den Energiebedarf

Der Einfluss des diagonalen **Schenkelabstandes** ist in Abbildung 8 dargestellt. Der Parameter wird ausgehend von der Referenzvariante mit einem Schenkelabstand von 70 mm in 2 mm Schritten um insgesamt 10 mm verringert bzw. erhöht.

Eine Verringerung des Schenkelabstandes von 70 mm auf 60 mm bringt eine Erhöhung des Gesamtenergiebedarfs von 5 % mit sich. Eine Erhöhung von 70 mm auf 80 mm verringert den Gesamtenergiebedarf um 4 %. Der Energiebedarf zum Heizen verändert sich insgesamt um lediglich 1 % bzw. um -1 %. Demgegenüber vergrößert sich der Energiebedarf zur Kühlung bei einer Verringerung des Schenkelabstandes im betrachteten Bereich um 24 % und verringert sich um 21 % bei einer Erhöhung des Schenkelabstandes. Der Parameter hat einen nahezu linearen Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf.



Schenkelabstand in mm	Veränderung Energiebedarf Heizen	Veränderung Energiebedarf Kühlen
60	1.1 %	23.7 %
62	0.9 %	19.7 %
64	0.6 %	14.3 %
66	0.4 %	9.7 %
68	0.2 %	5.3 %
70	0.0 %	0.0 %
72	-0.2 %	-4.7 %
74	-0.4 %	-9.2 %
76	-0.6 %	-13.4 %
78	-0.7 %	-16.6 %
80	-0.9 %	-20.6 %

Abbildung 8: Einfluss des Schenkelabstands der Sondenrohre auf den Energiebedarf

Der Einfluss des **Wärmeträgermediums** auf den verbleibenden Energiebedarf zeigt Abbildung 9. Dargestellt ist der Vergleich zwischen einer Mischung aus 25 % Glykol und 75 % Wasser und reinem Wasser als Wärmeträgermedium. Die Variante mit reinem Wasser dient zur Potentialabschätzung, in der Praxis wäre dieses Wärmeträgermedium in der betrachteten Konfiguration aufgrund der niedrigen Wärmepumpen-Austrittstemperaturen nicht möglich.

Im Vergleich zum Wasser/Glykol-Gemisch sinkt der Gesamtenergiebedarf bei Verwendung von reinem Wasser um 9 %. Der Bedarf zur Kühlung sinkt dabei um 22 % und der Bedarf zum Heizen um 9 %. Hauptgrund für den sinkenden Energiebedarf ist der verbesserte Wärmeübergang zwischen Rohrwand und Fluid im Sondenrohr aufgrund von steigenden Reynoldszahlen. Letztere steigen aufgrund einer wesentlich geringeren kinematischen Viskosität von Wasser im Vergleich zur Wasser/Glykol-Mischung. Die mittlere Reynoldszahl liegt in der Referenzvariante im Heizfall bei 2600 und im Kühlfall bei 8500. Mit Wasser steigt diese im Heizfall auf 3100 und im Kühlfall auf 9800.

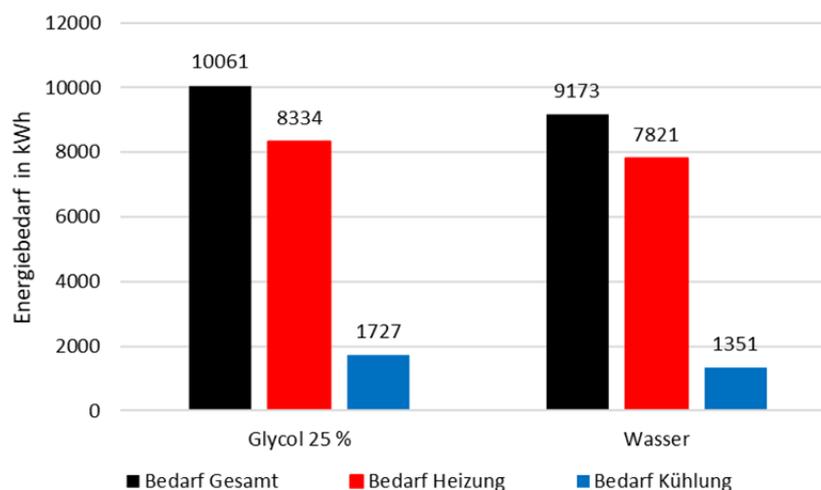


Abbildung 9: Einfluss des Wärmeträgermediums auf den Energiebedarf

Abbildung 10 zeigt den kombinierten Einfluss der Parameter **Wärmeträgermedium-Fließgeschwindigkeit** und **Sondenrohrdurchmesser**. Bei dieser Betrachtung wurde der absolute Massenstrom für das Sondenfeld wie in der Referenzvariante gewählt und nur die Dimension der Erdwärmesonden von DN 32x2,9 auf DN 40x3,7 geändert. Der Gesamtbedarf ändert sich durch die Vergrößerung des Sondenrohrdurchmessers und die damit verbundene Verringerung der Fluidgeschwindigkeit nur wenig (- 1 %). Der Bedarf für die Heizung steigt im Vergleich zur Referenzvariante um knapp 1 %. Der Bedarf zur Kühlung sinkt im Gegensatz dazu um 5,9 %. Der Grund für die Steigerung im Heizfall ist, dass die mittlere Reynoldszahl in den Sondenrohren bei 2300 liegt. Damit fällt sie teilweise in den laminaren- oder Übergangsbereich. Dies verschlechtert den Wärmeübergang und führt zu einem höheren Bohr-

lochwiderstand. Im Kühlfall ist der Massenstrom durch die höhere Leistung generell höher, wodurch eine Verringerung der Geschwindigkeit hier keinen negativen Effekt auf den Bohrlochwiderstand hat. Vielmehr sinkt der Bohrlochwiderstand durch den größeren Sondenrohrdurchmesser, was in einem geringeren Energiebedarf zur Kühlung resultiert.

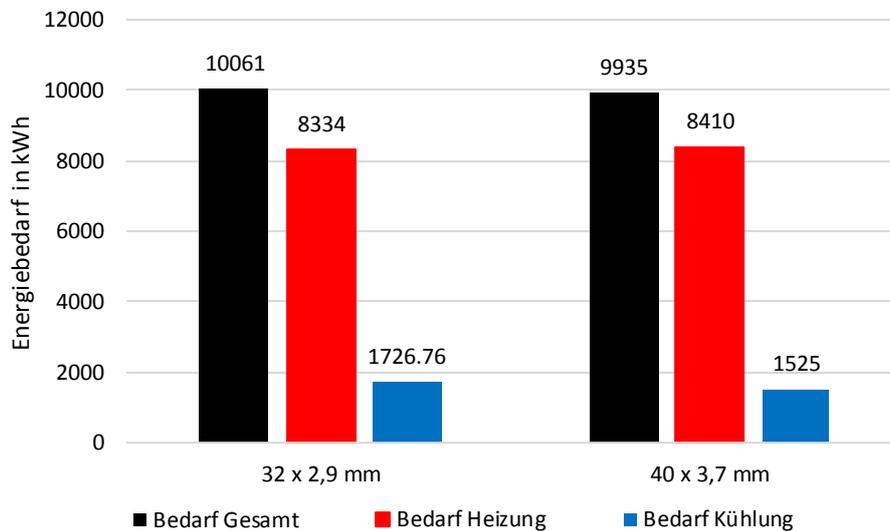


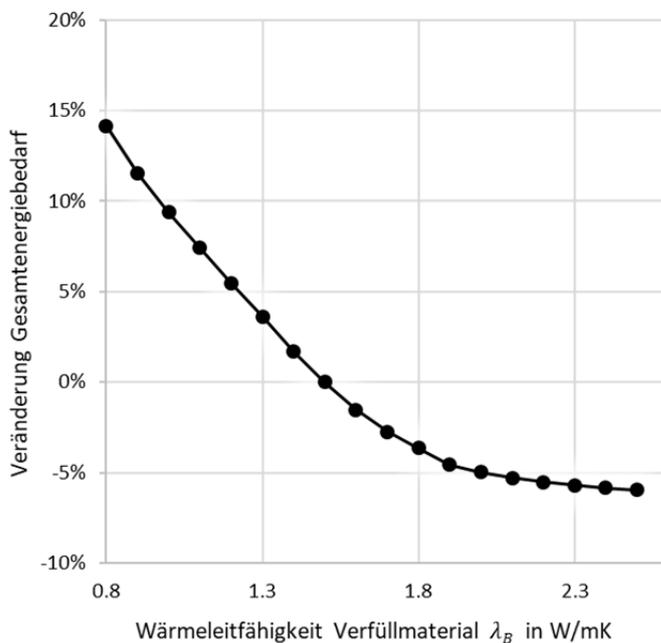
Abbildung 10: kombinierter Einfluss der Parameter Wärmeträgermedium-Fließgeschwindigkeit und Sondenrohrdurchmesser

Der Einfluss der **Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials** auf den Gesamtenergiebedarf ist in Abbildung 11 dargestellt. Dabei ist die prozentuale Veränderung gegenüber der Referenzvariante mit einer Wärmeleitfähigkeit von 1,5 W/(m K) aufgetragen. Bei einer Wärmeleitfähigkeit von 0,8 W/(m K) erhöht sich der Gesamtenergiebedarf um 14 %. Dabei steigen der Bedarf für die Kühlung um 64 % und der der Heizung um 4 %. Bei einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit auf 2,5 W/(m K) verringert sich der Gesamtenergiebedarf um 6 %. Die Verringerung des Energiebedarfs zum Heizen beträgt 2 % und die des Energiebedarfs zur Kühlung 25 %.

Die überproportionale Zunahme des Gesamtenergiebedarfs mit sinkender Wärmeleitfähigkeit liegt vor allem am Energiebedarf zur Kühlung. Dieser erhöht sich hier besonders stark, da die Auslasstemperatur zu hoch für eine direkte geothermische Kühlung wird. Im Gegensatz zur Referenzvariante verringert sich die Stundenzahl, in denen die freie Kühlung genutzt werden kann, um 218 h. Dieser Effekt schwächt sich mit steigender Wärmeleitfähigkeit ab. Ab einem Wert von 2,1 W/(m K) findet keine Verringerung des Kühlbedarfs mehr statt, da ab hier der gesamte Kühlbedarf über die direkte geothermische Kühlung gedeckt werden kann. Der Energiebedarf zum Heizen erhöht sich bei einer Verringerung der Wärmeleitfähigkeit auf 1,0 W/(m K) um 2 %. Demgegenüber verringert er sich bei einer Erhöhung um denselben

Anteil lediglich um 1 %. Nähert sich die Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials dem des umgebenden Erdreichs an, sinkt ihr Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Sonde.

Bei Wärmeleitfähigkeiten bis 1,1 W/(m K) sinken die Einlasstemperaturen in die Erdwärmesonden auf unter -3 °C. Hiermit kann kein frostfreier Betrieb der Anlage gewährleistet werden.



Wärmeleitfähigkeit Verfüllmaterial λ_B in W/(m K)	Veränderung Energiebedarf Heizen	Veränderung Energiebedarf Kühlen
0.8	3.9 %	63.9 %
0.9	2.9 %	53.0 %
1	2.2 %	44.0 %
1.1	1.6 %	35.3 %
1.2	1.1 %	26.5 %
1.3	0.7 %	17.7 %
1.4	0.3 %	8.3 %
1.5	0.0 %	0.0 %
1.6	-0.3 %	-7.6 %
1.7	-0.5 %	-13.5 %
1.8	-0.8 %	-17.6 %
1.9	-1.0 %	-21.9 %
2	-1.2 %	-23.4 %
2.1	-1.3 %	-24.3 %
2.2	-1.5 %	-25.0 %
2.3	-1.7 %	-25.1 %
2.4	-1.8 %	-25.3 %
2.5	-1.9 %	-25.3 %

Abbildung 11: Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials auf den Energiebedarf

Der Einfluss der **Wärmeleitfähigkeit der Sondenrohre** ist in Abbildung 12 dargestellt. Der Parameter wird vom derzeitigen Stand der Technik in der Referenzvariante mit 0,42 W/(m K) bis zu 2,0 W/(m K) variiert. Durch die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit des Sondenmaterials sinkt der Bohrlochwiderstand, was sich generell positiv auf den Wärmeaustausch zwischen dem Wärmeträgermedium und dem umgebenden Erdreich auswirkt.

Eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit von 0,42 W/(m K) auf 2,0 W/(m K) reduziert den Gesamtenergiebedarf um 5 %. Dabei reduziert sich der Energiebedarf zum Heizen um 1 % und der zur Kühlung um 25 %. Bereits ab einer Wärmeleitfähigkeit von 1,0 W/(m K) wird eine nahezu vollständige Kühlung durch die direkte geothermische Kühlung erreicht. Der Bedarf

sinkt bei Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit der Sondenrohre anfangs am stärksten. Je mehr sich die Wärmeleitfähigkeit des Sondenrohres der des Verfüllmaterials annähert umso geringer werden die Reduzierungen.

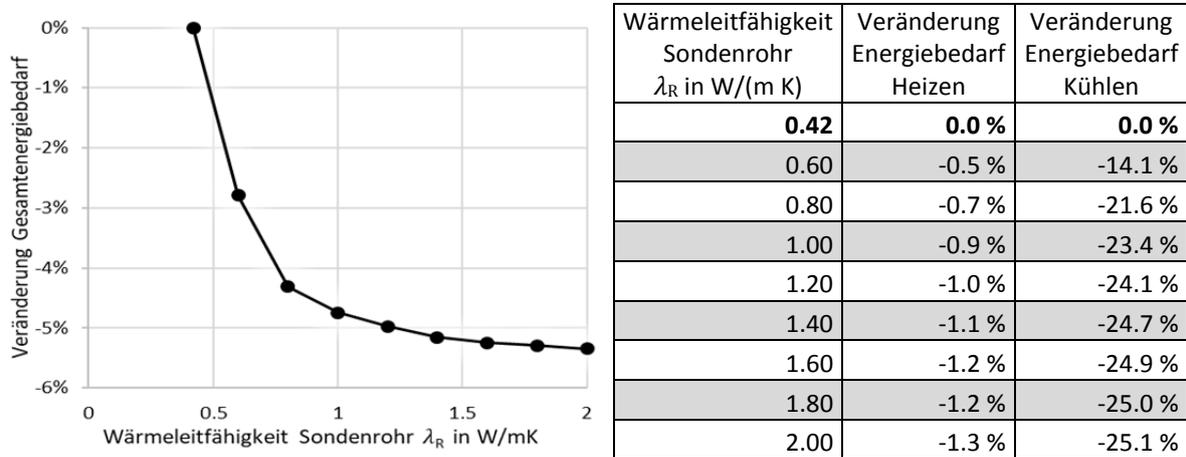


Abbildung 12: Einfluss der Wärmeleitfähigkeit der Sondenrohre auf den Energiebedarf

Parameter außerhalb der Erdwärmesonde

Abbildung 13 zeigt den Einfluss des **Abstands zwischen den Erdwärmesonden** auf den Energiebedarf. Diese Darstellung verdeutlicht, dass es unter den gegebenen Randbedingungen im kombinierten Heiz- und Kühlbetrieb einen optimalen Erdwärmesondenabstand gibt, der ca. 4 m beträgt. Größere Abstände verringern den Speichereffekt zwischen Heiz- und Kühlbetrieb, während geringere Abstände durch eine starke Untergrundaufheizung im Sommer die Möglichkeiten zur direkten Kühlung einschränken und damit insbesondere zu einem deutlichen Anstieg des Energiebedarfs zur Kühlung führen.

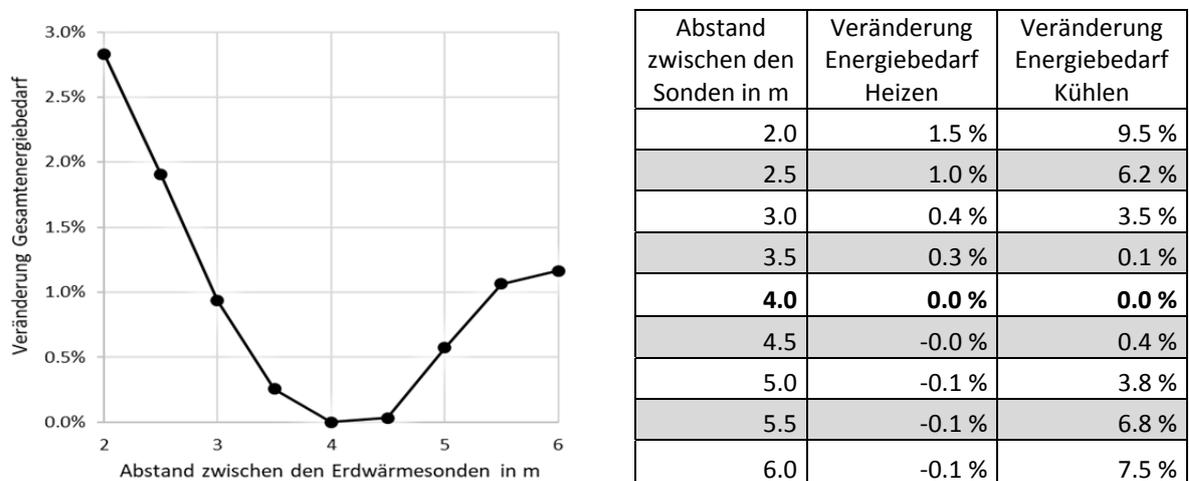


Abbildung 13: Einfluss des Abstands zwischen den Erdwärmesonden auf den Energiebedarf

Die unterschiedlichen **Anordnungen der Erdwärmesonden**, welche im Folgenden betrachtet werden, sind in Abbildung 14 dargestellt. Dabei wird neben der rechteckigen Anordnung der Referenzvariante eine Kreis-, Rechteck mit Mitte frei, L- und Linien-Anordnung untersucht. Die Anordnungen sind angelehnt an die Untersuchungen von Sauer et al. (2008). Die Anzahl, Tiefe und die Abstände der Erdwärmesonden werden konstant gehalten. Eine Ausnahme bildet die Kreis-anordnung, welche einen etwas geringeren mittleren Abstand aufweist.

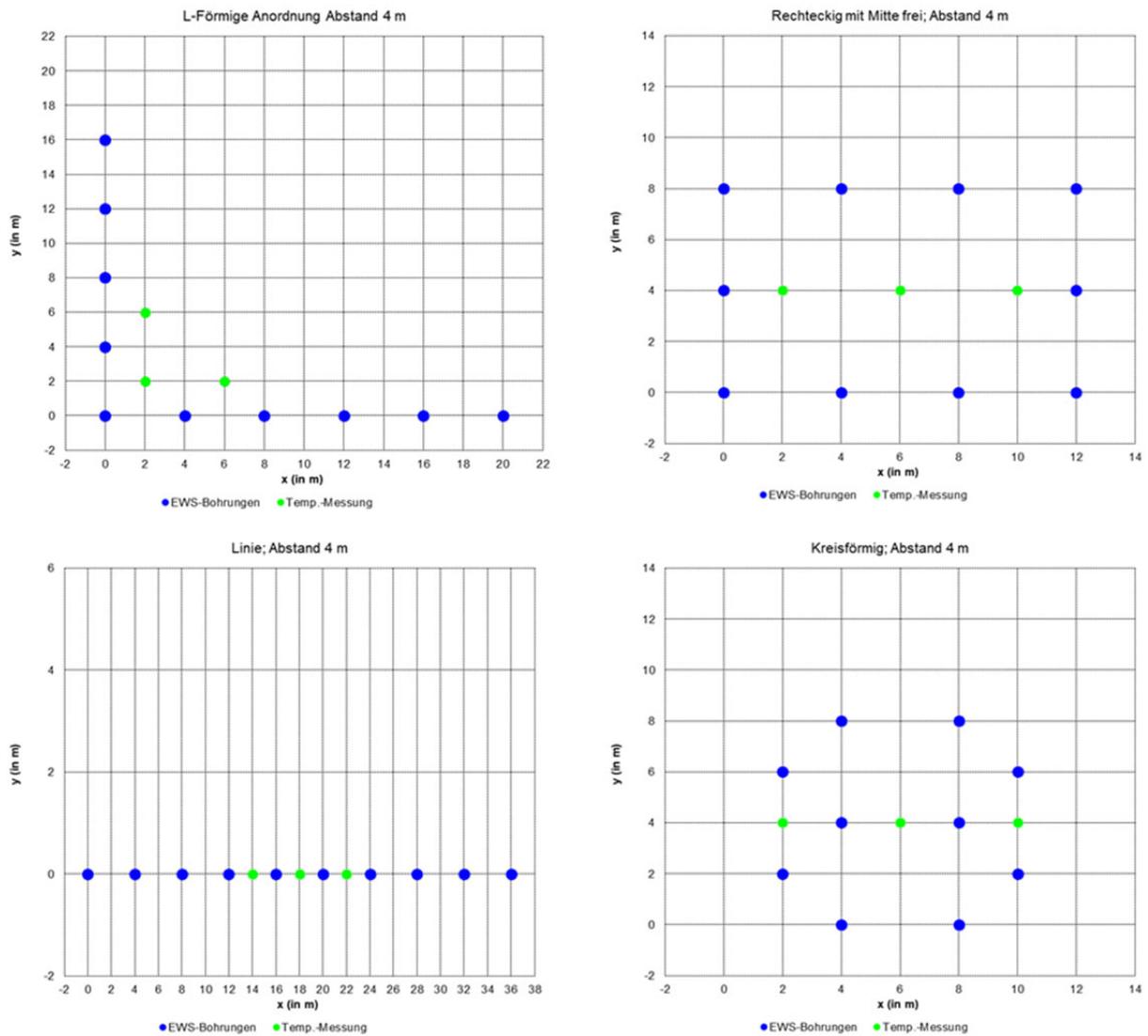


Abbildung 14: Anordnungsvarianten

Die Ergebnisse für den Gesamtenergiebedarf und den Bedarf zur Kühlung bzw. Heizung sind für die verschiedenen Anordnungen in Abbildung 15 dargestellt. Der Energiebedarf zum Heizen verändert sich durch die unterschiedliche Anordnung kaum. Auch hier ist die Leistungsfähigkeit im Heizbetrieb größer, je weniger sich die Bohrlöcher gegenseitig beeinflussen. Demgegenüber vergrößern sich der Energiebedarf zur Kühlung und damit der Gesamtenergiebedarf bei Anordnungen mit geringerer gegenseitiger Beeinflussung der Erdwärmesonden. Grund hierfür ist der abnehmende Speichereffekt bei diesen Anordnungen.

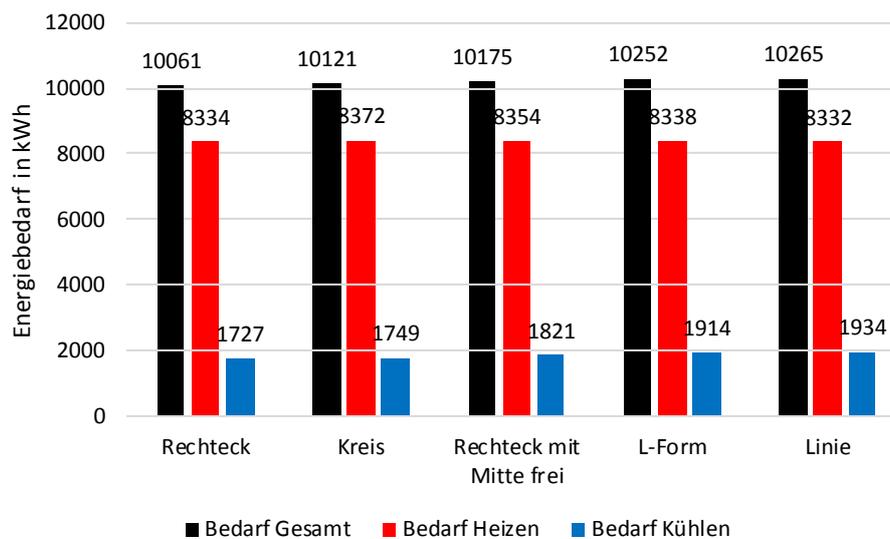


Abbildung 15: Einfluss der Anordnung der Erdwärmesonden auf den Energiebedarf

Die gegenseitige Beeinflussung der Erdwärmesonden ist in Abbildung 16 zu erkennen. In dieser sind die horizontalen Schnitte durch das Erdreich für die unterschiedlichen Anordnungen in einer Tiefe von 50 m dargestellt. Die Schnitte zeigen jeweils einen Zeitpunkt nach zehn Betriebsjahren während des Wärmeentzugs. Es ist die gegenseitige Beeinflussung zwischen den Erdwärmesonden zu erkennen. Diese ist bei gedrungenen Anordnungen größer ausgeprägt, als bei gestreckten Anordnungen. Auch ist der Einfluss auf das umgebende Erdreich umso stärker ausgeprägt, je kompakter das Erdwärmesondenfeld angeordnet ist.

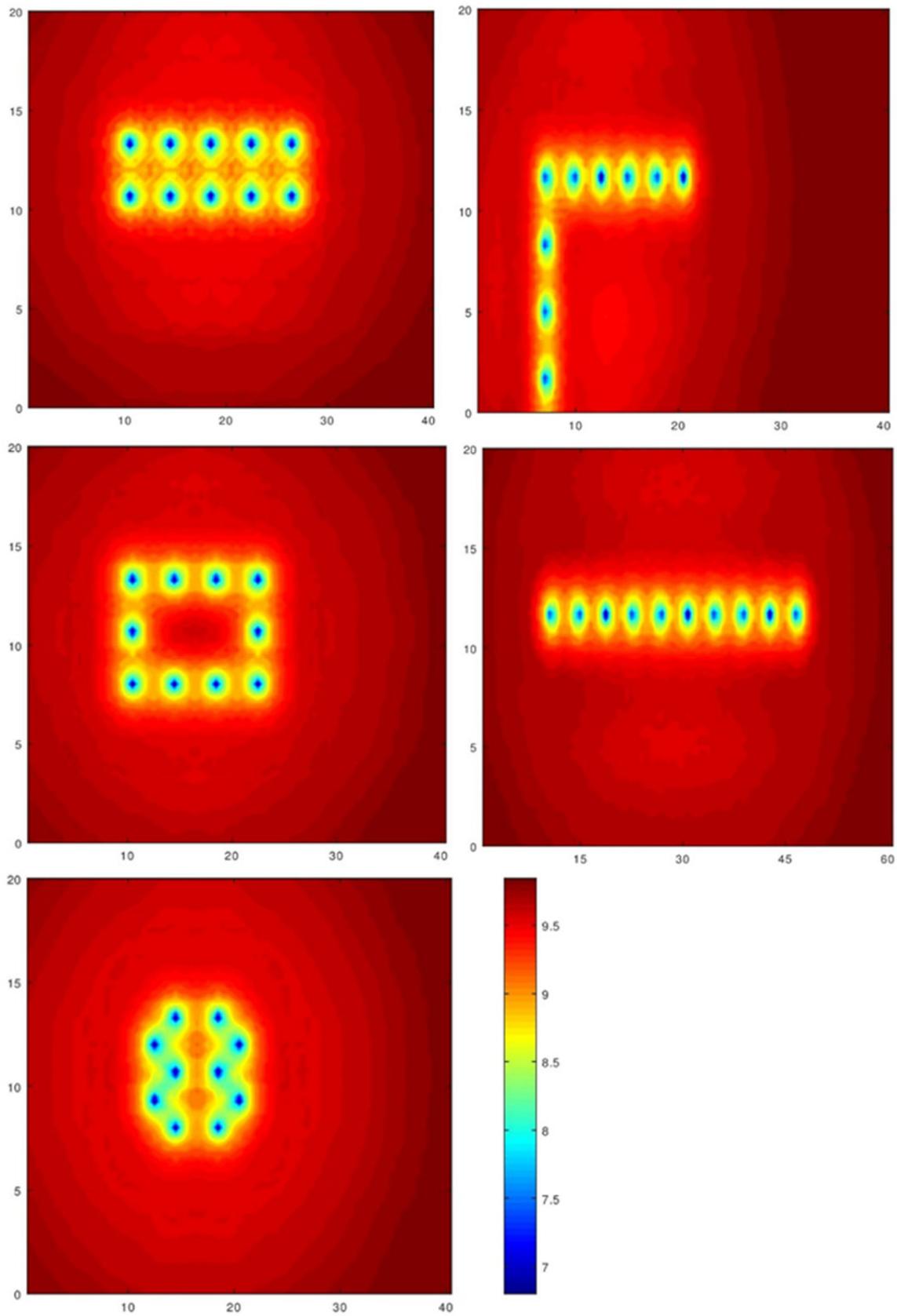


Abbildung 16: Temperaturfeld im Erdreich für die betrachteten Anordnungen in 50 m Tiefe nach zehn Betriebsjahren während des Heizbetriebs (Achsenwerte in m, Temperaturskala in °C)

Der Einfluss der **Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs** ist in Abbildung 17 dargestellt. Bei einer Verringerung um 25 % erhöht sich der Gesamtenergiebedarf um 8 %. Der Bedarf zum Heizen erhöht sich um 2 % und der zur Kühlung um 33 %. Bei einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit sinkt der Gesamtenergiebedarf zunächst linear. Ab 2,4 W/(m K) verläuft die Kurve flacher, da ab diesem Wert nahezu der gesamte Kühlenergiebedarf durch die direkte geothermische Kühlung gedeckt wird.

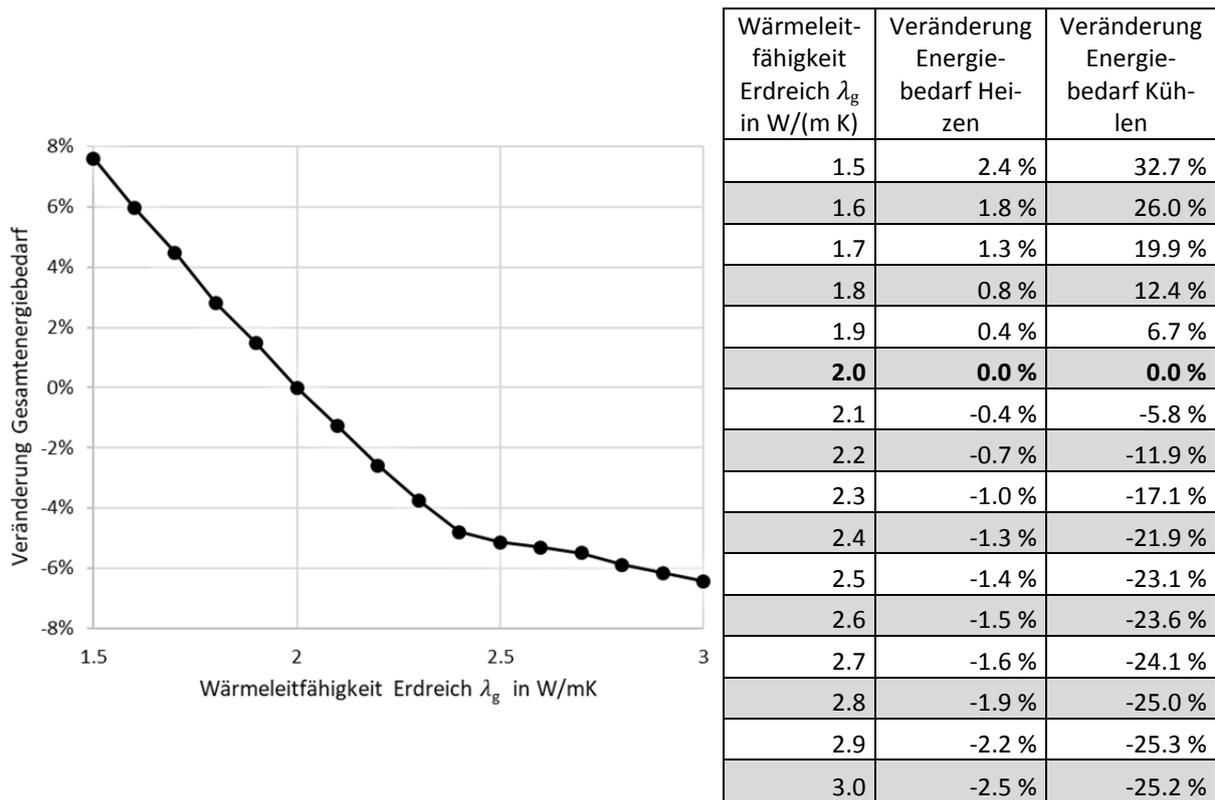


Abbildung 17: Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds auf den Energiebedarf

Variation von Systemparametern

Im Folgenden wird der Einfluss des **Verhältnisses von Heiz- zu Kühlenergiebedarf** durch eine Variation des Kühlenergiebedarfs bei konstantem Heizenergiebedarf betrachtet. Dabei werden im Kühlbetrieb lediglich die Laufzeiten erhöht, die Spitzenlasten und maximalen Massenströme in den Erdwärmesonden bleiben erhalten. Abbildung 18 zeigt die Auswirkungen auf den Energiebedarf zum Heizen bei Erhöhung bzw. Reduzierung des Kühlenergiebedarfs um jeweils 10 und 20 %. Zu erkennen ist, dass durch den erhöhten Wärmeeintrag in das Erdreich bei erhöhtem Kühlenergiebedarf der Energiebedarf für den Heizbetrieb sinkt und umgekehrt. Der Einfluss auf die Temperaturverhältnisse im Erdreich bei Variation des Kühlenergiebedarfs ist in Abbildung 19 dargestellt.

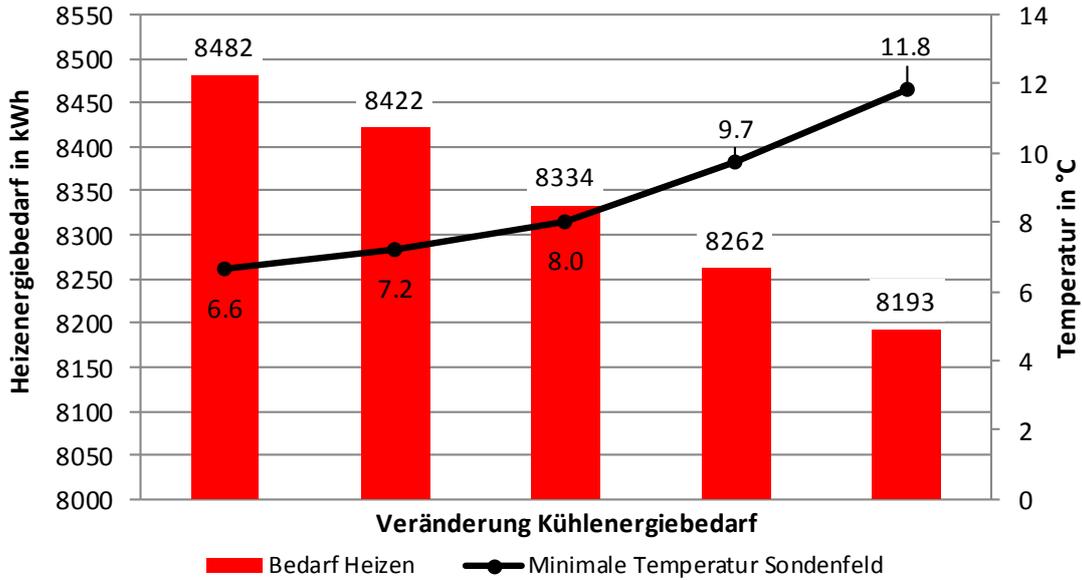


Abbildung 18: Einfluss des Kühlbedarfs (Veränderung um - 20 %, - 10 %, 0 %, + 10 %, + 20 %, siehe Abbildung 19) auf den Bedarf zum Heizen und die minimale Erdreichtemperatur im Sondenfeld (Ort der Temperaturmessung: siehe grüner Punkt innerhalb des Sondenfeldes in Abbildung 5)

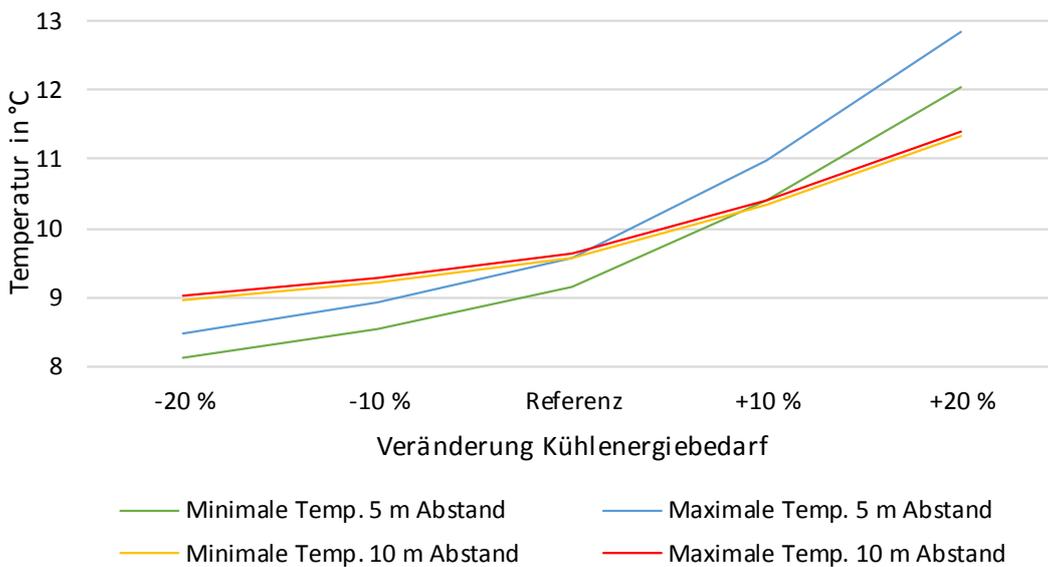


Abbildung 19: Einfluss des Kühlbedarfs auf die minimale und maximale Erdreichtemperatur im Sondenfeld (Ort der Temperaturmessung: siehe grüner Punkt innerhalb des Sondenfeldes in Abbildung 5)

Um den Einfluss der **Höhe der thermischen Leistungen beim Heizen und Kühlen** auf die Energiebedarfe zu ermitteln, wurde ausgehend von der Referenzvariante jeweils eine Variante mit erhöhten und reduzierten Leistungen betrachtet. Um die Beträge der dem Erdreich jährlich entzogenen bzw. zugeführten Wärmemengen nicht zu verändern, wurden die Laufzeiten der Betriebsvarianten entsprechend angepasst. Eine Übersicht über die betrachteten Varianten zeigt Tabelle 4.

Tabelle 4: Veränderung von Leistungen und Laufzeiten

	Thermische Leistung		Laufzeit	
	Heizen	Kühlen	Heizfall	Kühlfall
Reduzierte Maximallast	40 kW	69 kW	1130 h	630 h
Referenz Last	46 kW	80 kW	997 h	495 h
Erhöhte Maximallast	52 kW	90 kW	850 h	399 h

In Abbildung 20 sind die Ergebnisse für die drei in Tabelle 4 aufgelisteten Lastkombinationen dargestellt. Im Vergleich zur Referenzvariante sinkt der gesamte Energiebedarf zum Heizen und Kühlen bei Reduzierung der Last um 7 %. Die minimale Auslasstemperatur aus der Sonde steigt im Gegensatz zur Referenzvariante um 0,9 K. Bei einer Erhöhung der Leistung um denselben Betrag erhöht sich der Gesamtbedarf um 28 % und die minimale Auslasstemperatur sinkt um 1,1 K. Die minimale Auslasstemperatur verhält sich demnach nahezu linear, wohingegen der Bedarf zum Heizen bei einer Erhöhung der Leistung überproportional zunimmt. Der Bedarf zum Kühlen zeigt eine ähnliche Abhängigkeit von den Lastkombinationen. Begründen lässt sich das Verhalten durch die verzögerten Temperatúrausgleichseffekte im Erdreich.

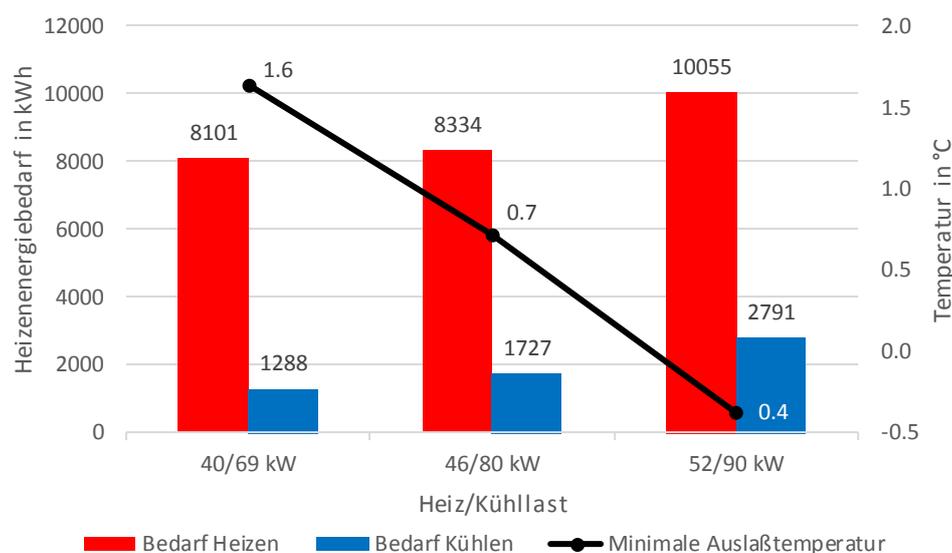


Abbildung 20: Einfluss der maximalen Heiz- bzw. Kühllast auf den Energiebedarf und die minimalen Auslasstemperaturen der Erdwärmesonden

Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse für die Parameter, für die eine quantitative Bewertung erfolgt ist, zeigt Abbildung 21. Die Parameter mit dem größten Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf sind demnach die Tiefe der Erdwärmesonden bzw. die insgesamt zur Verfügung stehende Erdwärmesonden-Länge und die Spitzenlast. Parameter mit einem vergleichsweise geringen Einfluss sind der Abstand zwischen den Erdwärmesonden und die Wärmeleitfähigkeit des Sondenrohrs.

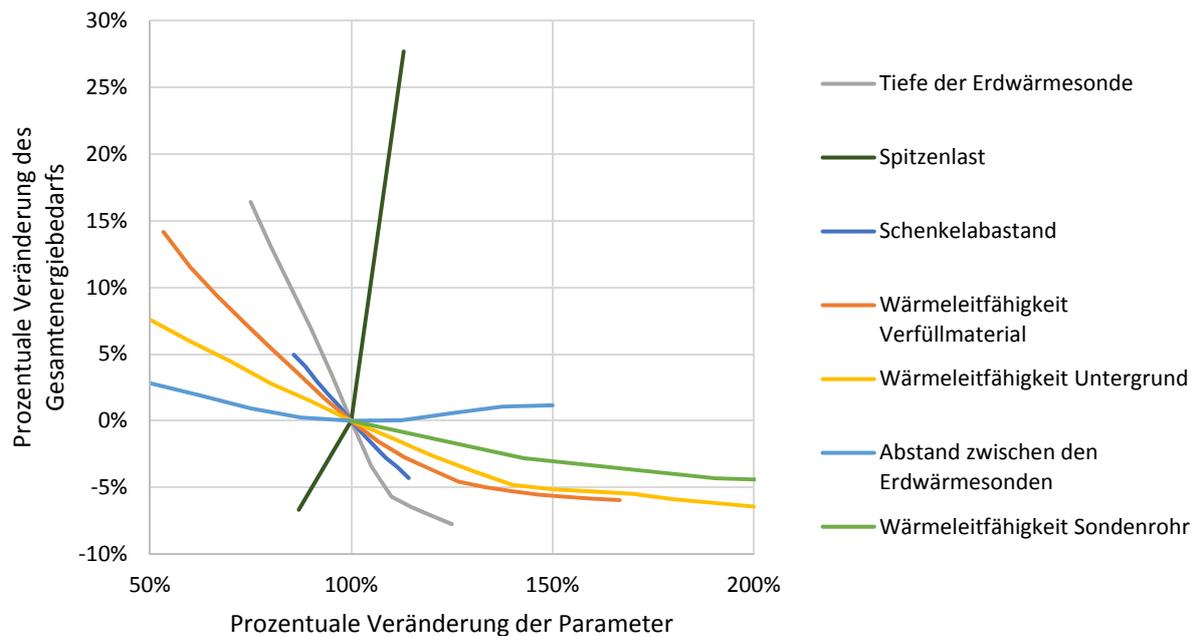


Abbildung 21: Zusammenfassung der Parameterstudie

2.2.7 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Zum Zeitpunkt der Berichtslegung sind den Autoren keine weiteren Arbeiten auf diesem Gebiet bekannt geworden.

2.2.8 Veröffentlichung der Ergebnisse, Ergebnis- und Forschungstransfer

Die erzielten Forschungsergebnisse wurden zum Zeitpunkt der Berichtslegung noch nicht publiziert.

2.2.9 Literatur

Bennet, J., Claesson, J., Hellström, G. (1987): Multipole method to compute the conductive heat flows to and between pipes in a composite cylinder, Notes on Heat Transfer 3-1987, Lund Institute of Technology, Lund (Schweden)

Casasso, A., Sethi, R. (2014): Efficiency of closed loop geothermal heat pumps: A sensitivity analysis. *Renew. Energy* 62, 737–746. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.08.019>

Claesson, J., Eskilson, P. (1987a): Thermal analysis of heat extraction boreholes: Conductive Heat Extraction By Thermally Interacting Deep Boreholes, Department of Building Technology, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden

Claesson, J., Eskilson, P., (1987b): Conductive Heat Extraction by a Deep Borehole. Thermal Analyses and Dimensioning Rules, Department of Building Technology, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden

Eskilson, P. (1987): Thermal analysis of heat extraction boreholes, PhD Thesis, Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden

Griebler, C., Kellermann, C., Kuntz, D., Walker-Hertkorn, S. (2014): Auswirkungen thermischer Veränderungen infolge der Nutzung oberflächennaher Geothermie auf die Beschaffenheit des Grundwassers und seiner Lebensgemeinschaften – Empfehlungen für eine Umweltverträgliche Nutzung, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

Gultekin, A., Aydin, M., Sisman, A. (2017): An investigation on thermal interaction coefficient for multiple borehole heat exchangers, Istanbul Technical University, Energy Institute, Istanbul, Turkey

Häfner, F., Wagner, R.-M., Meusel, L. (2015): Bau und Berechnung von Erdwärmeanlagen: Einführung mit praktischen Beispielen. Springer Vieweg, Berlin.

