

Eine universelle Methode zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit aus Aufheizkurven konstant geheizter Zylinderquellen

Diplom-Geophysiker

Kemal Erbaş

aus Berlin

von der Fakultät VI - Bauingenieurwesen und Angewandte Geowissenschaften
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Naturwissenschaften

- Dr. rer. nat. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuß

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. H. Wolff, TU-Berlin

Berichter: Prof. Dr. H. Burkhardt, TU-Berlin

Berichter: Prof. Dr. H. Villinger, Universität Bremen

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 19.10.2001

Berlin 2001

D 83

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Zylinderquellenmethode zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit	5
2.1	Linienquelle im Vollraum.....	6
2.1.1	Näherungslösung für große Zeiten	7
2.2	Zylindrische Quelle mit Kontaktschicht	8
2.2.1	Approximation der Aufheizkurve durch ein spezielles Funktionensystem	11
2.2.2	Spezieller Auswertalgorithmus zu Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit	13
2.3	Einfluß der endlichen Quellendimensionen	14
2.3.1	Länge der Quelle	14
2.3.2	Radius der Quelle.....	15
2.4	Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit Halbraumlinienquellen	17
2.5	Einfluß von Gefüge und Anisotropie	20
2.6	Vergleich verschiedener Meßmethoden	21
2.6.1	Abschätzungen zum erfaßten Probenvolumen.....	22
3	Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit der universellen Approximationsmethode	25
3.1	Grundlagen und Werkzeuge	25
3.1.1	Das Programm TKSAM.....	25
3.1.2	Das Programm TKGRAPH	26
3.2	Auswertung synthetischer Daten	27
3.2.1	NEPR-F Simulationen: Zylinderquelle mit Kontaktschicht	27
3.2.2	TFELD-Simulationen: 4-Schichtfall, radialsymmetrisch	30
3.2.3	Einfluß von Rauschen auf das Ergebnis der Auswertungen.....	35
3.2.4	Reproduzierbarkeit und Genauigkeit der Ergebnisse	35
3.3	Auswertung von Vollraummessungen	37
3.3.1	Laborsonden	37
3.3.2	Bohrlochmessungen.....	47
3.4	Auswertung von Halbraummessungen	53
3.4.1	Messungen mit der Standard-HLQ	54
3.4.2	Messungen mit einer Mini-HLQ	57
3.5	Genauigkeit der Wärmeleitfähigkeitsbestimmungen.....	62
4	Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit bei bekannter Wärmeleitfähigkeit	65
4.1	Mittelung der Aufheizkurven, Normierungen.....	66
4.2	Vorwärtsmodellierungen	69
4.2.1	NEPR-F Anpassungen	70

4.2.2	Temperaturleitfähigkeitsbestimmung: Messungen in Ton.....	73
4.3	Einflußgrößen bei der Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit	77
5	Schlußfolgerungen und Ausblick.....	81
6	Zusammenfassung	83
7	Literaturnachweis.....	85
8	Anhang : verwendete Programme, Datenblatt Meßapparatur TK04.....	90

1 Einleitung

Die Temperaturverteilung im Erdinneren kann als eine der entscheidenden Zustandsgrößen der Erde betrachtet werden. Sie ist von fundamentaler Bedeutung für geophysikalische Modelle und geologische Vorstellungen über den Zustand und die Prozesse im Erdinneren.

Die thermischen Eigenschaften von Gesteinen bilden deshalb eine wichtige Grundlage für geothermische und tektonische Studien in globalen und regionalen Maßstäben. Mit der fortschreitenden Entwicklung quantitativer Modellierungen von geothermischen Ressourcen und Kohlenwasserstofflagerstätten sowie deren Entstehungsgeschichte, wächst die Nachfrage nach einer umfassenden Datenbasis der thermischen Eigenschaften. Diese Nachfrage geht Hand in Hand mit Methoden, diese Eigenschaften möglichst schnell und an vielen Proben zu erfassen.

Drei physikalische Größen charakterisieren die thermischen Eigenschaften der Gesteine: die Wärmeleitfähigkeit λ , die Temperaturleitfähigkeit κ und die spezifische Wärmekapazität c . Die Wärmeleitfähigkeit kann als Koeffizient des stationären Wärmetransportes betrachtet werden, wohingegen die Temperaturleitfähigkeit ein Koeffizient des transienten Wärmetransportes ist: sie ist ein Maß dafür, wie schnell sich eine Temperaturänderung in einem bestimmten Material ausbreitet. Die beiden Größen sind miteinander über die Dichte ρ und die spezifische Wärmekapazität c verknüpft: $\lambda = \kappa \rho c$.

Die Wärmeleitfähigkeit kann mit stationären und instationären Verfahren gemessen werden, letztere bieten die Möglichkeit eines im Vergleich sehr viel höheren Proben-durchsatzes, werden aber i.a. auch als ungenauer angesehen. Die Temperaturleitfähigkeit wird mit instationären Methoden bestimmt, und obwohl mit diesen Verfahren oft sowohl die Temperaturleitfähigkeit als auch die Wärmeleitfähigkeit bestimmt werden kann, dominieren Werte aus den stationären Verfahren die Angaben zur Wärmeleitfähigkeit.

Unter den instationären Verfahren zur Wärmeleitfähigkeit hat sich die Nadelsonden-Methode als verlässlich und vielseitig einsetzbar erwiesen. Eine Erweiterung hierzu ist die Halbraumlinienquellenmethode, sie findet inzwischen neben den Geowissenschaften auch ein breites Anwendungsspektrum in der Elektronik-, Automobil-, Bau- und Lebensmittelindustrie.

In dieser Arbeit werden die Grundlagen der Linienquellenmethode dargestellt ([Kapitel 2](#)). Darauf aufbauend wird ein spezieller Algorithmus hergeleitet, der es ermöglicht, die Wärmeleitfähigkeit aus den Aufheizkurven mit hoher Genauigkeit und Reproduzierbarkeit zu bestimmen. Es werden Anwendungsbeispiele an synthetischen Daten und Meßbeispiele vorgestellt. Dabei wird gezeigt, daß der entwickelte Algorithmus bei Quellenlängen von einigen cm bis hin zu mehreren m und für Meßzeiten von einigen Minuten bis zu mehreren Stunden in unterschiedlichen Meßkonfigurationen gleichbleibend gute Ergebnisse liefert. Die mit hoher Genauigkeit ermittelte Wärmeleitfähigkeit von Vollraummessungen wird dann im [vierten Kapitel](#) genutzt, um die Temperaturleitfähigkeit des Probenmaterials durch iterative numerische Anpassung an die gemessene Aufheizkurve zu bestimmen. Eine Diskussion der Ergebnisse zeigt, daß die verwendeten Nadelsonden speziellen Anforderungen hinsichtlich ihres inneren Aufbaus genügen müssen, damit eine Bestimmung von Wärme- und Temperaturleitfähigkeit aus einer Messung erfolgreich sein kann.

2 Zylinderquellenmethode zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Die theoretischen Grundlagen der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit zylindrischen Quellen sind von vielen Autoren ausführlich dargestellt. Je nach Anwendungsgebiet kommen unterschiedliche Heizfunktionen bevorzugt zur Anwendung. So hat sich für Anwendungen in hochporösen (Tiefsee)-Sedimenten die Auswertung der Abkühlkurven nach Aufheizen mit einem kurzzeitigen Wärmeimpuls bewährt (Lister, 1979 u.a.). Durch die nur geringfügigen Temperaturänderungen dieser Heizfunktion wird die Anregung advektiver Prozesse vermieden. An die Meßwerterfassung und Auswertung werden jedoch aufgrund der geringen Temperaturänderungen hohe Anforderungen gestellt (Villinger & Davis, 1987; Hartmann & Villinger, 2001).

Bei Messungen im Labor und unter in situ Bedingungen haben sich neben den gepulsten Messungen auch solche mit konstant beheizten Quellen als geeignet erwiesen. Bei diesen Messungen läßt sich die Wärmeleitfähigkeit aus dem Temperaturverlauf der während der Messung registrierten Quellentemperatur bestimmen (Blackwell, 1954; von Herzen & Maxwell, 1959; Lister, 1979; Kristiansen, 1982). Im Gegensatz zur Methode der stationären Messung des Wärmestroms zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit („divided-bar“, Beck, 1957; Sass et al., 1984) wird die Wärmeleitfähigkeit hierbei mittels einer absoluten Methode bestimmt. Im allgemeinen ist eine Zuordnung der Wärmeleitfähigkeit zu einer Richtung jedoch nicht möglich, das Ergebnis ist ein Skalar und stellt eine Integration über ein endliches Probenvolumen senkrecht zur Quellenachse dar.

Für die Auswertung der Messungen werden üblicherweise Inversionsmethoden (Kristiansen, 1991 u.a.) sowie Näherungslösungen aus dem Temperaturverlauf der Quelle für große Zeiten benutzt (Villinger, 1983).

2.1 Linienquelle im Vollraum

Ausgangspunkt der Betrachtungen ist die Wärmeleitungsgleichung für einen homogenen, isotropen Vollraum, in dem sich eine Linienquelle befindet. Diese Quelle wird als idealer thermischer Leiter mit unendlicher Länge, verschwindendem Durchmesser und vernachlässigbarer Wärmekapazität angenommen. Sie setzt, beginnend zum Zeitpunkt $t=0$ eine konstante Wärmemenge pro Längeneinheit und Zeiteinheit frei (konstante Heizleistung). Die mathematische Formulierung dieser Versuchsanordnung in Zylinderkoordinaten (Blackwell, 1954; Kristiansen, 1982) führt zu folgender Darstellung der Temperaturverteilung im Vollraum:

$$(2-1) \quad T(\underline{r}, t) = \frac{q}{4\pi\lambda} E_1\left(\frac{r^2}{4\kappa t}\right)$$

mit: $T(\underline{r}, t)$: Temperatur an der Stelle \underline{r} , zur Zeit t [°C bzw. K]
 q : konstante Heizleistung pro Längeneinheit [W m^{-1}]
 $\lambda = \kappa \rho c$: Wärmeleitfähigkeit des Vollraums [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]
 κ : Temperaturleitfähigkeit [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]
 ρ : Dichte [kg m^{-3}]
 c : spezifische Wärme der Quelle [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]
 t : Zeit [s]
 $r = |\underline{r}|$: radialer Abstand von der Quelle [m]
 $E_1(x) = -\text{Ei}(-x)$, es ist $\text{Ei}(x)$ die Integralexponentialfunktion:

$$\text{Ei}(x) = \int_{-\infty}^x \frac{e^u}{u} du, \quad x > 0$$

Durch eine Reihenentwicklung von $E_1(r^2/4\kappa t)$ erhält man:

$$(2-2) \quad T(\underline{r}, t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \left[-\gamma - \ln\left(\frac{r^2}{4\kappa t}\right) + \frac{r^2}{4\kappa t} - \sum_{n=2}^{\infty} (-1)^n \frac{\left(\frac{r^2}{4\kappa t}\right)^n}{n!} \right]$$

mit: γ : Eulersche Konstante (0,57721566490....)

Vernachlässigt man die Summanden höherer Ordnung für sehr große Werte von t , d.h. kleine Werte von $r^2/4\kappa t$, so ergibt sich als Näherung für große Heizzeiten:

$$(2-3) \quad T(r, t) \cong \frac{q}{4\pi\lambda} \left[-\ln\left(\frac{r^2}{4\kappa t}\right) - \gamma \right] = \frac{q}{4\pi\lambda} \left[\ln(t) + \ln\left(\frac{4\kappa}{r^2}\right) - \gamma \right], \left(\frac{r^2}{4\kappa t}\right) \ll 1$$

Das Temperaturverhalten der Quelle selbst ergibt sich für große Zeiten ($t \rightarrow \infty$) zu (Kristiansen, 1982):

$$(2-4) \quad T_Q(t) \cong \frac{q}{4\pi\lambda} \ln(t) + \text{const.}$$

Diese Form der Näherungslösung für große Zeiten führt zu einer einfachen und oft verwendeten Bestimmungsgleichung der Wärmeleitfähigkeit des Vollraums aus dem zeitlichen Verlauf der Linienquellentemperatur.

2.1.1 Näherungslösung für große Zeiten

Die Gleichung (2-4) wird oft zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit aus Linienquellenmessungen herangezogen: trägt man die Temperatur der Quelle über dem Logarithmus der Heizdauer t auf, dann ist die Steigung der sich für große Zeiten ergebenden Geraden umgekehrt proportional zur Wärmeleitfähigkeit des Vollraums (Abb. 2-1).

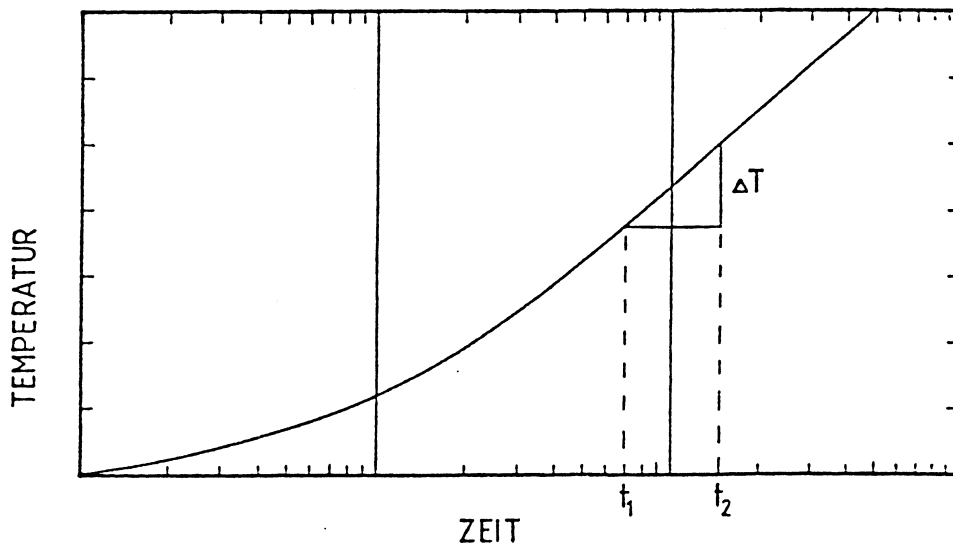


Abb. 2-1: Schematische Darstellung der Aufheizkurve T_Q einer konstant geheizten Linienquelle. Aus der Temperaturdifferenz ΔT läßt sich die Wärmeleitfähigkeit des Vollraums bestimmen (nach Villinger, 1983).

Prinzipiell genügen somit 2 Temperaturen der Quelle, gemessen im linearen Bereich der Aufheizkurve, um die Wärmeleitfähigkeit zu berechnen.

$$(2-5) \quad \lambda_a(t_m) = \frac{q}{4\pi} \frac{\ln(t_2) - \ln(t_1)}{T_Q(t_2) - T_Q(t_1)}, \quad t_m = t_1 + \frac{(t_2 - t_1)}{2}$$

λ_a wird im folgenden als scheinbare Wärmeleitfähigkeit bezeichnet, da sie eine Funktion der Heizdauer t ist und erst für t gegen unendlich gegen den wahren Wert λ strebt.

In der Praxis können Messungen der Wärmeleitfähigkeit nicht mit idealisierten Linienquellen durchgeführt werden. Deshalb wird im folgenden eine zylindrische Quelle endlichen Durchmessers betrachtet.

2.2 Zylindrische Quelle mit Kontaktschicht

Um Messungen der Wärmeleitfähigkeit durchführen zu können muß sich die Quelle im Probenmaterial befinden. Eine reale zylindrische Quelle ist von endlichem Durchmesser und beim Wärmeübergang zwischen der isothermen (perfekt leitenden) Quelle und dem Vollraum tritt ein Wärmeübergangswiderstand auf. Dieser kann in erster Näherung aus einer Grenzschichtbetrachtung zwischen Quelle und Vollraum hergeleitet werden (Carslaw & Jaeger, 1959).

Dazu wird, wie in [Abbildung 2-2](#) skizziert, eine infinitesimal dünne Schicht der Dicke d_G und der Wärmeleitfähigkeit λ_G angenommen, deren spezifische Wärmekapazität vernachlässigbar ist.

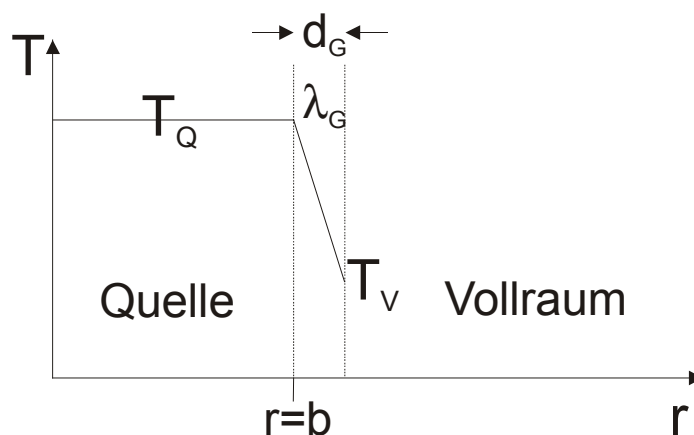


Abb. 2-2: Innerhalb der infinitesimal dünnen Grenzschicht der Dicke d_G und der Wärmeleitfähigkeit λ_G fällt die Temperatur von der Quellentemperatur T_Q auf die Temperatur des Vollraums an der Grenzschicht um die Quelle T_V ab.

Weil der übertragende Wärmestrom q_G näherungsweise proportional zur Temperaturdifferenz zwischen Quelle und Wand ist (Newton'sches Abkühlungsgesetz), führt man den Wärmeübergangskoeffizienten H als Proportionalitätsfaktor ein:

$$(2-6) \quad H(T_Q - T_V) = q_G = -\lambda \frac{\delta T_V}{\delta r}$$

wobei sich letzteres aufgrund der Stetigkeit des Wärmestroms an der Stelle $r=b$ ergibt. H [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$] wird auch als Oberflächenleitfähigkeit (surface conductance) bezeichnet. Oft wird auch der Kontaktwiderstand R (surface thermal resistance) angegeben:

$$R = 1/H \quad [\text{m}^2\text{K W}^{-1}]$$

Gleichung (2-6) ist eine der Randbedingungen für die Lösung der zweidimensionalen Wärmeleitungsgleichung in Zylinderkoordinaten (Blackwell, 1954):

$$(2-7) \quad \frac{\delta^2 T_V}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta T_V}{\delta r} = \frac{1}{\kappa} \frac{\delta T_V}{\delta t} ; \quad b \leq r < \infty, t > 0$$

mit: T_V : Temperatur im Vollraum [K]
 r : radialer Abstand vom Zentrum der Quelle [m]
 b : Radius der Quelle [m]
 κ : Temperaturleitfähigkeit des Vollraums [m^2s^{-1}]
 t : Zeit [s]

und der Anfangsbedingung:

$$(2-8) \quad T_Q = T_V = 0 \quad \text{für } t=0 \text{ und } 0 \leq r \leq \infty$$

Eine weitere Randbedingung liefert die zeitlich konstante Wärmeproduktion der isothermen Quelle für $t > 0$:

$$(2-9) \quad -\lambda 2\pi b \frac{\delta T_V}{\delta r} = q - mc \frac{\delta T_Q}{\delta r} ; \quad r=b, t>0$$

$$-\lambda \frac{\delta T_V}{\delta r} = \frac{q}{2\pi b} - \alpha \frac{\delta T_Q}{\delta r}$$

mit: T_Q : Temperatur der Quelle [K]
 q : konstante Heizleistung der Quelle pro Längeneinheit [W m^{-1}]
 m : Masse der Quelle pro Längeneinheit [kg m^{-1}]
 c : spezifische Wärme der Quelle [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]
 λ : Wärmeleitfähigkeit des Vollraums [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]
 ε : $(mc)/(\pi b)$

Die Lösung der partiellen [Differentialgleichung \(2-7\)](#) mit der [Anfangsbedingung \(2-8\)](#) und den [Randbedingungen \(2-6\)](#) und [\(2-9\)](#) erfolgt mittels der Laplace-Transformation. Der Lösungsweg ist bei [Kristiansen \(1982\)](#) ausführlich beschrieben. Da in der Praxis die Temperatur der Quelle T_Q am einfachsten gemessen werden kann, wird an dieser Stelle nur das Ergebnis hierfür dargestellt. T_Q erhält man im Zeitbereich durch die inverse Laplace-Transformation in der Form:

$$(2-10) \quad T_Q(t) = \frac{q}{\lambda} G(h, s, \tau)$$

$$(2-11) \quad G(h, s, \tau) = \frac{2s^2}{\pi^3} \int_0^{\infty} \frac{(1 - e^{-\pi u^2})}{u^3 f(u)} du$$

mit den dimensionslosen Größen:

$$(2-12) \quad h = \frac{\lambda}{bH}, \quad s = \frac{2\pi b^2 \rho c}{mc}, \quad \tau = \frac{\kappa t}{b^2} \text{ (Fourier-Zahl)}$$

und

$$(2-13) \quad f(u) = \left[uJ_0(u) + \lambda \left(\frac{u^2}{bH} - \frac{2b}{\varepsilon \kappa} \right) J_1(u) \right]^2 + \left[uY_0(u) + \lambda \left(\frac{u^2}{bH} - \frac{2b}{\varepsilon \kappa} \right) Y_1(u) \right]^2$$

J_i : Besselfunktion erster Art und i -ter Ordnung

Y_i : Besselfunktion zweiter Art und i -ter Ordnung

Die [Gleichung \(2-11\)](#) wurde von verschiedenen Autoren ([Jaeger, 1956](#); [Beck, 1965](#)) für die dimensionslosen Parameter h, s, τ numerisch untersucht.

[Blackwell \(1954\)](#) gibt eine Näherungslösung der Quelltemperatur für große Zeiten an, in der Terme der Ordnung $1/\tau^2$ vernachlässigt worden sind:

$$(2-14) \quad T(t) \cong A \ln(t) + B + (C \ln(t) + D) / t$$

mit : $A = \frac{q}{4\pi\lambda}$

$$B = A \left(\ln \left(\frac{4\kappa}{b^2} \right) - \gamma + \frac{2\lambda}{bH} \right)$$

$$C = A \frac{b^2}{2\kappa} \left(1 - \frac{\varepsilon\kappa}{b\lambda} \right)$$

$$D = A \frac{b^2}{2\kappa} \left[\left(1 - \frac{\varepsilon\kappa}{b\lambda} \right) \left(\ln \left(\frac{4\kappa}{b^2} \right) - \gamma \right) + 1 - \frac{2\varepsilon\kappa}{b^2H} \right]$$

Wie man leicht sieht, geht die Näherungslösung für große Zeiten (Gl. 2-4) auch aus dieser Gleichung hervor, wenn man die $1/t$ – Glieder vernachlässigt. Dies bedeutet, daß die dominierende logarithmische Zeitabhängigkeit faktisch bei allen Zylinderquellenmethoden vorhanden ist und daß die restlichen Terme in der Gleichung (2-14) die spezielle Quellenkonfiguration berücksichtigen. Durch die Einbeziehung von Termen höherer Ordnung wird die Übereinstimmung mit der Integrallösung (2-10) besser und der Gültigkeitsbereich wird zu kleineren Meßzeiten hin ausgedehnt.

Aus diesem Grund wird die Form der Gleichung (2-14) im folgenden zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit aus der Aufheizkurve herangezogen.

2.2.1 Approximation der Aufheizkurve durch ein spezielles Funktionensystem

Sortiert man die Koeffizienten der Gleichung (2-14) um, kann die Aufheizkurve der Quelle in der Form

$$(2-15) \quad T(t) = A_1 + A_2 \ln(t) + A_3 \ln(t)/t + A_4/t$$

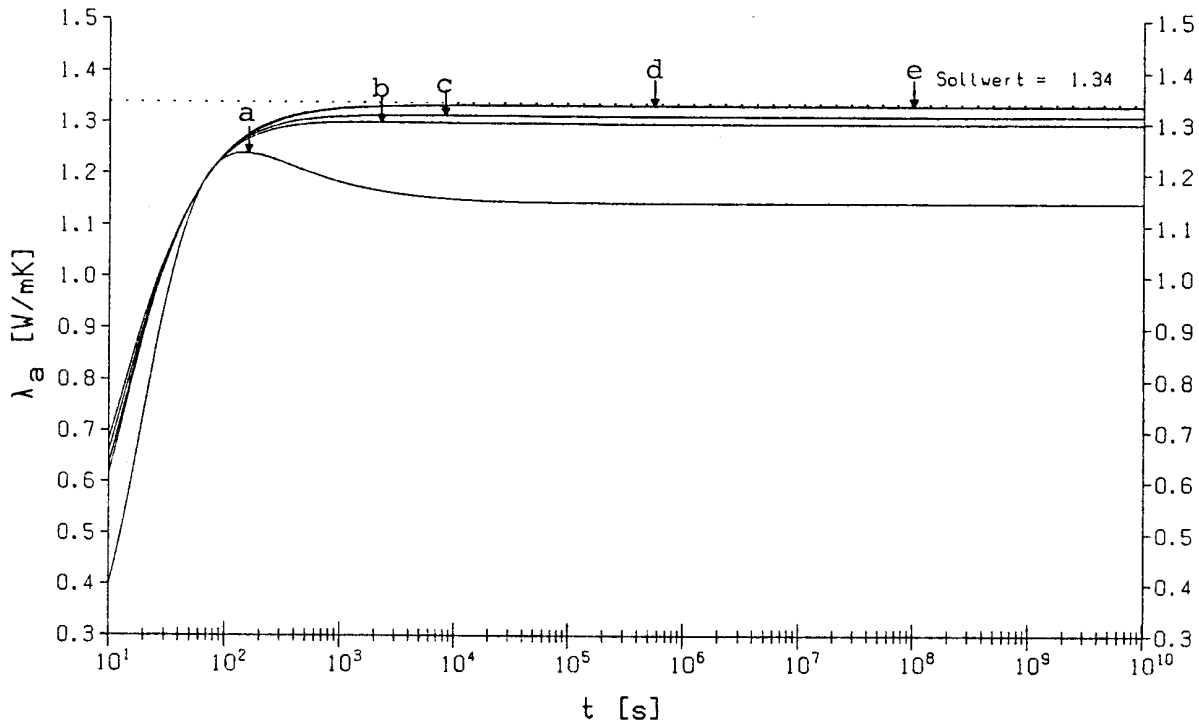
dargestellt werden (Villinger, 1983). Diese Form ist in einem größeren Zeitbereich gültig als die Form der Gleichung (2-4). Zudem ist für ihre Herleitung ein thermischer Kontaktwiderstand zwischen Quelle und Vollraum angenommen worden, wodurch die tatsächliche Meßsituation wesentlich besser beschrieben wird. Bei der numerischen Approximation der Aufheizkurve erfolgt die Berechnung der Koeffizienten A_i üblicherweise mit der Methode der kleinsten Quadrate, z.B. der Routine IFLSQ der Programmbibliothek IMSL.

Sind die Koeffizienten A_i bestimmt, kann $\lambda_a(t)$ aus der Gleichung (2-15) durch Differenzieren nach $\ln(t)$ berechnet werden:

$$(2-16) \quad \lambda_a(t) = q / (4\pi) [A_2 + A_3(1/t - \ln(t)/t) - A_4/t]^{-1}$$

Da $\lambda_a(t)$ erst für $t \rightarrow \infty$ gegen den tatsächlichen Wert λ strebt, kann für die Berechnungen in erster Näherung ein möglichst großer Wert t_g eingesetzt werden.

Untersuchungen an einer Probe bekannter Wärmeleitfähigkeit zeigten (Erbas, 1985), daß die berechneten $\lambda_a(t_g)$, trotz vergleichbarer Standardabweichungen der Approximationen der Aufheizkurve, von der Wahl des Approximationsintervalls abhängen. Es wurde festgestellt, daß die Abweichungen vom Sollwert um so geringer ausfielen, je weiter das Extremum (Maximum) in der Kurve der scheinbaren Wärmeleitfähigkeit $\lambda_a(t)$ zu großen Zeiten hin verschoben ist (Abb. 2-3).



	Approximation der Aufheizkurve im Intervall:	Standardabweichung der Approximation (*10 ⁻³ °C)	berechnete Wärmeleitfähigkeit (W/mK)	Abweichung vom Sollwert (%)
a	56 - 96 s	0,122	1,146	- 14,5
b	42 - 94 s	0,180	1,291	- 3,67
c	42 - 98 s	0,177	1,314	- 1,9
d	42 - 82 s	0,198	1,335	- 0,37
e	40 - 100 s	0,224	1,336	- 0,29

Abb. 2-3: scheinbare Wärmeleitfähigkeiten berechnet aus Approximationen verschiedener Intervalle (a-e) einer Aufheizkurve an einem Laborstandard. Die Pfeile markieren die Maxima der jeweiligen Kurven. Die Abweichungen der für große Zeiten berechneten scheinbaren Wärmeleitfähigkeiten vom Sollwert $1.34 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ sind um so geringer, je weiter diese Maxima bei großen Zeiten liegen.

Im folgenden wird eine Kurvendiskussion der [Approximationsfunktion](#) (Gl. 2-16) durchgeführt, um daraus Kriterien für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit herzuleiten.

Aus der Bedingung für ein Extremum der Funktion $\lambda_a(t)$ (Gl. 2-16)

$$\frac{d}{dt}(\lambda_a(t_e)) = 0$$

erhält man den Zeitwert t_e für das Extremum:

$$(2-17) \quad t_e = \exp\left(\frac{2A_3 - A_4}{A_3}\right), \quad A_2 t_e - A_3 \neq 0$$

Setzt man t_e in die 2.te Ableitung von $\lambda_a(t)$ ein, zeigt sich, daß $\lambda_a(t)$ ein Maximum für $A_3 > 0$ hat.

Eine Erklärung, warum $\lambda_a(t)$ den tatsächlichen Wert der Wärmeleitfähigkeit um so besser approximiert, je weiter das Maximum dieser Funktion bei großen Zeiten liegt, liefert eine Betrachtung der zeitabhängigen Terme der [Gleichung \(2-15\)](#) für $t=t_e$:

$$(2-18) \quad T(t_e) = A_2 \ln(t_e) + A_3 [\ln(t_e) / t_e] + A_4 t_e$$

Aufgrund der [Gleichung \(2-17\)](#) kann A_4 durch A_3 ausgedrückt werden und man erhält:

$$(2-19) \quad T(t_e) = A_2 \ln(t_e) + \frac{2A_3}{t_e}$$

Daraus ist ersichtlich, daß die dominierende logarithmische Zeitabhängigkeit der aus der Approximation berechneten Temperaturen (die ja für eine Linienquelle gefordert ist), für große t_e eher gegeben ist als für kleine Werte von t_e .

Für die Auswertungen bedeutet dies, daß man immer dann eine physikalisch sinnvolle Approximation der Aufheizkurve gefunden hat, wenn das Maximum der Funktion $\lambda_a(t)$ bei möglichst großen Zeiten liegt. Darauf aufbauend wurde der im folgenden skizzierte Auswertalgorithmus aufgestellt.

2.2.2 Spezieller Auswertalgorithmus zu Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Grundlage des Auswertalgorithmus ist die Approximation der Aufheizkurve in möglichst vielen Teilbereichen. Für diese wird dann jeweils geprüft, ob die Approximation die folgenden Kriterien erfüllt:

1. Die Standardabweichung der nach [Gleichung \(2-15\)](#) berechneten Temperaturen bzgl. der gemessenen Temperaturwerte für das Approximationsintervall liegt unterhalb eines vorgegebenen Grenzwertes (z.B. 0.0003 °C).
2. Das Extremum der aus der Approximation berechneten Funktion $\lambda_a(t)$ liegt oberhalb eines vorgegebenen Schwellwertes $t_{schwell}$

$$t_e > t_{schwell}$$

3. Bei dem Extremum der Funktion handelt es sich um ein Maximum, d.h.:

$$A_3 > 0$$

4. Die Ableitung von $\lambda_a(t)$ ist stetig für $t = t_e$, d.h.

$$A_2 t - A_3 \neq 0$$

Sind alle vorgenannten Kriterien erfüllt, wird die Wärmeleitfähigkeit der Probe nach folgender Gleichung berechnet:

$$(2-20) \quad \lambda_a = q / (4\pi A_2)$$

Im allgemeinen erfüllen für jede Aufheizkurve sehr viele Approximationen die o.a. Bedingungen. Aus der Menge dieser Lösungen wird dann die sogenannte asymptotische Wärmeleitfähigkeit ausgewählt, indem die Lösung mit dem Maximum bei der größten Zeit t_m ausgewählt wird.

Für die Mehrzahl aller Messungen ist keine weitere Datenbearbeitung bzw. –selektierung notwendig. Bei dieser Art der Wärmeleitfähigkeitsbestimmung handelt es sich um eine absolute Methode, Eichungen sind nicht notwendig. Zur Beurteilung der Qualität der Messungen und des bestimmten Wärmeleitfähigkeitswertes haben sich grafische Darstellungen der Lösungsgesamtheit bewährt. (s. [Kapitel 3.1](#)).

2.3 Einfluß der endlichen Quellendimensionen

Eine geschlossene Lösung für endliche Zylinderquellen mit komplexem inneren Aufbau ist bisher nicht verfügbar. Um die Näherungslösungen ([Gl. 2-4](#), [Gl. 2-18](#)) für große Zeiten trotzdem anwenden zu können, müssen deshalb Abschätzungen über den Gültigkeitsbereich gemacht werden.

2.3.1 Länge der Quelle

Ist eine in einem homogenen, isotropen Medium befindliche Zylinderquelle ausreichend lang, wird die in ihrer Mitte im Zentrum gemessene Temperatur in der Praxis keine Abweichungen von einem rein radialen Wärmefluß aufweisen. Andererseits erfordern größere Quellenlängen entsprechende Probenabmessungen, weshalb man bestrebt ist, die Quellenlänge möglichst klein zu halten.

Um den Einfluß der endlichen Quellenlänge abzuschätzen hat [Kristiansen \(1982\)](#) die Temperatur einer Linienquelle der Länge l mit derjenigen einer unendlich langen Linienquelle verglichen. Er zeigte, daß ein Zusammenhang zwischen maximal zulässiger Meßdauer t_{max} und der endlichen Länge l besteht und gibt folgende Abschätzung an:

$$(2-21) \quad \frac{l/2}{\sqrt{4\kappa t_{max}}} > \text{erf}^{-1}(1 - 2p)$$

Dabei bezeichnet der Exponent -1 die Umkehrfunktion von $\text{erf}(x)$ ([Abramowitz & Stegun, 1970](#)):

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-u^2} du \quad \text{mit: } 0 \leq \operatorname{erf}(x) \leq 1 \quad \text{für } 0 < x < \infty$$

p gibt den zulässigen relativen Fehler bzgl. der Linienquelle unendlicher axialer Erstreckung zum Zeitpunkt t_{\max} an. Bezeichnet man die rechte Seite der [Ungleichung \(2-21\)](#), das Argument der Fehlerverteilungsfunktion, mit $z(p)$, so muß für ein vorgegebenes p die Ungleichung:

$$(2-22) \quad l_{\min} > 2 z(p) \sqrt{4 \kappa t_{\max}}$$

erfüllt werden.

[Abbildung 2-4](#) zeigt diesen Zusammenhang zwischen t_{\max} und l_{\min} für verschiedene Werte von p. Wird zum Beispiel ein relativer Fehler von $p=0.005$ (0.5%) bei einer Meßdauer von $t_{\max}=100$ s in einem Material mit einer Temperaturleitfähigkeit von $\kappa=10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ angestrebt, so ergibt sich eine minimale Quellenlänge von 70 mm.

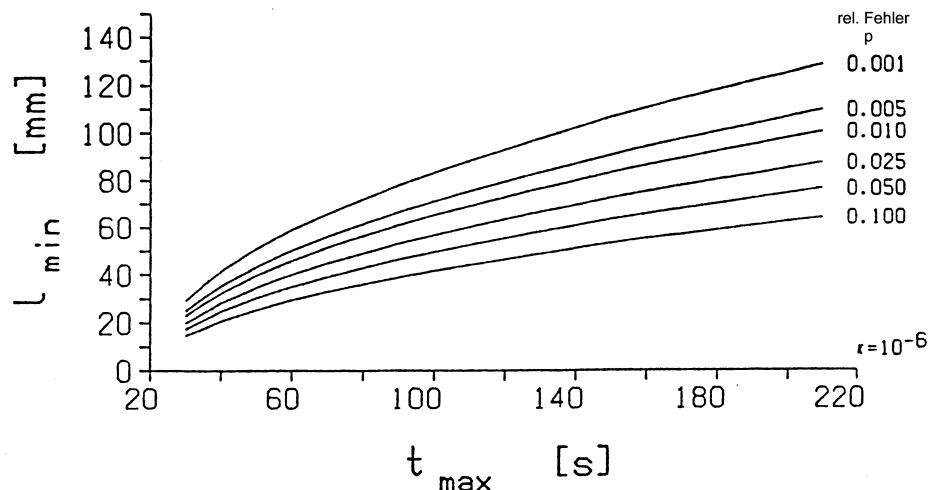


Abb. 2-4: Grafische Darstellung des Zusammenhanges zwischen maximaler Meßdauer t_{\max} und minimaler Sondenlänge l_{\min} für verschiedene relative Genauigkeiten p. Berechnungen für eine Temperaturleitfähigkeit von $\kappa=10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$.

Für eine vorgegebene Quellenlänge l bedeutet die [Gleichung \(2-22\)](#) auch, daß die maximal zulässige Meßdauer umgekehrt proportional zur Temperaturleitfähigkeit des Probekörpers ist.

2.3.2 Radius der Quelle

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit einer konstant geheizten Linienquelle aus der Temperatur ([Gl. 2-3](#)) kann unabhängig vom radialen Abstand r erfolgen. Den Fehler, den man durch Vernachlässigen des Terms $r^2/4\kappa t$ in der [Gleichung \(2-2\)](#)

macht, kann man quantifizieren, indem man ihn in erster Näherung als Faktor des Terms $(-\gamma - \ln(r^2/4\kappa t))$ ausdrückt. Legt man einen Faktor p fest, so muß $r^2/4\kappa t$ der Bedingung:

$$(2-23) \quad \frac{r^2}{4\kappa t} \leq p \left(-\gamma - \ln \frac{r^2}{4\kappa t} \right)$$

genügen. Führt man die Größe $y(p) = p(-\gamma - \ln(r^2/4\kappa t))$ ein, so erhält man als limitierende Ungleichung:

$$(2-24) \quad r_{\max} \leq 2\sqrt{y(p)\kappa t_{\min}}$$

Diese Ungleichung verknüpft den radialen Abstand r von der Quelle mit der Meßdauer t derart, daß im Falle ihrer Gültigkeit der relative Fehler der [Näherungslösung \(2-3\)](#) gerade das p -fache der Reihenentwicklung ([Gl. 2-2](#)) ist. Somit kann für einen radialen Abstand r die minimale Zeit t_{\min} angegeben werden, ab der die Langzeitlösung ([Gl. 2-4](#)) mit diesem Fehler Gültigkeit hat.

[Abbildung 2-5](#) zeigt diesen Zusammenhang exemplarisch für eine Temperaturleitfähigkeit $\kappa = 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ des äußeren Mediums. Die Kurven wurden für verschiedene Werte von p berechnet und können einer Abschätzung der Werte t_{\min} und r_{\max} dienen.

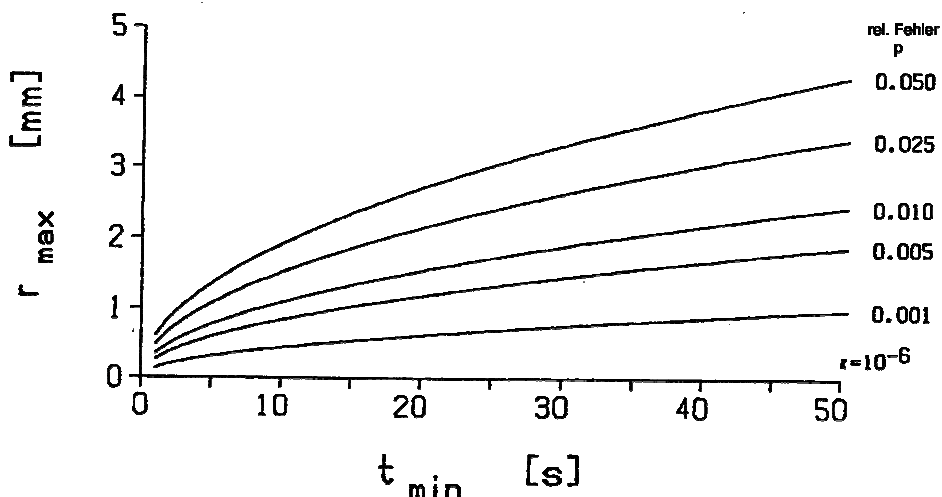


Abb. 2-5: Zusammenhang zwischen r_{\max} und t_{\min} für verschiedene relative Genauigkeiten p , berechnet für eine Temperaturleitfähigkeit von $\kappa = 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$.

Ist zum Beispiel ein radialer Abstand von der Quelle von $r = 1 \text{ mm}$ vorgegeben und soll ein Fehler von maximal 0,5% zulässig sein, so ergibt sich für $t_{\min} \cong 14 \text{ s}$.

Für reale zylindrische Quellen wird deshalb davon ausgegangen, daß ihr Radius das zur Auswertung nach der [Gleichung \(2-16\)](#) zulässige Zeitfenster nach unten hin be-

schränkt: der Startpunkt ab der eine Aufheizkurve nach der [Gleichung \(2-15\)](#) approximiert werden darf liegt für größere Quellradien bei größeren Zeiten. Die Praxis der Auswertung der Messungen mit dem speziellen Auswertalgorithmus ([Kap. 2.2.2](#)) hat zudem gezeigt, daß meist keine Lösungen für früh beginnende Approximationsintervalle gefunden werden bzw. diese für den bestimmten asymptotischen Wärmeleitfähigkeitswert nicht ausschlaggebend sind. Dies kann anhand der Lösungsgesamtheit ([Kap. 3.1.2](#)) für jede einzelne Messung nachträglich beurteilt und damit Fehlinterpretationen vermieden werden.

2.4 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit Halbraumlinienquellen

So verbreitet die Nadelsondenmessungen auch sind, sie haben einen entscheidenden Nachteil: um die Sonde in den Probenkörper einzubringen, muß dieser, falls es sich um einen Festkörper handelt, mit einer Bohrung aufgeschlossen werden. Zum einen ist der damit verbundene Präparationsaufwand nicht unerheblich, zum anderen wird das Gesteinsgefüge geringfügig verändert und, und dies wiegt schwerer, ist die Umgebung der Sonde nicht einsehbar. Beurteilungen der Gesteinshomogenität sowie der Ankopplungsbedingungen der Sonde sind deshalb nur indirekt möglich. Besonders im Hinblick auf die einfachere Probenpräparation und den größeren Proben-durchsatz werden deshalb instationäre Verfahren zur Messung der Wärmeleitfähigkeit an der Probenoberfläche vielfach angewendet. Die dabei verwendeten Heizfunktionen variieren ebenso wie die verwendete Anordnung der Heizelemente: scheibenförmige ([Gooma & Sommerton, 1972](#); [Hirsh, 1973](#); [Nguyen, 1973](#)), ringförmige ([Sommerton & Mossahebi, 1976](#)) werden ebenso beschrieben wie linienförmige ([Sass et al., 1984a](#); [Vacquier 1985](#)). Meistens ist der erforderliche Temperatursensor ein Thermoelement, das sich an dem oder in der Nähe des Heizelementes befindet. Dieses ist an der Oberfläche eines Materials kleiner und bekannter Wärmeleitfähigkeit (Sondenhalbraum) angebracht. [Erbas \(1985\)](#) beschreibt den Aufbau einer Halbraumlinienquelle (HLQ), bei der eine der üblichen Nadelsonden in die Oberfläche eines Plexiglas-Blocks eingelassen ist ([Abb. 2-6](#), [Abb. 3-40](#)). Dies hat den Vorteil, daß das Heizelement und der Temperatursensor gut gegen äußere Einflüsse geschützt sind.

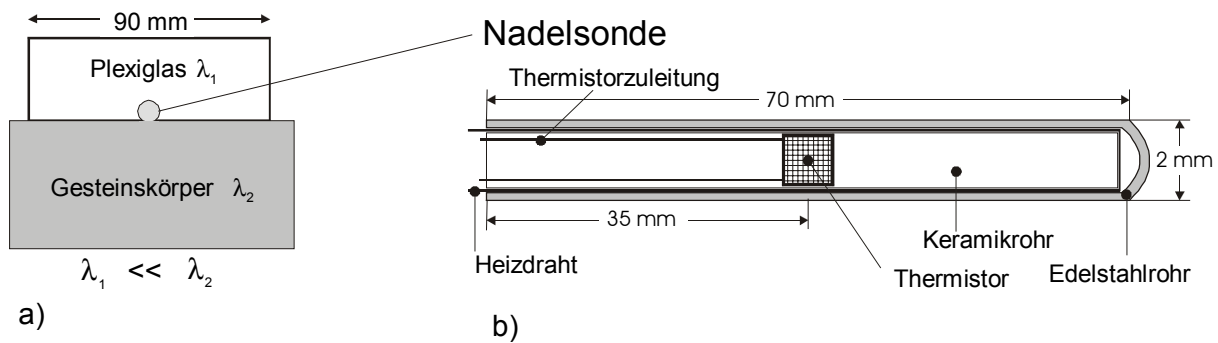


Abb. 2-6: schematischer Aufbau einer Halbraumlinienquelle (HLQ) und ein Querschnitt durch die in die Oberfläche des Sondenhalbraums eingelassene Nadelsonde (s. auch die [Abb. 3-40](#), Kapitel 3.3).

Unter der Voraussetzung, daß die Wärmeleitfähigkeit des Sondenhalbraums sehr viel kleiner ist als die des Probenmaterials, wird fast die gesamte produzierte Wärme von der Probe aufgenommen. Zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Probe wird deshalb auch bei der HLQ von der [Gleichung \(2-20\)](#) Gebrauch gemacht, es muß jedoch die zweifache Heizleistung angesetzt werden.

$$(2-25) \quad \lambda_a = 2q / (4\pi A_2) = q / (2\pi A_2)$$

Vergleichsmessungen an Eichkörpern ([Erbas, 1985](#)) zeigten, daß der Fehler, der aufgrund der endlichen Wärmeleitfähigkeit des Sondenhalbraums (z.B. Plexiglas mit $0.184 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) zu scheinbar höheren Werten der Wärmeleitfähigkeit führt, kleiner 3% ist, wenn ein Wärmeleitfähigkeitskontrast von mindestens 7:1 besteht. Bei Messungen an Gesteinsproben mit Wärmeleitfähigkeiten $> 1.3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ist dies gegeben. Sollen bei niedrigen Wärmeleitfähigkeiten höhere Genauigkeiten erreicht werden, so kann ein von der Probenwärmeleitfähigkeit abhängiger Halbraumkorrekturfaktor durch Messungen an Eichkörpern unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit bestimmt werden.

Abschätzungen zu den erforderlichen Sonden- und Probenabmessungen sind bei [Schärli, 1980](#); [Kristiansen, 1982](#); [Sass et al., 1984a](#)) und [Erbas \(1985\)](#) ausführlich dargestellt. So läßt sich der minimale Abstand α einer Linienquelle von der zu ihr parallelen Probenbegrenzung mit dem radialen Meßpunktabstand r und der Meßdauer t verknüpfen ([Kristiansen, 1982](#)):

$$(2-26) \quad E_1 \left(\frac{(2\alpha - r)^2}{4\kappa t} \right) \leq p \left(-\gamma - \ln \frac{r^2}{4\kappa t} \right)$$

mit: E_1 = Integralexponentialfunktion

γ = Eulersche Konstante

p = relative Genauigkeit bzgl. der im unendlichen Vollraum befindlichen
Linienquelle

Der Zusammenhang zwischen den dimensionslosen Größen $F_r=r^2/4\kappa t$ und $F_f=(2\alpha-r^2)/4\kappa t$ läßt sich z.B. grafisch für verschiedene Werte der relativen Genauigkeit p darstellen (Abb. 2-7) und daraus dann für die gewünschte relative Genauigkeit der zugehörige minimale Abstand α der Linienquelle zur Probenbegrenzung nach der Gleichung (2-27) berechnen:

$$(2-27) \quad \alpha = \frac{r}{2} + \sqrt{F_f \kappa t}$$

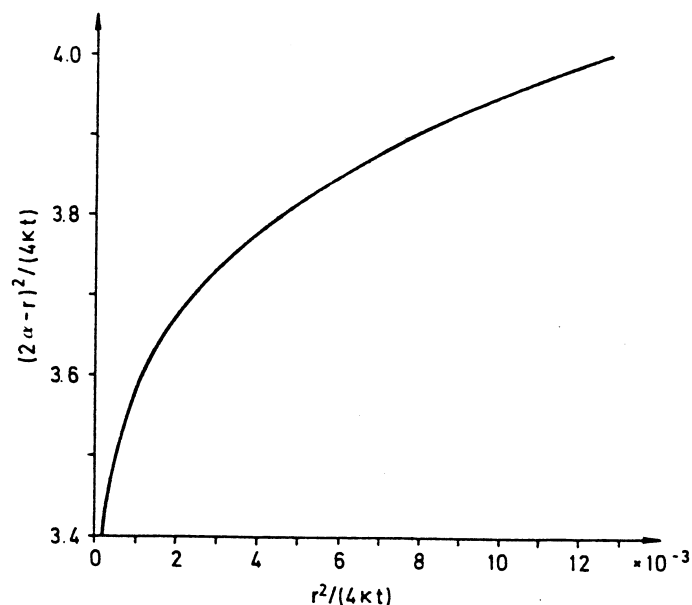


Abb. 2-7: Zusammenhang der dimensionslosen Größen $F_f=(2\alpha-r^2)/4\kappa t$ und $F_r=r^2/4\kappa t$ für eine gewünschte relative Genauigkeit von 0,1% ($p=0,001$). Für vorgegebene Parameter r , κ , t kann mit Hilfe dieser Abbildung der minimale Abstand α der Linienquelle zur Probenbegrenzung nach Gleichung (2-27) berechnet werden (aus: Kristiansen, 1982).

Für einen radialen Abstand $r=1$ mm, eine Meßdauer von $t=100$ s und eine Temperaturleitfähigkeit von $10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ ergibt sich z.B. der minimale Abstand α zur Probenbegrenzung zu: $\alpha=2,0$ cm.

Der Einfluß des Abstandes der vertikalen Probenbegrenzungen von den Enden der Nadelsonde in axialer Richtung ist theoretisch bisher nicht abgeschätzt worden. Pribnow (mündl. Mitteilung) berichtet jedoch von Versuchsreihen, bei denen dieser Abstand sukzessive verkleinert wurde. Demnach konnte das Ende einer 70 mm langen Halbraumzylinderquelle ($\varnothing=2\text{mm}$) bis direkt an den vertikalen Rand der Probe

verschoben werden, ohne einen Einfluß auf den ermittelten Wärmeleitfähigkeitswert zu beobachten.

[Pribnow \(1989\)](#) erweiterte die Halbraumlinienquellen-Methode dahingehend, daß eine Linienquelle an einem flexiblen Sondenhalbraum befestigt wird. Dadurch sind Wärmeleitfähigkeitsmessungen auch an gekrümmten Oberflächen möglich. Für Krümmungsradien der Meßoberfläche $< 3,8$ cm gibt er einen maximalen Fehler von 5% in den bestimmten Wärmeleitfähigkeitswerten für einen Meßbereich zwischen 1,5 und $6,0 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ an.

2.5 Einfluß von Gefüge und Anisotropie

Für Proben mit ausgeprägtem Gefüge und Anisotropie der Wärmeleitfähigkeit führte [Pribnow \(1994\)](#) eine spezielle Meßstrategie für Bohrkern ein, die im folgenden skizziert wird:

Zur Berechnung der Vertikalkomponente λ_z der Wärmeleitfähigkeit in Richtung der Bohrkernachse ist die Bestimmung der Komponenten parallel (λ_{par}) und senkrecht (λ_{per}) zur Foliation sowie eine Bestimmung des Einfallens der Foliationsebene notwendig. Diese werden nach einem Schema bestimmt, welches sich an den gemessenen Wärmeleitfähigkeitswerten orientiert ([Abb. 2-8](#)):

- auf der gesägten und geschliffenen Stirnfläche wird die Wärmeleitfähigkeit für verschiedene Azimute gemessen.
- Das Streichen der Foliationsebene ergibt sich aus dem Azimut des kleinsten gemessenen Wertes ([s. Abb. 2-8, oben](#))
- Der Kern wird senkrecht zu dem so bestimmten Streichen kalottiert
- Auf der Kalottenfläche wird die Wärmeleitfähigkeit für verschiedene Winkel bestimmt.
- Das Einfallen der Foliationsebene ergibt sich aus dem Azimut des kleinsten gemessenen Wertes ([Abb. 2-8, unten](#))

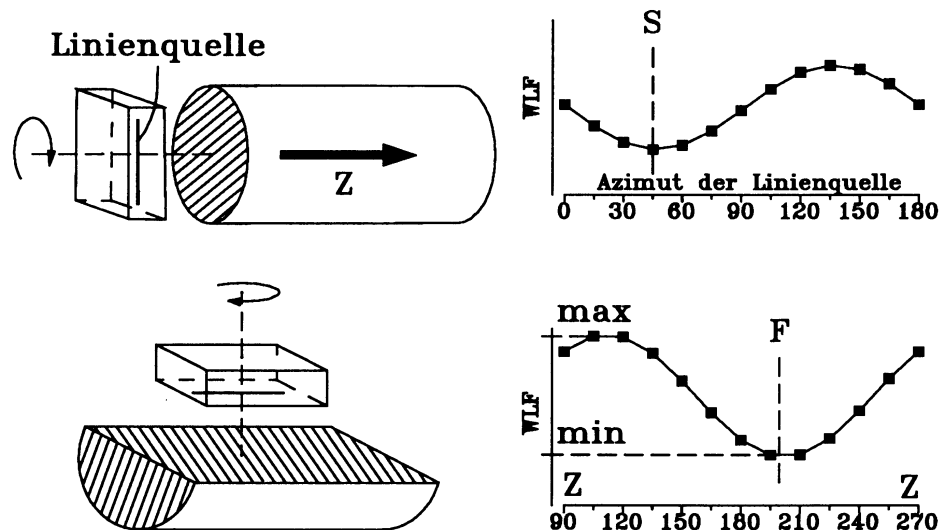


Abb. 2-8: schematische Darstellung der Meßstrategie zur Bestimmung der Komponenten der Wärmeleitfähigkeit an Bohrkernen. S: Streichen, F: Fallen. (aus: [Pribnow, 1994](#)).

