

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM  
KARLSRUHE**

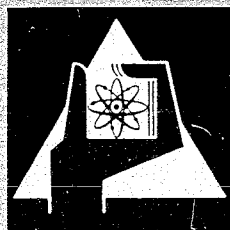
März 1969

KFK 894

Institut für Reaktorbauelemente

Heizstäbe mit indirekter Widerstandsbeheizung zur  
Simulierung von Kernbrennstäben

V. Casal



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.  
KARLSRUHE



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Maerz 1969

KFK 894

Institut fuer Reaktorbauelemente

Heizstaebe mit indirekter Widerstandsbeheizung zur  
Simulierung von Kernbrennstaeben

---

V. Casal

GESELLSCHAFT FUER KERNFORSCHUNG MBH., KARLSRUHE

1920

---

1921

## Inhalt

Thermodynamische Untersuchungen an Brennelementen  
Schneller Brutreaktoren setzen beheizbare Stäbe voraus.  
Hierfür wurden hochbelastete, indirekt beheizte Heizelemente entwickelt, instrumentiert und erprobt. Sie besitzen die Abmessungen der Brennstäbe Schneller Brutreaktoren und weisen mindestens die Reaktor-Stableistungen bei den geforderten maximalen Hüllrohrtemperaturen auf.

Damit werden erstmals Versuche zum Wärmeübergangs- und Korrosionsverhalten an Brennelementen für die zur Diskussion stehenden Kühlmedien Schneller Brutreaktoren, wie Natrium, Heißdampf und Helium bei realistischen Betriebsbedingungen möglich.

---

Zu Beginn dieser Arbeit über die Entwicklung von Heizstäben mit Magnesiumoxyd-Isolation und ihre Instrumentierung war Herr B.Sc. Ralph Waggott beteiligt. Die Herren Graf, Hartmann, Möhle und Politzky führten die schwierigen Versuchsarbeiten aus.

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einführung	1
2. Heizstäbe mit indirekter Beheizung	2
2.1 Versuchsbedingte Anforderungen	2
2.2 Diskussion des Isolators	2
2.2.1 Auswahl geeigneter Isolierwerkstoffe	2
2.2.2 Wahl der Isolatorstruktur- Massivkörper oder verdichtetes Pulver	3
2.2.3 Wärmeleitfähigkeit von verdichtetem MgO- Pulver	4
2.2.4 Elektrischer Widerstand	5
2.3 Ausführung und Erprobung der Heizstäbe	6
2.3.1 Aufbau der Heizstäbe	
2.3.2 Belastbarkeit der Heizstäbe	7
2.3.3 Thermischer Kontakt zwischen Isolator Innen- und Außenrohr	9
2.3.3.1 Bedeutung des Kontaktes für die Heizstäbe	9
2.3.3.2 Experimentelle Ermittlung der Kontaktzahlen	10
2.3.4 Zeitliches Verhalten der verwendeten Isolationsmaterialien	10
2.4 Instrumentierung der Heizstäbe	11
Zusammenfassung	14

## Heizstäbe mit indirekter Widerstandsbeheizung zur Simulierung von Kernbrennstäben

---

### 1. Einführung

Zur Simulierung von Reaktor-Brennelementen in Form von Stabbündeln werden den Brennstäben geometrisch entsprechende Heizelemente benötigt. Diese sollen möglichst die Leistungsdichte der Kernbrennstäbe erreichen.

Die Wärmeerzeugung erfolgt in der Regel durch elektrische Widerstandsheizung, die auf zwei Arten durchgeführt werden kann:

- Beheizung der Brennstabhülle (direkte Beheizung);
- Beheizung eines gegen das Aussenrohr elektrisch isolierten Stromleiters im Innern des Heizelementes (indirekte Beheizung).

Indirekte Beheizung, die im folgenden Beitrag ausschliesslich behandelt wird, erlaubt eine besonders einfache Simulation von Reaktor-brennstäben auch bei kompliziertem geometrischem Aufbau des Bündels, hohen Kühlmitteltemperaturen und Flüssigmetallkühlung.

Die Probleme dieses Heizstabtyps liegen im Wärmedurchgang vom Stromleiter im Innern bis zur Heizstabhülle, in der elektrischen Isolation zwischen Stromleiter und Hülle und in der Standzeit bei hohen Betriebstemperaturen.

Von den im Folgenden besprochenen 2 Heizleitertypen wird der niedriger belastbare Typ (MgO-Isolation) als Halbzeug bezogen und weiter verarbeitet, der zweite dagegen (BN-Isolation) ganz in eigener Fertigung hergestellt.

## 2. Heizstäbe mit indirekter Beheizung

### 2.1 Versuchsbedingte Anforderungen

Elektrische Heizstäbe ersetzen für Versuche die Kernbrennstäbe des Reaktors. Sie sollen diese in ihrem strömungstechnischen und thermodynamischen Verhalten simulieren. Deshalb und aus Gründen der Versuchsdurchführung müssen sie die folgenden Forderungen erfüllen:

- Herstellbarkeit in den gewünschten Abmessungen: Länge ca. 1 - 2 m, Durchmesser ca. 5 - 12 mm,
- genügend hohe Leistungsdichte über die geforderte Versuchszeit,
- genügende und zeitlich konstante elektrische Isolation der Heizstäbe,
- chemische Beständigkeit gegenüber dem Kühlmittel,
- Einbaumöglichkeit für Thermoelemente in die Heizstabhülle,
- Anpassung des elektrischen Widerstandes an verfügbare Stromquellen,
- stark reduzierter Wärmefluss in den Enden der Heizstäbe.

### 2.2 Diskussion des Isolators

#### 2.2.1 Auswahl geeigneter Isolierwerkstoffe

Die Belastbarkeit von Heizstäben wird bei vorgegebener Hüllentemperatur durch die maximal zulässige Leitertemperatur



im Innern des Heizstabes begrenzt. Deshalb erfordert hohe Leistungsdichte einen Isolator mit guter Wärmeleitfähigkeit bei gleichzeitig grossem elektrischem Widerstand und hoher Temperaturbeständigkeit. Die Forderungen nach hoher thermischer und niedriger elektrischer Leitfähigkeit stehen sich diametral gegenüber.

Abb. 1 zeigt die Wärmeleitfähigkeit einiger keramischer Stoffe als Funktion der Temperatur bei 100 % der theoretischen Dichte. Sie vermindert sich im interessierenden Bereich mit ansteigender Temperatur. BeO, dessen Leitfähigkeit etwa der von Aluminium entspricht, findet für Heizstäbe wegen seiner Giftigkeit keine Verwendung.

#### 2.2.2 Wahl der Isolatorstruktur - Massivkörper oder verdichtetes Pulver

Im Interesse einer hohen Wärmeleitfähigkeit soll der Isolator seiner theoretischen Dichte möglichst nahe kommen (siehe 2.4). Wegen ihrer grossen Härte sind ausser BN keine der verbleibenden Isolierstoffe (Abb. 1) bearbeitbar.