Han, C., Yu, X. (Bill) (2016): Sensitivity analysis of a vertical geothermal heat pump system. *Appl. Energy* 170, 148–160. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.085>

Janzen, F., (2019): Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Randbedingungen auf das thermische Verhalten von Erdwärmesonden im kombinierten Heiz- und Kühlbetrieb, Masterarbeit, Steinbeis Forschungsinstitut Solites, Stuttgart

Koenigsdorff, R. (2011): Oberflächennahe Geothermie für Gebäude: Grundlagen und Anwendungen zukunftsfähiger Heizung und Kühlung. Fraunhofer IRB-Verl, Stuttgart.

Li, Y., Mao, J., Geng, S., Han, X., Zhang, H. (2014): Evaluation of thermal short-circuiting and influence on thermal response test for borehole heat exchanger. *Geothermics* 50, 136–147. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2013.09.010>

Luo, J., Rohn, J., Bayer, M., Priess, A., Wilkmann, L., Xiang, W. (2015): Heating and cooling performance analysis of a ground source heat pump system in Southern Germany. *Geothermics* 53, 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.04.004>

Noorollahi, Y., Saeidi, R., Mohammadi, M., Amiri, A., Hosseinzadeh, M. (2018): The effects of ground heat exchanger parameters changes on geothermal heat pump performance – A review. *Appl. Therm. Eng.* 129, 1645–1658. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.111>

Pärisch, P., Mercker, O., Oberdorfer, P., Bertram, E., Tepe, R., Rockendorf, G. (2015): Short-term experiments with borehole heat exchangers and model validation in TRNSYS, *Renewable Energy* 74, p. 471–477, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.07.052>

Pahud, D. (2012): The Superposition Borehole Model for TRNSYS 16 or 17 (TRNSBM), University of Applied Sciences and Arts of Southern Switzerland (SUPSI), Canobbio, Switzerland

Sauer, M., Mands, E., Sanner, B. (2008): Wichtige Einflussfaktoren bei der Bemessung größerer Erdwärmesondenanlagen, bbr 04/2008, Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn

TRNSYS – A TRaNsient SYstem Simulation Program (2018): Manual, Solar Energy Lab, University of Wisconsin, Madison, USA, www.trnsys.de

Zhang, W., Yang, H., Lu, L., Fang, Z. (2015): Investigation on influential factors of engineering design of geothermal heat exchangers. *Appl. Therm. Eng.* 84, 310–319. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.03.023>

Zhou, H., Lv, J., Li, T. (2016): Applicability of the pipe structure and flow velocity of vertical ground heat exchanger for ground source heat pump. *Energy Build.* 117, 109–119. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.02.028>

2.3 AP 2: Systemtechnik und Planung von Anlagen zur Kühlung mit oberflächennaher Geothermie (HBC, FKZ: L75 17003)

2.3.1 Abstract zu den Forschungsergebnissen AP 2

Für die Systemtechnik und Planung von Anlagen zur Kühlung mit oberflächennaher Geothermie sind die grundsätzlichen Besonderheiten der geothermischen Kühlung zu beachten. Zu ihnen gehören die Temperaturverhältnisse und empfohlenen Temperaturänderungen im Untergrund, die Besonderheiten bei Systemen mit thermischer Rückwirkung (Speichereffekt), die korrekte Ermittlung der geothermieseitigen Lasten sowie die fachgerechte Auslegung von Wärmeübertragern.

Im Folgenden werden diese Aspekte genauer betrachtet und sowohl eine Methode zur Charakterisierung des Kühllastverlaufs als auch eine darauf aufbauende Methode bzw. ein Werkzeug zur Abschätzung des geothermischen Kühlpotenzials von Erdwärmesondenanlagen vorgestellt.

Es werden kurz konkrete Hinweise für die Planung, den Betrieb und die Effizienzbewertung von Anlagen zur geothermischen Kühlung vorgestellt, welche in [Bachseitz2020] und [Ryba2020] detaillierter ausgeführt sind.

An einem exemplarischen Anwendungsfall einer Rechenzentrumskühlung werden konkrete Vorschläge für die Anlagentechnik mit unterschiedlichen Kühlmöglichkeiten aufgezeigt, welche in [Schelkle2018] ausführlich beschrieben sind.

2.3.2 Motivation und Hintergründe

Die Erfahrung vieler ausgeführter Projekte zeigt, dass bei der technischen Umsetzung von Projekten zur Kühlung mit oberflächennaher Geothermie (ONG) nach wie vor häufig organisatorische und technische Probleme im Bereich der Gewerke-Schnittstellen sowie der übergreifenden Abstimmung im Sinne einer optimierenden integrierten Planung auftreten. Dies kann vor allem bei größeren und komplexeren Projekten mit kombinierter Heizung und Kühlung mit Hilfe von ONG kritisch werden im Hinblick auf Performance, Wirtschaftlichkeit oder sogar Funktionsfähigkeit.

Zur Planung, Ausführung und zum Betrieb von Geothermieanlagen sowie von Kälte- und Kühlanlagen existieren bisher v. a. objektspezifische Lösungen (individuelle Projektlösungen) sowie branchenspezifische Darstellungen (Kältetechnik, Geothermieanlagen). Im Bereich der Kältetechnik sind gewerkeübergreifende Ansätze und technische Darstellungen bzw. Empfehlungen in Bezug auf Abwärmenutzung (z. B. VDMA-Einheitsblatt 24019), integrierte Wärmerückgewinnung, Serverkühlung usw. bekannt, nicht jedoch in Kombinationen mit oberflächennaher Geothermie.

Weiterhin existieren vielfältige Ausarbeitungen im Hinblick auf ONG-Anlagen mit Fokus auf die Seite der Geologie und Geothermie. [AHO2011] nennt zwar zu den jeweiligen geothermieseitigen Planungsleistungen der Technischen Baugrundausrüstung (TBA) die von der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA) zu liefernden Informationen und Daten, allerdings in allgemeiner Weise, ohne auf Details und technische Spezifika einzugehen.

Die Grundlagen und das Wissen beider Fachgebiete zu verknüpfen, um die vorgenannten Schnittstellenprobleme und Defizite abzubauen, stellt somit in dieser Form im hier dargestellten Vorhaben ein Novum dar.

2.3.3 Aufgabenstellung

In diesem Arbeitspaket sollen deshalb die speziellen Anforderungen an die Anlagen- und Systemtechnik sowie Planung von Anlagen zur Kühlung mit oberflächennaher Geothermie herausgearbeitet und in Planungshinweisen (s. Anlage) zusammengefasst werden mit Fokus auf systemische und fachübergreifende Aspekte. Strukturelles Vorbild hierfür soll das oben erwähnte VDMA-Einheitsblatt 24019 „Abwärmenutzung aus Kälteanlagen“ [VDMA 24019] sein. In diesem werden Möglichkeiten der Nutzung von Abwärme aus Kälteerzeugungsprozessen dargestellt sowie Hinweise gegeben, wie Kälteanlagen an eine Abwärmenutzung angepasst zu planen und erstellen sind. Für eine Kühlung mittels oberflächennaher Geothermie sollen hier in ähnlicher Art und Weise auf folgende Punkte eingegangen werden:

- Darstellung der grundsätzlichen thermisch-energetischen sowie hydraulischen Anforderungen und Möglichkeiten auf Seiten der Kältenutzungs- und Kälteerzeugungsanlagen sowie der entsprechenden Aspekte auf Seiten der geothermischen Anlagen
- Kriterienliste und Hinweise für eine energiesystemische Bewertung und Abgrenzung zu alternativen Lösungen
- Planungs- und Ausführungshinweise für eine sachgerechte Ausgestaltung der Schnittstellen zwischen Kältenutzungs-, Kälteerzeugungs- und Geothermieanlagen
- Empfehlungen zur Planungsmethodik
- Beispiele möglicher Systemkombinationen im Zusammenspiel mit geothermischer Kühlung und Hinweise zur Entwicklung innovativer Lösungen.

Mit der interdisziplinären, gewerkeübergreifenden Zusammenstellung von Hinweisen und Beispielen soll der Einsatz der Kühlung mit oberflächennaher Geothermie gefördert werden. Damit wird eine breitere wirtschaftliche Anwendung unterstützt. Weiterhin lässt sich bei Geothermieanlagen der energetische Ertrag durch einen kombinierten Heiz-Kühlbetrieb steigern, was wiederum deren Wirtschaftlichkeit erhöht und damit den Anwendungsbereich verbreitert.

2.3.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Im Bereich der Kältetechnik sind gewerkeübergreifende Ansätze und technische Darstellungen bzw. Empfehlungen in Bezug auf Abwärmenutzung (z. B. VDI-Einheitsblatt 24019), integrierte Wärmerückgewinnung, Serverkühlung usw. bekannt, nicht jedoch in Kombinationen mit oberflächennaher Geothermie. Hier gibt es lediglich individuelle FuE- und Demonstrationsprojekte und einzelne Abhandlungen, jedoch keine umfassende Darstellung.

Weiterhin existieren vielfältige Ausarbeitungen im Hinblick auf ONG-Anlagen mit Fokus auf die Seite der Geologie und Geothermie. [AHO2011] geht lediglich grundsätzlich auf erforderliche Planungsleistungen auf beiden Seiten (Technische Baugrundausrüstung – TBA, Technische Gebäudeausrüstung - TGA) ein, nicht jedoch auf technische Details und Schnittstellenprobleme.

2.3.5 Ausführliche Darstellung der Ergebnisse AP 2

Grundsätzliche Besonderheiten der geothermischen Kühlung

Zunächst scheinen der Wärmeentzug aus dem Untergrund für die Wärmegewinnung sowie der Wärmeeintrag in den Untergrund für die geothermische Kühlung symmetrische Betriebsfälle zu sein. Denn bei gleich großen Leistungen und Energien ergeben sich rein rechnerisch betragsmäßig gleich große Abkühlungen bzw. Erwärmungen des Wärmeträgerfluids in der geothermischen Anlage (Wasser-Glykol-Gemisch, Grundwasser) sowie des Untergrundes um das geothermische Quellsystem (Erdwärmesonden, Energiepfähle, Brunnen usw.). Tatsächlich sind dies jedoch für den Untergrund und die darin betriebenen Anlagen i. d. R. unterschiedliche, d. h. asymmetrische Betriebsfälle. Die geothermische Kühlung weist gegenüber dem Wärmeentzug (Heizbetrieb) einige Besonderheiten auf:

Temperaturgrenzen:

In der Praxis sind die zulässigen Beträge der Erwärmung und Abkühlung meist unterschiedlich groß, bedingt durch die jeweilige Kombination aus vorliegender Untergrund- bzw. Grundwassertemperatur, anlagentechnischen bzw. nutzungsseitigen Temperaturgrenzen sowie hydrogeologischen Grenzwerten. Häufig ist die Temperaturerhöhung beim Wärmeeintrag wesentlich schneller kritisch als die Abkühlung beim Wärmeentzug, insbesondere in Gegenden mit einer durch Kultureinflüsse angestiegenen Untergrundtemperatur, in denen eine Abkühlung eher erwünscht ist [VDI 4640 Blatt 1].

Ausgehend von einer ungestörten Grundwasser- bzw. Untergrundtemperatur im Bereich von 9 - 12 °C ist z. B. bei einer direkten geothermischen Kühlung für die Gebäudeklimatisierung häufig die obere, durch die Kühlaufgaben vorgegebene Temperaturgrenze der kritische und leistungsbegrenzende Fall. Z. B. liegt bei Grundwassernutzung die technische untere Temperaturgrenze typischerweise bei 4 °C [Koenigsdorff2013], was eine Abkühlung von mindestens

5 - 6 K ermöglicht. Eine Erwärmung um denselben Betrag kann je nach Anwendungsfall bei der direkten geothermischen Kühlung kritisch werden. [Koenigsdorff2013].

Geothermieseitige Lasten:

Neben unterschiedlichen Temperaturgrenzen für den Heiz- und den Kühlfall führen auch Unterschiede zwischen nutzerseitigem Heiz- und Kühlbedarf zu verschiedenen Anforderungen an die Dimensionierung des Geothermiesystems. Daneben ist jedoch auch zu beachten (und wird in der Abstimmung zwischen Gebäude- und Geothermieplanern mitunter übersehen), dass bereits beim Einsatz desselben Aggregats als Kältemaschine für den Kühlbetrieb und als Wärmepumpe für den Heizbetrieb das Geothermiesystem in beiden Betriebsfällen sehr unterschiedlich belastet wird.

In Abbildung 22 ist dies beispielhaft für eine im Heiz- und Kühlbetrieb identische Leistungszahl (COP bzw. EER) von 4 verdeutlicht. Im Heizfall mit Wärmepumpenbetrieb wird der aufgewendete Strom als Wärme dem Nutzen zugeführt, wodurch nur 75 % der Nutzwärme aus der geothermischen Quelle stammen. Im Kühlfall mit Kältemaschinenbetrieb erhöht dagegen der aufgewendete Strom die Abwärmemenge, sodass bezogen auf 100 % Nutzwärme 125 % Abwärme in den Untergrund abzuführen sind. Im gezeigten Beispiel ist damit die Belastung des geothermischen Systems bei Kältemaschinenbetrieb um den Faktor 1,67 größer als bei Wärmepumpenbetrieb – bei jeweils gleicher nutzungsseitiger Leistung.

Neben dem maschinellen Heiz- und Kühlbetrieb sind in Abbildung 22 auch die Verhältnisse für direkte Erwärmung und direkte Kühlung ohne Wärmepumpe/Kältemaschine dargestellt. Mit Ausnahme von Sonderanwendungen (Frostfreihaltung, Vorwärmung) muss allerdings der Wärmeentzug i. d. R. mit einer Wärmepumpe bewerkstelligt werden. Damit ist für eine möglichst optimale Nutzung, d. h. für eine möglichst gleichmäßige Belastung des Geothermiesystems, die direkte geothermische Kühlung der maschinellen Kühlung mit geothermischer Rückkühlung vorzuziehen. Hinzu kommt die deutlich größere energetische Effizienz der Kühlung ohne Kältemaschine. Deshalb sollte der Fokus zunächst darauf gelegt werden, wie Kühlbedarfe möglichst mit einer direkten geothermischen Kühlung gedeckt werden können.

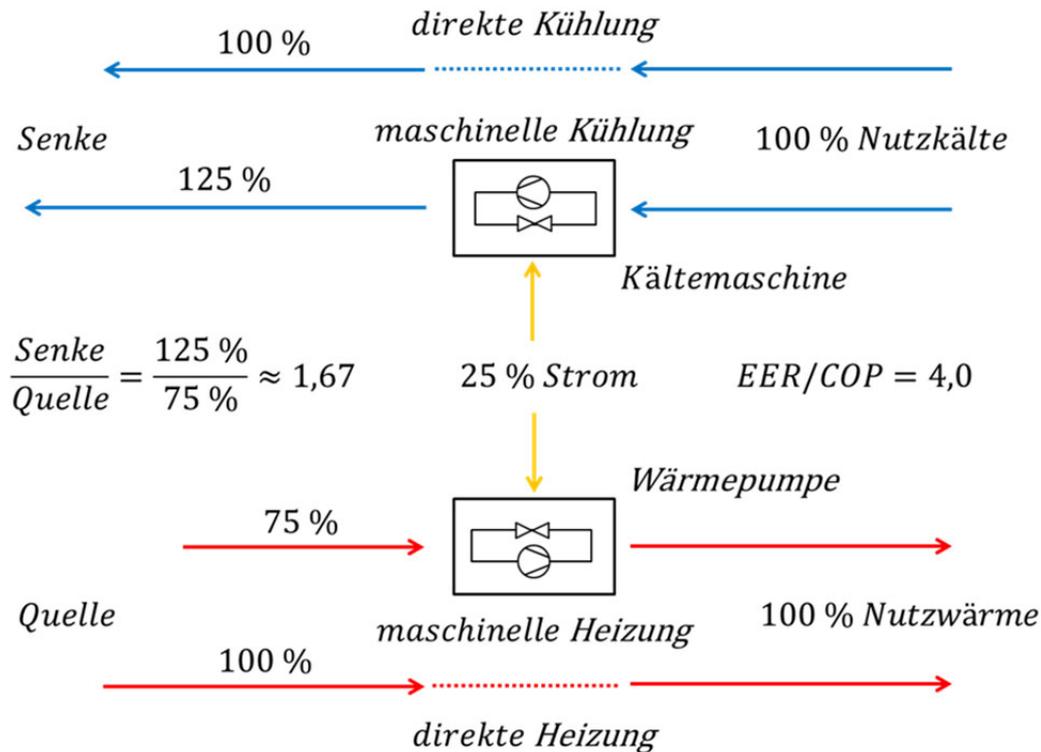


Abbildung 22: Geothermieseitige Belastung – Vergleich von direkter Kälte-/Wärmenutzung und maschineller Kälte-/Wärmebereitstellung (Pfeilrichtung entspricht Fließrichtung von Wärme/elektr. Strom)

Teilweise liegen für potenzielle Anwendungen für eine (direkte) geothermische Kühlung stündliche oder ggf. zeitlich höher aufgelöste Lastprofile für den Kühlbedarf vor. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn bei einer bestehenden Kühlanwendung eine Nutzkälteerfassung vorliegt oder entsprechende Kältelastprofile aus Simulationsberechnungen (Gebäude- und Anlagensimulationen) aus dem Planungsprozess vorhanden sind. Zur Beantwortung der Frage, ob und inwieweit für die Bedarfsdeckung die direkte geothermische Kühlung als sehr effiziente Alternative zur konventionellen Kühlung in Frage kommt, sind für eine Potenzialanalyse und eine (Vor-)Auslegung von Erdwärmesonden einfache Auslegungswerkzeuge, bspw. EED oder GEO-HAND^{light}, geeignet. Für diese ist eine Aggregation der stündlichen oder zeitlich höher aufgelösten Kältelastprofile auf die erforderlichen Eingabewerte in das Berechnungswerkzeug erforderlich. Für eine (Vor-)Auslegung von Erdwärmesonden mit GEO-HAND^{light} sind für den Kühlfall der geothermieseitige kumulierte Jahresenergieeintrag, der maximale Monatsenergieeintrag sowie die maximale Eintragsleistung und deren Dauer aus dem betrachteten Kältelastprofil zu ermitteln.

Zur Ermittlung der erforderlichen Eingabewerte für GEO-HAND^{light} aus Kältelastprofilen für ein Jahr mit stündlicher oder ggf. zeitlich höherer Auflösung wurde die folgende Methodik erarbeitet:

1. Für ein zeitlich höher aufgelöstes Kühllastprofil werden zunächst Stundenenergien berechnet.
2. Die Stundenenergien werden über ein Jahr zum Jahresenergieeintrag aufsummiert.
3. Aus der gleitenden 730 Stunden Summe über das Jahr wird der maximale Betrag zum Monatsenergieeintrag ermittelt.
4. Für den sich zum maximalen Monatsenergieeintrag ergebenden Monatszeitraum wird aus der gleitenden 24-Stunden-Summe der maximale Tagesenergieeintrag ermittelt.
5. Aus den Stundenenergien zum jeweiligen Monatszeitraum wird die maximale Stundenenergie als Spitzenleistung bestimmt.
6. Die Dauer der Spitzenleistung wird durch Division des maximalen Tagesenergieeintrags durch die ermittelte Spitzenleistung berechnet.

Soll der Heizbetrieb betrachtet werden, wird zur Bestimmung der Jahresentzugsenergie, der maximalen Monatsentzugsenergie und der maximalen Entzugsleistung und deren Dauer analog verfahren.

Der auszuwertende Datensatz zur Ermittlung der Eingabewerte für GEO-HAND^{light} muss ein gesamtes Jahr umfassen und mit dem Wechsel von Kühl- auf Heizsaison oder Heiz- auf Kühlsaison beginnen. Damit wird gewährleistet, dass die maximalen Monatsenergien aus einem zusammenhängenden Sommer- und zusammenhängenden Winterzeitraum ermittelt werden. Dies entspricht darüber hinaus der Modellvorstellung eines sinusförmigen Verlaufs (Jahresperiode) der Sondenbelastung, wie sie in GEO-HAND^{light} angenommen ist.

Im Zeitraum der Projektbearbeitung wurden gemessene Lastgänge zu verschiedenen Anwendungen entsprechend der beschriebenen Methodik aufbereitet. Das Einlesen der Daten, die Umsetzung der beschriebenen Berechnungen und die Ausgabe der Eingabewerte für GEO-HAND^{light} wurde in der Open-Source Softwareumgebung KNIME umgesetzt.

Die systematische Auswertung von stündlich oder höher aufgelösten Kühllastprofilen findet auch im Abschnitt „Methode/Werkzeug zur Abschätzung des geothermischen Kühlpotenzials von Erdwärmesondenanlagen“ beschriebenen Potenzialanalyse Anwendung. Eingangswerte in die Potenzialanalyse sind neben der zulässigen Temperaturänderung die Verhältnisse von periodischer Last zur Jahres-Grundlast und der Spitzenlast zur Jahres-Grundlast. Für den Kühlfall ist die Jahresgrundlast die Jahreseintragsenergie geteilt durch 8.760 Stunden und die periodische Last die maximale Monateintragsenergie geteilt durch 730 Stunden. Die folgende Tabelle 5 stellt die genannten Verhältnisse für einige ausgewertete Kältelastgänge gegenüber.

Tabelle 5: Eingabegrößen für eine Potenzialanalyse und (Vor-)Auslegung mit GEO-HAND^{light}

	Energie in kWh	Bezugszeit- raum in h	Durchschnitts- leistung in kW	Verhältnis zur Jahres- durchschnittsleistung
Bürogebäude				
Jahreswärmeeintrag	412.132	8.760	47,0	-
Monatswärmeeintrag	122.054	730	167,2	3,6
Spitzenwärmeeintrag	6.473	9,0	719,2	15,3
Schule				
Jahreswärmeeintrag	160.953	8.760	18,4	-
Monatswärmeeintrag	54.919	730	75,2	4,1
Spitzenwärmeeintrag	3.420	12,7	269,3	14,6
Maschinenkühlung				
Jahreswärmeeintrag	16.217	8.760	1,9	-
Monatswärmeeintrag	1.657	730	2,3	1,2
Spitzenwärmeeintrag	106	14,3	7,4	3,9

Thermische Rückwirkung / Speichereffekt:

Grundsätzlich sind bei oberflächennahen geothermischen Quellen-Senken-Systemen solche mit und solche ohne thermische Rückwirkung zu unterscheiden [Koenigsdorff 2011]. Dies ist für die geothermische Kühlung besonders wichtig. Bei Systemen ohne thermische Rückwirkung (Brunnendoubletten) hat das Einbringen von Wärme (nahezu) keinen Einfluss auf das Temperaturniveau der Wärmesenke. Diese Systeme bieten ein nahezu konstantes Temperaturniveau über die gesamte Nutzungszeit, sind jedoch nicht zur Speicherung von Abwärme für eine spätere Nutzung im Heizfall geeignet.

Bei Systemen mit thermischer Rückwirkung (Erdwärmesonden, Energiepfähle, Erdwärmekollektoren etc.) hingegen führt das Einbringen von Wärme aufgrund der Speichereigenschaften zu einer mehr oder weniger starken, kurz- und langfristigen Erwärmung des Untergrundes, was ggf. dazu führen kann, dass das vorhandene Temperaturniveau (sehr bald oder auch gegen Ende der Kühlperiode) nicht mehr für eine direkte geothermische Kühlung ausreicht. Das Ausmaß der Rückwirkung hängt von der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes und einer ggf. vorhandenen Grundwasserströmung ab. Bei diesen Systemen ist ein Wärmeentzug im Heizfall zur Regeneration für den Kühlbetrieb und umgekehrt sinnvoll und führt zu einer Erhöhung der Gesamteffizienz. Unter Umständen aber führt auch erst der Wärmeentzug im Heizfall zu Temperaturen im Untergrund, die eine direkte geothermische Kühlung

überhaupt erst ermöglichen. Die Systemkombination aus Heizung und Kühlung stellt daher einen besonders attraktiven, aber auch anspruchsvollen und hinsichtlich der Randbedingungen sensiblen Fall dar, wie im Folgenden bei der gewerkeübergreifenden Konzeptentwicklung und Systemplanung erläutert wird.

Temperaturregime des Untergrundes:

Grundsätzlich sind für den Wärmeeintrag in den Untergrund zunächst dieselben hydrogeologischen Grundlagen zu ermitteln wie für den Wärmeentzug. Bei der geothermischen Kühlung ist darüber hinaus das Temperaturregime des Untergrunds ein besonders kritischer Parameter:

- Die Untergrundtemperaturen sind vielerorts durch anthropogene Einflüsse erhöht [Menberg2013]. Dies verringert die zur Verfügung stehende Temperaturdifferenz für die geothermische Kühlung, während sich das Potenzial für einen Wärmeentzug entsprechend erhöht. Deshalb ist die genaue Kenntnis der am Standort vorliegenden Grundwasser- bzw. Untergrundtemperaturen unabdingbar und diese sind standortspezifisch zu ermitteln (Probepbohrung mit Temperaturmessung, Thermal Response Test, Pumpversuch etc.).
- Hinsichtlich der maximal zulässigen Einleittemperaturen für Grundwasser und maximalen Betriebstemperaturen für Erdwärmesonden existieren bundesweit keine einheitlichen Regelungen (s. Kapitel 2.9). Aus hydrogeologischer und gewässerökologischer Sicht wird unter bestimmten Umständen bereits eine geringe Erwärmung des Grundwassers als kritisch eingestuft [Griebler2015], ein einheitliches oder rechtlich eingeführtes Bewertungsverfahren existiert jedoch bislang nicht.
- Dies bedeutet für das einzelne Projekt, dass die vorgefundenen und einzuhaltenden Temperaturrandbedingungen jeweils projektspezifisch ermittelt und (mit den Behörden) abgeklärt werden müssen. Darüber hinaus besteht der dringende Bedarf, für unterschiedliche Bedingungen und Gebiete differenzierte Bewertungsmethoden und Genehmigungsverfahren zu entwickeln und zu etablieren, z. B. in Form unterirdischer Temperatur-Raumnutzungspläne [Griebler2015].

Wärmeübertrager in der Anlagentechnik

Ein häufig nicht hinreichend berücksichtigter Aspekt bei der Planung der Anlagentechnik ist die Wahl der Grädigkeit (Temperaturdifferenz zwischen Primär- und Sekundärseite) an den Wärmeübertragern. Die Standardauslegung von Fluid-Fluid-Wärmeübertragern beispielsweise erfolgt häufig mit einer Grädigkeit von 2 - 3 K oder mehr. Dies kann bei benötigten Kühltemperaturen nahe der Untergrundtemperatur dazu führen, dass eine direkte geothermische Kühlung alleine aufgrund einer derartigen Dimensionierung des Wärmeübertragers ausscheidet oder zumindest stark eingeschränkt ist und eine (betriebs-)kostenintensive maschinelle Kühlung zum Einsatz kommt. Mit einer sorgfältigen Auswahl und Dimensionierung der Wärmeübertrager kann dies u. U. vermieden werden. Und selbst, wenn eine maschinelle Kühlung unvermeidlich ist, lässt sich deren Effizienz häufig durch eine Optimierung des Wärmeübertragers steigern, da deren Leistungszahl pro Kelvin geringerer Rückkühltemperatur um ca. 2 % steigt. Dieses wichtige Planungsdetail wurde in einer Parameterstudie untersucht:

Mit dem Online-Auslegungsprogramm eines namhaften Herstellers wurde die Auslegung von Platten-Wärmeübertragern mit den Fluiden Wasser auf der einen und Wasser-Glykol auf der anderen Wärmeübertragerseite für die fünf Leistungsstufen 10 kW, 20 kW, 50 kW, 100 kW und 250 kW mit einer Temperaturspreizung von auf beiden Seiten jeweils 3 K für mehrere Grädigkeiten durchgeführt. Je Variante schlägt das Auslegungsprogramm fünf unterschiedliche Wärmeübertrager vor mit Angaben zu Typ, Wärmeübertragerfläche, Flächenreserve, Druckverlust und Preisindex u. a. m.

In Abbildung 23 sind beispielhaft für die Leistungsklasse 50 kW Preisindex (der direkt mit der Wärmeübertragerfläche korreliert) und Gesamtdruckverlust beider Seiten für die 15 Auslegungsvorschläge (je 5 zu den Grädigkeiten 1 K, 3 K u. 5 K) dargestellt. Insgesamt wurden in diesem Fall für die drei dargestellten Varianten (Grädigkeiten) neun verschiedene Wärmeübertragertypen vorgeschlagen, davon zwei mit demselben Preisindex von 1,0. Es ist zu erkennen, dass in vier Fällen mit demselben Wärmeübertrager sowohl 5 K als auch 3 K möglich sind. In einem Fall ist sogar ebenso eine Grädigkeit von nur 1 K realisierbar (Preisindex 1, Druckverlust ca. 36 kPa), wobei der Druckverlust in diesem Fall mehr als doppelt so hoch ist wie beim preisgleichen Wärmeübertrager mit den geringsten Druckverlusten.

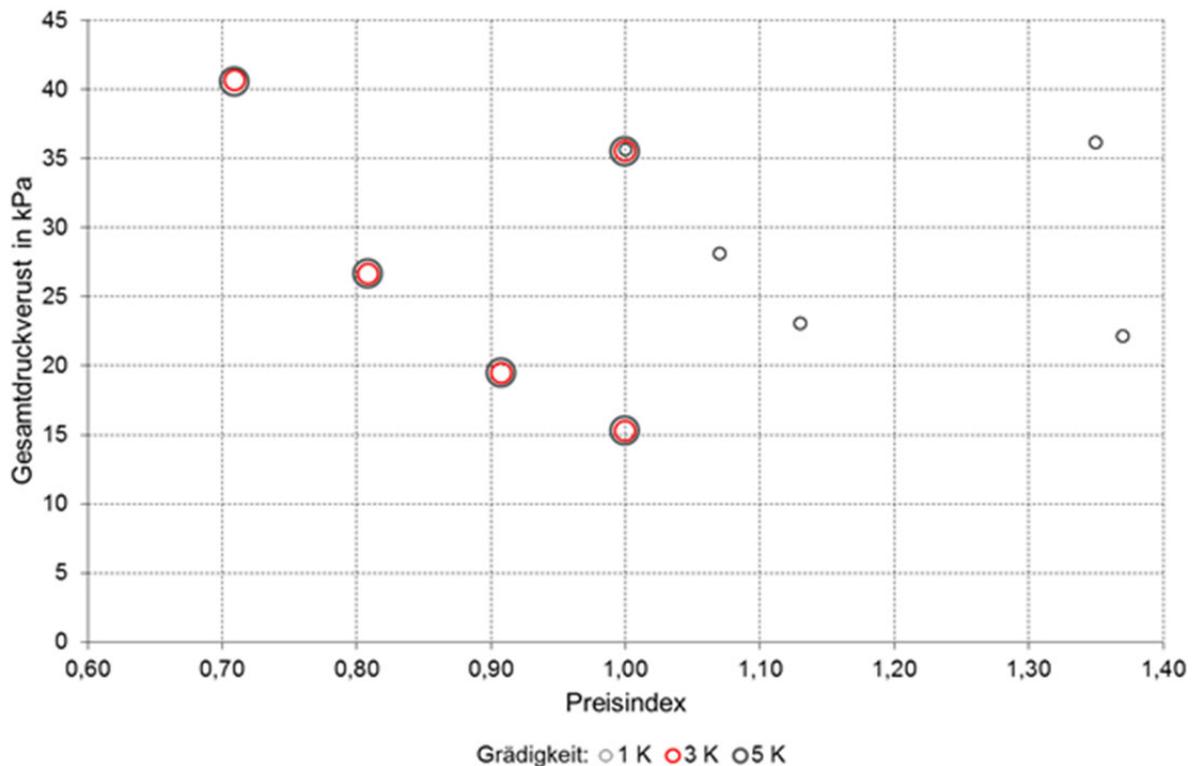


Abbildung 23: Parameterstudie Platten-Wärmeübertrager – Preisindices und Gesamtdruckverluste für 50 kW übertragene Leistung (ineinander liegende Kreise sind verschiedene Betriebspunkte desselben Wärmeübertragers) [Koenigsdorff2020]

Die Erklärung, weshalb häufig mit demselben Wärmeübertrager verschiedene Grädigkeiten möglich sind, ist Abbildung 24 zu entnehmen. Dort ist für jeden Auslegungsvorschlag die Flächenreserve über der Wärmeübertragerfläche (die mit dem Preisindex korreliert) aufgetragen. Man sieht, dass in dem Fall, in dem mit demselben Wärmeübertrager alle drei Grädigkeiten möglich sind, die Flächenreserve bei 5 K und 3 K Grädigkeit ca. 280 % bzw. ca. 160 % beträgt, d. h. der vorgeschlagene Wärmeübertrager dafür deutlich zu groß ist. Er kann auch mit 1 K Grädigkeit betrieben werden, allerdings beträgt die Flächenreserve dann nur noch 5 %. Die vom Auslegungsprogramm des Herstellers vorgeschlagenen Alternativen für 1 K Grädigkeit beinhalten größere Flächenreserven bis knapp 50 % bei z. T. geringerem Gesamtdruckverlust und moderaten Mehrkosten von ca. 10 bis knapp 40 %.

Das dargestellte Beispiel zeigt damit, dass es sich bei der Auslegung von Wärmeübertragern in jedem Fall lohnt, eine möglichst geringe Grädigkeit in Richtung 1 K unter gleichzeitiger Optimierung von Kosten, Druckverlusten und Flächenreserve anzustreben. Die Funktion derartiger Lösungen ist auch in der Praxis belegt [Schenk2016]. Durch ein solches Vorgehen lassen sich Einsatzfälle und Einsatzbereich der grundsätzlich vorzuziehenden direkten geothermischen Kühlung maximieren.

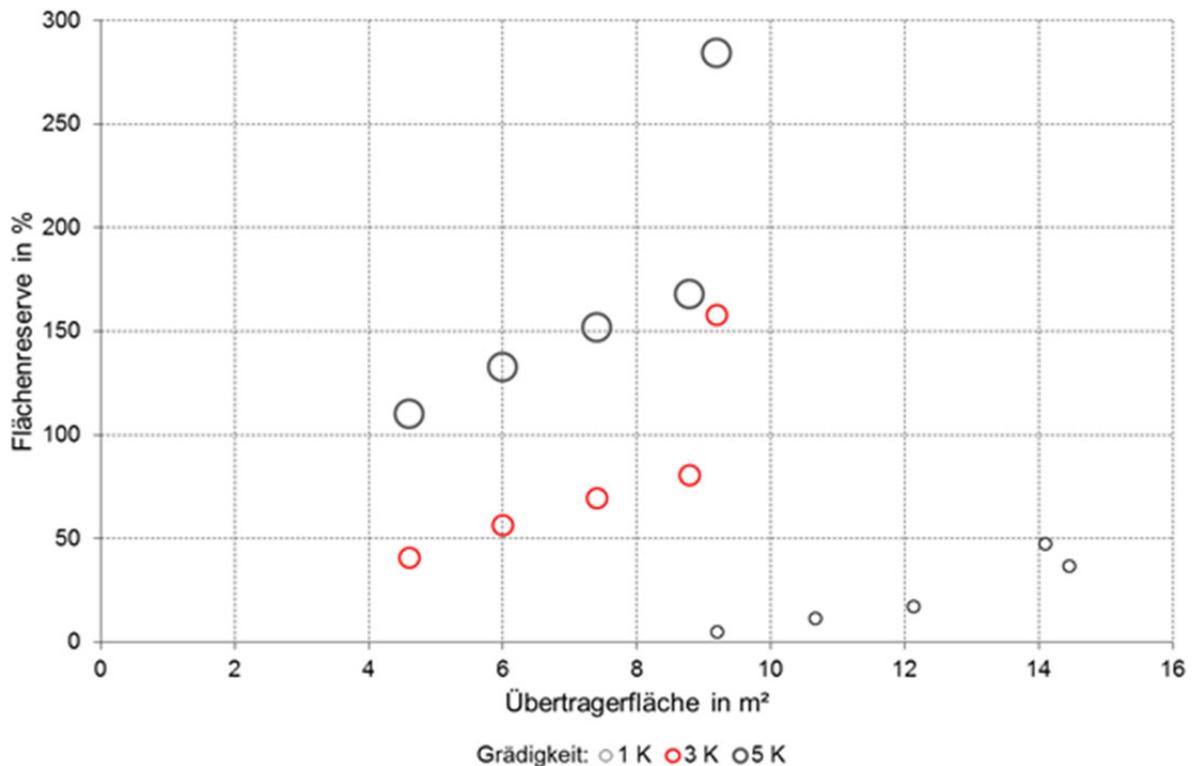


Abbildung 24: Parameterstudie Auslegung Platten-Wärmeübertrager – Übertragerfläche und Flächenreserve für 50 kW übertragene Leistung (senkrecht übereinander liegende Punkte mit identischer Übertragerfläche gehören jeweils zum selben Wärmeübertrager) [Koenigsdorff2020]

Beispiel zur Auswahl eines Wärmeübertragers zwischen geothermischer Senke und Anlagentechnik:

Folgendes Beispiel soll zeigen, wie sich die Mehrkosten für einen Wärmeübertrager mit geringer Grädigkeit von 1 K im Vergleich zu einem mit 5 K Grädigkeit durch Einsparungen beim Strombedarf einer maschinellen Kühlung (Kompressionskältemaschine) mit Rückkühlung über Geothermie aufgrund einer niedrigeren Rückkühltemperatur und ggf. durch Vermeidung der maschinellen Kühlung durch direkte geothermische Kühlung refinanzieren können.

Folgende Annahmen wurden für dieses Beispiel getroffen:

Pumpennutzungsgrad: 40 % (Nassläufer)

Die Investitionen für die Pumpe werden hier nicht berücksichtigt!

Strompreis: 0,15 €/kWh

Wärmeübertragerleistung: 250 kW

Wärmeübertrager 1 K Grädigkeit:

Preis: 23.067 €

Pumpenleistung (Überwindung WÜ-Druckverlust): 1.397 W

Wärmeübertrager 5 K Grädigkeit:

Preis: 17.214 €

Pumpenleistung (Überwindung WÜ-Druckverlust): 2.188 W

Preisdifferenz zwischen preisgünstigstem Wärmeübertrager mit 5 K Grädigkeit und größerem/teurerem Wärmeübertrager mit 1 K Grädigkeit: ca. 5.850 €

Vollaststunden Kühlung: 800 h/a

Nutzkühlenergie / -leistung: 150.000 kWh/a / 187,5 kW

EER (bei 5 K Grädigkeit): 3

Effizienzsteigerung (EER): 1,25 %/K

Beim Einsatz des Wärmeübertragers mit 5 K Grädigkeit ergibt sich folgendes:

Rückkühlenergie / -leistung: 200.000 kWh/a / 250 kW

Stromaufwand maschinelle Kühlung (EER = 3): 50.000 kWh/a

Stromkosten maschinelle Kühlung: 7.500 €/a

Stromkosten für Pumpenstrombedarf: 263 €/a

Beim Einsatz des Wärmeübertragers mit 1 K Grädigkeit ergibt sich folgendes:

EER: 3,15

Rückkühlenergie / -leistung: 197.500 kWh/a / 247 kW

Stromaufwand maschinelle Kühlung (EER = 3): 47.600 kWh/a

Stromkosten maschinelle Kühlung: 7.143 €/a

Stromkosten für Pumpenstrombedarf: 168 €/a

Nur durch die Effizienzsteigerung der Kältemaschine aufgrund der niedrigeren Rückkühltemperatur und dem geringeren Pumpenstrombedarf beim Einsatz des Wärmeübertragers mit 1 K Grädigkeit ergibt sich eine Stromkosteneinsparung von 452 €/a, womit sich die Mehrkosten des Wärmeübertragers statisch in ca. 13 Jahren amortisieren.

Geht man davon aus, dass durch die geringere Grädigkeit zumindest ein Teil der Nutzkälte durch direkte geothermische Kühlung bereitgestellt werden kann, ergeben sich folgende Einsparungen und statische Amortisationszeiten je nach Anteil der direkten geothermischen Kühlung:

10 % direkte geothermische Kühlung

Stromkosteneinsparung:	1.131 €/a
Statische Amortisationszeit:	5,2 a

20 % direkte geothermische Kühlung

Stromkosteneinsparung:	1.809 €/a
Statische Amortisationszeit:	3,2 a

30 % direkte geothermische Kühlung

Stromkosteneinsparung:	2.488 €/a
Statische Amortisationszeit:	2,4 a

Dieses Beispiel soll zeigen, dass auch bei der Auswahl des Wärmeübertragers eine Gesamtsystembetrachtung notwendig/sinnvoll ist.

Gewerkeübergreifende Konzeptentwicklung und Systemplanung

Zumindest bei komplexeren und/oder größeren Systemen sind die Konzeptentwicklung und Systemplanung Aufgaben, die nur in einer gewerkeübergreifenden Zusammenarbeit und mit der erwähnten iterativen Vorgehensweise zu guten Lösungen führen kann. Die große Vielfalt der zur Verfügung stehenden Konzeptvarianten zeigt sich bereits für den in Abbildung 25 dargestellten Fall einer ausschließlichen geothermischen Kühlung. Neben der Wahl zwischen direkter und maschineller Kühlung (wobei i. d. R. möglichst in Richtung direkter Kühlung optimiert werden sollte) und den nutzungs- sowie geothermieseitigen Temperaturniveaus können z. B auch Pufferspeicher die Auslegung und Dimensionierung der geothermischen Anlage maßgeblich beeinflussen.

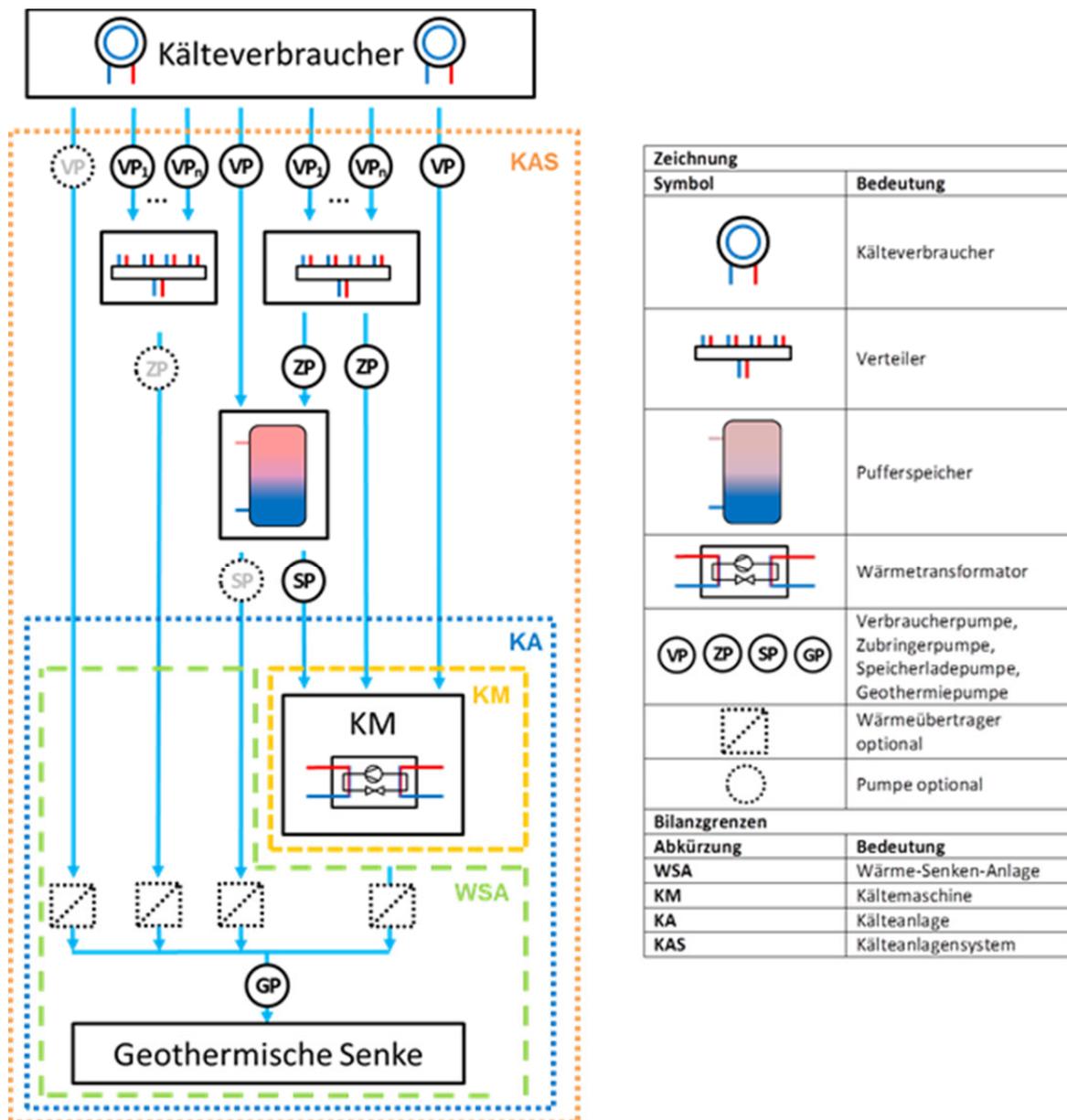


Abbildung 25: Konzeptvarianten einer ausschließlichen geothermischen Kühlung mit den jeweils benötigten Anlagenkomponenten

Die Vielfalt möglicher Konzeptionen und die Verzahnung der nutzungsseitigen und geothermieseitigen Gewerke in der Planung erweitern sich noch beträchtlich, wenn die folgenden weiteren Aspekte berücksichtigt werden:

- Oft ist eine Kombination der geothermischen Kühlung mit anderen Systemen im Sinne einer Hybridkühlung vorteilhaft. Wenn z. B. das Nutztemperaturniveau zeitweise über der Außenlufttemperatur liegt, dann kommt eine freie Außenluft-Kühlung als Ergänzung in Frage. Bei maschineller Kühlung kann dies in analoger Weise gelten. Ein besonderer Fall ist z. B. die Entwicklung bei der Kühlung von Rechenzentren in Richtung höherer Temperaturen – bis hin zur Wasserkühlung mit ganzjährig über der Außentemperatur liegenden Kühlwassertemperaturen.

