

Programm Lebensgrundlage Umwelt
und Ihre Sicherung (BWPLUS)

Zwischenbericht für das
BWPLUS-Statuskolloquium am 4. und 5. März 2009
im Forschungszentrum Karlsruhe

GEO-SOLE

**Forschungsprojekt zur thermisch-energetischen und
anlagentechnischen Bewertung von Wärmeträgerflüssigkeiten**

Roland Koenigsdorff, Meinhard Ryba, Andreas Köhler

Hochschule Biberach
Institut für Gebäude- und Energiesysteme IGE

Förderkennzeichen: ZO4E 26005

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung werden mit Mitteln des
Landes Baden-Württemberg gefördert

Summary

Ground-coupled heat pump plants are commonly operated with mixtures of water and anti-freezing agents. Brines based on glycol are most frequently used, but there is also a variety of other organic and inorganic fluids available. Even the use of pure water is possible when frost-prove operation can be assured. The material properties of the fluids are well-known, but there is no complete and consistent data basis to compare them, neither for the case of a leakage in the borehole heat exchanger's piping, nor with respect to the energy efficiency and operational characteristics of whole plants. The joint project GEO-SOLE of the Biberach University of Applied Sciences and the University Karlsruhe comprises experimental and theoretical investigations of various heat carrier fluids regarding their operational behaviour within heat pump plants and their characteristics when passing through the backfilling of boreholes and being dispersed within the ground. This report contains the current status of the results obtained at Biberach University of Applied Sciences within the joint project GEO-SOLE.

Zusammenfassung

Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen werden im Regelfall mit Wasser-Frostschutz-Gemischen als Wärmeträgerflüssigkeit betrieben. Neben den häufig eingesetzten Fluiden auf Glykol-Basis kommen hierfür eine Reihe anderer Wärmeträger auf anorganischer und organischer Basis in Betracht – bis hin zu frostsicher mit reinem Wasser betriebenen Anlagen. Die Stoffeigenschaften der in Frage kommenden Fluide sind zwar grundsätzlich bekannt, für ihre Auswirkungen im Falle einer Undichtigkeit der Erdwärmesondenrohre sowie auf das energetische und betriebstechnische Verhalten in Gesamtanlagen fehlt jedoch eine vollständige und durchgängige Vergleichsbasis. Im Verbundvorhaben GEO-SOLE der Hochschule Biberach und der Universität Karlsruhe werden auf experimenteller und theoretischer Basis sowohl die für den Anlagenbetrieb relevanten Eigenschaften verschiedener derartiger Wärmeträgerflüssigkeiten als auch ihr Durchtritt durch Bohrlochverfüllungen sowie ihre Ausbreitungsfahnen im Erdreich untersucht. In diesem Bericht werden die bisherigen Zwischenergebnisse der Hochschule Biberach im Verbundvorhaben GEO-SOLE vorgestellt.

1. Einleitung

Die Nutzung oberflächennaher geothermischer Energie besitzt ein großes energetisches und - im Sinne von Klimaschutz und Schadstoffemissionen in die Atmosphäre - ökologisches Potenzial. Bei erdgekoppelten Wärmepumpen, also Anlagen mit Erdwärmesonden, Erdreichkollektoren, Energiepfählen oder anderen erdberührten Bauteilen, stehen diesen ökologischen Vorteilen jedoch Risiken bzgl. des Grundwasserschutzes gegenüber, z. B. der mögliche unkontrollierte Austritt der Wärmeträgerflüssigkeit in das Erdreich bzw. Grundwasser. Aus diesem Grunde ist aus wasserrechtlicher Sicht „ausschließlich Wasser als Wärmeträgerflüssigkeit einzusetzen“ bzw. wird außerhalb von Wasserschutzgebieten der Einsatz von „Wärmeträgerflüssigkeiten der WGK 1 (Glykol ...) als vertretbar eingestuft“ [1].

Seitens der Lieferanten erdgekoppelter Wärmepumpen wird jedoch grundsätzlich der Einsatz frostsicherer Wärmeträgerflüssigkeiten gefordert. Ein Betrieb mit Wasser, d. h. mit gesicherten Betriebstemperaturen oberhalb 0 °C, ist zwar möglich, meist jedoch mit einem höheren Aufwand in Planung und Installation sowie ggf. einem höheren Risiko eines Anlagenschadens verbunden, weshalb die Zahl von Anlagen ohne Frostschutzmittel sehr gering ist. Diese Diskrepanz zwischen den Belangen des Grundwasserschutzes und der Anlagentechnik führt mitunter zu Lösungen, die nicht für alle Seiten befriedigend sind oder sogar gestellte Anforderungen außer Acht lassen.

Standard bei den Wärmeträgerflüssigkeiten sind derzeit verschiedene Glykol-Wasser-Gemische. Es werden zwar verschiedene alternative Wärmeträgerflüssigkeiten (auf Salz- oder organischer Basis) angeboten, sie sind aber bei Wärmepumpenanlagen – zumindest in Baden-Württemberg – nur wenig verbreitet. Dies hat z. T. Kostengründe, resultiert aber auch aus einer Unsicherheit, inwieweit diese „unbekannteren“ Wärmeträgerflüssigkeiten in ihren praktischen Betriebseigenschaften von üblichen Wärmeträgerflüssigkeiten abweichen bzw. welche planerischen und ausführungstechnischen Anpassungen jeweils erforderlich sind. Ebenso ist ungeklärt, wie sich unterschiedliche/alternative Wärmeträgerflüssigkeiten im Falle eines Austritts aus den Sondenrohren, durch die Verfüllung der Erdwärmesonden hindurch, in den Untergrund und das Grundwasser hinein ausbreiteten.

