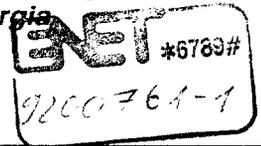




Bundesamt für Energiewirtschaft
Office fédéral de l'énergie
Ufficio federale dell'energia
Uffizi federal d'energia



Forschungsprogramm
Umgebungs- und Abwärmenutzung,
Wärme-Kraft-Kopplung (UAW)

Eigenschaften von Wärmeträgerflüssigkeiten

für die Anwendung in Erdwärmesonden

ausgearbeitet durch
Dr. R.J. Hopkirk
POLYDYNAMICS LIMITED
Zeltweg 16, 8032 Zürich

im Auftrag des
Bundesamtes für Energiewirtschaft

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Figurenverzeichnis	2
Zusammenfassung	3
Summary	3
1 Einleitung	5
2 Datengrundlagen	6
3 Eigenschaften von Wärmeträgerflüssigkeiten	10
3.1 Wärmeübergang und Druckverlust in Rohren	11
3.1.1 Der Wärmeübergang	12
3.1.2 Der Druckverlust	14
3.1.3 Das Verhältnis zwischen Druckverlust und Wärmeübergang	16
3.2 Wärmeübergang und Druckverlust im Plattenwärmetauscher	20
3.3 Korrosion	23
4 Schlussfolgerungen und Ausblick	26
5 Literaturverzeichnis	28
Anhang	30
Beilage 1: Abkürzungen der verwendeten Symbole	37
Beilage 2: Materialeigenschaften der untersuchten Wärmeträger	38

Figurenverzeichnis

	Seite
Fig. 1: Die Abhängigkeit des Wärmeübergangsfaktors F_{α} von der Temperatur für unterschiedliche Frostschutzmittel bei ausgebildeter laminarer Strömung	13
Fig. 2: Die Abhängigkeit des Wärmeübergangsfaktors F_{α} von der Temperatur für unterschiedliche Frostschutzmittel bei voll ausgebildeter turbulenter Strömung	14
Fig. 3: Die Abhängigkeit des Druckverlustfaktors $F_{\Delta p}$ von der Temperatur für unterschiedliche Frostschutzmittel bei ausgebildeter laminarer Strömung	15
Fig. 4: Die Abhängigkeit des Druckverlustfaktors $F_{\Delta p}$ von der Temperatur für unterschiedliche Frostschutzmittel bei voll ausgebildeter turbulenter Strömung bis Reynold's Zahlen von 10^5	16
Fig. 5: Die Abhängigkeit des Verhältnisses $F_{\Delta p}/F_{\alpha}$ von der Temperatur für unterschiedliche Frostschutzmittel bei ausgebildeter laminarer Strömung	18
Fig. 6: Die Abhängigkeit des Verhältnisses $F_{\Delta p}/F_{\alpha}$ von der Temperatur für unterschiedliche Frostschutzmittel bei voll ausgebildeter turbulenter Strömung	18
Fig. 7: Das Verhältnis $F_{\Delta p}/F_{\alpha}$ dividiert durch $F_{\Delta p}/F_{\alpha}$ von Wasser bei 15°C ist in Abhängigkeit von der Temperatur aufgetragen. Dieses Diagramm gilt für laminare Strömung.	19
Fig. 8: Das Verhältnis $F_{\Delta p}/F_{\alpha}$ dividiert durch $F_{\Delta p}/F_{\alpha}$ von Wasser bei 15°C ist in Abhängigkeit von der Temperatur aufgetragen. Dieses Diagramm gilt für turbulente Strömungen.	19

Zusammenfassung

Raumheizung mit Boden-gekoppelten Wärmepumpen verlangt in den meisten Fällen einen frostsicheren Wärmeträger im primären Kreislauf. Das System mit untiefen Erdwärmesonden bis 200 m Bohrteufe bildet keine Ausnahme. In der Schweiz wird mehrheitlich Ethylenglykol als Frostschutzmittel eingesetzt. Es wird aber nach Alternativen zu diesem Mittel gesucht, die eine bessere Effizienz jedoch mit akzeptableren Eigenschaften hinsichtlich Korrosionsschutz und in eventuellen Havariefällen hinsichtlich Toxizität im Grundwasser anbieten.

Die Effizienzen einiger Alternativen, die vom toxikologischen Standpunkt annehmbar sind, wurden untersucht und verglichen. Dabei wurde ihr Verhalten in der Sonde sowie in einem typischen Plattenwärmeaustauscher betrachtet.

Mit Bezug ausländischer Erfahrungen und Entwicklungen wird gezeigt, dass ein Umstieg auf Salz-basierte Frostschutzmittel heute denkbar und dass eine Steigerung der Systemeffizienz dadurch möglich ist.

Summary

Space heating systems using ground-coupled heat pumps demand in general a frost inhibitor in their primary circuit. This is generally true for all systems, including those using vertical tube heat exchangers less than 200 m deep. Currently in Switzerland, the most popular and accepted anti-freeze additive is Ethylene Glycol. Alternatives to this are however of interest if they offer a better system efficiency and at the same time are acceptable from the points of view of corrosion protection and toxicity - this latter condition applying in the eventuality of a fluid loss from the underground heat exchanger.

Several alternatives, acceptable from the toxicological side, are compared for their performance in the vertical tube system and in a typical multi-plate heat exchanger used as an evaporator.

International experiences are also collected to show that it is already practicable to change over to using certain salt-based anti-freeze mixtures which have the potential to improve system efficiency.

1 Einleitung

Im Quellenkreislauf einer Erdwärmesondenanlage (EWS-Anlage) schwankt die Flüssigkeitstemperatur um null Grad Celsius. Aus diesem Grund wird als Wärmeträgerflüssigkeit ein Gemisch aus Wasser und einem Frostschutzmittel verwendet.

Seit dem Bau der ersten Anlagen wurden als Frostschutzmittel vor allem Glykole verwendet, die aus der Kälte- und Heizungstechnik bekannt waren. Im Vergleich zu reinem Wasser zeigen die Glykol-Wasser Gemische schlechtere thermische Eigenschaften.

In den letzten Jahren wurden verschiedene Bestandteile der EWS-Anlagen optimiert. Ein weiterer Schritt in diese Richtung ist die Wahl eines geeigneteren Wärmeträgermediums. Im Vordergrund stehen dabei der Wärmeübergang, der Strömungswiderstand sowie eine gute Umweltverträglichkeit.

Um einen optimalen Wärmeträger bestimmen zu können, wurden verschiedene Flüssigkeiten auf Glykol- und Salzbasis ausgewählt. Ihre wärmetechnischen Eigenschaften wurden anhand von Literaturangaben und Erfahrungen aus dem In- und Ausland untersucht.

Neben den thermischen Eigenschaften ist für die Verwendung dieser Flüssigkeiten auch deren Umweltverträglichkeit wichtig. Diese wird vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) beurteilt und dann, falls dieses Medium die Anforderungen erfüllt, als Wärmeträgerflüssigkeit für Erdwärmesonden zugelassen.

Das Ziel des vorliegenden Berichtes ist nun, die im Handel erhältlichen und in der Praxis eingesetzten Wärmeträgerflüssigkeiten hinsichtlich ihrer thermischen Eigenschaften zu prüfen. Zudem werden die in der Schweiz erlaubten Frostschutzmittel und Zusätze im Einsatz mit EWS aufgelistet.

2 Datengrundlagen

Als erstes galt es abzuklären, welche Wärmeträger in der Schweiz erlaubt sind und wie ihre Umweltverträglichkeit ist. Das Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) veröffentlichte folgende Liste, Stand 1. Januar 1993, der erlaubten Wärmeträgerflüssigkeiten:

- Propylenglykol
- Ethylenglykol
- Polyethylenglykol
- Calciumchlorid
- Magnesiumchlorid
- Kaliumchlorid
- Kaliumcarbonat
- Natriumchlorid
- Natriumcarbonat

Des Weiteren teilte uns das BUWAL mit, dass in Wärmeträgerflüssigkeiten als Zusatzstoffe (z.B. als Korrosionsinhibitoren) keine biologisch schwer abbaubaren Stoffe, wie z.B. chlorierte Verbindungen, und keine Schwermetallsalze verwendet werden dürfen. Für den Hersteller oder Importeur dieser Produkte gelten für die Beurteilung der Zusatzstoffe die Vorschriften über die Selbstkontrolle nach der Verordnung vom 9. Juni 1986 über umweltgefährdende Stoffe (Art. 12ff., Stoffverordnung; StoV, 1986).

Verordnung über umweltgefährdende Stoffe.

Diese Verordnung regelt:

- a. Die Beurteilung der Umweltverträglichkeit von Stoffen, Erzeugnissen und Gegenständen, und
- b. den Umgang mit Stoffen, Erzeugnissen und Gegenständen, welche die Umwelt oder mittelbar über die Umwelt den Menschen gefährden können.

Diese Verordnung regelt unter anderem die Selbstkontrolle.

Der Hersteller darf einen Stoff, ein Erzeugnis oder einen Gegenstand nur abgeben, wenn er:

- a. dessen Umweltverträglichkeit beurteilt hat, und
- b. zur Annahme berechtigt ist, dass dessen Handhabung entsprechend den Angaben auf der Etiketle und der Gebrauchsanweisung die Umwelt und mittelbar über die Umwelt den Menschen nicht gefährden kann.

Zur Beurteilung neuer Stoffe.

Der Hersteller muss einen neuen Stoff auf folgende Aspekte hin beurteilen:

- a. das Abbau-, Akkumulations-, Umwandlungs- und Ausbreitungsverhalten in der belebten und unbelebten Umwelt;
- b. die Auswirkungen auf Mikroorganismen, Pflanzen und Tiere sowie auf Ökosysteme, und
- c. die mittelbaren langfristigen Wirkungen über die Umwelt auf den Menschen.