- Liegen, zumindest zeitweise, gleichzeitig ein Heizbedarf (Wärmepumpenbetrieb) und ein Kühlbedarf an, dann kann während dieser Betriebszeiten eine direkte Deckung des Kühlbedarfs durch die ohnehin betriebene Wärmepumpe der geothermischen Kühlung vorzuziehen sein, um das geothermische System zu entlasten.
- Sind Heiz- und Kühlbedarf vorhanden, aber zeitlich getrennt, dann muss bei vorliegender thermischer Rückwirkung das Geothermiesystem als Speicher bewirtschaftet werden. Zusätzliche Pufferspeicher können hierbei unterstützend eine Lastverschiebung bewerkstelligen.
- Auch für die Wärmebereitstellung sind bei großen Anlagen Hybridlösungen in Betracht zu ziehen. Dies erlaubt die wirtschaftliche Optimierung der geothermischen Anlage und erhöht ebenfalls die Freiheitsgrade im Betrieb.

Die aus den Kombinationsmöglichkeiten von Teilkonzepten resultierende Vielfalt ermöglicht es, Anlagenkonzepte zur optimierten geothermischen Kühlung, ggf. mit Einbindung zusätzlicher Kälteerzeuger, angepasst an den jeweiligen Bedarf zu entwickeln. Die Umsetzung aller erforderlichen Betriebszustände, insbesondere dann, wenn auch ein Heizbetrieb realisiert werden soll, erfordern anspruchsvolle hydraulische Lösungen und stellen besondere Anforderungen an die Regelung und Betriebsführung, was derartige Anlagen häufig komplex macht. Die Auswertung und Begutachtung umgesetzter Anlagen zeigt, dass die Komplexität in der Praxis mitunter zu weit getrieben und insbesondere gewerkeübergreifend nicht verstanden wird. Das Ergebnis sind dann suboptimale Anlagen.

Die wichtigsten Planungsschritte und Besonderheiten beim Einsatz direkter geothermischer Kühlung wurden in Planungshinweisen (s. [Bachseitz2020]) zusammengestellt.

Ausführliche Empfehlungen für die Effizienzbewertung von Anlagen zur Kühlung mit oberflächennaher Geothermie werden in [Ryba2020] gegeben.

Methode/Werkzeug zur Abschätzung des geothermischen Kühlpotenzials von Erdwärmesondenanlagen

Bei der Entwicklung von Konzepten zur Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden, in denen Erdwärmesonden zum Einsatz kommen sollen, tritt in der Planungspraxis häufig die Frage auf, wie viel Energie dem Erdreich entzogen (Heizfall) bzw. in das Erdreich eingebracht (Kühlfall) werden kann. Die Antwort auf diese Frage hängt von vielen Parametern bspw. den Untergrundeigenschaften, der möglichen Anzahl und Länge der Erdwärmesonden auf dem Grundstück, der erlaubten Änderung der Untergrundtemperatur bzw. benötigten Verbrauchertemperatur und dem zu erwartenden Lastprofil für den Wärmeentzug und/oder den Wärmeeintrag ab. Es gab bisher keine Berechnungswerkzeuge, die direkt das geothermische Potenzial von Erdwärmesondenanlagen ermitteln konnten. Nur indirekte Wege über die Er-

mittlung der Temperaturreaktion des Untergrundes aufgrund eines gegebenen Lastprofils standen zur Verfügung. Diese Lücke wird nun mit der im Folgenden vorgestellten Methode und der darauf basierenden Excel-Anwendung geschlossen.

Die Methode zur Abschätzung des geothermischen Potenzials von Erdwärmesonden basiert auf der Methode der Ermittlung der Temperaturänderung des Untergrundes eines gegebenen Erdwärmesondenfeldes aufgrund eines gegebenen Lastprofils (Jahres-, Monatsenergien und Spitzenlast/-dauer) mittels g-functions, wie es beispielsweise im Programm GEOHAND^{light} (Programmbeschreibung siehe [Koenigsdorff2011]) angewendet wird. Dabei wird ein thermisches Widerstandsnetzwerk genutzt, aus dem sich folgende Grundgleichung zur Ermittlung der Temperaturänderung des Untergrundes ableiten lässt.

$$\Delta g [K] = R \left[\frac{m \cdot K}{W} \right] \cdot \dot{q} \left[\frac{W}{m} \right] = R \left[\frac{m \cdot K}{W} \right] \cdot \frac{\dot{Q}}{n_{Bohrloch} \cdot H} \left[\frac{W}{m} \right] = R \left[\frac{m \cdot K}{W} \right] \cdot \frac{\dot{Q}}{L_{Bohrloch,ges}} \left[\frac{W}{m} \right]$$

Die gesamte Temperaturänderung setzt sich dabei aus der Temperaturänderung am Bohrlochrand und aufgrund dreier Lastkomponenten zusammen. Diese sind:

Die (quasi-)stationäre Reaktion im Bohrloch auf die Gesamtleistung:

$$\Delta g_b = R_b \cdot (\dot{q}_0 + \dot{q}_{p,res} + \dot{q}_{sp,res})$$

Die langfristige (stationäre) Reaktion auf die Jahres-Grundlast:

$$\Delta \bar{g}_{F,0} = R_0 \cdot \dot{q}_0$$

Die dynamische Reaktion auf die resultierende monatsperiodische Last:

$$\Delta \bar{g}_{F,p} = R_p \cdot \dot{q}_{p,res}$$

Die dynamische Reaktion auf die resultierende Spitzenlast:

$$\Delta \hat{g}_F = R_{Sp} \cdot \dot{q}_{Sp,res}$$

Abbildung 26 zeigt die Zusammensetzung der Temperaturänderungen aufgrund der drei Lastkomponenten.

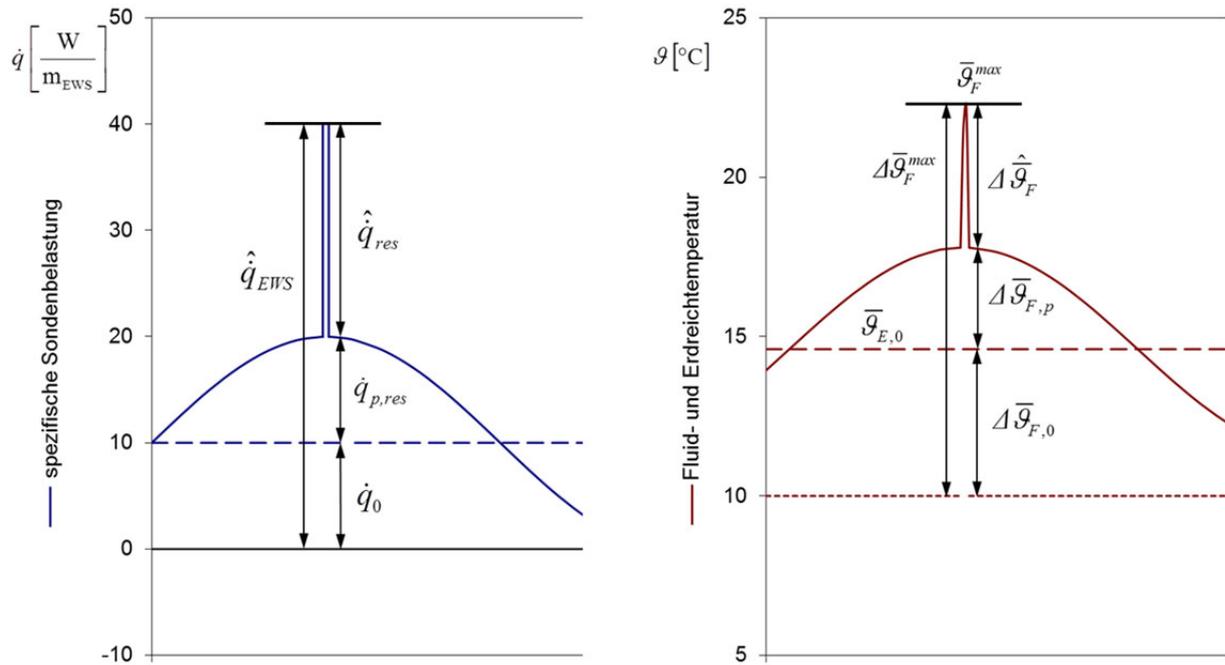


Abbildung 26: Temperaturreaktionen am Bohrlochrand

Die Gleichungen dieser Methode lassen sich so umstellen, dass anstatt die Temperaturänderung aus gegebenen Energien bzw. Leistungen zu berechnen die Energien bzw. Leistungen unter Vorgabe einer maximal erlaubten bzw. möglichen Temperaturänderung berechnet werden können. Die berechneten Energien bzw. Leistungen stellen das geothermische Potenzial der Erdwärmesondenanlage unter den angesetzten Bedingungen dar.

Im Folgenden wird diese neue Methode für den reinen Kühlfall (Wärmeeintrag) vorgestellt. Sie ist jedoch auch analog für den reinen Heizfall (Wärmeentzug) anwendbar.

Für die Potenzialabschätzung müssen neben den thermischen Widerständen R_b , R_0 , R_p und R_{Sp} für das Sondenfeld, welches aufgrund der Grundstücksgeometrie und möglichen Bohrlochtiefe festgelegt werden muss, auch die Dauer der Spitzenlast und die Temperaturspreizung im Sondenkreis bekannt sein oder festgelegt werden. Zur Charakterisierung des Lastganges müssen zudem die Verhältnisse zwischen der periodischen Last bzw. Spitzenlast und der Jahres-Grundlast vorgegeben werden. Sie sind also ebenfalls in der Planungsphase abzuschätzen.

Aus der damit ermittelbaren Jahres-Grundlast lässt sich das Kühlpotenzial der EWS-Anlage in Form der maximal zulässigen periodischen Last und Spitzenlast sowie der maximal zulässigen einbringbaren Wärmeenergie für das gesamte Jahr bzw. den wärmsten Monat ermitteln.

Der begrenzende Faktor für den Wärmeeintrag ist die maximal erlaubte Differenz der Fluid-eintrittstemperatur zur ungestörten Erdreichtemperatur. Sie ist in [VDI 4640 Blatt 2] für die Temperaturänderung im Spitzenlastfall mit 20 K und im Monatsmittel mit 15 K vorgegeben.

Aus diesen zwei Fällen sind somit zwei Potenziale zu ermitteln, wobei sich das endgültige jährliche Kühlpotenzial aus der kleineren der beiden Jahres-Grundlasten ergibt.

Die hier entwickelte Methode ist in einer Excel-Anwendung programmiert und leicht anwendbar. Die Implementierung in eine zukünftige Version des Programms GEO-HAND^{light} ist vorgesehen.

Mit dieser Methode wurde unter anderem eine Parametervariation der Verhältnisse zwischen der periodischen Last bzw. Spitzenlast und der Jahres-Grundlast durchgeführt, um den Einfluss der monatlichen Lastschwankung bzw. der auftretenden Spitzenlasten aufzuzeigen.

Abbildung 27 zeigt die in den Untergrund einbringbare Jahresenergie für eine beispielhafte Erdwärmesonde mit 125 m Tiefe aus [Koenigsdorff2011].

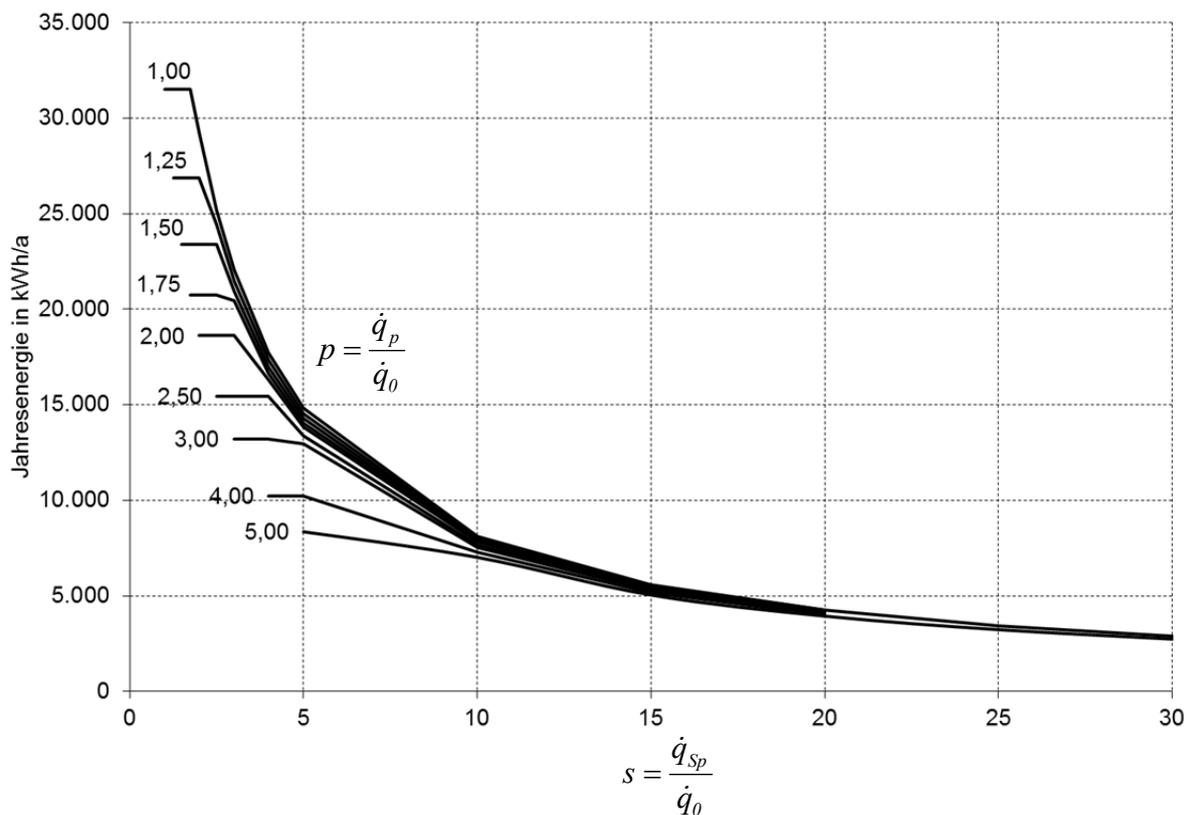


Abbildung 27: In den Untergrund einbringbare Jahresenergie für unterschiedliche Verhältnisse zwischen der periodischen Last bzw. Spitzenlast und der Jahres-Grundlast

Es ist gut zu erkennen, dass bei niedrigen Spitzenlasten die periodische Last einen deutlichen Einfluss auf das Kühlpotenzial hat. Je höher die Spitzenlast wird, desto geringer wird der Einfluss der periodischen Last, weil die erlaubte Temperaturänderung des Untergrunds nahezu vollständig von der Spitzenlast beansprucht wird.

Ein weiteres Beispiel, das den Einfluss der Lastcharakteristik, insbesondere der Spitzenlast, eines Bürogebäudes auf das geothermische Kühlpotenzial zeigt, wird in [Bachseit2021] vorgestellt.

Kühlung mit oberflächennaher Geothermie am Beispiel einer Rechenzentrumskühlung

Die Serverkühlung in Rechnerräumen und Rechenzentren ist ein stetig wachsender Bereich mit zunehmender Bedeutung. Der steigende Strombedarf hierfür spiegelt direkt den Anstieg des daraus resultierenden Kühlbedarfs wieder (s. Abbildung 28). Aufgrund der hohen Relevanz und der Vielfalt an Möglichkeiten, die Kühlung der Serverracks zu bewerkstelligen, wurde die Serverkühlung als exemplarischer Anwendungsfall für eine praxisnahe Untersuchung der Herausforderungen und Möglichkeiten der Kühlung mit ONG herangezogen.

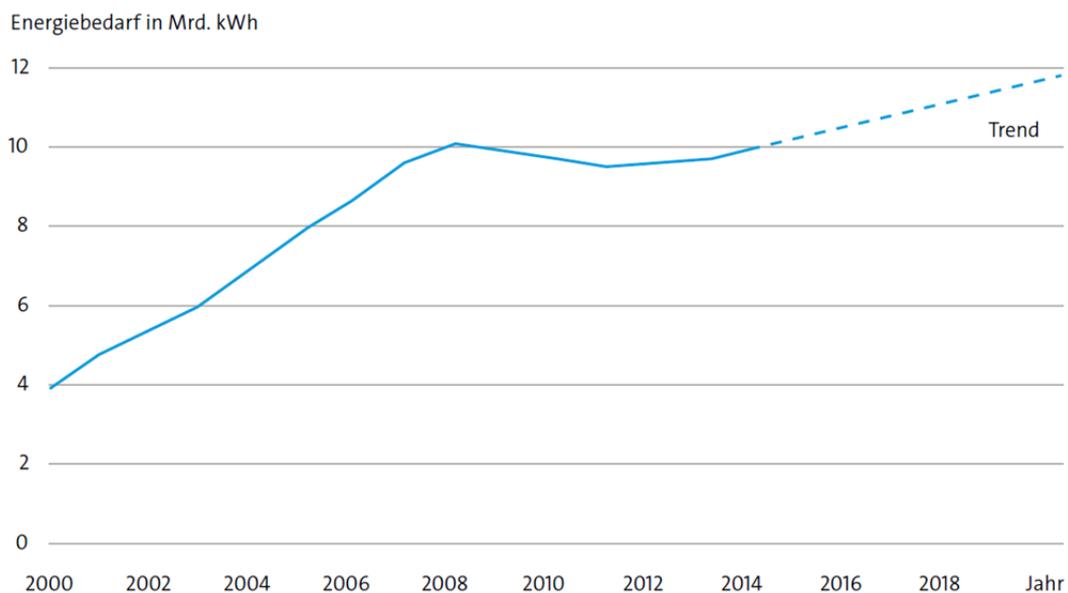


Abbildung 28: Entwicklung des Stromverbrauchs der Server und Rechenzentren in Deutschland [BITKOM2015]

Als Ausgangspunkt und konkrete Anwendung diente das Rechenzentrum der Hochschule Biberach, weil dieses – neben der direkten Verfügbarkeit und Zugänglichkeit vor Ort – einem kontinuierlichen Energiemonitoring durch die Arbeitsgruppe Kältetechnik an der Hochschule unterzogen wird. Aufbauend auf den hierzu verfügbaren Daten und Informationen wurde die Serverkühlung von Rechenzentren mit oberflächennaher Geothermie sowohl grundsätzlich als auch am konkreten Beispiel systemtechnisch, ökologisch (Primärenergiebedarf) und ökonomisch untersucht und anderen Varianten gegenübergestellt [Schelkle2018]. Neben einem Luft-Erdreich-Wärmeübertrager zur Außenluftkühlung wurden die direkte ONG-

Kühlung mit Grundwasserbrunnen sowie mit Erdwärmesonden (EWS) betrachtet (s. Abbildung 29 und Abbildung 30).

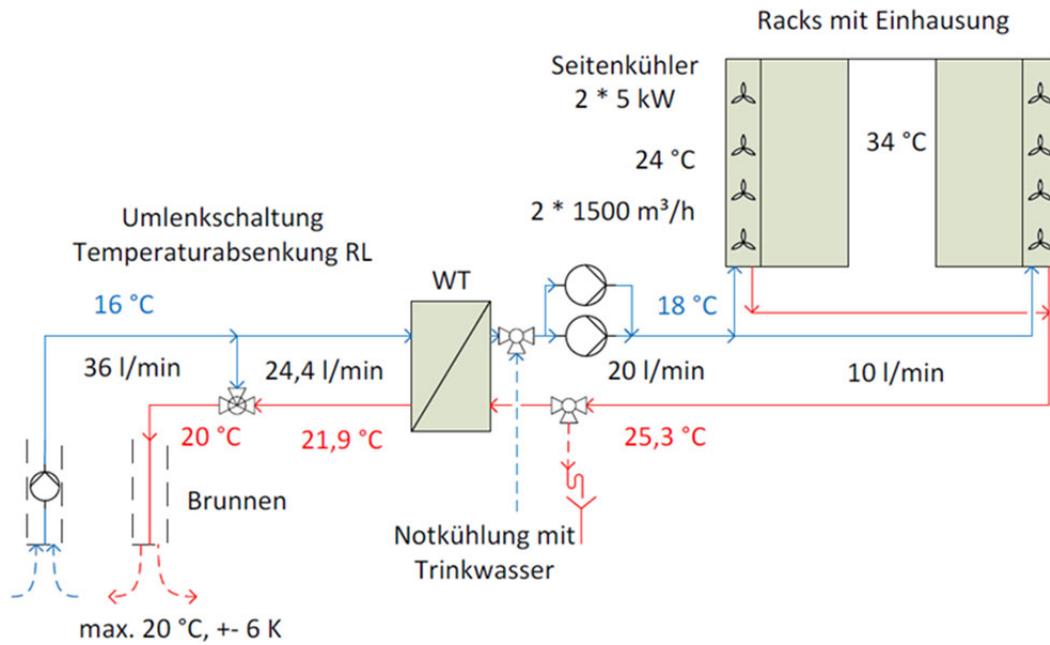


Abbildung 29: Funktionsschema Serverkühlung mit Grundwasserbrunnen und Umluft-Seitenkühlern [Schelkle201]

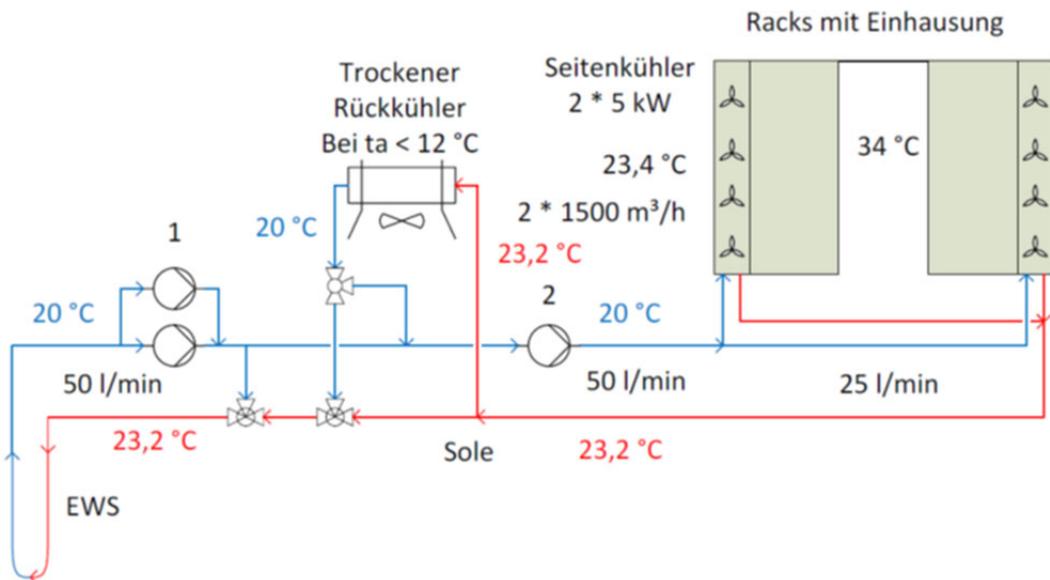


Abbildung 30: Funktionsschema Serverkühlung mit EWS und Umluft-Seitenkühlern [Schelkle2018]

Die wesentlichen Ergebnisse der Studie [Schelkle2018] sind:

- Die direkte Kühlung mit Brunnen und EWS ist technisch möglich und im untersuchten Beispiel bei längerfristiger Betrachtung (> 10 Jahre) im wirtschaftlichen Bereich, wobei die Grundwasseranlage über 25 % (Gesamtkosten über die Betriebszeit) günstiger abschneidet.
- Der Unterschied zwischen dem Geothermiesystem ohne thermische Rückwirkung (Grundwasserbrunnen) und dem mit thermischer Rückwirkung (EWS) zeigt sich im untersuchten Beispiel darin, dass bei der EWS-Anlage für ein wirtschaftlich tragfähiges Konzept zusätzlich ein Außenluft-Rückkühler zur direkten Außenluftkühlung bei Außentemperaturen unter 12 °C erforderlich ist. Damit wird der langjährige Temperaturanstieg der EWS minimiert, die Abwärme im Winter und einem Teil der Übergangszeit wird dabei allerdings an die Außenluft abgeführt.
- Zumindest bei kleineren Anlagen wie im Falle des HBC-Rechenzentrums ist eine Kühlung mit einem zentralen Lüftungsgerät eine einfach zu realisierende Alternative. Für eine Zulufttemperatur von 24 °C an den Server-Racks kann bis 23 °C Außentemperatur direkt die Außenluft genutzt werden, was am Standort Biberach im Mittel an über 90 % des Jahres der Fall ist (Abbildung 31).
- Bei großen und neu auszustattenden Rechenzentren kann auch die Flüssigkühlung von Prozessoren in Betracht gezogen werden. Dabei sind Wassertemperaturen über 40 °C erreichbar, was eine direkte Einspeisung in entsprechend ausgelegte Nieder-temperatur-Wärmenetze ermöglicht.
- Eine hausinterne Nutzung der Abwärme aus der Serverkühlung mittels Wärmepumpen wurde nicht näher untersucht, ist aber selbst bei konventionell ausgelegten Seitenkühlern als Wärmequelle für eine Wärmepumpe attraktiv.

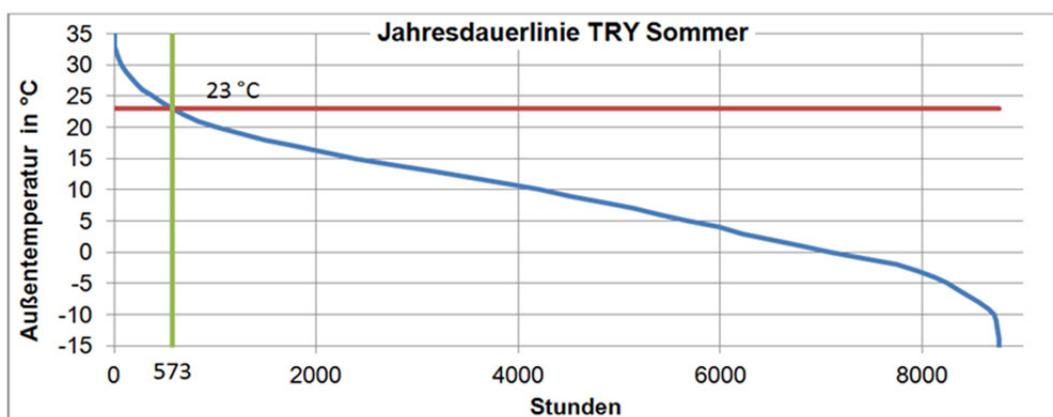


Abbildung 31: Jahresdauerlinie der Außentemperatur des Testreferenzjahres für Biberach a. d. Riß [Schelkle2018]

Die Ergebnisse zeigen einerseits, dass eine energetisch und wirtschaftlich interessante Kühlung von Servern wie im vorliegenden Fall mittels oberflächennaher Geothermie grundsätzlich möglich ist. Andererseits zeigt sich auch, dass dieses Potenzial erst durch ein abgestimmtes Gesamtkonzept aus Kältenutzung und Kältebereitstellung erschließbar wird.

Weiterhin ist die Kühlung mittels ONG lediglich ein möglicher Baustein einer energieeffizienten Serverkühlung und/oder Abwärmenutzung aus Rechenzentren. Zusätzlich sollten Alternativen bzw. Systemkombinationen z. B. mit direkter Außenluftkühlung und Abwärmenutzung mit Wärmepumpen (oder, im Falle direkter Wasserkühlung, eine direkte Abwärmenutzung) betrachtet werden. Die Integration der ONG in ein tragfähiges Gesamtkonzept der Server-Kühlung ist damit eine hochgradig interdisziplinäre Aufgabe, weil für die Systeme der Nutzung, der Kälte- und Kühltechnik sowie der ONG vielfältige Auslegungskombinationen existieren, die aufeinander abgestimmt und gegeneinander abgewogen werden müssen.

2.3.6 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Zum Zeitpunkt der Berichtslegung sind den Autoren keine weiteren Arbeiten auf diesem Gebiet bekannt geworden.

2.3.7 Veröffentlichung der Ergebnisse, Ergebnis- und Forschungstransfer

Tagungsbeiträge:

R. Koenigsdorff: Kombinierte Heiz- und Kühl-Konzepte für Nichtwohngebäude mit oberflächennaher Geothermie, 28. Zittauer Energieseminar, Görlitz, 27. November 2018.

M. Bachseitz, R. Koenigsdorff: *Kühlung mit oberflächennaher Geothermie – Möglichkeiten und Grenzen*. 27. C.A.R.M.E.N.-Symposium "Energie- & Ressourcenwende: Impulse aus dem ländlichen Raum", Straubing, 01.-02. Juli 2019.

M. Bachseitz, M. Ryba, R. Koenigsdorff: *Einfluss der Lastprofilcharakteristik auf das geothermische Potenzial von Erdwärmesonden*. eingereicht und angenommen für GeoTHERM 2021 (ursprünglich für ausgefallene GeoTHERM 2020 vorgesehen)

Veröffentlichungen:

R. Koenigsdorff, M. Ryba, M. Bachseitz: *Geo.COOL - Kühlung mit oberflächennaher Geothermie*. bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau 02/2020, Bonn: wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, 2020, ISSN 1611-1478, S. 58-65

M. Bachseitz, M. Ryba, R. Koenigsdorff: *Einfluss der Lastprofilcharakteristik auf das geothermische Potenzial von Erdwärmesonden*. vorgesehen für Tagungsband zur GeoTHERM 2021 (ursprünglich für ausgefallene GeoTHERM 2020 vorgesehen)

M. Ryba, R. Koenigsdorff, M. Bachseitz: *Empfehlungen für die Effizienzbewertung von Anlagen zur Kühlung mit oberflächennaher Geothermie*. Veröffentlichung in Vorbereitung

M. Bachseitz, M. Ryba, R. Koenigsdorff: *Planungshinweise Kühlung mit oberflächennaher Geothermie*. Veröffentlichung in Vorbereitung

2.3.8 Literatur

[AHO2011] Ausschuss der Verbände der und Kammern der Ingenieure und Architekten für die Honorarordnung e.V. (Hrsg.): *Planungsleistungen im Bereich der Oberflächennahen Geothermie*. Leistungsbild und Honorierung Nr. 26, Bundesanzeiger Verlag, 2011

[Bachseitz2020] M. Bachseitz, M. Ryba, R. Koenigsdorff: *Planungshinweise Kühlung mit oberflächennaher Geothermie*. Veröffentlichung in Vorbereitung

[Bachseitz2021] M. Bachseitz, M. Ryba, R. Koenigsdorff: *Einfluss der Lastprofilcharakteristik auf das geothermische Potenzial von Erdwärmesonden*. vorgesehen für Tagungsband zur GeoTHERM 2021 (ursprünglich für ausgefallene GeoTHERM 2020 vorgesehen)

[BITKOM2015] BITKOM: *Energieeffizienz in Rechenzentren - Leitfaden*, Berlin, 2015

[Griebler2015] C. Griebler, et al: *Auswirkungen thermischer Veränderungen infolge der Nutzung oberflächennaher Geothermie auf die Beschaffenheit des Grundwassers und seiner Lebensgemeinschaften – Empfehlungen für eine umweltverträgliche Nutzung*. Texte 54/2015, Hrsg.: Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, ISSN 1862-4804

[Koenigsdorff2011] R. Koenigsdorff: *Oberflächennahe Geothermie für Gebäude – Grundlagen und Anwendungen zukunftsfähiger Heizung und Kühlung*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2011, ISBN 978-3-8167-8271-1

[Koenigsdorff2013] R. Koenigsdorff: *Gebäudeklimatisierung mit oberflächennaher Geothermie*. bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, Sonderheft Geothermie 2014, Bonn: wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, 2013, ISSN 1611-1478, S. 30-37

[Koenigsdorff2020] R. Koenigsdorff, M. Ryba, M. Bachseitz: *Geo.COOL - Kühlung mit oberflächennaher Geothermie*. bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau 02/2020, Bonn:

wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, 2020, ISSN 1611-1478, S. 58-65

[Menberg2013] K. Menberg, P. Bayer, K. Zosseder, S. Rumohr, P. Blum: *Subsurface urban heat islands in German cities*. Science of The Total Environment, 442, 123–133, doi:10.1016/j.scitotenv.2012.10.043, 2013.

[Ryba2020] M. Ryba, R. Koenigsdorff, M. Bachseitz: *Empfehlungen für die Effizienzbewertung von Anlagen zur Kühlung mit oberflächennaher Geothermie*. Veröffentlichung in Vorbereitung

[Schlekle2018] R. Schelkle: *Kühlung von Rechenzentren mit oberflächennaher Geothermie – Anwendungsbeispiel Hochschule Biberach*. Masterarbeit, Hochschule Biberach, März 2018

[Schwenk2016] W. Schenk: *Erdreichkollektoranlage unter der Fundamentplatte mit Wasser gefüllt für ein Studentenwohnheim (Haunstetten) in einem Wasserschutzgebiet*. Online-Tagungsband zum 15. OTTI-Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie, 18.-19. April 2016, Kloster Banz, Bad Staffelstein

[VDI 4640 Blatt 1] VDI 4640 Blatt 1:2010-06: *Thermische Nutzung des Untergrunds; Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte*. Berlin: Beuth Verlag, 2010

[VDI 4640 Blatt 2] VDI 4640 Blatt 2:2019-06: *Thermische Nutzung des Untergrunds; Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen*. Berlin: Beuth Verlag, 2019

[VDAM 24019] VDMA 24019:2015-06 Entwurf: *Abwärmenutzung von Kälteanlagen*. Berlin: Beuth Verlag, 2015

2.4 AP 3: Analyse von Best-Practice-Beispielen (IGS, FKZ: L75 17008; HBC, FKZ: L75 17003)

2.4.1 Abstract zu den Forschungsergebnissen AP 3

Die oberflächennahe Geothermie steht im Wohnungsbau in direkter Konkurrenz zu günstig zu installierenden Luft/Wasser-Wärmepumpen und hat dadurch mehr denn je Anspruch ihre Energie- und Kosteneffizienz transparent und nachvollziehbar darzustellen. Die Wirtschaftlichkeit einer Geothermieanlage erfolgt über die Ermittlung einer Jahresarbeitszahl (JAZ) und eindeutig definierten Bilanzgrenzen. Die Beurteilung des geothermischen Betriebs auf die Schutzgüter Boden und Wasser sowie die gegenseitige Beeinflussung benachbarter Geothermieabsorber erfolgt durch die Auswertung von Temperaturmessungen im Mehrphasenmedium Boden. Die Grundlage für diese Betrachtungen bilden abgesicherte und zuverlässige Messdaten, deren konsequente und systematische Erhebung derzeit noch nicht zum Stand der Technik gehören.

2.4.2 Motivation und Hintergründe

Mittlerweile existieren an den unterschiedlichen Forschungseinrichtungen diverse Erfahrungen mit den Systemen der oberflächennahen Geothermie. Durch den Betrieb von Versuchsanlagen sowie die Betreuung und das Monitoring von existierenden Geothermieanlagen verfügen einige Teilnehmer dieses Verbundprojektes über zahlreiche Messdaten unterschiedlicher Qualität und Tiefe. Darüber hinaus existieren an den einzelnen Forschungseinrichtungen Erfahrungen über die Ausrüstung von Geothermieanlagen mit Messtechnik, den Einsatz unterschiedlicher Messsensoren, geeignete Messintervalle und Anordnung der Sensoren. Diese Erfahrungen sollen im Rahmen dieses Arbeitspaketes ausgetauscht und in einen gemeinsamen Entwurf zur Ausrüstung von Erdwärmesonden mit Messtechnik überführt werden.

Die vorhandenen Messdaten der unterschiedlichen Projekte können der Kalibrierung (Benchmarking) von analytischen und numerischen Berechnungsmodellen dienen. Die Grundvoraussetzung hierfür ist, dass die Messergebnisse eindeutig und nachvollziehbar dokumentiert sind.

2.4.3 Aufgabenstellung

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes sollen vorhandene Messdaten von Geothermieanlagen systematisch aufbereitet und zusammengeführt werden, sodass eine Datengrundlage für zukünftige Modellierungsaufgaben entsteht. Ein Auftakttreffen zwischen den beteiligten Partnern des Arbeitspaketes dient der Abstimmung und Vorstellung vorhandener Projekterfahrungen und Inhalte (IGS: Tunnelgeothermieanlagen Stuttgart-Fasanenhof und Jenbach, Österreich; Geothermieanlage Hans-Rehn-Stift, Stuttgart; HBC: Gebhard-Müller-Schule und

Verwaltungsgebäude in Biberach u. a. m.). Der Schwerpunkt dieser Abstimmung liegt neben dem Abgleich der eigentlichen Messdaten und einem Erfahrungsaustausch zu den durchgeführten Messungen in der Festlegung einer erforderlichen Datenstruktur zur Aufbereitung der Daten.

Die bei den Antragstellern vorhandenen Projekterfahrungen und Messdaten sollen durch eine Recherche nach weiteren Messdatensätzen ergänzt werden (z. B. Demoprojekte aus dem Förderprogramm „Energieoptimiertes Bauen – EnOB“ des Bundeswirtschaftsministeriums; Messwerte Dritter: Industrie & Bauherren).

Die Ergebnisse dieses Arbeitspaketes werden in Form eines Übersichtsblattes mit einem Entwurf zur Ausrüstung von Erdwärmesonden mit Messtechnik sowie mit einer Zusammenstellung der Messdaten der unterschiedlichen Forschungsprojekte dokumentiert. Diese Zusammenstellung dient ausschließlich der internen Verwendung innerhalb des Verbundprojektteams. Auf Anfrage können die Daten ggf. auch für Projektexterne zur Verfügung gestellt werden.

2.4.4 Planung und Ablauf des AP 3

Zu Beginn der Bearbeitung des AP 3 fand ein Workshop der Verbundpartner statt, der die Vorstellung der einzelnen Geothermieprojekte an den unterschiedlichen Forschungseinrichtungen zum Schwerpunkt hatte. Nachfolgend werden die diskutierten Geothermieanlagen vorgestellt und die vorhandenen Messdaten beschrieben.

Tunnelgeothermieanlage Stuttgart-Fasanenhof

Der Tunnel Stuttgart-Fasanenhof ist ein seicht liegender, ca. 380 m langer Stadtbahntunnel im Südwesten der Stadt Stuttgart. Der bergmännisch aufgefahrenen, zweigleisigen Tunnel besitzt eine Überdeckung von ca. 10 m und ist durch eine Spritzbetonaußenschale und eine Ortbetoninnenschale ausgebaut. Zwei der in der Regel 10 m langen Tunnelblöcke wurden mit insgesamt ca. 800 m Absorberleitungen mit einem Außendurchmesser von 25 mm ausgerüstet, wodurch eine Fläche von ca. 360 m² geothermisch aktiviert wird. Neben dem Absorbersystem wurde im Tunnel Stuttgart-Fasanenhof ein intensives Messsystem zur Überwachung des Tunnelklimas, der Tunnelschalentemperatur sowie der Baugrundtemperatur installiert. Darüber hinaus existieren Messdaten der angeschlossenen Anlagentechnik. Die TGTA Stuttgart-Fasanenhof wurde im Zeitraum 2011 - 2017 durch die Universität Stuttgart als reine Testanlage betrieben. In diesem Zeitraum wurden Wärmestromdichten von bis zu 30 W/m² erzielt. Ansprechpartner für dieses Projekt ist das Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart.

Tabelle 6: Exemplarischer Auszug der Messdaten der Tunnelgeothermieanlage Stuttgart-Fasanenhof

Zeit	Eintrittstemperatur		Austrittstemperatur			Volumenstrom		Leistung [W]		
	P204 TV 73 1	P204 TV 73 2	P204 TR 73 1	P204 TR 73 2	TR 73 m	DF 73 1	DF 73 2	Q 73 1	Q 73 2	Q 73
14.04.2011 18:00	25,3	25,3	15,7	15,1	15,4	292,1	264,7	3.163,6	3.058,4	6.221,9

Tunnelgeothermieanlage Jenbach

Der Tunnel Jenbach ist ein ca. 3,5 km langer zweigleisiger Hydroschild-Tunnel, in dem ein zusammenhängender Abschnitt von 54 m mittels sogenannter Energietübbingen geothermisch aktiviert wurde. In den Tübbingen sind Rohrleitungen aus vernetztem Polyethylen mit einem Außendurchmesser von 20 mm angeordnet und mit einem Abstand von 25 - 30 cm verlegt. Den Abnehmer der geothermischen Energie bildet ein Gebäude der österreichischen Gemeinde Jenbach, das einen maximalen Heizwärmebedarf von 80 kW bezogen auf eine Außentemperatur von -16 °C hat. Im Zuge des Praxisbetriebs von 2012 bis 2014, inklusive eines im Jahr 2013 durchgeführten Testbetriebs, konnte eine Wärmestromdichte von ca. 12,5 W/m² erreicht werden. Für die Tunnelgeothermieanlage Jenbach existieren Messdaten der Tunnellufttemperatur, der Tunnelschalentemperatur sowie der Ein- und Austrittstemperaturen in den Primärkreislauf. Darüber hinaus gibt es Informationen über die Anlagenparameter der angeschlossenen Wärmepumpe. Ansprechpartner für dieses Projekt ist das Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart.

Tabelle 7: Exemplarischer Auszug der Messdaten der Tunnelgeothermieanlage Jenbach

	TU 1	TU 2	AB 21	AB 22	ET 12	ET 21	ET 22	ET 23	ET 24
13.03.2012 11:04	10,06524 73	10,05700 95	8,808024 77	8,980932 76	9,422863 25	9,897775 33	9,900521 13	10,18332 44	9,820919 62

Erdwärmesondenanlage Bad Wurzach

Eine detaillierte Beschreibung dieser Geothermieanlage ist dem Arbeitspaket 4a zu entnehmen. Ansprechpartner für dieses Projekt ist das Institut für Wasserbau (VEGAS) der Universität Stuttgart.

Geothermiesondenfeld Hans-Rehn-Stift (Stuttgart)

Beim Hans-Rehn-Stift handelt es sich um eine Altenwohnanlage, deren Wärmeversorgung durch unterschiedliche Wärmebereitstellungsarten wie z. B. eine Kraft-Wärme-Kopplungsanlage, Solarthermie und eine Luftwärmepumpe sichergestellt wird. Darüber hinaus wird die Grundlast des Wärmebedarfs über ein Erdwärmesondenfeld bestehend aus 21

Erdwärmesonden mit einer mittleren Tiefe von 90 m gedeckt. Die Haustechnikanlage des Hans-Rehn-Stifts wird durch die Stadt Stuttgart einem intensiven Monitoring unterzogen, so dass über einen langen Zeitraum Messdaten sämtlicher Anlagenparameter zur Verfügung stehen. Mit Blick auf das Erdwärmesondenfeld liegen Informationen zu den Ein- und Austrittstemperaturen des Primärkreislaufes vor sowie Messdaten der Untergrundtemperaturen im Sondennahfeld. Bei der Errichtung des Erdwärmesondenfeldes wurden mehrere Geothermal-Response-Tests durchgeführt, über die eine lückenlose Dokumentation zur Verfügung gestellt werden kann. Ansprechpartner für dieses Projekt ist das Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart.

Tabelle 8: Exemplarischer Auszug der Messdaten des Erdwärmesondenfeldes Hans-Rehn-Stift

Datenpunkt	W_ALE	W_p5	Q_ss	Pth_ss	V_ss	T_vl_ss	WMZT_rl_ss	WMZQ_sole	Pth_sole	V_sole
	W1	W2	WMZ2	WMZ2	WMZ2	WMZ2	WMZ2	WMZ1	WMZ1	WMZ1
Einheit	[MWh]	[MWh]	[MWh]	[kW]	[m ³ /h]	[°C]	[°C]	[MWh]	[kW]	[m ³ /h]
01.01.2014 00:15	14,884566	7,939100	830	0	28,5393	26,3484	1872,060	31,0149		

Simulation der Nutzenergiebedarfe für das Thermoaktive Bauteilsystem eines typischen Bürogebäudes

Für dieses Arbeitspaket wurden die Ergebnisse einer Simulation des Nutzenergiebedarfs für die Beheizung und Kühlung eines typischen Bürogebäudes über ein Thermoaktives Bauteilsystem aufbereitet und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Es handelt sich dabei um ein dreistöckiges Gebäude mit ca. 1.000 m²_{NGF} aufgeteilt in 24 Büroräume und drei Verkehrszonen. Die Lastprofile wurden unter anderem für die Untersuchungen im Arbeitspaket 1b verwendet.

Gebhard-Müller-Schule Biberach

Aus mehreren Monitoringprojekten, in denen der Anlagenbetrieb der Gebhard-Müller-Schule Biberach intensiv und auch langjährig untersucht und optimiert wurde, standen große Datensätze zur Verfügung. Aus diesen wurde ein Lastprofil für die Gebäudekühlung ausgewählt und für eine Lastprofilcharakterisierung in AP 2 herangezogen.

Großes Bürogebäude in Biberach

Die aus einem Vorgängerprojekt vorhandenen Messdaten eines großen Bürogebäudes in Biberach mit 36 Erdwärmesonden als Wärmequelle und –senke wurden im Rahmen des Projektes auf Brauchbarkeit geprüft, aufbereitet und für eine Lastprofilcharakterisierung und Potenzialabschätzung in Arbeitspaket 2 verwendet. Die Erlaubnis zur Verwendung in weiteren F&E-Projekten wurde beim Eigentümer angefragt.

Nach der Vorstellung der unterschiedlichen Projekte wurden im Rahmen des Workshops die Erfahrungen bei der Ausrüstung der Geothermieanlagen mit Messtechnik diskutiert sowie das Vorgehen zur Aufzeichnung der Messdaten erläutert. Aufbauend auf diesem Expertengespräch wurde ein Vorschlag zur Ausrüstung von zukünftigen Erdwärmesonden mit Messtechnik erarbeitet.

