



# CO<sub>2</sub>-ERDWÄRMESONDE

## PHASE 2

### Jahresbericht 2008

Autor und Koautoren	Dr. Andrea Grüniger, Dr. Beat Wellig
beauftragte Institution	Hochschule Luzern - Technik & Architektur (HSLU T&A) CC Thermische Energiesysteme und Verfahrenstechnik
Adresse	Technikumstrasse 21, 6048 Horw
Telefon, E-mail, Internetadresse	041 349 32 57, <a href="mailto:beat.wellig@hslu.ch">beat.wellig@hslu.ch</a> , <a href="http://www.hslu.ch/tevt">www.hslu.ch/tevt</a>
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	102'247 / 152'857 (inkl. Vertragszusatz Nr.1)
BFE-Projektleiter	Th. Kopp, externer F&E-Programmleiter
Dauer des Projekts (von – bis)	Ressortforschungsprogramm Wärmepumpen, WKK, Kälte
Datum	August 2007 – August 2009
	07.12.2008

#### ZUSAMMENFASSUNG

Dieses Projekt befasst sich mit der Untersuchung der fluid- und thermodynamischen Vorgänge in einer CO<sub>2</sub>-Erdwärmesonde (EWS), welche nach dem Prinzip eines Thermosyphons funktioniert. Obwohl in den letzten Jahren bereits eine beträchtliche Anzahl von Anlagen, mehrheitlich in Deutschland und Österreich, in Betrieb gegangen sind, fehlt es nach wie vor an einem fundierten Verständnis der Funktionsweise solcher Sonden.

Um das Verhalten der EWS unter verschiedenen Bedingungen untersuchen zu können, wurde in MATLAB ein Simulationsmodell erstellt, welches das Verhalten der Sonde mit der Wärmeleitung im Erdreich koppelt. Es zeigt sich dabei, dass sich der Druck in der Sonde im stationären Zustand so einstellen wird, dass der Flüssigkeitsfilm bis zum Flüssigkeitspool hinunter reicht. Dies setzt jedoch voraus, dass die Füllmenge an CO<sub>2</sub> im Rohr genügend gross ist. Im Rahmen einer Parameterstudie wurde aufgezeigt, dass das Thermosyphonprinzip, unabhängig von der entzogenen Wärmeleistung, sogar bei ausgeschalteter Wärmepumpe, durch den selbsttätigen Umlauf zu einer Energieumlagerung von unten nach oben führt. Dadurch gleicht sich die Erdreichtemperatur in der Nähe der Sonde von oben nach unten rasch aus und führt zu gleichmässigerem Wärmeentzug über die Höhe. Ebenso ist dieses Verhalten vorteilhaft für die Regeneration des Erdreichts in „off“ Phasen.

Der Wärmeübergangswiderstand im Flüssigkeitsfilm an der Sondenwand ist gegenüber dem Wärmeleitwiderstand des Erdreichts sehr klein. Daher kann für die Wärmeübergangscharakteristik kein Vorteil festgestellt werden, wenn die Flüssigkeit auf mehreren Höhenstufen eingespritzt wird. Zwar kann die sogenannte Staugrenze durch Aufteilen der Flüssigkeit bei einer Mehrfacheinspritzung erhöht werden, doch wird dieser Effekt durch die Notwendigkeit der Einführung eines Innenrohrs wieder verringert. Das Prinzip der Mehrfacheinspritzung wird sich daher aus heutiger Sicht angesichts des hohen konstruktiven Aufwands kaum rechtfertigen lassen.

Für den Wärmeübergang sind weite Rohre wegen der grösseren Oberfläche günstiger. Auch muss für die Auslegung bezüglich Staugrenze ein gewisser Mindestdurchmesser eingehalten werden. Jedoch steigt mit dem Durchmesser auch der konstruktive Aufwand. Es muss daher in Zusammenarbeit mit dem Industriepartner ein Optimum zwischen theoretisch Wünschbarem und technisch und finanziell Machbarem gefunden werden.

## Projektziele

Im BFE-Forschungsprojekt „Pumpenlose Erdwärmesonde, Phase 1: Potenzialabklärung“ (Peterlunger, Ehrbar et al. 2004) wurde aufgezeigt, dass die Jahresarbeitszahl von Wärmepumpen um etwa 15% verbessert werden kann, wenn anstelle klassischer Wasser/Glykol-Erdwärmesonden solche mit Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) als Arbeitsmedium verwendet werden. Diese Sonden arbeiten nach dem Prinzip eines Thermosyphons, bei welchem das Kältemittel einen Phasenwechsel durchläuft. Das Kältemittel kondensiert im Sondenkopf, läuft als Film entlang der Sondenwand hinunter und verdampft unter Entzug von Erdwärme in der Sonde. Dadurch entsteht ein selbsttätiger Umlauf, welcher eine Umwälzpumpe überflüssig macht.

Obwohl in den letzten Jahren bereits einige Anlagen, mehrheitlich in Deutschland (Kruse, Stiller et al. 2008) und Österreich, in Betrieb gegangen sind, fehlt es nach wie vor an einem fundierten Verständnis der fluid- und thermodynamischen Vorgänge in der Sonde und der Wechselwirkung mit dem umgebenden Erdreich. Dies erschwert die klare Interpretation von auftretenden Phänomenen, Problemen und Limitationen, welche für eine optimale Auslegung der Sonde notwendig wäre.

