

Bernd Glück

SIMULATIONSMODELL "ERDWÄRMESONDEN"

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

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	Einführung	1
2	Geometrische Modellierung des Simulationsbereiches	3
2.1	Gestaltung des Simulationsbereiches	3
2.2	Rechentechnische Darstellung des Simulationsbereiches	6
2.3	Wahl des Simulationsbereiches	7
	• Erdreichparameter	7
	• Betriebsweise	7
	• Sondenanordnung	8
	• Generelle Anmerkung	9
3	Wärmetechnische Modellierung des Simulationsbereiches	10
3.1	Instationäre Wärmeleitung im Simulationsbereich und Randbedingungen	10
3.2	Wärmebilanz für ein Volumenelement	12
3.3	Neue Temperatur und Phase des Volumenelementes	14
3.4	Stabilitätskriterium für die numerische Berechnung	16
4	Wärmetechnische Modellierung der Bohrung	17
4.1	Bekannte Anwendung von Formfaktoren	18
4.2	Erweiterte Formfaktorenmethode	19
4.3	Algorithmus zur Bestimmung von Formfaktoren für Sondengeometrien	20
	• Gitterfestlegung	20
	• Geometrie der wärmeübertragenden Flächen	21
	• Flächenkennzeichnung	21
	• Temperaturfüllung	21
	• Berechnung der Wärmeströme in der Struktur	22
4.4	Formfaktoren für spezielle Erdwärmesonden	22
	• Beispiele I	22
	• Beispiele II	24
	• Beispiele III	25
	• Berücksichtigung der Exzentrizität der Rohre im Bohrloch	26
	• Hinweis auf mögliche Veränderung der Formfaktorendefinition	26
4.5	Rechenprogramm zur Bestimmung von Formfaktoren	26
4.6	Besonderheiten bei Verwendung der Formfaktoren im Simulationsprogramm	28
5	Wärmetechnische Modellierung des Rohrsystems	31
5.1	Zustands- und Stoffwerte der Durchflussmedien (Wasser, Tyfocor L)	31

5.2	Wärmeübergangskoeffizient für die Rohrströmung und Teilwärmedurchgangskoeffizient	33
5.3	Wärmetransport in den Rohren	36
6	Komplexmodell der Simulation von Erdwärmesonden	38
6.1	Festlegungen der Randbedingungen	38
	• Temperatur an der Erdoberfläche	38
	• Temperatur an der Sohle des Simulationsgebietes	40
	• Flüssigkeitseintrittstemperatur und Sondenleistung	40
	• Sondendurchfluss	40
	• Datenzusammenstellung für den Sondenbetrieb	40
6.2	Verknüpfung der Einzelalgorithmen zum Simulationsmodell	41
	• Instationäre Simulation	41
	• Stationäre Simulation	41
	• Wärmebilanzen an den Rändern des Simulationsgebietes	42
	• Speicherwärme im Simulationsgebiet	42
6.3	Programmablaufplan	43
6.4	Komplexprogramm zur Simulation der Erdwärmesonden	45
	• Hauptprogramm	45
	• Hauptprogrammeingabe und Steuerung des Programmablaufes	46
	• Eingabe zeitlich veränderlicher Flüssigkeitseintrittstemperaturen	48
	• Eingabe zeitlich veränderlicher Sondenleistungen	49
	• Eingabe zeitlich veränderlichen Durchflusses	50
	• Ausgaben (Druck- und Diagrammarten)	51
	• Hinweise zur Diagrammgestaltung	55
7	Programminstallation und Hinweise zu Programmänderungen	57
	• Grundlagen für die Programmanwendung	57
	• Start der Rechenprogramme	57
	• Bearbeitung der Programmlistings	58
8	Beispiele	59
8.1	Vorbemerkungen	59
	• Erdreichmodellierung	59
	• Gestaltung der Erdwärmesonde	59
	• Thermische Randbedingungen	60
	• Wärmetechnische Sondenbelastung	61
8.2	Alleinige Heizwärmenutzung beim Sondenbetrieb (Beispiel 1)	62

8.3	Variationen der Simulationsannahmen am Beispiel 1	73
	• Feinere Gitterteilung (Beispiel 1a)	73
	• Größere Zeitschrittweite (Beispiel 1b)	74
	• Tiefer liegende Sohle des Simulationsgebietes (Beispiel 1c)	74
	• Größerer Einflussbereich des Simulationsgebietes (Beispiel 1d)	75
	• Einfluss der Starttemperaturverteilung (Beispiel 1e)	77
8.4	Langzeitsimulation über 50 Jahre	79
8.5	Kombinierte Wärme-/Kältenutzung beim Sondenbetrieb (Beispiel 2)	80
8.6	Testbeispiel zur weiteren Demonstration der Simulationsmöglichkeiten	86
	Literaturverzeichnis	91

1 Einführung

Ziel der Ausarbeitung ist die Schaffung und kostenlose Bereitstellung eines Simulationsmodells für Erdwärmesonden.

Die wärmetechnische Nutzung der Erdwärmesonden kann verschiedene [energiesparende Lösungen](#) befördern. [Einsatzgebiete](#) sind beispielsweise:

- Wärmequellen für Wärmepumpen
- Wärmesenken für Bauteilkühlungen
- Wärme-/Kältespeicher.

Die genannten, umfassenden Einsatzmöglichkeiten haben bemerkenswerte energetische Vorteile. So ist in den beiden ersten Fällen eine [umweltschonende regenerative Energiequelle](#) verfügbar.

Bei großflächigen Bauteilkühlungen kann die Temperatur des aus der Sonde austretenden Mediums über lange Zeiträume niedrig genug sein, um eine direkte Kühlung zu verwirklichen. Ansonsten kann die Sonde als günstige Wärmesenke für eine Kältemaschine dienen.

Besonders vorteilhaft ist es, dass die Nutzung der Erdwärmesonde unabhängig von der Tageszeit mit stets gleicher Effizienz möglich ist. Damit können im Kühlfall auch Raumkühlflächen ohne Speichereffekte, d. h. beispielsweise übliche Kühldecken, mit regenerativer Energie versorgt werden. Schließlich bietet der dritte Fall, die Erdwärmesonde als Wärmequelle und Wärmesenke gleichermaßen zu nutzen, die Möglichkeit, zeitweise anfallende Energie zwischenzuspeichern. Dies könnte im Idealfall eine ausgeglichene Wärmebilanz im Jahresgang liefern.

Der [konstruktive Aufbau der Erdwärmesonden](#) ist vielfältig. Die Hauptmerkmale sind:

- Einfachsonde (ein U-Rohr)
- Doppelsonde (zwei U-Rohre)
- Sondentiefe (z. B. 10 ... 200 m)
- ohne/mit Wärmedämmung der Rohre in Nähe der Erdoberfläche
- Durchmesser der Rohre und der Bohrung
- Lage der medienführenden Rohre im Bohrlochquerschnitt
- Bohrlochverfüllmaterial.

Im vorliegenden Simulationsmodell wird sich auf Varianten mit U-Rohren beschränkt, da sie den weitaus häufigsten Einbaufall verkörpern. Konzentrische Rohranordnungen von Vor- und Rücklauf sind seltener und erfordern höheren bautechnischen Aufwand, um eine gute thermische Ankopplung an das Erdreich zu realisieren.

Von besonderem Einfluss sind selbstverständlich auch die [Erdreichparameter](#), wie beispielsweise:

- Temperatur des Erdreichs als Zeitfunktion
- Stoffwerte des Erdreichs (Dichte, Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität)
- Eisbildung in Sondennähe
- Grundwassereinfluss als Zeitfunktion
- gegenseitige Beeinflussung im Sondenfeld.

Es sei darauf hingewiesen, dass über fließendes Grundwasser kaum verlässliche Daten erhältlich sind und der wärmetechnische Einfluss auf die Leistung der Erdwärmesonden demzufolge nur relativ ungenau modellierbar ist.

Schließlich ist noch die **Betriebsart der Erdwärmesonde** bedeutungsvoll. Hier sind beispielhaft zu nennen:

- Durchflussmedium (Art der Sole, Wasser)
- Volumenstrom (turbulente oder laminare Strömung) als Zeitfunktion
- Leistungsanforderung oder Eintrittstemperatur als Zeitfunktion.

Die im Weiteren vorgestellte, völlige Neuentwicklung eines **Simulationsmodells für die wärmetechnischen Gegebenheiten von Erdwärmesonden** soll folgenden Ansprüchen genügen:

- genaue Darlegung der geometrischen und wärmetechnischen Modellierungen
- detaillierte Darstellung der Randbedingungen
- Algorithmus in Modulbauweise und Kennzeichnung der internen Schnittstellen
- vollkommene Offenlegung des Algorithmus einschließlich des Listings
- nachträgliche Ergänzungsmöglichkeiten für spezielle Einsatzbedingungen
- Kompromissfindung zwischen hoher Genauigkeit und kurzer Rechenzeit
- kostenfreie Nutzung des Simulationsmodells.

Damit können Erdwärmesonden unterschiedlichsten Aufbaus unter vielfältigsten thermischen sowie zeitlichen Randbedingungen untersucht werden. Mit Hilfe von Variantenvergleichen sind optimale Konstruktionen und/oder Betriebsbedingungen auffindbar.

An Beispielen werden die verschiedenen Einflüsse auf die Sondenleistung und deren Nachhaltigkeit demonstriert. Dabei wird die Komplexität der wärmetechnischen Vorgänge im Erdreich und im Bohrloch mit den Sondenrohren deutlich. Angaben über dauerhafte, konstante Entzugsleistungen – z. B. 50 W/m – sind nur unter bestimmten Randbedingungen realistisch.

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!

2 Geometrische Modellierung des Simulationsbereiches

2.1 Gestaltung des Simulationsbereiches

Es wird ein Simulationsverfahren entwickelt, welches von jedermann flexibel an die spezielle Problematik anpassbar ist. Als vorteilhaft wird hierfür die **Finite-Volumen-Methode** erachtet, weil das mathematische Formulieren und das Verfolgen der instationären Wärmeleitung, der Energiespeicherung und ggf. auch des Phasenwandels bei Eisbildung besonders anschaulich erfolgen. Die wärmetechnischen Vorgänge im Bohrloch selbst werden dagegen quasistationär betrachtet und somit nicht in den instationär betrachteten Simulationsbereich einbezogen.

Unter der Annahme eines zu jeder Zeit τ **rotationssymmetrischen Temperaturfeldes** $t(r, z, \tau)$ um das Bohrloch ist bezüglich der Geometrie eine nur zweidimensionale Diskretisierung nötig, wodurch Rechenzeit eingespart werden kann. Somit besitzt der **Simulationsbereich** um die Sondenumgebung **Zylinderform** (Bilder 2.1 und 2.2), wobei die Zylinderachse mit der Bohrlochachse identisch ist. Die vertikalen Simulationsabschnitte $i = 1 \dots i_{\max}$ haben alle die gleiche Dicke Δh . Das Erdreich kann jedoch aus mehreren Stoffschichten bestehen. Die Volumenelemente werden generell als **Kreisringe** der Dicke Δh approximiert. Die Kreisringe $k = 1 \dots k_{\max}$ beginnen mit dem Bohrdurchmesser r_{BL} als Innendurchmesser und enden mit dem wählbaren Außendurchmesser r_{EB} , der den zu betrachtenden Einflussbereich angibt (Bild 2.2). Die Wahl der Kreisringbreiten δ_k könnte nach verschiedenen Gesichtspunkten erfolgen. Im Bild 2.2 weisen sie beispielsweise gleiche Breite $\delta_{k=1 \dots k_{\max}}$ auf.

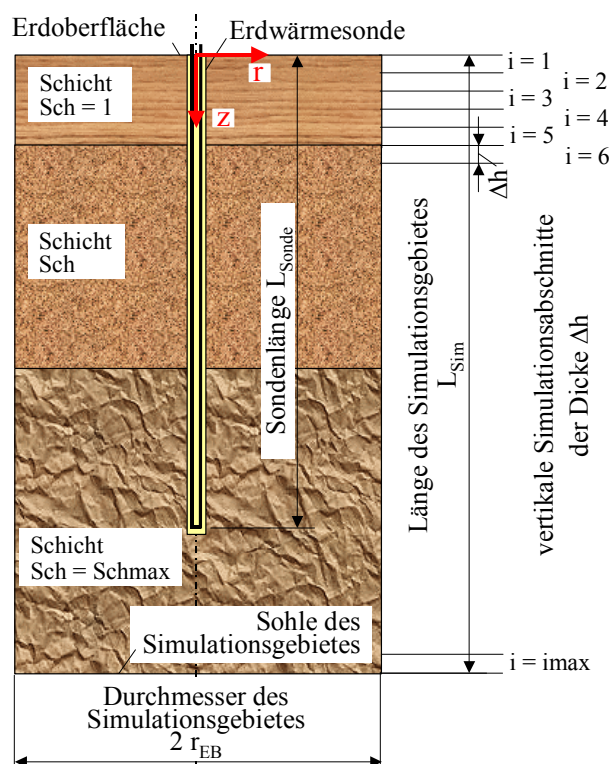
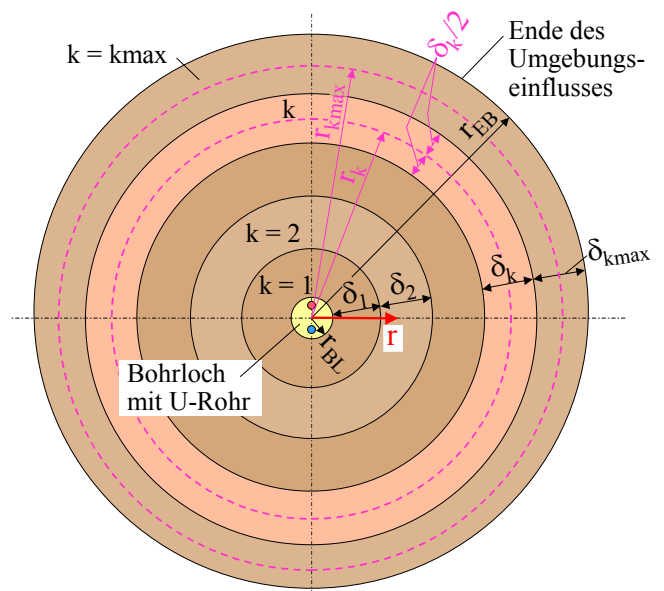


Bild 2.1 Vertikaler Schnitt durch das Simulationsgebiet in Form eines Erdreichzylinders mit unterschiedlichen horizontalen Schichten und mit Kennzeichnung der Simulationsabschnitte $i = 1 \dots i_{\max}$. Die Zylinderachse und die Sondenachse sind deckungsgleich.



Die Durchmesser des Bohrdurchmessers $2 r_{BL}$ und des Simulationsgebietes $2 r_{EB}$ sind größer dargestellt als im linken Bild!

Bild 2.2 Horizontaler Schnitt durch das Simulationsgebiet (Erdreichzylinder) mit aneinander grenzenden Kreisringen $k = 1 \dots k_{\max}$ gleicher Breite δ_k (Mittelpunkte für Bohrloch und Kreisringe sind identisch). r_k stellt den mittleren Radius des Kreisringes k dar.

Für die in allgemeiner Form dargestellten Kreisringe k ist jeweils der mittlere Radius r_k repräsentativ, sodass sich der Kreisring von $r_k - \delta_k/2$ bis $r_k + \delta_k/2$ erstreckt. Damit hat das Volumenelement gemäß Bild 2.3 das **Volumen**

$$V_k = \pi \left[\left(r_k + \frac{\delta_k}{2} \right)^2 - \left(r_k - \frac{\delta_k}{2} \right)^2 \right] \Delta h = 2 \pi r_k \delta_k \Delta h. \quad (2.1)$$

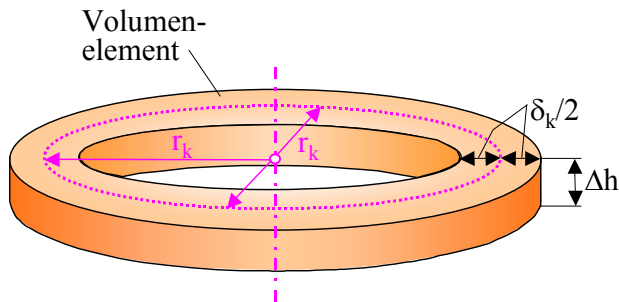


Bild 2.3 Darstellung des Volumenelementes (Kreisring der Dicke $\Delta h \equiv$ Hohlzylinder) mit dem mittleren Radius r_k

Zunächst wurde daran gedacht, die Breite der Kreisringe von innen nach außen wachsen zu lassen, sodass am Bohrloch eine feine Diskretisierung vorliegt. Würde man als Bildungsgesetz vorgeben, dass die Kreisringbreite dem Radius proportional sein soll

$$\delta_k = \varepsilon r_k$$

und passt man k_{\max} Kreisringe lückenlos zwischen den vorgegebenen Radien r_{BL} und r_{EB} ein, so ergeben sich mit

$$\varepsilon = 2 \frac{(r_{EB}/r_{BL})^{1/k_{\max}} - 1}{(r_{EB}/r_{BL})^{1/k_{\max}} + 1}.$$

die Radienverhältnisse

$$\frac{r_l}{r_{BL}} = \frac{1}{1 - \varepsilon/2}; \quad \frac{r_{k+1}}{r_k} = \frac{1 + \varepsilon/2}{1 - \varepsilon/2} \text{ (geometrische Folge); } \quad \frac{r_{EB}}{r_{k_{\max}}} = \frac{1 + \varepsilon/2}{1}.$$

Für den Bohrlochradius $r_{BL} = 75 \text{ mm}$, den Radius des Einflussbereiches $r_{EB} = 5 \text{ m}$ und $k_{\max} = 20$ Unterteilungen folgen mit den abgeleiteten Berechnungsgleichungen die im Bild 2.4 dargestellten Verhältnisse.

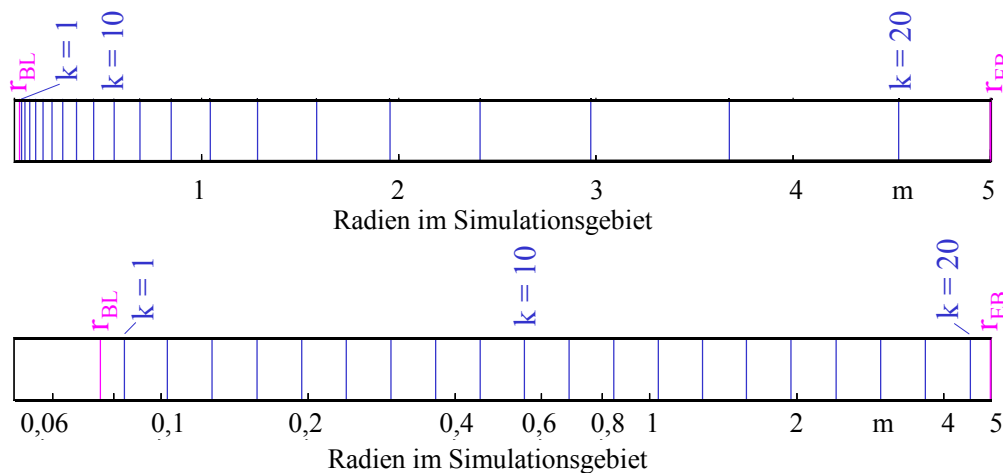


Bild 2.4 Radien zwischen Bohrloch $r_{BL} = 0,075 \text{ m}$ und dem Ende des Einflussbereiches $r_{EB} = 5 \text{ m}$ gemäß Berechnung (blaue Linien) oben: lineare Achsteilung unten: logarithmische Achsteilung

Die Darstellung mit logarithmischer Achsteilung zeigt sofort die geometrische Radienabstufung. Aber die lineare Achsteilung verdeutlicht die zu feine Gitterunterteilung in Nähe des Bohrloches.

Deshalb wird die geometrische Radienteilung verworfen, obwohl sie den bestechenden wärmetech-nischen Vorteil besitzt, dass alle Wärmeströme in radialer Richtung mit einer Konstanten K und der Temperaturdifferenz gebildet werden können:

$$\dot{Q}_k = 2\pi\lambda\Delta h \frac{\Delta t}{\ln \frac{r_k}{r_{k-1}}} = K \Delta t.$$

Die weitere Überlegung analysiert die Besonderheiten des zweidimensionalen Wärmestromes (Bild 2.5). Er wird beispielsweise längs der Sonde – bevorzugt natürlich im mittleren Sondenabschnitt – radial ausgerichtet sein. In der Erdschicht zwischen der Sohle des Simulationsgebietes und dem unteren Ende der Sonde erfolgt vorwiegend ein vertikaler Wärmestrom. Bereiche mit ausgeprägter zweidimensionaler Wärmeleitung existieren am Sondenfuß und am Sondenkopf.

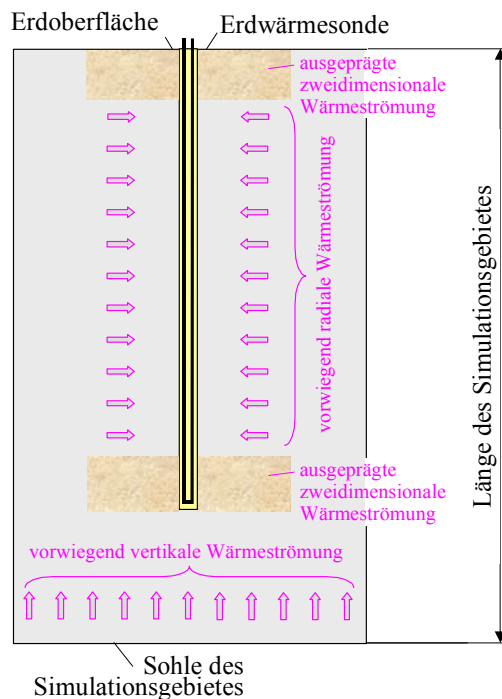


Bild 2.5 Stark vereinfachte Darstellung der bevorzugten Wärmeleitung im Erdreich

Ringelemente nach Bild 2.3 mit geringer Breite δ_k und großer Höhe Δh haben einen geringen Wärmeleitwiderstand in radialer Richtung aber einen großen in vertikaler Richtung, wodurch die elementweise bestimmte Temperaturverteilung in diesem Gebiet ein "verzerrtes" Bild ergibt. Deshalb wird bei der Gittermodellierung die **Gleichheit der Wärmeleitwiderstände** in beide Richtungen angestrebt. Betrachtet man losgelöst voneinander die Wärmeleitung innerhalb des Volumenelementes mit der im Bild 2.3 gezeigten Geometrie, so folgen bei jeweils gleicher Temperaturdifferenz Δt zwischen den gegenüberliegenden Oberflächen in vertikaler und in radialer Richtung

$$\dot{Q}_{\text{vertikal}} = 2\pi\lambda r_k \delta_k \frac{\Delta t}{\Delta h} \quad (2.2)$$

$$\dot{Q}_{\text{radial}} = 2\pi\lambda\Delta h \frac{\Delta t}{\ln \frac{r_k + \delta_k/2}{r_k - \delta_k/2}} \quad (2.3)$$

Setzt man beide Wärmeströme gleich, so folgt:

$$r_k \delta_k \ln \frac{r_k + \delta_k/2}{r_k - \delta_k/2} = \Delta h^2. \quad (2.4)$$

Ersetzt man den Logarithmus durch das erste Glied der nachfolgenden Reihe

$$\ln \frac{r_k + \delta_k/2}{r_k - \delta_k/2} = \ln \frac{1 + \frac{\delta_k}{2r_k}}{1 - \frac{\delta_k}{2r_k}} \approx 2 \frac{\delta_k}{2r_k} + \frac{2}{3} \left(\frac{\delta_k}{2r_k} \right)^3 + \dots \quad (2.5)$$

ergibt sich infolge der Linearisierung die erwartete, einfache Forderung

$$\delta_k \approx \Delta h. \quad (2.6)$$

Für die Gittergenerierung sollten i_{\max} und k_{\max} entsprechend gewählt werden.

Somit gilt im Weiteren:

$$\delta \equiv \delta_{k=1 \dots k_{\max}} = \text{const.} \quad (2.7)$$

2.2 Rechentechnische Darstellung des Simulationsbereiches

Die Bilder 2.1 und 2.2 zeigen das darzustellende zylindrische Simulationsgebiet mit dem r, z -Koordinatensystem. Für die rechentechnische Abarbeitung wird dafür ebenfalls ein **zweidimensionales Gitter in zylindrischer Form** mit den Zählvariablen i und k verwendet (Bild 2.6), woraus schließlich das Gitter in einer r, z -Ebene entwickelt wird (Bild 2.7).

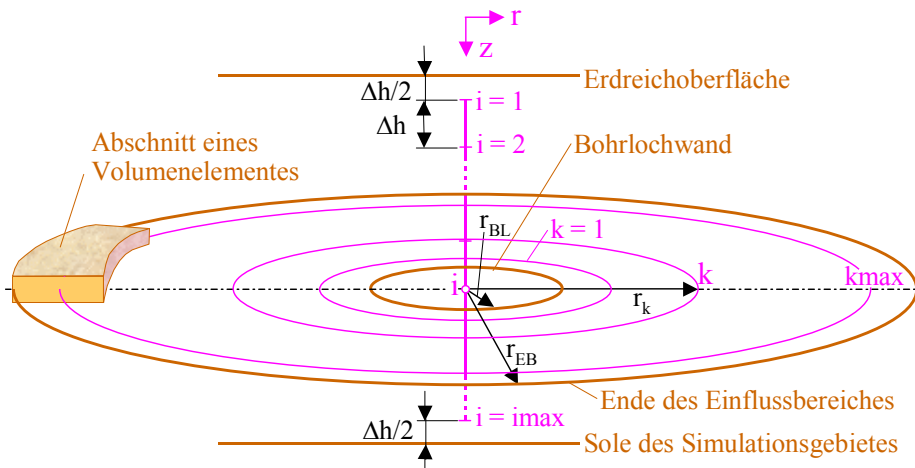


Bild 2.6 Zweidimensionales Gitter i, k und Darstellung der Begrenzungen mit realen Abmessungen
Die Kreise k liegen jeweils in der Mitte des im Bild 2.3 dargestellten ringförmigen Volumenelementes.

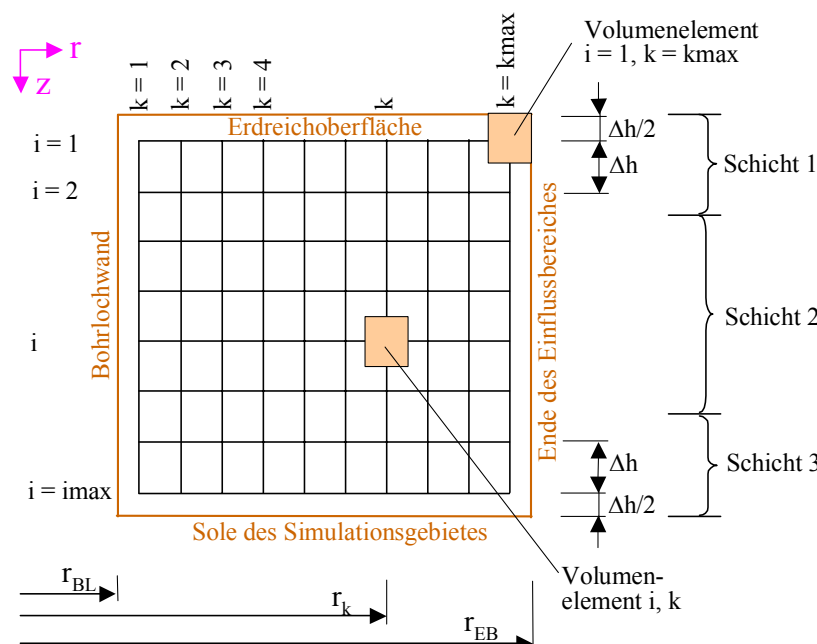


Bild 2.7 Zweidimensionales Gitter i, k und Darstellung der Begrenzungen mit Höhentteilung (z -Richtung) und Radiusteilung (r -Richtung)
Vorhandene Erdschichten mit unterschiedlichen Stoffwerten werden bezüglich ihrer Dicke so approximiert, dass sie von ganzen Volumenelementen gefüllt werden.

Die Volumenelemente stellen in der Horizontale liegende Kreisringe gemäß Bild 2.3 mit den mittleren Radien r_k dar. Die Anzahl der Unterteilungen k_{\max} ist dabei ein wählbarer Vorgabewert. Es folgen:

$$\delta = \frac{r_{EB} - r_{BL}}{k_{\max}} \quad (2.8)$$

$$r_k = r_{BL} + (k - 0,5) \delta \quad (2.9)$$

Die vertikalen Abstände Δh sind über die vorgegebene Länge des Simulationsgebietes L_{Sim} konstant. Damit ergibt sich für den Vorgabewert i_{\max} :

$$\Delta h = \frac{L_{\text{Sim}}}{i_{\max}} \quad (2.10)$$

Die Mitte des Volumenelementes gemäß der Bilder 2.3 und 2.6 liegt in einer Tiefe von

$$z_i = (i - 0,5) \Delta h \quad (2.11)$$

unter der Erdoberfläche. Das Volumen ist nach Gl. (2.1) berechenbar.

Die im Bild 2.1 dargestellten Schichtdicken, für die unterschiedliche Erdreichparameter gelten, werden den ganzzahligen i zugeordnet, d. h. gegebenenfalls "angepasst". Der damit eventuell verbundene Fehler ist gering, da die Schichtgrenzen in der Regel ohnehin nicht scharf definiert sind.

Die Sondenlänge L_{Sonde} und die Länge des Simulationsgebietes L_{Sim} sollten so gewählt werden, dass sie durch Δh ganzzahlig teilbar sind. Gleiches gilt für Sonderfälle der Sondengestaltung, so beispielsweise wenn eine bestimmte Länge eines Sondenrohres unter der Erdoberfläche gedämmt wird.

2.3 Wahl des Simulationsbereiches

Trivial formuliert sollte das zu untersuchende Simulationsgebiet so groß gewählt werden, dass an seinen Rändern eindeutige wärmetechnische Randbedingungen definierbar sind. Aber dies ist eben sehr häufig nicht gegeben und Approximationen sind oftmals unsicher. Nachfolgende Hinweise sollen die verschiedenartigen Einflüsse verdeutlichen und Hilfestellungen geben:

- **Erdreichparameter**

Die Stoffwerte Wärmeleitfähigkeit λ , Dichte ρ und spezifische Wärmekapazität c nehmen auf die Fortpflanzung einer Temperaturänderung Einfluss. Sie ist linear von der Temperaturleitfähigkeit $a = \lambda / (\rho c)$ abhängig. Dies bedeutet grundsätzlich: Je größer a ist, umso größer sollte auch der Simulationsbereich gewählt werden.

- **Betriebsweise**

Ideal sind Erdwärmesonden, die über einen bestimmten Zeitraum – in der Regel über ein Jahr – eine **ausgeglichene Wärmebilanz** ($|\text{Wärmeentzug}| \approx |\text{Wärmezufuhr}|$) aufweisen. Dies ist beispielsweise gegeben, wenn die Sonden im Winter als Wärmequelle und im Sommer als Wärmesenke dienen. Dieser Betrieb wird zunehmend bei Erdwärmesonden mit geringer Tiefe realisiert. Die radiale Ausbreitung der betriebsbedingten, periodischen Temperaturänderung ist dann begrenzt und unterliegt dem Jahresrhythmus. Hierbei wirken maßgeblich die Wärmeströme von und zur Sonde sowie der Wärmeaustausch mit der Erdreichoberfläche und eventuell mit einer vorhandenen Grundwasserströmung. Das System ist nach ca. zwei bis drei Jahren eingeschwungen.

Völlig anders verhalten sich Einzelsonden, die z. B. **nur** für den **Wärmentzug** im Winter genutzt werden. Das thermisch beeinflusste Gebiet vergrößert sich von Jahr zu Jahr, wobei sich im oberen Speicherbereich die merkbare radiale Ausdehnung langfristig asymptotisch einem Endzustand nähert. Der Wärmestrom von der Erdoberfläche führt somit im oberen Speicherbereich zu einer gleichmäßigen Jahresschwingung. Die jahreszeitlich bedingten Temperaturschwankungen an der Erdoberfläche wirken je nach Stoffwerten der Erdschichten etwa 10 bis 15 m tief.

Es sei angemerkt, dass Erdwärmekollektoren in etwa 1,2 m Tiefe durch den starken Einfluss des Wärmeaustausches mit der Erdoberfläche in der Regel bereits nach zwei Jahren einen eingeschwungenen Zustand erreicht haben [9].

- **Sondenordnung**

Meistens werden aufgrund der gegebenen Platzverhältnisse die Sonden in **Feldern** angeordnet. Platzsparend ist ein Raster mit gleichseitigen Dreiecken der Seitenlängen a (Bild 2.8).

Formal betrachtet berühren sich die kreisförmigen Einflussbereiche, sodass sich die Radien $r_{EB} = a/2$ ergeben. Bei der wärmetechnischen Simulation werde dann angenommen, dass der durch r_{EB} gebildete Zylindermantel eine adiabate Fläche bildet. Dadurch sind die im Bild 2.8 dargestellten hellgrünen Restflächen nicht mit in die Simulation einbezogen. Ausgehend von der Dreiecksfläche

$$A_{\Delta} = \frac{\sqrt{3}}{4} a^2 \quad (2.12)$$

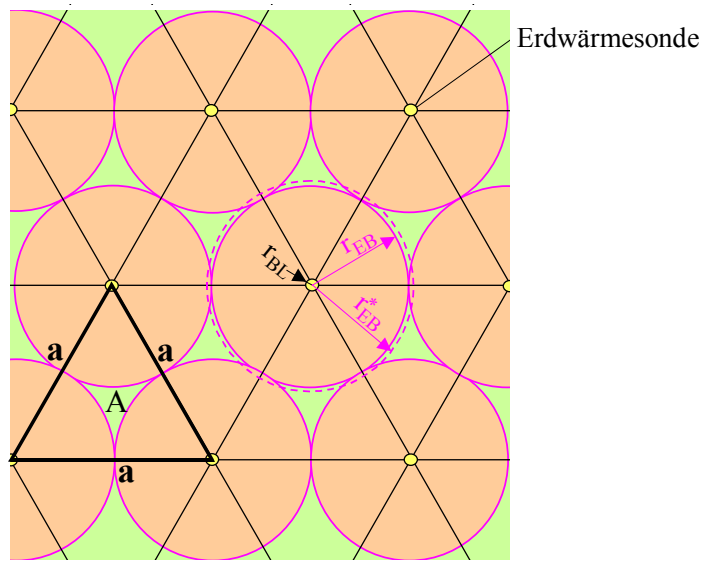


Bild 2.8 Draufsicht auf den Ausschnitt eines Sondenfeldes (Dreiecksteilung)
Die Erdwärmesonden mit dem Bohrlochradius r_{BL} und dem simulierten Einflussbereichsradius r_{EB} befinden sich jeweils an den Eckpunkten eines gleichseitigen Dreiecks. Der fiktive Radius r_{EB}^* integriert die Restfläche A in den Simulationsbereich.

und der innerhalb eines Dreieckes liegenden Einzugsbereichsflächen der Sonden

$$A_{EB} = \frac{\pi}{8} a^2 \quad (2.13)$$

folgt die Restfläche

$$A = \left(\frac{\sqrt{3}}{4} - \frac{\pi}{8} \right) a^2. \quad (2.14)$$

Prozentual stellt die Restfläche 9,3 % der verfügbaren Dreiecksfläche A_{Δ} dar. In der Realität nimmt die Fläche A selbstverständlich am instationären Wärmeleitvorgang im Erdreich teil, aufgrund der großen Entfernung zu den nächstgelegenen Sonden ist ihr Anteil jedoch klein. Eine pauschale Erfas-

sung der Fläche A in den Simulationsbereich ist durch einen fiktiven Radius möglich:

$$r_{EB}^* = \frac{\sqrt[4]{3}}{\sqrt{2} \pi} a = 0,525 a. \quad (2.15)$$

Dieser Radius ist im Bild 2.8 vermerkt.

In selteneren Fällen erfolgt die Anordnung der Erdwärmesonden nach einem quadratischen Raster (Bild 2.9).

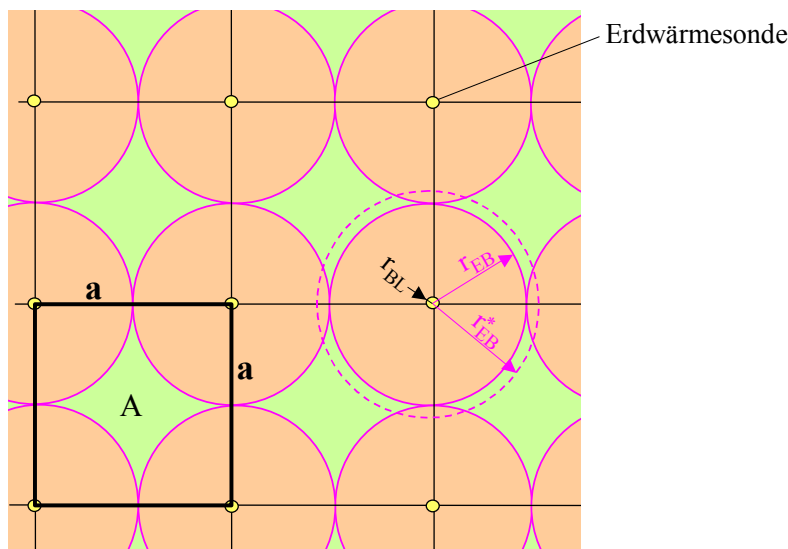


Bild 2.9 Draufsicht auf den Ausschnitt eines Sondenfeldes (Quadratteilung) Die Erdwärmesonden mit dem Bohrlochradius r_{BL} und dem simulierten Einflussbereichsradius r_{EB} befinden sich jeweils an den Eckpunkten eines Quadrates.

Der fiktive Radius r_{EB}^* integriert die Restfläche A in den Simulationsbereich.

Wollte man die Fläche A in den Simulationsbereich einbeziehen, ist der fiktive Radius zu wählen:

$$r_{EB}^* = \frac{1}{\sqrt{\pi}} a = 0,564 a. \quad (2.16)$$

Sehr unsicher ist die Wahl des Simulationsbereiches für **Einzelsonden**, weil der Einflussbereich stark von der Betriebsweise geprägt ist.

- **Generelle Anmerkungen**

Ist der Simulationsbereich zu klein gewählt, so liegt man auf der sicheren Seite, da in Wirklichkeit ein größeres Wärmereservoir verfügbar ist.

Das zu entwickelnde Rechenprogramm kann im Zweifelsfall selbstverständlich mit unterschiedlichen Radien für den Einflussbereich gestartet werden, um die anfänglich getroffene Festlegung von r_{EB} zu kontrollieren.

3 Wärmetechnische Modellierung des Simulationsbereiches

3.1 Instationäre Wärmeleitung im Simulationsbereich und Randbedingungen

Es ist die FOURIERSche Differenzialgleichung in zweidimensionaler Form mit einer Phasenwandlung für den homogenen, isotropen Körper bei vorgegebenen Anfangs- und Randbedingungen zu lösen. Die bekannte Differenzialgleichung für Zylinderkoordinaten ohne Beachten einer Winkelabhängigkeit lautet

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{\dot{q}_E}{\rho c} \quad (3.1)$$

mit der Temperaturleitfähigkeit

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (3.2)$$

und den Einzelgrößen

t	Temperatur	λ	Wärmeleitfähigkeit
r, z	Ortskoordinaten	ρ	Dichte
τ	Zeit	c	spezifische Wärmekapazität.
\dot{q}_E	Quellenergiebigkeit (Leistung pro Volumeneinheit)		

Der **Erdstoff** verkörpert in der Regel ein **sensibel speicherndes Material**. Dies gilt für den Trockenzustand und auch für Erdreich mit flüssigem oder gefrorenem Wasseranteil außerhalb der Phasenwandtemperatur ($> 0^\circ\text{C}$ oder $< 0^\circ\text{C}$). Während des Phasenwandels besitzt das Erdstoff-Wasser-Gemisch allerdings **Latentspeichereigenschaften**. Hierbei wird von einer homogenen Mischung mit gemittelten, jedoch konstanten Stoffwerten ausgegangen. Generell kann der Speicherkörper aus maximal acht unterschiedlichen Horizontalschichten (Schmax) bestehen (im Bild 2.1 existieren z. B. Schmax = 3 Schichten). Tiefe Erdwärmesonden arbeiten bei relativ hohen Temperaturen, sodass keine Eisbildung auftritt. Bei kurzen Sonden ist die Eisbildung in Erdoberflächennähe aber möglich, sodass generell der Phasenwandel in das Simulationsmodell einbezogen wird. Die durch die Phasenumwandlung bedingte latente Wärme wird als innere Wärmequelle oder -senke – wie in Gl. (3.1) bereits enthalten – dargestellt.

Die instationäre Wärmeleitung gemäß Gl. (3.1) wird näherungsweise durch Aneinanderreihung von quasistationären Wärmeleitvorgängen, die jeweils für den Zeitraum $\Delta\tau$ gelten, verfolgt. Als geeignetes **numerisches Lösungsverfahren** wurde die Finite-Volumen-Methode ausgewählt, wobei die Volumenelemente jeweils Hohlzylinder der Höhe Δh (Bilder 2.1 bis 2.3) verkörpern. Die Wärmeleitvorgänge zwischen den Volumenelementen und an den Rändern des Simulationsbereiches sind sehr anschaulich darstellbar. Für jedes Volumenelement wird pro Zeitschritt eine Wärmebilanz aufgestellt, d. h., alle Wärmeströme über die Elementoberflächen werden erfasst. Ist die Summe der Wärmeströme QE ungleich Null, liegt ein instationärer Wärmespeichervorgang vor. Die Temperatur- und die Phasenänderung im Element sind aus den Vorgängerwerten zu bestimmen. D. h., es kommt ein **explizites Verfahren** zur Anwendung.

Das **Temperaturfeld** im Simulationsgebiet (vgl. Bild 2.7) wird durch die Temperaturen der Volumenelemente an den Gitterpunkten definiert:

$t_{i,k}$ Temperatur zu Beginn eines Zeitschrittes

$tn_{i,k}$ Temperatur am Ende eines Zeitschrittes (n bedeutet "neu").

Nach Abarbeitung eines Zeitschrittes erfolgt das Umspeichern der Temperaturen

$$t_{i,k} = tn_{i,k}. \quad (3.3)$$

Die Simulation beginnt stets mit einer [Starttemperaturverteilung](#), die aus der vorgegebenen Temperatur an der Sohle des Simulationsgebietes t_{Erdsohle} und dem vertikalen Temperaturgradienten $0,03 \text{ K/m}$ mit $t_{\text{Start,oben}} = t_{\text{Erdsohle}} - 0,03 L_{\text{Sim}}$ höhenabhängig für alle Volumenelemente gebildet wird:

$$t_{i,k=1\dots k_{\text{max}}} = t_{\text{Start,oben}} + (i - 0,5) 0,03 \Delta h. \quad (3.4)$$

Alle Starttemperaturen $t_{i,k}$ sollten wegen der Besonderheiten beim Phasenwechsel stets unter oder oberhalb von 0°C liegen.

Da der [Erdstoff](#) als ein homogenes Erde-Wasser-Gemisch modelliert wird, der die Wärme [sensibel](#) und [latent](#) speichern kann, ist zusätzlich zum Temperaturfeld auch der Phasenzustand für jedes Volumenelement i, k zu vermerken:

$\text{Phase}_{i,k}$ Phasenzustand (geschmolzener Anteil) des Erdstoffs

$\text{Phase}_{i,k} = 0$ Wasser vollkommen gefroren; "fester" Erdstoff

$\text{Phase}_{i,k} = 1$ Wasser vollkommen geschmolzen; "flüssiger" Erdstoff.

Die Phasenwandelenthalpie des anteiligen Wassers wird vereinfacht auf die Gemischmasse bezogen.

Hinweis: Wird eine Simulation fortgesetzt, so können auch bereits vorhandene Temperatur- und Phasenfelder, die für alle Volumenelemente gespeichert wurden, geladen werden.

Die Stoffwerte sind schichtweise anzugeben. Es gelten:

ρ Dichte (Volumenänderung bei der Eisbildung bleibt unbeachtet)

rS Phasenwandelenthalpie.

Die Stoffdaten für Temperaturen unterhalb 0°C lauten:

λ Wärmeleitfähigkeit des erstarrten ("festen") Materials

c spezifische Wärmekapazität des erstarrten ("festen") Materials.

Analog gelten für Temperaturen oberhalb 0°C :

λ_{fl} Wärmeleitfähigkeit des geschmolzenen ("flüssigen") Materials

c_{fl} spezifische Wärmekapazität des geschmolzenen ("flüssigen") Materials.

Hinweis: Die genannten Größen sind im Anwendungsfall schichtweise vorzugeben ($\rho(\text{Sch})$, $\lambda(\text{Sch})$ usw.) und den entsprechenden Volumenelementen i, k zuzuweisen.

