

Bernd Glück

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

Anhang

**"Wärmetechnischer Vergleich von
Erdwärmekollektoren unterschiedlicher Bauart
und Vorschläge für einen kombinierten Betrieb mit
Luft-Umweltenergieaufnehmern"**

Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück, Goethestraße 18, D-08547 Jößnitz (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	5
2.1	Gestaltung und rechentechnische Darstellung des Simulationsbereiches	5
2.2	Wahl des Simulationsbereiches	8
	• Randeinflüsse	8
	• Erdreichparameter	8
	• Betriebsweise	9
	• Kollektorfelder und Simulationsgebiet	9
3	Wärmetechnische Modellierung des Simulationsbereiches	11
3.1	Instationäre Wärmeleitung im Simulationsbereich und Randbedingungen	11
3.2	Wärmebilanz für ein Volumenelement	13
3.3	Neue Temperatur und Phase des Volumenelementes	15
3.4	Stabilitätskriterium für die numerische Berechnung	17
4	Wärmetechnische Modellierung des Rohrsystems	18
4.1	Zustands- und Stoffwerte der Durchflussmedien (Wasser, Tyfocor L)	18
4.2	Wärmeübergangskoeffizient für die Rohrströmung und Teilwärmedurchgangskoeffizient	19
4.3	Spezielle Größen des Erdwärmekollektors	22
5	Komplexmodell der Simulation von Erdwärmekollektoren	24
5.1	Festlegungen der Randbedingungen	24
	• Temperatur an der Erdoberfläche	24
	• Temperatur an der Sohle des Simulationsgebietes	26
	• Flüssigkeitseintrittstemperatur und Kollektorleistung	26
	• Kollektordurchfluss	26
	• Datenzusammenstellung für den Kollektorbetrieb	27
5.2	Verknüpfung der Einzelalgorithmen zum Simulationsmodell	27
	• Instationäre Simulation	27
	• Stationäre Simulation	27
	• Wärmebilanzen an den Rändern des Simulationsgebietes	27
	• Speicherwärme im Simulationsgebiet	28
5.3	Programmablaufplan	28
5.4	Komplexprogramm zur Simulation des Erdwärmekollektors	30
	• Hauptprogramm	30

	• Hauptprogrammeingabe und Steuerung des Programmablaufs	32
	• Eingabe zeitlich veränderlicher Flüssigkeitseintrittstemperaturen	34
	• Eingabe zeitlich veränderlicher Kollektorleistungen	35
	• Eingabe zeitlich veränderlichen Durchflusses	36
	• Ausgaben (Druck- und Diagrammarten)	37
	• Hinweise zur Diagrammgestaltung	40
6	Programminstallation und Hinweise zu Programmänderungen	42
	• Grundlagen für die Programmanwendung	42
	• Laden und Start des Rechenprogramms	42
	• Bearbeitung des Programmlistings	43
7	Beispiele	44
7.1	Vorbemerkungen	44
	• Erdreichmodellierung	44
	• Gestaltung der Erdwärmekollektoren	45
	• Lage des Kollektors im Boden	45
	• Thermische Randbedingungen	45
	• Wärmetechnische Kollektorbelastung	47
7.2	Alleinige Heizwärmenutzung beim Kollektorbetrieb (Rohrschlangenkollektor: Beispiel 1)	49
7.3	Alleinige Heizwärmenutzung beim Kollektorbetrieb (Rohrmattenkollektor: Beispiel 2)	59
7.4	Variationen der Simulationsannahmen am Beispiel 1	64
	• Variation der Gitterteilung	64
	• Tiefer liegende Sohle des Simulationsgebietes	65
	• Geringerer solarer Absorptionskoeffizient an der Erdoberfläche	66
7.5	Kombinierte Wärme-/Kältenutzung beim Kollektorbetrieb (Beispiel 3)	67
7.6	Testbeispiel zur weiteren Demonstration der Simulationsmöglichkeiten	71
	Literaturverzeichnis	75

Anhang:

Wärmetechnischer Vergleich von Erdwärmekollektoren unterschiedlicher Bauart und Vorschläge für einen kombinierten Betrieb mit Luft-Umweltenergieaufnehmern

1 Einführung

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

Der Aufbau ist weitestgehend mit dem Simulationsmodell "Erdwärmesonden" identisch. Details finden sich unter

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

Die wärmetechnische Nutzung der Erdwärmekollektoren kann verschiedene **energiesparende Lösungen** befördern. **Einsatzgebiete** sind beispielsweise:

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

Die genannten, umfassenden Einsatzmöglichkeiten haben bemerkenswerte energetische Vorteile. So ist mit den beiden ersten Varianten eine **umweltschonende regenerative Energiequelle** verfügbar. Bei großflächigen Bauteilkühlungen kann die Temperatur des aus dem Kollektor austretenden Mediums über kurze Zeiträume niedrig genug sein, um eine direkte Kühlung zu verwirklichen. Ansonsten kann der Kollektor als günstige Wärmesenke für eine Kältemaschine dienen.

Besonders vorteilhaft ist es, dass die Nutzung des Erdwärmekollektors unabhängig von der Tageszeit mit stets gleicher Effizienz möglich ist.

Schließlich bietet der dritte Fall, den Erdwärmekollektor als Wärmequelle und Wärmesenke gleichermaßen zu nutzen, die Möglichkeit, zeitweise anfallende Energie zwischenzuspeichern.

Der **konstruktive Aufbau des Erdwärmekollektors** ist vielfältig. Die Hauptmerkmale sind:

- Flachkollektor als Rohrmäander (Rohrschlange) mit relativ großem Rohrdurchmesser z. B. 32×2,9 mm (Bild 1.1)
- Flachkollektor als Kapillarrohrmatte (parallel durchströmte Rohre mit Verteil- und Sammelrohr) mit relativ kleinen Rohrdurchmessern z. B. 4,3×0,8 mm (Bild 1.2)



Bild 1.1 Verlegung eines Erdwärmekollektors aus Kunststoffrohrschnängen
(Quelle: www.gesell-camburg.de/referenzen.html)



Bild 1.2 Verlegung eines Erdwärmekollektors aus Kunststoff-Kapillarrohrmatten
(Quelle: www.clina.de/Bilder/Erkolektoren.jpg)

- Flachkollektoren liegen parallel zur Erdoberfläche z. B. in der Verlegetiefe von 1,2 m
- Vertikalkollektoren mit Anordnung der Rohrschlagen oder Rohrmatten in vertikalen Gräben
- Kompaktrohrgeflechte beispielsweise in Form von Körben oder Zylindern.

Im Simulationsmodell wird sich auf [einlagige Flachkollektoren](#) bestehend aus Rohrmäandern oder Rohrmatten beschränkt. Diese Kollektoren können parallel zu Kollektorfeldern zusammen geschaltet sein.

Mehrlagige (übereinanderliegende) Flachkollektoren könnten erst nach einer Programmerweiterung betrachtet werden. Sie bleiben wegen der starken Vereisungsgefahr bei Wärmeentzug derzeit ausgeschlossen. Man kann bei einlagigen Kollektoren durch Parameterstudien (Variation: Verlegetiefe, Rohrabstand, Leistung, Betriebsdauer) die zeitabhängige Eisbildung verfolgen. Wie spätere Beispiele zeigen, kann diese bei einlagigen Flachkollektoren größerer Leistung umfangreich sein.

Hinweis: Wärme- bzw. Kältespeicher mit mehrlagigen Rohrsystemen sind detailliert in GLÜCK, B.: Bericht der RUD. OTTO MEYER – Umwelt – Stiftung, Hamburg 2006 unter <http://www.rom-umwelt-stiftung.de> (⇒ Arbeit bisher ⇒ Projekt 14; Teil 3: Wärmespeicher als mediendurchströmter Festkörper) abgehandelt. Forschungsbericht, Kurzbericht und Rechenprogramm stehen kostenlos zur Verfügung [1].

Von besonderem Einfluss auf die Kollektorleistung sind die [Erdreichparameter](#), die [Gestalt der Erdreichoberfläche](#) und die [Lage des Flachkollektors](#), wie beispielsweise:

- Temperatur des Erdreichs als Zeitfunktion
- Stoffwerte des Erdreichs (Dichte, Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität)
- Eisbildung in Kollektornähe
- Besonnung der Erdreichoberfläche und solarer Absorptionskoeffizient
- Grundwasserstand
- Niederschläge.

Der wärmetechnische Einfluss des [fließenden Grundwassers](#) auf die Leistung der Erdwärmekollektoren kann zwar beträchtlich sein. Verlässliche Daten – vor allem in Wohnsiedlungen – sind jedoch in der Regel nicht erhältlich. Die mögliche gegenseitige Beeinflussung von Kollektorfeldern durch fließendes und bereits temperaturverändertes Grundwasser ist kaum quantifizierbar. Somit wäre eine wärmetechnische Modellierung nur relativ ungenau möglich und unterbleibt.

Wenn der Erdkollektor als Wärmequelle genutzt werden soll, muss die [Besonnung der Erdreichoberfläche](#) gegeben sein. Somit darf der Erdwärmekollektor keinerlei Überbauung erhalten. Ist eine solche vorhanden, dann ist der Einsatz des Erdwärmekollektor nur als Speicher mit ausgeglichener Wärmebilanz betreibbar.

Die Wirkung der [Niederschläge](#) wird in einigen Veröffentlichungen als sehr einflussreich geschildert. Man propagiert mitunter, dass der Enthalpieeintrag der Niederschläge maßgeblich für die Wärmezufuhr an das Erdreich ist. Dies ist jedoch nicht zutreffend. In Tabelle 1.1 sind einige meteorologische Daten für den Standort Kassel zusammengestellt.

Tabelle 1.1 Mittlere Luft- und Erdreichtemperaturen sowie Niederschlagsmengen für Kassel

	Jan	Feb	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Mittlere Lufttemperatur in °C	-0,4	0,1	4,4	7,7	12,8	15,3	17,1	17,0	13,6	9,6	4,0	1,9	8,6
Mittlere Erdreichtemperatur in °C in der Tiefe von 5 cm	1,6	2,3	4,5	8,7	15,9	17,7	19,6	19,0	14,1	10,4	4,6	2,0	10,1
Niederschlag in mm/(m ² a)	43,2	37,1	40,7	33,6	40,6	53,0	54,3	38,7	43,2	40,1	44,5	47,6	516,6

Nimmt man vereinfachend an, dass die Temperatur der Niederschläge der Lufttemperatur entspricht, so würde deren Eindringen in das Erdreich sogar dessen Abkühlung bewirken. Im Jahresmittel ergäbe sich der Wärmeeintrag zu:

$$Q_{\text{Niederschlag}} = m_{\text{Niederschlag}} \cdot c_{\text{Wasser}} \cdot (t_{\text{Luft}} - t_{\text{Erdreich}}) = 516,6 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{a}) \cdot 4200 \text{ J}/(\text{kg K}) \cdot (8,6 \text{ °C} - 10,1 \text{ °C})$$

$$Q_{\text{Niederschlag}} = -904 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{a}).$$

Demgegenüber steht beispielsweise die flächenbezogene Entzugsleistung des Kollektorfeldes von $Q_{\text{Kollektor}} = 40 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot 2000 \text{ h/a} = 80000 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{a})$.

Damit beträgt der Wärmeentzug 1 % der Entzugsleistung, wodurch die immer wieder vorgebrachte und angeblich auf Erfahrung gestützte Behauptung des maßgeblichen Wärmeeintrages durch Niederschläge völlig entkräftet ist. Der Vorteil des eindringenden Niederschlagswassers wird jedoch darin gesehen, dass die Wärmeleitfähigkeit des feuchten Erdreiches bedeutend höher ist als die des trockenen Erdreiches. Aus diesem Grund sollten die Erdoberflächen auch [keine Versiegelung](#) erhalten.

Schließlich ist noch die [Betriebsart der Erdwärmekollektoren](#) bedeutungsvoll. Hier sind beispielhaft zu nennen:

- Durchflussmedium (Art der Sole, Wasser)
- Leistungsanforderung oder Eintrittstemperatur als Zeitfunktion.

Da das genaue Verfolgen der Temperaturänderung des Durchflussmediums beispielsweise längs der Rohrmäander außerordentlich aufwändig wäre und in Anbetracht der realen Betriebsgegebenheiten auch nur eine vorgetäuschte Exaktheit darstellte, wird bei der Simulation generell mit der mittleren Temperatur des Durchflussmediums – gebildet als arithmetisches Mittel aus Vor- und Rücklaufemperatur – gearbeitet. Die Leistung des Kollektorfeldes wird mit der Kollektorfläche auf die [Leistungsdichte](#) in W/m^2 umgerechnet. Der [Volumenstrom](#) bezieht sich ebenfalls auf das gesamte Kollektorfeld. Damit kann die Temperaturspreizung bestimmt und die Vor- bzw. Rücklaufemperatur des Kollektorfeldes ermittelt werden. Wegen der verschiedenen Kollektorgestaltungen – beispielsweise mehrere parallel angeschlossene Rohrschlangen oder parallel durchströmte Rohrmatten – kann aber nicht direkt auf den Durchsatz im simulierten Rohr geschlossen werden. Deshalb ist zusätzlich die [Anzahl der parallel durchflossenen Rohre](#) als Eingabewert zu benennen. Da Wärmestrom (Leistung), Volumenstrom und Temperaturspreizung über die Wärmebilanz verknüpft sind, können als Ausgangswerte für die Simulation prinzipiell die Zeitverläufe der Medieneintrittstemperatur oder der geforderten Kollektorleistung vorgegeben werden.

Die im Weiteren vorgestellte, völlige Neuentwicklung eines [Simulationsmodells für die wärmetechnischen Gegebenheiten von Erdwärmekollektoren](#) 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 Erdwärmekollektoren 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 Kollektorleistung und deren Nachhaltigkeit demonstriert. Dabei wird die Komplexität der wärmetechnischen Vorgänge im Erdreich und im Kollektor deutlich. Angaben über dauerhafte, konstante Entzugsleistungen – z. B. 40 W/m^2 – sind nur unter bestimmten Randbedingungen realistisch.

Da der Aufbau und die Handhabung der Simulationsmodelle "Erdwärmekollektoren" und "Erdwärmesonden" sich durch eine große Übereinstimmung auszeichnen, können Nutzer mit relativ geringem Zeitaufwand wärmetechnische Aufgabenstellungen mittels beider Erdwärmesysteme auf ihre optimale Anwendbarkeit überprüfen und ihre energetische Effizienz vergleichen.

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 und rechentechnische Darstellung 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 in den Kollektorrohren werden dagegen quasistationär betrachtet und somit nicht in den instationär betrachteten Simulationsbereich einbezogen.

Da – wie in der Einführung begründet – stets mit der mittleren Temperatur des Durchflussmediums gearbeitet wird, kann näherungsweise die Temperaturänderung im Erdreich längs der Rohrachsen (y -Richtung) vernachlässigt werden. Diese wäre bei Rohrmäandern wegen der Gegenläufigkeit des Durchflusses von nebeneinander liegenden Rohren ohnehin nur rein theoretisch zu betrachten. Diese Feinheit der Modellierung ist beispielsweise bei Fußbodenheizungen auch nicht üblich. Damit verbleibt das Betrachten eines zu jeder Zeit τ **zweidimensionalen Temperaturfeldes** $t(x, z, \tau)$ im Erdreich, was auch nur eine zweidimensionale Diskretisierung erfordert. Die Lage des Erdwärmekollektors im Erdreich parallel zur Oberfläche zeigt Bild 2.1. Das Erdreich kann aus mehreren Schichten $Sch = 1 \dots Sch_{max}$ unterschiedlicher Stoffwerte bestehen.

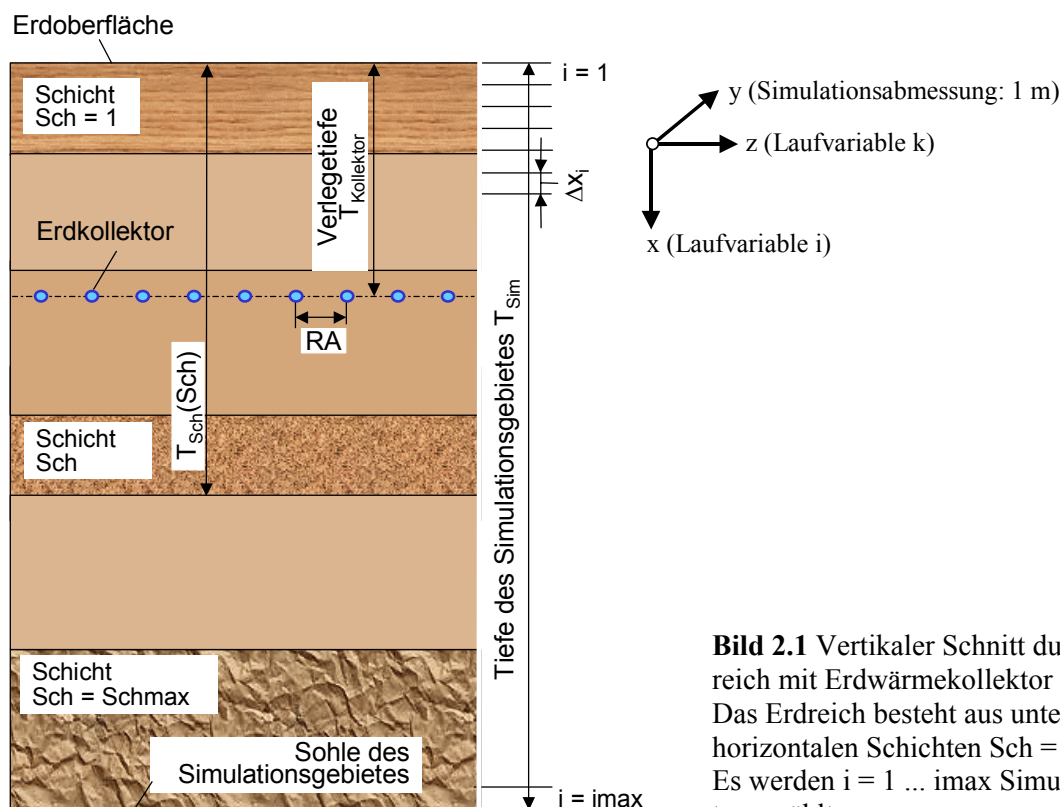


Bild 2.1 Vertikaler Schnitt durch das Erdreich mit Erdwärmekollektor
Das Erdreich besteht aus unterschiedlichen horizontalen Schichten $Sch = 1 \dots Sch_{max}$. Es werden $i = 1 \dots imax$ Simulationsabschnitte gewählt.

Der **Simulationsbereich** ist im Bild 2.2 gezeigt. Er erstreckt sich vertikal über die Abschnitte $i = 1 \dots imax$. Horizontal werden $k = 1 \dots kmax$ Abschnitte betrachtet, wobei – um kurze Rechenzeiten zu realisieren – die im Kollektor bestehenden Symmetrien genutzt werden. Das Simulationsgebiet umfasst das Rohr bis zur Mitte zwischen zwei Rohren. Der wärmetechnische **Bilanzbereich** liegt zwi-

schen den thermischen Symmetrieebenen: Mitte Rohr bis Mitte zwischen zwei benachbarten Rohren. Die Breite des Bilanzbereiches ist $RA/2$. Er ist somit etwas kleiner als der Simulationsbereich. Die Ursache liegt in der **Nachbildung des Kollektorrohres** begründet, das **ein Volumenelement** repräsentieren soll. Dadurch erzielt man bei der Gittererzeugung eine möglichst geringe Elementanzahl. (Würde man das Simulationsgebiet identisch dem Bilanzbereich wählen, müsste das Volumenelement einer Rohrhälfte entsprechen, wodurch sich die Zahl der zu simulierenden Volumenelemente nahezu verdoppeln würde.)

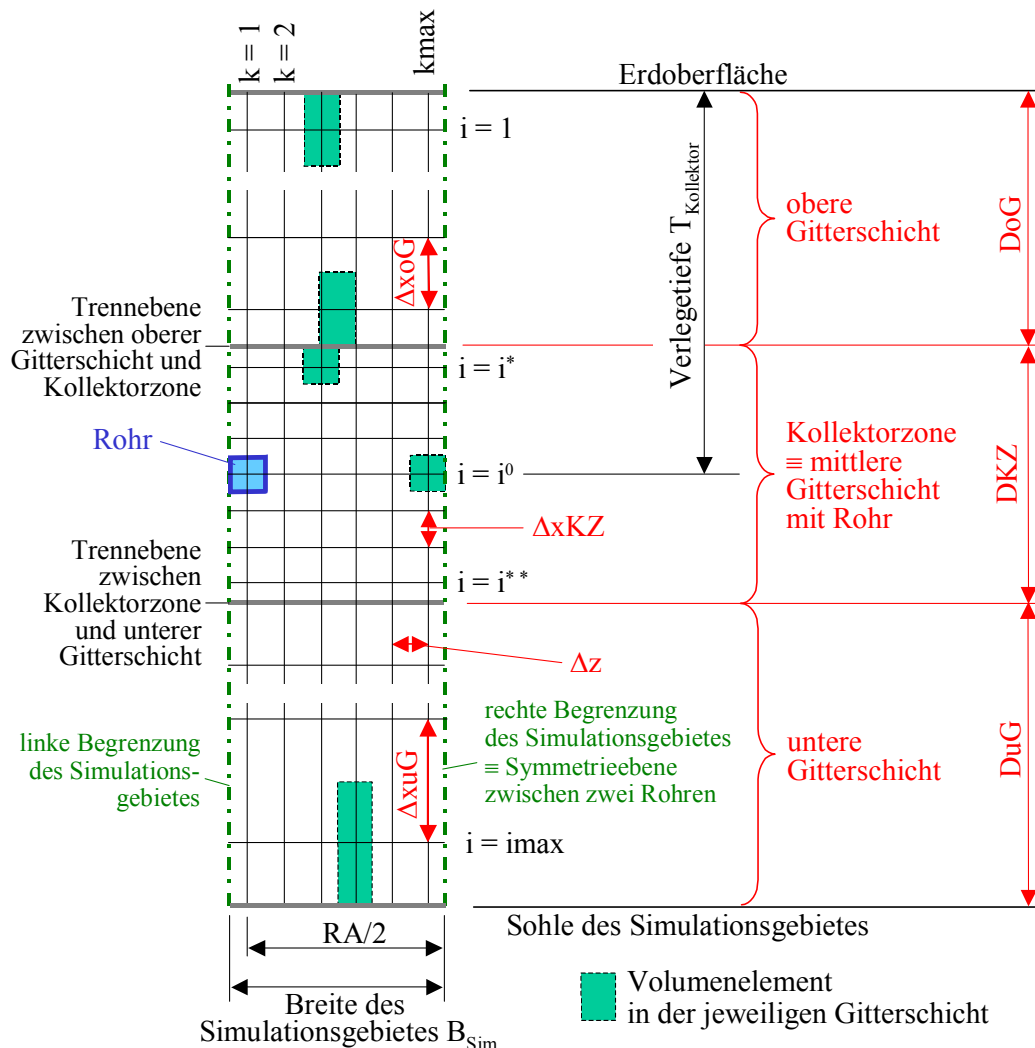


Bild 2.2 Vertikaler Schnitt durch das Simulationsgebiet mit Darstellung des zweidimensionalen Berechnungsgitters $i = 1 \dots imax$ und $k = 1 \dots kmax$

Weiterhin sind die drei unterschiedlichen Gitterschichten eingetragen. Die Größen der Volumenelemente sind gekennzeichnet, wobei die horizontale Abmessung Δz für alle Gitterschichten gilt.

Um den Eingabeaufwand gering zu halten, wird das Gitter automatisch erzeugt. Der programminterne Algorithmus sei nachfolgend vorgestellt.

Zunächst wird die sogenannte Kollektorzone, d. h. die mittlere Gitterschicht fixiert. Hierbei werde auf den Rohraußendurchmesser d_a aufgebaut. Das Rohr mit dem Rohrumfang

$$U_R = d_a \pi \quad (2.1)$$

soll möglichst als Quadrat bzw. als Rechteck mit nahezu gleichen Seiten approximiert werden. Die-

ser approximierte Rohrquerschnitt stellt ein Element im Gitter dar, welches in der sogenannten Kollektorzone ausschließlich zur Anwendung kommt. Für die Quadratseite gilt

$$a_Q = U_R / 4. \quad (2.2)$$

Um den halben Rohrabstand $RA/2$ möglichst exakt nachzubilden, wird zunächst geprüft, wie viele ganzzahlige Volumenelemente den Abstand näherungsweise ausfüllen:

$$k_{\max} = \text{INT} \left(\frac{RA}{2a_Q} + 0,5 \right). \quad (2.3)$$

Mit der Wahl von k_{\max} ergibt sich dann die horizontale Seitenlänge des approximierten Rechtecks zu

$$\Delta z = \frac{RA}{2(k_{\max} - 0,5)}. \quad (2.4)$$

Um den Rohrumfang exakt als Rechteckumfang wiederzugeben, folgt weiter für die vertikale Rechteckseite

$$\Delta x_{KZ} = \frac{U_R - 2\Delta z}{2}. \quad (2.5)$$

Über und unter der Rohrebene werden jeweils 10 gleiche Elementschichten angeordnet, sodass insgesamt $i_{KZ} = 21$ gleiche Gitterschichten als Kollektorzone definiert sind.

Oberhalb und unterhalb der Kollektorzone werden Elemente mit größerer vertikaler Teilung angeordnet. Im Normalfall sind diese etwa $\Delta x_{\text{Gitter}} = 100$ mm hoch. Bei feiner Unterteilung etwa 50 mm und bei grober Teilung etwa 200 mm. Die Art der Gittergestaltung ist eine Eingabgröße. Die genaue Größe ergibt sich durch die fixierten Größen Verlegetiefe $T_{\text{Kollektor}}$ und Tiefe des Simulationsgebietes T_{Sim} . Es gelten für die Gitterschichten die nachfolgenden vertikalen Abmessungen:

$$DKZ = i_{KZ} \cdot \Delta x_{KZ} \quad \text{Dicke der Kollektorzone} \quad (2.6)$$

$$DoG = T_{\text{Kollektor}} - DKZ / 2 \quad \text{Dicke der oberen Gitterschicht} \quad (2.7)$$

$$DuG = T_{\text{Sim}} - T_{\text{Kollektor}} - DKZ / 2 \quad \text{Dicke der unteren Gitterschicht.} \quad (2.8)$$

Daraus errechnen sich die noch fehlenden vertikalen Abmessungen der Volumenelemente (allgemeine Bezeichnung: Δx_i). Es gelten für die Anzahl der Elementschichten

$$ioG = \text{INT} \left(\frac{DoG}{\Delta x_{\text{Gitter}}} + 0,5 \right) \quad (2.9)$$

$$iuG = \text{INT} \left(\frac{DuG}{\Delta x_{\text{Gitter}}} + 0,5 \right), \quad (2.10)$$

woraus sich die endgültigen Abmessungen ergeben

$$\Delta x_{oG} = \frac{DoG}{ioG} \quad (2.11)$$

$$\Delta x_{uG} = \frac{DuG}{iuG}. \quad (2.12)$$

Zur Steuerung der Elementarbeitung werden gemäß Bild 2.2 noch festgelegt:

$$i^* = ioG + 1 \quad (2.13)$$

$$i^{**} = i^* + i_{KZ} - 1 \quad (2.14)$$

$$i_{\max} = i_{oG} + i_{KZ} + i_{uG}. \quad (2.15)$$

Damit haben die Elemente unter der Annahme eine Länge von 1 m in Richtung der Rohrachsen (y-Richtung) gemäß Bild 2.2 das Volumen:

$$V_i = \Delta z \Delta x_i \quad (\text{allgemeingültige Darstellung}) \quad (2.16)$$

$$V_{oG} = \Delta z \Delta x_{oG} \quad (\text{Volumen der Elemente in der oberen Gitterschicht}) \quad (2.17)$$

$$V_{KZ} = \Delta z \Delta x_{KZ} \quad (\text{Volumen der Elemente in der Kollektorzone}) \quad (2.18)$$

$$V_{uG} = \Delta z \Delta x_{uG}. \quad (\text{Volumen der Elemente in der unteren Gitterschicht}) \quad (2.19)$$

Die Mitte des Volumenelementes i liegt gemäß Bild 2.2 in einer Tiefe von:

obere Gitterschicht ($i < i^*$)

$$z_i = (i - 0,5) \Delta x_{oG} \quad (2.20)$$

Kollektorzone ($i^* \leq i \leq i^{}$)**

$$z_i = D_{oG} + (i - i^* + 0,5) \Delta x_{KZ} \quad (2.21)$$

untere Gitterschicht ($i > i^{}$)**

$$z_i = D_{oG} + D_{KZ} + (i - i^{**} - 0,5) \Delta x_{uG}. \quad (2.22)$$

Die im Bild 2.1 dargestellten Erdreichschichten Sch, 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 Verlegetiefe des Kollektors sowie Sohlentiefe des Simulationsgebietes T_{Sim} werden durch den gewählten Algorithmus genau wiedergegeben.

2.2 Wahl des Simulationsbereiches

Das zu untersuchende Simulationsgebiet wird bei den relativ großen flächenförmigen Erdwärmekollektoren auf einen **ungestörten inneren Bereich** begrenzt. Nachfolgend wird auf die verschiedenartigen, realen Einflüsse hingewiesen.

- **Randeinflüsse**

Die wärmetechnischen Besonderheiten, die an den seitlichen Rändern des Erdwärmekollektors wirken, werden vernachlässigt. Da längs der Kollektorränder ein wärmetechnisch "ungenutzter" Bereich existiert, ist deren Nichtbeachten real als zusätzliche Reserve zu werten. Der solare Wärmestrom an die Erdoberfläche wird später ausführlich als Zeitfunktion vorgestellt. Die thermische Randbedingung an der Sohle des Simulationsgebietes sei durch eine konstante Temperatur (Randbedingung 1. Art) fixiert. Falls bezüglich der zu wählenden Sohlentiefe T_{Sim} Zweifel bestehen, sollten Mehrfachrechnungen mit unterschiedlichen Werten durchgeführt werden, um den Einfluss abzuschätzen.

- **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. Weiterhin sind Dichte ρ und spezifische Wärmekapazität c maßgeblich für die Wärmespeicherung im Erdreich verantwortlich. Um diese Parameter im Simulationsmodell möglichst genau nachzubilden, können bis maximal sechs unterschiedliche Erdschichten Sch Berücksichtigung finden.

- Betriebsweise

Ideal sind Erdwärmekollektoren, die über einen bestimmten Zeitraum – in der Regel über ein Jahr – eine **ausgeglichene Wärmebilanz** aufweisen. Beispielsweise ist es vorteilhaft, wenn die Kollektoren im Winter als Wärmequelle und im Sommer als Wärmesenke dienen. Maßgeblich wirken die Wärmeströme von und zum Kollektor sowie der Wärmeaustausch mit der Erdoberfläche und eventuell mit einer vorhandenen Grundwasserströmung. Bei annähernd gleichmäßig wechselnden Belastungen im Jahresrhythmus ist das System nach ca. zwei Jahren eingeschwungen.

Über spezielle effizienzsteigernde Maßnahmen wird im Anhang berichtet.

- Kollektorfelder und Simulationsgebiet

Die Bilder 2.3 und 2.4 zeigen die zwei Grundtypen von Erdwärmekollektoren, wobei jeweils zwei Kollektoren zu einem Kollektorfeld vereint sind.

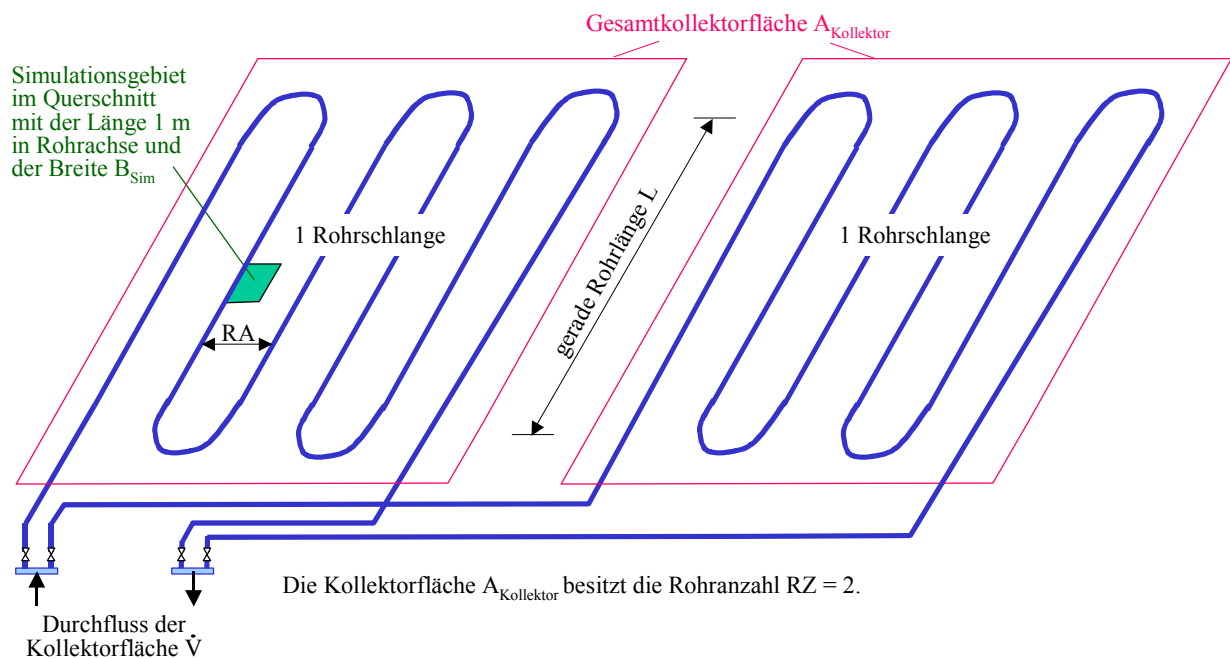


Bild 2.3 Zusammenschaltung von zwei Rohrschlängen-Kollektoren zu einem Erdwärmekollektorfeld

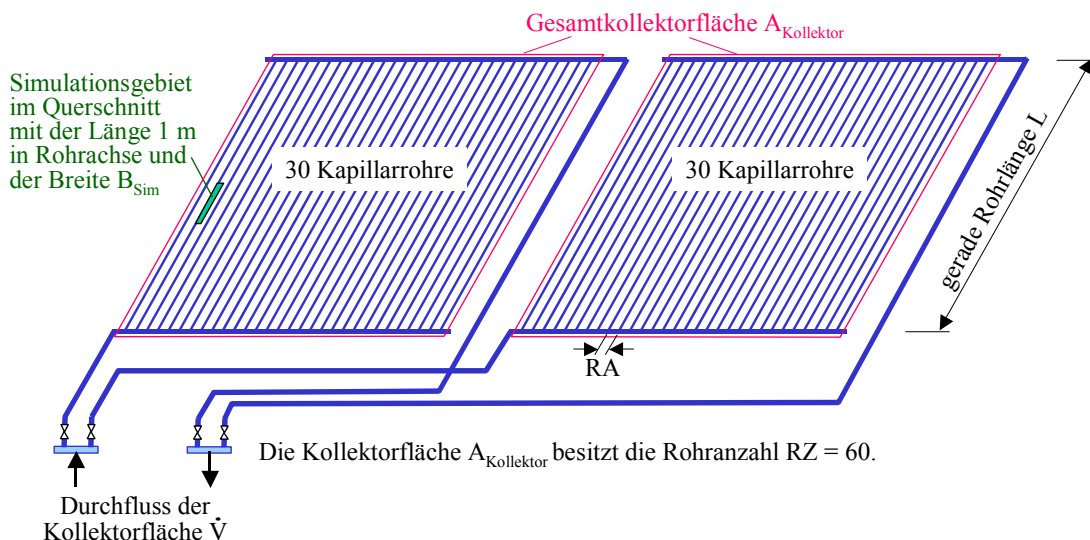


Bild 2.4 Zusammenschaltung von zwei Kapillarrohrmatten-Kollektoren zu einem Erdwärmekollektorfeld

Die **Parallelschaltung von Kollektoren** wird hauptsächlich gewählt, um die **Druckverluste** zu begrenzen. So gelten bei Einsatz von Rohrschlangen in der Regel 100 m als maximale Rohrlänge. Bei Kunststoff-Kapillarrohrmatten verwendet man Mattenlängen von etwa maximal 10 m. Aber auch **technologische Gründe** sprechen für die Parallelschaltung, wie beispielsweise bessere Handhabbarkeit bei der Verlegung, keine Rohrverbindungen an nicht kontrollierbaren Stellen, gute Anpassbarkeit an die örtlichen Gegebenheiten usw.

Die **gerade Rohrlänge** innerhalb des Kollektors dient lediglich der möglichst genauen Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Durchflussmedium und innerer Rohroberfläche. Während beim Einsatz von Kapillarrohrmatten die Kollektorlänge der geraden Rohrlänge entspricht, hat sie bei Rohrschlangen nicht unbedingt etwas mit den Kollektorabmessungen zu tun. Bei unregelmäßig verlegten Rohrschlangen und/oder bei bifilarer Rohrverlegung sind Mittelwerte zu verwenden.

Im Abschnitt 4.3 wird auf die **speziellen Definitionen des Kollektorfeldes** (Fläche, Durchfluss, Rohranzahl) eingegangen. Sie dienen der wärmetechnischen Komplexbeschreibung des Erdwärmekollektors mit dem Ziel die Verbindung zu den Ergebnissen des relativ kleinen Simulationsgebietes herzustellen. Die Beschreibung der Programmeingaben erfolgt im Abschnitt 5.4.