Im Rahmen dieses Projektes (Phase 2) sollen die offenen Fragen bezüglich Strömung und Wärmetransport untersucht werden. Das Hauptziel ist, die fluid- und thermodynamischen Vorgänge in einer  $\text{CO}_2$ -Erdwärmesonde ( $\text{CO}_2$ -EWS) transparent darzustellen und dabei auch das Konzept der Mehrfacheinspritzung einzubeziehen. Es soll untersucht werden, ob mit diesem Prinzip die Sondenoberfläche gleichmässiger ausgenutzt werden kann. Dabei soll auch die technische Realisierbarkeit einer solchen Sonde aus Kunststoff geprüft werden.

Das Gesamtprojekt sieht folgende Zielsetzungen vor:

1. Verständnis der relevanten fluid- und thermodynamischen Prozesse in der Sonde.
2. Erstellen eines Simulationsmodells, welches die physikalischen Vorgänge in der EWS bei einfacher und mehrfacher  $\text{CO}_2$ -Aufbringung beschreibt, sowie die Wechselwirkung mit dem Erdreich berücksichtigt.
3. Quantifizierung des Effizienzsteigerungspotenzials im Vergleich zu herkömmlichen Wasser / Glykol-Erdwärmesonden.
4. Abklärung der technischen Machbarkeit solcher  $\text{CO}_2$ -EWS aus Kunststoff.
5. Schaffen der Entscheidungsgrundlagen für die Durchführung einer allfälligen Phase 3 und Festlegen der Zielsetzung (falls die vorliegende Phase 2 ein Effizienzsteigerungspotenzial und die grundsätzliche Machbarkeit einer solchen Sonde zeigt).

Für das Jahr 2008 wurden folgende Zwischenziele definiert:

1. **Literaturrecherche:** Vervollständigung der Literaturrecherche als Basis zu einem besseren Verständnis der physikalischen Vorgänge in der Sonde und zur Erstellung des Simulationsmodells
2. **Simulationsmodell:** Erstellen eines Modells zur Abbildung der Vorgänge in der Sonde und deren Wechselwirkung mit dem Erdreich.
3. **Parameterstudie:** Mit dem erstellten Modell sollen, ausgehend von einem Referenzpunkt, verschiedene Sondenparameter (wie z.B. Anzahl Einspritzstellen) variiert und so deren Einfluss auf die Sondenleistung quantifiziert werden.
4. **Machbarkeitsabklärung:** Aufgrund der Resultate soll das Optimum zwischen „theoretisch Wünschbarem“ und „technisch Machbaren“ gefunden werden.

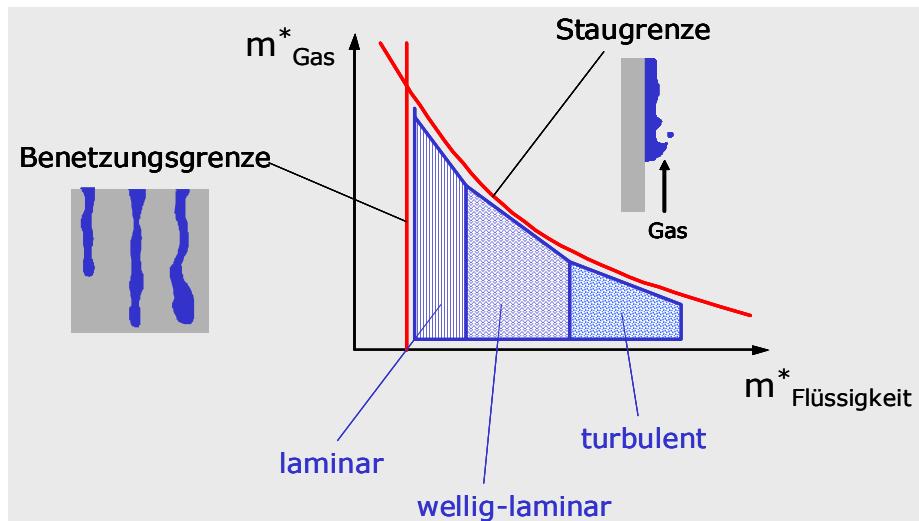
## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

### 1. Literaturrecherche

Da nur wenige experimentelle Untersuchungen zu  $\text{CO}_2$ -Thermosyphons publiziert sind, müssen für ein besseres Verständnis der Zusammenhänge in der Sonde auf verwandte Gebiete, insbesondere aus der Verfahrenstechnik zurückgegriffen werden (Fallfilmverdampfer, Rieselfilmverdampfer) Entsprechend kritisch müssen diese Resultate auf ihre Anwendbarkeit auf den vorliegenden Fall geprüft wer-

den. Zu folgenden Schwerpunkten wurden entsprechende Informationen zusammen getragen. Es sind dabei nur die wichtigsten Literaturstellen angefügt:

