

GEO-SOLE – Vergleichende hydrogeologische und anlagentechnische Bewertung von Wärmeträgerflüssigkeiten für oberflächennahe geothermische Anwendungen

Ergebnisbericht des Verbundprojekts

**der Hochschule Biberach und dem Karlsruher Institut für
Technologie Campus Süd**

im Auftrag des Umweltministeriums Baden-Württemberg

Projektträger:

Karlsruher Institut für Technologie Campus Nord

Teil A: Hochschule Biberach

vom 22.12.2009



Die vorliegende Arbeit mit dem Förderkennzeichen Z04E 26005 wurde im Rahmen des Programms „Herausforderung Erdwärme“ mit Mitteln aus der Zukunftsoffensive IV des Landes Baden-Württemberg finanziert.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	3
1 Recherche und Auswahl der Wärmeträgerflüssigkeiten	6
2 Versuchsanlage und Messtechnik	13
2.1 Versuchsanlage.....	13
2.2 Automatisierung, Messtechnik und Datenerfassung	15
3 Experimentelle Untersuchungen	17
3.1 Konzeption der Versuche.....	17
3.2 Verwendete Anlageneinstellungen im Versuchsablauf	18
3.3 Übersicht über die durchgeführten Versuche.....	22
3.4 Hindernisse und Störungen im Versuchsablauf.....	23
3.5 Versuchsauswertung	24
3.5.1 Auswertung Geothermiekreis	24
3.5.2 Versuche mit laminarer Strömung in der Sonde	30
3.5.3 Thermal Response Test (TRT)	30
3.5.4 Auswertung des Betriebsverhaltens der Gesamtanlage.....	30
3.5.5 Auswertung des Betriebsverhaltens der Gesamtanlage unter Einbeziehung der Versuche mit Wasser.....	45
3.6 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	47
4 Modellbildung und Simulation.....	48
4.1 Gesamt-Simulationsmodell erdgekoppelter Wärmepumpen	48
4.2 Simulationsergebnisse	51
4.2.1 Simulierte Anlage und Randbedingungen	51
4.2.1 Wärmeübertragung in der Erdwärmesonde und Bohrlochwiderstand	51
4.2.2 Hydraulisches Verhalten der Anlage.....	54
4.2.4 Optimierung des Volumenstroms im Geothermiekreislauf	60
4.3 Übertragung der Simulationsergebnisse auf das langfristige Anlagenverhalten	63
4.4 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse	67
5 Zusammenfassung und Ausblick	68
Literaturverzeichnis	70
Vorträge und Veröffentlichungen während des Projekts	72
Projekttreffen, Zwischenbegutachtung und Veranstaltungen	73

Kurzfassung

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 bezüglich des energetischen und betriebstechnischen Verhaltens in Gesamtanlagen fehlt jedoch eine vollständige und durchgängige Vergleichsbasis.

Die hier vorgestellten Ergebnisse der Hochschule Biberach zur thermisch-energetischen und anlagentechnischen Bewertung von Wärmeträgerflüssigkeiten (Teil A) beruhen auf experimentellen Untersuchungen an einer Versuchsanlage sowie auf Simulationen, in denen der Geothermiekreislauf samt Erdwärmesonde und Wärmepumpe gekoppelt-iterativ abgebildet wurde. Es zeigt sich übereinstimmend, dass die untersuchten Fluide Wasser, Ethylenglykol, Kaliumformiat und Kaliumkarbonat im Kurzzeitverhalten in den energetischen Kenndaten (Leistungs- und Arbeitszahlen) nur wenig voneinander abweichen (Experimente: $< \pm 3\%$, Simulationen: $\pm 1,5\%$). Lediglich bei abweichender Strömungsform (laminar anstatt turbulent) – in den Simulationen betrachtet am Beispiel von Propylenglykol – beträgt die Abweichung zu Wasser, dem energetisch besten Fluid, in der Simulation 5% . Die rechnerische Übertragung der Simulationsergebnisse auf das Langzeitverhalten lässt für die verschiedenen untersuchten Wärmeträgerfluide bei gleicher Strömungsform in der Sonde Unterschiede in den Leistungs- und Arbeitszahlen von maximal 5% bzw. bei der erforderlichen Länge einer auf jeweils gleiche minimale Fluidtemperatur ausgelegten Erdwärmesonde von 4% bis maximal ca. 8% erwarten. Erst bei abweichender Strömungsform (laminar/turbulent) treten Unterschiede in der erforderlichen Sondenlänge größer 10% auf.

Die rein fluidbedingten Unterschiede im Betriebsverhalten liegen damit innerhalb der ohnehin vorhandenen Bandbreite bzw. Unsicherheiten, die durch Planung, Ausführung sowie unsichere und variable Randbedingungen vorliegen.

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. Ein Risiko besteht z. B. in einem möglichen unkontrollierten 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“ [UM05].

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, i. d. R. 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 ist derzeit die Verwendung verschiedener 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 ausbreiten. Das Verbundvorhaben GEO-SOLE der Hochschule Biberach und der Universität Karlsruhe trägt zur Klärung der offenen Fragen in diesen beiden Bereichen bei. Die thematische Bearbeitung ist im Verbundprojekt gemäß der folgenden Abbildung aufgeteilt.

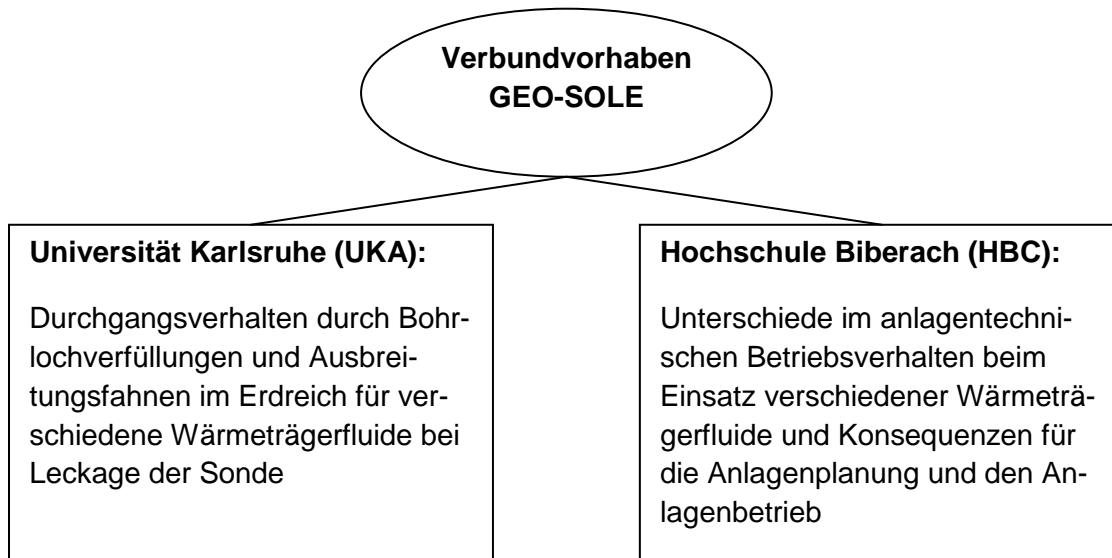


Abb. 1: Aufgaben der Projektpartner im Verbundvorhaben GEO-SOLE

Die in diesem Teilbericht beschriebene anlagentechnische Bewertung der unterschiedlichen Wärmeträgerflüssigkeiten an der Hochschule Biberach erfolgte in vier Arbeitsphasen:

Arbeitsphase I: Recherche und Analyse

In Arbeitsphase I wurden die für eine erdsondengekoppelte Wärmepumpenanlage in Frage kommenden Wärmeträgerfluide recherchiert und aufgrund vorliegender physikalischer Kenngrößen und sich daraus ableitender Größen bewertet. Ziel war die Auswahl der Wärmeträgerflüssigkeiten, die an der Versuchsanlage im Technikum der Hochschule Biberach näher untersucht werden sollten.

Arbeitsphase II: Laboruntersuchungen und Systemtests

In reproduzierbaren Versuchsreihen wurde in dieser Arbeitsphase das Betriebsverhalten der Versuchsanlage für jedes ausgewählte Fluid einzeln untersucht und mit dem der anderen Fluide verglichen.

Ziel war die Feststellung, ob und wie sich der Einsatz unterschiedlicher Wärmeträgerflüssigkeiten auf das Betriebsverhalten der Versuchsanlage auswirkt.

Arbeitsphase III: Modellbildung, Simulation und quantitative Bewertung

Parallel zu den Technikumsversuchen wurde ein Simulationswerkzeug entwickelt, das gekoppelt-iterativ das Betriebsverhalten einer Wärmepumpenanlage mit Erdsonde abbildet. Ergebnis sind vergleichende Simulationsberechnungen zum Betriebsverhalten der im Modell abgebildeten Standardanlage für unterschiedliche Wärmeträgerfluide.

Arbeitsschritt IV: Synthese, Bewertung, Zusammenfassung

Es wurde eine abschließende Bewertung der Ergebnisse aus den Versuchen und den Simulationen vorgenommen und daraus die Auswirkungen unterschiedlicher Wärmeträgerfluide auf die Anlagenplanung und die Betriebsführung abgeleitet.

Frühzeitig wurde damit 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 festgelegt, der eine vergleichende Auswertung der Messergebnisse beim Betrieb der Versuchsanlage mit unterschiedlichen Wärmeträgerfluiden zulässt und zugleich einem realen Anlagenbetrieb in der Praxis möglichst entspricht.

Zur Vereinfachung werden im Text die Frostschutz-Wasser-Gemische größtenteils verkürzt nur mit dem Namen des Frostschutzzusatzes bezeichnet.

1 Recherche und Auswahl der Wärmeträgerflüssigkeiten

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 Vorab-Analyse der Stoffdaten erfolgte auf der Datenbasis des Programmpakets Coolpack der Technischen Universität von Dänemark [Co98] bzw. auf Herstellerangaben und eigenen Routinen aus AP III. Grundlage für den Vergleich stellt dabei ein Frostschutz von -10 °C dar. Zur Analyse der Stoffdaten in hydraulischer und thermodynamischer Hinsicht wird in physikalische Stoffgrößen, abgeleitete physikalische Kenngrößen und abgeleitete technische Kenngrößen unterschieden.

Tab. 2: Bewertungsgrößen zur Vorab-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

Die vergleichende Auswertung der physikalischen Stoffgrößen zeigt, dass Wasser erwartungsgemäß 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.

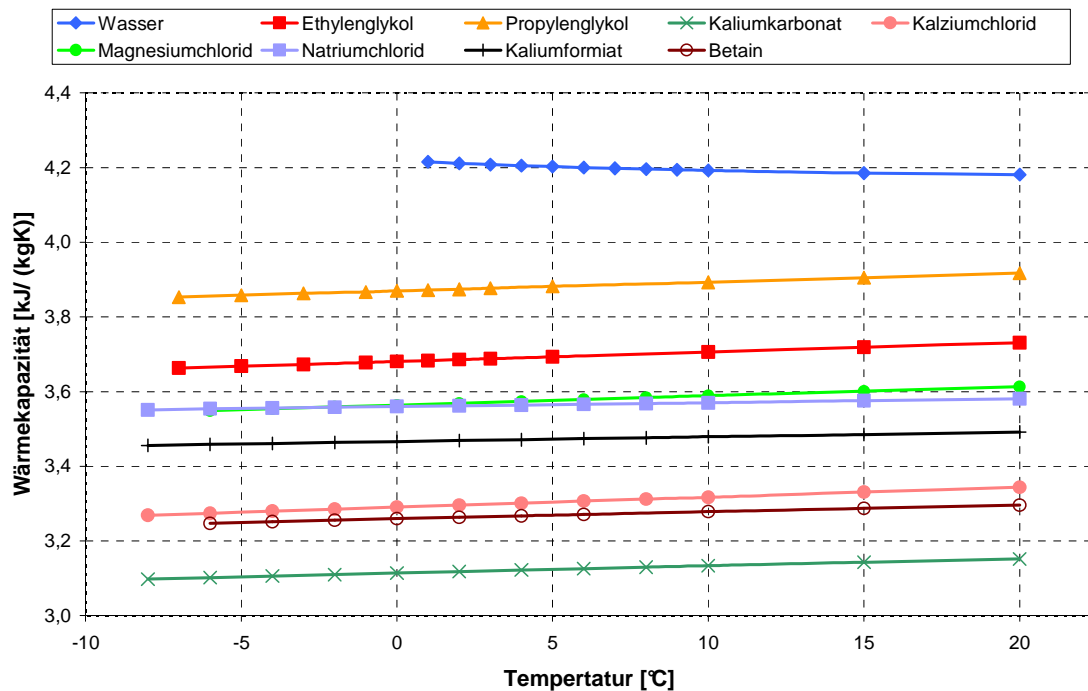


Abb. 2: Spezifische Wärmekapazität verschiedener Wärmeträgerfluide in Abhängigkeit von der Temperatur

Im weiteren Vorgehen stellte sich zunächst die Frage nach einem geeigneten Bewertungsverfahren der Fluideigenschaften anhand der Stoffdaten und Bewertungsgrößen ohne genaue Kenntnis der wechselseitigen Zusammenhänge zwischen diesen Größen beim Betrieb einer Wärmepumpenanlage mit Geothermie-sonde und dem von den Fluideigenschaften abhängigen 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 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"> geringe Dichte hohe Wärmekapazität niedrige kinematische Viskosität hohe Wärmeleitfähigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> hohe volumetrische Wärmekapazität hoher Wärmeübergangskoeffizient 	<ul style="list-style-type: none"> niedriger Druckverlust geringer Bohrlochwiderstand

Die Relativwertbildung erfolgt dabei so, dass sich stets ein Relativwert zu Wasser kleiner eins ergibt. Ist ein niedriger Wert positiv bewertet (z. B. Dichte), wird der Wert von Wasser durch den Wert des betreffenden Fluids geteilt. Ist ein hoher Wert positiv zu bewerten (z. B. Wärmeleitfähigkeit), wird der Wert des Fluids durch den Wert von Wasser dividiert.

Das folgende Diagramm zeigt eine Gegenüberstellung der auf Wasser bezogenen Relativwerte für die physikalischen Stoffgrößen.

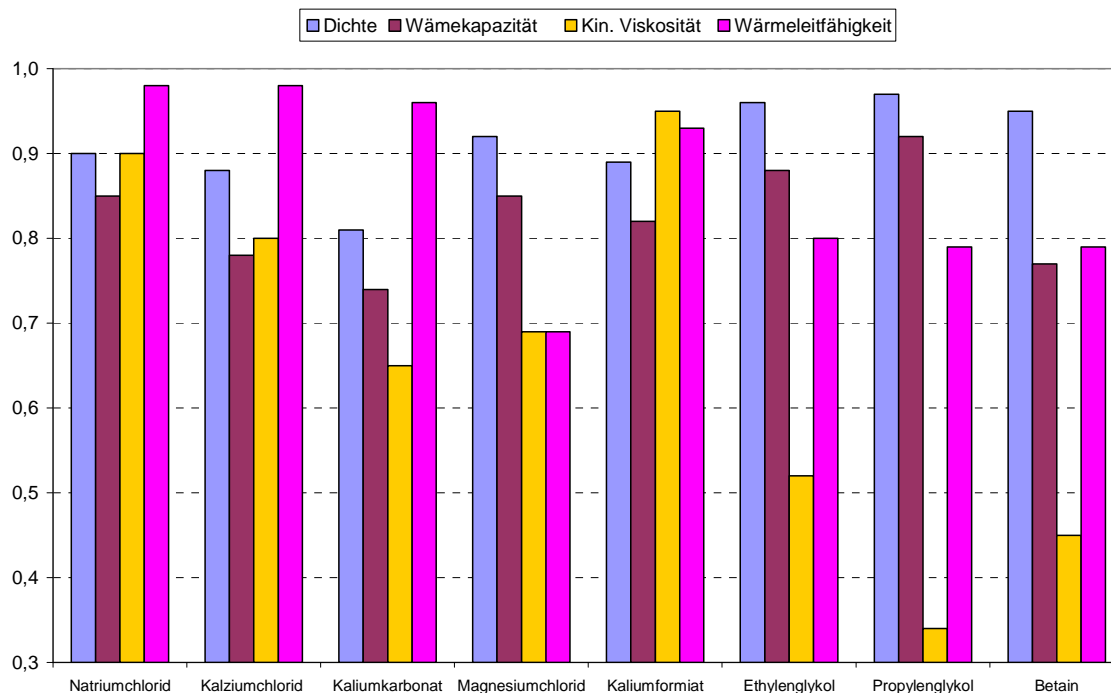


Abb. 3: Vergleichende Gegenüberstellung der auf Wasser bezogenen Relativwerte der physikalischen Stoffgrößen verschiedener Wärmeträgerfluide bei 2 °C

Auf der Grundlage der geschaffenen Datenbasis wurde die Auswahl der Wärmeträgerfluide für die Versuchsphase dann weiter eingeschränkt. Entscheidende Kriterien waren zunächst die Korrosivität und die Verfügbarkeit einsetzbarer Produkte für Wärmepumpenanlagen am Markt. Der Einsatz von Natriumchlorid, Kalziumchlorid und Magnesiumchlorid ist aufgrund der Korrosivität in der Versuchsanlage an der Hochschule Biberach nicht möglich und auch in der Praxis mit den dort zum Einsatz kommenden Materialien kritisch zu sehen.

Im Fall von Ethanol konnte in der Recherchephase zunächst kein in Deutschland liefernder Hersteller eines Ethanol-Wasser-Gemisches für Wärmepumpenanlagen gefunden werden. Im Nachgang wurde dann ein Hersteller mit einem als prinzipiell geeignet erscheinendem Produkt ausfindig gemacht. Ein Einsatz in der hochschuleigenen Versuchsanlage (Technikum) mit begleitend stattfindendem Studienbetrieb wäre aber aufgrund der im Sicherheitsdatenblatt getroffenen Einstufung des Ethanol-Wasser-Gemisches als leicht entzündlich nicht vertretbar gewesen. Ferner ergab eine Anfrage, dass der Hersteller für sein Produkt keine Stoffdaten bereitstellen kann. Das Diagramm aus Abb. 3 stellt sich mit der durch die vorgegebenen Möglichkeiten getroffene Auswahl in Abb. 4 wie folgt dar.

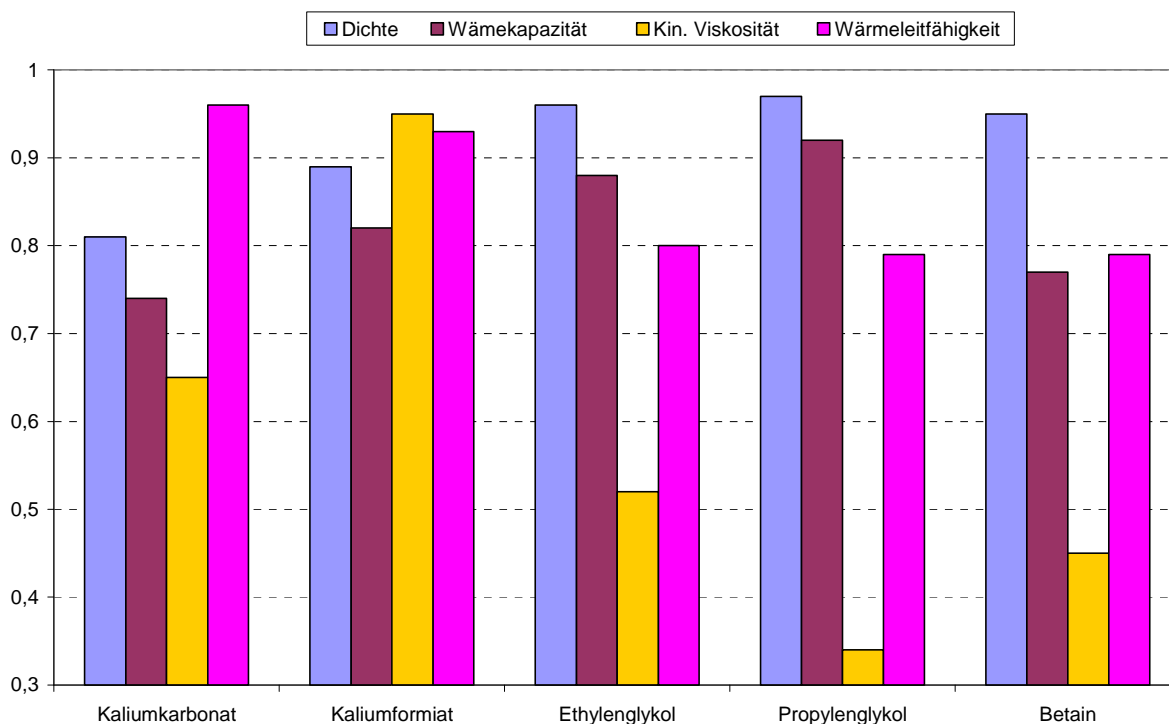


Abb. 4: Vergleichende Gegenüberstellung der auf Wasser bezogenen Relativwerte der physikalischen Stoffgrößen verschiedener Wärmeträgerflüsside (Auswahl) bei 2 °C

Ziel einer weiterführenden Betrachtung, auch unter Einbeziehung von abgeleiteten physikalischen und technischen Kenngrößen, ist eine qualitative Rangfolge dieser verbleibenden Wärmeträgerflüsside.

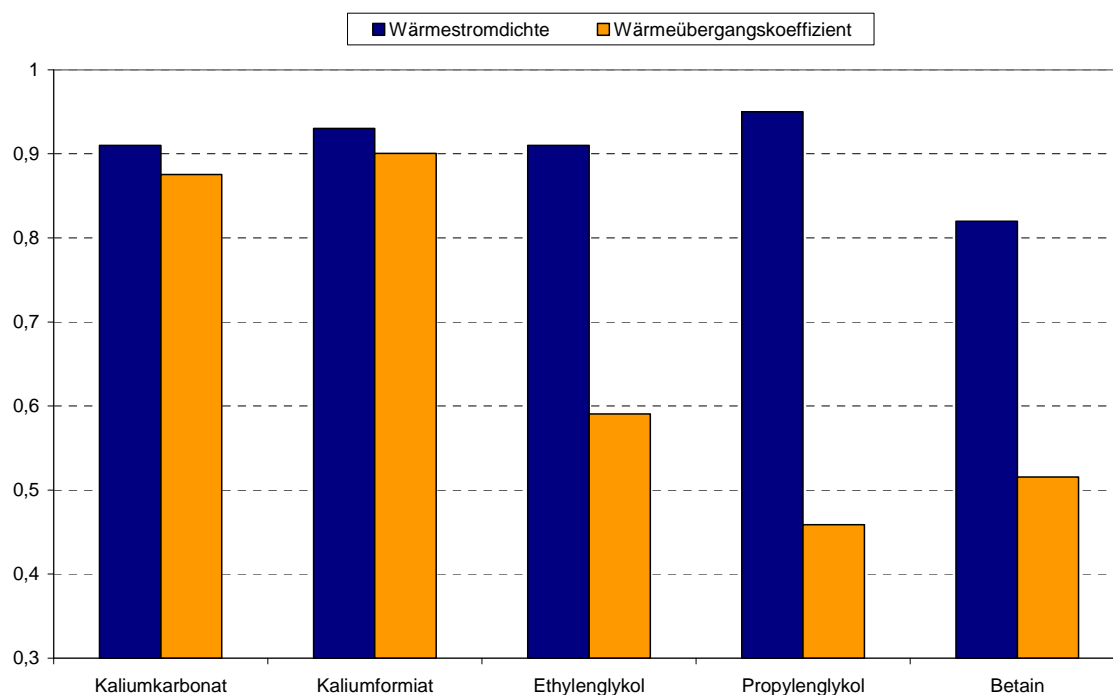


Abb. 5: Vergleichende Gegenüberstellung der auf Wasser bezogenen Relativwerte abgeleiteter physikalischer Kenngrößen verschiedener Wärmeträgerflüsside bei 2 °C

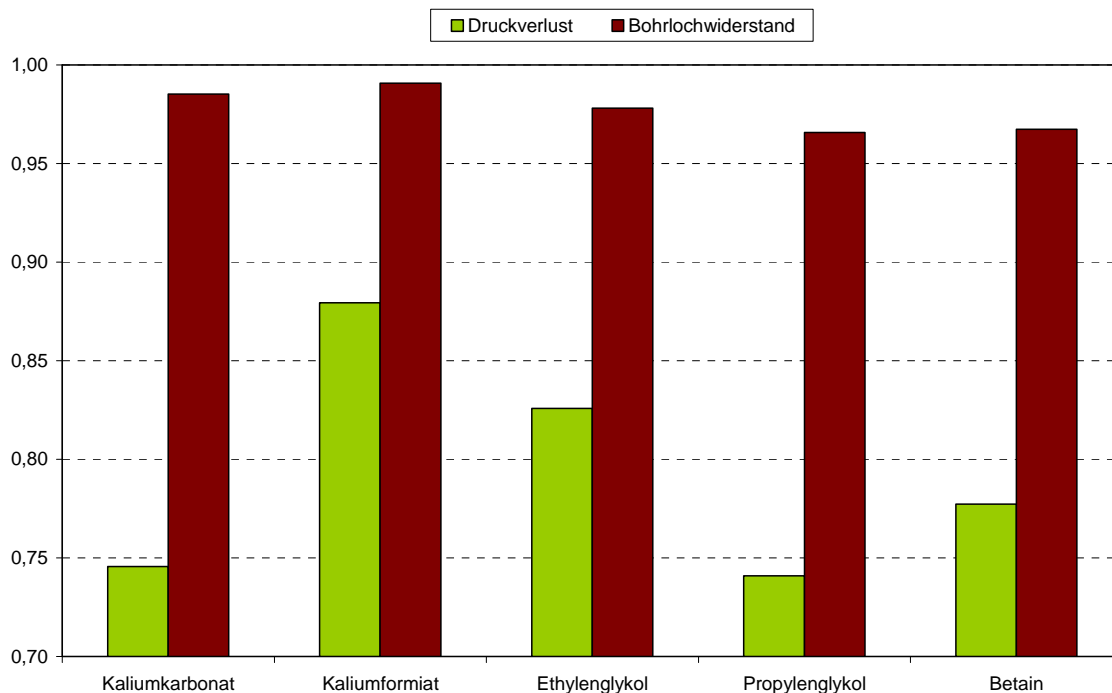


Abb. 6: Vergleichende Gegenüberstellung der auf Wasser bezogenen Relativwerte abgeleiteter technischer Kenngrößen verschiedener Wärmeträgerfluide bei 2 °C

Bei der Bildung der abgeleiteten technischen Kenngrößen wurde bereits die sich im Aufbau befindliche Simulationsumgebung zu AP II herangezogen.

Aus der Bewertung der Fluide mit Hilfe der gebildeten Relativwerte aller betrachteten Stoff- und Kenngrößen geht zunächst 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 (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. Betain wurde zurückgestellt, weil die Ergebnisse laufender Untersuchungen zu möglichen Abbauprodukten im Untergrund noch nicht vorlagen [Ha06]. Propylenglykol ist aufgrund seiner ungünstigeren Kenngrößen keine wirkliche Alternative zu Ethylenglykol.

Im Vorfeld der Technikumsversuche wurden in Arbeitsphase I volumenstromabhängige Druckverluste mit den Stoffwerten der einzelnen Wärmeträgerflüssigkeiten berechnet. Den Berechnungen lag das hydraulische Anlagensystem der Hochschule mit einer Doppel-U-Sonde der Länge 99 m zugrunde, wie es in den späteren Versuchen verwendet wurde.

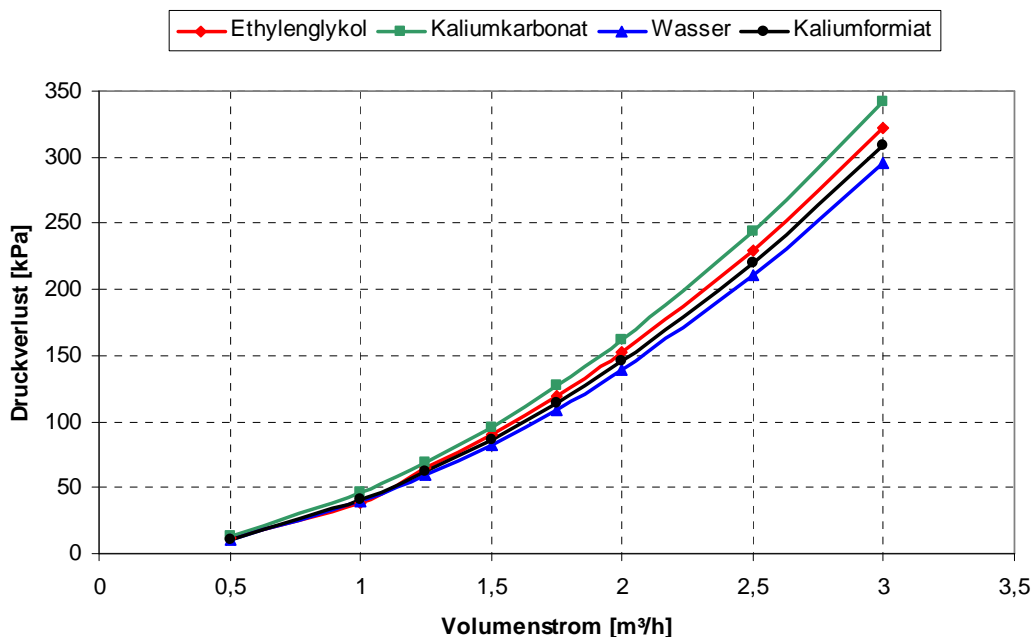


Abb. 7: Vergleichende volumenstromabhängige Druckverlustberechnungen für die Versuchsanlage bei einer Fluidtemperatur von 2 °C

Aus den Druckverlustberechnungen leitet sich über die Gleichung

$$P_{el,Pumpe} = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p}{\eta_{Pumpe}} \quad (1)$$

mit

$P_{el,Pumpe}$: elektrische Pumpenleistung [W]

\dot{V} : Volumenstrom [m^3/s]

Δp : Druckverlust [Pa]

η_{Pumpe} : Pumpenwirkungsgrad [-]

ein von Kaliumkarbonat über Ethylenglykol und Kaliumformiat zu Wasser hin abnehmender elektrischer Energieaufwand zur Förderung im Geothermiekreislauf ab.

In Abb. 8 ist der berechnete Druckverlust über den Wärmekapazitätsstrom

$$\dot{W} = \rho \cdot c_p \cdot \dot{V} \quad (2)$$

mit

\dot{W} : Wärmekapazitätsstrom [W/K]

ρ : Dichte [kg/m^3]

c_p : spezifische Wärmekapazität [J/(kg·K)]

\dot{V} : Volumenstrom [m^3/s]

aufgetragen.

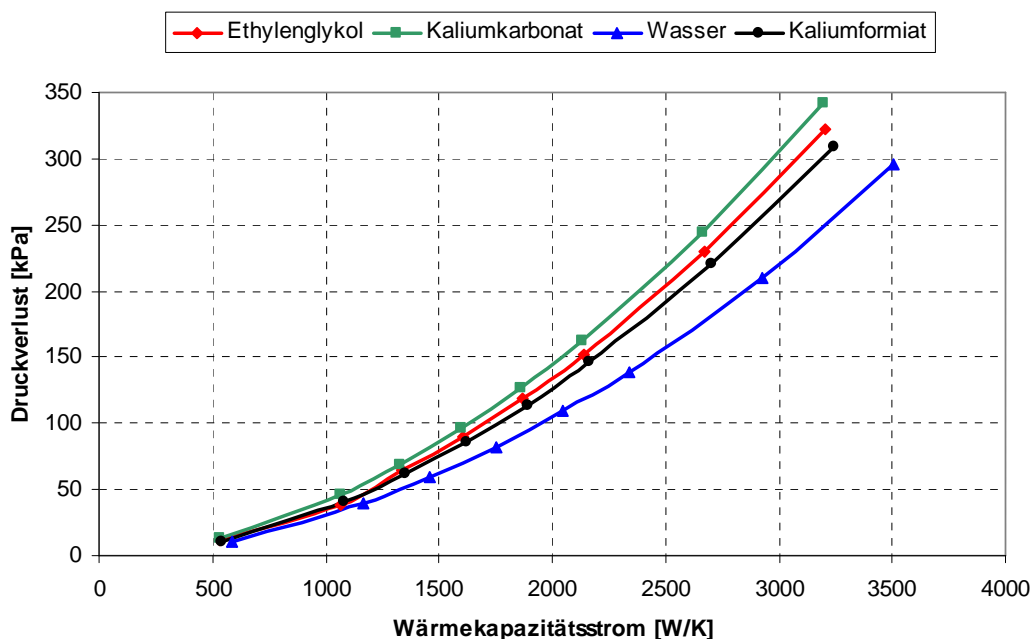


Abb. 8: Vergleichende Druckverlustberechnungen für die Versuchsanlage aufgetragen über den Wärmekapazitätsstrom bei einer Fluidtemperatur von 2 °C

Aus dieser Betrachtung ergibt sich, dass sich mit Wasser pro Kelvin Spreizung im Geothermiekreis bei gleichem Druckverlust mit Abstand die größte Wärmemenge transportieren lässt. Die Kurven für Ethylenglykol, Kaliumformiat und Kaliumkarbonat liegen zunächst eng beieinander und streben erst mit zunehmendem Wärmekapazitätsstrom auseinander. Dies liegt daran, dass der Unterschied der volumetrischen Wärmekapazität der drei Fluide relativ gering ist und erst bei zunehmendem Volumenstrom zum Tragen kommt. Zieht man als Beurteilungskriterium die Vorgabe heran, dass pro Kelvin Spreizung im Geothermiekreis eine möglichst große Wärmemenge bei gleichem Druckverlust transportieren werden soll, so ergibt sich unter den ausgewählten Fluiden die folgende Rangfolge:

1. Wasser
2. Kaliumformiat
3. Ethylenglykol
4. Kaliumkarbonat

Eine Weiterführung dieser Betrachtungen ist erst mit Kenntnis des Gesamtsystems inklusive der Wechselwirkung zwischen der Entzugsleistung der Wärmepumpe und den sich in der Erdsonde einstellenden Temperaturen, deren Spreizung sowie dem sich temperaturabhängig einstellenden Volumenstrom möglich.

2 Versuchsanlage und Messtechnik

2.1 Versuchsanlage

Für die vergleichenden Messungen im realitätsnahen Technikumsbetrieb verfügt die Hochschule Biberach über eine erdgekoppelte Wärmepumpenanlage mit zwei Erdwärmesonden, einem Bodenabsorber und verschiedenen weiteren zu- und abschaltbaren Wärmequellen und -senken, die ebenfalls Versuchszwecken dienen. Alle Komponenten befinden sich in, unter bzw. neben dem Gebäude G der Hochschule, dem Technikum Gebäudeklimatik.

Die Wärmepumpenanlage ist über einen zusätzlichen Zwischenkreis zwischen Heiz- und Kühlbetrieb hydraulisch umschaltbar. Die zugehörige Hydraulik ist in einem Hydraulikmodul zusammengefasst und zusammen mit der Wärmepumpe/Kältemaschine (Kältemittel R 407C) in ein Aggregat, die so genannte geothermische Energiezentrale (Fabrikat: GEOZENT[®]), integriert [Nüß04].

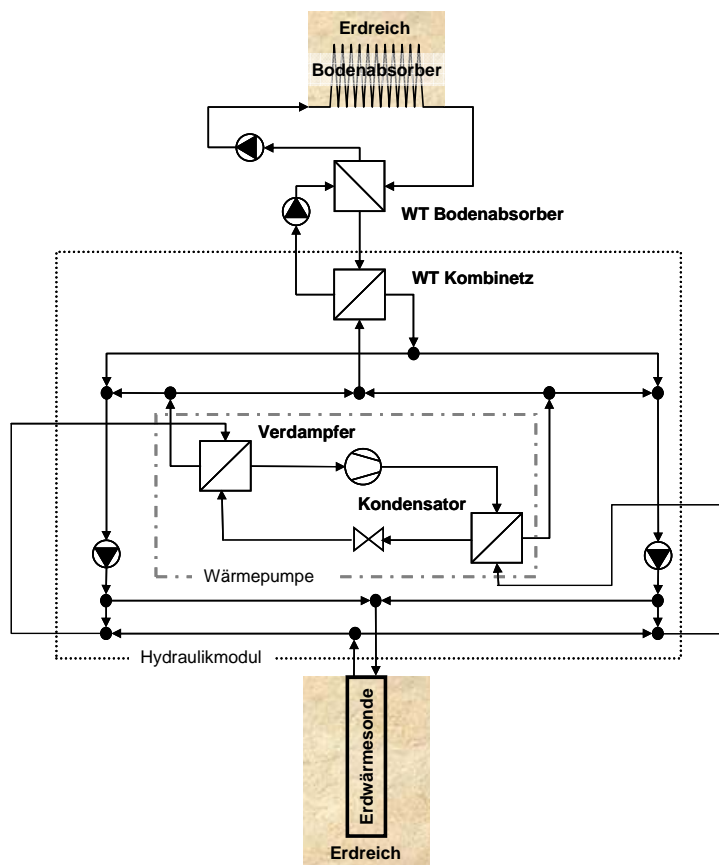


Abb. 9: Schema der Versuchsanlage mit den verwendeten Wärmequellen und -senken



Abb. 10: Geothermische Energiezentrale GEOZENT®

Die geothermische Energiezentrale verfügt nach außen hin lediglich über vier Rohranschlüsse (jeweils Vor- und Rücklauf zur Geothermie bzw. zum Gebäude). Die Umschaltung zwischen den Betriebsarten Heizung (Wärmepumpe, geothermieseitiger Wärmeentzug), Maschinenkühlung (Kältemaschine) und direkte geothermische Kühlung ohne Kältemaschine (geothermieseitiger Wärmeeintrag) erfolgt über die werkseitig im Hydraulikmodul zusammengefassten Umschalt- und Regelventile. Die Umschaltung zwischen den Betriebsarten kann sowohl automatisch über die Steuerung/Regelung bzw. auf verbraucherseitige Anforderung hin erfolgen als auch manuell gewählt werden.

Das Aggregat ist im 1. Obergeschoss des Technikumsgebäudes untergebracht und an eine eigens konzipierte Verteileranlage, die sich in einem Technikraum im Erdgeschoss befindet, angebunden. Über die Verteileranlage sind alle Geothermie- und Verbraucherkreise separat ansteuer- und regelbar, so dass eine Vielzahl von Betriebsarten möglich ist.



Abb. 11: Versuchs- und Demonstrationsgebäude Technikum G

Für die Versuchsdurchführung im Projekt GEO-SOLE wurden nur die beiden Erdwärmesonden und der sich unter dem Gebäude befindliche Bodenabsorber eingesetzt. Die beiden vertikalen Doppel-U-Erdwärmesonden reichen je 99 m in die Tiefe und haben einen Abstand von ca. 5 m zueinander [Bur02]. Eine der beiden Sonden ist mit Temperaturmessfühlern entlang der Sonde in unterschiedlichen Tiefen ausgestattet. Der horizontale Bodenabsorber direkt unter dem nicht unterkellerten Gebäude hat eine Fläche von ca. 358 m².

2.2 Automatisierung, Messtechnik und Datenerfassung

Zur Steuerung und Regelung der Versuchsanlage wurden für Lehrzwecke und frühere Forschungsprojekte (z. B. [DBU04]) vom Labor für Gebäudeautomation der Hochschule speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) für die Hydraulikanlage sowie die Geothermiezentrale konzipiert und aufgebaut. Diese beiden Unterstationen sind über eine Wizcon-Gebäudeleittechnik (GLT) miteinander, sowie mit weiteren Unterstationen im Gebäude verknüpft.

Sämtliche Messwerte und Stellsignale werden kontinuierlich auf einem eigenen Rechner für die GLT archiviert. Alle Komponenten der Automatisierungstechnik einschließlich der angeschlossenen Messfühler sind in handelsüblicher Qualität ausgeführt, um ein dem üblichen praktischen Einsatz weitgehend entsprechendes Betriebsverhalten der Anlage zu erhalten.

