

Modellierung und Simulation einer geothermischen Tiefensonde zur Untersuchung eines kombinierten geo- und solarthermischen Energieversorgungssystems

Berlin, 7. Oktober 1998

Diplomarbeit
Jörg Rädler
TU-Berlin
Matr.: 134745

Betreut durch

Dipl.-Phys. Tobias Schrag
bei
Prof. Dr. Ing. G. Bartsch
Institut für Energietechnik
Technische Universität Berlin

Die selbständige und eigenhändige Anfertigung versichere ich an Eides Statt.

Berlin, den 7. Oktober 1998

Jörg Rädler

Einleitung

Sowohl geothermische als auch solarthermische Heizsysteme können als regenerative Energiequellen einen Beitrag zur Verminderung des CO₂-Ausstoßes leisten. Die Technologien zur Nutzung dieser Energiequellen sind bekannt und werden bereits an verschiedenen Stellen eingesetzt. Im Rahmen einer vom BMBF geförderten Machbarkeitsstudie wird jetzt untersucht, welche Vorteile durch die Kombination beider Systeme unter wirtschaftlichen und technischen Gesichtspunkten zu erwarten sind.

Von den Beteiligten dieses Forschungsprojektes wurde eine Beispielkonfiguration einer solchen Anlage entwickelt, die als Grundlage für die weiteren Untersuchungen dienen kann. Es kommen hier eine geschlossene geothermische Tiefenbohrung (3000 m) und eine Sonnenkollektorfläche von ca. 5500 m² zum Einsatz, die in Kombination mit einer Wärmepumpe, einem Tagesspeicher und konventioneller Nachheizung zur Deckung eines Bedarfes von ca. 8000 MWh/a dienen können. Nach ersten Abschätzungen sind damit regenerative Deckungsraten von über 40% erreichbar.

Eine geothermische Tiefenbohrung entzieht dem Erdreich Wärme, die Temperaturen der umliegenden Erdschichten und damit auch die Bohrerleistung nehmen bei ständigem Betrieb ab. Die zeitweilige Deckung des Energiebedarfes durch Solarenergie führt zu Pausen im Bohrerbetrieb, in denen sich das Erdreich teilweise regenerieren kann. Höhere Bohrerleistungen sind die Folge. Überschüssige Sonnenenergie kann zudem über die Bohrerbohrung in der Erde eingespeichert werden, um diese Regeneration zu unterstützen.

In dieser Arbeit wird ein numerisches Modell einer geschlossenen geothermischen Tiefenbohrung entwickelt, welches in Kombination mit bereits vorhandenen Modellen der anderen Anlagenkomponenten zur Simulation eines solchen kombinierten Systems dienen kann. Als Simulationsumgebung und Modellbeschreibungssprache wird das an der TU-Berlin entwickelte Simulationssystem SMILE gewählt.

Die Validierung des Bohrermodells erfolgt durch Vergleich mit den Ergebnissen analytischer Berechnungen sowie den Meßdaten einer realen Anlage.

Das Modell wird dazu genutzt, Erkenntnisse über das Betriebsverhalten der Bohrerbohrung zu erhalten. Es werden der natürliche Regenerationseffekt des Erdreiches und die Möglichkeiten und Grenzen der Energieeinspeicherung durch die Bohrerbohrung untersucht.

Die Integration des Bohrermodells in die Simulation des kompletten Heizsystems, bestehend aus Sonnenkollektoren, Wärmepumpe, Pufferspeicher, Verbraucher und dem Regelungssystem, wird in dieser Arbeit vorgestellt. Die Auswertung dieser Simulationen und weitergehende Untersuchungen finden im Rahmen der Machbarkeitsstudie statt und sind nicht in dieser Arbeit dokumentiert.

Zusammenfassung

In dieser Arbeit ist dokumentiert, wie ein Simulationsmodell einer geschlossenen geothermischen Tiefensonde entwickelt und angewandt wurde. Für die Simulationsumgebung SMILE wurde ein zweidimensionales zylindrisches Wärmeleitungsmodell auf Grundlage finiter Differenzen zur Abbildung des Erdreiches erstellt, das sich auf die jeweiligen Bedingungen des zu untersuchenden Standortes anpassen und erweitern läßt. Gekoppelt mit einem dynamischen Modell des doppelten Wärmetauscherrohres lassen sich daraus Modelle der Erdsonde in verschiedenen Modellierungstiefen erzeugen. Die Modelle konnten einzeln anhand analytischer Lösungen und gekoppelt durch Vergleich mit Meßdaten einer existierenden Tiefensonde validiert werden.

Ein Problem beim Einsatz des Sondenmodells stellt die ungenaue Kenntnis der Stoffeigenschaften und der Temperaturen im Untergrund dar. Die selbst bei ausführlichen Gutachten mögliche Variationsbreite dieser Parameter kann zu erheblichen Fehlern bei der Voraussage des Sondenverhaltens führen.

Die untersuchte Anlagenkonfiguration mit einer 3000 m langen Sonde erbrachte im langzeitigen Mittel eine Leistung von ca. 300 kW bei Sondernaustrittstemperaturen von ungefähr 45°C. Diese Werte sind im Vergleich mit offenen SONDENSYSTEMEN relativ gering und erfordern den Einsatz einer Wärmepumpe für die Nutzung der Energie zu Heizzwecken.

In Simulationsrechnungen wurde die Abhängigkeit der Sondenleistung von baulichen Parametern bestimmt. Die Möglichkeit zur Leistungssteigerung ist vor allem durch den Einsatz einer längeren Sonde gegeben, Rohrdurchmesser und -materialien haben nur einen geringen Einfluß. Die Sondernaustrittstemperaturen und damit auch die Leistung sind stark von der Fließrate und der Eintrittstemperatur abhängig, diese Parameter werden jedoch auch vom Verhalten der nachgeschalteten Wärmepumpe bestimmt. Eine Optimierung der Betriebsparameter kann hier nur durch Simulation des Gesamtsystems erfolgen.

In Betriebspausen der Tiefensonde regenerieren sich die Temperaturen im Untergrund teilweise, eine Erhöhung der Sondenleistung im nachfolgenden Betrieb ist die Folge. Auf diese Art kann eine Verschiebung des Energieangebots durch den Einsatz eines zweiten Versorgungssystems erreicht werden.

Die Nutzung der Sonde als Energiespeicher, z.B. in Kombination mit Solarkollektoren, ist prinzipiell möglich. Die Speicherwirkungsgrade sind allerdings im Vergleich mit herkömmlichen Systemen sehr gering und verringern sich mit steigender Einspeicherzeit. Die saisonale Energiespeicherung durch die Tiefensonde erscheint daher nicht als Alternative zur Nutzung anderer Speichersysteme. Eine kurzzeitige Einspeicherung, auch zur Verhinderung von Stagnationsproblemen des Solarkollektors, ist jedoch möglich.

Die Kombination des Sondenmodells mit anderen Komponenten zur Simulation eines gesamten Heizsystems ist problemlos möglich. Dies eröffnet die Möglichkeit, das dynamische Zusammenspiel aller Komponenten der Anlage zu untersuchen und zu bewerten.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde am Institut für Energietechnik der Technischen Universität Berlin angefertigt.

An dieser Stelle möchte ich Tobias besonders danken für die engagierte Betreuung und die angenehme Zusammenarbeit, die mir viele Freiheiten ließ.

Für die fachliche Beratung, Betreuung und Unterstützung bei der Beschaffung der benötigten Daten danke ich Hannes und Dr. Liebisch, Kemal und Kuno vom Geoforschungszentrum Potsdam, sowie Dr. Kraft und den Mitarbeitern der Firma YORK. Für seine intensive Korrektur danke ich meinem Vater.

Mein besonderer Dank gebührt Steffen und Christian für ihre Unterstützung, ihre Kritik und Trost.

Berlin, 7. Oktober 1998

Jörg Rädler

Die Saurier überlebten 250 Millionen Jahre, wie stellen sie sich ein Wirtschaftswachstum über 250 Millionen Jahre vor? (Stichworte genügen.)

Max Frisch, 1987

Inhaltsverzeichnis

1. Allgemeine Einführung	5
1.1. Regenerative Energien	5
1.1.1. Solarthermische Heizsysteme	6
1.1.2. Geothermische Heizsysteme	7
1.1.3. Kombinierte Heizsysteme	11
1.2. Stand der Dinge	11
1.3. Untersuchungsziele	12
1.4. Das Hilfsmittel: SMILE	13
2. Modellierung der Erdsonde	15
2.1. Erdreichmodellierung	15
2.1.1. Wärmeleitung im Zylindermodell	17
2.1.2. Stoffwerte	19
2.1.3. Randbedingungen	20
2.1.4. Das Erdreichmodell als SMILE-Komponente	21
2.1.5. Validierung des Modells	22
2.1.6. Einsatzbereiche und Beschränkungen des Modells	24
2.2. Modellierung des Wärmetauscherrohres	27
2.2.1. Allgemeines Modell	27
2.2.2. Der Wärmeübergang an den Rohrwänden	29
2.2.3. Stoffwerte	31
2.2.4. Das Rohrmodell als SMILE-Komponente	32
2.2.5. Modellvalidierung	33

2.2.6. Einsatzbereiche und Beschränkungen des Modells	34
2.3. Gesamtmodell der Erdsonde	35
3. Validierung des Erdsondenmodells	39
3.1. Grundlagen	39
3.1.1. Parameterwahl	40
3.2. Vergleich der Ergebnisse	40
3.3. Auswertung	41
4. Untersuchungen an der Tiefenonde	43
4.1. Allgemeines Betriebsverhalten	43
4.1.1. Einfluß von Sondengeometrie und -materialien	43
4.1.2. Einfluß der Geologie	44
4.1.3. Einfluß des Massenstromes und der Einspeisetemperatur	45
4.2. Regenerationsverhalten	49
4.3. Möglichkeiten der Einspeicherung	50
4.4. Bewertung von Regenerations- und Speicherphasen	53
5. Modellierung der Gesamtanlage	55
5.1. Entwurf des Anlagenkonzeptes	55
5.1.1. Schaltungsbeschreibung	56
5.2. Implementation in SMILE	57
5.2.1. Tiefenonde	57
5.2.2. Wärmepumpe	58
5.2.3. Rohrmodell	59
5.2.4. Verbrauchsmodell	59
5.2.5. Weitere Modelle	60
5.3. Simulation des Systems	60
6. Schlußbetrachtungen	63
6.1. Ergebnisse der Untersuchungen	63

6.1.1. Auslegung und Betrieb der Tiefensonde	63
6.1.2. Kombination mit Solarkollektoren	64
6.2. Erfahrungen mit der Simulation in SMILE	66
6.3. Ausblick	67
Abbildungsverzeichnis	69
Tabellenverzeichnis	71
Zeichenerklärung	73
Literaturverzeichnis	75
A. Anhang	79
A.1. Geologische Parameter Prenzlau	79
A.2. Geologische Parameter Potsdam	79
A.3. Geometrie der Prenzlauer Sonde	80
A.4. Quelltexte der Simulationsmodelle	80

1. Allgemeine Einführung

In diesem Kapitel werden ausgehend von der Notwendigkeit, die Nutzung regenerativer Energien stärker zu fördern, solar- und geothermische Systeme mit ihren technischen Grundlagen kurz vorgestellt. Die Idee der Kopplung beider Varianten wird erläutert und vom bisherigen Wissensstand die in dieser Arbeit konkret zu untersuchenden Fragestellungen abgeleitet. Es folgt eine kurze Einführung in das Simulationssystem SMILE als gewähltes Hilfsmittel.

1.1. Regenerative Energien

“Diese Arbeit soll dazu beitragen, Wege zum umweltverträglichen Umgang mit Energie aufzuzeigen. Aus mehreren Gründen ist es dringend geboten, den Energieverbrauch drastisch zu senken. So sind die Vorkommen an fossilen Energieträgern begrenzt, aus Verantwortung gegenüber zukünftigen Generationen müssen diese Reserven geschont werden. Außerdem ist die Gewinnung von fossilen Energieträgern mit erheblichen Auswirkungen auf die Umwelt verbunden. Der Abbau von Braunkohle z.B. bedeutet immer landschaftliche Zerstörungen, die Ölförderung ist problematisch, der Transport von Erdöl birgt große Gefahren für die Meere, etc.

Der Verbrauch von Energie ist in der Regel auch mit dem Ausstoß von Schadstoffen verbunden, wobei die Erzeugung von Kohlendioxid eine immer größere Rolle spielt, da das sonst unschädliche Gas als stark klimagefährdend gilt und sich der CO₂-Ausstoß bei der Verbrennung von herkömmlichen Energieträgern nicht vermeiden läßt. Weitere bei der Verbrennung entstehende Abgase sind stark gesundheitsgefährdend und tragen zur Zerstörung der natürlichen Lebensgrundlagen bei.

Zudem kommt gerade den Menschen in Industrienationen eine besonders große Verantwortung im Umgang mit Energie zu. Der Verbrauch von Energie liegt in den industrialisierten Gesellschaften um ein Vielfaches höher als in den Ländern der sogenannten Dritten Welt. Schon um überhaupt die Möglichkeit zu haben, die bestehenden Ungerechtigkeiten bei der Verteilung der weltweiten Ressourcen überwinden zu können, ist ein sparsamer Umgang mit ihnen unumgänglich.

Eine Einsparung von Energie aus den genannten Gründen muß für die BetreiberInnen von energietechnischen Anlagen –dazu gehören z.B. auch Einfamilienhäuser oder

Kraftfahrzeuge– machbar sein. Das heißt, nur wenige werden Sparmaßnahmen umsetzen wollen oder können, wenn der Betrieb dadurch kostenintensiver wird oder dazu notwendige Investitionen nicht geleistet werden können. Oft ist ein wirklicher Anreiz auch erst durch reelle finanzielle Gewinne bzw. Einsparungen für die BetreiberInnen zu erreichen. Die zu erzielenden Einsparungen sind allerdings unter anderem davon abhängig, ob eine Verminderung des Verbrauches fossiler Energieträger politisch gewollt ist. So würde beispielsweise die Einführung einer CO₂-Steuer den Einsatz regenerativer Energieträger und Maßnahmen zur rationellen Energieverwendung wesentlich rentabler machen.” (MEESE 1996)

1.1.1. Solarthermische Heizsysteme

Solarenergie läßt sich besonders dort kostengünstig nutzen, wo der Energiebedarf einen ähnlichen zeitlichen Verlauf hat wie das Energieangebot durch solare Einstrahlung. Hier ist speziell die solare Klimatisierung zu nennen, die sicherlich in nächster Zeit noch weitere Verbreitung finden wird. Auch zur Unterstützung der Warmwasserbereitung sind solarthermische Systeme verbreitet, da hier in der einstrahlungsreichen Zeit ein bedeutender Anteil der herkömmlichen Energieträger ersetzt werden kann.

Prinzipiell kann man zwischen aktiver und passiver Solarenergienutzung unterscheiden. Durch passive Nutzung (Solararchitektur) kann bei entsprechender Planung von Gebäuden der Energieverbrauch stark herabgesetzt werden. Da hier keine aufwendigen technischen Systeme und keine spezielle Speicherung notwendig sind, ist der Einsatz besonders bei Neubauten eine kostengünstige Alternative. Aktive solarthermische Systeme bestehen meist aus Kollektorsystemen und Energiespeichern. Hier sind inzwischen verschiedene Kollektorbauformen von herkömmlichen Flachkollektoren bis zu hochevakuierten, konzentrierenden Systemen üblich.

Das grundsätzliche Problem aktiver solarthermischer Systeme zur Beheizung von Gebäuden ist der gegenläufige Verlauf von Energieangebot (Einstrahlung) und Energienachfrage (Heizbedarf). Um mit solchen Systemen überhaupt einen nennenswerten Anteil der Heizenergie bereitstellen zu können, ist entweder ein sehr großes Kollektorfeld notwendig, was wegen der hohen Investitionen wirtschaftlich nicht realisierbar wäre, oder die längerfristige Speicherung der gewonnenen Energie. Zur saisonalen Energiespeicherung gibt es verschiedene Konzepte.

Neben den Latentwärmespeichern, bei denen durch Nutzung der Schmelz-, Erstarrungs- oder Adsorptionswärme spezieller Stoffe sehr hohe Energiedichten erreicht werden können, kommen hauptsächlich Systeme zum Einsatz, bei denen die Speicherwirkung von Wasser oder dem Erdreich ausgenutzt wird.

Große Speicher werden oft unterirdisch angelegt. Es besteht hier die Möglichkeit, natürliche Wasseradern (Aquifere) oder Hohlräume (Kavernen) zu nutzen, oder letztere künstlich zu erzeugen. Ein solcher Aufwand lohnt nur bei einer relativ großen Anlage, beispiels-

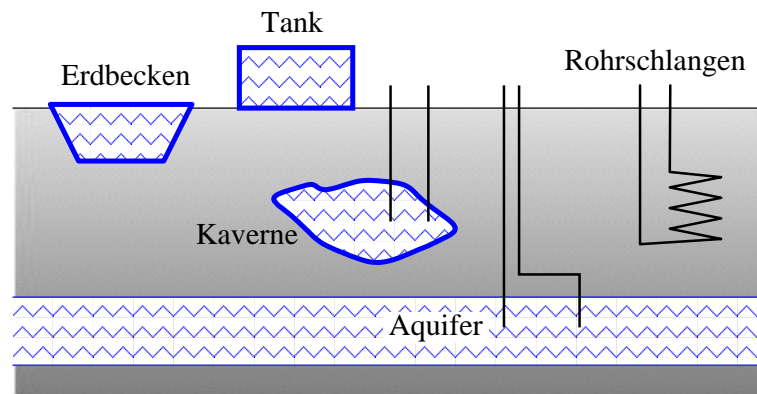


Abbildung 1.1.: Konzepte für die Langzeitwärmespeicherung

weise für ein größeres Nahwärmenetz. Bei sehr großen Speichern ist durch das Verhältnis von Speichervolumen und Hüllfläche eine Isolierung nicht mehr notwendig.

Auch das Erdreich selber kann als Wärmespeicher genutzt werden. Dazu werden Rohrschlangen im Erdreich in einer Tiefe von wenigen Metern verlegt, durch die das Wärmeträgermedium fließt. Um die Kontaktfläche mit dem Erdreich und auch das nutzbare Speichervolumen zu erhöhen, sind hier ausgedehnte Systeme von Rohrbündeln oder -schlangen notwendig. Außerdem können Doppelrohre eingesetzt werden, wie sie im folgenden Abschnitt als geschlossene geothermische Tiefensonde vorgestellt werden. Der Speicherwirkungsgrad wird bestimmt durch die Wärmeverluste des nicht isolierten Erdreiches. Die verschiedenen Speicherkonzepte sind in Abb. 1.1 schematisch dargestellt.

Weitere Informationen zu thermischen Solaranlagen und Speicherkonzepten sind u. a. in DALENBÄCK 1993, FISCH 1992, KHARTCHENKO 1996 zu finden.

1.1.2. Geothermische Heizsysteme

Die Erdreichtemperatur steigt mit zunehmender Tiefe. Dieser Anstieg ist stark von den geologischen Verhältnissen abhängig und kann in einigen Gebieten bis zu 100 K/km erreichen. Typische Werte für die Region um Berlin liegen bei 20 ... 30 K/km.

Geothermiesysteme bestehen aus einer oder mehreren mit Rohren versehenen Bohrungen, in denen die Wärmeenergie des Erdreiches durch ein Transportmedium an die Oberfläche gefördert wird. Abhängig von den erreichbaren Temperaturen kann die so gewonnene Energie zur Stromerzeugung und zu Heizzwecken genutzt werden, eine gekoppelte Nutzung ist auch möglich. Oft sind die Temperaturen nicht hoch genug für eine direkte Nutzung, als Quelle für eine Wärmepumpe ist die so gewonnene Energie aber meist trotzdem brauchbar.

Die Vorteile der geothermischen Energie gegenüber anderen regenerativen Energiearten sind vielfältig. Die Erdwärme ist nicht saisonabhängig und kann damit unter hoher zeit-

licher Auslastung der Anlage gewonnen werden, anders als bei Wind- und Solarenergie. Die Installation von Alternativsystemen aus Gründen der Versorgungssicherheit und die langfristige Energiespeicherung entfallen. Geothermiesysteme haben u. a. dadurch einen sehr geringen Platzbedarf, die Übertage-Installationen sind meist sehr klein.

Die Voraussetzungen für eine wirtschaftliche Nutzung geothermischer Energie sind regional sehr unterschiedlich. Es spielt hier natürlich die geologische Situation eine große Rolle, aber auch Faktoren wie die Siedlungsstruktur mit bereits vorhandenen oder neu zu errichtenden Heiznetzen. In der Schweiz wird jeder dritte bis vierte Neubau bereits über eine Geothermieanlage versorgt, es existieren ca. 20.000 solcher Anlagen mit einer Gesamtblöhlänge von 4000 km. Für Deutschland wird ein Bestand (1996) von ca. 50.000 Anlagen mit erdgekoppelten Wärmepumpen geschätzt, die eine Gesamtleistung von ca. 350 MW haben.

Tiefengeothermie

Die Tiefengeothermie wird heute fast ausschließlich mit offenen Systemen betrieben. Dabei wird das Erdreich nicht nur in den Energietransport sondern auch in den Stofftransport einbezogen. Hier sind meistens zwei Bohrungen notwendig (Doublette). Aus der Produktionsbohrung wird heißes Wasser gewonnen. Je nach Ergiebigkeit des genutzten Aquifers muß dieses nach der Nutzung über eine Verpressungsbohrung wieder der Erde zugeführt werden. Diese Verpressung ist oft auch aus Gründen des Umweltschutzes notwendig.

Das Schema einer solchen Anlage ist in Abbildung 1.2 dargestellt. Grundlage der Funktion eines offenen Systems ist die ausreichende Permeabilität (Durchlässigkeit) des Gesteins. Diese kann auch durch künstliche Reißbildung mittels hohem Druck (Stimulation) gesteigert werden.

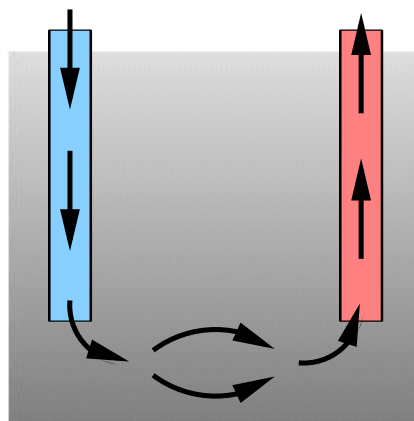


Abbildung 1.2.: Funktionsschema eines offenen geothermischen Systems

Da bei solchen Systemen ein sehr großes Gesteinsvolumen mit einer großen Oberfläche als Wärmetauscher durchströmt wird, können hier höhere Leistungen erreicht werden als bei den unten beschriebenen geschlossenen Systemen. Diesem Vorteil stehen allerdings verschiedene Nachteile gegenüber. Durch den direkten Kontakt des Mediums mit dem Gestein finden auch chemische Reaktionen statt, die in komplexen Wechselwirkungen mit thermischen und konvektiven Transportvorgängen im Erdreich stehen. Wichtige Parameter sind hier Porösität und Permeabilität des Gesteins, die aber durch verschiedene Effekte beeinflußt werden. Das Grundwasser (Sole) ist äußerst korrosiv, die Anlage muß aus hochwertigen Materialien gefertigt werden. Die Lösungs- und Reaktionsprozesse können zu Ablagerungen und Schlamm Bildung im System führen, was einen hohen apparativen Aufwand zur Filterung und Aufbereitung des Wassers übertage notwendig macht.

Das Vorhandensein und die Qualität des zu nutzenden Aquifers sind ausschlaggebend für den Erfolg eines offenen Geothermiesystems. Selbst mit aufwendigen Mitteln sind ohne Probebohrung keine genauen Vorhersagen darüber möglich. Das Risiko, die vorhergesagten Schichten überhaupt nicht oder in ungenügender Qualität (z.B. zementierter Porenraum) vorzufinden, bleibt bei einer solchen Anlage immer bestehen.

Bei der Tiefengeothermie sind Fluidtemperaturen erreichbar, die nicht nur zur Wärmeversorgung sondern auch zur Stromproduktion ausreichend sind.

Oberflächennahe Geothermie

Oberflächennahe Geothermie wird vorwiegend zur Gewinnung von Heizwärme genutzt. Wärmepumpen dienen hier zur Anhebung der Temperaturen auf das erforderliche Niveau.

