



KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH
GESELLSCHAFT MIT BESCHRÄNKTER HAFTUNG

Zentralabteilung Allgemeine Technologie

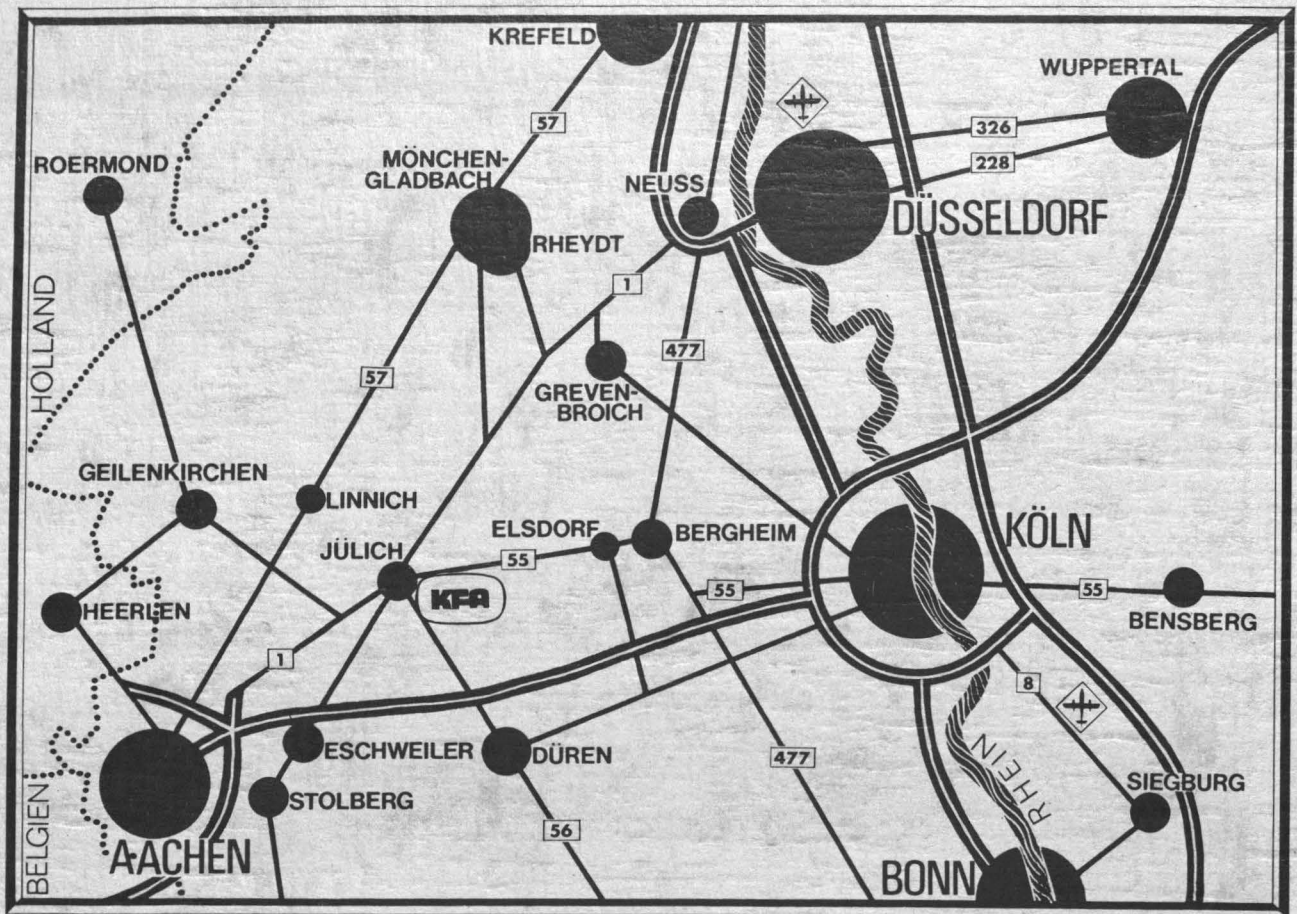
**Beiträge zu dem Temperaturmeßfehler von
Temperaturfühlern infolge Wärmeleitung
zwischen dem Temperaturfühler und dem
zu messenden Objekt**

von

H. J. Leyers

Jül - 1060 - AT
April 1974

Als Manuskript gedruckt



Berichte der Kernforschungsanlage Jülich - Nr. 1060

Zentralabteilung Allgemeine Technologie Jül - 1060 - AT

Dok.: Temperature Measuring Device
 Temperature Measurement - Measuring Error
 Thermal Conductivity - Temperature Measurement
 Temperature Measurement - Thermal Conductivity

Im Tausch zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH,
 Jülich, Bundesrepublik Deutschland

Gleichung (1.5) verallgemeinert für heterogenen Querschnitt lautet:

$$A_j^2 = \pi \cdot a \cdot \phi_a / \sum_k \lambda_k Q_k,$$

(k = Stoffindex, ϕ_a = Außendurchmesser der Schicht)

Beiträge zu dem Temperaturmeßfehler von Temperaturfühlern infolge Wärmeleitung zwischen dem Temperaturfühler und dem zu messenden Objekt

von

H. J. Leyers

Zusammenfassung

Im theoretischen Teil wird für den Fall, daß die Temperaturbestimmung eines Körpers durch einen zylindrischen Temperaturfühler, der in den Körper eingeführt wird, erfolgt, der Temperaturmeßfehler angegeben, der bedingt ist durch die eigene Wärmeleitung des Fühlers mit seiner Umgebung. Hierbei wird angenommen, daß die Temperaturen des Meßkörpers und seiner Umgebung ortsunabhängige Konstanten sind und der radiale Wärmetransport vernachlässigt werden kann. Im weiteren wird der Einfluß von Zwischenschichten, die gegebenenfalls zwischen dem Fühler und dem Körper angeordnet sind, auf den Temperaturmeßfehler behandelt. Ferner wird der Fall betrachtet, daß im Fühler und in den Zwischenschichten zusätzlich innere Wärmequellen (z.B. durch nukleare Aufheizung) erzeugt werden. Unter der Annahme, daß diese Wärmequellen konstante Größen sind (also keine Ortsabhängigkeit haben), wird deren Einfluß auf die Temperaturmessung des Temperaturfühlers behandelt.

Im 2. Teil wird an Hand eines durchgerechneten, typischen Beispiels aus der Praxis gezeigt, wie die abgeleiteten Gleichungen angewendet werden können. Im weiteren wird ein FORTRAN-Rechenprogramm angegeben, das die Berechnung des Meßfehlers eines Fühlers bestehend aus bis zu 10 Schichten bei Berücksichtigung von inneren Wärmequellen und Wärmeaustausch an den Stirnflächen der Schichten gestattet.

Im Anhang wird der radiale Temperaturfehler eines aus mehreren Schichten aufgebauten Fühlers behandelt. Dieser Meßfehler wird bestimmend bei großen Eintauchlängen des Fühlers und ist bedingt durch die inneren Wärmequellen.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Einleitung	1
1. Theoretische Betrachtungen	2
1.1. Temperaturverlauf eines Fühlers in einem Bohrloch (ohne innere Wärmequellen und ohne Wärme- austausch an der Stirnfläche des Fühlers)	2
1.2. Temperaturverlauf eines Fühlers in einem Bohrloch (ohne innere Wärmequellen und mit Wärme- austausch an der Stirnfläche des Fühlers)	6
1.3. Temperaturverlauf eines aus mehreren Schich- ten aufgebauten Fühlers in einem Bohrloch (ohne innere Wärmequellen und ohne Wärme- austausch an der Stirnfläche des Fühlers)	8
1.4. Temperaturverlauf eines aus mehreren Schich- ten aufgebauten Fühlers in einem Bohrloch (mit inneren Wärmequellen und ohne Wärme- austausch an der Stirnfläche des Fühlers)	18
1.5. Temperaturverlauf eines aus mehreren Schich- ten aufgebauten Fühlers in einem Bohrloch (mit inneren Wärmequellen und mit Wärmeaus- tausch an der Stirnfläche des Fühlers)	22
2. Anwendungen	23
2.1. Temperaturmeßfehler eines Fühlers, (numeri- sches Beispiel aus der Praxis)	23
2.2. FORTRAN-Rechenprogramm (TSS/370-Betrieb) für den Temperaturmeßfehler eines Fühlers	30
Anhang: Radialer Temperaturmeßfehler eines Fühlers (mit inneren Wärmequellen)	34
Bezeichnungen	38
Abbildungen	41

Einleitung.

Um eine Temperaturmessung an einem Objekt mit Hilfe einer Sonde durchführen zu können, muß die Sonde im Wärmeaustausch mit dem Objekt stehen. Da im Normalfall die Sonde jedoch nicht als wärmeisoliertes System betrachtet werden kann, bedingt die Wärmeleitung der Sonde nach außen, daß die Sonde nicht die Meßtemperatur des Objektes annimmt, womit eine Temperaturfehlmessung verbunden ist. Darüberhinaus wird die angeführte Wärmeleitung im allgemeinen eine Rückwirkung auf die Temperatur am Objekt verursachen, was zu einem weiteren Temperaturmeßfehler führt. Im folgenden wollen wir auf die geschilderten Verhältnisse an Hand von speziellen Beispielen, die sich aus der Praxis wie etwa bei der Temperaturmessung mit Thermoelementen ergeben, näher eingehen. Wir betrachten zunächst einen Körper, der sich auf konstanter Temperatur befindet und fragen nach dem Meßfehler eines zylindrischen Temperaturfühlers, der in ein Bohrloch des Körpers eingeführt ist und dessen Ende auf konstanter Temperatur gehalten wird.

1. Theoretische Ausführungen.

1.1. Temperaturverlauf eines Fühlers in einem Bohrloch,

(ohne innere Wärmequellen und ohne Wärmeaustausch an der Stirnfläche des Fühlers)

Die Anordnung ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt. Der zylindrische Fühler mit einem Außendurchmesser ϕ_a und einem Innendurchmesser ϕ_i hat die Länge L und ist homogen, d.h. wir können ihm den Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten λ zuordnen. Der Fühler ist mit einer Eintauchlänge L_1 in ein Bohrloch eines Blockes, der auf konstanter Temperatur T_a gehalten wird, eingeführt. Die Temperatur außerhalb des Blockes sei überall konstant und gleich der Temperatur T_o am Ende des Fühlers. Unter der Annahme, daß die Temperatur über den Querschnitt des Fühlers als konstant angesetzt werden kann (Vernachlässigung von radialen Wärmeströmen), wird das Temperaturverhalten des Fühlers beschrieben durch die 2 Gleichungen:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - A_j^2 (T - T_j) = 0 \quad , \quad (1)$$

$$(j = 1, 0)$$

mit den 4 Randbedingungen (siehe Abb. 1):

$$\frac{dT}{dx} (0) = 0 \quad (1.1)$$

$$\frac{dT}{dx} (L_1 - \delta) = \frac{dT}{dx} (L_1 + \delta) \quad , \quad (1.2)$$

$$T (L_1 - \delta) = T (L_1 + \delta) \quad , \quad (1.3)$$

$$T (L) = T_o \quad (1.4)$$

hierbei bedeutet:

$[K] T$ = Temperatur im Fühler

$[cm] x$ = Ortskoordinate (siehe Abb. 1)

Index j = Gebietsangabe

$j = 1 : 0 \leq x \leq L_1$ innerhalb des Bohrloches

$j = 0 : L_1 \leq x \leq L$ außerhalb des Bohrloches

$$[cm^{-2}] A_j^2 = \frac{4\alpha_j}{\lambda \phi_{hyd}} \quad (1.5)$$

$$[cm] \phi_{hyd} = \text{hydraulischer Durchmesser} \\ = \frac{4Q}{U} = \frac{\phi_a^2 - \phi_i^2}{\phi_a} \quad (1.6)$$

$[cm^2] Q$ = Querschnitt des Fühlers

$[cm] U$ = äußerer Umfang des Fühlers

$[W/cm^2 K] \alpha_j$ = Wärmeübergangszahl im Gebiet j

$[K] T_j$ = Umgebungstemperatur im Gebiet j

$[W/cm K] \lambda$ = Wärmeleitfähigkeitskoeffizient

δ = beliebig kleine Größe.

Gleichung (1) ergibt sich für den eindimensionalen Fall unmittelbar aus der Wärmebilanz pro Wegelement, nämlich:

abgeführter Wärmestrom $(d\dot{Q}_\lambda)$ = aufgenommener Wärmestrom $(d\dot{Q}_\alpha)$

$$d(-\lambda Q \cdot \frac{dT}{dx}) = \alpha_j U (T_j - T) dx$$

Anmerkung:

Eine strenge Ableitung von Gleichung (1) mit Hilfe der Wärmeleitungsgleichung: $\text{div}(\lambda \text{grad } T) = 0$ und die Berücksichtigung von radialen Wärmeströmen ist vom Verfasser an anderer Stelle, ZIR-Bericht Nr. 18 (1965), näher ausgeführt. Wie man zeigen kann, gilt Gl.1 (bzw. Gl.4.1) um so mehr, je besser die Bedingung erfüllt ist:

$$K_D = \frac{\alpha \phi_a}{4\lambda} \cdot \left[1 - \frac{2\phi_i^2}{\phi_a^2 - \phi_i^2} \cdot \ln \frac{\phi_a}{\phi_i} \right] < 1 \quad (1a)$$

Unter der Voraussetzung, daß im betrachteten Temperaturbereich die Stoffgrößen α_j und λ temperaturunabhängig sind, also A_j^2 eine Konstante ist, wird Gleichung (1) gelöst durch den Ansatz:

$$T = T_{\text{homogen}} + T_{\text{Partikulär}}$$

$$T = c_{1j} \cdot \cos A_j x + c_{2j} \cdot \sin A_j x + T_{\text{Part},j} \quad (1a)$$

Die Partikulärlösungen sind leicht zu erraten, nämlich:

$$T_{\text{Part},1} = T_a$$

$$T_{\text{Part},0} = T_o$$

Die 4 Konstanten (c_{1j} , c_{2j}) der hyperbolischen Funktionen (Cos, Sin) sind durch die 4 Randbedingungen (Gleichungen 1.1 - 1.4) festgelegt.

Ohne auf den kurzen Rechenweg einzugehen, ergeben sich damit die Lösungen von (1) explizit zu:

$$\text{für } x \leq L_1: T_a - T = a \cdot \cos A_1 x \quad , \quad (1.7)$$

$$\text{mit } a = \frac{T_a - T_o}{\cos A_1 L_1 \cdot \left[1 + \frac{A_1}{A_o} \operatorname{Tg} A_1 L_1 \cdot \operatorname{Tg} A_o (L - L_1) \right]}$$

und

$$\text{für } x \geq L_1: T_o - T = c \cdot \left[\sin A_o x - \operatorname{Tg} A_o L \cdot \cos A_o x \right] \quad , \quad (1.8)$$

$$\text{mit } c = a \cdot \frac{A_1}{A_o} \cdot \frac{\sin A_1 L_1}{\cos A_o L_1 - \operatorname{Tg} A_o L \cdot \sin A_o L_1}$$

Als Meßfehler des Fühlers definieren wir die Temperaturdifferenz zwischen der Blocktemperatur und der Fühlertemperatur am Ende des Bohrloches, also:

$$\Delta T = T_a - T(x = 0) \quad , \quad (1.9)$$

Mit (1.7) erhalten wir somit:

$$\Delta T = a$$

oder anders geschrieben bei Einführung der Größe $N = \frac{T_a - T_o}{a}$:

$$\Delta T = \frac{T_a - T_o}{N} \quad , \quad (1.10)$$

$$\text{mit } N = \cos A_1 L_1 + \frac{A_1}{A_o} \sin A_1 L_1 \cdot \operatorname{Tg} A_o (L - L_1)$$

Für die graphische Darstellung von (1.10) ist es zweckmäßig Gleichung (1.10) umzuschreiben. Bei Einführung der Parameter:

$$1.) \quad \frac{T_a - T_o}{T_a} \quad ,$$

$$2.) \quad W_{o1} = \frac{A_o - A_1}{A_1} \quad , \quad 3.) \quad s = \frac{L}{L_1} - 1 \quad \text{und}$$

$$4.) \quad \frac{1}{F_{1,0}} = 1 + \frac{1}{1 + W_{o1}} \cdot \operatorname{Tg} A_1 L_1 \cdot \operatorname{Tg} (1 + W_{o1}) \cdot s \cdot A_1 L_1$$

ergibt sich die mit (1.10) äquivalente Gleichung:

$$\frac{\Delta T}{T_a} = \frac{T_a - T_o}{T_a} \cdot F_{1,0} \cdot \frac{1}{\cos A_1 L_1} \quad (1.10a)$$

Da der Parameter $F_{1,0}$ nur schwach von der Größe $A_1 L_1$ abhängt, kann mit (1.10a) der relative Meßfehler $\frac{\Delta T}{T_a}$ als Funktion von $A_1 L_1$, wie in der Abb. 4 ausgeführt, betrachtet werden. Der Parameter $F_{1,0}$ kann hierbei den Abbildungen 5 und 6 entnommen werden.

1.2. Temperaturverlauf eines Fühlers in einem Bohrloch

(ohne innere Wärmequellen und mit Wärmeaustausch an der Stirnfläche des Fühlers)

Wir betrachten dieselbe Anordnung wie im Abschnitt 1.1. D.h. wir können den dort ausgeführten Rechenweg beibehalten und alle Aussagen übernehmen bis auf die 1. Randbedingung (Gleichung 1.1), die bei Berücksichtigung eines Wärmeaustausches an der Stirnfläche des Fühlers nun mehr erweitert lautet:

$$-\lambda \cdot \frac{dT}{dx}(0) = \alpha' \cdot (T_a - T(0)) \quad , \quad (2.1)$$

Durch Einführen der Wärmeübergangszahl α' von der Stirnfläche des Fühlers ist der Wärmeaustausch an der Stirnfläche bei unserer Annahme: keine Abhängigkeit vom Radius eindeutig beschrieben. Da der Effekt, die erweiterte Randbedingung (2.1), den Meßfehler im Normalfall nicht stark beeinflusst, führen wir die Rechnung einfachhalber nur für den Spezialfall: $L = L_1$ durch, wo der Effekt maximal wirksam ist. Als weitere Randbedingung führen wir also ein:

$$T(L_1) = T_0 \quad , \quad (2.2)$$

und können uns damit auf das Gebiet $j = 1$ innerhalb des Bohrloches beschränken.

Einsetzen des Lösungsansatzes (1a) in die Randbedingungen (2.1) und (2.2) führt auf die Lösung:

$$T_a - T = \frac{(T_a - T_o) \cdot K_\alpha}{\cos A_1 L_1} \left(\cos A_1 x + \frac{\alpha'}{\lambda A_1} \sin A_1 x \right), \quad (2.3)$$

$$\text{mit: } 1/K_\alpha = \left(1 + \frac{\alpha'}{\lambda A_1} \cdot \operatorname{Tg} A_1 L_1 \right)$$

Aus (2.3) folgt für den Meßfehler (1.9):

$$\Delta T' = \frac{T_a - T_o}{\cos A_1 L_1} \cdot K_\alpha, \quad (2.4)$$

Ein Vergleich mit (1.10) zeigt, daß (2.4) für $\alpha' = 0$ in (1.10) übergeht, damit ergibt sich der Faktor K_α als Korrekturfaktor und wir können verallgemeinert näherungsweise ansetzen:

$$\Delta T' = K_\alpha \cdot \Delta T, \quad (2.5)$$

wobei ΔT durch (1.10) erklärt ist.

In der Abbildung 7 ist der Korrekturfaktor K_α bei Einführung des Parameters $\frac{\alpha' L_1}{\lambda}$ als Funktion von $A_1 L_1$ aufgetragen, (hierbei ist $K_L = 1$ angenommen, siehe folgende Anmerkung).

Anmerkung:

Die strenge Ableitung ergibt für den Korrekturfaktor K_α den Ausdruck:

$$\frac{1}{K_{\alpha}} = 1 + \frac{\alpha_1}{\lambda_1 A_1} \cdot (\operatorname{Tg} A_1 L_1) \cdot K_L \quad (2.6)$$

mit der Größe:

$$K_L = \frac{1 + \frac{A_1}{A_0} \cdot \frac{\operatorname{Tg} A_0 (L-L_1)}{\operatorname{Tg} A_1 L_1}}{1 + \frac{A_1}{A_0} \cdot \operatorname{Tg} A_0 (L-L_1) \cdot \operatorname{Tg} A_1 L_1} \quad (2.6a)$$

Gleichung (2.6a) ist in Abb.8 bei Einführung des Parameters: $\frac{A_1}{A_0} \cdot \operatorname{Tg} A_0 (L-L_1)$ als Funktion von $A_1 L_1$ dargestellt. In Verbindung mit (2.6) ist damit der Grad der Näherung unmittelbar zu ersehen, d.h. für die meisten in der Praxis auftretenden Fälle ergibt sich, daß der durch die angeführte Näherung bedingte Fehler zu vernachlässigen ist.

1.3. Temperaturverlauf eines aus mehreren Schichten aufgebauten Fühlers in einem Bohrloch

(ohne innere Wärmequellen und ohne Wärmeaustausch an der Stirnfläche des Fühlers)

In der Praxis kommt es häufig vor, daß der eigentliche Temperaturfühler nicht direkt in ein Bohrloch, dessen Temperatur gemessen werden soll, eingeführt werden kann, sondern von ihm durch mehrere Schutz- und Isolationsschichten abgeschirmt ist. Im folgenden soll der Einfluß dieser Schichten auf den Meßfehler des Fühlers behandelt werden unter Beibehaltung aller im Abschnitt 1.1. eingeführten Annahmen. Entsprechend dem Gesagten erweitern wir also die Anordnung vom Abschnitt 1.1. (Abb. 1), indem wir weitere Schichten nach innen einführen, siehe Abb.2.