Für die wissenschaftliche Messdatenerfassung sind neben den Messfühlern für die GLT zur Anlagenautomatisierung Messfühler mit einer den hier gestellten Anforderungen gerecht werdenden höheren Messgenauigkeit installiert. Zur Versuchsauswertung im Projekt GEO-SOLE wurden die Daten aus der genaueren wissenschaftlichen Messtechnik herangezogen. Die folgende Abb. 12 gibt einen Überblick über die gesamte im Technikum eingerichtete Messdatenerfassung.

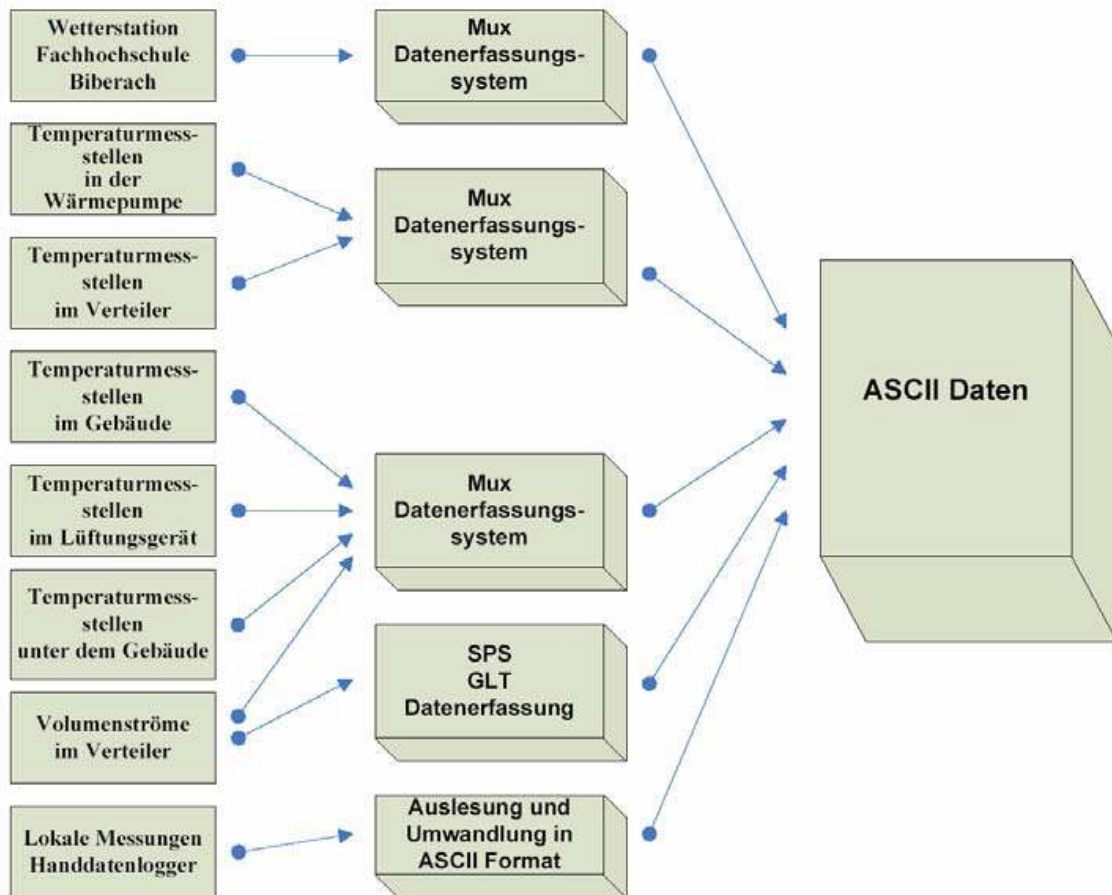


Abb. 12: Übersichtsschema zur Messdatenerfassung im Technikum und an der Versuchsanlage [DBU04]

Neben der automatisierten Messdatenerfassung der permanent installierten Fühler wurden zusätzliche temporäre, lokale Messungen von Druckverlusten und elektrischen Leistungsaufnahmen durchgeführt und mit Handdatenloggern aufgezeichnet.

3 Experimentelle Untersuchungen

3.1 Konzeption der Versuche

Erste Aufgabe zu Beginn der Arbeitsphase II war die Ausarbeitung eines standardisierten Versuchsablaufs, der einem realen Wärmepumpenbetrieb 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, schieden 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 betriebene Wärmepumpen eingesetzt, die taktend über einen bestimmten Zeitraum - bei der Gebäudebeheizung im Volllastbetrieb 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 wurde als Standardversuch abgeleitet, die Wärmepumpe mit einer Erdwärmesonde der Versuchsanlage bei maximaler Leistung im Heizbetrieb 15 Stunden ununterbrochen zu betreiben.

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. Als Wärmequelle für die Wärmepumpe wurde aus den beiden Sonden die Sonde mit Temperaturmessfühlern in unterschiedlichen Tiefen ausgewählt. Die Heizwärmeabgabe erfolgte in den unter dem Technikumsgebäude liegenden Bodenabsorber [UM05].

Um Versuche im Wochenrhythmus durchführen zu können, ist eine schnelle Regeneration der Versuchssonde und des Bodenabsorbers auf den Ausgangszustand erforderlich, damit zu Beginn des nächsten Versuches wieder dieselben Randbedingungen, d. h. Erdreichtemperaturen, vorliegen. Deshalb wurde im Anschluss an jeden Versuch der Versuchssonde genau die Wärmemenge wieder zugeführt, die ihr während des Versuchs entzogen wurde. Als Wärmequelle diente dabei der Bodenabsorber.

Aufgrund der jeweils der Wärmepumpe zugeführten elektrischen Energie wird dabei die Wärmebilanz am Bodenabsorber jedoch nicht vollständig ausgeglichen. Dies erfolgte durch die Nutzung der zweiten Erdwärmesonde des Technikums als zusätzliche Wärmesenke. Die folgende Abb. 13 zeigt beispielhaft an der Versuchssonde gemessene Temperaturen während eines solchen Versuches mit nachfolgendem Wärmemengenausgleich.

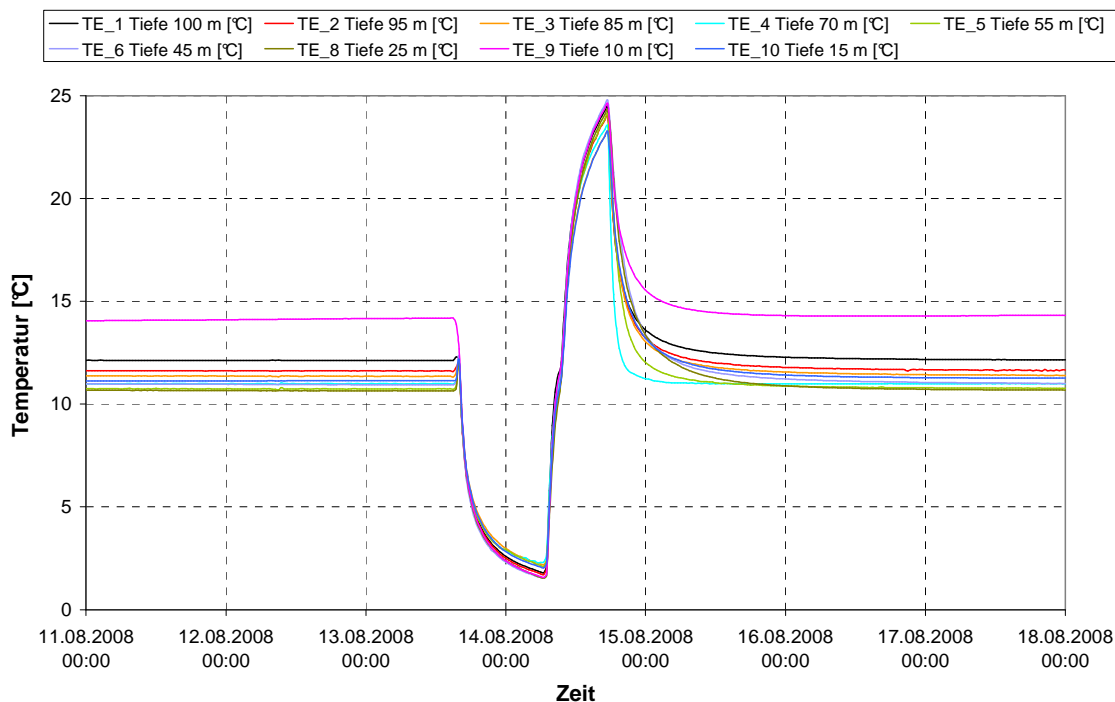


Abb. 13: Verlauf der in unterschiedlichen Tiefen außen an einem Sondenrohr der Versuchssonde gemessenen Temperaturen während eines Versuchs mit anschließendem Wärmemengenausgleich

3.2 Verwendete Anlageneinstellungen im Versuchsablauf

Die geothermische Energiezentrale GEOZENT® ist mit zwei Verdichtern ausgestattet. In den Standardversuchen wurde ein Betrieb mit beiden Verdichtern gewählt, um die Versuchssonde mit der größtmöglichen Entzugsleistung zu beaufschlagen. Die gemäß dem Versuchsablauf aufeinanderfolgenden Betriebsarten Heizen, freie Kühlung und aktive Kühlung wurden manuell gewählt. Ein ungewolltes Takten der Wärmepumpe im Heizbetrieb, das zu einer Unterbrechung der Entzugsleistung an der Erdwärmesonde geführt hätte, wurde durch eine angepasste Parametrisierung über die GLT verhindert. Im Folgenden sind die hydraulischen Systeme der über das Hydraulikmodul der Versuchsanlage im Versuchsablauf eingestellten Betriebsarten erklärt.

Heizbetrieb

Im Heizbetrieb wird der Versuchssonde Wärme entzogen und über den Verdampfer an den Kältekreislauf der Wärmepumpe abgegeben. Die vom Kondensator der Wärmepumpe abgegebene Heizenergie wird mittels eines Zwischenkreislaufs über einen Wärmetauscher an einen Verteilkreis weitergeführt, der als Kombinetz den jeweils ausgewählten Verbraucher mit Heizenergie versorgt. Bei den Versuchen diente im Heizbetrieb der Bodenabsorber unter dem Technikumsgebäude als Wärmesenke. Die Heizenergieübergabe vom Kombinetz an den Hydraulikkreis des Bodenabsorbers erfolgt über einen weiteren Wärmetauscher in der Verteileranlage. Die Abb. 14 stellt das hydraulische System der Versuchsanlage im Heizbetrieb schematisch dar.

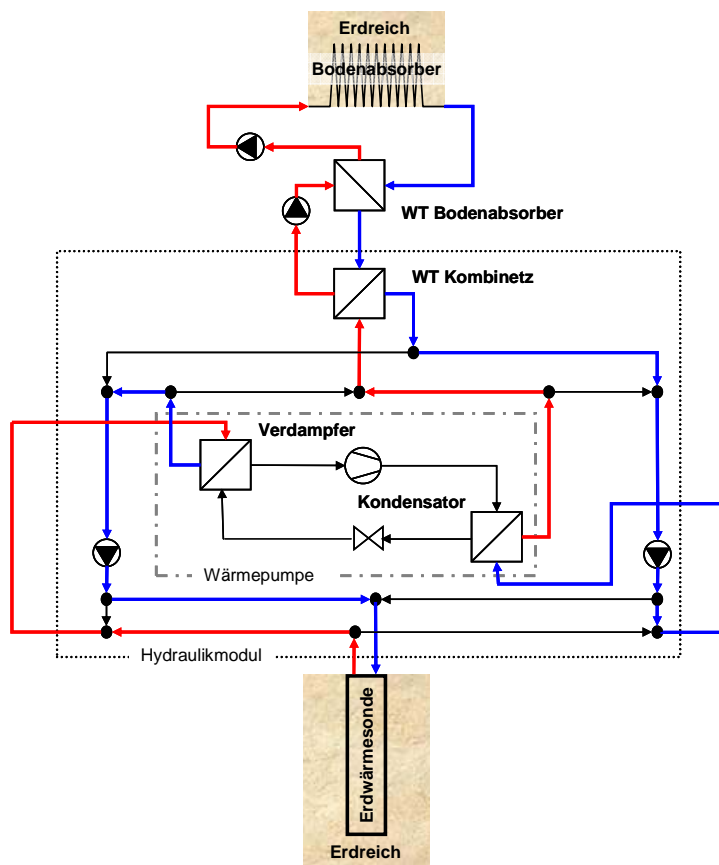


Abb. 14: Schema der Versuchsanlage für den Heizbetrieb

Somit ergeben sich beginnend von der Sonde als Wärmequelle im Heizbetrieb die vier Hydraulikkreise

- Geothermiekreis von der Sonde zum Verdampfer,
- Zwischenkreis vom Kondensator zum Wärmetauscher Kombinetz,
- Verteilkreis vom Wärmetauscher Kombinetz zum Wärmetauscher Bodenabsorber,
- Hydraulikkreis des Bodenabsorbers.

Das jeweilige Wärmeträgerfluid befindet sich dabei im Geothermiekreis, im Zwischenkreis und im Hydraulikkreis des Bodenabsorbers. Der Verteilkreis des Kombinetzes ist mit Wasser gefüllt.

Freie bzw. direkte Kühlung

In der Betriebsweise der freien bzw. direkten Kühlung erfolgte eine erste Wärmerückführung in die Erdwärmesonde ohne Einsatz der Wärmepumpe mit dem Bodenabsorber als Wärmequelle. Gemäß dem nachfolgenden Schema ergeben sich bei freier Kühlung beginnend vom Bodenabsorber als Wärmequelle die drei Hydraulikkreise

- Hydraulikkreis des Bodenabsorbers,
- Verteilkreis vom Wärmetauscher Bodenabsorber zum Wärmetauscher Kombinetz,
- Geothermiekreis vom Wärmetauscher Kombinetz zur Sonde.

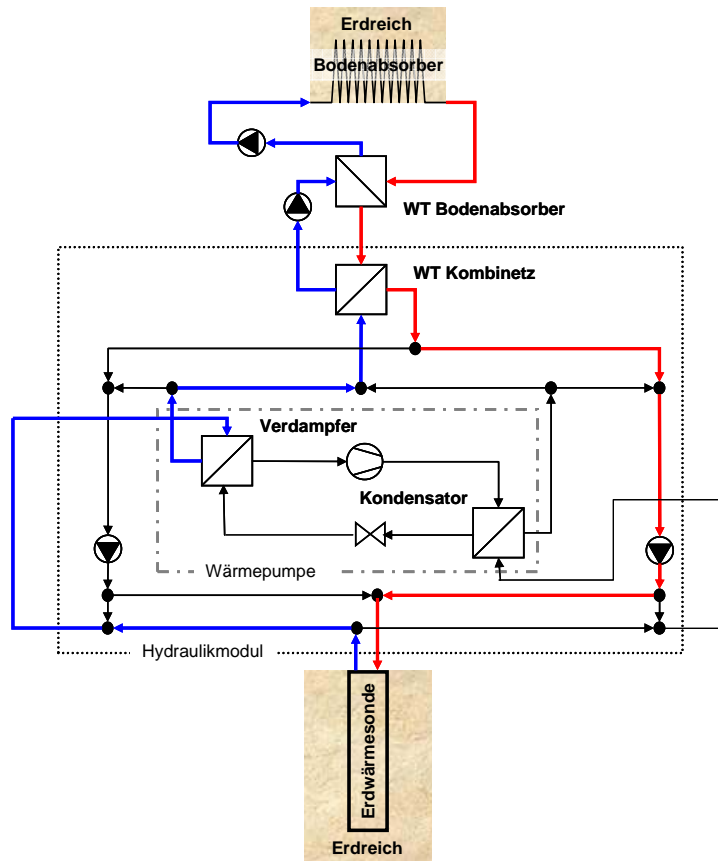


Abb. 15: Schema der Versuchsanlage im Betrieb der freien bzw. direkten Kühlung

Das jeweilige Wärmeträgerfluid befindet sich im Geothermiekreis und im Hydraulikkreis des Bodenabsorbers.

Die freie Kühlung wurde im Standardversuch zwischen den Heizbetrieb und die aktive Kühlung mit Wärmepumpe geschaltet, da ein direktes Umschalten des Hydraulikmoduls vom Heizbetrieb in die aktive Kühlung vor dem erneuten Start der Wärmepumpe zu einer Temperaturumkehr zwischen Verdampfer und Kondensator führt (vgl. Abb. 14 und Abb. 16). Die sich durch die direkte Umschaltung ergebende Temperaturdifferenz zwischen dem Verdampfer und dem Kondensator ist dadurch zu Beginn gegenläufig zur Temperaturdifferenz des Wärmepumpenbetriebs. Dies führte zu einer Niederdruckstörung im Kältekreis der Wärmepumpe mit einer Abschaltung der Anlage.

Aktive Kühlung

Der eigentliche thermische Ausgleich der Versuchssonde erfolgte im Anschluss an die freie Kühlung durch die aktive Kühlung mit Wärmepumpe. Die dem Bodenabsorber entzogene Wärme wird über den Verteilkreis zwischen dem Wärmetauscher am Bodenabsorber und dem Wärmetauscher Kombinetz dem Verdampfer zugeführt. Die von der Wärmepumpe am Kondensator abgegebene Wärmeenergie wird über den Geothermiekreis in die Versuchssonde zurückgeführt.

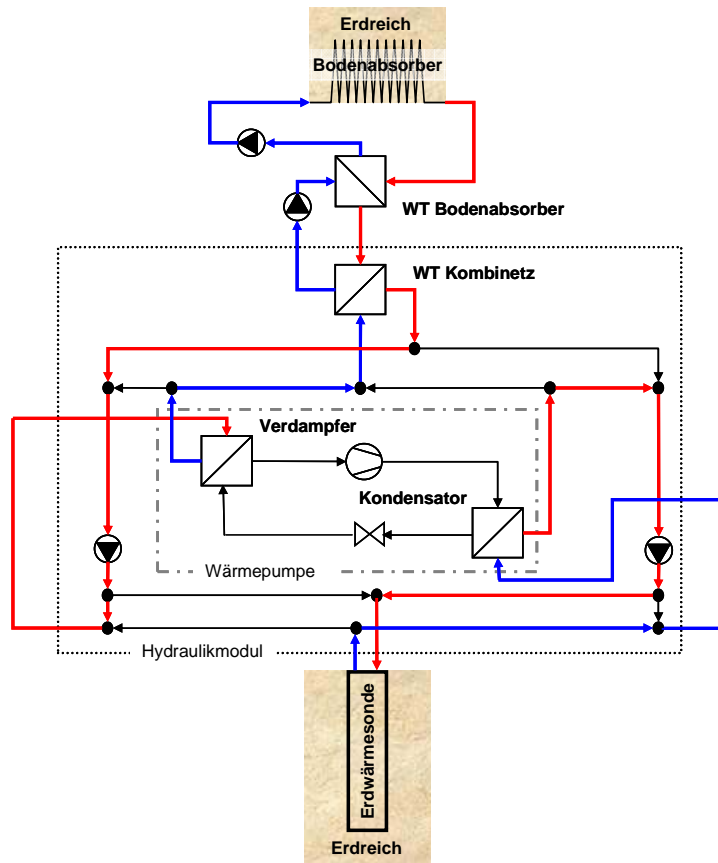


Abb. 16: Schema der Versuchsanlage für den Betrieb aktive Kühlung

Beginnend vom Bodenabsorber als Wärmequelle ergeben sich die vier Hydraulikkreise

- Hydraulikkreis des Bodenabsorbers,
- Verteilkreis vom Wärmetauscher Bodenabsorber zum Wärmetauscher Kombinetz,
- Zwischenkreis vom Wärmetauscher Kombinetz zum Verdampfer,
- Geothermiekreis vom Kondensator zur Versuchssonde.

Das jeweilige Wärmeträgerfluid befindet sich im Hydraulikkreis des Bodenabsorbers, im Zwischenkreis und im Geothermiekreis.

Nach dem erfolgten Wärmemengenausgleich an der Versuchssonde wurde der Bodenabsorber ebenfalls bis zum Ausgleich weiter rückgekühlt. Dafür diente die zweite Erdwärmesonde der Versuchsanlage als Wärmesenke.

3.3 Übersicht über die durchgeführten Versuche

Im Anschluss an Vorversuche mit Ethylenglykol zur Ausarbeitung und zum Test des beschriebenen Versuchsablaufes wurde in der eigentlichen Versuchsphase im zur Verfügung stehenden Zeitrahmen eine möglichst große Anzahl von Vergleichsversuchen durchgeführt. Hierbei wurden mit jedem Fluid mehrere Versuche mit unterschiedlichen Volumenströmen im Geothermiekreis gefahren. Einen Überblick über die insgesamt durchgeführten Versuche gibt die folgende Tabelle.

Tab. 5: Aufstellung der durchgeführten Versuche

Nr.	Datum	Versuchsbezeichnung	\dot{V} [m³/h]	
1.	25.06.2008	Ethylenglykol 080625 43 Hz	2,47	Vorversuch 6h, zwei Verdichter
2.	08.07.2008	Ethylenglykol 080708 K	-	Vorversuch Kühlen, zwei Verdichter
3.	09.07.2008	Ethylenglykol 080709 37 Hz	2,07	Vorversuch 12h, zwei Verdichter
4.	16.07.2008	Ethylenglykol 080716 50 Hz	2,79	Standardversuch 15h, zwei Verdichter
5.	23.07.2008	Ethylenglykol 080723 50 Hz	2,78	Standardversuch 15h, zwei Verdichter
6.	06.08.2008	Ethylenglykol 080806 43 Hz	2,47	Standardversuch 15h, zwei Verdichter
7.	13.08.2008	Ethylenglykol 080813 37 Hz	2,08	Standardversuch 15h, zwei Verdichter
8.	19.08.2008	Ethylenglykol 080819 43 Hz	2,47	Langzeitversuch 39 h, zwei Verdichter
9.	26.08.2008	Ethylenglykol 080826 50 Hz	2,80	Standardversuch 15h, zwei Verdichter
10.	02.09.2008	Ethylenglykol 080902 43 Hz	2,45	Standardversuch 15h, zwei Verdichter
11.	16.09.2008	Ethylenglykol 080916 37 Hz	2,07	Standardversuch 15h, zwei Verdichter
12.	07.10.2008	Ethylenglykol 081007 37 Hz	2,07	Standardversuch 15h, zwei Verdichter
13.	14.10.2008	Ethylenglykol 081014 50 Hz	2,80	Standardversuch 15h, zwei Verdichter
14.	28.10.2008	Kaliumformiat 081028 50 Hz	2,84	Standardversuch 15h, zwei Verdichter
15.	04.11.2008	Kaliumformiat 081104 37 Hz	2,13	Standardversuch 15h, zwei Verdichter
16.	11.11.2008	Kaliumformiat 081111 43 Hz	2,47	Standardversuch 15h, zwei Verdichter
17.	18.11.2008	Kaliumformiat 081118 50 Hz	2,79	Standardversuch 15h, zwei Verdichter
18.	25.11.2008	Kaliumformiat 081125 43 Hz	2,50	Standardversuch 15h, zwei Verdichter
19.	02.12.2008	Kaliumformiat 081202 37 Hz	2,13	Standardversuch 15h, zwei Verdichter
20.	10.02.2009	Kaliumformiat 090210 37 Hz	2,14	Standardversuch 15h, zwei Verdichter
21.	17.02.2009	Kaliumformiat 090217 43 Hz	2,48	Langzeitversuch 39 h, zwei Verdichter
22.	12.03.2009	Kaliumformiat 090312 L	0,44	laminar durch Drosselung, ein Verdichter
23.	18.03.2009	Kaliumformiat 090318 L	0,48	laminar durch Drosselung, zwei Verdichter
24.	31.03.2009	Kaliumkarbonat 090331 37 Hz	2,08	Standardversuch 15h, zwei Verdichter
25.	07.04.2009	Kaliumkarbonat 090407 50 Hz	2,76	Standardversuch 15h, zwei Verdichter
26.	15.04.2009	Kaliumkarbonat 090415 L	0,52	laminar durch Drosselung, zwei Verdichter
27.	21.04.2009	Kaliumkarbonat 090421 43 Hz	2,45	Standardversuch 15h, zwei Verdichter
28.	28.04.2009	Kaliumkarbonat 090428 37 Hz	2,08	Standardversuch 15h, zwei Verdichter
29.	12.05.2009	Kaliumkarbonat 090512 37 Hz	2,09	Standardversuch 15h, zwei Verdichter
30.	18.05.2009	Kaliumkarbonat 090518 50 Hz	2,77	Standardversuch 15h, zwei Verdichter
31.	26.05.2009	Kaliumkarbonat 090526 50 Hz	2,76	Standardversuch 15h, zwei Verdichter
32.	24.06.2009	Kaliumkarbonat 090624 L	-	Fehlversuch, zwei Verdichter
33.	30.06.2009	Kaliumkarbonat 090630 L	0,48	laminar durch Drosselung, zwei Verdichter
34.	05.08.2009	Wasser 090805 50 Hz	2,96	eine Sonde ca. 8 h, zwei Verdichter
35.	11.08.2009	Wasser 090811 37 Hz	2,37	1,5 Sonden, zwei Verdichter
36.	18.08.2009	Wasser 090818 37 Hz	2,44	beide Sonden, zwei Verdichter
37.	25.08.2009	Wasser 090825 50 Hz	2,76	eine Sonde ca. 8 h, zwei Verdichter
38.	22.09.2009	Wasser 090922 L	0,91	laminar durch Drosselung, zwei Sonden, zwei Verdichter

Neben den Versuchen mit Heizbetrieb (Wärmeentzug aus dem Erdreich) wurde mit jedem Wärmeträgerfluid jeweils mindestens ein Thermal Response Test (TRT) an der Erdwärmesonde durchgeführt (vgl. Tab. 6).

Tab. 6: Aufstellung der durchgeführten Thermal Response Tests

Nr.	Datum	Wärmeträgerfluid
1.	05.05.2008 - 13.05.2008	Ethylenglykol
2.	19.01.2009 - 24.01.2009	Kaliumformiat
3.	04.03.2009 - 10.03.2009	Kaliumformiat
4.	12.06.2009 - 08.06.2009	Kaliumkarbonat
5.	02.10.2009 - 09.10.2009	Wasser

Als Vertreter der Frostschutz-Wasser-Gemische mit Ethylenglykol, Kaliumformiat und Kaliumkarbonat kamen in der Versuchsanlage die in der folgenden Tabelle 7 aufgeführten Produkte zum Einsatz.

Tab. 7: Aufstellung der in den Versuchen eingesetzten Frostschutz-Wasser-Gemische

Nr.	Frostschutz-Wasser-Gemisch	Produkt	Hersteller/Lieferant
1.	Monoethylenglykol 23 %	keine Bezeichnung	CSC Jäklechemie GmbH & Co KG
2.	Kaliumformiatfertigmischung	Tyfoxit F15	Tyforop Chemie GmbH
3.	Kaliumkarbonatfertigmischung	Karbosol W	Pro Kühlsole GmbH

Der Frostschutz der Gemische lag produktabhängig zwischen ca. -10 °C bis ca. -16 °C.

3.4 Hindernisse und Störungen im Versuchsablauf

Ein erste Schwierigkeit war in der Ausarbeitung einer geeigneten Betriebsführung für die Versuchsanlage gegeben, die eine störungsfreie Abfolge der Versuchsphasen mit Heizbetrieb und Rückkühlung der Versuchssonde und des Bodenabsorbers für den Temperaturengleich ermöglicht, siehe Abschnitt 3.2. Bis zur abschließenden Ausarbeitung des Versuchsablaufs für den Standardversuch waren aufgrund anfänglich häufiger Betriebsstörungen im Wärmepumpenbetrieb zusätzliche Versuchsläufe erforderlich.

Bei den Druckverlustmessungen wurde festgestellt, dass beim Anschluss mehrerer Druckmesssensoren an ein Anzeige- und Aufzeichnungsgerät eine wechselseitige Beeinflussung der Messwerte erfolgte. Als Ursache wurde eine unzureichende galvanische Trennung der einzelnen Messkreise im Anzeige- und Aufzeichnungsgerät ausgemacht. In der Messanordnung wurde zur Fehlervermeidung dazu übergegangen für jeden Druckmesssensor jeweils ein eigenes Anzeige- und Aufzeichnungsgerät zu verwenden. Der Fehler wurde erst bei Versuchen mit Kaliumformiat auffällig, so dass auch erst beginnend bei diesen Versuchen die angepasste Messanordnung umgesetzt werden konnte.

Beim Einsatz von Kaliumformiat und dann verstärkt auch bei Kaliumkarbonat wurden an Messstellen und Anschlussstellen, an denen in geringem Umfang Wärmeträgerfluid austrat, nachhaltige Verfärbungen an Buntmetallbauteilen festgestellt, die auf das korrosive Verhalten hindeuten. Hinsichtlich eines Defekts an einem Drei-Wege-Ventil im Hydraulikkreis der Versuchsanlage konnte Korro-

sion als eine mögliche Ursache für den Defekt nicht abschließend ausgeschlossen werden. Im Rahmen der Reparaturarbeiten kam es dann durch einen Lötfehler seitens der ausführenden Firma zu einem Leckageschaden im Technikumsgebäude. Der Austritt größerer Mengen der Kaliumformiatlösung verursachte Schäden in der Versuchshalle im 1. Obergeschoss und den darunter liegenden Räumen im Erdgeschoss. Eine Versuchsunterbrechung war die Folge.

Unstimmigkeiten bei der Auswertung von Versuchen mit Kaliumformiat hinsichtlich der aufgestellten Leistungs- und Energiebilanzen erforderten vorübergehend ein Aussetzen der Versuche bis zu einer abschließenden Klärung. Festgestellt wurden als Ursache nicht hinreichende bekannte Stoffdaten, siehe Abschnitt 3.5.1.

Neben einer dreimonatigen Projektverlängerung aufgrund von Verzögerungen bei Projektstart erforderten die aufgetretenen Hindernisse und Störungen im Versuchsablauf eine weitere kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit um einen Monat.

3.5 Versuchsauswertung

3.5.1 Auswertung Geothermiekreis

Die umfangreichen, an der Versuchsanlage gewonnenen, Messdaten wurden zunächst in erster Linie in Hinblick auf den Geothermiekreis (Kreislauf des Wärmeträgersfluids von der Erdwärmesonde bis zum Verdampfer der Wärmepumpe) ausgewertet.

Abb. 17 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 %.

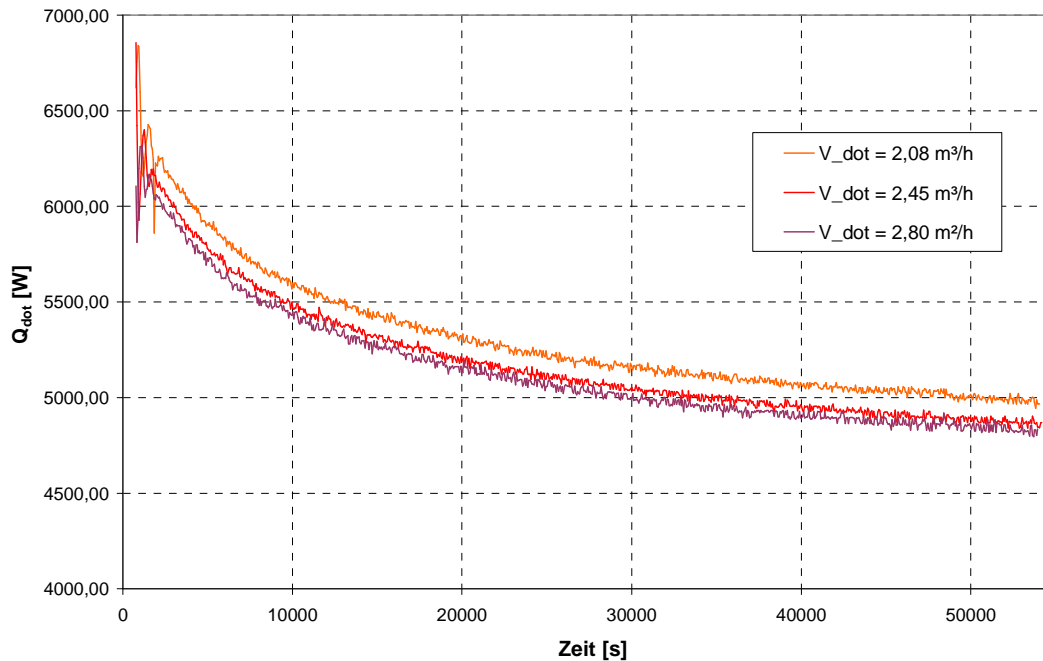


Abb. 17: Geothermische Entzugsleistungen der Versuchssonde (Ethylenglykol)

Als Grundlage für die vergleichende Auswertung der Versuche kann die folgende Darstellung des zeitlichen Verlaufs der mittleren Fluidtemperatur in der Erdwärmesonde als Reaktion auf die konstante Entzugsleistung herangezogen werden, wie sie auch zur Auswertung von Thermal Response Tests verwendet wird:

$$\bar{\vartheta}_{\text{Fluid}}(t) - \bar{\vartheta}_{\text{Fluid}}(t=0) = \Delta\vartheta_{\text{Fluid}}(t) = \left(R_b + \frac{g(t)}{2\pi\lambda_E} \right) \cdot \frac{\dot{Q}_{\text{geo}}}{H} \quad (3)$$

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 [-]

In den Versuchen ist die der Erdwärmesonde entzogene Wärmeleistung nicht konstant, ihr zeitlicher Verlauf zeigt aber eine gleich bleibende Charakteristik, vgl. Abb. 17. 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 (3) als Quotient aus

der jeweiligen mittleren Fluidtemperatur zum Zeitpunkt t und dem Mittelwert der bis zu diesem Zeitpunkt t aufgelaufenen Sondenleistung:

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

Das folgende Diagramm zeigt den Verlauf dieser Größe für vier Versuche mit Ethylenglykol bei drei verschiedenen Volumenströmen. Dabei belegt der annähernd identische Verlauf der beiden Kurven für den höchsten Volumenstrom von 2,77 m³/h bzw. 2,80 m³/h die gute Reproduzierbarkeit der Versuche, die auch bei den anderen Volumenströmen gegeben war.

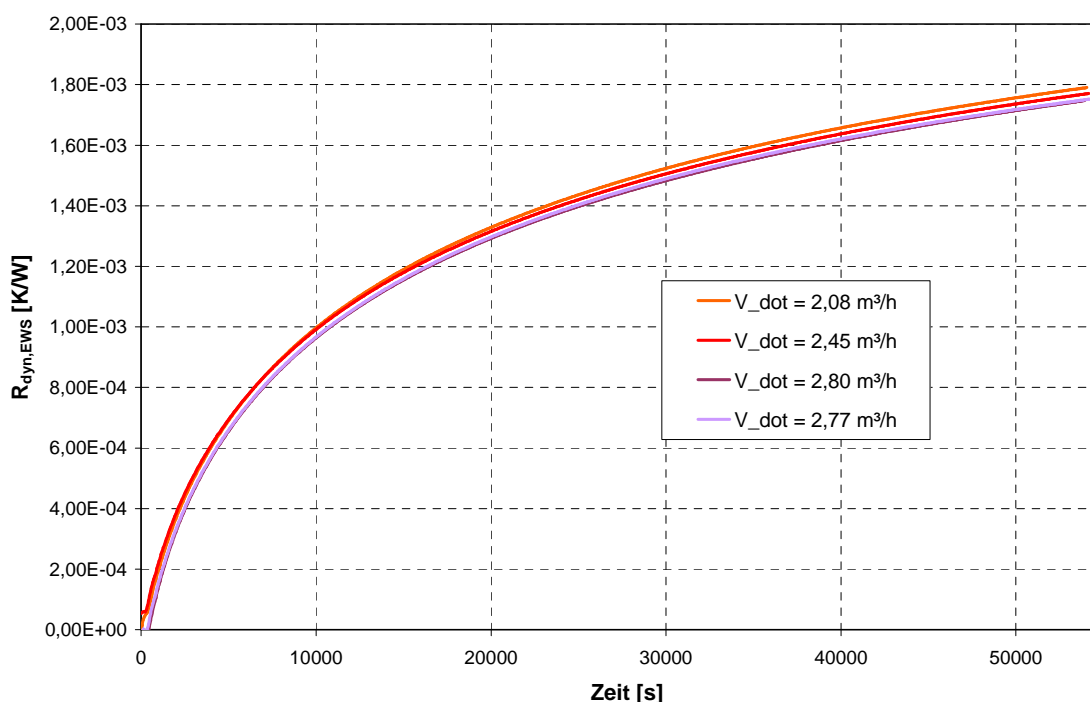


Abb. 18: Auswertungsdiagramm zur Wärmeübertragung in der Erdwärmesonde – Ethylenglykol

Es zeigt sich erwartungsgemäß, dass der dynamische geothermische Quellenwiderstand bei Verwendung derselben Sonde nur vom Bohrlochwiderstand abhängt. Der Bohrlochwiderstand ist bei gleicher Sonde wiederum nur von den Wärmeübertragungseigenschaften des Fluids an der Wand des Sondenrohres abhängig. Das Diagramm (Abb. 18) spiegelt also den verbesserten Wärmeübergang im Sondenrohr bei zunehmendem Volumenstrom für Ethylenglykol wider.

Das folgende Diagramm zeigt einen Vergleich von Versuchen mit Ethylenglykol und Kaliumformiat bei annähernd gleichem Volumenstrom.

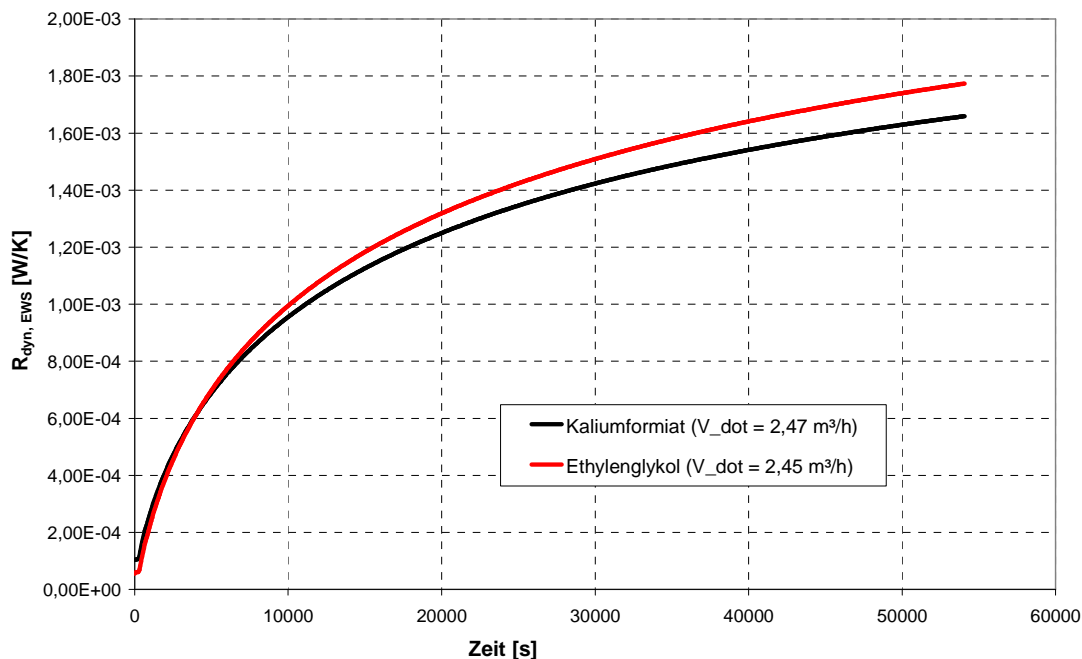


Abb. 19: Auswertungsdiagramm zur Wärmeübertragung in der Erdwärmesonde – Vergleich Ethylenglykol und Kaliumformiat (Stoffdaten laut Hersteller)

Aus der beschriebenen Auswertungsmethodik ergibt sich zunächst, dass der Wärmeübergang im Sondenrohr bei Kaliumformiat besser ist als bei Ethylenglykol. Eine weiterführende Auswertung unter Einbeziehung von Leistungs- und Energiebilanzen ergab, dass unter Zugrundelegung der für Ethylenglykol und Kaliumformiat zur Verfügung stehenden Stoffdaten die berechnete Entzugsleistung an der Erdwärmesonde bei den Versuchen mit Kaliumformiat gegenüber den Versuchen mit Ethylenglykol um etwa 13 bis 15 % größer erscheint. Die von der Wärmepumpe abgegebene Heizleistung unterschied sich bei den Vergleichsversuchen zwischen den beiden Fluiden dagegen nur um etwa ± 1 %. Die aufgenommene elektrische Leistung am Verdichter war bei den Versuchen mit Kaliumformiat zwar durchweg etwas geringer als bei Ethylenglykol, aber nicht in der Größenordnung in der die berechnete Entzugsleistung bei Kaliumformiat größer war. Nach eingehender Prüfung konnte ein messtechnischer Fehler ausgeschlossen werden. Ausgehend von den vergleichsweise geringen Unterschieden bei der elektrischen Leistungsaufnahme am Verdichter wurde anhand der Betriebstemperaturen im Geothermiekreis und im Heizkreis während des Versuchsverlaufs geprüft, ob die Unstimmigkeiten in den Leistungsbilanzen auf eine generell abweichende Betriebsweise der Versuchsanlage zurückzuführen ist. Eine Ursache für die unschlüssigen Leistungsbilanzen konnte auch in der Betriebsführung nicht ausgemacht werden.