Diese Keramiken müssen deshalb als Pulver mit stark verminderter Leitfähigkeit verwendet werden. MgO-Pulver kann dank seiner körnigen Struktur, die ein gutes Fließvermögen ergibt, leicht kalt verdichtet werden. Es ist deshalb der am häufigsten verwendete Isolierstoff für Heizstäbe. Heissgepresstes Bornitrid lässt sich dagegen sehr leicht spanabhebend bearbeiten, was die Herstellung von Isolierkörpern für Heizstäbe erlaubt. Kaltverdichten

scheidet aus wegen des hexagonalen Kristallgitters des BN, das ein schlechtes Fließvermögen bewirkt. Der erreichbare Dichtegrad würde keine genügende Wärmeleitung ergeben.

Im Folgenden werden Heizstäbe mit BN- und MgO-Isolation näher besprochen.

### 2.2.3 Wärmeleitfähigkeit von verdichtetem MgO-Pulver

In der bereits diskutierten Abb. 1 ist die Wärmeleitfähigkeit verschiedener Keramiken als Funktion der Temperatur dargestellt. Da MgO in Form von verdichtetem Pulver verwendet wird, interessiert dessen Leitfähigkeit zusätzlich als Funktion der Dichte.

Wie Abb. 2 zeigt, beeinflusst der Grad der theoretischen Dichte die Wärmeleitfähigkeit in hohem Masse. Darüber hinaus hängt die Wärmeleitfähigkeit ab von:

- der Wärmeleitfähigkeit des Gases in den verbleibenden Hohlräumen;
- der Anordnung der Festkörper (Abb. 3 zeigt die Wärmeleitfähigkeit der Grenzfälle Parallelschaltung und Reihenschaltung der Festkörper zum Wärmefluss sowie die Wärmeleitfähigkeit des verdichteten MgO-Pulvers in Abhängigkeit vom Grad der theoretischen Dichte);
- der Intensität des thermischen Kontaktes zwischen den einzelnen Festkörperpartikeln. (Die Intensität ist eine Funktion der Kontaktfläche, die ihrerseits von der Anpresskraft, der Rauigkeit und Härte der Körper sowie von der Kornfraktion abhängt);

- dem Temperaturgradienten im Pulver, da der Strahlungsaustausch zwischen den Partikeln den Wärmetransport fördert;
- dem Temperaturniveau bei gegebenem Temperaturgradienten, weil der Strahlungsaustausch zwischen benachbarten Partikeln mit steigendem Temperaturniveau wächst.

#### 2.2.4 Elektrischer Widerstand

Abb. 4 stellt den elektrischen Widerstand von heissgepresstem BN und von MgO-Pulver mit 87 % der theoretischen Dichte nach eigenen Messungen dar.

Die Messungen wurden an Heizstäben durchgeführt. Es zeigte sich, dass Heizstäbe mit BN-Isolation bei konstanter Temperatur sehr unterschiedliche spezifische Isolationswerte aufweisen. Die hohen Werte haben wahrscheinlich ihre Ursache in Zunderschichten der angrenzenden Metalle. Sie wurden an Heizstabproben ermittelt, die bereits hohen Temperaturen ausgesetzt waren. Das Diagramm zeigt eine starke Temperaturabhängigkeit der elektrischen Isolation. Sie vermindert sich bei MgO von 200 nach 800 °C etwa um den Faktor  $10^3$ , bei BN etwa um den Faktor  $10^5$ .

Aus den Stoffwerten erkennt man die günstigen Eigenschaften des BN für Heizstäbe. Seine Wärmeleitfähigkeit entspricht der austenitischen Stahls, seine elektrische Isolation liegt bei den interessierenden Temperaturen im Bereich keramischer Stoffe.

## 2.3 Ausführung und Erprobung der Heizstäbe

### 2.3.1 Aufbau der Heizstäbe

Hohe Stabileistungen erfordern dünne elektrische Isolierschichten guter Wärmeleitfähigkeit, grosse Grenzflächen zwischen Leiter- Isolator und Isolator-Hülle mit gutem thermischen Kontakt und Leitermaterialien hoher Temperaturbeständigkeit.

Diese Forderungen führen zu Heizleitern bestehend aus:

- 2 konzentrischen gegeneinander mit Keramik isolierten Rohren, von denen das innere vom Strom durchflossen wird,
- einer Keramik, (z.B. MgO) im Mittelteil des Innenrohres zur Abstützung desselben,
- Bolzen aus gut leitendem Material, vorzugsweise Kupfer, in den Enden des Stromleiters zur Reduktion der Wärmeentwicklung.

Abb. 5 zeigt diese Heizleiter im Längs- und Querschnitt. Die MgO-isolierten Heizstäbe enthalten den Isolator als verdichtetes Pulver, das bei 7 mm Stabdurchmesser etwa 87 % der theoretischen Dichte besitzt.

Die Heizstäbe mit BN-Isolation enthalten das BN in Form von spanabhebend bearbeiteten Hül- sen, das MgO im Stromleiter als verdichtetes Pulver. Die Kupferbolzen in den Enden der Heiz- stäbe sind in den Röntgenaufnahmen der Abb. 5 als dunkle Schatten zu erkennen.

Bei den Heizelementen bestehen Stromleiter und Heizstabhülle aus hochwarmfestem Stahl.

Der Einsatz von hochschmelzenden Metallen für den Stromleiter ist wegen der bereits sehr hohen Heizleistung nicht erforderlich. Sie würden den Aufbau und Betrieb des Heizelementes wegen ihres ungünstigen mechanischen und chemischen Verhaltens erschweren [4, 5].

### 2.3.2 Belastbarkeit der Heizstäbe

Abb. 6 zeigt die zulässige Oberflächenbelastung der besprochenen Heizstäbe und die elektrische Isolation gegen die Hülle als Funktion der Hüllentemperatur; für BN-Heizstäbe ist zusätzlich der Einfluss verschiedener Isolierschichtstärken zu ersehen. Die maximal zulässige Zentraltemperatur MgO-isolierter Heizstäbe liegt bei 1150 °C. Für BN-isolierte Stäbe wurde die Grenze bisher willkürlich bei 1000 °C gewählt, da die erreichten Heizflächenbelastungen längere Versuche bei höheren Zentraltemperaturen erübrigten. Eine Erhöhung der Temperatur auf 1150 °C erscheint jedoch möglich. Dadurch würden die in Abb. 6 angegebenen Heizflächenbelastungen bei 200 °C Oberflächentemperatur um 20 % und bei 700 °C etwa um 50 % steigen, die angegebenen Isolationswerte gegen die Hülle gleichzeitig abnehmen.

Abb. 7 zeigt die im Versuch erreichten Heizflächenbelastungen für beide Heizstabtypen; sie liegen teilweise erheblich über den in Abb. 6 angegebenen Werten.

Die zulässige Belastbarkeit sinkt mit wachsender Hüllentemperatur, weil sich das treibende Temperaturgefälle wegen der konstanten

Leitertemperatur vermindert. Die zulässigen Oberflächenbelastungen der MgO-Heizstäbe erreichen nicht ganz die Leistungsdichte der Brennstäbe Schneller Brutreaktoren ( $150 \text{ W/cm}^2$  bei  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  Oberflächentemperatur gegenüber ca.  $200 \text{ W/cm}^2$  beim Schnellen Brüter); BN-Heizstäbe übertreffen dagegen die zur Zeit vorgesehene Leistungsdichte Schneller Brutreaktoren bei weitem ( $330 - 450 \text{ W/cm}^2$  bei  $0,6 - 0,3 \text{ mm}$  Isolierschichtstärke und  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  Hüllentemperatur). Die elektrische Isolation vermindert sich mit steigender Oberflächentemperatur. Für BN-Heizstäbe dürfte bei ca.  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  Hüllentemperatur eine Grenze für den Einsatz wegen zu geringer Isolation liegen.

