

Kathrin Schröer

**Eine kompakte Sonde für Temperatur- und  
Wärmeleitfähigkeitsmessungen in den Geowissenschaften**



**Westfälische  
Wilhelms-Universität  
Münster**

2006



Geophysik

**Eine kompakte Sonde für Temperatur- und  
Wärmeleitfähigkeitsmessungen in den Geowissenschaften**

Inaugural-Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaften  
im Fachbereich Physik  
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät  
der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster

vorgelegt von

**Kathrin Schröer**

aus Lippstadt

– 2006 –

Dekan:	Prof. Dr. G. Münster
Erster Gutachter:	Prof. Dr. T. Spohn
Zweiter Gutachter:	Prof. Dr. E. K. Jeßberger
Tag der mündlichen Prüfung:	10.07.2006
Tag der Promotion:	10.07.2006



# Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>II</b>	<b>Theorie</b>	<b>7</b>
<b>1</b>	<b>Bestimmung thermischer Parameter</b>	<b>9</b>
1.1	Temperatur und Wärmekapazität . . . . .	10
1.1.1	Theoretische Grundlagen . . . . .	10
1.1.2	Verfahren zur Messung von Temperaturprofilen . . . . .	11
1.1.3	Temperatursensoren . . . . .	14
1.2	Wärmeleitung und Wärmeleitfähigkeit . . . . .	17
1.2.1	Physikalische Grundlagen der Wärmeleitung . . . . .	17
1.2.2	Verfahren zur Messung der Wärmeleitfähigkeit . . . . .	19
<b>2</b>	<b>Forschungsgebiete der Geowissenschaften</b>	<b>21</b>
2.1	Bodenkunde . . . . .	21
2.2	Glaziologie . . . . .	28
2.3	Baumaterialien und technische Werkstoffe . . . . .	29
2.4	Hydrogeologie . . . . .	30
2.5	Raumfahrt . . . . .	31

<b>III</b>	<b>Das Messsystem</b>	<b>33</b>
<b>3</b>	<b>Das Messsystem</b>	<b>37</b>
	<b>Thermalsonden und –sensoren</b> . . . . .	40
3.1	Thermalsonden . . . . .	40
3.2	Sensoren . . . . .	43
3.2.1	Herstellungsverfahren . . . . .	46
3.2.2	Kalibration der Thermalsonden . . . . .	49
3.2.3	Alterungsprozess der Sensoren . . . . .	54
	<b>Elektronik</b> . . . . .	54
3.3	Elektronik . . . . .	54
3.4	Datenstruktur . . . . .	57
3.5	Umrechnung von Messwerten . . . . .	58
	<b>Messverfahren</b> . . . . .	59
3.6	Das Messverfahren . . . . .	59
	<b>Software</b> . . . . .	61
3.7	Software . . . . .	61
<b>IV</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>71</b>
<b>4</b>	<b>Temperaturprofilmessungen</b>	<b>75</b>
4.1	Bodenkunde . . . . .	75
4.1.1	Dämpfung und Phasenverschiebung von Temperaturextrema . . . . .	75
4.1.2	Bestimmung thermischer Parameter von Böden mit geringen Temperaturunterschieden . . . . .	80
4.2	Glaziologie . . . . .	89

---

4.2.1	Temperaturprofile in Schnee und Eis unter wechselnden Wetterperioden auf Spitzbergen . . . . .	89
4.2.2	Wachstum einer Eisschicht unter Laborbedingungen . . . . .	110
4.2.2.1	Das STEFAN-Problem im Laborversuch . . . . .	120
4.3	Hydrogeologie . . . . .	123
4.3.1	Evaluation der Nutzung von Thermalsonden in Rammkernsonden im Labor und im Feld . . . . .	123
4.3.2	Detektion von Wasserintrusionen im Boden . . . . .	127
4.4	Zusammenfassung der Temperaturprofilmessungen . . . . .	130
<b>5</b>	<b>Methoden und Messungen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit</b>	<b>131</b>
5.1	Andere Methoden . . . . .	132
5.2	Auswerteverfahren: 2-D FEM-Modellierung mit FEMLAB <sup>®</sup> . . . . .	135
5.3	Einfluss von Heizdauer, Heizleistung und Sensorgröße auf die Ergebnisse . .	141
5.4	Anwendungsbeispiele . . . . .	144
	<b>Glaziologie</b> . . . . .	<b>144</b>
5.4.1	Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit eines Schneepakets in zwei Tiefen	144
5.4.2	Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Neuschnee unter natürlichen Bedingungen . . . . .	148
	<b>Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von <i>Space-Analog</i>-Materialien</b> . .	<b>148</b>
5.4.3	Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Mars-Analogmaterial in Abhängigkeit von der Feuchte . . . . .	149
5.4.4	Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Porosität . . . . .	154
	<b>Werkstoffen/Baumaterialien</b> . . . . .	<b>159</b>
5.4.5	Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Baumaterialien . . . . .	159
5.4.6	Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Teflon, Glasschaum und Sand	164
5.5	Zusammenfassung der Wärmeleitfähigkeitsmessungen . . . . .	171

<b>6 Diskussion, Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>173</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>178</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>181</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>187</b>
<b>Schaltpläne und Skizzen</b>	<b>188</b>
<b>Literaturwerte</b>	<b>198</b>
<b>Danksagung</b>	<b>200</b>
<b>Lebenslauf</b>	<b>203</b>

# Teil I

## Einleitung



---

*„Zwei Dinge sind zu unserer Arbeit nötig:*

*Unermüdliche Ausdauer und die Bereitschaft, etwas,*

*in das man viel Zeit und Arbeit gesteckt hat, wieder wegzuerwerfen.“*

**Albert Einstein**

Die Temperatur ist eine elementare Zustandsgröße der klassischen Thermodynamik. Ihre Masseinheit Kelvin ist eine der sieben Grundeinheiten (neben denen der Länge, Masse, Zeit, elektrischem Strom, Substanzmenge und Lichtstärke) im international gebräuchlichen *Systeme International d' Unite's*, abgekürzt SI-System.

Mit der Temperatur lässt sich der thermische Zustand eines Stoffes oder Körpers beschreiben. Für die Erde und sämtliche Prozesse, die sich auf und in ihr abspielen, sind die thermischen Eigenschaften wie die Temperatur, die Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit wichtige Parameter. So ist zum Beispiel die Temperaturverteilung im Erdinnern eine entscheidende Zustandsgröße der Erde. Vulkane, Intrusionen, Erdbeben und Metamorphismen werden durch den Transfer und die Erzeugung von Wärme angetrieben. Der Wärmehaushalt der Erde kontrolliert die Aktivität der Lithosphäre und Asthenosphäre genauso wie die Entwicklung der innersten Struktur der Erde (Fowler 2004)<sup>1</sup>.

Wärme erreicht die Erdoberfläche aber nicht nur aus ihrem Innern sondern auch aufgrund von Sonneneinstrahlung. Aus geologischer Perspektive ist die Wärme der Sonne wichtig, da sie den Wasserkreislauf, den Regen und infolgedessen die Erosion antreibt.

Aber nicht nur für großskalige Vorgänge auf der Erde spielt die Temperatur eine wichtige Rolle, auch oberflächennah sind thermische Eigenschaften entscheidend für viele Vorgänge in der Natur. Die thermischen Eigenschaften können wichtige Informationen liefern; so ist die Wärmeleitfähigkeit beispielsweise ein Maß für die Feuchte im Boden.

In der Glaziologie ist es unter anderem die Temperatur des Schnees, die das Gefüge verändert und bestimmt. Die Beobachtung der thermischen Eigenschaften des Schnees ist ein wichtiges Aufgabenfeld der Glaziologie. Aber auch in vielen anderen Gebieten der Geowissenschaften oder auch der Ingenieurwissenschaften spielen die Bestimmung von Temperaturprofilen und Wärmeleitfähigkeiten eine wichtige Rolle. Bauwesen, Vulkanismus, Weltraumforschung, Lage von Permafrostschichten in Böden (zum Beispiel beim Eisenbahnbau in Sibirien), Zufrier- und Auftauverhalten von Seen, Kontrolle des durch exotherme Zersetzung entstehenden Wärmeflusses auf Mülldeponien, Hydrogeologie, Oberflächenwärmefluss und Bestimmung von Eichwerten für die Fernerkundung sind nur einige Beispiele.

---

<sup>1</sup>Anmerkung für Literaturzitate: Zitate, die in oder am Ende eines Satzes stehen, beziehen sich auf diesen. Befindet sich das Literaturzitat alleinstehend am Ende eines Absatzes, beziehe ich mich auf den gesamten Teil davor.

Wie wichtig oberflächennahe Anwendungen in der Geophysik mittlerweile geworden sind, wird am Beispiel an aktuellen Aktivitäten der AGU (*American Geophysical Union*) deutlich. Dort wurde kürzlich eine neue *Focus Group* namens *Near Surface Geophysics* (NSGP) gegründet, die sich speziell mit dem Forschungsgebiet der nahen Grenzschicht der Erde, als den obersten Metern der Erdkruste beschäftigt. Die in dieser Arbeit vorgestellten Thermalsonden sind gezielt für den Bereich der oberflächennahen Prospektion entwickelt worden. Messungen von vertikalen Temperaturprofilen und der Wärmeleitfähigkeit sind Standardanwendungen in den Geowissenschaften, für die bereits verschiedene Messmethoden existieren. Der zu untersuchende Tiefenbereich kann dabei sehr ausgedehnt, beispielsweise bei Messungen des Wärmeflusses aus dem Erdinnern, oder auch relativ stark lokalisiert sein, wenn oberflächennahe Vorgänge wie zum Beispiel das tägliche Eindringen der Wärmewelle in den Boden untersucht werden. Bei größeren Tiefenlagen werden Thermalmessungen häufig in bereits existierenden Bohrungen oder manchmal auch in Bergbauschächten durchgeführt, da solche Bohrungen sehr kostenintensiv sind. Bei Untersuchungen geringerer Tiefenlagen (bis etwa 2 m Tiefe) werden in der Regel genügend große Löcher ausgehoben und der Boden angeschnitten, um dort einzelne Temperatursensoren einzusetzen. Diese Methode bringt allerdings erhebliche Nachteile mit sich, die durch das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Messsystem vermieden werden.

Besonders schwerwiegend sind diese Probleme, wenn es darum geht, die Wärmeleitfähigkeit eines Materials zu bestimmen. Hierzu werden üblicherweise Materialproben entnommen und die Wärmeleitfähigkeit im Labor bestimmt. Die Probe befindet sich hierbei aber nicht mehr in ihrem natürlichen Temperaturumfeld, die Beobachtung der zeitlichen Entwicklung unter natürlichen veränderlichen Bedingungen ist damit ausgeschlossen. Daher sind hohe Fehlerangaben bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit eines Materials keine Seltenheit. Es gibt zwar bereits einige wenige Messgeräte, mit denen die Wärmeleitfähigkeit auch im Gelände bestimmt werden kann, jedoch handelt es sich hierbei stets nur um punktuelle Messmethoden, Profilmessungen sind bisher kaum möglich. Außerdem sind keine langfristigen Messungen möglich, da die Messgeräte nicht für längere Feldmessungen konzipiert sind, sondern in ihrem Design eher Laborgeräten entsprechen. Hier gibt es also ein großes Feld für Verbesserungen.

Um die oben genannten Nachteile und die daraus resultierenden Messunsicherheiten zu minimieren, beziehungsweise die Verfahren zu verbessern, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein neues Messsystem entwickelt. Ziel des Projektes war die Entwicklung und Bereitstellung eines Gesamtsystems zur Messung von vertikalen Temperatur- und Wärmeleitfähigkeitsprofilen für den Einsatz bei oberflächennahen (geowissenschaftlichen) Feldmessungen. Das System besteht aus Thermalsonden, Elektronik zur Steuerung der Messungen, Datenerfassung und Auswertung, Stromversorgung und Benutzersoftware. Am Ende des Projektes steht ein Gesamtsystem, das seine Eignung und Reife bei Demonstrationsmessungen



unter realen Einsatzbedingungen bewiesen hat.

Die Idee zu diesem Projekt entstammt der Raumfahrt, aus diesem Grund wurde die Arbeit am Institut für Planetologie unter Förderung des DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) angefertigt. Das Projekt, aus dem das Konzept der Thermalsonde entstanden ist, heißt **MUPUS** (*MULTI PURPOSE Sensors for surface and subsurface science*) und ist ein Instrument der *ROSETTA*-Mission der ESA, die im Januar 2004 zum Kometen Churyamov-Gerasimenkow gestartet ist. Ziel der Mission ist es, Informationen über die Energiebilanz der oberflächennahen Schichten des Kometennukleus zu gewinnen. Im Rahmen eines *spin-off*-Projektes unter dem Namen **EXTASE** (*EXperimental Thermal probe for Application in Snow- and Earth sciences / EXperimentelle Thermalsonde für die Anwendung in der Schneeforschung und den Erdwissenschaften*) wurde das MUPUS-Messsystem auf die Anforderungen der Geowissenschaften übertragen.

In dieser Arbeit wird die Entwicklung dieses EXTASE-Gesamtsystems für die Bestimmung thermischer Parameter, bestehend aus Elektronik, Thermalsonden und Benutzersoftware, beschrieben. Dabei wurden zunächst die technischen Anforderungen definiert, die das neue Messsystem erfüllen soll. Danach wurden Prototypen hergestellt und getestet. Während dieser Testphase wurden Punkte Verbesserungsmöglichkeiten aufgedeckt, die dann entsprechend in der Weiterentwicklung umgesetzt wurden. Parallel dazu wurde die Benutzersoftware entwickelt. Nachdem ein lauffähiges, zuverlässiges Gesamtsystem fertig gestellt war, wurden zahlreiche weitere Messungen durchgeführt, um die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit zu demonstrieren. Im Rahmen dessen wurden mehrere Anwendungsgebiete aus dem Bereich der Geowissenschaften, sowie der Ingenieurwissenschaft, abgedeckt, um so einen großen Bereich an Materialien und Umgebungsbedingungen abzudecken. Dabei wurden unter anderem Temperaturprofile in Böden und Schneepaketen sowie die Wärmeleitfähigkeiten verschiedenster Materialien sowohl im Labor als auch unter Feldmessbedingungen gemessen.

Die Arbeit ist so strukturiert, dass zunächst die Grundlagen und üblichen Messmethoden der betrachteten thermischen Parameter zusammengefasst werden (Kapitel 1), danach wird zusammengefasst, warum diese Parameter in den Forschungsgebieten, in denen sie im Rahmen dieser Arbeit eingesetzt wurde, relevant sind (Kapitel 2). Anschließend werden die Voraussetzungen definiert, die das neue Thermalmesssystem erfüllen sollte und sein Aufbau sowie die Herstellung beschrieben (Kapitel 3). Im Ergebnisteil (Kapitel 4 und 5) werden die durchgeführten Messungen dargestellt. Die Arbeit schließt mit einer zusammenfassenden Diskussion der Ergebnisse und einem Ausblick auf die weitere Entwicklung und Anwendung des EXTASE-Messsystems.



**Teil II**

**Theorie**



# Kapitel 1

## Bestimmung thermischer Parameter

Thermische Parameter sind wichtige Kenngrößen eines Materials. Es sind im wesentlichen drei physikalische Größen, die die thermischen Eigenschaften von Materialien charakterisieren: die Wärmeleitfähigkeit  $k$ , die thermische Diffusivität  $\kappa$  (auch Temperaturleitfähigkeit genannt) und die spezifische Wärmekapazität  $c_p$ . Eine weitere wichtige Größe ist die Dichte  $\rho$ , die die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität miteinander verknüpft ( $k = \kappa \cdot \rho \cdot c_p$ ). Zur Bestimmung von Temperatur und Wärmeleitfähigkeiten beispielsweise existieren bereits eine Reihe von Verfahren, die jedoch auch systematische Unsicherheiten aufweisen. Zunächst werden die physikalischen Grundlagen der thermischen Parameter kurz beschrieben und im anschließenden Kapitel ihre Bedeutung für exemplarische Gebiete der Geowissenschaften konkretisiert. Die momentan gängigsten Messverfahren und -systeme und ihre Einschränkungen werden ebenfalls vorgestellt.

## 1.1 Temperatur und Wärmekapazität

### 1.1.1 Theoretische Grundlagen

#### Temperatur

Die Temperatur  $T$  ist physikalisch folgendermaßen definiert:

$$\frac{1}{T} = \left( \frac{\partial S}{\partial U} \right)_N, \quad (1.1)$$

wobei  $U$  die innere Energie und  $N$  die Gesamtzahl der Teilchen in einem betrachteten System ist. Mit  $S$  wird die thermodynamische Entropie bezeichnet, sie ist ein Maß für die Unordnung in einem System. Die Entropie ist proportional zum Logarithmus der Anzahl der Zustände, die für das System erreichbar ist. Nach der Definition ist nicht  $T$ , sondern  $\frac{1}{T}$  gleich  $\left( \frac{\partial S}{\partial U} \right)_N$ , da die Definition konsistent zur Vorstellung sein muss, dass Energie von einem System hoher Temperatur zu einem niedrigerer Temperatur fließt. Die Temperatur ist demnach ein Potential. Kittel und Krömer (1984)

Die Einheit der Temperatur ist Kelvin (K). Im täglichen Gebrauch ist in Mitteleuropa die Benutzung der Einheit Celsius vertrauter und verbreiteter, da traditionell der Nullpunkt dieser Skala mit dem Erstarrungspunkt von Wasser ohne großen technischen Aufwand nachvollzogen werden konnte. Temperaturunterschiede werden in der Regel in Kelvin angegeben.

#### Wärmekapazität

Die Wärmekapazität  $C$  bezeichnet das Vermögen eines Körpers, Energie in Form von thermischer Energie zu speichern. Per Definition gibt  $C$  die Wärmemenge  $\partial Q$  (in Joule) an, welche einem Körper zugeführt werden muss, um einen Anstieg der Temperatur  $\partial T$  zu erreichen:

$$C = \frac{\partial Q}{\partial T} .$$

Dabei ist es wichtig, dass der Prozess der Erwärmung quasistatisch, das heißt sehr langsam erfolgt, so dass währenddessen irreversible Veränderungen keine wesentliche Rolle spielen. Präziser sollte deshalb von der Gleichgewichtswärmekapazität gesprochen werden.

In diesem Fall ist es sinnvoll, die Wärmekapazität pro Masseneinheit (oder Stoffeinheit) anzugeben, welche dann als spezifische Wärmekapazität  $c_p$  (oder auch als volumetrische Wärmekapazität) bezeichnet wird. Die physikalische Einheit der Wärmekapazität ergibt

sich aus ihrer Definition als  $\text{J K}^{-1}$ ; die der spezifischen Wärmekapazität je nach bezogener Stoffeinheit als  $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$  oder  $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ .

### Thermische Trägheit

Die thermische Trägheit beschreibt den Widerstand eines Materials gegen Temperaturänderungen, die durch zeitabhängige Variationen in der Temperatur während eines vollen Aufheiz- und Abkühl-Zyklus (ein 24-Stunden Tag für die Erde) verursacht wird.  $P$  repräsentiert die Fähigkeit eines Materials Wärme zu leiten und zu speichern und es ist die Fähigkeit des Untergrundes Wärme während des Tages zu speichern und sie nachts wieder abzustrahlen.  $P$  ist definiert als

$$P = \sqrt{\rho \cdot \kappa^2 \cdot c_p^2} \quad ,$$

wobei  $\rho$  die Dichte,  $\kappa$  die thermische Diffusivität und  $c_p$  die spezifische Wärmekapazität ist. Die Einheit ist  $\text{J m}^{-1} \text{K}^{-1} \text{s}^{-\frac{1}{2}}$ .

Weil Materialien mit hoher thermischer Trägheit einen hohen Inertial-Widerstand gegenüber Temperaturfluktuationen an der Oberfläche haben, zeigen sie weniger Temperaturvariationen pro Aufheiz- und Abkühl-Zyklus als solche mit niedrigerer thermischer Trägheit. Steine haben z.B. eine höhere thermische Trägheit, daher dauert es länger, sie tagsüber aufzuheizen und nachts abzukühlen. Eine höhere Wärmekapazität bedeutet dabei, dass das System mehr Zeit benötigt, um ein Gleichgewicht zu erreichen.

### 1.1.2 Verfahren zur Messung von Temperaturprofilen

Messungen des vertikalen Temperaturprofils sind übliche Anwendungen in den Geowissenschaften, für die bereits einige Verfahren existieren. Bei oberflächennahen Messungen, beispielsweise in der Bodenkunde, wird in der Regel ein Loch ausgehoben und dann der Boden angeschnitten (exemplarisch dargestellt in Abbildung 1.1). Anschließend werden Temperatursensoren (siehe Abschnitt 1.1.3) eingesetzt und die Löcher zumeist wieder verfüllt. Diese Methode bringt einige Nachteile mit sich:

- Durch diese Methode wird das umgebende Temperaturfeld um die Temperatursensoren herum bereits verfälscht und die Ergebnisse beeinflusst.
- Die Anzahl der benötigten Sensoren, ihre Installation im zu untersuchenden Medium, sowie die notwendige Verkabelung erschweren die Vorbereitung einer Messreihe. Eine

laterale Abdeckung eines Untersuchungsgebietes mit mehreren, in einem Raster angeordneten Messungen ist in der Regel wegen des zeitlichen und technischen Aufwandes unmöglich. Außerdem transportieren lange Kabelauslagen zusätzlich Wärme, die das Messergebnis verfälschen können. Aufgrund der Verfüllung der Gruben ist es zudem möglich, dass die Kabel der Sonden durch die Auflast des Füllmaterials beschädigt werden.

- Der Aushub einer Grube zerstört unweigerlich das Messgelände teilweise und zumindest temporär. Diese Zerstörung ist natürlich unerwünscht. Darüber hinaus hat der Aushub einer Grube einen gewichtigen Einfluss auf die Messgrößen selbst. Das gesuchte Temperaturprofil wird empfindlich und nachhaltig gestört und die Materialeigenschaften des ausgehobenen und gegebenenfalls später wieder verfüllten Materials entsprechen nicht mehr denen des ungestörten Materials. Die so erhaltenen Daten sind daher kritisch zu betrachten.
- Der vorhergehende Punkt ist bei dem Einsatz im Schnee besonders problematisch, da Schnee eine sehr komplexe und empfindliche Struktur hat. Das Gefüge und dessen Veränderungen im Laufe der Zeit üben einen sehr großen Einfluss auf die thermischen Eigenschaften des Materials aus und sollten deswegen so weit wie möglich erhalten bleiben.
- Der Aushub einer Grube ist kraft- und zeitaufwendig.

Besonders wenn es darum geht, die Wärmeleitfähigkeit zu bestimmen, spielen die oben genannten Probleme eine große Rolle (siehe Einleitung und 1.2.2).



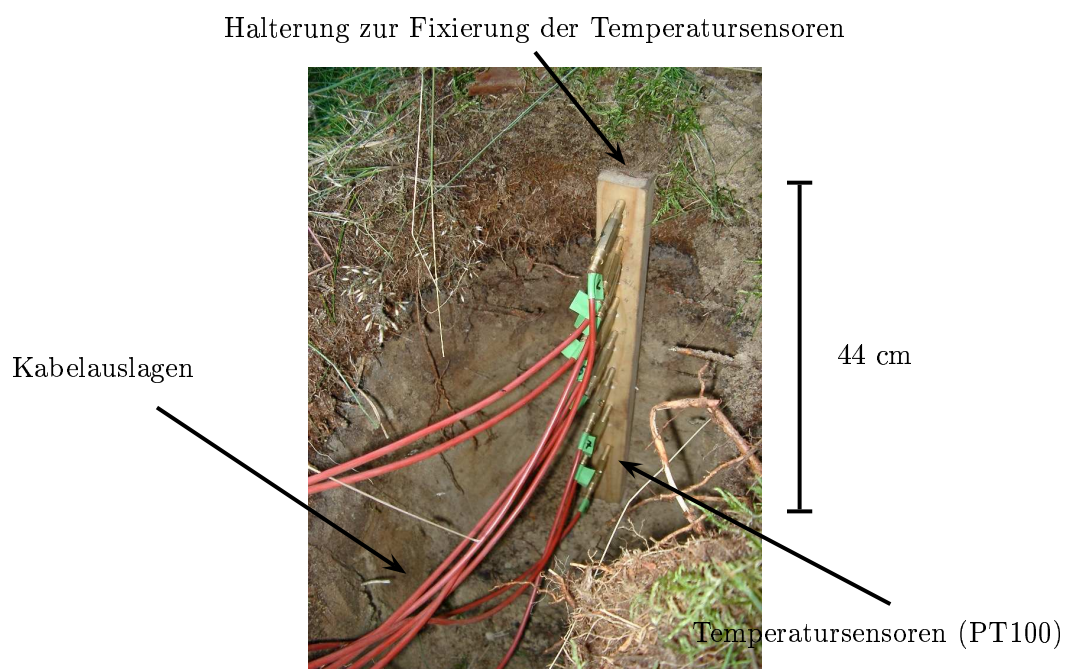


Abbildung 1.1: Typische Messung mit mehreren Temperatursensoren (PT100, siehe Kapitel 1.1.3) wie sie zum Beispiel in der Bodenkunde häufig durchgeführt wird. Kritische Punkte sind dabei die Einflüsse durch die Verkabelung und das ausgehobene Material, das später wieder verfüllt wurde.

### 1.1.3 Temperatursensoren

Nach Stöcker (1994) gibt es diverse Temperatursensoren auf dem Markt, die durch zwei grundsätzliche Methoden der Messung unterschieden werden können: zum einen Messungen, bei denen die Temperatursensoren direkt im Kontakt mit dem Material stehen, dessen Temperatur bestimmt werden soll und zum anderen Messungen, bei denen mit Hilfe elektromagnetischer Strahlung die Temperatur von Körpern bestimmt werden.

#### 1) Messung durch mechanischen oder elektrischen Kontakt

Die Temperaturmessung erfolgt mit Hilfe von Thermometern oder anderen wärmesensitiven Messgeräten. Bei Messungen mit massebehafteten Sensoren ist der Wärmeleitung besonders Rechnung zu tragen: Es muss so lange gemessen werden, bis der Temperaturausgleich im Rahmen der gewünschten Messgenauigkeit eingetreten ist. Andererseits können dabei andere Einflüsse wirksam werden (zum Beispiel Wärmestrahlung). Die Messgenauigkeit wird bei den präzisesten Methoden durch die BROWNSche Molekularbewegung begrenzt, bei der Bestimmung der Lufttemperatur meist durch lokale Turbulenzen. Einige Beispiele für die verschiedensten Arten und Formen für diese Art von Thermalsensoren sind (Stöcker 1994):

- Gas- oder Flüssigkeitsthermometer (z.B. traditionelle Quecksilber- oder Alkoholthermometer),
- Bimetallthermometer,
- Temperaturmessfarben (auch thermochromatische Farben; Farbveränderung bei einer bestimmten Temperatur),
- Seeger-Kegel (Formkörper, die ihre Festigkeit und dadurch ihre Kontur bei einer bestimmten Temperatur ändern),
- Thermoelemente (Thermokopplung),
- resistive Temperaturlaufnehmer (Widerstandsthermometer).

## 2) Messung mit Hilfe elektromagnetischer Strahlung

Eine andere Möglichkeit zur Temperaturmessung ist die Messung durch elektromagnetische Strahlung. Dabei wird der Umstand genutzt, daß jeder Körper in einem bestimmten Maße Licht emittiert.

- **Pyrometer** (auch Strahlungsthermometer): dabei wird die Temperatur in Abhängigkeit von der Farbe bzw. der Intensität des Lichts bestimmt, das von jedem festen Körper oder einem Gas emittiert wird. Die Grundlage dafür bildet das STEFAN-BOLTZMANN-Gesetz, nach dem die Gesamtstrahlungsleistung für einen idealen Schwarzen Körper von seiner absoluten Temperatur abhängt. Reale Körper strahlen eine um einen bestimmten Faktor geringere Intensität aus. Für eine berührungslose Temperaturmessung muss man diesen Faktor, den Emissionsgrad, also die Wärmeabstrahlungsfähigkeit des Messobjekts kennen.
- **Bolometer**: Messgeräte, die die abgestrahlte Energie- bzw. Leistungsdichte von meist schwachen Licht-, Infrarot-, Ultraviolett-Quellen zum Beispiel von astronomischen Objekten oder Fusionsplasmen detektieren können, indem sie die durch Absorption stattfindende Erwärmung registrieren.

In den Geowissenschaften werden überwiegend zwei verschiedene Typen von Temperatursensoren genutzt: Thermoelemente und Widerstandsthermometer. Ihre Messprinzipien werden im folgenden zusammengefasst beschrieben:

- **Thermoelemente**: Diese Messgeräte machen sich den SEEBECK-Effekt zunutze. Dabei lassen zwei verschiedene Metalle, die miteinander verbunden werden, an ihren Grenzschichten eine thermoelektrische Spannung entstehen. Diese Spannung ist temperaturabhängig und liegt im Bereich von wenigen Mikrovolt. Thermoelemente benötigen zur absoluten Bestimmung der Temperatur einen Referenzpunkt, an dem ein dediziertes Element im Kontakt mit einer Messstelle mit bekannter Temperatur angebracht wird. Jedes Metall besitzt einen thermoelektrischen Koeffizienten, der meist gegen Platin angegeben wird (Stöcker 1994).
- **Widerstandsthermometer** (PT100, PT500, PT1000...): Diese Art von Temperatursonden basieren auf der Zunahme des elektrischen Widerstands mit der Temperatur. Bei den häufig verwendeten PT100 (**P**latin **T**hermistoren) werden kleine Platin-Widerstände mit  $100\ \Omega$  bei  $0\ ^\circ\text{C}$  Temperatur eingesetzt. Der Widerstand sinkt mit sinkender Temperatur nahezu linear. Er wird gewöhnlich über eine Spannungsmessung bestimmt. Zu Vergleichszwecken wurden die meisten der für die Arbeit

durchgeführten Messungen gleichzeitig auch mit handelsüblichen PT100 durchgeführt. Abbildung 1.2 zeigt ein solches dabei benutztes PT100 (Firma Ahlborn) als Beispiel für die unzähligen Formen, in der solche Widerstandsthermometer existieren.

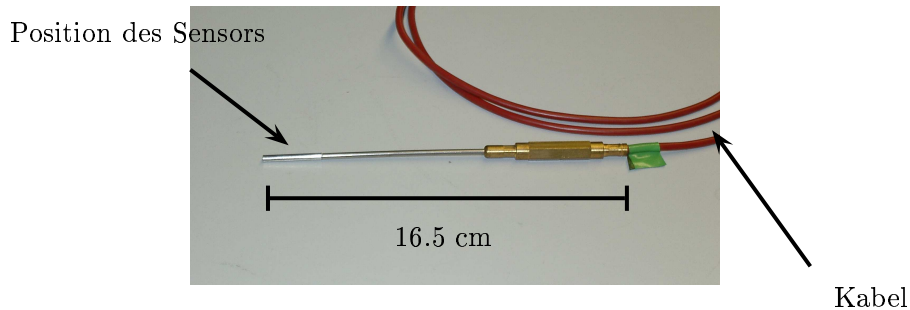


Abbildung 1.2: Typisches Platin-Widerstandsthermometer PT100, wie es bei vielen Messungen im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurde.

Für den Widerstand  $R(T)$  von PT100 gilt die folgende Approximation über die die Temperatur bestimmt wird:

$$R(T) = R_0(1 + s \cdot \Delta T + s_1 \cdot \Delta T^2 + s_2 \cdot \Delta T^3) \quad , \quad (1.2)$$

wobei  $R_0$  der Widerstand bei  $0^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T = T - T_0$  die Temperaturdifferenz und  $s = (R(T)/R_0 - 1)/\Delta T$  der Widerstandstemperaturkoeffizient  $s$  ist. Für alle reinen Metalle ist der Koeffizient  $s$  des linearen Gliedes hinreichend groß, um auch bei geringen Temperaturänderungen einen spürbaren Anstieg des Widerstands zu bewirken. Typische PT100 haben beispielsweise Werte von  $s$  von  $3.85 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  in absoluten Maßeinheiten.  $s_1$  und  $s_2$  können vernachlässigt werden, da ihre Werte geringer sind als die Auflösung der PTs. Legierungen sind als Temperatursensoren ungeeignet, da sie meistens nur eine geringe Temperaturabhängigkeit des Widerstands aufweisen (Seiferlin 1995).

## 1.2 Wärmeleitung und Wärmeleitfähigkeit

### 1.2.1 Physikalische Grundlagen der Wärmeleitung

„*Heat, as everyone knows, flows from a hot body to a cold body, not the other way around*“ (Fowler 2004).

Stehen zwei Körper unterschiedlicher Temperatur in Wärmekontakt, so wird nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik solange Energie vom wärmeren zum kälteren Körper übertragen, bis beide im thermischen Gleichgewicht stehen und die gleiche Temperatur angenommen haben. Es gibt dabei drei Möglichkeiten der Wärmeübertragung:

1. Wärmeleitung (Konduktion): Die Wärme wird durch atomare Gitterschwingungen (Phononen), d.h., durch den Körper selbst weitergegeben.
2. Konvektion: Die Wärme wird durch Bewegung innerhalb des erwärmten Materials transportiert. Ein Beispiel für das Auftreten von Konvektion sind Bohrlöcher. Diese können mit Gas gefüllt sein, welches konvektieren kann.
3. Wärmestrahlung: Sie beinhaltet den Transfer von Wärme durch elektromagnetische Wellen (beispielsweise von der Sonne).

An der Erdoberfläche wird Wärme überwiegend durch Konduktion (Wärmeleitung) transportiert. Da dies dem Anwendungsgebiet der in dieser Arbeit vorgestellten Thermalsonden entspricht, wird hier nur diese Form von Wärmetransport näher betrachtet. Die Oberflächentemperatur der Erde ist in diesem Zusammenhang von geringer Bedeutung, da sie in erster Linie das Resultat des Gleichgewichts aus Wärmeeinstrahlung von der Sonne und der Rückstrahlung der Erde ist. Viel aussagefähiger als der Oberflächenwert des Temperaturfeldes ist der durch die Wärmeleitung aus der Tiefe an die Erdoberfläche gelangende Wärmestrom (Berckhemer 2005). Wärme wird schneller weitergeleitet, wenn ein großer Temperaturgradient existiert und alle anderen Faktoren konstant bleiben.

Wärmeleitung ist ein Phänomen, das uns alltäglich begegnet. Wird zum Beispiel ein Ende eines Metallstabes in eine Gas- oder Kerzenflamme gehalten, wird das andere Ende schnell heiß. Physikalisch gesehen findet ein Transport von Wärmeenergie von Stellen höherer Temperatur zu Stellen geringerer Temperatur statt. Zweifellos besteht kein sehr großer Bedarf, für solch ein kleines Experiment den Temperaturverlauf zu berechnen, in anderen Fällen ist es jedoch sehr nützlich, die Wärmeleitung in einem Material zu kennen. Sind die Temperaturen bekannt, ermöglichen es die im weiteren Verlauf erläuterten physikalischen Gesetze quantitative Aussagen über den Wärmetransport zu treffen (Stoffel 1992). Dabei

ist wesentlicher Faktor die Wärmeleitfähigkeit des untersuchten Materials, die ein Maß für den Wärmetransport ist.

### Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit ist eine stoffspezifische physikalische Eigenschaft und ein Maß für die Fähigkeit eines Materials, Wärme zu leiten. Sie hängt von der Richtung des Wärmeflusses ab. Für geothermische Probleme spielt im Allgemeinen jedoch nur die vertikale Richtung eine Rolle (Beardmore und Cull 2001). Die Einheit ist  $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ . Die Werte für die Wärmeleitfähigkeit von Materialien weisen eine große Schwankungsbreite auf:  $429 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$  für Silber,  $159 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$  für Magnesium,  $(1.7 - 3.3) \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$  für Gestein und  $(0.04 - 2.2) \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$  für Schnee, um einige Beispiele zu nennen.

### Wärmefluss

Die Wärmeflussrate pro Einheitsfläche  $Q$  durch eine unendlich lange und breite, feste Platte eines Materials der Dicke  $d$  ist:

$$Q = -k \frac{T_2 - T_1}{d} \quad , \quad (1.3)$$

wobei  $T_1$  bzw.  $T_2$  die Temperaturen am oberen respektive unteren Rand der Platte und die Proportionalitätskonstante  $k$  die Wärmeleitfähigkeit bezeichnet. Der Betrag des Wärmeflusses  $Q$  wird in  $\text{W/m}^2$  gemessen. Das Minuszeichen ergibt sich aus der Tatsache, dass die Temperatur in positive  $z$ -Richtung zunimmt, da Wärme stets von wärmeren zu kälteren Regionen und somit in negative  $z$ -Richtung fließt. Mit  $z$  wird dabei die Tiefe bezeichnet.

### Thermische Diffusivität

Die thermische Diffusivität, auch Temperaturleitfähigkeit genannt, drückt das Vermögen eines Materials aus, Wärme durch Konduktion zu verlieren. Außerdem ist sie ein Maß dafür, wie schnell ein Material einen Temperaturwechsel vollzieht. Sie ist definiert als:

$$\kappa = \frac{k}{\rho c_p} \quad , \quad (1.4)$$

mit der Dichte  $\rho$  und der spezifischen Wärmekapazität  $c_p$ . Auch die thermische Diffusivität deckt einen breiten Wertebereich ab, bei Böden beispielsweise liegt sie im Bereich von  $0.0015$  bis  $0.015 \text{ cm}^2/\text{s}$  (Joos *et al.* 1952).

Die wichtigste Gleichung der Wärmeleitung ist die **Wärmeleitungsgleichung**, auch FOU-RIERS Gesetz genannt:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c_p} \nabla^2 T + \frac{A}{\rho c_p} \quad , \quad (1.5)$$

wobei  $A$  die Wärmeproduktion ist. Die Gleichung besagt, dass der Wärmefluss in einem homogenen Körper proportional zum Temperaturgradienten ist und in dessen Richtung fließt (Fowler 2004). In der Herleitung dieser Gleichung wurde vorausgesetzt, dass die Temperatur ausschließlich eine Funktion von Zeit  $t$  und Tiefe  $z$  ist und in  $x$ - und  $y$ -Richtung nicht variiert. Die Wärmeleitungsgleichung kann in dieser Form auch in jedem anderen Koordinatensystem genutzt werden, vorausgesetzt, dass die jeweils entsprechende Definition des Laplace-Operators  $\nabla^2$  benutzt wird.

Für stationäre Situationen, in denen sich die Temperatur mit der Zeit nicht ändert ( $(\frac{\partial T}{\partial t}) = 0$ ), wird Gleichung 1.5 zu:

$$\nabla^2 T = -\frac{A}{k} \quad . \quad (1.6)$$

Im Spezialfall nicht vorhandener Wärmeproduktion ( $A=0$ ) wird Gleichung 1.5 zu:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c_p} \nabla^2 T \quad . \quad (1.7)$$

Diese Gleichung wird **Diffusionsgleichung** genannt (äquivalent zum FICKSchen Gesetz in der Festkörperphysik), und wird im weiteren Verlauf der Arbeit verwendet (Fowler 2004). Wenn also keine Wärmequellen vorhanden sind kann mit zwei räumlich sehr nahe beieinanderliegenden Temperaturmessungen unter Annahme eines lineares Temperaturprofils und der Wärmeleitfähigkeit der Wärmefluss in einem Material bestimmt werden.

### 1.2.2 Verfahren zur Messung der Wärmeleitfähigkeit

Zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit existieren bisher nur wenige kommerzielle Geräte (zum Beispiel das Gerät TK04 der Firma TeKa Berlin oder Sensoren der Firma Hukseflux aus Holland), die die Wärmeleitfähigkeit zwar sehr genau bestimmen können, die allerdings allesamt nur punktuelle Messungen erlauben. Für kontinuierliche *in situ* Bestimmungen in mehreren Tiefen, vor allem für Messungen unter Bedingungen bei Feldmessungen, sind diese Geräte nicht geeignet, da es sich um Laborgeräte handelt. In den überwiegenden Fällen wird die Wärmeleitfähigkeit daher im Labor bestimmt.

Für Bestimmungen der wärmeleitfähigkeit unter Feldbedingungen hat eine Methode zur Messung der Wärmeleitfähigkeit besonders weite Verbreitung gefunden:

**Das *Line heat source*-Verfahren** (Linienquellen-Verfahren):

Bei diesem Verfahren wird eine möglichst lange und dünne beheizbare Sonde in eine Probe eingebracht. Die Sonde ist mit konstanter und bekannter Leistung heizbar, und die Sondentemperatur kann gemessen werden. Der durch das Beheizen verursachte Temperaturanstieg ist eine Funktion der bekannten Heizleistung und der Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Materials. Die Temperatur im Sensor steigt umso schneller, je schlechter das umgebende Material die erzeugte Wärme abführen kann. Die Änderung der Temperatur wird gegen die Zeit aufgetragen. Aus der Steigung des linearen Teils der erhaltenen Kurve kann die Wärmeleitfähigkeit nach folgender Formel berechnet werden (siehe Seiferlin 1995):

$$k = \left( \frac{P}{4\pi l} \right) \left( \frac{d(\ln t)}{dT} \right) \quad , \quad (1.8)$$

mit der konstanten Heizleistung  $P$ , der Länge der Sonde  $l$ , der Zeit  $t$  seit Einschalten der Heizung und der Sensortemperatur  $T$ . Dieses Verfahren wurde bereits in Seiferlin (1995) an porösen Eisproben und an Gesteinsmehl im Labor eingesetzt und hat sich als sehr geeignet erwiesen (siehe auch Seiferlin *et al.* 1996 und Banaszkiwicz *et al.* 1997). Dieses Verfahren eignet sich für Messungen im Gelände, da sich die kleine Sonde direkt in das ansonsten nicht beeinflusste untersuchte Medium einsetzen lässt und in vergleichsweise kurzer Zeit (je nach Sondendurchmesser einige Sekunden bis eine Stunde) die Wärmeleitfähigkeit mit hoher Genauigkeit gemessen werden kann. Ein großer Vorteil ist, dass prinzipbedingt weder ein Probenbehälter noch eine zweite Temperaturmessstelle benötigt werden.

Neben den Verfahren für Anwendungen im Feld gibt es auch solche für Labormessungen, ein exemplarisches Verfahren ist das **Plattenverfahren** (siehe zum Beispiel Seiferlin 1990).

Die *Line heat source*-Methode ist zwar sehr genau, erlaubt aber keine Profilmessung. Die Laborverfahren können nur einen ungenauen Wert für die Wärmeleitfähigkeiten liefern, da das entnommene Material sicher anders reagiert, als es das in seinem natürlichen Temperaturumfeld tun würde. Unsicherheiten von bis zu 20% für den für die Wärmeleitfähigkeit bestimmten Wert sind daher keine Seltenheit. Außerdem liefern diese Methoden nur eine Momentaufnahme; Entwicklungen, die von Temperatur- und anderen Änderungen, zum Beispiel der Wettersituation verursacht werden, können so nicht beobachtet werden.



## Kapitel 2

# Theoretische Grundlagen und Relevanz thermischer Parameter für verschiedene Forschungsgebiete der Geowissenschaften

In diesem Kapitel werden die einzelnen Forschungsgebiete vorgestellt, in deren Bereich Messungen mit dem im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Messsystem durchgeführt wurden. Dabei wird besonders darauf hingewiesen, warum thermische Parameter und deren Messung in diesen Gebieten relevant sind. Da die Bodenkunde ein wichtiges Einsatzgebiet darstellt und in diesem Bereich viele Messungen durchgeführt wurden, werden hierfür zusätzlich noch einige theoretische Grundlagen zusammengefasst, die elementare Phänomene beschreiben, die mit dem neuen Messsystem beobachtet wurden.

### 2.1 Bodenkunde

Böden sind, anders als Minerale, Pflanzen, Tiere, keine scharf abgrenzbare Naturkörper. Sie gehören als Grenzphänomen der Erdoberfläche der Pedosphäre an, in der sich Lithosphäre, Hydrosphäre, Atmosphäre und Biosphäre überlagern.

Laut Definition ist Boden das mit Wasser, Luft und Lebewesen durchsetzte, unter dem Einfluss der Umweltfaktoren an der Erdoberfläche entstandene und im Ablauf der Zeit sich weiterentwickelnde Umwandlungsprodukt mineralischer und organischer Substanzen mit eigener morphologischer Organisation, das in der Lage ist, höheren Pflanzen als Standort zu dienen und das die Lebensgrundlage für Tiere und Menschen bildet (Hillel 1998).

Die angewandte Bodenkunde befasst sich mit Nutzung des Bodens durch Kulturpflanzen mit dem Ziel, die Produktivität des Naturbodens zu erschließen, zu steigern oder zu erhalten. Neben Funktionen als Lebensraum, Nahrungsproduzent und Lieferant von Nutstoffen hat der Boden weitere wichtige Funktionen als Puffer, Filter- und Transformationssystem gegenüber zivilisationsbedingten Belastungen der menschlichen Umwelt (Hillel 1998). Die Bodenkunde befasst sich somit mit einem der kostbarsten Güter der Menschheit (Schroeder 1992).

So wie sich die Physik im Allgemeinen mit den Formen und Wechselwirkungen von Masse und Energie beschäftigt, so beschäftigt sich die Bodenphysik mit dem Zustand und der Bewegung von Material und mit Energieumwandlungen und -flüssen im Boden (Hillel 1998). Zur Bodenphysik gehören natürlich auch die thermischen Eigenschaften des Bodens, wie die Bodentemperatur und die Wärmeleitfähigkeit.

### **Bodentemperatur**

Die Bodentemperatur zu einem Zeitpunkt und die Art und Weise ihrer Variation mit der Zeit und der Tiefe ist eine Größe von primärer Bedeutung, wenn es darum geht, den Betrag und die Richtung von bodenphysikalischen Prozessen und von Energie- und Massenaustausch mit der Atmosphäre zu bestimmen. Die Temperatur bestimmt die Verdunstung und Belüftung sowie die Geschwindigkeit chemischer Reaktionen, die im Boden stattfinden und außerdem die Materialeigenschaften der Bodenbestandteile (wie zum Beispiel die Oberflächenspannung). Und schließlich beeinflusst die Temperatur des Bodens in großem Maße Stoffwechsel und Wachstumsprozesse von Organismen, wie zum Beispiel Saatkeimung, das Pflanzenwachstum, die Wurzelentwicklung und die mikrobiotische Aktivität (Hillel 1998). Die Temperatur des Bodens variiert als Reaktion auf Änderungen der Energieaustauschprozesse, die überwiegend über die Bodenoberfläche stattfinden. Die Effekte dieser Phänomene werden entlang des Bodenprofils durch eine komplexe Reihe von Transportprozessen verbreitet. Deren Betrag wird dabei wiederum durch zeitlich und räumlich variable Bodeneigenschaften beeinflusst. Daher ist die quantitative Aussage und Vorhersage des thermischen Regimes des Bodens keine triviale Aufgabe. Jenseits von passiver Vorhersage verlangt die Möglichkeit der Optimierung des thermischen Regimes eine vollständige Kenntnis der stattfindenden Prozesse und der Umwelt- und Bodenparameter, die deren Raten bestimmen. Die entsprechenden Bodenparameter beinhalten die spezifische Wärmekapazität, die Wärmeleitfähigkeit und die thermische Diffusivität, die alle stark von der Massendichte und Feuchtigkeit beeinflusst werden, sowie interne Wärmequellen und -senken.

In der Landwirtschaft spielt die Temperatur des Erdbodens eine wichtige Rolle. Auch im Weinanbau und anderen Spezialkulturen ist die Temperatur des Bodens und die Sonnenscheindauer von entscheidender Bedeutung, wenn es um Eignung der Böden für den Anbau

bestimmter Pflanzenarten geht. Neben der Höhe der Temperaturen ist vor allem die zeitliche Entwicklung bestimmter Parameter für die Länge der Vegetationsperiode, also für das Wachstum und die Reife, entscheidend. Darum ist es in vielen Anwendungsbereichen wichtig, die Temperaturen kontinuierlich und präzise zu bestimmen (Busch und Kuttler 1990).

### Wärmeleitung in Böden

Für den Energietransfer in Böden gelten die Prinzipien und Gleichungen aus Kapitel 1.2.1. Der primäre Transportprozess ist die Wärmeleitung. Wie schon in Kapitel 1.2.1 hergeleitet, ist die wichtigste Formel zur Beschreibung des Wärmeflusses im Boden die Diffusionsgleichung (1.7), unter der Annahme, dass die thermische Diffusivität konstant ist, also unabhängig von der Tiefe  $z$ :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{d^2 T}{dz^2} \quad , \quad (2.1)$$

wobei  $\kappa$  die thermische Diffusivität ist.

Um den Wärmetransport im Boden bestimmen zu können, werden also auch hier wieder die Ableitungen der Temperatur nach der Zeit und der Tiefe und die thermischen Parameter des Bodens, die thermische Diffusivität, respektive die Wärmeleitfähigkeit, die Dichte und die Wärmekapazität benötigt (Hillel 1998).

### Wärmeleitfähigkeit und thermische Diffusivität von Böden

Die Wärmeleitfähigkeiten spezifischer Bodenbestandteile unterscheiden sich deutlich (vergleiche Tabelle 2.1). Infolgedessen ist die räumlich gemittelte makroskopische Wärmeleitfähigkeit eines Bodens abhängig von seiner mineralogischen Zusammensetzung und seinem organischem Gehalt, ebenso wie von den Volumenanteilen des Wassers und der Luft. Da die Wärmeleitfähigkeit  $k$  von Luft viel geringer ist ( $0.025 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ), als die von Wasser ( $0.6 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) oder festen Stoffen wie Mineralien, korrespondiert ein hoher Luftanteil (oder niedriger Wasseranteil) mit einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit. Zudem können die Verhältnisse von Wasser und Luft kontinuierlich variieren, mit der Folge, dass  $k$  auch zeitabhängig ist. Die Zusammensetzung des Bodens ist selten einheitlich mit der Tiefe, daher ist  $k$  im Allgemeinen eine Funktion sowohl der Tiefe als auch der Zeit. Sie variiert ferner mit der Temperatur, aber unter normalen Bedingungen und kurzen Zeiteinheiten kann diese Variation vernachlässigt werden. Die Faktoren, die die Wärmeleitfähigkeit beeinflussen, nehmen auch Einfluss auf die Wärmekapazität, allerdings sind ihre relativen Effekte unterschiedlich, da ihre Variation die Wärmeleitfähigkeit viel stärker beeinflusst, als die Wärmekapazität. Im normalen Schwankungsbereich der Bodenfeuchte, die im Feld

bestimmt wird, kann die Wärmekapazität einer Änderung um einen Faktor 3 bis 4 unterliegen, wohingegen die Änderung von  $k$  zwei Größenordnungen oder mehr umfassen kann. Im Gegensatz zur Wärmekapazität reagiert die Wärmeleitfähigkeit nicht nur sensibel auf die volumetrische Zusammensetzung des Bodens, sondern auch auf die Größe, Form und räumliche Anordnung der Bodenpartikel (Hillel 1998).

### **Bodenfeuchte**

Für die Bestimmung der Bodenfeuchte gibt es eigene Messgeräte, daher ist es nicht von Interesse, die Thermalsonde als Ersatz für solche Feuchtesensoren zu nutzen. Sind aber keine solchen Geräte vorhanden, können über die Messung der Wärmeleitfähigkeit zusätzlich qualitative Aussagen über die Bodenfeuchte gemacht werden.

In einem ansonsten nicht modifizierten Bodenpaket sind die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität ein Maß für die Bodenfeuchte. Beim Einsatz von Thermalsonden ist weniger die Wärmeleitfähigkeit des Materials in verschiedenen Schichten selbst von Interesse, vielmehr ist diese ein Indikator für die Kompaktion des Bodens. Mit steigender Kompaktion steigt die Wärmeleitfähigkeit. Genauso kann es ein Hinweis auf die Bodenfeuchte sein: mit steigender Feuchte steigt die Wärmeleitfähigkeit. Das Beispiel von Sand in Tabelle 2.1 zeigt zum Beispiel die Wärmeleitfähigkeit bei Feuchtegehalten von 0%, 20% und 40% Prozent. Der Wert für die Wärmeleitfähigkeit steigt dabei von  $0.7 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  auf  $5.2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Da sich die Bodenfeuchte – und auf großen Zeitskalen auch die Kompaktion – im Laufe der Zeit ändern kann, ist eine *in situ* Beobachtung der Wärmeleitfähigkeit ein Maß für diese zeitlichen Feuchtevariationen. Mit den in dieser Arbeit vorgestellten Thermalsonden kann die Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Zeit und der Tiefe bestimmt werden, ohne das untersuchte Medium zu stören oder gar Proben entnehmen zu müssen. Eine Probenentnahme zu einem oder mehreren wenigen Zeitpunkten in der Nähe der Sonde während des Messzeitraums erlaubt es, eine Beziehung zwischen der Messgröße Wärmeleitfähigkeit und der eigentlich gefragten Bodenfeuchte herzustellen, so dass auch quantitative Messungen ermöglicht werden.

Die Bedeutung der Bodenfeuchte für die Landwirtschaft, aber auch Bauwirtschaft, ist offensichtlich. Weniger offensichtlich, aber in diesen Tagen in den Medien thematisiert, ist das Risikopotential, das sehr feuchte Bodenschichten in sich tragen: es kann zu Hangrutschungen und größeren Erdbeben kommen, sobald das im Boden befindliche Wasser die Fließfähigkeit des Bodenpakets als Ganzes dominiert. Oft wird die Bodenfeuchte, wie andere Oberflächengrößen, mit Hilfe von Verfahren der Fernerkundung beobachtet, mit allen ihren Nachteilen. Thermalsonden, die die Wärmeleitfähigkeit und damit die Bodenfeuchte kontinuierlich aufzeichnen, können hier Abhilfe schaffen.

Bodentyp	Porosität	rel. Feuchte	$k$ ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	$c_p$ ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	$d_{\text{täglich}}$ (cm)
Sand	0.4	0.0	0.7	0.3	8.0
	0.4	0.2	4.2	0.5	15.2
	0.4	0.4	5.2	0.7	14.3
Ton	0.4	0.0	0.6	0.3	7.4
	0.4	0.2	2.8	0.5	12.4
	0.4	0.4	3.8	0.7	12.2
Torf	0.8	0.0	0.14	0.35	3.3
	0.8	0.4	0.7	0.75	5.1
	0.8	0.8	1.2	1.15	5.4
Schnee	0.95	0.05	0.15	0.05	9.1
	0.8	0.2	0.32	0.2	6.6
	0.5	0.5	1.7	0.5	9.7

Tabelle 2.1: Durchschnittliche thermische Eigenschaften von Schnee und Böden. Mit  $k$  wird die Wärmeleitfähigkeit, mit  $c_p$  die spezifische Wärmekapazität und mit  $d_{\text{täglich}}$  die tägliche Dämpfungstiefe (siehe Gleichung 2.4) bezeichnet. Quelle: Hillel (1998)

### Thermisches Regime von Bodenprofilen

In der Natur variiert die Temperatur des Bodens kontinuierlich als Reaktion auf das sich stetig ändernde meteorologische Regime, das die Übergangsschicht zwischen Boden und Atmosphäre beeinflusst. Dieses Regime wird von einer gleichmäßigen periodischen Abfolge von Tag und Nacht sowie Sommer und Winter beherrscht. Zusätzlich werden die regelmäßigen täglichen und jährlichen Zyklen durch solch irreguläre episodische Phänomene wie Bewölkung, kalte oder warme Wetterperioden, Regen- oder Schneestürme und Perioden von Trockenheit gestört. Werden zu diesen externen Einflüssen die bodeneigenen Veränderungseigenschaften (wie temporäre Änderungen in der Reflektivität, Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit) sowie die Einflüsse der geographischen Lage, Vegetationsbedeckung und außerdem menschliche Beeinflussung addiert, so ist es verständlich, dass das thermische Regime von Bodenprofilen aufgrund der vielen, zum Teil nicht einkalkulierbare Faktoren in der Tat sehr komplex ist.

Die einfachste mathematische Darstellung des natürlichen fluktuierenden thermischen Regimes ist die Annahme, dass die Temperatur in allen Bodentiefen als eine reine harmonische sinusoidale Funktion der Zeit um einen Mittelwert herum oszilliert. Dies entspricht einer

gleichmäßigen periodischen Abfolge von Tagen und Nächten. Da jedoch die tatsächlichen Variationen in der Natur nicht perfekt systematisch sind, ist dies nur eine erste Approximation. Wird diese Annäherung in Verbindung mit Feldmessdaten benutzt, führt der Ansatz zu einem besseren Verständnis und einer ersten Annäherung an das thermische Regime eines Bodens.

Zunächst wird von der Annahme ausgegangen, dass, obwohl die Bodentemperatur in verschiedenen Bodentiefen unterschiedlich variiert, die Durchschnittstemperatur in allen Schichten dieselbe ist. Als nächstes wird eine Startzeit gesetzt ( $t = 0$ ), zu der die Oberfläche eine bestimmte Durchschnittstemperatur  $T_{ave}$  hat. Die Temperatur an der Oberfläche wird dann durch folgende Funktion der Zeit ausgedrückt:

$$T(0, t) = T_{ave} + A_0 \sin \omega t \quad , \quad (2.2)$$

wobei  $T(0, t)$  die Temperatur in der Tiefe  $z = 0$  (Bodenoberfläche) als Funktion der Zeit  $t$  ist.  $T_{ave}$  bezeichnet die mittlere Temperatur an der Oberfläche (sowie des Profils) und  $A_0$  die Amplitude der Temperaturschwankung an der Oberfläche (der Bereich vom Maximum oder vom Minimum zur mittleren Temperatur).  $\omega$  ist die Radialfrequenz ( $2\pi$  mal der tatsächlichen Frequenz). Im Falle der Tagesvariation ist die Periode 86400 s (24 Stunden), also ist  $\omega = 2\pi/86400 = 7.27 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ .

Diese Gleichung ist die Randbedingung für  $z = 0$ . Aus Gründen der Vereinfachung wird angenommen, dass die Temperatur in unendlicher Tiefe ( $z = \infty$ ) konstant und gleich  $T_{ave}$  ist. Unter diesen Verhältnissen ist die Temperatur in einer beliebigen Tiefe  $z$  ebenso eine Sinusfunktion der Zeit:

$$T(z, t) = T_{ave} + A_z \sin[\omega t + \phi(z)] \quad , \quad (2.3)$$

wobei  $A_z$  die Amplitude in der Tiefe  $z$  ist.  $A_z$  und  $\phi(z)$  sind abhängig von  $z$ , aber nicht von  $t$ .

Wird die Lösung von Gleichung 2.2 in die Differentialgleichung 2.1 substituiert, wobei  $\kappa$  die thermische Diffusivität ist, führt das zu folgender Lösung:

$$T(z, t) = T_{ave} + A_0 [\sin(\omega t - z/d)] e^{-z/d} \quad . \quad (2.4)$$

Die Konstante  $d$  ist die charakteristische Tiefe, *Dämpfungstiefe* genannt, in der die Amplitude der Temperatur auf den  $1/e$ -ten Teil der Amplitude an der Oberfläche  $A_0$  abnimmt.

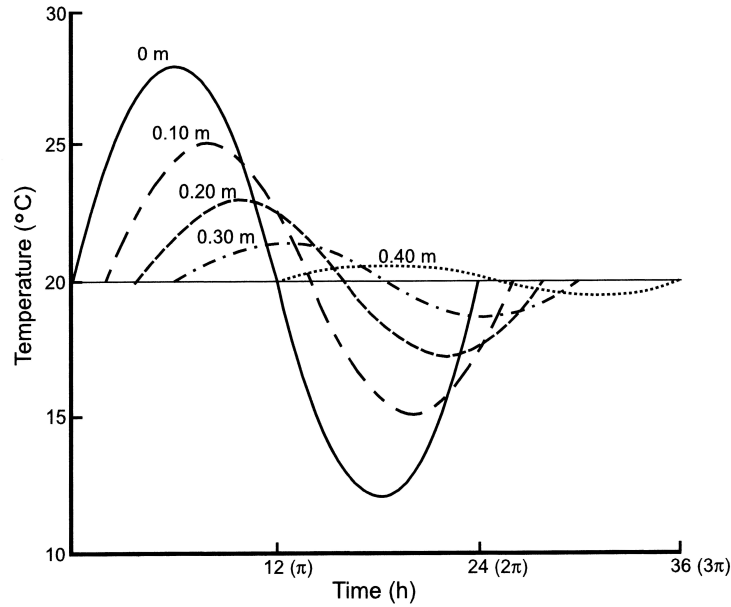


Abbildung 2.1: Idealisierte zeitliche Variation der Temperatur im Boden für verschiedene Tiefen. Es ist zu beachten, dass mit der Tiefe das Maximum der Temperatur gedämpft und fortschreitend mit der Zeit verschoben wird. Bildquelle: Hillel (1998).

Die Dämpfungstiefe ist folgendermaßen mit den thermischen Eigenschaften des Bodens und der Frequenz der Temperaturschwankungen wie folgt verbunden:

$$d = \sqrt{\frac{2k}{C\omega}} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\omega}} \quad . \quad (2.5)$$

In einer beliebigen Tiefe ist die Amplitude der Temperaturschwankung  $A_z$  um einen Faktor  $e^{z/d}$  kleiner als  $A_0$  und zusätzlich existiert eine Phasenverschiebung (also eine Zeitverzögerung des Temperaturmaximums), die gleich  $-\frac{z}{d}$  ist (siehe Abbildung 2.1). Die Abnahme der Amplitude und die Vergrößerung der Phasenverschiebung mit der Tiefe sind typische Phänomene bei der Voraussage einer periodischen Temperaturwelle im Boden.

Der physikalische Grund für die Dämpfung und das Verzögern der Temperaturwelle mit der Tiefe ist der, dass eine bestimmte Menge von Wärme entlang des Weges der Wärmeausbreitung absorbiert oder freigesetzt wird, wenn die Temperatur des leitenden Bodens zu- respektive abnimmt. Die Dämpfungstiefe ist umgekehrt proportional zur Frequenz (siehe Gleichung 2.5). Infolgedessen hängt sie direkt von der Periode der betrachteten Temperaturschwankung ab. Die Dämpfungstiefe der jährlichen Variation ist  $\sqrt{365} = 19$ -mal größer als die der täglichen Variation im selben Boden.

Wird ein willkürlicher Nullpunkt  $t_0$  in der Zeitskala eingeführt, wird Gleichung 2.4 zu:

$$T(z, t) = T_{ave} + A_0[\sin(\omega t + \phi_0 - z/d)]/e^{z/d} \quad . \quad (2.6)$$

Die Konstante ( $\phi_0 = -\phi t_0$ ) wird *Phasenkonstante* genannt.

Die jährliche Variation der Bodentemperatur, die bis in beträchtliche Tiefen reicht, verursacht Abweichungen von der vereinfachten Annahme, dass die tägliche Durchschnittstemperatur die gleiche für alle Tiefen eines Profils ist. Der kombinierte Effekt der jährlichen und täglichen Variation der Bodentemperatur kann durch folgende Gleichung ausgedrückt werden:

$$T(z, t) = T_{ave,y} + A_y[\sin(\omega_y t + \phi_y - z/d_y)]/e^{z/d_y} \\ + A_d[\sin(\omega_d t + \phi_d - z/d_d)]/e^{z/d_d} \quad ,$$

wobei die Indizes y und d die jährliche beziehungsweise tägliche Temperaturwellen bezeichnen. Tägliche Zyklen sind also als kurzzeitige Beeinflussungen, überlagert vom jährlichen Zyklus, zu betrachten.

Anwendungsbeispiele werden in 4.1 behandelt.

## 2.2 Glaziologie

Schnee ist ein sehr sensibles Untersuchungsmaterial. Seine Struktur ist sehr instabil und daher für geringste Änderungen anfällig. Thermische Eigenschaften sind wichtige Kenngrößen des Schnees, daher wird auf ihre möglichst genaue Bestimmung großen Wert gelegt. Bisherige Methoden sind teilweise stark fehlerbehaftet, da bei den Messmethoden oftmals viel von der Umgebungsstruktur beschädigt wird, die maßgeblichen Einfluss auf das Temperaturfeld hat. Vor allem bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit sind große Unsicherheiten vorhanden (1.2.2). Bei den meisten üblichen Verfahren wird eine Materialprobe entnommen und anschließend im Labor die Wärmeleitfähigkeit bestimmt. Es wäre jedoch besser, die Probe direkt in ihrer natürlichen Umgebung zu untersuchen und nicht im Labor, wo die Randbedingungen völlig anders sind.

Schnee und Eis rücken immer mehr ins Gesichtsfeld der Forschung, zum einen wegen der Gefahren (zum Beispiel Lawinen) und zum anderen aufgrund ihrer Anfälligkeit für Temperaturänderungen infolge des Klimawandels. Die thermische Eigenschaften von Eis und Schnee zu kennen, wird daher immer wichtiger.

Eine besondere Anwendung ist die Lawinenforschung. Die große Gefahr von Lawinen für



die Bevölkerung der Alpen oder vergleichbarer Regionen begründet den großen Forschungsaufwand, der zum Beispiel in der Schweiz am Eidgenössischen Institut für Schnee- und Lawinenforschung betrieben wird. Lawinen entstehen bevorzugt in Schneefeldern, in denen sich in Schneepaketen Schichten mit sehr geringer Kohäsion bilden. An den Schichtgrenzen zwischen verfestigtem alten Schnee und frischem Neuschnee entstehen aufgrund großer Temperaturunterschiede Becherkristalle oder andere Formen von Tiefenreif, die die bereits kleine Kohäsion im Neuschnee weiter verringern (Adams und Brown 1983). Die dabei stattfindenden Gefügeveränderungen des Schnees sind nicht mit einer Dichteänderung verbunden und daher bei einer Betrachtung der Schneeoberfläche nicht zu erkennen. Die Messung eines möglichst natürlichen Temperaturprofils ist bisher schwierig, da zur Einbringung von Temperatursensoren das untersuchte Schneepaket angeschnitten werden muss und somit die Temperaturen als auch das Gefüge nachhaltig gestört werden. Thermalsonden wie die in dieser Arbeit vorgestellten, können ohne größere Zerstörung des Gefüges in das Schneepaket eingebracht werden und den Temperaturverlauf als Funktion der Zeit beobachten. Die Wärmeleitfähigkeit des Schnees wird beinahe ausschließlich vom Gefüge bestimmt, da die chemische Zusammensetzung des Schnees bekannt und konstant ist. Sie ist proportional zu den Kontaktstellen zwischen den Eiskristallen und damit näherungsweise proportional zur Kohäsion. Wenn Gefügeänderungen die Kohäsion im Schnee herabsetzen und somit ein anfangs stabiles Schneepaket instabil wird, sind diese Gefügeveränderungen als Änderungen der Wärmeleitfähigkeit direkt beobachtbar. Im Allgemeinen werden bislang verschiedene Schneeproben im Feld genommen und im Labor Kohäsion und Wärmeleitfähigkeit bestimmt, sowie noch an Ort und Stelle oder später im Labor das Gefüge bestimmt. Der natürliche Prozess, der zur Gefügeveränderung führt, wird damit aber unterbrochen und bleibt daher unbeobachtbar. Die Probenahme selbst ist ebenfalls problematisch, da insbesondere die Proben mit kleiner Kohäsion noch vor der Messung teilweise oder ganz zerstört werden. Diese sind aber gerade von Interesse. Das heute bestehende Wissen über den Zusammenhang aus Gefüge, Kohäsion und Wärmeleitfähigkeit basiert also aus einer Vielzahl von Momentaufnahmen, genommen an ebensovielen möglicherweise nicht gut vergleichbaren oder gar zerstörten Schneeproben.

Beispiele zu diesem Anwendungsgebiet werden in den Kapiteln 4.2, 5.4.1 und 5.4.2 vorgestellt.

