

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM  
KARLSRUHE**

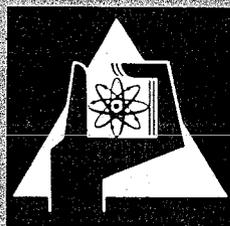
April 1972

KFK 1555

Institut für Reaktorbauelemente  
Projekt Schneller Brüter

Theoretische Untersuchungen zur Wandtemperaturmessung  
an simulierten Brennstäben für thermodynamische Experimente in Natrium

R. Möller, H. Tschöke



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.  
KARLSRUHE

**Als Manuskript vervielfältigt**

**Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor**

**GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.  
KARLSRUHE**

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

April 1972

KFK 1555

Institut für Reaktorbauelemente

Projekt Schneller Brüter

Theoretische Untersuchungen zur Wandtemperatur-  
messung an simulierten Brennstäben für thermody-  
namische Experimente in Natrium

von

R. Möller, H. Tschöke

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M.B.H., KARLSRUHE



### Kurzfassung

Durch den Einbau von Thermoelementen in die indirekt und stationär beheizte Hüllwand von Heizstäben werden das Temperaturfeld und der Wärmestrom gestört. Für verschiedene Werkstoffkombinationen wurden Temperaturfelder im Bereich der Störstelle berechnet und daraus für das vom Thermoelement angezeigte Signal Messwertkorrekturen ermittelt, die zur Oberflächentemperatur im ungestörten Bereich führen. Weiterhin wurden die Variationen der Messwertkorrektur bestimmt, die durch Unsicherheiten in der Einbaugeometrie sowie der Wärmeleitfähigkeit der Lotwerkstoffe verursacht werden.

Es zeigte sich, dass Thermoelemente mit BN-Isolierung in Verbindung mit Nickellot in einer Stahlhülle nur eine sehr geringe Störung des Wärmestromes bewirken und deshalb eine gute Voraussetzung für die Bestimmung von örtlichen Oberflächentemperaturen bieten. Für diesen Fall ergibt sich eine Genauigkeit für die rechnerische Messwertkorrektur von ca.  $\pm 25\%$ .

### Abstract

The installation of thermocouples into the cladding tube of heating rods, which is heated in an indirect and stationary way, results in a disturbance of the temperature field and heat flow. Temperature fields within the zone of disturbance were calculated for various combinations of materials and corrections to the measured values were determined for the signal indicated by the thermocouple. These corrections yield the surface temperature in the undisturbed zone. Moreover, the variations of corrections to measured values were determined which are caused by uncertainties of the installation - geometry as well as of the thermal conductivity of solders.

It was found that thermocouples with BN-insulation together with nickel solder in a steel sheath will cause only a small disturbance of the heat flow and, hence, provide good conditions for the determination of local surface temperatures. In this case, an accuracy of the calculated correction to the measured value of about  $\pm 25\%$  is obtained.



## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung
  2. Aufgabenstellung
  3. Rechenmodell
  4. Rechenverfahren
  5. Betrachtung der wesentlichen Störeinflüsse
  6. Diskussion der Ergebnisse
    - 6.1 Einfluß der Kontaktzahlen bei der elektrischen Stabisolation auf die Meßwertkorrektur
    - 6.2 Einfluß der Kontaktzahlen bei der Thermoelementisolation auf die Meßwertkorrektur
    - 6.3 Charakteristische Temperaturfelder bei verschiedenen Werkstoffkombinationen
    - 6.4 Zum Parametervergleich
      - 6.4.1 Meßwertkorrektur für verschiedene Werkstoffkombinationen
      - 6.4.2 Meßwertkorrektur bei Verwendung von Ag-Lot und ihre Variation durch Unsicherheiten in  $\lambda$ ,  $b$  und  $t$
      - 6.4.3 Meßwertkorrektur bei Verwendung von Ni-Lot und ihre Variation durch Unsicherheiten in  $\lambda$  und  $t$
      - 6.4.4 Beispiel mit stufenweiser Änderung der Kontaktzahl zwischen Elektrode/Isolation und Isolation/Stabhülle
  7. Zusammenfassung und Schlußfolgerung
- Literatur
- Bezeichnungen

## Verzeichnis der Abbildungen

- Abb. 1 Schematischer Vergleich des Temperaturverlaufes in der Stabhülle und im Kühlkanal für die Kühlmittel Natrium, Wasser und Luft
- Abb. 2 Prinzipskizze zum Rechenmodell
- Abb. 3 Netzwerk zur Berechnung des Temperaturfeldes
- Abb. 4 Temperaturfeld bei Verwendung von Ag-Lot und MgO-Isolation im Thermoelement
- Abb. 5 Temperaturfeld bei Verwendung von Ni-Lot und MgO-Isolation im Thermoelement
- Abb. 6 Temperaturfeld bei Verwendung von Ni-Lot und BN-Isolation im Thermoelement
- Abb. 7 Temperaturfeld bei Verwendung von Ni-Lot und MgO-Isolation im Thermoelement sowie ortsabhängige Kontaktzahlen der elektrischen Stab-  
isolation MgO
- Abb. 8 Temperaturverlauf in der Symmetrieachse durch das Thermoelement für verschiedene Werkstoffkombinationen
- Abb. 9 Verlauf der Oberflächentemperatur bei Verwendung von Ag-Lot und MgO-Isolation im Thermoelement
- Abb. 10 Verlauf der Oberflächentemperatur bei Verwendung von Ni-Lot und MgO-Isolation im Thermoelement
- Abb. 11 Verlauf der Oberflächentemperatur bei Verwendung von Ni-Lot und BN-Isolation im Thermoelement

- Abb. 12 Meßwertkorrektur bei verschiedenen Werkstoffkombinationen und konstanter Nutgeometrie
- Abb. 13 Meßwertkorrektur bei Verwendung von Ag-Lot (ihre Variation durch Unsicherheiten in  $\lambda$ , b und t)
- Abb. 14 Meßwertkorrektur bei Verwendung von Ni-Lot (ihre Variation durch Unsicherheiten in  $\lambda$ , b und t)
- Abb. 15 Querschnitt eines BN-Stabes und Hüllwandausschnitt mit im Ag-Lot eingebettetem Thermoelement



## 1. Einleitung

Bei Wärmeübergangs-Experimenten ist die zuverlässige Bestimmung örtlicher Temperaturen der wärmeabgebenden Oberfläche von entscheidender Bedeutung für die Güte der Versuchsergebnisse, insbesondere bei Flüssigmetallkühlung.

Der bei Flüssigmetallen im Vergleich zu anderen Flüssigkeiten und Gasen um 1 bis 2 Größenordnungen höhere Wärmeübergang bewirkt, daß zwischen Oberfläche und Kühlmittel relativ kleine Temperaturdifferenzen auftreten. Fehler bei der Bestimmung der Oberflächentemperatur verursachen deshalb in diesem Fall relativ große Fehler bei Wärmeübergangsmessungen. Der in Abb. 1 für verschiedene Kühlmittel schematisch dargestellte Temperaturverlauf in der indirekt beheizten Wand und im Kühlkanal veranschaulicht dies.

Grundsätzlich sind folgende Meßfehler zu beachten:

### 1. Fehlerhaftes Arbeiten

Das vom Temperaturmeßfühler angezeigte Signal wird verfälscht in der Meßwertverarbeitung oder durch Abweichung von der Eichkurve bei Veränderung der Meßfühler-Charakteristik.

### 2. Messen am falschen Ort

Der Temperaturmeßfühler ist in die wärmeabgebende Wand eingebaut und mißt deshalb nicht die Oberflächentemperatur, sondern die entsprechende Wandtemperatur.

### 3. Störung der Meßstelle

Der Temperaturfühler stört durch sein Vorhandensein das Temperaturfeld in der Umgebung der Meßstelle und verfälscht somit das Meßergebnis.

Die vorliegende Arbeit befaßt sich ausschließlich mit den in 2. und 3. genannten Meßfehlern in stationär beheizten Wänden.

## 2. Aufgabenstellung

Aus experimentell gewonnenen örtlichen Hüllwandtemperaturen (Thermoelement-Anzeige) an elektrisch beheizten Brennstabmodellen sollen lokale Oberflächentemperaturen ermittelt werden. Das erfordert entweder einen punktförmigen Temperaturfühler an der Hüllenoberfläche (theoretischer Fall), oder - bei endlicher Ausdehnung desselben - einen in die Hüllwand eingebetteten Fühler mit gleichem Wärmeleitvermögen wie die umgebende Wand, so daß keine Störung des Temperaturfeldes verursacht wird. Dabei muß aber die Tiefenlage der eigentlichen Meßstelle in der Wand genau bekannt sein.

Durch den Einbau des Temperaturfühlers wird jedoch in seiner unmittelbaren Umgebung eine Verzerrung des Temperaturfeldes und verbunden damit eine Verzerrung der Wärmestromverteilung verursacht. Die sich an der Staboberfläche direkt über dem Temperaturmeßfühler einstellende Temperatur weicht somit von der ungestörten ab.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist, die vom Meßfühler angezeigte Temperatur so zu korrigieren, daß sich die tatsächliche Oberflächentemperatur für den ungestörten Fall ergibt.

## 3. Rechenmodell

Maßgebend für die Ausbildung des Temperaturfeldes um die Störstelle ist zunächst die Beschaffenheit der Störstelle selbst, d.h. der geometrische Aufbau und die Unterschiede in der Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Werkstoffe. Darüberhinaus wird das Temperaturfeld von den Wärmeübergangsbedingungen an der Hüllrohroberfläche bestimmt.

Unsymmetrische Strömungsverhältnisse würden die Analyse der Störstelleneinflüsse erschweren. Deshalb wurde für die Parameteruntersuchungen eine symmetrische Ringraumgeometrie gewählt. Als Strömungsmodell wurde für Natrium-Kühlung Kolbenströmung (slug flow) angenommen.

Bei der vorliegenden Aufgabe handelt es sich also um ein dreidimensionales Wärmeleitproblem. Der stromführende Heizleiter stellt die Wärmequelle dar, und die Kühlmittelzone wirkt als gleichförmige Senke (Abb.2). Zur Begrenzung des Rechenaufwandes wird zweidimensional in der Querschnittsebene des Heizstabes gerechnet, d.h. es wird die Wärmeleitung in radialer und azimuthaler Richtung berücksichtigt, die in axialer Richtung vernachlässigt. Dies ist für den ungestörten Fall, d.h. ohne eingelötetes Thermoelement, gerechtfertigt, da der axiale Temperaturgradient um Größenordnungen kleiner ist als der radiale. Im gestörten Fall, d.h. mit eingelötetem Thermoelement (TE) ist die zweidimensionale Rechnung nur gerechtfertigt unter der Voraussetzung, daß die eigentliche Meßstelle des axial eingebauten TI-Thermoelementes (Schweißpunkt der Thermoadern ist gegen den TE-Mantel isoliert) mindestens 2 Thermoelement-Durchmesser<sup>1)</sup> von der Verschlusskappe entfernt ist. Bei einem TM-Thermoelement (Thermoadern sind mit der Verschlusskappe des Mantels verschweißt) mit BN-Isolierung wäre die zweidimensionale Behandlung dieses Problems noch zulässig, mit MgO-Isolierung jedoch nicht mehr.

Abb. 2 zeigt den maßgebenden Teil des Heizstabquerschnittes durch die Thermoelement-Meßstelle. Das relativ große Thermoelement und das verwendete Lot be-

---

<sup>1)</sup> siehe Abb. 4 und 9 über die Reichweite der Störwirkung

einflussen den Wärmestrom im Bereich des Thermoelementes. Bei konstanten äußeren Kühlmittelbedingungen am Heizstabumfang stellt sich deshalb direkt über der Meßstelle im Punkt O eine Oberflächentemperatur ein, die von der wirklichen Temperatur im ungestörten realen Fall abweicht. Verfolgt man nun die Meßisotherme, d.h. den vom Thermoelement angezeigten Meßwert, in azimuthaler Richtung soweit in den ungestörten Bereich hinein, bis sie nahezu auf einem Kreisbogen mit konstantem Radius verläuft, so gelangt man zu Punkt M'. Das ist nach  $\varphi = 60^\circ$  für die vorliegende Untersuchung der Fall, wie die Ergebnisse bestätigen. In diesem Ort kann man sich einen idealisierten, punktförmigen Meßfühler vorstellen, der genau die vom Thermoelement angezeigte Temperatur besitzt. Im Punkt M' sind damit folgende Größen bekannt: die Temperatur, der Ort durch den Radius  $ZM'$ , der mittlere Wärmestrom und die Wärmeleitfähigkeit der Hüllwand. Daraus läßt sich die Oberflächentemperatur in O' bestimmen. Die sich aus dem zu berechnenden Temperaturfeld ergebende Meßisotherme stellt somit das Verbindungsglied zwischen realem und idealisiertem Temperatur-Meßfühler dar.