In diesem Bereich kommen ausschließlich geschlossene Systeme zum Einsatz, die aus meist mehreren Rohrbündeln oder -schlangen mit einer Tiefe von wenigen Metern bestehen. Sie haben den Vorteil, daß nur thermischer Kontakt zwischen dem Trägermedium und dem Erdreich besteht. Chemische Reaktionen, Lösungsvorgänge und Verunreinigung des Mediums werden dadurch ausgeschlossen. Es sind für die Funktion eines solchen Systems nur die thermischen Eigenschaften des Gesteins ausschlaggebend. Die Temperaturschwankungen im Erdreich haben hier natürlich auch einen gewissen Einfluß auf dessen Eigenschaften. So können chemische Gleichgewichte verschoben oder bei porösem Gestein die Sättigung und mögliche konvektive Vorgänge beeinflußt werden. Der Einfluß ist aber geringer als bei den offenen Systemen.

Ein Nachteil geschlossener Systeme ist, daß die gesamte geförderte Energiemenge über die relativ geringe Außenfläche des Rohres übertragen werden muß. Eine Oberflächenvergrößerung durch entsprechende Rohrgeometrien oder eine höhere Anzahl von Rohren gleicht dies aus. Durch diese Maßnahmen wird gleichzeitig das erreichbare Erdreichvolumen vergrößert.

Die geschlossene Tiefensonde

Diese Tiefensonde¹ zählt zu den oben beschriebenen —sonst meist oberflächennah genutzten— geschlossenen Systemen, ist aber für den Einsatz in Tiefen von mehreren tausend Metern vorgesehen. Sie besteht aus einem Außen- und einem Innenrohr, die am unteren Ende miteinander verbunden sind. Im gut wärmeleitenden Außenrohr fließt ein Medium, in diesem Fall Wasser, nach unten und erwärmt sich durch den thermischen Kontakt mit dem Erdreich. Der schematische Aufbau der Sonde ist in Abb. 1.3 dargestellt. Das warme Wasser wird dann im gut isolierten Innenrohr wieder an die Oberfläche

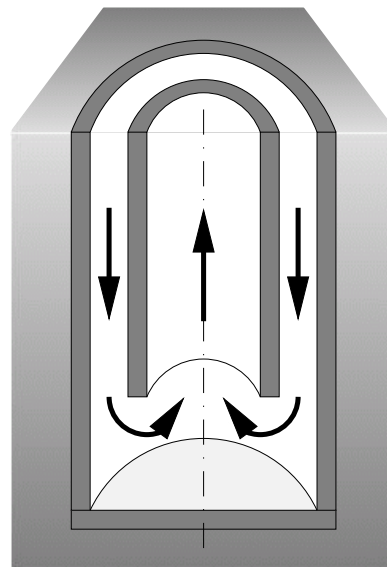


Abbildung 1.3.: Schnittzeichnung der Tiefensonde

gedrückt.

Bisher wird diese Technologie nur sehr begrenzt eingesetzt. In Prenzlau ist ein auf einer ca. 3000 m langen Tiefensonde basierendes Heizsystem seit 1994 erfolgreich in Betrieb. Die Leistung dieser Sonde beträgt ca. 300...400 kW.

In der Schweiz kommen geschlossene² Tiefensonden bei der Nutzung von bereits vorhandenen Bohrlöchern zum Einsatz. Diese Sonden mit Längen von ca. 900 m bis 2700 m erreichen Leistungen von 90..134 kW.

¹Diese Arbeit beschäftigt sich im folgenden ausschließlich mit der geschlossenen Tiefensonde. Sie wird auch als Erdsonde oder Erdwärmetauscher bezeichnet.

²Die bereits vorhandenen Verrohrungen der Löcher sind nicht völlig abgeschlossen. Ein Stoffaustausch mit dem umgebenden Erdreich findet dennoch kaum statt.

1.1.3. Kombinierte Heizsysteme

Die obengenannten Vor- und Nachteile legen es nahe, eventuelle Möglichkeiten der Koppelung beider Systeme genauer zu untersuchen und entstehende Synergieeffekte ebenso wie mögliche Inkompatibilitäten zu ermitteln. Dabei beschränkt sich diese Arbeit vollständig auf energetische Betrachtungen, wirtschaftliche Untersuchungen finden darauf aufbauend im Rahmen der Machbarkeitsstudie statt.

Da es hierzu bisher weder Pilotprojekte noch detaillierte theoretische Untersuchungen gibt, sind die folgenden Aussagen eher als Thesen zu verstehen, die in dieser Arbeit durch Modellierung und Simulation eines solchen Systems untermauert (oder widerlegt) werden sollen.

Bei der Bereitstellung der Heizenergie in den Wintermonaten wird das Erdreich ausgebeutet, die Temperatur sinkt ab und kann sich unter ständigem Heizbetrieb nicht regenerieren. Bezieht man nun die im Sommer notwendige Energie aus den Solarkollektoren, kann die Energie aus den umhüllenden Erdschichten nachfließen, das Erdreich regeneriert sich. Die bei herkömmlichen geothermischen Systemen auftretende langfristige Abkühlung des Erdreiches wird so vermindert oder sogar kompensiert. Da die Erdtemperaturen nahe der Sonde nach einer Regenerationspause höher sind als bei ständigem Betrieb, kann auch mit einer höheren Sondenleistung gerechnet werden.

Unterstützt werden kann dieser Effekt durch eine Einspeicherung von überschüssiger Energie der Kollektoren in das Erdreich. Dabei wird die Regeneration des Erdreiches gefördert oder zumindest die Energieentnahme aus dem Erdreich vermindert. Das zu erwartende Temperaturprofil in der Erde würde dabei als perfekte natürliche Isolierung des Speichers dienen, da die Wärme nicht zu den höheren Temperaturen in größerer Entfernung von der Erdsonde abfließen könnte.

1.2. Stand der Dinge

Die beschriebene kombinierte Nutzung einer Erdsonde als geothermische Wärmequelle und als saisonaler Speicher ist bisher noch nirgendwo realisiert worden.

Es existieren Planungen für einen Standort in Biesdorf, wo eine solche Anlage errichtet werden sollte. Die Firma EKT³ hat mit Hilfe des TRNSYS-Systems erste Simulationsrechnungen durchführen lassen, deren Ergebnisse das Funktionieren eines solchen Systems grundsätzlich betätigen. Die für den Standort in Biesdorf zugrunde gelegten Rahmenbedingungen bilden die Grundlage der in Kapitel 5 beschriebenen Modellierung und Simulation des gesamten Heizsystems. An der Planung beteiligt ist die Firma KEMA IEV⁴, die auch die Prenzlauer Anlage konzipiert hat.

³EKT Energie- und Kommunal-Technologie GmbH, Berlin

⁴KEMA IEV – Ingenieurunternehmen für Energieversorgung GmbH, Dresden

Als weiteres Projekt war geplant, eine neu zu errichtende Siedlung in Potsdam mit einem solchen System für Heizung und Warmwasserbereitung zu versorgen, unterstützt durch Fernwärmenutzung zur Spitzenlastabdeckung. Zu diesem Standort liegt bereits ein geologisches Gutachten des GFZ Potsdam⁵ vor, welches die Basis für die in den Simulationen eingesetzten geologischen Parameter bildet.

Im Rahmen einer vom BMBF geförderten Machbarkeitsstudie soll für den Standort Biesdorf untersucht werden, welche Möglichkeiten die Tiefensonde in Kombination mit den Solarkollektoren bietet. Diese Studie wird auf den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit aufbauen, erweitert um die Simulation des gesamten Heizsystems und die Auswertung der Ergebnisse unter wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten.

1.3. Untersuchungsziele

Das Funktionieren des beschriebenen SONDENSYSTEMS zur Förderung von geothermischer Energie ist bereits mit der Prenzlauer Anlage erprobt und bestätigt worden. Detaillierte Untersuchungen und Optimierungen des Betriebes liegen jedoch noch nicht vor. Unter welchen Bedingungen und in welchem Maße damit eine Energiespeicherung im Erdreich möglich und in Kombination mit Solarkollektoren sinnvoll ist, wurde bisher nur abgeschätzt.

Mit Hilfe eines auf die besonderen Bedingungen angepassten Modells der Erdsonde sollte es möglich sein, durch Simulationsläufe weitere Kenntnisse über das Verhalten des Systems zu erhalten. Interessant sind hierbei z.B. das Langzeitverhalten unter Last, die Abhängigkeit der Leistung von verschiedenen Parametern wie Massenströmen, Rohrgeometrien und -materialien sowie die Unterstützung des Regenerationseffektes durch Energieeinspeicherung.

Die hier gewonnenen Erkenntnisse können dann genutzt werden, um die Eignung der vorgeschlagenen Konfiguration des Heizsystems zu untersuchen. Dazu wird es notwendig werden, die gesamte Anlage detailliert in der Simulation nachzubilden, um das dynamische Zusammenspiel der Komponenten betrachten und bewerten zu können.

Neben der Modellierung der Erdsonde (☞Kapitel 2) und der gesamten Heizungssystems (☞Kapitel 5) sowie der Modellvalidierung anhand von Vergleichsdaten (☞Kapitel 3) werden deshalb in dieser Arbeit folgende Untersuchungsschwerpunkte gesetzt(☞Kapitel 4):

- ① Abhängigkeit der Erdsondenleistung im Entnahmebetrieb von baulichen Parametern wie Rohrgeometrie und -materialien, von Betriebsparametern wie Massenstrom, Einspeisetemperatur und Taktzeiten sowie Untersuchungen der Regenerationsfähigkeit des Erdreiches

⁵ Geoforschungszentrum Potsdam

- ② Möglichkeiten der Einspeicherung von Energie, Speicherwirkungsgrad, Beeinflussung des Erdtemperaturprofils durch die Speicherung
- ③ Auswertung dieser Erkenntnisse in Bezug auf die Betriebsweise einer solchen Anlage

1.4. Das Hilfsmittel: SMILE

Es existieren verschiedene Werkzeuge zur Simulation sowohl energietechnischer Anlagen als auch der komplexen Vorgänge im Erdreich. Aus verschiedenen Gründen fiel die Wahl auf SMILE, welches hier an der Technischen Universität entwickelt und bereits in unterschiedlichen Bereichen erfolgreich eingesetzt wird.

SMILE ist ein computerbasiertes Werkzeug zur dynamischen Simulation nahezu beliebiger Prozesse und Anlagen. Das objektorientierte Konzept von SMILE ermöglicht neben einer hohen Wiederverwendbarkeit und Erweiterbarkeit bereits implementierter Modelle das Arbeiten auf verschiedenen Abstraktionsebenen und den leichten Austausch von Modellbestandteilen. Zwei grundlegende Konzepte der Objektorientierung, die Vererbung und die Aggregation, werden unterstützt. So können Modelle Schritt für Schritt erweitert und aus anderen Modellbestandteilen kombiniert werden. Dies erleichtert erheblich das Arbeiten mit sehr komplexen Modellen.

Das SMILE-System arbeitet gleichungsorientiert. Die modellbeschreibenden Gleichungen können als kontinuierliche Gleichungen (cont), als einfache Differentialgleichungen erster Ordnung bezüglich der Zeit (diff), als implizite Gleichungen (implicit) und als Sprunggleichungen (discrete) angegeben werden. Als Modellierungssprache dient eine erweiterte Untermenge von *Objective C*, eines objektorientierten *C*-Dialektes.

SMILE rechnet simultan, es werden die Gleichungen aller für die Simulation verknüpften Modelle zu einem Gleichungssystem zusammengefaßt und für einen Zeitschritt gelöst. Dies ist ein wesentlicher Unterschied zu vielen vergleichbaren Simulationssystemen. Er muß unbedingt beachtet werden, um die Struktur der in dieser Arbeit beschriebenen Modellgleichungen verstehen zu können. Zur Integration stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, aus denen das für den jeweiligen Anwendungsfall geeignetste ausgewählt werden kann. Die Schrittweitensteuerung erfolgt automatisch.

Das Simulationssystem ist modular aufgebaut, die Lösungsverfahren sind von der Modell- und der Experimentbeschreibungssprache getrennt und mit klaren Schnittstellen versehen. Dadurch werden umfangreiche Anpassungen bei Änderung einer Komponente vermieden und die Anbindung weiterer Module (Sublöser, Optimierer etc.) vereinfacht.

Da SMILE sich noch in einer Entwicklungsphase befindet, werden die Anwendungsgebiete stark durch die Entwicklung von geeigneten Komponentenbibliotheken bestimmt. Die an der TU-Berlin vorhandene Basis an energietechnischen Modellkomponenten aus dem Niedertemperaturbereich ermöglicht einen Aufbau des Anlagenmodells nach dem

Baukastenprinzip, ohne daß dabei eine Vielzahl an Komponenten neu erstellt oder stark angepaßt werden muß. Allerdings fehlen für die hier beschriebene Anlage noch einzelne Komponenten, deren Modellierung innerhalb dieser Arbeit notwendig ist. Dazu gehört als größtes und sicherlich kompliziertestes Element die Erdsonde. Außerdem ist die Erstellung von Komponenten zur Beschreibung der Wärmepumpe notwendig, von Rohrleitungen, verschiedener Regelungselemente und weiterer virtueller Komponenten⁶ wie der Verbrauchsmodellierung oder einer Bilanzierungskomponente.

⁶ Komponenten, die keine realen Anlagenbauteile beschreiben

2. Modellierung der Erdsonde

In diesem Kapitel wird Schritt für Schritt die Modellierung des in Abschnitt 1.1.2 vorgestellten Sondensystems, von den grundlegenden Ansätzen bis zur Programmierung beschrieben. Die hier erstellten Modelle werden dann im nächsten Kapitel genutzt, um Aussagen über das Verhalten der Tiefenonde unter verschiedenen Bedingungen zu treffen.

Da bisher noch nicht feststeht, wie gut einzelne Modellansätze zur Beschreibung der Erdsonde geeignet sind, sollte ein späterer Austausch oder eine Erweiterung von Modellkomponenten problemlos möglich sein. Eine klare Trennung von Erdreich- und Wärmetauschermodell erscheint deshalb sinnvoll.

2.1. Erdreichmodellierung

Es bestehen folgende allgemeine Anforderungen an das Erdreichmodell:

- gute Wiedergabe der Erdreicheigenschaften wie z.B. der Schichtung, konvektiver Vorgänge (Grundwasser), chemisch-physikalischer Vorgänge infolge von Temperaturänderungen u.ä.,
- möglichst geringe Rechenzeiten, da der Rest der Anlage mit den komplexen Modellen schon einen hohen Rechenaufwand in der Simulation erfordert,
- geringer Implementationsaufwand, da das Modell möglichst schnell erstellt, verifiziert und angewandt werden soll.

Diese lassen sich nur schwer in einem Kompromiß vereinen. Vorgänge wie Stofftransport durch poröse Medien in Wechselwirkung mit chemisch-physikalische Umwandlungen erfordern sehr komplexe Modelle mit genaueren Ausgangsdaten als sie hier vorliegen. Zudem sind diese Vorgänge selbst noch Gegenstand aktueller Forschungen, so daß ihre Berücksichtigung den Rahmen dieser Arbeit mit Sicherheit sprengen würde. Da die erwähnten Vorgänge offensichtlich bei offenen Erdsondensystemen eine weitaus größere Rolle spielen als beim hier betrachteten geschlossenen System mit rein energetischer Kopplung zwischen Wärmeträgermedium und Erdreich, scheint eine Beschränkung des

Modells auf reine Wärmeleitung als Näherung vertretbar zu sein. Diese Vereinfachung ist auch bei vielen anderen Erdreichmodellen zu finden, die jedoch teilweise für andere Anwendungsbedingungen erstellt wurden.

Die grundlegende Beziehung zur Bestimmung des Temperaturfeldes im Erdreich bei reiner Wärmeleitung ergibt sich aus der Verknüpfung des Fourierschen Wärmeleitungsansatzes mit einer Energiebilanz zu

$$\rho \cdot c_V \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad}T). \quad (2.1)$$

Hier bedeuten ρ die Dichte, c_V die spezifische Wärmekapazität¹ und λ die Wärmeleitfähigkeit des Mediums. Die Temperatur ist mit T und die Zeit mit t bezeichnet. Da diese Gleichung analytisch nur für Spezialfälle geschlossen zu lösen ist, muß sie mit numerischen Methoden gelöst werden. Dazu wird das Erdreich in einzelne Volumenelemente (Segmente) aufgeteilt und die Gleichung in eine Form für endliche Volumina überführt.

Dreidimensionale hochauflösende numerische Modelle erbringen sicherlich die genauesten Ergebnisse, benötigen aber sehr hohe Rechenzeiten. Zudem bietet das SMILE-System wenig Unterstützung für diese Art der Modellierung, eine aufwendige Diskretisierung in Handarbeit wäre hier notwendig.

Um ein möglichst einfaches, auf typische Erdreischeigenschaften abgestimmtes Modell zu erstellen, ist eine genauere Betrachtung des Erdaufbaus notwendig.

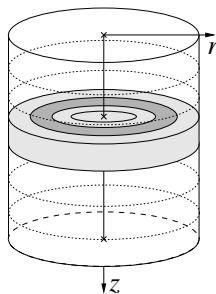


Abbildung 2.1.: Einfaches Zylindermodell

Die Erdreischeigenschaften zeichnen sich in vertikaler Richtung durch einen schichtartigen Verlauf mit teilweise sprunghaften Änderungen aus. Die Änderungen in den horizontalen Richtungen sind im allgemeinen unregelmäßiger, aber nicht sehr stark. Im übrigen sind sie oft — auch für das betrachtete Gebiet — nicht bekannt, da mit Probebohrungen nur die vertikale Schichtung an einem Punkt ermittelt oder der Verlauf zwischen mehreren Bohrungen abgeschätzt werden kann. Man darf daher annehmen, daß die Temperaturgradienten um die Erdsonde, die eine Wärmequelle bzw. -senke darstellt, in radialer Richtung relativ

stark sind, sich aber in den verschiedenen horizontalen Richtungen nur unwesentlich unterscheiden. Es sollte also möglich sein, die Abweichung der Vorgänge von der Axialsymmetrie zu vernachlässigen. Diese Überlegungen legen es nahe, ein rotationssymmetrisches Zylindermodell (siehe Abb. 2.1) mit einer axialen und einer radialen Unterteilung zu entwerfen. Die Reduktion auf zwei Dimensionen bringt erhebliche Einsparungen in der benötigten Rechenzeit. Um die Verständlichkeit und die Vergleichbarkeit mit typischen Modellen in den Zylinderkoordinaten r , ϕ , z und Laufvariablen i , j , k zu erhalten, werden diese Bezeichnung unter Verzicht auf die ϕ -Komponente beibehalten.

¹Da bei Feststoffen und Flüssigkeiten c_P und c_V (spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck bzw. konstantem Volumen) gleich sind, kann im folgenden auf eine Unterscheidung verzichtet werden.

Zur Diskretisierung von Modellen in einzelne Volumenelemente oder Flächenelemente gibt es zwei verbreitete Ansätze, die unterschiedliche Vor- und Nachteile aufweisen. Beim ersten werden die Temperaturen an den Kontaktstellen zwischen den Elementen bestimmt, die jeweils homogene Eigenschaften besitzen. Hier wird jedoch die zweite Methode gewählt, bei der die Temperaturen den einzelnen Elementen und nicht den Gitterpunkten zugeordnet werden. Die benötigten Gleichungen beschreiben dabei sehr anschaulich die Energiebilanz an den jeweiligen Elementen.

Abbildung 2.2 zeigt die gewählte Unterteilung des zylindrischen Raumes und einige typischen Größen. Als mittlerer Radius $r[i]$ der Segmente i wird hier der Radius bezeichnet, der ihr Volumen halbiert. Er läßt sich über

$$r[i] = \sqrt{\frac{r_i^2[i] + r_i^2[i+1]}{2}} \quad (2.2)$$

mit $r_i[i]$ als dem Innenradius des Segmentes bestimmen. Eine Ausnahme bilden — wenn vorhanden — die zentralen Segmente $i = 1$ mit $r[1] = 0$ (siehe dazu auch Abschnitt 2.1.6).

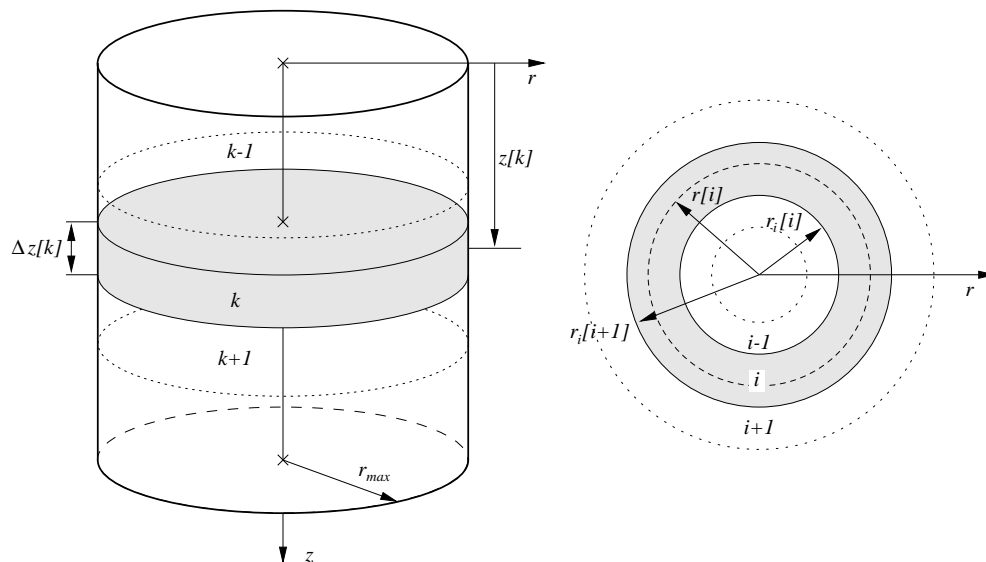


Abbildung 2.2.: Diskretisierung des Zylindermodelles

2.1.1. Wärmeleitung im Zylindermodell

Die Energiebilanz an einem Segment i, k mit dem Volumen $V[i, k]$, der Dichte $\rho[i, k]$ und der spezifischen Wärmekapazität $c[i, k]$ ergibt

$$\frac{\partial T[i, k]}{\partial t} = \frac{\sum \dot{Q}[i, k]}{V[i, k] \cdot \rho[i, k] \cdot c[i, k]}. \quad (2.3)$$

Dabei wird die Temperatur $T[i, k]$ hier den Koordinaten $z[k]$ und $r[i]$ zugeordnet. Unter der getroffenen Annahme, daß Wärmeleitung nur radial (Index r) und axial (Index a) stattfindet, treten folgende Wärmeströme auf:

$$\sum \dot{Q}[i, k] = \dot{Q}_{r-}[i, k] - \dot{Q}_{r+}[i, k] + \dot{Q}_{a-}[i, k] - \dot{Q}_{a+}[i, k]. \quad (2.4)$$

Der Index $-$ bezeichnet den Wärmestrom vom in Koordinatenrichtung vorherigen Segment, $+$ den zum nächsten. Da offensichtlich $\dot{Q}_{r+}[i, k] = \dot{Q}_{r-}[i + 1, k]$ und $\dot{Q}_{a+}[i, k] = \dot{Q}_{r-}[i, k + 1]$ ist, werden im folgenden nur noch die Wärmeströme zum jeweils nächsten Segment betrachtet und mit $\dot{Q}_r[i, k]$ bzw. $\dot{Q}_a[i, k]$ bezeichnet. Diese Wärmeströme lassen sich mit Hilfe eines Wärmeleitwertes L und der Temperaturdifferenzen zwischen den Segmenten berechnen,

$$\dot{Q}_r[i, k] = L_r[i, k] \cdot (T[i, k] - T[i + 1, k]), \quad (2.5)$$

$$\dot{Q}_a[i, k] = L_a[i, k] \cdot (T[i, k] - T[i, k + 1]). \quad (2.6)$$

Wärmeleitwerte L über eine Länge l konstanter Querschnitte A lassen sich im allgemeinen für örtlich konstante spezifische Wärmeleitfähigkeiten λ als $L = \lambda \cdot A/l$ berechnen. Da die Wärmeleitung aber über die Grenze von Segmenten mit eventuell unterschiedlichem λ stattfindet, muß der effektive Leitwert über den Gesamtwiderstand als Summe der Einzelwiderstände $1/L$ berechnet werden (siehe dazu auch Abb. 2.3). In axialer Richtung ergibt er sich zu

$$L_a[i, k] = \frac{1}{\frac{\frac{1}{2} \cdot \Delta z[k+1]}{\lambda[i, k+1] \cdot A_a[i]} + \frac{\frac{1}{2} \cdot \Delta z[k]}{\lambda[i, k] \cdot A_a[i]}} = \frac{2 \cdot \lambda[i, k+1] \cdot \lambda[i, k] \cdot A_a[i]}{\lambda[i, k] \cdot \Delta z[k+1] + \lambda[i, k+1] \cdot \Delta z[k]}. \quad (2.7)$$

Hierbei ist A_a die axial gerichtete Querschnittsfläche mit $A_a[i] = \pi \cdot (r_i[i+1]^2 - r_i[i]^2)$.