Zur Anmeldung von Stoffen.

Der Hersteller eines Stoffes muss dem Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft das Ergebnis der Selbstkontrolle mitteilen für:

- a. neue Stoffe, bevor er sie als solche oder als Bestandteil eines Erzeugnisses oder Gegenstands abgibt.

Für die weitere Studie wurden folgende Wärmeträgerflüssigkeiten ausgeschieden, da sie als umweltverträglich gelten:

Wärmeträgergemische	Chemische Formel
Ethylenglycol- Wasser	$\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$
Calciumchlorid - Wasser	$\text{CaCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$
Kaliumkarbonat - Wasser	$\text{K}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}$
Propylenglycol - Wasser	$\text{CH}_3\text{CHOHCH}_2\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$
Kaliumacetat - Wasser	$\text{CH}_3\text{COOK} + \text{H}_2\text{O}$
Magnesiumchlorid - Wasser	$\text{MgCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$
4:1 Magnesiumchlorid - Calciumchlorid - Wasser	$\text{MgCl}_2 + \text{CaCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$

Um ein möglichst breites Wissen über diese Wärmeträgerflüssigkeiten und deren physikalische Eigenschaften zu erhalten, wurde umfangreiche Fachliteratur studiert und zahlreiche Hersteller- und Handelsfirmen angefragt, wie:

- Abderhalden & Co., Rapperswil
- BASF Aktiengesellschaft, Ludwigshafen, Deutschland
- BMS-Energieanlagen, Merligen
- Chevron, San Francisco, U.S.A.
- Drew Chemicals, U.S.A.
- Hoechst Aktiengesellschaft, Frankfurt am Main, Deutschland
- Hoval Herzog AG, Feldmeilen
- Motorex, Bucher + Cie AG, Schmiertechnik, Langenthal
- Schick + Co., Stuttgart, Deutschland
- Sugro AG, Basel

Weitere kommerziell vertriebene Wärmeträgerflüssigkeiten, welche bereits mit Inhibitoren versetzt sind, sind in dieser Zusammenstellung noch nicht analysiert worden.

Auf Glykol- und Salz-Basis sind unter anderem folgende weitere Produkte auf dem Markt (ohne Anspruch auf Vollständigkeit):

Antifrogen L	Propylenglykol (1,2-Propanediol) und Inhibitoren
Antifrogen N	Monoethylenglykol (1,2-Ethandiol) und Inhibitoren
Glykosol	wässrige Lösung aus Mono-Ethylenglykol, Inhibitoren, Stabilisatoren, Pufferstoffen
Glythermin GP 42	Ethylenglykol/-1,2- Propylenglykol, Korrosionsinhibitoren
Glythermin P 44	1,2-Propylenglykol mit Korrosionsinhibitoren
Oeco Sol	wässrige Lösung aus 1,2 Propylenglykol, Inhibitoren, Stabilisatoren, Pufferstoffen
PKL 100	Propylenglykol, Ethylenglykol, Inhibitoren
PKL 300	Propylenglykol, Inhibitoren
PKS -3°C	wässrige Lösung von Natriumcarbonat, Natriummetasilikat, Inhibitoren, Stabilisatoren, Pufferstoffen
PKS -12°C	wässrige Lösung Carbamidsäureamid, Inhibitoren, Stabilisatoren, Pufferstoffen
PKS -20°C	wässrige Lösung von Ammoniumsulfat, Natriumsulfat, Inhibitoren, Stabilisatoren, Pufferstoffen
PKS -26°C-AC	wässrige Lösung von Natriumchlorid, Natriumnitrat, Inhibitoren, Stabilisatoren, Pufferstoffen
PKS -33°C-AC	wässrige Lösung von Ammoniumchlorid, Natriumnitrat, Inhibitoren, Stabilisatoren, Pufferstoffen
PKS -51°C	wässrige Lösung von Calciumchlorid, Inhibitoren, Stabilisatoren, Pufferstoffen
Reinhartin	Wässrige Lösung aus Magnesiumchlorid und Calciumchlorid mit Alkoholamin
Thermogen VP 1869	Glykolderivat, Oxidations- und Korrosionsinhibitoren
Thermogen 1693	Glykolderivat, Oxidations- und Korrosionsinhibitoren
Thermogen 1757	Glykolderivat, Oxidations- und Korrosionsinhibitoren

3 Eigenschaften von Wärmeträgerflüssigkeiten

Die Wärmeträgerflüssigkeit im Quellenkreislauf hat die Aufgabe, die in der Erdwärmesonde aufgenommene Wärme abzuführen und über einen Wärmetauscher an die Wärmepumpe (WP) abzugeben.

Die unterschiedlichen thermodynamischen Eigenschaften der verschiedenen Wärmeträgerflüssigkeiten beeinflussen den Wärmeübergang von der Sonde auf die Sole bzw. von der Sole auf die Wärmepumpe und somit auch die Leistung der gesamten Heizanlage. Des weiteren hängt die Wärmeaufnahme und -abgabe von der Strömungsgeschwindigkeit der Sole ab.

Um das Medium mit den optimalsten thermischen Eigenschaften zu bestimmen, wurden die verschiedenen physikalischen Eigenschaften in laminarer wie auch in turbulenter Strömung miteinander verglichen.

Da Wasser der beste flüssige Wärmeträger ist, wurde dieses Medium als Vergleichsgröße zu den anderen Wärmeträgerflüssigkeiten gewählt. Neben den für den Einsatz in WP-Anlagen gewünschten Eigenschaften, wie Gefrierpunktniedrigung, zeigen die Glykol-Wasser- und Salz-Wasser-Wärmeträger im Vergleich zu reinem Wasser auch ungünstige Eigenschaften:

- erhöhte Viskosität
- kleinere Wärmekapazität
- verschlechterter Wärmeübergang
- in einigen Fällen leicht toxisch

Das Mischungsverhältnis zwischen den Testprodukten und Wasser wurden so gewählt, dass die Frostsicherheit (Stockpunkt) mindestens -15°C beträgt (Tabelle 1).

Tabelle 1: Mischverhältnis zwischen Wasser und Frostschutzmittel (Gewichtsprozent)

Wärmeträgergemische	Chemische Formel	Gewichtsprozent für Stockpunkt -15° C
Ethylenglycol- Wasser	$\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$	30.5 %
Calciumchlorid - Wasser	$\text{CaCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$	18 %
Kaliumkarbonat - Wasser	$\text{K}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	27 %
Propylenglycol - Wasser	$\text{CH}_3\text{CHOHCH}_2\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$	33 %
Kaliumacetat - Wasser	$\text{CH}_3\text{COOK} + \text{H}_2\text{O}$	23 %
Magnesiumchlorid - Wasser	$\text{MgCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$	14 %
4:1 Magnesiumchlorid - Calciumchlorid - Wasser	$\text{MgCl}_2 + \text{CaCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$	13 %

3.1 Wärmeübergang und Druckverlust in Rohren

Die beiden wichtigsten physikalischen Parameter, welche die thermische Effizienz einer Wärmeträgerflüssigkeit in Erdwärmesonden bestimmen, sind der Wärmeübergang zwischen Flüssigkeit und Erdwärmesonde sowie der Druckverlust in der Sonde.

Da die Mischungen im Vergleich zu Wasser eine höhere Viskosität und Dichte besitzen, muss mit einem höheren Druckabfall beim Durchströmen von Rohrleitungen gerechnet werden. Dabei ist von ausschlaggebender Bedeutung, ob die Strömung im laminaren (Reynoldszahl kleiner als 2300) oder im turbulenten Bereich (Reynoldszahl grösser als 2300) verläuft.

Der betrachtete Wärmeübergang ist daher in erster Linie von der Fließgeschwindigkeit und der Temperatur des Wärmeträgermediums abhängig. Bei untielen Erdwärmesonden (Bohrteufe weniger als 150m, eventuell bis 200 m) werden bescheidene Bodentemperaturen angetroffen. Das Wärmeübertragungspotential vom Boden zur Wärmeträgerflüssigkeit

wird aber durch die Wärmeleitfähigkeit des Bodens limitiert und eine laminare Strömung wird sinnvoller. Bei tieferen Sonden und bei Anwendung von Sonden und Registern in saisonalen Speichern, wo hohe Temperaturen zu erwarten sind, wird ein turbulenter Wärmeübergang eher erwünscht. Es ist deshalb nützlich, in der vorliegenden Studie beide Regionen zu betrachten.

Im folgenden wird die Leistung der sieben ausgewählten Wärmeträger im laminaren sowie im turbulenten Strömungsbereich verglichen. Dabei wird zuerst die Strömung in den Sonden betrachtet. Das Strömungsregime ist jeweils als hydraulisch und thermisch voll ausgebildet in langen, glatten Rohren (ohne Anlauf effektiv) angenommen worden.

