

---

# Diplomarbeit

zum Erwerb des akademischen Grades Diplomingenieur  
der Studienrichtung Bauingenieurwissenschaften

von

**Andreas Kolarik**

eingereicht am

Institut für Bodenmechanik und Grundbau  
der Technischen Universität Graz

Vorstand: O. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stephan Semprich

Thema der Diplomarbeit

## **Verfahren zur Messung des Wärmeleitfähigkeitsbeiwertes von Bodenproben, vergleichende Messungen und numerische Simulation der Wärmeströmung**

Begutachter:

O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stephan Semprich

Betreuer:

Oberrat Dipl.-Ing. Otto Leibniz  
Ao.Univ.-Prof.i.R. DI Dr. Enrico Eustacchio

/

**DIPLOMARBEIT-AUSGABEPROTOKOLL**  
an der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften der TU Graz

KANDIDAT: Andreas KOLARIK (Name)	8835209 / F 610 (Mat.Nr.)/(Studienrichtung)
 (Unterschrift)	
THEMA der Diplomarbeit:  <b>Verfahren zur Messung des Wärmeleitfähigkeitsbeiwertes von Bodenproben, vergleichende Messungen und numerische Simulation der Wärmeströmung</b>  ZIELSETZUNG (stichwortartig): <ul style="list-style-type: none"> <li>- Literatursuche und -studium</li> <li>- Grundlagen der Wärmeleitung</li> <li>- Zusammenstellung unterschiedlicher Messmethoden</li> <li>- Erläuterung der Messprinzipien der unterschiedlichen Messmethoden</li> <li>- Durchführung von vergleichenden Messungen mit dem Plattengerät und der Halbraumsonde an 2 verschiedenen Materialien (Thermosand und UK4) mit jeweils 2 Trockendichten bei 3 unterschiedlichen Wassergehalten</li> <li>- Messergebnisse, Vergleich mit Werten aus der Literatur.</li> <li>- Numerische Simulation der Wärmeströmung für beide verwendeten Messverfahren</li> </ul>	
FACHGEBIET: Bodenmechanik und Grundbau ggf. 2. FACHGEBIET:	
BETREUER: O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Stephan Semprich ..... (Name)  (Unterschrift)	
ggf. 2. BETREUER: Ao.Univ.-Prof.i.R. DI Dr. E. Eustacchio ..... (Name)  (Unterschrift)	
mitbetreuender Assistent: Oberrat Dipl.-Ing. Otto Leibniz ..... (Name)  (Unterschrift)	
AUSGABEDATUM: 19.4.2010	
SPÄTESTER ABGABETERMIN: 19.7.2010	

**Beurteilung:**

Beurteilung erfolgt durch die Betreuer
--

  
 .....  
 Datum und Unterschrift des Studiendekans

---

# Vorwort

Ich danke meinen lieben Eltern für die jahrelange finanzielle und mentale Unterstützung, ohne euch hätte ich es nicht geschafft!

Nach etlichen Imponderabilien konnte mich Hr. Oberrat Dipl. Ing. Otto Leibniz für das Thema Verfahren zur Messung des Wärmeleitfähigkeitsbeiwertes von Bodenproben gewinnen, für seine Unterstützung und fachliche Beratung bedanke ich mich recht herzlich.

Natürlich gilt mein besonderer Dank Hrn. O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Stephan Semprich, dass er mich als Diplomand angenommen und unterstützt hat.

Des Weiteren danke ich Hrn. Ao.Univ.-Prof.i.R. DI. Dr. Enrico Eustacchio für die reichliche Unterstützung und fachliche Beratung und Hrn. Univ.-Prof. DI. Mag. Dr. iur. Dr. techn. Peter Kautsch für das Beiwohnen an der Diplomprüfung.

Ich grüße auch meine lieben und zahlreichen Freunde und Bekannten, die mich die ganze Zeit über begleitet haben.

Ihrer wahren Wesensbestimmung nach ist die Wissenschaft das Studium der Schönheit der Welt. (Simone Weil)

---

# Kurzfassung

In der Diplomarbeit wird eine vergleichende Messung der Wärmeleitfähigkeit von Sand durchgeführt.

Dabei kommen zwei zu vergleichende Messtechniken zum Einsatz: einerseits das Ein-Platten-Gerät, andererseits die Halbraumsonde.

Es wird Kabelsand (UK 4) und Thermosand untersucht.

Dieser Sand wird für eine Verlegung von Fernwärmeleitungen als Bettungsmaterial eingesetzt.

In der Einführung werden die thermodynamischen und mathematischen Gesetzmäßigkeiten behandelt.

Es folgt eine Aufzählung der bislang bekannten Messtechniken.

Anschließend wird etwas genauer auf die durchzuführenden Techniken eingegangen.

Der Vergleich der Versuche liefert Resultate, die zu analysieren sind.

Abschließend wird noch eine numerische Simulation durchgeführt.

---

# Abstract

This diploma thesis concerns the comparing measurement of the thermal conduction of sand.

There will be two kinds of techniques: the heat flow meter and the half-space source.

There are two kinds of sand examined, UK4 and Thermosand.

The sand is used for district heating pipes as bedding material.

The Introduction concerns thermodynamic and mathematical law.

Different current known measurement techniques are listed.

The applied techniques are firmer explained.

The comparison of the results is analyzed.

Finally there is a numeric simulation.

# Inhaltsverzeichnis

<b>0 WÄRMETECHNISCHE PARAMETER</b>	<b>10</b>
<b>1 WÄRMELEITUNG IM PORÖSEN MEDIUM</b>	<b>12</b>
<b>1.1 Grundlagen der Wärmeübertragung</b>	<b>12</b>
1.1.1 Wärmestrahlung	12
1.1.2 Konvektion	12
1.1.3 Konduktion	12
<b>1.2 Definitionen</b>	<b>14</b>
1.2.1 Temperatur und Wärme	14
1.2.2 Wärmestromdichte $q$ und Wärmestrom $Q$	15
1.2.3 Temperaturgradient und Temperaturfeld	16
1.2.4 Wärmeleitfähigkeit $\lambda$	17
1.2.5 Erster Hauptsatz der Wärmelehre	18
1.2.6 Leistung $P$	19
1.2.7 Wärmemenge $Q$	19
1.2.8 Wärmekapazität $C$	20
<b>1.3 Wärmedurchgang</b>	<b>20</b>
1.3.1 Der Wärmeübergangskoeffizient	21
1.3.2 Der Wärmedurchgangskoeffizient $U$	22
1.3.3 Der Wärmeleitwiderstand $R$	23
<b>2 MESSMETHODEN</b>	<b>24</b>
<b>2.1 Verfahrensarten</b>	<b>24</b>
2.1.1 Wärmestrommessung	24
2.1.2 Übersicht über Messmethoden	25
<b>2.2 Stationäre Methoden</b>	<b>27</b>
2.2.1 Plattenverfahren	27
2.2.2 Vergleichsverfahren	29
2.2.3 Rohrverfahren	30
2.2.4 Wärmestrommessplattenverfahren	32
2.2.5 Kugelverfahren	33
<b>2.3 Instationäre Methoden</b>	<b>33</b>
2.3.1 Nadelsondenmethode	34
2.3.2 Heißdrahtmethode	35
2.3.3 Quick Thermal Conductivity Meter (QTCM)	38

<b>2.4 Quasistationäre Methoden</b>	<b>39</b>
2.4.1 Laser-Impuls-Verfahren	39
2.4.2 Angström-Methode	41
<b>2.5 Vergleich der Messmethoden</b>	<b>41</b>
<b>3 EINPLATTENVERFAHREN</b>	<b>42</b>
<b>3.1 Das Messprinzip</b>	<b>42</b>
<b>3.2 Spezifikationen</b>	<b>44</b>
<b>3.3 Beschreibung Messinstrument</b>	<b>46</b>
3.3.1 Prüfeinheit	46
3.3.2 Kontroll und Messeinheit (C&M unit)	47
3.3.3 Umlaufkühlung	48
<b>4 HALBRAUMSONDE</b>	<b>49</b>
<b>4.1 Das Messprinzip</b>	<b>49</b>
<b>4.3 Das Messgerät TK 04</b>	<b>52</b>
<b>4.4 Probenpräparation und notwendige Apparaturen</b>	<b>53</b>
<b>4.5 Auswertung der Messungen, Qualitätskontrolle</b>	<b>55</b>
4.5.1 Das TC-Diagramm	55
4.5.2 Das Intervall Diagramm	56
4.5.3 Das Contact-Values (CV) Diagramm	56
4.5.4 Das LET Diagramm	57
4.5.5 Das „Number of Solution“-Diagramm	58
4.5.6 Das „Single Measurement“-Diagramm	58
<b>5 DIE EIGENSCHAFTEN DER BODENPROBEN</b>	<b>60</b>
<b>5.1 Materialzusammensetzung</b>	<b>60</b>
<b>5.2 Einfluss Feuchtegehalt</b>	<b>60</b>
<b>5.3 Einfluss der Dichte bzw. Verdichtung</b>	<b>61</b>
<b>5.4 Kornverteilung</b>	<b>62</b>
<b>5.5 Beispiele für Anwendungsmöglichkeiten</b>	<b>63</b>
<b>6 PRAKTISCHE UMSETZUNG PLATTENVERSUCH</b>	<b>64</b>

<b>6.1 Design und Material Probengefäß</b>	<b>64</b>
<b>6.2 Einbau und Verdichtung des Sandes</b>	<b>66</b>
<b>6.3 Einbau in das Plattenmessgerät</b>	<b>67</b>
<b>6.4 Messung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät</b>	<b>68</b>
<b>6.5 Messergebnisse in Tabellenform</b>	<b>69</b>
6.5.1 Tabelle PVC-hart Platten	69
6.5.2 Tabelle und Auswertung für UK4 Sand	70
<b>7 MESSERGEBNISSE</b>	<b>79</b>
<b>7.1 Messergebnisse Plattengerät</b>	<b>79</b>
<b>7.2 Messergebnisse Halbraumsonde</b>	<b>81</b>
7.2.1 Der Einbau der Sand-Probe	82
<b>8 NUMERISCHE SIMULATION</b>	<b>89</b>
<b>8.1 Numerische Simulation des Plattengerätversuchs</b>	<b>89</b>
8.1.1 Programmierung	89
8.1.2 Temperatur-Farbschichten für UK4, 0,5 M-% Wassergehalt, Trockendichte 1,67 g/cm <sup>3</sup>	90
8.1.3 Temperatur-Farbschichten für UK4, 5 M-% Wassergehalt, Trockendichte 1,35 g/cm <sup>3</sup>	92
8.1.4 Temperatur-Farbschichten für UK4, 20 M% Wassergehalt, Trockendichte 1,35 g/cm <sup>3</sup>	94
8.1.5 Temperatur-Farbschichten für Thermosand, 7 M% Wassergehalt, Trockendichte 1,32 g/cm <sup>3</sup>	96
8.1.6 Temperatur-Farbschichten für Thermosand 22 M% Wassergehalt, Trockendichte 1,14 g/cm <sup>3</sup>	98
<b>8.2 Numerische Simulation der Messung mit der Halbraumsonde</b>	<b>100</b>
8.2.1 Programmierung	100
8.2.2 Temperatur-Farbschichten und Isothermen für UK4, 0,5-M% Wassergehalt, Trockendichte 1,67 g/cm <sup>3</sup>	101
8.2.3 Temperatur-Farbschichten und Isothermen für UK4, 5-M% Wassergehalt, Trockendichte 1,35 g/cm <sup>3</sup>	103
8.2.4 Temperatur-Farbschichten und Isothermen für UK4, 20-M% Wassergehalt, Trockendichte 1,35 g/cm <sup>3</sup>	105
8.2.5 Temperatur-Farbschichten und Isothermen für Thermosand, 7 M-% Wassergehalt, Trockendichte 1,32 g/cm <sup>3</sup>	107
8.2.6 Temperatur-Farbschichten und Isothermen für Thermosand, 22 M-% Wassergehalt, Trockendichte 1,14 g/cm <sup>3</sup>	109
<b>9 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE UND AUSBLICK</b>	<b>111</b>
<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>112</b>



<b>ANHANG 1</b>	<b>115</b>
<b>ANHANG 2</b>	<b>116</b>
<b>ANHANG 3</b>	<b>127</b>

## 0 Wärmetechnische Parameter

Q	[Ws] [J] [Nm] [kg m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	Wärmemenge, Heizleistung, Source power „Paket an thermischer Energie“ (1. Hauptsatz der Thermodynamik)
$\dot{Q}$	[W] [J/s], [Nm/s]	Wärmestrom $\dot{Q} = \frac{Q}{t} \text{ bzw. } \frac{dQ}{dt}$
t	[s,d]	Zeit, abgelaufene Zeit, Zeitraum
$\dot{q}$	[W/m <sup>2</sup> ] [J/s m <sup>2</sup> ], [N/s m]	Wärmestromdichte $\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{Q}{tA} = \frac{q}{t}$
A	[m <sup>2</sup> ]	durchströmte Querschnittsfläche
ϑ	[°C]	Temperatur nach Celsius (0°C = Gefrierpunkt des Wassers)
T	[°K]	absolute Temperatur $T = \vartheta + 273,15$
x	[mm, cm, m]	Wegachse
$\rho_E$	[°K m/W]	spezifischer Wärmewiderstand $\rho_E = \frac{1}{\lambda}$
$\lambda$	[W/m°K] [J/s m°K]	Wärmeleitkoeffizient, Wärmeleitfähigkeit, Coefficient of heat conductivity, thermal conductivity, „Materialeigenschaft, die angibt, wie groß in einem gegebenen Temperaturfeld der Wärmestrom $\dot{Q}$ ist, der normal zur Messfläche unter der Wirkung eines Temperaturgefälles $\Delta T$ strömt.“ $\lambda$ kann im betrachteten Temperaturbereich als konstant angenommen werden.

$$R = \frac{\delta}{\lambda A} \quad [\text{m}^2\text{K}/\text{W}] \quad \text{Wärmeleitwiderstand}$$

$\delta$  ... Dicke des durchströmten Mediums [m]

$\lambda$  ... Wärmeleitfähigkeitsbeiwert [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]

$A$  ... Querschnittsfläche [ $\text{m}^2$ ]

$$a = \frac{\lambda}{\rho * c} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad \text{Temperaturleitfähigkeit}$$

# 1 Wärmeleitung im porösen Medium

## 1.1 Grundlagen der Wärmeübertragung

Wärme ist in der Thermodynamik jene Energie, welche die Grenze eines Systems, allein durch den Temperaturunterschied überschreitet. Unter einem System versteht man einen Festkörper oder ein Fluid. Dabei fließt Wärme stets in Richtung fallender Temperatur über die Systemgrenze. Das besagt der 2. Hauptsatz der Thermodynamik.

Thermodynamik oder Wärmelehre ist die Lehre der Energie, ihrer Erscheinungsformen und die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten.

### 1.1.1 Wärmestrahlung

Die Wärmestrahlung kommt zustande durch elektromagnetische Wellen, die jeder Körper aussendet. Daher ist auch durch Vakuum eine Energieübertragung möglich.

### 1.1.2 Konvektion

Konvektion ergibt sich in einem strömenden Fluid durch die makroskopische Bewegung. Makroskopische Bewegung ist die Bewegung der Moleküle untereinander.

Daher ist durch Konvektion keine Wärmeübertragung im leeren Raum (Vakuum) möglich.

### 1.1.3 Konduktion

Wärmeleitung oder Konduktion tritt zwischen benachbarten Molekülen aufgrund eines im Material vorhandenen Temperaturgradienten auf. Strahlungsundurchlässige Festkörper transportieren Energie ausschließlich durch Wärmeleitung. In elektrisch leitfähigen Körpern (z.B.: Metallen) erfolgt Wärmeleitung vorwiegend durch die freien Ladungsträger, die Elektronen.

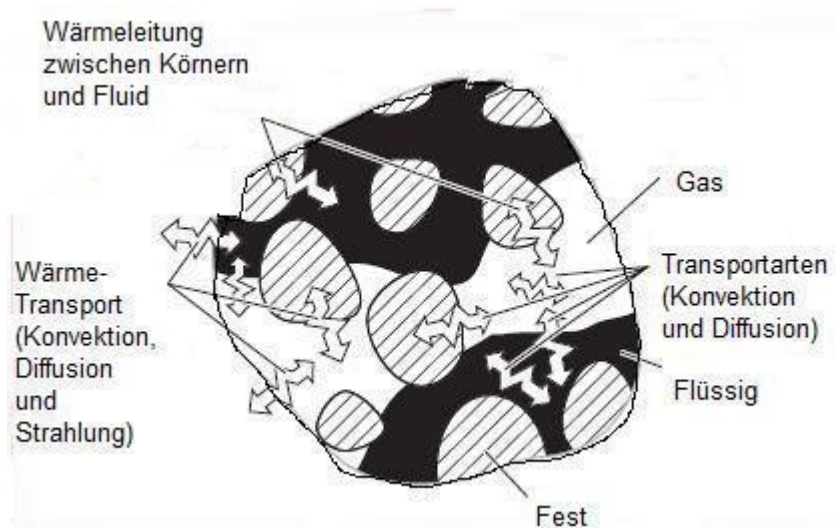
Als Elektronengas bezeichnet man die negativ geladenen, ungebundenen Elektronen, die sich frei durch die Gesamtstruktur bewegen können. Je mehr freie Elektronen (Elektronengas) vorhanden sind, umso besser ist die Wärmeleitfähigkeit des Metalls.

Darum leitet Kupfer Wärme besser als Eisen. Als Dielektrikum wird jede schwach oder nicht leitende, nicht metallische Substanz bezeichnet, deren Ladungsträger im Allgemeinen nicht frei beweglich sind.

Phononen sind bei Isolatoren (dielektrische Festkörper) für die Wärmeleitung zuständig.

In Isolatoren gibt es das Elektronengas nicht, dafür Phononen, das sind Quasiteilchen, die delokalisiert sind, im ganzen Kristallgitter existieren und keinem bestimmten Ort zuordenbar sind. Mit den Phononen lassen sich in der Quantenmechanik Gitterschwingungen in einem Kristall mit Hilfe eines vereinfachten Modells beschreiben.

Sand ist ein dielektrisches Material, das entsprechend der Abbildung 1.1 neben den mineralischen Körnern Hohlräume und einen Wassergehalt aufweist.



**Abb. 1.1:** Darstellung eines porösen Mediums mit den drei verschiedenen Übertragungsmechanismen: Wärmestrahlung, Wärmeleitung (Konduktion) und Konvektion (Kaviany, 1995).

Abbildung 1.1 stellt die Übertragungsmechanismen von Wärme in einem porösen Medium dar.

## 1.2 Definitionen

### 1.2.1 Temperatur und Wärme

Wärme ist eine Energieform, die in jedem Körper in unterschiedlicher Menge enthalten ist, durch die kinetische Energie der Moleküle verursacht. Bei Festkörpern schwingen die Moleküle um Ruhelagen, bei Fluiden gibt es keine feste Ruhelage, sondern die Moleküle sind frei im Raum beweglich. Bringt man zwei Körper in Kontakt, so fließt Wärme von einem zum anderen, wenn ein Temperaturunterschied vorliegt. Wärme ist keine Zustandsgröße, sondern beschreibt den Übergang von einem System zum anderen.

Temperatur  $\vartheta$  ist ein skalarer Wert, der den Energiezustand im betrachteten Punkt widerspiegelt. Die SI-Basiseinheit ist Kelvin, sie entspricht demselben Intervall wie Grad Celsius. Der Unterschied liegt bei der Wahl des Nullpunkts. Der absolute Nullpunkt (keine Molekülbewegung) liegt bei  $-273,15^{\circ}\text{C}$ . Der Temperaturunterschied von einem Kelvin ist der 273,16te Teil vom Temperaturunterschied vom absoluten Nullpunkt zum Tripelpunkt des Wassers. Im Tripelpunkt des Wassers treten bei einem Druck von 6 mbar und einer Temperatur von  $0,01^{\circ}\text{C}$  alle drei Phasen des Wassers gleichzeitig auf.

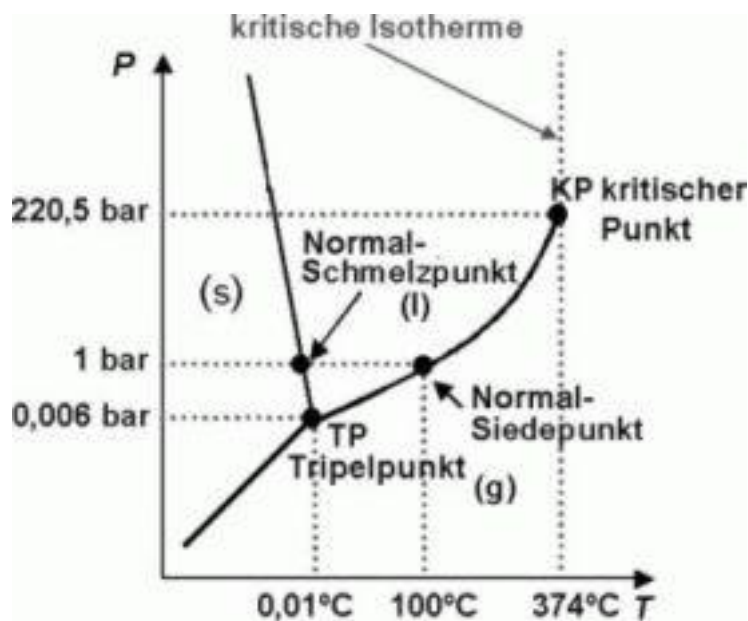
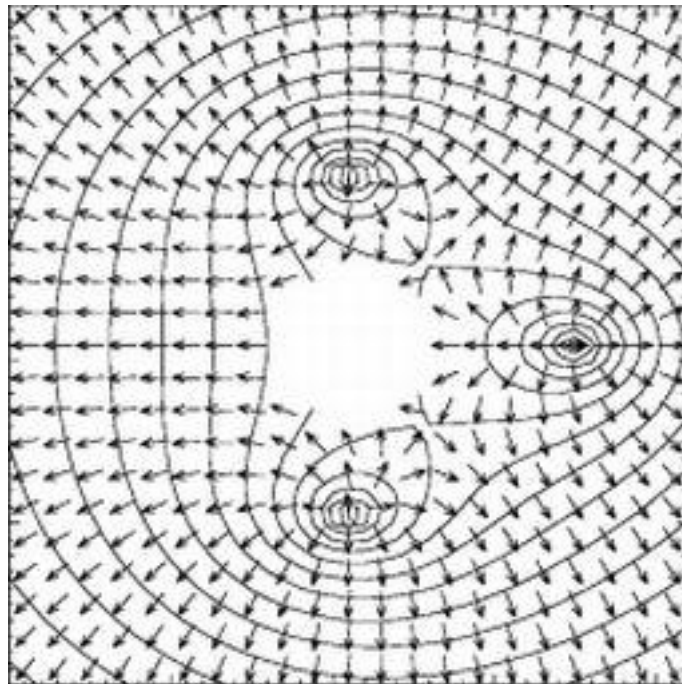


Abb. 1.2: Tripelpunkt des Wassers

## 1.2.2 Wärmestromdichte $\dot{q}$ und Wärmestrom $\dot{Q}$

Der Energietransport in einem wärmeleitenden Material ist beschrieben durch das Vektorfeld der Wärmestromdichte.

In jedem Punkt des Feldes gibt ein Vektor die Stärke und Richtung an. Abbildung 1.3 stellt ein solches Vektorfeld mit Isothermen, das sind Flächen im Raum auf denen die gleiche Temperatur  $\vartheta$  herrscht, dar.



**Abb. 1.3:** zweidimensionales Vektorfeld mit Isothermen

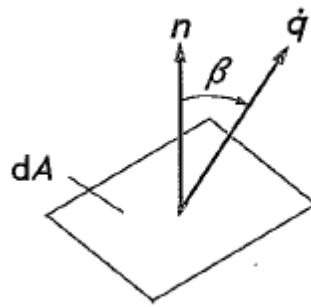
Der Wärmestrom durch ein beliebig orientiertes Flächenelement  $dA$  verhält sich zur Wärmestromdichte  $\dot{q}$ : Wobei  $n$  der Einheitsvektor in Richtung der äußeren Flächennormalen ist. Der Winkel  $\beta$  wird zwischen  $n$  und  $\dot{q}$  gebildet.

$$\dot{q} = \dot{q}(x, t) \quad (1.1)$$

$$\dot{q} = -\lambda \operatorname{grad} \vartheta \quad (1.2)$$

$$\vartheta = \vartheta(x, t) \quad (1.3)$$

$$\dot{Q} = \dot{q}(x, t) n dA = |\dot{q}| \cos \beta dA \quad (1.4)$$



**Abb. 1.4:** Flächenelement mit Normalenvektor  $n$  und dem Vektor der Wärmestromdichte  $\dot{q}$  (Baehr&Stephan, 2006)

Dimension des Wärmestroms ist die auf die Zeit bezogene Energie (Wärmeleistung) in Watt [ $J/s$ ], Wärmestromdichte ist die Dimension eines auf die Fläche bezogenen Wärmestroms [ $J/s m^2$ ] in [ $W/m^2$ ].

## 1.2.3 Temperaturgradient und Temperaturfeld

Ursache des Energietransports durch Wärmeleitung sind Temperaturgradienten. Die Gesamtheit der Temperaturen in einem Medium ergibt das Temperaturfeld.

Ein stationäres Temperaturfeld hängt nicht von der Zeit ab, ein instationäres Temperaturfeld ist von der Zeit abhängig.

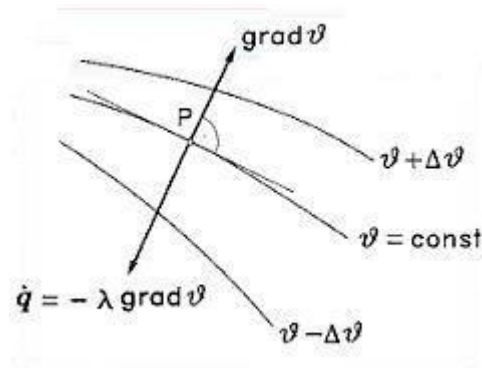
Alle Punkte, die zur selben Zeit dieselbe Temperatur haben, lassen sich verbinden, diese Fläche heißt dann Isotherme.

Die stärkste Temperaturänderung erfolgt normal auf die Isothermen und ist durch den Temperaturgradient gegeben:

$$\text{grad } \vartheta = \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \mathbf{e}_x + \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \mathbf{e}_y + \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \mathbf{e}_z \quad (1.5)$$

zeigt in Richtung des stärksten Temperaturanstiegs.





**Abb. 1.5:** Temperaturgradient, wobei der Punkt P auf einer Isotherme liegt. (Baehr&Stephan, 2006)

## 1.2.4 Wärmeleitfähigkeit $\lambda$

J.B. Fourier erkannte 1822, dass die Wärmestromdichte gleich dem Produkt aus einem Faktor  $\lambda$  und dem Temperaturgradienten ist. Das Minus beinhaltet den 2. Hauptsatz der Wärmelehre, dass Wärme in Richtung des Temperaturgefälles strömt. Die Proportionalitätskonstante  $\lambda$  ist eine Materialeigenschaft, die Wärmeleitfähigkeit. [W/m K]

Sie ist abhängig von der Temperatur und vom Druck. Dabei ist diese Abhängigkeit gering. Die Stoffeigenschaft „Wärmeleitfähigkeit“ kann aus den quantentheoretisch beschreibbaren Bindungen von Atomrümpfen und Elektronen an ihre Nachbarschaften erklärt werden. Diese Bindungsstärken sind von Temperatur und Druck abhängig. In Gemischen ist sie zusätzlich von deren Zusammensetzung abhängig, da jede Komponente für sich und in Kombination betrachtet werden muss.

Ist das Material isotrop, so ist die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  ein Skalar. In anisotropen Materialien, wie zum Beispiel Holz (Quer zur Faser leitet Holz Wärme wesentlich besser als in Richtung der Faser), ist  $\lambda$  ein Tensor. Sand wird als isotrop angenommen, da der Einbau in die Versuchsanordnung sehr vorsichtig und gleichmäßig erfolgt.

In der folgenden Abbildung Tabelle 1.1 werden Beispiele für Wärmeleitfähigkeit von ausgesuchten Baustoffen gegeben.

Stoff <input type="checkbox"/>	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ W / (m · K) <input type="checkbox"/>
Stahl unlegiert	48...58
Stahl niedrig legiert (z. B. 42CrMo4)	42
Stahl hochlegiert (z. B. X5CrNi18-10)	15
Granit	2,8
Beton	2,1
Zementestrich	1,4
Kalkzement-Putz	1,0
Glas	0,76
Ziegelmauerwerk (Vollziegel)	0,5...1,4
Holz senkrecht zur Faser	0,09...0,19
Gummi	0,16
Poroton (Lochziegel)	0,08...0,45
Porenbeton (Gasbeton)	0,08...0,25
Lehm	0,47...0,93
Sand, trocken	0,58
Sandstein	2,3
Marmor	2,8
Kalkstein	2,2

**Tab. 1.1:** Wärmeleitfähigkeit ausgewählter Stoffe (Dortmunder Datenbank, 2006)

Tabelle 1.1 listet verschiedene Materialien mit den zugehörigen Wärmeleitfähigkeiten  $\lambda$  auf.

## 1.2.5 Erster Hauptsatz der Wärmelehre

Der 1.Hauptsatz der Wärmelehre besagt, dass die Energie in einem abgeschlossenen System konstant ist. Wird ein Körper mit einer Kraft  $F$  entlang eines Weges um ein Wegelement  $\Delta s$  verschoben, so wird mechanische Arbeit verrichtet.

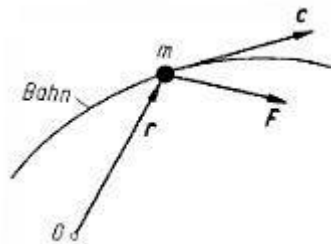
Die zeitliche Energieänderung, die ein geschlossenes System durch einen Prozess erfährt, ist gleich der Energie die während des Prozesses die Systemgrenze als Wärme und als Arbeit überschritten hat.

Es werden 3 Arten des Energietransports unterschieden:

1. Das Verrichten von mechanischer Arbeit
2. Das Übertragen von Wärme
3. Den an einen Stofftransport über die Systemgrenze gekoppelten Energietransport

Wird ein Stoff über die Systemgrenze bewegt, so nimmt er die gespeicherte Energie mit und ein Energieaustausch erfolgt.

Die Einheit der Energie = Arbeit = Wärme ist  $[Nm] = [J]$ .



**Abb. 1.6:** Bewegung eines Massepunktes unter der Einwirkung einer Kraft  $F$  (Baehr&Kabelac, 2006)

Abbildung 1.6 stellt die Bewegung eines Massenpunktes unter der Einwirkung einer Kraft  $F$  dar.

## 1.2.6 Leistung $P$

Leistung ist die Änderung der Arbeit oder Energie pro Zeiteinheit. Die Einheit der Leistung ist  $[J/s] = [W]$ .

## 1.2.7 Wärmemenge $Q$

Durch Erwärmen oder Abkühlen wird Energie zugeführt oder abgezogen. Diese Energie bezeichnet man als Wärmemenge  $Q$ . Gemessen wird die Wärmemenge in Joule  $[J]$  oder in Kalorien  $[cal]$ . Dabei ist eine Kilokalorie jene Wärmemenge, die benötigt wird um 1 Kilogramm Wasser bei einem Druck von 760 Torr um ein Grad von  $14,5^\circ$  auf  $15,5^\circ$  zu erwärmen.

## 1.2.8 Wärmekapazität C

Die Wärmekapazität  $C$  oder auch spezifische Wärme bezeichnet jene Energie, die notwendig ist, um ein Kilogramm eines Stoffes um  $1^\circ\text{Kelvin}$  zu verändern. Die Einheit ist  $[\text{J}/\text{kg K}]$ .

## 1.3 Wärmedurchgang

### 1.3.1 Beispiel für Wärmedurchgang

Zwei Fluide mit unterschiedlichen Temperaturen sind durch eine Wand getrennt. Wärme geht vom Fluid mit der höheren Temperatur auf die Wand über, wird in der Wand weitergeleitet und überträgt sich von der anderen Wandseite auf das Fluid mit der kälteren Temperatur.

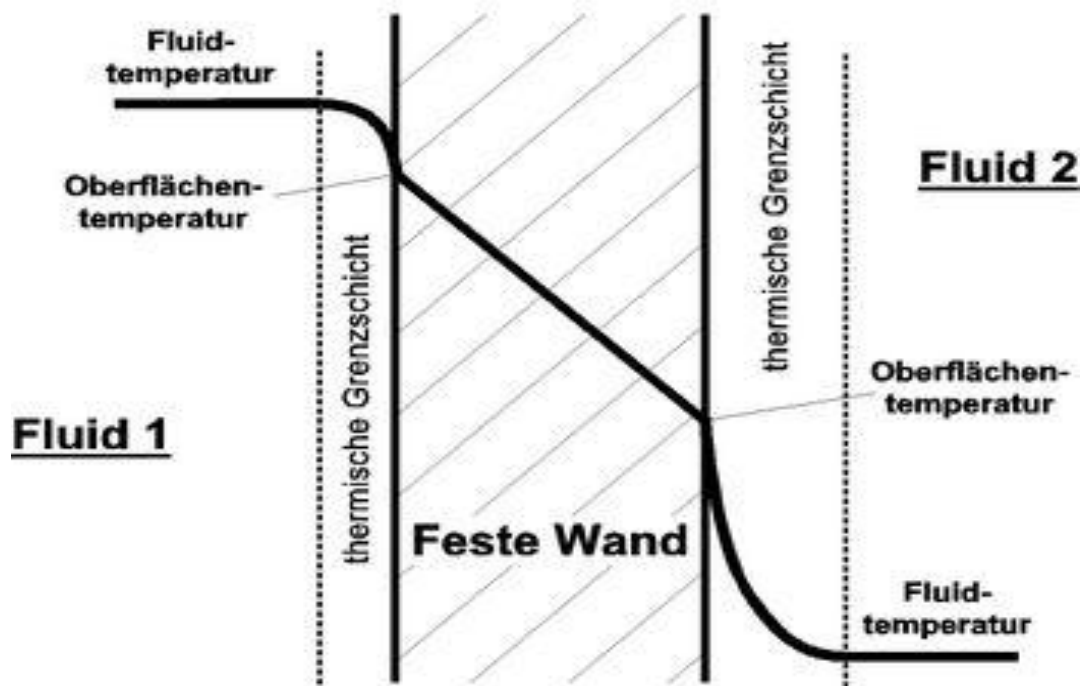


Abb. 1.7: Wärmedurchgang durch eine Wand

Diese Kombination von Wärmeübergang an der thermischen Grenzschicht und Wärmeleitung in der Wand bezeichnet man als Wärmedurchgang.

### 1.3.1 Der Wärmeübergangskoeffizient

Der Wärmeübergang erfolgt nicht nur durch Wärmeleitung vom Fluid zur festen Wand, sondern auch durch die makroskopische Bewegung des Fluides auf die Wand, Konvektion und durch die Wärmestrahlung. Dieses Verhalten wird durch den lokalen Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  beschrieben. Folgende Gesetzmäßigkeit ist zu erkennen:

$$\dot{q}_W = \alpha * (\vartheta_W - \vartheta_F) \quad (1.6)$$

- $\dot{q}_W$  ... Wärmestromdichte [W/m<sup>2</sup>]
- $\vartheta_W$  ... Temperatur an der Wandfläche [°C]
- $\vartheta_F$  ... Temperatur des Fluides vor der Grenzschicht [°C]
- $\alpha$  ... Wärmeübergangskoeffizient [W/m<sup>2</sup>K]

Das Gesetz von Fourier wird angewandt:

$$\dot{q}_W = -\lambda * \left( \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \right)_W \quad (1.7)$$

- $\lambda$  ... Wärmeleitfähigkeitsbeiwert [W/m K]

- $\left( \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \right)_W$  ... Änderung der Temperatur an der Grenzschicht der Wand

Einsetzen und Umformen in die Gleichung ergibt:

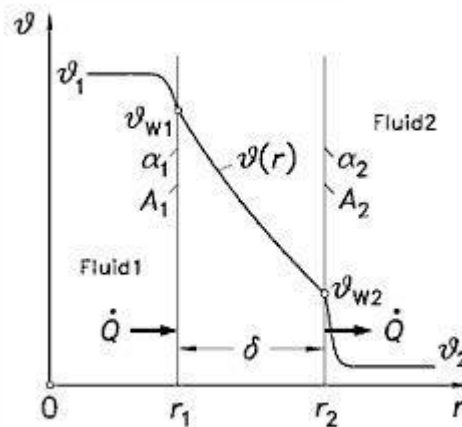
$$\alpha = -\lambda * \frac{\left( \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \right)_W}{\vartheta_W - \vartheta_F} \quad (1.8)$$

$\alpha$  der Wärmeübergangskoeffizient ist von der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  des angrenzenden Fluides, der Änderung der Temperatur nach dem Weg in der Grenzschicht und der Temperaturdifferenz  $\vartheta_W - \vartheta_F$  abhängig.

