

Wärmeübertragung

Simulationsmodell für Koaxialerdwärmesonden

Bernd Glück, Jößnitz (Plauen)

In [1, 2] wurde ein Simulationsmodell für Erdwärmesonden, die mit ein oder zwei U-Rohren bestückt sind, vorgestellt. 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 [3].

Autor



Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück, Jahrgang 1942, betreibt ein Forschungs- und Entwicklungsbüro für Technische Gebäudeausrüstung. Gleichzeitig ist er als Honorarprofessor an der Westsächsischen Hochschule Zwickau/FH) tätig.

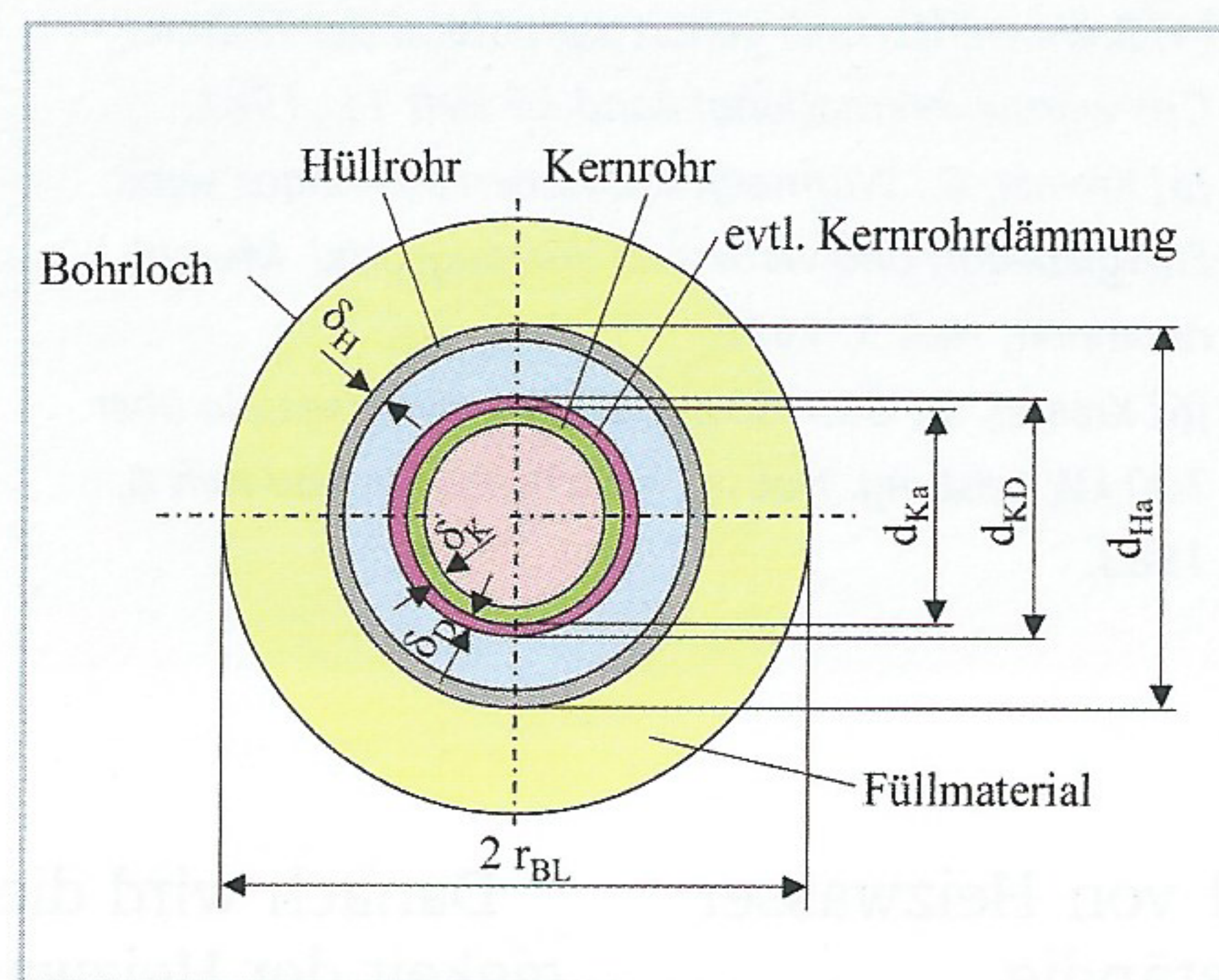


Bild 1

Querschnitt durch eine Koaxialsonde mit Kern- und Hüllrohr sowie Füllmaterial im Bohrloch. Außendurchmesser des Kernrohres d_{Ka} , Wanddicke des Kernrohres δ_K , Wärmeleitfähigkeit der Kernrohrwandung λ_K , Außendurchmesser einer eventuellen Kernrohrdämmung d_{KD} , Dicke der Wärmedämmung am Kernrohr δ_D , Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung am Kernrohr λ_D , Außendurchmesser des Hüllrohres d_{Ha} , Wanddicke des Hüllrohres δ_H , Wärmeleitfähigkeit der Hüllrohrwandung λ_H , Bohrlochdurchmesser $2 r_{Bl}$, Wärmeleitfähigkeit des Füllmaterials kann höhenabhängig $\lambda_s(\text{Sch})$ variieren

Die geometrische und wärmetechnische Modellierung des Erdsimulationsbereiches wird wie in [1, 2] beibehalten. Die wärmetechnische Modellierung der Bohrung werde dagegen komplett ersetzt. Der Querschnitt durch die Koaxialsonde ist im Bild 1 dargestellt. Die Wärmeleitfähigkeit des Füllstoffes, der zwischen dem Außendurchmesser des Hüllrohres und der Bohrlochwand flüssig eingebracht wird und anschließend aushärtet, kann in Zuordnung zu den Erdschichten variieren. Sie wird deshalb als $\lambda_s(\text{Sch})$ angegeben.

ben. Somit könnte beispielsweise im oberflächennahen Bereich die Verfüllung mit Dämmmaterial und im tieferen Bereich mit einem sehr gut wärmeleitenden Material erfolgen (Bild 2). Zur genauen Höhenanpassung kann nötigenfalls eine reale Erdschicht geteilt werden. Außer der Dämmung im oberflächennahen Hüllrohrbereich wird in

