

Bernd Glück

SIMULATIONSMODELL "ERDWÄRMESONDEN"

**zur wärmetechnischen Beurteilung von
Wärmequellen, Wärmesenken
und Wärme-/Kältespeichern**

1. ERGÄNZUNG: KOAXIALSONDEN

:

F+E TGA Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück, Goethestraße 18, D-08547 Jöbnitz (Plauen)
Tel.+Fax 03741 / 52 12 14 E-Mail B.GLUECK@t-online.de

Aufgrund der sehr guten Zusammenarbeit mit der RUD. OTTO MEYER-UMWELT-STIFTUNG wurde das vorliegende Simulationsmodell auch bei der Stiftung veröffentlicht.

Inhaltsverzeichnis

1	Vorbemerkung und Geometrie der Koaxialsonde	1
2	Wärmetechnische Modellierung der Koaxialsonde	3
2.1	Wärmeübergangskoeffizienten für die Rohr- und Ringspaltströmung	3
	• Kernrohr	3
	• Ringspalt	5
2.2	Wärmedurchgangs- und Teilwärmedurchgangskoeffizienten	7
2.3	Wärmetransport im Kernrohr und im Ringspalt	7
3	Komplexmodell zur Simulation von Koaxialsonden	10
	• Randbedingungen	10
	• Verknüpfung der Einzelalgorithmen	10
	• Programmablaufplan	10
	• Komplexprogramm zur Simulation der Koaxialwärmesonden	10
	• Hauptprogrammeingabe und Steuerung des Programmablaufs	11
	• Eingabe zeitlich veränderlicher Flüssigkeitstemperaturen	13
	• Eingabe zeitlich veränderlicher Sondenleistungen	14
	• Eingabe zeitlich veränderlichen Durchflusses	15
	• Ausgaben (Druck- und Diagrammarten)	16
4	Programminstallation und Hinweise zu Programmänderungen	17
	• Grundlagen für die Programmanwendung	17
	• Laden und Start des Rechenprogramms	17
	• Bearbeitung des Programmlistings	18
5	Beispiele	19
5.1	Alleinige Heizwärmenutzung beim Sondenbetrieb (Beispiel_Koax_1)	19
5.2	Variationen des Sondendurchlaufes und der Sondengestaltung am Beispiel_Koax_1	30
	Literaturverzeichnis	34

Wichtige Hinweise:

Alle in diesem Bericht und dem zugehörigen Rechenprogramm enthaltenen Angaben, Daten, Berechnungsverfahren usw. wurden vom Autor mit bestem Wissen erstellt und sorgfältig geprüft. Dennoch sind inhaltliche Fehler nicht vollständig auszuschließen, deshalb erfolgen alle Angaben usw. ohne jegliche Verpflichtung und Garantie des Autors. Er übernimmt keinerlei Verantwortung und Haftung für etwaige inhaltliche Unrichtigkeiten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Autors unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen und Einspeicherung sowie Verarbeitung in elektronischen Systemen, die über die Eigennutzung hinausgehen, sowie für Übersetzungen und Mikroverfilmungen.

Das vorgestellte Simulationsmodell ist als Testfassung zu verstehen. Alle Interessierten sind eingeladen, an der Weiterentwicklung mitzuwirken.

Viel Erfolg bei der Anwendung!

1 Vorbemerkung und Geometrie der Koaxialsonde

Die Ergänzung basiert auf dem gleichnamigen Hauptbericht [1], der weiterhin in vollem Umfang gilt. In diesem sind die allgemeingültigen Zusammenhänge und das Simulationsmodell detailliert beschrieben, wobei die spezielle Geometrie und das wärmetechnische Modell von U-Rohrsonden die Grundlage bildete. Die Simulation erfolgte für das Erdreich instationär und für den Bohrlochquerschnitt mit Verrohrung stationär. Als Besonderheit wurde der Bohrlochquerschnitt mit der neu entwickelten, erweiterten Formfaktorenmethode untersucht. **Ziel der vorliegenden Ergänzung des Simulationsmodells ist es, die Sonde als Koaxialsonde zu betrachten, stationär zu simulieren und an den bestehenden Algorithmus für die Erdreichsimulation anzupassen. Das separat gestaltete Simulationsmodell wird wiederum als kostenlose Software bereitgestellt.**

Die geometrische und wärmetechnische Modellierung des Simulationsbereiches wird wie im Hauptbericht [1], Abschnitte 2 und 3 (S. 3 ff.) beibehalten. Die wärmetechnische Modellierung der Bohrung werde dagegen komplett ersetzt. Der Querschnitt durch die Koaxialsonde ist im Bild 1.1 dargestellt.

Es gelten:

- $2 r_{BL}$ Bohrlochdurchmesser (vgl. auch Bild 1.2 sowie Hauptbericht [1], Bilder 3.1 und 6.1)
- d_{Ka} Außendurchmesser des Kernrohres
- δ_K Wanddicke des Kernrohres
- λ_K Wärmeleitfähigkeit der Kernrohrwandung
- δ_D Dicke einer eventuellen Wärmedämmung am Kernrohr
- λ_D Wärmeleitfähigkeit einer eventuellen Wärmedämmung am Kernrohr
- d_{KD} Außendurchmesser der Kernrohrdämmung
- d_{Ha} Außendurchmesser des Hüllrohres
- δ_H Wanddicke des Hüllrohres
- λ_H Wärmeleitfähigkeit der Hüllrohrwandung.

Die **Wärmeleitfähigkeit des Füllstoffes**, der zwischen dem Außendurchmesser des Hüllrohres und der Bohrlochwand flüssig eingebracht wird und anschließend aushärtet, kann schichtweise variieren. Er wird deshalb als $\lambda_S(\text{Sch})$ angegeben. Somit könnte beispielsweise im oberflächennahen Bereich die Verfüllung mit Dämmmaterial und im tieferen Bereich mit einem sehr gut wärmeleitenden Material erfolgen. Zur genauen Höhenanpassung kann nötigenfalls eine reale Erdschicht geteilt werden.

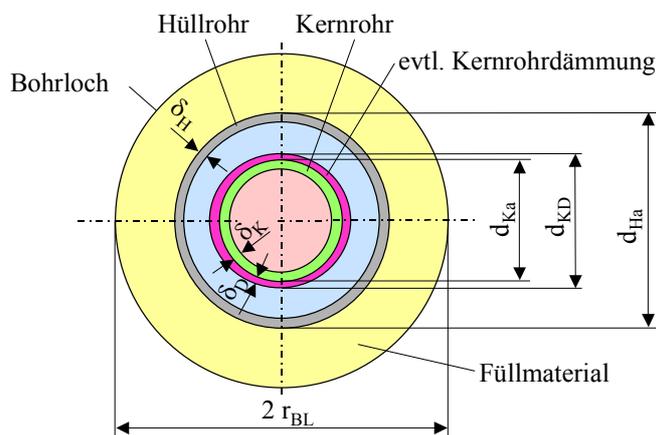


Bild 1.1 Querschnitt durch eine Koaxialsonde mit Kern- und Hüllrohr sowie Füllmaterial im Bohrloch (Durchmesser $2 r_{BL}$)
Das Füllmaterial kann bezüglich seiner Wärmeleitfähigkeit höhenabhängig variieren.
Im allgemeinen Fall ist auch eine Dämmung des Kernrohres denkbar.

Außer der Dämmung im oberflächennahen Hüllrohrbereich wird in Fachkreisen auch die **Dämmung des Kernrohres** diskutiert. Sie ist im Bild 1.1 magentafarben vermerkt. Um auch diesen Fall simulieren zu können, wird sie in die weiteren Betrachtungen über die **gesamte Sondenlänge** einbezogen. Ist sie nicht existent, so gilt $\delta_D = 0$ und $\lambda_D = 1$.

Die in den Bildern 1.1 und 1.2 dargestellten Geometrien sind Idealisierungen, da von einem über die Höhe gleich bleibenden Bohrlochdurchmesser ausgegangen wird. In der Realität könnte er auch abgestuft sein. Eine näherungsweise Anpassung an das Modell wäre durch die Variation der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_S(\text{Sch})$ denkbar.

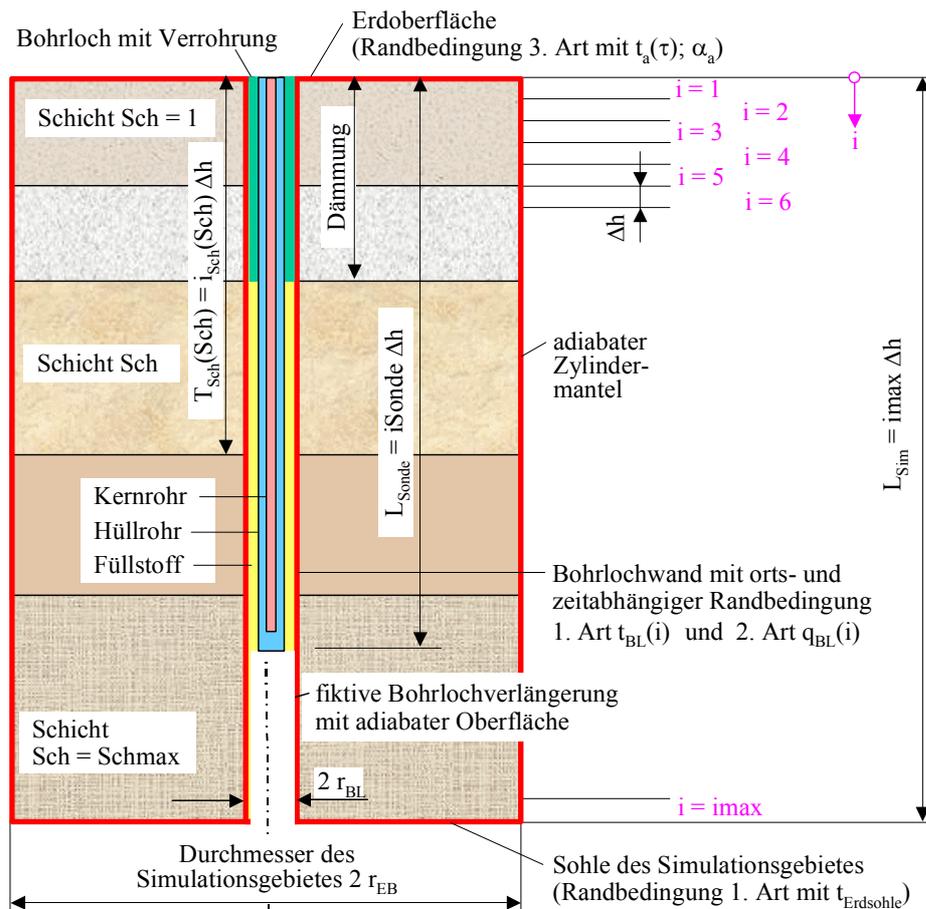


Bild 1.2 Vertikaler Schnitt durch das Simulationsgebiet mit Kennzeichnung der Simulationsabschnitte $i = 1 \dots i_{\text{max}}$

Das Simulationsgebiet umfasst den Erdreichzylinder mit unterschiedlichen Horizontalschichten und das Bohrloch mit der Koaxialsonde und unterschiedlicher Verfüllung zwischen Hüllrohr und Bohrlochwand (grün Dämmmaterial, gelb Füllstoff mit hoher Wärmeleitfähigkeit).

Die eventuelle vorhandene Dämmung des Kernrohres gemäß Bild 1.1 ist hier nicht dargestellt. Falls diese vorhanden ist, gelte sie über die gesamte Sondenlänge.

Der **Durchfluss** durch die Koaxialsonde kann verschiedenartig sein, in der Regel wird der Vorlauf (abwärts gerichteter Medienstrom) im Hüllrohr und der Rücklauf (aufwärts gerichteter Medienstrom) im Kernrohr geführt. Die Richtungsvorgabe stellt einen Eingabewert dar.

2 Wärmetechnische Modellierung der Koaxialsonde

Die **Zustands- und Stoffwerte der Durchflussmedien** (Wasser, Tyfocor L) sind dem Hauptbericht [1], Abschnitt 5.1 (S. 31 ff.) zu entnehmen.

2.1 Wärmeübergangskoeffizienten für die Rohr- und Ringspaltströmung

Die Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten im Kernrohr und im Rohrspalt sind differenziert zu behandeln. Aus dem Hauptbericht [1], Abschnitt 5.2 (S. 33 ff.) kann der Algorithmus für das Kernrohr übernommen werden, während der Wärmeübergangskoeffizient im Ringspalt zwischen Kern- und Hüllrohr zu ergänzen ist. Generell werden wegen der geringen Temperaturspreizung die Stoffwerte für das Durchflussmedium im Kernrohr und im Ringspalt gleich angenommen. Als Bezugstemperatur gelte die sogenannte **Umlenktemperatur** t_{Umlenk} vom Übergang Ringspalt zum Kernrohr, d. h. am unteren Ende des Kernrohres. Dies betrifft die auf das Fluid bezogenen Größen:

ν	m^2/s	kinematische Viskosität	c	$\text{J}/(\text{kg K})$	spezifische Wärmekapazität
λ	$\text{W}/(\text{m K})$	Wärmeleitfähigkeit	ρ	kg/m^3	Dichte
Pr	–	PRANDTLzahl.			

Als **Rohrlänge** L wird vereinfachend stets die Sondenlänge L_{Sonde} angesetzt.

Die **Richtung des Wärmestromes** hat normalerweise auch Einfluss auf den Wärmeübergang, da die Stoffwerte in der wandnahen Schicht gegenüber den mittleren Strömungswerten verändert sind. In den üblichen Einsatzfällen für Erdwärmesonden wird die Korrektur jedoch unter 2 % sein. D. h., sie liegt im Genauigkeitsbereich von Nu und bleibt deshalb unbeachtet.

• Kernrohr

Die Ermittlung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten basiert auf der Ähnlichkeitstheorie unter Verwendung der **Nußeltgleichungen** nach [2, 3]. Es gelten die Größen:

d_{Ki}	m	Kernrohrinnendurchmesser $d_{\text{Ki}} = d_{\text{Ka}} - 2 \delta_{\text{K}}$	w_{K}	m/s	Geschwindigkeit im Kernrohr
d_{Ka}	m	Kernrohraußendurchmesser	Re_{K}	–	REYNOLDSzahl im Kernrohr $\text{Re}_{\text{K}} = w_{\text{K}} d_{\text{Ki}} / \nu$
Nu_{K}	–	NUSSELTzahl im Kernrohr	α_{K}	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	Wärmeübergangskoeffizient im Kernrohr $\alpha_{\text{K}} = \text{Nu}_{\text{K}} \lambda / d_{\text{Ki}}$

Für die **erzwungene Rohrströmung** gelten in Abhängigkeit der Strömungsart:

Nußeltzahl bei laminarer Strömung ($\text{Re} \leq 2300$)

$$\text{Nu}_{\text{K}} = \left(49,028 + 4,173 \text{Re}_{\text{K}} \text{Pr} \frac{d_{\text{Ki}}}{L} \right)^{0,333} \quad (2.1)$$

Gültigkeitsbereich: $\text{Re}_{\text{K}} < 2300$; $0,1 < \text{Re}_{\text{K}} \text{Pr} d_{\text{Ki}}/L < 10^4$

Nußeltzahl bei turbulenter Strömung ($\text{Re} > 2300$)

$$\text{Nu}_{\text{K}} = \frac{B (\text{Re}_{\text{K}} - 1000) \text{Pr}}{1 + 12,7 B^{0,5} (\text{Pr}^{0,667} - 1)} \left(1 + \left(\frac{d_{\text{Ki}}}{L} \right)^{0,667} \right) \quad (2.2)$$

$$\text{mit der Hilfsgröße } B = (5,15 \lg \text{Re}_{\text{K}} - 4,64)^{-2} \quad (2.3)$$

Gültigkeitsbereich: $2300 < \text{Re}_{\text{K}} < 10^6$; $d_{\text{Ki}}/L < 1$.

Neuere Aussagen im **laminaren Bereich** gehen auf SHAH, MARTIN, STEPHAN, GNIELINSKI zurück, die die abschnittsweise geltenden Nußeltbeziehungen, die teilweise aus numerischen Auswertungen stammen, in eine Gleichung für die mittlere NUSSELT-Zahl mit Gültigkeit für den gesamten Bereich überführten. So folgt nach [3] der jetzigen Auflage:

$$\text{Nu}_K = \left\{ 3,66^3 + 0,7^3 + (1,615(\text{Re}_K \text{ Pr } d_{Ki}/L)^{0,333} - 0,7)^3 + \left(\left(\frac{2}{1+22 \text{ Pr}} \right)^{0,167} (\text{Re}_K \text{ Pr } d_{Ki}/L)^{0,5} \right)^3 \right\}^{1/3} \quad (2.4)$$

Gültigkeitsbereich: $\text{Re}_K < 2300$; $0 < \text{Re}_K \text{ Pr } d_{Ki}/L < \infty$.