In Abb. 3 sind die Hauptabmessungen des betrachteten Ausschnittes angegeben. Unter der Annahme, daß das Thermoelement sich in der Mitte zwischen den Nutflanken befindet, bildet die Linie durch M-Z eine Symmetrielinie und damit für das Problem eine Adiabate. Die Begrenzung des Ausschnittes nach  $\varphi = 60^\circ$  stellt eine weitere Adiabate dar. Die Wärmequelle wird durch eine Punktreihe auf der Elektroden-Außenfläche dargestellt. Die Quellstärke ist konstant angenommen, d.h.  $q''' / \text{Watt/cm}^3 / = \text{konst.}$  Bei Kolbenströmung gilt für die Senke im Kühlmittel entsprechendes.

Das von der Elektrode umschlossene Füllmaterial bleibt unberücksichtigt, da sein Einfluß bei der gewählten Kühlkanalgeometrie auf die Ausbildung des Temperaturfeldes um die Störstelle vernachlässigbar klein ist.

#### 4. Rechenverfahren

Die Bestimmung des Temperaturfeldes im Kühlmittel, in der instrumentierten Hüllwand, im Isolator und im Stromleiter (Elektrode) erfolgt auf numerischem Wege mit dem Programm 'RELAX' /1/.

Der betrachtete Teil des Heizstabquerschnittes mit der Thermoelement-Meßstelle und der zugehörige Kühlkanal werden mit einem Netzwerk überzogen (Abb.3). Im Bereich der Meßstelle ist das Netzwerk verfeinert. Für jeden dieser Punkte wird die Wärmebilanz gebildet, wodurch sich ein lineares Gleichungssystem ergibt, dessen Lösung die Temperaturen in den Netzwerkpunkten liefert.

Mit diesem Rechenprogramm ist es möglich, die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Temperatur zu berücksichtigen. Ebenso kann eine beliebige Geschwindigkeitsverteilung im Kühlmittel eingegeben werden.

#### 5. Betrachtung der wesentlichen Störeinflüsse

Die Ausbildung des Temperaturfeldes und damit der Wärmestromverteilung wird im Bereich des eingebetteten Thermoelementes durch folgende Parameter bestimmt:

- a) Nutgeometrie (Breite, Tiefe, Form des Nutgrundes)
- b) Lage des Thermoelementes in der Nut
- c) Thermoelement-Aufbau (Form und Lage der Meßperle, Isolationsmaterial)
- d) Lotmaterial (Lotmenge, Wärmeleitfähigkeit)
- e) Stabhülle (Wandstärke, Wärmeleitfähigkeit)
- f) Isolationsmaterial (Schichtstärke, Wärmeleitfähigkeit, Kontaktzahl)
- g) evtl. Variation der Kontaktzahl für die elektrische Isolierung im Bereich des betrachteten Sektors

- h) Wärmeübergang zum Kühlmittel
- i) konstante Wärmequellendichte bzw. konstante Temperatur der Elektrode.

Zu a): Die Nutgeometrie beeinflusst das Temperaturfeld bei Verwendung eines Lotes, das eine vom umgebenden Hüllmaterial abweichende Wärmeleitfähigkeit besitzt, also bei Silberlot in Verbindung mit einer Stahlhülle.

Bei Nickellot ist dies nicht der Fall, siehe unter d).

Folgende Fälle der Einbaugeometrie werden untersucht (s. Abb.3):

- symmetrische Lage des TE in der Nut,
- engster Spalt zwischen TE und Nutflanke 0,01 bzw. 0,025 mm,
- Nuttiefen von 0,475 und 0,45 mm, damit das TE mit 0,35 mm  $\varnothing$ , mindestens 0,1 mm unter der Oberfläche liegt, um bei Nacharbeiten der Lötstelle eine Beschädigung des TE-Mantels auszuschließen,
- nicht abgerundete Ecken am Nutgrund.

Zu b): Um den Rechenaufwand zu reduzieren (maßgebend hierfür ist die Anzahl der Netzwerkpunkte), ist das Thermoelement auf die Symmetrieachse der Nut gelegt worden. Somit braucht das Temperaturfeld nur einseitig berechnet zu werden. Weiter ist angenommen, daß das Thermoelement immer auf dem Nutgrund anliegt.

Die Tiefenlage des Thermoelementes im Lot ist nur in einem Querschliff zu bestimmen. Dazu müßte der Heizstab nach dem Versuch zerstört werden.

Zu c): Röntgenbilder zeigen, daß jedes Thermoelement an der Meßspitze anders aussieht. Lage, Größe und Form der Meßperle — dies ist die Schweißstelle der beiden Thermoedern — sind von Element zu Element so verschieden, so daß nur ein Querschliff darüber eine Aussage machen kann.

Für die Rechnung wird ein Thermoelement von 0,35 mm Durchmesser mit 0,05 mm Mantelstärke betrachtet. Die Meßperle liegt zentrisch als gedachtes Quadrat mit einer Seitenlänge von 0,08 mm im Isolationsmaterial. Als Isolationsmaterial werden Magnesiumoxyd (MgO) und wie in /3/ vorgeschlagen, Bornitrid (BN) eingesetzt.

Zu d): Als Lotmaterial wurden bisher wegen der leichten Verarbeitbarkeit und speziell bei Gaskühlung vorwiegend silberhaltige Lote verwendet. Mittelwertmessungen für den Wärmeübergang und der bei Luftkühlung große Temperaturabfall in der Grenzschicht (vergl. Abb. 1) haben dies gerechtfertigt.

Für Natrium-Kühlung ist ein Silberlot aus Löslichkeitsgründen nicht geeignet. Durch einen Nickel- bzw. Chromüberzug wäre nach einer praktischen Erprobung der Einsatz unter bestimmten Voraussetzungen (z.B. geringe Lotanhäufungen) denkbar.

Nickelbasislote sind aufwendiger und schwieriger in der Verarbeitung. Aus löttechnischen Gründen ist dabei eine geringe Lotspaltbreite erforderlich, um einen Härteanstieg in der Lotnaht sowie das Eindringen des Lotes durch Diffusion in den dünnen Thermoelement-Mantel zu vermeiden /2/.

In die Untersuchung sind beide Lote aufgenommen worden. Genaue Wärmeleitwerte sind uns für das Silberlot sowie für das Nickellot nicht bekannt. Reines Silber hat eine Wärmeleitfähigkeit von ungefähr 4 Watt/(cm·grd) bei 400° C, bei tieferen Temperaturen liegt sie noch etwas höher. Das betrachtete Silberlot enthält einen relativ hohen Silberanteil von 70 %. Um den Einfluß der nicht genau bekannten Wärmeleitfähigkeit von Silberlot abschätzen zu können, wurde mit 2 Werten gerechnet:

Silberlot:  $\lambda_{Ag} = 2$  bzw.  $3$  Watt/(cm·grd)

Die Zusammensetzung des Nickelbasislotes entspricht der von hochlegierten Nickelbasislegierungen, wie z.B. Inconel 625, Hastelloy X und Inconel 718 /2/. Die Wärmeleitfähigkeit des Nickelbasislotes wird daher gleich der von Nickelbasislegierungen gesetzt. Diese ist stark temperaturabhängig und entspricht nahezu der von Incoloy 800. Hierfür wird nach /5/ folgende lineare Beziehung angenommen:

Nickellot:	$\lambda$ $\left[ \frac{\text{Watt}}{\text{cm} \cdot \text{grd}} \right]$	T $[\text{°C}]$
	0,128	100
	0,239	760

Aus Vergleichsgründen wird darüberhinaus mit zwei konstanten Werten gerechnet:

a)  $\lambda = 0,20$  Watt/(cm·grd)

(Dies ist der Mittelwert für den sich später aus der Rechnung ergebenden Temperaturbereich)

- b)  $\lambda = 0,21 \text{ Watt}/(\text{cm grad})$   
(5 % Abweichung gegenüber a) ist eine angenommene Unsicherheit)

Zu e): Die betrachteten Isolationsmaterialien MgO und BN im Heizstab führen zu einem besseren azimuthalen Wärmeausgleich im Vergleich zu Brennstäben mit  $\text{UO}_2$ . Deshalb sollte bei Simulationsuntersuchungen die Hüllwand der Heizstäbe dünner sein als die der Brennstäbe.

Diese Forderung ist durch die Instrumentierung nach unten begrenzt. Durch die Thermoelementabmessung und zur Gewährleistung ausreichender Festigkeit der verbleibenden Hüllwandstärke im Nutgrund wird die ungeschwächte Wandstärke mit 0,7 mm festgelegt (Abb.3).

Als Werkstoff der Heizstabhülle wird Incoloy 800 betrachtet. Die Temperaturabhängigkeit des Wärmeleitwertes wird wie unter d) eingesetzt.

Zu f): Untersuchungen in [3], ausführlich in [8], zeigen, wie genau sich Natrium-gekühlte  $\text{UO}_2$ -Brennstäbe durch MgO- und BN-isolierte Heizstäbe simulieren lassen. Danach zeigen Stäbe mit MgO-Isolation fast das gleiche Verhalten wie Brennstäbe. Stäbe mit BN-Isolation weisen eine geringere azimuthale Variation der Oberflächentemperatur am Hüllrohr auf als beim Brennstab. Diese Abweichung wird durch die Schichtstärke des Isolators stark beeinflusst.

In der vorliegenden Untersuchung wird neben MgO auch BN als Isolationsmaterial betrachtet. Ausgehend von vorhandenen mit MgO isolierten Heizstäben wird mit konstanter Isolations-schichtstärke von 1 mm für beide Isolationswerkstoffe gerechnet.

Die Wärmeleitfähigkeit für MgO ist sehr stark dichteabhängig und kann nur grob angegeben werden /4/. Für die Rechnung wird folgender konstanter Wert angenommen:

$$\text{Stabisolation: } \lambda_{\text{MgO}} = 0,03 \text{ Watt}/(\text{cm}\cdot\text{grad})$$

BN hat eine wesentlich höhere Wärmeleitfähigkeit als MgO. Sie ist mit der von Stahl vergleichbar. Nach /4/ wird gerechnet mit:

$$\text{Stabisolation: } \lambda_{\text{BN}} = 0,24 \text{ Watt}/(\text{cm}\cdot\text{grad})$$

Für die Thermoelementisolation werden die gleichen Wärmeleitwerte verwendet, bei MgO darüberhinaus noch:

$$\text{TE-Isolation: } \lambda_{\text{MgO}} = 0,03 \text{ bzw. } 0,0003 \text{ Watt}/(\text{cm grad})$$

mit zugeordneten stark unterschiedlichen Kontaktzahlen

$$(\alpha_{\text{K}})_{\text{MgO}} = 1,0 \text{ bzw. } 0,01 \text{ Watt}/(\text{cm}^2\text{grad})$$

Die sehr niedrigen angenommenen Wärmeleitahlen und Kontaktzahlen für MgO erklären sich aus der geringen Dichte des im Bereich der Meßstelle aus fertigungstechnischen Gründen nur locker gepackten Isolationspulvers (großes Porenvolumen). Höhere Werte lassen sich erreichen durch Reduktion des Thermoelementdurchmessers nach Fertigstellung der Meßspitze.

Die experimentelle Bestimmung der Kontaktzahlen für den Wärmeübergang zwischen Isolationsmaterial und den angrenzenden Metallen ist sehr schwierig. Sie hängt besonders für MgO sehr stark von dessen Dichte /4/ ab. Es werden daher für MgO zwei

erheblich verschiedene Kontaktzahlen angenommen, um einen eventuellen Einfluß aufzeigen zu können:

Stabilisation:  $(\alpha_K)_{\text{MgO}} = 0,5 \text{ bzw. } 2 \text{ Watt}/(\text{cm}^2 \text{grd})$

Aufgrund von Versuchen an mit BN elektrisch isolierten Heizstäben konnte auf Kontaktzahlen von

$$\alpha_K > 20 \text{ Watt}/(\text{cm}^2 \text{grd})$$

geschlossen werden /4/. Wie bei MgO werden auch hier zwei verschiedene Werte angenommen:

Stabilisation:  $(\alpha_K)_{\text{BN}} = 10 \text{ bzw. } 25 \text{ Watt}/(\text{cm}^2 \text{grd})$

Im Thermoelement werden bei MgO-Isolation zwei ganz erheblich unterschiedliche Kontaktzahlen angenommen:

TE-Isolation:  $(\alpha_K)_{\text{MgO}} = 1,0 \text{ bzw. } 0,01 \text{ Watt}/(\text{cm}^2 \text{grd})$

mit zugeordneten stark unterschiedlichen Wärmeleitahlen

$$\lambda_{\text{MgO}} = 0,03 \text{ bzw. } 0,0003 \text{ Watt}/(\text{cm grd})$$

(Erläuterung dazu siehe oben).