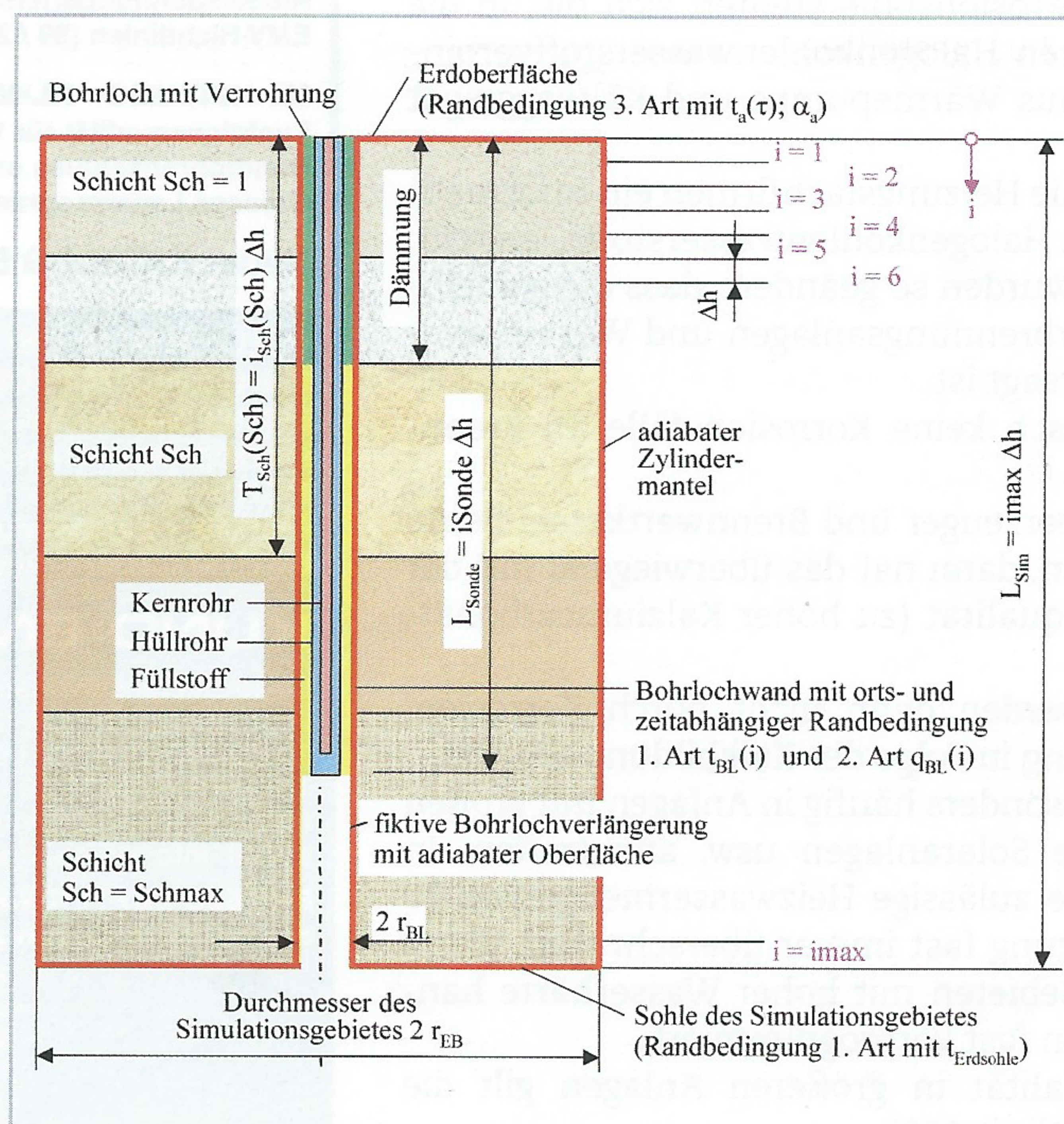


Bild 2

Vertikaler Schnitt durch das Simulationsgebiet mit Kennzeichnung der Simulationsabschnitte $i = 1 \dots i_{\max}$. Das Simulationsgebiet umfasst den Erdschichtzylinder 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 ist hier nicht dargestellt. Falls diese vorhanden ist, gelte sie über die gesamte Sondenlänge

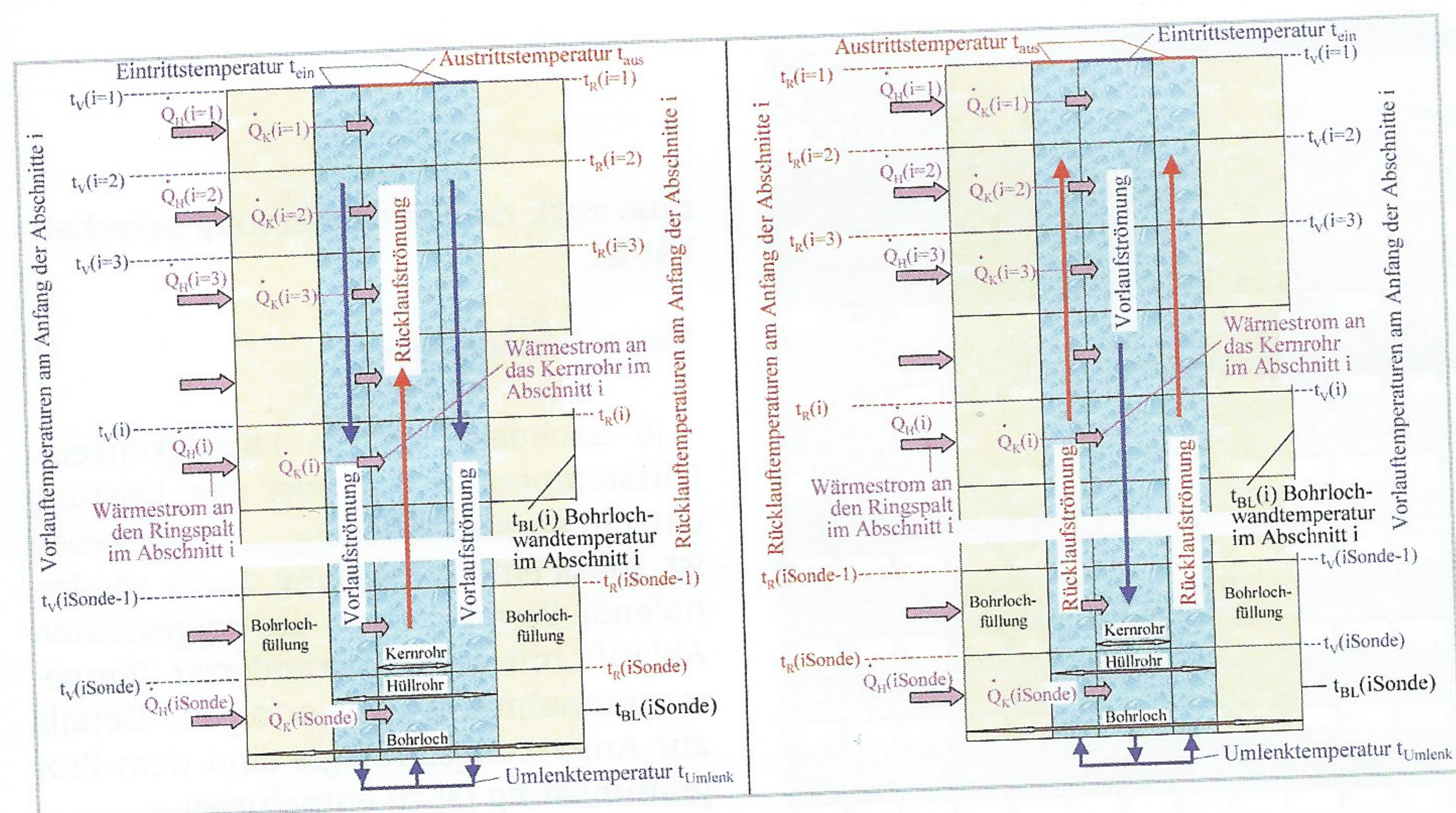


Bild 3

Bohrloch mit Koaxialsonde und Rücklauf (links) bzw. Vorlauf (rechts) im Kernrohr mit Kennzeichnung der Berechnungsabschnitte i und den zugehörigen Flüssigkeitstemperaturen sowie Wärmeströmen. Die Wärmeströme gelten rotationssymmetrisch. Die Pfeilrichtung symbolisiert positive Wärmeströme. Die Flüssigkeitstemperaturen werden dem jeweiligen Abschnittsbeginn zugeordnet. Die Bohrlochtemperaturen gelten näherungsweise in der jeweiligen Abschnittsmitte

Fachkreisen auch die Dämmung des Kernrohres diskutiert. Sie ist im Bild 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 und 2 dargestellten Geometrien sind Idealisierungen, da von einem über die Höhe gleich bleibenden Bohrl Lochdurchmesser 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.

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 im Simulationsprogramm dar.