Für den **turbulenten Bereich** erfolgten neue Auswertungen der bekannten Versuchsergebnisse, wobei auch ein stetiger Übergang zwischen den laminaren und den turbulenten NUSSELT-Zahlen hergestellt wurde. Dies dient einerseits der Beseitigung von numerischen Instabilitäten bei wärmetechnischen Berechnungen – beispielsweise Optimierungen – infolge wiederholter Sprünge zwischen $\text{Nu}_{\text{laminar}}$ und $\text{Nu}_{\text{turbulent}}$ im Übergangsbereich. Andererseits wird damit der Erkenntnis von ROTTA Rechnung getragen, der im Übergangsbereich $\text{Re} > 2300$ alternierende Umschläge der Strömungsform feststellte. GNIELINSKI schlägt nachfolgende Berechnung vor:

▪ **ausgebildete turbulente Strömung**

$$\text{Nu}_K = \frac{B \text{ Re}_K \text{ Pr}}{1 + 12,7 B^{0,5} (\text{Pr}^{0,667} - 1)} \left(1 + \left(\frac{d_{Ki}}{L} \right)^{0,667} \right) \quad (2.5)$$

$$\text{mit der Hilfsgröße } B = (5,09 \lg \text{Re} - 4,24)^{-2} \quad (2.6)$$

Gültigkeitsbereich: $10^4 \leq \text{Re}_K \leq 10^6$; $0,6 \leq \text{Pr} \leq 1000$; $d_{Ki}/L \leq 1$.

▪ **Übergangsbereich**

Es wird eine lineare Interpolation zwischen $\text{Nu}_{\text{laminar}}(\text{Re} = 2300)$ nach Gl. (2.4) und $\text{Nu}_{\text{turbulent}}(\text{Re} = 10000)$ nach Gl. (2.5) vorgenommen, wobei gelten:

$$\gamma = \frac{\text{Re}_K - 2300}{10^4 - 2300} \quad (2.7)$$

$$\text{Nu}_K = (1 - \gamma) \text{Nu}_{K,\text{laminar}}(\text{Re} = 2300) + \gamma \text{Nu}_{K,\text{turbulent}}(\text{Re} = 10000) \quad (2.8)$$

Gültigkeitsbereich: $2300 < \text{Re}_K < 10^4$; $0,6 \leq \text{Pr} \leq 1000$; $d_{Ki}/L \leq 1$.

Die Linearisierung im Übergangsbereich ist umstritten, denn bei technisch realen Einströmbedingungen wird häufig eine beständige turbulente Strömung zu erwarten sein. Die Linearisierung kann natürlich auch mit den früheren Berechnungsgleichungen erfolgen, wobei als Grenzwert $\text{Re} = 7000$ vorgeschlagen wird. Damit gelten in diesem Übergangsbereich die nachfolgenden Zusammenhänge:

$\text{Nu}_{K,\text{laminar}}(\text{Re} = 2300)$ nach Gl. (2.1) und $\text{Nu}_{K,\text{turbulent}}(\text{Re} = 7000)$ nach Gl. (2.2)

$$\gamma^* = \frac{\text{Re}_K - 2300}{7000 - 2300} \quad (2.9)$$

$$\text{Nu}_K = (1 - \gamma^*) \text{Nu}_{K,\text{laminar}}(\text{Re} = 2300) + \gamma^* \text{Nu}_{K,\text{turbulent}}(\text{Re} = 7000). \quad (2.10)$$

Im Bild 2.1 sind die unterschiedlichen Berechnungsansätze grafisch gegenübergestellt.

Anwendungsempfehlung: Die Abweichung zwischen den Gln. (2.8) und (2.10) ist unbedeutend gegenüber der ausgebildeten turbulenten Strömungsform nach Gl. (2.2). Somit kann $Nu = f(Re)$ beispielsweise im Übergangsbereich bis $Re \leq 7000$ durch die Gl. (2.10) und darüber durch Gl. (2.2) approximiert werden. Liegt laminare Strömung vor, ist der Einfachheit halber Gl. (2.1) zu bevorzugen, da der Unterschied zu Gl. (2.4) ohnehin klein ist.

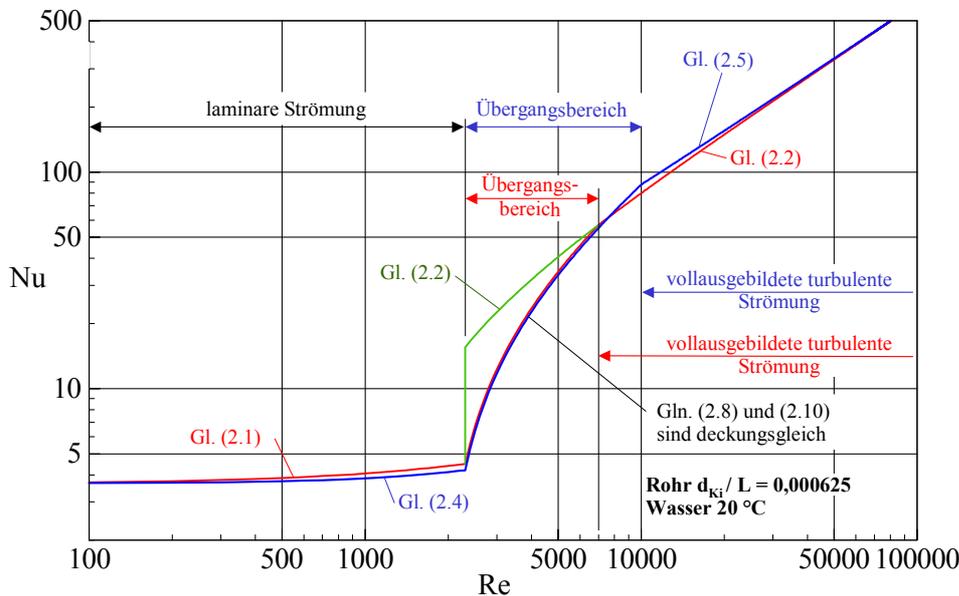


Bild 2.1 Gegenüberstellung der verschiedenen Nußeltgleichungen in Abhängigkeit von Re für einen ausgewählten Einsatzfall

• Ringspalt

Bei der Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten im Ringspalt werden nach [3] die im Bild 2.2 dargestellten Fälle unterschieden.

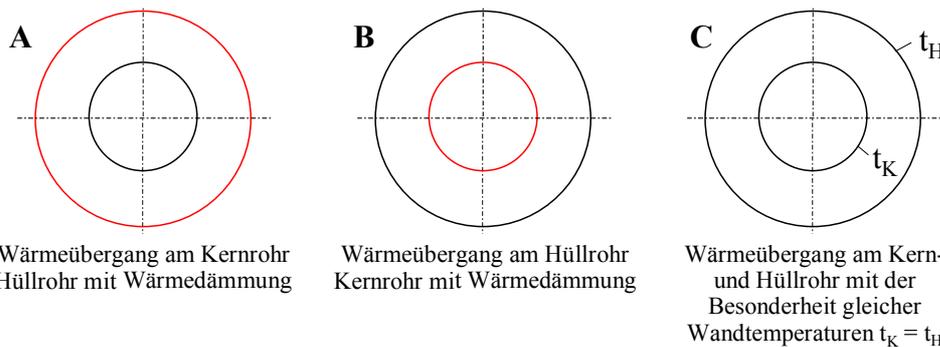


Bild 2.2 Übliche Berechnungsfälle nach [3] für den Wärmeübergang im konzentrischen Ringspalt

Die realen Wärmetransportbedingungen im konzentrischen Ringspalt der Sonde werden durch keine der algorithmierten Fälle korrekt beschrieben. Die Wirklichkeit der wärmetechnischen Verhältnisse ist zwischen den Fällen B und C zu erwarten. Es gelten die Größen:

d_{Hi}	m	Hüllrohrinnendurchmesser $d_{Hi} = d_{Ha} - 2 \delta_H$	d_{KD}	m	Kernrohrdämmdurchmesser $d_{KD} = d_{Ka} + 2 \delta_D$
d_{Ha}	m	Hüllrohraußendurchmesser	w_S	m/s	Geschwindigkeit im Spalt
d_{hy}	m	hydraulischer Durchmesser $d_{hy} = d_{Hi} - d_{KD}$	Re_S	–	REYNOLDSZahl im Ringspalt $Re_S = w_S d_{hy} / \nu$
Nu_S	–	NUSSELTzahl	α_S	W/(m ² K)	Wärmeübergangskoeffizient im Ringspalt $\alpha_S = Nu_S \lambda / d_{hy}$

Für die thermisch und hydraulisch **ausgebildete Laminarströmung** ($Re \leq 2300$) gelten nach [3] für die Fälle B und C:

$$Nu_B = 3,66 + 1,2 \left(\frac{d_{KD}}{d_{Hi}} \right)^{0,5}$$

$$Nu_C = 3,66 + \left(4 - \frac{0,102}{d_{KD}/d_{Hi} + 0,02} \right) \left(\frac{d_{KD}}{d_{Hi}} \right)^{0,04}$$

Für die weiteren Betrachtungen wird aus diesen Fällen der Mittelwert als repräsentativ für die Spaltströmung in der Koaxialsonde gebildet:

$$Nu_{S,End} = 3,66 + 0,6 \left(\frac{d_{KD}}{d_{Hi}} \right)^{0,5} + \left(2 - \frac{0,051}{d_{KD}/d_{Hi} + 0,02} \right) \left(\frac{d_{KD}}{d_{Hi}} \right)^{0,04} \quad (2.11)$$

Zur Berücksichtigung des thermischen Anlaufs gilt nach [3] – angewendet auf einen Zwischenwert der Fälle B und C – der Term

$$Nu_{S,Anl} = 1,615 \left(1 + 0,14 \left(\frac{d_{KD}}{d_{Hi}} \right)^{0,2} \right) \left(Re_S Pr \frac{d_{hy}}{L} \right)^{0,333} \quad (2.12)$$

Als Zusammenfassung schlägt STEPHAN vor:

$$Nu_S = \left(Nu_{S,End}^3 + Nu_{S,Anl}^3 \right)^{0,333} \quad (2.13)$$

Ein weiterer Term zur Berücksichtigung des hydrodynamischen Anlaufs (Strömungsaufbaus) am Eintritt in den Ringspalt bleibt unbeachtet, da diese Erhöhung auf die große Gesamtlänge L als unreal erachtet wird.

Für die **turbulente Strömung** ($Re > 2300$) werde wie bei der Rohrströmung zwischen der ausgebildeten Strömung und dem Übergangsbereich unterschieden.

▪ ausgebildete turbulente Strömung ($Re > 7000$)

Generell basiert die Berechnung auf der Rohrströmung in Analogie zu Gl. (2.2) mit den im Ringspalt geltenden Parametern. Die Nußeltzahl ist dann mit einem Faktor in Abhängigkeit des Berechnungsfalles B oder C (Bild 2.2) und des Durchmesserverhältnisses d_{KD}/d_{Hi} zu korrigieren. Aus den in [3] vorliegenden Angaben wurde näherungsweise der Korrekturfaktor zu $\{1 - 0,14 (d_{KD}/d_{Hi})^{0,7}\}$ bestimmt. Somit gilt zusammenfassend:

$$Nu_S = \left(1 - 0,14 \left(\frac{d_{KD}}{d_{Hi}} \right)^{0,7} \right) \frac{B (Re_S - 1000) Pr}{1 + 12,7 B^{0,5} (Pr^{0,667} - 1)} \left(1 + \left(\frac{d_{hy}}{L} \right)^{0,667} \right) \quad (2.14)$$

$$B = (5,15 \lg Re_S - 4,64)^{-2} \quad (2.15)$$

▪ Übergangsbereich ($2300 < Re_S \leq 7000$)

Es wird eine lineare Interpolation zwischen $Nu_{S,laminar}(Re = 2300)$ nach Gl. (2.13) und $Nu_{S,turbulent}(Re = 7000)$ nach Gl. (2.14) vorgenommen, wobei gelten:

$$\gamma^* = \frac{Re_S - 2300}{7000 - 2300} \quad (2.16)$$

$$Nu_S = (1 - \gamma^*) Nu_{S,laminar}(Re_S = 2300) + \gamma^* Nu_{S,turbulent}(Re_S = 7000) \quad (2.17)$$

Schließlich folgen die **Wärmeübergangskoeffizienten** im Kernrohr α_K und im Ringspalt α_S zu:

$$\alpha_K = \text{Nu}_K \lambda / d_{Ki} \quad \text{sowie} \quad \alpha_S = \text{Nu}_S \lambda / d_{hy}. \quad (2.18)$$

2.2 Wärmedurchgangs- und Teilwärmendurchgangskoeffizienten

Zwischen der Flüssigkeit im Kernrohr und im Ringspalt ist der **Wärmendurchgangskoeffizient** k_K bedeutungsvoll. Mit den geometrischen und wärmetechnischen Größen, die im Abschnitt 1 definiert wurden, gilt bezogen auf die Außenfläche der Kernrohrdämmung:

$$k_K = \left(\frac{d_{KD}}{\alpha_K d_{Ki}} + \frac{d_{KD}}{2 \lambda_K} \ln \frac{d_{Ka}}{d_{Ki}} + \frac{d_{KD}}{2 \lambda_D} \ln \frac{d_{KD}}{d_{Ka}} + \frac{1}{\alpha_S} \right)^{-1}. \quad (2.19)$$

Für den Wärmedurchgang vom Ringspalt an die Bohrlochwand ist der **Teilwärmendurchgangskoeffizient** κ_H zu bilden. Er wird auf den Durchmesser des Bohrloches $2 r_{BL}$ bezogen. Mit den Größen des Abschnittes 1 ergibt sich:

$$\kappa_H = \left(\frac{2 r_{BL}}{\alpha_S d_{Hi}} + \frac{r_{BL}}{\lambda_H} \ln \frac{d_{Ha}}{d_{Hi}} + \frac{r_{BL}}{\lambda_S(\text{Sch})} \ln \frac{2 r_{BL}}{d_{Ha}} \right)^{-1}. \quad (2.20)$$

2.3 Wärmetransport im Kernrohr und im Ringspalt

Die Rohrachsen sind in i-Richtung orientiert (siehe Bild 1.2). Die Rohrlänge beträgt L_{Sonde} , wobei mit der Abschnittshöhe Δh und der maximalen Abschnittszahl i_{Sonde} der Zusammenhang gilt:

$$L_{\text{Sonde}} = \Delta h i_{\text{Sonde}}. \quad (2.21)$$

Bei der Durchströmung des Kernrohres ($w_K > 0$) und des Ringspalt ($w_S > 0$) bleibt eine eventuelle Änderung der Wandtemperaturen der Koaxialsonde unbeachtet, d. h. ihre Wärmespeicherkapazität wird vernachlässigt und der gesamte Wärmestrom der Flüssigkeit zugeordnet. Eine weitere Vereinfachung stellt die Annahme dar, dass keine Wärmeleitung innerhalb der Flüssigkeit erfolgt. Diese ist gegenüber der relativ großen Mediengeschwindigkeit auch unbedeutend. Damit bewirkt die im Abschnitt i zugeführte Wärme eine eindeutige Änderung der Medientemperatur.

Die Medientemperaturen sind selbstverständlich in Abhängigkeit von der **Durchflussrichtung** zu ermitteln, weshalb zwischen Vor- und Rücklauf zu unterscheiden ist.

Die Lage der Rohrleitungsabschnitte i und die Zuordnung der Temperaturen folgen aus den Bildern 2.3 und 2.4. Die **zeitabhängige Eintrittstemperatur** $t_{\text{ein}}(\tau)$ und der **Massestrom** \dot{m} sind vorgegeben. Anstelle der Eintrittstemperatur kann auch ein **zeitabhängig geforderter Wärmeentzug** $\dot{Q}_{\text{Sonde}}(\tau)$ aus der Erdwärmesonde vorgegeben sein. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn eine Wärmepumpe diesen benötigt. Die abschnittswisen **Wärmeströme an die Rohrabschnitte** sind aus den Vor- und Rücklauftemperaturen sowie den Bohrlochwandtemperaturen unter Ansatz der Wärmeleitfähigkeit des Füllstoffes und der Wärmedurchgangs- bzw. Teilwärmendurchgangskoeffizienten der Rohre mit Hilfe der Gln. (2.19) und (2.20) bestimmbar.

Mit Kenntnis des Massestromes in den Rohren ergibt sich der Wärmekapazitätsstrom $\dot{C} = c \dot{m}$. Damit können abschnittsweise die Flüssigkeittemperaturen berechnet werden, wobei sich die Vor- und Rücklaufabschnitte gegenseitig beeinflussen und somit paarweise einzubeziehen sind.