### 1.3.2 Der Wärmedurchgangskoeffizient U

Der Prozess des Wärmedurchgangs findet wie in Kapitel 1.3 beschrieben, statt. Dabei können Außen- und Innenfläche der Wand wie im angeführten Beispiel auch gekrümmt sein. Bei einem Rohr (Hohlzylinder) ist der stationäre Temperaturverlauf analog:

$$\vartheta(r) = \frac{\ln(r_2 / r)}{\ln(r_2 / r_1)} (\vartheta_{w1} - \vartheta_{w2}) + \vartheta_{w2} \quad (1.9)$$



**Abb. 1.8:** Temperaturverlauf beim Wärmedurchgang durch eine Rohrwand, an die zwei Fluide mit unterschiedlichen Temperaturen grenzen.  $\vartheta_1 > \vartheta_2$  (Baehr&Stephan, 2006)

Aus den Gleichungen

$$\dot{Q} = \alpha_1 A_1 (\vartheta_1 - \vartheta_{w1}) \quad (1.10)$$

$$\dot{Q} = \alpha_2 A_2 (\vartheta_{w2} - \vartheta_2) \quad (1.11)$$

$$\dot{Q} = \frac{\lambda_m}{\delta} A_m (\vartheta_{w1} - \vartheta_{w2}) \quad (1.12)$$

1.1

lassen sich die unbekanntenen Wandtemperaturen  $\vartheta_{w1}$  und  $\vartheta_{w2}$  eliminieren, sodass nur die bekannten Temperaturen  $\vartheta_1$  und  $\vartheta_2$  der Fluide bleiben:

$$\dot{Q} = k * A * (\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad (1.13)$$

wobei

$$\frac{1}{kA} = \frac{1}{\alpha_1 A_1} + \frac{\delta}{\lambda_m A_m} + \frac{1}{\alpha_2 A_2} \quad (1.14)$$

Daraus lässt sich  $k A$  berechnen.  $k$  ist der Wärmedurchgangskoeffizient. Eine Angabe von  $k$  allein ohne die Bezugsfläche ist bedeutungslos, da es sich um die Außen-, Innen- oder eine beliebige Schnittfläche handeln kann. Bei ebenen Wänden ist dies die Wandfläche  $A_1 = A_2 = A_m$ .

$\frac{1}{kA}$  bezeichnet den Wärmedurchgangswiderstand. Er setzt sich additiv aus

den Einzelwiderständen der hintereinander geschalteten Übertragungsvorgänge zusammen: Wärmeübergang vom Fluid 1 an die Wand, Wärmeleitung in der Wand und Wärmeübergang von der Wand an das Fluid 2.

### 1.3.3 Der Wärmeleitwiderstand $R$

Der Wärmeleitwiderstand  $R$  oder Wärmedurchlasswiderstand ist zum Wärmestrom  $\dot{Q}$  umgekehrt proportional. Die Einheit ist  $[\text{m}^2 \text{K}/\text{W}]$ .

Er hängt von der Dicke  $\delta$  des durchströmten Mediums, der Querschnittsfläche  $A$  und dem Wärmeleitfähigkeitsbeiwert  $\lambda$  ab.

Der Wärmeleitwiderstand ist:

$$R = \frac{\delta}{\lambda A} \quad (1.15)$$

$R$  ... Wärmeleitwiderstand  $[\text{m}^2\text{K}/\text{W}]$

$\delta$  ... Dicke des durchströmten Mediums  $[\text{m}]$

$\lambda$  ... Wärmeleitfähigkeitsbeiwert  $[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$

$A$  ... Querschnittsfläche  $[\text{m}^2]$

## 2 Messmethoden

### 2.1 Verfahrensarten

Die Messverfahren mit stationärer Wärmeleitung werden in Absolut- und Relativverfahren eingeteilt.

Beim Absolutverfahren misst man den Temperaturgradienten und den Wärmestrom. Es wird die durch die Probe fließende Wärmemenge gemessen und daraus die Wärmeleitfähigkeit unmittelbar bestimmt.

Das Relativverfahren ist eine Vergleichsmessung mit einem Referenzmaterial, dessen Wärmeleitfähigkeit bekannt ist. Es muss nur das Temperaturgefälle gemessen werden und nicht der Wärmestrom. Er ergibt sich durch Rückrechnung mit der bekannten Wärmeleitfähigkeit. Dabei muss die Wärmeleitfähigkeit des Vergleichskörpers und die Abhängigkeit dieser von der Temperatur bekannt sein. Bei Messverfahren mit instationärer Wärmeleitung wird zwischen direkter und indirekter Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit unterschieden. Kann man den übertragenen Wärmestrom als Randbedingung annehmen, so lässt sich die Wärmeleitfähigkeit direkt bestimmen. Ist der Temperaturanstieg zeitlich abhängig (bei konstanter Aufheizgeschwindigkeit), so lässt sich die Temperaturleitfähigkeit  $a$  ermitteln.

Die Temperaturleitfähigkeit ist:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (2.1)$$

$a$  ... Temperaturleitfähigkeit [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$\lambda$  ... Wärmeleitfähigkeit [ $\text{W}/\text{mK}$ ]

$\rho$  ... Dichte [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$c$  ... spezifische Wärmekapazität [ $\text{J}/\text{kgK}$ ]

Wenn  $a$ ,  $\rho$  und  $c$  bekannt sind, lässt sich  $\lambda$  berechnen.

#### 2.1.1 Wärmestrommessung

Zur Bestimmung des Wärmeflusses gibt es verschiedene Methoden. Es kann die elektrische Leistung aus der verlustfreien Energieumwandlung in Wärme aus der Beziehung  $P = U \cdot I$  [ $\text{W}$ ] ermittelt werden.

Eine Methode ergibt den Wärmestrom aus der Messung des Volumenstroms einer siedenden Flüssigkeit, der bei der Verdampfung einer siedenden Flüssigkeit frei wird, von welcher die Verdampfungsenthalpie bekannt ist.

Bei einer weiteren Methode misst man die Temperaturerhöhung eines Kühlmittelstroms kalorimetrisch.

Zuletzt kann man noch ein Relativverfahren anwenden, bei welchem der Wärmestrom aus dem Temperaturabfall an einer Vergleichssubstanz mit bekannter Wärmeleitfähigkeit berechenbar ist.



Die Richtung des Wärmestroms und damit auch des Temperaturgradienten kann entweder radial (zylindrisch) oder longitudinal (zylindrisch, stabförmig als Draht) oder als Kombination radial und longitudinal gemessen werden. Besser ist es eindimensional zu messen, da mehrdimensionale Messungen komplexe Rechenvorgänge notwendig machen.

### **2.1.2 Übersicht über Messmethoden**

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die derzeit bekannten Messmethoden. Diese experimentellen Messmethoden basieren auf rund 100 Jahren Entwicklung. Sie wurden in Bezug auf Genauigkeit, Zuverlässigkeit, Einsatzbereich, zeitlichem und apparativem Aufwand immer weiter verbessert. Nur die grundlegenden Verfahren sind aufgeführt.

## 2 Messmethoden

Verfahren	Messdauer	Messgenauigkeit	Prüfkörper	Norm	Prinzip
<b>Einplattengerät</b> (z.B.: Lambda-Meter, Hesto)	Mehrere Stunden	$\pm 3\%$	Plattenförmig	ÖNORM B 6015-2	Absolut, einseitige Wärmestrommessung
<b>Nadelsonde:</b> <b>Halbraumsonde,</b> <b>Vollraumsonde</b> (z.B.: TK04)	5 Einzelmessungen Ca. 15-30 min	$\pm 2\%$	Feste Materialien, Pulver, viskose Flüssigkeiten		Direkt, Aufheiz- oder Abkühlintervall
<b>Zweiplattengerät</b>	Mehrere Stunden	$\pm 5\%$	Plattenförmig	DIN 52 612 DI- NEN12664/12667	Absolut, zweiseitige Wärmestrommessung
<b>Vergleichsverfahren</b>	Mehere Stunden	$\pm 5-10\%$	Plattenförmig		Relativ, Vergleich mit Referenzmaterial
<b>Rohrverfahren</b>	Mehere Stunden	$\pm 5\%$	hohlzylindrisch		Absolut, zylindrische Wärmestrommessung
<b>Wärmestrommessplattenverfahren</b>	Mehere Stunden	$\pm 8-15\%$	Plattenförmig		Absolut, Wärmestromdichtemessung
<b>Kugelverfahren</b>	5-10 Tage	?	Variabel, schüttbar		Absolut, zugeführte Wärmemenge
<b>HeißdrahtKreuz T(R)-Verfahren</b>	2-45 min	$\pm 8\%$	Fest, variabel		Direkt, Temperatur in zwei bekannten Zeitabschnitten
<b>HeißdrahtParallel Verfahren</b>	2-45 min	$\pm 8\%$	Fest, variabel		Indirekt, Temperaturanstieg als Funktion der Zeit
<b>QTCM</b>	Wenige min	?	Variabel		Indirekt, Aufheizgeschw. und Mikroprozessor
<b>LaserImpuls-Verfahren</b>	Wenige min	$< 5\%$	Plattenförmig		Indirekt, zeitliche Reaktion auf Wärmeimpuls
<b>Angström-Methode</b>	Wenige min	$< 5\%$	Stabförmig		Indirekt, Phasendifferenz

Tab 2.1: wichtigste Messmethoden

## 2.2 Stationäre Methoden

Unter stationär versteht man, dass sich der Temperaturgradient und der resultierende Wärmestrom zeitlich nicht mehr ändern. Bevor man eine Messung durchführt, müssen die Einschwingvorgänge des Systems abgeklungen und die Temperaturen zeitlich und örtlich konstant sein und es muss sich ein statisches Temperaturfeld bilden. Die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit wird mit dem ersten Fourier'schen Gesetz durchgeführt. Die stationären Messmethoden unterscheiden sich in der Messung des Wärmeflusses und seiner Richtung.

### 2.2.1 Plattenverfahren

Das Plattenverfahren wurde 1912 von Gröber und Poensgen, als absolute Methode entwickelt. Es wurde in Amerika unter dem Namen „guarded hot plate test“ bekannt. Man unterscheidet das Ein- und Zweiplattenverfahren. In der Messreihe kommt das Einplattenverfahren und die Halbraumsonde von TeKa, das ist eine Nadelsonde zum Einsatz. Beide Verfahren werden nach der allgemeinen vereinfachten Aufzählung und Erklärung noch genau betrachtet.

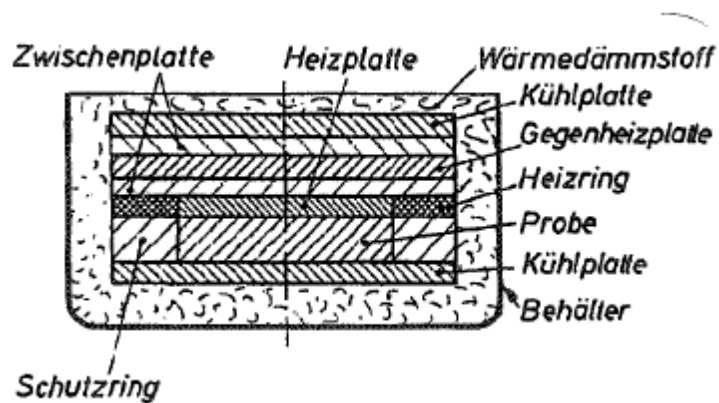
Beim Plattenverfahren wird der eindimensionale Wärmestrom, der axial durch die Probe(n) fließt, durch eine elektrisch beheizte Platte und durch ein Kühlelement erzeugt. Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  wird durch die Fläche und Dicke der Probe, den Wärmestrom, der sich aus der elektrischen Leistung ergibt mit dem Fourier'schen Gesetz bestimmt. Korrekturfaktoren berücksichtigen die radialen Wärmeverluste. Oder ein Heizring gleicht die Wärmeverluste an die Umgebung aus. Mit diesem Verfahren kann man plattenförmige Feststoffe oder wie im hier angewandten Fall Schüttungen (z.B.: Sand) messen.

Beim Einplattenverfahren liegt ein Probekörper zwischen Heiz- und Kühlplatte. Eine Gegenheizplatte verhindert Wärmeflüsse in Richtung der von der Probe abgewandten Seite. Der Heizring verhindert ebenfalls ein Abfließen der Wärme rund um die Probenplatte.

Folgende Gesetzmäßigkeit ergibt die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{Q \cdot d}{S \cdot \Delta T} \quad (2.2)$$

$\lambda$ ...	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
$Q$ ...	Wärmestrom [W]
$d$ ...	Dicke [m]
$S$ ...	Fläche [m <sup>2</sup> ]
$\Delta T$ ...	Temperaturdifferenz [°K]



**Abb. 2.1:** Einplattenverfahren (nach DIN 52 612, 1979)

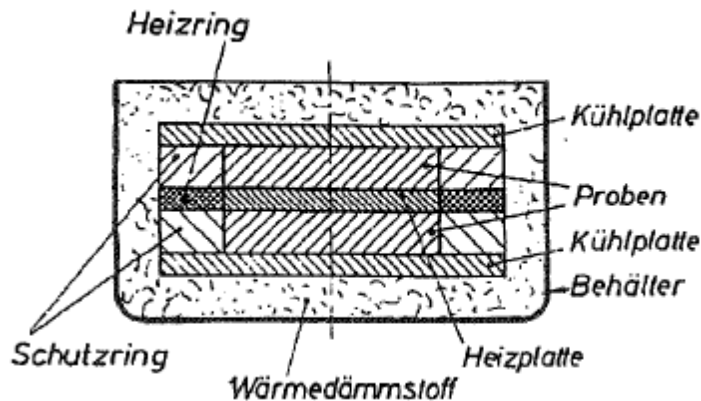
Abbildung 2.1 stellt schematisch das Einplattenverfahren dar, es wird später noch genau erläutert.

Beim Zweiplattenverfahren befinden sich zwei Probekörper symmetrisch auf beiden Seiten der Heizplatte. Hier entfällt eine Gegenheizplatte, dadurch ist eine einfachere Wärmestromlenkung durch die Proben möglich. Ein Vorteil gegenüber dem Einplattenverfahren ist, dass gleichzeitig zwei Proben gemessen werden können, was eine bessere Auflösung des Probenmaterials ergibt.

Hier gilt die Gesetzmäßigkeit:

$$\lambda = \frac{\phi * s_m}{2A * \Delta T_m} \quad (2.3)$$

- $\lambda$  ... Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
- $s_m$  ... mittlere Dicke [m]
- $A$  ... Fläche [m<sup>2</sup>]
- $\Delta T_m$  ... mittlere Temperaturdifferenz [°K]



**Abb. 2.2:** Zweiplattenverfahren (nach DIN 52 612, 1979)  
Abbildung 2.2 stellt das Zweiplattenverfahren schematisch dar.

## 2.2.2 Vergleichsverfahren

Das Verfahren wurde von Klasse entwickelt. Es ist ein Relativverfahren. Englisch spricht man von der „divided bar method“. Es ist ein eindimensionales Verfahren mit zeitlich konstantem Wärmestrom. Wie beim Zweiplattenverfahren werden zwei Proben, davon eine Referenzprobe und die zu untersuchende Probe hintereinander zwischen Wärmequelle und Wärmesenke so angeordnet, dass sie vom gleichen Wärmestrom axial durchflossen werden. Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_1$  der Referenzprobe ist bekannt und das Temperaturgefälle wird gemessen. Daraus lässt sich der Wärmestrom  $\phi$  berechnen und die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  der unbekannt Probe ergibt sich aus dem gemessenen Temperaturgradienten:

$$\phi = \frac{\Delta T_1}{\Delta s_1} = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta s} \quad (2.4)$$

(Guéguen&Palciauskas, 1994)

$\phi$ ...	Wärmestrom [W]
$\Delta s_1, \Delta s$ ...	Weg [m]
$\lambda$ ...	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
$\Delta T$ ...	Temperaturdifferenz [°K]

Der Wärmestrom, der durch die Probe fließt, muss nicht bestimmt werden. Dieses Verfahren ist wegen der einfachen Theorie ein Standardverfahren zur Messung der Wärmeleitfähigkeit von Gesteinen in der Geothermik. (Villinger, 1983) Die Vorbereitung der Proben und das Einstellen eines stationären Zustandes dauern allerdings sehr lange.

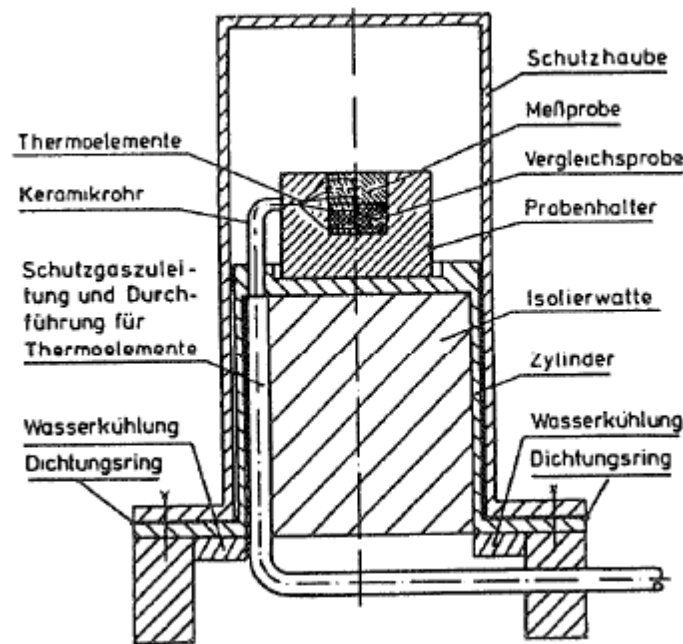


Abb. 2.3: Vergleichsverfahren (Vlajčić, 1976)

### 2.2.3 Rohrverfahren

Das Rohrverfahren unterscheidet sich von den bisher aufgeführten Verfahren, dass ein mehrdimensionaler Wärmestrom auftritt. Die Probe befindet sich in einem zylindrischen Rohr, dessen Oberfläche isotherm ist. Wenn der Probekörper ausreichend steif ist, kann man auf einen Behälter verzichten. In die Probe wird achsensymmetrisch ein Heizstab eingeführt, welcher die Wärme gleichmäßig an das umgebende Material abgibt. Es wird ein konstanter radialer Wärmestrom erzeugt. Axiale Wärmeverluste müssen durch beheizte oder gut gedämmte Schutzzone an den Stirnflächen vermieden werden. Lufteinschlüsse am Rohr und am Heizstab müssen vermieden werden. Dies ist bei Feststoffen in der praktischen Anwendung sehr schwierig, weshalb man das Verfahren vorwiegend für Schüttungen und weiche Substanzen bevorzugt anwendet. Der Temperaturgradient wird an der inneren und äußeren Mantelfläche an mehreren Stellen gemessen. Die Wärmeleitfähigkeit ergibt sich bei radialem Wärmefluss:

$$\lambda = \frac{\phi}{2\pi l} \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{T_1 - T_2} \quad (2.5)$$

(Marth, 1990)

- $\lambda$ ... Wärmeleitfähigkeit [W/mK]  
 $\phi$ ... Wärmestrom [W]  
 $l$ ... Länge [m]  
 $r$ ... Radius [m]  
 $T$ ... Temperatur [°K]

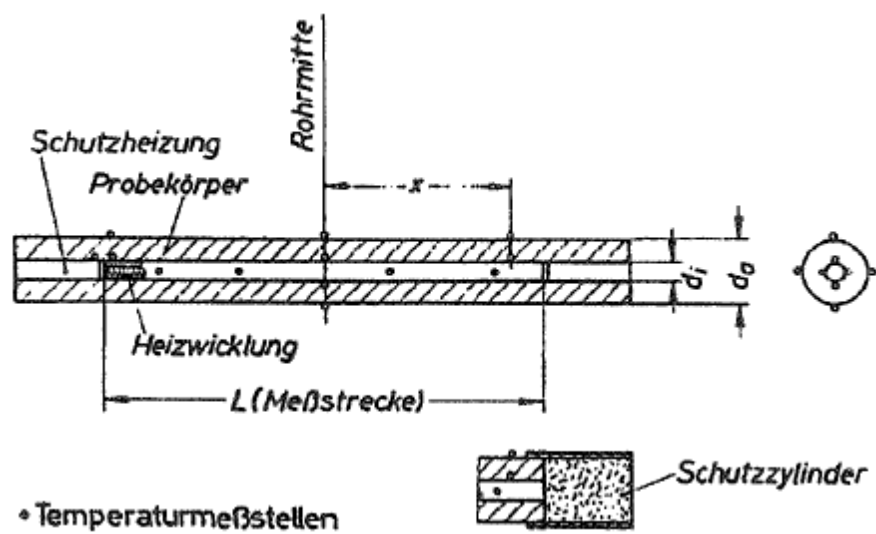


Abb. 2.4: Rohrverfahren (DIN 52 613, 1977)

## 2.2.4 Wärmestrommessplattenverfahren

Das Wärmestrommessplattenverfahren ist dem Einplattenverfahren sehr ähnlich. Die DIN 52 616 regelt das Verfahren. Der signifikante Unterschied besteht in der Messung des Wärmestromes mit zwei Wärmestrommessern. Jeder davon wird aus einem Bereich mit einer Vielzahl flächenhaft in zwei Ebenen angeordneter Temperaturfühler und einer Schutzzone gebildet, die diesen Bereich umgibt. Durch die Messung des Temperaturunterschiedes der beiden Ebenen kann die Wärmestromdichte, welche durch die Messplatte fließt, bestimmt werden. Aus dem Temperaturgradienten zwischen der warmen und der kalten Seite der Probeoberfläche berechnet sich die Wärmeleitfähigkeit analog:

$$\lambda = \frac{qs}{T_w - T_k} \quad (2.6)$$

q ... Wärmestrom [W]

s ... Weg durch die Probe [m]

$T_w - T_k$  ... Temperaturdifferenz zwischen Warm- und Kaltseite [°K]

Dieses Verfahren wird vorwiegend für Serienmessungen und für Produktionskontrollen eingesetzt. Vorteil ist der einfache Aufbau und die relativ schnelle Messung.

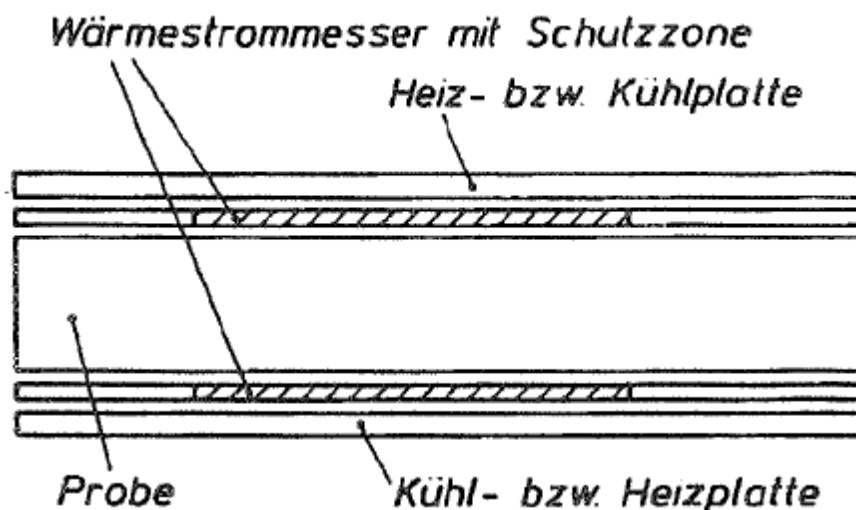


Abb. 2.5: Wärmestrommessplattenverfahren (DIN 52 612, 1984)



## 2.2.5 Kugelverfahren

Das Kugelverfahren ist gut geeignet für in situ Messungen. Englisch spricht man von der „sphere method“. Es kann aber auch im Labor angewandt werden.

Eine Metallkugel wird in die Probensubstanz mit im Verhältnis großer Überdeckung eingebracht, wobei die Probenverhältnisse möglichst wenig gestört werden dürfen. Nun muss sich ein stationärer Zustand einstellen, was 5 bis 10 Tage dauern kann. Die Wärmeleitfähigkeit lässt sich berechnen, wenn die Oberflächentemperatur einen stationären Zustand erreicht hat und die zugeführte Wärmemenge gemessen wurde. Der Temperaturverlust wird berechnet.

$$\lambda = \frac{\phi}{4\pi r(T_1 - T_2)} \quad (2.7)$$

(Farouki, 1986)

$\phi$  ... Wärmestrom [W]  
 $r$  ... Radius [m]  
 $\lambda$  ... Wärmeleitfähigkeit [W/mK]  
 $T_1 - T_2$  ... Temperaturdifferenz [°K]

Das Verfahren eignet sich ausschließlich zur Messung von körnigem und schüttfähigem Material, in das man die Metallkugel aus Kupfer oder aus Aluminium leicht einbringen kann.

## 2.3 Instationäre Methoden

Bei instationären Methoden ist das Temperaturfeld dynamisch. Der Temperaturgradient und der resultierende Wärmefluss werden als Funktion der Zeit betrachtet. Die Lösung dieser transienten Methoden (*transire vorbeigehen*) ergeben sich aus der thermischen Energiebilanz, die aus dem zweiten Fourier'schen Gesetz für die unterschiedlichen Geometrien und Randbedingungen herzuleiten ist.

Das zweite Fourier'sche Gesetz ist eine partielle Differenzialgleichung analog:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a * \left( \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right) = a \Delta \vartheta \quad (2.8)$$

$a$  ... Temperaturleitzahl  
 $\vartheta$  ... Temperatur bzw.  $\frac{\partial \vartheta}{\partial t}$  ... Änderung der Temperatur nach der Zeit  
 $\Delta = \nabla^2$  ... Laplace Operator

### 2.3.1 Nadelsondenmethode

Die Nadelsondenmethode kann sowohl in situ, als auch im Labor eingesetzt werden. Sie besteht aus einem Heizdraht, der koaxial in einen Edelstahlmantel eingebettet ist, der den Heizstrom zurückführt. Zwischen Heizdraht und Mantel befindet sich ein geeigneter Stoff, zum Beispiel Epoxydharz.

In der Mitte der Nadel ist ein Thermofühler, der an der Rohrinneisseite angeschweißt ist. Die Sonde wird komplett im Prüfgut versenkt, sodass nur der Kopf herausragt. Das Probenmaterial wird konstant aufgeheizt und der zeitliche Verlauf mit dem Temperatursensor aufgeheizt. (Großmann, 1993)

Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  kann für einen großen Zeitraum und mit Annahme eines zeitlich und örtlich konstanten  $\lambda$  über die Formel berechnet werden:

$$\lambda = \frac{q}{4\pi(T_2 - T_1)} \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (2.9)$$

(Farouki, 1986)

$\lambda$  ... Wärmeleitfähigkeit [W/mK]

$q$  ... Wärmestrom [W]

$T_2 - T_1$  ... Temperaturdifferenz [°K]

$t_1, t_2$  ... Zeitpunkt [sek]

Die Nadelsonde wird vor allem für Schüttungen, die in einem speziellen Topf verdichtet werden, aber auch für Festkörper, die dann besonders präpariert werden müssen, sodass keine Lufteinschlüsse vorkommen. Festkörper können auch zu feinem Pulver zerkleinert und mit destilliertem Wasser vermischt werden.

Die Substanz muss makroskopisch homogen und isotrop sein.

(Guéguen&Palciauskas, 1994)

Die in der Arbeit verwendete Halbraumsonde ist eine Abwandlung der Nadelsonde und wird noch explizit beschrieben.

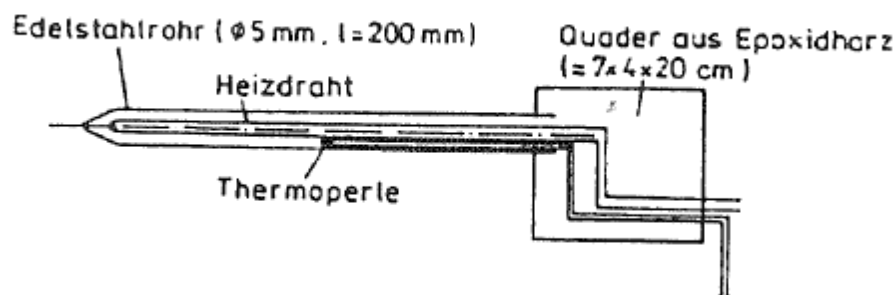


Abb. 2.6: Nadelsonde (Großmann, 1993)

### 2.3.2 Heißdrahtmethode

Diese Methode wurde erstmals von Schleiermacher 1888 angewandt. Bei diesem instationären Verfahren wird der zeitabhängige Temperaturanstieg in einem thermisch ausgeglichenen Prüfkörper gemessen. Es wird das Modell einer linienförmigen Wärmequelle im Vollraum angewandt. Eine dünne Heizquelle ist linienförmig zwischen Ober- und Unterteil eingebracht und erzeugt mit konstanter elektrischer Leistung einen über die Länge des Widerstandsdrahts gleichmäßigen radialen Wärmestrom, der sich achsialsymmetrisch in das umgebende Material ausbreitet. Die zeitliche Änderung der Temperaturdifferenz wird an zwei Stellen im Probekörper gemessen. Man kann zwei Verfahren unterscheiden, je nachdem, wo die beiden Thermofühler im Bezug auf den Heißdraht angebracht sind, das Kreuzdraht und das Paralleldrahtverfahren. (Manderla, 1987) Das zeitliche Temperaturfeld läßt sich mit Hilfe des zweiten Fourier'schen Gesetzes in Form von Zylinderkoordinaten beschreiben:

$$\rho * c \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial \lambda}{\partial t} \left( \frac{\partial \vartheta}{\partial r} \right)^2 + \lambda \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta}{\partial r} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial r^2} \right) \quad (2.10)$$

Diese Gleichung ist nicht geschlossen lösbar, sondern nur durch Näherung abschätzbar. (Marth, 1990)

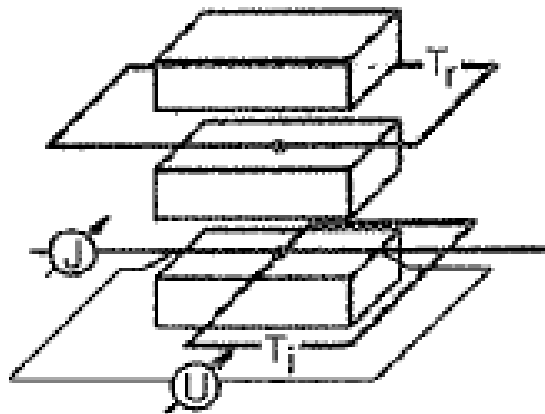
$\rho$ ...	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]
$c$ ...	spezifische Wärmekapazität [W/kg]
$\frac{\partial \vartheta}{\partial t}$ ...	Änderung der Temperatur nach der Zeit [K/sek]
$\frac{\partial \lambda}{\partial t}$ ...	Änderung der Wärmeleitfähigkeit nach der Zeit [W/mKsek]
$\frac{\partial \vartheta}{\partial r}$ ...	Änderung der Temperatur nach dem Radius [K/m]
$\lambda$ ...	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
$r$ ...	Radius [m]

Es ergeben sich folgende Randbedingungen: Die Probe ist ein unendlich ausgedehnter Körper, die Temperaturleitfähigkeit  $a$  und die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  werden als konstant und unabhängig von der Temperatur angenommen. Die Methoden sind gut geeignet für Fluide und Schüttungen. Der Einbau des Heißdrahtes ist unproblematisch und die Konvektion kann aufgrund einer kurzen Messdauer vermieden werden. Ein allseitig guter Kontakt zum Probenmaterial ist zu gewährleisten.

Das Heißdraht-Kreuz-Verfahren ist das einzige direkte instationäre Verfahren. Es wird nach der DIN EN 993-14 geregelt. Das Innenthermoelement ist senkrecht in der Mitte des Heißdrahtes aufgeschweißt und das Referenzelement ist gegenüberliegend im Abdeckkörper angebracht. Mit den beiden gemessenen Temperaturen und den zugehörigen Durchlaufzeiten nach Schließen des Heizkreises kann die Wärmeleitfähigkeit berechnet werden. (DIN EN 993-14):

$$\lambda = \frac{\phi/l}{4\pi} * \frac{\ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right)}{\Delta T_2 - \Delta T_1} \quad (2.11)$$

$\phi$ ...	Wärmestrom [W]
$\lambda$ ...	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
$l$ ...	Länge Heißdraht [m]
$t$ ...	Zeit 1,2 [sek]
$\Delta T$ ...	Temperaturdifferenz zum jeweiligen Zeitpunkt [°K]



**Abb. 2.7:** Kreuzdrahtverfahren (Kollenberg, 2004)

Beim Heißdraht-Parallel-Verfahren nach DIN EN 993-15 liegt das Thermoelement in einem separaten Messkreis in einem festgelegten Abstand ( $\approx 15\text{mm}$ ) zum Heißdraht, sodass sich seine Zuleitung parallel dazu befindet. Der Referenztemperaturfühler verläuft ebenfalls parallel, gegenüberliegend auf dem Abdeckkörper. Gleich wie beim Kreuzdrahtverfahren werden nach gewissen festgelegten Zeiten ab Schließen des Heizkreises zwei Temperaturdifferenzen zwischen den beiden Thermoelementen und die zugehörige Heizleistung gemessen. Die Wärmeleitfähigkeit kann über die Temperaturleitfähigkeit berechnet werden:

$$\lambda = \frac{\phi}{4\pi l} * \frac{-Ei\left(\frac{-r^2}{4at}\right)}{\Delta T(t)} \quad (2.12)$$

Der Ausdruck  $-Ei\left(\frac{-r^2}{4at}\right)$  ist ein Exponentialintegral der Form  $\int_x^u \frac{e^{-u}}{u} du$

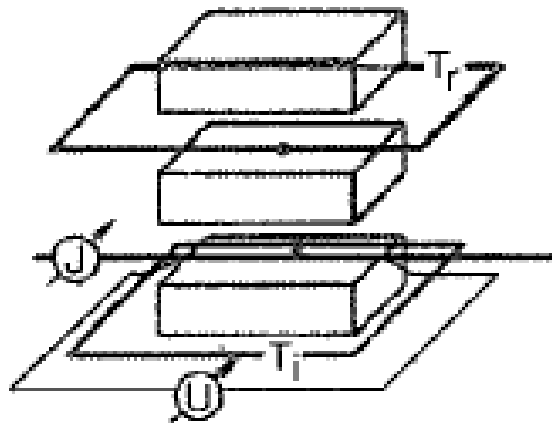
und kann als Funktion von  $\frac{\Delta T(2t)}{\Delta T(t)}$  mit Hilfe von Tabellen abgeschätzt werden.

(DIN EN 993-15)

- $\lambda$  ... Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
- $\phi$  ... Wärmestrom [W]
- $l$  .. Länge [m]
- $r$  ... Radius [m]
- $a$  ... Temperaturleitfähigkeit [m<sup>2</sup>/sek]
- $\Delta T$  ... Temperaturdifferenz [°K]

t ... Zeit [sek]

Da Mess- und Heizkreis voneinander getrennt sind und somit kein Wärmeverlust über das Thermoelement stattfinden kann, ist das Paralleldrahtverfahren präziser als das Kreuzdrahtverfahren.



**Abb. 2.8:** Paralleldrahtverfahren (Kollenberg, 2004)

Neben Kreuzdraht- und Paralleldraht-Verfahren gibt es noch das T(R)-Verfahren, dabei wird der Heißdraht selbst zur Messung der Temperatur verwendet.