Bei BN-Isolation wird angenommen:

TE-Isolation:  $(\alpha_K)_{\text{BN}} = 20 \text{ und } 15 \text{ Watt}/(\text{cm}^2 \text{grd})$

Zu g): Wie unter f) ausgeführt, sind die Kontaktzahlen zwischen Isolation und Metall schwer bestimmbare Werte. Es wird dort vorausgesetzt, daß sie an der gesamten Kontaktfläche der elektrischen Isolation sowie im Thermoelement konstant sind. Ebenso kann man sich vorstellen, daß z.B. durch die Schwächung des Heizstabmantels im Bereich der eingefrästen Thermoelement-Nut und zusätzlich durch den Lötprozeß unterschiedliche Kontaktwiderstände zwischen Isolation und Stabhülle bzw. Elektrode auftreten.

An einem Beispiel wird gezeigt, wie sich das Temperaturfeld bei folgenden Annahmen ändert:

MgO-Stabisolation  $1 \leq \alpha_K \leq 2$  Watt/(cm<sup>2</sup>grd)

Dabei wird eine stufenweise Änderung von  $\alpha_K$  über den Winkel des betrachteten Heizstababschnittes angenommen.

Für das Thermoelement wird hier eine konstante Kontaktzahl angenommen.

zu h): Wie unter 3. ausgeführt, wird Kolbenströmung und reine Wärmeleistung im Natrium angenommen.

Zu i): Unter der Voraussetzung, daß der Elektrodenquerschnitt kreisringförmig und in axialer Richtung konstant ist, liegt die Annahme einer konstanten Wärmequellendichte nahe. Eine Annahme konstanter Elektrodentemperatur erscheint unzweckmäßig,

weil durch starke äußere Einflüsse Temperaturschwankungen am Elektrodenumfang auftreten können. Es wird also in der Rechnung konstante Wärmequellendichte angenommen.

## 6. Diskussion der Ergebnisse

Der im folgenden benutzte Begriff Meßwertkorrektur ist definiert als Temperaturdifferenz  $\Delta T_W$  zwischen dem durch das Thermoelement angezeigten Meßwert an der Stelle M und der Staboberfläche im ungestörten Bereich an der Stelle O'. In den Diagrammen 12, 13 und 14 ist die Meßwertkorrektur als normierte Größe aufgetragen, d.h.  $\Delta T_W$  wird auf den für den Wärmeübergang charakteristischen mittleren Temperaturabfall  $\Delta T_K$  im Natrium bezogen.

### 6.1 Einfluß der Kontaktzahlen bei der elektrischen Stabisolation auf die Meßwertkorrektur

Um die Bedeutung der Kontaktzahlgröße bei der Betrachtung der Störeinflüsse abschätzen zu können, sind Rechnungen mit erheblich unterschiedlichen Werten bei MgO- und BN-Isolation (siehe 4f) durchgeführt worden.

Es zeigt sich, daß für beide Isolationsarten die Abweichung des zu korrigierenden Meßwertes weniger als 1 % beträgt. Damit ist die nur näherungsweise bekannte Größe der Kontaktzahl innerhalb der betrachteten Grenzen für die weitere Untersuchung der Störeinflüsse frei wählbar.

## 6.2 Einfluß der Kontaktzahlen im Thermoelement auf die Meßwertkorrektur

Eine entsprechende Unsicherheit der Kontaktzahlgröße für den Wärmeübergang existiert auch im Thermoelement. Um einen eventuellen Einfluß dieser Unsicherheit auf die Korrektur der Meßwerte zu ermitteln, sind nicht nur für die Kontaktzahl, sondern auch noch zusätzlich für die Wärmeleitfähigkeit des Thermoelementisulationsmaterials ganz erheblich unterschiedliche Werte angenommen worden (siehe 4f).

Auch hier zeigt das Ergebnis in jedem Fall, daß die Abweichung des zu korrigierenden Meßwertes weniger als 1 % beträgt. Somit sind für die weitere Störeinflußanalyse auch diese nur näherungsweise bekannten Werte der Kontaktzahl und der Wärmeleitfähigkeit im betrachteten Bereich frei wählbar.

Aufgrund dieser Ergebnisse (6.1 und 6.2) werden alle weiteren Untersuchungen mit folgenden Kontaktzahlen durchgeführt:

a) für Thermoelementisolation

$$(\alpha_K)_{\text{MgO}} = 1,0 \text{ Watt}/(\text{cm}^2\text{grd})$$

$$(\alpha_K)_{\text{BN}} = 20 \text{ Watt}/(\text{cm}^2\text{grd})$$

b) für elektrische Stabisolation

$$(\alpha_K)_{\text{MgO}} = 1,0 \text{ Watt}/(\text{cm}^2\text{grd})$$

$$(\alpha_K)_{\text{BN}} = 25,0 \text{ Watt}/(\text{cm}^2\text{grd})$$

### 6.3 Charakteristische Temperaturfelder bei verschiedenen Werkstoffkombinationen

Die Abbildungen 4 bis 6 zeigen den charakteristischen Temperaturverlauf in der Stabhülle für verschiedene Werkstoffkombinationen.

Wird ein MgO-isoliertes Thermoelement mit Silberlot in die Hülle aus Edelstahl eingelötet, so erfährt der Wärmestrom im Bereich des Thermoelementes eine deutliche Richtungsänderung. (Abb. 4, der Wärmestrom verläuft senkrecht zu den eingezeichneten Isothermen). Dieses Verhalten erklärt sich aus der gegenüber dem Hüllmaterial um eine Größenordnung besseren Wärmeleitfähigkeit des Silberlotes. Im Bereich der Störstelle wird erheblich mehr Wärme an das Kühlmittel abgegeben; deshalb liegt auch hier die Oberflächentemperatur über den Werten des ungestörten Bereiches. Dies zeigt Abb. 9. Darin ist der Verlauf der Oberflächentemperatur für den Fall nach Abb. 4 aufgetragen. Die maximale Differenz der Oberflächentemperatur am Stabumfang beträgt  $8^{\circ}\text{C}$ .

Wird dagegen das MgO-isolierte Thermoelement mit Nickelot eingelötet, so erleidet das Temperaturfeld im Bereich des Thermoelementes eine geringere Störung (Abb. 5). In diesem Falle ist die Oberflächentemperatur direkt über dem Thermoelement durch den größeren Wärmewiderstand nur noch um  $3,5^{\circ}\text{C}$  niedriger als im ungestörten Bereich, wie Abb. 10 zeigt.

Ein weiterer Beitrag zur Entstörung des Temperaturfeldes in der Stabhülle im Thermoelementbereich wird durch Verwendung von BN als Thermoelementisolation erreicht /3/. Ein typisches Temperaturfeld bei Verwendung eines mit Ni-Lot eingelöteten BN-Thermoelemen-

tes zeigt Abb. 6. In diesem Fall durchdringt der Wärmestrom weitgehend ungehindert das Thermoelement, und damit ergeben sich fast konstante Oberflächentemperaturen und auch fast konstante Wärmestromdichten auf dem gesamten Stabumfang. Eine Verzerrung des Temperaturfeldes ist in Abb. 6 kaum zu erkennen. Die maximale Differenz der Oberflächentemperatur beträgt nur noch  $1^{\circ}\text{C}$ , wie aus Abb. 11 hervorgeht.

Für örtliche Temperaturmessungen - z.B. Messung der Stabumfangstemperaturen im exzentrischen Ringraum oder in Dreieckskanälen bei Bündelanordnungen durch Drehen des instrumentierten Stabes - ist das mit BN isolierte Thermoelement damit vorzüglich geeignet.

#### 6.4 Zum Parametervergleich

Der Einfluß der untersuchten Parameter (s. Punkt 4) auf das Temperaturfeld und damit auf die Meßwertkorrektur ist in den Balkendiagrammen der Abbildungen 12, 13 und 14 dargestellt.

Die Länge der einzelnen Balken bildet kein Maß für die Genauigkeit der Korrektur.

Lange Balken bedeuten, daß der Temperaturabfall in der Wand zu einer großen Meßwertkorrektur führt. Kleine Balken ergeben eine kleinere Korrektur.

#### 6.4.1 Meßwertkorrektur für verschiedene Werkstoff- kombinationen

Aus Abbildung 12 ist die Meßwertkorrektur für verschiedene Werkstoffkombinationen bei festem geometrischen Aufbau zu ersehen. Bei Verwendung von Ni-Lot ergibt sich in jedem Fall eine um ca. 70 % größere Korrektur als bei Ag-Lot. Ni-Lot und Ag-Lot führen sowohl bei verschiedener Isolation des Thermoelementes als auch des Heizstabes zu einer unterschiedlichen Meßwert-Korrektur.

Hierfür folgende Erläuterung:

Wird bei Verwendung von Ni-Lot die TE-Isolation MgO in (1)<sup>+</sup> durch BN – mit einer wesentlich besseren Wärmeleitfähigkeit und dazu noch größeren Wärmeübergangszahlen im TE – ersetzt (3), so bewirkt man damit eine Vergleichmäßigung der Wärmestromverteilung; der Wärmestrom durch das TE wird größer. Entsprechendes gilt für die Diagrammbalken (5) und (7).

Wird bei gleichbleibender Thermoelementisolation die elektrische Stabisolation MgO (1) durch BN (5) ersetzt, so gilt auch hier entsprechendes wie oben. Durch die gute Wärmeleitfähigkeit von BN wird ein besserer Temperatúrausgleich in azimuthaler Richtung im Stabinneren erreicht und damit eine Egalisierung der Wärmestromverteilung gegenüber der MgO-Isolation. Entsprechendes gilt für die Diagrammbalken (3) und (7). Ähnlich sieht es auch bei der Betrachtung von Ag-Lot aus. Für die gleiche elektrische Stabisolation und unterschiedliche TE-Isolation gelten die gleichen Zuordnungen und die gleichen Erklärungen wie für Ni-Lot.

---

<sup>+</sup>(N) bedeutet Balkennummer

6.4.2 Meßwertkorrektur bei Verwendung von Ag-Lot und ihre Variation durch Unsicherheiten in  $\lambda$ , b und t

Abbildung 13 zeigt die Variation der Meßwertkorrektur für mit Ag-Lot eingebettete Thermoelemente, hervorgerufen durch Unsicherheiten in der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  des Lotes, der Nutbreite b und der Tiefenlage t der zentrisch im Thermoelement liegenden Meßstelle.

Eine Unsicherheit in der Wärmeleitfähigkeit von 50 % bewirkt bei konstanter Einbaugeometrie für die verschiedenen Werkstoffkombinationen eine Änderung der Meßwertkorrektur um 9-12 %, Balken (7)/(8), (10)/(12) und (1)/(2).

Eine Unsicherheit in der Nutbreite von 0,03 mm (angenommene Fertigungstoleranz) führt beim Einsatz von BN-isolierten Thermoelementen zu einer Änderung der Meßwertkorrektur von 9 % bei MgO-Stäben (3)/(4) und 7 % bei BN-Stäben (9)/(10).

Nimmt man bei der Bestimmung der Tiefenlage des konzentrisch aufgebauten BN-isolierten Thermoelementes eine Unsicherheit von 0,025 mm an, so bedeutet das eine Änderung der Meßwertkorrektur von 7 % bei MgO-Stäben (4)/(5) und von 9 % bei BN-Stäben (10)/(11).

6.4.3 Meßwertkorrektur bei Verwendung von Ni-Lot und ihre Variation durch Unsicherheiten in  $\lambda$  und t

Abbildung 14 zeigt die Variation der Meßwertkorrektur für mit Ni-Lot eingebettete Thermoelemente, verursacht durch Unsicherheiten in der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  des Lotes und der Tiefenlage t der Meßstelle.

Unsicherheiten in der Nutbreite bewirken wegen der hier sehr kleinen Wärmeleitfähigkeitsunterschiede von Lot und Hüllmaterial vernachlässigbare Änderungen der Meßwertkorrektur; sie werden deshalb nicht betrachtet.

Wird ein BN-isoliertes Thermoelement in die Hülle eines BN-Stabes eingelötet, dann führt eine Unsicherheit in der Wärmeleitfähigkeit des Lotes von 5 % zu einer Änderung der Meßwertkorrektur von 1 % (5)/(6). Berücksichtigt man die Wärmeleitfähigkeit des Lotes temperaturabhängig (7), dann bedeutet das gegenüber einem dem vorliegenden Temperaturbereich entsprechenden Mittelwert der Wärmeleitfähigkeit nur eine unwesentliche Änderung der Meßwertkorrektur. Da solche als Konstante eingesetzten Mittelwerte vorher nicht bekannt sind, muß die Wärmeleitfähigkeit temperaturabhängig eingesetzt werden.

Einen entscheidenden Einfluß auf die Meßwertkorrektur hat die Tiefenlage des Thermoelementes. Nimmt man bei der Bestimmung der Tiefenlage des konzentrisch aufgebauten, BN-isolierten Thermoelementes eine Unsicherheit von 0,025 mm an, so resultiert daraus eine Änderung der Meßwertkorrektur von 11 % bei MgO-Stäben (3)/(4) und von 16 % bei BN-Stäben (6)/(7). Damit werden an die genaue Bestimmung des Meßortes bei der rein rechnerisch ermittelten Meßwertkorrektur erhebliche Anforderungen gestellt. Die mechanische Zerstörung des Stabes wäre nötig, um aus dem Schliffbild die erforderliche Abmessung der Thermoelementlage zu erhalten.