Mit Kenntnis des Phasenzustandes kann durch einfache Wichtung die Wärmeleitfähigkeit des Latentspeichermaterials näherungsweise bestimmt werden. Für die aktuellen Feldgrößen gelten dann:

$$\lambda_{\text{Feld},i,k} = \lambda_{i,k} (1 - \text{Phase}_{i,k}) + \lambda_{\text{fl},i,k} \text{Phase}_{i,k}. \quad (3.5)$$

Die [wärmetechnischen Randbedingungen](#) an den Grenzen des Simulationsgebietes sind eindeutig definiert. Sie werden durch Bild 3.1 veranschaulicht.

Das [Bohrloch](#) mit seiner Verrohrung stellt keine innere Wärmequelle im Speicherkörper dar, es ist vom Speicherbereich ausgespart. Somit wird die [Bohrlochwandtemperatur](#) $t_{\text{BL},i}$ als [Randbedingung erster Art](#) am inneren Simulationsbereich definiert. Sie gilt für den Abschnitt i während des Zeitschrittes $\Delta\tau$.

Der [Zylindermantel](#) des Simulationsbereiches wird als [adiabate Wandung](#) aufgefasst.

An der **Erdoberfläche** wirken die von der Ortslage und der Zeit abhängigen meteorologischen Elemente Lufttemperatur und Sonnenstrahlung, die man zweckmäßigerweise zur **Sonnenlufttemperatur** (Außentemperatur) t_a zusammenfasst. Es wird empfohlen, hierfür die Daten des Testreferenzjahres TRY nach DIN 4710 zu verwenden. Unter Annahme eines vordefinierten Wärmeübergangskoeffizienten α_a ist eine **Randbedingung dritter Art** anzusetzen.

An der **Sohle des Simulationsbereiches** wird eine **Randbedingung erster Art** angenommen, d. h. eine Temperatur t_{Erdssole} vorgegeben. Sie wäre grundsätzlich auch als Zeitfunktion darstellbar. Falls sich eine Grundwasser führende Schicht am unteren Sondenende befindet, ist die Wassertemperatur maßgebend. Ist dies nicht der Fall, dann sollte die Länge des Simulationsbereiches bedeutend größer als die Sondenlänge gewählt und dort die Temperatur des ungestörten Erdreiches angesetzt werden.

Die **fiktive Bohrlochverlängerung** unterhalb der eigentlichen Sondenverrohrung wird der Einfachheit halber vom Simulationsgebiet ausgenommen. Bei einem Bohrlochradius $r_{\text{BL}} = 0,075 \text{ m}$ und einem Gebietsradius $r_{\text{EB}} = 5 \text{ m}$ bedeutet die Vernachlässigung nur ca. 0,02 %. Die Ränder der fiktiven Bohrlochverlängerung werden aus Symmetriegründen als **adiabat** betrachtet.

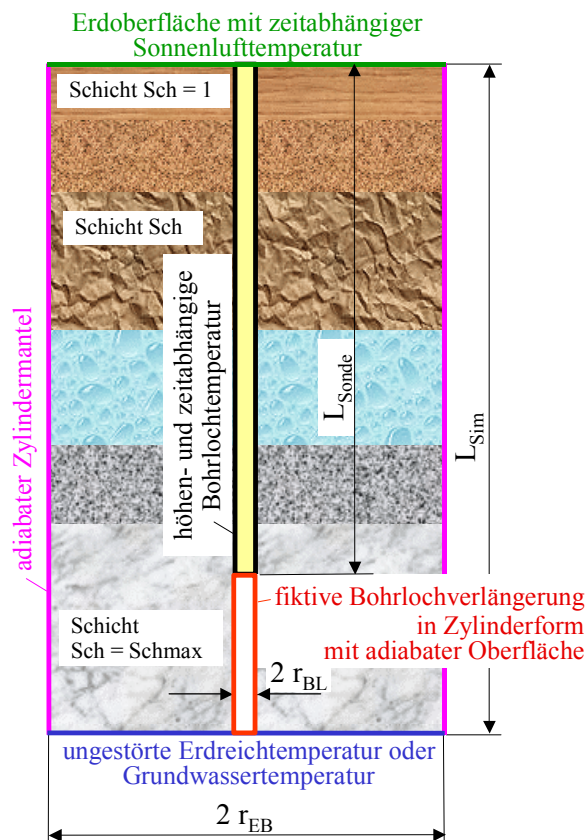


Bild 3.1 Wärmetechnische Randbedingungen für das Simulationsgebiet

Es umfasst einen Hohlzylinder mit der Länge L_{Sim} , dem Außenradius r_{EB} als Ende des Einflussbereiches und dem Bohrlochdurchmesser r_{BL} . Bei $L_{\text{Sim}} > L_{\text{Sonde}}$ gehört die scheinbare Bohrlochverlängerung nicht zum Simulationsbereich.

Bei unsicheren Annahmen bezüglich der Größe des Simulationsgebietes und der Randbedingungen wird empfohlen, diese zu variieren und die Simulationsergebnisse gegenüberstellend zu bewerten.

3.2 Wärmebilanz für ein Volumenelement

Im Bild 3.2 ist ein Volumenelement im Gitternetz an der Stelle i, k mit den Nachbarelementen als Schnittdarstellung gezeigt. Zusätzlich sind die durch die Elementoberflächen tretenden Wärmeströme dargestellt. Sie folgen aus dem FOURIERSchen Erfahrungsgesetz der Wärmeleitung

$$\dot{Q} = \lambda \frac{dt}{dn} A \quad (3.6)$$

mit

λ Wärmeleitfähigkeit

A Fläche, in der die Isothermenfläche t liegt

dt/dn Temperaturgradient.

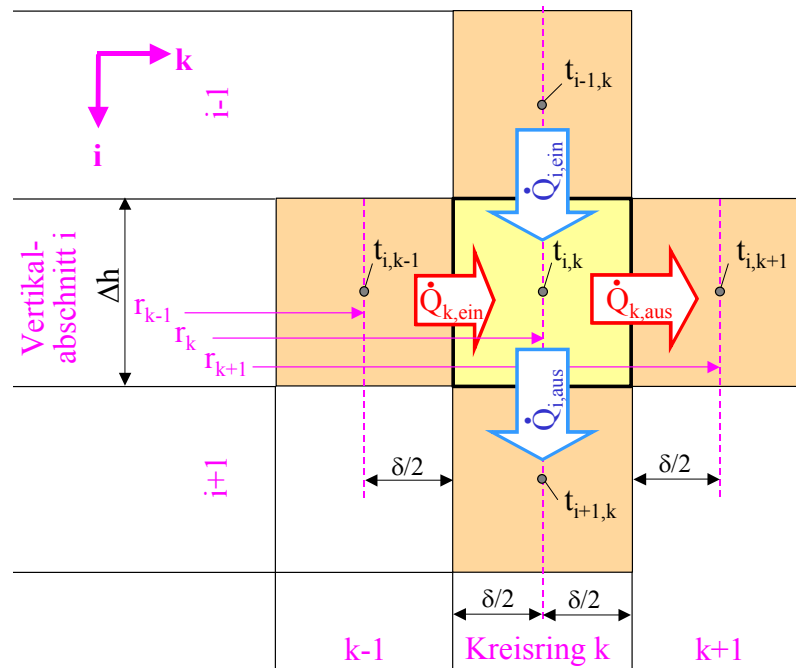


Bild 3.2 Vertikaler Schnitt durch das Volumenelement i, k und durch dessen Nachbarelemente mit Angabe der Elementtemperaturen $t_{i,k}$ usw. Zusätzlich sind die ein- und aus tretenden Wärmeströme in und aus dem Volumenelement i, k durch Wärmeleitung vermerkt.

Während der Temperaturgradient in der axialen i -Richtung sofort ersichtlich ist, folgt der in radialer k -Richtung aus der LAPLACESchen Differenzialgleichung

$$\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} = 0. \quad (3.7)$$

Schließlich können ableitend von Bild 3.2 die vier **Wärmeströme** angeschrieben werden:

$$\dot{Q}_{k,ein} = 2\pi \frac{\lambda_{Feld_{i,k-1}} + \lambda_{Feld_{i,k}}}{2} \Delta h \frac{t_{i,k-1} - t_{i,k}}{\ln \frac{r_k}{r_{k-1}}} \quad (3.8)$$

$$\dot{Q}_{k,aus} = 2\pi \frac{\lambda_{Feld_{i,k}} + \lambda_{Feld_{i,k+1}}}{2} \Delta h \frac{t_{i,k} - t_{i,k+1}}{\ln \frac{r_{k+1}}{r_k}} \quad (3.9)$$

$$\dot{Q}_{i,ein} = 2\pi r_k \delta \frac{\lambda_{Feld_{i-1,k}} + \lambda_{Feld_{i,k}}}{2} \frac{t_{i-1,k} - t_{i,k}}{\Delta h} \quad (3.10)$$

$$\dot{Q}_{i,aus} = 2\pi r_k \delta \frac{\lambda_{Feld_{i,k}} + \lambda_{Feld_{i+1,k}}}{2} \frac{t_{i,k} - t_{i+1,k}}{\Delta h}. \quad (3.11)$$

Wärmeleitfähigkeiten der betroffenen Volumenelemente werden gemittelt.

Des Weiteren sind noch einige **Sonderfälle** zu beachten, um die Randbedingungen nach Bild 3.1 zu erfüllen.

Am Bohrloch $k = 1$ gilt die Temperatur $t_{BL,i}$ und damit der eintretende Wärmestrom

$$\dot{Q}_{k=1,ein} = 2\pi \lambda \text{Feld}_{i,1} \Delta h \frac{t_{BL,i} - t_{i,k=1}}{\ln \frac{r_k}{r_{BL}}} . \quad (3.12)$$

An der fiktiven Bohrlochverlängerung $k = 1$ strömt keine Wärme ein:

$$\dot{Q}_{k=1,ein} = 0 . \quad (3.13)$$

Am Ende des Einflussbereiches r_{EB} (Zylindermantel) gilt $k = k_{max}$. Es tritt keine Wärme aus:

$$\dot{Q}_{k=k_{max},aus} = 0 . \quad (3.14)$$

An der Erdoberfläche gilt mit der Sonnenlufttemperatur als Außentemperatur t_a und dem äußeren Wärmeübergangskoeffizienten α_a der eintretende Wärmestrom

$$\dot{Q}_{i,ein} = 2\pi r_k \delta \left(\frac{1}{\alpha_a} + \frac{\Delta h}{2 \lambda \text{Feld}_{i,k}} \right)^{-1} (t_a - t_{i,k}) . \quad (3.15)$$

An der Sohle des Simulationsgebietes soll von einer konstanten Temperatur t_{Erdssole} (\equiv Temperatur des ungestörten Erdreiches in dieser Tiefe) ausgegangen werden, sodass für den austretenden Wärmestrom gilt

$$\dot{Q}_{i,aus} = 4\pi r_k \delta \lambda \text{Feld}_{i,k} \frac{t_{i,k} - t_{\text{Erdssole}}}{\Delta h} . \quad (3.16)$$

Schließlich ergibt sich die **Wärmezufuhr an das Volumenelement während des betrachteten Zeitintervalls $\Delta\tau$** zu:

$$QE = (\dot{Q}_{i,ein} + \dot{Q}_{k,ein} - \dot{Q}_{i,aus} - \dot{Q}_{k,aus}) \Delta\tau . \quad (3.17)$$

3.3 Neue Temperatur und Phase des Volumenelementes

Zur rationellen Berechnung ist es zweckmäßig, elementbezogene Größen zu definieren:

$m_{E,k}$ Masse des Volumenelementes (Elementmasse) $m_{E,k} = V_k \rho$ (V_k nach Gl. (2.1))

$Q_{\text{Phase},k}$ Phasenumwandlungswärme für die Elementmasse $Q_{\text{Phase},k} = m_{E,k} r_S$

$C_{E,k}$ Elementwärmekapazität des erstarrten Erdstoffs $C_{E,k} = c m_{E,k}$

$C_{\text{Efl},k}$ Elementwärmekapazität des geschmolzenen Erdstoffs $C_{\text{Efl},k} = c_{\text{fl}} m_{E,k}$

Erfolgt **kein Phasenwandel**, so kann die Temperaturänderung im Volumenelement am Ende des Zeitschrittes $\Delta\tau$ berechnet werden. Mit der Wärmekapazität des Volumenelementes gilt für die Temperaturänderung

$$\text{bei fester Phase } (<0^\circ\text{C}) \quad \Delta t = \frac{QE}{C_{E,k}} \quad \text{bzw. bei flüssiger Phase } (>0^\circ\text{C}) \quad \Delta t = \frac{QE}{C_{\text{Efl},k}} , \quad (3.18)$$

woraus die neue Temperatur folgt:

$$tn_{i,k} = t_{i,k} + \Delta t . \quad (3.19)$$

Liegt zwischen $tn_{i,k}$ und $t_{i,k}$ die Schmelztemperatur 0°C , ist der **Phasenwandel** – differenziert nach Aufheizen oder Abkühlen – zu beachten. In [1] ist ein Algorithmus dargelegt, der auch einen Phasenwandelbereich und eine Hysterese beinhaltet. Diese Varianten entfallen beim Idealfall Wasser /

Eis, sodass der temperaturabhängige Verlauf der spezifischen Enthalpie $h(t)$ gemäß Bild 3.3 gilt. Lineare Anstiege $dh/dt = c$ im festen Stoff und $dh/dt = c_{fl}$ im flüssigen Stoff sowie der Sprung bei 0°C sind kennzeichnend. Somit stellt h eine Funktion der Temperatur und des Phasenzustandes dar:
 $h = h(t, \text{Phase})$. (3.20)

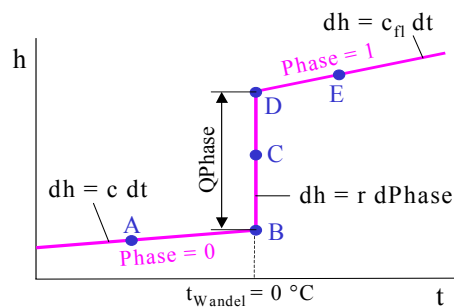


Bild 3.3 Verlauf der spezifischen Enthalpie $h(t, \text{Phase})$ in Abhängigkeit der Stofftemperatur t und des Phasenzustandes Phase bei Wasser / Eis

Zur rechnerischen Verfolgung der Temperatur- und Phasenänderung ist der im Bild 3.4 vorgestellte Rechenablauf nutzbar. Er berücksichtigt die Zustandsänderungen, die von allen real möglichen Punkten A bis E ausgehen und deren Wärmeeintrag in das Volumenelement i, k positiv oder negativ ist ($QE > 0$, $QE = 0$, $QE < 0$). Dabei gilt $|QE| = 0 \dots > Q_{\text{Phase}}$, sodass der komplette Phasenwandel von "fest" bis "flüssig" oder umgekehrt verfolgt werden kann.

```

'Übergabe der vorhandenen Feldgrößen
tE = t(i,k)
PH = Phase(i,k)
'Ermittlung der neuen Temperatur ohne Beachten des Phasenwandels
QER = 0 'QER bedeutet Restwärme im Element
If tE <= 0 And PH = 0 Then
    tneu = tE + QE / CE
    If tneu >= 0 Then QER = QE + CE * tE
ElseIf tE >= 0 And PH = 1 Then
    tneu = tE + QE / CEfl
    If tneu <= 0 Then QER = QE + CEfl * tE
Else
    QER = QE : tneu = tE
End If
'Phasenwandel
If PH < 1 And QER > 0 Then
    'Aufheizfall
    If QER < (1 - PH) * QPhase Then
        PH = PH + QER / QPhase
        tneu = 0
    Else
        tneu = (QER - (1 - PH) * QPhase) / CEfl
        PH = 1
    End If
ElseIf PH > 0 And QER < 0 Then
    'Abkühlfall
    If Math.Abs(QER) < PH * QPhase Then
        PH = PH + QER / QPhase
        tneu = 0
    Else
        tneu = (QER + PH * QPhase) / CE
        PH = 0
    End If
End If
'Rückgabe der ermittelten Werte als neue Feldgrößen
tn(i,k) = tneu
Phase(i,k) = PH

```

Bild 3.4 Algorithmus zur Berechnung der thermodynamischen Zustandsänderung für ein Erde-Wasser-Gemisch mit der Phasenwandeltemperatur 0°C (vgl. auch Bild 3.3)

Im Ergebnis des Phasenwandels gelten die neuen Elementgrößen: $tn_{i,j,k}$; $Phase_{i,j,k}$.

3.4 Stabilitätskriterium für die numerische Berechnung

In [2] sind Definitionen zur Stabilität und Konvergenz ausführlich dargestellt. Im vorliegenden Fall wird rein pragmatisch vorgegangen. Um die Rechenzeiten zu verringern, ist man bestrebt, mit großen Zeitschritten $\Delta\tau$ zu arbeiten. Das Ergebnis wird dann logischerweise ungenauer, da man die Ausgangsgrößen und Randbedingungen über diesen Zeitraum als konstant betrachtet. Sind die Zeitschritte zu groß gewählt, kann das Ergebnis sogar falsch werden. Die logischen Grenzen der möglichen Temperaturänderungen sind durch den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik gegeben. So kann die neue Temperatur eines Elementes z. B. nicht durch Wärmeaufnahme aus einer Umgebung niedrigerer Temperatur hervorgehen und umgekehrt. Für Verfahren, die **rein explizit im Zeitschritt** arbeiten und die ein rechtwinkliges Gitter x, y, z verwenden, gilt aus Stabilitätsgründen die bekannte Beschränkung für den Zeitschritt:

$$\Delta\tau \leq \frac{1}{2a \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right)}. \quad (3.21)$$

Im Weiteren wird eine analoge Beziehung für das vorgestellte Gitter abgeleitet. Ausgehend von Gl. (3.17) und der Substitution der Gln. (3.8) bis (3.11) ergibt sich durch Gleichsetzen mit einer Modifikation der Gl. (3.18):

$$\left[2\pi\lambda\Delta h \frac{t_{i,k-1} - t_{i,k}}{\ln \frac{r_k}{r_{k-1}}} - 2\pi\lambda\Delta h \frac{t_{i,k} - t_{i,k+1}}{\ln \frac{r_{k+1}}{r_k}} + 2\pi r_k \delta \lambda \frac{t_{i-1,k} - t_{i,k}}{\Delta h} - 2\pi r_k \delta \lambda \frac{t_{i,k} - t_{i+1,k}}{\Delta h} \right] \Delta\tau = 2\pi r_k \delta \Delta h \rho c (tn_{i,k} - t_{i,k}). \quad (3.22)$$

Unter Beachten der Gl. (3.2) folgt:

$$tn_{i,k} = a\Delta\tau \left[\frac{t_{i,k-1}}{r_k \delta \ln \frac{r_k}{r_{k-1}}} + \frac{t_{i,k+1}}{r_k \delta \ln \frac{r_{k+1}}{r_k}} + \frac{t_{i-1,k} + t_{i+1,k}}{\Delta h^2} \right] + \left\{ 1 - a\Delta\tau \left[\frac{1}{r_k \delta \ln \frac{r_k}{r_{k-1}}} + \frac{1}{r_k \delta \ln \frac{r_{k+1}}{r_k}} + \frac{2}{\Delta h^2} \right] \right\} t_{i,k}. \quad (3.23)$$

Der erste Summand ist positiv. Der zweite Summand muss auch positiv oder null sein, ansonsten würde mit steigender Ausgangstemperatur $t_{i,k}$ die neue Elementtemperatur $tn_{i,k}$ kleiner werden. Damit gilt die Bedingung

$$1 - a\Delta\tau \left[\frac{1}{r_k \delta \ln \frac{r_k}{r_{k-1}}} + \frac{1}{r_k \delta \ln \frac{r_{k+1}}{r_k}} + \frac{2}{\Delta h^2} \right] \geq 0, \quad (3.24)$$

woraus endgültig folgt:

$$\Delta\tau \leq \frac{1}{a \left[\frac{1}{r_k \delta \ln \frac{r_k}{r_{k-1}}} + \frac{1}{r_k \delta \ln \frac{r_{k+1}}{r_k}} + \frac{2}{\Delta h^2} \right]}. \quad (3.25)$$

Die zulässige Zeitschrittweite ist in Abhängigkeit der Schichtstoffwerte und der Geometrie zu ermitteln.

4 Wärmetechnische Modellierung der Bohrung

Bei einer Erdwärmesonde befinden sich im Bohrloch die **Vor- und Rücklaufleitungen**. Bei der Einfachsonde sind dies zwei, bei der Doppelsonde vier Rohrleitungen (Bild 4.1). Am Sondenfuß sind Vor- und Rücklauf verbunden, beispielsweise als U-Rohr oder mittels spezieller Umlenkstücke. Weiterhin gibt es noch Koaxialsonden mit einem großen Rohr, das in der Regel den abwärtsführenden Vorlauf darstellt, und einem kleineren Innenrohr mit dem aufwärtsführenden Rücklauf.

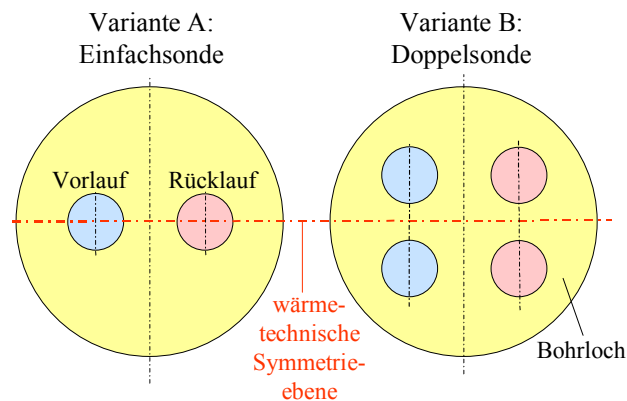


Bild 4.1 Querschnitte durch typische U-Rohr-Sonden

Das Bohrloch wird mit flüssigem, anschließend aushärtendem **Füllmaterial** verschlossen. Meistens wird ein Material mit hoher Wärmeleitfähigkeit verwendet, um einen guten Kontakt zwischen Bohrlochwand und Verrohrung zu gewährleisten.

Infolge der zeitlich wechselnden Rohr- und Bohrlochwandtemperaturen wird sich im Füllmaterial auch eine instationäre Wärmeleitung ausbilden. Die Wärmespeicherkapazität des Füllmaterials ist aber gegenüber dem angrenzenden Erdreich sehr klein, sodass es unter den praktischen Gegebenheiten ausreichend genau ist, im Bohrloch die Wärmeleitung **quasistationär** zu betrachten.

Rasche Temperaturwechsel im Bohrloch sind in der Regel nur bei Schaltvorgängen in der angeschlossenen Anlage zu erwarten, wobei kaum zu erfassende Wärmespeicher- und Strömungsvorgänge der Wärmeträgermedien (z. B. "Pfropfentransporte") überlagert werden.

Im Normalbetrieb treten nur langsame Temperaturänderungen auf, sodass der Ansatz der stationären Wärmeleitung als gerechtfertigt erscheint. Dennoch ist für die im Bild 4.1 vorgestellten Geometrien die Wärmeleitung zwischen den beispielsweise drei beteiligten Zylinderwandungen – Vor- und Rücklauf sowie Bohrlochwand – aber keinesfalls trivial darstellbar. Das sich im Bohrlochquerschnitt einstellende Temperaturfeld ist von den Oberflächentemperaturen der Sondenrohre und der Bohrlochwand abhängig. Eine numerische Lösung für jeden Längenabschnitt i durchzuführen, wäre aber zu aufwendig. Deshalb soll nur eine einmalige Ermittlung von **Formfaktoren** in Abhängigkeit eines dimensionslosen Temperaturfeldes erfolgen.

Anmerkung: Wird ein zusammenhängender Festkörper von zwei Oberflächen A_1 und A_2 mit den aufgeprägten Temperaturen t_1 und t_2 und eventuell von n weiteren adiabaten Oberflächen begrenzt, kann der stationäre Wärmestrom von A_1 zu A_2 mit Hilfe eines sogenannten Formfaktors S bestimmt werden. In der Literatur [4, 5] finden sich entsprechende Zusammenstellungen für zahlreiche Konstruktionen. In [3] wird gezeigt, dass eine analoge Anwendung auch bei drei Oberflächen A_1 , A_2 und A_3 mit den Temperaturen t_1 , t_2 und t_3 möglich ist. Die zugehörigen Überlegungen werden nachfolgend wiedergegeben.

4.1 Bekannte Anwendung von Formfaktoren

Für einen Körper mit gleichbleibender axialer Gestalt der Länge L gilt für den Wärmestrom von A_1 zu A_2 allgemein:

$$\dot{Q}_{12} = \lambda S L (t_1 - t_2). \quad (4.1)$$

Beispielsweise ergibt sich für einen Hohlzylinder nach Bild 4.2 zwischen innerer und äußerer Oberfläche bei als adiabat angenommenen Deckflächen der **Formfaktor**

$$S = \frac{2\pi}{\ln \frac{r_2}{r_1}}. \quad (4.2)$$

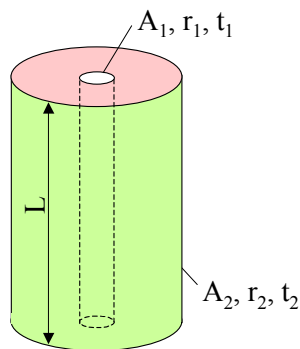


Bild 4.2 Hohlzylinder mit den Zylinderflächen A_1, A_2 und den Temperaturen t_1, t_2 sowie mit zwei adiabaten Kreisringflächen der Radien r_1 und r_2 . Die Kreisringdurchmesser $2r_1$ und $2r_2$ sind konzentrisch angeordnet. Die Wärmeleitfähigkeit des Zwischenraummaterials sei λ .

Somit folgt z. B. für die Wärmeabgabe eines gedämmten Heizrohres der bekannte Zusammenhang

$$\dot{Q}_{12} = \lambda S L (t_1 - t_2) = \lambda \frac{2\pi}{\ln \frac{r_2}{r_1}} L (t_1 - t_2). \quad (4.3)$$

Die *Bestimmung der Formfaktoren* kann aus dem FOURIERSchen Erfahrungsgesetz für den Wärmestrom abgeleitet werden. Allgemein gilt

$$\dot{Q}_{12} = -\lambda \int_{A_1} \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right) dA_1 \quad (4.4)$$

und für den hier zu betrachtenden Längskörper gleichenbleibenden Querschnitts z. B. am Umfang des Innenrohres (Bild 4.2)

$$\dot{Q}_{12} = -\lambda L \int_{U_1} \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right) dU_1. \quad (4.5)$$

Die Feldtemperatur t ersetzt man zweckmäßigerweise durch die Übertemperatur

$$\vartheta = \frac{t - t_2}{t_1 - t_2}. \quad (4.6)$$

Somit nimmt Gl. (4.5) die Form

$$\dot{Q}_{12} = -\lambda L (t_1 - t_2) \int_{U_1} \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial n} \right) dU_1 \quad (4.7)$$

an, woraus nach Gleichsetzen mit Gl. (4.1) folgt:

$$S = - \int_{U_1} \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial n} \right) dU_1 > 0. \quad (4.8)$$

Beim Wärmestrom von Fläche 1 zu Fläche 2 gelten $t_1 > t_2$ und $(\partial \vartheta / \partial n)_1 < 0$, sodass $S > 0$ folgt, was

die übliche Darstellung ist.

Hinweis: Für die Wärmeleitung zwischen zwei beliebigen Oberflächen des Körpers – z. B. zwischen zwei konzentrischen Kugeln – wird Gl. (4.1) $\dot{Q}_{12} = \lambda S_K (t_1 - t_2)$ geschrieben. Hierbei stellt S_K den mit der Dimension einer Länge behafteten Formkoeffizienten dar. Dieser sprachlich richtige Unterschied wurde bereits in [4] eingeführt. Die Bestimmungsgleichung hat dann analog zu Gl. (4.8) die Form: $S_K = - \int_{A_1} (\partial \vartheta / \partial n)_1 dA_1 > 0$.

Die Komplexität der Berechnung der mehrdimensionalen Wärmeleitung in einem beliebig berandeten Körper ist somit nur einmal zu lösen, da das Potenzialfeld der dimensionslosen Übertemperatur ϑ im ausgewählten Körper stets gleich ist.

In [4, 5] sind für eine Vielzahl von Körperformen die Formfaktoren S angegeben. Die Ermittlung erfolgte in der Regel nach anspruchsvollen analytischen Methoden. Es sind aber auch experimentelle Auswertungen der Potenzialfelder, die beispielsweise auf elektrisch leitendem Papier erzeugt wurden, üblich gewesen. Derzeit wird die Wärmeleitung in den mitunter komplizierten Körperstrukturen in der Regel numerisch simuliert und S aus dem ermittelten Wärmestrom eliminiert:

$$S = \frac{\dot{Q}_{12}}{\lambda L (t_1 - t_2)}. \quad (4.9)$$

So wurde mit einem noch vorzustellenden Rechenprogramm auf der Basis eines finiten Elementeverfahrens für eine Kreising Scheibe gemäß Bild 4.2 mit den Radien $r_1 = 16$ mm und $r_2 = 75$ mm bei einer quadratischen Gitterteilung von 0,5 mm $S_{\text{SIM}} = 4,041$ bestimmt. Aus Gl. (4.2) folgt der exakte Wert zu $S = 4,067$ (Fehler: -0,6 %).

Als weitere Verifikation dient die Struktur nach Bild 4.3, für die nach [5] die Lösung

$$S = \frac{2 \pi}{\operatorname{arccosh} \frac{r_1^2 + r_2^2 - e^2}{2 r_1 r_2}}. \quad (4.10)$$

existiert.

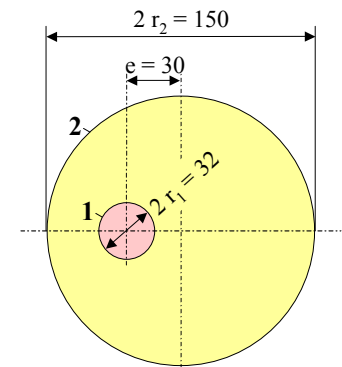


Bild 4.3 Querschnitt einer aus Bild 4.2 abgeleiteten Struktur mit exzentrischer Lage des Innenrohres (Maße in mm)

Die temperierten Umfänge 1 und 2 stellen wiederum Kreise dar.

Mit den Werten des Bildes 4.3, folgt der exakte Wert nach Gl. (4.10) zu $S = 4,622$. Demgegenüber liefert die numerische Simulation $S_{\text{SIM}} = 4,582$ (Abweichung: -0,9 %).

4.2 Erweiterte Formfaktorenmethode

Sind gemäß Bild 4.4 **drei Oberflächen** A_0, A_1, A_2 des umhüllten Körpers die unterschiedlichen Temperaturen t_0, t_1, t_2 aufgeprägt, so können formal analog zu Gl. (4.9) zwei Formfaktoren S_{10} und S_{20} definiert werden, wobei die Indizes auf die Temperaturbezüge hinweisen:

$$S_{10} = \frac{\dot{Q}_{10}}{\lambda L (t_1 - t_0)} \quad (4.11)$$

$$S_{20} = \frac{\dot{Q}_{20}}{\lambda L(t_2 - t_0)}. \quad (4.12)$$

Hinweis: \dot{Q}_{10} bedeutet, dass der Wärmestrom von der Oberfläche 1 abgegeben wird und dass der Wärmestrom mit der Temperaturdifferenz $t_1 - t_0$ zu bilden ist. Ungeachtet von der Bezugstemperaturdifferenz können Teilwärmeströme an die Oberflächen 0 und 2 fließen.

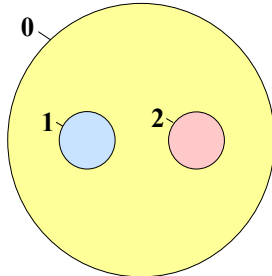


Bild 4.4 Querschnitt durch eine längenunabhängige Struktur mit den Oberflächen 1, 2 und 0, denen die konstanten Temperaturen t_1 , t_2 und t_0 aufgeprägt sind

Bei **zwei temperierten Flächen** ist das dimensionslose Übertemperaturfeld Θ und somit auch der Differenzialquotient $(\partial\Theta/\partial n)_1$ am Umfang des Rohres 1 unabhängig von der Temperaturdifferenz $(t_1 - t_2)$ stets gleich, sodass $S = \text{const}$ gilt.

Es ist leicht einzusehen, dass bei **drei unterschiedlich temperierten Flächen** das Potenzialfeld z. B. vom Verhältnis der Übertemperaturen

$$\Theta = \frac{t_1 - t_0}{t_2 - t_0} \quad (4.13)$$

beeinflusst wird. Somit sind S_{10} und S_{20} von Θ abhängige Größen, also im eigentlichen Sinne keine reinen Formfaktoren mehr.

Hinweis: Selbstverständlich könnte das Verhältnis der Übertemperaturen beispielsweise auch als $\Theta^* = (t_2 - t_0) / (t_1 - t_0)$ definiert werden. Man sollte eine Form wählen, die bei der Nutzung des praktisch infrage kommenden Temperaturbereichs keine Unendlichkeitsstelle (Nenner gleich null) verursacht.

Pragmatischer Weise bestimmt man für die im Bild 4.4 dargestellte Struktur mittels numerischer Simulation unter Annahme verschiedener Temperaturen t_1 , t_2 und t_0 die Wärmeströme \dot{Q}_{10} sowie \dot{Q}_{20} , ermittelt nach den Gln. (4.11) und (4.12) S_{10} sowie S_{20} und stellt sie als Funktion von Θ dar.

4.3 Algorithmus zur Bestimmung von Formfaktoren für Sondengeometrien

Zur Berechnung der Wärmeströme \dot{Q}_{10} sowie \dot{Q}_{20} könnten grundsätzlich herkömmliche Rechenprogramme, die auf der Grundlage von finiten Differenzenverfahren oder finiten Volumenverfahren arbeiten, eingesetzt werden. Nachfolgend wird eine spezielle Eigenentwicklung beschrieben.

- **Gitterfestlegung**

Es wird von einer x,y-Ebene mit den Abmessungen $x = 0$ bis x_{max} und von $y = 0$ bis y_{max} ausgegangen. In dieser erstreckt sich ein zweidimensionales, rechtwinkliges, äquidistantes Gitter mit der Teilung $\Delta x = \Delta y$. Damit ergeben sich gemäß Definition die Gitterlinien nach Bild 4.5 mit

$$i_{\text{max}} = x_{\text{max}} / \Delta x \quad (4.14)$$

$$j_{\text{max}} = y_{\text{max}} / \Delta x. \quad (4.15)$$

Die simulierte Querschnittsfläche ist somit allseitig um $\Delta x/2$ größer als $x_{\text{max}} \times y_{\text{max}}$.

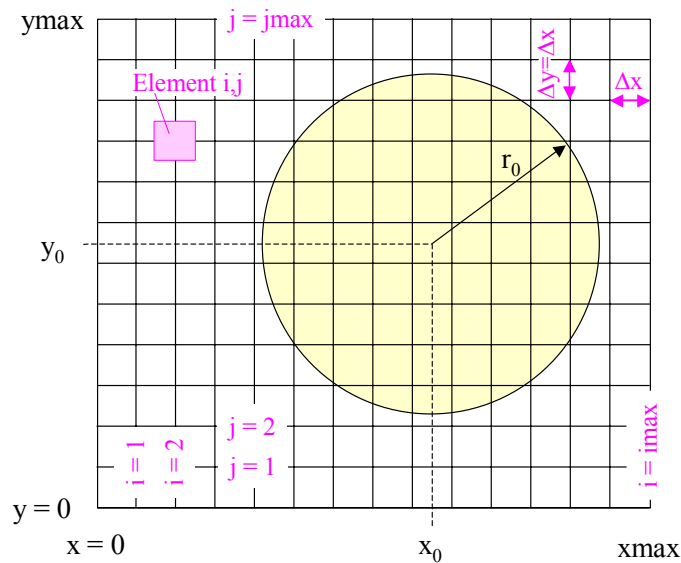


Bild 4.5 x,y-Ebene mit äquidistantem Gitternetz und beispielhaft eingetragenem Bohrlochquerschnitt nach Gl. (4.16)

• Geometrie der wärmeübertragenden Flächen

Bei den zu betrachtenden Rohren 1 und 2 sowie dem Bohrloch 0 handelt es sich im Querschnitt um Kreise. Sie werden durch die Koordinaten der Mittelpunkte und die Radien definiert, sodass die Kreisgleichungen gelten:

$$\text{Bohrloch} \quad (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r_0^2 \quad (4.16)$$

$$\text{Rohr 1} \quad (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = r_1^2 \quad (4.17)$$

$$\text{Rohr 2} \quad (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = r_2^2 \quad (4.18)$$

• Flächenkennzeichnung

Es erfolgt die Abarbeitung aller Gitterpunkte $i = 0$ bis i_{\max} und $j = 0$ bis j_{\max} . Dazu gehören jeweils die Koordinaten $x = i \Delta x$ und $y = j \Delta x$.

Liegt der Koordinatenpunkt innerhalb Rohr 1 $\{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 \leq r_1^2\}$ wird die Flächenkennzahl $KZ(i, j) = 1$ gesetzt. Liegt er innerhalb Rohr 2, so gilt $KZ(i, j) = 2$. Ist dies beides nicht der Fall, befindet sich der Koordinatenpunkt aber innerhalb des Kreises 0 (Bohrloch), so werde $KZ(i, j) = 3$ gesetzt. Liegt er außerhalb des Bohrlochs (Erdreich) so gilt $KZ(i, j) = 0$.

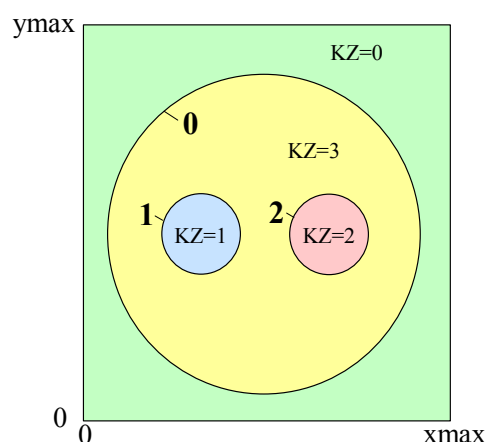


Bild 4.6 Flächenkennzeichnung der in der x,y-Ebene liegenden Struktur

• Temperaturfüllung

Anhand der Kennzahlen werden den zugehörigen Gitterpunkten die vorgegebenen Temperaturen zugewiesen. Für $KZ(i, j) = 1$ gilt t_1 , für $KZ(i, j) = 2$ gilt t_2 und für $KZ(i, j) = 0$ gilt t_0 . Diese Temperatu-

ren sind Eingabewerte, womit nach Gl. (4.13) das Verhältnis der Übertemperaturen Θ definiert ist.

- **Berechnung der Wärmeströme in der Struktur**

Um die gesuchten Wärmeströme \dot{Q}_{10} sowie \dot{Q}_{20} bestimmen zu können, muss das Temperaturfeld im Kennzahlbereich 3 bestimmt werden. Dies erfolgt in folgenden Schritten:

- Vorgabe einer Starttemperatur für alle KZ(i, j) = 3, die aus t_1 , t_2 und t_0 gemittelt ist.
- Lösung der instationären Wärmeleitung im Gebiet 3, indem eine finite Elementemethode verwendet wird. Der Zeitschritt $\Delta\tau$ wird unter Beachten der Gl. (3.21) für $\Delta x = \Delta y$ und $\Delta z = 1$ m sowie für programmintern festgelegte, fiktive Stoffwerte bestimmt. Es werden für alle i,j-Elemente (Volumen = $\Delta x^2 \times 1 \text{ m}^3$) mit KZ(i, j) = 3 die Wärmen zwischen den Elementen bestimmt. So beispielsweise:

$$Q_{j,\text{ein}} = \lambda \frac{t_{i,j-1} - t_{i,j}}{\Delta y} \Delta x \Delta z \Delta\tau = 1 \cdot (t_{i,j-1} - t_{i,j}) \cdot 1 \cdot \Delta\tau. \quad (4.19)$$

Aus der Wärmebilanz für das Element i, j

$$Q_E = Q_{i,\text{ein}} + Q_{j,\text{ein}} - Q_{i,\text{aus}} - Q_{j,\text{aus}} \quad (4.20)$$

folgt die neue Temperatur am Ende des Zeitschrittes $\Delta\tau$ mit CE, der Wärmekapazität des Volumelementes und den programmintern verwendeten Stoffwerten zu:

$$tn_{i,j} = t_{i,j} + \frac{Q_E}{CE}. \quad (4.21)$$

Zusätzlich werden die innerhalb von $\Delta\tau$ an die Bereiche 0, 1 oder 2 übertragenen Wärmen erfasst und unter Q_0 , Q_1 oder Q_2 summiert. Grenzt das im Kennzahlbereich 3 liegende Element an den Bereich 0, 1 oder 2, so wird die jeweils übertragene Wärme zu Q_0 , Q_1 oder Q_2 addiert oder subtrahiert. Z. B. gilt für $Q_{j,\text{ein}}$ nach Gl. (4.19), wenn KZ(i,j-1) = 0 galt, $Q_0 = Q_0 - Q_{j,\text{ein}}$. Anschließend werden die neuen Temperaturen umgespeichert $t_{i,j} = tn_{i,j}$ und es erfolgt eine weitere Neuberechnung des Temperaturfeldes für den Kennzahlbereich 3.

Die Berechnung wird beendet, wenn $|Q_0 + Q_1 + Q_2| / |Q_0| < 0,001$ gilt, d. h. ein nahezu stationärer Zustand in Form eines unveränderten Temperaturfeldes vorliegt.

- Als Ergebnis sind die zu Θ gehörigen Formfaktoren mit den Wärmeströmen aus den Bereichen 1 und 2 bestimmbar:

$$S_{10} = \frac{-Q_1}{\Delta\tau (t_1 - t_0)}; \quad S_{20} = \frac{-Q_2}{\Delta\tau (t_2 - t_0)}. \quad (4.22)$$

Es ist zusätzlich möglich, noch Korrekturfaktoren anzubringen, die Fehler durch die Gitterstruktur mindern.

- Die numerische Berechnung kann verkürzt werden, wenn man das Simulationsgebiet x_{max} , y_{max} durch Nutzung der wärmetechnischen Symmetrieebene nach Bild 4.1 begrenzt. Durch diese Möglichkeit ist auch die Ermittlung der Formfaktoren für eine Doppelsonde gegeben.

4.4 Formfaktoren für spezielle Erdwärmesonden

- **Beispiele I**

Es werden verschiedene Rohrquerschnitte betrachtet (Bild 4.7). Die Ergebnisse für die Sondenvarianten A und B sind in der Tabelle 4.1 für ausgewählte Übertemperaturverhältnisse Θ dargestellt. Die grafische Ergebnisauswertung der in Tabelle 4.1 gegebenen Werte zeigen die Diagramme im Bild 4.8.

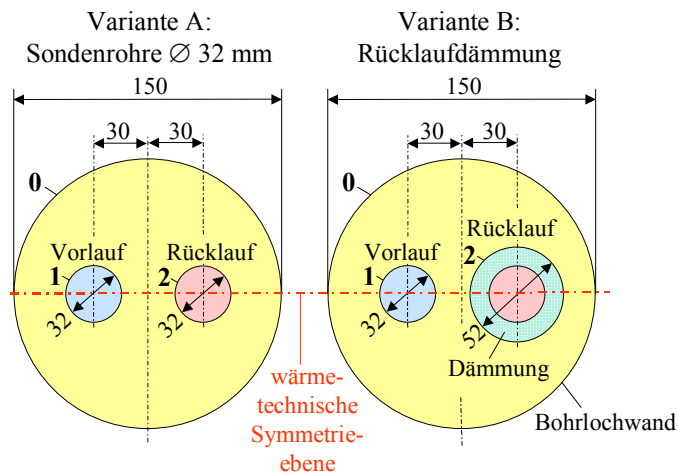


Bild 4.7 Querschnitte durch die Sondenvarianten A und B (Maße in mm)

Variante A zeigt eine U-Rohr-Sonde in Form einer Einfachsonde. Bei Variante B ist das austretende Rohr (Rücklauf) beispielsweise in der Nähe der Erdoberfläche zusätzlich gedämmt.