3.1.1 Der Wärmeübergang

F_α ist der Faktor, welcher den Einfluss der Flüssigkeitsstoffwerte auf den Wärmeübergang zwischen der Erdwärmesonde und dem Wärmeträger beschreibt. Zur Berechnung von F_α müssen für das Medium folgende Werte bekannt sein:

- Dichte	ρ	[kg/m ³]
- spezifische Wärmekapazität	c_p	[J/kg,K]
- Wärmeleitfähigkeit	λ	[W/m,K]
- die kinematische Viskosität	ν	[m ² /s]

Im laminaren Fall wird F_α , für den Wärmeübergang in Rohren, mit Gleichung (1) berechnet:

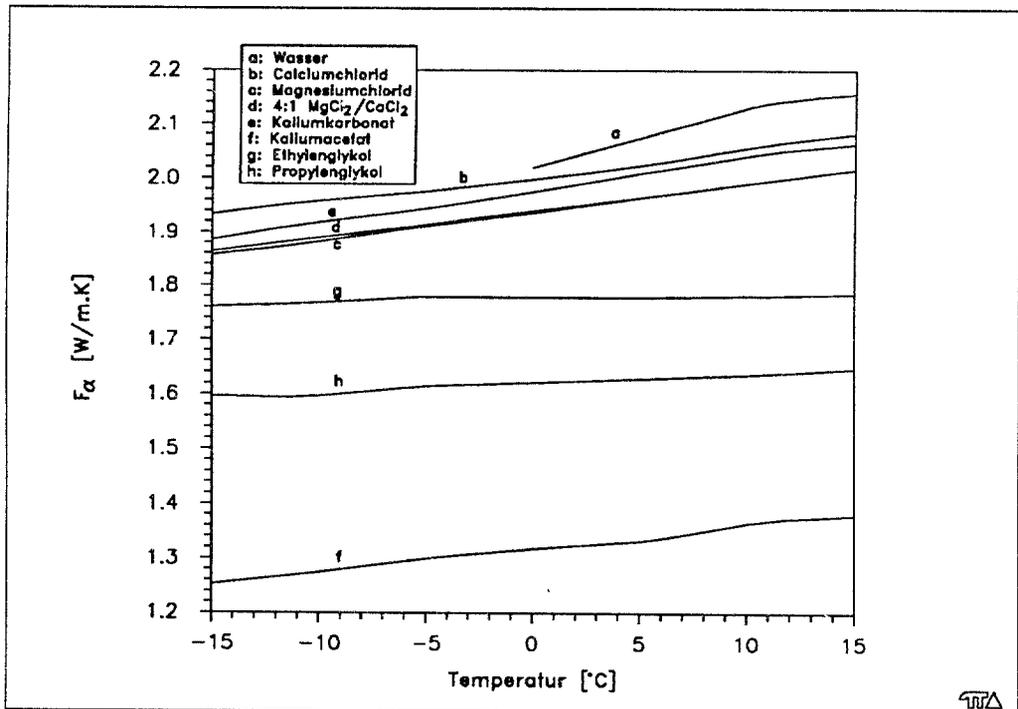
$$F_\alpha = 3.66 \lambda \quad [\text{W/m} \cdot \text{K}] \quad (1)$$

Im turbulenten Fall gilt für F_α Gleichung (2)

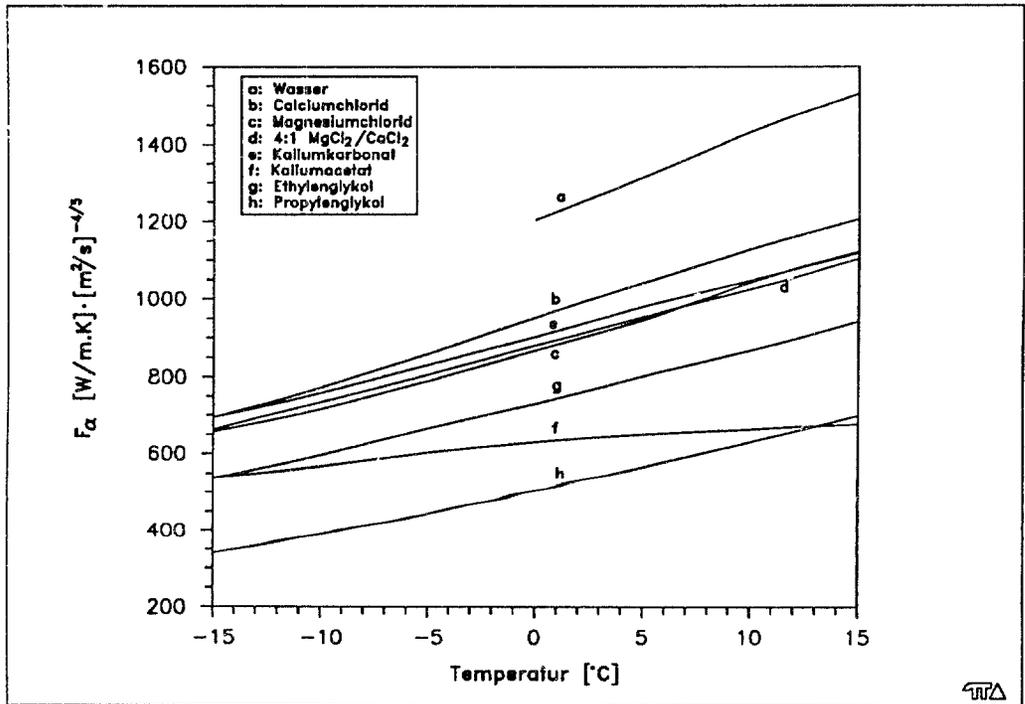
$$F_\alpha = 0.023 \cdot \lambda^{2/3} (\rho \cdot c_p)^{1/3} \cdot \nu^{(1/3-0.8)} \quad [\text{W/m} \cdot \text{K}] \cdot [\text{m}^2/\text{s}]^{-4/5} \quad (2)$$

Die Herleitungen der Gleichungen (1) und (2) sind im Anhang, Abschnitte 1.1 und 1.2 angegeben.

Die Figuren 1 und 2 zeigen F_α für die verschiedenen Frostschutzmittel im Temperaturbereich von -15 bis $+15^\circ\text{C}$ bei laminarer bzw. turbulenter Strömung in den Rohrleitungen.



Figur 1: Die Abhängigkeit des Wärmeübergangsfaktors F_α von der Temperatur für unterschiedliche Frostschutzmittel bei ausgebildeter laminarer Strömung.



Figur 2: Die Abhängigkeit des Wärmeübergangsfaktors F_α von der Temperatur für unterschiedliche Frostschutzmittel bei voll ausgebildeter turbulenter Strömung.

3.1.2 Der Druckverlust

Ein weiterer Faktor $F_{\Delta p}$ kann von der Gleichung für den Druckverlust in Rohren hergeleitet werden (siehe Anhang). $F_{\Delta p}$ ist daher proportional zum Druckverlust und somit ein Mass für die Pumpfähigkeit der Wärmeträgerflüssigkeit. Je kleiner dieser Wert, desto vorteilhafter ist dieses Medium.

Die folgende Gleichung (3) für $F_{\Delta p}$ im laminaren Fall ist ebenfalls nur für den Druckverlust in langen Rohren gültig.

$$F_{\Delta p} = 32 \cdot \rho \cdot v = 32\eta \quad [\text{kg/m,s}] \quad (3)$$

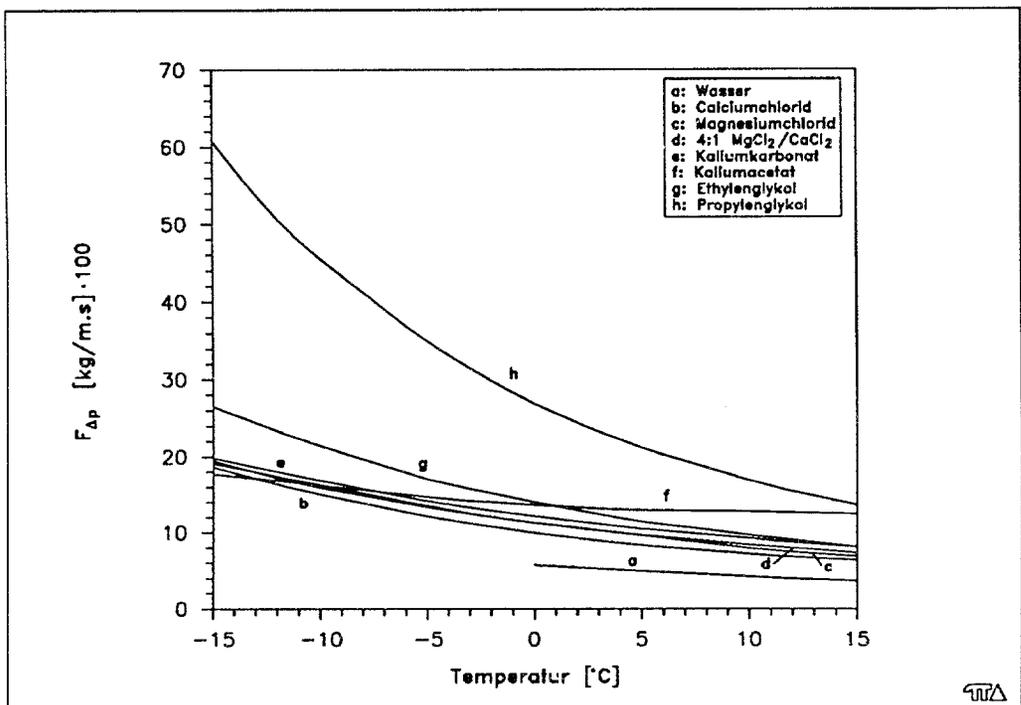
η = dynamische Viskosität $[\text{kg/m,s}]$

Im turbulenten Fall gilt für den stoffunabhängigen Druckverlustfaktor in Rohren folgende Gleichung.