Als verbleibende Ursache kommen damit nach dem Ausschlussverfahren nur noch fehlerhafte Stoffdaten für Kaliumformiat und damit eine falsch berechnete Entzugsleistung nach Gleichung

$$\dot{Q}_{\text{geo}} = \rho \cdot c_p \cdot \dot{V} \cdot \Delta T \quad (4)$$

mit

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

ρ : Dichte [kg/m³]

c_p : spezifische Wärmekapazität [J/(kg·K)]

\dot{V} : Volumenstrom [m³/s]

ΔT : Spreizung im Geothermiekreis [K]

in Betracht. Eine Bestimmung der Dichte anhand einer aus der Versuchsanlage entnommenen Probe mittels Wägung und ein Vergleich mit den Herstellerangaben ergab eine deutliche Abweichung. Hierauf wurde mit dem Hersteller Kontakt aufgenommen und eine Probe zur Analyse an ihn versandt. Die Ergebnisse der Probenanalyse und der telefonischen Rückfragen stellen sich zusammengefasst wie folgt dar:

- Bei der Umfüllung der Versuchsanlage war es offensichtlich zu einer leichten Verdünnung der Kaliumformiatfertigmischung mit Wasser gekommen. Laut Hersteller wurde dadurch der Gefrierpunkt um 5 K erhöht.
- Laut fernmündlicher Auskunft des Herstellers erfolgte für das als Fertigmischung gelieferte Produkt keine eigene labortechnische Bestimmung der Stoffwerte. Vielmehr wurden die Stoffwerte rechnerisch aus den Ergebnissen von labortechnischen Untersuchungen zu höher konzentrierten Kaliumformiatmischungen ermittelt.
- Vom Hersteller wurde angegeben, dass das eingesetzte Kaliumformiatprodukt einen nicht unerheblichen Masseanteil an Kaliumkarbonat enthält. Eine an der Universität Karlsruhe durchgeführte Analyse bestätigte dies.

Mit diesen Angaben und Ergebnissen ließ sich die Unsicherheit über die Stoffwerte der Kaliumformiatmischung nicht beseitigen. Auf eine kosten- und zeitintensive Bestimmung der Wärmekapazität für die sich in der Anlage befindliche verdünnte Kaliumformiatmischung wurde verzichtet. Die vom Hersteller durchgeführte rechnerische Bestimmung der Wärmekapazität für die in der Anlage befindliche Mischung musste als nicht Ziel führend unberücksichtigt bleiben.

Damit wurde eine Neuausrichtung der Versuchsauswertung erforderlich, da die vorgestellte Auswertungsmethodik der Verhältnisse im Geothermiekreis nach Gleichung (3) eine korrekte Bestimmung der Entzugsleistung nach Gleichung (4) mit genau bekannten Stoffdaten voraussetzt.

Für überschlägige Betrachtungen wurde ersatzweise die volumetrische Wärmekapazität an dem in Abschnitt 3.1 beschriebenen Wärmetauscher zwischen dem mit Wasser gefüllten Heizzwischenkreis und dem mit dem jeweiligen Fluid gefüllten Bodenabsorber (vgl. Abb. 16) nach der folgenden Gleichung bestimmt:

$$\dot{V}_{\text{Wasser}} \cdot \rho_{\text{Wasser}} \cdot c_{p, \text{Wasser}} \cdot \Delta T_{\text{Wasser}} = \dot{V}_{\text{Fluid}} \cdot \rho_{\text{Fluid}} \cdot c_{p, \text{Fluid}} \cdot \Delta T_{\text{Fluid}} \quad (5)$$

Die Energiebilanz nach Gleichung (5) geht von einer verlustfreien Wärmeübertragung am Wärmetauscher aus. Mit den bekannten Stoffdaten von Wasser und den durch die Messtechnik aufgezeichneten Temperaturen und Volumenströmen am Bodenabsorber lässt sich durch Umstellen der Gleichung (5) die spezifische volumetrische Wärmekapazität für das sich im Bodenabsorber befindliche Fluid näherungsweise bestimmen.

Die Ergebnisse dienen zur Abschätzung des Fehlers in den Herstellerangaben zu den Stoffdaten für die Kaliumformiatmischung. Eine entsprechende Bestimmung der Stoffdaten wurde zur Überprüfung der Herstellerangaben bei der folgenden Fluidumfüllung hin zu Kaliumkarbonat durchgeführt.

Abb. 20 zeigt, wie sich der Verlauf des dynamischen geothermischen Quellenwiderstands für Kaliumformiat bei Zugrundelegung der ermittelten volumetrischen Wärmekapazität an den Verlauf für Ethylenglykol annähert. Eine tiefere quantitative Auswertung lässt sich auf Grundlage der in Näherung bestimmten spezifischen volumetrischen Wärmekapazität nicht aufbauen.

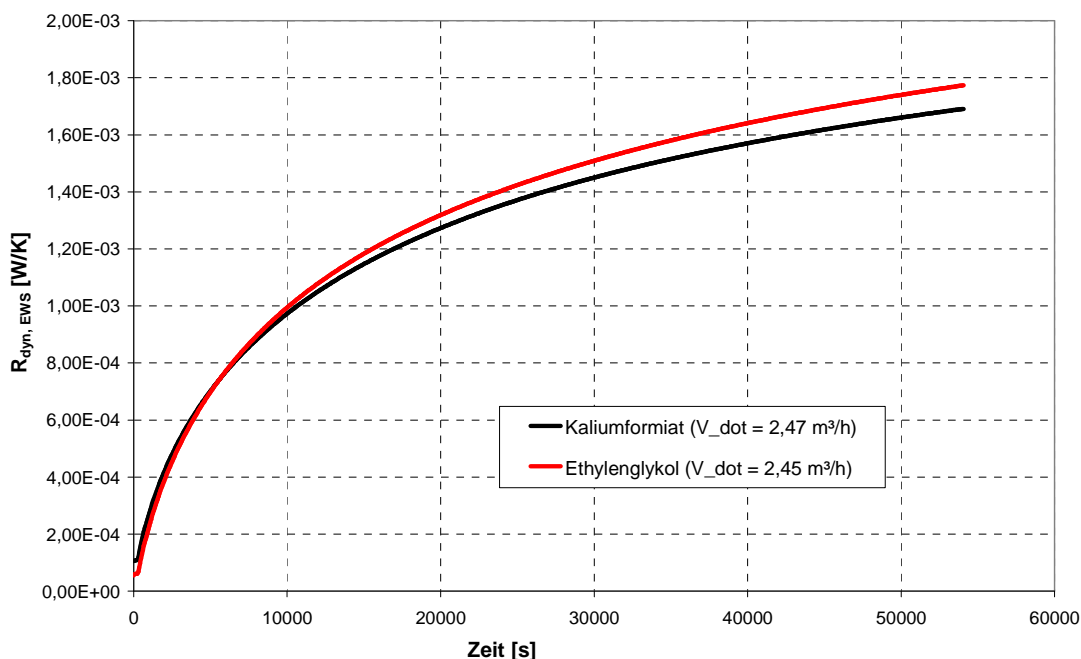


Abb. 20: Auswertungsdiagramm zur Wärmeübertragung in der Erdwärmesonde – Vergleich Ethylenglykol und Kaliumformiat (nach Gleichung (5) ermittelte Stoffdaten)

Aufgrund der dargelegten Umstände musste auf eine weiterführende Detailauswertung der Verhältnisse im Geothermiekreis auf Basis von Gleichung (4) verzichtet werden. Damit wurde eine Beschreibung des Betriebsverhaltens der Gesamtanlage über Kennzahlen, in die keine Stoffdaten der Wärmeträgerfluide einfließen, für eine vergleichende Betrachtung notwendig, siehe Abschnitt 3.5.4.

3.5.2 Versuche mit laminarer Strömung in der Sonde

Im Rahmen des Versuchsprogramms wurden auch Versuche mit laminaren Strömungsverhältnissen in der Erdwärmesonde durchgeführt. Hierbei war das Problem gegeben, dass sich der geothermieseitige Volumenstrom an der Versuchsanlage über eine Einstellung der Umwälzpumpe nicht nach unten bis zum Erreichen einer laminaren Durchströmung der Sondenrohre regeln lässt. Die Reduktion des Volumenstroms in der Erdwärmesonde bis in den Bereich einer laminaren Durchströmung der Sondenrohre wurde erst durch einen Bypass zwischen Sondenvorlauf und Sondenrücklauf erreicht.

Ziel dieser Versuche war, die Auswirkung eines durch die laminaren Strömungsverhältnisse verringerten Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Wärmeträgerfluid und Sondenrohr respektive des dadurch erhöhten Bohrlochwiderstands entsprechend dem in Abschnitt 3.5.1 vorgestellten Auswerteverfahren für den Geothermiekreis zu untersuchen. Mit den für das Kaliumformiatprodukt nicht zur Verfügung stehenden Stoffdaten war allerdings eine direkte vergleichende Auswertung aller untersuchten Fluide bei laminarer Strömung in der Erdwärmesonde nicht möglich, siehe Abschnitt 3.5.1.

3.5.3 Thermal Response Test (TRT)

Mit den durchgeführten Thermal Response Tests sollte detailliert die durch die Fluidwechsel verursachte Veränderung des Bohrlochwiderstands aufgrund eines veränderten Wärmeübergangs vom Fluid zum Sondenrohr an der Versuchssonde untersucht werden. In gleicher Weise wie bei den Versuchen mit laminaren Strömungsverhältnissen in der Sonde musste aufgrund der unzureichenden Stoffdaten auf eine vergleichende Auswertung verzichtet werden. Fallweise lieferten die durchgeführten TRT-Versuche jedoch eine Vergleichsbasis für zukünftige Versuche.

3.5.4 Auswertung des Betriebsverhaltens der Gesamtanlage

Bei der Versuchsauswertung zum Betriebsverhalten der Versuchsanlage insgesamt wurden zwei Fragen verfolgt:

- Wie unterscheidet sich die Betriebsweise der Versuchsanlage nach einer bestimmten Laufzeit seit Versuchsbeginn bzw. über die gesamte Versuchslaufzeit?
- Mit welcher Arbeitszahl wurde in welchem Zeitraum eine bestimmte Menge an Heizenergie geliefert?

Bei einer Versuchslaufzeit von 15 h erfolgte eine Auswertung nach einer Laufzeit von 7 h und von 10 h. Für die Auswertung wurde in einem ersten Schritt die Temperaturentwicklung im Geothermiekreislauf und am Verdampfer sowie Kondensator und der sich ergebende Hub der Wärmepumpe zwischen Verdampfer- und Kondensatoraustrittstemperatur untersucht.

Abb. 21 zeigt den Verlauf der Temperatur von Sondeneintritt und Sondenaustritt gemessen am Verteiler der Versuchssonde außerhalb des Gebäudes.

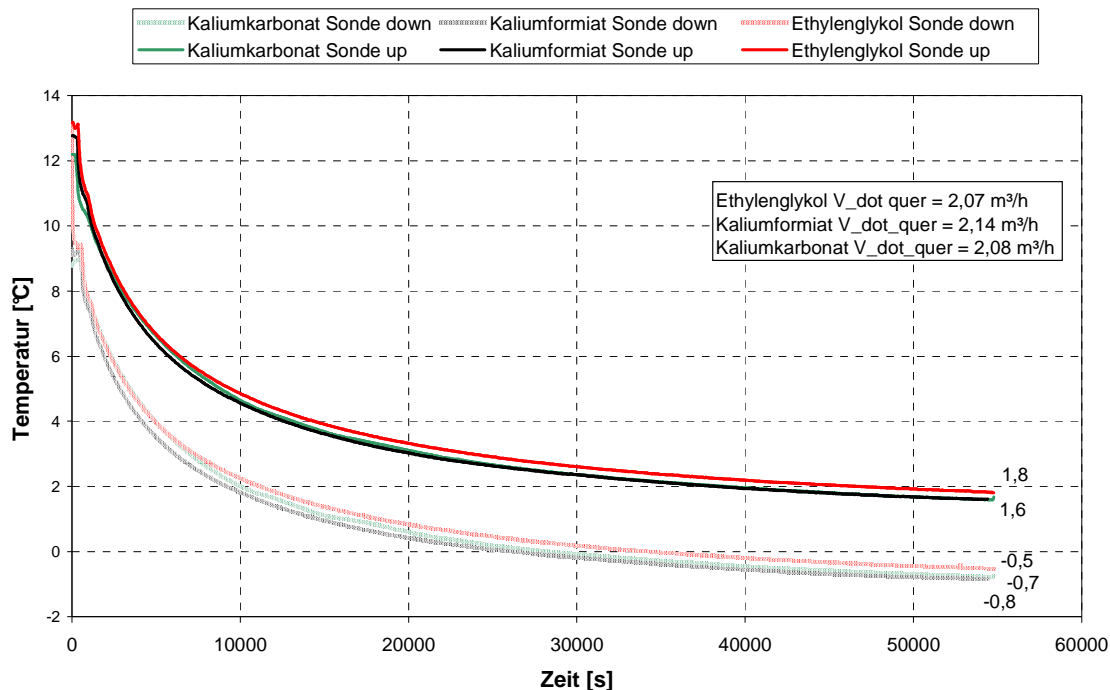


Abb. 21: Temperaturverlauf am Sondeneintritt und Sondenaustritt – Vergleich Ethylenglykol, Kaliumkarbonat und Kaliumformiat

Es zeigt sich der für eine mit einer Entzugsleistung beaufschlagten Erdsonde typische Temperaturverlauf mit einem starken Temperaturabfall zu Versuchsbeginn, der sich mit der Laufzeit der Wärmepumpe zunehmend abschwächt. Dabei ist der Verlauf der Kurven für die unterschiedlichen Wärmeträgerfluide ähnlich. Die Abweichung der Temperaturen an der Erdwärmesonde zwischen den Versuchen liegt im Bereich von 0,3 K.

Mithin ergibt sich ein entsprechender Temperaturverlauf am Verdampferaustritt, wie die folgende Abbildung zeigt.

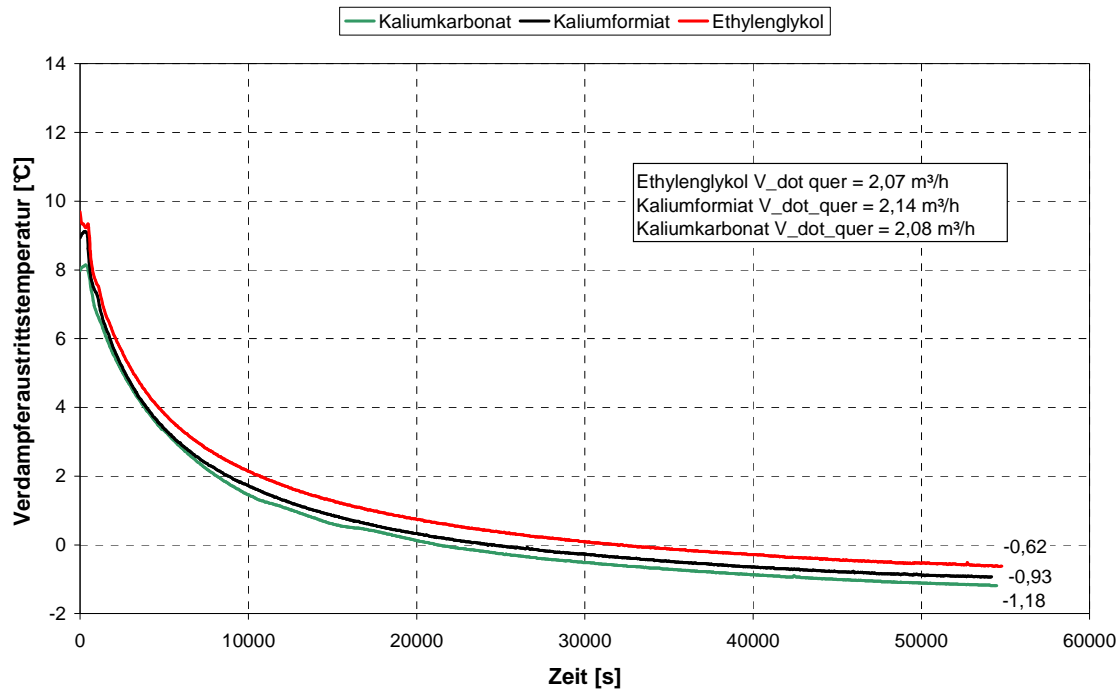


Abb. 22: Temperaturverlauf am Verdampferaustritt – Vergleich Ethylenglykol, Kaliumkarbonat und Kaliumformiat

Die Abweichungen bei den Temperaturen am Verdampferaustritt liegen bei den unterschiedlichen Fluiden im Bereich von 0,6 K. Mit ausschlaggebend für die sich über die Versuchszeit einstellenden Temperaturen ist die ungestörte Erdreichtemperatur vor dem Start der Verdichter. Trotz des durchgeführten Temperaturausgleichs über eine Rückführung der entzogenen Wärmemenge in die Versuchsonde nach jedem Versuch ergaben sich über die Versuchszeit von insgesamt 15 Monaten geringe Unterschiede in der ungestörten Erdreichtemperatur von maximal 1,1 K. Die Ursache liegt in jahreszeitlich bedingten Schwankungen und in dem nur nahezu perfekten Temperaturausgleich zwischen den Versuchen.

Bei den Abb. 22 zugrunde liegenden Versuchen lag der maximale Unterschied der ungestörten Erdreichtemperatur bei 0,35 K zwischen dem Versuch mit Ethylenglykol und dem Versuch mit Kaliumkarbonat, wobei die tiefere Starttemperatur bei Kaliumkarbonat lag.

Ausgehend von den, in einem engen Rahmen liegenden, Wärmequellentemperaturen lässt sich der Temperaturverlauf am Kondensatoraustritt und –eintritt auf der Wärmesenkenseite für die verschiedenen Fluide vergleichend betrachten, siehe Abb. 23.

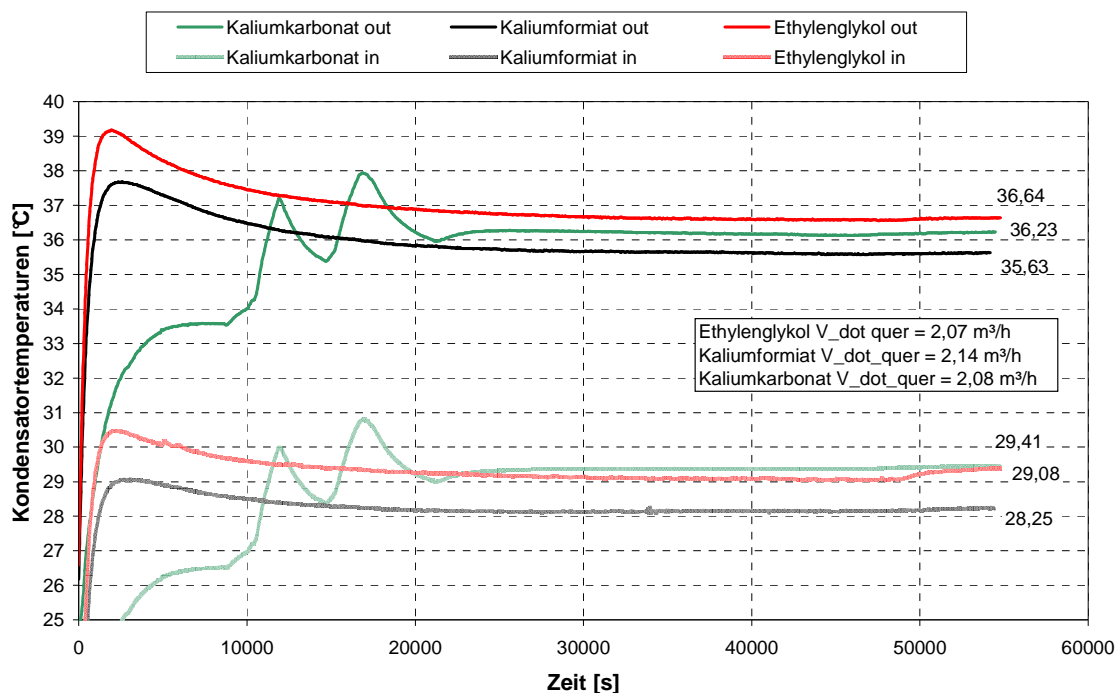


Abb. 23: Temperaturverlauf am Kondensatoraustritt und -eintritt- Vergleich Ethylenglykol, Kaliumkarbonat und Kaliumformiat

Die Temperaturdifferenz zwischen den Temperaturen am Kondensatoraustritt bzw. -eintritt bei dem Versuch mit Kaliumformiat und dem Versuch mit Ethylenglykol liegt bei etwa 1 K bzw. 1,2 K. Eine Ursache ist in Schwierigkeiten beim Temperatenausgleich auch des Bodenabsorbers unter dem Technikumsgebäude in der zwischen den Versuchen zur Verfügung stehenden Zeit zusätzlich zum Temperatenausgleich der Versuchssonde zu suchen. Darüber hinaus ergibt sich auch am Bodenabsorber ein jahreszeitlich bedingter Einfluss auf das Temperaturniveau. Um dem entgegenzuwirken, wurde bei den Versuchen mit Kaliumkarbonat dazu übergegangen, zu Versuchsbeginn regelnd einzugreifen, um möglichst identische Temperaturen am Kondensator zu denen eines Vergleichsversuchs zu erreichen.

Es wurden bei einem bestimmten Volumenstrom im Geothermiekreis jeweils zwei Versuche mit Kaliumkarbonat geregelt durchgeführt. Ziel war es, jeweils möglichst identische Temperaturen am Kondensator zu einem Referenzversuch bei gleichem Volumenstrom mit Ethylenglykol bzw. Kaliumformiat zu erreichen. Die Regelung erfolgte über eine Veränderung des Volumenstroms im wassergefüllten Heizzwischenkreis und über ein Drei-Wege-Ventil zur Mischung zwischen Vor- und Rücklauf am Bodenabsorber.

Der Eingriff in den Versuchsablauf mit Kaliumkarbonat ist in Abb. 23 deutlich zu erkennen. Hier wurde versucht, die Temperaturen an den Versuch mit Ethylenglykol anzugleichen. Der Zeitraum, in dem eine Regelung vorgenommen wurde, lag dabei mit ausreichend Abstand vor dem ersten Auswertungszeitpunkt nach sieben Stunden Versuchslaufzeit.

Unter Einbeziehung des Temperaturhubs zwischen Verdampferaustrittstemperatur und Kondensatoraustrittstemperatur ergibt sich, dass die Wärmepumpe bei annähernd identischem Hub die Wärme auf einem vergleichbaren Temperaturniveau abgegeben hat und somit eine vergleichbare Betriebsweise der Wärmepumpe vorlag.

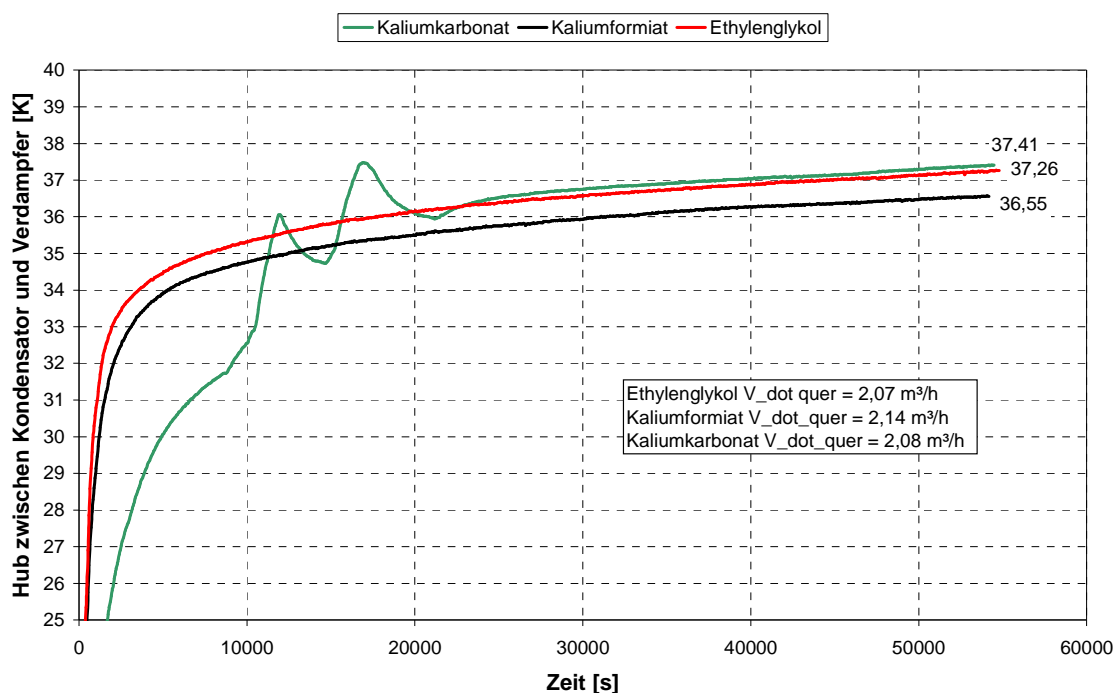


Abb. 24: Zeitlicher Verlauf des Temperaturhubs zwischen Verdampfer- und Kondensatoraustritt – Vergleich Ethylenglykol, Kaliumkarbonat und Kaliumformiat

In Abb. 25 sind die aufgenommenen elektrischen Leistungen an den Verdichtern und an der geothermieseitigen Umwälzpumpe sowie die abgegebene Heizleistung als Mittelwerte zwischen der 9. und 10. Stunde Laufzeit für die Versuche mit Ethylenglykol und Kaliumkarbonat dargestellt.

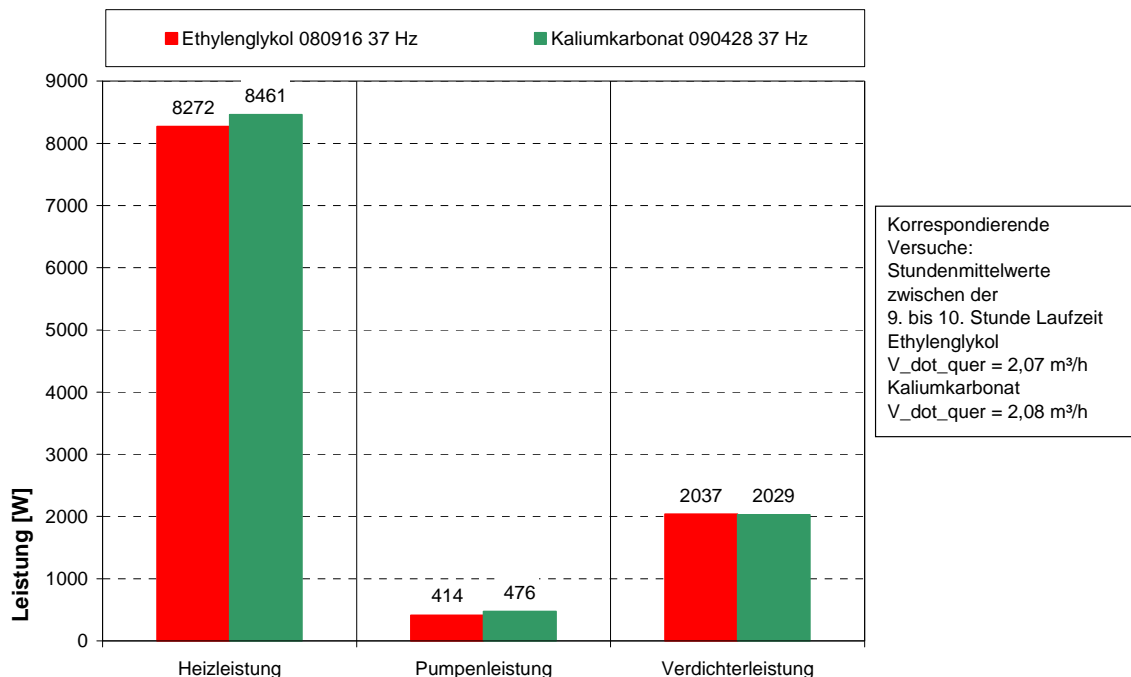


Abb. 25: Aufgenommene elektrische Leistung und abgegebene Heizleistung – Vergleich Ethylenglykol und Kaliumkarbonat

Erwartungsgemäß unterscheidet sich die Leistungsaufnahme an den Verdichtern aufgrund des hergestellten Temperaturabgleichs zwischen den Versuchen praktisch nicht. Bei Kaliumkarbonat sind allerdings die von der geothermieseitigen Umwälzpumpe aufgenommene elektrische Leistung deutlich und die abgegebene Heizleistung geringfügig höher als beim Vergleichsversuch mit Ethylenglykol.

Mit Einführung von Leistungszahlen (COP) für die Wärmepumpe (COP_{WP}), die geothermieseitige Umwälzpumpe (COP_{Pumpe}) und die Gesamtanlage (COP_{gesamt})

$$COP_{WP} = \frac{\dot{Q}_H}{P_{el, Verdichter}} \quad (6)$$

$$COP_{Pumpe} = \frac{\dot{Q}_H}{P_{el, Pumpe}} \quad (7)$$

$$COP_{gesamt} = \frac{\dot{Q}_H}{(P_{el, Pumpe} + P_{el, Verdichter})} \quad (8)$$

mit

\dot{Q}_H : Heizleistung [W]

$P_{el, \dots}$: elektrische Leistung [W]

differenziert sich das Bild, siehe Abb. 26.

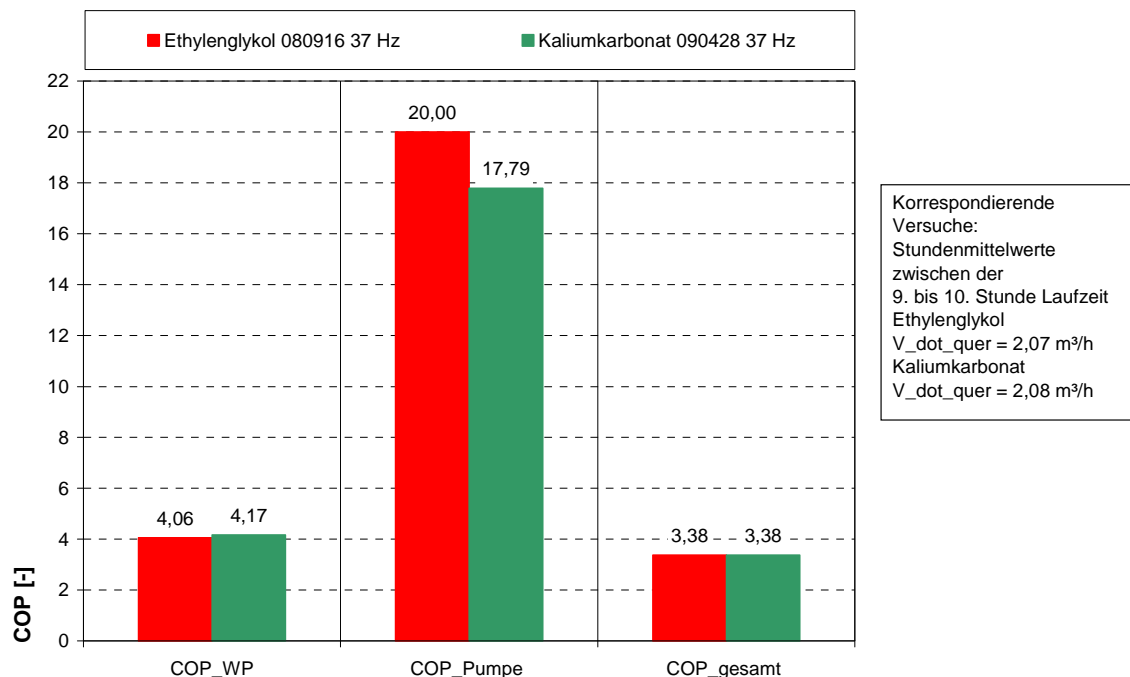


Abb. 26: COP_{WP} (Wärmepumpe), COP_{Pumpe} (geothermische Umwälzpumpe) und COP_{gesamt} (Gesamtanlage) – Vergleich Ethylenglykol und Kaliumkarbonat

Dabei wurden für die gebildeten COPs wiederum Stundenmittelwerte zwischen der 9. und 10. Stunde Laufzeit zugrunde gelegt. Deutlich wird, dass bei Kaliumkarbonat für die erzielte Heizleistung deutlich mehr elektrische Leistung an der Umwälzpumpe aufgewendet werden muss.

Analog zu der bisher vorgestellten Auswertung anhand von Versuchen mit einem Volumenstrom – in diesem Fall des geringsten in der Anlage gefahrenen – ergibt sich das zu Abb. 26 entsprechende Ergebnis für den größten bei den Versuchen gefahrenen Volumenstrom in Abb. 27.

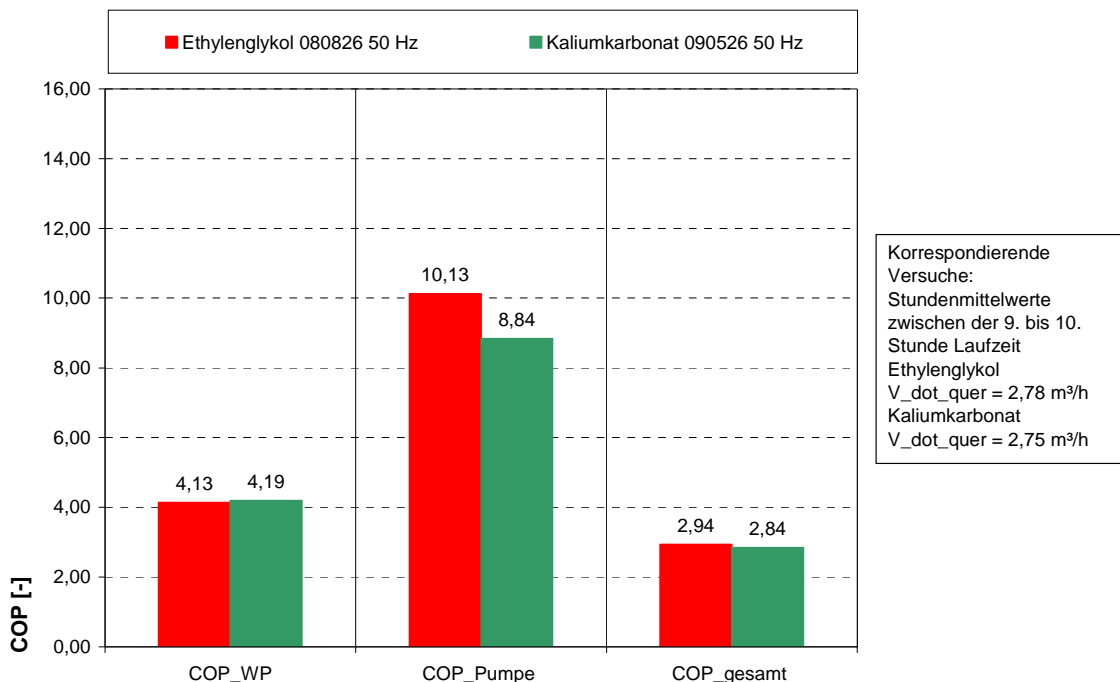


Abb. 27: COP_{WP} (Wärmepumpe), COP_{Pumpe} (geothermische Umwälzpumpe) und COP_{gesamt} (Gesamtanlage) – Vergleich Ethylenglykol und Kaliumkarbonat

Während der COP_{WP} der Wärmepumpe annähernd unverändert bleibt, nehmen der für die Umwälzpumpe gebildete COP_{Pumpe} und der COP_{gesamt} der Gesamtanlage erwartungsgemäß ab. Ein höherer geothermieseitiger Volumenstrom bewirkt bei einer kaum erhöhten Leistungsaufnahme am Verdichter nur eine geringe relative Erhöhung der abgegebenen Heizleistung, während die elektrische Leistungsaufnahme an der Pumpe prozentual stärker zunimmt (vgl. Abb. 25 mit Abb. 28).

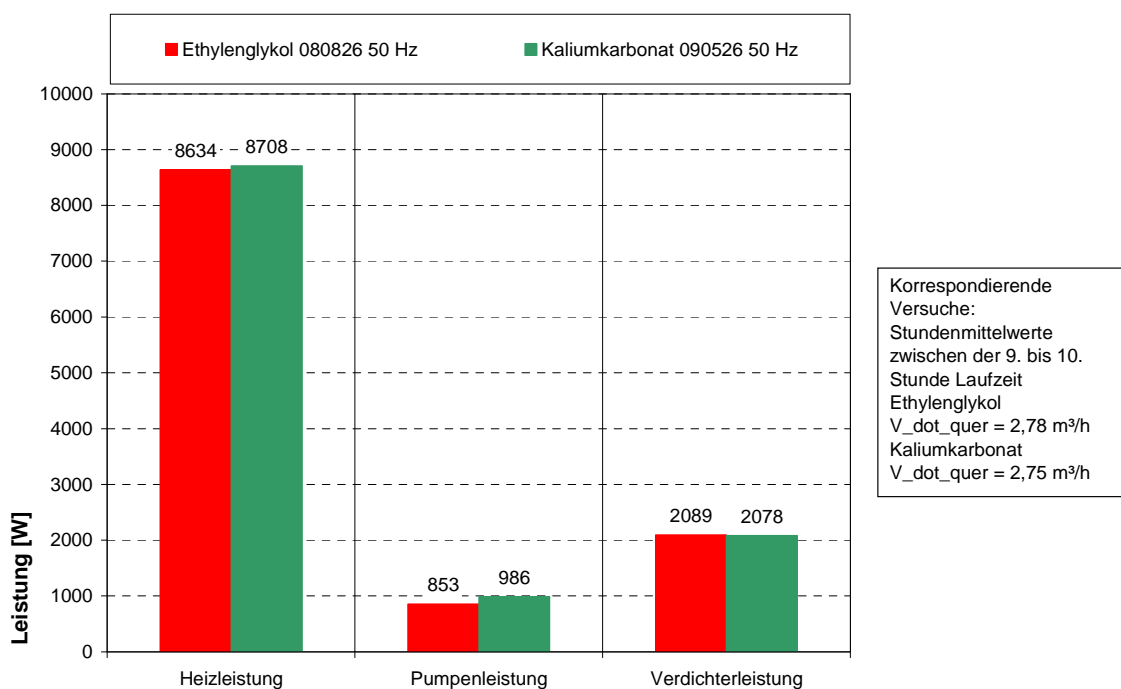


Abb. 28: Aufgenommene elektrische Leistung und abgegebene Heizleistung – Vergleich Ethylenglykol und Kaliumkarbonat

Auswertungen von Versuchspaaren aus Kaliumformiat und Kaliumkarbonat ergeben ein den Abb. 26 und Abb. 27 entsprechendes Ergebnis, siehe Abb. 29 und 30.