Zur Bestimmung eines radialen Wärmeleitwertes zwischen den Radien r_1 und r_2 muß über r integriert werden, da sich die wärmedurchströmte Fläche A_r mit dem Radius ändert (SEITZ),

$$L_r = \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta z \cdot \lambda}{\int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta z \cdot \lambda}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}. \quad (2.8)$$

Hierbei wurde wieder ein örtlich konstantes λ angenommen, so daß für die Leitfähigkeit zwischen zwei Segmenten folgende Beziehung angesetzt werden muß:

$$L_r[i, k] = \frac{1}{\frac{\ln\left(\frac{r_i[i+1]}{r_i[i]}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda[i, k] \cdot \Delta z[k]} + \frac{\ln\left(\frac{r_i[i+1]}{r_i[i+1]}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda[i+1, k] \cdot \Delta z[k]}} \quad (2.9)$$

$$= \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta z[k] \cdot \lambda[i, k] \cdot \lambda[i+1, k]}{\ln\left(\frac{r_i[i+1]}{r_i[i]}\right) \cdot \lambda[i+1, k] + \ln\left(\frac{r_i[i+1]}{r_i[i+1]}\right) \cdot \lambda[i, k]}. \quad (2.10)$$

2.1.2. Stoffwerte

Da die Stoffwerte ρ , c_P und λ als Felder (Arrays) behandelt werden, können hier sowohl verschiedene Schichtungen als auch Abhängigkeiten von den aktuellen Bedingungen im Segment berücksichtigt werden.

Die Genauigkeit der Berechnungen wird allerdings nicht nur durch die Genauigkeit der Modelle bestimmt, sondern auch durch die Genauigkeit der Ausgangsdaten. So liegen für das geplante Projekt in Potsdam nur Schätzungen für das Temperaturprofil und die Eigenschaften der einzelnen Erdreichschichten vor. Eine Streubreite kann nicht angegeben werden, es werden jedoch Fehler von mindestens 20% als wahrscheinlich angesehen². Es erscheint deshalb nicht sinnvoll, Abhängigkeiten zu berücksichtigen, deren Einfluß weit unter dieser Grenze liegt.

Temperaturabhängigkeit von λ

Da bei der zu untersuchenden Anwendung mit starken Temperaturschwankungen im Erdreich zu rechnen ist, sollte der Einfluß der Temperatur auf die sehr wichtige Größe Wärmeleitfähigkeit berücksichtigt werden. In der Literatur sind verschiedene empirische Beziehungen zu finden, die eine starke Temperaturabhängigkeit von λ für fast alle Gesteinsarten im hier interessanten Bereich zeigen. Nach AHRENS 1995 ermöglicht (2.11) eine einfache Bestimmung von $\lambda(T)$, wenn die Wärmeleitfähigkeiten bei 25°C bekannt sind:

$$\lambda(T) = \frac{\lambda(0)}{1.007 + T \cdot \left(0.0036 - \frac{0.0072}{\lambda(0)}\right)} \quad (2.11)$$

mit

$$\lambda(0) = \lambda(25) \cdot \left(1.007 + 25 \cdot \left(0.0037 - \frac{0.0074}{\lambda(25)}\right)\right).$$

Hier werden die Temperaturen in °C und die Wärmeleitfähigkeiten in W/(m · K) eingesetzt. Diese Gleichungen stellen nur eine Näherung für einen bestimmten Temperaturbereich dar. Setzt man beispielsweise $T=0^\circ\text{C}$ in obige Gleichung ein, ergibt sich eine mathematisch unsinnige Beziehung. Nach Aussagen von Mitarbeitern des Geoforschungszentrums Potsdam sind diese Gleichungen aber unter den hier auftretenden Bedingungen sinnvoll nutzbar.

Inhomogenität und Anisotropie der Gesteineigenschaften

Die Annahme homogener Elemente oder sogar ganzer Schichten mit richtungsunabhängigen (isotropen) Eigenschaften ist eine starke Vereinfachung. Im Erdboden gibt es eine

²nach Angaben von Mitarbeitern des Geoforschungszentrums Potsdam, die das entsprechende Gutachten erstellt haben

Vielzahl von Einschlüssen und Hohlräumen, die die Gesteinseigenschaften beeinflussen. Art und Form dieser Einschlüsse sind bestimmend für ihren Einfluß. So weisen z.B. Quarzkristalle eine starke Anisotropie auf, die sich auf die mittleren Eigenschaften des betrachteten Erdreichvolumens überträgt. Gerade die transportbestimmende Größe Wärmeleitfähigkeit wird durch solche Einschlüsse in verschiedenen Richtungen unterschiedliche Werte annehmen.

Poröses oder rissiges Gestein kann z.B. Wasser, Luft oder Öl enthalten, was sich auf verschiedene für die Wärmeleitung ausschlaggebende Eigenschaften auswirkt (siehe auch AHRENS 1995, VAN MEURS 1985). Während Dichte und spezifische Wärmekapazität sich einfach aus den Reinstoffwerten und den jeweiligen Anteilen im Erdreich mitteln lassen, ist die Bestimmung der resultierenden Wärmeleitfähigkeit komplizierter. Ist die Geometrie und Verteilung der Hohlräume nicht gleichmäßig, wird auch bei homogener Füllung eine Anisotropie entstehen. Der Wert für die effektive Wärmeleitfähigkeit liegt dann richtungsabhängig zwischen den Werten für Wärmeleitung parallel oder senkrecht zu einer Parallelschichtung der unterschiedlichen Stoffe (VAN MEURS 1985).

Diese Einflüsse sind erstens nur aufwendig zu modellieren, zweitens setzen sie zur Berechnung eine sehr genaue Kenntnis aller Eigenschaften des Untersuchungsgebietes voraus. Solche umfangreichen Datensätze stehen für diese Untersuchungen nicht zur Verfügung, so daß die beschriebenen Effekte in der Simulation vernachlässigt werden müssen.

2.1.3. Randbedingungen

Zur Formulierung der äußeren Randbedingungen (Zylindermantel und Grundflächen) bieten sich zwei Möglichkeiten. Es kann entweder eine bekannte Temperatur oder ein bekannter Wärmestrom angenommen werden. Für die obere Grundfläche (Erdoberfläche) ist ersteres sinnvoll, da hier die Lufttemperatur bekannt und als Größe im Simulationssystem bereits vorhanden ist. Bei den anderen Flächen sind weder Temperatur noch Wärmestrom bekannt. Die Möglichkeit, den Wärmestrom mit Null anzunehmen (adiabate Hülle), ist bei Kurzzeitsimulationen sicherlich vertretbar, da hier im noch nahezu ungestörten Temperaturfeld keine starken Gradienten auftreten. Für Langzeituntersuchungen, bei denen das Nachfließen der Wärme aus dem äußeren Bereich analysiert werden soll, ist dieser Weg nicht sinnvoll. Es bleibt die Möglichkeit, an den Rändern eine konstante Temperatur anzusetzen. Als Näherung bietet sich hier die Temperatur des ungestörten Erdreiches an.

Weitere Randbedingungen ergeben sich im Inneren des Modellraumes. Wird kein Radius ausgespart, ist die innere Randbedingung trivial, da es keine innere Grenzfläche gibt, muß auch $Q_r[0, k] = 0$ sein.

Soll hier jedoch wie vorgesehen ein Radius für das Wärmetauscherrohr ausgespart werden, muß auch hier für das System Erdreich eine Randbedingung formuliert werden. Die Randtemperatur des Erdreiches wäre dabei identisch mit der Außentemperatur des Rohres an dieser Stelle. Da aufgrund der gewählten Diskretisierungsart die Temperatu-

ren an den Elementgrenzen nicht explizit vorliegen, muß zusätzlich zu einer Temperatur noch ein Wärmeleitwert bekannt sein, um einen Wärmestrom bestimmen zu können. In

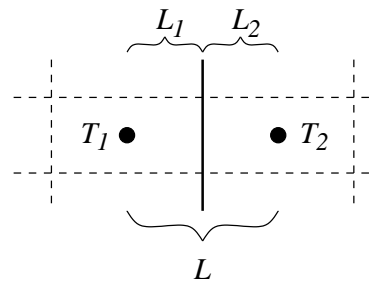


Abbildung 2.3.: Bestimmung des Wärmeleitwertes als Randbedingung

Abb. 2.3 ist dargestellt, wie der effektive Wärmeleitwert zwischen zwei Elementen sich aus den einzelnen Leitwerten vom Elementzentrum zum Rand zusammensetzt. Dabei gilt:

$$L = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}} \quad (2.12)$$

Das heißt, das bei der Kopplung von Erdreichmodellen untereinander und mit anderen Modellen sowohl die Temperaturen der Randelemente als auch die Randwärmeleitwerte verknüpft werden müssen. Diese werden bei Festkörpern über die Geometrie und die spezifische Wärmeleitfähigkeit λ und bei Fluiden über den Wärmeübergangskoeffizienten α bestimmt. Müssen wirklich die Temperaturen am Rand vorgegeben werden, kann dies durch einen sehr hohen Leitwert der (nicht vorhandenen) Nachbarelemente approximiert werden. Bei unterschiedlichen Materialien kann es zusätzlich notwendig sein, Kontaktwiderstände zu berücksichtigen.

2.1.4. Das Erdreichmodell als SMILE-Komponente

Die oben genannten Gleichungen (2.2) bis (2.10)³ wurden in verschiedenen Modellklassen implementiert. In der Klasse `EarthCylBase` werden einige grundlegende Berechnungen und Verknüpfungen durchgeführt. Die davon abgeleiteten Klassen `EarthCylRad` und `EarthCylAx` beschreiben die Wärmeströme in radialer bzw. axialer Richtung unter Berücksichtigung der entsprechenden Randbedingungen und berechnen das resultierende Temperaturfeld. In der Klasse `EarthCylRadAx` werden die Eigenschaften dieser beiden Klassen kombiniert. Alle Hüllflächen des Zylindermodells können mit unterschiedlichen Randbedingungen versehen werden.

Zur Bestimmung der Stoffwerte mit ihren unterschiedlichen Abhängigkeiten und für weitere eventuell benötigte Beziehungen, ist die von `EarthCylRadAx` abgeleitete Klasse

³ergänzt um einige triviale Beziehungen zur Bestimmung von Hilfsgrößen

`EarthCylRadAxExt` erstellt worden. Als Hilfsmittel zur automatischen Diskretisierung in radialer Richtung dient die Klasse `AutoRadDisc`. Hier wird der radiale Abstand der Elemente nach außen um einen vorzugebenden Faktor hin vergrößert, um die Feinheit der Diskretisierung den zu erwartenden Temperaturgradienten anzupassen.

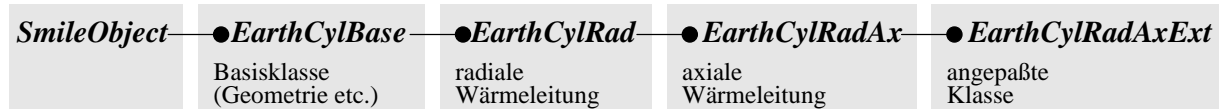


Abbildung 2.4.: Vererbungshierarchie der Erdreichklassen

Alle Klassen wurden möglichst allgemein formuliert, so daß die Modelle leicht ausgetauscht und kombiniert werden können⁴. Die Vererbungshierarchie der Klassen ist in Abb. 2.4 dargestellt.

2.1.5. Validierung des Modells

Die Überprüfung des in SMILE implementierten Erdreichmodells erfolgte auf verschiedenen Ebenen. Es wurden Testläufe mit unterschiedlichen Parametern und verschiedenen Randbedingungen durchgeführt (adiabat, Quellen und Senken an den Hüllflächen), die hier nicht im einzelnen beschrieben werden. Dabei wurde die Einhaltung der Energiebilanzen und die Plausibilität der Temperaturverläufe bestätigt.

Fehler durch ungenaue Modellierung und numerische Probleme können allerdings auf diese Art nicht immer erkannt werden. Hier muß anhand von Spezialfällen, für die eine exakte analytische Lösung existiert, ein Vergleich durchgeführt werden.

Radiale Wärmeleitung

Für die numerisch schwierig handhabbare radiale Wärmeleitung existiert ein im Rahmen einer Diplomarbeit (FLECKENSTEIN 1996) entwickeltes semianalytisch arbeitendes Computerprogramm (TFELD.EXE). Es setzt eine linienförmige Wärmequelle in einem unendlichen Raum voraus, die von mehreren homogenen Zylinderschalen umgeben ist. Für eine zeitlich konstante, impuls- oder rechteckförmige Heizfunktion wird der zeitabhängige Temperaturverlauf an drei verschiedenen Abständen berechnet und ausgegeben. Das SMILE-Erdreichmodell wird in der Vergleichsrechnung als oben und unten adiabater Zylinder benutzt, am Außenradius wird eine konstante Temperatur vorgegeben. Die Differentialgleichung der Temperatur (2.3) muß für die innersten Element um einen Quellterm \dot{Q}_{Quell} erweitert werden, da die bisherige Modellierung keine internen Quellen vorsieht. Die innerste Zylinderschale besitzt in Anlehnung an das TFELD-Programm eine sehr

⁴ Wegen der internen Struktur der aktuellen SMILE-Version ist es notwendig, bei feinerer Diskretisierung das Erdreich aus mehreren Komponenten zusammensetzen.

hohe Wärme- und Temperaturleitfähigkeit, um eine über das Quellvolumen nahezu konstante Temperatur zu gewährleisten. Der Quellenradius⁵ beträgt ca. 5 cm, als Quellstärke wurden 100 W/m (entspricht einer typischen Sondenleistung von ca. 300 kW) eingesetzt, die Stoffwerte entsprechen denen von Zechstein aus (KEMA 1998). Der Vergleich der

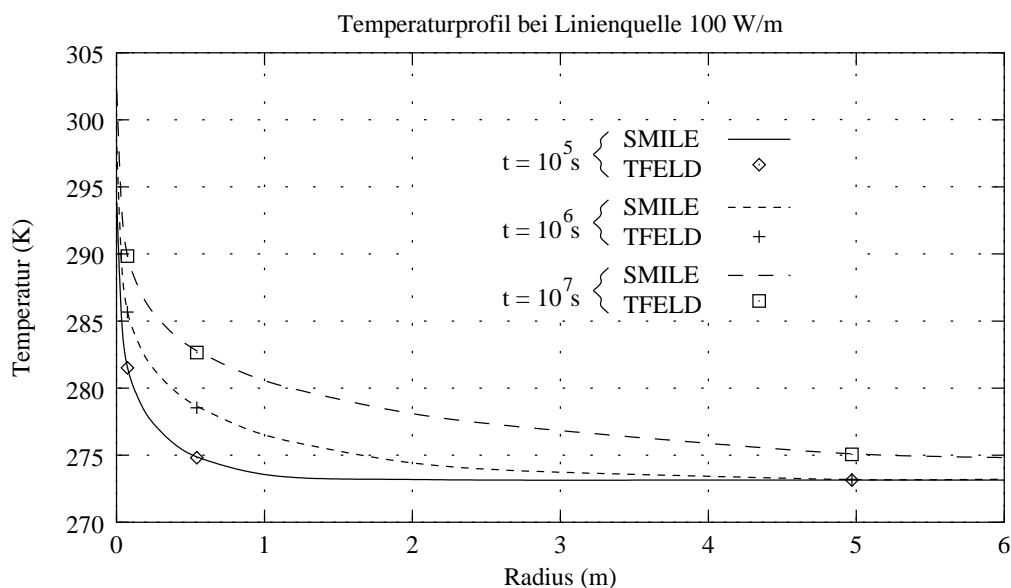


Abbildung 2.5.: Vergleich der Ergebnisse von TFELD und SMILE

Temperaturen beider Berechnungen an den entsprechenden Radien zu verschiedenen Zeitpunkten zeigt eine sehr gute Übereinstimmung (Abb. 2.5). Bei diesen Testrechnungen hat sich allerdings auch bestätigt, daß bei der Wahl der Diskretisierungsparameter auf die Stoffwerte Rücksicht genommen werden muß, um größere Rechenfehler zu vermeiden (siehe dazu auch Abschnitt 2.1.6).

Axiale Wärmeleitung

Die rein axiale Wärmeleitung im Zylinder ist vergleichbar der Wärmeleitung durch eine unendlich ausgedehnte (oder seitlich adiabat begrenzte) Wand aus mehreren homogenen Schichten i . Hier soll vereinfachend nur der stationäre Fall betrachtet werden. Sind die Temperaturen auf beiden Seiten, die Schichtdicken und die dazugehörigen Wärmeleitfähigkeiten bekannt, kann das gesamte Temperaturfeld angegeben werden. Die Wärmestromdichte \dot{q} ist bestimmt durch

$$\dot{q} = \Delta T \cdot \left(\sum_i \frac{d_i}{\lambda_i} \right)^{-1}. \quad (2.13)$$

⁵ Aufgrund interner Beschränkungen des TFELD-Programms können nur begrenzte Bereiche für bestimmte geometrische und stoffliche Parameter eingesetzt werden.

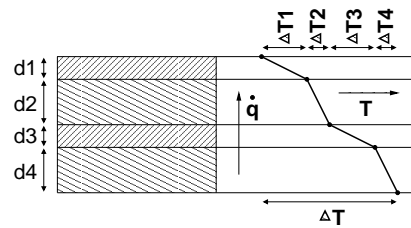


Abbildung 2.6.: Axiale Wärmeleitung im stationären Fall

Da der Wärmestrom im stationären Fall an jeder Stelle gleich ist, können die Kontakttemperaturen an den Schichtgrenzen über

$$\Delta T_i = \frac{\dot{q} \cdot d_i}{\lambda_i} \quad (2.14)$$

bestimmt werden. Der Temperaturgradient innerhalb jeder homogenen Schicht ist konstant.

Die obigen Gleichungen wurden genutzt, um für die im Anhang dokumentierte Schichtenfolge (Gutachten für den Standort Potsdam) den Temperaturgradienten des ungestörten Erdreiches (stationärer Fall) zu bestimmen. Dieser Gradient wird mit Ergebnissen einer Simulation des Erdreichmodells verglichen. Hier werden der Außenradius als adiabatisch und an der oberen und unteren Grenze die Temperaturen aus dem Gutachten als Randbedingungen angenommen. Nach genügend langer Zeit ist der stationäre Zustand erreicht, die Temperaturen ändern sich nicht mehr. Die Ergebnisse sind in Abb. 2.7 dargestellt. Die aus (2.13) und (2.14) bestimmten Temperaturen stimmen exakt mit den Simulationsergebnissen überein.

Im Gutachten ist neben den Stoffwerten der einzelnen Schichten auch ein geschätzter Temperaturgradient angegeben. Dieser ist zum Vergleich im selben Bild dargestellt. Unter der Voraussetzung, daß das Erdreich wirklich im stationären Zustand ist, passen diese Angaben nicht zusammen, die errechnete Temperatur liegt bis zu 10 K höher als in der Abschätzung! Werden nun die angenommenen Stoffwerte und der geschätzte Temperaturgradient⁶ gleichzeitig in einer Simulation der Erdsonde genutzt, treten Wärmeströme und Temperaturänderungen auf, die nicht durch den Sondenbetrieb bedingt sind und theoretisch das Ergebnis verfälschen könnten. Da diese Ausgleichsvorgänge allerdings im Gegensatz zu den von der Sonde verursachten Veränderungen ausgesprochen langsam verlaufen, können sie vernachlässigt werden. Die größten Abweichungen liegen zudem im oberen Bereich der Sonde, der auf den Sondenbetrieb nur einen geringen Einfluß hat.

2.1.6. Einsatzbereiche und Beschränkungen des Modells

Die wichtigsten Einschränkungen sind im Folgenden noch einmal zusammengefaßt:

⁶ Als Startwerte der Erdreichtemperaturen und Randbedingung am Außenradius des Zylinders.

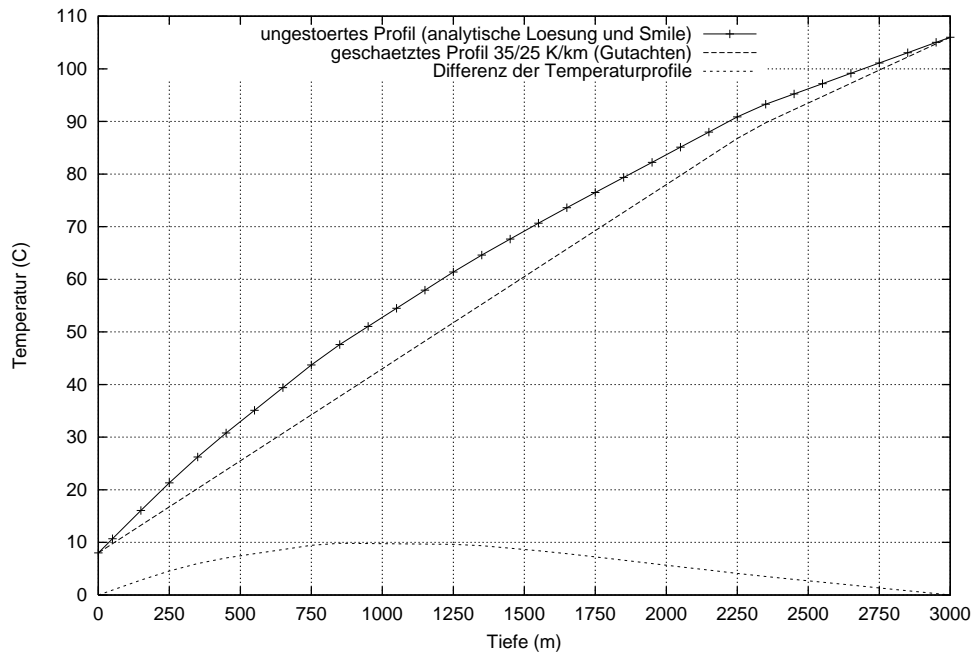


Abbildung 2.7.: Vergleich der Temperaturgradienten im stationären Fall

- ① reine Wärmeleitung, keine Konvektion,
- ② Axialsymmetrie,
- ③ nur Zylinderform (Hohlzylinder) darstellbar,
- ④ Erdreich über homogene Bereiche mit isotropen Eigenschaften darstellbar,
- ⑤ radiale Diskretisierung axial konstant, axiale Diskretisierung radial konstant.

Eine weitere bisher nicht erwähnte Besonderheit ergibt sich bei einem Vollzylinder ohne Aussparung. Nimmt man die Temperatur der innersten Elemente dem Radius $r[1] = 0$ zugeordnet an, werden der radiale Wärmeleitwert und damit der radiale Wärmestrom zu den radialen Nachbarelementen Null, die Temperatur wird nur durch axiale Wärmeleitung bestimmt. Dies ist ein offensichtlicher Schwachpunkt der gewählten Modellierungsart. Der beschriebene Effekt kann minimiert werden, indem ein Radius $r[1] \neq 0$ und eine sehr feine Diskretisierung nahe des Zentrums gewählt wird. Trotzdem muß immer mit einem Fehler für $r \rightarrow 0$ gerechnet werden.

Für den in dieser Arbeit beschriebenen Einsatz des Modelles, bei dem die inneren Elemente des Zylindermodells durch das im nächsten Abschnitt beschriebene Rohrmodell ersetzt werden, ist der oben beschriebene Effekt nicht weiter interessant, so daß auf eine genauere Untersuchung und Modellanpassung verzichtet wird.