Die Komponenten λ_{par} und λ_{per} werden anschließend aus den Messungen auf der Kalottenfläche bestimmt und die Vertikalkomponente der Wärmeleitfähigkeit in Richtung der Bohrkernachse daraus berechnet ([Pribnow, 1994](#)):

$$(2-28) \quad \lambda_Z = \lambda_{\text{par}} - (\lambda_{\text{par}} - \lambda_{\text{per}}) \cos^2(F)$$

Ein Vergleich mit Ergebnissen von Messungen in vertikaler Richtung in einer Divided-Bar Apparatur zeigte gute Übereinstimmung für anisotrope Gneise bei systematisch höheren Werten für die Messungen mit der Halbraumlinienquelle. Dies wurde darauf zurückgeführt, daß bei der Bestimmung der zur Foliation senkrechten Komponente der Wärmeleitfähigkeit immer auch ein Anteil der parallelen Komponente enthalten ist.

2.6 Vergleich verschiedener Meßmethoden

[Popov et al. \(1999\)](#) verglichen Ergebnisse von Messungen an identischen Kernproben, die mit einer Divided-Bar Apparatur, einer Halbraumlinienquellen-Apparatur und der Methode des berührungslosen „optical scanning“ erzielt wurden. Bei letztgenannter Methode handelt es sich um eine kontaktlose Messung der Wärmeleitfähigkeit durch „Scannen“ der Probenoberfläche mit einer fokussierten Wärmequelle und einer kontaktlosen Temperaturmessung mit Infrarot-Thermosensoren. Aus den Messungen entlang mehrerer Profile können dann sowohl die Wärmeleitfähigkeiten entlang der Profile als auch der Wärmeleitfähigkeitstensor berechnet werden. Die Auto-

ren zeigten, daß die Ergebnisse der verschiedenen Methoden trotz der Bandbreite für Wärmeleitfähigkeiten und teilweise ausgeprägter Richtungsabhängigkeiten (Anisotropie) gut übereinstimmten. Die Meßergebnisse der verschiedenen Methoden in Foliationsrichtung (λ_{par}) wiesen dabei im allgemeinen geringere Unterschiede (<1%) auf als die Werte λ_{per} senkrecht zur Foliationsrichtung (3-4%). Die systematisch größeren Abweichungen der Halbraumlinienquellenmessungen zu denen der anderen beiden Verfahren erklären die Autoren mit der größeren Streuung von Einzelwerten ($\pm 7-9\%$) und dem Einfluß von Inhomogenitäten auf das Meßergebnis. Demnach sind die Ergebnisse der HLQ-Messungen durch lokale Variationen der Wärmeleitfähigkeit beeinflusst, wenn ihr Wert in der Nähe der Nadelsondenmitte stark ($\cong 50\%$) von der mittleren Wärmeleitfähigkeit abweicht. Dies wurde darauf zurückgeführt, daß für diesen Fall die Isothermie der Quelle entlang der dünnen Stahlwand der Nadelprobe nicht gewährleistet ist und der Sensor dann einen lokal geprägten Temperaturanstieg registriert.

Durch die in den letzten Jahren erfolgten Verbesserungen der Meßgeräte ist die Reproduzierbarkeit von Einzelmessungen mit der HLQ inzwischen in der Größenordnung von $\pm 1\%$ für homogene und isotrope Materialien (Abb. 3-42) bzw. $\pm 2\%$ für Gesteine (Abb. 3-44). Auch der Aufbau der Sonden wurde inzwischen grundlegend verbessert (Kap. 4.3), so daß ein erneuter Vergleich noch geringere Unterschiede zwischen den Methoden zeigen dürfte.

2.6.1 Abschätzungen zum erfaßten Probenvolumen

Bei Messungen an inhomogenen oder anisotropen Materialien muß bei allen Vergleichen auch das von der Messung jeweils erfaßte Probenvolumen berücksichtigt werden. Bei den stationären Messungen mit einer Divided-Bar Apparatur entspricht es dem Gesamtvolumen der Probe (Sass et al., 1984b) während es bei Messungen nach der „optical scanning“ Methode von der Abtastgeschwindigkeit der Sensoren abhängt: je nach Wärmeleitfähigkeit der Probe beträgt die Schwerpunkttiefe zwischen ca. 7 und 30 mm Popov et al. (1999). Für die Zylinderquellenmethode kann das erfaßte Probenvolumen nach folgender Gleichung (Kristiansen, 1982) abgeschätzt werden:

$$(2-29) \quad \frac{d^2}{4 \kappa t} = \frac{p - 1 + \exp\left(-\frac{d^2}{4 \kappa t}\right)}{E_1\left(\frac{d^2}{4 \kappa t}\right)}$$

mit: d = radialer Abstand von der Linienquelle [m]
 p = relativer Anteil der innerhalb von d gespeicherten Energie bezogen auf die Gesamtenergie
 E_1 = Integraleponentialfunktion

Diese Formel ermöglicht es, den radialen Abstand d von der Quelle zu bestimmen, innerhalb dessen, zur Zeit t , p Prozent der Heizenergie enthalten sind. Trägt man $d^2/4\kappa t$ über p auf (Abb. 2-9), läßt sich für einen vorgegeben relativen Anteil p der Abstand d ermitteln. Die Abbildung 2-9 zeigt die Umsetzung der Gleichung (2-29): gibt man zum Beispiel p mit 95% vor, so erhält man für eine Meßzeit von $t=100\text{s}$ und eine Temperaturleitfähigkeit $\kappa=10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ einen radialen Abstand von 27 mm.

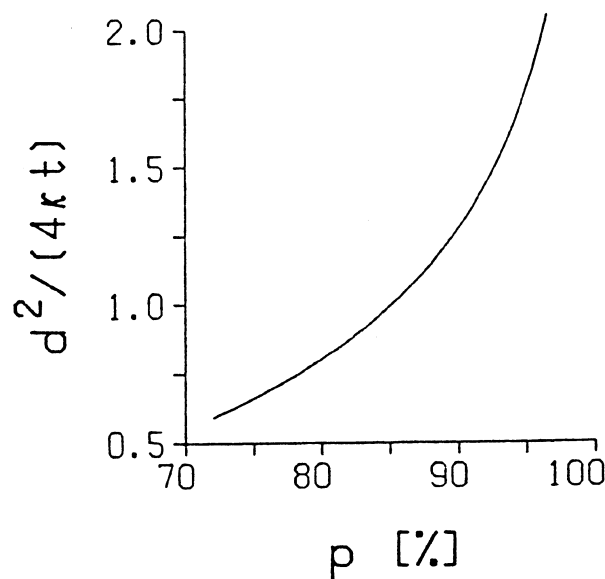


Abb. 2-9: Grafische Darstellung des Zusammenhanges zwischen p und der dimensionslosen Größe $d^2/4\kappa t$ (Gl. 2-29) zur Berechnung des radialen Abstandes d innerhalb dessen p Prozent der Gesamtenergie einer Linienquellenmessung konstanter Heizleistung gespeichert sind.

3 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit der universellen Approximationsmethode

3.1 Grundlagen und Werkzeuge

3.1.1 Das Programm TKSAM

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit aus den gemessenen Aufheizkurven geschieht anhand der in [Kapitel 2.2.2](#) beschriebenen Kriterien. Ein ursprünglich auf dieser Basis für den Einsatz auf Großrechenanlagen entwickeltes FORTRAN 5 Programm (WLFAUS, [Anhang E](#)) wurde laufend den raschen Entwicklungen in der Rechnerhardware angepaßt und ist zur Zeit als Turbo PASCAL Programm TKSAM ([Anhang A](#)) in der Version 3.46 auf jedem handelsüblichen PC in einem DOS-Fenster ausführbar. Wie die ursprüngliche Version erwartet das Programm Eingabedaten und einen Satz von Auswerteparametern:

- eine untere Grenze für die Zeit t_e des Maximums der Funktion $\lambda_a(t)$ ([Gl.2-16](#))
- Start- und Endzeit sowie minimale Länge der auszuwertenden Approximationsintervalle
- und die maximal zulässige Standardabweichung zwischen einer Approximation und der Aufheizkurve des entsprechenden Approximationsintervalls.

Diese Parameter können entweder interaktiv eingegeben oder in einer Eingabedatei (tksam.ini, s. [Anhang A](#)) vorliegen.

Für alle Teilintervalle der Aufheizkurve die sich aus den Vorgabeparametern ergeben (s. [Anhang A](#)), werden dann die Koeffizienten A_1 , A_2 und A_3 der [Gleichung \(2-16\)](#), sowie die übrigen Kriterien überprüft. Sind alle Kriterien erfüllt, wird die scheinbare Wärmeleitfähigkeit der Approximation nach den [Gleichungen \(2-20\)](#) (VLQ) bzw. [\(2-25\)](#) (HLQ) berechnet. Aus allen ermittelten Lösungen wird diejenige mit dem größten LET-Wert (\log_{10} der Zeit des Maximums von $\lambda_a(t)$) als asymptotischer Wärmeleitfähigkeitswert dieser Messung bestimmt und in einer ASCII-Datei gespeichert (Tc-list.dat, s. [Anhang A](#)). Auch die Ergebnisse aller übrigen gültigen Approximationen werden im ASCII-Format in einer Ergebnisdatei (*.erg, s. [Anhang A](#)) gespeichert und stehen damit einer detaillierten Begutachtung der Auswertungen zu Verfügung.

3.1.2 Das Programm TKGRAPH

Auch das Programm TKGRAPH ist eine Weiterentwicklung eines Teils der ursprünglichen Auswertesoftware WLFAUS. Es stellt den Inhalt der Ergebnislisten der Auswertungen des Programms TKSAM grafisch dar und ermöglicht somit eine visuelle Beurteilung der Qualität der Messungen und der Zuverlässigkeit des berechneten Wärmeleitfähigkeitswertes. Dadurch ist auch eine Überprüfung der Wahl der Auswerteparameter ([Kap. 2.2.2](#), [Kap. 3.1.1](#)) möglich, so daß diese für eine eventuelle nochmalige Auswertung z.B. mit strengeren Kriterien sinnvoll verändert werden können.

TKGRAPH ist in der aktuellen Version 3.50 auf jedem handelsüblichen PC mit den Betriebssystemen Windows9x, Windows NT, Windows2000 oder Windows ME ausführbar, wenn das Softwarepaket ORIGIN der Fa. Microcal in der Version 6.0 installiert ist. Eine in der Handhabung nicht ganz so komfortable aber von ORIGIN unabhängige ausführbare Version TKGRAPH ist ebenfalls verfügbar.

Die Ergebnisse der beiden Programme werden im folgenden anhand der Auswertungen einer Nadelsondenmessung (VLQ) an einem Probenkörper bekannter Wärmeleitfähigkeit und von numerischen Modellrechnungen ([Kap. 3.2](#)) exemplarisch dargestellt. Danach erfolgt eine Übersicht über ausgewählte VLQ- und HLQ-Messungen unterschiedlichster Sondendimensionen und Probeneigenschaften ([Kap. 3.3](#), [Kap. 3.4](#)).

Die [Abbildung 3-1](#) zeigt exemplarisch die Auswerteergebnisse einer Messung mit einer Nadelsonde (s.a. [Kap. 3.3.1](#)) an einem Eichkörper aus Macor mit einer Wärmeleitfähigkeit von $1.609 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1} \pm 1\%$. Sehr schön ist das asymptotische Verhalten ([s. auch Abb. 2-3](#)) der Gesamtheit der Lösungen zu erkennen. Der mit TKSAM bestimmte Wärmeleitfähigkeitswert von $1.605 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ repräsentiert dieses Verhalten außerordentlich gut und ist praktisch mit dem tatsächlichen Wert identisch. Dieses asymptotische Verhalten der Lösungsgesamtheit und die Lage des bestimmten Wärmeleitfähigkeitswertes auf dieser „Lösungsasymptote“ sind ein Maß für die Qualität der Messung. Weitere Beurteilungsmöglichkeiten ergeben sich aus der Betrachtung der Ergebnisse für die verschiedenen Auswertintervalle. Deshalb besteht die Möglichkeit, diese z.B. in Abhängigkeit von der Anfangszeit des Auswertintervalls farbig darzustellen ([Abb. 3-1](#)).

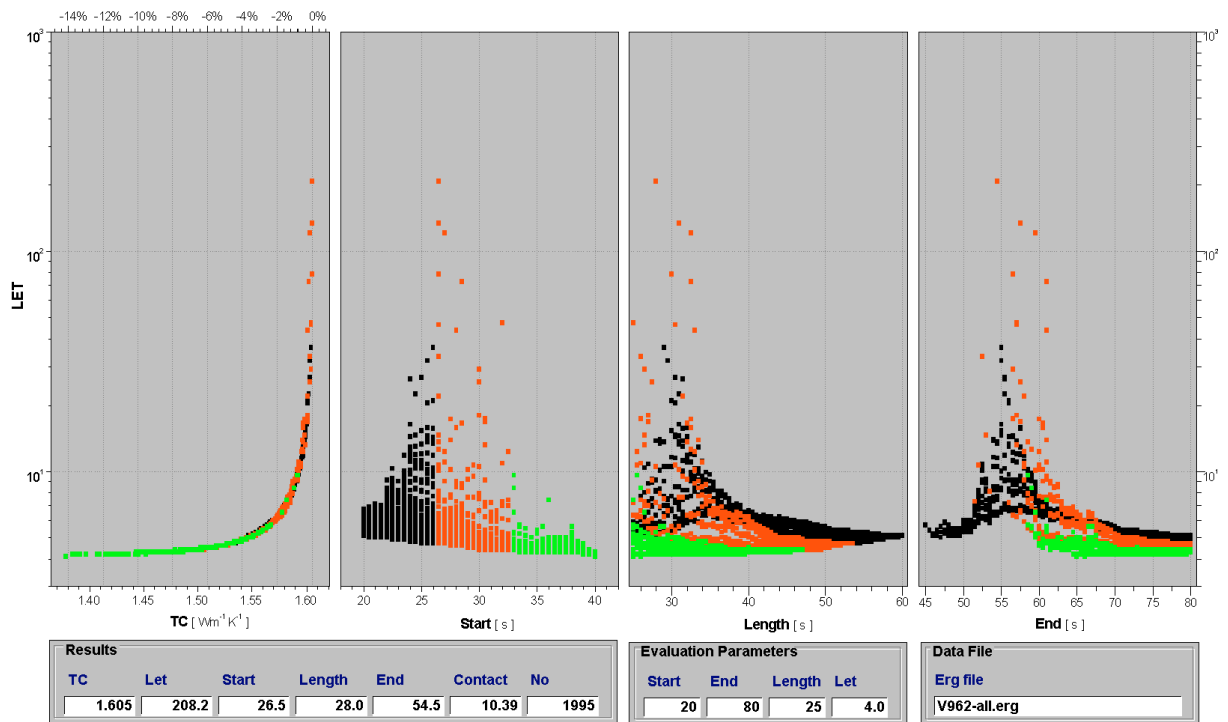


Abb. 3-1: Beispiel für die Ausgabe des Programms TKGRAPH. Der von TKSAM bestimmte Wärmeleitfähigkeitswert von $1.605 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ist praktisch mit dem für die Probe (Macor) angegebenen Wert $1.609 \pm 1\%$ identisch. Die Auswertung der Messung kann als außerordentlich gut beurteilt werden (Einzelheiten im Text).

3.2 Auswertung synthetischer Daten

Zur Beurteilung der Güte der Auswertungen mit der universellen Approximationsmethode können neben Messungen an Eichproben bekannter Wärmeleitfähigkeit (Abb. 3-1 und Kap. 3.3) auch Auswertungen von numerisch berechneten Aufheizkurven herangezogen werden. Neben der Möglichkeit den Einfluß verschiedener Quellenparameter (Radius, Länge, Heizleistung, Wärmekapazität) auf das Auswertergebnis zu betrachten, können die Auswirkungen von experimentell schwer zu erfassenden Größen wie z.B. dem Einfluß einer die Wärme schlecht leitenden Kontaktschicht zwischen Quelle und Probe auf das Ergebnis untersucht werden.

3.2.1 NEPR-F Simulationen: Zylinderquelle mit Kontaktschicht

Kristiansen (1982) beschreibt ein numerisches Inversionsverfahren zur Bestimmung von Wärmeleitfähigkeit und Temperaturleitfähigkeit einer Probe aus Aufheizkurven von Linienquellen endlicher Durchmesser. Dabei wird ein Ansatz von Blackwell (1954) benutzt, der das Problem einer vom Vollraum durch eine Kontaktschicht getrennten zylindrischen Quelle formulierte (Gl. 2-10, 2-11). Das Programm NEPR-F (Anhang D) wurde in Anlehnung an Kristiansen (1991) so umgeschrieben, daß die

gespeicherten Quelltemperaturen der numerischen Modellierungen als Eingabedaten für das Auswerteprogramm TKSAM genutzt werden können.

In der [Abbildung 3-2](#) sind die Aufheizkurven für Variationen der Temperaturleitfähigkeit um $\pm 25\%$ des von [Kristiansen \(1991\)](#) als EXAMPLE1 bezeichneten Falles dargestellt.

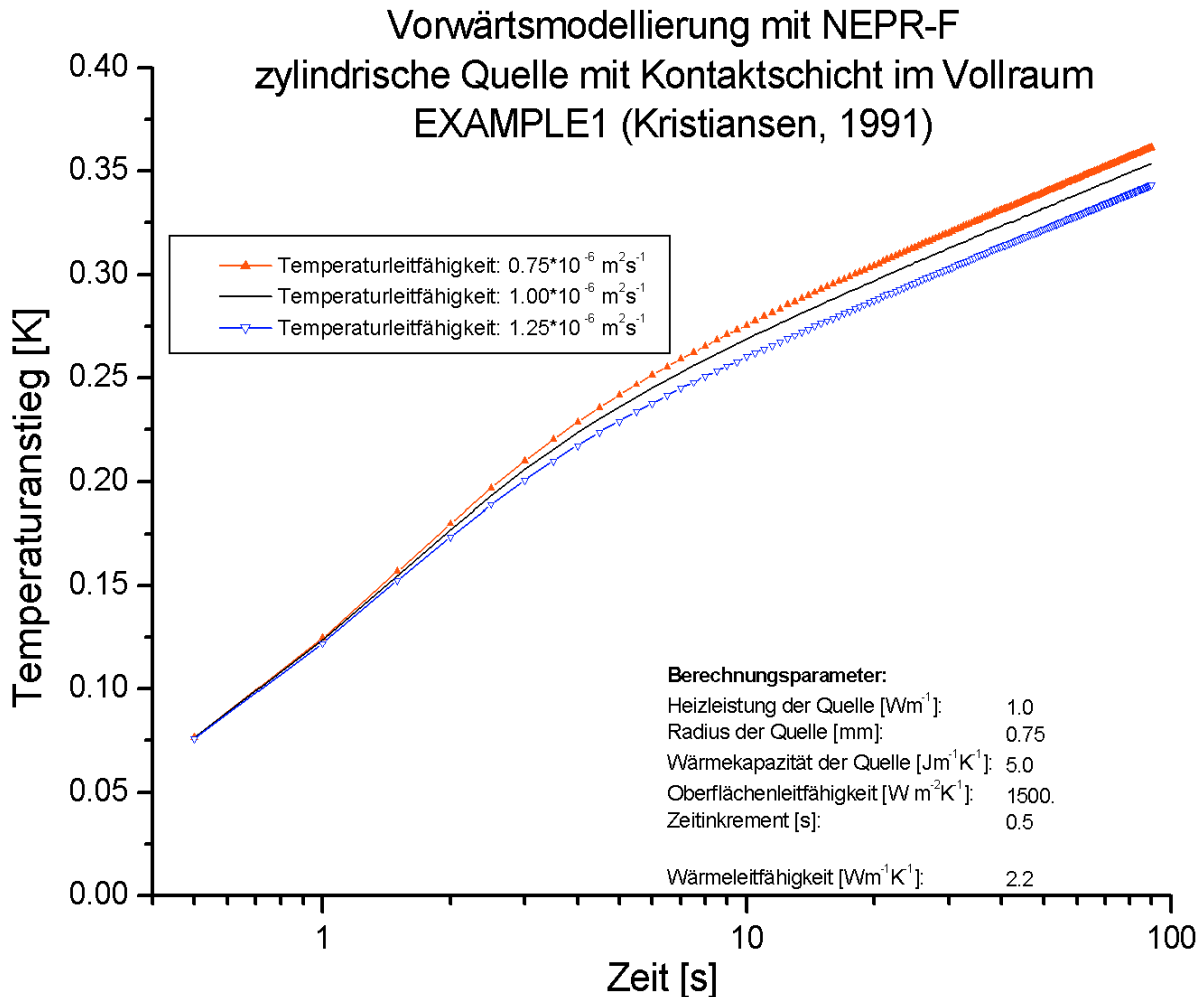


Abb. 3-2: Aufheizkurven für EXAMPLE1 ([Kristiansen, 1991](#)) mit den angegebenen Berechnungsparametern und Variationen der Temperaturleitfähigkeit um $\pm 25\%$.

Die vom Programm TKSAM erstellte Ergebnisliste der Auswertung der 3 Modellierungen ist in der [Tabelle 3-1](#) zusammengefaßt wiedergegeben:

Datei	WLF [W/(mK)]	TLF [m ² /s]	LET [s]	Anzahl Lösungen	Start [s]	Length [s]	End [s]
EX1-M25P	2.206	0.75*10 ⁻⁶	14567	1766	33.0	41.5	74.5
EXAMPLE1	2.202	1.00*10 ⁻⁶	20079	2238	25.0	49.5	74.5
EX1-P25P	2.200	1.25*10 ⁻⁶	97284	1425	20.0	66.0	86.0

Tab. 3-1: Ergebnis der Auswertungen von Modellierungen mit NEPR-F bei Änderung der Temperaturleitfähigkeit um $\pm 25\%$ zum Ursprungsmodell (EXAMPLE1)

Deutlich ist zu erkennen, daß mit der universellen Approximationsmethode die vorgegebene Modellwärmeleitfähigkeit von $2.2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ jeweils fast exakt bestimmt wird. Die in der [Abbildung 3-2](#) deutlich erkennbaren Unterschiede in den Aufheizkurven für verschiedene Temperaturleitfähigkeiten spielen bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit keine Rolle.

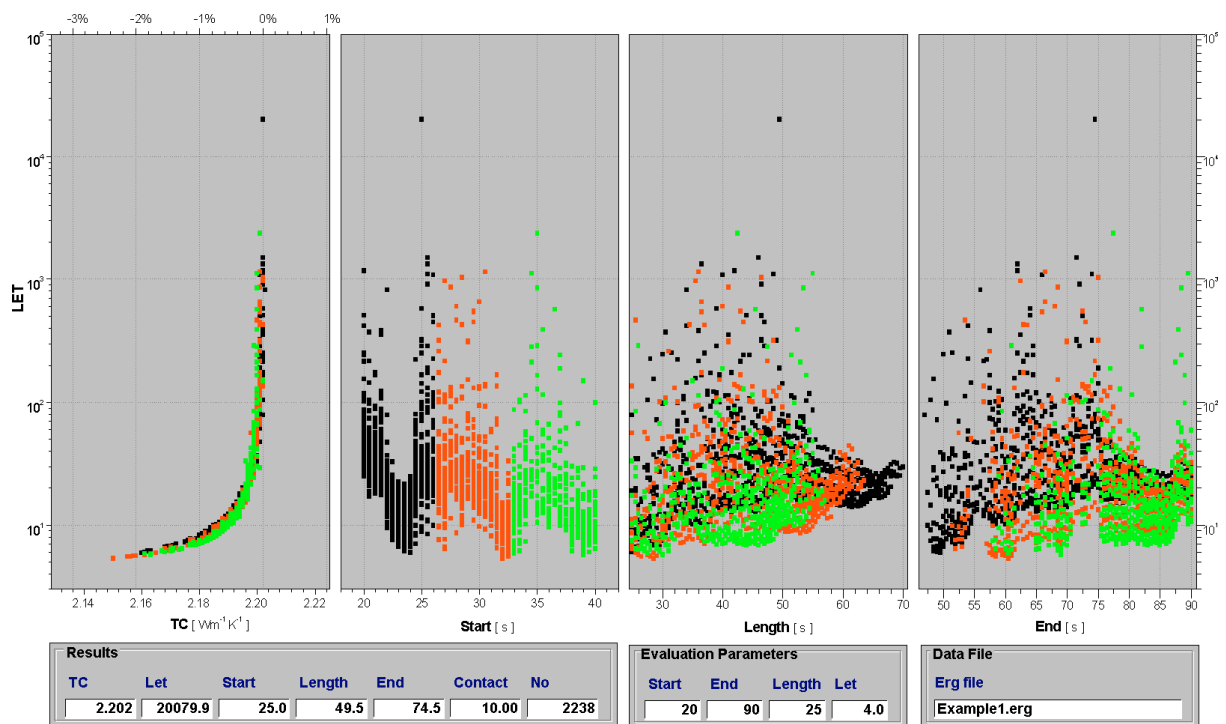


Abb. 3-3: Darstellung der Lösungsgesamtheit für eine Auswertung der Modellrechnungen mit dem Programm NEPR-F. Die Qualität der Auswertung ist außerordentlich gut. Im Ergebnis wird der für die numerische Berechnung vorgegebene Wärmeleitfähigkeitswert von $2.2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ fast exakt reproduziert.

Auch in den Darstellungen der Lösungsgesamtheit ([Abbildungen 3-3](#) und [3-4](#)) sind keine wesentlichen Unterschiede in der Qualität der Ergebnisse zu erkennen.

Damit ist gezeigt, daß die universelle Approximationsmethode bei der Anwendung auf numerische Daten sehr gute Ergebnisse ergibt. Dies wird in einem späteren Kapitel (4.2.1) benutzt werden, um Anpassungen mit dem Programm NEPR-F hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die berechnete Wärmeleitfähigkeit zu überprüfen.

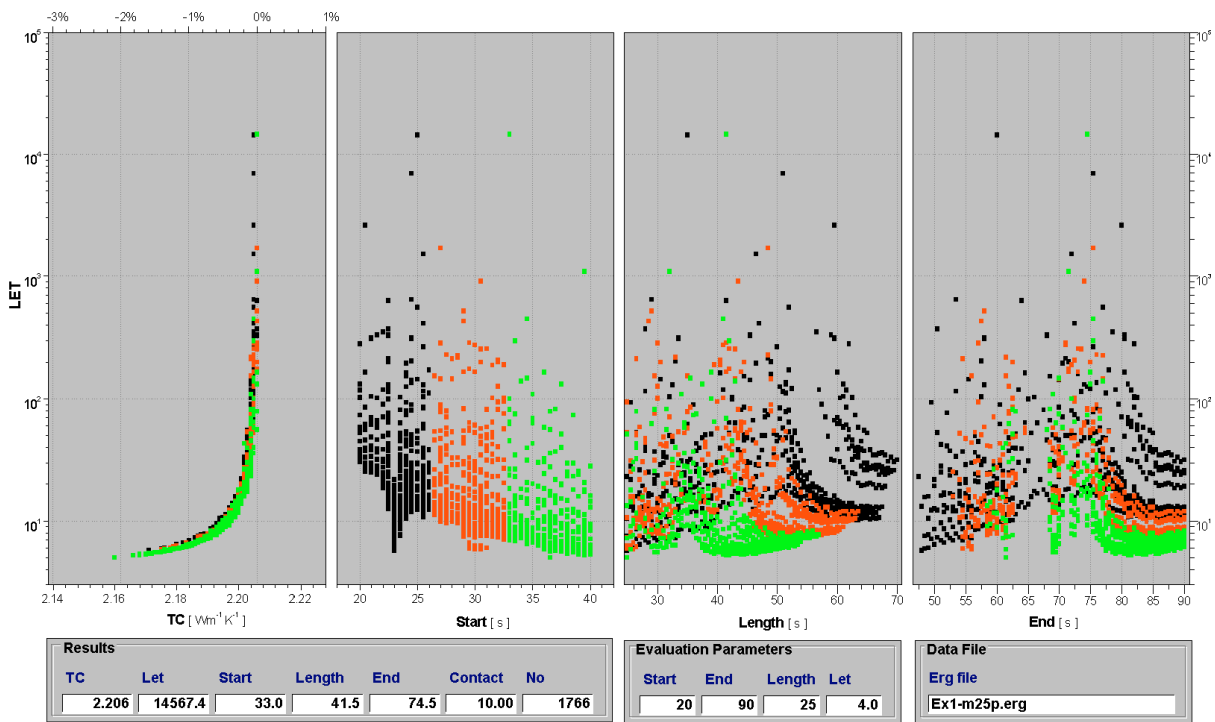


Abb. 3-4: Darstellung der Lösungsgesamtheit für eine Auswertung der Modellrechnungen mit dem Programm NEPR-F mit einer gegenüber dem Ausgangsmodell (s. [Abbildung 3-2](#)) um 25% reduzierten Temperaturleitfähigkeit. Auch hier wird die vorgegebene Wärmeleitfähigkeit von 2.2 Wm⁻¹K⁻¹ sehr genau wiedergegeben.

3.2.2 TFELD Simulationen: 4-Schichtfall, radialsymmetrisch

[Villinger \(1983\)](#) erstellte das FORTRAN Programm TFELD ([Anhang B](#)), mit dem das räumliche und zeitliche Temperaturfeld einer Heizquelle in einem Bohrloch berechnet werden kann. Die numerische Umsetzung basiert auf einer Lösung der inhomogenen Wärmeleitungsgleichung im n-fach geschichteten zylindrischen Halbraum ([Villinger, 1985](#)), ist jedoch aufgrund der Problemstellung auf einen 4-Schicht-Fall zugeschnitten: Quelle, Verrohrung, Ringraum, Gestein. Damit ermöglicht TFELD die zweidimensionale Modellierung zylindrischer Quellen mit Kontaktzonen in einem Vollraum. Im Rahmen der Entwicklung einer Bohrlochsonde zur in situ Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit in größeren Tiefen ([Burkhardt et al. \(1988, 1993\)](#); [Honarmand, 1993](#)) wurde es mit Erfolg zur Untersuchung der Auswirkungen der zu erwartenden Ver-

hältnisse (Gesteinswärmeleitfähigkeiten, Bohrllochdurchmesser, Spülungsparameter etc.) auf den Temperaturanstieg in der Quelle benutzt (s. auch [Kapitel 3.3.2](#)).

Das ursprünglich auf einer Großrechenanlage implementierte Programm wurde von [Fleckenstein \(1996\)](#) für den Einsatz auf PCs überarbeitet. Es ist zur Zeit als FORTRAN Programm TFELD in der Version 3.0 auf jedem handelsüblichen PC in einem DOS-Fenster ausführbar. Die Temperaturen der Quelle werden für die nachfolgende Bearbeitung zur Wärmeleitfähigkeitsberechnung in dem für TKSAM erforderlichen Dateiformat als ASCII-Werte gespeichert.

In der [Abbildung 3-5](#) sind die mit TFELD berechneten Aufheizkurven für eine zylindrische Quelle mit Kontaktschicht in einem Material der Wärmeleitfähigkeit $1.637 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ dargestellt. Die Temperaturleitfähigkeit von $0.73\text{E-}06 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ wurde um jeweils $\pm 25\%$ variiert, um den Einfluß auf die nachfolgende Berechnung der Wärmeleitfähigkeit mit TKSAM zu untersuchen.

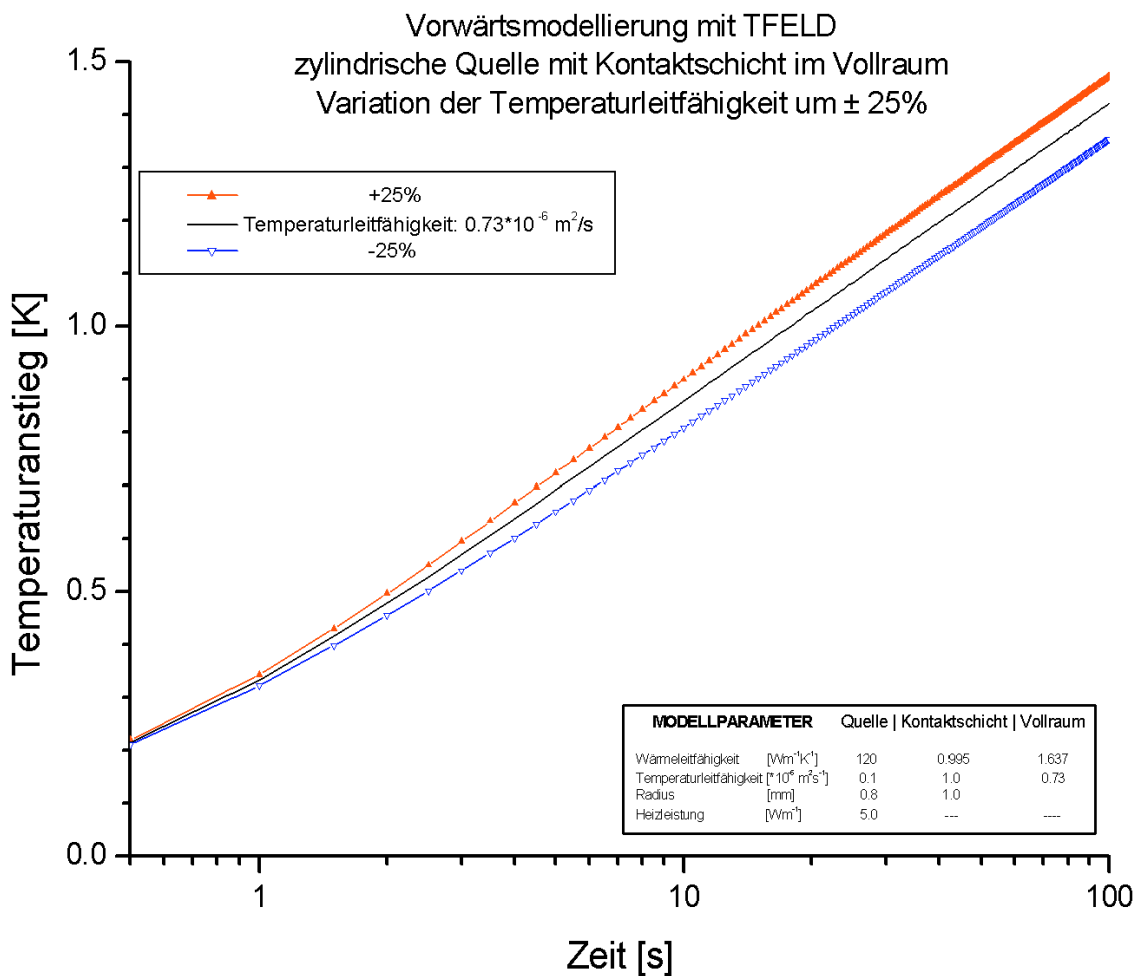


Abb. 3-5: Aufheizkurven für eine zylindrische Quelle mit einer Kontaktschicht, berechnet mit TFELD und den angegebenen Berechnungsparametern. Dargestellt sind Variationen der Temperaturleitfähigkeit um $\pm 25\%$.

Die vom Programm TKSAM erstellte Ergebnisliste der Auswertung der 3 Messungen ist in der [Tabelle 3-2](#) zusammengefaßt wiedergegeben:

Datei	WLF [W/(mK)]	TLF [m ² /s]	LET [s]	Anzahl Lösungen	Start [s]	Length [s]	End [s]
TF-P25P	1.628	9.125*10 ⁻⁷	103561	83	24.0	18.0	42.0
TF-29	1.633	7.3*10 ⁻⁷	110546	734	23.0	25.5	48.5
TF-M25P	1.642	5.475*10 ⁻⁷	38.6	110	32.5	16.5	49.0

Tab. 3-2: Ergebnis der Auswertungen von Modellierungen mit NEPR-F bei Änderung der Temperaturleitfähigkeit um ± 25% zum Ursprungsmodell (EXAMPLE1)

Die Abweichung der von TKSAM berechneten Wärmeleitfähigkeitswerte von dem Vorgabewert 1.637 Wm⁻¹K⁻¹ beträgt maximal 0.55 %. Eine Beurteilung der Güte der Auswertung ([Abb. 3-6](#)) zeigt auch hier sehr schön das asymptotische Verhalten der Lösungsgesamtheit.

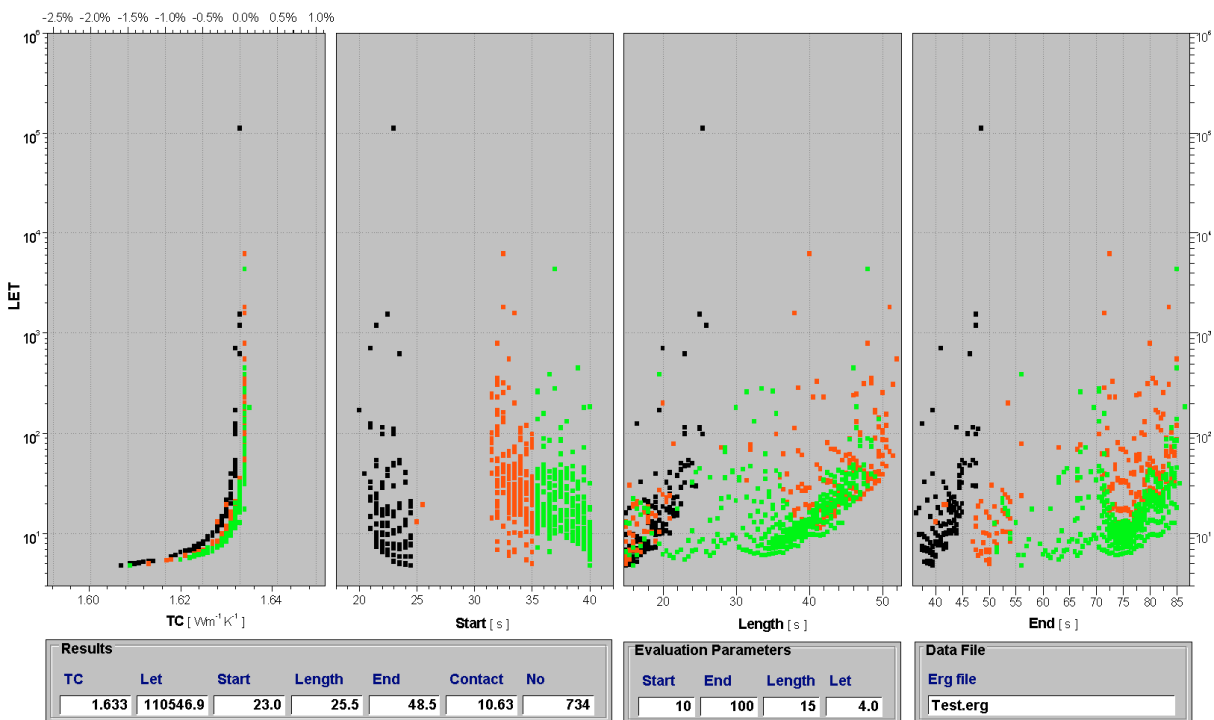


Abb. 3-6: Darstellung der Lösungsgesamtheit für eine Auswertung der Modellrechnungen mit dem Programm TFELD (s. [Abb. 3-5](#), mittlere Kurve). Die Qualität der Auswertung kann als gut bezeichnet werden. Im Ergebnis wird der für die numerische Berechnung vorgegebene Wärmeleitfähigkeitswert von 1.637 Wm⁻¹K⁻¹ fast exakt reproduziert.

Im Vergleich zu den Auswertungen von numerischen Berechnungen mit NEPR-F fällt auf, das für die mit TFELD berechneten Aufheizkurven (bei sonst gleichen Auswertekriterien) deutlich weniger Lösungen gefunden werden. Ein weiteres Ergebnis der Modellierungen mit TFELD ist, daß für 2-Schicht-Modelle ohne Kontaktschicht (Quelle - Halbraum) mit TKSAM keine Lösungen gefunden werden. Dies zeigt, daß

die in der Herleitung (Kapitel 2.2) des universellen Auswertalgorithmus eingegangene Kontaktschicht eine wesentliche physikalische Größe darstellt, deren Existenz bei jeder Auswertung implizit berücksichtigt wird.

Diese Erkenntnis war wesentlich für die Entwicklung der Heizstabsonde zur Bestimmung der in situ Wärmeleitfähigkeiten bei der KTB: Da in der verwendeten Bohrspülung (Dehydril HT) selbst bei Temperaturgradienten von 60 K/m keine thermisch induzierte Konvektion auftritt, wurde eine thermische Quelle aus einem Vollmetallrohr konstruiert (Honarmand, 1993; s. auch Kap.3.3.2). Der zwischen Quelle und Gestein verbleibende Ringraum niedriger Wärmeleitfähigkeit konnte als Kontaktschicht betrachtet werden. Die Abbildung 3-7 zeigt den mit TFELD berechneten Temperaturverlauf und die daraus mit der Gleichung (2-5) ermittelten scheinbaren Wärmeleitfähigkeiten.

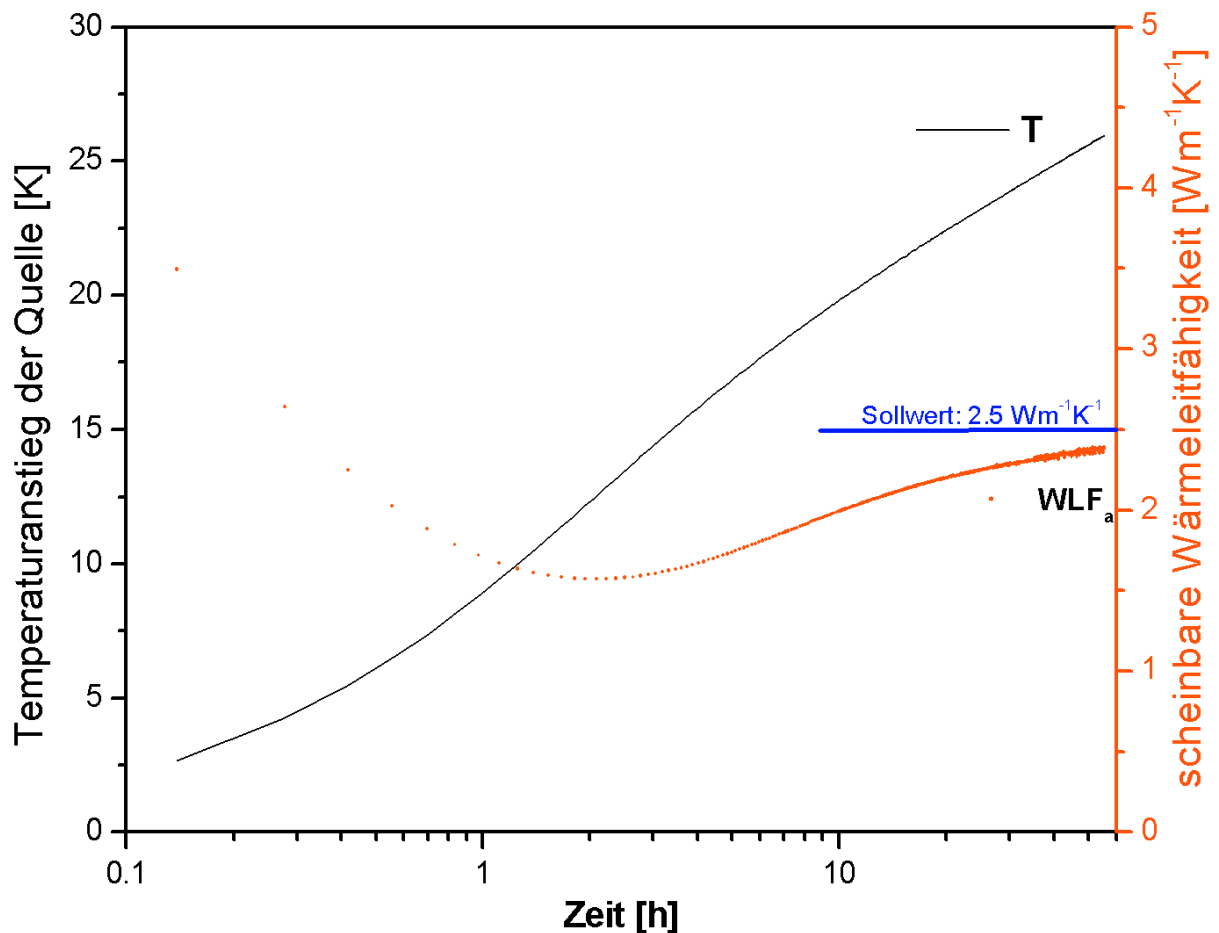


Abb. 3-7: Ergebnis der TFELD Modellierung einer zylindrischen Quelle in einer 6“ Bohrung. Der mit einer Wärmeleitfähigkeit von $0.7 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ modellierte Ringraum von 31 mm Dicke hat einen sehr großen Einfluß auf den asymptotischen Teil der Kurve der scheinbaren Wärmeleitfähigkeit: erst bei sehr großen Zeiten streben diese gegen den Modellwert.

Es ist zu erkennen, daß die scheinbaren Wärmeleitfähigkeiten deutlich unter dem Modellwert von $2.5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ liegen und sich diesem erst sehr langsam asymptotisch nähern. Um mit der Näherungslösung für große Zeiten eine Genauigkeit von $< 10\%$ zu erreichen, wären Meßzeiten von $> 56 \text{ h}$ notwendig gewesen.

Eine Auswertung des gleichen Datensatzes mit der universellen Approximationsmethode ergab einen nur um -1% vom Modellwert abweichenden Wärmeleitfähigkeitswert (s. [Abb. 3-8](#)). Zudem wurden die besten Lösungen in einem Zeitintervall zwischen 8-10 Stunden ermittelt, so daß die erforderlichen Meßzeiten in einem vertretbaren Rahmen festgelegt werden konnten.

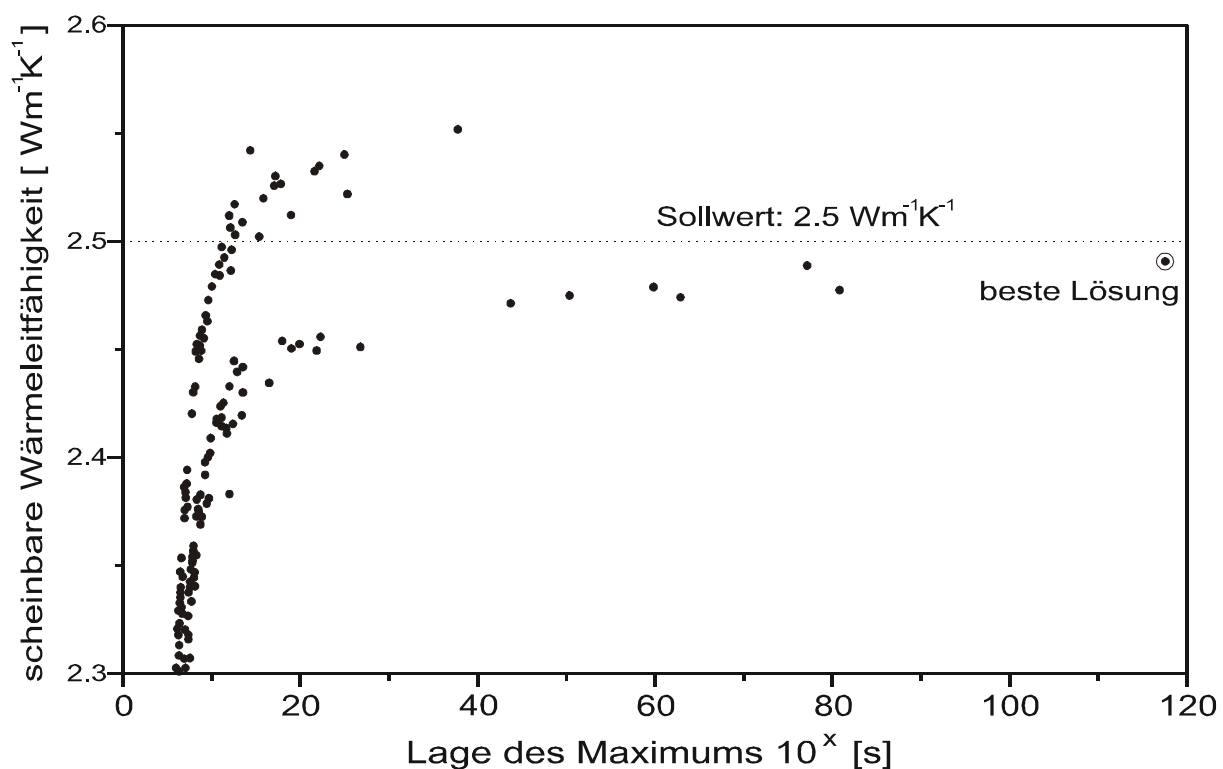


Abb. 3-8: Darstellung der Lösungsgesamtheit der Auswertung der Temperaturdaten aus [Abbildung 3-7](#). Der mit dem in [Kapitel 2.2.2](#) beschriebene Auswertalgorithmus bestimmte Wert weicht nur um -1% vom vorgegeben Modellwert ab.

Mit diesen drei numerischen Beispielen ist gezeigt worden, daß der universelle Approximationsalgorithmus synthetische Aufheizkurven zylindrischer Quellen ganz unterschiedlicher Skalenbereiche (Durchmesser, Heizzeiten) sehr zuverlässig bearbeitet.

3.2.3 Einfluß von Rauschen auf das Ergebnis der Auswertungen

Um die Empfindlichkeit des Algorithmus im Hinblick auf verrauschte Meßdaten zu untersuchen, wurde eine mit NEPR-F berechnete Aufheizkurve (EXAMPLE 1, s. [Abb. 3-2](#)) synthetisch verrauscht und die resultierenden Temperaturdaten mit gleichbleibenden Auswerteparametern ausgewertet. Die [Abbildung 3-9](#) zeigt, daß für einen Rauschpegel $\leq 2.5 \cdot 10^{-4}$ K die berechneten Wärmeleitfähigkeitswerte nur noch um maximal $\pm 2\%$ von der vorgegebenen Modellwärmeleitfähigkeit abweichen.

Abweichungen von maximal $\pm 1\%$ werden für Rauschpegel in der Größenordnung von $1 \cdot 10^{-4}$ K ermittelt.

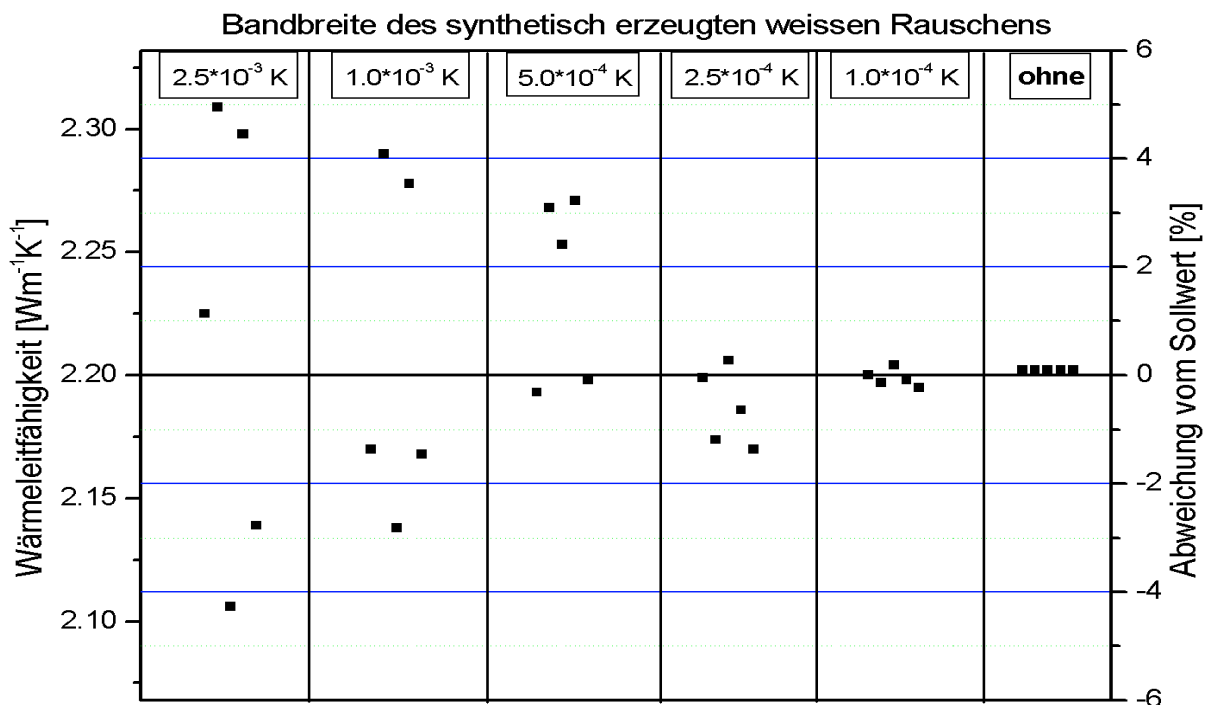


Abb. 3-9: Ergebnis der Auswertung von synthetisch verrauschten Aufheizkurven der Modellierung mit NEPR-F (EXAMPLE1, [Abb. 3-2](#), mittlere Kurve). Eine Reproduzierbarkeit der berechneten Werte $< 2\%$ wird für Rauschpegel $< 2.5 \cdot 10^{-4}$ K erreicht.

Daß auch bei den realen Messungen an Standardmaterialien eine solche Reproduzierbarkeit erreicht werden kann (s. [Abb. 3-13](#), [3-42](#)) zeigt, daß der Rauschpegel der eingesetzten Temperaturmeßtechnik in bei $< 2.5 \cdot 10^{-4}$ K liegt.

3.2.4 Reproduzierbarkeit und Genauigkeit der Ergebnisse

Die im vorangegangenen Kapitel dargestellten Überlegungen sind in Übereinstimmung mit der vom Hersteller der verwendeten Meßapparatur TK04 angegebenen Reproduzierbarkeit von besser $\pm 1,5\%$ für Messungen mit den Standard-Laborsonden

(Anhang F). Dies zeigen auch die Ergebnisse der Messungen an Standardmaterialien sowohl mit der Nadelsonde (Kap. 3.3.1.1.1) als auch mit der Halbraumlinienquelle (Kap. 3.4.1 und Kap 3.4.1.1).

Bei der Berechnung der Wärmeleitfähigkeit nach der Gleichung 2.20

$$(2-20) \quad \lambda_a = q / (4\pi A_2)$$

setzt sich der relative Fehler des berechneten Wärmeleitfähigkeitswertes aus dem Fehler des Koeffizienten A_2 und dem der Heizleistung pro Längeneinheit zusammen. Für die Genauigkeit des Auswerteergebnisses bei einer realen Messung ist neben der Genauigkeit der numerischen Approximation die genaue Bestimmung der Heizleistung q maßgeblich. Daß diese auch mit sehr hoher Konstanz und Zuverlässigkeit angegeben werden kann zeigen die im folgenden beschriebenen Ergebnisse verschiedener Meßkonfigurationen.