2. Das Verbundvorhaben GEO-SOLE

Das Verbundvorhaben GEO-SOLE der Hochschule Biberach und der Universität Karlsruhe möchte zur Klärung der offenen Fragen bzgl. des Einsatzes unterschiedlicher Wärmeträgerflüssigkeiten in erdgekoppelten Geothermieanlagen beitragen und damit eine einheitliche und verbesserte Bewertungsgrundlage für deren Einsatz liefern. Das Projekt konzentriert sich auf die beiden folgenden Punkte, deren Bearbeitung in einzelnen Schritten in Abbildung 1 dargestellt ist:

1. Schaffung einer konsistenten Vergleichsbasis für die anlagentechnischen Einsatzbereiche und Konsequenzen verschiedener Wärmeträgerflüssigkeiten bei erdgekoppelten Wärmepumpenanlagen durch Analyse vorhandener Daten, vergleichende Betriebsversuche in einer Versuchsanlage sowie qualitative und quantitative Verallgemeinerung der Ergebnisse (Biberach).
2. Untersuchung des Durchtritts verschiedener Wärmeträgerfluide durch Bohrlochverfüllungen und ihre Ausbreitungsfahnen im Erdreich im Falle einer Undichtigkeit der Erdwärmesondenrohre. Diese werden in an Erdwärmesondenfragestellungen angepassten Labor- und Technikumsversuchen sowie mit Hilfe von Modellberechnungen durchgeführt.

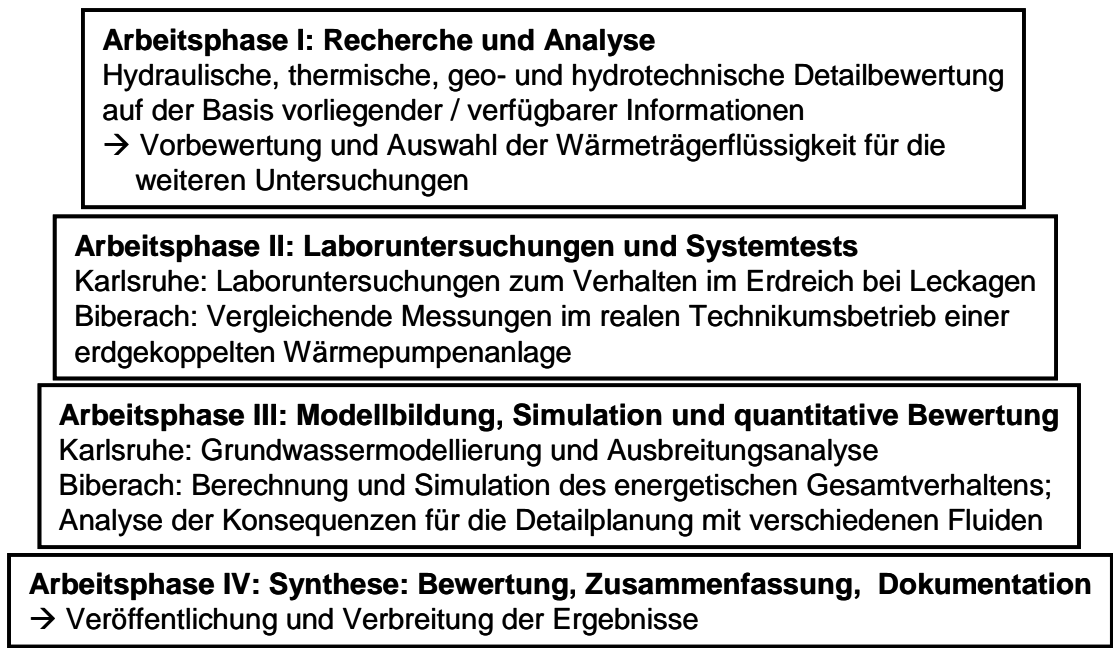


Abb. 1: Arbeitsinhalte und Struktur des Projektes GEO-SOLE.

3. Ergebnisse der einzelnen Arbeitsphasen

Mit dem Projektfortschritt wurde frühzeitig begonnen die Arbeitsphasen parallel zu bearbeiten um Zwischenergebnisse wechselseitig zu prüfen und frühzeitig zusammenzuführen. So erfolgte ein Teil der Auswertung von recherchierten Stoffeigenschaften zu den Wärmeträgerfluiden (Arbeitsphase I) mit Hilfe der bis dahin entwickelten Simulationsumgebung (Arbeitsphase III). Parallel zur Arbeitsphase I wurde ein standardisierter Versuchsablauf für die Arbeitsphase II entwickelt, der eine vergleichende Auswertung der Messergebnisse beim Betrieb der Versuchsanlage mit unterschiedlichen Wärmeträgerfluiden zulässt und zugleich einem realen Anlagenbetrieb in der Praxis möglichst entspricht. Im Folgenden sind die bislang an der Hochschule Biberach erzielten Ergebnisse dargestellt.

3.1 Arbeitsphase I: Recherche und Analyse

Eine erste Recherche zu möglichen Wärmeträgerflüssigkeiten für den Einsatz in oberflächennahen Wärmepumpen-Geothermiesystemen ergab als Stoffgruppen Fluide auf der Basis alkoholischer Verbindungen, anorganische Salze, organische Salze und sonstige Verbindungen.

Tab. 1: In Frage kommende Wärmeträgerfluide für erdgekoppelten Wärmepumpenanlagen

alkoholische Verbindungen	anorganische Salze	organische Salze	sonstige Verbindungen
Ethylenglykol Propylenglykol Ethanol	Natriumchlorid Kaliumchlorid Kaliumkarbonat Magnesiumchlorid	Kaliumformiat Kaliumacetat Kaliumpropionat	Betain, Harnstoff

Eine Analyse der Stoffdaten erfolgte auf der Datenbasis des Programmpakets Coolpack der Technischen Universität von Dänemark [2] bzw. auf Herstellerangaben und eigenen Routinen aus AP III. Grundlage für den Vergleich stellt dabei ein Frostschutz von -10°C dar. Zur hydraulischen, thermodynamischen Analyse der Stoffdaten wird in physikalische Stoffgrößen, abgeleitete physikalische Kenngrößen und abgeleitete technische Kenngrößen unterschieden.