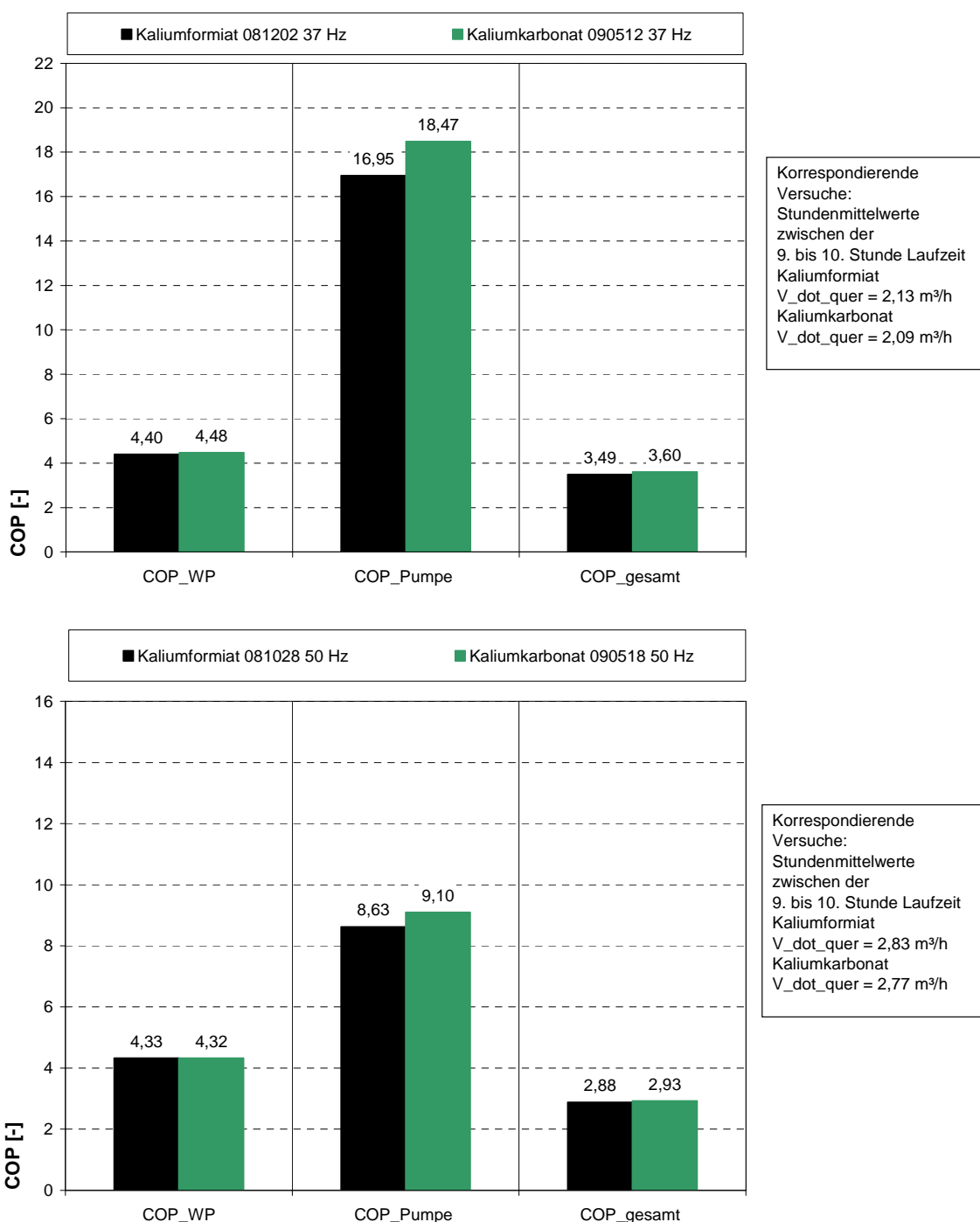


Abb. 29 und 30: COP_{WP} (Wärmepumpe), COP_{Pumpe} (geothermische Umwälzpumpe) und COP_{gesamt} (Gesamtanlage) – Vergleich Kaliumformiat und Kaliumkarbonat

Die Auswertung zeigt, dass bei den vergleichenden Versuchen mit Kaliumformiat und Kaliumkarbonat der COP_{WP} der Wärmepumpe durchweg etwas höher liegt. Eine Erklärung dafür ist, dass bei diesen Versuchen die Wärmeabgabe auf der Senkenseite auf einem etwas niedrigeren Temperaturniveau stattgefunden hat

(vgl. Abb. 22). Damit war der für die Wärmepumpe zu überwindende Temperaturhub ebenfalls geringer (vgl. Abb. 24). Dies führte in der Folge zu einer etwas geringeren elektrischen Leistungsaufnahme an den Verdichtern der Wärmepumpe.

Teilweise ergaben sich zwischen den Vergleichsgruppen von Versuchen mit Kaliumformiat und Kaliumkarbonat sowie Ethylenglykol und Kaliumkarbonat Unterschiede in der Wärmeleistung der Wärmepumpe im Bereich von 5 % bei Versuchen mit demselben Fluid und gleichen Volumenstrom. Diese Abweichungen sind auf die Versuchsdurchführung an einer Technikumsanlage mit realen, nur begrenzt beeinflussbaren Randbedingungen über einen langen Zeitraum zurückzuführen und sind bezogen darauf als gering zu betrachten. Die Reproduzierbarkeit der Versuche ist damit als gut zu bezeichnen.

Die Auswertung zeigt bei einem direkten Vergleich von Kaliumformiat und Kaliumkarbonat und von Ethylenglykol und Kaliumkarbonat, dass ein signifikanter Unterschied in der elektrischen Leistungsaufnahme der geothermischen Umwälzpumpe liegt, der sich jedoch nur in geringem Umfang und nur fallweise auf den Gesamt-COP der Versuchsanlage auswirkt. Deutlich wird, dass bei der Versuchsanlage bei den gegebenen Einstellungsmöglichkeiten des Volumenstroms der Anlagen-COP angefangen vom geringst möglichen Volumenstrom bis hin zum größtmöglichen Volumenstrom abnimmt. Eine entsprechende Auswertung zwischen der 6. und 7. Stunde der Versuchslaufzeit führt zum gleichen Ergebnis.

Ein weiterer Vergleich der Versuche erfolgte über die Bildung der Arbeitszahl

$$AZ = \frac{Q_H}{E_{el}} \quad (9)$$

mit

AZ : Arbeitszahl [-]

Q_H : abgegebene Heizenergie [kWh]

E_{el} : aufgenommene elektrische Leistung [kWh]

nach 7 Stunden Versuchslaufzeit und über den gesamten Versuchszeitraum nach 15 Stunden.

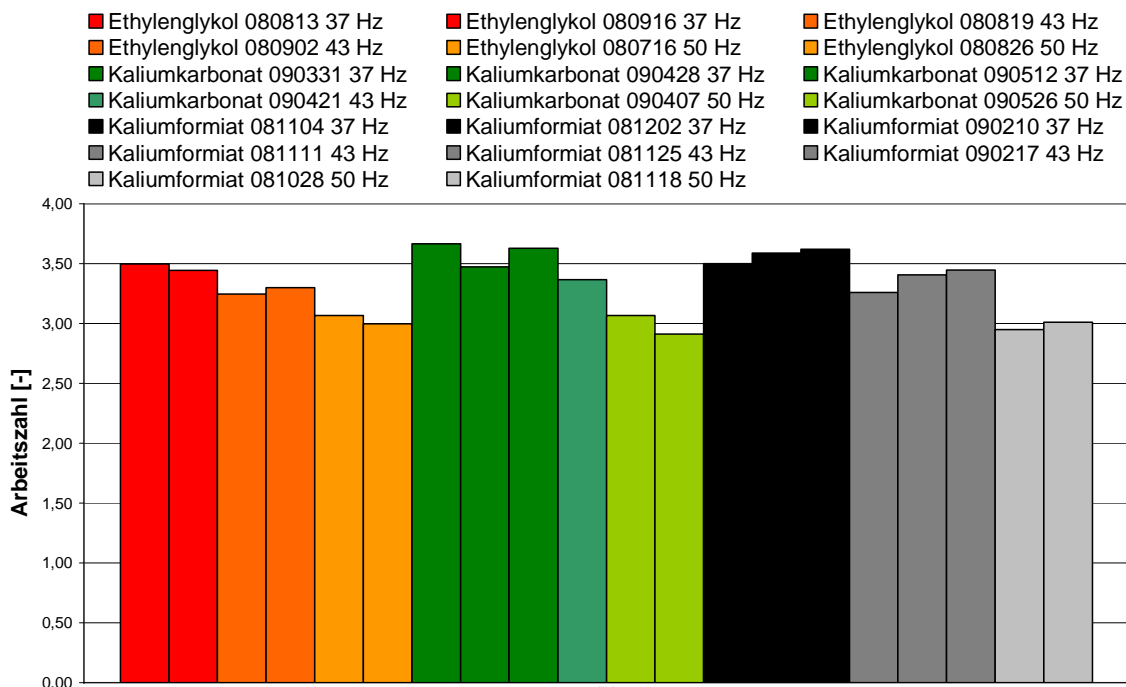


Abb. 31: Arbeitszahlen, gebildet über die Versuchslaufzeit von 15 h – Vergleich Kaliumformiat, Kaliumkarbonat und Ethylenglykol

Abb. 31 zeigt zum einen, wie die Arbeitszahl unabhängig vom Fluid mit zunehmenden Volumenstrom – hier identifiziert durch die an der Anlage eingestellte Frequenz des Pumpenantriebs – abnimmt. Zum anderen zeigt sich die Schwankungsbreite in der Arbeitszahl zwischen Versuchen mit demselben Wärmeträgerfluid bei einem bestimmten Volumenstrom, die auf die nicht ganz gleichen Randbedingungen für den Anlagenbetrieb zurückzuführen sind. Ein Vergleich von Versuchen mit unterschiedlichen Wärmeträgerfluiden bei vergleichbarem Volumenstrom zeigt, dass die Arbeitszahlen innerhalb der Schwankungsbreiten in einem engen Bereich zusammen liegen.

Eine Auftragung der Arbeitszahl aller Versuche mit Ethylenglykol, Kaliumformiat und Kaliumkarbonat für die Versuchslaufzeit von 15 h über den Temperaturhub von der ungestörten Erdreichtemperatur zur mittleren Kondensatoraustrittstemperatur enthält Abb. 32.

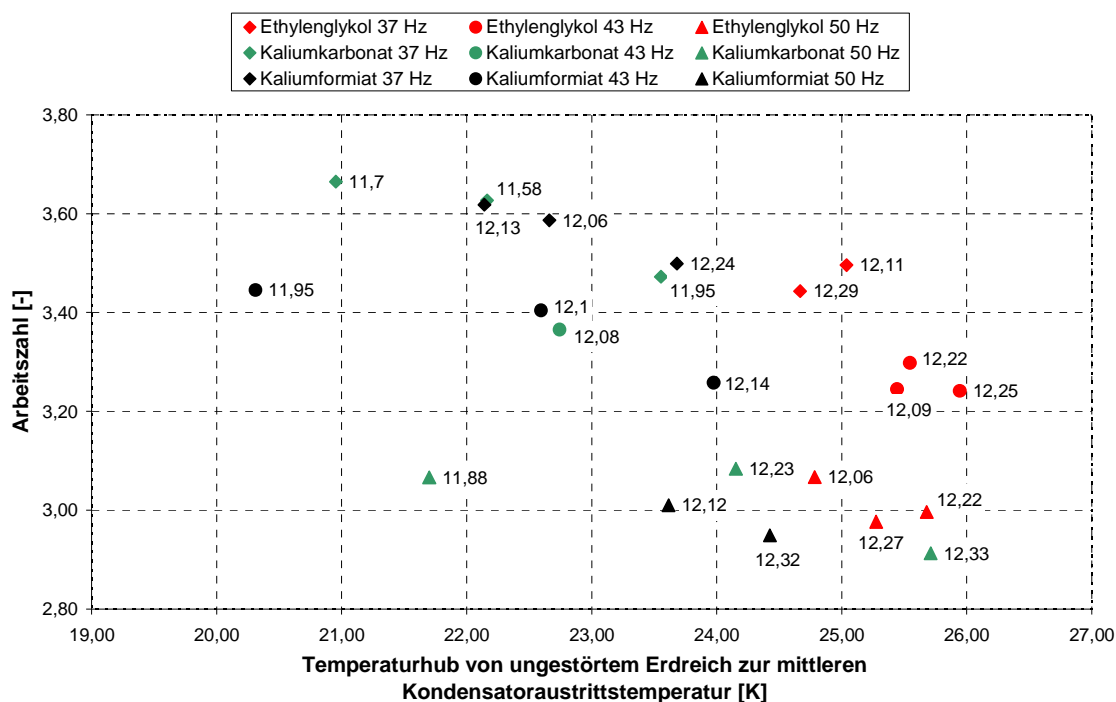


Abb. 32: Anlagenarbeitszahl (15 h) für Kaliumformiat, Kaliumkarbonat und Ethylenglykol aufgetragen über den Temperaturhub von der ungestörten Erdreichtemperatur zur mittleren Kondensatoraustrittstemperatur (die Zahlen an den Datenpunkten geben die ungestörte Erdreichtemperatur vor Versuchsbeginn in °C an)

Den einzelnen Versuchspunkten ist im Diagramm jeweils die ungestörte Erdreichtemperatur zugeordnet. Es wird deutlich, dass, ausgehend von einer geringen Abweichung der ungestörten Erdreichtemperatur, die von der Wärmepumpe abgegebene Wärme bei den verschiedenen Versuchen auf einem bis maximal über 5 K unterschiedlichen Temperaturniveau abgegeben wurde.

Eine Auswertung, bei der die Versuche nicht nach dem jeweils eingesetzten Wärmeträgerfluid unterschieden sind, zeigen die Abbildungen 33 und 34. Die Arbeitszahl der Gesamtanlage in Abb. 33 zeigt drei nach dem Volumenstrom geordnete Gruppen von Werten, deren Einzelwerte innerhalb einer engen Bandbreite von $\pm 2\%$ um die jeweils zugehörige Trendlinie liegen.

Die Trendlinien zeigen an, dass innerhalb jeder Versuchsgruppe mit vergleichbarem Volumenstrom die Arbeitszahl mit zunehmendem Temperaturhub abnimmt. Darin spiegelt sich die typische Charakteristik von Wärmepumpen wider, bei zunehmendem Temperaturhub mit niedrigerer Arbeitszahl zu arbeiten, wie dies Abb. 34 zusammenfassend zeigt.

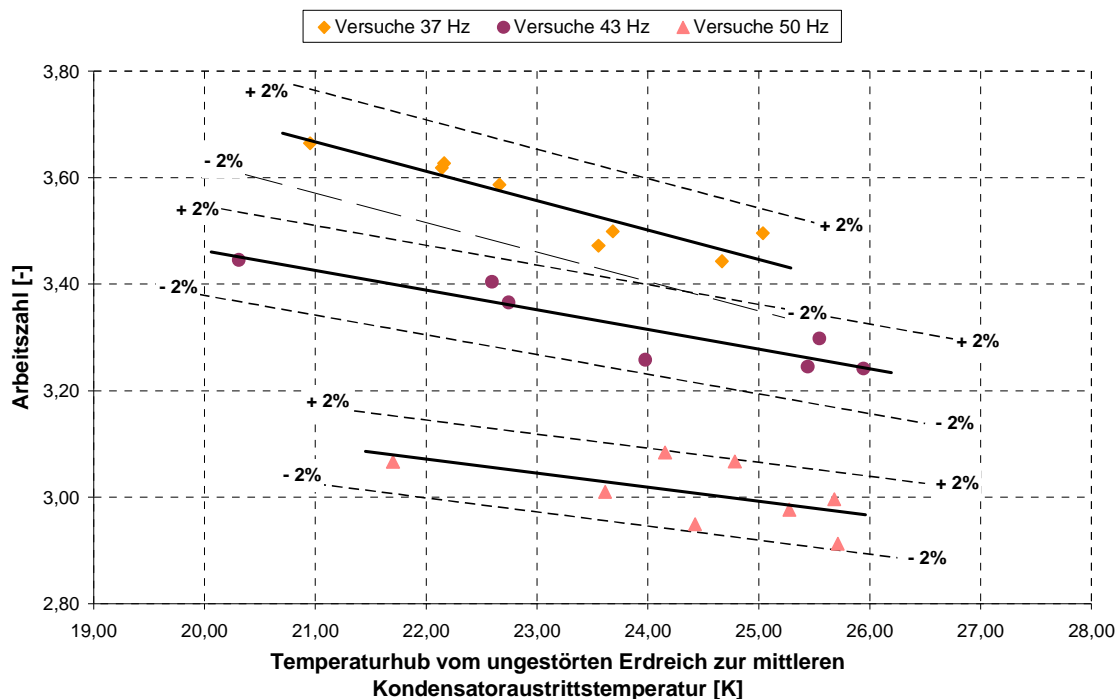


Abb. 33: Anlagenarbeitszahlen (15 h) unterschieden nach Volumenströmen im Geothermiekreislauf (identifiziert durch die Frequenz des Pumpenantriebs); aufgetragen über dem Temperaturhub von der ungestörten Erdreichtemperatur zur mittleren Kondensatoraustrittstemperatur

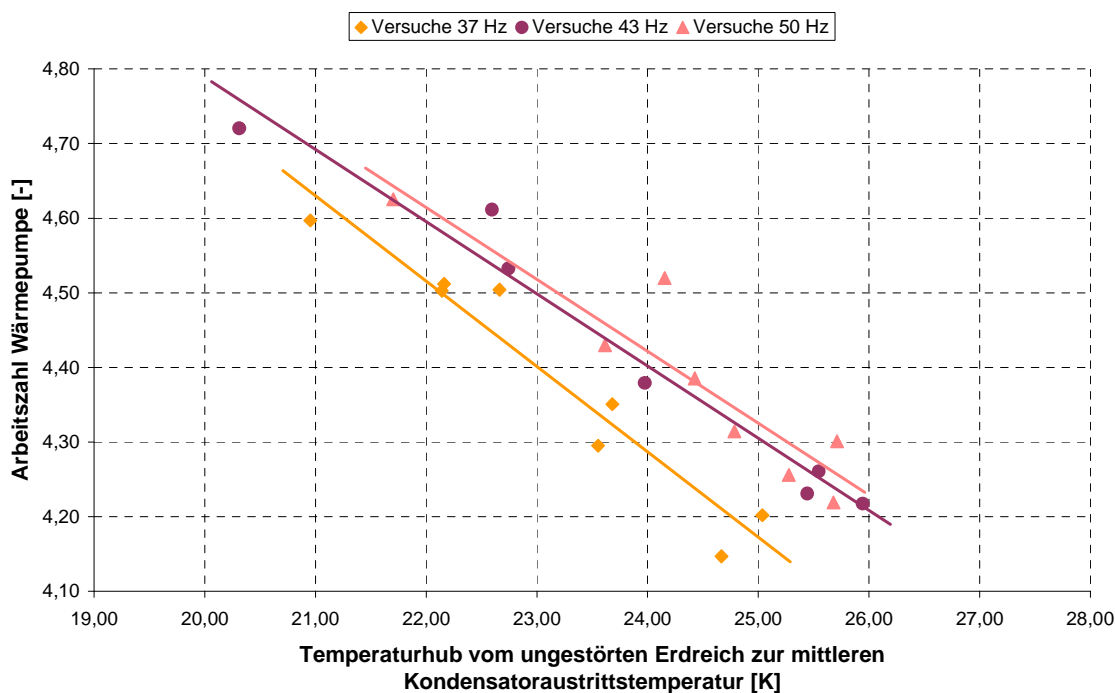


Abb. 34: Arbeitszahlen der Wärmepumpe(15 h) unterschieden nach Volumenströmen (identifiziert durch die Frequenz des Pumpenantriebs); aufgetragen über den Hub von der ungestörten Erdreichtemperatur zur mittleren Kondensatoraustrittstemperatur

Als Ergebnis dieser Auswertungen ist festzuhalten, dass die Arbeitszahl in erster Linie vom Temperaturhub abhängt und im zweiten Rang vom Volumenstrom im Geothermiekreislauf, d. h. von der elektrischen Leistungsaufnahme der Umwälz-

pumpe, beeinflusst wird, während der Einfluss des Wärmerträgerfluids nicht signifikant ist. Die Streuung um die eingezeichneten Trendlinien, welche den Einfluss des Fluids beinhaltet, überschreitet 2 % nicht.

Legt man der Auswertung den Anlagennutzen zugrunde, eine bestimmte Wärmemenge bereitzustellen, so rückt die Frage in den Mittelpunkt, in welcher Laufzeit und mit welcher Arbeitszahl dies erreicht wird.

Die Anlagenlaufzeiten, die bis zum Erreichen einer abgegebenen Heizenergie von 120 kWh benötigt werden, unterscheiden sich nur wenig, wie Abb. 35 zu entnehmen ist. Bezogen auf die gesamte benötigte Zeit für diese Wärmelieferung beträgt die Varianz bei Versuchen mit vergleichbarem Volumenstrom etwa 3,5 bis 4 % (vgl. Abb. 36). Ein vom Fluid abhängiger Trend in der Anlagenlaufzeit bis zum Erreichen der vorgegebenen Heizenergie von 120 kWh ist nicht zu erkennen.

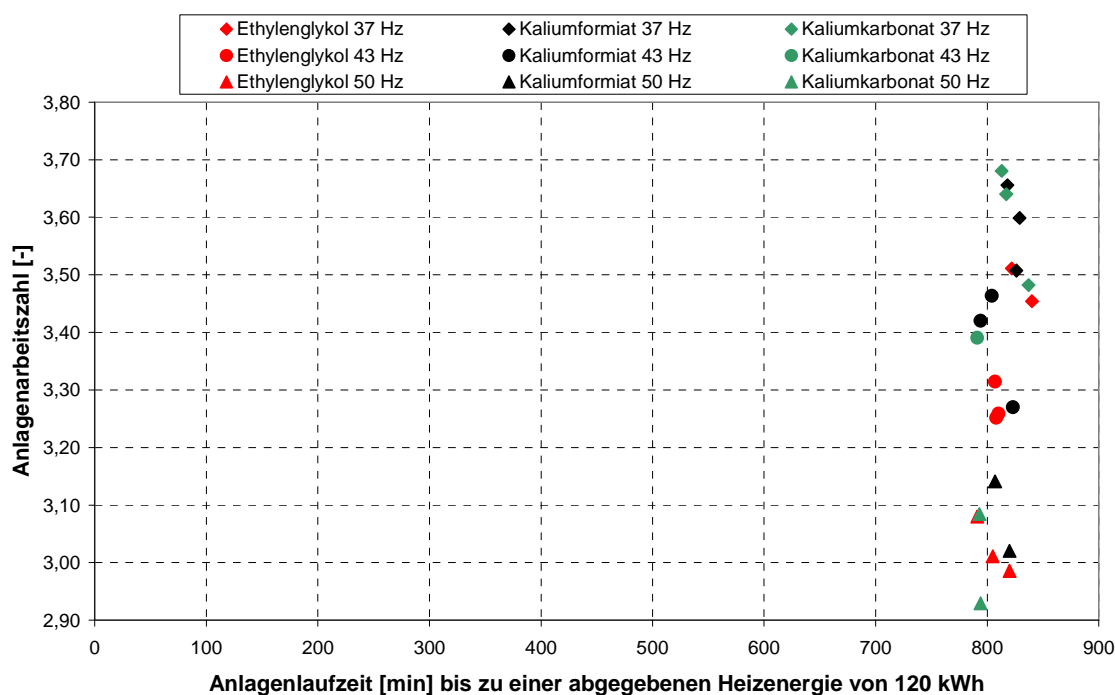


Abb. 35: Anlagenarbeitszahlen für Kaliumformiat, Kaliumkarbonat und Ethylenglykol aufgetragen über der Zeit bis zum Erreichen einer abgegebenen Heizenergie von 120 kWh

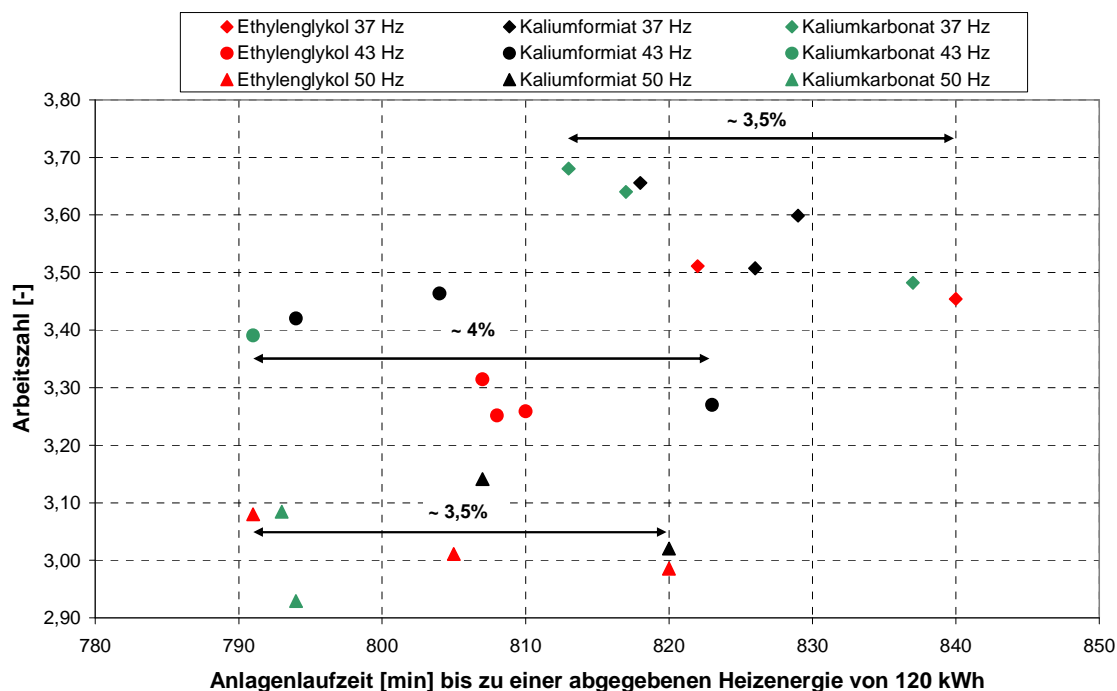


Abb. 36: Anlagenarbeitszahlen für Kaliumformiat, Kaliumkarbonat und Ethylenglykol aufgetragen über der Zeit bis zum Erreichen einer abgegebenen Heizenergie von 120 kWh

Die zu Abb. 33 analoge Auftragung der Arbeitszahlen über dem Temperaturhub von der ungestörten Erdreichtemperatur zur mittleren Kondensatoraustrittstemperatur in Abb. 37 ergibt ein nur minimal verändertes Bild.

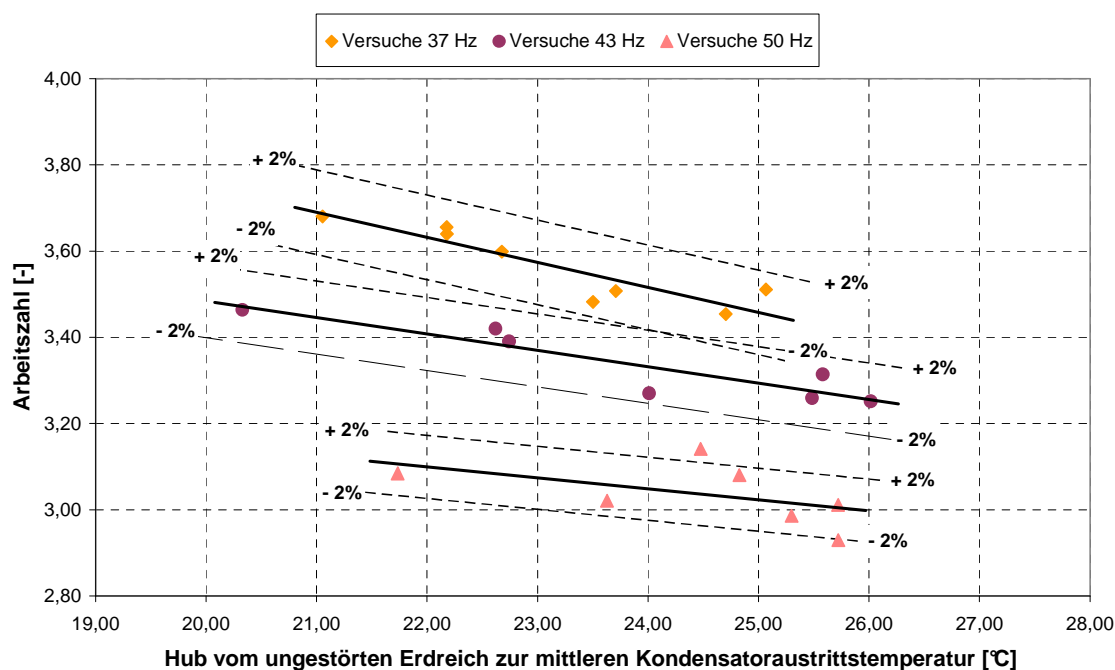


Abb. 37: Anlagenarbeitszahlen über die Laufzeit bis zum Erreichen einer abgegebenen Heizenergie von 120 kWh unterschieden nach Volumenströmen (identifiziert durch die Frequenz des Pumpenantriebs); aufgetragen über dem Hub von der ungestörten Erdreichtemperatur zur mittleren Kondensatoraustrittstemperatur

Der Grund für das geringfügig andere Bild ist in der Betrachtung unterschiedlicher Anlagenlaufzeiten, die zu geringfügig abweichenden Arbeitszahlen und einem leicht veränderten Temperaturhub führen, zu finden. Vom Ergebnis her gesehen sind die Versuche gleichen Volumenstroms wiederum in einer engen Bandbreite von ca. ± 2 % angeordnet, so dass auch hier unter Berücksichtigung der beschriebenen Charakteristik der Wärmepumpe (vgl. Abb. 34) der Einfluss durch die vorgenommenen Fluidwechsel an der Versuchsanlage bei ansonsten identischen Betriebsbedingungen (Temperaturhub) im Bereich von unter ± 3 % liegt.

3.5.5 Auswertung des Betriebsverhaltens der Gesamtanlage unter Einbeziehung der Versuche mit Wasser

Bei der Ausarbeitung des Versuchskonzepts war das Problem gegeben, einen Versuchsablauf zu finden, der einen Vergleich der Wärmeträgerflüssigkeiten unter möglichst realen Betriebsbedingungen erlaubt (vgl. Abschnitt 3.1). Dies bedeutet unter anderem, dass die Fluide in dem für sie vorgesehenen Einsatzbereich – bei Fluiden mit Frostschutz bis maximal an deren Frostgrenze – verglichen werden. Da der Einsatz von Wasser einen frostsicheren Anlagenbetrieb im Geothermiekreislauf erfordert, ergibt sich eine vorgegebene Grenze der Vergleichbarkeit durch die grundlegend verschiedenen Einsatzbereiche von Wärmeträgerfluiden mit Frostschutz gegenüber reinem Wasser, bei dem ein frostsicherer Betrieb nur oberhalb von 0 °C möglich ist.

Der gewählte Versuchsablauf trägt zunächst dem Ziel Rechnung, unterschiedliche Wärmeträgerfluide mit Frostschutz zu vergleichen. Damit wurden über die Versuchslaufzeit am Verdampferaustritt als der Stelle mit der tiefsten Temperatur im System des Geothermiekreislaufs bewusst Temperaturen im Frostbereich zugelassen (vgl. Abb. 22).

Im Rahmen des Vorhabens wurden erste Versuche mit Wasser ohne Frostschutzzusatz im Geothermiekreis der Versuchsanlage durchgeführt, ohne den gewählten Versuchsablauf abzuändern. Ziel war es, die Grenzen für den Einsatz von Wasser, in einer ansonsten auf den Betrieb mit Frostschutzgemischen ausgelegten Anlage, abzustecken. Gleichzeitig ermöglicht dies zumindest abschnittsweise einen Vergleich der Betriebsparameter der Anlage bei einem Betrieb mit Frostschutzgemischen gegenüber reinem Wasser.

Um die Versuche mit Wasser ohne Frostschutzmittel auswerten zu können, war eine ausreichend lange Versuchslaufzeit vor dem Erreichen einer kritischen Temperatur (Einfriergefahr) am Verdampferaustritt zu gewährleisten. Hierzu wurde der größte, in den Versuchen mit den Frostschutzgemischen gefahrene Volumenstrom gewählt, da im Geothermiekreis einer Wärmepumpenanlage mit größerem Volumenstrom die Verdampferaustrittstemperaturen höher liegen. Mit diesem Volumenstrom konnte eine Anlagenlaufzeit von etwas über 7 Stunden erreicht werden, bevor die Anlage wegen Einfriergefahr abgeschaltet werden musste.

Eine Gegenüberstellung der in diesem verkürzten Auswertzeitraum erreichten Anlagenarbeitszahlen liefert für Wasser eine vergleichsweise größere Arbeitszahl (siehe Abb. 38).

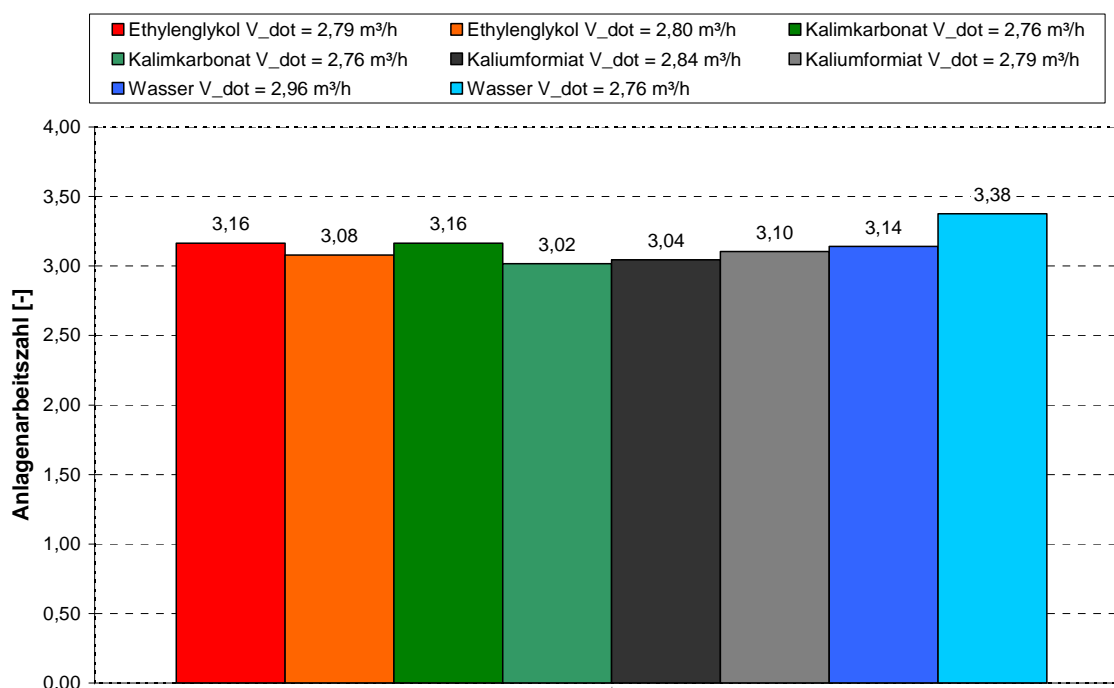


Abb. 38: Arbeitszahlen (7 h), gebildet über die Versuchslaufzeit von 7 Stunden – Vergleich Kaliumformiat, Kaliumkarbonat, Ethylenglykol und Wasser

Während sich bei den Versuchen mit den Frostschutzgemischen bei einer vorgeählten Pumpendrehzahl vergleichbare Volumenströme ergaben, lag der Volumenstrom bei einem ersten Versuch mit Wasser bei gleich eingestellter Pumpendrehzahl mit $2,96 \text{ m}^3/\text{h}$ signifikant höher (vgl. Legende Abb. 38). Die Ursache hierfür liegt im höheren Druckverlust bei den Frostschutzgemischen gegenüber Wasser, der durch den insgesamt hohen Volumenstrom deutlich zum Tragen kommt.

In einem zweiten Versuch mit Wasser wurde deshalb durch eine auf ca. 46 Hz reduzierte Pumpendrehzahl der Volumenstrom auf $2,76 \text{ m}^3/\text{h}$ an die Versuche mit den Frostschutzgemischen angepasst. In der Folge war bei diesem Versuch die Stromaufnahme der geothermieseitigen Umwälzpumpe über die betrachtete Anlagenlaufzeit geringer, was sich bei diesem, ansonsten gleichen Versuch in der höheren Arbeitszahl niederschlägt (vgl. Abb. 38).

Der hier angestellte Vergleich zwischen den untersuchten Frostschutzgemischen und Wasser ohne Frostschutzzusatz arbeitet den Aspekt des geringeren Druckverlusts bei Wasser aufgrund des durch die Versuchsdurchführung notwendigen hohen Volumenstroms sehr deutlich heraus.

Ein direkter Vergleich zwischen reinem Wasser und Frostschutzgemischen durch Versuche in ein und derselben Anlage ist aufgrund der dargelegten unterschiedlichen Einsatzbereiche zum einen im Frostbereich und zum anderen oberhalb von

0 °C nicht möglich. Die unterschiedlichen Einsatzbereiche erfordern eine grundlegend andere Sondenauslegung mit ggf. zusätzlich jeweils angepasster Anlagenkonfiguration. Ein Vergleich der Effizienz bei einem Betrieb mit reinem Wasser und einem Betrieb mit Frostschutzgemischen ließe sich bestenfalls über einen Vergleich zweier entsprechend angepasster und optimierter Anlagen miteinander herstellen.

3.6 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Die Auswertung der durchgeführten Versuche ergibt, dass sich die untersuchten Frostschutzgemische im Ergebnis hinsichtlich der Anlagenkennzahlen, wie z. B. dem COP_{gesamt} der Gesamtanlage und der Anlagenarbeitszahl, nur geringfügig unterscheiden. Berücksichtigt man in der Auswertung, dass bei einer realen Versuchsanlage durch witterungsbedingte Einflüsse nie ganz identische Rahmenbedingungen herrschen, so liegt der Unterschied in der Anlagenarbeitszahl über einen identischen Auswertungszeitraum und in der Anlagenarbeitszahl bis zum Erreichen einer bestimmten abgegebenen Wärmemenge unter $\pm 3\%$.

Die Unterschiede in den Arbeitszahlen werden dabei im Wesentlichen durch eine unterschiedliche elektrische Leistungsaufnahme der geothermieseitigen Umwälzpumpe bei den verschiedenen Fluiden hervorgerufen. Die Unterschiede in den hydraulischen Eigenschaften der einzelnen Fluide treten deshalb so deutlich zutage, weil die geothermieseitige Umwälzpumpe in der verwendeten Versuchsanlage im Verhältnis größer dimensioniert ist als bei handelsüblichen Anlagen. Daraus resultiert ein gegenüber der sonstigen Praxis höherer Volumenstrom mit entsprechend sich daraus ergebenden höheren Druckverlusten und folglich größeren Unterschieden im Druckverlust und der elektrischen Leistungsaufnahme der Umwälzpumpe. Es ist festzuhalten, dass in der Praxis ein von der Größe des Druckverlustes abhängiges Optimierungspotential durch einen auf Anlage und Fluid angepassten geothermieseitigen Volumenstrom vorhanden ist, vgl. Abschnitt 4.2.4.

Erste Versuche mit Wasser zeigen, dass in der Versuchsanlage bei den Betriebsbedingungen entsprechend der Versuche mit Frostschutzgemischen bereits nach wenigen Betriebsstunden kritische Temperaturen knapp über 0 °C erreicht werden. Ein direkter Vergleich zwischen den untersuchten Frostschutzgemischen und Wasser war daher nur bedingt und über den sich für einen Betrieb mit Wasser ergebenden verkürzten Betriebszeitraum möglich. Erwartungsgemäß liefert Wasser für diesen Zeitraum aufgrund der durchweg besten Stoffeigenschaften das beste Betriebsergebnis. Der grundlegend unterschiedliche Einsatzbereich -zum einen bis in den Frostbereich, zum anderen oberhalb von 0 °C- erfordert eine grundsätzlich verschiedene Anlagenauslegung, so dass vergleichende Versuche zum realen Betrieb in ein und derselben Anlage nicht möglich sind. Ein umfassender Vergleich der Effizienz bei einem Betrieb mit reinem Wasser und einem Betrieb mit Frostschutzgemischen ließe sich nur über einen Vergleich zweier entsprechend angepasster und optimierter Anlagen herstellen.