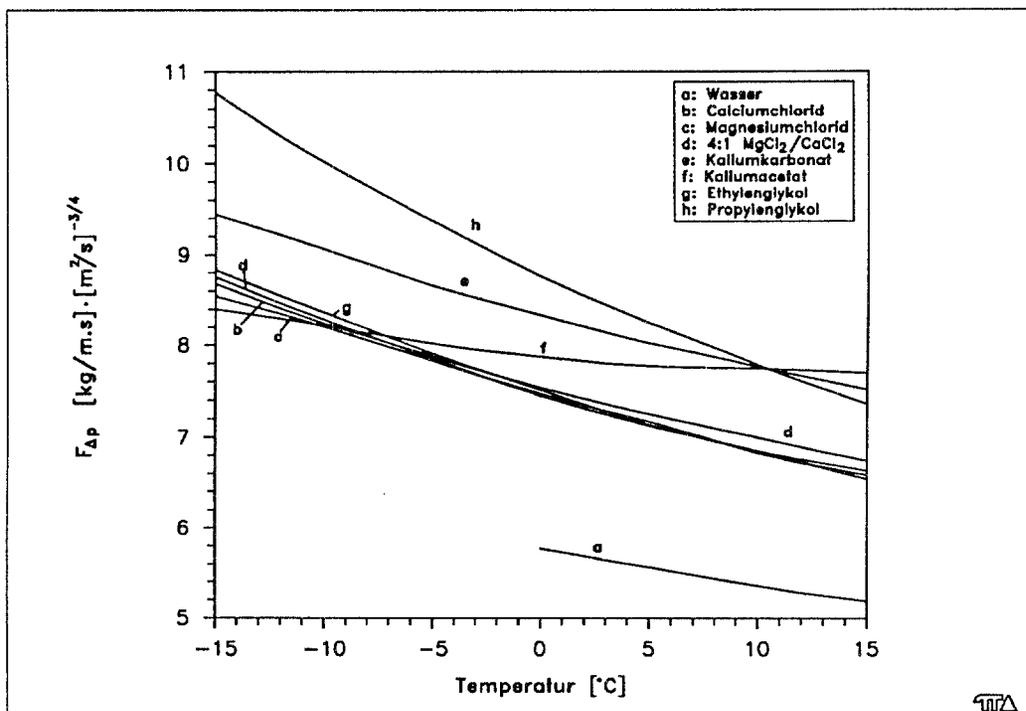
$$F_{\Delta p} = 0.158 \cdot \rho \cdot v^{1/4} \text{ [kg/m,s]} \cdot [\text{m}^2/\text{s}]^{-3/4} \quad (4)$$

Die Herleitung der Gleichungen (3) und (4) ist im Anhang, Abschnitt 2.1 und 2.2 angegeben.

Abbildungen 3 und 4 zeigen den Druckverlustfaktor $F_{\Delta p}$ für die verschiedenen Frostschutzmittel im Temperaturbereich von -15 bis $+15^\circ\text{C}$ bei laminarer bzw. turbulenter Strömung in den Rohrleitungen.



Figur 3: Die Abhängigkeit des Druckverlustfaktors $F_{\Delta p}$ von der Temperatur für unterschiedliche Frostschutzmittel bei ausgebildeter laminarer Strömung.



Figur 4: Die Abhängigkeit des Druckverlustfaktors $F_{\Delta p}$ von der Temperatur für unterschiedliche Frostschutzmittel bei voll ausgebildeter turbulenter Strömung bis Reynold's Zahlen von 10^5 .

3.1.3 Das Verhältnis zwischen Druckverlust und Wärmeübergang

Es ist ein Nachteil, wenn $F_{\Delta p}$ für ein bestimmtes Medium einen hohen Wert ergibt. Dies bedeutet, dass die Flüssigkeit aufgrund der Reibung einen hohen Druckverlust erfährt. Gleichzeitig kann aber dasselbe Medium einen sehr guten Wärmeübergang aufweisen. Dies wiederum wäre vorteilhaft.

Eine objektive Aussage über die Güte des Frostschutzmittels ist daher nur dann möglich, wenn der Druckverlust mit dem Wärmeübergang verglichen wird.

Das Verhältnis $F_{\Delta p}/F_{\alpha}$ bildet diejenige Grösse, welche die Qualität des Wärmeträgers ausdrückt. Der Unterschied dieser Grösse zweier verschiedener Wärmeträger bei gleicher Temperatur zeigt die Variation der Pumpenleistung, welche für eine gegebene Wärmeübergangsleistung notwendig ist. Das Verhältnis der elektrischen Pumpenleistung zur Wärmeübergangsleistung ist proportional zu $F_{\Delta p}/F_{\alpha}$ und daher nicht linear (Herleitung siehe Anhang).

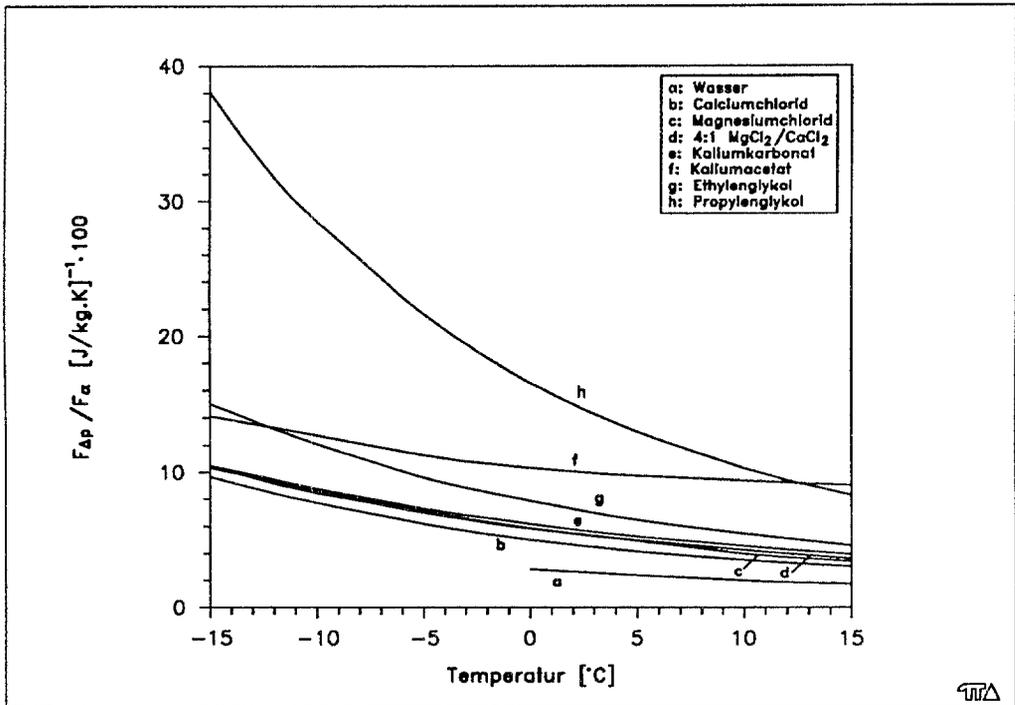
Die Figuren 5 und 6 zeigen das Verhältnis zwischen Druckverlust und Wärmeübergang für die verschiedenen Frostschutzmittel im Temperaturbereich von -15 bis $+15^{\circ}\text{C}$ bei laminarer bzw. turbulenter Strömung in Rohrleitungen.

Die Diagramme in den Figuren 5 und 6 bestätigen, dass in beiden Strömungsregime reines Wasser der effizienteste Wärmeträger ist. Dies ist natürlich schon bekannt, aber um die relative Qualität der verschiedenen frostgeschützten Wärmeträger quantitativ darzustellen, wurden diese Figuren in die beiden Figuren 7 bzw. 8 umgewandelt. Hier findet eine Normalisierung statt, indem die $F_{\Delta p}/F_{\alpha}$ -Kurven für jeden Wärmeträger durch den Wert von $F_{\Delta p}/F_{\alpha}$ für reines Wasser bei 15°C dividiert werden.

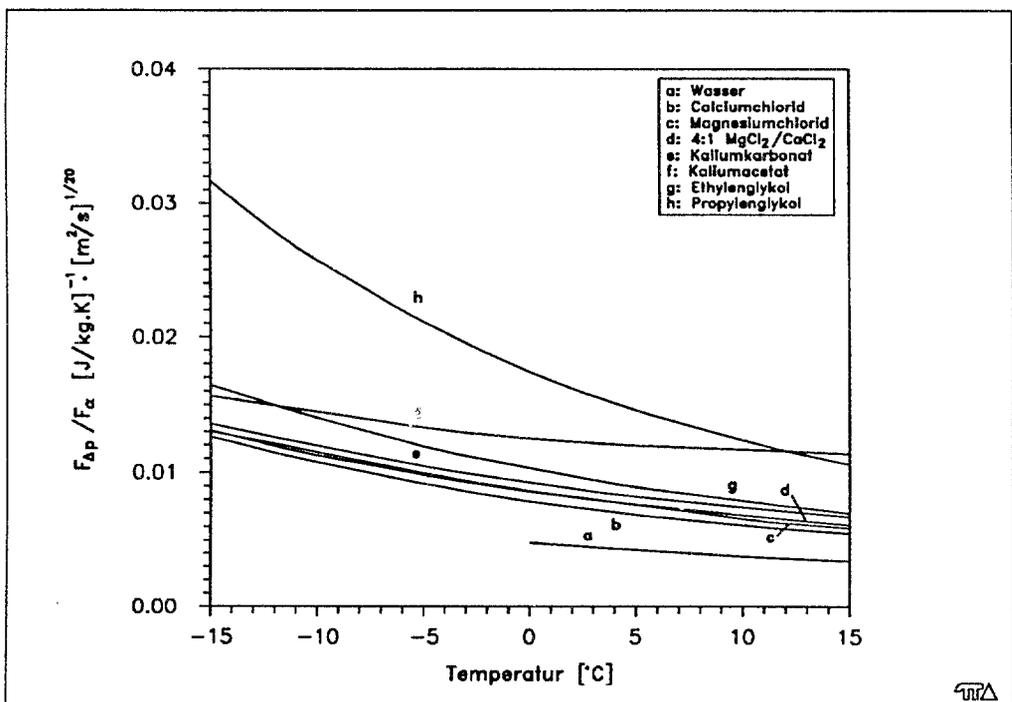
Es ist sichtbar, dass die vier Salzlösungen