Tabelle 4.1 Formfaktoren für die Sondenquerschnitte für Variante A und Variante B gemäß Bild 4.7 als Funktion des Übertemperaturverhältnisses Θ

	Variante A		Variante B	
Θ	S_{10}	S_{20}	S_{10}	S_{20}
0,5	2,486	4,394	1,402	7,289
1	3,758	3,758	3,472	6,256
2	4,394	2,486	4,507	4,192

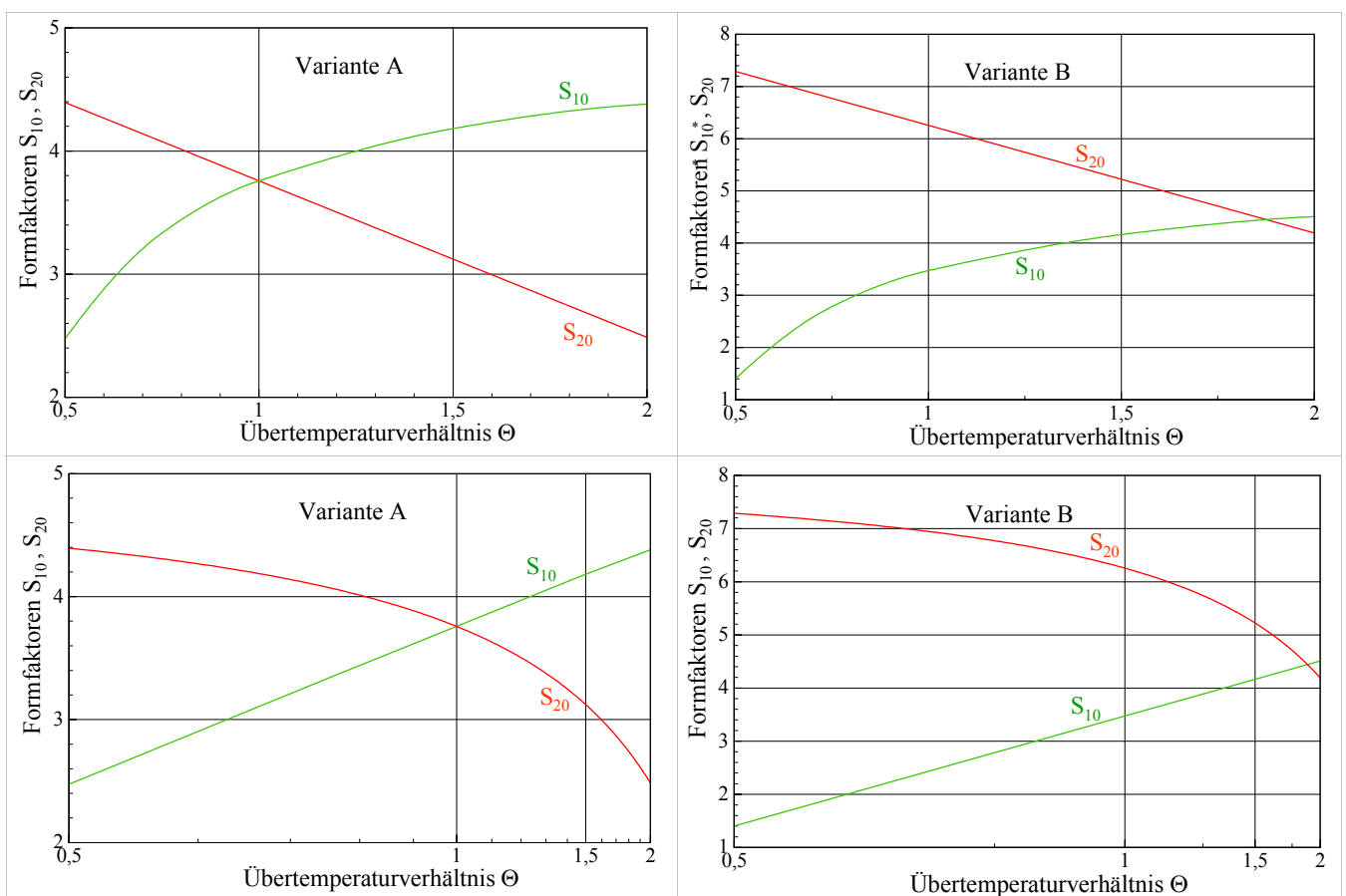


Bild 4.8 Verläufe der Formfaktoren für die Einfachsonde (Aufbau nach Bild 4.7) als Funktion des Übertemperaturverhältnisses Θ für Variante A und Variante B
Teilung der Abszisse: oben linear; unten reziprok

Aus Bild 4.8 ist erkennbar, dass S_{20} eine lineare Funktion von Θ und S_{10} eine lineare Funktion von Θ^{-1} darstellt. Im Einzelnen gelten:

Variante A

$$S_{20} = 5,030 - 1,272 \Theta \quad (4.23)$$

$$S_{10} = 5,030 - 1,272 \Theta^{-1}. \quad (4.24)$$

Variante B

$$S_{20} = 8,320 - 2,064 \Theta \quad (4.25)$$

$$S_{10} = 5,542 - 2,070 \Theta^{-1}. \quad (4.26)$$

Für die Berechnung der Wärmeströme \dot{Q}_{10} sowie \dot{Q}_{20} , die aus den Definitionsgleichungen (4.11) und (4.12) folgen, sind selbstverständlich die den Oberflächen zugeordneten Temperaturen t_1 , t_2 und t_0 zu verwenden.

Die Beziehungen zu den in den beiden Innenrohren anliegenden Medientemperaturen t_{F1} und t_{F2} sind in bekannter Weise mittels der Wärmeübergangswiderstände und der Wärmeleitwiderstände (Rohrwand und eventuell vorhandene Dämmung) herzustellen. Näheres ist im Abschnitt 4.6 zu finden.

- Beispiele II**

Außer den drei Körperoberflächen kann die betrachtete Struktur auch durch adiabate Flächen begrenzt werden. Weiterhin ist es möglich, dass die Struktur Körper mit abweichender Wärmeleitfähigkeit einschließt. Derartige Beispiele zeigt Bild 4.9. Die zugehörigen Simulationsergebnisse sind in Tabelle 4.2 gegenübergestellt.

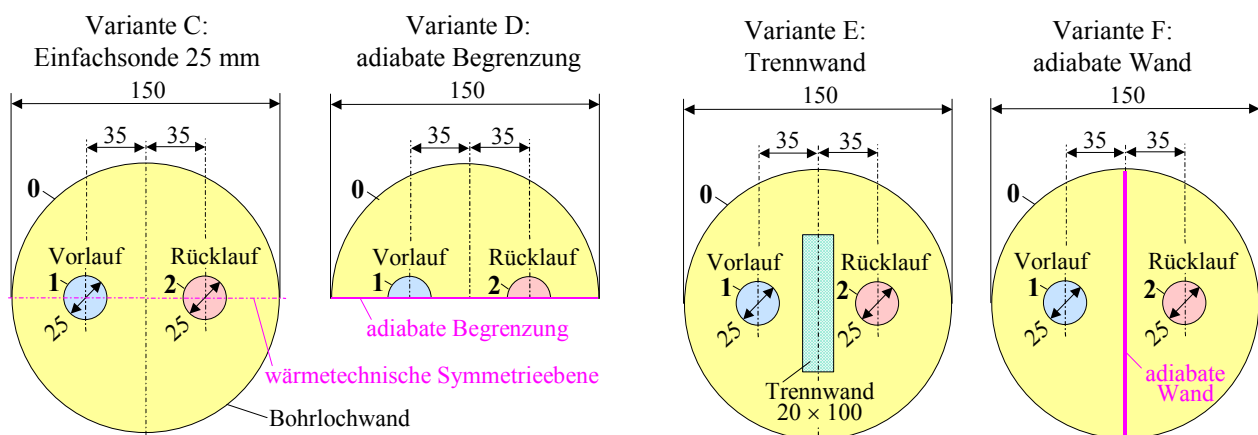


Bild 4.9 Querschnitte durch die Sondenvarianten C bis F (Maße in mm)

Die Varianten C und D sind bezüglich der Temperaturfelder in den beiden Strukturhälften identisch, da die Symmetrieebene lediglich durch eine adiabate Begrenzung dargestellt wird. Bei Variante E ist eine Teilabschirmung zwischen Vor- und Rücklauf installiert. Für die Wärmeleitfähigkeit der Trennwand gilt $\lambda_{\text{Trennwand}} = 0,1 \lambda$. Variante F stellt wärmetechnisch eine vollkommene Trennung zwischen dem Vor- und Rücklaufbereich dar.

Tabelle 4.2 Formfaktoren für die Sondenquerschnitte C bis F gemäß Bild 4.9 als Funktion des Übertemperaturverhältnisses Θ

	Variante C		Variante D		Variante E		Variante F	
Θ	S_{10}	S_{20}	S_{10}	S_{20}	S_{10}	S_{20}	S_{10}	S_{20}
0,5	2,854	3,854	1,427	1,927	3,194	3,461	3,521	3,521
1	3,521	3,521	1,760	1,760	3,372	3,372	3,521	3,521
2	3,854	2,854	1,927	1,427	3,461	3,194	3,521	3,521

mit unterschiedlicher Temperatur vorhanden und das vorgestellte Verfahren zur Bestimmung von S_{10} sowie S_{20} kann Anwendung finden. Die Ergebnisse sind nachfolgend zusammengestellt.

Tabelle 4.3 Formfaktoren für den Querschnitt der Doppelsonde gemäß Bild 4.10 als Funktion des Übertemperaturverhältnisses Θ

Θ	Variante G	
	S_{10}	S_{20}
0,5	3,015	4,029
1	3,691	3,691
2	4,029	3,015

Variante G

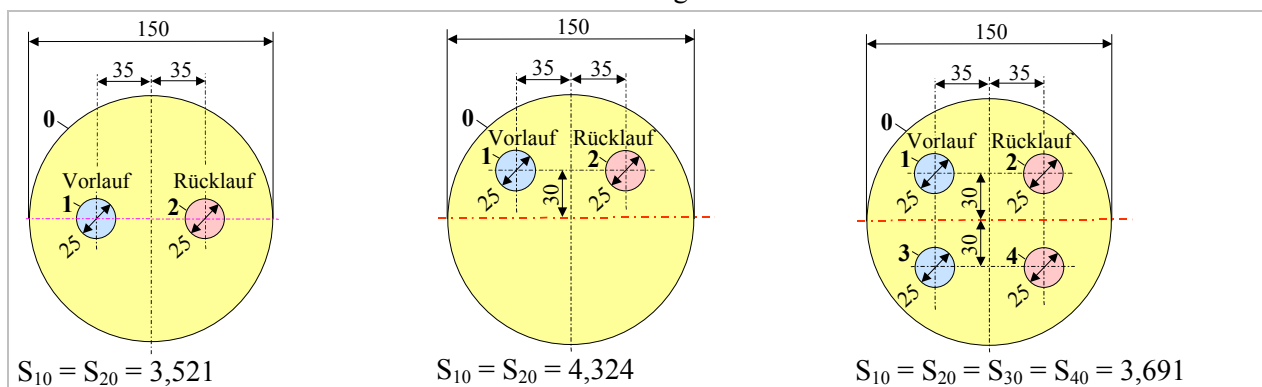
$$S_{20} = 4,367 - 0,676 \Theta \quad (4.34)$$

$$S_{10} = 4,367 - 0,676 \Theta^{-1}. \quad (4.35)$$

• Berücksichtigung der Exzentrizität der Rohre im Bohrloch

In der Literatur über Erdwärmesonden wird mitunter die asymmetrische Rohranordnung innerhalb des Bohrlochs diskutiert. Die entsprechenden Geometrien können bei der Ermittlung der Formfaktoren problemlos berücksichtigt werden. Tabelle 4.4 zeigt beispielhaft Ergebnisse für $\Theta = 1$. Die Optimierung der Lage ist aber nur sinnvoll, wenn auch der exakte Einbau gewährleistet werden kann.

Tabelle 4.4 Formfaktoren für verschiedene Rohranordnungen im Bohrloch bei $\Theta = 1$



• Hinweis auf mögliche Veränderung der Formfaktorendefinition

Das Einbeziehen von Füllkörpern mit abweichender Wärmeleitfähigkeit von der Grundstruktur, wie beispielsweise bei Vorhandensein einer Trennwand (Bild 4.9, Variante E), ermöglicht auch grundsätzlich veränderte Definitionen. So wäre es denkbar, die Wärmeleitwiderstände der Rohrwandung und ihrer zusätzlichen Dämmschicht (z. B. bei Bild 4.7, Variante B) in die Formfaktoren zu integrieren. Als Bezugstemperaturen müssten dann die inneren Rohrwandtemperaturen bei der Ermittlung der dimensionslosen Übertemperatur verwendet werden. (Der hier benutzte Verfahrensweg zum Einbeziehen der Wärmeleitwiderstände des Rohres ist im Abschnitt 4.6 dargelegt.)

4.5 Rechenprogramm zur Bestimmung von Formfaktoren

Das Rechenprogramm beruht auf dem im Abschnitt 4.3 vorgestellten Modell. Es steht zum kostenlosen Download bereit (siehe auch Abschnitt 7). Das lauffähige Programm ist in der Programmierungsumgebung VisualBasic.net (Standard) erstellt worden. Nachfolgend ist die Programmoberfläche mit dem Beispiel Variante C (Seite 24) im Bild 4.11 gezeigt.

Hauptprogramm - Formfaktoren

Formfaktoren für Erdwärmesonden

Autor: Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück (V12/2008)

Eingaben zur Berechnung der Formfaktoren

Geometriedaten

Bohrung: Radius (innen) mm Mittelpunkt x0 mm Mittelpunkt y0 mm

Innenrohr 1: Radius (außen) mm Mittelpunkt x1 mm Mittelpunkt y1 mm

Innenrohr 2: Radius (außen) mm Mittelpunkt x2 mm Mittelpunkt y2 mm

Simulationsgebiet: xmin mm xmax mm ymin mm ymax mm Dx = Dy mm

Temperaturen

Bohrlochwand Rohr 1 Rohr 2

t0 °C t1 °C t2 °C

Ergebnisse

Theta	S10	S20	Berechnungsschritte
0,500	2,854	3,854	50000

Fläche 1	Fläche 2	Fläche 3	FKorr1	FKorr2
490,3	490,3	16684,8	1,001	1,001

Simulationsebene zur numerischen Ermittlung der Formfaktoren für Erdwärmesonden

Adiabate Wand wird nicht benutzt!

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. DATENSPEICHERUNG zur Kontrolle und Speicherung der Eingaben drücken!
5. BERECHNUNG zur Ermittlung der Formfaktoren aktivieren!
6. Mittels DRUCKEN Komplettausgabe der Eingaben und der Ergebnisse starten.

STARTEN DATEI LADEN DATENSPEICHERUNG **BERECHNUNG FORMFAKTOREN** DRUCKEN BEENDEN

Bild 4.11 Programmoberfläche zur Ermittlung der Formfaktoren für die wärmetechnischen Zusammenhänge im Bohrloch von Erdwärmesonden mit den Daten für Variante C

In der Bildschirmmaske sind außer den Eingabedaten auch die wichtigsten Ergebnisse sowie die Buttons zur Steuerung des Programmablaufs enthalten. Mit **DRUCKEN** kann beispielsweise der komplette Ausdruck des Berechnungsbeispiels erfolgen.

Ausdruck des Rechenprogramms:

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\FORMFAKTOREN\VARIANTE_C\

Lambda W/(m K)	r0	x0	y0	r1	x1 mm	y1	r2	x2	y2
1,000	75,0	85	80	12,5	50	80	12,5	120	80

xmin	xmax	Dx mm	ymin	ymax	t0	t1 °C	t2
0	170	0,5	0	160	30	20	10

F3	F1 mm ²	F2	FKorr1	FKorr2
16684,8	490,3	490,3	1,001	1,001

Q0	Q1 W/m	Q2
-30,3	76,1	159,0
-40,3	60,7	126,6
-52,2	53,3	112,0
-61,5	48,4	103,3
-68,6	44,9	97,5
-74,2	42,2	93,4
-78,8	40,0	90,4
-82,6	38,2	88,0
-85,8	36,8	86,2
-88,6	35,6	84,7
-90,9	34,5	83,5
-93,0	33,7	82,5
-94,7	32,9	81,6

Fortsetzung auf folgender Seite!

Q0	Q1 W/m	Q2
-96,2	32,3	80,9
-97,5	31,7	80,3
.		
.		
-105,4	28,5	77,0
-105,4	28,5	77,0
-105,4	28,5	77,0

Entwicklung der Wärmeströme von der ersten Temperaturannahme bis zu einer ausgeglichenen Wärmebilanz, der von den drei Bereichsstrukturen aufgenommenen Wärmeströme.

Im berechneten Beispiel sind 50000 Berechnungsschritte notwendig geworden, wobei nach je 1000 Berechnungsschritten ein Ausdruck erfolgte.

In der linken Tabelle wird nur ein Auszug wiedergegeben.

Maximale Schrittzahl: 50000

Formfaktoren S in W/(m K) und Übertemperaturverhältnis:

S10 = 2,854 S20 = 3,854 theta = 0,500

Das Beispiel wurde gemäß Bild 4.9 (Variante C) durch die Eingaben abgebildet und berechnet. Unter Nutzung der Symmetriebedingung, die durch eine adiabate Wand bei der Eingabe realisiert wird, kann die Berechnung verkürzt werden. Sie entspricht dann der Variante D. Die zugehörige Bildschirmmaske ist im Bild 4.12 dargestellt.

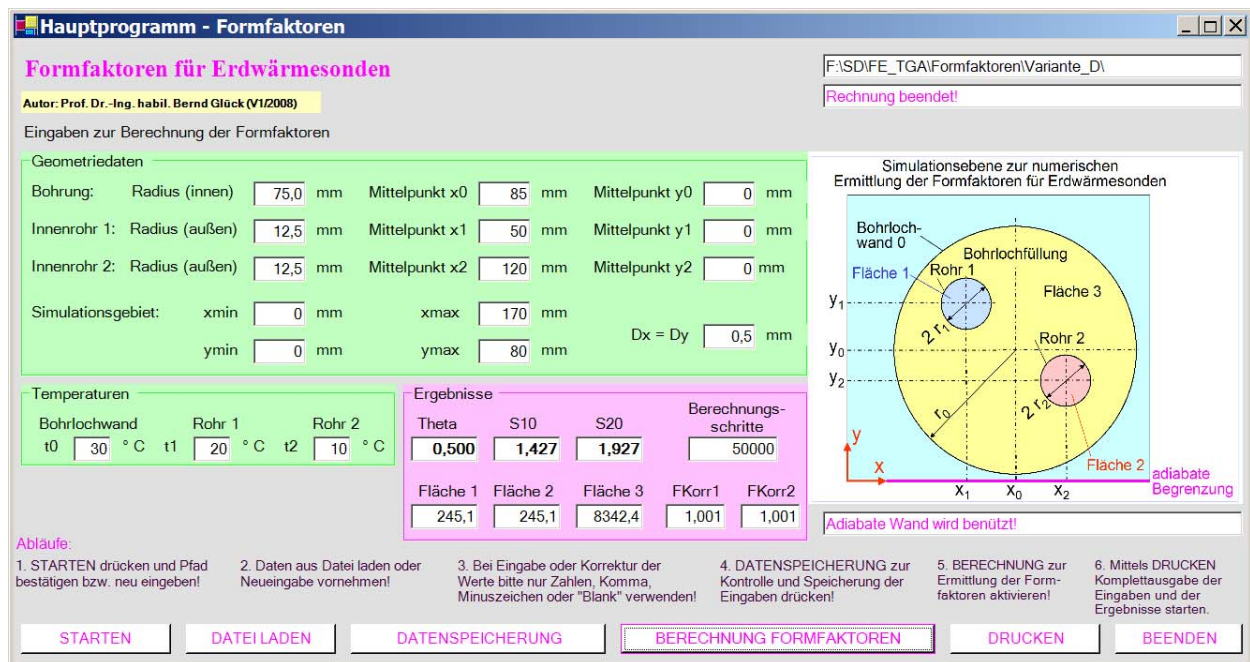


Bild 4.12 Programmoberfläche zur Ermittlung der Formfaktoren für die wärmetechnischen Zusammenhänge im Bohrloch von Erdwärmesonden mit den Daten der Variante D

4.6 Besonderheiten bei Verwendung der Formfaktoren im Simulationsprogramm

Die ermittelten Formfaktoren liegen – wie vorstehend abgeleitet – z. B. als Gln. (4.23) bis (4.35) vor. Die allgemeine Darstellung lautet mit den Indizes RL Rücklauf und VL Vorlauf:

Formfaktoren für ungedämmte Sondenrohre im Bohrloch

$$S_{20} \equiv S_{RL} = a_2 + b_2 \Theta \quad (4.36)$$

$$S_{10} \equiv S_{VL} = a_1 + b_1 \Theta^{-1} \quad (4.37)$$

Formfaktoren für gedämmte Sondenrohre im Bohrloch

$$S_{20} \equiv S_{RL} = a_{2D} + b_{2D} \Theta \quad (4.38)$$

$$S_{10} \equiv S_{VL} = a_{1D} + b_{1D} \Theta^{-1}. \quad (4.39)$$

Zugehörig gilt das Übertemperaturverhältnis gemäß Gl. (4.13) mit den speziellen Temperaturbezeichnungen (Oberflächentemperatur der Vorlaufleitung t_{VL} , Oberflächentemperatur der Rücklaufleitung t_{RL} , Bohrlochwandtemperatur t_{BL})

$$\Theta = \frac{t_{VL} - t_{BL}}{t_{RL} - t_{BL}} \equiv \frac{t_{BL} - t_{VL}}{t_{BL} - t_{RL}}. \quad (4.40)$$

Wird die Erdwärmesonde als Wärmequelle oder als Wärmesenke eingesetzt, ergeben sich beispielsweise die Temperaturverläufe nach Bild 4.13. In allen Rohrabschnitten i gilt dann stets $\Theta > 0$. Bei stark instationären Abläufen (Anfahren der Sonde nach zeitweisem Stillstand) und/oder bei sehr kleinen Sondendurchflüssen sind auch Temperaturverläufe nach Bild 4.14 denkbar. Das Übertemperaturverhältnis kann dabei theoretisch einen Bereich von $\Theta = -\infty \dots +\infty$ durchlaufen, wodurch die Formfaktoren Unendlichkeitsstellen aufweisen können. Die zwischen den nackten oder gedämmten Rohroberflächen und der Bohrlochwand vorhandenen Wärmeströme sind aber stets endlich. Deshalb wird gleich zur Wärmestromermittlung übergegangen. Z. B. folgen aus den Gln. (4.11) und (4.12) mit der Wärmeleitfähigkeit der Bohrlochfüllung λ_{BL} :

$$\dot{Q}_{VL} = \lambda_{BL} \Delta h S_{VL} (t_{BL} - t_{VL}) = \lambda_{BL} \Delta h \{a_1 (t_{BL} - t_{VL}) + b_1 (t_{BL} - t_{RL})\} \quad (4.41)$$

$$\dot{Q}_{RL} = \lambda_{BL} \Delta h S_{RL} (t_{BL} - t_{RL}) = \lambda_{BL} \Delta h \{a_2 (t_{BL} - t_{RL}) + b_2 (t_{BL} - t_{VL})\}. \quad (4.42)$$

Dabei ist per Definition der Wärmestrom von der Bohrlochwand zu den Sondenrohren positiv.

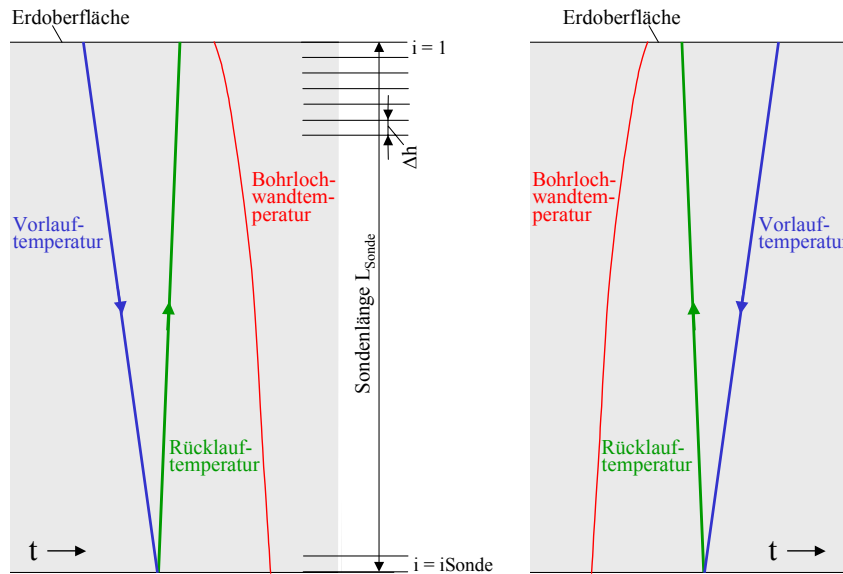


Bild 4.13 Erdwärmesonde als Wärmequelle (links) und als Wärmesenke (rechts) mit kontinuierlicher Temperaturveränderung des Sondenvor- und -rücklaufes (Übertemperaturverhältnis $\Theta > 0$)

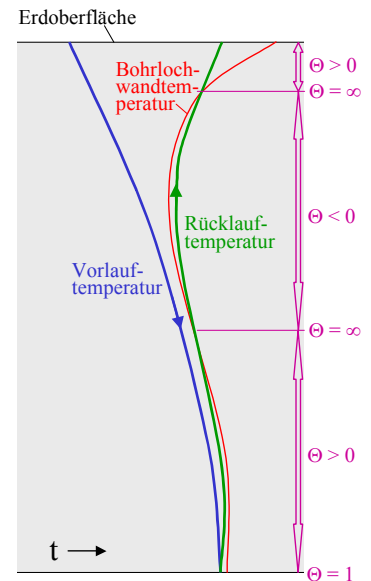


Bild 4.14 Erdwärmesonde als Wärmequelle in einem Anfahrzustand (Übertemperaturverhältnis Θ wechselnd)

Letztlich sind stets die Wärmeströme auf die Medientemperaturen in den Vor- und Rücklaufleitungen (t_V bzw. t_R) zu beziehen. Mit den später abgeleiteten Teilwärmedurchgangskoeffizienten κ_R (Gl. (5.13)) bzw. κ_{DV} und κ_{DR} (Gl. (5.13a)) folgen die Zusammenhänge zwischen Rohroberflächentemperatur und Medientemperatur. Dies sei zunächst für die ungedämmten Rohre (Rohraußendurchmesser d_a , Rohrlänge des betrachteten Abschnittes Δh) gezeigt:

$$t_{VL} = t_V + \frac{\dot{Q}_{VL}}{\kappa_R \pi d_a \Delta h} \quad (4.43)$$

$$t_{RL} = t_R + \frac{\dot{Q}_{RL}}{\kappa_R \pi d_a \Delta h}. \quad (4.44)$$

Setzt man diese Beziehungen in die Gln. (4.41) und (4.42) ein, so ergeben sich:

$$\dot{Q}_{VL} = \lambda_{BL} \Delta h \left\{ a_1 \left(t_{BL} - t_V - \frac{\dot{Q}_{VL}}{\kappa_R \pi d_a \Delta h} \right) + b_1 \left(t_{BL} - t_R - \frac{\dot{Q}_{RL}}{\kappa_R \pi d_a \Delta h} \right) \right\} \quad (4.45)$$

$$\dot{Q}_{RL} = \lambda_{BL} \Delta h \left\{ a_2 \left(t_{BL} - t_R - \frac{\dot{Q}_{RL}}{\kappa_R \pi d_a \Delta h} \right) + b_2 \left(t_{BL} - t_V - \frac{\dot{Q}_{VL}}{\kappa_R \pi d_a \Delta h} \right) \right\}. \quad (4.46)$$

Nach Einführen der Abkürzungen

$$R = \frac{1}{\lambda_{BL} \Delta h} + \frac{a_2}{\kappa_R \pi d_a \Delta h}; \quad V = \frac{1}{\lambda_{BL} \Delta h} + \frac{a_1}{\kappa_R \pi d_a \Delta h}; \quad S = \frac{b_2}{\kappa_R \pi d_a \Delta h}; \quad T = \frac{b_1}{\kappa_R \pi d_a \Delta h}$$

$$x = [a_1 (t_{BL} - t_V) + b_1 (t_{BL} - t_R)]; \quad y = [a_2 (t_{BL} - t_R) + b_2 (t_{BL} - t_V)]$$

und längerem Umformungen folgen:

$$\dot{Q}_{VL} = \frac{x R - y T}{V R - S T} \quad (4.47)$$

$$\dot{Q}_{RL} = \frac{y V - x S}{V R - S T}. \quad (4.48)$$

Die aufwändigen Substitutionen in den vorgestellten Ableitungen ermöglichen es, die explizite Bestimmung der Rohroberflächentemperaturen zu umgehen. Somit finden die Koeffizienten der Formfaktoren direkt Eingang in die Berechnungen, wie die vorgestellten Abkürzungen zeigen.

Die Ermittlung der Wärmeströme erfolgt abschnittsweise für die jeweilige Rohrlänge Δh und die determinierten Temperaturen t_V , t_R und t_{BL} . Damit ist eine iterationsfreie Ermittlung der Wärmeströme – in der Regel ohne numerische Komplikationen – gegeben. Die Zuordnungen der Größen werden im Abschnitt 5.3 beschrieben.

Die analogen Ableitungen gelten auch für gedämmte Rohre. Hierbei ist zu beachten, dass die Vor- und Rücklaufleitungen unterschiedlich dick gedämmt sein können (Außendurchmesser d_{DV} bzw. d_{DR}). Damit ergeben sich auch veränderte Teilwärmedurchgangskoeffizienten κ_{DV} bzw. κ_{DR} . Mit den neuen Definitionen folgen schrittweise:

$$t_{VL} = t_V + \frac{\dot{Q}_{VL}}{\kappa_{DV} \pi d_{DV} \Delta h} \quad (4.49)$$

$$t_{RL} = t_R + \frac{\dot{Q}_{RL}}{\kappa_{DR} \pi d_{DR} \Delta h}. \quad (4.50)$$

$$\dot{Q}_{VL} = \lambda_{BL} \Delta h \left\{ a_{1D} \left(t_{BL} - t_V - \frac{\dot{Q}_{VL}}{\kappa_{DV} \pi d_{DV} \Delta h} \right) + b_{1D} \left(t_{BL} - t_R - \frac{\dot{Q}_{RL}}{\kappa_{DR} \pi d_{DR} \Delta h} \right) \right\} \quad (4.51)$$

$$\dot{Q}_{RL} = \lambda_{BL} \Delta h \left\{ a_{2D} \left(t_{BL} - t_R - \frac{\dot{Q}_{RL}}{\kappa_{DR} \pi d_{DR} \Delta h} \right) + b_{2D} \left(t_{BL} - t_V - \frac{\dot{Q}_{VL}}{\kappa_{DV} \pi d_{DV} \Delta h} \right) \right\}. \quad (4.52)$$

$$R = \frac{1}{\lambda_{BL} \Delta h} + \frac{a_{2D}}{\kappa_{DR} \pi d_{DR} \Delta h}; \quad V = \frac{1}{\lambda_{BL} \Delta h} + \frac{a_{1D}}{\kappa_{DV} \pi d_{DV} \Delta h}; \quad S = \frac{b_{2D}}{\kappa_{DV} \pi d_{DV} \Delta h}; \quad T = \frac{b_{1D}}{\kappa_{DR} \pi d_{DR} \Delta h}$$

$$x = [a_{1D} (t_{BL} - t_V) + b_{1D} (t_{BL} - t_R)]; \quad y = [a_{2D} (t_{BL} - t_R) + b_{2D} (t_{BL} - t_V)].$$

Die Wärmeströme berechnen sich wiederum nach den Gln. (4.47) und (4.48).

5 Wärmetechnische Modellierung des Rohrsystems

Die wärmetechnische Betrachtung der Bohrlochgeometrie mit den medienführenden Rohrleitungen im allgemeinen Teil des Abschnittes 4 stellt die Berechnung der Wärmeströme bis zu den Rohroberflächen her. Um auf den Wärmestrom an das fließende Medium schließen zu können, muss der Wärmeleitwiderstand in der Rohrwand und der Übergangswiderstand zum Medium beachtet werden. Dies erfolgte für die übliche Sondengeometrie im speziellen Abschnitt 4.6.

Da sich die Temperaturen der Bohrlochwand und des Mediums tiefenabhängig ändern, ist eine abschnittsweise Betrachtung unabdingbar. Gemäß Bild 2.1 werden die bereits definierten Abschnitte $i = 0 \dots i_{\max}$ verwendet. Somit sind für die Wärmeleistung der Erdwärmesonde auch der Medienstrom, seine Stoffwerte und die abschnittswisen Eintrittstemperaturen des Vor- und Rücklaufs bedeutungsvoll. In den nachfolgenden Unterabschnitten werden die entsprechenden Stoffwertapproximationen und Teilalgorithmen vorgestellt.

5.1 Zustands- und Stoffwerte der Durchflussmedien (Wasser, Tyfocor L)

Für die Vielzahl der Einsatzfälle werden **Wasser** und **Tyfocor L** (Wasser-Propylenglykol-Gemisch bei Mischungsanteilen von ca. 40 % bis -20 °C , bei 25 % bis -10 °C frostsicher) als realistische, nicht gesundheitsgefährdende Medien ausgewählt. Die Kurzbezeichnungen für die wässrigen Tyfocorlösungen lauten im Weiteren **TL40** und **TL25**.

Für die genannten Flüssigkeiten und für Temperaturen bis 100 °C werden die Approximationen in Tabelle 5.1 vorgeschlagen. Für das Wasser-Propylenglykol-Gemisch basieren diese auf grafischen Angaben des Herstellers. Die Visualisierung der approximierten Stoffdaten zeigt Bild 5.1.

Tabelle 5.1 Approximationen für die Stoffwerte von Wasser und wässrigen Tyfocorlösungen TL40, TL25

Dichte in kg/m^3 mit t in $^{\circ}\text{C}$
$\rho_{\text{Wasser}} = 1002,045 - 0,1029905 t - 0,003698162 t^2 + 0,000003991053 t^3$
$\rho_{\text{TL40}} = 1050 - 0,4857143 t - 0,001746031 t^2 + 0,000001984122 t^3$
$\rho_{\text{TL25}} = 1031 - 0,3214706 t - 0,002498191 t^2 + 0,000001170051 t^3$
Spezifische Wärmekapazität in $\text{J}/(\text{kg K})$ mit t in $^{\circ}\text{C}$
$c_{\text{Wasser}} = 4212,404 - 2,271266 t + 0,0396373 t^2 - 0,0001543466 t^3$
$c_{\text{TL40}} = 3610 + 3,881099 t - 0,005363271 t^2 + 0,00002980124 t^3$
$c_{\text{TL25}} = 3876 + 2,371942 t + 0,004128137 t^2 - 0,00003225045 t^3$
Wärmeleitfähigkeit in $\text{W}/(\text{m K})$ mit t in $^{\circ}\text{C}$
$\lambda_{\text{Wasser}} = 0,5587913 + 0,002268458 t - 0,00001248304 t^2 + 0,00000001890318 t^3$
$\lambda_{\text{TL40}} = 0,3520003 + 0,001788111 t - 0,0000005362851 t^2 + 0,00000000297968 t^3$
$\lambda_{\text{TL25}} = 0,4020909 + 0,002401029 t - 0,0000001497917 t^2 + 0,000000005697341 t^3$
Kinematische Viskosität in m^2/s mit t in $^{\circ}\text{C}$
$\nu_{\text{Wasser}} = (556272,7 + 19703,39 t + 124,4091 t^2 - 0,3770952 t^3)^{-1}$

$$v_{TL40} = 0,0000114 \cdot \text{Exp}(-0,0002167876 - 0,05785851 t + 0,0004864946 t^2 - 0,00000186843 t^3)$$

$$v_{TL25} = 0,0000056 \cdot \text{Exp}(0,02699025 - 0,04543205 t + 0,0003234937 t^2 - 0,000001076019 t^3)$$

Prandtlzahl mit t in °C

$$\text{Pr}_{\text{Wasser}} = (0,07547718 + 0,00276297 t + 0,00003210257 t^2 - 0,0000001015768 t^3)^{-1}$$

Die Prandtlzahlen für Tyfocor L werden aus den Einzelgrößen gebildet:

$$\text{Pr} = \frac{v}{a} = \frac{v \rho c}{\lambda}$$

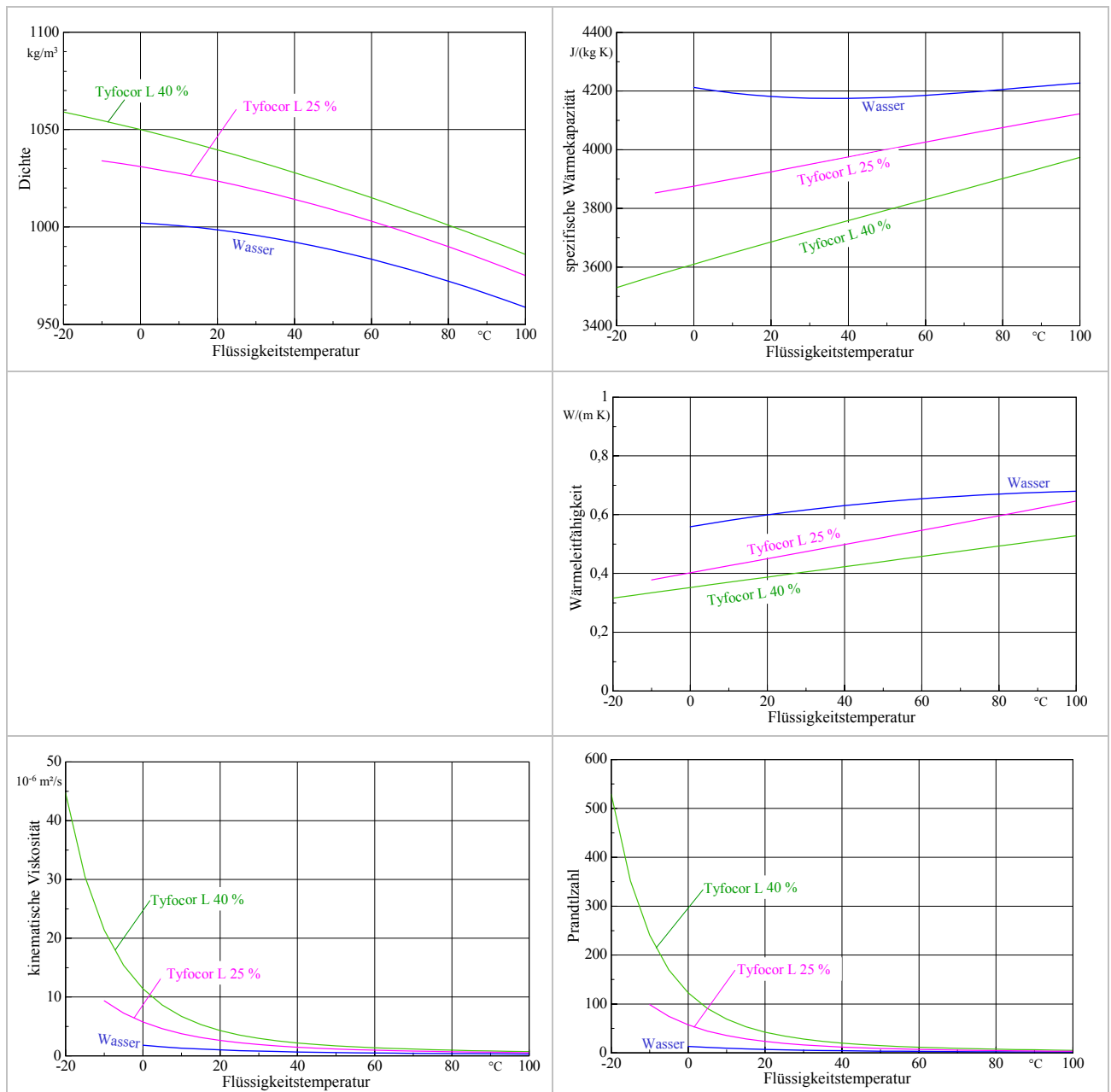


Bild 5.1 Grafiken für die Stoffwerte von Wasser und wässrigen Tyfocorlösungen TL40, TL25

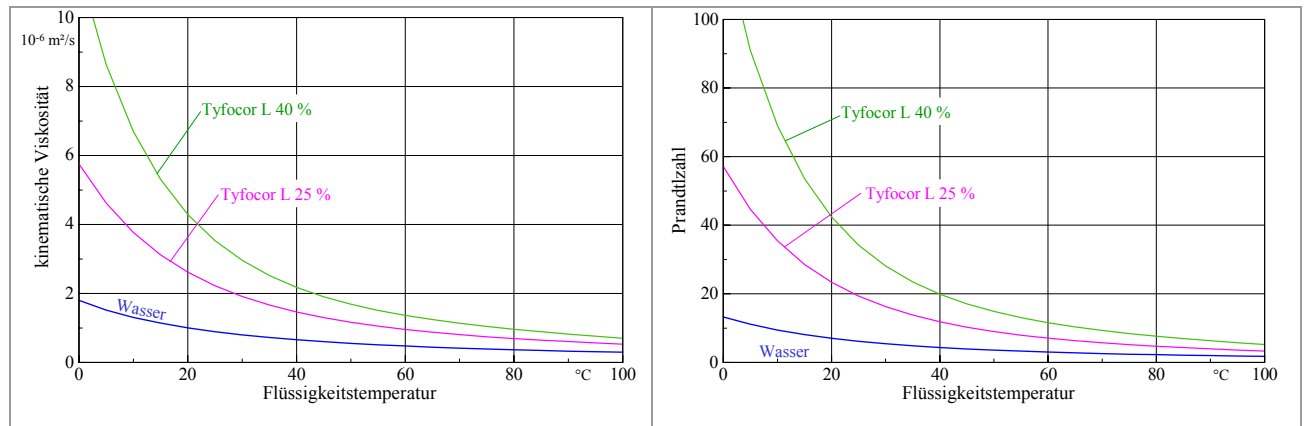


Bild 5.1 (Fortsetzung) Grafiken für die Stoffwerte von Wasser und wässrigen Tyfocorlösungen

5.2 Wärmeübergangskoeffizient für die Rohrströmung und Teilwärmedurchgangskoeffizient

Die Ermittlung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten basiert auf der Ähnlichkeitstheorie unter Verwendung der **Nußeltgleichungen** nach [6, 7]. Es gelten die Größen:

t	°C	Temperatur des Fluids	t _w	°C	Temperatur der Rohrwand
d _i	m	Rohrinnendurchmesser	d _a	m	Rohraußendurchmesser
L	m	gerade Rohrlänge	w	m/s	Durchflussgeschwindigkeit
ν	m ² /s	kinematische Viskosität des Fluids	c	J/(kg K)	spezifische Wärmekapazität des Fluids
λ	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit des Fluids	ρ	kg/m ³	Dichte des Fluids
Pr	–	PRANDTLzahl des Fluids	Nu	–	NUSSELTzahl Nu = α _R d _i / λ
Re	–	REYNOLDSzahl Re = w d _i / ν	α _R	W/(m ² K)	Wärmeübergangskoeffizient.

Bei den zu betrachtenden Einsatzgebieten ist nur die **erzwungene Strömung** von Interesse, sodass in Abhängigkeit der Strömungsart angegeben werden können:

Nußeltzahl bei laminarer Strömung (Re ≤ 2300)

$$Nu = \left(49,028 + 4,173 Re Pr \frac{d_i}{L} \right)^{0,333} \quad (5.1)$$

Gültigkeitsbereich: $Re < 2300$; $0,1 < Re Pr d_i / L < 10^4$

Nußeltzahl bei turbulenter Strömung (Re > 2300)

$$Nu = \frac{B (Re - 1000) Pr}{1 + 12,7 B^{0,5} (Pr^{0,667} - 1)} \left(1 + \left(\frac{d_i}{L} \right)^{0,667} \right) \quad (5.2)$$

$$\text{mit der Hilfsgröße } B = (5,15 \lg Re - 4,64)^{-2} \quad (5.3)$$

Gültigkeitsbereich: $2300 < Re < 10^6$; $d_i / L < 1$.

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 [7] der jetzigen Auflage:

$$\text{Nu} = \left\{ 3,66^3 + 0,7^3 + \left(1,615 (\text{Re Pr } d_i / L)^{0,333} - 0,7 \right)^3 + \left(\left(\frac{2}{1+22 \text{Pr}} \right)^{0,167} (\text{Re Pr } d_i / L)^{0,5} \right)^3 \right\}^{1/3} \quad (5.4)$$

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

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 RÖTTA Rechnung getragen, der im Übergangsbereich $\text{Re} > 2300$ alternierende Umschläge der Strömungsform feststellte. GNIELINSKI schlägt nachfolgende Berechnung vor:

▪ **ausgebildete turbulente Strömung**

$$\text{Nu} = \frac{B \text{Re Pr}}{1 + 12,7 B^{0,5} (\text{Pr}^{0,667} - 1)} \left(1 + \left(\frac{d_i}{L} \right)^{0,667} \right) \quad (5.5)$$

$$\text{mit der Hilfsgröße } B = (5,09 \lg \text{Re} - 4,24)^{-2} \quad (5.6)$$

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

▪ **Übergangsbereich**

Es wird eine lineare Interpolation zwischen $\text{Nu}_{\text{laminar}}(\text{Re} = 2300)$ nach Gl. (5.4) und $\text{Nu}_{\text{turbulent}}(\text{Re} = 10000)$ nach Gl. (5.5) vorgenommen, wobei gelten:

$$\gamma = \frac{\text{Re} - 2300}{10^4 - 2300} \quad (5.7)$$

$$\text{Nu} = (1 - \gamma) \text{Nu}_{\text{laminar}}(\text{Re} = 2300) + \gamma \text{Nu}_{\text{turbulent}}(\text{Re} = 10000) \quad (5.8)$$

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

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:

$\text{Nu}_{\text{laminar}}(\text{Re} = 2300)$ nach Gl. (5.1) und $\text{Nu}_{\text{turbulent}}(\text{Re} = 7000)$ nach Gl. (5.2)

$$\gamma^* = \frac{\text{Re} - 2300}{7000 - 2300} \quad (5.9)$$

$$\text{Nu} = (1 - \gamma^*) \text{Nu}_{\text{laminar}}(\text{Re} = 2300) + \gamma^* \text{Nu}_{\text{turbulent}}(\text{Re} = 7000). \quad (5.10)$$

Im Bild 5.2 sind die unterschiedlichen Berechnungsansätze grafisch gegenübergestellt.