Reduziert man jedoch die Heizflächenbelastung bei gegebener Hüllentemperatur, so steigt der Isolationswiderstand erheblich an (Abb. 8), weil gleichzeitig die mittlere Isolationstemperatur sinkt, was nach Abb. 4 den spezifischen Isolationswiderstand stark erhöht.

Wie Abb. 8 weiter zeigt, vergrössern dickere Isolierschichten bei konstanter Hüllentemperatur und Leistung nur relativ wenig den Isolationswiderstand der Heizstäbe. Infolge der starken Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes wird der grösste Teil der Isolation von den äusseren, d.h. den kälteren, Schichten des Isolators erbracht.

Mit zunehmendem Stabdurchmesser sinkt die Oberflächenbelastbarkeit der MgO-isolierten Heizstäbe wegen der aus fertigungstechnischen Gründen gleichzeitig wachsenden Isolierschichtstärke. Die Stableistung (Leistung je Längeneinheit) bleibt dabei etwa konstant. Bei BN-Heizstäben können dagegen

auch bei größerem Stabdurchmesser die dünnen Isolationsschichtstärken beibehalten werden. Dies ergibt vom Stabdurchmesser unabhängige Heizstab-Oberflächenbelastungen.

### 2.3.3 Thermischer Kontakt zwischen Isolator, Innen- und Außenrohr

#### 2.3.3.1 Die Bedeutung des Kontaktes für die Heizstäbe

Hohe Stabileistungen der Heizstäbe bei mäßigen Zentraltemperaturen von 1000 - 1200° C, die den Einsatz warmfesten Stahles oder Nickelbasislegierungen gestatten, erfordern außer gut leitendem Isolationsmaterial einen ausgezeichneten thermischen Kontakt zwischen dem Isolator und dem angrenzenden Innen- und Außenrohr. Hohe Kontaktzahlen setzen große Flächenpressung und möglichst glatte Grenzflächen voraus. Bei Heizkabeln werden hohe Kontaktzahlen durch Kaltverformen unter Durchmesserreduktion erreicht. Während dieses Vorganges verzahnt sich das körnige MgO mit dem Metall. BN besitzt wegen seines hexagonalen Kristallgitters ausgezeichnete Gleiteigenschaften an Grenzflächen. Dies bewirkt beim Kaltverformen ein Ausfüllen der Unebenheiten an den Grenzflächen, so daß im fertigen Heizstab ein sehr großer Anteil der Anpressfläche trägt, was extrem hohe Kontaktzahlen ergibt.

### 2.3.3.2 Experimentelle Ermittlung der Kontaktzahlen

Die Bestimmung von Kontaktzahlen unter Last ist in der Regel wegen des kleinen Temperatursprunges an der Kontaktstelle schwierig. Über die Güte des Kontaktes der hier besprochenen MgO-isolierten Heizstäbe kann keine Aussage gemacht werden, weil die Leitfähigkeit des MgO sehr stark von der Dichte abhängt ( Abb. 3 ) und diese nicht genau genug erfassbar ist.

Versuche an BN-Heizstäben mit Belastungen bis zu  $1000 \text{ W/cm}^2$  ergaben Temperaturdifferenzen zwischen Stromleiter und Hülle, die auf Kontaktzahlen von  $\alpha_K > 20 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$  schliessen lassen.

Geringste Abweichungen von der verwendeten Leitfähigkeit und der ermittelten Geometrie des Heizstabes verändern diese Werte zwar erheblich. Die Kontaktzahlen sind jedoch so gross, dass sie auf die zulässige Heizstabelleistung keinen nennenswerten Einfluss mehr ausüben. Es erübrigt sich deshalb, diese genau zu erfassen.

### 2.3.4 Zeitliches Verhalten der verwendeten Isolationsmaterialien

Dauerversuche an Heizstäben mit MgO als Isolierschicht ergaben bei hohen konstanten Betriebstemperaturen und Gleichstrombeheizung eine zeitlich nachlassende, bei Wechselstrombeheizung eine zeitunabhängige Isolation. BN dagegen zeigte bei hohen Betriebstemperaturen ein Anwachsen der Isolation



mit der Zeit. Letzteres hat vermutlich seine Ursache in einem Verzundern der an das BN angrenzenden Metalloberflächen. Das Nachlassen des elektrischen Widerstandes des MgO bei Gleichstrombetrieb könnte in einer physikalischen oder chemischen Veränderung des Isolators begründet sein.

Abb. 9 gibt an, in welchem Bereich sich die Isolationswerte der untersuchten Proben änderten.

#### 2.4 Instrumentierung der Heizstäbe

Bei der Simulierung von Reaktorbrandstäben interessieren in der Regel deren Oberflächentemperaturen. Zu ihrer Ermittlung werden Thermoelemente verwendet, weil sie eine räumlich sehr begrenzte Mess-Stelle besitzen. Um Störstellen in der Strömung zu vermeiden, müssen die Thermoelemente völlig in die Oberfläche eingelassen werden. Die geforderten hohen Heizflächenbelastungen bewirken einen starken Temperaturgradienten in der Hülle des Heizstabes. Bei einem Aussendurchmesser der Mantelthermoelemente von 0,25 oder 0,5 mm liegt die Mess-Stelle mindestens 0,125 bzw. 0,25 mm unter der Staboberfläche; legt man für Incoloy 800 als Hüllenwerkstoff eine Heizflächenbelastung von  $200 \text{ W/cm}^2$  bei  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  Staboberflächentemperatur zugrunde, so ergibt sich ein minimaler Temperaturabfall von der Mess-Stelle bis zur Oberfläche von 13 bzw. 26  $^\circ\text{C}$ . Eine Störung des Temperaturprofils in der Hülle durch das Thermoelement selbst ist bei dieser überschläglichen Rechnung nicht berücksichtigt.

Im Folgenden werden einige bereits erprobte Einbaumöglichkeiten für Thermoelemente in keramisch isolierte Heizstäbe beschrieben.

- 1.) In einen mit Längsnuten versehenen Heizstab werden Mantelthermoelemente eingelötet (Abb. 10). Nach mechanischer Überarbeitung der Lötstelle besitzt der Heizstab wieder seine ursprüngliche Oberfläche. Auf diese Art ist es möglich, die Mess-Stellen dicht unter die Staboberfläche zu legen, was den Temperaturabfall unter Last von der Mess-Stelle bis zur Oberfläche auf ein Minimum (siehe oben) beschränkt. Der Aufwand für eine befriedigende Lötung der Thermoelemente ist jedoch gross.
  