Wir kennzeichnen, wie aus Abb.2 ersichtlich, die Schichten mit einem laufenden Index $i = 1, 2, 3 \dots$, wobei wir außen anfangen und nach innen fortfahren. Der i .ten Schicht wird ferner die Temperatur T_i zugeordnet. Im weiteren wissen wir, daß entsprechend Gleichung (1.5) jede Schicht i durch ihre Stoff- und Geometrie-Konstante A_i charakterisiert ist, womit physikalisch die Anordnung erklärt ist. Das Temperaturverhalten der äußersten Schicht, also Schicht Nr. 1, ist im Abschnitt 1.1 behandelt und wird durch die Gleichungen (1.7) und (1.8) beschrieben, die wir hier übernehmen, es war:

$$\text{für } x \leq L_1: T_a - T_1 = a_{11} \cos A_1 x \quad (3.1)$$

und

$$\text{für } x \geq L_1: T_o - T_1 = b_{11} \cos A_{10} x + c_{11} \sin A_{10} x \quad (3.2)$$

(Wir haben hier die Konstanten mit Doppelindezes eingeführt, um mit dem 1.Index die Schicht und mit dem 2.Index die Schichtkonstante bezogen auf das Funktionsargument bezeichnen zu können, was sich im weiteren als nützlich erweist).

Entsprechend den Ausführungen des Abschnittes 1.1 muß für die i .te Schicht analog (Gl.1) die Differentialgleichung gelten:

$$\frac{d^2 T_i}{dx^2} - A_i^2 (T_i - T_{i-1}) = 0 \quad (3.3)$$

$$\text{für } 0 \leq x \leq L$$

$$\text{und } i = 2, 3, \dots$$

mit den Randbedingungen analog (1.1 - 1.4):

$$\frac{dT_i}{dx}(0) = 0 \quad (3.4)$$

$$\frac{dT_i}{dx}(L_1 - \delta) = \frac{dT_i}{dx}(L_1 + \delta) \quad (3.5)$$

$$T_i(L_1 - \delta) = T_i(L_1 + \delta) \quad (3.6)$$

$$T_i(L) = T_0 \quad (3.7)$$

für $i = 2, 3, \dots$

Da der inhomogene Teil des Gleichungssystems (3.3) sich mit Berücksichtigung von (3.1) und (3.2) ebenfalls aus hyperbolischen Funktionen zusammensetzen wird, ist zu vermuten, daß die allgemeine Lösung von (3.3) gefunden werden kann, wenn wir versuchsweise den folgenden Lösungsansatz ansetzen:

Für das Gebiet: $0 \leq x \leq L_1$ (innerhalb des Bohrloches)

$$T_a - T_i = \sum_{j=1}^i a_{ij} \cos A_j x + \sum_{j=1}^i d_{ij} \sin A_j x, \quad (3.8)$$

Analog (1a) ergibt sich die Lösung von (3.3) allgemein:

$$\begin{aligned} T_i &= T_{i,\text{homogen}} + T_{i,\text{Partikulär}} \\ &= -a_{ii} \cos A_i x - d_{ii} \sin A_i x + T_{i,\text{Part}} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Ein Vergleich von (3.8) und (3.9) ergibt, daß (3.8) gilt, wenn gezeigt werden kann, daß die Partikulärlösung $T_{i,p}$ als lineare

Funktion aller $\cos A_j x$ und $\sin A_j x$ ($j = 1, 2, \dots, i-1$) darstellbar ist. Um dies zeigen zu können, führen wir folgende Hilfsfunktion ein:

$$\begin{aligned} f_{i-1} &= T_a - T_{i-1} \\ &= \sum_{k=1}^{i-1} a_{i-1,k} \cos A_k x + \sum_{k=1}^{i-1} d_{i-1,k} \sin A_k x, \end{aligned} \quad (3.10)$$

wobei f_i nach Gleichung (3.1) erklärt ist, und versuchen für $T_{i,p}$ den Ansatz:

$$T_{i,p} = T_a + \sum_j \sum_k \frac{A_i^2}{A_j^2 - A_i^2} \cdot f_{i-1} \cdot \delta_{jk}, \quad (3.11)$$

(Kronecker-Symbol: $\delta_{jk} = 1$ für $j = k$, sonst $\delta_{jk} = 0$)

Aus (3.10) und (3.11) folgt:

$$\begin{aligned} T_{i,p} - T_{i-1} &= \sum_j \sum_k \left(\frac{A_i^2}{A_j^2 - A_i^2} \cdot f_{i-1} \cdot \delta_{jk} + f_{i-1} \right) \\ &= \sum_j \sum_k \frac{A_j^2}{A_j^2 - A_i^2} \cdot f_{i-1} \cdot \delta_{jk} \end{aligned}$$

und nach Multiplikation mit A_i^2 :

$$A_i^2 (T_{i,p} - T_{i-1}) = \sum_k \sum_j \frac{A_i^2 \cdot A_j^2}{A_j^2 - A_i^2} \cdot f_{i-1} \cdot \delta_{kj}, \quad (3.12)$$

Gleichung (3.11) zweimal nach x differenziert, ergibt:

$$\frac{d^2}{dx^2} T_{i,p} = \sum_k \sum_j \frac{A_i^2 \cdot A_j^2}{A_j^2 - A_i^2} \cdot f_{i-1} \cdot \delta_{kj}, \quad (3.13)$$

Setzen wir die Gleichungen (3.12) und (3.13) in (3.3) ein, so bestätigt sich, daß (3.11) tatsächlich eine Partikulärlösung von (3.3) ist, womit unsere Behauptung bewiesen ist, daß (3.8) die Lösung von (3.3) ist. Es folgen ferner nach Koeffizientenvergleich von (3.8) und (3.10) und bei Beachtung von (3.9) die Rekursionsformeln:

$$a_{ij} = - \frac{A_i^2}{A_j^2 - A_i^2} \cdot a_{i-1,j} \quad \text{für } j < i, \quad (3.14)$$

und

$$d_{ij} = - \frac{A_i^2}{A_j^2 - A_i^2} \cdot d_{i-1,j} \quad \text{für } j < i, \quad (3.15)$$

Führen wir die zweifach indizierte Größe h_{ij} definitionsgemäß ein durch:

$$h_{ij} = \frac{-A_j^2}{A_i^2 - A_j^2}, \quad (3.14a)$$

so erhalten wir aus (3.14), sukzessive angewendet, die Gleichung:

$$a_{ij} = B_{ij} \cdot a_{jj}, \quad (3.14b)$$

mit der Konstanten B_{ij} , die sich ergibt zu:

$$B_{ij} = \prod_{l=1}^{i-j} h_{j, (i+1-l)} \quad \text{für } j < i \quad (3.14c)$$

$$B_{ii} = 1 \quad \text{für } j = i$$

(hierbei wurde das Produktzeichen verwendet, das definiert ist durch: $\prod_{l=1}^i a_l = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \dots \cdot a_i$)

Auf analoge Weise ergibt sich für das Gebiet:

$$L_1 \leq x \leq L \quad (\text{außerhalb des Bohrloches})$$

die Lösung von (3.3) zu:

$$T_o - T_i = \sum_{j=1}^i b_{ij} \cos A_j x + \sum_{j=1}^i c_{ij} \sin A_j x, \quad (3.16)$$

mit den Rekursionsformeln:

$$b_{ij} = - \frac{A_i^2}{A_j^2 - A_i^2} \cdot b_{i-1,j}, \quad \text{für } j < i, \quad (3.17)$$

und

$$c_{ij} = - \frac{A_i^2}{A_j^2 - A_i^2} \cdot c_{i-1,j} \quad \text{für } j < i \quad (3.18)$$

Die noch unbekannten Koeffizienten der gefundenen Lösung (Gl. 3.8 und Gl. 3.16) sind durch die Randbedingungen (3.4-3.7) bei Beachtung der Rekursionsformeln (3.14; 3.15; 3.17 und 3.18), wie im folgenden ausgeführt wird, vollkommen bestimmt.

Aus (3.4) folgt:

$$0 = \sum_{j=1}^i A_j \cdot d_{ij} \quad (3.19)$$

Explizit ergibt sich aus (3.19):

$$\text{für } i = 1: \quad d_{11} = 0$$

$$\text{und mit (3.15) folgt daraus: } d_{i1} = 0 \quad (3.20)$$

für $i = 2$: $A_2 d_{22} + A_1 d_{21} = 0$

hieraus folgt wegen (3.20): $d_{22} = 0$

und mit (3.15) ferner: $d_{i2} = 0$

Die Berechnung successive fortgesetzt, liefert allgemein:

$$d_{ii} = 0 \quad \text{und} \quad d_{ij} = 0 \quad .$$

Die Lösung (3.8) vereinfacht sich damit zu:

$$T_a - T_i = \sum_{j=1}^i a_{ij} \cos A_j x \quad , \quad (3.21)$$

Aus (3.7) folgt:

$$0 = \sum_{j=1}^i b_{ij} \cos A_j' L + \sum_{j=1}^i c_{ij} \sin A_j' L \quad , \quad (3.22)$$

Anmerkung:

Da die 1. Schicht durch 2 Schichtkonstanten (A_1 und $A_0 = A_{10}$) charakterisiert ist, haben wir, um Verwechslungen zu vermeiden die Strichmarkierung eingeführt, es bedeutet also:

$$A_j = A_1, A_2, A_3, \dots \quad (\text{inneres Gebiet, Bohrloch})$$

$$\text{und} \quad A_j' = A_{10}, A_2, A_3, \dots \quad (\text{äußeres Gebiet})$$

Explizit ergibt sich aus (3.22):

$$\text{für } i = 1: \quad b_{11} = -c_{11} \operatorname{Tg} A_{10} L \quad , \quad (3.23)$$

(diese Koeffizienten sind mit (3.2) und (1.8) bereits bestimmt)

$$\text{für } i = 2: \quad 0 = b_{22} \cos A_2 L + b_{21} \cos A_{10} L + c_{22} \sin A_2 L + c_{21} \sin A_{10} L$$

Mit (3.17) und (3.18) ergibt sich:

$$0 = b_{22} \cos A_2 L + c_{22} \sin A_2 L - \frac{A_2^2}{A_{10}^2 - A_2^2} \cdot (b_{11} \cos A_{10} L + c_{11} \sin A_{10} L)$$

und wegen (3.23) und (3.17, 3.18) schließlich:

$$b_{22} = -c_{22} \operatorname{Tg} A_2 L; \quad b_{21} = -c_{21} \operatorname{Tg} A_{10} L$$

Die Berechnung successive fortgesetzt, liefert allgemein:

$$b_{ij} = -c_{ij} \operatorname{Tg} A_j' L$$

Die Lösung (3.16) vereinfacht sich damit zu:

$$T_o - T_i = \sum_{j=1}^i c_{ij} \left[\sin A_j' x - \operatorname{Tg} A_j' L \cdot \cos A_j' x \right], \quad (3.24)$$

Mit den Gleichungen (3.21) und (3.24) folgt aus (3.6):

$$T_o - T_a + \sum a_{ij} \cos A_j L_1 = \sum c_{ij} (\sin A_j' L_1 - \operatorname{Tg} A_j' L \cdot \cos A_j' L_1), \quad (3.25)$$

und schließlich aus (3.5):

$$\sum a_{ij} A_j \sin A_j L_1 = \sum c_{ij} \cdot A_j' (\cos A_j' L_1 - \operatorname{Tg} A_j' L \sin A_j' L_1) \quad (3.26)$$

Ohne auf den einfachen aber etwas langatmigen Rechengang einzugehen, ergibt sich aus den Gleichungen (3.25) und (3.26) folgende Beziehung:

$$T_a - T_o = \sum_{j=1}^i a_{ij} \cdot N_j, \quad (3.27)$$

hierbei bedeutet:

$$N_1 = \cos A_1 L_1 + \frac{A_1}{A_{10}} \cdot \operatorname{Tg} A_{10} (L - L_1) \cdot \sin A_1 L_1, \quad (3.28)$$

und

$$N_i = \cos A_i L_1 + \operatorname{Tg} A_i (L - L_1) \cdot \sin A_i L_1, \quad (3.29)$$

für $i = 2, 3, \dots$

Mit den Gleichungen (3.27) und (3.14) sind alle Koeffizienten a_{ij} von Gleichung (3.21) nun mehr bekannt, womit ebenfalls der Meßfehler der i -ten Schicht bestimmt ist, der sich aus (3.21) definitionsgemäß ergibt zu:

$$\Delta T_i = T_a - T_i(0) = \sum_{j=1}^i a_{ij} \quad (3.30)$$

Die Eliminierung der Größen a_{ij} aus den angegebenen Gleichungen gelingt bei Einführung des Korrekturfaktors K_i für den Meßfehler ΔT_i und der Hilfsgröße K_{oj} entsprechend den Definitionsgleichungen:

$$\Delta T_i = (T_a - T_o) \cdot \frac{K_i}{N_i}, \quad (3.31)$$

und

$$K_{oj} = \frac{a_{jj} \cdot N_j}{(T_a - T_o)} \quad (3.32)$$

Es ergibt sich aus den Gleichungen (3.30, 3.27 und 3.14 a,b,c) nach einfacher Rechnung explizit:

$$K_i = 1 + \sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{N_i}{N_j} - 1 \right) \cdot B_{ij} \cdot K_{oj} \quad (3.33a)$$

für $i = 2, 3, \dots$

$$\text{mit: } K_{oj} = 1 - \sum_{k=1}^{j-1} B_{jk} \cdot K_{ok} \quad , \quad (3.33b)$$

für $j = 2, 3, \dots$

$$\text{wobei gilt: } K_1 = 1 \quad \text{für } i = 1 \quad (3.33c)$$

$$\text{und : } K_{o1} = 1 \quad \text{für } j = 1 \quad (3.33d)$$

Wie es sein muß, ist Gleichung (3.31) für $i = 1$ bei Berücksichtigung von (3.28) und (3.33c) identisch mit (1.10). Für numerische Berechnungen kann in diesem Fall daher auf die gegebene graphische Darstellung (Abb. 4, 5, 6) zurückgegriffen werden. Um die numerische Berechnung im weiteren zu erleichtern, sind unter Beibehaltung derselben Parameter in den Abb. 9, 10 und 11 ferner die Größe N_i und in den Abb. 12 und 13 die Größe $\frac{N_i}{N_j}$ als Funktion von $A_i L_1$ graphisch aufgetragen.

1.4. Temperaturverlauf eines aus mehreren Schichten aufgebauten Fühlers in einem Bohrloch

(mit inneren Wärmequellen und ohne Wärmeaustausch an der Stirnfläche des Fühlers)

Innere Wärmequellen im Fühler können im Rahmen der gewählten Betrachtungsweise (siehe Abschnitt 1.1) ohne Schwierigkeiten durch einen entsprechenden Quellterm in der Wärmebilanzgleichung (s. Seite 3 unten) berücksichtigt werden. Bei Einführung der Größe $\dot{q}_v$ = Wärmequelle pro Volumeneinheit ergibt sich für den Quellterm pro Wegelement:

$$d\dot{Q}_s = \dot{q}_v \cdot Q \cdot dx$$

Damit lautet die Wärmebilanzgleichung jetzt:

$$d(-\lambda Q \frac{dT}{dx}) = \alpha_j U (T_j - T) dx + \dot{q}_v Q dx$$

und Gleichung (1) lautet erweitert:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - A_j^2 (T - T_j) + \frac{\dot{q}_v}{\lambda} = 0 \quad (4.1)$$

In analoger Weise lautet die Gleichung (3.3) erweitert:

$$\frac{d^2 T_i}{dx^2} - A_i^2 (T_i - T_{i-1}) + \frac{\dot{q}_{v,i}}{\lambda_i} = 0 \quad (4.2)$$

Um Verwechslungen zu vermeiden, verwenden wir im folgenden für die Temperatur zwei Symbole θ und T , u.z. bezeichnen wir die Temperatur mit θ dann, wenn der Fühler mit inneren Wärmequellen betrachtet wird, und mit T , wie früher, wenn der Fühler ohne

innere Wärmequellen betrachtet wird. Ferner führen wird als Rechengröße $\dot{q}_i$ den Ausdruck ein:

$$\dot{q}_i = \frac{\dot{q}_{v,i}}{\lambda_i \cdot A_i^2} \quad , \quad (4.3)$$

(Sind die inneren Wärmequellen pro Masse ($\dot{q}_m$) statt pro Volumen angegeben, so gilt, wenn die Dichte des Stoffes ρ beträgt, die Umrechnung:

$$\dot{q}_v = \rho \cdot \dot{q}_m \quad (4.4)$$

Schließlich benutzen wir wie früher die Strichmarkierung für Schichtkonstanten (A) und Rechengrößen ($\dot{q}$), die sich auf das Gebiet außerhalb des Bohrloches beziehen.

Unter Beibehaltung der Randbedingungen (Gl. 1.1-1.4) bzw. (Gl. 3.4-3.7) und mit der Annahme, daß die Wärmequellen ($\dot{q}_{v,i}$) konstant sind, (d.h. keine Ortsabhängigkeit von x vorliegt), ergibt sich keine Änderung des Typus der Differentialgleichungen (4.1) und (4.2) zu früher, so daß Lösungen nach dem angegebenen Verfahren in den vorangegangenen Abschnitten gefunden werden können.

Um Platz einzusparen, werden wir daher auf die Herleitung der Lösungen der Gleichungen (4.1) und (4.2) nach dem beschriebenen Verfahren hier nicht näher eingehen, sondern beschränken uns im folgenden auf eine Zusammenfassung der Ergebnisse. Die Lösungen lauten jetzt:

$$\theta_i = T_a + \sum_{j=1}^i (a_{ij} \cos A_j x + \dot{q}_j) \quad \text{für } x \leq L_i \quad (4.5)$$

und

$$\theta_i = T_0 + \sum_{j=1}^i (b_{ij} \cos A_j' x + c_{ij} \sin A_j' x + \dot{q}_j') \quad \text{für } x \geq L_1 \quad (4.6)$$

Für die Konstanten a_{ij} , b_{ij} und c_{ij} gelten dieselben Rekursionsformeln wie früher, siehe dort die Gleichungen (3.14, 3.17, 3.18 und 3.14a-c), also z.B.:

$$a_{ij} = B_{ij} \cdot a_{jj} \quad (4.7)$$

Die Lösungen (4.5) und (4.6) in die Randbedingungen eingesetzt ergeben für die Konstanten a_{ii} :

$$a_{ii} = - \frac{F_i}{N_i} + \frac{D_i}{M_i}, \quad \text{für } i = 1, 2, \dots \quad (4.8a)$$

hierbei sind folgende Größen neu eingeführt:

$$F_i = F_1 - \sum_{k=1}^{i-1} B_{ik} \cdot F_k, \quad \text{für } i = 2, 3, \dots \quad (4.8b)$$

mit:

$$F_1 = (T_a - T_0) + (\dot{q}_1 - \dot{q}_1'), \quad (\text{für } i = 1) \quad (4.8c)$$

ferner:

$$D_i = - \sum_{j=1}^i \dot{q}_j' - \sum_{k=1}^{i-1} B_{ik} \cdot D_k, \quad \text{für } i = 2, 3, \dots \quad (4.8d)$$

mit:

$$D_1 = - \dot{q}_1' \quad (\text{für } i = 1) \quad (4.8e)$$

ferner:

$$M_i = \cos A_i' L, \quad \text{für } i = 2, 3, \dots \quad (4.8f)$$

mit:

$$M_i = \cos A_i L_i \cdot \left(\frac{\cos A_i L_i + \frac{A_i}{A_o} \sin A_i L_i \cdot \operatorname{Tg} A_o (L-L_i)}{\cos A_o L_i + \sin A_o L_i \cdot \operatorname{Tg} A_o (L-L_i)} \right), \text{ (für } i=1) \quad (4.8g)$$

Der Meßfehler der i.ten Schicht ($\Delta\theta_i$) ergibt sich aus den Gleichungen (4.5, 4.7 und 4.8 a-g) jetzt schließlich zu:

$$\Delta\theta_i = \sum_{j=1}^i B_{ij} \frac{F_j}{N_j} - \sum_{j=1}^i B_{ij} \frac{D_j}{M_j} - \sum_{j=1}^i \dot{q}_j, \quad (4.9)$$

Die Ausrechnung der 1. Teilsumme von (4.9) ergibt:

$$\sum_{j=1}^i B_{ij} \cdot \frac{F_j}{N_j} = \left(1 + \frac{\dot{q}_1 - \dot{q}_i}{T_a - T_o} \right) \cdot \Delta T_i, \quad (4.10)$$

Gleichung (4.10) in (4.9) eingesetzt, ergibt endlich für den Meßfehler nach Umstellung den Ausdruck:

$$\Delta\theta_i = \Delta T_i + \Delta T_{q,i} \quad (4.11)$$

mit:

$$\Delta T_i = (T_a - T_o) \cdot \frac{K_i}{N_i} \quad (3.31)$$

und

$$\Delta T_{q,i} = \Delta T_i \cdot \left(\frac{\dot{q}_1 - \dot{q}_i}{T_a - T_o} \right) - \sum_{j=1}^i \left(\dot{q}_j + \frac{B_{ij} \cdot D_j}{M_j} \right). \quad (4.11a)$$

Aus (4.11) ist zu entnehmen, daß der Meßfehler ($\Delta\theta_i$) in 2 Anteile aufgegliedert werden kann, wobei der 1. Anteil proportional der Temperaturdifferenz ($T_a - T_o$) und unabhängig von den Wärmequellen ist, und der 2. Anteil, der unabhängig von der Temperaturdifferenz ($T_a - T_o$) ist, den Einfluß der Wärmequellen wiedergibt.