Anwendungsempfehlung: Die Abweichung zwischen den Gln. (5.8) und (5.10) ist unbedeutend gegenüber der ausgebildeten turbulenten Strömungsform nach Gl. (5.2). Somit kann $\text{Nu} = f(\text{Re})$ beispielsweise im Übergangsbereich bis $\text{Re} \leq 7000$ durch die Gl. (5.10) und darüber durch Gl. (5.2) approximiert werden. Der laminare Bereich sollte grundsätzlich vermieden werden. Würde ein Einsatz bei niedrigen Reynoldszahlen erfolgen, ist der Einfachheit halber Gl. (5.1) zu bevorzugen, da der Unterschied zu Gl. (5.4) ohnehin klein ist.

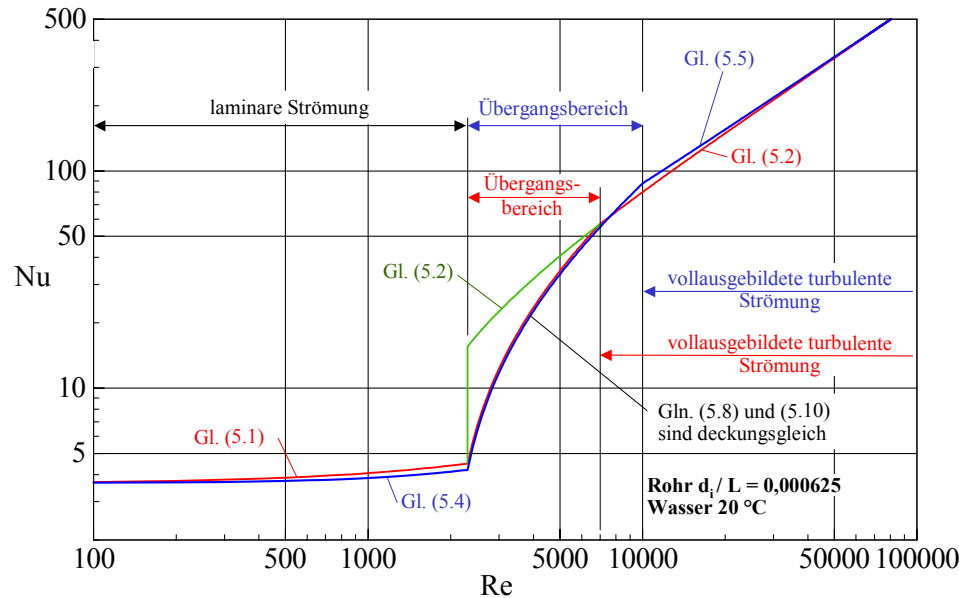


Bild 5.2 Gegenüberstellung der verschiedenen Nußeltgleichungen in Abhängigkeit von Re für einen ausgewählten Einsatzfall

Die **Stoffwerte** in den Nußeltgleichungen sind eigentlich auf die mittlere Fluidtemperatur zu beziehen. Da die Temperaturspreizung zwischen Ein- und Austritt in der Regel klein ist und um Iterationen zu vermeiden, wird programmintern die Fluidtemperatur am Sondenfuß t_{Umlenk} (Bild 5.3) verwendet. Geeignete Stoffwertapproximationen sind Tabelle 5.1 zu entnehmen.

Die **Richtung des Wärmestromes** hat normalerweise auch Einfluss auf den Wärmeübergang, da die Stoffwerte in der wandnahen Schicht gegenüber den mittleren Strömungswerten verändert sind. Als kennzeichnende Größe verwendet man meistens den Quotienten aus Pr bei der Fluidtemperatur t und Pr_W bei der Wandtemperatur t_W . Vereinfachend wird in [7] bei laminarer und turbulenter Strömung der gleiche Korrekturterm

$$Nu_{\text{kor}} = Nu \left(\frac{Pr}{Pr_W} \right)^{0,11} \quad (5.11)$$

angesetzt. In den üblichen Einsatzfällen für Erdwärmesonden wird die Korrektur jedoch unter 2 % bleiben. D. h., sie liegt im Genauigkeitsbereich von Nu.

Der **Wärmeübergangskoeffizient** zwischen Medium und Rohr folgt aus der Definitionsgleichung

$$\alpha_R = \frac{Nu \lambda}{d_i} \quad (5.12)$$

Der **Teilwärmedurchgangskoeffizient** κ_R fasst den Wärmeübergangswiderstand und den Wärmeleitwiderstand in der Rohrwand zusammen. Er wird auf die **Außenfläche** des Rohres bezogen:

$$\kappa_R = \left(\frac{d_a}{\alpha_R d_i} + \frac{d_a}{2 \lambda_R} \ln \frac{d_a}{d_i} \right)^{-1} \quad (5.13)$$

Für die eventuell gedämmten Vor- und Rücklaufrohrleitungen gelten analog:

$$\kappa_{DV} = \left(\frac{d_{DV}}{\alpha_R d_i} + \frac{d_{DV}}{2 \lambda_R} \ln \frac{d_a}{d_i} + \frac{d_{DV}}{2 \lambda_D} \ln \frac{d_{DV}}{d_a} \right)^{-1}; \quad \kappa_{DR} = \left(\frac{d_{DR}}{\alpha_R d_i} + \frac{d_{DR}}{2 \lambda_R} \ln \frac{d_a}{d_i} + \frac{d_{DR}}{2 \lambda_D} \ln \frac{d_{DR}}{d_a} \right)^{-1} \quad (5.13a)$$

5.3 Wärmetransport in den Rohren

Die Rohrachsen sind in i-Richtung orientiert (siehe Bild 2.1). Die Rohrlänge beträgt L_{Sonde} , wobei mit der Abschnittshöhe Δh und der maximalen Abschnittszahl i_{Sonde} der Zusammenhang gilt:

$$L_{\text{Sonde}} = \Delta h \cdot i_{\text{Sonde}}. \quad (5.14)$$

Bei der Durchströmung des Rohres ($w > 0$) bleibt eine eventuelle Änderung der Wandtemperatur 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 Rücklaufleitung zu unterscheiden ist.

Die Lage der Rohrleitungsabschnitte i und die Zuordnung der Temperaturen folgen aus Bild 5.3. 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 Teilwärmedurchgangskoeffizienten der Rohre mit Hilfe der Gln. (4.47) und (4.48) bestimmbar.

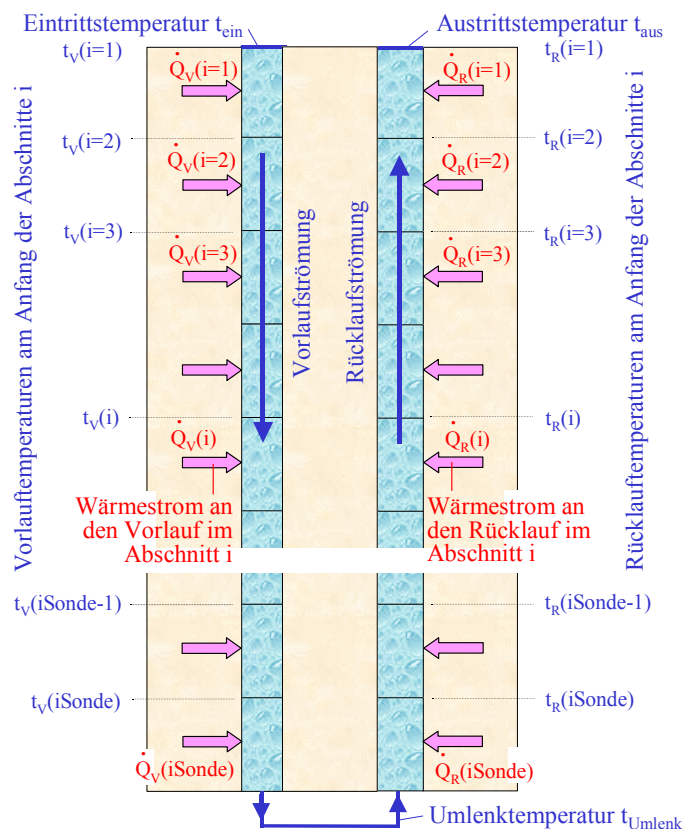


Bild 5.3 Vor- und Rücklaufrohrleitung mit Kennzeichnung der Abschnitte i und den zugehörigen Flüssigkeitstemperaturen sowie Wärmeströmen

Die Flüssigkeitstemperaturen werden dem jeweiligen Abschnittsbeginn zugeordnet. Die Bohrlochtemperaturen gelten näherungsweise in der jeweiligen Abschnittsmittle.

Mit Kenntnis des Massestromes in den Rohren ergibt sich der Wärmekapazitätsstrom $\dot{C} = c \dot{m}$. Damit können abschnittsweise die Flüssigkeitstemperaturen berechnet werden, wobei sich die Vor- und

Rücklaufabschnitte gegenseitig beeinflussen und somit paarweise einzubeziehen sind.

Würde man die Berechnung mit dem Abschnitt $i = 1$ beginnen, wäre die Eintrittstemperatur in den Vorlaufabschnitt bekannt, nicht aber die in den Rücklaufabschnitt. 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 **ein** U-Rohr:

- Berechnung der Wärmeströme $\dot{Q}_V(iSonde)$ und $\dot{Q}_R(iSonde)$ mit t_{Umlenk} für den Vor- und Rücklaufabschnitt $iSonde$ sowie der Bohrlochwandtemperatur $t_{BL}(iSonde)$

- Berechnung der Medientemperaturen

$$t_V(iSonde) = t_{Umlenk} - \frac{\dot{Q}_V(iSonde)}{\dot{C}} \quad (5.15)$$

$$t_R(iSonde) = t_{Umlenk} + \frac{\dot{Q}_R(iSonde)}{\dot{C}} \quad (5.16)$$

- Berechnung der Wärmeströme $\dot{Q}_V(iSonde-1)$ und $\dot{Q}_R(iSonde-1)$ mit $t_V(iSonde)$ und $t_R(iSonde)$ sowie der Bohrlochwandtemperatur $t_{BL}(iSonde-1)$

- Berechnung der Medientemperaturen

$$t_V(iSonde-1) = t_V(iSonde) - \frac{\dot{Q}_V(iSonde-1)}{\dot{C}} \quad (5.17)$$

$$t_R(iSonde-1) = t_R(iSonde) + \frac{\dot{Q}_R(iSonde-1)}{\dot{C}} \quad (5.18)$$

⋮

- Berechnung der Wärmeströme $\dot{Q}_V(1)$ und $\dot{Q}_R(1)$ mit $t_V(2)$ und $t_R(2)$ sowie der Bohrlochwandtemperatur $t_{BL}(1)$

- Berechnung der Medientemperaturen

$$t_{ein} = t_V(1) = t_V(2) - \frac{\dot{Q}_V(1)}{\dot{C}} \quad (5.19)$$

$$t_{aus} = t_R(1) = t_R(2) + \frac{\dot{Q}_R(1)}{\dot{C}} \quad (5.20)$$

Am oberen Rand der Erdwärmesonde ergeben sich zur angenommenen Temperatur t_{Umlenk} die Ein- und Austrittstemperaturen t_{ein} sowie t_{aus} , woraus auch die Sondenleistung

$$\dot{Q}_{Sonde} = \dot{C} (t_{aus} - t_{ein}) \quad (5.21)$$

berechenbar ist.

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. Die Strategie zur Anpassung ist dem Programmlisting zu entnehmen.

6 Komplexmodell der Simulation von Erdwärmesonden

Anhand des Bildes 6.1, das auf Bild 2.1 basiert, soll verdeutlicht werden, welche wärmetechnischen Approximationen bestehen und welche Schnittstellen existieren, um dann die Verknüpfungen zwischen den Algorithmen zu verstehen.

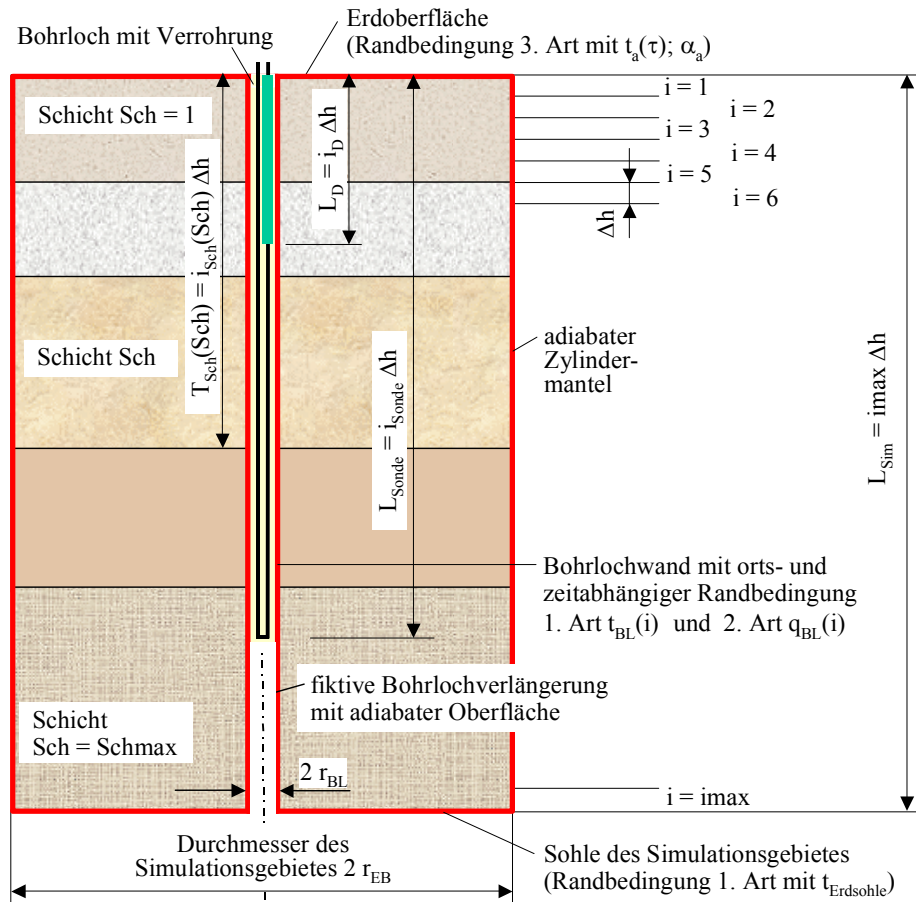


Bild 6.1 Vertikaler Schnitt durch das Simulationsgebiet mit Kennzeichnung der Simulationsabschnitte $i = 1 \dots i_{\max}$. Das Simulationsgebiet umfasst den Erdreichszylinder mit unterschiedlichen Horizontalschichten und das Bohrloch mit Verrohrung.

6.1 Festlegungen der Randbedingungen

Da es sich um Simulationszeiträume handelt, die über mehrere Jahre reichen, wird generell angenommen, dass sich die wärmetechnischen Randbedingungen nur im Stundenrhythmus ändern.

- **Temperatur an der Erdoberfläche**

Generell gibt es zwei Möglichkeiten. Am einfachsten ist die Vorgabe einer **ganzjährig konstanten Erdoberflächentemperatur** t_{OF} . Wäre beispielsweise die Erdwärmesonde und ihr thermischer Einflussbereich von einem Raum überbaut, würde man die entsprechende Raumtemperatur benennen. Bei einer freien, unverschatteten Erdoberfläche nehmen die Lufttemperatur und vor allem die Sonnenstrahlung Einfluss auf den Wärmestrom ans Erdreich. Es ist rechentechnisch rationell, wenn es gelingt, die meteorologischen Elemente zu einer resultierenden Größe zusammenzufassen, die zum gleichen wärmetechnischen Ergebnis führt, wie das Wirken der Einzelgrößen. Bild 6.2 zeigt eine Prinzipdarstellung der vorgenommenen Superposition. Hierzu werden jedoch mehrere Vereinfachungen getroffen.

- So wird an der Erdoberfläche ein Gesamtwärmeübergangskoeffizient α_a , der die langwellige Umgebungsstrahlung und Konvektion zusammenfasst, angesetzt.

- Die absorbierte Sonnenstrahlung wird als erhöhte Lufttemperatur nachgebildet und behält das Modell der konvektiven Wärmeübertragung an der Erdoberfläche gedanklich bei.

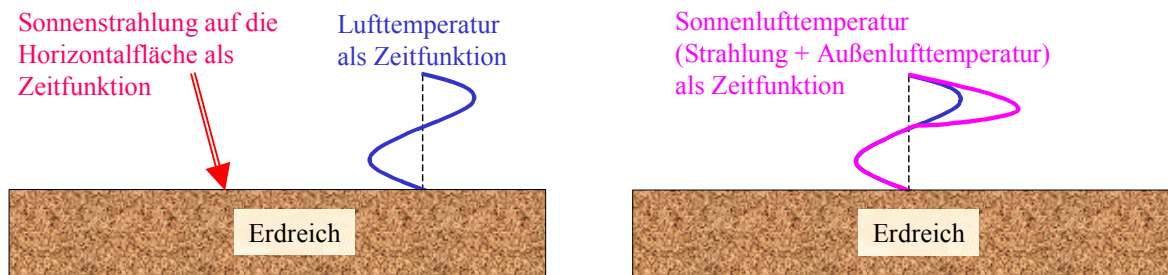


Bild 6.2 Prinzipdarstellung der Superposition der Lufttemperatur und der Gesamtsonnenstrahlung zur Sonnenlufttemperatur (Links: Reale Einzelwirkungen; rechts: Superposition)

Dieses Vorgehen hat eine lange Tradition. Es wurde und wird bei den verschiedenen Verfahren der Kühllastberechnungen – beispielsweise nach VDI 2078 und auch nach ASHRAE HANDBOOK "FUNDAMENTALS" – verwendet. Zur Ermittlung der neuen Außenlufttemperatur muss die Absorption der kurzwelligen Sonnenstrahlung und der langwellige Strahlungsaustausch mit dem Himmelsgewölbe sowie der terrestrischen Umgebung ergänzt werden. In der ersten Form berücksichtigte MACKEY/WRIGHT nur die Absorption der kurzwelligen Strahlung und bildete die **Sonnenlufttemperatur**

$$t_a(\tau) = t_L(\tau) + \frac{a \dot{I}_{\text{gesamt}}(\tau)}{\alpha_a} \quad (6.1)$$

$t_L(\tau)$	° C	Lufttemperaturverlauf
a	-	Absorptionskoeffizient für Sonnenstrahlung
\dot{I}_{gesamt}	W/m ²	Gesamtstrahlung auf die Oberfläche
α_a	W/(m ² K)	äußerer Gesamtwärmeübergangskoeffizient.

In den neueren Darstellungen – ASHRAE HANDBOOK "FUNDAMENTALS"; 1993 – berücksichtigte man bei der Sonnenlufttemperatur die "langwellige Strahlung" mit einem Zusatzglied X:

$$t_a(\tau) = t_L(\tau) + \frac{a \dot{I}_{\text{gesamt}}(\tau)}{\alpha_a} + X, \quad (6.2)$$

wobei $X = -3,9 \text{ K}$ für Dächer und $X = 0 \text{ K}$ für vertikale Wände empfohlen werden.

Eine bedeutend genauere Darstellung – die sogenannte **kombinierte Außentemperatur** bezogen auf Bauteiloberflächen – geht auf NEHRING zurück.

$$t_{ka} = t_L(\tau) + \frac{a \dot{I}_{\text{gesamt}}(\tau)}{\alpha_a} - \frac{\varepsilon C_s}{\alpha_a} \left\{ \left[\left(\frac{T_{Lm}}{100} \right)^4 + \beta(t_L(\tau) - t_{Lm}) \right] [-e_G \varepsilon_G - e_U \varepsilon_U] \right\} \quad (6.3)$$

ε	-	Emissionskoeffizient der Bauteiloberfläche für langwellige Strahlung
C_s	W/(m ² K ⁴)	Strahlungskoeffizient des schwarzen Körpers ($C_s = 5,67 \text{ W/(m}^2\text{K}^4)$)
t_{Lm}	° C	Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur
T_{Lm}	K	Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur (Absolutwert)
β	-	Temperaturfaktor zur Linearisierung des Strahlungsaustausches ($\beta \approx 1,05$)
e_G	-	Einstrahlzahl Bauteiloberfläche – Himmelsgewölbe

ε_G	-	Emissionsgrad für langwellige atmosphärische Gegenstrahlung
e_U	-	Einstrahlzahl Bauteiloberfläche – terrestrische Umgebung
ε_U	-	Emissionsgrad für terrestrische Umgebung.

NADLER übt an Gl. (6.3) Kritik, da diese nicht die langwelligen Reflexionen der Umgebung beinhaltet. Einzelheiten sind [8, Teil D] zu entnehmen. Für Horizontalflächen ist dieser Einfluss aber unwichtig.

Bei der Auswertung der Gln. (6.1) bis (6.3) ist der **Koeffizient a/α_a** von großer Bedeutung. Er ist nur in grober Näherung erfassbar. Für die Einzelwerte gelten relativ große Bereiche, wie [8, Teil D] verdeutlicht. Im vorliegenden Simulationsmodell finden näherungsweise die Gl. (6.1) sowie ganzjährig die Mittelwerte Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_a = 15 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ und Absorptionskoeffizient $a = 0,3$ für die Solarstrahlung auf eine unversiegelte Fläche Anwendung. Diese Annahmen können selbstverständlich zur Diskussion gestellt werden.

Somit ist die Sonnenlufttemperatur nach Gl. (6.1) aus den Lufttemperaturen und Globalstrahlungen des zutreffenden Testreferenzjahres nach DIN 4710 für 8760 Stunden zu bilden und in einer Datei abzulegen. Dies kann vorab mit entsprechenden Hilfsprogrammen erfolgen. Für die Gesamtheit der zu simulierenden Betriebsstunden BS_{\max} werden im Simulationsprogramm die stündlichen Sonnenlufttemperaturen $t_a(\text{Jahr})$ des Testreferenzjahres aneinander gereiht, sodass $t_{\text{oben}}(BS = 1 \dots BS_{\max})$ als programminterne Größe durchgängig vorliegt.

- **Temperatur an der Sohle des Simulationsgebietes**

Die Sohle des Simulationsgebietes besitzt eine **konstante Temperatur** t_{Erdsohle} . Sie entspricht der ungestörten Erdreichtemperatur in der Tiefe L_{Sim} . Ist $L_{\text{Sim}} > 15 \text{ m}$, so kann in der Regel kein jahreszeitlicher Verlauf mehr wahrgenommen werden, weshalb stets $L_{\text{Sim}} > 15 \text{ m}$ zu wählen ist.

- **Flüssigkeitseintrittstemperatur und Sondenleistung**

Welche der beiden Vorgaben für die Simulation relevant ist, bestimmt die Eingabe Anpass (Anpass = 1: Eintrittstemperatur; Anpass = 2: Sondenleistung).

Die Flüssigkeitseintrittstemperatur und die geforderte Sondenleistung können als **Konstantwerte** für die gesamte Simulationszeit gelten (Eingabe erfolgt in der Hauptprogrammoberfläche als T_{fix} bzw. \dot{Q}_{fix}) oder sie folgen einem **Jahresverlauf** (Eingabe in den Oberflächen "Flüssigkeitseintrittstemperatur" oder "Geforderte Sondenleistung" als $FT(\text{Monat, Stunde})$ bzw. $F\dot{Q}(\text{Monat, Stunde})$). Der Jahresgang wird aus je zwölf 24-Stunden-Tagesgängen, die für die Monate Januar bis Dezember repräsentativ sind, programmintern zusammengesetzt.

- **Sondendurchfluss**

Analog dazu wird mit der Vorgabe des Durchflusses verfahren. Der Volumenstrom pro Sonde kann als **Konstantwert** V_{fix} für die gesamte Simulationszeit oder als **Jahresverlauf** (Eingabe in der Oberfläche "Flüssigkeitsdurchfluss" als $FV(\text{Monat, Stunde})$) gegeben sein. Der Jahresgang wird wiederum aus je zwölf 24-Stunden-Tagesgängen der Monate Januar bis Dezember programmintern gebildet. **Der Durchsatz hat Steuerungsfunktion für den Sondenbetrieb**. Ist dieser > 0 , dann wird während dieser Betriebsstunde der Sondenbetrieb untersucht.

- **Datenzusammenstellung für den Sondenbetrieb**

Um einen einfachen Programmablauf zu gewährleisten, werden die vorgenannten Betriebsdaten

(Flüssigkeitseintrittstemperatur oder geforderte Sondenleistung und Durchfluss), die nach der Eingabe konstant sind bzw. als Jahresverlauf vorliegen über die Betriebszeit BS_{\max} in Form **eindimensionaler Felder** gebildet. Somit existieren: $T_{\text{Sim}}(BS = 1 \dots BS_{\max})$ oder $\dot{Q}_{\text{Sim}}(BS = 1 \dots BS_{\max})$ und $\dot{V}_{\text{Sim}}(BS = 1 \dots BS_{\max})$.

Sicherheitshalber erfolgt für alle Betriebsstunden mit SONDENDURCHSTRÖMUNG $\dot{V}_{\text{Sim}}(BS = 1 \dots BS_{\max}) > 0$ eine Überprüfung, ob dafür bei Anpass = 1 auch $T_{\text{Sim}}(BS = 1 \dots BS_{\max}) > -273$ bzw. bei Anpass = 2 der Wert $\dot{Q}_{\text{Sim}}(BS = 1 \dots BS_{\max}) \neq 0$ gilt. Ist dies nicht der Fall, wird eine Datenergänzung gefordert.

6.2 Verknüpfung der Einzelalgorithmen zum Simulationsmodell

• Instationäre Simulation

Das im Bild 6.1 rot umrandete Gebiet hat die Form eines Hohlzylinders, der mit **Erdreich** ausgefüllt ist. In ihm wird stets eine **instationäre Wärmeleitung** simuliert. Der zugehörige Algorithmus und die Randbedingungen sind im Abschnitt 3 vorgestellt.

- Die **Wärmetransporte an der Erdoberfläche** und der **Sohle** sowie die **adiabaten Begrenzungen** am **Zylindermantel** und an der **Bohrlochverlängerung** sind in einfacher Weise zu realisieren.
- Eine **Besonderheit** stellt die **Temperatur an der Bohrlochwand** dar. Sie ist von der Zeit sowie von der Tiefe (Abschnitt i) abhängig und bildet die Schnittstelle zum eigentlichen Sondenbereich, dem Bohrlochinneren.

• Stationäre Simulation

Das **Bohrloch** mit Verrohrung und dem Füllstoff bildet die eigentliche Sonde. In ihr werden die wärmetechnischen Vorgänge **quasistationär** aufgefasst, d. h., eine Wärmespeicherung in der Bohrlochfüllung wird nicht betrachtet (Einzelheiten siehe Abschnitte 4 und 5).

- Die **Bohrlochwandtemperatur** $t_{\text{BL}}(i)$ im Abschnitt i wird während eines Zeitschrittes als konstant betrachtet. Sie gilt unabhängig vom Drehwinkel φ innerhalb des Querschnittes, d. h. die Lage der Vor- und Rücklaufleitungen haben keinen örtlichen Einfluss auf die Bohrlochwandtemperatur.
- Nachdem der Zeitschritt im Erdreich simuliert wurde, erfolgt am **Ende eines Zeitschrittes** die **stationäre wärmetechnische Betrachtung im Bohrloch**. Da die "Zeit nicht weiter läuft", ist es in diesem Bereich bei Bedarf möglich, **iterative Anpassungen** durchzuführen. Dies betrifft die zunächst geschätzte Temperatur t_{Umlenk} am Sondenfuß. Sie wird solange variiert, bis die vorgegebene Flüssigkeitseintrittstemperatur $t_{\text{ein}} \equiv T_{\text{Sim}}(BS)$ am Sondenvorlauf oder die geforderte Sondenleistung $\dot{Q}_{\text{Sonde}} \equiv \dot{Q}_{\text{Sim}}(BS)$ erreicht werden. Das detaillierte Vorgehen zur Anpassung an die Vorgabeparameter ist aus dem Programmlisting ersichtlich.
- Um die aufgeprägte Bedingung am Sondenanschlusspunkt (t_{ein} oder \dot{Q}_{Sonde}) als Randbedingung an die Bohrlochwand weiterzugeben, wird mit den den Rohren zufließenden Wärmeströmen $\dot{Q}_V(i)$ und $\dot{Q}_R(i)$ unter Beachten der Anzahl der vorhandenen U-Rohre eine **neue Bohrlochwandtemperatur** analog zu Gl. (3.12) bestimmt:

$$t_{\text{BL},i} = t_{i,k=1} - \frac{\ln \frac{r_{k=1}}{r_{\text{BL}}}}{2 \pi \lambda_{\text{Feld}_{i,k}} \Delta h} (\dot{Q}_V(i) + \dot{Q}_R(i)) \times \text{Rohrzahl} \quad (6.4)$$

Diese Temperatur gilt dann für den folgenden Zeitschritt, sodass man mit der Anpassung grund-

sätzlich einen Zeitschritt nacheilt.

- Bei **hoher Wärmeleitfähigkeit des Füllstoffes** kann die wärmetechnische Ankopplung des Bohrlochs an das Erdreich zu **numerischen Schwingungen** führen. Deshalb 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 Sondennähe führen.

Generell bietet die Schnittstelle $t_{BL,i}$ noch Möglichkeiten für verbesserte Approximationen.

- **Wärmebilanzen an den Rändern des Simulationsgebietes**

Aus Bild 6.1 ist erkennbar, dass außer am **Bohrlochrand** an der **Erdoberfläche** und an der **Sohle** des Simulationsgebietes ein Wärmetransport zwischen Simulationsgebiet und Umgebung erfolgen kann. Am Mantel des Simulationsgebietes findet per Definition kein Wärmetransport statt. In einem Sondenfeld (Bilder 2.8 und 2.9) ist dies aus Symmetriegründen sofort einleuchtend. Bei einer Einzelsonde ist der Außenradius des Simulationsgebietes so groß zu wählen, dass der wärmetechnische Seiteneinfluss vernachlässigbar ist. Der Sonderfall einer starken seitlichen Wasserströmung wäre bei Bedarf noch ins Rechenprogramm zu integrieren.

Der Wärmestrom an der Bohrlochwand ist durch $(\dot{Q}_V(i) + \dot{Q}_R(i)) \times \text{Rohrzahl}$ bekannt. Aufgrund Gl. (6.4) besteht nach der beschriebenen Einschwingphase Identität mit dem Wärmestrom vom Radius $k = 1$ zur Bohrlochwand (Radius r_{BL}). Die Erfassung des Wärmestroms an der Erdoberfläche ist durch Gl. (3.15) bzw. an der Erdsohle durch die Gl. (3.16) gegeben. Die zugehörigen Wärmen ergeben sich durch Multiplikation mit $\Delta\tau$ und entsprechende Aufsummierungen der Zeitschritte über eine Stunde.

- **Speicherwärme im Simulationsgebiet**

Das Feststellen der Speicherwärme hat hier nur eine **Kontrollfunktion**. (Dies ist beispielsweise bei Raumumfassungen anders, wo man mit der geforderten Raumtemperatur als Bezugstemperatur das verbleibende theoretische Leistungsvermögen der passiven Kühlung beurteilen kann.) Die Ermittlung erfolgt am Ende eines Simulationsjahres mit dem willkürlichen Temperaturbezug von -10°C . Damit liegt man deutlich unter dem Gefrierpunkt. Selbstverständlich wird bei Bodenschichten mit Wasseranteil die Schmelzwärme des Eises berücksichtigt. Damit ergibt sich der Rechenalgorithmus für alle Volumenelemente i, k im Simulationsgebiet zu (Bezeichnungen in Anlehnung an Abschnitt 3.3, Index i berücksichtigt automatisch die unterschiedlichen Stoffwerte der Schichten):

$$t_{i,k} < 0: Q_{i,k} = C_{E,i,k} \cdot (t_{i,k} + 10) \quad (6.5)$$

$$t_{i,k} = 0: Q_{i,k} = C_{E,i,k} \cdot 10 + Q_{\text{Phase},i,k} \cdot \text{Phase}_{i,k} \quad (6.6)$$

$$t_{i,k} > 0: Q_{i,k} = C_{E,i,k} \cdot 10 + C_{\text{Efl},i,k} \cdot t_{i,k} + Q_{\text{Phase},i,k} \quad (6.7)$$

$$Q_{\text{Speicher}} = \sum_{i=1}^{\text{imax}} \sum_{k=1}^{\text{kmax}} Q_{i,k} \quad (6.8)$$

Wegen des zeitverzögerten Einschwingens am Bohrlochrand und aufgrund der millionenfachen Rechenoperationen mit kleinsten Temperaturdifferenzen kann keine exakte Übereinstimmung mit der Summe der Einzelbilanzen während der Simulationsrechnung erwartet werden (Auswertung später!).

6.3 Programmablaufplan

Eingabe gemäß Maske: Hauptprogramm

- Geometrie der Erdwärmesonde und des Simulationsgebietes mit Diskretisierung
- Formfaktoren als Funktion des Übertemperaturverhältnisses Θ
- Dicke und Stoffwerte der Erdschichten
- Rohr- und Flüssigkeitsdaten
- Bedingungen des Sondenbetriebes (evtl. konstante Eintrittstemperatur oder konstante Wärmeleistung; evtl. konstanter Volumendurchfluss); unterbleiben die genannten Eingaben wird auf Zeitfunktionen für diese Eingabegrößen in gesonderten Eingabemasken zurückgegriffen
- Vorgabe für die Simulationsanpassung (Eintrittstemperatur oder Leistung)
- Anzahl der Simulationsstunden
- Randbedingung an der Erdoberfläche (Konstanttemperatur oder Sonnenlufttemperatur aus TRY)
- Konstante Sohlentemperatur in der Tiefe des Simulationsgebietes
- Eventuelle Eingabe der Erdschichttemperaturverteilung am Ende einer früheren Simulation



Eingabe gemäß Maske: Flüssigkeitseintrittstemperaturen

- Für jeden Monat (Januar bis Dezember) wird ein repräsentativer Tag mit 24 Stundenwerten für die vorhandene Flüssigkeitseintrittstemperatur (Vorlaufeintritt) benannt
- Eingabe ist nur erforderlich, wenn der Konstantwert in der Hauptmaske nicht ausgefüllt ist und die Anpassung der Flüssigkeitseintrittstemperatur erfüllt werden soll (Anpass = 1).



Eingabe gemäß Maske: Sondenleistung

- Für jeden Monat (Januar bis Dezember) wird ein repräsentativer Tag mit 24 Stundenwerten für die geforderte Wärmeleistung der Sonde (alle U-Rohre) benannt
- Eingabe ist nur erforderlich, wenn der Konstantwert in der Hauptmaske nicht ausgefüllt ist und die Anpassung an die geforderte Leistung erfüllt werden soll (Anpass = 2).



Eingabe gemäß Maske: Flüssigkeitsdurchfluss

- Für jeden Monat (Januar bis Dezember) wird ein repräsentativer Tag mit 24 Stundenwerten für den Flüssigkeitsdurchfluss der Sonde (alle U-Rohre) benannt
- Eingabe ist nur erforderlich, wenn der Konstantwert in der Hauptmaske nicht ausgefüllt ist.



Basisberechnungen zur Simulationsvorbereitung

- Aufbau des Geometriegitters mit den Laufvariablen i und k sowie den Größen Δh , $r(1) \dots r(k_{\max})$
- Berechnung der Elementvolumina (Hohlzylinderringe)
- Zuordnung der Sondenlänge sowie der Erdschichten $sch = 1 \dots sch_{\max}$ zum Gitter
- Vorabberechnung konstanter Größen für die spätere elementweise Wärmestromermittlung
- Zuordnung der Schichtwerte an die Volumenelemente
- Ermittlung der zulässigen Zeitschrittweite $\Delta \tau$ unter Beachten des Stabilitätskriteriums und eines ganzzahligen Teilungsfaktors Intervallmax für 3600 s ($\text{Intervallmax} \times \Delta \tau = 3600$); als maximale Zeitschrittweite gilt $\Delta \tau = 600$ s
- Vorabberechnung von Größen zum Rohrquerschnitt
- Füllung der Starttemperatur- und Phasenzustandsfelder (Gitterwerte) anhand eines Algorithmus ausgehend von der Sohlentemperatur oder aber mit einem bekannten Temperaturfeld einer früheren Simulation einschließlich der Vorgabe der Umlenktemperatur der Flüssigkeit am Sondenfuß
- Auswahl charakteristischer Gitterpunkte für die Ergebnisdarstellung



Simulation

- Aufbau von Zeitverläufen für alle Betriebsstunden $BS = 1 \dots BS_{\max}$ aus der Eingabe von konstanten Werten oder monatlich geltenden Mustertagen, die die Betriebsbedingungen benennen:
 "Durchfluss" {Steuert gleichzeitig die Sonden-simulation! (Durchfluss = 0, Bohrlochwand adiabatisch)}
 "Eintrittstemperatur" $\{t_{\text{ein}}(BS)\}$ oder "Sondenleistung" $\dot{Q}_{\text{Sonde}}(BS)$
 "Sonnenlufttemperatur" {folgt aus dem Testreferenzjahr}
- Kontrolle der zeitbezogenen Eingaben auf Vollständigkeit

Beginn der Stunden-Zeitschleife $BS = 1 \dots BS_{\max}$

- Einladen der Stundenwerte
- Ermittlung der Stoffwerte für die Flüssigkeit, des Wärmeübergangskoeffizienten im Rohr (α_R) und der Teilwärmedurchgangskoeffizienten für nackte (κ_R) und gedämmte Vor- und Rücklauf-Sondenrohre (κ_{DV} sowie κ_{DR})
Hinweis: Es wird mit der mittleren Fluidtemperatur am Sondenfuß (t_{Umlenk}) der jeweils letzten Sondenbetriebsstunde gerechnet, um den Rechenaufwand zu begrenzen.

Beginn der Δt -Zeitschleife Intervall = 1 ... Intervall_{max}

Stationäre Temperaturfeldberechnung im Erdreich innerhalb des Simulationsgebietes

- Berechnung der Wärmeströme in die und aus den Volumenelementen
- Wärmezunahme im Element
- Zuordnung der Elementwärme und neuer thermischer Zustand mit und ohne Phasenwandel (Gefrieren bzw. Schmelzen von Wasser im Erdstoff)
- Übernahme der neuen Temperatur am Ende des Zeitschrittes $t(i, k) = t_n(i, k)$
- Bilden von Wärmesummen über die Betriebsstunde BS (Wert am Ende von BS)
- Abspeichern ausgewählter Temperatur- und Phasenfelder

Stationäre Wärmetransportberechnung im Bohrloch mit Hilfe der Formfaktoren und längs der Rohrleitungen mit iterativer Einpassung der Vorgabe Flüssigkeitseintrittstemperatur oder geforderter Sondenleistung $\{t_{\text{ein}}(\tau)$ oder $\dot{Q}_{\text{Sonde}}(\tau)\}$

- Abarbeitung erfolgt nur bei vorhandenem Sondenrohrdurchfluss

Abarbeitung der i-Sondenabschnitte $i = i_{\text{Sonde}} \dots 1$

- Annahme der Flüssigkeitstemperatur am Sondenfuß t_{Umlenk}
- Berechnung der Wärmeströme zwischen Bohrlochwand und Sondenrohren
- Bestimmung der Flüssigkeitstemperaturen im Vor- und Rücklauf $t_v(i)$ und $t_r(i)$
- Iterative Anpassung an $t_{\text{ein}}(BS)$ bzw. $\dot{Q}_{\text{Sonde}}(BS)$
- Bestimmung der neuen Bohrlochwandtemperatur $t_{BL}(i)$ für alle Abschnitte $i = 1 \dots i_{\text{Sonde}}$ bezogen auf $t(i, 1)$ unter Berücksichtigung eines Dämpfungsfaktors

Ende der stationären Wärmetransportberechnung

- Speicherung ausgewählter Stundenwerte

Ende der Δt -Zeitschleife Intervall = 1 ... Intervall_{max}

- Speicherung der Felder $t(i, k)$, $\text{Phase}(i, k)$ plus spezielle Sondenwerte für ausgewählte Simulationsstunden sowie für die letzte Sondenbetriebs- und Simulationsstunde;
- Ermittlung und Speicherung der Speicherwärme am Ende eines Simulationsjahres

Ende der Stunden-Zeitschleife $BS = 1 \dots BS_{\max}$

- Ergebnisspeicherung

Ausgabedruck

- alle Eingaben sowie Ergebnisse des letzten Sondenbetriebs und der Monats-/Jahressummen
- Temperaturen der Sondenabschnitte sowie Temperatur- und Phasenfelder der Volumenelemente zu ausgewählten Zeiten für maximal 10 Jahre

Ausgabegrafik

- Temperaturen und Leistungen längs der Sonde zu ausgewählten Zeiten für maximal 10 Jahre
- Temperatur- und Leistungsverläufe der Sonde sowie Temperaturverläufe im Sondenumfeld über die gesamte Simulationszeit

Die Zählweise der Betriebsstunden und der Intervalle ist aus Bild 6.3 ersichtlich. Daten am Ende einer Betriebsstunde entsprechen in Wirklichkeit denen dem Intervall_{\max} zugeordneten Werten (z. B. Temperaturen, Leistungen usw.) bzw. den bis dahin innerhalb der Stunde gebildeten Summengrößen wie beispielsweise die Wärme an den Flüssigkeitsstrom).

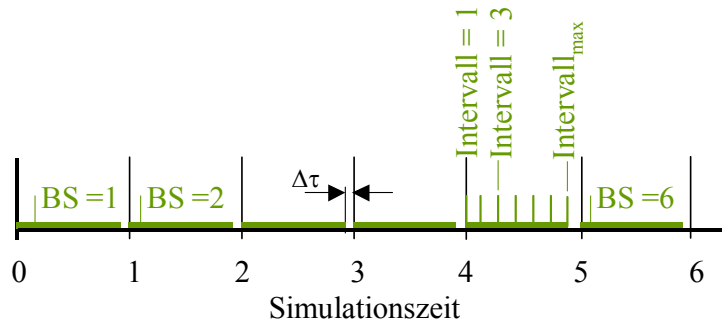


Bild 6.3 Definition und Zählung der Betriebsstunden sowie der Intervalle innerhalb der Betriebsstunden

Hinweis: Selbstverständlich hätte die Definition der Betriebsstunde auch jeweils an den rechten Vollstundenrand rücken können. Dies wurde aber vermieden, da zu einer vollen Stunde der Eingabewert – beispielsweise der Durchfluss – sprungförmig geändert werden kann. Bei der derzeitigen Festlegung bleibt der Ausgangswert wenigstens eine Stunde konstant erhalten.

6.4 Komplexprogramm zur Simulation der Erdwärmesonden

Das lauffähige Programm ist wiederum in der Programmierumgebung VisualBasic.net (Standard) erstellt worden und steht zum kostenlosen Download bereit (siehe auch Abschnitt 7). Nachfolgend werden anhand der Programmoberflächen die Eingabedaten beschrieben.

• Hauptprogramm

Bild 6.4 zeigt die Oberfläche des Hauptprogramms, die nach dem Programmstart erscheint. Sie dient der Dateneingabe für die zeitunabhängigen Größen und der Steuerung des Simulationsablaufes. Mit Hilfe der angeordneten Steuerelemente können alle Eingaben, Berechnungsabläufe und Ausgaben einschließlich der Öffnungen weiterer Bedienflächen ("Fenster") betätigt werden.

Um ein spezielles Beispiel bearbeiten zu können, ist der Button **STARTEN** zu drücken. Es erscheint dann das im Bild 6.5 dargestellte Fenster. Nach einer eventuellen Korrektur des Pfades – in dem sich das Beispiel befindet – wird mit OK bestätigt.

Nach dem Schließen des im Bild 6.5 gezeigten Fensters ist die Verbindung zum entsprechenden Ordner hergestellt. In ihm befinden sich bei einem bereits existierenden Beispiel die Dateien:

SPEICHER.dat Eingaben; Hauptergebnisse	ZVERLAUFT.dat Vorgabe Eintrittstemperaturverlauf	ZVERLAUFQ.dat Vorgabe Sondenleistungsverlauf	ZVERLAUFV.dat Vorgabe Durchflussverlauf
Speicherfeld.dat Zustand am Simulationsende	Speicherfeld-aktiv.dat Zustand am Ende des Sondenbetriebs	Feb1.dat bis Feb10.dat Zustand am 28. 2.; 23 Uhr; Jahr 1...10	Okt1.dat bis Okt10.dat Zustand am 31. 10.; 23 Uhr; Jahr 1...10

Wurde der Ordner vor Beginn des Programmstarts neu definiert, dann werden die genannten Dateien beim Füllen selbsttätig kreiert.