Wärmetechnische Modellierung der Koaxialsonde

Sie umfasst zuerst die Ermittlung der Stoffwerte für Wasser bzw. für Tyfocor (25 % und 50 %) und die differenzierte

Koaxialerdwärmesonde - Hauptprogramm
Sondensimulation für konzentrische Rohranordnung (Sondervariante)

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

Erdoberfläche: Bohrloch mit Rohren

Schicht Sch = 1: Bohrl Lochradius rBL 0,075 m
Länge L_Sonde 100 m
Rücklauf im Kernrohr
Vorlauf im Kernrohr

Schicht Sch = 2: Länge L_Sim 120 m
imax 120 m
Simulationsradius rEB 10 m
kmax 10 m

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 % oder Tyfocor L 25 % oder Wasser
Eintrittstemperatur °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.

Ablauf: 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 Gröbkontrolle. 5. Über ZEITVERLAUF Eintrittstemperatur oder Leistungsanforderung und Durchfluss eingeben! 6. BERECHNUNG, DRUCK, TABELLE oder DIAGRAMM drücken!

STARTEN DATEI LADEN EINGABESPEICHERUNG BERECHNUNG DRUCK DIAGRAMM-SONDE
Zeitverläufe > DURCHFLOSS EINTRITTSTEMPERATUR SONDENLEISTUNG Ergebnisse > T-/Phase-TABELLE DIAGRAMM-UMFELD BEENDEN

Schichtdaten und Bohrlochfüllmaterial

Schicht	Rho kg/m³	Lambda W/(m K)	c J/(kg K)	rS kJ/kg	TSch m	Lambda Füllstoff W/(m K)
Sch = 1	2400	2,6	900	900	0	1
Sch = 2	0	0	0	0	0	0
Sch = 3	0	0	0	0	0	0
Sch = 4	0	0	0	0	0	0
Sch = 5	0	0	0	0	0	0
Sch = 6	0	0	0	0	0	0
Sch = 7	0	0	0	0	0	0
Sch = 8	0	0	0	0	0	0

Daten zum Simulationsablauf
Beginn der Simulation: 1. Januar, 1. Stunde
Maximale Anzahl der Simulationsstunden 87600
Konstante Erdoberflächentemperatur °C
Evtl. Laden der Sonnenlufttemperatur (Pfad + Datei):
F:\SD\IFE_TGA\Erdoärmesonden\Beispiel_Koax_1\SL
Unbeeinflusste Schlentemperatur 12 °C
Evtl. Eingabe der Erdoärmeverteilung einer vorhandenen Simulation (Pfad mit \ beenden):
Bei Eingabe von "blank" wird die vertikale Temperaturverteilung für alle i ausgehend von der Schlentemperatur bei imax mit der Temperaturreduzierung von 0,03 K/m nach oben ermittelt. t(i, k) gilt für alle Kreisringe k.

Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten im Kernrohr α_K und im Rohrspalt α_S in Abhängigkeit der Strömungsform. Zwischen der Flüssigkeit im Kernrohr und im Ringpalt ist der Wärmedurchgangskoeffizient k_K bezogen auf die Außenfläche der Kernrohrdämmung bedeutungsvoll:

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

Für den Wärmedurchgang vom Ringpalt an die Bohrlochwand ist der Teilwärmedurchgangskoeffizient κ_H mit Bezug auf den Durchmesser des Bohrloches $2 r_{BL}$ zu bilden:

zug auf den Durchmesser des Bohrloches $2 r_{BL}$ zu bilden:

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

Mit diesen beiden Größen, den Bezugsflächen und den entsprechenden Temperaturen kann der Wärmetransport zwischen Bohrlochrand und Ringpalt sowie zwischen Ringpalt und Kernrohr beschrieben werden, wobei die möglichen Durchströmungsrichtungen zu beachten sind. Generell gelten nach Bild 3 für den Wärmestrom von der

Eingabe: Sondenleistung

Geforderte Sondenleistung in W

Pfad und vorhandener bzw. zukünftiger Dateiname: F:\SD\IFE_TGA\Erwärmesonden\Beispiel_Koax_1\ZVERLAUFQ.dat

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Januar					3500	3500	3500		3500		3500		3500		3500		3500		3500	3500	3500		3500	
Februar					3500	3500	3500		3500		3500		3500		3500		3500		3500	3500	3500		3500	
März					3500	3500		3500		3500		3500		3500		3500		3500	3500	3500		3500		
April					3500		3500		3500		3500		3500		3500		3500		3500	3500		3500		
Mai					3500														3500					
Juni																								
Juli																								
August																								
September																								
Oktober																								
November																								
Dezember																								

ANZEIGEN drücken! Daten überschreiben (nur Zahlen, Komma, Minuszeichen)!
DATENSPEICHERUNG drücken!
Evtl. KONTROLLDRUCK erzeugen!

MASKE LEEREN DATENANZEIGEN DATENSPEICHERUNG KONTROLLDRUCK BEENDEN

raus auch die Sondenleistung berechenbar ist

$$\dot{Q}_{\text{Sonde}} = \dot{C}(t_{\text{aus}} - t_{\text{ein}}) \quad (7)$$

Je nachdem, ob die Flüssigkeitseintrittstemperatur t_{ein} oder die Leistung der Erdwärmesonde $\dot{Q}_{\text{Sonde}}$ vorgegeben ist, muss eine Anpassung durch wiederholende Berechnungen des vorgestellten Ablaufs mit gezielt veränderter Temperaturannahme t_{Umlenk} erfolgen. Details zur Anpassungsstrategie sind dem Programmlisting [3] zu entnehmen.

Simulationsprogramm und Beispiel_Koax_1

Für das Simulationsprogramm steht unter [3] ein kostenloser Download mit einer ausführlichen Beschreibung bereit. Zwei der insgesamt vier Eingabeoberflächen und ein Ausschnitt der Ergebnisdarstellung können dem Beispiel entnommen werden (Bild 4, 5, 6). Bezüglich der Erdreichmodellierung, der ther-

Bild 5

Eingabeoberfläche für die geforderten Sondenleistungen für Beispiel_Koax_1. Die stündlichen Werte gelten für alle Tage des jeweiligen Monats. Zugehörig zu den aufgeführten Betriebsstunden ist in diesem Beispiel der Durchfluss von 2000 l/h angenommen worden. Anstelle der Leistungen könnten auch die Flüssigkeitseintrittstemperaturen vorgegeben werden

und weiter mit dem Wärmekapazitätsstrom $\dot{C}$ der Flüssigkeit

$$t_V(i) = t_V(i+1) - \frac{\dot{Q}_V(i)}{\dot{C}} \quad (5)$$

$$t_R(i) = t_R(i+1) + \frac{\dot{Q}_R(i)}{\dot{C}} \quad (6)$$

Die Berechnung endet bei $i = 1$, dem oberen Rand der Erdwärmesonde. Es gelten dann: $t_{\text{ein}} = t_V(1)$ und $t_{\text{aus}} = t_R(1)$, wo-