Das **Simulationsgebiet** ist in den Bildern 2.3 und 2.4 für die verschiedenen Kollektorformen gekennzeichnet. Die grünen Flächen sind als die Querschnitte der jeweiligen Simulationsgebiete zu verstehen. Sie umfassen die Breite B_{Sim} und in Rohrachsrichtung die Länge von 1 m. Die Tiefe des Simulationsgebietes entspricht stets T_{Sim} . Die Breite und die Tiefe des Simulationsgebietes ist auch aus den Bildern 2.1 und 2.2 zu entnehmen.

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 kartesische Koordinaten lautet in diesem zweidimensionalen Fall

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

mit der Temperaturleitfähigkeit

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

und den Einzelgrößen

t	Temperatur	λ	Wärmeleitfähigkeit
x, 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 Phasenwandeltemperatur ($> 0 \text{ °C}$ oder $< 0 \text{ °C}$). 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 sechs unterschiedlichen Horizontalschichten (Schmax) bestehen. 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 Quader der Länge 1 m, der Breite Δz und der Höhen Δx_oG , Δx_{KZ} bzw. Δx_{uG} (Bild 2.2) 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 Q_E 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 2.2) 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 vereinfacht etwa der mittleren Jahreslufttemperatur in Kassel $t_{\text{start}} = 8 \text{ }^\circ\text{C}$ entspricht:

$$t_{i=1\dots i_{\text{max}},k=1\dots k_{\text{max}}} = 8 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (3.4)$$

Temperaturen $t_{i,k} > 0 \text{ }^\circ\text{C}$ bedeuten, dass zu Beginn das im Erdstoff enthaltene Wasser stets in flüssiger Phase vorliegt.

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:

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

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

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 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ lauten:

λ Wärmeleitfähigkeit des erstarrten ("festen") Materials

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

Analog gelten für Temperaturen oberhalb $0 \text{ }^\circ\text{C}$:

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. Dazu gelten die nachfolgenden Erläuterungen:

- 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_{Erdsohle} vorgegeben. Sie wäre grundsätzlich auch als Zeitfunktion darstellbar. Falls sich eine Grundwasser führende Schicht in der Tiefe T_{Sim} befindet, ist die Wassertemperatur maßgebend. Ist dies nicht der Fall, dann sollte die Tiefe des Simulationsbereiches so gewählt werden, dass dort näherungsweise die Temperatur des ungestörten Erdreiches gilt.

- Der **rechten Rand des Simulationsgebietes** verkörpert die geometrische Symmetrieebene zwischen den Rohren, an der auch thermische Symmetrie gilt. D. h., sie kann als **adiabate Wandung** aufgefasst werden.
- Die thermische Randbedingung am **linken Rand des Simulationsgebietes** wird gemäß folgender Überlegung nachgebildet. An der durch $k = 1$ gelegten Ebene existiert geometrische und thermische Symmetrie. Daraus folgt, dass die aus den Volumenelementen – z. B. aus dem dargestellten Rohr – nach rechts und links austretenden Wärmeströme gleich groß sind. Der nach rechts austretende Wärmestrom, der innerhalb des Gitters berechenbar ist, kann also bei Bilden der Wärmebilanz verdoppelt werden.
- Das **Rohr verkörpernde Volumenelement** $i=i^0, k=1$ nimmt an der instationären Wärmeleitung nicht teil, somit stellt es auch eine Randbedingung für das Simulationsgebiet dar. Wenn kein Mediendurchfluss existiert (Betriebsruhe), erfolgt auch kein Wärmeaustausch mit dem Erdreich. Wird der Kollektor durchströmt, dann gelten rohreseitig als Wärmetransportwiderstand $1/\kappa_R$ mit dem Teilwärmedurchgangskoeffizienten κ_R nach Gl. (4.13).

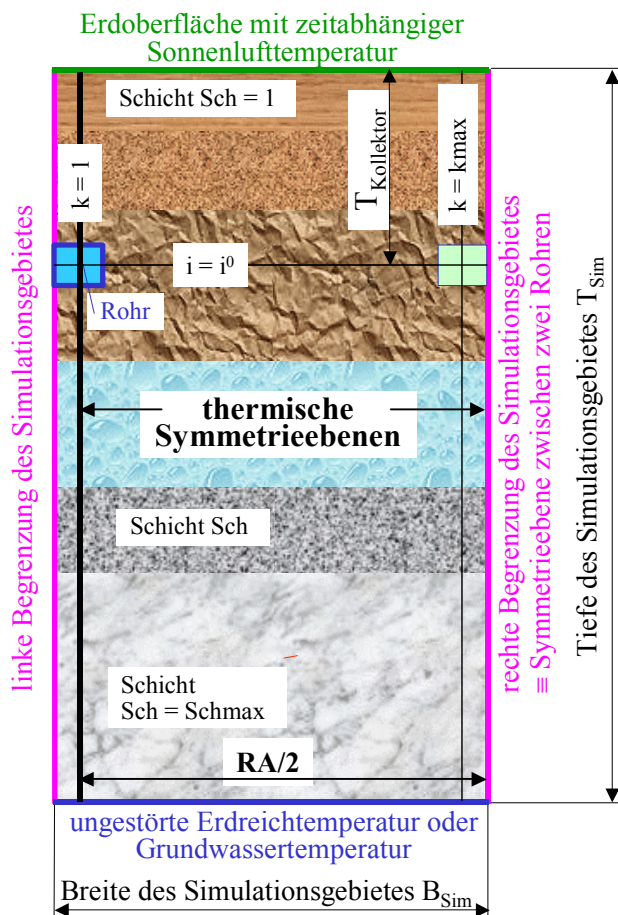


Bild 3.1 Wärmetechnische Randbedingungen für das Simulationsgebiet

Es umfasst einen Quader mit den Abmessungen T_{Sim} , B_{Sim} und in die Tafelenebene hinein von 1 m. Der Querschnitt des Simulationsgebietes ist aus den Bildern 2.3 und 2.4 ersichtlich.

Bei unsicheren Annahmen bezüglich der geeigneten Tiefe des Simulationsgebietes T_{Sim} und der oberen sowie unteren 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.

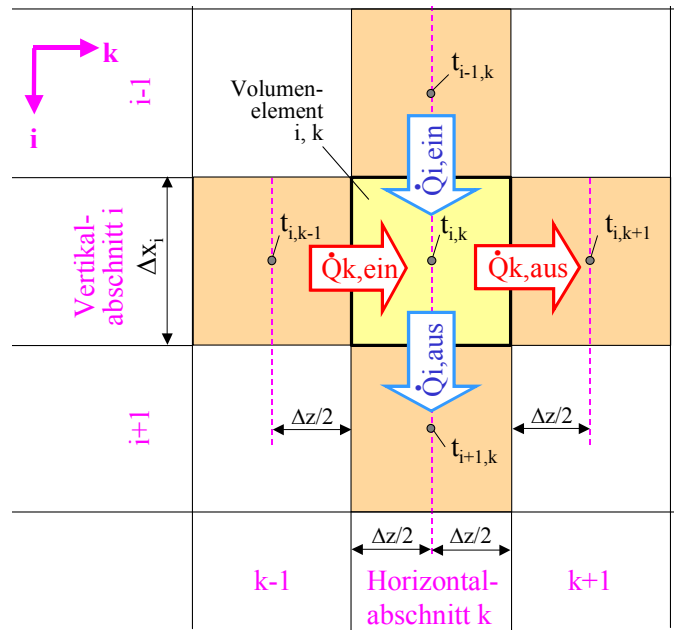


Bild 3.2 Vertikaler Schnitt durch das Volumenelement i, k und durch dessen Nachbar-elemente mit Angabe der Elementtemperaturen $t_{i,k}$ usw. Zusätzlich sind die ein- und austretenden Wärmeströme in und aus dem Volumenelement i, k durch Wärmeleitung vermerkt. Während die Abmessung Δz in k -Richtung bei allen Volumenelementen konstant ist, variiert die Abmessung Δx_i in i -Richtung je nach Lage des Volumenelementes in den drei Größen: Δx_{oG} , Δx_{KZ} , Δx_{uG} .

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

$$\dot{Q}_{kein_{i,k}} = \left(\frac{\Delta z/2}{\lambda \text{Feld}_{i,k-1}} + \frac{\Delta z/2}{\lambda \text{Feld}_{i,k}} \right)^{-1} \Delta x_i (t_{i,k-1} - t_{i,k}) \quad (3.7)$$

$$\dot{Q}_{kaus_{i,k}} \equiv \dot{Q}_{kein_{i,k+1}} = \left(\frac{\Delta z/2}{\lambda \text{Feld}_{i,k}} + \frac{\Delta z/2}{\lambda \text{Feld}_{i,k+1}} \right)^{-1} \Delta x_i (t_{i,k} - t_{i,k+1}) \quad (3.8)$$

$$\dot{Q}_{iein_{i,k}} = \left(\frac{\Delta x_{i-1}/2}{\lambda \text{Feld}_{i-1,k}} + \frac{\Delta x_i/2}{\lambda \text{Feld}_{i,k}} \right)^{-1} \Delta z (t_{i-1,k} - t_{i,k}) \quad (3.9)$$

$$\dot{Q}_{iaus_{i,k}} \equiv \dot{Q}_{iein_{i+1,k}} = \left(\frac{\Delta x_i/2}{\lambda \text{Feld}_{i,k}} + \frac{\Delta x_{i+1}/2}{\lambda \text{Feld}_{i+1,k}} \right)^{-1} \Delta z (t_{i,k} - t_{i+1,k}). \quad (3.10)$$

Wegen der bezeichneten Identitäten ist es ausreichend nur alle $\dot{Q}_{iein_{i,k}}$ und $\dot{Q}_{kein_{i,k}}$ zu bestimmen.

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

Am **linken Rand des Simulationsgebietes** $k = 1$ gilt für den eintretenden Wärmestrom

$$\dot{Q}_{kein_{i,k=1}} = -\dot{Q}_{kein_{i,k=2}}. \quad (3.11)$$

Am **rechten Rand des Simulationsgebietes** $k = k_{\max}$ tritt kein Wärmestrom aus, somit folgt:

$$\dot{Q}_{\text{kein},i,k_{\max}+1} = 0. \quad (3.12)$$

An der **Erdreichoberfläche** ($i = 1$) gilt mit der Sonnenlufttemperatur als Außentemperatur t_a und dem äußeren Wärmeübergangskoeffizienten α_a der eintretende Wärmestrom

$$\dot{Q}_{\text{ein},i,k} = \left(\frac{1}{\alpha_a} + \frac{\Delta x_i / 2}{\lambda \text{Feld}_{i,k}} \right)^{-1} \Delta z (t_a - t_{i,k}). \quad (3.13)$$

An der **Sohle des Simulationsgebietes** ($i = i_{\max}$) soll von einer konstanten Temperatur t_{Erdsohle} (\equiv Temperatur des ungestörten Erdreiches in dieser Tiefe) ausgegangen werden, sodass folgt:

$$\dot{Q}_{\text{ein},i_{\max}+1,k} = \frac{\lambda \text{Feld}_{i_{\max},k}}{\Delta x_{i_{\max}} / 2} \Delta z (t_{i_{\max},k} - t_{\text{Erdsohle}}). \quad (3.14)$$

Für das **Rohr und die angrenzenden Volumenelemente** gelten die speziellen Berechnungsansätze, wobei als Medientemperatur t_{mittel} Verwendung findet:

$$\dot{Q}_{\text{kein},i=i^0,k=2} = \left(\frac{1}{\kappa_R} + \frac{\Delta z / 2}{\lambda \text{Feld}_{i^0,2}} \right)^{-1} \Delta x_{i^0} (t_{\text{mittel}} - t_{i^0,2}) \quad (3.15)$$

$$\dot{Q}_{\text{ein},i=i^0,k=1} = \left(\frac{\Delta x_{i^0-1,1} / 2}{\lambda \text{Feld}_{i^0-1,1}} + \frac{1}{\kappa_R} \right)^{-1} \Delta z (t_{i^0-1,1} - t_{\text{mittel}}) \quad (3.16)$$

$$\dot{Q}_{\text{ein},i=i^0+1,1} = \left(\frac{1}{\kappa_R} + \frac{\Delta x_{i^0+1,1} / 2}{\lambda \text{Feld}_{i^0+1,1}} \right)^{-1} \Delta z (t_{\text{mittel}} - t_{i^0+1,1}). \quad (3.17)$$

Des Weiteren gilt natürlich auch Gl. (3.11). Bei Betriebsstillstand sind die Wärmeströme null.

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

$$QE = (\dot{Q}_{\text{ein},i,k} + \dot{Q}_{\text{kein},i,k} - \dot{Q}_{\text{ein},i+1,k} - \dot{Q}_{\text{kein},i+1,k}) \Delta \tau. \quad (3.18)$$

3.3 Neue Temperatur und Phase des Volumenelementes

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

$m_{E,i}$	Masse des Volumenelementes (Elementmasse)	$m_{E,i} = V_i \rho$ (V_i nach Gl. (2.16))
$Q_{\text{Phase},i}$	Phasenumwandlungswärme für die Elementmasse	$Q_{\text{Phase},i} = m_{E,i} r_S$
$C_{E,i}$	Elementwärmekapazität des erstarrten Erdstoffs	$C_{E,i} = c m_{E,i}$
$C_{\text{Efl},i}$	Elementwärmekapazität des geschmolzenen Erdstoffs	$C_{\text{Efl},i} = c_{\text{fl}} m_{E,i}$

Da sich die vorgestellten Größen nur schichtweise ändern, entfällt der Bezug auf die Laufvariable 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

$$\text{bei fester Phase } (<0 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad \Delta t = \frac{QE}{C_{E,i}} \quad \text{bzw. bei flüssiger Phase } (>0 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad \Delta t = \frac{QE}{C_{Efl,i}}, \quad (3.19)$$

woraus die neue Temperatur folgt:

$$tn_{i,k} = t_{i,k} + \Delta t. \quad (3.20)$$

Liegt zwischen $tn_{i,k}$ und $t_{i,k}$ die Schmelztemperatur $0 \text{ } ^\circ\text{C}$, ist der **Phasenwandel** – differenziert nach Aufheizen oder Abkühlen – zu beachten. In [1, Seite 9ff.] 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 $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ sind kennzeichnend. Somit stellt h eine Funktion der Temperatur und des Phasenzustandes dar:

$$h = h(t, \text{Phase}). \quad (3.21)$$

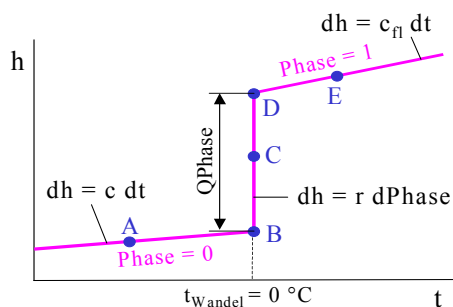


Bild 3.3 Verlauf der spezifischen Enthalpie $h(t, \text{Phase})$ in Abhängigkeit der Stofftemperatur t und des Phasenzustandes Phase bei Wasser / Eis

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

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:

$$\Delta\tau \leq \frac{1}{2a \left(\frac{1}{\Delta x_i^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right)}. \quad (3.22)$$

Die zulässige Zeitschrittweite wird in Abhängigkeit der Schichtstoffwerte und der Geometrie programmintern ermittelt, wobei für $\Delta y = 1$ m gilt.

4 Wärmetechnische Modellierung des Rohrsystems

Wie bereits in der Einführung dargelegt, wird der Erdwärmekollektor in seiner Gesamtheit betrachtet und bei der wärmetechnischen Modellierung mit der mittleren Medientemperatur – analog zu der Fußbodenheizung – gearbeitet. Dennoch sind die wärmetechnischen Verhältnisse im Rohr und in der Rohrwand realistisch zu approximieren.

4.1 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 4.1 vorgeschlagen. Für das Wasser-Propylenglykol-Gemisch basieren diese auf grafischen Angaben des Herstellers. Die Visualisierung der approximierten Stoffdaten zeigt Bild 4.1.

Tabelle 4.1 Approximationen für die Stoffwerte von Wasser und wässrigen Tyfocorlösungen TL40, TL25

Dichte in kg/m³ mit t in °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 J/(kg K) mit t in °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 W/(m K) mit t in °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 m²/s mit t in °C
$v_{\text{Wasser}} = (556272,7 + 19703,39 t + 124,4091 t^2 - 0,3770952 t^3)^{-1}$
$v_{\text{TL40}} = 0,0000114 \cdot \text{Exp}(-0,0002167876 - 0,05785851 t + 0,0004864946 t^2 - 0,00000186843 t^3)$
$v_{\text{TL25}} = 0,0000056 \cdot \text{Exp}(0,02699025 - 0,04543205 t + 0,0003234937 t^2 - 0,000001076019 t^3)$
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:
$\text{Pr} = \frac{v}{a} = \frac{v \rho c}{\lambda}$

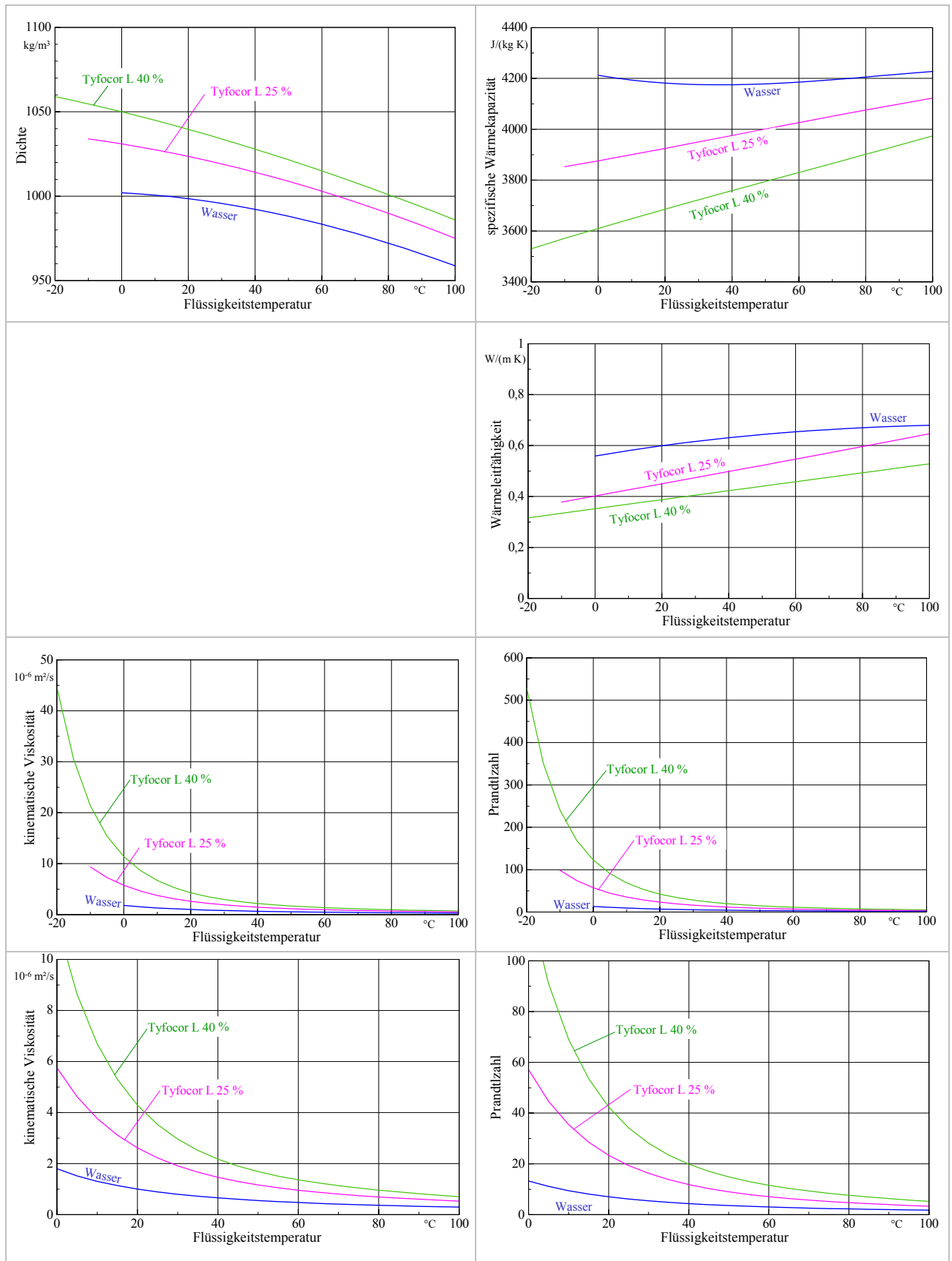


Bild 4.1 Grafiken für die Stoffwerte von Wasser und wässrigen Tyfocorlösungen TL40, TL25

4.2 Wärmeübergangskoeffizient für die Rohrströmung und Teilwärmedurchgangskoeffizient

Die Ermittlung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten basiert auf der Ähnlichkeitstheorie

unter Verwendung der **Nußeltgleichungen** nach [2, 3]. 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	ρ	kg/m ³	Dichte des Fluids
λ	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit des Fluids	Nu	–	NUSSELTzahl Nu = α _R d _i / λ
Pr	–	PRANDTLzahl des Fluids	α _R	W/(m ² K)	Wärmeübergangskoeffizient.
Re	–	REYNOLDSzahl Re = w d _i / ν			

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)

$$\text{Nu} = \left(49,028 + 4,173 \text{ Re Pr } \frac{d_i}{L} \right)^{0,333} \quad (4.1)$$

Gültigkeitsbereich: Re < 2300; 0,1 < Re Pr d_i/L < 10⁴

Nußeltzahl bei turbulenter Strömung (Re > 2300)

$$\text{Nu} = \frac{B (\text{Re} - 1000) \text{Pr}}{1 + 12,7 B^{0,5} (\text{Pr}^{0,667} - 1)} \left(1 + \left(\frac{d_i}{L} \right)^{0,667} \right) \quad (4.2)$$

$$\text{mit der Hilfsgröße } B = (5,15 \lg \text{Re} - 4,64)^{-2} \quad (4.3)$$

Gültigkeitsbereich: 2300 < Re < 10⁶; 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 [3] der jetzigen Auflage:

$$\text{Nu} = \left\{ 3,66^3 + 0,7^3 + \left(1,615 (\text{Re Pr } d_i / L)^{0,333} - 0,7 \right)^3 + \left(\left(\frac{2}{1 + 22 \text{Pr}} \right)^{0,167} (\text{Re Pr } d_i / L)^{0,5} \right)^3 \right\}^{1/3} \quad (4.4)$$

Gültigkeitsbereich: Re < 2300; 0 < Re Pr d_i/L < ∞.

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 Nu_{laminar} und Nu_{turbulent} im Übergangsbereich. Andererseits wird damit der Erkenntnis von ROTTA Rechnung getragen, der im Übergangsbereich Re > 2300 alternierende Umschläge der Strömungsform feststellte. GNIELINSKI schlägt nachfolgende Berechnung vor:

▪ **ausgebildete turbulente Strömung**

$$\text{Nu} = \frac{B \text{Re Pr}}{1 + 12,7 B^{0,5} (\text{Pr}^{0,667} - 1)} \left(1 + \left(\frac{d_i}{L} \right)^{0,667} \right) \quad (4.5)$$

$$\text{mit der Hilfsgröße } B = (5,09 \lg Re - 4,24)^{-2} \quad (4.6)$$

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

▪ Übergangsbereich

Es wird eine lineare Interpolation zwischen $Nu_{\text{laminar}}(Re = 2300)$ nach Gl. (4.4) und $Nu_{\text{turbulent}}(Re = 10000)$ nach Gl. (4.5) vorgenommen, wobei gelten:

$$\gamma = \frac{Re - 2300}{10^4 - 2300} \quad (4.7)$$

$$Nu = (1 - \gamma) Nu_{\text{laminar}}(Re = 2300) + \gamma Nu_{\text{turbulent}}(Re = 10000) \quad (4.8)$$

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

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 $Re = 7000$ vorgeschlagen wird. Damit gelten in diesem Übergangsbereich die nachfolgenden Zusammenhänge:

$Nu_{\text{laminar}}(Re = 2300)$ nach Gl. (4.1) und $Nu_{\text{turbulent}}(Re = 7000)$ nach Gl. (4.2)

$$\gamma^* = \frac{Re - 2300}{7000 - 2300} \quad (4.9)$$

$$Nu = (1 - \gamma^*) Nu_{\text{laminar}}(Re = 2300) + \gamma^* Nu_{\text{turbulent}}(Re = 7000). \quad (4.10)$$

Im Bild 4.2 sind die unterschiedlichen Berechnungsansätze grafisch gegenübergestellt.

Anwendungsempfehlung: Die Abweichung zwischen den Gln. (4.8) und (4.10) ist unbedeutend gegenüber der ausgebildeten turbulenten Strömungsform nach Gl. (4.2). Somit kann $Nu = f(Re)$ beispielsweise im Übergangsbereich bis $Re \leq 7000$ durch die Gl. (4.10) und darüber durch Gl. (4.2) approximiert werden. Der laminare Bereich sollte bei Rohrschlangen vermieden werden. Treten niedrige Reynoldszahlen auf, was bei Kapillarrohrmatten stets zutrifft, ist der Einfachheit halber Gl. (4.1) zu bevorzugen, da der Unterschied zu Gl. (4.4) ohnehin klein ist.

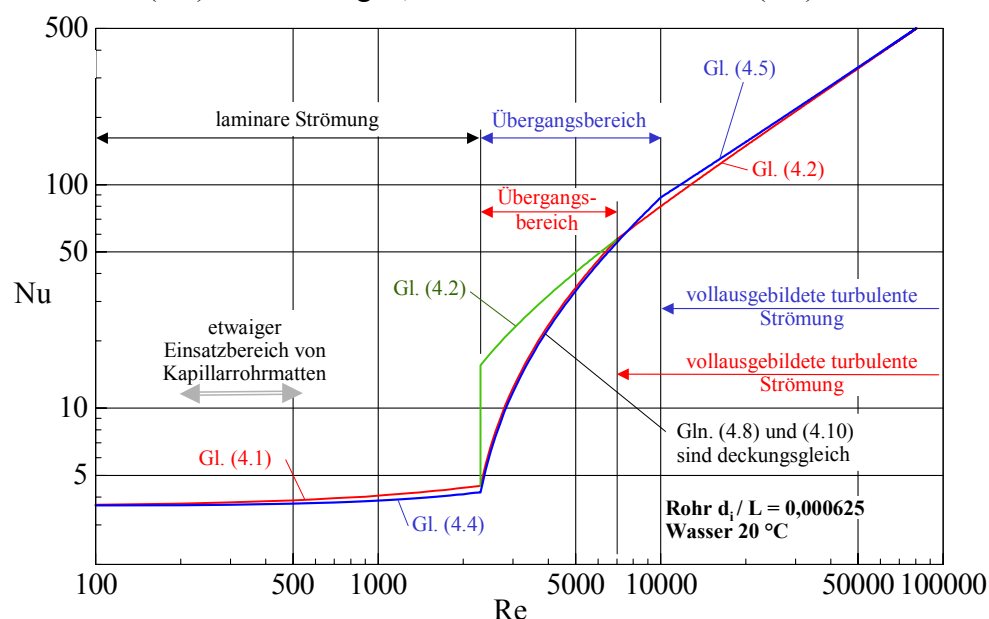


Bild 4.2 Gegenüberstellung der verschiedenen Nußeltgleichungen in Abhängigkeit von Re für einen ausgewählten Einsatzfall

Die **Stoffwerte** in den Nußeltgleichungen sind auf die mittlere Fluidtemperatur zu beziehen. Geeignete Stoffwertapproximationen sind Tabelle 4.1 zu entnehmen. Die Stoffwerte für Wasser basieren auf [5].

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 [3] bei laminarer und turbulenter Strömung der gleiche Korrekturterm

$$Nu_{\text{kor}} = Nu \left(\frac{Pr}{Pr_W} \right)^{0,11} \quad (4.11)$$

angesetzt. In den üblichen Einsatzfällen für Rohre in Erdwärmekollektoren 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

$$\alpha_R = \frac{Nu \lambda}{d_i} \quad (4.12)$$

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

$$\kappa_R = \left(\frac{d_a}{\alpha_R d_i} + \frac{d_a}{2 \lambda_R} \ln \frac{d_a}{d_i} \right)^{-1} \quad (4.13)$$

4.3 Spezielle Größen des Erdwärmekollektors

Für den Kollektor oder je nach Betrachtungsweise für das gesamte Kollektorfeld mit der Fläche $A_{\text{Kollektor}}$ gilt die Wärmeleistung $\dot{Q}_{\text{Kollektor}}$. Sie ist bei Wärmeaufnahme (Wärmequellenbetrieb) positiv.

Daraus folgt die **Wärmestromdichte** \dot{q} als flächenspezifischer Wert zu

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}_{\text{Kollektor}}}{A_{\text{Kollektor}}} \quad (4.14)$$

Die Leistung kann als Fixwert für alle Betriebsstunden oder als Zeitverlauf benannt werden.

Eine wichtige Größe stellt noch die **Flüssigkeitseintrittstemperatur** t_{ein} (Kollektorvorlauftemperatur) dar. Auch sie könnte einen konstanten oder zeitabhängigen Eingabewert darstellen.

Mit der **Temperaturspreizung** $\Delta t_{\text{Kollektor}}$ ergibt sich dann die Flüssigkeitsaustrittstemperatur

$$t_{\text{aus}} = t_{\text{ein}} + \Delta t_{\text{Kollektor}} \quad (4.15)$$

Schließlich besteht noch der Zusammenhang zwischen Wärmeleistung $\dot{Q}_{\text{Kollektor}}$ und **Massestrom** $\dot{m}_{\text{Kollektor}}$ ($= \dot{V} \rho$), wobei der Volumenstrom \dot{V} während der betrachteten Betriebsstunde als konstante Größe angenommen wird. Es gilt bekannterweise mit der spezifischen Wärmekapazität der Flüssigkeit (Medium) c_{Medium} :

$$\dot{Q}_{\text{Kollektor}} = \dot{m}_{\text{Kollektor}} c_{\text{Medium}} \Delta t_{\text{Kollektor}} = \dot{q} A_{\text{Kollektor}} \quad (4.16)$$

Wie bereits ausgeführt, sollen alle wärmetechnischen Kollektorberechnungen auf der **mittleren Medientemperatur** t_{mittel} basieren. Wegen der in der Regel kleinen Spreizung $\Delta t_{\text{Kollektor}}$ und zur Vereinfachung – die Kollektorgeometrie nicht detaillieren zu müssen – gelten für alle Flachkollektortypen:

$$t_{\text{mittel}} = t_{\text{ein}} + 0,5 \Delta t_{\text{Kollektor}} \quad (4.17)$$

Je nachdem, ob die Leistung des Erdwärmekollektors $\dot{Q}_{\text{Kollektor}}$ oder die Flüssigkeitseintrittstemperatur t_{ein} vorgegeben ist, muss eine Anpassung durch gezielte Veränderungen erfolgen. Die detaillierte Strategie zur Anpassung basiert auf Vorausabschätzungen der realen Wärmebilanzen und ist dem Programmlisting zu entnehmen.

5 Komplexmodell der Simulation von Erdwärmekollektoren

Anhand des Bildes 5.1, das auf den Bildern 2.2 und 3.1 basiert, soll verdeutlicht werden, welches Gittermodell und welche wärmetechnischen Randbedingungen bestehen, um die Algorithmen gut nachvollziehen zu können.

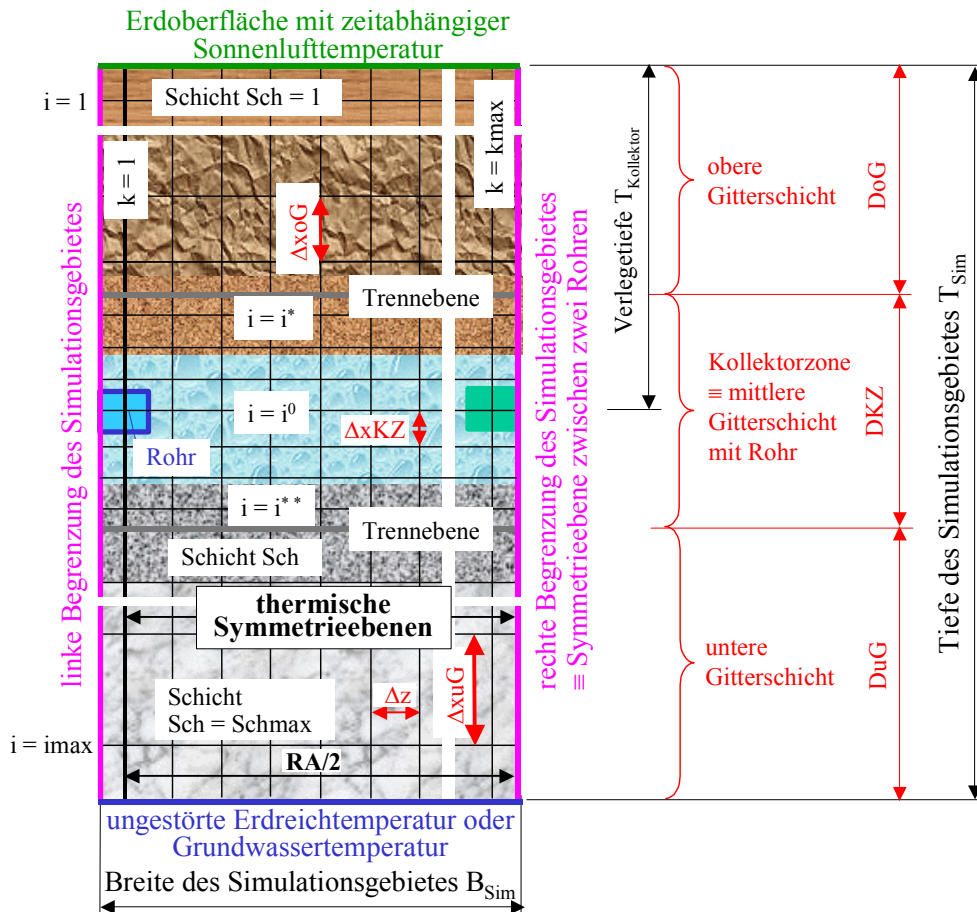


Bild 5.1 Vertikaler Schnitt durch das Simulationsgebiet mit Kennzeichnung der Simulationsabschnitte $i = 1 \dots i_{\max}$ und $k = 1 \dots k_{\max}$

Das Simulationsgebiet kann maximal sechs unterschiedliche horizontale Erdschichten umfassen.

Die Breite des Simulationsgebietes ergibt sich aus dem halben Rohrabstand plus einer halben Gitterbreite ($RA/2 + \Delta z/2$). Die Tiefe des Simulationsgebietes ist aus wärmetechnischer Sicht so festzulegen, dass dort eine nahezu ungestörte Erdreichtemperatur auftritt.

5.1 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 der Erdwärmekollektor von einem Gebäude überbaut, würde man die angrenzende mittlere Raumtemperatur benennen. Der Erdwärmekollektor könnte dann aber nur im ausgeglichenen Speicherbetrieb genutzt werden. 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 5.2 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 5.2 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 kurzwelligigen 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 kurzwelligigen Strahlung und bildete die **Sonnenlufttemperatur**

$$t_a(\tau) = t_L(\tau) + \frac{a \dot{I}_{\text{gesamt}}(\tau)}{\alpha_a} \quad (5.1)$$

$t_L(\tau)$	°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:

$$t_a(\tau) = t_L(\tau) + \frac{a \dot{I}_{\text{gesamt}}(\tau)}{\alpha_a} + X, \quad (5.2)$$

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

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

$$t_{ka} = t_L(\tau) + \frac{a \dot{I}_{\text{gesamt}}(\tau)}{\alpha_a} - \frac{\varepsilon C_S}{\alpha_a} \left\{ \left[\left(\frac{T_{Lm}}{100} \right)^4 + \beta(t_L(\tau) - t_{Lm}) \right] [-e_G \varepsilon_G - e_U \varepsilon_U] \right\} \quad (5.3)$$

ε	-	Emissionskoeffizient der Bauteiloberfläche für langwellige Strahlung
C_S	W/(m ² K ⁴)	Strahlungskoeffizient des schwarzen Körpers ($C_S = 5,67$ W/(m ² 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. (5.3) Kritik, da diese nicht die langwelligen Reflexionen der Umgebung beinhaltet. Einzelheiten sind [4, Teil D] zu entnehmen. Für Horizontalflächen ist dieser Einfluss aber unwichtig.

Bei der Auswertung der Gln. (5.1) bis (5.3) ist der **Koeffizient a/α_a** von großer Bedeutung. Er ist nur in grober Näherung erfassbar. Für die Einzelwerte gelten relativ große Bereiche, wie [4, Teil D] verdeutlicht. Im vorliegenden Simulationsmodell finden näherungsweise die Gl. (5.1) sowie ganzjährig die Mittelwerte Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_a = 15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und Absorptionskoeffizient $a = 0,3$ für die Solarstrahlung auf eine unversiegelte Fläche Anwendung. Diese Annahmen können selbstverständlich zur Diskussion gestellt werden (siehe auch Bild 7.2, Seite 46).

Somit ist die Sonnenlufttemperatur nach Gl. (5.1) 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 T_{Sim} . Ist T_{Sim} 10 ... 15 m, so kann in der Regel kein jahreszeitlicher Verlauf mehr wahrgenommen werden. Die Erdreichtemperatur in dieser Tiefe entspricht in der Regel der mittleren Jahreslufttemperatur. Ist in geringeren Tiefen bereits Grundwasser vorhanden, kann die Grundwassertemperatur als konstant – beispielsweise 10 °C – angenommen werden.