4 Modellbildung und Simulation

Arbeitsphase III des Vorhabens an der Hochschule Biberach umfasste die Erstellung eines thermisch-energetischen Simulationsmodells, welches das Betriebsverhalten einer typischen Wärmepumpenanlage samt einer Erdwärmesonde sowie hydraulischem Kreislauf zwischen Wärmepumpe und Sonde abbildet. Dieses Modell erlaubt die vergleichende Berechnung der Temperaturen, Leistungs- und Arbeitszahlen sowie des Volumenstroms im Geothermiekreislauf für verschiedene Wärmeträgerfluide unter identischen Randbedingungen, so dass ein exakter Vergleich möglich ist.

4.1 Gesamt-Simulationsmodell erdgekoppelter Wärmepumpen

Basierend auf einem ersten Prototyp des Gesamtmodells wurde das für das Vorhaben benötigte Modell im Rahmen der Master-Thesis von Ph. Feuerstein entwickelt, implementiert und auf verschiedene Wärmeträgerfluide angewendet. Die vollständige Dokumentation des Modells und der Simulationsergebnisse findet sich in [Feu09]. Abb. 39 zeigt eine Übersicht über das Modell, seine Komponenten und die darin abgebildeten Wechselwirkungen.

Um die erforderliche energetische Vergleichbarkeit bei verschiedenen Wärmeträgerfluiden und daraus resultierend, unterschiedliche Betriebszustände zu gewährleisten, wurde als feste nutzungsseitige Randbedingung eine konstante Kondensationstemperatur des Kältemittels von 40 °C vorgegeben, was in der Praxis einer Vorlauftemperatur auf der Heizseite von ca. 35 °C entspricht. Ausgegangen wurde von einer handelsüblichen Wärmepumpe eines einschlägigen Herstellers mit einem einstufigen, unregelmäßigen Scroll-Verdichter und einer unregelmäßigen Umwälzpumpe im Geothermiekreislauf. Die Regelung erfolgt im Ein- und Ausschaltbetrieb, d. h. die Wärmepumpe beaufschlagt das Erdreich in wiederkehrenden Betriebsphasen mit voller Leistung, die von Betriebspausen unterbrochen werden. Die Leistungszahl (COP), die Heizleistung und die Verdampferleistung (= Wärmeentzugsleistung an der Erdwärmesonde) von Wärmepumpen hängen stark von den nutzungs- und erdreichseitigen Betriebstemperaturen ab. Bei Vorliegen einer Leistungsanforderung seitens des Wärmeverbrauchers startet die Wärmepumpe in eine neue Betriebsphase und es stellt sich das folgende gekoppelte Betriebsverhalten der Anlage an:

Zu Beginn der Betriebsphase liegen aufgrund der vorangegangenen Betriebspause erhöhte, d. h. verhältnismäßig hohe Erdreich- und Fluidtemperaturen im Geothermiekreislauf vor. Die Umwälzpumpe im Geothermiekreislauf wälzt zunächst den maximalen Volumenstrom an Wärmeträgerfluid in dieser Betriebsphase um, da die Zähigkeit des Wärmeträgerfluids und somit die Druckverluste im Geothermiekreislauf bei höheren Fluidtemperaturen geringer sind. Die Wärmepumpe entzieht dem Erdreich aufgrund des geringen Temperaturhubes zwischen Geothermie- und Heizkreis eine hohe Wärmeleistung und liefert eine hohe Heizleistung bei hoher Leistungszahl. Durch den anfangs starken Wärmeentzug wird das Erdreich um die Erdwärmesonde zunächst rasch abgekühlt. Damit sinken auch

die Temperaturen des Wärmeträgerfluids zunächst schnell ab, was einen (i. d. R. geringfügig) zurückgehenden Volumenstrom im Geothermiekreislauf sowie eine veränderte Wärmeübertragung in den Sondenrohren und eine veränderte Spreizung zwischen der Vor- und der Rücklaufemperatur des Wärmeträgerfluids zur Folge hat. Diese Effekte führen zu veränderten Betriebsdaten der Wärmepumpe (in erster Linie: zurückgehende Heiz- sowie Verdampferleistung), mit entsprechend veränderten Rückwirkungen auf das Erdreich, das Wärmeträgerfluid usw. Neben den thermischen Leistungen verändern sich dabei auch die elektrischen Antriebsleistungen der Wärmepumpe und der Umwälzpumpe, was ebenfalls die Leistungs- und Arbeitszahlen der einzelnen Komponenten sowie der Gesamtanlage beeinflusst.

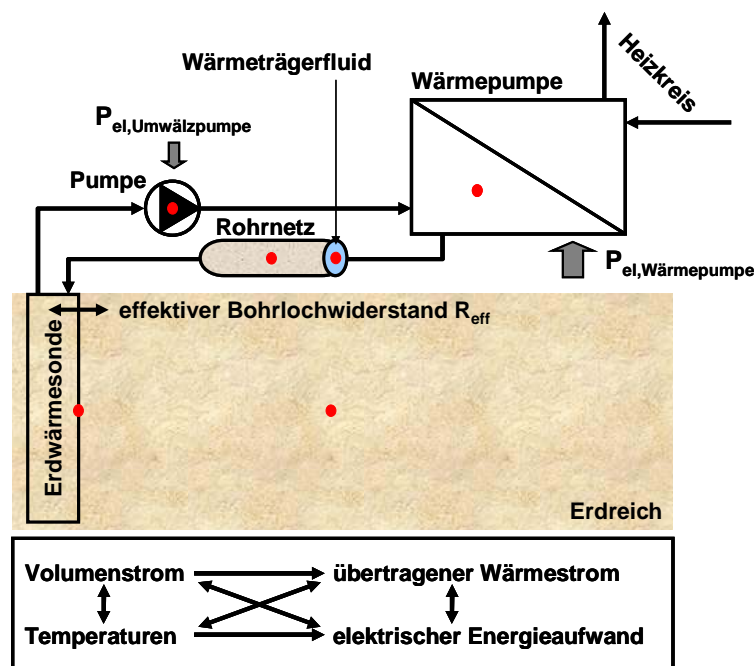


Abb. 39: Übersicht über das Gesamtmodell und die thermisch-energetischen Wechselwirkungen zwischen den Komponenten bzw. Teilmodellen [Feu09]

Im entwickelten Modell wird dieses Anlagenverhalten durch eine dynamische, vollständig gekoppelt-iterative Berechnung der folgenden Teilmodelle abgebildet (Details hierzu siehe [Feu09]):

1. Wärmepumpe: Stationäres Kennlinienmodell des Verdichters nach Herstellerdaten und mit Berücksichtigung einer Grädigkeit im Verdampfer.
2. Wärmeübertragung im Bohrloch: Analytisches stationäres Modell des Bohrlochwiderstandes nach Hellström [He91] inklusive fluid-, temperatur- und volumenstromabhängiger Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten in den Sondenrohren nach Hausen und Gnielinski [Bo02].

3. Erdreichmodell: Dynamische Berechnung der Erdreichtemperatur in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des Erdreichs als Reaktion auf den zeitvariablen Verlauf der Wärmeentzugsleistung mit der zugehörigen dimensionslosen Temperatur-Sprungantwortfunktion („g-function“) unter Anwendung des Superpositionsprinzips [Es87]. Für die „g-function“ wurde die Integral-Exponentialfunktion der Kelvin’schen Linienquellentheorie mittels Reihenentwicklung mit 250 Gliedern berechnet.

4. Umwälzpumpe: Das Verhalten der Umwälzpumpe im Geothermiekreislauf ist für jedes untersuchte Wärmeträgerfluid als fluid- und temperaturabhängige Kennlinie abgebildet, die mit Hilfe eines Auslegungsprogramms des Pumpenherstellers erstellt wurde.

5. Hydraulisches Verhalten des Geothermiekreislaufes: Der sich im Geothermiekreislauf einstellende Volumenstrom hängt ab vom Wärmeträgerfluid und dessen Temperatur sowie von der zugehörigen Pumpen- und Druckverlust-Anlagenkennlinie. Der jeweilige fluid- und temperaturabhängige Betriebspunkt (Volumenstrom, Druckverlust sowie elektrische Leistungsaufnahme der Umwälzpumpe) ergibt sich als Schnittpunkt aus der Pumpen- und der Druckverlust-Kennlinie. Für jedes untersuchte Fluid wurden Kennlinien für den Volumenstrom und den Pumpenwirkungsgrad aus den temperaturabhängigen Betriebspunkten der betrachteten Anlagenkonfiguration erstellt und in das Modell integriert.

6. Die benötigten Stoffeigenschaften der verschiedenen Wärmeträgerfluide sind als temperaturabhängige Kennlinien hinterlegt, die auf Herstellerangaben, dem VDI-Wärmeatlas sowie dem Softwarepaket CoolPack [Co98] erstellt basieren.

Für jeden simulierten Zeitschritt werden die, über die Fluidtemperatur gekoppelten Teilmodelle iterativ so oft gelöst, bis Konvergenz erreicht ist. Über das dynamische Modell des Erdreichs ergibt sich ein dynamisches Verhalten, bei dem das Ergebnis jedes berechneten Zeitschritts von den Ergebnissen der vorhergehenden Zeitschritte abhängt.

Um innerhalb der kurzen Projektlaufzeit das Modell in der vollen Komplexität implementieren, testen und umfassend anwenden zu können, wurde die für derartige Aufgaben entwickelte Berechnungs- und Programmierumgebung EES (Engineering Equation Solver) [EES] als Plattform ausgewählt. Die Zeitschrittweite der Simulationen betrug 15 Minuten. In Anlehnung an die durchgeführten Versuche wurden Betriebsphasen von 15 Stunden, also jeweils 60 Zeitschritte zu je $\frac{1}{4}$ Stunden, simuliert, die jeweils bei derselben ungestörten Erdreichtemperatur starteten.

4.2 Simulationsergebnisse

4.2.1 Simulierte Anlage und Randbedingungen

Für die Simulationen wurde eine für ein Einfamilienhaus typische Kleinanlage als Vergleichsbeispiel mit den folgenden Kenndaten und Randbedingungen ausgewählt und jeweils ein 15 Stunden durchgehender Heizbetrieb ausgehend vom ungestörten Erdreich simuliert [Feu09]:

- Erdreich: Wärmeleitfähigkeit: 3 W/(m·K),
volumenbezogene Wärmekapazität: 2,18 MJ/(m³·K),
ungestörte mittlere Erdreichtemperatur: 12,4 °C.
- Erdwärmesonde: eine Doppel-U-Sonde (DN 32x2,9, Polyethylen),
Bohrlochtiefe: 100 m,
Bohrlochdurchmesser: 0,18 m,
Wärmeleitfähigkeit Verfüllmaterial: 2,0 W/(m·K),
Schenkelabstand: 0,07 m.
- Wärmepumpe: Nenn-Heizleistung: 7,8 kW im Nenn-Betriebspunkt,
B0W35 (Sole: 0 °C, Heizungs-Vorlauf: 35 °C),
Leistungszahl (COP): 4,4 im Nenn-Betriebspunkt.
- Umwälzpumpe: UPS 32-55 (Grundfos).
- Geothermiekreislauf: Verteilleitungen DN 40x3,7 insgesamt 10 m,
Verteiler $\Delta p_n = 10^5$ Pa; $\dot{V}_N = 7,7$ m³/h,
Anschlussleitungen DN 32x2,9 insgesamt 5 m.
- Wärmeträgerfluide: Wasser (ohne Frostschutzzusatz),
Gemisch aus Ethylenglykol (25 %) und Wasser,
Gemisch aus Kaliumkarbonat (20 %) und Wasser,
Gemisch aus Kaliumformiat (20 %) und Wasser,
Gemisch aus Propylenglykol (25 %) und Wasser.

Die vier erstgenannten Wärmeträgerfluide entsprechen den in den Versuchen eingesetzten Flüssigkeiten, wobei allerdings für Kaliumformiat die Daten aus dem Programmpaket CoolPack [Co98] verwendet wurden, die sich auf ein anderes als das in den Versuchen eingesetzte Produkt beziehen, da hierfür keine gesicherten Stoffdaten vorliegen, siehe Abschnitt 3.5.1. Ergänzend wurde noch ein Propylenglykol-Wasser-Gemisch untersucht, weil dieses innerhalb der Gesamtheit der in Frage kommenden Wärmeträgerfluide die höchste kinematische Viskosität aufweist.

4.2.1 Wärmeübertragung in der Erdwärmesonde und Bohrlochwiderstand

In Abb. 40 sind die Wärmeübergangskoeffizienten der fünf Wärmeträgerfluide im Sondenrohr in Abhängigkeit von der Temperatur und vom Volumenstrom für das

jeweilige Fluid aufgetragen. Die Bereiche mit sehr nahe zusammenliegenden Iso-
 linien (Linien konstanter Werte) des Wärmeübergangskoeffizienten zeigen den
 laminar-turbulenten Umschlag der Strömung an. Entsprechend der unterschiedlichen
 Stoffeigenschaften unterschieden sich die Wärmeübergangskoeffizienten bei
 gleicher Temperatur und gleichem Volumenstrom bei identischer Strömungsform
 (laminar bzw. turbulent) um maximal ca. 50 % (bezogen auf den geringeren
 Wert, ohne Propylenglykol). Noch größere Unterschiede treten auf, wenn sich an
 einem bestimmten Punkt ein Fluid im laminaren und eines im turbulenten Strö-
 mungsbereich befindet (v. a. Propylenglykol im Vergleich zu den anderen Flui-
 den).

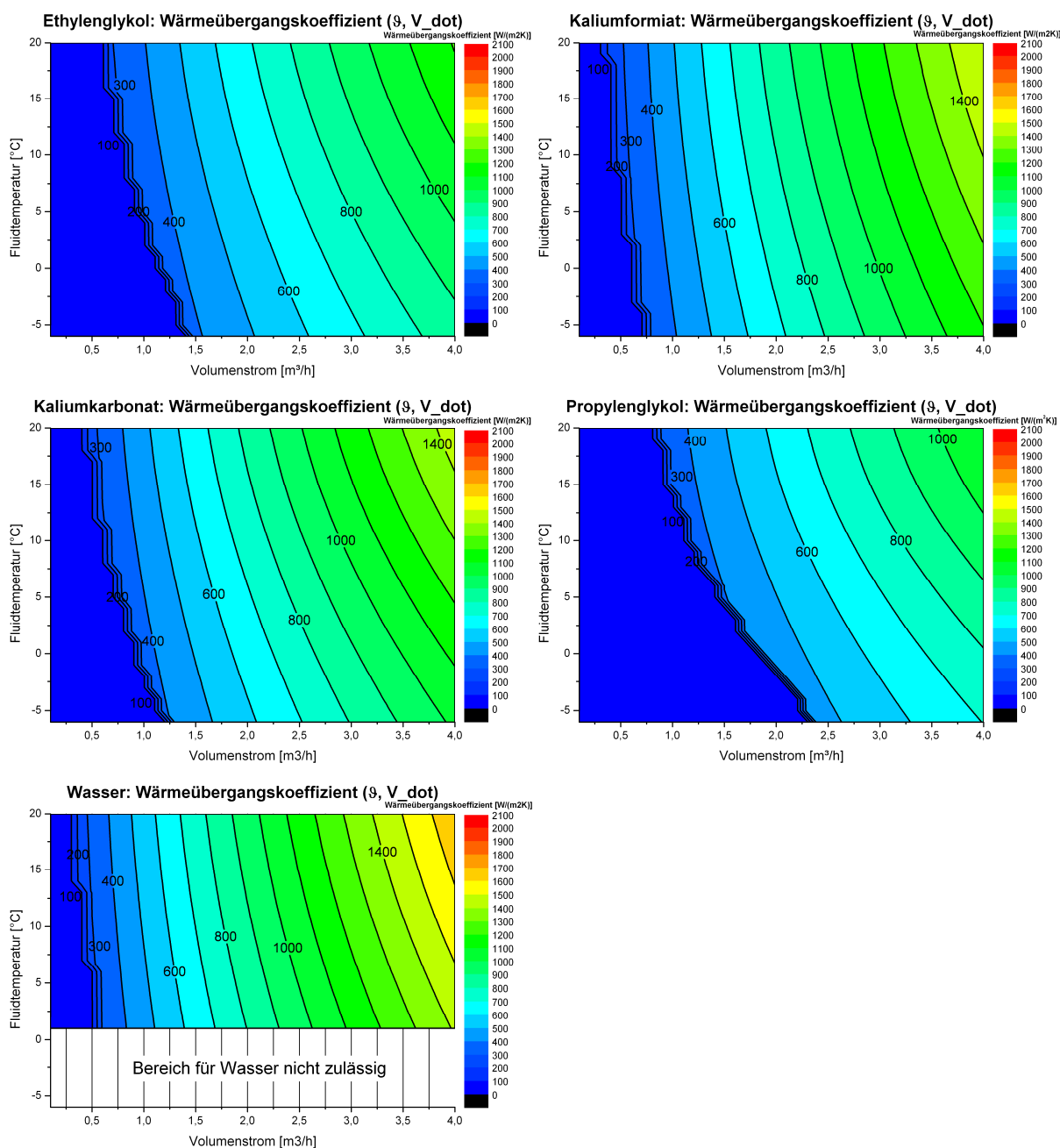


Abb. 40: Berechnete Wärmeübergangskoeffizienten der untersuchten Wärmeträgerfluide im Sondenrohr in Abhängigkeit von der Fluidtemperatur und vom Volumenstrom in einer Doppel-U-Sonde DN 32 [Feu09]

Der Wärmeübergang in den Sondenrohren beeinflusst den Bohrlochwiderstand der Erdwärmesonden, siehe Abb. 41. Da sich der gesamte Bohrlochwiderstand aus mehreren Teilwiderständen zusammensetzt (z. B. Wärmeleitwiderstände der Kunststoffrohre und der Bohrlochverfüllung), die mit dem Wärmeübergangswiderstand in Reihe geschaltet sind, fallen die Unterschiede bei ansonsten identischen Eigenschaften des Bohrlochs jedoch verhältnismäßig gering aus. Abweichend von den in Abschnitt 4.2.1 genannten Randbedingungen wurde für die Voruntersuchungen, die Abb. 41 zugrunde liegen, im Bohrloch ein Verfüllmaterial mit einer schlechteren Wärmeleitfähigkeit von nur 0,6 W/(m·K) angesetzt, woraus etwas geringere Unterschiede resultieren.

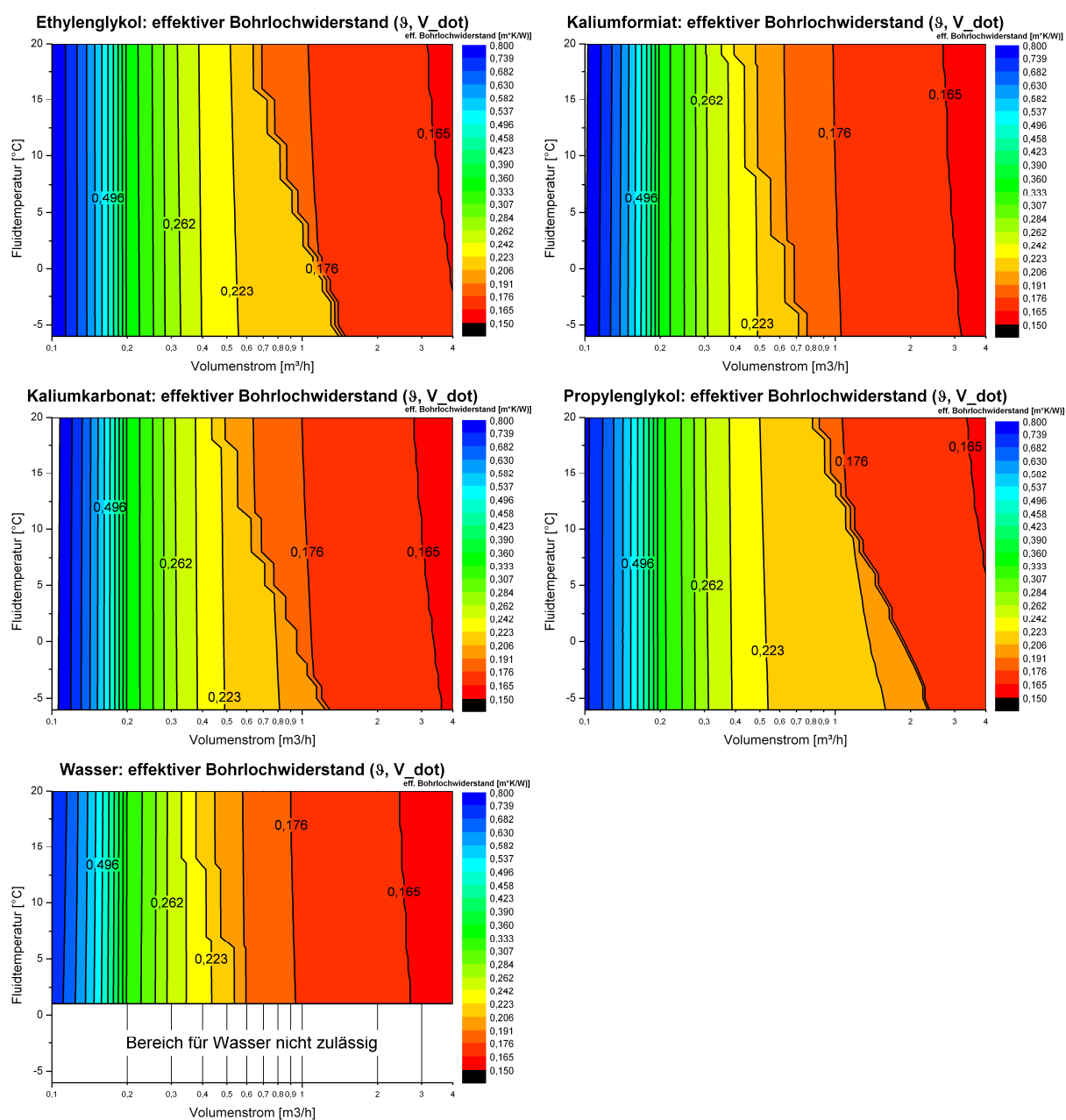


Abb. 41: Berechnete effektive Bohrlochwiderstände bei Betrieb mit den untersuchten Wärmeträgerfluiden in Abhängigkeit von der Fluidtemperatur und vom Volumenstrom [Feu09]

4.2.2 Hydraulisches Verhalten der Anlage

Abb. 42 zeigt auf, wie sich im Betrieb mit der unregulierten Umwälzpumpe und bei sich verändernder Fluidtemperatur im Geothermiekreislauf der umgewälzte Volumenstrom verändert. Die Anlagenkennlinien im Diagramm zeigen den Gesamt-Druckverlust im Geothermiekreislauf für verschiedene Fluidtemperaturen in Abhängigkeit vom Volumenstrom. Die Pumpenkennlinien stellen entsprechend die Förderhöhe, d. h. den Druck, den die Pumpe bei der jeweiligen Fluidtemperatur und beim jeweiligen Volumenstrom aufbauen kann, dar. Der sich jeweils einstellende Betriebspunkt ist der Schnittpunkt von Pumpen- und Anlagenkennlinie gleicher Temperatur. Dieser ist in derselben Anlage für jedes Fluid auf eine bestimmte Weise temperaturabhängig (siehe eingekreister Bereich in Abb. 42). Die Schnittpunkte beschreiben den temperaturabhängigen Zusammenhang zwischen Fluidtemperatur und Volumenstrom, wie er sich im Betrieb in dieser Anlage einstellt.

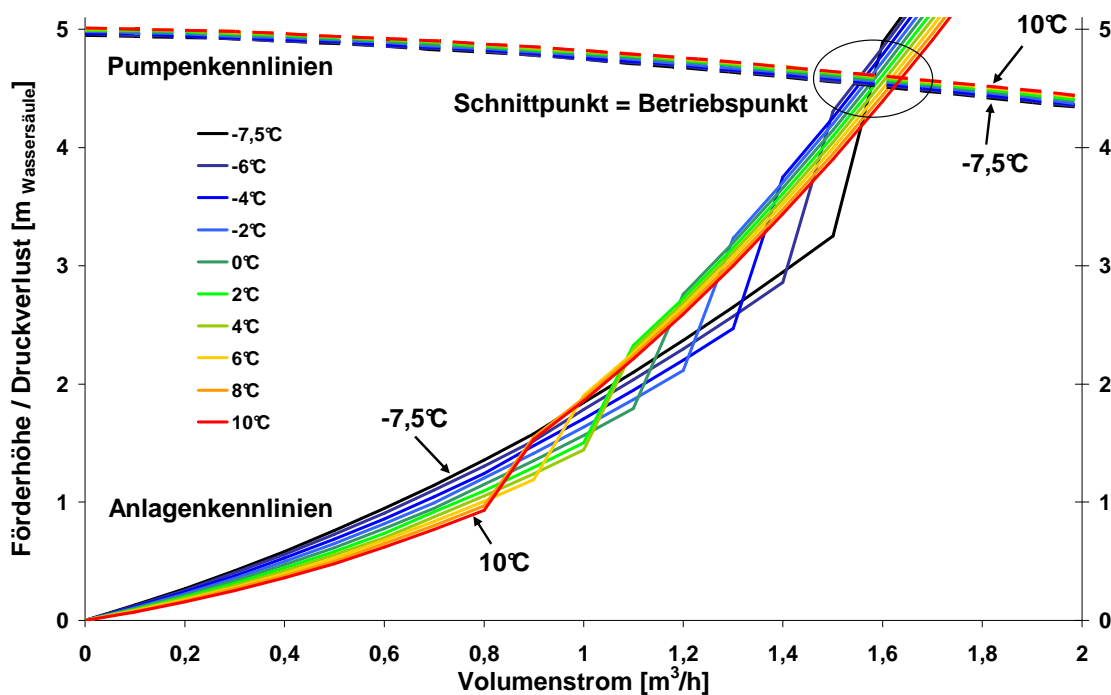


Abb. 42: Ermittlung der temperaturabhängigen Punkte der Betriebskennlinie der simulierten Anlage als Schnittpunkt aus Pumpen- und Anlagenkennlinie in Abhängigkeit von der Fluidtemperatur für den Betrieb mit Ethylenglykol [Feu09]

Wie sich dies in den durchgeführten Simulationen auswirkt, ist Abb. 43 zu entnehmen, welche die Volumen- und zugehörigen Wärmekapazitätsströme der Fluide während des Simulationszeitraums enthält. Entsprechend der Temperaturabnahme durch den Wärmentzug und die dadurch steigende Viskosität der Fluide nehmen der umgewälzte Volumenstrom und der Wärmekapazitätsstrom mit der Zeit geringfügig ab.

Einzig Propylenglykol zeigt ein davon abweichendes Verhalten, weil dort nach vier Stunden die Strömung in den Sondenrohren von turbulent nach laminar umschlägt, was einen deutlich schlechteren Wärmeübergang und daraus resultierende

rend eine tiefere Fluidtemperatur zur Folge hat (vgl. auch Abb. 44). Dass in Abb. 43 der Volumenstrom bei Propylenglykol nach 9 Stunden trotz abnehmender Fluidtemperatur, d. h. zunehmender Viskosität, ansteigt, ist physikalisch nicht real, sondern ein Artefakt der im Modell gewählten Interpolation der Betriebskennlinie im Übergangsbereich zwischen laminarer und turbulenter Strömung. Dieses Problem wird in [Feu09] im Detail erörtert. Seine Lösung blieb im Projektverlauf aus Zeitgründen unvollendet und ist künftigen Arbeiten vorbehalten. Da es sich jedoch nur um einen Detaileffekt handelt, ist der Einfluss auf die Genauigkeit der Gesamtergebnisse gering.

Insgesamt stellen sich je nach Fluid Volumenströme zwischen 1,45 bis 1,5 m³/h (Kaliumkarbonat) und ca. 1,75 m³/h (Wasser) ein, was knapp 10 % über bzw. unter dem Mittelwert von ca. 1,61 m³/h (Ethylenglykol) liegt. Bei den Wärmekapazitätsströmen ist die Bandbreite mit ca. 1550 bis 2050 W/K, also ±14 % um den Mittelwert, größer.

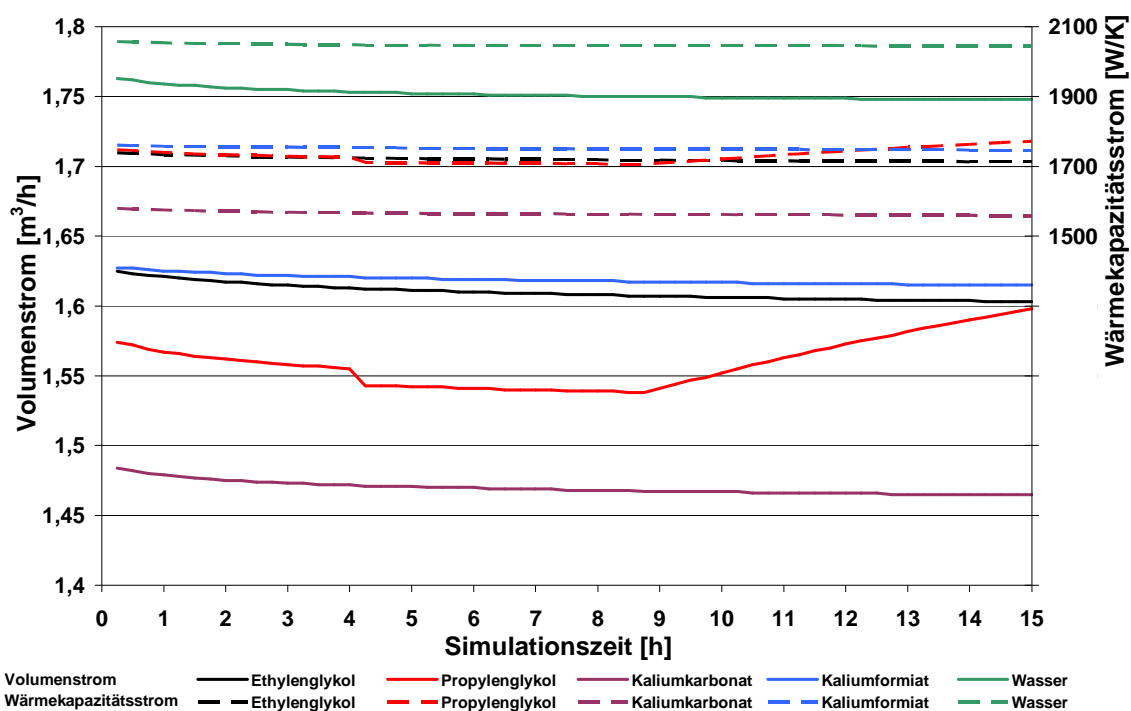


Abb. 43: Mit Hilfe der gemäß Abb. 42 ermittelten Betriebskennlinien simulierte Volumen- und Wärmekapazitätsströme der verschiedenen Wärmeträgerfluide [Feu09]

4.2.3 Thermisches und energetisches Verhalten der Anlage

Abb. 44 zeigt den Verlauf der mittleren Temperatur der verschiedenen Wärmeträgerfluide in der Sonde sowie die jeweils zugehörige elektrische Leistungsaufnahme der Umwälzpumpe. Die unterschiedlichen Stoffdaten und daraus resultierenden Betriebskennlinien führen für die verschiedenen Fluide zu elektrischen Leistungsaufnahmen der Umwälzpumpe zwischen 95 und 100 W, mit Ausnahme von Propylenglykol, bei dem aufgrund des turbulent-laminaren Übergangs/Umschlags die elektrische Antriebsleistung der Umwälzpumpe zeitweilig auf 75 W zurückgeht (vgl. vorhergehender Abschnitt).

Die Auswirkungen des gewählten Fluids auf die thermischen und energetischen Verhältnisse im Geothermiekreislauf lassen sich dem Verlauf der mittleren Fluidtemperatur in Abb. 44, der spezifischen Sondenentzugsleistung in Abb. 45 sowie Abb. 46 entnehmen. Für die verschiedenen Fluide ergeben sich nur geringe Unterschiede, wobei wiederum Propylenglykol die größte Abweichung von den anderen Fluiden zeigt. Die Unterschiede resultieren aus den unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten und damit Bohrlochwiderständen in der Erdwärmesonde sowie den unterschiedlichen Temperaturspreizungen zwischen Vor- und Rücklauf. Sind die Fluidtemperaturen höher, sind auch die Heizleistung der Wärmepumpe sowie deren Verdampferleistung größer. Dies ist jedoch unmittelbar mit einem stärkeren Wärmeentzug in der Sonde verbunden, was wiederum zu einem stärkeren Absinken der Fluidtemperatur im Betrieb führt, weil mehr Wärme über den Bohrlochwiderstand übertragen und aus dem umgebenden Erdreich entzogen wird. Diese gegenläufigen Effekte führen in der Summe dazu, dass im Systemzusammenhang im Betrieb die Unterschiede für die verschiedenen Fluide geringer ausfallen als aus den unterschiedlichen einzelnen Stoffdaten zunächst zu vermuten wäre.

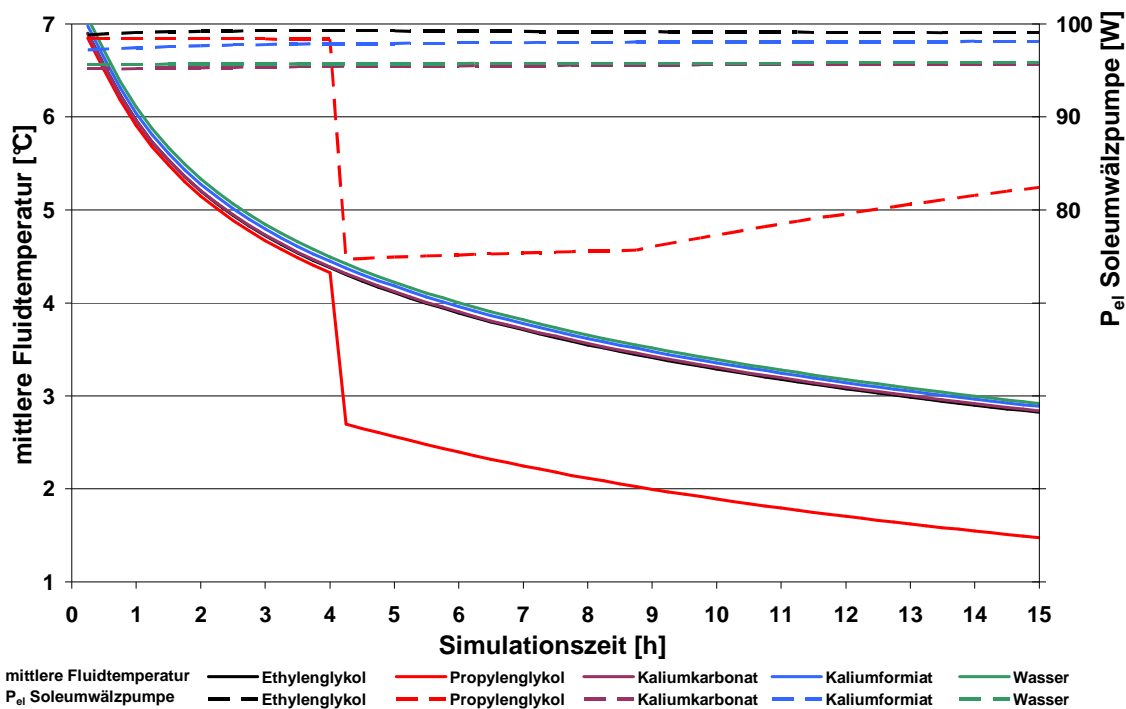


Abb. 44: Mittlere Fluidtemperaturen und elektrische Umwälzpumpenleistungen während der simulierten Betriebsphase [Feu09]

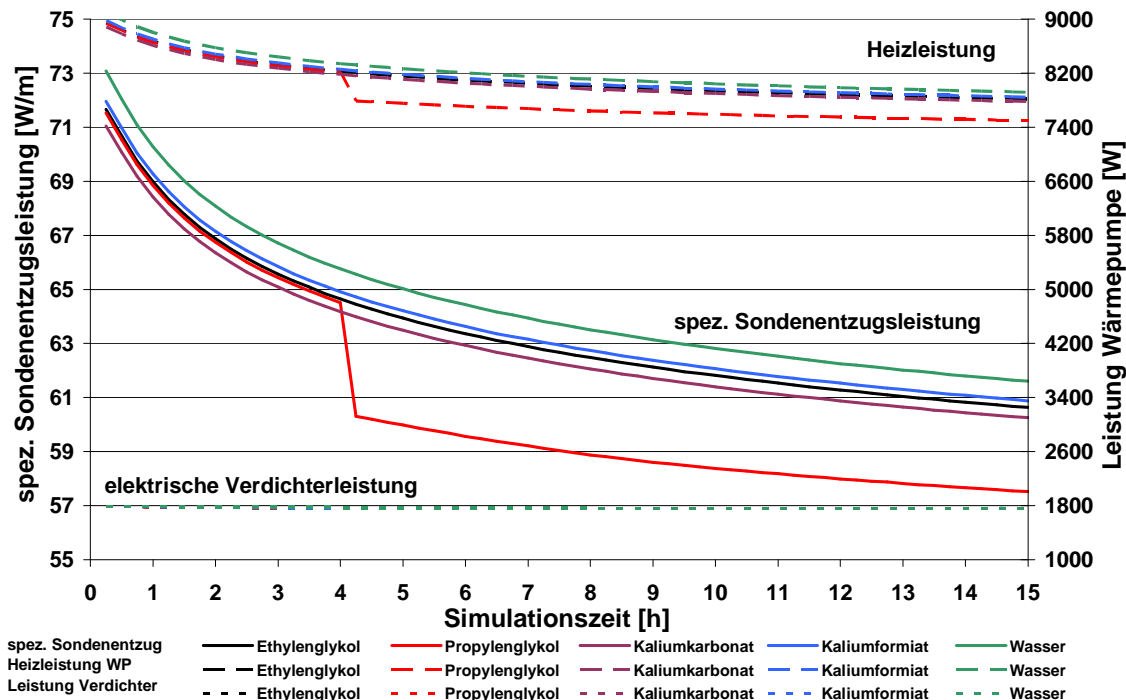


Abb. 45: Spezifische Sondenentzugsleistung sowie Heiz- und elektrische Verdichterleistung der Wärmepumpe während der simulierten Betriebsphase [Feu09]

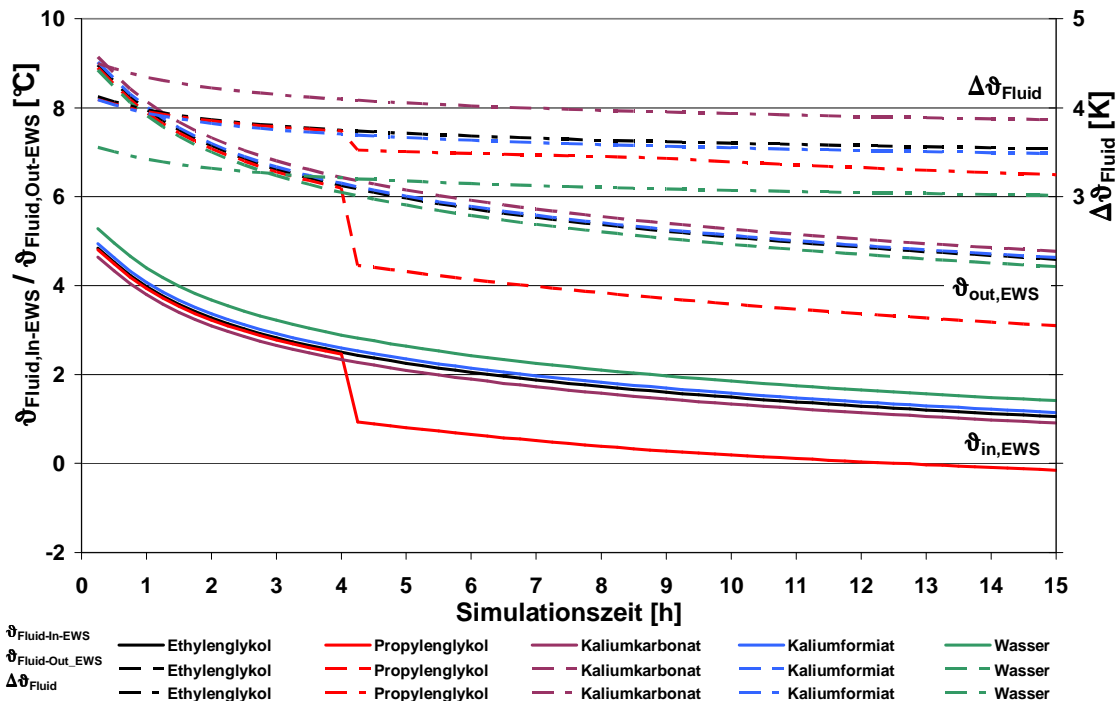


Abb. 46: Temperaturspreizung sowie Fluidtemperaturen am Eistritt und Austritt der Erdwärmesonde während der simulierten Betriebsphase [Feu09]

Diese teilweise Einebnung der Betriebsergebnisse für die verschiedenen Fluide schlägt sich direkt in den Leistungszahlen der Wärmepumpe sowie der Gesamtanlage ($COP_{ges} = \text{Heizleistung} / \text{Summe elektrische Leistung Wärmepumpe und Umwälzpumpe}$) nieder. Inklusive Propylenglykol, d. h. bei z. T. laminarer Strömung in den Sondenrohren, betragen die Unterschiede zwischen den betrachteten Fluiden maximal 5 %. Ohne Propylenglykol, d. h. bei durchgehend turbulenter Strömung aller Fluide in den Sondenrohren, unterscheiden sich die Fluide um weniger als 3 % voneinander.