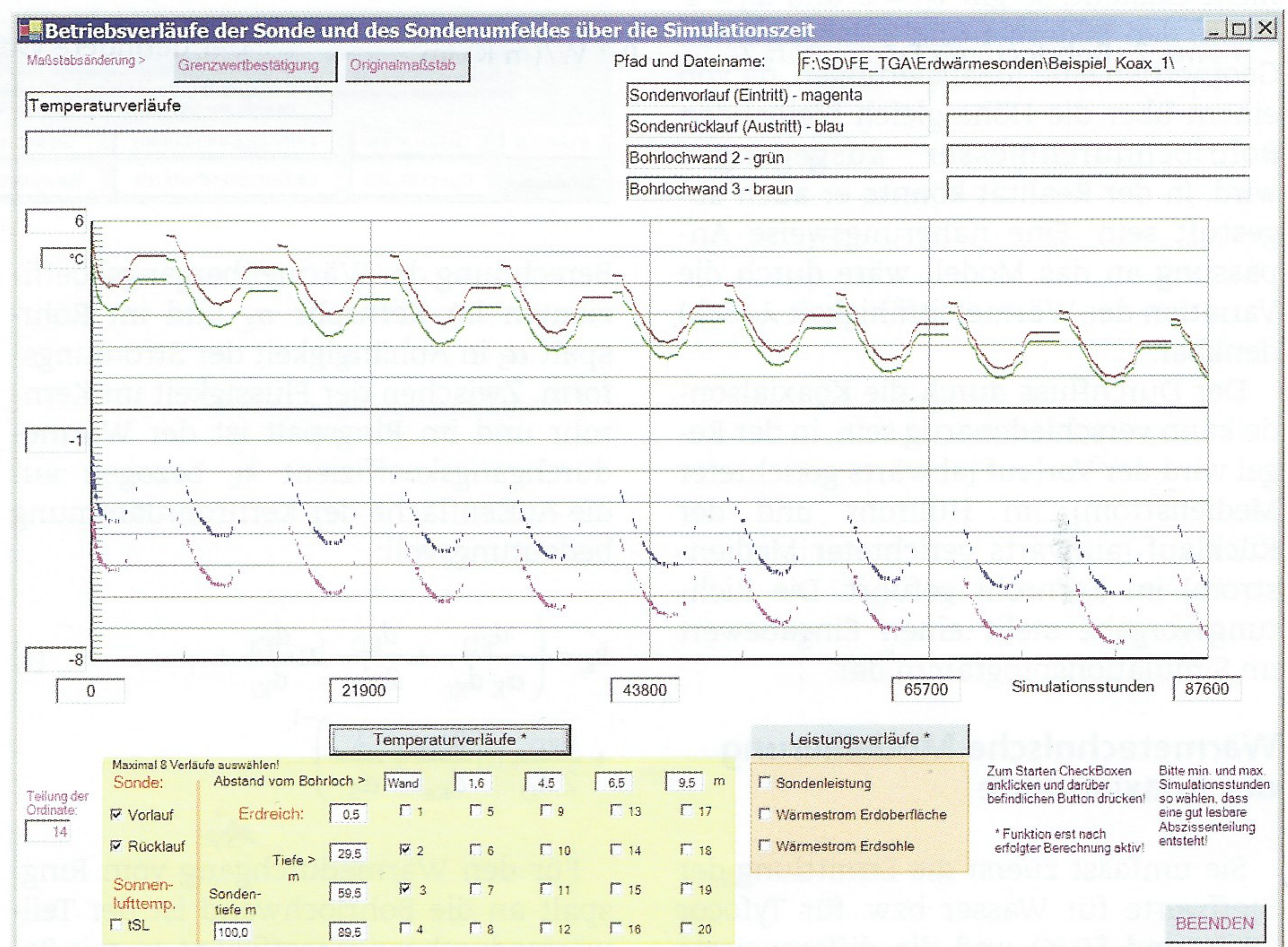
Bild 6

Vorlauf- und Rücklaufftemperaturen am Sondenkopf sowie zwei Bohrlochwandtemperaturen in ca. 30 m und 60 m Tiefe im Verlaufe von 10 Simulationsjahren

Bohrlochwand durch das Füllmaterial und die Hüllrohrwandung in den Ringspalt $\dot{Q}_H(i)$ sowie vom Ringspalt durch eine eventuell vorhandene Kernrohrdämmung und die Kernrohrwandung in das Kernrohr $\dot{Q}_K(i)$. 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 $\dot{Q}_K(i)$. Die Zuordnung wird programmintern vorgenommen. Die Berechnung beginnt mit dem Abschnitt iSonde unter Annahme der Umlenktemperatur t_{Umlenk} . Alle mein gelten für den Abschnitt i gemäß Bild 3 (links):

$$\dot{Q}_R(i) = k_K(t_V(i+1) - t_R(i+1))\pi d_{KD} \Delta h \quad (3)$$

$$\dot{Q}_V(i) = \kappa_H(t_{BL}(i) - t_V(i+1))\pi 2 r_{BL} \Delta h - \dot{Q}_R(i) \quad (4)$$



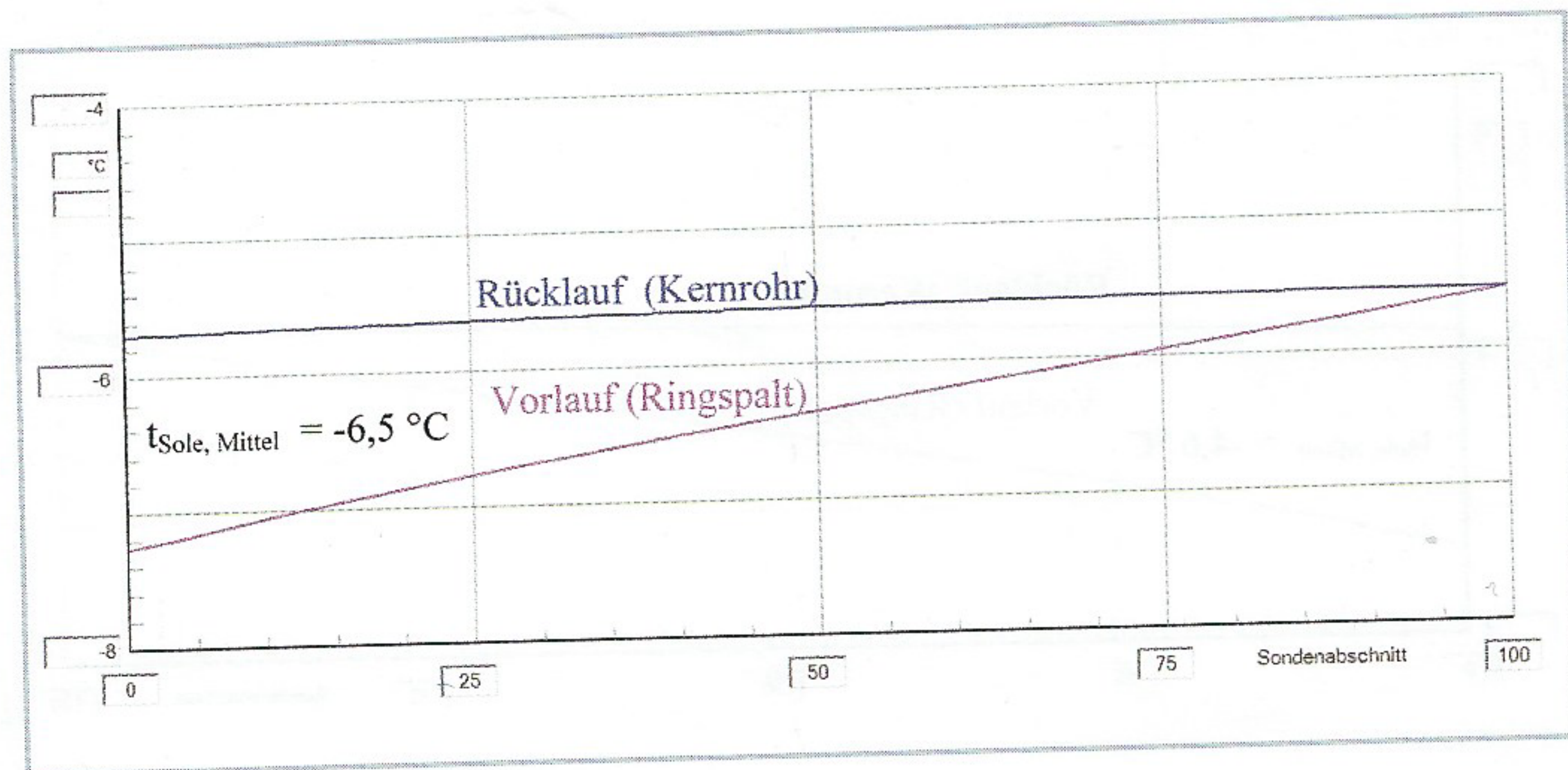


Bild 7

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 x 6,8; Kernrohr aus Kunststoff 50 x 4,6; Bohrllochdurchmesser 150 mm; Wärmeleitfähigkeit der Füllung 1 W/(m K); keine Dämmung der Sondenrohre) Merkmal:

- 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

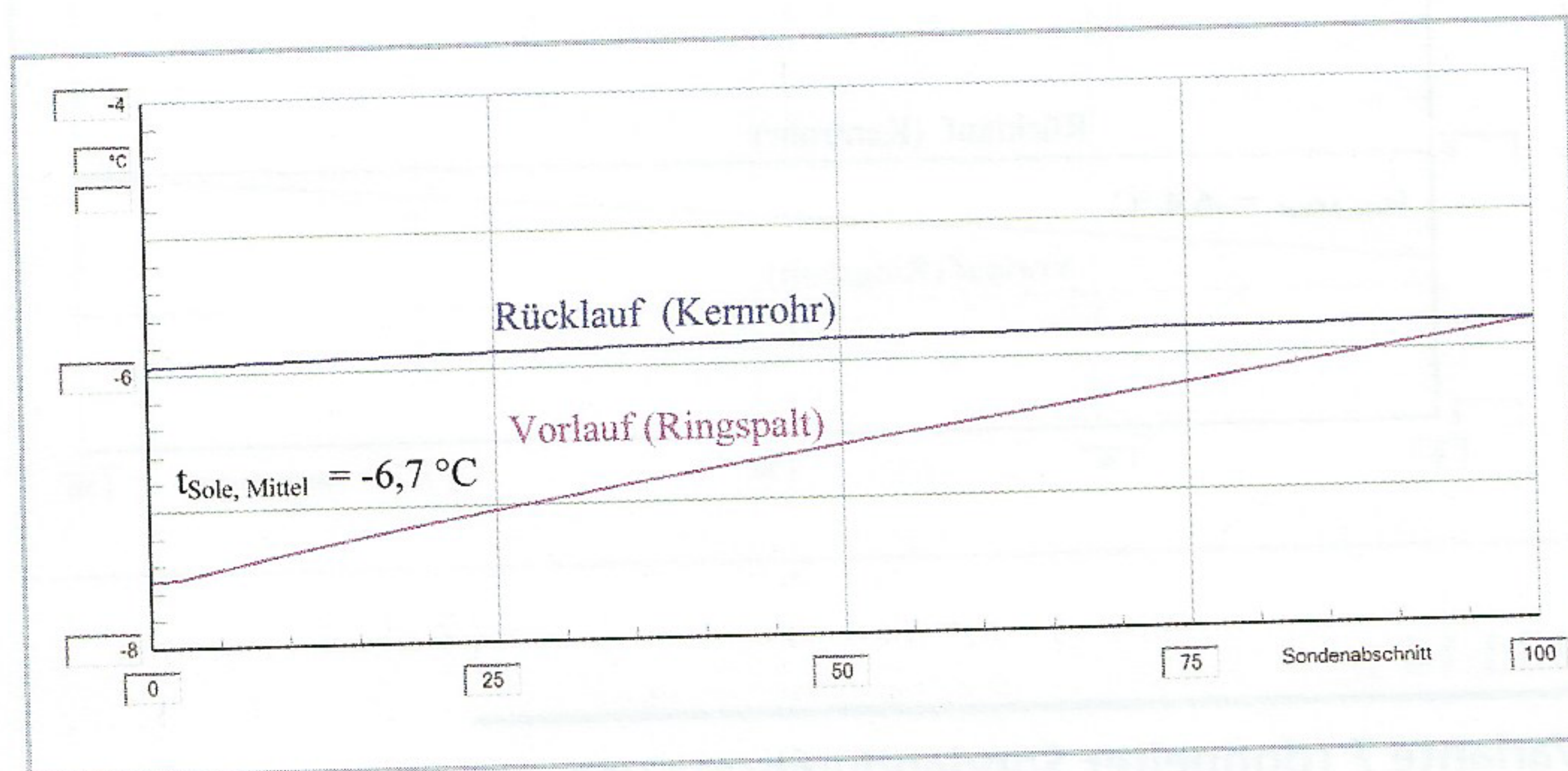


Bild 9

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

Merkmal:

- 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 Sondernähe ca. 3 °C .

mischen Randbedingungen und der wärmetechnischen Sondenbelastungen gelten die in [1, 2] getroffenen Festlegungen in gleicher Weise. Die betrachtete Sonde (Beispiel_Koax_1) dient der alleinigen Heizwärmenutzung. Es gelten die Merkmale:

- Die eingegebene Datei für die jährliche 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 Volllastbetriebsstunden (1997 h/a) sind gemäß Bild 5 über die Monate verteilt, wobei eine Sommerpause gegeben ist. Die spezifische Sondenleistung beträgt 35 W/m .

- Als Wärmeträger wird eine wässrige 25 %-ige Tyfocorlösung verwendet.

Bild 6 zeigt ein wichtiges Ergebnis, alle weiteren Resultate der Simulation sind [3] zu entnehmen.