- **Stoffdaten  $\text{CO}_2$ :** Für das Simulationsmodell müssen Informationen zu Stoffdaten wie Zustandsgleichung, Dampfdruckkurven, Verdampfungsenthalpie, thermische Leitfähigkeit, Viskosität, Oberflächenspannung etc. vorhanden sein. Die Zustandsgleichung und Dampfdruckkurve wurde nach der bekannten Veröffentlichung von (Span and Wagner 1996) programmiert.
- **Staugrenzenkorrelationen:** Wenn die der Flüssigkeitsströmung entgegen gesetzte Gasströmung eine bestimmte Geschwindigkeit überschreitet, kommt es zu einer Richtungsumkehr im Flüssigkeitsfilm und er kann nicht mehr ungehindert nach unten fliessen. Diese Grenze ist neben Stoffeigenschaften auch abhängig von der Geschwindigkeit bzw. dem Massenstrom der Flüssigphase (siehe Abbildung 1). Es wurden verschiedene Korrelationen aus der Literatur verglichen und für quantitative Aussagen die konservativste Beziehung nach (Tien and Chung 1979) ausgewählt.
- **Benetzungsgrenze:** Wenn der umfangspezifische Flüssigkeitsmassenstrom einen bestimmten Wert unterschreitet, kann nicht mehr die gesamte Oberfläche der Sonde benetzt werden und es kommt zu sogenannter Rinnalströmung. Die Benetzungsgrenze ist stark vom Benetzungswinkel des Systems ( $\text{CO}_2$  flüssig /  $\text{CO}_2$  gas / Wandmaterial) abhängig. Dieser kann jedoch nur abgeschätzt werden. Abschätzungen zeigen, dass diese Strömungsform durchaus relevant sein kann für die Verhältnisse in der Sonde. Sie muss also im Modell berücksichtigt werden (El-Genk and Saber 2001).
- **Wärmeübergang:** Entsprechend den in Abbildung 1 dargestellten Strömungsformen wird auch der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  zwischen Sondenwand und Filmoberfläche verschiedenen Gesetzen gehorchen. Analogien aus der Fallfilmtechnologie erlauben  $\alpha$  in Abhängigkeit des Flüssigkeitsmassenstroms zu bestimmen (Nusselt 1916; Chun and Seban 1971). Abschätzungen zeigen, dass das Blasensieden bei der Filmverdampfung keine Rolle spielt.



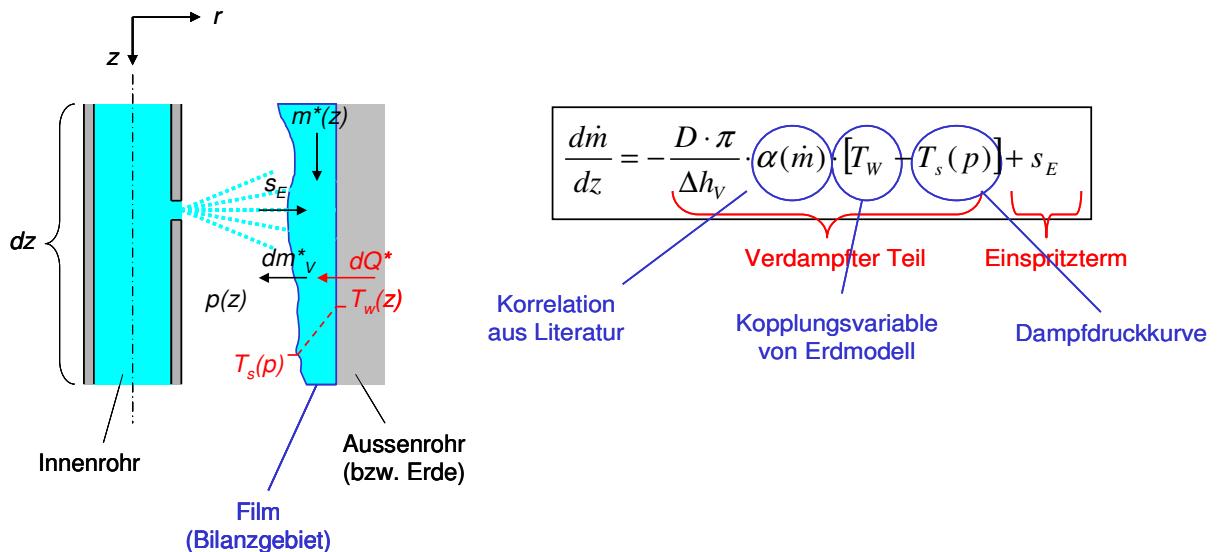
**Abbildung 1** Verschiedene Strömungsbereiche und Grenzen einer idealen Fallfilmströmung.