### 2.3.3 Quick Thermal Conductivity Meter (QTCM)

Das Quick Thermal Conductivity Meter ist der Halbraumsonde TeKa 04 sehr ähnlich. TeKa 04 wird in einem folgenden Kapitel genau erläutert. QTCM wurde in Japan von der Firma Kyoto Electronics entwickelt. Es misst die Temperatur in Abhängigkeit von der Zeit mit einer linienförmigen Heizquelle, die direkt auf die Oberfläche des zu messenden Materials gedrückt wird. Der Temperaturanstieg im Gerät wird über einen Thermofühler gemessen und mit Hilfe eines Mikroprozessors ausgewertet. Das Prinzip ist das gleiche wie bei der Nadelsonde, nur dass man hier einen Halbraum vorliegen hat. Das Gerät lässt sich schnell und unkompliziert anwenden, allerdings ist der erfassbare Temperaturbereich begrenzt. Da die Prüfeinheit mit dem Heißdraht nur mit geringem Druck und ohne Kontaktgel aufgebracht wird, ist das Messergebnis jedoch verfälscht.

### 2.4 Quasistationäre Methoden

Bei quasistationären Methoden ändert sich das Temperaturfeld ebenso wie bei instationären mit der Zeit, aber es besteht ein periodischer Zusammenhang mit der Zeit, während bei instationären Methoden eine lineare Funktion der Zeit zugrunde liegt. Mit stationären Methoden ist eine quasistationäre insofern vergleichbar, dass sich eine harmonische Schwingung einstellt, die eine Regelmäßigkeit besitzt.

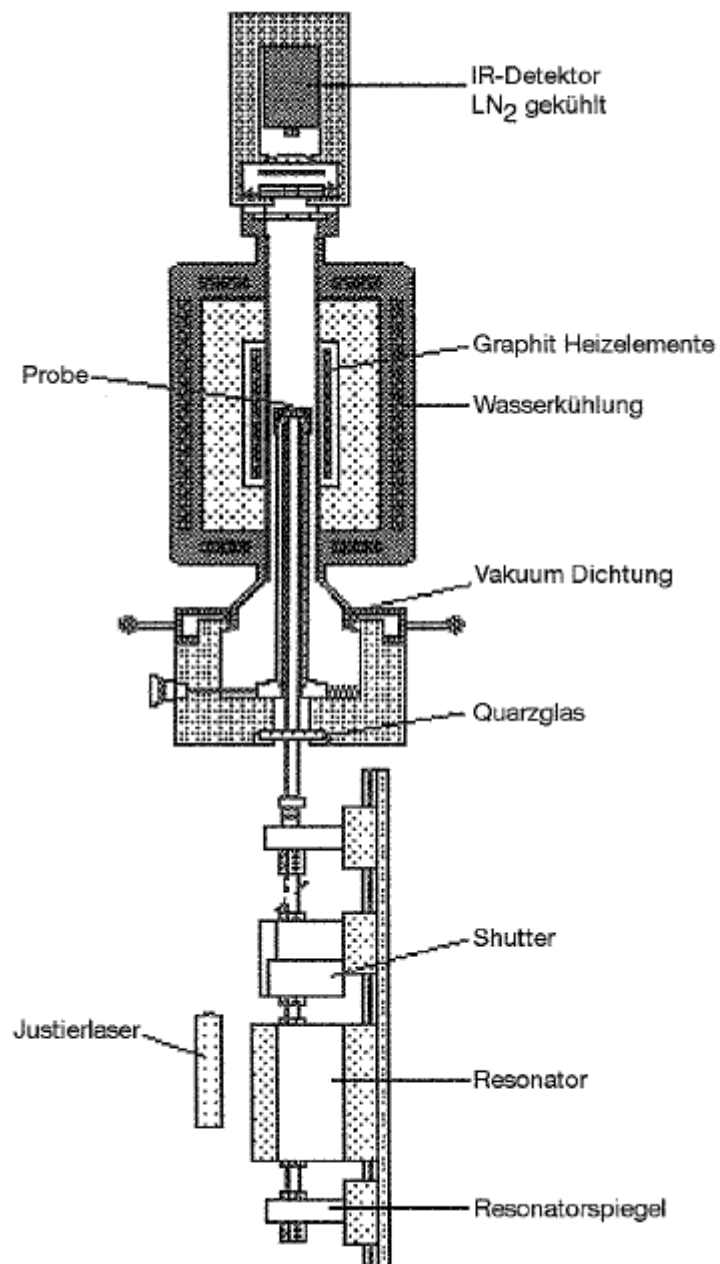
Solche Systeme sind von den Apparaten sehr aufwendig und nur für große Projekte wirtschaftlich.

#### 2.4.1 Laser-Impuls-Verfahren

Das Laser-Impuls-Verfahren ist auch als Laser-Flash-Methode oder englisch pulse-probe-method bekannt und hat eine extrem kurze Messzeit.

Das Laser-Impuls-Verfahren wird zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit fester Materialien bei hohen Temperaturen eingesetzt.

Die Probe muss schmal und scheibenartig sein und sich im thermischen Gleichgewicht befinden. Ein Laser sendet einen kurzen elektromagnetischen Wärmeimpuls aus, der eine genau definierte thermische Energiemenge enthält. Die Antwort auf diese thermische Anregung in Form einer Temperaturänderung über die Zeit wird aufgezeichnet. Die analytische Lösung eines eindimensionalen Wärmeleitproblems wird mit der Aufzeichnung verglichen und so kann die Wärmeleitfähigkeit berechnet werden. (Marth,1990&Czarnetzki,1997)



**Abb. 2.9:** Schematischer Aufbau einer Laserflash Anlage (Kollenberg, 2004)



### 2.4.2 Angström-Methode

Die Angström-Methode wurde von Angström entwickelt. „Periodic temperature waves“ sind harmonische Temperaturschwankungen, die einem homogenen Prüfkörper aufgezwungen werden. An einer Stirnfläche einer stabförmigen Probe werden periodische Thermowellen bekannter Frequenz erzeugt. An definierten Messstellen wird analog mechanischer Schwingungen nach einem Einschwingvorgang die Phasenverschiebung aus dem zeitlichen Verlauf als Maß für die Ausbreitungsgeschwindigkeit und die Amplitudenschwächung als Maß für die Dämpfung abgelesen und daraus die Temperaturleitfähigkeit errechnet.

Die Methode ist auch für sehr hohe Temperaturen geeignet.

Um Interferenzen und Reflexionen zu vermeiden, sollte die Probe eine einfache geometrische Form haben und eine eindimensionale Wellenausbreitung ist anzustreben.

Fehlerquellen sind unzureichend bekannte Anfangsbedingungen, welche durch einen hohen mathematischen Aufwand beachtet werden müssen, der große experimentelle und wirtschaftliche Aufwand sind weitere Nachteile.

(Vlajčić, 1976 & Czarnetzki, 1997)

Als Schwingungserzeuger können verschiedene Mittel angewandt werden, wie Peltierelemente, amplitudenmodellierter Laser, Infrarotstrahler, Xenonlampen oder Elektronenstrahlen für hohe Temperaturen. Für die Messung der thermischen Reaktionen verwendet man Thermoelemente, Infrarotstrahlungsdetektoren, holographische Interferometrie oder Photosensoren. (Czarnetzki, 1997)

### 2.5 Vergleich der Messmethoden

Stationäre Methoden zeichnen sich durch einfache Messapparate aus, die präzise und zuverlässige Ergebnisse erzielen. Wegen des eindimensionalen Wärmestroms wird die Orientierung der thermischen Anisotropie erfasst, hingegen ist bei instationären Verfahren nur die Bestimmung von Mittelwerten der richtungsabhängigen Wärmeleitfähigkeit möglich. Von Nachteil ist die lange Messdauer, eine aufwendige Probenvorbereitung und die Beschränkung auf eine Messgröße, die Wärmeleitfähigkeit.

Instationäre Methoden haben im Vergleich zu stationären viel kürzere Messzeiten, wodurch der Einfluss der Konvektion verhindert werden kann. Außerdem lässt sich neben der Wärmeleitfähigkeit auch die Temperaturleitfähigkeit bestimmen. Schwierig sind die Umsetzung der Randbedingungen und die verwendeten mathematischen Modelle, die auf der Fourier'schen Differentialgleichung basieren.

Quasistationäre Messmethoden sind wegen der aufwendigen Apparaturen kostenintensiv. Dafür sind sie extrem genau und können vielfältig eingesetzt werden.

## 3 Einplattenverfahren

Das Einplattenverfahren wird in der englischen Sprache “Guarded Hot Plate Apparatus” genannt.

Die Messung der Wärmeleitfähigkeit von Sand im Rahmen der Diplomarbeit wird mit einem Einplattengerät der slowakischen Firma Applied Precision Ltd., Modell GHP 674 durchgeführt und mit der Messung der Wärmeleitfähigkeit mit der Halbraumsonde der Firma TeKa, Modell TK 04 verglichen.

Das GHP 674 ist ein Messgerät zur Messung von stationären Wärmeleit-Eigenschaften für flache, plattenförmige Proben. Es ist mit einer schwenkbaren Prüfeinheit auf einem fahrbaren Metallgestell ausgestattet, in der die Probenplatte geprüft wird.

Der Wärmeleitwiderstand und die Wärmeleitfähigkeit können in horizontaler und vertikaler Position geprüft werden. Das GHP 674 kommt in Labors und für die Qualitätsprüfung zum Einsatz. Aufgrund der variablen Probengröße, die damit messbar ist, lässt sich damit auch inhomogenes Material prüfen.

Zur Messeinheit gehören noch Kontroll-Computer und Software.

Gemessen wird nach ISO 8302 und Isolierglas nach Standard EN 647.

Das Messgerät besteht aus einer Heizplatte und einer Kühlplatte.

Wärmeverluste in horizontaler und vertikaler Richtung werden durch zwei Heizsysteme, die unabhängig vom Mess-Heizsystem betrieben werden, kompensiert.

GHP 674 ermöglicht die Kalibration der elektrischen Spannung an drei Wärmefluss-Wandlern nach EN 1934, um eine konstante Heizleistung zu gewährleisten.

GHP 674 genügt hohen Qualitätsansprüchen und ist mit einer vollautomatischen Schaltung ausgestattet. Guter Bedienungskomfort, hohe Zuverlässigkeit und Messgenauigkeit zeichnen das GHP 674 aus.

Die dazugehörige Mess-Software wertet die Messungen nach den Standards ISO 8302 und EN 674 aus und liefert eine volle Messdatenliste für anschließende Analysen.

### 3.1 Das Messprinzip

Das Einplattengerät GHP 674 erzeugt durch die zu prüfende Platte einen stationären Wärmefluss gleicher Dichte zwischen Heiz- und Kühlplatte. Die zentrale Messeinheit der Heizplatte ist von einem Schutzring umgeben. Der Schutzring wird mit der gleichen Temperatur geheizt wie die Messeinheit, um einen Wärmeverlust in horizontaler Richtung zwischen Einheit und Umgebung zu vermeiden. Der vertikale Schutzbereich verhindert einen Wärmeverlust zwischen Unterseite der Heizplatte und der Umgebung in vertikaler Richtung.

### 3 Einplattenverfahren

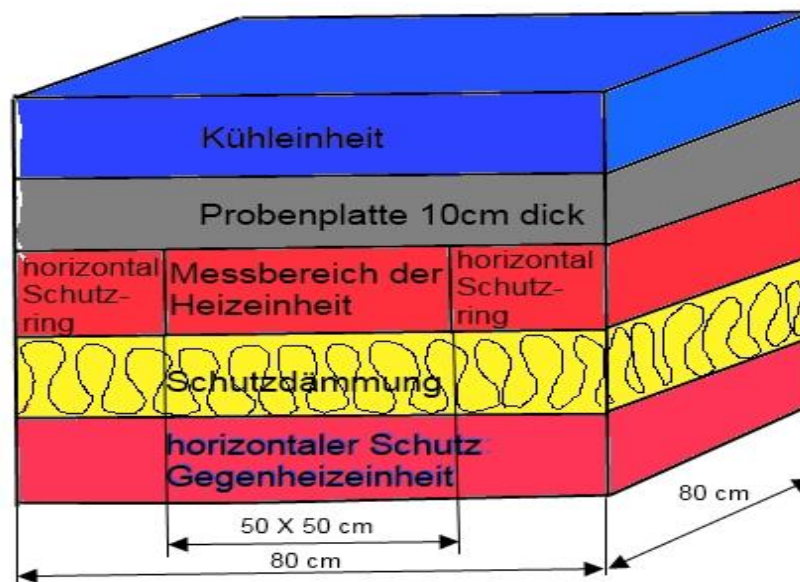
Das Messgerät wird über Gleichstrom gespeist, dabei ergibt sich die elektrische Leistung:

$$Q = U \cdot I \quad (3.1)$$

Q ... elektrische Leistung [W]

U ... elektrische Spannung [V]

I ... elektrische Stromstärke [A]



**Abb 3.1:** vereinfachte Darstellung des Aufbaus des Einplattenmessgeräts (Guarded Hot Plate Apparatus GHP674) (Applied Precision Ltd., 2010)

Das Einplattenverfahren ist ein absolutes Verfahren, es können Wärmeleitwiderstand  $R$  und Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  gemessen werden. Sie werden direkt aus der Wärmeflussdichte, Dicke des Materials und den Temperaturdifferenzen berechnet.

$$\lambda = \frac{Q \cdot d}{S \cdot (T_H - T_C)} \quad (3.2)$$

$$R = \frac{S \cdot (T_H - T_C)}{Q} \quad (3.3)$$

$\lambda$ ...	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
$d$ ...	Probendicke [m]
$S$ oder $A$ ...	Fläche des Messbereichs [m <sup>2</sup> ]
$T_H$ ...	Temperatur Heizplatte [K o. °C]
$T_C$ ...	Temperatur Kühlplatte [K o. °C]
$R$ ...	Wärmeleitwiderstand [m <sup>2</sup> K/W]
$Q$ ...	Heizleistung [W]

Die Heizplatte erzeugt durch Variation der zugeführten Wärmemenge drei verschiedene Temperaturen, wobei die eigentlichen, zu erzielende Temperatur und Heizleistung zwischen diesen liegen und durch Interpolation angenähert werden. Aus diesem Prinzip lässt sich mit den Ergebnissen ganz einfach die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  berechnen.

## 3.2 Spezifikationen

Die Spezifikationen, die für ein Verständnis der Messmethode notwendig sind, sind in folgender Tabelle aufgeführt:

Messmethode	Guarded Hot Plate Apparatus nach ISO 8302:1991, EN 12667:2001 und Probenvorbereitung nach EN 674
Probengröße	0.8m x 0.8m
Messbereich	0.5m x 0.5m
Bereich Wärmeleitfähigkeit	0.015 ... 1.0 W/m.K
Bereich Wärmewiderstand	0.1 ... 5 m <sup>2</sup> .K/W
Bereich Plattentemperatur	0 ... +60 °C
Maximale Dicke der Platte	100 mm
Spalt zwischen Messbereich und Schutzring	2 mm
Minimale Dicke bei Einhaltung von 1.7.6 ISO 8302 (Verhältnis zwischen Spaltbreite und minimaler Dicke)	20 mm
Wiederholbarkeit der Wärmeleitfähigkeit	1 %
Genauigkeit der Leistungsmessung	0.1%
Genauigkeit der Temperaturdifferenzmessung	1 %
Genauigkeit der Wärmeleitfähigkeitsmessung	3 %
Stromquelle	220 V AC/16A, 50Hz, 60Hz

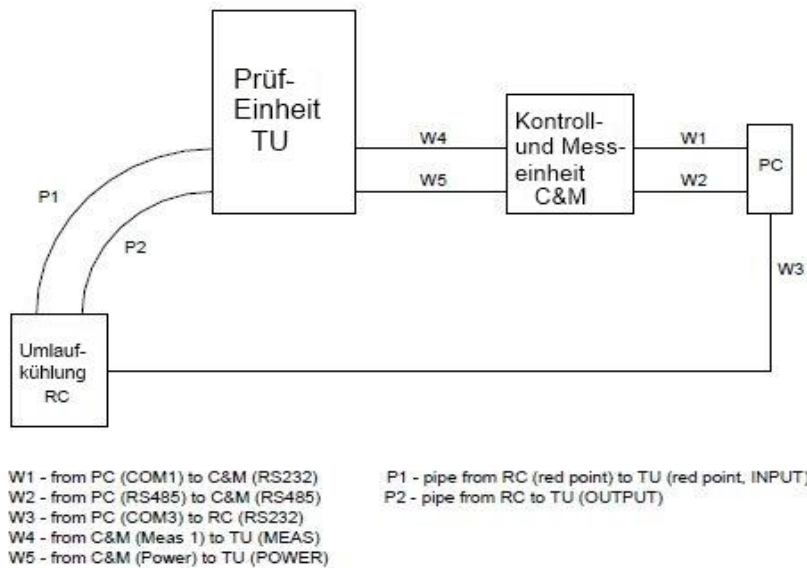
**Tab. 3.1:** Spezifikationen des GHP674 (Applied Precision Ltd., 2010)



**Abb. 3.2:** Einplattengerät GHP674 (Applied Precision Ltd., 2010)



**Abb. 3.3:** Verschiedene Positionen GHP674 (Applied Precision Ltd., 2010)



**Abb. 3.4:** Aufbau Messsystem GHP674 (Applied Precision Ltd., 2010)

Abbildung 3.4 stellt den Aufbau des Messsystems GHP674 dar, das in den folgenden Kapiteln beschrieben ist.

## 3.3 Beschreibung Messinstrument

### 3.3.1 Prüfeinheit

Das Messsystem GHP674 besteht aus vier funktionalen Einheiten, der Prüfeinheit, Kontroll- und Mess-Einheit, dem Kontroll-Computer und der Kühleinheit. Das Einplattengerät GHP674 verfügt über eine schwenkbare Prüfeinheit auf einem Metallgestell. Das Schwenken der Prüfeinheit und das Absenken der Kühlplatte werden über einen Elektromotor durchgeführt. Vier wärmegeädämmte Klappen verschließen die Probe im Kern der Messeinheit. Die Vorder- und Rück-Klappen sind an der oberen Kante aufgehängt und um rund 200° schwenkbar. Die geöffneten Klappen können durch Stäbe an der linken Seite des Prüfgehäuses fixiert werden. Sie verfügen über Sicherheitsbolzen in den unteren Ecken, die geschlossen werden müssen, wenn die Klappen geschlossen sind, bevor man die Einheit schwenkt. Die seitlichen Klappen sind um rund 10° um die untere Kante schwenkbar, was notwendig ist um die Probe zu platzieren und zu entnehmen und die Deckplatte zu bewegen. Die Bewegung der Seitenklappen wird durch zwei obenliegende Hebel geregelt.

Während der Wärmeleitfähigkeitsmessung müssen alle vier Klappen geschlossen sein. Wird die Probe eingebracht, sind alle Klappen zu öffnen. Vor dem Schwenken ist sorgsam auf das Schließen der Sicherheitsbolzen zu achten, um ein unbe-

absichtigtes Öffnen zu verhindern. Unten befindet sich die Heizeinheit der Prüfvorrichtung. Die Kühleinheit ist über der Heizeinheit angebracht und wird über einen Elektromotor bewegt. Jede der Messplatten verfügt über fünf Typ T Thermoelemente, die auf der Plattenoberfläche befestigt sind. Die eingebauten Thermoelemente sind über Typ T Thermoelement-Stecker mit den Input Sockeln des thermisch gleichen Blocks verbunden. Die Thermoelement Sockel unterhalb der vorderen Klappe dienen als Interface für Thermoelement-Verbindungen, sodass eingebaute Thermoelemente durch externe Thermoelemente ersetzt werden können. Sollte eine Matte zur Anpassung zwischen Messplatten und der Probe notwendig sein, werden die Oberflächentemperaturen der Probe durch externe Thermoelemente nach der EN 674 für Isolierglas gemessen, die direkt auf der Probenoberfläche angebracht sind. Die Dicke der Matte sollte kleiner gleich 2 mm betragen. Sollte die Matte dicker als 2 mm sein, muss jenes Thermoelement, das mit TH5 gekennzeichnet ist, mit einem eingebauten Thermoelement verbunden und für die Sicherheitsüberwachung der Heizeinheit eingestellt werden. An der Vorder- und Hinterseite der Heiz- und Kühleinheit befinden sich vier Kunststoffhalterungen, die die Schutzleisten aus rostfreiem Stahl fixieren. Die Schutzleisten haben zwei Funktionen, einerseits um die Kühleinheit in der vertikalen Position zu fixieren (z.B.: für Messung am Isolierglas), andererseits dienen sie als Führung der Kühleinheit, wenn sie auf die Probenoberfläche aufliegt. Die Kühlplatte und die Hilfskühlung der Heizplatte werden durch eine Kühlflüssigkeit von der Umlaufpumpe gespeist. Die Standard- Innen- und Außen-Düsen unterhalb der Prüfeinheit sind mit der Kühl-Umwälzpumpe über zwei gedämmte Kunststoffdüsen verbunden. Der Elektromotor bewegt die Prüfeinheit in vertikale Position und dann in horizontale. Der Motor wird über einen Drehschalter an einem flexiblen Kabel betätigt, was dem Bedienpersonal eine sichere Entfernung zur Prüfeinheit ermöglicht, wenn der Motor eingeschaltet wird.

### **3.3.2 Kontroll und Messeinheit (C&M unit)**

Die Kontroll und Messeinheit verfügt über das Netzteil für die Heizeinheit und gewährleistet die Leistungsmessung, die Messung der Thermoelemente, das Widerstandsthermometer und Wärmefluss-Ergebnisse. Die Messungen werden mit einer Daten- und Schalteinheit von Agilent Technologies, Modell 34970A durchgeführt. Die C&M Einheit wird vom Kontrollcomputer gesteuert. Die Kontroll-Software ermöglicht einen automatischen Messprozess der Wärmeleitfähigkeit und die fortwährende Aufzeichnung der Daten. Der Rückteil der C&M Einheit enthält den elektrischen Anschluss und Verbindungsanschlüsse zu den GHP674 Teilen. Spannung und aktuelle Werte der Messeinheit können über Standard Volt- und Amperemeter an der Rückseite der C&M Einheit über Zwillingsstecker, die mit „SHUNT“ gekennzeichnet sind, kalibriert werden. Der Terminal „U“ wird mit dem Messbereich der Heizeinheit verbunden und dient der Kalibrierung des Gleichstroms der Messbereich-Heizeinheit. Der Terminal

---

„I“ ermöglicht die aktuelle Kalibrierung der Messbereich-Heizeinheit mit einem Amperemeter.



**Abb. 3.5:** Vorder- und Rückseite der Kontroll und Messeinheit C&M unit

### 3.3.3 Umlaufkühlung

Die Umlaufkühlung ist von der Firma Thermo-Haake, Modell DC50-K40.

Die Umlaufkühlung gewährleistet stabile Temperaturen der Kühlflüssigkeit und deren Umlauf durch die Prüfeinheit. Die Umlaufkühlung ist mit der Prüfeinheit über zwei gedämmte Kunststoffdüsen verbunden. Die Umlaufkühlung muss mit der Hand oder mit dem Kontroll-Computer bedient und über Kontroll-Software gesteuert werden. Bevor die Heizeinheit eingeschaltet wird, muss die Umlaufkühlung für die Kühleinheit in Gang gesetzt werden.



# 4 Halbraumsonde

Die Halbraumsonde zählt wie die Vollraumsonde zu den Nadelsonden. Der Vorteil der Halbraumsonde ist, dass nicht in den Probenkörper gebohrt werden muss. Die Nadel und Probenumgebung sollten idealerweise vollkommen in Kontakt sein.

Bei der Halbraumsonde breitet sich die Wärme nur über den halben Raum aus, die Berechnung muss daher verdoppelt werden.

Für die Messung der Wärmeleitfähigkeit von porösem Material wird die Halbraumsonde herangezogen. Das Einbringen der Nadel einer Vollraumsonde würde das Gefüge im Sand stören und zu einer Verfälschung des Messergebnisses führen. Außerdem tritt bei einer Messung mit der Halbraumsonde seltener Konvektion auf, als bei der Messung mit der Vollraum-Sonde.

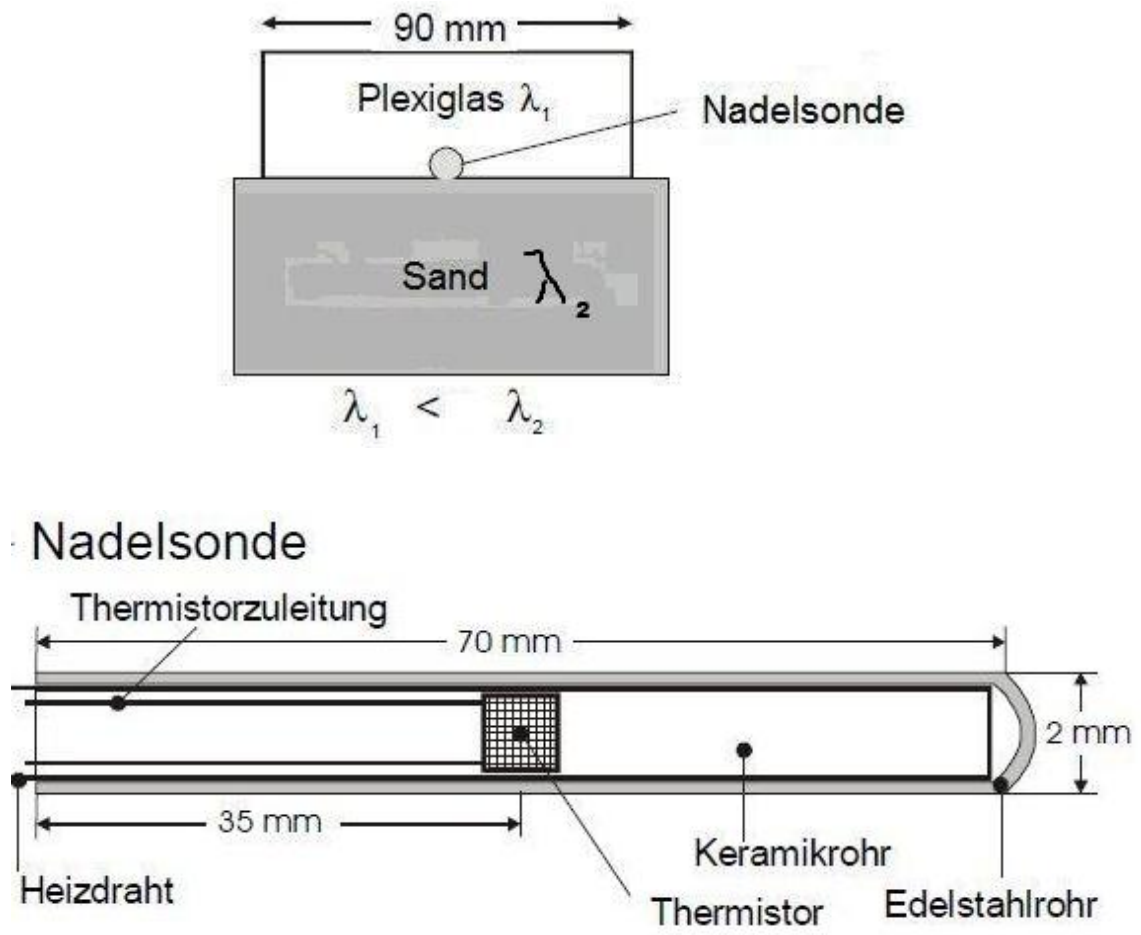
An der TU Graz wird das TK 04 der Firma TeKa mit einer Halbraumsonde zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit an zylindrischen Proben eingesetzt.

## 4.1 Das Messprinzip

TK04 verwendet die bewährte Methode der instationären Linienquelle. Dabei wird eine 70 mm lange, 2 mm dünne Heizquelle in Kontakt mit der Probe gebracht und mit konstanter Leistung beheizt, gleichzeitig wird die Temperatur im Inneren der Quelle registriert. Je langsamer die Quellen-Temperatur bei gegebener Heizleistung ansteigt, desto höher ist die Wärmeleitfähigkeit des Probenmaterials.

TK04 verwendet für die Auswertung ein analytisches Verfahren. Analytische Verfahren zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit beruhen auf der theoretischen Lösung der Wärmeleitungsgleichung für eine allseitig von Probenmaterial umgebene linienförmige Heizquelle, die als Differentialgleichung die zeitliche und räumliche Änderung der Temperatur in Heizquelle und Probe beschreibt.

Die Lösung der Wärmeleitungsgleichung liefert eine Formel für den Temperaturanstieg in der Heizquelle, die als Parameter unter anderem die Wärmeleitfähigkeit des Probenmaterials enthält. Diese theoretische Kurve wird an die gemessene Temperaturkurve angepasst, und aus den dabei ermittelten Anpassungskoeffizienten wird die Wärmeleitfähigkeit berechnet. Da analytische Verfahren absolute Werte liefern, sind im Gegensatz zu empirischen Verfahren keine Referenzstandards oder regelmäßige Kalibriermessungen erforderlich. (TeKa, 2010) Die folgenden Darstellungen sind Skizzen der Elemente der Halbraumsonde.



**Abb. 4.1:** schematischer Aufbau einer Halbraumlinienquelle (K.Erbas, 2001)



**Abb. 4.2:** Halbraumsonde TK 04 ( TeKa, 2010)

Der Berechnungsalgorithmus geht von der Wärmeleitungsgleichung für eine zylindrische Linienquelle in einem homogenen und isotropen Vollraum aus. Der ideale thermische Leiter als Quelle ist unendlich lang und hat einen sehr geringen Durchmesser mit vernachlässigbarer Wärmekapazität. Dabei setzt diese Quelle

ab dem Zeitpunkt  $t=0$  eine konstante Wärmemenge je Längeneinheit und Zeiteinheit frei.

Unter diesen Voraussetzungen ergibt sich folgende Temperaturverteilung im Vollraum:

$$T(r,t) = \frac{q}{4\pi\lambda} E_1\left(\frac{r^2}{4\kappa t}\right) \quad (4.1)$$

(K.Erbas, 2001)

$T(r,t) \dots$	Temperatur an der Stelle $r$ , zur Zeit $t$ [ $^{\circ}\text{C}$ oder $\text{K}$ ]
$q \dots$	konstante Heizleistung pro Längeneinheit [ $\text{Wm}^{-1}$ ]
$\lambda = \kappa\rho c \dots$	Wärmeleitfähigkeit des Vollraums [ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]
$\kappa \dots$	Temperaturleitfähigkeit [ $\text{ms}^{-2}$ ]
$\rho \dots$	Dichte [ $\text{kgm}^{-3}$ ]
$c \dots$	spezifische Wärme der Quelle [ $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]
$t \dots$	Zeit [sek]
$r \dots$	radialer Abstand von der Quelle [m]
$E_1(x) = -E_i(-x) \dots$	Integralexponentialfunktion $E_i(x) = \int_{-\infty}^x \frac{e^u}{u} du, x > 0$

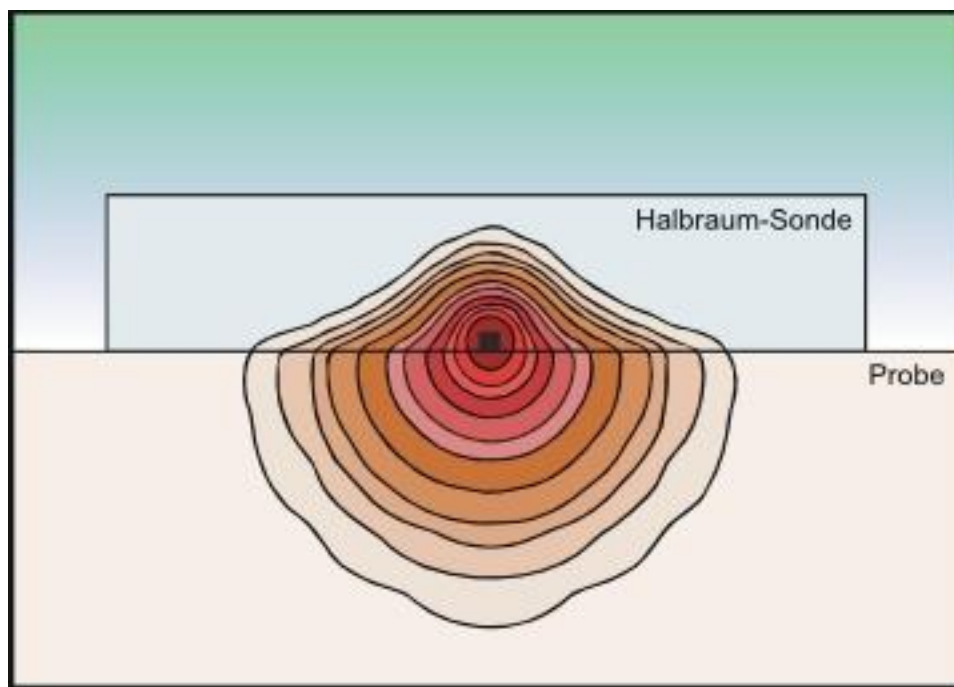
Durch die Lösung von Differentialgleichungen, die in der Doktorarbeit von Kemal Erbas, Berlin 2001 ausführlich beschrieben sind, wird ein komplizierter Algorithmus für eine Halbraumsonde mit endlich langer Nadel, die in einen Polymethylmethacrylat-Zylinder (Plexiglas) eingebettet ist, hergeleitet.

Für die praktische Anwendung kommen Näherungslösungen zum Einsatz, deren Genauigkeit unter anderem davon abhängt, wie stark die analytische Lösung der Differentialgleichung vereinfacht wurde. Üblich ist eine einfach auszuwertende Näherungsformel, die den Temperaturanstieg in halblogarithmischer Darstellung als linear betrachtet und deren Genauigkeit für nichtwissenschaftliche Anwendungen oft ausreicht.

TK04 verwendet stattdessen ein neuentwickeltes Verfahren auf Basis einer Näherung höherer Ordnung, das die nichtlineare Kurvenform einer realen Temperaturkurve berücksichtigt. Durch die aufwändigere Auswertung wird eine sehr hohe Genauigkeit von  $\pm 2\%$  erzielt. Zusätzlich ermöglicht der Vergleich der Kurvenformen von theoretischem und gemessenem Temperatur-Verlauf die Erkennung typischer Störeffekte (wie mangelhafter Kontakt zwischen Sonde und Probe) bereits aus den Messdaten heraus.

Üblicherweise werden Halbraum-Messungen mit demselben Verfahren ausgewertet wie die Vollraum-Messungen. Der berechnete Wärmeleitfähigkeits-Wert wird verdoppelt, da im Vergleich zu einer Vollraum-Messung die abgegebene Wärmemenge sich nur in einen Halbraum auf einer Seite der Heizquelle ausbreitet, während der andere Halbraum durch einen Sondenkörper aus wärmeisolierendem Material gebildet wird.

Da das Sondenmaterial in der Praxis kein idealer thermischer Isolator ist, strömt jedoch immer ein Teil der abgegebenen Wärmemenge auch in den Sondenkörper. Halbraum-Messungen sind daher mit einem Fehler behaftet, der umso größer wird, je dichter die Wärmeleitfähigkeiten von Sondenkörper und Probenmaterial beieinander liegen. Darum weisen instationäre Halbraum-Messungen systematisch überhöhte Werte im Vergleich zu stationären Messungen auf. Bei einem Sondenmaterial mit  $\lambda = 0.18 \text{ W/mK}$  ergibt sich bereits bei Wärmeleitfähigkeiten um  $1 \text{ W/mK}$  ein zusätzlicher systematischer Fehler von ca. +10%. Bisherige Versuche einer nachträglichen Korrektur blieben unbefriedigend, da diese nicht nur von der Wärmeleitfähigkeit der Probe, sondern auch von den Eigenschaften der einzelnen Sonde abhängt. TK04 korrigiert durch Regulierung der Temperatur unter Berücksichtigung der thermischen Parameter von Sonde und Probe die Heizleistung auf den Betrag, der tatsächlich in die Probe gelangt und gewährleistet damit innerhalb der Messgenauigkeit übereinstimmende Werte von Vollraum- und Halbraum-Messungen. ( TeKa, 2010)



**Abb. 4.3:** Erwärmung Halbraum-Sonde und Probe (TeKa, 2010)

### 4.3 Das Messgerät TK 04

Das Messgerät TK 04 verbindet den Computer, der die Messung steuert, mit der Halbraumsonde. Dabei werden die Heiz- und Abkühlprozesse geregelt und Daten an den Computer übermittelt. Die gemessene Temperatur in Abhängigkeit von der Zeit wird vom Computer für die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit herangezogen.