#### 6.4.4 Beispiel mit stufenweiser Änderung der Kontaktzahl zwischen Elektrode/Isolation und Isolation/Stabhülle

An mehreren Stellen ist in diesem Bericht auf die unbekannte Größe der Kontaktzahlen hingewiesen worden. In den bisher behandelten Beispielen sind konstante Werte am gesamten Umfang des betrachteten  $60^\circ$ -Sektors angenommen worden. Legt man die unter 4g) angeführten Gedanken zugrunde, so ergibt sich nach Abbildung 7:

Die stufenweise Änderung der Kontaktzahl von 1 bis 2 Watt/(cm<sup>2</sup>grd) über den betrachteten Sektor führt zu einer Abweichung des Wärmestromes im ganzen Hüllrohrausschnitt von der radialen Hauptrichtung. Die eingezeichneten Isothermen zeigen dies. Besonders deutlich wird es durch die aufgetragene Oberflächentemperatur.

An diesem Beispiel zeigt sich weiter ganz deutlich, mit welcher Unsicherheit dieses Problem der rein rechnerischen Korrektur des Meßwertes behaftet sein kann.

## 7. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Wärmeübergangsexperimente erfordern eine zuverlässige Bestimmung örtlicher Temperaturen der wärmeabgebenden Oberfläche, insbesondere bei Na-Kühlung. In der vorliegenden Arbeit wurden Temperaturfelder in der Umgebung des in eine indirekt und stationär beheizte Hüllwand eingebauten TI-Thermoelementes berechnet. Als Strömungsmodell für das Kühlmittel wurde ausschließlich mit Kolbenströmung gearbeitet.

Für verschiedene Werkstoffkombinationen wurden bei konstanter Einbaugeometrie für das vom Thermoelement angezeigte Signal Meßwertkorrekturen ermittelt, die zur Oberflächentemperatur im ungestörten Bereich führen.

Weiterhin wurden die durch Unsicherheiten in der Einbaugeometrie des Meßfühlers sowie in der Wärmeleitfähigkeit der betrachteten Lotwerkstoffe verursachten Variationen auf die Meßwertkorrektur bestimmt.

Silberlot wurde wegen seiner Verarbeitungsvorteile und seiner guten Verformbarkeit mit in die Betrachtungen aufgenommen. Die um eine Größenordnung bessere Wärmeleitfähigkeit des Silberlotes gegenüber der Stahlhülle führt bei der betrachteten Nutgeometrie zu einer beträchtlichen Störung des Temperaturfeldes und des Wärmeflusses im Bereich des Thermoelementes. Um die Silberlotmenge klein zu halten, muß die Nutform der des Thermoelementes angepaßt werden<sup>+</sup>). Die Störung des Temperaturfeldes und Wärmestromes verringert sich damit gegenüber dem betrachteten Fall, so daß die Verwendbarkeit des Silberlotes auch für örtliche Temperaturmessungen im Prinzip möglich wird.

---

<sup>+</sup>) Neu entwickelte Verfahren ermöglichen dies /7/.

Nickelbasislote bewirken in Verbindung mit MgO-Thermoelementen eine wesentlich geringere Störung des Temperaturfeldes als Silberlote, bieten von daher also bessere Voraussetzungen für die Bestimmung örtlicher Oberflächentemperaturen.

Erst durch den Einsatz von Bornitrid (BN) als Thermoelement-Isolation und in Verbindung mit Ni-Lot wird es möglich, mit dem in die Wand eingelöteten Thermoelement in einem fast ungestörten Temperaturfeld zu messen. Die nicht genau bekannten Wärmeleitfähigkeiten von Nickellot führen nur zu unwesentlichen Änderungen der Meßwertkorrektur. (Für die Hüllwand wurde die Wärmeleitfähigkeit als genau bekannt angenommen).

Für die Bestimmung von örtlichen Oberflächentemperaturen an Stabhüllen aus Edelstahl oder Nickelbasislegierungen ist die Verwendung von BN-Thermoelementen (die BN-Isolation ist nur im Bereich der Meßstelle erforderlich) und Nickellot eine wichtige Voraussetzung. Zur rechnerischen Ermittlung der Oberflächentemperatur aus dem angezeigten Meßwert ist die Kenntnis der genauen Tiefenlage der eigentlichen Meßstelle erforderlich. Eine Unsicherheit in der Tiefenlage des Thermoelementes von nur 0,025 mm bedeutet bereits eine Korrekturdifferenz von 16 %.

Für die exakte Lagebestimmung der Meßstelle in der Wand reichen Röntgenbilder nicht aus, nur Schliffbilder am zerstörten Stab ermöglichen eine genauere Ortsbestimmung.

Die bisher aufgezeigten Fehlerquellen sind in unterschiedlichem Maße zu beheben. Wenig befriedigend sind jedoch die Proberechnungen mit einer ortsabhängigen Kontaktzahl zwischen Stabisolation und Stabhülle, weil keine sinnvollen Annahmen getroffen werden können bezüglich einer Kontaktzahländerung.

Wird eine konstante Kontaktzahl angenommen und darüberhinaus symmetrische Versuchsbedingungen (d.h. konzentrischer Ringspalt für das Kühlmittel sowie für die elektrische Stabisolation und Kreisringquerschnitt der Elektroden), dann ergibt sich nach den durchgeführten Untersuchungen eine Genauigkeit für die rechnerische Meßwertkorrektur von ca.  $\pm 25\%$ .

Es wird z.Zt. geprüft, ob ein geeignetes Eichverfahren genauere Werte für die Meßwertkorrektur liefern kann.



## Literaturverzeichnis

- [1] S. Malang, K. Rust:  
Bestimmung von Temperaturfeldern mittels der  
Relaxationsmethode der Thermodynamik.  
KFK-1053, September 1969
- [2] K. Iversen:  
Hochtemperaturlöten von Reaktorbauteilen.  
Kerntechnik, Heft 4, 1971
- [3] S. Malang, K. Rust, H. Tschöke:  
The Influences of Heating Methods and Rod  
Eccentricities on the Measurements in  
Sodium Experiments.  
1971 International Seminar: 'Heat Transfer  
in Liquid Metals', Trogir/Jugoslawien, Sept. 71
- [4] V. Casal:  
Heizstäbe mit indirekter Widerstandsbeheizung  
zur Simulierung von Kernbrennstäben.  
KFK-894, März 1969
- [5] Huntington Alloy Products Division:  
Engineering Properties of Incoloy Alloy 800.  
Technical Bulletin T-40-Ausgabe 1965
- [6] A. Pee:  
Stoffdaten von Natrium.  
KFK-924, EUR 4168d, Februar 1969
- [7] Projekt Schneller Brüter  
4. Vierteljahresbericht 1971  
KFK-1271/4
- [8] S. Malang, K. Rust:  
Thermische Simulation von Brennstäben durch indirekt  
elektrisch beheizte Stäbe.  
KFK-1587, Mai 1972

## Bezeichnungen

Ag	Silber
b	Nutbreite
BN	Bornitrid
M	Meßstelle des Thermoelementes
M'	radiale Lage der Meßisotherme im ungestörten Bereich
MgO	Magnesiumoxid
Na	Natrium
Ni	Nickel
O	Staboberflächenpunkt über dem Thermoelement in der Symmetrieachse
O'	Staboberflächenpunkt im ungestörten Bereich
q''	Leistung pro Flächeneinheit [W/cm <sup>2</sup> ]
q'''	Leistung pro Volumeneinheit [W/cm <sup>3</sup> ]
t	Tiefenlage der Meßstelle [mm]
T	Temperatur [°C]
TE	Thermoelement
TI	Thermoelement mit isolierter Meßstelle
TM	Meßstelle mit TE-Mantel verschweißt
T <sub>M</sub>	Meßwert des Thermoelementes
T <sub>Na</sub>	mittlere Natriumtemperatur
T <sub>O'</sub>	Staboberflächentemperatur im Punkt O'
ΔT <sub>K</sub>	mittlerer Temperaturabfall im Kühlmittel
ΔT <sub>W</sub>	Temperaturdifferenz zwischen Meßwert T <sub>M</sub> und Oberfläche in O'
Z	Stabmittelpunkt
α <sub>K</sub>	Kontaktzahl [W/(cm <sup>2</sup> grd)]
λ	Wärmeleitfähigkeit [W/(cm grd)]
φ	Winkel [Grad]

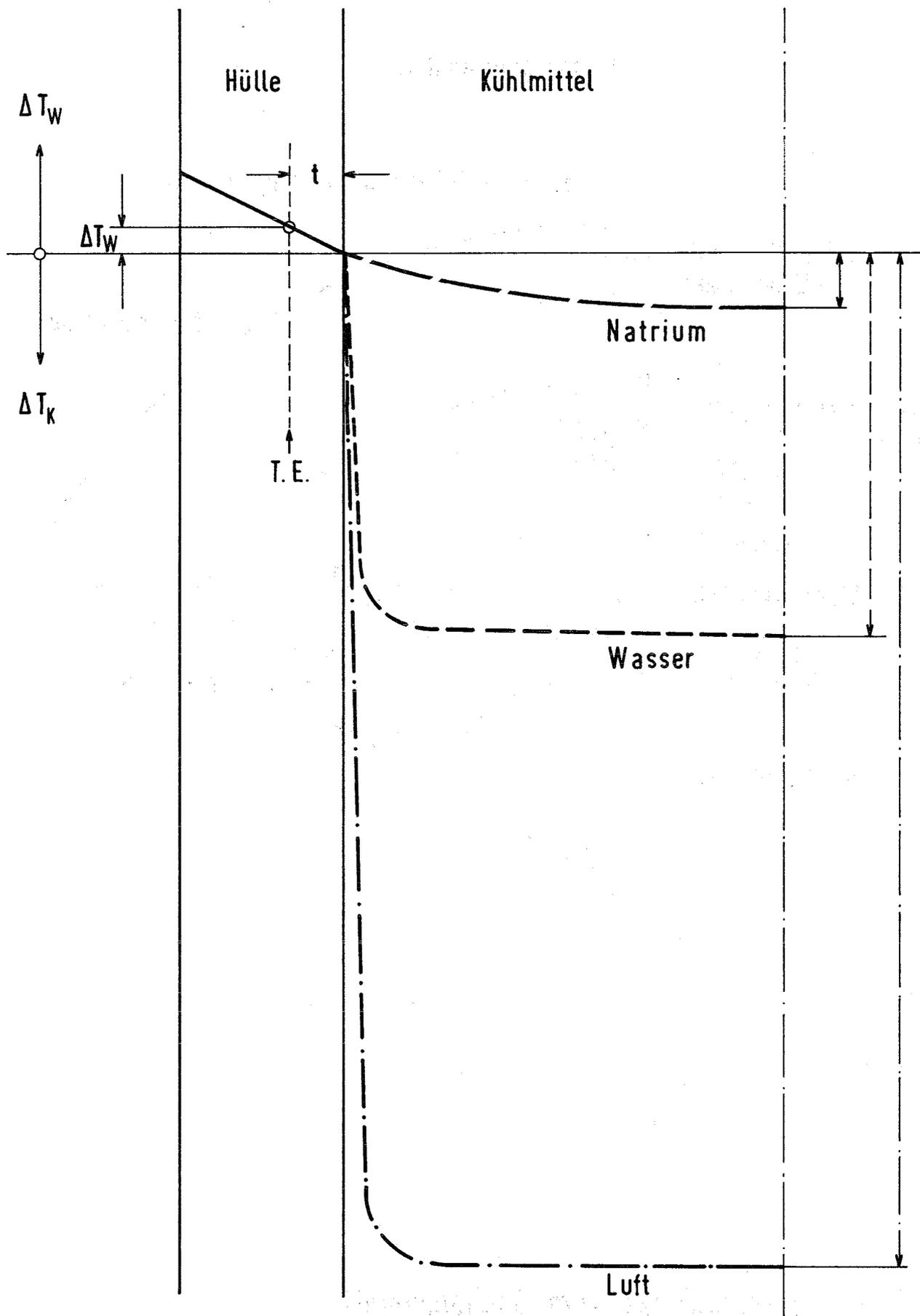


Abb.1 Schematischer Vergleich des Temperaturverlaufes in der Stabhülle und im Kühlkanal für die Kühlmittel Natrium, Wasser und Luft