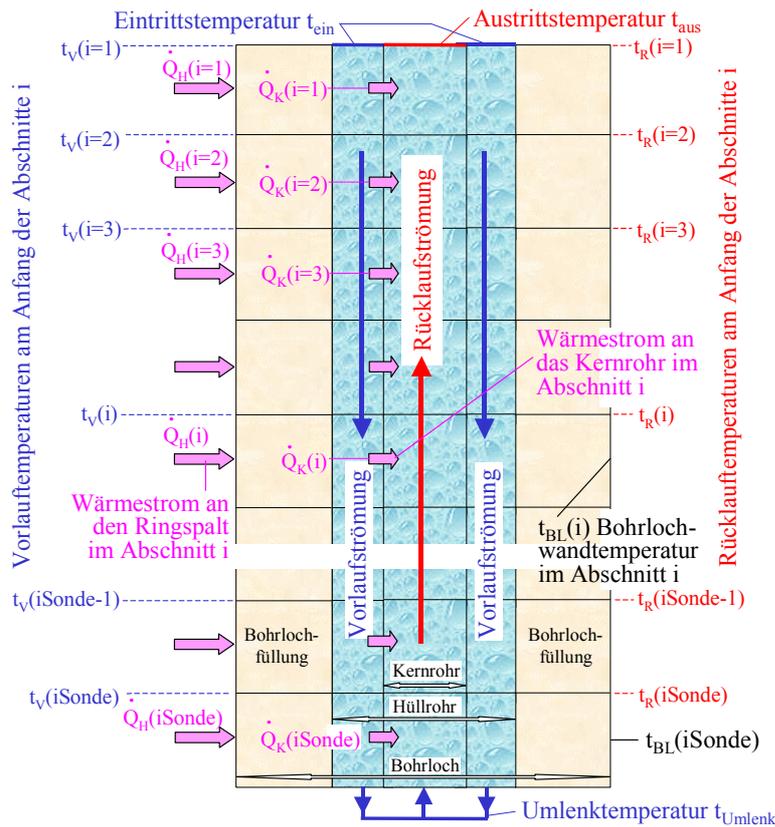


Bild 2.3 Bohrloch mit Koaxialsonde und Rücklauf im Kernrohr (Aufwärtsströmung) mit Kennzeichnung der Abschnitte i und den zugehörigen Flüssigkeitstemperaturen sowie Wärmeströmen

Die Wärmeströme gelten rotations-symmetrisch. Die Pfeilrichtung steht für positive Wärmeströme. Die Flüssigkeitstemperaturen werden dem jeweiligen Abschnittsbeginn zugeordnet. Die Bohrlochtemperaturen gelten näherungsweise in der jeweiligen Abschnittsmittle.

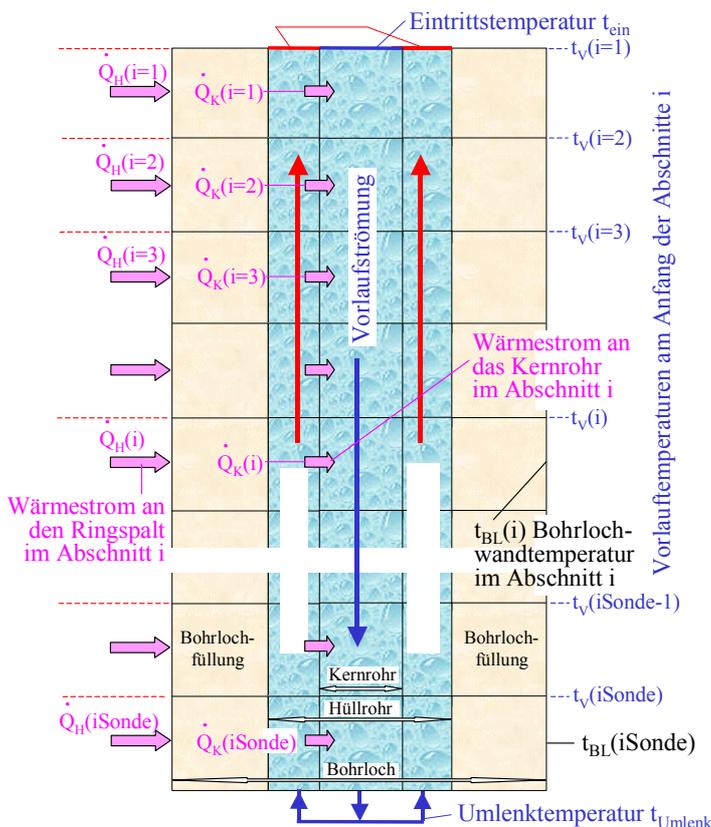


Bild 2.4 Bohrloch mit Koaxialsonde und Vorlauf im Kernrohr (Abwärtsströmung) mit Kennzeichnung der Abschnitte i und den zugehörigen Flüssigkeitstemperaturen sowie Wärmeströmen

Die Wärmeströme gelten rotations-symmetrisch. Die Pfeilrichtung gilt für positive Wärmeströme. Die Flüssigkeitstemperaturen werden dem jeweiligen Abschnittsbeginn zugeordnet. Die Bohrlochtemperaturen gelten näherungsweise in der jeweiligen Abschnittsmittle.

Würde man die Berechnung mit dem Abschnitt $i = 1$ beginnen, wäre die Eintrittstemperatur in den Vorlaufabschnitt bekannt, nicht aber die des Rücklaufabschnittes. Deshalb erfolgt die schrittweise Verfolgung der Medientemperaturen ausgehend von einer **angenommenen Umlenktemperatur t_{Umlenk}** , die am Sondenende anliegt. Von da aus folgen stets bezogen auf **einen** Rohrabschnitt i :

- Berechnung der Wärmeströme von der Bohrlochwand durch das Füllmaterial und die Hüllrohrwandung in den Ringspalt als $\dot{Q}_H(i)$ und vom Ringspalt durch eine eventuell vorhandene Kernrohrdämmung und die Kernrohrwandung in das Kernrohr als $\dot{Q}_K(i)$. Im Ringspalt verbleibt nur der Wärmestrom $\dot{Q}_H(i) - \dot{Q}_K(i)$. Je nach Strömungsrichtung handelt es sich dabei um die Wärmezufuhr an den Vor- oder Rücklauf. Analoges gilt für $\dot{Q}_K(i)$. Dies wird im Weiteren berücksichtigt. Die Berechnung beginnt mit dem Abschnitt iSonde. Es gelten gemäß Bild 2.3 und Bild 2.4:

Bohrlochwandtemperatur $t_{BL}(iSonde)$.

$$t_V(iSonde + 1) = t_{Umlenk} \quad (2.22)$$

$$t_R(iSonde + 1) = t_{Umlenk}. \quad (2.23)$$

- Berechnung der Wärmeströme für den Abschnitt i gemäß Bild 2.3

$$\dot{Q}_R(i) = k_K (t_V(i+1) - t_R(i+1)) \pi d_{KD} \Delta h \quad (2.24)$$

$$\dot{Q}_V(i) = \kappa_H (t_{BL}(i) - t_V(i+1)) \pi 2 r_{BL} \Delta h - \dot{Q}_R(i) \quad (2.25)$$

und nach Bild 2.4

$$\dot{Q}_V(i) = k_K (t_R(i+1) - t_V(i+1)) \pi d_{KD} \Delta h \quad (2.26)$$

$$\dot{Q}_R(i) = \kappa_H (t_{BL}(i) - t_R(i+1)) \pi 2 r_{BL} \Delta h - \dot{Q}_V(i). \quad (2.27)$$

- Berechnung der Medientemperaturen gemäß Bild 2.3 und Bild 2.4

$$t_V(i) = t_V(i+1) - \frac{\dot{Q}_V(i)}{\dot{C}} \quad (2.28)$$

$$t_R(i) = t_R(i+1) + \frac{\dot{Q}_R(i)}{\dot{C}}. \quad (2.29)$$

Die Berechnung endet bei $i = 1$, dem oberen Rand der Erdwärmesonde. Es gelten dann: $t_{ein} = t_V(1)$ und $t_{aus} = t_R(1)$, woraus auch die Sondenleistung berechenbar ist

$$\dot{Q}_{Sonde} = \dot{C} (t_{aus} - t_{ein}). \quad (2.30)$$

Je nachdem, ob die Flüssigkeitseintrittstemperatur t_{ein} oder die Leistung der Erdwärmesonde \dot{Q}_{Sonde} vorgegeben ist, muss eine Anpassung durch wiederholende Berechnungen des vorgestellten Ablaufs mit gezielt veränderter Temperaturannahme t_{Umlenk} erfolgen. Details zur Anpassungsstrategie sind dem Programmlisting zu entnehmen.

3 Komplexmodell zur Simulation von Koaxialerdwärmesonden

Als visuelle Grundlage dient Bild 1.2. Die meisten Abschnitte und Aussagen können vom Hauptbericht [1] übernommen werden. Sie finden der Vollständigkeit Erwähnung, Ergänzungen werden komplett wiedergegeben.

- Die **Randbedingungen** sind im Hauptbericht [1], Abschnitt 6.1 (S. 38 ff.) fixiert und gelten weiterhin uneingeschränkt.
- Für die **Verknüpfung der Einzelalgorithmen** – instationäre Simulation des Erdreiches und stationäre Simulation im Bohrloch – zum Gesamtsimulationsmodell ist wiederum der Hauptbericht [1], Abschnitt 6.2 (S. 41 ff.) voll gültig. Die betrifft grundsätzlich auch die Aussagen zur iterativen Einpassung der Sondenvorgaben – Eintrittstemperatur oder Sondenleistung. Es können lediglich zwei Varianten des Durchflusses gemäß des jetzigen Abschnittes 2.3 betrachtet werden. Die Auswahl wird durch eine entsprechende Eingabe getroffen. Für den Zusammenhang zwischen Bohrlochwandtemperatur $t_{BL,i}$ und der Erdreichtemperatur in der Mitte des ersten Kreisrings $t_{i,k=1}$ ändert sich jedoch die wärmetechnische Beziehung (Hauptbericht [1]: Gl. (6.4)) entsprechend der jetzigen Geometrie zu:

$$t_{BL,i} = t_{i,k=1} - \frac{\ln \frac{r_{k=1}}{r_{BL,i}}}{2 \pi \lambda_{Feld_{i,k}} \Delta h} (\dot{Q}_V(i) + \dot{Q}_R(i)). \quad (3.1)$$

Diese Temperatur gilt dann für den folgenden Zeitschritt, sodass man mit der Anpassung grundsätzlich einen Zeitschritt nacheilt.

Um **numerische Schwingungen** zu vermeiden, wird zur **Dämpfung** nur die Hälfte der Änderung weitergegeben. Damit verzögert sich die genaue Anpassung der Bohrlochtemperatur um weitere Zeitschritte. Bei durchgehendem Sondenbetrieb ist diese Einschwingphase für den gesamten Simulationszeitraum bedeutungslos. Problematisch ist das Vorgehen aber bei **intermittierendem Sondenbetrieb**, da z. B. bei einer Zeitschrittweite von 10 Minuten und einem Sondenbetriebsrhythmus von einer Stunde nur sechs Anpassungen möglich sind. Entscheidend ist dabei stets die Wahl der Bohrlochwandtemperatur beim Sondenbetriebsstart. Die Auswertung zahlreicher Proberechnungen mit konstanter Sondenleistung während der Betriebsphasen – wie sie annähernd bei einer taktenden Wärmepumpe gefordert wird – ergab, dass es meistens vorteilhaft ist, wenn man die letzte verwendete Bohrlochtemperatur beim Start der neuen Betriebsphase unverändert wiederverwendet. Bei langen Betriebspausen – z. B. einer Sommerpause – können die nachfolgenden ersten Betriebsstunden jedoch zu einem fehlerbehafteten Temperaturfeld in SONDENNAHE führen. Generell bietet die Schnittstelle $t_{BL,i}$ noch Möglichkeiten für verbesserte Approximationen.

Die **Wärmebilanzen an den Rändern** des Simulationsgebietes und die **Speicherwärme** im Simulationsgebiet werden wie im Hauptbericht erfasst, wobei lediglich der Wärmestrom an der Bohrlochwand durch $\dot{Q}_H(i) = \dot{Q}_V(i) + \dot{Q}_R(i)$ definiert ist.

- Der **Programmablaufplan** entspricht exakt dem des Hauptberichtes [1], Abschnitt 6.3 (S. 43 ff.).
- Auch für das **Komplexprogramm zur Simulation der Koaxialwärmesonden** bleibt grundsätzlich Hauptbericht [1], Abschnitt 6.4 (S. 45 ff.) gültig. Änderungen treten lediglich in der Hauptoberfläche (Maske 1) auf, die durch die Geometrie der Koaxialsonde bewirkt werden (Bild 3.1).

Um langes Suchen zu vermeiden wird die Eingabe komplett beschrieben.

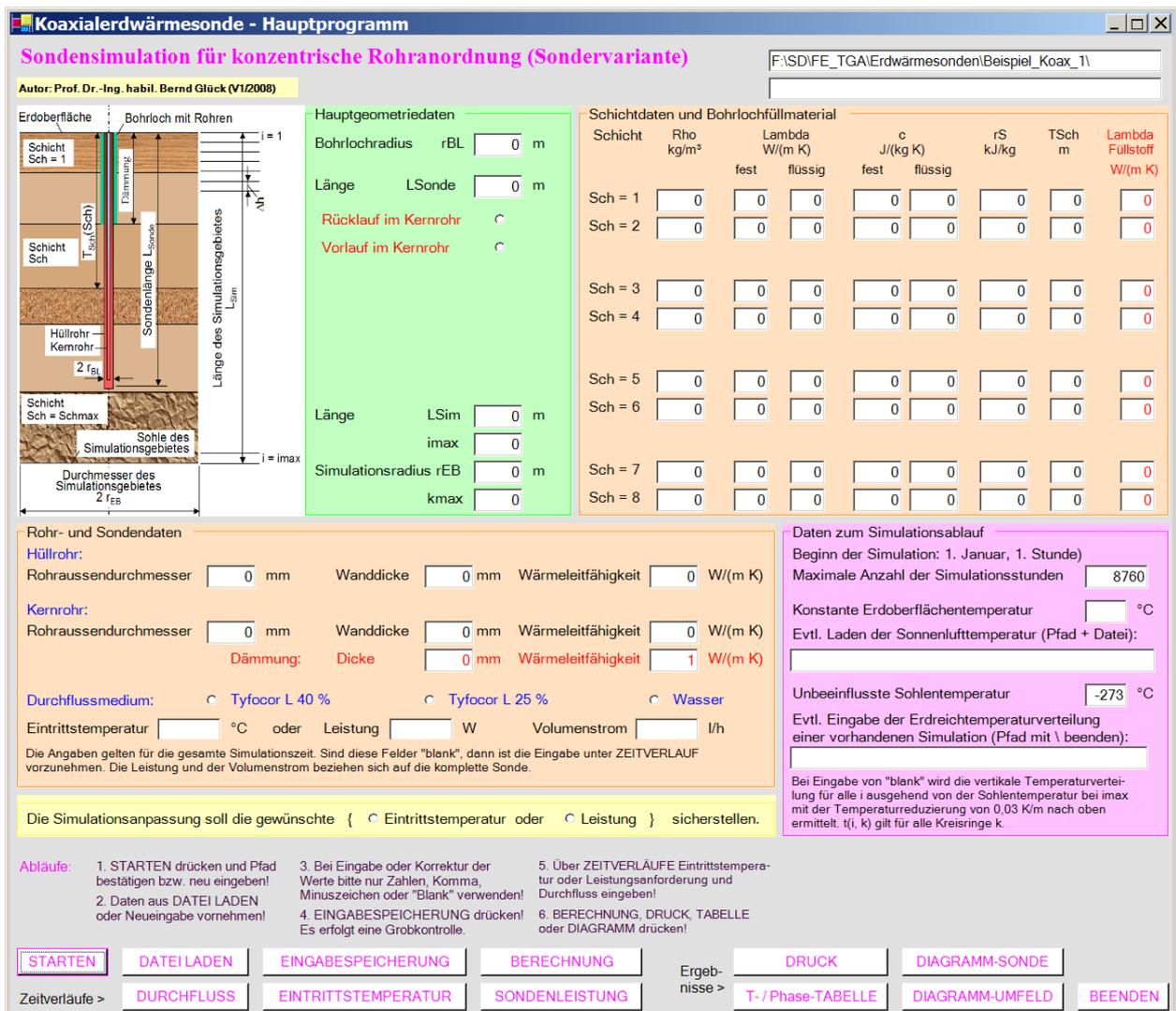


Bild 3.1 Hauptoberfläche (Maske 1) des Rechenprogramms "Koaxialerdwärmesonde" mit der Startfüllung von Daten, die durch das Laden einer bereits gefüllten Datei oder durch Einzeleingaben bzw. Korrekturen überschreibbar ist

• Hauptprogrammeingabe und Steuerung des Programmablaufs (Bild 3.1)

Die nachfolgenden Bezeichnungen entsprechen den programminternen Namen. Sie dürften aber leicht mit den Maskenbezeichnungen erklärlich sein.