2.4.5 Ausführliche Darstellung der Ergebnisse AP 3

Die Berichterstattung der einzelnen Geothermieprojekte der einzelnen Partner dieses Verbundprojektes hat gezeigt, dass die Methoden der Ausrüstung von Geothermieanlagen sowie die Durchführung von Messungen während des Betriebs sehr unterschiedlich sind. Folgende Ursachen konnten hierfür identifiziert werden:

- Einige Geothermieanlagen werden ausschließlich als Testanlage zu wissenschaftlichen Zwecken betrieben, andere Anlagen dienen der realen Wärmeversorgung.
- Es existieren sehr unterschiedliche Arten der Ausbildung des Wärmeübertragers im Untergrund, wie z. B. Doppel-U-Rohr-Sonden, Koaxialsonden, oder Wärmeübertrager in der Tunnelschale. Dies erfordert angepasste Monitoringsysteme, die sich nicht in allen Punkten standardisieren lassen.
- Oft ist zum Zeitpunkt der Ausrüstung einer Geothermieanlage die spätere Verwendung der Messdaten noch nicht bekannt. So ist es z. B. im Vorwege schwer zu beurteilen, welche Messdaten in welcher zeitlichen Auflösung für eine numerische oder analytische Vergleichsberechnung benötigt werden.
- Geothermieprojekte sind finanziell unterschiedlich ausgestattet, wodurch die Möglichkeiten zur Ausrüstung der Anlage mit Messfühlern teilweise sehr beschränkt sind.
- Privaten oder öffentlichen Auftraggebern ist die Erforderlichkeit eines gezielten Monitorings oft nur schwer zu vermitteln, besonders wenn die aufgezeichneten Messdaten vor allem von wissenschaftlichem Interesse sind.
- Die Messdatenerfassung bzw. die Bezeichnung der erhobenen Messdaten folgt keinem einheitlichen System. Ein Grund hierfür ist dem Umstand geschuldet, dass die Planung eines Monitorings von Ingenieuren unterschiedlichster Fachdisziplinen durchgeführt wird. Somit ist die Festlegung einer gemeinsamen normativen Grundlage schwierig.

Im Rahmen des Arbeitspaketes 3 wurden die Messdaten der unterschiedlichen Geothermieprojekte der jeweiligen Projektpartner "lesbar" und damit für die Partner des Verbundprojektes zugänglich gemacht. Somit steht eine Datengrundlage zur Verfügung, die z. B. für die Validierung von computergestützten Berechnungsmodellen zum Einsatz kommen kann. Darüber hinaus können die Messdaten dieser Projekte im Zuge von wissenschaftlichen Arbeiten weiter ausgewertet und hierdurch zu einem besseren Verständnis der Technologie "Oberflächennahe Geothermie" führen.

Im Rahmen der projektinternen Besprechungen wurde festgestellt, dass eine allgemeingültige Vorgehensweise zur Planung des Monitorings einer Geothermieanlage nicht definiert werden kann. Vor diesem Hintergrund wurde durch das Projektteam eine Planungsgrundlage für die zahlenmäßig größte Gruppe von Wärmeübertragern im Bereich der Geothermie, die Erdwärmesonde, erarbeitet.

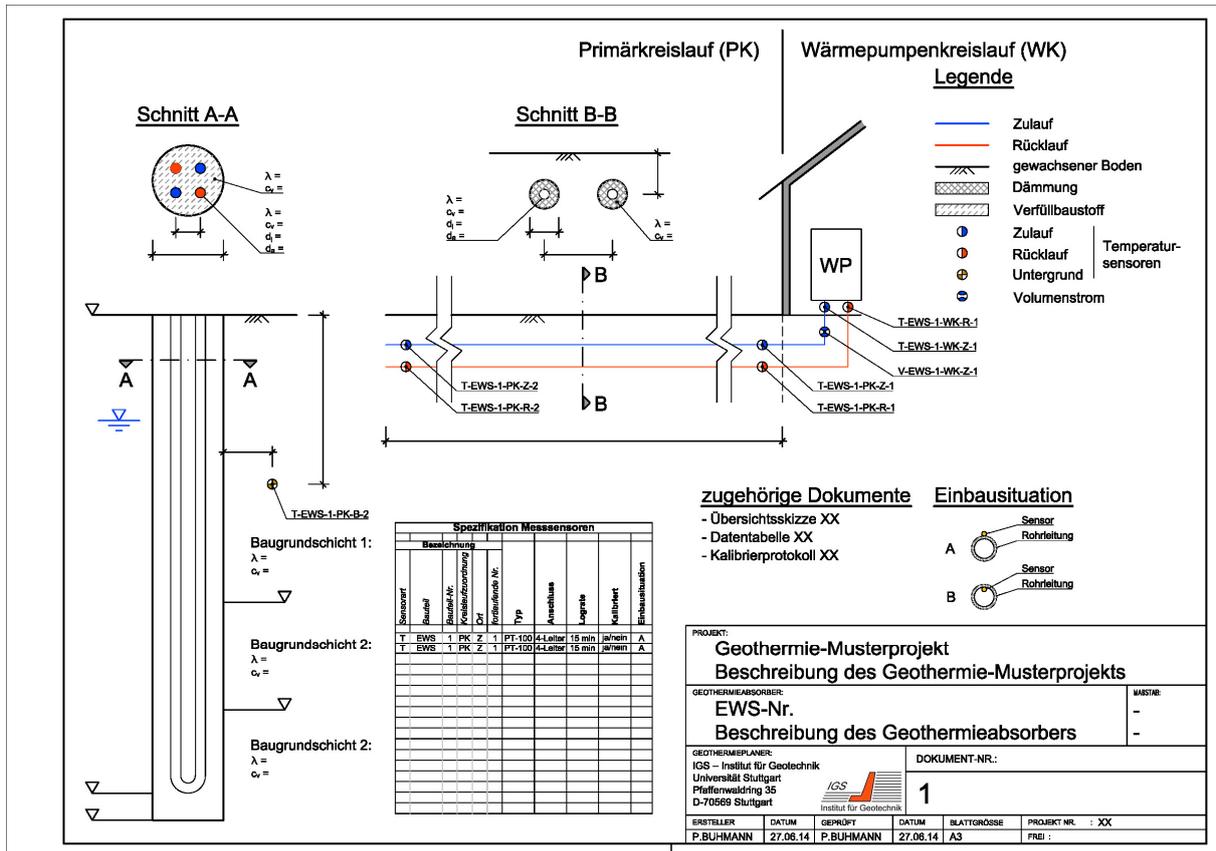


Abbildung 32: Monitoringkonzept zur Ausrüstung einer Erdwärmesonde mit Messensoren

Die Abbildung 32 zeigt das erarbeitete Monitoringkonzept. Zunächst wurde ein Bezeichnungsschlüssel für die unterschiedlichen Messensoren entwickelt, der zunächst die Sensorart (z. B. T=Temperaturmessung) und danach das Geothermiebauteil beschreibt. Es folgt die Kennzeichnung des entsprechenden Kreislaufes (z. B. PK=Primärkreislauf) und des Ortes innerhalb des Kreislaufes (z. B. Z=Zulauf). Nach einer fortlaufenden Nummer werden dann wichtige Informationen zum Sensor und dessen Anschlussart aufgeschlüsselt. Es folgt das eingestellte Aufzeichnungsintervall sowie eine Information über die Qualität der Messung gefolgt von einer Beschreibung über die Einbausituation. Hierfür finden sich entsprechende Hinweisbilder im Monitoringkonzept.

Einen wesentlichen Bestandteil des Konzeptes bildet eine standardisierte Skizze der Gesamtanlage bestehend aus der Erdwärmesonde, den Zu- und Rücklaufleitungen sowie der angeschlossenen Wärmepumpe. Neben der Zuordnung der einzelnen Messsensoren werden innerhalb der Skizze wichtige Informationen aufgenommen, die im Zusammenhang mit der späteren Auswertung der Messdaten von entscheidender Bedeutung sind.

Es wurden Empfehlungen für die Auswahl von Messtechnik (bspw. einzusetzende Sensortypen) und zur Messdatenaufzeichnung (bspw. Messintervalle) erarbeitet. Diese sollen gemeinsam mit den Empfehlungen zur Effizienzbewertung in [Ryba2020] veröffentlicht werden.

2.4.6 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Zum Zeitpunkt der Berichtslegung sind den Autoren keine weiteren Arbeiten auf diesem Gebiet bekannt geworden.

2.4.7 Veröffentlichung der Ergebnisse, Ergebnis- und Forschungstransfer

M. Ryba, R. Koenigsdorff, M. Bachseitz: *Empfehlungen für die Effizienzbewertung von Anlagen zur Kühlung mit oberflächennaher Geothermie*. Veröffentlichung in Vorbereitung

2.4.8 Literatur

[Ryba2020] M. Ryba, R. Koenigsdorff, M. Bachseitz: *Empfehlungen für die Effizienzbewertung von Anlagen zur Kühlung mit oberflächennaher Geothermie*. Veröffentlichung in Vorbereitung

2.5 AP 4a: Quantifizierung der Energieströme und des thermischen Verhaltens während der Kühlphase eines Gebäudes bei Verwendung einer Doppel-U- bzw. vier Koaxialerdwärmesonden am Feldstandort BauGrund Süd in Bad Wurzach (VEGAS, FKZ: L75 17007)

2.5.1 Abstract zu den Forschungsergebnissen AP 4a

Der aktuelle Zustand des von VEGAS aufgebauten und von 2011 bis 2014 in Rahmen des Projekts „Geomatrix.bw“ (Bisch, et al., 2014) betriebenen Überwachungssystem der Geothermie-Anlage auf dem Gelände Werk 2 der Firma Baugrund Süd wurde innerhalb des Projekts „GEO.Cool“ überprüft. Die Datenaufzeichnung wurde nicht unterbrochen, so dass ein Datensatz von 9 Jahren zur Verfügung steht: hochaufgelöste Temperaturmessungen im Grundwasser und im Untergrund um die Sonde herum sowie Daten über deren Betrieb wie Temperatur am Zulauf und Rücklauf der Sonde, Durchfluss, entzogene und zugeführte Wärmemengen. Innerhalb dieses Projekts wurden diese Daten vollständig bearbeitet, um den Einfluss des gemischten Anlagen-Betriebs auf Grundwasser und Boden sowie Energiebilanzen für den Boden und die Wärmepumpenanlage über die Jahre und die Effizienz der Anlage aufzuzeigen.

2.5.2 Motivation und Hintergründe

Der Energieaufwand zur Kühlung von z. B. Bürogebäuden ist insbesondere aus architektonischen Gründen (Glasfassaden), durch hohe interne Wärmelasten (IT-Ausstattung) und höhere Komfortansprüche gestiegen.

Eine optimale Nutzung des Untergrundes für Gebäude ist dann gegeben, wenn diese nicht nur beheizt, sondern im Sommer auch gekühlt werden. Grundwasser und Erdreich haben in größeren Tiefen, d. h. > 8 m Tiefe, Temperaturen von ca. 9 °C bis 10 °C. Somit ist die Temperatur des Untergrundes im Sommer geringer als die Umgebungstemperatur und kann entweder direkt oder mit Hilfe einer erdgekoppelten Wärmepumpe über Wand-, Decken- oder Fußbodenheizung zur Raumkühlung genutzt werden. Die Kopplung der Kälte- und Wärmeversorgung ist grundsätzlich die optimale Anwendung beim Einsatz von erdgekoppelten Wärmepumpen. Bei dieser Betriebsweise regeneriert sich der Untergrund schneller als bei ausschließlichem Heiz- oder Kühleinsatz.

2.5.3 Aufgabenstellung

Ein Beispiel für solch einen Betrieb ist die oberflächennahe Geothermieanlage, die sich auf dem Gelände Werk 2 der Firma BauGrund Süd befindet. Die Anlage besteht aus einer 190 m langen Doppel-U-Erdwärmesonde (EW1/09 in Abbildung 33) und vier in Reihe geschalteten 23 m langen Koaxialsonden (K1-K4 in Abbildung 33). Man kann zwischen den Erdwärmesonden (EWS) und den Koaxialsonden umschalten und die Systeme werden für die Kühlung sowie für die Heizung der Firmengebäude verwendet.

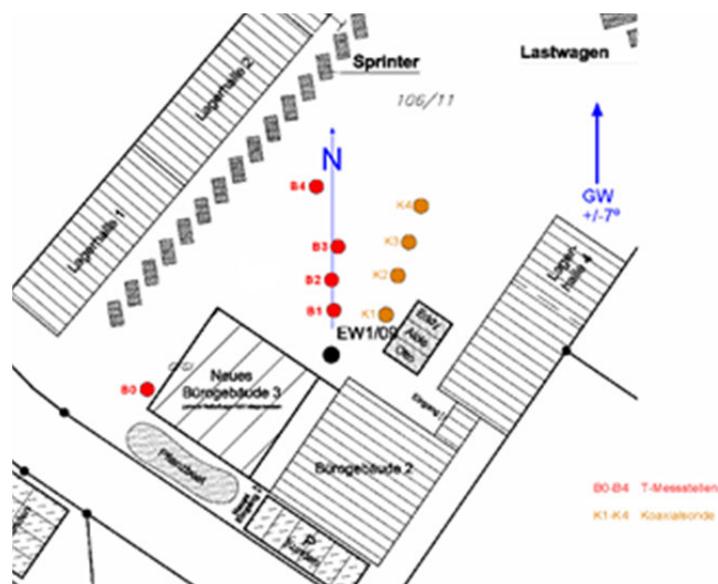


Abbildung 33: Layout der oberflächennahen Geothermieanlage und des Überwachungssystems auf dem BauGrund Süd Gelände in 2011.

Die Kühlung dieser Anlage erfolgt direkt („passiv“) durch eine Kühlstation (Abbildung 34), in diesem Fall einen Plattenwärmetauscher, mithilfe dessen die Wärme der Büroräume auf den Solekreislauf der Sonden übertragen wird. Letztlich beruht das direkte geothermische Kühlen nur auf einer Regelung, die die Kühlprimärpumpe einschaltet, ohne dass der Verdichter der Wärmepumpe angetrieben wird. Die Raumtemperatur kann je nach Raumluftfeuchte um 2 K bis 3 K abgesenkt werden. Solange die Temperaturdifferenz zwischen Raumtemperatur und Erdreichtemperatur groß genug ist, kann die Raumwärme direkt an das Erdreich abgegeben werden.

Das direkte geothermische Kühlen kann technisch relativ einfach realisiert werden: dazu sind nur ein (Platten-)Wärmeübertrager, 3-Wege-Ventile, Regler und eine Umwälzpumpe nötig und somit ist nur ein geringer Stromverbrauch gegeben.

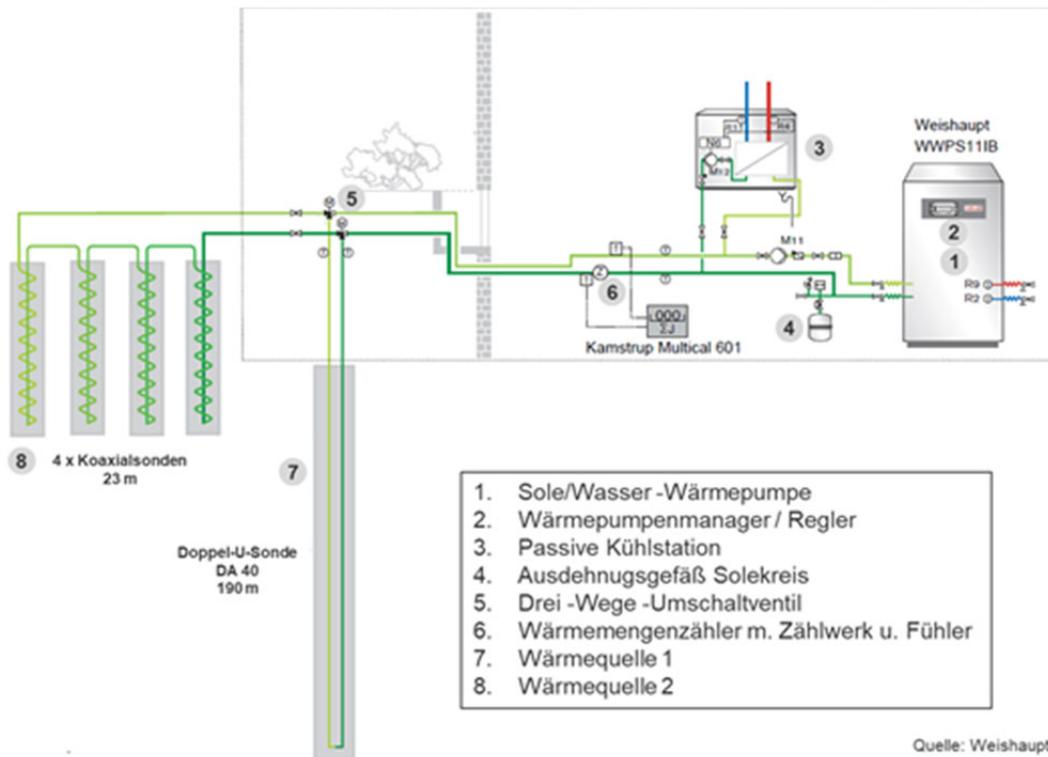


Abbildung 34: Fließbild eines Teiles der Anlage: der Wärmemengenzähler mit Zählwerk und Fühler (Position 6) befinden sich unterstromig der Wärmepumpe und der Kühlstation.

Im April 2011 wurde im Rahmen des Projekts „Geomatrix.bw“ ein Überwachungssystem im Werk 2 der Firma BauGrund Süd installiert, das fünf Temperaturmesslotrechte (B0 - B4 in Abbildung 33) mit jeweils 8 Sensoren auf unterschiedlichen Tiefen umfasst. Eine dieser fünf Messstellen (B0) wurde oberstromig als ungestörte Referenz gebohrt. Der Abstand von B1 zur EWS beträgt 3,90 m. B1, B2 und B3 liegen jeweils 2 m auseinander, B4 wurde im Abstand von 6 m zu B3 gebohrt (Bisch, et al., 2014). Die Koaxialsonden 1 und 3 sind in unterschiedlichen Tiefen mit Temperatursensoren ausgestattet. Gemessen werden die Temperatur am Zulauf der EWS bzw. der Koaxialsonde 1 und die Temperatur am Abstrom der EWS bzw. der Koaxialsonde 4.

Zusätzlich werden der Durchfluss der Sonden mittels eines Durchflussmessers und die Entzugsleistung/Abnahmeleistung mittels eines Wärmemengenzählers gemessen.

Alle Daten werden im 15-Minuten-Takt abgespeichert.

Auch nach dem Projektende von „Geomatrix.bw“ im März 2014 wurden und werden weiterhin Anlagedaten erfasst, so dass insgesamt Datensätze aus neun Jahren zur Verfügung stehen.

Spezifisch für VEGAS zu bearbeitende Ziele innerhalb des Arbeitspakets 4a „Quantifizierung der Energieströme“ sind:

1. Überprüfung des Überwachungssystems, Bearbeitung der alten Datensätze und Erarbeitung eines Protokolls um die Verwendung der Daten durch Dritte zu ermöglichen (sowie die Wiederherstellung des Datenfernzugriffs);
2. Beobachtung der Reaktion des Aquifers auf die gemischte Betriebsweise (Heizen/direktes Kühlen) der Geothermieanlage.
3. Berechnung der Entzugsenergie aus dem Boden im Heizbetrieb und der zugeführten Energie in den Boden im Kühlbetrieb anhand der vorhandenen Leistungswerte des Wärmemengenzählers als auch der aus den Rohdaten berechneten Leistungswerte.
4. Quantifizierung der Energieströme der Wärmepumpenanlage zu planen und zu ermöglichen.

2.5.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

In der Schweiz wurde schon von 2006 bis 2010 das Forschungsprojekt „SEK“ über Standardlösungen zum Energieeffizienten Heizen und Kühlen mit Wärmepumpe (FHNW, Fachhochschule Nordostschweiz, 2010) durchgeführt. Insbesondere die Möglichkeit, mit einer Erdwärmesonde sowohl durch eine erdgekoppelte Wärmepumpe zu heizen als auch direkt geothermisch zu kühlen, ist unter den verschiedenen Lösungen die beste in Bezug auf Effizienz und Betriebskosten. Von 2013 bis 2016 führte das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) Leipzig-Halle GmbH eine Überwachungskampagne der Grundwassertemperatur im westlichen Teil der Stadt Köln durch, wo sich ein Wohngebiet befindet, in dem seit 2008 drei Grundwasserbrunnen und 303 Erdwärmesonden im Betrieb sind. Andere Studien wurden nicht gefunden. Bei diesem Projekt lag das Merkmal jedoch nur auf Effizienz und Kosten aus Sicht des Gebäudes, ohne auch die Energiebilanz des Bodens zu berücksichtigen. Paket 4a berücksichtigt beide Aspekte zusammen. Die Aspekte sind stark miteinander verknüpft, da bei stark unausgeglichene Energieströme aus/in den Untergrund ein Effizienzverlust an der Wärmepumpe eintreten würde.

2.5.5 Planung und Ablauf des AP 4a

Das erste Kick-Off-Treffen des Arbeitspakets 4a fand am 31.05.2017 in Bad Wurzach zwischen den Firmen BauGrund Süd und Weishaupt, der Hochschule Biberach und VEGAS bei der Firma BauGrund Süd statt. Dort erfolgte ein erster Informationsaustausch über den Stand der Versuchsanlage BauGrund Süd Werk 2 und eine mögliche Zusammenarbeit zwischen den Partnern wurde besprochen.

Am 03.08.17 folgten das Auftakttreffen des Projekts und der offizielle Beginn der Arbeit.

Im Jahr 2017 wurde das alte Überwachungssystem überprüft, die fehlenden Informationen zurückgewonnen und der Datenfernzugriff wiederhergestellt. Eine Bearbeitung der alten Datensätze erfolgte mit Hilfe von Python und die bearbeiteten Rohdaten wurden an die interessierten Projektpartner weitergeschickt.

Anschließend wurden die Daten entsprechend bearbeitet und die Temperatursausbreitung im Boden und Grundwasser sowie mögliche Temperaturveränderungen in den Jahren 2012-2019 aufgrund des gemischten Betriebs (Heizen mit Wärmepumpe und direkte Kühlung) der Geothermie-Anlage untersucht. Schließlich erfolgten die Berechnungen für die Jahre der Datensätze sowohl für die entzogenen und zugeführten jährlichen Energieströme durch die Erdwärmesonde aus dem Boden bzw. in den Boden, als auch für den jährlichen Stromverbrauchs und der entsprechenden jährlichen Wirkungsgrade.

2.5.6 Ausführliche Darstellung der Ergebnisse AP 4a

1. Überprüfung des Überwachungssystems und Erarbeitung eines Protokolls

Im Laufe der Zeit sind einige Temperatursensoren ausgefallen. Insbesondere die Temperatursensoren der Messstelle B0 (oberstromig zur EWS), deren Datenerfassung sich direkt in einem Schacht unter dem Parkplatz befindet und die Daten per Funk überträgt, funktionieren seit Juni 2015 nicht mehr. Während einer von VEGAS erfolgten Besichtigung Ende Mai 2017 wurde festgestellt, dass der Datenlogger durch Feuchtigkeit endgültig unbrauchbar wurde.

Einige der unterstromigen Temperatursensoren, die sich in B1 - B4 Lotrechten befinden, waren ebenfalls defekt. Um welche es sich handelt und zu welchem Zeitpunkt die Störung auftrat, wurde in der Tabelle 1 des Zwischenberichts 2018 dieses Forschungsvorhabens zusammengefasst.

Eine Nachkalibrierung oder ein Austausch der sich unterirdisch befindlichen Sensoren sowie eine Umstellung auf eine modernere Messsoftware sind ohne Beeinträchtigung des gesamten Überwachungssystems nicht möglich. Allerdings wurden die Rohdaten in ein sauberes Datenformat umgewandelt. Die Datensätze wurden nach Jahren sortiert und Ausreißer und Werte der nicht mehr betriebenen bzw. defekten Temperatursensoren entfernt.

Bei der Bearbeitung der Datenerhebung fiel außerdem auf, dass vom Betreiber kein Betriebsprotokoll über die Nutzung der Koaxialsonden und der Erdwärmesonde verfasst wurde. Daher wurde dies, basierend auf den vorliegenden Messdaten, durch VEGAS retrospektiv verfasst. Bis heute wurde das Koaxialsystem nur vom 19.04.2011 bis 14.05.2011 und vom 08.02.2012 bis 17.06.2012 im Heizbetrieb betrieben (Koenigsdorff, et al., 2018).

Im Rahmen dieses Projekts wurde auch ein Protokoll für das Überwachungssystem erstellt. Insbesondere kommen folgende wichtige Informationen für die Datenauswertung im Protokoll vor:

- Im Oktober 2016 wurde die alte Wärmepumpe (Weishaupt - WWPS11IB) durch ein effizienteres Modell (Weishaupt - WWPS11ID) ausgetauscht.
- Vom 21.04.2016 bis 03.02.2017 trat ein Messfehler bei der Aufnahme der EWS-Zulauf- und Rücklauf-temperatur auf.
- Vom 31.05.2017 bis 15.07.2017 und vom 05.12.2017 bis 12.12.2017 war das Messsystem ausgeschaltet.

Die bearbeiteten Daten, die Checkliste der funktionierenden Temperatursensoren und das Betriebsprotokoll waren auf „eGroupWare“ bereitgestellt, die Rohdaten können nach Absprache zusätzlich zur Verfügung gestellt werden. Darüber hinaus wurde im Februar 2018 der Datenerfassungsrechner durch einen neuen Rechner (Windows 10), der mit dem geschützten Internet der Firma BauGrund Süd verbunden ist, ausgetauscht und die Ferndatenübertragung wurde durch die Software TeamViewer 13 ermöglicht.

2. Beobachtung der Reaktion des Aquifers auf die gemischte Betriebsweise der Geothermieanlage.

Die Beobachtung der Reaktion des Aquifers auf die gemischte Betriebsweise (Heizen/direkte Kühlung) der Geothermieanlage erfolgt über die Beobachtungsmessstellen (Abbildung 33). In der folgenden Tabelle 9 sind einige dieser Messstellen und deren Position zusammengefasst.

Tabelle 9: ID-Label der unterirdischen Temperatursensoren, die in den folgenden Grafiken (Abbildung 3) gezeigt werden, deren Entfernung von der EWS sowie deren Tiefe und die entsprechende geologische Beschreibung.

POSITION/ENTFERNUNG VON DER EWS					
B0: oberstr.	B1: 4 m	B2: 6 m	Tiefe der Grundwasserspiegel: 7 m u. GOK, 84 m u. GOK		
B0-T1	B1-T1	B2-T1	T1: 5 m u. GOK	Terrassenkies (Fein- bis Grobkies) bund, sandig, schwach schluffig	TIEFE
B0-T2	B1-T2	B2-T2	T2: 8 m u. GOK	Terrassenkies (Fein- bis Grobkies) bund, sandig	
B0-T7	B1-T7	B2-T7	T7: 25 m u. GOK	Beckenton, Ton (grau, stark)	

Dabei befindet sich die Tiefe 1 (5 m unter Grundoberkante) in der ungesättigten und die Tiefe 2 (8 m u. GOK) in der gesättigten Zone im Terrassenkies 1 m unter dem Grundwasserspiegel. Die Tiefe 7 befindet sich ebenfalls in der gesättigten Zone, nämlich 25 m u. GOK, aber im

Beckenton, sodass die Wärmeleitfähigkeit des Aquifers sich von der in der Tiefe 2 unterscheidet.

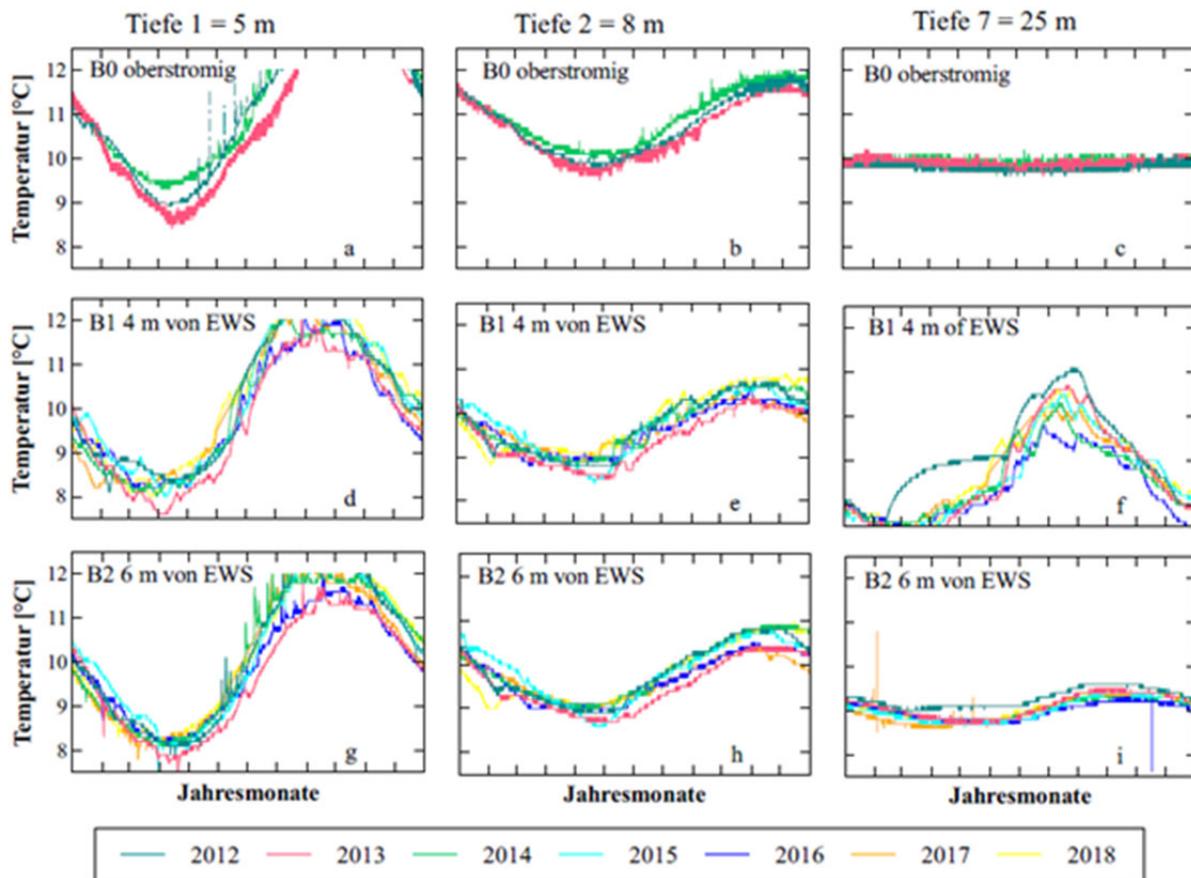


Abbildung 35: Beobachtung der Reaktion des Aquifers auf die gemischte Betriebsweise (Heizen/direktes Kühlen) der Geothermieanlage von 2012-2018. Ende des Jahres 2016 wurde die alte Wärmepumpe durch ein neues Modell ausgetauscht.

Die Diagramme a, b und c in Abbildung 35 zeigen für die Tiefen 1, 2 und 7 den ungestörten Jahrestemperaturverlauf im Boden an der Messstelle B0, oberstromig zur EWS, von Anfang 2012 bis Ende 2014. Durch einen Wassereinbruch wurde das Datenerfassungssystem der Messstelle B0, das sich direkt in einem Schacht unter dem Parkplatz (Abbildung 33) befand im Juni 2015 unbrauchbar. 5 m und 8 m unter Oberkante (Diagramme a und b, Tiefe 1 bzw. 2) ist der Saisoneinfluss der Lufttemperatur auf die Bodentemperatur deutlich zu sehen. Das Jahr 2013 war das kälteste der verfügbaren Jahresreihen. Mit zunehmender Tiefe sinkt die ungestörte Bodentemperatur im Vergleich zur Lufttemperatur verzögert ab, und Temperaturschwankungen nehmen immer mehr ab. In einer Tiefe von 25 m (Diagramm c, Tiefe 7) sind die Saisonschwankungen kaum zu bemerken und die Temperatur des Aquifers bleibt konstant bei 10 °C.

Die Diagramme d, e und f in Abbildung 35 zeigen für Tiefe 1, 2 bzw. 7 den Jahrestemperaturverlauf im Boden an der Messstelle B1, die sich 4 m unterstromig der EWS befindet. 5 m und 8 m unter Geländeoberkante (Diagramme d und e in Abbildung 35) ist eine Überlappung der Saisonschwankungen der Lufttemperatur und des EWS-Betriebs zu erkennen. Im Gegensatz dazu ist der Jahrestemperaturverlauf im Boden 25 m unter GOK (Tiefe 7, Diagramm f) nur durch den Einsatz der EWS beeinflusst. Insbesondere erkennt man hier für das Jahr 2012 den Einsatz der Koaxialsonden von Anfang Februar bis Mitte Juni (da die Länge der Koaxialsonden mit 23 m kleiner als die Tiefe 7 mit 25 m unter GOK, ist) und die allgemeine Regeneration des Bodens, die Ende des Frühlings und im Sommer (Null- oder Kühlbetrieb) stattfand. Allerdings ist die Auswirkung des EWS-Betriebs an der Messstelle B2 4 m unterstromig der EWS zu erkennen. Hier kam es zu einer Absenkung der Bodentemperatur um etwa 1,5 K in Tiefe 1 und 2 und bis 2,5 K in Tiefe 7.

Die Diagramme g, h und i in Abbildung 35 zeigen für Tiefe 1, 2 bzw. 7 den Jahrestemperaturverlauf im Boden an der Messstelle B2, die sich 6 m unterstromig der EWS befindet. Hier ist der Einfluss des EWS-Betriebs in Diagramm i (Abbildung 35) leicht zu sehen und die Auswirkung ist eine Absenkung der Bodentemperatur um etwa 1 K in Tiefe 7.

3. Berechnung der Entzugsenergie aus dem Boden im Heizbetrieb und der zugeführten Energie in den Boden im Kühlbetrieb

Die Berechnung der Energieströme aus dem und in den Boden erfolgt aus folgenden Gründen sowohl aus den vorhandenen, vom Wärmemengenzähler berechneten Leistungswerten als auch aus den auf den Rohdaten basierten Leistungswerten:

- I. Der Wärmemengenzähler ist direkt mit dem Durchflussmesser und mit zwei Temperatursensoren am Vorlauf und Rücklauf der Wärmepumpe verknüpft, somit wird die aus dem Untergrund entzogene bzw. dorthin abgegebene Leistung durch den Wärmemengenzähler anhand der Temperaturdifferenzen und der Durchflüsse berechnet und auf dem Bildschirm des Wärmemengenzählers aufgezeigt. Die auf dem Bildschirm des Wärmemengenzählers aufgezeigten Durchfluss- und Leistungswerte werden alle 15 Minuten an den Messcomputer gesendet und im String-Format als Ganzzahlen ohne Dezimalstellen in einer Datendatei gespeichert. Dies könnte zu einer signifikanten Messunsicherheit bei den in kW aufgezeichneten Leistungswerten im Bereich von 0 bis 8 kW führen, während die Messunsicherheit bei den in l/h aufgezeichneten Durchflusswerten vernachlässigbar ist.
- II. Die Werte aus den Temperatursensoren, die den Wärmemengenzähler bedienen, werden nicht vom Messsystem erfasst, sie können nur auf dem Zählerbildschirm abgelesen werden. Deren Temperaturdifferenz unterscheidet sich leicht von der Temperaturdifferenz der an das Messsystem angeschlossenen Temperatursensoren „Zulauf“ und „Rücklauf“ der Erdwärmesonde, obwohl alle Sensoren sehr nahe beieinanderliegen.

- III. Die im Wärmemengenzähler eingestellten Parameter der Dichte und der spezifischen Wärmeleitfähigkeit für die Berechnung der Leistung (P_{WMZ}) sind nicht bekannt.
- IV. Der Wärmemengenzähler funktioniert nur für positive Temperaturwerte, somit kann es passieren, dass die erfasste Leistung die reale Leistung während der kältesten Tage des Winters (wenn die WP-Rücklauftemperatur bzw. die EWS-Zulauftemperatur 0 °C unterschreitet) unterschätzt.

Unter der Annahme, dass der 15-Minuten-Messtakt (t_{MT}) ausreichend zur Ermittlung des Systemzustands ist, werden die jährlichen Energieflüsse nach den folgenden Formeln berechnet:

(3.1) jährliche Entzugsenergie vom Boden (JEE_{WMZ}) in den Heizbetriebsstunden (HBS) anhand der von Wärmemengenzähler erfassten Entzugsleistungswerten ($P_{ent/WMZ}$):

$$JEE_{WMZ} = \sum_{i \text{ in HBS im Jahr}} P_{ent/WMZ_i} * t_{MT}$$

(3.2) jährliche Entzugsenergie vom Boden (JEE_{RD}) in den Heizbetriebsstunden (HBS) anhand der aus den Rohdaten (RD) ausgewerteten Entzugsleistungswerten ($P_{ent/RD}$):

$$JEE_{RD} = \sum_{i \text{ in HBS im Jahr}} P_{ent/RD_i} * t_{MT}$$

(3.3) jährliche dem Boden zugeführte Energie (JZE_{WMZ}) in den Kühlbetriebsstunden (KBS) anhand der von Wärmemengenzähler erfassten Abgabeleistungswerten ($P_{ab/WMZ}$):

$$JZE_{WMZ} = \sum_{i \text{ in KBS im Jahr}} P_{ab/WMZ_i} * t_{MT}$$

(3.4) jährliche dem Boden zugeführte Energie (JZE_{RD}) in den Kühlbetriebsstunden (KBS) anhand der aus den Rohdaten (RD) berechneten Abgabeleistungswerten ($P_{ab/RD}$):

$$JZE_{RD} = \sum_{i \text{ in KBS im Jahr}} P_{ab/RD_i} * t_{MT}$$

Allgemein werden die Leistungswerten aus den Rohdaten (P_{RD}) nach folgender Formel (3.5) und folgenden Einheiten berechnet:

$$P_{RD}[kW] = Q_{Sole} \left[\frac{l}{h} \right] * \rho_{Sole} \left[\frac{kg}{l} \right] * c_{p\,Sole} \left[\frac{kJ}{kgK} \right] * |\Delta T_{EWS}|[K] * \frac{1}{3600} \left[\frac{h}{s} \right]$$

wobei die eingesetzte Sole aus einer 25 %_M Mischung aus Ethylglykol in Wasser besteht, und ρ_{sole} und $c_{p\,sole}$ die Dichte bzw. die spezifische Wärmeleitfähigkeit der betrachteten Mischung bei Durchschnittstemperatur in der Sonde sind.

Da laut Literatur beide Parameter für die gegebene Mischung im Temperaturbereich 0 °C bis 20 °C nur geringfügig variieren (die Dichte zwischen 1,047 und 1,042 g/cm³ (kg/l) und die spezifische Wärmeleitfähigkeit zwischen 3,79 und 3,82 kJ/kg/K), sind die Auswirkungen dieser Variationen in Formel 3.5 vernachlässigbar und die jeweiligen Mittelwerte (1,045 kg/l für die Dichte und 3,80 kJ/kg/K für die spezifische Wärmeleitfähigkeit) wurden für die Berechnungen verwendet. (Leider sind die im Wärmemengenzähler eingestellten Parameter der Dichte und der spezifischen Wärmeleitfähigkeit für die erfasste Leistung (PWMZ) nicht bekannt.)

Das Messsystem erfasst keine Temperaturwerte kleiner als 0 °C. Allerdings sind solche Werte selten an der EWS-Zulauftemperatur zu beobachten und zwar nur an einigen Tagen der kältesten Monate (Januar, Februar, Anfang März, Dezember). Deshalb ist für diese Messpunkte kein ΔT_{EWS} berechenbar und $\Delta T_{EWS} = 3K$ wird, in Übereinstimmung mit den beobachteten Daten, angenommen.

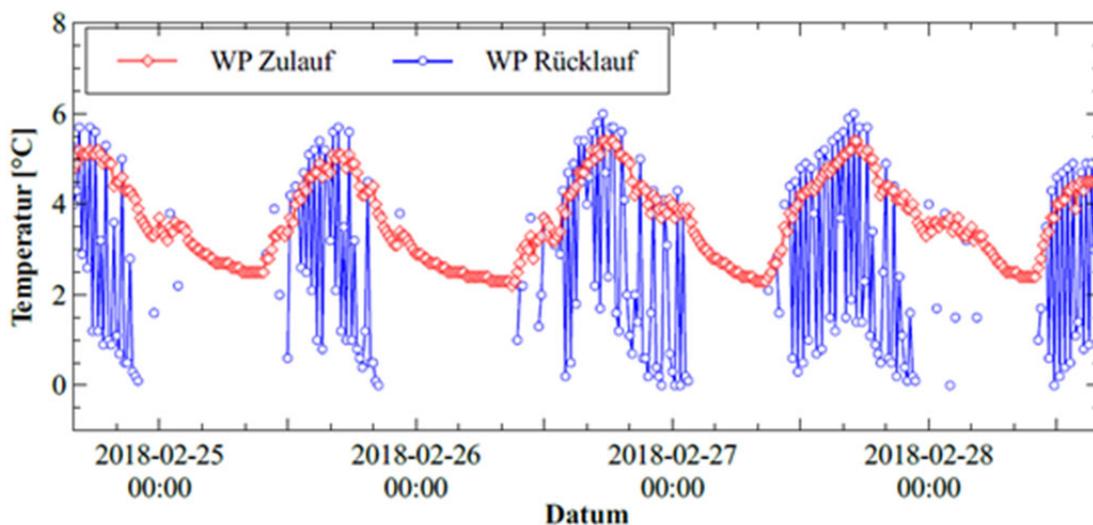


Abbildung 36: Temperaturwerte am Zulauf der Erdwärmesonde (WP-Rücklauf, blau markiert) und am Rücklauf der Erdwärmesonde (WP-Zulauf blau markiert) aus Rohdaten während einigen der kältesten Tagen in Februar 2018.

Darüber hinaus werden für die Zeitspanne vom 21.04.2016 bis 03.02.2017, in welcher ein Messfehler bei der Aufnahme der EWS-Zulauf- und Rücklauf-temperatur auftrat, die Leistungswerte des Wärmemengenzählers übernommen.

Die Problematik war, dass ein Betriebsprotokoll nicht vorhanden ist und alle Daten, wie z.B. der Durchfluss mittels Durchflussmessers als auch Leistung aus dem Wärmemengenzähler ohne Unterscheidung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb erfasst wurden. Trotzdem war es möglich, jeden Messwert des Datensatzes einer genauen Betriebsart zuzuordnen.

Es handelt sich um eine „Fixed-Speed-Wärmepumpe“ mit fester Drehzahl und EIN/AUS-Betrieb, bei der die Anpassung an die Heizlast im taktendem Betrieb erfolgt. Wenn die Wärmepumpe während der Heizperiode eingeschaltet ist, ist die Solenumwälzpumpe M11 (Abbildung 34), die einen Volumenstrom Q_{Heiz} (1800-2000 L/h) liefert, ebenso aktiv. Während der Kühlzeit bleiben die Wärmepumpe und die Solenumwälzpumpe M11 ausgeschaltet, wobei die von der passiven Kühlstation gesteuerte Solenumwälzpumpe M12 (Abbildung 34), die einen niedrigeren Volumenstrom $Q_{\text{kühl}}$ (ca. 900 L/h) liefert, eingeschaltet wird. Wenn die Erdwärmesonde nicht betrieben wird, ist kein Volumenstrom vorhanden. Unregelmäßige Messungen des niedrigeren Durchflusses können als Zeitpunkte angesehen werden, an denen die Umwälzpumpe kurz ein- oder ausgeschaltet wurde (transienter Zustand).

Dank dieser Beobachtungen war es möglich, jedem Messpunkt in Python eine der folgenden vier Betriebskategorien zuzuordnen: Heizung, passive Kühlung, kein Betrieb, keine Datenerfassung.

In Abbildung 37 werden für das Beispieljahr 2018 die Rohdaten für Zulauf und Rücklauf der Sonde sowie der Durchfluss zusammen mit dem oben gewonnenen Betriebsprotokoll gezeigt. Zur Vereinfachung wird die visuelle Darstellung der Betriebsart bei den Kategorien "Heizung", "passive Kühlung", "kein Betrieb" und "keine Erfassung" mit den Werten 1, -1, 0 und "NaN" angezeigt.