3.3 Auswertung von Vollraummessungen

Im folgenden werden einige Meß- und Auswertebeispiele von Messungen mit Vollraum- und Halbraumsonden unterschiedlicher Dimensionen beschrieben. Soweit nichts anderes angegeben ist, wurden alle Messungen mit einer Meßapparatur TK04 der Firma TeKa (TeKa 2001, Anhang F) am GeoForschungsZentrum Potsdam durchgeführt. Im Prinzip folgt der Aufbau der Apparatur dem von Erbas (1985) beschriebenen Schema, allerdings sind die einzelnen Baugruppen modular aufgebaut und die Elektronik entspricht jeweils dem Stand der Technik. Dies ist insbesondere in Hinblick der Anforderungen an die Konstanz der verwendeten Stromquelle wesentlich, da die konstante Heizleistung direkt in die Formel zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit eingeht (Gl. 2-20). Eine zu jeder Sonde vom Meßprogramm benötigte Datei enthält neben den Koeffizienten des jeweiligen Thermistors und den Heizdrahtparametern auch einen Heizkorrekturfaktor. Dieser experimentell (Längenmessung des Heizdrahtes, Überprüfung des Wärmeleitfähigkeitsmeßwertes an einem Eichkörper) bestimmte Wert berücksichtigt, daß nicht die gesamte Heizdrahtlänge für die Aufheizung der Probe genutzt werden kann, da ein kleiner Teil der Sonden immer in einer Halterung befestigt sein muß. Sein Wert ist deshalb von den Abmessungen der Sonde und den Anforderungen an die Robustheit (Laborsonde, Feldsonde etc.) abhängig.

3.3.1 Laborsonden

3.3.1.1 Standardsonde

Die standardmäßig eingesetzten Nadelsonden haben eine effektive Länge von 70 mm und einen Durchmesser von 2 mm (s. Abb. 3-10). Ihr innerer Aufbau entspricht dem in der Abbildung 2-6b skizzierten. Aufgrund des nicht unerheblichen Präparationsaufwandes zur Herstellung einer Bohrung in Gesteinsproben, kommt dieser Sondentyp hauptsächlich in Lockersedimenten zur Anwendung.

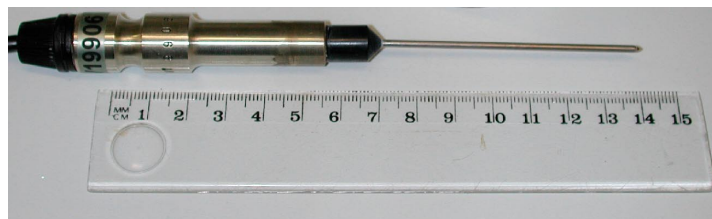


Abb. 3-10: Nadelsonde zur Messung der Wärmeleitfähigkeit, Sondenlänge 70 mm, Sonden-durchmesser 2 mm.

3.3.1.1.1 Überprüfung der Sonde in Macor

Macor ist eine spanbare Glaskeramik, die sich auch gut bohren läßt. Das Material wird seit längerem zur Kalibrierung und Überprüfung von Wärmeleitfähigkeitsmessungen benutzt, da es sehr homogen aufgebaut ist. Die im folgenden beschriebene Meßserie wurde mit einer neuen Nadelsonde (V19906) an einem zylindrischen Macor-Block (s. [Abb. 3-41](#)) durchgeführt, dessen Wärmeleitfähigkeit bei der PTB zu $1.637 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1} \pm 0,0164 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ bestimmt wurde. Die Sonde wird in eine Bohrung ($\varnothing=2\text{mm}$) in der Mitte dieses Zylinders eingeführt und als Kontaktmittel wird Dehydril HT benutzt. Dieses Kontaktmittel hat gegenüber den oft benutzten Wärmeleitpasten den Vorteil, daß es sich auch wieder restlos aus den Bohrungen entfernen läßt. In der verwendeten Konzentration von 2.5% kommt es bei Heizleistungen $\leq 5 \text{ W/m}$ nicht zu thermisch induzierten Konvektionen im Ringraum der Nadelsonde. Zwischen den Messungen wurde ein minimaler Zeitabstand von 30 Minuten vorgegeben, damit die Temperaturerhöhungen der vorangegangenen Messungen möglichst vollständig abgeklungen waren. Wie die Darstellung der Auswerteergebnisse zeigt (s. [Abb. 3-11](#)) weicht der Mittelwert aller Messungen nur unerheblich vom Sollwert ab. Die Werte streuen um -2% bis $+4\%$ um den Mittelwert.

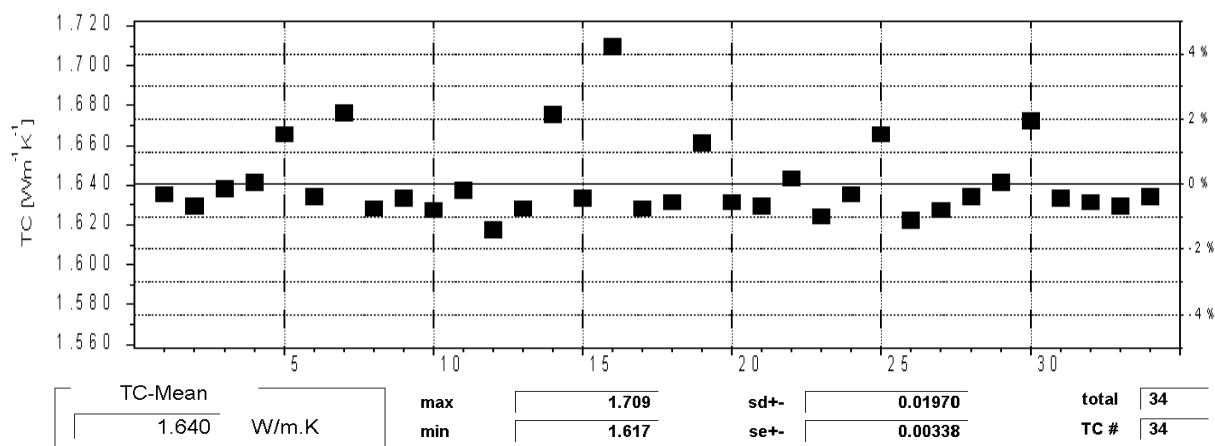


Abb. 3-11: Darstellung der Ergebnisse einer Nadelsondenmessung an einem Eichkörper (Macor: Wärmeleitfähigkeit= $1.637 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$). Der Mittelwert aller Messungen liegt innerhalb des für den Eichkörper angegebenen Toleranzbereichs von $\pm 1\%$.

Nach einer Beurteilung der einzelnen Auswertungen ([Abb. 3-12](#), s. auch [Kapitel 3.1.2](#)) wurden 7 Messungen aus der Mittelwertbildung ausgesondert, da sie offensichtlich geringe Störeffekte aufwiesen. Der sich danach ergebene Mittelwert (s. [Abb. 3-13](#)) fällt um 0,5% geringer aus, die Streuung der Werte beträgt nunmehr maximal 1%.

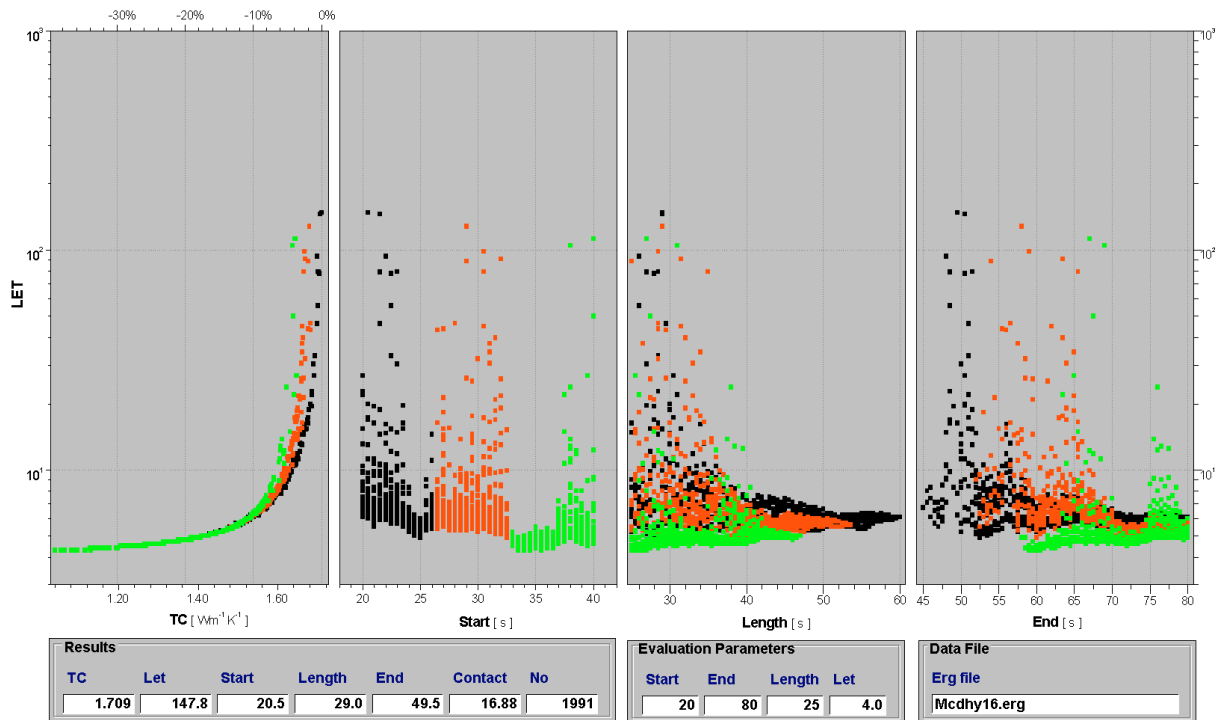


Abb. 3-12: Lösungsgesamtheit der Auswertung der Messung 16 der in der [Abbildung 3-11](#) dargestellten Meßserie. Deutlich ist die Ausbildung eines mehrfach gesplitteten Astes in den asymptotischen Wärmeleitfähigkeitswerten zu erkennen. Die verschiedenen Äste entsprechen Lösungen aus unterschiedlichen Bereichen der Aufheizkurve. Aus diesem Grund wird die Messung aus der Mittelwertbildung ausgeschlossen.

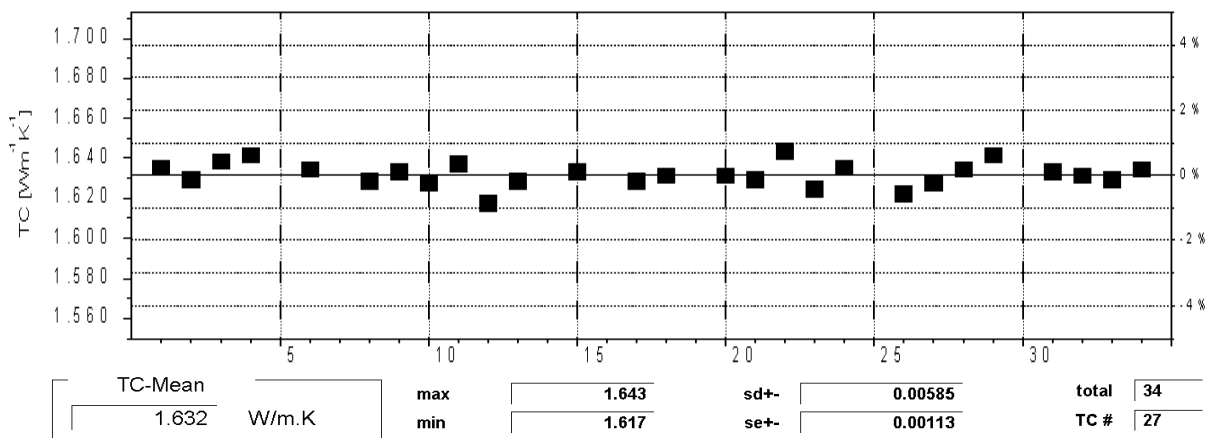


Abb. 3-13: Darstellung der Ergebnisse der Meßserie aus [Abbildung 3-11](#) nach Beurteilung jeder einzelnen Auswertung. Gegenüber der [Abbildung 3-11](#) wurden 7 Messungen aus der Mittelwertbildung herausgenommen.

Nach der visuellen Beurteilung der Meßserie wird die Wärmeleitfähigkeit des Probenkörpers mit $1.632 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1} \pm 1\%$ angegeben. Dieser Wert liegt um nur 0.3 % unter dem Sollwert von $1.637 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ und damit innerhalb des angegebenen Toleranzbereiches von $\pm 1\%$. Damit kann die Sonde in jeder Hinsicht als außerordentlich gut bezeichnet werden.

3.3.1.1.2 Meßbeispiel : Ton

Um Vergleichswerte für Messungen mit einer weiter unten beschriebenen Nadelsonde (Gashydratsonde) zu erhalten, wurden mit beiden Sonden Messungen in einem handelsüblichen Block aus Töpferton durchgeführt (Abb. 3-14).



Abb. 3-14: Meßanordnung mit den Nadelsonden V19906 (Standardsonde) und V10101 (Gashydratsonde) in Töpferton. (s.a. Kapitel 4.2.2)

Abbildung 3-15 zeigt das Ergebnis der Meßserie mit der Nadelsonde V19906 sowie die Lösungsgesamtheit für die 2. Messung der Serie. Der Mittelwert der 5 Messungen beträgt $1.692 \pm 0.0006 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, die Ergebnisse der einzelnen Messungen weisen eine Streuung $\ll 0.1\%$ auf. Dies ist auch auf die außerordentlich guten Ankopplungsbedingungen im Ton zurückzuführen.

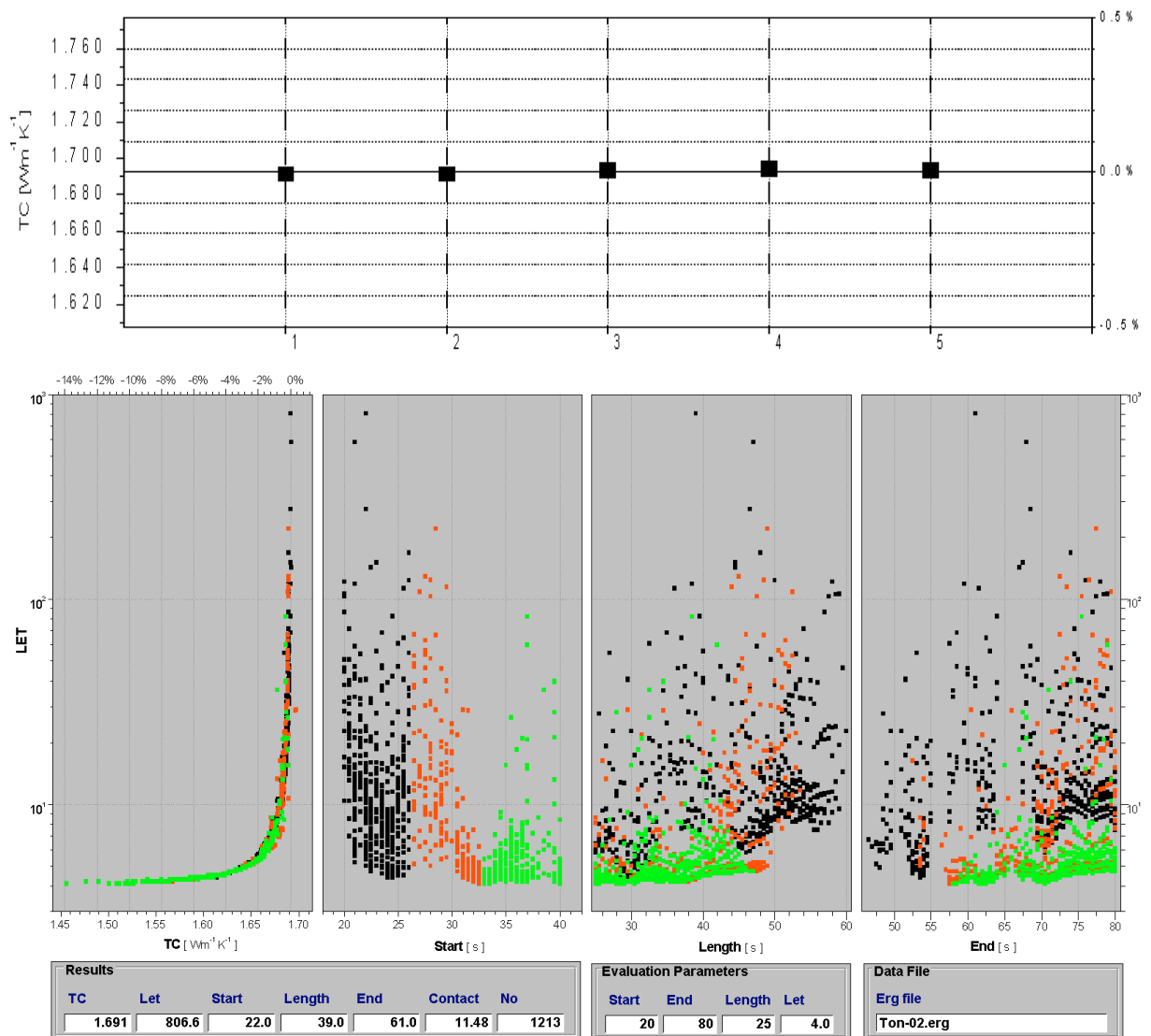


Abb. 3-15: Ergebnis einer Meßserie mit der Nadelsonde V19906 in Töpferon. Die Lösungsgesamtheit der 2. Messung der Serie zeigt, daß die Meßgüte außerordentlich gut ist. Dies ist auf die hervorragenden Ankopplungsbedingungen der Sonde im Ton zurückzuführen. Weitere Erläuterungen im Text.

3.3.1.2 Lange Sonde (Lockersedimente in situ)

Eine längere Version einer Nadelsonde, die bei Feldmessungen in Lockersedimenten eingesetzt werden kann (Biewald et al., 1995), wurde mir freundlicherweise von der Firma TeKa (Berlin) zu Testmessungen zur Verfügung gestellt. Die Sonde (V1F001) hat einen Durchmesser von 6 mm und eine Länge von 300 mm.

Aufgrund der Länge der Sonde mußten die Messungen in einem anderen Block Töpferon durchgeführt werden. Der für diese Meßserie ermittelte Wärmeleitfähigkeitswert liegt bei $1.902 \pm 0.005 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Die in der [Tabelle 3-3](#) dargestellten Ergebnisse zeigen, daß auch mit dieser Sonde sehr gut reproduzierbare Werte bestimmt werden. Auf eine Darstellung einzelner Lösungsgesamtheiten wird an dieser Stelle verzichtet.

Messung	WLF [W/(mK)]	LET [s]	No.	Start [s]	Length [s]	End [s]
TON-01	1.911	787.6	636	49.5	40.5	90
TON-02	1.899	398	488	48	33	81
TON-03	1.916	16576	393	52	31.5	83.5
TON-04	1.894	12773.9	1816	44	67	111
TON-05	1.918	594.9	1268	41.5	53	94.5

Tab. 3-3: Ergebnisse einer Meßserie mit einer Feldsonde (V1F001, Länge 30 cm, Ø 6mm) in Ton. Der Mittelwert der Einzelergebnisse beträgt: $1.902 \pm 0.005 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$.

3.3.1.3 Spezialsonden (Gashydrat-Autoklave)

Für den Einsatz in einem Gashydrat-Autoklaven wurde im Januar 2001 eine spezielle Ausführung einer Nadelsonde (V10101) beschafft. Die Sonde hat einen Außendurchmesser von 1,3 mm und eine effektive Länge von 45 mm. Sie ist in den Plexiglas-Deckel ([Abb. 3-16](#)) einer Meßzelle eingelassen, in der in einem Autoklaven unter kontrollierten Bedingungen Gashydrate erzeugt werden sollen (pers. Mitteilung, [Spangenberg, 2001](#)).

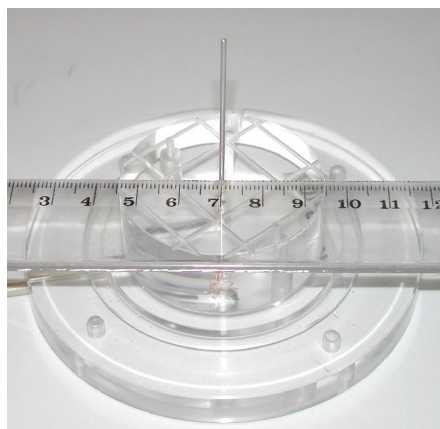


Abb. 3-16: Nadelsonde für den Einsatz in einem Gashydrat-Autoklaven. Die Sonde hat eine Länge von 45 mm und einen Durchmesser von 1,3 mm.

Nach den geplanten Messungen in dieser Zelle werden dann erstmalig Wärmeleitfähigkeitswerte für ein ganzes Spektrum von Sedimentzusammensetzungen und Sättigungsbedingungen erwartet. Im folgenden werden die ersten Meßergebnisse der Eignungstests dieser Sonde dargestellt.

3.3.1.3.1 Überprüfung der Sonde in Macor

Für eine Beurteilung der Sondenqualität und der mit ihr erzielbaren Genauigkeit, wurden Meßserien in einem Eichkörper aus Macor mit einer Wärmeleitfähigkeit von $1.637 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1} \pm 1\%$ durchgeführt. Dazu wurde in den Macorzylinder eine 46 mm tiefe Bohrung mit einem Durchmesser von 1.3 mm gebohrt. Als Kontaktmittel wurde Dehydril in einer Konzentration von 2.5% benutzt. Damit ließ sich die Sonde leicht in die Bohrung einpassen.

Die Analyse einer ersten Meßserie mit einer Heizleistung von 5 W/m ergab bei einzelnen Messungen Anzeichen für eine geringfügige thermisch induzierte Konvektion. Daraufhin wurde die Heizleistung auf 3.5 W/m reduziert. Zwischen den einzelnen Messungen wurde eine Totzeit von mindestens 20 Minuten vorgegeben.

Das Ergebnis dieser Meßserie ist in der [Abbildung 3-17](#) dargestellt. Nach visueller Beurteilung und Herausnahme der Messung Mcd3-30 aus der Mittelwertbildung ergibt sich ein Mittelwert von $1.641 \pm 0.0018 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Die Abweichung vom Sollwert beträgt somit +0,2% und liegt deutlich innerhalb der zulässigen Toleranzen. Die Messungen mit der Sonde werden als außerordentlich gut eingestuft.

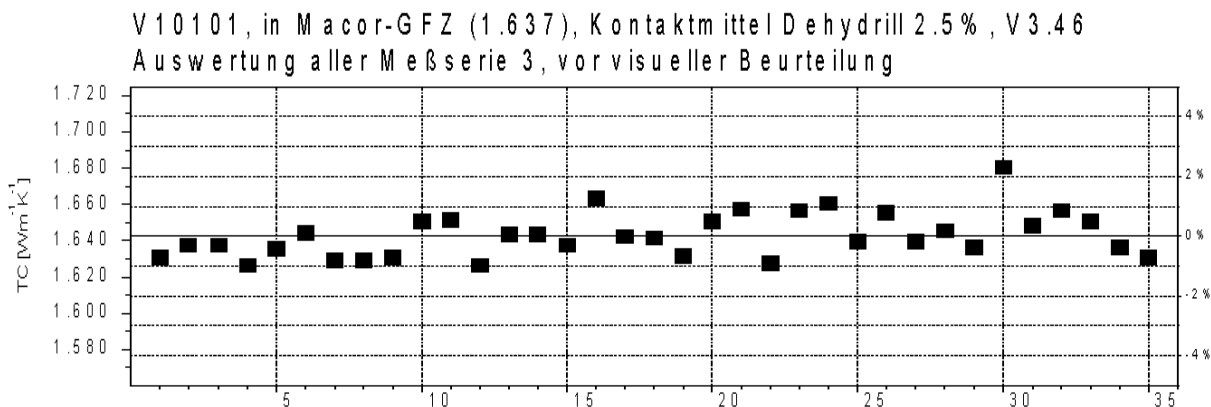


Abb. 3-17: Ergebnisse einer Meßserie zur Überprüfung der Nadelsonde für die Gashydrat-Meßzelle. Der aus dieser Meßserie ermittelte Wert (1,641) für die Wärmeleitfähigkeit des Eichkörpers weicht nur um +0,2% vom Sollwert $1,637 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ab.

In Zukunft soll die Nadelsonde V10101 in einer Gashydrat-Meßzelle zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit künstlich erzeugter Gashydrat-Sedimente eingesetzt werden. Diese werden zum Teil auch Modell-Sedimente darstellen, deren Matrix aus Glaskugeln unterschiedlicher Durchmesser bestehen wird. Um die Wärmeleitfähigkeit der Gashydrate zu ermitteln, wird es dann notwendig sein, die Wärmeleitfähigkeit der Matrix zu kennen. Im folgenden wird die umgekehrte Reihenfolge beschrieben: Messungen in Dehydril dienen der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit dieser thixotropen

Flüssigkeit, während aus den anschließenden Messungen eines Glaskugel-Dehydril Gemisches die Wärmeleitfähigkeit der Glaskugelpackung bestimmt werden soll.

3.3.1.3.2 Messungen in Dehydril

Die [Abbildung 3-18](#) zeigt den Meßaufbau der Nadelsonde in 2.5 %iger Dehydril Lösung. Aufgrund der thixotropen Eigenschaften dieser Lösung kann die Sonde direkt in die Lösung eingeführt werden. Bei Heizleistungen $< 5 \text{ W/m}$ kommt es bei diesen Konzentrationen zu keinen thermisch bedingten Konvektionen innerhalb der Meßzeiten.

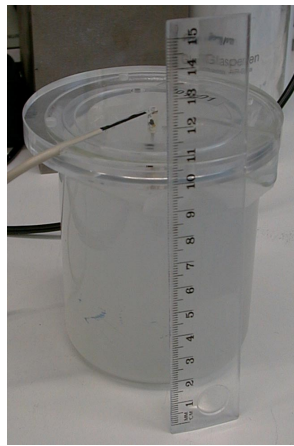


Abb. 3-18: Meßaufbau der kleinen Nadelsonde in 2.5 %iger Dehydril-Lösung.

Die Darstellung der Ergebnisse der ersten Meßserie ([Abb. 3-19](#)) zeigt, daß die Meßergebnisse bis auf 2 offensichtliche Fehlmessungen sehr gut übereinstimmen: für die Messung 10 wurden keine Lösungen gefunden, für die Messung 11 zwar 257, jedoch ohne das typische asymptotische Verhalten. Anhand der visuellen Beurteilung der Auswertungen der Einzelmessungen wurden anschließend 5 Messungen aus der Mittelwertbildung ausgeschlossen. Die Ausschlußkriterien dabei waren: weniger als 600 Lösungen und keine deutlich ausgeprägte Lösungsasymptote.

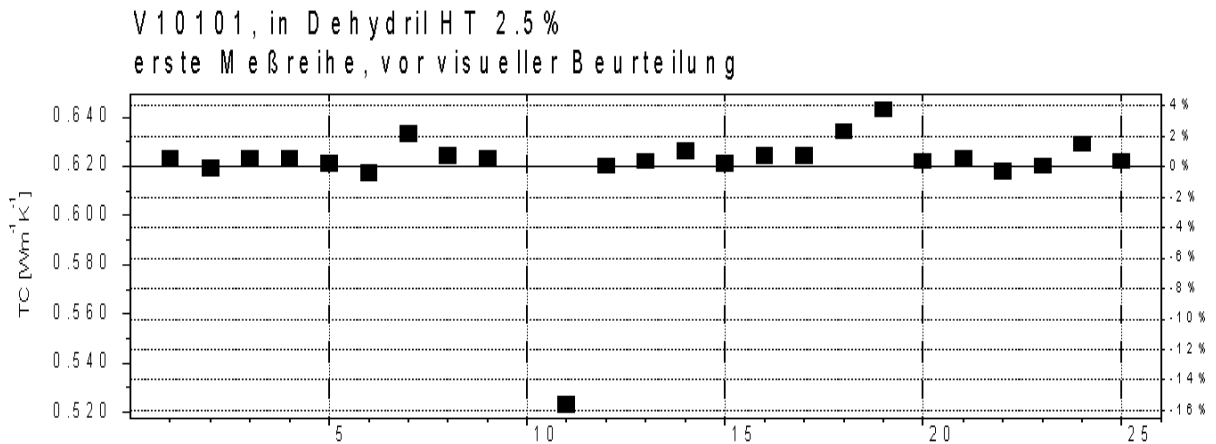


Abb. 3-19: Meßserie mit der kleinen Nadelsonde (V10101) in Dehydril (2.5%). Für die 10. Messung werden keine Lösungen gefunden, die 11. Messung liefert ein von den übrigen Messungen deutlich abweichendes Ergebnis. Bei der anschließenden visuellen Beurteilung wurden insgesamt 5 Messungen aus der Mittelwertbildung ausgeschlossen (Abb. 3-20)

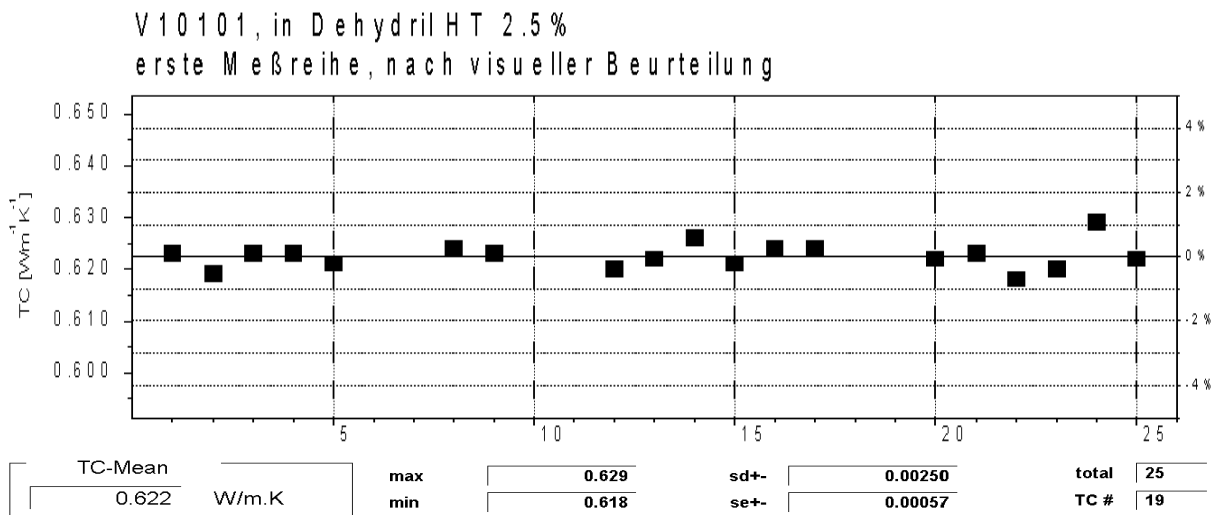


Abb. 3-20: Ergebnis der Meßserie (s. Abb. 3-19) mit der kleinen Nadelsonde (V10101) in Dehydril (2.5%) nach visueller Beurteilung der Auswertungen. Die Werte weisen eine sehr geringe Streuung auf, der Mittelwert von $0.622 \pm 0.001 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ entspricht dem Wärmeleitfähigkeitswert von Wasser sehr gut.

Die Abbildung 3-20 zeigt das Ergebnis der Meßserie nach der visuellen Beurteilung: die Werte weisen eine sehr geringe Streuung auf, und der Mittelwert von $0.622 \pm 0.001 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ entspricht dem Wärmeleitfähigkeitswert von Wasser bei 25°C (Abweichung $< 0.5 \%$, Jamieson et al., 1975) sehr gut. Er wird für die weiterführenden Berechnungen genutzt werden.

3.3.1.3.3 Messungen in einem Glaskugel-Dehydril Gemisch

Die Messungen erfolgten in einem Becherglas, welches abwechselnd mit Dehydril (2.5%) und Glaskugeln ($\varnothing 3\text{mm}$) gefüllt wurde. Nach jeder Füllung wurden die hinzu-

gefügten Gewichtsanteile durch Wiegen ermittelt und durch Schütteln jeweils versucht, eine dichte Kugelpackung der Glaskugeln herzustellen. Am Ende des Mischungsvorganges wurde noch darauf geachtet, daß an der Oberfläche möglichst ähnliche Bedingungen zum Inneren des Becherglases bestanden. Die Nadelsonde V10101 wurde danach äußerst vorsichtig in die Mitte des Becherglases eingeführt (s. [Abb. 3-21](#)).

Die Ergebnisse der ersten Meßserie sind in der [Abbildung 3-22](#) dargestellt. Bis auf den Wert der ersten Messung wurden alle übrigen nach der visuellen Beurteilung in die Mittelwertbildung einbezogen. Der resultierende Wärmeleitfähigkeitswert für das Glaskugel-Dehydril-Gemisch ist $0.799 \pm 0.002 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

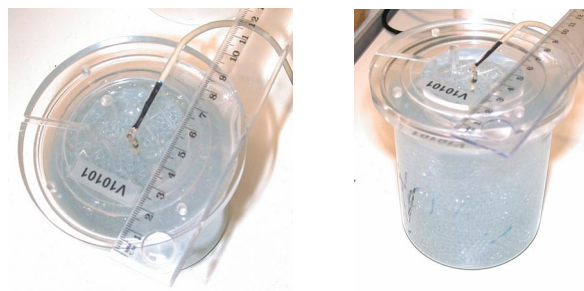


Abb. 3-21: Meßaufbau der kleinen Nadelsonde V10101 in einem Glaskugel-Dehydril Gemisch bekannter Volumenanteile. Die Wärmeleitfähigkeit der 2.5% igen Dehydril Lösung wurde vorher mit der gleichen Sonde bestimmt (s. [Abb. 3-18](#)).

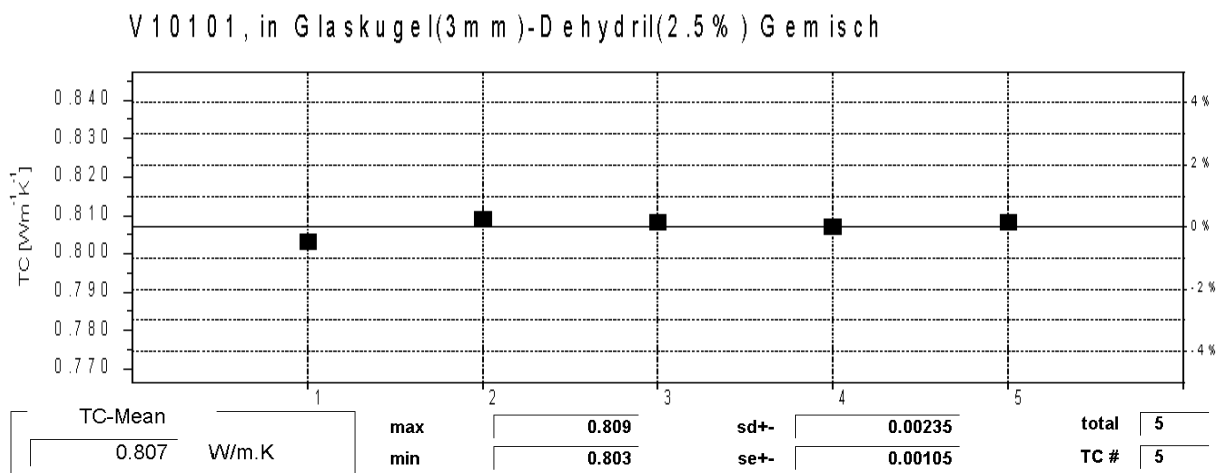


Abb. 3-22: Ergebnisse der Auswertung einer Meßserie in einem Glaskugel-Dehydril Gemisch. Aus den 5 Messungen der Serie wird eine Wärmeleitfähigkeit von $0.807 \pm 0.001 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ermittelt.

Zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit der Glaskugeln aus dem Meßergebnis des Gemischs wird das Modell des geometrischen Mittels ([Sass et al., 1971](#)) zugrunde gelegt. Obwohl diesem Modell keine geometrische Vorstellung zugrunde liegt, führt

es in der Fachliteratur häufig zu den besten Übereinstimmungen ([Burkhardt und Troschke, 1998](#))

$$\lambda_{\text{Gemisch}} = [\lambda_{\text{Glaskugeln}}]^{1-\Phi} * [\lambda_{\text{Dehydril}}]^{\Phi}$$

Der Volumenanteil Dehydril (Φ) des Gemischs wurde durch Wiegen zu 35,14 % ermittelt und mit der weiter oben gemessenen Wärmeleitfähigkeit ($0.622 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) des Dehydrils ergibt sich die Wärmeleitfähigkeit der Glaskugeln zu:

$$\lambda_{\text{Glaskugeln}} = 0,93 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$$

Damit stimmt der Wert auf ca. 7% genau mit Literaturwerten für Fensterglas ($0.87 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) überein. Für die benutzten Glaskugeln waren vom Hersteller (Windaus Labortechnik) bisher leider keine genaueren Angaben zur Wärmeleitfähigkeit zu erhalten.

Diese Messungen bilden somit die Basis für die noch ausstehenden Messungen zur Wärmeleitfähigkeitsbestimmung im Gashydrat-Autoklaven: bei bekannter Wärmeleitfähigkeit der Glaskugelpackungen kann die Wärmeleitfähigkeit der gebildeten Gashydrate rechnerisch bestimmt werden.

3.3.2 Bohrlochmessungen

Eine Übersicht zu Möglichkeiten der in situ Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit gibt [Honarmand \(1993\)](#). Die bisher am erfolgreichsten eingesetzte Meßmethode geht auf [Villinger \(1983\)](#) zurück: ein Teil der Wassersäule einer Bohrung wird als zylindrische Quelle genutzt, indem er aufgeheizt und die Temperatur in Abhängigkeit der Zeit registriert wird. Oberhalb und unterhalb des beheizten Bereiches befinden sich Dichtelemente, die einen konvektiven und konduktiven Wärmeaustausch zwischen beheizter Quelle und dem restlichen Bohrloch verhindern. Die für die Anwendbarkeit der Zylinderquellenmethode ausschlaggebende Isothermie der Quelle wird durch eine Durchmischung der aufgeheizten Wassersäule mit einer Umwälzpumpe ([Honarmand, 1993](#); [Burkhardt und Troschke, 1998](#)) erreicht.

Bisher ist eine kommerzielle Bohrlochsonde für Serienmessungen der in situ Wärmeleitfähigkeit nach diesem Prinzip zwar noch nicht vorhanden, doch zeigen die Untersuchungen, daß die erzielten Ergebnisse sowohl bei Messungen im Rahmen der Kontinentalen Tiefbohrung (KTB) ([Honarmand, 1993](#); [Pribnow, 1994](#)) als auch bei Messungen in oberflächennahen Lockersedimenten gut mit den Ergebnissen der Labormethoden übereinstimmen. So wurden bei oberflächennahen Messungen in

homogenen Gesteinsbereichen eine Übereinstimmung $< 5\%$ gegenüber den Kernmessungen erzielt (Burkhardt und Troschke, 1998).

Ist die Viskosität der Bohrspülung so hoch, daß es auch bei sehr hohen lokalen Temperaturgradienten nicht zu thermisch induzierten Konvektionen innerhalb des abgepackerten Bereiches kommt, ist eine gute mechanische Durchmischung mit vertretbarem Aufwand nicht zu realisieren. In diesen Fällen kann jedoch die zylindrische Quelle aus einem beheizten Vollmetallrohr (Heizstab) sehr guter Wärmeleitfähigkeit bestehen und der Ringraum (aus Bohrspülung) zum Gestein als Kontaktschicht betrachtet werden (Honarmand, 1993).

Insbesondere im Rahmen der Optimierungen zu operativ wichtigen Parametern wie Sondenlänge und Meßzeiten wurde die universelle Auswertemethode intensiv auf Ergebnisse numerischer Modellierungen angewendet (Burkhardt et al., 1993). Diese Anwendungen werden im folgenden exemplarisch an numerischen Untersuchungen zur Heizstabsonde aufgezeigt.

3.3.2.1 Heizstabsonde

Ein Prototyp der Heizstabsonde (s. Abb. 3-23) zur in situ Bestimmung der Wärmeleitfähigkeiten wurde im Rahmen des Kontinentalen Tiefbohrprogramms der Bundesrepublik Deutschland entwickelt (Burkhardt et al., 1993; Honarmand, 1993).

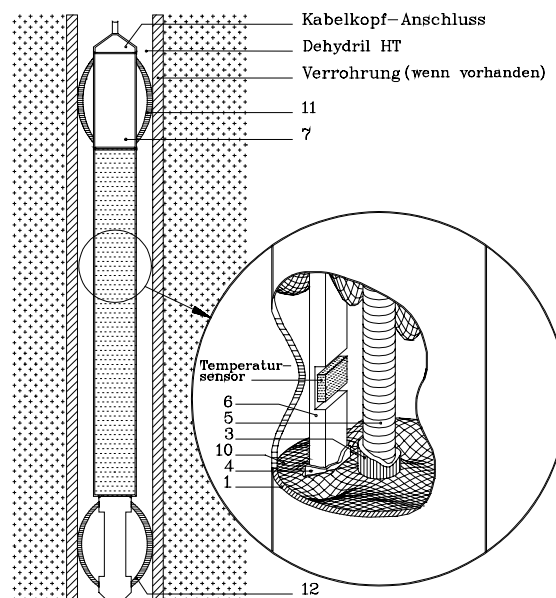


Abb. 3-23: Schematischer Aufbau der Heizstabsonde: **1**: Trägerrohr aus Stahl, **2, 3**: Stahlrohre zur Aufnahme der Heizungen, **4**: Kastenrohr aus Stahl zu Aufnahme der Thermistorstange, **5**: Rundheizstab, **6**: Thermistorstab (Alu-Stange mit Thermistoren), **10**: Aluminiumguß, **7**: Stahlrohr zur Aufnahme der Elektronik, **11, 12**: Centralizer (aus Honarmand, 1993)

Dabei wurden die thixotropen Eigenschaften der verwendeten Bohrspülung Dehydril HT ausgenutzt: bei fehlenden Scherkräften weist diese Spülung eine sehr hohe Viskosität auf.

Modellierungen dieser Quellenanordnung für eine 6“ Bohrung mit TFELD (s. [Kap. 3.2.2](#), [Abb. 3-7](#), [Abb. 3-8](#)) zeigten, daß die Anwendung der universellen Approximationsmethode die erforderlichen Meßzeiten erheblich reduzieren konnte.

Um den Einfluß der endlichen Quellenlänge auf die berechnete Wärmeleitfähigkeit zu bestimmen, wurden mit dem Finite-Differenzen-Programm SHEMAT ([Clauser, 1988](#); [Anhang C](#)) dreidimensionale Modellrechnungen durchgeführt.

In einem ersten Schritt wurde die Bohrlochgeometrie einer 8,5 Zoll Bohrung ($\varnothing \cong 0,215$ m) durch ein sehr feines Gitter (s. [Abb. 3-24](#)) dargestellt und die 2-dimensionalen Berechnungen für eine unendlich lange zylindrische Quelle dieses Durchmessers mit den Berechnungen des Programms TFELD verglichen.

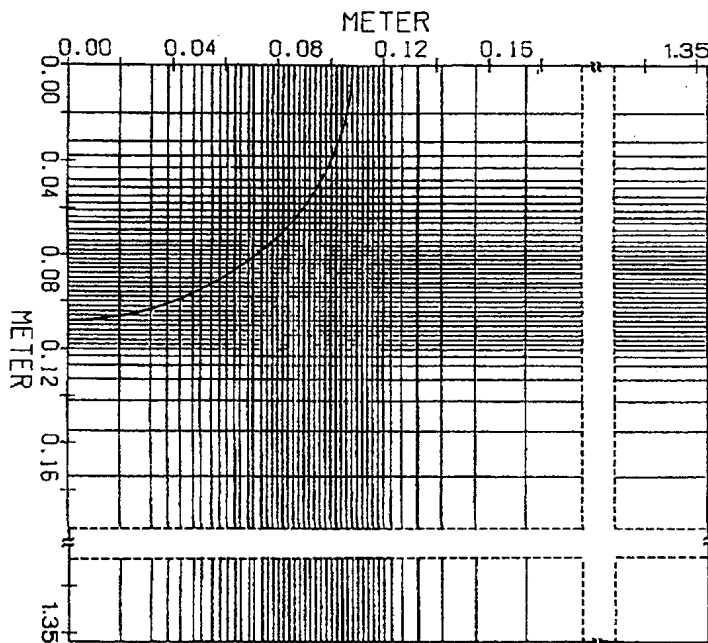


Abb. 3-24: Diskretisierung einer Bohrung mit einem Durchmesser von 20,5 cm (8,5 Zoll) für die Modellierungen einer unendlich langen zylindrischen Quelle mit dem Programm SHEMAT. Aufgrund der Symmetrieeigenschaften braucht nur ein Viertel des Umfanges modelliert zu werden.

Wie die [Abbildung 3-25](#) zeigt, ist mit dieser feinen Diskretisierung eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Aufheizkurven der 2-dimensionalen Modellierung mit SHEMAT und der mit dem Programm TFELD berechneten erzielt worden.

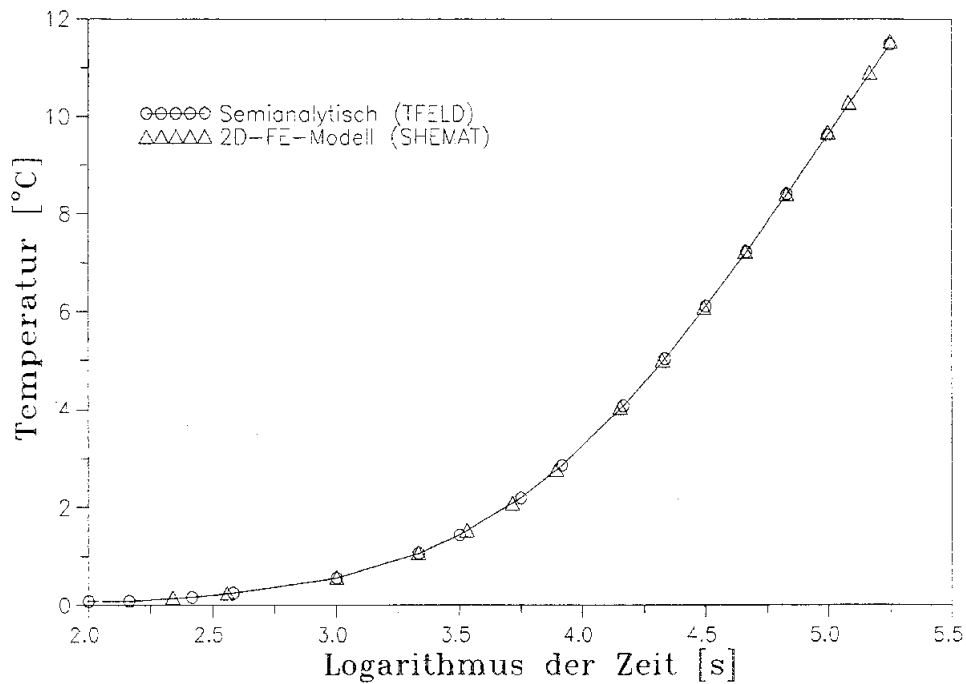


Abb. 3-25: Vergleich der Aufheizkurven der 2-dimensionalen FD Berechnungen mit SHEMAT und der Berechnungen mit dem Programm TFELD. Aufgrund der sehr guten Übereinstimmung der Ergebnisse wird das zweidimensionale Gitter als Basis für die dreidimensionalen Modellierungen verwendet. Berechnungsparameter: $\lambda_{\text{Vollraum}} = 2.5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, $(\rho \cdot c)_{\text{Vollraum}} = 2.3 \cdot 10^{-6} \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$, Heizleistung: 100 Wm^{-1} .

Die ursprünglich für eine 8,5 Zoll Bohrung angelegten Berechnungen wurden später an den Durchmesser einer 6 Zoll Bohrung (KTB-Vorbohrung) angepaßt, da ein Einsatz der Heizstabsonde in der Hauptbohrung der KTB nicht mehr möglich war (Honarmand, 1993; Burkhardt et al., 1993). Für die erforderlichen dreidimensionalen Modellierungen wurden in der Horizontalen die Abmessungen der Heizstabsonde durch entsprechende Parameterwahl (s. Abb. 3-26) berücksichtigt und dieses Gitter anschließend durch zusätzliche Schichten in der z-Richtung ergänzt (s. Abb. 3-27).

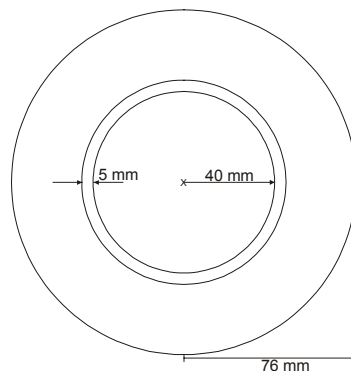


Abb. 3-26: Horizontaler Schnitt durch das Modell einer Heizstabsonde in einer Bohrung. Es gliedert sich in die Bereiche: Aluminiumguß, Stahlrohr, Ringraum, Gestein (s.a. Abb. 3-27).

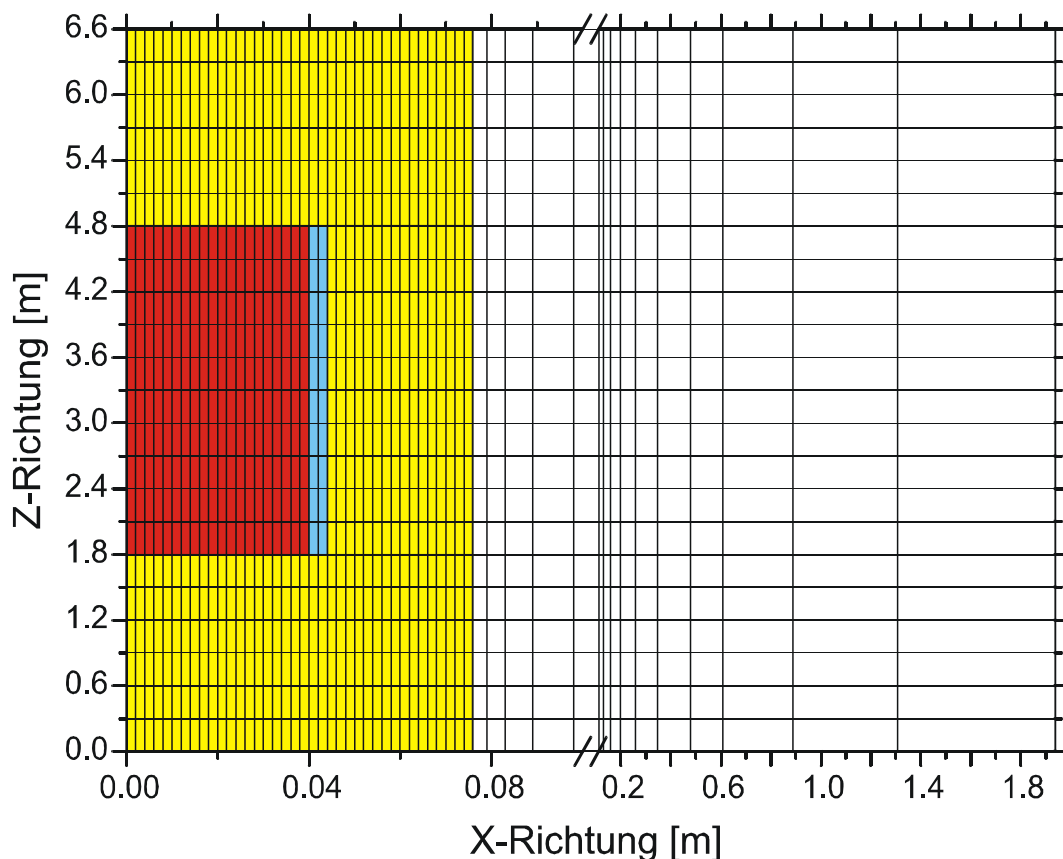


Abb. 3-27: Vertikalschnitt durch das Modell einer 3 m langen Heizstabsonde (Abb. 3-26) in einer Bohrung. Das horizontale Gitter wird durch 22 Schichten in Z-Richtung ergänzt. Aufgrund der Symmetriebedingungen reicht das Modell nur bis zur Bohrlochachse.

Nachdem in ersten Rechenläufen die Übereinstimmung zwischen dem zweidimensionalen und dem dreidimensionalen Modell für eine „quasi“-unendlich lange Quelle überprüft worden war, wurde die Quellenlänge auf 3 m reduziert (s. Abb. 3-27), um den Einfluß der axialen Randeffekte auf die Temperaturverteilung innerhalb der Quelle zu untersuchen. Abbildung 3-28 zeigt als Ergebnis die für 5 Positionen im vertikalen Abstand von jeweils 0,3 m berechneten Aufheizkurven. Die deutlich erkennbaren Unterschiede in den Aufheizkurven bei langen Zeiten sind auf 2 Effekte zurückzuführen:

- Begrenzung der Quelle.
- Axiale Wärmeabgabe an den Enden des beheizten Bereiches, da dieser im Kontakt mit der Spülung steht.

Im nächsten Schritt wurden die Aufheizkurven mit der universellen Approximationsmethode ausgewertet. Die Abbildung 3-29 zeigt erwartungsgemäß, daß die Abweichungen der ermittelten Wärmeleitfähigkeitswerte zur vorgegebenen Modellwärmeleitfähigkeit bei zunehmendem Abstand vom Quellenzentrum größer werden.