- **Flüssigkeitseintrittstemperatur und Kollektorleistung (Beachte: Abschnitt 4.3)**

Welche der beiden Vorgaben für die Simulation relevant ist, bestimmt die Eingabe Anpass {Anpass = 1: Eintrittstemperatur; Anpass = 2: Kollektorleistung pro m^2 (\equiv Wärmestromdichte)}.

Die Flüssigkeitseintrittstemperatur und die geforderte Wärmestromdichte 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 Kollektorleistung" als FT(Monat, Stunde) bzw. $F\dot{Q}$ (Monat, Stunde)). Der Jahresgang wird aus je zwölf 24-Stunden-Tagesgängen, die für die Monate Januar bis Dezember repräsentativ sind, programmintern zusammengesetzt.

- **Kollektordurchfluss**

Analog dazu wird mit der Vorgabe des Durchflusses verfahren. Der Volumenstrom des Kollektors

bzw. des Kollektorfeldes – stets bezogen auf die Fläche $A_{\text{Kollektor}}$ kann als **Konstantwert** \dot{V}_{fix} für die gesamte Simulationszeit oder als **Jahresverlauf** (Eingabe in der Oberfläche "Flüssigkeitsdurchfluss" als FV(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 Kollektorbetrieb**. Ist dieser >0 , dann wird während dieser Betriebsstunde auch der Wärmestrom zwischen Kollektorrohr und Erdreich mit untersucht, ansonsten werde nur die instationäre Wärmeleitung im Erdreich betrachtet.

- **Datenzusammenstellung für den Kollektorbetrieb**

Um einen einfachen Programmablauf zu gewährleisten, werden die vorgenannten Betriebsdaten (Flüssigkeitseintrittstemperatur oder geforderte Kollektorleistung und Durchfluss), die nach der Eingabe konstant sind bzw. als Jahresverlauf vorliegen über die Betriebszeit BS_{max} in Form **eindimensionaler Felder** gebildet. Somit existieren: $T_{\text{tSim}}(BS = 1 \dots BS_{\text{max}})$ oder $\dot{Q}_{\text{Sim}}(BS = 1 \dots BS_{\text{max}})$ und $\dot{V}_{\text{Sim}}(BS = 1 \dots BS_{\text{max}})$.

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

5.2 Verknüpfung der Einzelalgorithmen zum Simulationsmodell

- **Instationäre Simulation**

Das im Bild 5.1 dargestellte Gebiet hat die Form eines Quaders mit der Abmessung $\Delta y = 1$ m in die Tafelenebene hinein, der mit **Erdreich** ausgefüllt ist. Das Kollektorrohr ist jedoch ausgespart. Im Erdreich wird stets eine **instationäre Wärmeleitung** simuliert. Der zugehörige Algorithmus und die Randbedingungen sind im Abschnitt 3 vorgestellt.

Die **Wärmetransporte an der Erdoberfläche** und an der **Sohle** sowie die **thermischen Symmetrien** sind in einfacher Weise zu modellieren.

- **Stationäre Simulation**

Die wärmetechnischen Vorgänge im Kollektorrohr einschließlich Rohrwand werden als **quasistationär** aufgefasst, d. h., eine Wärmespeicherung im Rohr wird nicht betrachtet. Die bei Kollektordurchfluss zwischen Rohr und Erdreich auftretenden Wärmeströme sind in den Gl. (3.15) bis (3.17) formuliert.

- **Wärmebilanzen an den Rändern des Simulationsgebietes**

Aus Bild 5.1 ist erkennbar, dass an der **Erdoberfläche** und an der **Sohle** des Simulationsgebietes ein Wärmetransport zwischen Simulationsgebiet und Umgebung erfolgen kann.

An den seitlichen **thermischen Symmetrieebenen** findet per Definition kein Wärmetransport statt.

Die Bilanzierung aller Wärmeströme muss sich somit auf den Abstand $RA/2$, d. h. auf den Bereich zwischen den thermischen Symmetrieebenen beschränken.

Weshalb der Bilanzbereich ($RA/2$) kleiner als das ausgewiesene Simulationsgebiet B_{Sim} ist, wurde ausführlich auf Seite 6 begründet (Rohr umfasst *nur ein* Volumenelement!)

Der Sonderfall einer starken seitlichen Wasserströmung innerhalb der Tiefe des Simulationsgebietes T_{Sim} wäre bei Bedarf noch ins Rechenprogramm zu integrieren.

Die Erfassung des Wärmestroms an der Erdoberfläche ist durch Gl. (3.13) bzw. an der Erdsohle durch die Gl. (3.14) gegeben. Die zugehörigen Wärmemengen 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):

$$t_{i,k} < 0: Q_{i,k} = C_{E,i,k} \cdot (t_{i,k} + 10) \quad (5.4) \quad t_{i,k} = 0: Q_{i,k} = C_{E,i,k} \cdot 10 + Q_{\text{Phase},i,k} \cdot \text{Phase}_{i,k} \quad (5.5)$$

$$t_{i,k} > 0: Q_{i,k} = C_{E,i,k} \cdot 10 + C_{\text{Efl},i,k} \cdot t_{i,k} + Q_{\text{Phase},i,k} \quad (5.6) \quad Q_{\text{Speicher}} = \sum_{i=1}^{\text{imax}} \sum_{k=1}^{\text{kmax}} Q_{i,k} \cdot \text{HG} \quad (5.7)$$

Bei der Summierung gilt normalerweise $\text{HG} = 1$, bei Sonderelementen ist zu beachten:

Wenn $i=i^0, k=1$, dann $\text{HG} = 0$ (Rohr ist ausgespart).

Wenn $i,k=1$, dann $\text{HG} = 0,5$ (gemäß Bild 5.1 werden linke Volumenelemente nur zur Hälfte bilanziert).

5.3 Programmablaufplan

Eingabe gemäß Maske: Hauptprogramm

- Geometrie des Erdwärmekollektors und des Simulationsgebietes mit Angabe zur Diskretisierung
- Dicke und Stoffwerte der Erdschichten
- Rohr-, allgemeine Kollektordaten und Flüssigkeitsdaten
- Bedingungen des Kollektorbetriebes (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 Erdreichtemperaturverteilung 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: Kollektorleistung

- Für jeden Monat (Januar bis Dezember) wird ein repräsentativer Tag mit 24 Stundenwerten für die geforderte Wärmeleistung des Erdwärmekollektors 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 des Kollektors – auf den sich die Kollektorfläche bezieht – benannt.
- Eingabe ist nur erforderlich, wenn der Konstantwert in der Hauptmaske nicht ausgefüllt ist.

Basisberechnungen zur Simulationsvorbereitung

- Vorabberechnung von speziellen Rohrgrößen
- Aufbau des Geometriegitters mit den Laufvariablen $i = 1 \dots i_{\max}$ und $k = 1 \dots k_{\max}$ sowie den Größen ΔoG , ΔKZ , ΔuG usw.
- Berechnung der Elementvolumina
- Zuordnung 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 $Intervall_{\max}$ für 3600 s ($Intervall_{\max} \times \Delta\tau = 3600$); als maximale Zeitschrittweite gilt $\Delta\tau = 200$ s
- Füllung der Starttemperatur- und Phasenzustandsfelder (Gitterwerte) mit $t_{i,k} = 8$ °C $Phase_{i,k} = 1$ oder aber mit einem bekannten Temperaturfeld und Phasenfeld einer früheren Simulation einschließlich der Vorgabe der mittleren Medientemperatur im Rohr
- 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 Kollektorsimulation! (Durchfluss = 0, Rohrwand adiabat)} "Eintrittstemperatur" $\{t_{\text{ein}}(BS)\}$ oder "Kollektorleistung" $\dot{Q}_{\text{Kollektor}}(BS)$ "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 des Teilwärmedurchgangskoeffizienten für das Kollektorrohr (κ_R); Berechnung mit der mittleren Fluidtemperatur (t_{mittel}) der jeweils letzten Kollektorbetriebsstunde

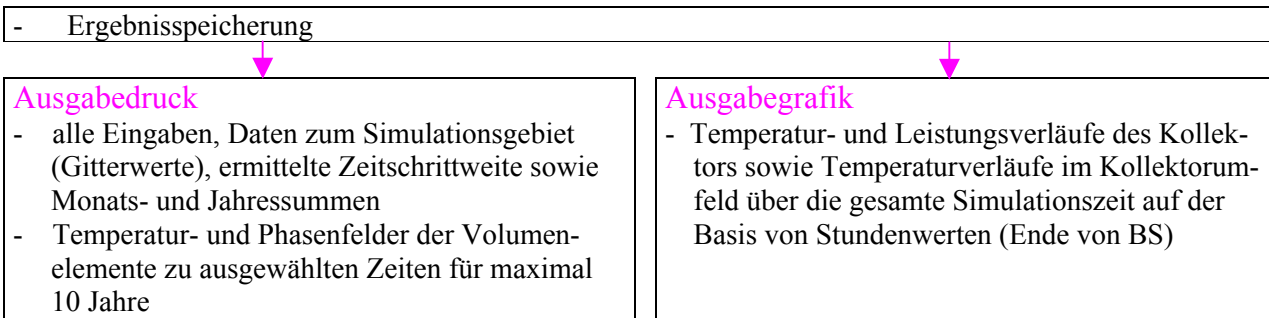
Beginn der $\Delta\tau$ -Zeitschleife $Intervall = 1 \dots Intervall_{\max}$ **Instationäre Temperaturfeldberechnung im Erdreich innerhalb des Simulationsgebietes und quasi-stationärer Wärmetransport an das Durchflussmedium**

- Berechnung der Wärmeströme in alle Volumenelemente $\dot{Q}_{\text{ein},i,k}$ und $\dot{Q}_{\text{kein},i,k}$
- Ermittlung der Wärmezufuhr von oben sowie von unten an das Erdreich und an das Rohr
- Wärmezunahme im Element
- Zuordnung der Elementwärme und neuer thermischer Zustand mit und ohne Phasenwandel (Gefrieren bzw. Schmelzen von Wasser im Erdstoff)
- Ermittlung spezieller Kollektordaten und Anpassung von t_{mittel} für den nächsten Zeitschritt entsprechend der Vorgaben $t_{\text{ein}}(BS)$ bzw. $\dot{Q}_{\text{Kollektor}}(BS)$
- Übernahme der neuen Temperatur am Ende des Zeitschrittes $t(i, k) = t_n(i, k)$
- Bestimmung ausgewählter Feld- sowie der Vor- und Rücklauftemperaturen (Ende von BS)
- Bilden von Wärmesummen über die Betriebsstunde BS (Ende von BS)

Ende der $\Delta\tau$ -Zeitschleife $Intervall = 1 \dots Intervall_{\max}$

- Speicherung der Felder $t(i, k)$, $Phase(i, k)$ plus t_{mittel} für ausgewählte Simulationsstunden sowie für die letzte Kollektorbetriebs- und Simulationsstunde
- Ermittlung und Speicherung der Speicherwärme am Ende eines Simulationsjahres

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



Die Zählweise der Betriebsstunden und der Intervalle ist aus Bild 5.3 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).

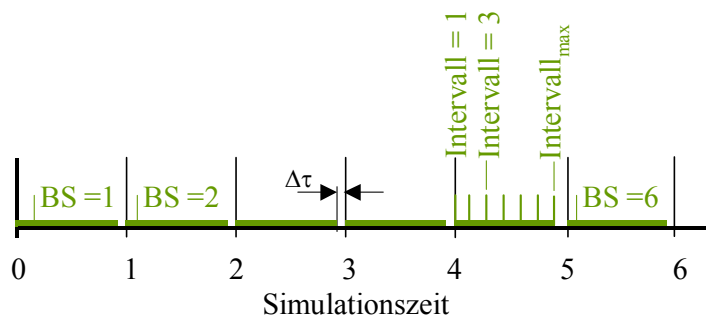


Bild 5.3 Definition und Zählung der Betriebsstunden sowie der Intervalle innerhalb der Betriebsstunden

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 – sprunghaft geändert werden kann. Bei der derzeitigen Festlegung bleibt der Ausgangswert wenigstens eine Stunde konstant erhalten.

5.4 Komplexprogramm zur Simulation des Erdwärmekollektors

Das lauffähige Programm ist wiederum in der Programmierumgebung VisualBasic.net (Standard) erstellt worden und steht zum kostenlosen Download bereit (siehe auch Abschnitt 6). Nachfolgend werden anhand der Programmoberflächen die Eingabedaten beschrieben.

• Hauptprogramm

Bild 5.4 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 5.5 dargestellte Fenster. Nach einer eventuellen Korrektur des Pfades – in dem sich das Beispiel befindet – wird mit OK bestätigt.

Nach dem Schließen des im Bild 5.5 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 Kollektorleistungsverlauf	ZVERLAUFV.dat Vorgabe Durchflussverlauf
Speicherfeld.dat Zustand am Simulationsende	Speicherfeld-aktiv.dat Zustand am Ende des Kollektorbetriebes	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

TIEFE.dat Lage der Gitterschichtmitten unter der Erdoberfläche	Wurde der Ordner für das Beispiel 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 Hauptoberfläche aus können auch die für die Eingabe der Zeitverläufe zuständigen Masken **EINTRITTSTEMPERATUR**, **KOLLEKTORLEISTUNG** und **DURCHFLUSS** durch die entsprechende Buttonaktivierungen aufgerufen werden. Sie werden später vorgestellt.

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

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

Bild 5.4 Hauptoberfläche (Maske 1) des Rechenprogramms "Erdwärmekollektor" mit der Startfüllung von Daten, die durch das Laden einer bereits gefüllten Datei oder durch Einzeleingaben bzw. Korrekturen überschreibbar ist

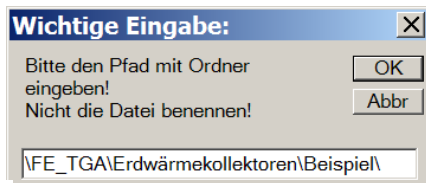


Bild 5.5 Fenster mit Vorschlag eines Pfades einschließlich Ordners für das Simulationsbeispiel

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 \(Bild 5.4\)](#)

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

Hauptgeometriedaten (siehe Bild 5.1 oder Bildschirmmaske 5.4):		
TKollektor	m	Verlegetiefe des Erdwärmekollektors
RA	mm	Rohrabstand zwischen den Kollektorrohren
KF	-	Kollektorform Rohrschlange: 1; Rohrmatte: 2
TSim	m	Simulationstiefe (Tiefe bis zur Sohle des Simulationsgebietes)
GF	-	Gitterform außerhalb der Kollektorzone normal: 1 fein: 2 grob: 3 (ca. 100 mm; 50 mm; 200 mm)
Schichtdaten (siehe Bild 5.1 oder Bildschirmmaske 5.4):		
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
Kollektordaten (siehe Bild 2.3, Bild 2.4 und Bildschirmmaske 5.4):		
da	mm	Außendurchmesser der Kollektorrohre
delR	mm	Rohrwanddicke
lamR	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit der Rohrwand
Fluessigkeit	-	Durchflussmedium in den Kollektorrohren: <ul style="list-style-type: none"> • wässrige Lösung mit 40 % Tyfocor L (programmintern: Fluessigkeit = 4) • wässrige Lösung mit 25 % Tyfocor L (programmintern: Fluessigkeit = 5) • Wasser (programmintern: Fluessigkeit = 1)
AKollektor	m ²	Kollektorfläche (gesamte belegte Rohrfläche mit Randabständen von RA/2)
RZ	-	Anzahl der parallel durchflossenen Rohre (Anzahl der Stromwege in die der Kollektordurchfluss aufgeteilt ist.)
L	m	Gerade Rohrlänge innerhalb des Kollektors (bei Schlangenform: Mittelwert)
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 Kollektorleistung während der gesamten Simulationszeit Falls Tfix gilt oder die Kollektorleistung zeitabhängig ist, "blank" eingeben (bitte kein Leerzeichen). {Für Zeitfolge Maske 3 verwenden!}
Vfix	l/h	Konstanter Durchfluss durch die Kollektorrohre (Gesamtkollektor) während der gesamten Simulationszeit ($V_{fix} \geq 0$) Wenn $V_{fix} > 0$, muss auch Tfix oder Qfix einen sinnvollen Wert besitzen! $V_{fix} = 0$ dient zur Erdreichsimulation ohne Kollektorbetrieb. 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) • Kollektorleistung (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. (5.1) gebildet werden, wobei der Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_a = 15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ zu verwenden ist. Weiterhin wird der Absorptionskoeffizient $a = 0,3$ empfohlen. Die Lufttemperatur und die Globalstrahlung ist dem für den Standort gültigen Testreferenzjahr nach DIN 4710 zu entnehmen. Die Datei muss 8760 Stundenwerte für t_a vom 1. Januar bis 31. Dezember enthalten und von Visual Basic durch einen Input-Befehl lesbar sein.
tErdsohle	°C	Konstante Erdsohlentemperatur Die Temperatur muss mit der Tiefe der Sohle des Simulationsgebietes zusammenpassen. Es darf kein Oberflächeneinfluss mehr auftreten.
Erdreichtemperatur- und Phasenfeld $t(i, k)$ $\text{Phase}(i, k)$	-	Bei Beginn einer Simulation wird normalerweise das Temperaturfeld $t(i, k) = 8 \text{ °C}$ und das Phasenfeld $\text{Phase}(i, k) = 1$ eingetragen. 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. Die Datei Speicherfeld.dat darf nicht benannt werden. Sie wird automatisch bei der Programmabarbeitung ergänzt. Da Speicherfeld.dat vorher vom Programm erzeugt wurde, ist sie auch komplikationslos einlesbar.

- Eingabe zeitlich veränderlicher Flüssigkeitseintrittstemperaturen (Bild 5.6)

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 5.3; es erfolgt keine Interpolation). Weiterhin gilt der Mustertag für den gesamten Monat.

Bild 5.6 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 Kollektordurchfluss erfolgt, muss bei Anpass = 1 auch die Flüssigkeitseintrittstemperatur bekannt sein. Stundeneingaben während des Kollektorstillstandes werden ignoriert, der besseren Übersicht wegen, sollten die Felder "blank" sein. Die Datenspeicherung erfolgt in der Datei **ZVERLAUFT.dat**.

- **Eingabe zeitlich veränderlicher Kollektorleistungen (Bild 5.7)**

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

Kollektorleistung		
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 5.3; es erfolgt keine Interpolation). Weiterhin gilt der Mustertag für den gesamten Monat.

Eingabe: Kollektorleistung

Geforderte Kollektorleistung in W/m²

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

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 5.7 Eingabeoberfläche für die geforderte Kollektorleistung (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 Kollektordurchfluss erfolgt, muss bei Anpass = 2 die Kollektorleistung bekannt sein. Stundeneingaben während des Kollektorstillstandes werden ignoriert, der besseren Übersicht wegen, sollten die Felder "blank" sein. Die Datenspeicherung erfolgt in der Datei **ZVERLAUFQ.dat**.

- **Eingabe zeitlich veränderlichen Durchflusses (Bild 5.8)**

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

Kollektordurchfluss		
FV(Monat, Tagesstunde)	l/h	Für jeden Monat wird ein repräsentativer Tag mit Stundenwerten gefüllt. Diese Werte gelten während der gesamten Stunde (Intervall = 1 bis Intervall _{max} nach Bild 5.3; es erfolgt keine Interpolation). Weiterhin gilt der Mustertag für den gesamten Monat. Durchflussangabe für den gesamten Kollektor, d. h. für alle parallelen Strömungswege (siehe Bilder 2.3 und 2.4).

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 Kollektorbetrieb. Sind Felder "blank", so erfolgt kein Kollektordurchfluss. 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 der Kollektor im Dauerbetrieb befinden.

Bild 5.8 Eingabeoberfläche für den Kollektordurchfluss (Maske 4)

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

Die Zusammenstellungen der Eingabewerte sowie der Ergebnisse werden als MS WORD-Dateien angezeigt. Sie können individuell geändert, gespeichert und ausgedruckt werden. Die Ausgaben sind selbsterklärend und anhand der Testbeispiele ersichtlich. Zusätzlich ist eine umfangreiche Grafikausgabe möglich.

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

DRUCK liefert den Ausdruck aller Eingaben und der erzeugten Gitterdaten einschließlich der verwendeten Zeitschrittweite sowie aller monatlichen und jährlichen Summenwerte.

Für die Summengrößen in Wh/m² gelten bezogen auf das Simulationsgebiet die folgenden Definitionen:

- "Sonnenwärme" ist die über die Erdoberfläche von 1 m² zugeführte Energie
- "Erdwärme" summiert den Energiestrom von unten im Bereich von 1 m²
- "Kollektorarbeit" stellt die Wärme an 1 m² Kollektorfläche dar
- "Bilanz" verkörpert "Sonnenwärme" + "Erdwärme" – "Kollektorarbeit" pro 1 m² Kollektorfläche .

Zudem wird am Jahresende die Speicherwärme für einen Erdreichquader mit dem Volumen Tiefe des Simulationsgebietes × 1 m² Kollektorfläche bezogen auf -10 °C ausgegeben. Sie beinhaltet – soweit vorhanden – auch die Phasenwandelwärme des Erdstoffes.

T-/Phase-TABELLE beinhaltet die Temperaturen und Phasen der Volumenelemente wahlweise Ende Februar bzw. Ende Oktober für maximal zehn Simulationsjahre und am Ende des Kollektorbetriebes sowie am Simulationsende (Bilder 5.9 und 5.10). Dabei gilt als Monatsende jeweils die 23. Stunde, da zu dieser Zeit eventuell noch Kollektorbetrieb herrscht.

Druck des Temperatur- / Phasenfeldes

Pfad und Dateiname: F:\ASD\FE_TGA\Erdwärmekollektoren\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 type="checkbox"/>	<input 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 Kollektordurchfluss		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Letzte durchgeführte Simulation		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

DRUCK **BEENDEN**

Bild 5.9 Auswahl des Druckes der Temperatur- und Phasenfelder

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\ERDWÄRMEKOLLEKTOREN\BEISPIEL\FEB2.DATBitte richten Sie die Tabellengestalt nach Ihren Wünschen ein!
Z. B.: Querformat, Schriftgröße, Farbe usw.**Temperaturen: Erdreich k = 1 ... 20 in °C zur Zeit 10175 Stunden**

R kennzeichnet die Rohrlage; z(i) gibt die Tiefe der Elementschicht i in m an

i	z(i)	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	0,05	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	
2	0,16	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	
3	0,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
4	0,37	-0,56	-0,56	-0,56	-0,56	-0,56	-0,56	-0,56	-0,56	-0,56	-0,56	-0,56	-0,56	-0,56	-0,56	-0,56	-0,56	-0,56	-0,56	-0,56	-0,56	
5	0,47	-1,10	-1,10	-1,10	-1,10	-1,10	-1,10	-1,10	-1,10	-1,10	-1,10	-1,10	-1,10	-1,10	-1,10	-1,10	-1,10	-1,10	-1,10	-1,10	-1,10	
.
19	1,18	-7,51	-6,62	-5,83	-5,29	-4,94	-4,72	-4,57	-4,49	-4,43	-4,41	-4,42	-4,42	-4,42	-4,42	-4,42	-4,42	-4,42	-4,42	-4,42	-4,42	
20	1,20	R	-7,35	-6,05	-5,37	-4,98	-4,74	-4,59	-4,50	-4,44	-4,42	-4,42	-4,42	-4,42	-4,42	-4,42	-4,42	-4,42	-4,42	-4,42	-4,42	
21	1,22	-7,50	-6,62	-5,82	-5,29	-4,94	-4,71	-4,57	-4,48	-4,43	-4,41	-4,42	-4,42	-4,42	-4,42	-4,42	-4,42	-4,42	-4,42	-4,42	-4,42	
22	1,25	-6,19	-5,89	-5,46	-5,10	-4,83	-4,65	-4,52	-4,45	-4,40	-4,38	-4,38	-4,38	-4,38	-4,38	-4,38	-4,38	-4,38	-4,38	-4,38	-4,38	
.
36	2,01	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55	
37	2,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
38	2,21	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	
.
65	4,95	9,83	9,83	9,83	9,83	9,83	9,83	9,83	9,83	9,83	9,83	9,83	9,83	9,83	9,83	9,83	9,83	9,83	9,83	9,83	9,83	

Mittlere Medientemperatur im Rohr: -11,60 °C

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\ERDWÄRMEKOLLEKTOREN\BEISPIEL\FEB2.DATBitte richten Sie die Tabellengestalt nach Ihren Wünschen ein!
Z. B.: Querformat, Schriftgröße, Farbe usw.**Phasenzustände des Erdreichs k = 1 ... 20 in Werten 0 ... 1 zur Zeit 10175 Stunden**

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

R kennzeichnet die Rohrlage; z(i) gibt die Tiefe der Elementschicht i in m an

i	z(i)	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	0,05	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	
2	0,16	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	
3	0,26	0,592	0,592	0,592	0,592	0,592	0,592	0,592	0,592	0,592	0,592	0,592	0,592	0,592	0,592	0,592	0,592	0,592	0,592	0,592	0,592	
4	0,37	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
5	0,47	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
.
19	1,18	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
20	1,20	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
21	1,22	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
22	1,25	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
.
36	2,01	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
37	2,11	0,474	0,474	0,474	0,474	0,474	0,474	0,474	0,474	0,474	0,474	0,474	0,474	0,474	0,474	0,474	0,474	0,474	0,474	0,474	0,474	
38	2,21	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	
.
65	4,95	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	

Bild 5.10 Musterausdruck eines Temperatur- und Phasenfeldes zur Kennzeichnung des Tabellenaufbaues und des Inhaltes**DIAGRAMM-UMFELD** bewirkt die grafische Darstellung der Temperaturen und Leistungen des Kollektors und der verwendeten Sonnenlufttemperatur sowie ausgewählter Erdreichtemperaturen für maximal zehn Simulationsjahre längs der Simulationszeit (Bild 5.11).**Anmerkung 1:** Die angebotenen Abstände vom linken Simulationsrand sowie die Tiefen von der Erdoberfläche aus sind programmintern festgelegt. Sie betragen:Tiefen: Mitte 1. Gitterschicht; ca. halbe Verlegetiefe; Mitte der Gitterschicht über dem Kollektor;
ca. Mitte zwischen Verlegetiefe und SimulationstiefeAbstände: $k_1=1$; $k_2 = \text{Int}(1/3 \cdot k_{\text{max}})$; $k_3 = \text{Int}(2/3 \cdot k_{\text{max}})$; $k_4 = k_{\text{max}}$.**Anmerkung 2:** Generell gelten die Stundendaten für das letzte Intervall (Intervallmax) der betrachteten Stunde (Beachte die Stundendefinition nach Bild 5.3). Deshalb beginnen die Kurvenverläufe zum Simulationsbeginn auch erst am Ende der ersten Simulationsstunde (siehe auch Bild 5.12, Darstellung der Sonnenlufttemperatur tSL). Da bei intermittierendem Kollektorbetrieb dann mitunter nur Punkte den Kurvenverlauf der Kollektordaten charakterisierten, wird in diesem Fall der Endwert der Stunde auch am Stundenanfang verwendet und verbunden. Somit werden die Betriebszeiten des Kollektors grafisch richtig dargestellt (Bild 5.12). Am Kurvenbeginn könnte die Temperatur oder die Leistung von der Realität abweichen. Hierzu sei aber angemerkt, dass die Transportzeiten im Kollektorrohr und

eventuelle Rohrbereiche mit abweichender Temperatur ("Pfropfen") beim wiederholten Durchflussbeginn ohnehin keine Beachtung finden.

Die Kollektorleistungen werden bei intermittierendem Betrieb nur für den Betriebsfall dargestellt, d. h., die Nullwerte bei Kollektorstillstand entfallen ebenso, wie vertikale Verbindungslinien am Anfang und Ende des Kollektorbetriebs.

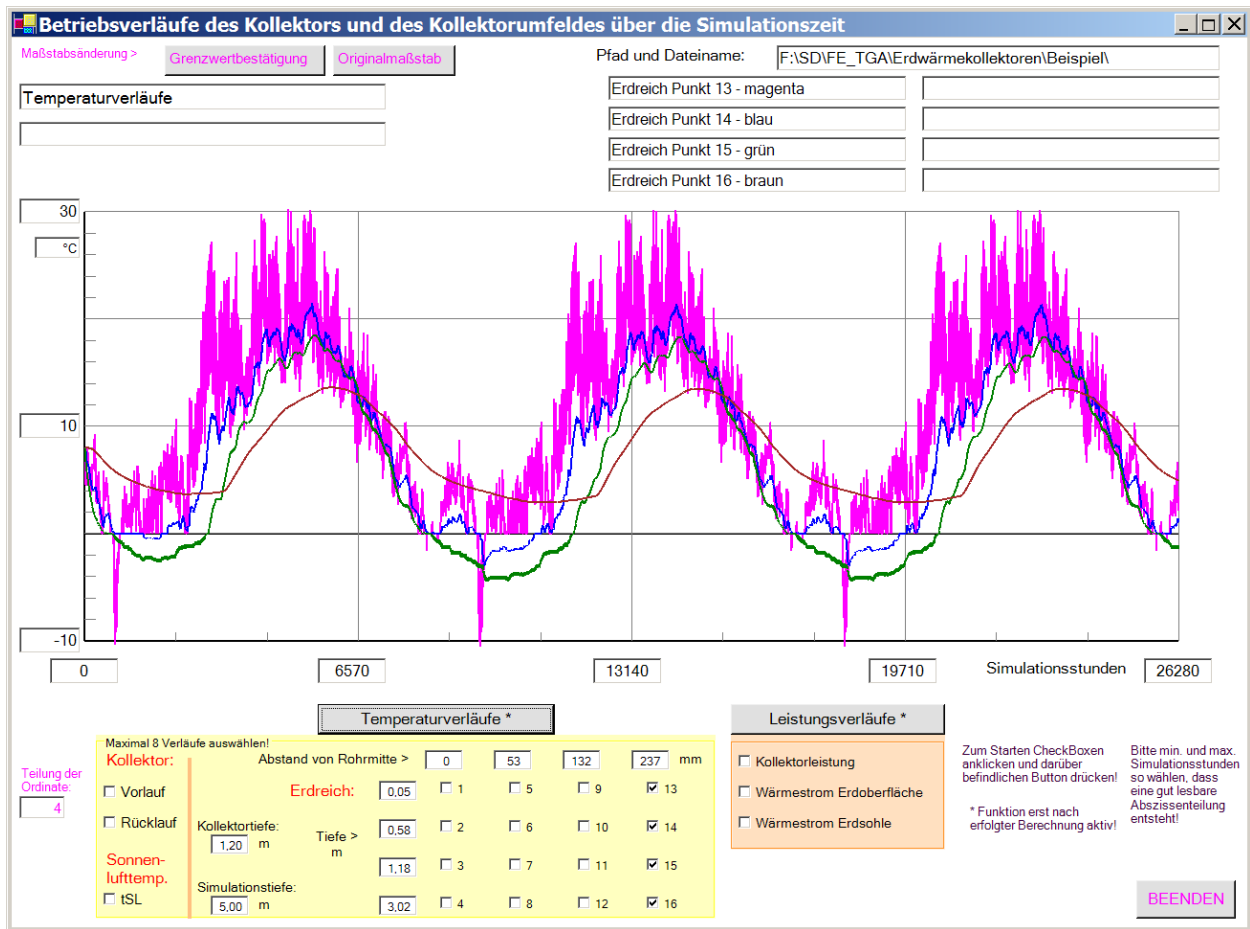


Bild 5.11 Musterdiagramm "Betriebsverläufe des Kollektors und des Kollektorfeldes über die Simulationszeit" zur Kennzeichnung des Diagrammaufbaues und des Inhaltes am Beispiel ausgewählter Temperaturverläufe während drei Simulationsjahren

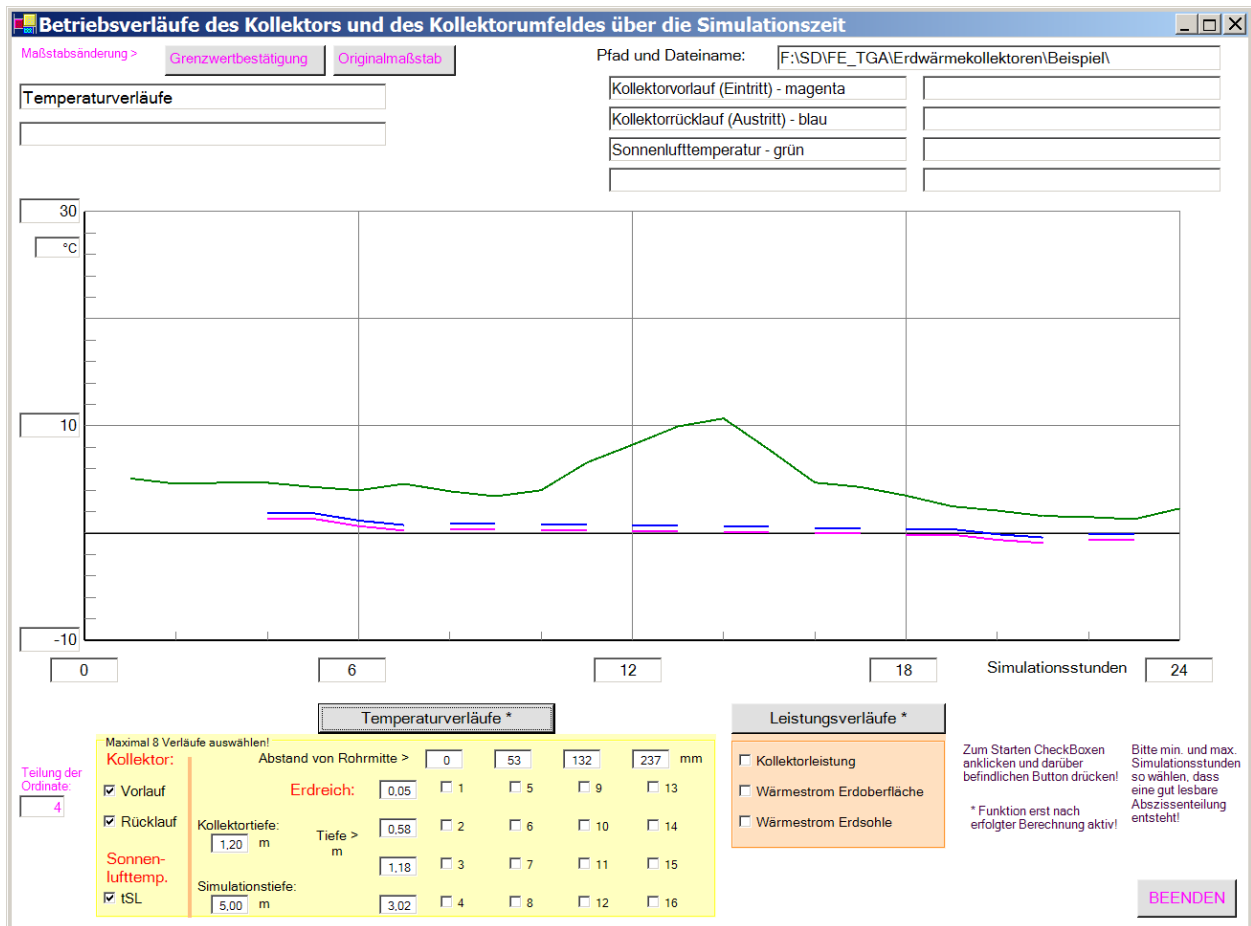


Bild 5.12 Musterdiagramm "Betriebsverläufe des Kollektors und des Kollektorumfeldes über die Simulationszeit" zur Kennzeichnung des Diagrammaufbaues und des Inhaltes am Beispiel ausgewählter Temperaturverläufe während der ersten 24 Simulationsstunden

Während die Sonnenlufttemperatur erst am Ende der ersten Simulationsstunde angezeigt wird, erfolgt für die Kollektortemperaturen 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 **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 **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 5.13).

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\ERDWÄRMEKOLLEKTOREN\BEISPIEL\

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

Monatliche Verläufe der geforderten Sondenleistung in W/m²

	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																								
Februar					40	40	40		40		40		40		40		40		40	40	40		40	
März					40	40	40		40		40		40		40		40		40		40		40	
April						40	40		40		40				40		40		40		40		40	
Mai							40		40		40						40		40		40			
Juni								40											40					
Juli																								
August																								
September								40																
Oktober								40		40								40		40		40		
November							40	40		40		40			40		40		40		40		40	
Dezember						40	40	40		40		40		40		40		40		40		40		40

Bild 5.13 Musterkontrollausdruck einer Leistungseingabe gemäß Maske 3 (Bild 5.7)

6 Programminstallation und Hinweise zu Programmänderungen

Das Rechenprogramm und zwei Beispiele stehen in der Datei "Erdwärmekollektor" zum kostenlosen Download bereit. Aus dem Programmlisting sind alle Module – gut strukturiert und mit zahlreichen Kommentaren versehen – ersichtlich, sodass eine Einarbeitung rasch möglich ist. Die Programmierung erfolgte in sehr einfacher Form, Anregungen zu eigenen Verbesserungen sind vielfach offensichtlich.