## 2. Simulationsmodell

Um das Verhalten der  $\text{CO}_2$ -Erdwärmesonde über der Zeit zu beschreiben, muss auch die Wechselwirkung mit dem Erdreich berücksichtigt werden. Das Gesamtmodell kann somit in zwei Hauptblöcke aufgeteilt werden. Das **Erdmodell** beschreibt die instationäre Wärmeleitung im Erdreich. Output aus diesem Block ist die Wandtemperaturverteilung  $T_w(z)$ , welche als Input in das **EWS-Modell** dient. Es wird dabei angenommen, dass die zeitlichen Vorgänge in der EWS viel schneller ablaufen als im Erdreich, d.h. dass in der EWS nur mit stationären Zuständen gerechnet wird. Das EWS-Modell liefert wiederum die tiefenabhängige spezifische Wärmestromdichte  $q_{EWS}(z)$ , welche der Erde entzogen wird. Jeder Zeitschritt im Erdmodell beinhaltet somit ein Update von  $q_{EWS}(z)$ .

Nach Evaluation verschiedener Möglichkeiten wurde beschlossen, das gesamte Modell in MATLAB zu programmieren. Ausschlaggebend dafür war insbesondere die Tatsache, dass dabei höchstmögliche Flexibilität und auch Zugänglichkeit besteht.

**EWS-Modell:** Wenn wie in Abbildung 2 dargestellt ein Filmelement der Höhe  $dz$  betrachtet wird, ergibt sich unter Vernachlässigung des Wärmeübergangs in  $z$ -Richtung und unter Berücksichtigung der Massen- und Energiebilanz die ebenfalls in Abbildung 2 dargestellte Formel. Die Veränderung des Filmmassenstroms über dem Element ergibt sich aus der Summe eines Verdampfungs- (oder Kondensations-) terms und eines allfälligen Einspritzterms. Der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  ist abhängig vom Massenstrom  $m^*$ . Dieser beinhaltet die Information über die Strömungsform und kann aus verschiedenen bekannten Korrelationen hergeleitet werden. Dieser Ansatz hat den Vorteil, dass dabei die Filmdicke und die Geschwindigkeitsverteilung nicht bekannt sein muss. Das treibende Temperaturgefälle ergibt sich aus der Differenz zwischen der Wandtemperatur  $T_w$  und der Siedetemperatur  $T_s$  an der Filmoberfläche. Die Wandtemperatur  $T_w(z)$  wird vom Erdmodell übergeben, während  $T_s$  sich aus der Dampfdruckkurve ergibt. Die beschriebene Gleichung wird in der Simulation mit einem Modell 1. Ordnung gelöst.



**Abbildung 2** Schematische Darstellung der relevanten Größen im Innern der CO<sub>2</sub>-EWS

Es stellt sich nun jedoch die Frage, von welchem Sondendruck  $p(z)$  dabei auszugehen ist. Dabei wurde die folgende Bedingung zu Hilfe genommen.

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{Film}(p(z)) + \dot{Q}_{Pool}(p(z))$$

Es wird davon ausgegangen, dass sich bei ausreichender Füllmenge am Sondenfuss ein Pool mit flüssigem CO<sub>2</sub> bildet. Auch in diesem Pool wird eine kleine Menge CO<sub>2</sub> verdampfen. Die Summe des Beitrags aus dem Pool  $\dot{Q}_{Pool}$  und aus der Filmverdampfung  $\dot{Q}_{Film}$  müssen im stationären Zustand der vorgegebenen, total entzogenen Wärmemenge  $\dot{Q}_{tot}$  (= Verdampferleistung der Wärmepumpe) entsprechen. Beide Beiträge sind massgeblich vom Druck  $p(z)$  abhängig, indem dieser die Temperaturdifferenz über dem Film in der Sonde bestimmt und er wird sich im stationären Zustand so einstellen, dass obige Bedingung erfüllt ist. Im Simulationsmodell wird dies iterativ gelöst. Der Beitrag des Pools wird mit einem Blasensiedmodell berücksichtigt.

**Erdmodell:** Zur Beschreibung der Wärmeleitung in der Erde muss die instationäre Wärmeleitungs-gleichung gelöst werden (2-Dimensional, axialsymmetrisch):

$$\frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

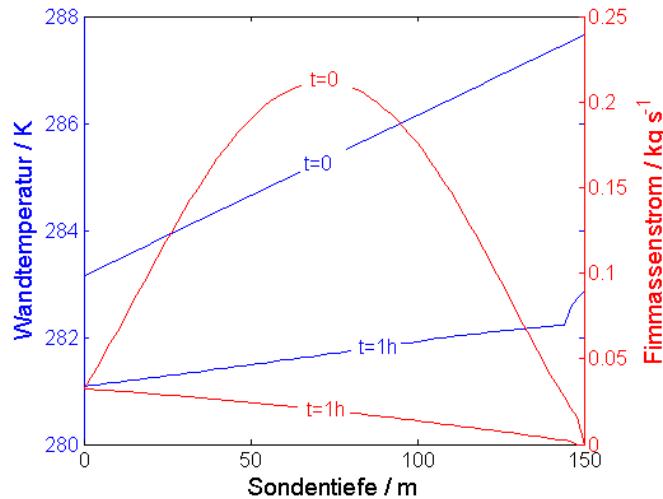
Dies wurde numerisch mit der Finiten Differenzen Methode (FDM), mit dem Crank-Nicolson Verfahren gelöst. Es wurde dabei ein linear skaliertes Netz mit wachsenden Gitterabständen von der Achse weg gewählt.