## 2.3 Baumaterialien und technische Werkstoffe

Für Baumaterialien ist die Wärmekapazität eines Materials ein entscheidender Faktor bei der Auswahl von Baustoffen für den Hausbau. Gerade heutzutage wird dabei darauf geachtet, wärmedämmende Materialien zu wählen, um Heizkosten zu sparen und so Ener-

giereserven zu schonen. In der Baustoffkunde ist es daher wichtig, thermische Eigenschaften von Baumaterialien gut zu kennen. Wichtig sind dabei besonders die Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes. So kann die Wärmekapazität Auskunft darüber geben, wie gut ein Stoff Wärme speichern kann, was bei Energiebetrachtungen eine wichtige Rolle spielt. Zusätzlich sagt die Wärmeleitfähigkeit aus, wie gut oder schlecht ein Material die Wärme weiterleitet, was ebenfalls entscheidend bei der Auswahl der Werkstoffe ist. Um zu verifizieren, dass die in dieser Arbeit vorgestellten Thermalsonden auch für diesen Bereich einen Beitrag leisten können, wurden einige Tests an Materialien durchgeführt, die auch im Bauwesen eine Rolle spielen: Granit, Marmor, Sandstein, Ytong™(Gasbeton) und Sand (Kapitel 5). Auch für die Charakterisierung von eher technischen Werkstoffen lässt sich die Thermalsonde einsetzen. Als Beispiel seien hier Messungen an Teflon und Glasschaum erwähnt, die ebenfalls in Kapitel 5 beschrieben werden.

## 2.4 Hydrogeologie

Die Hydrogeologie ist die Wissenschaft vom Wasser in der Erdkruste, wobei Wechselwirkungen mit oberirdischen Einflüssen bestehen. Forschungsgegenstände sind das Grundwasser und alle Faktoren, die Einfluss auf das Grundwasser haben (Wohlrab *et al.* 1992).

„Aufgabe der Hydrogeologie ist es, gemeinsam mit der Wasserwirtschaft Grundwasservorräte abzuschätzen, sie zu erschließen und optimal zu nutzen.“ Das Grundwasser ist durch zunehmenden Ge- und Verbrauch sowie durch Umwelteinflüsse mehr und mehr gefährdet. „Aber nicht nur Grundwassererschließung und Grundwasserschutz sind Aufgaben der Hydrogeologie, auch die Erkenntnis und die Erhaltung der Wasserqualität gehören dazu. Grundwasservorräte und -beschaffenheit werden in hydrogeologischen Karten dargestellt und in wasserwirtschaftlichen Rahmenplänen, in Raumordnungs- und Landesplanungen berücksichtigt. Schließlich sind hydrogeologische Untersuchungen vielfach Grundlage wasserrechtlicher Entscheidungen.“ (Hölting 1996)

Die thermischen Parameter können ebenfalls wichtige Beiträge in der Hydrogeologie liefern, da nicht nur das Grundwasser selbst, sondern auch der Boden, der es umgibt, Ziel hydrogeologischer Untersuchungen ist. Ein Beispiel sind Temperaturmessungen in Bohrlöchern und anderen Sondierungsrohren. Häufig werden zum Beispiel Rammkernsondierungen für eine schnelle Beprobung eines Messgebietes eingesetzt. Dazu werden schmale, zumeist aus Metall bestehende Rohre in den zu untersuchenden Untergrund gebohrt und der Bohrkern anschließend zum Beispiel auf Schichtfolgen untersucht. Für Grundwasseruntersuchungen verbleiben diese Rohre zuweilen auch im Erdboden und können so dauerhaft als Bohrloch eingesetzt werden. Hydrogeologen können anhand von Temperaturprofilen in solchen

Bohrlöchern Wasser(ein)strömungen erkennen beziehungsweise unterscheiden. Eine Wasserschicht kann sich beispielsweise als Anomalie in einem Bodentemperaturprofil anhand von deutlichen Änderungen in den Temperaturen abzeichnen. Anhand von mehreren, über eine bestimmte Fläche verteilten Rammkernsondierungen kann die Ausdehnung einer solchen Wasserschicht festgestellt werden, indem anhand der einzelnen Temperaturprofile in den Bohrlöchern nach dem Auftreten einer solchen Anomalie gesucht wird. Dazu ist es nicht notwendig, die Temperaturen exakt zu kennen; die Auflösung der Sonde muss nur größer sein, als eine solche Anomalie. Mit handelsüblichen Messsystemen ist es schwierig beziehungsweise unmöglich, innerhalb des Bohrgestänges in mehreren Tiefen gleichzeitig Temperaturen zu messen. Eine Fragestellung im Fall dieser Arbeit war nun, ob die Thermalsonden auch hierfür einsetzbar sind.

Eine weitere mögliche Anwendung liegt in der generellen Feststellung und in der Unterscheidung von Strömungsgeschwindigkeiten mit Thermalsonden. Die Sensoren der Sonde sind beheizbar (siehe Kapitel 3). Es ist möglich, einen Sensor zu beheizen und die Abkühlung durch eine vorhandene Strömung zu beobachten. Bei mehreren Versuchen sollte sich eine Abhängigkeit der Abkühlrate von der Strömungsgeschwindigkeit ergeben, schnellere Strömungen sollten die Sensoren schneller abkühlen.

Die Messungen zu diesem Themengebiet finden sich in Kapitel 4.3.1 und 4.3.2.

## 2.5 Raumfahrt

Die Raumfahrt ist ein kostspieliges Unternehmen; es gibt nur eine begrenzte Anzahl von Missionen, die auch wirklich durchgeführt werden. Nicht jede Idee für ein Experiment wird direkt Teil einer Mission, es bedarf vieler Tests, bevor es ausgewählt wird. Um mehr Informationen über Planeten oder andere Körper zu bekommen, ist die Weltraumforschung also zusätzlich zu einem großen Teil auf Laborexperimente auf der Erde angewiesen, in denen die Situationen und Gegebenheiten „vor Ort“ simuliert werden. Dies kann auch dazu dienen, mögliche zukünftige Missionen zu planen. Dabei ist es wichtig, die vorherrschenden Bedingungen zu kennen, damit bei einer möglichen Landung die Geräte entsprechend ausgerüstet werden können. Auch die thermischen Gegebenheiten auf planetaren Körpern sind von Interesse, sei es die Lufttemperatur oder die oberflächennahen Bodentemperaturen und daraus resultierend der Oberflächenwärmefluss. Die Wärmeleitfähigkeit kann interessant sein, um das vorgefundene Material auf den planetaren Körpern zumindest grob verifizieren zu können beziehungsweise das in Frage kommende Material eingrenzen zu können.

Im Fall der in dieser Arbeit vorgestellten Thermalsonden gibt es eine noch weitergehende, besondere Anwendung. Da die Thermalsonden in ihrem Aufbau der MUPUS-Thermalsonde

(siehe Einleitung) sehr ähneln, können sie sozusagen als Lieferant für Felddaten für das Raumfahrtexperiment fungieren. Es können damit Messungen unter Gegebenheiten simuliert werden, die denen entsprechen, die auf dem Kometen Churyamov-Gerasimenkow (im Jahr 2013) erwartet werden. So kann die lange Zeit, die die Mission bis zum Erreichen des Kometen braucht, genutzt werden, um bereits im Vorfeld Erkenntnisse zu gewinnen und gegebenenfalls mögliche Fehlerquellen oder Probleme zu entdecken und rechtzeitig zu beheben.

Im Laufe der Entwicklung der in dieser Arbeit vorgestellten Thermalsonden wurden einige Versuche zum Themenbereich Raumfahrt durchgeführt, die in Kapitel 5.4.3 und 5.4.4 beschrieben werden.

## Teil III

# Das Messsystem



In Kapitel 1 wurden Methoden und Messgeräte vorgestellt, die üblicherweise für die in Kapitel 2 beschriebenen Anwendungsgebiete eingesetzt werden. Diese Methoden haben Nachteile beziehungsweise bergen einige systematische Unsicherheiten, die die Ergebnisse in ihrer Qualität beeinflussen können (siehe 1.1.2 und 1.2.2). Wenn es darum geht, die Wärmeleitfähigkeit zu bestimmen, sind die Beeinflussungen noch gravierender. Zumeist ist es üblich, dem Material Proben zu entnehmen und anschließend im Labor die Wärmeleitfähigkeit zu bestimmen (Verfahren siehe 1.2.2). Durch die Entnahme wird die Probe aus ihrem natürlichen Temperaturfeld herausgenommen, eine stimmige Aussage ist kaum noch möglich. Die Beobachtung der zeitlichen Entwicklung unter natürlichen veränderlichen Bedingungen ist mit einer Probenentnahme ausgeschlossen.

Um diese Probleme zu vermindern, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein neues Messsystem unter dem Projektnamen **EXTASE** (*EX*perimental *T*hermal probe for *A*pplication in *S*now- and *E*arth sciences / *EX*perimentelle *T*hermalsonde für die *A*nwendung in der *S*chneeforschung und den *E*rdwissenschaften) entwickelt. Ausgehend von den bisher beschriebenen Nachteilen, sollte das Gerät festgelegte Voraussetzungen erfüllen, die im Folgenden beschrieben werden. Um zu verifizieren, dass die Entwicklung erfolgreich war und worin die Vorteile und Verbesserungen gegenüber herkömmlichen Systemen liegen, wurden zahlreiche (Test-)messungen durchgeführt, die ebenfalls bestimmte Ziele erfüllen sollten. Diese Ziele, die Messungen und deren Ergebnisse werden im Ergebnisteil (Kapitel 4 und 5) beschrieben und diskutiert.





## Kapitel 3

# Das Messsystem

In diesem Kapitel werden der Aufbau, die Herstellung und das Messverfahren des EXTASE-Messsystems (im weiteren als Messsystem bezeichnet) sowie die dazugehörige Benutzersoftware beschrieben. Ziel der Arbeit war es, ein komplettes und autarkes Thermal-Messsystem für den Feldeinsatz in den Geowissenschaften zu entwickeln, das aus Thermalsonden, Elektronik, Stromversorgung und Software besteht.

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, ist das in dieser Arbeit vorgestellte EXTASE-Messsystem ein *spin-off* des ESA-Raumfahrtexperimentes MUPUS. In der Raumfahrt gilt es aus Kostengründen, das Gewicht eines Messgerätes so gering wie möglich zu halten. Auf der Erde ist dies nicht zwingend nötig; zwar sollte das Gerät auch leicht von einer Person zu transportieren sein, einige zusätzliche Gramm spielen dabei jedoch keine Rolle. Auch muss sich die Sonde nicht wie auf dem Kometen selbsttätig in den Untergrund hämmern (siehe Einleitung), da auf der Erde die meisten Messgebiete zugänglich sind. Die Elektronik musste ebenfalls neu gestaltet werden; so sollen für die geplanten Anwendungen in den Geowissenschaften pro Messsystem bis zu vier Thermalsonden gleichzeitig betrieben und gegebenenfalls auch ganze Netzwerke solcher Systeme eingesetzt werden. Das System sollte dabei folgenden technischen Anforderungen genügen:

**Hardware**

- leicht transportabel,
- robust gegen Wettereinflüsse,
- einsetzbar in einem großen Temperaturbereich,
- einfach in der Handhabung, geringer Messaufwand, einfacher und damit zeitsparender Aufbau,
- hohe Auflösung in vertikaler Richtung,
- hohe Messgenauigkeit,
- geringe Störung des zu untersuchenden Mediums, keine großräumige Zerstörung,
- geringer Wärmefluss in vertikaler Richtung,
- wenig Verkabelung.

**Software**

- Datenerfassungssoftware, die eine komplette Steuerung durch einen PC erlaubt,
- automatische Datenarchivierung in einer Datenbank,
- weitestgehend automatische Auswertung der Rohdaten,
- Visualisierung der Messdaten und der daraus abgeleiteten Ergebnisse,
- weitestgehend automatische Protokollierung.

Das Endergebnis ist ein fertiges Thermalsonden-Komplettsystem bestehend aus drei Einheiten (siehe Abbildung 3.1), die in den folgenden Unterkapiteln beschrieben werden:

- **Thermalsonden** (bis zu vier pro Elektronik-Box) mit jeweils 16 Temperatursensoren
- **Elektronik** zur Steuerung der Messungen und Datenspeicherung
- **Software** zur Datenerfassung und -bearbeitung

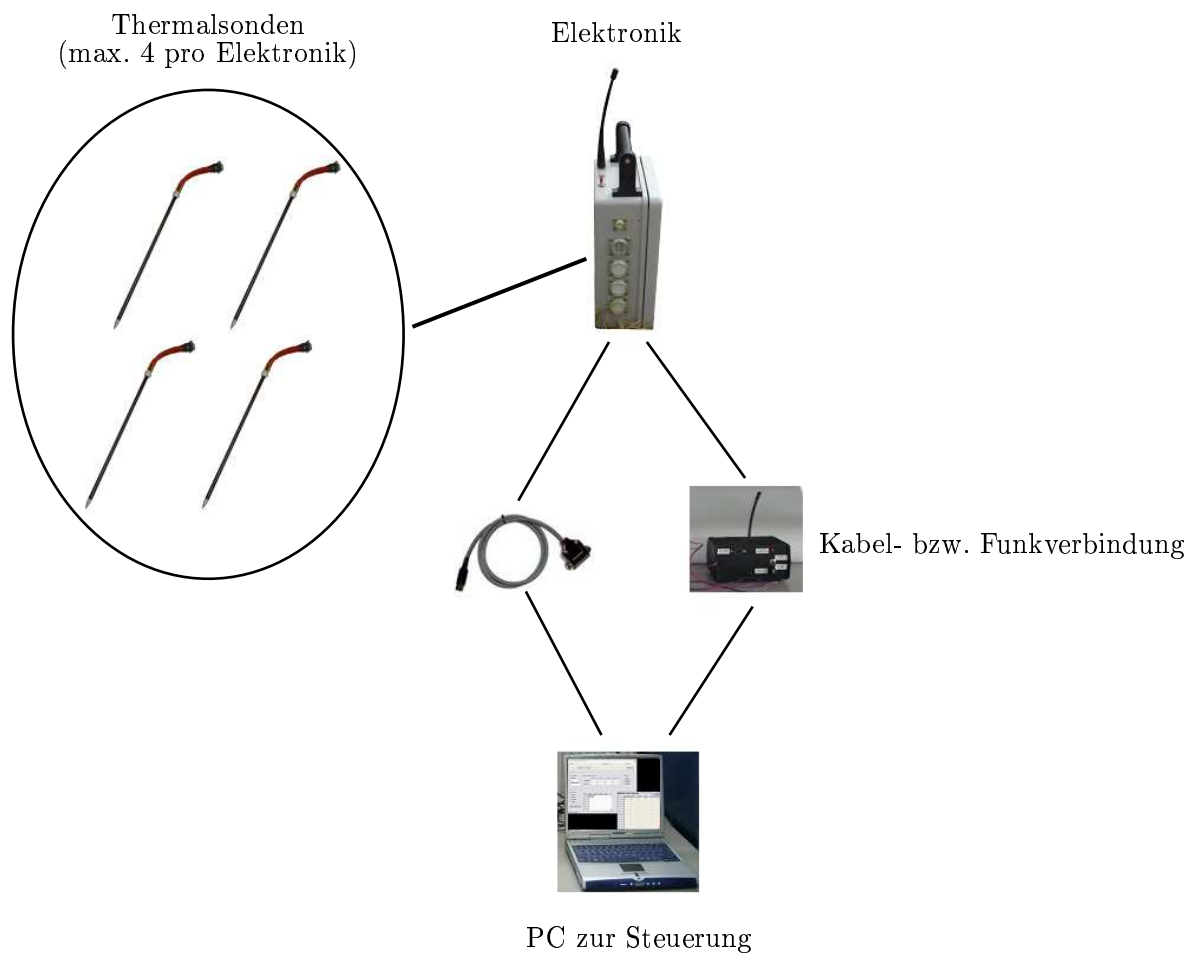


Abbildung 3.1: Aufbau des EXTASE-Messsystems. Je eine bis vier Thermalsonden können pro Elektronik-Box angeschlossen werden. Die Verbindung zum PC erfolgt über die serielle Schnittstelle oder über eine Funkverbindung.

### 3.1 Thermalsonden

Pro Elektronik-Box können bis zu vier Thermalsonden gleichzeitig betrieben werden. Jede Thermalsonde ist knapp 40 cm lang und mit 16 linear untereinander angeordneten toroidalen Widerstandssensoren bestückt, welche als Temperatursensoren und als beheizbare Elemente zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit genutzt werden. Die detaillierte Beschreibung der Sensoren und ihrer Herstellung folgt in Kapitel 3.2.

Das Messprinzip der Sonden basiert auf der Messung der transversalen Komponente des Wärmeflusses bezüglich der Längsachse der Sonde. Ein Wärmefluss innerhalb der Sonde wirkt der Methode entgegen und muss deswegen minimiert werden. Insgesamt wurde die Eigenwärmeleitfähigkeit der Längsachse der Sonde so weit wie möglich vermindert, indem gering wärmeleitfähige Materialien – sowohl für die Sensoren als auch für die Sonde selbst – eingesetzt wurden. Dazu wurden zum einen Dünnsensoren genutzt, deren Wärmekapazität im Vergleich zu „dicken“ Sensoren reduziert ist. Dadurch liegt die Gesamtmasse des benötigten Metalls bei unter 3 g pro Sonde. Zum anderen wurde eine Verringerung der Eigenwärmeleitfähigkeit durch die Auswahl von schlecht wärmeleitendem Material für die Außenhülle der Sensoren erreicht. Sie besteht aus einem Glasfaserkomposit mit Epoxidharz. Der Außendurchmesser der Sonde beträgt 10 mm, wobei die Wandstärke der Röhre 1 mm beträgt, so dass der innere Durchmesser 8 mm ausmacht.

Die Methode des Anbringens der Sensoren im Innern der Röhre scheint zunächst ungewöhnlich. Dem gewählten Material wird so ein recht hoher Widerstand für die Abführung der Wärme nach außen geboten. Diese Methode ist ein Kompromiss zwischen den thermischen Effekten und den Herstellungsmöglichkeiten. Neben der thermischen Aktivität ist die Sonde auch gewissen mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt. Zwar werden die Sonden nicht wie bei **MUPUS** in den Boden gehämmert, jedoch werden sie in das zu untersuchende Material gedrückt und außen angebrachte Dünnsensoren würden dabei unweigerlich beschädigt. Bei Betrachtung eines möglichen quantitativen Nachteils durch die Platzierung der Sensoren im Innern unter Berücksichtigung des Verhältnisses zwischen Wandstärke und Länge der Sensoren, zeigt sich, dass diese Bauweise nur eine minimale Einschränkung darstellt. Die Wegstrecke entlang der Längsachse ist mindestens eine Größeneinheit (für den kürzesten Sensor) länger als der Weg durch die 1 mm dicke Wand der Sonde, so dass davon ausgegangen werden kann, dass sich der Großteil der Wärme auch in das Medium und nicht entlang der Längsachse der Sonde ausbreitet. Die Sonde reagiert auf die Umgebung über ihre Seitenfläche. Die thermisch aktive Fläche der Sonde ist groß, insgesamt knapp 1 dm<sup>2</sup>. Der beheizte Sensor leitet die Wärme nur zur Wand der Sonde und die Außenwand strahlt in das umgebende Medium ab (Marczewski *et al.* 2004).

Am unteren Ende der Thermalsonden ist eine Spitze aus Titan angebracht, die das Eindringen der Sonden in das zu untersuchende Material erleichtert. Am oberen Ende der Sonde

ist ein Ring befestigt, an dem eine Verlängerung montiert werden kann. Diese dient dazu, die Sonde gegebenenfalls tiefer in das Material zu drücken. Über dem Ring ist zusätzlich ein PT100 in die Sonde eingebaut. Die genauen Abmessungen und die oben beschriebenen Elemente einer Thermalsonde sind Abbildung 3.2 zu entnehmen.

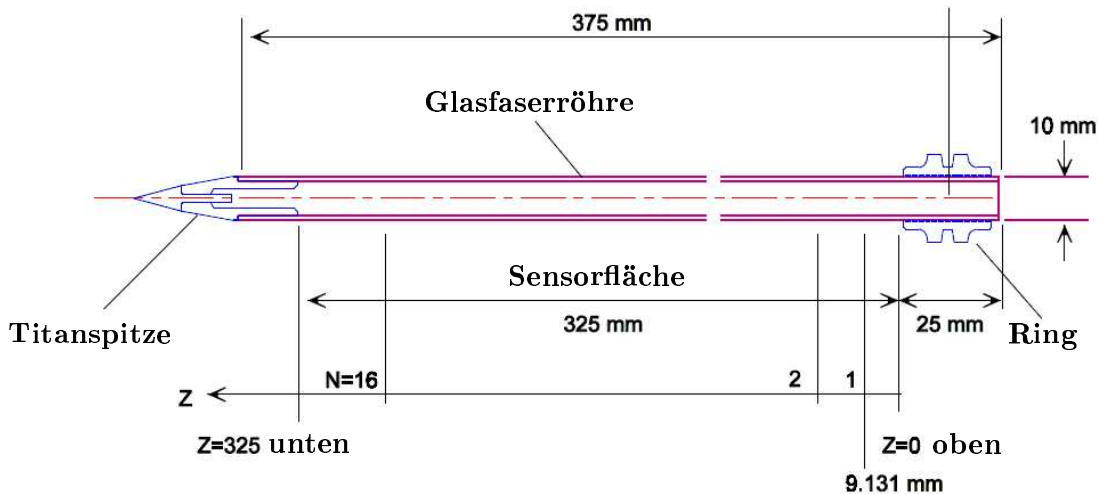


Abbildung 3.2: Schemazeichnung einer Thermalsonde mit genauen Abmessungen.

Um eine Luftzirkulation innerhalb der Sonde und damit eine mögliche Verfälschung der Temperaturwerte zu vermeiden, wurde der freie Innenraum der Sonden mit eingesprütztem Styropor ausgefüllt. Zuvor wurden auch Messungen mit Thermalsonden ohne Verfüllung durchgeführt (siehe Kapitel 4.2.1). Eine fertige Sonde, wie sie auch bei den in dieser Arbeit beschriebenen Messungen eingesetzt wurde, ist in Abbildung 3.3 zu sehen.

Für die Verbindung zur Elektronik befinden sich am oberen Ende der Sonden Stecker, an die die Verbindungskabel angeschlossen werden (siehe Abbildung 3.3). An den beiden Enden des Kabels sind sogenannte PCT-50 Stecker angebracht. Diese 50-fach Stecker erlauben es, die „4-wire method“ für die Messung zu nutzen. Dadurch werden die Kabel zu einem fast perfekten Voltmeter, das heißt, dass sie in der Summe keinen Strom und damit keine Wärme nach außen leiten, was zur Verbesserung der Methode beiträgt. Die Schemazeichnung der Stecker und die Belegung der 50 Kontakte sind Abbildung 3.4 zu entnehmen.

Mit dem Messsystem sind Messungen in einem Bereich von  $-50^{\circ}\text{C}$  bis  $+60^{\circ}\text{C}$  Außentemperatur möglich, so dass es in nahezu jedem Gebiet der Erde eingesetzt werden kann.

Die Verbindung zu einem PC erfolgt entweder über eine serielle Schnittstelle (RS-232) oder über eine Funkverbindung, die es über eine oben an der Elektronik-Box angebrachte Antenne (siehe Abbildung 3.13) ermöglicht, beispielsweise aus einem Auto oder einem Zelt die Messungen zu steuern. Die Reichweite ist dabei abhängig von der Umgebung und beträgt in etwa 100 Meter.

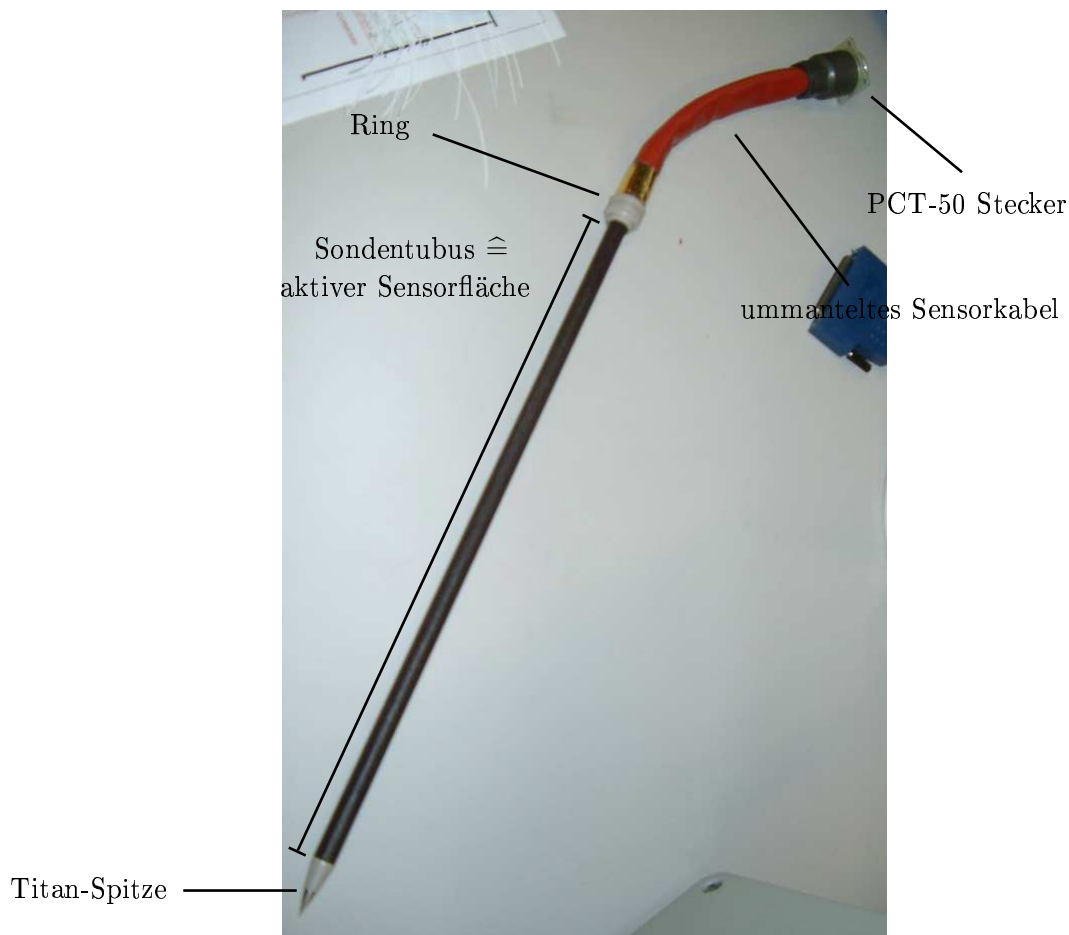


Abbildung 3.3: Beispiel einer fertigen Thermalsonde für den Feldeinsatz.

Die relative Auflösung des Messgerätes liegt bei 0.01 K, das ist genauso gut wie bei handelsüblichen PT100. Die absolute Messgenauigkeit ist ( $\pm 0.1$  K), was genau genug für die geplanten Anwendungen ist, da zum Beispiel bei Messung der Wärmeleitfähigkeit nur der relative Temperaturgradient entscheidend ist. Für Temperaturprofilmessungen ist die Genauigkeit mindestens so gut wie bei im Handel erhältlichen Geräten, die außerdem nicht über die Funktionen und Vorteile der EXTASE-Sonde, wie die Möglichkeit einer *in situ* Profilmessung (siehe Kapitel 1.2.2) verfügen.

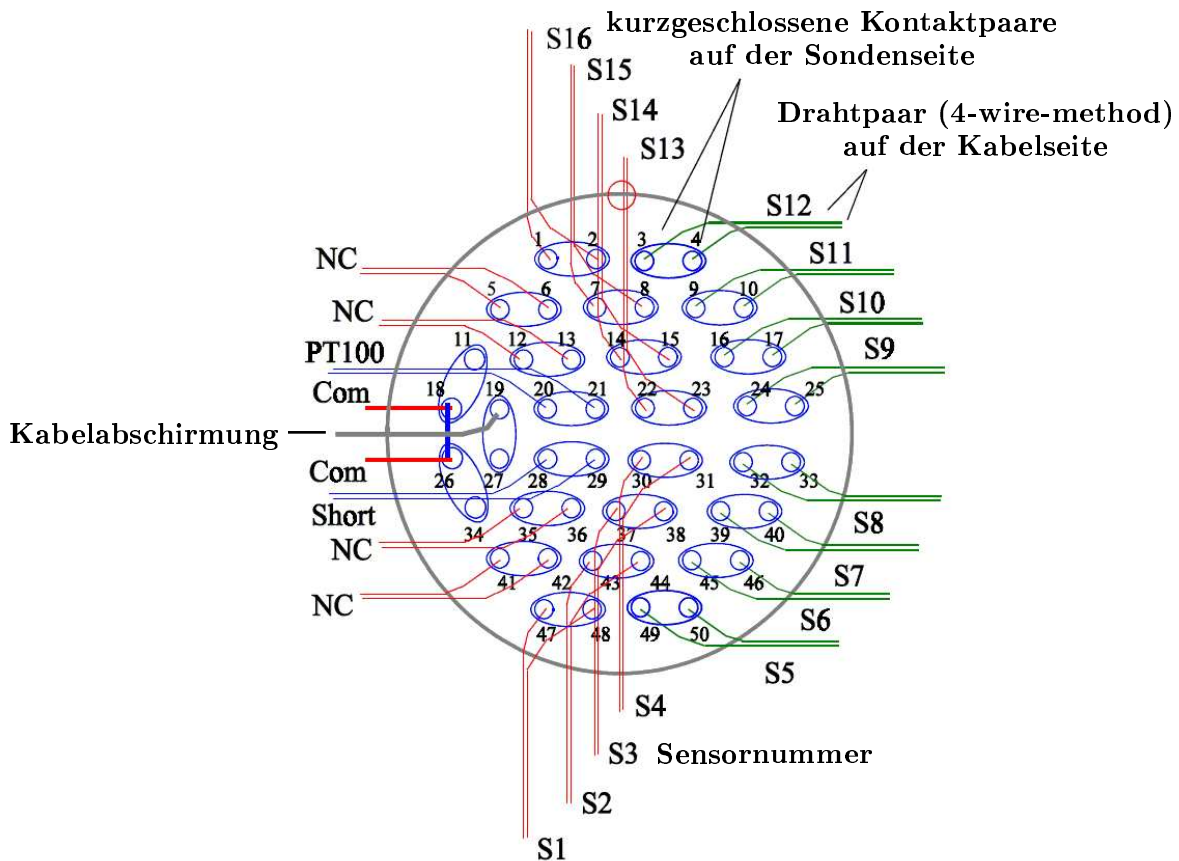


Abbildung 3.4: Schemazeichnung und Belegung der Kontakte der PCT-50 Stecker für die Verbindung zur Elektronik-Box.

## 3.2 Sensoren

Jede Thermalsonde enthält 16 Widerstandssensoren aus Titan. Bei der Herstellung werden die Sensoren per Laser mit Hilfe einer vorgefertigten Maske auf eine Kapton-Folie (Abbildung 3.5) aufgebracht. Diese wird anschließend aufgerollt und an die Innenseite der Glasfaser-Epoxid-Röhre geklebt. Das Herstellungsverfahren wird im nächsten Unterkapitel detailliert beschrieben. Der Einsatz von Titan als Sensormaterial auf einem Dünnschicht ist eine Neuerung im Bereich der Thermalsensoren, üblicherweise wird Platin benutzt. Die Wahl fiel aus technischen und praktischen Gesichtspunkten auf Titan.

Die 16 Sensoren sind in einer Reihenschaltung angeordnet, die über einen gemeinsamen Stromleiter (*common conductor*) und 16 weitere Leiter für die Sensoren mit dem Kontrollsystem verbunden sind (siehe Abbildung 3.5, links).

Das Messprinzip der Sensoren beruht auf der Temperaturabhängigkeit des Widerstands vieler Metalle, also der Tatsache, dass der Widerstand mit sinkender Temperatur beinahe linear abnimmt (siehe 1.1.3). Bei den handelsüblichen und für Temperaturmessungen in den Geowissenschaften oft genutzten PT100 zum Beispiel werden Platin-Widerstände mit einem Widerstand von  $100\ \Omega$  bei  $0^\circ\text{C}$  Raumtemperatur genutzt. Die in dieser Ar-

beit genutzten Sensoren haben unterschiedliche Widerstände bei  $0^\circ\text{C}$ , je nach Sonde und Sensor zwischen  $70$  und  $110\ \Omega$  (siehe Abschnitt 3.2.1 und 3.2.2). Der Widerstands-Temperaturkoeffizient  $s$  der Sensoren (circa  $2 \times 10^{-3}\ \text{K}^{-1}$ , siehe Kapitel 3.2.2) wurde durch die geringe Dicke der Titanschicht auf die Hälfte des entsprechenden Wertes von dichtem Titan reduziert. Diese Reduzierung ist eine Folge des Unterschieds in der Struktur der dünnen Titanschicht ( $0.5\ \mu\text{m}$ ) und hat keinen limitierenden Einfluss auf die Messung. Der Widerstand wird im Allgemeinen über eine Spannungsmessung bestimmt; im Fall der in dieser Arbeit vorgestellten Thermalsonden wird eine Gleichstromquelle mit typischerweise  $1\ \text{mA}$  verwendet, um eine kleine Spannung am Messwiderstand zu erzeugen. Das Messverfahren wird in Abschnitt 3.6 genauer beschrieben.

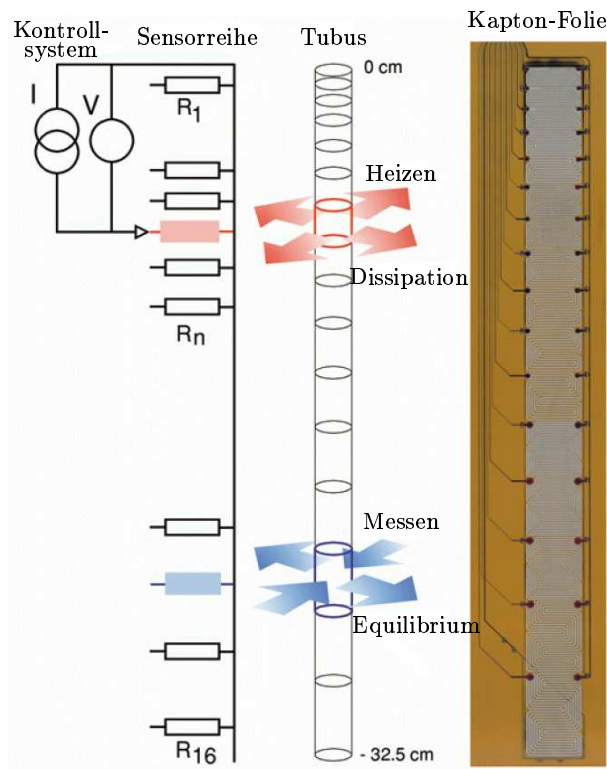


Abbildung 3.5: Schaltbild der EXTASE-Sensoren (links), schematisches Prinzip der Messmethode (Mitte) und Abbildung einer Kapton-Folie mit den Sensoren (rechts).

Die gesamte Fläche der Kapton-Folie ist mit den Sensoren bedeckt, zwischen den Sensoren gibt es keine Lücken (vergleiche Abbildung 3.6). Die Sensoren füllen dabei jeweils eine rechteckige Fläche möglichst dicht aus. Die Sensorgröße nimmt von oben nach unten zu; der erste Sensor ist  $0.91\ \text{cm}$  lang, der letzte  $3.92\ \text{cm}$ . Diese Größeneinteilung wurde gewählt, da gerade unter natürlichen Bedingungen (wie beispielsweise in einem Boden) in geringeren Tiefen eines zu untersuchenden Materials größere und häufigere Temperaturänderungen erwartet werden können, als in größeren Tiefen. Somit wird an der Oberfläche eine höhere



Sensorendichte benötigt und damit eine bessere Auflösung und in größeren Tiefen eine etwas geringere.

Sämtliche Zuleitungen und Verbindungen der Sensoren sind ebenfalls auf die Kapton-Folie aufgedampft (siehe Abbildung 3.5, rechts), dadurch verringert sich die Verkabelung erheblich, wodurch ein Großteil der Beeinflussung durch einen möglichen Wärmeeintrag über Kabel eliminiert wird; es wird nur ein Kabel pro Sonde benötigt.

Ein Detailausschnitt der Schemazeichnung der Folie mit den Sensoren ist in Abbildung 3.6 zu sehen. Das Foto einer Kapton-Folie vor Einbringen in eine Glasfaserröhre ist ebenfalls in Abbildung 3.6 zu sehen.

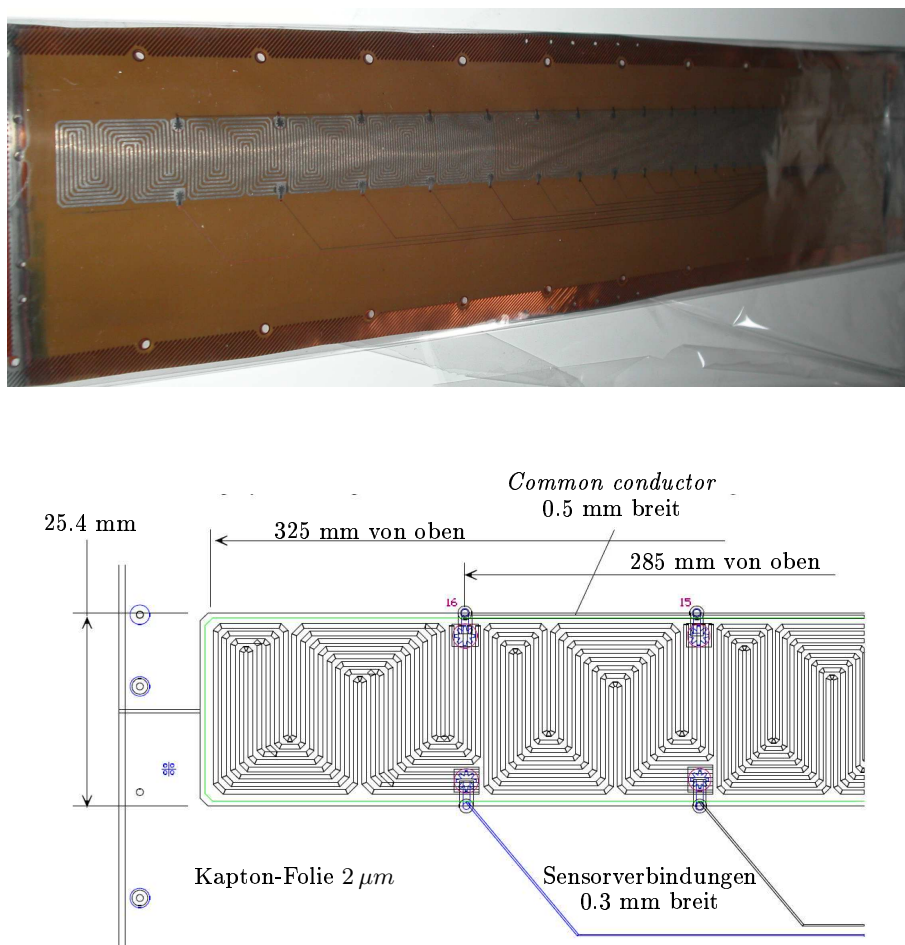


Abbildung 3.6: Kapton-Folie. Oberes Bild: Folie mit 16 Sensoren vor dem Einkleben in die Glasfaser-Epoxid-Röhre. Unteres Bild: Ausschnitt aus der Schemazeichnung der gesamten Kapton-Folie.

Die Sonden bestehen also aus einer linearen Reihe von toroidalen Einheiten, die in einer gemeinsamen Röhre untergebracht sind. Jede dieser Einheiten hat zwei Funktionen: Aufnehmen von Temperaturen und Heizen, wobei letztere Funktion dazu dient, die Wärme-

leitfähigkeit zu bestimmen. Dies ist eine weitere Neuerung, die die EXTASE-Thermalsonde von anderen bereits existierenden Verfahren unterscheidet. Bisher war es meist notwendig, neben einer Wärmequelle weitere Thermalsensoren im Material zu platzieren, um so die Wärmeleitfähigkeit zu bestimmen. Dies ist bei dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten System anders, denn alle Sensoren einer Sonde können gleichzeitig die Temperatur bestimmen und einzeln beheizt werden, um die Wärmeleitfähigkeit zu bestimmen. Dabei liegen die Herstellungskosten der EXTASE-Systeme wesentlich niedriger als die Kosten für kommerzielle Messgeräte (ca. 5000 Euro im Vergleich zu ungefähr 11000 Euro) und bieten dabei noch einige Vorteile. So können mit dem neuen Messsystem Profilmessungen in einem großen Temperaturbereich sowohl unter natürlichen als auch unter Laborbedingungen durchgeführt werden.

### 3.2.1 Herstellungsverfahren

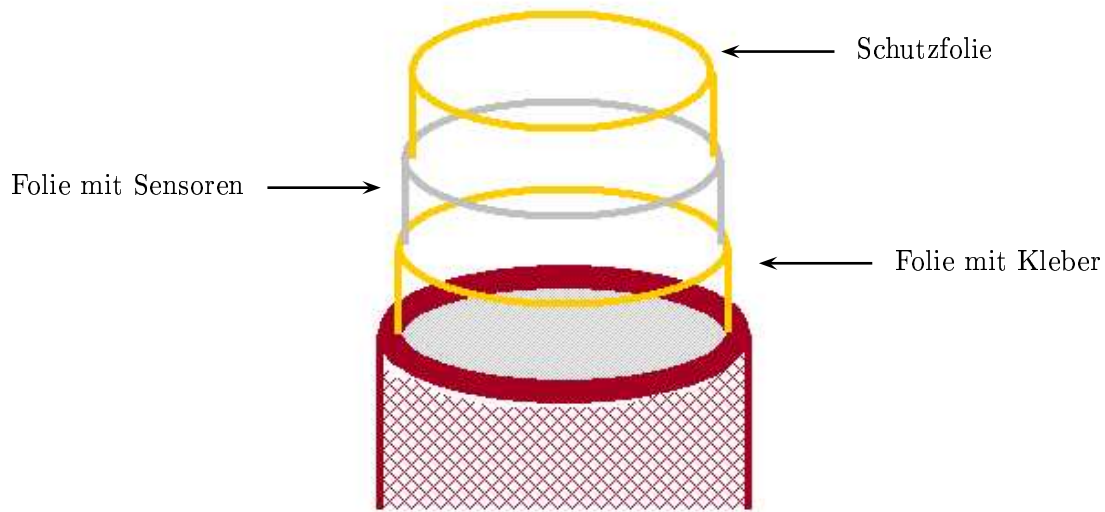
Die einzelnen Sensoren einer Thermalsonde werden auf eine  $50\ \mu\text{m}$  dünne Kapton-Folie aufgesputtert<sup>1</sup>, anschließend aufgerollt und an die Innenwand der Glasfaser-Röhre geklebt. Kapton ist sehr dünn, flexibel, vakuumbeständig und bleibt über einen sehr großen Temperaturbereich in seinen mechanischen und thermischen Eigenschaften stabil. Weiterhin weist es eine geringe Wärmeleitfähigkeit auf ( $0.12\ \text{W m}^{-1}\ \text{K}^{-1}$ ). Genauer betrachtet handelt es sich bei der Folie nicht um eine einzige Schicht, sondern um eine *Sandwich*-Struktur (siehe Abbildung 3.7), bestehend aus drei einzelnen Schichten: eine Folie mit Sensoren, die zum Schutz in zwei weitere Kapton-Schichten eingebettet wird, wobei die äußere Schicht zur Anbindung an die Röhre mit einem Film aus Acrykleber versehen ist.

#### Bedrucken der Folie

Die Titan-Sensoren, die dazugehörigen Zuleitungen und die Verbindungen (beides aus Kupfer) auf der mittleren der drei Kapton-Schichten werden mittels zweier metallischer Rasterschablonen auf die reine Kapton-Folie aufgebracht. Der *sputter*-Prozess wird in einem großen zylinderförmigen Behälter durchgeführt, der sich mit konstanter Geschwindigkeit dreht. In diesen Behälter wird die Kapton-Folie eingelegt und darüber die vorgefertigte Stahlschablone eingefügt. Anschließend wird das Material auf die Folie aufgesprüht. Die Zeit für das *sputtern* beträgt ein bis zwei Stunden. Mit Hilfe der ersten Schablone werden die  $0.3\ \text{mm}$  dünnen Leiterbahnen aufgedampft, sowie die Verbindungen mit der externen Stromversorgung und dem Kontrollstromkreis. Die zweite Schablone definiert die  $0.5\ \mu\text{m}$  dicken Widerstandssensoren inklusive der überlappenden Kupferkontakte auf den Leiterbahnen. Vor und während des *sputter*-Prozesses wird das Substrat aufgeheizt und auf

---

<sup>1</sup> *sputtern*, engl. = zerstäuben



Glasfaserröhre, Außendurchmesser 10 mm, Wandstärke 1 mm

Abbildung 3.7: *Sandwich*-Struktur der drei Kapton-Folien in der Glasfaser-Röhre.

120 °C gehalten. Abschließend wird die Kapton-Folie mit den Sensoren bei 100 °C an der Luft für 24 bis 26 Stunden ausgeheizt.

Das Design wurde so gewählt, dass die Gesamtmenge des benutzten Kupfers möglichst gering ist (sie beträgt circa 1.5 g), um den Wärmefluss entlang der Leiterbahnen so gering wie möglich zu halten. Das Hauptproblem beim Aufbringen des Metalls war es, eine geeignete Reihenfolge der Metallschichten in den Bereichen zu finden, wo sich die Dünnschicht aus Titan mit dem „dicken“ Kupferfilm auf der Kapton-Folie überschneidet. Dieses Problem wurde gelöst, indem dazwischenliegend Dünnschicht-Kupferverkleidungen von der oberen und unteren Seite auf das Titan aufgebracht wurden. Die Kontaktstellen der Sensoren sind besonders kritisch und wurden so groß wie möglich gewählt, um ein Abbrechen oder ähnliches zu verhindern. Dazu wurde eine Sternform für den Kontakt gewählt, der sich in einem Kreis mit einem Durchmesser von 2 – 4 mm (abhängig von der Sensorgröße) befindet (siehe Abbildung 3.8).

### Anbringen der Folie an die Innenwand der Glasfaser-Röhre

Einer der aufwendigsten Arbeitsschritte bei der Herstellung der Thermalsonden ist das Anbringen der Folie innerhalb der schmalen Röhre. Dabei werden die drei Schichten gleichmäßig unter konstantem Druck an die Innenwand der Glasfaser-Röhre geklebt. Jede Röhre mit einem Schichtenverbund aus drei Kapton-Folien wird zwischen zwei Silikonschläuchen

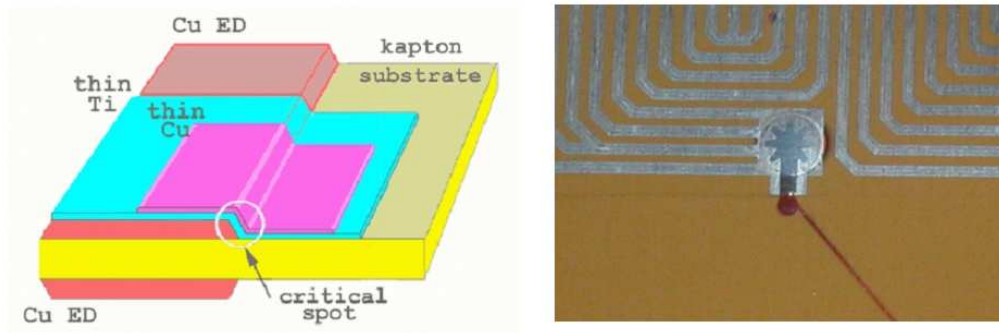


Abbildung 3.8: Schemazeichnung der aufgedampften Metallschichten auf der mittleren Kapton-Folie (links) und vergrößerte Aufnahme eines Kontakts mit einer Anschlussstelle eines Widerstands (rechts). Es muss an diesen Stellen ein recht großer Kupfertropfen benutzt werden, da die Kanten der Sensorzellen aufgrund des Höhenunterschieds im Material sensible Punkte darstellen.

platziert. Einer wird dabei innerhalb der Röhre angebracht und der andere wird von außen über die gesamte Röhre gestülpt (siehe Abbildung 3.9). Die sich zwischen den Schläuchen und im Volumen der Röhre befindliche Luft wird abgepumpt. Danach wird die Sonde in eine Kammer gelegt, in der Temperatur und Druck regelbar sind. Die Kammer wird mit gasförmigem Stickstoff mit einem Druck von 200 psi–400 psi beziehungsweise 13.79 bar–27.58 bar befüllt und auf 180 °C – 200 °C aufgeheizt. Nach einer Stunde ist der Acryl-Kleber ausgehärtet und die Folie fest mit der Wand der Röhre verbunden (Gregorczyk *et al.* 1999).

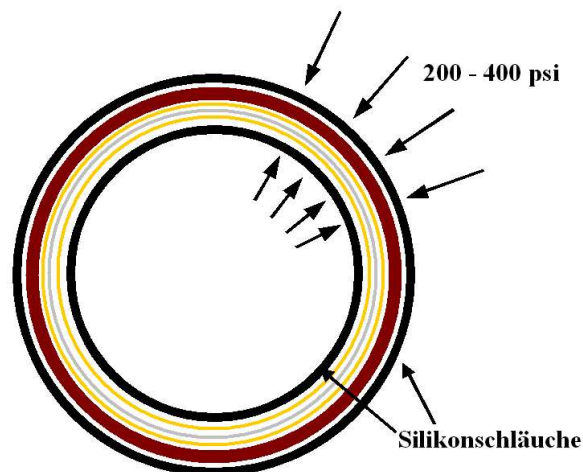


Abbildung 3.9: Schematische Ansicht des Verfahrens zum Anbringen der Folie an die Innenseite der Glasfaser-Röhre.

### 3.2.2 Kalibration der Thermalsonden

Vom Prinzip her gleichen die Sensoren den handelsüblichen PT100, nur dass hierbei die Widerstände bei  $0^\circ\text{C}$  nicht  $100\ \Omega$  betragen, sondern, abhängig von der Größe des jeweiligen Sensors, zwischen  $70\ \Omega$  und  $110\ \Omega$  liegen.

Die Rohdaten werden in ADC-Einheiten (**A**nalog-**D**igital-**C**hanger) gemessen und müssen zunächst in Widerstände umgewandelt werden, um daraus anschließend Temperaturen zu berechnen. Dazu müssen die Sensoren kalibriert werden. Für die Temperaturabhängigkeit des Sensorwiderstands wird wie bei den handelsüblichen PTs eine Approximation angenommen, über die dann der Widerstand  $R(T)$  eines jedes Sensors berechnet wird (siehe Gleichung 1.2).

Um nun die Parameter  $R_0$  und  $s$  zu bestimmen, werden die Sonden in einer Kammer (möglichst luftdicht, um störende Einflüsse zu vermeiden) platziert, deren Temperatur regelbar ist und kontrolliert wird. Die Sonde mit den Sensoren wird auf einem thermisch schlecht leitenden Material gelagert und die Widerstände (in ADC-Werten) kontinuierlich bestimmt. Parallel dazu werden die Temperaturen zur Kontrolle mittels mindestens zweier PT100 (in  $^\circ\text{C}$ ) gemessen, die an ausgewählten Stellen an der Sonde platziert werden. Dann werden jeweils zwei Messungen durchgeführt. Sie werden im folgenden als Heiz- und Kühlzyklus bezeichnet. Beim Heizzyklus wird die Kammer von der in ihr vorherrschenden Temperatur auf ungefähr  $60^\circ\text{C}$  erhitzt und beim Kühlzyklus auf circa  $-60^\circ\text{C}$  abgekühlt (die Endtemperatur ist abhängig vom gewählten Modell der Kammer, auch geringere Werte als die oben genannten sind ausreichend). Ist die gewählte Endtemperatur erreicht, wird die Kammer abgeschaltet und die Kammer kühlt respektive erwärmt sich passiv wieder bis zur Ausgangstemperatur. Da die Kammer mittels eines Ventilators auf ihre jeweilige Temperatur gebracht wird, gibt es eine Luftzirkulation in der Kammer, die unerwünscht ist und sich störend auf die Messung auswirkt. Aus diesem Grund wird nicht der Teil der Messung zur Bestimmung der Parameter gewählt, in dem die Kammer auf die gewünschte Endtemperatur gebracht wird, sondern der passive Teil, während dem sich die Kammer wieder auf die Ausgangstemperatur abkühlt beziehungsweise erwärmt. Diese Phasen benötigen mehrere Stunden und bieten so die Möglichkeit, Messwerte mit hinreichend großer zeitlicher Dichte und Anzahl aufzunehmen. Aus den gewonnenen Daten werden dann die gesuchten Parameter  $R_0$  und  $s$  wie folgt bestimmt:

Die Widerstandswerte jedes Sensors werden gegen die Durchschnittstemperatur der Referenz-PT100 aufgetragen. Aus dem Achsenabschnitt der Regressionsgeradengleichung wird der Widerstandswert bei  $0^\circ\text{C}$  ( $R_0$ ) bestimmt und die Steigung der Regressionsgeradengleichung geteilt durch den Achsenabschnitt definiert den Widerstandstemperaturkoeffizienten  $s$ . Dies wird für beide Temperaturzyklen durchgeführt und die Werte anschließend gemittelt. Zur Kontrolle der Werte werden diese wiederum in die gemessenen Daten einge-

setzt und die Widerstandswerte in Temperaturen umgewandelt. War die Messung genau, sollten alle Sensoren dieselben Temperaturen anzeigen.

Die gewonnenen Werte für  $R_0$  und  $s$  werden in einer Tabelle festgehalten und in die Benutzersoftware implementiert, um darauf bei der Umwandlung von Rohdaten in Temperaturwerte zurückgreifen zu können.

Um eine mögliche zeitliche Drift in den Sonden feststellen zu können, wird die Kalibrierung in gewissen Abständen wiederholt, um die Temperaturwerte möglichst exakt zu bestimmen (siehe Abschnitt 3.2.3).

Zu Anschauungszwecken wird im folgenden beispielhaft eine Kalibrationsmessung dargestellt und in allen Einzelheiten erläutert. Die Messung wurde im Institut für Geophysik der Universität Münster durchgeführt, da dort eine Kammer zur Verfügung stand. Vorherige Messungen wurden teilweise ebenfalls dort durchgeführt, aber auch am Space Research Centre in Warschau, wo die Sonden hergestellt wurden. Zwei Thermalsonden wurden auf einem Block aus Glasschaum platziert. Dieses Material hat eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit ( $0.045 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) und wirkt daher isolierend. Neben den Sonden wurden neun PT100 (Firma Ahlborn, Genauigkeit  $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ) in einer speziellen Vorrichtung arrangiert, die es ermöglicht, die PT100 exakt entsprechend zu den Mittelpunkten der EXTASE-Sensoren anzuordnen (siehe Abbildung 3.10).

Bei der ersten Messung wurde die Kammer auf  $-30 \text{ }^\circ\text{C}$  heruntergekühlt und nach knapp viereinhalb Stunden die Kühlung abgeschaltet. Während der nächsten Stunden erwärmte sich die Kammer wieder auf die Ausgangstemperatur (ca.  $17 \text{ }^\circ\text{C}$ ), bis die Messung schließlich per Zeitschaltuhr gestoppt wurde. Nachdem die Daten an den PC übertragen worden waren, wurde die nächste Messung vorbereitet. Der Messaufbau wurde unverändert belassen, die Kammer zwischenzeitlich auch nicht geöffnet, so dass stets gleiche Bedingungen herrschten. Bei dem zweiten Messzyklus wurde die Kammer auf  $+50 \text{ }^\circ\text{C}$  erwärmt. Auch hierbei wurde die Beheizung per Schaltuhr nach einigen Stunden abgeschaltet, das System kühlte sich passiv auf „Raumtemperatur“ ab und die Daten wurden abschließend übertragen. Zur Auswertung waren mehrere Schritte nötig:

- Zunächst wurden die Messdaten der neun PT100 gemittelt, da davon ausgegangen wurde, dass die Kammer überall die gleiche Temperatur aufwies und die Sensoren entsprechend die gleiche Temperatur messen sollten. Die Auswertung zeigt, dass diese Annahme berechtigt war, denn die Streubreite der Daten betrug maximal  $0.03 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- Aus den Rohdaten (in ADC-Einheiten) wurden die Widerstände der 16 Sensoren bestimmt (siehe Abschnitt 3.5); sie sind nur von den gemessenen Rohdaten und einem gerätespezifischen Wert der Elektronik abhängig.
- Anschließend wurden die Widerstände der einzelnen Sensoren jeweils gegen die Re-

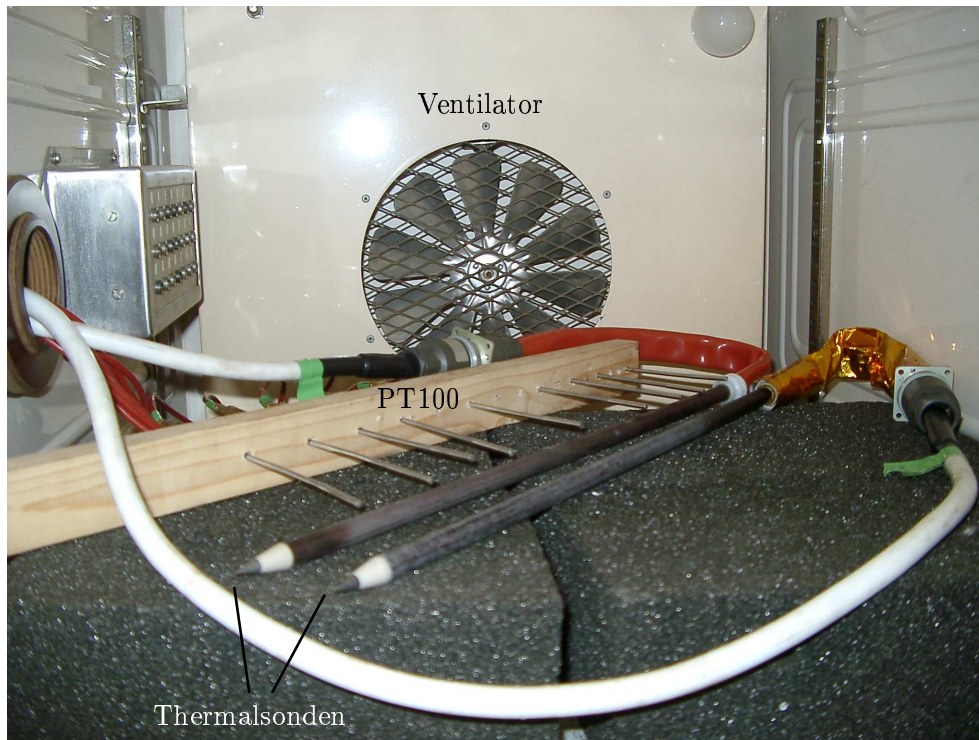


Abbildung 3.10: Wärmeschrank des Instituts für Geophysik der Universität Münster, in der ein Teil der Kalibrationsmessungen durchgeführt wurde. Im Vordergrund sind die beiden zu kalibrierenden Thermalsonden zu sehen. Daneben sind neun PT100 zu Kontrollzwecken platziert.

ferenztemperaturen der PT100 aufgetragen. Es ergab sich wie erwartet ein linearer Trend. Durch diese Daten wurde eine Ausgleichsgerade gelegt (Bestimmtheitsmaße lagen zwischen 0.9999 und 1), aus der sich dann die beiden gesuchten Parameter  $R_0$  und  $s$  ergaben. Der Wert des Achsenabschnitts ergab den Widerstand des Sensors bei  $0^\circ\text{C}$  ( $R_0$ ) und die Steigung geteilt durch den Achsenabschnitt lieferte den Widerstandstemperaturkoeffizienten ( $s$ ). Ein Beispiel für eine solche Anpassung ist in Abbildung 3.11 dargestellt.

- Um die Qualität der gewonnenen Parameter zu prüfen, wurden die Widerstände mit den bestimmten Parametern in Temperaturen umgewandelt. Danach wurden die Abweichungen dieser Temperaturen zu den Werten der Kontroll-PT100 berechnet. Diese lagen im Mittel bei  $0.096^\circ\text{C}$ , also recht genau im Bereich der Messgenauigkeit der Sonden selbst. Außerdem wurden noch die Temperaturen der 16 Sensoren miteinander verglichen, da sie alle dieselben Temperaturen anzeigen sollten. Die durchschnittlichen Abweichungen lagen hier bei  $0.04^\circ\text{C}$ , so dass abschließend gesagt werden kann, dass diese Methode der Kalibration zuverlässig und genau ist. Zur bildlichen Veran-

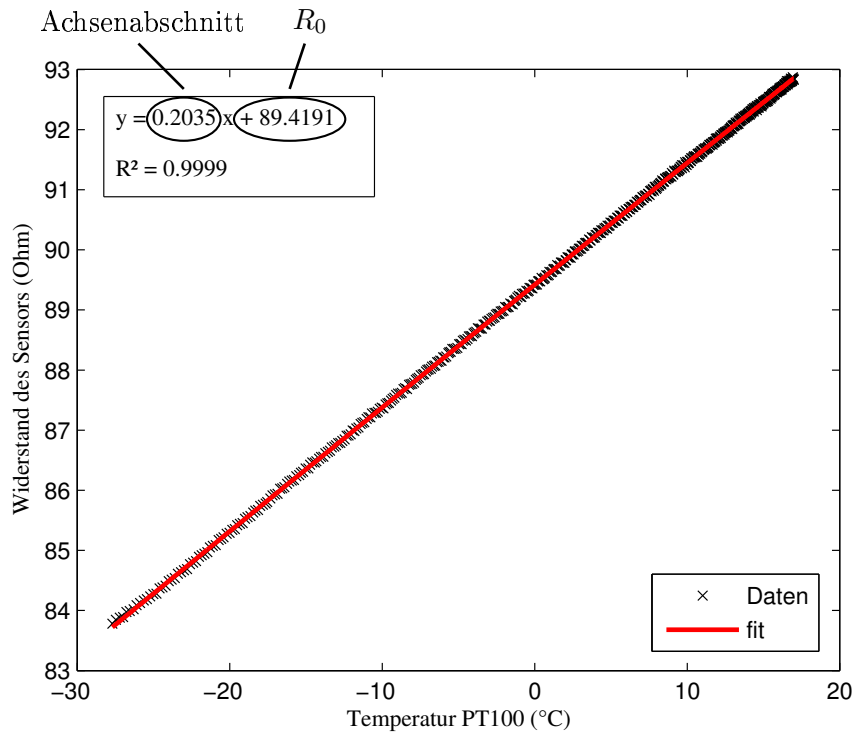


Abbildung 3.11: Bestimmung der gesuchten Parameter  $R_0$  und  $s$  aus den gemessenen Daten der EXTASE-Sensoren und der PT100.

schaulichung wurden die berechneten Temperaturen anschließend in Abhängigkeit von der Zeit aufgetragen. Bei einer guten Übereinstimmung sollten die Werte aller Sensoren aufeinander liegen, was sie auch tun, wie die Abbildung 3.12 zeigt.

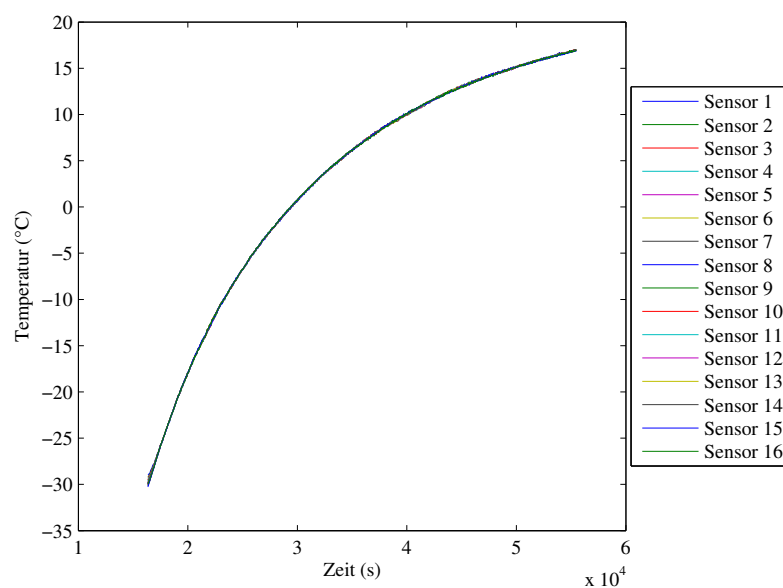


Abbildung 3.12: Abbildung aller 16 Sensoren zur Kontrolle der Qualität der Kalibration.



- Die gewonnenen Parameter werden in einer für jede Sonde charakteristischen Datei gespeichert (Beispiel siehe Tabelle 3.1). So können dann bei Messungen gewonnene Rohdaten in Temperaturen umgerechnet werden (Verfahren siehe Abschnitt 3.5). Dieses Verfahren wird für beide Temperaturzyklen durchgeführt und die Werte anschließend gemittelt. Die Abweichungen zwischen den beiden Zyklen liegen bei maximal  $0.08 \Omega$  für die Widerstände und bei maximal  $3.7 \times 10^{-5} K^{-1}$  für die Werte des Widerstandstemperaturkoeffizienten  $s$ .

Sensor (Nr.)	$R_0$ ( $\Omega$ )	$s$ ( $K^{-1}$ )
1	89.409	0.00228
2	85.779	0.00226
3	70.495	0.00229
4	64.930	0.00227
5	73.567	0.00213
6	69.763	0.00224
7	67.946	0.00224
8	79.862	0.00209
9	89.133	0.00204
10	84.473	0.00203
11	86.464	0.00201
12	93.977	0.00222
13	68.463	0.00226
14	68.558	0.00225
15	67.319	0.00227
16	64.641	0.00229

Tabelle 3.1: Kalibrationsparameter der Thermalsonde TP01.

### 3.2.3 Alterungsprozess der Sensoren

Wie bei anderen Sensoren auch, ändert sich der Widerstand der einzelnen Sensoren in der Thermalsonde mit der Zeit geringfügig. Ursachen für dieses „Altern“ der Sensoren ist die Tatsache, dass sich Metalle verändern, wenn sie zum Beispiel der Luft ausgesetzt sind. Auch durch ständiges Beheizen geht auf die Dauer minimal Material verloren, was sich auch in einer Änderung des Widerstands äußert. Um eine bestmögliche Genauigkeit der Temperaturmessungen zu erlangen, wurden die Sonden regelmäßig kontrolliert und neu kalibriert. Je älter die Sensoren sind, desto stabiler bleiben ihre Parameter. Werden die bei wiederholten Kalibrationsmessungen gewonnenen Daten verglichen, so zeigt sich, dass die Änderungen in den Widerständen der Sensoren minimal sind. Sie liegen maximal bei 0.6%. Da die Änderungen nur minimalen Einfluss auf die Umrechnung für die Messdaten haben, reicht es aus, die Sonden etwa alle 3–4 Monate zur Kontrolle neu zu kalibrieren.

## 3.3 Elektronik

Die Elektronik des Messsystems dient zum einen zur Steuerung der Messungen und zum anderen zur Speicherung der Messdaten. Pro Elektronik-Box können bis zu vier Thermalsonden gleichzeitig bedient werden, die Anschlüsse dafür befinden sich an einer Seite der Box (siehe Abbildung 3.13). Das Außenmaterial ist Metall (Material ROLEC EK162), die Abmessungen der Box betragen  $34 \times 18 \times 10$  cm (inklusive Handgriff) und das Gewicht 5 kg (inkl. Akkus). Die exakten Abmessungen sind den technischen Zeichnungen im Anhang zu entnehmen.