1.5. Temperaturverlauf eines aus mehreren Schichten aufgebauten Fühlers in einem Bohrloch

(mit inneren Wärmequellen und mit Wärmeaustausch an der Stirnfläche des Fühlers)

In diesem Fall ist entsprechend den Ausführungen des Abschnittes 1.2. das Gleichungssystem (4.1, 4.2) mit der erweiterten 1. Randbedingung:

$$-\lambda_i \cdot \frac{d\theta_i}{dx}(0) = \alpha_i' (T_a - \theta_i(0)) \quad (5.1)$$

zu lösen. Wir brechen an dieser Stelle ab und verzichten auf die Durchrechnung der langatmigen Rechenprozedur, die entsprechend dem angegebenen Verfahren der vorangegangenen Abschnitte problemlos durchgeführt werden könnte. Wir begnügen uns hier damit, das Ergebnis des Abschnittes 1.2. sinngemäß zu übernehmen (Gl. 2.6 und 2.6a). Das heißt, wir berücksichtigen den Wärmeaustausch an der Stirnfläche der Schichten, indem wir näherungsweise für den Meßfehler ($\Delta\theta'$) ansetzen:

$$\Delta\theta_i' = K_{\alpha,i} \cdot \Delta\theta_i, \quad (5.2)$$

mit dem Korrekturfaktor $K_{\alpha,i}$:

$$\frac{1}{K_{\alpha,i}} = \left(1 + \frac{\alpha_i' \cdot K_{Li}}{\lambda_i \cdot A_i} \cdot \operatorname{Tg} A_i L_1\right), \quad (5.2a)$$

und mit:

$$K_{Li} = \frac{1 + \operatorname{Tg} A_i (L-L_1) / \operatorname{Tg} A_i L_1}{1 + \operatorname{Tg} A_i (L-L_1) \cdot \operatorname{Tg} A_i L_1} \quad \text{für } i=2,3,\dots$$

bzw.

$$K_{Li} = \text{Gleichung (2.6a)}$$

für $i=1$

(5.2b)

2. Anwendungen.

2.1. Temperaturmeßfehler eines Fühlers, (numerisches Beispiel aus der Praxis).

Wie die in den vorangegangenen Abschnitten entwickelte Theorie in der Praxis angewendet werden kann, wollen wir an Hand eines typischen Beispiels aus der Praxis aufzeigen. Als Beispiel haben wir gewählt die Temperaturmessung von Coated Particles, die in einem Graphitkörper angeordnet sind, mit Hilfe eines Thermoelementes, Bestrahlungsexperiment: ZIR-Projekt LV 30, 2. Ausführung. Die geometrische Anordnung mit Angabe der zu erwartenden Temperaturen ist in Abb.3 wiedergegeben. Wie im folgenden näher ausgeführt wird, kann die Berechnung des Temperatur-Meßfehlers in dem betrachteten Fall und in ähnlichen Fällen mit Hilfe des Rechenschemas, das wir in Tabelle 1 zusammengestellt haben, durchgeführt werden. Das heißt entsprechend der von uns gewählten Nomenklatur ergibt sich für unser Beispiel (vgl. Abb. 3) die in Zeile 0 der Tabelle 1 angegebene Einteilung und die folgenden Schritte im weiteren. In Zeile 1 werden die entsprechenden Angaben der verwendeten Stoffe und diesbezüglichen Gasen eingetragen und in den nächsten Zeilen die benötigten Geometriegrößen ($\phi_a, \phi_i, \Delta\phi_a, \Delta\phi_i, L_1$ und L) und die Temperaturangaben von T_a und T_o . Der hydraulische Durchmesser (Zeile 7) ergibt sich mit den Angaben der Zeilen 2 und 3 nach (1.6), bzw. aus Abb.19. In Zeile 8 ist der Wärmeleitkoeffizient angegeben, der der zu messenden Temperatur T_a entspricht. In unserem Fall kann dieser den Abbildungen 16 und 17 entnommen werden, dort ist die Temperaturabhängigkeit des Wärmeleitkoeffizienten für die uns hier interessierenden Stoffe aus Literaturdaten (TPRC-Data, 1970) zusammengestellt. Bei der Ermittlung der Wärmeüber-

gangszahl α berücksichtigen wir 2 Terme, einen Strahlungsanteil (α_{Str}) und einen Leitungsanteil (α_L) (mit letzterem erfassen wir den Wärmeübergang in einem Gasspalt, bzw. die freie Konvektion); wir setzen also an:

$$\alpha = \alpha_{\text{Str}} + \alpha_L, \quad (\text{A.1})$$

Unter der Annahme, daß die von uns betrachteten Stoffe graue Stahler sind, ist für unsere Berechnungen der Strahlungsanteil mit genügender Genauigkeit gegeben durch:

$$\alpha_{\text{Str}} = 4 \bar{\epsilon} \sigma T^3 \quad (\text{A.2})$$

hierbei bedeutet:

$$\begin{aligned} \sigma &= 5,65 \cdot 10^{-12} \text{ W/cm}^2 \text{K}^4 \\ &= \text{Stefan-Boltzmann-Konstante} \\ \bar{\epsilon} &= \text{mittleres Emissionsvermögen} \end{aligned}$$

für parallele Wände gilt bei ungleichem Emissionsvermögen der Wände ϵ_1, ϵ_2 :

$$\frac{1}{\bar{\epsilon}} = \frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1. \quad (\text{A.2a})$$

Anmerkung:

Gleichung (A.2) ergibt sich durch Linearisierung der Temperaturabhängigkeit des für parallele Wände (graue Strahler) gültigen strengen Ausdruckes:

$$\dot{q}_{\text{Strahlung}} = \bar{\epsilon} \sigma ((T+\Delta T)^4 - T^4) \approx \alpha_{\text{Str}} \cdot \Delta T$$

Bei Kenntnis der Emissionszahl, die in Zeile 9 der Tabelle angeführt wird, kann der Term α_{Str} (Zeile 10) also nach (A.2) angegeben werden, bzw. aus Abb.15 entnommen werden.

Für die Ermittlung des Leitungsanteils α_L unterscheiden wir 2 Fälle:

- a) Für die freie Konvektion, d.h. wenn der Gasraum groß gegenüber dem Schichtdurchmesser ist, ist mit einer Nusseltzahl $N_u = 0,5$ zu rechnen, damit ergibt sich für α_L :

$$\alpha_L = 0,5 \cdot \frac{\lambda_{\text{Gas}}}{\phi_a} \quad , \quad (\text{A.3})$$

- b) Für einen kreisförmigen Gasspalt (Außenradius R_a , Innenradius R_i) ergibt sich, wie man zeigen kann, für α_L der Ausdruck:

$$\begin{aligned} \alpha_L &= E \cdot R \cdot \lambda_{\text{Gas}} \\ &= E \cdot \frac{1}{R_i \cdot \ln R_a / R_i} \cdot \lambda_{\text{Gas}} \quad , \quad (\text{A.4}) \end{aligned}$$

(Anmerkung: Die Radien ergeben sich sinngemäß aus den entsprechenden Durchmesserangaben der Schichten,

d.h. für die k.te Schicht:

$$\begin{aligned} 2 R_a &= \phi_{i,k-1} \\ \text{und } 2 R_i &= \phi_{a,k} \end{aligned} \quad (\text{A.4a})$$

Mit dem Korrekturfaktor E wird die Exzentrizität des Spaltes erfaßt. Für einen konzentrischen Spalt ist $E = 1$. Ist der Spalt exzentrisch angeordnet, so wird die effektive Wärmeleitung größer,

nach Carslaw gilt für E die Gleichung:

$$E = \frac{\lambda_{\text{eff}}}{\lambda_{\text{Gas}}} = \frac{\text{ArCos} \frac{1 + z^2}{2z}}{\text{ArCos} \frac{1 + z^2 - d'^2}{2z}}, \quad (\text{A.5})$$

hierbei bedeutet:

$$z = R_i / R_a$$

$d' = d / R_a$, wobei d der Abstand zwischen den
Mittelpunkten der Radiuskreise R_a
und R_i ist.

Der Faktor E ist in Abb.14 nach (A.5) graphisch aufgetragen.
Für unsere Berechnungen nehmen wir näherungsweise an, daß als
Maß für d die Toleranzangabe der Durchmesser angesetzt werden
darf. Wir setzen also an:

$$d = \Delta \phi_a \quad (\text{A.6})$$

Mit dieser Annahme ($d = \Delta \phi_a$ aus Zeile 4) ergeben sich die E-
Werte (Zeile 11) nach A.5 bzw. aus Abb.14. In Abb.18 ist als
weitere Hilfsgröße von (A.4) der Geometriefaktor R (Zeile 12)
graphisch aufgetragen. Somit kann zusammengefaßt der in Zeile 13
angeführte Term α_L nach (A.3) oder (A.4) berechnet werden, bzw.
im letzteren Fall nach Multiplikation mit λ_{Gas} (Zeile 8) und
E (Zeile 11) aus Abb.18 bestimmt werden. In Zeile 14 ist schließ-
lich die effektive Wärmeübergangszahl α aufgeführt, die sich
nach (A.1) mit den Zeilen 10 und 13 ergibt. Die Schichtkonstante

A, angegeben in den Zeilen 15 und 16, ergibt sich nach (1.5) aus den Angaben der Zeilen 7, 8 und 14. Die Größe AL_1 (Zeile 17) ist damit aus den Zeilen 5 und 16 ebenfalls bestimmt. Die Hilfsgröße h_{ij} (Gleichung 3.14a) ergibt sich aus den Angaben der Zeile 15 und ist in den Zeilen 18 und 19 angegeben. In Zeile 20 ist der Parameter F_{10} ($=F_{11}$ in unserem Fall), der entweder nach (1.10a) berechnet wird oder sich mit den Angaben der Zeilen 5 und 16 aus den Abbildungen 5 und 6 ergibt, eingetragen. Mit den Zeilen 6 und 20 ist damit der weitere Parameter $F_{10} \cdot \frac{T_a - T_o}{T_a}$ (Zeile 21) bestimmt, womit der relative Meßfehler der 1. Schicht (Zeile 22) bei Verwendung der Zeilen 17 und 21 aus Abb. 4 entnommen werden kann, bzw. rechnerisch nach (1.10). Die in Zeile 23 angegebene Größe $\frac{1}{N_i}$ ergibt sich rechnerisch nach (3.28) oder (3.29), bzw. ist aus den Abbildungen 9, 10 und 11 bei Beachtung der Angaben der Zeilen 5 und 17 zu entnehmen. Mit Zeile 23 können jetzt die Ausdrücke $\frac{N_i}{N_j}$ (Zeilen 24 und 25) gebildet oder direkt aus den Abb. 12 und 13 entnommen werden. Damit ergibt sich schließlich nach Gleichung (3.33a) der Faktor K_2 (Zeile 26) mit den Zeilen 18 und 24, bzw. mit den Zeilen 18, 19 und 25 der Faktor K_3 (Zeile 26). Entsprechend der Gleichung (3.31) ergeben sich bei Verwendung der Zeile 6, 23 und 26 schließlich die in Zeile 27 angegebenen Meßfehler der 1., 2. und 3. Schicht.

Aus Platzgründen haben wir in unserem Beispiel angenommen, daß keine Wärmequellen vorhanden sind.

Anmerkung:

Für den Fall, daß Wärmequellen vorhanden sind, wäre der Zusatzterm $\Delta T_{q,i}$ (Gleichung 4.11a) des Abschnittes 1.4. noch auszu-

rechnen und der Meßfehler ergäbe sich nach Summation entsprechend Gleichung (4.11), (siehe auch FORTRAN-Rechenprogramm).

Um den Einfluß des Wärmeaustausches zwischen den Stirnflächen der Schichten und dem Bohrloch abzuschätzen, ist in Zeile 28 der Parameter $\frac{\alpha' \cdot L_1}{\lambda}$ angegeben, wobei wir annehmen, daß näherungsweise gelten soll:

$$\alpha' = \alpha \quad (\text{Zeile 14}) \quad (\text{A.7})$$

Damit ergibt sich der Korrekturfaktor K_α (Zeile 29) rechnerisch nach (5.2a) oder graphisch aus der Abb.7 bei Beachtung der Zeilen 17 und 28, wobei $K_L = 1$ gesetzt ist (K_L siehe Abb.8). Mit ausreichender Genauigkeit ergeben sich nach Gleichung (5.2) aus Zeile 29 schließlich die in Zeile 30 angegebenen korrigierten Meßfehler der 1., 2. und 3.Schicht.

Beispiel: Temperaturmeßfehler des Experiments: ZIR-Projekt LV 30, 2. Ausf. (ohne Wärmequellen)

Tabelle 1:

Zeile 0	Schicht	3		2		1		0 (Meßobjekt)
1	Stoff und äußeres Gas	Ta	He	Ta	He	Re	He	Graphit
2	Innendurchmesser ϕ_i (cm)	0,11	0,16	0,18	0,28	0,31	0,36	0,40
3	Außendurchmesser ϕ_a (cm)	0,16	0,18	0,28	0,31	0,36	0,40	
4	Toleranzangabe $\Delta\phi_i$ (cm)	0,001	0,001	$\pm 0,001$		0,001	0,001	
	$\Delta\phi_a$ (cm)	0,001	0,001	$\pm 0,001$		0,001	0,001	
5	Eintauchlänge L_1 (cm)	2,7	$\Delta L = \pm 0,01; (s = 0,29)$					
	Gesamtlänge L (cm)	4						
6	Temperaturbereich: T_a (°C)	1600						
	T_o (°C)	800						
7	ϕ_{hyd} (cm), Abb. 19	0,085		0,16		0,09		
8	λ bei T_a (W/cm K), Abb. 16, 17	0,625	0,0058	0,625	0,0058	0,51	0,0058	
9	Emissionsvermögen ϵ	0,8		0,8		0,8		0,95
10	α_{Str} (W/cm²K), Abb. 15		0,115		0,115		0,130	
11	E , Abb. 14		1		1		1	
12	R (cm⁻¹), Abb. 18		100		70		50	
13	α_L (W/cm²K), (Gl. A.3, A.4)		0,580		0,406		0,290	
14	$\alpha = \alpha_{Str} + \alpha_L$		0,695		0,521		0,420	
15	A^2 (cm⁻²) (Gl. 1.5)	52,33		20,84		36,60		
16	A (cm⁻¹)	7,23		4,57		6,05		
17	AL_1	19,52		12,34		16,34		
18	h_{12} (Gl. 3.14a)					-1,32		
19	h_{23}, h_{13} (Gl. 3.14a)			1,66		3,33		
20	F_{10} (= F_{11}), Abb. 5, 6	0,5						
21	$F_{10} \cdot (T_a - T_o)/T_a$	0,25						
22	$\Delta T_1/T_1$ (%), Abb. 4					< 0,01		
23	$1/N_1$, Abb. 9, 10, 11 ($S = 0,3$)	$3,4 \cdot 10^{-9}$		$4,5 \cdot 10^{-6}$		$8,3 \cdot 10^{-8}$		
24	N_2/N_1					0,048		
25	$N_3/N_2, N_3/N_1$			1300		24		
26	K_i (Gl. 3.33a)	4900		2,3		1		
27	ΔT_1 (°C) (3.31)	0,013		0,008		0,0001		
28	$\alpha_i \cdot L_1/\lambda_i$	3		2,16		1,47		
29	K_a , Abb. 7	< 1		< 1		< 1		
30	$\Delta T_i = K_a \cdot \Delta T_1$ (°C)	< 0,013		< 0,008		< 0,0001		

2.2.FORTRAN-Rechenprogramm_(TSS/370-Betrieb)_für_den_Tempera-
turmeßfehler_eines_aus_mehreren_Schichten_aufgebauten_Füh-
lers_mit_innenen_Wärmequellen_und_mit_Wärmeaustausch_an
der_Stirnseite_des_Fühlers.

Annahmen: Der Fühler besteht aus bis zu 10 Zwischenschichten (Speicherplatz-Beschränkung) und erfüllt die in den Abschnitten 1.4, 1.5 und 2.1 gemachten Voraussetzungen, so daß die dort angeführten Gleichungen Gültigkeit haben. (Die Voraussetzungen zusammengefaßt waren: Der Fühler ist in einem Bohrloch des Körpers, dessen konstante Temperatur T_a gemessen werden soll, eingeführt. Die Umgebungstemperatur des Körpers T_o ist überall konstant und gleich der Temperatur am Ende des Fühlers. Alle Materialkonstanten des Fühlers sind ortsunabhängig und konstant. Die Temperatur über den Querschnitt des Fühlers wird überall konstant gesetzt, (Vernachlässigung des radialen Wärmetransportes)).

Beschreibung_des_Programms: (siehe Abb.2,20 und 21)

(Die Zuordnung der FORTRAN- und Text-Symbole sind der Bezeichnungsliste zu entnehmen).

Für die Aufarbeitung der Gleichungen benötigt das Programm

17 Eingaben der folgenden Größen:

1. Anzahl der Schichten ($N \leq 10$)
2. Bohrlochdurchmesser (DUOBJ)
3. Emissionsvermögen des Meßobjektes (EPSOB)
4. Gesamtlänge des Fühlers (L)

5. Eintauchlänge des Fühlers (L1)
6. Objekttemperatur (TA)
7. Umgebungstemperatur (T0)
8. Innendurchmesser der i.ten Schicht (DI(I))
9. Außendurchmesser der i.ten Schicht (DA(I))
10. Außendurchmessertoleranz der i.ten Schicht (DIFFDA (I))
11. Emissionsvermögen der i.ten Schicht (EPS(I))
12. Wärmeleitfähigkeitskoeffizient der i.ten Schicht (LAM(I))
13. Wärmeleitfähigkeitskoeffizient des Gases der i.ten Schicht (LAMA(I))
14. Dichte der i.ten Schicht (DICHT (I))
15. Wärmequelle pro Masse (QUELLE)
16. Wärmeübergangszahl an der Stirnfläche der i.ten Schicht (ALFAST(I)),
Zusatzbemerkung: Wenn für ALFAST (I) der Wert: 10^{-50} oder kleiner eingegeben wird, rechnet das Programm mit Gleichung (A.7), d.h.: es wird gesetzt: ALFAST (I) = ALFA (I)
17. Dichte des Gases außerhalb der i.ten Schicht (DICHTA(I))

Das Programm verarbeitet die Gleichungen in folgender Reihenfolge:

1. Berechnung von DH(I) nach Gleichung (1.6)
2. Berechnung von E(I) nach Gleichung (A.5) mit Berücksichtigung von (A.4a); für den Fall, daß $k-1 = 0$ wird, werden die entsprechenden Angaben des Meßobjektes verwendet.
3. Berechnung von ALFAL(I) nach den Gleichungen (A3 oder A4) mit Berücksichtigung von (A.4a)
Die Gleichungen A3 und A4 für die k.te Schicht umgeschrieben lauten:

$$\text{ALFAL}(K) = \text{LAMA}(K) / 2 * \text{DA}(K) \quad (\text{A3'})$$

und

$$\text{ALFAL}(K) = 2 * E(K) * \text{LAMA}(K) / (\text{DA}(K) * \text{ALOG}(\text{DI}(K-1)/\text{DA}(K))), \quad (\text{A4}')$$

wobei für $k-1=0$ die Werte vom Meßobjekt eingesetzt werden.
Es wird $\text{ALFAL}(I)$ nach $(\text{A3}')$ berechnet, wenn die Gleichung gilt: $\text{DI}(I-1)/\text{DA}(I) > 2$, sonst nach $(\text{A4}')$. Für die 1. Schicht werden 2 Werte (Innen- bzw. Außengebiet) berechnet mit der Kennzeichnung: $\text{ALFAL}(1)$ bzw. ALFALO .

4. Berechnung von EPSM nach Gleichung (A2a)

Gleichung (A2a) für die k .te Schicht umgeschrieben, lautet:

$$\bar{\epsilon}_k = \frac{\epsilon_{k-1} \cdot \epsilon_k}{\epsilon_{k-1} + \epsilon_k - \epsilon_{k-1} \cdot \epsilon_k},$$

wobei für $k-1=0$ die Werte vom Meßobjekt eingesetzt werden.

5. Berechnung von $\text{ALFAS}(I)$ nach Gleichung (A2)
6. Berechnung von $\text{ALFA}(I)$ nach Gleichung (A1) ,
für $i=1$: 2 Werte ($\text{ALFA}(1)$ und ALFAO)
7. Berechnung von $\text{AA}(I)$ nach Gleichung (1.5) ,
für $i=1$: 2 Werte ($\text{AA}(1)$ und AAO)
8. Berechnung von $\text{ALl}(I)$ und $\text{ALLl}(I)$
(Argumentwerte für Gleichungen 3.28 und 3.29)
9. Berechnung von $\text{FN}(I)$ nach Gleichung (3.29) ,
für $I=1$: nach Gleichung (3.28)
10. Berechnung von $\text{H}(I,J)$,
für $J > I$ nach Gleichung $(3.14a)$
für $I > J$: $\text{H}(I,J) = \text{FN}(I)/\text{FN}(J) - 1$.
für $I = J$: $\text{H}(I,J) = 1$
11. Berechnung von $\text{Kl}(I,J)$ nach Gleichung $(3.33b)$
12. Berechnung von $\text{K}(I)$ nach Gleichung $(3.33a)$
13. Berechnung von $\text{DT}(I)$ nach Gleichung (3.31)
14. Berechnung von $\text{QV}(I)$ nach Gleichung (4.4)

15. Berechnung von QR (Innengebiet) und QRO (Außengebiet) nach Gleichung (4.3)
16. Berechnung von $A(I).L$,
für $I=1$: 2 Werte ($A(1).L$ bzw. $A0.L$)
17. Berechnung von $MO(I)$ nach Gleichung (4.8f),
für $I=1$: nach Gleichung (4.8g)
18. Berechnung von $DO(I)$ nach Gleichung (4.8d),
für $I=1$: nach Gleichung (4.8e)
19. Berechnung von $DGTO(I)$ nach Gleichung (4.11a)
20. Berechnung von $DGT(I)$ nach Gleichung (4.11)
21. Berechnung von $KL(I)$ nach Gleichung (5.2b)
22. Berechnung von $KS(I)$ nach Gleichung (5.2a)
23. Berechnung von $DGST(I)$ nach Gleichung (5.2)
24. Berechnung von $DGTRI(I)$ nach Gleichung (B6)
25. Berechnung von $DGTR$ nach Gleichung (B9)
26. Berechnung von KD nach Gleichung (1a) (Bedingung für die Gültigkeit der Gl.(1,4.1), wird im Programm nach Berechnung Nr.12 durchgeführt).