Wird anstelle des gut Wärme leitenden Verfüllmaterials mit 2,0 W/(mK) ein schlechteres Material mit nur 0,6 W/(mK) Wärmeleitfähigkeit zur Verfüllung des Bohrlochs eingesetzt, ergibt sich ein ungünstigerer (höherer) Bohrlochwiderstand. Daraus resultieren tiefere Fluidtemperaturen und dementsprechend niedrigere Leistungszahlen, siehe Abb. 47 und [Feu09]. Die relativen Unterschiede zwischen den einzelnen Fluiden sind etwas geringer als bei der besser Wärme leitenden Bohrlochverfüllung. Die schwarzen Punkte auf den Kurven für Wasser in Abb. 48 zeigen den Zeitpunkt, ab dem die mittlere Fluidtemperatur 0 °C unterschreitet, womit ein Betrieb mit Wasser bei dieser Anlage und dem schlechteren Verfüllmaterial nur für wenige Stunden möglich wäre. Im Standardfall mit der besseren Bohrlochverfüllung wird dieser Punkt innerhalb der simulierten 15 Stunden nach Inbetriebnahme noch nicht erreicht, siehe Abb. 46.

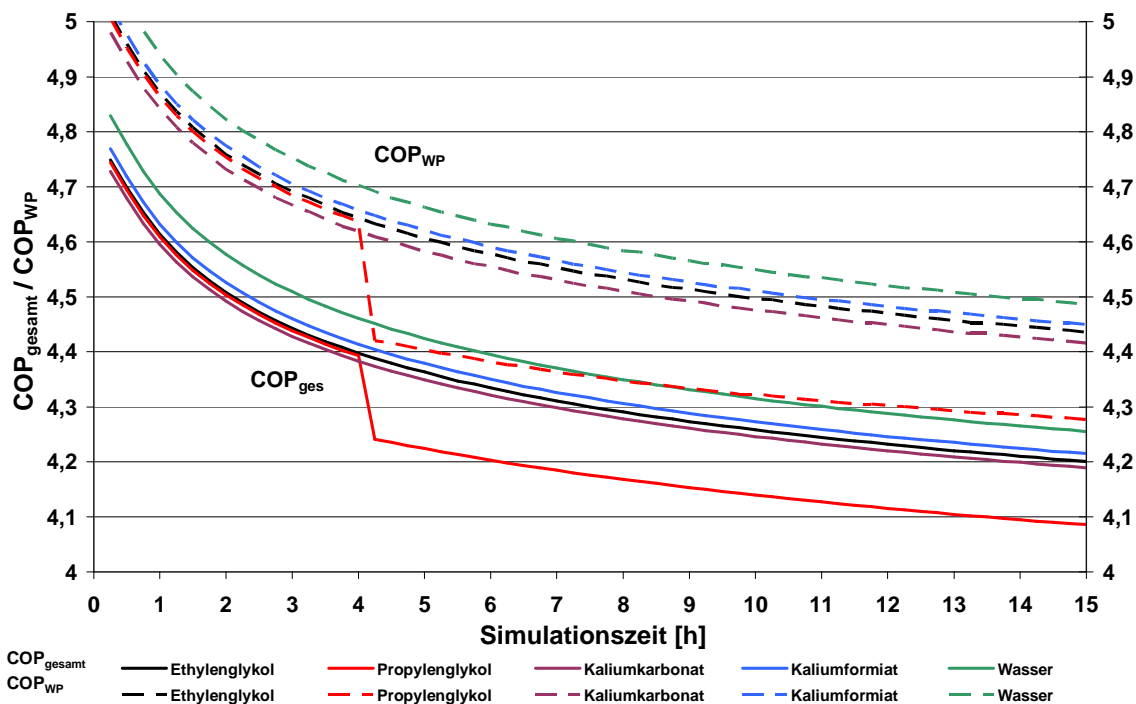


Abb. 47: Leistungszahl der Wärmepumpe und Anlagenleistungszahl während der simulierten Betriebsphase [Feu09]

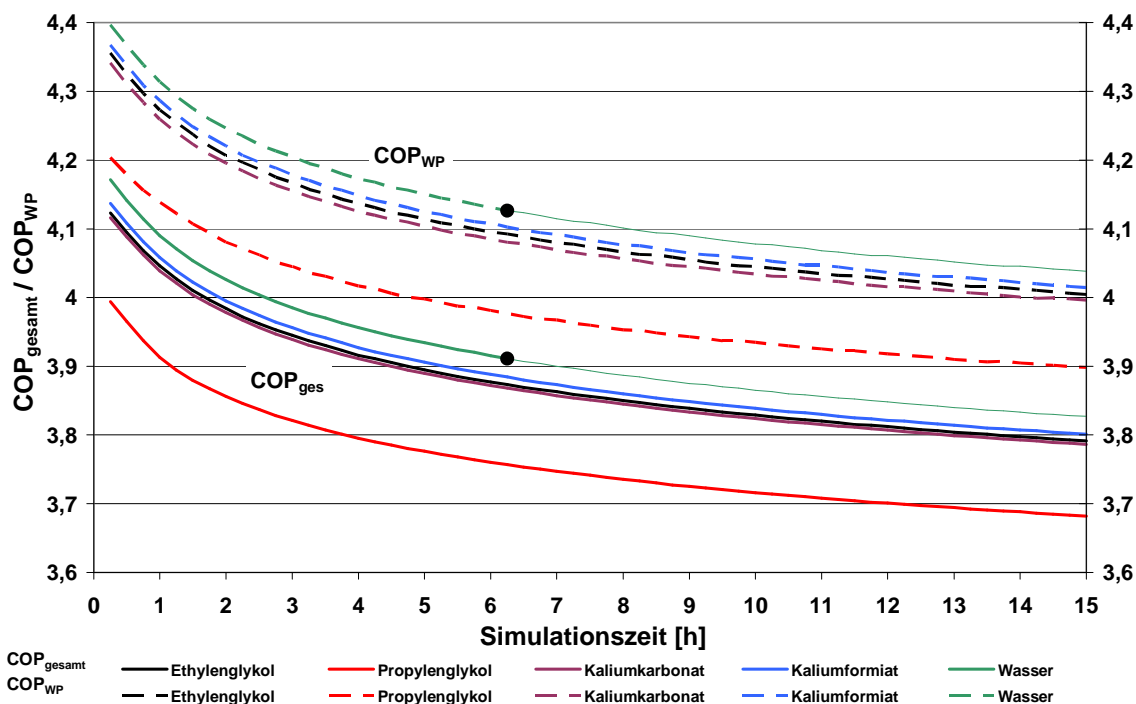


Abb. 48: Leistungszahl der Wärmepumpe und Anlagenleistungszahl während der simulierten Betriebsphase bei Verwendung eines schlechteren Verfüllmaterials [Feu09]

4.2.4 Optimierung des Volumenstroms im Geothermiekreislauf

Die vorhergehenden Simulationen beinhalten stets dieselbe Umwälzpumpe im Geothermiekreislauf und die sich dann in der Anlage einstellenden Volumenströme der Wärmeträgerfluide. Eine Anpassung bzw. Optimierung des im Geothermiekreislauf umgewälzten Volumenstroms für jedes Fluid ist dabei nicht berücksichtigt. Es könnten also zufällig für ein Fluid sehr ungünstige und für ein anderes nahezu optimale hydraulische Verhältnisse betrachtet worden sein, was die Vergleichbarkeit zunächst einschränkt. Deshalb wurden zusätzliche Simulationsreihen durchgeführt, bei denen der Volumenstrom für jede einzelne Simulation fest vorgegeben und die elektrische Leistungsaufnahme der Umwälzpumpe nach Gleichung (1) mit einem festen Wirkungsgrad berechnet wurde. Durch Variation des Volumenstroms kann dann ein für die Anlagenarbeitszahl optimaler Volumenstrom für jedes Fluid bestimmt und die Resultate mit anderen Fluiden verglichen werden.

Abb. 49 enthält die so berechneten Anlagenarbeitszahlen für die 15-stündige Betriebsphase bei einem Pumpenwirkungsgrad von 25 %, Abb. 50 entsprechend bei einem Pumpenwirkungsgrad von 15 %. Bei Wasser wurden ausschließlich Volumenströme größer gleich $1 \text{ m}^3/\text{h}$ simuliert, da nur dann die Frostfreiheit im Geothermiekreislauf über den gesamten Simulationszeitraum gegeben ist. Die Knicke und Übergänge in den Kurven trennen wiederum laminare und turbulente Strömungsverhältnisse, die bei entsprechend geringen Volumenströmen nicht nur bei Propylenglykol, sondern auch bei Ethylenglykol und Kaliumkarbonat auftreten. Erwartungsgemäß existiert für jedes Fluid und jeden Pumpenwirkungsgrad ein optimaler Volumenstrom, der jeweils zu einer maximalen Anlagenarbeitszahl führt. Bei der hier betrachteten Kleinanlage liegt das Optimum stets bei turbulenter Strömung in den Sondenrohren vor.

Die zu jedem Volumenstrom gehörenden Temperaturspreizungen an der Sonde am Ende der Simulation enthält Abb. 51. Im vorliegenden Fall sind für Kaliumkarbonat und Kaliumformiat Volumenströme kleiner $1 \text{ m}^3/\text{h}$ und damit Spreizungen oberhalb 5 K stets suboptimal. Bei Ethylenglykol und Propylenglykol sollte der Volumenstrom über $1,1 \text{ m}^3/\text{h}$ bzw. über $1,7 \text{ m}^3/\text{h}$ liegen, damit turbulente Strömungsverhältnisse mit einer höheren Anlageneffizienz vorliegen. Für alle Fluide generell ungünstig sind Volumenströme über $1,8 \text{ m}^3/\text{h}$ mit einer Spreizung von unterhalb 3 K.

Die jeweils optimalen Arbeitszahlen der Wärmepumpe, der Umwälzpumpe sowie der Gesamtanlage für die simulierte 15-stündige Betriebsphase und einen Pumpenwirkungsgrad von 25 % zeigen die Abbildungen 52 und 53. Durch die individuelle Optimierung des Volumenstroms liegen die Anlagenarbeitszahlen (inklusive des Betriebs mit Propylenglykol) mit 4,36 bis 4,46 (Unterschied kleiner als 2,5 %) noch enger zusammen.

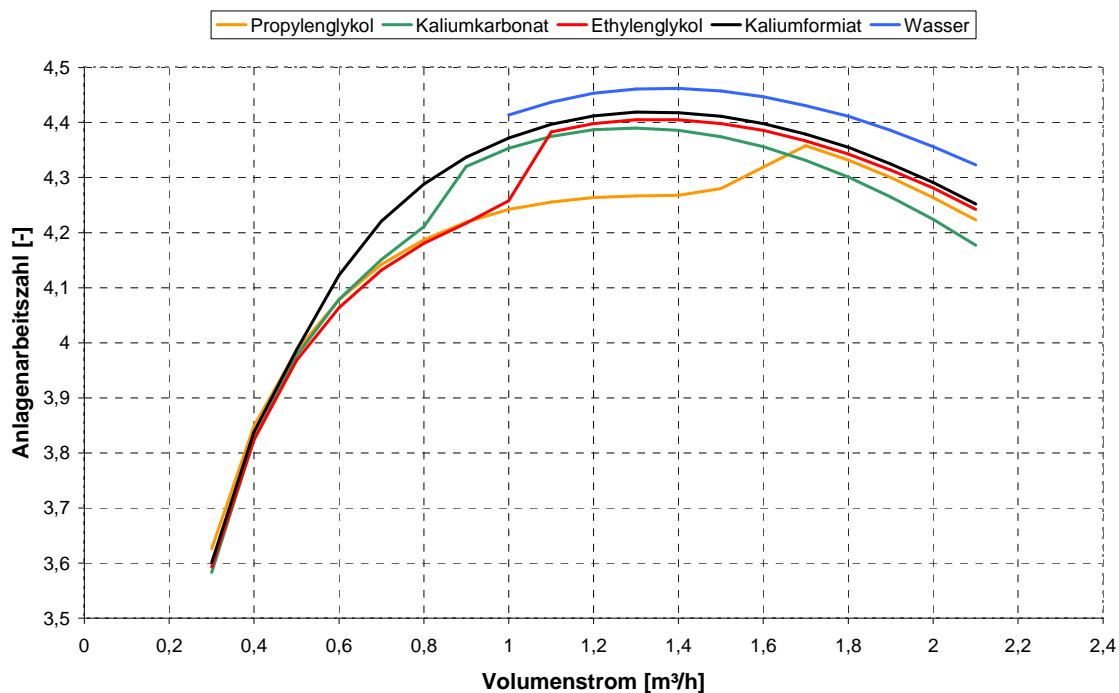


Abb. 49: Anlagenarbeitszahl für die 15-stündige Betriebsphase bei einem Pumpenwirkungsgrad von 25 %

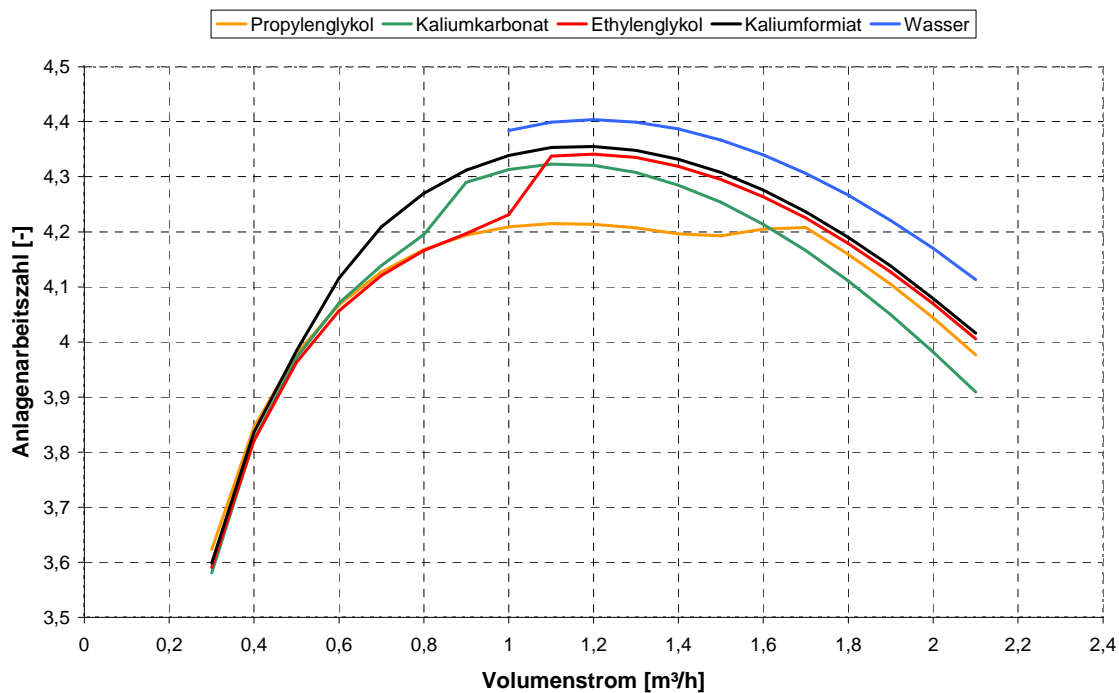


Abb. 50: Anlagenarbeitszahl für die 15-stündige Betriebsphase bei einem Pumpenwirkungsgrad von 15 %

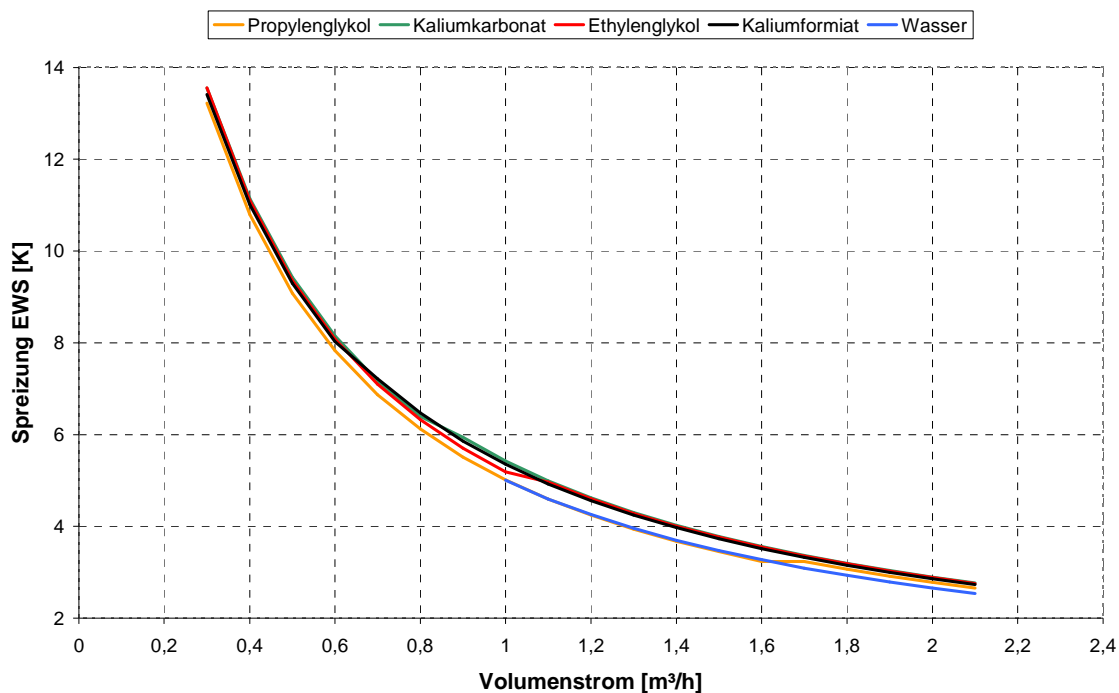


Abb. 51: Spreizung der Fluidtemperatur zwischen Sondenein- und -austritt am Ende der Simulationszeit mit einem Pumpenwirkungsgrad von 25 %

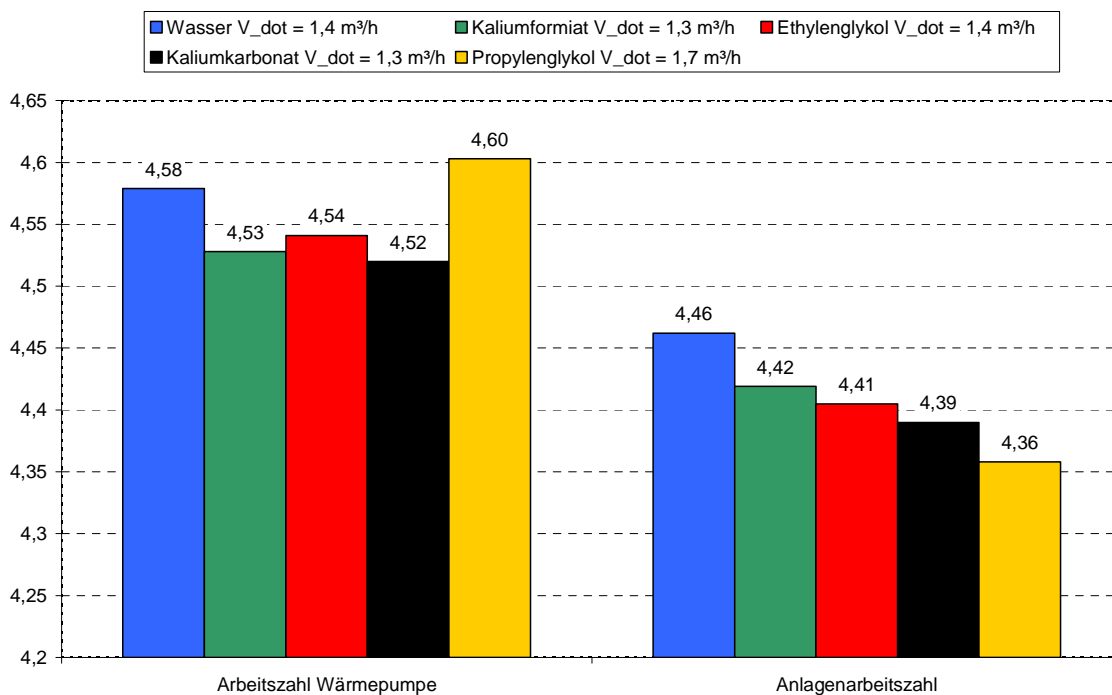


Abb. 52: Anlagenarbeitszahlen für Wärmepumpe und die Gesamtanlage für die 15-stündige Betriebsphase bei einem Pumpenwirkungsgrad von 25 %

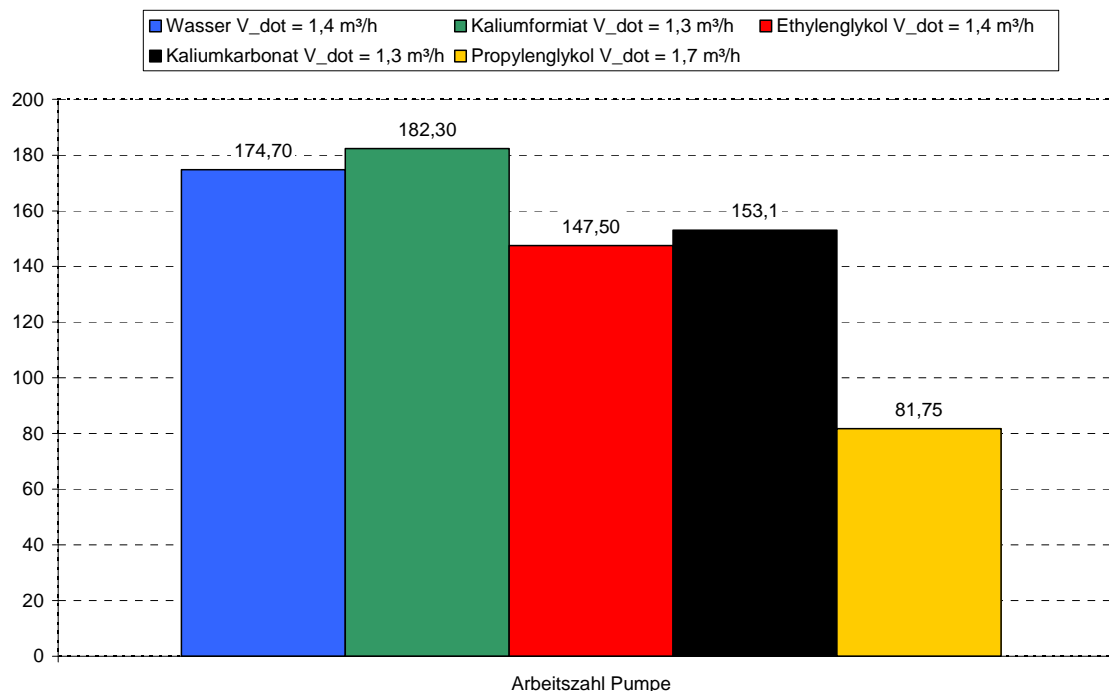


Abb. 53: Arbeitszahl für die geothermieseitige Umwälzpumpe bezogen auf die Heizenergie bei einem Pumpenwirkungsgrad von 25 %

4.3 Übertragung der Simulationsergebnisse auf das langfristige Anlagenverhalten

Die in den Versuchen und Simulationen identifizierten geringen Unterschiede im Anlagenverhalten bei Betrieb mit unterschiedlichen Fluiden gelten für eine einzelne, erste Betriebsphase von 15 Stunden. Die Frage, wie sich diese Unterschiede auf das langfristige Anlagenverhalten auswirken, lässt sich durch Berechnung der langfristigen Auswirkungen auf die Fluid- und Erdreichtemperaturen beantworten.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass der größte Unterschied beim Vergleich des Betriebs mit Wasser gegenüber dem Betrieb mit Propylenglykol auftritt, wenn die Strömung in den Sondenrohren in einen Fall (Wasser) turbulent und im anderen Fall (Propylenglykol) laminar ist. Der größere Bohrlochwiderstand bei Propylenglykol führt zu einer tieferen Fluidtemperatur und daraus resultierend zu bis zu 5 % niedrigeren Leistungs- und Arbeitszahlen der Wärmepumpe und der Gesamtanlage. Dieser Fall ergibt sich beispielsweise, wenn in der simulierten Beispielanlage beide Fluide mit einem Volumenstrom von $1,4 \text{ m}^3/\text{h}$ eingesetzt werden, siehe Abb. 49 und 50. Der Unterschied im Bohrlochwiderstand beträgt dann maximal ca. $0,04 \text{ m}\cdot\text{K}/\text{W}$, siehe Abb. 41. Eine 5 % geringere Arbeits- und Leistungszahl bedeutet jedoch, dass die Wärmepumpe mehr elektrischen Strom benötigt und weniger thermische Leistung und Energie aus der Erdwärmesonde entzieht. Bei Arbeits- und Leistungszahlen oberhalb von 3 bedeuten 5 % Abschlag maximal 3 % weniger Wärmeentzug aus dem Erdreich.

Diese Unterschiede in der genannten Größenordnung sind jedoch zum Teil in der unterschiedlichen Strömungsform (turbulent/laminar) und nur teilweise im anderen Fluid begründet. Die Strömungsform, die sich in der Sonde einstellt, hängt von den gewählten Sondendimensionen und Volumenströmen ab und ist damit planerisch beeinflussbar, wie z. B. auch in [Zapp07] gezeigt wurde. Hinsichtlich des Vergleichs der Fluide an sich ist deshalb auch der Fall jeweils gleicher Strömungsform zu betrachten. Die Unterschiede im Bohrlochwiderstand bei Betrieb mit verschiedenen Fluiden sind dann jedoch geringer, wie z. B. Abb. 41 entnommen werden kann. Sie sollen im folgenden konservativ mit 0,01 bzw. 0,02 m·K/W angesetzt werden. Für diese Fälle wird ferner keine Minderung des Wärmeentzugs aus dem Erdreich angesetzt, was ebenfalls eine konservative Annahme ist.

Die sich langfristig, d. h. im vollständig eingeschwungenen Zustand, der im Laufe der Jahrzehnte des Betriebs asymptotisch erreicht wird, einstellenden Fluidtemperaturen in der Sonde wurden für die vorgenannten Fälle mit dem Auslegungswerkzeug GEO-HAND^{light} [GEO-Hand] der Hochschule Biberach berechnet. Die Berechnungen erfolgten für die simulierte Beispielanlage (siehe Abschnitt 4.2.1) mit den folgenden Betriebsrandbedingungen:

1. Fälle mit turbulenter Strömung in der Sonde (z. B. Wasser):
Bohrlochwiderstand: 0,08 m·K/W, 0,09 m·K/W bzw. 0,1 m·K/W,
maximale Wärmeentzugsleistung: 6 kW, (60 W/m Erdwärmesonde),
maximale Dauer ununterbrochener Betrieb: 15 Stunden,
jährlicher Wärmeentzug: 10,8 MWh/a (1.800 Vollbetriebsstunden/Jahr),
maximaler monatlicher Wärmeentzug: 1,836 MWh/mon.
2. Laminare Strömung in der Sonde (z. B. Propylenglykol):
Bohrlochwiderstand: 0,12 m·K/W,
maximale Wärmeentzugsleistung: 5,7 kW, (57 W/m Erdwärmesonde),
maximale Dauer ununterbrochener Betrieb: 16 Stunden,
jährlicher Wärmeentzug: 10,5 MWh/a (1.824 Vollbetriebs-h/a),
maximaler monatlicher Wärmeentzug: 1,785 MWh/mon
(geothermische Arbeiten/Leistungen um 3 % bzw. 5 % reduziert).

Die Ergebnisse sind in Abb. 54 zusammengestellt. Gemäß den angesetzten Randbedingungen schneidet der Basisfall (1. mit $R_b = 0,08 \text{ m}\cdot\text{K}/\text{W}$) am günstigsten ab. Die Fluidtemperatur (Mittelwert aus Vor- und Rücklauftemperatur) in der Sonde erreicht im Monat mit dem stärksten Wärmeentzug langfristig ein Temperaturniveau von 1,7 °C („Grundlast“ - entspricht in etwa der mittleren Wochen- bzw. Monatstemperatur). Bei Spitzenlast, d. h. am Ende von 15 Stunden Dauerbetrieb der Wärmepumpe sinkt die Fluidtemperatur ausgehend von diesem Grundlastwert auf minimal -3,9 °C ab. Bezogen auf eine ungestörte Erdoberflächentemperatur von 10,1 °C bedeutet dies eine maximale Temperaturabsenkung bei Spitzenlast um (kurzzeitig) bis zu -14 K.

Den größten Unterschied dazu weist der Fall laminarer Strömung in der Sonde auf (Fall 2. mit $R_b = 0,12 \text{ m}\cdot\text{K}/\text{W}$). Die minimale Grundlasttemperatur liegt um 0,7 K tiefer, aber immer noch oberhalb der Frostgrenze $0 \text{ }^\circ\text{C}$, die minimale Spitzenlasttemperatur um 1,8 K. Die Temperaturabsenkung (-15,7 K) ist 12 % stärker ausgeprägt als im Basisfall. Da Erdwärmesonden auf eine bestimmte minimale Fluidtemperatur bemessen werden, würde dies bei identischer Bemessung eine 12 % größere Sondenlänge erfordern als im Basisfall. Wie vorstehend erläutert, ist hierbei bereits berücksichtigt, dass aufgrund der tieferen Fluidtemperaturen der Wärmeentzug und die Sondenleistung etwas niedriger ausfallen - andernfalls ergäbe sich ein - allerdings nur theoretischer - Unterschied von 17 %.

Wird die Strömungsform nicht von turbulent nach laminar geändert ($R_b = 0,09$ bzw. $0,10 \text{ m}\cdot\text{K}/\text{W}$), ergeben sich deutlich geringere Unterschiede zum Basisfall: Die Grundlastwerte der minimalen Fluidtemperaturen liegen maximal 0,5 K tiefer, die Spitzenlastwerte ca. 1 K. Die prozentualen Unterschiede der Temperaturabsenkung des Fluids gegenüber der ungestörten Erdreichtemperatur zum Basisfall betragen 4 bis 8,5 %.

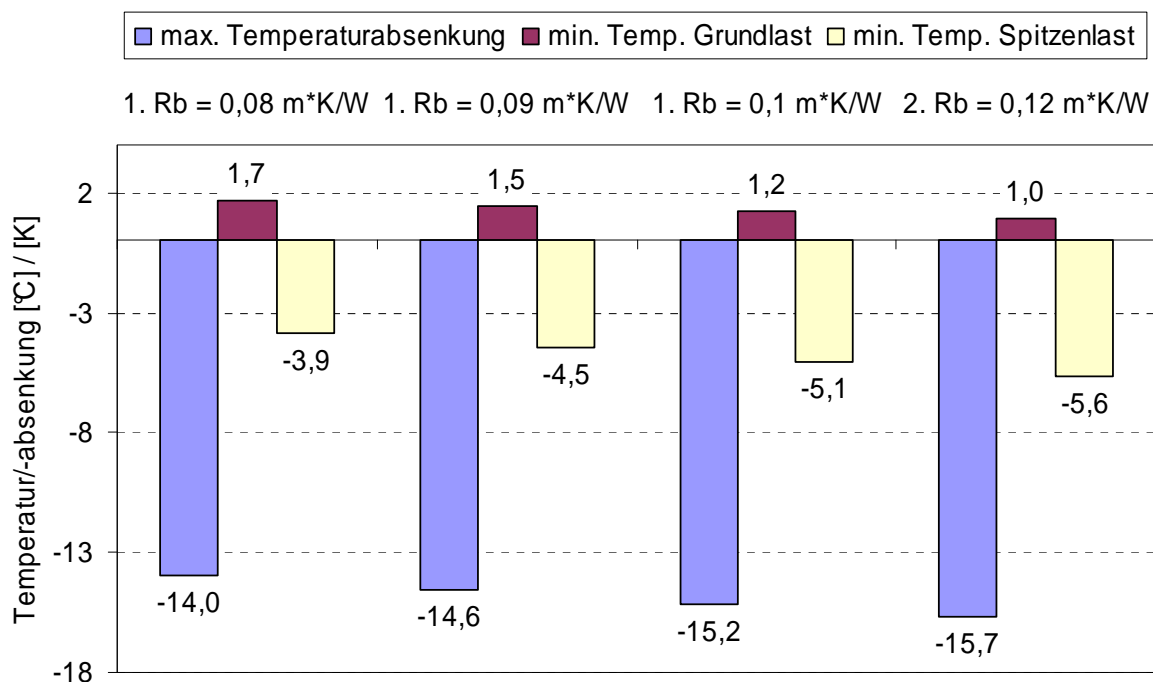


Abb. 54: Langfristige Minimalwerte der mittleren Fluidtemperatur in der Erdwärmesonde bei verschiedenen Bohrlochwiderständen aufgrund unterschiedlicher Fluide bzw. Strömungsformen (laminar/turbulent) in der Sonde

Aus Gründen des Grundwasserschutzes wird häufig der Betrieb mit reinem Wasser ohne Frostschutzmittel-Zusatz in die Diskussion gebracht und für Anlagen in sensiblen Gebieten auch gefordert. Wasser wäre auch aus energetischer und wirtschaftlicher Sicht der ideale Wärmeträger, wenn es nicht bereits bei $0 \text{ }^\circ\text{C}$ einfrieren würde. Bei den meisten geothermischen Wärmepumpen im kleineren und mittleren Leistungsbereich werden Plattenwärmeüberträger als Verdampfer ein-

gesetzt. Bei diesen geben die Hersteller üblicherweise 3 bis 4 °C als minimal zulässige Austrittstemperatur bei Betrieb mit Wasser ohne Frostschutzzusatz an, um ein Einfrieren zu vermeiden. Selbst bei einer hierfür minimierten Temperaturspreizung von 2 K bedeutet dies, dass die mittlere Fluidtemperatur in der Sondenanlage 4 °C nicht unterschreiten darf. Für den Fall 1. mit $R_b = 0,08 \text{ m}\cdot\text{K}/\text{W}$, also bei den günstigsten Randbedingungen, würde dies im hier betrachteten Beispiel eine Sondenlänge von minimal 200 m erfordern, was mindestens einer Verdoppelung der benötigten Sondenlänge entspricht. Die damit verbundenen zusätzlichen Investitionskosten machen den Betrieb mit reinem Wasser bei derartigen Anlagen im Regelfall unwirtschaftlich. Andere Untersuchungen zu diesem Thema kommen zu vergleichbaren Ergebnissen und ebenfalls zu einer kritischen Einschätzung des Betriebs mit reinem Wasser [Th-He08].

4.4 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

Die Simulationen bestätigen die in den Versuchen gewonnenen sehr geringen Unterschiede in der Leistungs- und Arbeitszahl nach einer 15-stündigen, von gleicher Starttemperatur ausgehenden Betriebsphase beim Betrieb mit den verschiedenen im Experiment eingesetzten Fluiden. Zusätzlich zu den experimentell untersuchten Fluiden wurde der Zusatz von Propylenglykol als Frostschutzmittel als Extrembeispiel in den Simulationen berücksichtigt. Im simulierten Beispiel stellt sich bei Verwendung von Propylenglykol bereits nach kurzer Betriebszeit eine laminare Strömung in der Sonde ein, woraus maximal 5 % geringere momentane Leistungszahlen sowie eine ca. 1,5 K tiefere Fluidtemperatur resultieren als beim Betrieb mit Wasser. Vom Betrieb mit Propylenglykol in erdgekoppelten Wärmepumpenanlagen ist daher - wie bereits bekannt - aus energetischer Sicht abzuraten. Aus der hier untersuchten Auswahl verbleiben damit für die Praxis die Fluide Wasser, Ethylenglykol, Kaliumformiat und Kaliumkarbonat. Diese führen im Kurzzeitbetrieb der Wärmepumpenanlage zu weniger als 3 % ($\pm 1,5$ %) voneinander momentanen Leistungszahlen.

Die langfristig zu erwartenden minimalen Fluidtemperaturen in der Sondenanlage liegen beim berechneten typischen Beispiel einer Kleinanlage für diese Fluide bis zu ca. 0,5 K, im Maximum ca. 1 K auseinander. Für die Temperaturabsenkung gegenüber der ungestörten Erdreichtemperatur bedeutet dies im Beispiel prozentuale Unterschiede von 4 %, im theoretischen Maximum bis zu ca. 8 %. Größere Unterschiede (hier: 12 %) treten dann auf, wenn verschiedene Strömungsformen (turbulent/laminar) in der Sonde miteinander verglichen werden. Laminare anstatt turbulenter Strömung wird zwar durch verschiedene Frostschutzzusätze (v. a. Propylenglykol) begünstigt, ist aber grundsätzlich bei jedem Wärmeträgerfluid möglich. Es handelt sich hierbei deshalb weniger um eine Frage des Fluids als um ein Problem der korrekten Planung, Auslegung und Ausführung der Anlage.