Die Felder in Maske 1 erscheinen mit einer neutralen Füllung. Durch **DATEI LADEN** können die Felder aber auch mit den Werten aus einer bereits bestehenden Datei – im Bild ist dies Beispiel – gefüllt werden. In beiden Fällen sind die Felddaten durch Überschreiben aktualisierbar. Die Speicherung aller angezeigten Daten wird durch Aktivierung des Buttons **EINGABESPEICHERUNG** in **SPEICHER.dat** bewirkt. Vorgeschaltet ist dabei eine Grobprüfung auf Vollständigkeit der Eingaben.

Von der Hautoberfläche aus können auch die für die Eingabe der Zeitverläufe zuständigen Masken **EINTRITTSTEMPERATUR**, **SONDENLEISTUNG** und **DURCHFLUSS** durch die entsprechende Buttonaktivierungen aufgerufen werden. Sie werden später vorgestellt.

Schließlich sind von der Hautoberfläche aus auch noch die Abläufe **BERECHNUNG**, **DRUCK**, **T-/Phase-TABELLE**, **DIAGRAMM-SONDE** und **DIAGRAMM-UMFELD** aktivierbar.

Die relevanten Ergebnisse werden wie die Hauteingabewerte in der Datei **SPEICHER.dat** eingelagert, sodass Eingaben und Ergebnisse eines Beispiels stets aktuell zueinander passen.

Erdwärmesonde - Hauptprogramm

Sondensimulation (Temperaturfeld im Erdreich instationär, im Bohrloch stationär)

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

Diagramm: Bohrloch mit Rohren, Schicht Sch = 1, Schicht Sch, Schicht Sch = Schmax, Sohle des Simulationsgebietes, Durchmesser des Simulationsgebietes $2 r_{EB}$, Länge des Simulationsgebietes L_{Sim} , Länge der Sonden L_{Sonde} , Sondenlänge L_{Sonde} , $2 r_{BL}$, $i = 1$, $i = i_{max}$

Hauptgeometriedaten

Bohrlochradius r_{BL} 0 m

Gedämmte Sondenlänge LD 0 m

Länge L_{Sonde} 0 m

Anzahl der U-Rohre (1 oder 2) 1

Länge L_{Sim} 0 m

i_{max} 0

Simulationsradius r_{EB} 0 m

k_{max} 0

Schichtdaten und Bohrlochfüllmaterial

Schicht	Rho kg/m^3	Lambda $W/(m \cdot K)$	c $J/(kg \cdot K)$	rS kJ/kg	TSch m	Lambda Füllstoff $W/(m \cdot K)$
Sch = 1	0	0	0	0	0	0
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

Formfaktoren für die Bohrlochgeometrie als Funktion des Übertemperaturverhältnisses

Beziehung für ungedämmten Rohrabchnitt: $S20 = 0 + 0 \cdot \Theta$ $S10 = 0 + 0 \cdot \Theta^{(-1)}$ Definition: $\Theta = (t_1 - t_0) / (t_2 - t_0)$

Beziehung für gedämmten Rohrabchnitt: $SD20 = 0 + 0 \cdot \Theta$ $SD10 = 0 + 0 \cdot \Theta^{(-1)}$

Rohr- und Sondenparam.

Rohraussendurchmesser 0 mm Wanddicke 0 mm Wärmeleitfähigkeit 0 $W/(m \cdot K)$

Dämmung: Dicke Vorlauf 0 mm Rücklauf 0 mm Wärmeleitfähigkeit 0 $W/(m \cdot K)$

Durchflussmedium: Tyfocor L 40 % Tyfocor L 25 % 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 (1 oder 2 U-Rohre).

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

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 ZEITVERLAUF Eintrittstemperatur oder Leistungsanforderung und Durchfluss eingeben!
6. BERECHNUNG, DRUCK, TABELLE oder DIAGRAMM drücken!

Daten zum Simulationsablauf

Beginn der Simulation: 1. Januar, 1. Stunde)

Maximale Anzahl der Simulationsstunden 8760

Konstante Erdoberflächentemperatur °C

Evtl. Laden der Sonnenlufttemperatur (Pfad + Datei):

Unbeeinflusste Sohlentemperatur -273 °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 i_{max} mit der Temperaturreduzierung von 0,03 K/m nach oben ermittelt. $t(i, k)$ gilt für alle Kreisläufe k.

Buttons: STARTEN, DATEI LADEN, EINGABESPEICHERUNG, BERECHNUNG, DRUCK, DIAGRAMM-SONDE, DIAGRAMM-UMFELD, BEENDEN

Zeitverläufe > DURCHFLUSS, EINTRITTSTEMPERATUR, SONDENLEISTUNG

Ergebnisse > T-/Phase-TABELLE, DIAGRAMM-UMFELD

Bild 6.4 Hautoberfläche (Maske 1) des Rechenprogramms "Erdwärmesonde" mit der Startfüllung von Daten, die durch das Laden einer bereits gefüllten Datei oder durch Einzeleingaben bzw. Korrekturen überschreibbar ist

Wichtige Eingabe:

Bitte den Pfad mit Ordner eingeben! Nicht die Datei benennen!

OK Abbr.

F:\SD\IFE_TGA\Erdwärmesonden\Beispiel\

Bild 6.5 Fenster mit Vorschlag eines Pfades einschließlich Ordners für das Simulationsbeispiel

Nach einer eventuellen Korrektur wird mit OK bestätigt. Im Ordner befinden sich oder werden neu angelegt die Dateien: Speicher.dat; ZVerlaufT.dat; ZVerlaufQ.dat; ZVerlaufV.dat usw.

• Hauptprogrammeingabe und Steuerung des Programmablaufs (Bild 6.4)

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

Hauptgeometriedaten (siehe Bild 6.1 oder Bildschirmmaske 6.4):		
rBL	m	Bohrlochradius
rEB	m	Simulationsradius
LD	m	Gedämmte Sondenlänge (Es können Vor- und/oder Rücklauf mit einer Dämmung versehen werden. Die wärmetechnische Qualität der Dämmung wird durch die entsprechenden Formfaktoren quantifiziert.)
LSonde	m	Sondenlänge (Tiefe bis zum Fußpunkt des U-Rohres bzw. der U-Rohre)
LSim	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 Kreisinge)
Rohrzahl	-	Anzahl der im Bohrloch installierten U-Rohre (1 oder 2 Stück)
Schichtdaten und Bohrlochfüllmaterial (siehe Bild 6.1 oder Bildschirmmaske 6.4):		
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)
Formfaktoren für die Bohrlochgeometrie als Funktion des Übertemperaturverhältnisses		
a2; b2 a1; b1	-	Formfaktoren S20 und S10 für die Berechnungsgleichungen analog der Gln. (4.23) bis (4.33) für nackte Sondenrohre
a2D; b2D a1D; b1D	-	Formfaktoren S20 und S10 für die Berechnungsgleichungen analog der Gln. (4.23) bis (4.33) für gedämmte Sondenrohre
Rohr- und Mediendaten		
da	mm	Außendurchmesser der Sondenrohre
delR	mm	Rohrwanddicke
lamR	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit der Rohrwand
delDV	mm	Dämmdicke des Vorlaufs
delDR	mm	Dämmdicke des Rücklaufs
lamD	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit der Dämmung
Fluessigkeit	-	Durchflussmedium in den Sondenrohren: <ul style="list-style-type: none"> • wässrige Lösung mit 40 % Tyfocor L (programintern: Fluessigkeit = 4) • wässrige Lösung mit 25 % Tyfocor L (programintern: Fluessigkeit = 5) • Wasser (programintern: 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 Sondenrohre (Angabe für 1 oder 2 U-Rohre) während der gesamten Simulationszeit ($V_{fix} \geq 0$); $V_{fix} > 0$ sollte möglichst eine turbulente Strömung, mindestens aber eine Geschwindigkeit $> 0,2$ m/s in den Sondenrohren garantieren. Wenn $V_{fix} > 0$, muss auch Tfix oder Qfix einen sinnvollen Wert besitzen! $V_{fix} = 0$ 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 Gl. (6.1) gebildet werden, wobei der Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_a = 15$ W/(m²K) 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.
Erdreichtemperatur- 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 6.6)

Die Maske 2 ist nur auszufüllen, wenn ein zeitabhängiger Verlauf der Flüssigkeitstemperatur berücksichtigt werden soll (Tfix 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 Bild 6.3; es erfolgt keine Interpolation). Weiterhin gilt der Mustertag für den gesamten Monat.

Eingabe: Flüssigkeitseintrittstemperaturen

Flüssigkeitseintrittstemperaturen in °C

Tagesstunde

Pfad und vorhandener bzw. zukünftiger Dateiname: F:\SD\FE_TGA\Erdwärmesonden\Beispiel\ZVERLAUFT.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

Februar

März

April

Mai

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

Bild 6.6 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 6.7)**

Die Maske 3 ist nur auszufüllen, wenn ein zeitabhängiger Verlauf der Sondenleistung zu beachten ist (Q_{fix} 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 Bild 6.3; es erfolgt keine Interpolation). Weiterhin gilt der Mustertag für den gesamten Monat.

Eingabe: Sondenleistung

Geforderte Sondenleistung in W
(bezogen auf alle installierten U-Rohre)

Pfad und vorhandener bzw. zukünftiger Dateiname: F:\SD\FE_TGA\Erdwärmesonden\Beispiel\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																								
Februar																								
März																								
April																								
Mai																								
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

Bild 6.7 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 6.8)**

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	<p>Für jeden Monat wird ein repräsentativer Tag mit Stundenwerten gefüllt. Diese Werte gelten während der gesamten Stunde (Intervall = 1 bis Intervall_{max} nach Bild 6.3; es erfolgt keine Interpolation). Weiterhin gilt der Mustertag für den gesamten Monat.</p> <p>Durchflussangabe für 1 oder 2 Sondenrohre (Gesamtwert).</p> <p>Der Durchsatz sollte möglichst eine turbulente Strömung, mindestens aber eine Geschwindigkeit > 0,2 m/s in den Sondenrohren garantieren.</p>

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.

Eingabe: Durchfluss

Flüssigkeitsdurchfluss in l/h
(bezogen auf alle installierten U-Rohre)

Tagesstunde

Pfad und vorhandener bzw. zukünftiger Dateiname: F:\SD\IFE_TGA\Erdwärmesonden\Beispiel\ZVERLAUFV.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																								
Februar																								
März																								
April																								
Mai																								
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

Bild 6.8 Eingabeoberfläche für den Sondendurchfluss (Maske 4)

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

Die Zusammenstellungen der Eingabewerte sowie der Ergebnisse werden als MS WORD-Dateien an-

gezeigt. Sie können individuell geändert, gespeichert und ausgedruckt werden. Die Ausgaben sind selbsterklärend und anhand der Testbeispiele ersichtlich. Zusätzlich ist eine umfangreiche Grafikausgabe möglich.

Die entsprechenden **Ausgabebutton** sind im Hauptprogramm (Maske 1) angeordnet:

DRUCK liefert den Ausdruck aller Eingaben und der wichtigsten Sondendaten sowie aller monatlichen und jährlichen Summenwerte.

Bei intermittierendem Sondenbetrieb beziehen sich die Sondendaten auf den Zeitpunkt des letzten Sondenbetriebes, denn die Simulationszeit kann darüber hinaus gehen.

Für die Summengrößen in kWh gelten die folgenden Definitionen:

- "Sonnenwärme" ist die über die Erdoberfläche dem Simulationsgebiet zugeführte Energie
- "Erdwärme" summiert den Energiestrom von unten an das Simulationsgebiet
- "Sondenarbeit" stellt die Wärme an die Sonde dar
- "Bilanz" verkörpert "Sonnenwärme" + "Erdwärme" – "Sondenarbeit" .

Zudem wird am Jahresende die Speicherwärme des Simulationsgebietes bezogen auf -10 °C ausgegeben. Sie beinhaltet – soweit vorhanden – auch die Phasenwandelwärme des Erdstoffes.

T-/Phase-TABELLE beinhaltet die Temperaturen der Sondenabschnitte (Vorlauf, Rücklauf, Bohrlochwand) sowie die Temperaturen und Phasen der Volumenelemente wahlweise Ende Februar bzw. Ende Oktober für maximal zehn Simulationsjahre und am Ende des Sondenbetriebes sowie am Simulationsende (Bilder 6.9 und 6.10). Dabei gilt als Monatsende jeweils die 23. Stunde, da zu dieser Zeit eventuell noch Sondenbetrieb herrscht.

Druck des Temperatur- / Phasenfeldes

Pfad und Dateiname: F:\SD\IFE_TGA\Erdwärmesonden\Beispiel

Auswahl der zu druckenden Temperatur- und/oder Phasenfelder vornehmen, indem Haken in den CheckBoxen gesetzt werden!

Auswahl des Druckes		Temperatur	Phase
1. Simulationsjahr	Vorletzte Stunde des Februars	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. Simulationsjahr	Vorletzte Stunde des Februars	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. Simulationsjahr	Vorletzte Stunde des Februars	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4. Simulationsjahr	Vorletzte Stunde des Februars	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5. Simulationsjahr	Vorletzte Stunde des Februars	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6. Simulationsjahr	Vorletzte Stunde des Februars	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
7. Simulationsjahr	Vorletzte Stunde des Februars	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8. Simulationsjahr	Vorletzte Stunde des Februars	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9. Simulationsjahr	Vorletzte Stunde des Februars	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10. Simulationsjahr	Vorletzte Stunde des Februars	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1. Simulationsjahr	Vorletzte Stunde des Oktobers	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. Simulationsjahr	Vorletzte Stunde des Oktobers	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. Simulationsjahr	Vorletzte Stunde des Oktobers	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4. Simulationsjahr	Vorletzte Stunde des Oktobers	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5. Simulationsjahr	Vorletzte Stunde des Oktobers	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6. Simulationsjahr	Vorletzte Stunde des Oktobers	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7. Simulationsjahr	Vorletzte Stunde des Oktobers	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8. Simulationsjahr	Vorletzte Stunde des Oktobers	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9. Simulationsjahr	Vorletzte Stunde des Oktobers	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10. Simulationsjahr	Vorletzte Stunde des Oktobers	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Letzte durchgeführte Simulation mit SONDENDURCHFLUSS		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Letzte durchgeführte Simulation		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

DRUCK **BEENDEN**

Bild 6.9 Auswahl des Druckes der Temperatur- und Phasenfelder

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\ERDWÄRMESONDEN\BEISPIEL\FEB6.DAT

Bitte richten Sie die Tabellengestalt nach Ihren Wünschen ein!
Z. B.: Querformat, Schriftgröße, Farbe usw.

Temperaturen: Vorlauf tV, Rücklauf tR, Bohrlochwand tBL; Erdreich k = 1 ... 20 in °C zur Zeit 45215 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	k=11	k=12	k=13	k=14	k=15	k=16	k=17	k=18	k=19	k=20
1	-9,27	-7,37	-4,66	1,37	2,19	2,42	2,52	2,55															
2	-9,26	-7,37	-4,44	1,93	3,18	3,63	3,84	3,92															
3	-9,25	-7,38	-4,22	2,53	3,96	4,53	4,80	4,91															
99	-8,24	-8,19	-1,47	5,20	6,55	7,07	7,31	7,41															
100	-8,23	-8,20	-1,10	5,93	7,10	7,51	7,71	7,79															
Ende der Sonde																							
101	-	-	-	7,43	7,79	8,00	8,13	8,18															
120	-	-	-	12,92	12,92	12,92	12,92	12,92															

Temperaturen: Vorlauf tV, Rücklauf tR, Bohrlochwand tBL in °C; Phasenzustände des Erdreichs k = 1 ... 20 in Werten 0 ... 1 zur Zeit 45215 Stunden

Phase = 0 gefrorener Boden; Phase = 1 ungefrorener Boden; Phase = 0 ... 1 teilgefrorener Boden;
Phase = x Boden ohne Feuchteanteil

i	tV	tR	tBL	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8	k=9	k=10	k=11	k=12	k=13	k=14	k=15	k=16	k=17	k=18	k=19	k=20
1	-9,27	-7,37	-4,66	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000															
2	-9,26	-7,37	-4,44	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000															
3	-9,25	-7,38	-4,22	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000															
4	-9,24	-7,38	-3,97	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000															
5	-9,23	-7,39	-3,77	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000															
6	-9,22	-7,40	-2,06	x	x	x	x	x															
99	-8,24	-8,19	-1,47	x	x	x	x	x															
100	-8,23	-8,20	-1,10	x	x	x	x	x															
Ende der Sonde																							
101	-	-	-	x	x	x	x	x															
120	-	-	-	x	x	x	x	x															

Bild 6.10 Musterausdruck eines Temperatur- und Phasensfeldes zur Kennzeichnung des Tabellenaufbaues und des Inhaltes

DIAGRAMM-SONDE führt zur grafischen Darstellung der Temperaturen und Leistungen der Sonde wahlweise Ende Februar bzw. Ende Oktober für maximal zehn Simulationsjahre und am Simulationsende bei Sondenbetrieb (Bild 6.11).

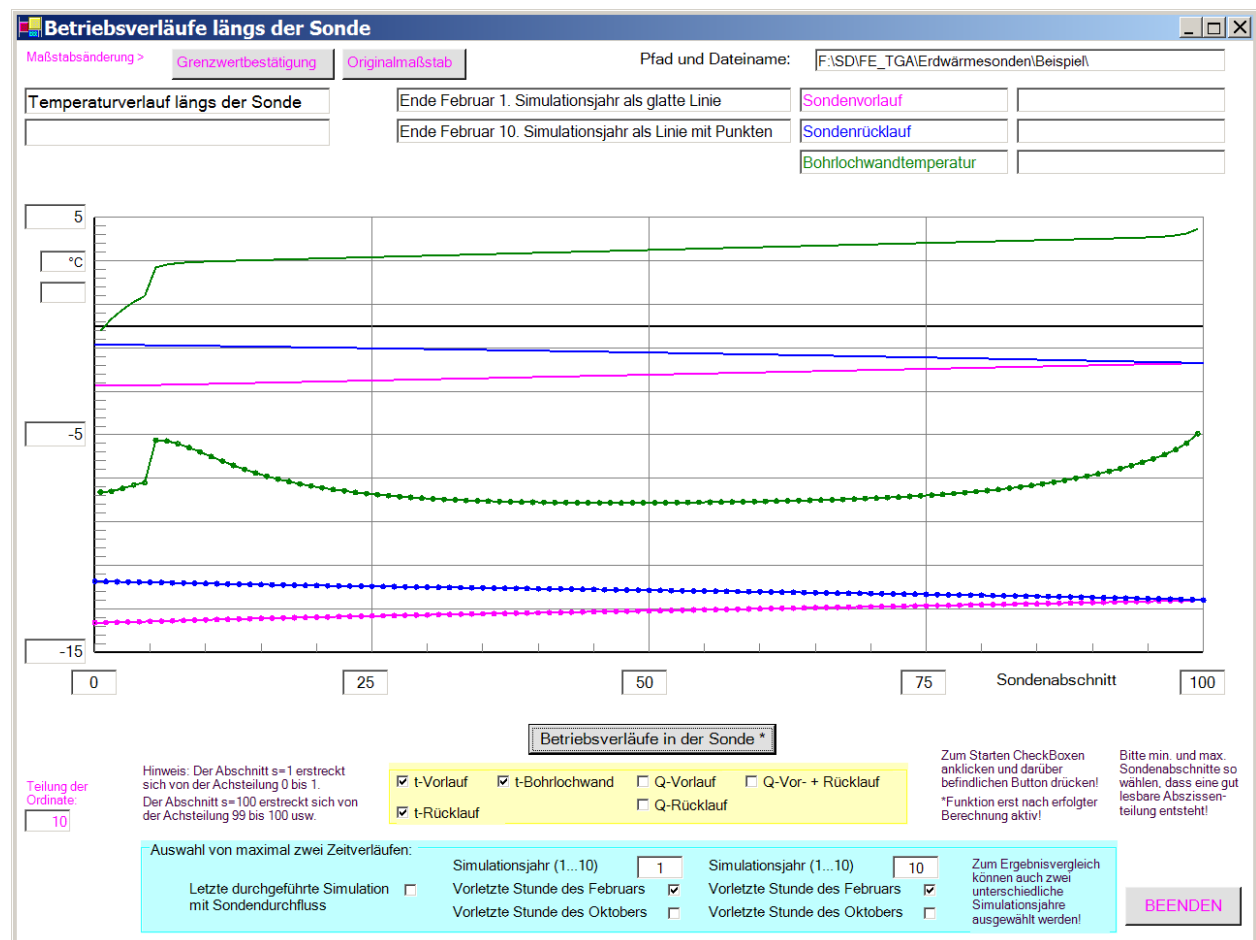


Bild 6.11 Musterdiagramm "Betriebsverläufe längs der Sonde" zur Kennzeichnung des Diagrammaufbaues und des Inhaltes am Beispiel der Temperaturen längs der Sonde im Abstand von neun Jahren

DIAGRAMM-UMFELD bewirkt die grafische Darstellung der Temperaturen und Leistungen der Sonde und der verwendeten Sonnenlufttemperatur sowie ausgewählter Erdreichtemperaturen für maximal zehn Simulationsjahre längs der Simulationszeit (Bild 6.12).

Anmerkung1: Die angebotenen Abstände vom Bohrloch sowie die Tiefen von der Erdoberfläche aus sind programmintern festgelegt. Sie betragen:

Tiefen: $i_0 = 1$; $i_1 = \text{Int}(0,25 \cdot i_{\text{max}})$; $i_2 = \text{Int}(0,5 \cdot i_{\text{max}})$; $i_3 = \text{Int}(0,75 \cdot i_{\text{max}})$

Radien: Bohrlochwand; $k_1 = \text{Int}(0,25 \cdot k_{\text{max}})$; $k_2 = \text{Int}(0,5 \cdot k_{\text{max}})$; $k_3 = \text{Int}(0,75 \cdot k_{\text{max}})$; $k_4 = k_{\text{max}}$.

Anmerkung2: Generell gelten die Stundendaten für das letzte Intervall (Intervallmax) der betrachteten Stunde (Beachte die Stundendefinition nach Bild 6.3). Deshalb beginnen die Kurvenverläufe zum Simulationsbeginn auch erst am Ende der ersten Simulationsstunde (Bild 6.12, Vergrößerung). Da bei intermittierendem Sondenbetrieb dann mitunter nur Punkte den Kurvenverlauf der Sondendaten charakterisierten, wird in diesem Fall der Endwert der Stunde auch am Stundenanfang verwendet und verbunden. Somit werden die Betriebszeiten der Sonde grafisch richtig dargestellt (Bild 6.13). Am Kurvenbeginn könnte die Temperatur oder die Leistung von der Realität abweichen. Hierzu sei aber angemerkt, dass die Transportzeiten im Sondenrohr und eventuelle Rohrbereiche mit abweichender Temperatur ("Pfropfen") beim wiederholten Durchflussbeginn ohnehin keine Beachtung finden. Die Sondenleistungen werden bei intermittierendem Betrieb nur für den Betriebsfall dargestellt, d. h., die Nullwerte bei Sondenstillstand entfallen ebenso, wie vertikale Verbindungslinien am Anfang und Ende des Sondenbetriebs.

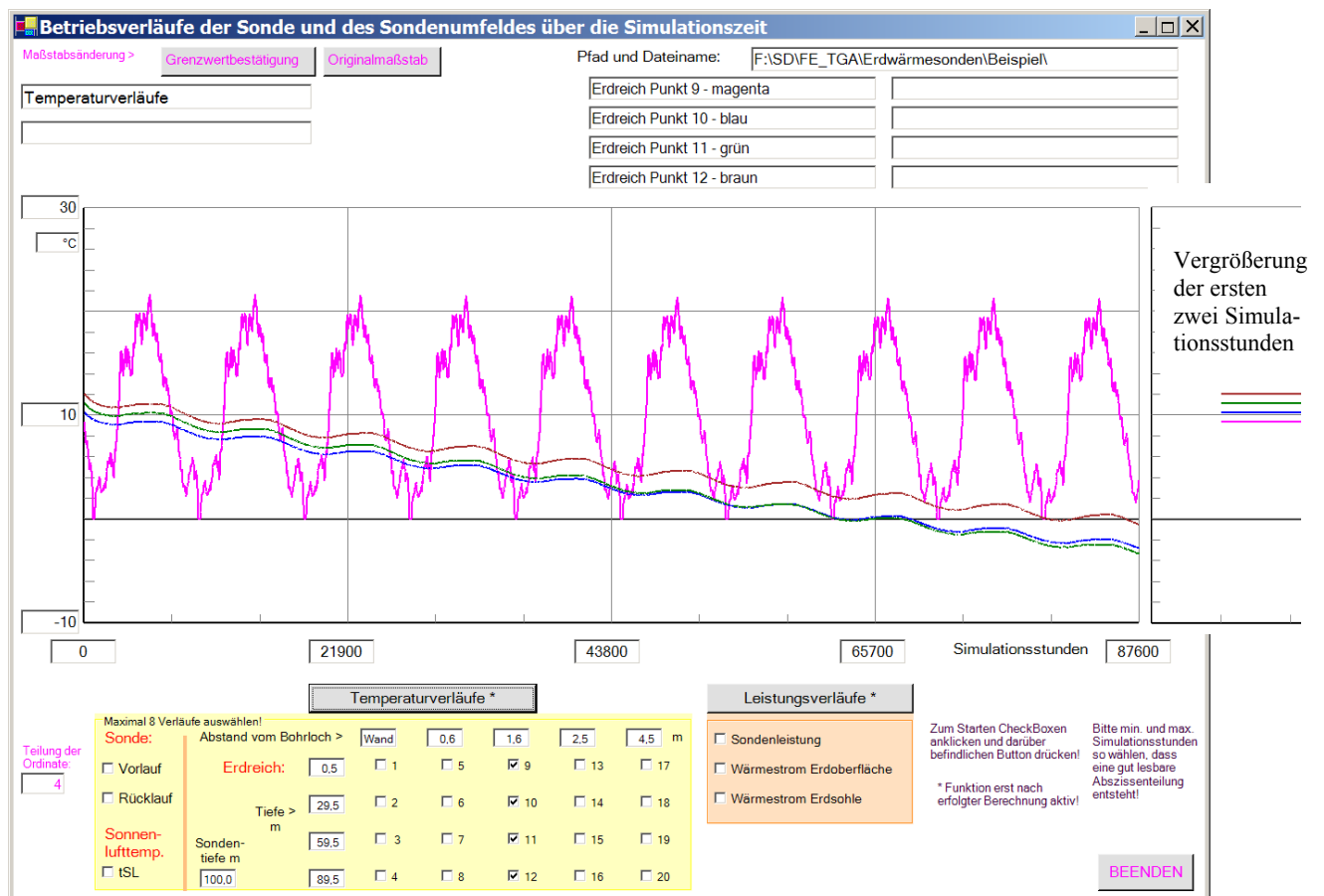


Bild 6.12 Musterdiagramm "Betriebsverläufe der Sonde und des Sondenumfeldes über die Simulationszeit" zur Kennzeichnung des Diagrammaufbaues und des Inhaltes am Beispiel ausgewählter Temperaturverläufe während zehn Simulationsjahren (Vergrößerung: Kurvenverläufe beginnen am Ende der Simulationsstunde 1.)

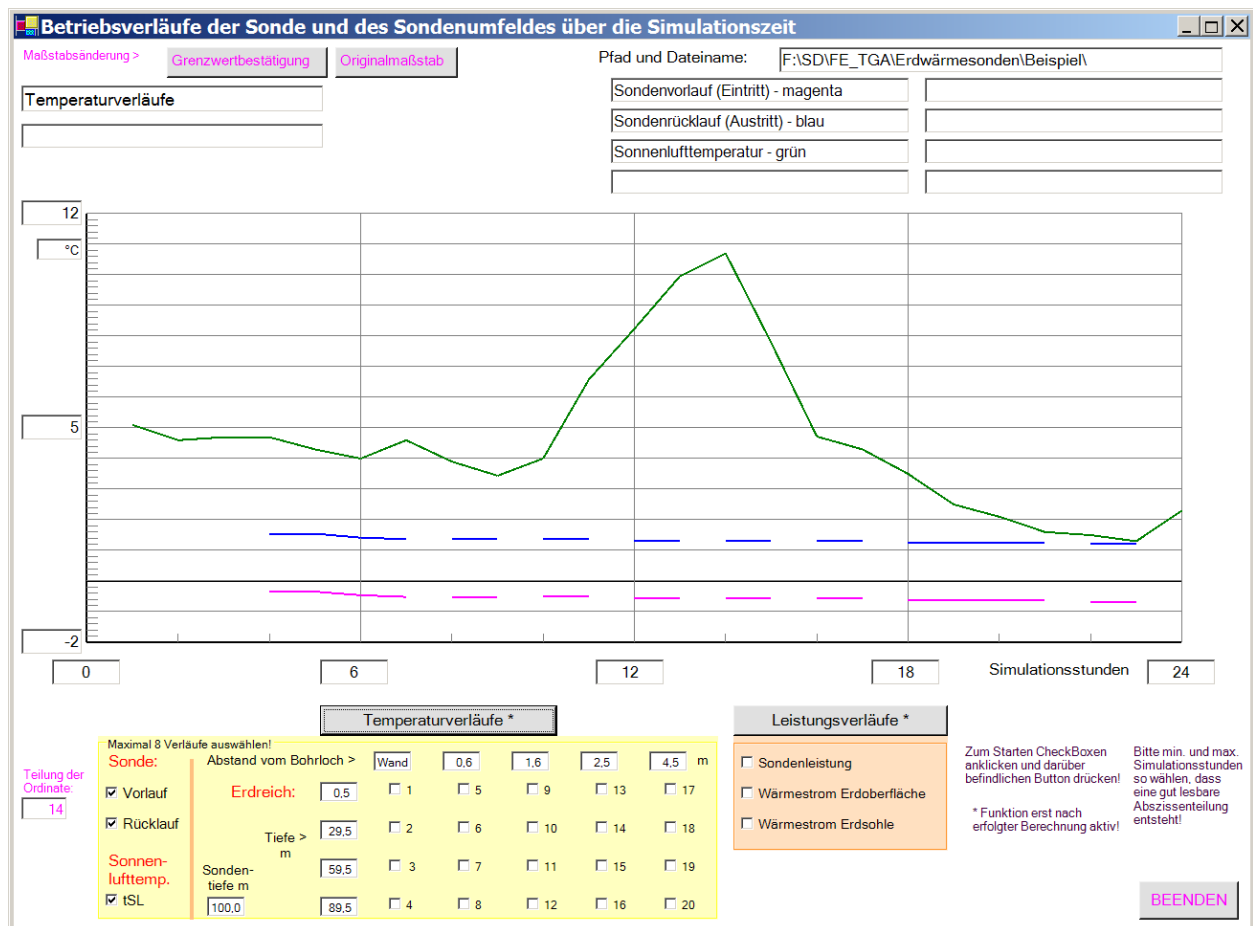


Bild 6.13 Musterdiagramm "Betriebsverläufe der Sonde und des Sondenumfeldes über die Simulationszeit" zur Kennzeichnung des Diagrammaufbaues und des Inhaltes am Beispiel ausgewählter Temperaturverläufe während der ersten 24 Simulationsstunden

Während die Sonnenlufttemperatur erst am Ende der ersten Simulationsstunde angezeigt wird, erfolgt für die Sondentemperaturen und -leistungen die Rückverlängerung des Stundenendwertes über die gesamte Betriebsstunde gemäß Anmerkung 2.

- **Hinweise zur Diagrammgestaltung**
- Die Achsteilungen sind sehr variabel gestaltbar.
- Beide Achsteilungen können verändert werden. Dabei sind die Grenzwerte an der Abszisse und an der Ordinate sowie die Teilung der Ordinate zu überschreiben und durch Drücken des Buttons **Grenzwertbestätigung** zu fixieren. Wird dann einer der Buttons **Betriebsverläufe in der Sonde**, **Temperaturverläufe** oder **Leistungsverläufe** gedrückt, so erscheint das neue, veränderte Diagramm.
- Damit können Ausschnitte aus dem ursprünglichen Diagramm erzeugt oder aber die Ablesegenauigkeit verbessert werden.
- Wird die Achsteilung falsch eingegeben, sodass beispielsweise der linke Abszissenwert größer als der rechte Wert ist, erfolgt eine Fehlerausschrift.
- Will man zur ursprünglichen Anzeige gemäß der programminternen Achsteilung zurückkehren, dann ist der Button **Originalmaßstab** zu drücken und danach einer der Buttons **Betriebsverläufe in der Sonde**, **Temperaturverläufe** oder **Leistungsverläufe** zu aktivieren.
- Die Bilder auf dem Monitor können durch gleichzeitiges Drücken der Tasten "Alt" und "Druck"

kopiert werden. Mit dem Befehl "Einfügen" sind die kopierten Monitoranzeigen dann in WORD- oder POWERPOINT-Dokumente übernehmbar. Dort können diese in bekannter Weise bearbeitet – z. B. beschnitten – werden.

Abschließend sei noch auf die erzeugbaren Kontrolldrucke in den Eingabeoberflächen für die Zeitfunktionen (Masken 2, 3 sowie 4) hingewiesen, die durch Aktivieren des jeweiligen Buttons **KONTROLLDRUCK** entstehen (Bild 6.14).

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\ERDWÄRMESONDEN\BEISPIEL\
Verläufe der geforderten Sondenleistung (alle U-Rohre) in W

Bitte richten Sie die Tabellengestalt nach Ihren Wünschen ein!
Z. B.: Querformat, Schriftgröße, Farbe usw.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Tagesstunde			14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Januar					4000	4000	4000		4000		4000		4000		4000		4000		4000		4000	4000	4000		4000
Februar					4000	4000	4000		4000		4000		4000		4000		4000		4000		4000	4000	4000		4000
März						4000	4000		4000		4000				4000		4000		4000		4000	4000	4000		4000
.																									
.																									

Bild 6.14 Musterkontrollausdruck einer Leistungseingabe gemäß Maske 3 (Bild 6.7)

7 Programminstallation und Hinweise zu Programmänderungen

Die beiden Rechenprogramme "ERDWÄRMESONDE" und "FORMFAKTOREN" stehen mit Beispielen zum kostenlosen Download bereit. Aus den beiden Programmlistings 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 Ausgabetabellen – 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 der Rechenprogramme

Die Dateien stehen in den übergebenen Ordnern "Form" und "Sonde". Sie sind in ein eigenes Verzeichnis auf die Festplatte zu kopieren. In den genannten Ordnern sind die Rechenprogramme und je ein Simulationsbeispiel enthalten. Die entsprechenden Unterordner tragen die Namen:

- **FORMFAKTOREN** (Rechenprogramm zur Ermittlung der Formfaktoren)
- **Variante_C** (Berechnungsbeispiel für Formfaktoren gemäß Seite 27 ff., Rechenzeit ca. 18 min)

- **ERDWÄRMESONDE** (Simulationsmodell für Erdwärmesonden)
- **Beispiel_1** (Simulationsbeispiel für eine Erdwärmesonde gemäß Seite 62 ff., Rechenzeit ca. 6 min) {Im Ordner "Beispiel_1" steht auch die Datei für die Sonnenlufttemperatur **tSL.dat**. Sie erscheint in der Hauptbedienoberfläche als **F:\Sonde\Beispiel_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 **"FORMFAKTOREN"** öffnen \Rightarrow Datei **"bin"** öffnen \Rightarrow **"Programm.exe"** Doppelklick

II. Beispielhafte Abarbeitung mit Entwicklungsumgebung:

Visual Basic.NET starten \Rightarrow Menüleiste **"Datei"** \Rightarrow **"Öffnen"** \Rightarrow **"Projekt"** Einfachklick
 \Rightarrow Ordner **"FORMFAKTOREN"** auswählen \Rightarrow **"Programm.sin"** Doppelklick
 \Rightarrow Menüleiste **"Debuggen"** Einfachklick \Rightarrow **"Starten"** Einfachklick

Zu Beginn wird in einem Fenster (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 der Programmlistings

In den Ordnern **"FORMFAKTOREN"** UND **"ERDWÄRMESONDE"** sind alle Dateien mit den Quellcodes (Formen) enthalten. Die Auswahl der Formen kann mit Hilfe des Projektmappen-Explorers vorgenommen werden.

- Gliederung des Rechenprogramms **"FORMFAKTOREN"**

Form1.vb	Hauptprogramm mit Eingabe, Ablaufsteuerung und Ergebnisdruck
Form2.vb	Anzeige des Simulationsstandes während der Berechnung

- Gliederung des Rechenprogramms **"ERDWÄRMESONDE"**

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

8 Beispiele

8.1 Vorbemerkungen

Die nachfolgenden Beispiele arbeiten zwar mit **praxisrelevanten Daten**, sie verfolgen aber auch **didaktische Ziele** bezüglich des **Erkennens** und **Wirkens** der **Randbedingungen** auf die Ergebnisse. Generell bestehen immer große Schwierigkeiten, wenn unterschiedliche Sondenanordnungen und/oder Sondenbetriebsweisen über eine vorgegebene Nutzungsdauer objektiv verglichen werden sollen.

Feldversuche sind in der Regel nicht nur wegen des großen Aufwandes sondern auch wegen der Nichtrealisierbarkeit absolut gleicher Randbedingungen untauglich.

Naheliegender ist es, den Vergleich mittels Simulationen durchzuführen. Hierbei ist es zwar leicht möglich, die **Randbedingungen** identisch zu gestalten, strittig bleiben aber immer die praxisbezogenen Annahmen. **Die Randbedingungen sind deshalb ausführlich vorzustellen.**

Wichtig ist vor allem auch die Zielaussage des Vergleichs. So könnte man z. B. den zeitlichen Leistungsverlauf einer Erdwärmesonde ermitteln, wobei z. B. die Wassereintrittstemperatur als Zeitfunktion vorgegeben ist. Für jeden Simulationsfall folgten dann abweichende Leistungen, die untereinander schwer zu bewerten sind, da sie die endgültige Nutzung beeinflussen usw. Deshalb wird von einer vorgegebenen spezifischen Entzugsleistung für Erdwärmesonde ausgegangen und unter sonst gleichen Bedingungen – wie z. B. Wetterdaten, Erdreich, Taktprofil der Wärmepumpe – die Wasseraustrittstemperatur bestimmt. Diese ist dann ein objektives Grundmaß für die Wirksamkeit des "Wärmequellsystems". Darauf aufbauend kann man für jede nachgeschaltete, beliebige Wärmepumpen- und Gebäudeheizanlage die spezielle Gesamteffizienz ermitteln.

- **Erdreichmodellierung**

Für die folgenden Beispiele werden zwei unterschiedliche Bodenarten verwendet.

Bodenart I: Sandboden mit Lehmantilen und einem Wasseranteil von etwa 10 %(Vol)

Die Stoffwerte sind für den ungefrorenen und den gefrorenen Boden in Tabelle 8.1 angegeben, wobei die Volumenänderung bei der Eisbildung unbeachtet bleibt. Beim Phasenwandel wird ein homogenes Erde-Wasser-Gemisch angenommen und die Phasenwandelenthalpie des anteiligen Wassers deshalb vereinfacht auf die Gemischmasse bezogen.

Bodenart II: Festgestein ohne Wasseranteil

Die Stoffwerte gelten unabhängig von der Temperatur. Es tritt keine Phasenwandel auf, weshalb die Angabe für die Phasenwandelwärme r_s entfällt.

Tabelle 8.1 Mittlere Stoffwerte der modellierten Böden

Bodenzustand	ρ kg/m ³	λ W/(m K)	c J/(kg K)	r_s kJ/kg
Bodenart I: Sandboden mit Lehmantilen und einem Wasseranteil von etwa 10 %(Vol)				
ungefrorener Boden	1630	1,5	1046	20,5
gefrorener Boden	1630	1,66	917	
Bodenart II: Festgestein ohne Wasseranteil	2400	2,6	900	0

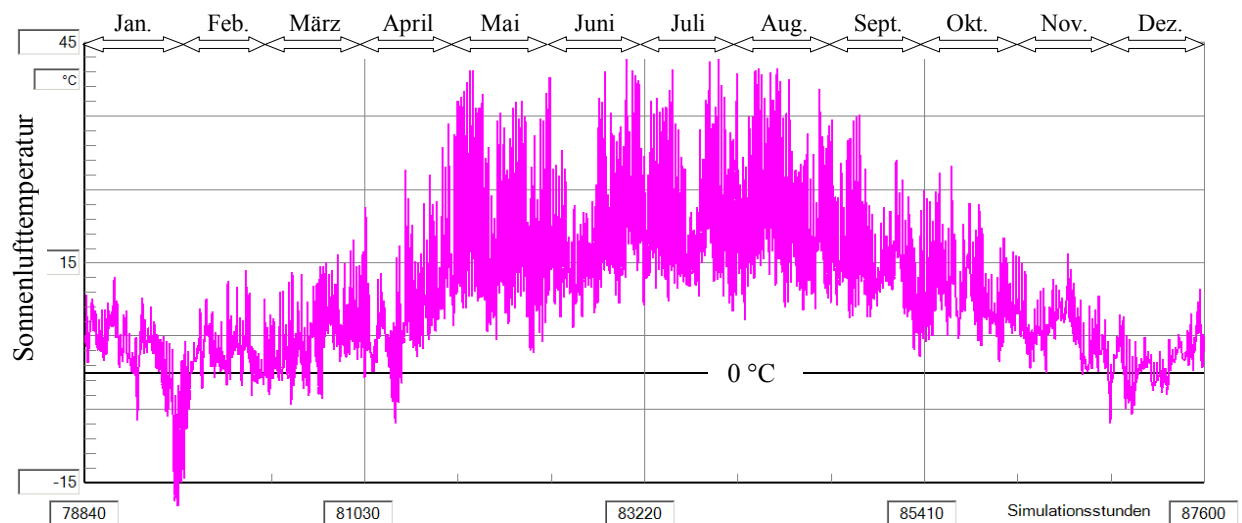
- **Gestaltung der Erdwärmesonde**

Zum Einsatz kommt eine **100 m lange Doppel-U-Rohrsonde** gemäß Bild 4.10 mit PE-Rohre 25×2,3 und $\lambda_R = 0,35$ W/(m K).

Als **Durchflussmedien** werden Wasser und Tyfocor L 25 % nach Abschnitt 5.1 betrachtet. Die Durchflussgeschwindigkeit werde unterschiedlich gewählt. Im günstigsten Fall liegt turbulente Strömung vor. Die **Wärmeleitfähigkeit des Bohrlochfüllstoffes** ist stark produktabhängig, für die Beispiele wird $\lambda_{\text{Füllstoff}} = 1 \text{ W/(m K)}$ angenommen.

- **Thermische Randbedingungen**

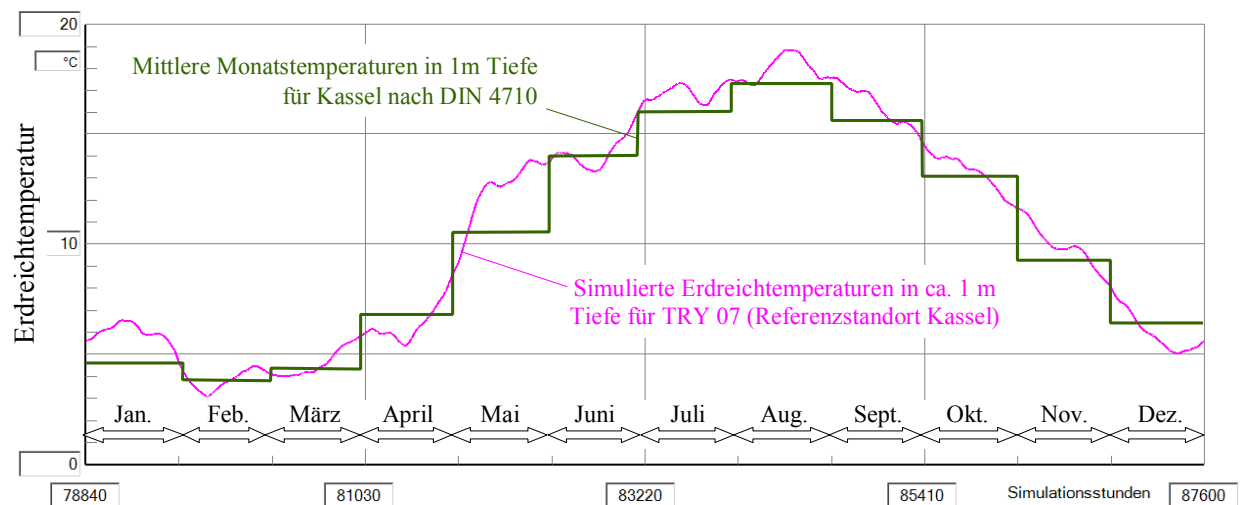
An der **Erdoberfläche** gelten die Wetterdaten gemäß Testreferenzjahr für den Standort Kassel (TRY07) mit stündlichen Stützwerten. Die Lufttemperatur und die Globalstrahlung auf die Horizontalfläche werden zur Sonnenlufttemperatur $t_a(\tau)$ gemäß Abschnitt 6.1 zusammengefasst (Bild 8.1), sodass eine Randbedingung dritter Art vorliegt.