Ein weiteres Problem kann grundsätzlich immer auftauchen, wenn ein eigentlich kontinuierliches System durch ein diskretisiertes dargestellt werden soll. In unserem Fall wird (2.1) ersetzt durch ein System von Differentialgleichungen (2.3), die die einzelnen Elemente beschreiben. Neben den in den Wärmeströmen enthaltenen Temperaturen der Nachbarelemente sind die Wärmeleitwerte L und die Wärmekapazität eines Elementes $V \cdot \rho \cdot c$ bestimmend für die Zeitkonstante des Systems und damit für den zeitlichen Temperaturverlauf in einem Element. Unterscheiden sich die Wärmekapazitäten benachbarter Elemente erheblich (durch verschiedene Stoffwerte und/oder Volumina), führt dies zu einem für kurze Zeiten eher sprunghaften als stetigen Temperaturverhalten der Elemente. Dies soll noch einmal an einem Extrembeispiel deutlich gemacht werden:

Ein adiabates System aus zwei Elementen der Wärmekapazitäten C_1 und C_2 , mit einem Wärmeleitwert $L_{1,2}$ zwischen den Elementen und einer inneren Quelle im ersten Element \dot{Q}_{Quell} wird über das Gleichungssystem

$$\dot{Q}_{1,2} = L_{1,2} \cdot (T_1 - T_2) \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\dot{Q}_{Quell} - \dot{Q}_{1,2}}{C_1} \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\dot{Q}_{1,2}}{C_2} \quad (2.17)$$

beschrieben. Der Temperaturverlauf eines solchen Systems ist in Abb. 2.8 dargestellt. Hier wurde den Elementen eine um den Faktor 10^3 unterschiedliche Wärmekapazität

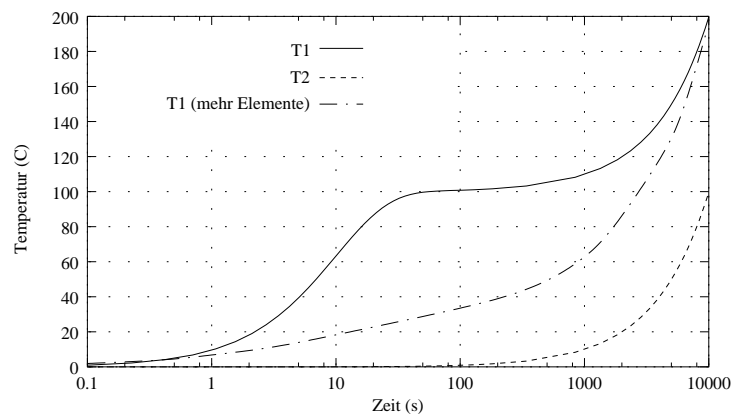


Abbildung 2.8.: Darstellung des Diskretisierungsfehlers

zugeordnet. Die Temperatur des ersten Elementes zeigt bis ca. 100 s einen Verlauf, der für eine konstante Randtemperatur typisch ist. Danach nähert der Wärmestrom zum zweiten Element sich dem Wert von \dot{Q}_{Quell} an, die Temperaturdifferenz zwischen den Elementen bleibt nahezu konstant. Verfeinert man die Diskretisierung des Modells, so nähert sich der Verlauf der analytischen Lösung an.

Grundsätzlich ist die Abweichung durch den hier beschriebenen “Einschwingeffekt” größer, wenn:

- ① die Diskretisierung zu grob ist,
- ② die Wärmekapazitäten benachbarter Elemente sich stark unterscheiden und
- ③ die Wärmeleitfähigkeiten relativ gering sind.

2.2. Modellierung des Wärmetauscherrohres

2.2.1. Allgemeines Modell

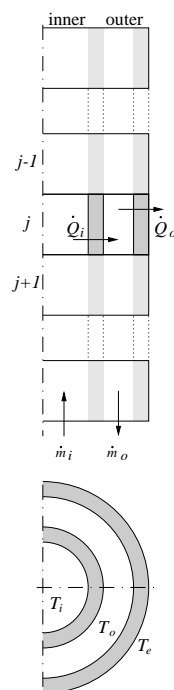


Abbildung 2.9.: Modell des Doppelrohres

Der Wärmetauscher ist ein konzentrisches, zylindrisches Rohr-In-Rohr-System, welches an der Außenfläche mit dem Erdreich in Kontakt steht (siehe auch Abschnitt 1.1.2). Am unteren Ende sind Außen- und Innenrohr verbunden. Es sind im aktuellen Betriebskonzept unterschiedliche Fließrichtungen für Ent- bzw. Beladung vorgesehen, was eine besondere Struktur bei der Programmierung des Rohrmodells notwendig macht.

Für den Fall, daß keine erzwungene Konvektion stattfindet, ist aufgrund der Temperaturunterschiede im Rohr eine natürliche Konvektion des Mediums zu erwarten. Deren

Modellierung wäre sehr aufwendig und würde das Rohrmodell stark verkomplizieren. Um diesen Effekt trotzdem ansatzweise berücksichtigen zu können, wird die axiale Wärmeleitung im Medium in das Modell aufgenommen. So kann bei Bedarf über einen erhöhten Wärmeleitfähigkeitswert des Mediums der Wärmetransport durch Zirkulation approximiert werden.

Die Speicherwirkung der Rohrwände wird vernachlässigt. Dies ist für die hier betrachtete Anwendung beim dünnen Innenrohr sicherlich zulässig. Sollte es beim Außenrohr notwendig werden, dessen Speichereffekt zu berücksichtigen, kann es als innerstes Element des Erdreichmodells mit den entsprechenden Parametern in die Berechnung aufgenommen werden.

In Abb. 2.9 sind die wesentlichen Größen für die Modellierung des Rohres dargestellt. Es erfolgt eine axiale Diskretisierung in j_{max} Segmente. Index i steht für das innere Rohr oder Medium (inner), Index o für das äußere (outer) und Index e für die Umgebung (environment). Massen- und Wärmeströme sind in Pfeilrichtung positiv. Für das Element j ergeben sich die folgenden Wärmeströme:

$$\dot{Q}_i[j] = kA_i[j] \cdot (T_i[j] - T_o[j]) \quad (2.18)$$

$$\dot{Q}_o[j] = kA_o[j] \cdot (T_o[j] - T_e[j]) \quad (2.19)$$

Das Produkt aus Wärmedurchgangskoeffizient und wärmedurchströmter Fläche kA wird in diesem Fall bestimmt aus den Wärmeübergangskoeffizienten α , den radialen Wärmeleitwerten der Rohrwände, die analog zu (2.8) berechnet werden. Zusätzlich muß bei Einbettung des Rohres in einen Festkörper ein der Temperatur T_e zugeordneter Leitwert L_e (siehe auch die Erläuterungen zu Abb. 2.3) oder bei einem umströmten Außenrohr ein äußerer Wärmeübergangskoeffizient bekannt sein. Die kA -Werte lassen sich dann grundsätzlich bestimmen durch:

$$kA = \frac{1}{\sum \frac{1}{\alpha \cdot A} + \sum \frac{1}{L}} \quad (2.20)$$

Der Energiegewinn des Fluids durch axiale Wärmeleitung \dot{Q}_f läßt sich durch

$$\dot{Q}_{f,i}[j] = \frac{\lambda_f[j] \cdot A_i[j]}{l[j]} (T_i[j-1] + T_i[j+1] - 2 \cdot T_i[j]) \quad (2.21)$$

und

$$\dot{Q}_{f,o}[j] = \frac{\lambda_f[j] \cdot A_o[j]}{l[j]} (T_o[j-1] + T_o[j+1] - 2 \cdot T_o[j]) \quad (2.22)$$

approximieren. Dabei steht A für die Strömungsquerschnittsfläche des entsprechenden Rohrteils, l für dessen Länge und λ_f für die Wärmeleitfähigkeit des Fluids⁷.

⁷Es wird hier vorausgesetzt, daß sich Rohrgeometrie und Länge benachbarter Segmente nicht wesentlich unterscheiden.

Aus den Energiebilanzen für die Volumenelemente erhält man folgende Beziehungen für die Temperaturen:

$$\frac{\partial T_i[j]}{\partial t} = \frac{|\dot{m}_i| \cdot c_{P,i}[j] \cdot (T_{i,in}[j] - T_i[j]) - \dot{Q}_i[j] + Q_{f,i}[j]}{V_i[j] \cdot \rho_i[j] \cdot c_{P,i}[j]} \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial T_o[j]}{\partial t} = \frac{|\dot{m}_o| \cdot c_{P,o}[j] \cdot (T_{o,in}[j] - T_o[j]) + \dot{Q}_i[j] - \dot{Q}_o[j] + Q_{f,o}[j]}{V_o[j] \cdot \rho_o[j] \cdot c_{P,o}[j]} \quad (2.24)$$

Hier bedeutet $T_{i,in}[j]$ die Temperatur des mit dem Massenstrom \dot{m}_i in das Volumenelement eintretenden Fluids, je nach Vorzeichen von \dot{m}_i also $T_i[j + 1]$ oder $T_i[j - 1]$. Für $T_{o,in}[j]$ gilt Entsprechendes.

2.2.2. Der Wärmeübergang an den Rohrwänden

Die folgenden Aussagen sind im Gegensatz zu oben viel stärker auf die aktuellen Einsatzbereich des Rohrmodelles bezogen. Sie müssen bei anderer Nutzung des Modelles unbedingt überprüft und eventuell erweitert oder angepaßt werden.

Die in kA enthaltenen Wärmeübergangskoeffizienten α sind stark von der Rohrgeometrie, dem Strömungszustand und den Strömungsgeschwindigkeiten abhängig. Oft können diese Abhängigkeiten aber vernachlässigt werden, wenn nämlich der Wärmeleitungswiderstand in den Rohrwänden erheblich höher als der Wärmeübergangswiderstand und damit bestimmend für den Wärmedurchgang ist. Dies trifft hier beim gut isolierten Innenrohr zu.

Der Wärmeübergang am Außenrohr ist nur sehr aufwendig zu modellieren, es gibt verschiedene Ansätze mit Hilfe dimensionsloser Kenngrößen. In unserem Fall können die Gleichungen nach WÄRMEATLAS 1994 für einen Ringspalt mit Wärmeübertragung am Außenrohr eingesetzt werden. Bei Verwendung des beschriebenen Modelles für die Tiefsonde ist mit sehr großen Rohrlängen in Verhältnis zum Rohrdurchmesser zu rechnen. Die Strömung wird hier schon nach sehr kurzer Lauflänge hydrodynamisch voll ausgebildet sein, so daß das Einlaufverhalten vernachlässigt werden kann. Für die thermische Ausbildung der Strömung gilt aufgrund des geringen Temperaturgradienten im realen Erdreich ähnliches, auch wenn durch die Diskretisierung im Modell Temperatursprünge an den Elementgrenzen auftreten.

Den Wärmeübergang selbst beschreibt die Nusseltzahl Nu . Sie ist abhängig von der Reynoldszahl Re , die den Strömungszustand angibt, und der Prandtlzahl Pr , die die Stoffeigenschaften des Fluids enthält. Diese Größen werden folgendermaßen definiert:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_h}{\lambda}, \quad (2.25)$$

$$Re = \frac{v \cdot d_h}{\nu}, \quad (2.26)$$

$$Pr = \frac{\eta \cdot c_P}{\lambda} = \frac{\nu}{a}. \quad (2.27)$$

Hier bedeuten η und ν die dynamische bzw. kinematische Viskosität des Fluids, a ist seine Temperaturleitfähigkeit mit $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_P}$. Der hydraulische Durchmesser d_h am Ringspalt ist die Differenz von Außen- und Innendurchmesser des Strömungsquerschnittes $d_h = d_a - d_i$.

In Abhängigkeit von der Reynoldszahl müssen verschiedene Strömungszustände getrennt behandelt werden.

Laminare Strömung bis $Re = 2300$

Die mittlere Nusseltzahl über eine Länge l für laminare Strömung im Ringspalt $Nu_{m,l}$ unter den beschriebenen Bedingungen läßt sich durch folgende Beziehungen bestimmen:

$$Nu_{m,l} = (Nu_{1,l}^3 + Nu_{2,l}^3)^{\frac{1}{3}}, \quad (2.28)$$

$$Nu_{1,l} = 3.66 + 1.2 \cdot \left(\frac{d_i}{d_a}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.29)$$

$$Nu_{2,l} = f_g \cdot \left(Re \cdot Pr \frac{d_h}{l}\right)^{\frac{1}{3}}, \quad (2.30)$$

$$f_g = 1.615 \cdot \left(1 + 0.14 \cdot \left(\frac{d_i}{d_a}\right)^{\frac{1}{3}}\right). \quad (2.31)$$

Turbulente Strömung ab $Re = 10^4$

Bei turbulenter Strömung am Ringspalt wird die mittlere Nusseltzahl $Nu_{m,t}$ auf die eines einfachen Rohres $Nu_{m,t,Rohr}$ bezogen:

$$Nu_{m,t} = Nu_{m,t,Rohr} \cdot \left(1 - 0.14 \cdot \left(\frac{d_i}{d_a}\right)^{0.6}\right). \quad (2.32)$$

Für das einfache Rohr gilt:

$$\text{Nu}_{m,t,\text{Rohr}} = \frac{\frac{\xi}{8} \cdot \text{Re} \cdot \text{Pr}}{1 + 12.7 \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8}} \cdot (\text{Pr}^{\frac{2}{3}} - 1)} \left[1 + \left(\frac{d_i}{l} \right)^{\frac{2}{5}} \right], \quad (2.33)$$

$$\xi = (1.8 \cdot \log_{10}(\text{Re}) - 1.5)^{-2}. \quad (2.34)$$

Der Übergangsbereich bei $\text{Re} = 2300 \dots 10^4$

Im Bereich zwischen den genannten Reynoldszahlen tritt weder eindeutig turbulente noch laminare Strömung auf. Hier kann folgende Beziehung eingesetzt werden:

$$\text{Nu}_{m,t} = (1 - \gamma) \cdot \text{Nu}_{m,t,2300} + \gamma \cdot \text{Nu}_{m,t,10^4}, \quad (2.35)$$

$$\gamma = \frac{\text{Re} - 2300}{10^4 - 2300}. \quad (2.36)$$

Dabei ist $\text{Nu}_{m,t,2300}$ der nach (2.28) mit $\text{Re} = 2300$ berechnete Wert, $\text{Nu}_{m,t,10^4}$ der nach (2.32) berechnete mit $\text{Re} = 10^4$.

2.2.3. Stoffwerte

Temperaturabhängigkeit

Die Stoffwerte c_p , ρ , λ , ν und damit auch Pr sind zum Teil sehr stark von der Temperatur abhängig. Genaue Berechnungsansätze für diese Größen sind teilweise sehr kompliziert. Es ist aber möglich, sie in begrenzten Temperaturbereichen über einfache Beziehungen auszudrücken. Dabei kommen hier Gleichungen der Form

$$y = A + B \cdot T + C \cdot T^2 + D \cdot T^3 + E \cdot T^4 + \dots \quad (2.37)$$

zum Einsatz, deren Koeffizienten A , $B \dots$ durch lineare Regressionsanalyse aus Tabellenwerten gewonnen wurden.

Testläufe haben gezeigt, daß die Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit die Simulationszeiten stark erhöht (um ca. den Faktor 6, bei stark dynamischem Betrieb bis zum Faktor 10). Es wurde deshalb die Möglichkeit geschaffen, wahlweise mit konstanten Werten zu rechnen, die aus o.g. Beziehung mit Hilfe einer Mitteltemperatur T_{mean} gewonnen werden.

Druckabhängigkeit

Bei dem vorgesehenen 3 km langen senkrechten Rohr tritt durch die hohe Wassersäule ein erheblicher statischer Druck von ca. 295 bar auf. Alle in der Modellierung benutzten

Stoffwerte sind druckabhängig. Es zeigt sich jedoch (Werte aus WÄRMEATLAS 1994), daß diese Abhängigkeiten sehr gering sind. Alle Werte zeigen im Bereich von 1...300 bar nur Änderungen von deutlich unter 2.5%, lediglich die Prandtlzahl liegt knapp über dieser Grenze. Die Druckabhängigkeit der Stoffwerte für Wasser kann deshalb vorerst vernachlässigt werden.

2.2.4. Das Rohrmodell als SMILE-Komponente

Das hier beschriebene dynamische Doppelrohrmodell ist in SMILE in der Modellklasse `DoubleTubeDyn` in allgemeiner Form umgesetzt worden. Es können wechselnde Rohrgeometrien und -materialien ebenso eingesetzt werden wie unterschiedliche und veränderliche Massenströme im Außen- und Innenrohr (Gleichstrom, Gegenstrom, Fließrichtungs-umkehr etc.). Die Rohrwand kann in thermischem Kontakt zu einem Fluid oder einem Feststoff stehen.

Die Gleichungen aus Abschnitt 2.2.2, die stark an die Bedingungen in der Erdsonde angepaßt sind, wurden in der von `DoubleTubeDyn` abgeleiteten Klasse `DoubleTubeDynExt` untergebracht, da sie nicht zum allgemeinen Modell gehören.

Zum Anschluß des Modelles an andere Komponenten, die normalerweise keine unterschiedlichen Fließrichtungen vorsehen, ist die Klasse `DoubleTubeHead` gedacht, die die Größen des Modelles je nach Betriebsart mit den entsprechenden Größen der Anschlußkomponenten verknüpft. Die Klasse `DoubleTubeEnd` verbindet am unteren Ende des Rohres die Massen- und Energieströme. Die Vererbungshierarchie der Klassen ist in

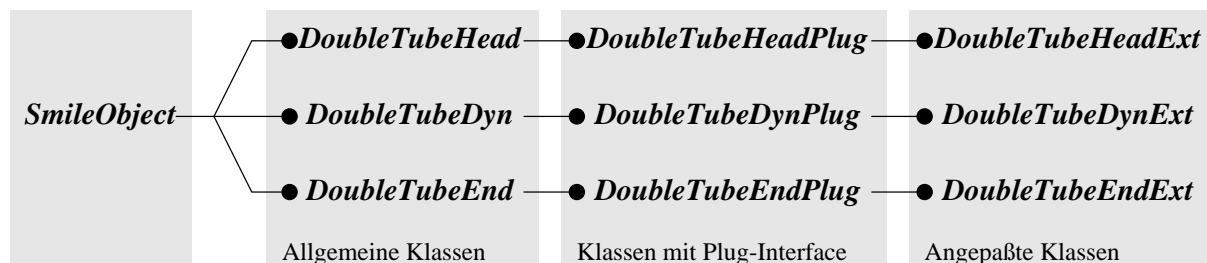


Abbildung 2.10.: Vererbungshierarchie der Rohrklassen

Abb. 2.10 dargestellt.

Da aufgrund der allgemeinen Modellierung beim Verbinden dieser Komponenten viele Größen miteinander verknüpft werden müssen, gibt es zu allen beschriebenen Klassen Erweiterungen (`DoubleTube*Plug`), die dies über eine einheitliche Schnittstelle stark vereinfachen.

Die Routinen zur Stoffwertberechnung ebenso wie die Berechnung der Nußeltzahlen sind in externen Funktionen untergebracht.

2.2.5. Modellvalidierung

Auch hier wurden, wie beim Erdreichmodell, zahlreiche Testläufe mit unterschiedlichen Parametern durchgeführt, bei denen die Übereinstimmung des Modells mit den physikalischen Grundlagen bestätigt wurde. Alle Stoffwerte und die für den Wärmeübergang wesentlichen Größen (siehe Abschnitt 2.2.2) wurden für verschiedene Bedingungen berechnet und mit Tabellenwerten und Kontrollrechnungen verglichen.

Eine für den Einsatz als Erdsonde wichtige Eigenschaft ist die Verzögerungszeit (sojourn time) des Rohres. Mit den geplanten Rohrgeometrien für die Potsdamer Anlage ergibt sich bei 3 km Länge ein Wasservolumen von ca. 20 m³, welches eine erhebliche Speicherwirkung besitzt. Änderungen der Fluideigenschaften am Eingang machen sich nicht sofort, sondern mit einer massenstromabhängigen Verzögerung am Ausgang bemerkbar. Diese Verzögerung über eine Länge l kann mit Hilfe der Fließgeschwindigkeit v einfach über

$$t = \frac{l}{v} = \frac{\rho \cdot V}{\dot{m}} \quad (2.38)$$

abgeschätzt werden. Die in Abb. 2.11 dargestellten Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung von Testrechnungen mit dieser Abschätzung. Hier wurde das Fluid am Eingang mit einem rechteckigen Temperatursprung versehen, der —in seiner Form beeinflusst⁸— nach einer Verzögerung auch am Ausgang auftritt. Die Rohrlänge beträgt 3000 m, es wurden allerdings für die Rohrdurchmesser Werte eingesetzt, die weder der Prenzlauer noch einer für Biesdorf geplanten Konfiguration entsprechen. Das Wasser fließt im (hier nach außen adiabaten) Außenrohr abwärts bis zum unteren Ende und dann im Innenrohr wieder aufwärts. Die aus obiger Formel abgeschätzten Verzögerungszeiten für die Strecke vom Eingang bis zum unteren Ende bzw. bis zum Ausgang sind im Diagramm eingetragen.

Es ist deutlich ein erstes Maximum der Ausgangstemperatur zum Zeitpunkt des Zurückspringens der Eingangstemperatur zu sehen, welches durch den Wärmedurchgang am Innenrohr im obersten Rohrbereich hervorgerufen wird. Das zweite Maximum tritt auf, wenn das warme Wasser den gesamten Weg durch das Rohr genommen hat und wieder am Ausgang austritt. Daß die Verzögerung etwas kürzer ist als nach obiger Abschätzung zu erwarten, läßt sich dadurch erklären, daß ein Teil der Energie schon schneller durch den Wärmeübergang am Innenrohr transportiert wird und nicht massegebunden den “langen Weg” über die gesamte Rohrlänge nehmen muß. Setzt man das Innenrohr als adiabat an, tritt der Temperaturpeak zum erwarteten Zeitpunkt auf⁹. Das langsame Abklingen der Temperaturen im Inneren des Rohres und damit auch am

⁸ Diese Verformung ist **nicht** auf reale Mischungseffekte zurückzuführen, sie wird neben Wärmeleitung und -übergang durch die Feinheit der Diskretisierung bestimmt, also die Approximation eines kontinuierlichen Systems durch eines n -ter Ordnung.

⁹ Es verbleibt nur ein geringer, durch feinere Diskretisierung minimierbarer Fehler von ca. Segmentlänge/Fließgeschwindigkeit.

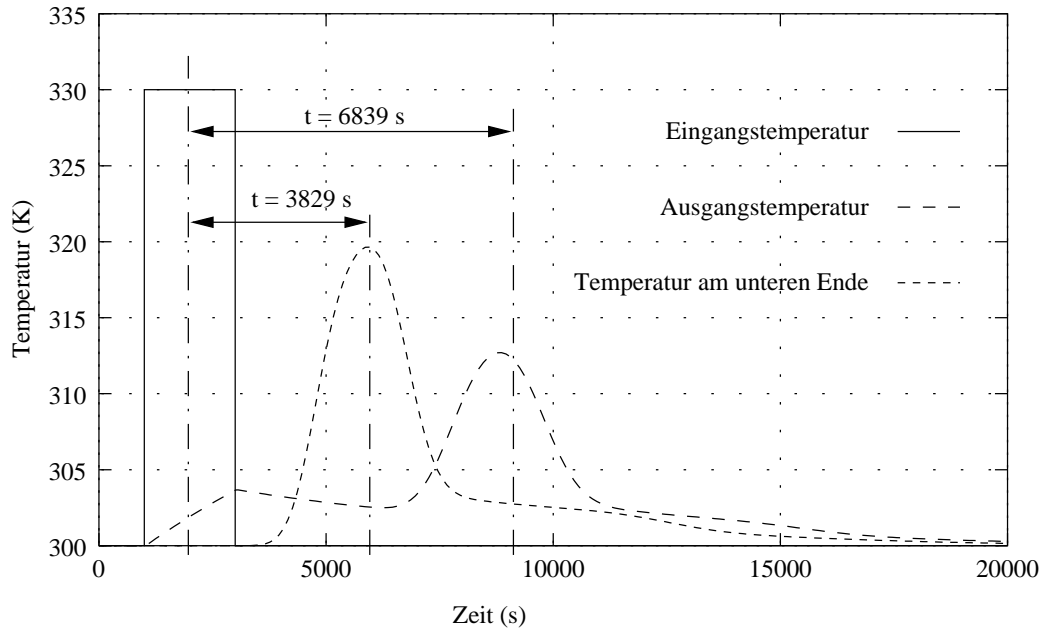


Abbildung 2.11.: Transportverzögerung eines Temperatursprunges am Doppelrohr

Ausgang läßt sich durch die wechselseitige Energieabgabe des auf- und abströmenden Mediums im Innen- bzw. Außenrohr erklären.

Da hier die Stoffwerte des Mediums als temperaturunabhängig angenommen worden sind, müssen bei konstantem Massenstrom nach Rückgang aller Temperaturen auf die Ursprungswerte (d.h. der Energieinhalt des Fluid im Rohr hat sich nicht geändert) die Flächen unter den Kurven der Eingangs- und Ausgangstemperatur für ein nach außen adiabates Rohr aufgrund des Energieerhaltungssatzes gleich sein¹⁰:

$$\Delta H = 0 = \int_0^{\infty} \dot{m} \cdot c_{p,Aus} \cdot \rho_{Aus} \cdot T_{Aus} dt \quad (2.39)$$

$$- \int_0^{\infty} \dot{m} \cdot c_{p,Ein} \cdot \rho_{Ein} \cdot T_{Ein} dt \quad (2.40)$$

$$\hookrightarrow \int_0^{\infty} T_{Aus} dt = \int_0^{\infty} T_{Ein} dt. \quad (2.41)$$

Dies konnte bei den beschriebenen Rechnungen bestätigt werden.