Die Ergebnisse des Rechenprogramms werden in folgender Form ausgegeben:

Zusammenstellung der erforderlichen Eingaben und Angaben von:
 I , $KD(I)$, $E(I)$, $EPSM(I)$, $A(I)$, $ALFAL(I)$, $ALFA(I)$, $FN(I)$, $K(I)$,
 $KL(I)$, $KS(I)$, $DGTRI(I)$, $DT(I)$, $DGT(I)$ und $DGST(I)$, ferner der radiale Temperaturmeßfehler ($DGTR$) und der axiale Temperaturmeßfehler ($DGST(N)$).

Anhang:

Radialer Temperaturfehler eines aus mehreren Schichten aufgebauten Fühlers in einem Bohrloch (mit inneren Wärmequellen).

Wir betrachten hier die Anordnung des Abschnittes 1.4. (Abbildung 2) und übernehmen sinngemäß die dortigen Ausführungen. Mit der Annahme, daß die Eintauchlänge des Fühlers genügend groß ist, so daß an der Stirnfläche des Fühlers der axiale Wärmetransport relativ zum radialen Wärmetransport vernachlässigt werden kann, ergibt sich aus der Wärmeleitungsgleichung: $\text{div} (\lambda \text{ grad } T) + \dot{q}_v = 0$ für den Temperaturverlauf der i. ten Schicht an der Stirnfläche des Fühlers jetzt als Funktion der radialen Ortskoordinate (r) die Gleichung:

$$\frac{d^2}{dr^2} (T_i) + \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} (T_i) + \frac{\dot{q}_{v,i}}{\lambda_i} = 0 \quad , \quad (B1)$$

$$i = 1, 2, \dots, N$$

(siehe auch Anmerkung auf Seite 3 unten).

Wie leicht gezeigt werden kann, lautet die Lösung von (B1):

$$T_i = - \frac{\dot{q}_{v,i}}{\lambda_i} \cdot \frac{r^2}{4} + c_{1,i} \ln r + c_{2,i} \quad . \quad (B2)$$

Für die Gasschicht oberhalb der i. ten Schicht, die wir im folgenden der i. ten Schicht zuordnen, gilt bei Vernachlässigung des Wärmestrahlungsanteiles eine zu (B1) analoge Differentialgleichung. Bezeichnen wir die Temperatur in der Gasschicht mit T_i^* und den Quellterm mit $\dot{q}_{v,i}^* = \vartheta_{\text{Gas},i} \cdot \dot{q}_m$, so erhalten wir

analog zu (B2) für T_i^* die Gleichung:

$$T_i^* = - \frac{\dot{q}_{v,i}^*}{\lambda_{\text{Gas},i}} \cdot \frac{r^2}{4} + c_{3,i} \cdot \ln r + c_{4,i} \quad (\text{B3})$$

Für die Bestimmung der 4 Konstanten (c_{1i} , c_{2i} , c_{3i} und c_{4i}) ergeben sich folgende 4 Randbedingungen:

$$1. \quad T_i^* (R_{i,i-1}) = T_{i0} \quad (\text{B4.1})$$

$$2. \quad T_i^* (R_{a,i}) = T_i(R_{a,i}) \quad (\text{B4.2})$$

$$3. \quad \lambda_{\text{Gas},i} \cdot \frac{d}{dr} [T_i^* (R_{a,i})] = \lambda_i \cdot \frac{d}{dr} [T_i(R_{a,i})] \quad (\text{B4.3})$$

$$4. \quad R_{i,i} \cdot \frac{d}{dr} [T_i(R_{i,i})] = - \frac{1}{2\pi\lambda_i} \cdot \int_0^{Q(R_{i,i})} \dot{q}_v \cdot dQ \quad (\text{B4.4})$$

= (einfließender Wärmestrom in die
i.te Schicht),

hierbei bedeutet: $R_{i,j}$ = Innenradius der j.ten Schicht
 $R_{a,j}$ = Außenradius der j.ten Schicht.

Führen wir ferner die Temperaturdifferenz δT_i der erweiterten
i.ten Schicht ein durch die Definitionsgleichung:

$$\delta T_i = T_i(R_{i,i}) - T_i^* (R_{i,i-1}) \quad , \quad (\text{B5})$$

so ergibt sich aus den Gleichungen (B2), (B3) und (B4.1-4) nach
einfacher Rechnung bei Verwendung der Durchmesser (ϕ) statt
Radien (R) für δT_i der Ausdruck:

$$\delta T_i = \phi_{a,i}^2 \cdot \frac{\dot{q}_m}{16} \cdot \frac{\rho_{Gas,i}}{\lambda_{Gas,i}} \cdot AZ + \frac{\dot{q}_m}{8} \cdot BZ \quad , \quad (B6)$$

mit den Abkürzungen:

$$AZ = \frac{\phi_{i,i-1}^2}{\phi_{a,i}^2} + \frac{\rho_i \lambda_{Gas,i}}{\rho_{Gas,i} \cdot \lambda_i} \left(1 - \frac{\phi_{i,i}^2}{\phi_{a,i}^2}\right) - 1 + \left(\frac{\rho_i}{\rho_{Gas,i}} - 1\right) \cdot 2 \cdot \ln \frac{\phi_{i,i-1}}{\phi_{a,i}} \quad , \quad (B7.1)$$

$$BZ = \left(\ln \frac{\phi_{a,i}}{\phi_{i,i}} + \frac{\lambda_i}{\lambda_{Gas,i}} \cdot \ln \frac{\phi_{i,i-1}}{\phi_{a,i}}\right) \cdot (S_i - \rho_i \phi_{i,i}^2) \quad , \quad (B7.2)$$

mit:

$$S_i = \sum_{j=i+1}^N \left[\rho_{Gas,j} (\phi_{i,j-1}^2 - \phi_{a,j}^2) + \rho_j (\phi_{a,j}^2 - \phi_{i,j}^2) \right] \quad , \quad (B7.3)$$

für $i=1$: Für die Größe mit dem Index: $i-1=0$ ist die entsprechende Größe vom Meßobjekt einzusetzen

für $i=N$: $S_N=0$ und bei $\phi_{i,N}=0$ auch: $BZ=0$ (letzteres folgt aus den Grenzübergängen der unbestimmten Ausdrücke).

Wir definieren den radialen Temperaturfehler des Fühlers analog zu früher durch den Ausdruck:

$$\Delta \theta_{\text{radial}} = T_a - T_N(R_{i,N}) \quad (B8)$$

Gleichung (B8) umgeschrieben mit Beachtung von Gleichung (B5) ergibt schließlich:

$$\Delta \theta_{\text{radial}} = - \sum_{i=1}^N \delta T_i \quad . \quad (B9)$$

Damit ist der radiale Temperaturmeßfehler bei Beachtung der Gleichungen (B6) und (B7.1-3) bestimmt. Die Berechnung von $\Delta\theta_{\text{radial}}$ explizit ist im FORTRAN-Rechenprogramm (Abschnitt 2.2) mitdurchgeführt.

Bezeichnungen.

<u>FORTTRAN</u>	<u>Text</u>	<u>Dimension</u>	<u>Größe</u>
	T	(K)	Temperatur (ohne Wärmequellen)
	θ	(K)	Temperatur (mit Wärmequellen)
TA	T_a	(K)	Objekttemperatur
TO	T_o	(K)	Umgebungstemperatur
DT	ΔT	(K)	Temperaturmeßfehler (ohne Wärmequellen)
DGT	$\Delta \theta$	(K)	Temperaturmeßfehler (mit Wärmequellen)
DGST	$\Delta \theta'$	(K)	Temperaturmeßfehler (mit Wärmequellen und Wärmeübergang an der F.-Stirnfläche)
A	A	(cm ⁻¹)	Schichtkonstante
AA	A ²	(cm ⁻²)	Schichtkonstante im Quadrat
	x	(cm)	axiale Ortskoordinate
L1	L ₁	(cm)	Eintauchlänge des Fühlers
L	L	(cm)	Gesamtlänge des Fühlers
DUOBJ	ϕ_B	(cm)	Durchmesser des Bohrloches
DA	ϕ_a	(cm)	Außendurchmesser der Schicht
DI	ϕ_i	(cm)	Innendurchmesser der Schicht
DH	$\phi_{hyd.}$	(cm)	Hydraulischer Durchmesser der Schicht
	Q	(cm ²)	Querschnitt der Schicht
	U	(cm)	äußerer Umfang der Schicht
ALFA	α	(W/cm ² K)	Wärmeübergangszahl
ALFAS	α_{Str}	(W/cm ² K)	Wärmeübergangszahl (Strahlungsanteil)
ALFAL	α_L	(W/cm ² K)	Wärmeübergangszahl (Leitungsanteil)
ALFAST	α'	(W/cm ² K)	Wärmeübergangszahl (Schicht-Stirnfläche)
LAM	λ	(W/cm·K)	Wärmeleitfähigkeitskoeffizient
LAMA	λ_{Gas}	(W/cm·K)	Wärmeleitfähigkeitskoeffizient des Gases oberhalb der Schicht
KS	K _{α}	G1.5.2a	Korrekturfaktor infolge α'
E	E	G1.A5	Korrekturfaktor für Spaltexzentrizität
	d	(cm)	Abstand der Mittelpunkte der Spaltwandradien

FORTTRAN	Text	Dimension	Größe
	R_a	(cm)	äußerer Spaltradius
	R_i	(cm)	innerer Spaltradius
EPS	ϵ		Emissionsvermögen der Schicht
EPSM	$\bar{\epsilon}$	G1.A2a	mittleres Emissionsvermögen
EPSOB			Emissionsvermögen des Meßobjektes
	$a_{ij}, d_{ij}, b_{ij}, c_{ij}$		Integrationskonstanten
COSH	Cos		} Hyperbolische Funktionen
SINH	Sin		
TANH	Tg		
....0	()'		Strichmarkierung für Außengebiet
FN	N	G1.3.28, 3.29	eingeführte Funktion
MO	M	G1.4.8f,g	eingeführte Funktion
	R	G1.A4	eingeführte Rechengröße
K	K	G1.3.33a	eingeführte Größe (Korrekturfaktor der Schicht)
Z	Z	G1.A5	eingeführte Rechengröße
Z1,Z2		G1.A5	eingeführte Rechengröße
QV	$\dot{q}_v$	(W/cm ³)	Wärmequelle pro Volumen
QUELLE	q_m	(W/gr)	Wärmequelle pro Masse
DICHTE	ρ	(gr/cm ³)	Dichte
QR	$\dot{q}$	G1.4.3	eingeführte Rechengröße
QRO	$\dot{q}'$	G1.4.3	eingeführte Rechengröße für Außengebiet
KL	K_L	G1.5.2b	eingeführte Rechengröße
DSTR	d'	G1.A5	eingeführte Rechengröße
I	i		} Indexgrößen für die i.te Schicht
J	j		
	k		
	B_{ij}	G1.3.14c	eingeführte Produktgröße
H(I,J)	h_{ij}	G1.3.14a	eingeführte Rechengröße
KI	K_{oj}	G1.3.33b	eingeführte Rechengröße
DO	D	G1.4.8d,e	eingeführte Rechengröße
	F	G1.4.8b,c	eingeführte Rechengröße
	$F_{1,0}$	G1.1.10a	Parameter
	W_{01}	G1.1.10a	Parameter
	S	G1.1.10a	Parameter
	δ		beliebig kleine Größe
	δ_{jk}		Kronecker-Symbol

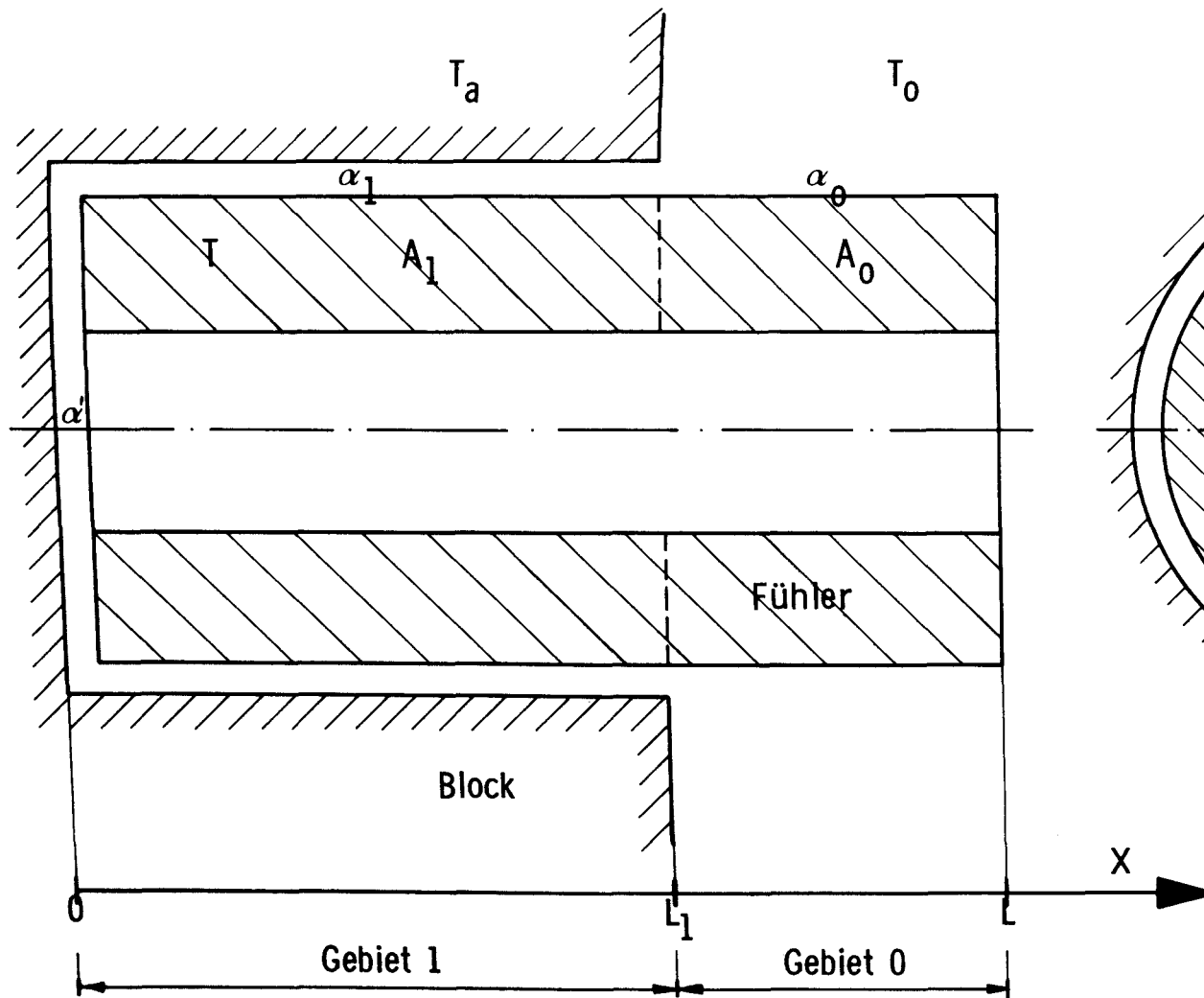
FORTRAN	Text	Dimension	Größe
DGTO	ΔT_q	G1.4.11a	eingeführte Rechengröße
AL	AL		} Funktionsargumente
AL1	AL_1		
ALL1	$A(L-L_1)$		
	f_{i-1}	G1.3.10	Hilfsfunktion
	$T_{i,p}$	G1.3.11	Partikulärlösung von T_i .
	$\Delta T'$		Temperaturmeßfehler (ohne Wärmequellen und mit Wärmeübergang an der F.-Stirnfläche)
	$T_i^{\#}$	(K)	Temperatur des Gases außerhalb der i.ten Schicht
	$q_v^{\#}$	(W/cm ³)	Wärmequelle pro Volumen im Gasraum
DICHTA	ρ_{Gas}	(gr/cm ³)	Dichte des Gases
	r	(cm)	radiale Ortskoordinate
	R_i	(cm)	Innenradius der Schicht
	R_a	(cm)	Außenradius der Schicht
DGTRI	δT_i	G1.B5	Temperaturdifferenz der erweiterten i.ten Schicht in [Kelvin].
DII			Hilfsgröße
AZ	AZ	G1.B7.1	Rechengröße
BZ	BZ	G1.B7.2	Rechengröße
S	S	G1.B7.3	Rechengröße
DGTR	$\Delta \theta_{radial}$	G1.B8	radialer Temperaturmeßfehler in [Kelvin]
KD	K_D	G1.1a	Rechengröße
KDD		G1.1a	Rechengröße (Faktor von G1.1a)

Zusammenstellung der Abbildungen.

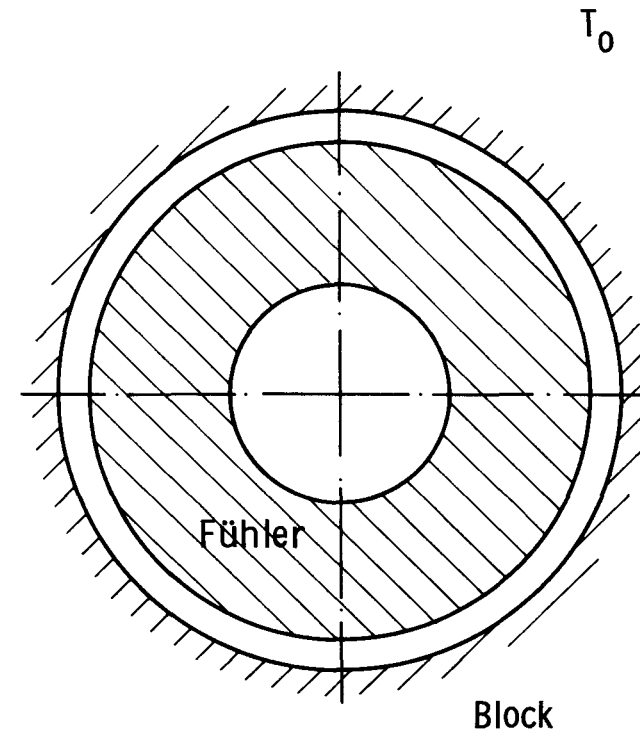
- Abb. 1: Schematische Darstellung der Ein-Schicht-Fühleranordnung
- " 2: Schematische Darstellung der Mehr-Schicht-Fühleranordnung
- " 3: Fühleranordnung in der Bestrahlungskapsel: Projekt LV 30, 2. Ausführung
- " 4: Relativer Temperaturmeßfehler $\frac{\Delta T}{T}$ als Funktion der Eintauchtiefe $A_i L_i$ und dem Parameter:

$$F_{10} = \frac{T_a - T_o}{T_a}$$
- " 5: Der Ausdruck $F_{1,0}$ als Funktion von $A_i L_i$ mit den Parametern: $W_{01} = \frac{A_o - A_i}{A_i}$ und $s = \frac{L}{L_i} - 1$
- " 6: Der Ausdruck F_{11} ($F_{1,0}$ für $A_o = A_i$) als Funktion von $A_i L_i$ mit dem Parameter $s = \frac{L}{L_i} - 1$
- " 7: Korrekturfaktor K_{α_i} als Funktion von $A_i L_i$ mit dem Parameter $\frac{x_i L_i}{\lambda_i}$ ohne Berücksichtigung von K_L
- " 8: Korrekturfaktor K_L als Funktion von $A_i L_i$ mit dem Parameter: $\frac{A_i}{A_o} \cdot \text{Tg } A_o (L - L_i)$
- " 9: Der Ausdruck $1/N_i$ als Funktion von $A_i L_i$ im Bereich: $0 \leq A_i L_i \leq 7$, Parameter $s = \frac{L}{L_i} - 1$
- " 10: Der Ausdruck $1/N_i$ als Funktion von $A_i L_i$ im Bereich: $7 \leq A_i L_i \leq 14$, Parameter $s = \frac{L}{L_i} - 1$
- " 11: Der Ausdruck $1/N_i$ als Funktion von $A_i L_i$ im Bereich: $14 \leq A_i L_i \leq 22$, Parameter $s = \frac{L}{L_i} - 1$
- " 12: Der Ausdruck N_i/N_j als Funktion von $A_i L_i$ mit dem Parameter $v = \frac{A_j}{A_i}$ für den Fall: $s = 0$ ($L_i = L$)