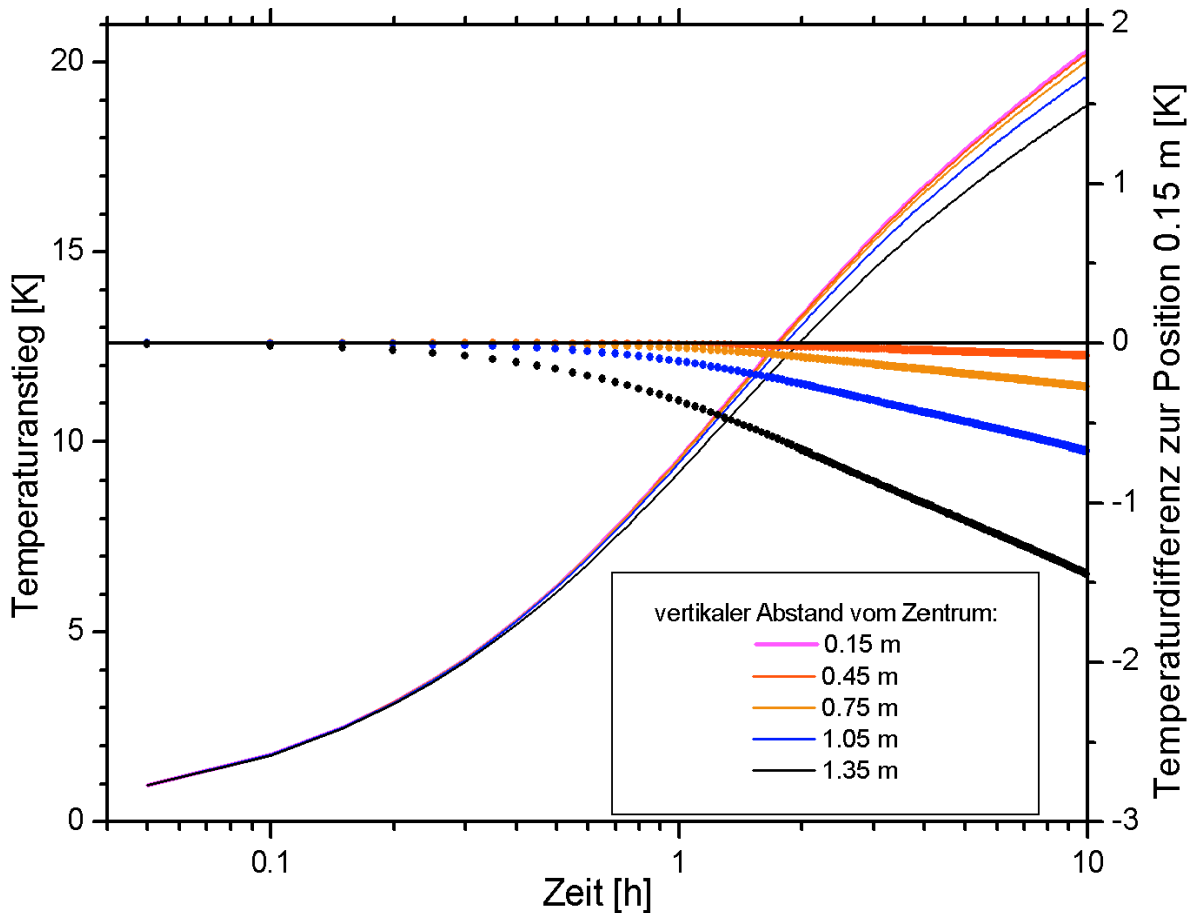


Abb. 3-28: Temperaturverteilung innerhalb einer 3 m langen Heizstabsonde (Abb. 3-26) in Abhängigkeit von der Heizdauer. Dargestellt sind die Berechnungsergebnisse der dreidimensionalen Modellrechnung mit SHEMAT für die Symmetrieachse der Quelle. Für große Heizzeiten sind die Temperaturen an den Enden der Quelle geringer als im Zentrum.

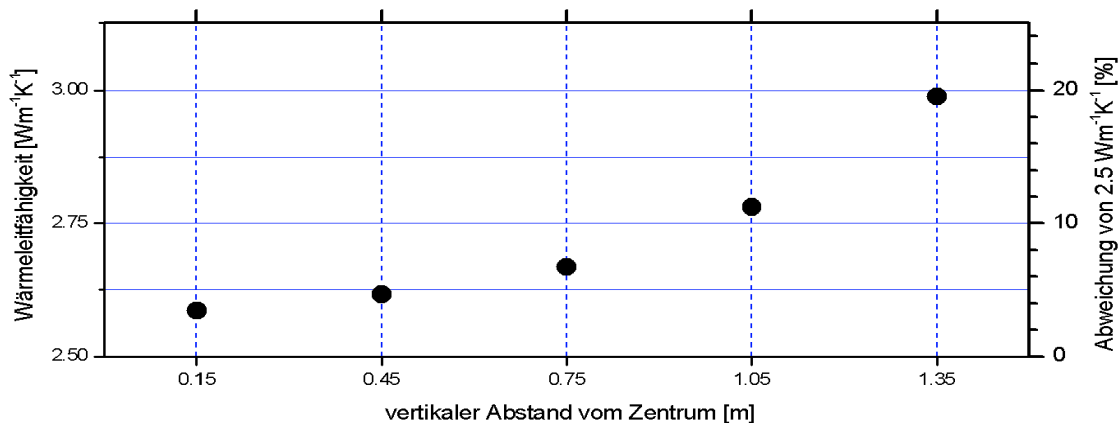


Abb. 3-29: Mit der speziellen Approximationsmethode berechnete Wärmeleitfähigkeitswerte für die in der Abb. 3-28 dargestellten Aufheizkurven. Aufgrund der axialen Randeffekte nehmen die berechneten Werte mit wachsendem Abstand vom Quellenzentrum hin zu. Die aus den zentralen Temperaturen berechneten Wärmeleitfähigkeiten stimmen gut mit den Modellwärmeleitfähigkeiten überein.

Die für die zentralen Bereiche der Heizstabsonde ermittelten Wärmeleitfähigkeitswerte weisen einen Fehler $< 4\%$ zum Sollwert auf. Damit stellt die 3 m lange Heiz-

stabsonde einen guten Kompromiß zwischen erreichbarer Genauigkeit der Wärmeleitfähigkeitsbestimmungen und Aufwand (Quellenlänge, Heizleistung) dar. Die spezielle Approximationsmethode liefert zufriedenstellende Ergebnisse für die Wärmeleitfähigkeitswerte schon für Heizzeiten < 10 h (s. a. [Kap. 3.2.2](#)), und hat damit einen erheblichen Anteil an dem erfolgreichen Einsatz der Heizstabsonde in der KTB Vorbohrung ([Burkhardt et al., 1993](#)) gehabt.

3.4 Auswertung von Halbraummessungen

Die Quellen in den standardmäßig eingesetzten Halbraumlinienquellen (HLQ) entsprechen denen der Standard-Nadelsonden ([Kap. 3.3.1.1.](#), [Abb. 3-10](#)). Sie haben eine effektive Länge von 70 mm und einen Durchmesser von 2 mm. Diese Quelle ist bündig in die Oberfläche eines Plexiglashalbraums ($\varnothing=90\text{mm}$) eingelassen ([Abb. 3-40](#), [Abb. 2-6a](#)). Der Halbraum mit eingelassener Nadelsonde ist danach soweit abgedreht worden, daß die Nadelsonde leicht angeschliffen ist. Über die gesamte Länge der Sonde steht somit eine Kontaktfläche von ca. 0.3 mm Breite zur Verfügung.



Abb. 3-40: Aufbau einer Halbraumlinienquelle für Standardanwendungen. Eine Nadelsonde ist bündig in die Oberfläche eines Plexiglashalbraums eingelassen. Die Zuleitungen für Heizspannung und Temperaturmessungen befinden sich an der Oberfläche (zu den Abmessungen s. a. [Abb. 2-6](#)).

Untersuchungen zum Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit der Proben auf das Meßergebnis ([Reibelt, 1991](#)) zeigten, daß bei Messungen mit unterschiedlichen Sondenorientierungen an gesägten Oberflächen geringe Anisotropieeffekte vorgetäuscht werden können. Eine Bearbeitung der Proben durch Schleifen mit einer 400er Körnung ergab maximale Abweichungen von 5% gegenüber der besten Präparationsstufe (1000er Körnung bei wassergesättigtem Granit). Für Routinemessungen ist deshalb Sägen der Probe und anschließendes Schleifen mit 400er Körnung bzw. alleiniges Sägen mit einem sehr feinen Sägeblatt ausreichend.

Im folgenden werden Meßbeispiele einer Standard-Halbraumlinienquelle sowie einer Spezialanfertigung mit kürzerer Quellenlänge (45 mm) bei einem auf 50 mm reduzierten Halbraumdurchmesser vorgestellt.

3.4.1 Messungen mit der Standard-HLQ

Die [Abbildung 3-41](#) zeigt die Standardmeßanordnung der HLQ an einem Eichkörper aus Macor. Probe und HLQ befinden sich unter einem Andruckstempel. Als Kontaktmittel kann eine dünne Schicht von Wärmeleitpaste auf die Probe aufgetragen werden. Mit einem Anpreßdruck von ca. 10-15 bar wird dann ein guter thermischer Kontakt zwischen HLQ und Gesteinsprobe hergestellt. Messungen an gesättigten Gesteinsproben können auch unter Wasser durchgeführt werden. Messungen an Bohrklein bzw. Gemischen lassen sich ebenfalls einfach durchführen: ein auf die Abmessungen der HLQ abgestimmter Probenbehälter nimmt dann das Material auf.



Abb. 3-41: Meßanordnung der Standard-HLQ im Labor. In einer speziellen Vorrichtung kann die Halbraumlinienquelle mit definiertem Anpreßdruck auf die Probe gepreßt werden.

Die Auswertung der Messungen erfolgt wieder mit der speziellen Approximationsmethode. Im Unterschied zu den Messungen mit den Vollraumsonden wird jedoch die Heizleistung mit einem Faktor 2 multipliziert, da davon ausgegangen wird, daß aufgrund der niedrigen Wärmeleitfähigkeit des Sondenhalbraums innerhalb der Meßzeit annähernd die gesamte Wärmemenge an die Probe abgegeben wird (s. [Kap. 2.4 Gl. \(2-25\)](#)).

Das Ergebnis einer Meßserie zur Überprüfung der Sonde an dem Laborstandard (Macor, $1.637 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1} \pm 1\%$) ist in der [Abbildung 3-42](#) dargestellt. Der ermittelte Wärmeleitfähigkeitswert des Eichkörpers von 1.635 entspricht dem Sollwert sehr genau, die Reproduzierbarkeit beträgt 0.9 %. Im Vergleich zu Messungen der Vollraumsonde ([Abb. 3-11](#)) streuen die Ergebnisse merklich weniger. Dies ist vermutlich auf die besseren Ankopplungsbedingungen zurückzuführen: Während bei den HLQ Messungen die Sonde auf die Probe gedrückt wird, befindet sich die Vollraumsonde in einer Bohrung im Probenkörper. Die Ankopplungsbedingungen lassen sich deshalb nicht genau reproduzieren. Messungen mit der Vollraumsonde in plastischen Materialien (z.B. Ton, s. [Abb. 3-15](#), [Abb. 4-7](#)) weisen hingegen ähnlich niedrige bzw. noch niedrigere Bandbreiten in den Ergebnissen auf.

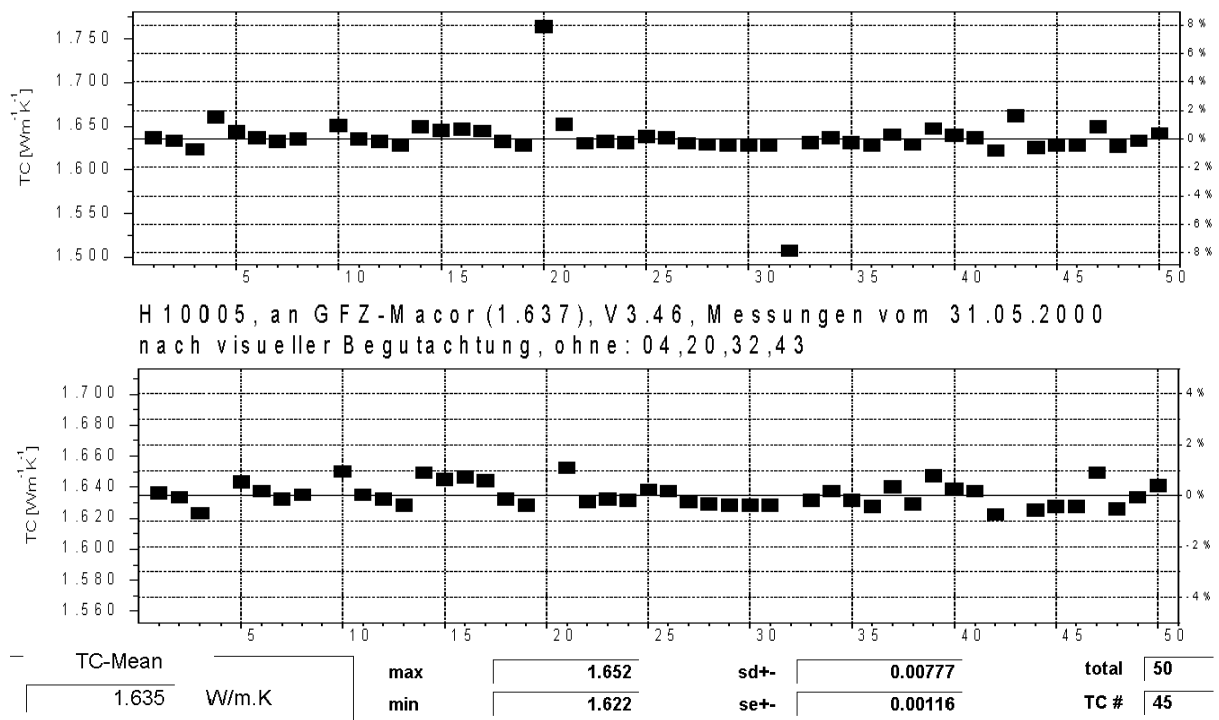


Abb. 3-42: Ergebnis der Überprüfung der Halbraumsonde H10005 an einem Laborstandard mit der Wärmeleitfähigkeit von $1.637 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Sowohl der vor der visuellen Begutachtung (oben) ermittelte Mittelwert von $1.636 \pm 0,004 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ als auch der anschließend bestimmte Wert von $1.635 \pm 0,001 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ stimmen sehr gut mit dem Sollwert überein. Die Reproduzierbarkeit der Einzelwerte beträgt ca. $\pm 1.0\%$.

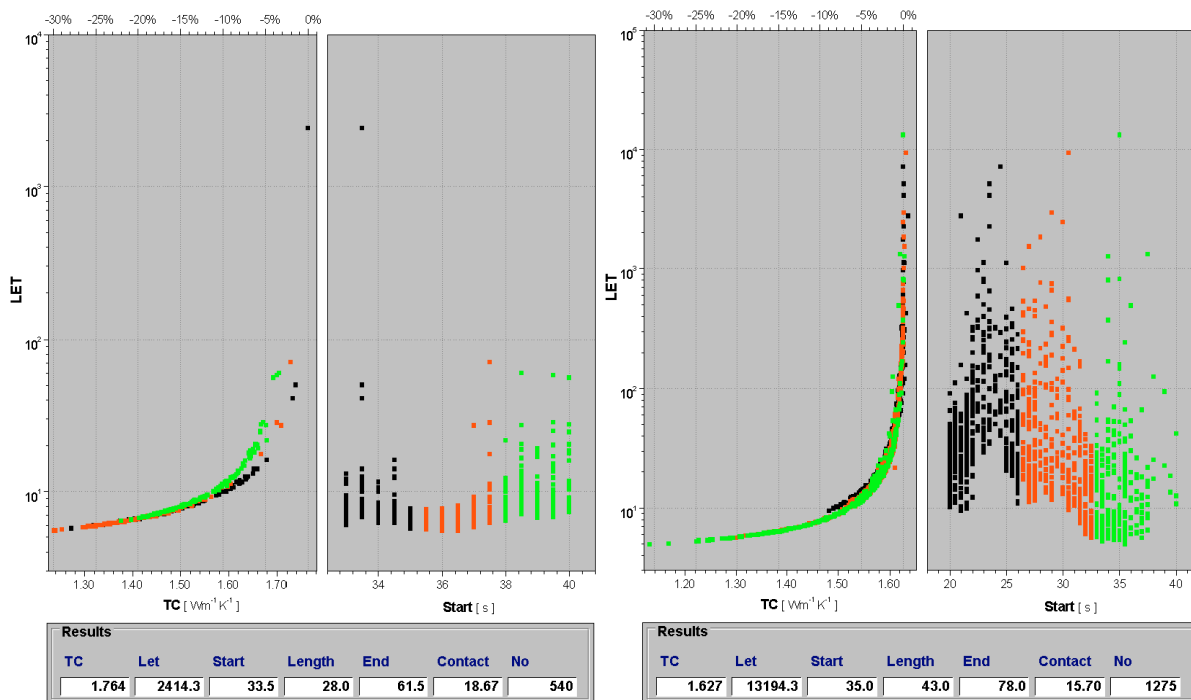


Abb. 3-43: Lösungsgesamtheit für eine gestörte (20, links) und eine ungestörte (19, rechts) Messung aus der in Abb. 3-42 dargestellten Meßserie. Aufgrund der visuellen Begutachtung wurde die Messung 20 (links) aus der Mittelwertbildung ausgeschlossen.

Eine Betrachtung der Lösungsgesamtheit wird auch hier zur Begutachtung der einzelnen Ergebnisse herangezogen (Abb. 3-43). Wie bei den Messungen mit der Vollraumsonde (Abb. 3-17) können gestörte Meßergebnisse deutlich von ungestörten unterschieden und anschließend aus der Mittelwertbildung ausgeschlossen werden.

3.4.1.1 Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse

Meßserien an Standardmaterialien geben die Bedingungen für Routinemessungen an Gesteinsproben nur in etwa wieder. Zum einen sind die zu untersuchenden Gesteinsproben in den meisten Fällen zumindest inhomogen, oft sind sie zusätzlich anisotrop. Auch sollen die Messungen meist schnell durchgeführt werden, für aufwendige Reihenuntersuchungen fehlt oft die Zeit.

Um neben den bisher gemachten Aussagen zur Genauigkeit bei Serienmessungen, bei denen die Meßanordnung während einer Meßserie nicht verändert wird, die Reproduzierbarkeit von Einzelmessungen bewerten zu können, werden im folgenden Ergebnisse von Messungen an einer Gesteinsprobe kleiner Körnung und homogenen Aufbaus (Granit, Kirchberg, Ki3H) vorgestellt. Die Probe ist nur gesägt worden, als Kontaktmittel wurde Wärmeleitpaste benutzt. Es wurden insgesamt 14 Meßserien a 5 Messungen bei einem Anpreßdruck von jeweils 20 bar durchgeführt. Zwischen den einzelnen Meßserien wurde die Halbraumlinienquelle von der Probe entfernt und

anschließend wieder möglichst genau auf die vorher eingezeichnete Meßposition aufgelegt. Die Messungen wurden ohne voreingestellte Pausen zwischen den Einzelmessungen durchgeführt, im Mittel dauerte jede Meßserie ca. 20 Minuten. **Abbildung 3-44** zeigt als Ergebnis die Darstellung der jeweils 2. Werte jeder Meßserie: Die Bandbreite der Einzelergebnisse liegt bei ca. $\pm 2\%$, und der Mittelwert beträgt $2.981 \pm 0,01 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Damit stimmt das Ergebnis sehr gut mit dem Mittelwert aller 70 Messungen ($2.992 \pm 0,01 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) überein.

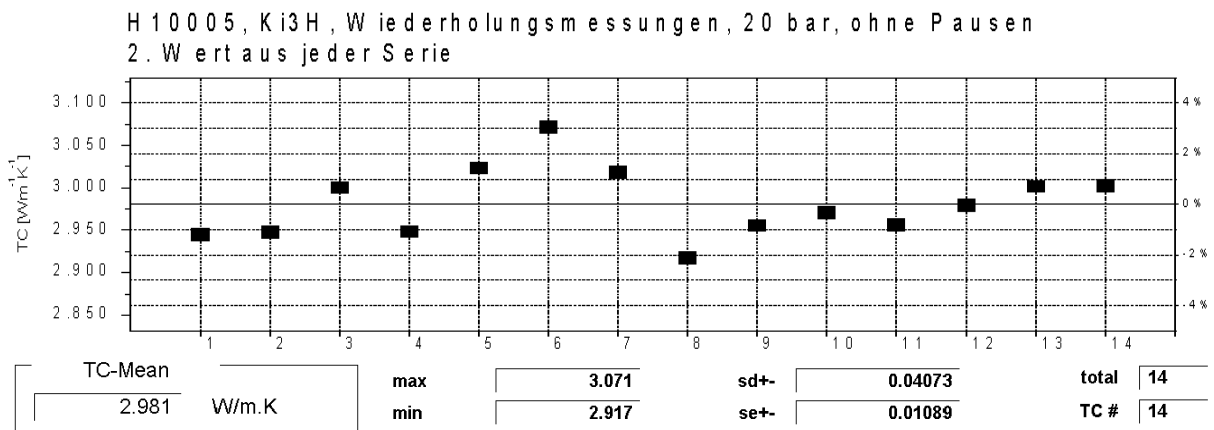


Abb.: 3-44: Darstellung der Ergebnisse von Wiederholungsmessungen mit der Standard Halbraumlinienquelle an einer Granitprobe. Zwischen den Meßserien mit jeweils 5 Messungen wurde die HLQ jeweils neu positioniert. Die Abbildung zeigt die hohe Reproduzierbarkeit des Meßergebnisses (s. Erläuterungen im Text).

Mit diesen Beispielen ist gezeigt worden, daß die universelle Approximationsmethode auch bei der Anwendung auf Daten von Halbraumlinienquellenmessungen hervorragende Ergebnisse liefert. Weitere Meßergebnisse an Gesteinsproben und Vergleiche mit Messungen einer stationären Methode werden anhand der Ergebnisse der Mini-HLQ im folgenden Abschnitt dargestellt.

3.4.2 Messungen mit einer Mini-HLQ

Für Testmessungen wurde mir von der Firma TeKa (Berlin) der Prototyp einer kleinen Version einer HLQ (Mini-HLQ) zur Verfügung gestellt. Bei dieser Spezialanfertigung beträgt die Quellenlänge 45 mm und der Außendurchmesser des Edelstahlröhrchens 1.2 mm (**Abb. 3-45**). Mit diesen Abmessungen war es möglich, die Quelle in einem Probenhalbraum von 50 mm Durchmesser unterzubringen. Da dies dem Standarddurchmesser entspricht, der für stationäre Wärmeleitfähigkeitsmessungen in Divided-Bar Apparaturen (**Sass et al., 1984; Pribnow und Sass, 1995**) benötigt wird, ist erstmalig ein Vergleich der Meßmethoden an identischem Probenmaterial möglich.



Abb. 3-45: Die Standard-Halbraumlinienquelle im Vergleich zur Mini-HLQ. Der Durchmesser des Probenhalbraums beträgt nur noch 50 mm, damit sind Vergleichsmessungen an identischen Proben mit gängigen stationären Meßapparaturen (Divided-Bar) möglich.

Zur ersten Beurteilung der Qualität der Messungen wurden wieder Messungen am Laborstandard (Macor, $1.637 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) durchgeführt. Die [Abbildung 3-46](#) zeigt das Ergebnis der Auswertungen: Der Mittelwert der Meßserie liegt ca. 0.7 % über dem Sollwert, die Reproduzierbarkeit ist ähnlich hoch wie bei der Standard-HLQ.

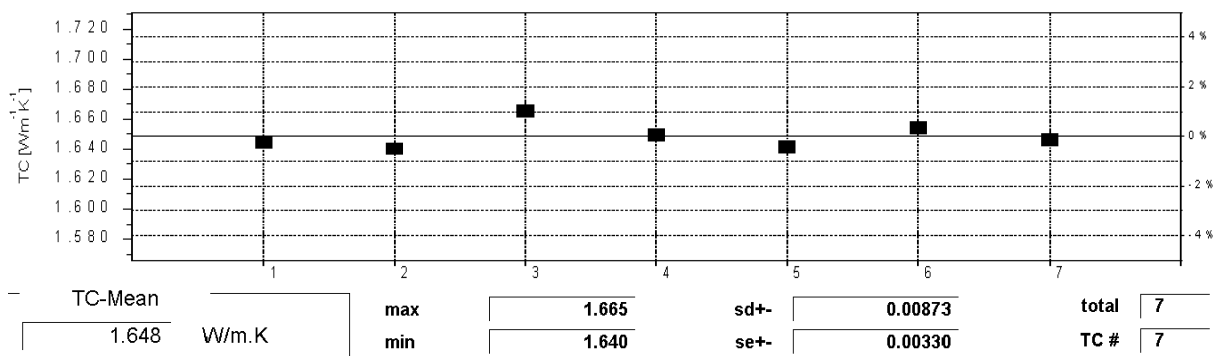


Abb. 3-46: Ergebnis der Auswertungen einer Meßserie der Mini-HLQ an dem Laborstandard (Macor, $1.637 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$).

Die Beurteilung der Güte der Einzelergebnisse (s. [Abb. 3-47](#)) fällt ähnlich positiv aus wie für die Auswertungen der Messungen mit den Vollraumsonden und der Standard Nadelsonde. Zu beachten ist jedoch, daß aufgrund der Sondenabmessungen andere Auswertintervalle berücksichtigt werden müssen. Aufgrund des kleineren Quellenradius kann die Auswertung schon bei kleineren Meßzeiten einsetzen (s. [Kap. 2.3.2](#)). Die deutlich kürzere Quellenlänge beschränkt das für die Auswertung zulässige Zeitintervall hingegen nach oben (s. [Kap. 2.3.1](#)). Für alle Auswertungen mit der Mini-HLQ wurde deshalb der Zeitbereich für die Approximationen auf ein Intervall zwischen 10 und 50 Sekunden (gegenüber 20-80 für die langen Sonden) festgelegt. In der Abbil-

derung (3-47) der Lösungsgesamtheit wird dies auch deutlich: die Mehrzahl der gültigen Approximationen befinden sich im vorderen Teil der Aufheizkurve.

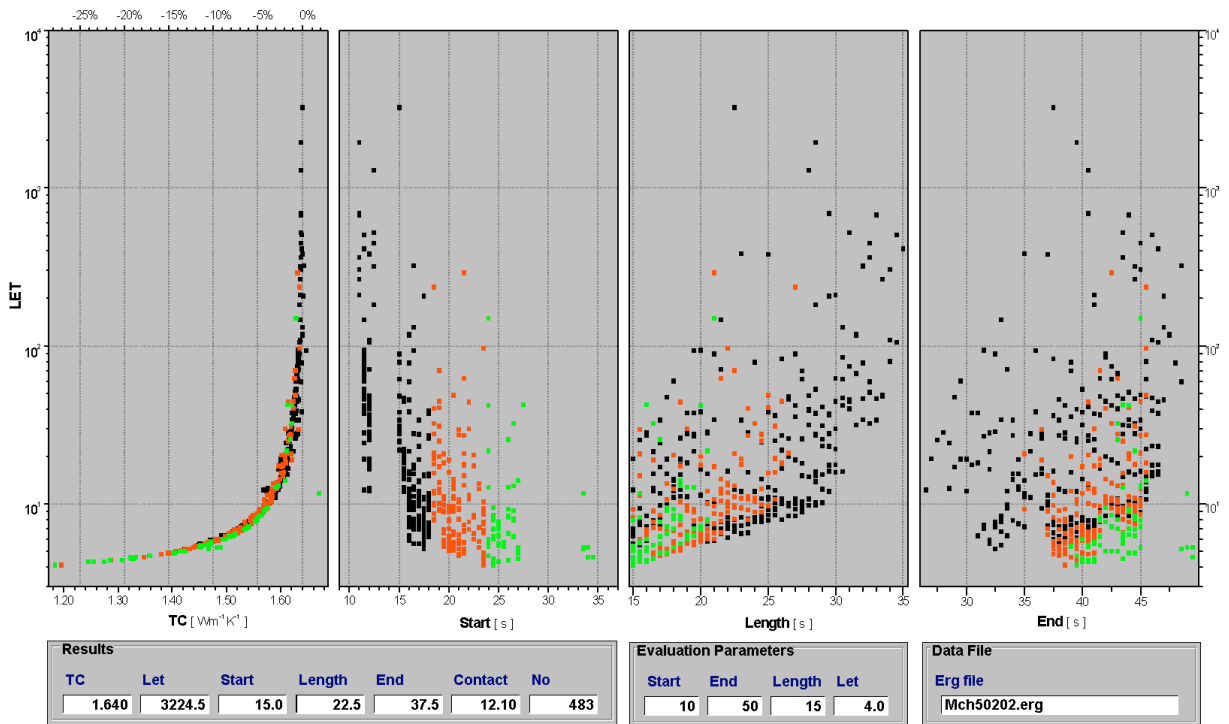


Abb. 3-47: Lösungsgesamtheit der 2. Messung der in Abb. 3-46 dargestellten Meßserie. Der ermittelte Wärmeleitfähigkeitswert repräsentiert das asymptotische Verhalten der übrigen gültigen Approximationen sehr gut.

3.4.2.1 Weitere Meßbeispiele der Mini-HLQ

Als Material für Vergleichsmessungen mit der Mini-HLQ standen mir 2 Gesteinsproben aus dem Erzgebirge zur Verfügung (s. Tab. 3-4). Dia-Sbr-1 ist ein Hornblende-schiefer aus der Bohrung Diabas/Schönbrunn 1, bei der Probe Kt-34-4 handelt es sich um einen Phyllit aus der Bohrung Klingenthal 34. Von beiden Proben war zuvor in der Divided-Bar Apparatur des Instituts für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben (GGA-Institut) in Hannover die Wärmeleitfähigkeit bestimmt worden. Da die Porositäten der Proben sehr klein sind (<3%) wurden die Messungen jeweils trocken durchgeführt.

Probe	TK04 (GFZ) [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	Divided-Bar (GGA) [Wm ⁻¹ K ⁻¹]
Dia-Sbr-1	2.143 ± 0.023	2.14
	2.209 ± 0.045	
Kt-34-4	4.61 ± 0.04	4.35
	4.59 ± 0.04	

Tab. 3-4: Vergleich zwischen Ergebnissen der Wärmeleitfähigkeitsmessungen an 2 Gesteinsproben.

Weitere Vergleichsmessung wurde an einer Metallegierung (RMI Ti-6Al-4V) durchgeführt. Nach Datenblatt des Herstellers beträgt die Wärmeleitfähigkeit 6.736 Wm⁻¹K⁻¹, Messungen mit der Standard Nadelsonde ergaben einen Mittelwert von 6.832 Wm⁻¹K⁻¹. Der Mittelwert einer Meßserie mit der MINI-HLQ 6.697 ± 0.004 Wm⁻¹K⁻¹ liegt leicht unter beiden Werten.

In der [Abbildung 3-48](#) sind diese Vergleichswerte zusammen mit dem für den Macor-Standard (s. [Abb. 3-46](#)) ermittelten Wert aufgetragen. Die Übereinstimmung der Werte über einen Wärmeleitfähigkeitsbereich von 1.6 bis 7 Wm⁻¹K⁻¹ ist als gut anzusehen, auch wenn die Messungen an den Gesteinsproben systematisch leicht zu hohe Werte andeuten. Dies kann z.B. auf einen möglicherweise vorhandenen Anisotropieeffekt zurückzuführen sein: Während das Ergebnis der stationären Messungen in der Divided-Bar einer Richtung zugeordnet werden kann, liefern die Linienquellenmessungen einen skalaren Wert aus einer Ebene. Bei den beiden Gesteinsproben muß aufgrund der inneren Struktur (Schieferung) von einer Richtungsabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit ausgegangen werden, allerdings sind sie aufgrund ihrer Größe (∅ 50 mm, Dicke: 20mm) nicht geeignet, diese Untersuchungen nach der von [Pribnow und Sass \(1995\)](#) beschriebenen Vorgehensweise (s. [Abb. 2-8](#)) durchzuführen. Weitere Meßserien mit dem Prototypen dieser Mini-HLQ an anisotropen und inhomogenen Materialien sind vorbereitet, die Ergebnisse stehen jedoch noch aus.

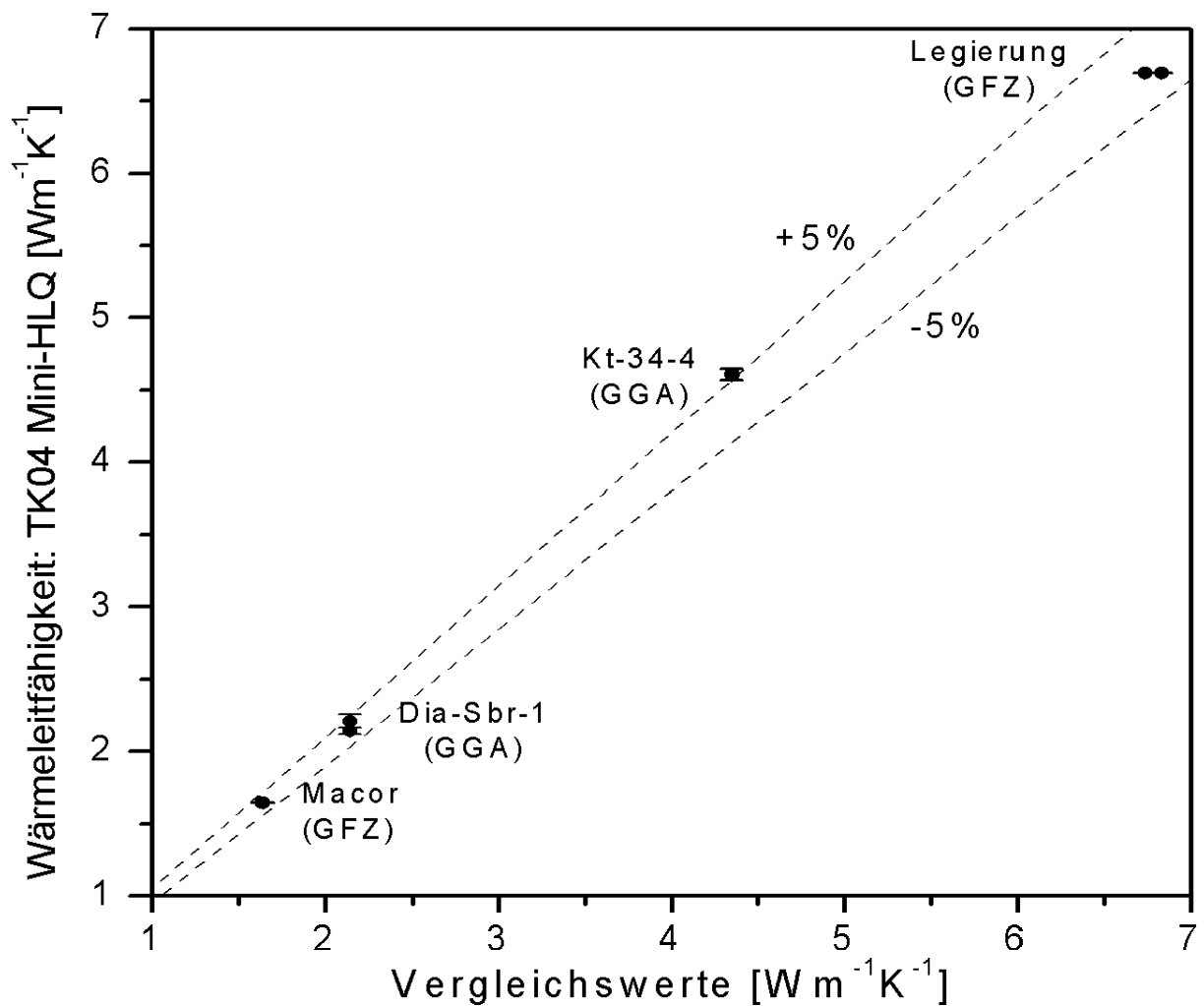


Abb. 3-48: Vergleich der Meßergebnisse der Mini-HLQ an Probenmaterialien verschiedener Wärmeleitfähigkeiten. Zu den einzelnen Proben ist jeweils die Herkunft des Bezugswertes angegeben. Weitere Erläuterungen im Text.

Die Anzahl der Messungen mit dem Prototypen der Mini-HLQ ist für eine abschließende Beurteilung der Meßqualität zwar noch nicht ausreichend, doch zeigen insbesondere die Ergebnisse an dem homogenen und isotropen Laborstandard, sowie die Messungen mit der kleinen Nadelsonde ([Kap. 3.3.1.3](#)), daß inzwischen auch für kleine Probenabmessungen Nadelsonden- und Halbraumlinienquellenmessungen zur Wärmeleitfähigkeitsbestimmung mit großer Zuverlässigkeit durchgeführt werden können.

3.5 Genauigkeit der Wärmeleitfähigkeitsbestimmungen

Die Beispiele zu den Auswertungen synthetischer Daten ([Kap. 3.2](#)) und verschiedener Meßkonfigurationen zeigen, daß die mit der universellen Approximationsmethode bestimmten Wärmeleitfähigkeitswerte eine Unsicherheit <2% aufweisen. Die Auswertungen von synthetisch verrauschten Aufheizkurven zeigen auch, daß Reproduzierbarkeiten in der Größenordnung von $\pm 1.5\%$ sehr hohe Anforderungen an die Meßtechnik und den Meßablauf stellen: der Rauschpegel der Temperaturmessungen darf $2.5 \cdot 10^{-4}$ K nicht übersteigen (s. [Abb. 3-9](#), [Kap. 3.2.3](#)).

Bei der Berechnung der Wärmeleitfähigkeit nach der [Gleichung 2.20](#)

$$(2-20) \quad \lambda_a = q / (4\pi A_2)$$

setzt sich der relative Fehler des berechneten Wärmeleitfähigkeitswertes aus dem Fehler des Koeffizienten A_2 und dem der Heizleistung pro Längeneinheit zusammen. Letzterer wird vom Hersteller der Apparatur ([TeKa, Berlin](#)) mit $\leq \pm 0,5\%$ bei einer Konstanz $< 0,01\%$ angegeben. Der relative Fehler des Koeffizienten A_2 ist nicht unmittelbar herleitbar, denn er wird durch eine Approximation der Aufheizkurve mit der Methode der kleinsten Quadrate nach der [Gleichung \(2-15\)](#) berechnet. Gemäß den Ausführungen im [Kapitel 3.2.3](#) und den Erfahrungen aus Labormessungen kann er mit $< 1,5\%$ nach oben abgeschätzt werden. Damit ergibt sich eine Genauigkeit von $\pm 2\%$ für den bestimmten Wärmeleitfähigkeitswert. Dies ist in sehr guter Übereinstimmung mit den Meßergebnissen an Standardmaterialien ([Kap. 3.3.1.1.1](#) und [Kap. 3.4.1](#)). Zu beachten ist, daß zur Erzielung dieser Genauigkeit Wert auf äußerst konstante Umgebungsbedingungen gelegt werden muß und die Auswertung jeder einzelnen Messung anhand der Lösungsgesamtheit beurteilt werden sollte.

Eine Grundvoraussetzung für verlässliche Ergebnisse experimenteller Bestimmungen der Wärmeleitfähigkeit ist natürlich ein geeignetes Meßsystem und ungestörte Temperaturverhältnisse am Ort der Messungen. Auch bei einem hochentwickeltem Meßgerät wie dem Gerät TK-04 muß darauf geachtet werden, daß sich Probenkörper und Meßsonden in einem thermischen Gleichgewicht befinden und dieses während der Meßserien nicht durch äußere Einflüsse (Sonneneinstrahlung, Zugluft, Beleuchtung, Heiz- und Kühlsysteme) gestört wird. Dies kann z.B. durch eine Unterbringung der Meßkonfiguration in einer Meßkammer gewährleistet werden.

Damit Einflüsse zwischen Einzelmessungen einer Meßserie möglichst ausgeschlossen sind, bietet die verwendete Meßapparatur zudem die Möglichkeit, wählbare Zeitabstände (> 10 min !) zwischen den Einzelmessungen vorzugeben. Generell wird vor jeder einzelnen Messung in einem Zeitfenster von 30 s überprüft, wie groß die zeitliche Änderung der Quelltemperatur (Drift) ist und ob eine ebenfalls wählbare, zulässige Grenze für diesen Parameter unterschritten wird. Erst nach Unterschreiten dieser Grenze und nach einer zusätzlichen Überprüfung des Rauschens während der Drift, wird die Messung gestartet. Nach der Messung wird die zuvor ermittelte Drift rechnerisch in den Zeitbereich der Messung extrapoliert und die Meßwerte der Aufheizkurve werden diesbezüglich korrigiert. Damit bietet auch die Driftkontrolle eine Möglichkeit, den Ablauf der Messungen steuern: je kleiner der zulässige Driftwert ist, desto größer ist der zeitliche Abstand zwischen den einzelnen Messungen einer Serie. Für sehr hohe Anforderungen können die Einstellungen natürlich auch kombiniert werden: Pausenvorgabe zwischen den Messungen bei Vorgabe eines kleinen Driftwertes.

Trotz sorgfältiger Versuchsdurchführung kann es unter Umständen zu einzelnen Fehlmessungen kommen (s. [Abb. 3-19](#)), deren Ursachen nicht eindeutig verifizierbar sind. Da diese Fehlmessungen anhand der aufbereiteten Auswertergebnisse jedoch erkannt werden können, beeinträchtigen sie die Genauigkeit der Meß- und Auswertemethode nicht.

4 Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit bei bekannter Wärmeleitfähigkeit

Die Temperaturleitfähigkeit κ ist ein Maß für die Geschwindigkeit, mit der sich eine Temperaturänderung in einem Gestein ausbreitet. Sie muß für die Modellierung zeitlich veränderlicher Temperaturverteilungen bekannt sein. κ ist über die Wärmeleitungsgleichung definiert:

$$(4-1) \quad \kappa \operatorname{div} \operatorname{grad} T = \frac{\delta T}{\delta t}$$

Bei bekannter Wärmeleitfähigkeit λ kann die Temperaturleitfähigkeit κ eines Materials über die Debye-Gleichung bestimmt werden:

$$(4-2) \quad \kappa = \frac{\lambda}{\rho c}$$

mit: ρ : Dichte
 c : spezifische Wärme

Die Dichte läßt sich experimentell einfach und mit sehr hoher Genauigkeit bestimmen. Messungen der spezifischen Wärmekapazität erfordern jedoch einen sehr hohen apparativen Aufwand.

Experimentell läßt sich die Temperaturleitfähigkeit auch aus Aufheizkurven bestimmen. In den meisten Fällen ist hierzu jedoch eine aufwendige Probenpräparation notwendig: es müssen neben einem Heizelement zusätzlich Temperatursensoren an bzw. in der Probe angebracht werden. [Dixon et al. \(1988\)](#) beschreiben eine Vorgehensweise, bei dem eine zylindrische Gesteinsprobe an einem Ende puls förmig aufgeheizt wird. Der resultierende Temperaturanstieg innerhalb der Probe wird an drei Positionen im Abstand von jeweils 5 mm gemessen und daraus anschließend die Temperaturleitfähigkeit berechnet. [Middleton \(1993\)](#) verwendet ebenfalls ein flächenhaftes Heizelement an der Oberfläche einer Probe, welches diese mit konstanter Heizleistung erwärmt. Bei den Versuchen sind die anderen Oberflächen thermisch isoliert und die Temperaturänderung in der Probe wird mit einer Nadelsonde gemessen. Die Temperaturleitfähigkeit wird aus diesen Werten unter der Annahme eines eindimensionalen Wärmeflusses bestimmt. Für unverfestigte Proben benutzte [Drury \(1988\)](#) eine Anordnung von 2 Nadelsonden im Abstand von 13 mm, von denen eine konstant geheizt wird, um die thermischen Parameter der Proben zu bestimm-

men. Bei [Seipold \(1988\)](#) befindet sich ein Heizdraht in der Achse einer zylindrischen Probe und die Ausbreitung eines Heizpulses endlicher Länge wird mit einem Thermoelement gemessen, das in einem zur Achse parallelem Schlitz mit definiertem Abstand untergebracht ist. Bei allen Verfahren zur Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit geht der Abstand zwischen Heizquelle und Temperatursensor in die Bestimmungsgleichungen ein und muß deshalb sehr genau bekannt sein, woraus ein sehr hoher Aufwand an Probenpräparation resultiert.

[Kristiansen \(1982, 1991\)](#) beschreibt ein Inversionsverfahren, bei dem Wärme- und Temperaturleitfähigkeit einer Probe aus Aufheizkurven einer konstant geheizten Nadelsonde bestimmt werden können. Für die Auswertungen müssen zusätzlich Angaben zur spezifischen Wärmekapazität der Quelle und zum Kontaktwiderstand gemacht, bzw. diese durch Eichmessungen an Proben bekannter Wärme- und Temperaturleitfähigkeit bestimmt werden. Die von [Kristiansen 1991](#) veröffentlichten Programme konvergieren bei der Anwendung auf reale Meßdaten jedoch nicht, bzw. sind die Inversionsergebnisse in keiner Weise zufriedenstellend. Mehrere Versuche, das Programmpaket auf Meßdaten anzuwenden, wurden in der Vergangenheit jeweils erfolglos abgebrochen (pers. Mitteilung, Pribnow, 2001).

Der Programmteil, der von [Kristiansen \(1991\)](#) zur Vorwärtsmodellierung benutzt wurde, erzeugt hingegen Temperaturdaten, deren Auswertung mit der universellen Approximationsmethode hervorragende Ergebnisse liefert. Deshalb werden im folgenden Betrachtungen angestellt, wie die aus den Auswertungen mit TKSAM bekannte Wärmeleitfähigkeit genutzt werden kann, um auch die Temperaturleitfähigkeit des Probenkörpers zu bestimmen.

4.1 Mittelung der Aufheizkurven, Normierungen

Für eine Modellierung mit dem Programm NEPR-F sind neben der Wärme- und Temperaturleitfähigkeit der Probe als zusätzliche Parameter die spezifische Wärmekapazität der Quelle und der Kontaktwiderstand zwischen Quelle und Gestein anzugeben. Letztgenannte Parameter können für jede Sonde durch eine iterative Anpassung an gemessene Aufheizkurven bestimmt werden, wenn Wärme- und Temperaturleitfähigkeit einer Probe bekannt sind.

Im Zuge der Berechnungen zeigte sich, daß einzelne Messungen einer Meßserie bei ansonsten gleichen äußeren Bedingungen geringfügig andere Anpassungsparameter erforderten, um die Abweichungen zwischen den Meß- und Modellkurven zu minimieren. Damit ergab sich, neben den sehr zeitaufwendigen manuellen Anpassungs-

modellierungen, das Problem, aus der Vielzahl der gefunden Parameterkombinationen für die weiteren Berechnungen eine bestimmte auszuwählen.

Diese Problematik kann umgangen werden, indem für jede Meßserie eine repräsentative Aufheizkurve bestimmt wird, für die dann die weiteren Berechnungen erfolgen. Die Grundidee folgt der [Gleichung \(2-4\)](#), in der die Temperatur T zum Zeitpunkt t direkt mit der Heizleistung der Quelle q verknüpft ist:

$$(2-4) \quad T(t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \ln(t) + C$$

Dividiert man nun die Aufheizkurven jeweils durch die Heizleistung, erhält man eine auf die Heizleistung 1 W/m normierte Aufheizkurve:

$$(4-3) \quad T_{qnorm}(t) = \frac{q_{qnorm}}{4\pi\lambda} \ln(t) + C, \quad q_{norm}=1 \text{ Wm}^{-1}$$

Die mittlere Aufheizkurve einer Meßserie wird dann durch Mittelwertbildung aller Temperaturen für einen Zeitpunkt bestimmt:

$$(4-4) \quad T_M(t_i) = \frac{\sum_{i=1}^n T_{qnorm}(t_i)}{n}$$

mit: n = Anzahl der Meßreihen

i = Anzahl der Meßwerte pro Meßreihe

Damit hat man eine geglättete Aufheizkurve gewonnen, aus der dann wieder die Wärmeleitfähigkeit, unter Verwendung der Heizleistung q_{norm} , berechnet werden kann. Die [Abbildung 4-1](#) zeigt, daß die individuellen Abweichungen aller Aufheizkurven einer Meßserie (Probe: Macor) zur berechneten mittleren Aufheizkurve für alle Zeitpunkte kleiner als $\pm 5 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$ sind.

Daß die Auswertung der mittleren Aufheizkurve mit der universellen Approximationsmethode zu Ergebnissen führt, die mit den Auswertergebnissen der einzelnen Messungen sehr gut übereinstimmen, zeigen die [Abbildungen 4-2](#) und [4-3](#).

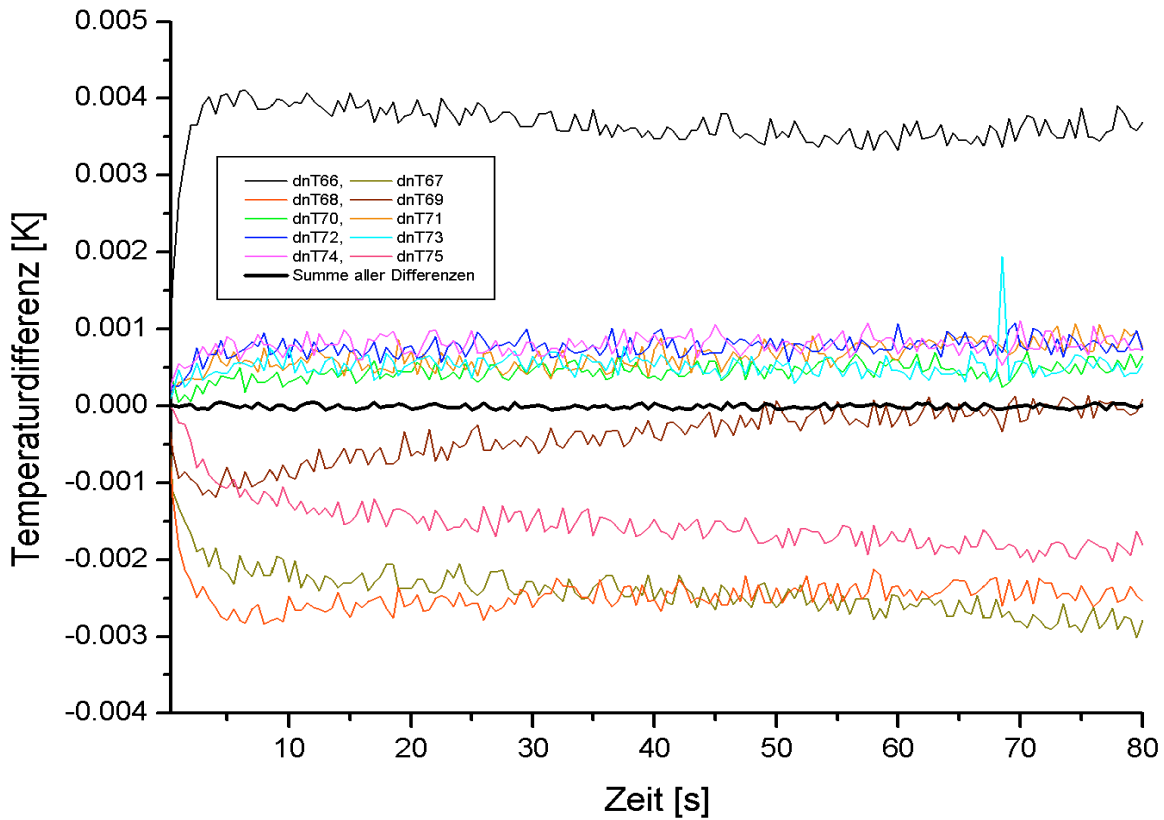


Abb. 4-1: Abweichungen der auf 5 Wm^{-1} normierten Aufheizkurven einer Meßserie an Macor von der berechneten mittleren Aufheizkurve.

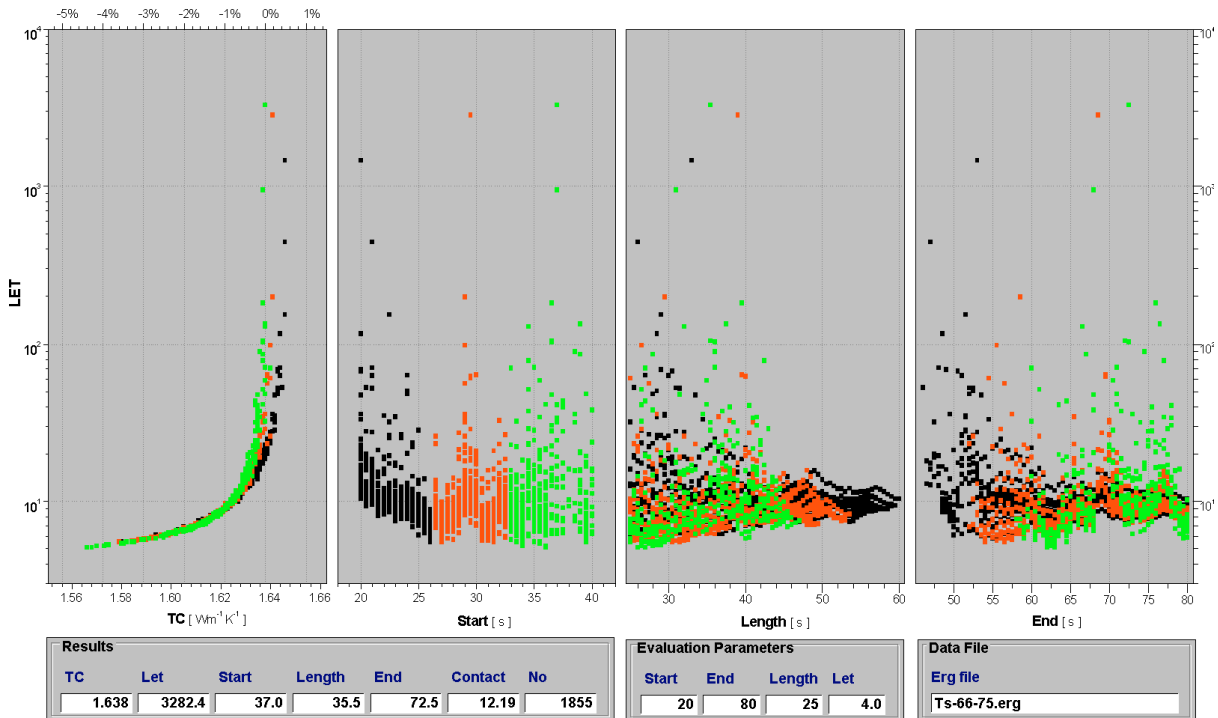


Abb. 4-2: Lösungsgesamtheit der Auswertung der mittleren Aufheizkurve der Meßserie Mcvlq-66 bis Mcvlq-75 an Macor. Der ermittelte Wärmeleitfähigkeitswert entspricht dem des Standards (1.637) fast exakt, die Bandbreite der Lösungsasymptote ist $< 0.5\%$

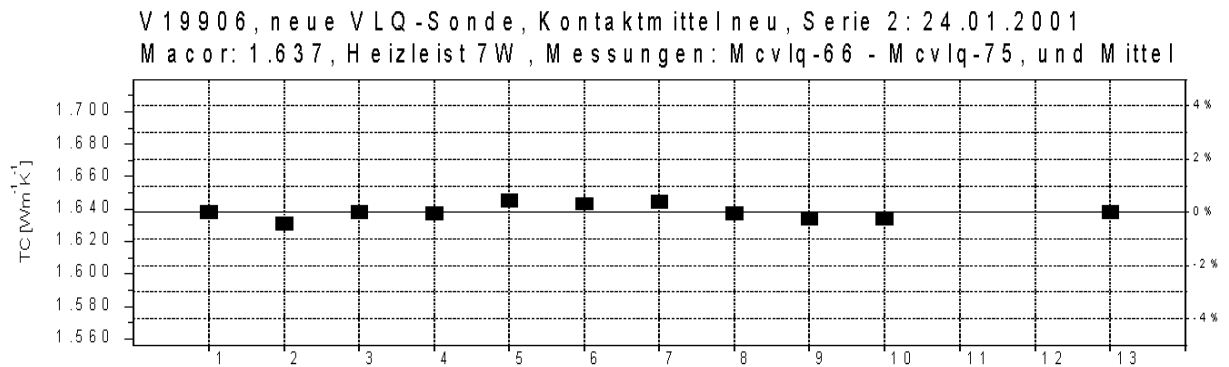


Abb. 4-3: Vergleich der Ergebnisse der Einzelauswertungen mit denen der Auswertung der mittleren Aufheizkurve (ganz rechts). Die Auswertung der mittleren Aufheizkurve gibt den Mittelwert der übrigen Auswertungen am Macor-Standard sehr genau wieder.