Tab. 2: Bewertungsgrößen zur Analyse der verschiedenen Wärmeträgerfluide

physikalische Stoffgrößen	abgeleitete physikalische Kenngrößen	abgeleitete technische Kenngrößen
<ul style="list-style-type: none"> • Dichte • Wärmekapazität • kinematische Viskosität • Wärmeleitfähigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • volumetrische Wärmekapazität • Wärmeübergangskoeffizient im Sondenrohr 	<ul style="list-style-type: none"> • spezifischer Druckverlust im Sondenrohr • Bohrlochwiderstand • COP (Leistungszahl)

Die vergleichende Auswertung der physikalischen Stoffgrößen zeigt, dass Wasser durchweg die günstigsten Eigenschaften als Wärmeträger besitzt. Die Einsatzmöglichkeit von Wasser ist allerdings durch den fehlenden Frostschutz eingeschränkt. Im folgenden Diagramm ist beispielhaft die spezifische Wärmekapazität verschiedener Wärmeträgerfluide über der Temperatur der Fluide aufgetragen.

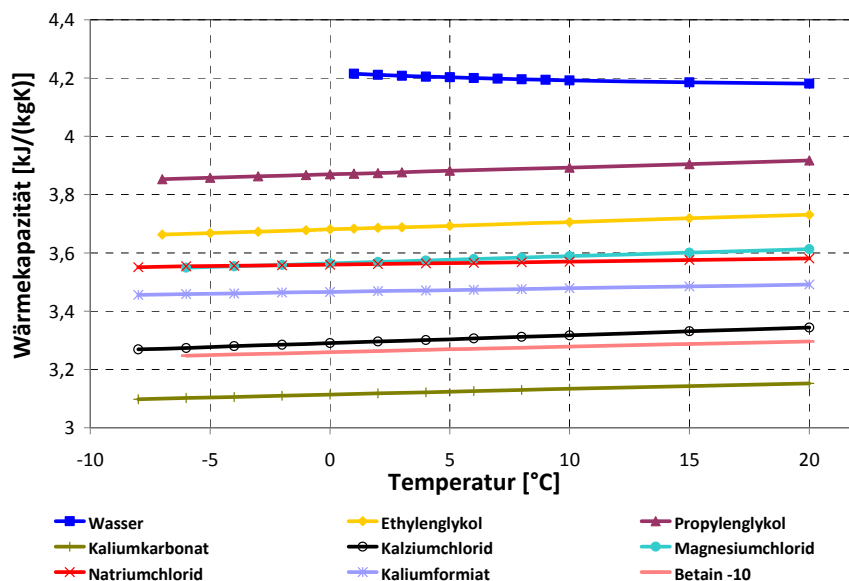


Abb. 2: Vergleich der spezifischen Wärmekapazität verschiedener Wärmeträgerfluide in Abhängigkeit von der Temperatur

Im weiteren Vorgehen stellt sich zunächst die Frage nach einem Bewertungsverfahren der Fluideigenschaften anhand der Stoffdaten und Bewertungsgrößen ohne genaue Kenntnis der wechselseitigen Zusammenhänge zwischen den Größen beim Betrieb einer Wärmepumpenanlage mit Geothermiesonde und dem sich durch die Fluideigenschaften veränderten Betriebsverhalten. Der Umstand, dass Wasser durchweg die besten Eigenschaften besitzt, gab dabei Anlass zur Bildung von auf die Eigenschaften von Wasser bezogenen Relativwerten für die physikalischen Stoffwerte sowie die physikalischen und technischen Kenngrößen. Diese Relativwerte dienen dann zur Bewertung eines Wärmeträgerfluids. Die Relativwertbildung zur jeweiligen Bezugsgröße erfolgt dabei so, dass sich stets ein Relativwert kleiner eins ergibt. Die einzelnen Stoff- und Kenngrößen wurden dabei wie folgt als positiv bewertet:

Tab. 3: Bewertung der Stoff- und Kenngrößen der Wärmeträgerfluide

physikalische Stoffgrößen	abgeleitete physikalische Kenngrößen	abgeleitete technische Kenngrößen
<ul style="list-style-type: none"> niedrige Dichte hohe Wärmekapazität hohe kinemat. Viskosität hohe Wärmeleitfähigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> hohe volumetrische Wärmekapazität hoher Wärmeübergangskoeffizient 	<ul style="list-style-type: none"> niedriger Druckverlust geringer Bohrlochwiderstand hoher Wert des COP

Im folgenden Diagramm sind beispielhaft die ermittelten Relativwerte für die physikalischen Stoffgrößen vergleichend gegenübergestellt.