Für die Stromversorgung sind in der Elektronik-Box sechs Blei-Akkus untergebracht (siehe Abbildung 3.14), die es ermöglichen, abhängig von dem Messprogramm mehrere Tage lang zu messen. Eine Messung über 48 Stunden mit einer Sonde mit einer Abtastrate von 30 Sekunden bei der kontinuierlich nacheinander alle Sensoren beheizt werden, um die Wärmeleitfähigkeit zu bestimmen, ist problemlos möglich. Zum Laden oder für Messungen, bei denen eine externe Stromversorgung möglich ist, verfügt die Box über ein 230 V-Netzteil. Außerdem kann die Elektronik auch über externe Batterien betrieben werden, beispielsweise mit einer Autobatterie mit 12 V.

Die Verbindung zum PC wird entweder durch eine Kabelverbindung mit der seriellen Schnittstelle (RS232) oder durch die Funkverbindung realisiert. Dazu besitzt die Elektronik eine Antenne (Abbildung 3.13) und an den Rechner wird ein externer Empfänger angeschlossen (Abbildung 3.15).

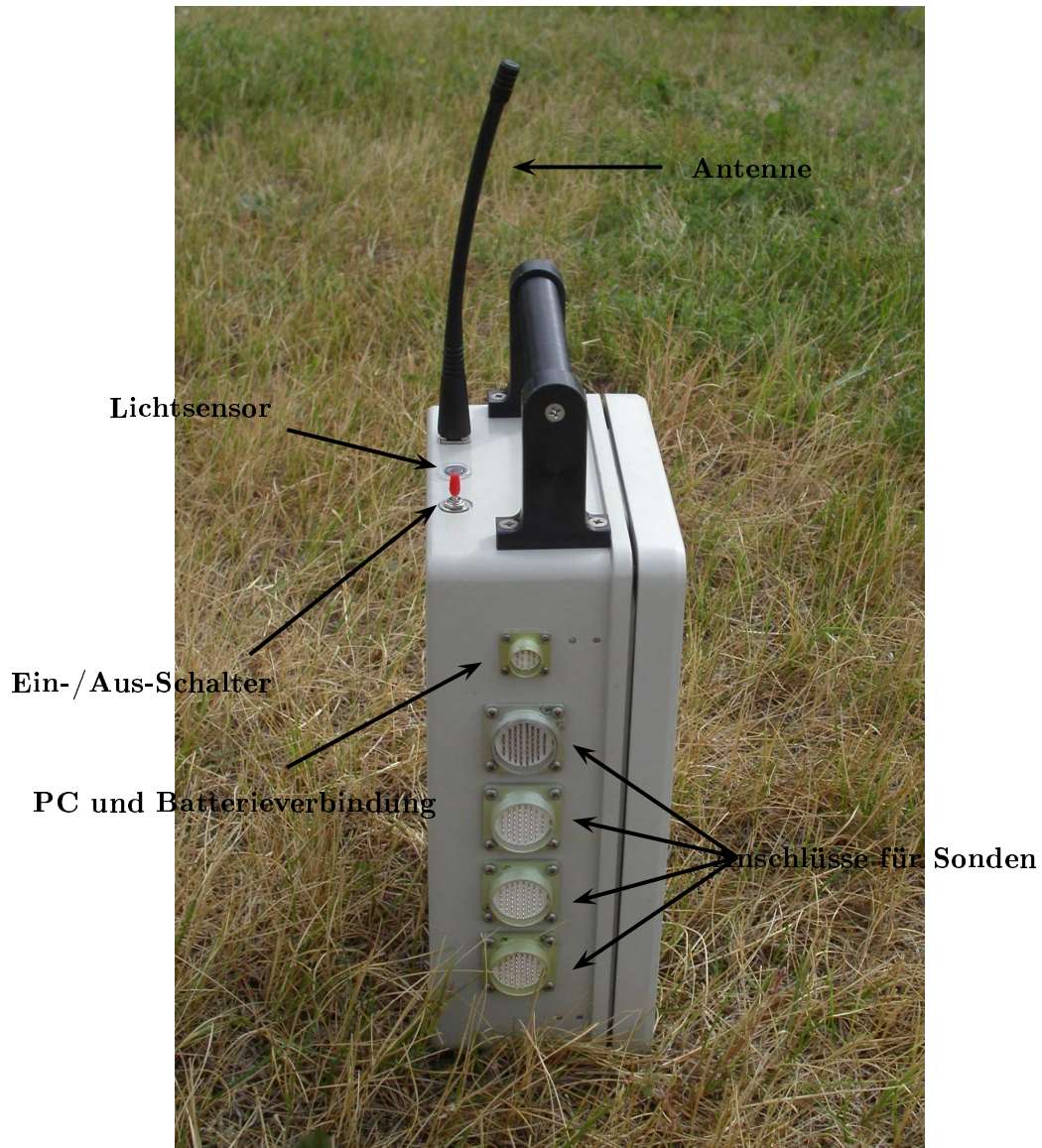


Abbildung 3.13: Elektronik des EXTASE-Messsystems wie sie für die in dieser Arbeit beschriebene Messungen genutzt wurde.

Zusätzlich verfügt die Elektronik über einen Lichtsensor (siehe Abbildung 3.13), der einen qualitativen Hinweis auf die während der Messung vorherrschende Helligkeitssituation liefert (siehe Tabelle 3.2). Dies kann bei der Interpretation der Daten hilfreich sein. Sind die Wetterbedingungen nicht bekannt, weil der Benutzer bei der Messung nicht zugegen war, können mit Hilfe der Daten des Lichtsensors Rückschlüsse gezogen werden, zum Beispiel, ob Schwankungen in der Temperatur durch variierende Bewölkung verursacht wurden. Sämtliche Skizzen und Schaltpläne der Elektronik sind im Anhang der Arbeit zu finden.

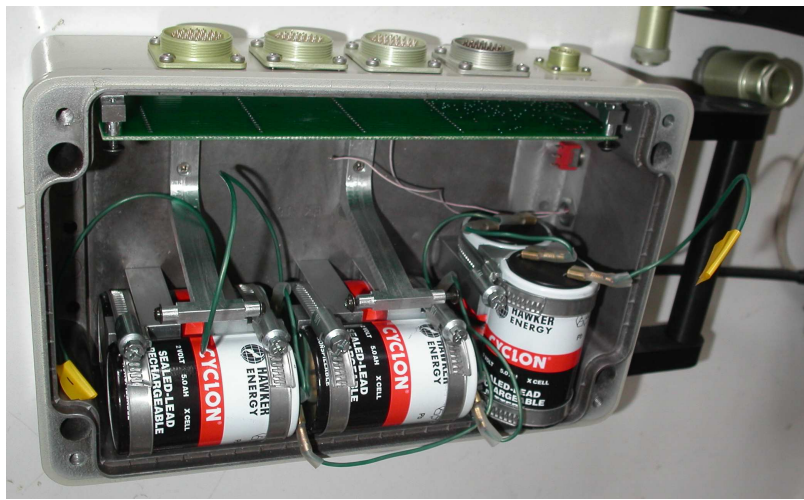


Abbildung 3.14: Blick in die geöffnete Elektronik-Box (vor dem Einsetzen der restlichen Bauteile) mit sechs Akkus zur Stromversorgung.

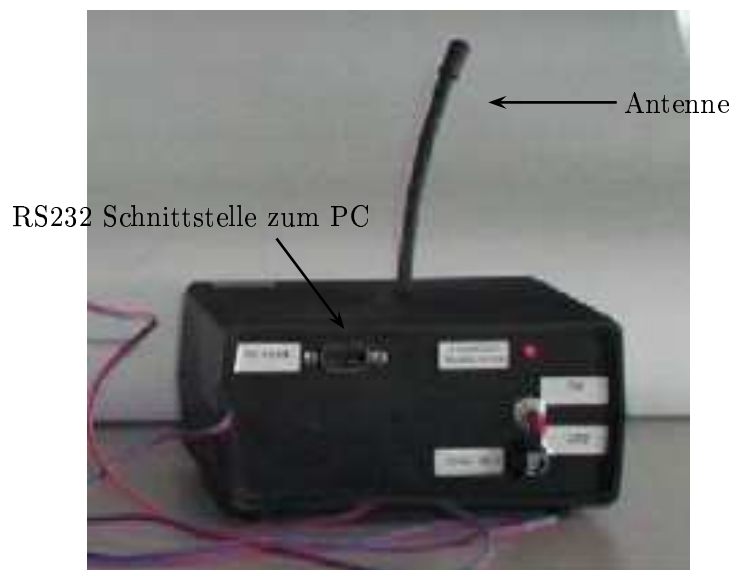


Abbildung 3.15: Empfänger-Box am Rechner für die Funkfernverbindung zur Elektronik.

### Lichtsensord

Die Messwerte des Lichtsensors sind einheitenlos und können als Maß für die vorherrschende Helligkeit während der Messung dienen. Die nachstehende Tabelle gibt Richtwerte für die Anzeigen des Lichtsensors:

gemessener Wert	Lichtsituation
15-25	absolut dunkel
500-1000	mittelhell, im Labor, mit Deckenlicht
1000-5000	mittelhell, im Labor bei Tageslicht, im Wald bei sonnigen Wetter
10000-20000	sehr hell, bei eingeschaltetem Licht im Labor, sonnig

Tabelle 3.2: Richtwerte für die Anzeige des Lichtsensors.

## 3.4 Datenstruktur

Die in der Elektronik gespeicherten Daten werden auf den PC übertragen und im ASCII-Format in der Reihenfolge der aufgenommenen Werte (*records*) gespeichert. Ein *record* besteht aus einer Zeile mit 45 ganzzahligen Werten zwischen 0 und 65536 und beinhaltet jeweils die Zeitangabe, die Messwerte für alle 16 Sensoren zu diesem Zeitpunkt, den Messwert des Lichtsensors und die geräteinternen Daten der Elektronik. Die Bedeutungen der einzelnen Werte erschließt sich wie folgt:

- Die ersten sechs Werte in den Positionen **0** – **5** stellen die Zeit (Reihenfolge: Jahr, Monat, Tag, Stunde, Minute, Sekunden) dar, wobei diese Werte immer gleich bleiben und den Startpunkt der Messung darstellen.
- Der Wert in Position **6** zeigt die fortlaufende Zeit in Sekunden an, die seit dem Start der Messung vergangen ist.
- Position **7** gibt die Sondennummer an. Pro Elektronik-Box können bis zu vier Sonden gleichzeitig angeschlossen werden, daher gibt es an dieser Position Nummern von 1 bis 4.
- Von Position **8** bis **39** gehören immer zwei Spalten zusammen. Dabei steht in der ersten Spalte der Messwert eines Sensors und die darauf folgende zeigt entweder eine 0 oder eine 1 an, wobei 1 bedeutet, dass der Sensor beheizt wurde und 0, dass er nur Temperaturen aufgenommen hat. Die Reihenfolge der Sensoren wird hier in *channels* von unten nach oben gezählt (*channel* 1 = Sensor 16), das heißt, in Position **8** und **9**

stehen die Messwerte vom untersten und damit größten Sensor (Nr. 16), in Position **38** und **39** die vom obersten Sensor und kleinsten (Nr. 1).

- Die letzten fünf Positionen zeigen die sogenannten *housekeeping*-Werte (geräteinterne Werte):
  - **40** *short channel*, wird zur Umrechnung der Daten in Temperaturen benötigt,
  - **41** Werte des Referenz-PT100 am oberen Ende der Sonde,
  - **42** die Daten des Lichtsensors in einem einheitenlosen Relativwert (siehe Abschnitt 3.3),
  - **43** *house keeping* Wert der 3V Stromversorgung,
  - **44** *house keeping* Wert der 5V Stromversorgung.

Die beiden *house keeping* Werte werden nicht für die Messungen benötigt, sie dienen nur als Kontrolle für die Stabilität der Elektronik.

Nach dem Übertragen der Daten an den PC erfolgt die Umrechnung der ADC-Werte zunächst in Widerstände und anschließend in Temperaturen. Die dazu verwendeten Formeln sind in Abschnitt 3.5 zu finden. Für den letzten Schritt werden die Daten aus der Kalibration benötigt, wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben. Nach diesen Umrechnungen stehen die Daten dann in Form von Temperaturen (in °C) der weiteren Verarbeitung zur Verfügung.

### 3.5 Umrechnung von Messwerten

Die EXTASE-Sensoren sind Widerstandssensoren. Aufgenommen werden die Messwerte in ADC-Einheiten, daher ist es notwendig, die Daten zunächst in Widerstände und anschließend in Temperaturen umzurechnen, dies geschieht nach folgendem Schema:

- Umrechnung von ADC-Werten in Widerstände:

$$R(\Omega) = \frac{R(ADC) - short(ADC)}{scalingfactor} \quad , \quad (3.1)$$

mit:

- $R(ADC)$ : Messwerte in ADC-Einheiten,
- $short(ADC)$ : Messwerte des *short*-Wertes aus den *housekeeping*-Daten,
- $scalingfactor$ : geräteabhängiger Kalibrationswert der Elektronik; bei dem in dieser Arbeit genutzten Gerät ist der Wert 439.5.

- Umrechnung von Widerständen in Temperaturen:

$$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{\frac{R(\Omega)}{R(0^{\circ}\text{C})} - 1}{s} , \quad (3.2)$$

wobei:

- $R(\Omega)$ : Widerstand nach Gleichung 3.1,
- $R(0^{\circ}\text{C})$ : Widerstand des beheizten Sensors bei  $0^{\circ}\text{C}$  aus den Kalibrierungsdaten (siehe Kapitel 3.2.2),
- $s$ : Widerstandstemperaturkoeffizient des beheizten Sensors aus den Kalibrierungsdaten (siehe Kapitel 3.2.2).

Sind Sensoren beheizt worden, um die Wärmeleitfähigkeit zu bestimmen, muss die Heizleistung in Watt bekannt sein. Gemessen wird die Leistung im einheitenlosen *PowerLevel* (siehe Abschnitt 3.6) und muss daher umgerechnet werden. Dies geschieht nach folgender Formel:

$$\text{Heizleistung(W)} = \frac{11.7^2 \cdot \frac{\text{PowerLevel}}{60} \cdot \frac{sp - (N \cdot 1.6)}{sp} \cdot \frac{1}{2}}{R(\Omega)} \quad (3.3)$$

wobei:

- $PL$ : *PowerLevel* in Stufen, einheitenlos
- $sp$ : Abtastrate (*sampling period*) der Messung in Sekunden
- $N$ : Anzahl der angeschlossenen Sonden.

Die Umrechnung der Daten erfolgt intern in der Benutzersoftware.

## 3.6 Das Messverfahren

Die Messmethode der EXTASE-Thermalsonden wurde angeregt durch das Messprinzip einer Linienquelle, auch bekannt als *Line heat source* Methode (siehe 1.2.2), die eine Standardmethode zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Materialien darstellt (siehe 1.2.2). Die Methode wurde im Rahmen dieser Arbeit erweitert, um eine Messung der räumlichen Verteilung der thermischen Eigenschaften zu ermöglichen.

Anstatt eine sehr lange und dünne Sonde zu beheizen (und stillschweigend in vertikaler Richtung Homogenität und Isothermie vorauszusetzen), werden nur kurze (1 bis 4 cm) ringförmige Segmente beheizt. Das Verfahren basiert auf demselben Prinzip: eine Heizung des Segments verursacht eine Temperaturerhöhung im Sensor selbst, die von der bekannten Heizleistung und der Wärmeleitfähigkeit der Umgebung abhängt. Die Sonden enthalten 16 dieser Sensoren in vertikaler Anordnung; so kann ein Tiefenprofil der Wärmeleitfähigkeit bestimmt werden, ohne die Sonde zu bewegen. Das Messverfahren und die dazugehörige Methode der Auswertung der Wärmeleitfähigkeitsmessungen werden detailliert in Kapitel 5 beschrieben. Die Abtastrate der Temperatur beträgt im Minimum zwei Sekunden bei reiner Temperaturmessung, mindestens vier Sekunden, wenn bei einer Sonde zusätzlich Sensoren beheizt werden und maximal 65535 Sekunden. Für die Messung der Temperatur wird der Heizzyklus für einige Millisekunden unterbrochen, was keinen Einfluss auf den Heizvorgang hat, da sich eine Heizphase im Normalfall über mehrere Minuten erstreckt. Die kürzeste Heizphase, die eingestellt werden kann, beträgt eine Sekunde, also immer noch zwei Größenordnungen mehr, als die Dauer der Temperaturmessung.

Jedes Sensorelement wird bei der Messung mit konstantem Strom abgetastet, um eine Messung der Temperatur zu erhalten. Dasselbe Element wird mit konstanter Spannung beheizt, wenn es als Wärmeleitfähigkeitssensor eingesetzt wird. Die Funktionen des Beheizens und der Temperaturbestimmung werden dadurch getrennt, dass die Operationen zeitlich im Multiplex-Verfahren durchgeführt werden.

Für die Temperaturmessung werden die Sensoren mit kurzen Strompulsen von 20 mA gespeist. Für einen einzigen gespeicherten Messwert werden 16 Pulse gemittelt. Zusätzliche erfolgt eine weitere Mittelung über 270 Messwerte. Beim Heizvorgang wird eine Serie von Strompulsen mit einer Periode von  $84 \mu\text{s}$  stetig wiederholt. Die Rate der Leistung wird durch die Wiederholrate der Pulse kontrolliert. Das Kontrollsystem nutzt eine 16-bit Auflösung für den reinen Messmodus und eine 12-bit Auflösung für die Heizrate im Heizmodus. Die verfügbare Heizleistung liegt bei ungefähr 1 W. Die Leistung wird dabei zunächst im sogenannten einheitenlosen *PowerLevel* gemessen. Der *PowerLevel* kann von Level 0 bis 60 (maximal erreichbare Leistung) variiert werden. Die verfügbare Leistung beträgt insgesamt 4 W (für alle Sonden und Sensoren zusammen) und gut 1 W zum Beheizen eines Sensors. Eine Erhöhung der maximalen Heizleistung eines Sensors ist einerseits nicht nötig, da die gewünschten Messungen mit 1 W durchgeführt werden können und andererseits nicht möglich, da eine höhere Heizleistung zu irreparablen Schäden an den Sensoren führen können.



## 3.7 Software

Die Benutzer-Software wurde von Dipl. Phys. Kai Multhaup entwickelt und soll der Vollständigkeit halber mit aufgeführt werden. Die Software sollte folgende Aufgaben erfüllen:

1. die Umsetzung von Benutzervorgaben in Befehle für die Steuerelektronik,
2. die Abfrage und Archivierung von Messergebnissen/Daten,
3. der Export von Messdaten in unterschiedliche Dateiformate,
4. die Aufbereitung, Auswertung und Visualisierung von Rohdaten,
5. die Protokollierung des Versuchsablaufs und automatisierte Reportgenerierung.

Nach einer Evaluierung einiger möglicher Entwicklungsumgebungen wurde Borland Delphi<sup>©</sup> für die Implementierung der Software ausgewählt. Diese Umgebung erlaubt die Entwicklung unter Windows lauffähiger Software, wobei die Verwendung der Bibliotheken gewährleistet, dass zu einem späteren Zeitpunkt bei Bedarf eine unter Linux betriebsfähige Version des Programmpakets erstellt werden kann. Lediglich das Interface<sup>2</sup> zur Steuerelektronik wäre dann noch zu portieren. Die Software ist modular ausgelegt, wobei die einzelnen Module mit ihren unterschiedlichen Aufgaben über ein Interface miteinander verbunden sind (Abbildung 3.16).

Die Treiberbibliothek (DLL=**D**ynamic **L**ink **L**ibrary) zur Kommunikation mit der EXTASE-Steuerelektronik ist bereits am Space Research Centre in Warschau fertiggestellt worden; darauf baut nun die Software, die am Institut für Planetologie der Universität Münster (IfP) entwickelt wurde, auf. Da der Treiber mit jeder möglichen Kombination zusätzlicher Module anwendbar sein muss, wird er als DLL mit einem Satz definierter Exportfunktionen zur Verfügung gestellt. Problematisch ist, dass unter Microsoft Windows<sup>™</sup> nur je eine Anwendung zugleich Zugriff auf den RS-Port des Systems hat. Da nun gegebenenfalls mehrere Anwendungen zur selben Zeit mit der Steuerlektronik kommunizieren können sollen, wurde das Programm **Agent RS** entwickelt. Agent RS vermittelt zwischen der Treiber-DLL und dem RS-Port. Während Agent RS die einzige Anwendung ist, die über den RS-Port kommunizieren darf, können andere Programme diesen Ausgang simultan über die DLL benutzen. Zugriff auf die DLL steht beliebig vielen aufrufenden Anwendungen offen, also gegebenenfalls auch unabhängig arbeitenden Modulen aus dem Endbenutzerssoftwarepaket. Außerdem besitzt Agent RS auch eine Benutzeroberfläche, die für die folgenden Funktionen entworfen wurde:

---

<sup>2</sup>Im Bereich der Computer werden allgemein viele englische Begriffe benutzt. Da es wenig Sinn macht, diese Begriffe „einzudeutschen“, wurde auf eine Übersetzung verzichtet.

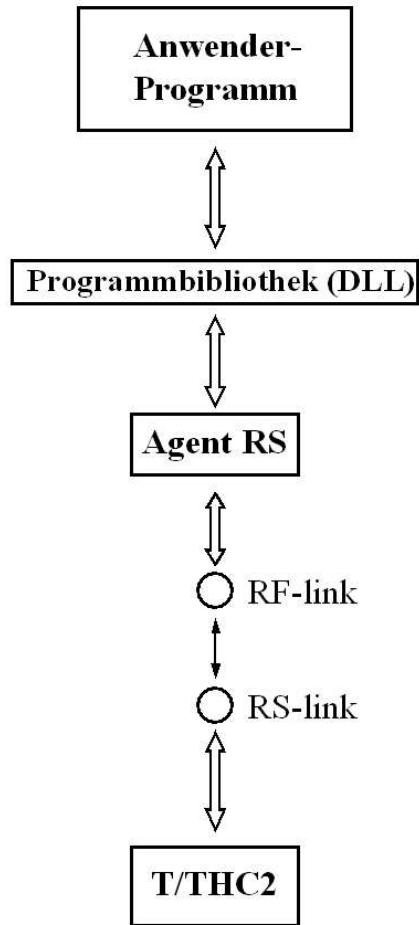


Abbildung 3.16: Flussdiagramm der Software. Dabei ist „T/THC2“ die Produktbezeichnung des Messsystems und „RF-/RS-link“ bezeichnet die Funk- bzw. die Kabelverbindung von einer Elektronik-Box zu einem Rechner. Das Programm „Agent RS“, die Programmbibliothek und das Anwenderprogramm werden im weiteren Text erläutert.

1. Zur Konfiguration der seriellen Schnittstelle (Baudrate...) und der Parameter für die Datenübertragung (*timeout...*).
2. Zur Darstellung des Datenverkehrs der RS-Verbindung, angegeben in *bytes* oder als Datenpakete.

Zur Vorbereitung eines Experiments spezifiziert der Anwender seine Vorgaben in Form eines Dialogs mit dem entsprechenden Modul. Dieses setzt das so definierte *Setup* in für die Elektronik verständliche Befehle um und sendet sie mittels Funktionen aus der DLL über RS Agent an die Steuerelektronik, mit der der PC des Experimentators verbunden ist. Nach Versuchsende werden die gesammelten und in der Steuerelektronik gespeicherten

Messdaten abgerufen. Das dafür zuständige Modul ist auch während des Versuchs jederzeit aufrufbar, um den Fortschritt des Experiments zu überprüfen. Die in einem binären Format gespeicherten Rohdaten werden mit Hilfe von Exportfiltern in gängige Dateiformate übertragen, beispielsweise in .txt- oder .csv-Dateien. Dabei ist der Anwender jedoch nicht auf externe Programme zur Verarbeitung seiner Daten angewiesen, denn zum Softwarepaket gehört ein Modul, das die Funktionen zur Auswertung der Messergebnisse und grafischen Darstellung bereitstellt. Gemeinsam mit Karten sowie Fotos der Versuchsumgebung sind diese Grafiken in einem Report fixierbar, den die Software für den Anwender erstellt. Dieser liegt im html-Format vor und kann somit unverzüglich im Intranet eines Unternehmens oder Instituts (oder auch im Internet) bereitgestellt werden. Bei der Planung der Software wurde berücksichtigt, dass zu den Anwendern auch Experimentatoren gehören werden, die nur gelegentlich mit EXTASE arbeiten und sich somit schnell in das Programm einarbeiten müssen. Darüber hinaus soll das Softwarepaket dem Benutzer soviel Arbeit wie möglich abnehmen. Die Bedienung ist intuitiv: Der Anwender soll sich auf seine wissenschaftliche Arbeit konzentrieren können, ohne von einem Programm mit komplexer Benutzerführung behindert zu werden. Im folgenden werden die einzelnen Module und ihre Funktionen kompakt vorgestellt.

## Benutzer-Programm

Das Programm startet und zeigt folgende Startschaltfläche:



Abbildung 3.17: Startschaltfläche der Anwendersoftware.

Beim Starten des Programms wird automatisch auch das Programm RS Agent mit folgender Benutzeroberfläche gestartet:

Konfiguration der RS232-Schnittstelle

Übertragungsparameter

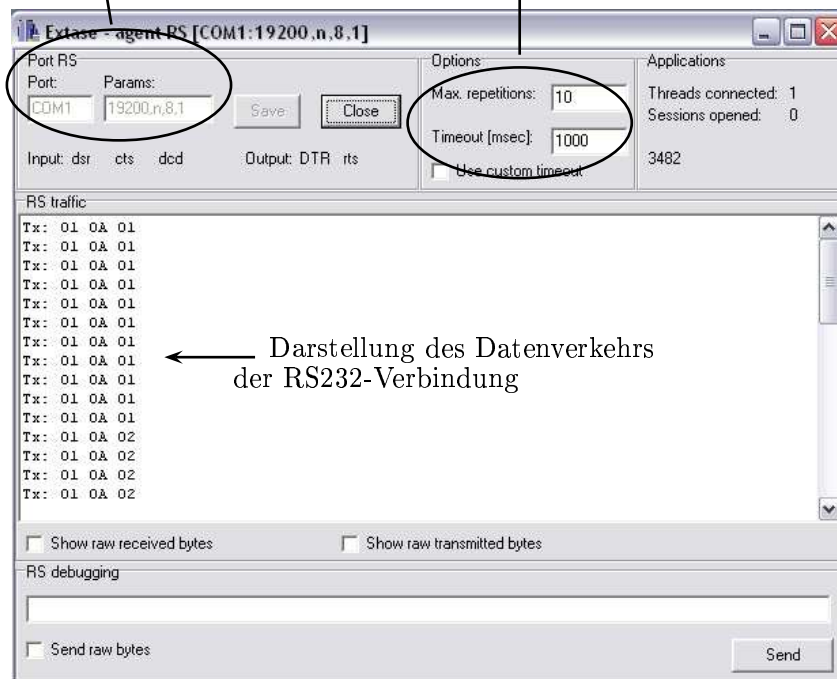


Abbildung 3.18: Benutzeroberfläche des Programms RS Agent.

Vor Beginn einer Messung wird ein Arbeitsverzeichnis (*workspace*) festgelegt, in dem sich der Übersicht halber alle zu einer Messung gehörenden Daten und Dateien befinden müssen. Dieses Verzeichnis wird an der Startschaltfläche definiert (siehe Abbildung 3.19) und in ihm werden alle bei einer Messung anfallenden/benötigten Dateien gespeichert.

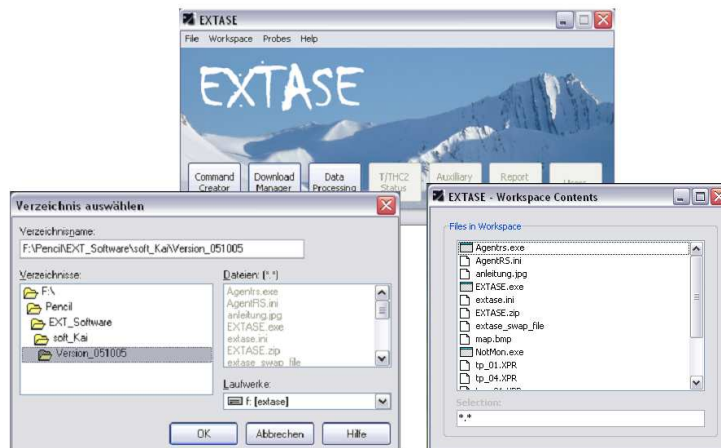


Abbildung 3.19: Startfläche mit *workspace*-Fenster (links) und Beispiel für den Inhalt eines *workspace* (rechts).

In diesem Verzeichnis müssen sich auch die sondenspezifischen Sensorendateien befinden, die die Werte aus der Kalibrierung enthalten (Abschnitt 3.1), damit im weiteren Verlauf die Rohdaten in Widerstände, respektive Temperaturen, umgewandelt werden können. Diese müssen vor Beginn der Messung festgelegt werden, damit bei der späteren Auswertung auf die richtigen Dateien zurückgegriffen werden kann. Mit dem *Probe Editor* können bei Bedarf diese Dateien verändert oder komplett neue Dateien erstellt werden (siehe Abbildung 3.20).

Von der Startfläche aus können die einzelnen oben genannten Module angesteuert werden, die zur Durchführung und ersten Auswertung einer Messung nötig sind. Zunächst muss ein *Setup* für die Messung definiert werden, dies geschieht mit Hilfe des ersten Moduls, dem *Command Creator*:

### Modul 1 - Umsetzung von Benutzervorgaben in Befehle für die Steuerelektronik, *Command Creator*

Mit diesem Modul kann der Anwender komplexe *Setups* an die Steuerelektronik senden und somit den Versuchsablauf festlegen. In einem solchen *Setup* wird beispielsweise festgelegt, wann welcher Sensor mit welcher Heizleistung beheizt wird und in welchen Abständen Temperaturen gemessen werden sollen. Dabei wurde darauf geachtet, dass die eingegebenen Konfigurationen physikalisch Sinn ergeben. Bei fehlerhaften Eingaben wird der Benutzer

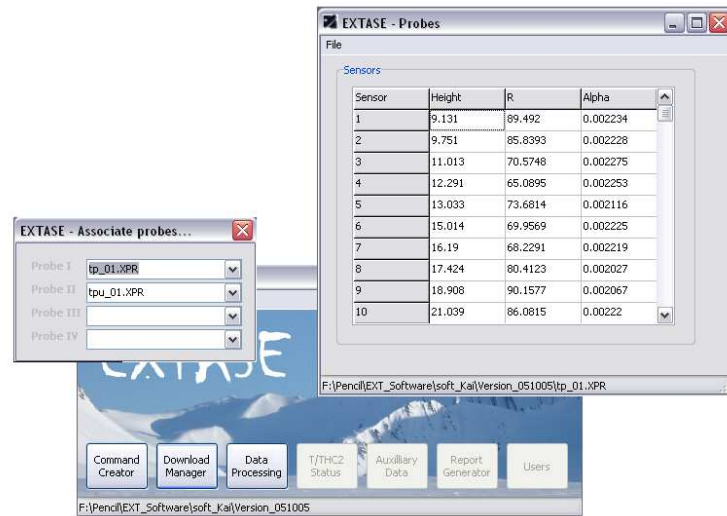


Abbildung 3.20: Screenshot des Sonden-Editors (rechts) und der Funktion „Sonden assoziieren“ (links).

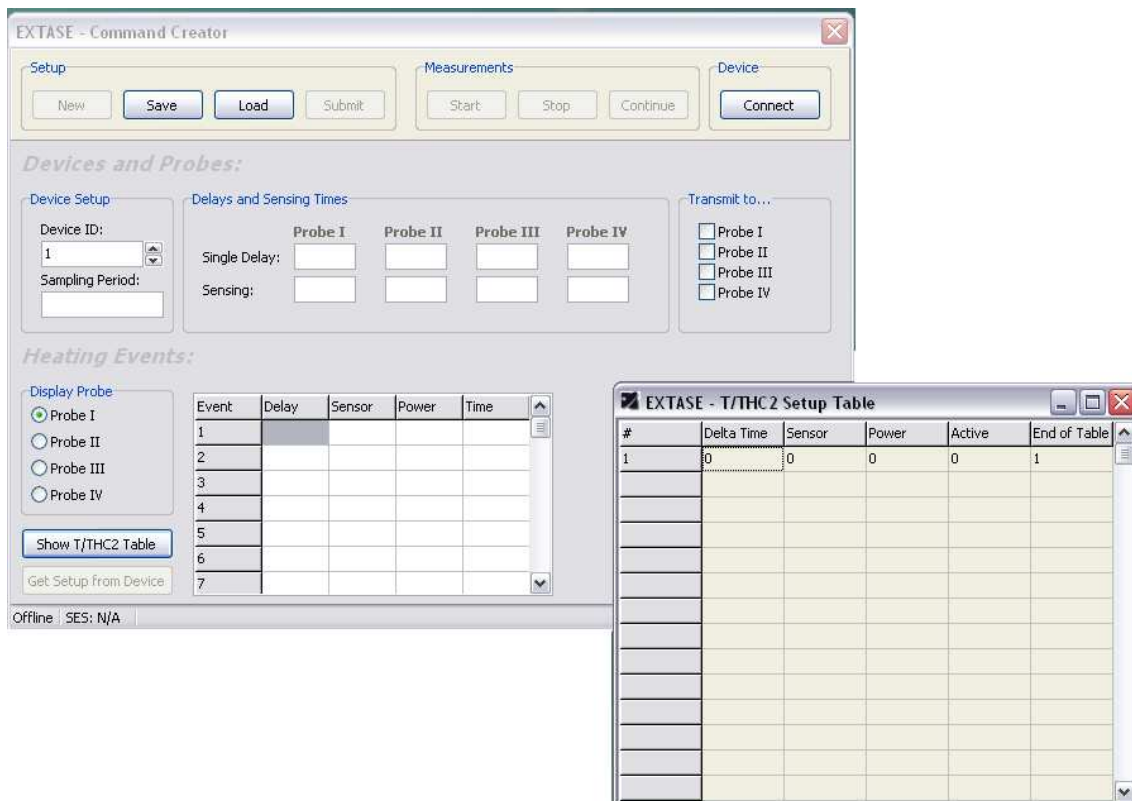


Abbildung 3.21: Screenshot des *Command Creator* für das *Setup* der Messungen

mittels einer Fehlermeldung darauf aufmerksam gemacht. Ist ein *Setup* vollständig, kann es abgespeichert werden, um gegebenenfalls bei einer anderen Messung erneut verwendet zu werden. Abschließend werden die eingegebenen Parameter von dem Modul an die Steuerelektronik übertragen und die Messung kann gestartet werden.

Ist die Messung abgeschlossen, müssen die Daten aus dem Speicher der Elektronik ausgelesen werden. Dies geschieht mittels des *Download Managers*:

## Modul 2 - Download Manager

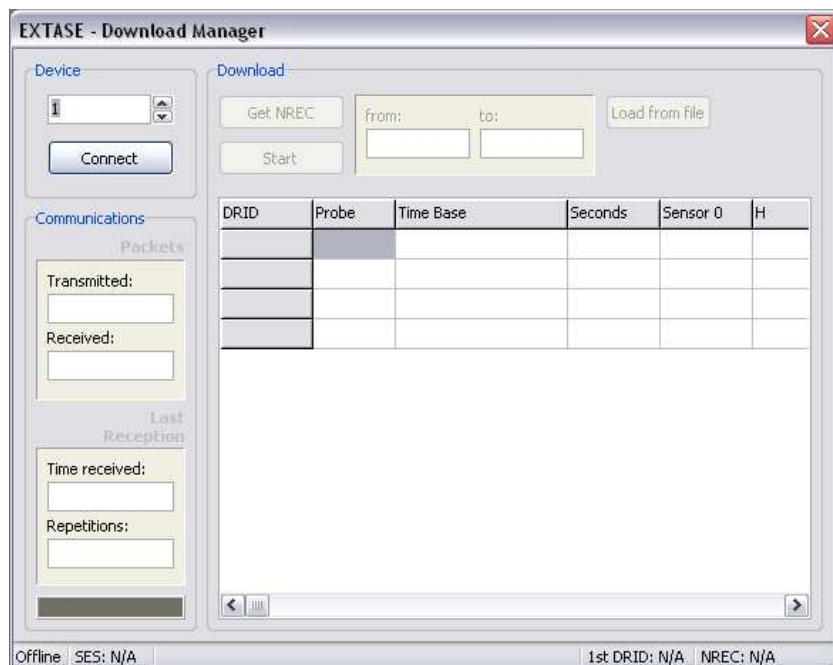


Abbildung 3.22: Screenshot des *Download Managers*

Dieses Modul stellt sicher, dass die von der Steuerelektronik zwischengespeicherten Daten an einen PC übertragen und dauerhaft lokal gesichert werden. Die Rohdaten werden dabei nicht als ASCII-Dateien, sondern im binären Format gespeichert, um so beabsichtigte oder unbeabsichtigte Manipulationen durch den Anwender zu verhindern. Außerdem erfolgt der gezielte Zugriff auf Datenelemente während der Laufzeit des Programms so wesentlich schneller. Zusätzlich überwacht das Modul den Zustand des Speichers der Steuerelektronik (Abbildung 3.23). Dieser kann über die Schaltfläche „T/THC2 Status“ in der Startschaltfläche abgerufen werden (siehe Abbildung 3.17).

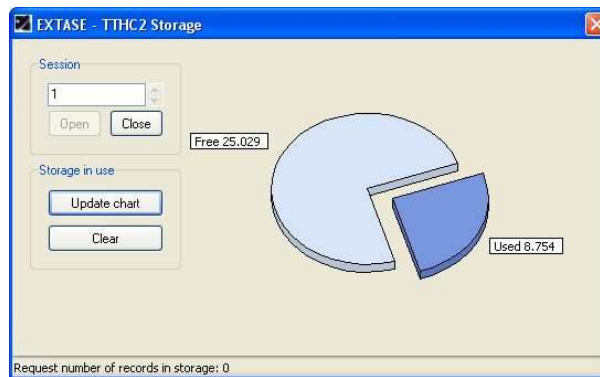


Abbildung 3.23: Tool zum Überprüfen des Speicher-Status.

Die Weiterverarbeitung der Daten und auch die Möglichkeit, die Daten in anderen Formaten abzuspeichern und zu exportieren, bietet das Modul 3 – *Data processing*:

### Modul 3 - Daten umrechnen, exportieren und visualisieren – *Data processing*

In diesem Modul können die Daten vom Rohformat (ADC) in Widerstände (Ohm) und Temperaturen ( $^{\circ}\text{C}$ ) umgerechnet und in andere Formate exportiert werden (Abbildung 3.24). Außerdem bietet dieses Modul die Möglichkeit, die Daten grafisch darzustellen, sowohl als Liniengrafen (Abbildung 3.25) als auch als 2D-Farbabbildungen (Abbildung 3.26).

Sondenauswahl    Linien- oder Farbplot

EXTASE - Data Center [Probe 1]										
Sensornummer										
File	Units	Probes	Graphics							
Time	501	502	503	504	505	506	507	508	509	
12/01/2005 15:26:13	41564	39897	32930	30377	34233	32556	31732	37077	41261	
12/01/2005 15:26:28	41605	39935	32960	30404	34273	32597	31772	37113	41301	
12/01/2005 15:26:43	41598	39960	32982	30421	34289	32620	31794	37138	41328	
12/01/2005 15:26:58	41639	39998	33012	30452	34315	32633	31810	37163	41361	
12/01/2005 15:27:13	41680	40036	33038	30479	34350	32673	31844	37193	41397	
12/01/2005 15:27:28	41681	40059	33079	30511	34385	32708	31875	37226	41431	
12/01/2005 15:27:43	41709	40089	33118	30555	34428	32751	31911	37271	41481	
12/01/2005 15:27:58	41744	40144	33160	30590	34464	32788	31957	37314	41531	
12/01/2005 15:28:13	41753	40187	33203	30629	34511	32832	32012	37367	41580	
12/01/2005 15:28:28	41794	40234	33246	30675	34565	32874	32054	37417	41636	
12/01/2005 15:28:43	41844	40281	33293	30727	34611	32928	32095	37471	41712	
12/01/2005 15:28:58	41878	40321	33346	30765	34664	32978	32148	37527	41764	
12/01/2005 15:29:13	41934	40383	33384	30817	34710	33028	32193	37569	41820	
12/01/2005 15:29:28	41950	40435	33437	30865	34761	33074	32240	37636	41888	
12/01/2005 15:29:43	42005	40485	33485	30902	34801	33127	32293	37677	41946	
12/01/2005 15:29:58	42053	40537	33531	30951	34857	33181	32338	37739	41991	
12/01/2005 15:30:13	42109	40588	33587	31000	34911	33222	32390	37790	42060	
12/01/2005 15:30:28	42156	40642	33629	31051	34971	33280	32443	37850	42129	
12/01/2005 15:30:43	42205	40704	33683	31098	35018	33338	32499	37908	42205	
12/01/2005 15:30:58	42255	40762	33735	31157	35077	33392	32545	37958	42256	
12/01/2005 15:31:13	42311	40818	33793	31204	35128	33449	32612	38026	42332	

Abbildung 3.24: Screenshot der Funktion zum Umrechnen der Rohdaten und zur Darstellung der Daten.



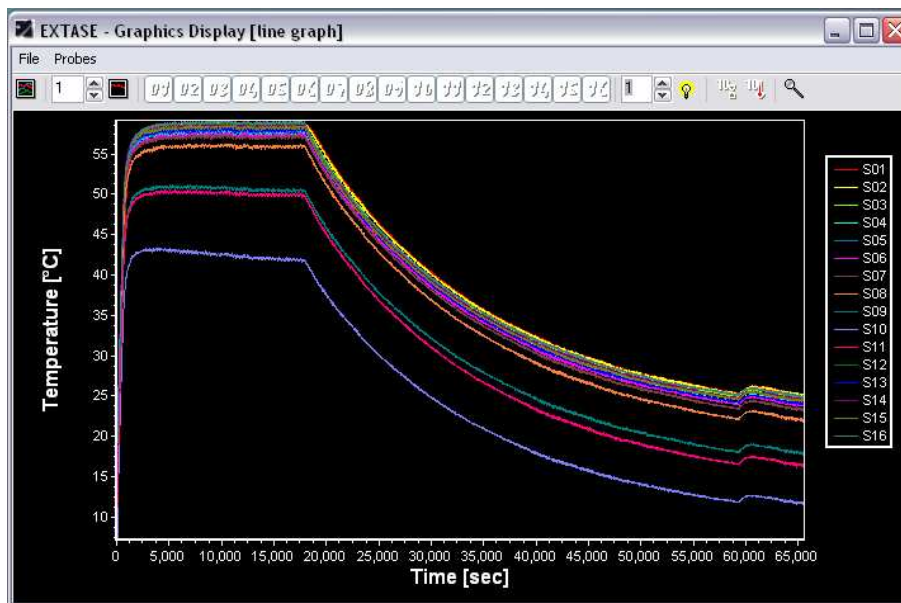


Abbildung 3.25: Beispiel für die Darstellung von Daten mit der Liniengrafen-Option.

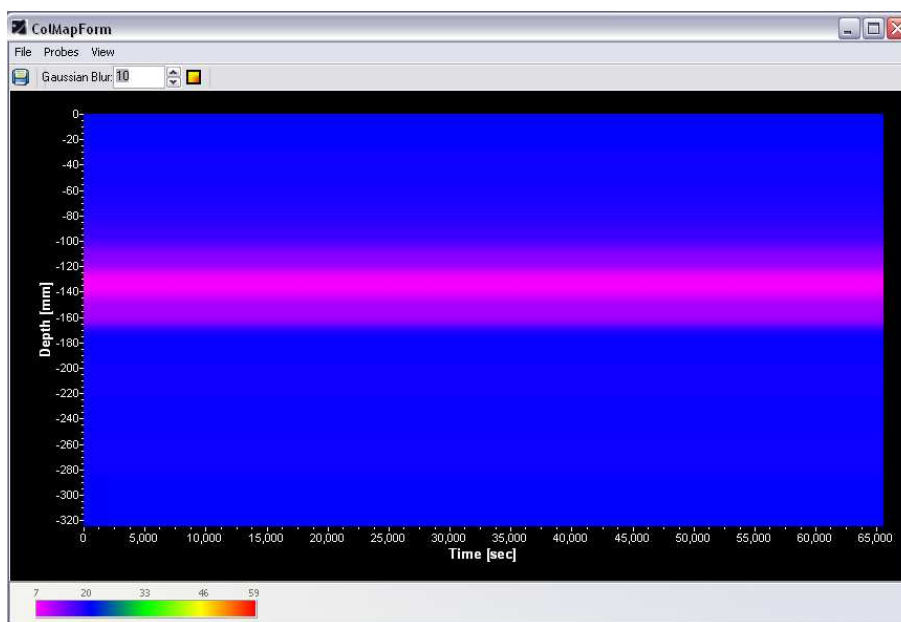


Abbildung 3.26: Beispiel für die Darstellung von Daten mit der 2D-Farbabbildung-Option.

Beide Darstellungsvarianten bieten einige Optionen zur Optimierung der Darstellung (Zoom, logarithmische Darstellung,...), die hier nicht näher erläutert werden sollen.

Zum Schluss besteht mit dem *Report generator* die Möglichkeit, einen kurzen Bericht als Zusammenfassung der Messung zu erstellen:

#### **Modul 4 - Berichte generieren, *Report Generator***

Das letzte Modul erstellt aus den Daten, während der Auswertung erstellten Grafiken und sonstigen zusätzlichen Informationen wie Kartenmaterial oder Fotos einen kurzen Bericht, der das Experiment in allen seinen Aspekten dokumentiert. Zunächst fragt das Programm alle relevanten Informationen ab, die es benötigt (Ort, Datum, Beginn und Ende der Messung, Fotos, erstellte Abbildungen bei der Auswertung,...), und erstellt anschließend einen Bericht im html-Format.

## Teil IV

# Ergebnisse



Um die Leistungsfähigkeit und Verbesserung gegenüber handelsüblichen Systemen zu demonstrieren, werden in dem Ergebnisteil einige Beispiele der zahlreichen, während der Entwicklung des Messsystems durchgeführten Messungen zusammengefasst. Dabei wurden unterschiedliche Anwendungsbereiche abgedeckt.

Eine mögliche Funktion der neuen Thermalsonden ist die Aufnahme von Temperaturprofilen. Auch bei dem Verfahren zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit werden Temperaturen gemessen (siehe Kapitel 5). Im folgenden Kapitel soll daher gezeigt werden, dass die Methode der Temperaturmessung zuverlässig funktioniert und welche Vorteile das Messsystem im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren bietet. Im Kapitel 5 folgen dann Beispiele von Messungen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeiten verschiedener Materialien.

## Wissenschaftliche Ziele

Um die Nutzbarkeit des neuen Messsystems für den Einsatz in den Geowissenschaften zu belegen, wurde es in mehreren Anwendungsbereichen getestet. Dazu wurden im Vorfeld mehrere Einsatzmöglichkeiten in Betracht gezogen, zu denen außerdem während der Entwicklung und der Testphase des Messsystems neue hinzu kamen (siehe auch Kapitel 6).

Die wissenschaftlichen Ziele waren:

- *in situ* Beobachtungen von Temperaturprofilen in verschiedenen Böden,
- *in situ* Beobachtung des Eindringens der täglichen Wärmewelle in Böden,
- *in situ* Beobachtung des Temperaturprofils in Schneepaketten,
- Bestimmung von Temperaturprofilen in Bereich der Hydrogeologie,
- Simulation des Einfrier- und Auftauverhaltens von Seen als Experiment im Labor,
- *in situ* Bestimmung der (qualitativen) Bodenfeuchte als Funktion der Zeit. Dabei wird die Bodenfeuchte aus der Änderung der Wärmeleitfähigkeit abgeleitet.
- Bestimmung vom Temperatur- und Wärmeleitfähigkeitsprofilen im Schnee,
- Temperaturprofile und Wärmeleitfähigkeiten (qualitativ und quantitativ) von Material, welches als Analogon für Material auf anderen Planeten in der experimentellen Raumfahrt untersucht wird,
- Bestimmung der Wärmeleitfähigkeiten von (Bau-)materialien.

Die hier aufgeführten wissenschaftlichen Ziele sind mit bisher verfügbaren Methoden gar nicht oder nur mit unverhältnismäßigem Aufwand realisierbar. Die Ergebnisse sind aufgrund ihrer Messmethode kritisch zu betrachten und teilweise stark fehlerbehaftet (siehe Kapitel 1 und 2).

# Kapitel 4

## Temperaturprofilmessungen

### 4.1 Bodenkunde

In diesem Abschnitt sind Beispiele von Messungen zusammengefasst, die sich mit Böden unter natürlichen Bedingungen befassen. Dabei wurden im wesentlichen vier Faktoren betrachtet: die Temperatur, die Wärmeleitfähigkeit, die Bodenfeuchte und der Wärmefluss. Auf die Messungen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit wird dabei in Kapitel 5 eingegangen.

#### 4.1.1 Dämpfung und Phasenverschiebung von Temperaturextrema

In diesem Abschnitt wird das Phänomen der Dämpfung und Phasenverschiebung von Temperaturmaxima aufgegriffen, das in Kapitel 2.1 angesprochen wurde. Dort wird erwähnt, dass mit zunehmender Tiefe im Boden eine Zeitverzögerung des Temperaturmaximums mit gleichzeitiger Abnahme der Amplitude beobachtet wird, bedingt dadurch, dass eine bestimmte Menge an Wärme entlang des Weges der Wärmeausbreitung absorbiert oder freigesetzt wird, je nachdem, ob die Temperatur des Bodens zu- oder abnimmt. Dieses Phänomen ist zwar nicht neu, wurde aber bisher selten gemessen, vor allem nicht mit einer Auflösung im Zentimeter-Bereich, wie sie die in dieser Arbeit vorgestellten Thermalsonden bieten. Um zu zeigen, dass diese Effekt mit den neuen Thermalsonden beobachtet werden kann, werden hier drei Beispiele diskutiert.

*Beispiel 1:*

Im ersten Beispiel wurde eine Thermalsonde morgens senkrecht in einen Waldboden eingesetzt und für etwa 24 Stunden den natürlichen Temperaturschwankungen ausgesetzt. Die gemessene Temperatur der 16 Sensoren der Thermalsonde in Abhängigkeit von der Zeit ist in Abbildung 4.1 dargestellt:

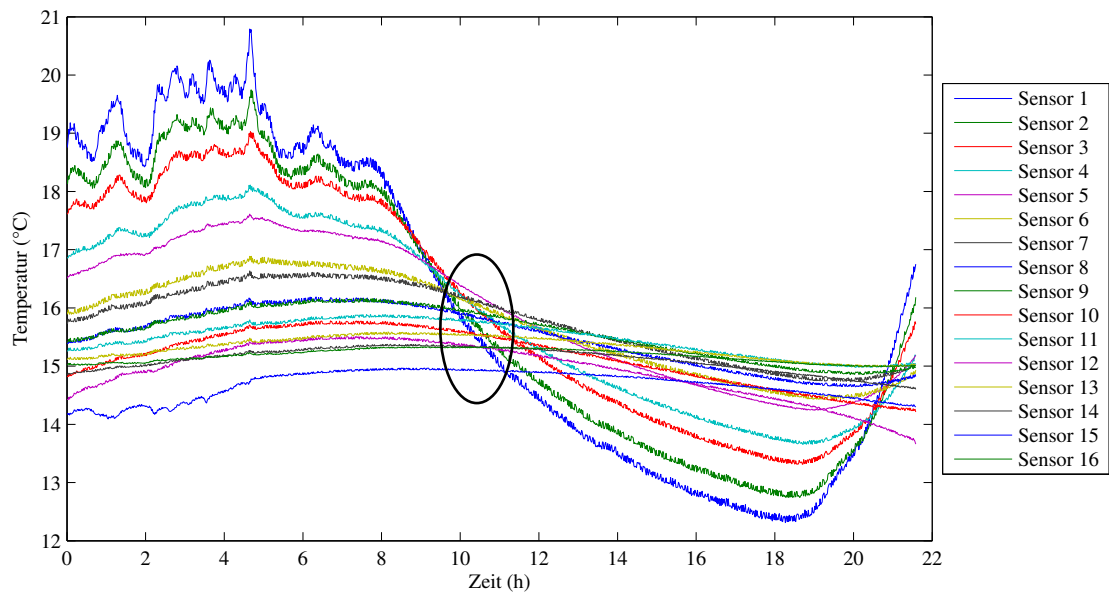


Abbildung 4.1: Zeitliche Variation der Temperatur in einem Waldboden für die 16 Sensoren der Thermalsonde.

Deutlich zu erkennen ist der Tagesgang der Temperaturen. In den oberen Schichten macht sich der Einfluss der Sonneneinstrahlung und anderer Faktoren wie Wind stärker bemerkbar, was sich in häufigeren und größeren Temperaturschwankungen niederschlägt. Dies ändert sich nachts, wenn schnelle Temperaturänderungen, die durch die ändernde Sonneneinstrahlung beziehungsweise Bewölkung bedingt sind, nicht mehr auftauchen. Es zeigt sich, dass die tägliche Wärmewelle selten mehr als 40 cm in den Boden eindringt, was wiederum belegt, dass die Thermalsonden eine ausreichende Länge für derartige Messungen haben. Weiterhin deutlich erkennbar ist die Verschiebung und Dämpfung des jeweiligen Maximums; in den untersten Schichten ist kaum noch eine Variation sichtbar. In der Abbildung 4.2 sind die aus den Daten bestimmten Maxima in den 16 Schichten respektive die Amplituden der Temperaturen, d.h., die Differenz zwischen dem jeweiligen Minimum und dem Maximum der Temperatur in einer Schicht, gegen die Tiefe aufgetragen. Hier wird die Dämpfung und Verschiebung nochmals besonders deutlich.



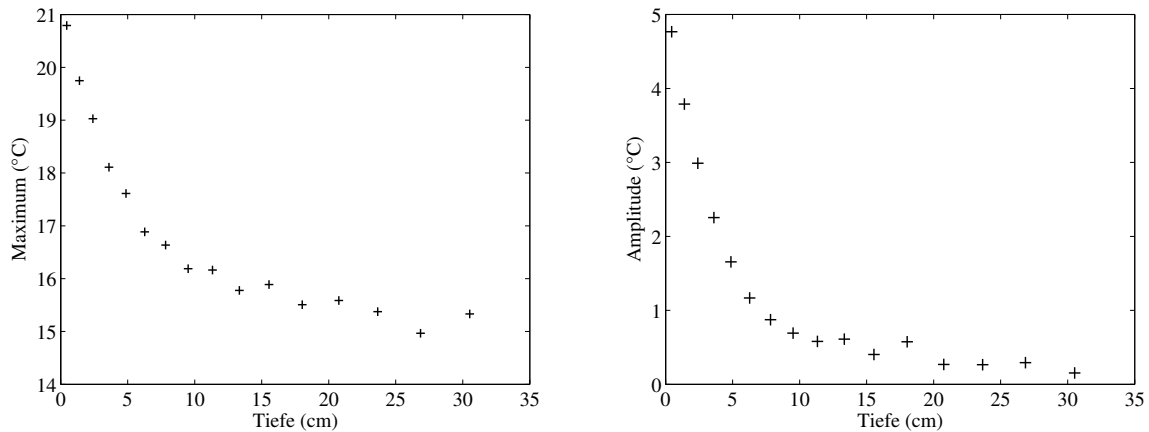


Abbildung 4.2: Maxima und Amplituden der Temperatur in 16 Tiefen, aufgenommen in einem Waldboden. Beide Kurven zeigen wie erwartet eine exponentielle Abnahme.

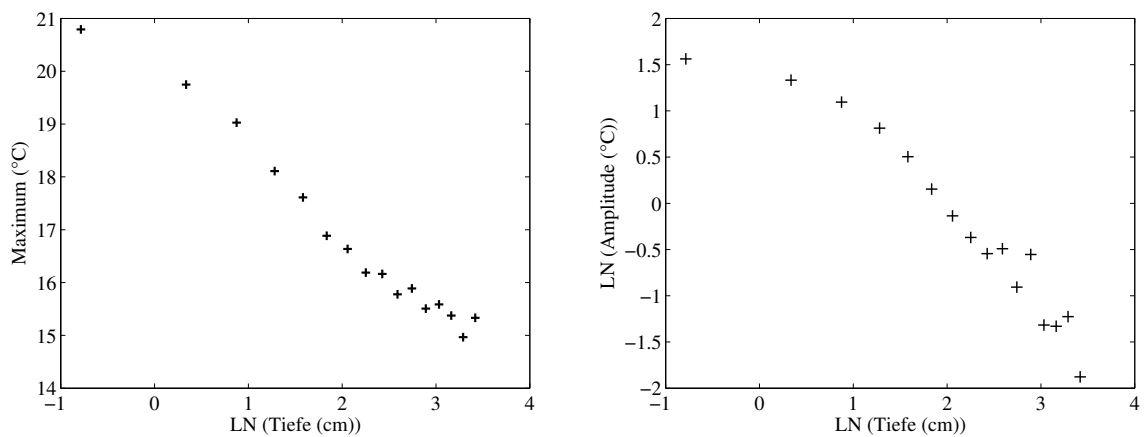


Abbildung 4.3: Logarithmische Abbildung der Werte aus Abbildung 4.2.

Um zu zeigen, dass es sich bei den Kurvenverläufen um exponentielle Abnahmen handelt, sind in der Abbildung 4.3 die logarithmischen Darstellungen der Verläufe abgebildet. Die Werte bilden annähernd eine Gerade, was den exponentiellen Verlauf bestätigt. Bei den beiden weiteren Beispielen ergab sich dasselbe Ergebnis, auf die Darstellung wird daher an dieser Stelle verzichtet.

Ein weiteres beobachtetes Phänomen ist die Tatsache, dass die Temperatur der bodennahen Luftschicht tagsüber höher ist als in der Nacht, dagegen ist nachts die Temperatur der obersten Bodenschichten höher als die der bodennahen Luftschichten. Dieses „Umschwenken“ ist in allen drei Beispielen zu beobachten und in den Abbildungen 4.1, 4.5 und 4.7 jeweils durch eine Ellipse kenntlich gemacht.

*Beispiel 2:*

Auch in diesem zweiten Beispiel wurden die Temperaturen in einem Waldboden gemessen, wobei sich die Messdauer diesmal über mehrere Tage erstreckte. Es sind deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Tagen erkennbar, was auf unterschiedliche Wetterbedingungen hinweist (Abbildung 4.5). Die Maxima und Amplituden zeigen auch hier wieder eine typische exponentielle Abnahme mit der Tiefe (Abbildungen 4.4).

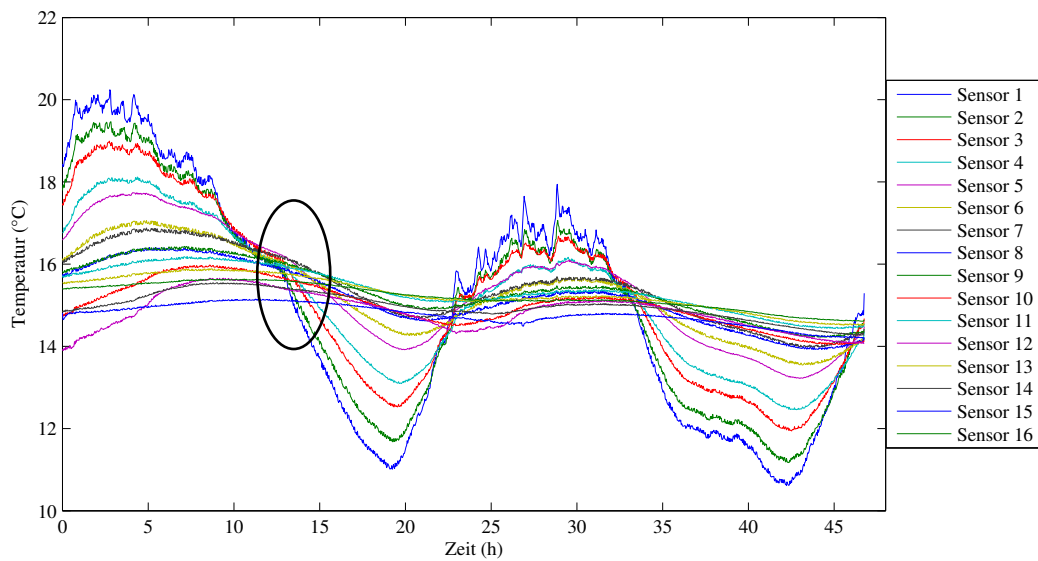


Abbildung 4.4: Zeitliche Variation der Temperatur in einem Waldboden für 16 verschiedene Tiefen für einen Zeitraum von etwa zwei Tagen.

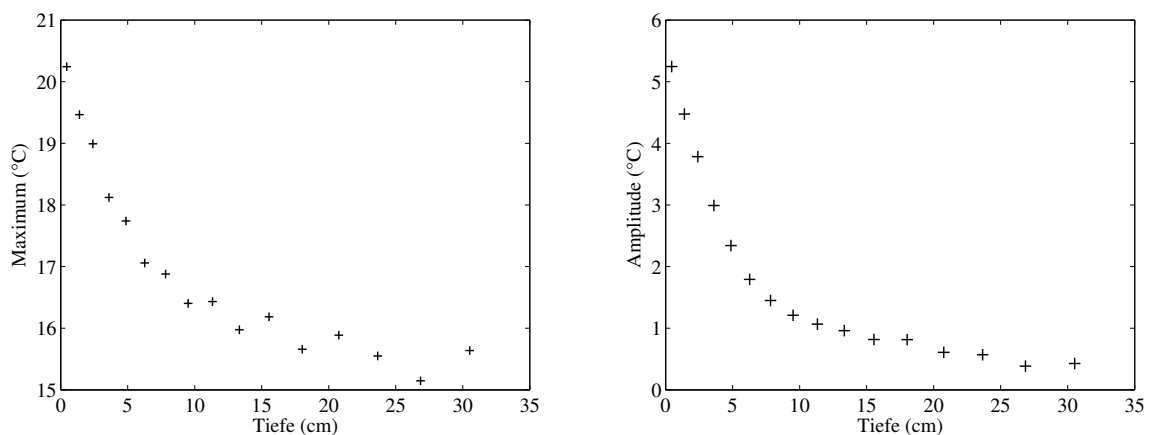


Abbildung 4.5: Maxima und Amplituden der Temperatur in 16 Tiefen, aufgenommen in einem Waldboden für einen Zeitraum von etwa zwei Tagen.

*Beispiel 3:*

Im letzten Beispiel wurden die Temperaturen in einem Ackerboden bestimmt. Abbildung 4.7 zeigt einen Teilausschnitt der gesamten Messung, der sich über einen 24-Stunden-Zyklus erstreckt. Die Maxima und Amplituden zeigen auch hier wieder die typische Dämpfung und Verschiebung (Abbildungen 4.6). Die Amplituden sind in diesem Beispiel deutlich größer als in den beiden vorherigen. Dies liegt an den allgemein höheren Temperaturen bei dieser Messung. Da es sich bei dem Testfeld um einen freiliegenden Acker handelt, kann die Sonneneinstrahlung den Boden viel stärker erwärmen als einen Waldboden, den durch starken Bewuchs viel weniger Sonnenstrahlung erreicht.

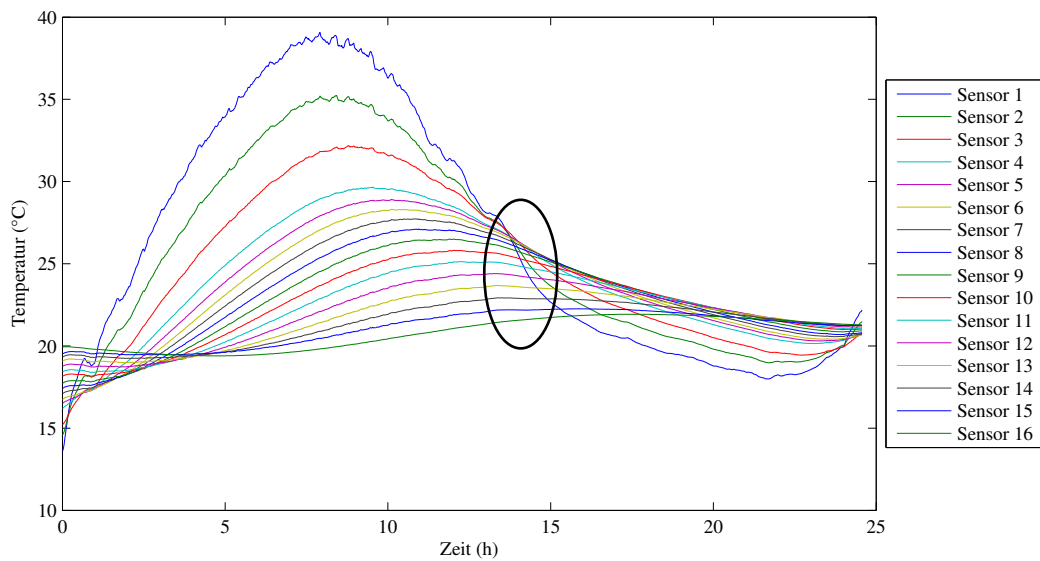


Abbildung 4.6: Zeitliche Variation der Temperatur in einem Ackerboden für 16 verschiedene Tiefen.

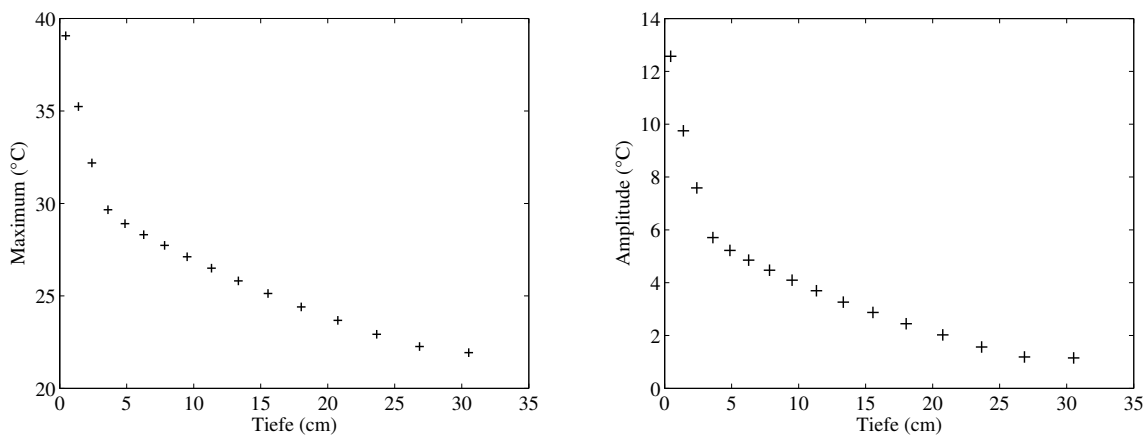


Abbildung 4.7: Maxima und Amplituden der Temperatur in 16 Tiefen, aufgenommen in einem Ackerboden.