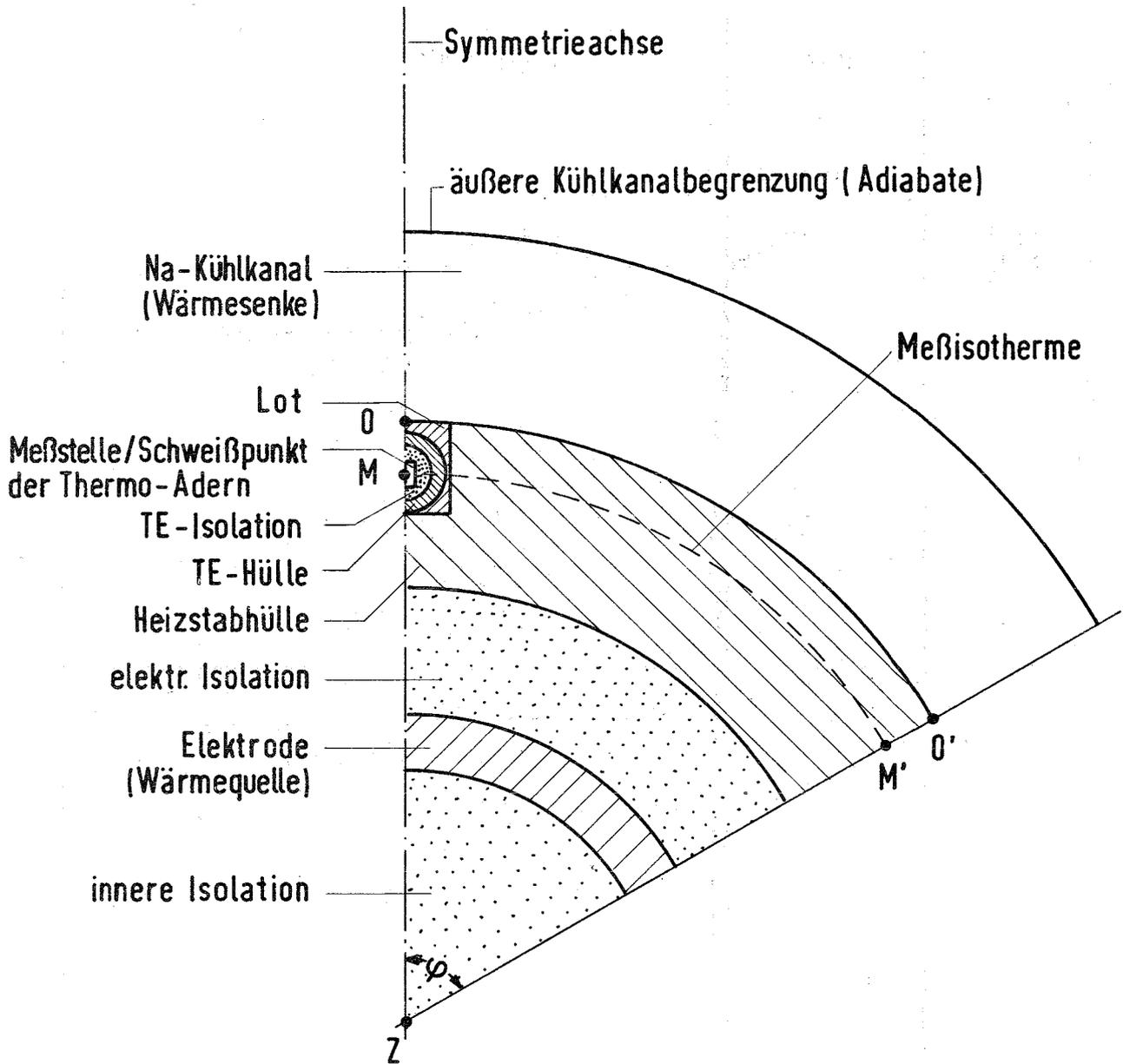
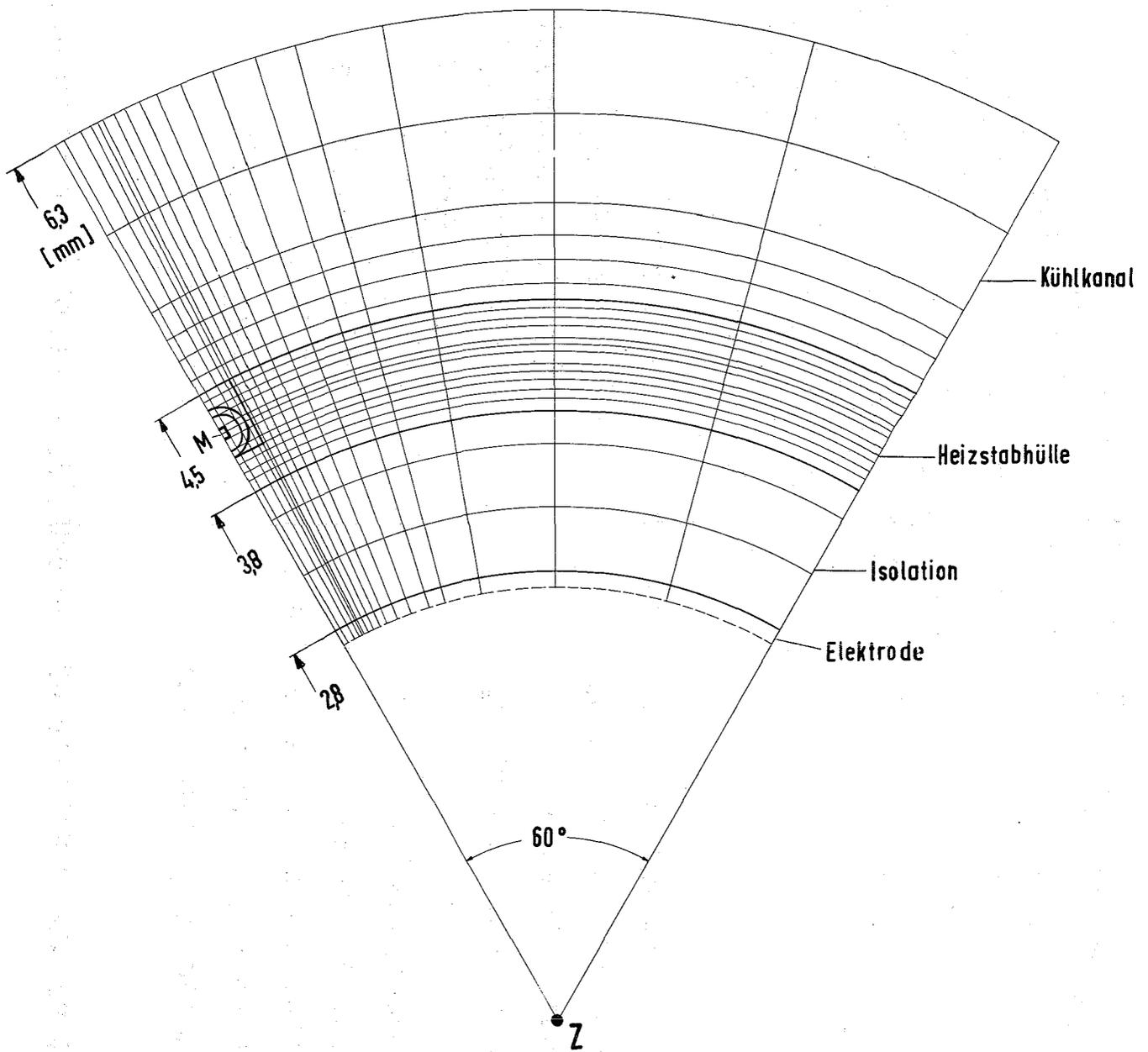
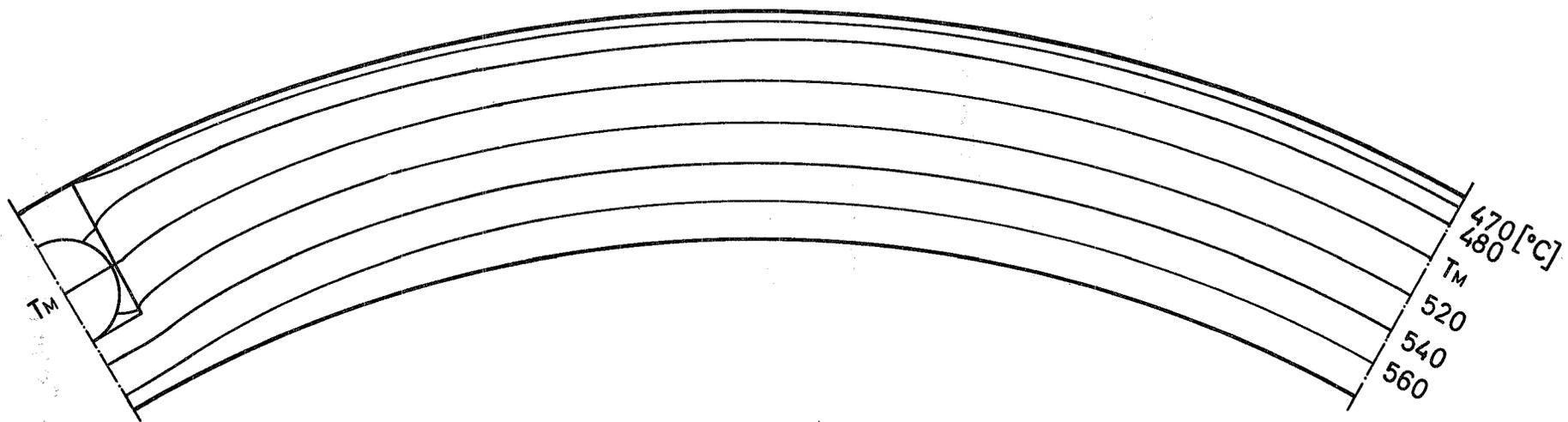


Abb. 2 Prinzipskizze zum Rechenmodell



TE - Durchmesser	0,35 mm
TE - Hüllwandstärke	0,05 mm
TE - Meßperle □	0,08 mm

Abb.3 Netzwerk zur Berechnung des Temperaturprofils



mittlere Wärmestromdichte an der Oberfläche	300 Watt / cm <sup>2</sup>
Wärmeleitfähigkeit von Silberlot	$\lambda_{Ag} = 2$ Watt / (cm grd)
elektr. Isolation BN	$\lambda_{BN} = 0,24$ Watt / (cm grd)
Thermoelement - Isolation MgO	$\lambda_{MgO} = 0,03$ Watt / (cm grd)
Kontaktzahl im TE	$(\alpha_k)_{MgO} = 1$ Watt / (cm <sup>2</sup> grd)
Kontaktzahl zw. elektr. Isolation und Elektrode bzw. Hülle	$(\alpha_k)_{BN} = 25$ Watt / (cm <sup>2</sup> grd)
engster Lotspalt zw. TE und Nutflanke	0,01 mm
Wärmeleitfähigkeit der Hülle	$\lambda$ von Incoloy 800
Wärmeleitfähigkeit von Natrium	nach / 6 /

Abb. 4 Temperaturfeld bei Verwendung von Ag - Lot und MgO - Isolation im Thermoelement



mittlere Wärmestromdichte an der Oberfläche

300 Watt/cm<sup>2</sup>

Wärmeleitfähigkeit von Ni-Lot

$\lambda$  wie Incoloy 800

elektr. Isolation BN

$\lambda_{BN} = 0,24$  Watt/(cm grad)

Thermoelement-Isolation MgO

$\lambda_{MgO} = 0,03$  Watt/(cm grad)

Kontaktzahl im TE

$(\alpha_K)_{MgO} = 1$  Watt/(cm<sup>2</sup> grad)

Kontaktzahl zw. elektr. Isolation

und Elektrode bzw. Hülle

$(\alpha_K)_{BN} = 25$  Watt/(cm<sup>2</sup> grad)

engster Lotspalt zw. TE und Nutflanke

0,01 mm

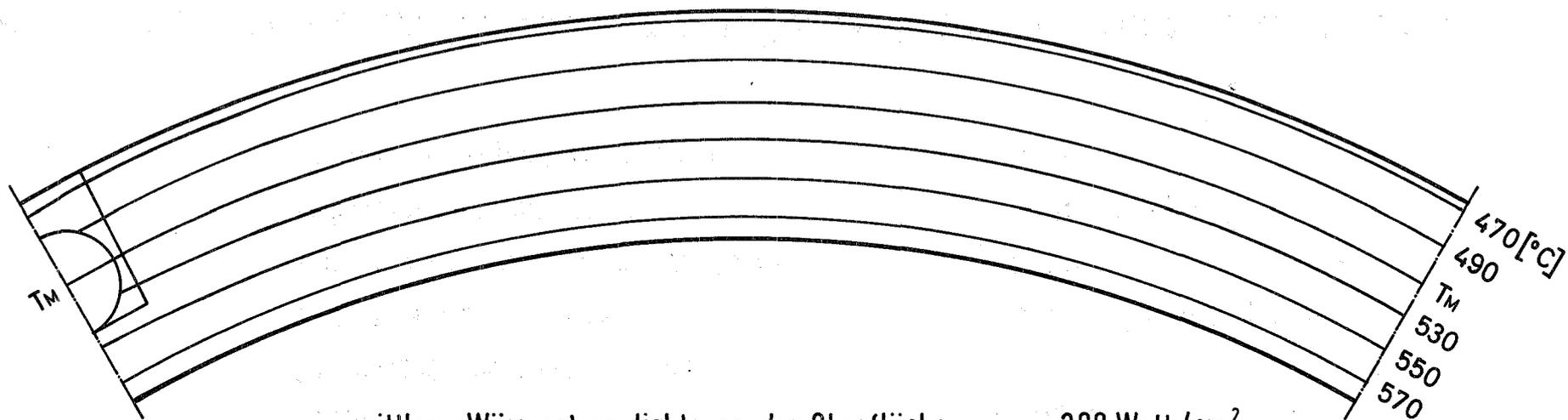
Wärmeleitfähigkeit der Hülle

$\lambda$  von Incoloy 800

Wärmeleitfähigkeit von Natrium

nach /6/

Abb. 5 Temperaturfeld bei Verwendung von Ni-Lot und MgO-Isolation im Thermoelement.