Die rechnerische Optimierung des Volumenstroms im Geothermiekreis der simulierten Beispielanlage für die Fluide Wasser, Ethylenglykol, Kaliumformiat, Kaliumkarbonat und Propylenglykol ergab individuelle Optima, die bei turbulenter Durchströmung der Sonde liegen. Einzige Ausnahme ist Propylenglykol bei einem geringen Pumpenwirkungsgrad (15 %), weil in diesem Fall der zusätzliche elektrische Förder-Energieaufwand im Geothermiekreis für einen Übergang auf turbulente Strömung größer ist als der Effizienzgewinn der Wärmepumpe durch eine höhere Fluidtemperatur. Dies bedeutet, dass im Regelfall eine turbulente Durchströmung der Sonde energetisch optimal ist. Je nach Fluid, Pumpenwirkungsgrad, Sondenkonfiguration (z. B. Koaxial- anstatt U-Sonde) sowie Rohrlängen sind jedoch auch Ausnahmen möglich, bei denen das Optimum bei laminarer Strömung liegt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse der Arbeiten der Hochschule Biberach zur thermisch-energetischen und anlagentechnischen Bewertung von Wärmeträgerflüssigkeiten im Verbundvorhaben GEO-SOLE lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Für die Technikumsanlage der Hochschule Biberach konnte ein Versuchsablauf entwickelt und erfolgreich angewendet werden, der - trotz geringer Unterschiede im Betriebsverhalten - aussagekräftige vergleichende Versuche hoher Reproduzierbarkeit mit unterschiedlichen Wärmeträgerflüssigkeiten im realen Anlagenbetrieb ermöglicht.
- Es wurde ein vollständig gekoppelt-iteratives Modell des Geothermiekreislaufs samt Erdwärmesonde und Wärmepumpe entwickelt und in der Softwareumgebung Engineering Equation Solver (EES) implementiert, mit dem sich das dynamische thermisch-energetische und hydraulische Verhalten einer typischen Kleinanlage in hoher zeitlicher Auflösung simulieren lässt.
- Die experimentellen Untersuchungen des Kurzzeitverhaltens der Versuchsanlage mit den Fluiden Wasser, Ethylenglykol, Kaliumformiat und Kaliumkarbonat im Geothermiekreislauf liefern bei identischen Betriebsbedingungen weniger als ± 3 % voneinander abweichenden energetischen Kenndaten (Leistungs- und Arbeitszahlen). Durch den hohen Leistungsanteil der Umwälzpumpe im Geothermiekreis bei der verwendeten Versuchsanlage treten die fluidbedingten Unterschiede stark zutage.
- Die Simulationen des Kurzzeitverhaltens einer typischen Wärmepumpen-Kleinanlage mit den Fluiden Wasser, Ethylenglykol, Kaliumformiat und Kaliumkarbonat im Geothermiekreislauf mit einem geringeren Leistungsanteil der Umwälzpumpe, wie dies in der Praxis üblich ist, ergeben Unterschiede von weniger als $\pm 1,5$ %. Lediglich bei abweichender Strömungsform (laminar anstatt turbulent) wurden am Beispiel von Propylenglykol 5 % Abweichung zu Wasser, dem energetisch besten Fluid, simuliert.
- Die rechnerische Übertragung der Ergebnisse der Beispielanlage auf das Langzeitverhalten lässt für die verschiedenen untersuchten Wärmeträgerfluide bei gleicher Strömungsform in der Sonde Unterschiede in den Leistungs- und Arbeitszahlen von maximal 5 % erwarten, was (für eine gleiche minimale Fluidtemperatur) in einer 4 % bis maximal ca. 8 % größeren erforderlichen Sondenlänge resultiert.
- Erst bei abweichender Strömungsform treten Unterschiede größer 10 % in der erforderlichen Sondenlänge für eine gegebene minimale Fluidtemperatur auf (im berechneten Beispiel: 12 %). Eine laminare anstatt einer turbulenten Strömung in der Sonde wird zwar durch verschiedene Frostschutzzusätze (v. a. Propylenglykol) begünstigt, ist aber grundsätzlich bei jedem Wärmeträgerfluid möglich.

- Die rein fluidbedingten Unterschiede im Betriebsverhalten liegen damit innerhalb der ohnehin vorhandenen Bandbreite bzw. Unsicherheiten, die durch Planung, Ausführung sowie unsichere und variable Randbedingungen vorliegen.

Trotz der verhältnismäßig geringen Unterschiede, die aus den untersuchten Fluiden resultieren, geht Wasser ohne Frostschutzzusatz - erwartungsgemäß - eindeutig als das energetisch optimale Wärmeträgerfluid aus den Untersuchungen hervor. Durch seinen hohen Frostpunkt führt es jedoch zu massiv vergrößerten Sondenanlagen und größeren Betriebsrisiken in Standardanlagen, was einem breiten praktischen Einsatz entgegensteht.

Aufbauend auf den Ergebnissen und dem erreichten Stand dieses Vorhabens lassen sich folgende künftige Arbeiten identifizieren:

- Im Rahmen des Vorhabens konnten aus Zeitgründen nicht alle in Frage kommenden Fluide, wie z. B. Betain und aktuelle Neuentwicklungen, untersucht bzw. vollständig bewertet werden.
- Das entwickelte Modell lässt sich an verschiedenen Stellen noch verfeinern und soll künftig in andere Simulationsumgebungen portiert werden, so dass es allgemeingültig in einem weiten Anlagen- und Zeitbereich einsetzbar ist.
- Wenn Wasser ohne Frostschutzzusatz künftig in größerem Umfang eingesetzt werden soll, sind speziell dafür angepasste Systemkonzepte erforderlich, die derzeit am Markt noch nicht verfügbar sind.

Literaturverzeichnis

- [UM05] Umweltministerium Baden-Württemberg: *Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden*. Stuttgart, 2005 (5. Auflage).
- [Zapp07] Zapp, F. J.; Rosinski, Chr.: *Auswirkung unterschiedlicher Parameter auf die Wärmeübertragungsfähigkeit von Erdwärmesonden*. Tagungsband: Der Geothermiekongress 29.-31.10.2007, Bochum, S. 146-158.
- [Co98] Software CoolPack Version 1.46; Copyright 1998 – 2000 Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark.
- [Ha06] Thimo Klotzbücher, Dr. Andreas Kappler, Prof. Haderlein: *Gefährdungspotential von Glykolen, Betain und Kaliumkarbonat aus Erdwärmesonden für anoxische Grundwässer - Zusammenfassung des Schussberichts-*, Tübingen 2006.
- [Bur02] Burkhardt, J.: *Konzeption, Auslegung und Bauablauf einer Erdsondenanlage für das Technikum Gebäudeklimatik der Fachhochschule Biberach*, Diplomarbeit an der Fachhochschule Biberach, Biberach, 2002.
- [Nüß04] Nüßle, F.: *Randstreifenelemente dynamisieren Betonkerntemperatur*, HLH Heizung Lüftung/Klima Haustechnik, 55 (2004) 8, Seiten 22-26, Düsseldorf, 2004.
- [Feu09] Philipp Feuerstein: *Master-Thesis – Modellbildung und Simulation des Kurzzeitverhaltens einer erdgekoppelten Wärmepumpe mit Erdwärmesonde*, Biberach 2009
- [He91] Hellström, G.: *Ground Heat Storage. Thermal Analysis of Duct Storage Systems. Theory*. Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden, 1991. ISBN: 91-628-0290-9.
- [Es87] Eskilson, P.: *Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes*. Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 1987. ISBN: 91-7900-298-6.
- [Bo02] Bohl, W.: *Technische Strömungslehre*. Vogel Fachbuch. Vogel Buchverlag, Würzburg, 2002. ISBN: 3-8023-1878-1.
- [DBU04] Koenigsdorf, R.; Heinrich, S; Koehler, A.; Sedlak, M.; Füßl, A.: *Abschlussbericht – Entwicklung eines Entscheidungs- und Auslegungswerkzeuges für die energieeffiziente Heizung und Kühlung durch bauteilintegrierte und geothermische Gebäudeimplementierung*, Biberach 2004.

- [EES] Engineering Equation Solver EES, Professional V7. Informationen zur Software über <http://www.fChart.com>, 2004.
Softwarebetreuung: Professor S.A. Klein, Department of Mechanical Engineering, University of Wisconsin-Madison, klein@engr.wisc.edu
- [Th-He08] Tholen, M.; Walker-Hertkorn, S.: Arbeitshilfen Geothermie, Bonn 2008 ISBN 978-3-89554-167-4
- [GEO-Hand] Koenigsdorff, R.; Köhler, A.; Kirschmann C.: *GEO-HAND^{light} – Handrechenverfahren zur überschlägigen Bemessung von Erdwärmesondenfeldern*. Tagungsband Siebtes Internationales Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie, 26.-27. April 2007, Freising, Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e. V. (OTTI), Regensburg, ISBN 978-3-934681-54-5, S. 97-101.
- Koenigsdorff, R.; Kirschmann C.: *Erweiterung des Handrechenverfahrens GEO-HAND^{light} zur überschlägigen Bemessung von Erdwärmesondenfeldern zur kombinierten Heizung und Kühlung*. Tagungsband (Buch & CD) „Der Geothermiekongress 2007 – Energie für alle Fälle“, Bochum, 29.-31.10.2007, Hrsg.: Geothermische Vereinigung – Bundesverband Geothermie e. V., ISBN 10: 3-932570-58-8, ISBN 13: 978-3-932570-58-2, S. 72-84 (ebenefalls veröffentlicht als CD: ISBN 10: 3-932570-58-2, ISBN 13: 978-3-932570-59-9).

Vorträge und Veröffentlichungen zum Projekt

1. 8. Internationales Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie, 26. - 28. Mai 2008 in Kloster Banz, Bad Staffelstein;
Vortrag (Dipl.-Ing. A. Köhler) & Veröffentlichung:
Koenigsdorff, R.; Ryba, M.; Köhler, A; *GEO-SOLE – Forschungsprojekt zur thermisch-energetischen und anlagentechnischen Bewertung von Wärmeträgerflüssigkeiten*;
Tagungsband: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e. V. (OTTI), Regensburg, ISBN 978-3-934681-71-2
2. Arbeitstagung „Nutzung der Erdwärme“, 21.10.2008 in Alpirsbach; Vortrag (Dipl.-Ing. (FH) M. Ryba): *GEO-SOLE – Forschungsprojekt zur thermisch-energetischen und anlagentechnischen Bewertung von Wärmeträgerflüssigkeiten*; Veranstalter: Umweltministerium Baden Württemberg
3. Zwischenbericht BWPLUS Kolloquium veröffentlicht vom Forschungszentrum Karlsruhe unter http://bwplus.fzk.de/inhalt_berichte_zwischen2009.html
4. 9. Neuntes Internationales Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie 27. - 29. April 2009 in Kloster Banz, Bad Staffelstein;
Vortrag (Prof. Dr.-Ing. R. Koenigsdorff) & Veröffentlichung:
Koenigsdorff, R.; Feuerstein Ph.; Ryba, M.; *Simulationsmodell zur Ermittlung des Einflusses unterschiedlicher Wärmeträgerflüssigkeiten auf die Anlageneffizienz erdgekoppelter Wärmepumpenanlagen*;
Tagungsband: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI), Regensburg, ISBN: 978-3-934681-95-8
5. 6. Biberacher Geothermietag, 5. November 2009;
Vortrag (Prof. Dr.-Ing. R. Koenigsdorff): *GEO-SOLE Vergleichende hydrogeologische und anlagentechnische Bewertung von Wärmeträgerflüssigkeiten für oberflächennahe geothermische Anwendungen*
6. Einblicke 2009 – Journal zur Umweltforschung in Baden-Württemberg, Stand August 2009, 1. Auflage; Artikel (Stefan Kriz): *Umweltgefahr durch Öko-Heizung? – Verbundprojekt untersucht Wärmeträgerflüssigkeiten für Wärmepumpenanlagen*;
Herausgeber: Umweltministerium Baden-Württemberg (UM); LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg; Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Projektträger Karlsruhe
7. GeoTHERM 2010, 25. – 26. Februar 2010 in Offenburg
Vortrag (Dipl.-Ing. (FH) M. Ryba) & Veröffentlichung: *GEO-SOLE Vergleichende Bewertung von Wärmeträgerflüssigkeiten für oberflächennahe geothermische Anwendungen*
Katalog zur GeoHERM 2010; Herausgeber GeoTHERM Messe Offenburg-Ortenau GmbH

8. 10. Neuntes Internationales Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie 19. - 21. April 2010 in Linz, Österreich;
Vortrag (Prof. Dr.-Ing. R. Koenigsdorff / Dipl.-Geol. Daniel Katzoreck) & Veröffentlichung:
Koenigsdorff, R.; Feuerstein Ph.; Ryba, M.; *GEO-SOLE - Vergleichende hydro-geologische und anlagentechnische Bewertung von Wärmeträgerflüssigkeiten für oberflächennahe geothermische Anwendungen*;
Tagungsband: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI), Regensburg, ISBN: 978-3-941785-12-0

Projekttreffen, Zwischenbegutachtung und Veranstaltungen

1. Projekttreffen der Verbundpartner mit Zwischenbegutachtung, 22. Juli 2008 an der Universität Karlsruhe unter Teilnahme von Vertretern des Umweltministeriums Baden Württemberg
2. Workshop zum Thema: *Wärmeträgerflüssigkeiten für oberflächennahe geothermische Anwendungen – Alternativen zu Ethylenglykol*, 28. November 2008 an der Hochschule Biberach mit Vertretern von Ministerien, Behörden und der Industrie
3. BWPLUS Kolloquium, 05. März 2009 am Forschungszentrum Karlsruhe

GEO-SOLE – Vergleichende hydrogeologische und anlagentechnische Bewertung von Wärmeträgerflüssigkeiten für oberflächennahe geothermische Anwendungen

Ergänzung vom 29.06.2010

**Stoffdaten zu den in der Versuchsanlage untersuchten
Wärmeträgerfluiden**

zum

Ergebnisbericht des Verbundprojekts

GEO-SOLE

Teil A: Hochschule Biberach

vom 22.12.2009

Zusammenstellung der Stoffdaten

Die vorliegende Ergänzung ergänzt die thermodynamisch relevanten Stoffdaten zu den in der Versuchsanlage im Rahmen des Projekts GEO-SOLE untersuchten Wärmeträgerfluiden. Die in den folgenden Tabellen angegebenen Stoffdaten zu den Fertigmischungen sind den in der Anlage dieser Ergänzung beigefügten technischen Dokumentationen entnommen. Die eingesetzte Ethylenglykollmischung wurde, wie bei der Anwendung von Ethylenglykol häufig üblich, aus Monoethylen und Wasser bei der Anlagenbefüllung angemischt. Die Ethylenglykollmischung wurde auf 25 Vol. % eingestellt. Die relevanten Stoffdaten dazu wurden aus der Software Coolpack¹ entnommen. Die untersuchte Ethylenglykollmischung war zu Projektbeginn als Erstbefüllung in der Anlage befindlich.

Stoffwerte zu der bei Projektbeginn in der Anlage befindlichen Ethylenglykollmischung mit 25 Vol. %:

Temperatur [°C]	Dichte [g/ cm ³]	spezifische Wärmekapazität [kJ/ (kg*K)]	Wärmeleitfähigkeit [W/ (m*K)]	dynamische Viskosität [mPa s]	kinematische Viskosität [mm ² / s]
20	1,038	3,73	0,474	1,92	1,85
10	1,041	3,71	0,461	2,56	2,46
5	1,042	3,69	0,455	3,01	2,89
0	1,044	3,68	0,448	3,58	3,43
-5	1,045	3,67	0,441	4,34	4,15
-7,5	1,046	3,66	0,438	4,63	4,43

Stoffwerte der Kaliumkarbonatfertigmischung Karbosol W der Firma Pro Kühlsole entnommen aus der in der Anlage zu dieser Ergänzung beiliegenden Produktbeschreibung:

Temperatur [°C]	Dichte [kg/ m ³]	spezifische Wärmekapazität [kJ/ (kg*K)]	Wärmeleitfähigkeit [W/ (m*K)]	dynamische Viskosität [mPa s]	kinematische Viskosität [mm ² / s]
20	1,260	2,964	0,561	2,1	1,7
10	1,265	2,941	0,544	3,1	2,5
0	1,269	2,92	0,528	4,7	3,7
-5	1,272	2,908	0,520	5,8	4,6
-10	1,275	2,897	0,511	7,3	5,7

Stoffwerte der Kaliumformiatfertigmischung Tyfoxit F15 der Firma Tyforop Chemie GmbH entnommen aus der in der Anlage zu dieser Ergänzung beiliegenden tech-

¹ Software CoolPack Version 1.46; Copyright 1998 – 2000 Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark.

nischen Dokumentation, ergänzt durch Daten aus dem zugehörigen Berechnungstool der Firma Tyforop Chemie GmbH:

Temperatur [°C]	Dichte [g/ cm ³]	spezifische Wärmekapazität [kJ/ (kg*K)]	Wärmeleitfähigkeit [W/ (m*K)]	dynamische Viskosität [mPa s]	kinematische Viskosität [mm ² / s]
20	1,222	3,20	0,545	2,04	1,67
10	1,226	3,19	0,534	2,37	1,93
5	1228	3,19	0,528	2,67	2,17
0	1,230	3,18	0,523	3,01	2,45
-5	1,232	3,18	0,516	3,42	2,77
-10	1,234	3,17	0,512	3,97	3,22

Bei der Umfüllung der Versuchsanlage von Ethylenglykol zu Kaliumformiat kam es bei der Wiederbefüllung mit dem Produkt Tyfoxit F 15 zu einer Vermischung mit Wasser. Von Seiten der Firma Tyforop Chemie GmbH wurden die Dichte und Wärmekapazität gemäß der folgenden Tabelle bestimmt bzw. berechnet:

Temperatur [°C]	Dichte [g/ cm ³]	spezifische Wärmekapazität [kJ/ (kg*K)]
20	1,179	3,48
10	1,184	3,47
0	1,189	3,46
-10	1,169	4,45

Anlagen

1. Sicherheitsdatenblatt zu Monoethylenglykol der Firma CSC Jäcklechemie mit Druckdatum 04.07.2000
2. Aktuelle Produktspezifikation zu Monoethylenglykol der Firma CSC Jäcklechemie freigegeben 24.04.2006
3. Produktbeschreibung der Firma Pro Kühlsole zum Produkt Karbosol W, Ausgabe 01.01.2003
4. Sicherheitsdatenblatt zum Produkt Karbosol W der Firma Pro Kühlsole mit Druckdatum 31.01.2008
5. Technische Information der Firma Tyforop Chemie GmbH zum Produkt Tyfoxit F15 - F50, Ausgabe 01/04
6. Sicherheitsdatenblatt zum Produkt Tyfoxit F15 - F50 der Firma Firma Tyforop Chemie GmbH mit Druckdatum 07.06.2005
7. Analyseergebnis der Firma Firma Tyforop Chemie GmbH zu eingesandten Proben. Analyse Nr.: 09/0209/1
8. Nachricht vom 25.02.2009 der Firma Firma Tyforop Chemie GmbH mit den für die eingesendete Probe der in der Versuchsanlage befindlichen Tyfoxit-Mischung bestimmten bzw. berechneten Stoffdaten

Sicherheitsdatenblatt
gemäß 91/155/EWG

Druckdatum: 18.08.2000

überarbeitet am: 04.07.2000

1 Stoff-/Zubereitungs- und Firmenbezeichnung

- Angaben zum Produkt
- Handelsname: Monoethylenglykol
- Artikelnummer: 140159
- Hersteller/Lieferant:
CSC JÄKLECHEMIE GmbH & Co. KG
Matthiasstr. 10 - 12
D-90431 Nürnberg
0911/3 26 46 -0
- Auskunftgebender Bereich: Abteilung Sicherheit & Technik
- Notfallauskunft: 0911/3 26 46 -0

2 Zusammensetzung/Angaben zu den Bestandteilen

- Chemische Charakterisierung:
CAS-Nr. Bezeichnung
107-21-1 Ethandiol
- Identifikationsnummer(n)
- EINECS-Nummer: 2034733
- EG-Nummer: 603-027-00-1

3 Mögliche Gefahren

- Gefahrenbezeichnung:



Xn Gesundheitsschädlich

- Besondere Gefahrenhinweise für Mensch und Umwelt:
R 22 Gesundheitsschädlich beim Verschlucken

4 Erste-Hilfe-Maßnahmen

- **Allgemeine Hinweise:**
Vergiftungssymptome können erst nach vielen Stunden auftreten, deshalb ärztliche Überwachung mindestens 48 Stunden nach einem Unfall.
- **nach Einatmen:** Frischluftzufuhr, bei Beschwerden Arzt aufsuchen.
- **nach Hautkontakt:**
Sofort mit Wasser und Seife abwaschen und gut nachspülen.
Im allgemeinen ist das Produkt nicht hautreizend.
- **nach Augenkontakt:**
Augen bei geöffnetem Lidspalt mehrere Minuten mit fließendem Wasser spülen.
- **nach Verschlucken:**
Mund ausspülen und reichlich Wasser nachtrinken.
Sofort Arzt aufsuchen.

5 Maßnahmen zur Brandbekämpfung

- **Geeignete Löschmittel:** Feuerlöschmaßnahmen auf die Umgebung abstimmen.
- **Besondere Schutzausrüstung:**
Umgebungsluftunabhängiges Atemschutzgerät tragen.

6 Maßnahmen bei unbeabsichtigter Freisetzung:

- **Personenbezogene Vorsichtsmaßnahmen:** Persönliche Schutzkleidung tragen.
- **Umweltschutzmaßnahmen:** Mit viel Wasser verdünnen.

(Fortsetzung auf Seite 2)

Sicherheitsdatenblatt
gemäß 91/155/EWG

Druckdatum: 18.08.2000

überarbeitet am: 04.07.2000

Handelsname: Monoethylenglykol

(Fortsetzung von Seite 1)

- **Verfahren zur Reinigung/Aufnahme:**
Mit flüssigkeitsbindendem Material (Sand, Kieselgur, Säurebinder, Universalbinder, Sägemehl) aufnehmen.
Kontaminiertes Material als Abfall nach Punkt 13 entsorgen.

7 Handhabung und Lagerung

- **Handhabung:**
- **Hinweise zum sicheren Umgang:**
Behälter trocken und dicht geschlossen halten.
- **Hinweise zum Brand- und Explosionsschutz:**
Keine besonderen Maßnahmen erforderlich.
- **Lagerung:**
- **Anforderung an Lagerräume und Behälter:** Keine besonderen Anforderungen.
- **Zusammenlagerungshinweise:** nicht erforderlich
- **Weitere Angaben zu den Lagerbedingungen:** keine
- **Lagerklasse:**
- **VbF-Klasse:** entfällt

8 Expositionsbegrenzung und persönliche Schutzausrüstung

- **Zusätzliche Hinweise zur Gestaltung technischer Anlagen:**
Keine weiteren Angaben, siehe Punkt 7.

Bestandteile mit arbeitsplatzbezogenen, zu überwachenden Grenzwerten:

107-21-1 Ethandiol

MAK: 26 mg/m³, 10 ml/m³

I C

MAK (TRGS 900): 26 mg/m³, 10 ml/m³

- **Zusätzliche Hinweise:**
Als Grundlage dienten die bei der Erstellung gültigen Listen.
- **Persönliche Schutzausrüstung:**
- **Allgemeine Schutz- und Hygienemaßnahmen:**
Von Nahrungsmitteln, Getränken und Futtermitteln fernhalten.
Vor den Pausen und bei Arbeitsende Hände waschen.
- **Atemschutz:** Bei guter Raumbelüftung nicht erforderlich.
- **Handschutz:** Schutzhandschuhe.
- **Augenschutz:** Beim Umfüllen Schutzbrille empfehlenswert.

9 Physikalische und chemische Eigenschaften

- **Form:** syrupartig flüssig
- **Farbe:** farblos
- **Geruch:** süßlich

Wert/Bereich Einheit Methode

- **Zustandsänderung**
- **Schmelzpunkt/Schmelzbereich:** -12,4 ° C
- **Siedepunkt/Siedebereich:** 197 ° C
- **Flammpunkt:** 111 ° C
- **Zündtemperatur:** 410 ° C
- **Explosionsgefahr:**
Das Produkt ist nicht explosionsgefährlich.
- **Explosionsgrenzen:**
- **untere:** 3,2 Vol %
- **obere:** 15,3 Vol %
- **Dampfdruck:** bei 20 ° C 0,06 hPa
- **Dichte:** bei 20 ° C 1,11 g/cm³
(Fortsetzung auf Seite 3)

Sicherheitsdatenblatt
gemäß 91/155/EWG

Druckdatum: 18.08.2000

überarbeitet am: 04.07.2000

Handelsname: Monoethylenglykol

(Fortsetzung von Seite 2)

- **Löslichkeit in / Mischbarkeit mit**
- **Wasser:** bei 20 ° C 1,000 g/l
vollständig mischbar
- **Viskosität:**
- **dynamisch:** bei 20 ° C 21 mPas

10 Stabilität und Reaktivität

- **Thermische Zersetzung / zu vermeidende Bedingungen:**
Keine Zersetzung bei bestimmungsgemäßer Verwendung.
Vor Feuchtigkeit schützen.
- **Gefährliche Reaktionen** Reaktionen mit starken Oxidationsmitteln.
- **Gefährliche Zersetzungsprodukte:**
keine gefährlichen Zersetzungsprodukte bekannt.

11 Angaben zur Toxikologie

- **Akute Toxizität:**
Einstufungsrelevante LD/LC50-Werte:
Oral: LD50: 5840 mg/kg (rat)
Dermal: LD50: 9530 mg/kg (rbt)
- **Primäre Reizwirkung:**
- **an der Haut:** Keine Reizwirkung
- **am Auge:** Kann Schmerzen verursachen.
- **Sensibilisierung:** Keine sensibilisierende Wirkung bekannt
- **Zusätzliche toxikologische Hinweise:** Gefahr der Hautresorption.

12 Angaben zur Ökologie

- **Angaben zur Elimination (Persistenz und Abbaubarkeit):**
- **Sonstige Hinweise:** Das Produkt ist biologisch leicht abbaubar.
- **Verhalten in Umweltkompartimenten:**
- **Komponente:**
Bei sachgemäßer Einleitung geringer Konzentrationen in adaptierte biologische Kläranlagen sind Störungen der Abbauaktivität von Belebtschlamm nicht zu erwarten.
- **Ökotoxische Wirkungen:**
- **Bemerkung:** Fischtoxizität: EC/LC50 (96 h): > 100 mg/l, *Leuciscus idus*
- **Allgemeine Hinweise:**
Wassergefährdungsklasse 1
nach VwVwS v. 17.05.1999

13 Hinweise zur Entsorgung

- **Produkt:**
- **Empfehlung:**
Darf nicht zusammen mit Hausmüll entsorgt werden. Nicht in die Kanalisation gelangen lassen.
- **Abfallschlüsselnummer:**
Die Zuordnung der Abfallschlüsselnummer ist vom Abfallerzeuger branchen- und prozeßspezifisch entsprechend der EAK-Verordnung durchzuführen.
- **Ungereinigte Verpackungen:**
- **Empfehlung:** Entsorgung gemäß den behördlichen Vorschriften.
- **Empfohlenes Reinigungsmittel:**
Wasser, gegebenenfalls mit Zusatz von Reinigungsmitteln.

14 Angaben zum Transport

- **Transport/weitere Angaben:** Kein Gefahrgut nach obigen Verordnungen

Sicherheitsdatenblatt
gemäß 91/155/EWG

Druckdatum: 18.08.2000

überarbeitet am: 04.07.2000

Handelsname: Monoethylenglykol**15 Vorschriften**

- **Kennzeichnung nach EWG-Richtlinien:**
Das Produkt ist nach EG-Richtlinien/GefStoffV eingestuft und gekennzeichnet.
- **Kennbuchstabe und Gefahrenbezeichnung des Produktes:**
Xn Gesundheitsschädlich
- **R-Sätze:**
22 Gesundheitsschädlich beim Verschlucken
- **S-Sätze:** 2 Darf nicht in die Hände von Kindern gelangen
- **Nationale Vorschriften:**
- **Klassifizierung nach VbF:** entfällt
- **Technische Anleitung Luft:**

<u>Klasse</u>	<u>Anteil in %</u>
I	100,0
- **Wassergefährdungsklasse:**
Wassergefährdungsklasse 1
nach VwVwS v. 17.05.1999
Kenn-Nr.:
105

16 Sonstige Angaben:

Die Angaben stützen sich auf den heutigen Stand unserer Kenntnisse, sie stellen jedoch keine Zusicherung von Produkteigenschaften dar und begründen kein vertragliches Rechtsverhältnis.

- **Datenblatt ausstellender Bereich:** Abteilung Sicherheit & Technik
- **Ansprechpartner:** Herr Dipl.-Ing. (FH) Kolb

Produktspezifikation / Productspecification

Nummer Number	Revision Revision	Seite Page	erstellt: created:	geprüft: examined:	freigegeben: released:	ersetzt: replace:
454 015	3	1 von 1	24.04.2006HPL	24.04.2006MS	24.04.2006HPL	29.04.2005

Produkt-Bezeichnung: Monoethylenglykol

Product-designation: Mono ethylene glycol

Produkt-Nr. / Product-Nr.: 454 015

**Verpackung: 20 l Packung
Blechfass + Container
Straßentankwagen**

**Package: 20 l package
Steeldrum + Container
Tank truck**

Beschreibung / Specification:

Aussehen / Appearance: farblos, klar/colourless, clear

Farbzahl / Colour: < 10 Hazen

Dichte bei 20 °C / Density at 20 ° C: 1,113 - 1,116 g/ml

Reinheit / Purity: > 99,5 %

Wassergehalt / Water content: < 0,2 %

Kein Änderungsdienst
For information only, no alteration service
Information



KARBOSOL W

Produktbeschreibung:

KARBOSOL W ist eine wässrige Kühlsole mit Korrosionsinhibitoren, Pufferstoffen und pH-Stabilisatoren auf Basis Erdalkaliverbindungen (Kaliumkarbonat).

Kaliumkarbonat (Pottasche) wird in der Backindustrie als Treibmittel eingesetzt und ist somit nicht giftig. Die Sole ist also gut geeignet für den Einsatz in der lebensmittelverarbeitenden und –produzierenden Industrie, sowie bei allen Anwendungen, wo glykolhaltige Produkte nicht eingesetzt werden können.

Produkteigenschaften:

KARBOSOL W wird gebrauchsfertig geliefert und darf nicht mit Wasser verdünnt oder mit andern Produkten gemischt werden.

KARBOSOL W wird nahezu chloridfrei geliefert (< 20 mg/l). Niemals darf **KARBOSOL W** mit Chloridsole gemischt werden. Gipsartige Ausfällungen wären die Folge. Diese würden die Rohrleitungen in kürzester Zeit verstopfen.

KARBOSOL W greift Eisen und Baustähle nicht an. Edeltähle sind geschützt, sofern der Chloridgehalt der Gebrauchslösung 50 mg/l nicht überschritten wird. Buntmetalle sind geschützt, wenn der Anteil 5% nicht übersteigt.

Nicht beständig ist Zink. Sonstige mit Sole benetzten Materialien müssen alkalibeständig sein. Aluminiumwerkstoffe sollten nicht verwendet werden.

Thermodynamische Daten:

Schmelzpunkt °C	Temperatur °C	Dichte g/cm ³	spezifische Wärme- kapazität kJ/kg K	Wärmeleit- fähigkeit W/m K	dynamische Viskosität mPa s	kinematische Viskosität mm ² /s
-13	20	1,260	2,964	0,561	2,1	1,7
	10	1,265	2,941	0,544	3,1	2,5
	0	1,269	2,920	0,528	4,7	3,7
	-5	1,272	2,908	0,520	5,8	4,6
	-10	1,275	2,897	0,511	7,3	5,7

Physikalische Kenndaten:

Dichte (bei 20°C): 1,260 – 1,265 g/cm³
 Aussehen: klare farblose Flüssigkeit
 Schmelzpunkt: ca. –13 °C
 pH-Wert (bei 20°C): ca. 11

Verpackung:	Füllgewicht:	Füllvolumen:
Kanister	35 kg	28 Liter
Kanister	70 kg	55 Liter
Faß	270 kg	214 Liter
Container	1.250 kg	992 Liter

Sicherheitstechnische Hinweise:

Beim Umgang mit **KARBOSOL W** sind die für den Umgang mit Chemikalien üblichen Schutzmaßnahmen zu beachten.

KARBOSOL W ist kennzeichnungspflichtig mit Xi, reizend.

Weitere Hinweise und Vorschriften entnehmen Sie bitte dem aktuellen EG-Sicherheitsdatenblatt.

Ökologie und Toxikologie:

KARBOSOL W ist nicht toxisch und biologisch abbaubar.

Wassergefährdungsklasse (WGK): 1, schwach wassergefährdend (nach VwVwS)

Versand, Lagerung und Entsorgung:

KARBOSOL W wird in den oben angegebenen Gebinden versandt. Alle Gebinde sind Mehrweggebinde. Vor Rücksendung bitte vollständig entleeren.

KARBOSOL W ist gut lagerstabil. Trocken in Originalgebinde lagern. Direkte Sonneneinstrahlung vermeiden. Bei der Entsorgung sind die jeweils gültigen Vorschriften zu beachten. Bei Bedarf organisieren wir die Entsorgung für Sie.

Service und Überwachung:

Bitte senden Sie uns 4-6 Wochen nach Erstbefüllung und dann 1-2 mal jährlich eine Probe von ca. 500 ml zur kostenlosen Kontrolle zu. Sie erhalten kurzfristig einen Analysenbericht mit den Ergebnissen und der daraus resultierenden Beurteilung. Dies ist auch die Basis unserer Gewährleistungen. Bei Bedarf senden wir Ihnen eine Probeflasche zu.

Weitere Produkte der pro KÜHLSOLE GmbH:

In technischen Kühl- und Heizsystemen empfehlen wir den Einsatz von GLYKOSOL N als Wärmeträger auf Ethylenglykolbasis. In kombinierten Kühl- und Heizsystemen empfehlen wir für Anwendungen in lebensmittelverarbeitenden Betrieben PEKASOL L als Wärmeträger auf Propylenglykolbasis.

Als Kälte­träger für lebensmittelverarbeitende Betriebe und technische Kühlsysteme empfehlen wir [®]PEKASOL 2000 auf Basis organischer Salze. Für Solaranlagen und reine Heizsysteme [®]PEKASOLar auf Propylenglykolbasis mit thermostabilen Korrosionsschutzstoffen.

Technische Beratung:

Wenn Sie sich individuell beraten lassen wollen, stehen wir Ihnen gerne in unserem Verkaufsbüro zur Verfügung.

Gerne helfen Ihnen auch unsere Handelspartner. Den für Sie zuständigen Ansprechpartner teilen wir Ihnen gerne mit.

Lieferanten von anlagentechnischem Equipment:

Wir halten eine Broschüre mit Anwendungs- und Planungshinweisen sowie eine Auflistung von Komponentenlieferanten für Sie bereit. Fordern Sie diese in unserem Verkaufsbüro an.

Die Angaben in diesem Datenblatt entsprechen dem heutigen Stand unserer Kenntnisse und informieren über Produkteigenschaften und den daraus resultierenden Anwendungsmöglichkeiten. Sie gewährleisten nicht die Eigenschaften bei konkreten Anwendungen. Rechtlich verbindliche Zusicherungen für die jeweiligen Einsatzzwecke können aus diesen Daten nicht abgeleitet werden. Durch unsere Qualitätssicherung auf Grundlage DIN ISO 9001 sichern wir Ihnen einwandfreie Qualität zu. Etwaige Schutzrechte und bestehende gesetzliche Bestimmungen sind zu beachten.

® Registrierte Marke der pro KÜHLSOLE GmbH

Diese Ausgabe ersetzt alle vorher erschienenen Daten.


pro KÜHLSOLE GmbH
Maurerstraße 46
D-52477 Alsdorf

Tel.: (02404) 6765-0
Fax: (02404) 6765-10
e-mail: info@prokuehlsole.de
www.prokuehlsole.de

Sicherheitsdatenblatt gemäß EG-Richtlinie 2001/58/EG



Druckdatum: 31.01.2008
Überarbeitet am: 18.01.2008

1. <u>Stoff-/Zubereitungs- und Firmenbezeichnung</u>											
<ul style="list-style-type: none"> • Angaben zum Produkt • Handelsname: <u>KARBOSOL W</u> • Hersteller/Lieferant: pro KÜHLSOLE GmbH Maurerstraße 46 52477 Alsdorf Tel.: 02404/6765-0 • Notrufnummer (Giftnotruf Berlin) Tel.: 030 / 19240 											
2. <u>Zusammensetzung/Angaben zu den Bestandteilen</u>											
<ul style="list-style-type: none"> • Chemische Charakterisierung: <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left; border-bottom: 1px solid black;">CAS-Nr.</th> <th style="text-align: left; border-bottom: 1px solid black;">Bezeichnung</th> <th style="text-align: left; border-bottom: 1px solid black;">%</th> <th style="text-align: left; border-bottom: 1px solid black;">Kennb. R-Sätze</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>584-08-7</td> <td>Kaliumcarbonat</td> <td>>20</td> <td>Xi 36/38</td> </tr> </tbody> </table>				CAS-Nr.	Bezeichnung	%	Kennb. R-Sätze	584-08-7	Kaliumcarbonat	>20	Xi 36/38
CAS-Nr.	Bezeichnung	%	Kennb. R-Sätze								
584-08-7	Kaliumcarbonat	>20	Xi 36/38								
3. <u>Mögliche Gefahren</u>											
<ul style="list-style-type: none"> • Gefahrenbezeichnung:  Xi Reizend • Besondere Gefahrenhinweise für Mensch und Umwelt: R 36/38 Reizt die Augen und die Haut. S 24/25 Berührung mit der Haut und den Augen vermeiden. 											
4. <u>Erste-Hilfe-Maßnahmen</u>											
<ul style="list-style-type: none"> • Allgemeine Hinweise: Verschmutzte Kleidung und Schuhe ausziehen. • nach Einatmen: entfällt. • nach Hautkontakt: Benetzte Stellen mit Wasser und Seife abwaschen und gut nachspülen.. • nach Augenkontakt: Mit viel Wasser spülen und Arzt aufsuchen. • nach Verschlucken: Kein Erbrechen herbeiführen! Wasser zu trinken geben und umgehend Arzt hinzuziehen. 											
5. <u>Maßnahmen zur Brandbekämpfung</u>											
<ul style="list-style-type: none"> • Geeignete Löschmittel: Schaum, CO₂, Pulverlöschmittel, Wassersprühstrahl • Besondere Schutzausrüstung: entfällt. 											
6. <u>Maßnahmen bei unbeabsichtigter Freisetzung:</u>											
<ul style="list-style-type: none"> • Personenbezogene Vorsichtsmaßnahmen: Personen in Sicherheit bringen. Schutzausrüstung tragen. Ungeschützte Personen fernhalten. Persönliche Schutzkleidung tragen. 											
(Fortsetzung auf Seite 2)											



Sicherheitsdatenblatt gemäß EG-Richtlinie 2001/58/EG

Druckdatum: 31.01.2008

Überarbeitet am: 18.01.2008

Handelsname: KARBOSOL W	(Fortsetzung von Seite 1)										
<ul style="list-style-type: none"> • Umweltschutzmaßnahmen: Nicht in die Kanalisation oder in Gewässer gelangen lassen. Eindringen in Kanalisation, Gruben und Keller verhindern. Bei Eindringen in Boden, Gewässer oder Kanalisation zuständige Behörden benachrichtigen. • Verfahren zur Reinigung/Aufnahme: Mit flüssigkeitsbindendem Material (Sand, Kieselgur, Universalbinder) aufnehmen und vorschriftsmäßig entsorgen. 											
7. Handhabung und Lagerung											
<ul style="list-style-type: none"> • Handhabung • Hinweise zum sicheren Umgang: Behälter dicht geschlossen halten. • Hinweise zum Brand- und Explosionsschutz: entfällt. • Lagerung • Anforderung an Lagerräume und Behälter: Keine besonderen Anforderungen. • Zusammenlagerungshinweise: nicht erforderlich. • Weiter Angaben zu den Lagerbedingungen: Behälter dicht geschlossen halten. 											
8. Expositionsbegrenzung und persönliche Schutzausrüstung											
<ul style="list-style-type: none"> • Zusätzliche Hinweise zur Gestaltung technischer Anlagen: Keine weiteren Anlagen, siehe Punkt 7. • Bestandteile mit arbeitsplatzbezogenen, zu überwachenden Grenzwerten: <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left; border-bottom: 1px solid black;">CAS-Nr.</th> <th style="text-align: left; border-bottom: 1px solid black;">Bezeichnung des Stoffes</th> <th style="text-align: left; border-bottom: 1px solid black;">Art</th> <th style="text-align: left; border-bottom: 1px solid black;">Wert</th> <th style="text-align: left; border-bottom: 1px solid black;">Einheit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="5">Das Produkt enthält keine relevanten Mengen von Stoffen mit arbeitsplatzbezogenen, zu überwachenden Grenzwerten.</td> </tr> </tbody> </table> • Zusätzliche Hinweise: Als Grundlage dienen die bei der Erstellung gültigen Listen. • Persönliche Schutzausrüstung: • Allgemeine Schutz- und Hygienemaßnahmen: Von Nahrungsmitteln, Getränken und Futtermitteln fernhalten. Beschmutzte, getränkte Kleidung sofort ausziehen. Vor den Pausen und bei Arbeitsende Hände waschen. Berührung mit den Augen und der Haut vermeiden. • Atemschutz: nicht erforderlich. • Handschutz: Schutzhandschuhe. • Augenschutz: Dichtschießende Schutzbrille. 		CAS-Nr.	Bezeichnung des Stoffes	Art	Wert	Einheit	Das Produkt enthält keine relevanten Mengen von Stoffen mit arbeitsplatzbezogenen, zu überwachenden Grenzwerten.				
CAS-Nr.	Bezeichnung des Stoffes	Art	Wert	Einheit							
Das Produkt enthält keine relevanten Mengen von Stoffen mit arbeitsplatzbezogenen, zu überwachenden Grenzwerten.											
9. Physikalische und chemische Eigenschaften											
<ul style="list-style-type: none"> • Form: flüssig • Farbe: farblos • Geruch: geruchlos 											
(Fortsetzung auf Seite 3)											



Sicherheitsdatenblatt gemäß EG-Richtlinie 2001/58/EG

Druckdatum: 31.01.2008

Überarbeitet am: 18.01.2008

Handelsname: KARBOSOL W	
	(Fortsetzung von Seite 2) <u>Wert/Bereich Einheit Methode</u>
<ul style="list-style-type: none"> • Zustandsänderung • Schmelzpunkt/Schmelzbereich: • Siedepunkt/Siedebereich: • Flammpunkt: • Zündtemperatur: • Selbstentzündlichkeit: Das Produkt ist nicht selbstentzündlich. • Explosionsgefahr: Das Produkt ist unter Normalbedingungen nicht explosionsgefährlich. • Dampfdruck: bei 20° C • Dichte: bei 20° C • Löslichkeit in / Mischbarkeit mit • Wasser: vollständig mischbar • pH-Wert: (g/l H₂O) bei 20° C • dynamische Viskosität: bei 20° C 	ca. -13°C n. a. n. a. < Wasser 1,26 g/cm ³ ca. 11 1,7 mm ² /s
10. Stabilität und Reaktivität	
<ul style="list-style-type: none"> • Zu vermeidende Bedingungen: Keine Zersetzung bei bestimmungsgemäßer Verwendung. • Gefährliche Reaktionen: keine gefährlichen Reaktionen bekannt. • Gefährliche Zersetzungsprodukte: keine 	
11. Angaben zur Toxikologie	
<ul style="list-style-type: none"> • Akute Toxizität: > 5000 mg/kg (LD 50 oral Ratte) • Primäre Reizwirkung: • an der Haut: Reizt die Haut und die Schleimhäute. • am Auge: Reizwirkung • Sensibilisierung: Keine sensibilisierende Wirkung bekannt. • Zusätzliche toxikologische Hinweise: n.a. 	
12. Angaben zur Ökologie	
<ul style="list-style-type: none"> • Allgemeine Hinweise: Wassergefährdungsklasse 1 (WGK 1) WGK-Nr.: 337 Nicht unverdünnt bzw. in größeren Mengen in das Grundwasser, in Gewässer oder in die Kanalisation gelangen lassen. 	
13. Hinweise zur Entsorgung	
<ul style="list-style-type: none"> • Produkt: • Empfehlung: Darf nicht zusammen mit Hausmüll entsorgt werden. Nicht in die Kanalisation gelangen lassen. Mit der zuständigen Behörde oder einem Abfallentsorgungsunternehmen Kontakt aufnehmen. Abfallschlüsselnummer: 51 508 (BRD) • Ungereinigte Verpackungen: Empfehlung: Rücktransport an den Hersteller (siehe Pkt. 1) bzw. Entsorgung gemäß der behördlichen Vorschriften. (Fortsetzung auf Seite 4) 	

Sicherheitsdatenblatt gemäß EG-Richtlinie 2001/58/EG

Druckdatum: 31.01.2008

Überarbeitet am: 18.01.2008

Handelsname: KARBOSOL W


(Fortsetzung von Seite 3)

- **Empfohlene Reinigungsmittel:**
Wasser, gegebenenfalls mit Zusatz von Reinigungsmitteln.