### 4.1.2 Bestimmung thermischer Parameter von Böden mit geringen Temperaturunterschieden

In der Agrophysik ist unter anderem die Temperatur, die Wärmeleitfähigkeit und damit letztendlich der Wärmefluss im Boden von Interesse. Bislang werden zur Bestimmung von Temperaturprofilen üblicherweise Widerstandthermometer wie PT100 eingesetzt (siehe Kapitel 2.1). Auf der Suche nach einer Alternativmethode wurden in Zusammenarbeit mit dem Institute of Agrophysics in Lublin (Polen) Testmessungen mit Prototypen der EXTASE-Thermalsonden durchgeführt. Da neben der generellen Eignung der neuen Thermalsonden auch ihre Sensibilität bei geringen Temperaturunterschieden getestet werden sollte, wurden die Messungen parallel auf zwei angrenzenden Testfeldern durchgeführt. Dabei handelte es sich um denselben Boden, wobei auf einem Teilstück die Grasschicht abgetragen worden war. Eine Sonde wurde in dem Boden ohne Grasbedeckung implementiert, während die zweite im direkt angrenzenden Boden mit verbliebenem Grasbewuchs installiert wurde. Neben den beiden neuen Thermalsonden wurden auch eine Reihe meteorologischer und bodenkundlicher Messsysteme installiert. Es wurden Geräte zur Bestimmung der kurz- und langwelligen Sonneneinstrahlung eingesetzt, woraus unter anderem die Albedo der Böden bestimmt wurde. Als Referenz zu den EXTASE-Sonden wurden zusätzlich PT100 zur Bestimmung der Bodentemperatur genutzt. Außerdem wurden Heizplatten zur Bestimmung des Wärmeflusses und Feuchtesensoren in den Boden eingesetzt. Zum Einsetzen der PT100 und der Heizplatten wurde jeweils ein Loch gegraben, die Sensoren eingesetzt und die Löcher anschließend wieder verfüllt. Schließlich wurden noch Bodenproben genommen, die zur Bestimmung der Zusammensetzung dienten und für Modellrechnungen genutzt wurden. Diese wurden durchgeführt, um die Wärmeleitfähigkeit der Böden zu bestimmen, da diese Funktion bei den neuen Thermalsonden zum Zeitpunkt der Messungen noch nicht verfügbar waren. Der komplette Messaufbau ist Abbildung 4.8 zu entnehmen.

Die Messung erstreckte sich über etwa 42 Stunden, die Temperaturen wurden mit den EXTASE-Sonden jede Minute aufgenommen. Die restlichen Parameter wurden alle fünf Minuten bestimmt. Während der Messungen wechselten die Wetterbedingungen von leicht sonnig zu nass und kalt, was auch in den Temperaturdaten ablesbar ist.

#### Ergebnisse und Interpretation

Zuerst werden die Temperaturen der beiden Thermalsonden verglichen. Bei beiden Sonden befanden sich die ersten zwei (Boden ohne Grasschicht) beziehungsweise vier Sensoren (Boden mit Grasschicht) über der Erde. Da unter anderem die Auswirkungen der Grasschicht auf das thermische Regime untersucht werden sollten, war mit dieser Anordnung gewährleistet, den Übergang zwischen bodennaher Luft- beziehungsweise Grasschicht und dem Boden abzudecken.

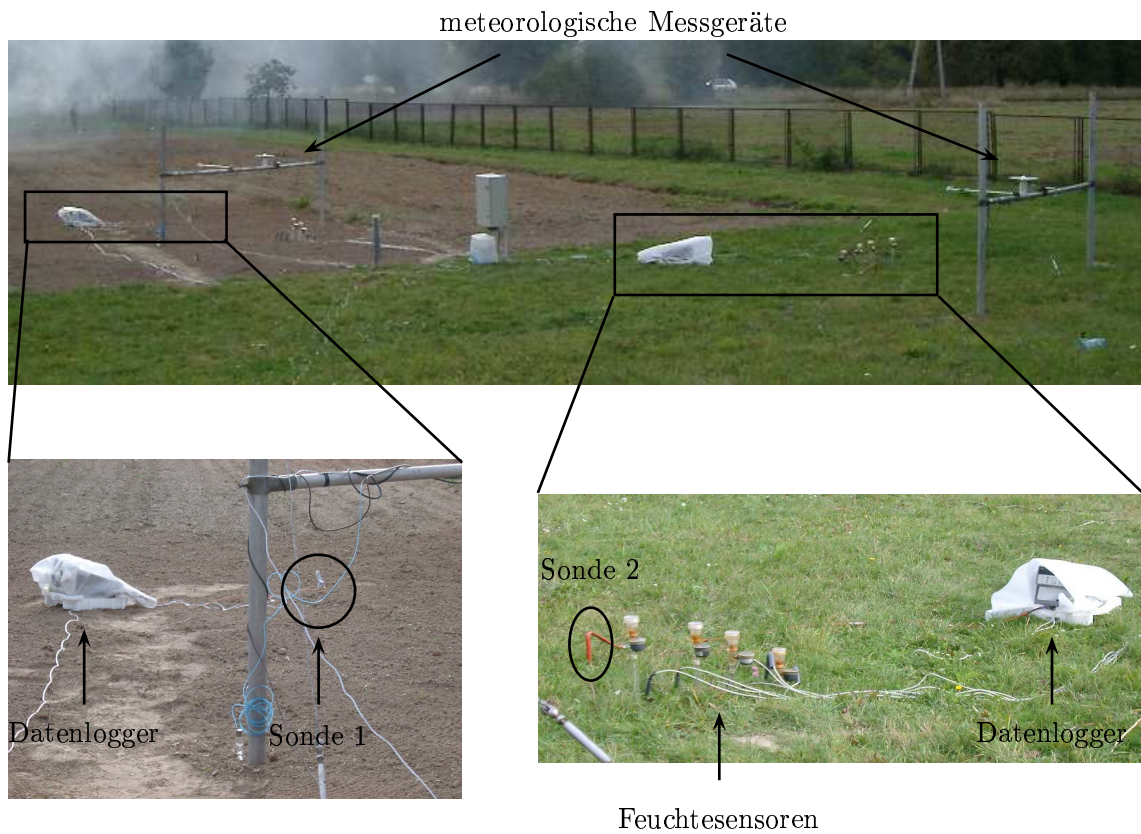


Abbildung 4.8: Messaufbau der Messungen in Lublin.

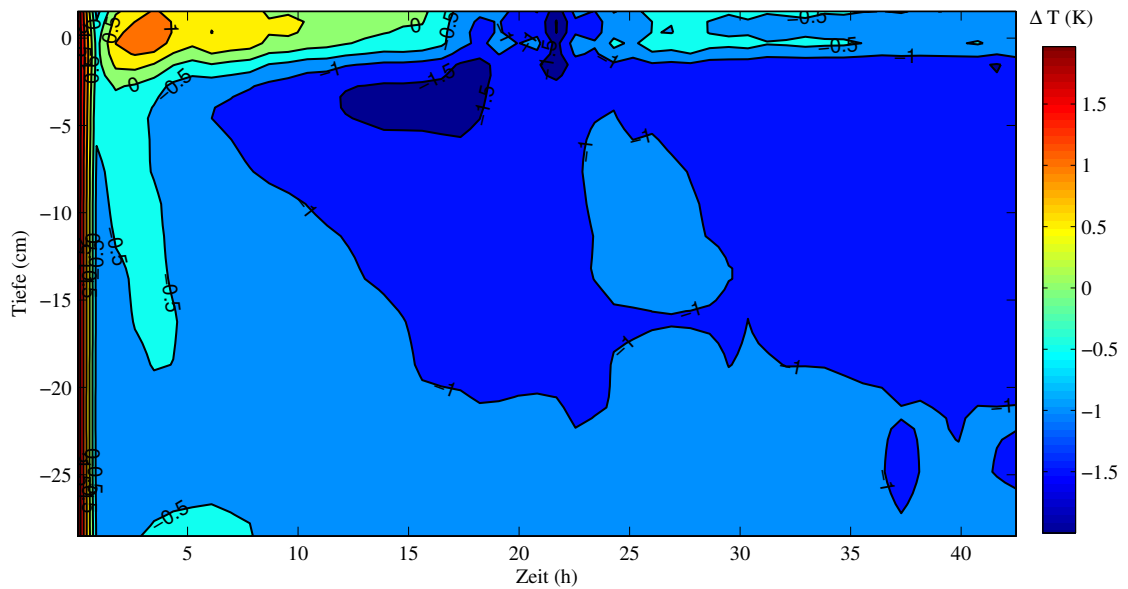
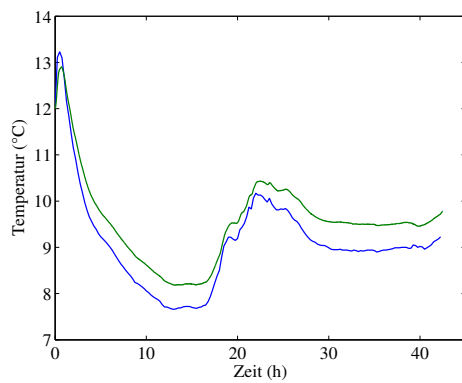


Abbildung 4.9: Differenz der gemessenen Temperaturen der beiden EXTASE-Sonden in Abhängigkeit von Zeit und Tiefe.

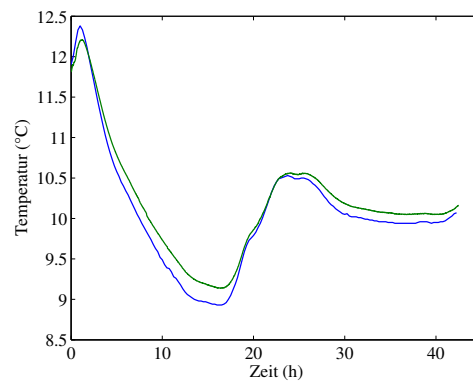
Die Temperaturen an der Luft sind, wie erwartet, sehr ähnlich für beide Datensätze; die Temperaturen in den Böden unterscheiden sich – wenn auch geringfügig – um 0.7 bis 1.5 °C (für die dargestellten Positionen in Abbildung 4.9). Es ist daher naheliegend, die Gründe für diese Unterschiede in der Grasschicht zu suchen, da sich die Böden unterhalb der Grasschicht nicht wesentlich unterscheiden sollten. Eine Grasschicht verändert die Albedo einer Oberfläche und führt so zu einer höheren Absorption von Sonnenlicht. Deswegen sollte sich der Boden unter der Grasschicht etwas stärker erwärmen als der Boden ohne Grasnarbe. Wird jedoch die gemessene Albedo betrachtet (Diagramm hier nicht gezeigt) zeigt sich, dass die Albedo des Bodens mit der Grasschicht im Mittel 14% höher ist. Dies sollte eigentlich in niedrigeren Temperaturen resultieren, da mehr Wärme zurückgestrahlt wird. Dennoch ist der Boden mit der Grasschicht wärmer. Die Temperaturen im Boden, die mit dem Lubliner System gemessen wurden (bestehend aus PT100), bestätigten diese Beobachtung. Eine zweite Messung mit demselben Versuchsaufbau einen Monat später brachte die gleichen Ergebnisse. Es scheint sich also um einen realen Effekt zu handeln, dessen Ursache noch nicht geklärt ist. Ganz allgemein lässt sich feststellen, dass die Temperaturunterschiede zwischen den beiden Böden klein sind (um 1 °C), mit den EXTASE-Sonden aber detektiert werden können, wie Abbildung 4.9 zeigt.

### **Vergleich der gemessenen Temperaturen mit der Thermalsonde und den PT100**

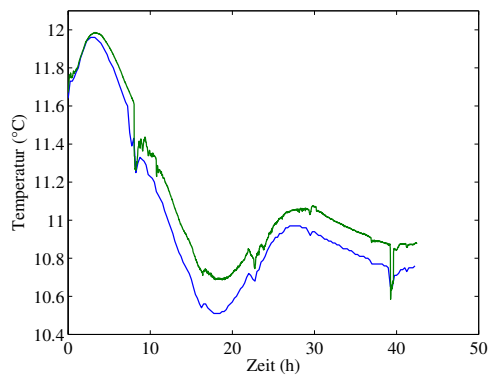
Im nächsten Schritt wurden die gemessenen Temperaturen mit denen der Referenz-PT100 verglichen. Da die PT100 fest installiert waren und nicht in andere Tiefen umgesetzt werden konnten, wurden die Sensoren der EXTASE-Thermalsonde ausgewählt, die sich in vergleichbarer Tiefe zu den jeweiligen PT100 befanden (die Tiefen sind in den Bildunterschriften angegeben), und diese mit den gemessenen Temperaturen der PT100 gegen die Zeit in einem gemeinsamen Diagramm aufgetragen. Dies wurde für beide Böden durchgeführt (Abbildung 4.10 und 4.11).

**Boden ohne Grasschicht:**

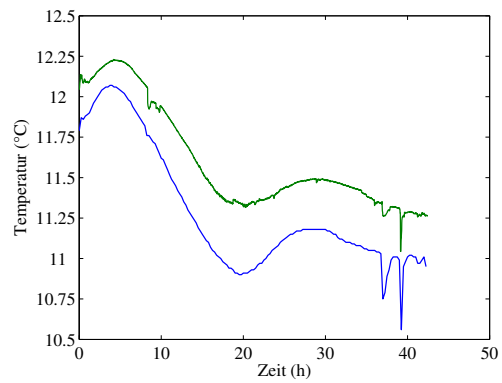
(a) PT 1 (-2.5 cm) und S 5 (-2.87 cm)



(b) PT 2 (-7.5 cm) und S 8 (-7.51 cm)



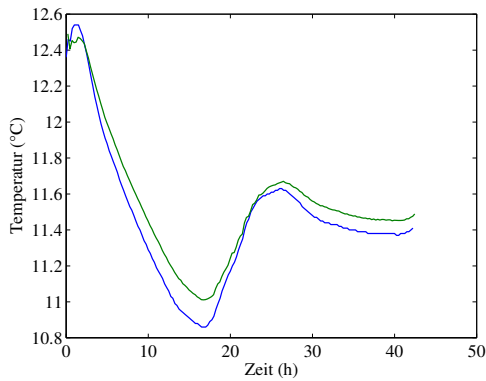
(c) PT 5 (-22.5 cm) und S 14 (-21.65 cm)



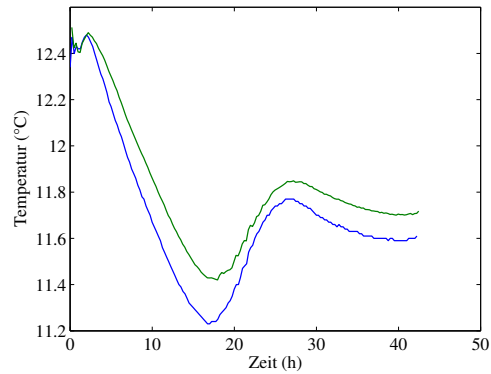
(d) PT 6 (-27.5 cm) und S 16 (-28.52 cm)

Abbildung 4.10: Vergleich der gemessenen Temperaturen der EXTASE-Thermalsonde (grüne Kurven) im Boden ohne Grasschicht mit denen der PT100 (blaue Kurven).

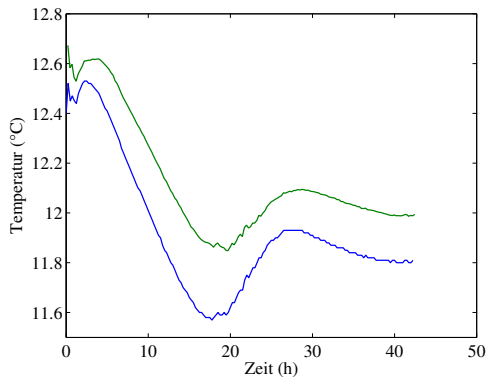
### Boden mit Grasschicht:



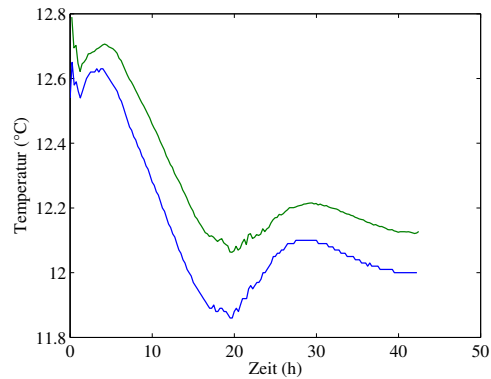
(a) PT3 (−12.5 cm) und Sensor 11 (−11.34 cm)



(b) PT4 (−17.5 cm) und Sensor 13 (−16.55 cm)



(c) PT5 (−22.5 cm) und Sensor 15 (−22.65 cm)



(d) PT6 (−27.5 cm) und Sensor 16 (−26.32 cm)

Abbildung 4.11: Vergleich der gemessenen Temperaturen der EXTASE-Thermalsonde (grüne Kurven) im Boden mit der Grasschicht mit denen der PT100 (blaue Kurven).

#### Statistik der Differenzen zwischen Thermalsonde und PT100

Die Auswertung zeigt, dass die absoluten Abweichungen zwischen den beiden Messsystemen sehr gering sind. Sie liegen im Mittel bei  $0.14\text{ }^{\circ}\text{C}$  für den Boden mit der Grasschicht und bei  $0.22\text{ }^{\circ}\text{C}$  für den Boden ohne Grasschicht (siehe Tabelle 4.1). Da sich die jeweiligen Sensoren nicht exakt in denselben Tiefen befanden und außerdem noch mehrere cm voneinander positioniert waren, sind diese geringen Abweichungen ein Beweis dafür, wie zuverlässig die neuen Thermalsonden prinzipiell funktionieren.



Bodenart	PT/EXT	$\Delta T_{Mittel}$	Fehler (%)
ohne Grasschicht	PT 1 / S 5	0.469	5.28
	PT 2 / S 8	0.126	1.29
	PT 3 / S 11	0.148	1.43
	PT 4 / S 13	0.177	1.67
	PT 5 / S 14	0.111	1.02
	PT 6 / S 16	0.311	2.78
alle Messungen		0.224	1.02
mit Grasschicht	PT 2 / S 9	0.149	1.35
	PT 3 / S 11	0.09	0.77
	PT 4 / S 13	0.12	1.03
	PT 5 / S 15	0.202	1.7
	PT 6 / S 16	0.141	1.16
	alle Messungen		0.14

Tabelle 4.1: Statistik der Differenzen zwischen Thermalsonde und PT100.

### Vergleich von Wärmeleitfähigkeit und Bodenfeuchte

Anschließend werden die anderen gemessenen Daten mit in die Interpretation einbezogen, um Abhängigkeiten zwischen Temperatur, Bodenfeuchte und Wärmeleitfähigkeit nachzuweisen. Da zur Zeit der Messungen die Funktion des Beheizens der Sensoren für die EXTASE-Sonden noch nicht zur Verfügung stand, wurde die Wärmeleitfähigkeit aus den Temperaturen mit Hilfe eines Modells von Usowicz (2002) bestimmt. Mit diesem Modell kann aus den Temperaturen, ihrer Entwicklung und weiteren Parametern (wie die mineralogische Zusammensetzung des Bodens aus Proben) die Wärmeleitfähigkeit modelliert werden. Hierfür wurden die mit den neuen Thermalsonden gemessenen Temperaturen sowie die der PT100 genutzt. Die Differenzen zwischen den Ergebnissen der unterschiedlichen Temperaturmessmethoden lagen bei maximal  $0.2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  (vergleiche Abbildung 11 in Marczewski *et al.* (2004)). Die Tiefenprofile der Wärmeleitfähigkeit sind stabil und variieren leicht in den oberflächennahen Schichten während der Dauer des Experimentes (siehe Abbildung 11 in Marczewski *et al.* (2004)). Aus der Literatur ist bekannt, dass die Wärmeleitfähigkeit stark von der Feuchte des Bodens abhängt. Nimmt diese zu, erhöht sich auch die Wärmeleitfähigkeit und umgekehrt. Dieser Effekt ist in den Daten gut nachweisbar und wird an ausgewählten Beispielen in den Abbildungen 4.12 und 4.13 gezeigt.

### Boden ohne Grasschicht:

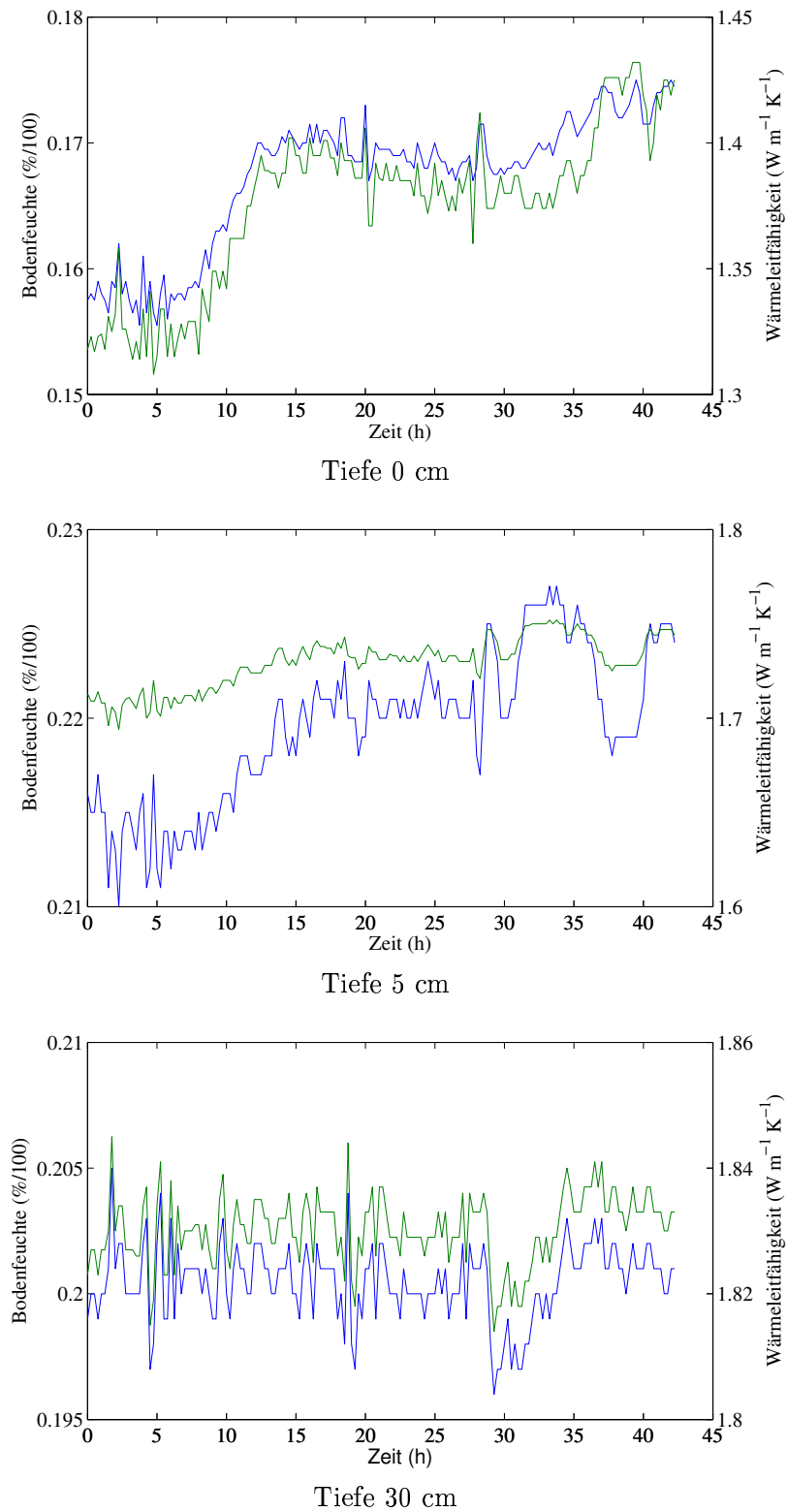
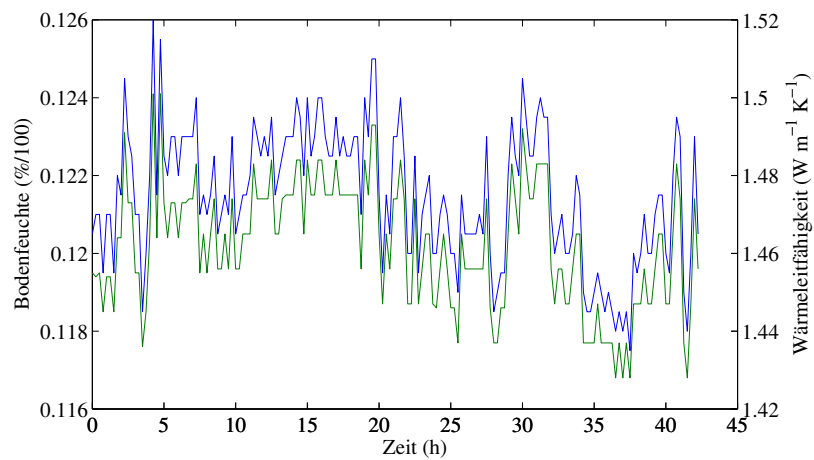
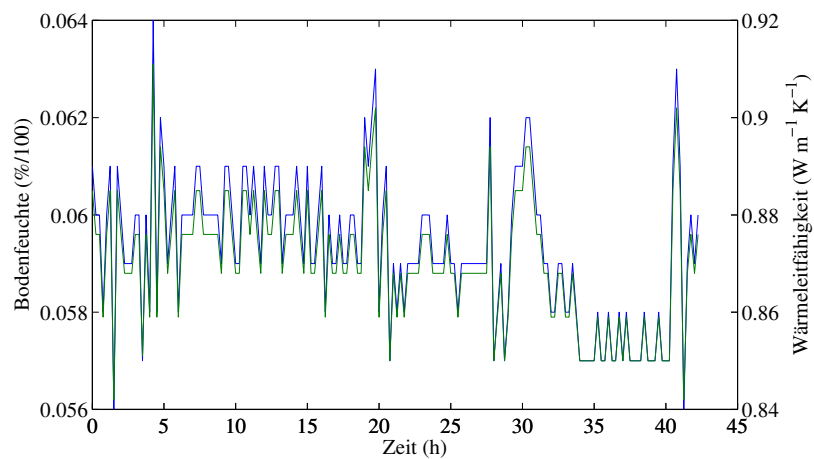


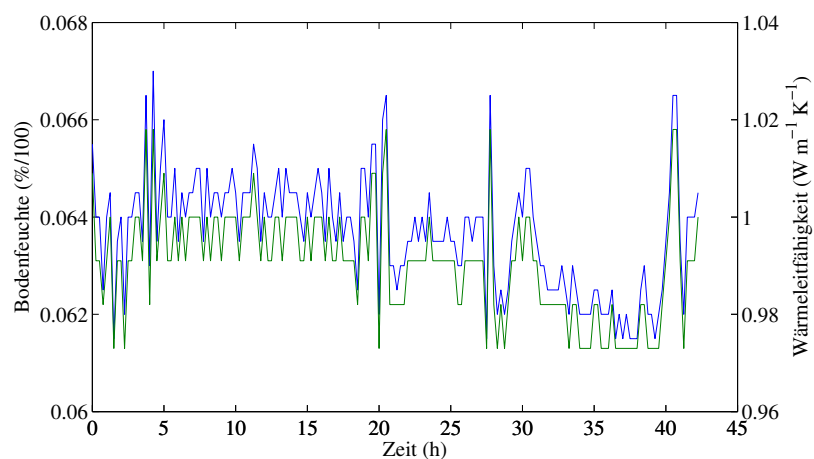
Abbildung 4.12: Nachweis der Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Bodenfeuchte in verschiedenen Tiefen. Die blauen Kurven stellen dabei die Feuchte dar, die grünen die Wärmeleitfähigkeit.

**Boden mit Grasschicht:**

Tiefe 15 cm



Tiefe 20 cm



Tiefe 25 cm

Abbildung 4.13: Nachweis der Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Bodenfeuchte in verschiedenen Tiefen. Die blauen Kurven stellen dabei die Feuchte dar, die grünen die Wärmeleitfähigkeit.

### Zusammenfassung

Ziel der Messungen war es, zu zeigen, dass das Messsystem für Messungen bodenphysikalischer Parameter geeignet ist. Außerdem sollte getestet werden, ob geringe Unterschiede in den Temperaturen zwischen zwei leicht unterschiedlichen Böden detektiert werden können. Zusammenfassend lassen sich die Ergebnisse folgendermassen interpretieren:

- Die EXTASE-Thermalsonde hat sich als gut geeignet für Messungen der Temperaturen in Böden herausgestellt.
- In der Handhabung erwies sie sich als wesentlich praktikabler als die ebenfalls in diesem Versuch genutzten, herkömmlichen PT100.
- Die Auflösung der Thermalsonden ist ausreichend, um selbst kleine Differenzen (unter  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) in den Temperaturen der beiden Böden auflösen zu können.
- Die Länge der Sonde erwies sich für diese Anforderungen als ausreichend, zumal noch einige cm an der Luft verblieben, was nicht unbedingt nötig ist.
- Die Differenzen zwischen den gemessenen Temperaturen der beiden Messsysteme (EXTASE und PT100) betragen im Mittel circa 1% (siehe Tabelle 4.1). Diese Unterschiede sind sehr gering und können durch die Distanz der Sensoren zueinander erklärt werden.

Dieses Beispiel macht deutlich, welche Verbesserung die Methode der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der neuen Sonden bieten kann. Zum Zeitpunkt der Messung konnten die Sensoren noch nicht beheizt, da die Elektronik noch nicht fertiggestellt war. Die Sonden wurden daher mit handelsüblichen Datenloggern (Firma Agilent) betrieben, die nicht über eine Heizfunktion verfügten. Aus diesem Grund musste die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit in diesem Fall mit einem anderen Verfahren erfolgen. Es wurde dazu ein Modell gewählt, dessen Parameter über entnommene Bodenproben bestimmt werden müssen. Dies ist im Vergleich wesentlich aufwändiger und zeitintensiver als das mittlerweile funktionsfähige Verfahren, was eine gute Alternative darstellt (siehe Kapitel 5).

## 4.2 Glaziologie

Der Bereich der Glaziologie ist ein wichtiges Anwendungsgebiet, in der das EXTASE-System zum Einsatz kommen kann (siehe Kapitel 2.2). Da Messungen der thermischen Parameter speziell von Schnee aufgrund der instabilen Struktur des Schneegefüges sehr sensibel sind, wird bei Messungen besonders darauf geachtet, das vorhandene Gefüge so wenig wie möglich zu zerstören. Besonders Messungen der Wärmeleitfähigkeit sind mit aktuellen Methoden relativ kompliziert und teilweise ungenau; hierfür bietet die EXTASE-Sonde eine sehr gute Alternative (siehe Kapitel 5). Da Messungen im Schnee (und natürlich auch im Eis) recht aufwendig und das Material sehr anfällig für Temperaturveränderungen sind, wurden während der kompletten Entwicklungsphase des Messsystems von Anfang an Messungen durchgeführt, um Erfahrungen mit dem Medium Schnee und Sicherheit in der Messmethode zu gewinnen, unter anderem, um geeignete Heizzeiten und -leistungen für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeiten zu finden. Im folgenden werden zwei Beispiele von Messungen aus dem Bereich Glaziologie behandelt.

### 4.2.1 Temperaturprofile in Schnee und Eis unter wechselnden Wetterperioden auf Spitzbergen

Die Messkampagne wurde in Zusammenarbeit mit dem Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven auf Spitzbergen durchgeführt. Ziel der Messungen war es, zu testen, ob das EXTASE-Messsystem eine gute Alternative zu herkömmlichen Thermalmesssystemen bietet. Dabei war insbesondere interessant, dass sich die Umgebungs-, also Wetterbedingungen mit dem Einsetzen der Tauperiode stark änderten und somit eine längere Messung während wechselnder Randbedingungen durchgeführt werden konnte. Da zu der Zeit noch Prototypen des Messsystems genutzt wurden, waren noch keine Wärmeleitfähigkeitsmessungen möglich, weil die dazu nötige Elektronik noch nicht fertig entwickelt war (siehe Kapitel 4.1.2).

Die Messungen wurden in der Zeit vom 18. Mai bis 3. Juni 2002 (Julianische Tage 138 bis 154) durchgeführt. Messgebiet war das Meereis des Kongsfjorden in der Nähe der Koldewey-Station in Ny-Ålesund auf Spitzbergen. Die Messstation wurde bei den Koordinaten 79.96 N/12.26E, zwischen den Inseln Gerdøya und Blomstrandhalvøya installiert, gut 200 m von der Insel Gerdøya entfernt (siehe Abbildung 4.14). Für den Messaufbau wurde eine Fläche auf dem Eis ausgewählt, auf der die Schneefläche eben und ungestört war.

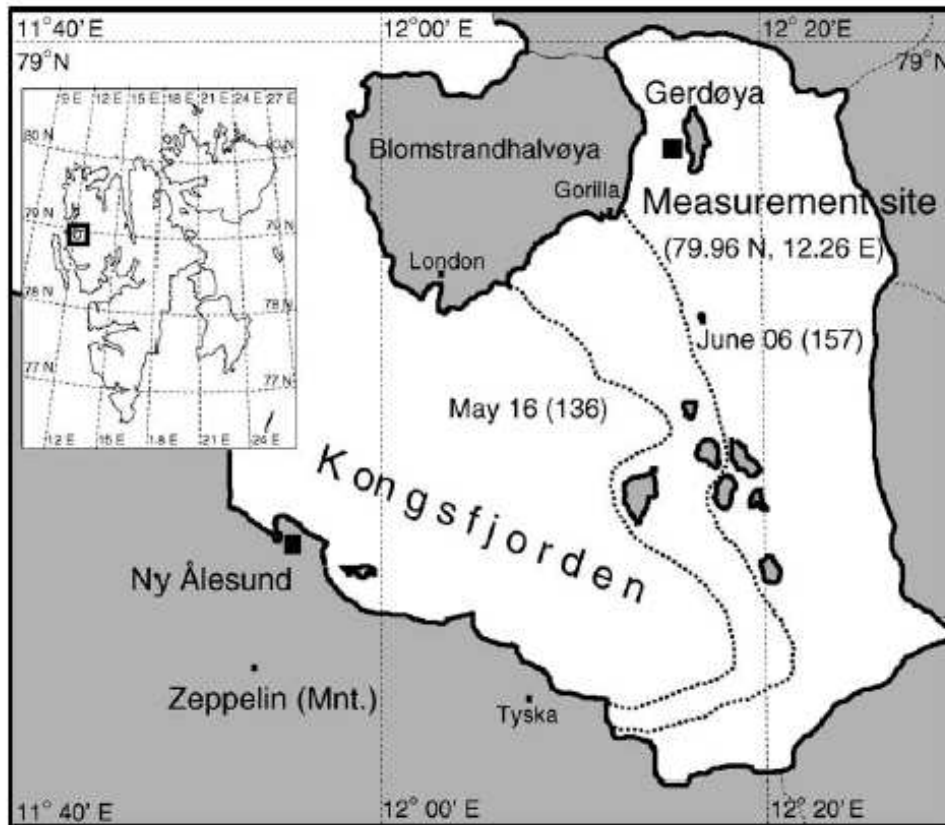


Abbildung 4.14: Karte vom Kongsfjorden mit der Position der Messstation („Measurement site“) und der jeweiligen Grenzen des Meereises zu Beginn und Ende der Messungen (Nicolaus *et al.* (2003)).

### Messaufbau

Die Messstation mit sämtlichen Messgeräten ist in Abbildung 4.15 dargestellt. Neben den Temperaturprofilen wurden meteorologische Parameter bestimmt. Dazu gehörten die lang- und kurzweilige Strahlung (terrestrische und solare Strahlung), die Windgeschwindigkeit und -richtung, die Luftfeuchtigkeit und -temperatur, die Albedo und die Beschattung. Zusätzlich wurden täglich eine Reihe von glaziologischen Standardmessungen in 1 m-Abständen entlang eines 50 m langen Testprofil durchgeführt. Bestimmt wurden Schneehöhe, Schneefeuchte, Schneedichte und Kristallstruktur. An neun Tagen wurden außerdem Eiskerne entnommen, an denen Temperatur- und Salinitätsprofile bestimmt wurden. In dieser Arbeit werden außer den Temperaturen nur die zusammengefassten Ergebnisse der meteorologischen Daten wiedergegeben, die ausführlichen Ergebnisse und Beschreibungen der Apparaturen sind Nicolaus *et al.* (2003) zu entnehmen. Die meteorologische Messstation wurde über einem ungestörten Stück Schneeoberfläche installiert. Die Messungen der Temperaturprofile im Schnee beziehungsweise Eis wurden in der direkten Umgebung der

Messstation durchgeführt. Es wurde eine Stelle gewählt, die in einem vom Gestänge der meteorologischen Messstation nicht abgeschatteten Bereich lag, um die Ergebnisse nicht zu verfälschen. Das 50 Meter lange Testprofil befand sich etwa zehn Meter entfernt, weit genug, um die Oberfläche für die Messungen nicht zu zerstören und dennoch nah genug an der Messstation, um ein repräsentatives Bild zu liefern.

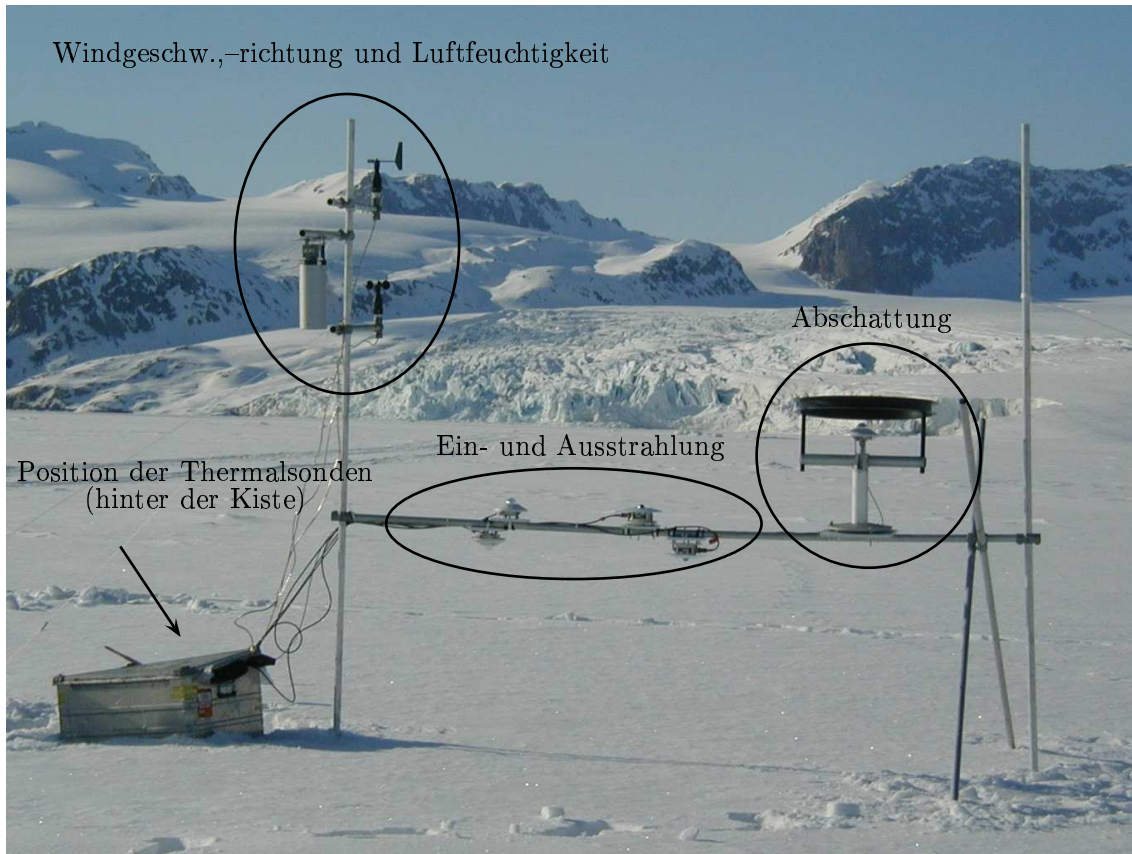


Abbildung 4.15: Messstation mit meteorologischen Messgeräten und den Thermalsonden. Die Messgröße, die mit den Geräten bestimmt wurde, ist jeweils angegeben.

Zusätzlich zu der EXTASE-Thermalsonde wurden auch mit zehn handelsüblichen PT1000 vergleichende Temperaturprofile bestimmt. Dazu wurden die beiden Messsysteme in einem Abstand von 30 cm installiert. Die Messwerte der beiden Verfahren sollten nicht mehr als  $1 - 2^{\circ}\text{C}$  voneinander abweichen, damit die Werte der neuen Thermalsonde als zuverlässig gelten können.

Wird der Aufbau der beiden Verfahren zur Temperaturmessung verglichen (Abbildung 4.16), wird direkt deutlich, worin einer der Vorteile der EXTASE-Thermalsonden liegt. Zur Installation wurde die EXTASE-Sonde lediglich senkrecht in den Schnee gesteckt und war damit bereit zur Messung. Das umgebende Material wurde kaum zerstört und der Schnee schloss mit der Sonde ab. Für die PT1000 wurde ein Loch gegraben und der Schnee



Abbildung 4.16: Installation der Temperatursensoren. Links im Bild die PT1000, rechts die EXTASE-Thermalsonde (die Sonde wurde nach Aufnahme dieses Fotos noch umgesetzt).

angeschnitten, um die Sensoren zu installieren. Das ausgehobene Loch wurde wieder mit Schnee verfüllt. Diese Methode birgt bereits Fehlerquellen für die Messungen (siehe 1.1.2, 1.2.2 und 2.2). Um konstante Abstände zwischen den Sensoren zu gewährleisten, wurden die PT1000 ab dem dritten Tag der Messungen auf einem Brett fixiert.

Aufgrund des wolkenlosen und sehr sonnigen Wetters schmolz die Schneeschicht nach und nach, so dass die Sensoren beider Systeme immer weiter aus dem verbliebenem Schnee herausragten. Um dieses „Freischmelzen“ zu verhindern, wurden die PT1000 mithilfe eines kleinen, mit Alufolie beklebten Pappdaches abgeschattet. Dies verringerte zwar das „Freischmelzen“, hat aber sicherlich auch die Messwerte beeinflusst. Um die Messungen den gegebenen Schneeverhältnissen anzupassen und die gesamte Sondenlänge möglichst komplett auszunutzen, wurde die Position der EXTASE-Thermalsonde mehrmals verändert (siehe Abbildung 4.19). Das Abtauen des Schnees an der Messstation und in ihrer Umgebung sind anhand einiger Fotos (aufgenommen aus circa 1 km Entfernung) in Abbildung 4.18 dargestellt (Fotos mit freundlicher Genehmigung des AWI Bremerhaven).



### Meteorologische Daten (Zusammenfassung der Daten nach Nicolaus *et al.* (2003))

Die Zeit der Messkampagne lässt sich in zwei deutlich unterschiedliche meteorologische Phasen und eine dazwischenliegenden Übergangsphase teilen, die durch den Übergang von Winter zu Sommer geprägt waren:

1. Präschmelzphase: Die Phase vor dem 27. Mai war durch Wetter mit klarem Himmel bestimmt.
2. Schmelzphase: Die Phase nach dem 27. Mai war geprägt durch bedecktes Wetter, was sich vor allem durch einen drastischen Anstieg in der langwelligen Strahlung – also der Wärmestrahlung der Erde – am 27.05. abzeichnete (siehe Nicolaus *et al.* (2003), Abbildung 2a). Daraus resultierend stieg die Lufttemperatur bis über den Gefrierpunkt und blieb ab diesem Zeitpunkt stets im positiven Temperaturbereich (siehe Nicolaus *et al.* (2003) Abbildung 2c). Der 27. Mai markierte somit das Einsetzen der Schmelzphase, im Zuge derer sich die Schneebedeckung, beziehungsweise die Eisschicht im Fjord, deutlich verringerte.

Die physikalischen Eigenschaften der Schnee- und Eisbedeckung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- **Schnee- und Eismächtigkeit:**  
Entlang des Schneeprofiles war die Schneehöhe sehr homogen mit einer mittleren Anfangshöhe von knapp 23 cm. Ab dem Beginn der Schmelze nahm sie rapide ab. Am 29. Mai waren es nur noch 11.5 cm und 1. Juni war sie nahezu auf 0.5 cm vermindert und war vom sich dann bildenden verwitterten Eis kaum noch zu unterscheiden. Die Eismächtigkeit betrug zu Anfang 78 cm und hat sich während der Beobachtungsperiode nicht verändert. Tatsächlich stieg die Eismächtigkeit sogar auf 84 cm an (1. Juni), bedingt durch die Bildung des Aufeises<sup>1</sup>.
- **Schneedichte:**  
Die anfängliche Schneedichte in der ersten Phase betrug  $268 \pm 40 \text{ kg/m}^3$ . Sie stieg auf  $357 \pm 42 \text{ kg/m}^3$  beim Einsetzen der Schmelze an. Am 1. Juni, als nur noch 8 cm Schneeeauflage gemessen werden konnten, war die Dichte auf  $366 \pm 40 \text{ kg/m}^3$  angestiegen.
- **Schneefeuchte:**  
Auch hier finden sich die drei Wetterphasen wieder: Vor Beginn der Schmelze lag die

---

<sup>1</sup>Neues Eis, dass sich auf bereits bestehendem, älterem Eis bildet.

Feuchtigkeit in sämtlichen Tiefen des gemessenen Profils bei  $< 0.2\%_{vol}$ . Bei Einsetzen der Schmelze am 27.5. konnte ein Anstieg in der Feuchte bis zu einem Mittel für sämtliche Schichten von  $3.3\%_{vol}$  Danach verursachte das fortschreitende Abschmelzen einen weiteren Anstieg der Feuchte im Mittel auf bis zu  $11\%_{vol}$ . Die letzten Messungen, als nur noch 0.06 m Schnee übrig waren, zeigten eine mittlere Feuchte von  $8.7\%_{vol}$ .

- Stratigraphie:

Die anfängliche Schneedecke war deutlich geschichtet. Bestimmte gleichartige Schichten konnten in vielen Schneegruben identifiziert werden, obwohl ihre Mächtigkeit und Festigkeit variabel war. Die unteren 0 – 6 cm waren durch das Vorhandensein von zwei 5 – 20 mm dicken Eisschichten charakterisiert. Diese Schichten wurden an fast allen Stellen des Testprofils gefunden, wenngleich auch ihre Härte, beziehungsweise ihr Grad der Vereisung, lateral variierte. Zwischen diesen Eisschichten wurden lockere Schichten von kleinen, gerundeten Eiskörnern von etwa 1 mm Durchmesser gefunden. An der Oberfläche wurde eine 0.5 cm dicke weiche Schneeschicht beobachtet, zunächst war diese praktisch trocken.

Während des Einsetzens der Schmelze wurden die untersten 1 – 2 cm mehr und mehr verwässert und leicht salinisch. Nach dem 27. Mai wurden die Basis-Eisschichten dicker und wandelten sich in eine brüchige Schicht um, was das Einsetzen der Aufeisbildung darstellte. Die Unterschiede zwischen den weichen und vereisten Schichten wurde weniger offensichtlich und der Schnee erschien sehr nass.

Nach dem 29. Mai hatte sich eine 3 cm mächtige Aufeissschicht aus den Eisschichten gebildet. Jedoch war das Aufeis nicht gut mit der darunter liegenden Eisoberfläche verbunden, so dass die Temperatur- und Feuchtesensoren leicht bei 0 cm eingebracht werden konnten. Am Tag 152 war der Großteil des Schnees abgeschmolzen. In den darauffolgenden Tagen begann die Aufeisoberfläche zu zerfallen. Die Oberfläche setzte sich aus einer 0.5 – 1 cm dicken Schicht aus etwa 1.5 mm großen, polygonalen Eiskörnern zusammen.

- Albedo:

Während der drei oben genannten Phasen änderte sich auch die Konsistenz des Schnees von trockenem, kaltem Schnee, über nasse zu wassergesättigtem Schnee und einer verminderten Aufeisoberfläche. Dies beeinflusste die spektrale Albedo stark. Unter Prä-Schmelzbedingungen (21. Mai), als das Meereis noch von einer 25 cm dicken Schneeschicht bedeckt war, war die spektrale Albedo hoch für sichtbare Wellenlängen und Wellenlängen im nahen Infrarotbereich (0.8 mm bis 1.3 mm). Sie blieb praktisch konstant bis zum 27. Mai. Während der frühen Schmelzphase (29. Mai) verringerte flüssiges Wasser im Schneepaket die Albedo, die im nah-infraroten Bereich bestimmt wurde, während die sichtbare Albedo immer noch hoch war. In den

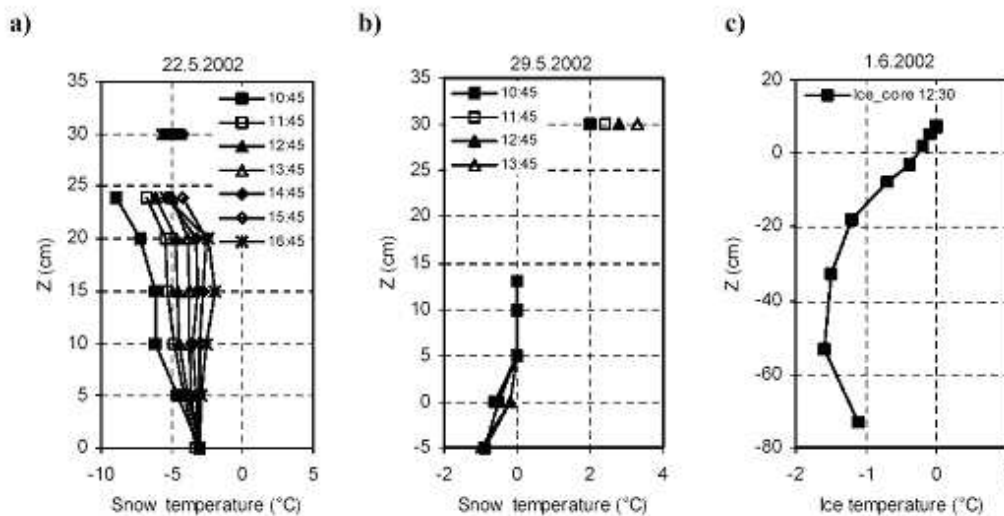


Abbildung 4.17: Vertikale Schnee- a) und b) und Eis- c) Temperaturprofile, typisch für a) Präsichelphase (22. Mai); b) Einsetzen der Schmelze (29. Mai) und c) Schmelzbedingungen (1. Juni). Beim Vergleich sind die unterschiedlichen Tiefen- und Temperaturskalen zu beachten  $z=0$  bezieht sich für a) und b) auf die Schneebasis und für c) auf den Wasserlevel. Bildquelle: Nicolaus *et al.* (2003)

finalen Tagen der Beobachtungen bestand die vermessene Oberfläche nur noch aus dm-großen Stellen aus schmelzendem Schnee und Eis. Infolgedessen verringerte sich die spektrale Albedo drastisch, nicht nur im infraroten Bereich, sondern auch für sichtbare Wellenlängen (1. Juni).

- Tiefenprofile:

Abbildung 4.17 zeigt typische Temperaturprofile für die drei Wetterphasen. In der ersten traten starke negative Temperaturgradienten im Schnee auf, mit Oberflächentemperaturen bis zu  $-9^{\circ}\text{C}$ , die damit niedriger als die Lufttemperaturen waren (Abbildung 4.17 a). Während des Tages stiegen die Schneetemperaturen um bis zu  $5^{\circ}\text{C}$  an, lagen aber immer noch deutlich unter  $0^{\circ}\text{C}$ . Beim Einsetzen der Schmelze hatte das obere Schneepaket eine konstante Temperatur von  $0^{\circ}\text{C}$  (Abbildung 4.17 b). Das untere Schneepaket zeigt schwache Tagesgänge. Während dieser Phase näherte sich die Eis-Schnee-Grenze langsam der  $0^{\circ}\text{C}$ -Grenze, erreicht wurde sie am 30. Mai (Tag 150). Danach verringerte sich die Schneemächtigkeit rapide und die unteren Eisschichten erreichten ebenfalls  $0^{\circ}\text{C}$  (Abbildung 4.17 c). Interessanterweise wurde das Eis von oben und von unten erwärmt. Letzteres ist vermutlich auf das Einströmen von wärmerem Wasser aus dem Fjord zurückzuführen; dazu gibt es jedoch keine weiteren Messungen.

### Temperaturmessungen

Von beiden Messsystemen wurden kontinuierlich Temperaturprofile aufgenommen. Das Messintervall betrug dabei fünf Minuten, um ausreichend Speicher für mehr als einen Tag zu haben, da damit zu rechnen war, dass die Messstationen aufgrund schlechter Wetter- oder Eisbedingungen nicht jeden Tag aufgesucht werden konnte.

Zunächst wurde die Thermalsonde so installiert, dass sie mit dem unteren Ende auf dem Meereis aufsaß. Da die Schneebedeckung nur 23 cm betrug, befand sich ein Teil der Sonde über der Schneedecke. Zwei Tage später wurde die Sonde dann ein Stück ins Eis gebohrt, um ihre volle Länge auszunutzen. Nachdem ein Teil des Schnees abgetaut war, wurde die Sonde neu in den Schnee eingesetzt und zwar schräg, um auch weiterhin die gesamte Länge der Sonde nutzen zu können. Dabei saß die untere Spitze der Thermalsonde wieder auf dem Eis auf, so dass über die jeweilige Schneehöhe die absolute Tiefenlage der einzelnen Sensoren berechnet werden konnte. Zum Schluss, als fast kein Schnee mehr übrig war, wurde die Sonde wieder teilweise ins Eis gebohrt. Die genauen Tiefenlagen der Sensoren können Tabelle 4.2 entnommen werden. Positive Höhenangaben bedeuten dabei, dass sich die Sensoren oberhalb der Grenze Schnee/Luft befanden. In den Abbildungen 4.19 sind die Fotos der Sondenpositionen im Verlauf der Messkampagne dargestellt.



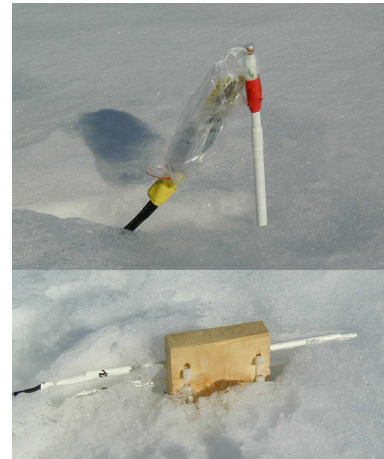
Abbildung 4.18: Fotos der Umgebung des Messgebietes während der Dauer der Messkampagne. Die drei Fotos wurden zu Beginn der Kampagne (oben), zu Beginn der Schmelzphase (Mite) und zum Ende der Kampagne (unten) aufgenommen. Die Kreis markieren jeweils den Standort der Messstation.

Sensor (Nr.)	20./21.05.	22.-24.05.	25.05.	26.05.	27.05.	28.05.	29.05.	30.05.	31.05.	02.06.	03.06.
1	-6.54	0.46	-5.04	-6.01	0.25	-0.75	-6.05	-0.79	-6.42	-8.54	-9.54
2	-5.6	1.4	-4.01	-5.07	0.77	-0.23	-5.53	0.15	-5.47	-7.6	-8.6
3	-4.56	2.44	-3.06	-4.03	1.34	0.34	-4.96	1.19	-4.44	-6.56	-7.56
4	-3.4	3.6	-1.9	-2.86	1.98	0.98	-4.32	2.35	-3.27	-5.4	-6.4
5	-2.13	4.87	-0.63	-1.6	2.67	1.67	-3.63	3.62	-2.01	-4.13	-5.13
6	-0.73	6.27	0.77	-0.2	3.44	2.44	-2.86	5.02	-0.6	-2.73	-3.73
7	0.83	7.83	2.33	1.36	4.3	3.3	-2.0	6.5	0.96	-1.17	-2.17
8	2.51	9.51	4.01	3.05	5.22	4.22	-1.08	8.26	2.64	0.51	-0.49
9	4.33	11.33	5.83	4.86	6.21	5.21	-0.09	10.08	4.46	2.33	1.33
10	6.33	13.33	7.83	6.86	7.31	6.31	1.01	12.08	6.45	4.33	3.33
11	8.54	15.54	10.04	9.07	8.52	7.52	2.22	14.29	8.66	6.54	5.54
12	11.02	18.02	12.52	11.56	9.88	8.88	3.58	16.77	11.15	9.02	8.02
13	13.75	20.75	15.25	14.28	11.37	10.37	5.07	19.5	13.87	11.75	10.75
14	16.65	23.65	18.15	17.17	12.96	11.96	6.66	22.4	16.77	14.65	13.65
15	19.85	26.85	21.35	20.38	14.72	13.72	8.42	25.6	19.97	17.85	16.85
16	23.52	30.52	25.02	24.05	16.73	15.73	10.43	29.27	23.64	21.52	20.52

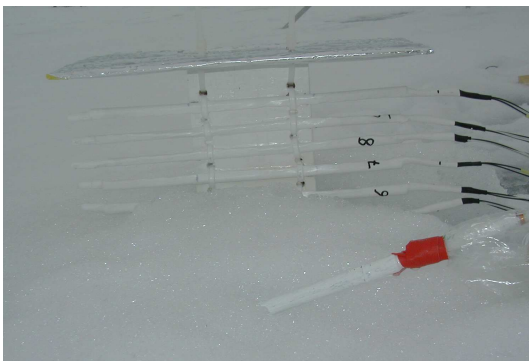
Tabelle 4.2: Positionen der Sensoren der Thermalsonde während der Messkampagne.

**Positionen der Sonden während der Dauer der Messkampagne**

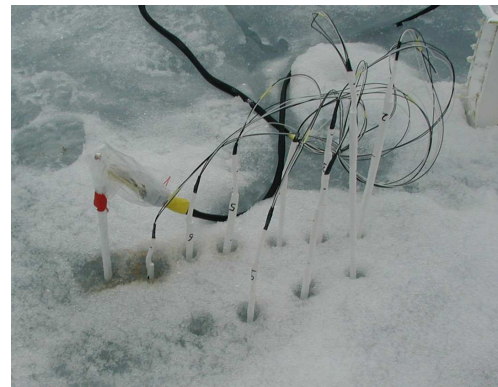
23.05.02-25.05.02



26.05.02



29.05.2002



ab 31.05.2002

Abbildung 4.19: Positionen der Sonden während der Dauer der Messkampagne auf Spitzbergen. Unter den einzelnen Abbildungen ist das jeweilige Datum der Aufnahme angegeben. Dazwischen verblieben die Messsysteme an derselben Position.

## Ergebnisse

Wie schon erwähnt, wurden nahezu kontinuierlich Temperaturprofile sowohl mit dem EXTASE-Messsystem als auch mit den zehn PT1000 aufgenommen. Da sich einige der Ergebnisse sehr ähneln, werden die Charakteristika der Messungen und des neuen Messsystems an repräsentativen Beispielen verdeutlicht. Zusätzlich werden die Ergebnisse der beiden Messsysteme miteinander verglichen und die Unterschiede bewertet.

Zunächst werden exemplarische Temperaturprofile der EXTASE-Thermalsonde in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt. Dabei wird die Temperatur jeweils farbkodiert in Abhängigkeit von der Zeit ( $x$ -Achse) und der Tiefe ( $y$ -Achse) abgebildet, wobei positive Tiefen wieder bedeuten, dass sich die Sensoren über der Schneeschicht befanden.

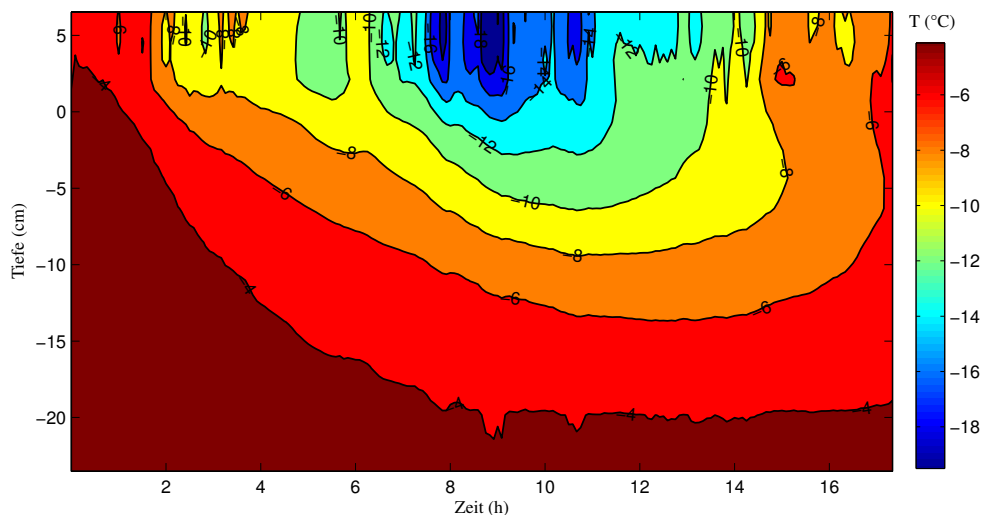


Abbildung 4.20: Temperaturen, gemessen mit der EXTASE-Thermalsonde vom 20. bis 21. Mai. Startzeitpunkt: 20. Mai, 18:22 Uhr Ortszeit.

Die Temperaturen über der Schneeschicht zeigen deutlich Einflüsse durch Wind und Sonneneinstrahlung und unterliegen deswegen viel häufigeren, wenn auch geringen, Temperaturänderungen als die im Schnee. Ebenfalls deutlich sichtbar ist das Eindringen der Wärmewelle und deren Zeitverzögerung in größeren Tiefen.

Das nächste Beispiel zeigt die Daten, die vom 23. bis 25. Mai aufgenommen wurden. Die Sonde befand sich nun komplett im Schnee beziehungsweise die letzten Zentimeter im Eis. Das Wetter war zunächst warm und windig mit bedecktem Himmel. Dieser klarte danach komplett auf. Das sonnige Wetter verursachte im Laufe der Zeit ein Freischmelzen der ersten fünf Zentimeter der Thermalsonde. All diese Phänomene lassen sich auch in den Daten wiederfinden, wie in Abbildung 4.21 gezeigt wird.



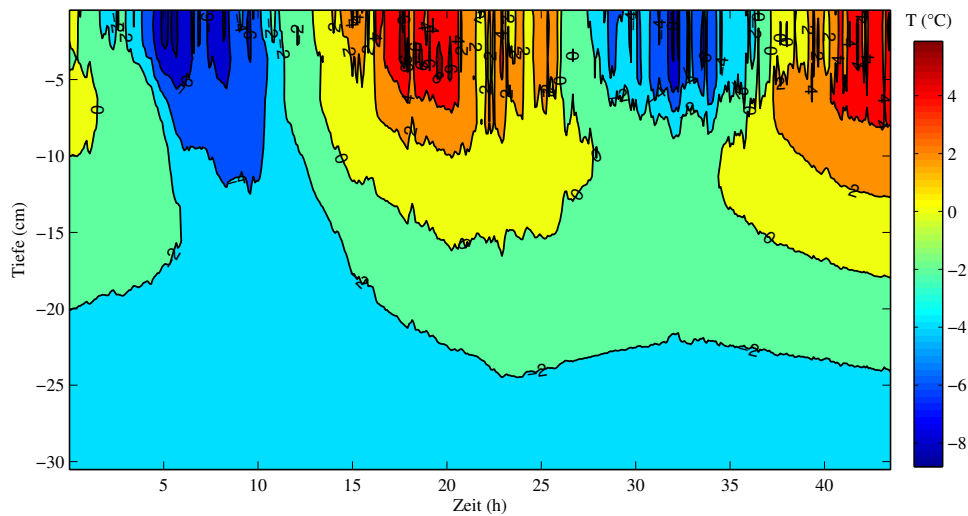


Abbildung 4.21: Temperaturen, gemessen mit der EXTASE-Thermalsonde vom 23. bis 25. Mai. Startzeitpunkt: 23. Mai, 19:05 Uhr Ortszeit.

In der Eisschicht (ab circa -26 cm) liegt die Temperatur konstant bei  $\approx -2^\circ\text{C}$ , was mit üblicherweise beobachteten Temperaturen bei Meereis übereinstimmt (siehe zum Beispiel <http://www.awi-bremerhaven.de/ClickLearn/Buch/meereis-d.html>: „Bei einer Wassertemperatur von unter  $-1.8^\circ\text{C}$  bilden sich mm-große Eiskristalle, die sich an der Wasseroberfläche ansammeln. ...“, abgerufen am: 21.05.2006 und Petrenko und Whitworth (1999)).

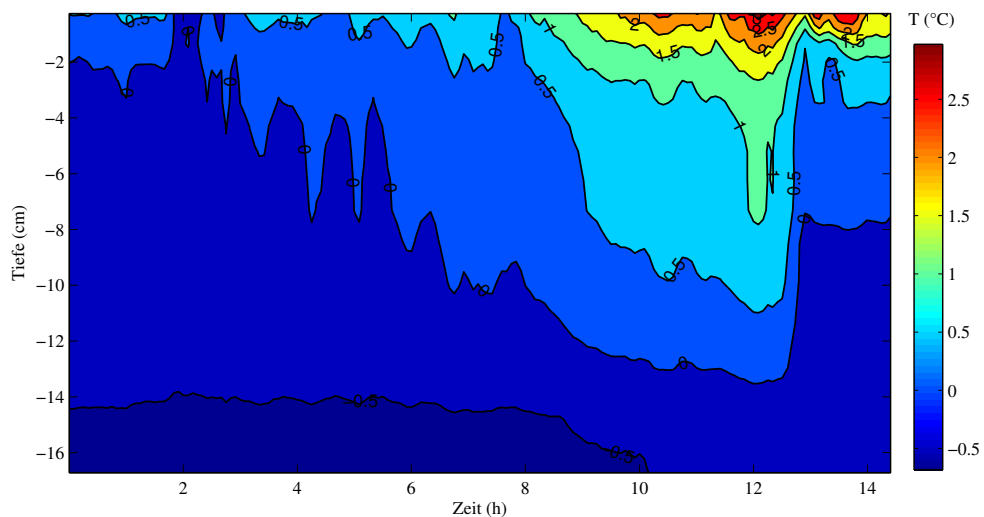


Abbildung 4.22: Temperaturen, gemessen mit der EXTASE-Thermalsonde vom 27. bis 28. Mai. Startzeitpunkt: 27. Mai, 23:50 Uhr Ortszeit.

Beim dritten Beispiel (Abbildung 4.22) befand sich die Sonde als Reaktion auf die stark verringerte Schneehöhe bereits schräg im Schnee (Berechnung der Sensortiefen siehe oben). Auch hier kann das Eindringen der Wärmewelle beobachtet werden. Die positiven Temperaturen in der zweiten Hälfte des Datensatzes wurden dadurch verursacht, dass auch hier wieder im Laufe der Messung einige Zentimeter Schnee durch die starke Sonneneinstrahlung schmolzen.

Im letzten Beispiel ist einer der letzten aufgenommenen Datensätze dargestellt (Abbildung 4.23). Ein großer Teil der Thermalsonde befand sich nun im Eis, da der Schnee nahezu vollständig abgetaut war. Daher liegen die Temperaturen ab circa  $-5$  cm konstant bei  $-1.5$  °C, da sich dieser Teil der Sonde im Meereis befand, welches sich während der Dauer der Messung nicht merklich änderte.