- 2.) - In Längsnuten der Heizstäbe werden Mantelthermoelemente eingelegt und ihre Mess-Stellen mit diesen verlötet. Darüber wird ein dünnwandiges Rohr, gegebenenfalls auch ein Rippenrohr, unter Reduktion seines Durchmessers aufgezogen (Abb. 11). Die Brauchbarkeit der Lösung hängt von der Güte des thermischen Kontaktes zwischen Heizelement und äusserem Rohr ab. Ein schlechter Kontakt reduziert die zulässige Leistung der Heizstäbe und verursacht unter Last einen grossen Temperaturabfall zwischen Mess-Stelle und Oberfläche. Der Temperatursprung von der Mess-Stelle bis zur Oberfläche bei einer Oberflächenbelastung von  $200 \text{ W/cm}^2$ , einer Wanddicke des äusseren Rohres von  $0,5 \text{ mm}$  und einer Kontaktzahl von  $2,4 \text{ W/cm}^2 \text{ }^\circ\text{C}$  beträgt  $160 \text{ }^\circ\text{C}$ .
  
- Der Temperatursprung an der Kontaktstelle zwischen innerem und äusserem Rohr lässt sich durch Verlöten beider Teile über die gesamte Länge völlig abbauen. Abb. 12 zeigt ein solches Heizelement im Querschliff. Der Temperaturabfall von einem Thermoelement

zwischen den beiden Rohren bis zur Heizstaboberfläche vermindert sich dann bei  $200 \text{ W/cm}^2$  von  $160 \text{ }^\circ\text{C}$  auf  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Die zweite Möglichkeit des Einbaues von Thermoelementen in Heizstäbe hat gegenüber der ersten den Vorteil der einfacheren Fertigung, weil aufwendige Lötarbeit weitgehend entfällt.

- 3.) Die Thermoelemente befinden sich unmittelbar unter dem Hüllrohr des Heizstabes in der Isolierschicht. Abb. 13 zeigt ein solches Element, wobei als Heizstabhülle ein Rippenrohr und als Isolator Bornitrid verwendet wurde. Um den Temperatursprung an der Kontaktstelle zwischen Thermoelement und Hülle zu vermeiden, können die Thermoelemente an der Mess-Stelle mit der Hülle verlötet werden. Der Temperaturabfall von der Mess-Stelle bis zur Oberfläche würde dann bei  $200 \text{ W/cm}^2$  etwa  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  betragen.

## Zusammenfassung

Die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Heizleiter wurden experimentell in Luft-, Wasser- und Heißdampfströmungen erprobt. Aus diesen Untersuchungen geht hervor, daß die MgO-isolierten Stäbe bei Oberflächentemperaturen von  $700^{\circ}\text{C}$  Stabileistungen von  $300\text{ W/cm}$  erreichen. Diese kann durch BN-isolierte Stäbe bei gleicher Temperatur auf rund  $900\text{ W/cm}$  gesteigert werden, ein Wert, der die maximale Stabileistung selbst des fortschrittlichsten Brüter-Brennelementes bei weitem übertrifft.

Die Heizelemente sind in allen interessierenden Durchmessern und Längen mit berippten und unberippten Hüllrohren herstell- und instrumentierbar. Ihre Erprobung im strömenden Natrium wird zur Zeit durchgeführt.

## Nomenklatur

$d_{Ha}$ [mm]	Aussendurchmesser des Hüllrohres
$d_{Hi}$ [mm]	Innendurchmesser des Hüllrohres
$h$ [h]	Zeit
$n$ [ $W/cm^2$ ]	Heizflächenbelastung
$r$ [ $M\Omega \cdot cm$ ]	spez. Isolationswiderstand
$R$ [ $\Omega/m$ ]	Isolationswiderstand je m Stablänge
$s$ [mm]	Isolationsschichtstärken
$t_{HA}$ [ $^{\circ}C$ ]	Temperatur der Heizstaboberfläche
$t_{Hi}$ [ $^{\circ}C$ ]	Temperatur des Heizstabes an der Innenseite des Hüllrohres
$t_{zentr.}$ [ $^{\circ}C$ ]	Zentraltemperatur des Heizstabes
$\alpha$ [./.]	volumetrischer Isolatoranteil
$\alpha$ [ $W/cm^2 \cdot ^{\circ}C$ ]	thermische Kontaktzahl
$\rho$ [%]	Dichte eines verdichteten Pulvers bezogen auf seine theoretische Dichte

## Literaturverzeichnis

- [1] W.D.Kingery, McQuarrie  
Thermal Conductivity-Concept of Measurement  
and Factors Affecting Thermal Conductivity  
of Ceramic Materials.  
Journal American Ceramic Soc. 1954 Bd. 37  
H 2/II S. 67 - 100.
- [2] M. v. Kiss  
Messung und theoretische Bestimmung der Wärme-  
leitfähigkeit von gut leitenden Pulvern.  
Würenlingen: Bericht d. Eidgen. Inst. f. Reaktor-  
forschung Nr. 46 1963.
- [3] Krischer, Kroll  
Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungs-  
technik.  
Springer 1963, Berlin, Göttingen, Heidelberg
- [4] R.L. McKisson, E.L. Babbe  
High Heat Flux Heater Development, Status Report  
AJ-AEC-12681 Juni 1968
- [5] Jr. P.H.J. de Wringer, M.W. Brieko  
RCN  
persönliche Mitteilung.
- [6] Bornitrid, Bornitrid-Sinterkörper  
Elektroschmelzwerk Kempten G.m.b.H., 8 München
- [7] Mitteilung der Firma Union Carbide Europa  
S.A. Genf