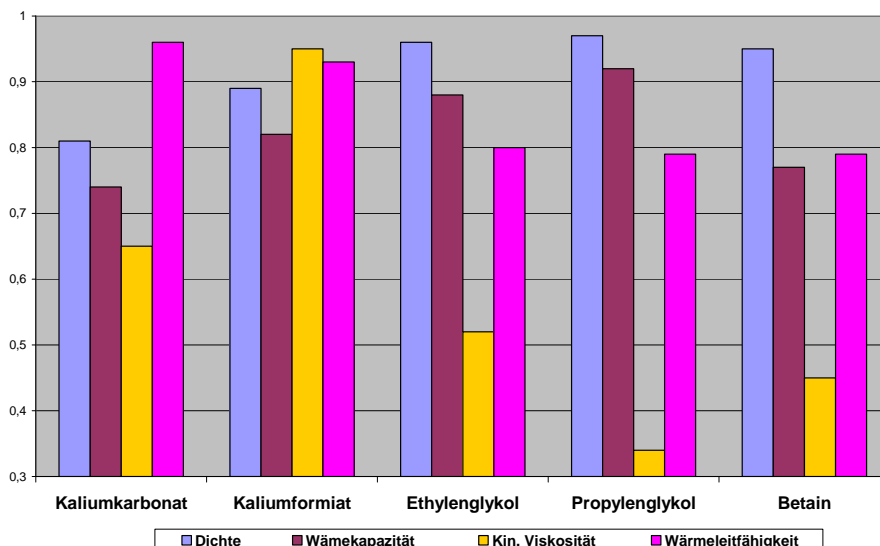


Abb. 3: Vergleichende Gegenüberstellung der auf Wasser bezogenen Relativwerte der Stoffgrößen verschiedener Wärmeträgerfluide

Dem Diagramm liegt bereits eine Vorauswahl dahingehend zugrunde, dass ein Einsatz von anorganischen Salzen aufgrund der Korrosivität in der Versuchsanlage nicht möglich ist und auch in der Praxis mit den dort zum Einsatz kommenden Materialien kritisch ist. Darüber hinaus ist im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nur der Einsatz von als fertigen Produkten erhältlichen Wärmeträgerfluiden vorgesehen. Aus der Bewertung der Fluide mit Hilfe der gebildeten Relativwerte aller betrachteten Stoff- und Kenngrößen geht folgende Rangfolge hervor:

1. Wasser
2. Kaliumformiat
3. Kaliumkarbonat
4. Ethylenglykol
5. Propylenglykol und Betain

Auf Basis dieser Ergebnisse wurden in einem Projekttreffen mit dem Auftraggeber am 22.07.2008 an der Universität Karlsruhe für die Versuche an der Hochschule Biberach neben Ethylenglykol als das Fluid, das bereits zu Projektbeginn in der Versuchsanlage war, Kaliumformiat, Kaliumkarbonat und Wasser ausgewählt. Kaliumformiat und Kaliumkarbonat kommen mittlerweile in zunehmendem Maße in erdgekoppelten Wärmepumpenanlagen zum Einsatz. In Bezug auf Betain bestehen Unsicherheiten über mögliche Abbauprodukte mit negativer Umweltwirkung im Untergrund [3]. Propylenglykol ist aufgrund seiner ungünstigeren Kenngrößen keine wirkliche Alternative zu Ethylenglykol.

Der Einsatz von Wasser stellt eine große Herausforderung an die Planung der Anlagenkonfiguration dar. Im Projekt GEO-SOLE sollen hierzu, soweit es der zeitliche Rahmen zulässt, grundlegende Fragen zum Einsatz von Wasser in erdgekoppelten Wärmepumpenanlagen bearbeitet und mit den derzeitigen Möglichkeiten der Versuchsanlage ggf. noch erste Versuche durchgeführt werden.

Die Rechercheergebnisse zu den untersuchten Wärmeträgerfluiden in Arbeitsphase I sind in einer Auswahlmatrix zusammengestellt, deren Grobstruktur die folgende Tabelle zeigt.

Tab. 4: Grobstruktur der Auswahlmatrix für Wärmeträgerfluide.

Wärmeträgerflüssigkeit / Frostschutzzusatz	rechtliche Beurteilung	ökologisch- biologische Beurteilung	chemische Eigenschaften	physikalische Eigenschaften
Wasser anorganische Salze organische Salze alkoholische Verbindungen Sonstige	Zulassung in den Bundesländern	z.B. Abbaubarkeit Toxizität	Korrosivität gegenüber verschiedenen Werkstoffen	physikalische Stoffdaten wie volumetrische Wärmekapazität etc. Ähnlichkeitskennzahlen

Die Arbeitsphase I ist grundsätzlich abgeschlossen. Lediglich die Auswahlmatrix soll bis Projektende laufend aktualisiert und die Ergebnisse von Teil 2 des Projekts GEO-SOLE der Universität Karlsruhe sowie die Ergebnisse des Forschungsprojekts an der Uni Tübingen zur biologischen Beurteilung von Wärmeträgermischungen eingepflegt werden.

3.2 Arbeitsphase II: Systemtests und Messungen im Technikumsbetrieb

Für die vergleichenden Messungen im realen Technikumsbetrieb verfügt die Hochschule Biberach über eine erdgekoppelte Wärmepumpenanlage mit zwei Erdwärmesonden als Wärmequellen und verschiedenen zu- und abschaltbaren Wärmesenken, die ebenfalls Versuchszwecken dienen. Über einen Zwischenkreis ist die Versuchsanlage zwischen Heiz- und Kühlbetrieb hydraulisch umschaltbar (geothermische Energiezentrale GEOZENT®).

Erste Aufgabe zu Beginn der Arbeitsphase II war die Ausarbeitung eines standardisierten Versuchsablaufs, der einem realen Wärmepumpenbetrieb möglichst weitgehend entspricht und gleichzeitig reproduzierbare und vergleichbare Ergebnisse über den gesamten Projektzeitraum, d. h. z. B. auch zu unterschiedlichen Jahreszeiten, liefert. Langzeitversuche, die beispielsweise eine Heizperiode oder zumindest längere Zeitabschnitte einer Heizperiode abbilden, sind aufgrund des vorgegebenen Zeitrahmens aus, da derartige Versuche mit unterschiedlichen Fluiden zu unterschiedlichen Jahreszeiten keine vergleichbaren Ergebnisse ergeben hätten.