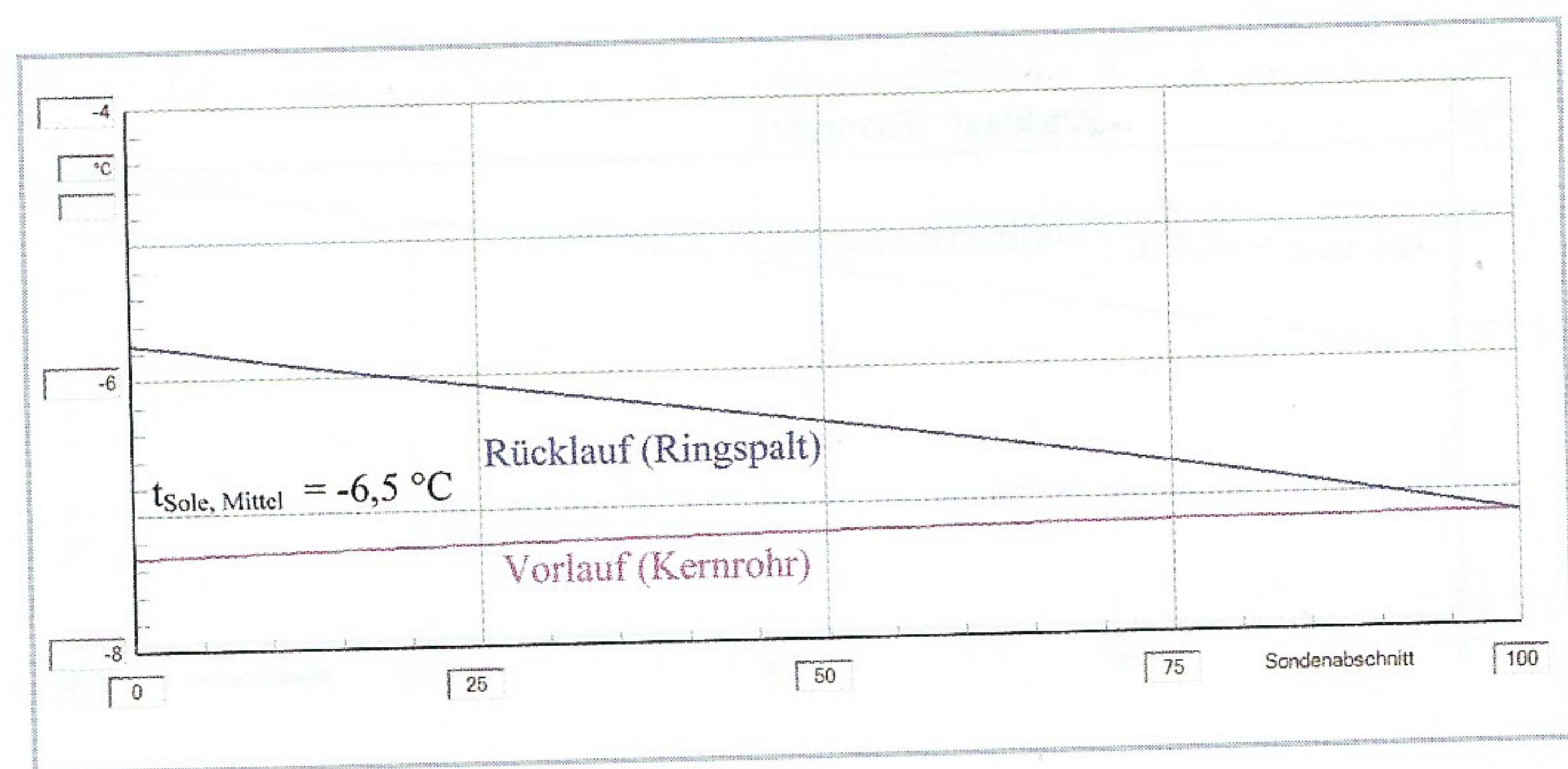


Bild 8

Variante 1 (Strömungsumkehr mit 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 zum Ursprungsbeispiel feststellbar

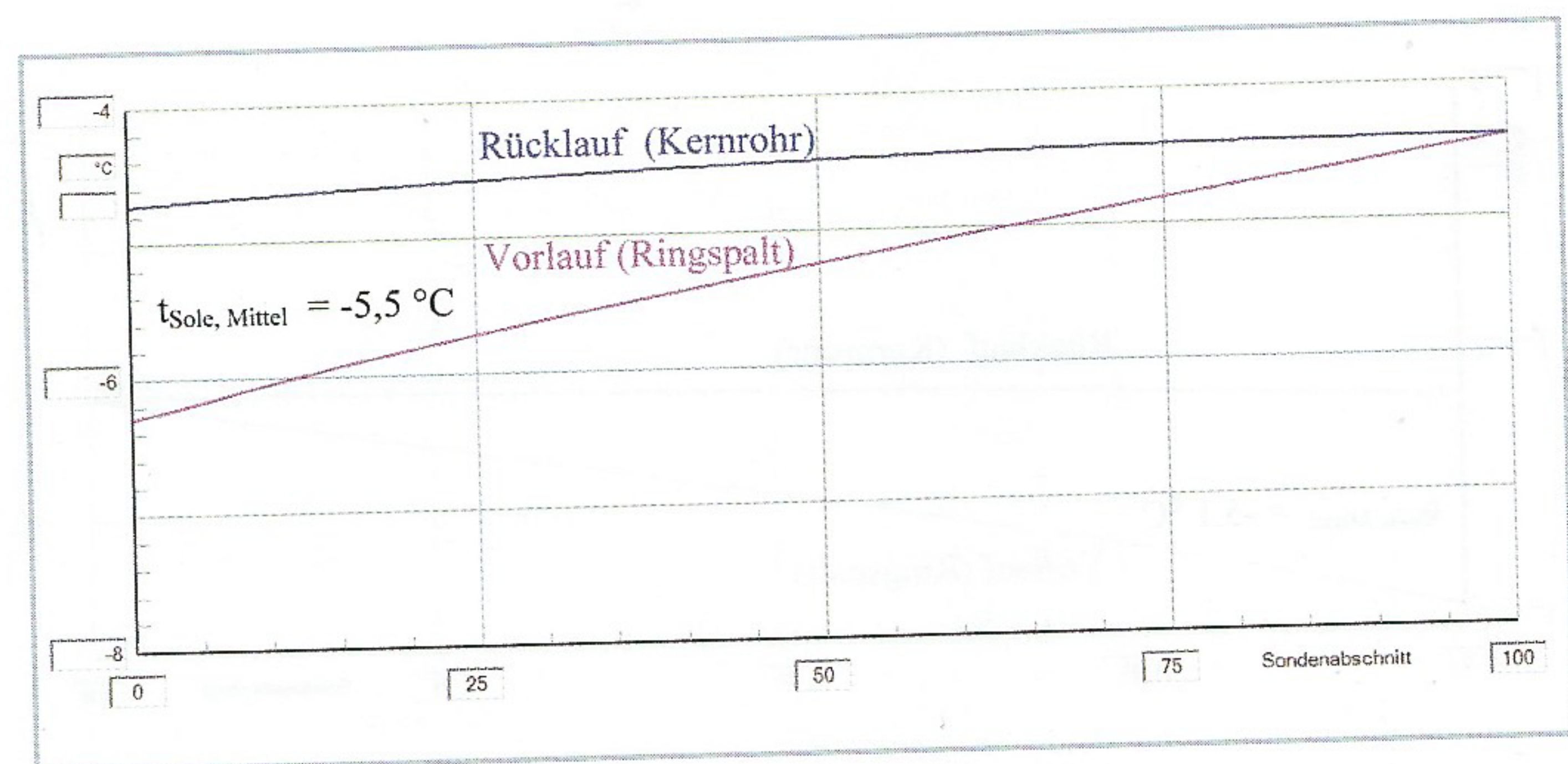


Bild 10

Variante 3 (Sondenrohre aus Edelstahl: Hüllrohr 60,3 x 2, Kernrohr 33,7 x 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 K wie bei den früheren Varianten gering, da der Wärmedurchgangswiderstand vom Ringspalt zum Kernrohr stark durch die relativ hohen Wärmeübergangswiderstände beeinflusst wird

Variationen des SONDENDURCHLAUFES und der SONDENGESTALTUNG am Beispiel_Koax_1

Um die Einflüsse von Parameteränderungen deutlich zu erkennen, wird in Variante 1 bis 7 jeweils nur ein Parameter gegenüber dem Ursprungsbeispiel (Beispiel_Koax_1) geändert. Als kennzeichnende Charakteristika sind in den Bildern 7 bis 14 der Temperaturverlauf längs der Sonde und die mittlere Sole-