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

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

- **Grundlagen für die Programmanwendung**

Voraussetzung für die Programmnutzung sind die Betriebssysteme:

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

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

1. Datei: [Microsoft® .NET Framework Version 1.1 Redistributable Package](#)

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

2. Datei: [Sprachpaket Deutsch für Microsoft® .NET Framework Version 1.1](#)

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

- **Laden und Start des Rechenprogramms**

Die Datei im Ordner "Erdwärmekollektor" sind in ein eigenes Verzeichnis auf die Festplatte zu kopieren. In dem genannten Ordner sind das Rechenprogramm und zwei Simulationsbeispiele enthalten. Die entsprechenden Unterordner tragen die Namen:

- **Programm** (Simulationsmodell für Erdwärmekollektoren)
- **Beispiel_1** (Simulationsbeispiel für einen Erdwärmekollektor in Form von Rohrschlangen gemäß

Seite 49 ff., Rechenzeit ca. 5 min)

- **Beispiel_2** (Simulationsbeispiel für einen Erdwärmekollektor in Form von Kapillarrohrmatten gemäß Seite 59 ff., Rechenzeit ca. 45 min)

{In den Unterordnern "Beispiel_1" und "Beispiel_2" steht jeweils auch die Datei für die Sonnenlufttemperatur **tSL.dat**. Sie erscheint in der Hauptbedienoberfläche als **F:\Erdwärmekollektor\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 "**Programm**" öffnen ⇒ Datei "bin" öffnen ⇒ "**Programm.exe**" Doppelklick

II. Beispielhafte Abarbeitung mit Entwicklungsumgebung:

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

Zu Beginn wird in einem Fenster (Bild 5.5) ein Pfad für das zu bearbeitende Beispiel angegeben. Dieser Vorschlag ist in der Regel mit dem selbst gewählten Pfad zu überschreiben!

- **Bearbeitung des Programmlistings**

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

- Gliederung des Rechenprogramms

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

7 Beispiele

7.1 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 Erdwärmekollektoren und/oder Kollektorbetriebsweisen 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 eines Erdwärmekollektors ermitteln, wobei z. B. die Medieneintrittstemperatur 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 den Erdwärmekollektor ausgegangen und unter sonst gleichen Bedingungen – wie z. B. Wetterdaten, Erdreich, Taktprofil der Wärmepumpe – die Mediaustrittstemperatur 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 7.1 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 7.1 Beispiele für mittlere Stoffwerte von 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 Erdwärmekollektoren

Zum Einsatz kommen ein **Rohrschlangenkollektor** aus PE-Rohr und ein **Rohrmattenkollektor** aus PP-Kunststoff-Kapillarrohmatten analog der Bilder 1.1 und 1.2 sowie der Bilder 2.3 und 2.4. Die speziellen Daten sind aus Tabelle 7.2 zu entnehmen.

Der Durchsatz wird für das konventionelle Rohr so gewählt, dass eine turbulente Strömung vorliegt (günstigster Fall). In den Kapillarrohren gilt laminare Strömung. In Tabelle 7.2 sind die etwaigen Geschwindigkeiten in den Rohren vermerkt. Das Durchflussmedium ist Sole.

Tabelle 7.2 Rohrabmessungen und Materialdaten der Erdwärmekollektoren

Kollektorart	d_a	s	RA	$A_{\text{Kollektor}}$	L	RZ	w	Flüssigkeit
	Rohr- außen- durch- messer mm	Rohr- wand- dicke mm	Rohr- ab- stand mm	Kollektor- fläche m ²	gerade Rohrlänge m	Anzahl parallel durchflossener Rohre -	Nenn- geschwin- digkeit m/s	
Rohrschlange	32	2,9	500	100*	8	2	0,90	Tyfocor L 25 %(Vol)
Kapillarrohmatten	4,3	0,8	20	100**	5	1000	0,17	

*) Das Kollektorfeld besteht aus 2 Kollektoren zu je 50 m², wobei jeder Kollektor mit einer Rohrschlange von 100 m Länge bestückt ist.

***) Das Kollektorfeld besteht aus 20 Kollektoren zu je 5 m², wobei jeder Kollektor aus 50 parallelen Kapillarrohren besteht.

- Lage des Kollektors im Boden

Die **Verlegetiefe** beträgt einheitlich 1,2 m unter der unversiegelten Geländeoberfläche.

- 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 5.1 zusammengefasst (Bild 7.1), sodass eine Randbedingung dritter Art vorliegt. Der dargestellte Jahresgang gilt für alle Simulationsjahre.

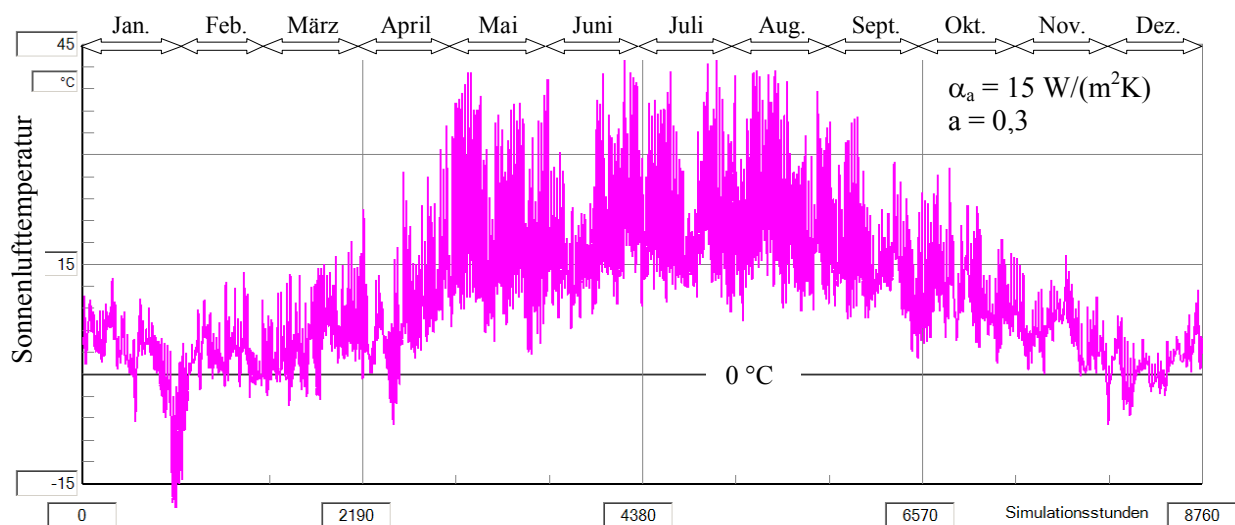


Bild 7.1 Sonnenlufttemperatur im Jahresgang gemäß Gl. (5.1) auf der Basis des Testreferenzjahres TRY 07

Die möglichst genaue Erfassung der meteorologischen Elemente an der Erdoberfläche ist wichtig, da der **hauptsächliche Energieeintrag** bei den Erdwärmekollektoren und damit die **angestrebte Nachhal-**

tigkeit bei der Erdwärmenutzung durch die "Sonne" gegeben ist.

Ob der äußere Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_a = 15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und der Absorptionskoeffizient $a = 0,3$ für die Solarstrahlung auf die Erdoberfläche im Jahresmittel – wie im Abschnitt 5.1 angenommen – realistisch sind, kann nicht eindeutig beantwortet werden. Für diese Bedingungen wurde gemäß TRY 07 (Standort Kassel) die Datei: tSL.dat entwickelt. Sie ist im Bild 7.1 wiedergegeben.

Eine Testsimulation des Erdreichs der Bodenart I (Kollektordurchfluss $V_{\text{fix}} = 0$) über 3 Jahre mit der in 15 m Tiefe geltenden Jahresmitteltemperatur für Kassel von $8,8 \text{ °C}$ ergab bei Kollektorstillstand eine relativ gute Übereinstimmung mit den mittleren Monatswerten nach DIN 4710 (Bild 7.2, oben).

Nimmt man den äußeren Wärmeübergangskoeffizient zu $\alpha_a = 15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ändert aber den Absorptionskoeffizient für die Solarstrahlung auf die Erdoberfläche im Jahresmittel auf $a = 0,2$ ab, so folgt aus dem TRY 07 die Datei: tSL1.dat. Eine Wiederholung der Simulation bei Kollektorstillstand zeigt gemäß Bild 7.2 (unten) eine verbesserte Anpassung an die Messwerte.

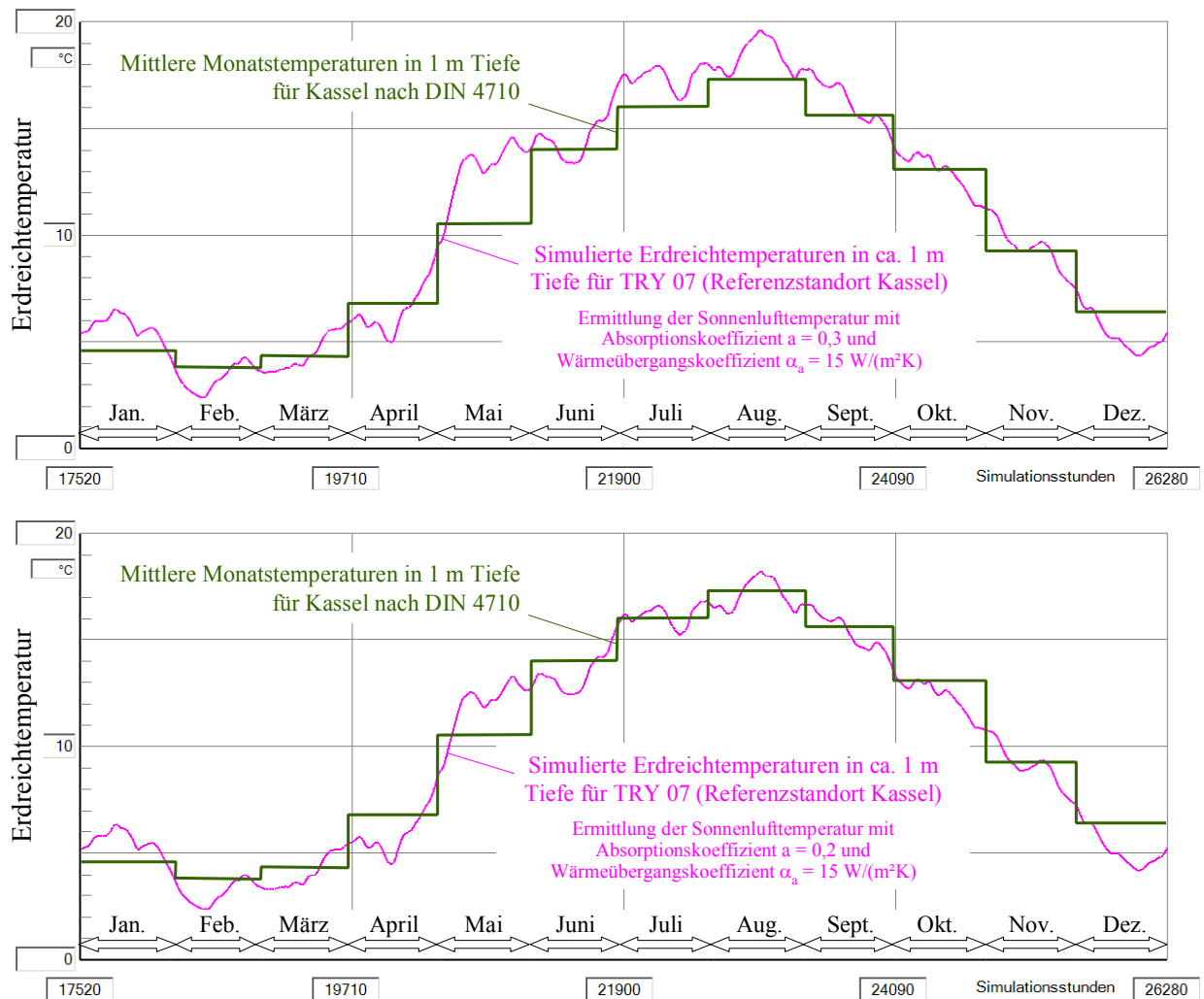


Bild 7.2 Gegenüberstellung der ungestörten Erdreichtemperaturen in ca. 1 m Tiefe gemäß Simulation (Basis: stündliche Sonnenlufttemperaturen; Bodenart I) und monatlich gemittelter Messwerte

Bild oben: Verwendung der Datei "tSL.dat" (Erzeugt aus TRY 07 mit $a/\alpha_a = 0,02$)

Bild unten: Verwendung der Datei "tSL1.dat" (Erzeugt aus TRY 07 mit $a/\alpha_a = 0,0133$)

Aus Bild 7.2 kann nicht geschlussfolgert werden, dass die letztgenannte Approximation für die Sonnenlufttemperatur richtiger ist, denn Wärmeübergangskoeffizient und Absorptionskoeffizient sind

Funktionen vielfältiger Einflüsse. Sie sind stark von der Oberflächenbeschaffenheit und der Witterung abhängig. Zur Illustration einige spezielle Beispiele:

Absorptionsgrad der Solarstrahlung: Schiefer 90 %; Schamotte 10 %; Beton 60 %; Putz 30 ... 60 %; Neuschnee 10 %; Altschnee 70 ... 80 %; Gras 80 ... 90 %

Wärmeübergangskoeffizient durch Konvektion: 5 W/(m²K) bei w = 1 m/s; 30 W/(m²K) bei 10 m/s.

Dabei sind einige Angaben unter praktischen Gesichtspunkten zu werten, so ist beispielsweise der hohe Absorptionsgrad von Gras nicht gleichbedeutend mit einer hohen Erdoberflächentemperatur, da die große Grasoberfläche einer verstärkten Konvektion ausgesetzt ist und das Graspolster als Wärmeleitwiderstand wirkt. Schließlich sei noch auf die große Variation der Erdreichparameter und die Fixierung der Simulationstiefe mit der vorgegebenen Sohlentemperatur verwiesen, die den Temperaturgang im Erdreich maßgeblich beeinflussen.

Die Randbedingung an der **Sohle des Simulationsgebietes** wird gemäß Abschnitt 5.1 als konstante Temperatur t_{Erdsohle} definiert, die der ungestörten Erdreichtemperatur in dieser Tiefe entsprechen soll. Für die Beispiele werde angenommen, dass in einer Tiefe von 5 m ganzjährig die Temperatur von 10 °C (Randbedingung erster Art) herrscht. Dies könnte beispielsweise durch eine grundwasserführende Schicht verursacht sein.

- **Wärmetechnische Kollektorbelastung**

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 dem Erdwärmekollektor mit der auf die Fläche bezogenen Kollektorleistung von 30 W/m². 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 °C sowie der möglichen Raumnutzung. Die angenommene Verteilung zeigt Tabelle 7.3.

Tabelle 7.3 Tages- und Monatsverteilung der Volllaststunden (= Entzugsstunden x)

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	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			9	270
Dez						x	x	x		x		x		x		x		x		x		x		x		11	341
Jahresstunden:																								1997			

Damit soll der Erdwärmekollektor die Jahreswärme von $Q = 1997 \cdot 30 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{a}) = 59910 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{a})$ liefern.

Weiterhin wird für einen Vergleichstest ein kombinierter Heiz-/Kühlerdkollektor mit 1196 zusätzlichen Kühlstunden während der Sommermonate untersucht (Tabelle 7.4). Die Kühlleistung betrage $35 \text{ W}/\text{m}^2$, sodass die "Kältenutzung" $Q = -1196 \cdot 35 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{a}) = -41860 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{a})$ beträgt.

Tabelle 7.4 Tages- und Monatsverteilung der Volllaststunden bei kombiniertem Heiz-/Kühlbetrieb (Wärmequellbetrieb rot, Wärmesenkenbetrieb blau)

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								x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x					13	390
Juli								x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x					13	403
Aug								x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x					13	403
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 als Wärmequelle:		1997	
																								Jahresstunden als Wärmesenke:		1196	

7.2 Alleinige Heizwärmenutzung beim Kollektorbetrieb (Rohrschlangenkollektor: Beispiel 1)

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

Erdwärmekollektor - Hauptprogramm

Kollektorsimulation (Temperaturfeld im Erdreich instationär)

Autor: Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück (V1/2009)

Hauptgeometriedaten

Verlegetiefe TKollektor: 1,2 m
 Rohrabstand RA: 500 mm
 Kollektorform: Rohrschlange 1; Rohrmatte 2
 Simulationstiefe TSim: 5 m
 Gitterdarstellung: normal 1; fein 2; grob 3

Schichtdaten

Schicht	Lambda W/(m K)		e J/(kg K)		rS kJ/kg	TSch m
	fest	flüssig	fest	flüssig		
Sch = 1	1630	1,66	1,5	917	1046	20,5
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

Kollektordaten

Rohraussendurchmesser: 32 mm
 Wanddicke: 2,9 mm
 Wärmeleitfähigkeit: 0,38 W/(m K)
 Kollektorfläche (gesamt): 100 m²
 Anzahl der parallel durchflossenen Rohre: 2
 Gerade Rohrlänge im Kollektor (Mittelwert): 8 m

Durchflussmedium: Tyfocor L 40 %
 Tyfocor L 25 %
 Wasser

Eintrittstemperatur: °C oder Leistung: W/m²
 Volumenstrom: l/h

Daten zum Simulationsablauf

Beginn der Simulation: 1. Januar, 1. Stunde
 Maximale Anzahl der Simulationsstunden: 26280
 Konstante Erdoberflächentemperatur: °C
 Evtl. Laden der Sonnenlufttemperatur (Pfad + Datei): F:\SD\IFE_TGA\Erdwärmekollektoren\Beispiel_1\tSL.dat
 Unbeeinflusste Sohlentemperatur: 10 °C
 Evtl. Eingabe der Erdreichtemperaturverteilung einer vorhandenen Simulation (Pfad mit \ beenden):

Bei Eingabe von "blank" wird die Anfangstemperatur für alle Volumenelemente mit 8 °C eingegeben.

Abläufe:

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

STARTEN **DATEI LADEN** **EINGABESPEICHERUNG** **BERECHNUNG** **DRUCK** **DIAGRAMM-UMFELD**

Zeitverläufe > **DURCHFLUSS** **EINTRITTSTEMPERATUR** **KOLLEKTORLEISTUNG** Ergebnisse > **T-/Phase-TABELLE** **BEENDEN**

Bild 7.3 Hauptoberfläche (Maske 1) mit den Eingabedaten für Beispiel_1

Die Eingabedaten sind im Abschnitt 5.4 erläutert, Aussagen zu speziellen hier angenommenen Werten finden sich im Abschnitt 7.1. 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. Es wird die Datei "tSL.dat" verwendet.
- Die Simulationszeit erstreckt sich über 3 Jahre. Die Rechenzeit beträgt mit einem üblichen PC etwa 5 Minuten.
- Die Betriebszeiten des Erdwärmekollektors entsprechen der Tabelle 7.3. Sie finden sich in den Masken der Bilder 7.4 und 7.5 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.

Ergebnisdrucke und Grafiken des Beispiels

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\ERDWÄRMEKOLLEKTOREN\BEISPIEL_1\

Hauptgeometriedaten:

Verlegetiefe	Rohrabstand	Kollektorform	Simulationstiefe	Gitterteilung
m	mm		m	
1,20	500	Rohrschlange	5,00	normal

Erdschichten:

Schicht	Dichte kg/m ³	Wärmeleitfähigkeit		Wärmekapazität		Schmelz- wärme kJ/(kg)	Schicht- tiefe m
		fest W/(m K)	flüssig	fest J/(kgK)	flüssig		
1	1630	1,66	1,50	917	1046	20,5	5,0
2	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0
3	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0
4	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0
5	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0
6	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0
7	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0
8	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0

Rohr- und Kollektordaten:

da	delR	lamR	AKollektor gesamt	Rohrzahl parallel	L_gerade Mittelwert	Flüssigkeit	Eintritts- temperatur °C	Kollektor- leistung W/m ²	Durch- fluss l/h
mm	mm	W/(m K)	m ²		m				
32,0	2,9	0,380	100	2	8,0	Tyfocor L25		Z-funk.	Z-funk.

Es erfolgt die Anpassung an die vorgegebene Kollektorleistung! Zeitschrittweite: 120 s

Daten zum Simulationsgebiet und zur Simulationszeit:

oberes Gitter	Kernzone	unteres Gitter	imax	Dz	kmax	Oberflächen- temperatur °C	Erdsohlen- temperatur °C	Simula- tionszeit h		
DxoG	Dicke	DxKZ	Dicke	DxuG	Dicke					
mm	m	mm	m	mm	m					
105,4	0,95	23,9	0,50	101,4	3,55	65	26,3	10	10,0	26280

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

Datei Erdreichtemperaturverteilung früherer Simulation:

Monatswerte, Jahressummen und Speicherzustände

Simulations- jahr	Monat	Sonnenwärme Wh/m ²	Erdwärme Wh/m ²	Kollektorarbeit Wh/m ²	
1	1	-4833	1929	11161	
1	2	4820	2120	9240	
1	3	6031	2971	8370	
1	4	9142	3086	5400	
1	5	12246	2908	1860	
1	6	6681	977	0	
1	7	3272	-597	0	
1	8	3022	-1646	0	
1	9	-2244	-1992	900	
1	10	-408	-1460	4650	
1	11	-923	-101	8100	
1	12	1293	1574	10230	
	Jahressummen:	38099	9769	59911	Bilanz: -12043 Wh/m ²
	Speicherzustand am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:				74042 Wh/m ²
2	1	-1029	2719	11160	
2	2	5066	2817	9240	
2	3	7624	3345	8370	
2	4	9875	3351	5400	
2	5	13658	3264	1860	
2	6	7250	1436	0	
2	7	3494	-377	0	
2	8	3112	-1555	0	
2	9	-2208	-1956	900	
2	10	-393	-1444	4650	
2	11	-917	-95	8100	
2	12	1295	1577	10230	
	Jahressummen:	46828	13081	59910	Bilanz: -1 Wh/m ²
	Speicherzustand am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:				74037 Wh/m ²

3	1	-1028	2720	11160	
3	2	5067	2817	9240	
3	3	7625	3345	8370	
3	4	9875	3351	5400	
3	5	13658	3264	1860	
3	6	7250	1436	0	
3	7	3494	-377	0	
3	8	3112	-1555	0	
3	9	-2208	-1956	900	
3	10	-393	-1444	4650	
3	11	-917	-95	8100	
3	12	1295	1577	10230	
Jahressummen:		46831	13083	59910	Bilanz: 4 Wh/m ²
Speicherzustand am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:					74037 Wh/m ²

- Während der Bilanzwert (Wärmezufuhr von der Erdoberfläche und von der Sohle des Simulationsgebietes minus Kollektorarbeit) im ersten Simulationsjahr noch auf eine große Wärmeent- speicherung des Erdreiches hinweist, ist die Wärmebilanz ab dem zweiten Jahr ausgeglichen. Damit sind im vorliegenden Fall **zwei Simulationsjahre** ausreichend, da bereits dann ein ther- misch eingeschwungener Zustand vorliegt.
- Die jährliche Kollektorarbeit entspricht sehr genau dem berechneten Wert (siehe Seite 48) von 59910 Wh/(m²a). Dass dies bereits im ersten Simulationsjahr so gut passt, weist auf die sehr ge- naue programminterne "Regelung der mittleren Soletemperatur" hin.
- Nach zwei Jahren beträgt die Herkunft der Erdwärmekollektorarbeit:
 - 78 % durch Wärmezufluss von der Erdoberfläche
 - 22 % durch Wärmezufluss von der Sohle des Simulationsgebietes (z. B. Grundwasser)
 - 0 % durch Erdreichabkühlung.

Die Wirkung der solaren Einstrahlung und die damit verbundene Nachhaltigkeit wird sehr deut- lich. Dies ist bei Erdwärmesonden in den ersten Betriebsjahren nicht so offensichtlich.

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\ERDWÄRMEKOLLEKTOREN\BEISPIEL_1\FEB3.DAT

Temperaturen: Erdreich k = 1 ... 20 in °C zur Zeit 18935 Stunden
 R kennzeichnet die Rohrlage; z(i) gibt die Tiefe der Elementschicht i in m an

i	z (i)	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8	k=9	k=10
1	0,05	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
2	0,16	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
3	0,26	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76
4	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
5	0,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,58	-0,36	-0,36	-0,36	-0,36	-0,36	-0,36	-0,36	-0,36	-0,36	-0,36
7	0,69	-0,72	-0,72	-0,72	-0,72	-0,72	-0,72	-0,72	-0,72	-0,72	-0,72
8	0,79	-1,08	-1,08	-1,08	-1,08	-1,08	-1,08	-1,07	-1,07	-1,07	-1,07
9	0,90	-1,46	-1,46	-1,45	-1,45	-1,45	-1,44	-1,44	-1,43	-1,43	-1,43
10	0,96	-1,71	-1,70	-1,70	-1,69	-1,68	-1,67	-1,66	-1,65	-1,64	-1,64
11	0,98	-1,80	-1,80	-1,79	-1,78	-1,76	-1,75	-1,73	-1,72	-1,71	-1,71
12	1,01	-1,91	-1,90	-1,89	-1,87	-1,85	-1,83	-1,81	-1,80	-1,79	-1,78
13	1,03	-2,02	-2,01	-1,99	-1,97	-1,94	-1,91	-1,89	-1,87	-1,85	-1,85
14	1,06	-2,15	-2,14	-2,11	-2,07	-2,03	-1,99	-1,96	-1,93	-1,92	-1,91
15	1,08	-2,32	-2,30	-2,25	-2,18	-2,12	-2,07	-2,02	-1,99	-1,97	-1,96
16	1,10	-2,55	-2,51	-2,41	-2,31	-2,21	-2,14	-2,08	-2,04	-2,02	-2,00
17	1,13	-2,88	-2,79	-2,62	-2,45	-2,31	-2,20	-2,13	-2,08	-2,05	-2,04
18	1,15	-3,42	-3,19	-2,87	-2,60	-2,40	-2,26	-2,17	-2,11	-2,07	-2,06
19	1,18	-4,38	-3,72	-3,12	-2,72	-2,46	-2,29	-2,18	-2,12	-2,08	-2,06
20	1,20	R	-4,25	-3,27	-2,77	-2,47	-2,29	-2,18	-2,11	-2,07	-2,05
21	1,22	-4,35	-3,68	-3,09	-2,68	-2,42	-2,26	-2,15	-2,08	-2,04	-2,03
22	1,25	-3,35	-3,12	-2,80	-2,53	-2,33	-2,19	-2,10	-2,04	-2,00	-1,99
23	1,27	-2,78	-2,69	-2,52	-2,35	-2,20	-2,10	-2,03	-1,98	-1,95	-1,93
24	1,30	-2,41	-2,37	-2,27	-2,17	-2,07	-2,00	-1,94	-1,90	-1,88	-1,86
25	1,32	-2,15	-2,12	-2,07	-2,01	-1,94	-1,89	-1,85	-1,82	-1,80	-1,79
26	1,34	-1,94	-1,93	-1,90	-1,86	-1,82	-1,78	-1,75	-1,72	-1,71	-1,70
27	1,37	-1,77	-1,77	-1,75	-1,72	-1,69	-1,67	-1,64	-1,62	-1,61	-1,60
28	1,39	-1,63	-1,62	-1,61	-1,59	-1,57	-1,55	-1,53	-1,52	-1,51	-1,50
32	1,60	-0,51	-0,51	-0,51	-0,51	-0,51	-0,51	-0,51	-0,50	-0,50	-0,50
33	1,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
34	1,81	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
35	1,91	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64
64	4,85	9,56	9,56	9,56	9,56	9,56	9,56	9,56	9,56	9,56	9,56
65	4,95	9,85	9,85	9,85	9,85	9,85	9,85	9,85	9,85	9,85	9,85

Mittlere Medientemperatur im Rohr: -7,10 °C

- Die relativ große Temperaturdiffe- renz zwischen den Elementen, die das Rohr berühren und dem Me- dium (ca. 2,8 K) zeigt, dass die Summe aus dem Wärmeleitwi- derstand der Rohrwand und dem inneren Wärmeübergangswider- stand sehr groß ist.
- Damit erklärt sich die niedrige, thermodynamisch ungünstige So- letemperatur, die die geforderte Entzugsleistung von 30 W/m² ge- währleistet.
- Die Dicke des gefrorenen Bodens (Eisdicke) beträgt etwa 1,23 m.

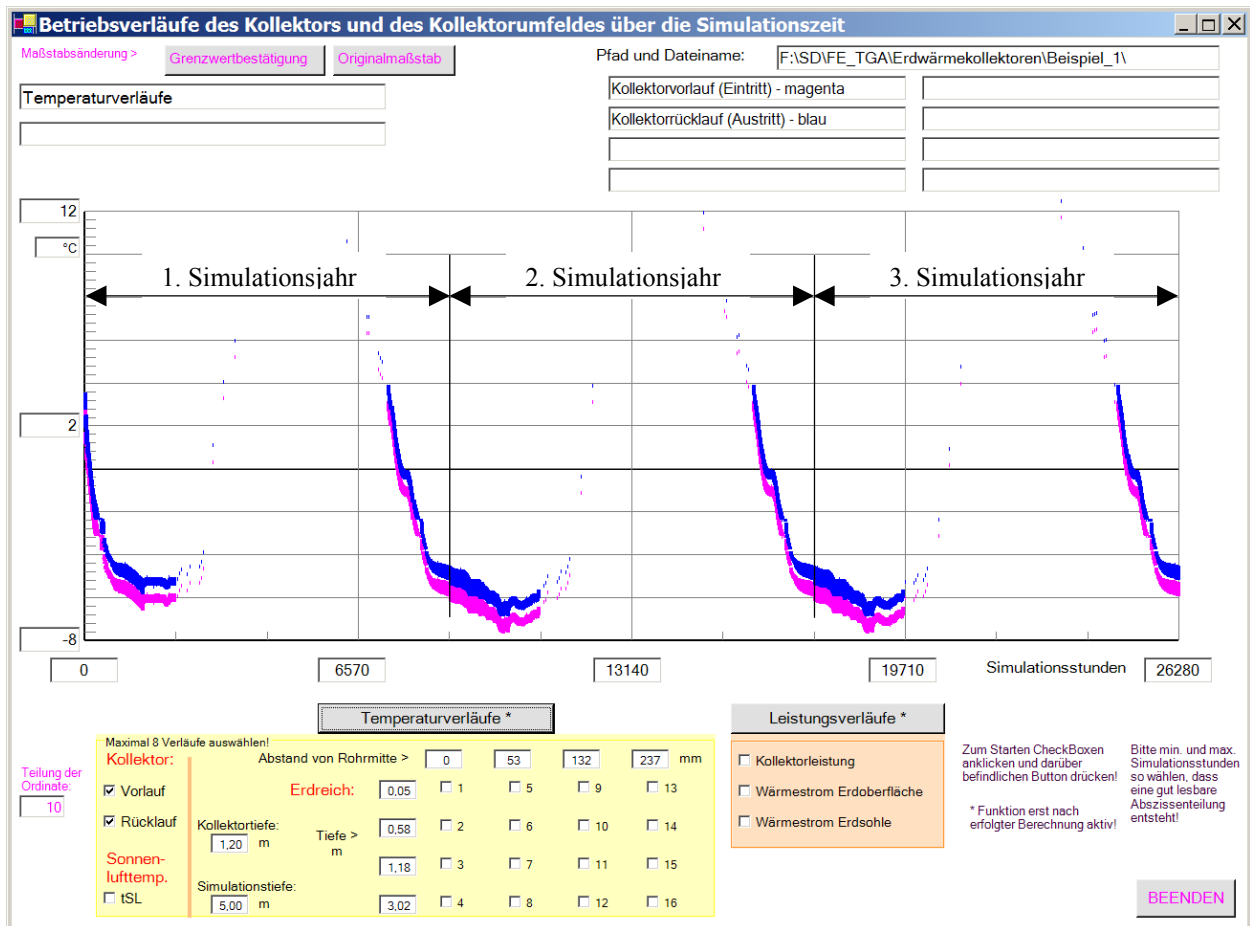


Bild 7.6 Vorlauf- und Rücklauftemperaturen des Erdwärmekollektors im Verlaufe von drei Simulationsjahren (Bild oben) bzw. im letzten Jahr (Bild rechts)

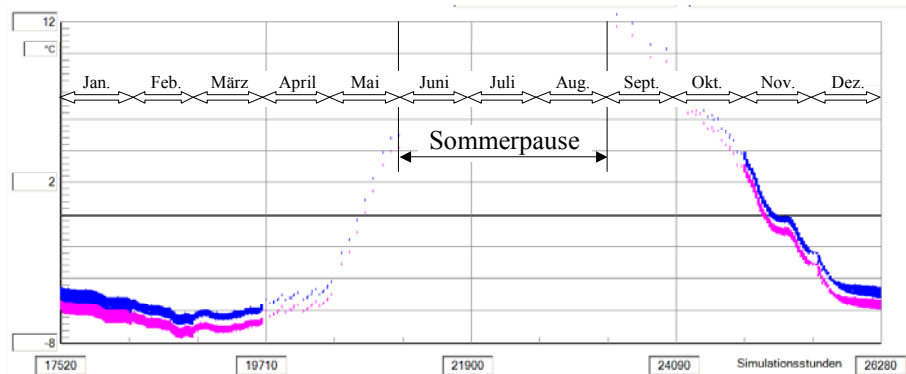
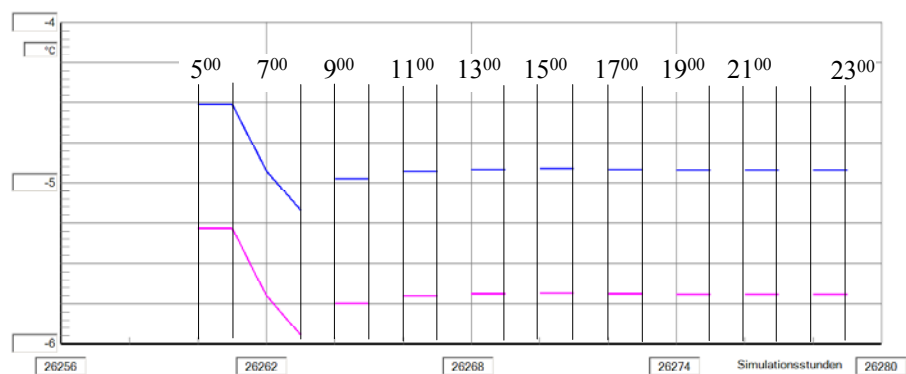


Bild 7.7 Vorlauf- und Rücklauftemperaturen des Erdwärmekollektors im Verlaufe der letzten 24 Simulationsstunden



- Die sommerlichen Betriebspausen sind deutlich zu erkennen. Mit Beginn der Heizperiode sinken die Soletemperaturen stark ab, im späten Frühjahr steigen sie aufgrund der verringerten Anforderung wieder etwas an. Eine offensichtliche Erholung tritt in der Sommerpause ein, da

Wärme zur unmittelbaren Kollektorumgebung fließt.

- Sehr gut zu erkennen ist die gute Übereinstimmung der Verläufe im 2. und 3. Simulationsjahr. Dies rechtfertigt eine Verkürzung der Simulationszeit auf zwei Jahre.
- Bild 7.7 zeigt die genaue stündliche Auflösung der Temperaturverläufe. Es besteht exakte Übereinstimmung mit den Betriebszeiten nach Tabelle 7.3, die 11 Betriebsstunden im Dezember angibt.
- Bild 7.7 verdeutlicht auch, dass bereits die einstündige Betriebspause von 8⁰⁰ bis 9⁰⁰ Uhr eine "Erholung" des Erdreiches bewirkt.
Bezüglich der Kurvendarstellung mit der rückwärtigen Verlängerung beim "Einschalten" des Kollektordurchflusses sei auf Seite 40 verwiesen.

Aussagen zu Bild 7.8 (oben):

- Der Temperaturverlauf am Punkt 5 (0,05 m unter der Erdoberfläche) zeigt sehr deutlich den Einfluss der Sonnenlufttemperatur im Jahresgang.
- Die darunter liegenden Punkte 6, 7 und 8 in 0,58 m, 1,18 m und 3,02 m Tiefe weisen auch eine Temperaturschwingung im Jahresgang auf. Sie wird verursacht durch die Überlagerung der meteorologische Randbedingung an der Erdoberfläche und der Entzugsleistung des Erdwärmekollektors, die einem eigenen Jahresgang (siehe Tabelle 7.3) folgt.
Mit zunehmender Tiefe tritt eine Amplitudenreduzierung und eine Phasenverschiebung auf. Die hohen Schwingungsfrequenzen der Sonnenlufttemperatur verschwinden, sodass beispielsweise in ca. 3 m Tiefe (Punkt 8, braune Kurve) nur noch der reine Jahresgang wahrnehmbar ist.
Die Verdickung der grünen Kurve (Punkt 7) entsteht durch die intermittierende Betriebsweise des Kollektors.

Aussagen zu Bild 7.8 (unten):

- Die Temperaturverläufe an den Erdreichpunkten 3, 7, 11 und 15 repräsentieren eine Tiefe, die knapp über der Verlegetiefe des Erdwärmekollektors liegt. Die Abstände zur Rohrachse betragen 0, 53 mm, 132 mm und 237 mm. Die Verdickungen der Kurvenzüge zeigen deutlich den Einfluss des Kollektorrohres. Sie entstehen durch den intermittierenden Betrieb, wie aus der zeitlichen Auflösung gemäß Bild 7.7 hervorgeht. An der Verringerung der Dicke ist erkennbar, wie der Einfluss mit zunehmenden Abstand vom Kollektorrohr schwindet.