2.2.6. Einsatzbereiche und Beschränkungen des Modells

Folgende allgemeine Anforderungen bestehen für den Einsatz des implementierten Doppelrohrmodells:

¹⁰Für die anderen Temperaturen gilt dies nur bei adiabatem Innenrohr!

- ① Die Speicherwirkung der Rohrwände muß vernachlässigbar sein.
- ② Freie Konvektion durch Temperaturgradienten im Fluid darf nicht auftreten oder muß über den Wärmeleitungsansatz approximierbar sein. Wenn letzteres der Fall ist, darf sich die Diskretisierung über die Länge des Rohres nicht wesentlich ändern.
- ③ Die Modellierung des Wärmeübergangs (isoliertes Innenrohr, Wärmeübergang am Außenrohr) muß für den konkreten Anwendungsfall überprüft und eventuell korrigiert werden.
- ④ Die Vernachlässigung der Abhängigkeit der Stoffwerte von Druck und Temperatur muß überprüft und das Modell entsprechend angepaßt werden.
- ⑤ Hydraulische Effekte müssen vernachlässigbar sein.
- ⑥ Bei Kombination des Modelles mit anderen als den hier genutzten Klassen `DoubleTubeHead`, `DoubleTubeEnd` und `EarthCyl*` kann es nötig werden, die Schnittstellen der Parameterübergabe zu modifizieren.

2.3. Gesamtmodell der Erdsonde

In den vorhergehenden Abschnitten wurde die Modellierung von Einzelkomponenten beschrieben. Um ein Modell der gesamten Erdsonde zu erhalten, müssen nun diese Komponenten miteinander verschaltet werden. Dies wird hier am Beispiel einer auf die Bedingungen von Potsdam abgestimmten Sonde gezeigt.

Wählt man für das Erdreich in radialer Richtung eine Elementanzahl von 10 (ein Element davon bleibt ungenutzt, da hier das Wärmetauscherrohr sitzt), so kann mit einem Startradius von 10 cm bei einer Radiusverdoppelung zum jeweils nächsten Element ein Zylinder von ca. 25 m Radius abgedeckt werden. Aufgrund des natürlichen Temperaturfeldes in der Erde und der Länge des Rohres sind in axialer Richtung nur geringe Temperaturgradienten zu erwarten. Eine grobere Diskretisierung ist hier möglich. Setzt man eine Schichtdicke von 50 m an, sind trotzdem noch 60 Schichten notwendig, um die 3000 m Tiefe zu erreichen. Zusätzlich müssen noch einige Schichten ohne Aussparung unterhalb des Rohres angesetzt werden, um das Nachfließen der Wärme aus dem Bereich unter dem Rohr berücksichtigen zu können. Damit kommt man insgesamt auf mehr als 600 Elemente.

Die Struktur der aktuellen SMILE-Version, bei der die Gleichungen für ganze Variablenfelder einer Modellklasse vor der Kompilation in einzelne Gleichungen für jedes Element umgewandelt werden, beschränkt allerdings den Diskretisierungsgrad (also die Anzahl der Elemente) einzelner Klassen¹¹. Dies macht es notwendig, feiner diskretisierte Modelle aus mehreren miteinander verknüpften Instanzen dieser Klassen aufzubauen.

¹¹Diese Einschränkung wird mit der kommenden Programmversion von SMILE aufgehoben

Das Erdreich wird hier deshalb aus sieben Zylindern der Modellklasse `EarthCylRadAxExt` mit je 100 Elementen aufgebaut. Als Randbedingungen erhalten die Elemente, die an einer Grenze zu einem anderen Zylinder liegen, die Temperaturen und Leitwerte (vom Rand bis bis zum Elementzentrum) der jeweiligen Nachbarelemente. Mit Hilfe dieser Verknüpfungen wird das selbe Gleichungssystem aufgebaut, wie es ein einzelnes, feiner diskretisiertes Zylindermodell aufweisen würde. Die radiale Diskretisierung übernimmt eine Instanz der Klasse `AutoRaDisc`. Das

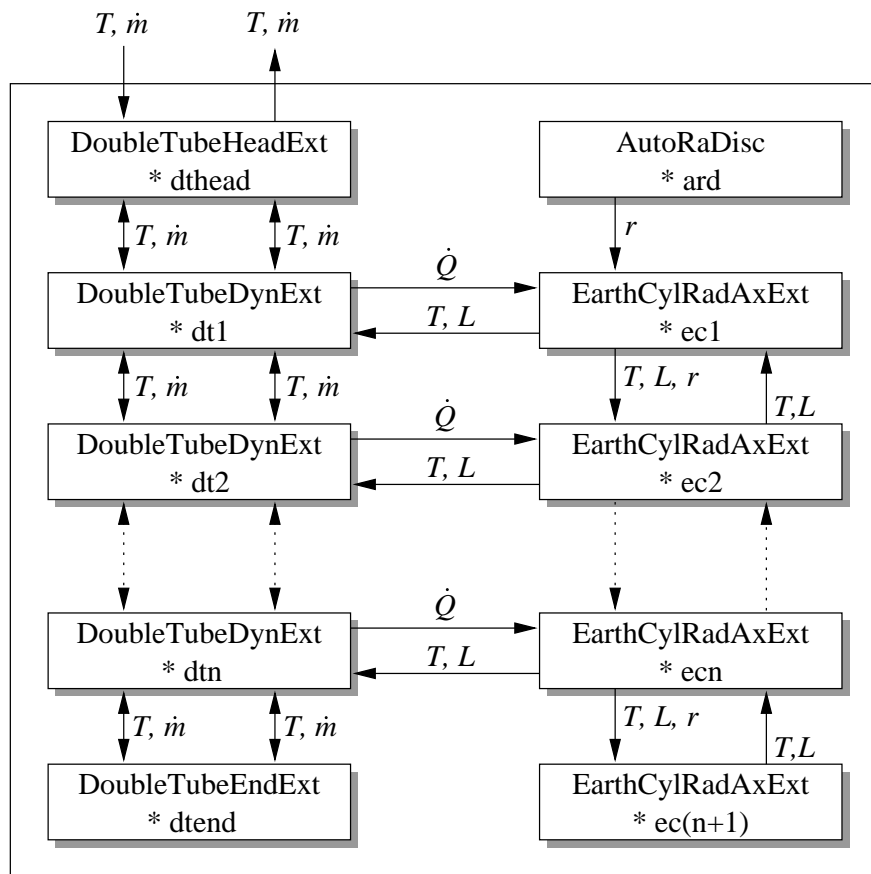


Abbildung 2.12.: Aufbau des Erdsondenmodells aus Einzelmodellen

Rohrmodell wird in axialer Richtung genauso diskretisiert wie das Erdreich. Auch hier wird das gesamte Rohr aus mehreren Instanzen einer Modellklasse (`DoubleTubeDynExt`) zusammengesetzt, wobei Massenströme und Temperaturen der Einzelmodelle verknüpft werden. Zum Anschluß an den Rest des Heizsystems und zum Abschluß am unteren Ende dienen Instanzen spezieller Klassen (`DoubleTubeHeadExt`, `DoubleTubeEndExt`). Als Randbedingung wird dem Rohr die Temperatur und der radiale Leitwert der innersten Erdreichelemente übergeben. Der daraus berechnete radiale Wärmestrom stellt dann die innerer Randbedingung für das Erdreichmodell dar.

Die Struktur des resultierenden Modells ist in Abb. 2.12 dargestellt. Hier sind die wichtigsten Größen angegeben, mit denen die Einzelmodelle verknüpft werden. Viele andere verknüpfte Parameter, wie z.B. Rohrradius und Innenradius der inneren Erdreichteile, wurden in dieser Darstellung weggelassen.

Das beschriebene Modell ist in der Klasse `EWT Potsdam` implementiert. Zur Kopplung des Modells mit weiteren Komponenten des Heizsystems müssen nun nur noch der Massenstrom und die Eingangs- und Ausgangstemperaturen verknüpft werden. Initialisierungsparameter wie Stoffeigenschaften der einzelnen Schichten und das Temperaturprofil zum Simulationsbeginn müssen allerdings je nach Einsatzzweck angepaßt werden.

Bei der Kopplung des Modells mit den Modellen anderer Anlagenbestandteile war es notwendig, einige Vereinfachungen vorzunehmen, um die Simulationszeiten des Gesamtsystems zu reduzieren (siehe auch Kapitel 5.2.1). Dazu gehört eine Einschränkung der Segmentanzahl ebenso wie die Beschränkung auf radiale Wärmeleitung im Erdreich. Diese Änderungen sind aufgrund der stufenweisen Erdreichmodellierung durch einfachen Austausch der genutzten Modellklassen im Sondenmodell erreichbar.

Das oben beschriebene detailliertere Modell bildet die Grundlage aller Untersuchungen am reinen Sondenmodell (Kapitel 4). Die Validierung des Gesamtmodells der Sonde (Kap. 3) und die in Kap. 5 beschriebenen Untersuchungen wurden mit dem vereinfachten Sondenmodell durchgeführt.

3. Validierung des Erdsondenmodells

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie das Sondenmodell anhand von Meßwerten einer existierenden Anlage vorläufig validiert wird.

3.1. Grundlagen

Die erfolgreiche Validierung der Einzelkomponenten durch Vergleich mit analytischen Lösungen ist bereits im vorherigen Kapitel beschrieben worden. Bei diesen Vergleichen konnte allerdings nicht festgestellt werden, ob die vereinfachenden Modellannahmen wie z.B. Vernachlässigung von Grundwasserkonvektion im Erdreich zur Beschreibung realer Verhältnisse statthaft sind. Der Einfluß bestimmter Annahmen und Unsicherheiten bei der Parameterwahl ist nicht bekannt.

Der Vergleich des Modells mit Meßwerten einer realen Anlage ist daher unbedingt notwendig, bevor diese Modell zur weiteren Untersuchung des Sondenverhaltens genutzt wird.

In Prenzlau ist eine geschlossene geothermische Tiefensonde bereits mehrere Jahre in Betrieb. Der Betrieb der Sonde wurde teilweise ausführlich dokumentiert, und diese Daten können hier als Grundlage für Vergleiche mit dem Modell dienen.

Da das Temperaturprofil in der Erde zu einem bestimmten Zeitpunkt vom Betrieb der Sonde in der zurückliegenden Zeit abhängt, kann als Vergleichsintervall nicht irgendein Zeitraum ohne Berücksichtigung der Vorgeschichte gewählt werden. Es bietet sich daher an, Meßwerte vom Zeitpunkt der ersten Inbetriebnahme der Sonde zu nutzen. Die Erdtemperaturen werden hier als stationär (ungestörtes Profil) angenommen.

Es liegen durchgehende Meßreihen vor für die ersten beiden Betriebsmonate der Sonde. Dabei wurden die Volumenströme sowie die Sondeneintritts- und -austrittstemperatur als Viertelstundenwerte registriert.

Bei der Simulation werden die Volumenströme und Eintrittstemperaturen eingelesen und als Parameter an das Sondenmodell übergeben. Die daraus berechnete Austrittstemperatur wird daraufhin mit den Meßwerten verglichen und die Abweichung festgestellt.

Das Sondenmodell besteht in diesem Fall aus 300 Elementen. Um die wechselnde Rohrgeometrie darstellen zu können, wurde es aus mehreren Instanzen der Doppelrohr- und Erdreichklassen zusammengesetzt. Die Wärmeleitung in der Erde wird nur in radialer Richtung berücksichtigt. Diese Einschränkung hat sich in späteren umfangreichen Simulationen des Gesamtsystems als notwendig erwiesen, um geringere Rechenzeiten zu erreichen (siehe Abschnitt 5.2.1).

3.1.1. Parameterwahl

Eine Problem besteht in der ungenauen Kenntnis der Untergrundverhältnisse am Standort Prenzlau. Es ist hier nur die ungefähre Schichtenfolge bekannt, genaue Werte für c_P , ρ und λ sind nicht vorhanden. Deshalb müssen die entsprechenden Parameter durch Vergleich mit den bekannten Werten für den Standort Potsdam abgeschätzt werden. Es wird die in im Anhang dargestellte Abfolge zugrunde gelegt.

Das Temperaturprofil für Prenzlau ist ebenfalls nicht genau bekannt. In vorherigen Abschätzungen (KEMA 1995) wurde eine Temperatur von 108°C am unteren Ende der Sonde bei 2769 m angenommen. Mit einer Temperatur der Erdoberfläche von 8°C und den in der Tabelle angegebenen Werten kann so ein Temperaturprofil des ungestörten Erdreiches errechnet werden (siehe auch 2.1.5). Die Differenz dieses Profils zu einem angenommenen konstanten Gradienten von 37 K/km liegt deutlich unter 1 K , so daß es in weiteren Berechnungen über einen solchen Gradienten approximiert werden kann.

Die Rohrgeometrie der Prenzlauer Anlage ist im Anhang dargestellt.

3.2. Vergleich der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulation der Prenzlauer Sonde mit den oben genannten Parametern ist im Vergleich mit den Meßwerten in Abb. 3.1 dargestellt. Es ist eine deutliche Korrelation zwischen den gemessenen und den berechneten Sondaustrittstemperaturen zu erkennen. Die Abweichung liegt im Durchschnitt bei $1\text{--}2\text{ K}$ (dies entspricht einem Fehler der Sondenleistung von $3.3\text{--}6.7\%$), in Einzelfällen erreicht sie 4 K .

Für die Stoffwerte des Untergrundes muß infolge der Schätzung mit einer Abweichung von bis zu 30% gerechnet werden, das Temperaturprofil kann ebenfalls erheblich von der getroffenen Annahme abweichen. Der Sensitivität des Sondenverhaltens bezüglich dieser Parameter ist in Kapitel 4 dargestellt.

Die Meßwerte sowohl für den Volumenstrom als auch für die Temperaturen liegen nur ganzzahlig gerundet vor. Nimmt man bei typischen Betriebsbedingungen (Temperaturen $45\text{--}15^\circ\text{C}$, Volumenstrom $10\text{ m}^3/\text{h}$) die Extremfälle (alle Werte ± 0.5) an, ergeben sich Abweichungen in der Sondenleistung von mehr als 15% , mögliche Meßfehler sind dabei noch nicht berücksichtigt.

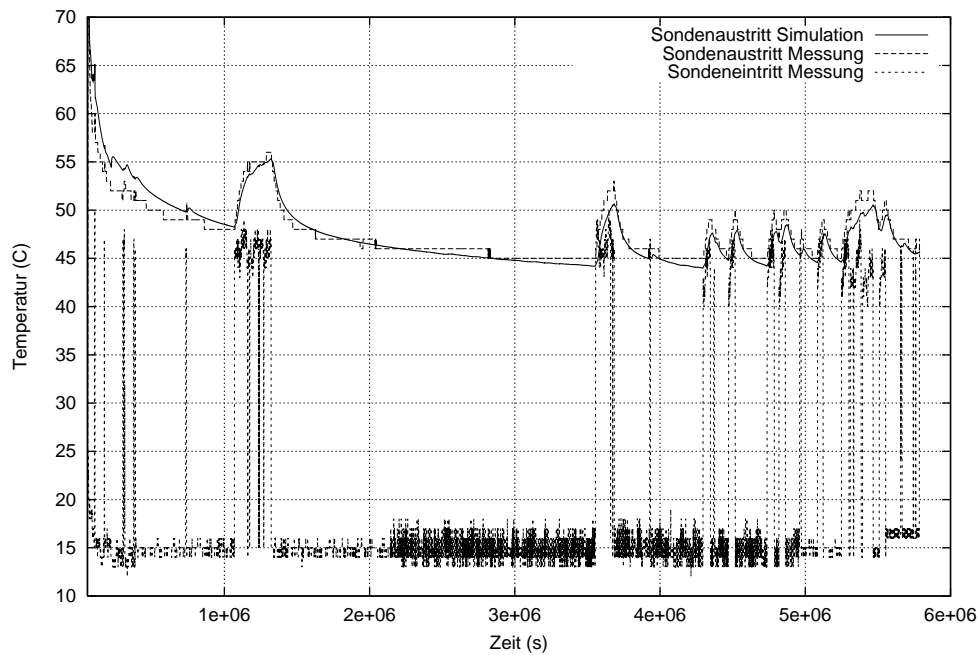


Abbildung 3.1.: Vergleich der Simulation mit Meßdaten

3.3. Auswertung

Berücksichtigt man die Sensitivität des Sondenmodells bezüglich der oben genannten Parameter und ihre mögliche Streubreite, ist die Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den Meßwerten als erstaunlich gut zu bewerten. Schließt man grobe, sich jedoch gegenseitig aufhebende Fehler aus, muß angenommen werden, daß die oben getroffenen Abschätzungen relativ gut mit den realen Verhältnissen übereinstimmen.

Eine exakte Validierung könnte nur durch Vergleich mit kompletten Datensätzen verschiedener Erdsonden unter unterschiedlichen geologischen und anlagentechnischen Bedingungen erfolgen. Diese Möglichkeit besteht im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht, da keine weiteren Datensätze zur Verfügung stehen.

4. Untersuchungen an der Tiefensonde

4.1. Allgemeines Betriebsverhalten

Die wichtigsten Größen beim Betrieb einer Erdsonde sind die Sondenleistung und die Austrittstemperatur des Fluids. Sie werden neben dem Regenerationszustand des Erdreiches und festgelegten Parametern wie Sondengeometrie, -materialien und geologischer Situation hauptsächlich von den beiden Betriebsparametern Massenstrom (oder Fließrate) und Einspeisetemperatur bestimmt.

Im Rahmen dieser Arbeit können keine umfangreichen Parameterstudien durchgeführt werden. Das Ziel der hier beschriebenen Untersuchungen ist hauptsächlich, die Sensitivität des SONDENSYSTEMS bezüglich der Parameter einzuschätzen und die wesentlichsten Einflußgrößen auf das SONDENVERHALTEN zu bestimmen. Diese Erkenntnisse sind notwendig, um die in der Machbarkeitsstudie notwendige Anlagenauslegung und -optimierung durchführen zu können.

Für alle folgenden Berechnungen werden die für Potsdam ermittelten geologischen Parameter eingesetzt. Die Rohrgeometrie basiert auf dem in Prenzlau angewandten System¹ bei einer Sondenlänge von 3000 m. Diese Parameter bilden auch die Grundlage des für den Standort Berlin-Biesdorf untersuchten Systems. Alle Simulationen wurden mit einem über 10 Jahre durchgehenden SONDENBETRIEB durchgeführt. Wenn nicht anders beschrieben, wurden eine SONDENEINTRITTSTEMPERATUR von 20°C und ein Massenstrom von 3 kg/s zugrunde gelegt.

4.1.1. Einfluß von Sondengeometrie und -materialien

Sondenmaterialien

Das in Prenzlau genutzte Sondeninnenrohr ist doppelwandig mit Luftspalt. Es wird dafür ein k -Wert von ca. $1.0 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ angegeben, dies entspräche einem Vollrohr mit einer Wärmeleitfähigkeit von ca. $0.03 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Ändert man diesen Wert auf 0.02 oder $0.04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, hat dies einen Einfluß auf die Sondenleistung, der deutlich unterhalb von

¹ Ohne den Wechsel des Rohrdurchmessers, es sind über die gesamte Länge die Parameter des zweiten, dünneren Außenrohres zugrundegelegt

1% liegt. Die Abweichung ist beim Einschalten am stärksten, da hier die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenrohr am größten ist. Insgesamt scheint dieser Parameter — solange diese Größenordnung nicht verlassen wird — nur einen sehr geringen Einfluß zu haben.

Das Außenrohr ist aus Stahl mit einer Wärmeleitfähigkeit von ca. $50 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Verringert man diesen Wert auf $10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, sinkt die Sondenleistung nur um deutlich weniger als 1%. Eine Erhöhung der Leitfähigkeit auf $100 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ führt zu einer Leistungssteigerung unterhalb der Promillegrenze.

Es kann festgehalten werden, daß durch den Einsatz anderer Sondenmaterialien keine wesentliche Beeinflussung der Sondenleistung erreichbar ist.

Sondengeometrie

Der Rohrdurchmesser der Sonde ist technisch nur schwer variierbar, da die Bohrtechnik und die Bohrkosten hier enge Grenzen setzen. Es sollte dennoch abgeschätzt werden, welchen Einfluß er auf die Sondenleistung hat. Erhöht man den Außendurchmesser des Außenrohres von ca. 170 mm auf 300 mm, resultiert daraus eine Steigerung der Sondenleistung um 6 ... 7%. Die Bohrkosten würden um einen weitaus höheren Anteil steigen, so daß diese Form der Leistungserhöhung nicht weiter relevant ist.

Die Sondenlänge ist dagegen ein Parameter, der auch technisch leicht zu variieren ist. Durch eine längere Sonde wird das ausbeutbare Erdvolumen vergrößert und gleichzeitig die maximale Sondentemperatur erhöht. Für die Verlängerung der Sonde um 500 m werden vereinfachend weiterhin der Zechsteinhorizont und ein konstanter Temperaturgradient angenommen. Mit einer um 17% auf 3500 m verlängerte Sonde wird eine Leistungssteigerung ca. 30% erreicht, die im Laufe der Zeit auf knapp 40% anwächst. Ausschlaggebend hierfür ist die hohe Wärmeleitfähigkeit des Zechsteins.

4.1.2. Einfluß der Geologie

Stoffwerte

Die in den geologischen Gutachten angegebenen Stoffwerte können mit Ungenauigkeiten von bis zu 20% behaftet sein. Zur Abschätzung des Einflusses auf die Sondenleistung wurde der für die Wärmeleitung ausschlaggebende Parameter Wärmeleitfähigkeit um $\pm 10\%$ variiert. Der Einfluß auf die Sondenleistung ist für kurze Betriebszeiten sehr gering, steigt im weiteren Betrieb jedoch ständig an und erreicht nach zehn Jahren 4.5% bei weiter steigender Tendenz. Der Einfluß von Wärmekapazität und Dichte liegt in einer ähnlichen Größenordnung.

Temperaturgradient

Die realen Temperaturgradienten sind meist nicht genau bekannt und hängen stark von den Stoffwerten des Gesteins ab (siehe auch Abschnitt 2.1.5). Der vereinfachte konstante Temperaturanstieg von 0.035 K/m (0.025 K/m), wie er in den bisherigen Berechnungen angenommen wurde, stellt nur eine grobe Schätzung dar. Eine Erhöhung oder Verminderung dieses Wertes um 0.005 K/m (14%) führt zu einer entsprechenden Änderung der Sondenleistung um ca. 17%.

4.1.3. Einfluß des Massenstromes und der Einspeisetemperatur

Der bei den folgenden Untersuchungen angenommene kontinuierliche Betrieb der Sonde mit entweder konstantem Massenstrom oder konstanter Einspeisetemperatur ist sicherlich nicht realistisch für eine reale Anlage. Hier ist mit abwechselnden Förder- und Stillstandsphasen und einer schwankenden Einspeisetemperatur zu rechnen, die durch den sich ändernden Energiebedarf, die Eigenschaften der Wärmepumpe und die Sondenaustragstemperatur beeinflusst wird. Außerdem treten diese Schwankungen bei unterschiedlichen Ausbeutungs- bzw. Regenerationszuständen des SONDENSYSTEMS auf. Dieses stark dynamische System ist nur in einem kompletten Anlagenmodell nachzubilden. Für die Auslegung des Systems (insbesondere der Wärmepumpe) ist jedoch die im Folgenden beschriebene Abschätzung der verschiedenen Einflüsse notwendig.

Massenstrom

In Abb. 4.1 wird deutlich, daß die Ausgangstemperatur der Sonde stark vom Massenstrom abhängt. Geringe Fließraten, die bei insgesamt geringerer Energieentnahme und damit höheren Erdtemperaturen zu einer langen Verweilzeit des Mediums im Wärmetauscherrohr führen, erreichen weitaus höhere Temperaturen als hohe Fließraten.

Die Sondenleistung, die proportional zum Massenstrom und zur Differenz aus Ein- und Ausgangstemperatur ist, zeigt für kurze Zeiten ebenfalls eine erhebliche Abhängigkeit vom Massenstrom (siehe Abb. 4.2). Bei 6 kg/s wird gegenüber 1 kg/s immer noch eine um nur ca. $\frac{1}{3}$ verminderte maximale Temperaturspreizung erreicht. Die daraus resultierende Sondenleistung liegt im Maximum um den Faktor 4 höher. Durch die viel stärkere Ausbeutung des Erdreiches sinken die Temperaturen in Rohrnähe allerdings sehr schnell. Der hohe Massenstrom wird durch die immer geringere Erwärmung des Mediums in Bezug auf die Sondenleistung fast ausgeglichen, eine langfristige Annäherung der Leistungen bei unterschiedlich hohen Strömen ist die Folge.