### 3. Parameterstudie

Als Referenzpunkt für die Parameterstudie wurden Bedingungen gewählt, welche sich an den Bedarf eines Einfamilienhauses anlehnen:

Totale Entzugsleistung $Q_{tot}^*$	7.5 kW	(10 kW Heizleistung bei COP 4)
Maximalwerte Druck $p_{min}/p_{max}$	25/50 bar	(relevant für Füllmenge und Startwerte Iteration)
Sondenlänge $L$	150 m	(ergibt durchschn. Entzugsleistung von 50 W/m)
Innen-Ø Aussenrohr $D$	63 mm	(Grenze der techn. Realisierbarkeit)
Aussen-Ø Innenrohr $d$	0 mm	(kein Innenrohr)
Anzahl Einspritzstellen $N$	1	(konventioneller Thermosyphon)
Höhe Erdmodell $H$	180 m	
Radius Erdmodell $R$	100 m	

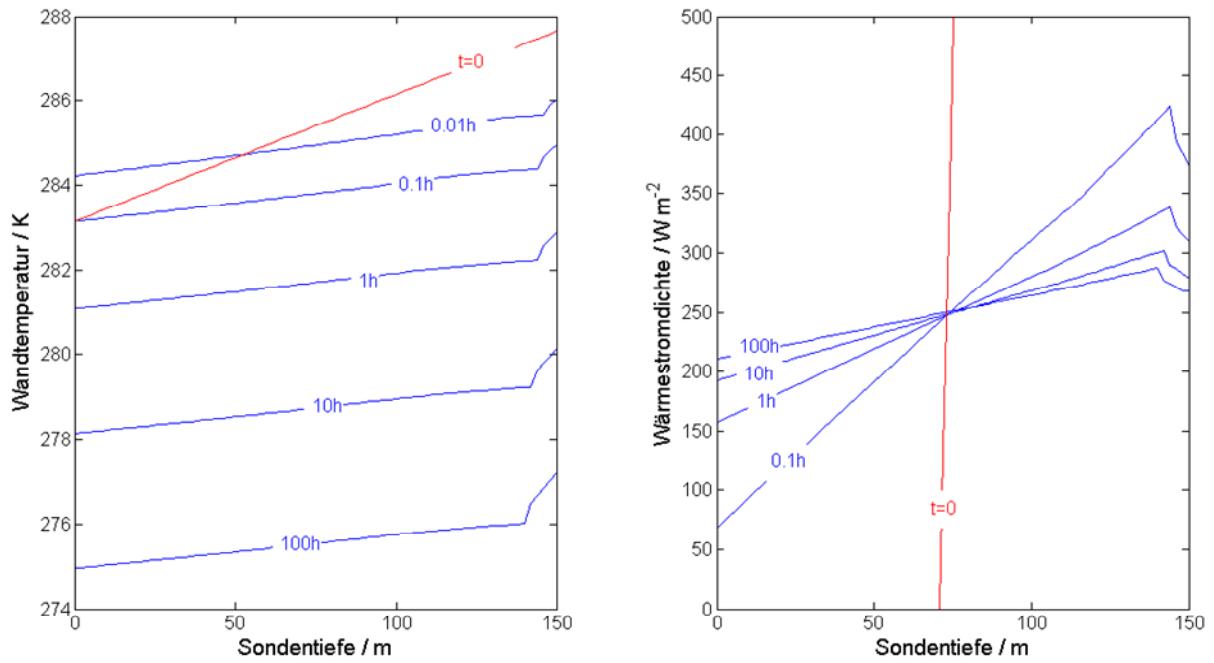
**Grundsätzliches Verhalten der CO<sub>2</sub>-EWS:** In Abbildung 3 ist ersichtlich, wie sich der Filmmassenstrom zum Zeitpunkt 0 (Simulationsstart) ausbildet, wenn von einer Wandtemperatur, welche dem ungestörten Erdtemperaturprofil entspricht, ausgegangen wird (Anstieg von 0.03 K/m). Die hügelförmige Ausbildung bedeutet, dass im oberen Bereich Kondensation und erst im unteren Bereich Verdampfung stattfindet. Dieses Phänomen führt zu einer Energieumlagerung von unten nach oben und zu einer Abflachung des Wandtemperaturprofils, welches sich sehr schnell dem Verlauf der Siedetemperatur anschmiegt. Diese steigt nach unten aufgrund des Druckanstiegs durch die Dampfsäule an.