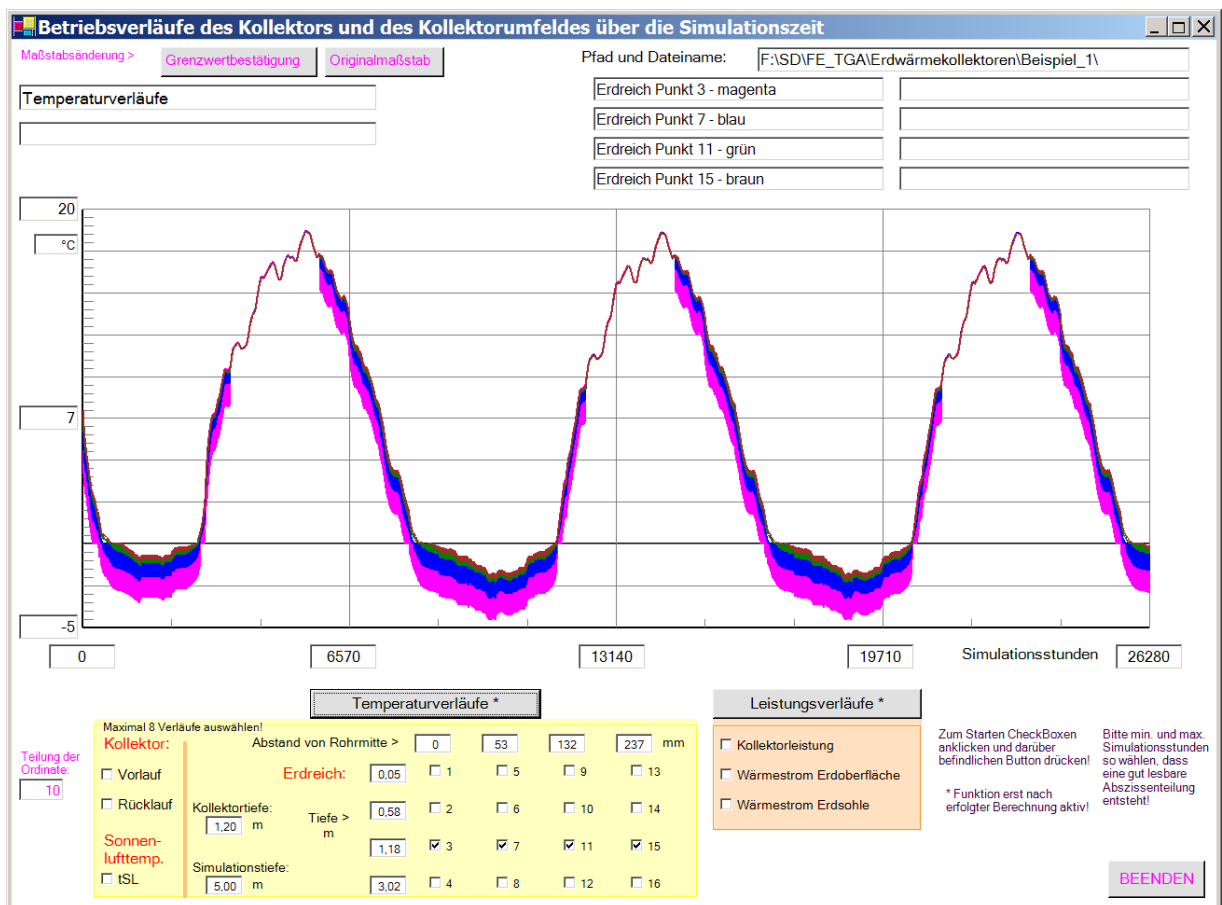
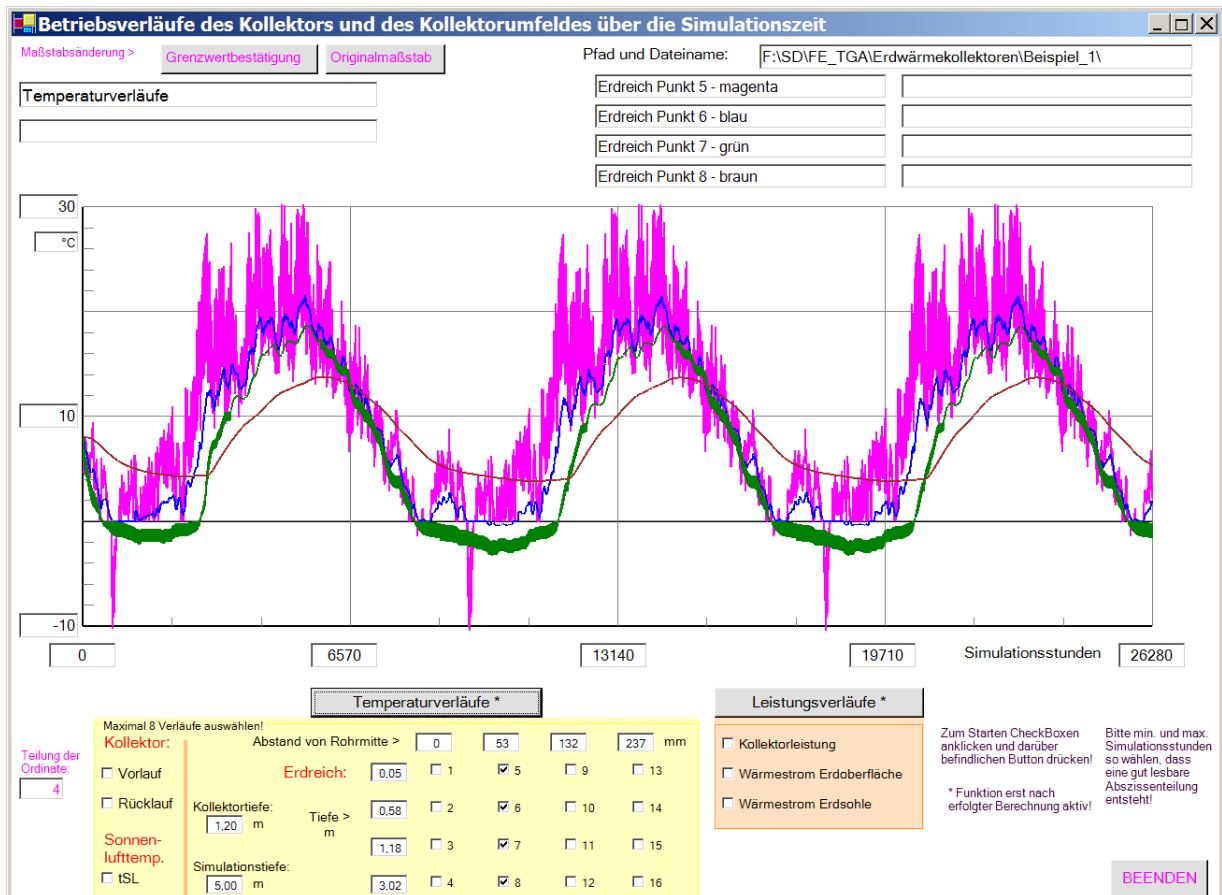


Bild 7.8 Ausgewählte Erdreichtemperaturen im Verlaufe von drei Simulationsjahren
Bild oben: Abstand von Rohrmitte 53 mm, Tiefen variiert; Bild unten: Tiefe 1,18 m, Abstände variiert

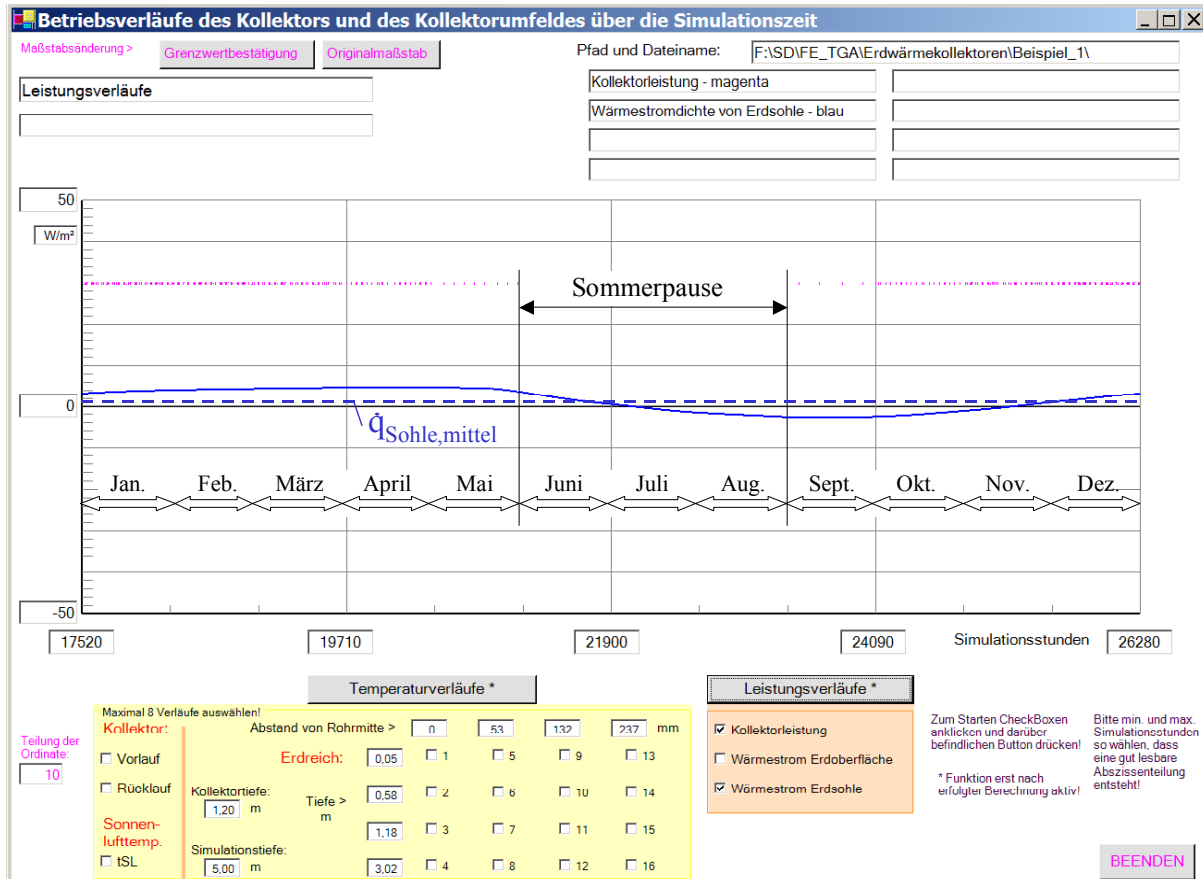


Bild 7.9 Kollektorleistung und Wärmestrom an der Sohle des Simulationsgebietes in das Simulationsgebiet im letzten Simulationsjahr

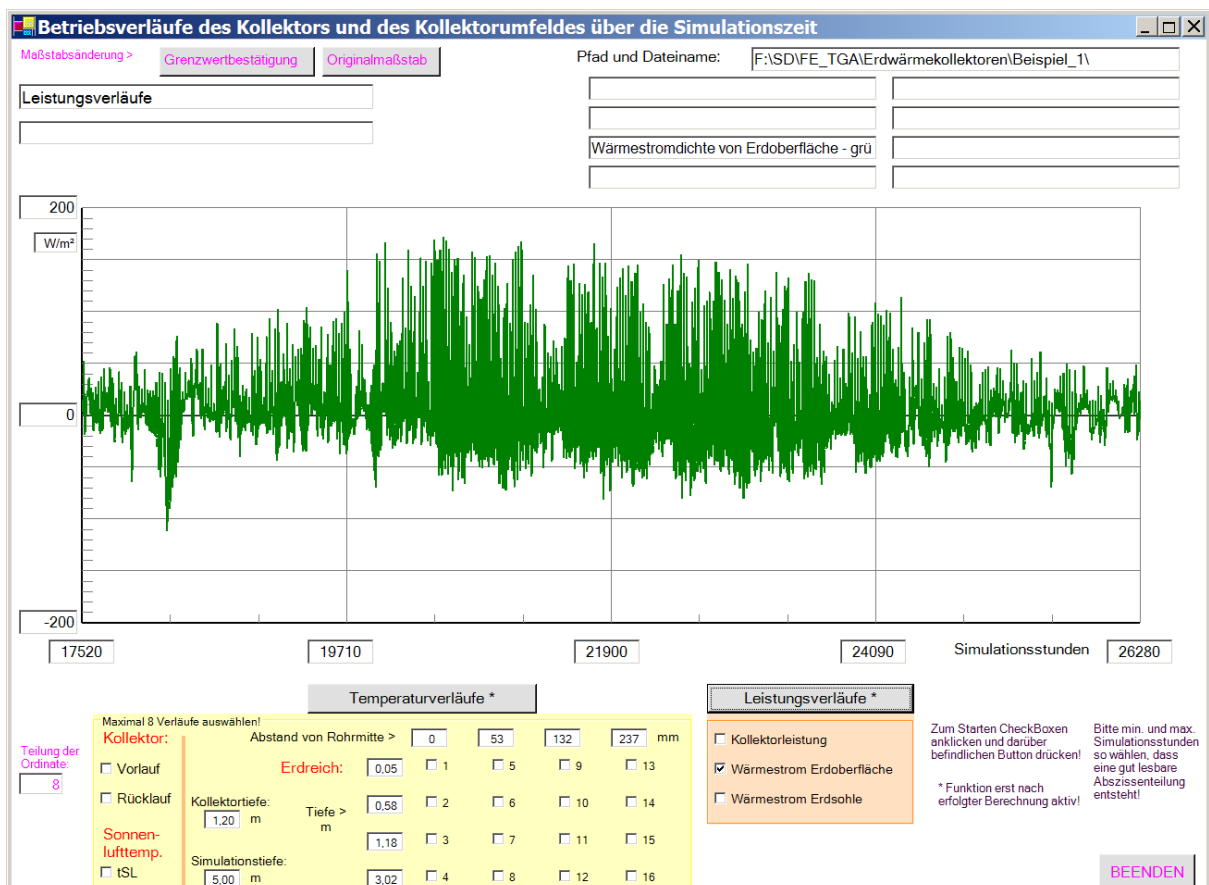


Bild 7.10 Wärmestrom an der Erdoberfläche in das Simulationsgebiet im letzten Simulationsjahr

- Die Leistung des Erdwärmekollektors entspricht während der Betriebszeit der Anforderung von 30 W/m^2 . Die Konstanz weist auf die "gute programminterne Leistungsregelung" hin.
- Der Wärmestrom aus der Erdtiefe steigt während der Betriebszeit des Kollektors ganz allmählich an und erreicht Ende April seinen Höchstwert. Von Anfang Juli bis Mitte November fließt ein Wärmestrom an die Erdsohle. Die Wärmezufuhr ins Simulationsgebiet beträgt nach der Wärmebilanz (Seite 53) 13083 Wh/a . Somit folgt die mittlere Wärmestromdichte an das Simulationsgebiet im Jahresmittel zu:

$$\dot{q}_{\text{Sohle,mittel}} = 13083 / 8760 = 1,5 \text{ W/m}^2.$$

Dieser Wert wird im Bild 7.9 durch die blau gestrichelte Linie markiert. Ein visueller Vergleich mit der realen blauen Kurve des Jahresganges deutet auf die Übereinstimmung der Jahreswärmebilanz an der Sohle (Simulationsgrenze) hin.

- Demgegenüber ist nach Bild 7.10 der Wärmestrom an der Erdoberfläche ins Simulationsgebiet beträchtlich.

7.3 Alleinige Heizwärmenutzung beim Kollektorbetrieb (Rohrmattenkollektor: Beispiel 2)

Das Beispiel 2 wird dem Beispiel 1 gegenübergestellt, um die thermodynamischen Vorteile bei Einsatz von Mattenkollektoren zu demonstrieren. Die Belastungsdaten des Erdwärmekollektors (Einzugsleistung, Durchfluss) und die Randbedingungen (Belegungsfläche, Verlegetiefe, Erdreichparameter, Verlauf der Sonnenlufttemperatur usw. werden deshalb unverändert übernommen. Kommentare zu den Ergebnissen finden sich im Anschluss an die Bilder und Tabellen.

Erdwärmekollektor - Hauptprogramm

Kollektorsimulation (Temperaturfeld im Erdreich instationär)

Autor: Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück (V1/2009)

F:\SD\IFE_TGA\Erdwärmekollektoren\Beispiel_2\

Erdoberfläche

Schicht Sch = 1
Verlegetiefe $T_{Kollektor}$
Erdkollektor
Schicht Sch
 $T_{Sch}(Sch)$
Sohle des Simulationsgebietes
Schicht Sch = Schmax

$i = 1$
 Δt
 T_{Sim}
 $i = imax$

Hauptgeometriedaten

Verlegetiefe $T_{Kollektor}$ m
 Rohrabstand RA mm
 Kollektorform:
 Rohrschlange 1; Rohrmatte 2 2
 Simulationstiefe T_{Sim} m
 Gitterdarstellung:
 normal 1; fein 2; grob 3

Generell wird versucht die Rohre als Quadrate bzw. als Rechtecke mit nahezu gleichen Seiten zu approximieren. Der approximierte Rohrquerschnitt stellt ein Element im Gitter dar, welches in der sogenannten Kollektorzone ausschließlich zur Anwendung kommt. Über und unter der Rohrebene werden stets 10 gleiche Elementschichten angeordnet, sodass insgesamt 21 gleiche Schichten definiert sind. Oberhalb und unterhalb der Kollektorzone werden Elemente mit größerer vertikaler Teilung angeordnet. Im Normalfall sind diese etwa 100 mm hoch. Bei feiner Unterteilung etwa 50 mm und bei grober Teilung etwa 200 mm.

Schichtdaten

Schicht	Rho kg/m ³	Lambda W/(m K)		c J/(kg K)		rS kJ/kg	T _{Sch} m
		fest	flüssig	fest	flüssig		
Sch = 1	1630	1,66	1,5	917	1046	20,5	5
Sch = 2	0	0	0	0	0	0	0
Sch = 3	0	0	0	0	0	0	0
Sch = 4	0	0	0	0	0	0	0
Sch = 5	0	0	0	0	0	0	0
Sch = 6	0	0	0	0	0	0	0

Kollektordaten

Rohraussendurchmesser mm Wanddicke mm Wärmeleitfähigkeit W/(m K)
 Kollektorfläche (gesamt) m² Anzahl der parallel durchflossenen Rohre
 Gerade Rohrlänge im Kollektor (Mittelwert) m

Durchflussmedium: Tyfocor L 40 % Tyfocor L 25 % Wasser

Eintrittstemperatur °C oder Leistung W/m² Volumenstrom l/h

Die Angaben gelten für die gesamte Simulationszeit. Sind diese Felder "blank", dann ist die Eingabe unter ZEITVERLAUF vorzunehmen. Der Volumenstrom bezieht sich auf die gesamte Kollektorfläche (alle parallel durchströmten 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 ZEITVERLÄUFE Eintrittstemperatur oder Leistungsanforderung und Durchfluss eingeben!
6. BERECHNUNG, DRUCK, TABELLE oder DIAGRAMM drücken!

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

Zeitverläufe > DURCHFLUSS, EINTRITTS-TEMPERATUR, KOLLEKTORLEISTUNG Ergebnisse > T-/Phase-TABELLE

Daten zum Simulationsablauf

Beginn der Simulation: 1. Januar, 1. Stunde
 Maximale Anzahl der Simulationsstunden
 Konstante Erdoberflächentemperatur °C
 Evtl. Laden der Sonnenlufttemperatur (Pfad + Datei):

 Unbeeinflusste Sohlentemperatur °C
 Evtl. Eingabe der Erdreichtemperaturverteilung einer vorhandenen Simulation (Pfad mit \ beenden):

Bei Eingabe von "blank" wird die Anfangstemperatur für alle Volumenelemente mit 8 °C eingegeben.

Bild 7.11 Hauptoberfläche (Maske 1) mit den Eingabedaten für Beispiel_2

- Für die Sonnenlufttemperatur wird wiederum die Datei "tSL.dat" verwendet.
- Die Simulationszeit erstreckt sich über 2 Jahre. Die Rechenzeit beträgt mit einem üblichen PC etwa 45 Minuten. Diese enorme Vergrößerung resultiert aus dem kleinen Zeitschritt von $\Delta\tau = 2$ s. Bei Beispiel 1 wurde mit $\Delta\tau = 120$ s gearbeitet. Dieser Unterschied resultiert aus dem Stabilitätskriterium gemäß Gl. (3.22). Ursache ist das kleinere Gitter zur Anpassung an das Kapillarrohr.
- Die Betriebszeiten des Erdwärmekollektors entsprechen weiterhin der Tabelle 7.3.
- Durchfluss und Wärmestromdichte sind identisch mit den Bildern 7.4 sowie 7.5.
- Als Wärmeträger wird eine wässrige 25 %-ige Tyfocorlösung verwendet.

Ergebnisdrucke und Grafiken des Beispiels

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\ERDWÄRMEKOLLEKTOREN\BEISPIEL_2\

Hauptgeometriedaten:

Verlegetiefe	Rohrabstand	Kollektorform	Simulationstiefe	Gitterteilung
m	mm		m	
1,20	20	Rohrmatte	5,00	normal

Erdschichten:

Schicht	Dichte kg/m ³	Wärmeleitfähigkeit		Wärmekapazität		Schmelz- wärme kJ/(kg)	Schicht- tiefe m
		fest W/(m K)	flüssig	fest J/(kgK)	flüssig		
1	1630	1,66	1,50	917	1046	20,5	5,0
2	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0
3	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0
4	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0
5	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0
6	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0
7	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0
8	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0

Rohr- und Kollektordaten:

da	delR	lamR	AKollektor	Rohrzahl	L_gerade	Flüssigkeit	Eintritts- temperatur	Kollektor- leistung	Durch- fluss
mm	mm	W/(m K)	gesamt m ²	parallel	Mittelwert m		°C	W/m ²	l/h
4,3	0,8	0,210	100	1000	5,0	Tyfocor L25		Z-funk.	Z-funk.

Es erfolgt die Anpassung an die vorgegebene Kollektorleistung! Zeitschrittweite: 2 s

Daten zum Simulationsgebiet und zur Simulationszeit:

oberes Gitter	Kernzone	unteres Gitter	imax	Dz	kmax	Oberflächen- temperatur	Erdsohlen- temperatur	Simula- tionszeit		
DxoG	Dicke	DxKZ	Dicke	DxuG	Dicke	°C	°C	h		
mm	m	mm	m	mm	m					
97,6	1,17	2,8	0,06	99,2	3,77	71	4,0	3	10,0	17520

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

Datei Erdreichtemperaturverteilung früherer Simulation:

Monatswerte, Jahressummen und Speicherzustände

Simulations- jahr	Monat	Sonnenwärme Wh/m ²	Erdwärme Wh/m ²	Kollektorarbeit Wh/m ²	
1	1	-4813	2003	11160	
1	2	4813	2041	9240	
1	3	6089	2800	8370	
1	4	9086	2836	5400	
1	5	12191	2753	1860	
1	6	6665	999	0	
1	7	3285	-537	0	
1	8	3059	-1513	0	
1	9	-2209	-1724	900	
1	10	-378	-1458	4650	
1	11	-908	-123	8100	
1	12	1315	1531	10230	
	Jahressummen:	38196	9607	59909	Bilanz: -12106 Wh/m ²
	Speicherzustand	am Ende des Jahres	bezogen auf -10 °C:		74111 Wh/m ²
2	1	-1100	2561	11160	
2	2	5050	2647	9240	
2	3	7608	3123	8370	
2	4	9907	3046	5400	
2	5	13607	3081	1860	
2	6	7220	1438	0	
2	7	3500	-320	0	
2	8	3150	-1423	0	
2	9	-2167	-1676	900	
2	10	-358	-1431	4650	
2	11	-900	-115	8100	
2	12	1317	1534	10230	
	Jahressummen:	46834	12466	59909	Bilanz: -609 Wh/m ²
	Speicherzustand	am Ende des Jahres	bezogen auf -10 °C:		74104 Wh/m ²

- Die jährliche Kollektorarbeit entspricht wieder sehr genau dem berechneten Wert (siehe Seite 48) von 59910 Wh/(m²a).
- Nach zwei Jahren beträgt die Herkunft der Erdwärmekollektorarbeit:
 - 78 % durch Wärmezufluss von der Erdoberfläche
 - 21 % durch Wärmezufluss von der Sohle des Simulationsgebietes (z. B. Grundwasser)
 - 1 % durch Erdreichabkühlung.
 Die Unterschiede zum Beispiel 1 sind nur marginal.

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\ERDWÄRMEKOLLEKTOREN\BEISPIEL_2\FEB2.DAT

Temperaturen: Erdreich k = 1 ... 20 in °C zur Zeit 10175 Stunden
 R kennzeichnet die Rohrlage; z(i) gibt die Tiefe der Elementschicht i in m an

i	z(i)	k=1	k=2	k=3
1	0,05	0,94	0,94	0,94
2	0,15	1,05	1,05	1,05
3	0,24	0,81	0,81	0,81
4	0,34	0,42	0,42	0,42
5	0,44	0,00	0,00	0,00
6	0,54	-0,27	-0,27	-0,27
7	0,63	-0,53	-0,53	-0,53
8	0,73	-0,81	-0,81	-0,81
9	0,83	-1,11	-1,11	-1,11
10	0,93	-1,43	-1,43	-1,43
11	1,02	-1,76	-1,76	-1,76
12	1,12	-2,15	-2,15	-2,15
13	1,17	-2,49	-2,49	-2,49
14	1,18	-2,51	-2,51	-2,51
15	1,18	-2,53	-2,53	-2,53
16	1,18	-2,55	-2,55	-2,55
17	1,18	-2,57	-2,57	-2,57
18	1,19	-2,59	-2,59	-2,59
19	1,19	-2,62	-2,61	-2,61
20	1,19	-2,64	-2,64	-2,63
21	1,19	-2,67	-2,66	-2,65
22	1,20	-2,71	-2,68	-2,66
23	1,20	R	-2,70	-2,67
24	1,20	-2,71	-2,68	-2,66
25	1,21	-2,66	-2,65	-2,64
26	1,21	-2,63	-2,62	-2,62
27	1,21	-2,60	-2,60	-2,60
28	1,21	-2,57	-2,57	-2,57
.
32	1,22	-2,47	-2,47	-2,47
33	1,23	-2,45	-2,45	-2,45
34	1,28	-2,02	-2,02	-2,02
35	1,38	-1,49	-1,49	-1,49
36	1,48	-0,99	-0,99	-0,99
37	1,58	-0,49	-0,49	-0,49
38	1,68	0,00	0,00	0,00
39	1,77	0,30	0,30	0,30
.
71	4,95	9,87	9,87	9,87

Mittlere Medientemperatur im Rohr: -3,08 °C

- Das Hauptmerkmal ist die bedeutend **höhere Soletemperatur**. Sie betrug beim Beispiel 1 $t_{\text{mittel}} = -7,10 \text{ °C}$, sie liegt nunmehr mit $t_{\text{mittel}} = -3,08 \text{ °C}$ um ca. **4 K höher**.
 Dadurch ergeben sich in Rohrnähe auch deutlich höhere Erdreichtemperaturen.
 Ursache ist vor allem der geringere Wärmeleitwiderstand der dünnen Rohrwand
- Bemerkenswert sind auch die sehr homogenen Erdreichtemperaturen in **allen** horizontalen Ebenen aufgrund der kleinen Rohrabstände. So tritt in der Kollektorebene nur ein Unterschied von 0,03 K auf. Dieser betrug beim Rohrschlagenkollektor gemäß Beispiel 1 maximal 2,2 K.

Phasenzustände des Erdreichs k = 1 ... 20 in Werten 0 ... 1 zur Zeit 10175 Stunden

Phase = 0 gefrorener Boden; Phase = 1 ungefrorener Boden; Phase = 0 ... 1 teilgefrorener Boden; Phase = x Boden ohne Feuchteanteil
 R kennzeichnet die Rohrlage; z(i) gibt die Tiefe der Elementschicht i in m an

i	z(i)	k=1	k=2	k=3
1	0,05	1,000	1,000	1,000
2	0,15	1,000	1,000	1,000
3	0,24	1,000	1,000	1,000
4	0,34	1,000	1,000	1,000
5	0,44	0,991	0,991	0,991
6	0,54	0,000	0,000	0,000
.
22	1,20	0,000	0,000	0,000
23	1,20	R	0,000	0,000
24	1,20	0,000	0,000	0,000
25	1,21	0,000	0,000	0,000
26	1,21	0,000	0,000	0,000
27	1,21	0,000	0,000	0,000
28	1,21	0,000	0,000	0,000
29	1,22	0,000	0,000	0,000
30	1,22	0,000	0,000	0,000
31	1,22	0,000	0,000	0,000
32	1,22	0,000	0,000	0,000
33	1,23	0,000	0,000	0,000
34	1,28	0,000	0,000	0,000
35	1,38	0,000	0,000	0,000
36	1,48	0,000	0,000	0,000
37	1,58	0,000	0,000	0,000
38	1,68	0,003	0,003	0,003
39	1,77	1,000	1,000	1,000
.
71	4,95	1,000	1,000	1,000

- ungefrorener Boden
- teilgefrorener Boden (Tiefe unter der Erdoberfläche: 0,44 m)
- gefrorener Boden (Eisdicke: ca. 1,24 m)
- teilgefrorener Boden (Tiefe unter der Erdoberfläche: 1,68 m)
- ungefrorener Boden

- Die Phasenzustände passen genau zu den Bodentemperaturen (vgl. obere Temperaturtabelle auf Seite 61).
- Im Beispiel 1 liegt die gleiche Eisdicke vor (vgl. 53). Dies ist auch logisch, da dem Erdreich die gleich große Wärmemenge entzogen wurde.

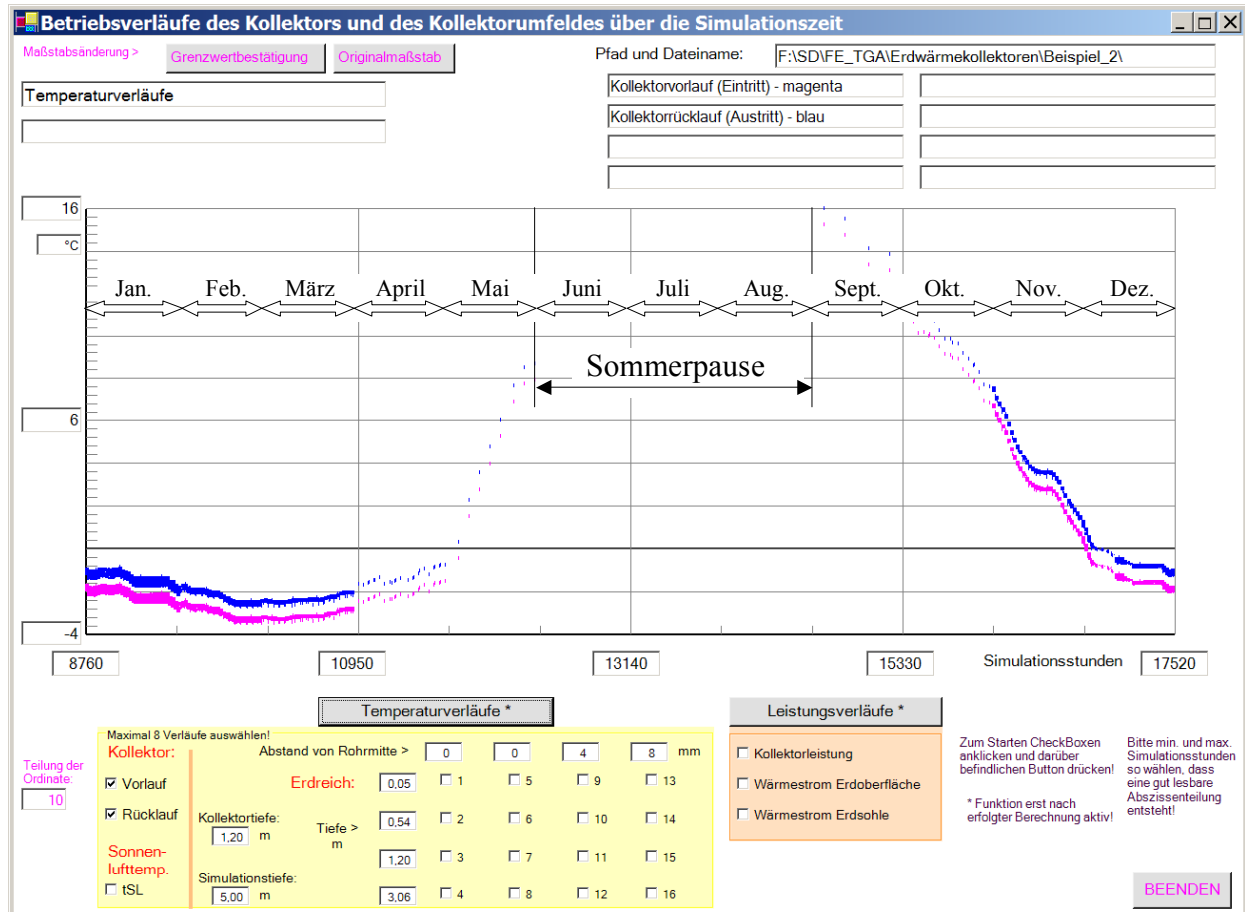


Bild 7.12 Vorlauf- und Rücklauftemperaturen des Erdwärmekollektors im letzten Simulationsjahr

- Die Temperaturverläufe liegen gegenüber dem Rohrschlangenkollektor (Bild 7.6) um etwa 4 K höher.

Aussagen zu Bild 7.13 (oben):

- Prinzipiell gelten die analogen Aussagen wie für den Rohrschlangenkollektor (siehe Seite 55).
- Die Verdickung der grünen Kurve (Punkt 7) entsteht durch die intermittierende Betriebsweise des Kollektors.

Aussagen zu Bild 7.13 (unten):

- Alle markierten Temperaturverläufe an den Erdreichpunkten 3, 7, 11 und 15 liegen übereinander. Dies zeigt die völlig homogene Temperatur zwischen den Rohren, die bei eingebetteten Kunststoff-Kapillarrohrmatten symptomatisch ist. Damit wird die Wärmekapazität des Erdreichs ideal zur Wärmespeicherung genutzt. Die Erdreichtemperatur ist dadurch etwas höher als bei der Rohrschlangenverlegung (vgl. Bild 7.8).