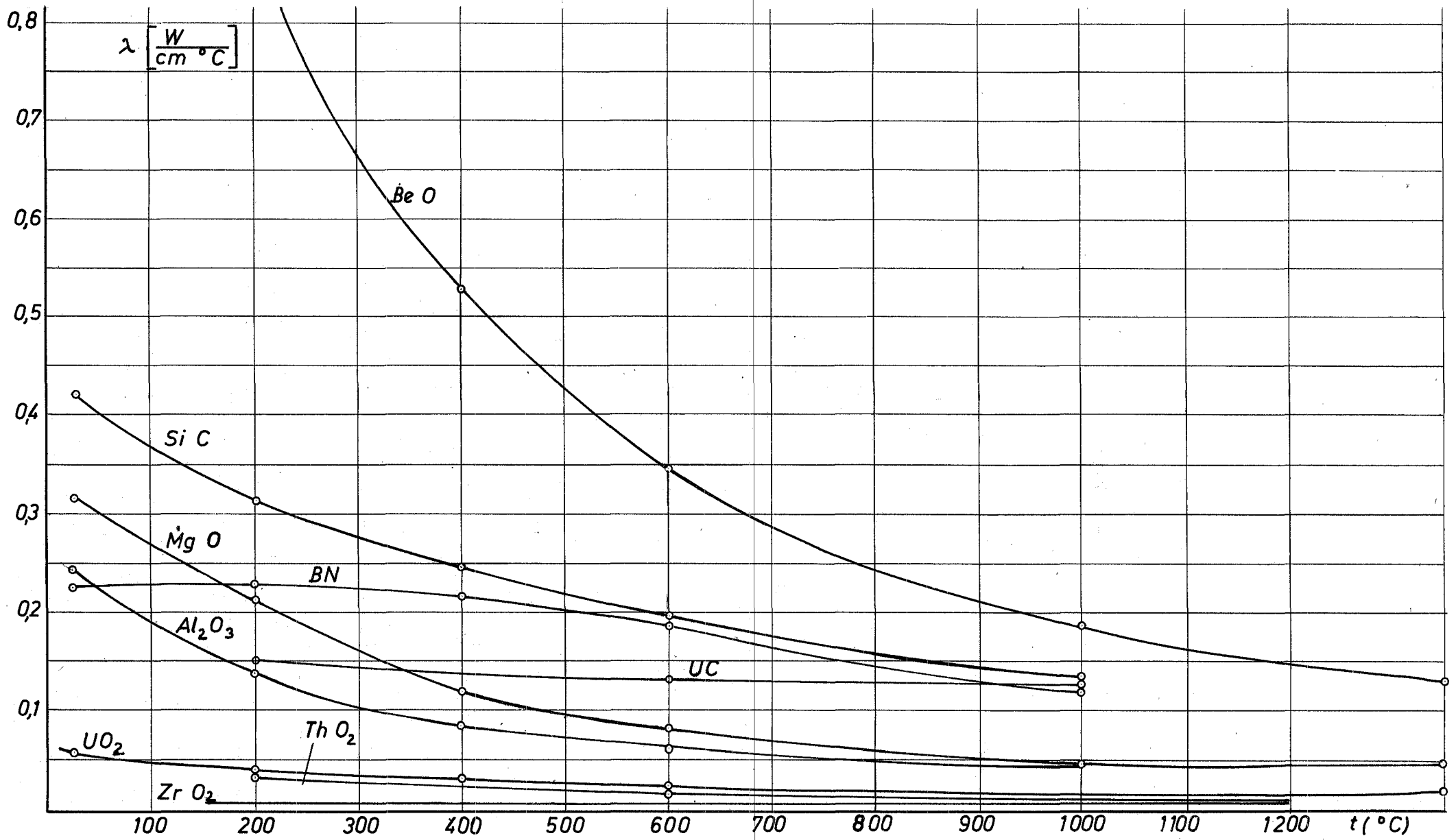


Abb. 1 Wärmeleitfähigkeit verschiedener Keramiken als Funktion der Temperatur nach [1] [2] u.[7]

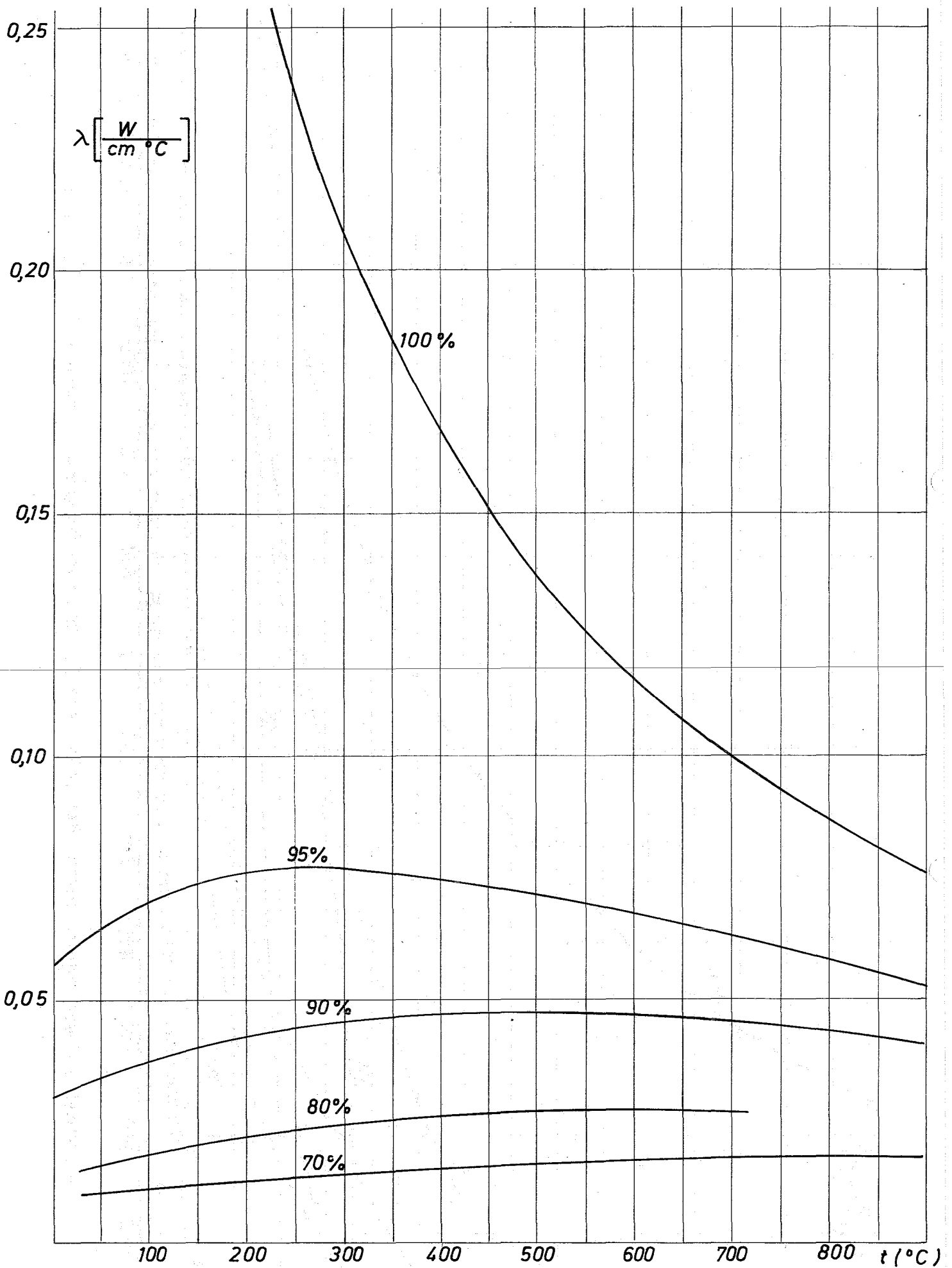


Abb.2 Wärmeleitfähigkeit von verdichtetem MgO-Pulver als Funktion der Temperatur nach [3]