**Abbildung 3 Entwicklung von Filmmassenstrom und Wandtemperatur in der ersten Stunde (Referenzbedingungen)**

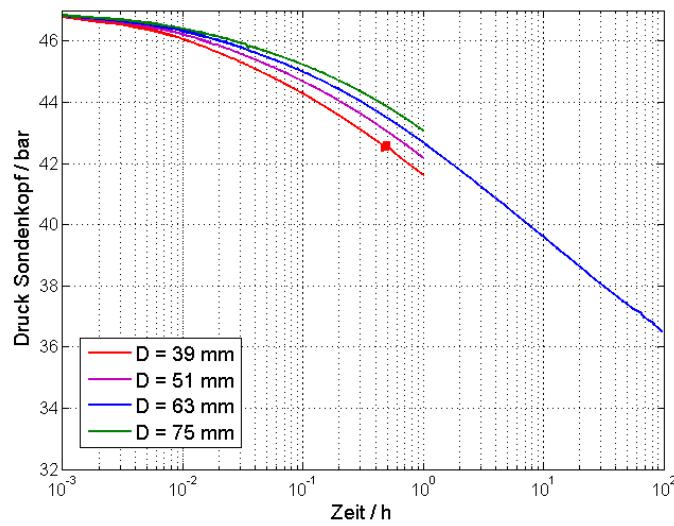
Wie aus Abbildung 4 ersichtlich erfolgt diese Umlagerung in den ersten Minuten. Danach ändert sich der Temperaturanstieg über die Tiefe kaum mehr, sondern das Niveau sinkt mit zunehmender Zeit kontinuierlich nach unten. Der steilere Temperaturanstieg am Sondenfuss ist auf die veränderten Bedingungen im Pool zurückzuführen.

Die rechte Grafik in Abbildung 4 zeigt die zeitliche Entwicklung der spezifischen Wärmestromdichte. Diese nimmt gegen den Sondenfuss zu, die Kurve flacht jedoch mit zunehmender Zeit ab. Es ist also auch hier ein Ausgleichseffekt über die Zeit zu beobachten.



**Abbildung 4** Zeitliches Verhalten von Wandtemperatur und Wärmestromdichte bei Referenzbedingungen (Blockbelastung bei 7.5 kW).

**Einfluss des Sondendurchmessers:** Um verschiedene Sondenkonfigurationen bezüglich ihrer Effizienz quantitativ zu beurteilen ist massgebend, bei welcher Temperatur das  $\text{CO}_2$  am Sondenkopf kondensiert. Das Simulationsmodell liefert den Druckverlauf am Sondenkopf über die Zeit. Die Temperatur kann direkt über die Dampfdruckbeziehung errechnet werden. Aufgrund des relativ hohen Rechenaufwandes, der vor allem durch die notwendige Druckiteration bei jedem Zeitschritt notwendig ist, konnten bis anhin nicht alle Konfigurationen beliebig lange gerechnet werden.

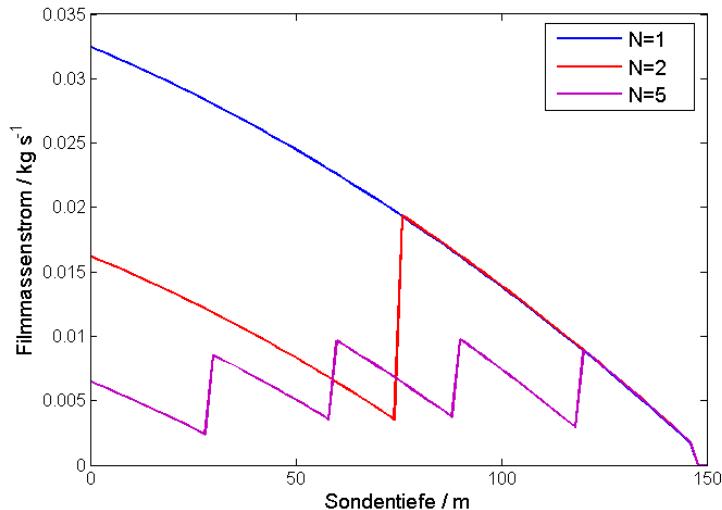


**Abbildung 5** Druckverlauf am Sondenkopf über die Zeit bei variablem Sondendurchmesser

Abbildung 5 zeigt den Druckverlauf über die Zeit bei unterschiedlichem Sondendurchmesser. Beim Standarddurchmesser von 63 mm erreicht der Druck nach 100 h Dauerbelastung einen Wert von 36.5 bar, was einer Temperatur von 1.8 °C entspricht. Eine Abschätzung durch Extrapolation der Kurve auf 500 h ergibt eine Temperatur von ca. -0.4 °C. Aus der Grafik ist klar ersichtlich, dass mit steigendem Durchmesser ein höherer Druck bzw. eine höhere Temperatur erzielt werden kann. Dies ist auf die grössere verfügbare Wärmeübertragungsfläche zurück zu führen.

Bei den Standardsimulationen wurde von einer reinen Filmströmung ausgegangen. Es wurde jedoch bei den Simulationsreihen mit variablem Durchmesser ein Rinnensalmodell eingeschlossen, wobei sich zeigte, dass die Rinnensalbildung einen vernachlässigbaren Einfluss hat.