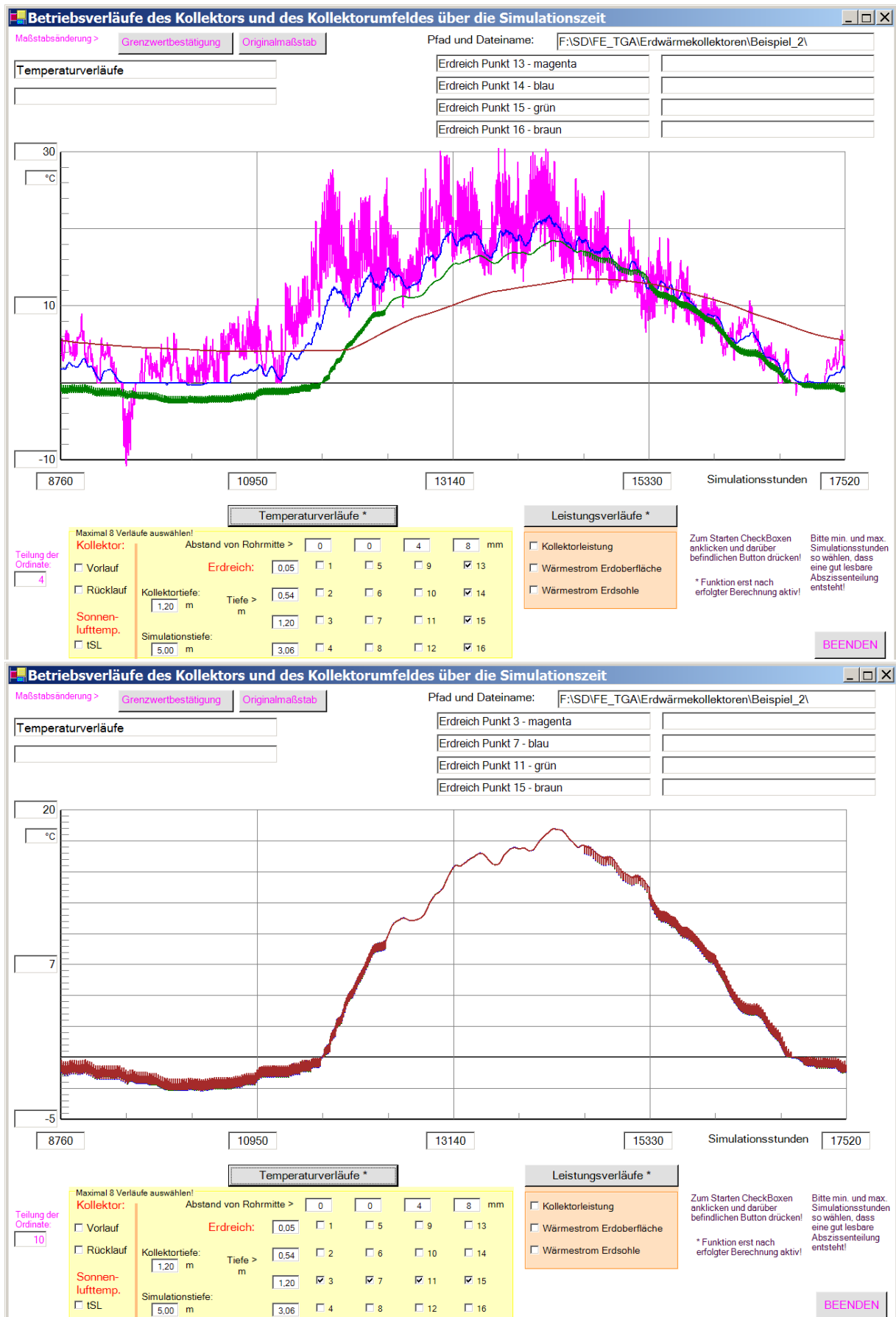


Bild 7.13 Ausgewählte Erdreichtemperaturen im Verlaufe des letzten Simulationsjahres
 Bild oben: Abstand von Rohrmitte ca. 8 mm, Tiefen variiert
 Bild unten: Tiefe ca. 1,20 m (direkt über dem Kollektorrohr), Abstände variiert

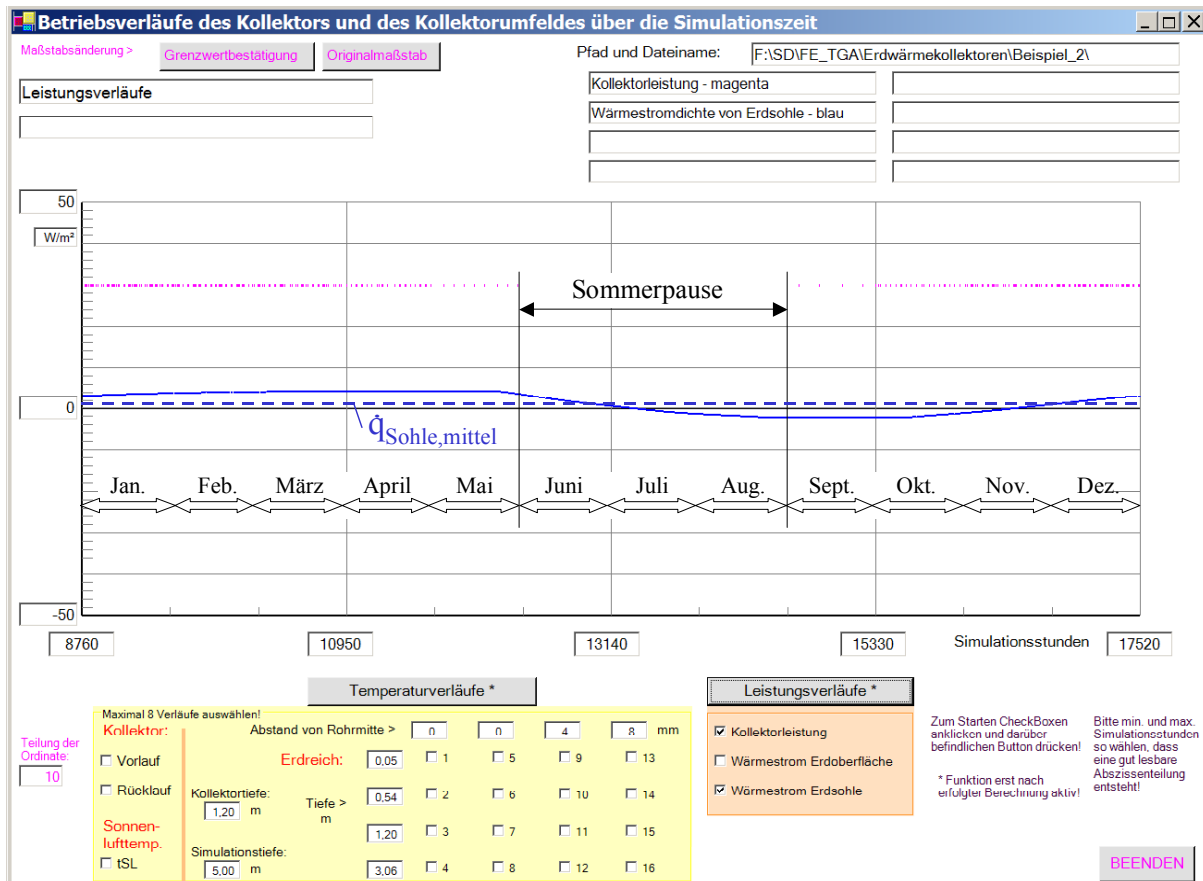


Bild 7.14 Kollektorleistung und Wärmestrom an der Sohle des Simulationsgebietes in das Simulationsgebiet im letzten Simulationsjahr

- Bezüglich der Leistungsverläufe gelten die zu Bild 7.9 und Bild 7.10 (Seite 58) nahezu identischen Aussagen.

7.4 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.

- **Variation der Gitterteilung**

Feine Gitterteilung (Beispiel 1a)

oberes Gitter DxoG mm	Gitter Dicke m	Kernzone DxKZ mm	Dicke m	unteres Gitter DxuG mm	Gitter Dicke m	imax	Dz mm	kmax
49,9	0,95	23,9	0,50	50,0	3,55	111	26,3	10

Normale Gitterteilung (Beispiel 1)

oberes Gitter DxoG mm	Gitter Dicke m	Kernzone DxKZ mm	Dicke m	unteres Gitter DxuG mm	Gitter Dicke m	imax	Dz mm	kmax
105,4	0,95	23,9	0,50	101,4	3,55	65	26,3	10

Grobe Gitterteilung (Beispiel 1b)

oberes Gitter DxoG mm	Gitter Dicke m	Kernzone DxKZ mm	Dicke m	unteres Gitter DxuG mm	Gitter Dicke m	imax	Dz mm	kmax
189,7	0,95	23,9	0,50	197,1	3,55	44	26,3	10

Tabelle 7.5 Spezielle Ergebnisse nach einer Simulationszeit von 2 Jahren bei Änderung der Gitterteilung im Vergleich (magentafarbene Einträge beziehen sich auf Beispiel 1)

		Beispiel 1 normales Gitter	Beispiel 1a feines Gitter	Beispiel 1b grobes Gitter
Gitterteilung	-	imax = 65 kmax = 10	imax = 111 kmax = 10	imax = 44 kmax = 10
Zeitschrittweite Δt	s	120	120	120
Mittlere Medientemperatur am 28. Februar	°C	-7,10	-7,12 0,02 K	-7,28 0,18 K
Erdreichtemperatur in der Kollektorebene in der Mitte zwischen den Rohren (k = kmax)	°C	-2,05	-2,07 0,02 K	-2,22 0,17 K
Speicherzustand bezogen auf -10 °C nach 2 Simulationsjahren	Wh	74037	74029 0,0 %	74043 0,0 %

Die Berechnung mit einer normalen Gitterteilung wird empfohlen!

- Tiefer liegende Sohle des Simulationsgebietes (Beispiel 1c)

Um die Wirkung der Randbedingung an der Sohle des Simulationsgebietes zu überprüfen, werde die Sohle von 5 m auf $T_{\text{Sim}} = 10$ m abgesenkt und dort die Temperatur mit $t_{\text{Erdsohle}} = 10$ °C angenommen.

Auszüge aus den Ergebnislisten:

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\ERDWÄRMEKOLLEKTOREN\BEISPIEL_1C

Monatswerte, Jahressummen und Speicherzustände

Simulations- jahr	Monat	Sonnenwärme Wh/m ²	Erdwärme Wh/m ²	Kollektorarbeit Wh/m ²	
3	1	-1020	94	11160	
3	2	5123	259	9240	
3	3	7784	509	8370	
3	4	10113	699	5400	
3	5	14691	901	1860	
3	6	8778	1003	0	
3	7	4738	1072	0	
3	8	4109	928	0	
3	9	-1538	634	900	
3	10	-16	352	4650	
3	11	-789	111	8100	
3	12	1307	21	10230	
	Jahressummen:	53280	6584	59910	Bilanz: -47 Wh/m ²
	Speicherzustand am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:				163227 Wh/m ²

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\ERDWÄRMEKOLLEKTOREN\BEISPIEL_1C\FEB3.DAT

Temperaturen: Erdreich k = 1 ... 20 in °C zur Zeit 18935 Stunden

R kennzeichnet die Rohrlage; z(i) gibt die Tiefe der Elementschicht i in m an

i	z(i)	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8	k=9	k=10
1	0,05	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
.											
18	1,15	-3,67	-3,44	-3,12	-2,85	-2,65	-2,51	-2,42	-2,36	-2,32	-2,31
19	1,18	-4,64	-3,98	-3,38	-2,98	-2,72	-2,55	-2,44	-2,38	-2,34	-2,32
20	1,20	R	-4,52	-3,54	-3,04	-2,74	-2,56	-2,45	-2,38	-2,34	-2,32
21	1,22	-4,62	-3,96	-3,37	-2,96	-2,70	-2,53	-2,43	-2,36	-2,32	-2,30
22	1,25	-3,63	-3,41	-3,08	-2,81	-2,61	-2,47	-2,38	-2,32	-2,29	-2,27
.											
114	9,85	9,95	9,95	9,95	9,95	9,95	9,95	9,95	9,95	9,95	9,95
115	9,95	9,98	9,98	9,98	9,98	9,98	9,98	9,98	9,98	9,98	9,98

Mittlere Medientemperatur im Rohr: -7,38 °C

Die Auswertung erfolgt auf der nachfolgenden Seite.

Tabelle 7.6 Spezielle Ergebnisse im 3. Simulationsjahr Änderung des Simulationsgebietes von 5 m auf 10 m Tiefe bei gleicher Sohrentemperatur von 10 °C im Vergleich zum Beispiel 1

		Beispiel 1	Beispiel 1c
Gitterteilung	-	imax = 65 kmax = 10	imax = 115 kmax = 10
Mittlere Medientemperatur am 28. Februar	°C	-7,10	-7,38
Erdreichtemperatur in der Kollektorebene in der Mitte zwischen den Rohren (k = kmax)	°C	-2,05	-2,32
Wärmezufuhr von der Erdoberfläche	%	78	89
Wärmezufuhr von der Sohle des Simulationsgebietes	%	22	11
Erdreichabkühlung	%	0	0

- Obwohl erwartungsgemäß der Anteil der Wärmezufuhr von der Oberfläche um 11 % ansteigt, sinkt die mittlere Medientemperatur nur um ca. 0,3 K ab.
Damit ist die Randbedingung an der Sohle des Simulationsgebietes nicht von dominanter Bedeutung.
- **Geringerer solarer Absorptionskoeffizient an der Erdoberfläche (Beispiel 1d)**
Während für die Sonnenlufttemperatur beim Beispiel 1 die Datei "tSL.dat" (erzeugt aus TRY 07 mit $\alpha_a = 0,02$) zum Einsatz kam, wird bei Beispiel 1d die Datei "tSL1.dat" (erzeugt aus TRY 07 mit $\alpha_a = 0,0133$) verwendet (siehe auch Bild 7.2, Seite 46).

Auszüge aus den Ergebnislisten:

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\ERDWÄRMEKOLLEKTOREN\BEISPIEL_1D

Monatswerte, Jahressummen und Speicherzustände

Simulations- jahr	Monat	Sonnenwärme Wh/m ²	Erdwärme Wh/m ²	Kollektorarbeit Wh/m ²	
3	1	-1308	2750	11160	
3	2	4720	2832	9240	
3	3	7327	3366	8370	
3	4	9476	3367	5400	
3	5	13117	3363	1860	
3	6	7217	1783	0	
3	7	3325	-46	0	
3	8	2929	-1249	0	
3	9	-2087	-1676	900	
3	10	-271	-1214	4650	
3	11	-773	62	8100	
3	12	1234	1668	10230	
Jahressummen:		44907	15006	59910	Bilanz: 3 Wh/m ²
Speicherzustand am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:					73655 Wh/m ²

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\ERDWÄRMEKOLLEKTOREN\BEISPIEL_1D\FEB3.DAT

Temperaturen: Erdreich k = 1 ... 20 in °C zur Zeit 18935 Stunden

R kennzeichnet die Rohrlage; z(i) gibt die Tiefe der Elementschicht i in m an

i	z(i)	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8	k=9	k=10
1	0,05	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61
18	1,15	-3,44	-3,21	-2,89	-2,62	-2,42	-2,28	-2,19	-2,13	-2,10	-2,08
19	1,18	-4,41	-3,74	-3,15	-2,74	-2,48	-2,31	-2,21	-2,14	-2,10	-2,09
20	1,20	R	-4,27	-3,30	-2,79	-2,50	-2,32	-2,20	-2,13	-2,09	-2,08
21	1,22	-4,37	-3,71	-3,11	-2,71	-2,45	-2,28	-2,17	-2,11	-2,07	-2,05
22	1,25	-3,37	-3,14	-2,82	-2,55	-2,35	-2,21	-2,12	-2,06	-2,03	-2,01
64	4,85	9,56	9,56	9,56	9,56	9,56	9,56	9,56	9,56	9,56	9,56
65	4,95	9,85	9,85	9,85	9,85	9,85	9,85	9,85	9,85	9,85	9,85

Mittlere Medientemperatur im Rohr: -7,13 °C

Die Auswertung erfolgt auf der nachfolgenden Seite.

	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
September							30																	
Oktober							30		30								30		30		30			
November						30	30		30		30				30		30		30		30		30	
Dezember					30	30	30		30		30		30		30		30		30		30		30	

Ergebnisdrucke und Grafiken des Beispiels 3

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\ERDWÄRMEKOLLEKTOREN\BEISPIEL_3\

Hauptgeometriedaten:

Verlegetiefe	Rohrabstand	Kollektorform	Simulationstiefe	Gitterteilung
m	mm		m	
1,20	20	Rohrmatte	5,00	normal

Erdschichten:

Schicht	Dichte	Wärmeleitfähigkeit	Wärmeleitfähigkeit	Wärmekapazität	Schmelz-	Schicht-
	kg/m ³	fest	flüssig	fest	wärme	tiefe
		W/(m K)	W/(m K)	J/(kgK)	kJ/(kg)	m
1	1630	1,66	1,50	917	1046	5,0
2	0	0,00	0,00	0	0	0,0
3	0	0,00	0,00	0	0	0,0
4	0	0,00	0,00	0	0	0,0
5	0	0,00	0,00	0	0	0,0
6	0	0,00	0,00	0	0	0,0
7	0	0,00	0,00	0	0	0,0
8	0	0,00	0,00	0	0	0,0

Rohr- und Kollektordaten:

da	delR	lamR	AKollektor	Rohrzahl	L_gerade	Flüssigkeit	Eintritts-	Kollektor-	Durch-
mm	mm	W/(m K)	gesamt	parallel	Mittelwert		temperatur	leistung	fluss
			m ²		m		°C	W/m ²	l/h
4,3	0,8	0,210	100	1000	5,0	Tyfocor L25		Z-funk.	Z-funk.

Es erfolgt die Anpassung an die vorgegebene Kollektorleistung! Zeitschrittweite: 2 s

Daten zum Simulationsgebiet und zur Simulationszeit:

oberes Gitter	Kernzone	unteres Gitter	imax	Dz	kmax	Oberflächen-	Erdsohlen-	Simula-		
DxoG	Dicke	DxKZ	Dicke	DxuG	Dicke	temperatur	temperatur	tionszeit		
mm	m	mm	m	mm	m	°C	°C	h		
97,6	1,17	2,8	0,06	99,2	3,77	71	4,0	3	10,0	17520

Datei Sonnenlufttemperatur: F:\SD\FE_TGA\Erdwärmekollektoren\Beispiel_3\tsL.dat

Datei Erdreichtemperaturverteilung früherer Simulation:

Monatswerte, Jahressummen und Speicherzustände

Simulations-	Monat	Sonnenwärme	Erdwärme	Kollektorarbeit		
jahr		Wh/m ²	Wh/m ²	Wh/m ²		
2	1	-1176	2494	11160		
2	2	5038	2621	9240		
2	3	7489	3109	8370		
2	4	9886	3045	5400		
2	5	13545	3074	1860		
2	6	2537	1088	-13650		
2	7	-5191	-2179	-14105		
2	8	-6604	-4297	-14105		
2	9	-7371	-4624	900		
2	10	-2052	-3045	4650		
2	11	-1569	-783	8100		
2	12	1190	1261	10230		
Jahressummen:		15721	1765	18049	Bilanz:	-563 Wh/m ²
Speicherzustand am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:						74673 Wh/m ²

- Die **jährliche** Gesamtsondenarbeit liegt bei ca. 18049 Wh/m². Gefordert ist eine Heizarbeit von 30 W/m² × 1997 h = 59910 Wh/m² und eine Kühlarbeit von -35 W/m² × 1196 h = -41860 Wh/m² (vgl. auch Seite 48). Damit verbleibt ein positiver Wärmeentzug von 18050 Wh/m², der durch die programminterne "Leistungsregelung" in sehr guter Näherung realisiert wird.
- Die von oben in das Simulationsgebiet strömende Wärme beträgt aufgrund der Leistungskompensation (Heizen und Kühlen) näherungsweise nur noch ein Drittel des Beispiels 2. Die von unten in das Simulationsgebiet strömende Wärme reduziert sich auf 1/7.

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\ERDWÄRMEKOLLEKTOREN\BEISPIEL_3\FEB2.DAT

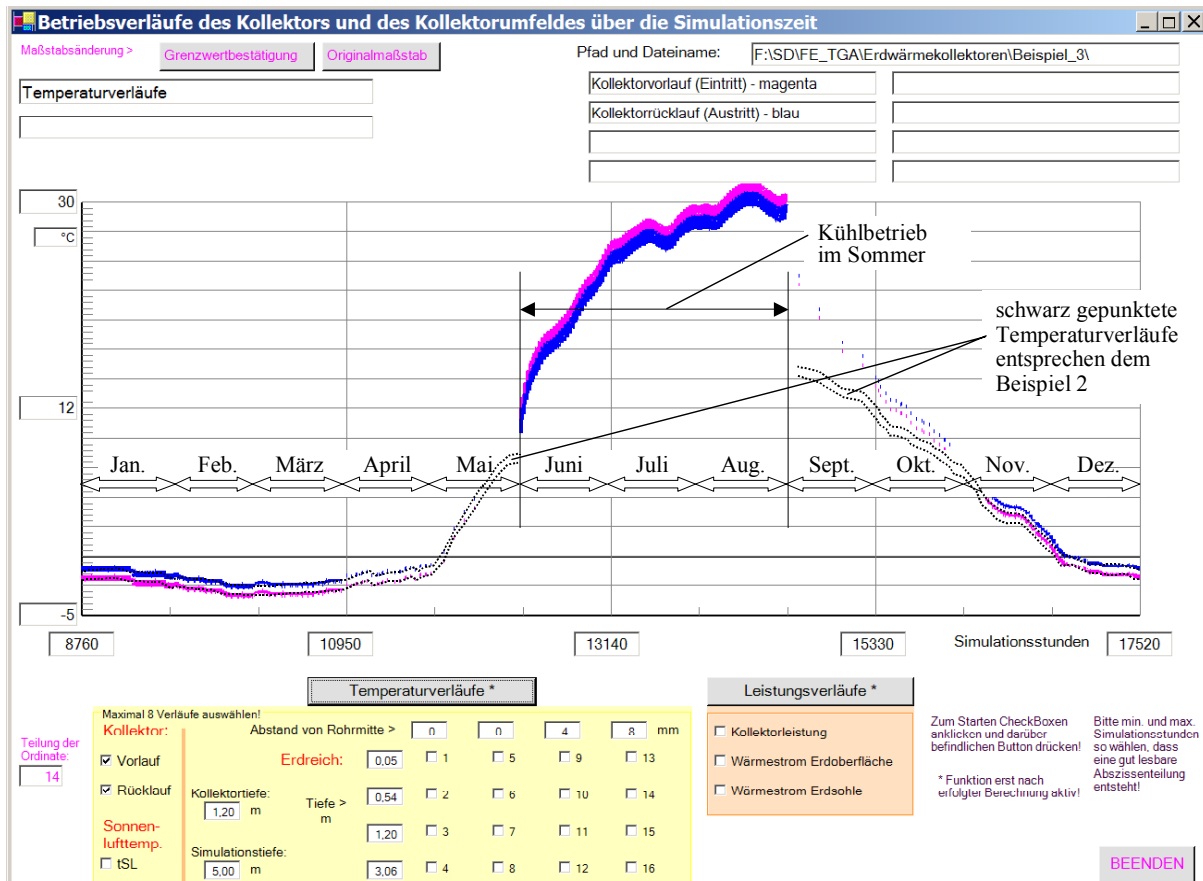
Phasenzustände des Erdreichs k = 1 ... 20 in Werten 0 ... 1 zur Zeit 10175 Stunden
 Phase = 0 gefrorener Boden; Phase = 1 ungefrorener Boden; Phase = 0 ... 1 teilgefrorener Boden; Phase = x Boden ohne Feuchteanteil
 R kennzeichnet die Rohrlage; z(i) gibt die Tiefe der Elementschicht i in m an

Beispiel 3				Elementtiefe	Beispiel 2 (identisch mit Tabelle auf Seite 61)				
i	k=1	k=2	k=3	i	z(i)	i	k=1	k=2	k=3
1	1,000	1,000	1,000	1	0,05	1	1,000	1,000	1,000
2	1,000	1,000	1,000	2	0,15	2	1,000	1,000	1,000
3	1,000	1,000	1,000	3	0,24	3	1,000	1,000	1,000
4	1,000	1,000	1,000	4	0,34	4	1,000	1,000	1,000
5	1,000	1,000	1,000	5	0,44	5	0,991	0,991	0,991
6	0,116	0,116	0,116	6	0,54	6	0,000	0,000	0,000
7	0,000	0,000	0,000	7	0,63	7	0,000	0,000	0,000
...						
22	0,000	0,000	0,000	22	1,20	22	0,000	0,000	0,000
23	R	0,000	0,000	23	1,20	23	R	0,000	0,000
24	0,000	0,000	0,000	24	1,20	24	0,000	0,000	0,000
25	0,000	0,000	0,000	25	1,21	25	0,000	0,000	0,000
26	0,000	0,000	0,000	26	1,21	26	0,000	0,000	0,000
27	0,000	0,000	0,000	27	1,21	27	0,000	0,000	0,000
28	0,000	0,000	0,000	28	1,21	28	0,000	0,000	0,000
29	0,000	0,000	0,000	29	1,22	29	0,000	0,000	0,000
30	0,000	0,000	0,000	30	1,22	30	0,000	0,000	0,000
31	0,000	0,000	0,000	31	1,22	31	0,000	0,000	0,000
32	0,000	0,000	0,000	32	1,22	32	0,000	0,000	0,000
33	0,000	0,000	0,000	33	1,23	33	0,000	0,000	0,000
34	0,000	0,000	0,000	34	1,28	34	0,000	0,000	0,000
35	0,000	0,000	0,000	35	1,38	35	0,000	0,000	0,000
36	0,000	0,000	0,000	36	1,48	36	0,000	0,000	0,000
37	0,000	0,000	0,000	37	1,58	37	0,000	0,000	0,000
38	0,210	0,210	0,210	38	1,68	38	0,003	0,003	0,003
39	1,000	1,000	1,000	39	1,77	39	1,000	1,000	1,000
...						
71	1,000	1,000	1,000	71	4,95	71	1,000	1,000	1,000

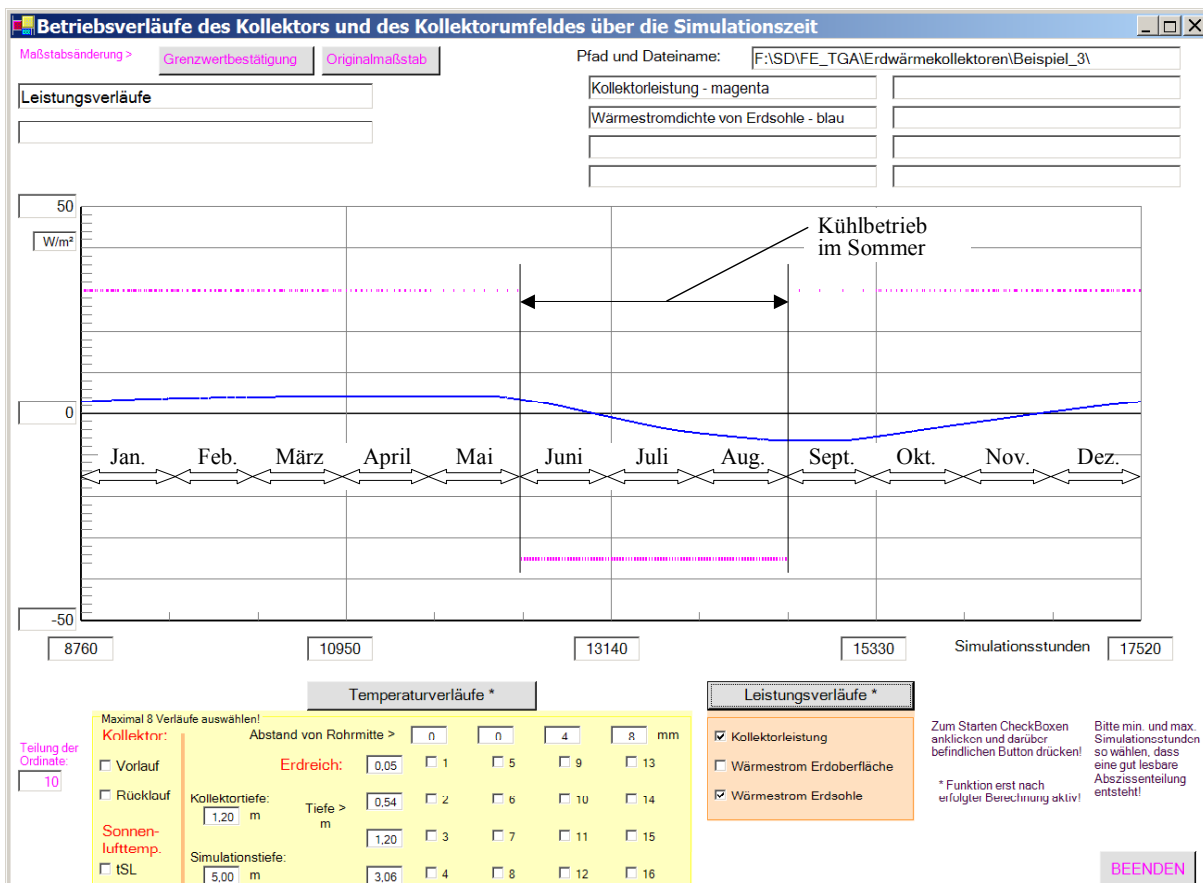
- Die Phasengrenzen zwischen ungefrorenem und gefrorenem Boden verschieben sich infolge der sommerlichen Kühlung nur geringfügig. Die Dicke des Eisblocks reduziert sich nur um etwa 10 cm. Darin zeigt sich, dass der zusätzliche, sommerliche Wärmeeintrag Ende Februar nahezu komplett aufgebraucht ist.

Aussagen zum Bild 7.15:

- Im Bild 7.15 sind die Vor- und Rücklauftemperaturen im Originalausdruck für Beispiel 3 (kombinierter Heiz-/Kühlbetrieb) zu sehen. Im Vergleich dazu wurden die Temperaturverläufe des Beispiels 2 (nur Heizbetrieb gemäß Bild 7.12, Seite 62) überlagert. Besonders bemerkenswert sind:
 - Die Vor- und Rücklauftemperaturen für den Kühlfall steigen bereits im Juni stark an und sind danach unakzeptabel hoch.
 - Die Vor- und Rücklauftemperaturen für den Heizfall profitieren nur bis Ende November vom zusätzlichen sommerlichen Energieeintrag.



7.15 Vorlauf- und Rücklauftemperaturen des Kapillarrohrmattenkollektors im Heiz-/Kühlbetrieb im 2. Simulationsjahr



7.16 Heiz- und Kühlleistungen sowie Wärmestromdichtenverlauf von der Sohle des Simulationsgebietes bei Einsatz eines Kapillarrohrmattenkollektors im Heiz-/Kühlbetrieb im 2. Simulationsjahr

Aussagen zum Bild 7.16:

- Die geforderten Leistungen (Heizleistung 30 W/m², Kühlleistung 35 W/m²) werden exakt erbracht.
- Der Wärmeaustausch an der Sohle des Simulationsgebietes ist über das Jahr nahezu ausgeglichen. Im Mittel fließen 0,2 W/m² von unten ins Simulationsgebiet.

Gesamtfeststellung:

- Die im konstruierten Beispiel angesetzte sommerliche Kühlleistung wurde viel zu groß gewählt. Eine Bauteilkühlung ohne Zwischenschalten einer Kältemaschine wäre nicht möglich. **Die Aufnahmefähigkeit des Erdreiches im Sommer wird sehr oft überschätzt.**
- Der sommerliche Wärmeeintrag wirkt nur über eine relativ kurze Zeit positiv auf den Heizbetrieb. Der betrachtete Kontrolltag Ende Februar zeigt beispielsweise die gleiche mittlere Medientemperatur von -3,08 °C wie bei Betrieb ohne zusätzlichen sommerlichen Wärmeeintrag (Beispiel 2). **Auch diese Nachhaltigkeit wird subjektiv in der Regel zu hoch bewertet.**

7.6 Testbeispiel zur weiteren Demonstration der Simulationsmöglichkeiten

Es handelt sich hierbei um ein **konstruiertes Beispiel**, um die noch nicht vorgestellten Berechnungsmöglichkeiten hervorzuheben.

- Die obere 2 m dicke Erdschicht entspricht nach Tabelle 7.1 der Bodenart I, die aufgrund des Wasseranteils gefrieren kann. Es folgt dann eine Festgesteinsschichten gemäß Bodenart II.
- Weiterhin soll die Funktionsweise mit einer Starttemperaturverteilung, die einer vorausgegangen Erdreichtemperaturverteilung entspricht, überprüft werden.
- Das betrachtete Beispiel basiert bezüglich der weiteren Annahmen auf Beispiel 1. Die Berechnung wird als Beispiel 4 über drei Jahre geführt. Anschließend werde der gleiche Aufbau als Beispiel 5 ebenfalls über zwei Jahre untersucht, wobei die frühere Erdreichtemperaturverteilung am Ende der Simulationszeit als Starttemperaturverteilung genutzt wird.

Ergebnisauszüge und Auswertung des Beispiels 4:

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\ERDWÄRMEKOLLEKTOREN\BEISPIEL_4

Hauptgeometriedaten:

Verlegetiefe m	Rohrabstand mm	Kollektorform	Simulationstiefe m	Gitterteilung
1,20	500	Rohrschlange	5,00	normal

Erdschichten:

Schicht	Dichte kg/m ³	Wärmeleitfähigkeit		Wärmekapazität		Schmelzwärme kJ/(kg)	Schichttiefe m
		fest	flüssig	fest	flüssig		
		W/(m K)		J/(kgK)			
1	1630	1,66	1,50	917	1046	20,5	2,0
2	2400	2,60	2,60	900	900	0,0	5,0
3	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0
4	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0
5	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0
6	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0
7	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0
8	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0

Rohr- und Kollektordaten:

da	delR	lamR	AKollektor	Rohrzahl	L gerade	Flüssigkeit	Eintritts-	Kollektor-	Durch-
mm	mm	W/(m K)	gesamt	parallel	Mittelwert		temperatur	leistung	fluss
			m ²		m		°C	W/m ²	l/h
32,0	2,9	0,380	100	2	8,0	Tyfocor L25		Z-funk.	Z-funk.

Es erfolgt die Anpassung an die vorgegebene Kollektorleistung! Zeitschrittweite: 120 s

Daten zum Simulationsgebiet und zur Simulationszeit:

oberes Gitter	Kernzone	unteres Gitter	imax	Dz	kmax	Oberflächen-	Erdsohlen-	Simula-		
DxoG	Dicke	DxKZ	Dicke	DxuG	Dicke	temperatur	temperatur	tionszeit		
mm	m	mm	m	mm	m	°C	°C	h		
105,4	0,95	23,9	0,50	101,4	3,55	65	26,3	10	10,0	17520

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

Datei Erdreichtemperaturverteilung früherer Simulation:

Monatswerte, Jahressummen und Speicherzustände

Simulations-	Monat	Sonnenwärme	Erdwärme	Kollektorarbeit		
jahr		Wh/m ²	Wh/m ²	Wh/m ²		
1	1	-4951	3022	11161		
.						
1	12	1140	2704	10230		
	Jahressummen:	35706	13798	59911	Bilanz:	-10407 Wh/m ²
	Speicherzustand	am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:				56147 Wh/m ²
2	1	-1288	4245	11160		
.						
2	12	1140	2705	10230		
	Jahressummen:	42418	17492	59910	Bilanz:	-1 Wh/m ²
	Speicherzustand	am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:				56146 Wh/m ²
3	1	-1288	4246	11160		
3	2	4902	4245	9240		
3	3	6609	4968	8370		
3	4	9166	4840	5400		
3	5	11124	3907	1860		
3	6	6399	661	0		
3	7	3472	-1354	0		
3	8	3537	-2553	0		
3	9	-1646	-2772	900		
3	10	-21	-1724	4650		
3	11	-978	323	8100		
3	12	1140	2705	10230		
	Jahressummen:	42418	17492	59910	Bilanz:	0 Wh/m ²
	Speicherzustand	am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:				56146 Wh/m ²

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\ERDWÄRMEKOLLEKTOREN\BEISPIEL_4\FEB3.DAT

Temperaturen: Erdreich k = 1 ... 20 in °C zur Zeit 18935 Stunden

R kennzeichnet die Rohrlage; z(i) gibt die Tiefe der Elementschicht i in m an

i	z(i)	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8	k=9	k=10
1	0,05	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
2	0,16	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08
3	0,26	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
4	0,37	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47
5	0,47	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
6	0,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,69	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25
.											
17	1,13	-2,08	-1,99	-1,82	-1,65	-1,51	-1,40	-1,33	-1,28	-1,25	-1,23
18	1,15	-2,60	-2,37	-2,05	-1,78	-1,58	-1,44	-1,35	-1,29	-1,26	-1,24
19	1,18	-3,56	-2,89	-2,30	-1,89	-1,63	-1,46	-1,36	-1,29	-1,25	-1,23
20	1,20	R	-3,41	-2,43	-1,93	-1,63	-1,45	-1,34	-1,27	-1,23	-1,21
21	1,22	-3,49	-2,83	-2,24	-1,83	-1,57	-1,40	-1,30	-1,23	-1,19	-1,18
22	1,25	-2,48	-2,26	-1,93	-1,66	-1,46	-1,33	-1,23	-1,18	-1,14	-1,12
.											
30	1,44	-0,39	-0,39	-0,38	-0,38	-0,37	-0,36	-0,35	-0,35	-0,34	-0,34
31	1,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
32	1,60	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47
.											
62	4,65	9,11	9,11	9,11	9,11	9,11	9,11	9,11	9,11	9,11	9,11
63	4,75	9,36	9,36	9,36	9,36	9,36	9,36	9,36	9,36	9,36	9,36
64	4,85	9,62	9,62	9,62	9,62	9,62	9,62	9,62	9,62	9,62	9,62
65	4,95	9,87	9,87	9,87	9,87	9,87	9,87	9,87	9,87	9,87	9,87

Mittlere Medientemperatur im Rohr: -6,22 °C

Erdwärmekollektor - Hauptprogramm

Kollektorsimulation (Temperaturfeld im Erdreich instationär)

Autor: Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück (V1/2009)

Geometrie: F:\SD\FE_TGA\Erdwärmekollektoren\Beispiel_5\

Hauptgeometriedaten

Verlegetiefe TKollektor m

Rohrabstand RA mm

Kollektorform:
Rohrschlange 1; Rohrmatte 2

Simulationstiefe T_{Sim} m

Gitterdarstellung:
normal 1; fein 2; grob 3

Generell wird versucht die Rohre als Quadrate bzw. als Rechtecke mit nahezu gleichen Seiten zu approximieren. Der approximierte Rohrquerschnitt stellt ein Element im Gitter dar, welches in der sogenannten Kollektorzone ausschließlich zur Anwendung kommt. Über und unter der Rohrebene werden stets 10 gleiche Elementschichten angeordnet, sodass insgesamt 21 gleiche Schichten definiert sind. Oberhalb und unterhalb der Kollektorzone werden Elemente mit größerer vertikaler Teilung angeordnet. Im Normalfall sind diese etwa 100 mm hoch. Bei feiner Unterteilung etwa 50 mm und bei grober Teilung etwa 200 mm.

Schichtdaten

Schicht	Rho kg/m³	Lambda W/(m K)		c J/(kg K)		rS kJ/kg	T _{Sch} m
		fest	flüssig	fest	flüssig		
Sch = 1	1630	1,66	1,5	917	1046	20,5	2
Sch = 2	2400	2,6	2,6	900	900	0	5
Sch = 3	0	0	0	0	0	0	0
Sch = 4	0	0	0	0	0	0	0
Sch = 5	0	0	0	0	0	0	0
Sch = 6	0	0	0	0	0	0	0

Kollektordaten

Rohraussendurchmesser mm Wanddicke mm Wärmeleitfähigkeit W/(m K)

Kollektorfläche (gesamt) m² Anzahl der parallel durchflossenen Rohre

Gerade Rohrlänge im Kollektor (Mittelwert) m

Durchflussmedium: Tyfocor L 40 % Tyfocor L 25 % Wasser

Eintrittstemperatur °C oder Leistung W/m² Volumenstrom l/h

Die Angaben gelten für die gesamte Simulationszeit. Sind diese Felder "blank", dann ist die Eingabe unter ZEITVERLAUF vorzunehmen. Der Volumenstrom bezieht sich auf die gesamte Kollektorfläche (alle parallel durchströmten 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 ZEITVERLAUFE 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

Konstante Erdoberflächentemperatur °C

Evtl. Laden der Sonnenlufttemperatur (Pfad + Datei):

Unbeeinflusste Sohlentemperatur °C

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

Bei Eingabe von "blank" wird die Anfangstemperatur für alle Volumenelemente mit 8 °C eingegeben.