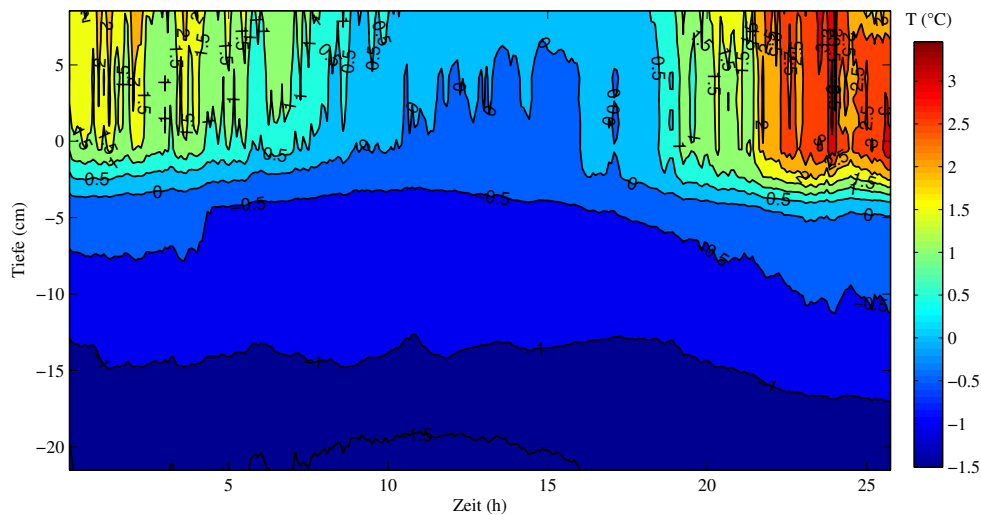


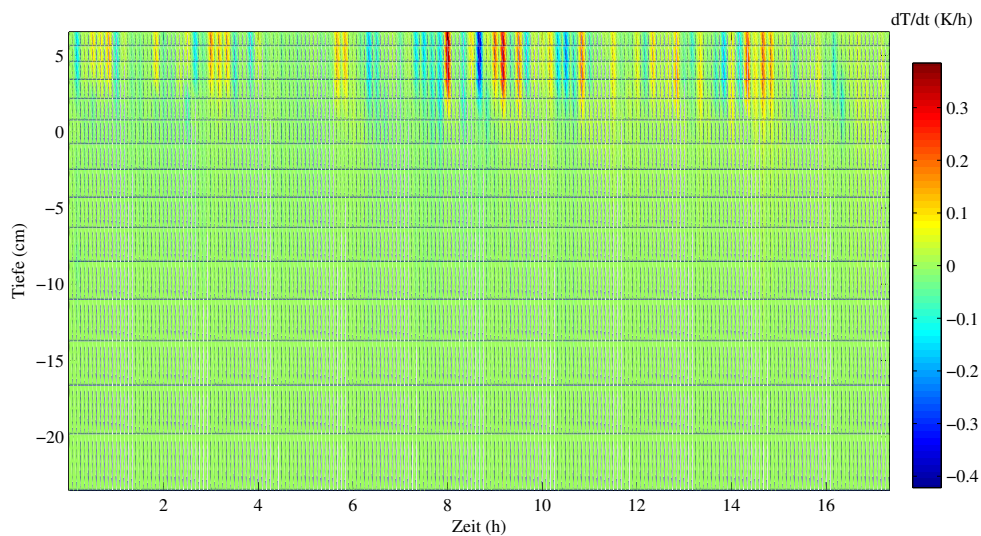
Abbildung 4.23: Temperaturen, gemessen mit der EXTASE-Sonde vom 01. bis 02. Juni. Startzeitpunkt: 01. Juni, 12:54 Uhr Ortszeit.

### Darstellung der Ableitungen nach der Zeit und der Tiefe

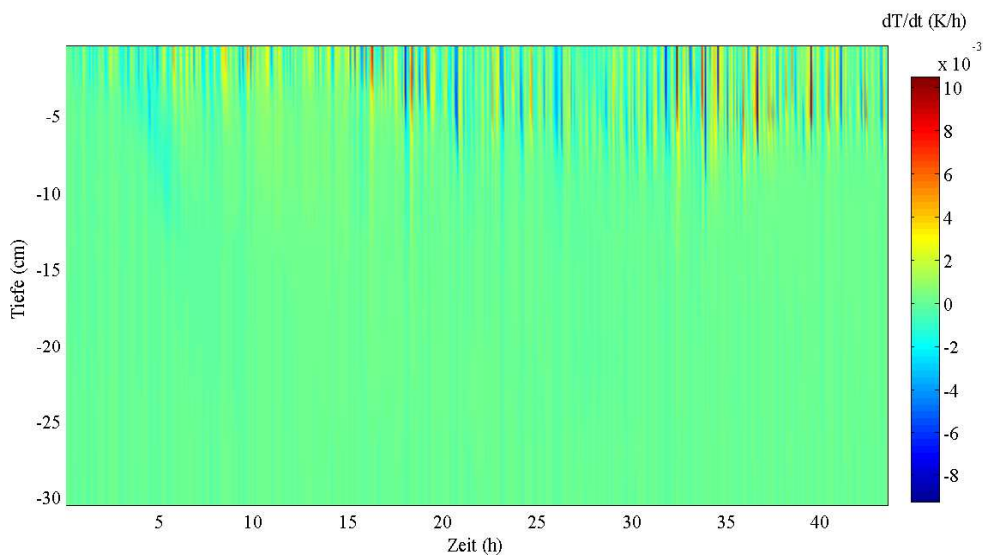
Aus den zeitlichen und räumlichen Ableitungen der Temperaturen lassen sich ebenfalls Aussagen über das thermische Regime im Schneeprofil treffen. Die zeitlichen Ableitungen verdeutlichen die Lokalisierung und die Extrema der Aktivitäten im Schneeprofil und die Ableitungen mit der Tiefe können zum Beispiel Grenzflächen im Schneeprofil aufzeigen.

Zeitliche Ableitungen:

Die beiden im folgenden Verlauf gezeigten Beispiele (Abbildung 4.24) bestätigen, was auch aus den bisherigen Temperaturprofilen abgelesen werden konnte: Die größte Aktivität und damit verbunden auch die größten und häufigsten Veränderungen sind an der Oberfläche zu finden. Hier haben Wind und andere äußere Einflüsse die größte Wirkung auf das Schneepaket, die darunter liegenden Schichten sind weniger stark davon betroffen. Da sämtliche Darstellungen der zeitlichen Gradienten ein sehr ähnliches Verhalten aufzeigen, wird auf die Darstellung der kompletten Ergebnisse verzichtet.



Darstellung der zeitlichen Ableitung der Messdaten vom 20. bis 21. Mai.



Darstellung der zeitlichen Ableitung der Messdaten vom 23. bis 25. Mai.

Abbildung 4.24: Beispiele für die Darstellung des zeitlichen Gradienten der Temperaturdaten.

Vertikale Temperaturgradienten:

Anhand der Darstellungen des vertikalen Temperaturgradienten lassen sich häufig Grenzschichten erkennen, da ein Wechsel, beispielsweise von Luft zu Schnee, oftmals mit einem größeren Temperaturgradienten einhergeht. In den Abbildungen 4.25 und 4.26 sind vier Beispiele dargestellt, an denen sich diese Tatsache gut belegen lässt. Für die letzten drei Datensätze gilt, dass die Tiefen denjenigen entsprechen, die am Ende des Datensatzes abgelesen wurden. Das heißt, dass sich die Sonde zu Beginn der jeweiligen Messung komplett im Schnee befand und die positiven Tiefen verdeutlichen die Abnahme der Schneeschicht im Verlauf der Messungen. Beim ersten Beispiel sind die Tiefen zu Beginn der Messung aufgetragen; auch hier nahm die Mächtigkeit der Schneedecke mit der Zeit ab.

In allen Darstellungen zeichnet sich diese Grenzschicht zwischen Luft und Schnee deutlich ab.

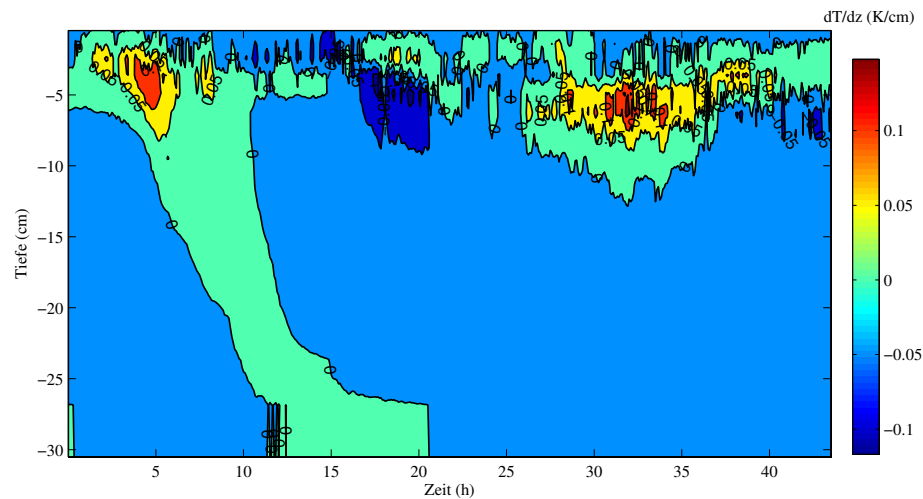
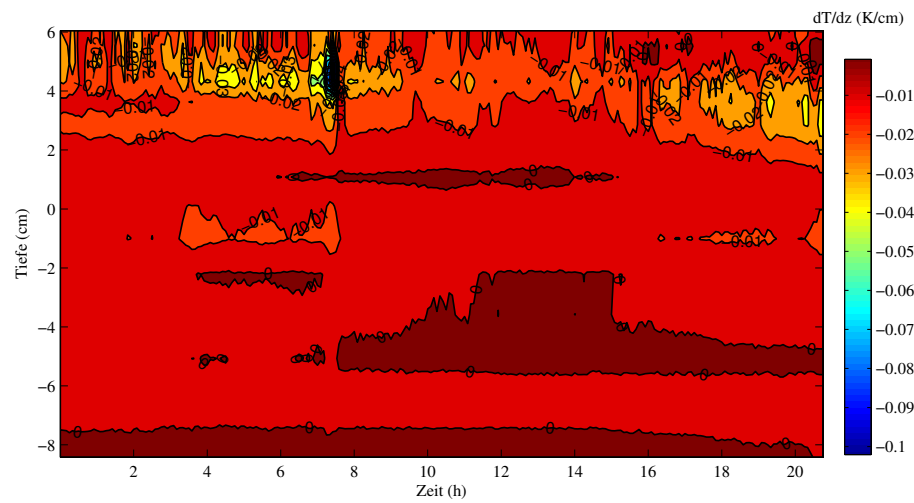
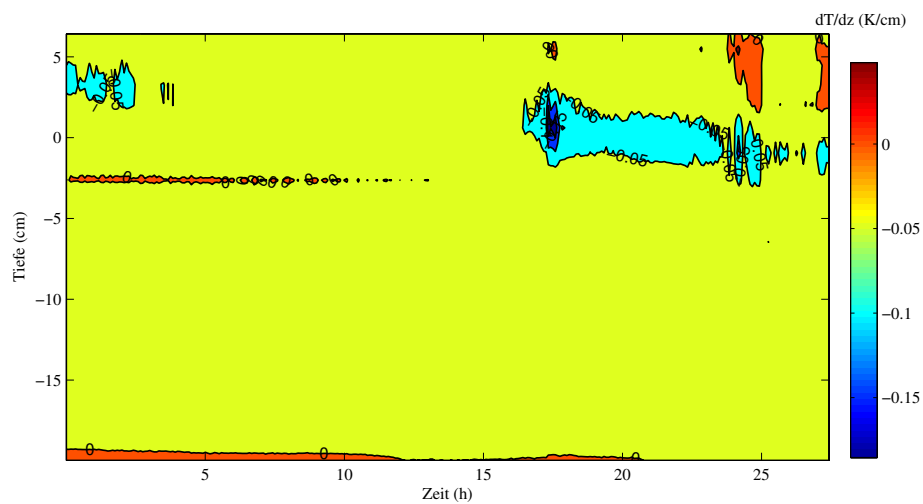


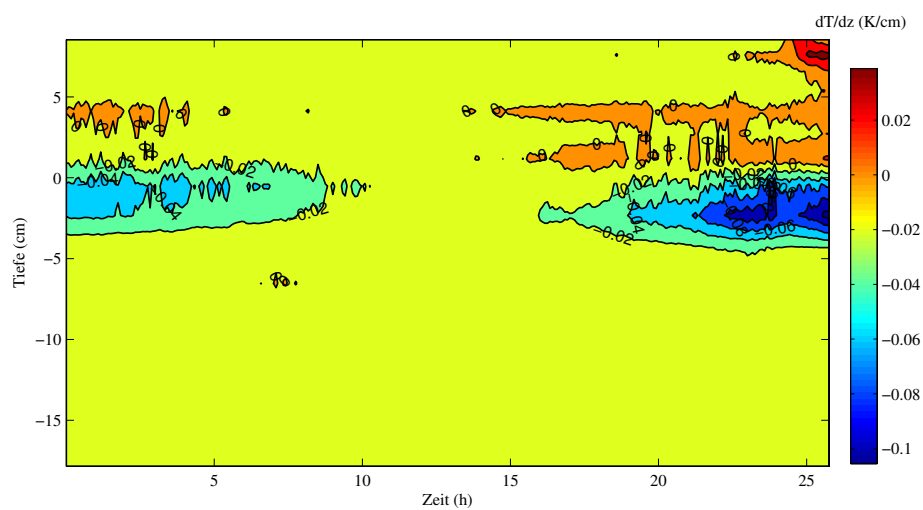
Abbildung 4.25: Darstellung des vertikalen Temperaturgradienten der Messdaten vom 23./25. Mai.



Darstellung des vertikalen Temperaturgradienten der Messdaten vom 29. Mai.



Darstellung des vertikalen Temperaturgradienten der Messdaten vom 31. Mai.



Darstellung des vertikalen Temperaturgradienten der Messdaten vom 02. Juni.

Abbildung 4.26: Beispiele für die Darstellung des zeitlichen Gradienten der Temperaturdaten.

### Darstellung der Differenzen zwischen EXTASE-Thermalsonde und PT1000

Um die beiden Messsysteme besser vergleichen zu können, wurden die Differenzen der gemessenen Temperaturen beider Systeme gebildet (Abbildungen 4.27 und 4.28). Wieder werden hier nur einige Beispiele gezeigt, anhand derer die wesentlichen Aussagen verdeutlicht werden können. Die weißen Flächen in den Diagrammen sind Stellen, an denen die Messdaten von nur einem Messsystem vorhanden waren und so keine Differenzen gebildet werden konnten.

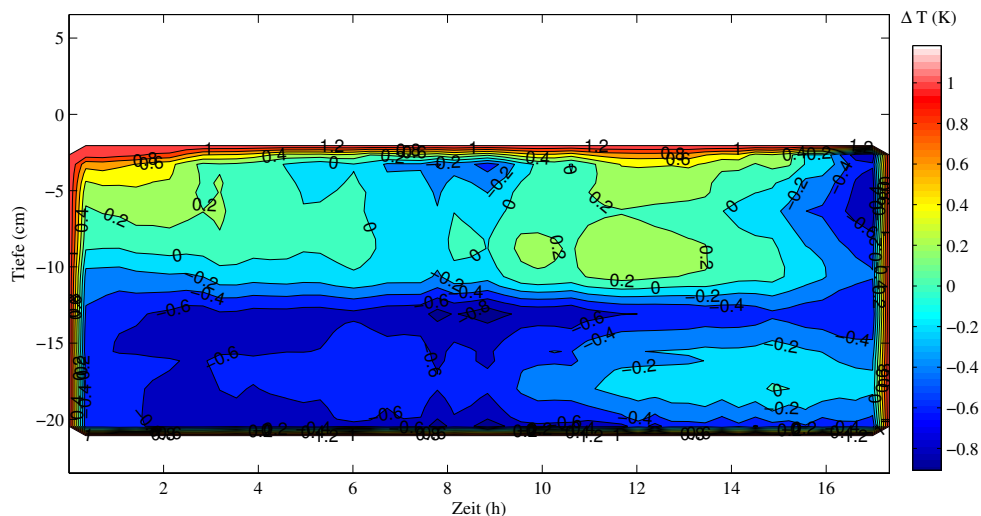
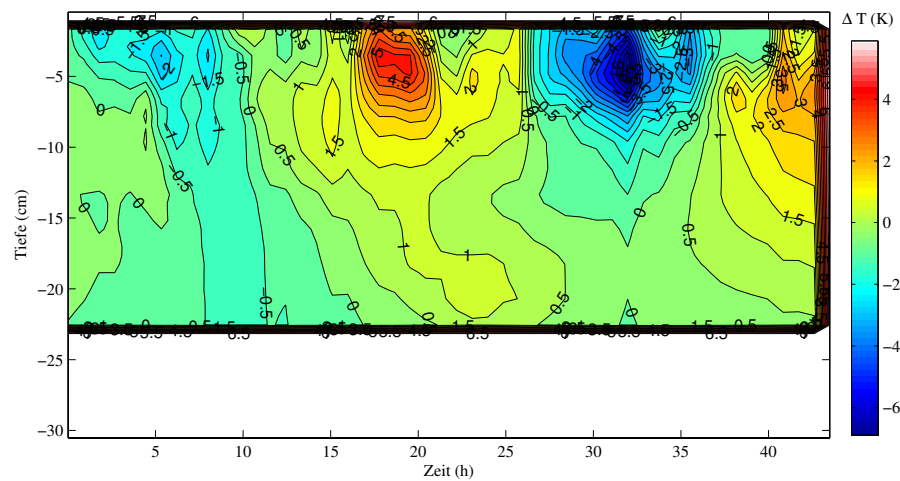


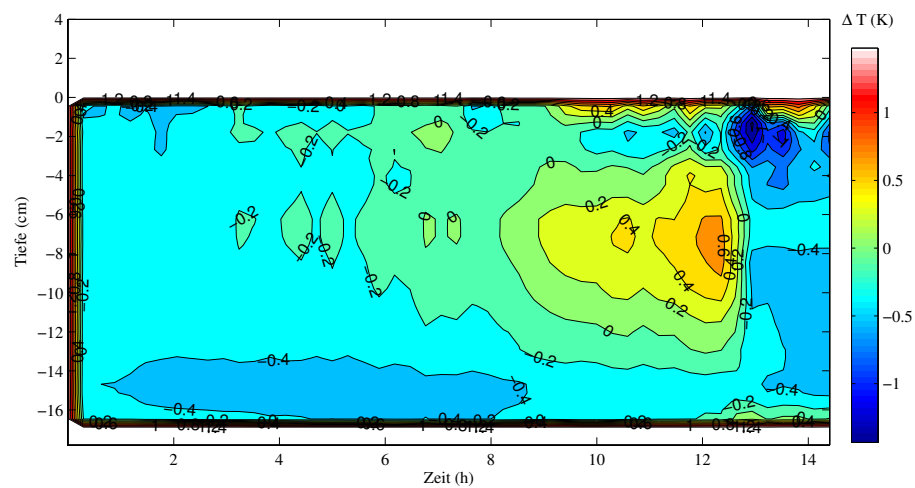
Abbildung 4.27: Darstellung der Differenzen zwischen den Messwerten der EXTASE-Sonde und den PT1000 vom 20. bis 21. Mai.

Ein Vergleich der Datensätze zeigt, dass die Daten nicht exakt übereinstimmen; das generelle Verhalten der Daten beider Systeme ist jedoch gleich. Sie unterscheiden sich jeweils um ungefähr  $1 - 2^\circ\text{C}$ . Diese Abweichungen haben mehrere Ursachen. Insgesamt zeigt sich, dass die Abweichungen bis auf eine Ausnahme relativ gering sind. Die Abweichungen zwischen den Messsysteme sind in Tabelle 4.3 zusammengefasst.

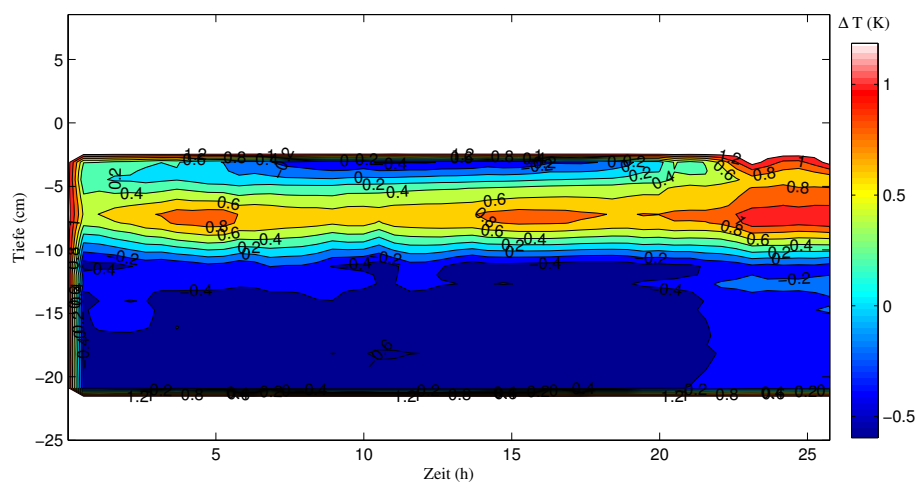
Die Analyse der Abweichungen zwischen den Methoden zeigt, dass die maximale Abweichung in allen Datensätzen  $7^\circ\text{C}$  beträgt. Dies ist nur ein singuläres Ereignis und tritt so extrem nur in einem einzigen Datensatz auf, kann also auf einen Messfehler oder die im folgenden genannten Gründe zurückzuführen sein. Im Durchschnitt liegen die mittleren Abweichungen bei  $1.865^\circ\text{C}$ .



Darstellung der Differenzen vom 23. bis 25. Mai.



Darstellung der Differenzen vom 28. Mai.



Darstellung der Differenzen vom 02. Juni.

Abbildung 4.28: Beispiele für die Darstellung der Differenzen zwischen den Messwerten der EXTASE-Sonde und den PT1000.

Datum	$\Delta T_{max}$	$\Delta T_{min}$	$\Delta T_{mittel}$
20./21.05.	1.1	0.9	1
21./22.05.	1.8	0.6	1.2
23.-25.05.	7.0	5.0	6.0
27.05.	1.9	0.2	1.05
28.05.	1.4	0.8	1.1
29.05.	0.9	0.8	0.85
30.05.	3.0	3.0	3.0
31.05.	3.6	0.4	2
02.06.	1.3	0.6	0.95
03.06.	1.8	1.2	1.5
Mittelwert	2.38	1.35	1.865

Tabelle 4.3: Statistik der Differenzen zwischen Thermalsonde und PT1000.

### Zusammenfassung

Zusammenfassend hat sich herausgestellt, dass die neuen Thermalsonden sehr gut geeignet für die Messungen im Bereich der Glaziologie sind. Es lassen sich aus den Messungen weitere folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- In der Handhabung bietet die EXTASE-Sonde deutliche Vorteile gegenüber den PT1000. Der Zeitaufwand für den Messaufbau ist um ein Vielfaches geringer, und Probleme wie eine falsche Positionierung einzelner Sensoren können nicht auftreten.
- Durch den geringen Durchmesser und die einfache Installation der Thermalsonden wird wesentlich weniger Umgebungsmaterial zerstört, als bei herkömmlichen Methoden.
- Ableitungen der Temperaturen zeigten zum einen die lokalen Extrema der Temperaturänderungen (zeitliche Ableitungen) und zum anderen konnte die Grenzfläche zwischen Luft und Schnee aus den vertikalen Temperaturgradienten bestimmt werden.
- Die Differenzen zwischen den gemessenen Temperaturen der beiden Messsysteme lassen sich durch mehrere Faktoren erklären. Der Datensatz mit der größten Differenz ist in Abbildung 4.28 oben abgebildet. Zu Beginn der Messung sind die Unterschiede in den Temperaturen der beiden Messsysteme noch wesentlich geringer. Dies lässt sich durch die Wetterbedingungen erklären. Zunächst war der Himmel noch bedeckt, was sich während der Messung änderte. Dadurch trat ein typisches Phänomen bei Temperaturmessungen im Schnee auf: Absorption von Strahlung. Dabei dringt Sonnenlicht



einige wenige Zentimeter in den Schnee ein, die Sensoren absorbieren Teile der Energie und heizen sich selbst auf. Die Sensoren schmelzen sich frei und zeitweise messen sie dadurch positive Temperaturen im Schnee. Um diesen Effekt möglichst gering zu halten, wurden die Sonden weiß angestrichen, was dieses Problem verringerte. Bei weniger sonnigem Wetter trat dieser Effekt nicht auf. Er war bei den PT1000 etwas geringer, da sie zum einen eine kleinere aktive Messfläche haben und zum anderen weil sie im Schnee vergraben waren. Befanden sie sich durch Freischmelzen bedingt über der Schneedecke, trat dieser Effekt auch auf, wurde allerdings dadurch unterdrückt, dass ein mit Alufolie beklebtes Pappdach über den Sensoren installiert wurde. Die Ergebnisse wurden dadurch beeinflusst, denn das Abschatten verursachte sicher etwas niedrigere Temperaturen, als sich ohne das Pappdach ergeben hätten. Außerdem wurde mit den beiden Systemen zwar in relativ geringen Entfernungen (Distanz 0.5 m) gemessen, dennoch sind zwei Temperaturen, die in gewisser Entfernung von einander bestimmt werden, sicherlich verschieden. Gerade im Schnee können sich Eigenschaften wie die Temperatur innerhalb kleinster Entfernungen signifikant ändern. Es ist zu erwarten, dass selbst identische Messsysteme an zwei verschiedenen Stellen gering unterschiedliche Temperaturen messen. Ein weiterer Faktor ist die Interpolation zwischen den PT1000. Die EXTASE-Sonde deckt ihre kompletten 32 cm Länge mit Sensoren ab, während zwischen den PT1000 Lücken von bis zu zwei cm existieren. So ist es also nicht verwunderlich, dass die Messergebnisse voneinander abweichen. Aufgrund der Ursachen können die Abweichungen aber immer noch als gering genug betrachtet werden, um die Messung mit der EXTASE-Thermalsonde als zuverlässig zu bezeichnen.

- Die Reflektionseigenschaften bedürfen unter Berücksichtigungen der praktischen Erfahrungen auf Spitzbergen noch einer weiteren Optimierung gerade im Hinblick auf eine weitere Erhöhung der Reflektivität.
- Die Wärmeleitung entlang der Sonde wurde im Anschluss an diese Messkampagne reduziert, indem die nächste Generation der Sonden von innen ausgeschäumt wurde, um eine Luftzirkulation in der Sonde und so eine zusätzliche Erwärmung zu verhindern.
- Ein Wärmestrom von der Seite durch Anschnitt des Untergrundes und Beeinflussung der Messwerte durch das Verfüllen des entstandenen Lochs (veränderte Struktur) wie bei den PT1000 treten bei der EXTASE-Sonde nicht auf.
- Wärmeflüsse entlang der Kabel wie bei den PT1000 treten kaum auf, da es nur ein einziges Kabel gibt, welches sich nicht im Untergrund, sondern an der Oberfläche befindet. Außerdem ist die Wärmeleitfähigkeit der Kabel durch die Nutzung der *4-wire*-Methode extrem gering.

- Die Abweichungen zwischen den Messmethoden sind gering bzw. durch die Entfernung der beiden Messsysteme zueinander erklärbar (siehe oben), so dass die Messmethode mit der EXTASE-Thermalsonde als zuverlässig bezeichnet werden kann. Nur in einem Datensatz (23.-25.05.) sind die Abweichungen sehr groß, dieser Effekt kann aber durch die Absorption von Strahlung (s.o.) erklärt werden.

#### 4.2.2 Wachstum einer Eisschicht unter Laborbedingungen

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit der Thermalsonde findet sich in der Beobachtung des Auf- und Abtauverhaltens von Seen. Im kleinen Maßstab wurde dies mit einer EXTASE-Thermalsonde im Labor simuliert. Hierzu wurde ein Tank mit Leitungswasser gefüllt und durch Senken der umgebenden Lufttemperatur das Gefrier- und Auftauverhalten des Wassers beobachtet. Dabei sollte unter anderem getestet werden, ob anhand der Temperaturprofile die Grenzschicht zwischen gefrorenem und noch flüssigem Wasser erkannt werden kann und wie sich das Gefrierverhalten mit variierendem Salzgehalt des Wassers ändert. Dazu wurde dem Leitungswasser Salz beigemischt, um verschiedene Salinitäten zu erreichen.

##### Versuchsaufbau

Die Messungen fanden im Eislabor des Instituts für Geophysik statt. In diesem Labor sind Einstellungen der Lufttemperatur von  $-3^{\circ}\text{C}$  bis  $-25^{\circ}\text{C}$  möglich. Bei den Versuchen wurde eine Messtemperatur von  $-20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  gewählt. In dem Labor befindet sich ein Tank mit folgenden Abmessungen: 0.8 m x 1.5 m x 0.8 m. Die allseitige Isolation der Wanne erlaubt einen Wärmeaustausch vorwiegend über die freie Oberfläche und simuliert somit näherungsweise den Gefriervorgang eines Stillgewässers. Da bei den Messungen gleichzeitig anderen Messungen durchgeführt wurden, die über der Mitte der Wanne stattfanden, wurde die Thermalsonde am Rand des Tanks angebracht, dabei befanden sich die beiden obersten Sensoren der Sonde über der Wasseroberfläche. Neben der Sonde wurden vier (in den ersten Versuchen) beziehungsweise acht konventionelle PT100-Widerstandsthermometer im Tank installiert, um die Temperaturen zu kontrollieren. Weiterhin wurden drei manuell betriebene magnetomechanische Sensoren zur Bestimmung der Eismächtigkeit im Tank platziert. Um der Bildung eines Überdrucks unter dem Eis und damit einer möglichen Anhebung der Eisschicht entgegenzuwirken, wurde zusätzlich ein beheizbarer Abfluss installiert. Um das Auftauen zu beschleunigen, wurden Heizbänder im Tank ausgelegt. Durch Senken der Umgebungstemperatur auf  $-20^{\circ}\text{C}$  wurde das Wasser gefroren und durch Heben der Umgebungstemperatur auf  $+5^{\circ}\text{C}$  und Beheizen durch die Heizschlangen wurde der Prozess umgekehrt.

Die Wanne wurde mit Leitungswasser gefüllt, dem ein Mittel zur Verhinderung von Algenbildung (ohne Einfluss auf den Gefrierpunkt) zugefügt wurde. Bei weiteren Versuchen

wurde dem Wasser dann Salz in verschiedenen Konzentrationen zugefügt um zwei verschiedene Salzkonzentrationen zu erreichen: Einmal 5 kg und einmal 10 kg, so dass sich ein Salzgehalt von 1% beziehungsweise 2% ergab. In einem weiteren Versuch wurde nach der Bildung einer Eisschicht zusätzlich eine Schneeauflage hinzugefügt. In Abbildung 4.29 ist der Versuchsaufbau festgehalten.

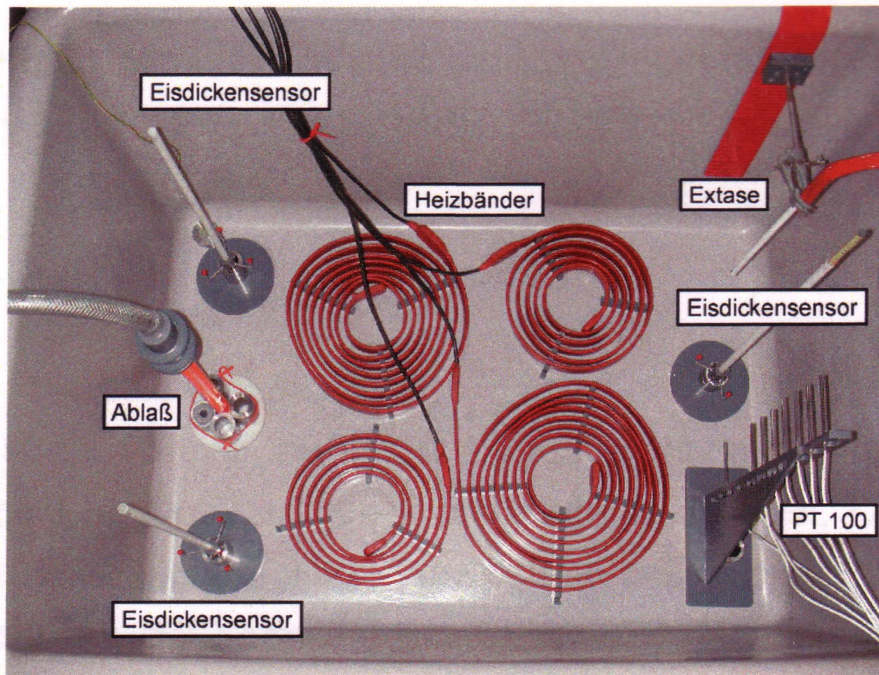


Abbildung 4.29: Messaufbau im Eislabor des Instituts für Geophysik der Universität Münster. Bildquelle: Blindow und Pipatpan (2004).

### Messungen

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Beispiele zeigen eine Messung mit normalem Leitungswasser, zwei mit verschiedenen Salzgehalten und die Messung mit der zusätzlichen Schneeschicht. Die Temperatur des Wassers lag vor Beginn der jeweiligen Messungen zwischen  $5^{\circ}\text{C}$  und  $15^{\circ}\text{C}$ . Mit dem Einschalten der Kühlung sank die Lufttemperatur innerhalb weniger Minuten auf die Zieltemperatur von  $-20 \pm 1^{\circ}\text{C}$ . Die Eismächtigkeit wurde manuell in Abständen von anfangs einer halben bis hin zu einigen Stunden mit einer Genauigkeit von einem Millimeter an drei Stellen in der Wanne gemessen (Blindow und Pipatpan (2004)). Die Eismächtigkeit wurde durch einen direkt neben der Versuchsanordnung lokalisierten Sensor bestimmt (siehe Abbildung 4.29). Die anderen Sensoren zeigten aufgrund ihrer räumlichen Nähe zu dem Kühlgebläse leicht abweichende Werte. Die Temperaturen der PT100 wurden in Minutenabständen (anfänglich eine Minute, im weiteren Verlauf fünf Minuten) mit einer Genauigkeit von  $0.1^{\circ}\text{C}$  bestimmt. Mit der EXTASE-Sonde wurden die

Temperaturen alle fünf Minuten mit derselben Genauigkeit gemessen. Wenn die Eisschicht eine Mächtigkeit von 20 cm erreichte, wurde die Thermostatregelung im Labor auf 5 °C gestellt und zusätzlich wurden die Heizbänder eingeschaltet, um den Schmelzvorgang zu beschleunigen.

Für alle Versuche wurden die mit den beiden Messsystemen bestimmten Temperaturen miteinander verglichen. Die PT100 waren in einem Gestell fest installiert und konnten daher in ihren Tiefen nicht variiert werden. Die Sensoren der beiden Systeme befanden sich daher nicht in exakt denselben Tiefen. Es wurden deswegen diejenigen Sensoren der EXTASE-Thermalsonde zum Vergleich mit den PT100 gewählt, die diesen am nächsten lagen. In allen Versuchen zeigte sich, dass die Abweichungen zwischen den beiden Messsystemen für alle Beispiele sehr gering waren. Sie lagen im Mittel unter 1 °C, was sich durch die Entfernungen der Sensoren zueinander erklären lässt. Es wird an dieser Stelle darauf verzichtet, erneut die Diagramme der Abweichungen darzustellen, da dies bei den vorher beschriebenen Messungen bereits ausführlich getan wurde. Bei den Messungen in diesem Abschnitt sind weitere interessante Phänomene zu beobachten, die hier im Vordergrund stehen sollen.

### **Beispiel 1: Leitungswasser**

Im Tank befand sich normales Leitungswasser mit einem Zusatz von Antialgenmittel. Die Kühlung wurde ungefähr 120 Stunden lang aufrecht erhalten, danach wurde sie auf 5 °C gestellt und die Heizschlangen im Wassertank eingeschaltet. Am Ende der Messung war das Eis wieder komplett geschmolzen. In allen Beispielen wird nur der Teil der Messungen dargestellt, der die Eisbildung beinhaltet (da nur dieser von Interesse war).

Die beiden oberen Sensoren befanden sich über der Wasseroberfläche. Bei ihnen ist der Einfluss des Kühlgebläses deutlich zu sehen, er bildet sich als Schwankung in den Temperaturen ab; im Wasser bleiben die Sensoren davon unbeeinflusst. Das singuläre Ereignis bei etwa 70 Stunden ist auf ein kurzzeitiges Ausschalten der Kühlung zurückzuführen.

In der Abbildung 4.30 lässt sich qualitativ bereits gut bei der Betrachtung der Temperaturen das Anwachsen der Eisschicht erkennen. Um die Grenze zwischen gefrorenem und flüssigem Wasser genauer zu bestimmen, wurden Temperatur-Tiefenprofile erstellt, aus denen die Phasengrenzen als deutlicher Wendepunkt in den Kurven abgelesen werden konnten (Beispiel siehe Abbildung 4.31).

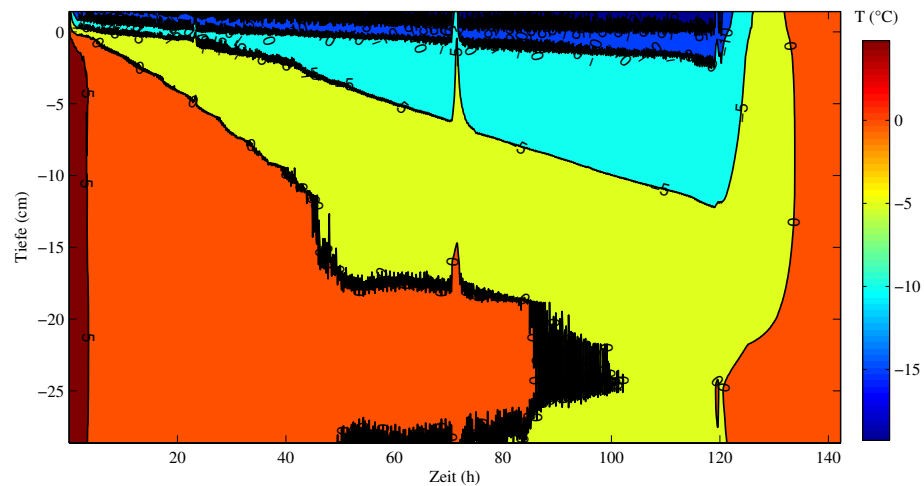


Abbildung 4.30: Farbkodierte Darstellung der gemessenen Temperaturen von Versuch 1 in Abhängigkeit von Zeit und Tiefe.

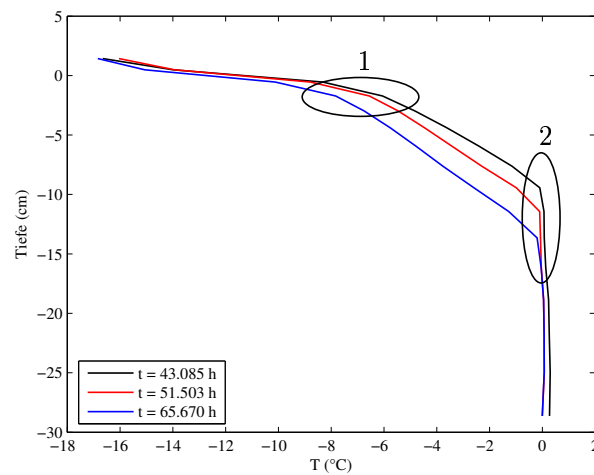


Abbildung 4.31: Beispiel für drei Tiefenprofile (Temperatur in Abhängigkeit von der Tiefe), aus denen die Eismächtigkeiten abgelesen wird. Deutlich ist das Anwachsen der Eisschicht an dem scharfen Wechsel der Steigung in den Kurven erkennbar. Dabei korrespondiert der jeweils erste Wechsel (1) mit der Grenzfläche Luft/Eis (Oberkante der Eisschicht) und der zweite (2) mit der Grenzschicht Eis/Wasser (Unterseite der Eisschicht).

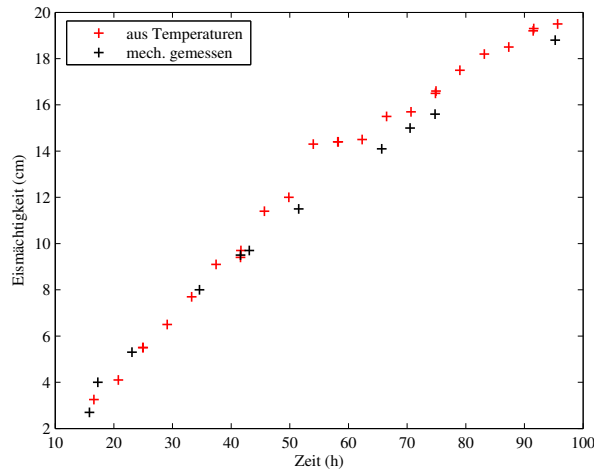


Abbildung 4.32: Vergleich der Eismächtigkeiten in Versuch 1, die aus den Phasengrenzen in den Temperaturprofilen mit den mechanisch gemessenen bestimmt wurden.

Anschließend wurden die so gewonnenen Eismächtigkeiten mit den mechanisch gemessenen verglichen (siehe Abbildung 4.32). Es fand sich eine sehr gute Übereinstimmung, die Abweichungen liegen unter 1.5 cm. Diese Abweichung ist sehr gering, vor allem unter der Berücksichtigung der Tatsache, dass bereits der Fehler beim Ablesen der Werte für den Phasenwechsel in den Temperaturprofilen circa 0.2 cm beträgt.

### Beispiel 2: Salzgehalt 1%

Bei dieser Messung wurden dem Leitungswasser 5 kg Salz hinzugefügt und somit die Salinität auf  $1\% \pm 0.1\%$  erhöht. Die Mischung wurde mit Hilfe eines elektrischen Rührers homogenisiert. Die elektrische Leitfähigkeit des Wassers erhöhte sich durch die Zugabe von Salz auf 15.56 mS/cm. Die Messung dauerte etwa 150 Stunden, wobei nach ungefähr 120 Stunden die Kühlung abgeschaltet wurde.

Der Effekt des Salzes im Wasser ist bei dieser Menge gut sichtbar, da die Eisbildung bereits leicht verzögert wurde. So dauerte es bei diesem Versuch ungefähr 100.3 Stunden, bis sich eine 20 cm mächtige Eisschicht gebildet hatte, während es in dem ersten Versuch mit reinem Leitungswasser circa 99.9 Stunden dauerte (bei gleichen Randbedingungen). Dennoch ist der Effekt detektierbar (siehe Abbildung 4.33). Er kann auch bei Meereis beobachtet werden. Bei höherem Salzgehalt muss das Wasser erst unter  $-1.8^\circ\text{C}$  abkühlen, bis die Eisbildung einsetzt (Petrenko und Whitworth 1999).

Auch für diesen Versuch wurden die aus den Temperaturdaten abgelesenen Eismächtigkeiten mit den tatsächlich gemessenen verglichen (siehe Abbildung 4.34). Die Abweichungen

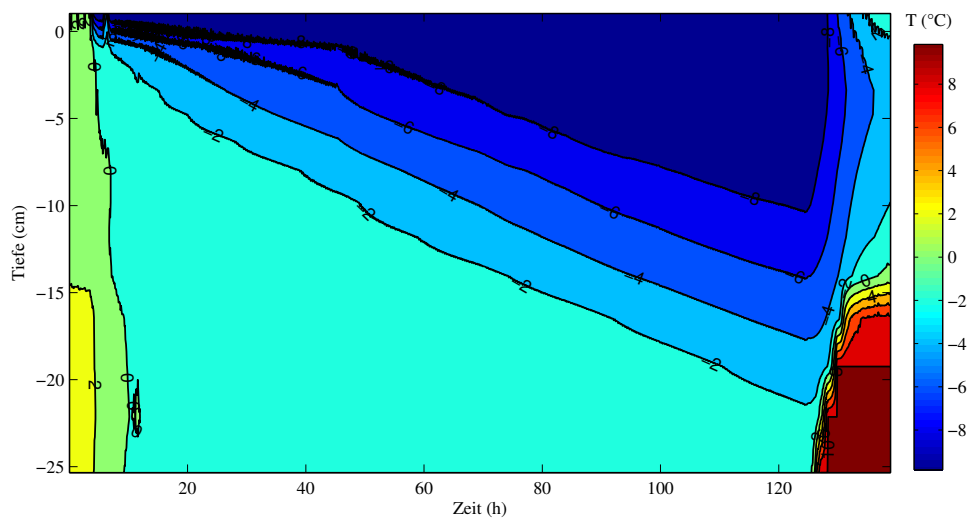


Abbildung 4.33: Farbkodierte Darstellung der gemessenen Temperaturen von Versuch 2 in Abhängigkeit von Zeit und Tiefe.

sind auch hier relativ gering, wobei sie mit größeren Zeiten leicht zunehmen. Insgesamt liegen die Differenzen jedoch bei maximal 2 cm.

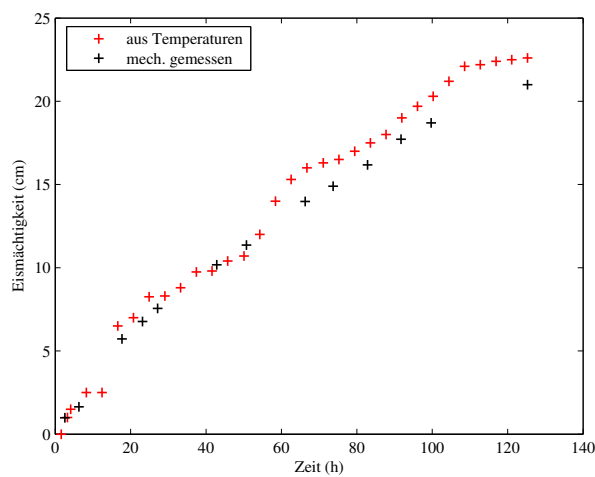


Abbildung 4.34: Vergleich der Eismächtigkeiten, die aus den Phasengrenzen in den EXTASE-Temperaturprofilen bestimmt wurden mit den mechanisch gemessenen beim Versuch mit einer Salinität von 1%.

### Beispiel 3: Salzgehalt 2%

Das nächste Beispiel behandelt die Messung, in der die Salinität des Wassers auf  $2\% \pm 0.1\%$  erhöht wurde. Dazu wurden dem Wasser 10 kg Salz beigemischt, wodurch sich die elektrische Leitfähigkeit des Wassers auf  $35.1 \text{ mS/cm}$  erhöhte. Die Messung dauerte gut 170 Stunden (Kühlung nach circa 155 Stunden abgeschaltet) und wurde beendet, als das gesamte Eis wieder geschmolzen war.

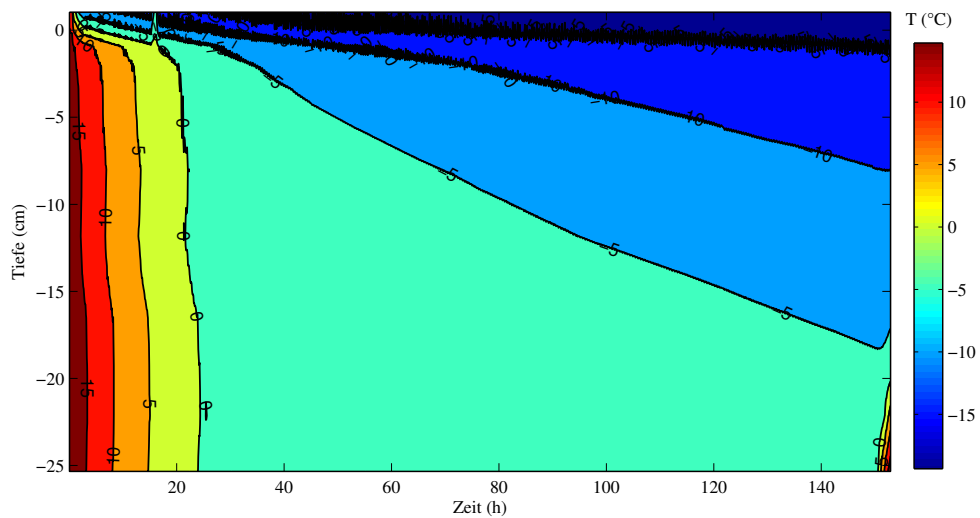


Abbildung 4.35: Farbkodierte Darstellung der gemessenen Temperaturen von Versuch 2 in Abhängigkeit von Zeit und Tiefe.

Auch hier kann wieder der Effekt des Salzes im Wasser beobachtet werden, da die Eisbildung diesmal deutlich verzögert wurde (siehe Abbildung 4.35). So dauerte es bei diesem Versuch ungefähr 112,8 Stunden, bis sich eine 20 cm mächtige Eisschicht gebildet hatte. Der Vergleich der Eismächtigkeiten zeigt auch hier wieder ein vergleichbares Verhalten wie zuvor, welches sich in geringen Abweichungen zwischen den aus den mit der EXTASE-Thermalsonde gemessenen Temperaturen bestimmten und den direkt gemessenen Eismächtigkeiten ausdrückt (Abbildung 4.36).



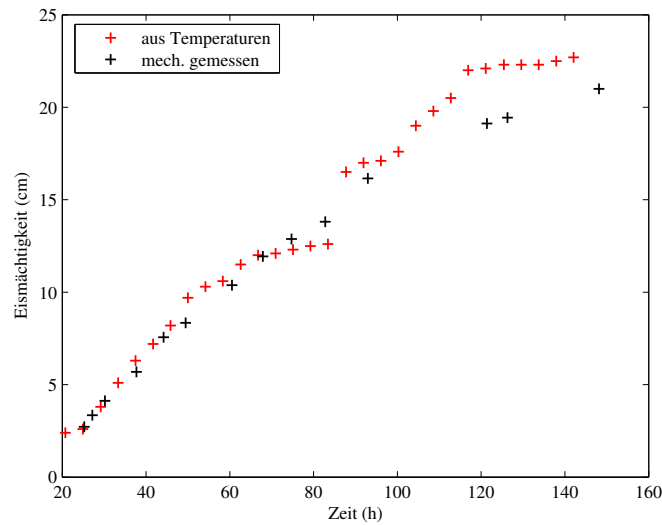


Abbildung 4.36: Vergleich der Eismächtigkeiten, die aus den Phasengrenzen in den EXTASE-Temperaturprofilen bestimmt wurden mit den mechanisch gemessenen beim Versuch mit einer Salinität von 2%.

#### Beispiel 4: Eisschicht mit zusätzlicher Schneeauflage (Leitungswasser)

Bei diesem letzten Versuch wurde, nachdem sich nach 70 Stunden eine 20 cm dicke Eisschicht gebildet hat, auf diese eine zusätzliche 15 cm dicke Schneeschicht aufgebracht. Dieser Versuch wurde genutzt, um zu testen, ob Veränderungen im Temperaturverhalten der Schichten unter der Schneeschicht mit Hilfe einer EXTASE-Thermalsonde nachweisbar sind.

In der Darstellung als Liniengrafik (Abbildung 4.37) wird deutlich, dass der Effekt gut detektierbar ist. Die Kühlung wurde kurzzeitig unterbrochen, während die Schneeschicht auf das Eis aufgebracht wurde, was in den Daten vor allem in den oberen Schichten deutlich sichtbar ist. Anschließend wurde die Kühlung erneut eingeschaltet, was in der Abnahme der Temperatur der Sensoren sichtbar wird. Es fällt sofort auf, dass die Temperaturen nach Aufbringen der Schneeschicht vor allem in den oberen Schichten deutlich höher sind als zuvor. Dies kommt daher, dass sich die Sensoren jetzt auch im Schnee befanden und nicht mehr an der Luft, wie zuvor. Durch die relativ hohe Wärmekapazität des Schnees stellt dieser eine Isolationsschicht dar, die die Abkühlung der Schichten darunter vermindert und die Temperaturen konstant hält. Dies ist ein allgemein bekanntes Phänomen aus der Natur, beispielsweise überleben Pflanzen unter der Schneeschicht besser als solche, die frei den niedrigen Temperaturen ausgesetzt sind.

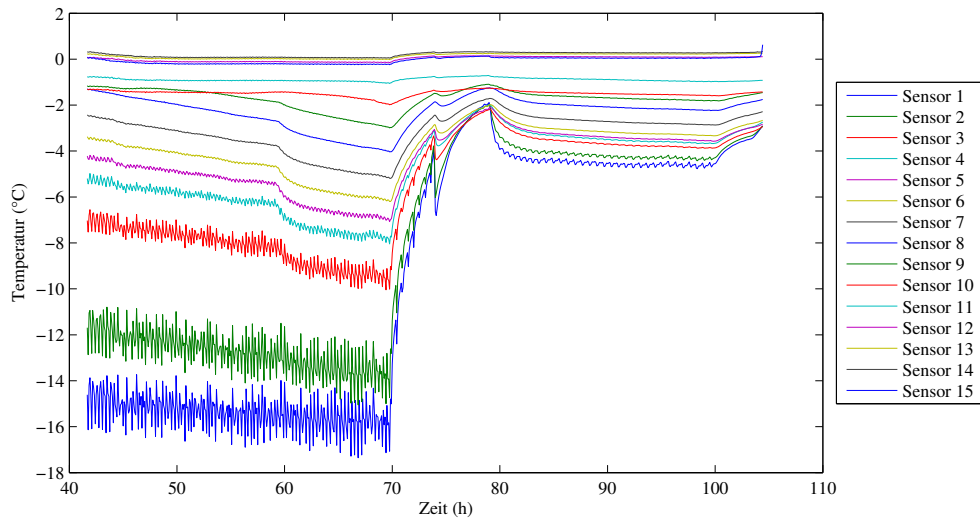


Abbildung 4.37: Teilausschnitt der mit der EXTASE-Thermalsonde gemessenen Temperaturen bei Versuch 4.

Der Unterschied im Temperaturverhalten wird besonders gut sichtbar, wenn Tiefenprofile als Darstellung gewählt werden, wie in Abbildung 4.38 exemplarisch an einem Profil ohne und einem mit Schneeauflage dargestellt ist. Auch hier ist klar zu sehen, dass die Temperaturen in den oberen Schichten trotz gleicher Umgebungstemperatur höher liegen, als ohne Schneeauflage.

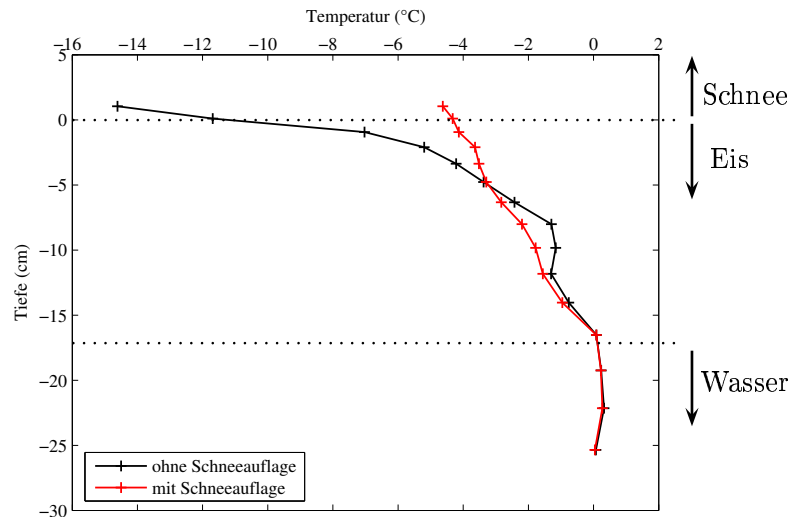


Abbildung 4.38: Temperatur-Tiefenprofile zu zwei Zeitpunkten mit und ohne Schneeauflage.

### Zusammenfassung

Die neue Thermalsonde eignet sich sehr gut für Messungen, die das Zufrieren von Gewässern im Labor simulieren und allgemein für Messungen in Eis. Auf der Basis der vorgestellten Versuche können folgende Aussagen gemacht werden:

- Die gemessenen Temperaturen sind gut mit denen der Referenz-PT100 vergleichbar. Obwohl sich die entsprechenden Sensoren nicht in exakt denselben Tiefen befanden, sind die Abweichungen sehr gering ( $< 1^\circ\text{C}$ ) und können durch die Entfernung zueinander erklärt werden.
- Aus den Steigungswechseln in den Temperaturdaten lassen sich die Grenzen zwischen gefrorenem und noch flüssigem Wasser mit geringen Abweichungen zu mechanisch gemessenen Eisdicken bestimmen.
- Auch Phänomene wie eine nachträglich aufgebraachte Schneeauflage werden in den Daten sichtbar und äußern sich in Veränderungen der Temperaturprofile.
- In Zukunft kann die Sonde auch unter natürlichen Bedingungen zur Bestimmung der Eismächtigkeit genutzt werden. So kann zum Beispiel bestimmt werden, ob eine Eisschicht dick genug ist, um sie zur öffentlichen Nutzung freizugeben.

#### 4.2.2.1 Das STEFAN-Problem im Laborversuch

Der Begriff STEFAN-Problem umfasst allgemein Wärmestransportprobleme, bei denen ein Phasenwechsel stattfindet, wie beispielsweise von flüssig zu fest bei einem ausfrierenden Magmaozean. Ursprünglich wurde die Theorie von Stefan (1891) formuliert, um das Zufrieren von Seen zu beschreiben. Da die Messungen in den vorher beschriebenen Versuchen nichts anderes als eben dieses Problem simulieren, wurde geprüft, ob diese Theorie hier anwendbar ist. Die Randbedingungen waren nicht optimal, da es sich bei dem Versuch nicht um einen natürlichen See handelte, sondern um eine räumlich begrenzte Wasseroberfläche im Labor. Da die Wanne aber rundherum isoliert war, erscheint es plausibel, von einem Halbraum zu sprechen und die Theorie anzuwenden. Das zu lösende Problem ist in Abbildung 4.39 illustriert. Im folgenden werden die wichtigsten Formeln angegeben; die ausführliche Theorie ist in Turcotte und Schubert (2002) zu finden.

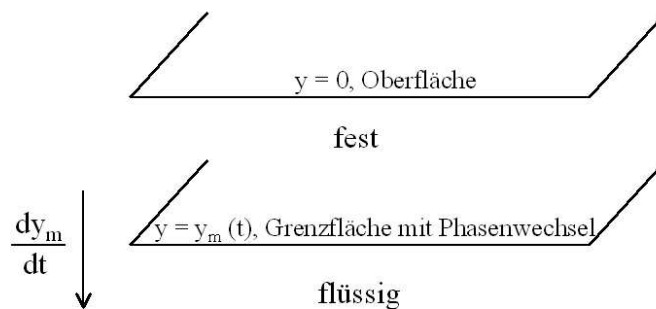


Abbildung 4.39: Anwachsen einer Eisschicht an der Oberfläche eines Gewässers, Illustration des STEFAN-Problems.

Das Wasser im Probenbehälter hat sich bis zu der Tiefe  $y_m$  verfestigt. Es wird angenommen, dass sich das flüssige Material mit der einheitlichen Temperatur  $T_m$  überall unter der anwachsenden Oberfläche befindet. Die Tatsache, dass die flüssige Region sich nicht unendlich weit ausdehnt, hat keine Konsequenzen für die Lösungsgleichung. Im Bereich  $0 \leq y \leq y_m$  muss die folgende Wärmeleitungsgleichung gelöst werden:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad , \quad (4.1)$$

wobei  $\kappa$  die thermische Diffusivität ist unter den Bedingungen  $T = T_0$  bei  $y = 0$ ,  $T = T_m$  bei  $y = y_m$  und  $y_m = 0$  zur Zeit  $t = 0$ . Die Position der Verfestigungsgrenze ist eine *a priori* unbekannte Funktion der Zeit. Wie in dem Fall von schlagartiger Erwärmung oder Abkühlung eines Halbraumes, gibt es dort keine Längenskala in diesem Problem. Aus diesem Grund kann die dimensionslose Koordinate  $\eta = y \sqrt{\kappa t}$  eingeführt werden. Dabei ist

$\sqrt{\kappa t}$  die thermische Diffusionslänge. In gleichem Maße muss  $y_m$  mit dieser Länge normiert werden und zwar so, dass  $y_m/\sqrt{\kappa t}$  eine Konstante ist. Das bedeutet, dass die Tiefe der Erstarrungsgrenze mit der Zeit proportional mit der Quadratwurzel der Zeit zunimmt. Da  $\eta = y/\sqrt{\kappa t}$  und  $y_m$  proportional zu  $\sqrt{\kappa t}$  ist, korrespondiert die Erstarrungsgrenze mit einem konstanten Wert  $\eta_m = y_m/2\sqrt{\kappa t}$ , der Ähnlichkeits-Koordinate  $\eta$ . Dieser Wert wird mit  $\eta_m = \lambda_l$  bezeichnet. Daraus ergibt sich:

$$y_m = 2 \lambda_l \sqrt{\kappa t} \quad . \quad (4.2)$$

Es ist ebenso sinnvoll, die dimensionslose Temperatur  $\theta = (T - T_0)/(T_m - T_0)$  zu nutzen.

Es folgt letztendlich eine Gleichung, mit der  $\lambda_l$  bestimmt werden kann:

$$\frac{L\sqrt{\pi}}{c_p(T_m - T_0)} = \frac{e^{-(\lambda_l)^2}}{\lambda_l \operatorname{erf} \lambda_l} \quad , \quad (4.3)$$

wobei  $L$  die latente Wärme des Materials (in diesem Fall Wasser) ist und  $c_p$  die spezifische Wärmekapazität des Materials. Ist ein numerischer Wert für die linke Seite von Gleichung 4.3 gegeben, kann  $\lambda_l$  iterativ gefunden werden. Alternativ kann die rechte Seite von Gleichung 4.3 als Funktion von  $\lambda_l$  dargestellt werden und die Lösung für einen bestimmten Wert auf der linken Seite grafisch bestimmt werden.

Im Fall der in Kapitel 4.2.2 beschriebenen Messungen wird der Wert  $y_m$ , also die Tiefe der Grenzschicht zwischen Eis und Wasser, gesucht. Dazu wurden diese Werte mit Hilfe von Formel 4.3 berechnet. Tabelle 4.4 zeigt die Parameter, die dazu benutzt wurden und Tabelle 4.5 die mechanisch gemessenen und berechneten Ergebnisse für  $y_m$ . Die Nummern der Versuche entsprechen hier nicht denen aus Kapitel 4.2.2. Die ersten drei Messungen wurden in Leitungswasser durchgeführt, die Messungen 4 und 5 entsprechen denen in Wasser mit einem Salzgehalt von 1% beziehungsweise 2%.

Parameter	Wert
$L$	320 kJ kg <sup>-1</sup>
$T_m$	273 K
$T_0$	253 K
$c_p$	4 kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
$k$	2 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
$\rho$	1000 kg m <sup>3</sup>

Tabelle 4.4: Parameter zur Berechnung von  $y_m$ . Die Werte wurden Turcotte und Schubert (2002) entnommen.

Versuch-Nr.	t (s)	$y_{m,theor}$ (cm)	$y_{m,exp}$ (cm)	$a$ (berechnet)	$a$ (gemessen)
1	417912	31.09	23.5	68.013	51.409
2	349200	28.42	22.0	68.015	52.650
3	343800	28.20	22.5	68.016	54.268
4	433500	31.67	22.6	68.025	48.543
5	500400	34.02	22.7	68.013	45.382

Tabelle 4.5: Vergleich der in Kapitel 4.2.2 mechanisch gemessenen ( $y_{m,exp}$ ) und berechneten ( $y_{m,theor}$ ) Eismächtigkeiten.

Wie in der Theorie beschrieben, muss der Faktor  $a = \frac{y_m}{\sqrt{\kappa t}}$  konstant sein. Das bedeutet, dass die Tiefe der Erstarrungsgrenze proportional mit der Quadratwurzel der Zeit zunimmt. Wie in Tabelle 4.5 zu sehen, ist  $a$  für die berechneten Werte konstant. Für die gemessenen Werte ist er das nicht, das bedeutet, dass das Anwachsen der Eisschicht in dem Versuch nicht proportional erfolgte. Damit lassen sich die Unterschiede in den berechneten und gemessenen Eisschichten erklären. Der Grund für das nicht proportionale Anwachsen liegt in der Tatsache begründet, dass die Sonde nah am Rand der Wanne befestigt war und so Randeffekte auftreten konnten, die in einem theoretisch unendlich ausgedehnten Halbraum nicht berücksichtigt werden.

Für die Versuche 4 und 5 wird die sehr deutliche Abweichung für  $a$  dadurch verursacht beziehungsweise verstärkt, dass es sich um Salzwasser handelt, welches wie beschrieben die Eisbildung verzögert. Dadurch ergibt sich automatisch eine Abweichung vom proportionalen Anwachsen der Eisschicht. Im Fall von Turcotte und Schubert (2002) wurde für die Dichte des Wassers 1000 kg m<sup>3</sup> angenommen, der Wert für Salzwasser liegt aber eher bei 1100 kg m<sup>3</sup>. Wird diese höhere Dichte für Versuch 4 und 5 berücksichtigt, ergeben sich Werte von 51.169 und 47.84. Diese liegen schon näher an einem konstanten Wert, trotz-

dem sind insgesamt die Werte aus den fünf Versuchen nicht so konstant, wie sie es bei den berechneten sind, was, wie schon gesagt, an den nicht berücksichtigten Randeffekten liegt. Insgesamt ließ sich dennoch zeigen, dass die EXTASE-Thermalsonden prinzipiell gut geeignet sind, um das STEFAN-Problem zu beobachten. In Zukunft könnte ein Versuch in einem größeren Gewässer unter natürlichen Bedingungen zeigen, ob die Randeffekte dort vernachlässigbar sind und die Messergebnisse dann besser vergleichbar mit den theoretisch berechneten sind.

## 4.3 Hydrogeologie

In diesem Abschnitt werden zwei Beispiele vorgestellt, die dem Bereich der Hydrogeologie zuzuordnen sind. Dabei geht es im ersten Beispiel um die mögliche Nutzung der Thermalsonden für Messungen in Rammkernsonden und im zweiten Beispiel um die Detektierbarkeit von Wasserintrusionen.

### 4.3.1 Evaluation der Nutzung von Thermalsonden in Rammkernsonden im Labor und im Feld

In der Hydrogeologie werden häufig Rammkernsondierungen für eine schnelle Beprobung eines Messgebietes eingesetzt. Dazu werden schmale (zumeist aus Metall bestehende) Rohre in den zu untersuchenden Untergrund gebohrt und der Bohrkern anschließend zum Beispiel auf Schichtfolgen untersucht. Für Grundwasseruntersuchungen verbleiben diese Rohre zuweilen auch im Erdboden und können so dauerhaft als Bohrloch genutzt werden. Die Fragestellung bei diesen Messungen war, ob die Thermalsonden auch in Rammkernsonden einsetzbar sind oder ob die Metallwände der Sonden die Messergebnisse verfälschen würden.

Zunächst wurden dazu Voruntersuchungen im Labor durchgeführt, um das generelle Verhalten einer EXTASE-Thermalsonde in einer Rammkernsonde (im weiteren Verlauf RK-Sonde genannt) zu charakterisieren. Dazu wurde eine RK-Sonde, wie sie auch üblicherweise in der Hydrogeologie genutzt wird, im Labor auf einem Tisch aufgebaut. Eine Thermalsonde wurde im Rohr und eine parallel dazu außerhalb davon arrangiert. Die Sonden wurden so angeordnet, dass sich ihre Sensoren auf gleichen Höhen befanden. Anschließend wurden mit beiden Sonden mehrere Stunden lang die Temperaturen gemessen.

Werden die jeweiligen Sensoren der Sonden innerhalb und außerhalb der RK-Sonde miteinander verglichen (Beispiele in 4.40) wird deutlich, dass sie sich um ein nahezu konstantes *offset* voneinander unterscheiden. Die Änderungen durch äußere Einflüsse (Tagesgang der Temperatur, kurzzeitige Änderungen der Lichtverhältnisse...) sind in beiden Sonden zu

sehen, wenngleich diese Effekte (vor allem die kurzzeitigen) bei der Messung in der RK-Sonde abgeschwächt sind. Insgesamt sind die Temperaturen dort, wie erwartet, wesentlich geringeren kurzzeitlichen Schwankungen unterworfen. Die Differenzen sind im Allgemeinen sehr konstant, außer an Stellen, wo ein kurzzeitiger äußerer Einfluss nur die Temperaturen außerhalb der Sonde beeinflusst und aufgrund seiner geringen Dauer nicht die der Sonde im Rohr erreicht. Da auch die PT100 einen solchen *offset* aufweisen, kann davon ausgegangen werden, dass es sich hierbei nicht um einen Effekt der Thermalsonden handelt, da es sich bei den PT100 um handelsübliche Messgeräte handelt, die nachträglich in die Sonde eingebaut wurden und so genaue Werte liefern sollten.