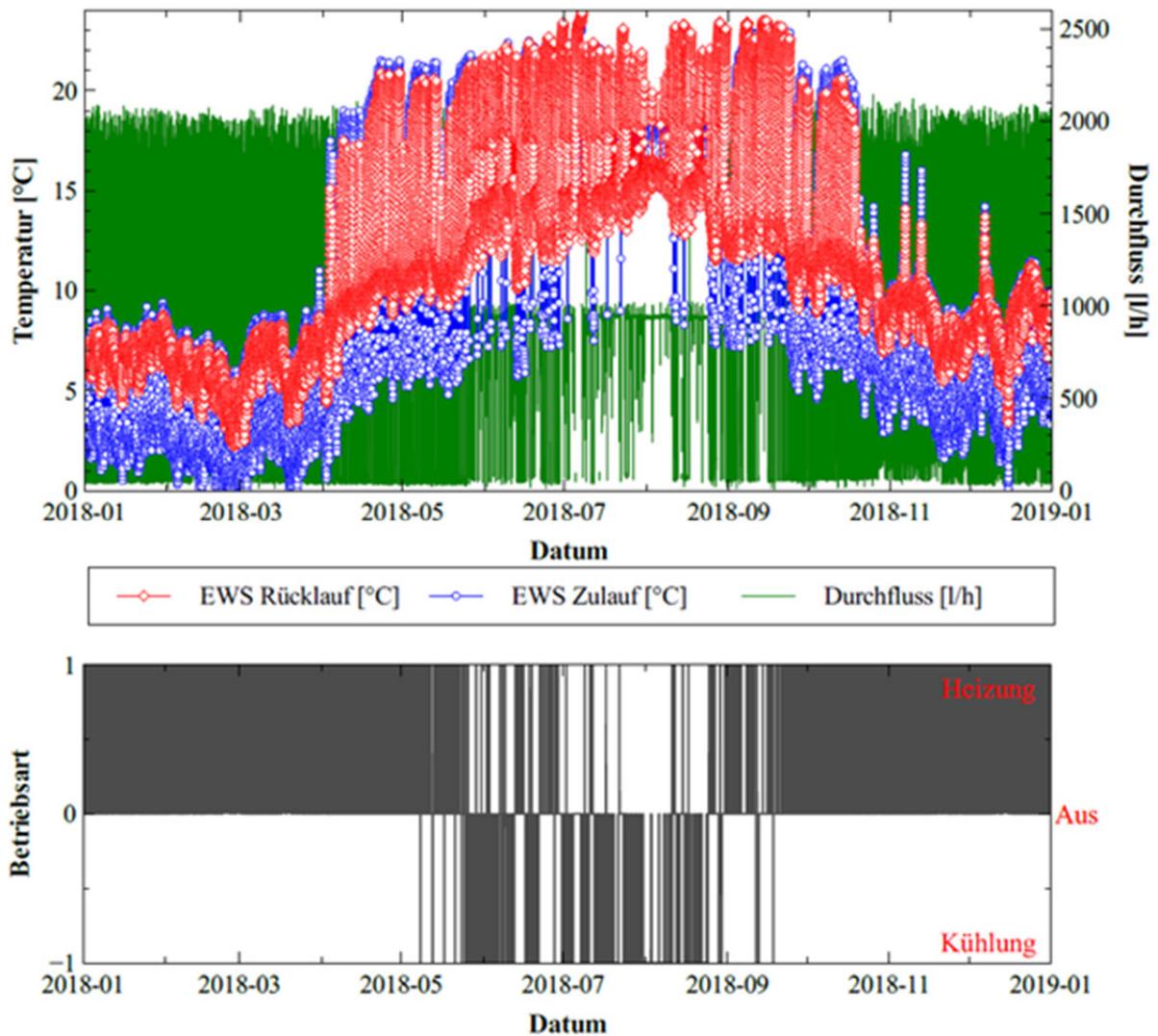


Abbildung 37: oben: Werte des Zulaufs und des Rücklaufs der Erdwärmesonde und der Durchfluss aus Rohdaten für das Beispieljahr 2018 (Durchflusswerte gleich Null sind nicht dargestellt um eine bessere Beobachtung des EIN/AUS-Betriebs zu ermöglichen). Unten: zugehörige Betriebsart

Unter der Annahme, dass der Betrieb während der 15-Minuten-Messungenintervalle konstant bleibt, wurden die jährlichen Stunden des Heizens und passiven Kühlens sowie die Stunden des Stillstands berechnet. Dies ist jedoch eine Vereinfachung, da der 15-Minuten-Messtakt gelegentlich größer als die Takte der Ein-/Ausschaltungs-Regelung der Wärmepumpe ist. Die Ergebnisse sind in Abbildung 38 zusammengefasst.

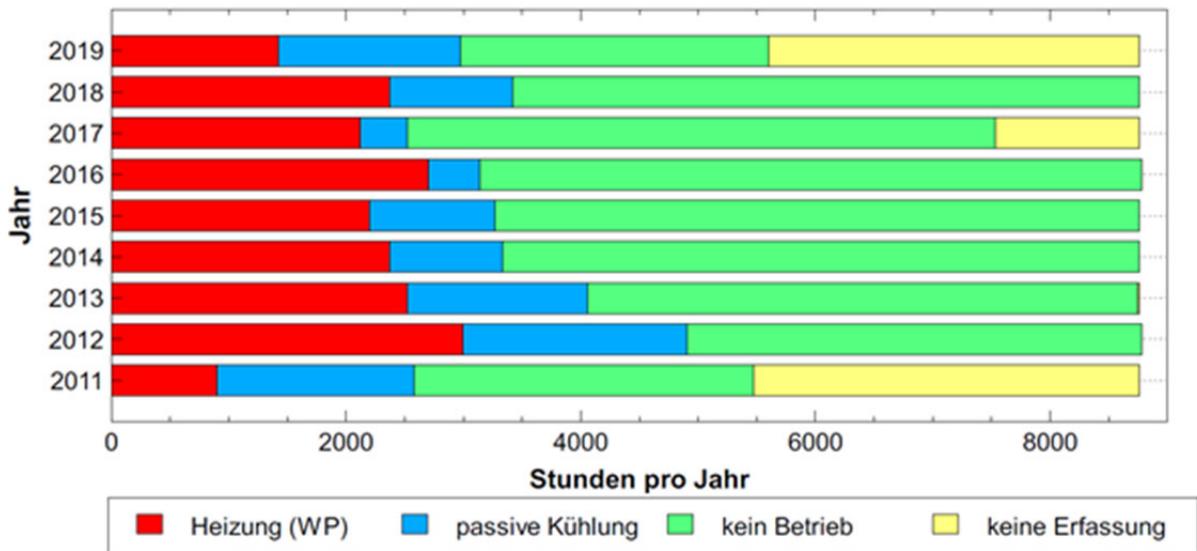


Abbildung 38: Übersicht des Anlagenbetriebs für die Jahre 2011-2019 (2012 und 2016 sind Schaltjahre; 8784 statt 8760 Stunden).

Das Überwachungssystem ist seit Mai 2011 in Betrieb, so dass während der ersten Heizperiode dieses Jahres (Januar bis April) keine Daten vorliegen. Aus Abbildung 38 wird ersichtlich, wie oben bereits beschrieben, dass es im Jahr 2017 während einer Woche im Dezember (Heizperiode) sowie während des gesamten Junis und der Hälfte des Julis (vermutlich während der Kühlperiode) zu Unterbrechungen des Messsystems kam. Die Daten wurden bis Ende August 2019 aktualisiert, so dass noch keine Daten für Herbst 2019 und Winter 2019/20 (voraussichtlich eine Heizperiode) vorliegen.

Abbildung 38 zeigt das Ungleichgewicht zwischen Heiz- und Kühlungsdauer während des Jahres. Aus Sicht der Bodenregeneration ist neben dem geringen jährlichen Kühlbedarf, der vor allem in den heißesten Sommerwochen des Jahres entsteht, auch eine Zeit gegen Ende des Frühjahrs, in der keine Wärmepumpen und Kühlung eingesetzt werden, zu berücksichtigen.

In Abbildung 39 ist der Verlauf der an der Wetterstation Leutkirch-Herlazhofen (ID 7403) gemessenen Außenlufttemperatur über die Jahre 2011-2019 zu sehen. Diese Wetterstation ist ca. 20 km vom Standort in Bad Wurzach entfernt.

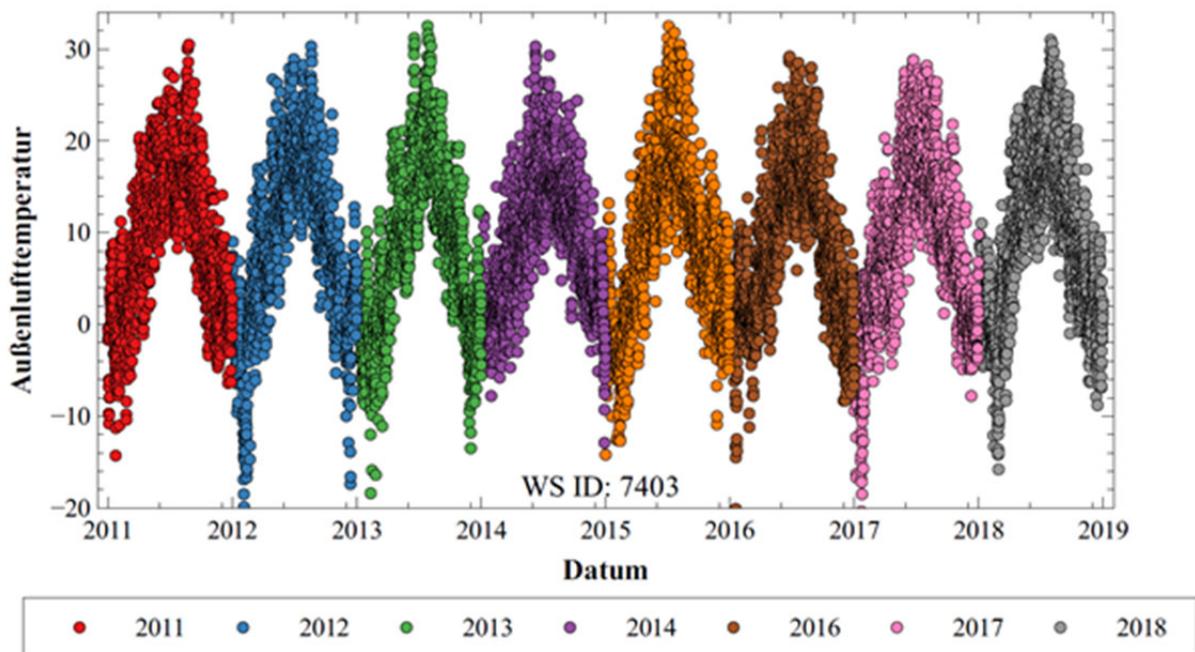


Abbildung 39: Verlauf der an der Wetterstation Leutkirch-Herlazhofen (ID 7403) gemessenen Außenlufttemperatur über die Jahre 2011 - 2019. Rohdaten sind auf der Website des Deutschen Wetterdiensts (DWD) in der Datenbank „Climate Data Center“ (CDC) verfügbar.

Eine Korrelationsstudie zwischen den Daten in Abbildung 38 und der Außenlufttemperatur ist möglich und sinnvoll, wurde aber in diesem Projekt nicht im Detail durchgeführt. Aus der Betrachtung der Abbildung 39 lässt sich auch ohne Clusteranalyse eindeutig erkennen, dass es im Jahr 2012 am Anfang und Ende des Jahres mehrere Tage gab, an denen die Temperatur sehr niedrig war und daher die hohen Heizstunden gerechtfertigt sind.

Abbildung 40 zeigt die mit den Formeln 3.1, 3.2, 3.3 und 3.4 berechneten jährlichen Energieströme. Ein Vergleich zwischen Berechnung aus P_{RD} (oberes Diagramm) und P_{WM} (unteres Diagramm) ist daher möglich. Insbesondere für das Jahr 2012 ist die Entzugsenergie im Jahresheizbetrieb im ersten Diagramm höher als im zweiten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass im ersten Diagramm die Berechnung basierend auf den Rohdaten der Leistung, $P_{ent/RD}$ erfolgte, die auch die Auswirkungen von Zyklen, bei denen die EWS-Zulauftemperatur unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt, beinhaltet. Das hatte sicherlich 2012 einen deutlichen Einfluss, da dort oft sehr niedrige Außenlufttemperaturen registriert wurden (Abbildung 7). Andere leichte Unterschiede sind wahrscheinlich auf die unterschiedlichen Temperaturdifferenzen zurückzuführen.

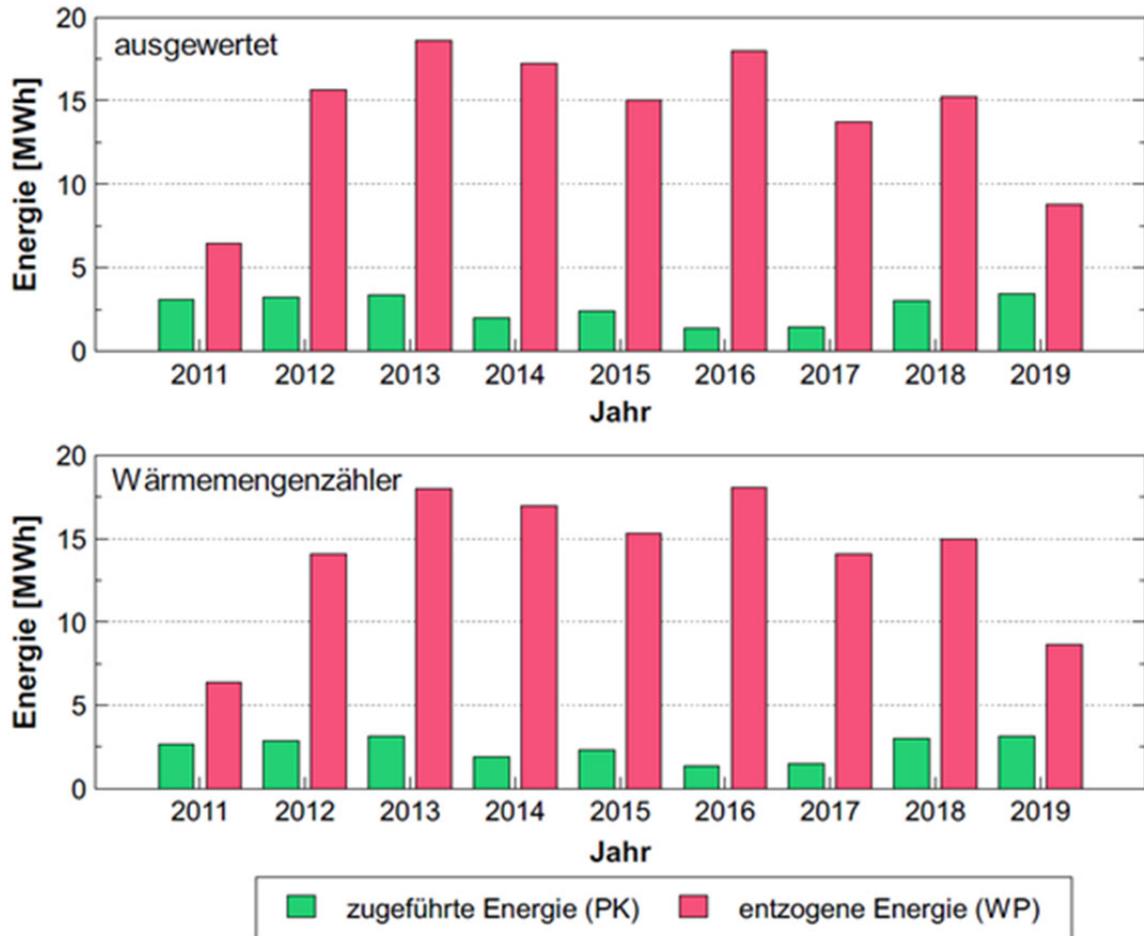


Abbildung 40: zugeführte und entzogene Energieströme zum bzw. vom Boden aus P_{RD} (oberes Diagramm) sowie aus P_{WMZ} (unteres Diagramm).

4. Quantifizierung der Energieströme der Wärmepumpenanlage

Im vorliegenden Betrieb wird, wie in VDI 4650 Blatt 1 beschrieben, die Jahresarbeitszahl (JAZ) für die Bilanzgrenze der Wärmepumpenanlage berechnet. Das bedeutet, dass die Wasserumwälzpumpe für die Fußbodenheizung nicht berücksichtigt wird, sondern nur die Antriebsleistung für die Wärmequelle (Umwälzpumpe, Wärmepumpenverdichter). Die Wärmepumpenanlage ist monoenergetisch und monovalent und die Warmwasservorbereitung erfolgt laut Abbildung 34 getrennt.

Energiebilanz im Kühlbetrieb

Bei der passiven Kühlung wird Wärme aus dem Gebäude abgeführt, ohne dass der Wärmepumpen-Kältekreis aktiv ist. Die abgeführte Kühllast wird direkt in die Erdwärmesonde übertragen. Im Kühlbetrieb sind nur die Umwälzpumpen im Betrieb. Die Wirkungsgrade der passiven Kühlung sind deutlich höher als die Wirkungsgrade der Wärmepumpe. Laut VDI 4650 kann die Berechnung der Kältearbeitszahl nach der folgenden Gleichung (4.1) vereinfacht erfolgen:

$$4.1 \quad SEER_{\text{passive Kühlung}} = \frac{\text{Kühlarbeit}}{\text{Energiebedarf der Umwälzpumpe}}$$

Leider gibt es keine Messungen direkt von der Kühlstation und die Leistungsaufnahme der Soleumwälzpumpe ist unbekannt.

Unter der Annahme, dass die Kühlarbeit gleich der zugeführten Energie ist und bei der Betrachtung alleine der Energiebedarf der M11-Pumpe (Abbildung 34) berücksichtigt wird, können die SEER-Koeffizienten berechnet werden. Für die Berechnungen werden die Leistungsaufnahme der Regler sowie die Leistungsaufnahme der Wasserumwälzpumpe nicht berücksichtigt.

Eine Beispielberechnung für das Szenario einer unregelmäßig alten Solenumwälzpumpe mit einer Leistungsaufnahme von 80 W erfolgt hier für das Jahr 2018, in welchem der Kühlbetrieb ca. 1049 Std betrug:

$$SEER(2018)_{\text{passive Kühlung}} = \frac{3012 \text{ kWh}}{80 * 10^{-3} \text{ kW} * 1049 \text{ h}} = 35.89$$

Energiebilanz im Heizbetrieb

Die Effizienz von Wärmepumpen wird mit unterschiedlichen Begriffen ausgedrückt, je nachdem ob eine Leistungs- oder eine Arbeitsbetrachtung angestellt wird und ob ein Wert berechnet oder gemessen wird (VDI 4650).

Die gemessene Jahresarbeitszahl oder der „Seasonal Performance Factor“ (SPF) wird als das Verhältnis der im Jahr abgegebenen, mit Messgeräten ermittelten Nutzwärme einer Elektrowärmepumpe, bezogen auf die ebenfalls gemessene eingesetzte elektrische Energie für den Antrieb des Verdichters, der Hilfsantriebe und der Regelung aber nicht der Heizungsumwälzpumpe definiert. Es wird jedoch auch in der Praxis akzeptiert, wenn der Stromverbrauch für die Regelung nicht vom Stromzähler der Wärmepumpe erfasst wird (BAFA).

Da keine Messungen der Leistungsaufnahme der Wärmepumpe oder der Vorlauftemperatur des Heizwassers im Gebäude (Fußbodenheizung) vorhanden sind, wird hier eine alternative Strategie zur Berechnung des Stromverbrauchs während der Heizperiode und zur Berechnung der entsprechenden JAZ vorgeschlagen.

Nach VDI 450 ist die Leistungszahl oder „Coefficient of Performance“ (COP) als das Verhältnis des bei bestimmten Betriebsbedingungen abgegebenen Nutzwärmestroms einer Elektrowärmepumpe im Heizbetrieb bezogen auf die eingesetzte elektrische Leistung für den Antrieb des Verdichters, der Hilfsantriebe (Solenumwälzpumpe) und der Regelung nach DIN EN 14511 definiert.

Der COP drückt daher aus, was an einem bestimmten Betriebspunkt mit einer genauen Temperatur am Soleneintritt in die Wärmepumpe und einer genauen Temperatur im Wasservorlauf der Wärmepumpe passiert. Im Datenblatt der Wärmepumpe finden sich einige der Kennlinien des COP der Wärmepumpe, d. h. die COP-Werte über die Soleneintrittstemperatur für bestimmte Wasservorlauftemperaturen, z. B. 35, 45, 5 °C (gemessen nach DIN EN 14511).

Aus den technischen Daten wurde die Kennlinie des COP ($COP_{(i)} = f(x_{(i)})$) über die Soleneintrittstemperatur (x) für eine Wasservorlauftemperatur von 35°C sowie 45 °C abgeleitet. Bis Oktober 2016 werden die Kennlinien der alten Wärmepumpe verwendet, während danach die der neuen Wärmepumpe übernommen wurden.

Unter der Annahme, dass die gemessene Temperatur am Rücklauf der Sonde der Temperatur des Soleneintritts in die Wärmepumpe entspricht, wurde an jedem Messpunkt ein Wert COP (35 °C) sowie COP (45 °C) vergeben.

Mittels der $COP_{(i)}$ -Funktion wurde für jeden Messpunkt (i) die entsprechende elektrische Leistung anhand der Entzugsleistung für beide oben beschriebenen Werte der Wasservorlauftemperatur (35 °C, 45 °C) ermittelt. Hier folgt das Berechnungsverfahren für ein Szenario:

$$4.2 \quad COP_{(i)W35} = \frac{P_{Nutzwärme_i}}{P_{el/W35_i}} = \frac{P_{Erd_i} + P_{el/W35_i}}{P_{el/W35_i}}$$

$$4.3 \quad P_{el/W35_i} = \frac{P_{Erd_i}}{(COP_{(i)W35} - 1)}$$

Unter der Annahme, dass der 15-Minuten-Messtakt (t_{MT}) für den Systemzustand ausreichend repräsentativ ist, wird der Jahresstromverbrauch (JSV) in den Heizbetriebsstunden (HBS) anhand der oben berechneten elektrischen Leistungswerte für das entsprechende Szenario ($P_{el/W35}$) nach folgender Formel (4.4) berechnet:

$$4.4 \quad JSV_{W35} = \sum_{i \text{ in HBS im Jahr}} P_{el/W35_i} * t_{MT}$$

Damit kann, basierend auf der aus den Rohdaten abgeleiteten Jahresentzugsenergie (3.2) und dem Jahresstromverbrauch, die Jahresarbeitszahl (JAZ) für das entsprechende Szenario nach der folgenden Formel (4.5) berechnet werden:

$$4.5 \quad JAZ_{W35} = \frac{En_{Nutzwärme_i}}{JSV_{W35}} = \frac{JEE_{RD} + JSV_{W35}}{JSV_{W35}} = 1 + \frac{JEE_{RD}}{JSV_{W35}}$$

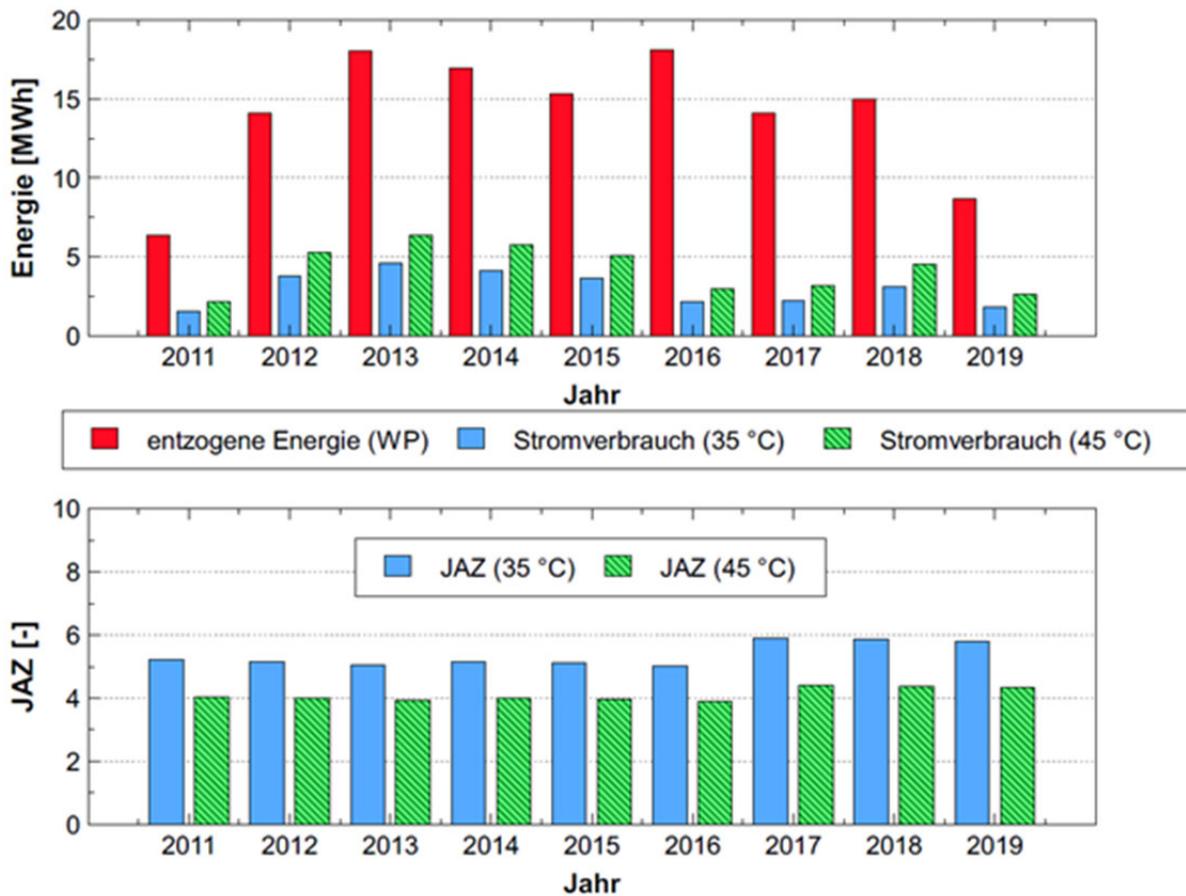


Abbildung 41: Jahresstromverbrauch für die zwei Szenarien, Wasservorlauftemperatur von 35 °C bzw. von 45 °C, und die aus den Rohdaten berechnete Jahresentzugsenergie (oben) sowie Jahreswirkungsgrade (JAZ) für beide Szenarien (unten)

Die Ergebnisse für beide Szenarien sind in Abbildung 41 zusammengefasst. Insbesondere Folgendes kann beobachtet werden:

- Unter den gleichen Bedingungen hat die Wasservorlauftemperatur, bei der die Fußbodenheizung betrieben wird (und damit eventuelle Schwankungen), einen wesentlichen Einfluss auf den Wirkungsgrad und damit auf die Betriebskosten der Anlage.
- Wie erwartet, sind die Jahreswirkungsgrade ab 2017 mit der Inbetriebnahme der neuen Wärmepumpe allgemein höher.

Die Ergebnisse berücksichtigen alle Schwankungen am Verdampfer der Wärmepumpe, d. h. bei der gemessenen Temperatur der aus der Sonde austretenden Sole, während der Jahre.

Es ist keine Verschlechterung der JAZ und somit keine Verschlechterung der Quellentemperatur aufgrund einer möglicher Senkung im Laufe der Jahre zu beobachten. Das bedeutet, dass der intermittierende Betrieb, die Stillstandzeit und die zugeführte Energie während der passiven Kühlung ausreichen, den Boden zu regenerieren und dass die Energiebilanz des Untergrunds über das Jahr ausgeglichen ist.

2.5.7 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Es sind keine bekannt.

2.5.8 Veröffentlichung der Ergebnisse, Ergebnis- und Forschungstransfer

Ergebnisse wurden nur im Rahmen dieses Projekts veröffentlicht.

2.5.9 Literatur

Bisch, G., Klaas, N. & Braun, J., 2014. *geomatrix.bw, Teil 3: Kosteneffiziente Messsysteme und Konzepte zur Überwachung oberflächennaher Erdwärmenutzung (ZOE E28 002)*, IWS, VEGAS: s.n.

Deutscher Wetterdienst (DWD), kein Datum *Climate Data Center (CDC)*. [Online] Available at: <https://cdc.dwd.de/portal/>

FHNW, Fachhochschule Nordostschweiz, 2010. *SEK - Standardlösungen zum Energieeffizienten Heizen und Kühlen mit Wärmepumpe*, Schweiz: Bundesamt für Energie BFE.

Koenigsdorff, et al., 2018. *GEO.Cool - GEO.Cool – Kühlung mit oberflächennaher Geothermie*. Status-Kolloquium, Fellbach: s.n.

Verein Deutscher Ingenieure, März 2019. *VDI 4650 - Blatt 1 - Berechnung der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpenanlagen*. s.l.:s.n.

2.6 AP 4b: Einfluss der Gesteinszusammensetzung auf die Wasserchemie und damit auf geothermische Nutzungssysteme, Beispiel: Gesteine des Schwarzwaldes (KIT/AGW-AG, FKZ: L75 17004)

2.6.1 Abstract zu den Forschungsergebnissen AP 4b

Die Chemie von Wässern im Untergrund wird stark von den sie umgebenden Gesteinen geprägt. Die einzelnen Minerale geben hierbei spezifische Stoffe an das durch die Gesteine zirkulierende Wasser ab. Um mögliche schädliche Einflüsse dieser Inhaltsstoffe auf Erdwärmesonden in granitischen Umgebungen abschätzen zu können, wurden Laugungsversuche bei Temperaturen von 70 °C an natürlichen Gesteinen des Schwarzwaldes durchgeführt. Hierfür wurden die pulverisierten Gesteinsproben bei 70 °C in deionisiertem Wasser gelaugt. Die Experimente wurden jeweils so lange durchgeführt, bis die elektrische Leitfähigkeit und der pH-Wert der Laugungswässer konstante Werte erreichten. Die Analysen der Laugungswässer zeigen, dass in diesen Gesteinen nicht mit einer Betonaggressivität nach DIN 4030 zu rechnen ist.

2.6.2 Motivation und Hintergründe

Die Chemie von Wässern im Untergrund wird stark von den sie umgebenden Gesteinen geprägt. Die einzelnen Minerale geben hierbei spezifische Stoffe an das durch die Gesteine zirkulierende Wasser ab. Um mögliche schädliche Einflüsse dieser Inhaltsstoffe auf Erdwärmesonden in granitischen Umgebungen abschätzen zu können, wurden Laugungsversuche bei Temperaturen von 70 °C an Gesteinen granitischer und monzonitischer Zusammensetzung aus dem nördlichen und mittleren Schwarzwald durchgeführt (Abbildung 42). Dafür wurden die Gesteine zunächst mineralogisch anhand von Dünnschliffen sowie geochemisch und mineralchemisch analysiert und charakterisiert. Die Zusammensetzung der Laugungswässer wurde ebenfalls analysiert, um potenziell schädliche Einflüsse auf Erdwärmesonden – d.h. insbesondere eine mögliche Beton-Aggressivität nach DIN 4030 – abschätzen zu können. Da man bei 70 °C in der Regel weit über dem Temperaturbereich der allermeisten eingesetzten Erdwärmesonden liegt, stellen die Ergebnisse eine Obergrenze der Reaktivität in Wasser für Erdwärmesonden in granitischen Umgebungsgesteinen dar wie z. B. im Schwarzwald. Die erhöhte Temperatur wurde gewählt, um die Versuchsdauer zu reduzieren und um dadurch mehr Gesteinsproben untersuchen zu können.

2.6.3 Aufgabenstellung

Für die Laugungsversuche wurden insgesamt 27 Gesteinsproben (Probenlokationen siehe Abbildung 42) pulverisiert (Korngröße <40 µm). Jeweils 10 g Gesteinspulver wurden in 80 ml monodestilliertem Wasser bei 70 °C in einem geschlossenen Behälter auf einer Heizplatte mit Rührfisch gelaugt. Dabei wurden in geringen zeitlichen Abständen von i) anfänglich 30 Sekunden in den ersten 5 Minuten auf bis zu ii) 10 Minuten nach 30 Minuten der pH-Wert

und die elektrische Leitfähigkeit gemessen. In der Regel wurden nach ca. 2 Stunden konstante Werte erreicht, so dass die Messungen beendet werden konnten. Anschließend wurden die Proben 5 Minuten zentrifugiert. An 5 ml der Laugungswässer wurde ein Alkalinitätstest zur Ermittlung der Hydrogenkarbonatkonzentration durchgeführt. Danach wurde die Probe weitere 25 Minuten zentrifugiert, um auch die aller kleinsten Tonmineralpartikel abzutrennen. Das abfiltrierte Laugungswasser wurde in zwei verschließbare Behälter (je etwa 12,5 ml) gefüllt. Die Wasserprobe im ersten Gefäß wurde angesäuert, um später die Kationengehalte zu messen, während die zweite Wasserprobe für die Anionenmessung eingefroren wurde, um die Anionen bis zur Analyse zu stabilisieren. Um die experimentell bedingten Fehler zu quantifizieren, wurden Blind-Versuche durchgeführt, wobei ein identischer Versuchsablauf ohne Probenpulver durchgeführt wurde.

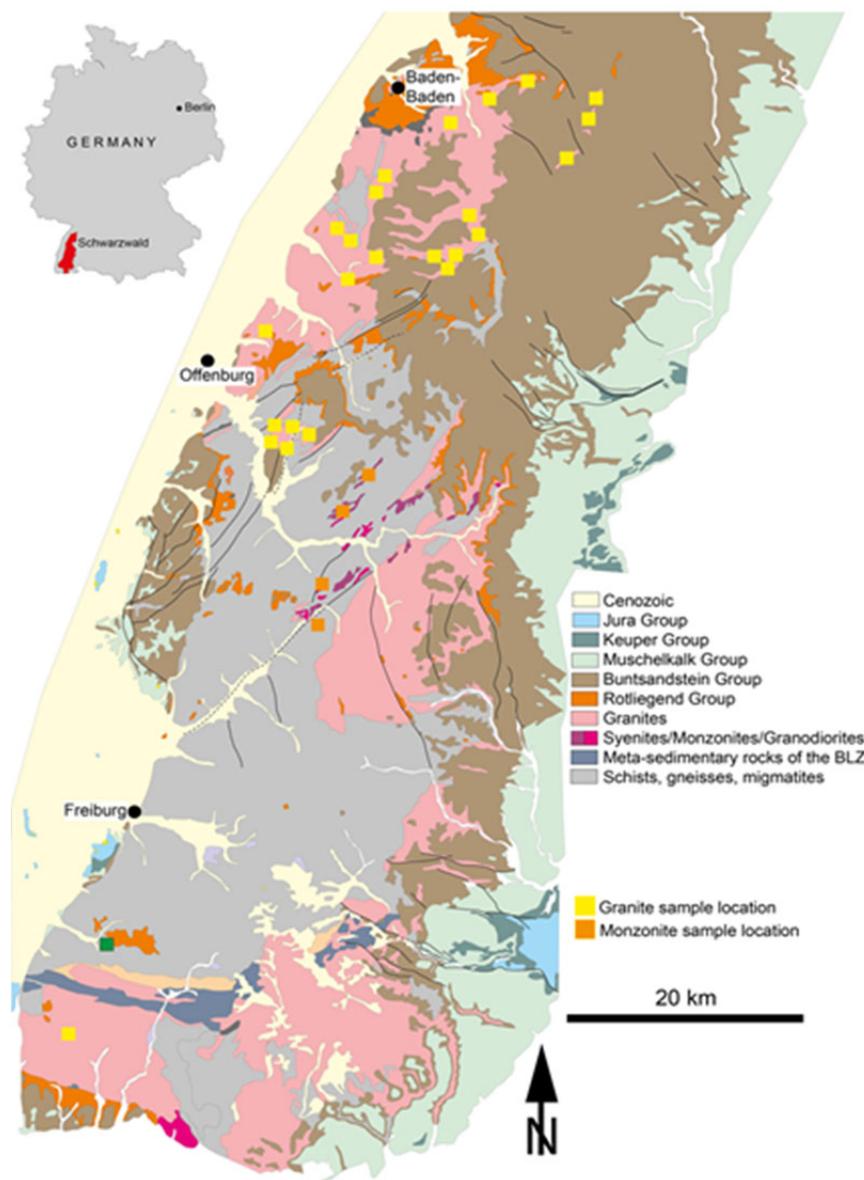


Abbildung 42: Geologische Übersichtskarte vom Schwarzwald (verändert nach LGRB, 2006) mit Probenlokationen der Gesteine für die Laugungsexperimente

Die Versuche bauen auf den Erfahrungen von Grimmer et al. (2016) auf.

2.6.4 Ausführliche Darstellung der Ergebnisse AP 4b

Bei den Experimenten wurden aus den Monzoniten 97-300 mg/l, bei den Graniten 45,4 – 146 mg/l an Feststoffen (TDS) gelöst. Die höheren TDS-Werte der Laugungswässer der Monzonite sind auf höhere Anorthitkomponente der Feldspäte sowie generell höhere Anteile mafischer Minerale im Vergleich zu den Graniten zurückzuführen. In den Laugungswässern aller Proben dominieren bei den Kationen Natrium und Kalium, bei den Anionen Chlorid, Sulfat und Hydrogenkarbonat.

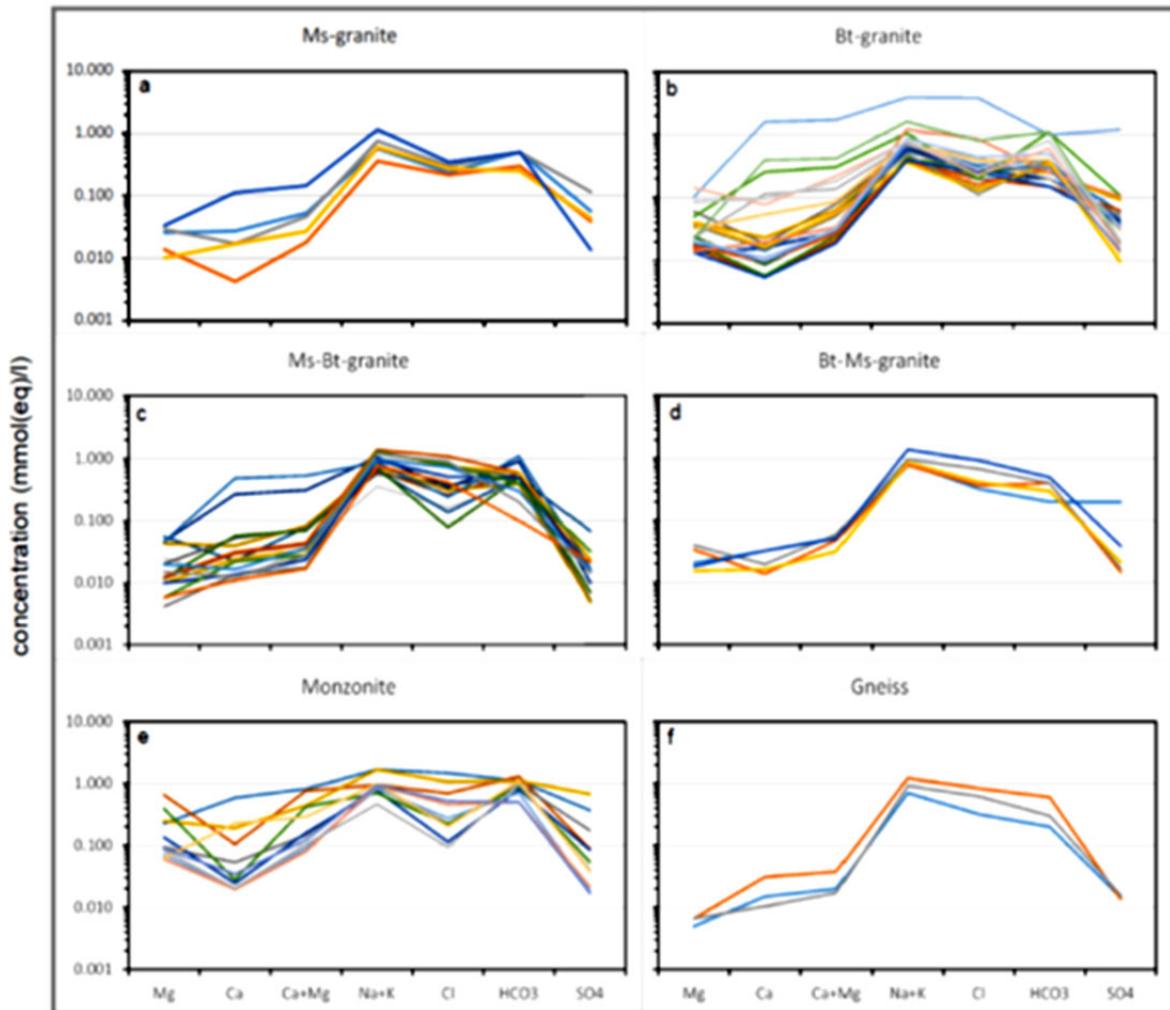


Abbildung 43: Schoeller-Diagramme der Laugenwässer aus den Verschiedenen Granit-Varietäten des Schwarzwaldes

Die pH-Werte variieren von 6,8 bis 8,8. Alle gemessenen Konzentrationen liegen - wie auch die gemessenen pH-Werte – deutlich unterhalb der in der DIN 4030 angeführten Werte für schwach angreifende Wässer. Da die Experimente bei 70 °C und mit pulverisierten Proben durchgeführt wurden, besteht beim Einbau von Erdwärmesonden in granitischen und monzonitischen Gesteinen keine Gefährdung hinsichtlich einer Betonaggressivität durch Wässer, die mit diesen Gesteinen assoziiert sind.

2.6.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Fortschritte auf diesem Gebiet sind uns nicht bekannt geworden.

2.6.6 Veröffentlichung der Ergebnisse, Ergebnis- und Forschungstransfer

Die Ergebnisse sind nicht nur für die angewandte Fragestellung hinsichtlich einer möglichen Betonaggressivität nutzbar, sondern auch für wissenschaftliche Fragestellungen zur Elementmobilisierung in der oberen Kruste. Deshalb sollen die Ergebnisse aus dieser Studie in eine Publikation in einer internationalen Fachzeitschrift einfließen (Drüppel et al., in prep.).

2.6.7 Literatur

Drüppel K, Stober I, Grimmer JC (in prep.) Geofluids.

Grimmer JC, Drüppel K, Stober I (2016) Origin of lithium in deep brines of SW-Germany – first results. European Geothermal Congress EGEC Strasbourg, 3pp.

LGRB (2006) Geologische Karte des Schwarzwaldes. Maßstab 1:150.000. Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Baden-Württemberg, Freiburg.

2.7 AP 4c: Wärmeübergang in der Strömungs- und Temperaturgrenzschicht zwischen Boden und bodenberührendem Bauteil (IGS, FKZ: L75 17008)

2.7.1 Abstract zu den Forschungsergebnissen AP 4c

Die Effizienz eines geothermischen Absorbers hängt in starkem Maße von der thermischen Interaktion des Bauteils mit dem Untergrund ab. Steht eine Erdwärmesonde oder ein thermisch aktiviertes Hybridbauteil, wie z.B. ein Energiepfahl oder eine Tunnelgeothermie, in Kontakt mit einem durchströmten Aquifer, wird der Wärmetransport neben der Wärmediffusion durch Advektion getrieben. Die entscheidenden Faktoren zur Quantifizierung dieses Wärmestroms sind die anliegende Filtergeschwindigkeit sowie die Art des Wärmeübergangs vom Aquifer auf das thermisch aktivierte Bauteil. In der Disziplin der klassischen Wärmeübertragung wird die Art des Wärmeübergangs durch sogenannte Nußelt-Korrelationen bei der Dimensionierung und Auslegung von Wärmeübertragern berücksichtigt. Im Bereich der Geothermie wird diesem Phänomen bislang keine Bedeutung beigemessen. Zur Untersuchung ob und in welchem Umfang der Wärmeübergang vom Aquifer zum thermisch aktivierten Bauteil zu berücksichtigen ist, soll dieses Arbeitspaket erste Erkenntnisse liefern.

2.7.2 Motivation und Hintergründe

Zwischen über- und umströmten Bauteilen eines Wärmeübertragers bilden sich sogenannte Strömungsgrenzschichten aus, die den wandnahen Strömungszustand und damit den Wärmeübergang vom Bauteil an das Fluid maßgeblich bestimmen. Im Bereich der oberflächennahen Geothermie treten diesen Phänomene an der inneren Rohrwandung am Übergang zum Absorberfluid auf und werden bei analytischen und numerischen Berechnungen einer Erdwärmearanlage bereits berücksichtigt. Bei der Untersuchung von umströmten Tunnelgeothermieanlagen und Erdwärmesonden konnte im Rahmen von vorangegangenen Forschungsarbeiten gezeigt werden, dass eine Vernachlässigung dieser Grenzschichtphänomene am Übergang des Geothermieabsorbers zum Aquifer zu einer Über- oder Unterschätzung der möglichen Wärmeströme führen kann.

2.7.3 Aufgabenstellung

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wird ein bestehender Versuchstand weiterentwickelt, der die Beschreibung der Grenzschicht, also des Wärmeübergangs zwischen Absorberbauteil und Aquifer ermöglichen wird. Hierzu werden erforderliche Adaptionen des Versuchstandes zunächst konzipiert und konstruiert und es werden entsprechende Fertigungsskizzen erstellt. Im Anschluss daran erfolgt die Umsetzung der Adaptionen am Versuchstand. Das Versuchsprogramm wird zunächst die Kalibrierung Versuchstandes und der eingesetzten Messtechnik umfassen, bevor dann bekannte Nußelt-Korrelationen zur Beschreibung des Wärmeübergangs zwischen einer ebenen Platte und einem Fluid (Wasser) experimentell bestätigt werden. Daran anschließend wird eine erste Versuchsreihe zur Ermittlung des Wärmeüber-

gangskoeffizienten zwischen einer durchströmten Kiesschicht und einer ebenen Platte durchgeführt. Diese Versuchsreihen sind nicht mehr Bestandteil dieses Arbeitspaketes.

2.7.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die Disziplin der klassischen Wärmeübertragung liefert bereits zahlreiche Ansätze zu Beschreibung des Wärmeübergangs von unterschiedlichen Fluiden an unterschiedlich geometrisch ausgebildete Wärmeübertrager. Ein Standardwerk in diesem Zusammenhang ist der VDI-Wärmatlas [5]. Wärmetransportprozesse im Grundwasser werden zusammenfassend in [1] beschrieben. Untersuchungen zur Ausbreitung von Wärmefahnen im Untergrund bzw. zur Advektion im Untergrund wurden zum Beispiel in [3], [2] oder [4] durchgeführt. Konkrete Untersuchungen die auf den Wärmeübergang zwischen einem durchströmten Aquifer und einem Geothermieabsorber abzielen sind nicht bekannt.

2.7.5 Planung, Ablauf und Ergebnisse des AP 4c

Zur Untersuchung des Wärmeübergangs von einem Geothermieabsorber zum durchströmten Aquifer wurde ein Versuchsstand in Anlehnung an thermische Reaktoren aus dem Bereich der Verfahrenstechnik entwickelt. Innerhalb des Reaktors strömt ein Fluid (hier: Leitungswasser) durch ein poröses Medium und wird von den Reaktorwänden mit einem Wärmestrom beaufschlagt. Die Abbildung 44 zeigt den Aufbau des Versuchsstandes.