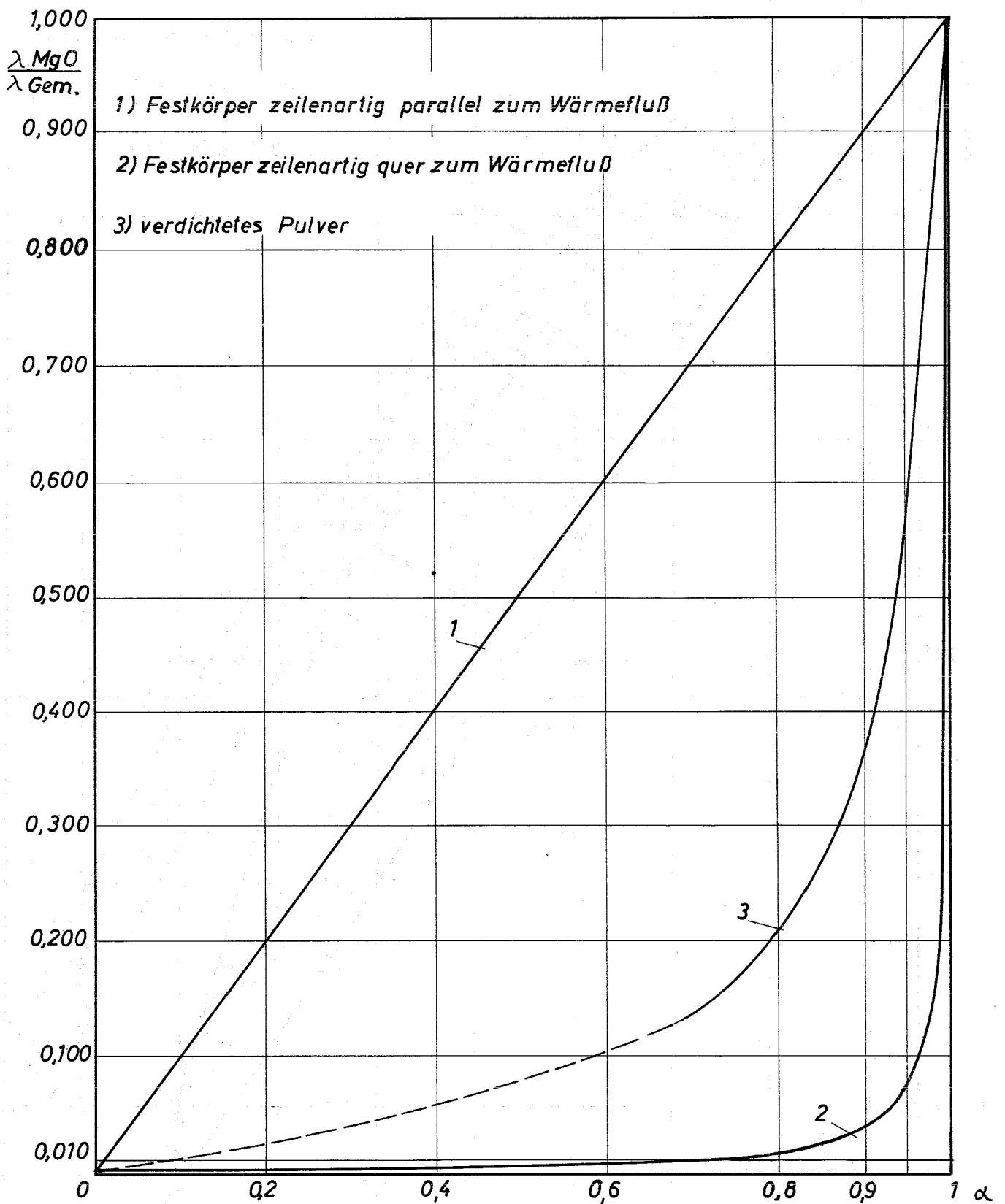


Abb. 3

Leitfähigkeit eines Gemisches von Mg O und Luft bei 500°C  
 als Funktion der Anordnung und des volumetrischen Mg O-Anteils  $\alpha$   
 nach [2] und [3]

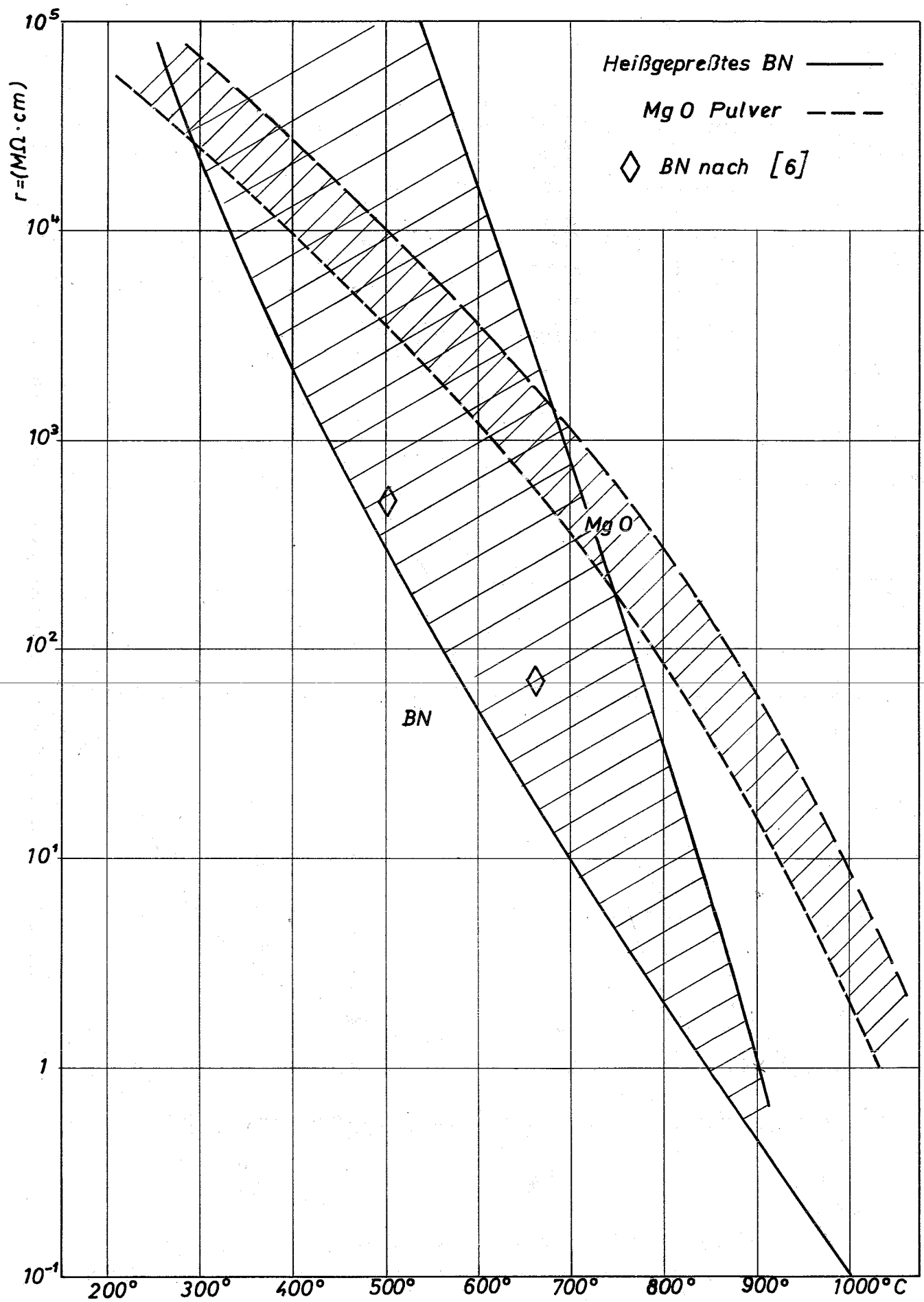
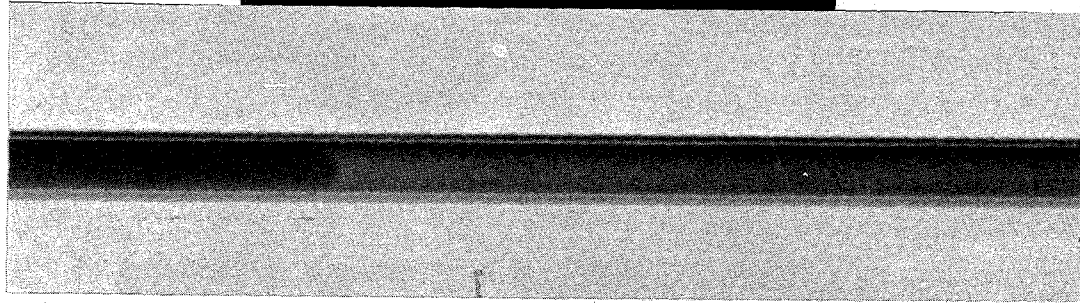
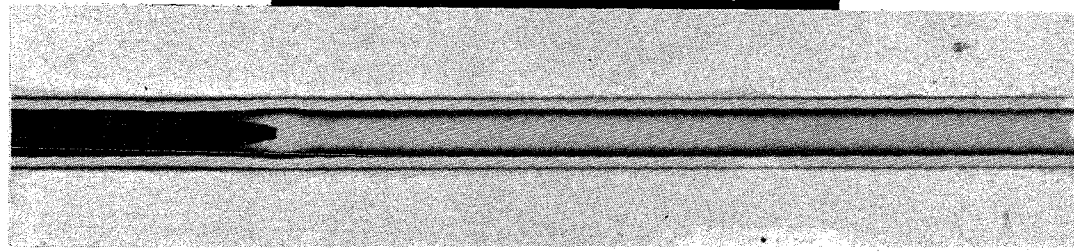