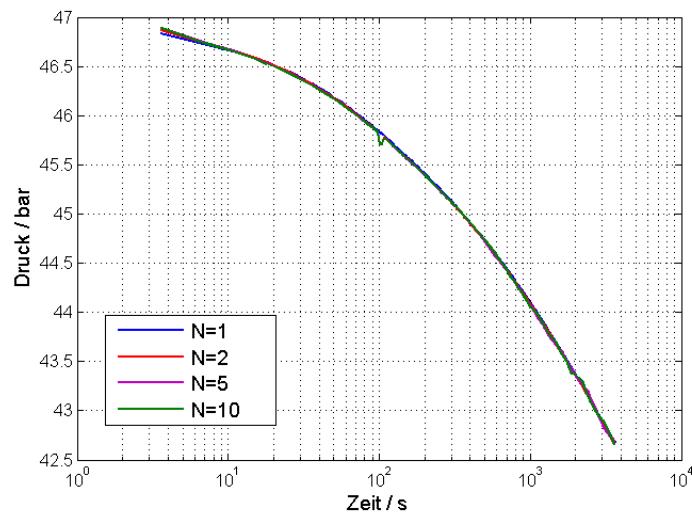
**Effekt von mehreren Einspritzstellen:** Ein wichtiges Ziel in diesem Projekt ist, die Idee einer Mehrfacheinspritzung auf ihr Potenzial hin zu überprüfen. Wenn das CO<sub>2</sub>-Kondensat durch Einführen eines konzentrischen Innerohrs auf verschiedenen Höhenstufen eingebracht wird, wird der Massenstrom aufgeteilt und es ergibt sich ein „gezackter“ Verlauf wie in Abbildung 6 dargestellt.



**Abbildung 6 Ausbildung des Filmmassenstroms nach einer Stunde Laufzeit bei unterschiedlicher Anzahl Einspritzstellen N**

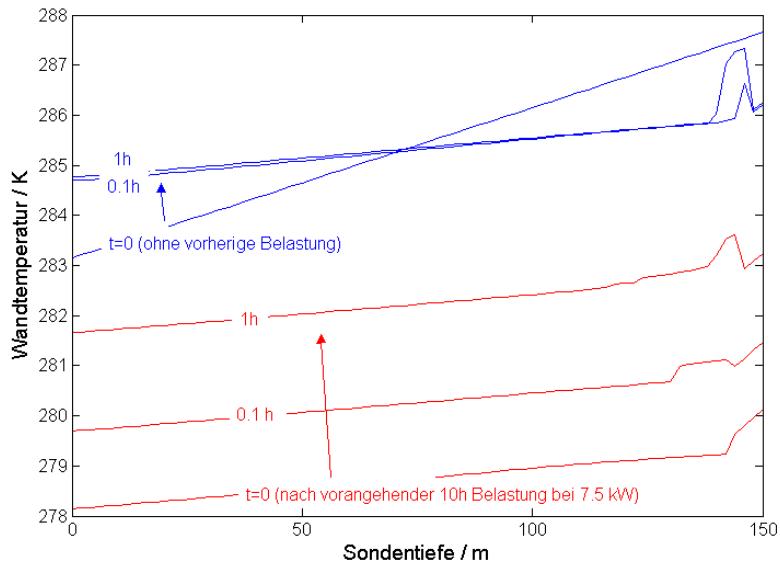
Der Vergleich des Druckverlaufs in Abbildung 7 zeigt, dass das Einführen von mehreren Einspritzstellen praktisch keinen Einfluss hat. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Wärmeübergangswiderstand im Film gegenüber dem Widerstand des Erdreichs vernachlässigbar klein ist und somit verschiedene Filmkonfigurationen daher für den Gesamtwiderstand kaum ins Gewicht fallen. Dies zeigt sich auch in sehr kleinen Temperaturdifferenzen über dem Film im Bereich von 0.1 bis 0.2 K.

Hinsichtlich der Wärmeübertragungscharakteristik bringt daher die Mehrfacheinspritzung keinen Vorteil. Es wurde zusätzlich überprüft, ob durch die Reduktion des maximalen Filmmassenstroms die Staugrenze reduziert werden kann. Jedoch wird der Vorteil durch die Notwendigkeit eines Innenrohrs, welche den Strömungsquerschnitt verringert, wieder reduziert. Der zusätzliche konstruktive Aufwand wird sich daher aus heutiger Sicht kaum rechtfertigen lassen.



**Abbildung 7 Vergleich des Druckverlaufs bei unterschiedlicher Anzahl Einspritzstellen N**

**Sonde im „OFF Betrieb“:** Wenn die Wärmepumpe ausgeschaltet ist, wird netto keine Leistung entzogen. Simulationen zeigen jedoch, dass der Thermosyphon auch in diesem Fall aktiv ist. Durch Verdampfung im unteren Teil und Kondensation im oberen Teil der Sonde wird dauernd ein Flüssigkeitsfilm aufrecht erhalten. Auch hier zeigt sich wiederum der „vertikale Energietransporteffekt“. Wenn in einem fiktiven Beispiel mit einem Wandtemperaturprofil des ungestörten Erdreichs begonnen wird, nimmt die Kurve innerhalb kürzester Zeit dieselbe Steigung an wie nach 10 h Belastung mit 7.5 kW (Abbildung 8). Es kann daraus geschlossen werden, dass die Steigung des Temperaturprofils unabhängig von der totalen Wärmeleistung gleich bleibt und sich lediglich das Niveau verschiebt. Dieses Verhalten wird auch von Vorteil sein für die Regenerationsverhalten des Erdreichs indem ein konvektiver Wärmetransport von unten nach oben erfolgt im Gegensatz zu einer Sole-Sonde, bei welcher der Transport rein konduktiv erfolgt, wenn die Umwälzpumpe ausgeschaltet ist.