- CaCl_2
- $\text{MgCl}_2 / \text{CaCl}_2$ (4:1)
- MgCl_2
- K_2CO_3

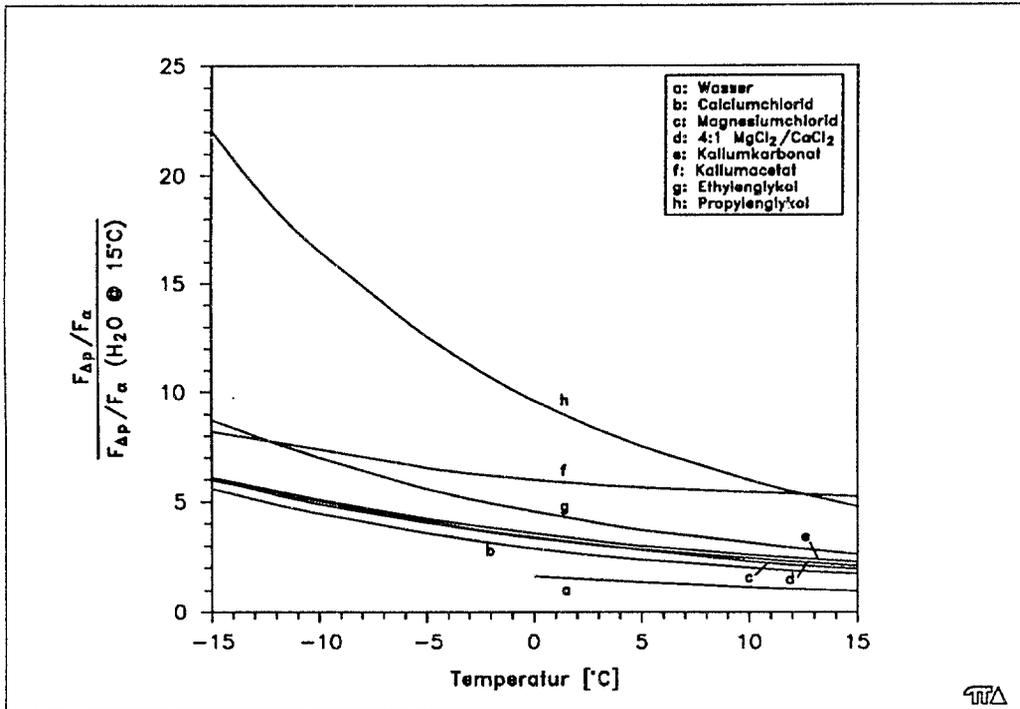
in dieser Reihenfolge vom Standpunkt der Effizienz als Wärmeträger vorzuziehen sind. Kaliumacetat ist weniger günstig, besonders bei höheren Temperaturen. Diese vier Salzlösungen bieten, vor allem unter laminaren Bedingungen, bessere Effizienzen an als die beiden Glykole.



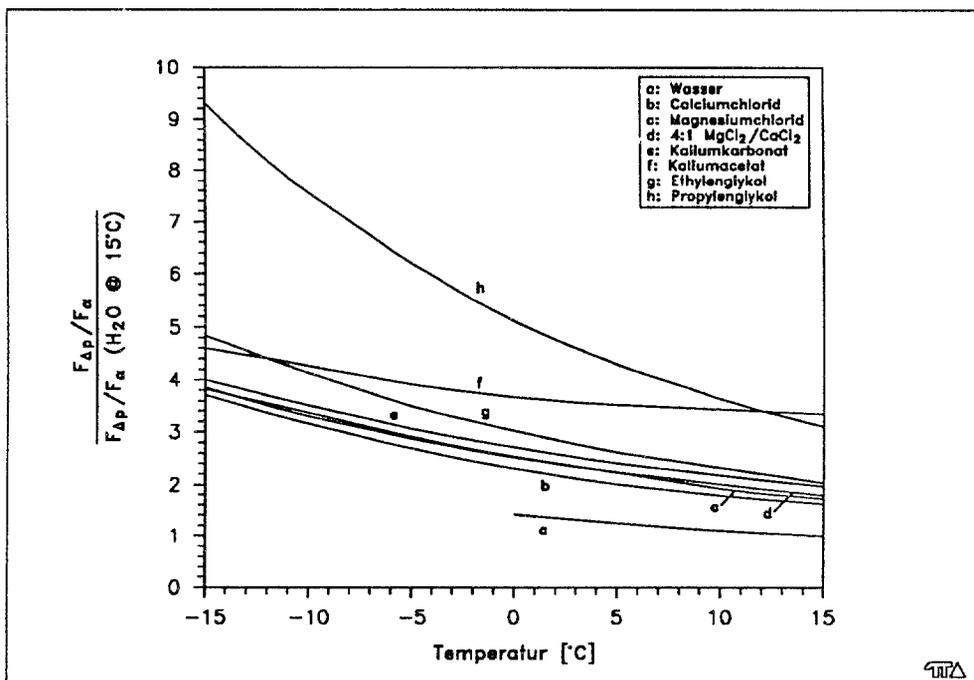
Figur 5: Die Abhängigkeit des Verhältnisses $F_{\Delta p} / F_{\alpha}$ von der Temperatur für unterschiedliche Frostschutzmittel bei ausgebildeter laminarer Strömung.



Figur 6: Die Abhängigkeit des Verhältnisses $F_{\Delta p} / F_{\alpha}$ von der Temperatur für unterschiedliche Frostschutzmittel bei voll ausgebildeter turbulenter Strömung.



Figur 7: Das Verhältnis F_{Ap}/F_{α} dividiert durch F_{Ap}/F_{α} von Wasser bei 15° C ist in Abhängigkeit von der Temperatur aufgetragen. Dieses Diagramm gilt für laminare Strömungen.



Figur 8: Das Verhältnis F_{Ap}/F_{α} dividiert durch F_{Ap}/F_{α} von Wasser bei 15° C ist in Abhängigkeit von der Temperatur aufgetragen. Dieses Diagramm gilt für turbulente Strömungen.

3.2 Wärmeübergang und Druckverlust im Plattenwärmetauscher

Im vorhergehenden Abschnitt wurden die Einflüsse der thermo-hydraulischen Eigenschaften der verschiedenen Wärmeträger in langen, glatten Rohren verglichen. Dabei wird der Bodenwärmetauscher (insbesondere z.B. eine Erdwärmesonde) berücksichtigt. Wärmeaustausch und Druckverlust finden aber auch im Verdampfer statt. Für solche Systeme sind die geschweissten Plattenwärmetauscher als Verdampfer besonders geeignet. Um die Wirkung des Wärmeträgers im Plattenwärmetauscher sowie im ganzen primären Kreislauf untersuchen zu können, wurde ein hypothetischer Wärmeaustauscher der Firma SWEP vordimensioniert. Alle Berechnungen basieren auf folgenden Ausgangsdaten:

Verdampfertyp	SWEP V25x28
Anzahl Platten	28
Kanäle primärseitig	14
Kanäle für Kältemittel	13
Kältemitteltyp	R22
Betriebspunkt	S0/W35
Soletemperaturen	Eintritt 0°C, Austritt -3°C
Kältemitteltemperaturen (R22)	Verdampfungstemperatur -7°C, Ueberhitzung 5 K
Kälteleistung	10 kW

Diese Auslegung stellt genügend Wärmeaustauschfläche zur Verfügung, um die erwünschten 10 kW-Normleistung bei jeder der sieben Wärmeträgerflüssigkeiten zu erbringen. In Tabelle 2 sind Druckverluste für jeden Wärmeträger angegeben. Auch hier wurde die entsprechende Konzentration der Frostschutzmittel für einen Stockpunkt von -15°C angenommen.

Tabelle 2: Vergleich der hydraulischen Charakteristiken der ausgewählten Wärmeträgerflüssigkeiten in einem Plattenwärmetauscher als Verdampfer einer Wärmepumpe mit Kälteleistung 10 kW beim Auslegungspunkt.

	CaCl ₂	MgCl ₂	(4:1) MgCl ₂ /CaCl ₂	K ₂ CO ₃	KAc	E.G.	P.G.
Notwendige Umlaufmenge (kg/s)	1.017	0.961	0.956	1.070	0.860	0.863	0.84
Druckverlust (kPa)	54.2	52.5	51.2	57.1	44.6	49.0	55.8
Theoretische Pumpleistung(W)	47.2	44.9	43.0	48.2	33.9	40.1	45.1
Ausnutzung des Potentials des Wärmeaustauschers (%)	84	86	86	85	95	91	98

Die notwendigen theoretischen Pumpleistungen (ohne Berücksichtigung der Effizienz der Pumpe) zeigen, mit Ausnahme von Kaliumacetat, eine Gesamtstreuung von ca. 20% bezogen auf den Wert für Ethylenglykol. Kaliumacetat weist weitaus die geringsten Werte für Druckverlust und Pumpenleistung auf. Dies ist die Folge der günstigen Werte der spezifischen Wärme für diesen Wärmeträger.

In Tabelle 3 wird der Vergleich nun auf den gesamten Bodenkreislauf ausgedehnt. Ein Erdwärmesondensystem für die optimierte Wärmepumpe wird konzipiert. Diese liefert 10 kW Kälteleistung aus einer normierten Bodenformation zur erwünschten Temperatur von 0.1°C anhand der in der Tabelle 2 angegebenen Umlaufrate. Die hypothetischen Sonden bestehen, der heutigen Praxis mehrheitlich entsprechend, jeweils aus zwei parallelen 1"-HDPE-Rohrschlaufen. Um die gesuchte Heizleistung mit Sondenbohrteufen von weniger als 150 m zu erreichen, erweist es sich als notwendig, in jedem Fall zwei Sonden zu betrachten.