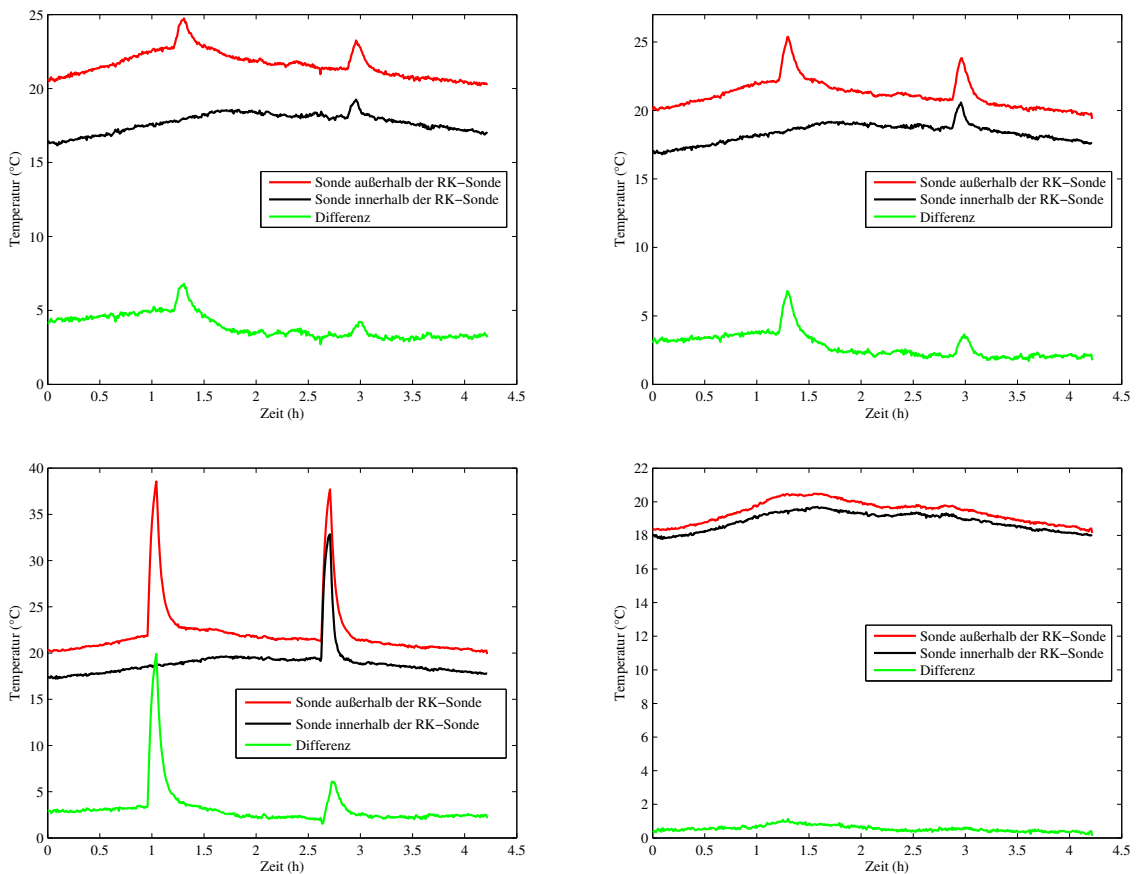


Abbildung 4.40: Vergleich der Temperaturen von drei Sensoren und der PT100 der Thermalsonden innerhalb und außerhalb der Rammkernsonde. Oben links: Sensor 16 (30.52 cm innerhalb der RK-Sonde), oben rechts: Sensor 14 (23.65 cm innerhalb der RK-Sonde), unten links: Sensor 2 (1.4 cm innerhalb der RK-Sonde), unten rechts: PT100.



Weiterhin lässt sich beobachten, dass der *offset* zwischen den Sonden mit der Tiefe abnimmt, das heißt, die Sensoren, die sich tiefer in der RK-Sonde befanden, zeigen größere Differenzen als die in Positionen, die sich näher am Rand der RK-Sonde befanden. Die PT100, die sich am oberen Rand der RK-Sonden befanden, verdeutlichen dies besonders: ihre Abweichungen voneinander liegen im Mittel bei nur  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (maximal bei  $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) (siehe Abbildung 4.40).

Diese Messung wurde mehrfach mit dem gleichen Ergebnis wiederholt. Dies belegt, dass Messungen mit einer EXTASE-Thermalsonde in einer Rammkernsonde durchaus sinnvolle Ergebnisse liefern können. Es macht Sinn, zusätzlich die Differenz mit zwei handelsüblichen PT100 innerhalb und außerhalb des Rohres aufzunehmen und so die Messungen zusätzlich noch genauer zu eichen.

Im nächsten Schritt folgte der Feldversuch.

### Messaufbau und Durchführung

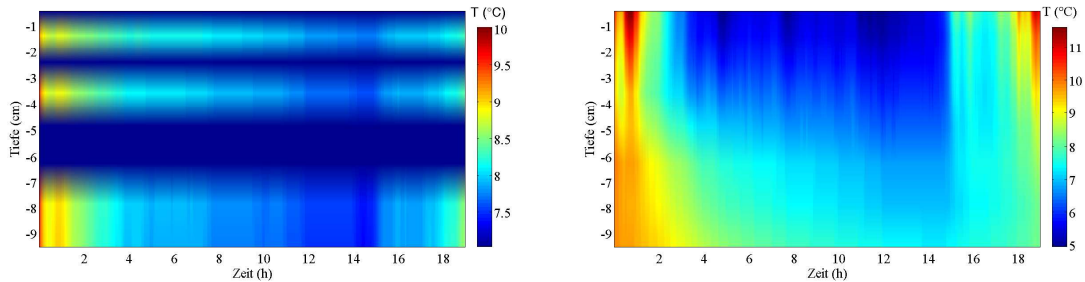
Es wurden zwei EXTASE-Sonden eingesetzt, um gleichzeitig Messungen in einer Rammkernsonde und zum Vergleich außerhalb davon durchzuführen. Die Messungen fanden auf dem Testgelände der Universität Tübingen statt. Auf diesem Gelände befindet sich ein Schacht, in dem ein Rammkern-Bohrgestänge permanent in den Boden eingebracht ist. In dieses Gestänge wurde die erste Sonde eingebracht und direkt im Boden daneben die zweite Sonde (siehe Abbildung 4.41). Durch den damaligen Betrieb der Sonden mit einem Datenlogger (Firma Hewlett Packard) konnten nur die jeweils ersten acht Kanäle einer Thermalsonde betrieben werden. Die Messung wurde gegen 16 Uhr mit einem Messintervall von 30 s gestartet und am nächsten Vormittag gegen 11 Uhr beendet. Zum Zeitpunkt der Messung verfügte einer der Prototypen nur über vier funktionsfähige Sensoren, dies musste bei der Interpretation berücksichtigt werden.



Abbildung 4.41: Messaufbau mit den beiden Thermalsonden.

## Ergebnisse

Allgemein lässt sich feststellen, dass die Verlaufsform der Temperatur, die im Erdboden neben dem Rohr gemessen wurden, von der Sonde im Rohr – soweit feststellbar – korrekt wiedergegeben wurden. Werden die jeweiligen Sensoren, die sich in der gleichen Tiefe befanden, miteinander verglichen (Abbildungen 4.43), findet sich erwartungsgemäß keine exakte Übereinstimmung. Die Abweichungen liegen jedoch unter  $2^\circ\text{C}$ .



(a) Temperaturen innerhalb des RK-Rohres.

(b) Temperaturen außerhalb des RK-Rohres.

Abbildung 4.42: Vergleich der gemessenen Temperaturen der beiden Thermalsonden innerhalb (a) und außerhalb (b) der Rammkernsonde. Da in der Sonde innerhalb des Rohres vier Sensoren ausgefallen sind, sind die Werte dort konstant (auf  $7^\circ\text{C}$ ) gesetzt worden.

Bei Betrachtung ausgewählter Tiefenprofile (hier nicht dargestellt) fällt auf, dass die Schwankungen der Temperaturen innerhalb der Rammkernsonde insgesamt geringer sind. Dies könnte durch die Eigenschaft des Rohres, von äußeren Einflüssen verursachte Temperaturschwankungen auszugleichen, bedingt sein. Außerdem liegen die Temperaturen in dem Rohr insgesamt etwas höher als außerhalb. Zum Vergleich der Daten wurden die jeweils korrespondierenden Sensoren einander gegenübergestellt. Da sich die Diagramme für die einzelnen Sensoren sehr ähneln, werden hier nur zwei Beispiele aufgeführt. Aufgetragen ist die Temperatur außerhalb des Rohres gegen die innerhalb davon. Bei exakt übereinstimmenden Temperaturen würde sich eine Gerade ergeben. Wie Abbildung 4.43 zeigt, ist dies nicht der Fall. Die Tendenz wird aber, teils mit einer Hysterese, gut wiedergegeben.

## Schlussfolgerungen

Nach diesen Testmessungen ist es durchaus möglich, innerhalb eines Rammkernsondiergestänges aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Die Tendenzen im Vergleich zu einer Sonde, die außerhalb des Gestänges gemessen hat, wurden wiedergegeben. Die Abweichungen zwischen den Sonden waren sehr konstant. Da eine Wiederholung der beschriebenen Messung zunächst nicht möglich war, müssen in Zukunft weitere Messungen im Feld erfolgen, um die Eignung der EXTASE-Thermalsonden für dieses Anwendungsgebiet weiter zu untersuchen.

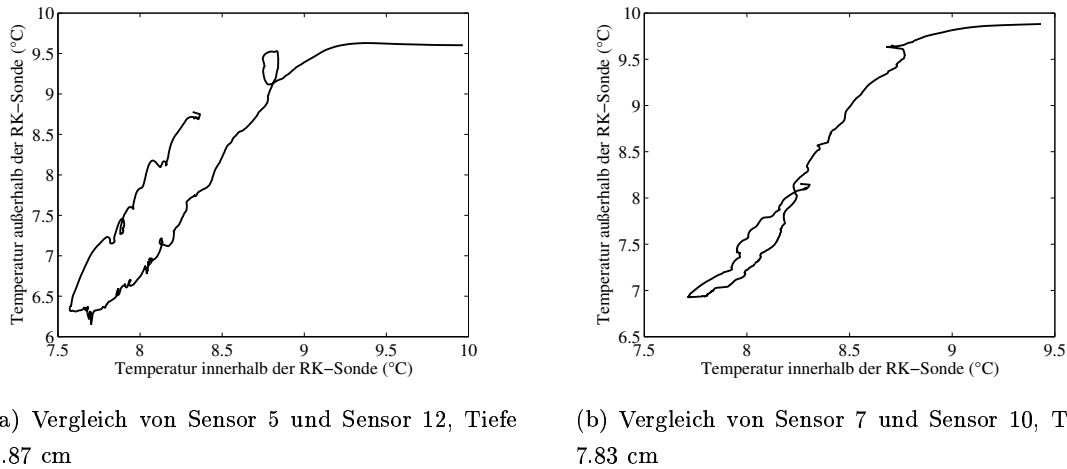


Abbildung 4.43: Vergleich der Temperaturen zweier Sensoren innerhalb und außerhalb der Rammkernsonde.

### 4.3.2 Detektion von Wasserintrusionen im Boden

Um zu demonstrieren, wie empfindlich die Thermalsonden auch auf geringe Änderungen der Bodenfeuchte reagieren, wurde ein einfaches Experiment auf dem Gelände des Space Research Centre in Warschau durchgeführt. Dazu wurde eine Thermalsonde im Boden installiert und knapp 24 Stunden lang kontinuierlich die Temperaturen in einem Intervall von 60 Sekunden aufgenommen. Nach knapp 21 Stunden wurde in circa 50 cm Entfernung von der Sonde 0.25 l Leitungswasser mit einer Temperatur von 15 °C auf die Bodenoberfläche aufgebracht, so dass das Wasser versickern konnte. Die Ergebnisse der Messung sind in der folgenden Abbildung dargestellt, dabei wurde ein Teil der Daten nicht abgebildet, um den interessanten Teil hervorzuheben.

Allgemein lässt sich feststellen, dass die Temperaturen oberhalb des Erdbodens deutlich häufigeren und schnelleren Temperaturänderungen unterworfen sind, dies wird durch Phänomene wie Wind und andere kurzfristige Temperaturänderungen wie verschieden intensive Sonneneinstrahlung an der Oberfläche verursacht. Mit der Tiefe werden die Änderungen in der Temperatur wesentlich geringer und weniger häufig. Ebenfalls explizit auszumachen ist der Tag/Nacht-Wechsel. Das Wesentliche ist jedoch der Zeitpunkt, an dem das Wasser dem Boden zugeführt wurde. Der Effekt dieser „Wärmeinjektion“ wurde von der Hälfte der Sensoren eindeutig detektiert, obwohl die „Störung“ relativ gering ist. Die Temperatur in den oberen Schichten erhöht sich sprunghaft, wenn auch nur um einen geringen Betrag. Diese Erhöhung kommt dadurch zustande, dass das Wasser wärmer als der Boden war. Mit der Zeit lässt sich beobachten, wie die Temperatur wieder abnimmt, aber während der restlichen Zeit auf einem höheren Niveau bleibt, als zuvor. Besonders deutlich ist dies nachvollziehbar, wenn die Daten als einzelne Linien dargestellt werden (siehe Abbildung

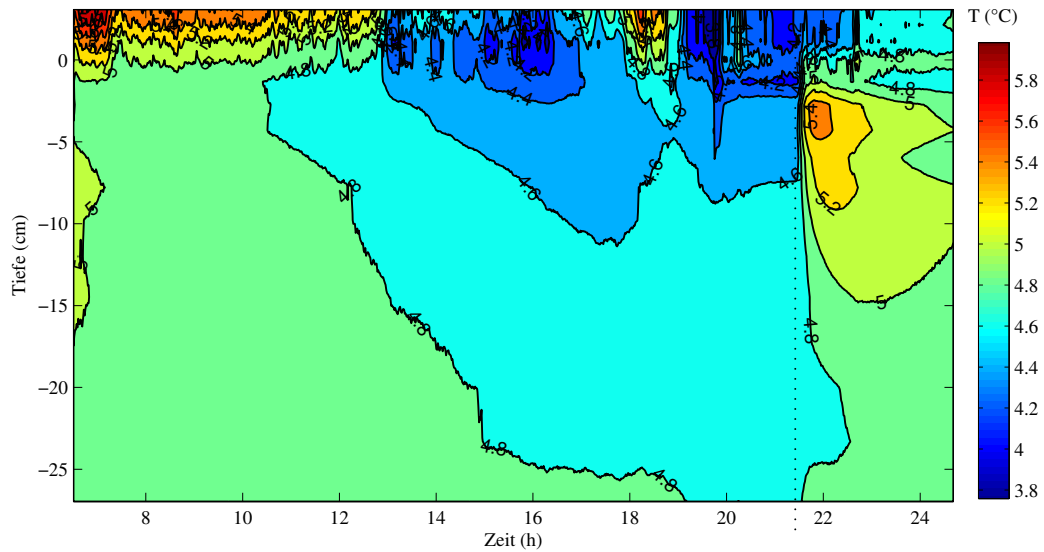


Abbildung 4.44: Temperatur des Bodenprofils in Abhängigkeit von der Zeit (x-Achse) und der Tiefe (y-Achse) Die senkrechte gepunktete Linie kennzeichnet den Zeitpunkt, an dem dem Boden das Wasser zugeführt wurde.

4.45). Auch hier wurde der dargestellte Bereich eingeschränkt, um die wichtigen Details hervorzuheben, es sind nur die letzten drei Stunden abgebildet.

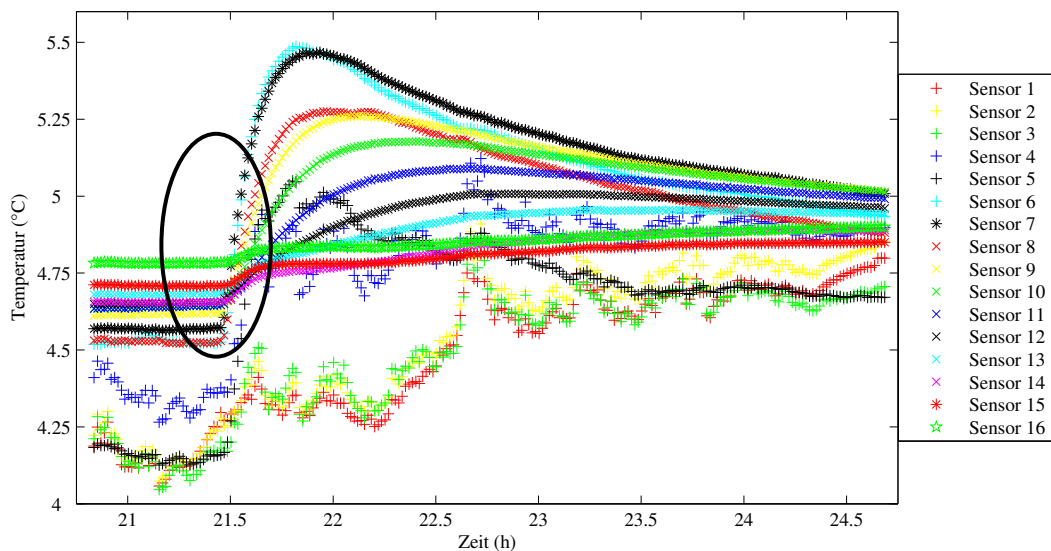


Abbildung 4.45: Temperaturprofil der 16 Sensoren zum Zeitpunkt der Wasserintrusion.

Anhand dieser Abbildung ist deutlich erkennbar, welche Sensoren sich im Boden befanden und welche darüber. Die Graphen der Sensoren, die sich im Boden befanden, weisen wesentlich weniger kurzfristige Änderungen auf als die der Sensoren, die sich an der Luft befanden. Bevor das Wasser in den Boden eindrang, waren die Temperaturen vor allem in den unteren Schichten sehr gleichmäßig. Bei  $t = 21,45$  Stunden ist in allen Schichten ein

sprunghafter Anstieg zu sehen, der nur durch das eindringende Wasser verursacht werden konnte (siehe Ellipse in Abbildung 4.45). Dabei ist selbst an den Sensoren oberhalb der Boden/Luft Grenze ein leichter Anstieg zu beobachten. Deutlicher ist die Temperaturerhöhung in den Schichten unterhalb dieser Grenze zu erkennen, ab dem 4. und dem 5. Sensor (der genau auf der Grenze lag) beträgt der Gradient maximal bis zu einem Grad. Da die freie Energie des adsorbierten Wassers niedriger ist als die des „freien“ Wassers, beinhaltet der Prozess der Adsorption von Wasser in einem trockenen Boden eine Freisetzung von Energie in Form von Wärme. Mit anderen Worten, die Befeuchtung eines anfänglich trockeneren Bodens ist ein exothermes Phänomen Hillel 1998. In den untersten Schichten ist der Anstieg recht gering, aber noch deutlich auszumachen. Das Wasser braucht eine gewisse Zeit, um sich bis in die entsprechende Tiefe auszubreiten, was gut an der Verschiebung in den Maxima zu sehen ist (Abbildung 4.45).

Wird die Tiefe abgelesen, in der das Maximum noch zu erkennen ist und die Zeit gewählt, die seit Einbringen des Wassers verstrichen ist, bis diese Tiefe vom Maximum erreicht wurde, so kann die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Wassers im Boden berechnet werden und es ergibt sich in diesem Fall auf eine Geschwindigkeit von 20 cm pro Stunde. Dies ist die hydraulische Leitfähigkeit des Bodens. Sie ist ein Maß, um den Durchfluss durch ein poröses Medium zu beschreiben. Bei dem Boden in diesem Versuch handelte es sich um einen sandigen Boden. In der Literatur findet sich ein Wert für die hydraulische Leitfähigkeit von  $10^{-5}$  bis  $10^{-3}$  m/s (Hillel 1998). Wird der im Versuch bestimmte Wert berechnet, ergibt sich ein Wert von ungefähr  $5 \times 10^{-5}$  m/s. Durch die grobe Abschätzung aus den Temperaturdaten ergibt sich also eine sehr gute Übereinstimmung mit der Literatur.

**Fazit:**

Wasserintrusionen können mit der Thermalsonde gut detektiert werden. Auch wenn der Zeitpunkt des Einbringens des Wassers in dem Versuch nicht bekannt gewesen wäre, wäre dieser deutlich aus den Daten hervorgegangen. Dieser Umstand kann zukünftig genutzt werden, um beispielsweise Schadstoffintrusionen im Wasser zu beobachten, die sich manchmal durch höhere Temperaturen abzeichnen. Außerdem konnte aus den Daten ein Wert für die hydraulische Leitfähigkeit abgeschätzt werden, der sehr gut mit Werten aus der Literatur übereinstimmt.

## 4.4 Zusammenfassung der Temperaturprofilmessungen

In sämtlichen Messungen dieses Kapitels konnte gezeigt werden, dass die Temperaturmessungen mit dem neuen Messsystem sehr erfolgreich waren. Das Messsystem erfüllte alle Anforderungen (Kapitel 3), die an das Instrument gestellt worden waren. Mit ihm wurden Messungen in verschiedenen Anwendungsgebieten durchgeführt. Dabei wurde unter anderem gezeigt, dass Temperaturprofile in Böden, Schnee, Eis und anderen Materialien sowohl im Labor als auch bei „Feldbedingungen“ unter teilweise extremen Temperaturbedingungen zuverlässig bestimmt werden können. Die Messfehler im Vergleich zu den zusätzlich genutzten PT100 lagen bei dem Großteil der Messungen im Mittel bei 1 – 2% und lassen sich im Allgemeinen durch die Anordnung der Messsysteme zueinander erklären. Bei den Messungen auf Spitzbergen (Kapitel 4.2.1) kamen andere Ursachen für die Temperaturunterschiede hinzu, die aber ebenfalls erklärt werden konnten.

Zusätzlich soll besonders auf die Zeitersparnis hingewiesen werden, die diese neue Messtechnik mit sich bringt. Im Vergleich der Zeit, die benötigt wird, um das EXTASE-System zu installieren, zur Zeit, die benötigt wird, um eine Messung auf herkömmliche Weise vorzubereiten, wird bereits der erste Vorteil des neuen Systems deutlich. Während das neue System in gut fünf Minuten bereit zur Messung ist, braucht es mindestens eine gute halbe Stunde, um die Messung, wie sie üblicherweise in den Geowissenschaften durchgeführt wird (siehe Kapitel 1.1.2), vorzubereiten.

## Kapitel 5

# Methoden und Messungen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Ein wesentlicher Punkt bei der Entwicklung des neuen Messsystems war die Ausarbeitung einer verbesserten Methode zur Bestimmung von Wärmeleitfähigkeiten verschiedener Materialien. Das Messprinzip der neuen Methode ist eine Weiterentwicklung der bekannten *Line heat source*-Methode (siehe 1.2.2), mit dem Unterschied, dass statt eines langen dünnen Segments kurze, ringförmige genutzt werden. Zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit wird jeweils ein Sensor beheizt. Der Temperaturanstieg, der durch dieses aktive Beheizen verursacht wird, ist eine Funktion der bekannten Heizleistung und der Wärmeleitfähigkeit des Materials, das die beheizte Zelle umgibt.

Die Methode zur Auswertung musste ebenfalls modifiziert werden, da die Annahmen der *Line heat source*-Methode (unendlich langer und dünne Sensor) nicht mehr erfüllt waren. Es gibt zwei Gruppen von Methoden zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit, zum einen statische und zum anderen transiente Methoden (Beardsmore und Cull 2001). Die in dieser Arbeit vorgestellte Methode gehört zur zweiten Gruppe. Bei transienten Messtechniken wird die Wärmeleitfähigkeit eines Materials über die Rate bestimmt, mit der sich die Temperatur in Abhängigkeit von der genutzten Wärmequelle ändert. Es wurden verschiedene Ansätze zur Auswertung evaluiert. Ideal wäre eine analytische Methode, da sie am genauesten ist. Allerdings hat sich gezeigt, dass die Theorie sehr kompliziert und analytisch im Rahmen dieser Arbeit nicht komplett zu lösen ist, ein erster Ansatz konnte trotzdem gefunden werden. Letztendlich hat sich eine 2D-Finite-Elemente-Methode als am ehesten geeignet herausgestellt. In den folgenden Abschnitten wird die ausgewählte Methode beschrieben und ihre Anwendbarkeit an mehreren Beispielen diskutiert. Zuvor wird gezeigt, dass die *Line heat source*-Methode zur Auswertung nicht in Frage kam. Weiterhin wird der Ansatz der analytischen Methode kurz beschrieben.

## 5.1 Andere Methoden

### Erste Näherung mit der *Line heat source*-Methode

Es soll geprüft werden, ob diese Methode hier anwendbar ist, dazu wird anhand von zwei Beispielen gezeigt, welche Ergebnisse diese Auswertemethode bei der Berechnung der Wärmeleitfähigkeit erbringt. Wie in Kapitel 1.2.2 erwähnt, wird bei der *Line heat source*-Methode ein langer, dünner Draht in das zu untersuchende Medium eingebracht und mit konstanter Leistung beheizt. Der dadurch verursachte Temperaturanstieg ist eine Funktion der bekannten Heizleistung und der Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Materials. Die Änderung der Temperatur wird gegen die Zeit aufgetragen. Aus der Steigung des linearen Teils der erhaltenen  $t/T$ -Kurve wird die Wärmeleitfähigkeit berechnet (siehe Formel 1.8). In den beiden folgenden Beispielen wurden zwei Messungen, die mit der in dieser Arbeit vorgestellten Thermalsonde durchgeführt wurden, mit der *Line heat source*-Methode ausgewertet. Die Ergebnisse sind im folgenden dargestellt.

#### Beispiel 1: Teflon

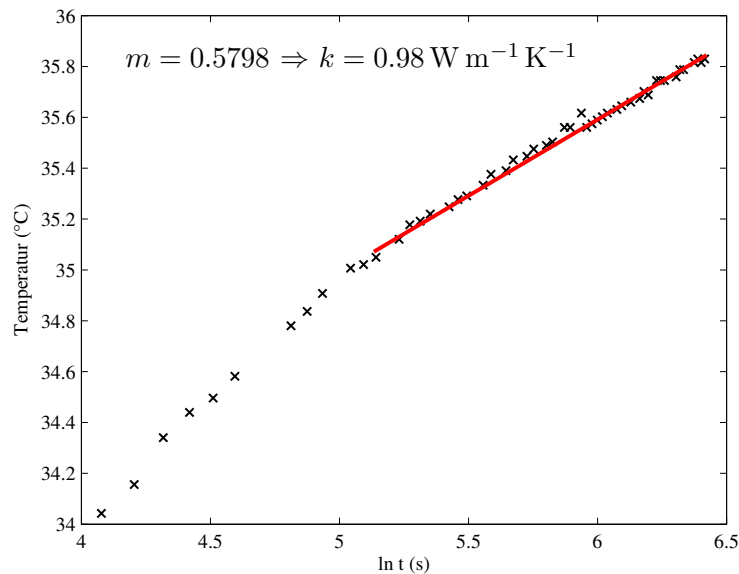


Abbildung 5.1: Beispiel für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Teflon mit der *Line heat source*-Methode.  $m$  bezeichnet dabei die Steigung der eingezeichneten Gerade und  $k$  ist die daraus abgeleitete Wärmeleitfähigkeit.



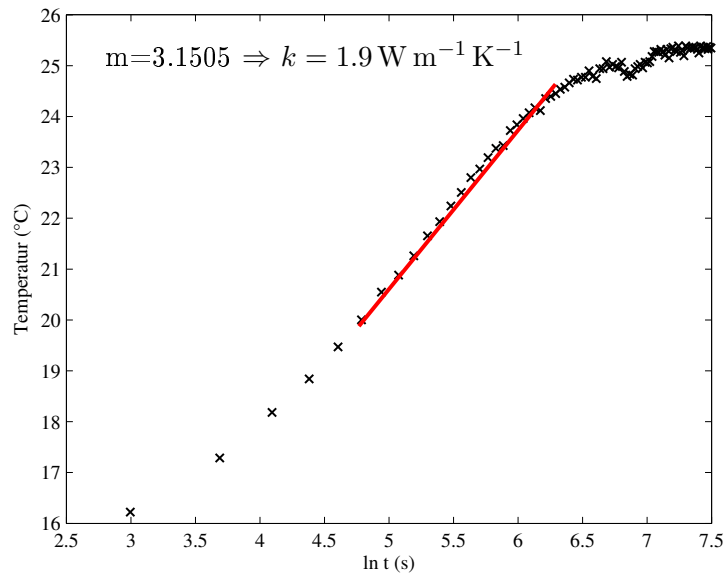
Beispiel 2: Wasser

Abbildung 5.2: Beispiel für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Wasser mit der *Line heat source*-Methode.  $m$  bezeichnet dabei die Steigung der eingezeichneten Gerade und  $k$  ist die daraus abgeleitete berechnete Wärmeleitfähigkeit.

Im ersten Beispiel ergab sich ein Wert von  $0.98 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  für die Wärmeleitfähigkeit von Teflon. Nach der Literatur wurde jedoch ein Wert von  $0.25 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  erwartet. Wasser hat eine Wärmeleitfähigkeit von  $0.6 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , die Anwendung der *Line heat source*-Methode auf die mit der EXTASE-Thermalsonde gemessenen Daten lieferte einen Wert von  $1.9 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .

Beide Beispiele zeigen, dass die Methode hier nicht anwendbar ist, die berechneten Werte weichen zu stark von denen aus der Literatur ab. Diese Methode kam zur weiteren Auswertung nicht in Frage.

### Analytische Lösung der Wärmeleitungsgleichung (Stand der Dinge)

Im Rahmen des MUPUS-Projektes (siehe Einleitung) wurde von Dr. Marek Banaszkiwicz am Space Research Centre in Warschau eine analytische Lösung für die Auswertung der Messungen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit entwickelt. Grundlage für die Methode ist die Einteilung der Thermalsonde in zylinderförmige Elemente und die Berechnung der Wärmeleitungsgleichung mit Hilfe von Greenschen Funktionen. Diese Lösung lagen als *pre-prints* vor, so dass aus ihnen eine numerische Auswertung der analytischen Lösung für das Wärmeleitungsproblem erstellt werden konnte. Da zur Zeit noch Zweifel am Gültigkeitsbereich dieser numerischen Lösung vorliegen, wurden die Auswertungen der Wärmeleitfähigkeitsmessungen mit einem 2D-Finite-Elemente-Verfahren (siehe Kapitel 5.2) durchgeführt. Zum Vergleich wurden die mit der analytischen Methode bisher erzielten Ergebnisse gegebenenfalls zusätzlich angegeben.

Dem Programm werden folgende Werte als Eingabe angegeben: 16 Wertepaare Zeit und gemessene Temperatur, die Initialtemperatur, die Heizleistung, Startwerte für die Wärmeleitfähigkeit und thermische Diffusivität des Materials und der Sonde und Temperaturen an den Rändern (Übergang Sonde/Medium und äußerster Rand des Mediums). Als Ausgabe ergeben sich für jeden vorher eingegebenen Zeitpunkt jeweils vier Werte (Zeitpunkt, gemessene und berechnete Temperatur und die Differenz zwischen den beiden). Zusätzlich befinden sich in der Ausgabedatei die thermische Diffusivität des Materials, sowie der jeweils berechnete Wert für die Wärmeleitfähigkeit, der die beste Anpassung der berechneten Temperaturen an die gemessenen Temperaturdaten ergab. Dabei wird ein ganzer Wertebereich von Wärmeleitfähigkeiten iterativ durchgerechnet und für jeden eingesetzten Wert oben genannte Parameter ausgegeben.

Es handelt sich bei dem Programm um einen ersten Ansatz des Transfers der Theorie in eine vollständig stabil laufende Software. Quellen von Problemen in der praktischen Anwendung des Programms finden sich in der Wahl der Randbedingungen. Diese können mit sehr unterschiedlichen Auswirkungen auf das Ergebnis variiert werden. Es konnten noch keine sicheren Kriterien gefunden werden, wie diese Werte anzusetzen sind. Zukünftige Entwicklungen werden diese Probleme noch beseitigen. Erste Rechnungen mit dem Programm erbrachten vielversprechende Ergebnisse, die im Ergebnisteil zusätzlich mit angegeben werden.

## 5.2 Auswerteverfahren: 2-D FEM-Modellierung mit FEMLAB<sup>©</sup>

Das Software-Paket FEMLAB<sup>©</sup> dient zur Modellierung (geo)physikalischer und anderer Probleme. Es bietet zahlreiche Möglichkeiten zur Simulation von elektromagnetischen, fluiddynamischen und vielen anderen physikalischen Phänomenen. Ein komplettes Modul widmet sich ausschließlich dem Wärmetransfer sowohl bei statischen als auch bei transienten Anwendungen. Dabei kann zwischen Konduktion und Konvektion ausgewählt werden. Wie schon in Kapitel 1.2.1 erwähnt, handelt es sich im Fall der in dieser Arbeit beschriebenen Anwendungen um konduktiven Wärmetransfer. Mit FEMLAB<sup>©</sup> wurden die mit den Thermalsonden durchgeführten Messungen modelliert und die Wärmeleitfähigkeit der Materialien bestimmt. Abbildung 5.3 verdeutlicht den Vorgang einer solchen Auswertung; die einzelnen Schritte werden im folgenden erläutert.

Zunächst wurde ein möglichst detailgenaues Modell der Thermalsonde erstellt und den einzelnen Elementen (Sensoren, Titan-Spitze, untersuchte Probe...) Materialkonstanten zugeordnet (Abbildung 5.3 oben links). Aufgrund der geringen Dicke der Kapton-Folie konnte diese nicht exakt nachgebildet werden, da die Auflösung des Programms dafür nicht ausreicht. Die Schichten wurden daher dicker modelliert und die Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit mit entsprechenden Korrekturfaktoren versehen. Außerdem werden die Randbedingungen (Temperaturen an den Rändern der Proben und der Sonde, Umgebungstemperatur...) festgelegt.

Das Modell der Thermalsonde war stets dasselbe, da alle benutzen Sonden baugleich sind, nur die Parameter der Proben und die Randbedingungen wurden verändert.

Dem zu untersuchenden Material wird dabei ein Startwert für die Wärmeleitfähigkeit zugeordnet. Weiterhin werden Parameter wie die Heizdauer, die Heizleistung und die Initialtemperatur aller Elemente eingegeben (Abbildung 5.3 oben Mitte).

Nachdem alle Parameter festgelegt sind, wird das Modell mit Hilfe eines Gittergenerators in Teile aufgeteilt, anschließend wird das Modell vom Programm berechnet und das Ergebnis grafisch dargestellt (Abbildung 5.3 oben rechts). Anschließend werden die Daten der Heizkurve des beheizten Sensors als ASCII-Datensatz ausgelesen und mit den tatsächlich gemessenen Werten verglichen (Abbildung 5.3 unten links). Je nach Übereinstimmung mit den Messwerten wird der Wert für die Wärmeleitfähigkeit iterativ verändert (Abbildung 5.3 unten Mitte), bis die Fehlerabweichung zwischen den beiden Datensätzen minimal ist. Damit ist der Wert für die Wärmeleitfähigkeit bestimmt.

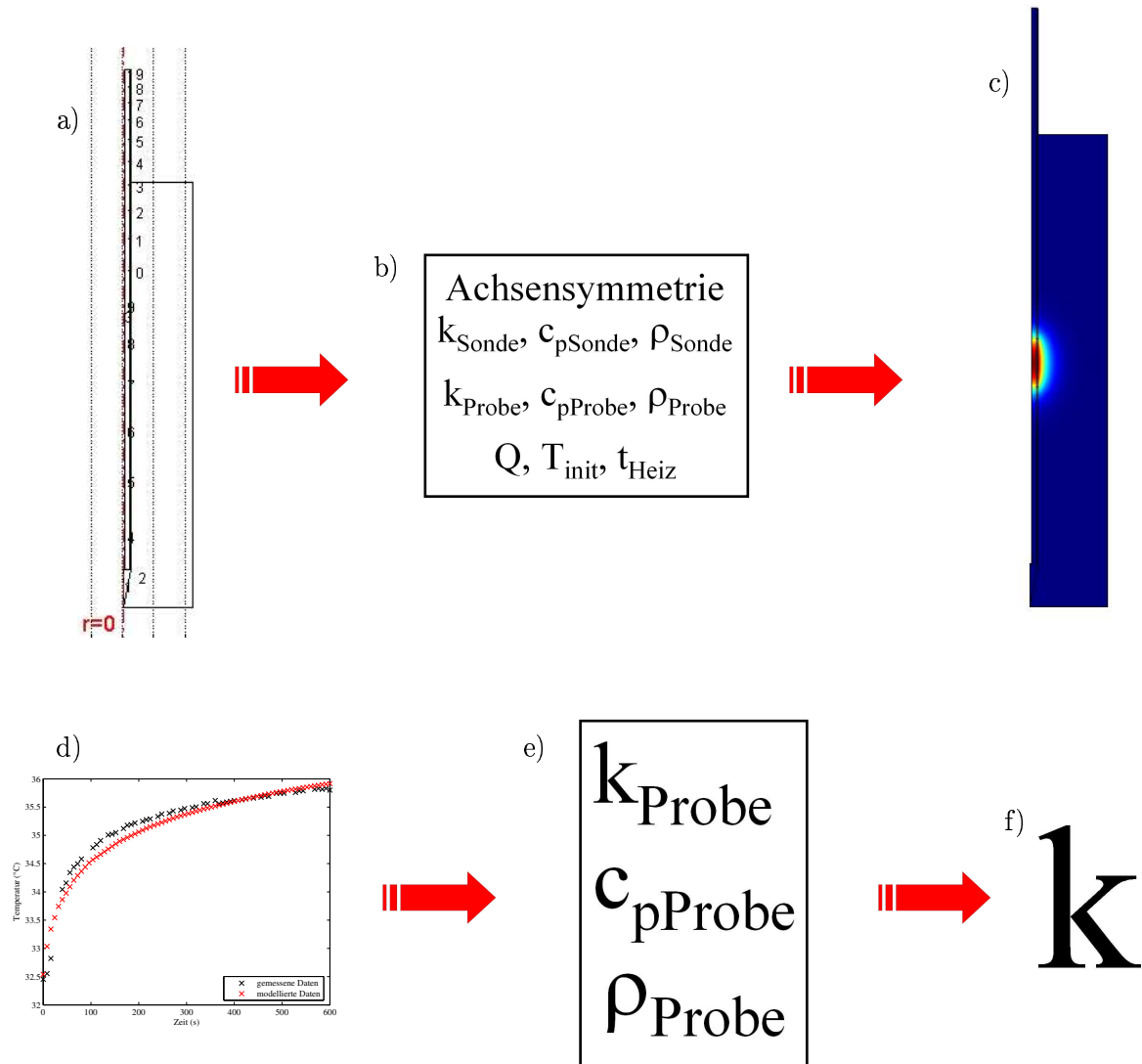


Abbildung 5.3: Funktionsschema der Methode zur Auswertung der Wärmeleitfähigkeitsmessungen mit dem Programm FEMLAB<sup>®</sup>. a) Modell der Thermalsonde und einer Probe, b) Eingabe der Parameter, c) berechnetes Modell, d) Vergleich mit den gemessenen Daten, e) Veränderung der Parameter, f) bestimmte Wärmeleitfähigkeit.

### Mathematisches Modell

Das mathematische Modell für den Wärmetransfer ist die Wärmeleitungsgleichung in folgender Form:

$$\delta_{ts} \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q \quad (5.1)$$

mit

$\delta_{ts}$ : Koeffizient zum Skalieren der Zeiteinheiten,

$\rho$ : Dichte des Probenmaterials,

$c_p$ : Wärmekapazität,

$T$ : Temperatur,

$t$ : Zeit,

$k$ : Wärmeleitfähigkeit,

$Q$ : Wärmequelle (Heizleistung).

$\delta_{ts}$  ist in diesem Fall = 1, was bedeutet, dass die Einheit für alle Zeitangaben Sekunden ist.

### *Subdomain settings*

Das Modell der Sonde und des Probenkörpers wird in mehrere sogenannte *subdomains* (Unterbereiche) unterteilt. Dabei werden allen Unterbereichen wie Sensoren, Glasfaserröhre, Titan-Spitze, Probe usw. die oben aufgeführten Parameter zugewiesen.

### Randbedingungen

Weiterhin müssen die Randbedingungen definiert werden. Das FEMLAB<sup>©</sup>-Modell ist achsensymmetrisch, das heißt, dass nur eine Hälfte des Modells modelliert zu werden braucht. Als Randbedingung an den äußeren Rändern des Probenbehälters, beziehungsweise -körpers, wird eine konstante Temperatur angesetzt und zwar die Umgebungstemperatur ( $T = T_0$ ). Dies ist realistisch, da sich die Umgebungsbedingungen in den kurzen Zeitspannen der Wärmeleitfähigkeitsmessungen nicht signifikant ändern.

### Automatisierung mit MATLAB<sup>®</sup>

Zunächst wurden die Parameter  $\rho$ ,  $c_p$  und  $k$  nur manuell in FEMLAB<sup>®</sup> verändert und die Daten miteinander verglichen. Um das Verfahren zu automatisieren, wurde das FEMLAB<sup>®</sup>-Modell mit dem Programm MATLAB<sup>®</sup> über ein gemeinsames *Interface* gekoppelt. Es wurden genetische Algorithmen (siehe zum Beispiel Nadalini *et al.* (2005)) für das Inversionsprogramm benutzt, um das FEMLAB<sup>®</sup>-Modell zu berechnen, die gesuchten Parameter zu finden und die quadratischen Abweichungen zu minimieren. Das Programm arbeitet also nach dem *Least Square Fit*-Prinzip. Es werden jeweils 100 Durchläufe (Populationen) berechnet, wobei die drei Parameter Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität und Dichte des zu untersuchenden Materials verändert werden. Danach wird die bisher beste Anpassung ausgewählt und von dieser ausgehend die nächsten 100 Populationen berechnet. Dies wird so lange wiederholt, bis das Abbruchkriterium erreicht wird, welches individuell festgelegt werden kann. Für die Berechnungen in dieser Arbeit wurde das Kriterium so festgelegt, dass die Rechnungen abgebrochen wurden, wenn sich über 100 Populationen der Wert für die beste Annäherung nicht mehr verändert hat.

Während der Berechnungen werden drei Diagramme erzeugt. Das erste Diagramm zeigt den Fortschritt der Modellqualität (siehe Abbildung 5.4). Dabei steht jeder schwarze Punkt für ein Modell und in rot ist der Median der aktuellen Generation (jeweils 100 Populationen) angezeigt. Rote Linien bezeichnen die Streuung (die mittleren 50% der Verteilung).

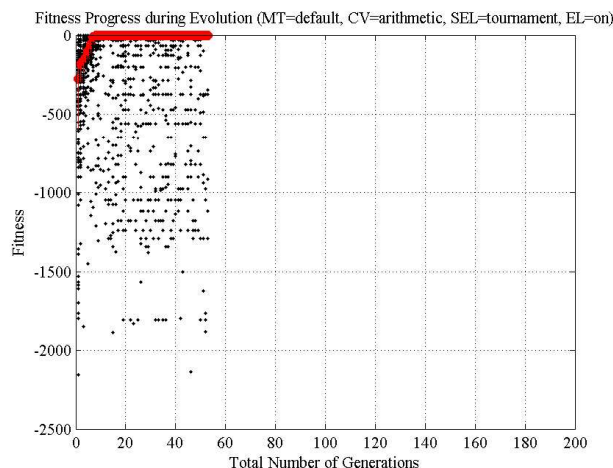


Abbildung 5.4: Beispiel für die Darstellung des Fortschritts der Modellqualität.

Das zweite Diagramm (Beispiel in Abbildung 5.5) zeigt die jeweilige Anpassung an die gemessenen Daten. Dabei wird die gemessene Kurve in rot dargestellt, in blau die Temperaturkurven für die in der aktuellen Generation veränderten Modelle und in grün die jeweils aktuelle, beste Anpassung.

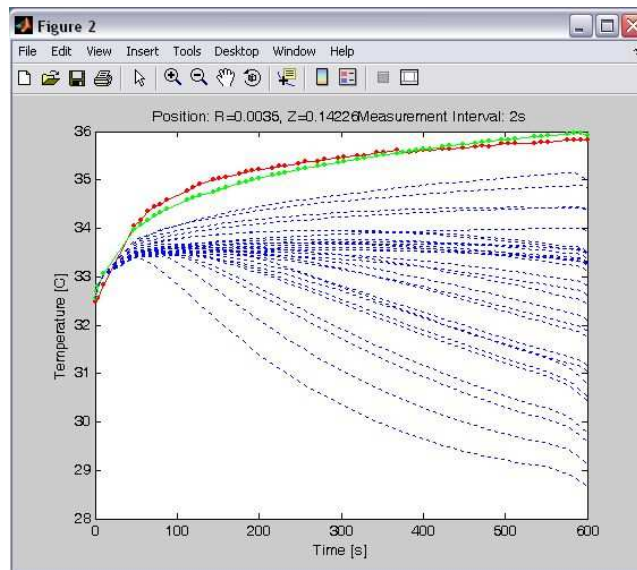


Abbildung 5.5: Beispiel für die Entwicklung der besten Anpassung an die gemessenen Daten.

Das dritte Diagramm zeigt nochmal im Einzelnen die jeweils aktuell berechnete Modellkurve und in der Überschrift die aktuell zusätzlich berechnete thermische Diffusivität (siehe Abbildung 5.6). Da sich die jeweiligen Prozesse der Anpassung ähneln und im Rahmen dieser Arbeit nur das Endergebnis in Form der bestimmten Wärmeleitfähigkeit interessant ist, wird in den folgenden Ergebnissen nur die jeweils beste Anpassung dargestellt und das Ergebnis für die Wärmeleitfähigkeit angegeben.

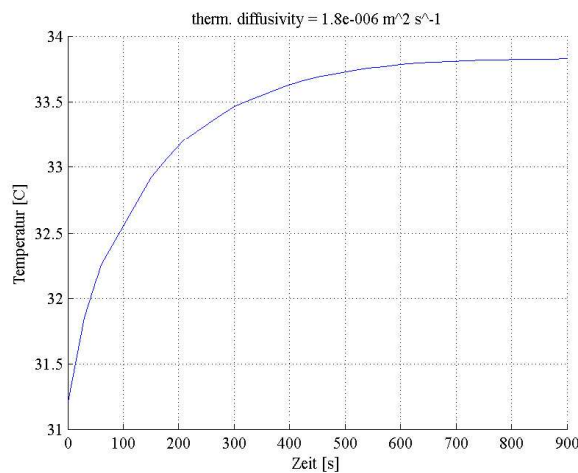


Abbildung 5.6: Beispiel für die Darstellung des jeweils berechneten FEMLAB<sup>®</sup>-Modells.

Die Automatisierung mit MATLAB<sup>®</sup> wurde erst im späteren Verlauf entwickelt, so dass

die meisten Modelle nur in FEMLAB<sup>©</sup> angepasst wurden.

In den folgenden Unterkapiteln werden Beispiele vorgestellt, an denen die Anwendbarkeit der Methode der Auswertung verdeutlicht wird.



### 5.3 Einfluss von Heizdauer, Heizleistung und Sensorgröße auf die Ergebnisse

Es gibt mehrere Faktoren, die die Messungen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit beeinflussen. Diese führen zu einer Veränderung der Form der Heizkurve in Abhängigkeit von der Dauer und der Leistung, mit der ein Sensor beheizt wird, und außerdem der Größe des beheizten Sensors. Dies äußert sich zum einen in der Höhe des Temperaturgradienten und im Verlauf der Kurve. Bei großen Heizdauern findet sich eine Annäherung an den thermischen Gleichgewichtszustand.

Die in vielen Messungen erhaltenen Ergebnisse erlauben einen Vergleich des Verhaltens unterschiedlicher Sensorlängen, die Abschätzung einer geeigneten Heizleistung für Proben mit verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten, sowie die Bestimmung notwendiger Heizdauern. Anhand der folgenden Abbildungen wird die Abhängigkeit von den oben genannten Faktoren deutlich. Für alle Diagramme gilt, dass die Kurven gegebenenfalls auf dieselbe Anfangstemperatur und -zeit normiert wurden, um sie besser vergleichen zu können.

Bei allen drei Messungen befand sich die Thermalsonde in einem mit trockenem Sand gefüllten Probenbehälter in einem Labor.

#### **Abhängigkeit von der Sensorgröße:**

Bei diesem Beispiel wurden alle 16 Sensoren einer Sonde mit derselben Leistung (einheitenloser *PowerLevel* ( $PL$ )=30) für jeweils 300 Sekunden beheizt. Da die Größe der Sensoren mit der Tiefe zunimmt und die Sensoren unterschiedliche Widerstände haben (siehe Kapitel 3.2.2), variieren die Kurven entsprechend. Die kleineren Sensoren mit kleineren Widerständen heizen sich mehr auf, als die größeren respektive die mit größeren Widerständen (siehe Abbildung 5.7). Wie in Kapitel 3 beschrieben, nimmt die Größe der Sensoren vom oberen Ende der Sonde zum unteren hin stetig zu. Aufgrund der Verteilung des jeweiligen Sensormaterials kann es vorkommen, dass ein Sensor trotz größerer Fläche einen geringeren Widerstand im Vergleich zu einem kleineren Sensor hat. Zur Verdeutlichung sind in Abbildung 5.7 die Widerstände und Sensorlängen angegeben.

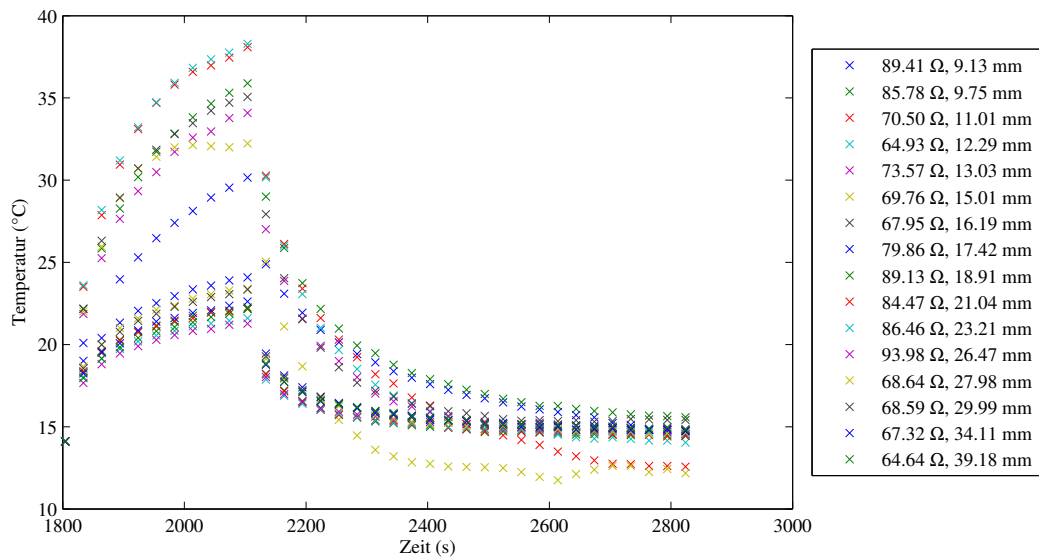


Abbildung 5.7: Abhängigkeit der Heizkurve von der Sensorgröße.

**Abhängigkeit von der Heizleistung:**

Ein Sensor wurde mit unterschiedlichen Heizleistungen (siehe Legende in Abbildung 5.8) für jeweils 600 Sekunden beheizt. Wie erwartet, verhält sich der Temperaturanstieg des Sensors proportional zur Heizleistung (Abbildung 5.8).

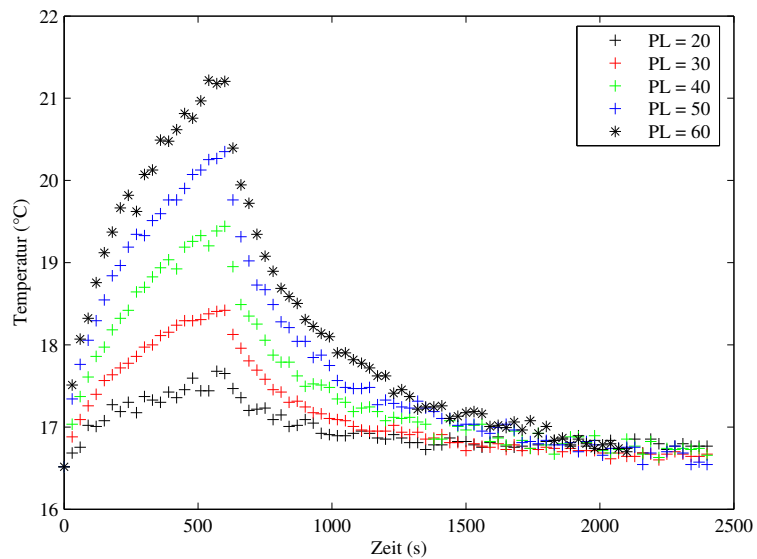


Abbildung 5.8: Abhängigkeit der Heizkurve von der Heizleistung.

**Abhängigkeit von der Heizdauer:**

Bei diesem Test wurde ein Sensor jeweils unterschiedlich lang beheizt (60s, 300s, 600s, 1200s), um die Abhängigkeit der Kurvenform von der Dauer zu bestimmen.

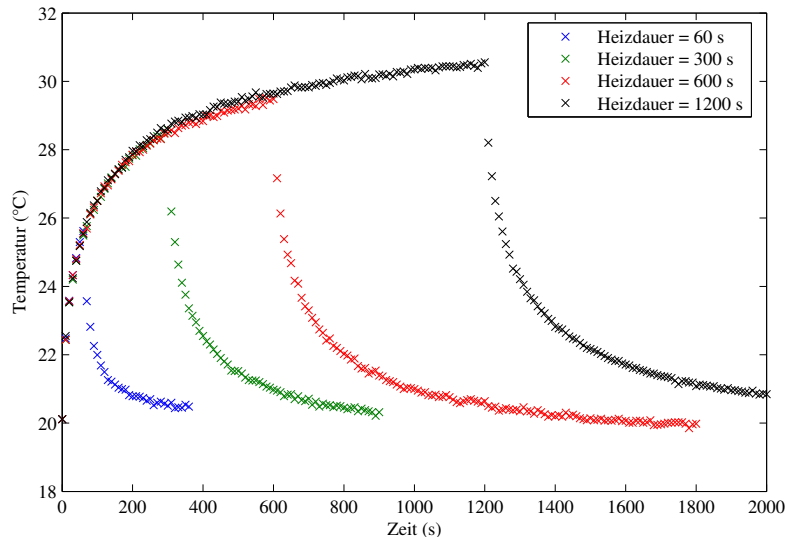


Abbildung 5.9: Abhängigkeit der Heizkurve von der Heizdauer.

Auch hier verhielten sich die Kurven entsprechend der Erwartung, dass mit längerer Heizdauer eine höhere Temperatur erreicht wird (siehe Abbildung 5.9). Die Kurve mit der Heizdauer von 600 s ist etwas niedriger, da sich während der Messung kurzzeitig die Intensität der Sonneneinstrahlung änderte.

Da es erwünscht ist, einen Gleichgewichtszustand zu erreichen, ist im Regelfall eine längere Heizdauer besser. Bei Messungen in Schnee sollte aber darauf geachtet werden, das Material durch die Sensorbeheizung nicht zu stark zu erhitzen, um Verfälschungen durch ein mögliches Aufschmelzen zu verhindern.

Für alle Messungen gilt, dass unabhängig von den gewählten Parametern (Sensorgröße, Heizdauer und -leistung) im Rahmen der Messungenauigkeiten dieselbe Wärmeleitfähigkeit bestimmt werden sollte. Im nächsten Kapitel werden einige der zahlreichen Anwendungsbeispiele gezeigt, die belegen, dass die FEMLAB<sup>©</sup>-Methode zuverlässige Ergebnisse liefert.

## 5.4 Anwendungsbeispiele

Im folgenden werden Anwendungsbeispiele vorgestellt, anhand derer die Zuverlässigkeit der Auswertemethode demonstriert wird. Dabei wird jeweils der bestimmte Wert für die Wärmeleitfähigkeit angeben mit einem prozentualen Fehler. Dieser bezieht sich auf die Abweichung der gemessenen Daten zu den vom FEMLAB<sup>®</sup>-Modell berechneten. Die Abweichungen der bestimmten Werte zu den Literaturwerten werden zusammengefasst in Abschnitt 5.5 diskutiert.

### 5.4.1 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit eines Schneepakets in zwei Tiefen

Bei dieser Messung wurden sowohl Temperaturprofile als auch die Wärmeleitfähigkeit von Schnee unter natürlichen Bedingungen bestimmt. Die Messung fand im Februar in einem Schneegebiet eine Autostunde von Graz entfernt statt. Die Wetterbedingungen waren sonnig, die Lufttemperatur lag bei ungefähr  $+5^{\circ}\text{C}$ . Der Messaufbau ist der nachfolgenden Abbildung zu entnehmen.

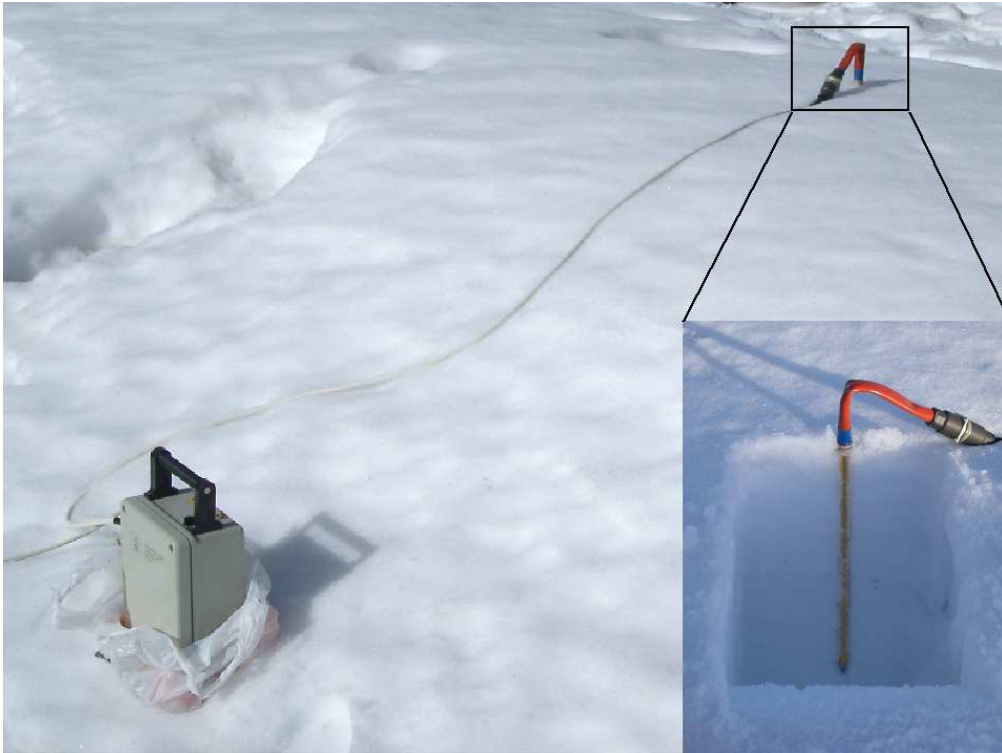


Abbildung 5.10: Messaufbau, *inlay*: Anschnitt des Schneepaketes, in dem die Messung stattfand. Der Anschnitt erfolgte nach Beendigung der Messungen.

Zunächst wurden ausschließlich die Temperaturen im Schnee bestimmt, um ein Bild über eine mögliche Schichtung im Schneepaket zu bekommen. Die Ergebnisse dieser Teilmessung sind in Abbildung 5.11 dargestellt.

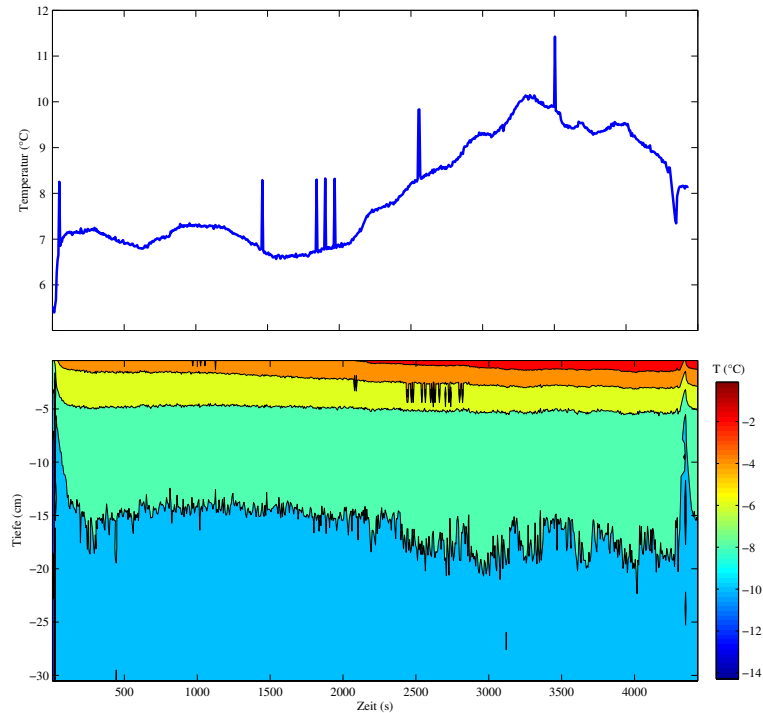


Abbildung 5.11: Obere Abbildung: Temperaturverlauf des in der Thermalsonde integrierten PT100 an der Luft. Untere Abbildung: Farbkodierte Darstellung der Temperaturen der 16 Sensoren in Abhängigkeit von der Zeit und der Tiefe.

Es ist ersichtlich, dass eine gewisse Schichtung vorlag, erkennbar an den farblich unterschiedlichen Bereichen in Abbildung 5.11. Weiterhin ist deutlich erkennen, dass in großen Tiefen konstante Temperaturen herrschen, also weniger Einfluss durch das Sonnenlicht stattfindet, da die Wärmewelle (zumindest während der Dauer der Messung) nicht weit in die Tiefe eindringen konnte.

Gut zu erkennen ist bei kleinen Zeiten (bis circa  $t=100$ ) die Einlaufphase, die die Sonde benötigt, um ihre Temperatur an die der Umgebung anzupassen. Im Vergleich zur Lufttemperatur, die direkt über dem Temperaturplot abgebildet ist, lässt sich erkennen, dass die Verläufe parallel sind. Das langsame Ansteigen der Lufttemperatur spiegelt sich im Verhalten der Temperaturen der Schneeschichten wider. Mit zunehmender Zeit und zunehmender Lufttemperatur nimmt auch die Temperatur in den oberen Schichten zu.

Neben der Temperaturmessung wurde auch die Wärmeleitfähigkeit des Schnees in zwei Tiefen bestimmt, bei knapp 5 cm (Sensor 5) und 27 cm (Sensor 15).

Bei der ersten Messung (Sensor 15) betrug die Dauer des Heizvorgangs 360 Sekunden. Der

Temperaturverlauf des beheizten Sensors ist in Abbildung 5.12 (schwarze Symbole) dargestellt.

An dem Beispiel wird bereits deutlich, dass darauf geachtet werden muss, wie hoch die Heizleistung gewählt wird. In diesem Fall waren es 0.91 W und es ergab sich eine Temperaturerhöhung von gut 15 °C. Dies kann zum Aufschmelzen des Schnees und damit einer Verfälschung der Ergebnisse führen. Es hat sich gezeigt, dass die Heizdauer bei dieser Messung kurz genug war, um den Schnee nicht aufzuschmelzen (siehe Anschnitt in Abbildung 5.10).

Die Wärmeleitfähigkeit wurde sowohl mit FEMLAB<sup>©</sup> bestimmt, als auch mit der analy-

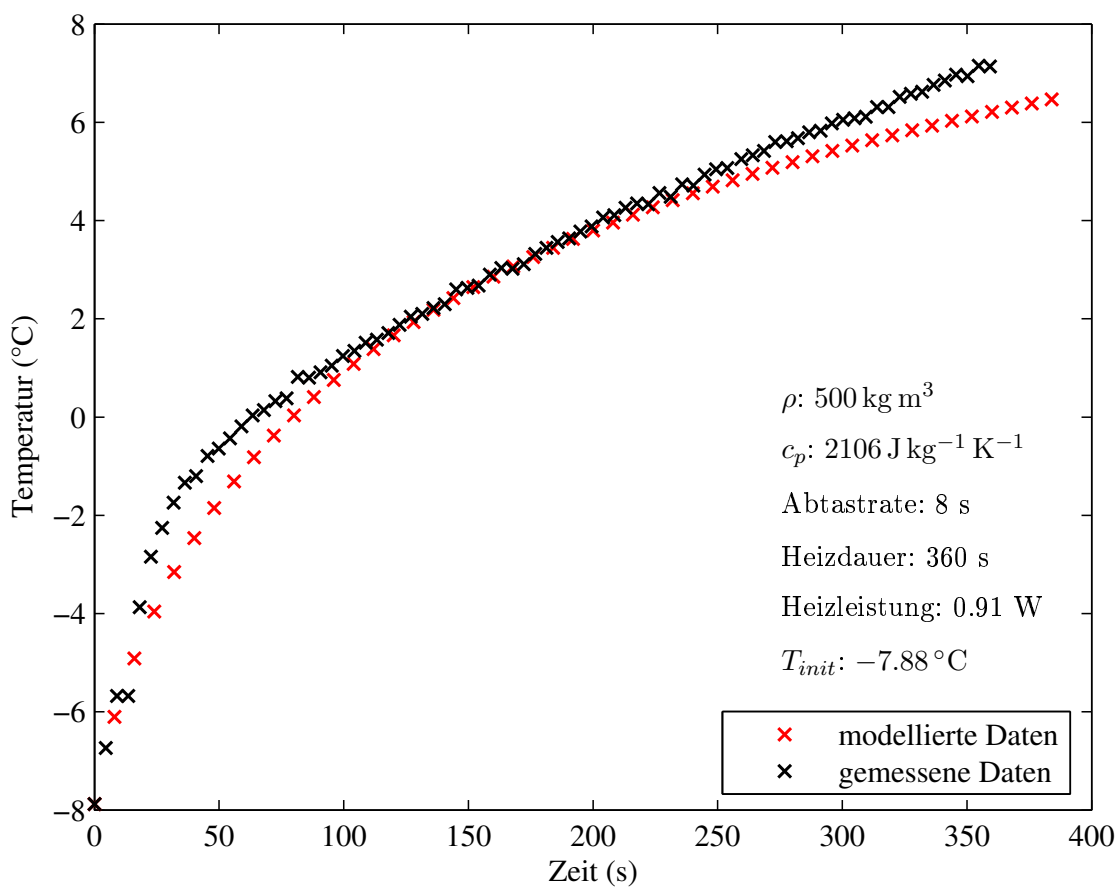


Abbildung 5.12: Vergleich von gemessenen und modellierten Daten von Sensor 15 zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Schnee.

Bei der Auswertung ergab sich eine Wärmeleitfähigkeit von  $0.2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  mit einer mittleren Abweichung vom Modell von 2.45%. Der Wert passt liegt gut im Bereich, der in der Literatur angegeben wird (siehe Literaturwerte im Anhang). Da der Schnee nicht mehr sehr frisch war, ist ein Wert von  $0.2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  sinnvoll. Mit der analytischen Methode wurde ein ähnlicher Wert berechnet, ( $0.234 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ), was unterstützt, dass die Methode bereits brauchbare Ergebnisse liefert.

Der zweite Heizzyklus dauerte 790 Sekunden. Die Messergebnisse sind in Abbildung 5.13 (schwarze Symbole) dargestellt. Die Messungen wurden nur mit FEMLAB<sup>©</sup> ausgewertet.