mittlere Wärmestromdichte an der Oberfläche

Wärmeleitfähigkeit von Ni-Lot

elektr. Isolation BN

Thermoelement - Isolation BN

Kontaktzahl in TE

Kontaktzahl zw. elektr. Isolation und

Elektrode bzw. Hülle

engster Lotspalt zw. TE und Nutflanke

Wärmeleitfähigkeit der Hülle

Wärmeleitfähigkeit von Natrium

300 Watt/cm<sup>2</sup>

$\lambda$  wie Incoloy 800

$\lambda_{BN} = 0,24$  Watt / (cm grad)

$\lambda_{BN} = 0,24$  Watt / (cm grad)

$(\alpha_k)_{BN} = 20$  Watt / (cm<sup>2</sup> grad)

$(\alpha_k)_{BN} = 25$  Watt / (cm<sup>2</sup> grad)

0,01 mm

$\lambda$  von Incoloy 800

nach / 6 /

Abb.6 Temperaturfeld bei Verwendung von Ni-Lot und BN - Isolation im Thermoelement

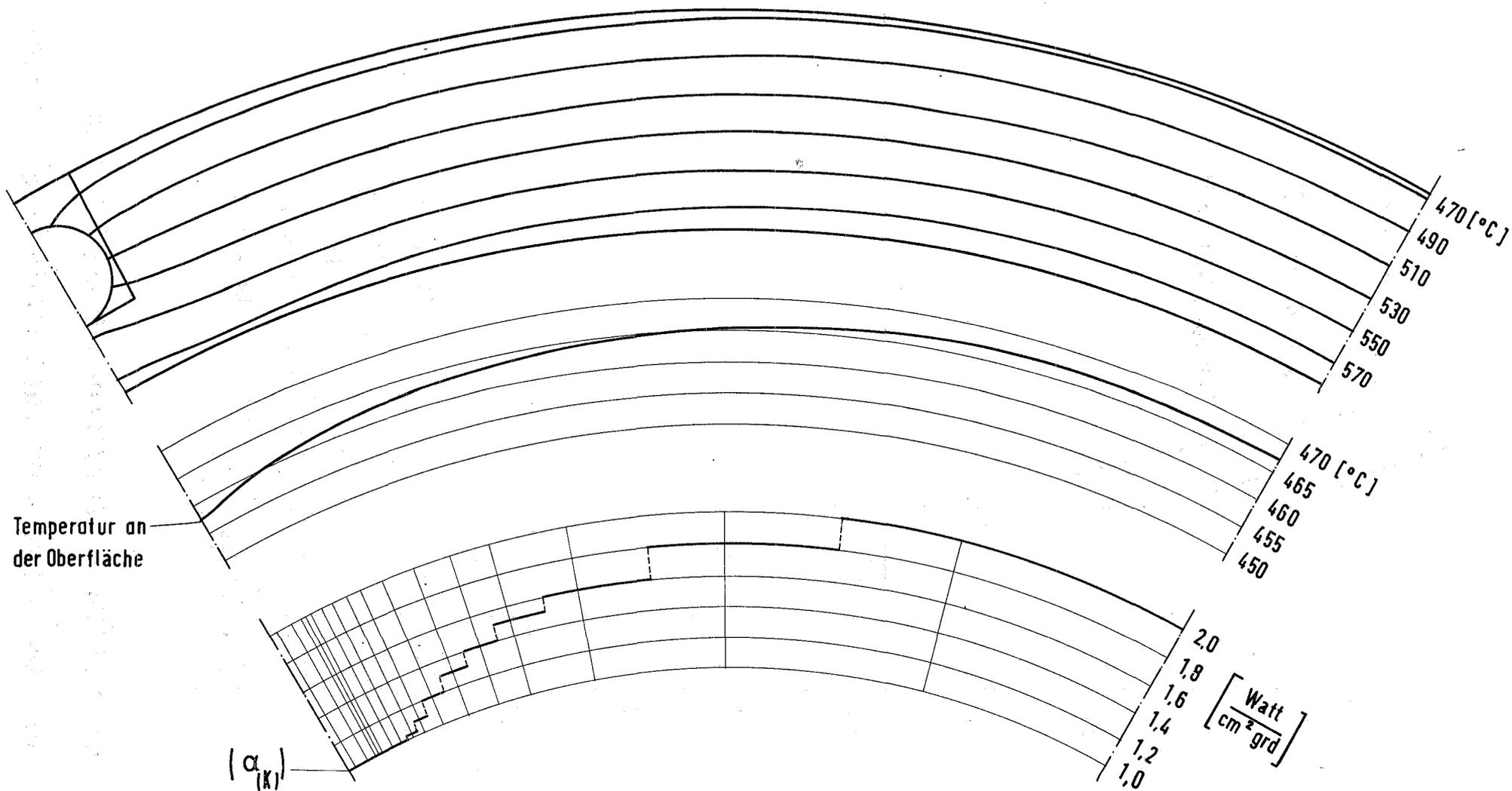


Abb. 7 Temperaturfeld bei Verwendung von Ni-Lot und MgO-Isolation im Thermoelement sowie ortsabhängigen Kontaktzahlen der elektrischen Stabisolation MgO

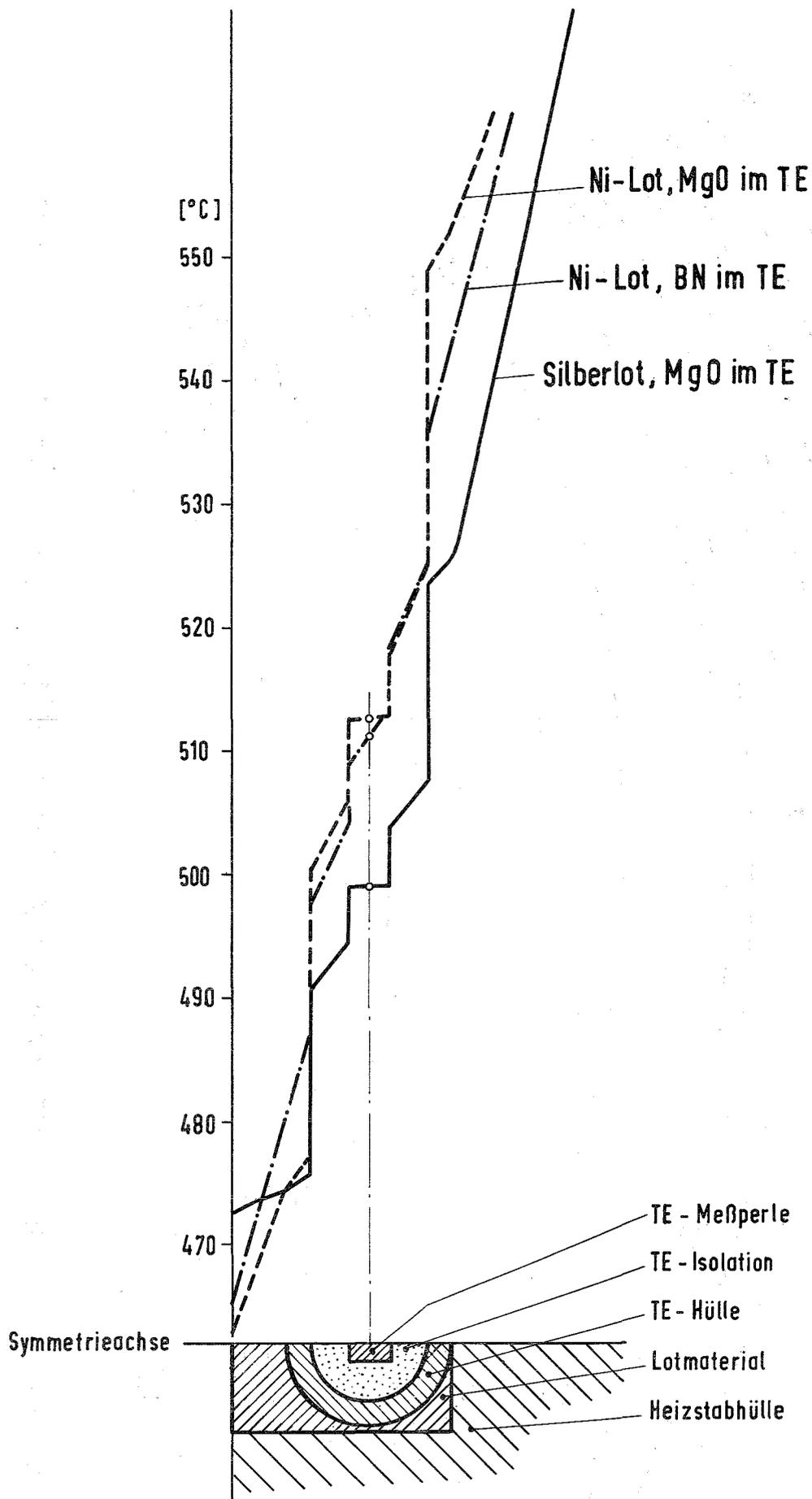


Abb. 8 Temperaturverlauf in der Symmetrieachse durch das Thermoelement für verschiedene Werkstoffkombinationen.

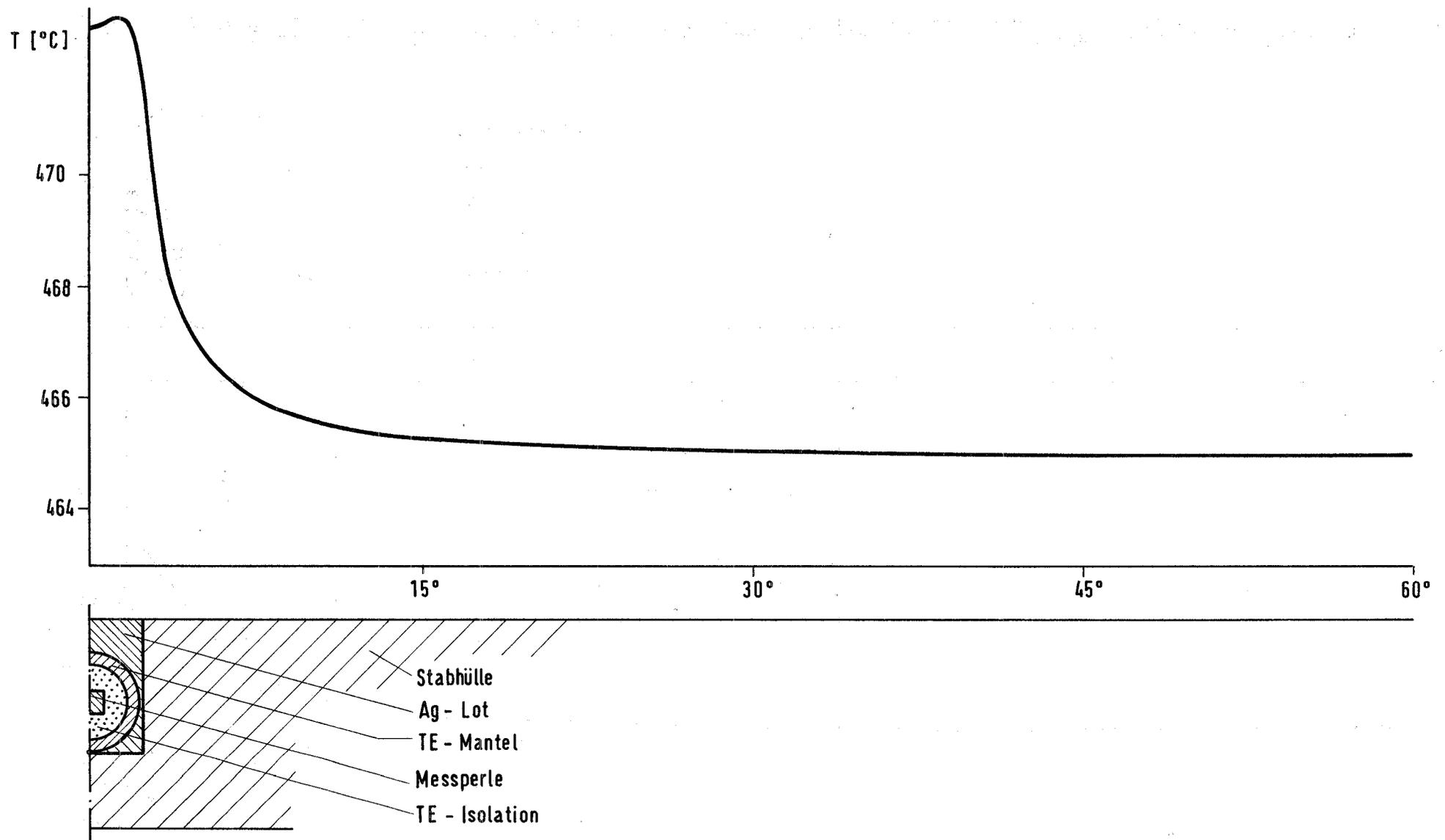


Abb. 9 Verlauf der Oberflächentemperatur bei Verwendung von Ag-Lot und MgO-Isolation im Thermoelement