Tabelle 3: Vergleich der Sondenlängen, Kreislaufpumpleistungen und Arbeitszahlen der Wärmepumpe bei Einsatz der ausgewählten Wärmeträgerflüssigkeiten.

	CaCl ₂	MgCl ₂	(4:1) MgCl ₂ /CaCl ₂	K ₂ CO ₃	KAc	E.G.	P.G.
Notwendige Gesamtsondenlänge (m)	198	204	204	200	300	222	244
Elektrische Pumpenleistung (W)	169	166	156	173	141	159	220
Arbeitszahl W-P (S0/W35)	3.86	3.86	3.87	3.85	3.89	3.87	3.80

Der Kreislauf besteht dann aus folgenden Komponenten:

- der Plattenwärmetauscher als Verdampfer
- für den Bodenwärmeaustausch notwendige Sondenlänge
- 20 m Anschlussrohre (10 m Vorlauf, 10 m Rücklauf)
- 2 Abschlussventile
- 6 Stk. Winkelstücke 90° pro Umlauf
- eine teilweise idealisierte Pumpe

Die Umlaufpumpe ist idealisiert, weil sie nur gerade die Leistung erbringt, die im jeweiligen Fall notwendig ist und dabei zu einer normierten (aber typischen) Effizienz von 35% arbeitet.

Die Signifikanz der Wärmeaustauscher hinsichtlich Pumpleistung wird aus Tabelle 3 klar. Es muss hier aber bemerkt werden, dass eine solche Auslegung, bei der die Anzahl Fließwege durch den Plattentauscher nur anhand der erwünschten Wärmeaustauschleistung bestimmt wird, nicht normal ist. In der Praxis wäre eine Optimierung auch hinsichtlich Minimalisierung des Druckverlustes vorzunehmen. Dieser Fall dient schliesslich nur zum Vergleich der Wärmeträgerflüssigkeiten.

Der Hauptunterschied zwischen den Flüssigkeiten zeigt sich nicht durch die Systemeffizienz, sondern durch den Systempreis. Weil eine normierte und optimierte Wärmepumpe betrachtet wird, ist die Auswirkung der Leistung der Förderpumpe gering. Weil aber auch ein normierter Auslegungspunkt (Soletemperatur) verlangt wird, ist der Einfluss der Wärmeträgerflüssigkeit eher bei der notwendigen Sondenlänge zu spüren.

Für die in Tabelle 3 zusammengefassten Berechnungen wurde zuerst der Fall mit Ethylenglykol durchgerechnet. Dies entspricht der heutigen Praxis. Für jede weitere Flüssigkeit variieren nicht nur die physikalischen Stoffeigenschaften, sondern auch die erforderliche Umlaufmenge, um die Kälteleistung im Verdampfer anzubringen. Die notwendige Sondenlänge ist 10% kleiner für Calciumchlorid, Magnesiumchlorid, das 4:1-Gemisch und für

Kaliumkarbonat. Für Propylenglykol wird 10% mehr Sondenlänge und für Kaliumacetat sogar, trotz der kleineren Umlaufmenge, 40% mehr notwendig.

3.3 Korrosion

In einem Erdwärmesondenkreislauf kann Korrosion auftreten, da verschiedene Materialien im Quellenkreislauf vorhanden sind. Die Korrosionsvorgänge, die zwischen den Bauteilen und der Wärmeträgerflüssigkeit auftreten können, sollten durch geeignete Inhibitoren verhindert werden.

Mit Wärmeträgerflüssigkeiten auf Glykolbasis hat das Interkantonale Technikum in Rapperswil bereits eine langzeitige Untersuchung abgeschlossen (Frei et al., 1984). In dieser Studie wurden neun verschiedene Produkte unter möglichst praxisnahen Bedingungen in Bezug auf ihren Korrosionsschutz gegenüber Aluminium, Anticorodal, Messing, Kupfer, Weichlot, Stahl und CrNi-Stahl untersucht. Die Versuchsdauer betrug für alle Wärmeträgerflüssigkeiten je 1, 3 und 12 Monate. Bei den Testprodukten handelt es sich um:

Produktenummer	Bezeichnung der Wärmeträgerflüssigkeit	Basisprodukt
1	PKL 300	Propylenglykol
2	keine Namensnennung	Propylenglykol
3	Antifrogen L	Propylenglykol
5	keine Namensnennung	Propylenglykol
7	PKL 100	Propylenglykol, Ethylenglykol
8	Glykolen	Ethylenglykol
9	Antifrogen N	Ethylenglykol
11	keine Namensnennung	Propylenglykol
13	Monopropylenglykol	Propylenglykol

Bei dieser Untersuchung hat sich gezeigt, dass die geprüften Wärmeträgerflüssigkeiten hinsichtlich ihres Korrosionsschutzes sehr unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Die Produkte 2, 5 und 13 griffen Aluminium oder Anticorodal lokal an. Die Produkte 3, 7 und 9 führten beim Korrosionsversuch zu den geringsten Masseverlusten an den Prüfmitteln.

Die Salz-Wassergemische, welche gute Wärmeübertragungen bei gleichzeitigen niedrigen Druckverlusten haben, zeigen neben diesen sehr guten thermischen Eigenschaften jedoch einen Nachteil: Das Hauptproblem dieser Salze sind die sehr stark korrosiven Eigenschaften.

Diese Problematik beschäftigt gegenwärtig viele Leute weltweit und einige Erfahrungen dürfen hier beigezogen werden.

Kaliumkarbonat wurde als Frostschutzmittel an der KTH (Königlich Technische Hochschule), Stockholm in Schweden eingehend untersucht (Granryd, 1990). Als Inhibitor gegen Korrosion wird Glukose empfohlen. Glukose ist ökologisch problemlos und bietet effektiven Korrosionsschutz für Stahl, rostfreien Stahl, Eisen und Kupfer. Dieses Resultat wurde in Langzeitversuchen mit einer Dauer bis zu 2 Jahren erworben. Kein befriedigender Schutz ist vorhanden für Aluminium, Zink, Zinn oder Messing. Es ist aber problemlos, einen Sondenkreislauf ohne diese Werkstoffe zu konzipieren.

Kaliumacetat wurde in den USA untersucht (Bose & Price, 1991). Es wird als kommerzielles Produkt inklusive Inhibitoren von der Chevron Chemical Company angeboten. Kurzzeitige Laboruntersuchungen (14 - 28 Tage) wurden von der Oklahoma State University durchgeführt. Der Korrosionsschutz wurde gegenüber rostfreiem Stahl, Kupfer und rotem Messing aus den ersten Testreihen als annehmbar eingestuft. Die Arbeiten werden weitergeführt.

Das von der technischen Leistung her am meisten versprechende Salzgemisch ist Calciumchlorid. Erst dieses Jahr, nach längerer Entwicklungszeit, wird ein Inhibitor für Calciumchlorid-Sole angeboten. Dieser organophosphor-basierte Inhibitor, Performax 345, der Drew Chemical Industrial Division entspricht dem heutigen Trend zugunsten der Umwelt weg von Nitriten und von Schwermetallen. Gemäss Herstellerdaten ist Schutz für Stahl, rostfreien Stahl, Aluminium und Kupferlegierungen gewährleistet.

Eine weitere Möglichkeit wird durch ein seit 50 Jahren in Europa kommerziell vertriebenes Produkt, Reinhartin-Hochleistungs-Kühlsole, der deutschen Firma Schick + Co. angeboten. Diese Sole ist im wesentlichen ein Gemisch im Verhältnis 4:1 zwischen Magnesiumchlorid und Calciumchlorid mit entsprechend kleinen zusätzlichen Mengen an Pufferstoffen und Inhibitoren (keine weiteren Angaben vorhanden). Korrosionsschutz bei Reinhartin-Sole ist gegenüber rostfreiem Stahl sowie Aluminiumlegierungen nicht gegeben.

Aus diesen Ausführungen wird klar, dass es schon Alternativlösungen auf Salzbasis gibt. Für zwei dieser Alternativen (Kaliumcarbonat und Calciumchlorid) sind auch Korrosionsinhibitoren vorhanden, die ökologisch absolut unbedenklich sind. Detaillierte Auskünfte fehlen noch über den genauen Aufbau der Inhibitoren für das Magnesiumchlorid/Calciumchlorid-Gemisch (Reinhartin-Sole). Sorgfalt muss im allgemeinen bei der entsprechenden Auswahl der im Kreislauf verwendeten Werkstoffe getragen werden; Schutz für alle Metalle wird nicht überall angeboten. Dagegen sind keine Probleme beim Einsatz in Kunststoffröhren mit Gummidichtungen gefunden worden.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die vorliegende Studie zeigt, dass Wärmeträger auf Salzbasis für Bodenkreisläufe vorteilhaft und möglich sind. Diese Aussage gilt für das Verhalten sowohl allein in den langen, glatten Rohren, die ein Merkmal solcher Systeme sind, als auch in den kompakten Plattenwärmetauschern, die wir heute als Verdampfer der Wärmepumpe empfehlen. Vom wirtschaftlichen Standpunkt aus dominiert das Wärmeübertragungspotential in den Sondenrohren und die daraus resultierende notwendige Sondenlänge.

Um eine Auswahl der zu betrachtenden Frostschutzmittel zu treffen, wurde die Liste annehmbarer Mittel des BUWAL als Grundsatz genommen. Natriumsalze wurden nicht betrachtet, weil für diese die Inhibitoren noch auf Schwermetallen basieren. Zusätzlich betrachtet wurde, wegen seiner harmlosen Natur und kommerziellen Verfügbarkeit, Kaliumacetat. Eine Möglichkeit, die noch zu betrachten bleibt, ist Kaliumchlorid.