Derzeit werden in der Praxis überwiegend unregelmäßig eingesetzte Wärmepumpen eingesetzt, die taktend über einen bestimmten Zeitraum - bei der Gebäudebeheizung im Vollastbetrieb typischerweise einige Stunden - mit maximaler Leistung aus dem Untergrund Wärme entziehen und der Nutzung zuführen. Abschnittsweise ergibt sich dadurch eine Sondenreaktion ähnlich einem auf Kühlung des Erdreichs basierendem Thermal Response Test (TRT). Daraus wird als Standardversuch abgeleitet, die Wärmepumpe mit einer Erdwärmesonde der Versuchsanlage bei maximaler Leistung im Heizbetrieb 15 Stunden ununterbrochen zu betreiben und die gelieferte Heizwärme in den unter dem Technikumsgebäude der Hochschule liegenden Bodenabsorber [4] abzugeben. Die Versuchszeit von 15 Stunden ergibt sich dabei als Kompromiss zwischen der Auswertbarkeit des Versuchs ähnlich einem TRT und dem realen Betrieb an einem sehr kalten Tag mit entsprechend langer Wärmepumpenlaufzeit. Um Versuche im Wochenrhythmus durchführen zu können, ist eine schnelle Regeneration der Versuchssonde und des Bodenabsorbers auf den Ausgangszustand erforderlich. Deshalb wird im Anschluss an jeden Versuch der Versuchssonde genau die Wärmemenge zugeführt, die ihr während des Versuchs entzogen wurde. Als Wärmequelle dient dabei der Bodenabsorber. Aufgrund der jeweils der Wärmepumpe zugeführten elektrischen Energie würde die Wärmebilanz am Boden dabei jedoch nicht ausgeglichen. Dies wird durch die Nutzung der zweiten Erdwärmesonde des Technikums als zusätzliche Wärmesenke erreicht. Der Versuch wird für ein Fluid bei unterschiedlichen Volumenströmen im Geothermiekreis gefahren. Die folgende Abbildung zeigt an der Versuchssonde gemessene Temperaturen während eines solchen Versuchs mit nachfolgendem Wärmemengenausgleich.

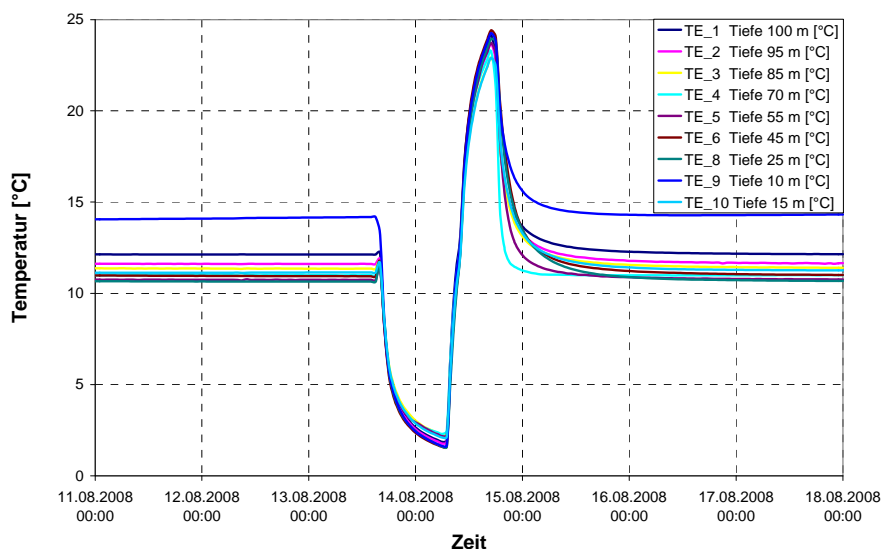


Abb. 3: Verlauf der in unterschiedlichen Tiefen außen an einem Sondenrohr der Versuchssonde gemessenen Temperaturen während eines Versuchs mit anschließendem Wärmemengenausgleich

Zum Berichtszeitpunkt (31.12.2008) sind die Versuche mit dem zu Projektbeginn in der Anlage befindlichen Ethylenglykol abgeschlossen. Eine erste Versuchsreihe mit Kaliumformiat wurde durchgeführt. Die mit der umfangreichen Messtechnik an der Versuchsanlage aufgezeichneten Messdaten wurden zunächst in erster Linie in Hinblick auf den Geothermiekreis (Kreislauf des Wärmeträgersfluids von der Erdwärmesonde bis zum Verdampfer der Wärmepumpe) ausgewertet.

Abbildung 3 zeigt den Verlauf der der Erdwärmesonde entzogenen Wärmeleistung für drei Versuche mit Ethylenglykol bei unterschiedlichen Volumenströmen. Entsprechend der Betriebscharakteristik der Wärmepumpe geht die Entzugsleistung, die in erster Näherung der Verdampferleistung der Wärmepumpe entspricht, nach einem Einschwingen beim Anfahren mit der Zeit zurück, weil aufgrund der Auskühlung der Erdwärmesonde und ihrer Umgebung die Temperaturen im gesamten Geothermiekreis abnehmen. Der Verlauf ist dabei für alle Versuche ähnlich. Die Leistungsabnahme beträgt von Versuchsbeginn bis Versuchsende nach 15 Stunden ca. 20%.