**Abbildung 8 Zeitliche Entwicklung des Wandtemperaturprofils bei ausgeschalteter Wärmepumpe.**  
**1. Fall ausgehend von ungestörtem Erdtemperaturprofil. 2. Fall nach einer 10 h Belastung mit 7.5 kW.**

#### 4. Machbarkeitsstudie

Die Resultate der Parameterstudie haben gezeigt, dass das Konzept der Mehrfacheinspritzung zu wenig Vorteile bringt, um den massiv grösseren Aufwand bei Einbau und Betrieb einer CO<sub>2</sub>-EWS zu rechtfertigen. Ein konventioneller Thermosyphon kann die gleiche Leistung erzielen. Auf Basis des heutigen Wissensstands entfällt daher die Notwendigkeit einer Machbarkeitsstudie für die Mehrfacheinspritzung.

Auch wenn die Sonde als einfaches Rohr ausgeführt wird, muss allerdings bei der Dimensionierung der Zusammenhang zwischen gewünschter Leistung und Mindestinnendurchmesser berücksichtigt werden, der durch die Staugrenze gegeben ist. Konservative Schätzungen ergeben beispielsweise, dass bei einer Entzugsleistung von 7.5 kW mindestens ein Durchmesser von 41 mm notwendig ist, sofern nur ein Rohr verwendet wird. Wie ebenfalls in der Parameterstudie gezeigt, sind grosse Rohre auch für die Wärmeübertragungscharakteristik von Vorteil. Jedoch wird im Gegensatz dazu der konstruktive Aufwand steigen. Es sind dickere Wandstärken notwendig und das Wickeln wird schwieriger. Denkbar ist auch, die Sonde anstatt nur mit einem Rohr mit mehreren Rohren auszustatten. Für den Entzug von 7.5 kW mit 4 Rohren wäre ein Innendurchmesser von mindestens 22 mm notwendig. Abklärungen um das Optimum zwischen theoretisch Wünschbarem und technisch und finanziell Machbarem zu finden, sind momentan noch im Gange.

#### Nationale Zusammenarbeit

- HakaGerodur AG, Giessenstrasse 3, 8717 Benken
- Geowatt AG, Dohlenweg 28, 8050 Zürich
- Hubacher Engineering, Tannenbergstrasse 2, 9032 Engelburg

## Internationale Zusammenarbeit

### Bewertung 2008 und Ausblick 2009

Das wichtigste und zugleich anspruchsvollste Ziel dieses Jahres, nämlich das Erstellen eines Simulationsmodells, welches die Vorgänge in und um die Sonde abbildet, wurde vollumfänglich erreicht. Dieses ermöglicht die Untersuchung des Einflusses verschiedener Parameter auf das Sondenverhalten und führte auch zu einem wesentlich besseren Verständnis der Vorgänge, welche innerhalb einer CO<sub>2</sub>-EWS stattfinden. Es zeigte sich, dass das Prinzip der Mehrfacheinspritzung bezüglich Wärmeübertragung keinen Vorteil bringt gegenüber dem konventionellen Konzept. Die weiteren Untersuchungen werden daher auf das konventionelle Konzept fokussiert.

Für den Projektabschluss im kommenden Jahr sind noch folgende Punkte ausstehend:

- Abschluss der Parameterstudie: Weiterführende Berechnungen zu Teillastbetrieb und quantitativer Vergleich mit Wasser/Glykol-Sonde.
- Abklärungen zur Machbarkeit von Kunststoffsonden
- Erstellen des Abschlussberichts

Der Projektabschluss wurde aufgrund eines Mutterschaftsurlaubs der Hauptsachbearbeiterin auf August 2009 verschoben.

### Referenzen

- Chun, K. R. and R. A. Seban (1971). "Heat Transfer to Evaporating Liquid Films." Journal of Heat Transfer **93**(4): 391-8.
- El-Genk, M. S. and H. H. Saber (2001). "Minimum thickness of a flowing down liquid film on a vertical surface." International Journal of Heat and Mass Transfer **44**(15): 2809-2825.
- Kruse, H., W. Stiller, et al. (2008). "Stand der Entwicklung und Markteinführung des FKW-CO<sub>2</sub>-Erdwärmerohrs." Geothermische Energie **17**(1): 18-22.
- Nusselt, W. (1916). "The surface condensation of steam." Zeitschrift Des Vereines Deutscher Ingenieure **60**: 569-575.
- Peterlunger, A., M. Ehrbar, et al. (2004). Schlussbericht Pumpenlose Erdwärmesonde, Phase 1: Potentialabklärung, Machbarkeitsstudie energetisch und wirtschaftlich, Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs, Labor für Thermodynamik und Kältetechnik.
- Span, R. and W. Wagner (1996). "A new equation of state for carbon dioxide covering the fluid region from the triple-point temperature to 1100 K at pressures up to 800 MPa." Journal of Physical and Chemical Reference Data **25**(6): 1509-1596.
- Tien, C. L. and K. S. Chung (1979). "Entrainment Limits in Heat Pipes." Aiaa Journal **17**(6): 643-646.

### Anhang