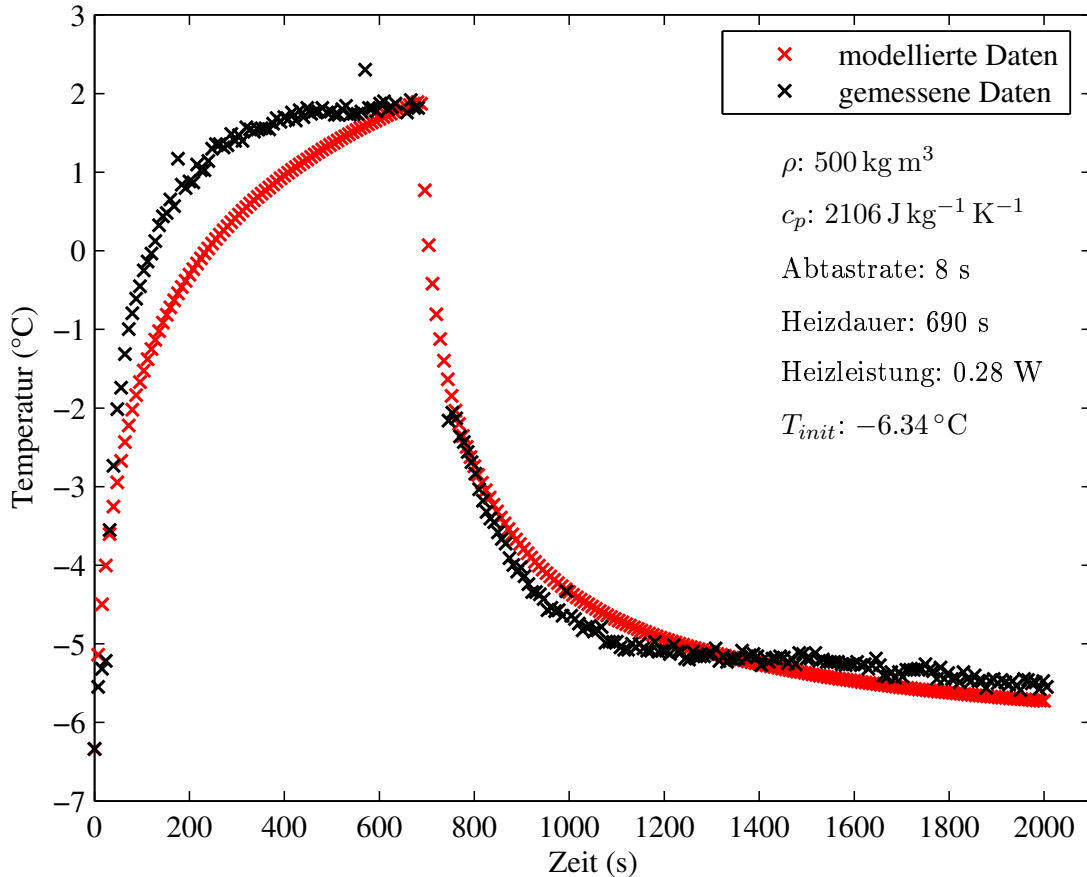


Abbildung 5.13: Vergleich von gemessenen und modellierten Daten von Sensor 5 zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Schnee.

Die Modellierung brachte eine gute Übereinstimmung zwischen modellierten und gemessenen Daten (Abbildung 5.13) und eine Wärmeleitfähigkeit von  $0.13 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  mit einer Abweichung von 16.55%.

Im Vergleich zu Sensor 15 wurde damit ein geringerer Wert für die Wärmeleitfähigkeit gefunden. Dies wurde so erwartet, da sich Sensor 5 in geringerer Tiefe befand als Sensor 15. In der Tiefe von Sensor 15 ist die Dichte des Schnees höher, als in geringeren Tiefen. Da sich das Material in seiner Zusammensetzung nicht verändert hat, sondern sich nur die Kompaktion erhöht hat, muss auch die Wärmeleitfähigkeit höher sein.

Dieses Beispiel zeigt, dass sich Unterschiede in der Kompaktion in einem von außen betrachtet homogenen Schneepaket in einer Änderung der Wärmeleitfähigkeit abzeichnen. Diese können mit den Thermalsonden detektiert werden und die Methode somit einen Beitrag bei der Untersuchung zur Ursache von Lawinen liefern (siehe 2.2).

### 5.4.2 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Neuschnee unter natürlichen Bedingungen

Im Rahmen einer Testreihe am Space Research Centre in Warschau wurden unter anderem Wärmeleitfähigkeitsmessungen in Neuschnee auf dem Institutsgelände durchgeführt. Die Sonde wurde dazu komplett im Schnee installiert. Anhand eines Beispiels wird gezeigt, dass die Wärmeleitfähigkeit des Schnees mit Hilfe der FEMLAB<sup>®</sup>-Methode bestimmt werden konnte. Der Temperaturverlauf von Sensor 15 und die Anpassung durch das Modell sind in Abbildung 5.14 dargestellt. Die benutzten Parameter für das Modell sind ebenfalls aufgeführt.

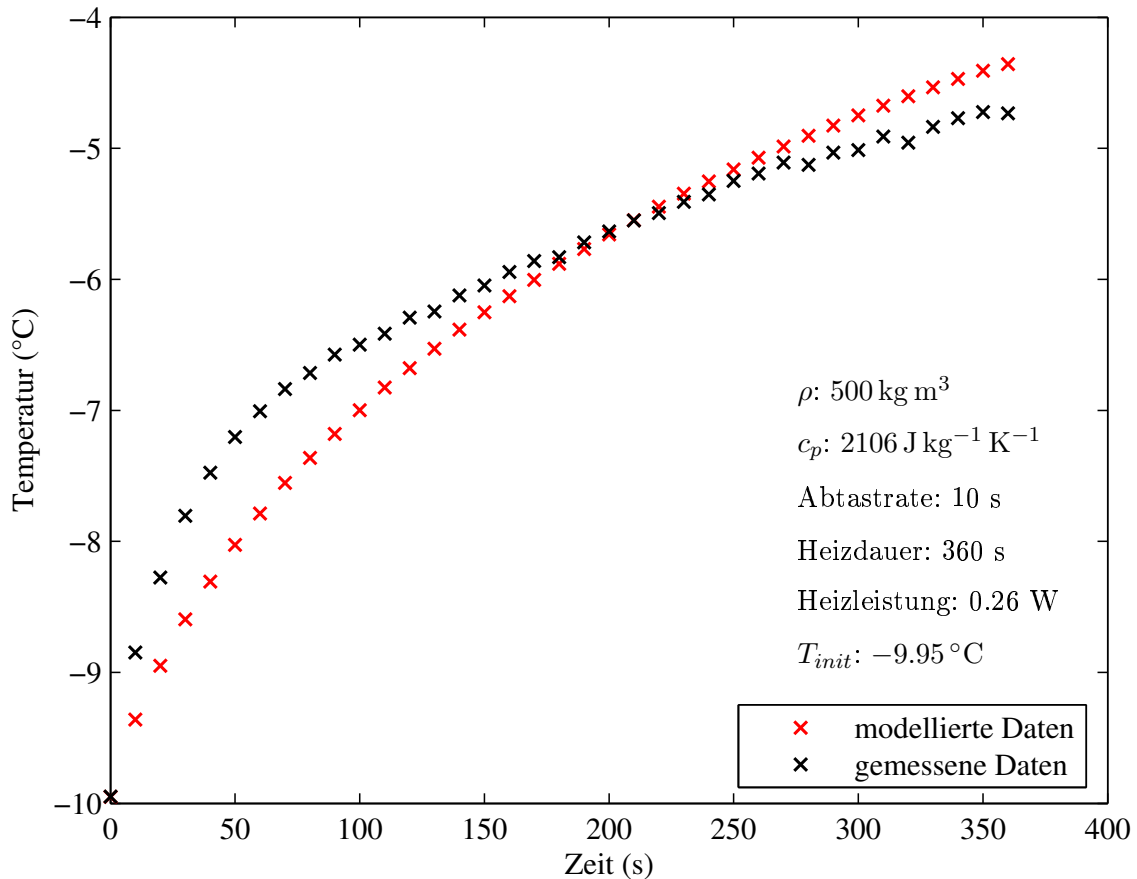


Abbildung 5.14: Vergleich von gemessenen und modellierten Daten von Sensor 15 zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Schnee.

Es wurde eine Wärmeleitfähigkeit von  $0.075 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  bestimmt, was im Bereich der Literaturwerte für frischen Schnee liegt (siehe Kapitel 6). Die Abweichungen zu den modellierten betragen im Mittel 4.21 %.



### 5.4.3 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Mars-Analogmaterial in Abhängigkeit von der Feuchte

In Zusammenarbeit mit der DLR Berlin-Adlershof wurde Mars-ähnliches Material untersucht. Fragestellung der Messreihe war es, wie die Feuchtigkeit des Materials die Wärmeleitfähigkeit beeinflusst und ob dieser Effekt auch bei geringen Unterschieden in der Feuchtigkeit mit der EXTASE-Thermalsonde beobachtbar ist. Dazu wurde in einem Labor ein Probenbehälter (Höhe 21 cm, Durchmesser 19 cm) mit dem Mars-Analogmaterial befüllt und mit mehreren Sensoren bestückt, zum einen mit zwei Feuchtesensoren und zum anderen mit einer EXTASE-Thermalsonde (Abbildung 5.15).



Abbildung 5.15: Messaufbau mit der Probe mit Thermalsonde und Feuchtesensoren (links im Bild), der Elektronik (Mitte) und dem Laptop zur Steuerung der Messung (rechts im Bild).

Als Material wurde Bentonit gewählt, da es ähnliche Eigenschaften wie das Oberflächenmaterial hat, welches auf dem Mars vermutet wird. Das Bentonit lag einmal in Pulverform vor und einmal als Granulat. Die Feuchte des Materials wurde variiert, indem jeweils ein Teil des Materials in einem Ofen getrocknet und mit dem Originalmaterial vermischt wurde.

### Pulver

Zunächst werden die Messungen mit dem Pulver mit zwei unterschiedlichen Feuchten (10.8% und 5.7%) miteinander verglichen. Die Werte für die Feuchtigkeit unterschieden sich deutlich voneinander, was in zwei unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten resultieren sollte. Der Vergleich der Temperaturverläufe für jeweils denselben beheizten Sensor (Abbildung 5.16) zeigt bereits deutlich unterschiedliche Kurven. Da der beheizte Sensor und die Heizleistung und -dauer identisch war, kann das unterschiedliche Verhalten der Kurven nur materialabhängig sein.

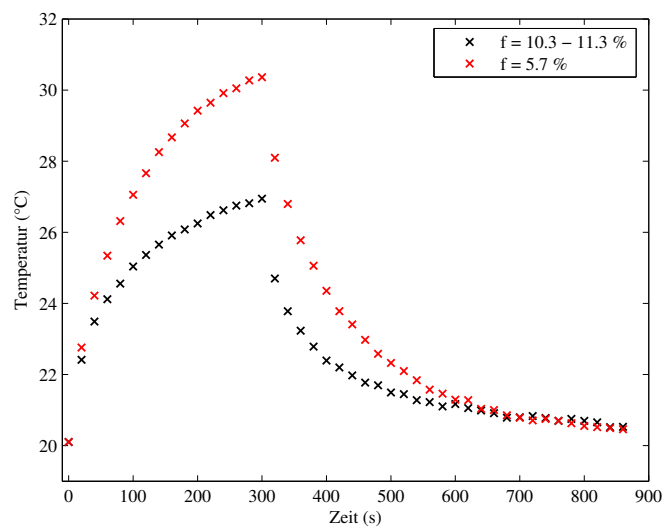


Abbildung 5.16: Temperaturverlauf des beheizten Sensors für Bentonit-Pulver mit zwei verschiedenen Feuchtigkeiten  $f$ .

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit bestätigt die Annahme, dass sich die beiden Materialien in ihrer Wärmeleitfähigkeit voneinander unterscheiden. Für das feuchtere Material, welches zuerst gemessen wurde, ergab sich ein Wert von  $0.09 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  (mittlere Abweichung=1.78%) und für das trockenere Material mit  $0.04 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  (mittlere Abweichung=2.49%) ein deutlich geringerer Wert (Abbildungen 5.17 und 5.18).

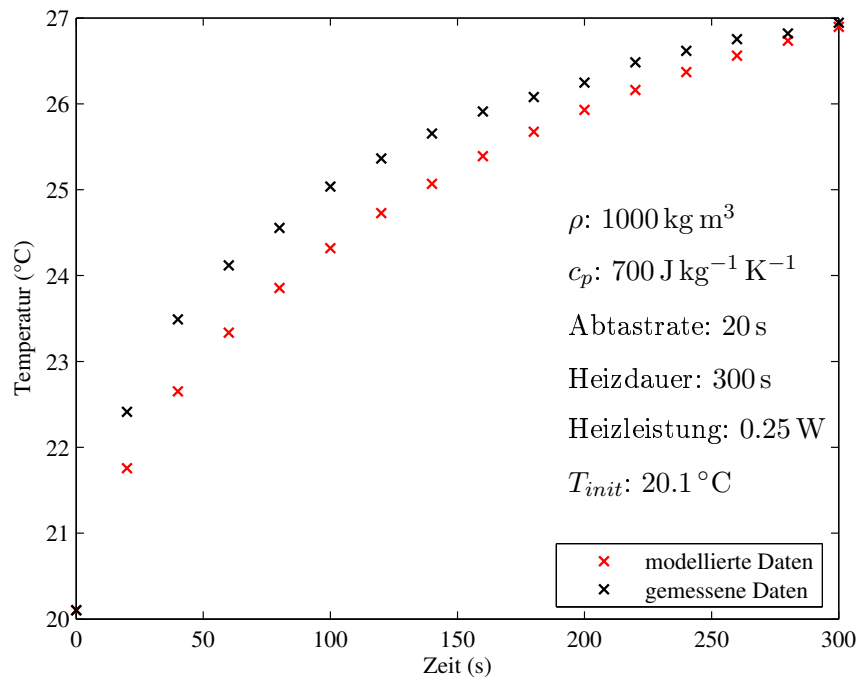


Abbildung 5.17: Vergleich von gemessenen und modellierten Daten für Bentonit-Pulver mit einer Feuchtigkeit von 10.8%

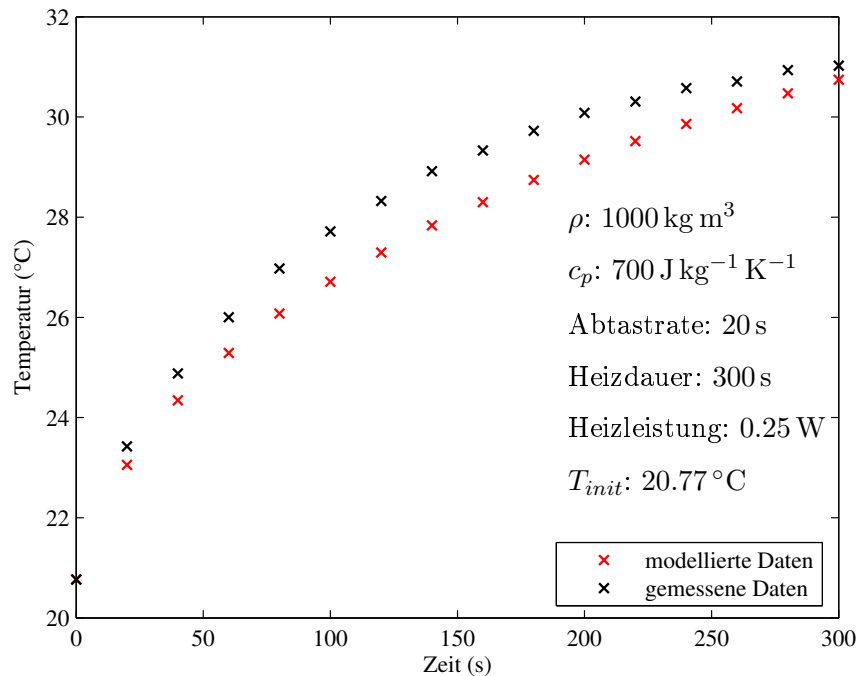


Abbildung 5.18: Vergleich von gemessenen und modellierten Daten für Bentonit-Pulver mit einer Feuchtigkeit von 5.7%.

**Granulat**

Auch für das Bentonit-Granulat wurden zwei Proben mit unterschiedlicher Feuchtigkeit miteinander verglichen. Der Unterschied im Feuchtegehalt ist dabei nicht so deutlich, wie bei dem Pulver, vermutlich war die Vermischung nicht optimal. Dennoch lässt sich auch hier bereits in den Temperaturverläufen der beheizten Sensoren ein – wenn auch geringer – Unterschied erkennen (Abbildung 5.19).

Messung (Nr.)	Feuchte (TDR) (%)	$T_A$ (°C)
2	7.7	22.7
4	5.8 - 6.4	24.1

Tabelle 5.1: Feuchtigkeit und Umgebungstemperatur zu Beginn der Messungen mit Bentonit-Granulat.

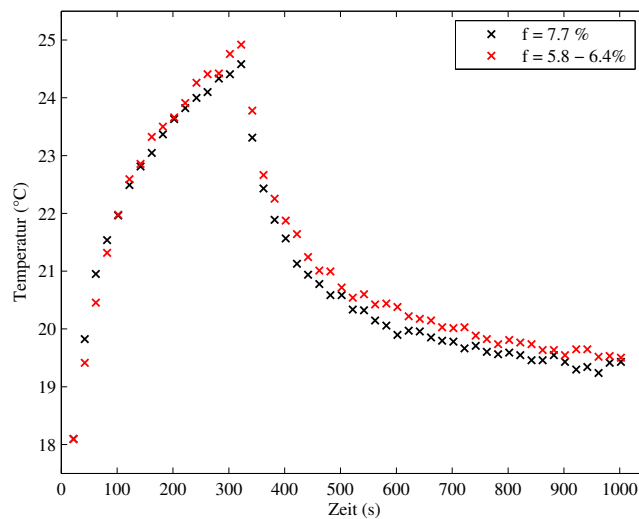


Abbildung 5.19: Temperaturverlauf des beheizten Sensors für Bentonit-Granulat mit zwei verschiedenen Feuchtigkeiten.

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit ergab zwei deutlich unterschiedliche Werte von  $0.06 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  mit einer mittleren Abweichung von 1.68% für das feuchtere Material und  $0.035 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  (mittlere Abweichung=3.74%) für das etwas trockenere.

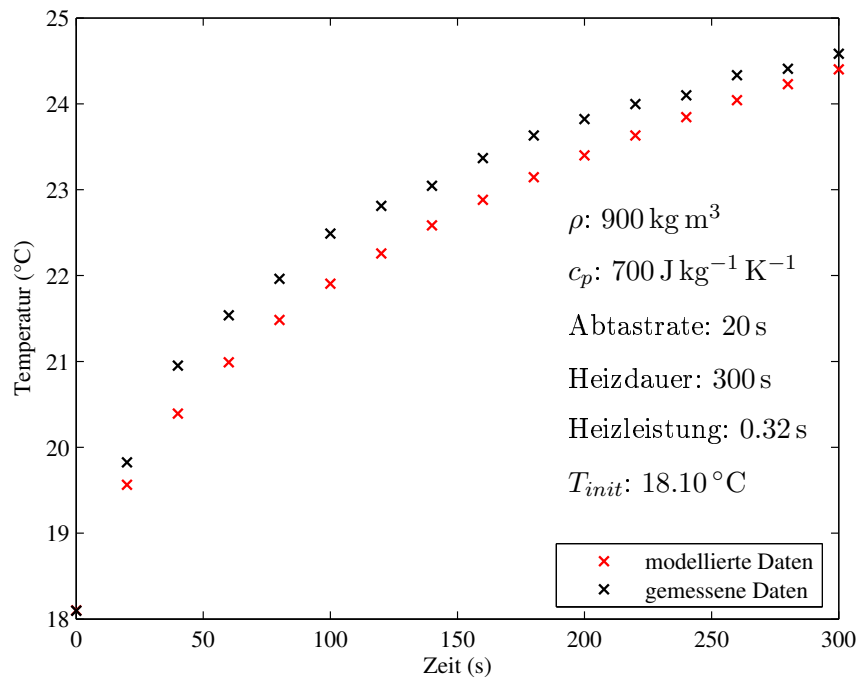


Abbildung 5.20: Vergleich von gemessenen und modellierten Daten für Bentonit-Granulat mit einer Feuchtigkeit von 7.7%.

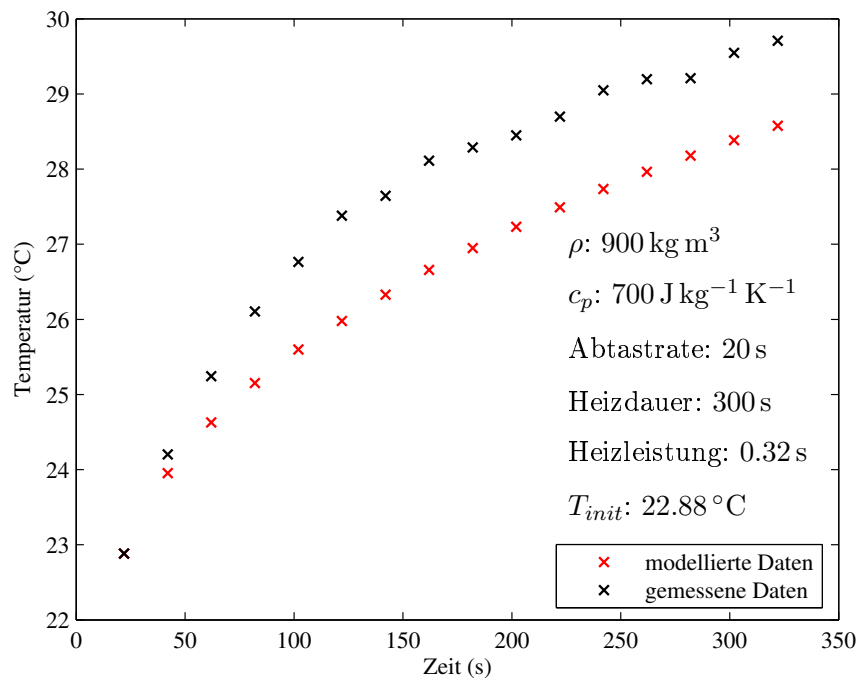


Abbildung 5.21: Vergleich von gemessenen und modellierten Daten für Bentonit-Granulat mit einer Feuchtigkeit von (5.8 – 6.4)%.

#### 5.4.4 Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Porosität

In diesem Versuch wurde qualitativ die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Porosität untersucht. Dabei wurden die Messungen mit verschiedener Porosität einmal an Luft und einmal im Vakuum durchgeführt. Als Probenmaterial dienten Kugeln aus Kalknatron-glas mit zwei verschiedenen Durchmessern, um unterschiedliche Porositäten zu simulieren. Die kleineren Proben hatten einen Durchmesser von (1.00 – 1.25) mm und die großen von (3.7 – 4.1) mm. Das jeweilige Material wurde in einen Probenbehälter gefüllt und dieser in einer Vakkumkammer platziert (Abbildung 5.22). Diese wurde verschlossen, aber zunächst nicht evakuiert, war somit also noch mit Luft gefüllt. Diese wurde nach einigen Stunden abgepumpt. Die Messungen liefen dabei kontinuierlich weiter. Dieser Vorgang wurde für beide Proben durchgeführt.



(a) Kugeln mit einem Durchmesser von (1.00 – 1.25) mm



(b) Kugeln mit einem Durchmesser von (3.7 – 4.1) mm

Abbildung 5.22: Versuchsaufbau mit Proben unterschiedlicher Porosität.

Die Daten werden auf ihre Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Umgebungsmedium und ihrer Porosität hin verglichen, die dazugehörigen Ergebnisse finden sich in den Abbil-

dungen 5.23 bis 5.26. Da die Methode zur Auswertung noch Ungenauigkeiten bei Materialien mit sehr geringer Wärmeleitfähigkeiten aufwies, werden die Messungen im Rahmen dieser Arbeit nur qualitativ ausgewertet.

### 1. Verschiedene Porositäten in gleicher Umgebung (Vakuum)

Zunächst werden die beiden Proben mit unterschiedlichen Porositäten im Vakuum miteinander verglichen. Es zeigt sich, dass der Anstieg der Temperatur für die Probe mit der geringeren Porosität niedriger ist. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Probe aufgrund ihrer niedrigeren Porosität eine größere Dichte hat, damit die Wärme besser in das Material abfließen kann und das Material daher eine höhere Wärmeleitfähigkeit hat.

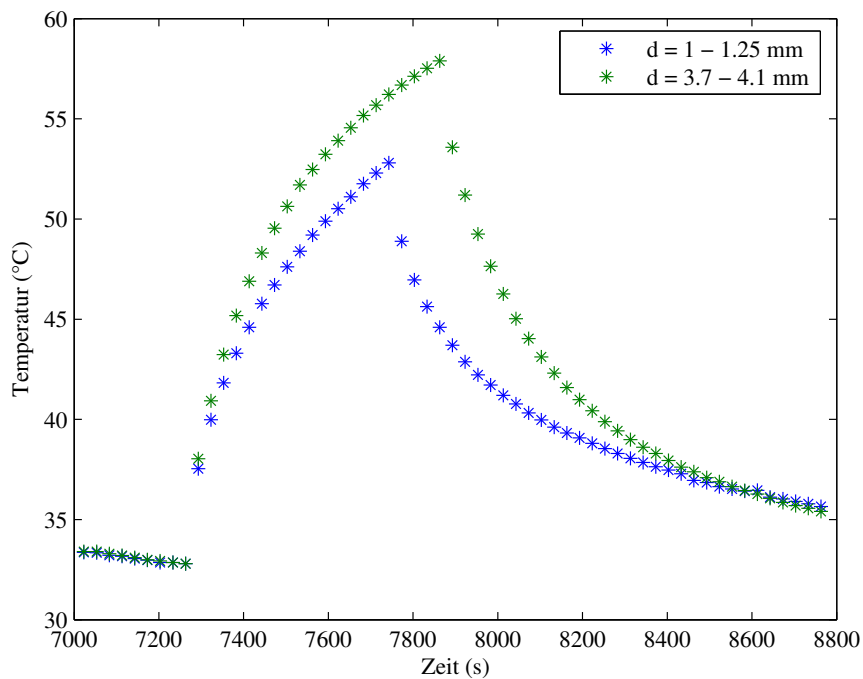


Abbildung 5.23: Vergleich der Temperaturen des beheizten Sensors bei Proben mit kleinen und großen Kugeln im Vakuum.

2. Verschiedene Porositäten in gleicher Umgebung (Luft)

Derselbe Versuch wie im Beispiel 1) wurde an Luft durchgeführt und brachte ein vergleichbares Ergebnis. Wieder ist der Anstieg der Temperatur der Probe mit der geringeren Porosität niedriger.

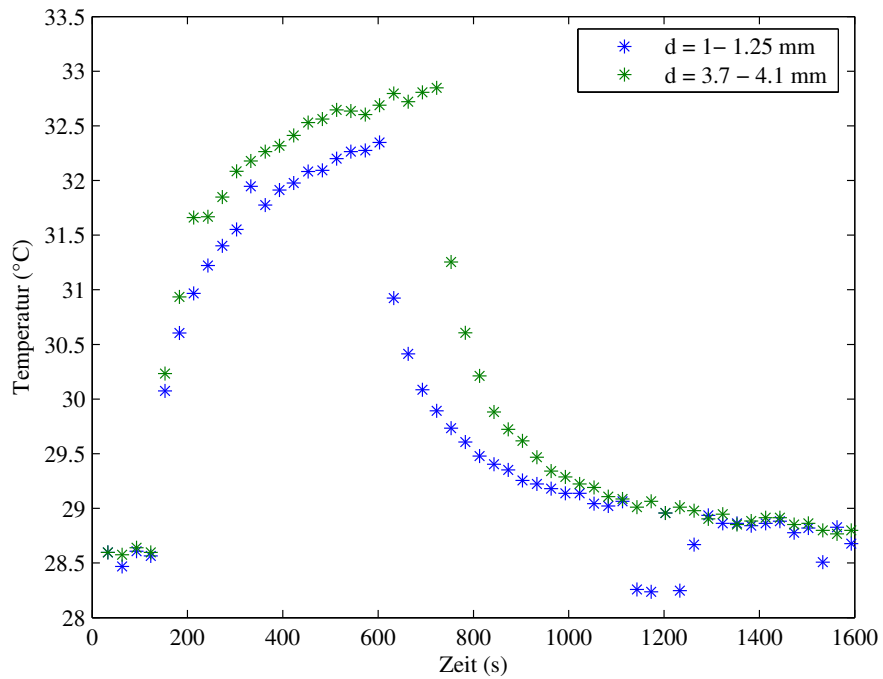


Abbildung 5.24: Vergleich der Temperaturen des beheizten Sensors bei Proben mit kleinen und großen Kugeln in Luft.



### 3. Gleiche Porositäten in verschiedenen Umgebungen (geringere Porosität)

Als nächstes wird dieselbe Probe geringerer Porosität in unterschiedlicher Umgebung verglichen. Es wurde erwartet, dass der Sensor in der Probe in Luft einen geringeren Temperaturanstieg erfahren würde, als der im Vakuum, da dort kaum Wärmeleitung stattfindet. Wie Abbildung 5.25 zeigt, bestätigte sich diese Vermutung.

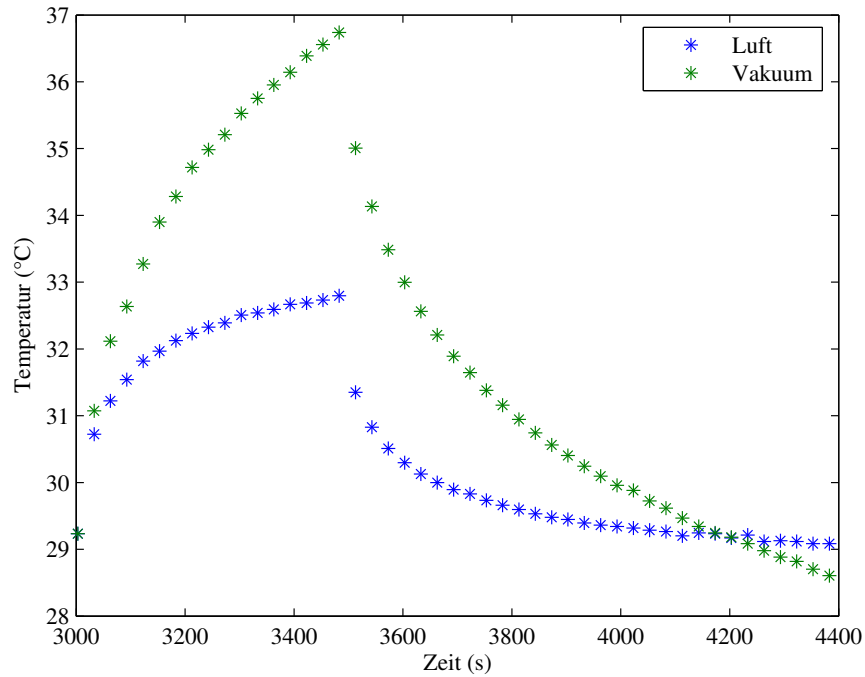


Abbildung 5.25: Vergleich der Temperaturen des beheizten Sensors bei der Probe mit kleinerer Porosität in Luft und im Vakuum.

#### 4. Gleiche Porositäten in verschiedenen Umgebungen (höhere Porosität)

Zum Abschluss wird auch die Probe mit der höheren Porosität in beiden Umgebungen verglichen. Die Erwartungen waren dieselben wie bei Punkt 3) und auch diese wurden erfüllt, wie Abbildung 5.26 zeigt.

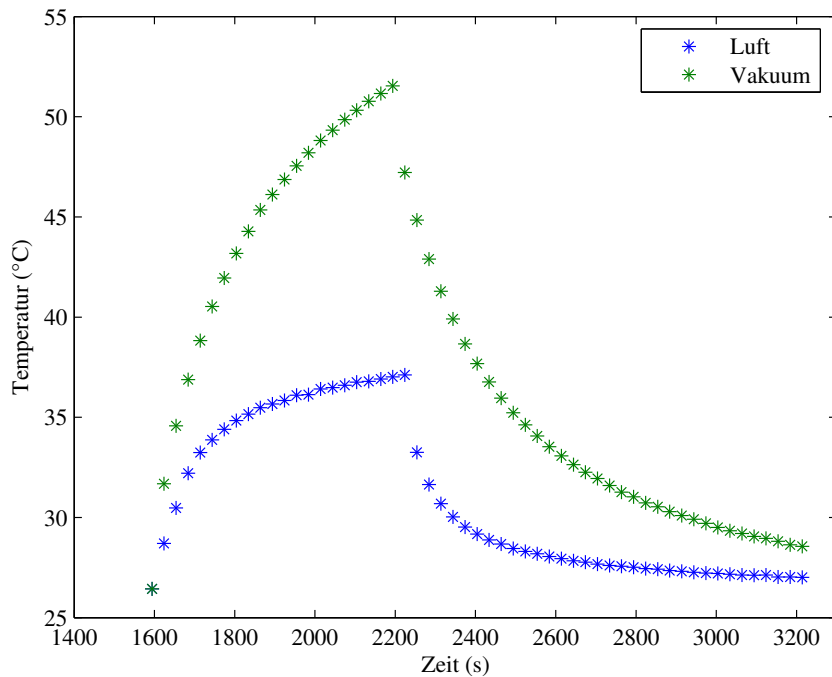


Abbildung 5.26: Vergleich der Temperaturen des beheizten Sensors bei der Probe mit größerer Porosität in Luft und im Vakuum.

**Fazit:** Proben unterschiedlicher Porosität können mit einer EXTASE-Thermalsonde qualitativ unterschieden werden. Die Wärmeleitfähigkeiten der Proben wurden nicht mit der FEMLAB<sup>®</sup>-Methode bestimmt, da das Modell wie bereits zuvor erwähnt, bei Wärmeleitfähigkeiten deutlich unter  $0.1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  noch Fehler aufweist. Da die erwarteten Wärmeleitfähigkeiten bei diesen Proben eher unter  $0.1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  liegen, wurden die Unterschiede in der Wärmeleitfähigkeit nur qualitativ bestimmt. Der Einfluss der Porosität der Proben ist aber so bereits deutlich zu beobachten.

### 5.4.5 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Baumaterialien

Als Beispiel für das Gebiet der Baumaterialien werden in diesem Abschnitt die Wärmeleitfähigkeiten von mehreren Gesteinsarten bestimmt. Exemplarisch werden hier die Ergebnisse der Messungen von Granit, Marmor, Sandstein und Ytong™ dargestellt.

Für die Messungen an den Gesteinen wurde jeweils ein Block des Materials mit den Maßen 30 cm x 30 cm x 50 cm verwendet, beziehungsweise 30 cm x 50 cm x 60 cm für den Ytong™-Block. In die Steinblöcke wurde ein Loch mit einem Durchmesser von 11 mm gebohrt. Das Loch wurde mit Glisseal™ (Kontaktmittel) gefüllt und anschließend die Thermalsonde eingesetzt (siehe Abbildung 5.27). Das Glisseal™ diente dazu, den Kontakt zwischen dem Gestein und der Sonde zu verbessern.



Abbildung 5.27: Messaufbau zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Gesteinen. Von links nach rechts: Sandstein (1), Marmor (2), Granit (3). Vorne rechts im Bild: Ytong™(4).

Zunächst werden die Temperaturverläufe der vier Gesteine im Vergleich abgebildet, dabei werden die qualitativen Unterschiede in der Wärmeleitfähigkeit bereits in der Darstellung der gemessenen Temperatur deutlich. Es ist zu erkennen, dass die Gesteine unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten haben, da die Temperaturanstiege trotz identischer Heizleistungen unterschiedlich sind. Da Ytong™ die niedrigste Wärmeleitfähigkeit hat, kann sich die Wärme nicht weit in das Material ausbreiten; daher ist der Temperaturanstieg der höchste.

Anschließend wurde mit der FEMLAB©-Methode und mit der analytischen Methode die Wärmeleitfähigkeit von einigen der Gesteine bestimmt. Die bei FEMLAB© benutzen Pa-

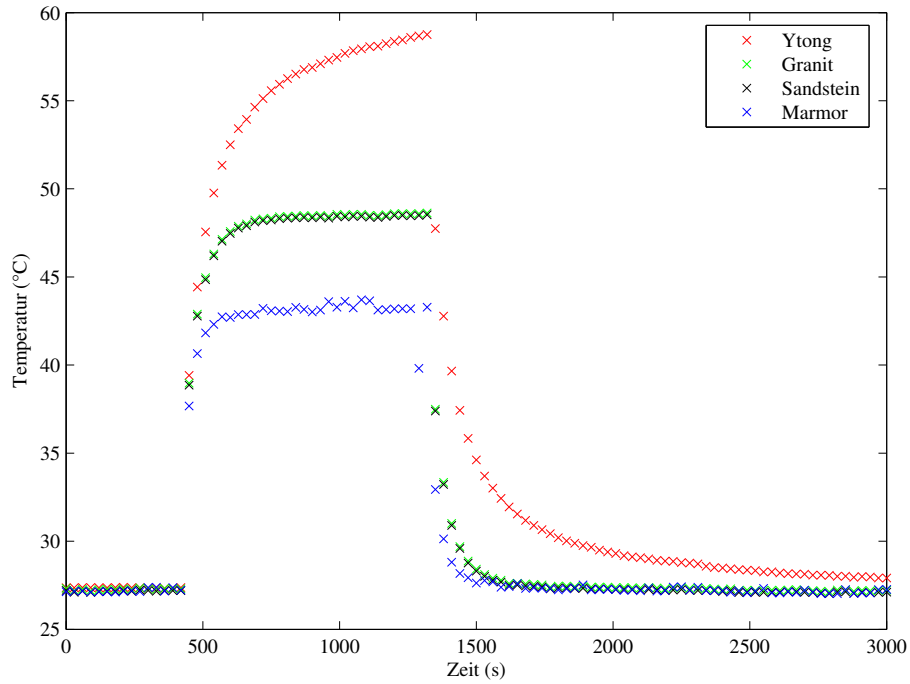


Abbildung 5.28: Vergleich des Heizverhaltens der vier Gesteine, auf dieselbe Starttemperatur normiert.

parameter sind jeweils in den Diagrammen mit den modellierten und gemessenen Daten aufgeführt.

### Granit

Die mit der EXTASE-Sonde gemessenen Temperaturdaten sowie die im FEMLAB<sup>®</sup>-Modell eingesetzten Werte sind in Abbildung 5.29 angegeben. Die Anpassung mit dem Modell gelang sehr gut, wie die dazugehörige Kurve der modellierten Daten in Abbildung 5.29 zeigt.

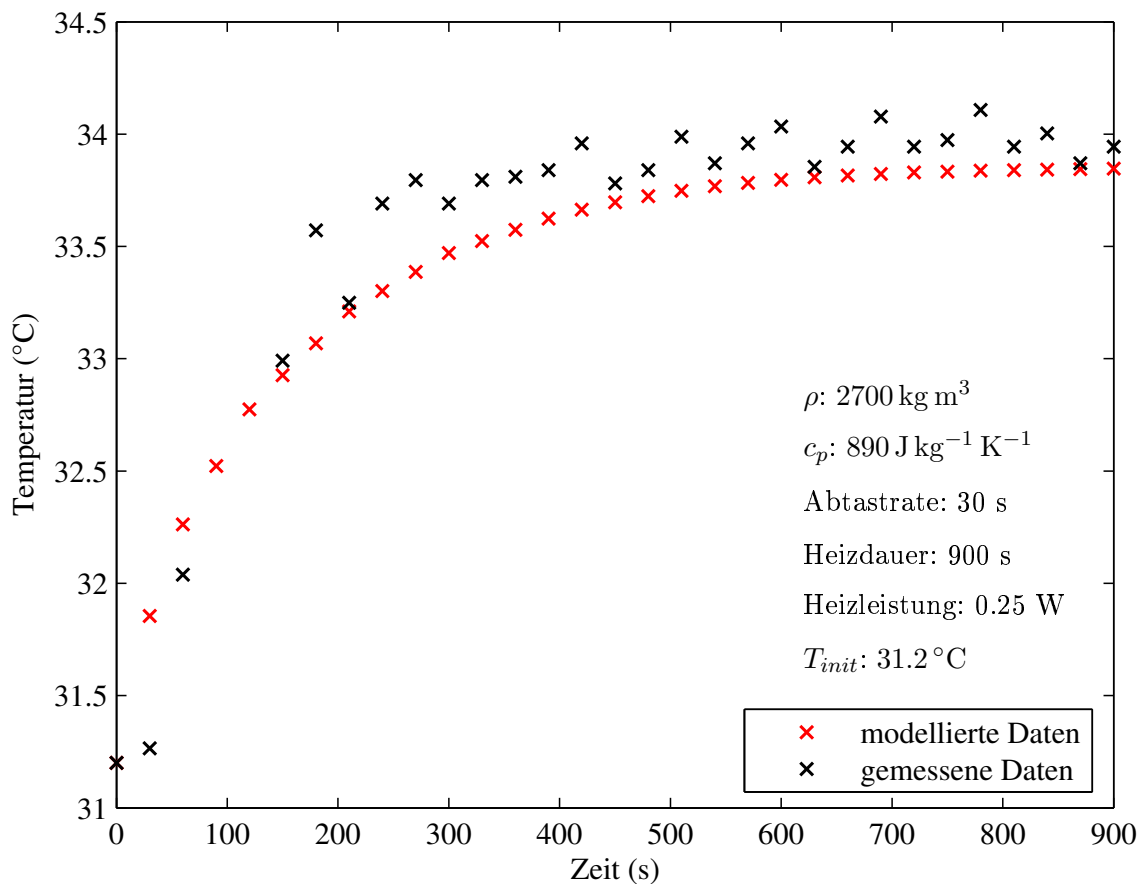


Abbildung 5.29: Vergleich von gemessenen und modellierten Daten bei Granit.

Die Anpassung ergab eine Wärmeleitfähigkeit von  $2,8 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Die mittlere Abweichung betrug dabei 0,6%. In der Literatur findet sich eine Wärmeleitfähigkeit von  $2,9 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , womit die Anpassung als erfolgreich anzusehen ist.

Die Anpassung mit dem analytischen Programm ergab eine Wärmeleitfähigkeit von  $2,677 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .

**Sandstein**

Auch die Anpassung für Sandstein ergab eine sehr gute Übereinstimmung, wie Abbildung 5.30 zeigt.

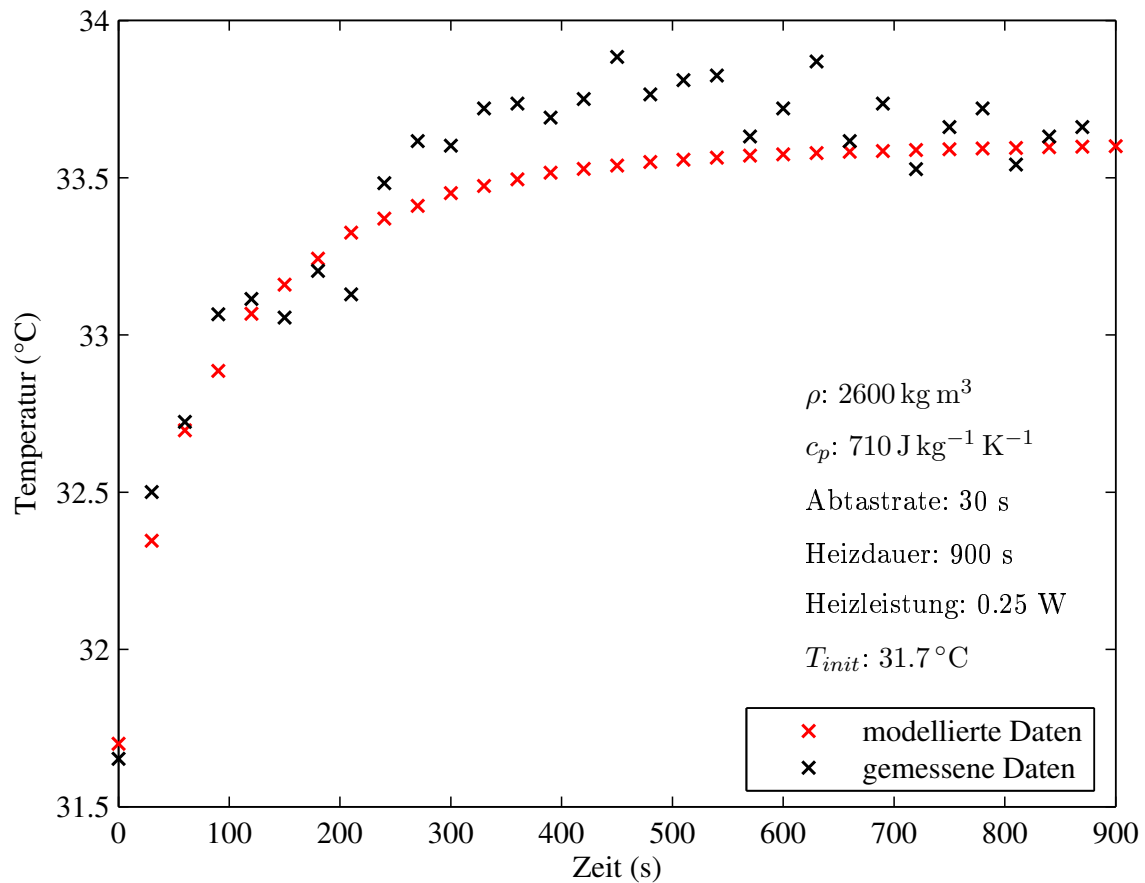


Abbildung 5.30: Vergleich von gemessenen und modellierten Daten bei Sandstein.

Als Ergebnis brachte die Modellierung mit FEMLAB<sup>®</sup> eine Wärmeleitfähigkeit von  $2.0 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , was dem Literaturwert entspricht. Die Abweichung bezogen auf die Modelldaten beträgt im Mittel nur 0.43%.

Auch die Berechnung mit der analytischen Methode brachte ein sehr gutes Ergebnis von  $2.01 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .

## Marmor

Die Anpassung für Marmor brachte eine nicht ganz so gute Übereinstimmung zwischen der gemessenen und modellierten Kurve (siehe Abbildung 5.31) wie zum Beispiel bei Granit, dennoch ist die mittlere Abweichung mit 3.955% immer noch besser ist als bei vielen herkömmlichen Methoden. Dabei stimmt das Ergebnis von  $2.6 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  gut mit den durchschnittlichen Literaturwerten von  $2.8 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  überein.

Die analytische Methode brachte mit  $2.677 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  einen ebenso realistischen Wert.

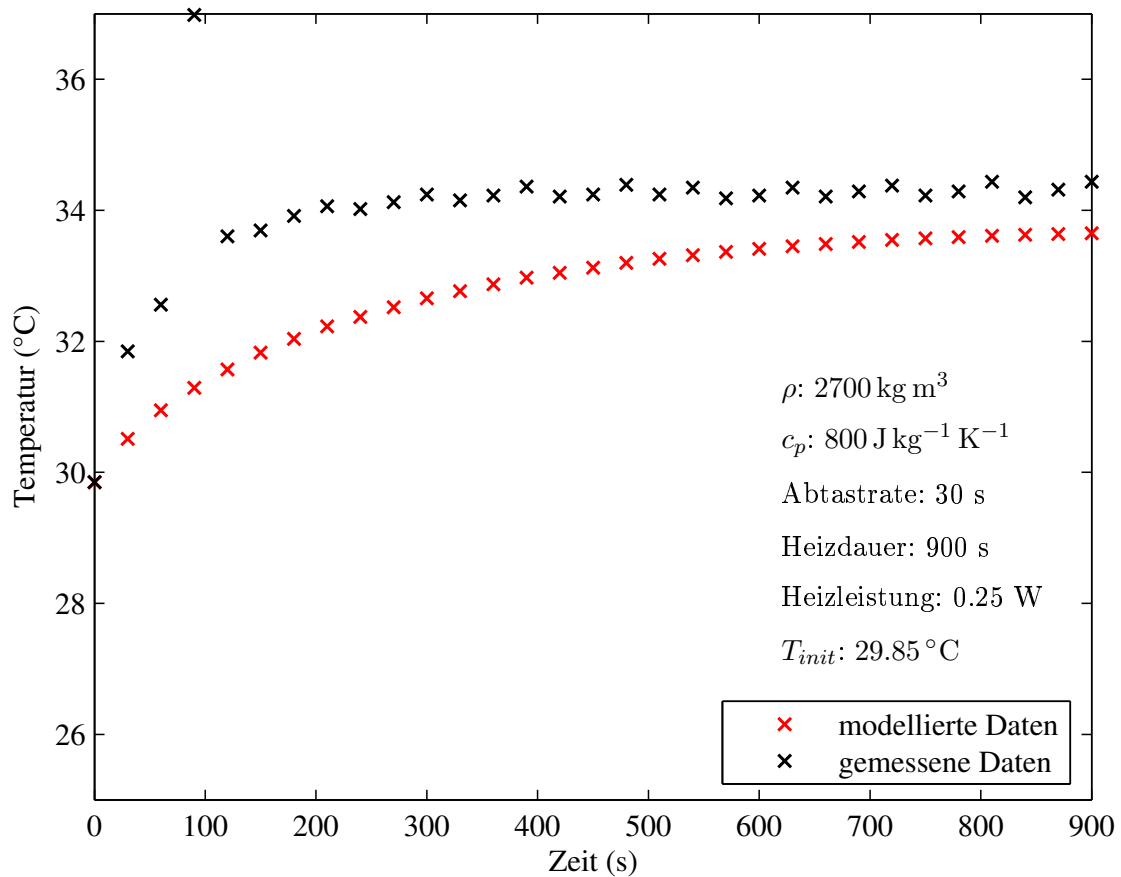


Abbildung 5.31: Vergleich von gemessenen und modellierten Daten bei Marmor.

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Baustoffe gelang gut. Die Abweichungen zwischen den modellierten und gemessenen Daten betrug in keinem Fall mehr als 20%, in der Regel unter 5%, was ein sehr gutes Ergebnis ist. Herkömmliche Methoden zeigen Fehlergenauigkeiten von 5% – 20%, daher kann die Modellierung der EXTASE-Daten mit FEMLAB<sup>©</sup> als mindestens ebenso zuverlässig bezeichnet werden.

### 5.4.6 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Teflon, Glasschaum und Sand

Neben den im vorherigen Abschnitt beschriebenen Messungen an Gesteinen wurden auch andere Werkstoffe untersucht. An den drei Beispielen von Teflon, Glasschaum und Sand soll gezeigt werden, dass die Methode der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit auch an solchen Materialien zuverlässige Ergebnisse liefert.

#### Teflon

Die thermischen Eigenschaften von Teflon sind gut bekannt, daher kann das Material als Referenz und Eichung für die neuen Thermalsonden genutzt werden. Der Messaufbau ist in Abbildung 5.32 (links) dargestellt.

Der Literaturwert ist  $0.25 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , genau dieser brachte auch die beste Anpassung an die Modellkurve. Die mittlere Abweichung betrug 0.364%.

Auch die analytischen Methode lieferte ein gutes Ergebnis von  $(0.26 - 0.276) \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .

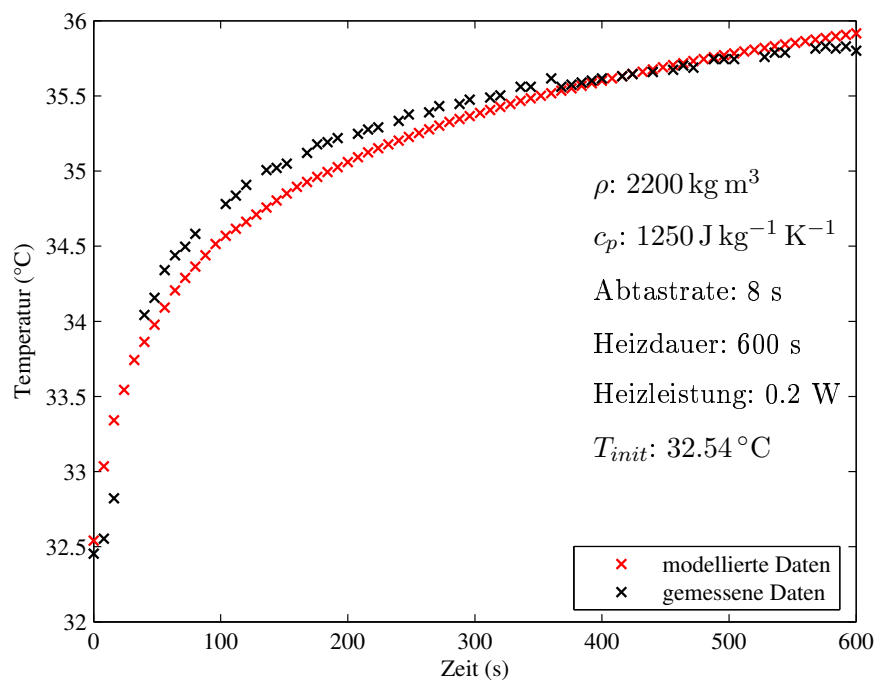


Abbildung 5.32: Links: Teflonblock mit EXTASE-Thermalsonde. Rechts: Vergleich von gemessenen und modellierten Daten bei Teflon.



### Glasschaum

Ein weiteres gut definiertes Baumaterial ist Glasschaum, das aufgrund seiner geringen Wärmeleitfähigkeit häufig als Material zur Wärmedämmung eingesetzt wird. Bei diesem Versuch wurde eine Thermalsonde teilweise in einem Block aus Teflon und teilweise in einem Block aus Glasschaum installiert. Zum Vergleich wurden zwei Sensoren benachbarte (und damit ähnlich große) Sensoren beheizt, von denen der eine sich im Teflon und der andere im Glasschaum befand. Dabei wurde ein großer zeitlicher Abstand zwischen den beiden Messungen eingehalten, damit sie sich nicht gegenseitig beeinflussen. Abbildung 5.33 zeigt die beiden Temperaturverläufe im Vergleich.

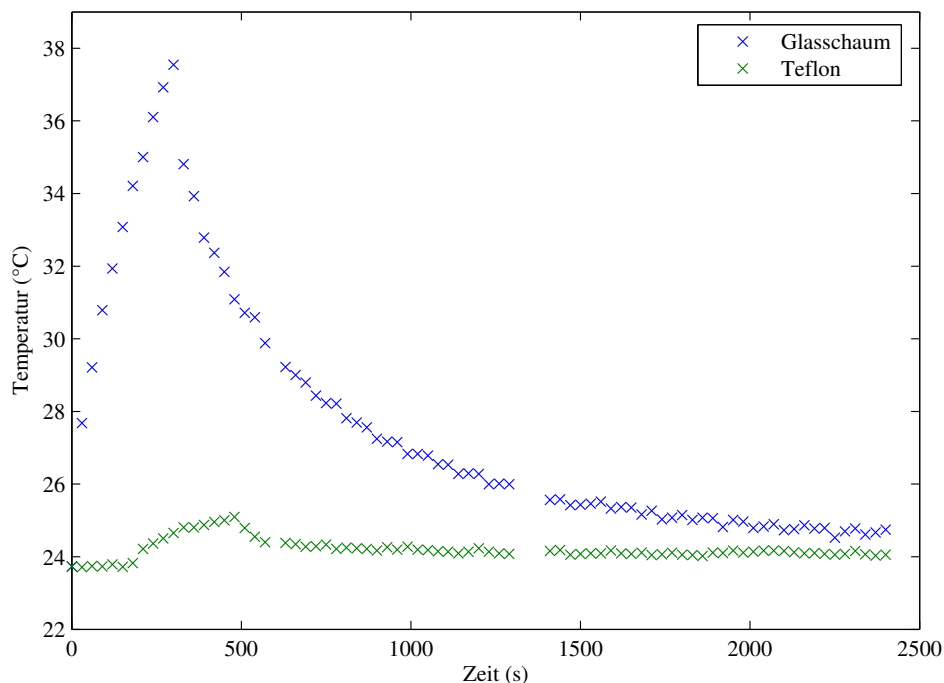


Abbildung 5.33: Vergleich der Temperaturverläufe eines Sensors im Teflon-Block (grün) und im Glasschaum (blau).

Aus Abbildung 5.33 wird bereits deutlich, dass die beiden Materialien deutlich unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten haben, was sich in den verschiedenen Anstiegen der Temperaturkurven abzeichnet.

Die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit von Glasschaum mit FEMLAB<sup>®</sup> ergab einen Wert von  $0.01 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  und lag damit weit unter dem Literaturwert von  $0.045 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Es ergab sich eine mittlere Abweichung von 6.13% im Vergleich zu den Modelldaten.

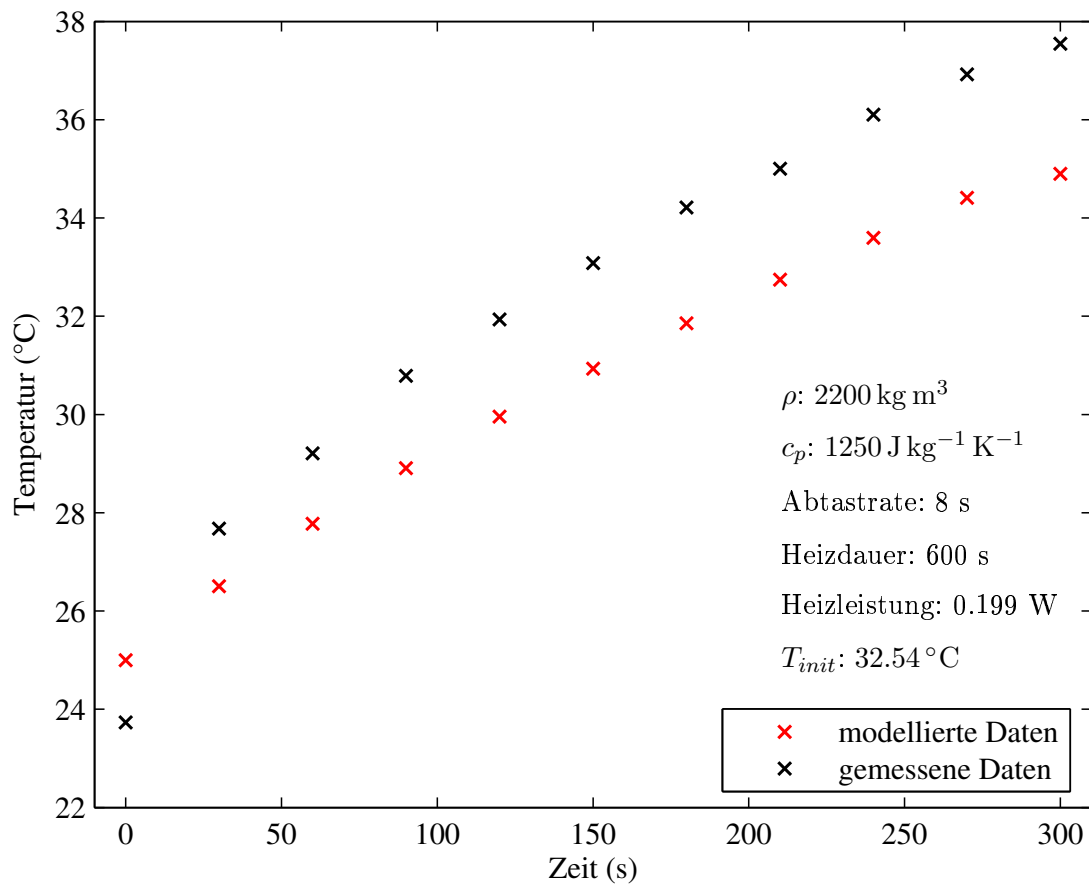


Abbildung 5.34: Vergleich zwischen gemessenen und modellierten Daten von Glasschaum mit der FEMLAB<sup>®</sup>-Methode.

### Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Teflon mit unterschiedlichen Heizleistungen

Um zu zeigen, dass die Wärmeleitfähigkeit unabhängig von der gewählten Heizleistung ist, wird in diesem Abschnitt die Ergebnisse einer Messung dargestellt, in der Teflon mit drei unterschiedlichen Leistungen beheizt wurde. Es wurde jeweils Sensor 13 genutzt, so dass alle Parameter außer der Heizleistung identisch waren. Der Messaufbau war dabei identisch zu Abbildung 5.32. Der Sensor wurde jeweils 600 Sekunden lang beheizt; die gewählten Heizleistungen waren 0.199 W, 0.398 W und 0.797 W. Die Temperaturverläufe der drei Messungen sind in Abbildung 5.35 dargestellt. Alle Parameter, die zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit benutzt wurden, sind in Tabelle 5.2 aufgeführt. Dort finden sich auch die Ergebnisse der Modellierung für die Wärmeleitfähigkeit und der jeweilige prozentuale Fehler. Die dazugehörigen Vergleiche zwischen den modellierten und gemessenen Daten sind in Abbildung 5.36 dargestellt.

Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass die Anpassungen mit FEMLAB<sup>®</sup> sehr gut waren, alle

mittleren Fehler liegen unter 1%.

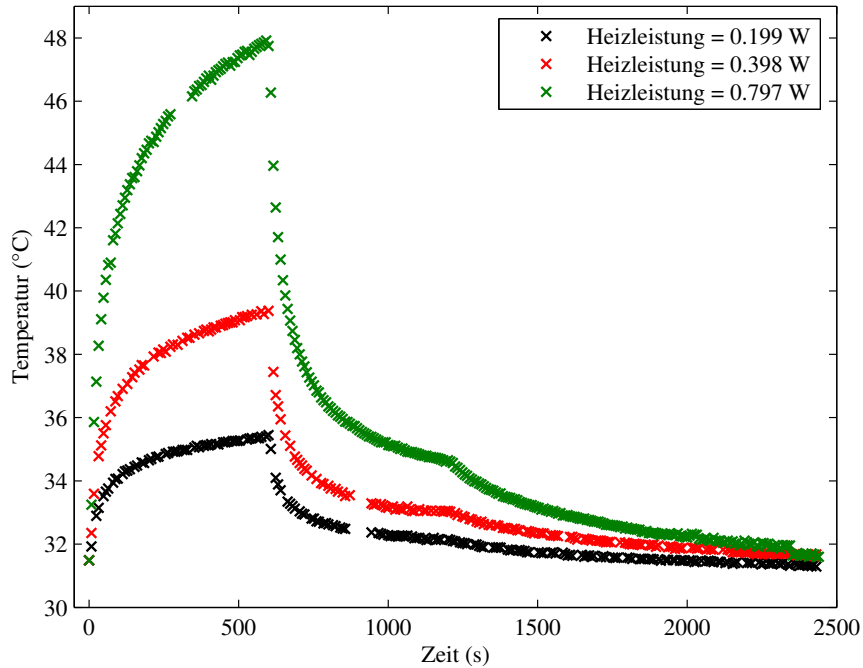


Abbildung 5.35: Vergleich der Temperaturverläufe von Sensor 13 bei drei verschiedenen hohen Heizleistungen.

Parameter	0.199 W	0.398 W	0.797 W
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	2200	2200	2200
$c_p$ (J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	1250	1250	1250
$T_{init}$ (°C)	31.49	31.53	31.74
Abtastrate (s)	8	8	8
Heizdauer (s)	600	600	600
Heizleistung (W)	0.199	0.398	0.797
Wärmeleitfähigkeit (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	<b>0.23</b>	<b>0.25</b>	<b>0.24</b>
mittl. Abweichung (%)	0.090	0.474	0.749

Tabelle 5.2: Eingesetzte Parameter für die Modellierung mit FEMLAB<sup>®</sup> für Teflon bei drei verschiedenen Heizleistungen.

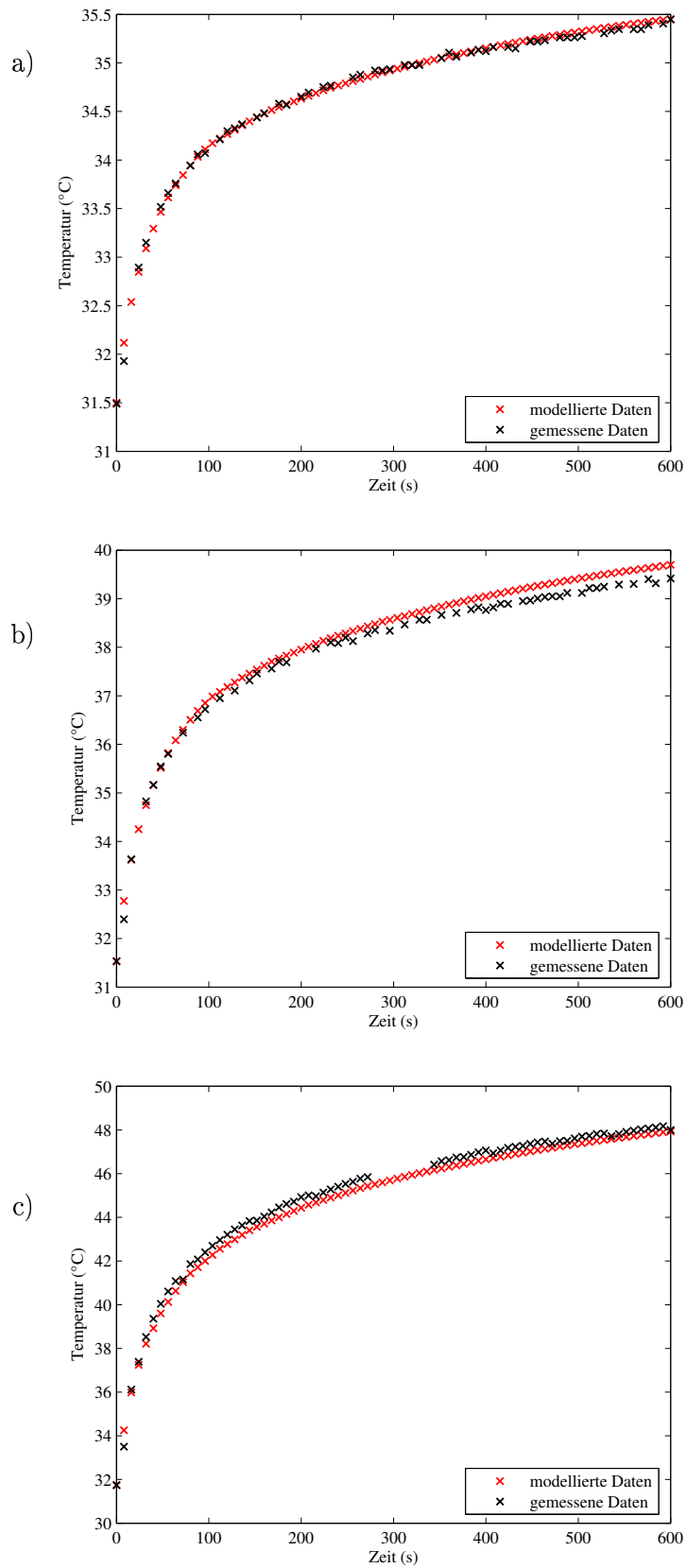


Abbildung 5.36: Vergleich zwischen gemessenen und modellierten Daten von Teflon bei drei verschiedenen Heizleistungen (a) 0.199 W, b) 0.398 W, c) 0.797 W) mit der FEMLAB<sup>®</sup>-Methode.

## Sand

Ein weiteres untersuchtes Material war Sand. Dieser weist eine weite Bandbreite an Wärmeleitfähigkeitswerten auf, abhängig von den Materialeigenschaften und der Feuchte des Sandes ( $(0.2 - 2) \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ). Im hier beschriebenen Fall handelte es sich um feinkörnigen Sand, der zuvor in einem Trockenschrank getrocknet wurde. Ungefähr 20 Liter wurden in einen Probenbehälter gefüllt und eine Thermalsonde in der Mitte installiert (Messaufbau gemäß Abbildung 5.37). Es wurden mehrere Sensoren beheizt, exemplarisch werden hier die Ergebnisse von Sensor 9 vorgestellt.



Abbildung 5.37: Messaufbau für die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit von Sand.

Bei einer Wärmeleitfähigkeit von  $0.35 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  wurde eine sehr gute Anpassung an die Modellkurve erreicht (siehe Abbildung 5.38). Der Literaturwert für trockenen Sand liegt ebenfalls bei  $0.35 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Dabei beträgt die mittlere Abweichung zum Modell 1.47 %.