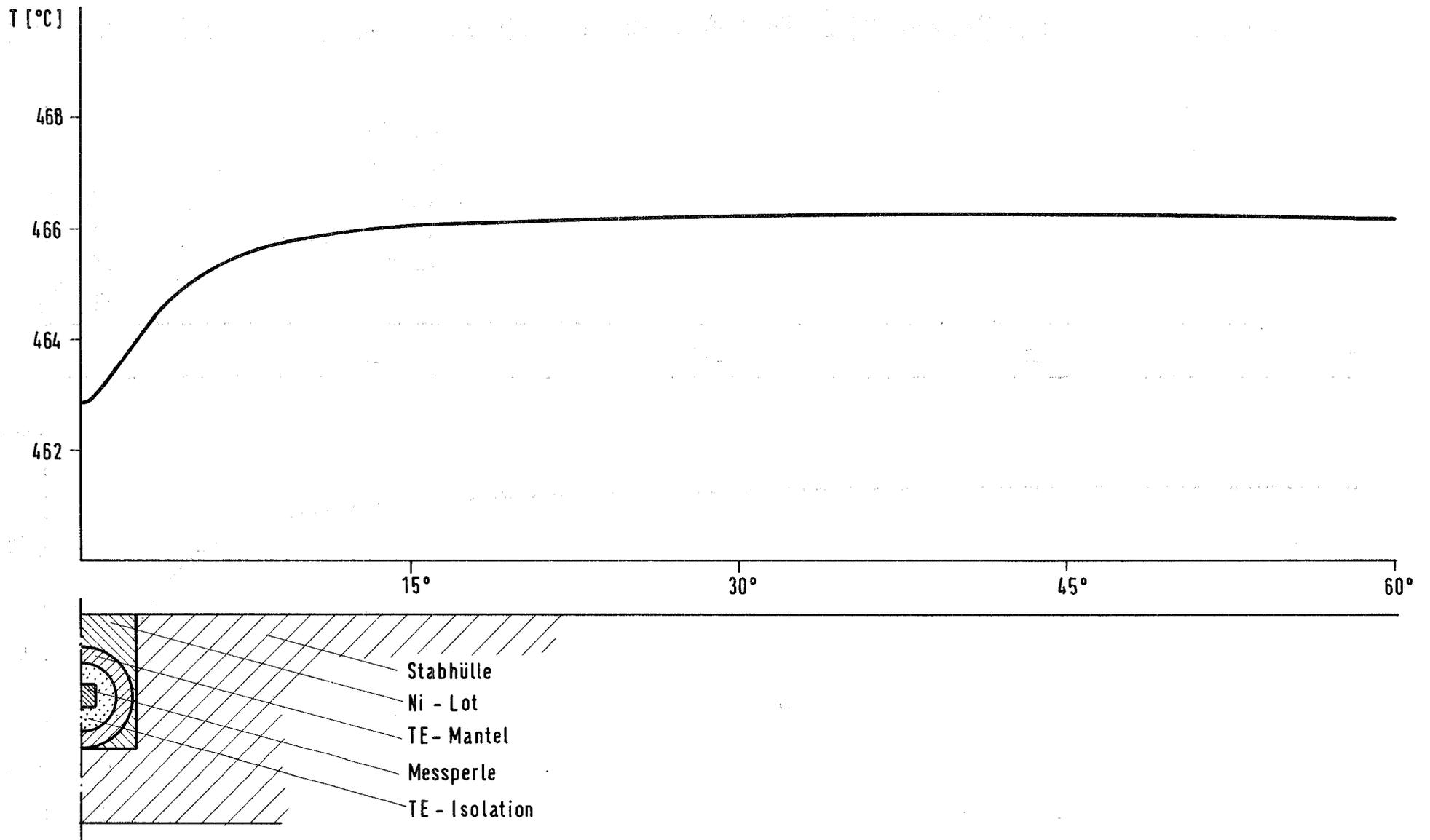


Abb.10 Verlauf der Oberflächentemperatur bei Verwendung von Ni-Lot und MgO-Isolation im Thermoelement

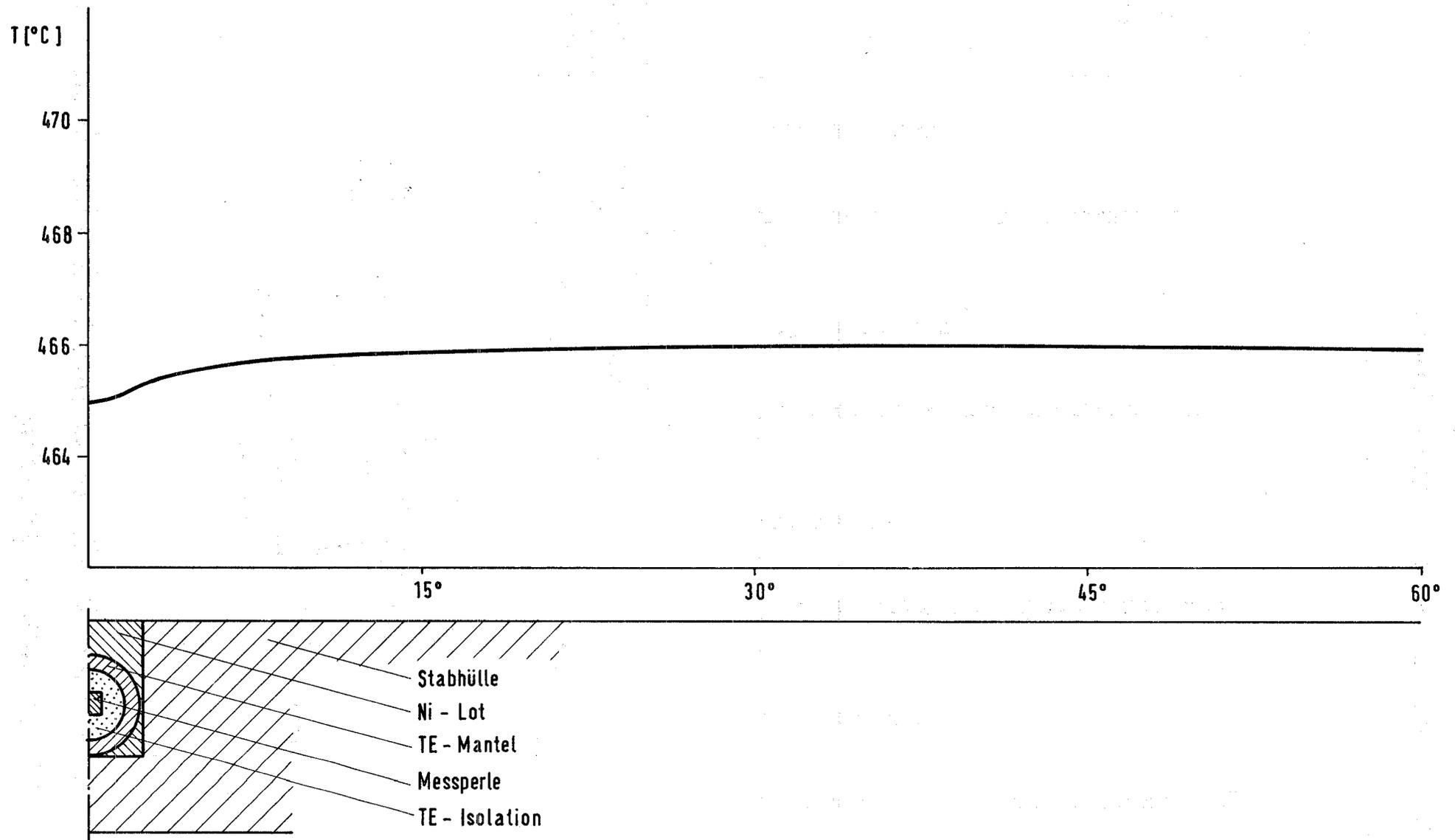
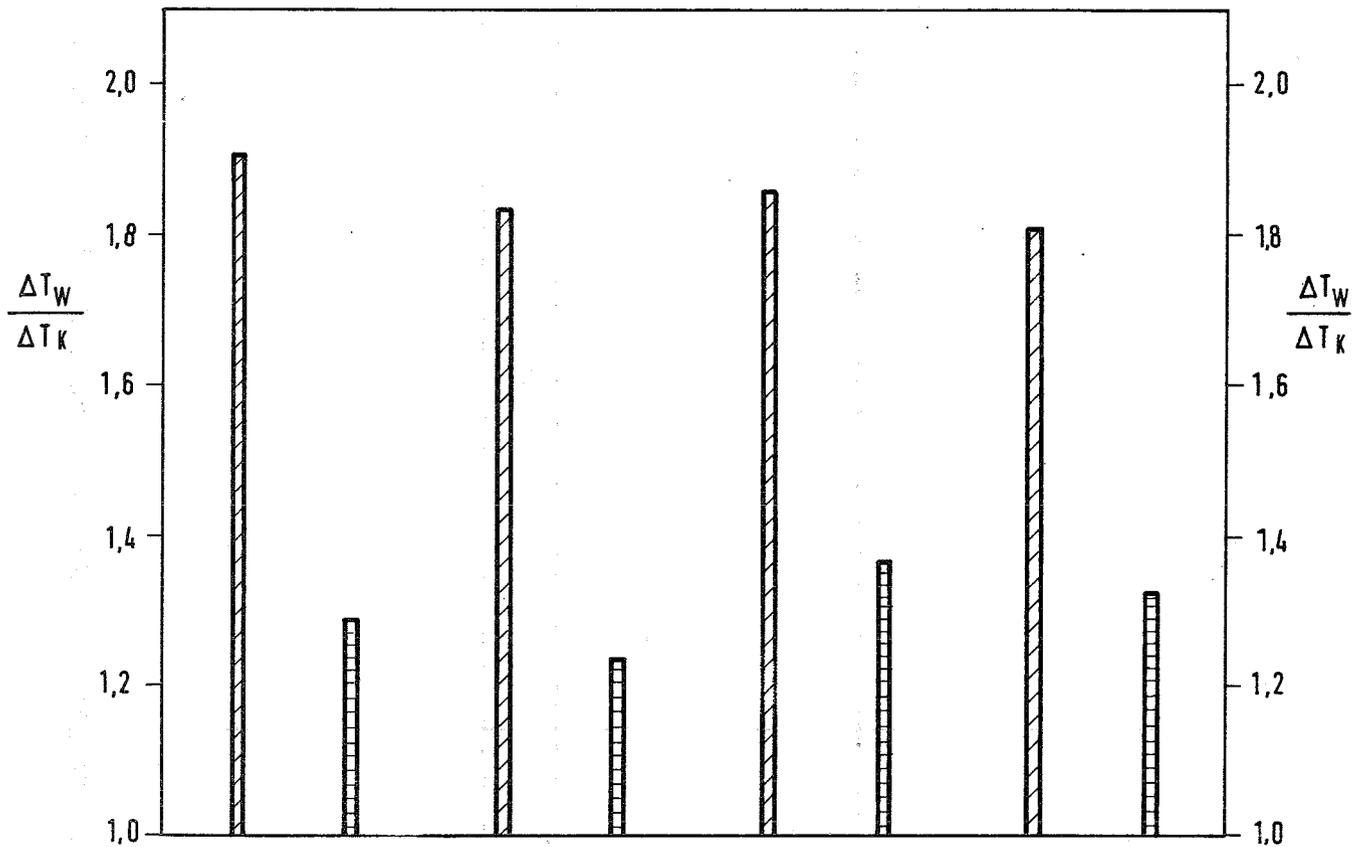


Abb.11 Verlauf der Oberflächentemperatur bei Verwendung von Ni-Lot und BN -Isolation im Thermoelement

$\Delta T_W$  = Temperaturdifferenz zwischen Meßstelle und Oberfläche

$\Delta T_K$  = mittlerer Temperaturabfall im Kühlmittel



Ni	Ag	Ni	Ag	Ni	Ag	Ni	Ag	Lot
MgO		BN		MgO		BN		TE-Isolation
MgO				BN				elektr.-Isolat.