14. Transportvorschriften

- **Landtransport ADR/RID und GGVS/GGVE (grenzüberschreitend/Inland):**
 ADR/RID-GGVS/E Klasse: entfällt.
 Ziffer/Buchstabe: entfällt.
 Kemler-Zahl: entfällt.
 UN-Nummer: entfällt.
- **Seeschifftransport IMDG/GGVSee:**
 IMDG/GGVSee-Klasse: entfällt.
 Seite: entfällt.
 UN-Nummer: entfällt.
 Verpackungsgruppe: entfällt.
 EMS-Nummer: entfällt.
 MFAG: entfällt.
- **Lufttransport ICAO-TI und IATA-DGR:**
 ICAO/IATA-Klasse: entfällt.
 UN/ID-Nummer: entfällt.

15. Vorschriften

- **Kennzeichnung nach EU-Richtlinien:**
Das Produkt ist aufgrund der uns vorliegenden Daten eingestuft und gekennzeichnet.
- **Kennbuchstabe und Gefahrenbezeichnung des Produktes:**
 Xi Reizend
- **R-Sätze:**
R 36/38 Reizt die Augen und die Haut.
- **S-Sätze:**
S 25/25 Berührung mit Augen und Haut vermeiden.
- **Nationale Vorschriften:**
- **Technische Anleitung Luft:**
n. a.
- **Wassergefährdungsklasse:**
WGK 1 (Listeneinstufung): schwach wassergefährdend.

16. Sonstige Angaben:

Die Angaben stützen sich auf den heutigen Stand unserer Kenntnisse, sie stellen jedoch keine Zusicherung von Produkteigenschaften dar und begründen kein vertragliches Rechtsverhältnis.

- **Datenblatt ausstellender Bereich:** Abteilung SEH
- **Ansprechpartner:** Tel.: 02404/6765-0

TYFOXIT[®] F15-F50



**Hochleistungs-Kälte­träger
für den Einsatz bis -50 °C**

Technische Information

Allgemeines

TYFOXIT[®] F15-F50 sind auf Lebensmittelzusatzstoffen basierende farblose, nicht brennbare, nichttoxische Hochleistungs-Kälte­träger, die in allen indirekten Kältesystemen einsetzbar sind. Als konsequente Weiterentwicklung des TYFOXIT[®]s besitzt die TYFOXIT[®] F -Produktreihe ein nochmals deutlich verbessertes Viskositätsverhalten und ermöglicht so für bestehende Anlagen eine gesteigerte Kälte­leistung und verringerte Energiekosten, bei Neuplanung die Auslegung von Anlagen kleinerer Dimension. Wie TYFOXIT[®] bieten TYFOXIT[®]F-Formulierungen Langzeit-Korrosions-

schutz für sämtliche im Kälteanlagenbau verwendeten Werkstoffe wie Stahl, Edelstähle, Gußeisen, Messing, Kupfer, Bronze und Aluminium.

Anwendung

TYFOXIT[®] F ist in fünf füllfertigen Varianten F15 bis F50 erhältlich, deren Kennzahlen die jeweilige Abkühlungsgrenze angeben. Vor Befüllung der Anlage ist eventuell noch im System befindliches Wasser möglichst vollständig zu entfernen. Geringfügige Verdünnungen werden jedoch durch die betreffende TYFOXIT[®] F -Formulierung abge­puffert.

Tabelle 1: Abkühlungsgrenzen und Kenndaten von TYFOXIT[®] F15-F50

TYFOXIT [®] F Abkühlungsgrenze	Dichte (20 °C) [g/cm ³]	Viskosität (20 °C) [mm ² /s] [mPas]		pH-Wert (20 °C)	Siedepunkt [°C]
F15 / -15 °C	1.222	1.67	2.04	11.50	> 100 °C
F20 / -20 °C	1.262	1.73	2.18	11.76	> 100 °C
F30 / -30 °C	1.284	1.79	2.29	11.82	> 100 °C
F40 / -40 °C	1.336	2.05	2.74	12.03	> 100 °C
F50 / -50 °C	1.358	2.36	3.20	12.08	> 100 °C

Sicherheitstechnische Angaben zu TYFOXIT[®] F15-F50

MAK-Werte:	Nicht festgelegt.
Flammpunkte:	Nicht entflammbar.
Entsorgungshinweise:	Siehe unten.
Wassergefährdungsklasse:	1 (schwach wassergefährdend gemäß VwVwS vom 17. Mai 1999).
Transportvorschriften:	Nach EG-Richtlinien nicht kennzeichnungspflichtig.



TYFOROP Chemie GmbH

Anton-Rée-Weg 7 D-20537 Hamburg Tel: ++49 (0)40 20 94 97-0 und -61 21 69 Fax: -61 52 99 e-mail: info@tyfo.de

Technische Information TYFOXIT[®] F15-F50, Ausgabe 01/04

S.1

Korrosionsschutz

Tabelle 2 zeigt das gute Korrosionsverhalten von TYFOXIT® F 20 u. F 40, verglichen mit einem auf einen Frostschutz von -40 °C eingestellten Ethylenglykol/Wasser-Gemisch sowie CaCl₂-Sole mit einer Abkühlungsgrenze von -50 °C, in Anlehnung an ASTM D 1384 (336 h, 88 °C, 6 l Luft/h).

Tabelle 2: Korrosionstest nach ASTM D 1384

Werkstoff	Ethylenglykol / H ₂ O 1:1	Tyfoxit F 20	Tyfoxit F 40	CaCl ₂ -Sole 30 %ig
Kupfer	3.6 x 10 ⁻³	2.3x 10 ⁻³	0.6 x 10 ⁻³	0.03
Messing	3.9 x 10 ⁻³	5.2 x 10 ⁻³	k. A.	0.11
Stahl	1.6 x 10 ⁻³	k. A.	k. A.	0.32
Grauguß	1.1 x 10 ⁻³	k. A.	k. A.	1.04
Alu-Guß	k. A.	k. A.	k. A.	1.25

Abtragsraten in Millimeter / Jahr [mm/a]
k. A.: kein Abtrag feststellbar.

Materialbeständigkeit

TYFOXIT® F -Zubereitungen greifen die im Kälteanlagenbau verwendeten Dichtungswerkstoffe nicht an. Beständig sind Baumwolle, Hanf, sowie

Butylkautschuk	IR
Polyethylen weich, hart	L/HDPE
Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk	EPDM
Polyethylen vernetzt	VPE
Epoxidharze	EP
Polypropylen	PP
Fluorcarbon-Elastomere	FPM
Polytetrafluorethylen	PTFE
Nitrilkautschuk	NBR
Polyvinylchlorid weich, hart	PVC w, h
Polyamid	PA
Styrolbutadienkautschuk	SBR
Polychlorbutadienkautschuk	CR
Ungesättigte Polyesterharze	UP

Asbestfreie Aramid-Flachdichtungen sind ebenso beständig, Aminoplaste und Silicone laut Literatur nur bedingt resistent. Bei PTFE-Dichtungsband ist das irreversible temperaturabhängige Ausdehnungsverhalten zu beachten. Im Bedarfsfall ist mit den Herstellern Kontakt aufzunehmen.

Anwendungsrichtlinien

Die Einhaltung der im folgenden beschriebenen Richtlinien ist für einen umfassenden Korrosionsschutz der mit TYFOXIT® F15-F50 betriebenen Anlagen zwingend erforderlich.

1. Mischbarkeit mit anderen Kälteträgern

TYFOXIT® F -Kälteträger dürfen keinesfalls mit herkömmlichen Salzsolen - insbesondere Chloridsolen - oder wässrigen Glykol-Lösungen vermischt werden, da dies zu Ausfällungen und chemischen Reaktionen führen kann. Anlagen, die bereits mit Salzsolen betrieben wurden, sind gründlich zu reinigen.

2. Temperaturbelastbarkeit

TYFOXIT® F -Formulierungen sind von -60 bis +80 °C einsetzbar, wobei die thermische Belastungsgrenze des betreffenden Kälteträgers von den in der Anlage verwendeten Werkstoffen abhängt. So sind bei in Edelstahl ausgeführten Systemen kurzfristig Temperaturen bis zu +80 °C möglich, während bei Mischinstallation +60 °C nicht überschritten werden sollten. Für den nicht empfehlenswerten Dauereinsatz von TYFOXIT® F15-F50 als Warmsole gelten +20 °C als Obergrenze. Im Einzelfall wenden Sie sich bitte an unsere Anwendungstechnik.

3. Ausführung u. Installation der Kälteanlage

1. Wir empfehlen generell die Verwendung von TYFOXIT® F15-F50 in **geschlossenen** Kälteanlagen, da die Inhibitoren in Gegenwart von Luft-sauerstoff schneller verbraucht werden. Bei **offenen** Kreisläufen sollte die Einleitung des Mediumrücklaufes unterhalb des Flüssigkeitsspiegels erfolgen, um unnötigen Lufteinschlag zu vermeiden.

In jedem Fall ist hier der pH-Wert häufiger zu prüfen.

2. Im Kreissystem ist der Einbau eines Filterelementes an der tiefsten Stelle zum Anschwemmen von Feststoffen vorzusehen.

3. Alle Leitungen müssen derart verlegt werden, daß keine Zirkulationsstörungen durch Gaspolster oder Ablagerungen auftreten können.

4. Das Kreissystem muß bis zur höchsten Stelle permanent mit dem Kälteträger gefüllt sein. An der höchsten Stelle ist zur Gasabscheidung ein geschlossenes Gefäß mit einem Entlüftungsventil vorzusehen. Dabei dürfen nur automatische Entlüftungsventile eingebaut werden, die das Einschnüffeln von Luft mit Sicherheit verhindern.

5. Der Einsatz innenverzinkter Rohrleitungen oder Behälter ist zu vermeiden. Bei Kontakt mit Außenverzinkungen (Abdeckbleche, Träger usw.) ist der Kälteträger umgehend durch Spülen mit viel Wasser zu entfernen.

6. Lötverbindungen sind vorzugsweise mit Kupfer-Hartlot auszuführen. Der Einsatz bleihaltigen Weichlots ist zu vermeiden. In jedem Falle ist Kontakt mit dem Hersteller des betreffenden Materials aufzunehmen. Weiterhin dürfen keine chloridhaltigen Flußmittel verwendet werden.

7. Es muß sichergestellt sein, daß zwischen Anlagenteilen, die mit dem Medium in Kontakt stehen, keine elektrischen Fremdpotentiale anliegen.

4. Reinigung und Befüllung der Anlage

1. Während der Montage und vor der Befüllung muß die Anlage gegen den Zutritt von Schmutz u. Wasser geschützt sein. Nach der Fertigstellung soll eine Innenreinigung durch Spülung und Filtra-

tion erfolgen, um Fremdstoffe (Metallspäne, Zunder, Verpackungsreste, Montagehilfsmittel etc) zu entfernen. Nach Beendigung der Innenreinigung und der Dichtigkeitsprobe ist das System vollständig zu entleeren und sofort mit dem Medium zum Schutz gegen Korrosion zu befüllen, auch wenn die Inbetriebnahme erst später erfolgt.

2. Nach der Befüllung ist darauf zu achten, daß sich in der Anlage keine Luftpolster mehr befinden, da diese bei Temperaturabsenkung einen Unterdruck aufbauen, sodaß Luft ins System eingesaugt werden kann. Gaspolster sind deshalb fallweise zu beseitigen.

3. Nach der ersten Füllung und Inbetriebnahme, jedoch spätestens nach 14 Tagen müssen die eingebauten Filter gereinigt werden, um den freien Durchfluß des Mediums sowie die Funktion

der Pumpen nicht zu beeinträchtigen.

4. Bei Flüssigkeitsverlusten durch Leckage oder Entnahme muß Kälteträger entsprechend der vorhandenen Zubereitung nachgefüllt werden. Im Zweifel ist der TYFOXIT® F -Gehalt zu prüfen.

5. Überwachung der Kälteträger

Auf Wunsch bieten wir eine Kontrolle der relevanten Parameter (pH-Wert, Inhibitorkonzentration, Dichte usw.) an. Dazu ist zunächst innerhalb eines Monats ab Inbetriebnahme, nach sechs Monaten und anschließend im Abstand von einem Jahr je eine Probe von ca. 0.5 l der Anlage zu entnehmen und an unser Labor einzusenden. Nach erfolgter Analyse erhält der Auftraggeber einen Prüfbericht. Aräometer zur Dichtemessung vor Ort sind bei uns erhältlich.

Hinweise zur Handhabung von TYFOXIT® F15-F50

1. Verpackung

TYFOXIT® F15-F50 ist im Tankzug, in 1m³-Containern sowie in 200 bzw. 30 l -Gebinden lieferbar

2. Unbeabsichtigte Freisetzung

Kurzzeitiger Kontakt mit den Kälteträgern erzeugt keine oder nur sehr geringe Auswirkungen. Bei Umgang mit den Produkten ist das Tragen von Gummihandschuhen empfehlenswert. Sind Personen ungeschützt mit TYFOXIT® F15-F50 in Berührung gekommen, so ist wie folgt zu verfahren:

Art des Kontaktes	Symptome	Maßnahmen
Augenkontakt	vorübergehend sind Brennen und Rötung der Augen möglich.	10 Minuten mit viel Wasser spülen, Augen dabei geöffnet halten.
Hautkontakt	wiederholte längere Einwirkung kann zu leichten Reizungen führen.	benetzte Haut mit viel Wasser spülen. Kleidung entfernen.
Inhalation	nach Einatmen v. Nebeln, Aerosolen Atemwegsreizung möglich.	Person an die frische Luft bringen.
Ver-schlucken	Schleimhautreizung des Verdauungstrakts möglich.	Mund m. Wasser spülen, nicht erbrechen lassen, bei größeren Mengen Arzt aufsuchen

Beim Be- und Entladen, bei Dosierung in das System oder durch Leckagen unbeabsichtigt ausgetretener Kälteträger ist wie folgt zu beseitigen:

1. Ausgelaufenes oder verschüttetes Produkt ist mit geeignetem flüssigkeitsbindenden Material (Sägespäne, Holzwolle, Sand) einzudämmen. Zur weiteren Behandlung s. u., 3. Entsorgung.

2. Kleine Mengen sind mit viel Wasser fortzuspülen, bei größeren Mengen, die in die Drainage oder in Gewässer abfließen können, ist die zuständige Wasserbehörde zu informieren.

3. Anlagenteile, die mit dem Produkt in Berührung gekommen sind, sind umgehend durch Spülen mit viel Wasser zu reinigen. Die Verwendung warmen Wassers oder der Einsatz eines Dampf-

strahlgerätes erhöht dabei die Wirksamkeit des Reinigungsvorganges. Anschließend sollte die betreffende Oberfläche mit einem sauberen Tuch abgetrocknet werden. Industriefußböden sind in der gleichen Weise zu behandeln.

3. Entsorgung

Eingedämmtes Produkt kann unter Beachtung der behördlichen Vorschriften einer Sonderbehandlung zugeführt werden, z. B. der Entsorgung in einer genehmigten Müllverbrennungsanlage. Im übrigen sind die Bestimmungen des „Gesetzes über die Vermeidung u. Entsorgung von Abfällen (Abfallgesetz - AbfG) vom 27. August 1986“ und die dazu erlassenen Verordnungen - insbesondere über Transport u. Nachweis - zu beachten (Bundesrecht und ergänzende Vorschriften der einzelnen Länder). Ungereinigte Verpackungen sind optimal zu entleeren und können nach entsprechender Reinigung wiederverwendet werden.

4. Lagerung, Stabilität und Reaktivität

Die Lagerung sollte in Polyethylenfässern erfolgen. In luftdicht verschlossenen Behältern sind die Produkte mindestens fünf Jahre lang lagerfähig und chemisch stabil bei sachgemäßer Handhabung und Lagerung. Sie dürfen nicht bei höheren Temperaturen u. gemeinsam mit starken Oxidationsmitteln (Wasserstoffperoxid, Salpetersäure) o. Mineralsäuren (Salzsäure) gelagert werden.

5. Sicherheit

TYFOXIT® F -Formulierungen sind im Sinne der Gefahrstoffverordnung vom 26. August 1986 nicht kennzeichnungspflichtig. Ein Sicherheitsdatenblatt gemäß Richtlinie 91/155/EEC liegt vor.

6. Ökologie

Alle Kälteträger sind biologisch leicht abbaubar. Bei sachgemäßer Einleitung in adaptierte biologische Kläranlagen sind keine Störungen der Abbauproduktivität des Belebtschlammes zu erwarten.

Tabelle 3: Physikalische Daten der Kälteträger TYFOXIT® F15-F50

Produkt	T [°C]	Spez. Wärme [J/g·K]	Wärmeleitfähig- keit [W/m·K]	Viskosität		Dichte [g/cm ³]
				[mm ² /s]	[mPa·s]	
TYFOXIT® F15	+40	3.22	0.567	1.26	1.53	1.214
	+30	3.21	0.556	1.44	1.75	1.218
	+20	3.20	0.545	1.67	2.04	1.222
	+10	3.19	0.534	1.93	2.37	1.226
	±00	3.18	0.523	2.45	3.01	1.230
	-10	3.17	0.512	3.22	3.97	1.234
	-15	3.16	0.501	3.79	4.68	1.236
TYFOXIT® F20	+40	2.97	0.553	1.29	1.62	1.254
	+30	2.96	0.542	1.47	1.84	1.258
	+20	2.95	0.531	1.73	2.18	1.262
	+10	2.94	0.519	2.06	2.61	1.266
	±00	2.93	0.508	2.58	3.28	1.270
	-10	2.92	0.497	3.57	4.55	1.274
	-20	2.91	0.486	5.00	6.39	1.278
TYFOXIT® F30	+40	2.84	0.537	1.33	1.69	1.276
	+30	2.83	0.524	1.50	1.92	1.280
	+20	2.82	0.511	1.79	2.29	1.284
	+10	2.81	0.498	2.20	2.83	1.288
	±00	2.80	0.485	2.74	3.54	1.292
	-10	2.79	0.472	3.77	4.89	1.296
	-20	2.78	0.459	5.36	6.97	1.300
	-30	2.77	0.446	8.35	10.89	1.304
TYFOXIT® F40	+40	2.72	0.513	1.49	1.98	1.328
	+30	2.71	0.502	1.70	2.26	1.332
	+20	2.70	0.491	2.05	2.74	1.336
	+10	2.69	0.480	2.58	3.46	1.340
	±00	2.68	0.469	3.25	4.37	1.344
	-10	2.67	0.458	4.55	6.13	1.348
	-20	2.66	0.447	6.57	8.88	1.352
	-30	2.65	0.436	10.31	13.98	1.356
TYFOXIT® F50	+40	2.64	0.493	1.73	2.34	1.350
	+30	2.63	0.481	2.00	2.71	1.354
	+20	2.62	0.468	2.36	3.20	1.358
	+10	2.61	0.455	2.92	3.98	1.362
	±00	2.60	0.443	3.87	5.29	1.366
	-10	2.59	0.431	5.30	7.26	1.370
	-20	2.58	0.418	8.07	11.09	1.374
	-30	2.57	0.405	12.89	17.89	1.378
	-40	2.56	0.392	24.19	33.43	1.382
-50	2.55	0.379	54.96	76.17	1.386	

Sämtliche Daten wurden im Labor unter Standardbedingungen ermittelt, die nicht ohne weiteres auf technische Anlagen übertragbar sind. Daher können diese Werte bei der Auslegung von Kälteanlagen lediglich als Anhaltswerte dienen.

Änderungen zur vorangegangenen Ausgabe sind mit einem „*“ gekennzeichnet. Ältere Ausgaben verlieren damit ihre Gültigkeit. Die Angaben in dieser Druckschrift entsprechen unseren derzeitigen technischen Kenntnissen und Erfahrungen. Wegen der Fülle unvorhersehbarer Umstände bei der Anwendung unserer Produkte sind eigene Prüfungen und Vorsichtsmaßnahmen erforderlich. Etwaige Schutzrechte, bestehende Gesetze u. Bestimmungen sind vom Empfänger in eigener Verantwortung zu beachten.



TYFOROP Chemie GmbH

Anton-Rée-Weg 7 D-20537 Hamburg Tel: ++49 (0)40 20 94 97-0 und -61 21 69 Fax: -61 52 99 e-mail: info@tyfo.de

Technische Information TYFOXIT® F15-F50, Ausgabe 01/04

S.4



EG - SICHERHEITSDATENBLATT

gem. 91/155/EG; 2001/58/EG

Überarbeitet am 07.06.05

Druckdatum: 07.06.05

Blatt 01 von 04

1. Stoff-/Zubereitungs- und Firmenbezeichnung

Handelsname: TYFOXIT® F15, F20, F30, F40, F50 - füllfertige Zubereitungen
Firma: TYFOROP Chemie GmbH, Anton-Rée-Weg 7, D - 20537 Hamburg
 Tel.: +49 (0)40 -20 94 97-0; Fax: -20 94 97-20; e-mail: info@tyfo.de
Notfallauskunft: Tel.: +49 (0)40 -20 94 97-0

2. Zusammensetzung / Angaben zu Bestandteilen

Chemische Charakterisierung: Wässrige Kaliumformiatlösungen mit Korrosionsinhibitoren.

Kaliumformiat	Gehalt (w/w): <50 %	CAS-Nr.: 590-29-4
	EG-Nr.: 209-677-9	Symbol: Xi R-Sätze: 22, 36

Der Wortlaut der Gefahrensymbole und R-Sätze ist in Kapitel 16 aufgeführt.

3. Mögliche Gefahren

Besondere Gefahren für Mensch und Umwelt:

Gesundheitsschädlich beim Verschlucken. Reizt die Augen.

Die Zubereitungen sind aufgrund der uns vorliegenden Daten keine gefährlichen Stoffe im Sinne der GefStoffV. Die Klassifizierung erfolgte aufgrund der den aktuellen EG-Listen, der Fachliteratur sowie Firmenangaben entnommenen Informationen.

4. Erste Hilfe - Maßnahmen

Nach Augenkontakt: Mindestens 10 Minuten lang mit reichlich Wasser spülen, dabei Augen geöffnet halten.

Nach Hautkontakt: Benetzte Haut mit viel Wasser abspülen, mit Seife abwaschen.

Nach Inhalation: An die frische Luft bringen.

Nach Verschlucken: Mund mit Wasser ausspülen, nicht zum Erbrechen reizen, bei anhaltenden Beschwerden Arzt hinzuziehen.

Hinweise für den Arzt: Kein spezifisches Gegenmittel. Unterstützende Maßnahmen erforderlich. Beim Verschlucken größerer Mengen werden Hyperkaliämie und evtl. Herzrhythmie hervorgerufen.

5. Maßnahmen zur Brandbekämpfung

Geeignete Löschmittel: Die Produkte sind nicht brennbar. Zur Bekämpfung von Umgebungsbränden sind Wassernebel, Kohlendioxid (CO₂), alkoholbeständiger Schaum sowie Trockenlöschmittel geeignet.

Besondere Schutzausrüstung bei der Brandbekämpfung: Feuerweherschutzkleidung tragen.

Weitere Angaben: Gefährdung hängt von den verbrennenden Stoffen und den Brandbedingungen ab. Kontamniertes Löschwasser muss entsprechend den behördlichen Vorschriften entsorgt werden.

TYFOROP EG-Sicherheitsdatenblatt
Produkt: TYFOXIT® F15, F20, F30, F40, F50

Überarbeitet am 07.06.05

Druckdatum: 07.06.05

Blatt 02 von 04

6. Maßnahmen bei unbeabsichtigter Freisetzung

Personenbezogene Maßnahmen:

Übermäßigen Haut- und Augenkontakt vermeiden, das Tragen von Gummihandschuhen wird empfohlen. Bei freigewordenen größeren Mengen durchtränkte Kleidung entfernen, Körper mit Wasser abspülen.

Umweltschutzmaßnahmen:

Das Produkt darf nicht ohne Vorbehandlung (biologische Kläranlage) in Gewässer gelangen.

Verfahren zur Reinigung/Aufnahme:

Mit flüssigkeitsbindendem Material (Sägespäne, Holzwolle, Sand) aufnehmen und vorschriftsmäßig entsorgen. Kleine Mengen mit viel Wasser fortspülen. Bei größeren Mengen, die in Drainage oder Gewässer laufen könnten, ist die zuständige Wasserbehörde zu informieren.

7. Handhabung und Lagerung

Handhabung:

Bei sachgemäßem Umgang mit den Produkten sind keine besonderen Maßnahmen erforderlich.

Brand- u. Explosionsschutz:

entfällt.

Lagerung:

Lagerung in Polyethylen- oder Stahlbehältern, nicht in verzinkten Behältern. Nicht gemeinsam mit Säuren und Oxidationsmitteln lagern. Behälter dicht geschlossen halten.

8. Expositionsbegrenzung und persönliche Schutzausrüstungen

Bestandteile mit arbeitsplatzbezogenen zu überwachenden Grenzwerten: keine

Persönliche Schutzausrüstung

Atemschutz:

Nicht erforderlich.

Handschutz:

Chemikalienbeständige Schutzhandschuhe (EN 374). Empfohlen: Nitrilkautschuk (NBR) Schutzindex 6. Wegen großer Typenvielfalt Gebrauchsanweisungen der Hersteller beachten.

Augenschutz:

Schutzbrille mit Seitenschutz (Gestellbrille) (EN 166).

Allgemeine Schutz- u. Hygienemaßnahmen:

Die beim Umgang mit Chemikalien üblichen Vorsichtsmaßnahmen sind zu beachten.

9. Physikalische und chemische Eigenschaften

Die nachfolgenden Aussagen gelten für sämtliche TYFOXIT® F-Zubereitungen.

Form:

flüssig.

Farbe:

farblos.

Geruch:

charakteristisch.

Schmelzpunkt:

nicht bestimmt.

Siedepunkt:

>100 °C.

Löslichkeit in Wasser:

vollständig löslich.

Flammpunkt:

entfällt.

Zündtemperatur:

entfällt.

Explosionsgrenzen:

entfallen.

	F15	F20	F30	F40	F50
Abkühlungsgrenze (°C):	-15	-20	-30	-40	-50
Dichte (20 °C, g/cm ³): ca.	1.22	1.26	1.28	1.34	1.36
pH-Wert (20 °C): ca.	11.5	11.7	11.8	12.0	12.1
Viskosität (20 °C, mPa·s):	2.04	2.18	2.29	2.74	3.25

TYFOROP EG-Sicherheitsdatenblatt
Produkt: TYFOXIT® F15, F20, F30, F40, F50

Überarbeitet am 07.06.05

Druckdatum: 07.06.05

Blatt 03 von 04

10. Stabilität und Reaktivität

Zu vermeidende Stoffe:	Säuren und Oxidationsmittel.
Gefährliche Reaktionen:	Keine gefährlichen Reaktionen bei vorschriftsmäßiger Handhabung und Lagerung, höhere Temperaturen sind zu vermeiden.
Gefährliche Zersetzungsprodukte:	Keine bei sachgemäßer Handhabung und Lagerung.

11. Angaben zur Toxikologie

Akute orale Toxizität:	LD50/oral/Ratte: >2000 mg/kg
Erfahrungen am Menschen:	
Nach Augenkontakt:	Vorübergehend Brennen, Rötung möglich, Kontakt vermeiden.
Nach Hautkontakt:	Gelegentlicher Kontakt erzeugt keine oder nur sehr geringe Auswirkungen. Wiederholte längere Einwirkung kann zu leichten Reizungen führen.
Nach Inhalation:	Nach Einatmen von Nebeln oder Aerosolen sind unter Umständen Reizungen der Atemwege möglich.
Nach Verschlucken:	Reizungen des Verdauungstraktes sind möglich.
Zusätzliche Hinweise:	Bei sachgemäßem Umgang und bestimmungsgemäßer Verwendung verursachen die Produkte nach unseren Erfahrungen und Informationen keine gesundheitsschädlichen Wirkungen.

12. Angaben zur Ökologie

Ökotoxizität:	Fischtoxizität: Regenbogenforelle/LC50 (96 h): >1000 mg/l Mikroorganismen/Wirkung auf Belebtschlamm: Bei sachgemäßer Einleitung geringer Konzentrationen in adaptierte biologische Kläranlagen sind Störungen der Abbauaktivität des Belebtschlammes nicht zu erwarten.
Persistenz und Abbaubarkeit:	Angaben zur Elimination: Versuchsmethode OECD 301 D Analysemethoden: DOC-Abnahme Eliminationsgrad: 89 % (Literaturdaten). Bewertung: leicht biologisch abbaubar.
Zusätzliche Hinweise:	Sonstige ökotoxikologische Hinweise: Produkt nicht ohne Vorbehandlung in Gewässer gelangen lassen. Die Produkte wurden nicht geprüft. Die Aussagen sind von den Eigenschaften der Einzelkomponenten abgeleitet.

13. Hinweise zur Entsorgung

	Die Produkte müssen unter Beachtung der örtlichen Vorschriften z. B. einer geeigneten Deponie oder einer geeigneten Verbrennungsanlage zugeführt werden.
	Ungereinigte Verpackung: Nicht kontaminierte Verpackungen können wieder verwendet werden. Nicht reinigungsfähige Verpackungen sind wie der Stoff zu entsorgen. Empfohlenes Reinigungsmittel: Wasser.

TYFOROP EG-Sicherheitsdatenblatt
Produkt: TYFOXIT® F15, F20, F30, F40, F50

Überarbeitet am 07.06.05

Druckdatum: 07.06.05

Blatt 04 von 04

14. Angaben zum Transport

VbF: unterliegen nicht der Verordnung brennbarer Flüssigkeiten. Postversand zugelassen.

GGVE/RID: kein Gefahrgut

GGVS/ADR: kein Gefahrgut

IMDG-Code: kein Gefahrgut

UN-Nr.: kein Gefahrgut

IATA-DGR: kein Gefahrgut

TA-Luft: kein Gefahrgut

Die Zubereitungen sind gemäß den Transportvorschriften nicht klassifiziert.

15. Vorschriften

Die Zubereitungen sind von Paragraph 2 Absatz (1) 2 der GefStoffV nicht erfaßt und damit noch nicht kennzeichnungspflichtig. Aufgrund der uns vorliegenden Daten kennzeichnen wir sie jedoch freiwillig entsprechend Anlage 1 Nr.1.1 der GefStoffV bzw. des "EG-Leitfadens zur Einstufung und Kennzeichnung".

Enthält: Kaliumformiat.

Symbol: Xi Reizend.

R - Sätze: 22 Gesundheitsschädlich beim Verschlucken.

36 Reizt die Augen.

S - Sätze: 24/25 Berührung mit der Haut und den Augen vermeiden.

Sonstige Vorschriften: Wassergefährdungsklasse: (Anhang 4 der VwVwS (Deutschland) vom 17. Mai 1999): 1 (schwach wassergefährdend).

16. Sonstige Angaben

Vollständiger Wortlaut der Gefahrensymbole und R-Sätze falls in Kapitel 2 genannt:

Xi: Reizend

22: Gesundheitsschädlich beim Verschlucken

36: Reizt die Augen

Alle Angaben, die sich im Vergleich zur vorangegangenen Ausgabe geändert haben, sind durch einen senkrechten Strich am linken Rand der betreffenden Passage gekennzeichnet. Ältere Ausgaben verlieren damit ihre Gültigkeit.

Das Sicherheitsdatenblatt ist dazu bestimmt, die beim Umgang mit chemischen Stoffen und Zubereitungen wesentlichen physikalischen, sicherheitstechnischen, toxikologischen u. ökologischen Daten zu vermitteln, sowie Empfehlungen für den sicheren Umgang bzw. Lagerung, Handhabung und Transport zu geben. Eine Haftung für Schäden im Zusammenhang mit der Verwendung dieser Information oder dem Gebrauch, der Anwendung, Anpassung oder Verarbeitung der hierin beschriebenen Produkte ist ausgeschlossen. Dies gilt nicht, soweit wir, unsere gesetzlichen Vertreter oder Erfüllungsgehilfen bei Vorsatz oder grober Fahrlässigkeit zwingend haften. Die Haftung für mittelbare Schäden ist ausgeschlossen.

Diese Angaben sind nach bestem Wissen und Gewissen angefertigt und entsprechen unserem aktuellen Kenntnisstand. Sie enthalten keine Zusicherung von Produkteigenschaften.

Datenblatt ausstellender Bereich: Abt. AT, Tel.: +49 (0)40 -20 94 97-0



TELEFAX

TYFOROP CHEMIE GmbH

Anton-Rée-Weg 7

D - 20537 Hamburg

Tel./Fax: ++49 (0)40 20 94 97-0 / 20

Nachricht vom: 09.02.09**Seitenzahl:** 2**An:** Hochschule Biberach
Institut für Gebäude- u. Energiesysteme
Karlstrasse 11
88400 Biberach/Riß
e-mail: ryba@hochschule-bc.de**Zu Händen:** Herrn Dipl.-Ing Ryba**Betr.:** Proben TYFOXIT® F15 – Ihr Schreiben vom 15.01.09

Sehr geehrter Herr Ryba,

als Anlage sende ich den Prüfbericht zu den o.g. Proben.

Bei Rückfragen stehe ich jederzeit gern zur Verfügung.

Herzliche Grüße

TYFOROP CHEMIE GMBH**Anlagen:** Prüfbericht 09/0209/I



TYFOROP Chemie GmbH

Anton-Rée-Weg 7 * D - 20537 Hamburg
Tel. +49 40 - 20 94 97-0 · Fax +49 40 - 20 94 97-20

Kälteträger - Analyse

Analysen Nr.: 09/0209/I
Einsender der Proben: Hochschule Biberach, 88400 Biberach/Riß
Datum der Entnahme: im Januar 2008
Entnahmeort: Erdwärme-Solewärmepumpe, Projekt GEO-SOLE

Untersuchungsergebnis

Prüfpunkt	Probe bezeichnet mit „Aus Lieferung“	Probe bezeichnet mit „Aus der Anlage“	Rückstellmuster TYFOXIT® F15 (Ch.-B. 1084221075)
Aussehen (visuell)	Leicht trübe, nach Filtration klar, farblos	Leicht trübe, nach Filtration klar, farblos	Klar, farblos, ohne unlösliche Bestandteile
Dichte (20 °C) (DIN 51757)	1.1853 g/cm ³	1.1787 g/cm ³	1.2242 g/cm ³
Brechungsindex nD20 (DIN 51423)	1.36536	1.36437	1.37117
pH-Wert (20 °C) (ASTM D 1287)	11.37	11.38	11.64
Gefrierpunkt (ASTM D1177)	-16.4 °C	-15.7 °C	-20.8 °C
Leitfähigkeit (konduktometrisch)	230 mS/cm	226 mS/cm	248 mS/cm
Korrosionsschutz (Hausvorschrift)	Gegeben	Gegeben	Entspricht

Beurteilung:

Die zur Untersuchung eingereichten Proben sind im Vergleich zum Originalzustand leicht mit Wasser verdünnt und geringfügig mit abfiltrierbaren Schmutzteilchen verunreinigt. Entsprechend liegen die Gefrierpunkte um ca. 5 °C oberhalb des von der Originalware sichergestellten Wertes. Während der im Kältebad durchgeführten Abkühlung der Proben waren vor Erreichen des jeweiligen Eisflockenpunktes keinerlei Auffälligkeiten wie Eintrübungen oder Ausfällungen sichtbar, die z. B. auf die Anwesenheit von Glykolen hingewiesen hätten.

Dr. F. Hillerns, Labor



TELEFAX

TYFOROP CHEMIE GmbH

Anton-Rée-Weg 7

D - 20537 Hamburg

Tel./Fax: ++49 (0)40 20 94 97-0 / 20

Nachricht vom: 25.02.09**Seitenzahl:** 1

An: Hochschule Biberach
Institut für Gebäude- u. Energiesysteme
Karlstrasse 11
88400 Biberach/Riß
e-mail: ryba@hochschule-bc.de

Zu Händen: Herrn Dipl.-Ing Ryba**Stoffdaten verdünntes TYFOXIT® F15, Gefrierpunkt -15.7 °C (Abkühlungsgrenze -10 °C)**

Sehr geehrter Herr Ryba,

wie besprochen haben wir die Dichte der in der Anlage befindlichen Sole bei verschiedenen Temperaturen experimentell ermittelt. Die spezifische Wärmekapazität wurde berechnet, nachdem die Gewichtsanteile der Inhaltsstoffe laboranalytisch bestimmt wurden.

T [°C]	Dichte [kg/m ³]	Cp [kJ/kgK]
-10	1194	3.45
0	1189	3.46
+10	1184	3.47
+20	1179	3.48
+30	1174	3.49
+40	1169	3.50

Wir hoffen, dass wir hiermit behilflich waren. Bei Rückfragen stehen wir jederzeit gern zur Verfügung.

Mit freundlichen Grüßen

TYFOROP CHEMIE GMBH

Dr. Frank Hillerns