In den Abbildungen 4.1 und 4.2 zeigt sich deutlich der Einfluß der Fließrate auf die Verzögerung der Leistungsspitze (sojourn time) nach der Inbetriebnahme der Sonde. Die Maximalleistung tritt auf, wenn der Teil des Mediums an die Oberfläche gefördert

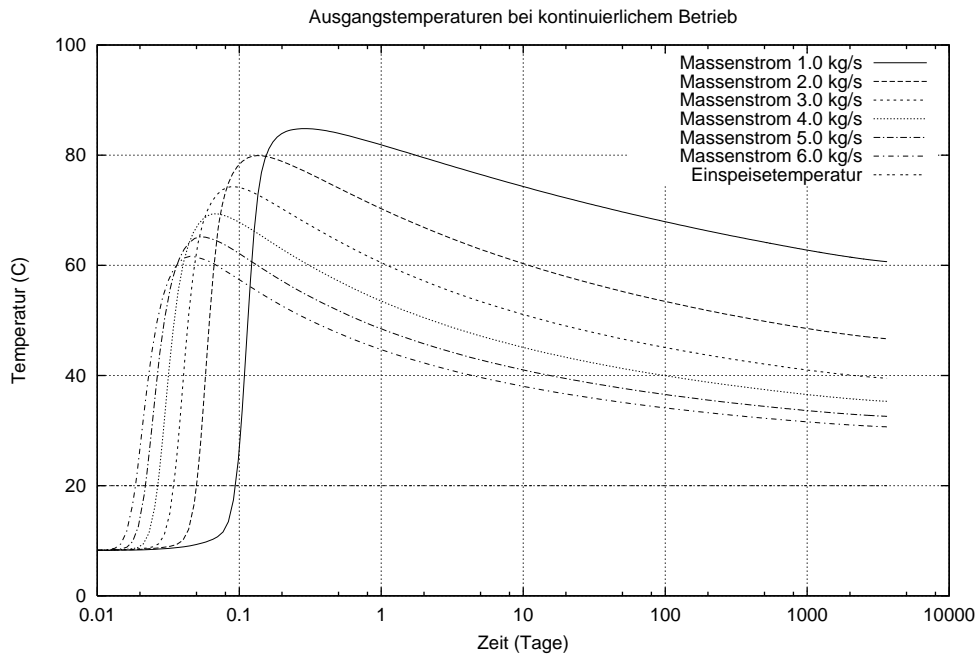


Abbildung 4.1.: Massenstromabhängigkeit der Ausgangstemperatur

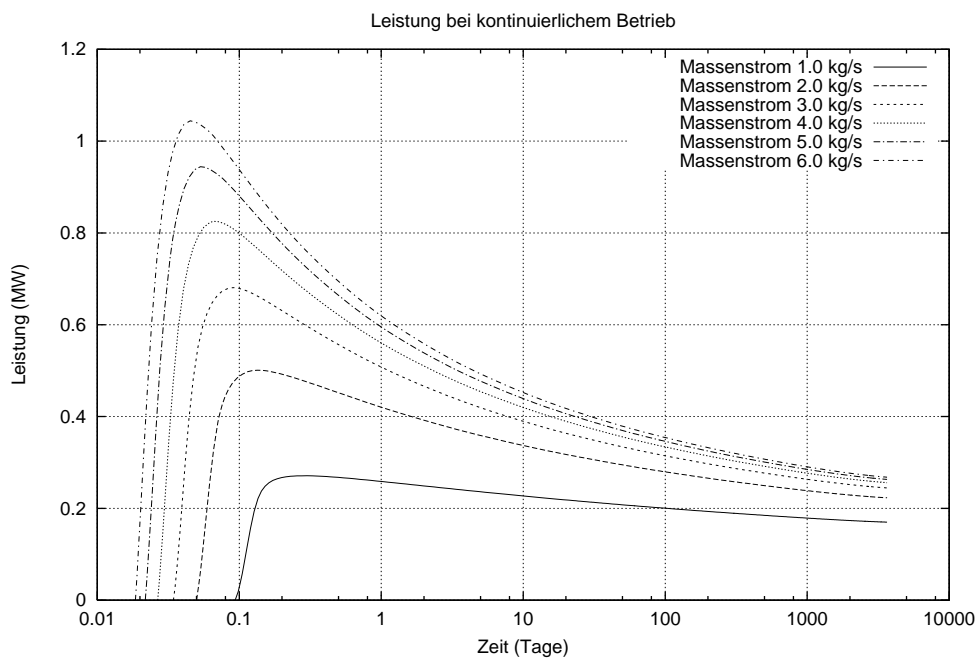


Abbildung 4.2.: Massenstromabhängigkeit der Sondenleistung

wird, der sich vorher am unteren Rohrende befand und die dort maximale Temperatur des umliegenden Erdreiches angenommen hat.

Einspeisetemperatur

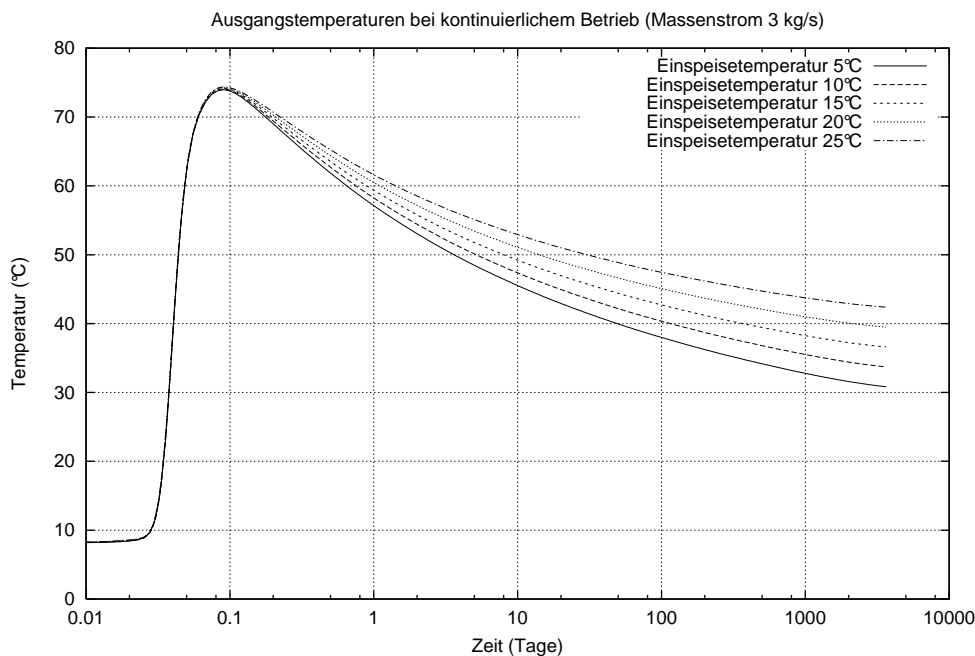


Abbildung 4.3.: Abhängigkeit der Sondenausgangstemperatur von der Einspeisetemperatur

Die Abbildungen 4.3 und 4.4 zeigen den Einfluß der Einspeisetemperatur auf den Sondenbetrieb. Die Ausgangstemperatur reagiert erst nach längerer Zeit auf die Einspeisetemperatur. Nach dem Anfahren der Sonde wird zuerst das in der Sonde stehende Wasser gefördert, welches die Umgebungstemperatur angenommen hat, die Ausgangstemperatur ist nicht von der Einspeisetemperatur abhängig. Im weiteren Betrieb führt eine geringere Einspeisetemperatur durch höhere Sondenleistungen zu stärkerer Ausbeutung der Erde, die Temperaturspreizung sinkt immer weiter und nähert sich für unterschiedliche Einspeisetemperaturen langsam an. Für die Sondenleistung bedeutet dies, daß sich der anfänglich starke Einfluß der Einspeisetemperatur immer weiter abschwächt.

Konsequenzen

Alle Untersuchungen zeigen ein langfristig gegenläufiges Verhalten von Sondenleistung und -ausgangstemperatur. Hohe Leistungen führen natürlich zu einer höheren Ausbeutung und damit geringeren Ausgangstemperaturen. Ein energetisches und wirtschaftliches Optimum läßt sich nicht allein durch die Betrachtung der Sonde finden, es

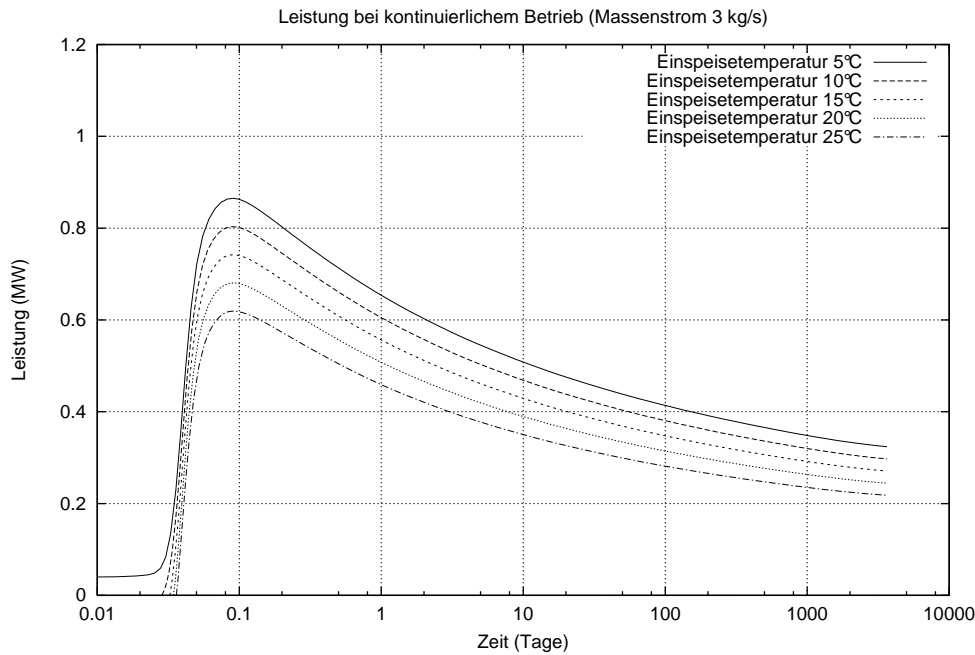


Abbildung 4.4.: Abhängigkeit der Sondenleistung von der Einspeisetemperatur

müssen unbedingt die Gesamtanlage, besonders aber die Eigenschaften der Wärmepumpe berücksichtigt werden.

Für die Auslegung eines Betriebspunktes der Wärmepumpe muß eine Kombination aus Massenstrom, Eingangs- und Ausgangstemperatur und daraus resultierender Sondenleistung gefunden werden, die verschiedenen Ansprüchen genügt. Wirtschaftliche und ökologische Gesichtspunkte fordern eine hohe Sondenleistung, um die hohen Investitionskosten und einen bedeutenden Teil des Energiebedarfs durch die Sonde decken zu können.

Im realen Betrieb sollten die Betriebsparameter für mittlere bis lange Zeiträume nicht erheblich von den Auslegungswerten abweichen. Hohe Fließraten, die die erforderlichen hohen Sondenleistungen erbringen können, führen allerdings zu stärkeren zeitlichen Änderungen von Sondenleistung und -temperaturen.

Die ausgeprägte Leistungsspitze nach dem Anfahren der Anlage und der folgende starke Abfall stellen ebenso wie die massenstromabhängige Verzögerung von bis zu mehreren Stunden besondere Ansprüche an die Regelung eines solchen Systems. Es erscheint sinnvoll, durch geeignete Anlagenverschaltung die Nutzung dieser Leistungsspitzen bei hohen Ausgangstemperaturen direkt unter Umgehung der Wärmepumpe zu ermöglichen. Um die Verzögerung der Leistungsspitze nach dem Anfahren der Anlage zu minimieren ist es möglich, das Medium bei ausgeschalteter Wärmepumpe mit einem hohen Massenstrom durch die Sonde zu pumpen, bis die Ausgangstemperatur hoch genug ist, um die Wärmepumpe effektiv betreiben zu können. Beide Maßnahmen sind nur sinnvoll, wenn der Sondenbetrieb stark taktet.

All dies zeigt, daß die Auslegung des Systems eine sehr komplexe Aufgabe sein wird, die Zahl der zu variierenden Parameter und der schwer abzuschätzende Einfluß des Regenerationszustandes werden dabei ein iteratives Vorgehen mit Hilfe von Simulationen des Gesamtsystems notwendig machen.

4.2. Regenerationsverhalten

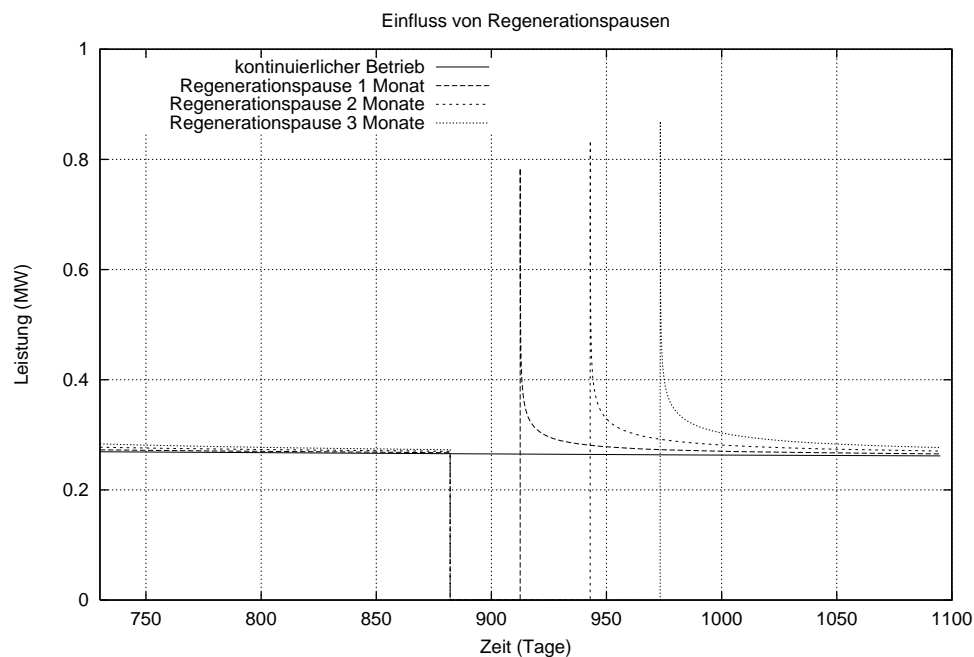


Abbildung 4.5.: Sondenleistungen nach Regenerationspausen

Die Untersuchung der natürlichen Regenerationsfähigkeit der Erdreichtemperaturen ist besonders interessant für die Beurteilung der Kombinationsmöglichkeiten mit solarthermischen Systemen. Zu diesem Zweck wurden Testrechnungen durchgeführt, die einen Vergleich zwischen durchgängigem Betrieb der Erdsonde und einer Betriebsweise mit Regenerationspausen ermöglichen. Für diese erste Abschätzung der grundsätzlichen Möglichkeiten saisonaler Betriebsweise werden die zeitlichen Schwankungen des Energiebedarfs und des Energieangebots durch ein zweites Versorgungssystem (Solarkollektoren) vernachlässigt. Der Massenstrom beträgt während des Sondenbetriebes konstant 3 kg/s , die Einspeisetemperatur 20°C . Es wurden Regenerationspausen von einem, zwei und drei Monaten pro Jahr festgelegt. Die Sondenleistungen für das dritte Betriebsjahr sind in Abb. 4.5 dargestellt.

Einige charakteristische Werte dieser Rechnungen sind in Tabelle 4.1 zusammengefaßt. Hier sind alle Energiemengen als prozentuale Anteile der geförderten Jahresenergie bei kontinuierlichem Betrieb angegeben.

	kont. Betrieb	1 Monat Reg.	2 Monate Reg.	3 Monate Reg.
Energieförderung im gesamten Betriebsjahr	100%	94.4%	87.8%	80.8%
Förderverzicht in der Regenerationsphase	—	8.3%	16.6%	24.9%
Mehrförderung in den Extraktionsphasen	—	2.7%	4.5%	5.7%
Verschiebungswirkungsgrad		0.32	0.27	0.23

Tabelle 4.1.: Einfluß von Regenerationspausen auf die Energieförderung

Durch den Verzicht auf Energieentnahme in den Regenerationsphasen und die Deckung des Bedarfes aus anderen Quellen (Sonnenkollektoren) ergeben sich höhere Fördermengen in der übrigen Zeit. Als Verschiebungswirkungsgrad wird hier das Verhältnis aus der in den Extraktionsphasen mehr geförderten Energiemenge zu der Energie bezeichnet, auf deren Förderung während der Regenerationsphasen verzichtet wird. Diese Größe ist analog zu einem Speicherwirkungsgrad zu verstehen. Je länger die Regenerationsphasen sind, desto geringer wird der Verschiebungswirkungsgrad. Da die Regeneration des Erdreiches mit der Zeit aufgrund des sich abflachenden Temperaturgradienten immer langsamer verläuft, ergibt sich für lange Regenerationsphasen ein immer schlechteres Verhältnis der nachfließenden Energie zu der Menge, die bei Sondenbetrieb zu fördern wäre.

4.3. Möglichkeiten der Einspeicherung

Die Einspeicherung von Energie im Erdreich durch die Tiefenonde wurde bereits kurz beschrieben. Kehrt man die Fließrichtung in der Sonde um, schickt also heißes Wasser im Innenrohr nach unten, gibt dieses seine Energie auf dem Weg an die Oberfläche durch das Außenrohr an das umgebende Erdreich ab. Eine natürliche Isolierung durch den im Extraktionsbetrieb entstandenen "Temperaturtrichter" verhindert Energieverluste an die umliegenden Erdschichten. Dieser Effekt ist in Abb. 4.6 dargestellt.

Zur Einspeicherung ist eine Temperaturdifferenz zwischen dem Fluid und dem umgebenden Erdreich notwendig. Da gleichzeitig auch der natürliche Regenerationseffekt auftritt, ist die mögliche Einspeicherzeit begrenzt. Die Eingangstemperatur des Fluids muß jedoch — abhängig vom Typ des Sonnenkollektors und der Anlagenkonfiguration (Wärmetauscher) — unterhalb der maximalen ungestörten Erdtemperatur von ca. 120°C angenommen werden. Die Einspeicherung kann also nur funktionieren, wenn das Erdreich bereits stark ausgebeutet wurde. Sind die Erdreichtemperaturen zu hoch, gibt das Fluid seine Energie erst in den höheren Erdschichten ab, hier fehlt dann aber die natürliche Iso-

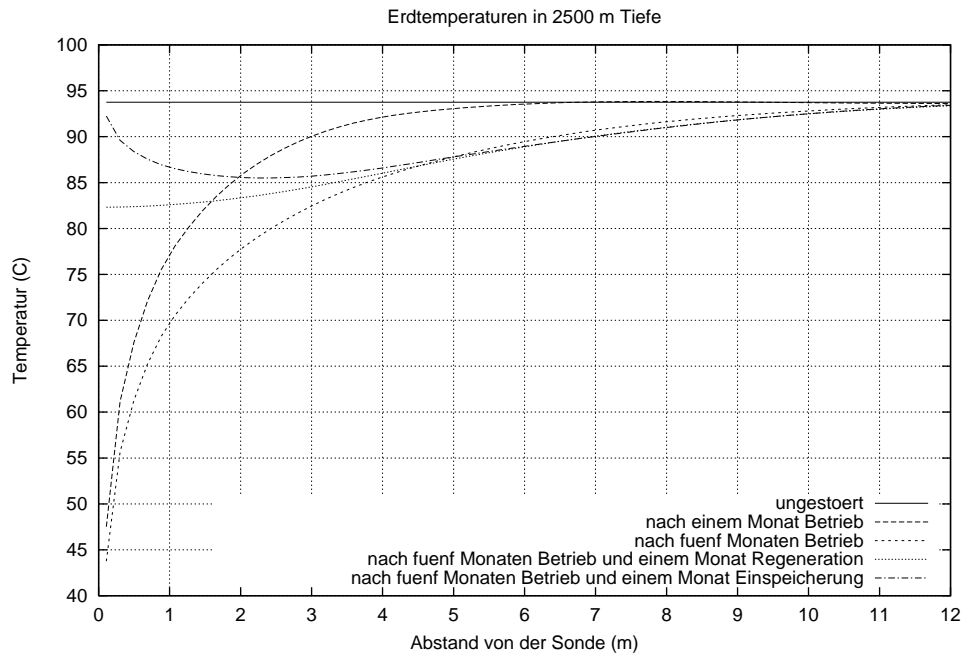


Abbildung 4.6.: Erdtemperaturen nach Extraktion, Regeneration und Einspeicherung

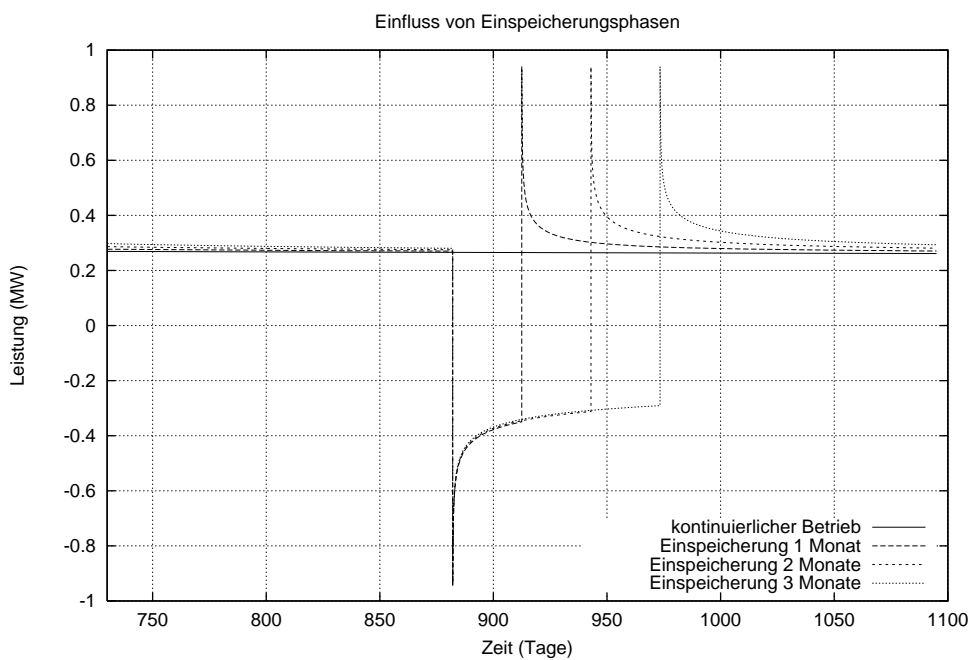


Abbildung 4.7.: Sondenleistungen nach Einspeicherung

lierung durch den Temperaturgradienten. Bei zu hohen Erdtemperaturen kann es sogar vorkommen, daß das Fluid am unteren Ende des Rohres dem Erdreich Energie entzieht und es damit abkühlt, diese Energie aber in geringeren Tiefen wieder abgibt. Eine Förderung von Energie innerhalb der Erde in Richtung Oberfläche wäre die Folge, was den nachfolgenden Extraktionsbetrieb negativ beeinflussen könnte.

	kont. Betrieb	1 Monat Einsp.	2 Monate Einsp.	3 Monate Einsp.
Energieförderung im gesamten Betriebsjahr	100%	97.8%	92.7%	86.6%
Förderverzicht in der Speicherphase	—	8.3%	16.6%	24.9%
Einspeicherung	—	12.9%	23.0%	32.1%
Mehrförderung in den Extraktionsphasen	—	6.1%	9.4%	11.5%
Verschiebungswirkungsgrad		0.32	0.27	0.23
Speicherwirkungsgrad		0.26	0.21	0.18
Gesamtwirkungsgrad		0.29	0.24	0.20

Tabelle 4.2.: Einfluß von Einspeicherung auf die Energieförderung

Für die erste Abschätzung der Speichermöglichkeiten wurden Berechnungen in Anlehnung an die in Abschnitt 4.3 dargestellten durchgeführt. Statt der Regenerationspausen wird nun mit Wasser von 95°C bei einem Massenstrom von 3 kg/s Energie gespeichert. Die Sondenleistung im dritten Betriebsjahr ist in Abb. 4.7 dargestellt.

Einige zusammengefaßte Ergebnisse dieser Rechnungen sind Tabelle 4.2 zu entnehmen. Als Maßstab wurde analog zu Tabelle 4.1 die bei kontinuierlichen Betrieb förderbare Jahresenergie gewählt.