Es wurden keine eigenen Messungen der Parameter der untersuchten Stoffe gemacht. Alle Daten wurden schon veröffentlichten Quellen entnommen.

Für die untersuchten Frostschutzlösungen sind schon Korrosionsinhibitoren vorhanden, die Schutz anbieten für verfügbare Kreislaufwerkstoffe. Es ist wahrscheinlich, dass verbesserte, umweltverträgliche Inhibitoren für andere Stoffe auch bald auf den Markt gebracht werden.

Insbesondere sind folgende Salze interessant:

Calciumchlorid

Magnesiumchlorid

Magnesiumchlorid/Calciumchlorid

Kaliumcarbonat

Kaliumacetat ist eher weniger interessant vom Standpunkt der Wärmeträgereffizienz her.

Ein weiteres Ziel ist es, die Umweltverträglichkeit der mit Inhibitoren versetzten Wärmeträgerflüssigkeiten auch praktisch zu analysieren. Da Unfälle mit Erdwärmesonden, obwohl äusserst selten, nach wie vor möglich sind, kann erst nach umfangreichen geochemischen Versuchen eine breite Palette von Wärmeträgermedien für den Einsatz mit EWS propagiert werden. Diese Labortests müssen Auskunft geben über die Reaktion der Wärmeträgerflüssigkeiten mit dem Boden und dem Grundwasser, welche für die Schweiz typisch sind. Auf diese Weise würde man das effektive Belastungspotential der Wärmeträgerflüssigkeit in Verbindung mit unserer Umwelt erhalten.

5 Literaturverzeichnis

Bose J.E., Price C.E., 1991: Preliminary Test Results of Potassium Acetate as an Anti-Freeze Fluid in Ground-Source Heat Pump Systems, IEA Heat Pump Centre Workshop, Proceedings on Ground Source Heat Pumps - Advancements Towards Cost Reduction , Montreal, pp. 15 - 23.

Colburn A.P., 1933: Trans. Am. inst. Chem. Enges., 29, pp. 174-210.

Granryd E.G., 1990: Heat Pumps, Solving Energy and Environmental Challenges, Ground Source Heat Pump Developments, Pergamon Press, pp. 423 - 432.

Eckert E.R.G., Drake R.M., 1972: Analysis of Heat and Mass Transfer, McGraw-Hill Book Company, New York, p. 806.

Frei U., Geiser R., Theiler F., 1984: Forschungsprojekt Lebensdauer und Betriebssicherheit von Solaranlagen, Teil 3, Wärmeträgerflüssigkeiten in Solaranlagen (Korrosionsuntersuchung), Interkantonales Technikum, Rapperswil / Eidg. Materialprüfungs- und Versuchsanstalt, Dübendorf.

Hoechst AG, 1990: Antifrogen, PC Datenprogramm zu Eigenschaften und Handhabung von Antifrogen N + L, Hoechst AG, Frankfurt am Main, Version 1.1.

Kaye G.W.C., Laby T.H., 1985: Tables of Physical and chemical Constants, 14th Edition, Longmann Inc., New York.

Melinder A., Granryd E., 1991: A Comparison of Thermodynamic Properties of Secondary Refrigerants for Heat Pumps, IEA Heat Pump Centre Workshop, Proceedings on Ground Source Heat Pumps - Advancements Towards Cost Reduction, Montreal, pp. 41 - 48.

Top P., De Lint N., 1991: Investigation of Antifreeze Agents for Ground Source Heat Pumps, IEA Heat Pump Centre Workshop, Proceedings on Ground Source Heat Pumps - Advancements Towards Cost Reduction , Montreal, 25 - 39.

Verordnung über umweltgefährdende Stoffe, vom 9. Juni 1986:

Stoffverordnung, StoV, Stand am 1. Juli 1992, Herausgegeben von der Bundeskanzlei, Bern, 1992

VDI-Wärmeatlas, 1991: 6. Auflage, Register Dd, pp. Dd8 - Dd51.

Anhang

Herleitung der Koeffizienten F_α und $F_{\Delta p}$ aus empirischen Wärmeübergangs- bzw. Druckverlustkorrelationen. Es wird hier auf Werte für sehr lange zylindrische Röhren konzentriert, d.h. die zahlenmässigen Daten gelten, streng gesagt, nur für die Boden-Wärmetauscher. Für die Erklärung der verwendeten Symbole und Abkürzungen siehe bitte Beilage 1, Seite 38. In diesen Ableitungen werden die empirischen Konstanten jeweils in die Stoffwerte in den Koeffizienten F_α und $F_{\Delta p}$ integriert.

Stoffwerte für die Berechnungen der Koeffizienten wurden aus diversen Literaturquellen gesammelt (Granryd (1990), Eckert + Drake (1972), Hoechst (1990), Melinder + Granryd (1991), VDI (1991)). Diese Werte sind in der Beilage 2, Seiten 37-38 tabellarisch zusammengestellt.

1. Wärmeübertragungskoeffizienten

1.1 F_α laminar, gemäss z.B. Eckert & Drake, 1972.

Der Grenzwert für den Wärmeübergangskoeffizient zwischen laminar strömender Flüssigkeit und Rohrwand bei einem unendlich langen Rohr zur konstanten Oberflächentemperatur ist durch die Gleichung

$$Nu = 3.66$$

gegeben, wobei
$$Nu = \frac{\alpha D}{\lambda}$$

Deshalb darf der Wärmeübergangskoeffizient wie folgt geschrieben werden:

$$\alpha = 3.66 \frac{\lambda}{D}$$

oder
$$\alpha = \frac{F_\alpha}{D} \quad \text{Wärmeübertragungskoeffizient}$$

wobei F_α demjenigen Teil der Funktion entspricht, welcher nur von den Flüssigkeitseigenschaften abhängig ist:

$$F_\alpha = 3.66 \lambda$$

1.2 F_α turbulent nach Colburn, 1933.

$$Nu = 0.023 \cdot Pr^{1/3} \cdot Re^{0.8}$$

Der Wärmeübertragungskoeffizient $\alpha = \frac{\lambda}{D} \cdot Nu$

$$= 0.023 \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{\rho \cdot v \cdot c_p}{\lambda} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{v \cdot D}{\nu} \right)^{0.8}$$

$$= 0.023 \cdot \lambda^{2/3} \left(\rho \cdot c_p \right)^{1/3} \cdot v^{(1/3-0.8)} \cdot \left(\frac{v^{0.8}}{D^{0.2}} \right)$$

F_α entspricht demjenigen Teil der Funktion, welcher nur von den Flüssigkeitseigenschaften abhängig ist:

$$F_\alpha = 0.023 \cdot \lambda^{2/3} \cdot \left(\rho \cdot c_p \right)^{1/3} \cdot v^{(1/3-0.8)}$$

2. Druckverlustfaktoren

2.1 $F_{\Delta p}$ laminar aus *Analysis of Heat and Mass Transfer*, Eckert & Drake, 1972.

$$\Delta p = f \cdot \frac{l}{D} \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2}$$

wobei f für kleine Reynoldszahlen (Re) folgendermassen definiert ist:

$$f = \frac{64}{Re} = 64 \cdot \left(\frac{\nu}{U \cdot D} \right)$$

$$\Delta p = 32 \cdot \left(\frac{\nu}{U \cdot D} \right) \cdot \frac{l}{D} \cdot \rho \cdot U^2$$

$$= 32 \cdot \left(\frac{l}{D^2} \right) \cdot U \cdot \eta$$

Gleich wie F_α enthält $F_{\Delta p}$ nur den flüssigkeitsabhängigen Teil der Gleichung

$$F_{\Delta p} = 32 \cdot \rho \cdot \nu = 32 \cdot \eta$$

2.2 $F_{\Delta p}$ turbulent aus *Analysis of Heat and Mass Transfer, Eckert & Drake, 1972.*

$$\Delta p = f \cdot \frac{l}{D} \cdot \rho \cdot \frac{\nu^2}{2}$$

wobei f für grosse Reynoldszahlen bis 10^5 folgendermassen definiert ist:

$$f = \frac{0.316}{Re^{1/4}} = 0.316 \cdot \left(\frac{\nu}{U \cdot D} \right)^{1/4}$$

$$\Delta p = 0.316 \cdot \left(\frac{\nu}{U \cdot D} \right)^{1/4} \cdot \frac{l}{D} \cdot \rho \cdot \frac{U^2}{2}$$

$$= 0.158 \cdot \frac{l}{D^{5/4}} \cdot U^{7/4} \cdot \rho \cdot \nu^{1/4}$$

Gleich wie F_α enthält $F_{\Delta p}$ nur den flüssigkeitsabhängigen Teil der Gleichung

$$F_{\Delta p} = 0.158 \cdot \rho \cdot \nu^{1/4}$$

3. Verhältnis zwischen Druckverlust und Wärmeübergang

3.1 Das Verhältnis der Pumpenleistung zur Wärmeleistung für ein Wärmeaustauschrohr mit **laminarer** Strömung.

$$F_{\Delta p} = 32 \cdot \eta$$

Der Druckverlust Δp ist definiert als (siehe 2.1):

$$\Delta p = F_{\Delta p} \cdot \nu \cdot \frac{l}{D^2}$$

Die elektrische Pumpenleistung E_p wird definiert durch den Volumenfluss \dot{V} , die Pumpenleistung η_p und den Druckverlust Δp .