Hauptgeometriedaten (siehe Bild 1.2 oder Bildschirmmaske 3.1):		
rBL	m	Bohrlochradius
Rücklauf_Kernrohr	-	Durchströmrichtung (im Normalfall wird der Rücklauf im Kernrohr geführt): <ul style="list-style-type: none"> • Rücklauf im Kernrohr (programmintern: Rücklauf_Kernrohr = 1) • Vorlauf im Kernrohr (programmintern: Rücklauf_Kernrohr = 0)
rEB	m	Simulationsradius
L_Sonde	m	Sondenlänge (Tiefe bis zum Fußpunkt der Koaxialsonde)
L_Sim	m	Tiefe bis zur Sohle des Simulationsgebietes (simulierter Erdreichzylinder)
imax	-	Anzahl der vertikalen Unterteilungen des Simulationsgebietes

kmax	-	Anzahl der horizontalen Unterteilungen des Simulationsgebietes (Anzahl der konzentrischen Kreistränge)
Schichtdaten und Bohrlochfüllmaterial (siehe Bild 1.2 oder Bildschirmmaske 3.1):		
Rho(Sch)	kg/m ³	Dichte des Erdstoffes in der Schicht Sch (Es wird kein Unterschied zwischen gefrorenem und ungefrorenem Boden getroffen.)
lam(Sch)	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit des gefrorenen Bodens
lamfl(Sch)	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit des ungefrorenen Bodens (fl für flüssiges Wasser)
c(Sch)	J/(kg K)	Spezifische Wärmekapazität des gefrorenen Bodens
cfl(Sch)	J/(kg K)	Spezifische Wärmekapazität des ungefrorenen Bodens (fl für flüssiges Wasser)
rS(Sch)	kJ/kg	Phasenwandelwärme des homogenen Erde-Wasser-Gemischs (Schmelzenthalpie des anteiligen Wassers wird vereinfacht auf die Gemischmasse bezogen)
TSch(Sch)	m	Tiefe der Schichtunterseite von der Erdoberfläche
lamS(Sch)	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit des Füllstoffs im Bohrloch (Zuordnung kann schichtenweise erfolgen; zur genauen Höhenanpassung kann nötigenfalls eine reale Erdschicht geteilt werden)
Rohr- und Mediendaten (siehe Bild 1.1)		
dHa	mm	Außendurchmesser des Hüllrohres
delH	mm	Rohrwanddicke des Hüllrohres
lamH	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit der Hüllrohrwand
dKa	mm	Außendurchmesser des Kernrohres
delK	mm	Rohrwanddicke des Kernrohres
lamK	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit der Kernrohrwand
delD	mm	Dämmdicke des Kernrohres
lamD	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit der Dämmung des Kernrohres (Wenn delD = 0, dann lamD = 1 setzen!)
Fluessigkeit	-	Durchflussmedium in den Sondenrohren: <ul style="list-style-type: none"> • wässrige Lösung mit 40 % Tyfocor L (programmintern: Fluessigkeit = 4) • wässrige Lösung mit 25 % Tyfocor L (programmintern: Fluessigkeit = 5) • Wasser (programmintern: Fluessigkeit = 1)
Tfix	°C	Konstante Flüssigkeitseintrittstemperatur während der gesamten Simulationszeit Falls Qfix gilt oder die Eintrittstemperatur zeitabhängig ist, "blank" eingeben (bitte kein Leerzeichen). {Für Zeitfolge Maske 2 verwenden!}
Qfix	W	Geforderte, konstante Sondenleistung während der gesamten Simulationszeit Falls Tfix gilt oder die Sondenleistung zeitabhängig ist, "blank" eingeben (bitte kein Leerzeichen). {Für Zeitfolge Maske 3 verwenden!}
Vfix	l/h	Konstanter Durchfluss durch die Sonde während der gesamten Simulationszeit (Vfix ≥ 0); Vfix > 0 sollte eine Geschwindigkeit im Kernrohr und Ringspalt von 0,2 ... 1,5 m/s garantieren. Wenn Vfix > 0, muss auch Tfix oder Qfix einen sinnvollen Wert besitzen! Vfix = 0 dient zur Erdreichsimulation ohne Sondenbetrieb. Falls sich der Durchfluss in seiner Größe zeitlich ändert oder Unterbrechungen aufweist, "blank" eingeben (bitte kein Leerzeichen). {Für Zeitfolge Maske 4 verwenden!}

Anpass	-	Anpassung der Simulation soll gewährleisten: <ul style="list-style-type: none"> • Flüssigkeitseintrittstemperatur (programmintern: Anpass = 1) • Sondenleistung (programmintern: Anpass = 2)
Daten zum Simulationsablauf		
BSmax	h	Anzahl der gewünschten Simulationsstunden
tOF	°C	Konstante Erdoberflächentemperatur Bei einer Einhausung über dem Simulationsgebiet gilt die Raumtemperatur. Bei freier Fläche über dem Simulationsgebiet ist die zeitlich veränderliche Sonnenlufttemperatur maßgebend, die als Datei benannt werden muss. Für tOF ist "blank" einzugeben (bitte kein Leerzeichen).
Datei für Sonnenlufttemperatur	-	Wenn tOF = "blank", dann Pfad und Datei für Sonnenlufttemperatur benennen. Die Sonnenlufttemperatur $t_a(\tau)$ sollte nach [1], Gl. (6.1) gebildet werden, wobei der Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_a = 15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ zu verwenden ist. Weiterhin wird der Absorptionskoeffizient $a = 0,3$ empfohlen. Die Lufttemperatur und die Globalstrahlung ist dem für den Standort gültigen Testreferenzjahr nach DIN 4710 zu entnehmen. Die Datei muss 8760 Stundenwerte für t_a vom 1. Januar bis 31. Dezember enthalten und von Visual Basic durch einen Input-Befehl lesbar sein.
tErdsohle	°C	Konstante Erdsohlentemperatur Die Temperatur muss mit der Tiefe der Sohle des Simulationsgebietes zusammenpassen. Es darf kein Oberflächeneinfluss mehr auftreten.
Erdreich-temperatur- und Phasenfeld $t(i, k)$ Phase(i, k)	-	Bei Beginn einer Simulation wird normalerweise ein Temperaturfeld $t(i, k)$ allein aus tErdsohle und einem Temperaturgradienten von 0,03 K/m kreiert. Soll eine bereits erfolgte Simulation mit gleichen oder veränderten Randbedingungen fortgesetzt werden, dann kann das zuletzt ermittelte Temperaturfeld $t(i, k)$, das stets automatisch unter Speicherfeld.dat gespeichert wird, wiederum eingelesen werden und als Starttemperaturverteilung dienen. Der Pfad ist anzugeben und mit \ zu beenden. Da die Datei Speicherfeld.dat vorher vom Programm erzeugt wurde, ist sie auch komplikationslos einlesbar.

- **Eingabe zeitlich veränderlicher Flüssigkeitseintrittstemperaturen (Bild 3.2)**

Die Maske 2 ist nur auszufüllen, wenn ein zeitabhängiger Verlauf der Flüssigkeitstemperatur berücksichtigt werden soll (T_{fix} in Maske 1 ist "blank") und außerdem die Anpassung der Simulation an die vorgegebene Eintrittstemperatur gebunden ist (Anpass = 1).

Flüssigkeitseintrittstemperatur		
FT(Monat, Tagesstunde)	°C	Für jeden Monat wird ein repräsentativer Tag mit Stundenwerten gefüllt. Diese Werte gelten während der gesamten Stunde (Intervall = 1 bis Intervall _{max} nach [1], Bild 6.3; es erfolgt keine Interpolation). Weiterhin gilt der Mustertag für den gesamten Monat.

Bild 3.2 Eingabeoberfläche für die Flüssigkeitseintrittstemperatur (Maske 2)

Das Ausfüllen der Oberfläche kann in eine leere Maske erfolgen, oder aber vorhandene Daten des Beispiels können überschrieben werden. Für die Stunden, in denen der Sondendurchfluss erfolgt, muss bei Anpass = 1 auch die Flüssigkeitseintrittstemperatur bekannt sein. Stundeneingaben während des Sondenstillstandes werden ignoriert, der besseren Übersicht wegen, sollten die Felder "blank" sein. Die Datenspeicherung erfolgt in der Datei **ZVERLAUFT.dat**.

- **Eingabe zeitlich veränderlicher Sondenleistungen (Bild 3.3)**

Die Maske 3 ist nur auszufüllen, wenn ein zeitabhängiger Verlauf der Sondenleistung zu beachten ist (Qfix in Maske 1 ist "blank") und außerdem die Anpassung der Simulation an die vorgegebene Sondenleistung gebunden ist (Anpass = 2).

Sondenleistung		
FQ(Monat, Tagesstunde)	W	Für jeden Monat wird ein repräsentativer Tag mit Stundenwerten gefüllt. Diese Werte gelten während der gesamten Stunde (Intervall = 1 bis Intervall _{max} nach [1], Bild 6.3; es erfolgt keine Interpolation). Weiterhin gilt der Mustertag für den gesamten Monat.

Bild 3.3 Eingabeoberfläche für die geforderte Sondenleistung (Maske 3)

Das Ausfüllen der Oberfläche kann in eine leere Maske erfolgen, oder aber vorhandene Daten des Beispiels können überschrieben werden. Für die Stunden, in denen der Sondendurchfluss erfolgt, muss bei Anpass = 2 die Sondenleistung bekannt sein. Stundeneingaben während des Sondenstillstandes werden ignoriert, der besseren Übersicht wegen, sollten die Felder "blank" sein. Die Datenspeicherung erfolgt in der Datei **ZVERLAUFQ.dat**.

- **Eingabe zeitlich veränderlichen Durchflusses (Bild 3.4)**

Die Maske 4 ist nur auszufüllen, wenn ein zeitabhängiger Verlauf des Sondendurchflusses bzw. Stillstandszeiten auftreten (Vfix in Maske 1 ist "blank").

Sondendurchfluss		
FV(Monat, Tagesstunde)	l/h	Für jeden Monat wird ein repräsentativer Tag mit Stundenwerten gefüllt. Diese Werte gelten während der gesamten Stunde (Intervall = 1 bis Intervall _{max} nach [1], Bild 6.3; es erfolgt keine Interpolation). Weiterhin gilt der Mustertag für den gesamten Monat. Bei vorhandenem Sondendurchfluss sollte eine Geschwindigkeit im Kernrohr und Ringspalt von 0,2 ... 1,5 m/s garantiert werden.

Das Ausfüllen der Oberfläche kann in eine leere Maske erfolgen, oder aber vorhandene Daten des

Beispiels können überschrieben werden. Die mit einem Wert belegten Stunden kennzeichnen den Sondenbetrieb. Sind Felder "blank", so erfolgt kein Sondendurchfluss. Die Simulation beschränkt sich dann nur auf den instationären Wärmetransport im Erdreich. Die Datenspeicherung erfolgt in der Datei **ZVERLAUFV.dat**.

Wäre $V_{fix} \neq 0$, so würde sich die Sonde im Dauerbetrieb befinden.

Bild 3.4 Eingabeoberfläche für den Sondendurchfluss (Maske 4)

- **Ausgaben (Druck- und Diagrammarten)**

Die Zusammenstellungen der Eingabewerte sowie der Ergebnisse werden als MS WORD-Dateien angezeigt. Sie können individuell geändert, gespeichert und ausgedruckt werden. Die Ausgaben sind selbsterklärend und anhand der Testbeispiele ersichtlich. Zusätzlich ist eine umfangreiche Grafikausgabe möglich. Angaben finden sich im Hauptbericht [1], Abschnitt 6.4 (S. 52 ff.)

4 Programminstallation und Hinweise zu Programmänderungen

Das Rechenprogramm "**KOAXIALERDWÄRMESONDE**" steht mit einem Beispiel zum kostenlosen Download bereit. Aus dem Programmlisting sind alle Module – gut strukturiert und mit zahlreichen Kommentaren versehen – ersichtlich, sodass eine Einarbeitung rasch möglich ist. Die Programmierung erfolgte in sehr einfacher Form, Anregungen zu eigenen Verbesserungen sind vielfach offensichtlich.

Erfolgt die Programmabarbeitung in der Programmierumgebung **MICROSOFT VISUALBASIC.NET STANDARD**, sind mögliche Fehlbedienungen und/oder noch vorhandene Programmfehler durch Nutzung des Debuggers relativ leicht auffindbar.

Auf jegliche Spezialsoftware, die einige wesentliche Programmiererleichterungen – beispielsweise bei der Erzeugung von Ausgabetafeln – bewirkt hätte, wurde bewusst verzichtet. Es werden lediglich Verbindungen zu MICROSOFT WORD hergestellt.

- **Grundlagen für die Programmanwendung**

Voraussetzung für die Programmnutzung sind die Betriebssysteme:

- Microsoft Windows 2000 Professional mit Service Pack 4 oder
- Microsoft Windows XP mit Service Pack 1.

Für beide Betriebssysteme werden zur Abarbeitung der vorliegenden Programme zusätzlich maximal zwei Dateien benötigt, die man unter <http://www.microsoft.com/germany/default.aspx> kostenlos downloaden kann.

1. Datei: **Microsoft® .NET Framework Version 1.1 Redistributable Package**

Quickinfo	Dateiname:	dotnetfx.exe
	Downloadgröße:	23709 KB
	Veröffentlichungsdatum:	22.05.2003
	Version:	1.1 bzw. 1.1.4322
Die Datei findet man z. B. unter dem Suchbegriff: Net Framework		

2. Datei: **Sprachpaket Deutsch für Microsoft® .NET Framework Version 1.1**

Quickinfo	Dateiname:	langpack.exe
	Downloadgröße:	1408 KB
	Veröffentlichungsdatum:	21.05.2003
	Version:	1.1
Die Datei findet man z. B. unter dem Suchbegriff: Net Sprachpaket		
Das Sprachpaket enthält deutsche Texte, z. B. Fehlermeldungen.		

- **Laden und Start des Rechenprogramms**

Die Datei steht in dem übergebenen Ordner "Koaxialsonde". Sie ist in ein eigenes Verzeichnis auf die Festplatte zu kopieren. Im genannten Ordner sind das Rechenprogramm und ein Simulationsbeispiel enthalten. Die entsprechenden Unterordner tragen die Namen:

- **KOAXIALERDWÄRMESONDE** (Simulationsmodell für konzentrische Erdwärmesonden)
- **Beispiel_Koax_1** (Simulationsbeispiel für eine Erdwärmesonde gemäß Seite 19 ff., Rechenzeit

ca. 6 min) {Im Ordner "Beispiel_Koax_1" steht auch die Datei für die Sonnenlufttemperatur **tSL.dat**. Sie erscheint in der Hauptbedienoberfläche z. B. als

F:\Koaxialsonde\Beispiel_Koax_1\tSL.dat.

Der blaue Teil des Pfades ist den realen Gegebenheiten des benutzten Computers anzupassen.}

Die Programmabarbeitung kann generell auf zweierlei Weise erfolgen.

I. Beispielhafte Abarbeitung ohne Entwicklungsumgebung:

Ordner "**KOAXIALERDWÄRMESONDE**" öffnen ⇒ Datei "bin" öffnen
⇒ "**Programm.exe**" Doppelklick

II. Beispielhafte Abarbeitung mit Entwicklungsumgebung:

Visual Basic.NET starten ⇒ Menüleiste "**Datei**" ⇒ "**Öffnen**" ⇒ "**Projekt**" Einfachklick
⇒ Ordner "**KOAXIALERDWÄRMESONDE**" auswählen ⇒ "**Programm.sin**" Doppelklick
⇒ Menüleiste "**Debuggen**" Einfachklick ⇒ "**Starten**" Einfachklick

Zu Beginn wird in einem Fenster ([1], Bild 6.5) ein Pfad für das zu bearbeitende Beispiel angegeben. Dieser Vorschlag ist in der Regel mit dem selbst gewählten Pfad zu überschreiben!

- **Bearbeitung des Programmlistings**

Im Ordner "**KOAXIALERDWÄRMESONDE**" sind alle Dateien mit den Quellcodes (Formen) enthalten. Die Auswahl der Formen kann mit Hilfe des Projektmappen-Explorers vorgenommen werden.

- Gliederung des Rechenprogramms

Form1.vb	Hauptprogramm mit Haupteingabe, Ablaufsteuerung, Ergebnisdruck und Steuerung weiterer Druck- und Grafikausgaben
Form2.vb	Eingabe des Zeitverlaufes "Flüssigkeitseintrittstemperatur" mit Kontrolldruck
Form3.vb	Anzeige zum Simulationsstand in Stunden während der Berechnung
Form4.vb	Eingabe des Zeitverlaufes "Sondenleistung" mit Kontrolldruck
Form5.vb	Eingabe des Zeitverlaufes "Flüssigkeitsdurchfluss" mit Kontrolldruck
Form6.vb	Druck des Temperatur- und Phasenfeldes
Form7.vb	Grafik der Betriebsverläufe längs der Sonde
Form8.vb	Grafik der Betriebsverläufe der Sonde und des Sondenumfeldes über die Simulationszeit

5 Beispiele

Bezüglich der Erdreichmodellierung, der thermischen Randbedingungen und der wärmetechnischen Sondenbelastungen gelten die in [1], Abschnitt 8.1 (S. 59 ff.) getroffenen Festlegungen.

5.1 Alleinige Heizwärmenutzung beim Sondenbetrieb (Beispiel_Koax_1)

Das Beispiel wird anhand der folgenden Bilder, Bildunterschriften und Zwischentexten erläutert.