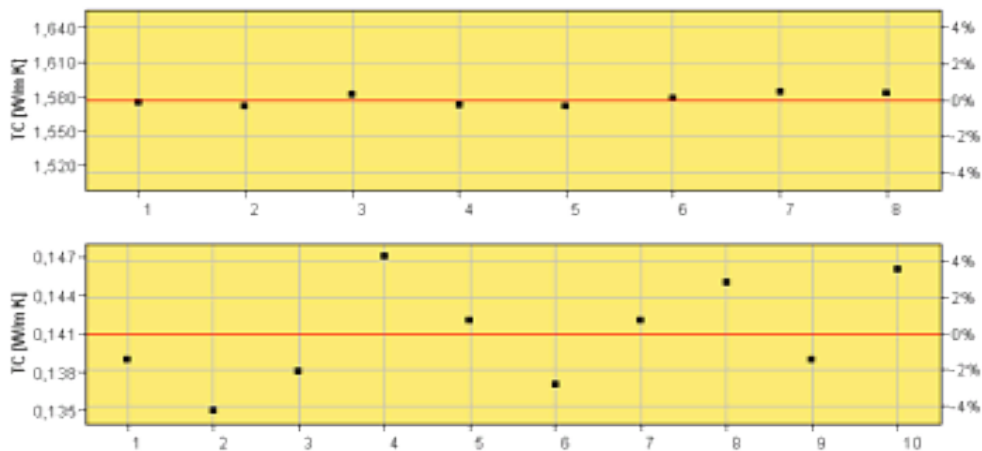
**Abb. 4.4:** Messgerät TK 04 (TeKa, 2010)

### 4.4 Probenpräparation und notwendige Apparaturen

Um die sehr sensible, hochauflösende Temperaturmessung an der Probe ungestört durchführen zu können, sind eine möglichst konstante Raumtemperatur und ein sattes Aufliegen der Halbraumsonde unter Druck zu gewährleisten. Dazu empfiehlt es sich einen wärmedämmten Behälter (Thermoschrank) einzusetzen. Luftzug, Sonneneinstrahlung und Strahlung durch Heizkörper müssen vermieden werden. Zur Sicherstellung der Schlüssigkeit zwischen Sonde und Probe wird eine Presse verwendet. Idealerweise sollte der Druck auf die Probe zwischen 5 und 15 bar betragen. Ein höherer Druck als 15 bar würde die Sonde beschädigen. An der zylinderförmigen Probe sind planparallele Oberflächen herzustellen, dies geschieht bei Festkörpern durch Sägen und anschließendes Schleifen (Körnung 400). Der Probendurchmesser sollte zumindest dem Sondendurchmesser entsprechen, was bei der Standard Halbraumsonde 88 mm entspricht. Die Probendicke beträgt mindestens 15 mm. Die Verwendung eines Kontaktmittels, einer silikonhaltigen Wärmeleitpaste wird empfohlen. Diese wird dünn auf die Unterseite der Sonde aufgetragen, wo sich die Wärmequelle befindet.

Es werden immer Messreihen mit 3 bis 10 Einzelmessungen durchgeführt. Ein Indikator für die Qualität der Messungen ist die Streuung der Messwerte innerhalb

einer Reihe, die auf alle Fälle unter  $\pm 5\%$  liegen muss. Optimal beträgt die Streuung unter  $\pm 0.5\%$ . Über  $\pm 5\%$  sind die Messbedingungen zu überprüfen.



**Abb. 4.5:** Streuung über der Anzahl der Messungen aufgetragen, oben optimale Bedingungen, unten zu große Streuung (TeKa, 2010)



**Abb. 4.6:** Presse mit Handpumpe (TeKa, 2010)



Abb. 4.7: Probenbehälter (TeKa, 2010)

## 4.5 Auswertung der Messungen, Qualitätskontrolle

Die graphische Auswertung der Diagramme, die anhand der Messreihen aus 3 bis 10 Einzelmessungen (maximal bis zu 99 Einzelmessungen) übernimmt die Messsoftware der Firma TeKa. Sie gibt Aufschluss über die Qualität der erhaltenen Messergebnisse. Sechs verschiedene Diagramme sind verfügbar.

### 4.5.1 Das TC-Diagramm

Das Thermal Conductivity (TC) Diagramm vergleicht die Werte der Einzelmessungen der Wärmeleitfähigkeit mit ihrem Mittelwert. Auf der linken Y-Achse sind die  $\lambda$ -Werte, auf der rechten die prozentuelle Abweichung vom Mittelwert aufgetragen. Eine Abweichung größer dem Bereich  $\pm 5\%$  liegt außerhalb des Toleranzbereichs und weist auf einen Messfehler hin.

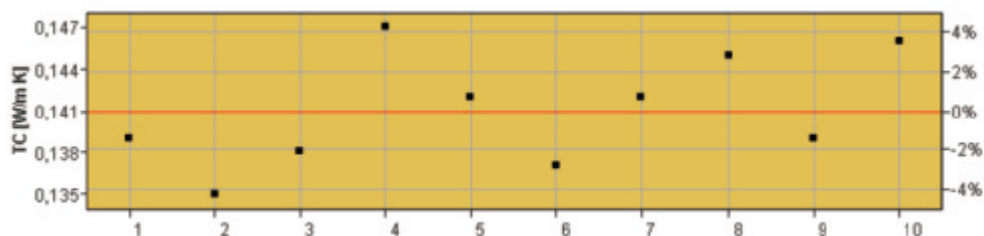
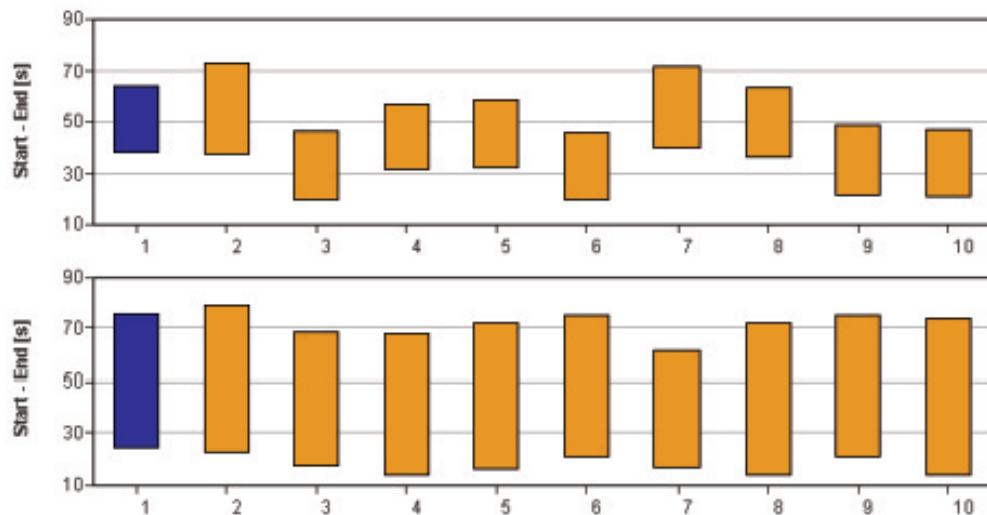


Abb. 4.8: TC-Diagramm mit Einzelmessungen (Punkte) und Mittelwert (Mittelinie) (TeKa, 2010)



## 4.5.2 Das Intervall Diagramm

Die TK 04 Software ermittelt automatisch das optimale Intervall für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit. Die tatsächlichen Intervalle werden mit dem theoretischen Intervall verglichen und sollten diesem in Lage und Dauer möglichst ähnlich kommen. Sind die gemessenen Intervalle sehr kurz und oder liegen relativ weit hinten (im Graph oben), deutet dies auf thermische Störungen durch unzureichenden Kontakt zwischen Probe und Sonde oder zu kleinen Proben hin. Gute Messreihen haben lange Intervalle und beginnen relativ weit vorne ( im Graph unten). Sollte der Intervallbeginn nach 35 Sekunden starten, müssen die Messungen überprüft werden.

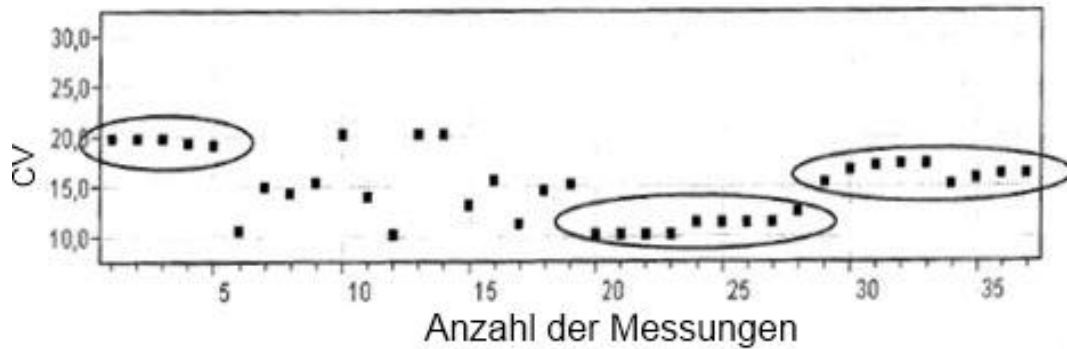


**Abb. 4.9:** oben: „schlechte Messreihe“ Intervall Diagramm mit kurzem Intervall, Intervall relativ weit oben, unten „gute Messreihe“ Intervall Diagramm mit langem Intervall, Intervall relativ weit unten (TeKa, 2010)

## 4.5.3 Das Contact-Values (CV) Diagramm

Ein weiteres Qualitätsmerkmal für die Messreihe sind die Contact Values der einzelnen Messungen. Diese sollten möglichst konstant sein, ansonsten sind die Messungen zu wiederholen. Der Wert kann sich bezüglich der Messreihe unterscheiden, obwohl in der Einzelmessung kein Messfehler zu erkennen ist.



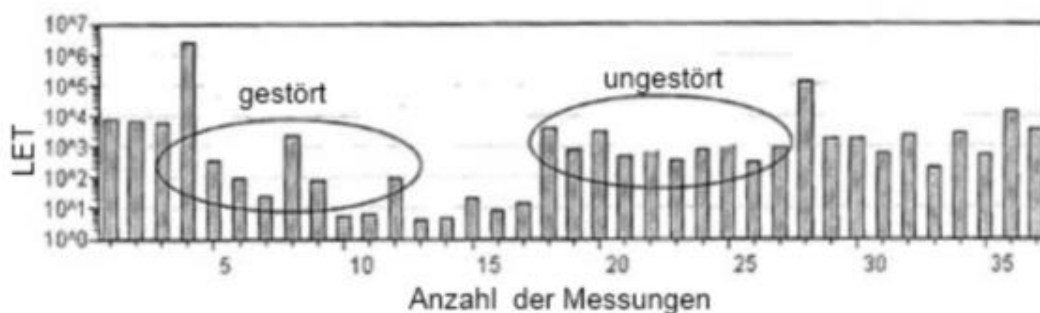


**Abb. 4.10:** Contact Value Diagram, der Verlauf ist nur bereichsweise konstant (TeKa, 2010)

#### 4.5.4 Das LET Diagramm

Der LET-Wert oder „Ln extreme time-Wert“ beschreibt in der Stochastik den natürlichen Logarithmus der verstrichenen Zeit bis zum Erreichen eines Extremwertes (Minimum oder Maximum eines Prozesses). Im vorliegenden Fall der Heizzyklen mit konstanter Heizleistung und dazwischenliegender Abkühlphasen nimmt man den natürlichen Logarithmus der Zeit bis zum Erreichen der höchsten Temperatur jeder diskreten Einzelmessung.

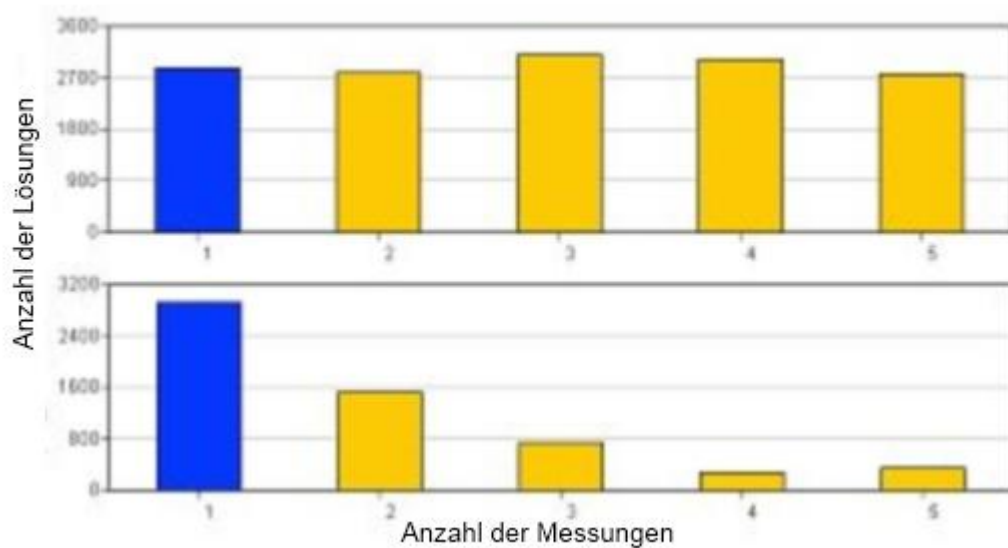
Der LET-Wert gibt Aufschluss über die Ungestörtheit der Messungen. ER soll möglichst hoch sein und zumindest einen Wert von 50 überschreiten. Die erhaltenen LET-Werte für die Einzelmessungen sollen sich so gering wie möglich voneinander unterscheiden.



**Abb. 4.11:** LET-Diagramm, gestörte und ungestörte Messungen (TeKa, 2010)

### 4.5.5 Das „Number of Solution“-Diagramm

Das „Number of Solution“ Diagramm, in der deutschen Sprache Lösungs- Anzahl, zeigt die Anzahl der gefundenen möglichen Lösungen für die Einzelmessungen an. Je mehr Lösungen vorhanden sind, umso besser ist die Qualität der Messung. Die Anzahl der Lösungen sollte zwischen 100 und bis zu 3000 liegen, auf keinen Fall 100 unterschreiten. Sie sollte für die Einzelmessungen möglichst konstant sein, kann aber innerhalb einer Messreihe abfallen, was keinen Einfluss auf die Qualität der Messung hat, solange der Toleranzbereich eingehalten wird.

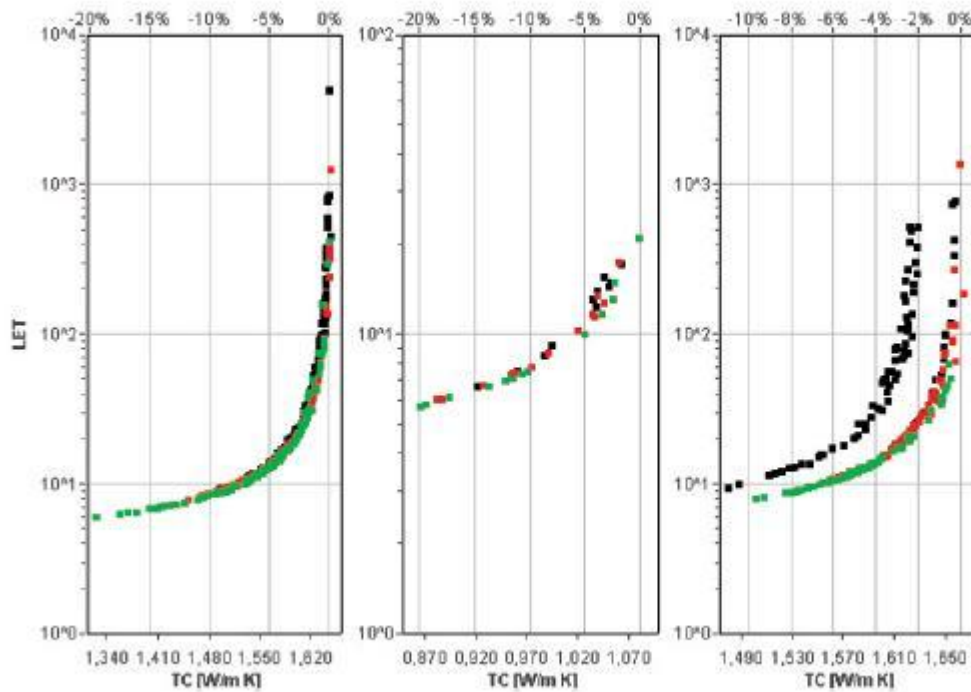


**Abb. 4.12:** „Number of Solution“-Diagramm, oben „gute“ Messreihe, nahezu konstante Anzahl Lösungen, unten „schlechte“ Messreihe, zu wenige Lösungen und Anzahl variiert zu stark. (TeKa, 2010)

### 4.5.6 Das „Single Measurement“-Diagramm

Trägt man die LET-Werte aller ausgewerteten Intervalle über den zugehörigen Wärmeleitfähigkeits-Werten auf, sollten sich diese bei einer ungestörten Messung einer charakteristischen Asymptote annähern. Der bei der Messung ermittelte Wärmeleitfähigkeitsbeiwert entspricht dem Maximum der Kurve, der Spitze der Asymptote.

Weicht die Kurve vom asymptotischen Verlauf ab, lässt sich auf die Art des Fehlers schließen.



**Abb. 4.13:** „Single Measurement“-Diagramm links: korrekte Messung, Störungen mitte: unzureichender Kontakt zwischen Sonde und Probe, rechts: Reflexionen der Wärmequelle am Probenrand (TeKa, 2010)

## 5 Die Eigenschaften der Bodenproben

Die Wärmeleitfähigkeit der Bodenproben aus Sandmaterial wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst, die auch für die Interpretation der Messergebnisse relevant sind. Im ersten Kapitel konnten dazu bereits Anhaltspunkte geliefert werden. Konkret werden in der Diplomarbeit die Wärmeleitfähigkeiten eines UK 4 Sandes und eines Thermosandes bei unterschiedlichen Feuchtegehalten untersucht.

### 5.1 Materialzusammensetzung

Sand besteht aus einem festen Kornanteil (Matrix) und einem mehr oder weniger großen Porenraum. Die Wärmeleitfähigkeit der Matrix des Grundmaterials ist ein grundlegender Einflussfaktor, die höchste Matrix-Wärmeleitfähigkeit natürlicher Materialien erreicht reiner Quarzsand mit 6,5 bis 12,5  $Wm^{-1}K^{-1}$ .

Der untersuchte Thermosand aus dem Werk Fohnsdorf besteht zu 52%  $SiO_2$ , zu 22%  $Al_2O_3$  und zu 11%  $Fe_2O_3$ , was die rote Färbung erklärt. Die sogenannte Halde (ein Gemisch aus Kohle und Ton), welche heute noch in der Tiefe mit über 1000 Grad brennt.

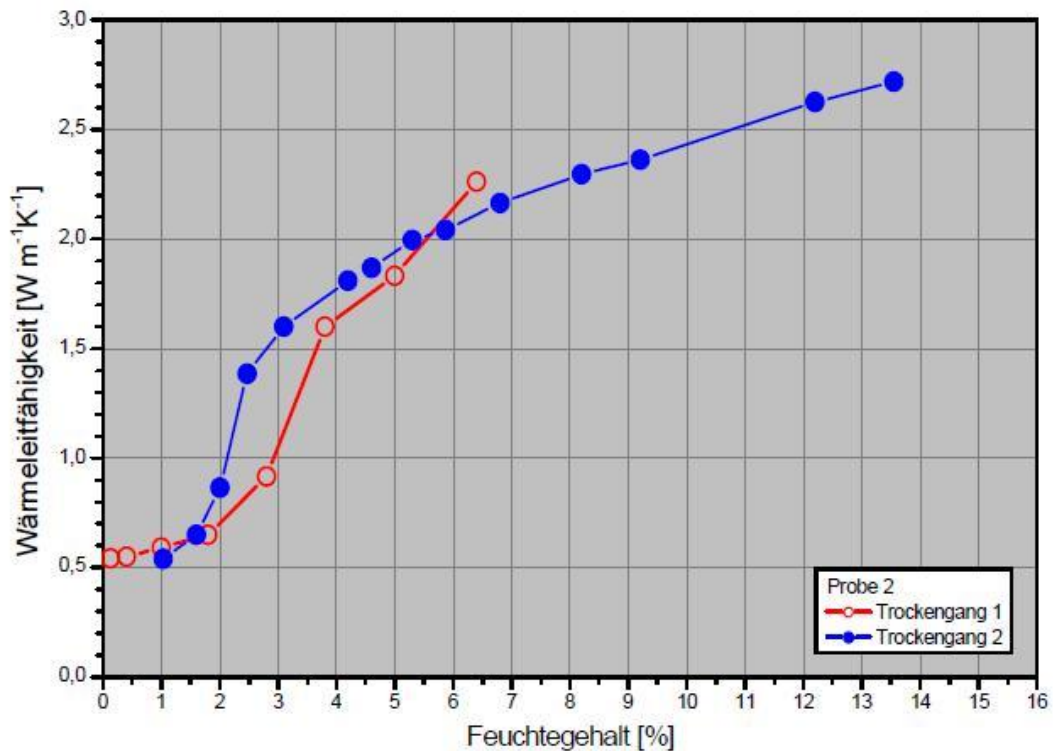
(Institut für Sporttechnologie, Österreichisches Forschungsinstitut für Chemie und Technik, Arsenal Wien, 2002)

### 5.2 Einfluss Feuchtegehalt

Die Gesamt-Wärmeleitfähigkeit eines porösen Materials setzt sich zusammen aus der Wärmeleitfähigkeit der Matrix und der der Porenfüllung. Die Porenfüllung besteht bei einem trockenen Material aus Luft ( $\lambda$  ca. 0,03  $Wm^{-1}K^{-1}$ ), bei einem voll gesättigten aus Wasser ( $\lambda$  ca. 0,6  $Wm^{-1}K^{-1}$ ). (Dortmunder Datenbank)

Wenn der Feuchtegehalt steigt, verdrängt Wasser zunehmend die Luft als Porenfüllung. Luft leitet Wärme wesentlich schlechter als Wasser. Damit steigt die Wärmeleitfähigkeit des Sandes bis zu einem Maximalwert (voll gesättigt) auf das fünf- bis sechsfache gegenüber dem trockenen Zustand. Die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Feuchtegehalt ist nicht linear.

Eine vollständige Erfassung der Feuchte-Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit erfordert 7 bis 10 Feuchtestufen und die Bestimmung im vollständig trockenen Zustand und/oder des Maximalwertes im gesättigten Zustand.



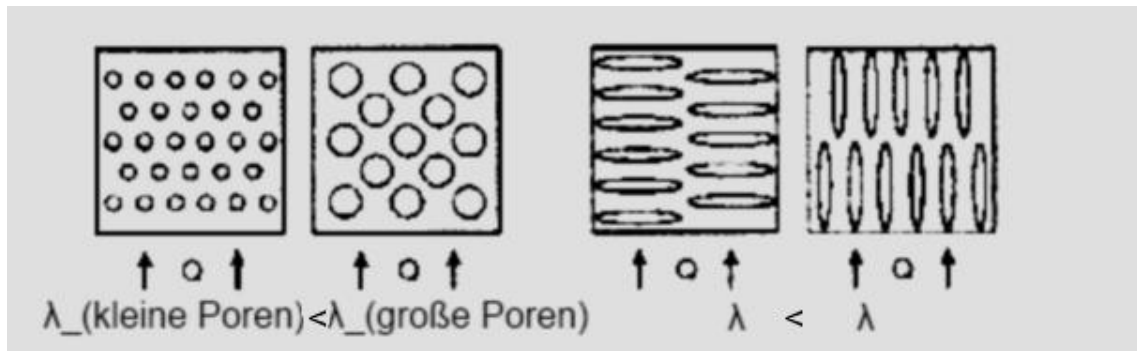
**Abb. 5.1** : Beispielkurve Wärmeleitfähigkeit von Quarzsand in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt (TeKa, 2010)

### 5.3 Einfluss der Dichte bzw. Verdichtung

Da die Matrix die höchste Wärmeleitfähigkeit aufweist, nimmt bei einer stärkeren Verdichtung, daher einer Verringerung des Porenvolumens die Gesamt-Wärmeleitfähigkeit des Materials zu. Dies gilt streng nur für Materialien gleicher Zusammensetzung. Unverdichtete, nur geschüttete Quarzsande erreichen im trockenen Zustand trotz der hohen Matrix-Wärmeleitfähigkeit des Quarzes nur Werte von ca.  $0,3-0,6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ . Jedoch lässt sich dieser durch Verdichten um den Faktor 1,5 erhöhen.

Bei der Messung in der Presse darf der Sand nicht weiter verdichtet werden und auf einen unverfälschten Feuchtegehalt ist zu achten, das Wasser darf sich nicht absetzen.

Auch spielt noch die Lage und Form der Poren eine Rolle.

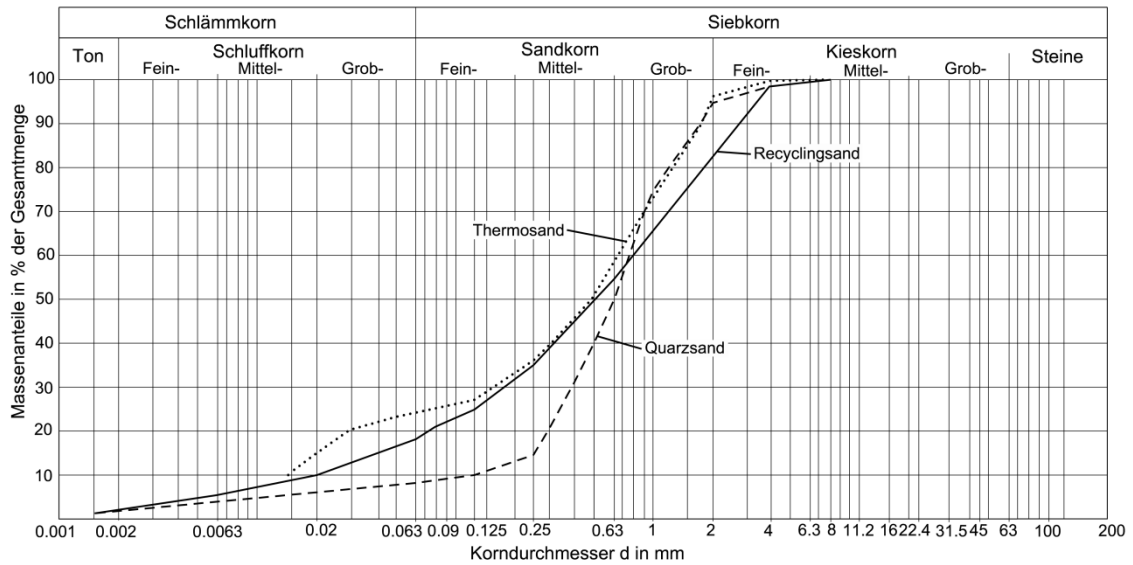


**Abb. 5.2 :** Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Porengröße (links) und der Orientierung der Poren (rechts) zur Wärmeflussrichtung bei jeweils gleichem Gesamtporenvolumen (Kollenberg, 2004)

## 5.4 Kornverteilung

Die Wärmeleitfähigkeit ist umso größer, wenn die Kornverteilung möglichst weit gestuft ist, daher einen möglichst hohen Ungleichförmigkeitsgrad aufweist. Der Grad an Feinanteil sollte für das Erzielen einer hohen Wärmeleitfähigkeit so enthalten sein, dass möglichst viel an Matrix und wenig an Poren auftreten.

Um Inhomogenitäten natürlicher Materialien einzuberechnen, sollten mehrere Proben genommen und geprüft werden.



**Abb. 5.3:** Vergleich der Sieblinien von Thermosand, Recyclingsand und Quarzsand (O.Henögl)

Abbildung 5.3 stellt die Sieblinien von Thermosand, Recyclingsand und Quarzsand dar.

### 5.5 Beispiele für Anwendungsmöglichkeiten

Weitere Anwendungsmöglichkeiten für Sand wären die Verwendung als Speichermedium für thermische Energie, Dämmung, Isolation, Wärmeableitung und als Stützmaterial für Konstruktionen.

## 6 Praktische Umsetzung Plattenversuch

Das erstmalig für die Messung von Sand angewandte Einplattenprüfverfahren, in der englischen Sprache „Guarded Hot Plate Apparatus“ genannt, war schwierig in der Umsetzung und es galt viele Problemstellungen zu lösen.

Es musste ein geeignetes Gefäß entworfen und gebaut werden. Wobei das Design und Material eine wichtige Rolle spielt.

Nach dessen Fertigstellung musste der Sand vom Geotechniklabor Rechbauerstrasse in die konstruktive Versuchsanstalt Inffeldgasse geliefert und mit dem passenden Verdichtungswerkzeug per Hand eingebaut werden.

Auch der Einbau in das Plattengerät der fertig präparierten Probe stellte eine große Herausforderung dar.

Nach den geleisteten Arbeitsschritten konnte letztendlich die Messung, die mehr als 24 Stunden dauerte durchgeführt werden.

Ein Messergebnis wurde ermittelt, die Probe ausgebaut und in das Bodenmechaniklabor Rechbauerstrasse zur weiteren Prüfung der Materialeigenschaften überstellt.

### 6.1 Design und Material Probengefäß

Das Probengefäß mit der Außenabmessung 80x80x10 cm musste aus einem Material sein, das gesamt 20 kg Masse nicht gravierend übersteigen durfte.

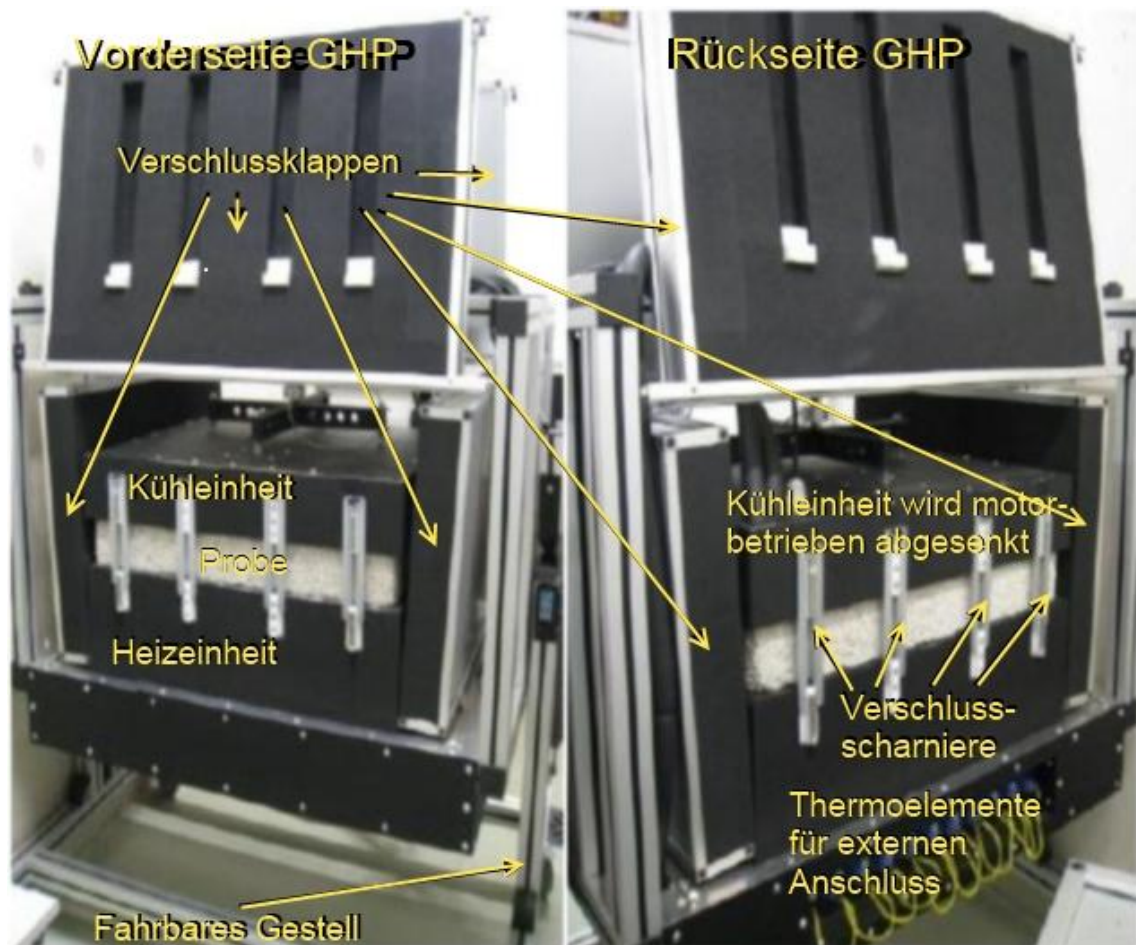
Ein Gefäß aus Stahl war bereits vorhanden und hatte eine Masse von rund 100 kg. Die zu erwartende Masse des Sandes lag bei rund 80 kg. Das Plattenmessgerät erlaubt nur maximal 100 kg Masse gesamt.

Es wurde PVC hart mit einer Wandstärke 1 cm gewählt. PVC hart hat eine relativ geringe Dichte und wird den Anforderungen gerecht. Um den zu erwartenden Belastungen (Beulen und Auseinanderbrechen der Form) zu widerstehen, wurden 6 Versteifungsstege, die außerhalb der Messfläche in der Mitte von 50 x 50 cm liegen, vorgesehen. Die Stege sind parallel zur Einfüllrichtung eingebaut.

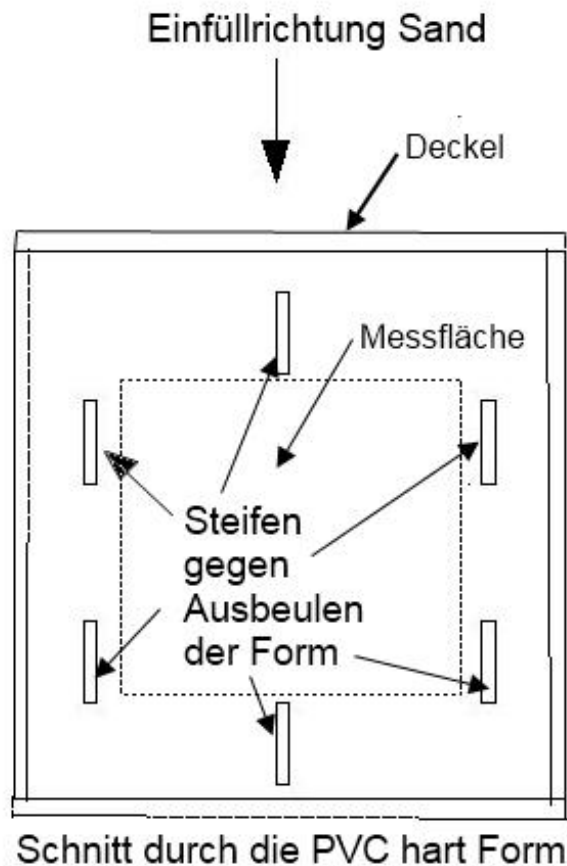
Die Form wurde geklebt und zusätzlich verschraubt, was einige Tage Arbeit in Anspruch nahm. Es musste auf den richtigen Zusammenbauablauf und die einzuhaltenden Trocknungszeiten geachtet werden.

An einer Seite der quadratischen Form ist ein Deckel vorgesehen, der mit Stahlwinkel verschraubt wird. Die Form wurde, an der Seite wo sich der Deckel befindet mit Moosgummidichtlippen versehen.