- Abb. 13: Der Ausdruck N_i/N_j als Funktion von $A_i L_1$ mit dem Parameter $v = \frac{A_j}{A_i}$ für den Fall $s = 0,5$ ($L_1 = \frac{2}{3} L$)
- " 14.: Korrekturfaktor E für einen exzentrischen Gasspalt als Funktion von $d' = \frac{d}{R_a}$ (d = Abstand zwischen den Mittelpunkten der Radiuskreise R_a und R_i) mit dem Parameter $z = R_i/R_a$
- " 15.: Wärmeübergangszahl für den Strahlungsterm (α_{Str}) als Funktion der Temperatur T mit dem Parameter $\bar{\epsilon}$ (mittleres Emissionsvermögen)
- " 16.: Die Temperaturabhängigkeit des Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten für einige Schwermetalle (W, Nb, Ta, Re und WRe 25%) und für die Keramiken (BeO , MgO , Al_2O_3 und ThO_2) nach TPRC-Data von 1970
- " 17.: Die Temperaturabhängigkeit des Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten der Gase (He , Ne , Luft, N_2 und Ar) bei Atmosphärendruck nach TPRC-Data von 1970
- " 18.: Parameterdarstellung der Hilfsgröße $R = \frac{\alpha_L}{\lambda_g \cdot E}$ als Funktion der Spaltradien R_i und R_a
- " 19.: Hydraulischer Durchmesser (ϕ_{hyd}) als Funktion des Innendurchmesser ϕ_i bei dem Außendurchmesser ϕ_a als Parameter
- " 20.: FORTRAN-Quellprogramm: FAULTL (TSS/370-Betrieb)
- " 21.: FORTRAN-Rechnung: FAULTL (TSS/370-Betrieb)

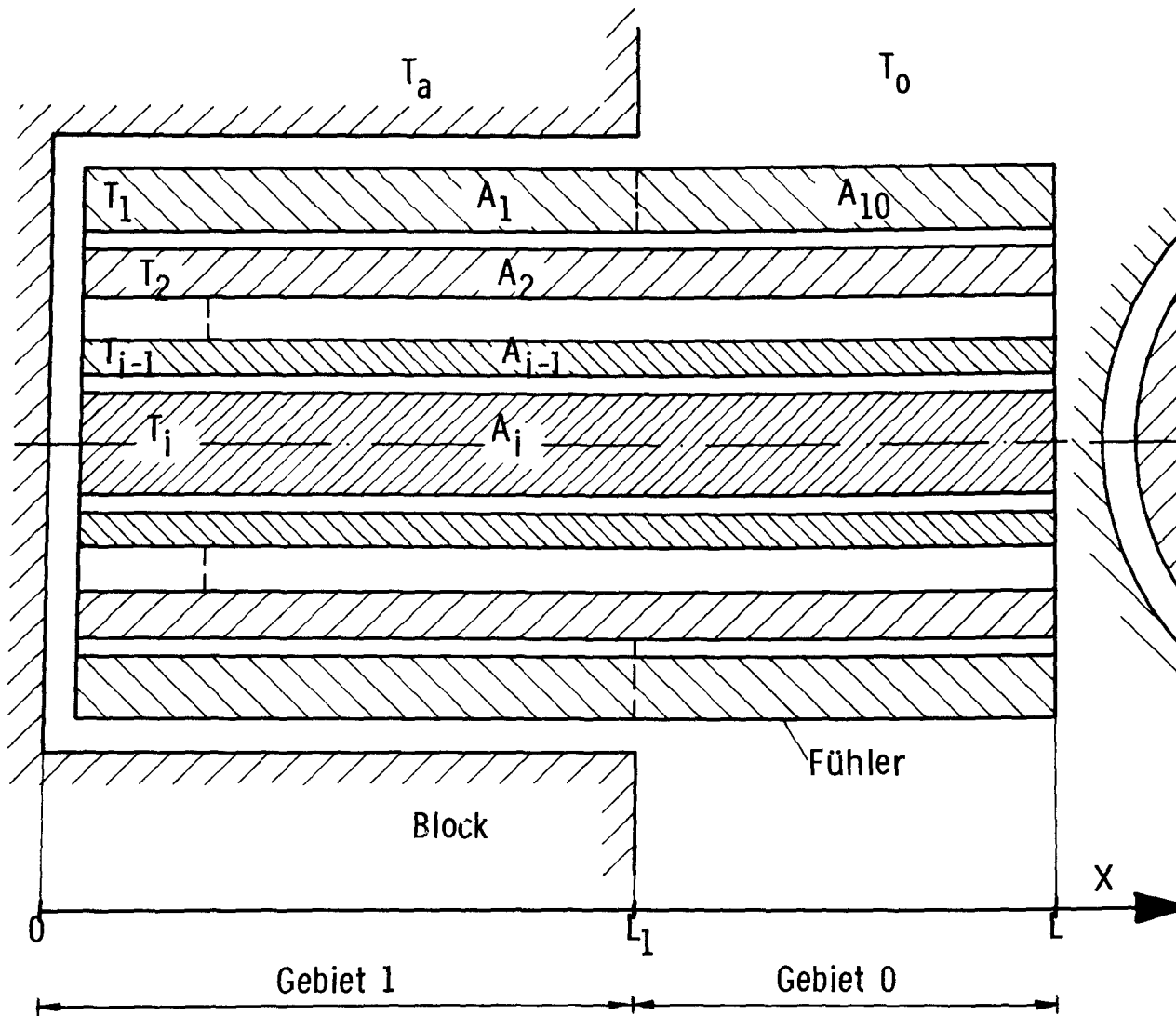


a. Seitenriss

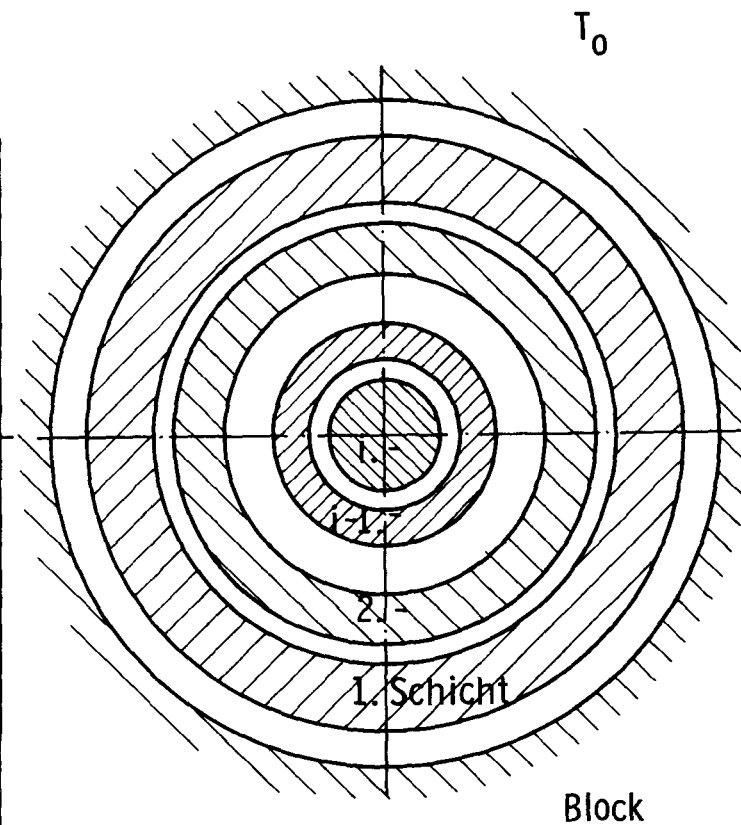


b. Grundriss

Abbildung 1: Einschicht-Fühleranordnung (schematisch),
(Ortskoordinate x , Temperatur T , Fühlerkonstante A , Wärmeübergangszahl α)



a. Seitenriss



b. Grundriss

Abbildung 2: Mehrschicht-Fühleranordnung (schematisch),
(x-Koordinate (L_1 , L), Temperatur (T_a , T_0 , T_i), Schichtkonstante A_i , $i=1, 2, \dots$)

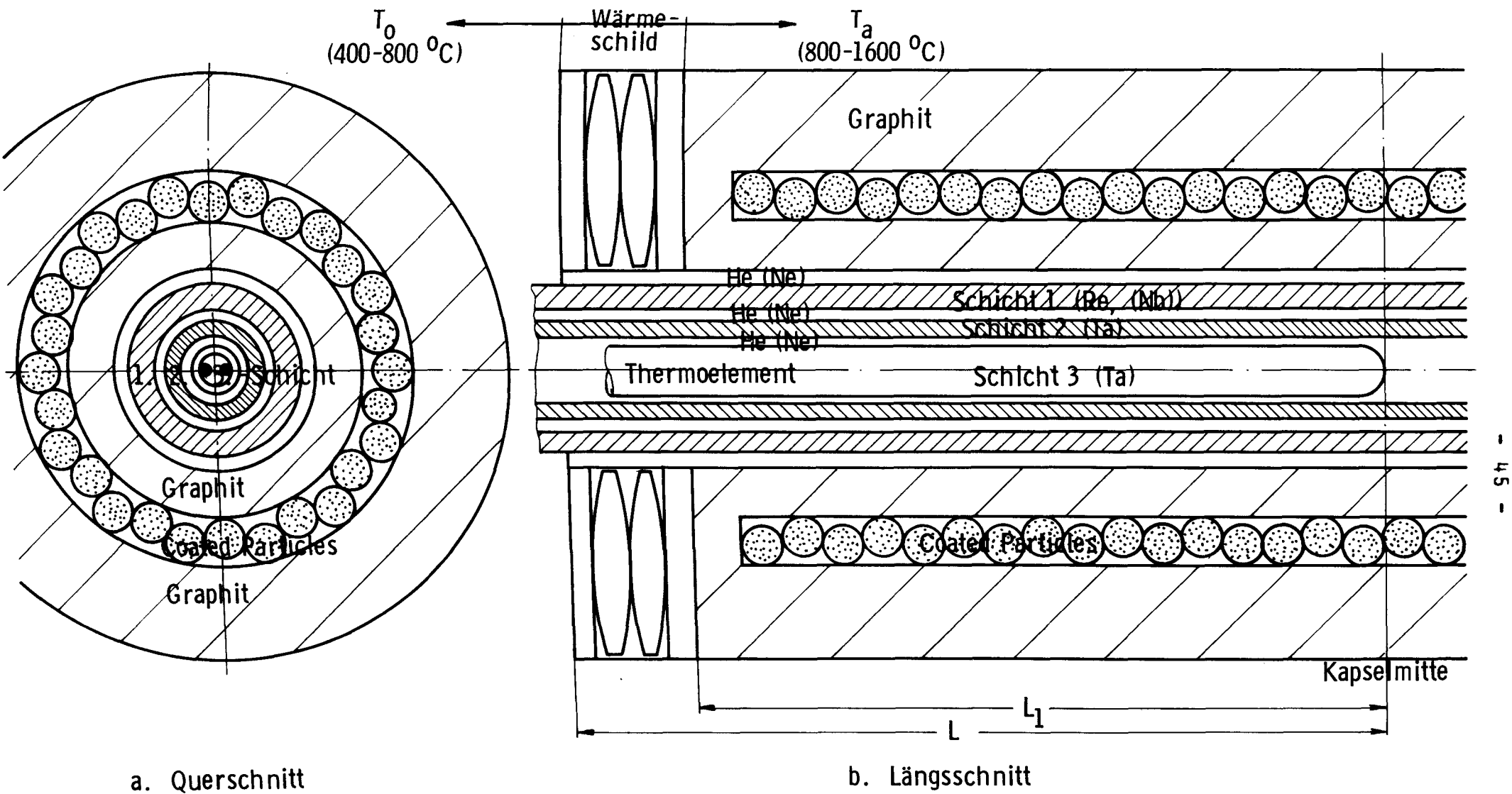


Abbildung 3: Bestrahlungskapsel LV 30, 2.Ausführung (schematisch),
(der besseren Übersicht wegen ist der Aufbau der Kapsel außerhalb des Graphitkörpers
nicht gezeichnet).

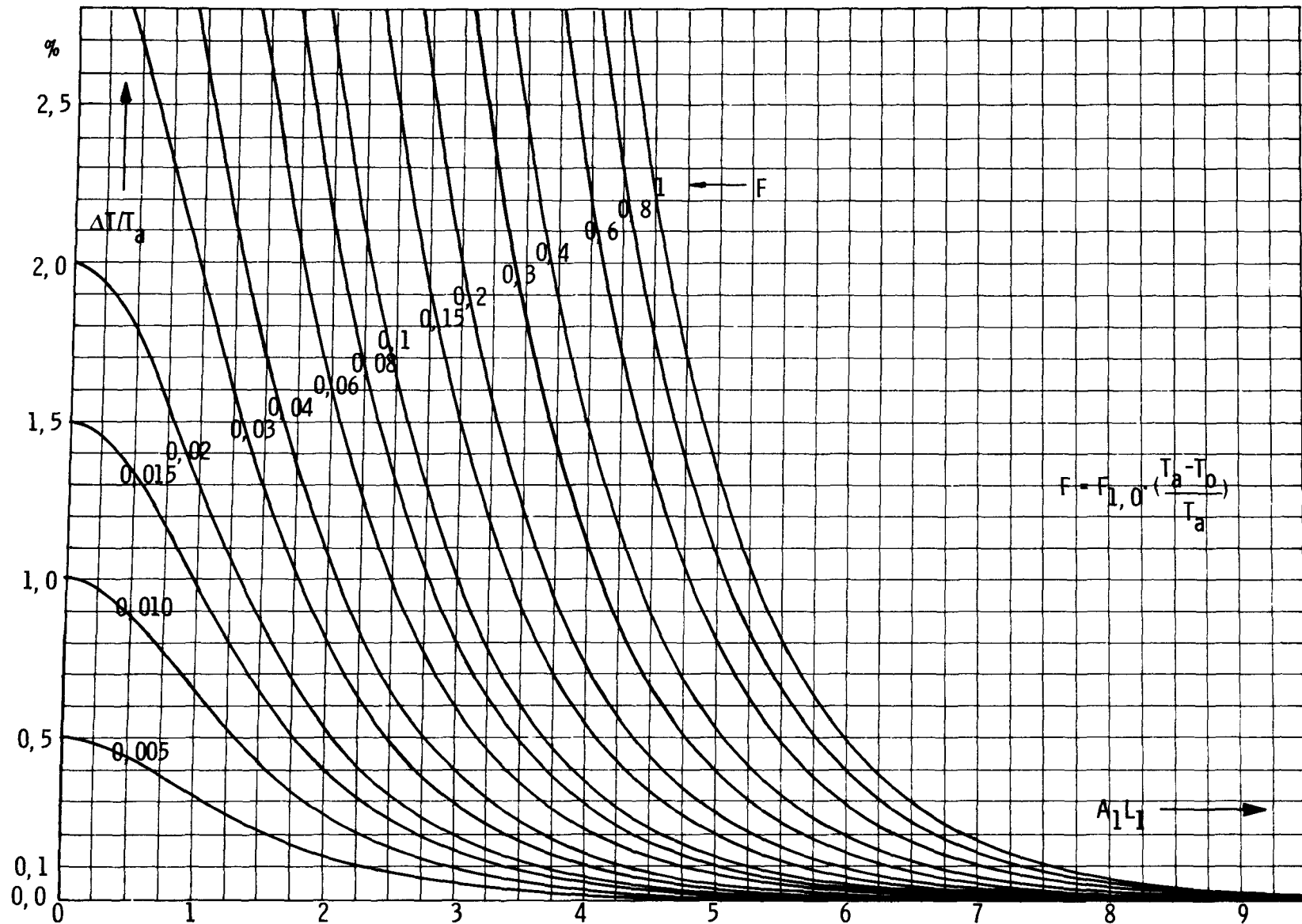


Abbildung 4: Relativer Temperaturmeßfehler $\Delta T/T_a$ als Funktion von $A_1 L_1$, Parameter F , (Gleichung 1.10a).

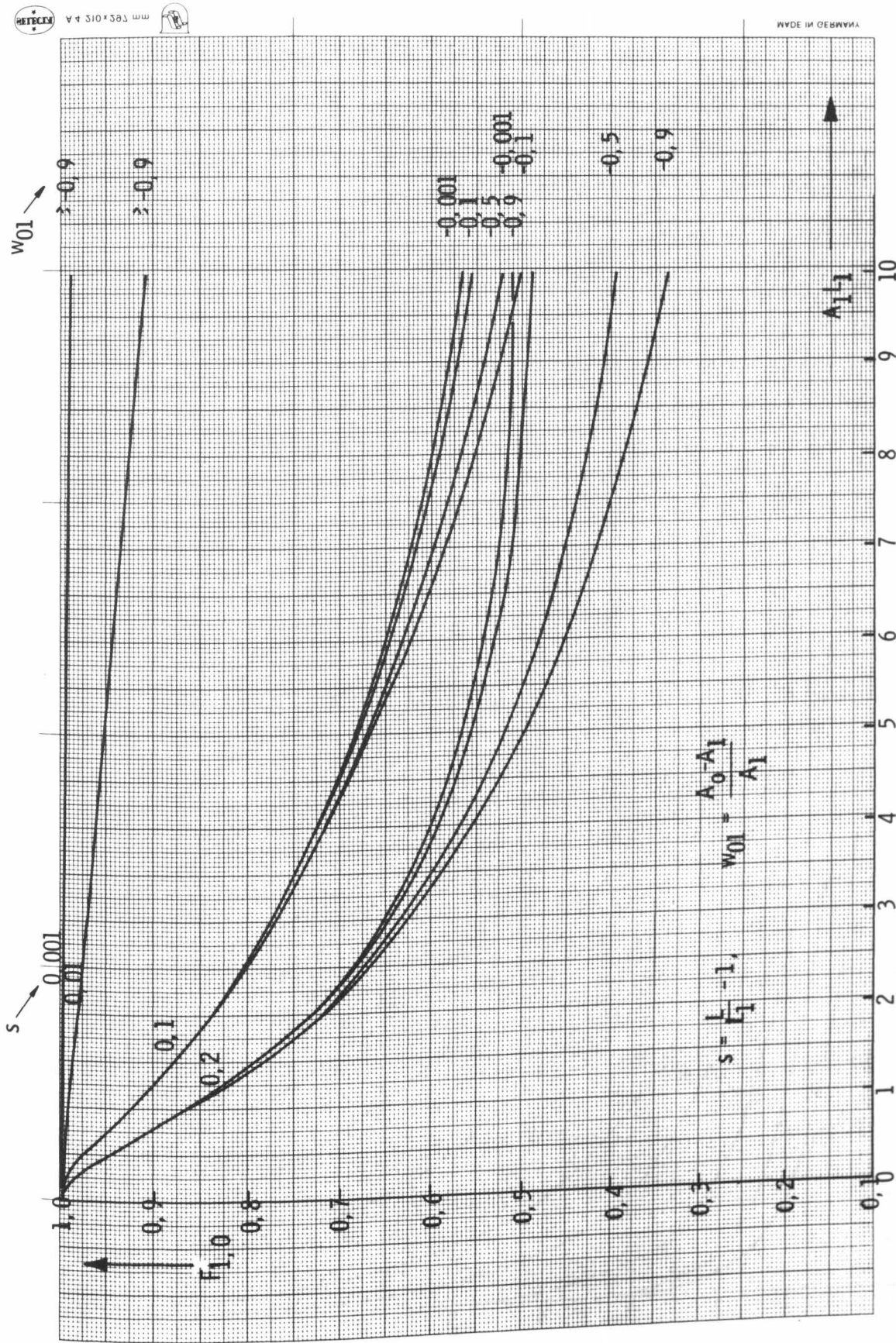


Abbildung 5: Der Ausdruck $F_{1,0}$ als Funktion von A_1/L_1 , Parameter: s und w_{01} ,
(Gleichung 1.10a)

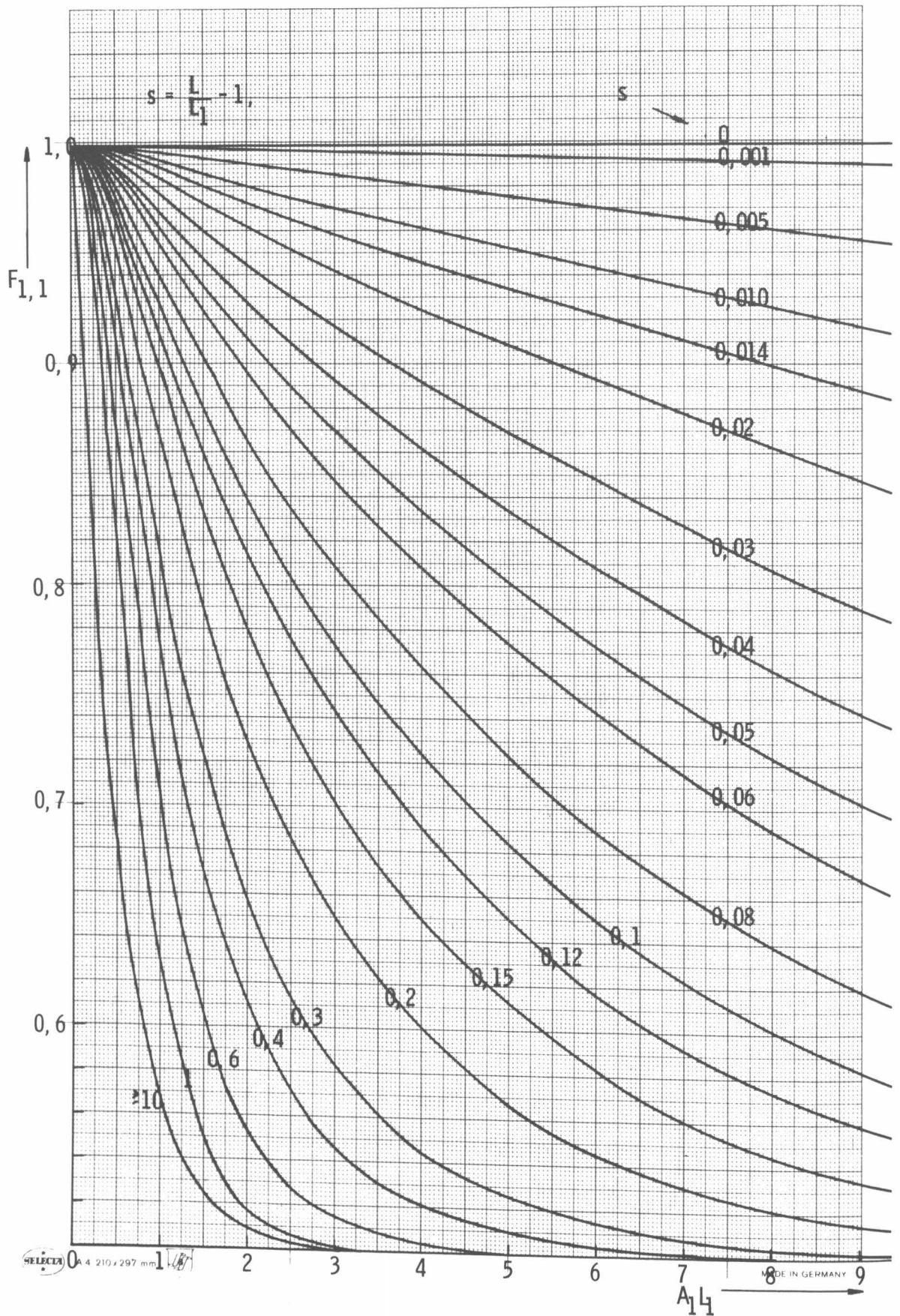


Abbildung 6: Der Ausdruck $F_{1,1}$ als Funktion von $A_1 L_1$, Parameter: s ,
 ($F_{1,1} = F_{1,0}$ für $w_{01} = 0$, Gleichung 1.10a)