Damit ist gezeigt, daß die mittlere Aufheizkurve einer Meßserie die Gesamtheit der einzelnen Messungen sehr gut wiedergibt und die Wärmeleitfähigkeit der Probe ebenso gut aus ihr bestimmt werden kann. Die im folgenden betrachteten Vorwärtsmodellierungen zur Bestimmung der Einflüsse der Temperaturleitfähigkeit auf die Aufheizkurven werden deshalb auf eine mittlere Aufheizkurve bezogen.

4.2 Vorwärtsmodellierungen

Um die für die Modellierungen erforderlichen zusätzlichen Parameter für die Sonde V19906 (spezifische Wärmekapazität der Quelle und Kontaktwiderstand zwischen Quelle und Probe) bestimmen zu können, wurden Messungen in Macor durchgeführt. Die Wärmeleitfähigkeit des Probenkörpers beträgt $1.637 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Dichte ρ und spezifische Wärme c wurden beim GGA-Institut in Hannover an einem Teilstück des Standards bestimmt: $\rho=2.52 \text{ gcm}^{-3} (\pm 1\%)$ und $c=0.797 \text{ kJkg}^{-1}\text{K}^{-1} (\pm 1\%)$ (bei 25°C , Schellschmidt, pers. Mitteilung) und dann die Temperaturleitfähigkeit nach der Gleichung (4-2) berechnet. Daraus ergibt sich ein Wert von $\kappa=0,805 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1} \pm 2\%$ für diesen Macor-Standard.

Die 34 Messungen der Serie McDhyd wurden mit Dehydril als Kontaktmittel durchgeführt. Der Mittelwert der Auswertungen der einzelnen Messungen betrug $1.640 \pm 0.004 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, die Auswertung der mittleren Aufheizkurve lieferte einen Wert von $1.634 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ (s. Abb. 4-4).

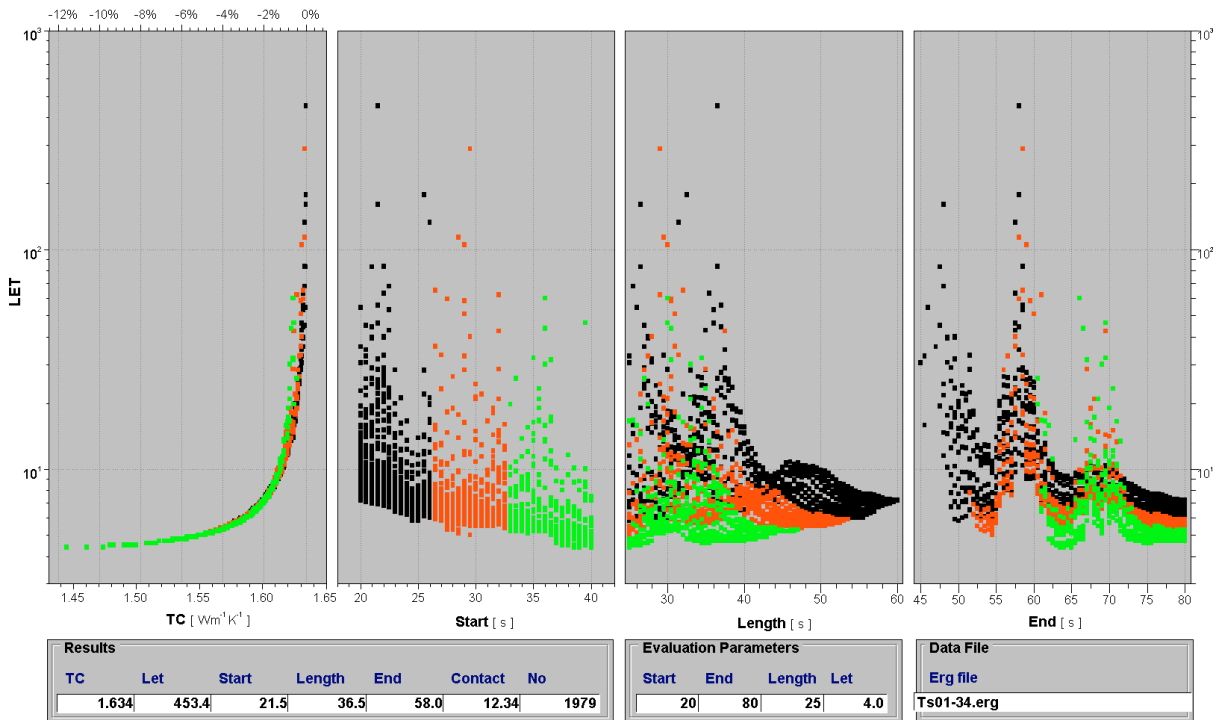


Abb. 4-4: Lösungsgesamtheit der Auswertung der mittleren Aufheizkurve für die Meßserie McDhyd (34 Messungen).

4.2.1 NEPR-F Anpassungen

Nach ca. 10 Anpassungsversuchen durch Vorwärtsmodellierungen mit dem Programm NEPR-F (Anhang D) konnten die in [Abbildung 4-5](#) dargestellten Aufheizkurven als beste Anpassungen ermittelt werden. Als beste Anpassung wurde trotz der geringfügig höheren Standardabweichung zur Bezugskurve das Modell 09 gewählt, weil sich die Differenzen zur mittleren Aufheizkurve in der logarithmischen Darstellung gleichmäßiger auf positive und negative Bereiche verteilen und die Differenzen am Ende der Meßzeit geringer ausfallen als bei der Anpassung mit dem Modell 13. Außerdem zeigt die Verteilung der Differenzen, daß es noch einen systematischen Unterschied zwischen den Kurven gibt. Mit den beiden noch freien Parametern für die Vorwärtsmodellierung läßt sich dieses Problem jedoch nicht lösen. Eine Erklärung des Phänomens könnte in Parametern der Quelle liegen: aufgrund ihres Aufbaus ([Abb. 2-6 b](#)) weicht sie sicherlich stark von einem perfekten radialsymmetrischen Modell ab. Der innere Aufbau der Quelle könnte auch die starken Abweichungen in den ersten 2 Sekunden hervorrufen. Eine Möglichkeit, dies zu verifizieren, würden u.U. detaillierte dreidimensionale numerische Modellrechnungen unter Berücksichtigung des inneren Aufbaus der Quelle bieten, was aber den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde.

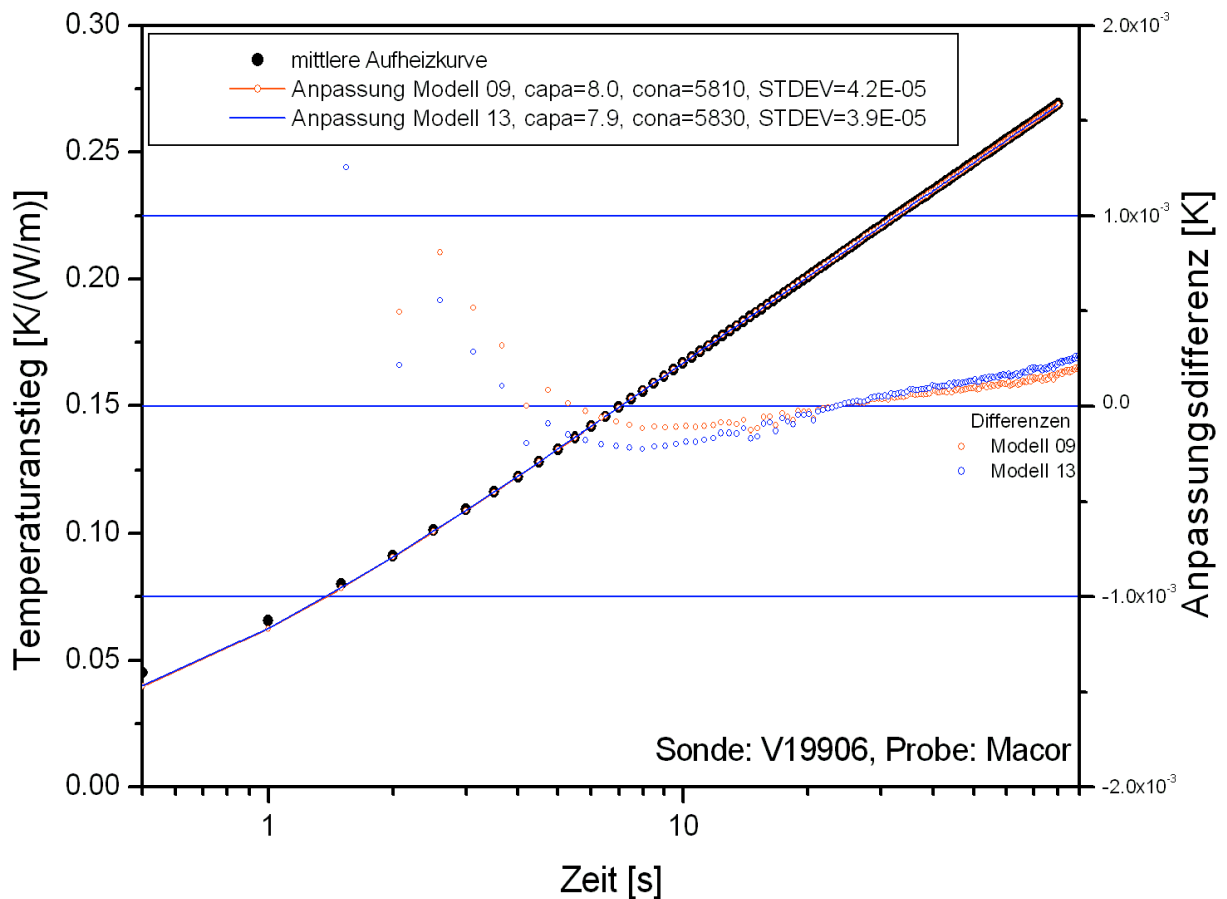


Abb. 4-5: NEPR-F Anpassungen an die mittlere Aufheizkurve der Meßserie McDhyd zur Bestimmung der Parameter *capa* (Wärmekapazität/Längeneinheit) und *cona* (Oberflächenleitfähigkeit/Längeneinheit) der Quelle. Die beiden besten Anpassungen sind sowohl in ihren Standardabweichungen zur Bezugskurve als auch in den bestimmten Parametern kaum zu unterscheiden.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die mittlere Aufheizkurve (mit den vorgenannten Einschränkungen) gut durch eine Vorwärtsmodellierung anpassen lässt. Die Parameter **capa**: Wärmekapazität der Quelle/Längeneinheit und **cona**: Oberflächenleitfähigkeit/Längeneinheit können dadurch bei Messungen an Eichproben auf ca. 3% genau bestimmt werden.

In einem nächsten Schritt wurde untersucht, welche Auswirkungen eine Änderung der Temperaturleitfähigkeit um $\pm 5\%$ in den Modellierungen hat. Die Differenzen der resultierenden Aufheizkurven zum Ausgangsmodell (Modell 09) sind in der [Abbildung 4-6](#) dargestellt.

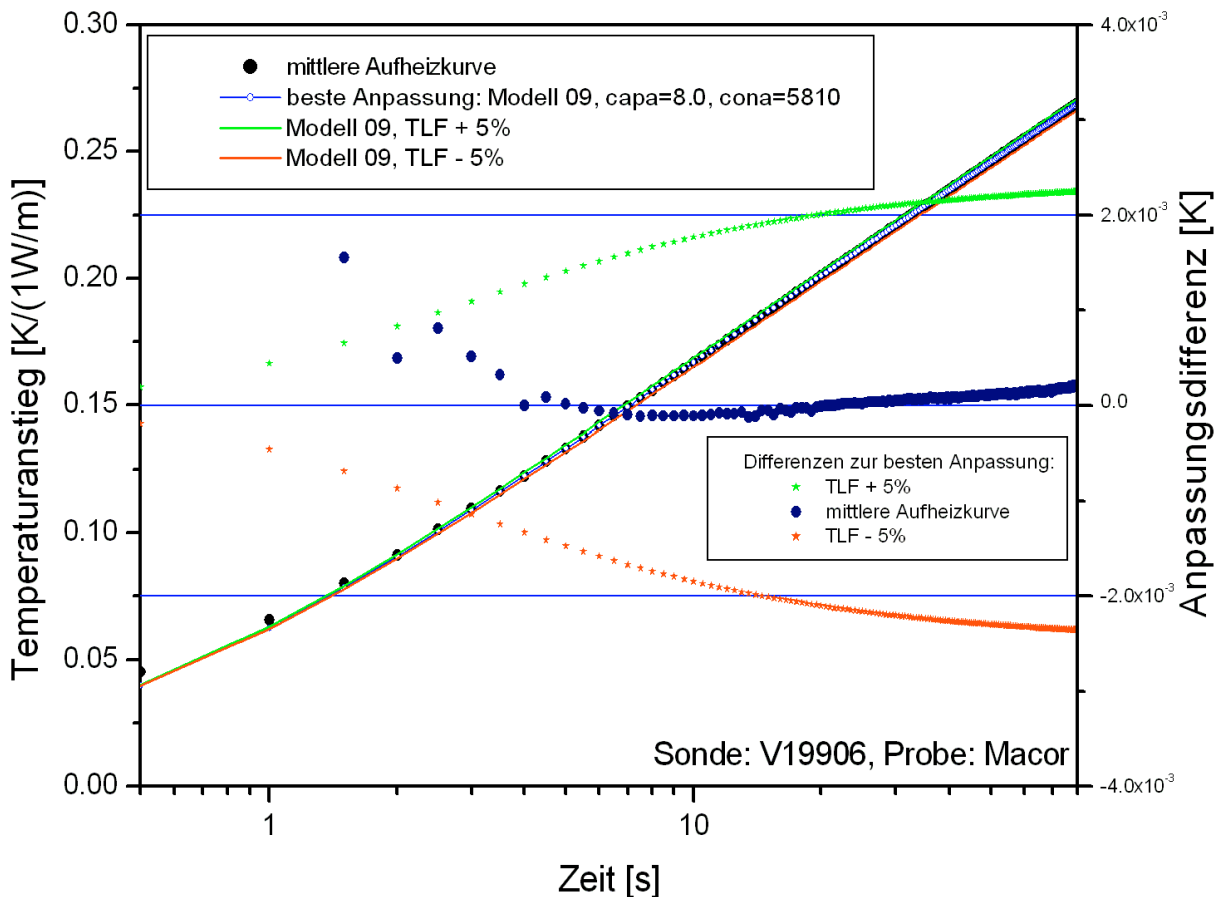


Abb. 4-6: Einfluß der Änderung der Temperaturleitfähigkeit um $\pm 5\%$ auf den Verlauf der Aufheizkurven. In der Differenzendarstellung zur besten Anpassung wird deutlich, daß eine Änderung in dieser Größenordnung sehr deutlich vom Verlauf der mittleren Aufheizkurve unterschieden werden kann.

Die Abbildung macht deutlich, daß eine Änderung der Temperaturleitfähigkeit um $\pm 5\%$ sehr deutlich in den Aufheizkurven und den Differenzen zu erkennen ist. Wenn die Untersuchungen an der mittleren Aufheizkurve einer Meßserie vorgenommen werden, kommt dem Rauschpegel der Einzelmessungen (der ohnehin sehr klein ist, s. [Abb. 3-9](#), [Abb. 4-1](#)) keine wesentliche Bedeutung zu.

Da, wie in [Kapitel 3.2](#) gezeigt, die Wärmeleitfähigkeit mit der universellen Approximationsmethode trotz großer Änderungen der Temperaturleitfähigkeitswerte, sehr genau bestimmt werden kann, lassen sich die Vorwärtsmodellierungen zur Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit nutzen:

Die durch Messungen an einem Standardmaterial gewonnenen quellspezifischen Parameter (capa, cona,) werden als Basis für die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von anderen Proben genutzt. Dafür wird die Wärmeleitfähigkeit einer Probe durch Vollraumnadelsondenmessungen und Auswertungen der Einzelmessungen und der mittleren Aufheizkurve mit der speziellen Approximationsmethode ermittelt. Die mittlere Aufheizkurve wird sodann mit dem Programm NEPR-F mit den freien

Parametern Temperaturleitfähigkeit und Oberflächenleitfähigkeit/Längeneinheit (co-na) modelliert. Letzterer Parameter muß variiert werden da er zusätzlich jeweils den Kontakt zwischen Sonde und Probe beschreibt. Zur Kontrolle wird anschließend die angepaßte Aufheizkurve wieder mit TKSAM ausgewertet. Dabei muß sich die gleiche Wärmeleitfähigkeit ergeben wie für die zuvor für die mittlere Aufheizkurve bestimmte. Die so skizzierte Vorgehensweise wird im folgenden am Beispiel einer Meßserie in Töpferton demonstriert.

4.2.2 Temperaturleitfähigkeitsbestimmung: Messungen in Ton

Die Vorgehensweise wird für die Sonde V19906 am Beispiel von Messungen in Ton demonstriert, da bei diesen Messungen eine hervorragende Ankopplung der Nadelsonde an das Probenmaterial gegeben ist: es gibt keinen zusätzlichen Ringraum zwischen Nadelsonde und Probe und es kann davon ausgegangen werden, daß der Kontakt zwischen Sonde und Probe auf der gesamten Sondenlänge annähernd gleich ist. Die [Abbildung 4-7](#) zeigt die hervorragenden Ergebnisse der Messungen in einem Block Töpferton (s. a. [Kap. 3.3.1.1.2](#)). Der Mittelwert der Messungen beträgt $1.692 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, die Einzelergebnisse streuen nur um ca. 0.1 % und die Auswertung der mittleren Aufheizkurve ergibt mit $1.691 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ einen mit dem Mittelwert der Einzelmessungen übereinstimmenden Wärmeleitfähigkeitswert.

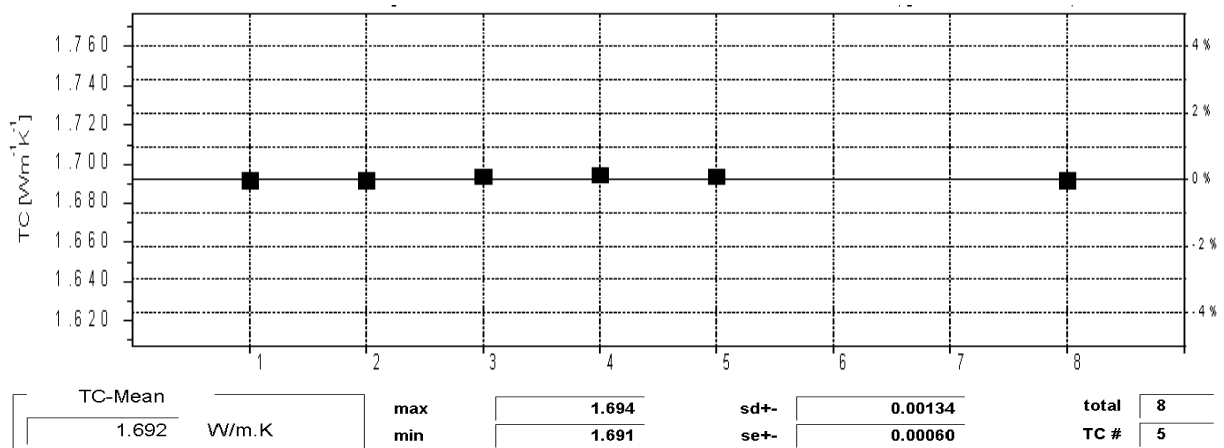


Abb. 4-7: Darstellung der Ergebnisse der Messungen in Töpferton. Die Auswertung der mittleren Aufheizkurve (ganz rechts) ergibt eine Wärmeleitfähigkeit von $1.691 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ und repräsentiert damit die Gesamtheit der Messungen sehr gut (s. auch [Abb. 4-8](#)).

Auch die Analyse der Lösungsgesamtheit für die Auswertung der mittleren Aufheizkurve ([Abb. 4-8](#)) zeigt sehr schön das asymptotische Verhalten, welches für einen sinnvollen Wärmeleitfähigkeitswert gefordert wird.

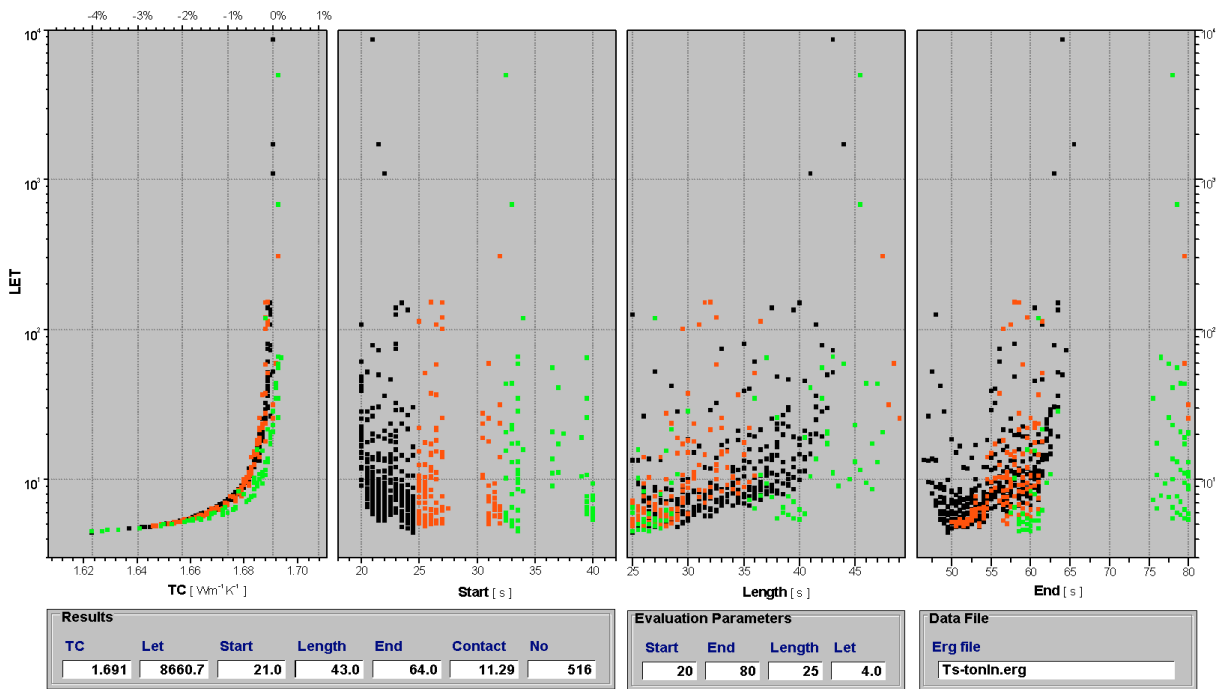


Abb. 4-8: Lösungsgesamtheit der Auswertung der mittleren Aufheizkurve der Meßserie an Töpferton (s. Abb. 4-7). Der ermittelte Wert von $1.691 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ist als sehr verlässlich einzustufen.

Mit der so ermittelten Wärmeleitfähigkeit und den zuvor (Kap. 4.2.1) bestimmten Parametern Wärmekapazität der Nadelsonde/Längeneinheit von $8.0 \text{ Jm}^{-1}\text{K}^{-1}$ und einer Oberflächenleitfähigkeit/Längeneinheit von $5810 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ wurden anschließend Modellrechnungen mit dem Programm NEPR-F durchgeführt. Einzige freie Variable für die Rechenläufe war die Temperaturleitfähigkeit des Probenmaterials.

Die Abbildung 4-9 zeigt die gute Übereinstimmung zwischen mittlerer Aufheizkurve und der numerischen Modellierung nach 5 manuellen Anpassungsversuchen.

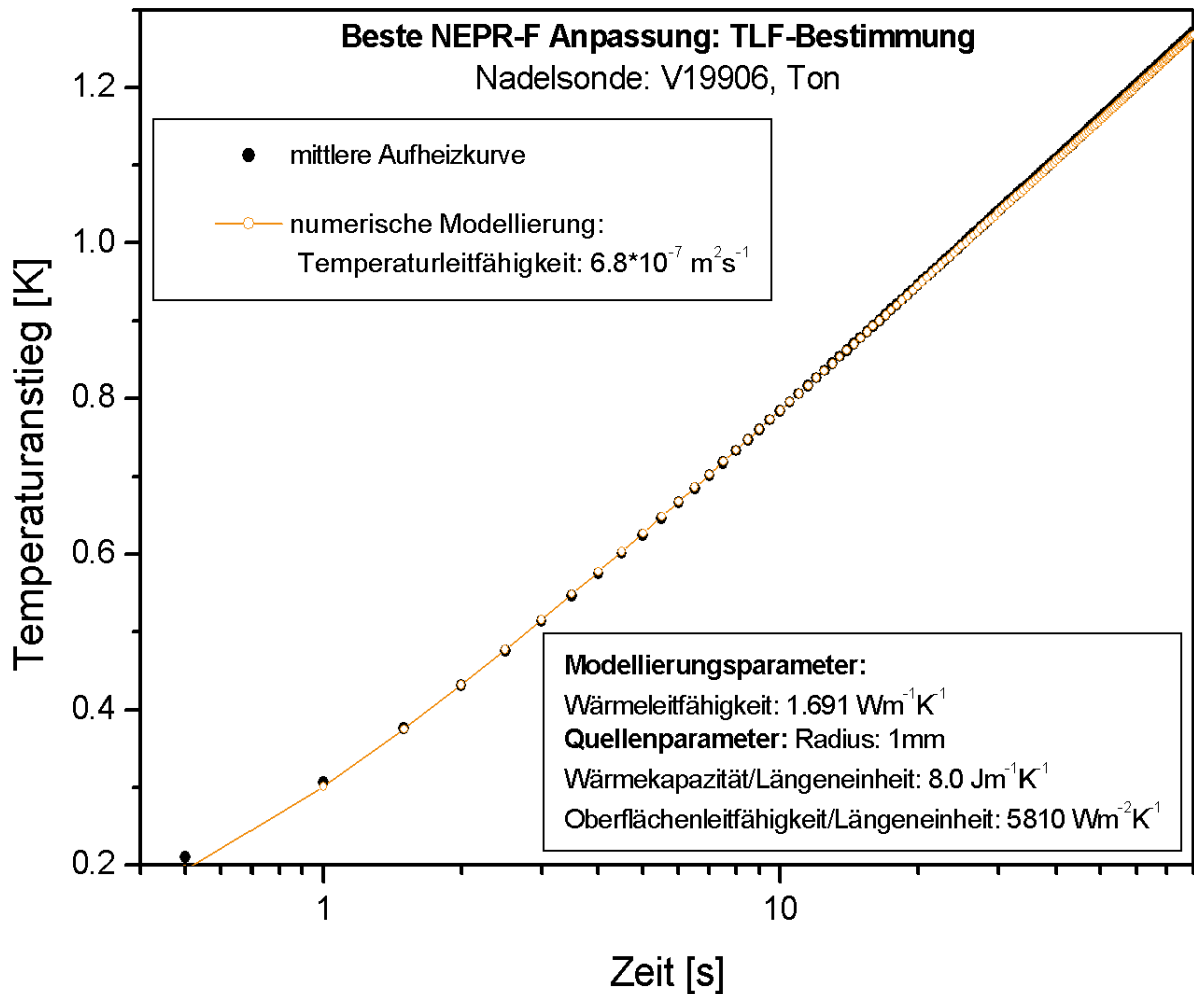


Abb. 4-9: Anpassung der mittleren Aufheizkurve einer Meßserie an Töpferton mit dem Programm NEPR-F. Einziger freier Parameter bei der Anpassung war die Temperaturleitfähigkeit. Die Standardabweichung zwischen Meßdaten und numerischen Daten beträgt $2.08 \cdot 10^{-4} \text{ °C}$. Die Differenzen der Anpassung zu mittleren Aufheizkurve sind für Meßzeiten $> 1\text{s}$ jeweils kleiner als $3 \cdot 10^{-3} \text{ °C}$ (s. Abb. 4-11)

Trotz der systematischen Abweichungen zur mittleren Aufheizkurve (s. Abb. 4-11) ist die Anpassung als gut zu bewerten. Die anschließende Auswertung der numerisch berechneten Aufheizkurve ergab eine Wärmeleitfähigkeit von $1.691 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ mit sehr schön ausgeprägtem asymptotischen Verhalten der Lösungsgesamtheit (Abb. 4-10).

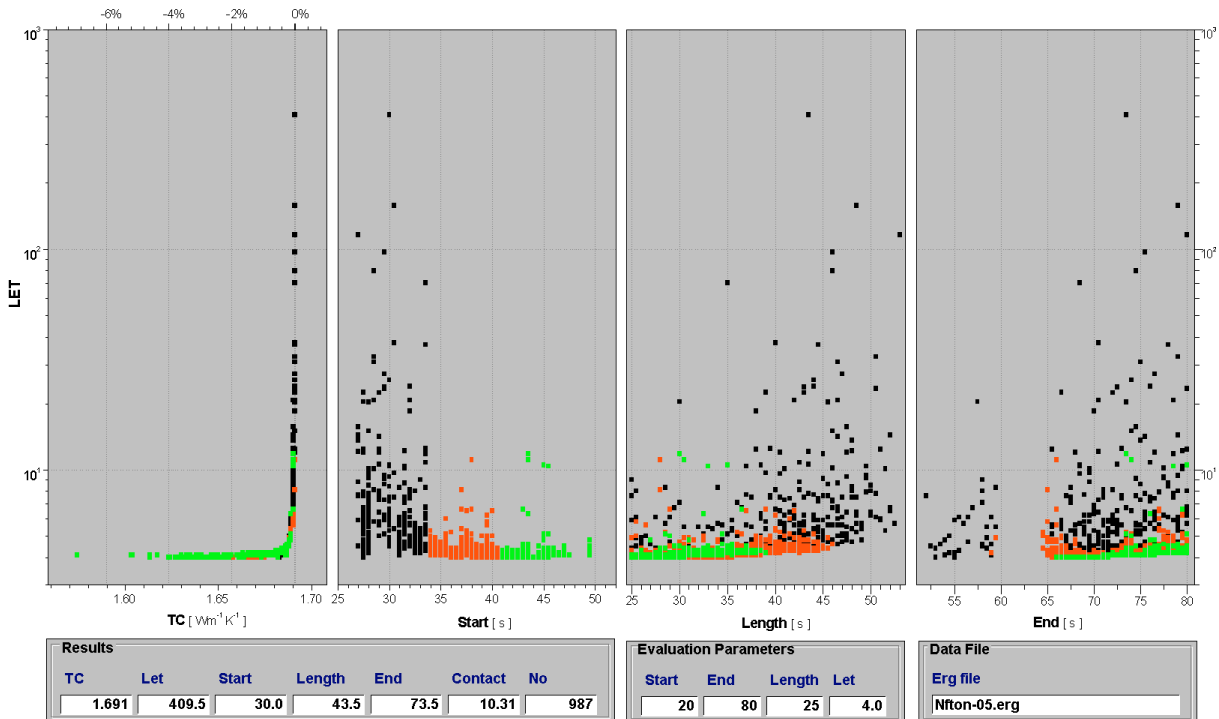


Abb. 4-10: Lösungsgesamtheit der Auswertung der numerischen Aufheizkurve aus der [Abb. 4-9](#). Der ermittelte Wert von $1.691 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ entspricht dem Vorgabewert für die Modellierung und ist als sehr verlässlich einzustufen: er gibt das asymptotische Verhalten der Lösungsgesamtheit sehr gut wieder.

Um den Einfluß der Modellierungsparameter auf das Ergebnis zu untersuchen, wurden in den nächsten Schritten die Eingangsgrößen Temperaturleitfähigkeit und cona (Oberflächenleitfähigkeit/Längeneinheit) um jeweils $\pm 5\%$ gegenüber der ermittelten besten Anpassung variiert. Wie die [Abbildung 4-11](#) zeigt, befindet sich die mittlere Aufheizkurve innerhalb des so aufgespannten Bereiches. Eine Änderung der vorgeannten Parameter um 5% könnte also direkt im Unterschied zur mittleren Aufheizkurve erkannt werden. Die noch vorhandenen systematischen Differenzen lassen sich aus den weiter oben genannten Gründen mit den für die Modellierung verfügbaren freien Parametern nicht weiter minimieren.

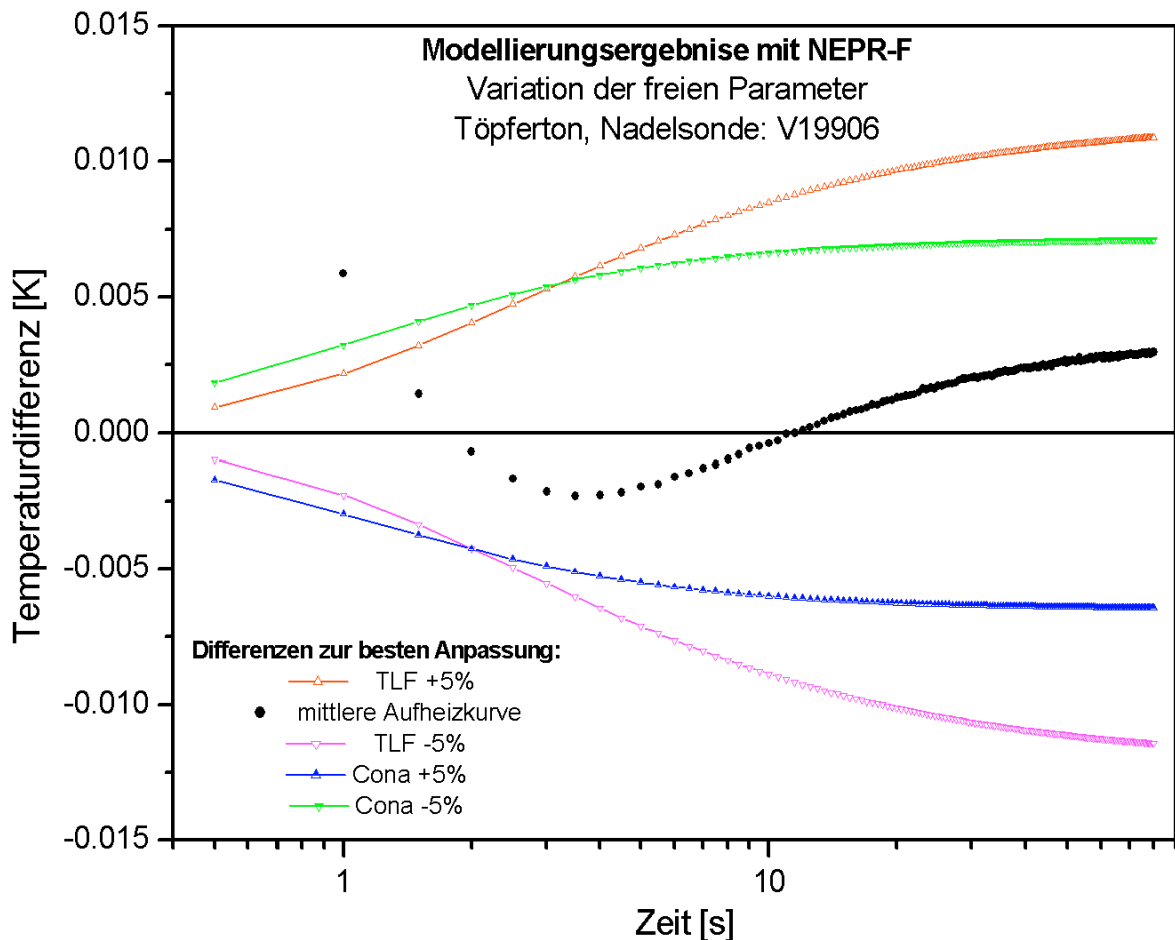


Abb. 4-11: Variationen der Berechnungsparameter Temperaturleitfähigkeit und Oberflächenleitfähigkeit/Längeneinheit für die Anpassung der Meßserie in Ton um jeweils $\pm 5\%$ zeigen, daß sich die ermittelte Temperaturleitfähigkeit auf ca. 5% genau angeben läßt.

Die ermittelte Temperaturleitfähigkeit von $6.8 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ stimmt gut mit Literaturwerten überein: Middleton (1993) gibt für einen Ton (Blina Shale, Canning Basin, Australien) eine Temperaturleitfähigkeit von $6.0 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ($\lambda = 1.34 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\rho = 2.55 \text{ g/cm}^3$) und für einen Tonstein (Dingo Claystone, Carnavon Basin, Australien) eine Temperaturleitfähigkeit von $8.2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ($\lambda = 1.88 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\rho = 2.50 \text{ g/cm}^3$) an.

Damit kann die beschriebene Vorgehensweise zur Temperaturleitfähigkeitsbestimmung als erfolversprechend angesehen werden.

4.3 Einflußgrößen bei der Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit

Bei der Untersuchung von Messungen mit verschiedenen Nadelsonden am gleichen Probenmaterial ergaben sich erhebliche Unterschiede in den Möglichkeiten und Genauigkeiten, die Meßkurven durch numerische Modellierungen anzupassen. Besonders deutlich wurden diese Unterschiede, als versucht wurde, die Parameter für Wärmekapazität und Oberflächenleitfähigkeit für 2 verschiedene Nadelsonden durch

Anpassungen an Messungen in Macor zu bestimmen: während bei der einen Nadelsonde dies schon nach wenigen Anpassungsversuchen gelang, ließen sich die Messungen der anderen Nadelsonde mit den verfügbaren Parametern nur sehr ungenügend anpassen.

[Abbildung 4-12](#) zeigt mittlere Aufheizkurven der beiden Nadelsonden V19906 und V19602 an Macor Blöcken vergleichbarer Wärme- und Temperaturleitfähigkeiten, das Ergebnis der besten Anpassungen mit dem Programm NEPR-F und Ergebnisse von Parametervariationen. Deutlich ist zu erkennen, daß bei der Sonde V19906 Variationen in den freien Parametern capa (Wärmeleitfähigkeit/Längeneinheit) und cona (Oberflächenleitfähigkeit/Längeneinheit) um $\pm 5\%$ kaum einen erkennbaren Einfluß auf die Güte der Anpassungen haben: alle Kurven fallen in der gewählten Skalierung nahezu aufeinander. Ganz anders ist die Situation bei Anpassungen der Messungen mit der Nadelsonde V19602: relative Änderungen der gleichen Größenordnung wirken sich deutlich aus, die Kurven sind signifikant unterschiedlich.

Die [Abbildung 4-12](#) zeigt auch, daß den Anpassungen durch Vorwärtsmodellierungen mit dem Programm NEPR-F bei der Nadelsonde V19602 deutliche Grenzen gesetzt sind: mit den zur Verfügung stehenden freien Parametern kann der Anfangsbereich der Aufheizkurve prinzipiell nicht besser angepaßt werden. Physikalisch bedeutet dies, daß die reale Quelle aufgrund ihres Innenaufbaus deutlich von der idealisierten Zylinderquelle mit Kontaktschicht abweicht.

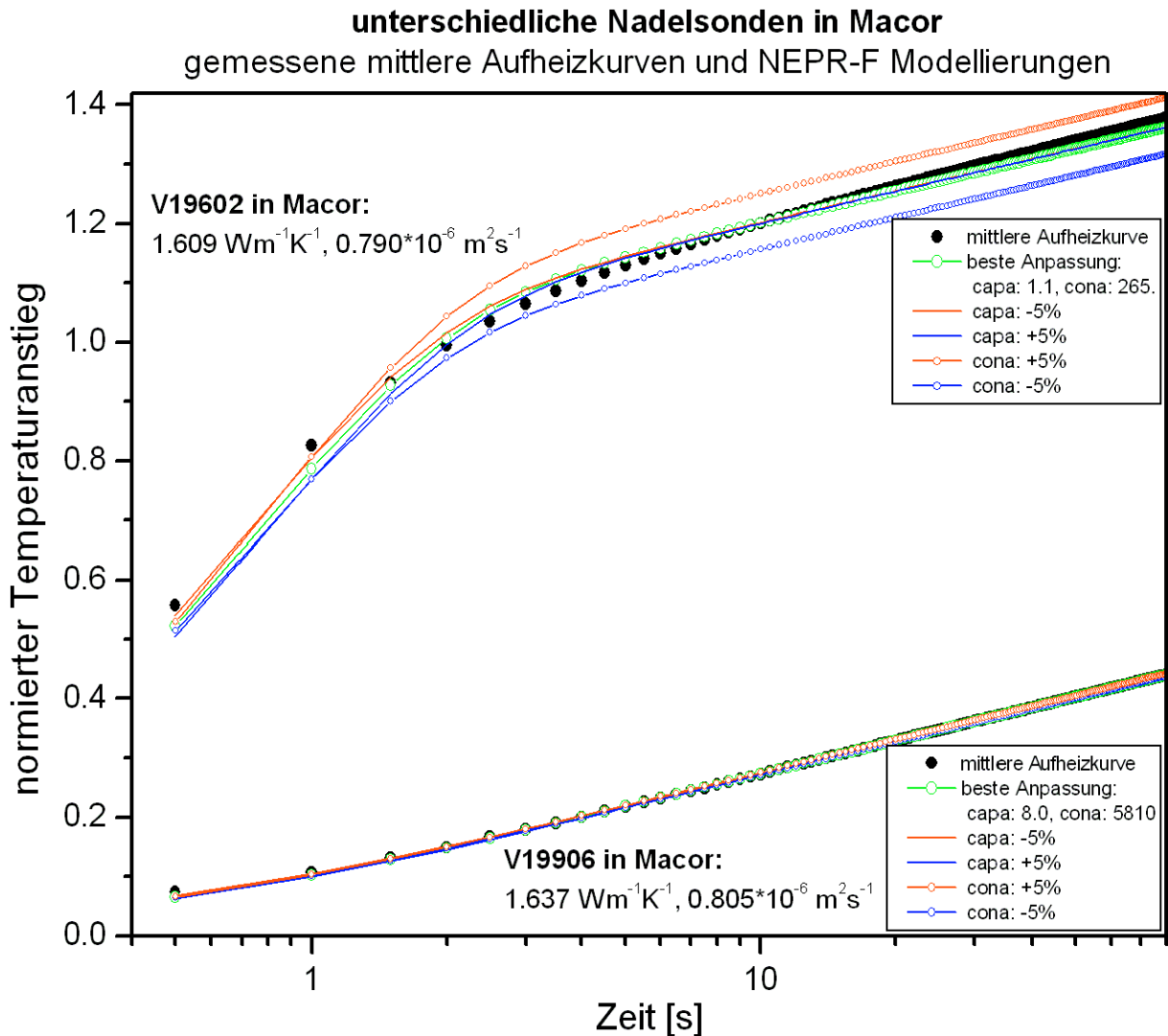


Abb. 4-12: Aufheizkurven der Nadelsonden V19602 (oben) und V19906 (unten) in Macor vergleichbarer Wärme- und Temperaturleitfähigkeit. Die für die Modellierungen notwendigen Parameter capa und cona (s. Erläuterungen im Text) lassen sich für die Nadelsonde V19602 nicht mit der erforderlichen Genauigkeit bestimmen. Für den direkten Vergleich wurden alle Temperaturwerte bzgl. Heizleistung und Wärmeleitfähigkeit normiert.

Dies macht auch eine Betrachtung der Quellparameter deutlich. Insbesondere fällt auf (Abb. 4-12), daß sich die Werte für den Parameter cona zwischen den Sonden um den Faktor 20 unterscheiden. In diesem Parameter ist mehr noch als in der geringeren Wärmekapazität (ausgedrückt durch den Parameter capa: Wärmekapazität/Längeneinheit) der Grund für den starken Temperaturanstieg im Anfangsbereich zu sehen: die geringe Oberflächenleitfähigkeit führt zu einem Temperaturstau in der Quelle. Da die Meßbedingungen in den Probenkörpern nahezu identisch waren, spiegelt dieser Parameter auch den inneren Aufbau der Quelle wider. Er kann nachträglich nicht mehr verändert werden.

Die neueren Nadelsonden, zu denen auch die Sonde V19906 gehört, haben einen gegenüber den älteren Versionen wesentlich geänderten Innenaufbau (pers. Mitteilung, Dr. Honarmand, Fa. Teka Berlin, 2001): die in dem Keramikröhrchen (s. [Abb. 2-6](#)) verbliebenen freien Kanäle wurden mit Kupferdraht aufgefüllt. Dies erklärt die höhere Wärmekapazität der Sonden. Zusätzlich wird bei der Herstellung darauf geachtet, daß möglichst keine luftgefüllten Hohlräume in der Quelle verbleiben. Durch diese Maßnahme werden die quelleninternen Kontakwiderstände soweit minimiert, daß daraus eine hohe Oberflächenleitfähigkeit/Längeneinheit (cona) resultiert.

Für zukünftige Modellierungen zur Temperaturleitfähigkeitsbestimmung müssen aufgrund dieser Erfahrungen folgende Schlüsse gezogen werden:

- der Innenaufbau der Quelle hat einen entscheidenden Einfluß
- eine idealisierte Zylinderquellenmodellierung mit Kontaktschicht wird nur für „fast ideale“ Quellen erfolgversprechend sein
- Modellierungen, die den Innenaufbau der Quelle mit berücksichtigen können, sind als Alternative in Betracht zu ziehen

Für letzteren Punkt scheint das Programm TFELD durchaus geeignet: eine Modellierung der Quelle durch zylindrische Schichten ist damit möglich (s. [Abb. 3-5](#)). Allerdings stehen bisher noch eingehende Untersuchungen zu den Rechengenauigkeiten mit diesem Programm bei der Modellierung sehr dünner zylindrischer Schichten aus. Gegenüber einem Inversionsprogramm hätte TFELD den Nachteil, daß die iterative Anpassung von Modellparametern voraussichtlich sehr viel aufwendiger programmiert werden muß. Die hohe Rechengeschwindigkeit könnte diesen Nachteil jedoch aufwiegen: diese ist für TFELD ca. 100 mal schneller als die von NEPR-F.

5 Schlußfolgerungen und Ausblick

Die vorgestellten Beispiele der Auswertungen von synthetischen Daten und Meßdaten zeigen, daß der entwickelte Auswertalgorithmus bei gleichzeitiger Berücksichtigung der für eine Beurteilung der Einzelmessungen zur Verfügung gestellten Bewertungsparameter (LET, Anzahl der Lösungen, Verteilung der gefundenen Lösungen) eine sehr genaue Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Proben ermöglicht. Bei sorgfältiger Versuchsdurchführung unter Laborbedingungen können an homogenen und isotropen Materialien Reproduzierbarkeiten der Wärmeleitfähigkeitswerte <2% erreicht werden. Damit stoßen die Messungen in den Bereich vor, der z.B. von der PTB (Physikalisch Technische Bundesanstalt) als Vertrauensgrenze ($\pm 1\%$) für die dort vermessenen Proben (z.B. Laborstandard Macor mit $1.609 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) angegeben wird.

Wie die aufgeführten Beispiele zeigten, ist die Methode sowohl auf Messungen mit zylindrischen Quellen im Vollraum als auch auf Halbraumlinienquellenmessungen anwendbar. Der Einsatzbereich reicht von Messungen im cm Bereich bei Meßzeiten < 100 Sekunden bis hin zu in situ Messungen der Wärmeleitfähigkeit in Bohrungen (Meßzeiten ≈ 10 Stunden, Quellenlängen von mehreren m). Da Routinemessungen mit in situ Wärmeleitfähigkeitssonden nach den vorgestellten Prinzipien ([Honarmand, 1993](#)) bisher noch nicht realisiert worden sind (es fehlt eine kommerziell verfügbare Sonde), dominieren zur Zeit noch die Erfahrungen mit Laborsonden.

Aufgrund der hohen Genauigkeiten der ermittelten Wärmeleitfähigkeitswerte wurde in dieser Arbeit untersucht, ob diese Tatsache genutzt werden kann, um auch die Temperaturleitfähigkeit des Probenmaterials aus den Vollraummessungen zu bestimmen. Eine numerische Anpassung gemessener Aufheizkurven zeigt, daß die zu verwendenden Nadelsonden hohen Qualitätsansprüchen genügen müssen, um dieses Ziel zu erreichen. Der innere Aufbau der Sonde muß so gestaltet sein, daß die Isothermie der Quelle gewährleistet ist, bei gleichzeitiger Minimierung von sondeninternen thermischen Kontaktwiderständen. Wie die Messungen mit und die Berechnungen für speziell gefertigte Sonden zeigen, läßt sich dies mit heute verfügbaren Technologien realisieren.

Zur Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit wird eine Vorgehensweise vorgeschlagen, bei der die für eine numerische Anpassung (Programm NEPR-F) der gemessenen

nen Aufheizkurve notwendigen sondenspezifischen Parameter (Wärmekapazität und Oberflächenleitfähigkeit der Sonde) aus Messungen an Standards bekannter Wärme- und Temperaturleitfähigkeit bestimmt werden. Hat man die Wärmeleitfähigkeit einer zu untersuchenden Probe anschließend mit hoher Genauigkeit ermittelt, ist eine numerische Kurvenanpassung mit der gesuchten Temperaturleitfähigkeit als dominierendem Parameter möglich. Zur Kontrolle der Gültigkeit der numerisch berechneten besten Anpassung an die gemessene Aufheizkurve sollte anschließend die vorgestellte Methode zur Wärmeleitfähigkeitsbestimmung mit der speziellen Approximationsmethode genutzt werden: der für die Messungen ermittelte Wert für die Wärmeleitfähigkeit der Probe muß sich auch aus der Auswertung der numerischen Daten ergeben.

Bisher erfolgt die numerische Anpassung der Aufheizkurven manuell. Eine automatische Anpassung der meßtechnisch in kurzer zeitlicher Abfolge (0.5 s) und mit hoher Genauigkeit (Rauschen $\leq 2.5 \cdot 10^{-4} \text{K}$) erfaßbaren Aufheizkurven steht bisher noch aus. Ebenso fehlen bisher noch iterative numerische Anpassungsverfahren, die den inneren Aufbau der Quellen (z.B. unter Annahme radialer Symmetrie) berücksichtigen können.

Die vorgestellten Ergebnisse wurden mit einer Methodik erzielt, die für homogene, isotrope Materialien hergeleitet worden ist. Bei Messungen an Materialien, die diese Eigenschaften nicht aufweisen, müssen die Meßergebnisse sorgfältig auf ihre Aussagekraft überprüft werden, da Richtungsabhängigkeiten der thermischen Parameter, neben optimalen Sonden, guter Probenpräparation und einer verlässlichen Auswertemethode, besondere Strategien (Orientierung der Sonde in mehrere Richtungen, Präparation gerichteter Oberflächen) für die Messungen erfordern. Die in dieser Arbeit erstmalig vorgestellten sehr guten Ergebnisse von Messungen mit sehr kleinen Nadelsonden (\varnothing 1.2 mm, Länge 45 mm) lassen erwarten, daß sich zumindest für die Wärmeleitfähigkeitsmessungen auch weitere Anwendungsfelder erschließen lassen, bei denen nur kleine Proben vorhanden sind. Inwieweit die Messungen mit den kleineren Sonden Verbesserungen bei der Bestimmung von Anisotropie und Inhomogenität der thermischen Parameter an Proben möglich machen, müssen zukünftige Messungen zeigen. Im Routinebetrieb an großen Probenaufkommen werden sie voraussichtlich nicht mit den berührungslosen Verfahren ([Popov et al., 1999](#)) konkurrieren können, bieten aber bei methodischen Untersuchungen zusätzliche Möglichkeiten.

6 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird ein Algorithmus vorgestellt, mit dem die Wärmeleitfähigkeit von Probenmaterialien aus Aufheizkurven konstant geheizter Zylinderquellen mit einer Genauigkeit von $\pm 2\%$ bestimmt werden kann.

Die Methode ist bei gleichbleibender Genauigkeit sowohl auf Messungen mit zylindrischen Quellen im Vollraum als auch an Halbraumoberflächen anwendbar. Der Einsatzbereich reicht dabei von Messungen im cm Bereich bei Meßzeiten <100 Sekunden bis hin zu in situ Messungen der Wärmeleitfähigkeit in Bohrungen (Meßzeiten ≈ 10 Stunden, Quellenlängen von mehreren m).

Es konnte gezeigt werden, daß Messungen mit konstant geheizten Nadelsonden zusätzlich die prinzipielle Möglichkeit der Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit einer Probe ermöglichen. Die zuvor erfolgte möglichst präzise Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit ist hierzu eine notwendige Bedingung, da dadurch die Freiheitsgrade einer iterativen Anpassung der Aufheizkurve eingeschränkt werden. Als variable Parameter bleiben für diesen Fall die gesuchte Temperaturleitfähigkeit und ein Term, der sich aus Kontaktschichtparametern innerhalb der Sonde und solchen am Übergang Sonde-Probe zusammensetzt. Der innere Aufbau der Sonde entscheidet (neben der Ankopplung zur Probe) in jedem Fall darüber, ob der Einfluß der Temperaturleitfähigkeit die Variationen in den Aufheizkurven dominiert. Ist dies der Fall, kann sie zusätzlich zu der Wärmeleitfähigkeit bestimmt werden.

Da Nadelsondenmessungen zur Wärmeleitfähigkeitsbestimmung zu den Standardmeßverfahren an Gesteinen, Lockersedimenten und weiteren Materialien (Baustoffe, Industriekeramik etc.) gehören und die Datenbasis der Temperaturleitfähigkeitswerte noch sehr große Lücken aufweist, können, bei Anwendung der vorgeschlagenen Methodik, diese Lücken in den Daten der thermischen Parameter in Zukunft effektiv geschlossen werden.