$$E_p = \Delta p \cdot \frac{\dot{V}}{\eta_p}$$

Der Volumenfluss kann folgendermassen beschrieben werden:

$$\dot{V} = \frac{\nu \cdot \pi \cdot D^2}{4}$$

Dadurch kann man E_p folgendermassen umformen:

$$\begin{aligned} E_p &= F_{\Delta p} \cdot \nu \cdot \frac{l}{D^2} \cdot \frac{\nu \cdot \pi \cdot D^2}{4 \cdot \eta_p} \\ &= F_{\Delta p} \cdot \frac{\pi \cdot l \cdot \nu^2}{4 \cdot \eta_p} \end{aligned}$$

Der gesamte Wärmeübergang \dot{Q} (W/K) für einen Rohrabschnitt mit Durchmesser D und Länge l , ist definiert als:

$$\dot{Q} = \alpha \cdot \pi \cdot D \cdot l$$

Mit

$$\alpha = \frac{F_\alpha}{D}$$

kann der Wärmeübergang \dot{Q} auch folgendermassen geschrieben werden:

$$\dot{Q} = F_\alpha \cdot \pi \cdot l$$

Das Verhältnis der elektrischen Pumpenleistung zum Wärmeübergang sieht nun folgendermassen aus:

$$\frac{E_p}{\dot{Q}} = \left(\frac{F_{\Delta p}}{F_\alpha} \right) \cdot \frac{D^2}{4 \cdot \eta_p}$$

Da der Term $\frac{D^2}{4 \cdot \eta_p}$

unter identischen Bedingungen für alle Wärmeträgerflüssigkeiten gleich ist, ist das Verhältnis der elektrischen Pumpenleistung zur Wärmeübergangsleistung nur noch abhängig vom Verhältnis $F_{\Delta p} / F_\alpha$.

$$\left(\frac{F_{\Delta p}}{F_\alpha} \right) = \frac{32\eta}{3.66\lambda}$$

Somit ist dieses Verhältnis E_p zu \dot{Q} in einfacher Weise direkt von der Viskosität und invers von der Wärmeleitfähigkeit der Flüssigkeiten abhängig.

3.2 Das Verhältnis der Pumpenleistung zur Wärmeleistung für ein Wärmeaustauschrohr mit **turbulenter** Strömung.

$$F_{\Delta p} = 0.158 \cdot \rho \cdot v^{1/4}$$

Der Druckverlust Δp ist im turbulenten Fall definiert als:

$$\Delta p = F_{\Delta p} \cdot D^{1.75} \cdot \frac{l}{D^{1.25}}$$

Die elektrische Pumpenleistung wird definiert durch den Volumenfluss \dot{V} , die Pumpeneffizienz η_p und den Druckverlust Δp .

$$E_p = \Delta p \cdot \frac{\dot{V}}{\eta_p}$$

Der Volumenfluss kann folgendermassen beschrieben werden:

$$\dot{V} = \frac{D \cdot \pi \cdot D^2}{4}$$

dadurch kann man E_p folgendermassen umschreiben:

$$E_p = F_{\Delta p} \cdot \vartheta^{1.75} \cdot \frac{l}{D^{1.25}} \cdot \frac{\vartheta \cdot \pi \cdot D^2}{4 \cdot \eta_p}$$

$$= \frac{F_{\Delta p} \vartheta^{2.75} \cdot l \cdot D^{0.75} \cdot \pi}{\eta_p \cdot 4}$$

Die spezifische Wärmeübergangsleistung \dot{Q} [W/K] für einen Rohrabschnitt mit Durchmesser D und Länge l , ist definiert als:

$$\dot{Q} = \alpha \cdot \pi \cdot D \cdot l$$

Mit
$$\alpha = F_\alpha \cdot \frac{\vartheta^{0.8}}{D^{0.2}}$$

erhält man für den Wärmeübergang \dot{Q} :

$$\dot{Q} = F_\alpha \cdot \pi \cdot D^{0.8} \cdot l \cdot \vartheta^{0.8}$$

$$= F_\alpha \cdot \pi \cdot l \cdot (D \cdot \vartheta)^{0.8}$$

Das Verhältnis der elektrischen Pumpenleistung zur Wärmeübergangsleistung sieht nun folgendermassen aus:

$$\frac{E_p}{\dot{Q}} = \left(\frac{F_{\Delta p}}{F} \right) \cdot \frac{\vartheta^{2.75} \cdot l \cdot D^{0.75} \cdot \pi}{\eta_p \cdot 4} \cdot \frac{1}{\pi \cdot l \cdot (D \cdot \vartheta)^{0.8}}$$

$$\frac{E_p}{\dot{Q}} = \left(\frac{F_{\Delta p}}{F_\alpha} \right) \cdot \frac{\vartheta^{1.95}}{\eta_p \cdot 4 \cdot D^{0.05}}$$

Da der Term
$$\frac{\vartheta^{1.95}}{\eta_p \cdot 4 \cdot D^{0.05}}$$

unter identischen Bedingungen für alle Wärmeträgerflüssigkeiten gleich ist, ist das Verhältnis der elektrischen Pumpenleistung zum Wärmeübergang nur noch abhängig vom Verhältnis $F_{\Delta p}/F_\alpha$.

$$\left(\frac{F_{\Delta p}}{F_\alpha} \right) = \frac{0.158}{0.023} \cdot \left(\frac{\rho}{\lambda} \right)^{2/3} \cdot \nu^{1.05-1/3} \cdot c_p^{-1/3} [\text{J/kgK}]^{-1} \cdot [\text{m}^2/\text{s}]^{0.05}$$

Somit ist dieses Verhältnis E_p zu \dot{Q} nicht linear.

Beilage 1

Erklärung der verwendeten Symbole:

- dynamische Viskosität	η	kg/m s
- Pumpeneffizienz	η_p	-
- Wärmeleitfähigkeit	λ	W/m K
- kinematische Viskosität	ν	m ² /s
- Dichte	ρ	kg/m ³
- spezifische Wärme	c_p	J/kg K
- Pumpenleistung	E_p	W
- Wärmeübergangskoeffizient	α	W/m ² K
- Nusseltzahl	Nu	-
- Prandtlzahl	Pr	-
- Pecletzahl	Pe	-
- Reynoldszahl	Re	-
- hydraulischer Durchmesser	D	m
- Reibungskoeffizient	f	-
- Länge	l	m
- mittlere Fließgeschwindigkeit	\bar{u}	m/s
- Volumenfluss	\dot{V}	m ³ /s
- gesamter Wärmeübergang	\dot{Q}	W/K

Beilage 2

Materialeigenschaften der untersuchten Wärmeträger. Massenverhältnisse Frostschutzmittel/Wasser entsprechend Tabelle 1 für Stockpunkt -15°C.

Dichte (kg/m³)

T(°C)	H ₂ O	CaCl ₂	MgCl ₂	4:1 Mg Cl ₂ /CaCl ₂	K ₂ CO ₃	KAc	E.G.	P.G.
-15		1174	1127	1144	1272	1130	1056	1044
-10		1171	1126	1142	1271	1130	1055	1043
-5		1170	1125	1140	1269	1130	1055	1042
0	999.8	1168	1123	1138	1267	1130	1054	1041
+5	1000	1166	1122	1136	1266	1130	1052	1039
+10	999.7	1164	1121	1134	1264	1130	1051	1037
+15	999.1	1162	1120	1132	1263	1130	1049	1035

Spezifische Wärme (kJ/kgK)

T(°C)	H ₂ O	CaCl ₂	MgCl ₂	4:1 Mg Cl ₂ /CaCl ₂	K ₂ CO ₃	KAc	E.G.	P.G.
-15		3.15	3.33	3.35	2.99	3.57	3.72	3.79
-10		3.15	3.34	3.36	3.00	3.57	3.73	3.80
-5		3.16	3.35	3.37	3.01	3.57	3.74	3.81
0	4.22	3.18	3.36	3.38	3.02	3.57	3.74	3.82
+5	4.21	3.19	3.37	3.39	3.03	3.57	3.75	3.83
+10	4.19	3.19	3.38	3.40	3.03	3.57	3.76	3.84
+15	4.19	3.20	3.39	3.41	3.04	3.57	3.77	3.85

Wärmeleitfähigkeit(W/mK)

T(°C)	H ₂ O	CaCl ₂	MgCl ₂	4:1 Mg Cl ₂ /CaCl ₂	K ₂ CO ₃	KAc	E.G.	P.G.
-15		0.53	0.51	0.51	0.52	0.34	0.48	0.44
10		0.54	0.51	0.52	0.52	0.35	0.48	0.44
-5		0.54	0.52	0.52	0.53	0.36	0.49	0.44
0	0.55	0.55	0.53	0.53	0.54	0.36	0.49	0.44
+5	0.57	0.55	0.54	0.54	0.55	0.36	0.49	0.45
+10	0.58	0.56	0.54	0.54	0.56	0.37	0.49	0.45
+15	0.59	0.57	0.55	0.55	0.56	0.38	0.49	0.45

Dynamische Viskosität (mPa s)

T(°C)	H ₂ O	CaCl ₂	MgCl ₂	4:1 Mg Cl ₂ /CaCl ₂	K ₂ CO ₃	KAc	E.G.	P.G.
-15		5.82	5.98	6.08	6.20	5.54	8.28	19.00
-10		4.70	5.09	4.97	5.26	5.07	6.69	14.22
-5		3.80	4.22	4.16	4.41	4.58	5.33	10.92
0	1.78	3.10	3.52	3.51	3.80	4.25	4.36	8.39
+5	1.53	2.60	3.00	3.02	3.26	4.04	3.56	6.60
+10	1.32	2.24	2.47	2.63	2.88	3.99	3.03	5.26
+15	1.16	1.97	2.15	2.28	2.54	3.89	2.54	4.25