Das Wasser tritt seitlich in das Zulaufrohr DN 300 ein, sodass sich eine stationäre Überströmung am Kopf des Zulaufrohres einstellt. Die Wassertemperatur beträgt im Zulauf ca. 20 °C, was der Umgebungstemperatur außerhalb des Versuchsstandes entspricht. Innerhalb des Zulaufrohres stellt sich ein klassisches Rohrströmungsprofil ein, bis es in den Bereich der hydraulischen Bremse a) gemäß Abbildung 45 kommt. Diese besteht aus einem Aluminiumlochsieb, einem Filtervlies sowie Quarzsand mit einer Schichtmächtigkeit von ca. 8,0 cm.

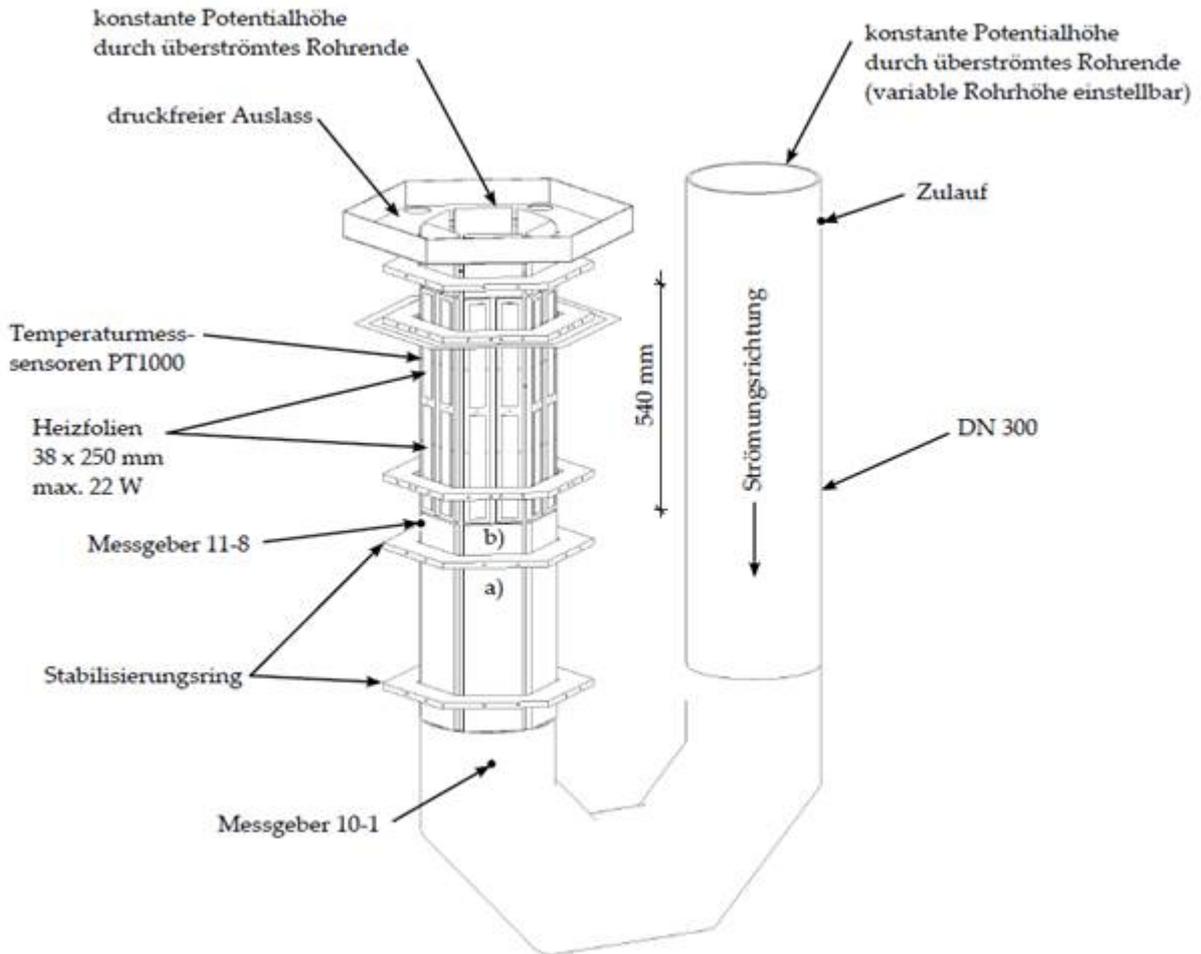


Abbildung 44: Übersicht Versuchsaufbau, a) hydraulische Bremse, b) Strömungsgleichrichter



Abbildung 45: links: hydraulische Bremse a), rechts: Strömungsgleichrichter b)

Auf die hydraulische Bremse folgt ein Strömungsgleichrichter b) mit einer Höhe von ca. 4,5 cm (vgl. Abbildung 45 rechts), der aus Kunststoffrohren mit einem Durchmesser von 5,0 mm besteht. Oberhalb des Strömungsgleichrichters kann von einer, über die Grundrissfläche des Reaktors konstanten, aufwärts gerichteten Strömung ausgegangen werden. Nach dem Strö-

mungsgleichrichter tritt das Wasser in den Reaktorbereich ein, dessen Wände aus 12 Aluminiumpaneelen gemäß Abbildung 46 gebildet werden.

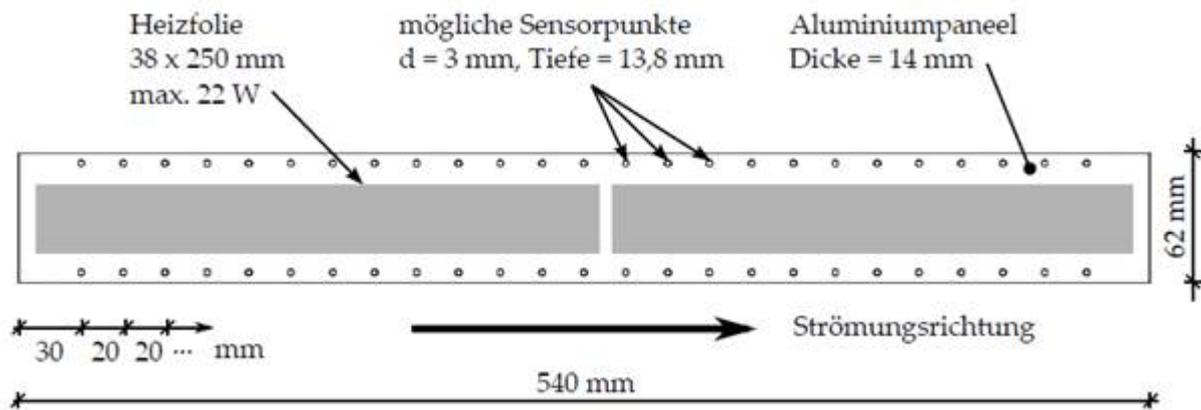


Abbildung 46: Detaildarstellung Messpaneel

Auf den Messpaneelen sind jeweils 2 Heizfolien mit einer maximalen Leistung von 22 W appliziert, mit denen ein konstanter Wärmestrom auf die Reaktorwände aufgebracht werden kann. Zur Messung der Wandtemperatur der Reaktorwand wurden in diskreten Abständen Bohrungen angeordnet, deren Bohrlochgrund bis ca. 0,2 mm an die Innenseite der Reaktorwand heranreicht. Die Temperaturmessgeber bestehen aus Platintemperatursensoren der Klasse A mit einem Widerstand bei 0 °C von 1000 Ω , die in ein Kunststoffrohr mit 3,0 mm Außendurchmesser eingebettet sind. Der Anschluss der Temperatursensoren erfolgt als Vierleiterschaltung. Sämtliche Temperatursensoren wurden über eine Zweipunktkalibrierung kalibriert und zusammen mit einer silikonfreien Wärmeleitpaste in die Aluminiumpaneele eingebaut.

Nach der Durchströmung des Reaktors verlässt das Wasser den Versuchsstand drucklos und fließt in eine Messeinrichtung zur Aufzeichnung des Volumenstroms. Die Füllstandsmessung erfolgt mittels eines kapazitiven Drucksensors. Die Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeit erfolgt für die durchströmte Reaktorquerschnittsfläche.

Sämtliche Versuche werden für einen thermisch-hydraulisch stationären Zustand ausgewertet. Hierzu wird dem Reaktor nach dem Einstellen eines konstanten hydraulischen Potentialunterschieds ein konstanter Wärmestrom zugeführt und die Wandtemperaturen über den Versuchszeitraum gemessen.

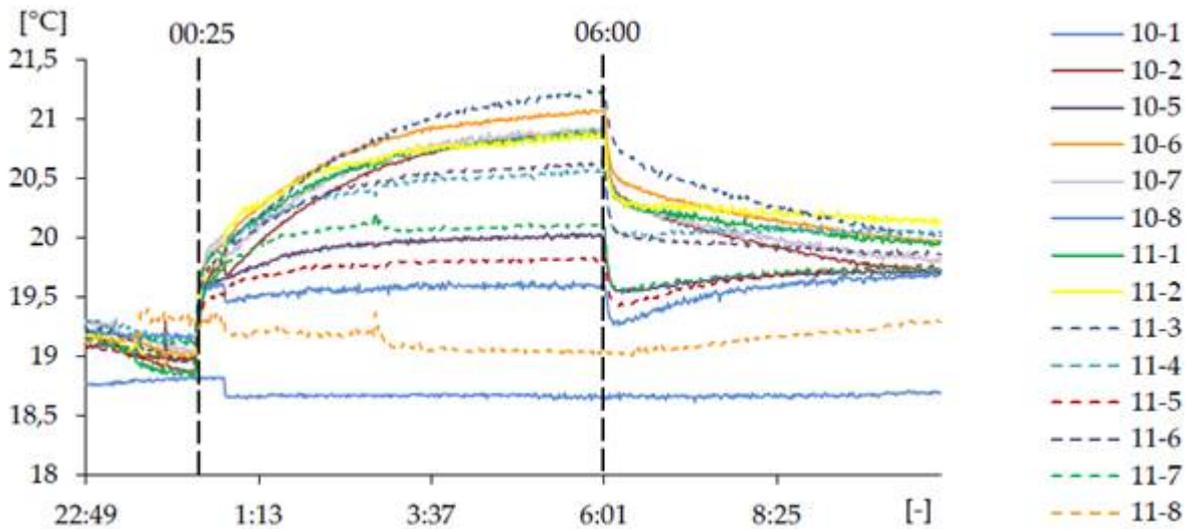


Abbildung 47: Temperaturverlauf während eines Validierungsversuches über den Zeitraum

Die Abbildung 47 zeigt den Temperaturverlauf eines Validierungsversuches über die Dauer von ca. 11,5 h. Um 22:49 Uhr wurde die Temperaturaufzeichnung gestartet. Zu diesem Zeitpunkt ist lediglich die Durchströmung aktiv, die Beaufschlagung des Reaktors mit einem Wärmestrom erfolgt erst gegen 00:25 Uhr. Zunächst erkennt man eine Vergleichmäßigung der Reaktortemperatur durch das einströmende Wasser, das eine Temperatur von ca. 18,8 °C besitzt. Mit dem Zuschalten des Wärmestroms steigt die Temperatur der Reaktorwand. Die Messgeber nahe des Einstromes (z.B. Messgeber 11-5) erreichen bereits nach ca. 3 h quasi stationäre Verhältnisse, während die Messgeber im Bereich des Ausstroms (z.B. Messgeber 11-3) erst nach ca. 7 Stunden keine wesentliche Temperaturänderung mehr zeigen. Zu diesem Zeitpunkt erfolgt die Auswertung des Versuches. Um 06:00 Uhr wurde die Wärmezufuhr zum Reaktor abgeschaltet, während die Durchströmung aufrechterhalten wurde. Ab diesem Zeitpunkt erkennt man eine langsame Angleichung der Temperaturen im Bereich des Reaktors. Der Messgeber 10-1 steht in direktem Kontakt mit dem einströmenden Fluid und ist unterhalb der hydraulischen Bremse angeordnet (vgl. Abbildung 44). Auch nach dem Abschalten der Wärmezufuhr findet keine thermische Rückkopplung mit diesem Messgeber statt. Anders verhält sich der Messgeber 11-8, der im Bereich des Strömungsgleichrichters in direktem Kontakt zum Fluid steht. Nach der Unterbrechung der Wärmezufuhr nimmt dieser stetig Wärme aus dem Bereich des Reaktors auf, steht folglich im gegenseitigen thermischen Austausch mit dem Reaktorbereich.

Zur Validierung des Versuchsstandes wurden zunächst Versuche mit einer freien Fluidströmung innerhalb des Reaktors durchgeführt und mit numerischen Berechnungen verglichen. Für eine freie Fluidströmung sind die physikalischen Gesetzmäßigkeiten durch die Navier-Stokes-Gleichungen sowie einen gekoppelten Wärmetransport numerisch abbildbar. Die Simulation des Versuchsstandes erfolgt auf der Basis von zweidimensionalen, rotations-symmetrischen Berechnungen, bei denen der rechnerische Umfang des Simulationsmodells der

Abwicklungslänge der Innenseite des polygonalen Reaktors entspricht (siehe Abbildung 48). Hierdurch ist eine direkte Übertragung der im Versuch aufgeprägten Wärmestromdichte in das numerische Modell möglich.

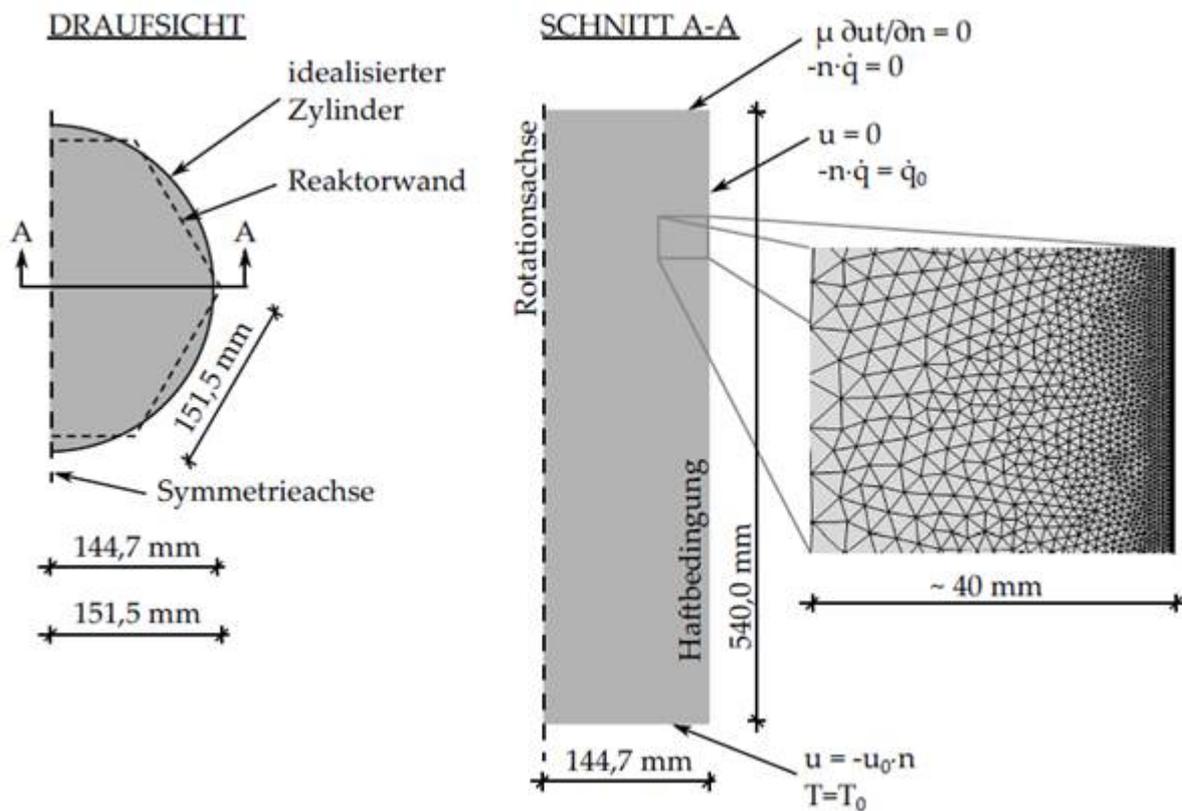


Abbildung 48: Zweidimensionales, rotationssymmetrisches Berechnungsmodell des Versuchszustandes zur Untersuchung des Wärmeübergangs von einem Geothermieabsorber zum durchströmten Aquifer

Die Abbildung 48 zeigt neben der Modellgeometrie auch einen Ausschnitt des numerischen Berechnungsnetzes als Ergebnis einer Konvergenzuntersuchung. Das Berechnungsgebiet besteht aus 36.674 Dreieckselementen, die mit Annäherung an die Reaktorwand (Haftbedingung) stark verfeinert sind. Die maximale Elementlänge beträgt in diesem Bereich ca. 1,6 mm. Die Strömungsgeschwindigkeit innerhalb des Reaktors wird zum einen durch die erzwungene Strömung, zum anderen durch die durch Dichteunterschiede getriebene Strömung hervorgerufen. Es findet somit eine Überlagerung einer erzwungenen und einer freien Konvektion statt. Durch das Beaufschlagen der Reaktorwände mit einem Wärmestrom kommt es zunächst zu einem instationären Strömungsregime. Die Einschwingphase wurde auf der Basis einer instationären Simulation untersucht. Die Abbildung 49 zeigt den Strömungszustand innerhalb des Reaktors für die Zeiten 1 min, 3 min, 5 min und 10 min nach Beginn der Wärmestromzuführung.

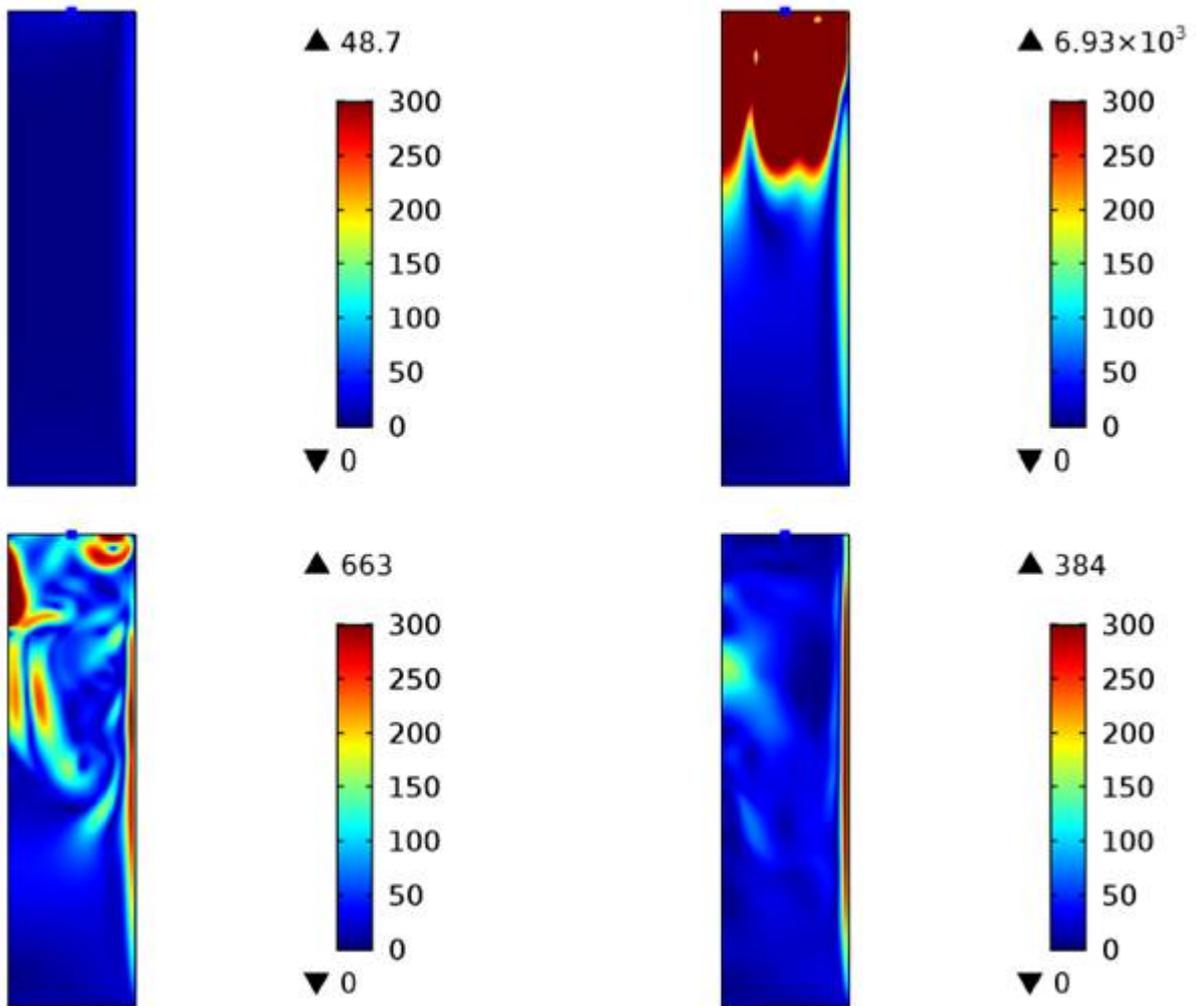


Abbildung 49: Strömungsfeld in [m/d] einer zweidimensionalen, rotationssymmetrischen Strömungssimulation, links oben: Zeitpunkt $t = 1 \text{ min}$, rechts oben: Zeitpunkt $t = 3 \text{ min}$, links unten: Zeitpunkt $t = 5 \text{ min}$, recht unten: Zeitpunkt $t = 10 \text{ min}$

Zu Beginn beträgt die maximale Strömungsgeschwindigkeit ca. 50 m/d, was ca. der 6-fachen ungestörten Einströmgeschwindigkeit entspricht. Hervorgerufen wird diese Geschwindigkeitserhöhung durch die Haftbedingung an der Wand. In weiterer Folge wird das Strömungsregime vollständig chaotisch, bevor es nach ca. 10 min stationäre Verhältnisse erreicht. Nahe der Wand werden in einer schmalen Zone Geschwindigkeiten von bis zu 380 m/d erreicht, die vor dem Hintergrund der Massenerhaltung zur Ausbildung von Rückströmungen innerhalb des Reaktors führen. Bei der Interpretation der Entwicklung der Wandtemperatur auf der Innenseite des Reaktors ist die Instationarität der Strömung entsprechend zu berücksichtigen.

Zur Validierung des Versuchsstandes wurden folgende Versuchsrandbedingungen eingestellt:

- Validierungsversuch 1: $u_0 = 8,0 \text{ m/d}$ und $q = 100 \text{ W/m}^2$
- Validierungsversuch 1: $u_0 = 10,0 \text{ m/d}$ und $q = 100 \text{ W/m}^2$
- Validierungsversuch 1: $u_0 = 2,0 \text{ m/d}$ und $q = 100 \text{ W/m}^2$

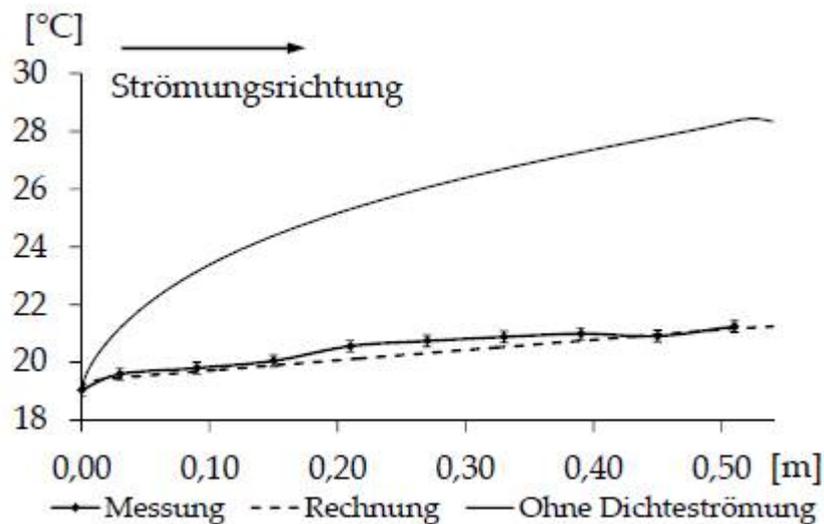


Abbildung 50: Validierungsversuch 1: Vergleich der gemessenen und berechneten Wandtemperaturen über die vertikale Achse des Reaktors ($u_0 = 8,0 \text{ m/d}$ und $q = 100 \text{ W/m}^2$), Vergleich Temperaturverlauf ohne Berücksichtigung einer Dichteströmung

Die Abbildung 50 zeigt den gemessenen sowie den simulierten Temperaturverlauf entlang der inneren Reaktorwand bei quasi stationären Strömungs- und Temperaturverhältnissen für den Validierungsversuch 1. Es ist eine gute Übereinstimmung der gemessenen und simulierten Temperaturen zu erkennen. Für jeden Messgeber ist die zu erwartende Messgenauigkeit symbolisch dargestellt. Einige der Temperatursensoren zeigen unter Einbeziehung der Messergebnisse der weiteren Validierungsversuche systematische Abweichungen, die auf ungenaue Kalibrierungen zurückgeführt werden. Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang der Vergleich mit einer Strömungssimulationen, bei dem Strömungsänderungen infolge von Dichteunterschieden vernachlässigt wurden.

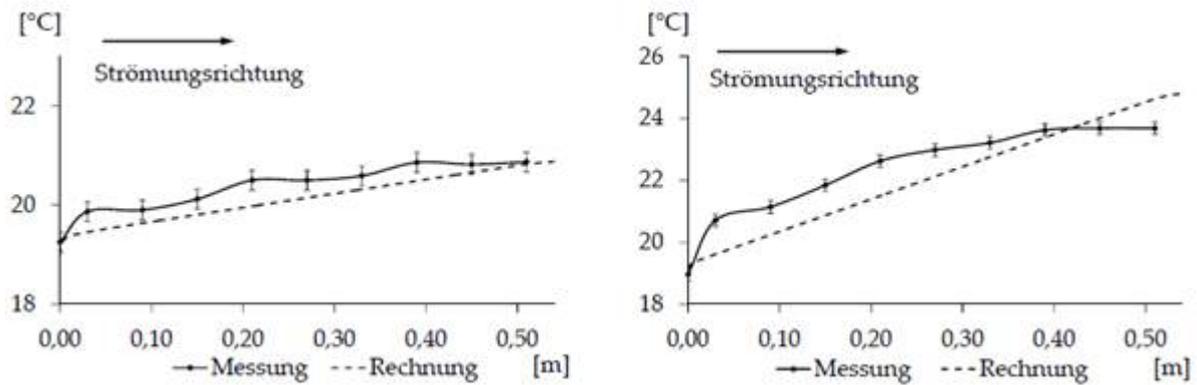


Abbildung 51: Vergleich der gemessenen und berechneten Wandtemperaturen über die vertikale Achse des Reaktors, links: Validierungsversuch 2: $u_0 = 10,0 \text{ m/d}$ und $q = 100 \text{ W/m}^2$, rechts: Validierungsversuch 3: $u_0 = 2,6 \text{ m/d}$ und $q = 100 \text{ W/m}^2$

Auch für die Validierungsversuche 2 und 3 konnte eine gute Übereinstimmung zwischen dem gemessenen und simulierten Temperaturverlauf erreicht werden, wobei sich mit abnehmender Strömungsgeschwindigkeit auseinanderdriftende Trends der Temperaturkurven erkennen lassen (vgl. Abbildung 51). Ein Grund hierfür wird in der Temperaturrandbedingung am einströmenden Modellrand gesehen, der in der numerischen Simulation eine unveränderbare Größe darstellt (Randbedingung 1. Art). Die Messung der Temperatur am Geber 11-8 zeigt für eine sehr geringe Geschwindigkeit eine Temperaturrückkopplung mit dem Reaktorbereich, so dass die gewählte Randbedingung ggf. zu 'starr' ist. Grundsätzlich konnte für den Versuchsstand zur Untersuchung des Wärmeübergangs von einem Geothermieabsorber zum durchströmten Aquifer eine gute Übereinstimmung mit den durchgeführten numerischen Simulationen festgestellt werden, sodass der Versuchsaufbau als validiert angesehen wird.



Abbildung 52: Temperatursensoren zur Messung der Temperatur innerhalb der Kugelpackung, links: Kugelhalbschale mit Vertiefung für den Sensor nach der Herstellung, Mitte: Kugelhalbschalen mit eingelegtem Sensor, rechts: Kugel aus Kugelpackung zum Vergleich

Das poröse Medium innerhalb des Reaktorbereiches wird durch eine regelmäßige Kugelpackung gebildet. Die Kugeln besitzen einen Durchmesser von 20mm und bestehen aus einem hochmolekularen, thermoplastischen Kunststoff (POM). Der gewählte Kugeldurchmesser geht auf die Anforderung zurück, die Temperaturen innerhalb des porösen Mediums ohne die Störung des Strömungsfeldes zu messen (vgl. Abbildung 52). Diese Funktion wurde bis dato noch nicht genutzt.

Die Kugeln werden in dichtester Lagerung innerhalb des Reaktors angeordnet, so dass sich eine Porosität von $n = 0,272$ ergibt. Hierzu wurde die Geometrie des Reaktors auf die Geometrie der Kugelpackung angepasst, so dass sichergestellt ist, dass alle äußeren Kugeln der 1., 3. Lage usw. direkten Kontakt mit der Reaktorwand besitzen. Diese Lagen bestehen aus jeweils 169 Kugeln, die Zwischenlagen 2, 4 usw. aus jeweils 147 Kugeln. Die gesamte Kugelpackung besteht aus 5225 Kugeln. Die Abbildung 53 zeigt den Vergleich der gemessenen und simulierten Wandtemperatur für den Indexversuch bei Durchströmung der beschriebenen Kugelpackung in dichtester Lagerung. Die Simulation bildet eine Kolbenströmung (Potentialströmung) ab, wie sie üblicherweise der Simulation von Grundwasserströmungen zu Grunde gelegt wird. Hierbei werden vorhandene Grenzschichtentwicklungen nahe der Reaktorwand vernachlässigt.

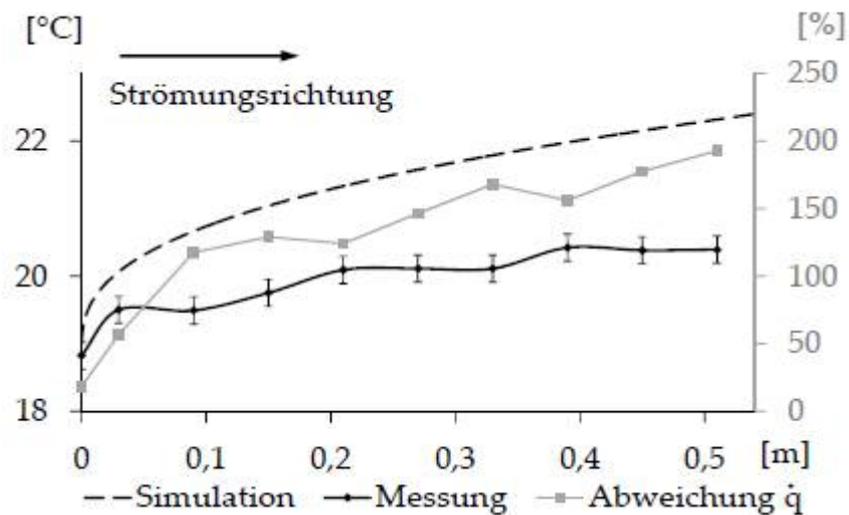


Abbildung 53: Indexversuch: Vergleich der gemessenen und berechneten Wandtemperaturen T_w über die vertikale Achse des Reaktors ($v_f = 11,0$ m/d und $q = 100$ W/m²) mit Kugelpackung in dichtester Lagerung

Während sich im Versuch bis zum Ende des Reaktors bereits ein quasi stationärer Zustand eingestellt hat, prognostiziert die Simulation einen weiteren Temperaturanstieg. Das Simulationsergebnis unterschätzt den Wärmeübergang von der Reaktorwand an das poröse Medium am Ausstromrand des Reaktors um ca. 200 %. Grundsätzlich führen zwei physikalische Phänomene zu der Abweichung zwischen dem Ergebnis der Simulation und dem Ergebnis der Messung:

- Die Vernachlässigung der Haftbedingung an der temperierten Reaktorwand führt zu einer Überschätzung des Wärmeübergangs
- Die Abbildung einer homogenen Permeabilität des porösen Mediums führt zu einer Unterschätzung des Wärmeübergangs.

2.7.6 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Zum Zeitpunkt der Berichtslegung sind dem Autor keine weiteren Arbeiten auf diesem Gebiet bekannt geworden.

2.7.7 Veröffentlichung der Ergebnisse, Ergebnis- und Forschungstransfer

Die erzielten Forschungsergebnisse wurden zum Zeitpunkt der Berichtslegung noch nicht publiziert.

2.7.8 Literatur

[1] Bear, J. 1988. *Dynamics of fluids in porous media*. Dover books on physics and chemistry. Dover, New York.

[2] Chang, W.-S. 2001. *Experimentelle Untersuchung zur freien Konvektion an Rohren in einer Kies/Wasser-Schüttung*. Dissertation, Universität Stuttgart.

[3] Hähnlein, S., Molina-Giraldo, N., Blum, P., Bayer, P., and Grathwohl, P. 2010. Ausbreitung von Kältefahnen im Grundwasser bei Erdwärmesonden. *Grundwasser* 15, 2, 123–133.

[4] Huber, H. 2013. *Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Wärmetransportverhalten oberflächennaher, durchströmter Böden*. Dissertation Heft 40. Technische Universität Darmstadt (Eigenverlag), Darmstadt.

[5] 2006. *VDI-Wärmeatlas*. VDI Buch. Springer, Berlin.

2.8 AP 4d: Verfahren zur vereinfachten Berücksichtigung von Grundwasserströmungen durch Verwendung effektiver Wärmeleitfähigkeiten (Solites, FKZ: L75 17006)

2.8.1 Abstract zu den Forschungsergebnissen AP 4d

In diesem Arbeitspaket wurde untersucht, ob durch eine vereinfachende Verwendung einer effektiven Wärmeleitfähigkeit über die gesamte Bohrlochlänge einer Erdwärmesonde an Stelle einer detaillierten Betrachtung jeder einzelnen Bodenschicht eine ausreichend genaue Berücksichtigung eines im Untergrund vorhandenen Grundwasserflusses möglich ist. Hierfür wurde zunächst eine detaillierte Berechnung eines Erdwärmesondenfeldes in einem Untergrund mit Grundwasserfluss mit Hilfe des Finite-Element-Programms FEFLOW durchgeführt. In diesem Untergrund-Modell mit Grundwasserströmung wurde ein Thermal Response Test (TRT) simuliert und daraus die effektive Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes bestimmt. Die so ermittelte effektive Wärmeleitfähigkeit bezieht sich somit auf den gesamten Höhenbereich der Erdwärmesonde. Anschließend wurde dasselbe Erdwärmesondenfeld ohne detaillierte Berücksichtigung des Grundwasserflusses und mit der zuvor ermittelten effektiven Wärmeleitfähigkeit modelliert. Dieses Vorgehen wurde mit verschiedenen Variationen der Grundwasserfließgeschwindigkeit sowie der Mächtigkeit des Aquifers durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die Ergebnisse im Falle einer geringen Filtergeschwindigkeit besser sein können als bei der Ignorierung der Grundwasserströmung. Mit zunehmender Filtergeschwindigkeit divergieren die Ergebnisse zwischen einer Berechnung mit detaillierter Betrachtung des Untergrunds und eines vereinfachten Untergrundmodells. Mit dem gewählten Vorgehen konnte die ermittelte effektive Wärmeleitfähigkeit jedoch nicht so bestimmt werden, dass sie generell als hinreichender Parameter für die Vorhersage von zu erwartenden Wärmeeinspeise- und Entzugsmengen herangezogen werden kann.

2.8.2 Motivation und Hintergründe

Für die Durchführung mehrjähriger systemweiter Simulationsrechnungen zur Systemdimensionierung bzw. Systemoptimierung von Erdwärmesonden ist die Verwendung detaillierter FEM Modelle für den Untergrund wegen langer Rechenzeiten nicht praktikabel. Einfache Auslegungsprogramme wie EED, GEO-HAND^{light}, etc. berücksichtigen in der Regel keine Grundwasserbewegung im Untergrund. Die fehlende hinreichende Möglichkeit bzw. das Ausbleiben einer detaillierten Berücksichtigung von Grundwasserbewegungen soll durch die Verwendung von effektiven Wärmeleitfähigkeiten für die Beschreibung des Untergrunds kompensiert werden. Ein vereinfachtes FEFLOW-Modell steht dabei stellvertretend für zahlreiche andere Rechenprogramme für Erdwärmesonden (EWS), die keine detaillierte Berücksichtigung von Grundwasserflüssen erlauben.

Fragestellung: Ist mit einer effektiven Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds an Stelle einer detaillierten Betrachtung eine ausreichend genaue Berücksichtigung eines im Untergrund vorhandenen Grundwasserflusses möglich?

Ziel: Aussagen über die Eignung der effektiven Wärmeleitfähigkeit als Planungsparameter für verschiedene hydrogeologische Randbedingungen

2.8.3 Aufgabenstellung

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes soll die Aussagekraft der durch Thermal Response Tests ermittelten effektiven Wärmeleitfähigkeiten in Bezug auf den kombinierten Heiz- und Kühlbetrieb von EWS-Feldern in Grundwasserleitern mit Grundwasserfließbewegung überprüft werden. Ziel ist es aufzuzeigen, unter welchen hydrogeologischen Randbedingungen (Mächtigkeit und kf-Wert von Grundwasserleitern, Fließgeschwindigkeiten etc.) das Verfahren welche Ergebnisqualitäten liefert.

2.8.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Beim Vorhandensein einer Grundwasserströmung kommt zum konduktiven Wärmetransport im Untergrund ein konvektiver Wärmetransport hinzu. Hierdurch steigt die effektive Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes. Je nach Untergrund können schon kleine Fließgeschwindigkeiten von 0,1 m/d (Meter/Tag) Auswirkungen auf die effektive Wärmeleitfähigkeit haben. In aktuellen Planungsrichtlinien wie der VDI 4640 werden Empfehlungen zu ausgewählten Stoffwerten für verschiedene trockene, feuchte und wassergesättigte Untergründe angegeben. Hinweise zur quantitativen Berücksichtigung von Grundwasserbewegungen sind jedoch nicht enthalten. (VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt, 2016).

Von Huber (2013) wurden Laborversuche und numerische Modellierungen verwendet um Abhängigkeiten zwischen Wärmeleitfähigkeit und Geschwindigkeit der Grundwasserströmung zu bestimmen. Dabei wurde festgehalten, dass die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeiten umso stärker ausgeprägt ist, je höher die Grundwasserfließgeschwindigkeiten sind.

Der Einfluss der Grundwasserströmung auf die Leistungsfähigkeit eines Erdwärmesondenfeldes war Teil der Untersuchung von Lee & Lam (2007). Ihre Aussagen zur positiven Wirkung von Grundwasserströmungen beziehen sich dabei nur auf den Wärmeentzug.

2.8.5 Methodik

In einem Simulationsmodell mit detaillierter Berücksichtigung von Grundwasserströmung wurde ein Thermal Response Test simuliert und daraus die effektive Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes bestimmt. Die effektive Wärmeleitfähigkeit bezieht sich somit auf den gesamten Höhenbereich der Erdwärmesonde und ist ein Durchschnittswert. Dasselbe Modell wurde anschließend ohne detaillierte Berücksichtigung des Grundwasserflusses und mit der zu-

vor ermittelten effektiven Wärmeleitfähigkeit im gesamten Modell parametrisiert. Um die Zulässigkeit zu prüfen, wurden Detailmodell und vereinfachtes Modell mit einem Lastprofil über den geplanten Zeitraum von mindestens 3 Jahren beaufschlagt. Als Vergleichswerte dienen die im 3. Betriebsjahr eingespeisten und entzogenen Wärmemengen. Dieses Prinzip der Untergrundhomogenisierung wurde mit verschiedenen Variationen der Grundwasserfließgeschwindigkeit sowie der Mächtigkeit des Aquifers durchgeführt.

Für den Vergleich verschiedener homogener, mit effektiven Wärmeleitfähigkeiten parametrisierten Modellen mit heterogenen Referenzmodellen werden zunächst die heterogenen Modelle mit Grundwasserströmung erstellt.

Die Modellierung erfolgte mit dem Finite Elemente Programm FEFLOW v. 7.2 (update 2) (DHI 2018) in Verbindung mit der integrierten BHE-Randbedingung (BHE: Borehole Heat Exchanger) (Diersch et al. 2010). Durch die Verwendung dieser Randbedingung muss die Sondengeometrie nicht ausdiskretisiert werden, wodurch die Elementanzahl in Kombination mit einem empfohlenen Schichtabstand von 1 m (Diersch et al. 2010) trotz großer Modellabmessungen (100 x 100 x 110 m) auf 282.920 Elemente begrenzt werden kann.

Die Parameter des Grundmodells und der EWS sowie die Sondenanordnung (s. Abbildung 54) orientieren sich an dem Grundmodell aus dem AP 1b (in Anlehnung an Janzen F. (2019)):

- Erdwärmesonden: 2-U-EWS, 150 mm Bohrlochdurchmesser, 100 m tief
- Sondenanordnung: 2 x 5 Stück in Rechteckanordnung mit 4 m Bohrlochabstand
- Wärmeleitfähigkeit des Verfüllbaustoffs und des Untergrunds (Feststoff *Aquitard*): 1,5 bzw. 2,0 W/m/K.
- Volumetrische Wärmekapazität des Verfüllbaustoffs und des Untergrunds (Feststoff *Aquitard*): 2,17 bzw. 2,39 MJ/m³/K
- Porosität des Aquitards: 0
- Ungestörte Bodentemperatur: 10 °C
- Durchlässigkeitsbeiwert (k_f -Wert): 0 m/s

Durch die Verwendung eines sehr kleinen k_f -Werts wurde eine Grundwasserfließbewegung im Aquitard unterbunden. An den Modellrändern herrscht eine adiabate Randbedingung.

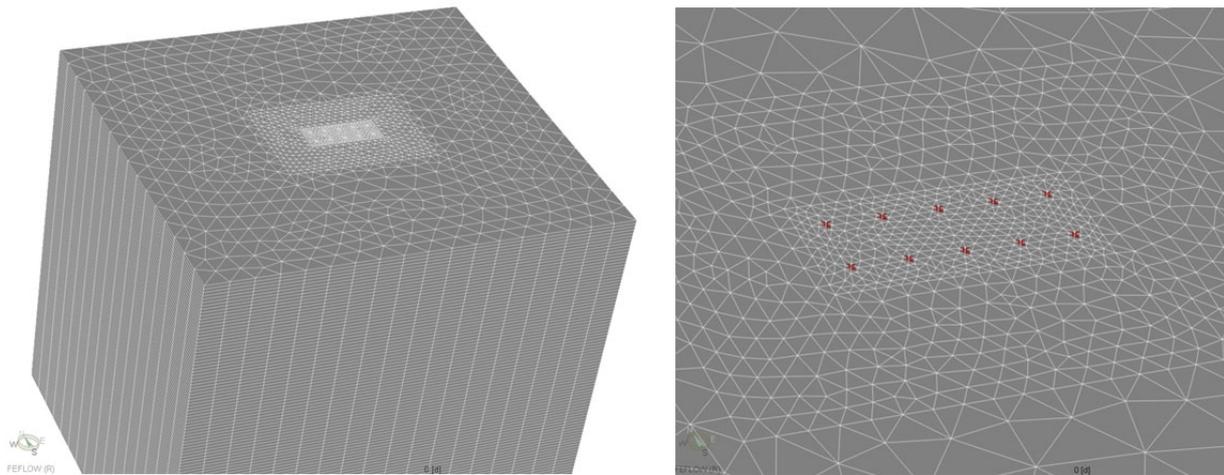


Abbildung 54: Überblick des entwickelten FEFLOW-Grundmodells mit Sondenordnung des EWS-Feldes, 10 EWS (rechts).

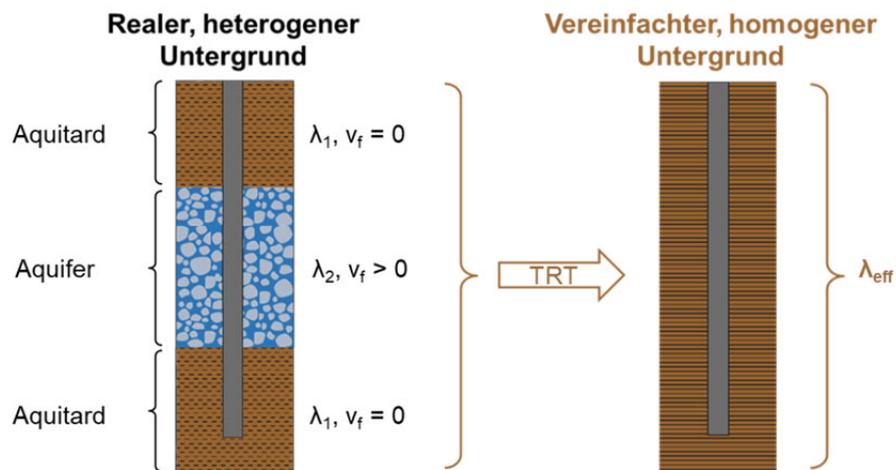
In diesem Grundmodell wurde anschließend ein Aquifer, wie in Abbildung 55 zu sehen, implementiert, dessen Eigenschaften hinsichtlich der zu untersuchenden Parameter variieren. Die Untersuchungsparameter des Aquifers in den heterogenen Modellen waren Mächtigkeit (m), Durchlässigkeitsbeiwert (k_f), hydraulischer Gradient (i) und Filtergeschwindigkeit (v_f) des Aquifers. Da k_f -Wert, hydraulischer Gradient und Filtergeschwindigkeit über nachfolgende Beziehung (Gleichung 4d-1) gekoppelt sind, resultiert die Änderung eines der Parameter immer in der Änderung der für den konvektiven Teil des Wärmetransports relevanten Größe der Filtergeschwindigkeit:

$$v_f = k_f \cdot i \quad (4d-1)$$

Aufgrund dessen wurden die Untersuchungsparameter auf die Mächtigkeit des Aquifers und dessen Filtergeschwindigkeit beschränkt. Die betrachteten Parameterkombinationen sind Tabelle 10 zu entnehmen. Die Grundvariante ohne Grundwasserbewegung wird mit dem Kürzel „0“ bezeichnet.