1. bis 10. Simulationsjahr

Bild 8.1 Sonnenlufttemperatur im Jahresgang gemäß Gl. (6.1) auf der Basis des Testreferenzjahres TRY 07

Ob der äußere Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_a = 15 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ und der Absorptionskoeffizient $a = 0,3$ für die Solarstrahlung auf die Erdoberfläche im Jahresmittel realistisch sind, kann nicht eindeutig beantwortet werden. Eine Testsimulation des Erdreichs der Bodenart I (Sondendurchfluss $V_{\text{fix}} = 0$) über 10 Jahre mit der in 15 m Tiefe geltenden Jahresmitteltemperatur für Kassel von $8,8 \text{ °C}$ ergab eine relativ gute Übereinstimmung mit den mittleren Monatswerten nach DIN 4710 (Bild 8.2).



10. Simulationsjahr

Bild 8.2 Gegenüberstellung der ungestörten Erdreichtemperaturen in ca. 1 m Tiefe gemäß Simulation (Basis: stündliche Sonnenlufttemperaturen nach Bild 8.1; Bodenart I) und monatlich gemittelter Messwerte

Die möglichst genaue Erfassung der meteorologischen Elemente an der Erdoberfläche ist wichtig, da der **hauptsächliche Energieeintrag** bei den betrachteten Sondentiefen und damit die **angestrebte Nachhaltigkeit bei der Erdwärmesondennutzung** durch die "Sonne" gegeben ist.

Die Randbedingung an der **Sohle des Simulationsgebietes** wird gemäß Abschnitt 6.1 als konstante Temperatur t_{Erdsohle} definiert, die der ungestörten Erdreichtemperatur in dieser Tiefe entsprechen soll. Die Tiefe des Simulationsgebietes endet 20 m unter dem Sondenende. Dies ist zunächst eine willkürliche Vorgabe. Die Beispiele zeigen später die Vertretbarkeit dieser Annahme. Als Temperaturgradient wird 0,03 K/m angenommen. Der realistische Wärmeeintrag von unten ist somit relativ klein, bei $\lambda_{\text{Erdreich}} = 2,6 \text{ W/(m K)}$ beträgt er im ungestörten Feld nur $0,078 \text{ W/m}^2$. Die mittlere Jahrestemperatur für Kassel beträgt $8,8 \text{ }^\circ\text{C}$. Sie spiegelt sich in der Regel in einer Tiefe von 15 ... 20 m wider, sodass in der Tiefe von 120 m die ungestörte Temperatur $t_{\text{Erdsohle}} = 12 \text{ }^\circ\text{C}$ angesetzt wird.

Der **Radius des Einflussgebietes** wird variiert. Als Standard gelte für eine Sonde im Feld $r_{\text{EB}} = 10 \text{ m}$.

- **Wärmetechnische Sondenbelastung**

Im Verlauf eines Jahres werden ca. 2000 (exakt 1997) Volllaststunden für den Betrieb einer Heizwärmepumpe angenommen. Sie sind identisch mit den Entzugsstunden eines konstanten, vorgegebenen Wärmestromes aus der Erdwärmesonde mit der mittleren Sondenleistung von **45 W/m**. Die Wasser- bzw. Soleeintrittstemperatur wird durch eine "Regelung im Simulationsmodell" (Anpass = 2) so eingestellt, dass die geforderte Wärmestromdichte während der Entzugsdauer eingehalten wird. Die Wärmepumpe arbeitet intermittierend (Mindestlaufzeit: 1 Stunde) auf einen Heizwasserspeicher. Die Nutzstunden sind über die Monate unterschiedlich verteilt. Die Festlegung erfolgte unter Berücksichtigung der mittleren Monatstemperaturen für Kassel gemäß DIN 4710 und unter Beachtung einer Heizgrenztemperatur von $15 \text{ }^\circ\text{C}$ sowie der möglichen Raumnutzung. Die angenommene Verteilung zeigt Tabelle 8.2.

Tabelle 8.2 Tages- und Monatsverteilung der Volllaststunden (\equiv Entzugsstunden x)

Tages- stunde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	Std/ Tag	Std/ Mon
Jan					x	x	x		x		x		x		x		x		x	x	x		x		12	372
Feb					x	x	x		x		x		x		x		x		x		x		x		11	308
März						x	x		x		x				x		x		x		x		x		9	279
Apr							x		x		x						x		x		x				6	180
Mai							x												x						2	62
Juni																									0	0
Juli																									0	0
Aug																									0	0
Sep							x																		1	30
Okt							x		x								x		x		x				5	155
Nov						x	x		x		x				x		x		x		x		x		9	270
Dez					x	x	x		x		x		x		x		x		x		x		x		11	341
Jahresstunden:																									1997	

Damit soll die 100 m lange Erdwärmesonde die Jahreswärme von $Q = 1997 \cdot 45 \cdot 100 \text{ Wh/a} = 8986,5 \text{ kWh/a}$ liefern. – Weiterhin wird für einen Vergleichstest eine kombinierte Heiz-/Kühlsonde mit einer zusätzlichen "Kältenutzung" von $Q = -5980 \text{ kWh}$ während der Sommermonate untersucht.

8.2 Alleinige Heizwärmenutzung beim Sondenbetrieb (Beispiel 1)

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

Erdwärmesonde - Hauptprogramm

Sondensimulation (Temperaturfeld im Erdreich instationär, im Bohrloch stationär)

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

Ordner: F:\SD\IFE_TGA\Erdwärmesonden\Beispiel_1\

Schicht	Rho kg/m³	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

Hauptgeometriedaten

Bohrlochradius rBL 0,075 m

Gedämmte Sondenlänge LD 0 m

Länge L_Sonde 100 m

Anzahl der U-Rohre (1 oder 2) 2

Länge L_Sim 120 m

imax 120

Simulationsradius rEB 10 m

kmax 10

Formfaktoren für die Bohrlochgeometrie als Funktion des Übertemperaturverhältnisses

Beziehung für ungedämmten Rohrabschnitt: $S20 = 4,367 + [-0,676] \cdot \text{THETA}$

Beziehung für gedämmten Rohrabschnitt: $SD20 = 0 + 0 \cdot \text{THETA}$

$S10 = 4,367 + [-0,676] \cdot \text{THETA}^{(-1)}$

$SD10 = 0 + 0 \cdot \text{THETA}^{(-1)}$

Definition: $\text{THETA} = (t1 - t0) / (t2 - t0)$

Rohr- und Sondendaten

Rohraussendurchmesser 25 mm

Wanddicke 2,3 mm

Wärmeleitfähigkeit 0,35 W/(m K)

Dämmung: Dicke Vorlauf 0 mm

Rücklauf 0 mm

Wärmeleitfähigkeit 0 W/(m K)

Durchflussmedium: Tyfocor L 40 %

Tyfocor L 25 %

Wasser

Eintrittstemperatur °C

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 (1 oder 2 U-Rohre).

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\Erdwärmesonden\Beispiel_1\tsL.dat

Unbeeinflusste Sohlentemperatur 12 °C

Evtl. Eingabe der Erdoberflächentemperaturverteilung 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 Kreisläufe k.

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

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 ZEITVERLAUF Eintrittstemperatur oder Leistungsanforderung und Durchfluss eingeben!
6. BERECHNUNG, DRUCK, TABELLE oder DIAGRAMM drücken!

Buttons: STARTEN, DATEI LADEN, EINGABESPEICHERUNG, BERECHNUNG, DRUCK, DIAGRAMM-SONDE, ZEITVERLAUF >, DURCHFLUSS, EINTRITTSTEMPERATUR, SONDENLEISTUNG, Ergebnisse >, T- / Phase-TABELLE, DIAGRAMM-UMFELD, BEENDEN

Bild 8.3 Hauptoberfläche (Maske 1) mit den Eingabedaten für Beispiel_1

Die Eingabedaten sind im Abschnitt 6.4 erläutert, Aussagen zu speziellen hier angenommenen Werten finden sich im Abschnitt 8.1. Der Ordner "Beispiel_1" ist vor dem Programmstart anzulegen. In diesem Fall wurde die Datei mit den Daten der stündlichen Sonnenlufttemperatur "tsL.dat" in den Ordner "Beispiel_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 der Tabelle 8.2. Sie finden sich in den Masken der Bilder 8.4 und 8.5 wieder.
- Als Wärmeträger wird eine wässrige 25 %-ige Tyfocorlösung verwendet, da Temperaturen unter 0 °C erwartet werden. Die Wärmeübergangskoeffizienten sind kleiner als bei reinem Wasser.


Eingabe: Durchfluss

Flüssigkeitsdurchfluss in l/h

(bezogen auf alle installierten U-Rohre)

Tagesstunde

Pfad und vorhandener bzw. zukünftiger Dateiname:

F:\SD\FE_TGA\Erdwärmesonden\Beispiel_1\ZVERLAUFV.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					2000	2000	2000		2000		2000		2000		2000		2000		2000	2000	2000		2000	
Februar					2000	2000	2000		2000		2000		2000		2000		2000		2000		2000		2000	
März						2000	2000		2000		2000				2000		2000		2000		2000		2000	
April							2000		2000		2000						2000		2000		2000			
Mai							2000												2000					
Juni																								
Juli																								
August																								
September							2000																	
Oktober							2000		2000								2000		2000		2000			
November						2000	2000		2000		2000				2000		2000		2000		2000		2000	
Dezember					2000	2000	2000		2000		2000		2000		2000		2000		2000		2000		2000	

ANZEIGEN drücken! Daten überschreiben (nur Zahlen, Komma, Minuszeichen)!

DATENSPEICHERUNG drücken!

Evtl. KONTROLLDRUCK erzeugen!

MASKE LEEREN

DATENANZEIGEN

DATENSPEICHERUNG

KONTROLLDRUCK

BEENDEN


Bild 8.4 Eingabeoberfläche (Maske 4) mit den zeitabhängigen Sondendurchsätzen für Beispiel_1

- Der nachfolgende Kontrollausdruck gibt das monatlich unterschiedliche Betriebsstundenschema der Tabelle 8.2 richtig wieder.

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE TGA\ERDWÄRMESONDEN\BEISPIEL 1\

Monatliche Verläufe des Flüssigkeitsdurchflusses (alle U-Rohre) in l/h

[illegible]


Eingabe: Sondenleistung

Geforderte Sondenleistung in W
 (bezogen auf alle installierten U-Rohre)

Pfad und vorhandener bzw. zukünftiger Dateiname:
 F:\SD\FE_TGA\Erdwärmesonden\Beispiel_1\ZVERLAUFQ.dat

	Tagesstunde																							
	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					4500	4500	4500		4500		4500		4500		4500		4500		4500	4500	4500		4500	
Februar					4500	4500	4500		4500		4500		4500		4500		4500		4500		4500		4500	
März						4500	4500		4500		4500				4500		4500		4500		4500		4500	
April							4500		4500		4500						4500		4500		4500			
Mai							4500												4500					
Juni																								
Juli																								
August																								
September							4500																	
Oktober							4500		4500								4500		4500		4500			
November						4500	4500		4500		4500				4500		4500		4500		4500		4500	
Dezember					4500	4500	4500		4500		4500		4500		4500		4500		4500		4500		4500	

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

MASKE
LEEREN

DATENANZEIGEN

DATENSPEICHERUNG

KONTROLLDRUCK

BEENDEN

Bild 8.5 Eingabeoberfläche (Maske 3) mit den geforderten Stundenleistungen der Sonde für Beispiel_1

- Der Kontrollausdruck entspricht wiederum dem monatlich unterschiedlichen Betriebsstundenschema der Tabelle 8.2.

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE TGA\ERDWÄRMESONDEN\BEISPIEL 1\

Monatliche Verläufe der geforderten Sondenleistung (alle U-Rohre) in W

[illegible]

Ergebnisdrucke und Grafiken des Beispiels

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\ERDWÄRMESONDEN\BEISPIEL_1\

Rohr- und Bohrlochdaten:

rBL	da	delR	lamR	delDV	delDR	lamD	a2	b2	a1	b1	a2D	b2D	a1D	b1D
mm	mm	mm	W/(mK)	mm	mm	W/(mK)								
75	25	2,3	0,35	0,0	0,0	0,000	4,367	-0,676	4,367	-0,676	0,000	0,000	0,000	0,000

Erdschichten:

Schicht	Dichte	Wärmeleitfähigkeit	Wärmeleitfähigkeit	Wärmekapazität	Wärmekapazität	Schmelz-	Schicht-	Wärmeleitfähigkeit
	kg/m³	fest	flüssig	fest	flüssig	wärme	tiefe	Bohrlochfüllung
		W/(mK)		J/(kgK)		kJ/(kg)	m	W/(mK)
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	U-Rohranzahl
gesamt	gedämmt	gesamt	gedämmt					
m	m							
100,0	0,0	100	0	Tyfocor L25		Z-funk.	Z-funk.	2

Es erfolgt die Anpassung an die vorgegebene Sondenleistung! Zeitschrittweite: 600 s

Daten zum Simulationsgebiet und zur Simulationszeit:

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

Datei Sonnenlufttemperatur: F:\SD\FE_TGA\Erdwärmesonden\Beispiel_1\tSL.dat

Datei Erdreichtemperaturverteilung früherer Simulation:

Werte des letzten Simulationszyklus bei Sondendurchfluss

Letztes Intervall der Simulationsstunde: 87599

i	tV(i)	tR(i)	tBL(i)	QV(i)	QR(i)
	°C	°C	°C	W	W
1	-7,8	-5,8	-1,6	25,2	16,0
11	-7,7	-5,9	-0,4	29,7	21,5
21	-7,6	-6,0	-1,2	25,9	18,7
31	-7,5	-6,1	-1,4	24,3	18,0
41	-7,4	-6,2	-1,6	23,3	17,9
51	-7,2	-6,2	-1,6	22,9	18,3
61	-7,1	-6,3	-1,5	22,7	19,0
71	-7,0	-6,4	-1,3	22,8	20,0
81	-6,9	-6,5	-1,1	23,2	21,3
91	-6,8	-6,6	-0,7	24,3	23,3

Wärmeaufnahme			Temperaturspreizung
Bezug 1 U-Rohr	Sonde		
Vorlauf	Rücklauf	Gesamt	
W	W	W	K
1234	1003	4474	2,0

Monatswerte

Simulations-	Monat	Sonnenwärme	Erdwärme	Sondenarbeit
jahr		kWh	kWh	kWh
1	1	-2733	18	1662
1	2	-437	16	1376
1	3	366	18	1258

Simulations- jahr	Monat	Sonnenwärme kWh	Erdwärme kWh	Sondenarbeit kWh	
1	4	1451	18	815	
1	5	3304	18	281	
1	6	2415	18	0	
1	7	1611	18	0	
1	8	1414	18	0	
1	9	-927	18	134	
1	10	-1139	18	693	
1	11	-2198	18	1206	
1	12	-1938	18	1523	
	Jahressummen:	1190	215	8949	Bilanz: -7544 kWh
	Speicherzustand am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:				449340 kWh
2	1	-1875	18	1663	
2	2	-368	17	1380	
2	3	354	19	1261	
2	4	1417	19	815	
2	5	3265	20	281	
2	6	2379	19	0	
2	7	1576	21	0	
2	8	1383	21	0	
2	9	-954	21	134	
2	10	-1163	22	693	
2	11	-2218	22	1206	
2	12	-1956	23	1524	
	Jahressummen:	1842	241	8956	Bilanz: -6873 kWh
	Speicherzustand am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:				442471 kWh
3	1	-1889	23	1663	
.					
3	12	-1956	29	1524	
	Jahressummen:	1766	308	8955	Bilanz: -6882 kWh
	Speicherzustand am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:				435593 kWh
4	1	-1889	30	1663	
.					
4	12	-1952	36	1523	
	Jahressummen:	1795	389	8955	Bilanz: -6771 kWh
	Speicherzustand am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:				428823 kWh
5	1	-1884	37	1663	
.					
5	12	-1945	44	1523	
	Jahressummen:	1861	476	8958	Bilanz: -6622 kWh
	Speicherzustand am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:				422205 kWh
6	1	-1877	45	1663	
.					
6	12	-1938	51	1523	
	Jahressummen:	1941	564	8956	Bilanz: -6450 kWh
	Speicherzustand am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:				415757 kWh
7	1	-1869	52	1664	
.					
7	12	-1930	59	1524	
	Jahressummen:	2028	651	8959	Bilanz: -6279 kWh
	Speicherzustand am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:				409481 kWh
8	1	-1861	59	1664	
.					
8	12	-1922	66	1524	
	Jahressummen:	2117	736	8959	Bilanz: -6106 kWh
	Speicherzustand am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:				403379 kWh
9	1	-1854	66	1664	
.					
9	12	-1915	73	1524	
	Jahressummen:	2206	819	8956	Bilanz: -5930 kWh
	Speicherzustand am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:				397454 kWh
10	1	-1846	73	1664	
.					
10	12	-1907	79	1524	
	Jahressummen:	2295	899	8959	Bilanz: -5764 kWh
	Speicherzustand am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:				391695 kWh

Kontrolle:
449340 kWh
-6873 kWh
= 442467 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 8949 kWh und 8959 kWh. Damit beträgt die

mittlere Sondenleistung 4481... 4486 W. Die programminterne "Leistungsregelung" arbeitet somit sehr gut, die geforderten 4500 W werden um weniger als 0,5 % unterschritten.

- Nach 10 Jahren beträgt die Herkunft der Erdwärmesondenarbeit:

64 % durch Erdreichabkühlung

10 % durch Wärmezufluss vom Erdinneren

26 % durch Wärmezufluss von der Erdoberfläche.

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\ERDWÄRMESONDEN\BEISPIEL_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	-4,72	-2,70	-1,06	2,00	2,45	2,60	2,67	2,70	2,73	2,74	2,75	2,76	2,76
2	-4,71	-2,71	-0,56	3,07	3,80	4,09	4,24	4,33	4,39	4,42	4,45	4,46	4,47
3	-4,70	-2,71	-0,18	3,90	4,78	5,16	5,37	5,50	5,59	5,65	5,68	5,70	5,71
4	-4,69	-2,72	0,19	4,70	5,70	6,14	6,40	6,57	6,68	6,75	6,80	6,82	6,83
5	-4,68	-2,72	0,53	5,41	6,51	7,01	7,31	7,50	7,62	7,70	7,76	7,79	7,80
50	-4,16	-3,07	1,18	6,72	7,97	8,55	8,90	9,13	9,28	9,39	9,45	9,49	9,51
99	-3,61	-3,56	2,00	8,45	9,78	10,32	10,63	10,82	10,94	11,02	11,07	11,10	11,11
100	-3,59	-3,57	2,23	8,94	10,08	10,52	10,76	10,92	11,02	11,08	11,13	11,15	11,16
Ende der Sonde													
101	-	-	-	10,15	10,51	10,75	10,91	11,02	11,10	11,15	11,19	11,21	11,21
102	-	-	-	10,70	10,83	10,95	11,05	11,13	11,18	11,22	11,25	11,26	11,27
103	-	-	-	10,99	11,05	11,11	11,17	11,22	11,26	11,28	11,30	11,31	11,32
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	11,98	11,98

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\ERDWÄRMESONDEN\BEISPIEL_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	-8,06	-6,05	-2,63	1,72	2,34	2,53	2,62	2,67	2,70	2,71	2,73	2,73	2,73
2	-8,05	-6,05	-2,18	2,62	3,57	3,93	4,12	4,23	4,31	4,35	4,38	4,39	4,40
3	-8,04	-6,06	-1,82	3,34	4,46	4,93	5,19	5,35	5,46	5,52	5,57	5,59	5,60
4	-8,03	-6,07	-1,44	4,08	5,31	5,85	6,17	6,37	6,50	6,58	6,63	6,66	6,68
5	-8,02	-6,08	-1,11	4,75	6,06	6,66	7,01	7,24	7,39	7,48	7,54	7,58	7,59
50	-7,50	-6,46	-1,72	3,47	4,65	5,19	5,52	5,73	5,88	5,97	6,04	6,07	6,09
99	-6,97	-6,93	-0,26	6,33	7,69	8,25	8,56	8,75	8,87	8,95	9,00	9,03	9,05
100	-6,96	-6,94	0,04	6,93	8,09	8,54	8,79	8,95	9,05	9,12	9,16	9,18	9,19
Ende der Sonde													
101	-	-	-	8,26	8,62	8,87	9,03	9,15	9,23	9,28	9,32	9,34	9,35
102	-	-	-	8,91	9,05	9,17	9,27	9,35	9,41	9,45	9,47	9,49	9,50
103	-	-	-	9,31	9,37	9,43	9,49	9,55	9,58	9,61	9,63	9,64	9,65
119	-	-	-	11,82	11,82	11,82	11,82	11,82	11,82	11,82	11,82	11,82	11,82
120	-	-	-	11,94	11,94	11,94	11,94	11,94	11,94	11,94	11,94	11,94	11,94

- Die Temperaturverteilung im Erdreich im Abstand von 8 Jahren zeigt die deutliche Abkühlung im mittleren und unteren Sondenbereich beispielsweise um 2 ... 3 K.
- An der Sohle des Simulationsgebietes steigt der Temperaturgradient von 0,03 K/m auf 0,12 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 0,31 W/m² verwiesen.

Aussagen zu Bild 8.6:

- Deutlich zeigt sich die Temperaturabsenkung innerhalb von 8 Betriebsjahren. So sinkt die mittlere Soletemperatur beispielsweise um mehr als 3 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.

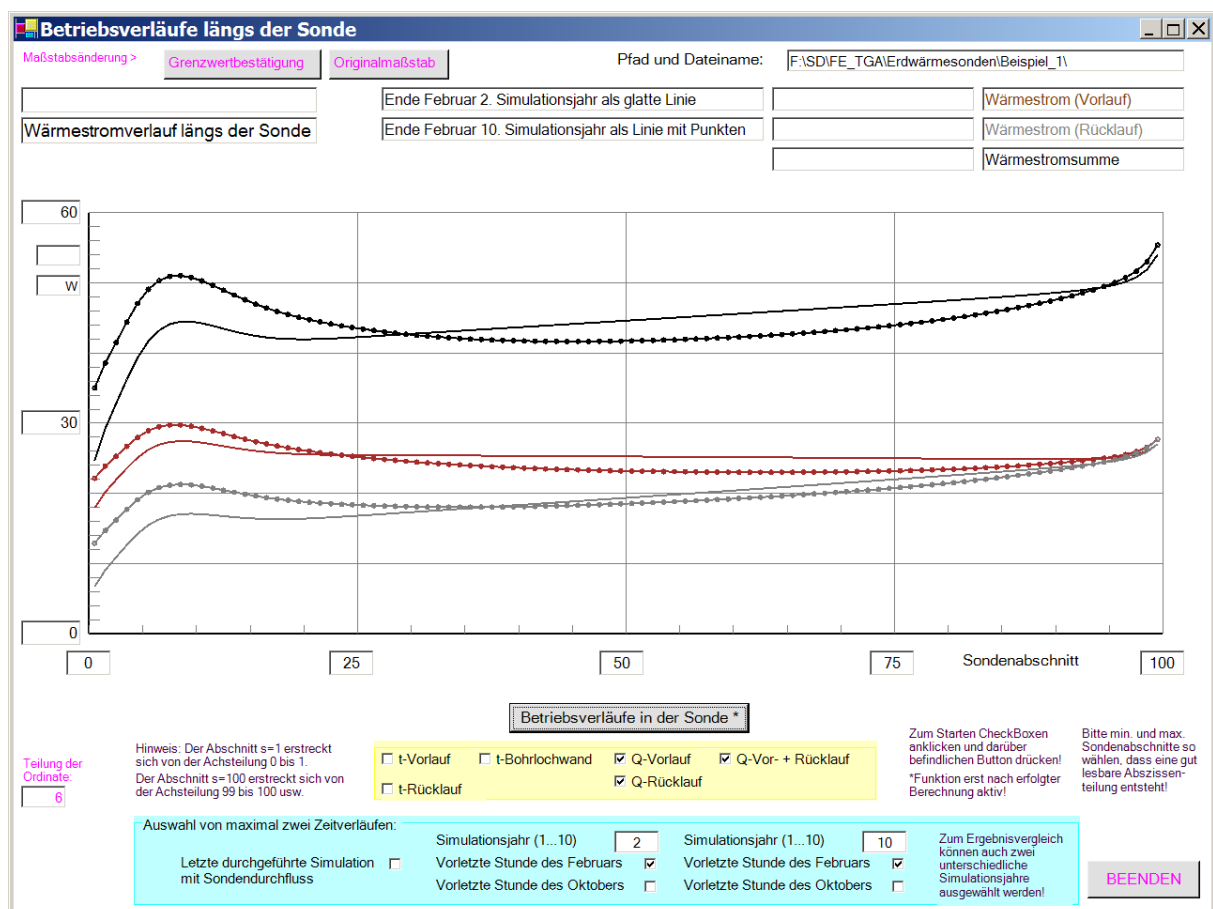
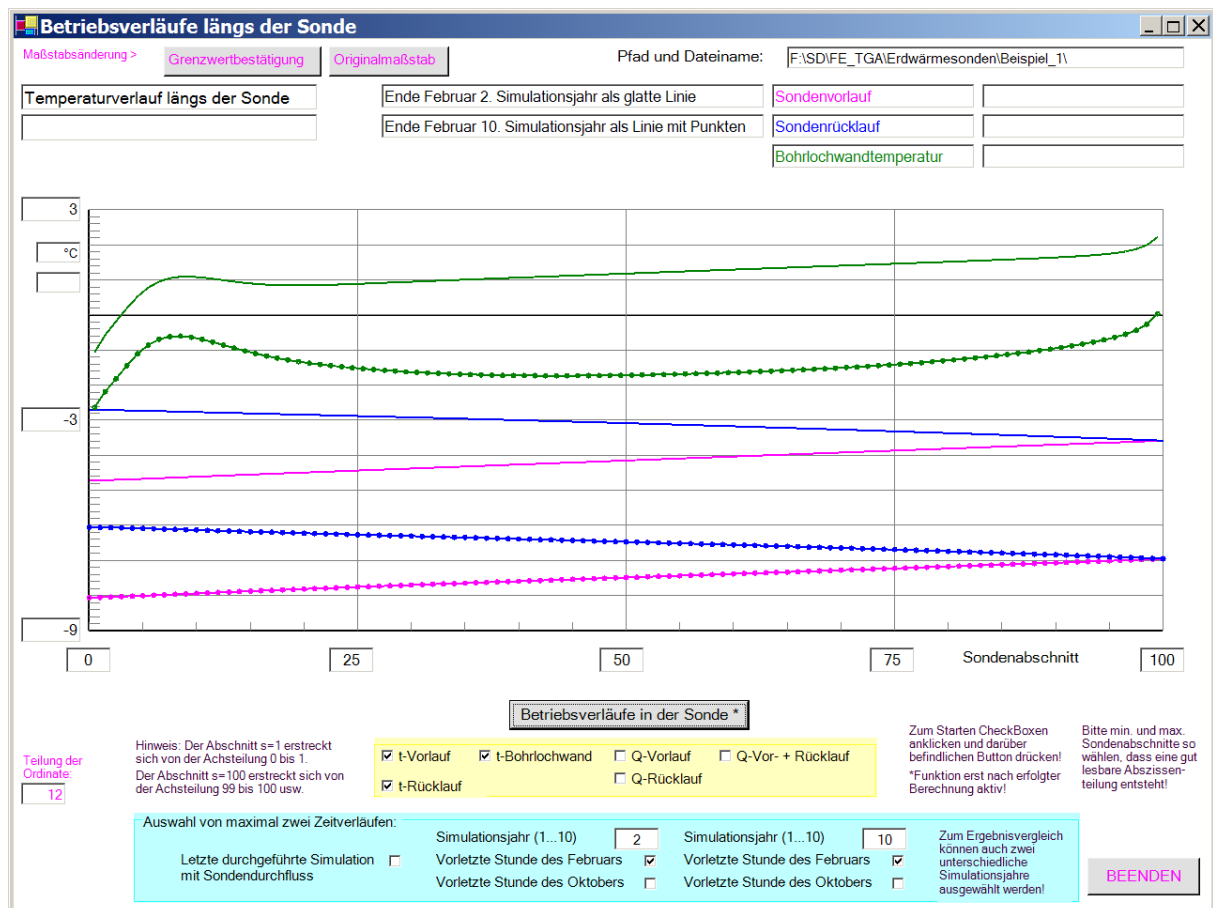


Bild 8.6 Ausgewählte Betriebsverläufe (Ende Februar des 2. und 10. Simulationsjahres) über die Sondentiefe

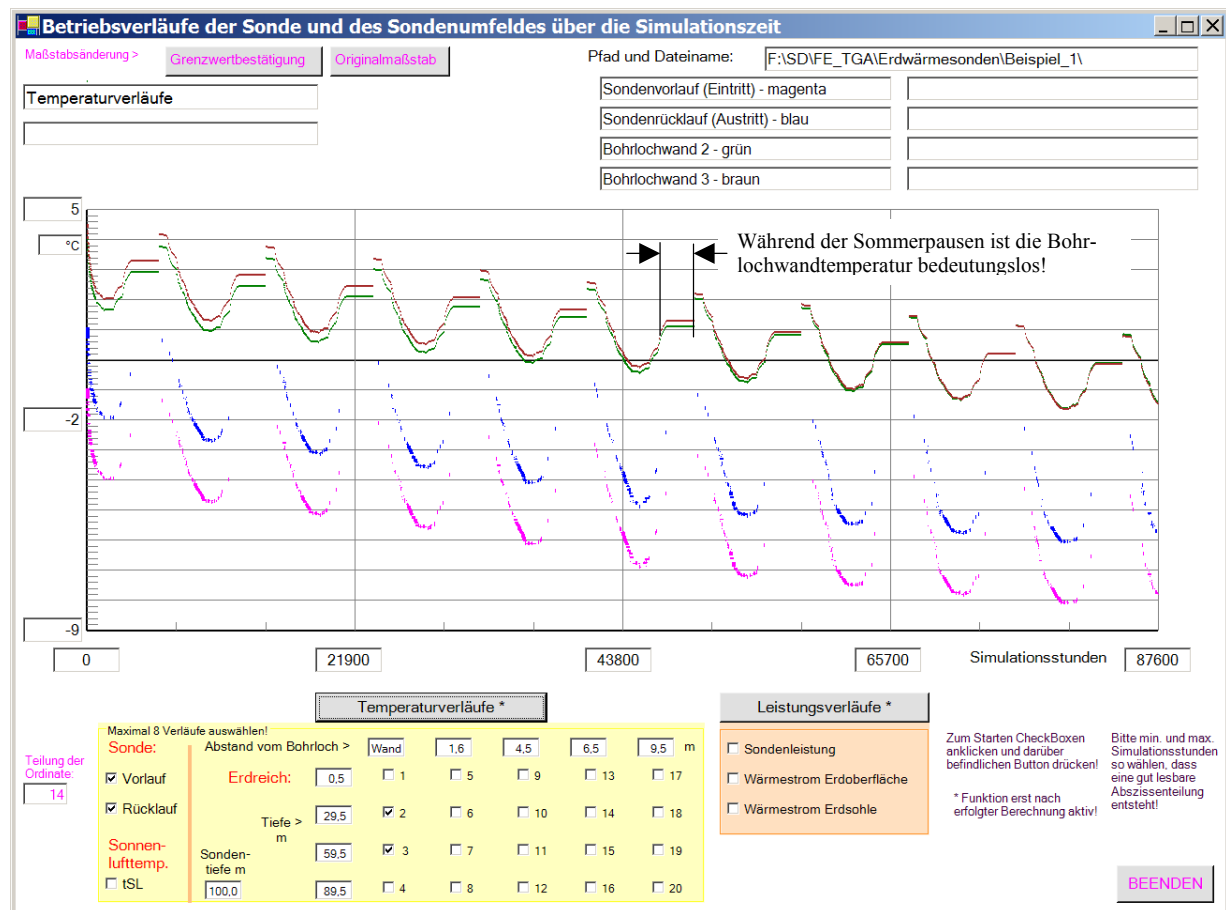
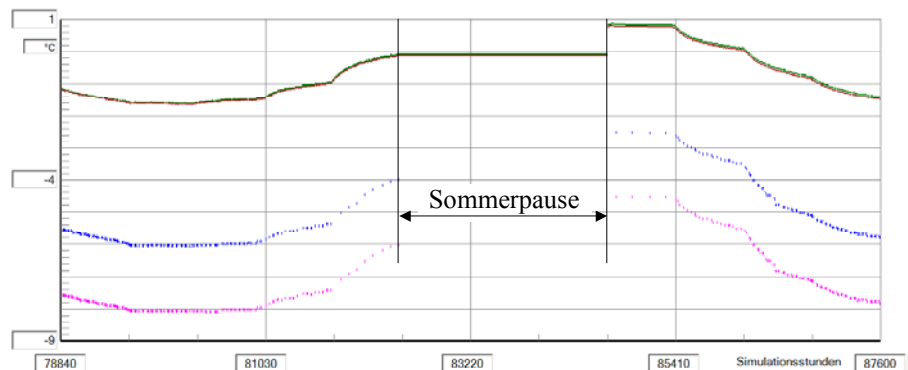


Bild 8.7 Vorlauf- und Rücklauftemperaturen am Sondenkopf sowie zwei Bohrlochwandtemperaturen in ca. 30 m und 60 m Tiefe im Verlaufe von 10 Simulationsjahren (Bild oben) bzw. im letzten Jahr (Bild rechts)



- Die sommerlichen Betriebspausen sind deutlich zu erkennen. Mit Beginn der Heizperiode sinken die Sole- und Bohrlochwandtemperaturen 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 Bohrlochwandtemperaturen während der Betriebspausen sind unreal. Entsprechend Abschnitt 6.2 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 Bohrlochwandtemperatur 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.

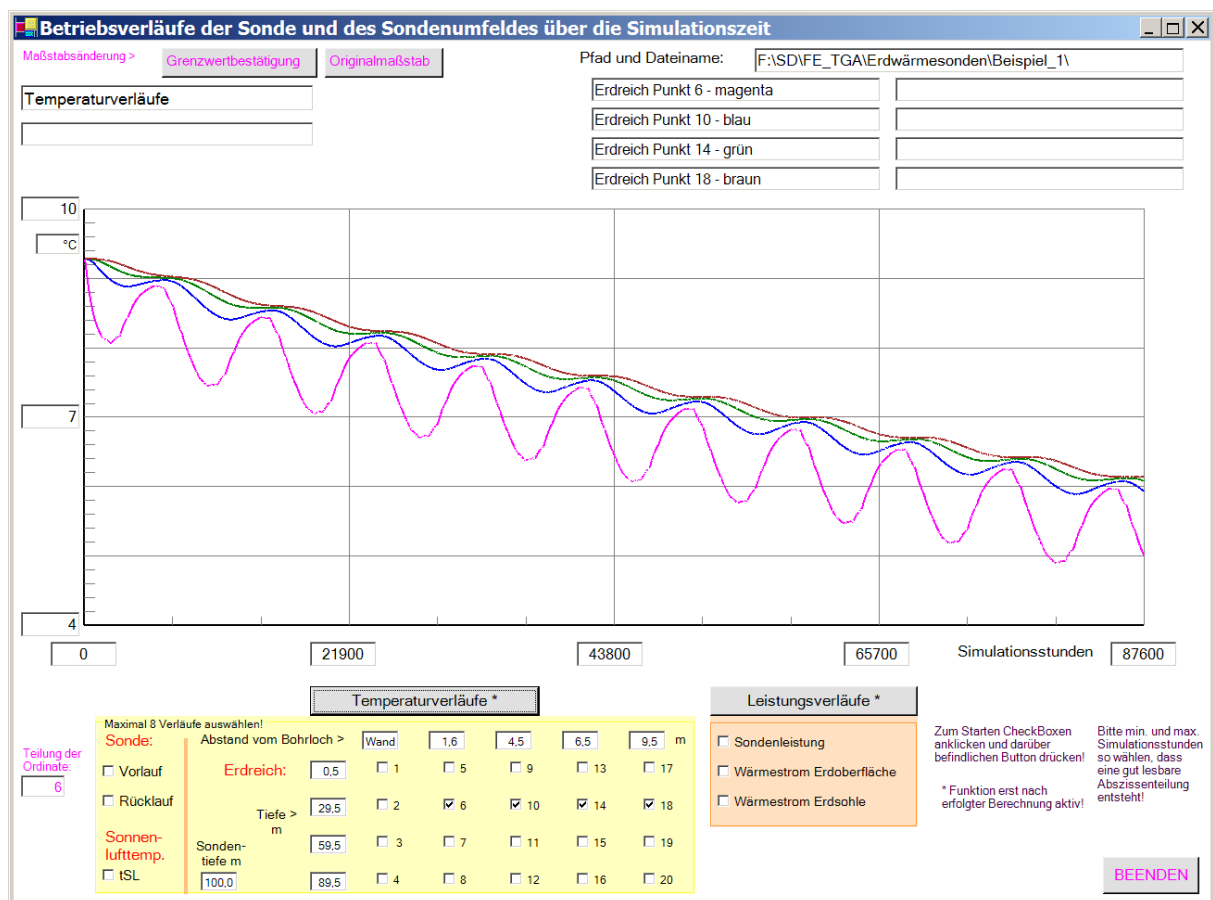
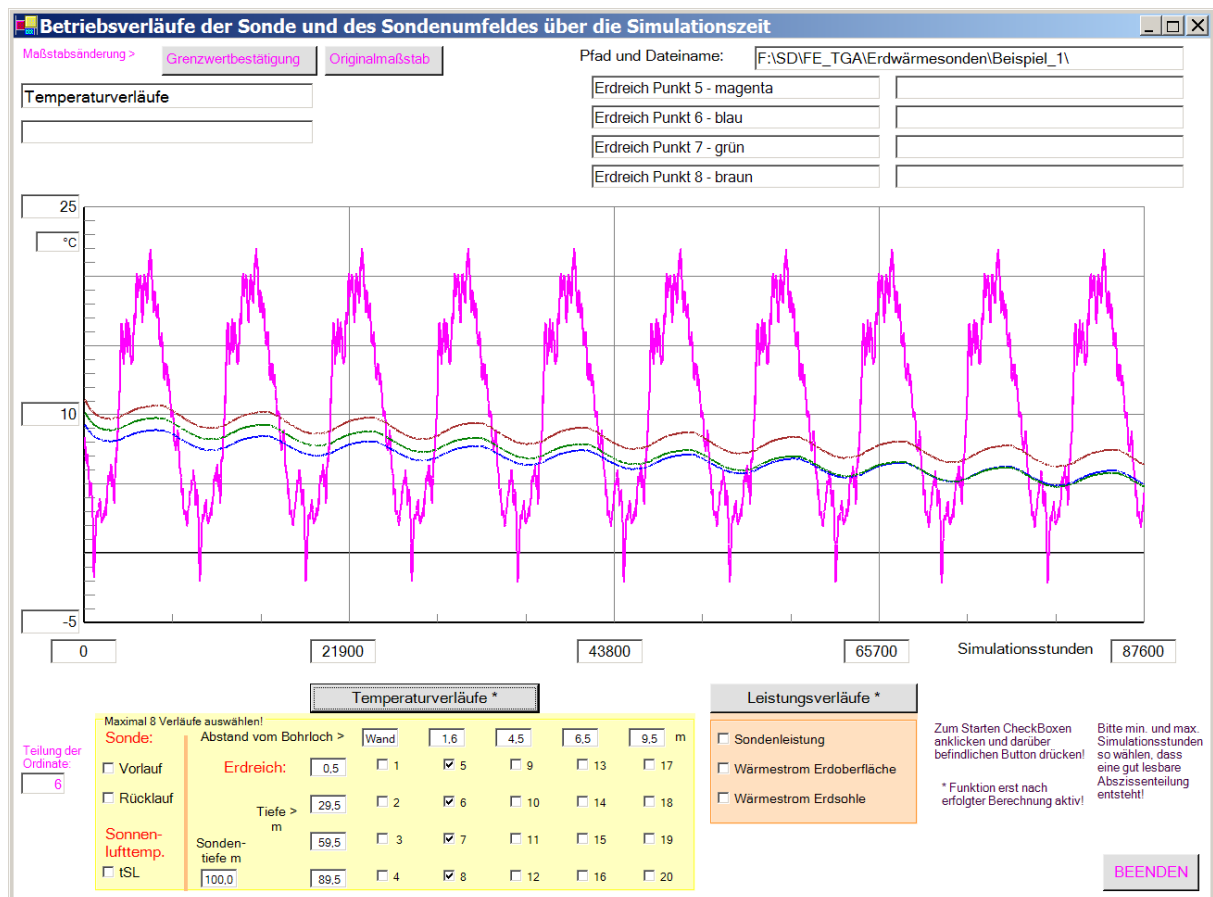


Bild 8.8 Ausgewählte Erdreichtemperaturen im Verlaufe von 10 Simulationsjahren

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. 3 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.

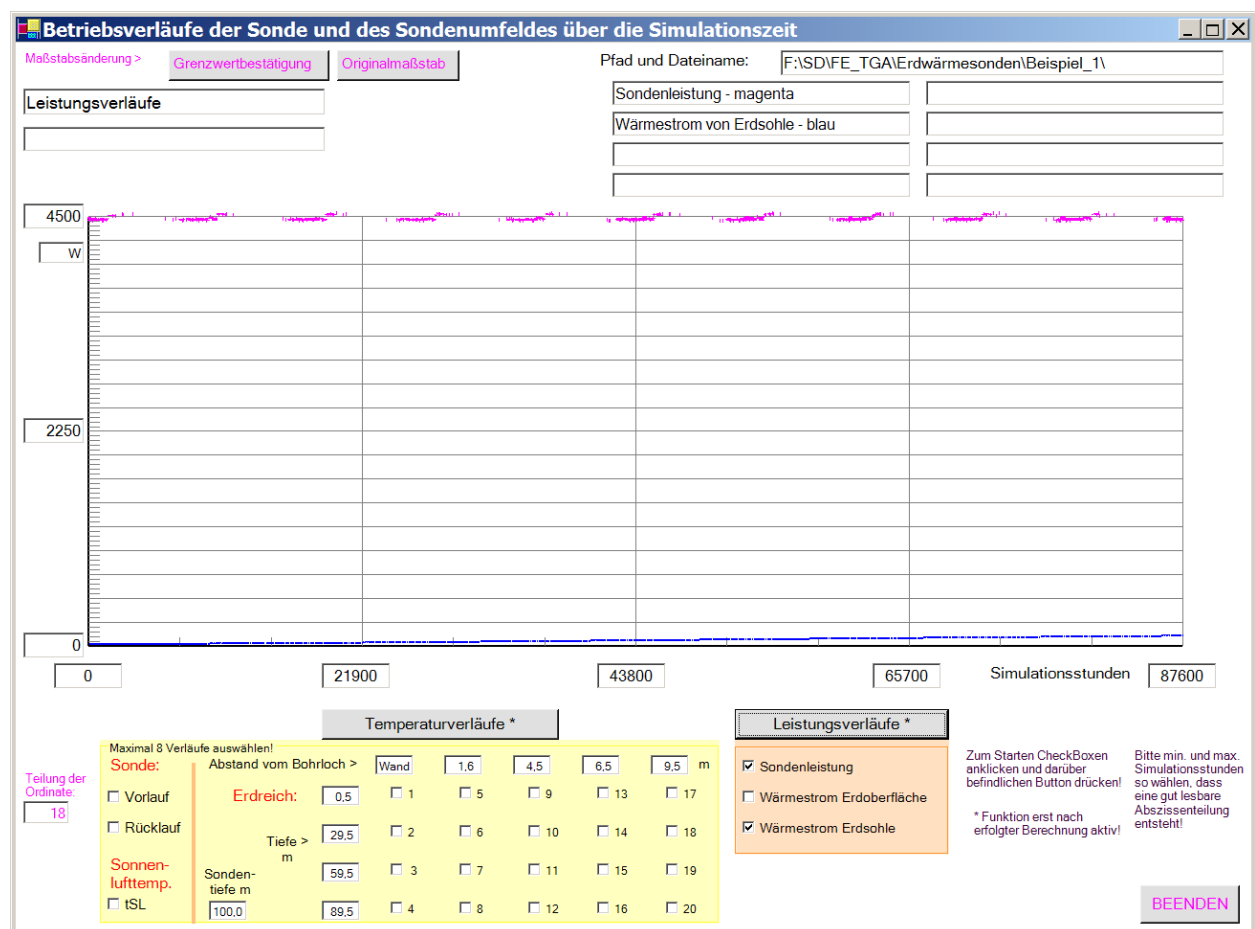


Bild 8.9 Sondenleistung und Wärmestrom an der Sohle des Simulationsgebietes in das Simulationsgebiet im Verläufe von 10 Simulationsjahren

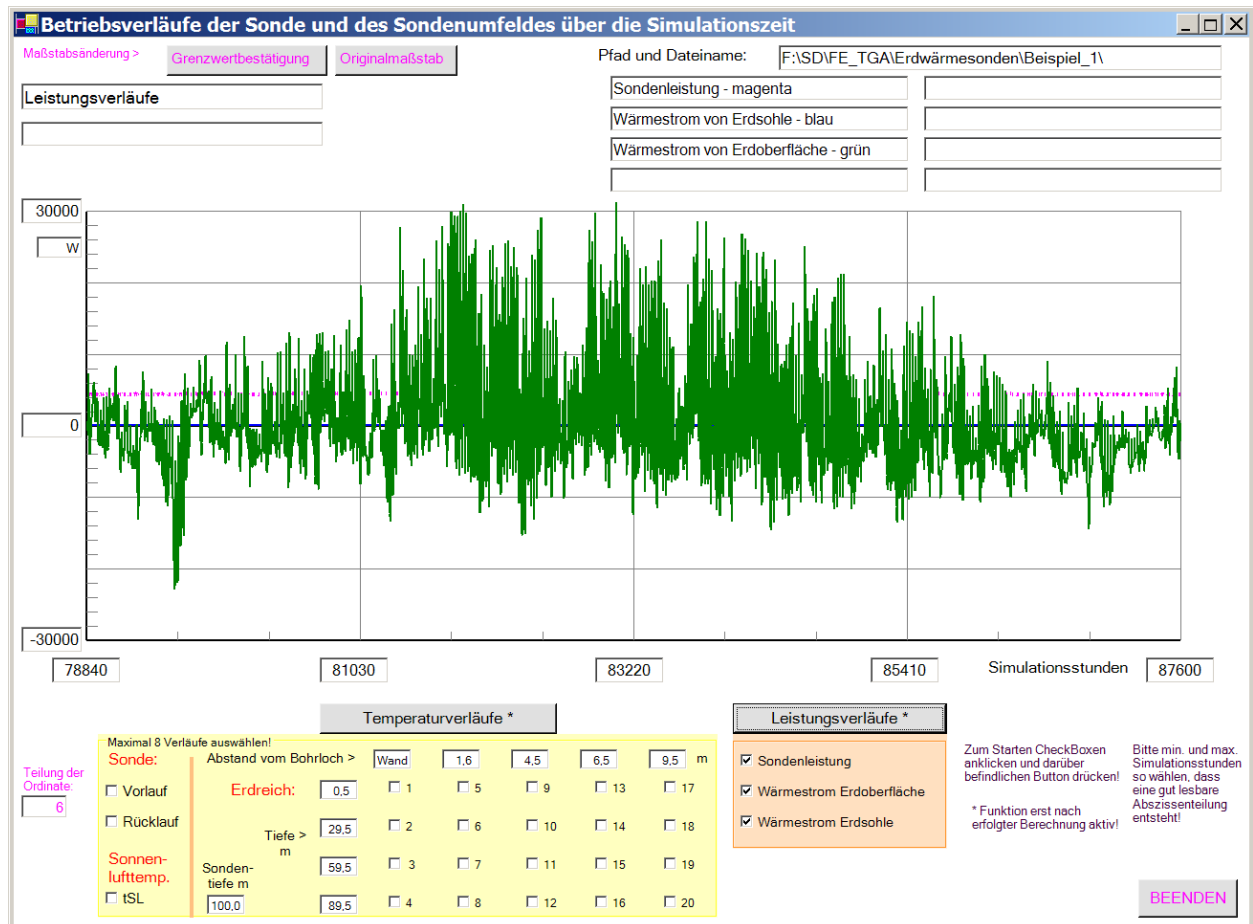


Bild 8.10 Sondenleistung, Wärmestrom an der Sohle des Simulationsgebietes und an der Erdoberfläche in das Simulationsgebiet im Verlaufe des letzten Simulationsjahres

- Die Sondenleistung entspricht während der Betriebszeit der Anforderung von 4500 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.