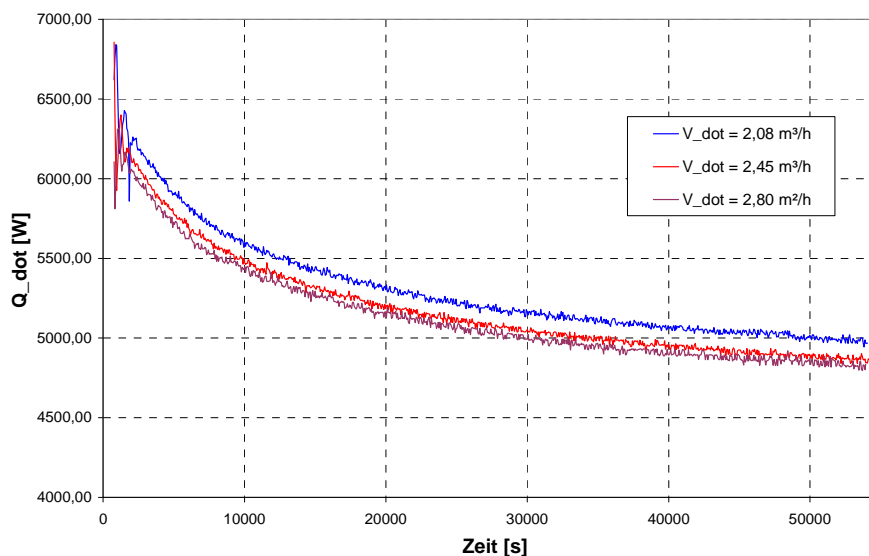


Abb. 3: Geothermische Entzugsleistungen der Versuchssonde

Als Grundlage für die vergleichende Auswertung der Versuche wird in Analogie zur Standardauswertung eines Thermal Response Tests die folgende Darstellung des Mittelwertes der Fluidtemperatur in der Erdwärmesonde als Reaktion auf die konstante Entzugsleistung herangezogen:

$$\bar{\vartheta}_{\text{Fluid}}(t) - \bar{\vartheta}_{\text{Fluid}}(t=0) = \Delta \vartheta_{\text{Fluid}}(t) = \left(R_b + \frac{g(t)}{2\pi\lambda_E} \right) \cdot \frac{\dot{Q}_{\text{geo}}}{H}$$

mit :

$\bar{\vartheta}_{\text{Fluid}}$: mittlere Fluidtemperatur in der Sonde [°C]

λ_E : Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs [W/(m · K)]

R_b : Bohrlochwiderstand [m · K/W]

H : Bohrlochtiefe [m]

\dot{Q}_{geo} : Wärmeleistung an der Erdwärmesonde [W]

t : Zeit [s]

g : g - Funktion (Sprungantwort) der Erdwärmesonde am Bohrlochrand [-]

In den Versuchen ist die der Erdwärmesonde entzogene Wärmeleistung nicht konstant, ihr zeitlicher Verlauf zeigt aber eine gleich bleibende Charakteristik, vgl. Abb. 3. Aufgrund dieser Ähnlichkeit kann eine vergleichende Auswertung für ein und dieselbe Sonde durch Definition eines dynamischen (zeitabhängigen) geothermischen Quellenwiderstandes vorgenommen werden. Der dynamische Sondenwiderstand ergibt sich aus vorstehender Gleichung als Quotient aus der jeweiligen mittleren Fluidtemperatur zum Zeitpunkt t und dem Mittelwert der bis zu diesem Zeitpunkt t aufgelaufenen Sondenleistung:

$$\text{dynamischer geothermischer Quellenwiderstand } R_{\text{dyn,EWS}} = \frac{\Delta \vartheta_{\text{Fluid}}(t)}{\dot{Q}_{\text{geo}}^{0 \rightarrow t}(t)} \quad [\text{K/W}]$$

Das folgende Diagramm zeigt den Verlauf dieser Größe für vier Versuche mit Ethylenglykol bei drei verschiedenen Volumenströmen.

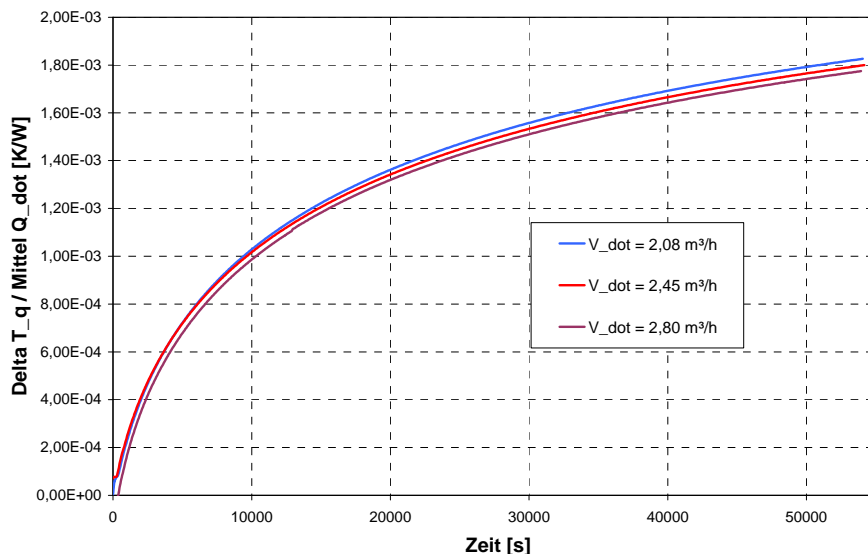


Abb. 5: Auswertungsdiagramm zur Wärmeübertragung in der Erdwärmesonde – Ethylenglykol

Es zeigt sich, dass erwartungsgemäß der dynamische geothermische Quellenwiderstand bei Verwendung derselben Sonde nur vom Bohrlochwiderstand abhängig ist. Der Bohrlochwiderstand ist bei gleicher Sonde wiederum nur von den Wärmeübertragungseigenschaften des Fluids an der Wand des Sondenrohres abhängig. Das Diagramm oben spiegelt also den verbesserten Wärmeübergang am Sondenrohr bei zunehmendem Volumenstrom für Ethylenglykol wider.