Tabelle 10: Untersuchungsszenarien

Variante	Mächtigkeit Aquifer [m]	Tiefe Oberkante Aquifer unter GOK [m]	Filtergeschwindigkeit [m/d]
0	-	-	-
A	20	40	0.01
B	50	25	0.01
C	50	25	0.1
D	50	25	1



λ : Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds, v_f : Filtergeschwindigkeit (-> konvektive Wärmeübertragung)
 λ_{eff} : effektive Wärmeleitfähigkeit (beschreibt Wärmeleitung + konvektive Wärmeübertragung)

Abbildung 55: Aufbau und Vergleich des Modells mit heterogenem Untergrund (Detailmodell) und des vereinfachten homogenen Modells mit effektiver Wärmeleitfähigkeit. TRT: Thermal Response Test

Um den konvektiven Anteil des Wärmetransports getrennt von der Wärmeleitung betrachten zu können, soll die Wärmeleitfähigkeit im Aquifer bei einer Filtergeschwindigkeit von 0 m/s, gleich der Wärmeleitfähigkeit des Aquitards sein ($\lambda_{Ar} = \lambda_{Ad} = 2 \text{ W/m/K}$). Selbiges gilt für die Wärmekapazität ($c_{p,Ar} = c_{p,Ad} = 2,39 \text{ MJ/m}^3/\text{K}$). Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des Feststoffs im Untergrund wurden daher in Abhängigkeit der Porosität angepasst, um bei ruhendem Grundwasser im Aquifer eine durchschnittliche Wärmeleitfähigkeit von 2 W/m/K und eine Wärmekapazität von 2,39 MJ/m³/K zu erzeugen. Die Porosität im Aquifer (Φ_{Ar}) wurde auf 0,3 festgelegt. Die Konsistenz dieses Vorgehens wurde durch den Vergleich der Ergebnisse von Thermal Response Tests validiert, bei denen ein Modell mit Porosität 0 und ein Modell mit Porosität 0,3 und angepassten Werten (Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität) simuliert wurde.

Die Parameter im Aquifer sind:

- Wärmeleitfähigkeit Grundwasser: 0,65 W/m/K
- Volumetrische Wärmekapazität Grundwasser: 4,2 MJ/m³/K
- Wärmeleitfähigkeit Feststoff Aquifer: 2,58 W/m/K.
- Volumetrische Wärmekapazität Feststoffanteil im Aquifer: 1,61 MJ/m³/K
- Porosität Aquifer: 0,3
- k_f -Wert: 10^{-4} m/s

Die Grundwasserströmung wurde durch Randbedingungen 2. Art (Neumann) an den Ein- und Austrittsflächen des Aquifers induziert.

Um in den FEFLOW Modellen mit BHE-Randbedingung die resultierenden Wärmeleitfähigkeiten ermitteln zu können, wurden jeweils Thermal Response Tests (Gehlin 2002) über einen Zeitraum von 6 Tagen (d.h. 144 Stunden) simuliert und mit Hilfe der Linienquellentheorie entsprechend den Angaben in (Gehlin 2002) ausgewertet. Hierbei wurde unter Einhaltung des theoretischen Mindestzeitkriteriums (VDI 4640 Blatt 5) für das Zeitintervall von $t_1 = 139$ h bis $t_2 = 144$ h die Untergrund- Wärmeleitfähigkeit (λ_{eff}) ermittelt gemäß:

$$\lambda_{eff} \approx \frac{P_{EWS}}{4 \cdot \pi \cdot L_{EWS}} \cdot \frac{\ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right)}{\vartheta_F(t_2) - \vartheta(t_1)} \quad (4d-2)$$

P_{EWS} gibt die Heizleistung der betrachteten Erdwärmesonde der Länge L_{EWS} wieder, die mit einem EWS-Volumenstrom von $20,7 \text{ m}^3/\text{d}$ unter Verwendung einer Temperaturdifferenz zwischen EWS-Vor- und Rücklauf von 4 K betrieben wurden. Das arithmetische Mittel aus den EWS-Vor- und Rücklauftemperaturen zum Zeitpunkt t wird als $\vartheta_F(t)$ bezeichnet.

Da die der Linienquellentheorie zu Grunde liegenden Annahmen (z. B. unendliche Linienquelle mit konstanter spezifischer Heizleistung P_{EWS}/L_{EWS} über die gesamte EWS-Länge) durch die betrachteten EWS lediglich näherungsweise erfüllt werden, kann die gemäß Gleichung 4d-2 ermittelte Untergrundwärmeleitfähigkeit von der tatsächlichen, in den Simulationsmodellen vorgegebenen Untergrundwärmeleitfähigkeit abweichen.

Mit den ermittelten effektiven Wärmeleitfähigkeiten aus den Modellen mit heterogenem Untergrund für die in Tabelle 10 dargestellten Varianten wurden die zugehörigen homogenen Modelle mit einheitlicher effektiver Wärmeleitfähigkeit parametrisiert.

Die Modellpaare wurden jeweils mit demselben, sich jährlich wiederholenden Lastprofil über eine Dauer von 3 Jahren beaufschlagt. Die Datengrundlage bildeten die Volumenströme und Sondeneintrittstemperaturen der EWS des simulierten Typgebäudes aus (Janzen F. 2019) (Vgl. AP 1b). Die häufigen Lastwechsel durch das fast tägliche An- und Abschalten der Wärmepumpe und der innerhalb eines Tages mehrmals wechselnde Volumenstrom führten bei der Simulation zu sehr hohen Rechenzeiten (siehe Kapitel 2.8.6). Um die erforderliche Fehlertoleranzgrenze einzuhalten, werden die Zeitschrittweiten bei harten Lastwechseln automatisch stark reduziert, sodass immer wieder Zeitschrittweiten im Bereich von weniger als 10^{-12} Tagen erreicht werden. Folglich erhöht sich die Gesamtheit der benötigten Berechnungsschritte. Deshalb wurde das Lastprofil vereinfacht, indem die Leistungsdaten wochenweise zusammengefasst wurden (Abbildung 56). Dadurch wurden die Lastwechsel bei gleicher jährlicher Einspeise- und Entzugsenergie auf 104 pro Jahr reduziert (52 x Anfahren + 52 x Abschalten).

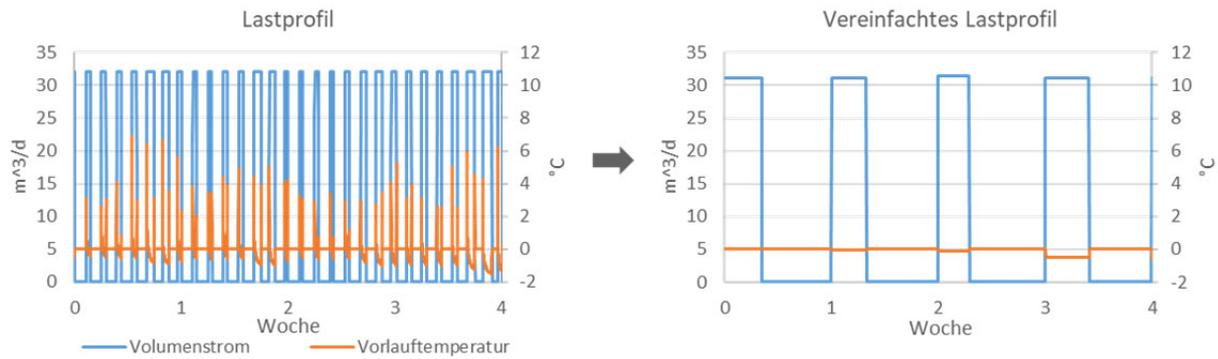


Abbildung 56: Vereinfachung des Lastprofils (Vorlauftemperatur und EWS-Volumenstrom)

Ausgabegröße der Simulationen ist die gemittelte Sondenaustrittstemperatur der 10 EWS ($\bar{\vartheta}_{out}$), womit die Entzugs- und Einspeiseleistung (\dot{Q}) des EWS-Feldes bzw. die entzogene und eingespeiste Wärmemenge (Q) im 3. Jahr unter Verwendung der vorgegebenen Sondeneintrittstemperaturen (ϑ_{in}) und Volumenströme (\dot{V}_{EWS}) berechnet wurde. Die Dichte (ρ) und Wärmekapazität ($c_{p,F}$) beziehen sich auf das Wärmeträgermedium:

$$\dot{Q}(t) = \left(\bar{\vartheta}_{out}(t) - \vartheta_{in}(t) \right) \cdot \dot{V}_{EWS}(t) \cdot \rho \cdot c_{p,F} \quad (4d-3)$$

$$Q = \int \dot{Q}(t) dt \quad (4d-4)$$

2.8.6 Ausführliche Darstellung der Ergebnisse AP 4d

Thermal Response Test (TRT)

Tabelle 11 zeigt die mit Hilfe des simulierten TRTs ermittelten effektiven Wärmeleitfähigkeiten für die 4 untersuchten Szenarien A bis D aus Tabelle 10. Zu erkennen ist, dass die effektiven Wärmeleitfähigkeiten sowohl mit zunehmender Aquifermächtigkeit (vgl. A-B), als auch mit zunehmender Filtergeschwindigkeit (vgl. B-D) zunehmen. Unter Einbeziehung der Datenpunkte aus der Simulation des 50 m mächtigen Grundwasserleiters zeichnet sich zudem ein linearer Trend für den Zusammenhang von Filtergeschwindigkeit und effektiver Wärmeleitfähigkeit ab (Abbildung 57). Die Regressionsgerade hat ein hohes Bestimmtheitsmaß von 99,9996 % und schneidet die y-Achse bei 2,0 W/m/K ($v_f = 0$ m/d). Der Schnittpunkt liegt somit dicht an der ungestörten Untergrundwärmeleitfähigkeit von 2 W/m/K der Grundvariante 0 ohne Grundwasserbewegung und stützt die Plausibilität der Simulationsergebnisse. Da die Vermutung zu diesem Trend jedoch auf lediglich 3 Datenpunkten basiert, sollten für ein gesichertes Ergebnis noch mehr Simulationen durchgeführt werden. Einschränkend muss zudem beachtet werden, dass die TRT-Auswertemethode für den Wärmetransport durch reine Wärmeleitung gilt, aber auch für Verhältnisse mit geringem Grundwassereinfluss angewendet werden kann (VDI 4640 Blatt 5, 2016). Die Varianten A bis C halten dabei das in VDI 4640

Blatt 5 vorgegebene Konvergenzkriterium ein. Für hohe Filtergeschwindigkeiten wie in Untersuchungsvariante D muss eine geeignete Auswertemethode, wie beispielsweise auf Basis der Multipole-Methode, angewandt werden.

Tabelle 11: Durch die simulierten TRTs ermittelten effektiven Wärmeleitfähigkeiten λ_{eff}

Variante	Mächtigkeit Aquifer [m]	Filtergeschwindigkeit v_f [m/d]	λ_{eff} [W/m/K]
0	-	-	2,01
A	20	0,01	2,04
B	50	0,01	2,08
C	50	0,1	2,92
D	50	1	12,88

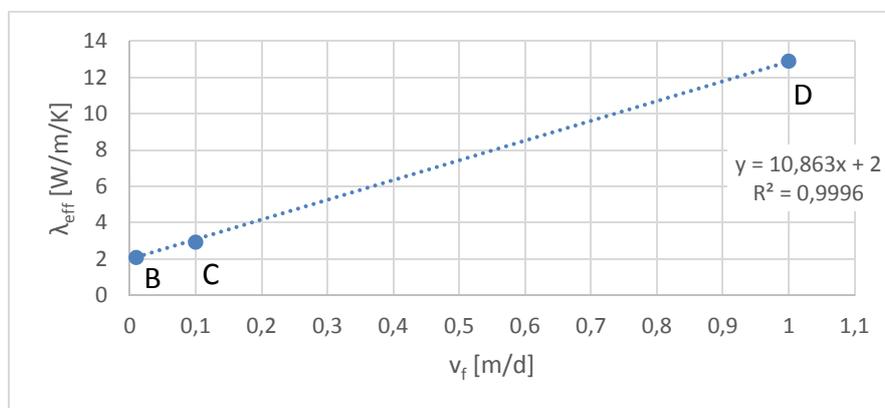


Abbildung 57: Verhältnis von Grundwasserfließgeschwindigkeit (v_f) zu ermittelten effektiven Wärmeleitfähigkeit (λ_{eff}) bei 50 m mächtigem Grundwasserleiter

Als maßgeblicher Parameter für die Genauigkeit der simulierten TRT-Ergebnisse stellte sich die maximal zugelassene Zeitschrittweite pro Rechenschritt (Δt_{max}) heraus. Je größer Δt_{max} gewählt wird, desto ungenauer wird das Simulationsergebnis. Tabelle 12 zeigt eine Auswahl von simulierten TRTs zur Ermittlung eines annehmbaren Kompromisses zwischen Rechenzeiten und Simulationsergebnis in Abhängigkeit von der maximalen Zeitschrittweite Δt_{max} . Auf dieser Basis wurde eine maximale Zeitschrittweite von $\Delta t_{max} = 0,001$ d festgelegt. Der Verlauf von Temperatur und Vorwärtskonvergenz des zugehörigen TRTs ist in Abbildung 58 dargestellt. Zu beachten ist, dass der Zeitaufwand für die Durchführung eines 6-tägigen TRTs bereits ca. 4 Stunden Rechenzeit beträgt. Dies ist in Anbetracht einer angedachten Langzeitsimulation der Lastszenarien über einen Zeitraum von mindestens drei Jahren problematisch. Das Gitternetz wurde deshalb mehrmals optimiert, außerdem wurden Anpassungen von Fehlertoleranz, Iterationsanzahl und Solver-Einstellungen vorgenommen. Versuche die Rechenzeiten weiter zu reduzieren gingen entweder zu Lasten der Genauigkeit der Ergebnisse oder reduzierten die Rechenzeiten nicht signifikant. Empfehlungen des DHI WASY FEFLOW-

Supports wurden beachtet, waren jedoch zum Teil nicht für das Anwendungsziel geeignet (z. B. $\Delta t_{max} = 1$ d, Iterationsanzahl = 1).

Tabelle 12: Einfluss der maximalen Zeitschrittweiten (Δt_{max}) auf die Ergebnisse des simulierten TRTs bei einem Modell ohne Grundwasserleiter (Grundvariante 0). Vorgegebene Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds (λ_g): 2 W/m/K (entspricht Zielwert)

Δt_{max} [d]	λ_g EWS-Feld	Rechenzeiten [h] (durchschnittlich, gerundet)
0.0005	2,00	8
0.001	2,01	4
0.002	2,20	2,1
0.005	3,16	1

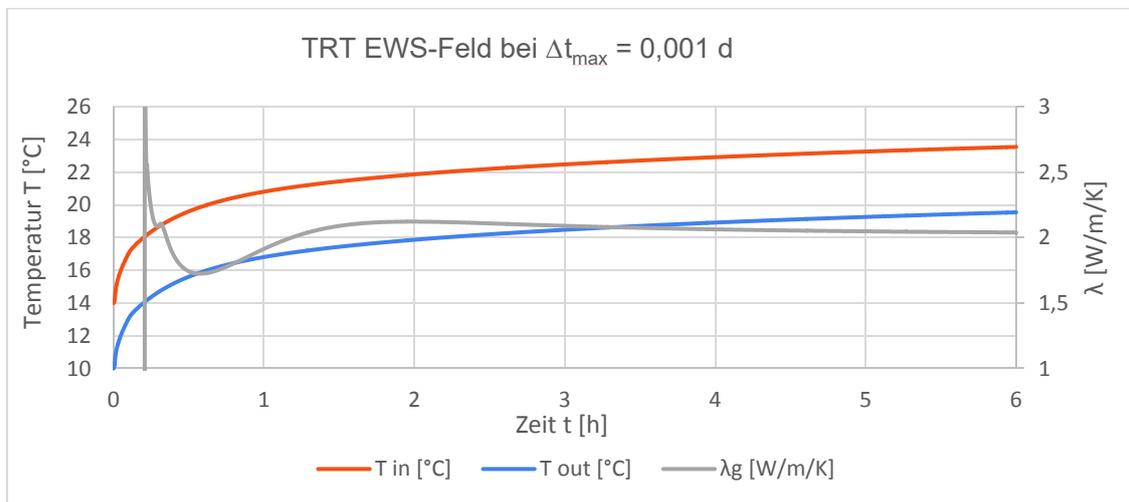


Abbildung 58: Temperaturverlauf und Vorwärtskonvergenz der Wärmeleitfähigkeit (λ_g) des simulierten TRTs der Grundvariante 0 ohne Grundwassereinfluss bei Zeitschrittweite $\Delta t_{max} = 0.001$ d. Vorgegebene Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds (λ_g): 2 W/m/K (entspricht Zielwert)

Auf Grundlage der aus den TRT-Simulationen gemachten Erfahrungen war, auf eine Langzeitsimulation von 3 Jahren extrapoliert, mit einer Rechenzeit von ca. 30 Tagen zu rechnen. Hinzu kam die Reduktion der Zeitschrittweiten an den harten Lastwechseln beim Ein- und Ausschalten der Wärmepumpe, wie im Methodenteil beschrieben. Als Folge erhöhte sich der Rechenaufwand entsprechend der Gesamtheit an Rechenschritten. Abbildung 59 führt die Längen der einzelnen Berechnungsschritte einer Langzeitsimulation ohne Grundwassereinfluss auf. Es ist zu erkennen, wie die Zeitschrittweiten wöchentlich auf unter 10^{-12} d fallen. Ebenfalls erkennbar sind die Übergangsbereiche zwischen Heiz- und Kühlphase im Frühjahr und Herbst, in denen aufgrund des nicht vorhandenen Betriebs der EWS keine Lastwechsel stattfinden.

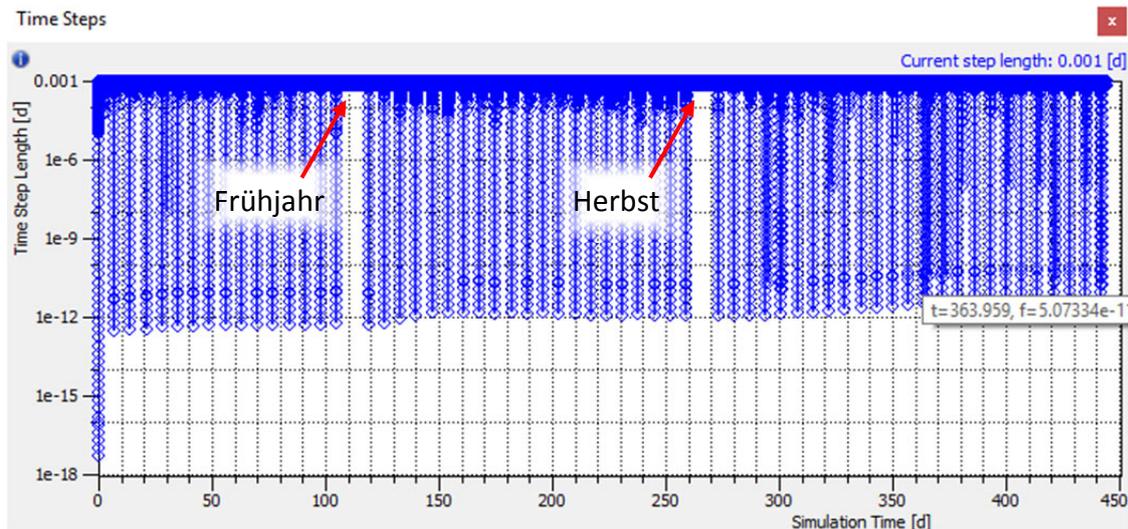


Abbildung 59: Darstellung der Zeitschrittweiten in Tagen [d] in den ersten 450 Tagen. $t_0 = 1.$ Januar

Folgende Lastdaten eines Typgebäudes (Vergleichsgebäudes) bilden die Grundlage für die Simulationen:

- Gesamte jährliche entzogene Wärmeenergie: 31,0 MWh
- Gesamte jährliche eingetragene Wärmeenergie: 25,6 MWh

Simulationsergebnis der Grundvariante nach 3 Jahren:

- Gesamte jährliche entzogene Wärmeenergie: 33,4 MWh
- Gesamte jährliche eingetragene Wärmeenergie: 24,2 MWh

Der Vergleich von Lastdaten des Typgebäudes auf dessen Datengrundlage die Simulationen durchgeführt werden, zeigt, dass die entzogene Energie überschätzt und die eingespeiste Energie unterschätzt wird. Im ersten bzw. dritten Betriebsjahr beträgt die entzogene Energie 113 % bzw. 106 % und der Energieeintrag 84 % bzw. 93 % gegenüber den Daten des Typgebäudes. Die Summen nähern sich demnach an (Abbildung 60). Als Ursache für die Abweichungen wird angenommen, dass sich der Untergrund nach 3 Jahren Simulationsdauer thermisch noch nicht vollständig angeglichen hat.

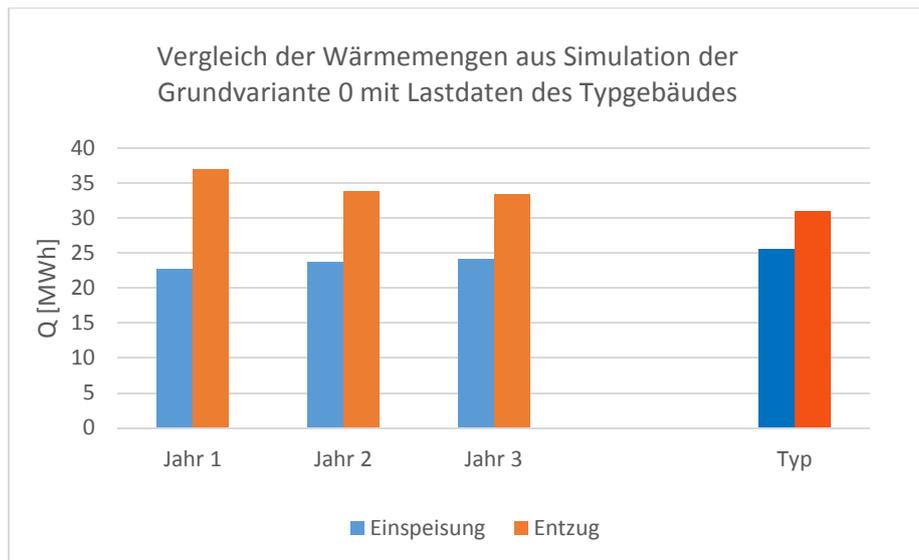


Abbildung 60: Simulationsergebnisse für jährliche ein- und ausgetragenen Wärmemengen in den Ersten 3 Jahren der Grundvariante 0. Zum Vergleich ist die Einspeise- und Entzugswärme des Typgebäudes angezeigt, das als Datengrundlage diente

Abbildung 61 zeigt die entzogenen und eingespeisten Wärmemengen im 3. EWS-Betriebsjahr der drei betrachteten Szenarien B, C und D mit dem 50 m mächtigem Grundwasserleiter und verschiedenen Grundwasserfließgeschwindigkeiten sowie der zugehörigen homogenisierten Modelle mit der effektiver Wärmeleitfähigkeit. Bei den homogenisierten Modellen zeigt sich, dass die ein- und ausgetragenen Wärmemengen als logische Konsequenz der zunehmenden Wärmeleitfähigkeiten steigen. Mit Blick auf das Detailmodell der Variante B ist zu erkennen, dass die Wärmemengen ebenfalls steigen und nahe an den Werten des vereinfachten, homogenen Modells liegen (Abbildung 61 und Tabelle 13). Dagegen wird bei zunehmender Filtergeschwindigkeit weniger Wärme ein- und ausgetragen (vgl. Variante B und C). Die EWS-Rücklauftemperaturen der Simulation des Detailmodells D mit Grundwasserfluss führten regelmäßig zum Abbruch der Simulation aufgrund unrealistisch hoher Temperaturen die zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Simulation auftraten. Für Szenario D konnte deshalb keine Detailsimulation über 3 Jahre erfolgreich abgeschlossen werden.

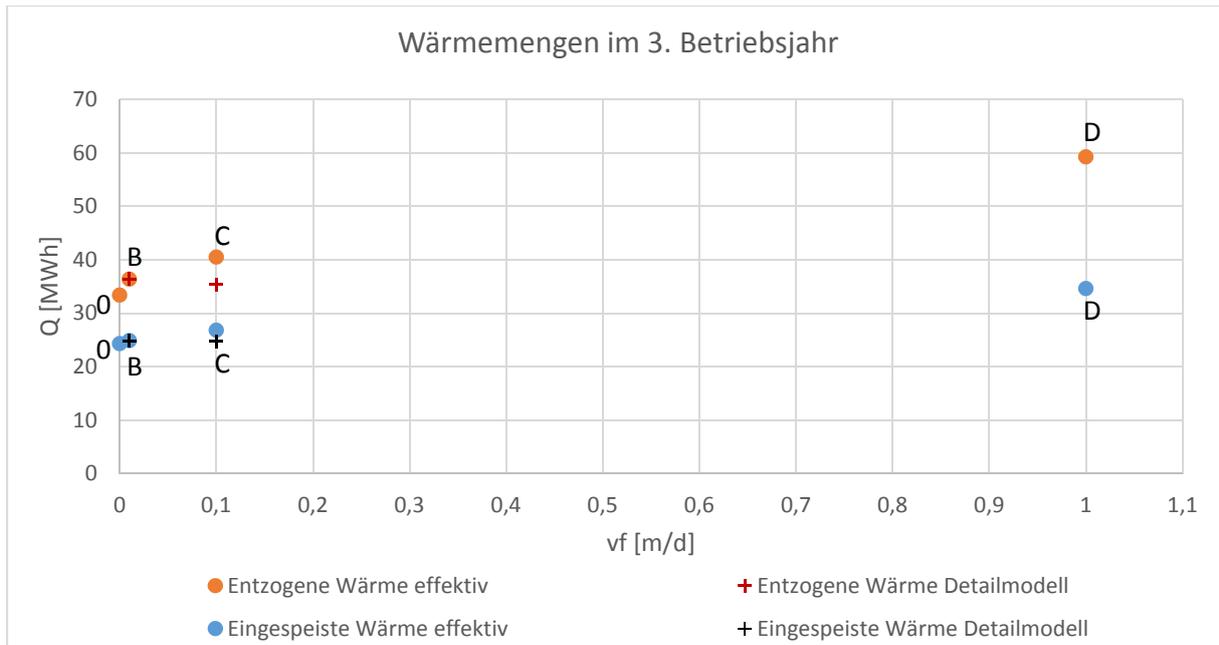


Abbildung 61: Entzogene und eingespeiste Wärmemengen (Q) im 3. EWS-Betriebsjahr der drei betrachteten Szenarien B, C und D in Abhängigkeit der Filtergeschwindigkeit (v_f). Dabei sind die Detailmodelle mit heterogenem Untergrund den Modellen mit homogenem Untergrund und λ_{eff} gegenübergestellt.

Tabelle 13: Vergleich der Jahressummen im 3. Simulationsjahr

Eintrag [MWh]	λ_{eff}	Detailmodell	Abweichung [%]
A	24,8	24,67	0,5
B	24,9	24,74	0,6
C	26,8	24,71	7,9
D	34,6	-	-

Entzug [MWh]	λ_{eff}	Detailmodell	Abweichung [%]
A	36,2	35,8	0,7
B	36,4	35,9	1,6
C	40,5	35,4	12,6
D	59,2	-	-

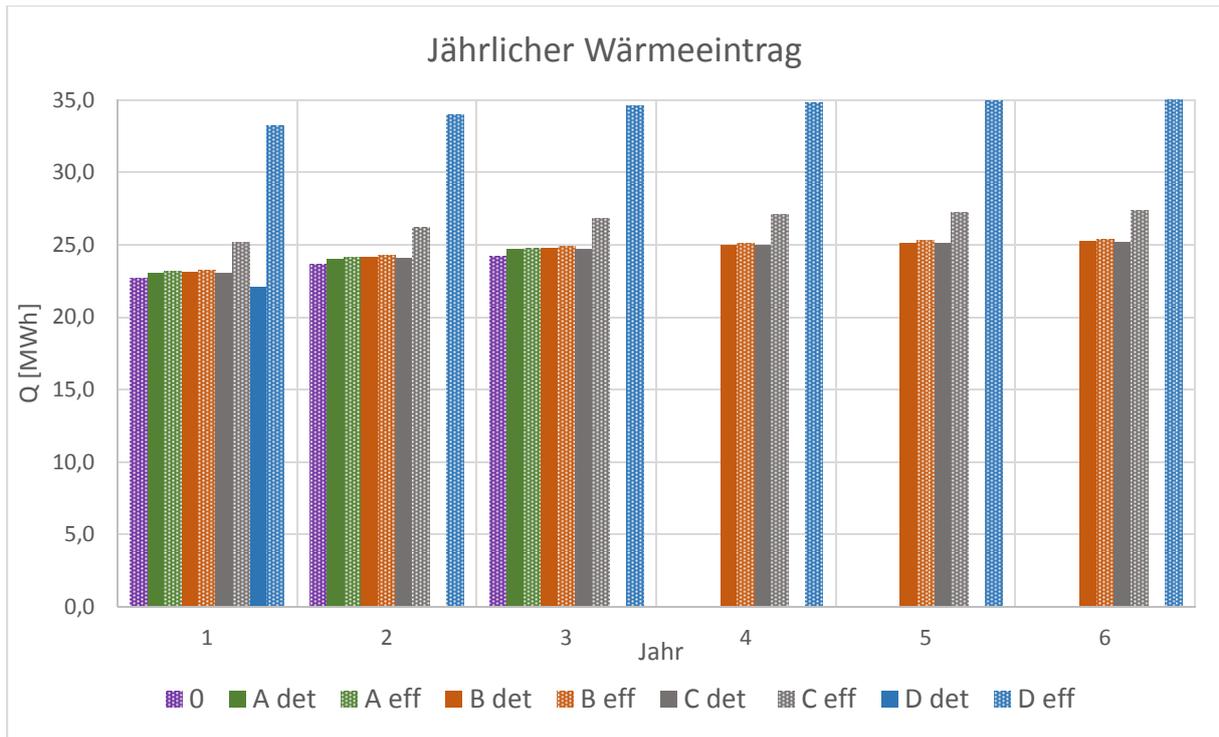


Abbildung 62: Darstellung der jährlichen Wärmeeintragsmengen über 6 Simulationsjahre. gefüllt: Detailmodelle, schraffiert: homogenisierte Modelle mit λ_{eff}

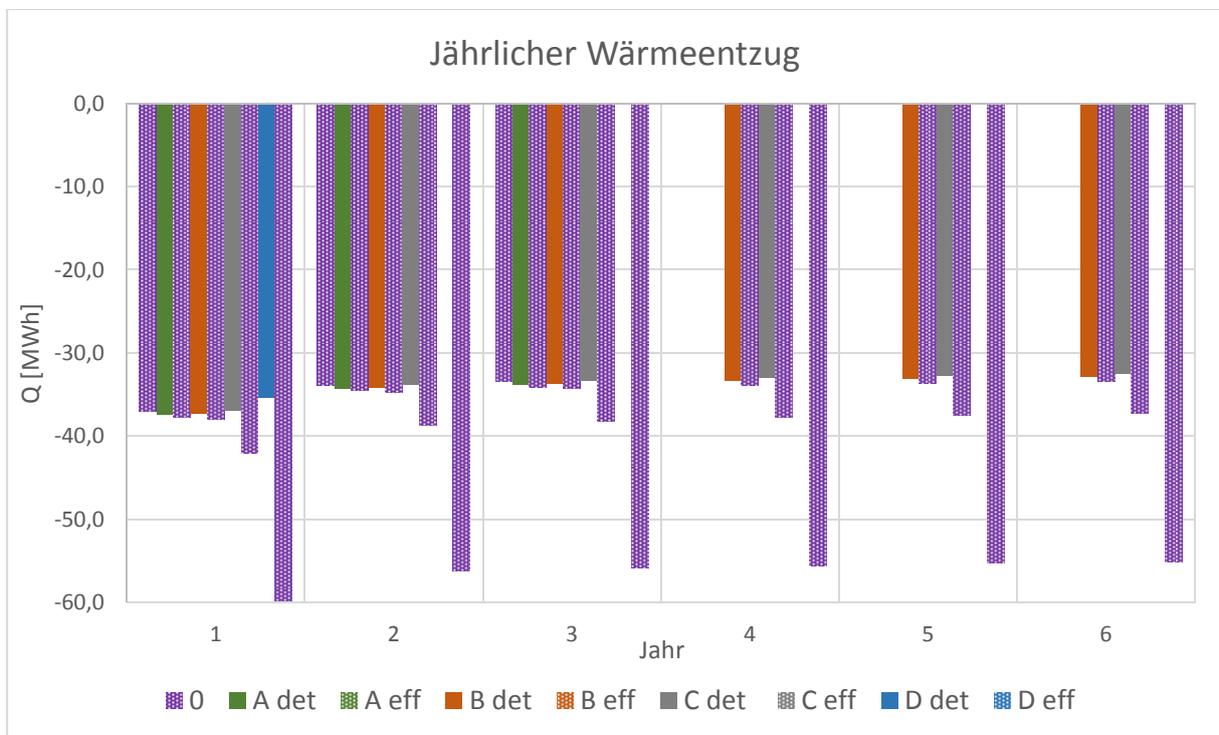


Abbildung 63: Darstellung der jährlichen Wärmeentzugsmengen über 6 Simulationsjahre. Vollfarben: Detailmodelle, schraffiert: homogenisierte Modelle mit λ_{eff}

Als Ursache für den Anstieg der Wärmeentzugs- und -eintragsmengen kann die durch den Grundwasserstrom beigeführte Wärme angeführt werden, die der Temperaturabsenkung des Untergrunds im Heizbetrieb bzw. der Temperaturerhöhung im Kühlbetrieb im Umfeld der EWS entgegenwirkt. Dies scheint bei Varianten A und B mit einer Filtergeschwindigkeit von 0,01 m/d der Fall zu sein. Bei den Varianten beträgt die Abweichung zwischen Detail- und Effektivmodell 0,5 % bzw. 0,6 % im Kühlbetrieb und 0,7 % bzw. 1,6 % im Heizbetrieb.

Ein Effekt der bei wechselseitigem Heiz- und Kühlbetrieb der EWS zu tragen kommt, ist die Speicherung der Wärmeenergie im Untergrund. Ohne Grundwasserströmung (Abbildung 62) resultiert der Wärmeeintrag während der Kühlperiode in einer erhöhten Wärmeentzugsleistung in der Heizphase und umgekehrt. Mit steigender Grundwasserbewegung reduziert sich der positive Effekt auf Grund des Abtransports des thermisch aktivierten Fluids, das somit in der komplementären EWS-Betriebsphase nicht mehr zur Verfügung steht. Zudem liegen die meisten Sonden des längs angeströmten EWS-Feldes im Strömungsschatten der davorliegenden Sonden (Abbildung 65). Innerhalb einer Betriebsphase kann sich die erhöhte bzw. gesenkte Umgebungstemperatur negativ auf die Energiebilanz auswirken.

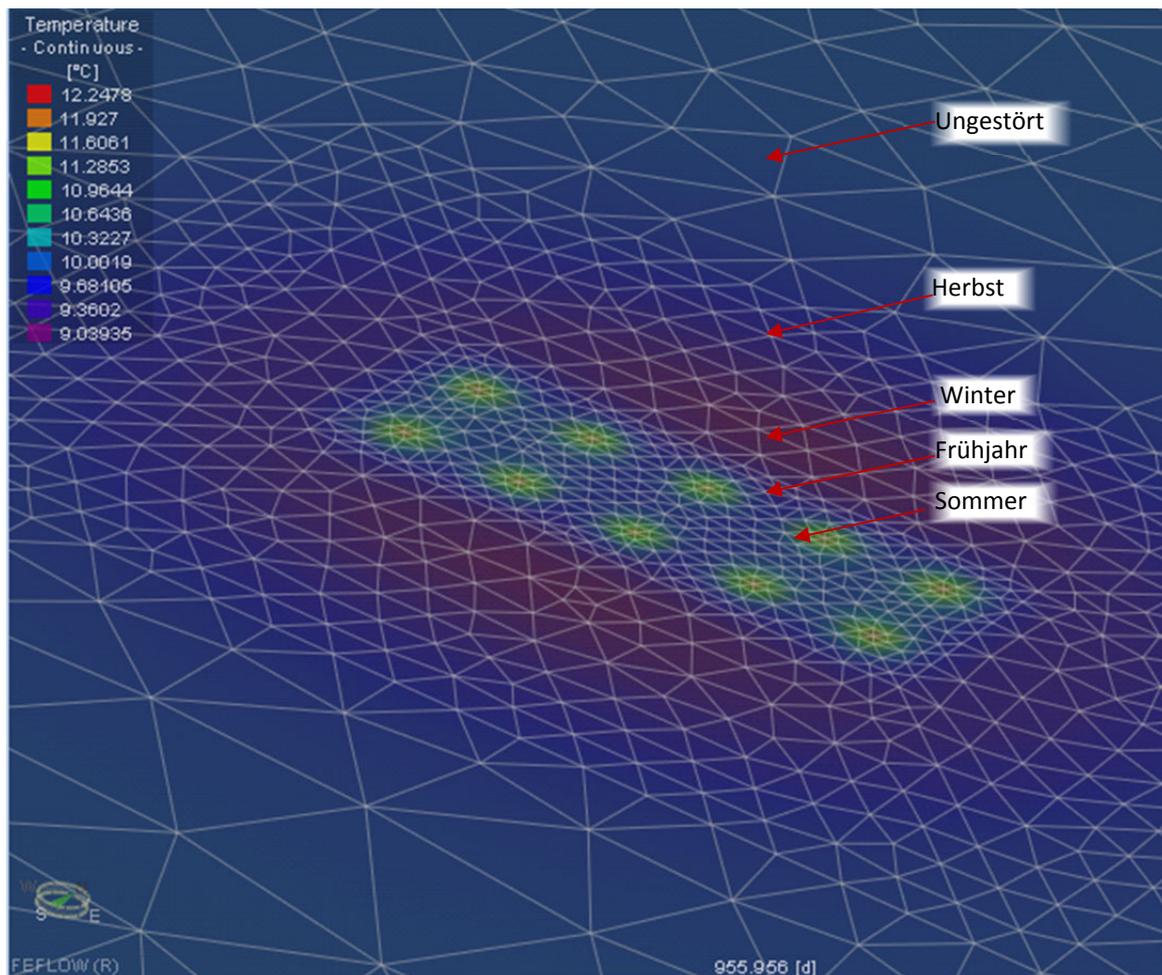


Abbildung 64: Temperaturverteilung in 1 m Tiefe nach 956 Tagen Simulationsdauer der Grundvariante 0.

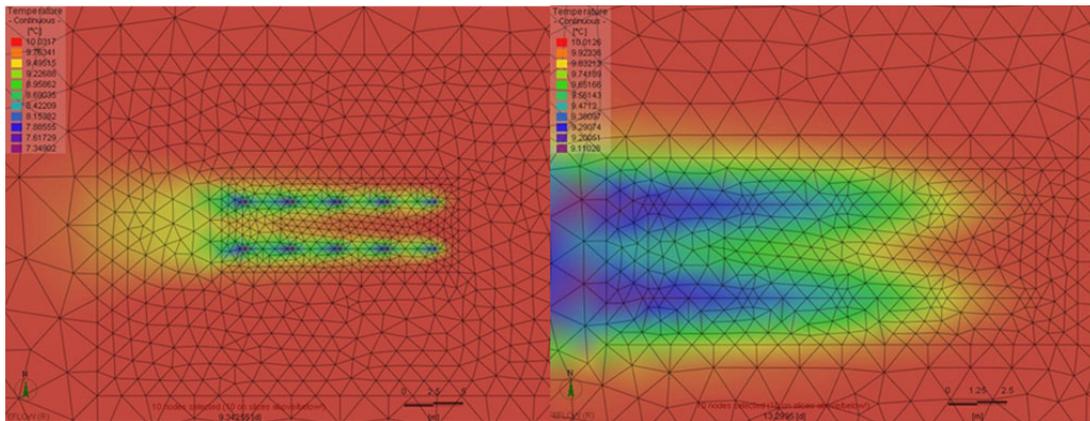


Abbildung 65: Temperaturverteilung in 50 m Tiefe bei $v_f=1$ m/d nach 10 Tagen (links) und 13 Tagen (rechts)

Fazit

Es wurde versucht die Jahressummen von eingespeister Wärme und entzogener Wärme bei dem wechselseitigen Betrieb eines beispielhaften EWS-Feldes durch die Erstellung eines vereinfachten Simulationsmodells mit einem effektiven Wärmeleitkoeffizienten λ_{eff} zu ermitteln. Dabei hat sich gezeigt, dass die Ergebnisse dieses Verfahrens, im Falle einer geringen Filtergeschwindigkeit von 0,01 m/d, besser sein können als bei der Ignorierung der Grundwasserströmung, da die Jahressummen aus eingetragenen und entzogenen Wärmemengen eine höhere Übereinstimmung zeigen. Mit zunehmender Filtergeschwindigkeit divergieren die Ergebnisse zwischen einer Berechnung mit detaillierter Betrachtung des Untergrunds und eines vereinfachten Untergrundmodells. Mit dem gewählten Vorgehen konnte die ermittelte effektive Wärmeleitfähigkeit jedoch nicht so bestimmt werden, dass sie generell als hinreichender Parameter für die Vorhersage von zu erwartenden Wärmeeinspeise- und Entzugsmengen herangezogen werden kann. Es konnte zudem nicht mit ausreichender Sicherheit erklärt werden, weshalb die durch einen TRT ermittelte effektive Wärmeleitfähigkeit bei zunehmender Grundwasserfließgeschwindigkeit steigt, bei dem realen Betrieb des EWS-Feldes jedoch geringere Entzugs- und Einspeisemengen resultieren. Als ein maßgeblicher Faktor für die Konsistenz der Ergebnisse aus TRT und Langzeitsimulation konnte die maximale zeitliche Größe eines Berechnungsschrittes identifiziert werden. Die maximale Zeitschrittweite bestimmt die Genauigkeit der Ergebnisse auf Kosten der Rechenzeit und konnte daher nicht beliebig verkleinert werden. Eine ausführlichere Parameterstudie wurde durch den zeitlichen Rechenaufwand verhindert. Die Verwendung eines Parameteridentifikationsverfahrens als Alternative zum TRT zur Bestimmung von geeigneten Werten für eine effektive Wärmeleitfähigkeit für diesen Anwendungsfall, ist derzeit allerdings aufgrund des erheblichen Rechenaufwandes schwer möglich.

2.8.7 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Zum Zeitpunkt der Berichtslegung sind dem Autor keine weiteren Arbeiten auf diesem Gebiet bekannt geworden.

2.8.8 Veröffentlichung der Ergebnisse, Ergebnis- und Forschungstransfer

Die erzielten Forschungsergebnisse wurden zum Zeitpunkt der Berichtslegung noch nicht publiziert.

2.8.9 Literatur

DHI (2018): MIKE Powered by DHI Software FEFLOW 7.2 Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System – User Guide; Berlin

Diersch, H.-J. G.; Bauer, D.; Heidemann, W.; Rühaak, W.; Schätzl, P. (2010): Finite element formulation for borehole heat exchangers in modeling geothermal heating systems by FEFLOW, In: DHI-WASY GmbH (Hrsg.): FEFLOW White Papers Vol. V; Berlin

Gehlin, S. (2002): Thermal Response Test – Method Development and Evaluation, Dissertation; Luleå University

Janzen, F., (2019): Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Randbedingungen auf das thermische Verhalten von Erdwärmesonden im kombinierten Heiz- und Kühlbetrieb, Masterarbeit (unveröffentlicht); Hochschule Trier

Lee, C. K.; Lam, H. N. (2007). EFFECTS OF GROUNDWATER FLOW DIRECTION ON PERFORMANCE OF GROUND HEAT EXCHANGER BOREFIELD IN GEOTHERMAL HEAT PUMP SYSTEMS USING 3-D FINITE DIFFERENCE METHOD; University of Hong Kong

VDI 4640 Blatt 5 (2016): Thermische Nutzung des Untergrunds - Thermal Response Test, Beuth Verlag; Berlin

2.9 AP 5: Genehmigungspraxis und Grenzwerte (KIT/AGW-IG, FKZ: L75 17005)

2.9.1 Abstract zu den Forschungsergebnissen AP 5

Für die geothermische Nutzung des Untergrundes gibt es deutschlandweit keine rechtlich bindenden und einheitlichen Temperaturgrenzwerte, sondern nur Richtlinien, die in Leitfäden der einzelnen Bundesländer definiert werden. Besonders die maximale Einspeisetemperatur von 20 °C und die maximal erlaubte Differenz zwischen Entnahme- und Eingabetemperatur von 6 K führen zu einer erheblichen Verringerung des Potentials geothermischer Kühlanlagen. Im urbanen Bereich ist die Grundwassertemperatur im Vergleich zum ländlichen Bereich um 3 – 7 K erhöht (Menberg et al. 2013a,b). Untersuchungen in AP 5b haben allerdings gezeigt, dass die erhöhten Temperaturen weniger auf die geothermische Nutzung des Untergrundes, als vielmehr auf weitere anthropogene Wärmequellen wie die städtische Bebauung oder die Infrastruktur im urbanen Untergrund (z. B. Fernwärme- und Abwasserleitungen) zurückzuführen sind (Menberg et al., 2013b, Tissen et al., 2019). Trotz des erheblichen Einflusses werden diese Wärmequellen in den Genehmigungsrichtlinien nicht berücksichtigt. Untersuchungen der Grundwasserfauna im Karlsruher Stadtgebiet (Schweikert, 2014) haben zudem gezeigt, dass kein direkter Zusammenhang zwischen der vorherrschenden Grundwasserfauna und der thermischen Beeinflussung des Grundwassers besteht. Deshalb empfehlen wir eine Differenzierung zwischen Gebieten, in denen noch natürliche Grundwasserbedingungen mit einer intakten Grundwasserfauna vorliegen und Gebieten, in denen das Grundwasser bereits unnatürlich und anthropogen beeinflusst ist.