8.3 Variationen der Simulationsannahmen am Beispiel 1

Im Weiteren werden einige für die Simulation des Beispiels 1 getroffenen Annahmen gezielt geändert, um den Einfluss auf die Ergebnisse abschätzen zu können.

- **Feinere Gitterteilung (Beispiel 1a)**

Es wird eine doppelt so feine Gitterteilung wie im Ursprungsbeispiel gewählt. Die markanten Endergebnisse in Tabelle 8.3 zeigen als Hauptauswirkung am Ende der Simulationszeit von 10 Jahren eine Erhöhung der mittleren Soletemperatur um 0,7 K. Die Änderung der Wärmebilanzen ist marginal.

Die Unterschiede in der Soletemperatur resultieren vor allem aus der verfeinerten radialen Unterteilung. Die radialen Temperaturverläufe in 50 m Tiefe sind im Bild 8.11 gegenübergestellt.

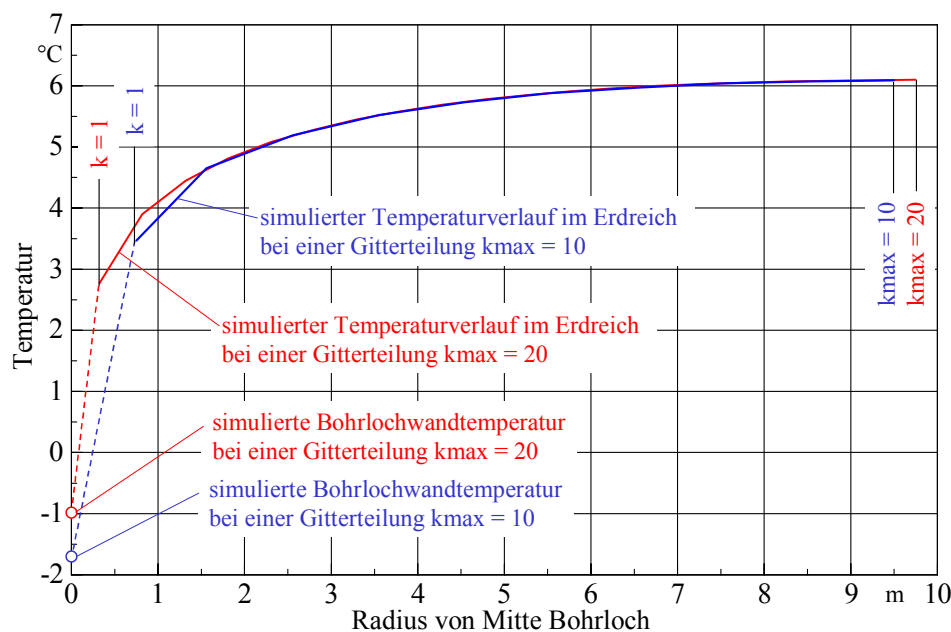


Bild 8.11 Gegenüberstellung der simulierten Temperaturverläufe in 50 m Tiefe bei unterschiedlicher Gitterteilung

Die Erdreichtemperaturen ab 1,5 m von der Bohrlochmitte nach außen sind bei den sehr unterschiedlichen Gitterteilungen deckungsgleich. **Somit nimmt die Gitterteilung kaum Einfluss auf die Wärmebilanzen.** Die hauptsächlichen Abweichungen ergeben sich bezüglich der Sole- und Bohrlochwandtemperatur. Somit wäre eine verfeinerte Gitterteilung in Sondennähe zu bevorzugen. Die Überlegungen im Abschnitt 2.1 führten zur derzeitigen Gittereinteilung.

Tabelle 8.3 Hauptergebnisse nach einer Simulationszeit von 10 Jahren bei Änderung der Gitterteilung und der Zeitschrittweite im Vergleich (magentafarbene Einträge beziehen sich auf Beispiel 1)

		Beispiel 1	Beispiel 1a	Beispiel 1b
Gitterteilung	-	$i_{\max} = 120$ $k_{\max} = 10$	$i_{\max} = 240$ $k_{\max} = 20$	$i_{\max} = 120$ $k_{\max} = 10$
Zeitschrittweite Δt	s	600	600	1200
Mittlere Soletemperatur am Sondenkopf zum Simulationsende	°C	-6,8	-6,1 0,7 K	-6,8 0,0 K
Jahressummen-Wärmebilanz nach 10 Simulationsjahren	kWh	-5764	-5750 0,2 %	-5760 0,1 %
Speicherzustand bezogen auf -10 °C nach 10 Simulationsjahren	kWh	391695	391518 0,0 %	391652 0,0 %

- **Größere Zeitschrittweite (Beispiel 1b)**

Nach programminterner Verstellung beträgt die Zeitschrittweite 1200 s statt 600 s. Wie die in Tabelle 8.3 eingetragenen Werte zeigen, wäre eine größere Zeitschrittweite problemlos anwendbar. Raschen Lastwechseln könnte dann jedoch nicht so schnell gefolgt werden.

- **Tiefer liegende Sohle des Simulationsgebietes (Beispiel 1c)**

Um die Wirkung der Randbedingung an der Sohle des Simulationsgebietes zu überprüfen, werde die Sohle von 120 m auf $L_{\text{Sim}} = 220$ m abgesenkt und dort die Temperatur um 3 K auf $t_{\text{Erdsohle}} = 15$ °C erhöht.

Auszüge aus den Ergebnislisten:

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	-7,8	-5,8	-1,6	25,2	15,9
11	-7,7	-5,9	-0,3	29,6	21,4
21	-7,5	-6,0	-1,1	25,8	18,7
31	-7,4	-6,1	-1,4	24,2	17,9
41	-7,3	-6,1	-1,5	23,2	17,8
51	-7,2	-6,2	-1,5	22,8	18,2
61	-7,1	-6,3	-1,5	22,6	18,9
71	-7,0	-6,4	-1,3	22,7	19,9
81	-6,9	-6,5	-1,1	23,1	21,2
91	-6,8	-6,6	-0,7	24,1	23,2

- Die Sondenergebnisse gelten praktisch unverändert gegenüber dem Ursprungsbeispiel (Seite 65).

Wärmeaufnahme			Temperaturspreizung
Bezug 1 U-Rohr	Sonde		
Vorlauf	Rücklauf	Gesamt	
W	W	W	K
1229	999	4455	2,0

Monatswerte

Simulations-jahr	Monat	Sonnenwärme kWh	Erdwärme kWh	Sondenarbeit kWh	
1	12	-1938	18	1523	
	Jahressummen:	1190	215	8949	Bilanz: -7544 kWh
10	12	-1907	18	1524	
	Jahressummen:	2296	215	8959	Bilanz: -6449 kWh

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\ERDWÄRMESONDEN\BEISPIEL_1C\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	-8,12	-6,09	-2,66	1,72	2,34	2,53	2,62	2,67	2,70	2,71	2,73	2,73	2,73
2	-8,11	-6,10	-2,21	2,62	3,57	3,93	4,12	4,23	4,30	4,35	4,38	4,39	4,40
99	-7,03	-6,98	-0,33	6,25	7,60	8,16	8,47	8,66	8,78	8,86	8,91	8,94	8,95
100	-7,01	-6,99	-0,03	6,84	8,00	8,44	8,69	8,84	8,95	9,01	9,06	9,08	9,09
Ende der Sonde													
101	-	-	-	8,15	8,51	8,76	8,92	9,04	9,12	9,17	9,20	9,22	9,23
102	-	-	-	8,79	8,92	9,05	9,15	9,23	9,28	9,32	9,35	9,36	9,37
103	-	-	-	9,18	9,23	9,30	9,36	9,41	9,45	9,48	9,49	9,51	9,51
157	-	-	-	13,09	13,09	13,09	13,09	13,09	13,09	13,09	13,09	13,09	13,09
158	-	-	-	13,12	13,12	13,12	13,12	13,12	13,12	13,12	13,12	13,12	13,12
159	-	-	-	13,16	13,16	13,16	13,16	13,16	13,16	13,16	13,16	13,16	13,16
160	-	-	-	13,19	13,19	13,19	13,19	13,19	13,19	13,19	13,19	13,19	13,19
219	-	-	-	14,96	14,96	14,96	14,96	14,96	14,96	14,96	14,96	14,96	14,96
220	-	-	-	14,99	14,99	14,99	14,99	14,99	14,99	14,99	14,99	14,99	14,99

Vergleichswerte des Ursprungsbeispiels:
9,19

9,35
9,50
9,65

$\Delta t = 0,03$ K/m
 $\Delta t = 0,04$ K/m
 $\Delta t = 0,03$ K/m

Erste merkbare Änderung gegenüber der natürlichen Temperaturschichtung.

Die Auswertung ist aus Tabelle 8.4 ersichtlich.

- Am Ende des 1. Simulationsjahres ist die Jahreswärmebilanz identisch mit dem Ursprungsbeispiel (Seite 66).
- In den Folgejahren bleibt der Wärmestrom von unten in das nunmehr vergrößerte Simulationsgebiet jedoch unverändert. Damit erfolgt an der tiefer liegenden Sohle keine Veränderung der natürlichen Temperaturschichtung. Sie macht sich erst in einer Tiefe von ca. 158 m mit 0,01 K nach 10 Betriebsjahren bemerkbar. Entscheidend ist der Wärmestrom in das Simulationsgebiet am Sondenfuß bei 100 m Tiefe. Dort änderte sich die Erdreichtemperatur im Verlauf der 10 betrachteten Jahre um weniger als 0,1 K. Der für den Wärmestrom entscheidende Temperaturgradient änderte sich in dieser Tiefe praktisch nicht. Damit kann die willkürlich festgelegte Tiefe des Simulationsgebietes mit 120 m während der 10-jährigen Simulationszeit akzeptiert werden.
- Die Wärmeströme an der Erdoberfläche entsprechen im Verlaufe der 10 Simulationsjahre denen des Ursprungsbeispiels.
- **Größerer Einflussbereich des Simulationsgebietes (Beispiel 1d)**

Der Abstand der Sonden im Sondenfeld wird verdoppelt, sodass sich der Radius des Simulationsgebietes von $r_{EB} = 10$ m auf 20 m vergrößert.

Auszüge aus den Ergebnislisten:

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	-4,6	-2,6	-0,2	21,6	10,3
11	-4,5	-2,7	1,6	29,0	19,0
21	-4,3	-2,7	1,2	26,4	17,5
31	-4,2	-2,8	1,1	25,3	17,5
41	-4,1	-2,9	1,0	24,6	17,9
51	-4,0	-3,0	1,1	24,2	18,6
61	-3,9	-3,1	1,2	24,0	19,4
71	-3,8	-3,2	1,3	23,9	20,4
81	-3,7	-3,3	1,4	23,9	21,6
91	-3,6	-3,4	1,6	24,2	23,0

Wärmeaufnahme			Temperaturspreizung
Bezug 1 U-Rohr	Sonde		
Vorlauf	Rücklauf	Gesamt	
W	W	W	K
1257	973	4459	2,0

Monatswerte

Simulations-jahr	Monat	Sonnenwärme kWh	Erdwärme kWh	Sondenarbeit kWh	
1	12	-7903	73	1524	
	Jahressummen:	3732	859	8950	Bilanz: -4359 kWh
10	12	-8172	129	1524	
	Jahressummen:	3142	1484	8957	Bilanz: -4330 kWh
	Speicherzustand am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:				1786766 kWh

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse zeigt Tabelle 8.4.

- Die mittlere Soletemperatur am Sondenkopf hat sich deutlich erhöht. Sie beträgt nach 10 Jahren -3,6 °C (Ursprungsbeispiel: -6,8 °C).
- Der Anteil der an der Erdoberfläche ins Simulationsgebiet eingetragenen Wärme bezogen auf die Sondenarbeit erhöhte sich auf 35 %, da sich der Einzugsbereich vergrößerte.

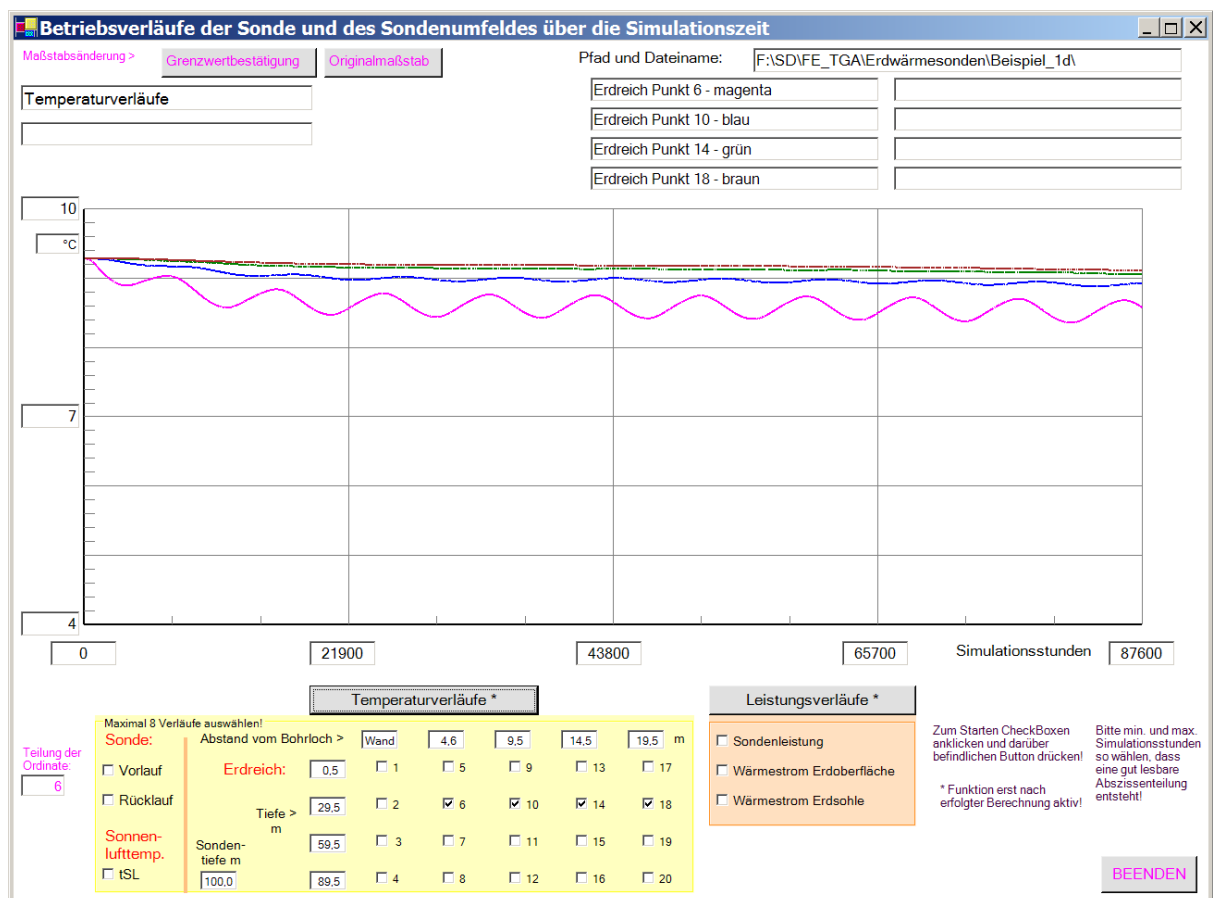
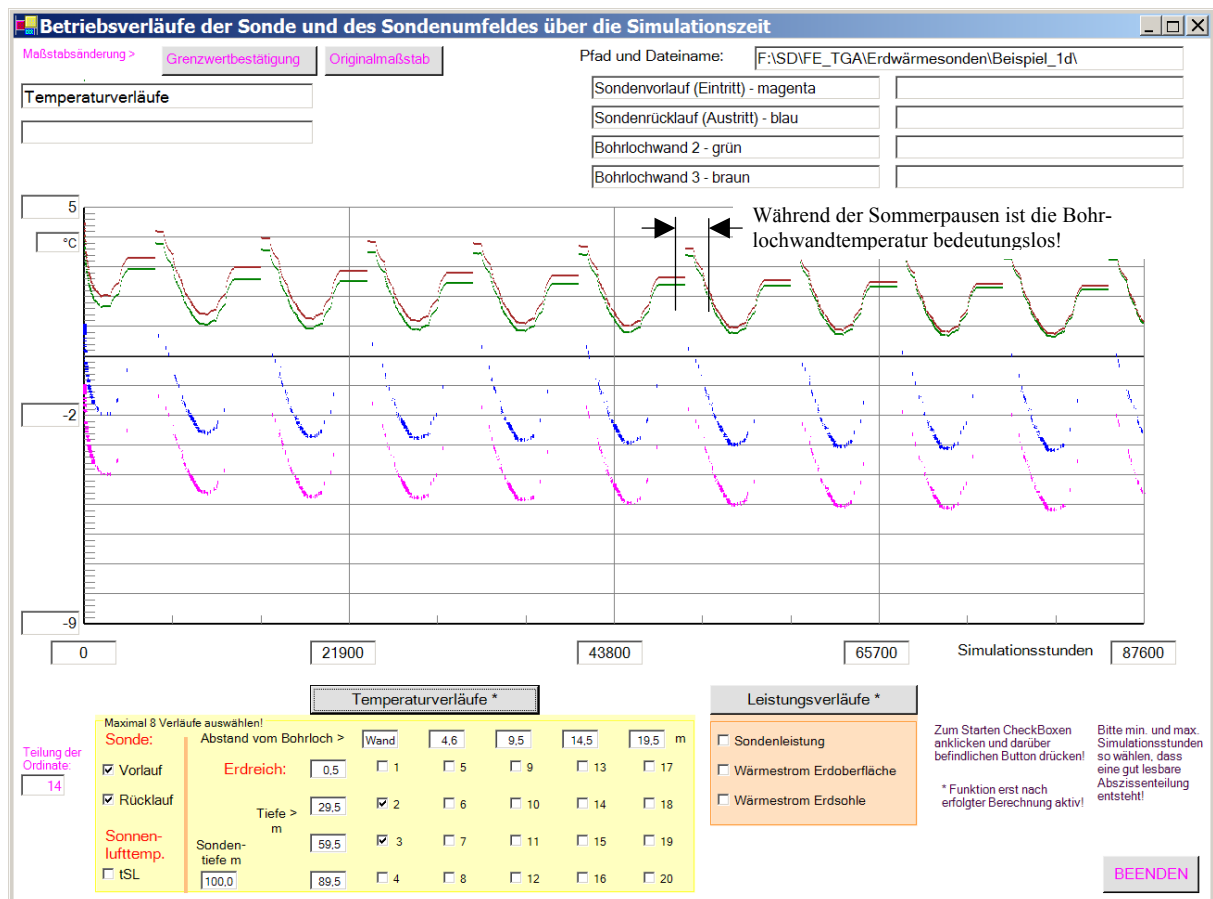


Bild 8.12 Vorlauf- und Rücklauftemperaturen am Sondenkopf sowie zwei Bohrlochwandtemperaturen (Bild oben) und ausgewählte Erdreichtemperaturen (Bild unten) im Verlaufe von 10 Simulationsjahren

- Vergleicht man die Kurvenverläufe im Bild 8.12 mit den analogen Kurven in den Bildern 8.7 und 8.8 (unten), so wird beim größeren Simulationsgebiet die schnellere asymptotische Annäherung an einen Endzustand deutlich.
- Einfluss der Starttemperaturverteilung (Beispiel 1e)

Bisher wurde zum Simulationsbeginn stets eine vertikale Temperaturverteilung im Erdreich nach Gl. (3.4) bestimmt. Diese stellt keine reale Verteilung des ungestörten Erdreiches dar, sondern dient lediglich als Starttemperaturfeld. Demgegenüber könnte auch eine Simulation zum Erzeugen von nahezu ungestörten Erdreichtemperaturen vorgeschaltet werden, wie sie zur Ermittlung für Bild 8.2 Verwendung fand. Beispielhaft wurde ausgehend von einer Verteilung nach Gl. (3.4) eine Simulation ohne Sondendurchfluss über 20 Jahre vorgenommen. Mit dem dann vorliegenden Temperaturfeld erfolgte die Simulation bei Sondenbetrieb über 10 weitere Jahre (Ergebniszusammenstellung nachfolgend und in Tabelle 8.4).

Auszüge aus den Ergebnislisten:

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	-7,5	-5,5	-1,4	24,7	15,4
11	-7,3	-5,6	-0,0	29,6	21,4
21	-7,2	-5,6	-0,8	26,1	18,9
31	-7,1	-5,7	-1,0	24,6	18,3
41	-7,0	-5,8	-1,1	23,7	18,2
51	-6,9	-5,9	-1,1	23,1	18,5
61	-6,8	-6,0	-1,1	22,8	19,1
71	-6,7	-6,1	-1,0	22,7	19,9
81	-6,6	-6,2	-0,8	23,1	21,2
91	-6,5	-6,3	-0,4	24,0	23,0

Wärmeaufnahme			Temperaturspreizung
Bezug 1 U-Rohr	Sonde		
Vorlauf	Rücklauf	Gesamt	
W	W	W	K
1235	1004	4477	2,0

Monatswerte

Simulations-jahr	Monat	Sonnenwärme kWh	Erdwärme kWh	Sondenarbeit kWh	
1	12	-2048	18	1524	
	Jahressummen:	496	215	8952	Bilanz: -8242 kWh
	Speicherzustand am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:				460427 kWh
10	12	-1925	77	1524	
	Jahressummen:	2080	870	8958	Bilanz: -6008 kWh
	Speicherzustand am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:				398626 kWh

- Die mittlere Soletemperatur am Sondenkopf beträgt -6,5 °C. Sie zeigt gegenüber dem Ursprungsbeispiel von -6,8 °C nur eine geringe Veränderung. Dies betrifft nicht nur das Simulationsende sondern auch den zeitlichen Verlauf (vgl. Bilder 8.7 und 8.13, oben).
- Der Anteil der von oben aufgenommenen Wärme zur Sondenarbeit beträgt 23 %. Die Verringerung gegenüber dem Ursprungsbeispiel wird durch die höhere Erdreichtemperatur im oberen Bereich hervorgerufen.
- Die Erdreichtemperatur in 30 m Tiefe liegt zum Simulationsbeginn um etwa 1 K und am Ende noch um 0,5 K höher als bei Ursprungsbeispiel (vgl. Bilder 8.8 und 8.13, unten).

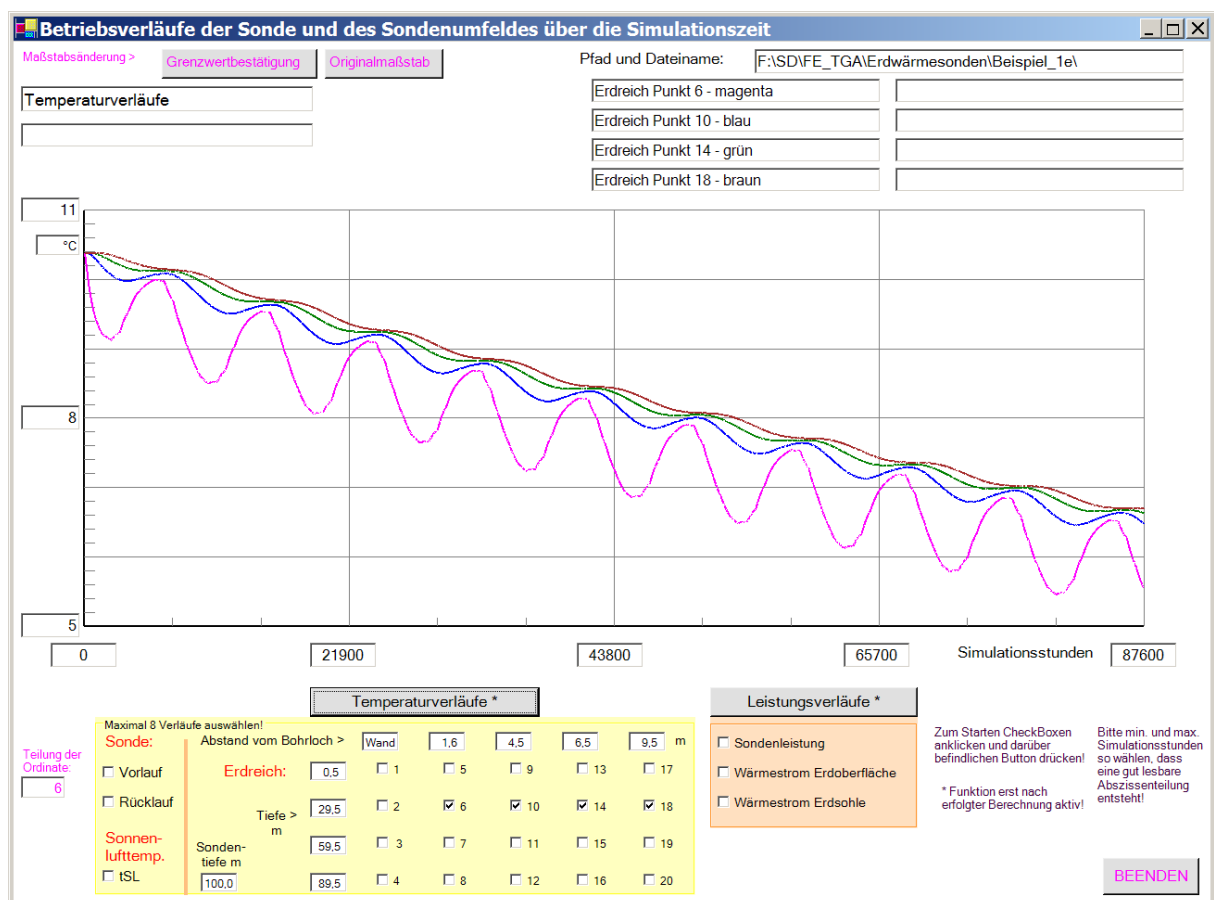
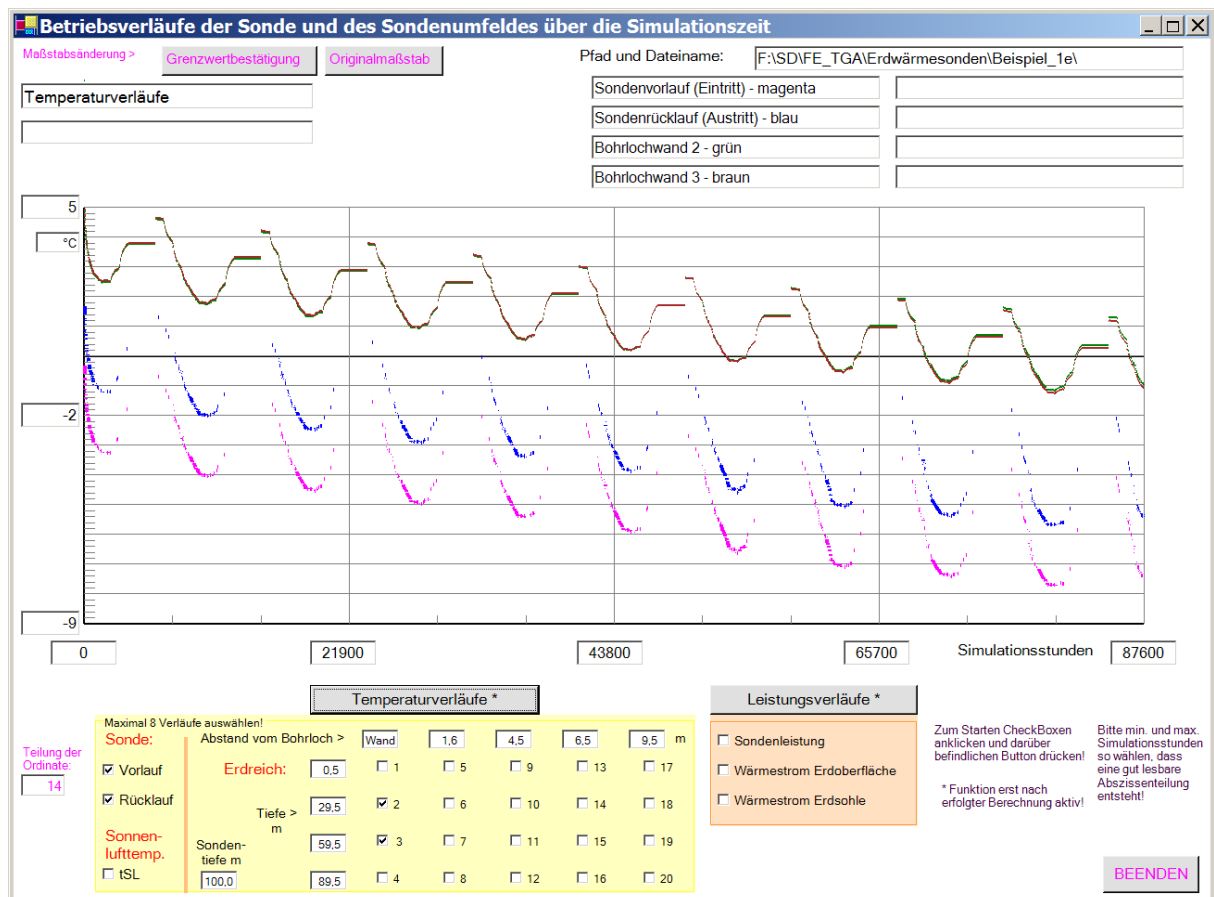


Bild 8.13 Vorlauf- und Rücklauftemperaturen am Sondenkopf sowie zwei Bohrlochwandtemperaturen (Bild oben) und ausgewählte Erdreichtemperaturen (Bild unten) im Verlaufe von 10 Simulationsjahren

Tabelle 8.4 Hauptergebnisse nach einer Simulationszeit von 10 Jahren bei Änderung des Simulationsgebietes und der Starttemperaturverteilung im Vergleich (magentafarbene Einträge beziehen sich auf Beispiel 1)

		Beispiel 1	Beisp. 1c	Beisp. 1d	Beispiel 1e
Simulationsgebiet: Tiefe / Radius	m	120 / 10	220 / 10	120 / 20	120 / 10
Starttemperaturverteilung	-	Gl. (3.4)	Gl. (3.4)	Gl. (3.4)	20 Jahre Simulation ohne Sondenbetrieb
Mittlere Soletemperatur am Sondenkopf zum Simulationsende	°C	-6,8	-6,8 0,0 K	-3,6 3,2 K	-6,5 0,3 K
Wärmestromanteil von oben bezogen auf die Sondenarbeit nach 10 Simulationsjahren	%	26 %	26 %	35 %	23 %

- Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass in der Regel eine um 20 m tiefer liegende Sohle des Simulationsgebietes unter dem Sondenfuß und auch die einfache Annahme einer linearen Erdreichtemperaturverteilung nach Gl. (3.4) zum Simulationsbeginn ausreichend genau sind, um das wärmetechnische Verhalten der Erdwärmesonde beurteilen zu können.
- Der radiale Einflussbereich der Sonde sollte möglichst exakt erfasst werden. Dies ist bei einem geometrisch definierten Sondenfeld leicht möglich. Ansonsten werden Variantenrechnungen mit unterschiedlichen r_{EB} empfohlen.

8.4 Langzeitsimulation über 50 Jahre

Beispiel 1 ($r_{EB} = 10$ m) und Beispiel 1d ($r_{EB} = 20$ m) werden wiederholt für jeweils 10 Jahre abgearbeitet, wobei die Erdreich- und Sondenaten zu Beginn stets auf den Enddaten der Vorgängervariante aufbauen. Als markante Größen sind im Bild 8.14 die mittlere Soletemperatur am Sondenkopf und im Bild 8.15 die jährlich ins Simulationsgebiet eingetragene "Sonnenenergie" visualisiert.

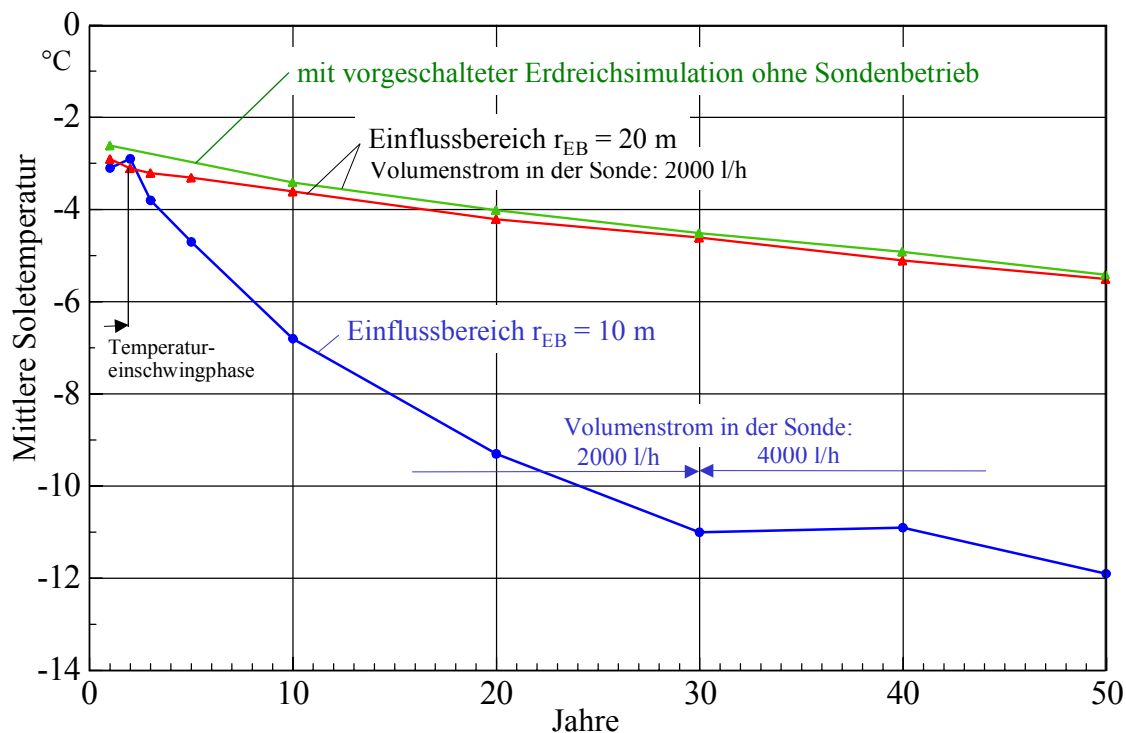


Bild 8.14 Mittlere Soletemperatur am Sondenkopf im Verlauf von 50 simulierten Betriebsjahren. Da beim Beispiel 1 ($r_{EB} = 10$ m) ein zeitlich starkes Absinken der mittleren Soletemperatur auftritt, wurde nach 30 Jahren der Sondenumschlag verdoppelt, wodurch sich die Spreizung halbiert.

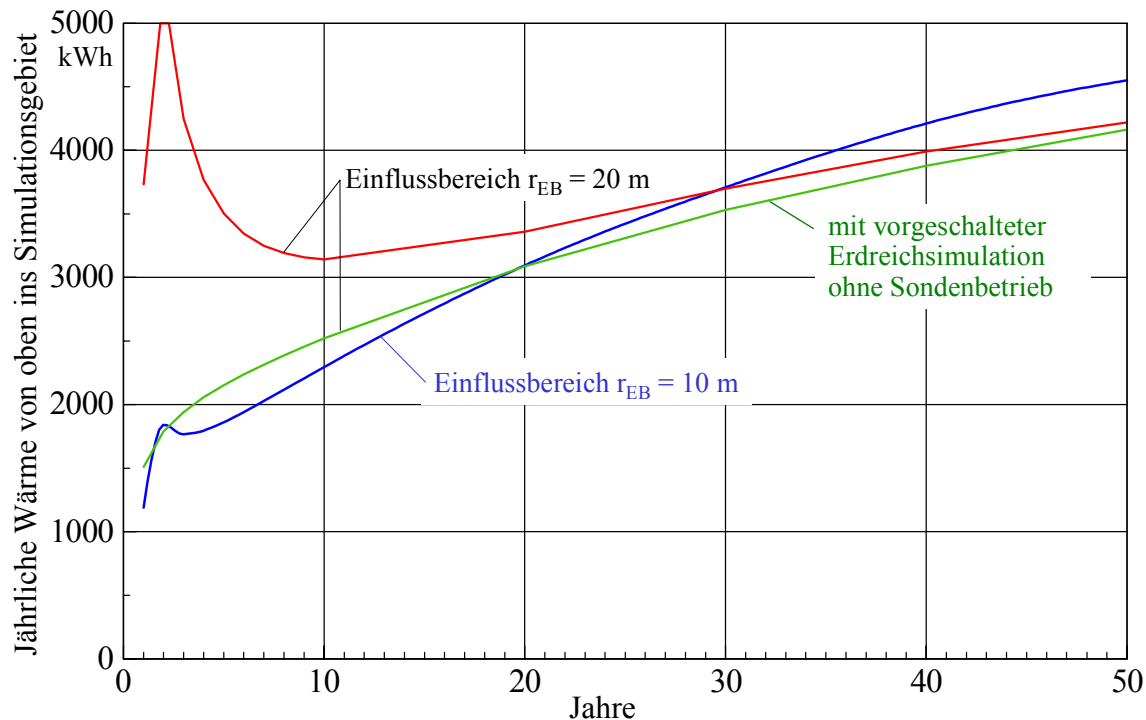


Bild 8.15 Jährlich an der Erdoberfläche zugeführte Wärmeenergie

Die Starttemperaturverteilung macht sich stark bemerkbar, vor allem wenn eine große Oberfläche besteht. Dies wird bei $r_{EB} = 20$ m besonders deutlich. Aus diesem Grund wurde bei einer erneuten Simulation eine 10-jährige Erdreichsimulation ohne Sondenbetrieb vorgeschaltet.

- Die Änderung der mittleren Soletemperatur nimmt mit der Zeit ab, dennoch liegt auch nach 50 Jahren noch kein stationärer Vorgang vor. Die Erhöhung des Durchsatzes wirkt sich positiv auf die Soletemperatur aus.
- Die an der Erdoberfläche zugeführte Energie wächst von Jahr zu Jahr. Betrag beim Beispiel $r_{EB} = 10$ m ihr Anteil nach 10 Jahren 26 % der Sondenarbeit, steigt dieser nach 50 Jahren auf 51 % an. Ein Zeichen dafür, dass letztlich die "Erdwärmennutzung" in den betrachteten Tiefen auch auf die "Sonnenenergienutzung" zurückzuführen ist.
- Da die Oberflächentemperatur die Energieaufnahme von oben sehr stark beeinflusst, macht sich die Starttemperaturverteilung außerordentlich lange bemerkbar. Verkürzend wirkt eine vorgeschaltete Simulation ohne Sondenbetrieb (Bild 8.15). Dieses Phänomen darf man aber nicht überbewerten, da der Wärmeaustausch zwischen Erdreich und Sonde davon kaum betroffen ist, wie die Verläufe der mittleren Soletemperatur (Bild 8.14) verdeutlichen.
- Beispiel 1 zeigt, dass die Sondenleistung von 45 W/m unter den genannten Betriebsbedingungen und dem Einflussbereich von $r_{EB} = 10$ m zu hoch angesetzt ist. Eine Möglichkeit besteht in der Vergrößerung des Sondenabstandes. Wirtschaftlich gestaltet sich vor allem eine kombinierte "Wärme-/Kältenutzung".

8.5 Kombinierte Wärme-/Kältenutzung beim Sondenbetrieb (Beispiel 2)

Im Weiteren wird aufbauend auf das Beispiel 1 eine veränderte Nutzung simuliert. Während die Wärmeentnahme im Heizfall gleich bleibt, wird im Sommer zusätzlich Wärme über die Sonde ins Erdreich gebracht. Sie kann beispielsweise aus der aktiven Bauteilkühlung oder aus Kälteprozessen

stammen.

Die im Beispiel 2 angenommenen **zeitabhängigen Belastungen** sind den nachfolgenden Kontrollausdrucken zu entnehmen.

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\ERDWÄRMESONDEN\BEISPIEL_2\

Monatliche Verläufe der geforderten Sondenleistung (alle U-Rohre) in W

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	Tagesstunde																							
Januar					4500	4500	4500		4500		4500		4500		4500		4500		4500	4500	4500		4500	
Februar					4500	4500	4500		4500		4500		4500		4500		4500		4500		4500		4500	
März						4500	4500		4500		4500				4500		4500		4500		4500		4500	
April							4500		4500		4500						4500		4500		4500		4500	
Mai								4500		4500		4500						4500		4500		4500		
Juni								4500											4500					
Juli								-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	
August								-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	
September								-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	-5000	
Oktober							4500																	
November							4500		4500								4500		4500		4500			
Dezember						4500	4500		4500		4500				4500		4500		4500		4500		4500	

Monatliche Verläufe des Flüssigkeitsdurchflusses (alle U-Rohre) in l/h

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	Tagesstunde																							
Januar					2000	2000	2000		2000		2000		2000		2000		2000		2000	2000	2000		2000	
Februar					2000	2000	2000		2000		2000		2000		2000		2000		2000		2000		2000	
März						2000	2000		2000		2000				2000		2000		2000		2000		2000	
April							2000		2000		2000						2000		2000		2000			
Mai								2000										2000		2000		2000		
Juni																			2000					
Juli								2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	
August								2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	
September								2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	
Oktober																								
November								2000		2000							2000		2000		2000			
Dezember						2000	2000		2000		2000				2000		2000		2000		2000		2000	

Ergebnisdrucke und Grafiken des Beispiels

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\ERDWÄRMESONDEN\BEISPIEL_2\

Rohr- und Bohrlochdaten:

rBL	da	delR	lamR	delDV	delDR	lamD	a2	b2	a1	b1	a2D	b2D	a1D	b1D
mm	mm	mm	W/(mK)	mm	mm	W/(mK)								
75	25	2,3	0,35	0,0	0,0	0,000	4,367	-0,676	4,367	-0,676	0,000	0,000	0,000	0,000

Erdschichten:

Schicht	Dichte	Wärmeleitfähigkeit	Wärmeleitfähigkeit	Wärmekapazität	Schmelz-	Schicht-	Wärmeleitfähigkeit
	kg/m³	fest	flüssig	fest	wärme	tiefe	Bohrlochfüllung
		W/(mK)	W/(mK)	J/(kgK)	kJ/(kg)	m	W/(mK)
1	2400	2,60	2,60	900	900	0,0	1,00
2	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,00
3	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,00
4	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,00
5	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,00
6	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,00
7	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,00
8	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,00

Sondendaten:

Sondenlänge	Abschnitte	Flüssigkeit	Eintritts-	Sonden-	Durchfluss	U-Rohranzahl
gesamt	gesamt	gesamt	temperatur	leistung		
m	m		°C	W	l/h	
100,0	0,0	100	0	Tyfocor L25	Z-funk.	Z-funk.
						2

Es erfolgt die Anpassung an die vorgegebene Sondenleistung!