**Abb. 6.1:** Vorder und Rückseite des „Guarded Hot Plate Apparatus“, Einplattenmessgerät GHP674 mit vereinfachter Beschreibung



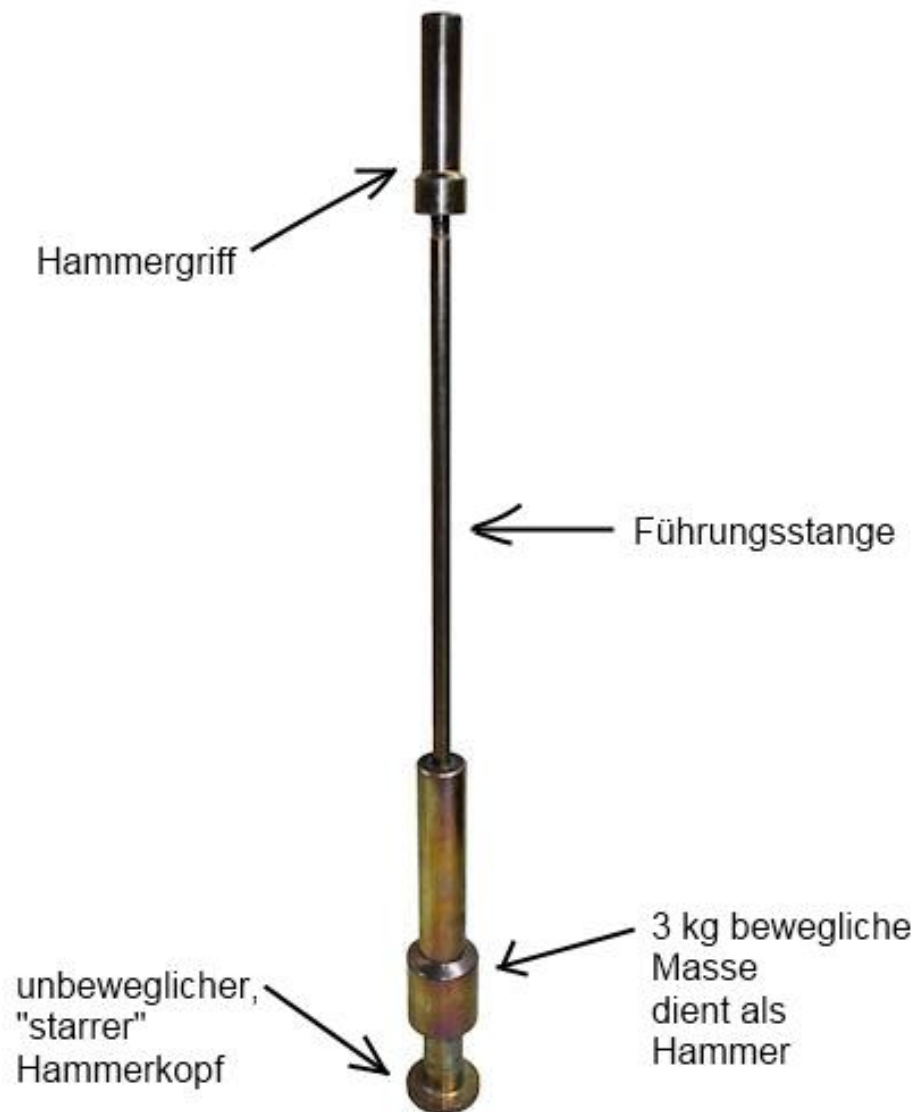
**Abb. 6.2:** Schematische Darstellung Probengefäß

### 6.2 Einbau und Verdichtung des Sandes

Die Vorgabe der Dichte bestimmte die einzufüllende Masse Sand.

Um ein Ausbeulen der Form zu verhindern, wurde sie mit Schraubzwingen in der Mitte unterstützt.

Der Sand wurde lagenweise zu je rund 4cm Schichtdicke eingeschüttet und händisch mit einem geeigneten Proctorhammer durch das Anheben und Fallenlassen des Hammers von 3 kg Masse verdichtet. Die durchaus schweißtreibende Arbeit dauerte rund 2-3 Stunden. Es wurde eine Trockendichte von  $1,67 \text{ g/cm}^3$  erzielt, die größtmögliche mit dieser Vorgangsweise. Die mindestens zu erreichende Trockendichte hätte  $1,56 \text{ g/cm}^3$  betragen sollen. Dazu wurden Einheiten zu 10 kg abgewogen, um in der Summe die zu erzielende Masse von rund 80 kg zu ergeben. Der verbleibende Rest wurde gewogen und aus der Differenz konnte die exakte Gesamtmasse und mit Kenntnis des genauen Leervolumens die exakte Dichte ermittelt werden. Abschließend wurde die Form, die eine Moosgummi-dichtung aufweist mit dem Deckel, dicht verschlossen.



**Abb. 6.3:** verwendeter Proctorhammer für Verdichtung

### 6.3 Einbau in das Plattenmessgerät

Die über 100 kg schwere Probe musste vom Erdgeschoß, wo sich das Arbeitslabor befindet in das tiefer gelegene Kellergeschoß transportiert werden, dafür war ein halbautomatischer Gabelstapler notwendig, der ebenfalls mit einem Kran

vom Erdgeschoß in den Keller abgesenkt wurde. Die Probe selber wurde mit dem Lastenaufzug in den Keller transportiert, wo sie mit dem Gabelstapler bis zum Messplatz geführt wurde.

Das Messgerät lässt sich auf einen lichten Spalt von 16 cm öffnen und somit blieben abzüglich der 10 cm, die die Probendicke ausmacht, 6 cm Manipulationsraum. Mit Rundstangen an den Außenseiten der Form wurde sie sukzessive in die Öffnung geschoben und mit Keilen in die Endposition bewegt.

Nun konnte die obere Platte des Plattenmessgerätes geschlossen werden und die Probe war eingebaut und zu einer Messung bereit.

### 6.4 Messung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät

Nach einem Tag Pause, durch eine Stromabschaltung verursacht, konnte die eigentliche Messung beginnen.

Nach rund 2,5 Stunden war auf der Warmseite der Platten eine Ausgangstemperatur von 10,00°C und auf der Kaltseite eine Ausgangstemperatur von 1,12°C erreicht.

Das zu erzielende Ergebnis des Temperaturmittelwertes sollte 10,00° betragen. Es werden nun auf der Heizseite, die die untere Platte darstellt drei verschiedene Temperaturen erzeugt: 10,00°C, 15,00°C und 20,00°C und die Kühlseite so gekühlt, dass ein exakter Wert des Temperaturmittelwerts von 10,00° interpoliert werden kann. Dabei ist das der Mittelwert aus Heiz- und Kühltemperatur.

Die Wärmeleitfähigkeit wird aus der Formel ermittelt:

$$\lambda = \frac{Q \cdot d}{S \cdot (T_H - T_C)} \quad (6.1)$$

$\lambda$  ... Wärmeleitfähigkeit [W/mK]

$Q$  ... Wärmestrom [W]

$d$  ... Dicke [m]

$S$  ... Fläche [m<sup>2</sup>]

$T_H$  ... Temperatur Warmseite [K]

$T_C$  ... Temperatur Kühlseite [K]

Diese Wärmeleitfähigkeit setzt sich aus den Wärmeleitfähigkeiten des Sandes und den PVC hart Wänden zusammen.

2 PVC hart Platten und die leere Form wurden zuvor schon geprüft, wobei sich für 2x1 cm PVC hart Wand eine Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda_1$  im Mittel mit 0,145 W/mK und für die leere Form ein  $\lambda$  im Mittel aus 2 Messungen von 0,352 W/mK ergab.

## 6.5 Messergebnisse in Tabellenform

### 6.5.1 Tabelle PVC-hart Platten

Zeit	$T_{Heiz}$	$T_{Kühl}$	$T_{Mittel}$	Widerstand	<b>0,145</b>	Energie
Zustand: trocken						
1.7.10 0:11	10,00	2,48	6,24	0,141	0,143	13,27
1.7.10 7:11	15,00	6,81	10,91	0,138	0,146	14,79
1.7.10 14:12	20,00	11,34	15,67	0,137	0,148	15,82
			<b>10,00</b>	$\lambda_{mittel} =$	<b>0,145</b>	

Tab. 6.1.: Messergebnisse für 2x1 cm PVC hart Platten

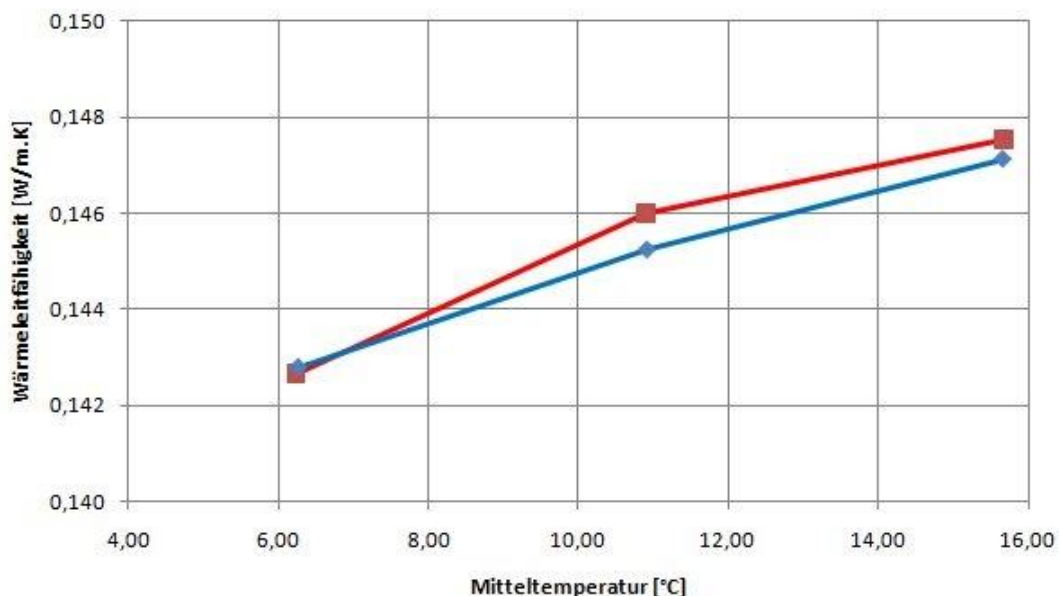


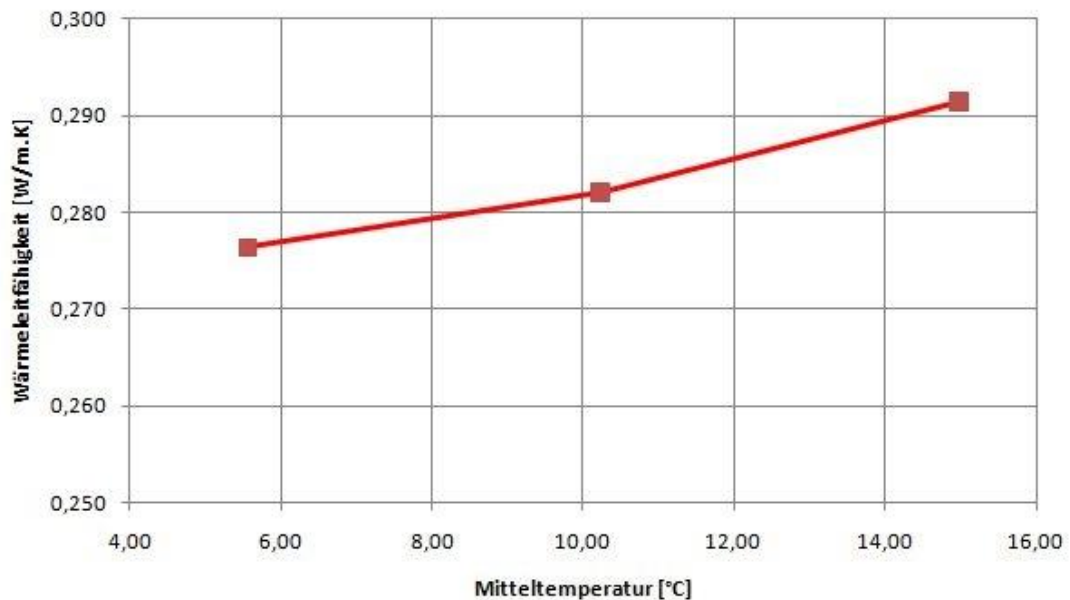
Abb. 6.4: Diagramm Wärmeleitfähigkeit über der Mitteltemperatur aufgetragen

Die PVC-Platten müssen vor der Herstellung der PVC-Form separat gemessen werden. Der Wärmeleitwiderstand  $R$  der Platten muss vom Wärmeleitwiderstand  $R$  der Probe abgezogen werden um den Wärmeleitwiderstand des reinen Sandes zu erhalten.

Es wird bei drei verschiedenen Temperaturen 10°C, 15°C und 20°C auf der „Warmseite“ gemessen, wobei die Temperaturdifferenz zur „Kaltseite“ rund 10°C beträgt. Die mittlere Temperatur, die zugehörige Wärmeleitfähigkeit und der Wärmeleitwiderstand werden berechnet. Die Wärmeleitfähigkeit wird für eine mittlere Temperatur von 10°C interpoliert.

### 6.5.2 Tabelle und Auswertung für UK4 Sand

Datum	T <sub>Heiseite</sub> °C	T <sub>Kaltseite</sub> °C	T <sub>Mittel</sub> °C	Widerstand m <sup>2</sup> .K/W	Leitfähigkeit W/m.K	Energie W
Zustand: feucht						
11.8.10 12:25	10,00	1,12	5,56	0,362	0,276	6,138
12.8.10 1:27	15,00	5,46	10,23	0,355	0,282	6,727
12.8.10 12:29	20,00	9,96	14,98	0,343	0,291	7,320
			<b>10,00</b>		<b>0,282</b>	



#### Berechnung WLZ des Materials

	d <sub>i</sub>	λ <sub>i</sub>	R <sub>i</sub> = d <sub>i</sub> /λ <sub>i</sub>
PVC	0,020	0,145	0,138
gesamt	0,100	0,282	0,355
<b>UK4</b>	0,080	<b>0,368</b>	0,217

Abb. 6.5: Tabellen und Auswertung für UK4 Sand

Analog zur Messung der PVC-Platten wird die gesamte Probe bei drei verschiedenen Temperaturen der „Warmseite“ bei 10°C, 15°C und 20°C gemessen. Die Temperaturdifferenz zur „Kaltseite“ beträgt rund 10°C. Die mittlere Temperatur, die Wärmeleitfähigkeit und der Wärmeleitwiderstand werden berechnet.

Die Wärmeleitfähigkeit wird auf eine mittlere Temperatur von 10°C interpoliert. Der Wärmeleitwiderstand  $R$  des PVC (2x1 cm Dicke) wird vom Wärmeleitwiderstand der gesamten Probe (10 cm Dicke) abgezogen, um den Wärmeleitwiderstand des Sandes (8 cm Dicke) zu erhalten.

„Warmseite“ bedeutet relativ warm zur „Kaltseite“. Die Temperatur der „Warmseite“ liegt unter der Raum-Temperatur.

Die Mess-Temperaturen sind für den Hochbau übliche Umgebungstemperaturen, da das Messverfahren mit dem Plattengerät eigentlich für den Hochbau bestimmt ist.

Die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit des UK4 Sandes  $\lambda_{sand}$  ergibt sich nach der ÖNorm B 6015-3 Teil 3 (Weiterbehandlung der Messwerte geschichteter Materialien für die Anwendung im Bauwesen) analog folgender mathematischer Formeln:

Für dreischichtige Materialien, 2x1cm PVC hart und 8cm UK4 Sand:

$$R_r = \frac{R_{10,dry,90/90}}{b \cdot d_1 + a \cdot b \cdot d_2 + a \cdot d_3} \cdot \left[ \frac{b \cdot d_1}{F_{m(23,80),1}} + \frac{a \cdot b \cdot d_2}{F_{m(23,80),2}} + \frac{a \cdot d_3}{F_{m(23,80),3}} \right] \quad (6.2)$$

$R_{10,dry,90/90}$  Fraktilwert des Wärmedurchlasswiderstandes des Materials im trockenen Zustand, interpoliert für eine Mitteltemperatur von 10°C aus den Messwerten gemäß ÖNormen EN 12664, EN 12667 und EN 12939

$d_1, d_2, d_3$  Dicken der Schichten 1 bis 3, aus denen das Material besteht, in m

$F_{m(23,80),1}, F_{m(23,80),2}, F_{m(23,80),3}$  Umrechnungsfaktoren für den Feuchtegehalt bei Klima 23°C, 80% relative Luftfeuchte nach ÖNorm B 6015-2 für die Schichten 1, 2 und 3, aus denen das Material besteht

a, b Verhältnisse der Wärmeleitfähigkeiten der Schichten

Es bedeutet:

$$a = \frac{(\lambda_{10,dry,90/90})_1}{(\lambda_{10,dry,90/90})_2}$$

$$b = \frac{(\lambda_{10,dry,90/90})_3}{(\lambda_{10,dry,90/90})_2}$$



$$\left\{ \begin{array}{l} (\lambda_{10,dry,90/90})_1 \\ (\lambda_{10,dry,90/90})_2 \\ (\lambda_{10,dry,90/90})_3 \end{array} \right\}$$

Messwerte der Wärmeleitfähigkeiten der Schichten

1 bis 3 für die Mitteltemperatur von 10°C in trockenem Zustand, in W/(m.K)

$$R = \frac{\delta}{\lambda A} \quad (6.3)$$

R ... Wärmeleitwiderstand [m<sup>2</sup>K/W]

δ ... Dicke des durchströmten Mediums [m]

λ ... Wärmeleitfähigkeitsbeiwert [W/m<sup>2</sup>K]

A ... Querschnittsfläche [m<sup>2</sup>]

$$\lambda = \frac{\delta}{R \cdot A} \quad (6.4)$$

Die Wärmeleitfähigkeit λ ist die Dicke der Schicht dividiert durch den Wärmeleitwiderstand multipliziert mit der Fläche.

### 6.5.3 Fotos von der Herstellung der Probe



**Abb. 6.6:** Trockenofen zur Trocknung des Sandes

Um einen exakten Wassergehalt der Sand-Proben zu gewährleisten, wird der Sand in einem Trockenofen bis zur Massenkonstanz getrocknet und die anteilige Masse an Wasser zugegeben und gut vermischt.



**Abb. 6.7:** Zugabe Anteil Masse Wasser für die Charge getrockneten Sand



**Abb. 6.8:** Mischen des Sandes mit Wasser





**Abb. 6.9:** Einbau feuchter Sand in die PVC-Form



**Abb. 6.10:** Verdichten des Sandes auf eine vordefinierte Füllhöhe



**Abb. 6.11:** Blick in das Innere der PVC-Form



**Abb. 6.12:** Fertig eingebaute Probe, bereit für die Lieferung





**Abb. 6.13:** Plattengerät mit eingebauter Probe



**Abb. 6.14:** Messplatz

# 7 Messergebnisse

## 7.1 Messergebnisse Plattengerät

Es wurde insgesamt sieben Mal UK4- und Thermo-Sand in die PVC-Form eingebaut, wobei zwei Mal die Verdichtung des Sandes zu einer Ausbeulung der Form führte und erneut bei geringerer Verdichtung eingebaut werden musste. Die aufgezeichneten Messprotokolle und die Dichteberechnungen sind im Anhang 2 zu finden.

Nach der Messung im Plattengerät wurden Proben mittels Stechzylinder entnommen und der Wassergehalt kontrolliert.

Als Richtwert galten folgende Trockendichte- und Wassergehalt-Werte:

	Thermosand	Thermosand	UK 4	UK 4
Trockendichte [g/cm <sup>3</sup> ]	1,39	1,39	1,40	1,40
Wassergehalt [M-%]	5 %	20 %	5 %	20 %

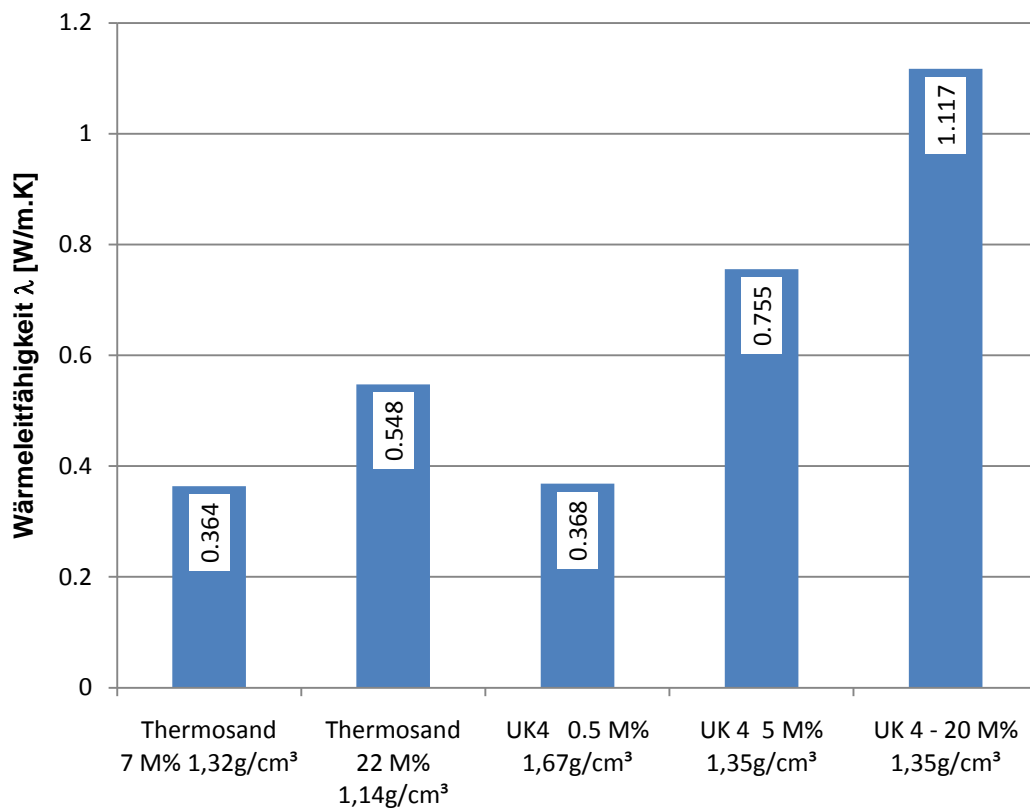
**Tab.7.1:** Richtwerte für den Einbau der Proben

Vorab wurde der „natürliche“ Wassergehalt des zu verwendenden Materials ermittelt. Dabei wurde für den UK4-Sand ein Feuchtigkeitsgehalt von 0,5 % und für den Thermosand ein Feuchtigkeitsgehalt von 4,5 % bestimmt.

Diese Grundfeuchtigkeit wurde bei der Erstellung der „Mischungs-Rezeptur“ berücksichtigt.

Das Gesamtgewicht der Probe wurde in acht Teile aufgeteilt, um das Mischen und den Einbau besser handhaben zu können.

Die Einbauhöhe für jeden Teil in der PVC-Form wurde berechnet, der Sand bis zu dieser Höhe mit einem Kantholz und dem „Proctorhammer“ verdichtet.



**Abb. 7.1:** Messergebnisse Plattengerät „Guarded Hot Plate Apparatus“

Es wurde für Thermosand mit der Trockendichte  $\rho_d=1,32 \text{ g/cm}^3$  und 7 M-% Wassergehalt eine Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = 0,364 \text{ W/mK}$  gemessen. Für Thermosand mit der Trockendichte  $\rho_d=1,14 \text{ g/cm}^3$  und 22 M-% Wassergehalt wurde eine Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = 0,548 \text{ W/mK}$  gemessen.

Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  des UK4 Sandes mit der Trockendichte  $\rho_d=1,67 \text{ g/cm}^3$  und einem Wassergehalt von 0,5-M% beträgt  $0,368 \text{ W/mK}$ . Bei einer Trockendichte  $1,35 \text{ g/cm}^3$  und einem Wassergehalt von 5-M%  $0,755 \text{ W/mK}$ .

Bei einer Trockendichte  $\rho_d=1,35 \text{ g/cm}^3$  und einem Wassergehalt von 20-M% ergab sie sich mit  $1,117 \text{ W/mK}$ .



## 7.2 Messergebnisse Halbraumsonde

Row	File Name	TC	LET	Start	End	Length	No of Solutions	CV
1	UK0501	0.292	684.6	35.5	72.5	37.0	191	16.8
2	UK0502	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	19.06
3	UK4 0,5 % UK0503	0.308	49.7	32.0	57.5	25.5	12	17.66
4	UK0504	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	10.0
5	UK0505	0.325	295.5	40.0	68.5	28.5	87	18.13
6	UK501	1.178	98.0	39.0	64.0	25.0	18	14.14
7	UK502	0.959	20.0	30.5	55.5	25.0	7	10.0
8	UK4 5 % UK503	0.955	417.2	37.5	71.5	34.0	179	10.0
9	UK504	0.986	85.5	20.5	46.0	25.5	55	16.56
10	UK505	0.973	2019.6	28.0	70.5	42.5	1131	14.53
11	Thermo-sand 7 % Ha501	0.566	93.6	34.5	62.5	28.0	22	15.08
12	Ha502	0.51	236.0	38.0	66.0	28.0	160	14.14
13	Ha503	0.492	205.4	20.0	48.0	28.0	128	13.98
14	Ha504	0.505	187.9	35.5	69.0	33.5	188	14.14
15	Thermo-sand 22 % Ha2001	0.856	31.4	33.5	59.0	25.5	15	14.84
16	Ha2002	0.725	1366.2	31.0	71.0	40.0	337	13.28
17	Ha2003	0.731	431.4	39.5	76.5	37.0	286	13.28
18	Ha2004	0.711	589.6	35.0	69.5	34.5	70	11.25
19	Ha2005	0.722	1435.9	34.5	72.0	37.5	280	13.13
20	UK2001	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	15.86
21	UK4 20 % UK20a01	1.625	518.3	36.5	64.0	27.5	42	11.8
22	UK20a02	1.576	615.0	22.5	66.5	44.0	191	14.61
23	UK20a03	1.664	318.0	30.5	59.5	29.0	118	12.66
24	UK20a04	1.645	2716.3	23.5	54.0	30.5	566	13.2

Abb. 7.2: Messprotokoll in Listenform mit TK04 Graph

Das Messprotokoll der Messung mit der Halbraumsonde TK04 listet die Ergebnisse in Zahlenwerten auf. Der File Name bezeichnet das gemessene Material. Dabei steht UK für UK4, 05 für 0,5 M-% Wassergehalt und 01 für die erste Messung. Ha steht für Thermo-sand, 5 für 5 M-% Wassergehalt und 01 für die erste Messung.

TC ist die „Thermal Conductivity“, die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  in W/mK.

LET ist der „Ln Extreme Time“-Wert.

Das ist der natürliche Logarithmus der Zeit bis zum Erreichen des Extremwertes (Minimum oder Maximum eines Prozesses)

Start-End bezeichnet die Zeit bis zum Start beziehungsweise bis zum Ende des Messintervalls in Sekunden.

Length ist die Dauer der Messung in Sekunden.

No. of Solutions ist die Anzahl der Lösungen, die aus dem Messalgorithmus ermittelt wurde.

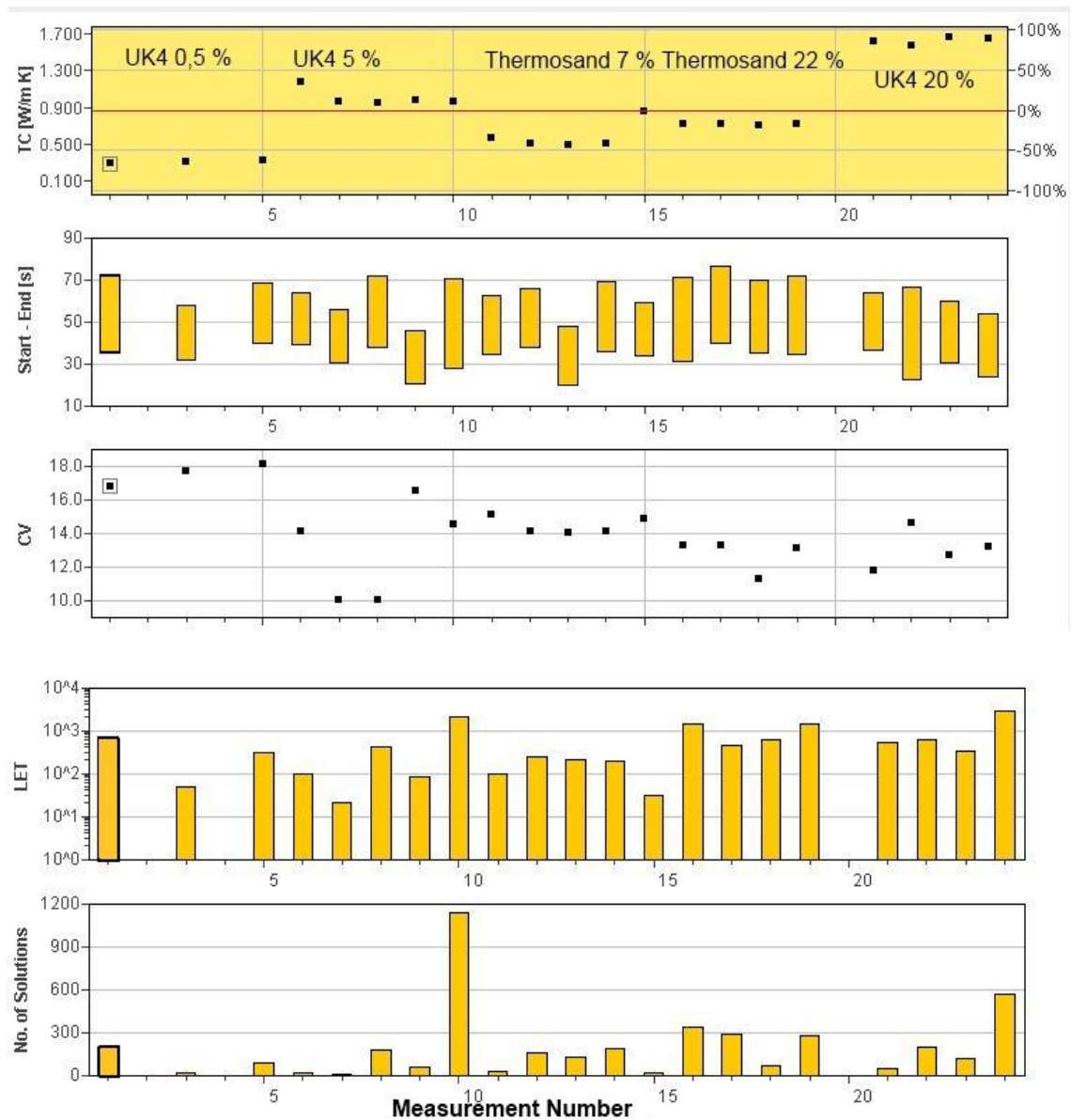
CV bezeichnet Contact-Values, das sind die Kontakt Werte. Sie bewerten den Kontakt zwischen Plexiglassonde und Probe.

### **7.2.1 Der Einbau der Sand-Probe**

Der Einbau der Sand-Proben erfolgte in einen Stechzylinder mit 10 cm Durchmesser und 12 cm Höhe. Dabei wurde das Material zuerst im Trockenofen bis zur Massenkonstanz getrocknet und entsprechend dem Feuchtegehalt der Probe im Plattengerät mit Wasser versetzt und gemischt. Die Dichte wurde analog der erreichten Dichte in der PVC-Form für das Plattengerät gewählt, damit die Messungen vergleichbar sind. Die Masse wurde in 3 Teile geteilt und bis zur entsprechenden Einbauhöhe mit einer hydraulischen Presse verdichtet. Es konnten damit Dichte und Wassergehalt mit Sorgfalt den Vorgaben aus der Messung mit dem Plattengerät nachempfunden werden.

Die Plexiglas-Halbraumsonde wurde mit der Probe, die mit Wärmeleitpaste versehen wurde mit einem Schraubstock unter einem Druck von 15 bar zusammengepresst. Der Messaufbau befindet sich in einem Thermoschrank.

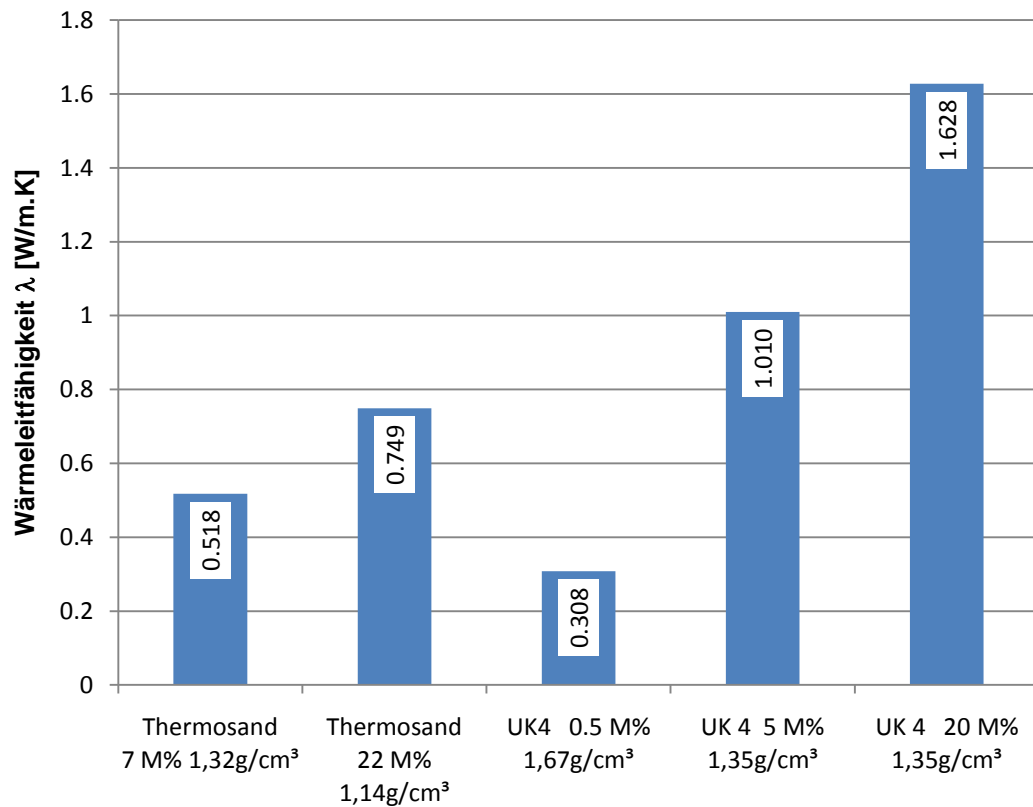
Sobald der Druck konstant war, wurde die Messung eingeleitet.



**Abb. 7.3:** Messprotokoll in Diagrammform mit TK04 Graph

Das Messprotokoll in Diagrammform entspricht dem Messprotokoll in Listenform gemäß Abbildung 7.2.

Das Messprotokoll in Diagrammform wurde mit TK04 Graph erstellt.



**Abb. 7.4:** Messergebnisse Halbraumsonde

Thermosand mit der Trockendichte  $\rho_s=1,32 \text{ g/cm}^3$  und dem Wassergehalt von 7 M-% hat eine Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  von 0,518 W/mK.

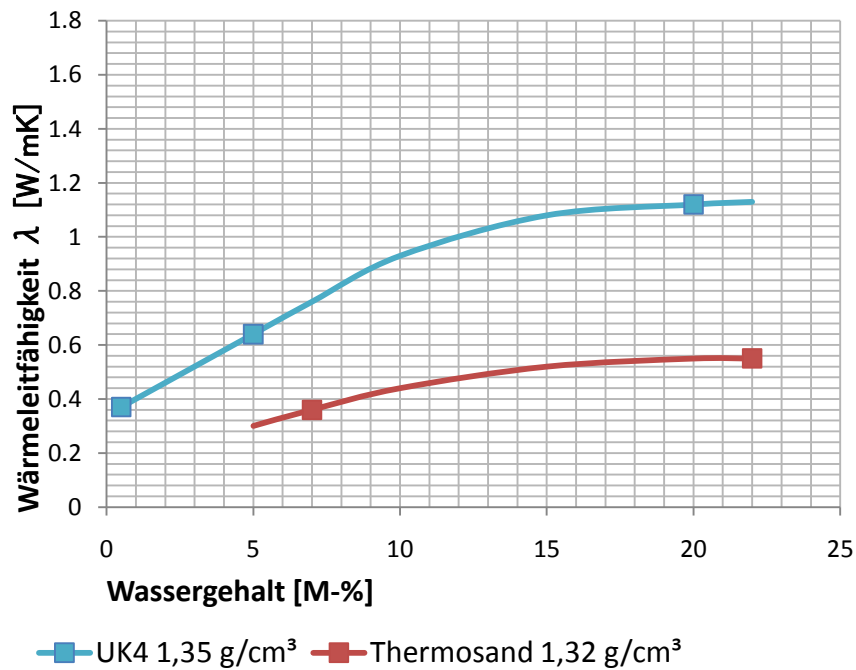
Bei Thermosand mit der Trockendichte  $\rho_s=1,14 \text{ g/cm}^3$  und dem Wassergehalt von 22 M-% beträgt die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  0,749 W/mK.