STARTEN DATEI LADEN EINGABESPEICHERUNG BERECHNUNG DRUCK DIAGRAMM-UMFELD

Zeitverläufe > DURCHFLUSS EINTRITTSTEMPERATUR KOLLEKTORLEISTUNG Ergebnisse > T-/Phase-TABELLE BEENDEN

Bild 7.17 Eingabemaske für Beispiel 5

Als Erdreichtemperaturverteilung wird auf die letzte Simulation des Beispiels 4 bezogen, die in Speicherfeld.dat abgelegt ist. Der Dateiname darf nicht benannt werden, seine Ergänzung an den Pfad erfolgt programmintern. Der Pfad ist mit \ abzuschließen.

Ergebnisauszüge und Auswertung des Beispiels 5:

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\ERDWÄRMEKOLLEKTOREN\BEISPIEL_5\

Hauptgeometriedaten, Rohr- und Kollektordaten, Daten zum Simulationsgebiet und zur Simulationszeit entsprechen dem Beispiel 4.

Datei Sonnenlufttemperatur: F:\SD\FE_TGA\Erdwärmekollektoren\Beispiel_5\tSL.dat

Datei Erdreichtemperaturverteilung früherer Simulation:

F:\SD\FE_TGA\Erdwärmekollektoren\Beispiel_4\

Monatswerte, Jahressummen und Speicherzustände

Simulations-jahr	Monat	Sonnenwärme Wh/m²	Erdwärme Wh/m²	Kollektorarbeit Wh/m²	
1	1	-1288	4246	11161	
.					
1	12	1140	2705	10230	
	Jahressummen:	42419	17493	59911	Bilanz: 0 Wh/m²
	Speicherzustand am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:				56146 Wh/m²
2	1	-1288	4246	11160	
.					
2	12	1140	2705	10230	
	Jahressummen:	42418	17492	59910	Bilanz: 0 Wh/m²
	Speicherzustand am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:				56146 Wh/m²

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\ERDWÄRMEKOLLEKTOREN\BEISPIEL_5\FEB1.DAT

Temperaturen: Erdreich k = 1 ... 20 in °C zur Zeit 1415 Stunden
 R kennzeichnet die Rohrlage; z(i) gibt die Tiefe der Elementschicht i in m an

i	z(i)	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8	k=9	k=10
1	0,05	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
2	0,16	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08
3	0,26	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
4	0,37	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47
5	0,47	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
6	0,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,69	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25
...											
19	1,18	-3,56	-2,89	-2,30	-1,89	-1,63	-1,46	-1,36	-1,29	-1,25	-1,23
20	1,20	R	-3,41	-2,43	-1,93	-1,63	-1,45	-1,34	-1,27	-1,23	-1,21
21	1,22	-3,49	-2,83	-2,24	-1,83	-1,57	-1,40	-1,30	-1,23	-1,19	-1,18
22	1,25	-2,48	-2,26	-1,94	-1,66	-1,46	-1,33	-1,23	-1,18	-1,14	-1,12
23	1,27	-1,90	-1,81	-1,64	-1,47	-1,33	-1,23	-1,15	-1,10	-1,07	-1,06
24	1,30	-1,52	-1,48	-1,39	-1,28	-1,19	-1,11	-1,06	-1,02	-0,99	-0,98
25	1,32	-1,25	-1,23	-1,17	-1,11	-1,05	-0,99	-0,95	-0,92	-0,90	-0,89
26	1,34	-1,03	-1,02	-0,99	-0,95	-0,91	-0,87	-0,84	-0,82	-0,80	-0,79
27	1,37	-0,85	-0,84	-0,82	-0,80	-0,77	-0,75	-0,72	-0,71	-0,69	-0,69
28	1,39	-0,69	-0,68	-0,67	-0,66	-0,64	-0,62	-0,60	-0,59	-0,58	-0,58
29	1,42	-0,54	-0,53	-0,53	-0,52	-0,50	-0,49	-0,48	-0,47	-0,46	-0,46
30	1,44	-0,39	-0,39	-0,38	-0,38	-0,37	-0,36	-0,35	-0,35	-0,34	-0,34
31	1,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
32	1,60	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47
33	1,70	0,94	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
...											
65	4,95	9,87	9,87	9,87	9,87	9,87	9,87	9,87	9,87	9,87	9,87

Mittlere Medientemperatur im Rohr: **-6,22 °C**

- Wie die gelb und blau markierten Ergebnisse zeigen, schließt das Beispiel 5 lückenlos an Beispiel 4 an. Dies beweist die funktionstüchtige Übernahme des Temperaturfeldes aus Beispiel 4.

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\ERDWÄRMEKOLLEKTOREN\BEISPIEL_5\FEB1.DAT

Phasenzustände des Erdreichs k = 1 ... 20 in Werten 0 ... 1 zur Zeit 1415 Stunden
 Phase = 0 gefrorener Boden; Phase = 1 ungefrorener Boden; Phase = 0 ... 1 teilgefrorener Boden; Phase = x Boden ohne Feuchteanteil
 R kennzeichnet die Rohrlage; z(i) gibt die Tiefe der Elementschicht i in m an

i	z(i)	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8	k=9	k=10
1	0,05	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
2	0,16	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
3	0,26	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
4	0,37	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
5	0,47	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
6	0,58	0,964	0,965	0,967	0,970	0,974	0,977	0,980	0,983	0,985	0,985
7	0,69	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
...											
19	1,18	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
20	1,20	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
21	1,22	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
22	1,25	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
23	1,27	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
24	1,30	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	1,32	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
26	1,34	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
27	1,37	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
28	1,39	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
29	1,42	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
30	1,44	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
31	1,50	0,451	0,463	0,497	0,548	0,608	0,672	0,728	0,772	0,803	0,819
32	1,60	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
33	1,70	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
34	1,81	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
35	1,91	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
36	2,01	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
37	2,11	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
38	2,21	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
39	2,31	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
...											
63	4,75	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
64	4,85	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
65	4,95	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

- Der Wechsel der Bodenart liegt in der vorgegebenen Tiefe von 2 m.

Literaturverzeichnis

- [1] GLÜCK, B.: Wärmespeicher als mediendurchströmter Festkörper. Bericht der RUD. OTTO MEYER – Umwelt – Stiftung, Hamburg 2006.
Kostenlos erhältlich unter:
<http://www.berndglueck.de/Waermespeicher>
- [2] GLÜCK, B.: Wärmeübertragung, Wärmeabgabe von Raumheizflächen und Rohren, 2. Auflage. Berlin: Verlag für Bauwesen 1990. ISBN 3-345-00515-8
- [3] VDI-Wärmeatlas, 2. bis 9. Auflage. Düsseldorf: VDI-Verlag 1994 bis 2002
- [4] 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>
- [5] GLÜCK, B.: Zustands- und Stoffwerte (Wasser, Dampf, Luft), 2. Auflage. Berlin: Verlag für Bauwesen 1991 (ISBN 3-345-00487-9)
Kostenlos erhältlich unter:
<http://www.berndglueck.de/Stoffwerte>
- [6] GLÜCK, B.: Thermische Bauteilaktivierung – Nutzen von Umweltenergie und Kapillarrohren. Heidelberg: C. F. Müller Verlag 1999 (ISBN 3-7880-7674-7)
Kostenlos erhältlich unter:
<http://www.berndglueck.de/Bauteilaktivierung>
- [7] Abschlussbericht zum Teilthema des Verbundforschungsvorhabens LowEx:
"INNOVATIVE WÄRMEÜBERTRAGUNG UND WÄRMESPEICHERUNG"
Bearbeiter: Westsächsische Hochschule Zwickau / Clina GmbH Berlin;
Autor des Berichtes und Ersteller der Rechenprogramme : Prof. Dr. Bernd Glück; 2008
Kostenlos erhältlich unter:
<http://www.berndglueck.de/LowEx>

Ergänzende Literatur und Rechenprogramme:

GLÜCK, B.: Simulationsmodell "Erdwärmesonden". Forschungsbericht und Rechenprogramme, 2008.
Kostenlos erhältlich unter:
<http://www.berndglueck.de/Erdwaermesonde>

Anhang

"Wärmetechnischer Vergleich von Erdwärmekollektoren unterschiedlicher Bauart und Vorschläge für einen kombinierten Betrieb mit Luft-Umweltenergieaufnehmern"

Der Bericht wurde 2007 erarbeitet. Die untersuchten Kollektorvarianten mit den zugrunde gelegten Randbedingungen entsprechen weitestgehend den jetzt verwendeten Beispielen 1 und 2.

Grundlage bildete damals ein Simulationsmodell, welches zwar auf [1] basierte jedoch weitreichende Modifikationen beinhaltete. Der Entwicklungsstand des Programms gestattete keine Weitergabe an Dritte.

Mit dem jetzt vorliegenden Simulationsmodell "Erdwärmekollektor", das eine sehr umfangreiche Weiterentwicklung bezüglich Inhalt und Bedienfreundlichkeit darstellt, erhält man mitunter kleine Ergebnisunterschiede.

Die Ursachen liegen beispielsweise an einer veränderten Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten bei der Rohrströmung, dem Aussparen des Kollektorrohres aus dem instationär betrachteten Temperaturfeld während der Betriebspausen, dem Einsatz einer anderen Sole usw.

Die Geringfügigkeit der möglichen Abweichungen bewirkt aber keine grundsätzliche Änderungen an den interessanten Aussagen zum wärmetechnischen Vergleich der Kollektorbauarten und zu den Möglichkeiten der Effizienzsteigerung beim kombinierten Betrieb mit Luft-Umweltenergieaufnehmern.

In den letzten Jahren kamen außer den konventionellen Rohrschlangen **Kompaktabsorber aus Kunststoff-Kapillarrohrmatten** für erdreichgekoppelte Wärmepumpen zum Einsatz. Die VDI 4640, Blatt 2 gibt für Erdwärmekollektoren spezifische Entzugsleistungen in Abhängigkeit der Bodenbeschaffenheit an und empfiehlt Rohrabstände von 0,3 m bis 0,8 m. Die üblicherweise verwendeten Kapillarrohrmatten haben Rohrabstände von 20 mm. Ihre wärmetechnische Effizienz wird nachfolgend verglichen.

Generell bestehen immer große Schwierigkeiten, wenn ein Vergleich zwischen sehr unterschiedlichen Systemen beispielsweise über eine Jahresnutzungsperiode objektiv erfolgen soll. Feldversuche sind in der Regel nicht nur wegen des großen Aufwandes sondern auch wegen der Nichtrealisierbarkeit absolut gleicher Randbedingungen untauglich. Nachfolgend wird der Vergleich mittels Simulationen durchgeführt. Hierbei ist es zwar leicht möglich, die Randbedingungen identisch zu gestalten, strittig bleiben aber immer die praxisbezogenen Annahmen. Sie werden deshalb ausführlich vorgestellt.

Wichtig ist vor allem die Zielaussage des Vergleichs. So könnte man z. B. den zeitlichen Leistungsverlauf einer Kollektorfläche ermitteln, abweichende Leistungen beeinflussen jedoch auch die Nutzung usw. Deshalb wird von einer vorgegebenen **spezifischen Entzugsleistung** für eine Kollektorfläche von 1 m² ausgegangen und unter sonst gleichen Bedingungen – wie z. B. Wetterdaten, Stoffwerte des Erdreichs, Taktprofil der Wärmepumpe – die Soletemperatur 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. Um die wärmetechnischen Systemunterschiede zu verdeutlichen, werden teilweise Extrembelastungen der Erdwärmekollektoren zugrunde gelegt.

A.1 Modellbildung

• Erdreichmodellierung

Es wird ein Sandboden mit Lehnteilen und einem Wasseranteil von etwa 10 %(Vol) angenommen. Die Stoffwerte sind für den ungefrorenen und den gefrorenen Boden in Tabelle A.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.

Tabelle A.1 Mittlere Stoffwerte des modellierten Bodens

Bodenzustand	ρ kg/m ³	λ W/(m K)	c J/(kg K)	r kJ/kg
ungefrorener Boden	1630	1,5	1046	20,5
gefrorener Boden	1630	1,66	917	

• Kollektormodellierung

Zum Einsatz kommen PE-Rohre und PP-Kapillarrohrmatten nach Tabelle A.2. Die Durchfluss-

Tabelle A.2 Rohrabmessungen und Materialdaten des Erdwärmekollektors

Kollektorart	d_a mm	s mm	Rohrabstand mm	ρ_R kg/m ³	λ_R W/(m K)	c_R J/(kg K)	w m/s	Flüssigkeit
Rohr	32	2,9	500	930	0,38	2000	0,9	Tyfocor L 40 %(Vol)
Kapillarrohrmatte	4,3	0,8	20	897	0,21	2000	0,2	

geschwindigkeit ist für das konventionelle Rohr so gewählt, dass turbulente Strömung vorliegt (günstigster Fall). In den Kapillarrohren gilt laminare Strömung. Das Durchflussmedium ist Sole.

• Lage des Kollektors im Boden und thermische Randbedingungen

Die Verlegetiefe beträgt einheitlich 1,2 m unter der Geländeoberfläche. An der Oberfläche 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 zusammengefasst, sodass eine Randbedingung dritter Art vorliegt. Als äußerer Wärmeübergangskoeffizient gelte $\alpha_a = 15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, und der Absorptionskoeffizient ist mit $a = 0,3$ für die Solarstrahlung auf eine unversiegelte Fläche angenommen worden. Diese Annahmen können selbstverständlich zur Diskussion gestellt werden. Testrechnungen ergaben im September (Erdkollektoreinfluss nur noch sehr gering) Erdreichtemperaturen, die vom Mittelwert nach DIN 4710 für Kassel um weniger als 0,3 K abweichen. – In einer Tiefe von 5 m herrscht ganzjährig die Temperatur von 10 °C (Randbedingung erster Art). Dies könnte beispielsweise durch eine grundwasserführende Schicht verursacht sein.

• Wärmetechnische Kollektorbelastung

Im Verlauf eines Jahres werden **1997 Volllaststunden** angenommen. Sie sind identisch mit den Entzugsstunden einer konstanten, vorgegebenen Wärmestromdichte aus dem Erdkollektor von $\dot{q} = 20 \text{ W}/\text{m}^2$ bzw. $40 \text{ W}/\text{m}^2$. Die Soletemperatur wird durch eine "Regelung im Simulationsmodell" so eingestellt, dass die geforderte Wärmestromdichte während der Entzugsdauer eingehalten wird. Die Wärmepumpe läuft mindestens 1 Stunde. Die Nutzhstunden 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 °C sowie der möglichen Raumnutzung. Die angenommene Verteilung zeigt Tabelle A.3.

Tabelle A.3 Tages- und Monatsverteilung der Volllaststunden (= 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				12	372	
Feb					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			

• Simulationsmodell

Grundlage bildete das Simulationsmodell für den **durchströmten Festkörperspeicher** nach [1], wobei zur Beschleunigung des Rechenablaufs die Wärmeleitung nur zweidimensional betrachtet wird. In Richtung der Rohrachse ist die Wärmeleitung vernachlässigt, weshalb für die **Soletemperatur** der **Mittelwert aus Vor- und Rücklauf** gilt.

Das Erdreich ist in **drei horizontale Schichten** mit den stets gleichen Stoffdaten (Tabelle A.1) gegliedert. In der mittleren Schicht mit kleinen Gitterabständen befindet sich das Rohrregister, sodass eine genaue Modellierung der Abmessungen möglich ist, und in der unteren bzw. oberen Schicht sind die Gitterabstände in vertikaler Richtung größer gewählt (Bild A.1).

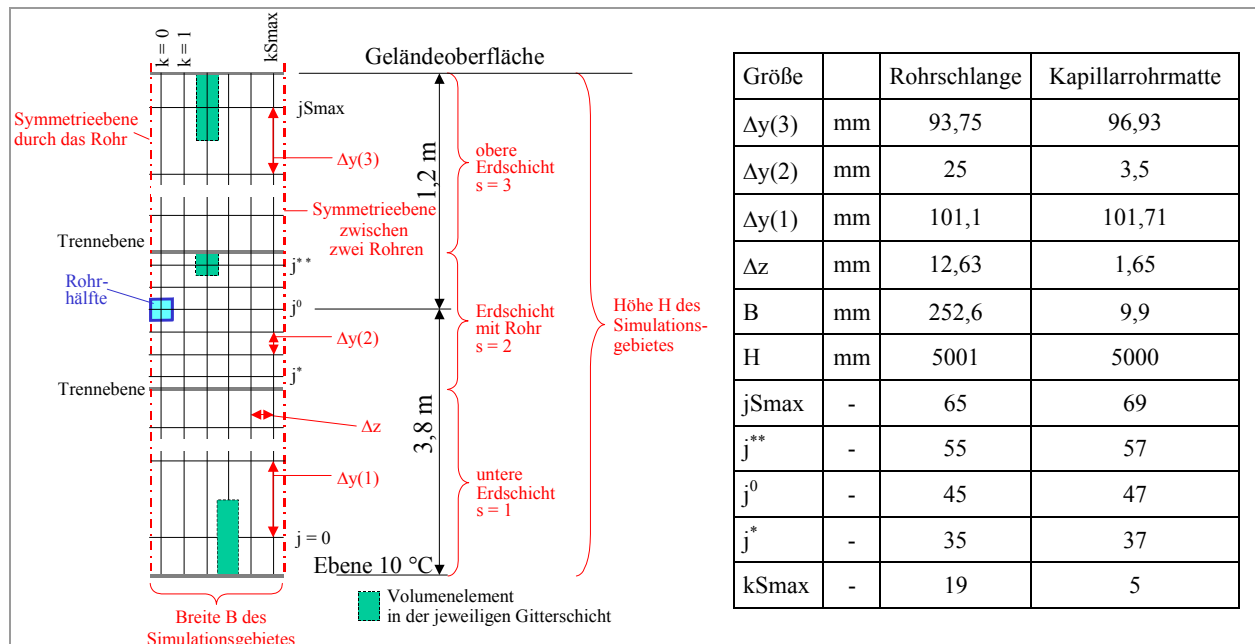


Bild A.1 Gitterdarstellung und charakteristische Parameter als Grundlage für die Simulation beider Kollektortypen mittels Finite-Volumen-Methode

Die **Zeitschrittweite** beträgt beim **konventionellen Rohr 50 s** und bei der **Kapillarrohrr Matte 1 s**. Die Simulationszeit erstreckt sich über drei Jahre (Beginn: 1. Januar; erste Betriebsstunde: 0^{00} bis 1^{00} Uhr), wobei von einer homogenen Erdreichtemperatur $t_{start} = 10\text{ °C}$ ausgegangen wird.

Aus der Ergebnisfülle sind nachfolgende Daten als Stundenwerte verfügbar:

- Sonnenlufttemperatur nach TRY07 (t_a)
- Wärmefaufnahme an der unteren Erdreichgrenze (q_{Uu}) und an der Oberfläche (q_{Uo})
- Wärmefaufnahme vom Rohrregister zur Kontrolle des Vorgabewertes (q_R)
- Soletemperatur (t_{Sole})
- Erdreichtemperatur senkrecht über einem Rohr in den Tiefen von ca. 30, 60, 90 cm (t_{30} , t_{60} , t_{90}).

Die stündlichen Wärmeströme werden monatsweise und über das Jahr summiert (Σq_{Uu} , Σq_{Uo} , Σq_R). Die Soletemperaturen als stündliche Mittelwerte (t_{Sole}) bilden die eigentliche Hauptaussage. Für den schnellen Überblick sind zusätzlich die monatlichen und jährlichen Mittelwerte ($t_{Sole,Mittel}$) bezogen auf die definierten Volllastbetriebsstunden gemäß Tabelle A.3 gebildet. Ergänzend können die Temperatur- und Phasenzustandsverteilungen im gesamten Erdreich zur jeweils letzten Kollektorbetriebsstunde im Februar und im Oktober eines jeden Jahres betrachtet werden.

A.2 Simulationsergebnisse

• Rohrschlange mit Entzugsleistung 20 W/m^2

Im 3. Jahr ergeben sich die Werte der Tabelle A.4. Einige Stundenwerte sind auszugsweise für Februar in Tabelle A.5 angegeben. Hier sind auch die Erdreichtemperaturen in den Tiefen von etwa 30, 60 und 90 cm vermerkt. Schließlich zeigt Bild A.2 die Temperaturen in Teilen des untersuchten Querschnitts zur Simulationszeit Ende Februar. Es ist trotz des großen Rohrabstandes und der relativ kleinen Entzugsleistung eine durchgehende Vereisung eingetreten. (Hinweis: In Tabelle

A.5 ist die mittlere stündliche Soletemperatur z. B. für die 23. Tagesstunde angegeben, im Bild A.2 ist die Soletemperatur am Ende der Betriebsstunde bereits um 0,25 K niedriger.)

Tabelle A.4 Ergebnisse für Erdkollektor: Rohrschlange; Entzugsleistung 20 W/m²; 3. Simulationsjahr

Monat	Σq_{Uu} Wh/m ²	Σq_{Uo} Wh/m ²	Σq_R Wh/m ²	$t_{Sole, Mittel}$ °C
Januar	2404	-1891	7433	-2,6
Februar	2552	4777	6180	-3,0
März	2988	5318	5601	-3,1
April	2935	7893	3614	-1,8
Mai	2274	9526	1252	7,0
Juni	337	5866	0	-
Juli	-905	2963	0	-
August	-1772	2897	0	-
September	-2047	-2394	607	13,1
Oktober	-1545	-1047	3114	8,6
November	-354	-2285	5425	3,3
Dezember	1118	322	6828	-1,7
Jahr 3	7985	31945	40053	-0,3

Tabelle A.5 Stundenwerte für Erdkollektor: Rohrschlange; Entzugsleistung 20 W/m²; 3. Jahr, 28. Februar

Stunde	t_a °C	q_{Uu} Wh/m ²	q_{Uo} Wh/m ²	q_R Wh/m ²	t_{Sole} °C	t_{30} °C	t_{60} °C	t_{90} °C
1	-0,7	4	-7	0	-	0,2	0,2	0,0
2	-0,7	4	-7	0	-	0,2	0,2	0,0
3	-0,7	4	-7	0	-	0,2	0,2	0,0
4	-0,9	4	-9	0	-	0,2	0,1	0,0
5	-1,3	4	-13	20	-2,9	0,2	0,1	0,0
6	-1,3	4	-13	20	-3,3	0,2	0,1	0,0
7	-1,3	4	-13	20	-3,5	0,2	0,1	0,0
8	-1,6	4	-17	0	-	0,2	0,1	0,0
9	-0,4	4	-4	20	-3,2	0,2	0,1	0,0
10	1,6	4	17	0	-	0,1	0,1	0,0
11	2,2	4	22	20	-3,2	0,1	0,1	0,0
12	4,5	4	45	0	-	0,1	0,1	0,0
13	4,8	4	42	20	-3,2	0,1	0,1	0,0
14	5,1	4	39	0	-	0,1	0,1	0,0
15	10,0	4	79	20	-3,2	0,2	0,1	0,0
16	10,1	4	70	0	-	0,2	0,1	0,0
17	5,4	4	20	20	-3,2	0,3	0,1	0,0
18	1,8	4	-12	0	-	0,4	0,1	0,0
19	1,7	4	-8	20	-3,2	0,5	0,1	0,0
20	-0,1	4	-21	0	-	0,6	0,1	0,0
21	0,1	4	-14	20	-3,2	0,7	0,1	0,0
22	0,2	4	-11	0	-	0,7	0,1	0,0
23	0,1	4	-10	20	-3,2	0,7	0,2	0,0
24	0,3	4	-7	0	-	0,7	0,2	0,0
Zum Vergleich die Erdreichtemperaturen aus Bild A.2:						0,71	0,15	0,00

Feldtemperaturen in °C (braunes Feld: Rohr; weißes Feld: ungefrorener Boden; blaues Feld: gefrorener Boden; grünes Feld: teilgefrorener Boden)																				
j	k=0	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
65	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
64	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17
63	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
62	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71
61	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
60	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
59	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
58	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
57	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
55	-0,12	-0,12	-0,12	-0,11	-0,11	-0,11	-0,10	-0,10	-0,09	-0,08	-0,08	-0,06	-0,05	-0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
54	-0,17	-0,17	-0,17	-0,16	-0,16	-0,15	-0,15	-0,14	-0,13	-0,12	-0,11	-0,10	-0,09	-0,07	-0,06	-0,05	-0,04	-0,02	0,00	0,00
53	-0,22	-0,22	-0,22	-0,21	-0,21	-0,20	-0,19	-0,19	-0,18	-0,17	-0,15	-0,14	-0,13	-0,12	-0,11	-0,10	-0,09	-0,08	-0,07	-0,07
52	-0,28	-0,28	-0,28	-0,27	-0,26	-0,25	-0,24	-0,23	-0,22	-0,21	-0,20	-0,19	-0,18	-0,16	-0,15	-0,14	-0,14	-0,13	-0,12	-0,12
51	-0,36	-0,35	-0,35	-0,34	-0,33	-0,31	-0,30	-0,29	-0,27	-0,26	-0,24	-0,23	-0,22	-0,20	-0,19	-0,18	-0,18	-0,17	-0,17	-0,16
50	-0,45	-0,45	-0,44	-0,42	-0,40	-0,38	-0,36	-0,34	-0,32	-0,30	-0,29	-0,27	-0,25	-0,24	-0,23	-0,22	-0,21	-0,20	-0,20	-0,20
49	-0,59	-0,58	-0,56	-0,53	-0,50	-0,47	-0,44	-0,41	-0,38	-0,35	-0,33	-0,30	-0,29	-0,27	-0,26	-0,25	-0,24	-0,23	-0,23	-0,22
48	-0,79	-0,77	-0,73	-0,68	-0,62	-0,57	-0,52	-0,47	-0,43	-0,39	-0,36	-0,34	-0,31	-0,29	-0,28	-0,26	-0,25	-0,24	-0,24	-0,24
47	-1,12	-1,06	-0,97	-0,87	-0,77	-0,68	-0,60	-0,54	-0,48	-0,43	-0,39	-0,36	-0,33	-0,30	-0,29	-0,27	-0,26	-0,25	-0,24	-0,24
46	-1,71	-1,50	-1,28	-1,09	-0,92	-0,79	-0,67	-0,58	-0,51	-0,45	-0,40	-0,36	-0,33	-0,30	-0,28	-0,27	-0,25	-0,24	-0,24	-0,23
45	-3,45	-2,03	-1,55	-1,22	-0,99	-0,82	-0,69	-0,59	-0,51	-0,44	-0,39	-0,35	-0,31	-0,29	-0,26	-0,25	-0,23	-0,22	-0,22	-0,21
44	-1,67	-1,46	-1,24	-1,04	-0,88	-0,74	-0,63	-0,54	-0,46	-0,40	-0,35	-0,31	-0,28	-0,25	-0,23	-0,21	-0,20	-0,19	-0,18	-0,18
43	-1,03	-0,97	-0,88	-0,78	-0,68	-0,59	-0,52	-0,45	-0,39	-0,34	-0,30	-0,26	-0,23	-0,21	-0,19	-0,17	-0,15	-0,14	-0,14	-0,13
42	-0,66	-0,64	-0,60	-0,55	-0,49	-0,44	-0,39	-0,34	-0,30	-0,26	-0,22	-0,20	-0,17	-0,15	-0,13	-0,11	-0,10	-0,08	-0,08	-0,07
41	-0,42	-0,41	-0,39	-0,36	-0,33	-0,29	-0,26	-0,23	-0,20	-0,17	-0,15	-0,12	-0,10	-0,08	-0,06	-0,05	-0,03	0,00	0,00	0,00
40	-0,25	-0,24	-0,23	-0,21	-0,19	-0,17	-0,14	-0,12	-0,10	-0,08	-0,06	-0,05	-0,03	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04
39	-0,12	-0,11	-0,10	-0,09	-0,08	-0,06	-0,03	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,04	0,05	0,06	0,06	0,07	0,08	0,08	0,08
38	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06	0,07	0,08	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13
37	0,09	0,09	0,10	0,10	0,11	0,12	0,12	0,13	0,14	0,15	0,15	0,16	0,17	0,17	0,18	0,18	0,19	0,19	0,19	0,19
:																				
5	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54
4	8,81	8,81	8,81	8,81	8,81	8,81	8,81	8,81	8,81	8,81	8,81	8,81	8,81	8,81	8,81	8,81	8,81	8,81	8,81	8,81
3	9,07	9,07	9,07	9,07	9,07	9,07	9,07	9,07	9,07	9,07	9,07	9,07	9,07	9,07	9,07	9,07	9,07	9,07	9,07	9,07
2	9,34	9,34	9,34	9,34	9,34	9,34	9,34	9,34	9,34	9,34	9,34	9,34	9,34	9,34	9,34	9,34	9,34	9,34	9,34	9,34
1	9,60	9,60	9,60	9,60	9,60	9,60	9,60	9,60	9,60	9,60	9,60	9,60	9,60	9,60	9,60	9,60	9,60	9,60	9,60	9,60
0	9,87	9,87	9,87	9,87	9,87	9,87	9,87	9,87	9,87	9,87	9,87	9,87	9,87	9,87	9,87	9,87	9,87	9,87	9,87	9,87

Bild A.2 Speicherzustand im Querschnitt nach Bild A.1 für Erdkollektor: Rohrschlange; Entzugsleistung 20 W/m²; 3. Simulationsjahr, 28. Februar, 1 Zeitschritt vor 23 Uhr

• **Rohrschlange mit Entzugsleistung 40 W/m²**

Die Werte für das 3. Jahr sind Tabelle A.6 zu entnehmen. Bild A.3 zeigt die Erdreichvereisung Ende Februar. Sie hat gegenüber der niedrigeren Lastvariante (Bild A.2) deutlich zugenommen. Die mittlere Soletemperatur ist enorm abgefallen.

Tabelle A.6 Ergebnisse für Erdkollektor: Rohrschlange; Entzugsleistung 40 W/m²; 3. Simulationsjahr

Monat	Σq_{Uu} Wh/m ²	Σq_{Uo} Wh/m ²	Σq_R Wh/m ²	$t_{Sole,Mittel}$ °C
Januar	2966	-35	14945	-8,3
Februar	3112	7202	12376	-10,1
März	3829	10221	11230	-9,5
April	3862	11498	7269	-7,4
Mai	3852	15779	2499	-2,6
Juni	2612	9138	0	-
Juli	280	4174	0	-
August	-1280	3387	0	-
September	-1836	-1984	1222	9,8
Oktober	-1324	286	6247	4,0
November	172	421	10835	-2,6
Dezember	1953	1728	13701	-6,5
Jahr 3	18200	61812	80324	-6,2

Feldtemperaturen in °C (braunes Feld: Rohr; weißes Feld: ungefrorener Boden; blaues Feld: gefrorener Boden; grünes Feld: teilgefrorener Boden)																				
j	k=0	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
65	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61
64	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
63	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
62	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44
61	-0,89	-0,89	-0,89	-0,89	-0,89	-0,89	-0,89	-0,89	-0,89	-0,89	-0,89	-0,89	-0,89	-0,89	-0,89	-0,89	-0,89	-0,89	-0,89	-0,89
60	-1,33	-1,33	-1,33	-1,33	-1,33	-1,33	-1,33	-1,33	-1,33	-1,33	-1,33	-1,33	-1,33	-1,33	-1,33	-1,33	-1,33	-1,33	-1,33	-1,33
59	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,79	-1,79	-1,79	-1,79	-1,79	-1,79	-1,79	-1,79	-1,79	-1,79	-1,79	-1,79	-1,79	-1,79	-1,79
58	-2,27	-2,27	-2,27	-2,27	-2,27	-2,27	-2,27	-2,27	-2,27	-2,27	-2,27	-2,27	-2,27	-2,27	-2,27	-2,27	-2,27	-2,27	-2,27	-2,27
57	-2,77	-2,77	-2,77	-2,77	-2,77	-2,77	-2,77	-2,77	-2,77	-2,77	-2,76	-2,76	-2,76	-2,76	-2,76	-2,76	-2,76	-2,76	-2,76	-2,76
56	-3,30	-3,30	-3,30	-3,29	-3,29	-3,29	-3,29	-3,29	-3,28	-3,28	-3,28	-3,27	-3,27	-3,27	-3,26	-3,26	-3,26	-3,26	-3,26	-3,26
55	-3,66	-3,65	-3,65	-3,65	-3,64	-3,64	-3,63	-3,63	-3,62	-3,61	-3,61	-3,60	-3,59	-3,59	-3,58	-3,58	-3,57	-3,57	-3,57	-3,57
54	-3,81	-3,81	-3,81	-3,80	-3,80	-3,79	-3,78	-3,77	-3,76	-3,75	-3,75	-3,74	-3,73	-3,72	-3,71	-3,70	-3,70	-3,70	-3,70	-3,70
53	-3,97	-3,97	-3,97	-3,96	-3,95	-3,94	-3,93	-3,92	-3,91	-3,90	-3,88	-3,87	-3,86	-3,85	-3,84	-3,83	-3,83	-3,82	-3,82	-3,82
52	-4,15	-4,15	-4,14	-4,13	-4,12	-4,10	-4,09	-4,07	-4,05	-4,04	-4,02	-4,01	-3,99	-3,98	-3,97	-3,96	-3,95	-3,95	-3,94	-3,94
51	-4,35	-4,35	-4,33	-4,32	-4,30	-4,27	-4,25	-4,23	-4,20	-4,18	-4,16	-4,14	-4,12	-4,10	-4,09	-4,07	-4,06	-4,05	-4,05	-4,05
50	-4,60	-4,59	-4,56	-4,54	-4,50	-4,47	-4,43	-4,39	-4,35	-4,32	-4,29	-4,26	-4,23	-4,21	-4,19	-4,18	-4,17	-4,16	-4,15	-4,15
49	-4,92	-4,90	-4,86	-4,80	-4,75	-4,68	-4,62	-4,56	-4,51	-4,46	-4,42	-4,38	-4,34	-4,32	-4,29	-4,27	-4,26	-4,25	-4,24	-4,24
48	-5,37	-5,32	-5,24	-5,14	-5,04	-4,93	-4,83	-4,74	-4,66	-4,59	-4,53	-4,48	-4,44	-4,41	-4,38	-4,35	-4,34	-4,32	-4,31	-4,31
47	-6,07	-5,95	-5,77	-5,57	-5,38	-5,21	-5,05	-4,92	-4,81	-4,71	-4,64	-4,57	-4,52	-4,48	-4,44	-4,41	-4,39	-4,38	-4,37	-4,36
46	-7,31	-6,89	-6,45	-6,06	-5,73	-5,46	-5,24	-5,06	-4,92	-4,80	-4,71	-4,63	-4,57	-4,52	-4,48	-4,45	-4,43	-4,41	-4,40	-4,40
45	-10,82	-7,98	-7,02	-6,38	-5,92	-5,58	-5,32	-5,12	-4,96	-4,84	-4,73	-4,65	-4,59	-4,54	-4,50	-4,47	-4,44	-4,43	-4,42	-4,41
44	-7,31	-6,89	-6,45	-6,06	-5,73	-5,46	-5,24	-5,07	-4,92	-4,81	-4,71	-4,64	-4,57	-4,53	-4,49	-4,46	-4,43	-4,42	-4,41	-4,40
43	-6,07	-5,96	-5,78	-5,58	-5,39	-5,21	-5,06	-4,93	-4,82	-4,72	-4,64	-4,58	-4,53	-4,48	-4,45	-4,42	-4,40	-4,39	-4,38	-4,37
42	-5,38	-5,33	-5,26	-5,16	-5,05	-4,94	-4,85	-4,76	-4,68	-4,61	-4,55	-4,50	-4,45	-4,42	-4,39	-4,36	-4,35	-4,33	-4,33	-4,32
41	-4,93	-4,91	-4,87	-4,82	-4,76	-4,70	-4,64	-4,58	-4,52	-4,47	-4,43	-4,39	-4,36	-4,33	-4,31	-4,29	-4,27	-4,26	-4,26	-4,25
40	-4,62	-4,60	-4,58	-4,56	-4,52	-4,48	-4,45	-4,41	-4,37	-4,34	-4,31	-4,28	-4,25	-4,23	-4,21	-4,20	-4,19	-4,18	-4,17	-4,17
39	-4,37	-4,37	-4,36	-4,34	-4,32	-4,30	-4,27	-4,25	-4,22	-4,20	-4,18	-4,16	-4,14	-4,12	-4,11	-4,10	-4,09	-4,08	-4,07	-4,07
38	-4,18	-4,17	-4,16	-4,15	-4,14	-4,13	-4,11	-4,09	-4,08	-4,06	-4,05	-4,03	-4,02	-4,00	-3,99	-3,98	-3,98	-3,97	-3,97	-3,96
37	-4,00	-4,00	-3,99	-3,99	-3,98	-3,97	-3,96	-3,95	-3,93	-3,92	-3,91	-3,90	-3,89	-3,88	-3,87	-3,86	-3,86	-3,85	-3,85	-3,85
36	-3,84	-3,84	-3,84	-3,83	-3,82	-3,82	-3,81	-3,80	-3,79	-3,78	-3,77	-3,77	-3,76	-3,75	-3,74	-3,74	-3,73	-3,73	-3,73	-3,73
35	-3,69	-3,68	-3,68	-3,68	-3,67	-3,67	-3,66	-3,66	-3,65	-3,64	-3,64	-3,63	-3,62	-3,62	-3,61	-3,61	-3,60	-3,60	-3,60	-3,60
34	-3,31	-3,31	-3,31	-3,31	-3,30	-3,30	-3,30	-3,30	-3,29	-3,29	-3,29	-3,28	-3,28	-3,28	-3,27	-3,27	-3,27	-3,27	-3,27	-3,27
33	-2,74	-2,74	-2,74	-2,74	-2,74	-2,73	-2,73	-2,73	-2,73	-2,73	-2,73	-2,73	-2,73	-2,73	-2,73	-2,73	-2,73	-2,73	-2,73	-2,73
32	-2,18	-2,18	-2,18	-2,18	-2,18	-2,18	-2,18	-2,18	-2,18	-2,18	-2,18	-2,18	-2,18	-2,18	-2,18	-2,18	-2,18	-2,18	-2,18	-2,18
31	-1,64	-1,64	-1,64	-1,64	-1,64	-1,64	-1,64	-1,64	-1,64	-1,64	-1,64	-1,64	-1,64	-1,64	-1,64	-1,64	-1,64	-1,64	-1,64	-1,64
30	-1,09	-1,09	-1,09	-1,09	-1,09	-1,09	-1,09	-1,09	-1,09	-1,09	-1,09	-1,09	-1,09	-1,09	-1,09	-1,09	-1,09	-1,09	-1,09	-1,09
29	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55
28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
27	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
:																				
2	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17
1	9,50	9,50	9,50	9,50	9,50	9,50	9,50	9,50	9,50	9,50	9,50	9,50	9,50	9,50	9,50	9,50	9,50	9,50	9,50	9,50
0	9,83	9,83	9,83	9,83	9,83	9,83	9,83	9,83	9,83	9,83	9,83	9,83	9,83	9,83	9,83	9,83	9,83	9,83	9,83	9,83

Bild A.3 Speicherzustand im Querschnitt nach Bild A.1 für Erdkollektor: Rohrschlange; Entzugsleistung 40 W/m²; 3. Simulationsjahr, 28. Februar, 1 Zeitschritt vor 23 Uhr

• Kapillarrohmatte mit Entzugsleistung 40 W/m²

Die im 3. Jahr geltenden Ergebnisse sind Tabelle A.7 zu entnehmen. Aus Bild A.4 ist der Gefrierbereich wiederum Ende Februar ersichtlich.