Abb.4 Spezifischer Isolierwiderstand von heißgepreßtem BN und verdichtetem MgO-Pulver (87% der th.D) als Funktion der Temperatur



*BN-Jsolation*



*MgO-Jsolation*

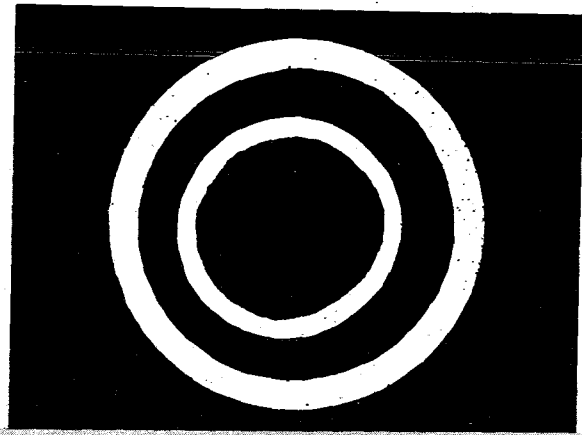
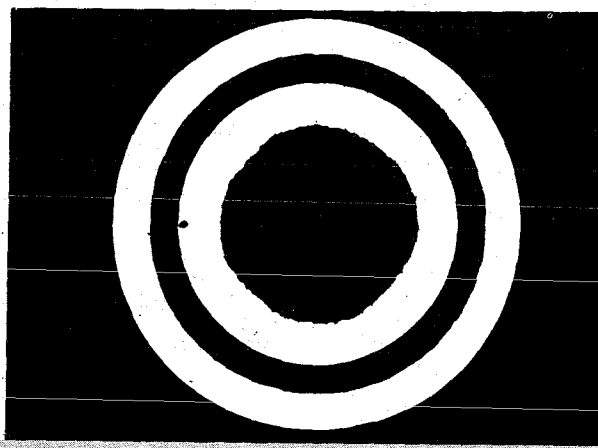


Abb. 5 Heizstab im Querschliff und in Längsansicht (Röntgenaufnahme)

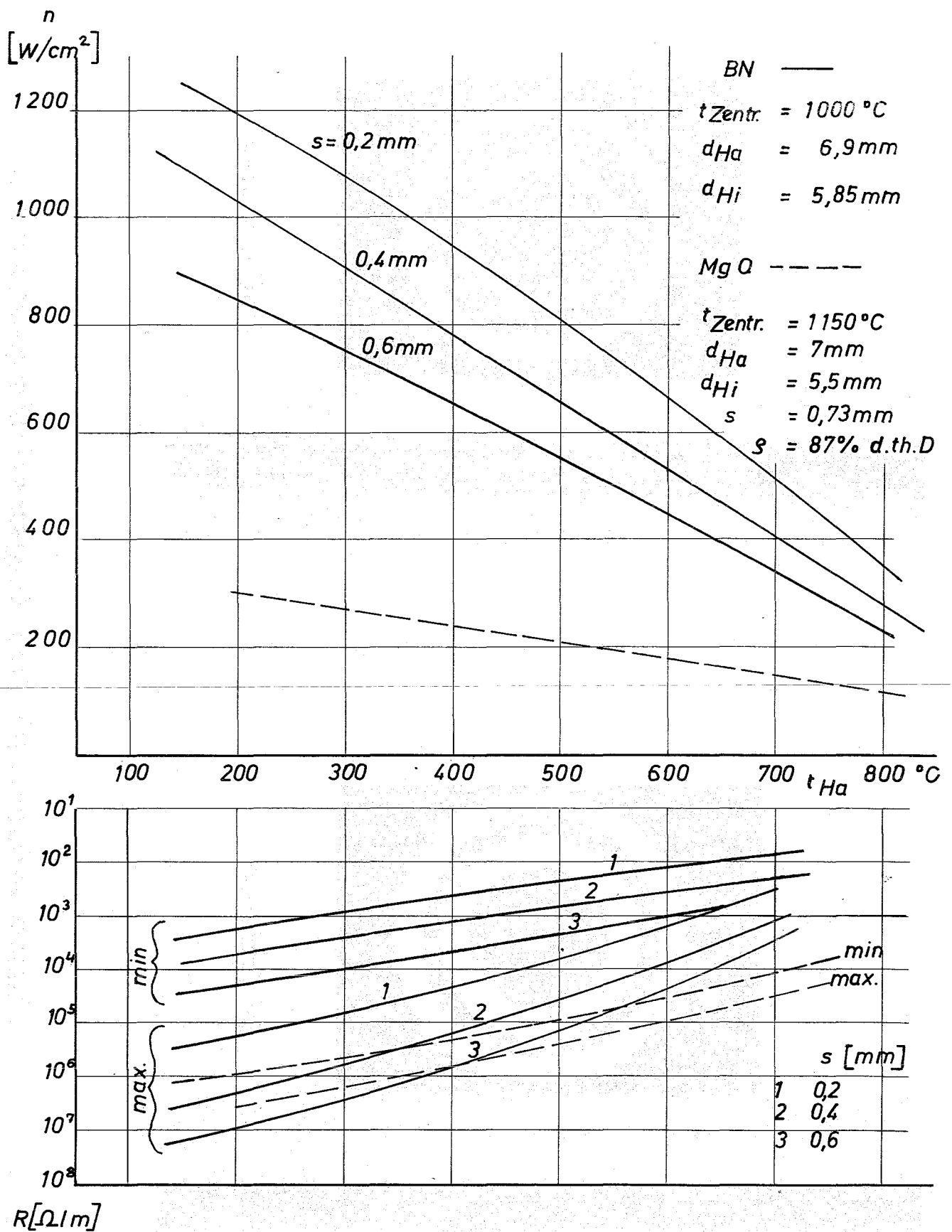


Abb. 6 Zulässige Heizflächenbelastung und elektrische Isolation für 1m lange Stäbe mit BN- und MgO-Isolation als Funktion der Hüllentemperatur.