UK4-Sand mit der Trockendichte  $\rho_s=1,67 \text{ g/cm}^3$  und dem Wassergehalt von 0,5 M-% hat eine Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  von 0,308 W/mK.

Bei UK4-Sand mit der Trockendichte  $\rho_s=1,35 \text{ g/cm}^3$  und dem Wassergehalt von 5 M-% beträgt die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  1,01 W/mK.

UK4-Sand mit der Trockendichte  $\rho_s=1,35 \text{ g/cm}^3$  und dem Wassergehalt von 20 M-% hat eine Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  von 1,628 W/mK.

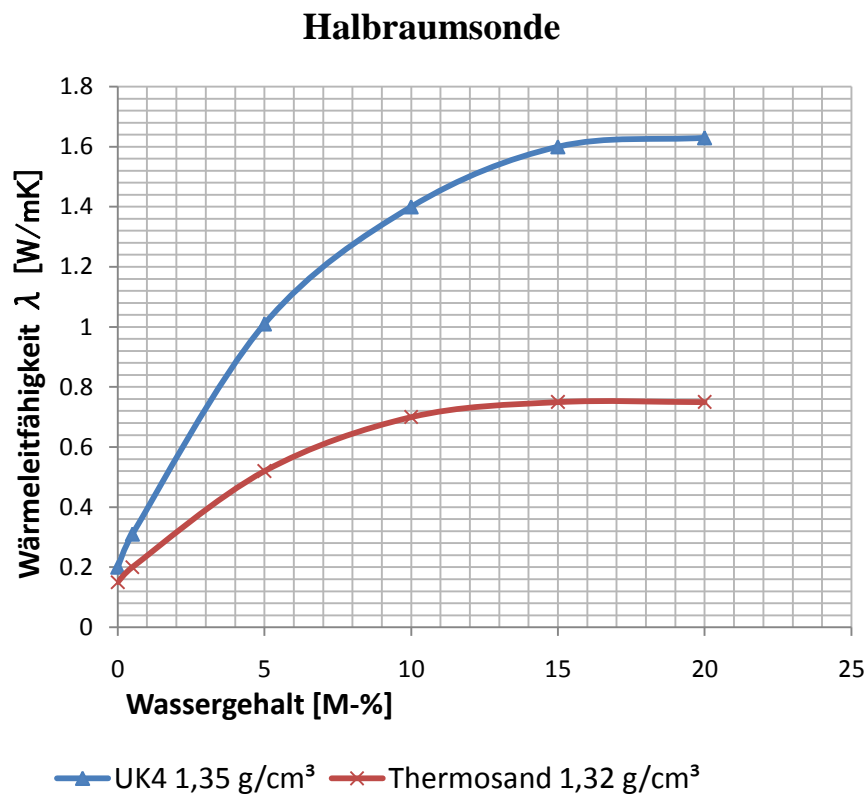
## Plattengerät



**Abb. 7.5:** Messergebnisse Plattengerät

Abbildung 7.5 zeigt das Diagramm mit den Ergebnissen der Messungen, wobei die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  in W/mK auf der Ordinate und der Wassergehalt in M-% auf der Abszisse aufgetragen sind.

Die Wärmeleitfähigkeit von Thermosand ist nur rund halb so groß wie die des UK4-Sandes. Bei einem höheren Wassergehalt als 20 M-% steigt die Wärmeleitfähigkeit nicht weiter an und bleibt konstant.

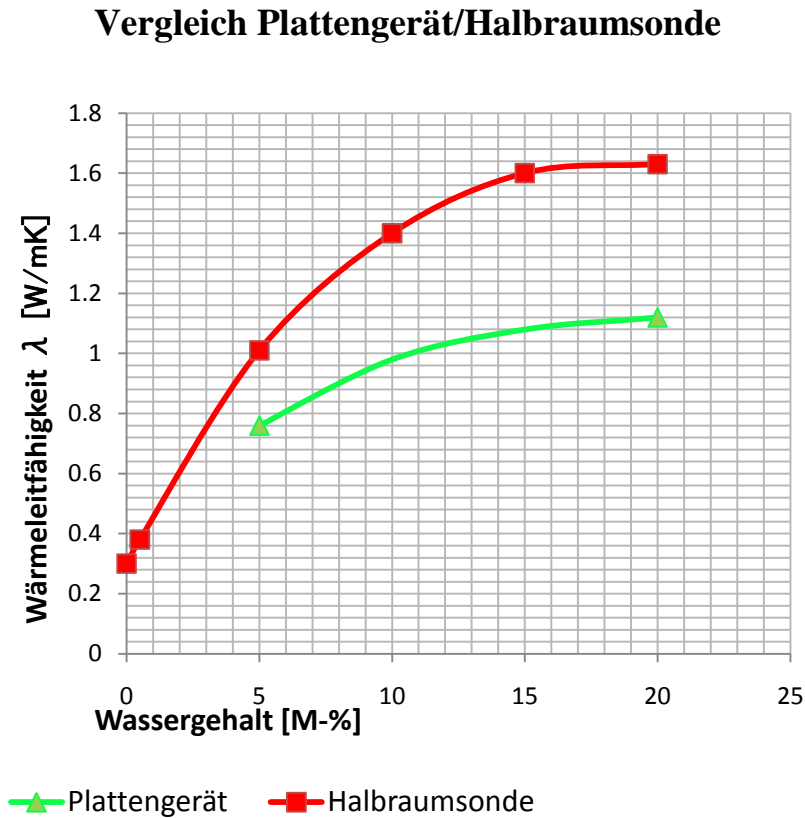


**Abb. 7.6:** Messergebnisse Halbraumsonde

Abbildung 7.6 stellt die Ergebnisse der Messung mit der Halbraumsonde TK04 dar.

Es ist die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  in W/mK auf der Ordinate und der Wassergehalt in M% auf der Abszisse aufgetragen.

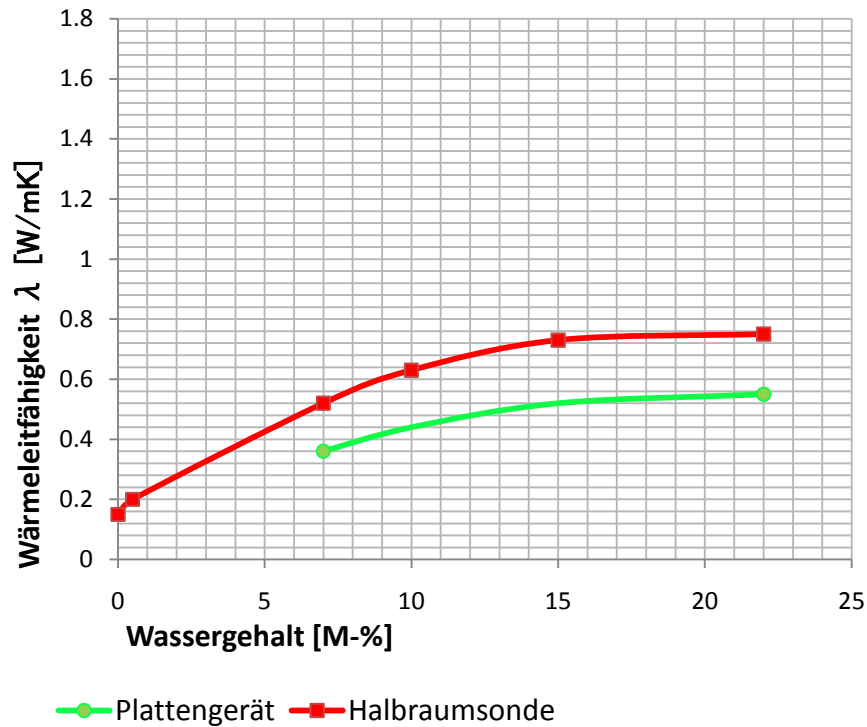
Wie bei der Messung mit dem Plattengerät zeigt sich, dass die Wärmeleitfähigkeit von Thermosand rund halb so groß ist wie die von UK4.



**Abb. 7.7:** Vergleich Plattengerät/Halbraumsonde UK4  $\rho_d=1,35 \text{ g/cm}^3$

Für UK4-Sand mit einer Trockendichte von  $1,35 \text{ g/cm}^3$  und einem Wassergehalt von 5 M-% wurde mit dem Plattengerät ein 25,2 % geringerer Wert für die Wärmeleitfähigkeit gemessen, bezogen auf das Messergebnis der Halbraumsonde. Für UK4-Sand mit einer Trockendichte von  $1,35 \text{ g/cm}^3$  und einem Wassergehalt von 20 M-% wurde mit dem Plattengerät ein 31,4 % geringerer Wert für die Wärmeleitfähigkeit gemessen, bezogen auf das Messergebnis der Halbraumsonde.

## Vergleich Plattengerät/Halbraumsonde



**Abb. 7.8:** Vergleich Plattengerät/Halbraumsonde Thermosand  $\rho_d=1,32 \text{ g/cm}^3$

Bei Thermosand mit einer Trockendichte von  $1,32 \text{ g/cm}^3$  und einem Wassergehalt von 7 M-% weist die Messung mit dem Plattengerät einen um 29,7 % geringeren Wert auf, als in der Messung mit der Halbraumsonde, bezogen auf das Ergebnis der Halbraumsonde.

Bei Thermosand mit derselben Trockendichte und einem Wassergehalt von 22 M-% weist die Messung mit dem Plattengerät einen um 26,8 % geringeren Wert auf als mit der Halbraumsonde, bezogen auf das Ergebnis der Halbraumsonde.



# 8 Numerische Simulation

## 8.1 Numerische Simulation des Plattengerätversuchs

### 8.1.1 Programmierung

Die numerische Simulation wurde mit dem Simulationsprogramm Therm 6.3 von Lawrence Berkeley National Laboratory der „Regents of the University of California“ durchgeführt.

Das ist ein Finite Elemente Programm.

Es wurde mit dem CAD-Programm AutoCAD die Geometrie des Messaufbaues erstellt.

Der CAD-File wurde in das Programm Therm 6.3 importiert.

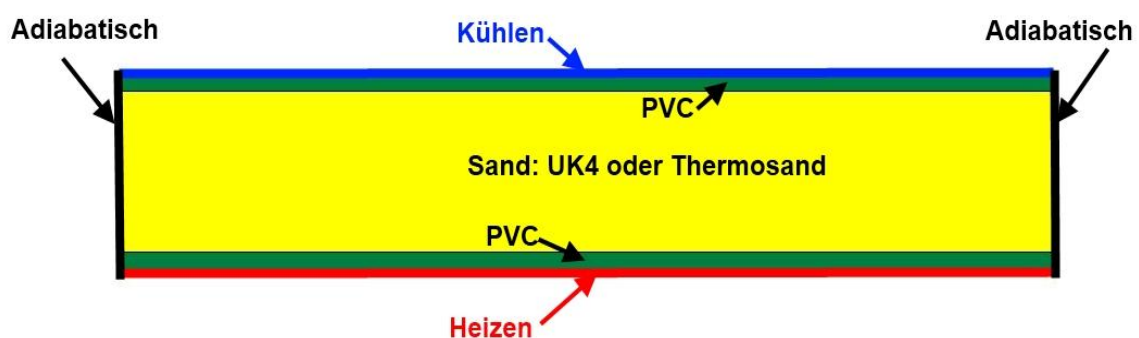
Die durchströmende Energiemenge wurde auf die Fläche umgerechnet, als Randbedingung für die Quelle positiv und für die Senke negativ angenommen.

Die Temperaturen auf der Heiz- und Kühlplatte aus der Simulation entsprechen den im Versuch ermittelten Temperaturen.

Der Wärmeverlauf im Probenmaterial Thermosand und UK4-Sand ist als Ergebnis den Abbildungen zu entnehmen.

Der Materialkennwert Wärmeleitfähigkeit wurde durch inverse Modellierung erreicht.

Es wurden bei der stationären Messung drei verschiedene Temperaturen auf der „Heizplatte“ exakt eingestellt: 10°C, 15°C und 20°C. Wobei die Kühltemperatur so eingestellt wird, dass sich eine Temperaturdifferenz von annähernd 10°C einstellt.

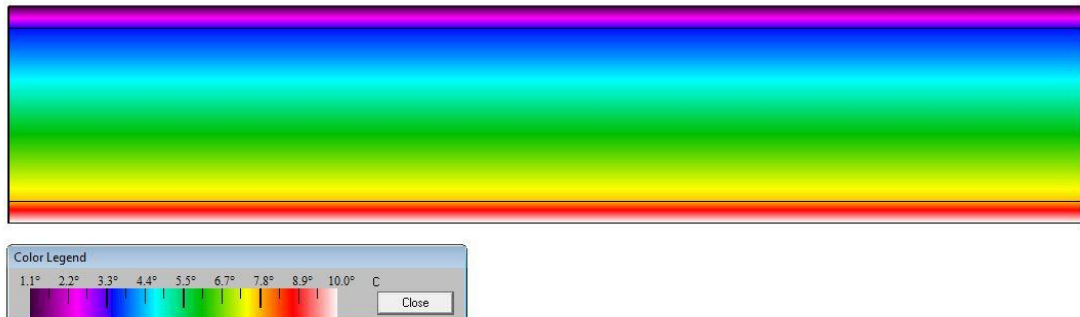


**Abb. 8.1:** Schnitt Randbedingungen und Material Plattengerät

Abbildung 8.1 zeigt den Messbereich der Probe in zweidimensionaler Ansicht. Der Messbereich ist 50 cm breit und 10 cm hoch.

Es sind die Materialien und die Randbedingungen dargestellt.

## 8.1.2 Temperatur-Farbschichten für UK4, 0,5 M-% Wassergehalt, Trockendichte 1,67 g/cm<sup>3</sup>



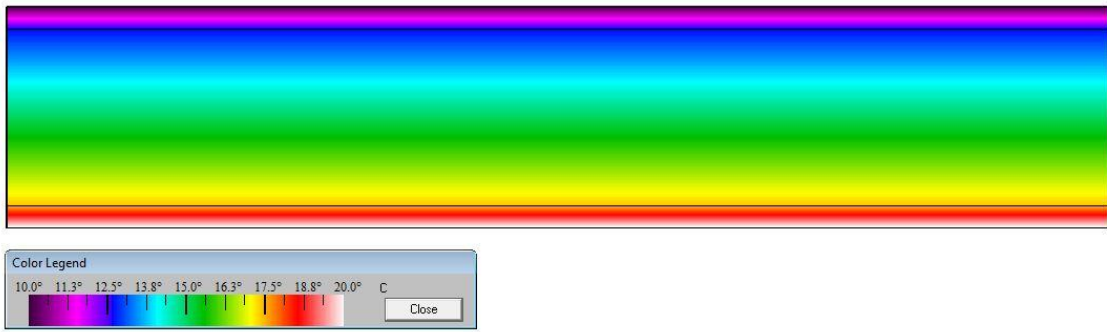
**Abb. 8.2:** Temperaturbereich 1,1°-10°C

Der Temperaturverlauf wird durch Farbschichten repräsentiert. Die Farb-Legende unter dem Farbschichten-Bild weist den Temperaturen im Spektrum 1,1° bis 10°C kontinuierlich Farben zu.



**Abb. 8.3:** Temperaturbereich 5,5°-15°C

In Abbildung 8.3 ändert sich der Temperaturbereich. Die in Abbildung 8.2 den Temperaturen zugewiesenen Farben entsprechen nicht den Farben für die Temperaturen in Abbildung 8.3.

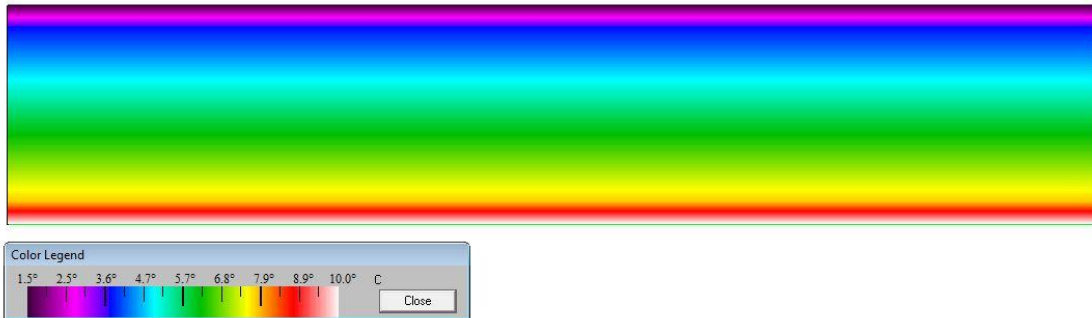


**Abb. 8.4:** Temperaturbereich 10,0°-20°C

Abbildung 8.4 zeigt den Temperaturbereich 10,0° bis 20,0°C der Simulation der Messung des UK4-Sandes mit 0,5 M-% Wassergehalt und der Trockendichte von 1,67 g/cm<sup>3</sup>.

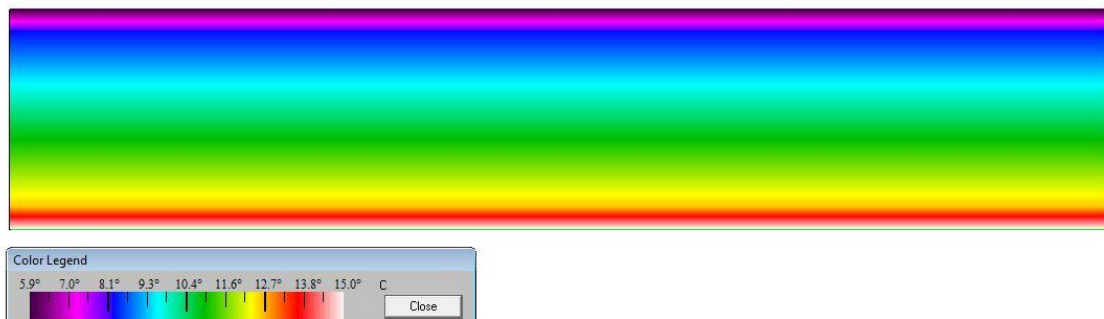
Die ersten drei Abbildungen unterscheiden sich kaum in der Farbgebung, da dasselbe Material mit gering steigender Wärmemenge durchströmt wird und sich die Zuordnung der Farben zu den Temperaturen entsprechend den Rand-Temperaturen ändert.

### 8.1.3 Temperatur-Farbschichten für UK4, 5 M-% Wassergehalt, Trockendichte 1,35 g/cm<sup>3</sup>



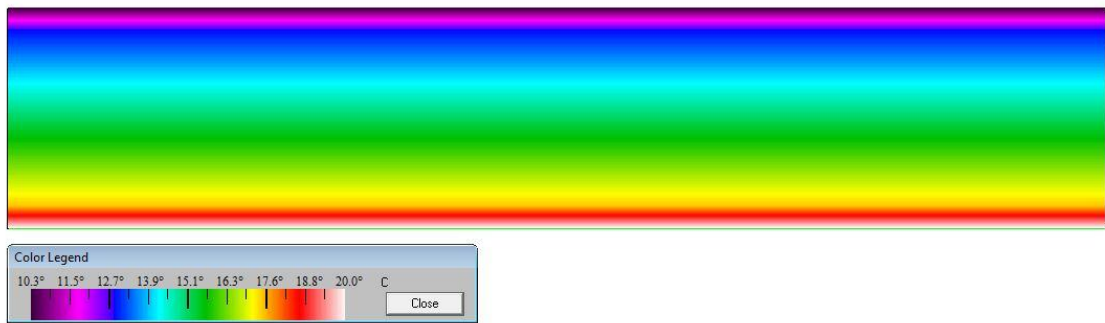
**Abb. 8.5:** Temperaturbereich 1,5°-10°C

Abbildung 8.5 zeigt den Temperaturbereich 1,5° bis 10,0°C der Simulation der Messung des UK4-Sandes mit 5 M-% Wassergehalt und der Trockendichte von 1,35 g/cm<sup>3</sup>.



**Abb. 8.6:** Temperaturbereich 5,9°-15°C

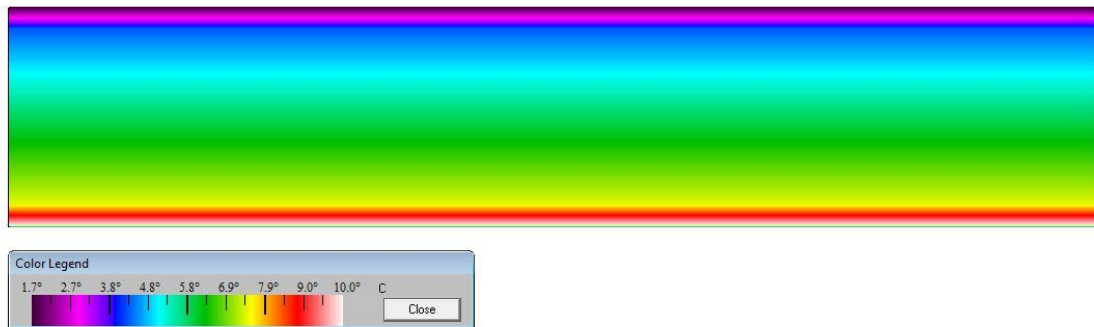
Abbildung 8.6 zeigt den Temperaturbereich 5,9° bis 15,0°C der Simulation der Messung des UK4-Sandes mit 5 M-% Wassergehalt und einer Trockendichte von 1,35 g/cm<sup>3</sup>.



**Abb. 8.7:** Temperaturbereich 10,3°-20°C

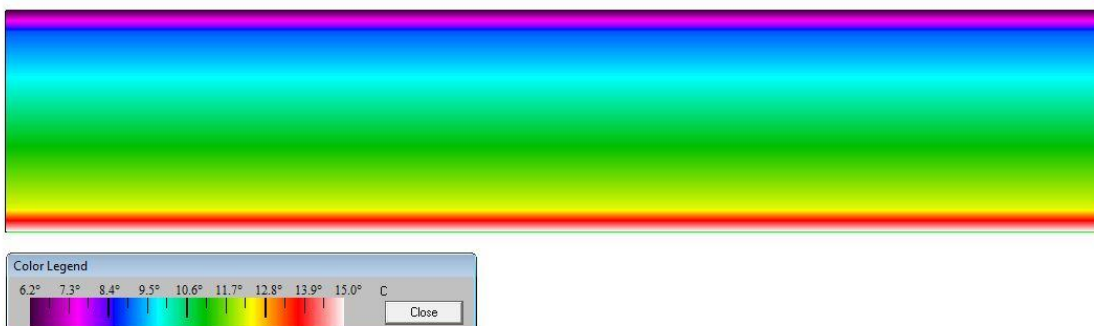
Abbildung 8.7 zeigt den Temperaturbereich 10,3° bis 20,0°C der Simulation der Messung des UK4-Sandes mit 5 M-% Wassergehalt und einer Trockendichte von 1,35 g/cm<sup>3</sup>. Mit zunehmendem Wassergehalt und der damit zunehmenden Wärmeleitfähigkeit strömt Wärme rascher ab, bei gleichbleibender Energie, die durch die Probe geschickt wird, erhöht sich die Temperatur auf der „Kaltseite“.

### 8.1.4 Temperatur-Farbschichten für UK4, 20 M% Wassergehalt, Trockendichte 1,35 g/cm<sup>3</sup>



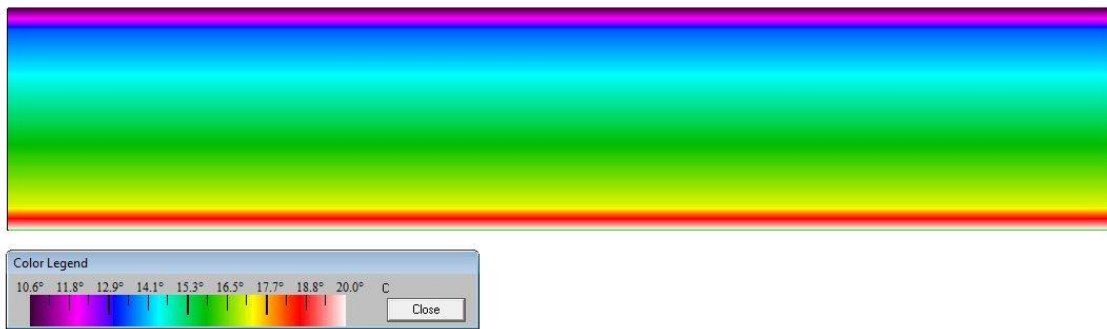
**Abb. 8.8:** Temperaturbereich 1,7°-10°C

Abbildung 8.8 zeigt den Temperaturbereich 1,7° bis 10,0°C der Simulation der Messung des UK4-Sandes mit 20 M-% Wassergehalt und einer Trockendichte von 1,35 g/cm<sup>3</sup>.



**Abb. 8.9:** Temperaturbereich 6,2°-15°C

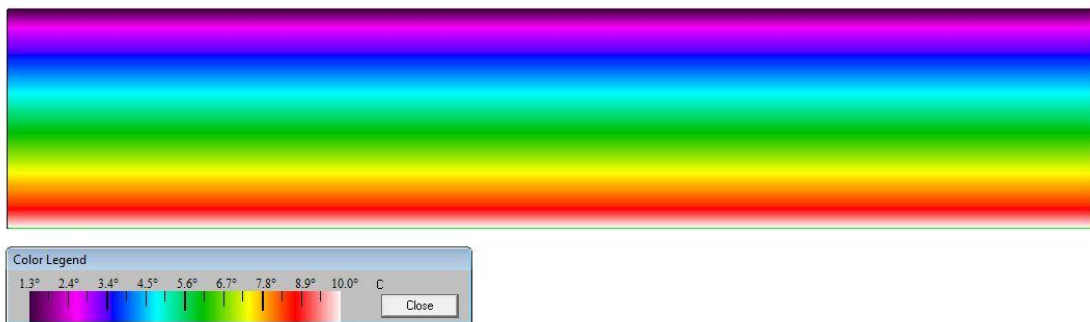
Abbildung 8.9 zeigt den Temperaturbereich 6,2° bis 15,0°C der Simulation der Messung des UK4-Sandes mit 20 M-% Wassergehalt und einer Trockendichte von 1,35 g/cm<sup>3</sup>.



**Abb. 8.10:** Temperaturbereich 10,6°-20°C

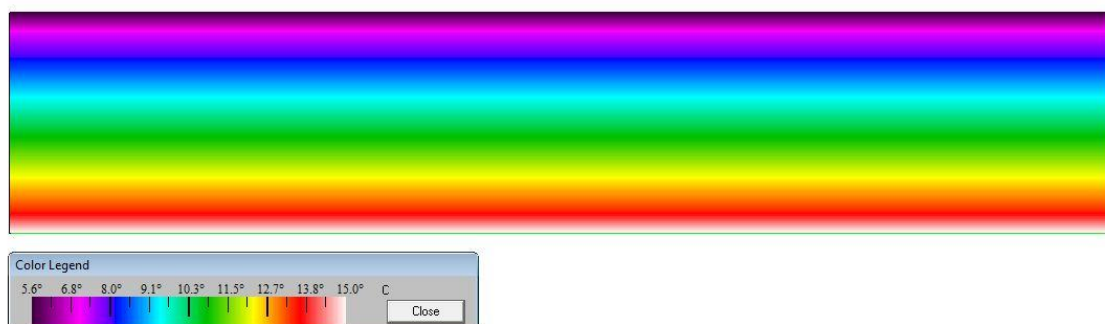
Abbildung 8.10 zeigt den Temperaturbereich 10,6° bis 20,0°C der Simulation der Messung des UK4-Sandes mit 20 M-% Wassergehalt und einer Trockendichte von 1,35 g/cm<sup>3</sup>.

### 8.1.5 Temperatur-Farbschichten für Thermosand, 7 M% Wassergehalt, Trockendichte 1,32 g/cm<sup>3</sup>



**Abb. 8.11:** Temperaturbereich 1,3°-10°C

Abbildung 8.11 zeigt den Temperaturbereich 1,3° bis 10,0°C der Simulation der Messung des Thermosandes mit 7 M-% Wassergehalt und einer Trockendichte von 1,32 g/cm<sup>3</sup>.



**Abb. 8.12:** Temperaturbereich 5,6°-15°C

Abbildung 8.12 zeigt den Temperaturbereich 5,6° bis 15,0°C der Simulation der Messung des Thermosandes mit 7 M-% Wassergehalt und einer Trockendichte von 1,32 g/cm<sup>3</sup>.

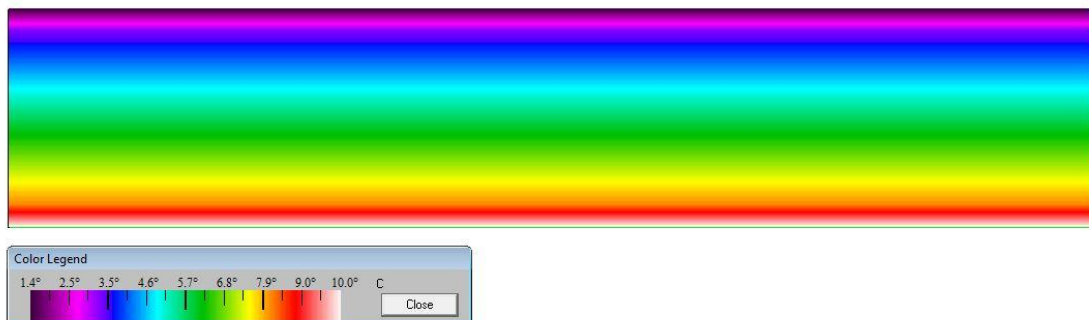




**Abb. 8.13:** Temperaturbereich 10°-20°C

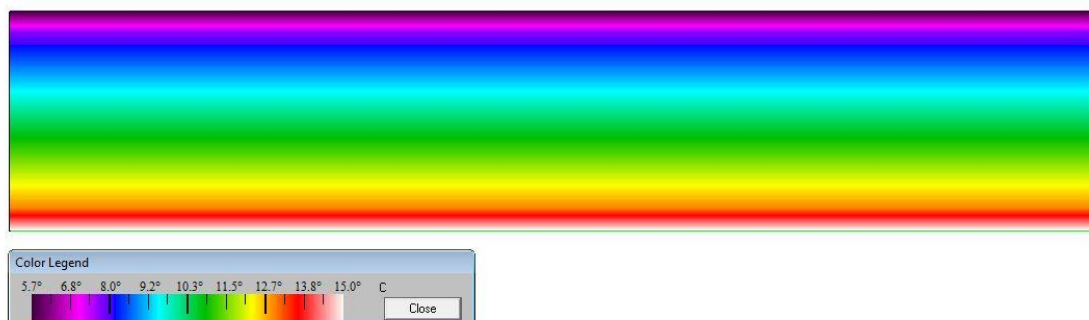
Abbildung 8.13 zeigt den Temperaturbereich 10,0° bis 20,0°C der Simulation der Messung des Thermosandes mit 7 M-% Wassergehalt und einer Trockendichte von 1,32 g/cm<sup>3</sup>.

### 8.1.6 Temperatur-Farbschichten für Thermosand 22 M% Wassergehalt, Trockendichte 1,14 g/cm<sup>3</sup>



**Abb. 8.14:** Temperaturbereich 1,4°-10°C

Abbildung 8.14 zeigt den Temperaturbereich 1,4° bis 10,0°C der Simulation der Messung des Thermosandes mit 22 M-% Wassergehalt und einer Trockendichte von 1,14 g/cm<sup>3</sup>.



**Abb. 8.15:** Temperaturbereich 5,7°-15°C

Abbildung 8.15 zeigt den Temperaturbereich 5,7° bis 15,0°C der Simulation der Messung des Thermosandes mit 22 M-% Wassergehalt und einer Trockendichte von 1,14 g/cm<sup>3</sup>.



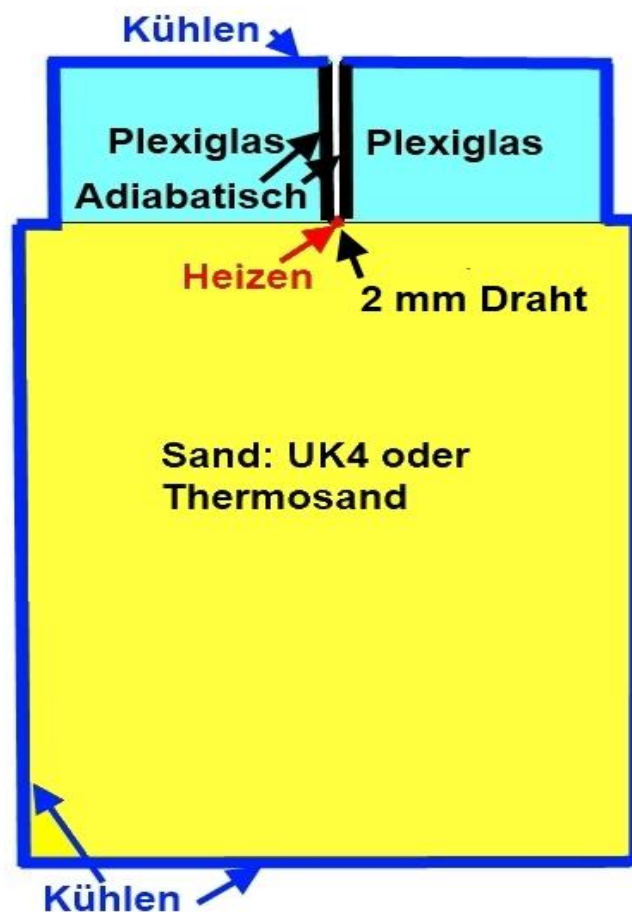
**Abb. 8.16:** Temperaturbereich 10,2°-20°C

Abbildung 8.16 zeigt den Temperaturbereich 10,2° bis 20,0°C der Simulation der Messung des Thermosandes mit 22 M-% Wassergehalt und einer Trocken-  
dichte von 1,14 g/cm<sup>3</sup>.