Tabelle A.7 Ergebnisse für Erdkollektor: Kapillarrohmatte; Entzugsleistung 40 W/m²; 3. Simulationsjahr

Monat	Σq_{Uu} Wh/m²	Σq_{Uo} Wh/m²	Σq_R Wh/m²	$t_{Sole,Mittel}$ °C
Januar	2597	-66	14692	-3,5
Februar	2734	6971	12177	-5,2
März	3360	10069	11055	-4,8
April	3330	11386	7146	-2,8
Mai	3441	15700	2466	1,8
Juni	2552	8930	0	-
Juli	362	4107	0	-
August	-978	3394	0	-
September	-1181	-1939	1188	14,3
Oktober	-1161	328	6173	8,6
November	60	455	10731	1,8
Dezember	1723	1727	13474	-1,8
Jahr 3	16838	61061	79103	-1,5

Feldtemperaturen in °C (braunes Feld: Rohr; weißes Feld: ungefrorener Boden; blaues Feld: gefrorener Boden; grünes Feld: teilgefrorener Boden)						
j	k=0	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5
69	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
68	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
66	-0,46	-0,46	-0,46	-0,46	-0,46	-0,46
65	-0,90	-0,90	-0,90	-0,90	-0,90	-0,90
64	-1,35	-1,35	-1,35	-1,35	-1,35	-1,35
63	-1,81	-1,81	-1,81	-1,81	-1,81	-1,81
62	-2,30	-2,30	-2,30	-2,30	-2,30	-2,30
61	-2,80	-2,80	-2,80	-2,80	-2,80	-2,80
60	-3,32	-3,32	-3,32	-3,32	-3,32	-3,32
59	-3,85	-3,85	-3,85	-3,85	-3,85	-3,85
58	-4,44	-4,44	-4,44	-4,44	-4,44	-4,44
57	-4,92	-4,92	-4,92	-4,92	-4,92	-4,92
56	-4,95	-4,95	-4,95	-4,95	-4,95	-4,95
55	-4,99	-4,99	-4,99	-4,99	-4,99	-4,99
54	-5,02	-5,02	-5,02	-5,02	-5,02	-5,02
53	-5,06	-5,06	-5,06	-5,06	-5,06	-5,06
52	-5,10	-5,10	-5,10	-5,10	-5,10	-5,10
51	-5,14	-5,14	-5,14	-5,13	-5,13	-5,13
50	-5,18	-5,18	-5,17	-5,17	-5,17	-5,17
49	-5,22	-5,22	-5,22	-5,21	-5,21	-5,21
48	-5,28	-5,27	-5,26	-5,25	-5,24	-5,23
47	-5,80	-5,32	-5,29	-5,27	-5,25	-5,25
46	-5,28	-5,27	-5,26	-5,25	-5,24	-5,24
45	-5,22	-5,22	-5,22	-5,21	-5,21	-5,21
44	-5,18	-5,18	-5,18	-5,17	-5,17	-5,17
43	-5,14	-5,14	-5,14	-5,14	-5,14	-5,14
42	-5,10	-5,10	-5,10	-5,10	-5,10	-5,10
41	-5,06	-5,06	-5,06	-5,06	-5,06	-5,06
40	-5,03	-5,03	-5,03	-5,03	-5,03	-5,03
39	-4,99	-4,99	-4,99	-4,99	-4,99	-4,99
38	-4,96	-4,96	-4,96	-4,96	-4,96	-4,96
37	-4,92	-4,92	-4,92	-4,92	-4,92	-4,92
36	-4,43	-4,43	-4,43	-4,43	-4,43	-4,43
35	-3,83	-3,83	-3,83	-3,83	-3,83	-3,83
34	-3,26	-3,26	-3,26	-3,26	-3,26	-3,26
33	-2,71	-2,71	-2,71	-2,71	-2,71	-2,71
32	-2,16	-2,16	-2,16	-2,16	-2,16	-2,16
31	-1,62	-1,62	-1,62	-1,62	-1,62	-1,62
30	-1,09	-1,09	-1,09	-1,09	-1,09	-1,09
29	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55	-0,55
28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
27	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
26	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77
:						
2	9,24	9,24	9,24	9,24	9,24	9,24
1	9,55	9,55	9,55	9,55	9,55	9,55
0	9,85	9,85	9,85	9,85	9,85	9,85

Bild A.4 Speicherzustand im Querschnitt nach Bild A.1 für Erdkollektor: Kapillarrohrmatte; Entzugsleistung 40 W/m²; 3. Simulationsjahr, 28. Februar, 1 Zeitschritt vor 23 Uhr

A.3 Auswertung und Schlussfolgerungen

A.3.1 Feststellungen

- In VDI 4640, Blatt 2 sind Verlegeabstände der Rohre gefordert, die zu keinem Zusammenwachsen der Eisradien um die Rohre führen. Dies ist in Anbetracht der verfügbaren Verlegeflächen für die Erdwärmekollektoren in der Regel nicht realisierbar. Wie das erste Beispiel mit Rohrschlangen und einer Entzugsleistung von 20 W/m² (10 W/m_{Rohr}) zeigte, tritt auch bei dieser moderaten Leistung eine **durchgehende Eisschicht** auf, die zumindest zeitweise die Wasserversickerung unterbindet.
- Die beiden Erdwärmekollektoren mit der hohen Entzugsleistung von 40 W/m² bilden unabhängig von der Rohrregisterform eine sehr dicke Eisschicht von etwa 1,8 m. Dies ist auch logisch, da es sich in beiden Fällen um den gleichen saisonalen Erdspeicher handelt. In der Regel wird man daraus eine kleinere zulässige Entzugsleistung schlussfolgern und die Kollektorfläche größer gestalten.

Die Bauart des Kollektors hat keinen nennenswerten Einfluss auf den Verlauf der Erdreichtemperaturen im Jahresgang bei den sonst gleichen Modellannahmen, sondern nur die spezifische Entzugsleistung (Bild A.5).

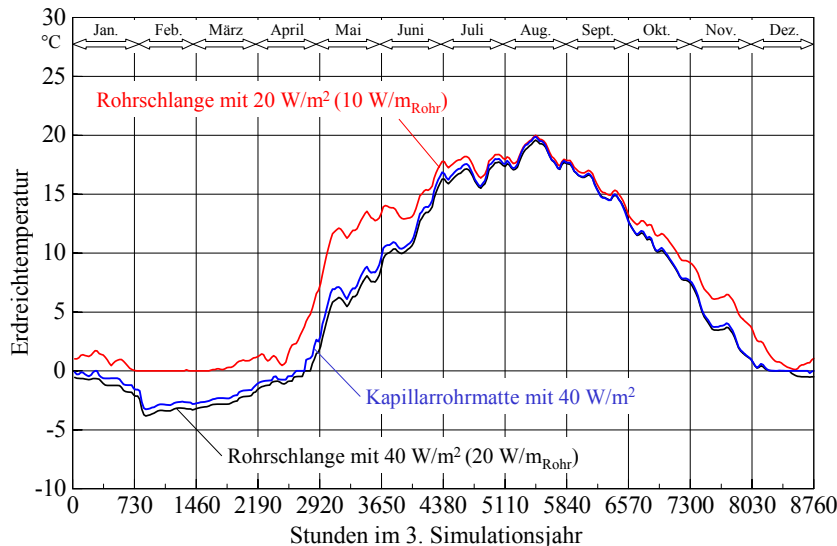


Bild A.5 Erdreichtemperaturverläufe in ca. 0,8...0,9 m Tiefe im Jahresgang für die drei unterschiedlichen Simulationsbeispiele

Der oftmals zitierte Vorteil, dass Rohrschlangenregister zwischen den Rohren im Frühjahr zeitiger auftauen und somit die Wasserversickerung früher freigeben als Kapillarrohrmatten, trifft für hochbelastete Kollektoren – wie der Vergleich der Temperaturverteilungen der Bilder A.3 und A.4 zeigen – nicht a priori zu. Außerdem sei auf die flächenmäßige Gestaltung der sogenannten Kompaktabsorber mit großen Freiräumen zwischen den Matten hingewiesen.

- Unabhängig von der praktischen Umsetzbarkeit lassen sich aus den beiden Beispielen mit 40 W/m^2 Entzugsleistung sehr **interessante Vergleiche bezüglich der Soletemperaturen** (Mittelwert zwischen Vor- und Rücklauf) ziehen:
 - Da die niedrigste Soletemperatur beim Rohrschlangenregister Ende Februar nach Bild A.3 theoretisch ca. -11 °C betragen würde, scheidet diese hochbelastete Kollektorvariante in aller Regel für die übliche Wärmepumpennutzung aus wirtschaftlichen und betriebstechnischen Gründen aus. Bei Einsatz der Kapillarrohrmatte ergibt sich nach Bild A.4 zu diesem Zeitpunkt ein theoretischer Wert von ca. -6 °C , der eventuell noch realisierbar wäre.
 - Die sich im Jahresverlauf einstellende Soletemperatur liegt beim Einsatz von Kapillarrohrmatten im Mittel um $4,7 \text{ K}$ höher als beim Rohrschlangenregister (Tabelle A.6, A.7), was einen bedeutenden thermodynamischen und somit wirtschaftlichen Vorteil für den Wärmepumpenbetrieb hat. Die Jahresverläufe sind im Bild A.6 dargestellt. Der Vorteil höherer Soletemperatur bei gleicher Belastung ist ganzjährig gegeben.

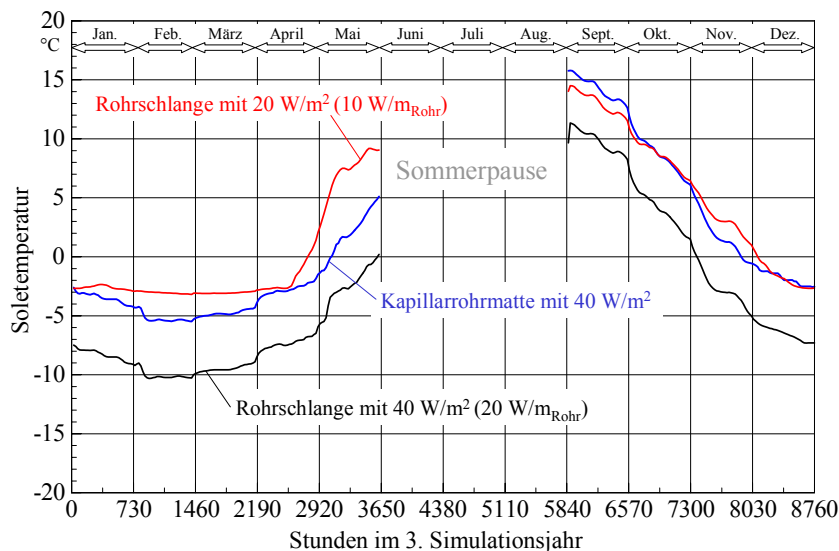


Bild A.6 Soletemperatur (Mittelwert aus Vor- und Rücklauf) im Jahresgang für die drei unterschiedlichen Simulationsbeispiele (Die Unstetigkeiten nach der Sommerpause sind numerisch bedingt.)

- Die Bilder A.3 und A.4 zeigen die **thermodynamischen Vorteile der Kapillarrohmatten** sehr deutlich:
 - Trotz der laminaren Strömungsverhältnisse in den Röhrcchen besteht eine sehr kleine Temperaturdifferenz zwischen der Sole und der Rohr Umgebung. Bei den Kapillarrohren tritt beispielsweise eine Temperaturdifferenz von ca. 0,5 K auf, beim 32 mm Rohr von über 3 K.
 - Bei Kapillarrohreneinsatz besteht im Erdreich eine sehr homogene Temperaturverteilung. Innerhalb der Rohrachsebene treten nur Erdreichtemperaturschwankungen von 0,07 K auf, bei der Rohrschlangenverlegung sind dies 3,57 K.
 - Eine Korrelation zwischen der Erdreichtemperatur und der Soletemperatur für alle simulierten Beispiele und Betriebsstunden des Kollektors ist im Bild A.7 dargestellt. Es verdeutlicht, dass bei gleicher Entzugsleistung die Kapillarrohmatten stets den Rohrschlangenkollektoren wärmetechnisch überlegen sind, und dass die mit 40 W/m² belasteten Kollektoren in dieser Charakteristik etwa dem schwachbelasteten Rohrschlangensystem entsprechen.

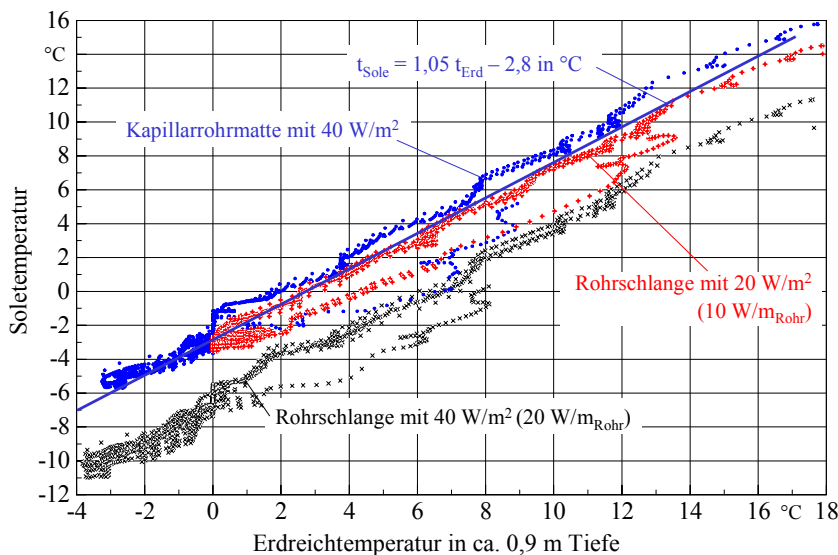


Bild A.7 Korrelation zwischen Soletemperatur (Mittelwert aus Vor- und Rücklauf) und Erdreichtemperatur in einer Tiefe von 0,8...0,9 m für alle Beispiele und Betriebsstunden

- Daraus wird deutlich, dass Kapillarrohmatten sich besonders für Hochleistungsspeicher eignen. Dies ist übrigens in [1], bei der thermischen Bauteilaktivierung [6] und früher auch schon bei Eisspeichern erkannt worden.

A.3.2 Abschätzung von effizienzsteigernden Maßnahmen

Variante I: Bei den kleiner werdenden Bebauungsflächen und zur Kostenersparnis sind Hochleistungsspeicher unabdingbar. Weiterhin sollte zeitweise die **Energienutzung aus der atmosphärischen Luft** einbezogen werden. Eine sehr gute Lösung für Luft-Flüssigkeits-Wärmeübertrager stellt die spiralförmige Wickelkonstruktion aus Kunststoff-Kapillarrohmatten in Form **radial luftdurchströmter Säulen** nach [7, S. 199ff.] dar. Sie sollten ebenfalls von Sole durchströmt werden und somit umschaltbar zum Erdwärmekollektor als zusätzliche Wärmequelle für die Wärmepumpe dienen.

Mittels eines vorgegebenen und/oder eines selbstlernenden Algorithmus könnte die Steuerung der Wärmebereitstellung vorgenommen werden.

Für das Kapillarrohrmattenbeispiel wurde eine bivalente Wärmequellvariante – Erdwärmekollektor und Luftenthalpieaufnehmer – mit einem Umschaltalgorithmus simuliert. Die Luftwärmenutzung erfolgt, wenn die Lufttemperatur mindestens 7 K über der zur Erdreichtemperatur gehörenden Soletemperatur gemäß Regressionsgerade im Bild A.7 liegt. Die Ergebnisse sind in Tabelle

A.8 und Bild A.8 vermerkt. Weitere vergleichende Auswertungen bezüglich der Jahrestemperaturverläufe Erdreich und Sole zeigen die Bilder A.9 und A.10.

Tabelle A.8 Ergebnisse für bivalenten Betrieb mit Erdkollektor (Kapillarrohrmatte; Entzugsleistung 40 W/m²) und Kapillarrohrmatten-Wärmeübertrager zur Luftenthalpienutzung

Monat	Σq_{Uu} Wh/m ²	Σq_{Uo} Wh/m ²	Σq_R Wh/m ²	$t_{Sole,Mittel}$ °C
Januar	2431	-797	10481	-1,8
Februar	2417	5232	8883	-3,0
März	2836	7842	6603	-2,4
April	2758	9330	2882	0,8
Mai	2749	11978	1642	8,4
Juni	1135	6685	0	-
Juli	-322	3342	0	-
August	-1095	3145	0	-
September	-1244	-2001	1203	14,3
Oktober	-1221	183	5922	8,8
November	4	117	10003	2,2
Dezember	1641	1684	12159	-1,6
Jahr 3	12089	46740	59779	0,1

Feldtemperaturen in °C (braunes Feld: Rohr; weißes Feld: ungefrorener Boden; blaues Feld: gefrorener Boden; grünes Feld: teilgefrorener Boden)

j	k=0	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5
69	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
68	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
67	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
66	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41
65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
64	-0,40	-0,40	-0,40	-0,40	-0,40	-0,40
63	-0,77	-0,77	-0,77	-0,77	-0,77	-0,77
62	-1,14	-1,14	-1,14	-1,14	-1,14	-1,14
61	-1,50	-1,50	-1,50	-1,50	-1,50	-1,50
60	-1,84	-1,84	-1,84	-1,84	-1,84	-1,84
59	-2,20	-2,20	-2,20	-2,20	-2,20	-2,20
58	-2,64	-2,64	-2,64	-2,64	-2,64	-2,64
57	-3,08	-3,08	-3,08	-3,08	-3,08	-3,08
56	-3,11	-3,11	-3,11	-3,11	-3,11	-3,11
55	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14
54	-3,18	-3,18	-3,18	-3,18	-3,18	-3,18
53	-3,21	-3,21	-3,21	-3,21	-3,21	-3,21
52	-3,25	-3,25	-3,25	-3,25	-3,25	-3,25
51	-3,28	-3,28	-3,28	-3,28	-3,28	-3,28
50	-3,32	-3,32	-3,32	-3,32	-3,32	-3,32
49	-3,37	-3,36	-3,36	-3,35	-3,35	-3,35
48	-3,42	-3,41	-3,40	-3,39	-3,38	-3,37
47	-3,94	-3,46	-3,42	-3,40	-3,39	-3,39
46	-3,42	-3,41	-3,39	-3,38	-3,37	-3,37
45	-3,36	-3,35	-3,35	-3,35	-3,34	-3,34
44	-3,31	-3,31	-3,31	-3,31	-3,30	-3,30
43	-3,27	-3,27	-3,27	-3,27	-3,27	-3,26
42	-3,23	-3,23	-3,23	-3,23	-3,23	-3,23
41	-3,19	-3,19	-3,19	-3,19	-3,19	-3,19
40	-3,15	-3,15	-3,15	-3,15	-3,15	-3,15
39	-3,11	-3,11	-3,11	-3,11	-3,11	-3,11
38	-3,08	-3,08	-3,08	-3,08	-3,08	-3,08
37	-3,04	-3,04	-3,04	-3,04	-3,04	-3,04
36	-2,53	-2,53	-2,53	-2,53	-2,53	-2,53
35	-1,96	-1,96	-1,96	-1,96	-1,96	-1,96
34	-1,47	-1,47	-1,47	-1,47	-1,47	-1,47
33	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
32	-0,51	-0,51	-0,51	-0,51	-0,51	-0,51
31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
:						
1	9,62	9,62	9,62	9,62	9,62	9,62
0	9,87	9,87	9,87	9,87	9,87	9,87

Bild A.8 Speicherzustand im Querschnitt nach Bild A.1 für bivalenten Betrieb mit Erdkollektor (Kapillarrohrmatte; Entzugsleistung 40 W/m²) und Kapillarrohrmatten-Wärmeübertrager zur Luftenthalpienutzung; 3. Simulationsjahr, 28. Februar, 1 Zeitschritt vor 23 Uhr

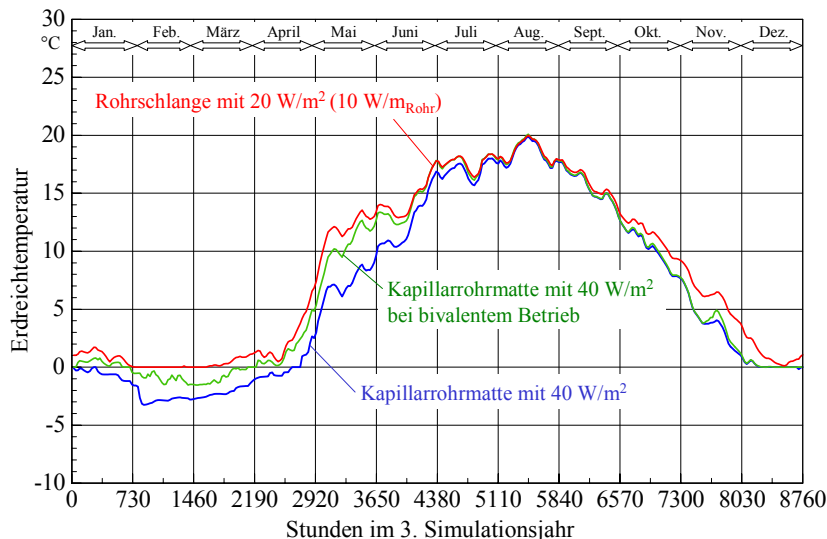


Bild A.9 Erdreichtemperaturverläufe in ca. 0,8...0,9 m Tiefe im Jahresgang bei unterschiedlichen Kollektorbauarten, Entzugsleistungen und Betriebsvarianten für ausgewählte Simulationsbeispiele

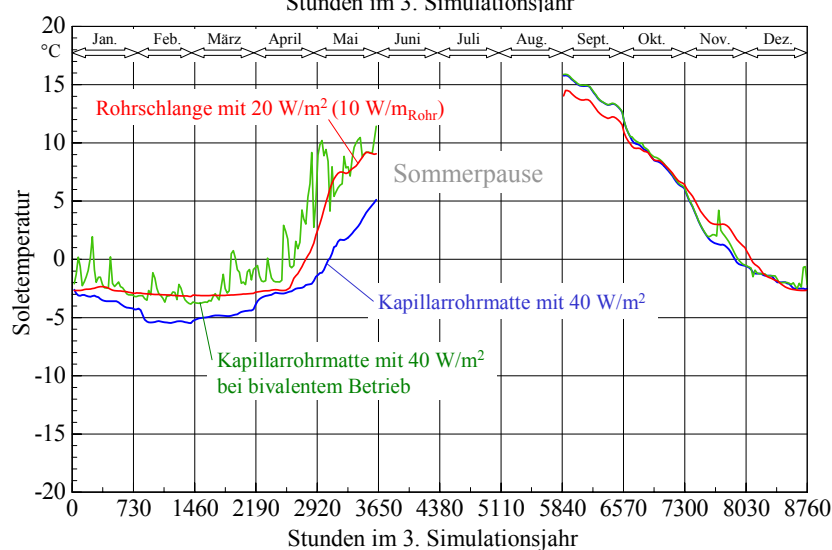


Bild A.10 Soletemperatur (Mittelwert aus Vor- und Rücklauf) im Jahresgang bei unterschiedlichen Kollektorbauarten, Entzugsleistungen und Betriebsvarianten

Diskussion der Veränderungen:

- Die Soletemperatur stieg im Jahresmittel bei gleicher Entzugsleistung von 40 W/m^2 von $-1,5 \text{ °C}$ (Beispiel gemäß Tabelle A.7) auf nunmehr $+0,1 \text{ °C}$ (Tabelle A.8) an.
- Die Ende Februar festgestellte minimale Soletemperatur (Mittel aus Vor- und Rücklauf) erhöhte sich von $-5,80 \text{ °C}$ (Bild A.4) auf $-3,94 \text{ °C}$ (Bild A.8).
- Der Erdwärmekollektor wird jährlich nur noch zu etwa 75 % der Betriebsstunden benutzt. Die restliche Zeit dient der Luftenthalpieaufnehmer (Produktbezeichnung der Fa. Clina als "Energiekorb") als Wärmequelle für die Wärmepumpe. – Während im Herbst und zu Beginn des Winters die Nutzung der Erwärme aufgrund der hohen Erdreichtemperatur dominiert, nimmt die Luftwärmeaufnahme in der zweiten Winterhälfte und im Frühjahr stark zu.
- Die Dicke des gefrorenen Bodens hat sich von ca. 1,8 m auf ca. 1,3 m reduziert.
- Interessant ist auch der Vergleich mit dem Rohrschlängenkollektor bei der halben Belastung (20 W/m^2). Die Soletemperatur liegt im Jahresmittel beim Kapillarrohrmattenkollektor (40 W/m^2) um $0,4 \text{ K}$ höher.

Variante II: Als weitere Möglichkeit bietet sich die zusätzliche **aktive Regeneration des Erdwärmespeichers** z. B. mit der Umweltenergie aus der Luft an, sodass der Erdwärmespeicher zum reinen Spitzenspeicher für kalte Tage wird. Für das abschließende Simulationsbeispiel gilt eine Entzugsleistung von 60 W/m^2 . Eine Beladung erfolgt in den Betriebspausen der Wärmepumpe,

wenn die Lufttemperatur mindestens 10 K über der Erdreichtemperatur liegt. Die Ergebnisse sind in Tabelle A.9 mit der Wärmeaufnahme des Erdreichs durch aktive Regeneration (Σq_{Reg}) sowie in den Bildern A.11 bis A.13 zusammengestellt.

Tabelle A.9 Ergebnisse für bivalenten und regenerativen Betrieb mit Erdkollektor (Kapillarrohrmatte; Entzugsleistung 60 W/m²) und Kapillarrohrmatten-Wärmeübertrager zur Luftenthalpienutzung

Monat	Σq_{Uu} Wh/m ²	Σq_{Uo} Wh/m ²	Σq_{R} Wh/m ²	Σq_{Reg} Wh/m ²	$t_{\text{Sole,Mittel}}$ °C
Januar	2716	263	12317	1155	-3,0
Februar	2717	6655	9930	0	-4,6
März	3248	9216	8011	941	-3,4
April	3179	9486	4358	7097	0,4
Mai	2713	8219	2862	5211	10,2
Juni	631	5738	0	1391	-
Juli	-691	2490	0	638	-
August	-1274	2699	0	0	-
September	-1349	-1927	1732	0	13,7
Oktober	-1199	1229	8657	0	7,0
November	415	1701	13328	0	0,2
Dezember	2006	2239	16626	203	-3,5
Jahr 3	13113	48009	77820	16636	-1,2

Feldtemperaturen in °C (braunes Feld: Rohr; weißes Feld: ungefrorener Boden; blaues Feld: gefrorener Boden; grünes Feld: teilgefrorener Boden)														
j	k=0	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5		j	k=0	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5
69	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88		47	-6,66	-5,95	-5,90	-5,86	-5,85	-5,84
68	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92		46	-5,89	-5,87	-5,85	-5,83	-5,82	-5,82
67	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55		45	-5,80	-5,80	-5,79	-5,78	-5,78	-5,78
66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		44	-5,73	-5,73	-5,73	-5,73	-5,72	-5,72
65	-0,63	-0,63	-0,63	-0,63	-0,63	-0,63		43	-5,67	-5,67	-5,67	-5,67	-5,67	-5,67
64	-1,25	-1,25	-1,25	-1,25	-1,25	-1,25		42	-5,61	-5,61	-5,61	-5,61	-5,61	-5,61
63	-1,86	-1,86	-1,86	-1,86	-1,86	-1,86		41	-5,56	-5,56	-5,56	-5,56	-5,56	-5,56
62	-2,45	-2,45	-2,45	-2,45	-2,45	-2,45		40	-5,50	-5,50	-5,50	-5,50	-5,50	-5,50
61	-3,01	-3,01	-3,01	-3,01	-3,01	-3,01		39	-5,45	-5,45	-5,45	-5,45	-5,45	-5,45
60	-3,54	-3,54	-3,54	-3,54	-3,54	-3,54		38	-5,40	-5,40	-5,40	-5,40	-5,40	-5,40
59	-4,05	-4,05	-4,05	-4,05	-4,05	-4,05		37	-5,35	-5,35	-5,35	-5,35	-5,35	-5,35
58	-4,69	-4,69	-4,69	-4,69	-4,69	-4,69		36	-4,63	-4,63	-4,63	-4,63	-4,63	-4,63
57	-5,36	-5,36	-5,36	-5,36	-5,36	-5,36		35	-3,94	-3,94	-3,94	-3,94	-3,94	-3,94
56	-5,41	-5,41	-5,41	-5,41	-5,41	-5,41		34	-3,36	-3,36	-3,36	-3,36	-3,36	-3,36
55	-5,46	-5,46	-5,46	-5,46	-5,46	-5,46		33	-2,75	-2,75	-2,75	-2,75	-2,75	-2,75
54	-5,51	-5,51	-5,51	-5,51	-5,51	-5,51		32	-2,11	-2,11	-2,11	-2,11	-2,11	-2,11
53	-5,56	-5,56	-5,56	-5,56	-5,56	-5,56		31	-1,42	-1,42	-1,42	-1,42	-1,42	-1,42
52	-5,62	-5,62	-5,62	-5,62	-5,62	-5,62		30	-0,72	-0,72	-0,72	-0,72	-0,72	-0,72
51	-5,67	-5,67	-5,67	-5,67	-5,67	-5,67		29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50	-5,73	-5,73	-5,73	-5,73	-5,73	-5,73		28	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
49	-5,80	-5,80	-5,79	-5,79	-5,78	-5,78		:						
48	-5,89	-5,87	-5,85	-5,84	-5,82	-5,82		1	9,57	9,57	9,57	9,57	9,57	9,57
47	-6,66	-5,95	-5,90	-5,86	-5,85	-5,84		0	9,86	9,86	9,86	9,86	9,86	9,86

Bild A.11 Speicherzustand im Querschnitt nach Bild A.1 für bivalenten und regenerativen Betrieb mit Erdkollektor (Kapillarrohrmatte; Entzugsleistung 60 W/m²) und Kapillarrohrmatten-Wärmeübertrager zur Luftenthalpienutzung; 3. Simulationsjahr, 28. Februar, 1 Zeitschritt vor 23 Uhr

Diskussion der Veränderungen:

- Die Entzugsleistung von 60 W/m² ist für die gewählte Regenerationsform mittels Luft-Sole-Wärmeübertrager sehr hoch angenommen worden.
- Die sich im Jahresmittel ergebende Soletemperatur ist mit -1,2 zwar akzeptabel, der Minimalwert von ca. -7 °C befriedigt aber nicht. – Die mittleren Betriebsbedingungen für die Wärmepumpe entsprechen etwa denen des ursprünglichen Betriebes mit der Kapillarrohrmatte bei 40 W/m².

- Der Erdwärmekollektor wird aufgrund der niedrigen Erdreichtemperatur im Winter nur zu etwa 65 % der Gesamtbetriebszeit der Wärmepumpe benutzt.
- Die dem Erdspeicher zugeführte Regenerationsenergie von $\Sigma q_{\text{Reg}} = 16636 \text{ Wh/m}^2$ ist zwar hoch, wird durch den Jahreseintrag an der Geländeoberfläche $\Sigma q_{\text{Uo}} = 48009 \text{ Wh/m}^2$ aber relativiert. Würde zur Regeneration des Erdreiches eine andere Wärmequelle – z. B. Solarkollektoren – verfügbar sein, so könnte während der Monate Januar bis März wahrscheinlich ein größerer Wärmeeintrag erfolgen.

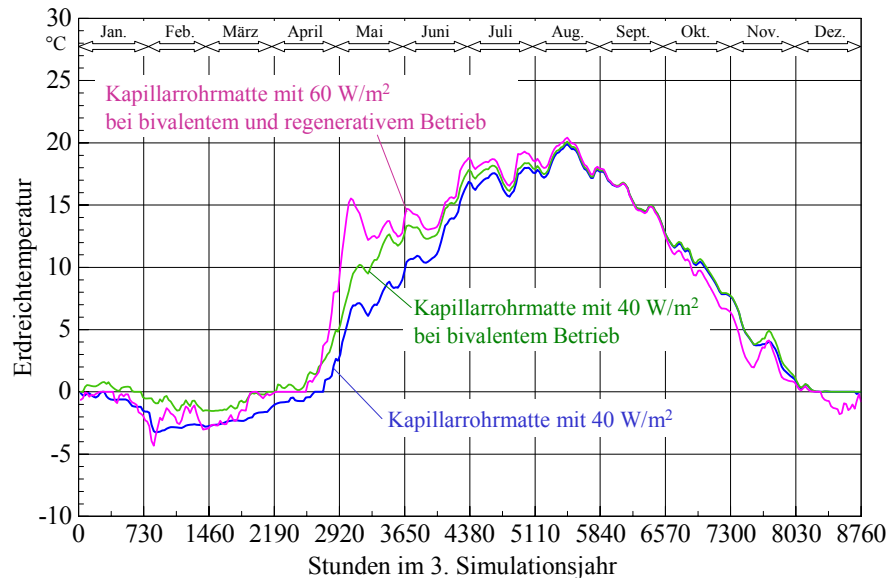


Bild A.12 Erdreichtemperaturverläufe in ca. 0,8...0,9 m Tiefe im Jahresgang bei unterschiedlichen Kollektorbauarten, Entzugsleistungen und Betriebsvarianten für ausgewählte Simulationsbeispiele

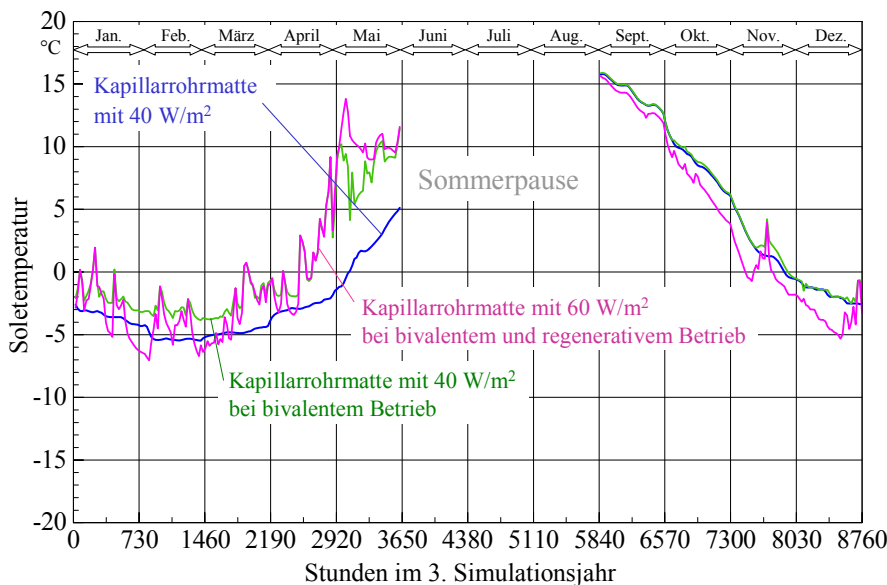


Bild A.13 Soletemperatur (Mittelwert aus Vor- und Rücklauf) im Jahresgang bei unterschiedlichen Kollektorbauarten, Entzugsleistungen und Betriebsvarianten

A.3.3 Fazit

Mit den **Kapillarrohrmatten** als sogenannte Kompaktabsorber ist ein **Hochleistungs-Erdwärmekollektor** verfügbar, der bei jeder gewählten Entzugsleistung vergleichsweise hohe Soletemperaturen liefert. Die **bivalente Wärmequellennutzung** von Erdreich und atmosphärischer Luft mittels Kunststoff-Kapillarrohrmatten ist energetisch **sehr vorteilhaft**.

Die **Regeneration des Erdreichs** allein mit Wärme aus der atmosphärischen Luft erscheint derzeit nicht effizient. Bei Verfügbarkeit einer wirksamen Wärmequelle – beispielsweise eines Solarkollektors – zur Regeneration des Erdreichs wird der Erdreichkollektor zum Spitzenwärmespeicher.