Koaxialerdwärmesonde - Hauptprogramm

Sondensimulation für konzentrische Rohranordnung (Sondervariante)

Autor: Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück (V1/2008)

Erdoberfläche Bohrloch mit Rohren

Schicht Sch = 1

Schicht Sch

Hüllrohr Kernrohr

Schicht Sch = Schmax

Schle des Simulationsgebietes

Durchmesser des Simulationsgebietes

$i = 1$

$i = imax$

r_{BL}

L_{Sonde}

L_{Sim}

r_{EB}

k_{max}

Hauptgeometriedaten

Bohrlochradius r_{BL} 0,075 m

Länge L_{Sonde} 100 m

Rücklauf im Kernrohr

Vorlauf im Kernrohr

Länge L_{Sim} 120 m

$imax$ 120

Simulationsradius r_{EB} 10 m

k_{max} 10

Schichtdaten und Bohrlochfüllmaterial

Schicht	Rho kg/m^3	Lambda $W/(m K)$		c $J/(kg K)$		rS kJ/kg	TSch m	Lambda Füllstoff $W/(m K)$
		fest	flüssig	fest	flüssig			
Sch = 1	2400	2,6	2,6	900	900	0	120	1
Sch = 2	0	0	0	0	0	0	0	0
Sch = 3	0	0	0	0	0	0	0	0
Sch = 4	0	0	0	0	0	0	0	0
Sch = 5	0	0	0	0	0	0	0	0
Sch = 6	0	0	0	0	0	0	0	0
Sch = 7	0	0	0	0	0	0	0	0
Sch = 8	0	0	0	0	0	0	0	0

Rohr- und Sondendaten

Hüllrohr:

Rohraussendurchmesser 75 mm Wanddicke 6,8 mm Wärmeleitfähigkeit 0,35 $W/(m K)$

Kernrohr:

Rohraussendurchmesser 50 mm Wanddicke 4,6 mm Wärmeleitfähigkeit 0,35 $W/(m K)$

Dämmung: Dicke 0 mm Wärmeleitfähigkeit 1 $W/(m K)$

Durchflussmedium: Tyfocor L 40 % Tyfocor L 25 % Wasser

Eintrittstemperatur $^{\circ}C$ oder Leistung W Volumenstrom l/h

Die Angaben gelten für die gesamte Simulationszeit. Sind diese Felder "blank", dann ist die Eingabe unter ZEITVERLAUF vorzunehmen. Die Leistung und der Volumenstrom beziehen sich auf die komplette Sonde.

Die Simulationsanpassung soll die gewünschte { Eintrittstemperatur oder Leistung } sicherstellen.

Daten zum Simulationsablauf

Beginn der Simulation: 1. Januar, 1. Stunde

Maximale Anzahl der Simulationsstunden 87600

Konstante Erdoberflächentemperatur $^{\circ}C$

Evtl. Laden der Sonnenlufttemperatur (Pfad + Datei):

F:\SD\IFE_TGA\Erdwärmesonden\Beispiel_Koax_1\SL

Unbeeinflusste Sohlentemperatur 12 $^{\circ}C$

Evtl. Eingabe der Erdreichtemperaturverteilung einer vorhandenen Simulation (Pfad mit \ beenden):

Bei Eingabe von "blank" wird die vertikale Temperaturverteilung für alle i ausgehend von der Sohlentemperatur bei $imax$ mit der Temperaturreduzierung von 0,03 K/m nach oben ermittelt. $t(i, k)$ gilt für alle Kreisringe k .

Abläufe:

1. STARTEN drücken und Pfad bestätigen bzw. neu eingeben!
2. Daten aus DATEI LADEN oder Neueingabe vornehmen!
3. Bei Eingabe oder Korrektur der Werte bitte nur Zahlen, Komma, Minuszeichen oder "Blank" verwenden!
4. EINGABESPEICHERUNG drücken! Es erfolgt eine Grobkontrolle.
5. Über ZEITVERLAUFE Eintrittstemperatur oder Leistungsanforderung und Durchfluss eingeben!
6. BERECHNUNG, DRUCK, TABELLE oder DIAGRAMM drücken!

STARTEN DATEI LADEN EINGABESPEICHERUNG BERECHNUNG DRUCK DIAGRAMM-SONDE

Zeitverläufe > DURCHFLUSS EINTRITTSTEMPERATUR SONDENLEISTUNG Ergebnisse > T- / Phase-TABELLE DIAGRAMM-UMFELD BEENDEN

Bild 5.1 Hauptoberfläche (Maske 1) mit den Eingabedaten für Beispiel_Koax_1

Die Eingabedaten sind im Abschnitt 3 erläutert, Aussagen zu speziellen hier angenommenen Werten finden sich in [1], Abschnitt 8.1 (S. 59 ff.). Der Ordner "Beispiel_Koax_1" ist vor dem Programmstart anzulegen. In diesem Fall wurde die Datei mit den Daten der stündlichen Sonnenlufttemperatur "tSL.dat" in den Ordner "Beispiel_Koax_1" kopiert. Sie könnte aber auch an anderer Stelle stehen, wobei sie entsprechend zu benennen wäre.

- Die Sonnenlufttemperatur ist aus der Außenlufttemperatur und der Globalstrahlung für Kassel nach TRY 07 ermittelt.
- Die Simulationszeit erstreckt sich über 10 Jahre. Die Rechenzeit beträgt mit einem üblichen PC etwa 6 Minuten.
- Die Betriebszeiten der Sonde entsprechen [1], Tabelle 8.2 (S. 61). Sie finden sich in den Masken der Bilder 5.2 und 5.3 wieder.

Ergebnisdrucke und Grafiken des Beispiels

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\ERDWÄRMESONDEN\BEISPIEL_KOAX_1\

Rohr- und Bohrlochdaten:

rBL	dHa	delH	lamH	dKa	delK	lamK	delD	lamD
mm	mm	mm	W/(mK)	mm	mm	W/(mK)	mm	W/(mK)
75	75	6,8	0,35	50	4,6	0,35	0,0	1,00

Erdschichten:

Schicht	Dichte kg/m ³	Wärmeleitfähigkeit		Wärmekapazität		Schmelz- wärme kJ/(kg)	Schicht- tiefe m	Wärmeleitfähigkeit Bohrlochfüllung W/(mK)
		fest	flüssig	fest	flüssig			
		W/(mK)		J/(kgK)				
1	2400	2,60	2,60	900	900	0,0	120,0	1,00
2	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0	0,00
3	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0	0,00
4	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0	0,00
5	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0	0,00
6	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0	0,00
7	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0	0,00
8	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0	0,00

Sondendaten:

Sondenlänge	Abschnitte	Flüssigkeit	Eintritts- temperatur °C	Sonden- leistung W	Durchfluss l/h	Im Kernrohr fließt:
m						
100,0	100	Tyfocor L25		Z-funk.	Z-funk.	Rücklauf

Es erfolgt die Anpassung an die vorgegebene Sondenleistung!

Zeitschrittweite: 600 s

Daten zum Simulationsgebiet und zur Simulationszeit:

Tiefe	Radius	imax	kmax	Oberflächentemperatur °C	Erdsohlentemperatur °C	Simulationszeit h
m	m					
120,0	10,0	120	10		12,0	87600

Datei Sonnenlufttemperatur: F:\SD\FE_TGA\Erdwärmesonden\Beispiel_Koax_1\tSL.dat

Datei Erdreichtemperaturverteilung früherer Simulation:

Werte des letzten Simulationszyklus bei Sondendurchfluss

Letztes Intervall der Simulationsstunde: 87599

i	tV(i) °C	tR(i) °C	tBL(i) °C	QV(i) W	QR(i) W
1	-7,3	-5,7	-0,2	38,3	-6,7
11	-7,1	-5,7	2,0	46,2	-6,0
21	-6,9	-5,6	1,1	40,7	-5,2
31	-6,7	-5,6	0,9	38,2	-4,6
41	-6,5	-5,6	0,8	36,6	-3,9
51	-6,3	-5,6	0,9	35,6	-3,3
61	-6,2	-5,6	1,1	35,1	-2,6
71	-6,0	-5,6	1,4	35,0	-2,0
81	-5,9	-5,6	1,8	35,2	-1,3
91	-5,7	-5,5	2,3	36,1	-0,7

Wärmeaufnahme			Temperaturspitzung K
Vorlauf W	Rücklauf W	Gesamt W	
3803	-332	3471	1,6

Monatswerte

Simulations- jahr	Monat	Sonnenwärme kWh	Erdwärme kWh	Sondenarbeit kWh
1	1	-2735	18	1294
1	2	-439	16	1071
1	3	363	18	977

Simulations- jahr	Monat	Sonnenwärme kWh	Erdwärme kWh	Sondenarbeit kWh		
1	4	1446	18	634		
1	5	3299	18	218		
1	6	2411	18	0		
1	7	1607	18	0		
1	8	1411	18	0		
1	9	-931	18	105		
1	10	-1144	18	539		
1	11	-2206	18	939		
1	12	-1947	18	1186		
	Jahressummen:	1136	215	6962	Bilanz:	-5612 kWh
	Speicherzustand	am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:				451281 kWh
2	1	-1885	18	1294		
2	2	-377	16	1074		
2	3	343	18	980		
2	4	1406	18	634		
2	5	3254	19	218		
2	6	2369	19	0		
2	7	1567	20	0		
2	8	1375	20	0		
2	9	-962	20	105		
2	10	-1173	21	539		
2	11	-2230	20	939		
2	12	-1969	21	1186		
	Jahressummen:	1718	230	6970	Bilanz:	-5021 kWh
	Speicherzustand	am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:				446266 kWh
3	1	-1904	22	1294		
.						
3	12	-1973	26	1186		
	Jahressummen:	1593	280	6970	Bilanz:	-5097 kWh
	Speicherzustand	am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:				441172 kWh
4	1	-1908	26	1295		
.						
4	12	-1972	31	1186		
	Jahressummen:	1580	341	6970	Bilanz:	-5050 kWh
	Speicherzustand	am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:				436124 kWh
5	1	-1906	32	1294		
.						
5	12	-1969	37	1186		
	Jahressummen:	1606	406	6966	Bilanz:	-4953 kWh
	Speicherzustand	am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:				431174 kWh
6	1	-1903	38	1294		
.						
6	12	-1965	43	1186		
	Jahressummen:	1651	471	6967	Bilanz:	-4844 kWh
	Speicherzustand	am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:				426333 kWh
7	1	-1898	43	1294		
.						
7	12	-1960	48	1186		
	Jahressummen:	1705	537	6967	Bilanz:	-4726 kWh
	Speicherzustand	am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:				421608 kWh
8	1	-1893	49	1294		
.						
8	12	-1955	54	1186		
	Jahressummen:	1762	602	6967	Bilanz:	-4603 kWh
	Speicherzustand	am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:				417004 kWh
9	1	-1888	54	1294		
.						
9	12	-1950	59	1186		
	Jahressummen:	1822	664	6967	Bilanz:	-4482 kWh
	Speicherzustand	am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:				412524 kWh
10	1	-1883	59	1294		
.						
10	12	-1945	64	1186		
	Jahressummen:	1883	724	6967	Bilanz:	-4361 kWh
	Speicherzustand	am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:				408167 kWh

Kontrolle:
451281 kWh
-5021 kWh
= 446260 kWh

- Der Bilanzwert (Wärmezufuhr von der Erdoberfläche und von der Sohle des Simulationsgebietes minus Sondenarbeit) nimmt jährlich ab, ist nach zehn Jahren aber noch deutlich negativ. D. h., das Erdreich im Simulationsgebiet erfährt noch eine kräftige Entspeicherung.
- Die jährliche Sondenarbeit schwankt zwischen 6962 kWh und 6970 kWh. Damit beträgt die

mittlere Sondenleistung 3486... 3490 W. Die programminterne "Leistungsregelung" arbeitet somit sehr gut, die geforderten 3500 W werden um weniger als 0,5 % unterschritten.

- Nach 10 Jahren beträgt die Herkunft der Erdwärmesondenarbeit:
 63 % durch Erdreichabkühlung
 10 % durch Wärmezufluss vom Erdinneren
 27 % durch Wärmezufluss von der Erdoberfläche.

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\ERDWÄRMESONDEN\BEISPIEL_KOAX_1\FEB2.DAT

Temperaturen: Vorlauf tV, Rücklauf tR, Bohrlochwand tBL; Erdreich k = 1 ... 10 in °C zur Zeit 10175 Stunden

i	tV	tR	tBL	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8	k=9	k=10
1	-5,60	-4,03	-0,63	2,10	2,50	2,63	2,69	2,72	2,74	2,75	2,76	2,76	2,77
2	-5,58	-4,03	0,13	3,29	3,92	4,16	4,29	4,37	4,41	4,44	4,46	4,47	4,48
3	-5,57	-4,02	0,72	4,20	4,95	5,27	5,45	5,56	5,63	5,68	5,70	5,72	5,73
4	-5,55	-4,02	1,29	5,07	5,92	6,29	6,50	6,64	6,73	6,79	6,83	6,85	6,86
5	-5,53	-4,01	1,80	5,86	6,77	7,18	7,42	7,58	7,68	7,75	7,79	7,82	7,83
50	-4,71	-3,89	3,10	7,42	8,39	8,84	9,12	9,30	9,42	9,50	9,55	9,58	9,59
99	-3,87	-3,84	4,58	9,24	10,21	10,60	10,82	10,96	11,05	11,11	11,14	11,17	11,17
100	-3,86	-3,84	4,83	9,62	10,44	10,76	10,93	11,04	11,12	11,17	11,20	11,21	11,22
Ende der Sonde													
101	-	-	-	10,50	10,76	10,93	11,05	11,13	11,19	11,22	11,25	11,26	11,27
102	-	-	-	10,90	11,00	11,09	11,16	11,21	11,25	11,28	11,30	11,31	11,32
103	-	-	-	11,13	11,17	11,21	11,25	11,29	11,32	11,34	11,35	11,36	11,36
119	-	-	-	11,95	11,95	11,95	11,95	11,95	11,95	11,95	11,95	11,95	11,95
120	-	-	-	11,98	11,98	11,98	11,98	11,98	11,98	11,98	11,98	11,99	11,99

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\ERDWÄRMESONDEN\BEISPIEL_KOAX_1\FEB10.DAT

Temperaturen: Vorlauf tV, Rücklauf tR, Bohrlochwand tBL; Erdreich k = 1 ... 10 in °C zur Zeit 80255 Stunden

i	tV	tR	tBL	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8	k=9	k=10
1	-7,54	-5,96	-1,41	1,98	2,46	2,60	2,67	2,71	2,73	2,75	2,76	2,76	2,76
2	-7,52	-5,96	-0,69	3,08	3,82	4,11	4,26	4,34	4,40	4,43	4,46	4,47	4,47
3	-7,51	-5,96	-0,12	3,95	4,82	5,19	5,40	5,52	5,61	5,66	5,69	5,71	5,72
4	-7,49	-5,96	0,43	4,79	5,76	6,19	6,44	6,59	6,70	6,76	6,80	6,83	6,84
5	-7,47	-5,95	0,92	5,56	6,59	7,06	7,34	7,51	7,63	7,71	7,75	7,78	7,79
50	-6,65	-5,86	0,78	4,88	5,81	6,23	6,49	6,66	6,78	6,85	6,90	6,93	6,94
99	-5,85	-5,82	2,85	7,66	8,64	9,05	9,27	9,41	9,51	9,56	9,60	9,62	9,63
100	-5,84	-5,82	3,15	8,11	8,95	9,27	9,46	9,57	9,64	9,69	9,72	9,74	9,75
Ende der Sonde													
101	-	-	-	9,08	9,35	9,52	9,65	9,73	9,79	9,82	9,85	9,86	9,87
102	-	-	-	9,57	9,66	9,76	9,83	9,89	9,93	9,96	9,97	9,99	9,99
103	-	-	-	9,87	9,91	9,96	10,00	10,04	10,07	10,09	10,10	10,11	10,11
119	-	-	-	11,85	11,85	11,85	11,85	11,85	11,85	11,85	11,85	11,85	11,85
120	-	-	-	11,95	11,95	11,95	11,95	11,95	11,95	11,95	11,95	11,95	11,95

- Die Temperaturverteilung im Erdreich im Abstand von 8 Jahren zeigt die deutliche Abkühlung im mittleren und unteren Sondenbereich beispielsweise um 1,5 ... 2,5 K.
- An der Sohle des Simulationsgebietes steigt der Temperaturgradient von 0,03 K/m auf 0,10 K/m an. Obwohl sich der Anstieg des Gradienten stark erhöht und die Frage nach der Richtigkeit der Randbedingung einer konstanten Temperatur an der Sohle des Simulationsgebietes aufwirft, sei auf die Kleinheit des vertikalen Wärmestromes von 0,26 W/m² verwiesen.

Aussagen zu Bild 5.4:

- Deutlich zeigt sich die Temperaturabsenkung innerhalb von 8 Betriebsjahren. So sinkt die mittlere Soletemperatur um etwa 2 K.
- Die vertikale Verteilung der Bohrlochwandtemperatur zeigt zunehmend den Einfluss der Wärmeströme von oben und unten ins Simulationsgebiet.
- Dies spiegelt sich auch in den Verläufen der abschnittswisen Wärmestromaufnahme wider, wobei die Sondenleistung konstant bleibt.