## 8.2 Numerische Simulation der Messung mit der Halbraumsonde

### 8.2.1 Programmierung

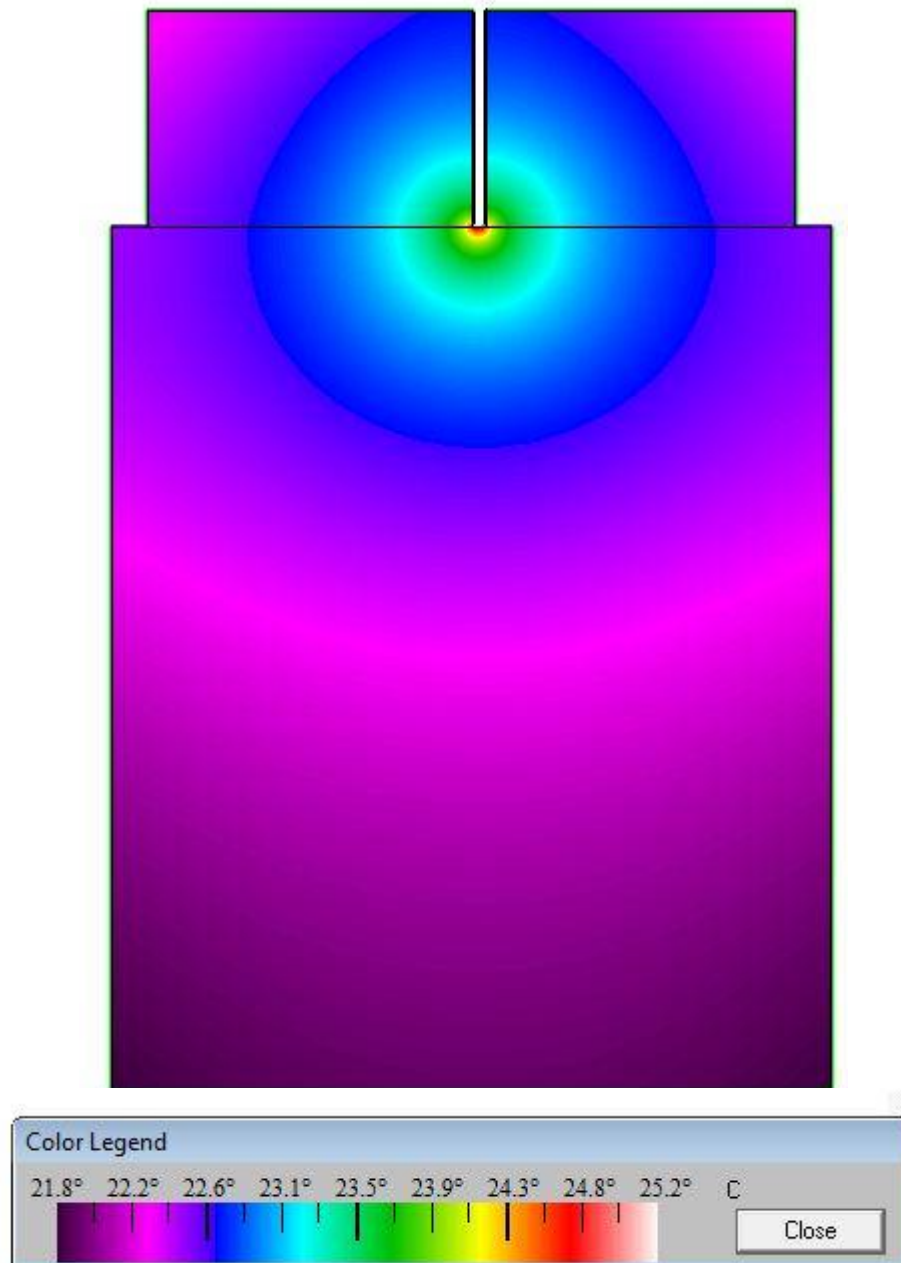
Die Simulation wurde mit Therm 6.3 von Lawrence Berkeley National Laboratory der „Regents of the University of California“ durchgeführt. Die Geometrie wurde mit dem CAD-Programm AutoCAD erstellt und in Therm 6.3 importiert. Die entsprechenden Randbedingungen wurden so eingegeben, dass sie einer Momentaufnahme nach einem 80 Sekunden Heizintervall entsprechen.



**Abb. 8.17:** Schnitt Randbedingungen und Material Halbraumsonde

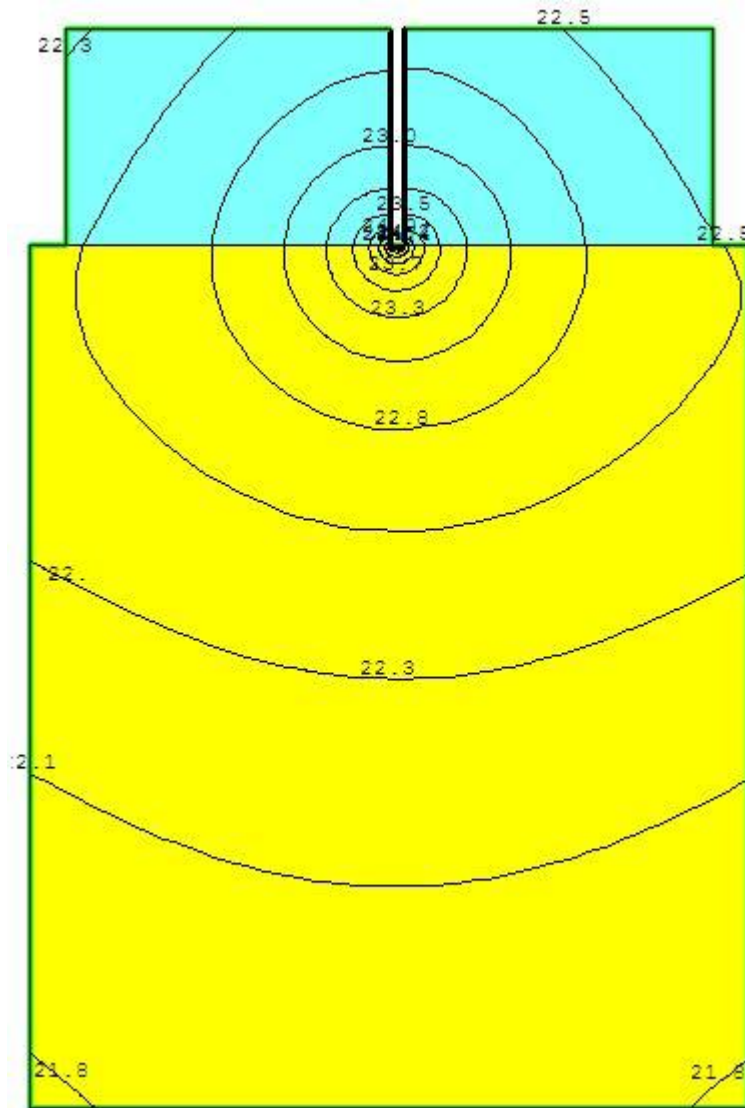
Abbildung 8.17 stellt die Materialien und Randbedingungen der Simulation des Aufbaus der Messung mit der Halbraumsonde dar. Die Halbraumsonde TK04 aus Plexiglas ist ein Zylinder mit einem Durchmesser von 9 cm und einer Höhe von 3 cm. Der Heizdraht hat einen Durchmesser von 2 mm. Der Stechzylinder mit der Sand-Probe hat 10 cm Durchmesser und ist 11 cm hoch.

### 8.2.2 Temperatur-Farbschichten und Isothermen für UK4, 0,5-M% Wassergehalt, Trockendichte 1,67 g/cm<sup>3</sup>



**Abb. 8.18:** Farbschichten Temperaturverlauf 21,8°-25,2°C

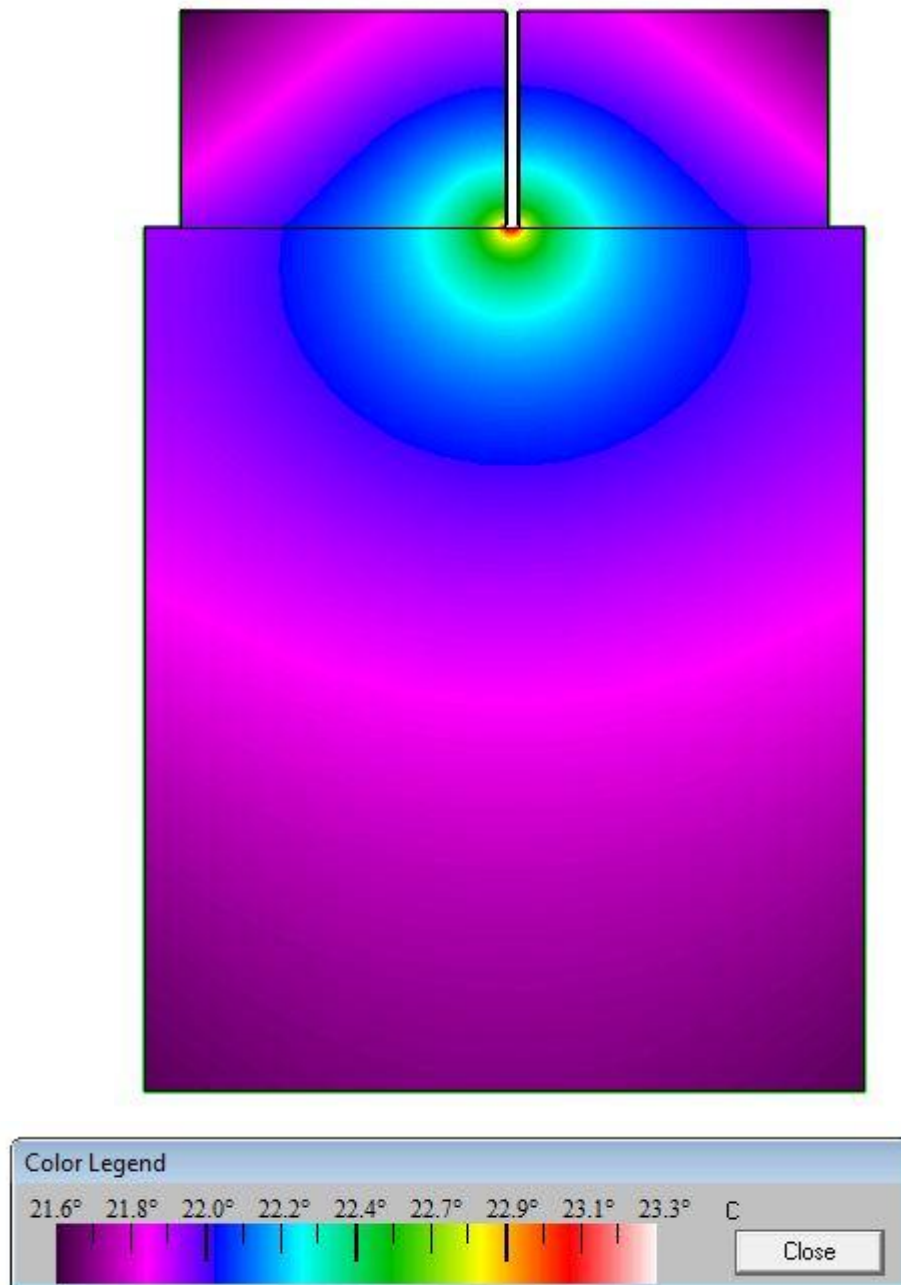
Abbildung 8.18 stellt den Farbschichten-Temperaturverlauf in der UK4-Probe mit 0,5 M-% Wassergehalt und einer Trockendichte von 1,67 g/cm<sup>3</sup> und dem Plexiglaszylinder am Ende eines 80 Sekunden-Heiz-Intervalls dar.



**Abb. 8.19:** Isothermen Temperaturverlauf  $21,8^{\circ}$ - $25,2^{\circ}\text{C}$

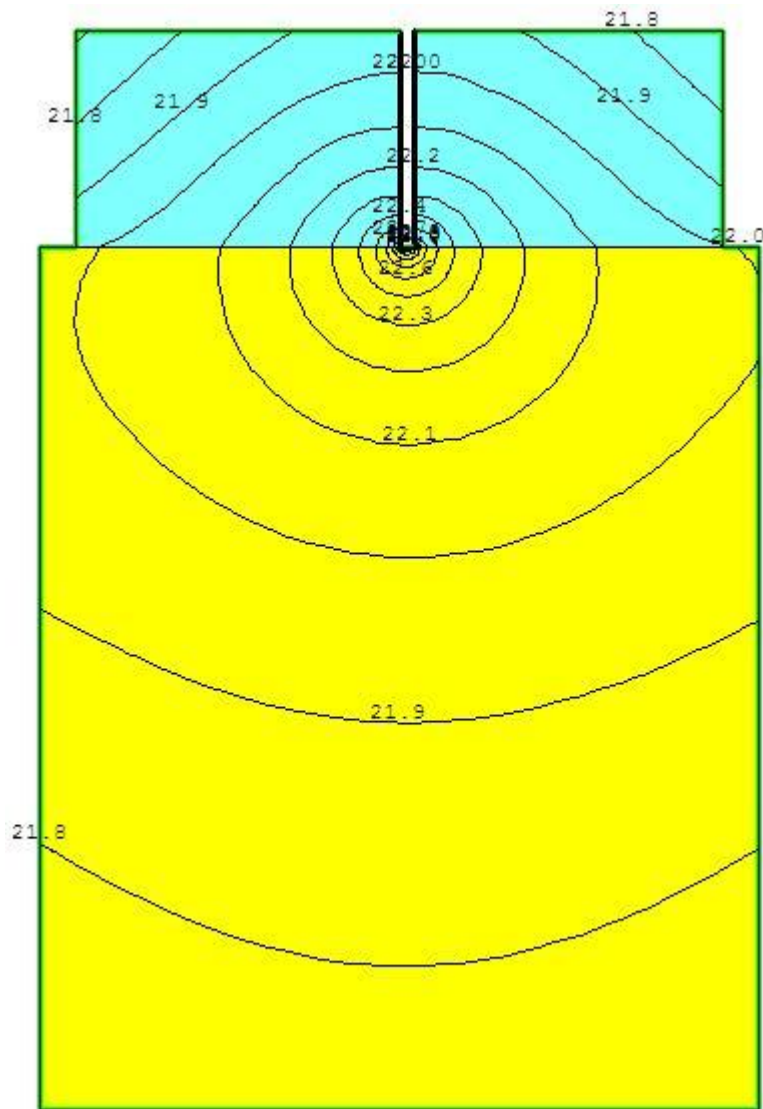
Abbildung 8.19 stellt den Isothermen-Linien-Temperaturverlauf in der UK4-Probe mit 0,5 M-% Wassergehalt und einer Trockendichte von  $1,67 \text{ g/cm}^3$  und dem Plexiglaszylinder am Ende eines 80 Sekunden-Heiz-Intervalls dar.

### 8.2.3 Temperatur-Farbschichten und Isothermen für UK4, 5-M% Wassergehalt, Trockendichte 1,35 g/cm<sup>3</sup>



**Abb. 8.20:** Farbschichten Temperaturverlauf 21,6°-23,3°C

Abbildung 8.20 stellt den Farbschichten-Temperaturverlauf in der UK4-Probe mit 5 M-% Wassergehalt und einer Trockendichte von 1,35 g/cm<sup>3</sup> und dem Plexiglaszylinder am Ende eines 80 Sekunden-Heiz-Intervalls dar.

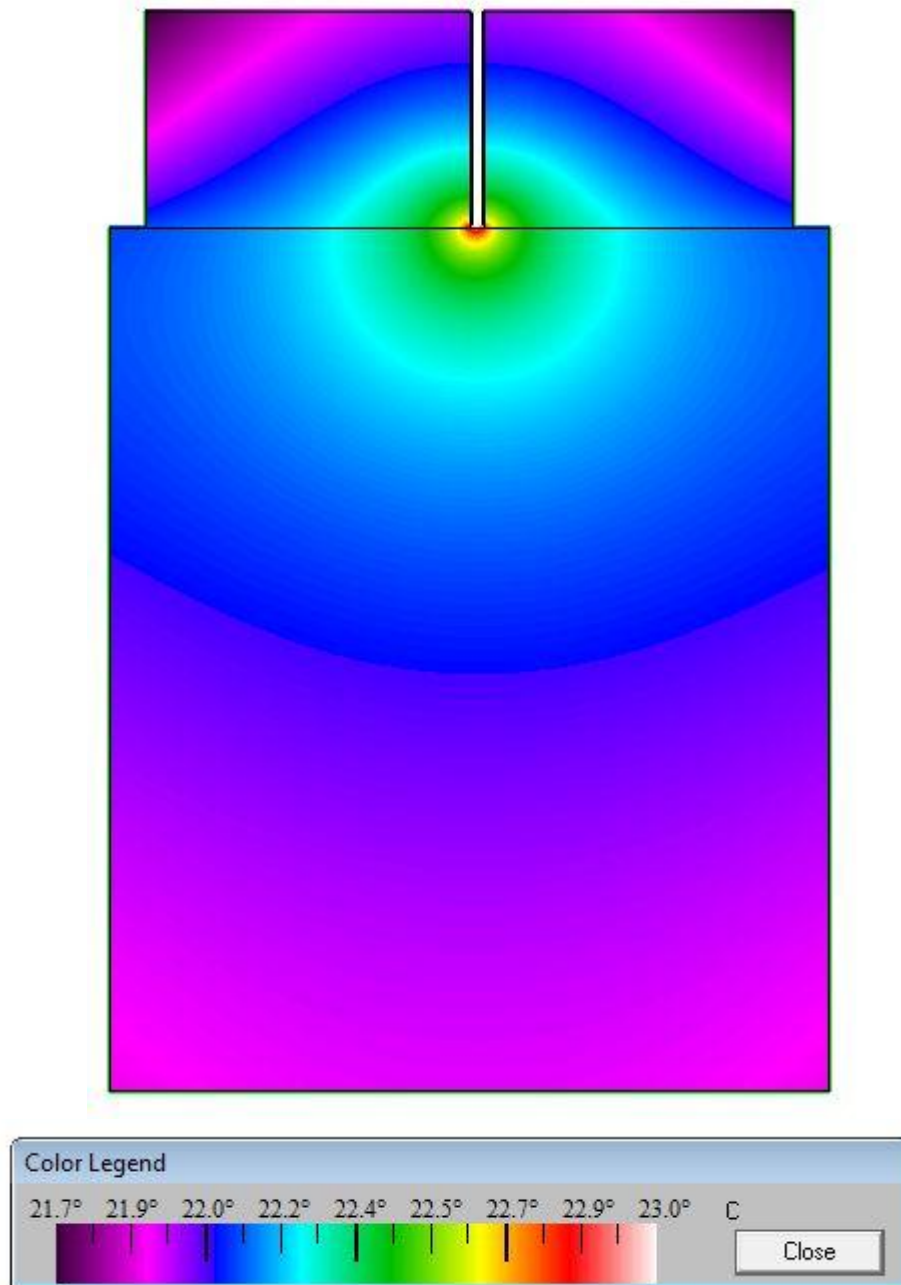


**Abb. 8.21:** Isothermen Temperaturverlauf  $21,6^{\circ}$ - $23,3^{\circ}\text{C}$

Abbildung 8.21 stellt den Isothermen-Linien-Temperaturverlauf in der UK4-Probe mit 5 M-% Wassergehalt und einer Trockendichte von  $1,35 \text{ g/cm}^3$  und dem Plexiglaszylinder am Ende eines 80 Sekunden-Heiz-Intervalls dar.

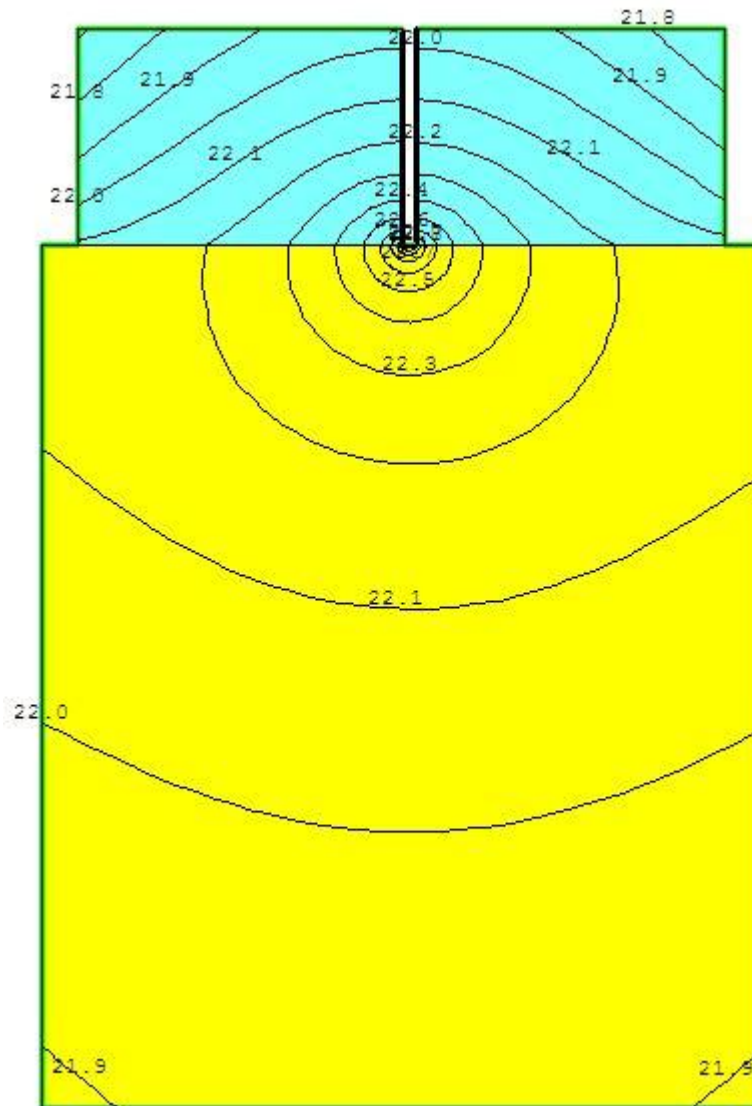


### 8.2.4 Temperatur-Farbschichten und Isothermen für UK4, 20-M% Wassergehalt, Trockendichte 1,35 g/cm<sup>3</sup>



**Abb. 8.22:** Farbschichten Temperaturverlauf 21,7°-23°C

Abbildung 8.22 stellt den Farbschichten-Temperaturverlauf in der UK4-Probe mit 20 M-% Wassergehalt und einer Trockendichte von 1,35 g/cm<sup>3</sup> und dem Plexiglaszylinder am Ende eines 80 Sekunden-Heiz-Intervalls dar.

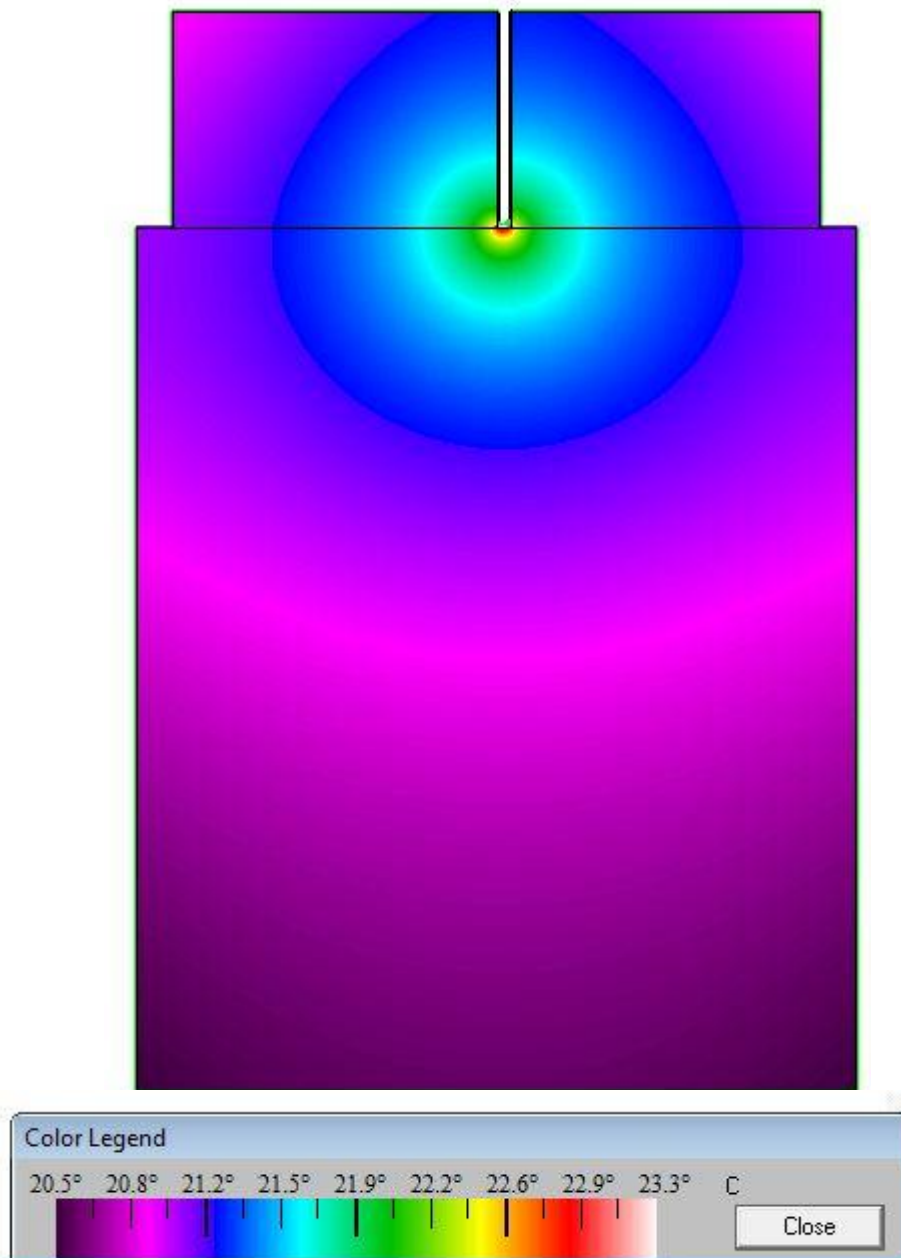


**Abb. 8.23:** Isothermen Temperaturverlauf  $21,7^{\circ}$ - $23^{\circ}\text{C}$

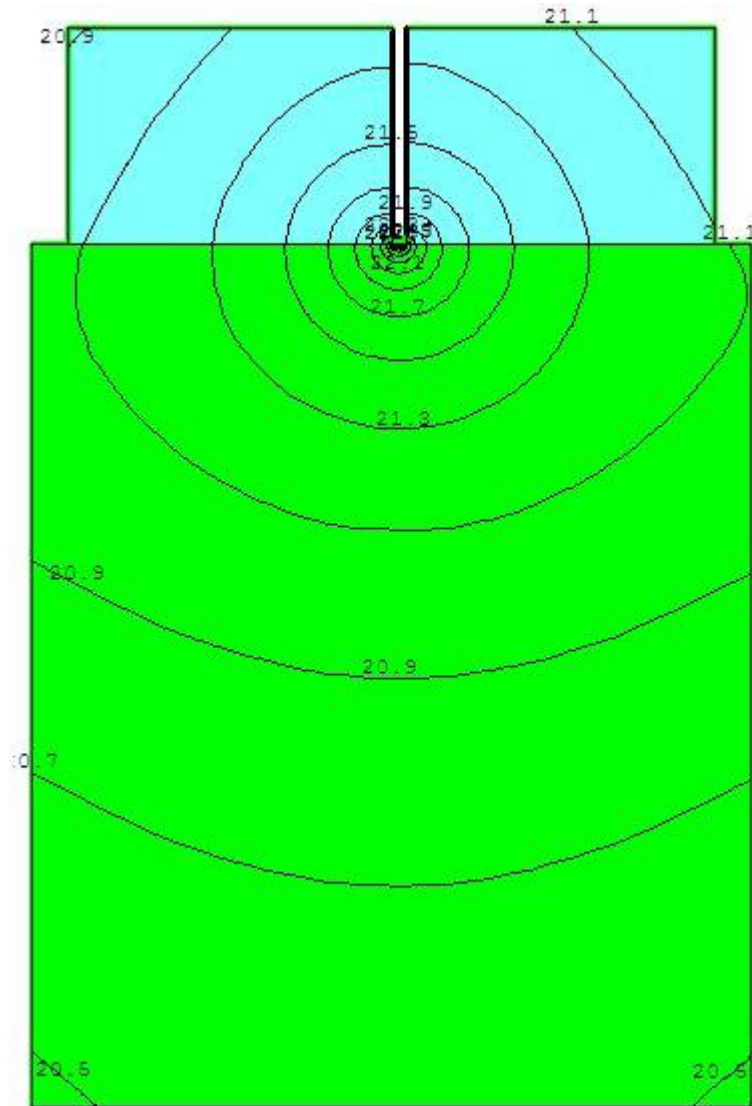
Abbildung 8.23 stellt den Isothermen-Linien-Temperaturverlauf in der UK4-Probe mit 20 M-% Wassergehalt und einer Trockendichte von  $1,35 \text{ g/cm}^3$  und dem Plexiglaszylinder am Ende eines 80 Sekunden-Heiz-Intervalls dar.

Man kann erkennen, dass mit einer größeren Differenz zwischen der Wärmeleitfähigkeit in der UK4-Sand Probe mit  $\lambda = 1,63 \text{ W/mK}$  und dem Plexiglas der TK04-Sonde mit  $\lambda = 0,18 \text{ W/mK}$  die Isothermen weiter in den UK4-Sand reichen, als in das Plexiglas.

### 8.2.5 Temperatur-Farbschichten und Isothermen für Thermosand, 7 M-% Wassergehalt, Trockendichte 1,32 g/cm<sup>3</sup>



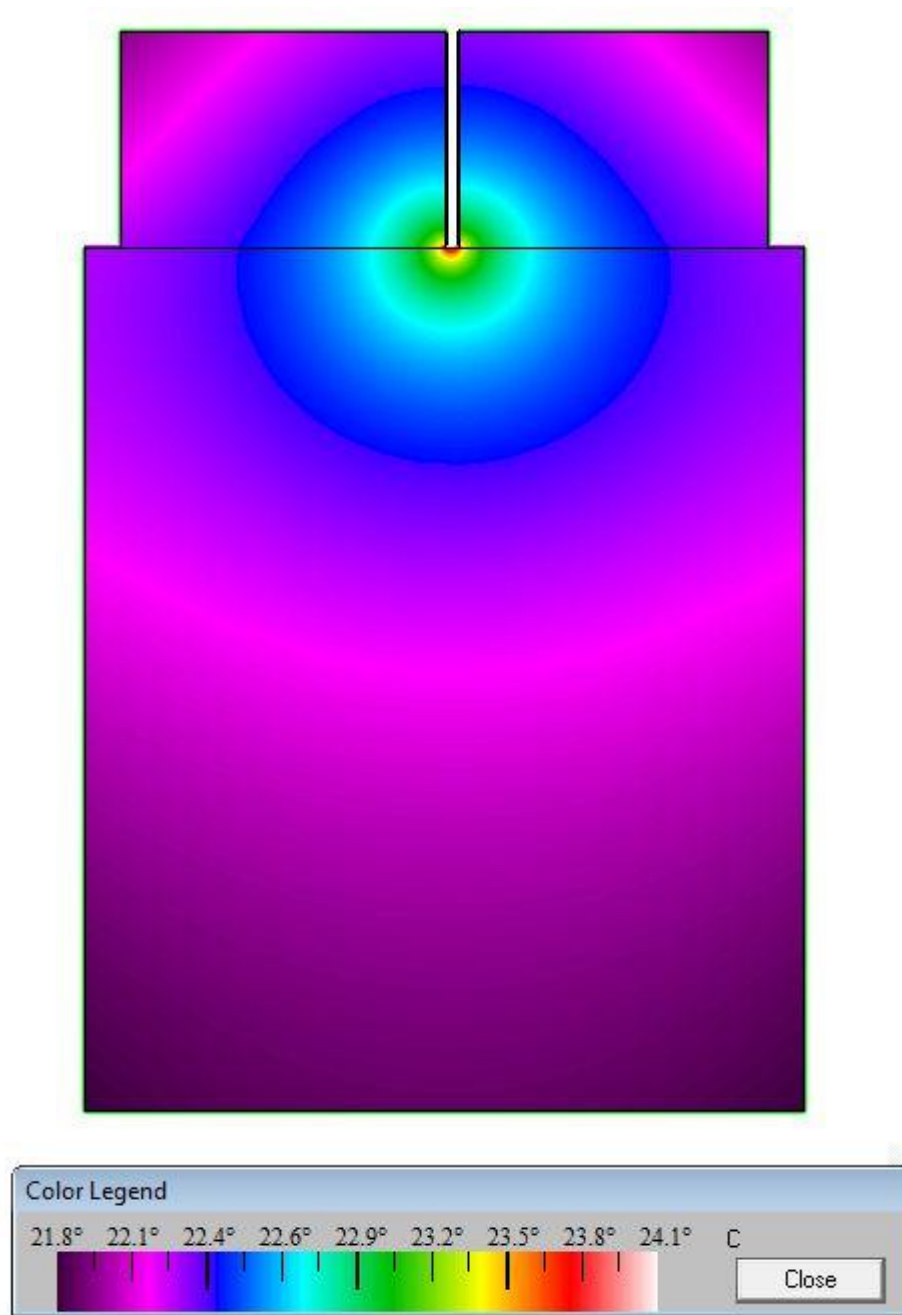
**Abb. 8.24:** Farbschichten Temperaturverlauf 20,5°-23,3°C  
Abbildung 8.24 stellt den Farbschichten-Temperaturverlauf in der Thermosand-Probe mit 7 M-% Wassergehalt und einer Trockendichte von 1,32 g/cm<sup>3</sup> und dem Plexiglaszylinder am Ende eines 80 Sekunden-Heiz-Intervalls dar.



**Abb. 8.25:** Isothermen Temperaturverlauf  $20,5^{\circ}$ - $23,3^{\circ}\text{C}$

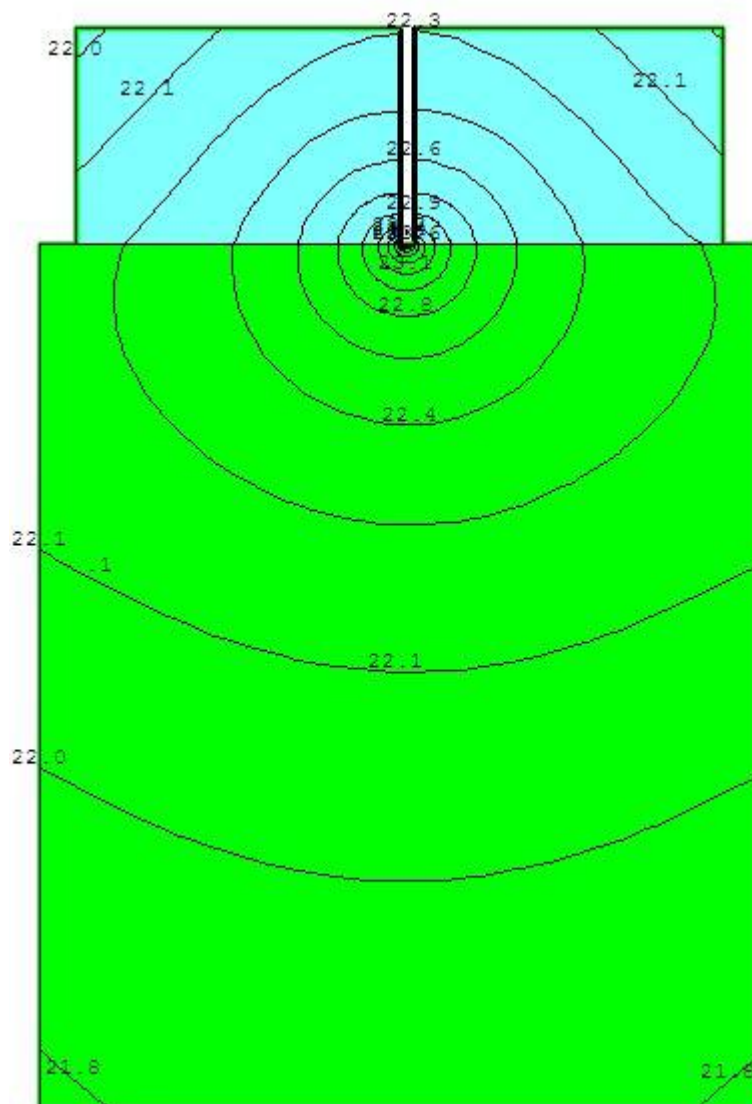
Abbildung 8.23 stellt den Isothermen-Linien-Temperaturverlauf in der Thermo-sand-Probe mit 7 M-% Wassergehalt und einer Trockendichte von  $1,32 \text{ g/cm}^3$  und dem Plexiglaszylinder am Ende eines 80 Sekunden-Heiz-Intervalls dar.

### 8.2.6 Temperatur-Farbschichten und Isothermen für Thermosand, 22 M-% Wassergehalt, Trockendichte 1,14 g/cm<sup>3</sup>



**Abb. 8.26:** Farbschichten Temperaturverlauf 21,8°-24,1°C

Abbildung 8.26 stellt den Farbschichten-Temperaturverlauf in der Thermosand-Probe mit 22 M-% Wassergehalt und einer Trockendichte von 1,14 g/cm<sup>3</sup> und dem Plexiglaszylinder am Ende eines 80 Sekunden-Heiz-Intervalls dar.



**Abb. 8.27:** Isothermen Temperaturverlauf  $21,8^{\circ}$ - $24,1^{\circ}$ C

Abbildung 8.27 stellt den Isothermen-Linien-Temperaturverlauf in der Thermo-sand-Probe mit 22 M-% Wassergehalt und einer Trockendichte von  $1,14 \text{ g/cm}^3$  und dem Plexiglaszylinder am Ende eines 80 Sekunden-Heiz-Intervalls dar.