Das folgende Diagramm zeigt einen Vergleich von Versuchen mit Ethylenglykol und Kaliumformiat bei annähernd gleichem Volumenstrom. Aus dieser Auswertung ergibt sich zunächst, dass der Wärmeübergang am Sondenrohr bei Kaliumformiat besser ist als bei Ethylenglykol. Dieses vorläufige Zwischenergebnis ist allerdings noch mit Unsicherheiten behaftet, da beim Vergleich der Versuche mit Ethylenglykol und mit denen mit Kaliumformiat noch nicht geklärte Differenzen in den Leistungsbilanzen auftraten. Als mögliche Ursachen sind derzeit ausgemacht:

- eine abweichende Betriebsweise der Wärmepumpe,
- falsche Stoffdaten für das verwendete Kaliumformiatprodukt des Herstellers,
- evtl. noch vorhandene Messfehler.

An einer Klärung wird derzeit gearbeitet.

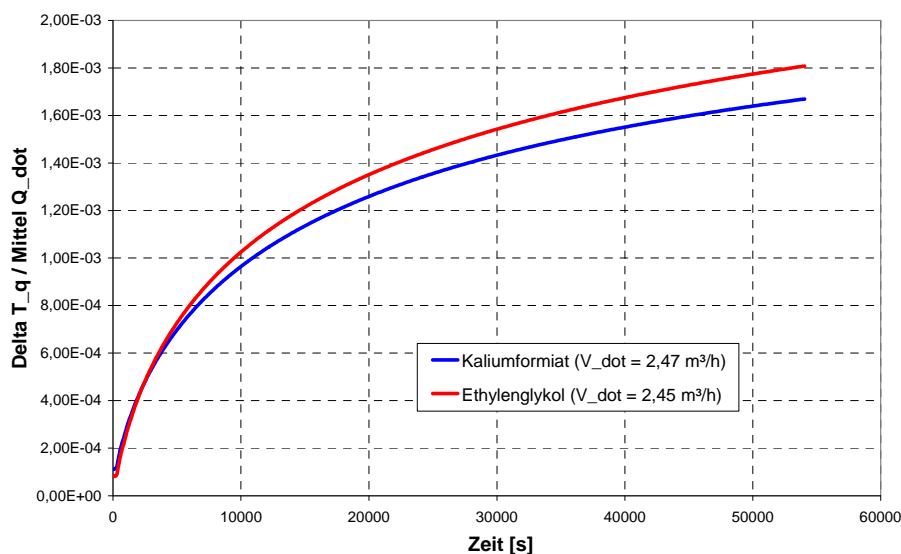


Abb. 6: Auswertungsdiagramm zur Wärmeübertragung in der Erdwärmesonde – Vergleich Ethylenglykol und Kaliumformiat.

Der in Abbildung 6 dargestellten Auswertung zur Wärmeübertragung in der Sonde werden weitere Auswertungen zur elektrischen Leistungsaufnahme der Wärmepumpe und der geothermieseitigen Umwälzpumpe, zum Anlagendruckverlust und schließlich zum gesamten Betriebsverhalten folgen.

3.2 Arbeitsphase III: Modellbildung, Simulation und quantitative Bewertung

Neben den experimentellen Untersuchungen an der Versuchsanlage der Hochschule Biberach wird der Einfluss unterschiedlicher Wärmeträgerflüssigkeiten auf die gesamte Anlageneffizienz erdgekoppelter Wärmepumpenanlagen simulationstechnisch untersucht. Hierbei sollen die Arbeitszahlen der Anlage (Wärmepumpe inkl. Umwälzpumpe im Geothermiekreislauf) für verschiedene Wärmeträgerflüssigkeiten ermittelt sowie für jede untersuchte Flüssigkeit die günstigste Anlagenauslegung bestimmt werden.

Das Modell besteht aus folgenden Teilmodellen:

- Wärmepumpenmodell, welches die Verdampferleistung sowie die Leistungszahl der Wärmepumpe in Abhängigkeit vom Temperaturhub abbildet;
- hydraulisches Modell des gesamten Geothermiekreislaufes, welches die unterschiedlichen Fluideigenschaften hinsichtlich Druckverlust, Wärmeübertragung sowie die Pumpencharakteristik beinhaltet;
- Erdwärmesondenmodell, welches den Bohrlochwiderstand sowie die dynamische Reaktion des umliegenden Erdreichs mit einbezieht.

Das Wärmepumpenmodell basiert auf polynomischen Kennlinien, welche die thermische und elektrische Leistungsaufnahme sowie der Wärmeabgabe der Wärmepumpe in Abhängigkeit vom Temperaturhub beschreiben [5].

Das hydraulische Modell beinhaltet neben einer vom Fluid und dessen Temperatur abhängigen Berechnung der Druckverluste im gesamten Geothermiekreis die Kennlinie der Umwälzpumpe, so dass der sich jeweils einstellende Volumenstrom temperaturabhängig ermittelt wird und damit die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten im Sondenrohr erfolgt [5].

Das Erdwärmesondenmodell verwendet diesen Wärmeübergangskoeffizienten zur Ermittlung des Bohrlochwiderstands, wie er auch bei der Auswertung von Thermal-Response-Tests und in Standard-Auslegungsprogrammen verwendet wird. Die dynamische Reaktion des Erdreichs am Bohrlochrand wird derzeit mit Hilfe der Kelvin'schen Linienquellentheorie ermittelt. Aufgrund der kurzen betrachteten Zeiträume von wenigen Stunden und der notwendigen kleinen Simulationsschrittweite (derzeit ¼ Stunde) wird nicht auf die üblichen Näherungen für die Lösung der Kelvin'schen Linienquellentheorie zurückgegriffen, sondern die exakte Lösung durch numerische Berechnung der Reihenentwicklung mit einer hohen Anzahl von Gliedern (> 100) weitest möglich angenähert.

Im Modell werden die Wechselwirkungen der einzelnen Komponenten gekoppelt-iterativ abgebildet (vgl. Abb. 6).