Die Mehrförderung in den Extraktionsphasen wird durch zwei Effekte beeinflußt. In den Einspeicherphasen wird auf eine Energieentnahme verzichtet (Förderverzicht). Gleichzeitig wird Energie ins Erdreich eingebracht (Einspeicherung). Der reine Speicherwirkungsgrad ist das Verhältnis der eingespeicherten Energie zum dadurch erreichten Nutzen. Dieser Nutzen besteht aber nicht in der gesamten Mehrförderung gegenüber der kontinuierlichen Betriebsweise, die auch durch den Förderverzicht erreicht wird, sondern nur in der Mehrförderung gegenüber dem Betrieb mit Regenerationsphasen ohne Speicherung.

Der Gesamtwirkungsgrad aus Einspeicherung und Verschiebung ergibt sich aus dem Verhältnis des Gesamtnutzens — also der Mehrförderung gegenüber dem kontinuierlichen Betrieb — zum Gesamtaufwand, der aus der Summe von Förderverzicht und eingespeicherter Energie besteht.

4.4. Bewertung von Regenerations- und Speicherphasen

Es hat sich gezeigt, daß lange Pausen im Förderbetrieb, eventuell unter Einspeicherung von Energie, einen relativ geringen Nutzen (Mehrförderung) im Verhältnis zum Aufwand (Förderverzicht, Einspeicherung) erbringen. Die Ergebnisse der zugrunde liegenden Berechnungen sind in Abb. 4.8 noch einmal zusammenfassend dargestellt.

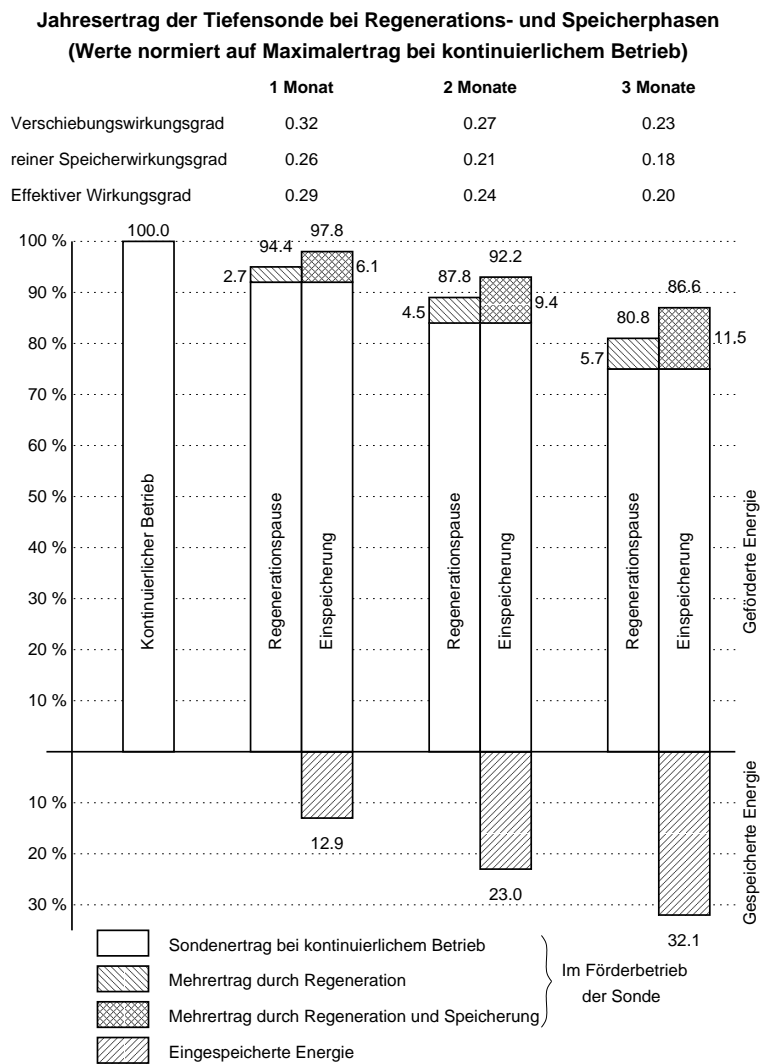


Abbildung 4.8.: Gegenüberstellung von kontinuierlichem Betrieb, Regenerations- und Einspeicherphasen

Eine saisonale Verschiebung des Energieangebots bzw. Nutzung des Speichereffektes scheint aufgrund der geringen Wirkungsgrade nicht sinnvoll zu sein. Die Ergebnisse zei-

gen zudem deutlich, daß der stärkste Effekt (hohe Sondenleistungen) von Regeneration und Einspeicherung direkt nach der entsprechenden Phase auftritt.

Der reale Betrieb eines kombinierten Systems wird allerdings zeitlich viel differenzierter ausfallen, als in dieser Abschätzung angenommen. Schwankender Energiebedarf und schwankendes Strahlungsangebot wird zu einem kurzen und damit effektiven Wechsel der Betriebszustände führen. Stagnationsprobleme des Kollektors können bei entsprechender Auslegung auch unter ungünstigen Bedingungen (gut regeneriertes SONDENSYSTEM im Sommer) eine Einspeicherung notwendig machen.

Eine differenziertere Betrachtung unter Berücksichtigung der zeitlichen Abhängigkeit von Energiebedarf und Kollektorleistung erfolgt durch Simulation des Gesamtsystems im Rahmen der Machbarkeitsstudie unter Mitarbeit des Autors. Die Grundlagen dieser Untersuchungen (Modellierung des Systems unter Einbindung des Sondenmodells) werden im nächsten Kapitel kurz vorgestellt. Eine ausführliche Darstellung und Bewertung der Ergebnisse und die damit verbundene Anlagenauslegung und -optimierung wird in dieser Arbeit allerdings nicht mehr erfolgen.

5. Modellierung der Gesamtanlage

In diesem Kapitel wird kurz dargestellt, wie das geplante Heizsystem insgesamt in SMILE modelliert wird. Die Einbindung des Sondenmodells ermöglicht detailliertere Untersuchungen des Verhaltens der Erdsonde in Kombination mit allen anderen Anlagenkomponenten.

5.1. Entwurf des Anlagenkonzeptes

Aufbauend auf Untersuchungen, die im Vorfeld der Machbarkeitsstudie bereits durchgeführt wurden, wird nun eine Anlagenverschaltung entwickelt, die eine sinnvolle Kopplung von Tiefensonde und Solarkollektoren erlaubt. Der in Abb. 5.1 gezeigte Entwurf stellt die Basis für alle weiteren Untersuchungen dar.

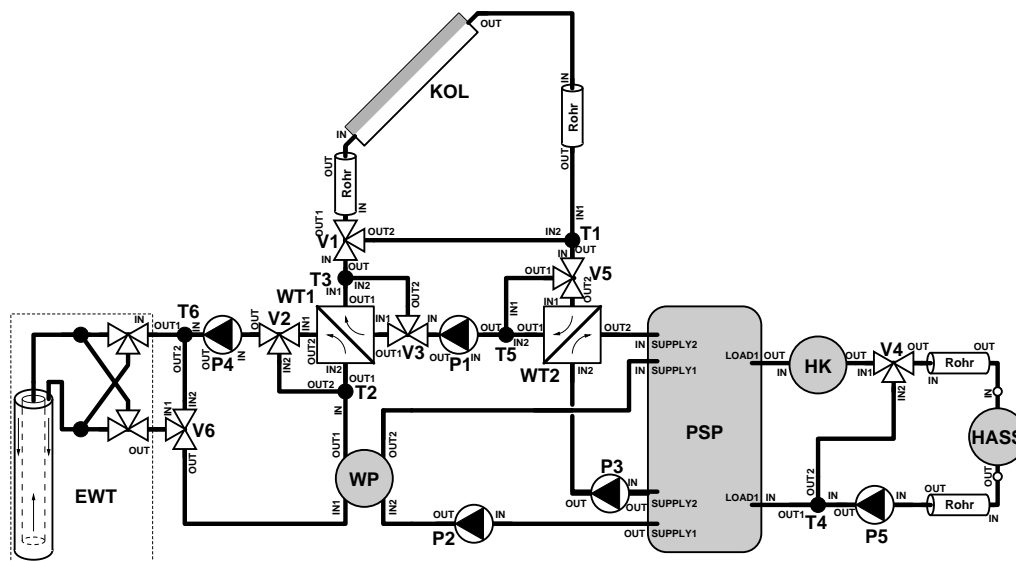


Abbildung 5.1.: Schaltbild des GESOTHERM S-Systems

Grundlage dieser Auslegung sind die Ausschreibungsvorgaben für ein geplantes Wärmeversorgungssystem in Berlin-Biesdorf. Diese Rahmenbedingungen und die vorläufigen Auslegungsparameter sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Wärmebedarf:		
Heizung	5739	MWh/a
Warmwasser	2029	MWh/a
Anschlußleistung	4.1	MW
Auslegungsparameter:		
Tiefensonde	3000	m
Wärmepumpe	ca. 1.3	MW
Solarkollektoren	5500	m ²
Pufferspeicher	200	m ³
Heizkessel	2 * 2.0	MW
Heiznetz	70/40	°C

Tabelle 5.1.: Rahmenbedingungen für das Versorgungssystem

Da bisher kein geeignetes geologisches Gutachten für diesen Standort vorliegt, wird zunächst mit den vorhandenen Daten für den nahegelegenen Standort in Potsdam gerechnet.

5.1.1. Schaltungsbeschreibung

Sowohl das Kollektorfeld als auch die Verbraucher sind vereinfachend als einzelne Komponenten dargestellt. Die Wärmeverluste im Kollektor- bzw. Versorgungsnetz sind in den entsprechenden Rohrkomponenten zusammengefaßt.

Die vorgestellte Schaltung bietet verschiedene Möglichkeiten, den Betrieb von Kollektoren und Tiefensonde zu kombinieren. Beide Komponenten verfügen aus technischen Gründen über eigene Kreise, diese sind über Wärmetauscher bzw. -pumpen mit dem Speicher und untereinander gekoppelt. Kollektor und Sonde können so unabhängig voneinander betrieben werden. Der Wärmetauscher WT1 dient zum Einspeichern von Solarenergie in die Erdsonde, wenn der Pufferspeicher PSP voll ist und die Kollektoren einen ausreichenden Ertrag liefern oder Stagnationsprobleme bestehen. In diesem Fall ist die Wärmepumpe nicht in Betrieb¹. Auch bei Betrieb der Sonde und geringem Strahlungsangebot kann auf diesem Weg ein Teil der Solarenergie zur Erhöhung der Sondereintrittstemperatur genutzt werden. Stellen sich beim Anfahren der Sonde so hohe Ausgangstemperaturen ein, daß der Einsatz der Wärmepumpe nicht notwendig ist, können beide Wärmetauscher und einen Teil des Kollektorkreises zur direkten Beladung des Speichers dienen. Wie sinnvoll oder notwendig diese verschiedenen Betriebszustände sind, wird die Simulation des Gesamtsystems zeigen. Durch die gezeigte Verschaltung der Anlage wird eine Vielzahl von Möglichkeiten eröffnet, das Zusammenspiel von Solarkollektoren und Tiefensonde zu optimieren.

¹Die beidseitigen Wärmepumpen-Bypass sind nicht dargestellt

5.2. Implementation in SMILE

Für viele der Anlagenbestandteile stehen geeignete Modelle in der Komponentenbibliothek von SMILE bereit. Der wichtigste Schritt zur der Modellierung des Gesamtsystems war die Erstellung des Tiefensondenmodells, wie sie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben wurde. Trotzdem fehlen noch einige Modellkomponenten, um die Gesamtanlage simulieren zu können. Deren Erstellung wird im folgenden kurz beschrieben.

Eine wichtige Entscheidung bei der Auswahl der zu implementierenden Modelle und der Modellierungstiefe betrifft die Frage der dynamischen oder stationären Modellierung. Hier müssen verschiedene Faktoren berücksichtigt werden. Viele der benötigten Komponenten sind bereits mit bestimmten Modellen implementiert, eine Änderung oder Neuimplementierung würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen und den Schwerpunkt zu stark verschieben. Dynamische Modelle sind in der Regel rechenzeitaufwendiger, was sich besonders bei einer sehr komplexen Anlage bemerkbar machen kann. Das Mischen von dynamischen Modellen mit sehr unterschiedlichem Zeitverhalten (z.B. Energiespeicher und relativ schnelle Regelungseinrichtungen) führt in der Numerik zu steifen Systemen, die oft höhere Rechenzeiten zur Folge haben.

Die Abschätzung der unterschiedlichen Zeitkonstanten zeigt eine deutliche Dominanz der energiespeichernden Komponenten Pufferspeicher und Erdwärmetauscher. Die Dynamik dieser Komponenten wird also für das Langzeitverhalten der Anlage ausschlaggebend sein, während das dynamische Verhalten der Transport- und Wandlungskomponenten mit ihren relativ geringen Zeitkonstanten nur einen geringen Einfluß hat. Die Modellierung des Erdwärmetauschers und des Pufferspeichers² ist deshalb dynamisch erfolgt, während für alle anderen neuen Komponenten einfachere Modelle ausreichen. Eine Ausnahme bildet hier die Verbrauchsmodellierung: Eine Energiespeicherung auf Verbraucherseite durch Pufferspeicher oder die Gebäudehülle können Einfluß auf das Verhalten der Gesamtanlage haben. Die genauere Modellierung würde allerdings die Einbeziehung von komplizierten Gebäudemodellen und ein erheblich erweitertes Anlagenmodell bedeuten, was durch den hohen Implementationsaufwand und die stark erhöhten Simulationszeiten im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich erscheint.

5.2.1. Tiefensonde

Erste Simulationsversuche haben gezeigt, daß das in Kapitel 2 vorgestellte detaillierte Sondenmodell in Kombination mit dem gesamten Heizsystem sehr hohe Rechenzeiten verlangt. Eine Beschränkung auf rein radiale Wärmeleitung (wie sie in anderen ähnlichen Modellen auch vorgenommen wurde), scheint unter den gegebenen Bedingungen vertretbar zu sein. Die Sondenleistung weicht dabei nur maximal 2% von den unter Berücksichtigung axialer Wärmeleitung erzielten Ergebnissen ab. Zusätzlich wurde die Zahl der Erdreichsegmente auf 300 beschränkt, was zu einem um den Faktor 4 kleineren

²Eine passende Komponente ist hier bereits vorhanden.

Gleichungssystem gegenüber der doppelten Segmentzahl führt. Auch diese Änderung erzielt erhebliche Einsparungen in der Rechenzeit, ohne das Ergebnis stark zu beeinflussen.

5.2.2. Wärmepumpe

Für die Gesamtanlage wird das Modell einer gasmotorisch betriebenen Wärmepumpe mit Abwärmenutzung benötigt.

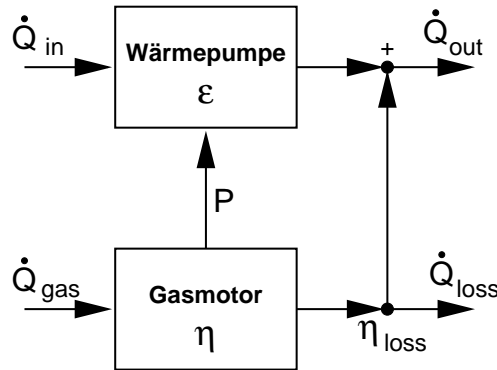


Abbildung 5.2.: Darstellung des einfachen Wärmepumpenmodells

Die Modellierung der Wärmepumpensystems inklusive Motor erfolgt hier auf Grundlage einfacher Energiebilanzen. Hierbei bedeuten ϵ die Leistungszahl, η den mechanischen Motorwirkungsgrad und η_{loss} den Grad der Abwärmenutzung. Es ergeben sich in Anlehnung an Abb. 5.2 folgende Bilanzen:

$$P = \dot{Q}_{gas} \cdot \eta, \quad (5.1)$$

$$\dot{Q}_{out} = P \cdot \epsilon + \dot{Q}_{gas} \cdot (1 - \eta) \cdot \eta_{loss}, \quad (5.2)$$

$$= \dot{Q}_{gas} \cdot (\epsilon + \eta_{loss} \cdot (1 - \eta)), \quad (5.3)$$

$$\dot{Q}_{in} = \dot{Q}_{gas} \cdot \eta \cdot (\epsilon - 1), \quad (5.4)$$

$$\dot{Q}_{loss} = \dot{Q}_{gas} \cdot (1 - \eta) \cdot (1 - \eta_{loss}). \quad (5.5)$$

Die Energiebilanzen am Fluid auf Quell- und Heizseite stellen den Zusammenhang mit den Temperaturen her:

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_{in} \cdot c_{P,in} \cdot \Delta T_{in}, \quad (5.6)$$

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m}_{out} \cdot c_{P,out} \cdot \Delta T_{out}. \quad (5.7)$$

Die Bestimmung der Leistungszahl ϵ und des Leistungsfeldes in Abhängigkeit von den Verdampfungs- und Kondensationstemperaturen des Kältemittels erfolgt auf der Grundlage von Gleichungen, die das Betriebsverhalten realer Wärmepumpen mit genügender

Genauigkeit wiedergeben. Sowohl diese Gleichungen (NINNEMANN 1995) als auch die hier eingesetzten Parameter basieren auf Angaben der Firma YORK³. Die Leistungszahl einer Wärmepumpe ϵ_{WP} steht in Bezug zur Leistungszahl einer Kältemaschine durch $\epsilon_{WP} = 1 + \epsilon_{KM}$. Mit Hilfe der Fluidaustrittstemperaturen auf Quell- und Heizseite⁴ T_{min} und T_{max} , der Temperaturdifferenzen in Verdampfer und Kondensator ΔT_{Verd} und ΔT_{Kond} sowie eines Gütegrades η_G ist die Leistungszahl bestimmt durch:

$$\epsilon_{KM} = \eta_G \cdot \left(\frac{T_{min} - T_{max}}{(T_{max} - \Delta T_{Kond}) - (T_{min} - \Delta T_{Verd})} \right). \quad (5.8)$$

Das Leistungsfeld kann mit Hilfe der Parameter a und b , der Auslegungstemperaturen $T_{min,0}$ und $T_{max,0}$, sowie der Auslegungsverdampferleistung $\dot{Q}_{in,0}$ beschrieben werden:

$$\dot{Q}_{in} = \dot{Q}_{in,0} \cdot (1 - a \cdot (T_{max} - T_{max,0})) \cdot (1 + b \cdot (T_{min} - T_{min,0})). \quad (5.9)$$

Dieses Wärmepumpenmodell (ohne und mit Abwärmenutzung) ist in den Modellklassen `HeatPumpChar` bzw. `HeatPumpCharGas` implementiert.

5.2.3. Rohrmodell

Das einfache diskretisierte Rohrmodell basiert auf denselben Ansätzen wie das für die Erdsonde erstellte Doppelrohrmodell (siehe Kapitel 2.2). Die Energiebilanz eines Rohrsegmentes i läßt sich formulieren als:

$$\frac{\partial T[i]}{\partial t} = \frac{\dot{m} \cdot c_P[i] \cdot (T[i-1] - T[i]) - l[i] \cdot k_R[i] \cdot (T[i] - T_{env})}{V[i] \cdot \rho[i] \cdot c_P[i]} \quad (5.10)$$

k_R kennzeichnet hier den bei Rohren wie üblich auf die Länge bezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten. Dieses simple Modell ist in der Lage, die Wärmeverluste des Rohres und die von der Strömungsgeschwindigkeit abhängige Rohrverzögerung darzustellen. Beide Eigenschaften sind wichtig für die Nachbildung des Nahwärmesystems. Auf die genaue Berechnung des Wärmeüberganges kann bei großen gut isolierten Rohren in diesem Fall verzichtet werden. Das beschriebene Modell ist in der Klasse `TubeDiscSimple` implementiert.

5.2.4. Verbrauchsmodell

Als Verbraucher wird vereinfachend ein einzelner Energieübertrager (Wärmetauscher) angenommen, der einem Fluidstrom eine festgelegte Leistung entzieht. Der Massenstrom

³ YORK International GmbH, Mannheim

⁴ Hier muß die Austrittstemperatur aus der Wärmepumpe eingesetzt werden, nicht die des Abgaswärmetauschers!

kann so geregelt werden, daß die Rücklauftemperatur möglichst konstant gehalten wird. Dieses Verhalten ist in der Modellklasse `LoadStationSimple` implementiert.

Die Berechnung der zeitabhängigen Leistungsnachfrage für Heizbedarf und Warmwasserbereitung übernimmt die Modellklasse `HeatingLoadSimple`. Hier wird in Abhängigkeit von der Außentemperatur der Heizbedarf bestimmt und mit einem vorgegebenen Warmwasserbedarf – entweder konstant oder durch ein von einer anderen Komponente vorgegebenes Zapfprofil – zu einem Gesamtbedarf addiert.

5.2.5. Weitere Modelle

Die sehr komplexe Regelung der gesamten Anlage wird, aufbauend auf verschiedenen Hilfskomponenten (Hystereseschalter, Logikbausteine), durch eine Vielzahl von Gleichungen beschrieben. Da gerade die Auslegung und Optimierung der Regelung ein Gegenstand der weiteren Untersuchungen sein soll, wird an dieser Stelle auf eine genaue Beschreibung verzichtet.

Verschiedene weniger umfangreiche Modelle, z.B. für Ventile und T-Stücke, mußten teilweise neu erstellt oder angepaßt werden.

5.3. Simulation des Systems

Zur Untersuchung dieses Heizsystems werden eine Vielzahl von Simulationsläufen durchgeführt, um die technischen Möglichkeiten der Kopplung von Kollektoren und Tiefen-sonde zu ermitteln. Einen Schwerpunkt bildet die Optimierung der Regelung, um die gegenseitige “Verdrängung” der beiden Energiequellen zu minimieren. Gleichzeitig werden, basierend auf Rechnungen mit Variationen der Kollektorgröße, der Wärmepumpenauslegung u.ä., die wirtschaftlichen Parameter sinnvoller Anlagenvarianten bestimmt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in [LIEBISCH 1998](#) veröffentlicht.

Ein vorläufiges Ergebnis solcher Berechnungen ist in [Abb. 5.3](#) dargestellt. Hier werden die einzelnen Anteile am Gesamtenergieeinsatz für eine Beispielkonfiguration (siehe [Tabelle 5.1](#)) gezeigt. Die Einsparung an Gas und Emissionen bezogen auf einen herkömmliches Gaskesselheizsystem liegt bei ca. 48%.

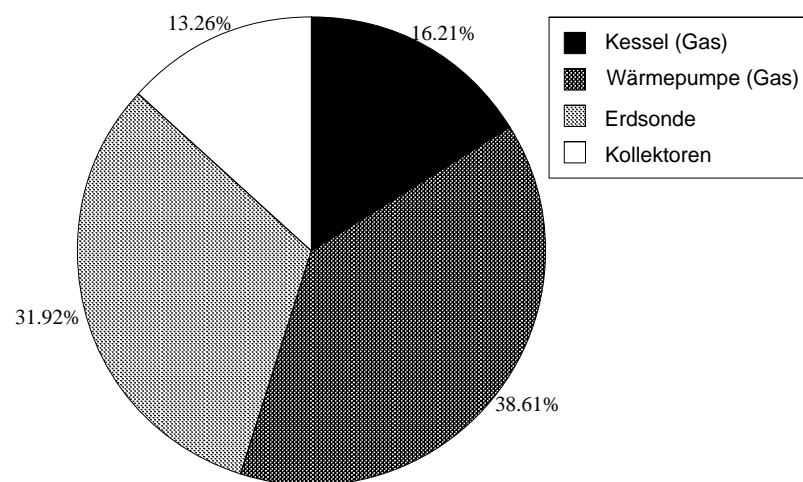


Abbildung 5.3.: Anteile der Komponenten am Gesamtenergieeinsatz

6. Schlußbetrachtungen

6.1. Ergebnisse der Untersuchungen

6.1.1. Auslegung und Betrieb der Tiefensonde

Die Kenntnis der genauen Bedingungen im Untergrund ist sehr wichtig für die Erstellung von Ertragsprognosen und die darauf basierende technische und wirtschaftliche Auslegung einer Tiefensonde. Die Sondenleistung hängt stark von den Stoffeigenschaften und dem Temperaturprofil im Untergrund ab. Diese Parameter sind meist nur unzureichend bekannt. Selbst beim Standort Potsdam, für den ein ausführliches geologisches Gutachten vorliegt, können große Abweichungen von den angenommenen Werten nicht ausgeschlossen werden. Bei ungünstiger Kombination dieser Abweichungen muß mit einem Fehler bei der Abschätzung der Sondenleistung von bis zu 30% gerechnet werden.