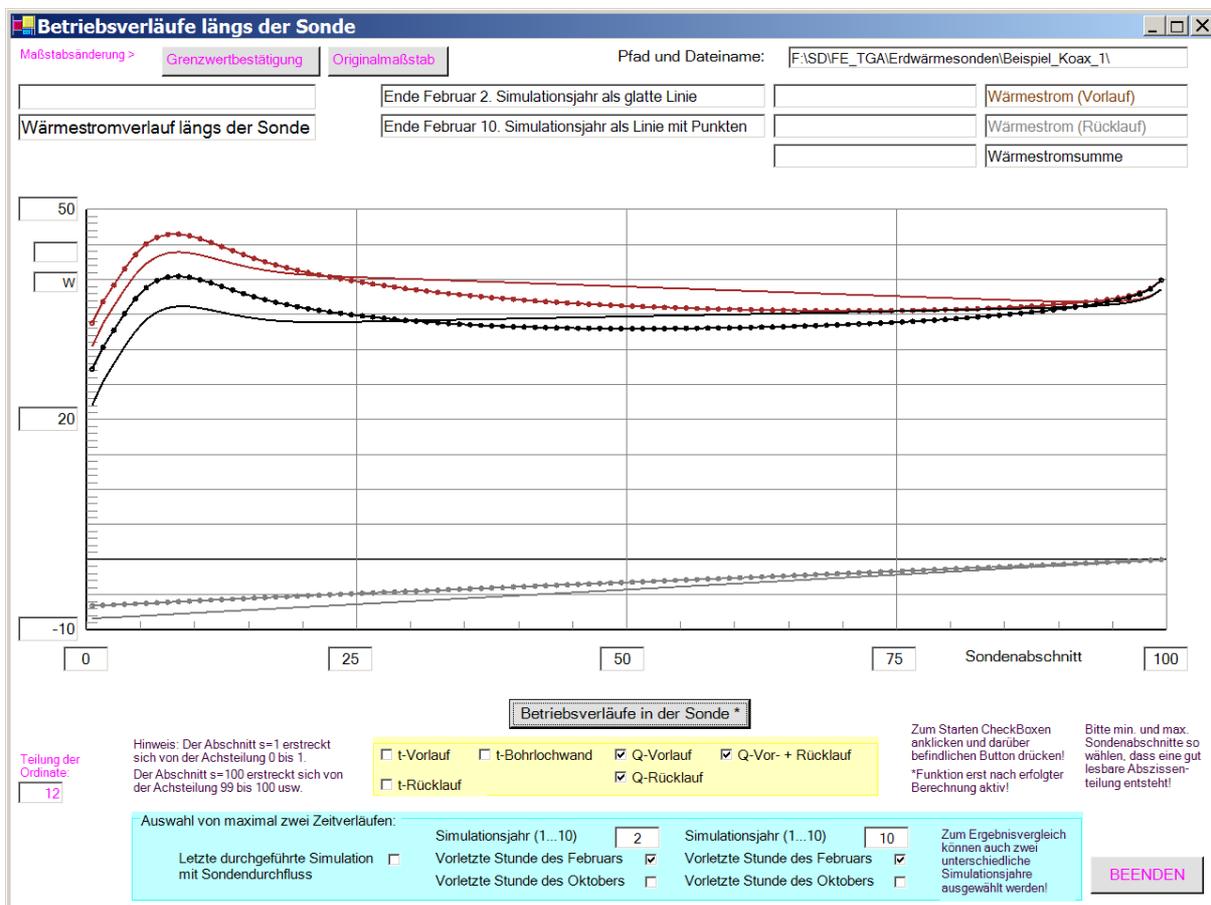
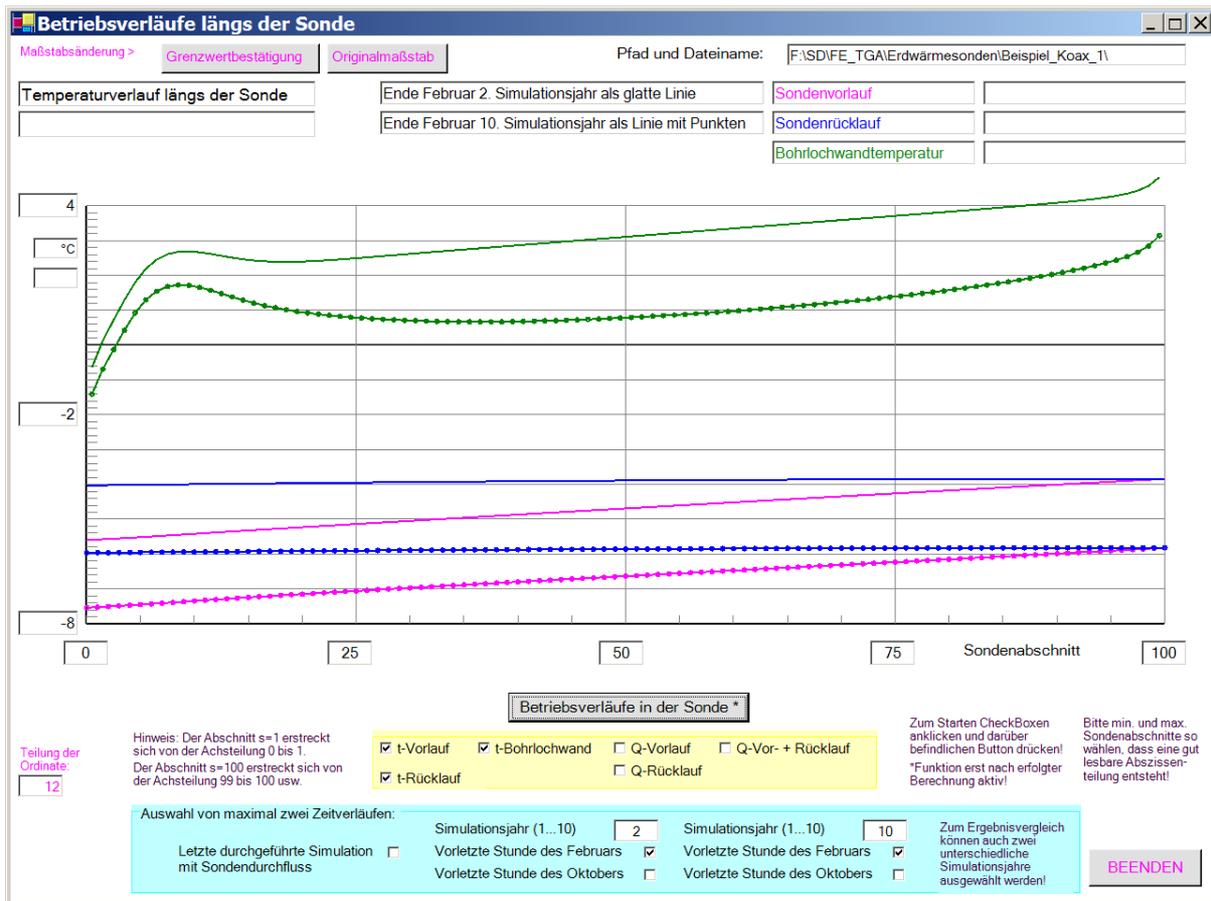


Bild 5.4 Ausgewählte Betriebsverläufe (Ende Februar des 2. und 10. Simulationsjahres) über die Sondentiefe

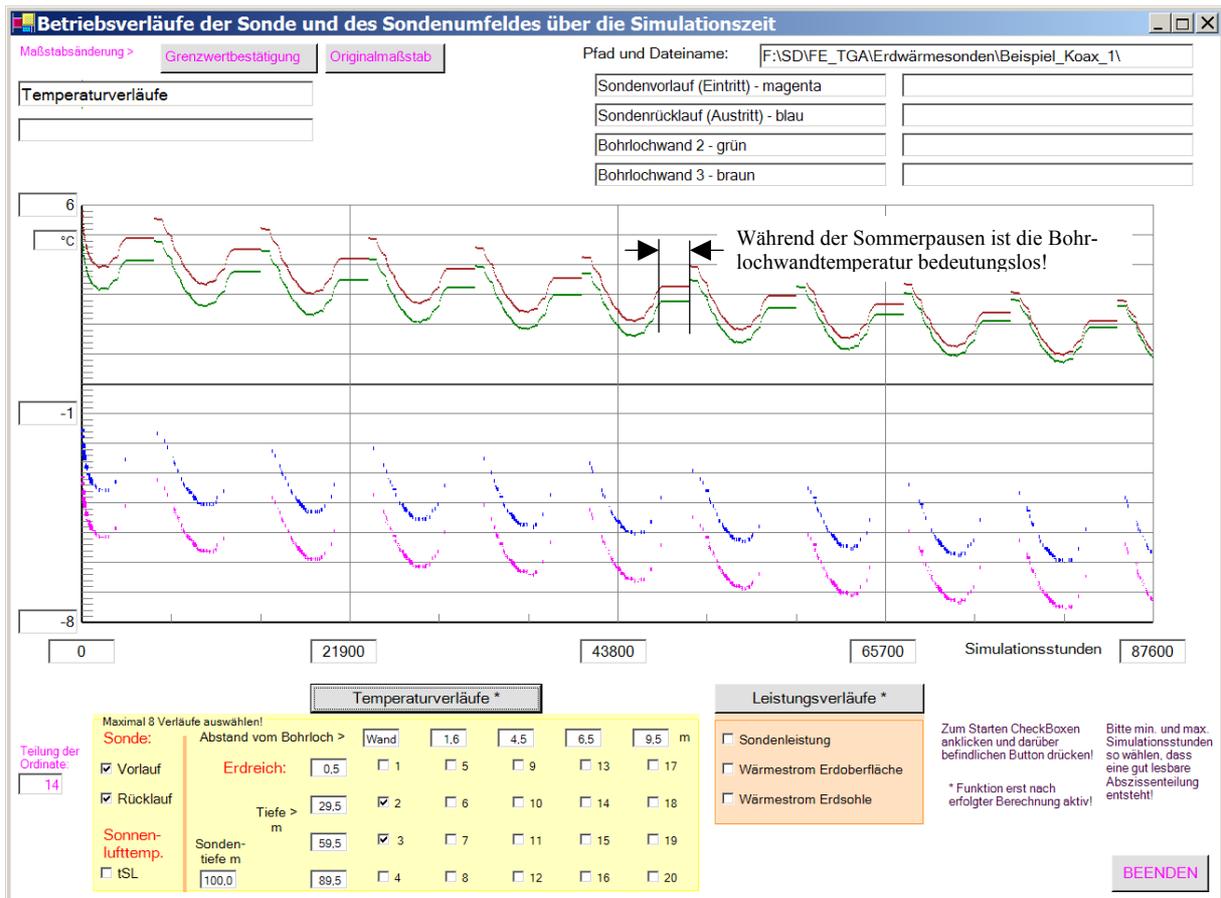
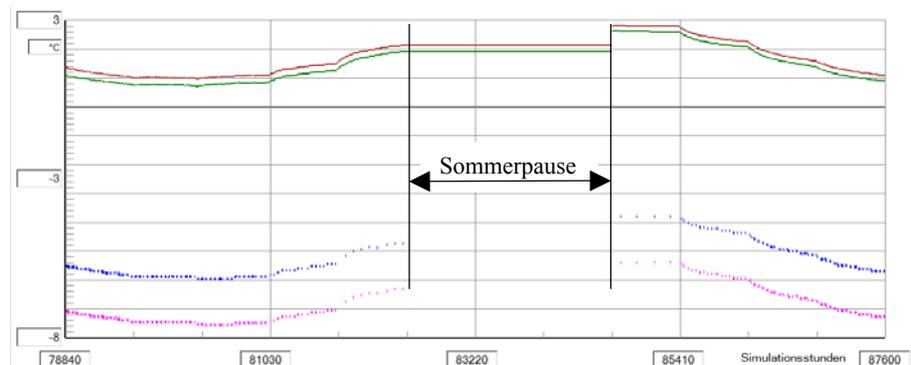


Bild 5.5 Vorlauf- und Rücklaufemperaturen am Sondenkopf sowie zwei Bohrlöchwandtemperaturen in ca. 30 m und 60 m Tiefe im Verlaufe von 10 Simulationsjahren (Bild oben) bzw. im letzten Jahr (Bild rechts)



- Die sommerlichen Betriebspausen sind deutlich zu erkennen. Mit Beginn der Heizperiode sinken die Sole- und Bohrlöchwandtemperaturen stark ab, im Frühjahr steigen sie aufgrund der verringerten Anforderung wieder etwas an. Eine offensichtliche Erholung tritt in der Sommerpause ein, da Wärme zur unmittelbaren Sondenumgebung fließt.
- Die dargestellten Bohrlöchwandtemperaturen während der Betriebspausen sind unreal. Entsprechend Abschnitt 3 (S. 10) bleiben sie bei intermittierendem Sondenbetrieb während der Pausen unverändert, um die "numerische Einschwingphase" zu verkürzen. Dies erwies sich auch als zweckdienlich. Nach der langen Sommerpause jeweils zu Beginn der Heizperiode ergibt sich jedoch eine erneute Einfahrkurve. Die Bohrlöchwandtemperatur nimmt während der Sondenbetriebspausen keinen Einfluss auf die Erdreichtemperaturverteilung.
- Sehr gut zu erkennen ist das langfristige Absinken der Soletemperatur. Die Änderung nimmt mit zunehmender Zeit erwartungsgemäß ab, was auf einen asymptotischen Endwert schließen lässt.

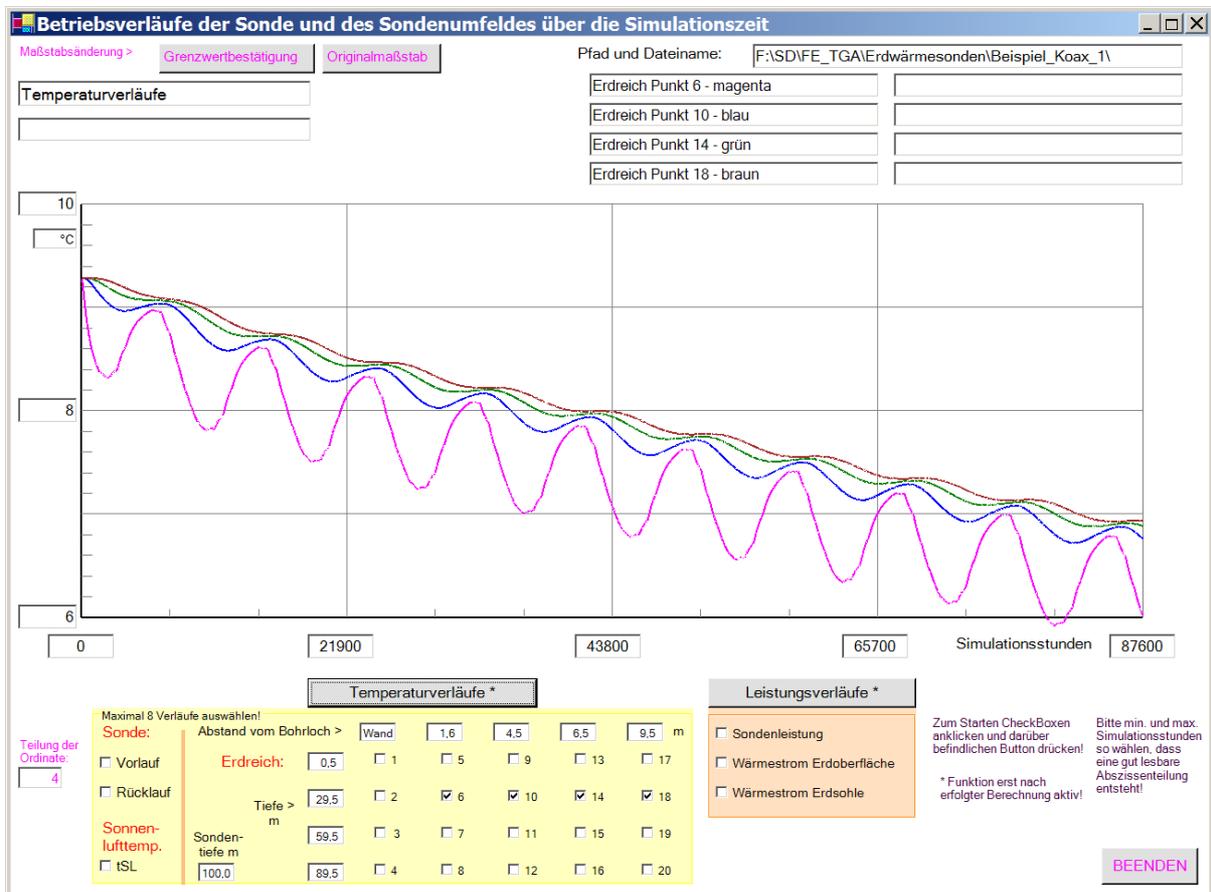
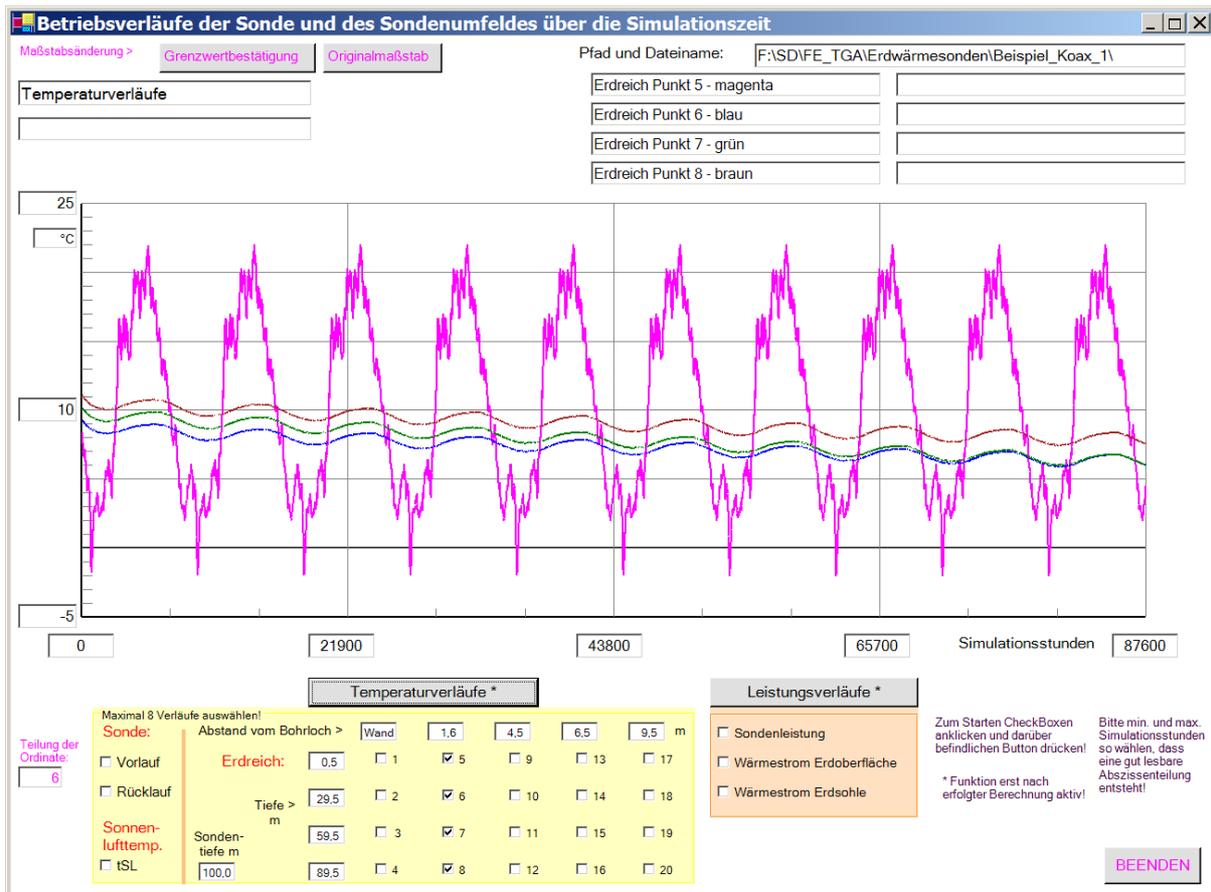