7 Literaturnachweis

- Abramowitz, M., and I. A. Stegun, 1970, Handbook of Mathematical Functions, Dover Publications, 1046 p.
- Beck, A. E., 1957, A steady state method for the rapid measurement of the thermal conductivity of rocks: J. Sci. Instr., v. 34, p. 186-189.
- Beck, A. E., 1965, Techniques of measuring heat flow on land, in W. H. K. Lee, ed., Terrestrial Heat Flow: AGU Monograph, Washington, p. 24-57.
- Beck, A. E., 1988, Methods for determining thermal conductivity and thermal diffusivity, in R. Haenel, L. Rybach, and L. Stegena, eds., Handbook of Terrestrial Heat-Flow Density Determination, Kluwer Academic Publishers, p. 87-124.
- Biewald, H., L. Hänisch, H. Honarmand, and A. Hopp, 1995, Untersuchungen über thermisch stabilisierte Kabelbettungsmaterialien.: Elektrizitätswirtschaft (Zeitschrift der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke VDEW), v. 94, p. 699-704.
- Blackwell, J. H., 1954, A transient flow method for determination of thermal constants of insulating materials in bulk: J. Appl. Phys., v. 25, p. 137-144.
- Blackwell, J. H., 1956, The axial flow error in the thermal conductivity probe: Can. J. Phys., v. 34, p. 412-417.
- Blum, P., 1997, Physical properties handbook: a guide to the shipboard measurement of physical properties of deep-sea cores. ODP Tech. Note, 26 [Online: <http://www-odp.tamu.edu/publications/tnotes/tn26/INDEX.HTM>]
- Burkhardt, H., K. Erbas, and H. Honarmand, 1988, Bohrlochsonde zur in situ Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit in größeren Tiefen: KTB Report, v. 88, p. 305-341.
- Burkhardt, H., D. Pribnow, H. Honarmand, and K. Erbas, 1993, Weiterentwicklung einer Bohrlochsonde zur in situ Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit für größere Tiefen, Bundesministerium für Forschung und Technologie.

- Burkhardt, H., and B. Troschke, 1998, Bestimmung von in situ Wärmeleitfähigkeiten, Geoforschungszentrum Potsdam, p. 50.
- Carslaw, H. S., and J. C. Jaeger, 1959, Conduction of heat in solids.-2.nd ed.: Oxford, Oxford scientific Publications, 510 p.
- Clauser, C., 1988, Untersuchungen zur Trennung der konduktiven und konvektiven Anteile im Wärmetransport in einem Sedimentbecken am Beispiel des Oberrheintalgrabens: Dissertation, Technische Universität, Berlin.
- Dixon, G. S., V. A. Stephen, and S. K. Sahai, 1988, A pulse method for studying thermal transport properties of sedimentary rocks: Tectonophysics, v. 148, p. 317-322.
- Drury, M. J., 1988, A Simple Needle-Probe Method for Measuring Thermal Diffusivity of Unconsolidated Materials: Geothermics, v. 17, p. 757-763.
- Erbas, K., 1985, Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Festkörpern mit einer Halbraum-Linien-Quellen-Apparatur: unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Angewandte Geophysik, Petrologie und Lagerstättenforschung, Technische Universität, Berlin, 72 p.
- Fleckenstein, P., 1996, Numerische Berechnungen zur Bestimmung der Wärme- und Temperaturleitfähigkeit aus instationären Linienquellenmessungen: Diplomarbeit, Technische Universität, Berlin, 74 p.
- Gooma, E., and W. Sommerton, 1972, Transient method for measuring thermal properties of fluid-saturated porous media: XII Thermal Conductivity Conference, p. 284-294.
- Hartmann, A., and H. Villinger, 2001, Inversion of marine heat flow measurements by expansion of the temperature decay integral: Geophys. J. Int., v. submitted.
- Hirsh, J., 1973, Transient method of measuring thermal properties of rocks, Berkeley, Univ. of California, p. 54.
- Honarmand, H., 1993, Bohrlochsonden zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit in größeren Tiefen: Dissertation, Technische Universität, Berlin, 190 p.

- Von Herzen, R., and E. A. Maxwell, 1959, The measurement of thermal conductivity of deep-sea sediments by a needle-probe method: *J. Geophys. Res.*, v. 64, p. 1557-1563.
- Jaeger, J. C., 1956, Conduction of heat in an infinite region bounded internally by a circular cylinder of a perfect conductor: *Austr. J. Phys.*, v. 15, p. 167-179.
- Jaeger, J. C., and J. H. Sass, 1964, A line source method for measuring the thermal conductivity and diffusivity of cylindrical specimens of rock and other poor conductors: *Brit. J. Appl. Phys.*, vol. 15; p. 1187-1194.
- Jamieson, D. T., J. B. Irving, and J. S. Tudhope, 1975, A data survey to liquid thermal conductivity: Edinburgh, H.M.S.O.
- Kristiansen, 1982, The Transient Cylindrical Probe Method for Determination of Thermal Parameters of Earth Materials: *Geoskrifter*, v. 18, p. 154.
- Kristiansen, 1991, NEPR: A Fortran-77 Program for Determining Thermal Conductivity and Diffusivity by Needle-Probe Inversion: *Computers & Geosciences*, v. 17, p. 351-290.
- Lister, C. B. R., 1973, The pulse-probe method of conductivity measurement: *Geophys. J. R. astr. Soc.*, v. 57, p. 451-461.
- Middleton, M. F., 1993, A transient method of measuring the thermal properties of rocks: *Geophysics*, v. 58, p. 357-365.
- Nguyen, T., 1974, Transient method of measuring thermal properties of rocks at elevated pressures and temperatures, Berkeley, Univ. of California, p. 74.
- Popov, Y. A., D. F. C. Pribnow, J. H. Sass, C. F. Williams, and H. Burkhardt, 1999, Characterization of rock thermal conductivity by high-resolution optical scanning: *Geothermics*, v. 28, p. 253-276.
- Pribnow, D., 1989, Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit einer Halbraum-Linienquelle an Nicht-Ebenen Festkörperoberflächen: unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Angewandte Geophysik, Petrologie und Lagerstättenforschung, Technische Universität, Berlin.

- Pribnow, D., 1994, Ein Vergleich von Bestimmungsmethoden der Wärmeleitfähigkeit unter Berücksichtigung von Gesteinsgefügen und Anisotropie: Dissertation, Technische Universität, Berlin, 111 p.
- Pribnow, D. C., and J. Sass, H., 1995, Determination of thermal conductivity for deep boreholes: *Journal of Geophysical Research*, v. 100, No. B6, p. 9981-9994.
- Reibelt, M., 1991, Untersuchung des Einflusses der Oberflächenbeschaffenheit und der Fluidsättigung von Gesteinen auf die Messung der Wärmeleitfähigkeit mit einer Halb-raum-Linienquelle: unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Angewandte Geophysik, Petrologie und Lagerstättenforschung, Technische Universität Berlin.
- Sass, J. H., A. H. Lachenbruch, and Munroe, R.J., 1971, Thermal Conductivity of Rocks from Measurements on Fragments and its Application to Heat-Flow Determinations: *Journal of Geophysical Research*, v. 76, p. 3391-3401.
- Sass, J. H., J. P. Kennelly, E. P. Smith, and W. E. Wendt, 1984 (a), Laboratory line-source methods for the measurements of thermal conductivity of rocks near room temperature, Open-File Report 84-91, US Geological Survey, Menlo Park, California.
- Sass, J. H., C. Stone, and R. J. Munroe, 1984 (b), Thermal conductivity determinations on solid rock - a comparison between a steady-state divided-bar apparatus and a commercial transient line-source device: *J. Volcanol. Geotherm. Research*, v. 20, p. 145-153.
- Schärli, U., 1980, Methodische Grundlagen zur Erstellung eines Wärmeleitfähigkeits-Kataloges schweizerischer Gesteine, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich.
- Seipold, U., 1988, Simultaneous measurements of thermal diffusivity and thermal conductivity under high pressure using thermal pulses of finite length: *High Temperatures-High Pressures*, v. 20, p. 609-613.
- Sommerton, W., and M. Mossahebi, 1976, Ring heat source probe for rapid determination of thermal conductivity of rocks: *Rev. Sci. Instr.*, v. 38, p. 1368-1371.
- Spangenberg, E., 2001, pers. Mitteilung, s.a.:

<http://www.gfz-potsdam.de/pb5/pb52/devices/gashydrat/welcome.html>

- TeKa, 2001, Bedienungsanleitung zur Meßapparatur TK04, Version 3.42, TeKa Berlin, Geophysikalische Meßgeräte und Geothermische Untersuchungen, Malplaquestr. 10, D-13347 Berlin.
- Vacquier, V., 1985, The measurement of thermal conductivity of solids with a transient linear heat source on the plane surface of a poorly conducting body: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 74, p. 275-279.
- Villinger, H., 1983, *In Situ Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit in Bohrungen*: Dissertation, Technische Universität, Berlin, 152 p.
- Villinger, H., 1985, Solving cylindrical geothermal problems using the Graver-Stehfest inverse Laplace transform: *Geophysics*, v. 50, p. 1581-1587.
- Villinger, H., and E. E. Davis, 1987, A New Reduction Algorithm for Marine Heat Flow Measurements: *JGR*, v. 92(B12), p. 12846-12856.
- Zheng, W., Z. Yinping, L. Xingang, and G. Xinshi, 1994, Long/short hot-probe method for determining thermophysical properties: *Meas. Sci. Technol.*, v. 5, p. 964-968.

8 Anhang : verwendete Programme, Datenblatt Meßapparatur TK04

Anhang: A	Aufbau der Dateien für die Programme TKSAM, TKGRAPH	91
Anhang: B	Programm TFELD	95
Anhang: C	Programm SHEMAT	97
Anhang: D	Programm NEPR-F	99
Anhang: E	Programm WLFAUS	111
Anhang: F	Datenblatt Wärmeleitfähigkeitsapparatur TK04	163

Anhang A: Aufbau der Dateien für die Programme TKSAM, TKGRAPH

Das Programm TKSAM ist eine Weiterentwicklung des Auswerteprogramms WLFAUS ([Anhang E](#)) und basiert auf den Überlegungen aus den Kapiteln 2.1.4 und 2.1.5. Es ist zur Zeit in der Version 3.46 als Turbo Pascal Programm implementiert und auf jedem handelsüblichen PC in einem DOS-Fenster ausführbar.

Die Eingabedaten für TKSAM müssen gewissen Konventionen genügen, damit zwischen Vollraum- und Halbraumlinienquellenmessungen unterschieden werden kann. Im folgenden werden die notwendigen Dateiformate kurz vorgestellt:

Datei mit den Auswerteparametern: tksam.ini

```
SAM Evaluation Parameters for TKSAM
25      Interval length minimum [s]
20      Start time of evaluation [s]
80      End time of evaluation [s]
4.0     LET (log (Extreme Time))
0.0003  Limit of standard deviation [°C] (optional)
```

Die in dieser Datei oder manuell anzugebenden Parameter sind:

- Start- und Endzeit sowie minimale Länge der auszuwertenden Approximationsintervalle
- eine untere Grenze (LET) für die Zeit t_e des Maximums der Funktion $\lambda_a(t)$ ([Gl.2-20](#))
- und die maximal zulässige Standardabweichung zwischen einer Approximation und der Aufheizkurve des entsprechenden Approximationsintervalls.

Die Aufheizkurve wird dann entsprechend dieser Parameter in Teilbereichen approximiert, die z.B. für die oben angegebenen Parameter folgendermaßen aussehen:

```
[20,45] [20,46] [20-47] ... [20,78] [20,79] [20,80]
      [21,46] [21-47] ... [21,78] [21,79] [21,80]
            [22-47] ... [22,78] [22,79] [22,80]
                  .      ...      .      .      .
                  .      ...      .      .      .
                        [53,78] [53,79] [53,80]
                                [54,79] [54,80]
                                        [55,80]
```

Datei mit den Daten der Aufheizkurve: (*.dwl)

Diese Datei enthält die Temperaturwerte der Aufheizkurve und die Heizleistung für die Messung. Zusätzlich sind Kommentarzeilen (Zeilen 3,5,6,9) sowie 2 Zeilen zur Authentifizierung (7,8) vorhanden. Der erste Buchstabe in der 2. Zeile gibt an, ob es sich um eine Vollraum-(V) oder eine Halbraummessung (H) handelt.

```
1   AnhangD.dwl
2   V19602.ini, NEPR-F, V1.1, ANHANG D
3   Vollraumparameter: WLF:  1.637  TLF:  0.80500E-06
4   Heating Power (W/m) = 1.0000
5   Quellparameter: Radius:  1.000  capa:  8.000  cona:  5810.000
6   Kalibrierungen: calibc:  1.000
7   123456789
8   123
9   T [°C] ** NEPR-F ** t [s]
10  0.00000      0.00      10000.00
11  0.03978      0.50      10000.00
12  0.06240      1.00      10000.00
13  0.07835      1.50      10000.00
14  0.09064      2.00      10000.00
    .
    .
157 0.27376      78.50     10000.00
158 0.27403      79.00     10000.00
159 0.27431      79.50     10000.00
160 0.27458      80.00     10000.00
```

Datei mit den Ergebnissen der Auswertung: (*.erg)

Diese Datei enthält die Ergebnisse der Auswertung einer einzelnen Aufheizkurve mit TKSAM. Nach der Information zum ursprünglichen Datenfile (AnhangD.dwl, Zeile 01) wird eine Kommtarzeile (02) aus der dwl-Datei übernommen. Es folgt die Information der vorgegebenen Auswerteparameter und danach die gefundenen Lösungen für diese Parametervorgaben. Die Daten dieser Datei dienen der Beurteilung der Güte der Messung und sind Eingabedaten für das Programm TKGRAPH.

```
01 File Name: AnhangD
02 Vollraumparameter: WLF: 1.637 TLF: 0.80500E-06
03
04 SAM Evaluation Parameters for TKSAM V3.46:
05 25 Interval length minimum [s]
06 20 Start time of evaluation [s] (user limit set to 40s)
07 80 End time of evaluation [s]
08 25.0 LET (Ln(Extreme Time))
09 0.0003 Limit of standard deviation (optional)
10
11 TC LET Start Length End STD
12 -----
13 1.629 41.9 23.5 33.5 57.0 0.000003
14 1.629 33.9 23.5 34.5 58.0 0.000003
15 1.629 36.4 24.0 32.0 56.0 0.000002
16 1.629 64.2 25.0 26.5 51.5 0.000002
17 1.629 35.9 25.5 33.5 59.0 0.000003
18 1.630 132.0 26.0 30.0 56.0 0.000002
19 1.631 77.6 31.0 36.5 67.5 0.000003
20 1.629 42.5 33.5 27.5 61.0 0.000003
21 1.632 1367.8 39.0 40.5 79.5 0.000003
22 1.631 25.2 39.5 28.5 68.0 0.000003
```

Im vorliegenden Fall wird eine Wärmeleitfähigkeit von 1.632 als asymptotischer Wert ermittelt. Das dem Ergebnis zugrundeliegende Approximationsintervall reicht von 39.0 bis 79.5 s und hat eine Länge von 40.5 s. Die Standardabweichung zwischen den gemessenen Temperaturen und dem nach Gleichung 2-19 berechneten Temperaturanstieg für dieses Zeitintervall beträgt $3 \cdot 10^{-6}$ K. Aufgrund der Voreinstellung für LET (Extremzeit) werden nur einige Lösungen gefunden, sie sind eine Teilmenge der mit dem üblichen Wert von 4 gefundenen Lösungen, in den sich dann das asymptotische Verhalten sehr schön widerspiegelt (s. Abb. A-1).

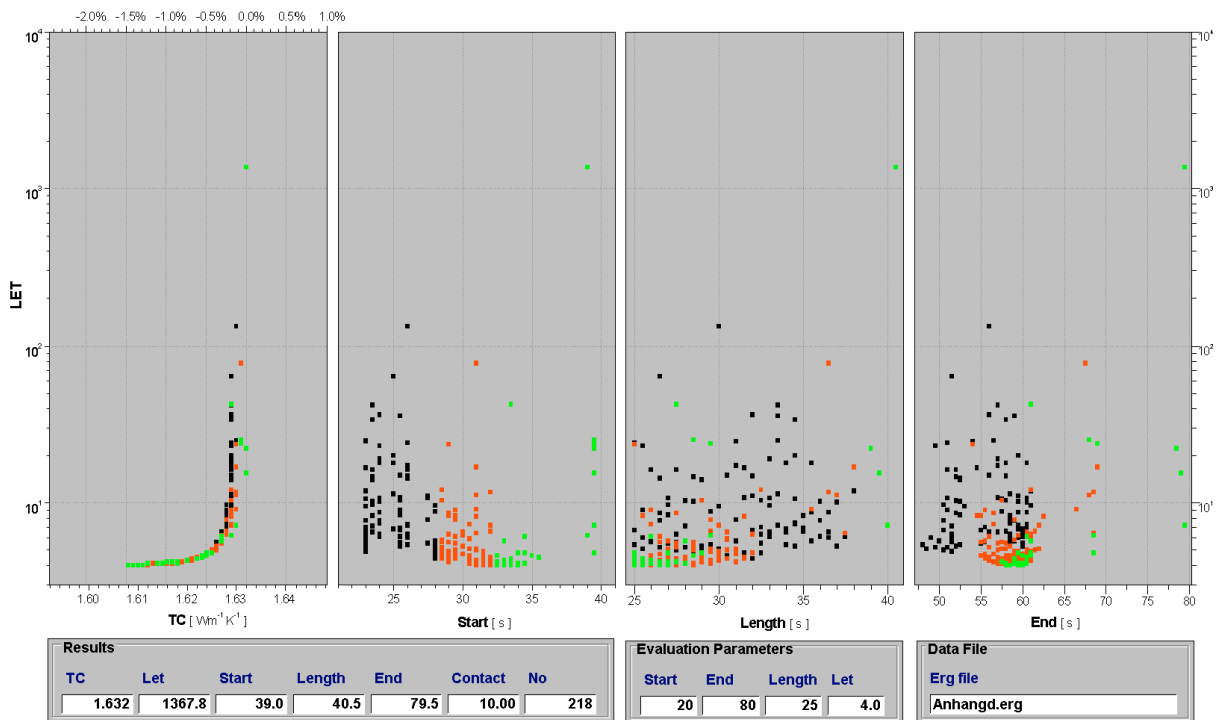
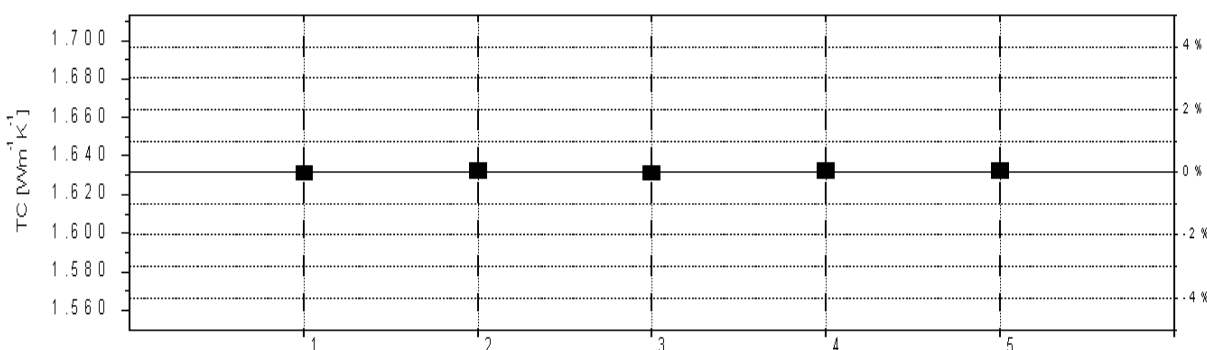


Abb. A-1: Ergebnis der Auswertung des Beispiels einer Vorwärtsmodellierung mit NEPR-F (Parameter aus ANHANG D). Der ermittelte Wärmeleitfähigkeitswert weicht nur um 0.3% vom Vorgabewerte $1.637 \text{ W}^{\text{m}^{-1}}\text{K}^{-1}$ ab.

Liegen zu einer Meßserie Auswertungen mehrerer Messungen vor, so werden diese von TKSAM in einer Datei (**TC-list.dat**) abgespeichert. Sie dient ebenfalls als Eingabe für TKGRAPH und erlaubt eine Beurteilung der Güte der Meßserie:

File	TC	LET/STD	No.	Start	Length	End	CV	Eval.	Comment
TLFN06	1.631	423.5	8	38.0	25.5	63.5	10.00	SAM	Vollraum
TLFN07	1.632	1723.7	9	40.0	27.0	67.0	10.00	SAM	Vollraum
TLFN08	1.631	69.7	16	33.5	25.0	58.5	10.00	SAM	Vollraum
TLFN09	1.632	1367.8	218	39.0	40.5	79.5	10.00	SAM	Vollraum
TLFN10	1.632	312.5	238	35.0	26.5	61.5	10.00	SAM	Vollraum

Beispiel für Anhang A: Auswertung von Vollraum - Modellierungen



Anhang B: Programm TFELD

TFELD wurde von Villinger (1983) erstellt, um das räumliche und zeitliche Temperaturfeld einer Heizquelle in einem Bohrloch zu bestimmen. Die Lösung im Zeitbereich wird dabei numerisch durch inverse Laplace-Transformation mit der Graver-Stehfest-Methode erhalten (Villinger, 1984). Aufgrund der Problemstellung ist das Programm auf einen 4-Schicht-Fall zugeschnitten: Quelle, Verrohrung, Ringraum und Vollraum. Aufgrund der axialen Symmetrie vereinfacht sich die Wärmeleitungsgleichung in Zylinderkoordinaten zu:

$$(A.2.1) \quad \frac{\delta T}{\delta t} = \kappa \left(\frac{\delta^2 T}{\delta r^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \right) + \frac{q(t)}{\rho c}$$

mit:

- c : spezifische Wärme [J kg⁻¹ K⁻¹]
- ρ : Dichte [kg m⁻³]
- κ : Temperaturleitfähigkeit [m²s⁻¹]
- q : Heizleistung/Volumen [W m⁻³]
- r : Radius [m]
- T : Temperatur [K]
- t : Zeit [s]

Für jede der 4 Schichten wird diese Wärmeleitungsgleichung aufgestellt und die dazugehörigen Randbedingungen festgelegt. Die resultierenden Gleichungen werden unter Einbeziehung der Anfangsbedingungen einer Laplace-Transformation unterzogen.

$$(A.2.2) \quad L\{T_i(r, t)\} = \int_0^{\infty} T_i(r, t) e^{-st} dt, \quad i=1, 2, \dots, n$$

mit: $s = \sigma + j\omega$

Damit erhält man inhomogene partielle Differentialgleichungen im Ortsbereich, deren Lösungen mit Hilfe modifizierter Bessel'scher Funktionen erhalten werden können. Diese Lösungen werden im Bildbereich über die Randbedingungen an den Schichtgrenzen (Stetigkeit der Temperatur und des Wärmeflusses) miteinander verknüpft. Die Lösung im Zeitbereich erhält man anschließend durch eine inverse Laplace-

Transformation, die numerisch mit der Graver-Stehfest-Methode durchgeführt wird. Das Ergebnis ist danach das Temperaturfeld $T(r,t)$.

TFELD ermöglicht es, eine zylindrische Quelle mit Kontaktzonen in einem Vollraum zweidimensional zu modellieren. Aus der berechneten Quelltemperatur kann dann die Wärmeleitfähigkeit des Vollraums ermittelt werden. Randeffekte einer endlich langen Quelle können mit diesem Programm nicht untersucht werden.

Anhang C: Programm SHEMAT

Um Bohrlochsonden dreidimensional modellieren und somit axiale Randeﬀekte endlich langer Heizquellen untersuchen zu können, wurde das Finite-Differenzen-Programm SHEMAT benutzt. Diese Programm wurde von Clauser (1988) ursprünglich entwickelt, um den gekoppelten Fluid- und Wärmetransport innerhalb eines Systems zu berechnen. Dabei werden die in finite Differenzen überführten Differentialgleichungen für Fluid- und Wärmetransport doppelt iterativ gelöst und somit beide Gleichungen wechselseitig gekoppelt. Da bei den Modellierungen der Bohrlochsonden konvektiver Wärmetransport nicht berücksichtigt werden sollte, vereinfachte sich das Problem zur Lösung von:

$$(A.3.1) \quad \frac{\delta(\rho c T)}{\delta t} = \text{div}[\lambda \text{ grad} T] + H,$$

mit:

- c : spezifische Wärme [J kg⁻¹ K⁻¹]
- ρ : Dichte [kg m⁻³]
- λ : Wärmeleitfähigkeit [Wm⁻¹K⁻¹]
- q : Wärmeproduktion [W m⁻³]
- T : Temperatur [K]
- t : Zeit [s]

Anhang D: Programm NEPR-F

Ausdruck des Programm-Listings

```
PROGRAM NEPRF

CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C   THIS PART OF THE NEEDLE-PROBE PROGRAM COMPUTES
C   TEMPERATURE RISE OF NEEDLE PROBES
C
C   THE ORIGINAL VERSION OF THE NEEDLE-PROBE PACKAGE WAS DEVELOPED BY:
C
C   JAN I. KRISTIANSEN
C   LABORATORY OF GEOPHYSICS
C   DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES
C   UNIVERSITY OF AARHUS
C   DENMARK
C
C   and was published as:
C
C   Kristiansen, J.I., 1991,
C   NEPR: A Fortran-77 Program for Determining Thermal Conductivity and
C   Diffusivity by Needle-Probe Inversion,
C   Computers & Geosciences, v. 17, p. 351-290.
C
C   THE PROGRAM CAN BE RUN AS:
C
C   1: FORWARD RESPONSE RUN (ITYPE=-1)
C
C   IN A FORWARD RESPONSE RUN THE TEMPERATURE RISE OF THE
C   NEEDLE-PROBE IS CALCULATED ON THE BASIS OF SPECIFIED
C   THERMAL PARAMETERS AND TIME VALUES.
C
C   SI-UNITS ARE USED THROUGHOUT.
C
C   THE FOLLOWING FILES/UNITS ARE ASSOCIATED WITH THE PACKAGE:
C
C   FIL10 / UNIT 10 : INPUT DATA TEMPERATURE RISE DATA
C                   THESE DATA MUST BE STORED AS *-FORMAT DATA
C   FIL11 / UNIT 11 : OUTPUT DATA
CKEM  FIL12 / UNIT 12 : OUTPUT DATA FOR TKSAM
C
C   INPUT PARAMETERS ARE SPECIFIED FROM UNIT 1 AND ALL PARAMETERS
C   MUST BE FORMATTED ACCORDING TO *-FORMAT (LIST-DIRECTED
C   FORMAT)
C
C   THE INPUT PARAMETERS ARE READ IN THE FOLLOWING ORDER:
C
C   LABEL : TEXTLINE OF MAX 55 CHARACTERS
C
C   ITYPE : IF .EQ. -1 FORWARD RESPONSE RUN
C
C   FIL10 : NAME OF INPUT DATA FILE
C   FIL11 : NAME OF OUTPUT PRINT FILE
C   FIL12 : OUTPUT DATA FOR TKSAM
C
C   QHEAT  : HEATING POWER IN W/M
CKEM  RAD      : RADIUS OF THE NEEDLE-PROBE IN METRES
C                   eingabe in mm dann division durch tausend !
C
C   T0      : TIME OF FIRST SAMPLE IN SEC
C   TMAX    : UPPER TIME LIMIT OF TEMPERATURE DATA SEQUENCE IN SEC
C   DELTAT  : SAMPLE RATE IN SEC
C   CAPA    : HEAT CAPACITY OF THE NEEDLE-PROBE PER UNIT LENGTH J/m/K
C   CON     : THERMAL CONDUCTIVITY OF EXTERNAL MEDIUM IN W/M/K
C   DIF     : THERMAL DIFFUSIVITY OF EXTERNAL MEDIUM IN M**2/SEC
C   CONA    : SURFACE CONDUCTANCE OF NEEDLE PROBE IN W/m2/K
C
CKEM  ND: Anzahl der Meßwerte, wird berechnet aus: TMAX, T0, DELTAT
CKEM  NY, N: Anzahl der Meßwerte, in NEPRMAIN berechnet
CKEM  DATA (1000): ND Temperaturmeßwerte zu den Zeiten TIME1, s.u.
CKEM  TIME1(1000): Zeitwerte mit Messdaten, werden berechnet:
CKEM                      TIME1(1) = T0, TIME1(ND)=TMAX
CKEM
CKEM ***** Beispiel eines Eingabedatensatzes
C----BEGINN
C   VNEPR-F, V19906: Radius 1.0mm, WLF 1.637 W/(mK), TLF 0.805E-06
```

```

C -1
C AnhangD.dat
C AnhangD.out
C AnhangD.dwl
C 1.          qheat          [W/m]
C 1.          calibc         immer 1.
C 1.0         rad            [mm]
C 0.5         first time     [s]
C 90.0        last time      [s]
C 0.5         sample-rate    [s]
C 8.0         heat-capacity  [J/m/K]
C 1.637       con           [W/(mK)]
C 0.805E-06   dif           [m**2/s]
C 5810.0      cona          [W/(m**2)/K]
C-----ENDE
CKEM ***** Beispiel eines Eingabedatensatzes
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC

double precision PI
COMMON /BLKke1/ PI, CON1, ifix, Version

COMMON/BLK1/BETA,BETA1,RAD,CAPA,QHEAT,ITYPE

COMMON/BLK2/DATA(1000),TIME1(1000),ND,NY,T0,TMAX,DELTAT
COMMON/BLK3/AN,BN,SIGMA,SNAN,XKORR,ISTART,ISLUT,INN
COMMON/BLK5/TIME(45),TEMP(45),DV(45,3),YT(45,3),N
COMMON/BLK6/EPS1,EPS2,BO(45),HSUM,MAX1,MAX2,AAA,BB,CON,DIF,CONA,
+   A1,TMAX1,III,IFR,NRHO,INRHO,IRESP
COMMON/BLK7/U(45,3),H(3,45),XT(3,1),ATA(3,3),V(3,3),ROOT(3),NEIG
COMMON/BLK8/VARX(3),SINF(45,45),RES(3,3)

CHARACTER*72 LABEL, FIL10, FIL11, FIL12, Version
character ctime*10

Version=' NEPR-F, V1.1, ANHANG D'
PI=4.D0*DATAN(1.D0)
ifix = 1
CON1 = 2.2

C***** A LABEL IS READ
WRITE(*,*) TYPE: TITEL - (IN *-FORMAT)'
READ (*,(A)) LABEL
write (*,(A)) LABEL
WRITE(*,*) '

C***** SELECTION OF RUN TYPE
CKEM** -1: theor.computation ONLY !
WRITE(*,500)
READ (*,*) ITYPE
write (*,*) ITYPE
WRITE(*,*) '

IF(ITYPE.NE.-1) THEN
C***** ITYPE ist 0 oder 1: ABBRUCH !
CKEM***
        PAUSE ' FORWARD RUN ONLY in NEPR-F !'
        STOP
else
C***** IF ITYPE.EQ.-1 FORWARD IS CALLED FOR COMPUTATION of response
CKEM*** Parameter werden dort eingegeben !
        CALL FORWARD
end if

400 continue

WRITE(11,600)
WRITE(11,*) Version
write (11,*) ' THE NEEDLE-PROBE PACKAGE IS TERMINATED'

WRITE(*,601)
print *, Version
STOP ' THE NEEDLE-PROBE PACKAGE IS TERMINATED'

500 FORMAT(' TYPE: COMPUTATION MODE' ,/,
+ ' -1 FOR COMPUTING THEORETICAL NEEDLE-PROBE RESPONSE',/,
+ ' ONLY FOWRARD COMPUTATION ALLOWED !')

```

```
600  FORMAT(/,25(4H O *),/)
601  FORMAT(/,18(4H O *),/)
```

```
END
```

```
SUBROUTINE FORWARD
```

```
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
```

```
C
C      THIS ROUTINE COMPUTES THE FORWARD RESPONSE OF A NEEDLE-
C      PROBE. THE MODEL IS THE INTEGRAL SOLUTION OF BLACKWELL.
C      THE RESPONSE IS COMPUTED BY BLW11 AND DATA ARE STORED
C      ON UNIT 11.
```

```
C
CKEM  Eingabe der Parameter in den subroutinen:
C      param1, getcal, getcapa, getcon, getdif, getConA
C      getfil10, getfil11, getfil12
```

```
C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
      double precision PI
```

```
      COMMON /BLKke1/ PI, CON1, ifix, Version
      COMMON/BLK1/BETA,BETA1,RAD,CAPA,QHEAT,ITYPE
      COMMON/BLK2/DATA(1000),TIME1(1000),ND,NY,T0,TMAX,DELTAT
      COMMON/BLK3/AN,BN,SIGMA,SNAN,XKORR,ISTART,ISLUT,INN
      COMMON/BLK5/TIME(45),TEMP(45),DV(45,3),YT(45,3),N
      COMMON/BLK6/EPS1,EPS2,BO(45),HSUM,MAX1,MAX2,AAA,BB,CON,DIF,CONA,
+ A1,TMAX1,III,IFR,NRHO,INRHO,IRESP
      COMMON/BLK7/U(45,3),H(3,45),XT(3,1),ATA(3,3),V(3,3),ROOT(3),NEIG
      COMMON/BLK8/VARX(3),SINF(45,45),RES(3,3)
```

```
      CHARACTER*72 FIL10, FIL11, FIL12, Version
      character ccode*10
```

```
      call getfil10 (FIL10)
      call getfil11 (FIL11)
      call getfil12 (FIL12)
```

```
      call getQH (qheat)
      call getCAL (calibc)
      QHEAT=QHEAT*calibc
```

```
      call getRAD (rad)
      call getT0 (t0)
      call getTMAX (tmax)
      call getDT (deltat)
      call getcapa (CAPA)
      call getcon (CON)
      call getdif (DIF)
      call getconA (CONA)
```

```
      WRITE (11,600)
      WRITE (11,*) 'COMPUTATION OF THEORETICAL NEEDLE-PROBE RESPONSE'
      Write (11,*) Version
      WRITE (* ,601)
      WRITE (* ,*) 'COMPUTATION OF THEORETICAL NEEDLE-PROBE RESPONSE'
```

```
      AAA=1.E-4
      BB=0.2
      EPS1=1.E-4
      EPS2=1.E-4
      MAX1=15
      MAX2=100
```

```
      A1=2*PI*(RAD**2)/CAPA
```

```
CKEM** Durchlaufzahl initialisieren, pro Durchlauf werden 45 Werte
CKEM** berechnet, es wird mindestens ein Durchlauf mit 45 werten
CKEM** gerechnet, auch wenn die Zeitvorgabe nicht so viele erfordert
      loop = 1
      N=45
```

```
CKEM** erster durchlauf mit 45 Werten
CKEM** danach jeweils 45 weitere, bis time(n*loop) > tmax
10  CONTINUE
```

```

write (*,*) ' Run :', loop
write (11,*) ' Run :', loop
Tstart = T0 + (loop-1)*N*deltat
tend = Tstart + deltat*(n-1)
write (*,*) ' von: ', Tstart, ' bis', tend

WRITE (*,15) N
WRITE (11,15) N
DO 20 I=1,N
20      TIME(I) = Tstart + DELTAT*(I-1)
      WRITE(11,25)
      WRITE(*,25)

CALL BLWI1

CKEM** Berechnungsparameter auf das File schreiben
if (loop.eq.1) then
      write (10,*) Version
      write (10,*) qheat,          ' qheat'
      write (10,*) calibc,      ' calibc'
      radm = rad * 1000.
      write (10,*) radm,          ' rad'
      write (10,*) t0,          ' t0'
      write (10,*) tmax,        ' tmax'
      write (10,*) deltat,      ' deltat'
      write (10,*) capa,        ' capa'
      write (10,*) con,          ' con'
      write (10,*) dif,          ' dif'
      write (10,*) cona,        ' cona'
      write (10,*) ' Temperatures:'
end if

DO 30 I=1,N
c      WRITE (11,27) TIME(I),BO(I)
      WRITE (*,27) TIME(I),BO(I)
      WRITE (10,*) BO(I)
30      continue

CKEM DWL-File für TKSAM erzeugen
var1 = 123.
if (loop.eq.1) then
      call code (var1, ccode, icode)
      rewind 12
      write (12,'(A)') fil12
      write (12,'(A,A)')
+      'V19602.ini,', Version
      write (12,'(A, F8.3, A, E14.5)')
+      'Vollraumparameter: WLF: ', con,' TLF:', dif
      write (12,'(A22,F7.4)') 'Heating Power (W/m) = ', qheat
      write (12,'(A, F8.3, A, F8.3, A, F10.3)')
+      'Quellparameter: Radius: ', radm,' capa: ', capa,' cona: ',con
      write (12,'(A, F8.3, A, F16.14)')
+      'Kalibrierungen: calibc: ', calibc
      write (12,'(A9)') ccode
      write (12,'(I4)') icode
      write (12,'(A)') ' T [°C] ** NEPR-F ** t [s]'
      if ( (Time(1)-deltat).eq. 0.) then
            WRITE (12,28) 0., 0., 10000.
      end if
end if

DO 40 I=1,N
40      WRITE (12,28) BO(I), TIME(I), 10000.

      continue

      if (time(n).lt.tmax) then
            loop = loop + 1
            go to 10
      end if

RETURN

15      FORMAT(//,' NUMBER OF THEORETICAL DATA.....',I10,/)
25      FORMAT(/, ' TIME TEMPERATURE',/,
+      ' SEC C',/)
27      FORMAT(2X,F10.2,2X,F14.7)
28      FORMAT(1X,F10.5, 1X,F17.2, 1X,F16.2)

```



```

600  FORMAT(/,25(4H O */)
601  FORMAT(/,18(4H O */)

      END

      subroutine getqch (QHEAT)
      WRITE(*,*)
+   ' TYPE: HEAT INPUT TO THE NEEDLE-PROBE [W/m]'
      READ (*,*) QHEAT
      write (*,*) QHEAT
      WRITE(*,*) '
      return
      end

      subroutine getcal (calibc)
      WRITE(*,*)
+   ' TYPE: CALIBRATION CONSTANT FOR FORWARD COMPUTATION'
      READ (*,*) calibc
      write (*,*) calibc
      WRITE(*,*) '
      return
      end

      subroutine getRAD (RAD)
      WRITE(*,*)
+   ' TYPE: RADIUS OF THE NEEDLE-PROBE [mm]'
      READ (*,*) RAD
      write (*,*) RAD
      RAD=RAD/1000.
      WRITE(*,*) '
      return
      end

      subroutine getT0 (T0)
      WRITE(*,*)
+   ' TYPE: TIME VALUE OF FIRST MEASUREMENT [SEC]'
      READ (*,*) T0
      write (*,*) T0
      WRITE(*,*) '
      return
      end

      subroutine getTMAX (TMAX)
      WRITE(*,*)
+   ' TYPE: TIME VALUE OF LAST MEASUREMENT [SEC]'
      READ (*,*) TMAX
      write (*,*) TMAX
      WRITE(*,*) '
      return
      end

      subroutine getDT (DELTAT)
      WRITE(*,*)
+   ' TYPE: SAMPLE RATE [SEC]'
      READ (*,*) DELTAT
      write (*,*) DELTAT
      WRITE(*,*) '
      return
      end

      subroutine getCapa (CAPA)
      WRITE(*,*)
+   ' TYPE: HEAT CAPACITY OF NEEDLE-PROBE - [J/m/K]'
      READ (*,*) CAPA
      write (*,*) CAPA
      WRITE(*,*) '
      return
      end

      subroutine getcon (CON)
      WRITE(*,*)
+   ' TYPE: CONDUCTIVITY OF EXTERNAL MEDIUM [W/m/K]'
      READ (*,*) CON
      write (*,*) CON
      WRITE(*,*) '
      return
      end

```

```

subroutine getdif (DIF)
WRITE(*,*)
+ ' TYPE: DIFFUSIVITY OF EXTERNAL MEDIUM [m2/SEC]'
READ (*,*) DIF
write (*,*) Dif
WRITE(*,*)' '
return
end

subroutine getConA (CONA)
WRITE(*,*)' TYPE: SURFACE CONDUCTANCE [W/m2/K]'
READ(*,*) CONA
write (*,*) CONA
WRITE(*,*)' '
return
end

subroutine getFIL10 (FIL10)
character*72 fil10
WRITE(*,*)' TYPE: NAME OF DATA FILE TO CREATE (IN *-FORMAT)'
READ (*,(A)) FIL10
WRITE(*,*)' '
OPEN(10,FILE=FIL10,status='replace')
return
end

subroutine getFIL11 (FIL11)
character*72 fil11
WRITE(*,*)' TYPE: NAME OF OUTPUT PRINT FILE - (IN *-FORMAT)'
READ (*,(A)) FIL11
WRITE(*,*)' '
OPEN(11,FILE=FIL11,status='replace')
return
end

subroutine getFIL12 (FIL12)
character*72 fil12
WRITE(*,*)' TYPE: NAME OF OUTPUT DWL-FILE - (IN *-FORMAT)'
READ (*,(A)) FIL12
WRITE(*,*)' '
OPEN(12,FILE=FIL12,status='replace')
return
end
subroutine code (qheat, cc, icode)

USE DFPORT

INTEGER(4) int_time
character*8 char_time
character cc*10, cq*8

INTEGER*2 IYR,IMON,IDAY1,IDAY2,IHR,IMIN,ISEC,I100TH

C***** TIME AT INITIATION
CDAN CALL GETDAT(IYR,IMON,IDAY1)
CDAN CALL GETTIM(IHR,IMIN,ISEC,I100TH)
CDAN CPUMIN=IHR*60.+IMIN*1.+ISEC/60.+I100TH/6000.

int_time = TIME( )
call TIME(char_time)
c print *, 'Integer: ', int_time, 'time: ', char_time

read (char_time,'(i2)') ihr
read (char_time,'(3x,i2)') imin
read (char_time,'(6x,i2)') isec

c print *, ' ihr, imin, isec:'
c print *, ihr, imin, isec

cpusec = isec + 60*imin + 3600*ihr
c print *, ' cpusec: ', cpusec
cpusec=cpusec + isec/100. + imin/1000. + ihr/10000.
c print *, ' cpusec: ', cpusec
write (cc,'(F10.3)') cpusec
c print *, ' cc: ', cc
i1 = 0

```

```

i2 = 0
i3 = 0
i4 = 0
i5 = 0
i6 = 0
read (cc, '(i1)') i1
read (cc, '(1x,i1)') i2
read (cc, '(2x,i1)') i3
read (cc, '(3x,i1)') i4
read (cc, '(4x,i1)') i5
read (cc, '(5x,i1)') i6

c      print *, ' i1, i2, i3, i4, i5, i6 :'
c      print *, i1, i2, i3, i4, i5, i6

ckem   qheat = 454.9927
c      print *, ' qheat: ', qheat
       write (cq, '(F8.4)') qheat
c      print *, ' cq: ', cq

       iq1 = 0
       iq2 = 0
       iq3 = 0

       read (cq, '(i1)') iq1
       read (cq, '(1x,i1)') iq2
       read (cq, '(2x,i1)') iq3

c      print *, ' iq1, iq2, iq3:'
c      print *, iq1, iq2, iq3

       icc = i1+i2+i3+i4+i5+i6 + iq1+iq2+iq3

       icode = icc*15

c      print *, ' icc: ', icc
c      print *, ' icode: ', icode

c      pause ' vor return aus code'

       return
       end

```

SUBROUTINE BLWI1

```

CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
C      THIS ROUTINE CALCULATES THE TEMPERATURE RESPONSE AND THREE
C      DERIVATIVES (WITHIN RESPECT TO CONDUCTIVITY, DIFFUSIVITY AND
C      SURFACE CONDUCTANCE).
C      THE MODEL IS THE INTEGRAL-SOLUTION OF BLACKWELL.
C      THE SIMPSON INTEGRATION FORMULA IS USED IN A RUNNING
C      INTEGRATION PROCEDURE.
C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
COMMON/BLK1/BETA,BETA1,RAD,CAPA,QHEAT,ITYPE

COMMON/BLK5/TEMP(45),DV(45,3),YT(45,3),N
COMMON/BLK6/EPS1,EPS2,BO(45),HSUM,MAX1,MAX2,AAA,BB,CON,DIF,CONA,
+ A1,TMAX1,III,IFR,NRHO,INRHO,IRESP
COMMON/BLK7/U(45,3),H(3,45),XT(3,1),ATA(3,3),V(3,3),ROOT(3),NEIG
COMMON/BLK8/VARX(3),SINF(45,45),RES(3,3)

DIMENSION A(45),O(45),P(45),Q(45),BA(45),BP(45),BQ(45)
DIMENSION CA(45),CO(45),CP(45),CQ(45),DA(45),DO(45),DP(45),DQ(45)
DIMENSION EA(45),EO(45),EP(45),EQ(45),SUMA(45),SUMO(45),SUMP(45)
DIMENSION SUMQ(45),BJ(2),BY(2)

imax1 = 0
ieps1 = 0
ieps2 = 0

HSUM=0.0
DO 14 I=1,N
  DA(I)=0.0

```

```

        DO(I)=0.0
        DP(I)=0.0
        DQ(I)=0.0
14      CONTINUE

C*****THIS DO-LOOP MANAGES THE RUNNING INTERVALS
        DO 90 I=1,MAX2
        AA=AAA+(I-1)*BB
        DO 15 I=1,N
        A(I)=0.0
        O(I)=0.0
        P(I)=0.0
        Q(I)=0.0
        BA(I)=0.0
        BO(I)=0.0
        BP(I)=0.0
        BQ(I)=0.0
        CA(I)=0.0
        CO(I)=0.0
        CP(I)=0.0
        CQ(I)=0.0
        EA(I)=0.0
        EO(I)=0.0
        EP(I)=0.0
        EQ(I)=0.0
15      CONTINUE

        M=2
        HBB=BB/2.

C*****CONTRIBUTION FROM END-POINTS IN THE ACTUAL
C*****RUNNING INTERVAL IS CALCULATED IN DO-LOOP
C*****30 AND 40
        DO 30 J=1,2
        X=AA+(J-1)*BB
        CALL BESJY(X,BJ,BY)
        PSI=2.*(X*BJ(1)-(A1*CON/DIF-CON*(X**2)/(RAD*CONA))*BJ(2))
        ETA=2.*(X*BY(1)-(A1*CON/DIF-CON*(X**2)/(RAD*CONA))*BY(2))

        DELTAU=((PSI**2)+(ETA**2))/4.
        R=(X**3)*DELTAU
        R0=(PSI*BJ(2)+ETA*BY(2))/((X**3)*(DELTAU**2))
        R1=(A1/DIF-(X**2)/(RAD*CONA))*R0
        R2=(A1*CON/(DIF**2))*R0
        R3=(X**2)*CON/(RAD*(CONA**2))*R0

        DO 20 I=1,N
        DD=TIME(I)*DIF*(X**2)/(RAD**2)-670.0
        IF(DD) 21,22,23

22      CONTINUE

23      A(I)=A(I)+1./R
        O(I)=O(I)-R1
        P(I)=P(I)-R2
        Q(I)=Q(I)-R3
        GO TO 24

21      FI=EXP(-TIME(I)*DIF*(X**2)/(RAD**2))
        A(I)=A(I)+(1.-FI)/R
        O(I)=O(I)-(1.-FI)*R1
        P(I)=P(I)+TIME(I)*(X**2)*FI/((RAD**2)*R)-(1.-FI)*R2
        Q(I)=Q(I)-(1.-FI)*R3

24      CONTINUE
20      CONTINUE
30      CONTINUE

        DO 40 I=1,N
        A(I)=(2.*HBB*A(I))/3.
        O(I)=(2.*HBB*O(I))/3.
        P(I)=(2.*HBB*P(I))/3.
        Q(I)=(2.*HBB*Q(I))/3.
40      CONTINUE

        JJ=1

```

```

C*****FURTHER SUBDIVISION OF THE ACTUAL RUNNING INTERVAL
42   CONTINUE
      DO 50 I=1,N
          SUMA(I)=0.0
          SUMO(I)=0.0
          SUMP(I)=0.0
          SUMQ(I)=0.0
50   CONTINUE
      MM=M-1

C*****CONTRIBUTION FROM INNER POINTS IN THE
C*****ACTUAL RUNNING INTERVAL
      DO 60 J=1,MM,2
          X=AA+J*HBB
          CALL BESJY(X,BJ,BY)
          PSI=2.*(X*BJ(1)-(A1*CON/DIF-CON*(X**2)/(RAD*CONA))*BJ(2))
          ETA=2.*(X*BY(1)-(A1*CON/DIF-CON*(X**2)/(RAD*CONA))*BY(2))

          DELTAU=((PSI**2)+(ETA**2))/4.
          R=(X**3)*DELTAU
          R0=(PSI*BJ(2)+ETA*BY(2))/((X**3)*(DELTAU**2))
          R1=(A1/DIF-(X**2)/(RAD*CONA))*R0
          R2=(A1*CON/(DIF**2))*R0
          R3=(X**2)*CON/(RAD*(CONA**2))*R0

          DO 70 I=1,N
              DD=TIME(I)*DIF*(X**2)/(RAD**2)-670.0
              IF(DD) 71,72,73

72   CONTINUE

73   SUMA(I)=SUMA(I)+1./R
      SUMO(I)=SUMO(I) - R1
      SUMP(I)=SUMP(I) - R2
      SUMQ(I)=SUMQ(I) - R3
      GO TO 74

71   FI=EXP(-TIME(I)*DIF*(X**2)/(RAD**2))
      SUMA(I)=SUMA(I)+(1.-FI)/R
      SUMO(I)=SUMO(I)-(1.-FI)*R1
      SUMP(I)=SUMP(I)+TIME(I)*(X**2)*FI/((RAD**2)*R)-(1.-FI)*R2
      SUMQ(I)=SUMQ(I)-(1.-FI)*R3

74   CONTINUE
70   CONTINUE
60   CONTINUE

      LA=0
      LO=0
      LP=0
      LQ=0

```

```

C*****CONTRIBUTION FROM END-POINTS AND INNER
C*****POINTS IN THE ACTUAL RUNNING INTERVAL AT
C*****THE ACTUAL SUBDIVISION
      DO 80 K=1,N
          SUMA(K)=SUMA(K)*HBB*4./3.
          A(K)=A(K)/2.+CA(K)/4.
          EA(K)=A(K)+SUMA(K)
          CA(K)=SUMA(K)

          SUMO(K)=SUMO(K)*HBB*4./3.
          O(K)=O(K)/2.+CO(K)/4.
          EO(K)=O(K)+SUMO(K)
          CO(K)=SUMO(K)

          SUMP(K)=SUMP(K)*HBB*4./3.
          P(K)=P(K)/2.+CP(K)/4.
          EP(K)=P(K)+SUMP(K)
          CP(K)=SUMP(K)

          SUMQ(K)=SUMQ(K)*HBB*4./3.
          Q(K)=Q(K)/2.+CQ(K)/4.
          EQ(K)=Q(K)+SUMQ(K)
          CQ(K)=SUMQ(K)

```

```

C*****INVESTIGATION OF CONVERGENCE WITHIN THE
C*****ACTUAL RUNNING INTERVAL

```

```

IF(ABS((EA(K)-BA(K))/EA(K)).LE.EPS1) LA=LA+1
IF(ABS((EO(K)-BO(K))/EO(K)).LE.EPS1) LO=LO+1
IF(ABS((EP(K)-BP(K))/EP(K)).LE.EPS1) LP=LP+1
IF(ABS((EQ(K)-BQ(K))/EQ(K)).LE.EPS1) LQ=LQ+1

      BA(K)=EA(K)
      BO(K)=EO(K)
      BP(K)=EP(K)
      BQ(K)=EQ(K)

      IF ( (LA.EQ.N)
+           .AND.(LO.EQ.N)
+           .AND.(LP.EQ.N)
+           .AND.(LQ.EQ.N)) then
          ieps1 = ieps1 + 1
          GO TO 100
      end if

      IF(JJ.GE.MAX1) Then
          imax1 = imax1 + 1
          GO TO 100
      end if

80      CONTINUE
      JJ=JJ+1

C*****FURTHER SUBDIVISION OF THE ACTUAL RUNNING INTERVAL
      M=M*2
      HBB=HBB/2.
      GO TO 42

C*****INTEGRATION IN THE ACTUAL RUNNING INTERVAL
C*****IS COMPLETED
100     CONTINUE
      LLA=0
      LLO=0
      LLP=0
      LLQ=0
      DO 110 I=1,N
          DA(I)=DA(I)+EA(I)
          DO(I)=DO(I)+EO(I)
          DP(I)=DP(I)+EP(I)
          DQ(I)=DQ(I)+EQ(I)

C*****INVESTIGATION OF CONVERGENCE WITHIN THE
C*****WHOLE INTEGRATION INTERVAL
      IF(ABS(EA(I)/DA(I)).LE.EPS2) LLA=LLA+1
      IF(ABS(EO(I)/DO(I)).LE.EPS2) LLO=LLO+1
      IF(ABS(EP(I)/DP(I)).LE.EPS2) LLP=LLP+1
      IF(ABS(EQ(I)/DQ(I)).LE.EPS2) LLQ=LLQ+1

      IF ( (LLA.EQ.N)
+           .AND.(LLO.EQ.N)
+           .AND.(LLP.EQ.N)
+           .AND.(LLQ.EQ.N)) then
          ieps2 = ieps2 + 1
          GO TO 200
      end if

110     CONTINUE
90      CONTINUE

C*****INTEGRATION WITHIN THE WHOLE INTEGRATION
C*****INTERVAL IS COMPLETED AND THE FOLLOWING
C*****LINES ESTABLISH THE RIGHT COEFFICIENTS
200     CONTINUE
      DO 130 I=1,N
          BA(I)=+.064503*(A1**2)*DA(I)/(DIF**2)
+          -.064503*(A1**2)*CON*DO(I)/(DIF**2)
          BP(I)=-.129006*(A1**2)*CON*DA(I)/(DIF**3)
+          +.064503*(A1**2)*CON*DP(I)/(DIF**2)
          BQ(I)=-.064503*(A1**2)*CON*DQ(I)/(DIF**2)
          BO(I)=+.064503*(A1**2)*CON*DA(I)/(DIF**2)

          BO(I)=BO(I)*QHEAT

```

```

      DV(I,1)=BA(I)*QHEAT*CON
      DV(I,2)=BP(I)*QHEAT*DIF
      DV(I,3)=BQ(I)*QHEAT*CONA
      HSUM=(TEMP(I)-BO(I))**2+HSUM

```

```
130    continue
```

```

      RETURN
      END

```

```
      SUBROUTINE BESJY(X,BJ,BY)
```

```
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
```

```

C
C      THIS ROUTINE COMPUTES BESSEL FUNCTIONS OF FIRST AND SECOND
C      KIND AND OF ORDER 0 AND 1. VALID ARGUMENT X IS: X.GT.0
C

```

```

C      POLYNOMIAL APPROXIMATIONS ARE FROM ABRAMOWITZ AND STEGUN:
C      HANDBOOK OF MATHEMATICAL FUNCTIONS, DOVER PUBLICATIONS.
C

```

```

C      BJ(1) RETURNS BESSEL FUNCTION OF FIRST KIND AND ORDER 0
C      BJ(2) RETURNS BESSEL FUNCTION OF FIRST KIND AND ORDER 1
C      BY(1) RETURNS BESSEL FUNCTION OF SECOND KIND AND ORDER 0
C      BY(2) RETURNS BESSEL FUNCTION OF SECOND KIND AND ORDER 1
C

```

```

C      ERRORS ARE OF THE ORDER 1.E-7
C

```

```
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
```

```

      REAL BJ(2),BY(2)
      REAL J0A(7),J0B(7),J1A(7),J1B(7),Y0A(7),Y0B(7),Y1B(7)
      DATA PI,EU /3.141592653,0.5772156649/
      DATA J0A /1.,-2.2499997,1.2656208,-.3163866,
+         0.0444479,-.0039444,0.00021/
      DATA J0B /0.79788456,-0.0000077,-0.0055274,-.00009512,
+         0.00137237,-0.00072805,0.00014476/
      DATA Y0A /0.36746691,0.60559366,-0.74350384,0.25300117,
+         -0.04261214,0.00427916,-0.00024846/
      DATA Y0B /-0.78539816,-0.04166397,-0.00003954,0.00262573,
+         -0.00054125,-0.00029333,0.00013558/
      DATA J1A /0.5,-0.56249985,0.21093573,-0.03954289,
+         0.00443319,-0.00031761,0.00001109/
      DATA J1B /0.79788456,0.00000156,0.01659667,0.00017105,
+         -0.00249511,0.00113653,-0.00020033/
      DATA Y1B /-2.35619449,0.12499612,0.0000565,-0.00637879,
+         0.00074348,0.00079824,-0.00029166/

```

```

C*****INITIALIZATION
      BJ(1)=0.0
      BJ(2)=0.0
      BY(1)=0.0
      BY(2)=0.0

```

```

C*****CHECK FOR CORRECT ARGUMENT
      IF(X.LE.0) THEN
        WRITE(11,50)
50      FORMAT(' ARGUMENT OF BESSEL FUNCTIONS .LE. 0',)
        STOP' ERROR IN CALL OF BESJY'
      ENDIF

```

```
      IF(X.GT.3.) GO TO 100
```

```
C*****IF ARGUMENT LESSER THAN EQUAL TO 3.
```

```

C*****BJ(1)
      DO 1 I=1,7

```

```
1      BJ(1)=BJ(1)+J0A(I)*(X/3.)**(2*(I-1))
```

```
C*****BY(1)
```

```
      BY(1)=2./PI*ALOG(.5*X)*BJ(1)
```

```
      DO 2 I=1,7
```

```
2      BY(1)=BY(1)+Y0A(I)*(X/3.)**(2*(I-1))
```

```
C*****BJ(2)
```

```
      DO 3 I=1,7
```

```
3      BJ(2)=BJ(2)+J1A(I)*(X/3.)**(2*(I-1))
```

BJ(2)=BJ(2)*X

C*****A SERIES REPRESENTATION FOR BY(2) IS APPLIED

Z=X/2.