Mit der analytischen Methode wurden mehrere mögliche Ergebnisse bestimmt, so ergaben sich Werte zwischen  $0.26 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  und  $0.53 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , was zeigt, dass noch Unsicherheiten in der Methode bestehen.

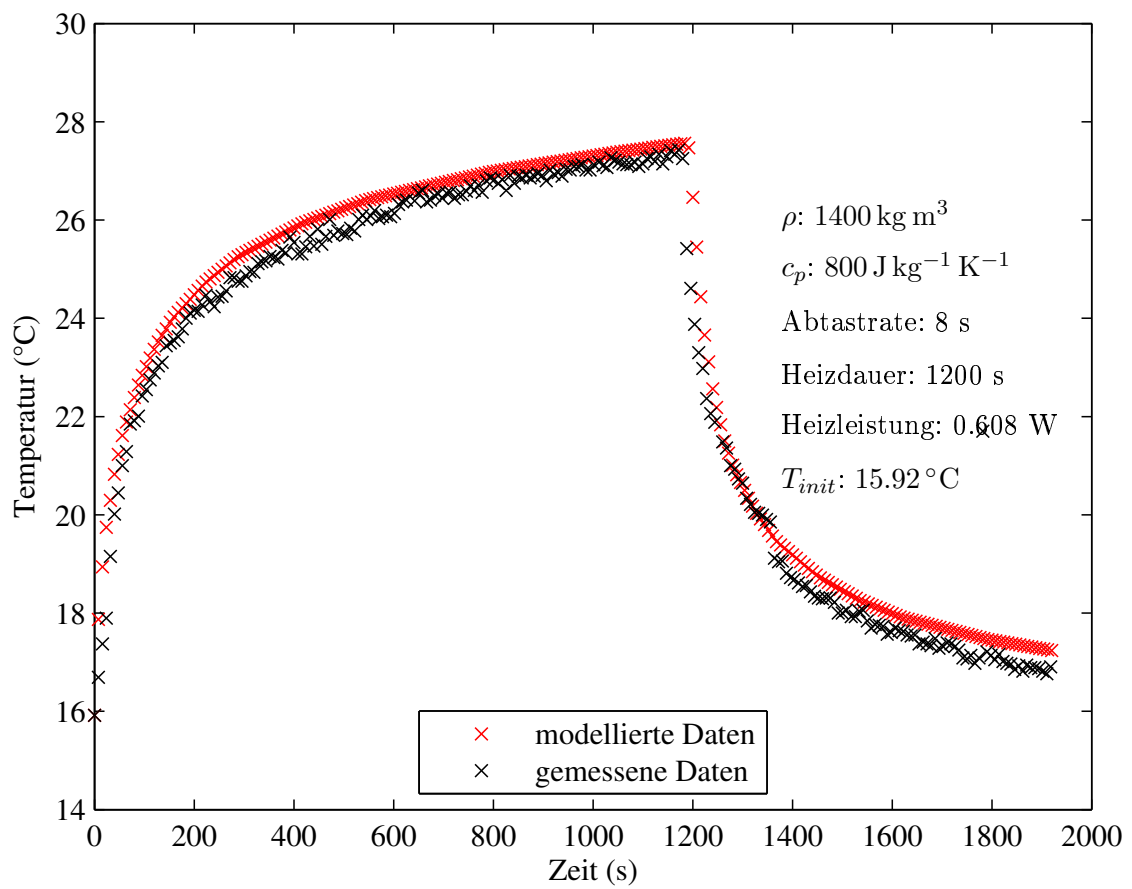


Abbildung 5.38: Vergleich von gemessenen und modellierten Daten bei Sand.

## 5.5 Zusammenfassung der Wärmeleitfähigkeitsmessungen

In diesem Kapitel konnte anhand von Beispielen gezeigt werden, dass die neue Methode zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit FEMLAB<sup>©</sup> zuverlässig funktioniert. Die mittleren Fehler der gemessenen Temperaturkurven im Vergleich zu den mit FEMLAB<sup>©</sup> berechneten Temperaturverläufen waren überwiegend sehr gering, insgesamt lagen sie in allen Fällen deutlich unter 20%. Auch im Vergleich zu den Literaturwerten (Quellen siehe Anhang) ergaben sich überwiegend geringe Abweichungen. Das FEMLAB<sup>©</sup>-Modell weist noch Unsicherheiten bei Wärmeleitfähigkeiten auf, die deutlich unter  $0.01 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  liegen; für diesen Wertebereich muss das Modell noch optimiert werden.





## Kapitel 6

# Diskussion, Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der Arbeit war es, ein Gesamtsystem bestehend aus Thermalsonden, Elektronik und Benutzer-Software zur Messung von Temperatur- und Wärmeleitfähigkeitsprofilen für den Anwendungsbereich oberflächennaher Messungen zu entwickeln und mit dem System in beispielhaften Anwendungen die Leistungsfähigkeit zu demonstrieren. Das Ergebnis ist ein Messsystem, das sich in typischen Einsatzgebieten in unterschiedlichen Anwendungsgebieten der Geowissenschaften als gute Alternative zu herkömmlichen Thermalmesssystemen erwiesen hat. Die vorher definierten technischen (siehe Kapitel 3) und wissenschaftlichen (Abschnitt IV) Ziele wurden vollständig erfüllt.

technische Forderung	Lösung
leicht transportabel	Gewicht nur 5 kg
robust gegen Wettereinflüsse	wasserfest
großer Temperaturbereich	$-50\text{ °C}$ bis $+60\text{ °C}$
einfache Handhabung	geringer Messaufwand
hohe Auflösung	cm-Bereich, 16 Sensoren untereinander
möglichst hohe Messgenauigkeit	$\leq 0.1\text{ K}$
geringe Materialzerstörung	Sondendurchmesser 10 mm
geringer Wärmefluss in vertikaler Richtung	schlecht wärmeleitendes Material
wenig Verkabelung	nur 1 Kabel
Benutzersoftware	umfassende Software

Tabelle 6.1: Zusammenfassung der Anforderungen an das Messsystem und die Lösungen.

Tabelle 6.1 zeigt, dass das Gerät die technischen Anforderungen erfüllt. Das Endergebnis war ein Messsystem, was in seiner Genauigkeit mindestens so gut ist wie herkömmliche Messgeräte und welches zusätzlich entscheidende Vorteile mit sich bringt. So kann mit jeder der Thermalsonden die Temperatur und auch die Wärmeleitfähigkeit eines Materials gleichzeitig in 16 Tiefen bestimmt werden. Beim Installieren des Gerätes wird das umgebende Material im Vergleich zu anderen Methoden kaum gestört. Die Verfälschungen der Messergebnisse durch die Methode selbst sind so wesentlich geringer als bei herkömmlichen Methoden.

Vor allem bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit bietet die in dieser Arbeit vorgestellte Methode große Vorteile gegenüber üblicherweise genutzten Methoden. Eine Probenentnahme des zu untersuchenden Materials entfällt. Das Material kann direkt in seiner natürlichen Umgebung, und auch über längere Zeiträume hinweg, untersucht werden. Die bestimmten Werte für die Wärmeleitfähigkeiten weisen in der Regel geringere Fehlerunsicherheiten auf als Werte, die mit anderen Verfahren bestimmt wurden. Es gibt zwar kommerzielle Geräte, die eine höhere Messgenauigkeit aufweisen (siehe Kapitel 1.2.2), diese Geräte erlauben jedoch nur Einzelmessungen. Außerdem können mit ihnen keine Profilmessungen und vor allem keine längerfristigen Messungen unter Feldbedingungen durchgeführt werden.

Die wissenschaftlichen Ziele, die zu Beginn der Entwicklung an das System gestellt wurden, konnten ebenfalls erfüllt werden:

- In der Bodenkunde können mit dem neuen Messsystem Temperatur- und Wärmeleitfähigkeitsprofile aufgenommen werden. Es können qualitative Aussagen über den Gehalt und die Variation der Bodenfeuchte gemacht werden.
- Im Bereich der Hydrogeologie konnten Wasserintrusionen detektiert werden. Damit besteht die berechtigte Annahme, dass auch Schadstoffintrusionen entdeckt werden können; zukünftige Tests sollen dies belegen. Außerdem konnte gezeigt werden, dass die Thermalsonden auch in Sondierungsrohren zur Temperaturbestimmung eingesetzt werden können.
- In dem Bereich der Glaziologie konnte längerfristige Temperaturprofile unter extremen Außenbedingungen aufgenommen werden. Die Wärmeleitfähigkeit von Schnee konnte ebenfalls bestimmt werden. Auch unter Laborbedingungen arbeiteten die Thermalsonden zuverlässig und konnten dort unter anderem zur Bestimmung von Eismächtigkeiten eingesetzt werden.
- Im Bereich der Baumaterialien konnten die Wärmeleitfähigkeiten von verschiedenen Gesteinen und anderen Werkstoffen präzise bestimmt werden.

- Auch im Bereich der Weltraumforschung hat sich das in dieser Arbeit vorgestellte Messsystem als geeignet herausgestellt, um mit ihm Messungen, bei denen Weltraumbedingungen (Vakuum, tiefe Temperaturen...) simuliert werden, durchzuführen.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass mit dem neuen Messsystem Temperatur- und Wärmeleitfähigkeitsprofile in verschiedensten Materialien und unter den unterschiedlichsten Randbedingungen durchgeführt werden können. Die Genauigkeit der Messungen liegt dabei bei denen von herkömmlichen Messsystemen und teilweise auch darüber.

## Ausblick

In Zukunft wird die Methode zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit weiter optimiert, um dann auch Wärmeleitfähigkeiten bestimmen zu können, die deutlich unter  $0.1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  liegen. Auch die analytische Methode wird weiterentwickelt werden.

Während der Entwicklung und den durchgeführten Messungen ergaben sich, neben den beschriebenen, weitere mögliche zukünftige Anwendungsgebiete, die hier stichpunktartig angegeben werden, um zu demonstrieren, wieviel Potential für zukünftige Anwendungen noch in dem in dieser Arbeit vorgestellten Messsystem steckt.

## Bodenkunde

- In situ Beobachtung des Eindringens der monatlichen und jährlichen Wärmewelle in Böden.
- Untersuchung des Mikroklimas mit Hilfe von Bodentemperaturen und Bodenfeuchte.

## Glaziologie

- *In situ* Beobachtung des Auftauens zugefrorener Seen unter natürlichen Bedingungen, Ermittlung von Tauraten in Abhängigkeit von der Witterung.
- *In situ* Beobachtung von Gefügeveränderungen in Schneepaketen. Aus langfristigen Beobachtungen lässt sich ableiten, wie schnell Gefügeveränderungen im Schnee unter verschiedenen Witterungsbedingungen ablaufen, und welche Wetterlagen besonders dazu führen, dass sich instabile Schneepackete bilden, die letztendlich zu Lawinenabgängen führen.
- Untersuchung des Einflusses von Kunstschnee auf das Edaphon (Kleinstlebewesen im Boden) und das Bodenklima. Schlüsselparameter für die gezogenen Folgerungen sind neben den Temperaturprofilen in der Schneedecke und dem darunter liegenden Boden die Wärmeleitfähigkeit der Schneedecke.

## Wärmefluss der Erde

- Temperaturmessungen nahe der Oberfläche als *ground truth* (Eichwert) für Messungen der Oberflächentemperatur mit Fernerkundungsmethoden.
- Per Fernerkundung gemessene Daten für die thermische Trägheit (engl. *thermal inertia*, Produkt aus Wärmeleitfähigkeit, Dichte und Wärmekapazität) können durch den lokalen Vergleich mit *in situ* Messungen besser verstanden werden.
- Langzeitbeobachtungen des Temperaturprofils und der Wärmeleitfähigkeit erlauben eine Bestimmung des Oberflächenwärmeflusses.
- Eine vielversprechende regenerative Energie ist die Bodenwärme. Die optimale Auslegung von Wärmepumpen, insbesondere die Geometrie der ausgelegten Rohre, ist nur mit einer guten Kenntnis der typischen Temperaturen in den in Frage kommenden Standorte möglich. Die Bodentemperatur ist in den oberflächennahen Erdschichten starken jahreszeitlichen Unterschieden unterworfen.

## Allgemeine Anwendungen

- Kontrolle des durch exotherme Zersetzungsreaktionen generierten Wärmeflusses in Mülldeponien. Ein übermäßiger Temperaturanstieg ist eine Gefahr für die Schutzfolie am Grund des Deponiekörpers, die das Grundwasser vor dem Eindringen von Schadstoffen schützt.
- Auch in der Vulkanologie könnte die Bestimmung des Wärmeflusses eine wichtige Rolle spielen. Das Eindringen von Magma in oberflächennahe Magmenkammern oder Lavakanäle führt zu kurzfristig stark erhöhten Wärmeflüssen aus tieferen Schichten, die mit Thermalsonden *in situ* und routinemäßig über lange Zeiträume beobachtet werden können. Das heißt, dass sich ein möglicher Vulkanausbruch durch erhöhte Wärmeflüsse an der Oberfläche ankündigen könnte. Bei Kontrolle des Wärmeflusses könnte so ein Frühwarnsystem entwickelt werden.
- Fernerkundungsmethoden erlauben es, vergleichsweise schnell und umfassend große Gebiete bezüglich einiger Bodeneigenschaften (Bodenfeuchte, Bodentemperatur) zu kartieren. Diese Verfahren leiden aber durchweg an der Mehrdeutigkeit der Daten und der mangelnden quantitativen Auswertbarkeit, sofern keine Fixpunkte an der Oberfläche durch *in situ* Verfahren untersucht werden. Dieses Problem wird in vielen Veröffentlichungen zu Fernerkundungsmethoden herausgehoben. Ein Beispiel findet sich unter <http://wwwghcc.msfc.nasa.gov/land/aamu/AMSPaper/text.htm> (aufgerufen am 30.05.2006).

- Ein derzeit favorisiertes Verfahren im Tunnelbau (für U-Bahn, Abwassersysteme, Kabel, Leitungen) verfestigt das auszuhebende lockere Erdreich durch Einleitung von Flüssig-Stickstoff und spritzt dünnflüssigen Beton nach Aushub des Materials an die gefrorenen Wände. Der Tunnel entsteht danach durch Aushärten des Betons. Von essentieller Bedeutung ist dabei eine Kontrolle des Temperaturprofils in der Tunnelwand. Ein Auftauen der gefrorenen Schichten hätte im besten Fall den Einbruch des entstandenen aber noch nicht ausgehärteten Tunnels zur Folge. Verlässliche Temperaturdaten lassen sich nicht gewinnen, indem die Tunnelwand angeschnitten wird, um dann horizontal normale Temperatursensoren einzubringen. Eine alternative Methode könnte sich in der Anwendung der EXTASE-Thermalsonden finden.

Alle hier aufgeführten wissenschaftlichen Ziele sind mit bisher verfügbaren Methoden gar nicht oder nur mit unverhältnismäßigem Aufwand realisierbar. Das EXTASE-Messsystem ist ein probates Mittel, um diese Aufgabengebiete zu bearbeiten.



# Literaturverzeichnis

- Adams, E. und Brown, R., 1983. Metamorphism of dry snow as a result of temperature gradient and vapor density differences. *Annals of Glaciology* 4.
- Banaszkiewicz, M., Spohn, K. S. T., Kargl, G. und Kömle, N., 1997. A new method for the determination of thermal conductivity and thermal diffusivity from linear heat source. *Review of Scientific Instrumentation*, **68(11)**, 4184 – 4190.
- Beardsmore, G. R. und Cull, J., 2001. *Crustal heat flow - A guide to measurement and modelling*. Cambridge University Press, New York.
- Berckhemer, H., 2005. *Grundlagen der Geophysik*. Johann Wolfgang Goethe Universität Frankfurt, Institut für Meteorologie und Geophysik, Frankfurt.
- Blindow, N. und Pipatpan, S., 2004. BMBF-Verbundprojekt „Seegangsmessung mit Radar“, SchlusSbericht, Förderkennzeichen 03KIS034. Technical report, Institut für Geophysik der Westfälischen Wilhelms-Universität, Münster.
- Busch, P. und Kuttler, W., 1990. *Klimatologie*. Paul Busch und Heinz Heineberg, Verlag Ferdinand Schöningh, Paderborn.
- Fowler, C., 2004. *The Solid Earth: An introduction to global geophysics*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Gregorczyk, W., Jancewicz, B. und Marczewski, W., 1999. Titanium thin film thermometric sensors on multilayered Kapton foil substrate for the experiment MUPUS of the ESA Cometary Mission ROSETTA. *IMAPS proceedings*.
- Hillel, D., 1998. *Environmental Soil Physics*. Academic Press, San Diego.
- Höltling, B., 1996. *Hydrogeologie*, Ausgabe 5. Auflage. Enke Verlag, Stuttgart.
- Joos, G., Bartels, J. und Bruggenscate, P. T., 1952. *Landolt-Börnstein: Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.

- Kittel, C. und Krömer, H., 1984. *Physik der Wärme*, Ausgabe 2. Auflage. R. Oldenbourg, München Wien.
- Marczewski, W. *et al.*, 2004. Prelaunch performance evaluation of the cometary experiment MUPUS-TP. *Journal of geophysical research*, **109**.
- Nadalini, R., Knapmeyer, M. und Schroerer, K., 25.-29.04.2005. Inversion of thermal layering data through genetic algorithms-assisted numerical modelling. In *Geophys. Res. Abstr.*, Ausgabe 7, Vienna, Austria. EGU General Assembly.
- Nicolaus, M., Haas, C. und Bareiss, J., 2003. Observations of superimposed ice formation at melt-onset on fast ice on Kongsfjorden, Svalbard. *Physics and chemistry of the earth*, **28**, 1241 – 1248.
- Petrenko, V. F. und Whitworth, R. W., 1999. *Physics of ice*. Oxford University Press, New York.
- Schroeder, D., 1992. *Bodenkunde in Stichworten*. FERDINAND HIRT, Berlin, Stuttgart.
- Seiferlin, K., 1990. Die Wärmeleitfähigkeit synthetischer poröser Eisproben - Messungen und einfache Modelle. Diplomarbeit, Institut für Planetologie, Westfälische Wilhelms-Universität, Münster.
- Seiferlin, K., 1995. *Die Wärmeleitfähigkeit von porösem Eis und von Mineralstaubschüttungen: Bedeutung für Kometensimulationsexperimente und für die thermische Entwicklung von Kometen*. Dissertation, Institut für Planetologie, Westfälische Wilhelms-Universität.
- Seiferlin, K., Kömle, N., Kargl, G. und Spohn, T., 1996. Linear heat source measurements of the thermal conductivity of porous H<sub>2</sub>O-ice, CO<sub>2</sub>-ice and mineral powders under space conditions. *Planetary Space Science*, **44**, 691 – 704.
- Stöcker, H., 1994. *Taschenbuch der Physik*. Harri Deutsch, Frankfurt am Main, Thun.
- Stoffel, A., 1992. *Finite Elemente und Wärmeleitung*. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim.
- Turcotte, D. L. und Schubert, G., 2002. *Geodynamics*. Cambridge University Press, New York.
- Usovich, B., 2002. The universal model of mass and energy transfer in a porous medium. *17th WCSS, Bangkok, symposium no 4*, **paper 275**.
- Wohlrab, B., Ernstberger, H., Meuser, A. und Sokollek, V., 1992. *Landschaftswasserhaushalt*. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin.



# Abbildungsverzeichnis

1.1	Typische Messung mit mehreren Temperatursensoren in der Bodenkunde. . .	13
1.2	Typisches Platin-Widerstandsthermometer PT100 der Firma Ahlborn. . . .	16
2.1	Idealisierte zeitliche Variation der Temperatur im Boden für verschiedene Tiefen. . . . .	27
3.1	Aufbau des EXTASE-Messsystems. . . . .	39
3.2	Schemazeichnung einer Thermalsonde mit genauen Abmessungen. . . . .	41
3.3	Beispiel einer fertigen Thermalsonde. . . . .	42
3.4	PCT-50 Stecker für die Verbindung zur Elektronik-Box. . . . .	43
3.5	Schaltbild und Messprinzip der EXTASE-Sensoren. . . . .	44
3.6	Schaltbild und Messprinzip der EXTASE-Sensoren. . . . .	45
3.7	<i>Sandwich</i> -Struktur der drei Kapton-Folien in der Glasfaser-Röhre. . . . .	47
3.8	Schemazeichnung der aufgedampften Metallschichten auf der mittleren Kapton-Folie. . . . .	48
3.9	Schematische Ansicht des Verfahrens zum Anbringen der Folie an die Innenseite der Glasfaser-Röhre. . . . .	48
3.10	Kammer für die Kalibrationsmessungen. . . . .	51
3.11	Bestimmung der gesuchten Parameter $R_0$ und $s$ aus den gemessenen Daten. . .	52
3.12	Abbildung aller 16 Sensoren zur Kontrolle der Qualität der Kalibration. . .	52
3.13	Elektronik . . . . .	55

3.14	Elektronik-Box mit sechs Akkus zur Stromversorgung. . . . .	56
3.15	Empfänger-Box am Rechner für die Funkfernverbindung zur Elektronik. . .	56
3.16	Organisation der Software. . . . .	62
3.17	Startschaltfläche der Anwendersoftware. . . . .	64
3.18	Benutzeroberfläche des Programms RS Agent. . . . .	64
3.19	<i>Workspace</i> Screenshot. . . . .	65
3.20	Screenshot des Sonden-Editors und der Funktion „Sonden assoziieren“ . . .	66
3.21	Screenshot des <i>Command Creator</i> . . . . .	66
3.22	Screenshot des <i>Download Managers</i> . . . . .	67
3.23	Tool zum Überprüfen des Speicher-Status. . . . .	68
3.24	Screenshot der Funktion zum Umrechnen der Rohdaten und zur Darstellung der Daten. . . . .	68
3.25	Beispiel für die Darstellung von Daten mit der Liniengraphen-Option. . . .	69
3.26	Beispiel für die Darstellung von Daten mit der Farbplot-Option. . . . .	69
4.1	Zeitliche Variation der Temperatur in einem Waldboden für die 16 Sensoren der Thermalsonde. . . . .	76
4.2	Maxima und Amplituden der Temperatur in 16 Tiefen, aufgenommen in einem Waldboden. . . . .	77
4.3	Logarithmische Abbildung der Werte aus Abbildung 4.2. . . . .	77
4.4	Zeitliche Variation der Temperatur in einem Waldboden für 16 verschiedene Tiefen für einen Zeitraum von etwa zwei Tagen. . . . .	78
4.5	Maxima und Amplituden der Temperatur in 16 Tiefen, aufgenommen in einem Waldboden für einen Zeitraum von etwa zwei Tagen. . . . .	78
4.6	Zeitliche Variation der Temperatur in einem Ackerboden für 16 verschiedene Tiefen. . . . .	79
4.7	Maxima und Amplituden der Temperatur in 16 Tiefen, aufgenommen in einem Ackerboden. . . . .	79

4.8	Messaufbau der Messungen in Lublin. . . . .	81
4.9	Differenz der gemessenen Temperaturen der beiden EXTASE-Sonden in Abhängigkeit von Zeit und Tiefe. . . . .	81
4.10	Vergleich der gemessenen Temperaturen der EXTASE-Thermalsonde im Boden ohne Grasschicht mit denen der PT100. . . . .	83
4.11	Vergleich der gemessenen Temperaturen der EXTASE-Thermalsonde im Boden mit der Grasschicht mit denen der PT100. . . . .	84
4.12	Nachweis der Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Bodenfeuchte in verschiedenen Tiefen. . . . .	86
4.13	Nachweis der Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Bodenfeuchte in verschiedenen Tiefen. . . . .	87
4.14	Karte des Messgebietes auf Spitzbergen . . . . .	90
4.15	Messstation auf Spitzbergen. . . . .	91
4.16	Installation der Temperatursensoren. . . . .	92
4.17	Vertikale Schnee- und Eis-Temperaturprofile. . . . .	95
4.18	Fotos der Umgebung des Messgebietes während der Dauer der Messkampagne. . . . .	97
4.19	Positionen der Sonden während der Dauer der Messkampagne auf Spitzbergen. . . . .	99
4.20	Temperaturen, gemessen mit der EXTASE-Thermalsonde vom 20. bis 21. Mai. . . . .	100
4.21	Temperaturen, gemessen mit der EXTASE-Thermalsonde vom 23. bis 25. Mai. . . . .	101
4.22	Temperaturen, gemessen mit der EXTASE-Thermalsonde vom 27. bis 28. Mai. . . . .	101
4.23	Temperaturen, gemessen mit der EXTASE-Sonde vom 01. bis 02. Juni. . . . .	102
4.24	Beispiele für die Darstellung des zeitlichen Gradienten der Temperaturdaten. . . . .	103
4.25	Darstellung des vertikalen Temperaturgradienten der Messdaten vom 23./25. Mai. . . . .	104
4.26	Beispiele für die Darstellung des zeitlichen Gradienten der Temperaturdaten. . . . .	105

4.27	Darstellung der Differenzen zwischen den Messwerten der EXTASE-Sonde und den PT1000 vom 20. bis 21. Mai. . . . .	106
4.28	Beispiele für die Darstellung der Differenzen zwischen den Messwerten der EXTASE-Sonde und den PT1000. . . . .	107
4.29	Messaufbau im Eislabor des Instituts für Geophysik der Universität Münster.	111
4.30	Farbkodierte Darstellung der mit der EXTASE-Thermalsonde gemessenen Temperaturen von Versuch 1 in Abhängigkeit von Zeit und Tiefe. . . . .	113
4.31	Beispiel für drei Tiefenprofile zum Ablesen der Eismächtigkeit. . . . .	113
4.32	Vergleich der Eismächtigkeiten in Versuch 1. . . . .	114
4.33	Farbkodierte Darstellung der gemessenen Temperaturen von Versuch 2 in Abhängigkeit von Zeit und Tiefe. . . . .	115
4.34	Vergleich der Eisdicken beim Versuch mit einem Salzgehalt von 1%. . . . .	115
4.35	Farbkodierte Darstellung der gemessenen Temperaturen von Versuch 2 in Abhängigkeit von Zeit und Tiefe. . . . .	116
4.36	Vergleich der Eisdicken beim Versuch mit einem Salzgehalt von 2%. . . . .	117
4.37	Teilausschnitt der mit der EXTASE-Thermalsonde gemessenen Temperaturen bei Versuch 4. . . . .	118
4.38	Temperatur-Tiefenprofile zu zwei Zeitpunkten mit und ohne Schneeauflage.	118
4.39	Illustration des STEFAN-Problems. . . . .	120
4.40	Vergleich der Temperaturen von drei Sensoren und der PT100 der Thermalsonden innerhalb und außerhalb der Rammkernsonde. . . . .	124
4.41	Messaufbau mit den beiden Thermalsonden. . . . .	125
4.42	Vergleich der gemessenen Temperaturen der beiden Thermalsonden innerhalb und außerhalb der Rammkernsonde. . . . .	126
4.43	Vergleich der gemessenen Temperaturen der Thermalsonde und der PT100 .	127
4.44	Temperatur des Bodenprofils. . . . .	128
4.45	Temperaturprofil der 16 Sensoren zum Zeitpunkt der Wasserintrusion . . . .	128

5.1	Beispiel für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Teflon mit der <i>Line heat source</i> -Methode. . . . .	132
5.2	Beispiel für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Wasser mit der <i>Line heat source</i> -Methode. . . . .	133
5.3	Funktionsschema der Methode zur Auswertung der Wärmeleitfähigkeitsmessungen mit dem Programm FEMLAB <sup>©</sup> . . . . .	136
5.4	Beispiel für die Darstellung des Fortschritts der Modellqualität. . . . .	138
5.5	Beispiel für die Entwicklung der besten Anpassung an die gemessenen Daten.	139
5.6	Beispiel für die Darstellung des jeweils berechneten FEMLAB <sup>©</sup> -Modells. . . . .	139
5.7	Abhängigkeit der Heizkurve von der Sensorgröße. . . . .	142
5.8	Abhängigkeit der Heizkurve von der Heizleistung. . . . .	142
5.9	Abhängigkeit der Heizkurve von der Heizdauer. . . . .	143
5.10	. . . . .	144
5.11	Farbkodierte Darstellung der Temperaturen der 16 Sensoren in Abhängigkeit von der Zeit und der Tiefe. . . . .	145
5.12	Vergleich von gemessenen und modellierten Daten von Sensor 15. . . . .	146
5.13	Vergleich von gemessenen und modellierten Daten von Sensor 5. . . . .	147
5.14	Vergleich von gemessenen und modellierten Daten von Sensor 15. . . . .	148
5.15	Messaufbau mit der Probe mit Thermalsonde und Feuchtesensoren. . . . .	149
5.16	Temperaturverlauf des beheizten Sensors für Bentonit-Pulver mit zwei verschiedenen Feuchtigkeiten. . . . .	150
5.17	Vergleich von gemessenen und modellierten Daten für Bentonit-Pulver mit einer Feuchtigkeit von 10.8%. . . . .	151
5.18	Vergleich von gemessenen und modellierten Daten für Bentonit-Pulver mit einer Feuchtigkeit von 5.7%. . . . .	151
5.19	Temperaturverlauf des beheizten Sensors für Bentonit-Pulver mit zwei verschiedenen Feuchtigkeiten. . . . .	152
5.20	Vergleich von gemessenen und modellierten Daten für Bentonit-Pulver mit einer Feuchtigkeit von 7.7%. . . . .	153

---

5.21	Vergleich von gemessenen und modellierten Daten für Bentonit-Pulver mit einer Feuchtigkeit von (5.8 – 6.4)% . . . . .	153
5.22	Versuchsaufbau mit Proben unterschiedlicher Porosität. . . . .	154
5.23	Vergleich der Temperaturen des beheizten Sensors bei Proben mit kleinen und großen Kugeln im Vakuum. . . . .	155
5.24	Vergleich der Temperaturen des beheizten Sensors bei Proben mit kleinen und großen Kugeln in Luft. . . . .	156
5.25	Vergleich der Temperaturen des beheizten Sensors bei der Probe mit kleinerer Porosität in Luft und im Vakuum. . . . .	157
5.26	Vergleich der Temperaturen des beheizten Sensors bei der Probe mit größerer Porosität in Luft und im Vakuum. . . . .	158
5.27	Messaufbau zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Gesteinen. . . . .	159
5.28	Vergleich des Heizverhaltens der vier Gesteine. . . . .	160
5.29	Vergleich von gemessenen und modellierten Daten bei Granit. . . . .	161
5.30	Vergleich von gemessenen und modellierten Daten bei Sandstein. . . . .	162
5.31	Vergleich von gemessenen und modellierten Daten bei Marmor. . . . .	163
5.32	Vergleich von gemessenen und modellierten Daten bei Teflon. . . . .	164
5.33	Vergleich der Temperaturverläufe eines Sensors im Teflon-Block und im Glasschaum. . . . .	165
5.34	Vergleich zwischen gemessenen und modellierten Daten von Glasschaum mit der FEMLAB <sup>©</sup> -Methode. . . . .	166
5.35	Vergleich der Temperaturverläufe von Sensor 13 bei drei verschiedenen hohen Heizleistungen. . . . .	167
5.36	Vergleich zwischen gemessenen und modellierten Daten von Teflon bei drei verschiedenen Heizleistungen mit der FEMLAB <sup>©</sup> -Methode. . . . .	168
5.37	Messaufbau für die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit von Sand. . . . .	169
5.38	Vergleich von gemessenen und modellierten Daten bei Sand. . . . .	170

# Tabellenverzeichnis

2.1	Durchschnittliche thermische Eigenschaften von Schnee und Böden. . . . .	25
3.1	Kalibrationsparameter der Thermalsonde TP01. . . . .	53
3.2	Richtwerte für die Anzeige des Lichtsensors. . . . .	57
4.1	Statistik der Differenzen zwischen Thermalsonde und PT100. . . . .	85
4.2	Positionen der Sensoren der Thermalsonde während der Messkampagne. . .	98
4.3	Statistik der Differenzen zwischen Thermalsonde und PT1000. . . . .	108
4.4	Parameter zur Berechnung von $y_m$ . . . . .	122
4.5	Vergleich der mechanisch gemessenen und berechneten Eismächtigkeiten. . .	122
5.1	Feuchtigkeit und Umgebungstemperatur zu Beginn der Messungen mit Bentonit-Granulat. . . . .	152
5.2	Eingesetzte Parameter für die Modellierung mit FEMLAB <sup>©</sup> für Teflon bei drei verschiedenen Heizleistungen. . . . .	167
6.1	Zusammenfassung der Anforderungen an das Messsystem und die Lösungen.	173
2	Thermische Parameter von Materialien, die in dieser Arbeit verwendet wurden.	199

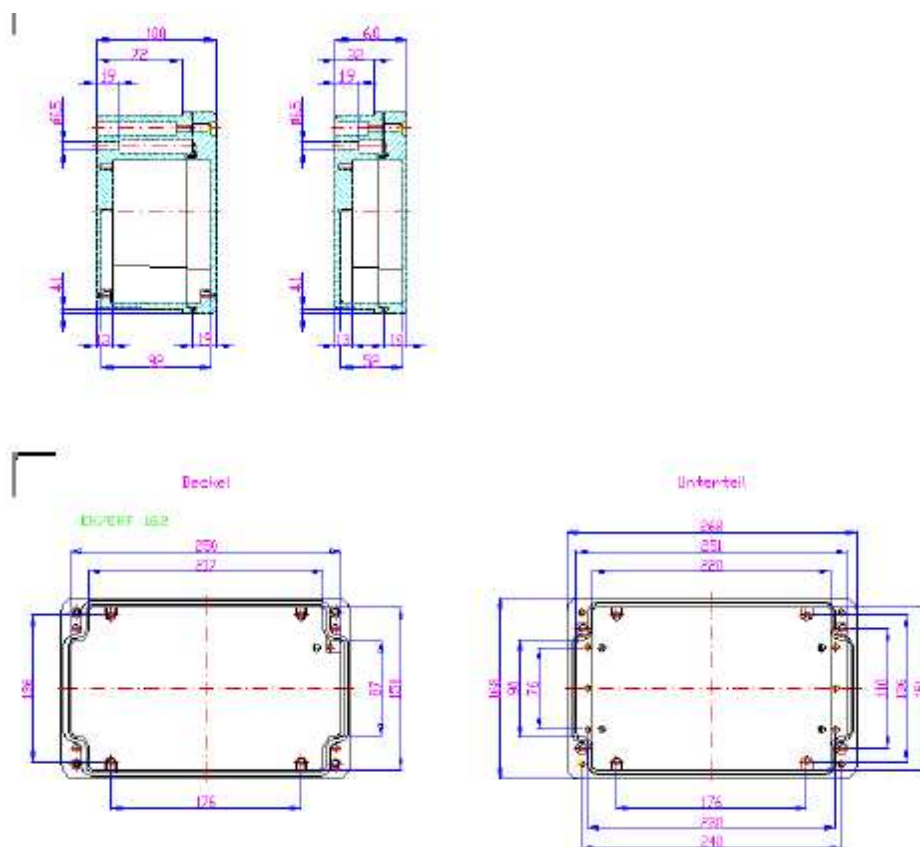




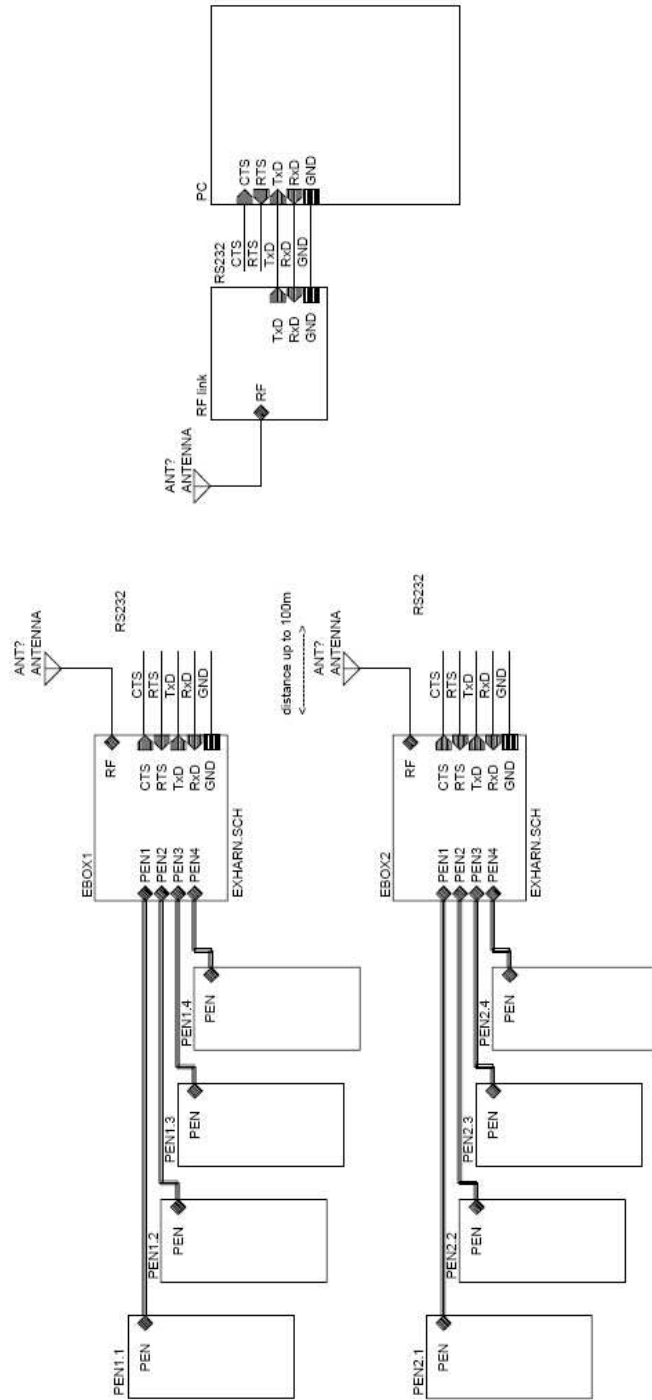
# Schaltpläne und Skizzen

In diesem Anhang werden alle relevanten Bau- und Schaltpläne der EXTASE-Elektronik zusammengefasst, weitere Details sind in den zum Gerät gehörenden Handbüchern (befinden sich gerade in der Erstellung) zu finden.

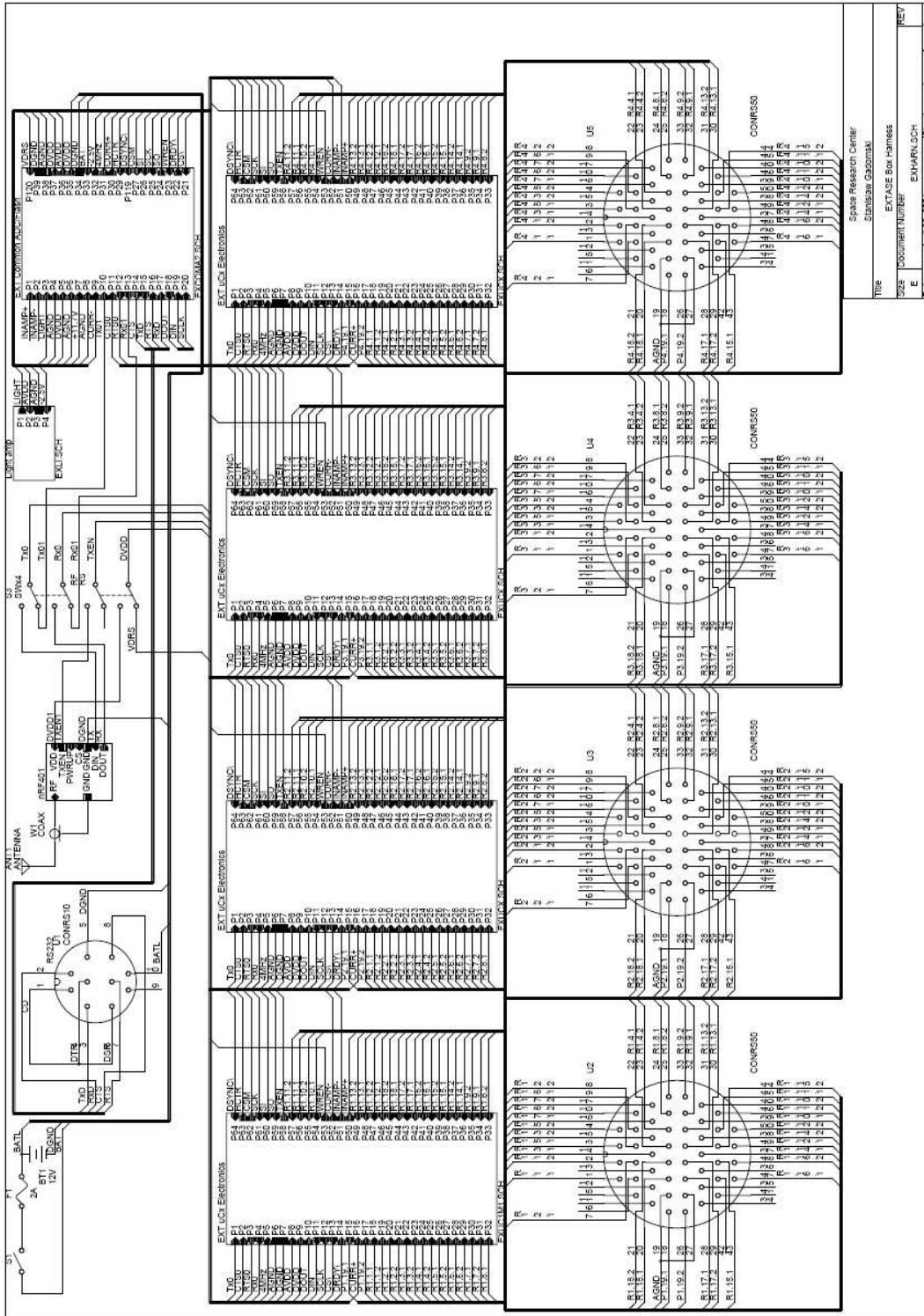
## Gehäuse



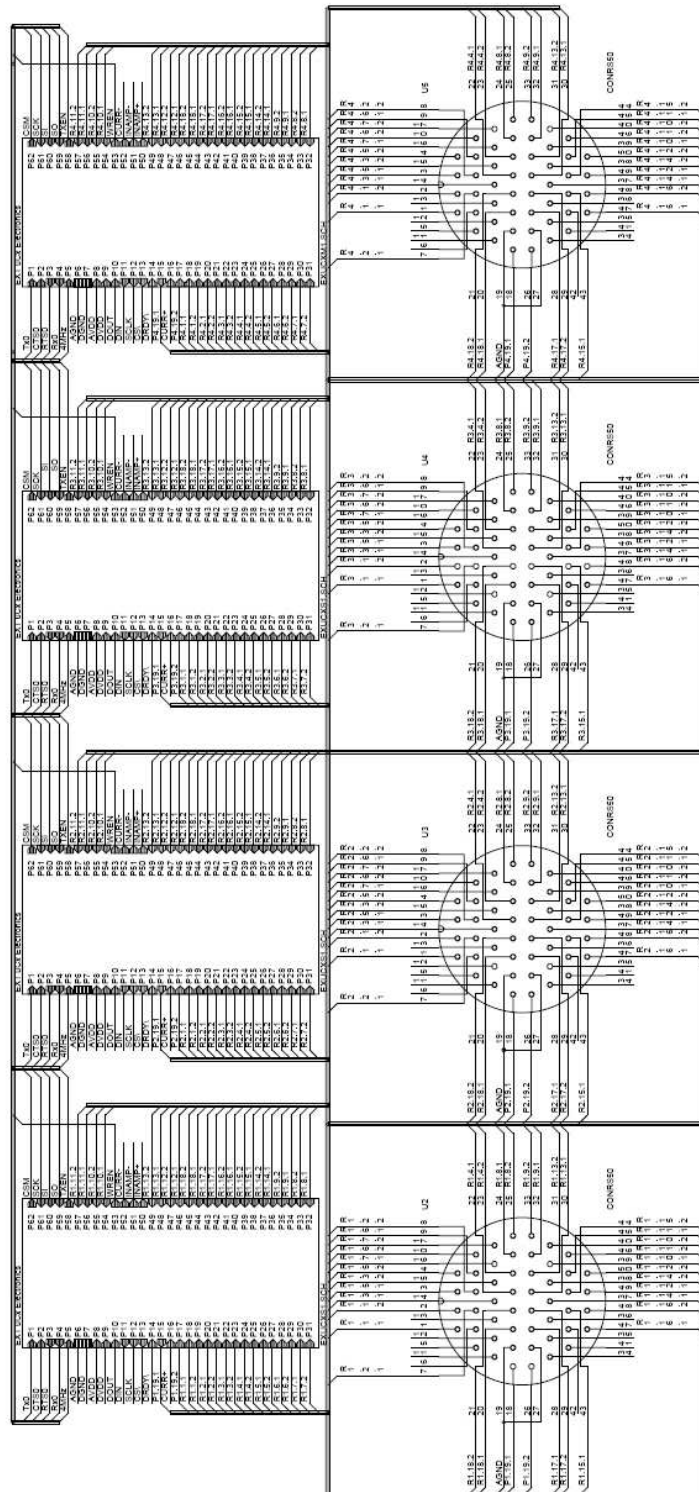
general block scheme



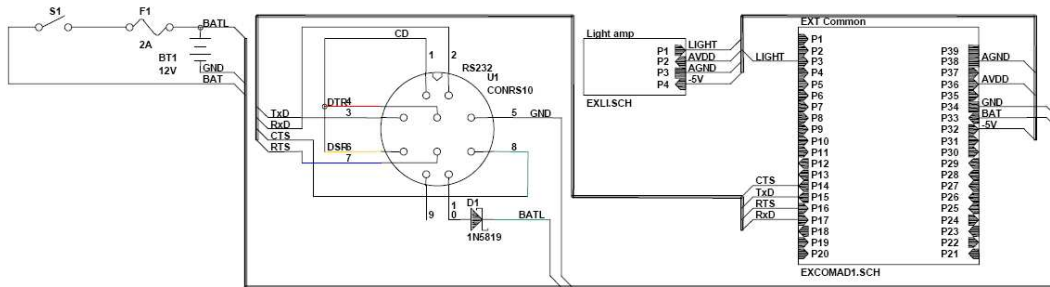
all harness and the block diagram



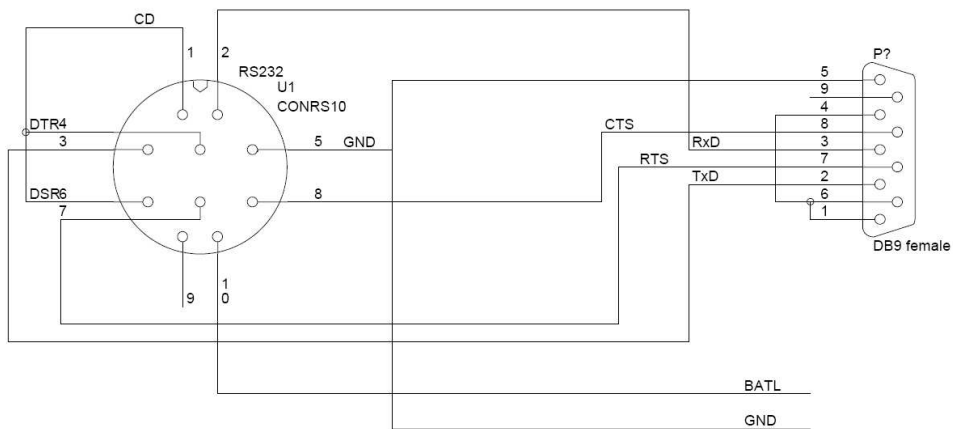
harness 1, four independent cables



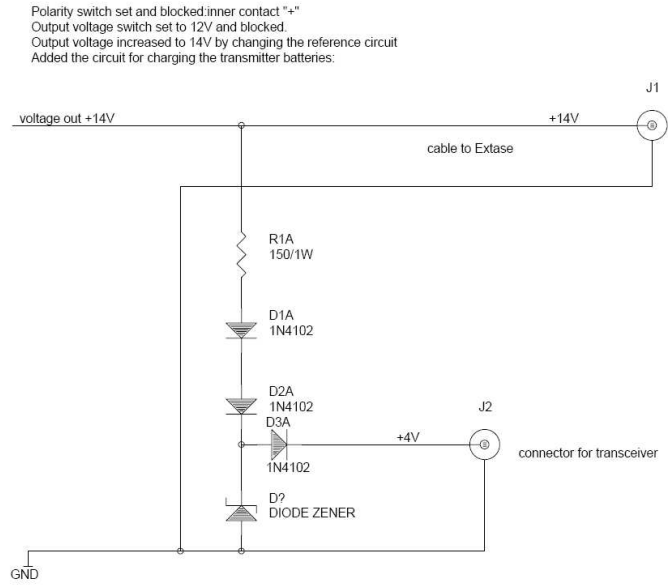
### harness 2 RS and power supply cables



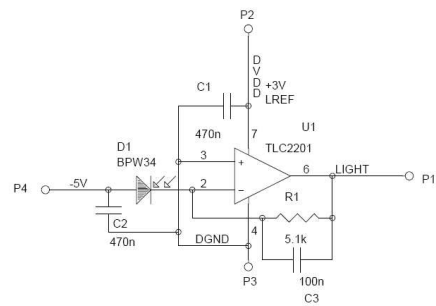
### RS232 and battery charger cable



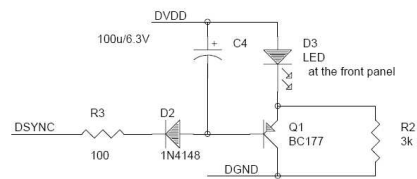
### charger modifications



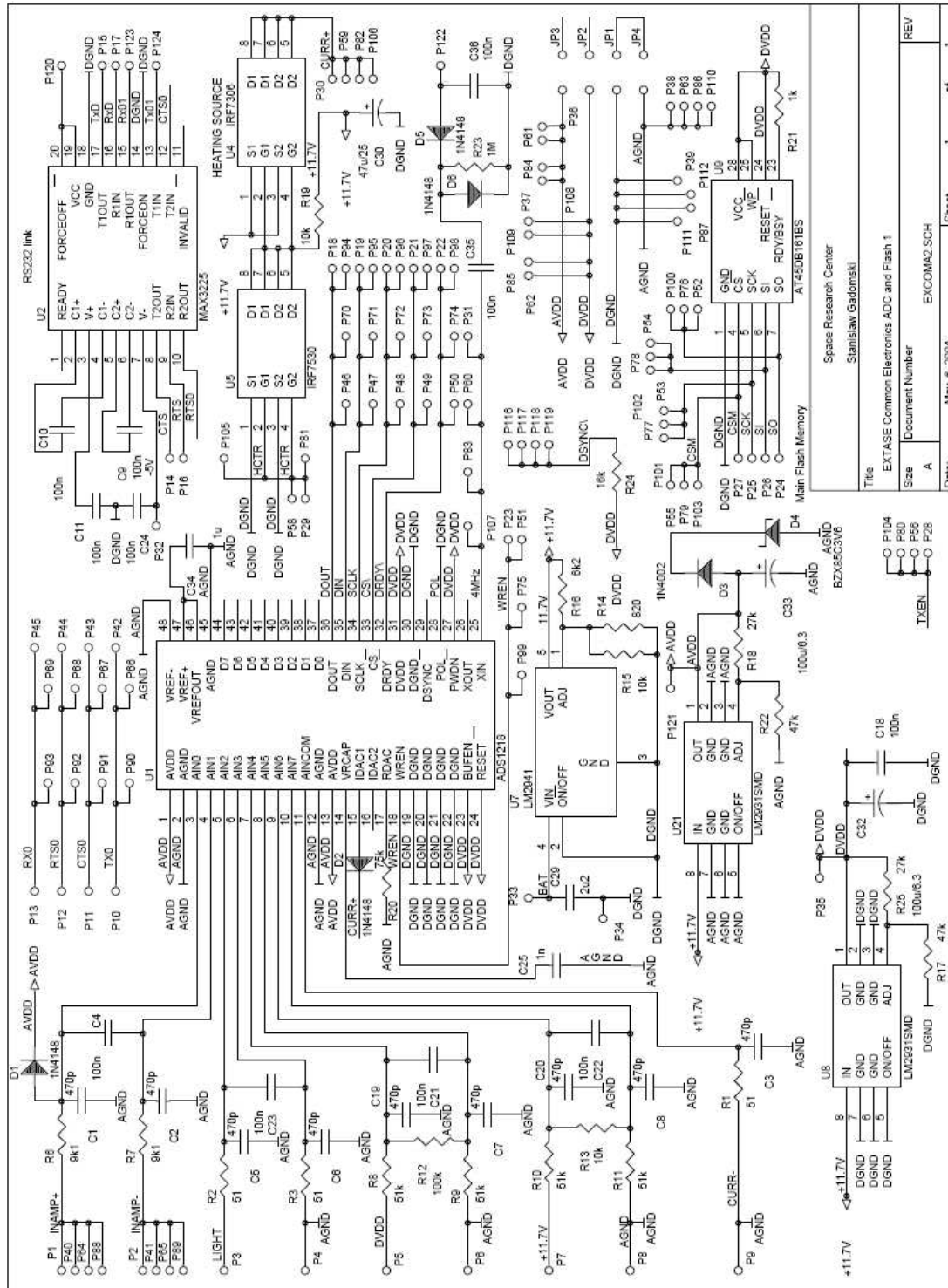
### Light sensor



Added status signalisation circuit  
 Mounted only in plastic enclosure vesion

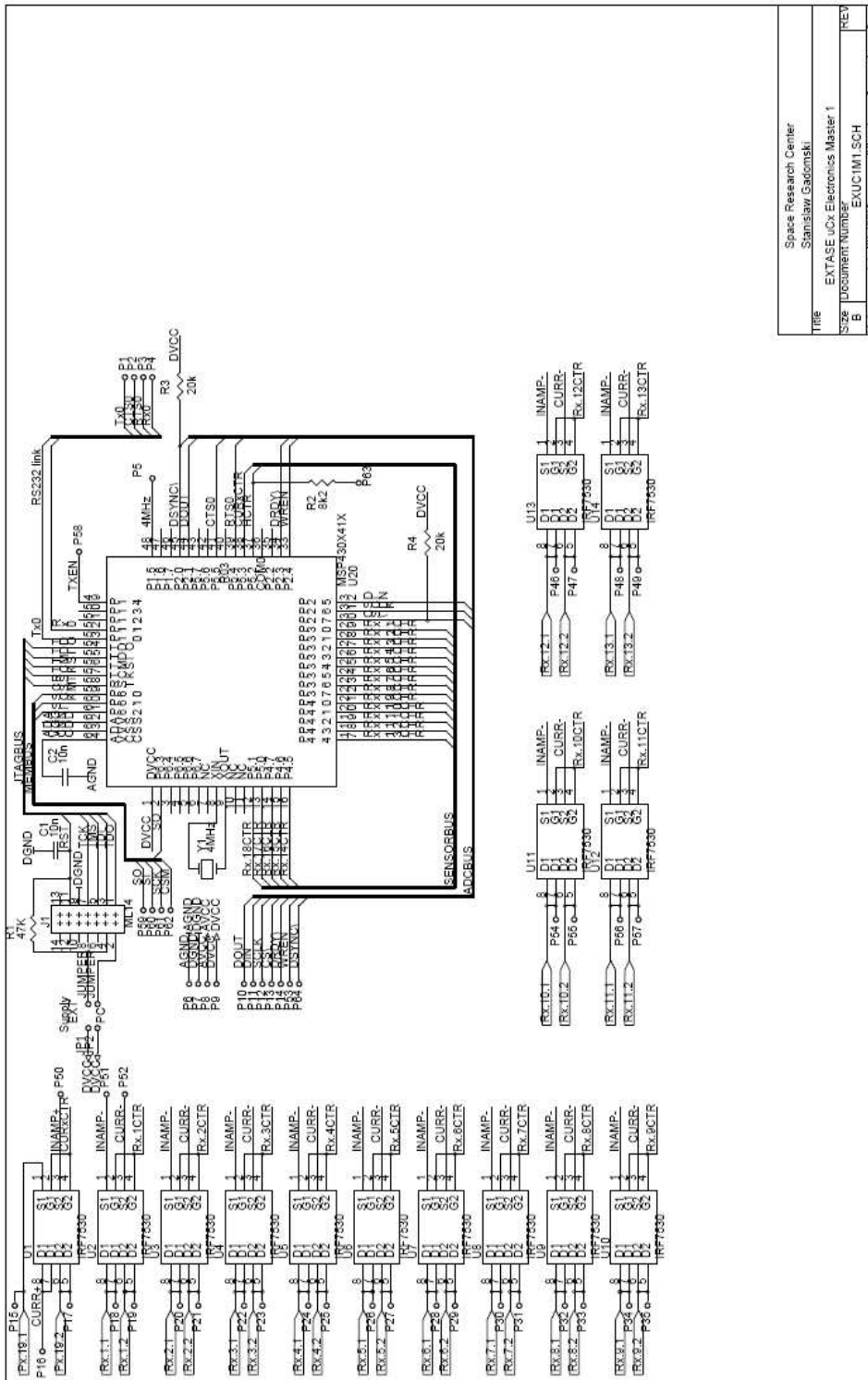


analog electronics; power supply, transceiver, RS232, flash memory, heating control



Title		Space Research Center
EXTASE Common Electronics ADC and Flash 1		Stanislaw Gadowski
Size	Document Number	EXCOMA2.SCH
REV		
A		
Date:	May 6, 2004	Sheet 1 of 1

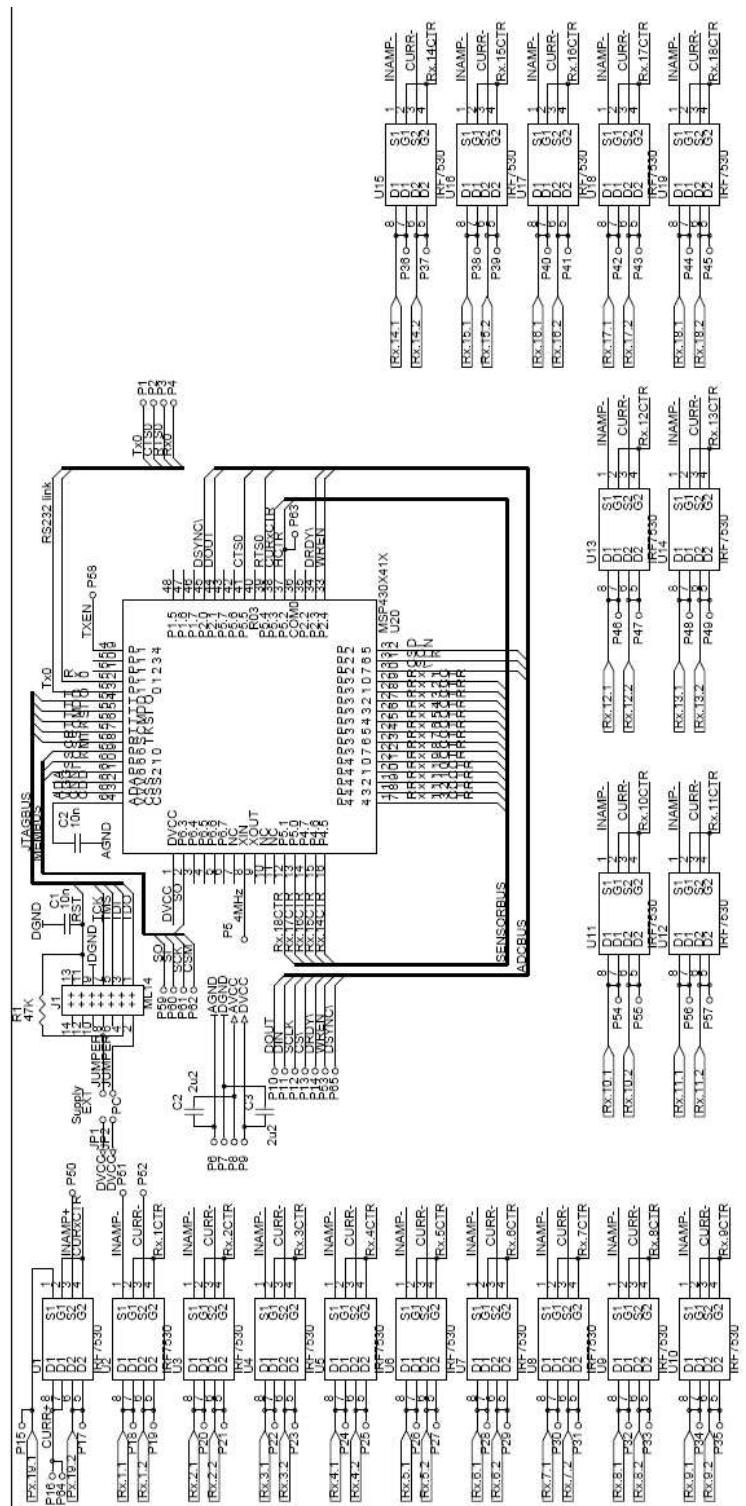
Microcontroller and sensor switches master board 1



Title	Space Research Center Stanislaw Gadowski
Size	EXTASE VCK Electronics Master 1
Doc. Number	EXUCTM1.SCH
DATE	JUL 30, 2004
SHEET	1 of 1



Microcontroller and sensor switches slave board 2-4





# Literaturwerte

Material	$k$ (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
Eis	2.1
Wasser	0.6
Luft	0.025
Schnee, allg.	0.0247-2.2 (Eis)
Teflon	0.25
Boden, allg.	0.15-4.0
Sand, trocken	0.35
Sand, gesättigt	2.7
Sandstein	2.0
Glasschaum	0.045
Granit	2.9
Marmor	2.8
Ytong	0.09
Polystyrol	0.015
Titan	21.9
epoxy glass fibre	0.23
Glisseal	0.14
Kapton	0.12

Tabelle 2: Thermische Parameter von Materialien, die in dieser Arbeit verwendet wurden.

Quellen: Joos *et al.* (1952), [http://www.hukseflux.com/thermal/\\$%20conductivity/thermal.htm](http://www.hukseflux.com/thermal/$%20conductivity/thermal.htm), abgerufen am: 25.05.06, <http://www.goodfellow.com/csp/active/gfHome.csp>, abgerufen am 25.05.06, <http://www.dupont.com/kapton/general/H-38492-2.pdf>, abgerufen am 20.05.06 und [www.wikipedia.de](http://www.wikipedia.de)



# Danksagung

Es gibt viele Leute, die in irgendeiner Art und Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben; bei einigen möchte ich mich besonders bedanken:

- Ich danke Herrn Prof. Dr. T. Spohn für die Übertragung dieser Arbeit und die Betreuung bei der Durchführung.
- Ich danke Herrn Prof. Dr. E. K. Jeßberger für die Begutachtung der Arbeit.
- W. Marczewski, M. Banaszekiewicz und S. Gadowski sowie allen anderen beteiligten Mitarbeitern am Space Research Centre in Warschau danke ich für die Fertigung und die Unterstützung während der gesamten Entwicklungsphase des Messsystems.
- Ich danke Dipl. Phys. Kai Multhaupt für die Erstellung der Benutzersoftware und seine Kreativität und Schnelligkeit bei der Umsetzung meiner Änderungswünsche.
- Der Arbeitsgruppe Planetenphysik bzw. „Teilchen“physik danke ich erstmal dafür, dass wir auch trotz Sparbesetzung eine gut funktionierende Arbeitsgruppe waren. Zusätzlicher Dank gilt euch für die Korrektur meiner Arbeit, die angenehme Arbeitsatmosphäre, die Dartturniere, CSI und OTIS, die Pressemitteilungen, die Mini-Betriebsausflüge und die unzähligen Gelegenheiten, um Kuchenrezepte zu testen.
- Ein ganz besonderer Dank gilt Markus Schröder, Melanie Köhler und Christian Klein-Bösing für das intensive Korrekturlesen der Arbeit in unglaublich kurzer Zeit.
- Bei den Mitarbeitern des Instituts für Weltraumforschung in Graz sowie den Mitarbeitern vom Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven möchte ich mich für ihre Zusammenarbeit und Unterstützung bei Messungen, ihre Gastfreundschaft und sonstige Hilfe bedanken.
- Ich danke Dr. Norbert Blindow für die Möglichkeit der Messungen im Eislabor und dem Wärmeschrank, für die ständige Diskussionsbereitschaft, die stete Gastfreundschaft in der Geophysik (das gilt natürlich auch für alle anderen Mitarbeiter) und ganz besonders für die Korrekturen.

- Nochmal Danke an Melanie für die Rettung in später Stunde, als mein Rechner zu guter letzt doch nicht mehr so wollte wie ich, für's Eisessen und die kurzen Pausen, die doch immer länger wurden.
- Dank auch an den Rest des Instituts für Planetologie für die gute Arbeitsatmosphäre und für das Asyl beim Gang in die Mensa.
- Großer Dank gebührt Gea für die Bewältigung der anfallenden Bürokratie für das Projekt, besonders für die unzähligen mails an und von Frau F. . Ich werde vermutlich nie dahinter kommen, was an positiven Kontobeständen so negativ ist. Noch viel mehr Dank gilt Dir dafür, dass du immer ein offenes Ohr für Probleme jeglicher Art und immer gute Laune hast.
- Ich danke den beiden Martins: M. Leweling für seine Funktion als mein persönlicher Administrator und für die cineastischen Diskussionen...und M. Knapmeyer für seine Hilfe bei der Automatisierung der FEMLAB<sup>©</sup>-Modelle.
- Alex: Muchas gracias para la asistencia con el ordenador, para acampar en el cuarto de estar, para la asistencia con los deberes espanol etcetera.
- Ein Dank auch all denen, die die Zeit neben der Arbeit so schön gemacht haben: Markus, Marcus, Christian K.-B., Christian B., Melanie K., Melanie H., Alex, Maisha, dem STV und BSV, die vor allem in der Schlussphase der Arbeit meine physischen und geistigen Ausfälle so gelassen ertragen haben.
- Ein ganz großer Dank geht an Markus fürs Aufbauen und Anspornen, Gespräche bis tief in die Nacht über wirklich alles, vom Korrekturlesen bis zur letzten Minute mal ganz zu schweigen. Danke für Kino, Konzerte, ca. 1500 Liter gemeinsame koffeinhaltige Kaltgetränke vorm Colaautomaten, 500 bemalte und noch nicht bemalte Minis, 150 Folgen griechischer Mythologie...und ich wollte schon immer dieses Zitat anbringen: „We will always have Paris!“
- Ich danke den zahllosen Studenten, die mich mit immer neuen interessanten Fragen erheitert haben; so weiß ich jetzt endlich, dass sich der 2. Stock über dem 1. befindet.
- Ein riesiges Dankeschön gilt meinen Eltern, die nicht nur durch ihre jahrelange finanzielle Unterstützung dazu beigetragen haben, dass ich diese Arbeit schreiben konnte. Abgesehen davon danke ich für euer Verständnis, eure stete „Gastfreundschaft“, für die Regeneration meines vom der Mensa geschädigten Magens und die vielen anderen Dinge, die ich gar nicht alle aufzählen kann.

# Lebenslauf

## Persönliche Daten

Name	Kathrin Schröer
Geburtsort	Lippstadt
Geburtsdatum	11. März 1976
Staatsangehörigkeit:	deutsch

## Schulbildung

1982 – 1986	Wiese-Grundschule Soest
1986 – 1995	Aldegrevier-Gymnasium Soest
13.06.1995	Abitur

## Studium

01.09.1995	Beginn des Geophysikstudiums an der Universität Münster
06.04.1998	Vordiplom Geophysik
10.01.2001	Diplom Geophysik
seit 01.02.2001	Doktorandin bei Prof. Dr. T. Spohn

## Berufliche Tätigkeit

01.04.1998 – 30.09.1998	studentische Hilfskraft am Institut für Geophysik der Universität Münster
01.09.2000 – 31.10.2000	studentische Hilfskraft am Institut für Geophysik der Universität Münster
01.02.2001 – 31.07.2006	wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Planetologie der Universität Münster