Bild 5.6 Ausgewählte Erdreichtemperaturen im Verlaufe von 10 Simulationsjahren
Bild oben: Abstand 1,6 m, Tiefen variiert; Bild unten: Tiefe ca. 30 m, Abstände variiert

- Der Temperaturverlauf am Punkt 5 (0,5 m unter der Erdoberfläche) zeigt den deutlichen Einfluss der Sonnenlufttemperatur im Jahresgang.
- Die darunter liegenden Punkte 6, 7 und 8 in ca. 30 m, 60 m und 90 m Tiefe weisen auch eine Schwingung im Jahresgang auf. Sie ist aber nicht durch die meteorologische Randbedingung an der Erdoberfläche verursacht, sondern durch den Jahresgang der abgeforderten Sondenleistung. Die Frequenz der Sonnenlufttemperaturschwingung und die gegebenen Stoffwerte des Erdreiches bewirken eine so starke Amplitudendämpfung, dass in den betrachteten Tiefen praktisch keine Temperaturschwingung mehr merkbar sein kann.
- Die Temperaturverläufe in der Tiefe von ca. 30 m, wobei die Punkte 6, 10, 14 und 18 mit den Sondenabständen von 1,6 m, 4,5 m, 6,5 m und 9,5 m betrachtet werden, zeigen mit zunehmendem Abstand eine Amplitudenreduzierung und eine Phasenverschiebung. Die Jahresschwingung ist eindeutig durch den Jahresgang der Sondenleistung geprägt. Die mittlere Temperaturabnahme beträgt während der zehn Betriebsjahre ca. 2,5 K. Dabei wird die Senkung auch am Rand des Simulationsgebietes (Radius des Einflussbereiches 10 m) deutlich. Das angenommene Sondenfeld erfährt somit eine merkliche Abkühlung. Würde es sich um eine Einzelsonde handeln, so müsste der radiale Einflussbereich r_{EB} bei der Simulation spürbar vergrößert werden.

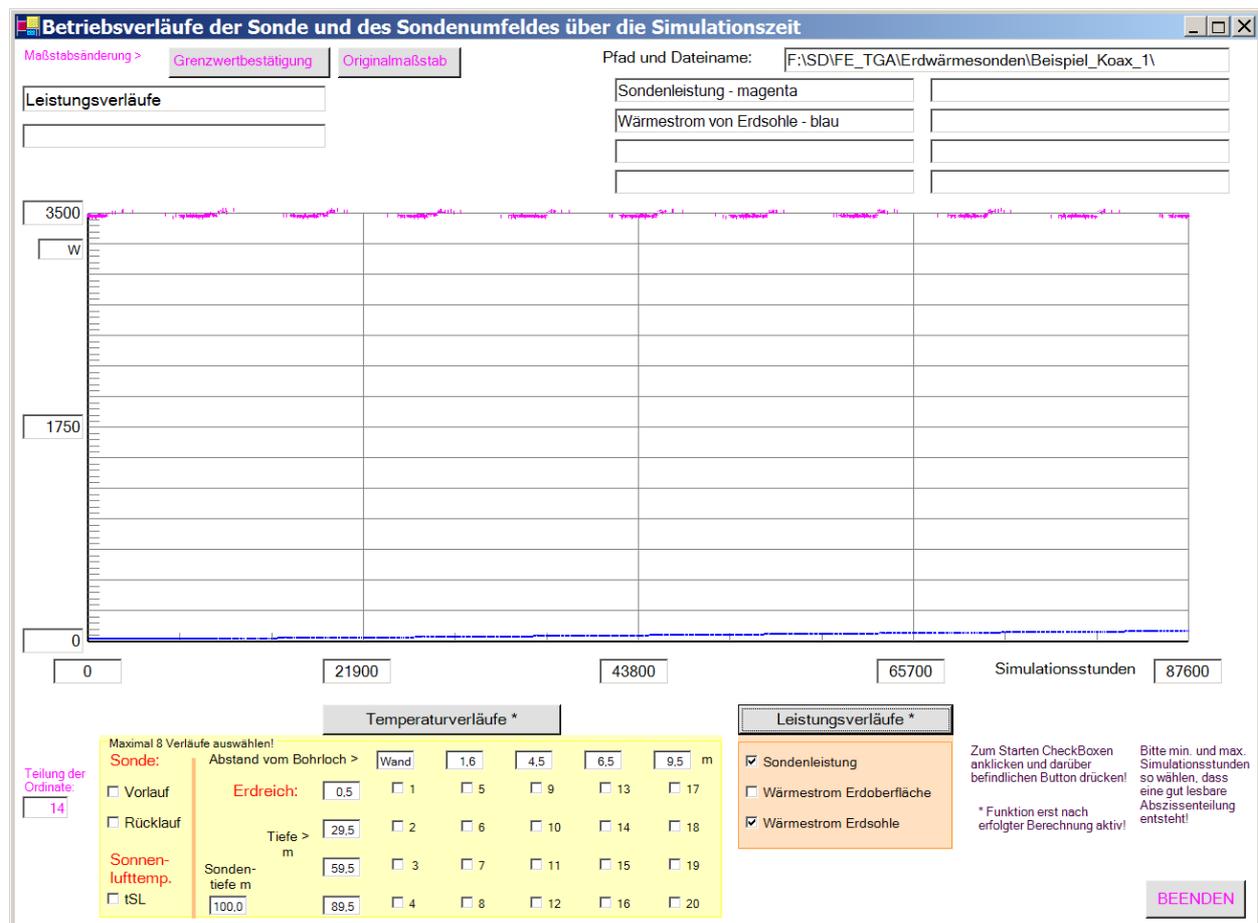


Bild 5.7 Sondenleistung und Wärmestrom an der Sohle des Simulationsgebietes in das Simulationsgebiet im Verläufe von 10 Simulationsjahren

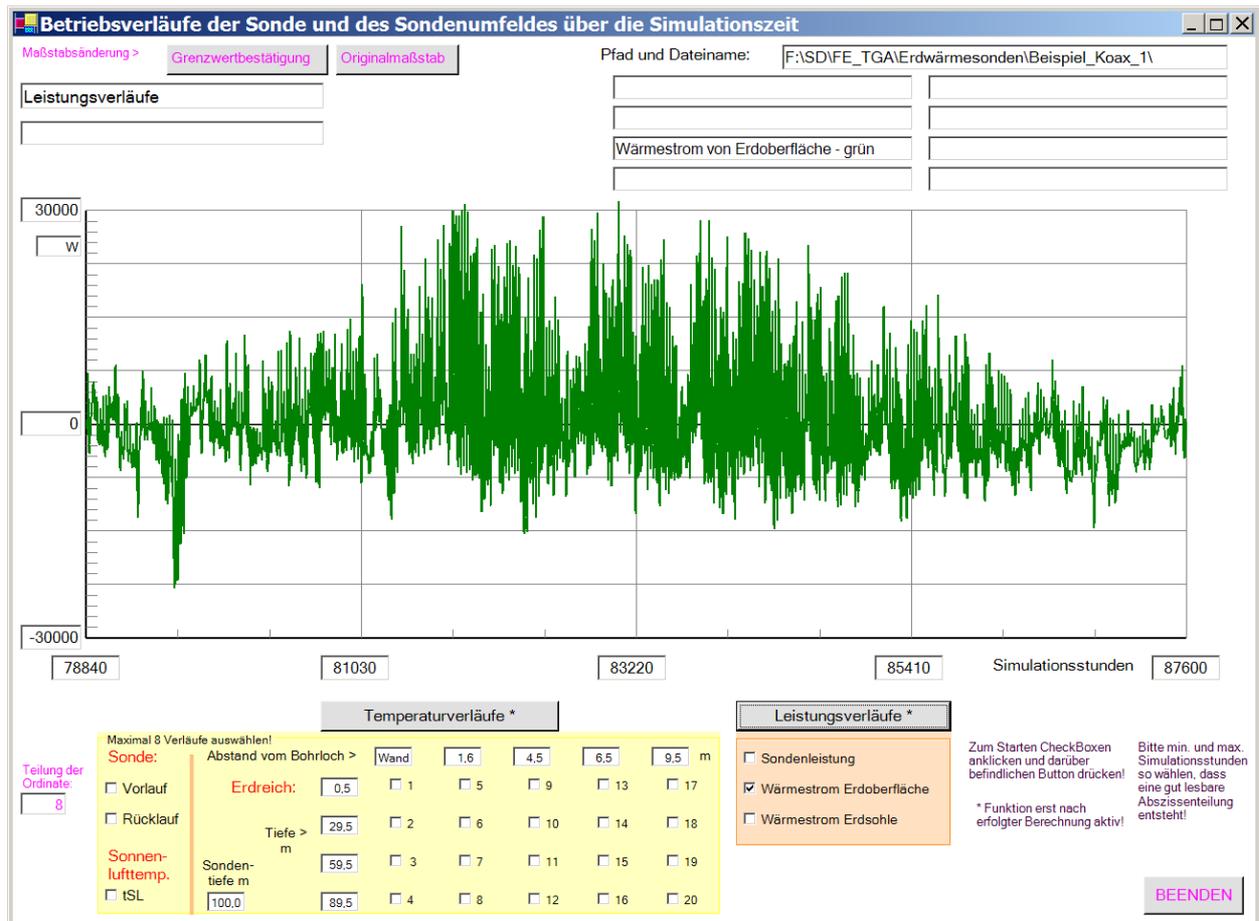


Bild 5.8 Sondenleistung, Wärmestrom an der Sohle des Simulationsgebietes und an der Erdoberfläche in das Simulationsgebiet im Verlaufe des letzten Simulationsjahres

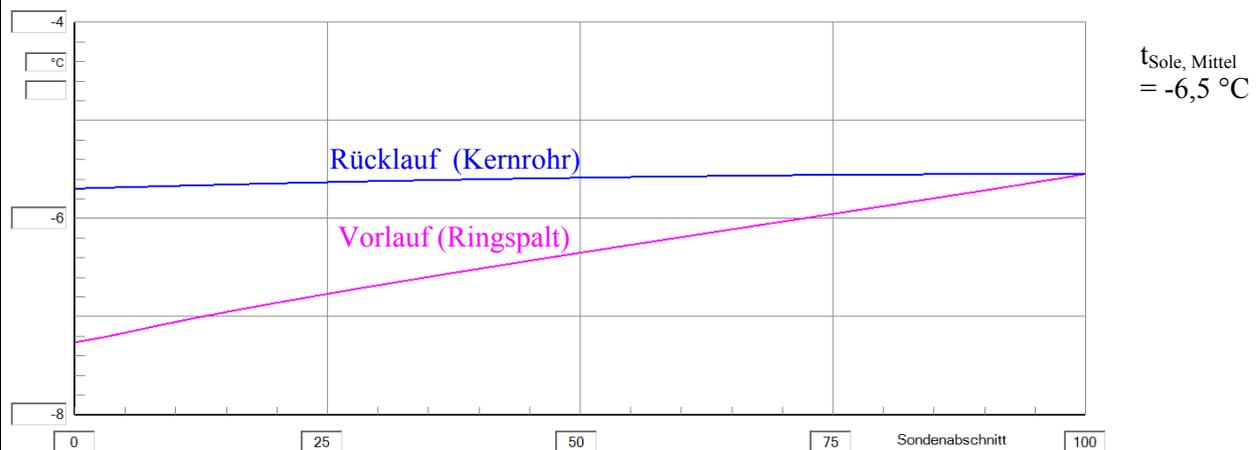
- Die Sondenleistung entspricht während der Betriebszeit der Anforderung von 3500 W. Der Wärmestrom aus der Erdtiefe steigt ganz allmählich an, hat aber absolut gesehen nur geringen Anteil an der Wärmezufuhr ins Simulationsgebiet. Eine eventuelle Änderung der Randbedingung an der Sohle des Simulationsgebietes hätte keinen dominierenden Einfluss.
- Demgegenüber ist der Wärmestrom an der Erdoberfläche ins Simulationsgebiet beträchtlich. Somit muss die Randbedingung an der Erdoberfläche möglichst genau nachgebildet werden.

5.2 Variationen des Sondendurchlaufes und der Sondengestaltung am Beispiel_Koax_1

Um die Einflüsse der Parameteränderungen deutlich zu erkennen wird jeweils nur ein Parameter gegenüber dem Ursprungsbeispiel geändert. Die Ergebnisse zeigen die Bilder 5.9 bis 5.16. Als kennzeichnende Merkmale werden die mittlere Soletemperatur am Sondenkopf $t_{\text{Sole, Mittel}}$ und der Temperaturverlauf längs der Sonde am Ende der Simulationszeit von 10 Jahren (letzte Betriebsstunde am 31. Dezember) in den Bildern wiedergegeben.

Ursprungsbeispiel

Sondentiefe 100 m; Simulationstiefe 120 m; Radius des Einflussbereiches 10 m; Leistung 3500 W; Betriebsstunden 1997 h/a; Durchfluss 2000 l/h; Wärmeleitfähigkeit des Erdreiches 2,6 W/(m K); Rücklauf im Kernrohr; Hüllrohr aus Kunststoff 75×6,8; Kernrohr aus Kunststoff 50×4,6; Bohrlochdurchmesser 150 mm; Wärmeleitfähigkeit der Füllung 1 W/(m K); keine Dämmung der Sondenrohre

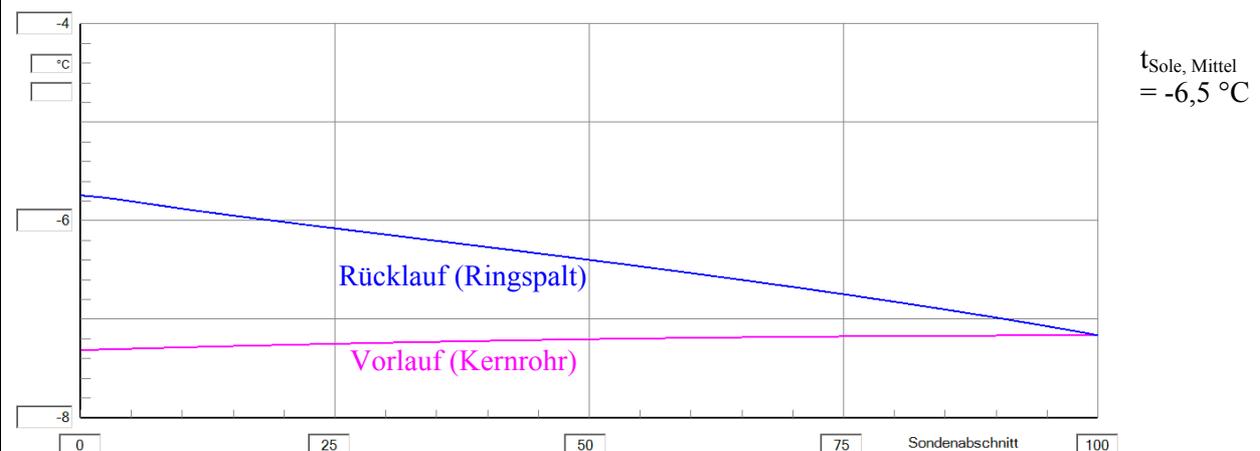


Merkmale:

- Die Temperaturabnahme im Rücklauf (Kernrohr) beträgt nur ca. 0,2 K, da bei den gewählten Parametern die Temperaturdifferenz zwischen Kernrohr und Ringspalt, die Übertragungsfläche und die Wärmeübergangskoeffizienten wegen laminarer Strömung klein sind.