Zeitschrittweite: 600 s

Daten zum Simulationsgebiet und zur Simulationszeit:

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

Datei Sonnenlufttemperatur: F:\SD\FE_TGA\Erdwärmesonden\Beispiel_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	-4,3	-2,3	-0,0	21,2	9,8
11	-4,2	-2,4	1,9	29,4	19,2
21	-4,1	-2,4	1,5	26,8	17,8
31	-3,9	-2,5	1,4	25,7	17,8
41	-3,8	-2,6	1,3	24,9	18,1
51	-3,7	-2,7	1,4	24,4	18,7
61	-3,6	-2,8	1,4	24,0	19,5
71	-3,5	-2,9	1,5	23,8	20,4
81	-3,4	-3,0	1,6	23,7	21,4
91	-3,3	-3,1	1,8	23,9	22,8

Wärmeaufnahme			Temperaturspreizung
Bezug 1 U-Rohr	Sonde		
Vorlauf	Rücklauf	Gesamt	
W	W	W	K
1261	974	4470	2,0

Monatswerte

Simulations- jahr	Monat	Sonnenwärme kWh	Erdwärme kWh	Sondenarbeit kWh	
1	1	-2733	18	1662	
.					
1	12	-1967	18	1524	
.					
.	Jahressummen:	975	215	2989	Bilanz: -1800 kWh
.	Speicherzustand	am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:			455092 kWh
2	12	-2000	20	1524	
.					
.	Jahressummen:	1394	221	2994	Bilanz: -1379 kWh
.	Speicherzustand	am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:			453721 kWh
7	12	-2023	35	1524	
.					
.	Jahressummen:	984	392	2996	Bilanz: -1620 kWh
.	Speicherzustand	am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:			445585 kWh
8	12	-2022	37	1524	
.					
.	Jahressummen:	986	423	2995	Bilanz: -1585 kWh
.	Speicherzustand	am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:			444008 kWh
9	12	-2022	40	1524	
.					
.	Jahressummen:	995	453	2994	Bilanz: -1547 kWh
.	Speicherzustand	am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:			442470 kWh
10	12	-2020	42	1524	
.					
.	Jahressummen:	1007	481	2993	Bilanz: -1506 kWh
.	Speicherzustand	am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:			440974 kWh

- Die **jährliche** Gesamtsondenarbeit liegt bei ca. 3000 kWh. Gefordert ist eine Heizarbeit von $4500 \text{ W} \times 1997 \text{ h} = 8987 \text{ kWh}$ und eine Kühlarbeit von $-5000 \text{ W} \times 1196 \text{ h} = -5980 \text{ kWh}$. Damit verbleibt ein positiver Wärmeentzug von 3007 kWh, der durch die programminterne "Leistungsregelung" in sehr guter Näherung realisiert wird.

- Die von oben und unten in das Simulationsgebiet strömende Wärme ist aufgrund der Leistungskompensation (Heizen und Kühlen) näherungsweise halb so groß wie im Beispiel 1.

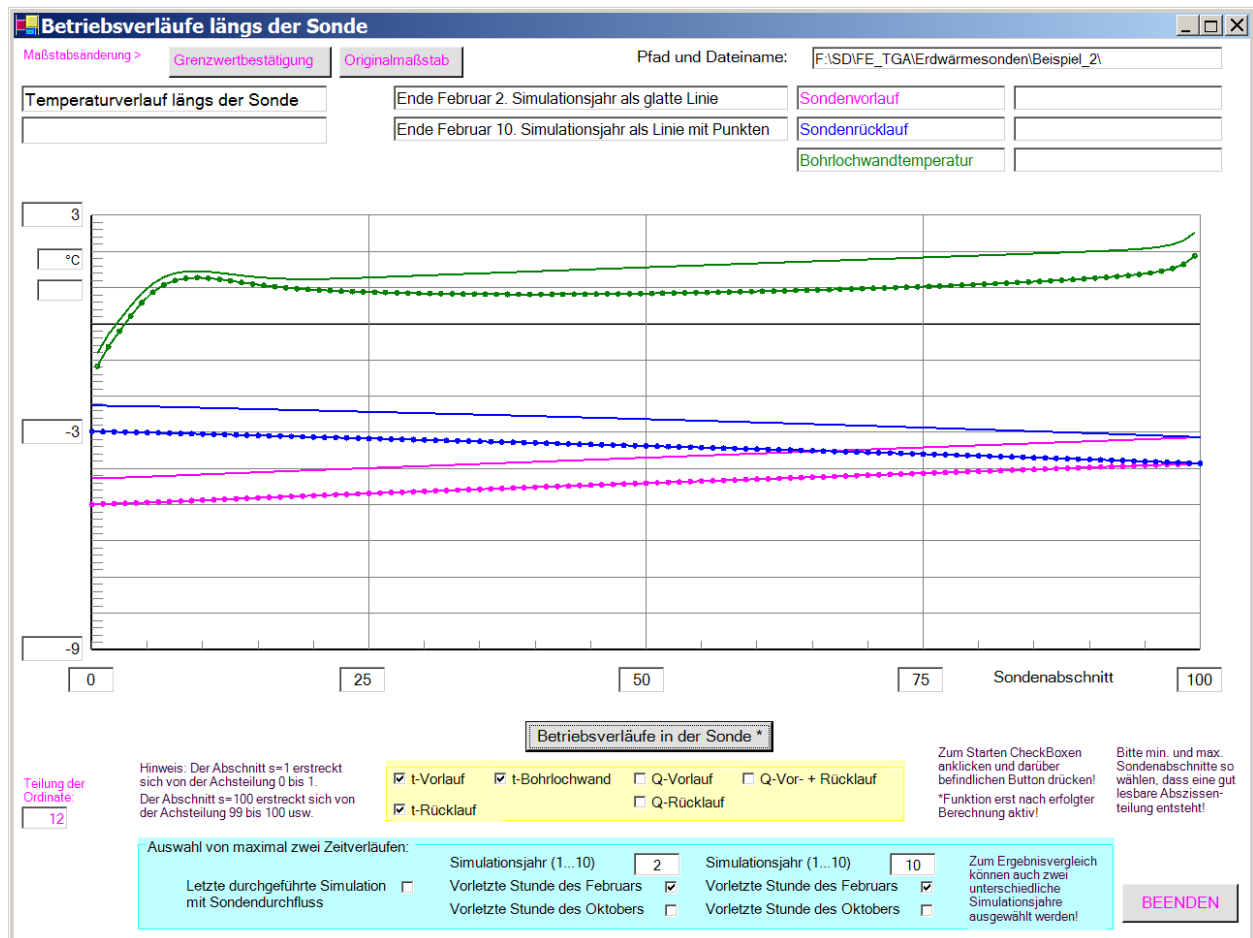


Bild 8.16 Vor- und Rücklauftemperatur am Sondenkopf und Bohrlochwandtemperatur (Ende Februar des 2. und 10. Simulationsjahres) über die Sondentiefe

- Im Zeitraum von 8 Jahren sank bei reinem Heizbetrieb die Soletemperatur um über 3 K ab (Bild 8.6), jetzt reduzierte sich der Wert auf <1 K.

Aussagen zu den Bildern 8.17 bis 8.19:

- Die Sohletemperaturen zeigen über 10 Jahre nur noch einen geringen Temperaturabfall, welcher sich im Heizfall negativ und im Kühlfall positiv bemerkbar macht (Bild 8.17). Die Ursache liegt an der nicht ausgeglichenen Wärmebilanz über das Jahr, da die Kühlarbeit nur etwa 2/3 der Heizarbeit beträgt. Vergleichend sollte das Bild 8.7 betrachtet werden, dass bei reinem Heizbetrieb einen sehr großen Temperaturabfall zeigt.
- Die Mittelwerte der Erdreichtemperaturen in ca. 30 m Tiefe (Bild 8.18) fallen in 10 Jahren um nur etwa 0,4 K ab. Als Vergleich dient das Bild 8.8 (unten).
- Bild 8.18 zeigt weiterhin sehr deutlich, wie die Temperaturschwingung, die von der wechselnden Sondenbelastung ausgeht, in radialer Richtung phasenverschoben und gedämpft ist.
- Bild 8.19 veranschaulicht die genaue Einhaltung der geforderten Sondenleistung. Außerdem wird nochmals der sehr geringe Wärmestrom von der Sohle in das Simulationsgebiet deutlich.

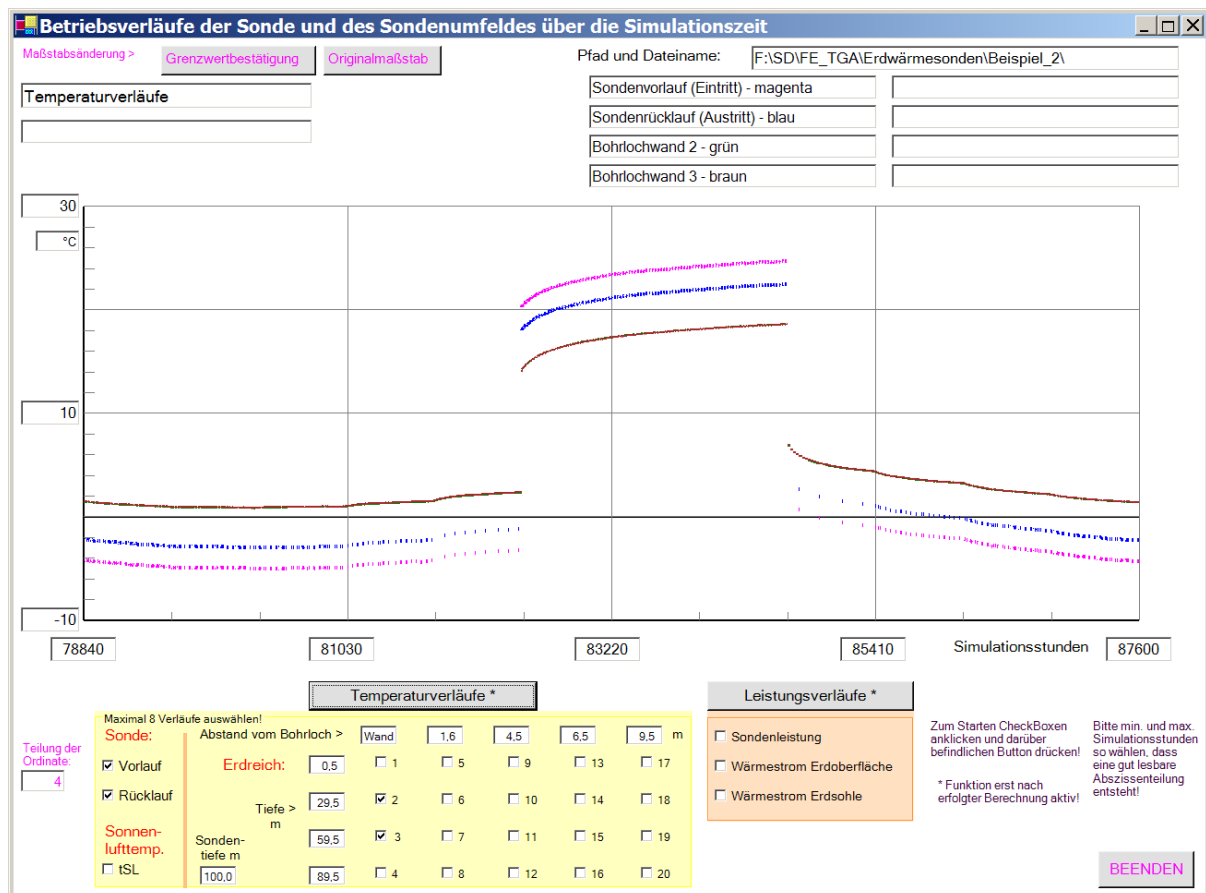
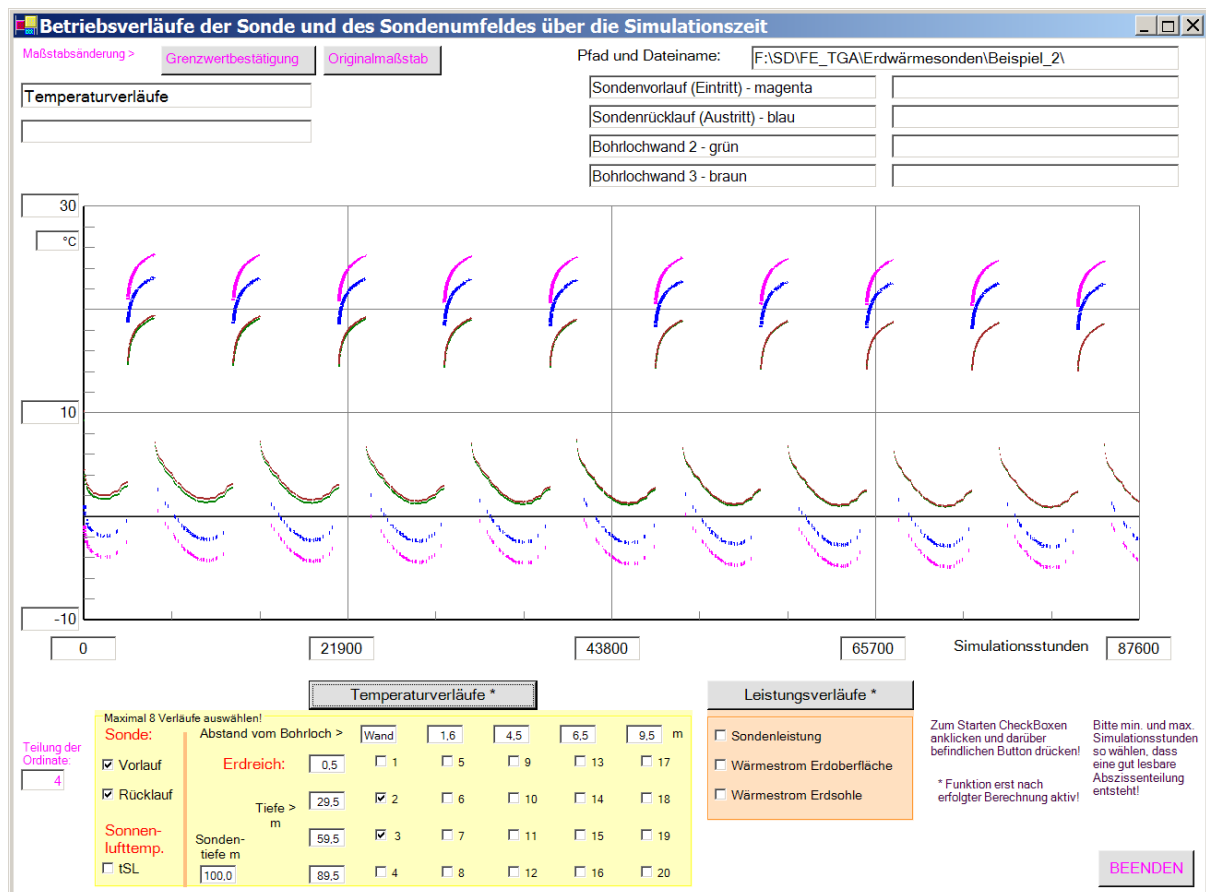


Bild 8.17 Vorlauf- und Rücklauftemperaturen am Sondenkopf sowie zwei Bohrlochwandtemperaturen in ca. 30 m und 60 m Tiefe im Verlaufe von 10 Simulationsjahren (Bild oben) bzw. im letzten Jahr (Bild unten)



Bild 8.18 Ausgewählte Erdreichtemperaturen in ca. 30 m Tiefe im Verlaufe von 10 Simulationsjahren

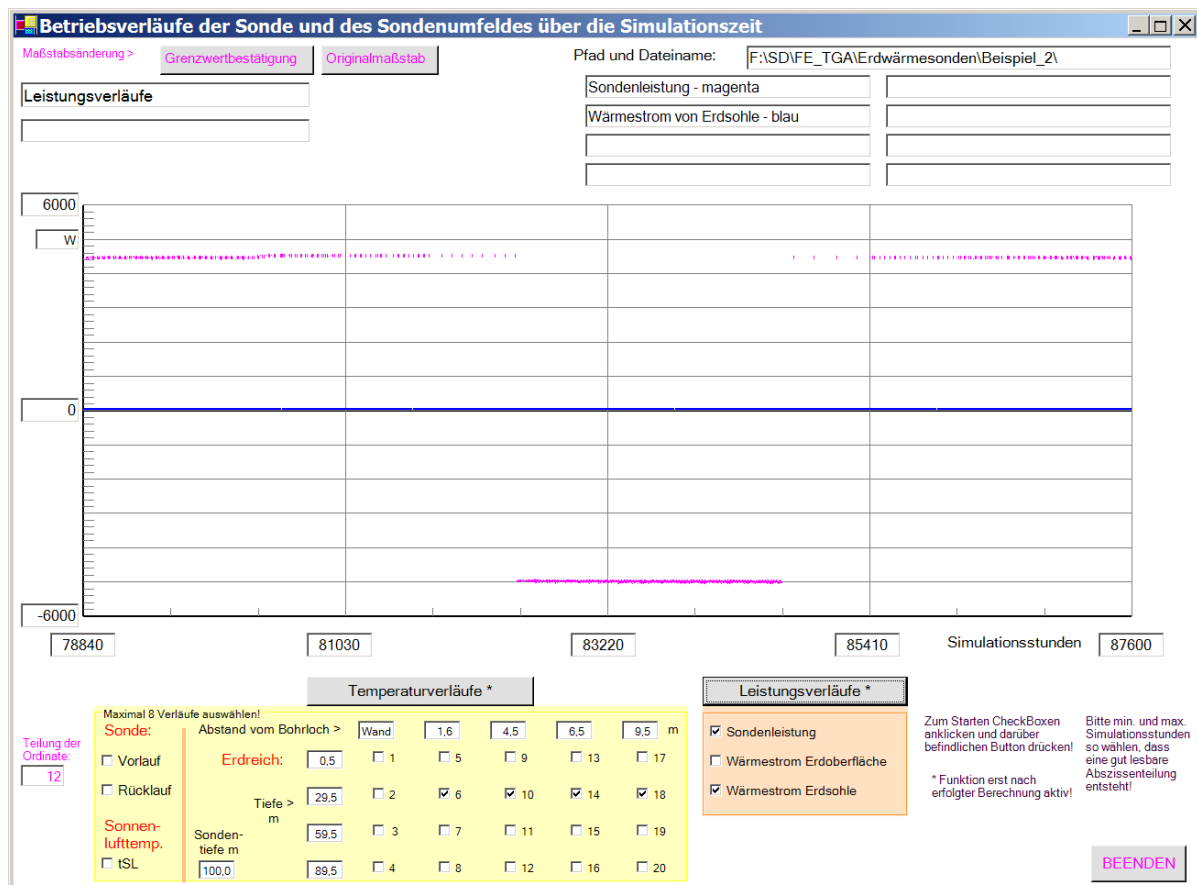


Bild 8.19 Heiz-/Kühlleistungsverlauf sowie Wärmestrom von der Erdsohle im 10. Simulationsjahr

8.6 Testbeispiel zur weiteren Demonstration der Simulationsmöglichkeiten

Es handelt sich hierbei um ein [konstruiertes Beispiel](#), um die noch nicht vorgestellten Berechnungsmöglichkeiten hervorzuheben.

- Es wird eine einfache U-Rohr-Sonde nach Bild 4.7 betrachtet, deren Rücklaufleitung vom Sondenkopf ausgehend eine 5 m lange Wärmedämmung (Dicke 10 mm) besitzt.
- Die obere 12 m dicke Erdschicht entspricht nach Tabelle 8.1 der Bodenart I, die aufgrund des Wasseranteils gefrieren kann. Es folgen dann zwei unterschiedliche Festgesteinsschichten.
- Die in den bisherigen Beispielen verwendete Sonnenlufttemperatur wurde für alle Jahresstunden um 5 K abgesenkt. Die neue Datei tSL.dat befindet sich im Ordner "Testbeispiel".
- Vorgegeben sind zu den Betriebsstunden gemäß Tabelle 8.2 die stets konstanten Werte: Volumenstrom 1000 l/h (nur etwa 0,25 m/s) und Soleeintrittstemperatur -6 °C.

Ergebnisauszüge und Auswertung:

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\ERDWÄRMESONDEN\TESTBEISPIEL\

Rohr- und Bohrlochdaten:

rBL	da	delR	lamR	delDV	delDR	lamD	a2	b2	a1	b1	a2D	b2D	a1D	b1D
mm	mm	mm	W/(mK)	mm	mm	W/(mK)								
75	32	2,9	0,35	0,0	10,0	0,040	5,030	-1,272	5,030	-1,272	8,320	-2,064	5,542	-2,070

Erdschichten:

Schicht	Dichte	Wärmeleitfähigkeit	Wärmeleitfähigkeit	Wärmekapazität	Wärmekapazität	Schmelz-	Schicht-	Wärmeleitfähigkeit
	kg/m³	fest	flüssig	fest	flüssig	wärme	tiefe	Bohrlochfüllung
		W/(mK)		J/(kgK)		kJ/(kg)	m	W/(mK)
1	1630	1,66	1,50	917	1046	20,5	12,0	1,00
2	2200	2,00	2,00	900	900	0,0	40,0	1,00
3	2400	2,60	2,60	900	900	0,0	120,0	1,00
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-	Sonden-	Durchfluss	U-Rohranzahl
gesamt	gesamt		temperatur	leistung	l/h	
m	m		°C	W		
100,0	5,0	100	5	Tyfocor L25	Z-funk.	1

Es erfolgt die Anpassung an die vorgegebene Eintrittstemperatur! Zeitschrittweite: 600 s

Daten zum Simulationsgebiet und zur Simulationszeit:

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

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

Datei Erdreichtemperaturverteilung früherer Simulation:

Werte des letzten Simulationszyklus bei SONDENDURCHFLUSS
Letztes Intervall der Simulationsstunde: 87599

i	tV(i)	tR(i)	tBL(i)	QV(i)	QR(i)
	°C	°C	°C	W	W
1	-5,9	-3,6	-2,0	9,1	0,5
11	-5,8	-3,6	0,0	12,4	6,9
21	-5,7	-3,7	0,8	13,5	8,5
31	-5,6	-3,8	1,0	13,6	9,1

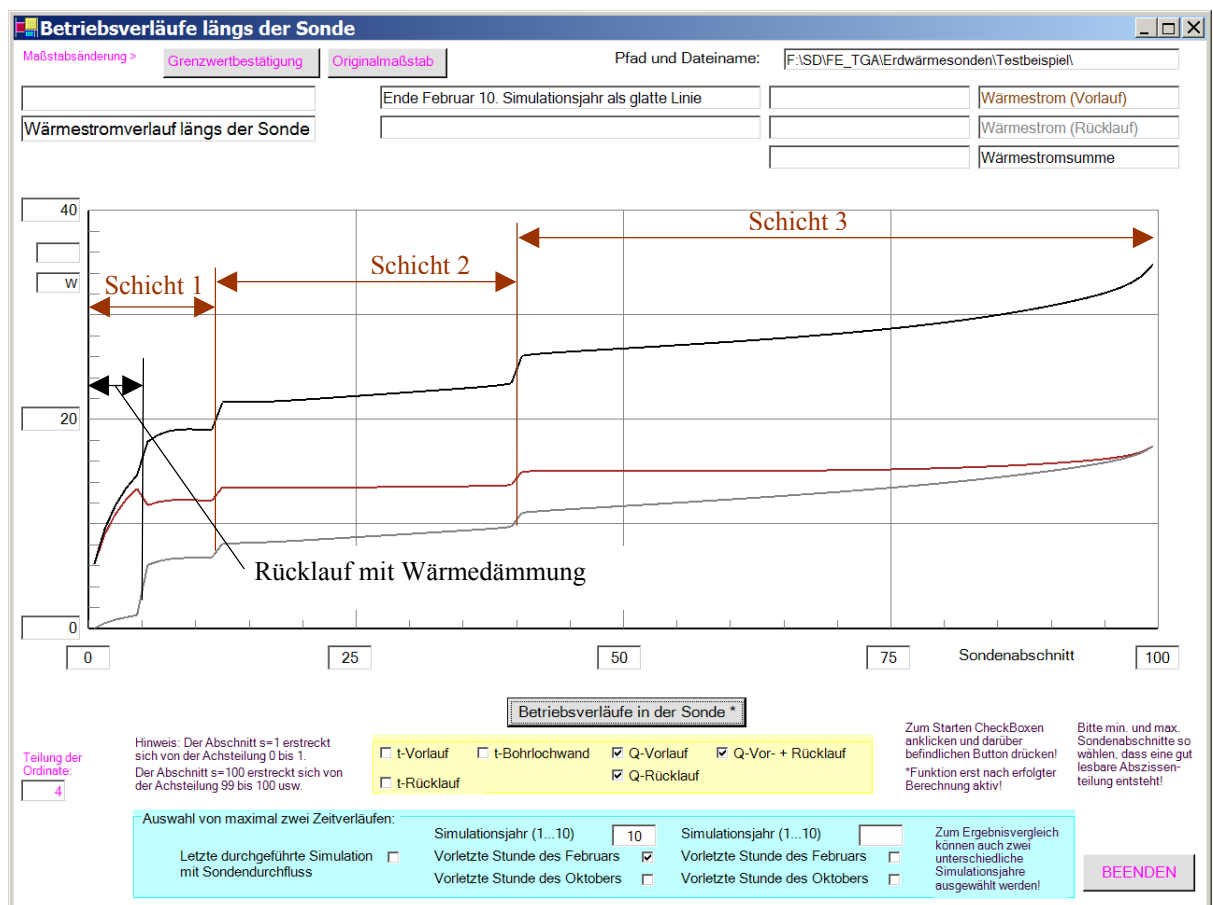
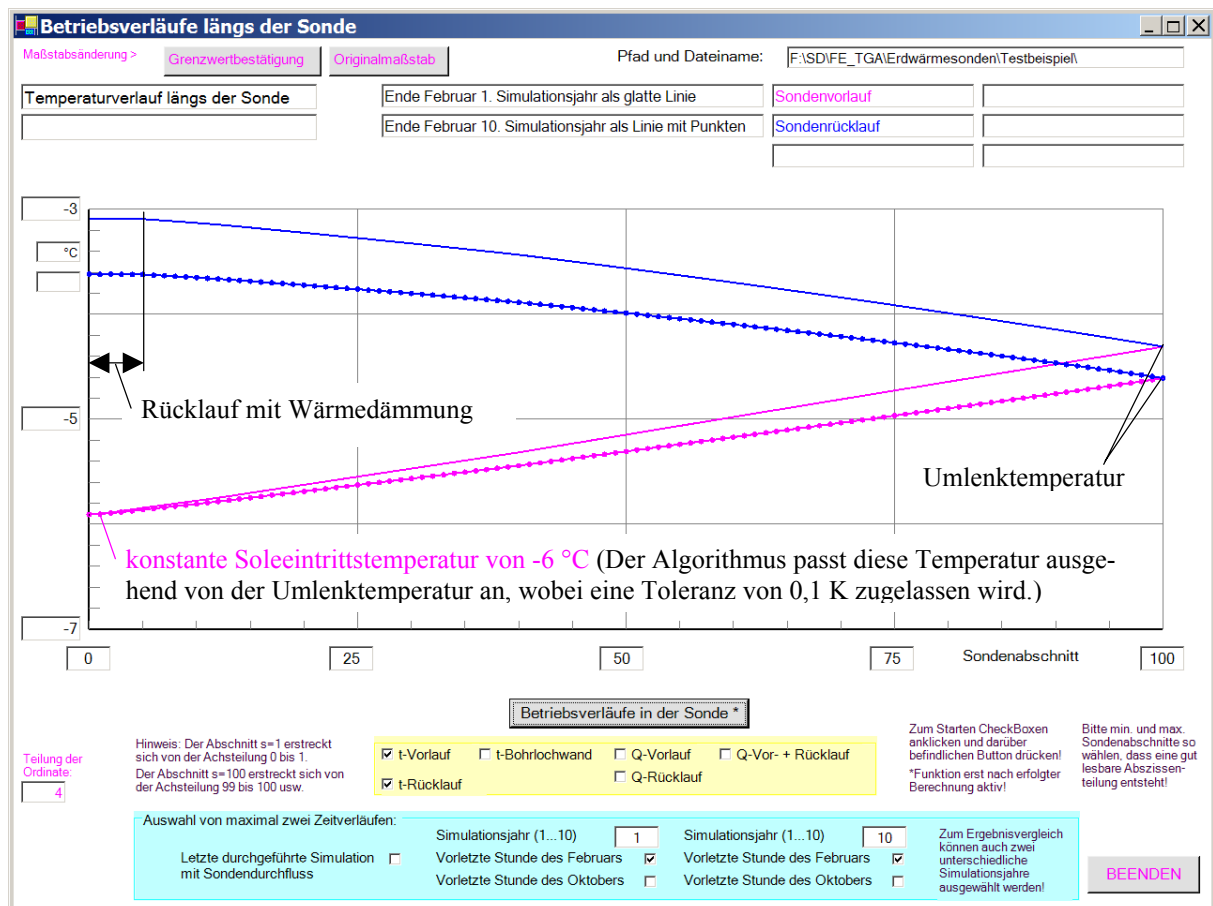


Bild 8.20 Vorlauf- und Rücklauftemperaturen am Sondenkopf (Bild oben) und Leistungsverläufe (Bild unten) längs der Sonde

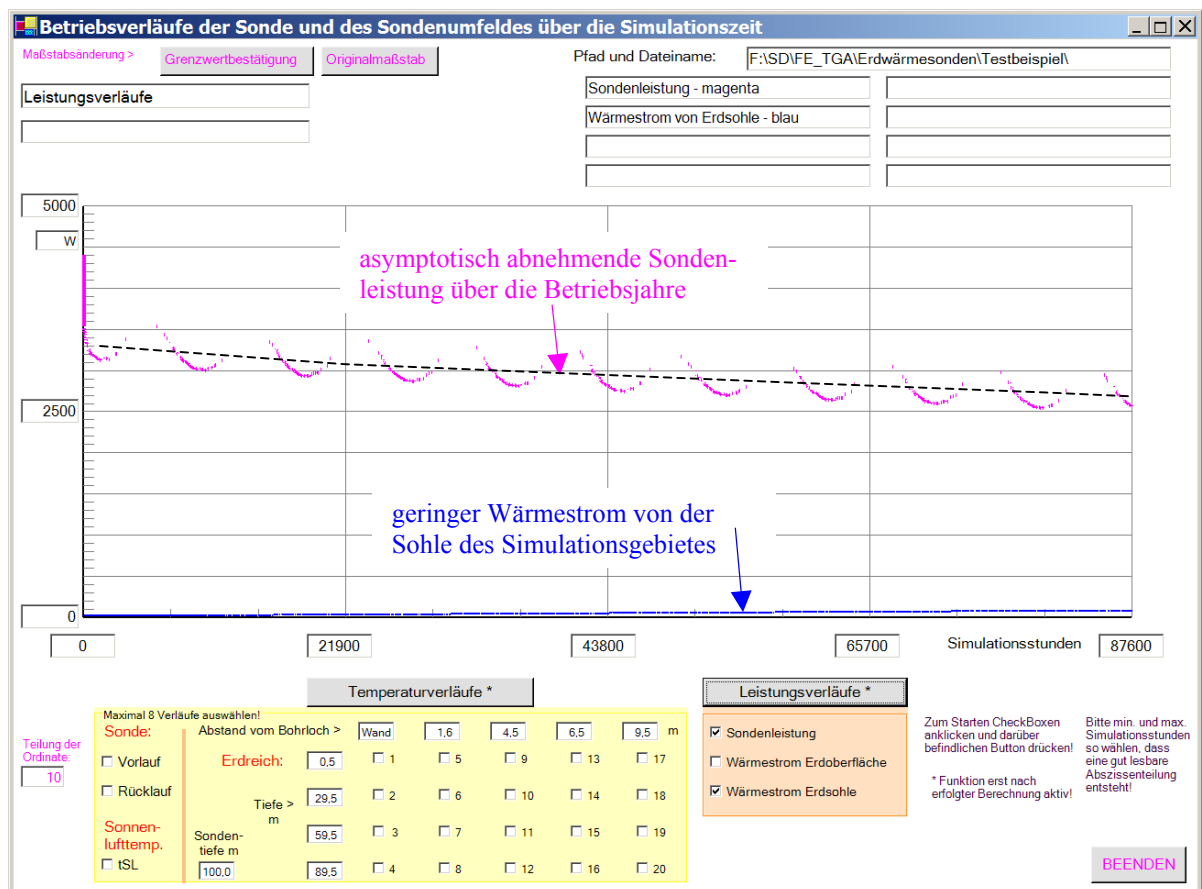
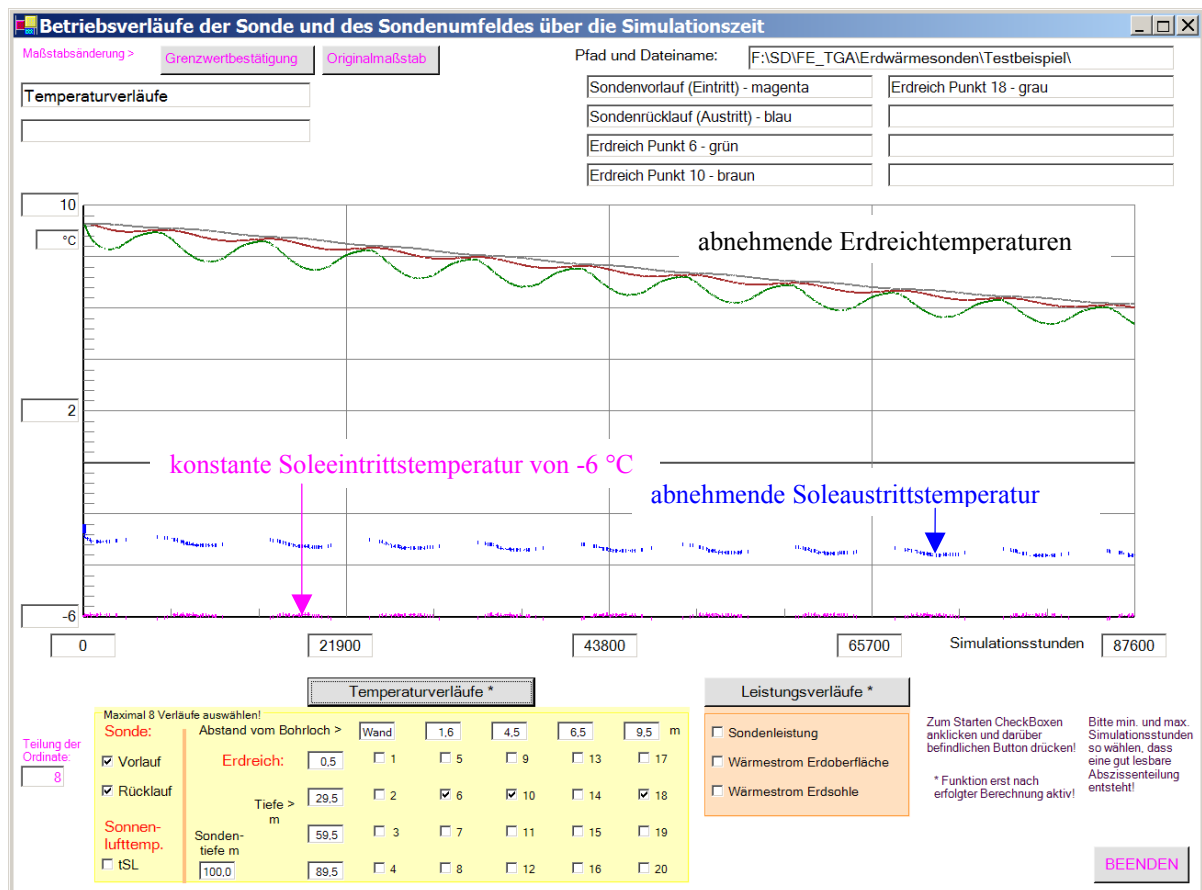


Bild 8.21 Vorlauf- und Rücklauftemperaturen am Sondenkopf sowie ausgewählte Erdreichtemperaturen (Bild oben) und Leistungsverläufe (Bild unten) im Verlauf von 10 Simulationsjahren

8.7 Abschließende Anmerkungen zum Simulationsablauf

Bei den beispielhaften Simulationen war eine **stabile Arbeitsweise** feststellbar. Dies ist bei der Vielzahl der numerischen Rechnungen mit kleinsten Temperaturdifferenzen zwischen den Volumenelementen und dem laufenden iterativen Einpassen des stationär betrachteten Sondenbetriebs innerhalb des Bohrlochs keine Selbstverständlichkeit. Numerisch bedingte **Schwingungen** können bei sehr langen Sonden, bei Füllstoffen im Bohrloch mit hoher Wärmeleitfähigkeit und vor allem bei sehr kleinen Sondendurchsätzen auftreten. Generell problematisch sind rasch wechselnde Sondenbeaufschlagungen und Randbedingungen (Bild 8.22). **Als vorteilhaft stellte sich dar, dass praxisorientierte Randbedingungen bisher stets zu stabilen Berechnungsabläufen führten.**

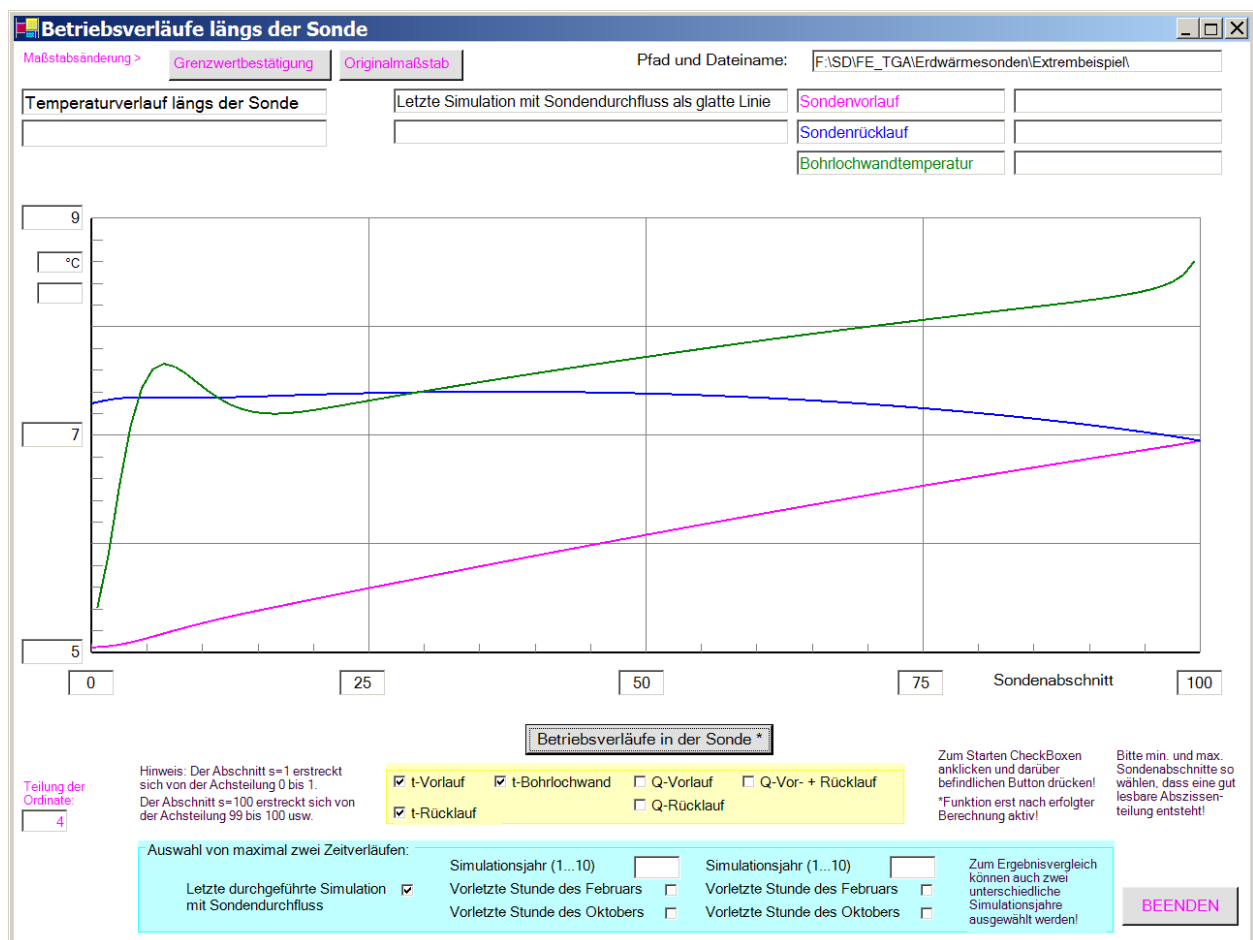


Bild 8.22 Rücklauftemperatur schneidet längs der Sonde mehrfach die Bohrlochwandtemperatur

Die festgestellten **Rechenzeiten** erscheinen als vertretbar. So ergaben sich für 100 m tiefe Sonden in einem Sondenfeld mit 10 m Abstand für 10 Simulationsjahre etwa 6 Minuten.

Die Variabilität bei der Nachbildung der Erdschichten (unterschiedliche Stoffwerte, Berücksichtigung von wasserhaltigen und gefrierenden Böden) blähten den Algorithmus auf. Verzichtete man auf diese Differenziertheit, so könnte die Rechnung weiter beschleunigt werden. Wichtige Hinweise zur Rechenzeitverringerung in Gegenüberstellung mit der Genauigkeit sind aus Abschnitt 8.3 zu entnehmen.

Literatur

- [1] GLÜCK, B.: Wärmespeicher als mediendurchströmter Festkörper. Bericht der RUD. OTTO MEYER – Umwelt – Stiftung, Hamburg 2006.
Kostenlos erhältlich unter:
<http://www.berndglueck.de/Waermespeicher>
oder
<http://www.rom-umwelt-stiftung.de> (⇒ Arbeit bisher ⇒ Projekt 14, Teil 3)
- [2] MAREK, R., GÖTZ, W.: Numerische Lösung von partiellen Differenzialgleichungen mit finiten Differenzen. Bruchloe: Moreno-Verlag, 1995. ISBN 3-931139-00-X
- [3] Glück, B.: Berechnung der stationären, mehrdimensionalen Wärmeleitung mittels Formfaktoren bei drei Körperoberflächen mit vorgegebenen Temperaturen und ihre Anwendung zur wärmetechnischen Simulation von Erdwärmesonden, Heizung-Lüftung-Haustechnik H. 8/2008
- [4] HAHNE, E., GRIGULL, U.: Formfaktor und Formwiderstand der stationären mehrdimensionalen Wärmeleitung, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 18, pp. 751-767, Pergamon Press 1975
- [5] HAHNE, E.: VDI-Wärmeatlas (Abschnitt: Zweidimensionale Wärmeleitung), 9. Auflage. Düsseldorf: VDI-Verlag 2002
- [6] GLÜCK, B.: Wärmeübertragung, Wärmeabgabe von Raumheizflächen und Rohren, 2. Auflage. Berlin: Verlag für Bauwesen 1990. ISBN 3-345-00515-8
- [7] VDI-Wärmeatlas, 2. bis 9. Auflage. Düsseldorf: VDI-Verlag 1994 bis 2002
- [8] GLÜCK, B.: Dynamisches Raummodell zur wärmetechnischen und wärmephysiologischen Bewertung. Bericht der RUD. OTTO MEYER – Umwelt – Stiftung, Hamburg 2004 bis 2006.
Kostenlos erhältlich unter:
<http://www.berndglueck.de/Raummodell>
oder
<http://www.rom-umwelt-stiftung.de> (⇒ Arbeit bisher ⇒ Projekt 14, Teil 1)
- [9] Glück, B.: Wärmetechnischer Vergleich von Erdwärmekollektoren unterschiedlicher Bauart und zusätzliche Nutzung eines Luft-Sole-Wärmeübertragers, Heizung-Lüftung-Haustechnik H. 12/2007
oder siehe auch:
<http://www.berndglueck.de/Erdwaermekollektor>