Durch eine Änderung von Rohrmaterial und -durchmesser ist keine nennenswerte Steigerung der Sondenleistung erzielbar. Die Sondenlänge stellt hier den einflußreichsten Parameter dar. Eine längere Sonde ist technisch einfach realisierbar, der begrenzende Faktor sind dabei die Bohrkosten. Das wirtschaftliche Optimum hängt nicht nur von den geologischen Gegebenheiten und den spezifischen Bohrkosten am geplanten Standort ab, sondern auch von den voraussichtlichen Betriebsparametern.

Die mit der hier betrachteten Tiefensonde erzielbaren Temperaturen reichen nicht für eine direkte Nutzung der Sondenwärme zu Heizzwecken aus. Der Einsatz von Wärmepumpen bietet sich daher an. Die im Betrieb auftretenden Sondenaustrittstemperaturen weisen starke Schwankungen auf. Eine direkte Nutzung der Temperaturspitzen ist wegen der noch zu geringen Temperaturen nicht möglich. Die Nutzung durch die Wärmepumpe ist technisch schwierig zu realisieren, da Wärmepumpen normalerweise eine maximal zulässige Eintrittstemperatur auf der Quellseite haben. Es ist empfehlenswert Wärmepumpen einzusetzen, die auf schwankende Quelltemperaturen flexibel reagieren können, um die sich auch nach längerem Betrieb noch ändernden Sodontemperaturen optimal nutzen zu können.

Beim Einsatz einer Wärmepumpe muß das Gesamtsystem zur Ermittlung der sinnvollsten Auslegung betrachtet werden. Wärmepumpen mit geringem Temperaturhub arbeiten energetisch günstiger als solche mit hohen Temperaturdifferenzen zwischen Quell-

und Heizseite. Hohe Rücklauftemperaturen in die Sonde, die zu einer hohen Leistungsziffer der Wärmepumpe führen, verringern gleichzeitig die nutzbare Sondenleistung und bedingen Verluste an die kühlen oberen Erdschichten.

Eine Erhöhung des Massenstromes steigert nur begrenzt die Sondenleistung, verringert allerdings die Sondenaustrittstemperaturen stark. Auch dieser Effekt verlangt eine gemeinsame, gegenseitig angepaßte Auslegung von Tiefen-sonde und Wärmepumpe. Das Langzeitverhalten der Sonde macht es notwendig, dabei lange Betriebszeiträume zu betrachten, um eine optimale Auslegung zu finden.

6.1.2. Kombination mit Solarkollektoren

Technische Möglichkeiten

Die Untersuchungen in den Abschnitten 4.2 und 4.3 haben gezeigt, daß grundsätzlich die Möglichkeit besteht, durch den Einsatz eines zweiten Versorgungssystems Synergieeffekte zu erzielen. Eine Nutzungspause der Tiefen-sonde ermöglicht die teilweise Regeneration der Erdtemperaturen und führt zu höheren Sondenleistungen im nachfolgenden Betrieb¹. Dieser Effekt kann analog zu einer Energiespeicherung betrachtet werden, da das Energieangebot zeitlich verschoben wird. Je länger die Regenerationspausen sind, desto schwächer wird allerdings der dadurch erzielbare Nutzen. Der analog zu einem Speicherwirkungsgrad ermittelte Verschiebungswirkungsgrad liegt für eine saisonale Betriebsweise mit maximal 30% weit unterhalb der Werte von echten Speichersystemen.

Die Einspeicherung von Energie in das Erdreich über die Tiefen-sonde ist möglich, wird jedoch durch den oben beschriebenen Regenerationseffekt erschwert. Je weiter die natürliche Regeneration der Erdtemperaturen vorangeschritten ist, desto schwieriger ist eine Einspeicherung. Schon nach relativ kurzer Zeit kann in tieferen Erdschichten keine Energie mehr an das Gestein übertragen werden. Die Speicherung in geringeren Tiefen ist trotzdem möglich, jedoch kann später –bedingt durch die Linienstruktur der Sonde, die geringe Wärmeübertragungsfläche und die fehlende Isolierung– nur ein geringer Teil dieser Energie wiedergewonnen werden. Bei der Energiespeicherung über die Sonde überlagern sich der Verschiebung- oder Regenerationseffekt und die wirkliche Einspeicherung. Beide Effekte zeigen eine deutliche Abnahme des Wirkungsgrades mit der Zeit.

Wenn im Sommer die Kollektoren ihren Maximalertrag haben, ist das Erdreich durch die verringerte Energieentnahme in der Übergangszeit schon teilweise regeneriert, eine Einspeicherung ist nur sehr begrenzt möglich. Die Erhöhung der Sondenleistung ist kurz nach der Einspeicherung am deutlichsten, hier ist aber der Energiebedarf noch relativ gering.

¹ Diese hohen Leistungen sind natürlich nur bei entsprechend großzügiger Auslegung der Wärmepumpe auch nutzbar!

Ausgehend von den oben beschriebenen Untersuchungen erscheint die Tiefensole nicht als eine Alternative zu herkömmlichen saisonalen Wärmespeichern. Gerade in Bezug auf Solarkollektoren ist es nicht sinnvoll, die erzeugte Energie in die Erde einzuspeichern, sie später mit einem geringen Wirkungsgrad auf einem niedrigeren Temperaturniveau wiederzugewinnen und durch die Wärmepumpe unter Einsatz von fossilen Brennstoffen zu Heizzwecken nutzbar zu machen. Eine direkte Nutzung der regenerativen Solarenergie sollte Vorrang haben und durch die Betriebsführung einer solchen kombinierten Anlage maximiert werden.

Zur kurzzeitigen Aufnahme von Energie bei Stagnationsproblemen des Kollektors kann die Tiefensole dennoch dienen.

Ökologische und wirtschaftliche Gesichtspunkte

Die über die rein technischen Belange hinausgehenden Synergieeffekte einer kombinierten Anlage wurden in dieser Arbeit bisher nicht betrachtet. Aufbauend auf den in Kapitel 5 angedeuteten Simulationsrechnungen des kombinierten Heizsystems werden die wirtschaftlichen Parameter ebenso ermittelt wie die Möglichkeiten zur regenerativen Deckung des Energiebedarfs (LIEBISCH 1998 und ERDMANN 1998).

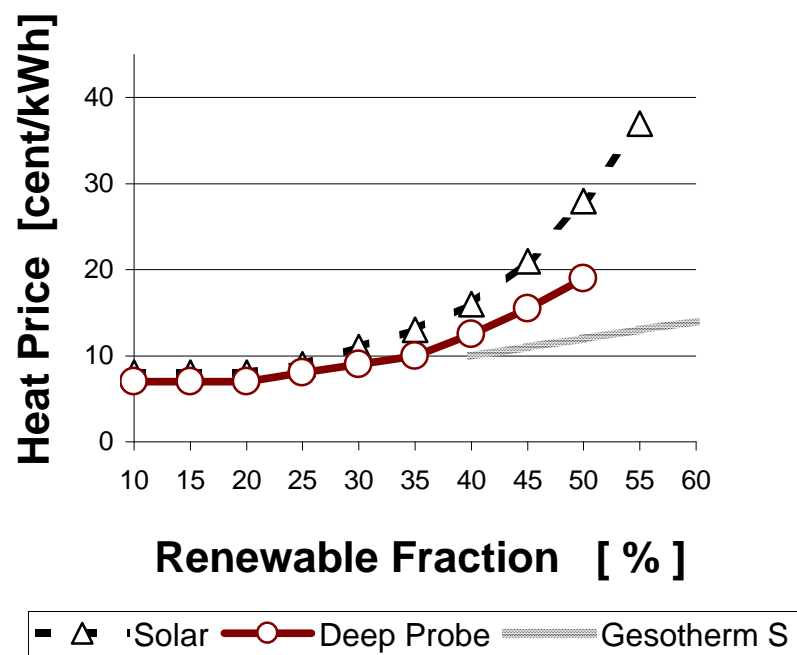


Abbildung 6.1.: Vergleich der Wärmepreise (Quelle: ERDMANN 1998)

Sowohl beim Einsatz von Solarkollektoren als auch bei der Tiefen-sonde steigen die Wärmekosten mit der Deckungsrate an. Gerade bei der Solarthermie muß eine hohe regenerative Deckung bedingt durch das zeitlich gegenläufige Verhalten von Energieangebot und Energiebedarf und die damit verbundene Speicherung durch hohe Energiepreise erkauf-
t werden. Die Tiefen-sonde kann bedingt durch den Gaseintrag der Wärmepumpe nur eine regenerative Deckungsrate von maximal 50% erreichen.

Durch die Kombination beider Systeme ist es möglich, hohe Deckungsra-ten bei vergleichsweise geringen Energiepreisen zu erzielen. Betrachtet man nur diesen Energiepreis, kann das System momentan nicht mit herkömmlichen fossilen Versorgungssystemen konkurrieren. Sind allerdings hohe regenerative Deckungsra-ten das Ziel, stellt das kombinierte System sicherlich eine interessante Alternative zu reinen solar- oder geothermischen Versorgungsvarianten dar.

6.2. Erfahrungen mit der Simulation in SMILE

Hier sollen einige Bemerkungen zu den Erfahrungen folgen, die während der Modellierung und Implementation der Modelle in SMILE gemacht wurden.

Die objektorientierten Eigenschaften der Modellsprache sind sehr gut geeignet, die schrittweise Modellerstellung, -validierung und -anpassung zu unterstützen, eine entsprechende Arbeitsweise vorausgesetzt. Die Gleichungsorientierung dieser Sprache, unterstützt durch die Trennung von Modell und Numerik, führt zu einer Übersichtlichkeit der Modelle, die besonders die Wartung und Fehlersuche auch für Programmierer vereinfacht, die mit dem entsprechenden Modell nicht vertraut sind.

Diese Trennung der Numerik vom Modell in Verbindung mit dem simultanen Lösungsverfahren kann gerade dort ihre großen Vorteile ausspielen, wo viele kleinere Modelle mit unterschiedlichen Ansätzen (dynamisch – stationär, (un-)diskretisiert etc.) verknüpft werden. Bei den hier betrachteten Simulationen erwies sich das Fehlen einfacher Einflußmöglichkeiten auf den Löser allerdings auch als unkomfortabel. Das diskrete Sondenmodell, bestehend aus vielen hundert Gleichungen, benötigt viel Rechenzeit für einen Integrationsschritt, könnte durch die hohen Zeitkonstanten allerdings sehr große Zeitschritte bei der Integration in Kauf nehmen. Der Rest der Anlage beinhaltet vergleichsweise wenige und weniger rechenintensive Gleichungen, verhält sich aber dynamischer und benötigt durch kurzzeitige Schwankungen und Schaltvorgänge kurze Integrationsschritte. Beide Teile für sich benötigen aufgrund der Schrittweitensteuerung nicht übermäßig viel Rechenzeit. In der Kombination entsteht allerdings ein sehr großes und gleichzeitig steifes Gleichungssystem, welches komplett in sehr kurzen Zeitschritten gelöst werden muß. Je nach Computertyp benötigt eine Jahressimulation der kompletten Anlage bis zu mehreren Tagen, womit die Grenze der Machbarkeit von ausführlichen Parameterstudien markiert wird.

Die Schaffung von Möglichkeiten zur einfachen Anbindung von Sublösern würde hier sehr vorteilhaft sein². Die Simulation einer komplexen Anlage unter Nutzung von mehrdimensionalen, hoch diskretisierten Modellen —wie sie an vielen Stellen benötigt werden— würde extrem erleichtert oder (in Bezug auf die Rechenzeit) erst ermöglicht.

6.3. Ausblick

Mit der in dieser Arbeit dokumentierten Entwicklung und Implementation eines Modells der geothermischen Tiefensonde ist es möglich geworden, detaillierte simulationsbasierte Untersuchungen an der Sonde durchzuführen. Gleichzeitig kann das dynamische Zusammenspiel der Sonde mit anderen Komponenten wie einer Wärmepumpe oder Solarkollektoren analysiert werden.

Solche Untersuchungen werden momentan im Rahmen der oben erwähnten Machbarkeitsstudie durchgeführt, um die bisherigen Prognosen der wirtschaftlichen und technischen Kopplungsmöglichkeiten von geothermischen und solarthermischen Energieversorgungssystemen zu untermauern oder zu widerlegen.

Die geschlossene Tiefensonde wird zur Zeit von vielen Experten bei neu zu errichtenden Versorgungssystemen nicht als Alternative zu herkömmlichen Geothermiesystemen gesehen. Ein Potential für den Einsatz der Tiefensonde besteht jedoch. Ob sich die Nutzung nur bei einigen der Hunderte bisher ungenutzter Bohrlöcher lohnt oder an Standorten, die geologisch für andere Systeme ungeeignet sind, oder auch als echte Alternative zu anderen Versorgungsvarianten, wird sich in den nächsten Jahren herausstellen.

² An dieser Möglichkeit arbeiten die SMILE-Entwickler momentan

Abbildungsverzeichnis

1.1. Konzepte für die Langzeitwärmespeicherung	7
1.2. Funktionsschema eines offenen geothermischen Systems	8
1.3. Schnittzeichnung der Tiefensonde	10
2.1. Einfaches Zylindermodell	16
2.2. Diskretisierung des Zylindermodelles	17
2.3. Bestimmung des Wärmeleitwertes als Randbedingung	21
2.4. Vererbungshierarchie der Erdreichklassen	22
2.5. Vergleich der Ergebnisse von TFELD und SMILE	23
2.6. Axiale Wärmeleitung im stationären Fall	24
2.7. Vergleich der Temperaturgradienten im stationären Fall	25
2.8. Darstellung des Diskretisierungsfehlers	26
2.9. Modell des Doppelrohres	27
2.10. Vererbungshierarchie der Rohrklassen	32
2.11. Transportverzögerung eines Temperatursprunges am Doppelrohr	34
2.12. Aufbau des Erdsondenmodells aus Einzelmodellen	36
3.1. Vergleich der Simulation mit Meßdaten	41
4.1. Massenstromabhängigkeit der Ausgangstemperatur	46
4.2. Massenstromabhängigkeit der Sondenleistung	46
4.3. Abhängigkeit der Sondenausgangstemperatur von der Einspeisetemperatur	47
4.4. Abhängigkeit der Sondenleistung von der Einspeisetemperatur	48
4.5. Sondenleistungen nach Regenerationspausen	49

4.6.	Erdtemperaturen nach Extraktion, Regeneration und Einspeicherung . . .	51
4.7.	Sondenleistungen nach Einspeicherung	51
4.8.	Gegenüberstellung von kontinuierlichem Betrieb, Regenerations- und Einspeicherphasen	53
5.1.	Schaltbild des GESOTHERM S-Systems	55
5.2.	Darstellung des einfachen Wärmepumpenmodells	58
5.3.	Anteile der Komponenten am Gesamtenergieeinsatz	61
6.1.	Vergleich der Wärmepreise (Quelle: ERDMANN 1998)	65

Tabellenverzeichnis

4.1. Einfluß von Regenerationspausen auf die Energieförderung	50
4.2. Einfluß von Einspeicherung auf die Energieförderung	52
5.1. Rahmenbedingungen für das Versorgungssystem	56

Zeichenerklärung

Zeichen	Beschreibung	Einheit
A	Fläche	m^2
a	Index für <i>axial</i>	—
a	Temperaturleitfähigkeit	m^2/s
c, c_p	spezische Wärmekapazität	$J/(kg \cdot K)$
C	Wärmekapazität	J/K
d	Durchmesser	m
i	Index für <i>inner</i>	—
i	allgemeine Laufvariable	—
i	radiale Laufvariable im Erdreichmodell	—
j	Laufvariable im Rohrmodell	—
k	axiale Laufvariable im Erdreichmodell	—
k	Wärmedurchgangskoeffizient	$W/(m^2 \cdot K)$
k_R	Wärmeverlustkoeffizient eines Rohres	$W/(m \cdot K)$
L	Wärmeleitwert	W/K
l	Länge	m
m	Masse	kg
\dot{m}	Massenstrom	kg/s
Nu	Nusseltzahl	—
o	Index für <i>outer</i>	—
P	Leistung	W (kW, MW)
Pr	Prandtlzahl	—
Q	Wärmemenge	J (kWh)
\dot{Q}	Wärmestrom	W
\dot{q}	spezifischer Wärmestrom	W/m^2
Re	Reynoldszahl	—
r	Index für <i>radial</i>	—
r	Radius	m
T	Temperatur	K ($^{\circ}C$)
V	Volumen	m^3
\dot{V}	Volumenstrom	m^3/s
v	Geschwindigkeit	m/s
x	Koordinate	—

Zeichen	Beschreibung	Einheit
y	Koordinate	—
z	Koordinate	—
α	Wärmeübergangskoeffizient	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
ϵ	Leistungszahl	—
ϵ_{WP}	Leistungszahl einer Wärmepumpe	—
ϵ_{KM}	Leistungszahl einer Kältemaschine	—
η	dynamische Viskosität	$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$
η	mechanischer Motorwirkungsgrad	—
η_{loss}	Wirkungsgrad der Abwärmenutzung	—
η_G	Gütegrad einer Wärmepumpe/Kältemaschine	—
λ	spezifische Wärmeleitfähigkeit	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
ν	kinematische Viskosität	m^2/s
ρ	Dichte	kg/m^3

Literaturverzeichnis

- AHRENS 1995 Thomas J. Ahrens: **Rock physics and phase relations: a handbook of physical constants**, American Geophysical Union, Washington, 1995
- BAEHR 1996 Hans Dieter Baehr, Karl Stephan: **Wärme- und Stoffübertragung**, Zweite Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 1996
- CARSLAW 1959 H. S. Carslaw, J. C. Jaeger: **Conduction of Heat in Solids**, Reprint of Second edition (1959), Oxford University Press Inc. New York, 1996
- CROFT 1977 David R. Croft, David G. Lilley: **Heat Transfer Calculations Using Finite Difference Equations**, Applied Science Publishers LTD, 1977
- DALENBÄCK 1993 Jan-Olof Dalenbäck: **Solar heating with seasonal storage — Some aspects of the design and evaluation of systems with water storage**, Doktorarbeit, School of Civil Engineering, Chalmers University of Technology Göteborg, 1993
- ERDMANN 1998 Prof. Dr. G Erdmann, J. Hinrichsen, Dr. H. Liebisch, J. Rädler, T. Schrag: **Heat supply with renewable energy: A proposal for an economically feasible solution**, Technische Universität Berlin, 1998
- FISCH 1992 N. Fisch, R. Kübler: **Wärmespeicher, BINE-Informationspaket**, Fachinformationszentrum Karlsruhe, Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1992
- FLECKENSTEIN 1996 Philip Fleckenstein: **Numerische Berechnungen zur Bestimmung der Wärme- und Temperaturleitfähigkeit aus instationären Linienquellenmessungen**, Diplomarbeit, Technische Universität Berlin, 1996
-

- GLÜCK 1989 Bernd Glück: **Wärmeübertragung - Wärmeabgabe von Raumheizflächen und Rohren**, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1989
- GRIGULL 1979 U. Grigull, H. Sandner: **Wärmeleitung**, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 1979
- KALTSCHMITT 1995 Martin Kaltschmitt: **Erneuerbare Energien**, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 1995
- KEMA 1995 I. Kraft: **Prenzlau geothermal deep probe: one year of trial operation**, KEMA IEV - Ingenieurunternehmen für Energieversorgung GmbH Dresden, 1995
- KEMA 1998 I. Kraft, Kunert, D. Schneider: **Kombinierte geothermische und solare Wärmeversorgung eines Wohngebietes im Bornstedter Feld in Potsdam**, KEMA IEV - Ingenieurunternehmen für Energieversorgung GmbH Dresden, 1998
- KHARTCHENKO 1996 N. Khartchenko: **Thermische Solaranlagen**, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 1996
- LIEBISCH 1998 Dr. H. Liebisch et al: **Untersuchung der Durchführbarkeit des solar-/geothermisch gestützten Wärmeversorgungssystems Geso therm S**, BMBF-Förderkennzeichen: 0329606N, Berlin, 1998, *Anmerkung: zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit noch unveröffentlicht*
- MEESE 1996 Steffen Meese, Jörg Rädler, Christian Waldhoff: **Energiebedarfsanalyse für ein ländliches Wohn- und Gewerbegebiet – Entwurf verschiedener Versorgungsvarianten unter Nutzung thermischer Solarenergie**, Studienarbeit, Technische Universität Berlin, 1996
- MINKOWYCZ 1988 W.J. Minkowycz, E. M. Sparrow, G. E. Schneider, R. H. Pletcher: **Handbook Of Numerical Heat Transfer**, John Wiley & Sons, Inc., 1988
- NINNEMANN 1995 Stephan Ninnemann: **Synthese des zeitabhängigen Energiebedarfs komplexer Gebäude**, Diplomarbeit, Technische Universität Berlin, 1995
- SEITZ H. Seitz: **WIROCO, Fortran-Rechenprogramm für die radiale und axiale Wärmeübertragung ...**, Kernforschungszentrum Karlsruhe, KFK-Bericht Nr. 2149, Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe
-

- VAN MEURS 1985 Gerardus Antonius Maria van Meurs: **Seasonal heat storage in the soil**, Doktorarbeit, Technische Hochschule Delft, 1985
- WÄRMEATLAS 1994 Verein Deutscher Ingenieure: **VDI Wärmeatlas - Berechnungsblätter für den Wärmeübergang**, Auflage 7, VDI-Verlag 1994
- ZAPHOD 42 Autorenkollektiv: **Per Anhalter durch die Galaxis**, Megadodo-Verlage von Ursa Minor, zeitlos
-

A. Anhang

A.1. Geologische Parameter Prenzlau

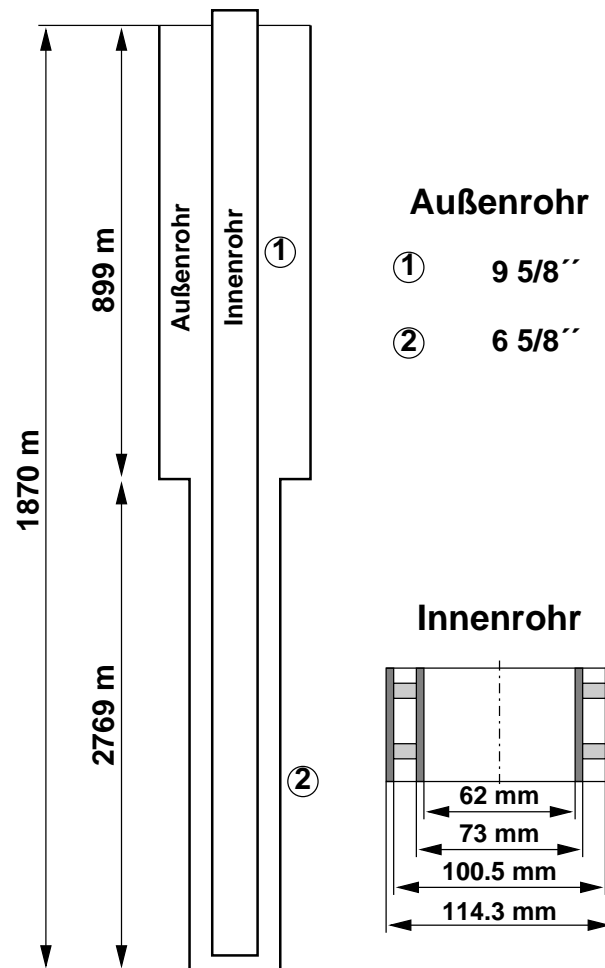
Schicht	Starttiefe m	c_P $\frac{J}{kg \cdot K}$	ρ $\frac{kg}{m^3}$	λ $\frac{W}{m \cdot K}$
Quartär	0	1684	1900	1.6
Tertiär	60	1012	2100	1.7
Kreide	200	659	2100	1.8
Jura	700	580	2300	2.0
Keuper	1100	667	2500	2.5
Muschelkalk	1650	704	2700	2.85
Buntsandstein	2000	769	2600	3.0
Zechstein	2800	800	2200	4.4

A.2. Geologische Parameter Potsdam

Schicht	Starttiefe m	c_P $\frac{J}{kg \cdot K}$	ρ $\frac{kg}{m^3}$	λ $\frac{W}{m \cdot K}$
Quartär	0	1684	1900	1.6
Tertiär	150	1012	2100	1.7
Kreide	200	659	2100	1.8
Jura	290	580	2300	2.0
Keuper	690	667	2500	2.5
Muschelkalk	1220	704	2700	2.85
Buntsandstein	1500	769	2600	3.0
Zechstein	2250	800	2200	4.4
Rotliegendes	3400			

A.3. Geometrie der Prenzlauer Sonde

Geometrie der Prenzlauer Sonde



A.4. Quelltexte der Simulationsmodelle

Die Quelltexte der Modelle werden an dieser Stelle nicht abgedruckt, da sie sehr umfangreich sind. Die dieser Arbeit beiliegende Diskette enthält alle genutzten Modelldateien.