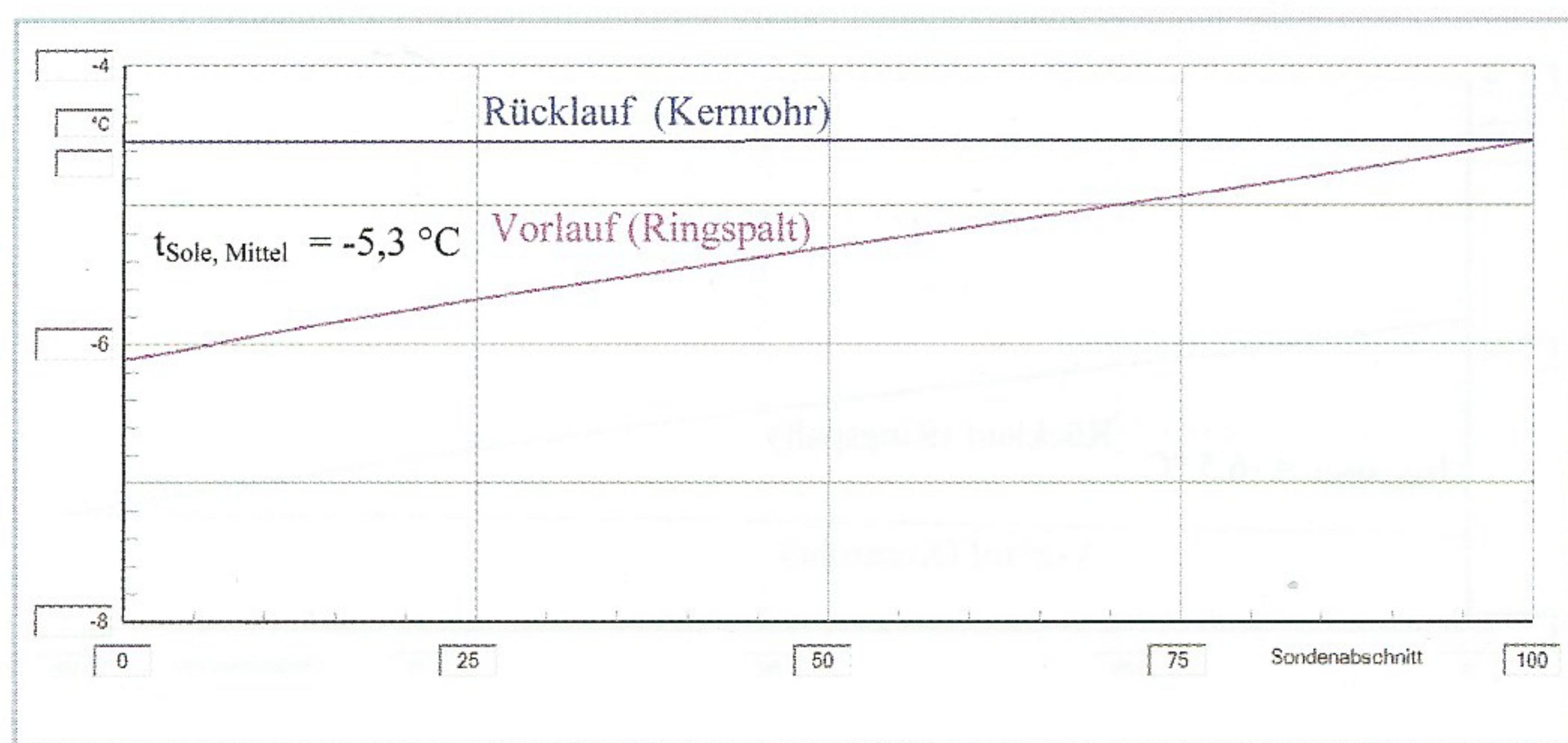


Bild 11

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

- Um die Dämmung des Kernrohres zu simulieren wurde hier ein Rohr 33,7 x 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

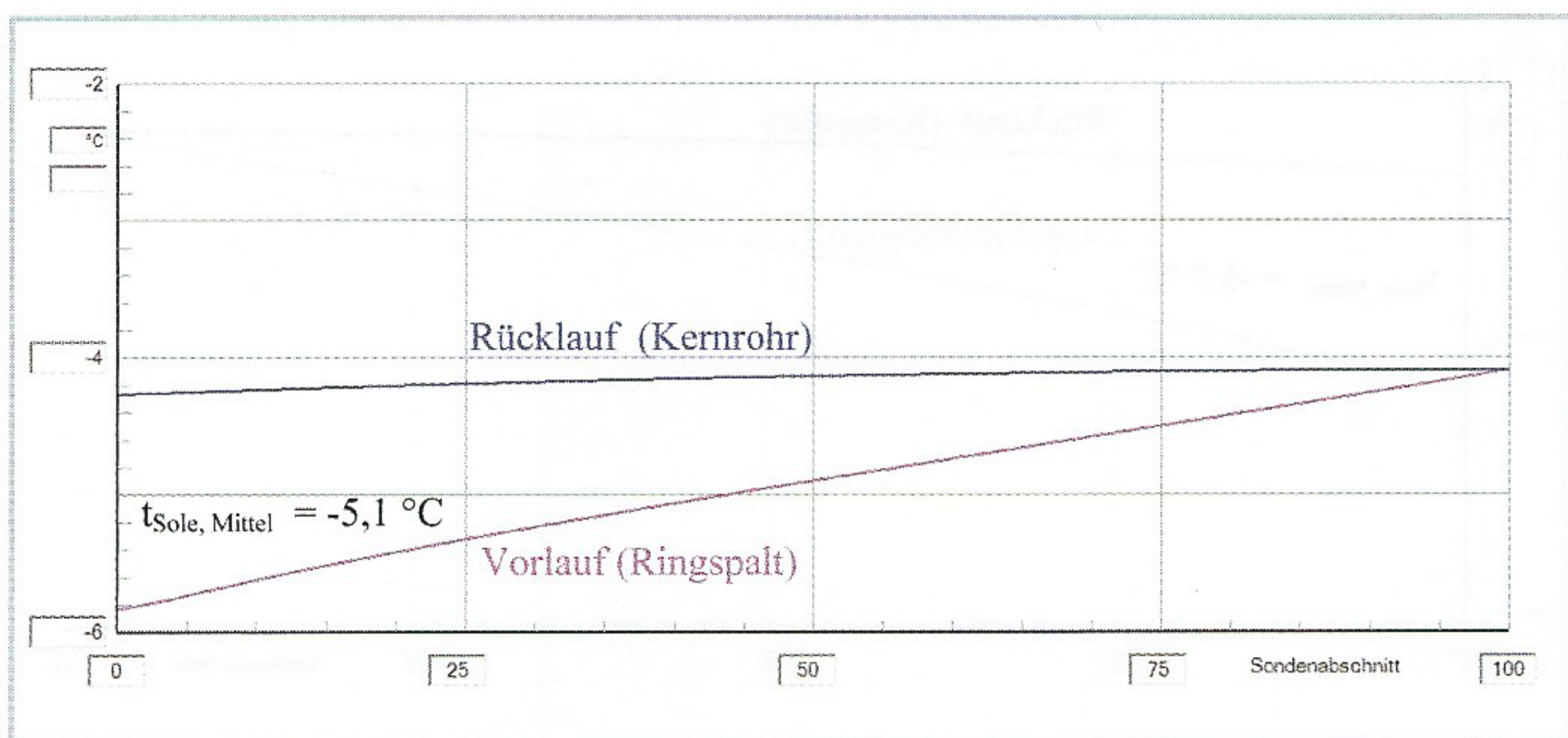


Bild 13

Variante 6 (gute wärmetechnische Anbindung ans Erdreich durch Verkleinerung des Bohrlochdurchmessers auf 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