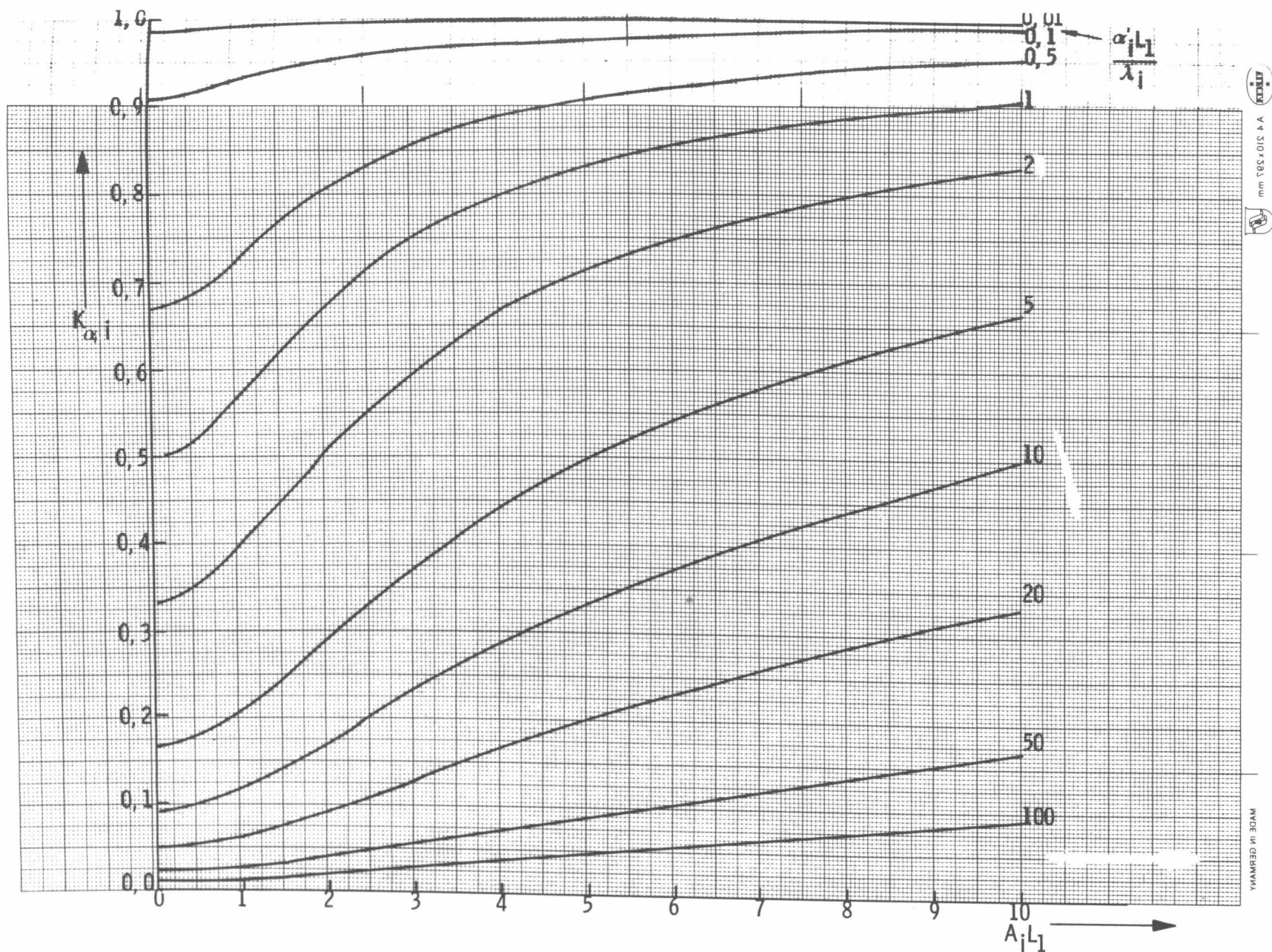


Abbildung 7: Korrekturfaktor $K_{\alpha,i}$ als Funktion von $A_i L_1$, Parameter: $\alpha'_i L_1 / \lambda_i$,
(Gleichung 5.2a, ohne Berücksichtigung von K_L , ($K_L = 1$)).

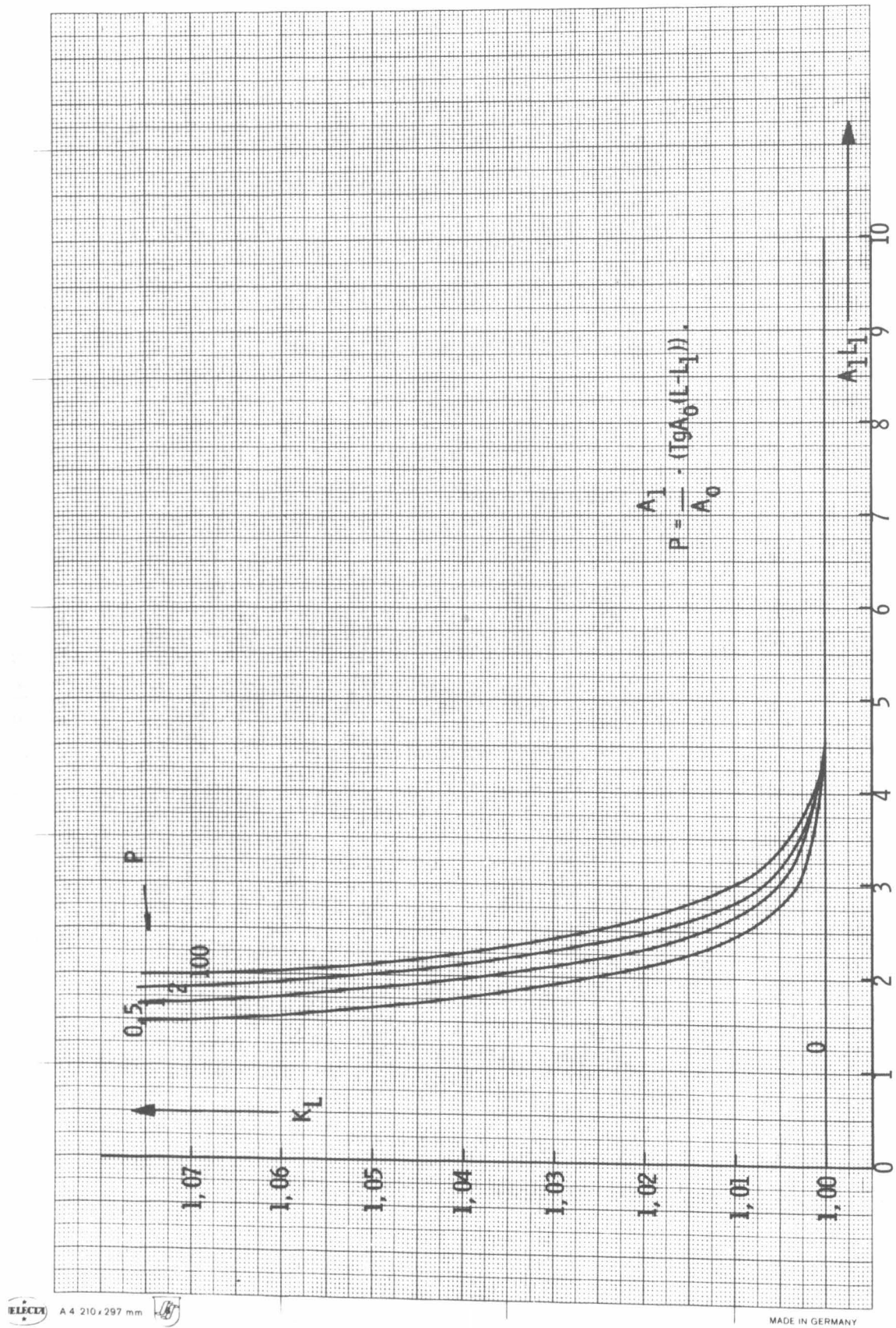


Abbildung 8: Korrekturfaktor K_L als Funktion von $A_1 L_1$, (Gleichung 2.6a, bzw. 5.2b),
Parameter: P , ($0 \leq Tg A_0 (L - L_1) \leq 1$).



Abbildung 9: Der Ausdruck $1/N_i$ als Funktion von $A_i L_1$, Parameter s , im Bereich: $0 \leq A_i L_1 \leq 7$, (Gleichung 3.29).

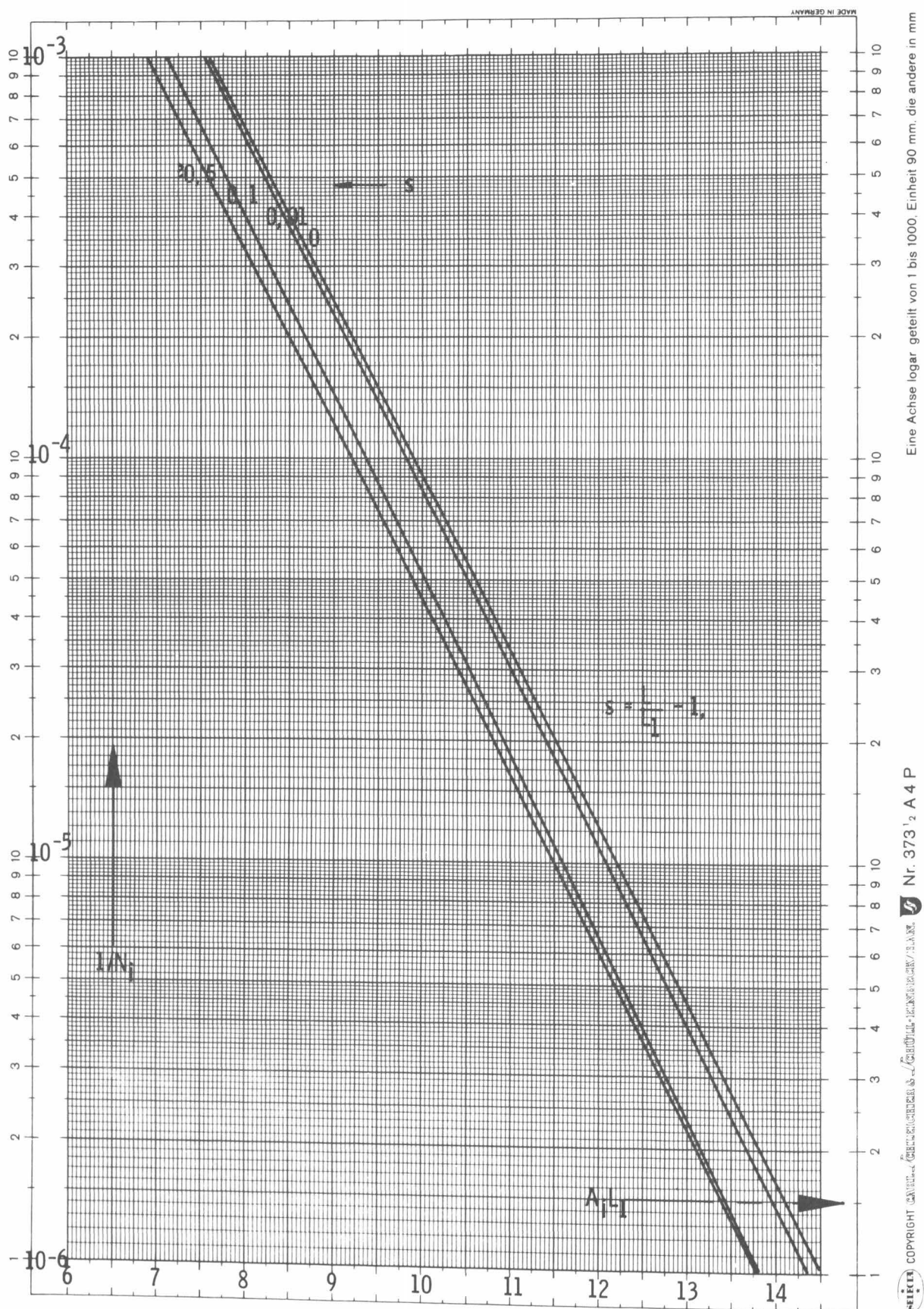
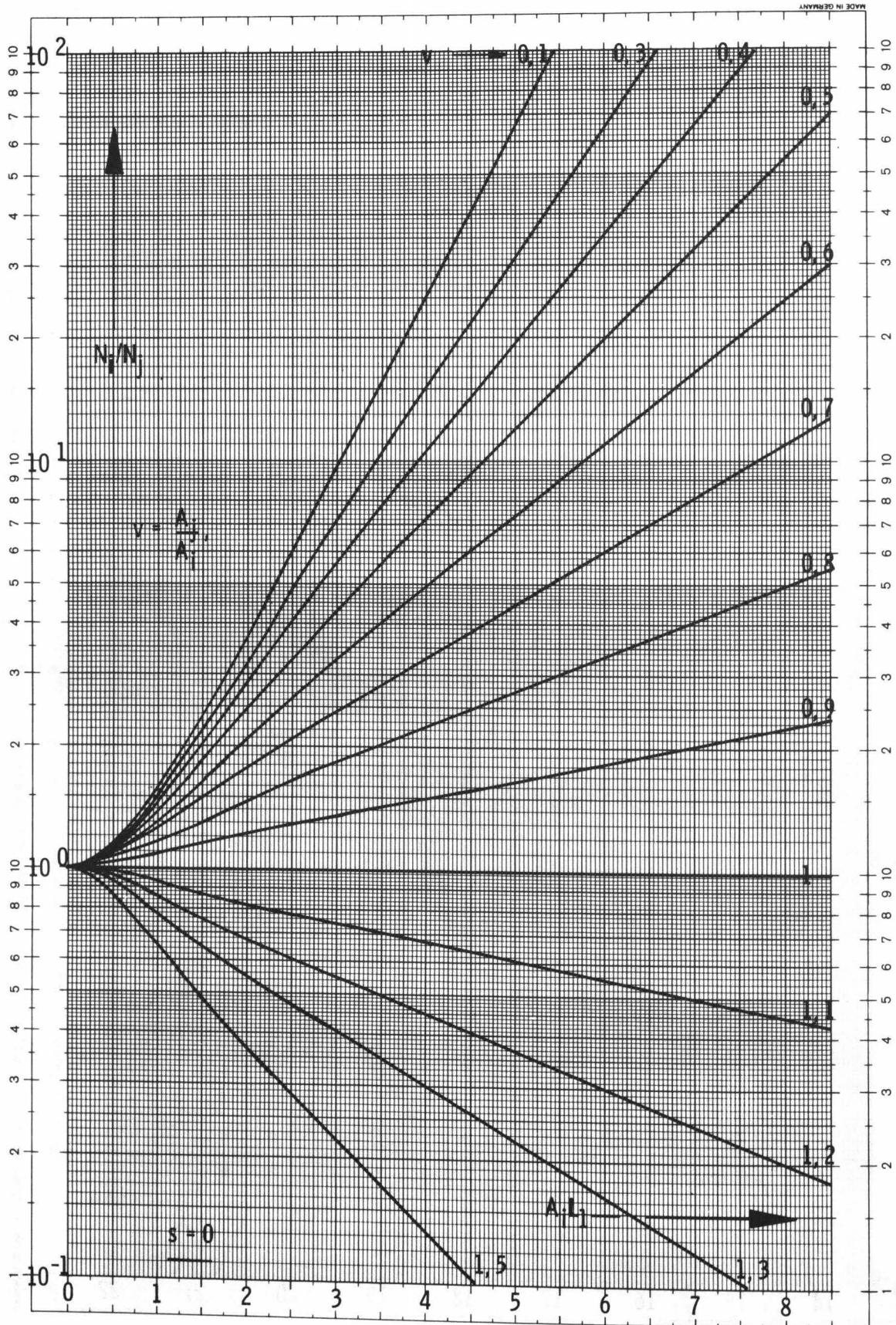


Abbildung 10: Der Ausdruck $1/N_i$ als Funktion von $A_i L_1$, Parameter s , im Bereich: $7 \leq A_i L_1 \leq 14$, (Gleichung 3.29).



Abbildung 11: Der Ausdruck $1/N_i$ als Funktion von $A_i L_1$, Parameter s , im Bereich: $14 \leq A_i L_1 \leq 22$, (Gleichung 3.29).



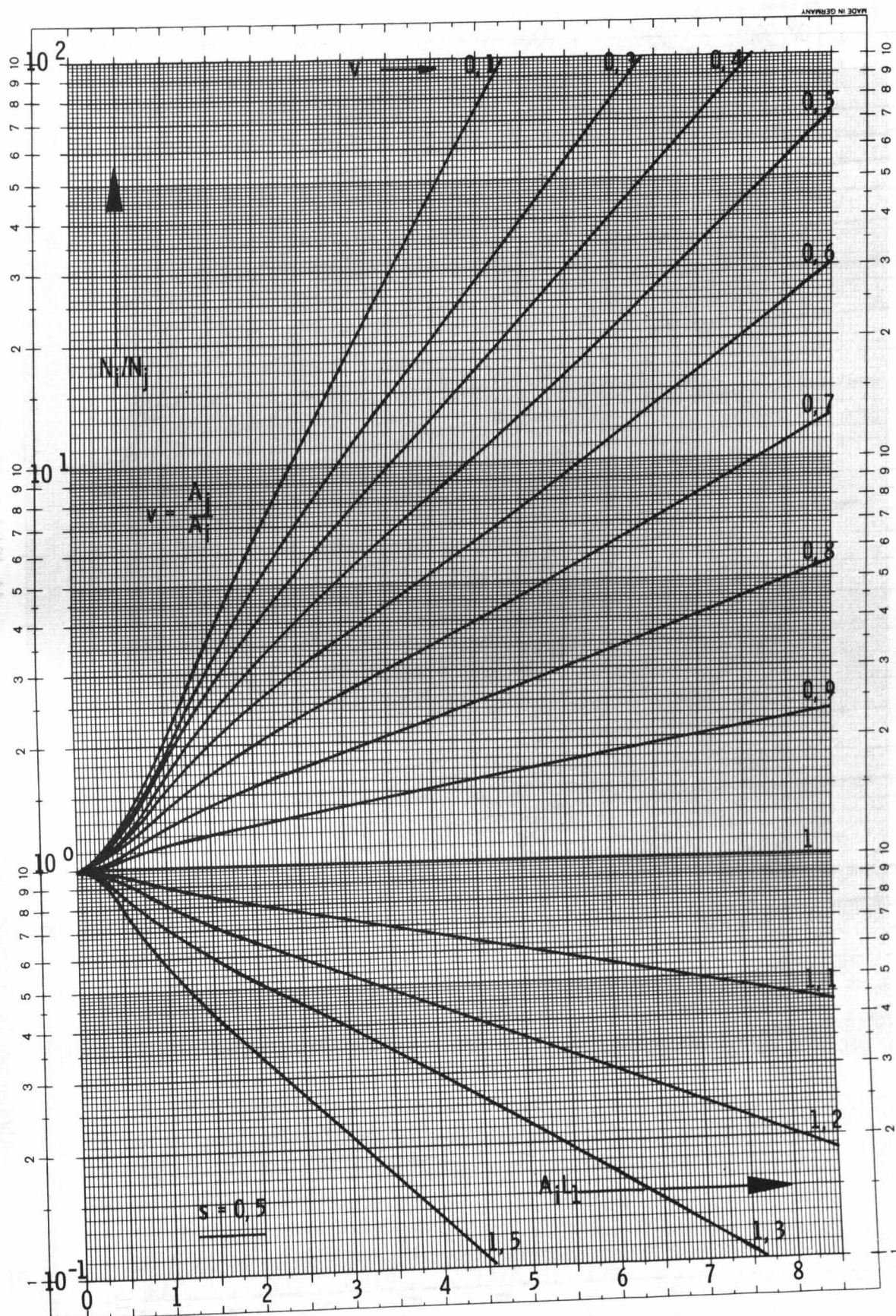
Eine Achse logar. geteilt von 1 bis 1000. Einheit 90 mm, die andere in mm

Nr. 373 1/2 A 4 P



WEIKER COPYRIGHT GAMBRO/GERMANY S. G. GMBH. KÖLN/FRANKFURT/BERLIN

Abbildung 12: Der Ausdruck N_i/N_j als Funktion von $A_i L_1$, Parameter v , für den Fall: $s = 0$ ($L_1 = L$).