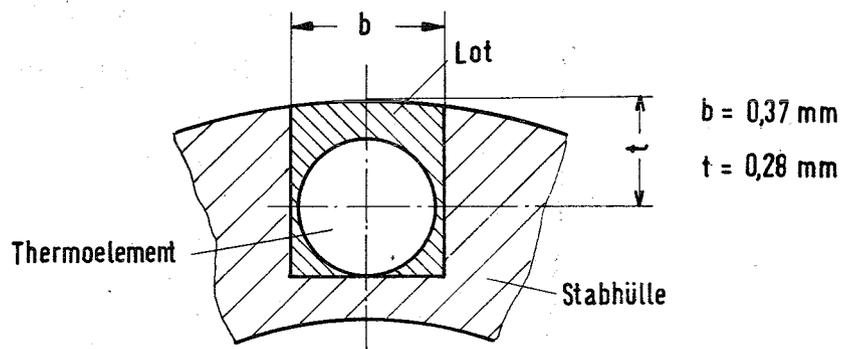
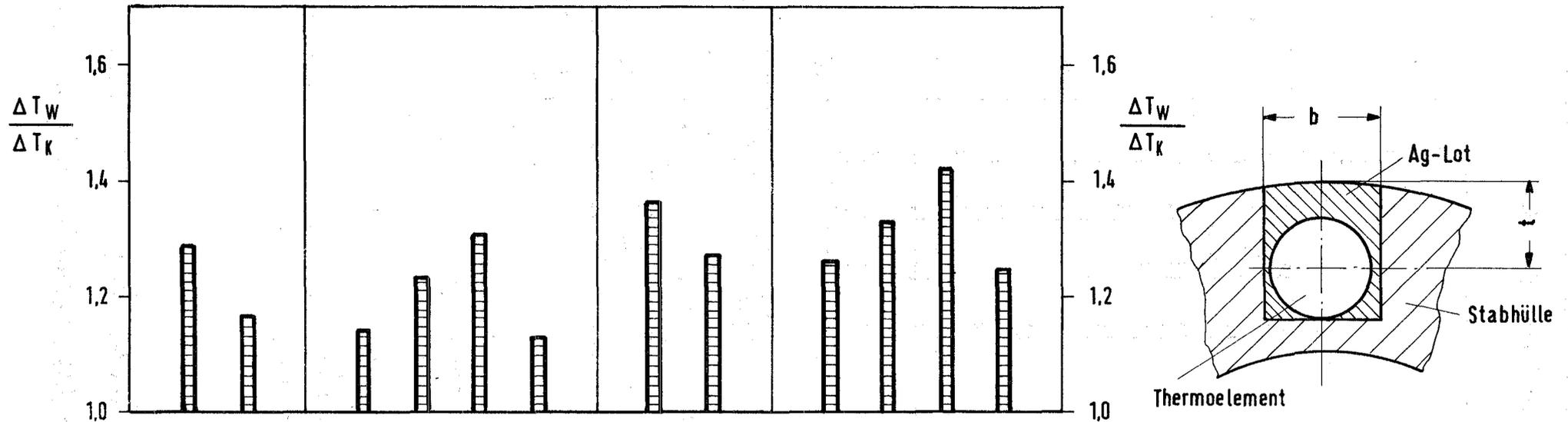


Abb.12 Meßwertkorrektur bei verschiedenen Werkstoffkombinationen und konstanter Nutgeometrie

$\Delta T_W$  = Temperaturdifferenz zwischen Meßwert und Oberfläche

$\Delta T_K$  = mittlerer Temperaturabfall im Kühlmittel

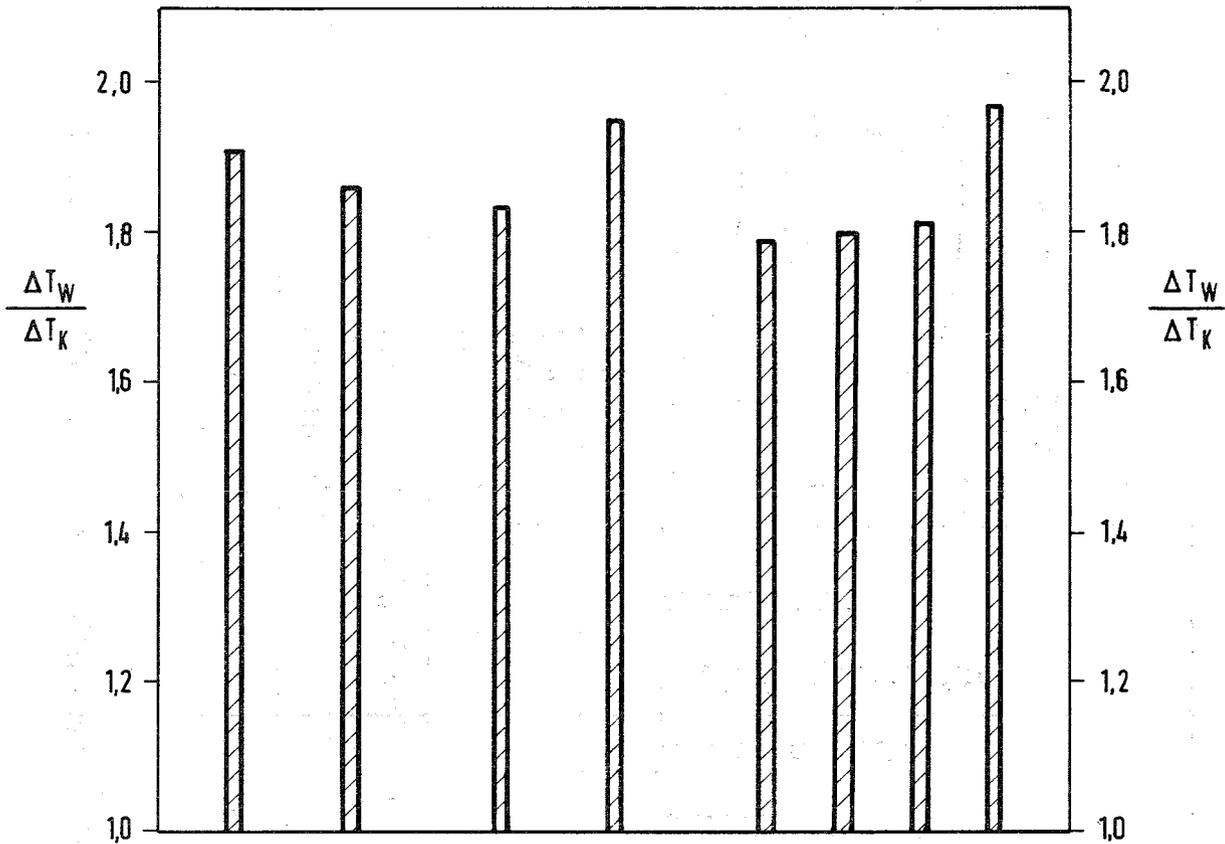


2	3	2		3	2	3	2		3	$\lambda_{Lot} \left[ \frac{\text{Watt}}{\text{cm grad}} \right]$
0,37		0,4	0,37		0,37		0,4	0,37		b [mm]
0,28		0,28	0,305	0,28	0,28		0,28	0,305	0,28	t [mm]
MgO		BN			MgO		BN			TE-Isolation
MgO					BN					elektr. Isolation

Abb.13 Meßwertkorrektur bei Verwendung von Ag-Lot (Ihre Variation durch Unsicherheiten in  $\lambda$ , b und t)

$\Delta T_w$  = Temperaturdifferenz zwischen Meßwert und Oberfläche

$\Delta T_k$  = mittlerer Temperaturabfall im Kühlmittel



$\lambda(T)^*$		$\lambda(T)^*$		0,21	0,20	$\lambda(T)^*$	$\lambda_{Lot} \left[ \frac{\text{Watt}}{\text{cm grad}} \right]$
0,28	0,28	0,305		0,28		0,305	t [mm]
MgO		BN		BN			TE-Isolation
MgO	BN	MgO		BN			elektr. Isolation

\*  $\lambda$  temperaturabhängig eingesetzt

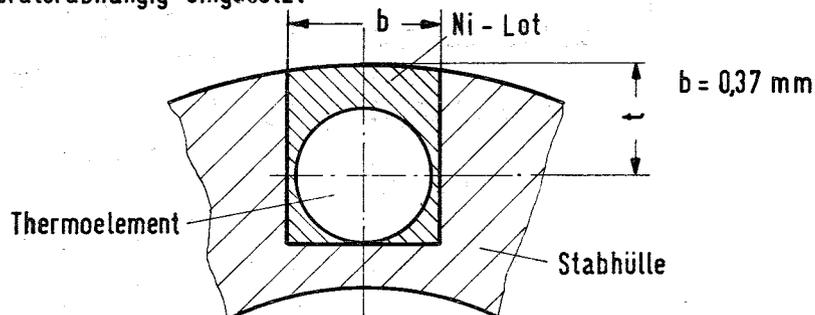
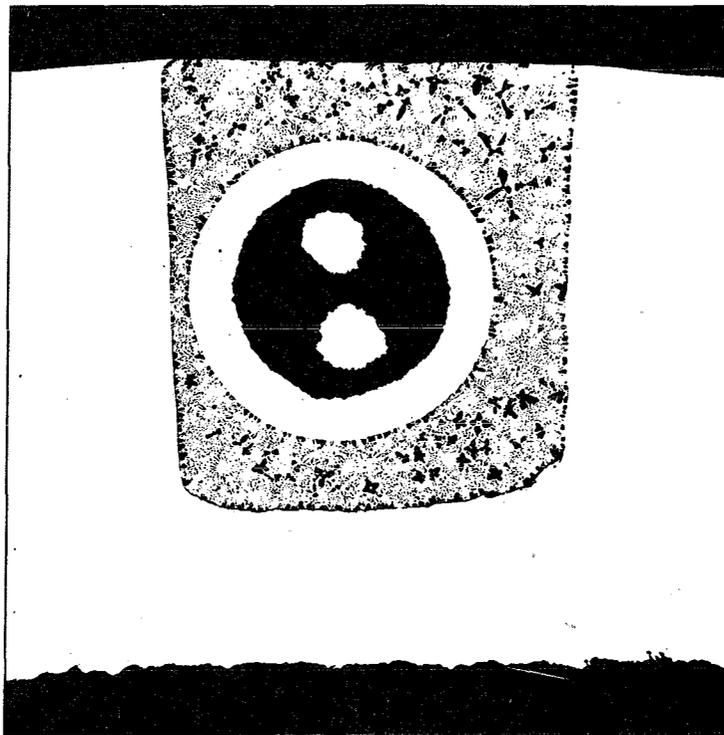
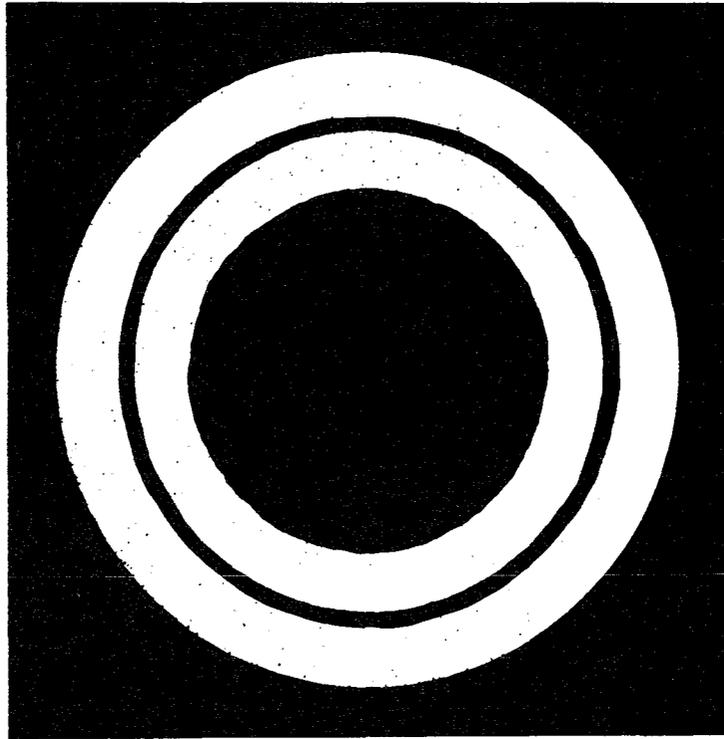


Abb.14 Meßwertkorrektur bei Verwendung von Ni - Lot  
(Ihre Variation durch Unsicherheiten in  $\lambda$  und t)



**Abb. 15** Querschnitt eines BN - Stabes und Hüllwandausschnitt mit  
in Ag - Lot eingebettetem Thermoelement