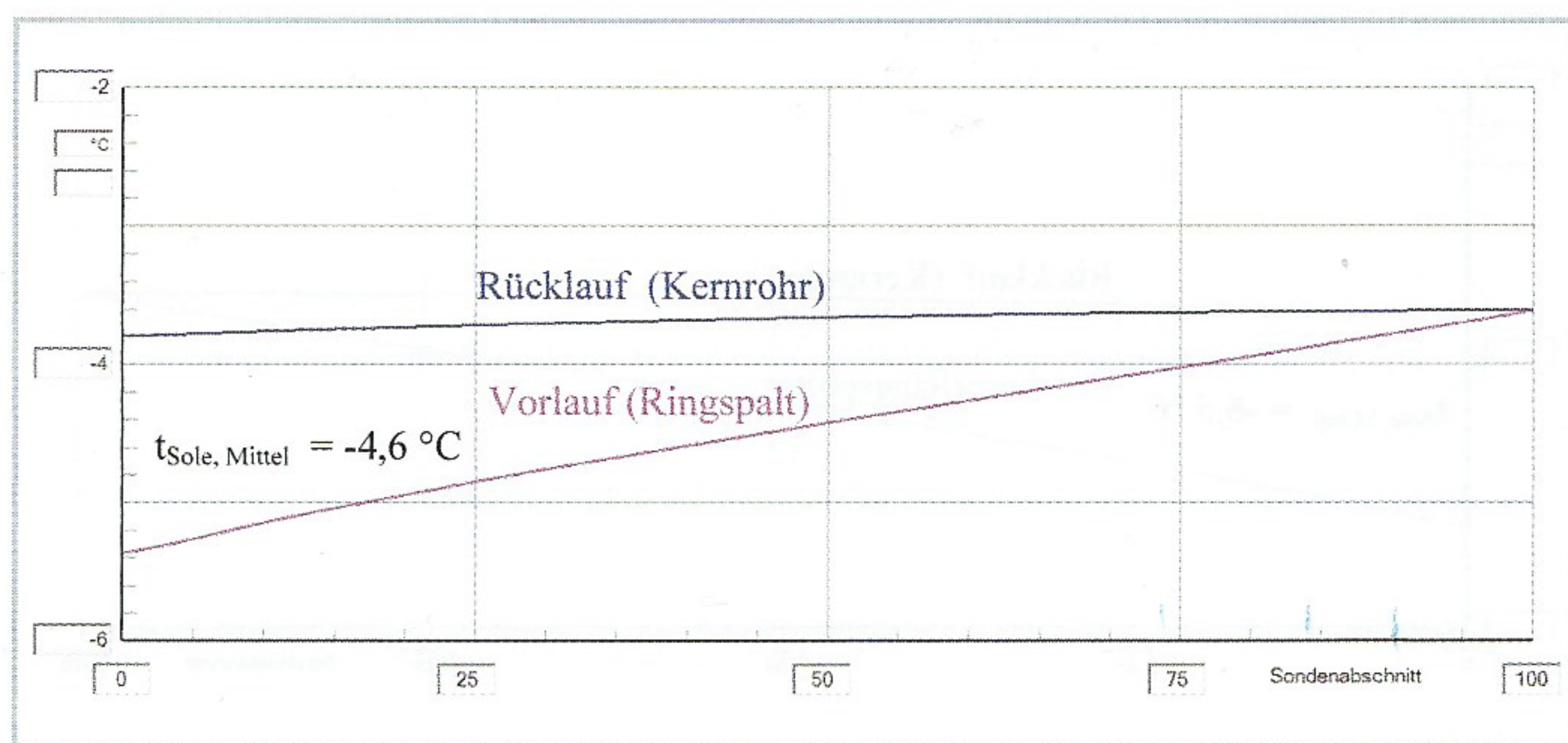


Bild 12

Variante 5 (gute wärmetechnische Anbindung ans Erdreich durch Bohrlochfüllung mit hoher Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{Füllung}} = 2 \text{ W/(m K)}$)
Merkmal:

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

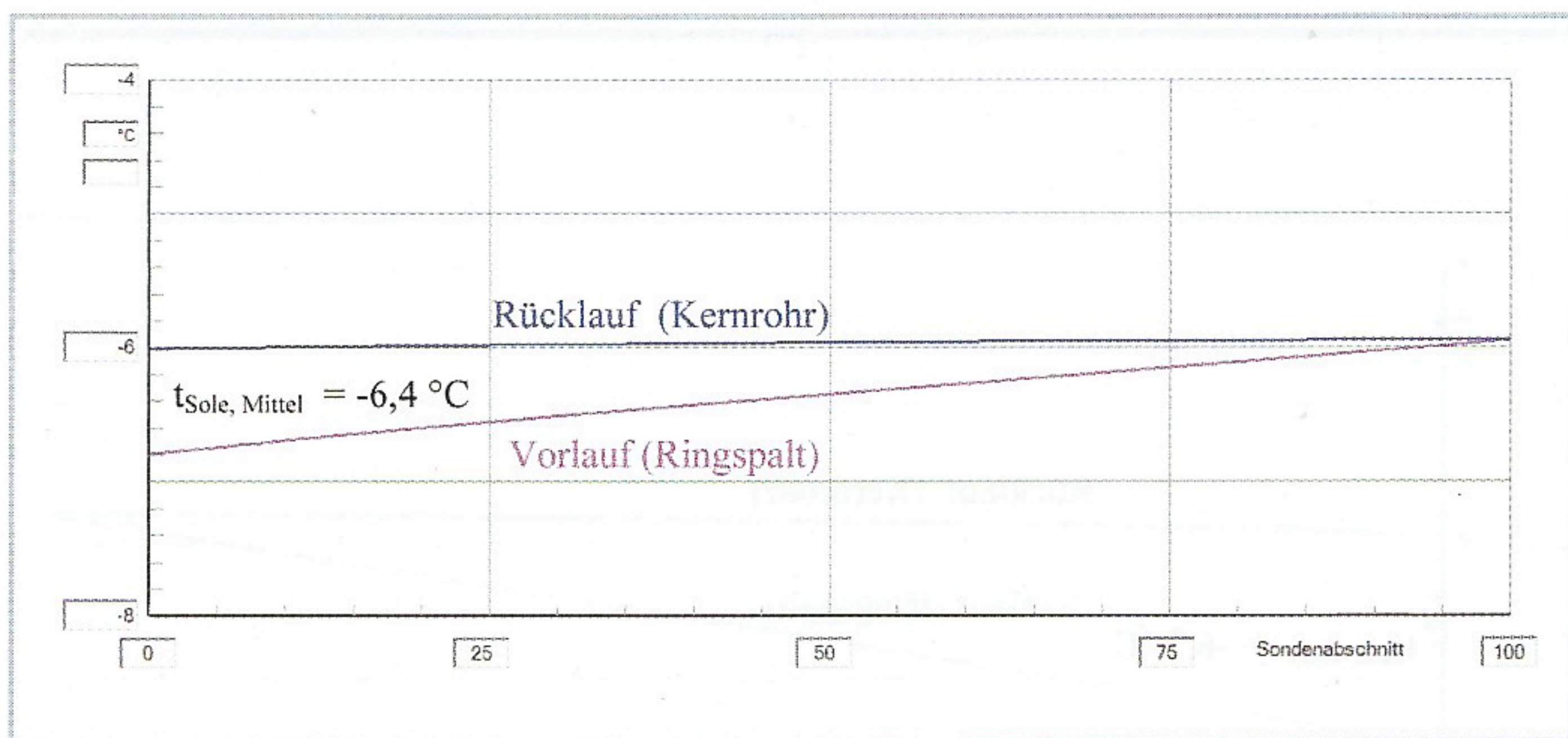


Bild 14

Variante 7 (doppelter Sondenumschlag von 4000 l/h)
Merkmal:

- Der erhöhte Sondenumschlag 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

temperatur am Sondenkopf $t_{\text{Sole, Mittel}}$ am Ende der Simulationszeit von 10 Jahren (letzte Betriebsstunde am 31. Dezember) dargestellt. Auf die speziellen Veränderungen und die markanten Merkmale wird in den Bildunterschriften verwiesen.

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“. Bericht der RUD. OTTO MEYER – Umwelt – Stiftung, Hamburg 2008.

http://www.rom-umwelt-stiftung.de/arbbisher/pdf/Glueck_Bericht_Erdwaermesonde.pdf

[2] Glück, B.: Neues Simulationsmodell für Erdwärmesonden, HLH Bd.Bd. 59 (2008) Nr. 10, S. 24-29 und Nr. 11, S. 58-63.

[3] Glück, B.: Simulationsmodell „Erdwärmesonden“. Bericht der RUD. OTTO MEYER – Umwelt – Stiftung, Hamburg 2008.

Kostenlos erhältlich unter: <http://www.rom-umwelt-stiftung.de> (=> Arbeit bisher => Projekt 18)

Detaillaufruf: http://www.rom-umwelt-stiftung.de/arbbisher/pdf/Glueck_Bericht_Koaxialsonde.pdf