## 9 Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick

Die Messung der Wärmeleitfähigkeit von Bodenproben mit dem Plattengerät ist sehr aufwändig.

Die Herstellung einer Probe mit Sand und Messung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät dauerte rund fünf bis sieben Arbeitstage und war nur von zwei Personen zu bewerkstelligen.

Es wurden sieben Proben zur Messung vorbereitet, wobei bei zwei Proben der Sand zu stark verdichtet wurde und das PVC-Gefäß ausbeulte.

Es musste erneut eingebaut werden.

Die Herstellung einer Probe und Messung mit der Halbraumsonde dauerte zwei Tage.

Dabei ist das Hauptproblem der Kontakt zwischen Sonde und Probe, der durch sorgfältige Präparation hergestellt werden muss und die „Ungestörtheit“ der Probe selbst.

Dies ist erst mit einer gewissen Erfahrung durchzuführen. Die Probe muss sich über die Dauer von mehreren Stunden an die Temperatur im Klimaschrank anpassen.

Sowohl bei der Messung mit dem Plattengerät als auch mit der Halbraumsonde wurde festgestellt, dass Thermosand eine geringere Wärmeleitfähigkeit als Bettungssand UK4 aufweist. Sie beträgt bei beiden Messungen rund die Hälfte.

Außerdem weichen die Messungen mit dem Plattengerät von den Messungen mit der Halbraumsonde ab, wobei die Ergebnisse der Halbraumsonden-Messung um bis zu 45,7%, bezogen auf das Ergebnis der Messung mit der Halbraumsonde bei UK4 20 M-% und  $\rho_{\text{trocken}}=1,35\text{g/cm}^3$  höher sind als die mit dem Plattengerät.

Für eine genaue Untersuchung der Gründe müssten umfangreiche Messserien durchgeführt werden.

Da Sand komplexe Wärmeleiteigenschaften aufweist, müsste man ein anderes Material, zum Beispiel Leichtbeton prüfen, um die Messung mit dem Plattengerät mit der der Halbraumsonde besser vergleichen zu können.

Auch eine Untersuchung des Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Sand und PVC könnte über das geringere Ergebnis der Messung mit dem Plattengerät gegenüber der Halbraumsonde Aufschluss geben.

# Literaturverzeichnis

Applied Precision Ltd. (2010). *Applied Precision Ltd.* Von <http://www.appliedp.com> abgerufen

Niedersächsischer Landkreistag. (2007). *Informationsveranstaltung zum Ausbau des Hoch- und Höchstspannungsnetzes.* Groß Düngen.

Axnix, P. J. *Wärmeausbreitung im Boden Mathematische Formulierung und Fernwärmeleitungen als Anwendungsbeispiel.* 2008: Diplomarbeit TU Graz.

Baehr, H.-D. S. (2010). *Wärme- und Stoffübertragung.* Berlin: Springer-Verlag.

Baehr, Hans Dieter; Kabelac, Stephan;. (2006). *Thermodynamik.* Springer Verlag.

Czarnetzki, Walther Theodor;. (1997). *Messverfahren mit Temperaturschwingungen für Wärme- und Temperaturleitfähigkeit.*

Deutsches Institut für Normung. (1979). *DIN 52 612.*

Deutsches Institut für Normung. (1984). *DIN 52 612.*

Deutsches Institut für Normung. (1977). *DIN 52 613.*

Deutsches Institut für Normung. *DIN EN 993-14.*

Deutsches Institut für Normung. *DIN EN 993-15.*

Erbas, K. (2001). *Eine universelle Methode zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit aus Aufheizkurven konstant geheizter Zylinderquellen.* Berlin.

Europäische Norm. *EN 1934.*

Europäische Norm. *EN 647.*

Europäische Norm. *EN 674.*

Farouki, Omar;. (1986). *Thermal properties of soils.*

Großmann. (1993). *Nadelsonde.*



- Gueguen; Palciauskas;. (1994). *Introduction to the Physics of Rock*. Schön.
- Hauptmüller, S. (2005). Wärmeleitfähigkeit von Fels bei hohen Temperaturen. In *Diplomarbeit*. TU München.
- Henögl, O. (2006). Bodenmechanische Eignung und thermische Vorteile eines neuartigen Bettungssandes für Fernwärmeleitungen. *Tagungsband 5 Kolloquium Bauen in Boden und Fels, Technische Akademie Esslingen, Ostfildern*, S. 187-194.
- Henögl, O. (2009). Thermal propagation around heat supply pipes-determining thermal conductivity of soil specimens. *International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 1036-1040.
- Hunklinger, S. (2007). *Festkörperphysik*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- Institut für Sporttechnologie; Österreichisches Forschungsinstitut für Chemie;. (2002). *Analyse Chemie Thermosand*.
- International Organization for Standardization. *ISO 8302*.
- Kollenberg, Wolfgang ;. (2004). *Technische Keramik*. Vulkan-Verlag GmbH.
- Laboratory, L. B., & California, R. o. (2011). *Therm 6.3*.
- Leibniz, Otto;. (2010). *Stabilisierter Thermosand als fließfähiges Bettungsmaterial mit guten Wärmedämmeigenschaften für Fernwärmeleitungen*. Institut für Bodenmechanik und Grundbau TU Graz.
- Marth, J. *Zur Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Kohleschüttungen und ihren Pyrolyseprodukten bei Temperaturen von 150 bis 550°C*. 1990: VDI Verlag.
- Michael A. Stroschio, M. D. (2005). *Phonons in nanostructures*. Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- ON-Komitee ON-K 175. (2009). *ÖNorm B 6015-2*. Wien.
- ON-Komitee ON-K 175. (2009). *ÖNorm B 6015-3 Teil 3*. Wien.
- TeKa. (2010). *TK 04 Thermal Conductivity Meter*. Berlin: Thermophysical Instruments-Geothermal Investigation.
- Villinger, Erich;. (1983). *Geologisches Jahrbuch*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.

Vlajčić, Todor;. (1976). *Ein instationäres Verfahren zur Bestimmung der Temperatur- und Wärmeleitfähigkeit von festen Stoffen*. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.

# Anhang 1

## Spezifikationen TK04 Messeinheit

Bezeichnung	TK04 Messeinheit
Messprinzip	instationäre Linienquelle (Nadelsondenmethode)
Messbereich	0.1 bis 10 W/mK (sondenabhängig, s. u.)
Genauigkeit	$\pm 2 \%$ (sondenabhängig, s. u.)
Reproduzierbarkeit	$\pm 1.5 \%$
Konstanz des Heizstroms	$\pm 0.01 \%$
Messdauer Einzelmessung	80 sec (sondenabhängig, s. u.)
Wiederholungsmessungen	bis 99 Messungen pro Messreihe (vollautomatisch)
Probengröße	keine Begrenzung nach oben, Form beliebig, Mindestgröße sondenabhängig (s. u.)
Betriebstemperatur	0 bis 45°C
Probentemperatur	0 bis 70°C (-25 bis 125°C auf Anfrage)
Stromversorgung	220/240 V $\sim$ (50 Hz) ; 100/120 V $\sim$ (60 Hz)
Leistungsaufnahme	$\sim 40W$
Abmessungen (B x H x T)	471 x 147 x 391 mm
Gewicht	13 kg
Interface	serielle Schnittstelle RS232

# Anhang 2

<b>UK4 - 0,5%</b>					
Datum Einbau:			Datum Ausbau:		02/11/2010
<b>Grundlagen</b>					
Vorsättigung UK4 [%]		0.46	Volumen Behälter [cm <sup>3</sup> ]		48192
			Masse Behälter [g]		23200
<b>Sollwerte</b>			<b>Istwerte</b>		
<b>Trockendichte</b>		<b>-g/cm<sup>3</sup></b>	<b>Trockendichte</b>		<b>1.67g/cm<sup>3</sup></b>
<b>Wassergehalt</b>		<b>-%</b>	<b>Wassergehalt</b>		<b>0.46%</b>
<b>Wärmeleitfähigkeit λ</b>			<b>0.22W/mK</b>		
<b>Rezeptur</b>					
Anzahl Lagen:		-	Höhe je Lage:		-cm
			Gesamt	je Lage	
Trockenmasse [g]			-	-	
Masse bezogen auf Vorsättigung [g]			-	-	
Masse Wasser [g]			-	-	
Gesamtmasse [g]			-	-	
<b>Rückrechnung und Kontrolle nach Einbau</b>					
<b>Wassergehalt</b>					
Masse Schüssel [g]	Gesamt feucht [g]	Probe feucht [g]	Gesamt trocken [g]	Probe trocken [g]	Masse Wasser [g]
-	-	-	-	-	-
<b>Wassergehalt bei Einbau</b>					<b>-%</b>
<b>Trockendichte</b>					
Gesamtmasse (Probe + Behälter)			104550g		
Masse Probe			81350g		
Trockenmasse			80976.7g		
<b>Trockendichte</b>			<b>1,67g/cm<sup>3</sup></b>		
<b>Rückrechnung und Kontrolle nach Ausbau</b>					
<b>Wassergehalt</b>					
Masse Schüssel [g]	Gesamt feucht [g]	Probe feucht [g]	Gesamt trocken [g]	Probe trocken [g]	Masse Wasser [g]
547.1	1593.2	1046.1	1588.4	1041.3	4.8

<b>Wassergehalt bei Ausbau</b>		<b>0.46%</b>	
<b>Trockendichte</b>			
Einzelmassen trocken [g]	14582		
	20021		
	15908.4		
	11896		
	18399		
Gesamtmasse	80806.4	Gesamtmasse [g]	80806.4
		Volumen Behälter [cm <sup>3</sup> ]	48192
		<b>Trockendichte [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>1.67</b>

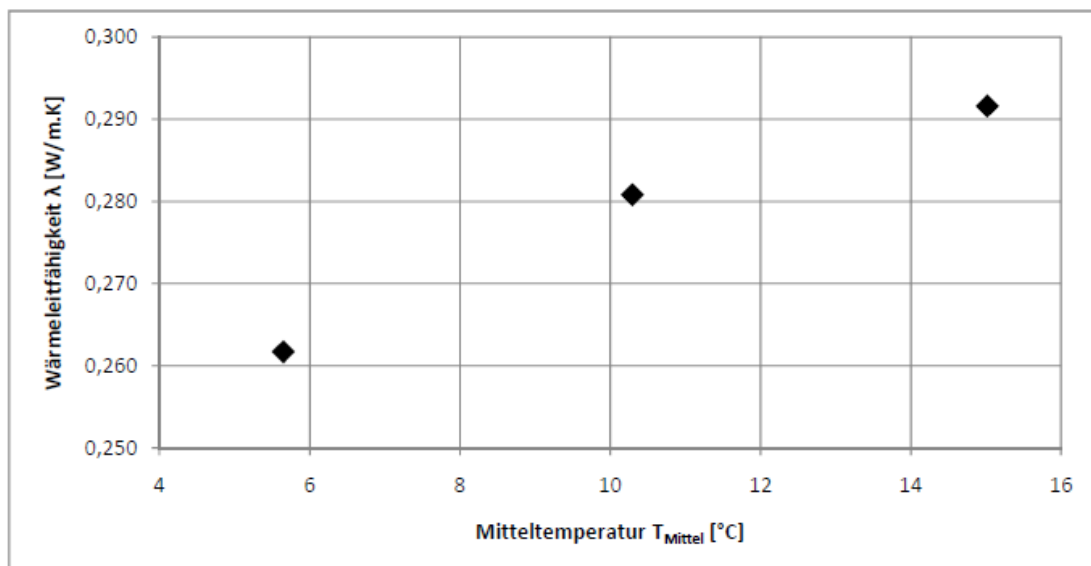
<b>Trockendichte mittels Stechzylinder</b>					
<b>Zusätzliche Bestimmung der Trockendichte mittels Stechzylinder</b>					
Zylinder-Nr.	[-]	299	215	233	214
Masse Schüssel	[g]	171.5	172.7	171.2	171.8
Masse Zylinder	[g]	162.9	163.5	165.2	162.8
Gesamt feucht	[g]	698.3	700.7	687.3	693
Probe feucht	[g]	363.9	364.5	350.9	358.4
Gesamt trocken	[g]	647.5	649.9	637.3	641.7
Probe trocken	[g]	313.1	313.7	300.9	307.1
Volumen	[cm <sup>3</sup> ]	201.31	201.31	201.31	201.31
<b>Trockendichte</b>	<b>[g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>1.56</b>	<b>1.56</b>	<b>1.49</b>	<b>1.53</b>
<b>Messprotokoll Wärmeleitfähigkeitsmessung</b>					
<b>Auswertung der Messung des gesamten Versuchsaufbaues und Rückrechnung</b>					
Energie: > 4W	T <sub>Heiseite</sub>	T <sub>Kaltseite</sub>	T <sub>Mittel</sub>	Widerstand R <sub>ges</sub>	Leitfähigkeit λ <sub>ges</sub>
Datum / Uhrzeit	°C	°C	°C	m <sup>2</sup> K/W	W/mK
11/08/10, 12:25	10.00	1.12	5.56	0.3618	0.27639
12/08/10, 01:27	15.00	5.46	10.23	0.3545	0.28207
12/08/10, 12:29	20.00	9.96	14.98	0.3432	0.2914
			<b>10</b>	<b>0.3549</b>	<b>0.28179</b>
	d	R	λ = d / R		
Behälter (PVC)	0.02	0.13760	0.14535		
ges. Aufbau	0.10	0.35486	0.28179		
Probe	0.08	0.21726	<b>0.36822</b>		

# UK4-Sand, w ~ 5%

Thermosand - 5%									
Datum Einbau:		04.11.2010		Datum Ausbau:		11.11.2010			
<b>Grundlagen</b>									
Vorsättigung Thermosand [%] (falsche Annahme!)				0,50		Volumen Behälter [cm <sup>3</sup> ]		48192	
						Masse Behälter [g]		23200	
<b>Sollwerte</b>				<b>Istwerte</b>					
<b>Trockendichte</b>		1,4 g/cm <sup>3</sup>		<b>Trockendichte</b>		1,32 g/cm <sup>3</sup>			
<b>Wassergehalt</b>		5 %		<b>Wassergehalt</b>		6,98 %			
<b>Wärmeleitfähigkeit λ</b>				0,22 W/mK					
<b>Rezeptur</b>									
Anzahl Lagen:		8		Höhe je Lage:		9,75 cm			
				Gesamt		je Lage			
Trockenmasse [g]				67468,8		8433,6			
Masse bezogen auf Vorsättigung [g]				67806,1		8475,8			
Masse Wasser [g]				3036,1		379,5			
Gesamtmasse [g]				70842,2		8855,3			
<b>Rückrechnung und Kontrolle nach Einbau</b>									
<b>Wassergehalt</b>									
Masse Schüssel [g]	Gesamt feucht [g]	Probe feucht [g]	Gesamt trocken [g]	Probe trocken [g]	Masse Wasser [g]				
171,8	395,5	223,7	380,9	209,1	14,6				
<b>Wassergehalt bei Einbau</b>					<b>6,98 %</b>				
<b>Trockendichte</b>									
Gesamtmasse (Probe + Behälter)				91150 g					
Masse Probe				67950 g					
Trockenmasse				63515,2 g					
<b>Trockendichte</b>				<b>1,32 g/cm<sup>3</sup></b>					
<b>Rückrechnung und Kontrolle nach Ausbau</b>									
<b>Wassergehalt</b>									
Masse Schüssel [g]	Gesamt feucht [g]	Probe feucht [g]	Gesamt trocken [g]	Probe trocken [g]	Masse Wasser [g]				
171,8	412,3	240,5	396,6	224,8	15,7				
<b>Wassergehalt bei Ausbau</b>					<b>6,98 %</b>				
<b>Trockendichte</b>									
Einzelmassen trocken [g]	16472								
	14706								
	13840								
	13067					Gesamtmasse [g]		62891	
	4806					Volumen Behälter [cm <sup>3</sup> ]		48192	
Gesamtmasse	62891					<b>Trockendichte [g/cm<sup>3</sup>]</b>		<b>1,31</b>	

Trockendichte mittels Stechzylinder				
Zusätzliche Bestimmung der Trockendichte mittels Stechzylinder				
Zylinder-Nr.	[-]			
Masse Schüssel	[g]			
Masse Zylinder	[g]			
Gesamt feucht	[g]			
Probe feucht	[g]	0	0	0
Gesamt trocken	[g]			
Probe trocken	[g]	0	0	0
Volumen	[cm <sup>3</sup> ]	201,31	201,31	201,31
Trockendichte	[g/cm <sup>3</sup> ]	0,00	0,00	0,00

Messprotokoll Wärmeleitfähigkeitsmessung					
Auswertung der Messung des gesamten Versuchsaufbaues und Rückrechnung					
Energie: > 4W	$T_{\text{Hei\ss}seite}$	$T_{\text{Kaltseite}}$	$T_{\text{Mittel}}$	Widerstand $R_{\text{ges}}$	Leitfähigkeit $\lambda_{\text{ges}}$
Datum / Uhrzeit	°C	°C	°C	m <sup>2</sup> K/W	W/mK
09.11.10, 11:37	10,00	1,3	5,65	0,3821	0,2617
10.11.10, 00:39	15,00	5,59	10,295	0,3561	0,28083
10.11.10, 12:41	20,00	10,04	15,02	0,3429	0,29162
			<b>10</b>	<b>0,3578</b>	<b>0,27962</b>
	d	R	$\lambda = d / R$		
Behälter (PVC)	0,02	0,13760	0,14535		
ges. Aufbau	0,10	0,35775	0,27962		
Probe	0,08	0,22015	<b>0,36338</b>		



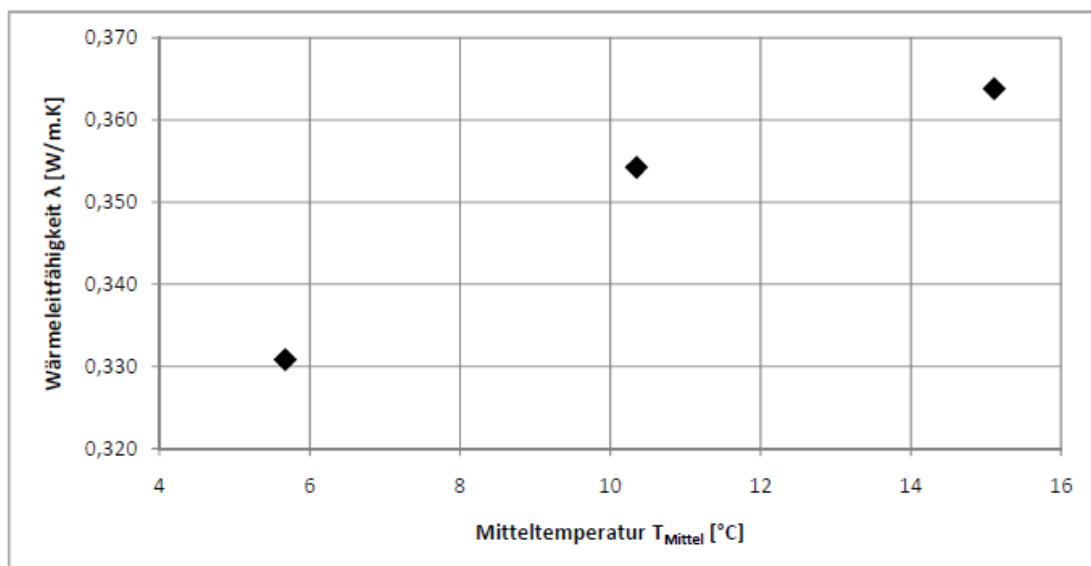


# UK4-Sand, w ~ 20%

Thermosand - 20%							
Datum Einbau:		16.11.2010		Datum Ausbau:		24.11.2010	
<b>Grundlagen</b>							
Vorsättigung Thermosand [%]		2,87		Volumen Behälter [cm <sup>3</sup> ]		48192	
				Masse Behälter [g]		23200	
<b>Sollwerte</b>				<b>Istwerte</b>			
<b>Trockendichte</b>		<b>1,4 g/cm<sup>3</sup></b>		<b>Trockendichte</b>		<b>1,14 g/cm<sup>3</sup></b>	
<b>Wassergehalt</b>		<b>20 %</b>		<b>Wassergehalt</b>		<b>22,17 %</b>	
<b>Wärmeleitfähigkeit λ</b>				<b>0,15 W/mK</b>			
<b>Rezeptur</b>							
Anzahl Lagen:		8		Höhe je Lage:		9,75 cm	
				<b>Gesamt</b>		<b>je Lage</b>	
Trockenmasse [g]				67468,8		8433,6	
Masse bezogen auf Vorsättigung [g]				69402,9		8675,4	
Masse Wasser [g]				11559,6		1445,0	
Gesamtmasse [g]				80962,6		10120,3	
<b>Rückrechnung und Kontrolle nach Einbau</b>							
<b>Wassergehalt</b>							
Masse Schüssel [g]	Gesamt feucht [g]	Probe feucht [g]	Gesamt trocken [g]	Probe trocken [g]	Masse Wasser [g]		
158,9	327,0	168,1	296,5	137,6	30,5		
<b>Wassergehalt bei Einbau</b>				<b>22,17 %</b>			
<b>Trockendichte</b>							
Gesamtmasse (Probe + Behälter + Steife zu 7500 g)				97550 g			
Masse Probe				66850 g			
Trockenmasse				54720,8 g			
<b>Trockendichte</b>				<b>1,14 g/cm<sup>3</sup></b>			
<b>Rückrechnung und Kontrolle nach Ausbau</b>							
<b>Wassergehalt</b>							
Masse Schüssel [g]	Gesamt feucht [g]	Probe feucht [g]	Gesamt trocken [g]	Probe trocken [g]	Masse Wasser [g]		
322,4	580,3	257,9	536,6	214,2	43,7		
<b>Wassergehalt bei Ausbau</b>				<b>20,40 %</b>			
<b>Trockendichte</b>							
Einzelmassen trocken [g]	13550						
	11561						
	12350						
	13161			Gesamtmasse [g]		55439	
	4817			Volumen Behälter [cm <sup>3</sup> ]		48192	
Gesamtmasse	55439			<b>Trockendichte [g/cm<sup>3</sup>]</b>		<b>1,15</b>	

Trockendichte mittels Stechzylinder					
Zusätzliche Bestimmung der Trockendichte mittels Stechzylinder					
Zylinder-Nr.	[-]	215			
Masse Schüssel	[g]	158,9			
Masse Zylinder	[g]	163,5			
Gesamt feucht	[g]	580,3			
Probe feucht	[g]	257,9	0	0	0
Gesamt trocken	[g]	536,6			
Probe trocken	[g]	214,2	0	0	0
Volumen	[cm <sup>3</sup> ]	201,31	201,31	201,31	201,31
<b>Trockendichte</b>	<b>[g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>1,06</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>

Messprotokoll Wärmeleitfähigkeitsmessung					
Auswertung der Messung des gesamten Versuchsaufbaues und Rückrechnung					
Energie: > 4W	$T_{\text{Hei\ss}seite}$	$T_{\text{Kaltseite}}$	$T_{\text{Mittel}}$	Widerstand $R_{\text{ges}}$	Leitfähigkeit $\lambda_{\text{ges}}$
Datum / Uhrzeit	°C	°C	°C	m <sup>2</sup> K/W	W/mK
17.11.10, 15:50	10,00	1,35	5,675	0,3023	0,33085
18.11.10, 04:51	15,00	5,7	10,35	0,2823	0,35424
18.11.10, 17:52	20,00	10,22	15,11	0,2749	0,36381
			<b>10</b>	<b>0,2838</b>	<b>0,35249</b>
	d	R	$\lambda = d / R$		
Behälter (PVC)	0,02	0,13760	0,14535		
ges. Aufbau	0,10	0,28380	0,35249		
Probe	0,08	0,14620	<b>0,54720</b>		



# Thermosand, w ~ 5%

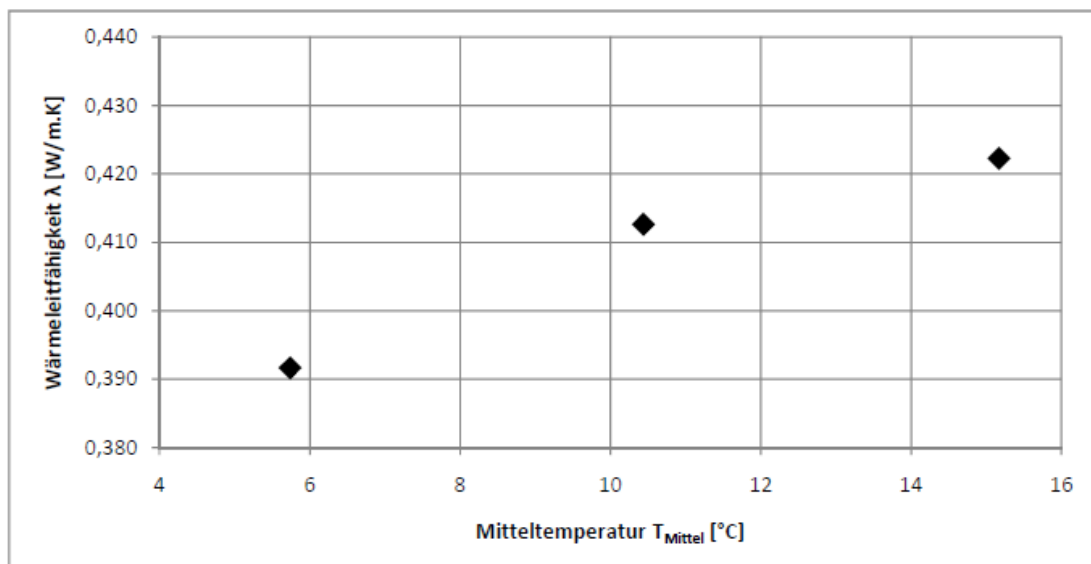
UK4 - 5%							
Datum Einbau:		24.11.2010		Datum Ausbau:		06.12.2010	
<b>Grundlagen</b>							
Vorsättigung UK4 [%]		0,46		Volumen Behälter [cm <sup>3</sup> ]		48192	
				Masse Behälter [g]		23200	
<b>Sollwerte</b>				<b>Istwerte</b>			
<b>Trockendichte</b>		<b>1,39 g/cm<sup>3</sup></b>		<b>Trockendichte</b>		<b>1,35 g/cm<sup>3</sup></b>	
<b>Wassergehalt</b>		<b>5 %</b>		<b>Wassergehalt</b>		<b>4,90 %</b>	
<b>Wärmeleitfähigkeit λ</b>				<b>0,11 W/mK</b>			
<b>Rezeptur</b>							
Anzahl Lagen:		8		Höhe je Lage:		9,75 cm	
				<b>Gesamt</b>		<b>je Lage</b>	
Trockenmasse [g]				66986,9		8373,4	
Masse bezogen auf Vorsättigung [g]				67295,7		8412,0	
Masse Wasser [g]				3040,6		380,1	
Gesamtmasse [g]				70336,2		8792,0	
<b>Rückrechnung und Kontrolle nach Einbau</b>							
<b>Wassergehalt</b>							
Masse Schüssel [g]	Gesamt feucht [g]	Probe feucht [g]	Gesamt trocken [g]	Probe trocken [g]	Masse Wasser [g]		
k.A.	k.A.	#WERT!		#WERT!	#WERT!		
<b>Wassergehalt bei Einbau</b>				<b>#WERT! %</b>			
<b>Trockendichte</b>							
Gesamtmasse (Probe + Behälter)				110050 g			
Masse Probe				79350 g			
Trockenmasse				75640,4 g			
<b>Trockendichte</b>				<b>1,57 g/cm<sup>3</sup></b>			
<b>Rückrechnung und Kontrolle nach Ausbau</b>							
<b>Wassergehalt</b>							
Masse Schüssel [g]	Gesamt feucht [g]	Probe feucht [g]	Gesamt trocken [g]	Probe trocken [g]	Masse Wasser [g]		
334,5	608,3	273,8	595,5	261	12,8		
<b>Wassergehalt bei Ausbau</b>				<b>4,90 %</b>			
<b>Trockendichte</b>							
Einzelmassen trocken [g]	13774						
	16110						
	15070						
	13974			Gesamtmasse [g]		64943	
	6015			Volumen Behälter [cm <sup>3</sup> ]		48192	
Gesamtmasse	64943			<b>Trockendichte [g/cm<sup>3</sup>]</b>		<b>1,35</b>	

Trockendichte mittels Stechzylinder				
Zusätzliche Bestimmung der Trockendichte mittels Stechzylinder				
Zylinder-Nr.	[-]	214	215	
Masse Schüssel	[g]	171,8	158,9	
Masse Zylinder	[g]	162,7	163,5	
Gesamt feucht	[g]	606,9	608,3	
Probe feucht	[g]	272,4	285,9	0
Gesamt trocken	[g]	594,8	595,5	
Probe trocken	[g]	260,3	273,1	0
Volumen	[cm <sup>3</sup> ]	201,31	201,31	201,31
<b>Trockendichte</b>	<b>[g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>1,29</b>	<b>1,36</b>	<b>0,00</b>

### Messprotokoll Wärmeleitfähigkeitsmessung

#### Auswertung der Messung des gesamten Versuchsaufbaues und Rückrechnung

Energie: > 4W	T <sub>HeiÙseite</sub>	T <sub>Kaltseite</sub>	T <sub>Mittel</sub>	Widerstand R <sub>ges</sub>	Leitfähigkeit λ <sub>ges</sub>
Datum / Uhrzeit	°C	°C	°C	m <sup>2</sup> K/W	W/mK
04.12.10, 05:30	10,00	1,48	5,74	0,2553	0,39168
04.12.10, 15:30	15,00	5,88	10,44	0,2423	0,41264
05.12.10, 01:30	20,00	10,34	15,17	0,2368	0,42225
			<b>10</b>	<b>0,2435</b>	<b>0,41068</b>
	d	R	λ = d / R		
Behälter (PVC)	0,02	0,13760	0,14535		
ges. Aufbau	0,10	0,24352	0,41068		
Probe	0,08	0,10592	<b>0,75530</b>		

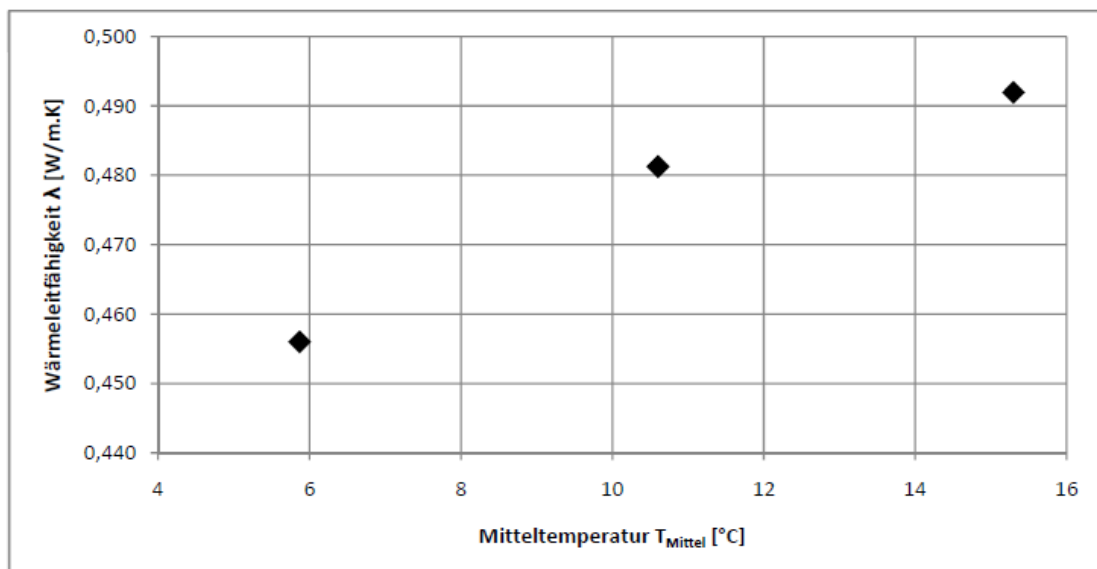


# Thermosand, w ~ 20%

UK4 - 20%							
Datum Einbau:		06.12.2010		Datum Ausbau:		17.12.2010	
<b>Grundlagen</b>							
Vorsättigung UK4 [%]		0,46		Volumen Behälter [cm <sup>3</sup> ]		48192	
				Masse Behälter [g]		23200	
<b>Sollwerte</b>				<b>Istwerte</b>			
<b>Trockendichte</b>		<b>1,39 g/cm<sup>3</sup></b>		<b>Trockendichte</b>		<b>1,35 g/cm<sup>3</sup></b>	
<b>Wassergehalt</b>		<b>20 %</b>		<b>Wassergehalt</b>		<b>19,75 %</b>	
<b>Wärmeleitfähigkeit λ</b>				<b>0,07 W/mK</b>			
<b>Rezeptur</b>							
Anzahl Lagen:		8		Höhe je Lage:		9,75 cm	
				Gesamt		je Lage	
Trockenmasse [g]				66986,9		8373,4	
Masse bezogen auf Vorsättigung [g]				67295,7		8412,0	
Masse Wasser [g]				13088,6		1636,1	
Gesamtmasse [g]				80384,3		10048,0	
<b>Rückrechnung und Kontrolle nach Einbau</b>							
<b>Wassergehalt</b>							
Masse Schüssel [g]	Gesamt feucht [g]	Probe feucht [g]	Gesamt trocken [g]	Probe trocken [g]	Masse Wasser [g]		
308,1	697,4	389,3	633,2	325,1	64,2		
<b>Wassergehalt bei Einbau</b>				<b>19,75 %</b>			
<b>Trockendichte</b>							
Gesamtmasse (Probe + Behälter)				101000 g			
Masse Probe				77800 g			
Trockenmasse				64969,9 g			
<b>Trockendichte</b>				<b>1,35 g/cm<sup>3</sup></b>			
<b>Rückrechnung und Kontrolle nach Ausbau</b>							
<b>Wassergehalt</b>							
Masse Schüssel [g]	Gesamt feucht [g]	Probe feucht [g]	Gesamt trocken [g]	Probe trocken [g]	Masse Wasser [g]		
		0		0	0		
<b>Wassergehalt bei Ausbau</b>				<b>#DIV/0! %</b>			
<b>Trockendichte</b>							
Einzelmassen trocken [g]			Gesamtmasse [g]				0
			Volumen Behälter [cm <sup>3</sup> ]				48192
	Gesamtmasse		0		<b>Trockendichte [g/cm<sup>3</sup>]</b>		<b>0,00</b>

Trockendichte mittels Stechzylinder					
Zusätzliche Bestimmung der Trockendichte mittels Stechzylinder					
Zylinder-Nr.	[-]				
Masse Schüssel	[g]				
Masse Zylinder	[g]				
Gesamt feucht	[g]				
Probe feucht	[g]	0	0	0	0
Gesamt trocken	[g]				
Probe trocken	[g]	0	0	0	0
Volumen	[cm <sup>3</sup> ]	201,31	201,31	201,31	201,31
Trockendichte	[g/cm <sup>3</sup> ]	0,00	0,00	0,00	0,00

Messprotokoll Wärmeleitfähigkeitsmessung					
Auswertung der Messung des gesamten Versuchsaufbaues und Rückrechnung					
Energie: > 4W	$T_{\text{Hei\ss}seite}$	$T_{\text{Kaltseite}}$	$T_{\text{Mittel}}$	Widerstand $R_{\text{ges}}$	Leitfähigkeit $\lambda_{\text{ges}}$
Datum / Uhrzeit	°C	°C	°C	m <sup>2</sup> K/W	W/mK
10.12.10, 06:10	10,00	1,74	5,87	0,2193	0,456
10.12.10, 19:13	15,00	6,21	10,605	0,2078	0,48124
11.12.10, 07:16	20,00	10,6	15,3	0,2033	0,49192
			<b>10</b>	<b>0,2093</b>	<b>0,47802</b>
	d	R	$\lambda = d / R$		
Behälter (PVC)	0,02	0,13760	0,14535		
ges. Aufbau	0,10	0,20927	0,47802		
Probe	0,08	0,07167	<b>1,11622</b>		



# Anhang 3