Z2=Z**2

A=1.

B=1.

BY(2)=2./PI*ALOG(Z)*BJ(2)-1./Z/PI

DO 4 I=1,1000

AB=Z/PI*(A-2*EU)*B

BY(2)=BY(2)-AB

IF(ABS(AB/BY(2))).LT.1.E-9) RETURN

AI=FLOAT(I)

A=A+1./AI+1./AI+1)

B=B*Z2/AI/(AI+1.)*(-1.)

4 CONTINUE

RETURN

C*****IF ARGUMENT GREATER THAN 3.

100 CONTINUE

C*****BJ(1) AND BY(1)

A=0.0

B=0.0

DO 5 I=1,7

5 A=A+J0B(I)*(3./X)**(I-1)

B=X

DO 6 I=1,7

6 B=B+Y0B(I)*(3./X)**(I-1)

BJ(1)=1./SQRT(X)*A*COS(B)

BY(1)=1./SQRT(X)*A*SIN(B)

C*****BJ(2) AND BY(2)

A=0.0

B=0.0

DO 7 I=1,7

7 A=A+J1B(I)*(3./X)**(I-1)

B=X

DO 8 I=1,7

8 B=B+Y1B(I)*(3./X)**(I-1)

BJ(2)=1./SQRT(X)*A*COS(B)

BY(2)=1./SQRT(X)*A*SIN(B)

RETURN

END

Anhang E: Programm WLFAUS

Ausdruck des Programm-Listings

```
program wlfaus

C *****
C *****
C ***** Auswerteprogramm für Aufheizkurven von Linienquellen.
C *****
C ***** ZEITANF - Anfangszeit des auszuwertenden Intervalls
C ***** ZEITEND - Endzeit des auszuwertenden Intervalls
C ***** ANFLANG - Kleinste laufende Intervalllänge
C ***** ENDLANG - Groesste laufende Intervalllänge
C ***** INKLANG - Schrittgrösse des laufenden Intervalls
C ***** in Einheiten der Messpunktabstände
C ***** MAXLOES - Untere Zeitgrenze für das Maximum
C ***** der sch. Wlf
C ***** MAXSDEV - Obere Grenze für Standardabweichung der
C ***** Approximation der Aufheizkurve
C *****
C ***** Belegung der Kanäle:
C ***** 1: Zum Einlesen der Daten
C ***** 2: Tabellarisches Protokoll der Auswertung. Kann auch für
C ***** Darstellung mit Grapher genutz werden
C ***** 3: Zusammenfassung der Auswertung mit Endergebnis
C ***** 4: Errorfile für Fehlermeldungen
C ***** 5: Standard Input
C ***** 6: Standard Output
C ***** 7: GRIPS - Metafile
C ***** 8: Datei zum Einlesen der Auswerteparameter
C ***** 9: Datei für Tabelle mit scheinbarer WLF
C ***** 10: Datei mit Eichkoeffizienten für Thermistoren
C ***** 11: Datei für alle Relativkanäle der Sonde
C ***** 12: Datei für alle Absolutkanäle der Sonde
C ***** 13: Datei für Heizleistung, Strom und Spannung der Sonde
C *****
C *****
C *****
parameter (nmes=1000, nerg=500)

C *****
C ***** Parameter-Anweisung für Anzahl der Messwerte (nmes) und
C ***** Lösungen (nerg). Kommt in folgenden Routinen vor:
C ***** AUSWERT, LIESDAT, LIESERG, SONDEKT, SONDEROE
C ***** SPEICHER, ZERGB
C *****
C *****
logical dataset,ergset,paraset,bild,proto,ergeb
integer *2 auswahl
integer datentyp,anzahl
real maxloes,maxsdev
character *70 fmt,titel
character *10 kdatum,ktime

common /data/ zeit(nmes),temp(nmes),hzleist,anzahl,wlfa(nmes)
common /para/ zeitanf,zeitend,anflang,endlang,inklang,
+ maxloes,maxsdev
common /ausw/ wlf(nerg),wlfmax(nerg),wlfanf(nerg),
+ wlfend(nerg),wlfint(nerg),sdev(nerg)
common /ergb/ wlfmtl,wlfasy,asymax,asyanf,asyend,wlfamin,wlfamax
common /logo/ bild,proto,ergeb
common /char/ titel,kdatum,ktime

dataset = .false.
paraset = .false.
ergset = .false.

call header
pause
C *****
C ***** Auswahlmenue aufrufen
C *****
0001 auswahl = -1
call menu (auswahl)

C *****
```

```

c ***** AUSWAHL = 0 : Ende des Programms
c *****
  if (auswahl .eq. 0) then
    goto 9999

c *****
c ***** AUSWAHL = 1 : Einlesen oder bearbeiten der Daten
c *****
  else if (auswahl .eq. 1) then

0002   call datform (datentyp,fmt)
       call liesdat (datentyp,fmt)
       dataset = .true.
       goto 0001

c *****
c ***** AUSWAHL = 2 : Festlegen der Auswerteparameter
c *****
  else if (auswahl .eq. 2) then
0003   call getpara
       paraset = .true.
       goto 0001

c *****
c ***** AUSWAHL = 3 : Festlegen der Ergebnisform
c *****
  else if (auswahl .eq. 3) then
0004   call ergform
       ergset = .true.
       goto 0001

c *****
c ***** AUSWAHL = 4 : Darstellung der Messwerte und sch. Wlf
c *****
  else if (auswahl .eq. 4) then

       if (.not. dataset) goto 0002
       call messkurv (datentyp,fmt)
       call dospause
       goto 0001

c *****
c ***** AUSWAHL = 5 : Darstellung der Ergebnisse
c *****
  else if (auswahl .eq. 5) then

       call lieserg (iloes, dauer)
       proto = .false.
       ergeb = .false.
       bild = .true.
       call dospause

       goto 0001

c *****
c ***** AUSWAHL = 8 : Auswertung mit L.R.
c *****
  else if (auswahl .eq. 8) then

       if (.not. dataset) goto 0002
       if (.not. paraset) goto 0003
       call linaus (datentyp)

       goto 0001

c *****
c ***** AUSWAHL = 9 : Auswertung mit Kristiansen
c *****
  else if (auswahl .eq. 9) then

       if (.not. dataset) goto 0002
       if (.not. paraset) goto 0003
       if (.not. ergset) goto 0004

       call auswert (datentyp)

```

```

        goto 0001

    else
        goto 0001

    end if

9999  stop 'Ende WLFAUS'
      end
      subroutine auswd (datentyp,minsoll,maxsoll)
C *****
C *****
C ***** Auswertung der Aufheizkurve. Schema:
C *****
C ***** - Festlegen eines Zeitintervalls
C ***** - Einlesen der Daten aus diesem Intervall
C ***** - Approximation der Daten
C ***** - Auswahlkriterium SDEV
C ***** - Auswahlkriterium Zeitpunkt des Maximums
C ***** - Wenn Kriterien erfuehlt, speichern
C ***** - Neues Intervall?
C *****
C *****
C *****
      parameter (mmmlll=1500)

      logical bild,proto,ergeb
      integer anzahl,datentyp

      real maxloes,maxsdev,intlang,minsoll,maxsoll

      character *70 titel
      character *10 kdatum, ktime

      character*72 lfn

      double precision workz(1000),workt(1000)
      double precision weight(1000)
      double precision work(10000), koeff(7)
      double precision abweich, summe, dbsdev, faktor
      double precision zeit0,zeit1,zeite,arg
      double precision wwert, zgros

      common /data/ zeit(1000),temp(1000),hzleist,anzahl,wfa(1000)
+      common /para/ zeitanf,zeitend,anflang,endlang,inklang,
+      maxloes,maxsdev

      common /ausw/ wlf(mmmlll),wlfmax(mmmlll),wlfanf(mmmlll),
+      wlfend(mmmlll),wlfint(mmmlll),sdevs(mmmlll)

      common /ergb/ wlfmtl,wlfasy,asymax,asyanf,asyend
      common /logo/ bild,proto,ergeb
      common /char/ titel,kdatum,ktime

      external fapprox, flog
          external dfnlsq, df2lsq, umach

      open (4,file='errors')
      rewind (4)

      do 9000 i=1,500
          wlf(i) = 0.
          wlfmax(i) = 0.
          wlfanf(i) = 0.
          wlfend(i) = 0.
          wlfint(i) = 0.
9000  continue

      ilauf = 0
      iloes = 0
      wlfsum = 0.
      wlfmtl = 0.
      wlfasy = 0.
      asymax = 0.
      asyanf = 0.
      asyend = 0.

```

```

c ***** Bildschirm aufbauen
  call maske1 (titel, kdatum, ktime)

c *****
c ***** Anfangszeit der Auswertung bestimmen
c *****

      call getdat (iyear, imonth, iday)
cKEM      iyear bezieht sich auf das Jahr 2000
          iyear = iyear - 2000
          write (kdatum, '(1x,i2,a1,i2,a1,i2,1x)' iday,' ',imonth,' ',
+            iyear
          call gettim (ihour, iminute, isecound, ihhsec)
          write (ktime, '(1x,i2,a1,i2,a1,i2,a1)' ihour,' ',iminute,' ',
+            isecound,' '

          call secon (sec)
          zeit0 = dble(sec)

          call info4 (' Abbruch mit beliebiger Taste möglich !')

c ***** Anzahl der Koeffizienten festlegen

  NAP = 4

c *****
c ***** Faktor = Q/4*PI
c *****

  pi = 3.14159265

  faktor = dble( hzleist / (4. * pi))

  if (datentyp .eq. 1) faktor = faktor * dble(2.)

c *****
c ***** Festlegen eines Zeitintervalls
c *****

  if (zeit(anzahl) .lt. zeitend) zeitend = zeit(anzahl)

  do 1000 i=1,anzahl
    if (zeit(i) .le. zeitanf) ianf = i
1000  continue

  zeitstop = zeitend - anflang

  do 1001 i=ianf,anzahl
    if (zeit(i) .le. zeitstop) istop = i
    if (zeit(i) .le. zeitend ) iende = i
1001  continue

3000  intlang = anflang

  do 1005 i=ianf,iende
    if (zeit(i) .le. (zeit(ianf) + intlang)) iend = i
1005  continue

  if (zeit(iend) .gt. zeitend .and. ianf .ge. istop) goto 9999

2000  if (iend .gt. anzahl) goto 5000
      if (zeit(iend) .gt. zeitend) goto 5000

  nwork = iend - ianf + 1

c *****
c ***** Double Precision Arbeitsfelder festlegen
c *****

  do 1010 i=1,nwork
    j = ianf + i - 1
    workz(i) = dlog( dble ( zeit(j) ) )
    workt(i) = dble ( temp(j) )
1010  continue

c *****
c ***** Approximation der Werte mit dflnsq aus IMSL

```

```

c *****
C Arguments:
C F - User-supplied FUNCTION to evaluate basis functions.
C The form is
C F(K, X), where
C K - Number of the basis function. (Input)
C K may be equal to 1, 2, ... NBASIS.
C X - Argument for evaluation of the K-th basis
C function. (Input)
C F - The function value. (Output)
C F must be declared EXTERNAL in the calling program.
C The data FDATA is approximated by INTCEP + A(1)*F(1,X)
C + A(2)*F(2,X) + ... + A(NBASIS)*F(NBASIS,X).
C INTCEP - Intercept option. (Input)
C INTCEP Action
C 0 No intercept is automatically included in the
C model.
C 1 An intercept is automatically included in the
C model.
C NBASIS - Number of basis functions. (Input)
C NDATA - Number of data points. (Input)
C XDATA - Array of length NDATA containing the abscissas of the
C data points. (Input)
C FDATA - Array of length NDATA containing the ordinates of the
C data points. (Input)
C IWT - Weighting option. (Input)
C IWT Action
C 0 Weights of one are assumed.
C 1 Weights are supplied in WEIGHT.
C WEIGHT - Array of length NDATA containing the weights.
C (Input if IWT = 1)
C If IWT = 0, WEIGHT is not referenced and may be
C dimensioned of length one.
C A - Array of length NBASIS containing the coefficients of the
C approximation. (Output)
C If INTCEP = 1, A(1) contains the intercept. A(INTCEP+I)
C contains the coefficient of the I-th basis function.
C SSE - Sum of squares of the errors. (Output)

```

```

intcep = 0
nbasis = nap
ndata = nwork
iwt = 0

```

```

c***** Entsprechungen

```

```

c xdata = workz
c fdata = workt
c a = koeff
c sse = sdev

```

```

+ call dfnlsq (flog, intcep, nbasis, ndata, workz, workt, iwt,
weight, koeff, sse )

```

```

c ***** Berechnung der WLF fuer grosse Zeiten aus dem Funktionensystem

```

```

zgros = dble(1.e10)
wwert = wlfgrs( faktor, zgros, nap, koeff)

ww = sngl( faktor / koeff(2) )
write (*, '(1x,f10.0,e20.6,2f15.5)')zeit(iend),sdev,wwert,ww
write(24,'(1x,f10.0, e20.6,2f15.5)')zeit(iend),sdev,wwert,ww

write (*, '(1x,f10.0,f15.5,e20.6)')zeit(iend),wwert,sdev
write(24,'(1x,f10.0, f15.5,e20.6)')zeit(iend),wwert,sdev

goto 4000

```

```

c *****
c ***** Berechnung der zeitl. Lage des Maximums der sch. Wlf
c *****

```

```

arg = (2. * koeff(3) - koeff(4)) / koeff(3)

if ( arg .gt. 300.) .or. (arg .lt. -300.) then
call SetCuP (21,1)
print *, ' ***** nicht fataler Fehler in HLQAUS : '

```

```

print *, '*** ARG VON EXP >> 300 ODER << ALS -300 ***'
goto 4000
end if

zeitmax = sngl( dlog10( dexp( arg)))

C *****
C ***** Maximum?
C *****

if ( koeff(3) .le. 0.) goto 4000

C *****
C ***** Liegt das Maximum ueber MAXLOES?
C *****

if (zeitmax .lt. alog10(maxloes)) goto 4000

C *****
C ***** Ableitung bei Maximum stetig?
C *****

zeitm = 10.**zeitmax
if ( (koeff(2) * zeitm - koeff(3)) .eq. 0.) goto 4000

C *****
C ***** Wenn Kriterien erfuellt, WLF berechnen
C *****

wfwert = sngl( faktor / koeff(2) )

C *****
C ***** Bereich der Loesungen einschränken
C *****

if (wfwert .lt. minsoll) goto 4000
if (wfwert .gt. maxsoll) goto 4000

C *****
C ***** Berechnung der SDEV
C *****

summe = dble(0.)

do 1020 i=1,nwork
  abweich = workt(i) -
+      ( koeff(1) +
+      koeff(2) * workz(i) +
+      koeff(3) * workz(i) / dexp( workz(i) )+
+      koeff(4) / dexp( workz(i) ) )

  summe = summe + abweich**2
1020 continue

dbsdev = dsqrt (summe)/dble(nwork)

sdev = sngl(dbsdev)

C *****
C ***** SDEV kleiner als MAXSDEV ?
C *****

if (sdev .gt. maxsdev) goto 4000

C *****
C ***** Wenn Kriterien erfuellt, Wert speichern
C *****

iloes = iloes + 1

if (iloes .gt. mmmlll) then

  call setup (17,1)
  write (*,'(A,i4,A)') ' Mehr als ',mmmlll, ' Loesungen!'
  pause ' Weiter mit RETURN'

```

```

        call speicher (iloes,dauer,datentyp)

        return
    end if

wlf(iloes) = sngl( faktor / koeff(2) )
wlfmax(iloes) = zeitmax
wlfanf(iloes) = zeit(ianf)
wlfend(iloes) = zeit(iend)
wlfint(iloes) = zeit(iend) - zeit(ianf)
sdevs(iloes) = sdev

wlfsum = wlfsum + wlf(iloes)
wlfmtl = wlfsum/real(iloes)

if (iloes .eq. 1) then

    altmax = 0.
    asymax = wlfmax(1)
    wlfasy = wlf(1)
    asyanf = wlfanf(1)
    asyend = wlfend(1)
    ilauf = 0

    if (wlfmax(1).gt.30.) wlfmax(1)=30.

else if (iloes .gt. 1) then

    do 1500 i=2,iloes
        if (wlfmax(i) .gt. asymax) then
            asymax = wlfmax(i)
            iasy = i
            wlfasy = wlf(iasy)
            asyanf = wlfanf(iasy)
            asyend = wlfend(iasy)
            if (wlfmax(i).gt.30.) wlfmax(i)=30.
        end if
1500    continue

    if (asymax .gt. altmax) then
        altmax = asymax
        ilauf = 0

    else if (asymax .le. altmax) then
        ilauf = ilauf + 1
    end if

    else
        asymax = 0.
        wlfasy = 0.
        ilauf = 0
    end if

4000 wlfwert = sngl( faktor / koeff(2) )
    if (ierr.ne.0) wlfwert = 0.

c *****
c ***** Auswertzustand auf Bildschirm geben
c *****

CKEM  call chkend (iquit)
      IQUIT = 0
      if (iquit .ne. 0) then
          call setcup (17,1)
          print *, ' Vorzeitiger Abbruch!'
          pause ' Weiter mit RETURN'
          dauer = sngl(zeit1)
          call speicher (iloes,dauer,datentyp)
          return
      end if

c***** Bildschirmausgabe der Auswertinformationen

      call secon (sec)

      zeit1 = dble(sec)
      zeit1 = zeit1 - zeit0

```

```

zanf = zeit(ianf)
zend = zeit(iend)

call info1 (zanf,zend,intlang,wfswert)
call info2 (maxloes,iloes,wfswmt,wfswasy,asymax,ilauf)

call info3 (zeit1)

c *****
c ***** Neues Intervall mit neuer Laenge bei gleicher Anfangszeit
c *****

iend = iend + inklang
intlang = zeit(iend)-zeit(ianf)
if (intlang .le. endlang) goto 2000

c *****
c ***** Neues Intervall mit Anfangslänge. Anfangszeit eins weiter.
c *****

IQUIT = 0
if (iquit .ne. 0) then
  call setup (17,1)
  print *, 'Vorzeitiger Abbruch!'
  pause ' Weiter mit RETURN'
  dauer = sngl(zeit1)
  call speicher (iloes,dauer,datentyp)
  return
end if

5000 ianf = ianf + inklang

if (ianf .le. istop) goto 3000

9999 continue

      call secon (sec)

      zeit1 = dble(sec)
      zeite = zeit1 - zeit0
      dauer = sngl (zeite)

      call setup (17,1)

      call speicher (iloes,dauer,datentyp)

      return
      end

      subroutine datform (datentyp,fmt)

c *****
c ***** Legt das Datenformat fest und übergibt es als Character FRMT
c ***** Moegliche Datensätze:
c *****
c ***** - Messdaten mit der HLQ
c ***** - Modelldaten von SHEMAT
c ***** - Modelldaten von TFELD
c ***** - Messdaten der Bohrlochsonde
c ***** - Eigenes Format
c *****
c *****

      character *70 fmt
      integer dententyp

      call clrmon
c***** Negativanzeige an
      call SetGrM (7)

      write (*,100)

100  format (15x,'FESTLEGUNG DES DATENFORMATS',15x,///)

c***** Negativanzeige aus
      call SetGrM (0)

```



```

c***** Intensivanzeige an
call SetGrM (1)

write (*,110)

110 format (12x,
+ ' Bitte waehlen Sie eine Nummer!,,,
+ ' Messdaten der HLQ ..... (1)',//,
+ ' Messdaten der Bohrlochsonde ..... (2)',//,
+ ' Modelldaten SHEMAT ..... (3)',//,
+ ' Modelldaten TFELD ..... (4)',//,
+ ' Eigenes Format ..... (5)',//,
+ ' Hauptmenue ..... (0)',//)

c***** Intensivanzeige aus
call SetGrM (0)

print *

call readkbd (datentyp)

c *****
c ***** Datentyp = 0 : Abbruch
c *****
c         if (datentyp .eq. 0) then
c           return

c *****
c ***** Datentyp = 1 : Daten HLQ
c *****
c         else if (datentyp .eq. 1) then
c           frmt = 'f16.9,f16.4'

c *****
c ***** Datentyp = 2 : Daten Bohrlochsonde
c *****
c         else if (datentyp .eq. 2) then

c           call clrmon

c           write (*,2000)
2000 format(
+ ' Packersonde Roethenbach 12/89 ..... (1)',/
+ ' Heizstabsonde Roethenbach 12/89 ..... (2)',/
+ ' Heizstabsonde KTB-VB korrekte Kanäle (800/1465) .... (3)',/
+ ' Heizstabsonde KTB-VB vertauschte Kanäle ..... (4)',/)

c           call readkbd (datentyp)

c           datentyp = datentyp + 10

c           return

c *****
c ***** Datentyp = 3 : Modelldaten SHEMAT
c *****
c         else if (datentyp .eq. 3) then
1000 call clrmon
c           write (*,130)
130 format (//,' In welcher Spalte stehen die Temperaturwerte?',//)
c           call readkbd (ispalt)
c           if (ispalt .eq. 1) then
c             frmt = '(1x,g12.5,1x,f12.4)'
c           else if (ispalt .eq. 2) then
c             frmt = '(1x,g12.5,13x,f12.4)'
c           else if (ispalt .eq. 3) then
c             frmt = '(1x,g12.5,25x,f12.4)'
c           else if (ispalt .eq. 4) then
c             frmt = '(1x,g12.5,37x,f12.4)'
c           else if (ispalt .eq. 5) then
c             frmt = '(1x,g12.5,49x,f12.4)'
c           else
c             print *, ' Spalte 1 - 5 !!!'
c             goto 1000
c           end if

c *****

```

```

c ***** Datentyp = 4 : Modelldaten TFELD
c *****
   else if (datentyp .eq. 4) then
       frmt = '(1x,f11.3,1x,f8.4)'

c *****
c ***** Datentyp = 5 : Daten mit eigenem Format
c *****
   else if (datentyp .eq. 5) then
       call clrmon
       write (*,140)
140   format (//,' Bitte eigenes Format eingeben!',//,
+         ' Z.B.: (1x,f11.3,1x,f8.4)',//)
       read (*,'(a70)') frmt
1100  write (*,120)
120   format (//,' Bitte die Reihenfolge angeben!',//,
+         ' Temp,Zeit ..... (1)',//,
+         ' Zeit,Temp ..... (2)',//)
       call readkbd (ireih)
       if (ireih .eq. 1) then
           datentyp = 5
       else if (ireih .eq. 2) then
           datentyp = 6
       else
           print *, ' Fehler! Bitte nochmal'
           goto 1100
       end if
   end if

   return
   end

       subroutine dospause

c *****
c ***** Ruft den Befehl "PAUSE" auf, so dass im folgenden mit
c ***** MSDOS gearbeitet werden kann. Z.B.: PREVIEW
c *****
       call clrmon

       print *
       print *

c***** Negativanzeige an
       call SetGrM (7)

       write (*,100)
100   format (' PAUSE :',//,' Sie können jetzt mit MSDOS arbeiten!',//,
+         ' Z.B.: PV NAME.GKS',//,
+         ' Mit RETURN wird WLFAUS wieder aktiv.')
```

```

c***** Negativanzeige aus
       call SetGrM (0)

       pause

       return
       end

       subroutine ergform (bild,proto,ergeb,wlfamin,wlfamax)

c *****
c ***** Festlegen der Ergebnisform.
c *****
c ***** 1: Tabellarisches Protokoll der Auswertung. Kann auch fuer
c ***** Darstellung mit Grapher genutzt werden.
c ***** 2: Zusammenfassung der Auswertung mit Endergebnis.
c ***** 3: Erzeugung eines GRIPS - Metafiles. Noch nicht bereit.
c *****
c *****
       logical bild, proto, ergeb, test

       common /tst/ test

       proto = .false.
```

```

    ergeb = .false.
    bild = .false.

c *****
c ***** Bereich der Loesungen einschraenken
c *****

        if (.not.test) then
            call clrmon

100         write (*,100)
            format (//,' Eingrenzung der gefundenen Loesungen:',//,
+              ' Untere Grenze :  ')

110         read (*,110) wlfamin
            format (f16.4)

120         write (*,120)
            format (/, ' Obere Grenze :  ')

            read (*,110) wlfamax

            call clrmon

        else
            wlfamin = 0.
            wlfamax = 1000.
            proto   = .true.
            ergeb   = .true.
            bild    = .false.
            return

        end if

0001    continue
        call clrmon
c***** Negativanzeige an
        call SetGrM (7)

        write (*,130)
130    format (/,10x,'MENUE ZUM FESTLEGEN DER ERGEBNISFORM',11x,//
+          11x,'Die Auswahl ist nicht alternativ !',12x)

c***** Negativanzeige aus
        call SetGrM (0)

c***** Intensivanzeige an
        call SetGrM (1)

        write (*,140)
140    format (//,
+ ' Hauptmenue ..... (0)',//,
+ ' Tabellarisches Protokoll der Auswertung ..... (1)',//,
+ ' Zusammenfassung mit Endergebnis ..... (2)',//,
+ ' Erzeugung eines GRIPS - Metafiles .....(3)',//)

c***** Intensivanzeige aus
        call SetGrM (0)

c***** Negativanzeige an
        call SetGrM (7)

        write (*,200)
200    format (' Bisher ausgewaehlt :',//)

c***** Negativanzeige aus
        call SetGrM (0)

        call setup (18,1)

        if (proto) write (*,210)
210    format (22x,' Tabellarisches Protokoll',/)
        if (ergeb) write (*,220)
220    format (22x,' Zusammenfassung',/)
        if (bild) write (*,230)
230    format (22x,' GRIPS - Metafile ',/)

        call iget (' >>>> Auswahl ?', iwahl, 0)

```

```

if (iwahl .eq. 0) then
  return
else if (iwahl .eq. 1) then
  proto = .true.
  goto 0001
else if (iwahl .eq. 2) then
  ergeb = .true.
  goto 0001
else if (iwahl .eq. 3) then
  bild =.true.
  goto 0001
else
  pause ' Eingabefehler!'
  goto 0001
end if

return
end

```

double precision FUNCTION FAPPROX (K,X)

```

C *****
C *****
C ***** DIENT ZUR BERECHNUNG DER FORMEL:
C ***** TEMPERATUR(T) =
C ***** = A1+A2*LNT+A3*(LNT)/T+A4/T+[A5*LNT**2+A6*LNT+A7]/T**2
C ***** ES IST : X = ln t
C *****
C *****

```

implicit double precision (a-h,o-z)

```

IF (K.EQ.1) FAPPROX = 1.
IF (K.EQ.2) FAPPROX = x
IF (K.EQ.3) FAPPROX = x/dexp(x)
IF (K.EQ.4) FAPPROX = 1./dexp(x)
IF (K.EQ.5) FAPPROX = x**2./(dexp(x))**2.
IF (K.EQ.6) FAPPROX = x/(dexp(x))**2.
IF (K.EQ.7) FAPPROX = 1./(dexp(x))**2.

```

```

RETURN
END

```

double precision FUNCTION FLOG (K,X)

```

C *****
C *
C * DIENT ZUR BERECHNUNG DER FORMEL:
C * TEMPERATUR(T) =
C * = A1+A2*LNT+A3*(LNT)/T+A4/T+A5((LNT)/T)**2+A6LNT/T**2+A7/T**2
C * ES IST : X = t
C *
C *****

```

implicit double precision (a-h,o-z)

```

IF (K.EQ.1) FLOG = 1.
IF (K.EQ.2) FLOG = X
IF (K.EQ.3) FLOG = X*dEXP(-X)
IF (K.EQ.4) FLOG = dEXP(-X)
IF (K.EQ.5) FLOG = (X * dEXP(-X)) ** 2.
IF (K.EQ.6) FLOG = X * dEXP(-2.*X)
IF (K.EQ.7) FLOG = dEXP(-2.*X)

```

```

RETURN
END

```

subroutine freqtemp(ifreq,ikenn,temp)

```

c *****
c ***** Berechnet die Temperatur aus den Polynomkoeffizienten der
c ***** Thermistoren PT1001 - PT1008 gemäss der Eichung vom 9.10.89
c ***** aus der von der Sonde gemessenen Frequenz.
c *****
c ***** Sonde Röthenbach:
c *****
c ***** ikenn 0 : Datenblatt PT1000

```

```

c ***** ikenn < 0 : Absolutkanäle
c ***** ikenn 1 - 99 : Packersonde
c ***** ikenn 100 - 199 : Heizstabsonde
c *****
c ***** Sonde KTB :
c *****
c ***** ikenn >1000 : Bereich als letzte Ziffer
c *****
c ***** Sonde Griessbach:
c *****
c ***** ikenn >2000 : Bereich als letzte Ziffer
c *****
c *****

```

implicit double precision (f)

```

c ***** Faktoren für die Umrechnung Frequenz - Widerstand

```

```

c ***** Relativkanäle Röthenbachsonde

```

```

    if (ikenn.ge.0 .and. ikenn.lt.1000) then

```

```

        freqfak1 = 1012.36
        freqfak2 = 0.0020645
        freqfak3 = 0.

```

```

c ***** Absolutkanäle Röthenbachsonde

```

```

    else if (ikenn .lt. 0) then

```

```

        freqfak1 = -0.826842
        freqfak2 = .0210642
        freqfak3 = 0.

```

```

c ***** Absolutkanäle KTB Sonde

```

```

    else if (ikenn .eq. 1000) then

```

```

        freqfak1 = -36.2
        freqfak2 = -4.62e-3
        freqfak3 = 1.42e-7

```

```

c ***** Relativkanäle KTB Sonde Bereich 1

```

```

    else if (ikenn .eq. 1001) then

```

```

        freqfak1 = 1011.75
        freqfak2 = 2.533e-3
        freqfak3 = 0.

```

```

c ***** Relativkanäle KTB Sonde Bereich 2

```

```

    else if (ikenn .eq. 1002) then

```

```

        freqfak1 = 1069.68
        freqfak2 = 2.537e-3
        freqfak3 = 0.

```

```

c ***** Relativkanäle KTB Sonde Bereich 3

```

```

    else if (ikenn .eq. 1003) then

```

```

        freqfak1 = 1130.99
        freqfak2 = 2.544e-3
        freqfak3 = 0.

```

```

c ***** Relativkanäle KTB Sonde Bereich 4

```

```

    else if (ikenn .eq. 1004) then

```

```

        freqfak1 = 1184.81
        freqfak2 = 2.558e-3
        freqfak3 = 0.

```

```

c ***** Relativkanäle KTB Sonde Bereich 5

```

```
else if (ikenn .eq. 1005) then
```

```
  freqfak1 = 1243.02  
  freqfak2 = 2.606e-3  
  freqfak3 = 0.
```

```
c ***** Relativkanäle KTB Sonde Bereich 6
```

```
else if (ikenn .eq. 1006) then
```

```
  freqfak1 = 1292.48  
  freqfak2 = 3.029e-3  
  freqfak3 = 4.536e-9
```

```
c ***** Relativkanäle Griessbach-Sonde Bereich 1
```

```
else if (ikenn .eq. 2001) then
```

```
  freqfak1 = 2.9393  
  freqfak2 = 6.5368E-4
```

```
c ***** Relativkanäle Griessbach-Sonde Bereich 2
```

```
else if (ikenn .eq. 2002) then
```

```
  freqfak1 = 17.889  
  freqfak2 = 6.5471E-4
```

```
c ***** Relativkanäle Griessbach-Sonde Bereich 3
```

```
else if (ikenn .eq. 2003) then
```

```
  freqfak1 = 33.711  
  freqfak2 = 6.5651E-4
```

```
c ***** Relativkanäle Griessbach-Sonde Bereich 4
```

```
else if (ikenn .eq. 2004) then
```

```
  freqfak1 = 47.600  
  freqfak2 = 6.6013E-4
```

```
c ***** Relativkanäle Griessbach-Sonde Bereich 5
```

```
else if (ikenn .eq. 2005) then
```

```
  freqfak1 = 62.949  
  freqfak2 = 6.6761E-4
```

```
c ***** Relativkanäle Griessbach-Sonde Bereich 6
```

```
else if (ikenn .eq. 2006) then
```

```
  freqfak1 = 78.560  
  freqfak2 = 6.7122E-4
```

```
else
```

```
  pause 'Eingabefehler Sub FREQTEMP'  
  return
```

```
end if
```

```
c ***** Faktoren für die Umrechnung Widerstand - Temperatur
```

```
c ***** Thermistor 1
```

```
if (ikenn .eq. 1) then
```

```
  a1 = -234.428  
  a2 = 0.216  
  a3 = 1.85E-5
```

```
c ***** Thermistor 2
```

```
else if (ikenn .eq. 2) then
```

```
  a1 = -229.263  
  a2 = 0.206916
```

```

a3 = 2.24E-5
c ***** Thermistor 3

else if (ikenn .eq. 3) then
a1 = -233.064
a2 = 0.214284
a3 = 1.89752E-5

c ***** Thermistor 4

else if (ikenn .eq. 4) then
a1 = -235.915
a2 = 0.219091
a3 = 1.69718E-5

c ***** Thermistor 5

else if (ikenn .eq. 5) then
a1 = -233.139
a2 = 0.214315
a3 = 1.90247E-5

c ***** Thermistor 6

else if (ikenn .eq. 6) then
a1 = -240.022
a2 = 0.225543
a3 = 1.43829E-5

c ***** Thermistor 7

else if (ikenn .eq. 7) then
a1 = -235.691
a2 = 0.218548
a3 = 1.72501E-5

c ***** Thermistor 8

else if (ikenn .eq. 8) then
a1 = -234.487
a2 = 0.216707
a3 = 1.79732E-5

c ***** Thermistor 101

else if (ikenn .eq. 101) then
a1 = -244.363
a2 = 0.234216
a3 = 1.03E-5

c ***** Thermistor 102

else if (ikenn .eq. 102) then
a1 = -244.924
a2 = 0.234162
a3 = 1.08E-5

c ***** Thermistor 105

else if (ikenn .eq. 105) then
a1 = -248.727
a2 = 0.241267
a3 = 0.76E-5

c ***** Thermistor 108

else if (ikenn .eq. 108) then
a1 = -244.674
a2 = 0.233898
a3 = 1.08E-5

c ***** Thermistor 113

else if (ikenn .eq. 113) then
a1 = -258.001
a2 = 0.257843

```

```

a3 = 0.0
c ***** Thermistor 114
    else if (ikenn .eq. 114) then
        a1 = -244.199
        a2 = 0.23331
        a3 = 1.09E-5
c ***** ungeeichter Thermistor (Tabelle PT1000)
    else if (ikenn.le.0 .or. ikenn.ge.1000) then
        a1 = -258.157
        a2 = .258064
        a3 = 0.
    else
        pause ' Eingabefehler bei Thermistorzuweisung!'
        return
    end if
    freq = dble( float(ifreq))
c ***** Berechnung des Widerstands aus der Frequenz
    r = sngl ( freqfak1 +
+         freqfak2 * freq +
+         freqfak3 * freq**2. )
c ***** Berechnung der Temperatur aus dem Widerstand
    if (ikenn .lt. 2000) then
        temp = a1 + a2 * r + a3 * r**2.
    else
        temp = r
    end if
    return
end

subroutine getpara
c *****
c ***** Zur Festlegung der Auswerteparameter.
c *****
c ***** ZEITANF - Anfangszeit des auszuwertenden Intervalls
c ***** ZEITEND - Endzeit des auszuwertenden Intervalls
c ***** ANFLANG - Kleinste laufende Intervallaenge
c ***** ENDLANG - Groesste laufende Intervallaenge
c ***** INKLANG - Schrittgroesse des laufenden Intervalls
c ***** in Einheiten der Messpunktabstände
c ***** MAXLOES - Untere Zeitgrenze fuer das Maximum
c ***** der sch. Wlf
c ***** MAXSDEV - Obere Grenze fuer Standardabweichung der
c ***** Approximation der Aufheizkurve
c *****
c *****
    logical test
    real maxloes,maxsdev
    character *70 parname
    common /para/ zeitanf,zeitend,anflang,endlang,inklang,
+         maxloes,maxsdev
    common /tst/ test
10 call clrmon

```



```

        if (test) then
            jn = 1
        else

            write (*,1000)
            format (//,' Auswerteparameter von Datei lesen ?',/
1000 +      ' Ja = 1   Nein = 0',/)
            call readkbd (jn)

        end if

c *****
c ***** Auswerteparameter von Datei lesen
c *****

        if ( jn .eq. 1 ) then

            if (test) then
                parname = 'ausparam.dat'
            else
                write (*,1100)
                format (//,' Name der Datei mit Auswerteparametern?',
1100 +      ' <ausparam.dat>',/)
                read (*,'(a70)') parname
                if (parname .eq. ' ') parname = 'ausparam.dat'

            end if

            open (8,file = parname)
            rewind (8)

            read (8,'(g16.4)') zeitanf
            read (8,'(g16.4)') zeitend
            read (8,'(g16.4)') anflang
            read (8,'(g16.4)') endlang
            read (8,'(i5)')  inklang
            read (8,'(g16.4)') maxloes
            read (8,'(g16.4)') maxsdev

            else

            call clrmon

c *****
c ***** ZEITANF - Anfangszeit des auszuwertenden Intervalls
c *****
            write (*,100)
            100 format (//,' Anfangszeit des auszuwertenden Intervalls',/
+      ' ZEITANF = ')
            read (*,'(g16.4)') zeitanf

c *****
c ***** ZEITEND - Endzeit des auszuwertenden Intervalls
c *****
            write (*,110)
            110 format (' Endzeit des auszuwertenden Intervalls',/
+      ' ZEITEND = ')
            read (*,'(g16.4)') zeitend

c *****
c ***** ANFLANG - Kleinste laufende Intervallaenge
c *****
            write (*,120)
            120 format (' Kleinste laufende Intervallaenge',/
+      ' ANFLANG = ')
            read (*,'(g16.4)') anflang

c *****
c ***** ENDLANG - Groesste laufende Intervallaenge
c *****
            write (*,130)
            130 format (' Groesste laufende Intervallaenge',/
+      ' ENDLANG = ')
            read (*,'(g16.4)') endlang

c *****
c ***** INKLANG - Schrittgroessee des laufenden Intervalls
c *****
            in Einheiten der Messpunktabstände

```

```

c *****
  write (*,140)
140  format (' Schrittgroesse des laufenden Intervalls',/,
+         ' INKLANG = ')
  read (*,(i5)) inklang

c *****
c *****  MAXLOES - Untere Zeitgrenze fuer das Maximum
c *****      der sch. Wlf
c *****
  write (*,150)
150  format (' Untere Zeitgrenze des Maximums',/,
+         ' MAXLOES = ')
  read (*,(g16.4)) maxloes

c *****
c *****  MAXSDEV - Obere Grenze fuer Standardabweichung der
c *****      Approximation der Aufheizkurve
c *****
  write (*,160)
160  format (' Maximale SDEV fuer Approximation',/,
+         ' MAXSDEV = ')
  read (*,(g16.4)) maxsdev

      end if

20  call clrmon
  write (*,200) zeitanf,zeitend,anflang,endlang,inklang,
+         maxloes,maxsdev
200  format (//,'      Auswerteparameter:',//,
+ ' Auszuwertendes Zeitintervall laeuft von',/,
+ g16.4,' bis ',g16.4,' Sekunden.',//,
+ ' Das laufende Intervall hat eine Laenge von',/,
+ g16.4,' bis ',g16.4,' Sekunden mit einem Inkrement von',/,
+ i5,' Messpunktabstaenden.',//,
+ ' Das Maximum der scheinbaren Wlf muss mindestens bei',/,
+ g16.4,' liegen.',//,
+ ' Die Standardabweichung der Approximation der',/,
+ ' Aufheizkurve darf nicht groesser als ',/,
+ g16.4,' sein.',///,
+ ' Alle Parameter sind richtig ..... (0)',/
+ ' Parameter neu festlegen ..... (1)')

      if (.not.test) then
          call readkbd (iwahl)
          if (iwahl .eq. 1) goto 10
      end if

return
end

subroutine Header
c *****
c * benoetigte externe Routinen :
c *
c * ClrMon, SetCuP, warte ..... IOSUBS
c *
c *****
  call ClrMon
c*****  Negativanzeige an
  call SetGrM (7)

  do 10 i=1,7
    write(*,1) '          '
10  continue

  call setup (8, 0)

  write(*,1) *****
  write(*,1) ****
  write(*,1) ***      Programm WLFAUS      **
  write(*,1) **          Version 4.0        *
  write(*,1) *
  write(*,1) *
  write(*,1) *          Ke                 *
  write(*,1) *
  write(*,1) *          April 2001        **
  write(*,1) ****

```

```

write(*,1) '***'
write(*,1) '*****'

do 20 i=1,6
  write(*,1) ' '
20 continue

c***** Negativanzeige aus

  call SetGrM (0)

  print *

  return

1  format (15x,a,15x)

end

subroutine info1 ( zanf, zend, ausinte, wlfwert )

call SetCuP (7,1)
print '(f9.1,a2,f9.1,5x,f9.1,2x,f10.2)',
& zanf, '-', zend, ausinte, wlfwert

return
end

subroutine info2 (zl, lngn, wlfmtl, TMPWLF, TMPMAX, LLNGN)
call SetCuP (12,1)
print '(1x,i5,2x,e9.1,f11.2,1x,f12.2,3x,f10.1, 8x, i5)',
& lngn, zl, wlfmtl, tmpwlf, tmpmax, llngn
return
end

subroutine info3 (sec)
double precision sec
call SetCuP (15,1)
write (*,'(f10.1)') sec
return
end

subroutine info4 (str)
character *(*) str
call SetCuP (17,1)
print *, ' '
call SetCuP (17,1)
print '(A)', str
return
end

c      IOSUBS.FOR
c      Enthalt :cget,dget,get,jn,kjn,fjn,dput,iput,put,wrt,wrtln,
c      clock,time,weiter,starttime,stoptime,warte,date,
c      endvdi,clrmon,getcur,setcur,setgr,setsn
CKEM   Fortran Powerstation 6.0, 2001/04

subroutine gettim (ih, im, is, ims)
integer ih, im, is, ims

INTEGER DATE_TIME (8)
CHARACTER (LEN = 12) REAL_CLOCK (3)
CALL DATE_AND_TIME
1 ( REAL_CLOCK(1),
2   REAL_CLOCK(2),
3   REAL_CLOCK(3),
4   DATE_TIME )

ih = date_time(5)
im = date_time(6)
is = date_time(7)
ims = date_time(8)

return
end

subroutine getdat (iyear, imonth, iday)

```

```

integer iyear, imonth, iday

INTEGER DATE_TIME (8)
CHARACTER (LEN = 12) REAL_CLOCK (3)
CALL DATE_AND_TIME
1 ( REAL_CLOCK(1),
2     REAL_CLOCK(2),
3     REAL_CLOCK(3),
4     DATE_TIME          )

iyear      = date_time(1)
imonth     = date_time(2)
iday       = date_time(3)

return
end

subroutine second (sec)
real*8 sec
integer ih, im, is, ims

call gettim (ih, im, is, ims)

sec = FLOAT(ih)      *3600.
1  + FLOAT(im)      * 60.
2  + FLOAT(is)
3  + FLOAT(ims)     * .001

return
end
subroutine secon (sec)
real*8 sec
call second (sec)
return
end

subroutine starttime (sec)
real*8 sec
call second (sec)
return
end

subroutine stoptime (sec1, zeit)
real*8 sec1, sec2, zeit
call second (sec2)
zeit = sec2 - sec1
return
end

subroutine warte (sec)
real*8 sec1,sec2,sec
call second (sec1)
110 call second (sec2)
   if(sec1+sec.gt.sec2) goto 110

return
end

subroutine date ( idate )
integer*4 idate
call getdat (iyear, imonth, iday )
idate = iyear-1900 + 100*imonth + 10000*iday
return
end

SUBROUTINE CGET (STR,CVAR)
CHARACTER *(*) STR, CVAR
WRITE (*,'(A)') STR
READ (*,'(A)') CVAR
RETURN
END

SUBROUTINE DGET (STR,DVAR)
CHARACTER *(*) STR
DOUBLE PRECISION DVAR
WRITE (*,'(A)') STR
READ (*,*) DVAR

```

```
RETURN
END
```

```
      SUBROUTINE IGET (STR, IVAR, iv)
ckem   20010501 fuer VisualFortran
* *****
* * MS-FORTRAN 4.01   03/89, Kemal Erbas
c *****
c * Routine zur Ausgabe eines Textes und anschliessendem Einlesen einer
c * Integer-Zahl vom Keyboard
c * Vorgabe eines Defaultwertes ist möglich :
c * für iv=1 wird der Defaultwert in ivar erwartet
c *****
c * Eingabe-Parameter:
c *   STR
c *   <IVAR> nur für iv=1 notwendig
c *   IV
c *****
c * Ausgabe-Parameter:
c *   IVAR
c *****
c *
c * benötigte externe Routinen :
c *   TEXTL ..... IOHELP
c *                   bzw IOSUBS
c *****
c *
c * nicht Standard :
c *   Backslash Editing, MS-Fortran 4.00, Language Reference, Kap. 4.8.1.7
c *
c *****
```

```
implicit integer*2 (i-n)
```

```
character*(*) STR
character dummy*72
```

```
01 if (iv.eq.1) then
    ivor = ivar
    if (ivor.ge.0) then
        if (ivor.lt.10) then
            print '(a,a,i1,a)', str,'<',ivor,'> '
        else if (ivor.lt.100) then
            print '(a,a,i2,a)', str,'<',ivor,'> '
        else if (ivor.lt.1000) then
            print '(a,a,i3,a)', str,'<',ivor,'> '
        else if (ivor.lt.10000) then
            print '(a,a,i4,a)', str,'<',ivor,'> '
        else
            print '(a,a,i10,a)', str,'<',ivor,'> '
        end if
    else
        if (iabs(ivor).lt.10) then
            print '(a,a,i2,a)', str,'<',ivor,'> '
        else if (iabs(ivor).lt.100) then
            print '(a,a,i3,a)', str,'<',ivor,'> '
        else if (iabs(ivor).lt.1000) then
            print '(a,a,i4,a)', str,'<',ivor,'> '
        else if (iabs(ivor).lt.10000) then
            print '(a,a,i5,a)', str,'<',ivor,'> '
        else
            print '(a,a,i10,a)', str,'<',ivor,'> '
        end if
    end if
    read (*,'(a72)') dummy
    call textl (dummy, ltext)
    if (ltext.eq.0) then
        ivar=ivor
    else
        read (dummy,'(i10)',err=10) ivar
```

```

    end if

else

    WRITE (*,'(A)') STR
    READ (*,'(i10)',err=10) IVAR

end if

RETURN

10 print *, ' >>>> Eingabefehler ! Eingabe wiederholen : '
go to 01

end

    SUBROUTINE GET (STR,VAR)
CHARACTER *(*) STR
WRITE (*,'(A)') STR
READ (*,*) VAR
RETURN
END

    SUBROUTINE JN (JANEIN)
CALL IGET (' >>> JA / NEIN ..... 1/0 : ',janein)
RETURN
END

    SUBROUTINE KJN (JANEIN)
CALL IGET (' >>> KORREKTUR ? JA / NEIN ..... 1/0 : ',janein)
RETURN
END

    SUBROUTINE FJN (JANEIN)
CALL IGET (' >>> FERTIG ? JA / NEIN ..... 1/0 : ',janein)
RETURN
END

    SUBROUTINE DPUT (STR,DVAR)
CHARACTER *(*) STR
DOUBLE PRECISION DVAR
WRITE (*,'(A,T50,F10.4)') STR,DVAR
RETURN
END

    SUBROUTINE IPUT (STR,IVAR)
CHARACTER *(*) STR
WRITE (*,'(A,T50,i10)') STR,IVAR
RETURN
END

    SUBROUTINE PUT (STR,VAR)
CHARACTER *(*) STR
WRITE (*,'(A,T50,F10.4)') STR,VAR
RETURN
END

    SUBROUTINE WRT (STR)
CHARACTER *(*) STR
WRITE (*,'(A)') STR
RETURN
END

    SUBROUTINE WRTLN (STR)
CHARACTER *(*) STR
WRITE (*,'(A,/)') STR
RETURN
END

    subroutine weiter
integer*2 m
call wrt (' >>> weiter im Programm ?')
call jn(m)
if (m.ne.1) stop ' ***** PROGRAMM abgebrochen *****'
return
end

```

```

subroutine ENDVDI
*****
C
C * Aufruf der ANSI Escape Sequenz : 'ESC [ ? 2 h'
C * durch Aufruf der Fortran Routine setSM aus IOsubs
C * dadurch wird der Bildschirm in den Modus : 80*25 Monochrom
C * gesetzt, anschliessend Loeschen des Bildschirms mit der
C * Routine clrMon aus IOsubs
C *
C * Literatur: COMPAQ MS-DOS Handbuch, Seite 5-15 bis 5-30
C *
C * Kemal Erbas, IBM Pro. Fortran 1.0, MS-DOS 3.2, 12/87
C *
C * benötigte externe Routinen :
C *
C *   setSM, clrMon .....IOsubs
C *
*****

call setSM (2)
call clrMon

stop ' ***** Prog. ENDVDI '
END

subroutine ClrMon
cKEM 20010501 fuer VisualFortran
C *****
C *
C * Der Bildschirm wird gelöscht, Curser in Home-Position
C *
C * Aufruf der ANSI-Escape-Sequenz: esc [ 2 J
C *
C *****
character seq*4
seq = '[2J'
write (*,1) seq
return
1 format ('+',a4)
end

subroutine getcur (m,n)
C * ruft die aktuelle cursorposition
implicit integer*2 (i-n)

character seq*4

seq = '[6n'
write (*,*) seq
read (*,*) m,n
return
end

subroutine setCUR (m,n)
C *****
C *
C * Positioniert den Curser auf die m.te zeile, n.te Spalte
C *
C * Aufruf der ANSI-Escape-Sequenz: esc [ m,n f
C *
C *****

implicit integer*2 (i-n)

character seq*35

mi = 2
ni = 2
if (m .lt. 10) mi = 1
if (n .lt. 10) ni = 1
write (seq,1) mi,ni
write (*,seq) m,n
return
1 format (11h('+', '[',i,i1,4h';',i,i1,5h'f\\'))
end

subroutine setgr (mode)
C *****

```

```

c *
c * Es wird die Grafik Voreinstellung ausgeführt
c * mögliche Werte für mode sind:
c * mode = 0 : alle Attribute aus (schwarz/weiss)
c * mode = 1 : verstärkte Intensität
c * mode = 4 : Unterstreichen (nur bei Schwarz-Weiss-Bildschirm)
c * mode = 5 : Blinken
c * mode = 7 : Umkehranzeige ein
c * mode = 30-37 : Vordergrundfarben
c * mode = 40-47 : Hintergrundfarben
c *
c * Aufruf der ANSI-Escape-Sequenz: esc [ mode m
c *
c *****

```

```
implicit integer*2 (i-n)
```

```
character seq*20
```

```

if ( mode.lt.10 ) then
  write (seq,1) '[:,mode,'m'
else
  write (seq,2) '[:,mode,'m'
end if

```

```
write (*,3) seq
```

```
return
```

```

1 format (a,i1,a)
2 format (a,i2,a)
3 format (1x,a)
end

```

```
subroutine setSM (mode)
```

```

c *****
c *
c * Es wird der Bildschirm-Modus gesetzt
c * mögliche Werte für mode sind:
c * mode = 0 : 40 * 25 Monochrome
c * mode = 1 : 40 * 25 Farbe
c * mode = 2 : 80 * 25 Monochrom
c * mode = 3 : 80 * 25 Farbe
c * mode = 4 : 320 * 200 Farbe
c * mode = 5 : 320 * 200 Monochrom
c * mode = 6 : 640 * 200 Monochrom
c * mode = 7 : Das letzte Wort das nicht mehr in die Zeile passt,
c * wird automatisch in die nächste Zeile übernommen.
c *
c * Aufruf der ANSI-Escape-Sequenz: esc [ ? mode h
c *
c *****

```

```
implicit integer*2 (i-n)
```

```
character seq*20
```

```

if ( mode.lt.10 ) then
  write (seq,1) '[:,mode,'h'
else
  write (seq,2) '[:,mode,'h'
end if

```

```
write (*,3) seq
```

```
return
```

```

1 format (a,i1,a)
2 format (a,i2,a)
3 format (1x,a)
end

```

```
subroutine liesdat (datentyp,frmt)
```

```

c *****
c ***** Zum Einlesen der Daten von Kanal 1.
c *****
c ***** Datentypen (datentyp):
c ***** 0: Datentyp muss noch festgelegt werden!