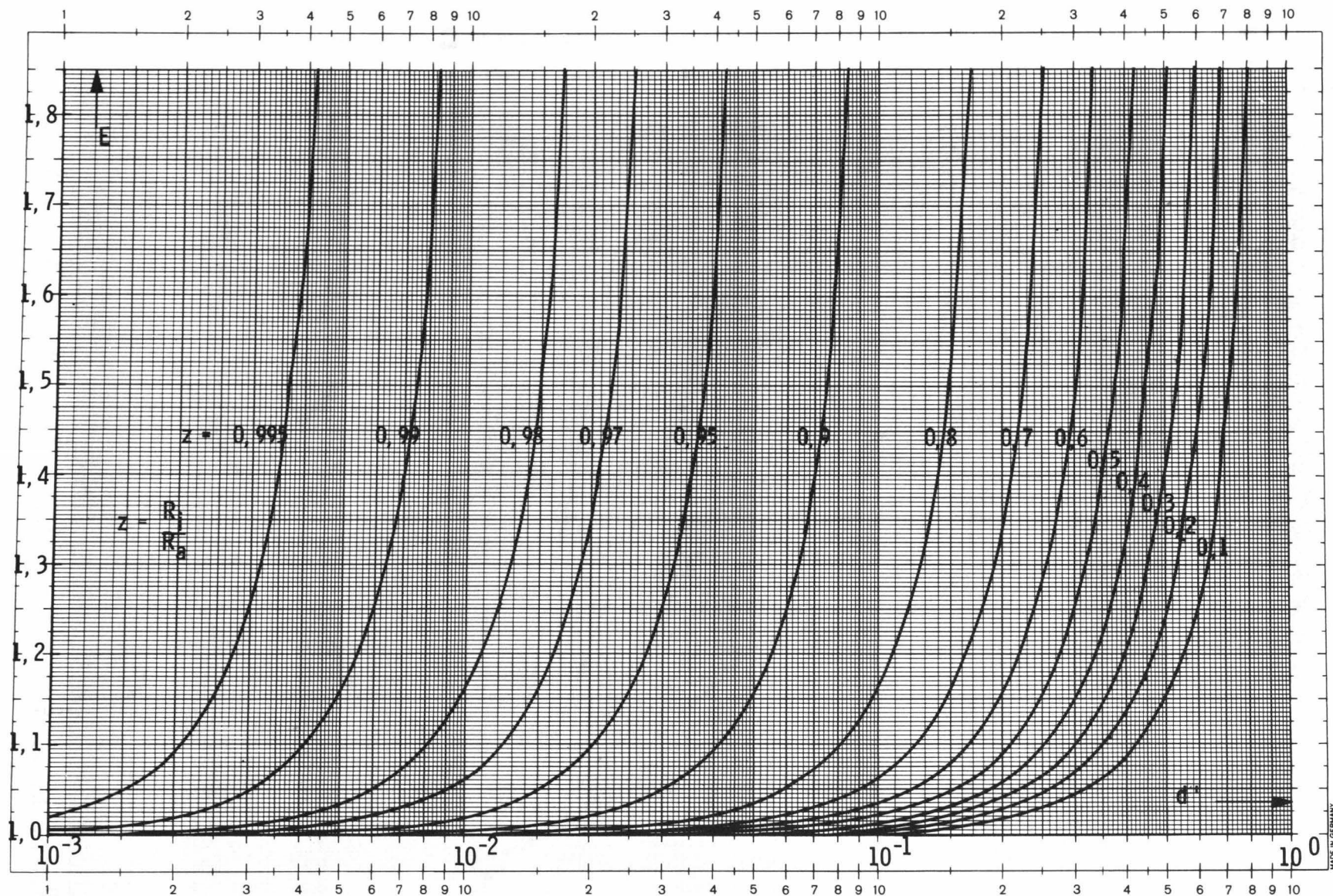
Eine Achse logar. geteilt von 1 bis 1000. Einheit 90 mm, die andere in mm

Nr. 373 1/2 A 4 P



Copyright 1973 by Carl Hanser Verlag, München

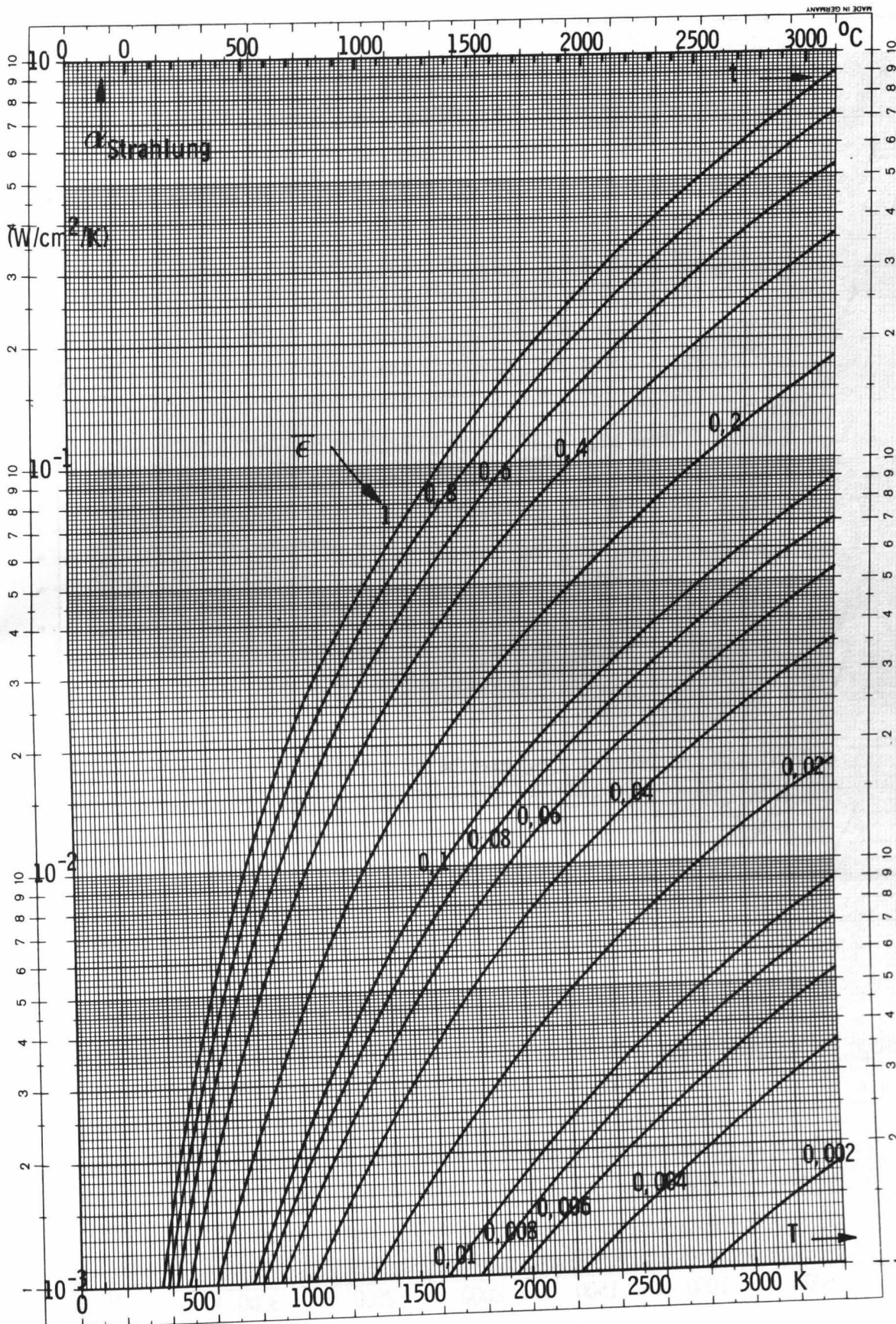
Abbildung 13: Der Ausdruck N_i/N_j als Funktion von $A_i L_1$, Parameter v , für den Fall: $s = 0,5$ ($L_1 = 2L/3$).



COPYRIGHT GEBRÜDER KERN & CO. GEBRÜDER KERN & CO. GEBRÜDER KERN & CO. Nr. 373 1/2 A 4 P

Eine Achse logar. geteilt von 1 bis 1000, Einheit 90 mm, die andere in mm

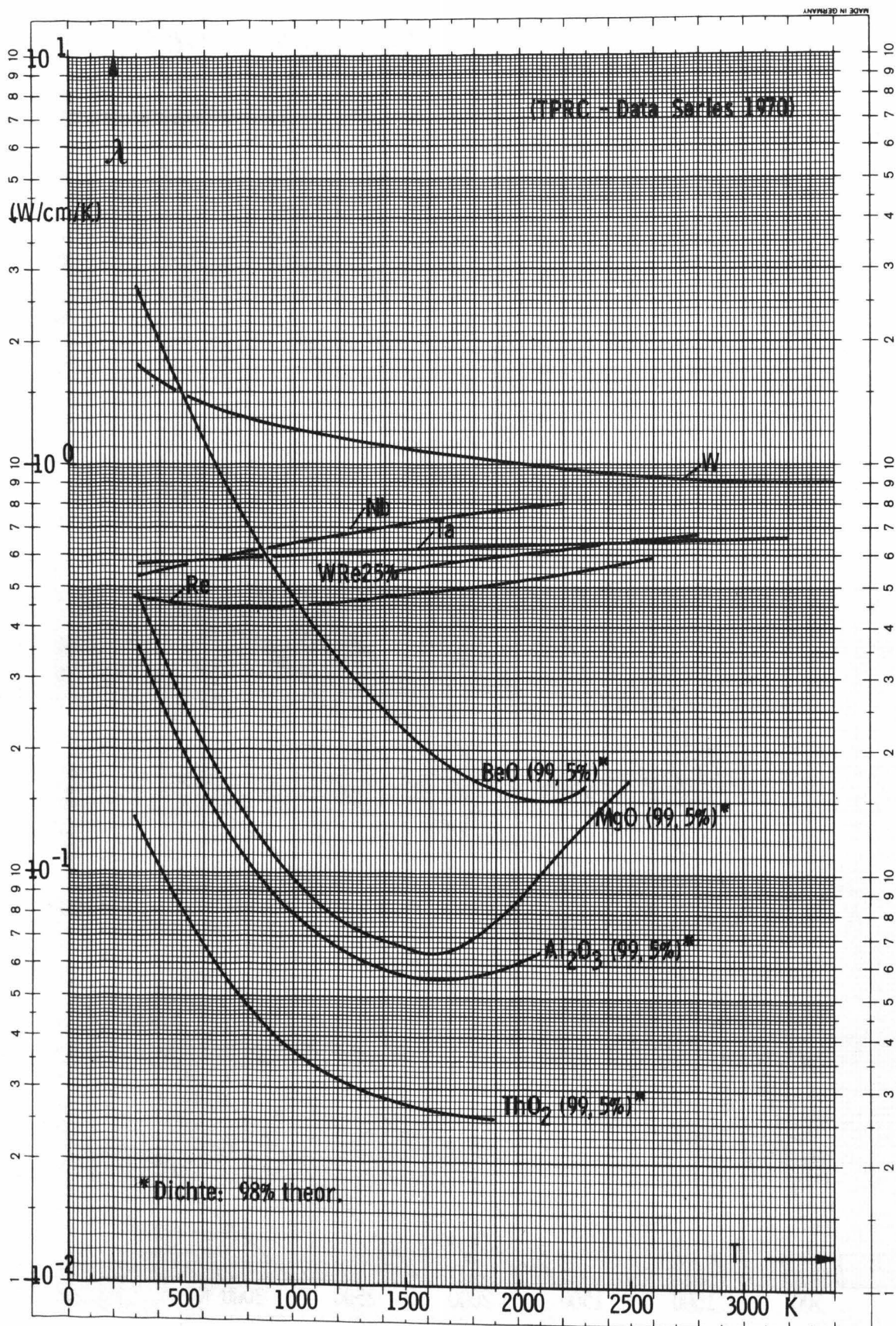
Abbildung 14: Korrekturfaktor E als Funktion von d' (Gleichung A5), Parameter z ,
 $(d' = d/R_a, d = \text{Abstand zwischen den Mittelpunkten der Radiuskreise } R_a, R_i)$



Eine Achse logar. geteilt von 1 bis 1000. Einheit 90 mm, die andere in mm

Copyright © 1988, GEBRÜDER MANNHEIM/FAW Nr. 373 1/2 A 4 P

Abbildung 15: Wärmeübergangszahl für den Strahlungsterm α_{Str} als Funktion der Temperatur (T, t), Parameter ϵ , (Gleichungen A2, A.2a).



Eine Achse logar. geteilt von 1 bis 1000, Einheit 90 mm, die andere in mm

Copyright Carl Hanser Verlag München / Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG Nr. 373 1/2 A 4 P

Abbildung 16: Temperaturabhängigkeit des Wärmeleitkoeffizienten (λ) der Stoffe: W, Nb, Ta, Re, WRe25% (Schwermetalle) und BeO, MgO, Al₂O₃, ThO₂ (Keramiken).

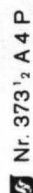


Abbildung 17: Temperaturabhängigkeit des Wärmeleitkoeffizienten (λ) der Gase: He, Ne, Luft, N_2 und Ar, bei Atmosphärendruck.

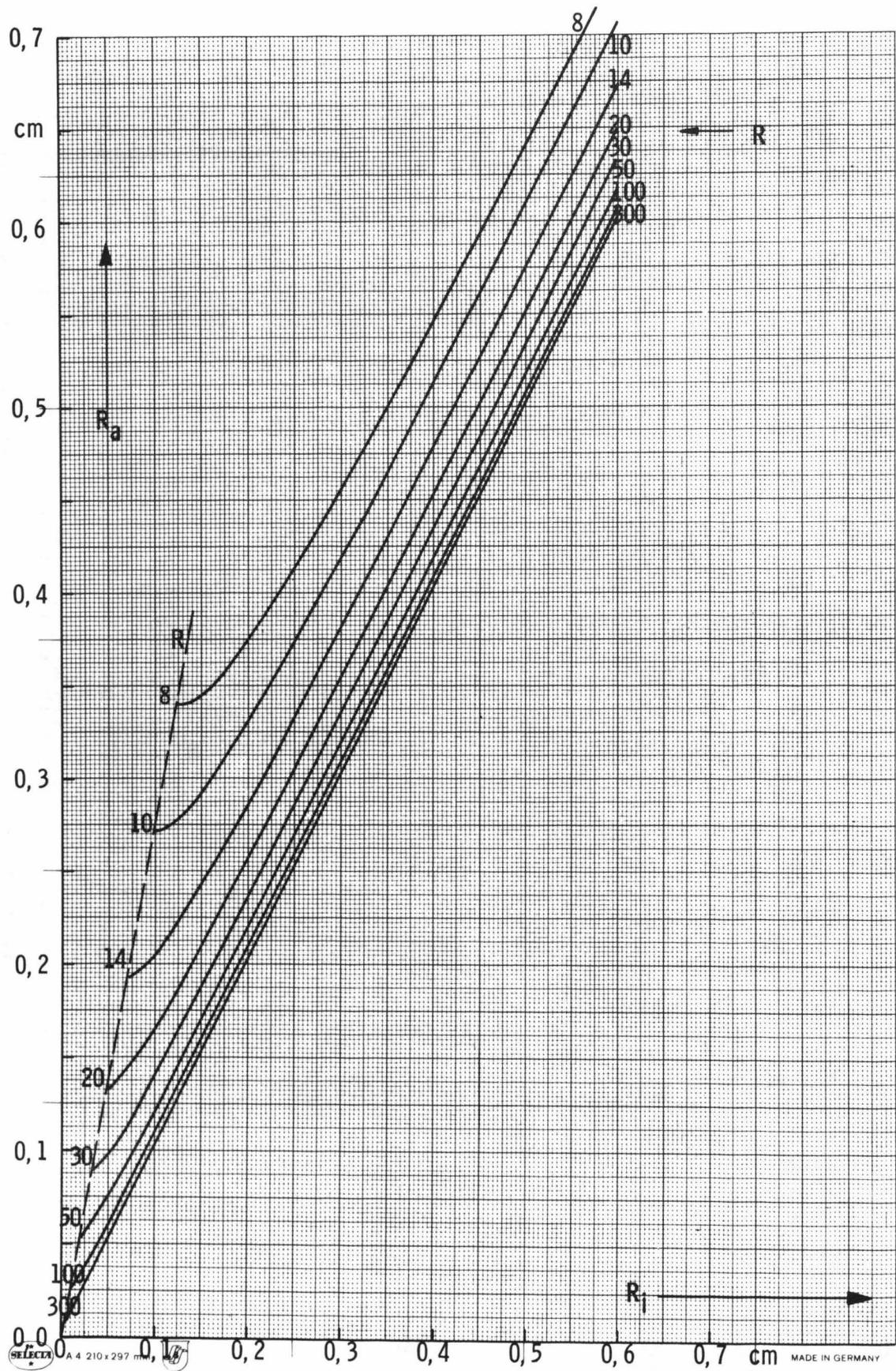


Abbildung 18: Parameterdarstellung der Hilfsgröße R als Funktion der Gasspaltradien R_1 , R_a , (Gleichung A4).

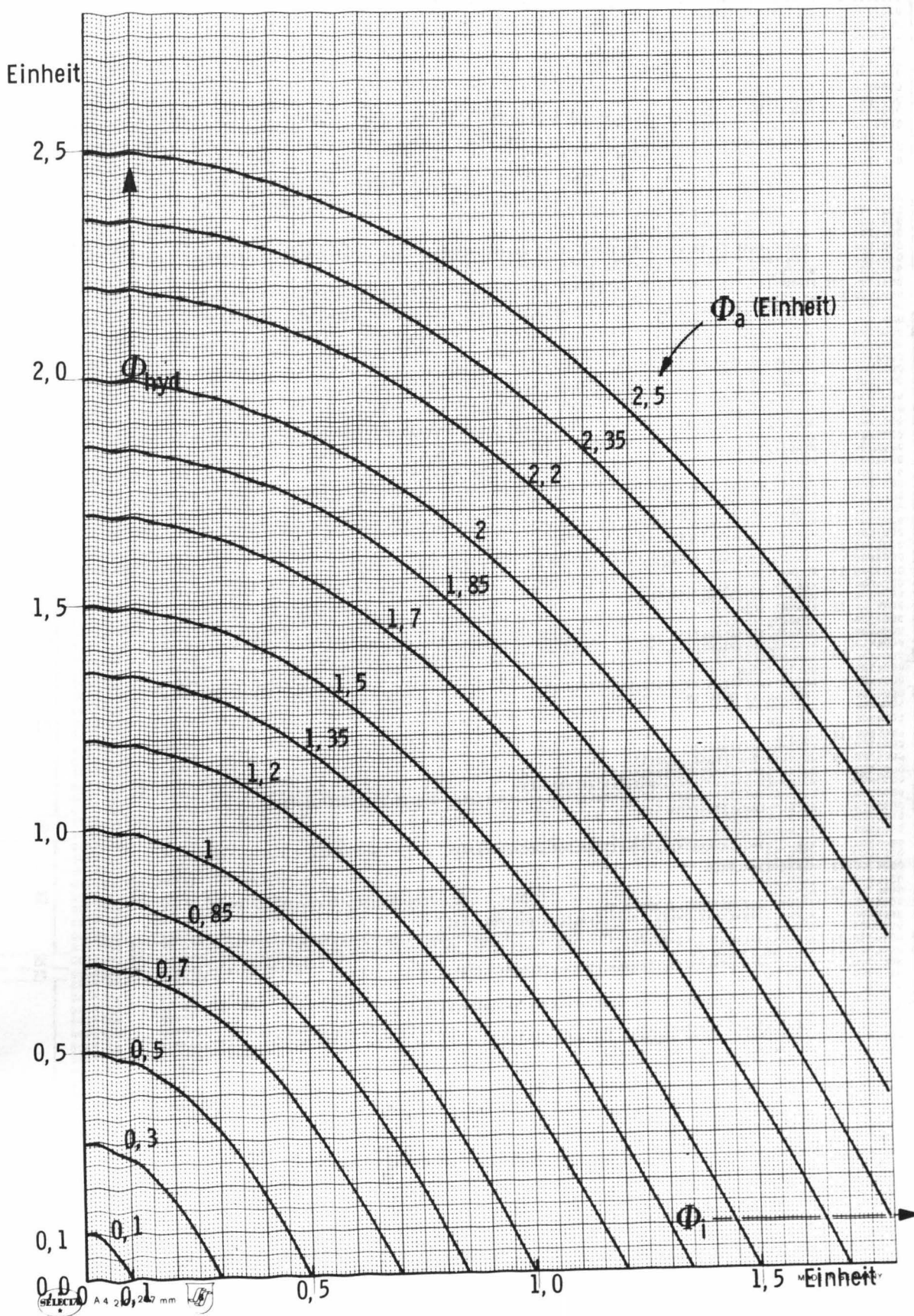


Abbildung 19: Hydraulischer Durchmesser Φ_{hyd} als Funktion des Innendurchmessers Φ_i , Parameter: Außendurchmesser Φ_a , (Gleichung 1.6); Φ_{hyd} , Φ_a , Φ_i haben dieselben Einheiten.