2.9.2 Motivation und Hintergründe

Weltweit wird bis 2050 ein Anstieg des jährlichen globalen Wärme- und Kältebedarfs um 179 % und 183 % in Bezug auf 2010 erwartet (IPCC, 2014). In Deutschland betrug im Jahr 2008 der jährliche Stromverbrauch für die stationäre Kälteerzeugung 252 PJ, was einer CO₂-Emission von 45.6 Mio. t pro Jahr entspricht (Heinrich et al., 2014).

Tabelle 14 vergleicht den Wärme- und Kältebedarf auf globaler, nationaler, regionaler und lokaler Ebene. Beispielsweise schätzt das Projekt „Heat Roadmap Europe“ den Wärme- und Kältebedarf in Städten an Hand von Karten zur Landnutzung, Bevölkerungsdichte und Energiedaten ab. Zukünftige Projekte wie „HOTMAPS“ und „PLANHEAT“ streben eine noch exaktere Bedarfsabschätzung an. Die Untersuchungen zeigen einen großen Kältebedarf, der je nach Betrachtungsgröße zwischen 3 % und 200 % des Wärmebedarfs ausmacht.

Tabelle 14: Wärme- und Kältebedarf auf globaler, nationaler, regionaler und lokaler Ebene.

Betrachtungsgröße	Kältebedarf [PJ]	Wärmebedarf [PJ]	Kälte- /Wärmebedarf (%)
ATES Reichsgebäude ¹	0,014	0,007	200
Städtisches Klinikum ²	0,017	0,013	130
KIT-Campus Nord ³	0,054	0,29	19
Stadt Karlsruhe ⁴	2,0	6,7	30
Stadt Karlsruhe ⁵	0,5 (0-1)	12 (6-18)	4
Deutschland ⁶	72	2.818	3
Europäische Union ⁶	691	13.104	5
Weltweit ⁷	~1.500	~30.000	~5

¹ Kabus & Seibt (2000); ²Schüppler (2017) nur Gebäude M; ³ Schnurr (2017); ⁴ Benz et al. (2014) und BWPLUS (2016); ⁵ Heat Roadmap Europe - Peta 4 (2017): Angabe des Mittelwertes inkl. der Spannbreite in Klammern; ⁶Connolly (2017); ⁷ Isaac & van Vuuren (2009).

Ein großes und bisher ungenutztes Potential zur Dekarbonisierung des Kältesektors liegt in der Nutzung von Grundwasserkühlanlagen. Durch die Reduzierung der maximalen Rückgabetemperatur von Kühlwasser in den Untergrund im Jahr 2009 von 25 °C auf 20 °C sind viele Grundwasserkälteanlagen nicht mehr profitabel. Bei den 20 °C handelt es sich um eine empfohlene Höchsttemperatur des einzuleitenden Wassers (Umweltministerium, 2009). Ein Beispiel für die Genehmigungspraxis und deren Auswirkung hierfür ist das Städtische Klinikum Karlsruhe, wo aufgrund der neuen Vorgaben die Kühlung mittels Grundwasser nicht mehr kosteneffizient war und die bestehende Anlage durch eine Kompressionskältemaschine ersetzt wurde (Abbildung 66).



Abbildung 66: Kompressionskältemaschine (6 MW) am Städtisches Klinikum Karlsruhe (Blum, 2017).

2.9.3 Aufgabenstellung

In Deutschland gibt es keine einheitliche Genehmigungspraxis für geothermische Anlagen, wie auch für Grundwasserkühlanlagen (Hähnlein et al., 2011). Ziel dieses AP 5 ist es daher den aktuellen Stand der Genehmigungspraxis für geothermische Anlagen mit Fokus auf Anlagen zur Kühlung (Wärmeeintrag) in Baden-Württemberg darzulegen (AP 5a). Vorschläge für eine Umweltbewertung (AP 5c) unter besonderer Berücksichtigung ökologischer Auswirkungen (AP 5b) soll entwickelt werden.

2.9.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die Arbeiten von Hähnlein et al. (2010, 2011, 2013), Jaudin et al. (2013) und Somogyi et al. (2017) geben eine europa- und weltweite Übersicht zur Genehmigungspraxis von thermischer Grundwassernutzung. In Kanada, USA, Australien, China und Japan gibt es beispielsweise keine gesetzlichen Grenzwerte für die Rückgabetemperatur von thermisch genutztem Grundwasser. Die rechtliche Situation in Europa ist in Abbildung 67 dargestellt. Als Grundlage für die Arbeiten im Rahmen dieses Verbundvorhabens dienen die bereits publizierten Arbeiten von Hähnlein et al. (2010, 2011, 2013).

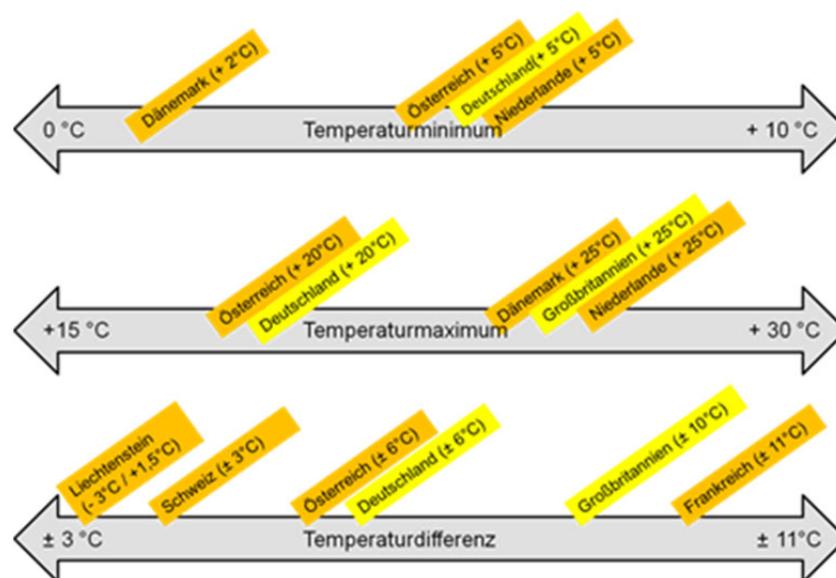


Abbildung 67: Absolute und relative Temperaturgrenzwerte für das Grundwasser in verschiedenen europäischen Ländern (Hähnlein et al., 2011).

2.9.5 Ausführliche Darstellung der Ergebnisse AP 5

AP 5a. Aktuelle Genehmigungspraxis in Deutschland

Aktuell gibt es in Deutschland keine rechtlich bindenden und einheitlichen Temperaturgrenzwerte, sondern nur Richtlinien, die in Leitfäden definiert werden. Im „Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Grundwasserwärmepumpen“ von Baden-Württemberg ist beispielsweise eine Temperaturdifferenz zwischen Entnahme- und Rückgabetemperatur von ± 6 K bzw. eine maximale und minimale Temperatur von 20 °C und 5 °C empfohlen (Umweltministerium, 2009). In Tabelle 15 sind die aktuellen Empfehlungen für die Einleitungs-temperaturen aller deutschen Bundesländer aufgelistet. Die Empfehlungen der einzelnen Bundesländer richten sich nach der VDI-Richtlinie 4640-2 (2001) und unterscheiden sich vor allem durch Abstandsregeln zwischen einzelnen Erdwärmesonden und benachbarten Erdwärmesondensystemen. Während alle Bundesländer Leitlinien für die Nutzung von geschlossenen Systemen vorgeben, ist dies für offene Systeme nur in Baden-Württemberg, Bayern und Sachsen der Fall. Bei der Entwicklung von Grundlagen für eine Umweltbewertung oberflächennaher geothermischer Systeme ist eine engere Abstimmung zwischen den einzelnen Bundesländern notwendig. Zudem sollte die Umweltbewertung auf Grundlage einheitlicher Maßstäbe erfolgen und diese auch einheitlich in rechtlich bindenden Vorgaben umgesetzt werden.

Tabelle 15: Übersicht über die Temperaturempfehlungen in Deutschland basierend auf den einzelnen Leitfäden der Bundesländer.

	ΔT [°C]	Min T [°C]	Max T [°C]	Abstand Nachbar-grundstück [m]	Abstand EWS [m]	Abstand benachbarte EWS [m]	Referenz
Baden-Württemberg *	-	-	-	-	10	-	LFBW (2005)
Baden-Württemberg	6	5	20	-	-	-	LFBW (2009)
Bayern *,#	6	-	20	3/5	6	10	LFBAY (2012)
Berlin *	-	-	-	5	5/6	10	LFB (2017)
Brandenburg *	-	-	-	-	5/6	-	LFBR (2009)
Bremen	-	-	-	-	-	-	-
Hamburg *	-	-	-	5	5/6	-	LFHH (2017)
Hessen *	-	-	-	5	5/6	10	LFH (2017)
Meck-Vpm. *	-	-	-	5	5-6	-	LFMVP (2015)
Niedersachsen *	-	-	-	5	5	10	LFN (2012)
NRW *	-	-	-	-	-	-	LFNRW (2012)
Rheinland-Pfalz *	-	-	-	3	6	-	LFRP (2007)
Saarland *	-	-	-	5	5	-	LFSL (2008)
Sachsen *	-	-	-	5	5/6	-	LFS (2014)
Sachsen #	6	5	20				LFS (2015)
Sachsen-Anhalt *	-	-	-	5	6	-	LFSA (2012)
Schleswig-Holstein *	-	-	-	5	5/6	10	LFSH (2011)
Thüringen *	-	-	-	5	5/6	-	LFT (2013)

* geschlossene Anlage

offene Anlage

EWS = Erdwärmesonde

Min T: Mindesttemperatur des einzuleitenden Wassers

Max T: Höchsttemperatur des einzuleitenden Wassers

ΔT : Temperaturveränderung des einzuleitenden Wassers gegenüber der Entnahmetemperatur

AP 5b, 5c: Zustand des Grundwassers und Umweltbewertungskriterien

Im urbanen Bereich ist die Grundwassertemperatur im Vergleich zum ländlichen Bereich um 3 – 7 K erhöht (Menberg et al., 2013a, b). Dieser Effekt wird als „subsurface urban heat island“ (SUHI) bezeichnet und wurde in Städten weltweit untersucht (Benz et al., 2015, 2016, 2018; Ferguson and Woodbury, 2007; Menberg et al., 2013a, b; Zhu et al., 2010). Die Ursache für die erhöhten Grundwassertemperaturen sind anthropogene Wärmequellen wie beispielsweise das Abwassersystem, Fernwärmeleitungen oder beheizte Keller. Lokal verursachen diese Wärmequellen Grundwassertemperaturanomalien von über 30 °C (Menberg et al., 2013b; Tissen et al., 2019). In Abbildung 68 ist beispielhaft für zwei Tiefgaragen, ein Freizeitbad und eine Fernwärmeleitung in Wien die thermische Beeinflussung des Untergrundes durch anthropogene Wärmequellen deutlich erkennbar. Besonders die Fernwärmeleitung sorgt für einen erheblichen Wärmeintrag im Wiener Untergrund und überschreitet die für geothermische Anlagen geltende maximale Einleitungstemperatur um über 5 K. Auch der Temperatureintrag des Schwimmbades sowie der Tiefgaragen übertreffen z. T. die empfohlene Höchsttemperatur für die Grundwassereinleitung. Die Untersuchungen zeigen somit, dass Grundwasserkühlanlagen nicht die einzigen anthropogenen Wärmequellen sind. Jedoch werden diese extremen thermischen Einflüsse von unterirdischen Infrastrukturen in der Genehmigungspraxis nicht berücksichtigt und benötigen derzeit keine Genehmigung durch die Unteren Wasserbehörden. Demzufolge ist eine Genehmigungspraxis, die lediglich Absolutwerte für die Grundwassereinleitung festlegt, aber andere, weitaus entscheidendere anthropogene Wärmequellen außer Acht lässt, nicht verhältnismäßig.

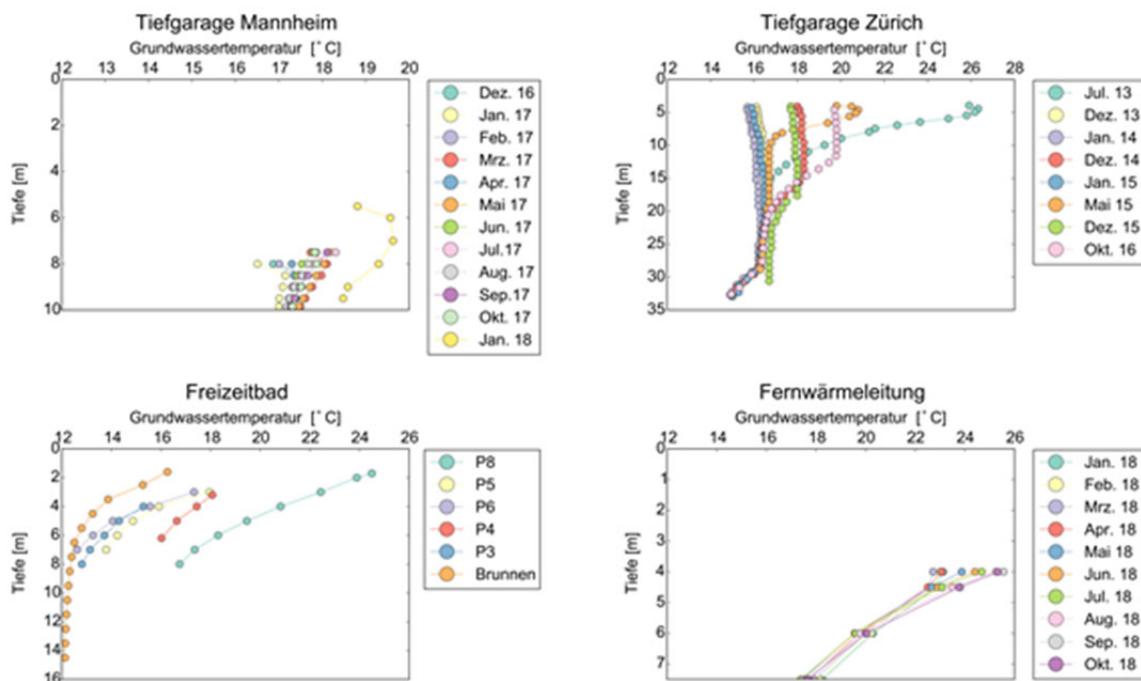


Abbildung 68: Anthropogener Wärmeintrag von Tiefgeragen in Zürich und Mannheim, eines Freizeitbades in Hockenheim sowie einer Fernwärmeleitung in Wien.

Ebenso wie die Grundwassertemperaturen sind der chemische und physikalische Zustand des Grundwassers im urbanen Bereich bereits beeinträchtigt (Arning et al., 2006; Bonte et al., 2011, 2013a, 2013b; Briemann et al., 2011; Griffioen and Appelo, 1993; Possemiers et al., 2014). Am Beispiel von Karlsruhe wurde der Zusammenhang zwischen Grundwasserqualität, -temperatur und Grundwasserökologie untersucht (Schweikert, 2014). Im Stadtzentrum von Karlsruhe sowie in vereinzelt Messstellen im südlichen und westlichen Teil der Stadt wurden erhöhte Grundwassertemperaturen im Bereich von 14 bis 17 °C gemessen. Die Messstellen mit den niedrigsten Temperaturen, die als „naturnah“ definiert wurden, befinden sich in einem Waldgebiet nördlich der Stadt. Der Sauerstoffgehalt und der Verschmutzungsgrad des Grundwassers, die beide mit der Grundwassertemperatur korrelieren, beeinflussen wiederum die Grundwasserfauna. Abbildung 69 stellt die Anzahl und Verteilung der Spezi *Crustacea* (Krebstieren) dar, die als Indikator für die Grundwasserqualität dient. Je höher der Anteil an *Crustaceas* ist, desto besser ist die Grundwasserqualität im Hinblick auf Sauerstoffgehalt und Verschmutzungsgrad. Im Stadtzentrum und westlichen Industriegebiet von Karlsruhe ist der Anteil an *Crustaceas* am geringsten und somit die Grundwasserqualität am schlechtesten. Auch nördlich der Stadt, wo die Grundwassertemperaturen nicht erhöht sind und keine direkte anthropogene Beeinflussung vorliegt, sind vereinzelt Messstellen als „nicht naturnah“ einzustufen. Diese heterogene Verteilung der *Crustaceas* impliziert, dass die Grundwasserfauna nicht nur von erhöhten Grundwassertemperaturen beeinflusst wird, sondern auch von anderen Faktoren wie Landnutzung und Hintergrundbelastung.

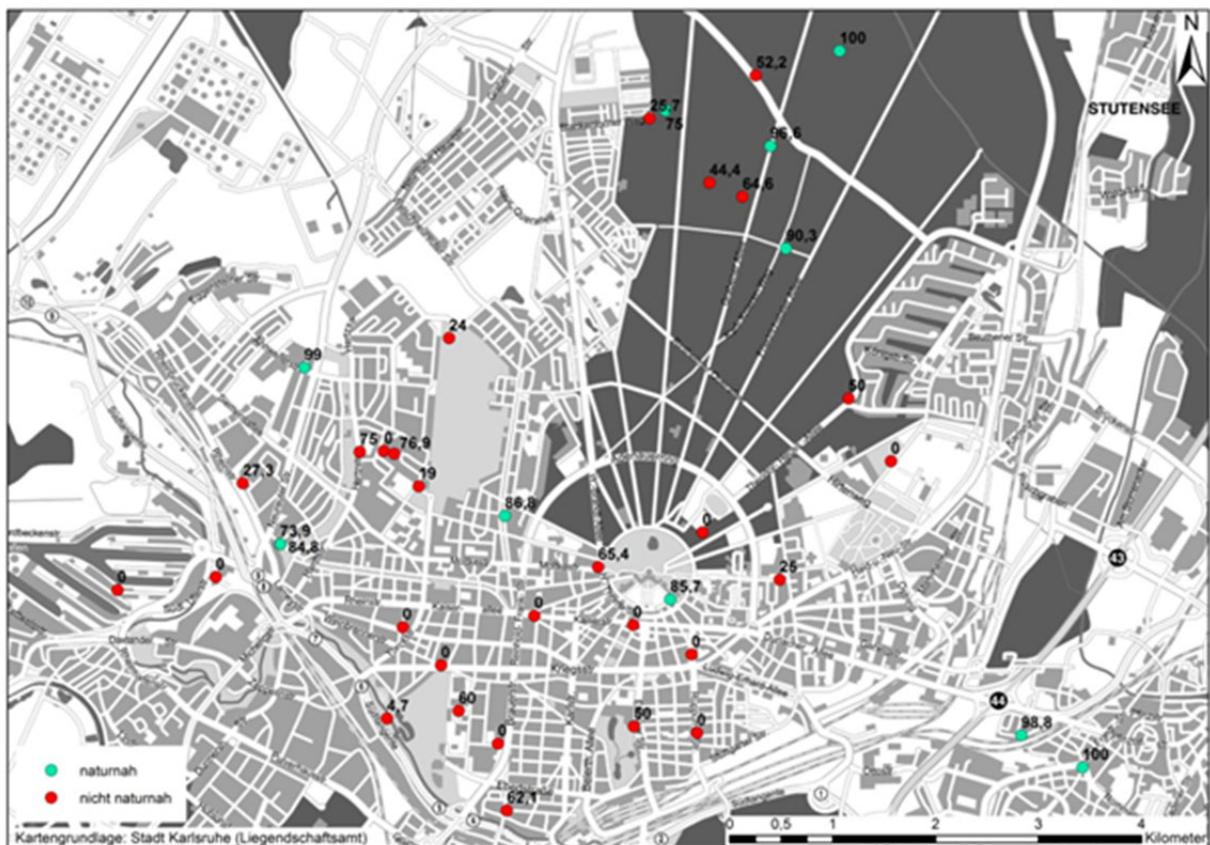


Abbildung 69: Übersichtskarte des Stadtgebiets Karlsruhe mit dem Anteil an *Crustacea* (Krebstieren) in %. (Schweikert, 2014)

Dementsprechend empfehlen wir bei der Entwicklung von Grundlagen für eine Umweltbewertung für Städte in Deutschland eine Differenzierung zwischen Gebieten, in denen noch natürliche Grundwasserbedingungen mit einer intakten Grundwasserfauna vorliegen und Gebieten, in denen das Grundwasser bereits unnatürlich und anthropogen beeinflusst ist. Naturnahe Grundwasservorkommen sollten als Schutzzonen ausgeschrieben werden, um die mikrobiologische Diversität und den ursprünglichen Chemismus zu erhalten. Außerhalb der Schutzzonen wären hohe, relative Temperaturveränderungen wie sie beispielsweise in Frankreich (± 11 K) üblich sind, vertretbar. Dadurch wäre eine flexiblere Handhabung der Energiebewirtschaftung des Grundwassers und eine Steigerung der technischen sowie ökonomischen Effizienz von Grundwasserkühlanlagen als auch Aquiferspeichern (sogenannte Aquifer Thermal Energy Storage = ATEs) im urbanen Raum erreichbar.

2.9.6 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Es sind keine bekannt.

2.9.7 Veröffentlichung der Ergebnisse, Ergebnis- und Forschungstransfer

Tissen et al. (2019) hat die gemessenen Temperaturanomalien von 12.000 Grundwassermessstellen in 10 europäischen Ländern analysiert. Die Ergebnisse wurden in der Fachzeitschrift *Environmental Research Letters* (2019) publiziert. Zudem wurden die Ergebnisse von AP 5b und AP 5c auf der Konferenz „Groundwater Quality“ in Lüttich von Blum et al. (2019) sowie auf der Konferenz „IUGG“ von Benz et al. (2019) präsentiert.

Die gewonnenen Ergebnisse dienen zudem als wichtige Grundlage im Forschungsprojekt GeoSpeicher.bw (Förderkennzeichen L75 16014 - 16019). Im Zuge des Projektes soll die erfolgreiche Kältespeicherung im Grundwasser am Campus Nord des KIT demonstriert werden. Im Dialog mit Genehmigungsbehörden liefern die gewonnenen Erkenntnisse aus dem Projekt GEO.Cool wichtige Argumentationsgrundlagen für die Diskussion genehmigungsrechtlicher Fragestellungen, um eine effiziente Nutzung des Untergrundes bei gleichzeitigem Schutz des Grundwassers zu gewährleisten.

2.9.8 Literatur

Arning, E., Kölling, M., Schulz, H. D., Panteleit, B. and Reichling, J.: Einfluss oberflächennaher Wärmegewinnung auf geochemische Prozesse im Grundwasserleiter, *Grundwasser*, 11(1), 27–39, doi:10.1007/s00767-006-0116-0, 2006.

Benz, S. A., Bayer, P., Menberg, K., Jung, S. and Blum, P.: Spatial resolution of anthropogenic heat fluxes into urban aquifers, *Science of The Total Environment*, 524–525, 427–439, doi:10.1016/j.scitotenv.2015.04.003, 2015.

Benz, S. A., Bayer, P., Goettsche, F. M., Olesen, F. S. and Blum, P.: Linking Surface Urban Heat Islands with Groundwater Temperatures, *Environmental Science & Technology*, 50(1), 70–78, doi:10.1021/acs.est.5b03672, 2016.

Benz, S. A., Bayer, P., Winkler, G. and Blum, P.: Recent trends of groundwater temperatures in Austria, *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(6), 3143–3154, doi:10.5194/hess-22-3143-2018, 2018.

Benz, S., Tissen, C., Menberg, K., Blum, P., Bayer, P.,: Cataloging groundwater temperature anomalies in Central Europe. The International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG), Montreal, 2019.

Blum Philipp, Menberg Kathrin, Koch Fabien, Benz Susanne, Tissen Carolin, Peter Bayer: Is Heat a Contaminant?, *Groundwater Quality*, Lüttich, 2019.

Bonte, M., Stuyfzand, P. J., van den Berg, G. A. and Hijnen, W. A. M.: 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*, 63(9), 1922–1931, doi:10.2166/wst.2011.189, 2011.

Bonte, M., Röling, W. F. M., Zaura, E., van der Wielen, P. W. J. J., Stuyfzand, P. J. and van Breukelen, B. M.: Impacts of Shallow Geothermal Energy Production on Redox Processes and Microbial Communities, *Environ. Sci. Technol.*, 47(24), 14476–14484, doi:10.1021/es4030244, 2013a.

Bonte, M., van Breukelen, B. M. and Stuyfzand, P. J.: 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, doi:10.1016/j.watres.2013.05.049, 2013b.

Briellmann, H., Lueders, T., Schreglmann, K., Ferraro, F., Avramov, M., Hammerl, V., Blum, P., Bayer, P. and Griebler, C.: Oberflächennahe Geothermie und ihre potenziellen Auswirkungen auf Grundwasserökosysteme, *Grundwasser*, 16(2), 77–91, doi:10.1007/s00767-011-0166-9, 2011.

BWPLUS : Nachhaltige Nutzung von Erdwärmesonden. Zwischenbericht, Karlsruhe, 2016.

Connolly, D.: Heat Roadmap Europe: Quantitative comparison between the electricity, heating, and cooling sectors for different European countries. *Energy* 139, 580–593, 2017.

Ferguson, G. and Woodbury, A. D.: Urban heat island in the subsurface, *Geophys. Res. Lett.*, 34(23), L23713, doi:10.1029/2007GL032324, 2007.

Griebler, C., Brielmann, H., Haberer, C.M., Kaschuba, S., Kellermann, C., Stumpp, C., Hegler, F., Kuntz, D., Walker-Hertkorn, S., and Lueders, T. (2016). Potential impacts of geothermal energy use and storage of heat on groundwater quality, biodiversity, and ecosystem processes. *Environmental Earth Sciences* 75.

Griffioen, J. and Appelo, C. A. J.: Nature and extent of carbonate precipitation during aquifer thermal energy storage, *Applied*

Hähnlein, S., Bayer, P., and Blum, P. (2010). International legal status of the use of shallow geothermal energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 2611–2625.

Hähnlein, S., Blum, P., and Bayer, P. (2011). Oberflächennahe Geothermie – aktuelle rechtliche Situation in Deutschland. *Grundwasser* 16, 69–75.

Hähnlein, S., Bayer, P., Ferguson, G., and Blum, P. (2013). Sustainability and policy for the thermal use of shallow geothermal energy. *Energy Policy* 59, 914–925.

Heat Roadmap Europe: Heat Roadmap Europe - Peta 4, 2017.

Heinrich, C., Wittig, S., Albring, P., Richter, L., Safarik, M., Böhm, U., and Hantsch, A. (2014). Nachhaltige Kälteversorgung in Deutschland an den Beispielen Gebäudeklimatisierung und Industrie.

HOTMAPS Hotmaps — The open source mapping and planning tool for heating and cooling.

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change* (Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change), 2014.

Isaac, M., and van Vuuren, D.P.: Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change. *Energy Policy* 37, 507–521, 2009.

Jaudin, F., Angelino, L., Annunziata, E., van Beek, D., Benson, J., Bezelgues, S., Croufer, M., Cucueteanu, D., Cuevas, J., Frey, M., et al. (2013). D2.2: General Report of the current situation of the regulatve framework for the SGE systems -Overview of Shallow Geothermal Legislation in Europe.

Kabus, F., and Seibt, P.: Aquifer thermal energy storage for the Berlin Reichstag building-new seat of the german parliament. In *Proceedings of the World Geothermal Congress*, pp. 3611–3615, 2000.

LFB: Erdwärmennutzung in Berlin - Merkblatt für Erdwärmesonden und Erdwärmekollektoren mit einer Heizleistung bis 30 kW außerhalb von Wasserschutzgebieten, Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz, 11, 2017.

LFBA: Leitfaden Erdwärmesonden in Bayern, 2012.

LFBR: Nutzung von Erdwärme in Brandenburg, Die Brandenburgische Energie Technologie Initiative, 24, 2009.

LFBW: Baden-Württemberg: Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden, Umweltministerium Baden-Württemberg, Stuttgart, 2005.

LFBW: Baden-Württemberg: Arbeitshilfe zum Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Grundwasserwärmepumpen, Umweltministerium Baden-Württemberg, 2009.

LFH: Erdwärmennutzung in Hessen - Leitfaden für Erdwärmesondenanlagen zum Heizen und Kühlen, Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, 41, 2017.

LFMVP: Erdwärmesonden und Erdwärmekollektoren in Mecklenburg-Vorpommern: Leitfaden zur geothermischen Nutzung des oberflächennahen Untergrundes, 54, 2015.

LFN: Leitfaden Erdwärmennutzung in Niedersachsen: Rechtliche und technische Grundlagen, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, 60, 2012.

LFNRW: Wärmepumpen-Marktplan NRW Planungsleitfaden Wärmepumpen, EnergieAgentur.NRW, 36, 2012.

LFRP: Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden, Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz, 28, 2007.

LFS: Erdwärmesonden Informationsbroschüre zur Nutzung oberflächennaher Geothermie, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 2014.

LFS: Grundwasserwärmepumpen Merkblatt zum Bau und Betrieb, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 2015.

LFSA: Erdwärmennutzung in Sachsen-Anhalt Informationsbroschüre zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden, Landesamt für Geologie und Bergwesen, 2012.

Menberg, K., Blum, P., Schaffitel, A. and Bayer, P.: Long-Term Evolution of Anthropogenic Heat Fluxes into a Subsurface Urban Heat Island, *Environmental Science & Technology*, 47(17), 9747–9755, doi:10.1021/es401546u, 2013a.

Menberg, K., Bayer, P., Zosseder, K., Rumohr, S. and Blum, P.: Subsurface urban heat islands in German cities, *Science of The Total Environment*, 442, 123–133, doi:10.1016/j.scitotenv.2012.10.043, 2013b.

Possemiers, M., Huysmans, M. and Batelaan, O.: Influence of Aquifer Thermal Energy Storage on groundwater quality: A review illustrated by seven case studies from Belgium, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2, 20–34, doi:10.1016/j.ejrh.2014.08.001, 2014.

PLANHEAT PlanHeat.

Somogyi, V., Sebestyén, V., and Nagy, G. (2017). Scientific achievements and regulation of shallow geo-thermal systems in six European countries – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 68, 934–952.

Schüppler, S.: Wirtschaftlichkeit von Aquiferwärmespeichern (ATES) gegenüber konventionellen Versorgungsalternativen. Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie, 2017.

Schweikert, S.: Untersuchung der Grundwasserökologie von Karlsruhe. Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie, 2014.

Tissen, C., Benz, S. A., Menberg, K., Bayer, P. and Blum, P.: Groundwater temperature anomalies in Central Europe, *Environ. Res. Lett.*, doi:10.1088/1748-9326/ab4240, 2019.

Umweltministerium: Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Grundwasserwärmepumpen. Umweltministerium Baden-Württemberg, Stuttgart, 2009.

Zhu, K., Blum, P., Ferguson, G., Balke, K.-D. and Bayer, P.: The geothermal potential of urban heat islands, *Environmental Research Letters*, 5, doi:10.1088/1748-9326/6/1/019501, 2010.

2.10 AP 6a: Synopse und Transfer der Ergebnisse (HBC & Partner)

2.10.1 Aufgabenstellung

Der Stand des Wissens und der Erfahrungen aus Forschung und Praxis im Hinblick auf die Kühlung mit oberflächennaher Geothermie, wie er in AP 1 bis 3 erhoben und mittels der Untersuchungen in AP 1 bis 5 ergänzt wurde, soll ganzheitlich und interdisziplinär erfasst und systematisch ausgewertet werden. Hierzu sind (hydro-) geologische, geologisch-thermische, geothermie- und nutzerseitige anlagentechnische Aspekte sowie nutzerseitige Bedarfe und Anforderungen in einem Gesamtkontext zu betrachten und zusammenzuführen.

Dies soll im interdisziplinären FuE-Team in Workshops sowie deren Vor- und Nachbereitung geschehen. Aus dieser interdisziplinären Betrachtungsweise sollen ganzheitliche Empfehlungen zur Optimierung des geothermischen Kühlungspotenzials sowie Anstöße für technische und planerische Innovationen für die Praxis entwickelt und in diese transferiert werden.

2.10.1 Ausführliche Darstellung der Ergebnisse AP 6a

Die Ergebnisse und Erfahrungen aus den einzelnen Arbeitspaketen wurden in zwei Workshops vorgestellt und die Querbezüge der einzelnen Themen diskutiert. Ein Workshop befasste sich schwerpunktmäßig mit dem Entwurf der Konfiguration einer standardisierten Messtechnik für ONG-Anlagen, in den die Erfahrungen der Projektpartner aus verschiedenen Monitoringprojekten einfließen.

Neben den Erfahrungen aus den Monitoringprojekten wurden die wesentlichen Aspekte und Hinweise für die Planung, den Betrieb und die Effizienzbewertung von ONG-Anlagen zur (direkten) Kühlung zusammengetragen, diskutiert und in den Planungshinweisen [Bachseitz2020] und Empfehlungen zur Effizienzbewertung [Ryba2020] dokumentiert.

Aus dem Erfahrungsaustausch der Projektpartner ergab sich auch der Bedarf einer Möglichkeit, das geothermische (Kühl-)Potenzial einer Erdwärmesondenanlage abschätzen zu können, woraufhin die oben beschriebene Methode entwickelt und zunächst in einer Excel-Anwendung umgesetzt wurde. Es ist vorgesehen diese im Projektnachgang in die Auslegungssoftware GEO-HAND^{light} (Programmbeschreibung siehe [Koenigsdoeff2011]) zu integrieren.

2.10.2 Veröffentlichung der Ergebnisse, Ergebnis- und Forschungstransfer

Die erstellten Planungshinweise [Bachseitz2020] und Empfehlungen zur Effizienzbewertung [Ryba2020] sollen in geeigneter Weise veröffentlicht werden.

Die entwickelte Methode zur Abschätzung des geothermischen (Kühl-)Potenzials von Erdwärmesondenfeldern soll im Projektanschluss beispielsweise im Maßnahmenpaket „Rollout von OpenSource- und nichtkommerzieller FuE-Software“ des Projekts InnoSüd

(<https://innosued.de/>), an dem die Hochschule Biberach beteiligt ist, in die erfolgreich in der Branche verbreitete Auslegungssoftware für Erdwärmesonden GEO-HAND^{light} integriert und damit Planern zur Verfügung gestellt werden.

Die gemessenen Temperaturanomalien von 12.000 Grundwassermessstellen in 10 europäischen Ländern wurden in der Fachzeitschrift *Environmental Research Letters* (2019) publiziert und auf der Konferenz „Groundwater Quality“ in Lüttich von Blum et al. (2019) sowie auf der Konferenz „IUGG“ von Benz et al. (2019) präsentiert.

Die gewonnenen Ergebnisse dienen zudem als wichtige Grundlage im Forschungsprojekt GeoSpeicher.bw (Förderkennzeichen L75 16014 - 16019). Im Zuge des Projektes soll die erfolgreiche Kältespeicherung im Grundwasser am Campus Nord des KIT demonstriert werden. Im Dialog mit Genehmigungsbehörden liefern die gewonnenen Erkenntnisse aus dem Projekt GEO.Cool wichtige Argumentationsgrundlagen für die Diskussion genehmigungsrechtlicher Fragestellungen, um eine effiziente Nutzung des Untergrundes bei gleichzeitigem Schutz des Grundwassers zu gewährleisten.

2.10.3 Literatur

Siehe Literaturhinweise zu den einzelnen Arbeitspaketen bzw. obige Hinweise zu vorgesehenen Veröffentlichungen.

2.11 AP 6b: Informations- und Management-Werkzeug für das Projekt (HS OG, FKZ: L75 17009)

2.11.1 Abstract zu den Forschungsergebnissen AP 6b

Das Groupware- Programm eGroupWare der Firma Stylite AG wird weltweit für vielfältige Projektaufgaben eingesetzt, um Projektarbeiten zu unterstützen, Abhängigkeiten diverser Teilaufgaben sichtbar zu machen und die Projektarbeit insgesamt zu optimieren durch Vermeidung von Doppelarbeit, Verhinderung von Zeitverlusten durch Informationslücken und Unterstützung kooperativer Aufgaben.

Für das Forschungsvorhaben GEO.Cool wurde das Programm eGroupWare als serverbasierte Lösung mit den erforderlichen Lizenzen auf einem verfügbaren Linux- Server der Hochschule Offenburg installiert und für die Forschungspartner bereitgestellt, wobei für jeden Forschungspartner eigene Zugriffsrechte definiert wurden. Mittels der intern zur Verfügung gestellten Bedienungsanleitung und der projektbegleitenden Schulungen der einzelnen Projektpartner wurde die Nutzung der Groupware für die einzelnen Projektpartner ermöglicht und mittels eines Supports durch die Hochschule Offenburg unterstützt.

Nach der Systemanpassung des Systems (Customizing) wurden alle Arbeitspakete in der eGroupWare erfasst, in einzelne Arbeitsbereiche aufgeteilt und dazu Teilaufgaben definiert, die wiederum in zeitlichem Zusammenhang gestellt wurden. Im Hinblick auf Daten und Kooperationen zur wissenschaftlichen Forschung konnte eine qualitative Verbesserung erzielt werden, indem die Forschungspartner zu jedem Stadium der Projektarbeiten über den Fortgang informiert waren.

2.11.2 Motivation und Hintergründe

Mit Hilfe von modernen Groupware- Lösungen können Projektarbeiten gefördert, strukturiert und zur kollaborativen Arbeit der einzelnen Projektpartner genutzt werden. Speziell im Falle der hier durchgeführten Geothermie-Forschung sind ortsübergreifende und nach Themen- und Aufgabengebieten strukturierte Projektmanagement-Werkzeuge erforderlich, weil mehrere Arbeitsgruppen an verschiedenen Orten und Teilbereichen arbeiten und diese Arbeiten zum Abschluss zu einem Gesamtergebnis zusammengeführt werden. Im Rahmen bisheriger diesbezüglicher Forschungstätigkeiten hat sich das System eGroupWare als serverbasierte Lösung bewährt, so dass der Server für die aktuelle Forschungstätigkeit ohne neue Installationen mit den erforderlichen Lizenzen ausgestattet und nach Anpassungsarbeiten für das Projekt genutzt werden kann.

2.11.3 Aufgabenstellung

Ziel der Anwendung ist es, die Arbeitsschritte der Forschungspartner zu koordinieren, sich gegenseitig über die Fortschritte und Ergebnisse zu informieren und die Forschungseinrichtungen bei der Kooperation zu unterstützen. Damit kann auch sichergestellt werden, dass die Daten und Teilergebnisse der Forschungstätigkeiten umfassend gesichert und zur Gesamtauswertung des Forschungsprojektes herangezogen werden können.

Daher wurde folgender Arbeitsplan aufgestellt und im Verlaufe der Projektarbeiten ausgeführt:

Arbeitsplan

- Aspekt 1:
Anlegen und Strukturieren des Projektes auf eGroupWare-Plattform
- Aspekt 2:
Strukturierung der Aufgabengebiete, Definition von Abhängigkeiten und Implementation der Teilprojekte
- Aspekt 3:
Festlegung der verantwortlichen Personen für die Teilprojekte, Definition der Datenbasis mit grundlegenden Dokumenten, Zuordnung der Aufgaben zu den einzelnen Forschungspartnern, Definition der übergreifenden Projektziele und Implementierung im System
- Aspekt 4:
Betrieb der e- Groupware in Kooperation mit den Forschungspartnern, Anwendersupport, automatisierte Generierung von Fortschrittsberichten auf der Grundlage der im System verfügbaren Dokumente, Organisation des Dokumentationsbereichs für fertiggestellte Aufgaben
- Aspekt 5:
Feststellung des Erreichens der Forschungsziele durch die einzelnen Forschungspartner, Hilfestellung bei der Erstellung und Internet-Publikation der Forschungsergebnisse übergreifend und in den einzelnen Teilaspekten.

2.11.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Im Rahmen bisheriger Forschungstätigkeiten hat sich das System eGroupWare der Firma Stylite AG als serverbasierte Lösung für den beschriebenen Aufgabenbereich bewährt und wird daher für das Verbundprojekt GEO.Cool als Plattform gewählt. eGroupWare in der aktuellen Version 17.1 ist eine Client-Server-Anwendung und auf einer eigens dafür eingerichteten Web-Plattform auf einem LINUX-Server der Hochschule Offenburg implementiert. Der Webzugriff erfolgt über eine verschlüsselte Datenverbindung und war während der Projektlaufzeit über die Internetadresse <https://bwplus.hs-offenburg.de> erreichbar.

2.11.5 Planung und Ablauf des AP 6b

Die spezifischen Arbeiten zur Verfügbarkeit des Informations- und Managementwerkzeuges eGroupWare wurden im Rahmen des Forschungsprojektes vorwiegend zu Beginn der Forschungsarbeiten mit Auswahl, Installation und Strukturierung des Programmes geleistet, sodass der Online-Zugriff für alle Forschungspartner ab Anfang 2017 zur Verfügung stand. Nach der Inbetriebnahme wurden verschiedene Unterstützungsaufgaben wahrgenommen, um die Einstellung der Daten und deren Nutzung im Verbundprojekt zu ermöglichen. Hierfür wurde in Offenburg eine allgemeine Einführung angeboten und im Rahmen der LFZG-Sitzungen kontinuierlich berichtet.

2.11.6 Ausführliche Darstellung der Ergebnisse AP 6b

Für die Anwendung wurde das Gesamtprojekt inklusive der verschiedenen Arbeitspakete implementiert und in untereinander abhängige Aufgabenbereiche strukturiert. Dabei wurden alle projektbezogenen Daten und Aufgaben der einzelnen Arbeitspakete aus dem Projektantrag im System hinterlegt. Jeder Benutzer verfügt nun über projektspezifische Zugriffsrechte und trifft nach der Anmeldung auf eine individuell angepasste Benutzeroberfläche. Ergänzend wurde vor der Inbetriebnahme und Freigabe an die Benutzer eine auf das Projekt bezogene Bedienungsanleitung erstellt, die die Benutzer in der Anwendung unterstützt.

Die Applikation Infolog stellt eine vielschichtige Benutzeroberfläche des eGroupWare zusammen und ermöglicht den benutzerspezifischen Einsatz des Managementwerkzeuges. Damit können alle projektbezogenen Aufgaben ausgeführt werden, wie z. B.:

- Tasklisten für die einzelnen Projektpartner entsprechend der definierten Teilaufgaben
- Übersichten zur Verfolgung oder Erfüllung termingerechter Einhaltung der Teilaufgaben
- allgemeine Bereitstellung von Dokumenten für alle Projektpartner zur gegenseitigen Information und Darstellung des Projektfortschritts
- Funktionen zum Austausch von Dokumenten.

Im Verlauf des Projektes ergab sich über den Austausch von Daten und der Projektsteuerungsfunktion hinaus noch eine zusätzliche Anforderung an die Projektplattform. Es zeigte sich, dass die verschiedenen Projektpartner vorteilhafterweise an gemeinsamen Dokumenten auch via Internet kollaborativ arbeiten wollten, so dass nach einer kollaborativen Lösung gesucht wurde. Diese konnte in der eGroupWare und den verfügbaren Lizenzen nur mit einem kostenpflichtigen Zusatz erreicht werden.

Daher wurde die vom Land Baden-Württemberg zur Verfügung gestellte Plattform bwSync&Share zum Austausch von Daten für MitarbeiterInnen sowie Studierende der Universitäten und Hochschulen in Baden-Württemberg sowie Mitgliedern des DFN-Vereins (Sie-

he: <https://help.bwsyncandshare.kit.edu/61.php>) geprüft und in den weiteren Verlauf der Projektarbeiten integriert.

Die Vorteile dieser Ergänzung sind zweifelsohne die kostenfreie Bereitstellung des Dienstes, der vom KIT gehostet wird, die einfache Userverwaltung und die mögliche Synchronisation von Dokumenten bei den Projektpartnern mittels Clientversionen.

Die Registrierung und Berechtigungsabfrage der User für den Dienst bwSync&Share geschieht über einen Shibboleth-Identity-Provider, über den die an den teilnehmenden Partnerinstitutionen vorhandenen Login-Daten zur Freischaltung des bwSync&Share genutzt werden können.

Im Vergleich mit der eGroupWare ist für den Einsatz des bwSync&Share allerdings festzustellen, dass letzterer Dienst kein automatisiertes Backup der Dokumente beinhaltet, wie das bei der eGroupWare der Fall ist. Außerdem ist der Speicherbereich an einen Projektordner gebunden, der eine(m) Mitarbeiter/Mitarbeiterin zugeordnet ist. Dieses bereitet Probleme bei einem eventuellen Personalwechsel während der Laufzeit des Forschungsprojektes. Darüber hinaus gibt es im bwSync&Share keine weiteren Projektsteuerungsfunktionen, was für das Forschungsprojekt GEO.Cool jedoch erforderlich war.

2.11.7 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Ergänzt wurde die Online-Kommunikation um eine vom Land Baden-Württemberg zur Verfügung gestellte Plattform "bwSyncAndShare" zum Online-Bearbeiten von gemeinsamen Dokumenten und zum Austausch von Daten für MitarbeiterInnen sowie Studierende der Universitäten und Hochschulen in Baden-Württemberg sowie Mitgliedern des DFN-Vereins (Siehe 2.11.6).

2.11.8 Veröffentlichung der Ergebnisse, Ergebnis- und Forschungstransfer

Die Projektarbeiten wurden in Arbeitstreffen, einem User-Workshop und im Online-Kontakt kontinuierlich kommuniziert und präsentiert. Die Projektmanagementtools wurden eingesetzt, um die terminabhängigen Teilaufgaben fristgerecht zu erfüllen und die Teilarbeitspakete abzuschließen.

Mit Hilfe der Online-Dokumentenbearbeitung bwSync&Share wurde das Abschlussdokument bearbeitet und zusammengestellt.

Die Autoren danken dem Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg für die finanzielle Förderung des Vorhabens und dem Projektträger Karlsruhe, Baden-Württemberg Programme (PTKA-BWP) für die Unterstützung der administrativen Abwicklung sowie beiden Institutionen für die gute Zusammenarbeit.



Ministerium für Umwelt, Klima und
Energiewirtschaft Baden-Württemberg