Bild 5.9 Ursprungsbeispiel

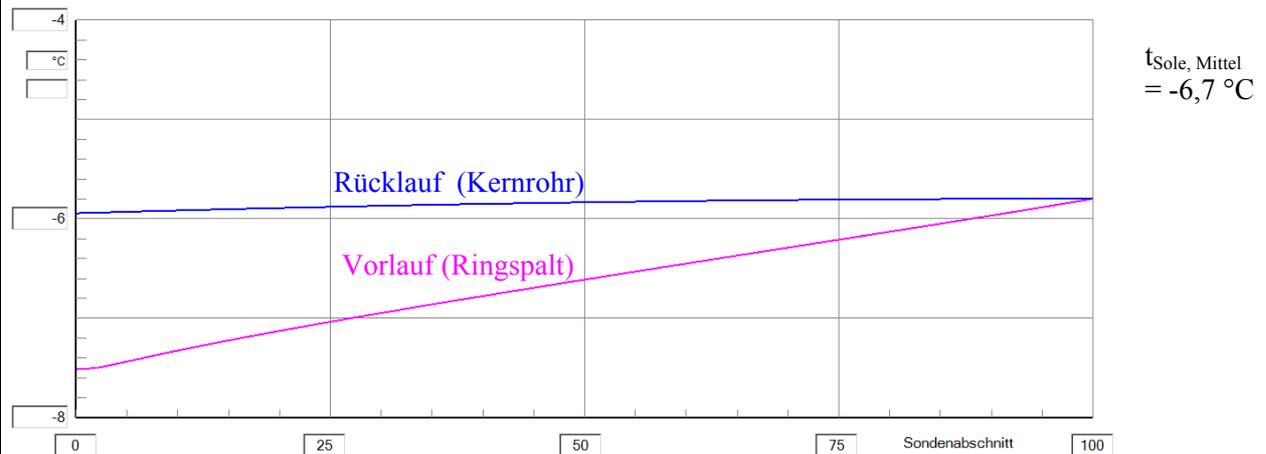
Variante 1: Vorlauf im Kernrohr, Rücklauf im Ringspalt



Merkmale:

- Die Temperaturzunahme im Vorlauf (Kernrohr) ist wegen des geringen Wärmestromes vom Ringspalt zum Inneren des Kernrohres klein.
- Bei der betrachteten Konfiguration ist kein strömungsbedingter Unterschied feststellbar.

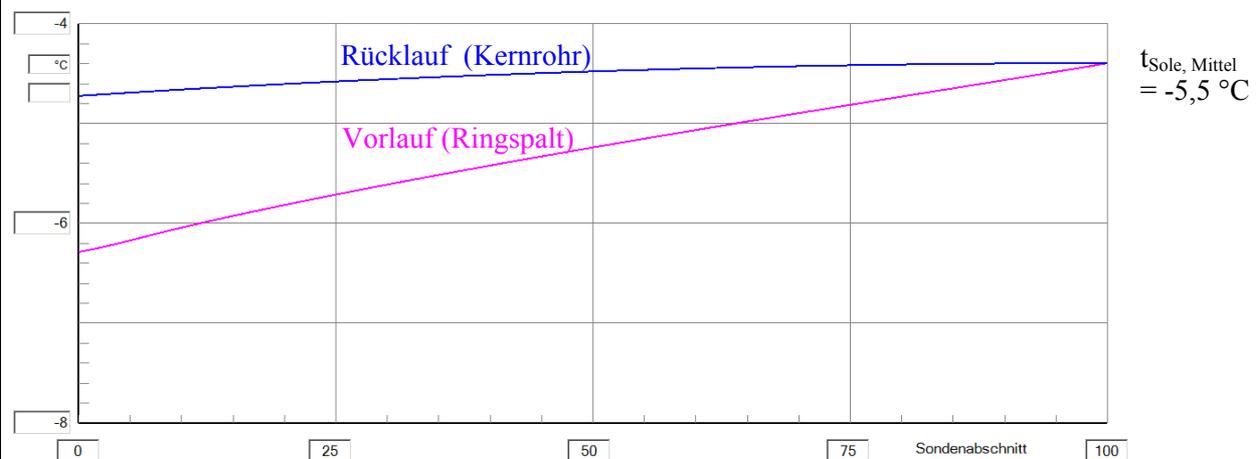
Bild 5.10 Variante 1 (Strömungsumkehr)

Variante Bohrloch mit Dämmstoff ($\lambda_{\text{Füllung}} = 0,1 \text{ W/(m K)}$) im oberflächennahen Bereich von 2 m


Merkmale:

- Die Dämmung wirkt sich im betrachteten Fall geringfügig nachteilig aus, da die Soletemperatur am Sondenkopf (Vorlauf $-7,5 \text{ °C}$; Rücklauf $-5,9 \text{ °C}$) niedriger als die Erdreichtemperatur im oberflächennahen Bereich ist. Sie beträgt zum Simulationszeitpunkt in Sondennähe ca. 3 °C .

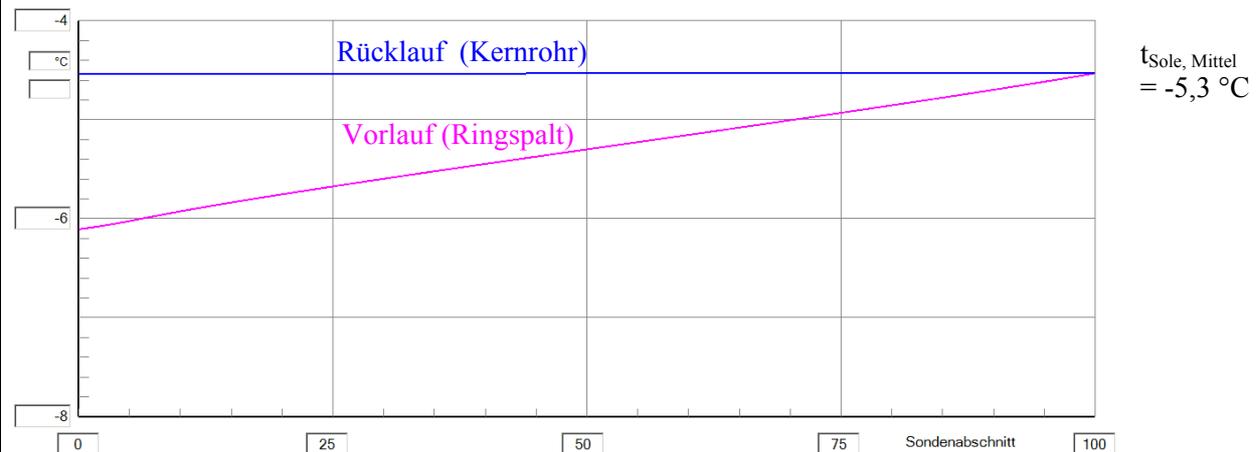
Bild 5.11 Variante 2 (obere Bohrlochdämmung)

Variante 3: Sondenrohre aus Edelstahl (Hüllrohr 60,3×2, Kernrohr 33,7×2)


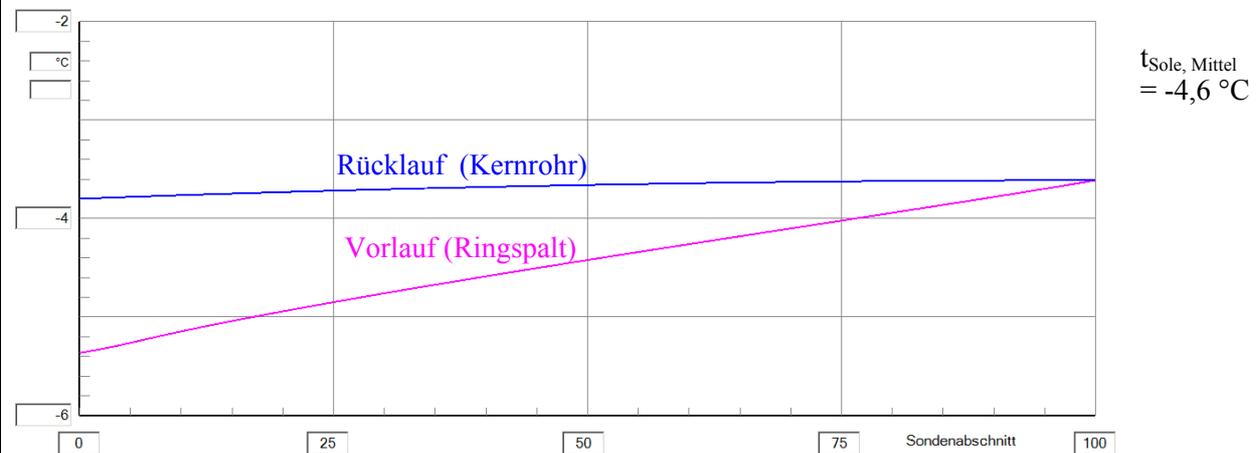
Merkmale:

- Der geringere Wärmeleitwiderstand der Hüllrohrwandung führt zu einer höheren Soletemperatur bei gleicher vorgegebener Nutzleistung der Sonde.
- Die Absenkung der Rücklauftemperatur im Kernrohr bleibt mit ca. $0,3 \text{ K}$ wie bei den früheren Varianten gering, da der Wärmedurchgangswiderstand vom Ringspalt zum Kernrohr stark durch die relativ hohen Wärmeübergangswiderstände beeinflusst wird.

Bild 5.12 Variante 3 (Edelstahlverrohrung)

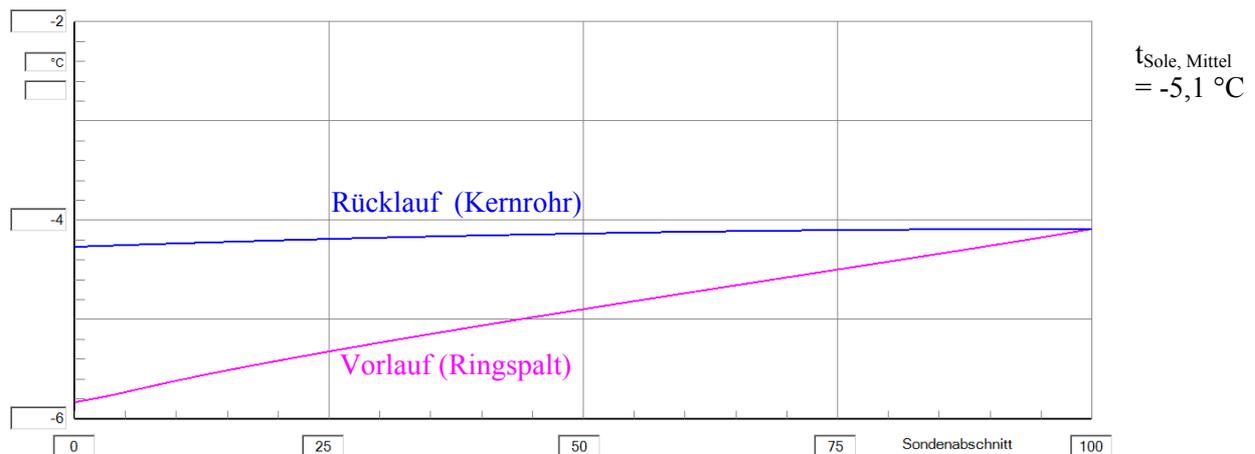
Variante 4: Hüllrohr aus Edelstahl mit Kernrohr fast ideal gedämmt**Merkmale:**

- Um die Dämmung des Kernrohres zu simulieren wurde hier ein Rohr 33,7×4 mit der Wärmeleitfähigkeit 0,01 W/(m K) angenommen. Somit bleibt der Ringspalt gegenüber Variante 3 unverändert. Der Rücklauf zeigt erwartungsgemäß keine Temperaturveränderung längs der Sonde.
- Die mittlere Solentemperatur erhöht sich bei den angenommenen wärmetechnischen Bedingungen jedoch nur um 0,2 K gegenüber Variante 3.

Bild 5.13 Variante 4 (Edelstahlhüllrohr und gedämmtes Kernrohr)**Variante 5: Bohrlochfüllung mit hoher Wärmeleitfähigkeit ($\lambda_{\text{Füllung}} = 2 \text{ W/(m K)}$)****Merkmale:**

- Die verbesserte wärmetechnische Anbindung ans Erdreich bewirkt eine deutliche Erhöhung der mittleren Solentemperatur um fast 2 K bezogen auf das Ursprungsbeispiel. Sie ist damit ein sehr wirksames Mittel zur Effizienzsteigerung nachgeschalteter Systeme, wie beispielsweise einer Wärmepumpe.

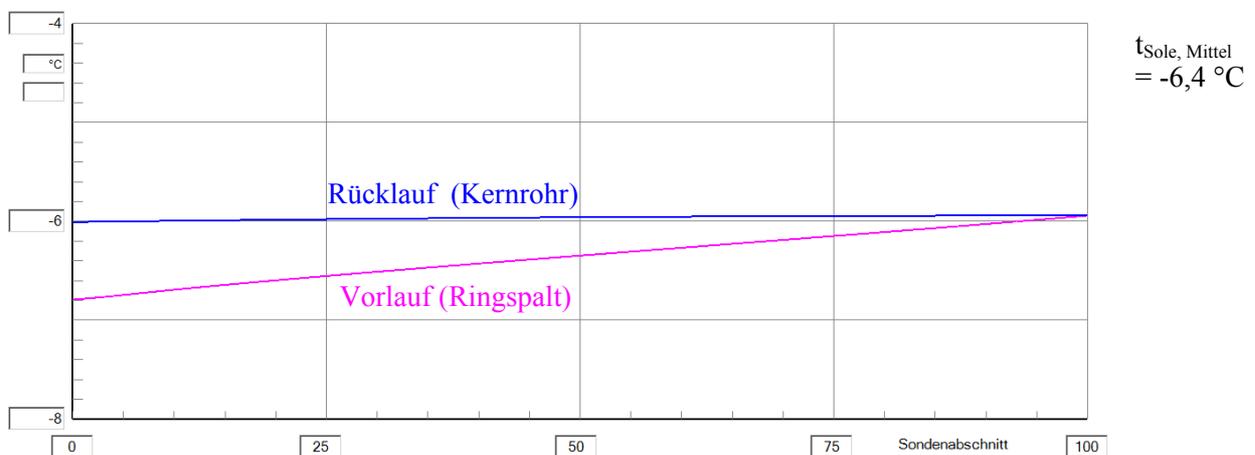
Bild 5.14 Variante 5 (gute wärmetechnische Anbindung ans Erdreich durch Bohrlochfüllung mit hoher Wärmeleitfähigkeit)

Variante 6: Kleiner Bohrlochdurchmesser (100 mm)

Merkmal:

- Die verbesserte wärmetechnische Anbindung ans Erdreich, die hier durch einen kleineren Bohrlochdurchmesser erreicht wird, führt zu einer Erhöhung der mittleren Soletemperatur um 1,4 K. Es ist jedoch fraglich, ob ein so enger Ringspalt zwischen Bohrlochwand und Sondenhüllrohr einwandfrei verfüllbar ist. Luftspalte und/oder Lunker würden den Wärmeleitwiderstand extrem erhöhen und damit die mittlere Soletemperatur stark senken.

Bild 5.15 Variante 6 (gute wärmetechnische Anbindung ans Erdreich durch Verkleinerung des Bohrlochdurchmessers)

Variante 7: Doppelter Sondendurchsatz (4000 l/h)

Merkmal:

- Der erhöhte Sondendurchfluss führt bewirkt größere Wärmeübergangskoeffizienten. Da aber die Spreizung zwischen Rücklauf und Vorlauf bei gleicher Sondenleistung halbiert wird, sinkt sogar die Temperaturabnahme im Rücklauf gegenüber dem Ursprungsbeispiel noch ab. Die mittlere Soletemperatur erhöht sich lediglich um 0,1 K.

Bild 5.16 Variante 7 (doppelter Sondendurchsatz)

Die in den Bildern vorgestellten Ergebnisse gelten selbstverständlich nur unter den beschriebenen Randbedingungen der Simulation. Dennoch sind daraus Trends erkennbar. Für detaillierte und spezielle Aussagen bzw. Vergleiche ist das Simulationsprogramm zu nutzen.

Literatur

[1] GLÜCK, B.: Simulationsmodell "Erdwärmesonden".

Kostenlos erhältlich unter:

<http://www.berndglueck.de/Erdwaermesonde>

[2] GLÜCK, B.: Wärmeübertragung, Wärmeabgabe von Raumheizflächen und Rohren, 2. Auflage.
Berlin: Verlag für Bauwesen 1990

[3] VDI-Wärmeatlas, 2. bis 9. Auflage. Düsseldorf: VDI-Verlag 1994 bis 2002