Abbildung 20: FORTRAN-QUELLPROGRAMM: FAULTL, (TSS/370-Betrieb)

```

0000100 C  HESSFEHLER EINES TEMPERATURFUEHLERS BESTEHEND AUS N-SCHICHTEN IN EINEM BOHRLOCH DES MESSOBJEKTES.
0000200  DIMENSION H(10,10)
0000300  REAL L,L1,UI(10),UA(10),EPS(10),DIFFDA(10),LAM(10),LAMA(10),DICHT(10),ALFAS(10),DH(10),Z(10),-
0000400  1 DSTR(10),Z1(10),Z2(10),E(10),ALFAL(10),EPSH(10),ALFAST(10),ALFA(10),AA(10),A(10),AL1(10),-
0000500  1 ALL1(10),FV(10),K(10),UT(10),QV(10),QR(10),DGT(10),KS(10),DGST(10),K1(10,10),-
0000510  1 DGT0(10),DO(10),AL(10),QRO(10),H0(10),KL(10),DICHTA(10),DGTRI(10),S(10),KD(10),KDD(10)
0000550  WRITE(6,5)
0000560 5  FORMAT(1H1,'EINGABEN FUEH DAS PROGRAMM FAULTL:')
0000600  WRITE(6,1)
0000700 1  FORMAT(1H1,'1.ZEILE: ANZAHL SCHICHTEN (N<11) IM FORMAT 12, (NUMMIERIERUNG VON AUSSEN NACH INNEN)'-
0000800  1 ,/,1X,'2.ZEILE: BOHRLOCHDURCHMESSER, (DUOBJ, (CM)), IM FORMAT F7.2',/,1X,'3.ZEILE: EMISSIONSVERMOEGEN -
0000900  1 DES MESSOBJEKTES, (EPSOB) IM FORMAT F7.4',/,1X,'4.ZEILE: GESAMTLAENGE DES FUEHLERS, (L, (CM)) IM -
0001000  1 FORMAT F7.2',/,1X,'5.ZEILE: EINTAUCHLAENGE DES FUEHLERS, (L1, (CM)), IM FORMAT F7.2',/,1X,'6.ZEILE: -
0001100  1 OBJEKTTEMPERATUR, (TA, (K)), IM FORMAT F4.0',/,1X,'7.ZEILE: UMGEBUNGSTEMPERATUR, (T0, (K)), IM FORMAT -
0001200  1 F4.0',/,1X,'8.ZEILE: 1.TER INNENDURCHMESSER, (DI(1), (CM)), IM FORMAT 5F7.2',/,1X,'9.ZEILE: 1.TER -
0001300  1 AUSSENDURCHMESSER, (DA(1), (CM)), IM FORMAT 5F7.2',/,1X,'10.ZEILE: 1.TE AUSSENDURCHMESSERTOLERANZ, -
0001400  1 (DIFFDA(1), (CM)), IM FORMAT 5F7.3',/,1X,'11.ZEILE: 1.TES EMISSIONSVERMOEGEN, (EPS(1), IM FORMAT 5F7.4' -
0001500  1 ,/,1X,'12.ZEILE: 1.TER WAERMELEITKOEFFIZIENT, (LAM(1), (W/CM/K)), IM FORMAT 5E13.5',/,1X,'13.ZEILE: -
0001600  1 1.TER AUSSENWAERMELEITKOEFFIZIENT DES GASES, (LAMA(1), (W/CM/K)), IM FORMAT 5E13.5',/,1X,'14.ZEILE: -
0001700  1 1.TE DICHT, (DICHT(1), (GR/CM**3)), IM FORMAT 5F10.5',/,1X,'15.ZEILE: WAERMEQUELLE, (QUELLE, (W/GR)), -
0001800  1 IM FORMAT F7.2',/,1X,'16.ZEILE: 1.TE WAERMEDURCHGANGSZAHL AN STIRNFLAECHE, (ALFAST(1), (W/CM**2/K)), -
0001900  1 IM FORMAT 5E13.5',/,1X,10X,'FUEH ALFAST(1) LESS EQUAL 10*(-50) IST: ALFAST(1)=ALFA(1)')
0001904  WRITE(6,110)
0001906 110 FORMAT(1X,'17.ZEILE: 1.TE GASDICHTE AUSSERHALB DER SCHICHT, (DICHTA(1), (GR/CM**3)), IM FORMAT 5F10.7')
0001910 91  WRITE(6,8)
0001920 8  FORMAT(/,1X,'SOLL ZUHAECHEST KEINE RECHNUNG ODER KEINE WEITERE RECHNUNG ERFOLGEN, SETZE: N=0 (1.ZEILE)-
0001925  1 SONST DIE EINGABEN')
0002100  READ(5,2)H
0002200 2  FORMAT(12)
0002210  IF(N.EQ.0)GOTO 92
0002300  READ(5,3)DUOBJ
0002400 3  FORMAT(F7.2)
0002500  READ(5,4)EPSOB
0002600 4  FORMAT(F7.4)
0002700  READ(5,5)L
0002800  READ(5,5)L1
0002900  READ(5,7)TA
0003000 7  FORMAT(F4.0)
0003100  READ(5,7)T0
0003200  READ(5,9)(DI(1), I=1,N)
0003300 9  FORMAT(5F7.2)
0003400  READ(5,9)(DA(1), I=1,N)
0003500  READ(5,9)(DIFFDA(1), I=1,N)
0003600  READ(5,12)(EPS(1), I=1,N)
0003700 12  FORMAT(5F7.4)
0003800  READ(5,13)(LAM(1), I=1,N)
0003900 13  FORMAT(5E13.5)
0004000  READ(5,13)(LAMA(1), I=1,N)
0004100  READ(5,15)(DICHT(1), I=1,N)
0004200 15  FORMAT(5F10.5)
0004300  READ(5,3)QUELLE
0004400  READ(5,13)(ALFAST(1), I=1,N)
0004410  READ(5,16)(DICHTA(1), I=1,N)
0004420 16  FORMAT(5F10.7)
0004500  DO 18 I=1,N
0004600  DH(I)=(UA(1)*UA(I)-DI(1)*DI(I))/DA(I)
0004700  IF(I.NE.1) GOTO 19
0004800  Z(1)=DUOBJ/UA(1)
0004900  GOTO 20
0005000 19  H1=I-1
0005100  Z(I)=UI(H1)/UA(I)
0005200 20  DSTR(I)=2*DIFFDA(I)/UA(I)
0005300  Z1(I)=(1+Z(I)*Z(I))/(2*Z(I))
0005400  Z2(I)=Z1(I)-(DSTR(I)*DSTR(I))/(2*Z1(I))
0005500  E(I)=ALOG(Z1(I)*SQRT(Z2(I)*Z1(I))-1.))/ALOG(Z2(I)*SQRT((Z2(I)*Z2(I))-1))
0005600  ALFALO=LAMA(1)/(2*DA(1))
0005700  IF(I.NE.1)GOTO 22
0005800  IF(DUOBJ/UA(1).GT.2.)GOTO 21
0005900  ALFAL(1)=2*LAMA(1)*E(1)/(DA(1)*ALOG(DUOBJ/DA(1)))
0006000  GOTO 23
0006100 21  ALFAL(1)=ALFALO
0006200  GOTO 23
0006300 22  M2=I-1
0006400  IF(DI(M2)/DA(I).GT.2.)GOTO 24
0006500  ALFAL(I)=2*LAMA(1)*E(I)/(DA(I)*ALOG(DI(M2)/DA(I)))
0006600  GOTO 23
0006700 24  ALFAL(I)=LAMA(1)/(2*DA(I))
0006800 23  IF(I.NE.1)GOTO 25
0006900  EPSH(1)=EPSOB*EPS(1)/(EPSOB*EPS(1)-(EPSOB*EPS(1)))
0007000  GOTO 26
0007100 25  M3=I-1
0007200  EPSH(I)=EPS(H3)*EPS(1)/(EPS(H3)+EPS(1)-(EPS(H3)*EPS(1)))
0007300 26  STEF=5.65E-12
0007400  ALFAS(I)=4*STEF*EPSH(I)*(TA**3)
0007500  ALFA(I)=ALFAS(I)+ALFAL(I)
0007600  AA(I)=4*ALFA(I)/(LAM(I)*DH(I))
0007700  A(I)=SQRT(AA(I))
0007800  AL1(I)=A(I)*L1
0007900  ALL1(I)=A(I)*(L-L1)
0008000  FH(I)=COSH(AL1(I))*(TANH(ALL1(I)))*SINH(AL1(I))
0008100  IF(I.NE.1)GOTO 18
0008200  ALFA0=ALFALO+ALFAS(1)
0008300  AA0=AA(1)*ALFA0/ALFA(1)
0008400  A0=SQRT(AA0)
0008500  AOLL1=A0*(L-L1)
0008600  FH(1)=FH(1)+(A(1)*TANH(AOLL1)/(A0*TANH(ALL1(1)))-1)*TANH(ALL1(1))*SINH(AL1(1))
0008700 18  CONTINUE
0008800  DO 30 M=1,N
0008900  DO 30 L2=1,N
0009000  IF(M=L2)31,32,33
0009100 32  H(H,L2)=1.
0009200  GOTO 30
0009300 33  H(H,L2)=1.-(FH(M)/FH(L2))
0009350  H(H,L2)=H(H,L2)
0009400  GOTO 30
0009500 31  H(H,L2)=(-AA(L2))/(AA(H)-AA(L2))
0009600 30  CONTINUE
0009900 30  CONTINUE
0010000  J3=H-1
0010100  K1(1,1)=1.
0010300  DO 40 J=2,N3
0010400  J1=J-1
0010500  SUM=1.
0010600  DO 40 K2=1,J1
0010700  PRDU=1.
0010800  L7=J-K2
0010900  DO 41 L3=1,L7
0011000  L8=J+1-L3
0011100 41  PRDU=PRDU*H(K2,L8)
0011200  PRDU1=PRDU*K1(1,K2)
0011300  SUM=SUM-PRDU1
0011400 40  K1(1,J)=SUM

```

Fortsetzung: Abb.20

```

0011500 K(1)=1.
0011600 DO 42 I=2,N
0011700 SUM1=1.
0011750 N4=I-1
0011800 DO 42 J=1,N4
0011900 PROD2=1.
0012000 L9=I-J
12 0012100 DO 43 L3=1,L9
0012200 L4=I+1-L3
0012300 43 PROD2=PROD2*H(J,L4)
0012400 PROD5=PROD2*H(I,J)*K1(1,J)
0012440 SUM1=SUM1+PROD5
0012450 42 K(1)=SUM1
0012460 DO 46 I=1,N
0012462 KDD(I)=ALFA(I)*DA(I)/(4*LAM(I))
0012464 IF((I.EQ.N).AND.(DI(I).EQ.0)) GOTO 47
26 0012466 GOTO 48
0012468 47 KD(I)=KDD(I)
0012470 GOTO 46
0012472 48 KD(I)=KDD(I)*(1-(2*DI(I)*DI(I)*ALOG(DA(I)/DI(I))/(DA(I)*DA(I)-DI(I)*DI(I))))
0012474 46 CONTINUE
13 0012500 DO 50 I=1,N
0012520 DT(I)=K(I)*(TA-T0)/FH(I)
14 0012540 QV(I)=DICHT(I)*QUELLE
0012560 QR(I)=QV(I)/(LAM(I)*AA(I))
15 0012580 QRO(I)=QR(I)
0012600 IF(I.EQ.1) GOTO 51
16 0012620 AL(I)=A(I)*L
0012640 MO(I)=COSH(AL(I))
0012660 GOTO 50
0012680 51 AOL=A0*L
0012700 AOL1=A0*L1
0012720 AOL1=A0*(L-L1)
0012740 MO(I)=COSH(AOL)*FH(I)/(COSH(AOL1)+SINH(AOL1)*TANH(AOL1))
17 0012760 50 CONTINUE
0012780 QRO(I)=QV(I)/(LAM(I)*AA0)
15 0012800 SUM20=-QRO(I)
0012820 DO(1)=-QRO(1)
0012840 DO 52 I=2,N
0012860 SUM20=SUM20-QRO(I)
0012880 SUM21=0
0012900 K10=I-1
18 0012920 DO 53 K11=1,K10
0012940 L3=I-K11
0012960 PROD20=1.
0012980 DO 54 L10=1,L3
0013000 L12=I+1-L10
0013020 54 PROD20=PROD20*H(K11,L12)
0013040 53 SUM21=SUM21 + PROD20*DO(K11)
0013060 52 DO(1)=SUM20-SUM21
0013080 DGT0(1)=-QRO(1)-DO(1)/MO(1) +DT(1)*(QR(1)-QRO(1))/(TA-T0)
0013100 DO 55 I=2,N
0013120 SUM=DT(I)*(QR(1)-QRO(1))/(TA-T0)
0013140 SUM3=0
0013160 SUM1=DO(1)/MO(1)+QR(1)
19 0013180 J1=I-1
0013200 DO 56 J=1,J1
0013220 J20=I-J
0013240 PROD=1.
0013260 DO 57 K20=1,J20
0013280 L20=I+1-K20
0013300 57 PROD=PROD*H(J,L20)
0013320 56 SUM3=SUM3+QR(J)+PROD*DO(J)/MO(J)
0013340 DGT0(I)=SUM1-SUM1-SUM3
20 0013360 55 DGT(I)=DGT0(I)+DT(I)
0013380 DGT(1)=DGT0(1)+DT(1)
0013900 DO 70 I=1,N
0013910 IF(ALFAST(I).LE.1.E-50)GOTO 65
0013920 GOTO 68
0013930 65 ALFAST(I)=ALFA(I)
21 0013940 68 CONTINUE
0013950 KL(I)=(COSH(AL1(I))/FH(I))*(1.+TANH(ALL1(I))/TANH(AL1(I)))
0013960 IF(I.EQ.1)GOTO 67
0013970 GOTO 66
0013980 67 KL(I)=(COSH(AL1(I))/FH(I))*(1.+(A(I)*TANH(AOL1))/(A0*TANH(AL1(I))))
22 0014000 66 KS(I)=1./(1.+ALFAST(I)*KL(I)*TANH(AL1(I))/(LAH(I)*A(I)))
23 0014100 70 DGST(I)=KS(I)*DGT(I)
0014102 S(H)=0
0014104 H100=N-1
0014106 DO 95 I=1,H100
0014108 H=N-I
0014110 M1=H+1
0014112 SUM=DICHTA(H1)*(DI(H)*DI(M)-DA(H1)*DA(M1))+DICHTA(M1)*(DA(M1)*DA(M1)-DI(M1)*DI(H1))
95 0014114 S(H)=SUM+S(M1)
0014116 SUM=0
0014118 DO 96 I=1,N
0014120 M1=I-1
0014122 IF(I.EQ.1)GOTO 97
24 0014124 D11=DI(M1)
0014126 GOTO 98
0014128 97 D11=DU06J
0014130 98 AZ=-1.*D11*D11/(DA(I)*DA(I))+DICHTA(I)*LAMA(I)/(DICHTA(I)*LAM(I))*(1-(DI(I)*DI(I)/(DA(I)*DA(I))))-
0014132 1+(-1*(DICHTA(I)/DICHTA(I)))*2*ALOG(D11/DA(I))
0014134 IF((I.EQ.N).AND.(DI(N).EQ.0))GOTO 100
0014136 GOTO 99
0014138 100 BZ=0
0014140 GOTO 101
0014142 99 BZ=(ALOG(DA(I)/DI(I))+(LAM(I)/LAMA(I))*ALOG(D11/DA(I)))+(S(I)-(DICHTA(I)*DI(I)*DI(I)))
0014144 101 DGTRI(I)=QUELLE+DICHTA(I)*DA(I)*DA(I)*AZ/(16*LAMA(I))+QUELLE*BZ/(8*LAM(I))
25 0014150 96 SUM=SUM+DGTRI(I)
0014152 DGTR=-SUM
0014200 WRITE(6,80)
0014300 80 FORMAT(1H1,2X,'I',3X,'KD(I)',4X,'E(I)',3X,'EPSM(I)',2X,'A(I)',4X,'ALFAL(I)',6X,'ALFA(I)',9X,'FH(I)',//,1X)
0014400 DO 81 I=1,N
0014500 81 WRITE(6,82)I,KD(I),E(I),EPSM(I),A(I),ALFAL(I),ALFA(I),FH(I)
0014600 82 FORMAT(14,F9.5,3F8.4,1X,E13.7,1X,E13.7,1X,E13.7)
0014700 WRITE(6,83)
0014800 83 FORMAT(///,1X,2X,'I',5X,'K(I)',8X,'KL(I)',3X,'KS(I)',4X,'DGTRI(I)',2X,'DT(I)',2X,'DGT(I)',2X,'DGST(I)',//,1X)
0014900 DO 84 I=1,N
0015000 84 WRITE(6,85)I,K(I),KL(I),KS(I),DGTRI(I),DT(I),DGT(I),DGST(I)
0015100 85 FORMAT(14,1X,E13.7,1X,2F8.4,F10.2,3F8.2)
0015102 WRITE(6,86)DGTR,DGST(H)
0015104 86 FORMAT(/,1X,5X,'RADIALER TEMPERATURMESSFEHLER: DGTR =',F6.2,-
0015106 1/,1X,6X,'AXIALER TEMPERATURMESSFEHLER: DGST =',F6.2)
0015110 GOTO 91
0015120 92 CONTINUE
0015200 STOP
0015300 END

```

Abbildung 21: FORTRAN - Rechnung: FAULTL (TSS/370-Betrieb)

faultl

EINGABEN FUER DAS PROGRAMM FAULTL

1.ZEILE: ANZAHL SCHICHTEN (N=<11) IM FORMAT I2, (NUMMERIERUNG VON AUSSEN NACH INNEN)
 2.ZEILE: BOHRLOCHDURCHMESSER, (DUOBJ, (CM)), IM FORMAT F7.2
 3.ZEILE: EMISSIONSVERMOEGEN DES MESSOBJEKTES, (EPSOB), IM FORMAT F7.4
 4.ZEILE: GESAMTLAENGE DES FUEHLERS, (L, (CM)) IM FORMAT F7.2
 5.ZEILE: EINTAUCHLAENGE DES FUEHLERS, (L1, (CM)), IM FORMAT F7.2
 6.ZEILE: OBJEKTTEMPERATUR, (TA, (K)), IM FORMAT F4.0
 7.ZEILE: UMGEBUNGSTEMPERATUR, (TO, (K)), IM FORMAT F4.0
 8.ZEILE: I.TER INNENDURCHMESSER, (DI(I), (CM)), IM FORMAT 5F7.2
 9.ZEILE: I.TER AUSSENDURCHMESSER, (DA(I), (CM)), IM FORMAT 5F7.2
 10.ZEILE: I.TE AUSSENDURCHMESSERTOLERANZ, (DIFFDA(I), (CM)), IM FORMAT 5F7.3
 11.ZEILE: I.TES EMISSIONSVERMOEGEN, (EPS(I), IM FORMAT 5F7.4
 12.ZEILE: I.TER WAERMELEITKOEFFIZIENT, (LAM(I), W/CM/K), IM FORMAT 5E13.5
 13.ZEILE: I.TER AUSSENWAERMELEITKOEFFIZIENT DES GASES, (LANA(I), (W/CM/K)), IM FORMAT 5E13.5
 14.ZEILE: I.TE DICHTE, (DICHTA(I), (GR/CM**3)), IM FORMAT 5F10.5
 15.ZEILE: WAERMEQUELLE, (QUELLE, (W/GR)), IM FORMAT F7.2
 16.ZEILE: I.TE WAERMEDURCHGANGSAHLE AN STIRNFLAECHE, (ALFAST(I), (W/CM**2/K)), IM FORMAT 5E13.5
 (FUER ALFAST(I) LESS EQUAL 10*(-50) IST: ALFAST(I)=ALFA(I))
 17.ZEILE: I.TE GASDICHTE AUSSERHALB DER SCHICHT, (DICHTA(I), (GR/CM**3)), IM FORMAT 5F10.7

SOLL ZUNAECHEST KEINE RECHNUNG ODER KEINE WEITERE RECHNUNG ERFOLGEN, SETZE: N=0 (1.ZEILE) SONST DIE EINGABEN

3
 0.4
 0.95
 4.
 2.7
 1873
 1073
 0.31 0.18 0.11
 0.36 0.28 0.16
 0.001 0.001 0.001
 0.8 0.8 0.8
 0.51 e 00.625 e 00.625 e 0
 5.8 e- 35.8 e- 35.8 e- 3
 20. 20. 20.
 1.
 1. e-501. e-501. e-40
 0.0000262 0.0000262 0.0000262

I	KD(I)	E(I)	EPSM(I)	A(I)	ALFAL(I)	ALFA(I)	FN(I)
1	0.01054	1.0015	0.7677	5.9517	0.3062733E 00	0.4202721E 00	0.1359666E 08
2	0.02144	1.0025	0.6667	4.4444	0.4080564E 00	0.5070553E 00	0.1627553E 06
3	0.01509	1.0057	0.6667	7.3800	0.6190328E 00	0.7180316E 00	0.4505293E 09

I	K(I)	KL(I)	KS(I)	DGTRI(I)	DT(I)	DGT(I)	DGST(I)
1	0.1000000E 01	1.0000	0.8784	4.28	0.00	-1.11	-0.97
2	0.2245539E 01	1.0000	0.8456	2.67	0.01	-2.72	-2.30
3	0.9700426E 04	1.0000	1.0000	0.69	0.02	-3.30	-3.30

RADIALER TEMPERATURMESSFEHLER: DGTR = -7.64
 AXIALER TEMPERATURMESSFEHLER: DGST = -3.30

SOLL ZUNAECHEST KEINE RECHNUNG ODER KEINE WEITERE RECHNUNG ERFOLGEN, SETZE: N=0 (1.ZEILE) SONST DIE EINGABEN

0
 TERMINATED: STOP