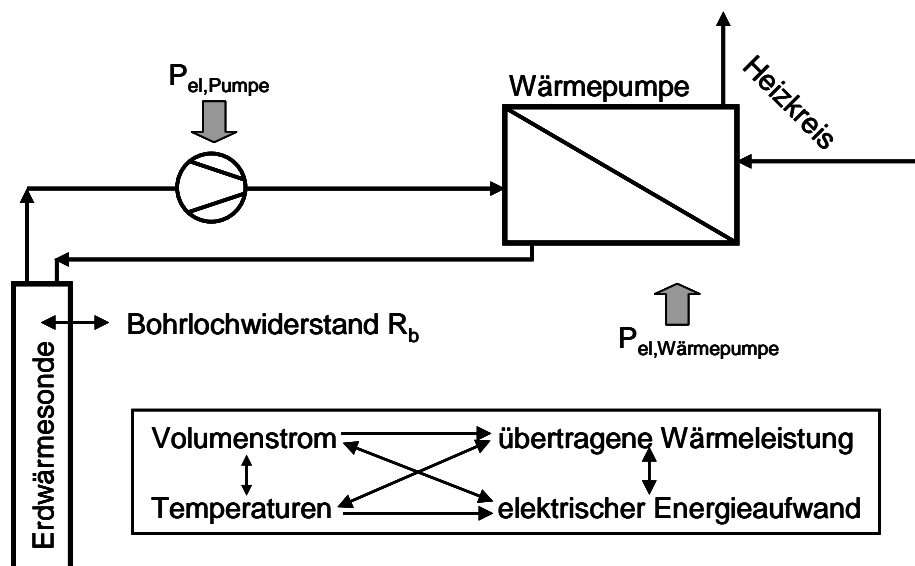


Abb. 6: Systemstruktur und Wechselwirkungen

Erste Simulationsergebnisse mit einem Prototypen des Modells weisen darauf hin, dass sich für unterschiedliche Wärmeträgerflüssigkeiten ein Maximum der Gesamtleistungszahl einer Anlage jeweils bei einem anderen Volumenstrom mit anderem Wert einstellt (vgl. Abb. 7). Das Modell wird derzeit verfeinert und getestet [5]. Anschließend erfolgt die Anwendung des Modells auf die Versuchsanlage der Hochschule Biberach sowie eine Standardanlage für ein kleineres Wohngebäude.

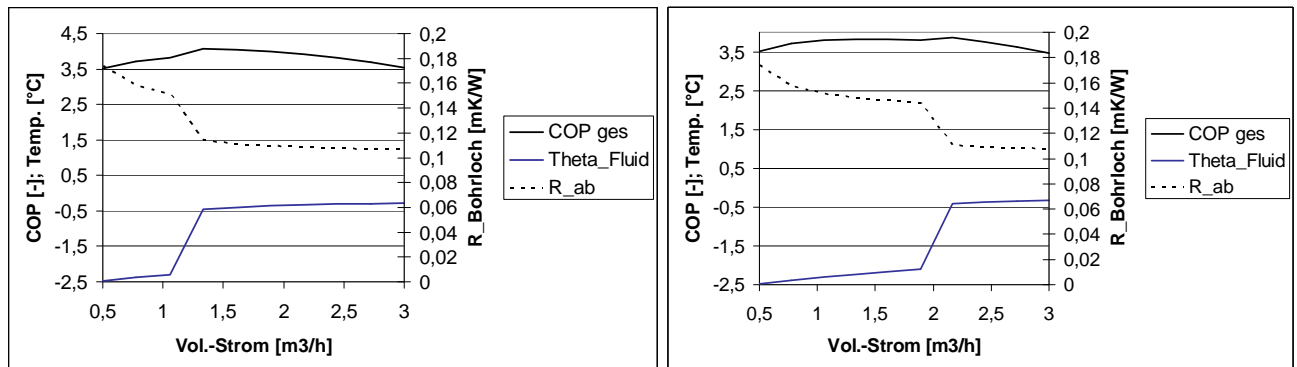


Abb. 7: Überschlägiger Vergleich der Leistungszahl einer Wärmepumpenanlage inkl. Geothermie-Umwälzpumpe bei Verwendung der Wärmeträgerfluide Ethylenglykol (links) und einem Fluid mit größerer Zähigkeit (rechts) [6]

Quellenangaben

- [1] Umweltministerium Baden-Württemberg: *Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmsonden*. Stuttgart, 2005 (5. Auflage).
- [2] Software CoolPack Version 1,46; Copyright 1998 – 2000 Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark
- [3] Thimo Klotzbücher, Dr. Andreas Kappler, Prof. Haderlein: *Gefährdungspotential von Glykolen, Betain und Kaliumkarbonat aus Werdwärmesonden für anoxische Grundwässer -Zusammenfassung des Schussberichts-*, Tübingen 2006.
- [4] Umweltministerium Baden-Württemberg: *Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmekollektoren*. Stuttgart, 2008 (1. Auflage).
- [5] P. Feuerstein: *Modellbildung und Simulation des Kurzzeitverhaltens einer erdgekoppelten Wärmepumpe*. Master-Thesis in Vorbereitung, Hochschule Biberach, 2009.
- [6] A. Köhler, M. Ryba, R. Koenigsdorff: *GEO-SOLE – Forschungsprojekt zur thermisch-energetischen und anlagentechnischen Bewertung von Wärmeträgerflüssigkeiten*. Tagungsband 8. Internationales Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie, 27.-28. Mai 2008, Bad Staffelstein, Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e. V. (OTTI), Regensburg, ISBN 978-3-934681-71-2, S. 34-41.

Danksagung

Die Autoren danken dem Umweltministerium Baden-Württemberg für die Förderung des Vorhabens.