```



```

c ***** 1: Messungen der HLQ
c ***** 3: Modelldaten SHEMAT
c ***** 4: Modelldaten TFELD
c ***** 5: Daten im eigenen Format
c ***** 11-14: Messungen der Bohrlochsonde
c *****
c *****
c *****
parameter (nmes=1000, nerg=500)

      logical test

character *70 frmt,titel,datfln,wffln,dummy
character *4 datend
      character*2 dumm2

integer datentyp,anzahl,kopf

logical wfsch

common /data/ zeit(nmes),temp(nmes),hzleist,anzahl,wlfa(nmes)

common /char/ titel

      common /tst/ test

if (datentyp .eq. 0) call datform (datentyp,frmt)

c *****
c ***** Sondendaten
c ***** Packersonde Roethenbach 12/89 ..... 11
c ***** Heizstabsonde Roethenbach 12/89 ..... 12
c ***** Heizstabsonde KTB-VB korrekte Kanäle (800/1465) .... 13
c ***** Heizstabsonde KTB-VB vertauschte Kanäle ..... 14
c *****

      if (datentyp .eq. 11) then
            call sonderoe(datentyp)
            return

      else if (datentyp .eq. 12) then
            call sonderoe(datentyp)
            return

      else if (datentyp .eq. 13) then
            call sondektb(datentyp)
            return

      else if (datentyp .eq. 14) then
            call sondektb(datentyp)
            return

      end if

      wfsch = .false.

      pi = 3.14159265

c *****
c ***** Festlegen des Datenfilenamens
c *****
      if (.not.test) then

            call clrmon
            write (*,10)
10          format (/, ' Name des Datenfiles? <wlf.dat>',/)

            read (*,'(a70)') datfln
            if (datfln .eq. '') datfln = 'wlf.dat'

c *****
c ***** Soll die scheinbare WLF berechnet werden?
c *****

20          write (*,20)
            format (/, ' Scheinbare WLF berechnen und in ein',
+              ' File schreiben ?',/,
+              ' Ja = 1, Nein = 0 ',/)

```

```

                call readkbd(iwahl)
                if (iwahl .eq. 1) wlfisch = .true.
c *****
c ***** Festlegen des Datenfilenamens fuer die scheinbare WLF
c *****

                if (wlfisch) then

30      write (*,30)
          format (/, ' Name des Files fuer die sch. WLF? <wlfa.dat>',/)

          read (*,'(a70)') wffln
          if (wffln .eq. ' ') wffln = 'wlfa.dat'

          print *, 'Mit welcher Schrittweite soll die scheinbare ',
+             'WLF berechnet werden?'
          print *
          print *
          read (*,'(i3)') iwlf

          write (*,40)
40      format (//, ' Eingrenzung der scheinbaren WLF: ',//,
+             ' Untere Grenze :  ')
          read (*,50) wlfamin
50      format (f16.4)
          write (*,60)
60      format (/, ' Obere Grenze :  ')
          read (*,50) wlfamax

                end if

                else

                datfln = 'tfeld.dat'
                open (1, file=datfln, status='old')
                rewind 1

                wlfisch = .true.
                wffln = 'tfeldwlf.dat'
                wlfamin = 0.

                wlfamax = 1000.

                open (9,file=wffln)

                rewind (9)
                end if

c *****
c ***** Messdaten der HLQ
c *****

                if (datentyp .eq. 1) then

                read (1,'(a)') dummy
                read (1,'(i2,i3,a)') kopf,anzahl,dummy
                read (1,'(a70)') titel
                call clrmon
                print *,titel
                read (1,'(a)') dummy
                read (1,'(a)') dummy
                read (1,'(17x,f9.4)') hzleist
                read (1,'(a)') dummy

                if (kopf .gt. 5.) then
                    do 1010 i=1,(kopf - 5.)
1010      read (1,'(a)') dummy
                else if (kopf .le. 5.) then
                    call clrmon
                    print *, ' ***** FEHLER IN DATEI ! '
                    call datform(datentyp,frmt)
                end if

                do 1020 i=1,anzahl
1020      read (1,frmt) temp(i),zeit(i)
                continue

c *****

```

```
c ***** Modelldaten SHEMAT
c *****
```

```

else if (datentyp .eq. 3) then

    read (1,'(a70)') titel
    call clrmon
    print *,titel

    write (*,300)
300   format (//,'Wieviele Temperaturnodes wurden gewaehlt?',
+         /,'Maximal 5!',//)
    call readkbd(inodes)

    write (*,310)
310   format (//,'Anzahl der Temperaturwerte?',//)
    read (*,'(i3)') anzahl

    write (*,320)
320   format (//,'Zeitschrittgroesse in s?',//)
    read (*,'(f7.2)') deltaz

    write (*,330)
330   format (//,'Heizleistung? [W/m]',//)
    read (*,'(f12.4)') hzleist

    call clrmon
    print *
    print *
    print *,titel
    print *
    print *
    print *, 'Einlesen der Daten ...'

    do 3010 i=1,(inodes+4)
3010   read (1,'(a70)') dummy
        continue

    do 3020 i=1,anzahl
        read (1,frmt) zeit(i),temp(i)
        zeit(i) = i * deltaz
3020   continue

```

```
c *****
c ***** Modelldaten TFELD
c *****
cKEM 04/01 anpassung an TFELD DWL-File
```

```

else if (datentyp .eq. 4) then
    print *, datfln

    rewind 1
    read (1,'(A70)') titel
    print *, titel

    read (1,'(a70)') dummy
    print *, dummy
    read (1,'(a70)') dummy
    print *, dummy

    read (1,'(21x, f12.4)') hzleist
    print *, hzleist

    read (1,'(a70)') dummy
    print *, dummy
    read (1,'(a70)') dummy
    print *, dummy
    read (1,'(a70)') dummy
    print *, dummy
    read (1,'(a70)') dummy
    print *, dummy
    read (1,'(a70)') dummy
    print *, dummy
    read (1,'(a70)') dummy
    print *, dummy

    anzahl = 0
do 4010 i=1,nmes
    read (1, '(F11.5, F18.2)', end=4011) temp(i), zeit(i)

```

```

anzahl = anzahl + 1
print *, zeit(i), Temp(i)

4010  continue
4011  continue
      print *, anzahl, ' Tfeld-Daten eingelesen !'

c *****
c ***** Daten mit eigenem Format
c *****

      else if (datentyp .eq. 5 .or. datentyp .eq. 6) then

          write (*,500)
500    format (//, ' Titel der Daten?',//)
          read (*,'(a70)') titel
          write (*,510)
510    format (//, ' Anzahl der Temperaturwerte?',//)
          read (*,'(i3)') anzahl
          write (*,520)
520    format (//, ' Heizleistung? [W/m]',//)
          read (*,'(f12.4)') hzleist

          if (datentyp .eq. 5) then
              do 5010 i=1,anzahl
                  read (1,frmt) temp(i),zeit(i)
5010    continue
          else if (datentyp .eq. 6) then
              do 5020 i=1,anzahl
                  read (1,frmt) zeit(i),temp(i)
5020    continue
          end if

          else
              print *, ' Fehler beim Datenlesen!'
              return
          end if

c ***** Scheinbare WLF ausgeben, falls gewuenscht

      if (wlfsch) then
          print *
          print *
          print *, 'Berechnen der scheinbaren WLF ...'
          do 6000 k=1,anzahl
              if (k .le. (iwlfa + 1) .and. k .gt. 1) then
                  write (9,600) zeit(k),temp(k)

                  else if (k .gt. (iwlfa + 1) ) then
                      j = k - iwlfa
                      z0 = alog(zeit(k)) - alog(zeit(j))
                      z1 = temp(k) - temp(j)
                      wlfaj = (hzleist * z0) / (4.*pi*z1)
                      if (wlfaj) .lt. wlfamin ) wlfaj = wlfamin
                      if (wlfaj) .gt. wlfamax ) wlfaj = wlfamax
                      write (9,610) zeit(k),temp(k),wlfaj)

                  end if
600    format (f7.0,f9.4)
610    format (f9.1,2f9.4)
6000  continue

          end if

      return
      end

      subroutine lieserg (iloes,dauer)

c *****
c ***** Liest die Ergebnisse einer vorherigen Auswertung ein.
c ***** Es müssen Ergebnisfile und Protokollfile vorliegen !
c *****

      parameter (nmes=1000, nerg=500)

```

```

character *70 prtname,ergname,titel,text
character *10 kdatum,ktime

integer anzahl

real maxloes,maxsdev

common /data/ zeit(nmes),temp(nmes),hzleist,anzahl,wlfa(nmes)
common /para/ zeitanf,zeitend,anflang,endlang,inklang,
+      maxloes,maxsdev
common /ausw/ wlf(nerg),wlfmax(nerg),wlfanf(nerg),
+      wlfend(nerg),wlfint(nerg),sdev(nerg)
common /ergb/ wlfmtl,wlfasy,asymax,asyanf,asyend,wlfamin,wlfamax
common /logo/ bild,proto,ergeb
common /char/ titel,kdatum,ktime

call clrmon

c***** Negativanzeige an
call SetGrM (7)

write (*,100)
100  format (//,8x,'EINLESEN VON ERGEBNISSEN EINER AUSWERTUNG',8x)

write (*,105)
105  format (//,6x,'Ergebnis- und ',
+      'Protokollfile müssen vorliegen!',6x)

c***** Negativanzeige aus
call SetGrM (0)

write (*,300)
300  format (//,' Name des Ergebnis - Files ?',
+      ' <wlf.erg>',/)

read (*,(a70)) ergname
if (ergname .eq. ' ') ergname = 'wlf.erg'

open (3,file = ergname)
rewind (3)

write (*,200)
200  format (//,' Name des Protokoll - Files ?',
+      ' <wlf.prf>',/)

read (*,(a70)) prtname
if (prtname .eq. ' ') prtname = 'wlf.prf'

open (2,file = prtname)
rewind (2)

c *****
c ***** Zusammenfassendes Ergebnisfile lesen
c *****

do 3900 i=1,9
read (3,(a70)) text
3900  continue

read (3,310) titel
310  format (9x,a70)

c***** Intensivanzeige an
call SetGrM (1)

write (*,101) titel
101  format (//,a70,/)

c***** Intensivanzeige aus
call SetGrM (0)

do 3910 i=1,2
read (3,(a70)) text
3910  continue

read (3,315) hzleist

```

```

315   format (31x,f9.2)

      do 3920 i=1,6
        read (3,'(a70)') text
3920   continue

      read (3,'(60x,f10.1)') zeitanf
      read (3,'(60x,f10.1)') zeitend
      read (3,'(60x,f10.1)') anflang
      read (3,'(60x,f10.1)') endlang
      read (3,'(60x,i10)')   inklang
      read (3,'(60x,g10.1)') maxloes
      read (3,'(60x,g10.1)') maxsdev

      do 3930 i=1,3
        read (3,'(a70)') text
3930   continue

      read (3,325) kdatum,ktime
325   format(47x,2a10)

      read (3,'(a70)') text

      read (3,330) iloes
330   format (47x,i10)

      read (3,'(a70)') text

      read (3,335) wfmntl
335   format (47x,f10.3)

      do 3940 i=1,3
        read (3,'(a70)') text
3940   continue

      read (3,340) wlfasy
340   format (47x,f10.3)

      do 3950 i=1,3
        read (3,'(a70)') text
3950   continue

      read (3,'(47x,g10.1)') asymax
      read (3,'(47x,f10.1)') asyanf
      read (3,'(47x,f10.1)') asyend

      read (3,'(a70)') text

C *****
C ***** Protokollfile lesen
C *****

      read (2,'(a70)') text

      read (2,'(a70)') text

      do 2000 i=1,iloes
        read (2,220) j, wlf(i), wlfmax(i), sdev(i),
+         wlfanf(i), wlfend(i), wlfint(i)
        if (wlfmax(i) .eq. maxloes) wlfmax(i) = maxloes + 1.
2000   continue

220   format (i4,1x,f6.3,f10.6,f9.3,3(1x,f9.1))

      return
      end

      subroutine linaus (datentyp)

C *****
C *****
C ***** Auswertung der Aufheizkurve mit Linearer Regression
C *****
C *****

      parameter (nmes=1000, nerg=500)

```

```

implicit double precision (d)

logical bild,proto,ergeb

integer anzahl,datentyp
real maxloes,maxsdev,intlang,minsoll,maxsoll
character *70 titel
character *10 kdatum, ktime

double precision workz(nmes),workt(nmes)
double precision dsum(5)

common /data/ zeit(nmes),temp(nmes),hzleist,anzahl,wlfa(nmes)
common /para/ zeitanf,zeitend,anflang,endlang,inklang,
+ maxloes,maxsdev
common /ausw/ wlf(nerg),wlfmax(nerg),wlfanf(nerg),
+ wlfend(nerg),wlfint(nerg),sdev(nerg)
common /ergb/ wlfmtl,wlfasy,asymax,asyanf,asyend,minsoll,maxsoll
common /logo/ bild,proto,ergeb
common /char/ titel,kdatum,ktime

call clrmon

print *, ' Berechnung der WLF mit L.R. ...'

open (22,file='linerg.dat')
rewind (22)

write (22,700)
700 format (' WFLIN NWORK CORR ZEITANF ZEITEND')

wlfsum = 0.
ilauf = 0

c *****
c ***** Faktor = Q/4*PI
c *****
c *****
pi = 4.*atan(1.)

faktor = dble( hzleist / (4. * pi))

if (datentyp .eq. 1) faktor = faktor * dble(2.)

c *****
c ***** Festlegen eines Zeitintervalls
c *****
if (zeit(anzahl) .le. zeitend) zeitend = zeit(anzahl)

do 1000 i=1,anzahl
if (zeit(i) .le. zeitanf) ianf = i
1000 continue

zeitstop = zeitend - anflang

do 1001 i=ianf,anzahl
if (zeit(i) .le. zeitstop) istop = i
if (zeit(i) .le. zeitend ) iende = i
1001 continue

3000 intlang = anflang

do 1005 i=ianf,iende
if (zeit(i) .le. (zeit(ianf) + intlang)) iend = i
1005 continue

c if (zeit(iend) .gt. zeitend .and. ianf .ge. istop) goto 9999

2000 if (iend .gt. anzahl) goto 5000
if (zeit(iend) .gt. zeitend) goto 5000

nwork = iend - ianf + 1
dnwork = dble(nwork)
intlang = zeit(iend)-zeit(ianf)

```

```

C *****
C ***** Double Precision Arbeitsfelder festlegen
C *****

      do 1010 i=1,nwork
        j = ianf + i - 1
        workz(i) = dlog( dble ( zeit(j) ) )
        workt(i) = dble ( temp(j) )
1010  continue

C *****
C *****
C ***** Lineare Regression des aktuellen Zeitintervalls
C *****
C *****

      do 7000 i=1,5
        dsum(i) = 0.
7000  continue

      do 7010 i=1,nwork

        dsum(1) = dsum(1) + workz(i)**2.
        dsum(2) = dsum(2) + workt(i)**2.
        dsum(3) = dsum(3) + workz(i)
        dsum(4) = dsum(4) + workt(i)
        dsum(5) = dsum(5) + workz(i)*workt(i)

7010  continue

      dymean = dsum(4) / dnwork

      dcova = (dsum(5)-dsum(3)*dsum(4)/dnwork)/(dnwork-1.)

      dvarrx = (dsum(1)-(dsum(3)**2.)/dnwork)/(dnwork-1.)
      dvarry = (dsum(2)-(dsum(4)**2.)/dnwork)/(dnwork-1.)

      dsdevx = dsqrt(dvarrx)
      dsdevy = dsqrt(dvarry)

      dcorr = dcova/(dsdevx*dsdevy)
      if (dcorr .le. 0.) goto 4000

      dsteig = dcova/dvarrx

      steig = sngl(dsteig)

      wflin = faktor / steig
      ilauf = ilauf + 1
      wflsum = wflsum + wflin

C *****
C ***** Speichern
C *****

      write (22,710) wflin,zeit(ianf),zeit(iend),intlang,dcorr,dymean
710  format (6f12.4)

C *****
C ***** Neues Intervall mit neuer Länge bei gleicher Anfangszeit
C *****

4000  iend = iend + inklang
      intlang = zeit(iend)-zeit(ianf)

      if (intlang .le. endlang) goto 2000

C *****
C ***** Neues Intervall mit Anfangslänge. Anfangszeit eins weiter.
C *****

5000  ianf = ianf + inklang

```



```

        if (ianf .le. istop) goto 3000

9999  dauer = 0.

        close (22)

        wlfmtl = wlfsum / float(ilauf)

        print *, 'Anzahl der Regressionen:', ilauf
        print *, 'Mittelwert der WLF      ', wlfmtl

        print *, 'Auswertung beendet!'
        pause 'Weiter mit RETURN'

        return
        end

        subroutine maske1 ( mkenn, kdatum, ktime )

        character mkenn*50, kdatum*10, ktime*10

        call ClrMon
c***** Intensivanzeige an
        call SetGrM (1)
        print *, 'Messung :', mkenn
        print *, 'Beginn der Auswertung', kdatum, ' ', ktime
c***** Intensivanzeige aus
        call SetGrM (0)

        call SetCuP (4,1)
c***** Negativanzeige an
        call SetGrM (7)
        print*, 'Approximation der verschiedenen Intervalle : '
c***** Negativanzeige aus
        call SetGrM (0)

        call SetCuP (6,1)
c***** Intensivanzeige an
        call SetGrM (1)
        print '(5x,a,10x,a,5x,a) ',
        & 'Intervall','Intervalllänge','WLF'
c***** Intensivanzeige aus
        call SetGrM (0)

        call SetCuP (9,1)
c***** Negativanzeige an
        call SetGrM (7)
        print *, 'bisher gefundene Lösungen : '
c***** Negativanzeige aus
        call SetGrM (0)

        call SetCuP (10,1)
c***** Intensivanzeige an
        call SetGrM (1)
        print *, 'Mittelwert asympt. WLF ',
        + ' mit Maximum unverändert'
        call SetCuP (11,1)
        print *, 'Anzahl ZL bisher z. Zt. ',
        + ' bei 10 hoch seit Lösungen'
c***** Intensivanzeige aus
        call SetGrM (0)

        call SetCuP (14,1)
c***** Negativanzeige an
        call SetGrM (7)
        print *, 'Dauer der Auswertung (Sekunden) : '
c***** Negativanzeige aus
        call SetGrM (0)

        call SetCuP (16,1)
c***** Negativanzeige an
        call SetGrM (7)
        print *, 'Programm-Status : '
c***** Negativanzeige aus
        call SetGrM (0)

```

```

    call SetCuP (20,1)
c***** Negativanzeige an
    call SetGrM (7)
    print *, ' Fehlermeldungen : '
c***** Negativanzeige aus
    call SetGrM (0)

    return
end

    subroutine menue (auswahl)

c          benoetigt: clrmon, setgm, readkbd
c *****
c ***** Erstellt Meue zur Auswahl der gewuenschten Arbeiten.
c ***** Daniel, 2.8.98
c *****

    integer auswahl

    call clrmon

c***** Negativanzeige an
    call SetGrM (7)

    write (*,90)

90   format (22x,'HAUPT - MENUE           ',//)

c***** Negativanzeige aus
    call SetGrM (0)

c***** Intensivanzeige an
    call SetGrM (1)

    write (*,100)

100  format (
+   15x,'Bitte waehlen Sie eine Zahl!',//,
+   ' Programm beenden ..... (0)',//,
+   ' Daten einlesen oder bearbeiten ..... (1)',//,
+   ' Auswerteparameter angeben ..... (2)',//,
+   ' Form der Ergebnisse festlegen ..... (3)',//,
+   ' Darstellung der Messkurve mit sch. WLF ..... (4)',//,
+   ' Darstellung der Ergebnisse ..... (5)',//,
+   ' Auswerten der Daten mit L.R. .... (8)',//,
+   ' Auswerten der Daten mit Approximation ..... (9)',//)

c***** Intensivanzeige aus
    call SetGrM (0)

    call readkbd (auswahl)

    return
end

    subroutine menue1 (auswahl)

c *****
c ***** Erstellt Menue zur Auswahl der gewuenschten Arbeiten.
c *****

    integer auswahl

    call clrmon

c***** Negativanzeige an
    call SetGrM (7)

    write (*,90)

90   format (22x,'SONDEN - MENUE',21x)

c***** Negativanzeige aus
    call SetGrM (0)

```

```

print *
print *

c***** Intensivanzeige an
call SetGrM (1)

write (*,100)

100 format (
+ 15x,'Bitte waehlen Sie eine Zahl!',//,
+' Temperaturen unbearbeitet ..... (0)',//,
+' Temperaturen mit gleichem Anfangswert ..... (1)',//,
+' Differenzen zu einem Kanal ..... (2)',//,
+' (1) + (2) ..... (3)',//)

c***** Intensivanzeige aus
call SetGrM (0)

call readkbd (auswahl)

return
end

subroutine readkbd (antwort)
integer *2 antwort

antwort = 6

read (*,'(i1)',ERR=99) antwort
99 return
end

subroutine SetCuP (m,n)

c *****
c * Set Cursor Position
c *
c * Positioniert den Curser auf die m.te zeile, n.te Spalte
c *
c * Aufruf der ANSI-Escape-Sequenz: esc [ m;n H
c *
c *****

implicit integer*2 (i-n)

character seq*8

if ( (m.lt.10).and.(n.lt.10) ) then
write (seq,'(a2,i1,a1,i1,a1)' '.[',m,',',n,'H'
write (*,'( "+" ,a6)' ) seq
else if ( (m.lt.10).and.(n.ge.10) ) then
write (seq,'(a2,i1,a1,i2,a1)' '.[',m,',',n,'H'
write (*,'( "+" ,a7)' ) seq
else if ( (m.ge.10).and.(n.lt.10) ) then
write (seq,'(a2,i2,a1,i1,a1)' '.[',m,',',n,'H'
write (*,'( "+" ,a7)' ) seq
else if ( (m.ge.10).and.(n.ge.10) ) then
write (seq,'(a2,i2,a1,i2,a1)' '.[',m,',',n,'H'
write (*,'( "+" ,a8)' ) seq
end if

return
end

subroutine setGRM (mode)

c *****
c *
c * setzt den Grafik-MODE des Bildschirms
c * mögliche Werte für mode sind:
c * mode = 0 : alle Attribute aus (schwarz/weiss)
c * mode = 1 : verstärkte Intensität
c * mode = 4 : Unterstreichen (nur bei Schwarz-Weiss-Bildschirm)
c * mode = 5 : Blinken
c * mode = 7 : Umkehranzeige ein
c * mode = 30-37 : Vordergrundfarben
c * mode = 40-47 : Hintergrundfarben

```

```

c *
c * Aufruf der ANSI-Escape-Sequenz: esc [ mode m
c *
c *****

implicit integer*2 (i-n)

character seq*5

if ( mode.lt.10 ) then
  write (seq,1) '.,mode,'m'
  write (*,3) seq
else
  write (seq,2) '.,mode,'m'
  write (*,4) seq
end if

return
1 format (a,i1,a)
2 format (a,i2,a)
3 format ('+',a4)
4 format ('+',a5)
end

subroutine sondmenu (auswahl,titel)

c *****
c ***** Erstellt Menue zur Auswahl der gewuenschten Arbeiten.
c *****

integer auswahl

character *70 titel

call clrmon

c***** Negativanzeige an
call SetGrM (7)

write (*,90)

90 format (22x,'SONDEN - MENUE',21x)

c***** Negativanzeige aus
call SetGrM (0)

print *
print *

print *,titel

print *
print *

c***** Intensivanzeige an
call SetGrM (1)

write (*,100)

100 format (
+ 15x,'Bitte waehlen Sie eine Zahl!',//,
+ ' Hauptmenue ..... (0)',//,
+ ' Alle Kanäle bearbeiten ..... (1)',//,
+ ' Einzelne Kanäle einlesen ..... (2)',//,
+ ' Scheinbare WLF berechnen ..... (3)',//)

c***** Intensivanzeige aus
call SetGrM (0)

call readkbd (auswahl)

return
end

subroutine sondektb(datentyp)

c *****

```

```

c *****
c ***** Zum Einlesen der Daten von Messungen mit der Packersonde
c ***** oder der Heizstabssonde.
c *****
c ***** Im Unterschied zu den Messungen in Röthenbach werden hier
c ***** 10 Relativkanäle gemessen, wobei für jeden Messbereich eine
c ***** Eichung Temp - Freq vorliegt. Die Thermistoren sind ungeeicht
c *****
c *****
parameter (nmes=1000, nerg=500)

character *70 titel,datfln,wffln,dummy

integer anzahl,kopf, bereich, datentyp
integer lfindnr,izeit,rahmen,ref, thermpos(10)
integer abst(2), relt(10), spond1, spond2

logical korr, diff

real strom(nmes), spann(nmes), leist(nmes),syszeit(nmes)
real tall(10), t0(10), spannung

common /data/ zeit(nmes),temp(nmes),hzleist,anzahl,wfa(nmes)

common /char/ titel

pi = 4.*atan(1.)

sumheiz = 0.

c *****
c ***** Festlegen des Datenfilenamens
c *****
write (*,130)
130 format (/, ' Name des Datenfiles? <wlf.dat>',/)

read (*,'(a70)') datfln
if (datfln .eq. ' ') datfln = 'wlf.dat'
open (1,file=datfln)
rewind (1)

c ***** Lesen vom Datenfile

anzahl = nmes

read (1,'(a70)',END=9999) dummy

read (1,'(a70)') dummy

read (1,'(a70)') titel

read (1,'(a70)') dummy
read (1,'(a70)') dummy
read (1,'(a70)') dummy
read (1,'(a70)') dummy
read (1,'(a70)') dummy
read (1,'(a70)') dummy

read (1,'(i2)') bereich

bereich = bereich + 1000

read (1,'(a70)') dummy
read (1,'(a70)') dummy
c ***** Abfragen der Heizspannung

print *, ' Heizspannung ?'
print*
read (*,'(f12.4)') spannung

c *****
c ***** Menueauswahl
c *****

```

```

0001 call sondmenu(iwahl,titel)

C *****
C ***** IWAHL = 0 : Hauptmenue
C *****
  if (iwahl .eq. 0) then
    return
  end if

C *****
C ***** IWAHL = 1 : Bearbeitung aller Kanäle
C *****
C ***** Ausgabe:
C *****
C ***** 1) RELT.DAT : Zeitlicher Temperaturverlauf aller reativen
C *****      Temperaturkanäle
C *****
C ***** 2) ABST.DAT : Zeitlicher Temperaturverlauf aller absoluten
C *****      Temperaturkanäle
C *****
C ***** 3) LEIST.DAT: Zeitlicher Verlauf der Heizleistung, Spannung
C *****      und des Stroms.
C *****
C ***** Dazugehörige GRAPHER Files: SONDRELT.GRF, SONDABST.GRF
C *****      SONDLAIS.GRF, SONDSPAN.GRF
C *****      SONDSTRO.GRF, SONDDIFF.GRF
C *****
C *****
  if (iwahl .eq. 1) then

    korr = .false.
    diff = .false.

    open (11,file='reld.dat')
    rewind (11)

    open (12,file='abst.dat')
    rewind (12)

    open (13,file='leis.dat')
    rewind (13)

C ***** Sollen die Temperaturen bearbeitet werden?

    call menue1(iw)

    print *

    if (iw .eq. 1 .or. iw .eq. 3) then

      korr = .true.

    end if

    if (iw .eq. 2 .or. iw .eq. 3) then

      diff = .true.
      print *, 'Referenzkanal : '
      call readkbd (iref)
      print *,iref

    end if

    print *

  end if

C *****
C ***** IWAHL = 2 : Bearbeitung einzelner Kanäle
C *****

  if (iwahl .eq. 2 .or. iwahl .eq. 3) then

155   write (*,150)
150   format (/, 'Wieviele Thermistorkanäle sollen ',

```

```

+      'berücksichtigt werden ? (max. 10)',/)
      read (*,'(i2)') ithanz
      print *
      if (ithanz.lt.1 .or. ithanz.gt.10) goto 155

165     write (*,160)
160     format (/, 'Welche ? (1-10)',/)

      do 1020 i=1,ithanz
      read (*,'(i2)') thermpos(i)
      print *
      if (thermpos(i).lt.1 .or.
+       thermpos(i).gt.10) goto 165

1020    continue

      end if

C *****
C ***** IWAHL = 3 : Scheinbare WLF
C *****

      if (iwahl .eq. 3) then

      write (*,170)
170     format (/, 'Name des Files für die sch. WLF? <wfa.dat>',/)

      read (*,'(a70)') wffln
      if (wffln .eq. ' ') wffln = 'wfa.dat'
      open (9,file=wffln)
      rewind (9)

      print *, 'Mit welcher Schrittweite soll die scheinbare ',
+       'WLF berechnet werden?'
      print *
      read (*,'(i3)') iwfa

      write (*,100)
100     format (//, 'Eingrenzung der scheinbaren WLF: ',//,
+       ' Untere Grenze : ')

      read (*,110) wlfamin
110     format (f16.4)

      write (*,120)
120     format (/, ' Obere Grenze : ')

      read (*,110) wlfamax

      end if

C *****
C ***** Einlesen der Messdaten als Frequenzen
C *****

      k = 0

      call clrmon
      print *
      print *
      print *,titel
      print *
      print *
      print *, ' Einlesen der Daten '

      do 9000 i=1,anzahl

C ***** Kanäle korrekt (800, 1465)

      if (datentyp .eq. 13) then

      read (1,220,END=999,ERR=999)
+       lfndnr, izeit, rahmen, spond1,
+       abst(1), abst(2),
+       relt(1), relt(2), relt(3), relt(4)

```

```

        read (1,230,END=999,ERR=999) ref, spond2,
+         relt(5), relt(6),
+         relt(7), relt(8), relt(9), relt(10),
+         strom(i)
c ***** Kanäle vertauscht
        else if (datentyp .eq. 14) then

        read (1,220,END=999,ERR=999)
+         lfindnr, izeit, rahmen, spond1,
+         abst(1), abst(2),
+         relt(4), relt(3), relt(2), relt(1)

        read (1,230,END=999,ERR=999) ref, spond2,
+         relt(10), relt(9),
+         relt(8), relt(7), relt(6), relt(5),
+         strom(i)
220    format (i4,9(i6))
230    format (10x,8(i6),f10.4)

        end if
c ***** Kanäle in Ordnung?
        if (ref.lt.38000 .or. ref.gt.40000) then
            goto 9000
        end if

c ***** Wird schon geheizt?
c         if (spond2.le.10000 .or. strom(i).le. 0.5) then

            if (strom(i).le. 0.5) then
                goto 9000
            end if

c ***** Index weiterzählen
            k = k+1

c ***** Zeitumrechnung
            if (k .eq. 1) time0 = float(izeit)

            syszeit(k) = float(izeit)

            if ( syszeit(k) .lt. syszeit(k-1) ) then

                syszeit(k) = syszeit(k) + 86400.

            end if

            zeit(k) = syszeit(k) - time0

            zeit(k) = zeit(k) / 3600.

c ***** Umrechnung der Spannung
            u = float(spond2)
            spann(k) = u1 + u2 * u + u3 * u**2.

c ***** Berechnung der Leistung
            sondlang = 3.
            leist(k) = spannung * strom(i) / sondlang
            sumheiz = sumheiz + leist(k)

c *****
c ***** IWAHL = 1 : Bearbeitung aller Kanäle
c *****

            if (iwahl .eq. 1) then

c ***** Umrechnung der Absolutkanäle

```



```

        call freqtemp(abst(1), 1000, abst1)
        call freqtemp(abst(2), 1000, abst2)
c ***** Umrechnung der Relativkanäle
        do 2000 j=1,10
            call freqtemp (relt(j),bereich, tall(j))
            temp(j) = tall(j)
2000      continue
c ***** Normierung, falls gewünscht
        if (korr) then
            do 2010 j=1,10
                if (k .eq. 1) t0(j) = tall(j)
                temp(j) = tall(j) - t0(j)
2010      continue
        end if
c ***** Differenzen, falls gewünscht
        if (diff) then
            temp0 = temp(iref)
            do 2020 j=1,10
                temp(j) = temp(j) - temp0
2020      continue
        end if
c ***** Speichern auf den jeweiligen Dateien
        write (11,300) zeit(k),
+           temp(1),temp(2),temp(3),temp(4),temp(5),
+           temp(6),temp(7),temp(8),temp(9),temp(10)
300      format (f7.4,10(1x,f8.4))

        write (12,310) zeit(k),abst1,abst2
310      format (f7.4,2(1x,f8.4))

        write (13,320) zeit(k),leist(k),spann(k),strom(i)
320      format (f7.4,2(1x,f5.1),1x,f7.4)

        end if
c *****
c ***** IWAHL = 2 : Bearbeitung einzelner Kanäle
c *****
        if (iwahl .eq. 2 .or. iwahl .eq. 3) then
c ***** Mittelwert der gewählten Thermistoren
            sum = 0.
            do 4000 j=1,ithanz
                call freqtemp (relt(thermpos(j)),
+                   bereich, t)
                sum = sum + t
4000      continue
            temp(k) = sum / float(ithanz)

```

```

        end if
9000 continue
999  anzahl = k
      hzleist = sumheiz / float(k)
c *****
c ***** IWAHL = 3 : Scheinbare WLF
c *****
      if (iwahl .eq. 3 ) then
        print *, ' und Berechnung der scheinbaren WLF ...'
        do 5000 k=1,anzahl
          if (k .le. (iwlfa + 1) .and. k .gt.1) then
            write (9,400) zeit(k),temp(k)
400      format (f7.0,f9.4)
          else if (k .gt. (iwlfa + 1) ) then
            j = k - iwlf
            z0 = alog(zeit(k)) - alog(zeit(j))
            z1 = temp(k) - temp(j)
            wlfaj = (hzleist * z0) / (4.*pi*z1)
            if (wlfaj .lt. wlfamin ) wlfaj = wlfamin
            if (wlfaj .gt. wlfamax ) wlfaj = wlfamax
c          if (wlfaj .lt. wlfamin ) goto 5000
c          if (wlfaj .gt. wlfamax ) goto 5000
            write (9,410) zeit(k),temp(k),wlfaj)
410      format (f7.0,f9.4,f6.2)
          end if
5000  continue
        end if
9999 return
      end
      subroutine sonderoe(datentyp)
c *****
c *****
c ***** Zum Einlesen der Daten von Messungen mit der Packer/Heizstab
c ***** vom Einsatz in Roethenbach.
c *****
c *****
c *****
      parameter (nmes=1000, nerg=500)
      character *70 titel,datfln,wlffln,dummy
      integer anzahl,kopf,datentyp
      integer lfndnr,izeit,rahmen,ref,thermnum(8)
      integer abst(4), relt(8), spond1, spond2, thermpos(8)
      logical korr, diff
      real strom(nmes), spann(nmes), leist(nmes),syszeit(nmes)
      real tall(8), t0(8)
      common /data/ zeit(nmes),temp(nmes),hzleist,anzahl,wlfa(nmes)
      common /char/ titel
      pi = 4.*atan(1.)

```

```

c *****
c ***** Festlegen des Datenfilenamens
c *****

      write (*,130)
130  format (/, ' Name des Datenfiles? <wlf.dat>',/)

      read (*,'(a70)') datfln
      if (datfln .eq. ' ') datfln = 'wlf.dat'
      open (1,file=datfln)
      rewind (1)

c ***** Faktoren für Spannungsumrechnung

      u1 = -2.15947
      u2 = 7.60047E-3

      sumheiz = 0.

c ***** Abfragen der Heizspannung

c  print *, ' Heizspannung ?'
c  print*
c  read (*,'(f12.4)') spannung

c ***** Lesen vom Datenfile

      read (1,'(a70)',END=9999) dummy

      read (1,'(i3, i5)') kopf,anzahl

      read (1,'(a70)') titel

      do 1000 i=2,(kopf+2)
        read (1,'(a70)') dummy
1000  continue

c *****
c ***** Menueauswahl
c *****

0001  call sondmenu(iwahl,titel)

c *****
c ***** IWAHL = 0 : Hauptmenue
c *****

      if (iwahl .eq. 0) then

        return

      end if

c *****
c ***** IWAHL = 1 : Bearbeitung aller Kanäle
c *****
c ***** Ausgabe:
c *****
c ***** 1) RELT.DAT : Zeitlicher Temperaturverlauf aller reativen
c *****           Temperaturkanäle
c *****
c ***** 2) ABST.DAT : Zeitlicher Temperaturverlauf aller absoluten
c *****           Temperaturkanäle
c *****
c ***** 3) LEIST.DAT: Zeitlicher Verlauf der Heizleistung, Spannung
c *****           und des Stroms.
c *****
c ***** Dazugehörige GRAPHER Files: SONDRELT.GRF, SONDABST.GRF
c *****           SONDLEIS.GRF, SONDDIFF.GRF
c *****           SONDSTRO.GRF, SONDDIFF.GRF
c *****
c *****

```

```
if (iwahl .eq. 1) then
```

```
  korr = .false.  
  diff = .false.
```

```
  open (11,file='relt.dat')  
  rewind (11)
```

```
  open (12,file='abst.dat')  
  rewind (12)
```

```
  open (13,file='leist.dat')  
  rewind (13)
```

```
c ***** Sollen die Temperaturen bearbeitet werden?
```

```
  call menue1(iw)
```

```
  print *
```

```
  if (iw .eq. 1) then  
    korr = .true.
```

```
  else if (iw .eq. 2) then
```

```
    diff = .true.  
    print *, 'Referenzkanal : '  
    call readkbd (iref)  
    print *,iref
```

```
  else if (iw .eq. 3) then
```

```
    korr = .true.  
    diff = .true.  
    print *, 'Referenzkanal : '  
    call readkbd (iref)  
    print *,iref
```

```
  end if
```

```
  print *
```

```
c ***** Zuordnung Position - Thermistornummer
```

```
  do 1010 i=1,8
```

```
    thermnum (i) = 0
```

```
1010   continue
```

```
  end if
```

```
c *****
```

```
c ***** IWAHL = 2 : Bearbeitung einzelner Kanäle
```

```
c *****
```

```
  if (iwahl .eq. 2 .or. iwahl .eq. 3) then
```

```
    write (*,150)
```

```
150   format (/, 'Wieviele Thermistorkanäle sollen ',  
+         'berücksichtigt werden ?',/)
```

```
    call readkbd (ithanz)
```

```
    write (*,'(i2)') ithanz
```

```
    print *
```

```
    write (*,160)
```

```
160   format (/, 'Welche ? (1-9)',/)
```

```
    do 1020 i=1,ithanz
```

```
      call readkbd (thermpos(i))
```

```
      write (*,'(i2)') thermpos(i)
```

```
      print *
```

```
c ***** Zuordnung Position - Thermistornummer
```

```

        thermnum (i) = 0
1020  continue

    end if

c *****
c ***** IWAHL = 3 : Scheinbare WLF
c *****

    if (iwahl .eq. 3) then

        write (*,170)
170    format (/, ' Name des Files für die sch. WLF? <wfa.dat>',/)

        read (*,'(a70)') wffln
        if (wffln .eq. ' ') wffln = 'wfa.dat'
        open (9,file=wffln)
        rewind (9)

        print *,'Mit welcher Schrittweite soll die scheinbare ',
+          'WLF berechnet werden?'
        print *
        read (*,'(i3)') iwfa

        write (*,100)
100    format (//, ' Eingrenzung der scheinbaren WLF:!',//,
+          ' Untere Grenze :  ')

        read (*,110) wlfamin
110    format (f16.4)

        write (*,120)
120    format (/, ' Obere Grenze :  ')

        read (*,110) wlfamax

    end if

c *****
c ***** Einlesen der Messdaten als Frequenzen
c *****

    k = 0

    call clrmon
    print *
    print *
    print *,titel
    print *
    print *
    print *, ' Einlesen der Daten '

    do 9000 i=1,anzahl

c ***** Packersonde

    if (datentyp .eq. 11) then

        read (1,220,END=9998,ERR=9998)
+          lfindnr, izeit, rahmen, spond1,
+          abst(1), abst(2),
+          relt(1), relt(2), relt(3), relt(4)
c **** Halle 90
c +          abst(3), relt(7), relt(8), abst(4)

        read (1,230,END=9998,ERR=9998)
+          ref, spond2,
+          abst(3), abst(4),
+          relt(5), relt(6), relt(7), relt(8),
c **** Halle 90
c +          relt(1), abst(2),
c +          relt(3), relt(4), relt(5), relt(6),
+          strom(i)

```

```

else if (datentyp .eq. 12) then
  read (1,220,END=9998,ERR=9998)
+     lfindnr, izeit, rahmen, spond1,
+     abst(1), abst(2),
+     relt(4), relt(3), relt(2), relt(1)
  read (1,230,END=9998,ERR=9998)
+     ref, spond2,
+     abst(3), abst(4),
+     relt(8), relt(7), relt(6), relt(5),
+     strom(i)

220   format (i4,9(i6))
230   format (10x,8(i6),f10.4)

end if

c ***** Kanäle in Ordnung?
      if (ref.lt.38500 .or. ref.gt.40000) then
        goto 9000
      end if

c ***** Wird schon geheizt?
      if (spond1.le.2000 .or. strom(i).le. 0.1) then
        goto 9000
      end if

c ***** Index weiterzählen
      k = k+1

c ***** Zeitumrechnung
      if (k .eq. 1) time0 = float(izeit)
      syszeit(k) = float(izeit)
      zeit(k) = syszeit(k) - time0

c ***** Zeitumrechnung in Stunden
      zeit(k) = zeit(k) / 3600.

c ***** Umrechnung der Spannung
      u = float(spond1)
      spann(k) = u1 + u2 * u

c ***** Berechnung der Leistung
      leist(k) = spann(k) * strom(i) / 3.
c      leist(k) = spannung * strom(i) / 3.

      sumheiz = sumheiz + leist(k)

c *****
c ***** IWAHL = 1 : Bearbeitung aller Kanäle
c *****
      if (iwahl .eq. 1) then
c ***** Umrechnung der Absolutkanäle
          call freqtemp(abst(1), -1, abst1)
          call freqtemp(abst(2), -1, abst2)
          call freqtemp(abst(3), -1, abst3)

```

```

        call freqtemp(abst(4), -1, abst4)
c ***** Umrechnung der Relativkanäle
        do 2000 j=1,8
            call freqtemp (relt(j),thermnum(j), tall(j))
            temp(j) = tall(j)
2000    continue
c ***** Normierung, falls gewünscht
        if (korr) then
            do 2010 j=1,8
                if (k .eq. 1) t0(j) = tall(j)
                temp(j) = tall(j) - t0(j)
2010    continue
        end if
c ***** Differenzen, falls gewünscht
        if (diff) then
            temp0 = temp(iref)
            do 2020 j=1,8
                temp(j) = temp(j) - temp0
2020    continue
        end if
c ***** Speichern auf den jeweiligen Dateien
        if (k .gt. 1 ) then
            write (11,300) zeit(k),
+                temp(1),temp(2),temp(3),temp(4),
+                temp(5),temp(6),temp(7),temp(8)
300    format (f12.4,8(1x,f8.4))

            write (12,310) zeit(k),abst1,abst2,abst3,abst4
310    format (f12.4,4(1x,f8.4))

            write (13,320) zeit(k),leist(k),spann(k),strom(i)
320    format (f12.4,2(1x,f5.1),1x,f7.4)

        end if
    end if

c *****
c ***** IWAHL = 2 : Bearbeitung einzelner Kanäle
c *****

        if (iwahl .eq. 2 .or. iwahl .eq. 3) then
c ***** Mittelwert der gewählten Thermistoren
            sum = 0.

            do 4000 j=1,ithanz
                call freqtemp (relt(thermpos(j)),
+                thermnum(j), t)

                sum = sum + t
4000    continue

```

```

        temp(k) = sum / float(ithanz)
    end if
9000 continue
9998 anzahl = k

    hzleist = sumheiz / float(k)

    print *, ' Heizleistung in W/m: ', hzleist
    pause
c *****
c ***** IWAHL = 3 : Scheinbare WLF
c *****

    if (iwahl .eq. 3 ) then

        print *, ' und Berechnung der scheinbaren WLF ...'

        do 5000 k=1,anzahl

            if (k .le. (iwlfa + 1) .and. k .gt.1) then

                write (9,400) zeit(k),temp(k)
400         format (f12.4,f9.4)

            else if (k .gt. (iwlfa + 1) ) then

                j = k - iwlfa

                z0 = alog(zeit(k)) - alog(zeit(j))

                z1 = temp(k) - temp(j)

                wfa(j) = (hzleist * z0) / (4.*pi*z1)

                if (wfa(j) .lt. wlfamin ) wfa(j) = wlfamin
                if (wfa(j) .gt. wlfamax ) wfa(j) = wlfamax

                write (9,410) zeit(k),temp(k),wfa(j)
410         format (f12.4,f9.4,f6.2)

            end if

6000         continue

        end if

9999 return
end

    subroutine speicher (iloes,dauer,datentyp)
cKEM    20010409, keine grafik, d.h. alle subroutinen werden nicht gebraucht !
c *****
c ***** Speichert die bis zum Aufruf erhaltenen Lösungen je nach
c ***** Auswahl der Ergebnisform (Subroutine ERGFORM).
c *****

    parameter (nmes=1000, nerg=500)

    character *70 prtname,ergname,gksname,titel,text
    character *10 kdatum,ktime

    dimension workz(nmes),workt(nmes)

    logical bild,proto,ergeb

    integer anzahl,datentyp

    real maxloes,maxsdev

    common /data/ zeit(nmes),temp(nmes),hzleist,anzahl,wfa(nmes)

```



```

common /para/ zeitanf,zeitend,anflang,endlang,inklang,
+   maxloes,maxsdev
common /ausw/ wlf(nerg),wlfmax(nerg),wlfanf(nerg),
+   wlfend(nerg),wlfint(nerg),sdev(nerg)
common /ergb/ wlfmtl,wlfasy,asymax,asyanf,asyend,wlfamin,wlfamax
common /logo/ bild,proto,ergeb
common /char/ titel,kdatum,ktime

call clrmon

if (iloes .lt. 1) return

c***** Negativanzeige an
call SetGrM (7)

write (*,100)
100 format (//,19x,'SPEICHERN DER ERGEBNISSE DER AUSWERTUNG',19x)

c***** Negativanzeige aus
call SetGrM (0)

c***** Intensivanzeige an
call SetGrM (1)

write (*,101) titel
101 format (//,1x,a70,/)

c***** Intensivanzeige aus
call SetGrM (0)

c *****
c ***** Arbeitsfelder anlegen
c *****
do 1001 i=1,anzahl
  workt(i) = temp(i)
  workz(i) = zeit(i)
1001 continue

c *****
c ***** Protokoll
c *****

if (proto) then

  write (*,200)
200 format (//,' Name des Protokoll - Files ?',
+         ' <wlf.prf>',/)

  read (*,'(a70)') prtname
  if (prtname .eq. ' ') prtname = 'wlf.prf'

  open (2,file = prtname)
  rewind (2)

  do 2100 i=1,iloes

    sdev(i) = sdev(i) * 1000000.

    write (2,220) wlf(i), wlfanf(i), wlfend(i),
+               wlfint(i), sdev(i), wlfmax(i)
2100 continue

220 format (6f12.4)

c *****
c ***** Arbeitsfelder anlegen
c *****

do 1002 i=1,anzahl
  temp(i) = workt(i)
  zeit(i) = workz(i)
1002 continue

end if

c *****

```

```

c ***** Zusammenfassendes Ergebnisfile
c *****
      if (ergeb) then
        write (*,300)
300      format (//,' Name des Ergebnis - Files ?',
+          '<wlf.erg>',//)

        read (*,(a70)) ergname
        if (ergname .eq. ' ') ergname = 'wlf.erg'

        open (3,file = ergname)
        rewind (3)

        write (3,305)
305      format (////,10x,'ZUSAMMENFASSUNG DER AUSWERTUNG',////)

        write (3,310) titel
310      format (9x,a70,//)

        write (3,315) hzleist
315      format (10x,'Heizleistung (W/m) : ',f9.2,//)

        write (3,320) zeitanf,zeitend,
+          anflang,endlang,inklang,
+          maxloes,maxsdev
320      format(/,10X,'Vorgegebene Auswerteparameter :',//,
+ 10X,'Anfangszeit des Auswertintervalls (ZEITANF) =',f10.1,/,
+ 10X,'Endzeit des Auswertintervalls (ZEITEND) =',f10.1,/,
+ 10X,'Anfangslänge des Näherungsintervalls (ANFLANG) =',f10.1,/,
+ 10X,'Endlänge des Näherungsintervalls (ENDLANG) =',f10.1,/,
+ 10X,'Inkrement der Näherungsintervalllängen (INKLANG) =',i10,/,
+ 10X,'Unterer Grenzwert fürs Maximum (MAXLOES) =',g10.1,/,
+ 10X,'Maximale SDEV (MAXSDEV) =',g10.1,/)

        write (3,325) kdatum,ktime
325      format(/,10x,'Auswertung vom : ',2a10,/)

        write (3,330) iloes
330      format
+ (10x,'Anzahl der Gefundenen Lösungen : ',i10,/)

        write (3,335) wlfmtl
335      format
+ (10x,'Mittelwert der gefundenen Lösungen : ',f10.3,//)

        write (3,399)
399      format ('*****',
+          '*****')

        write (3,340) wlfasy
340      format
+ (10x,'Asymptotischer Wert der W L F : ',f10.3)

        write (3,399)

        write (3,345) asymax,asyanf,asyend
345      format
+ (//,10x,'Mit Maximum bei 10 hoch ',f10.1,/,
+ 10x,'Im Intervall von ',f10.1,/,
+ 10x,'bis ',f10.1,/)

        write (3,350) dauer
350      format
+ (10x,'Dauer der Auswertung (Sekunden) : ',f10.1)

c *****
c ***** Arbeitsfelder anlegen
c *****

      do 1003 i=1,anzahl
        temp(i) = workt(i)
        zeit(i) = workz(i)
1003      continue

      end if

```

```

cKEM 20010409, keine grafik, d.h. alle subroutinen werden nicht gebraucht !
c *****
c ***** GRIPS Metafile
c *****
cKEM 20010409, keine grafik, d.h. alle subroutinen werden nicht gebraucht !

        bild = .false
        if (bild) then

            write (*,400)
400     format (//,' Name des GRIPS - Metafiles ?',
+         ' <gmfile>',//)

            read (*,'(a70)') gksname
            if (gksname .eq. ' ') gksname = 'gmfile'

            open (7,file = gksname)
            rewind (7)

c     call ginit1 (7)
c ***** Titel als šberschrift
c     call textl (titel,ltitel)
        xa = 2.0
        ya = 21.0
        h = 0.5
        w = 0.0

c     call symbol (xa, ya, h, titel, w, ltitel)
c ***** Text der linken Bildhlfte

        xa = 5.
        ya = 3.5

c     call ztext1 (xa, ya, iloes)
c ***** Text der linken Bildhlfte

        xa = 19.
        ya = 3.5
c     call ztext2 (xa, ya, asyanf, asyend)
c ***** Graph 1 : WLF ber Lage des Maximums

        xa = 5.
        ya = 14.

c     call zergb (xa,ya,wlfmax,wlf,iloes,0.,0.,1)
c ***** Graph 2 : WLF ber Intervalllnge

        xa = 19.
        ya = 14.

c     call min (wlfint,iloes,x1)
c     call max (wlfint,iloes,x2)
c     call zergb (xa,ya,wlfint,wlf,iloes,x1,x2,2)

c ***** Graph 3 : WLF ber Intervallanfang
        xa = 5.
        ya = 6.
c     call min (wlfanf,iloes,x1)
c     call max (wlfanf,iloes,x2)
c     call zergb (xa,ya,wlfanf,wlf,iloes,x1,x2,3)

c ***** Graph 4 : WLF ber Intervalllänge
        xa = 19.
        ya = 6.
c     call min (wlfend,iloes,x1)
c     call max (wlfend,iloes,x2)

c     call zergb (xa,ya,wlfend,wlf,iloes,x1,x2,4)

c     call ugetio (1,nin,nout)
c     call ugetio (3,nin,4)
c     call ende
c     call ugetio (3,nin,nout)

c *****
c ***** Arbeitsfelder anlegen

```

```

c *****
do 1004 i=1,anzahl
  temp(i) = workt(i)
  zeit(i) = workz(i)
1004 continue
end if

return
end

subroutine textl (text,ltext)

```

```

c *****
c ***** Bestimmt die Länge eines Textesstrings
c *****

```

```

character*72 text

do 10 i=1,69
  if(text(73-i:73-i).ne.' ') goto 20
10 continue

20 ltext=72-i+1

return
end

```

Anhang F: Datenblatt der Meßapparatur TK04

Technische Daten

Sie können TK04 mit jedem PC unter DOS, Win 3.1 oder Win 95/98 betreiben.

Modell:	Wärmeleitfähigkeits-Meßgerät TK04
Meßprinzip:	Methode des instationären Wärmestroms (Nadelsondenmethode)
Meßbereich: *	0.1 - 12 Wm ⁻¹ K ⁻¹ (VLQ) 0.3 - 12 Wm ⁻¹ K ⁻¹ (HLQ)
Genauigkeit:	besser als ± 5% (Standard) besser als ± 2% (hochgenaue Messungen mit Meßwertkontrolle)
Reproduzierbarkeit:	besser als ± 1.5%
Konstanz des Heizstroms:	besser als 0.01%



Meßdauer: *	80 sec	Stromversorgung:	220/240 V ~ (50 Hz); 100/120 V ~ (60 Hz)
Meßwiederholung:	1 - 99 automatisch	Leistungsaufnahme:	~ 40W
Min. Probengröße: *	Durchmesser 30mm, L 75mm (VLQ) Durchmesser 70mm, H 20mm (HLQ)	Abmessungen:	471 x 147 x 412 mm (B x H x T)
Probentemperatur:	0 - 70°C	Gewicht:	13 kg (Meßgerät)
Betriebstemperatur:	0 - 45°C	Interface:	RS232 Serielle Schnittstelle
Aufwärmzeit:	30 Minuten für hochgenaue Messungen		

* Die Angaben beziehen sich auf die Standard- VLQ- und HLQ-Laborsonden.
Bei anderen Sondentypen oder -größen sind Abweichungen möglich. Weitere Informationen auf [Anfrage](#).

Quelle: www.te-ka.de