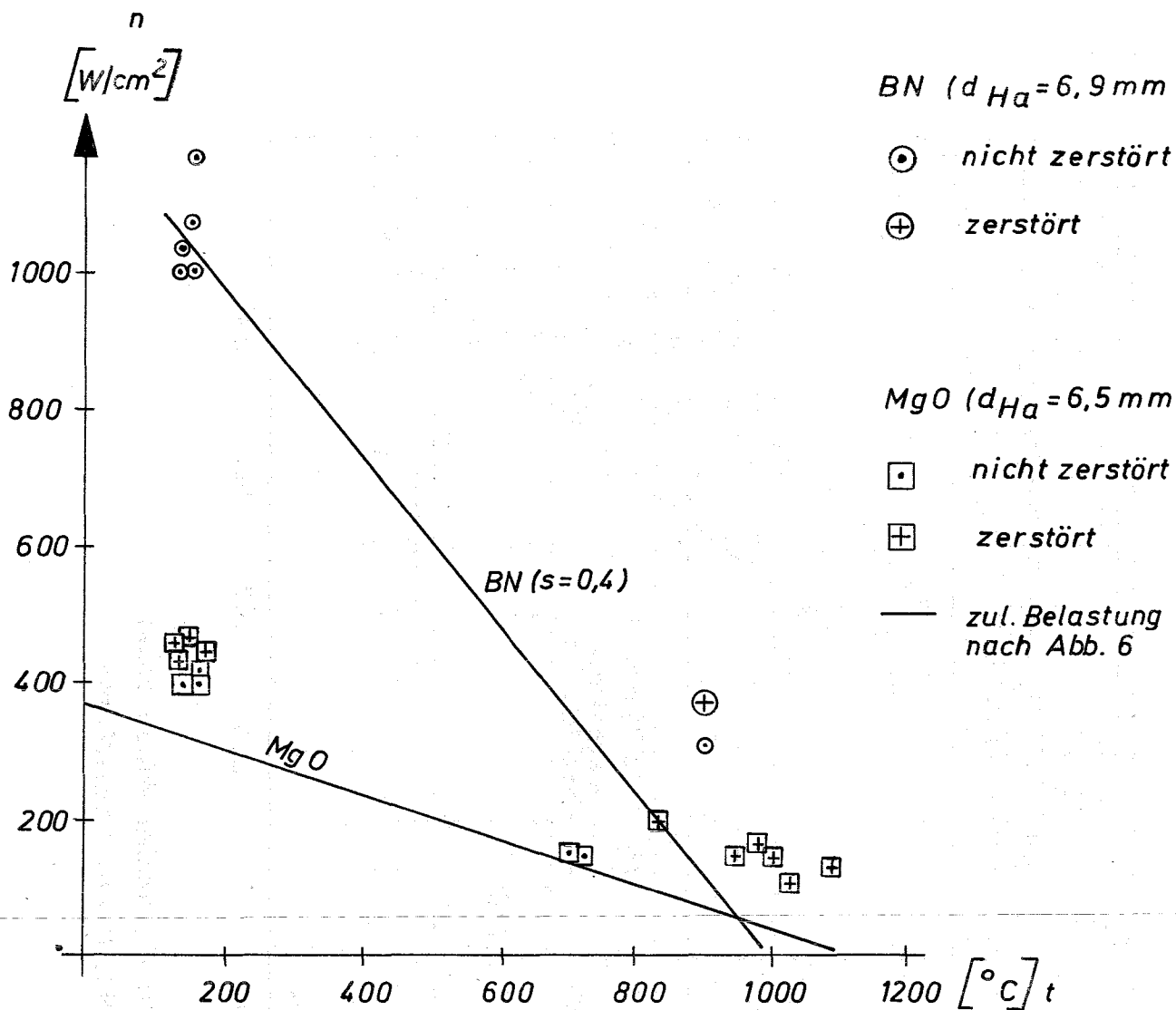


Abb. 7 Im Versuch erreichte Oberflächenbelastung als Funktion der Hüllentemperatur für BN- und MgO-isolierte Heizstäbe (eingezeichnete Kurve nach Abb. 6)

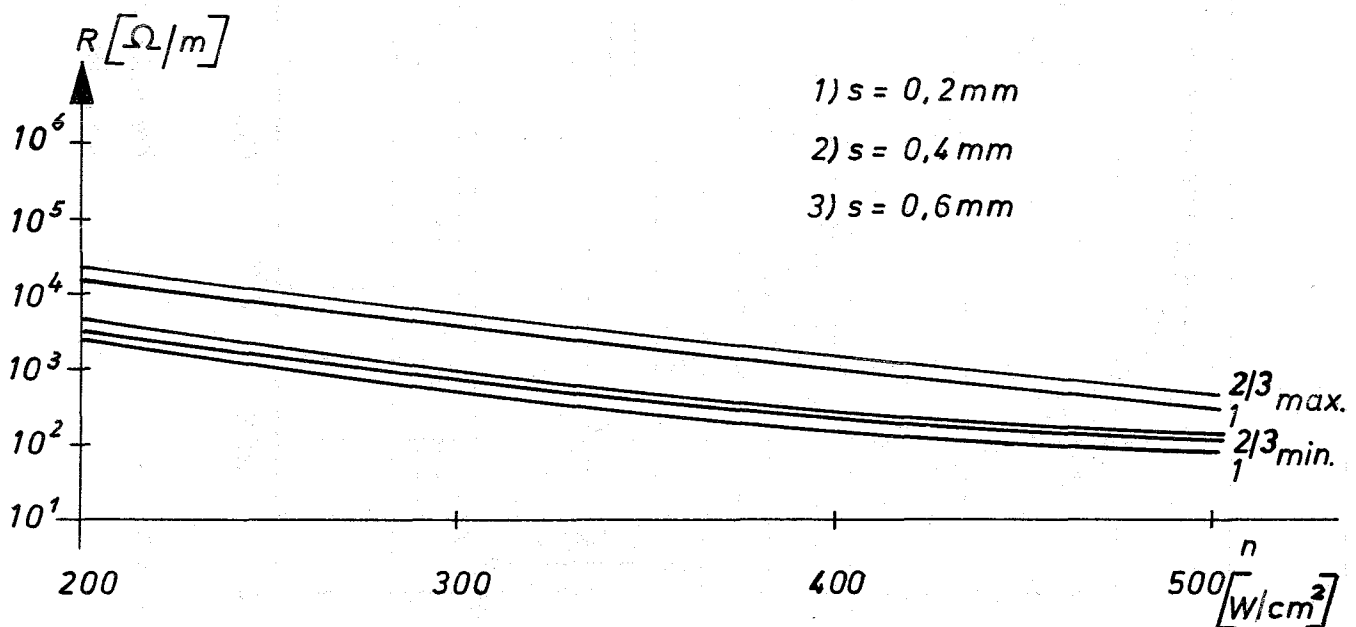


Abb. 8 Elektrische Isolation als Funktion der Heizflächenbelastung für BN-Heizstäbe bei 700 °C Hüllentemperatur

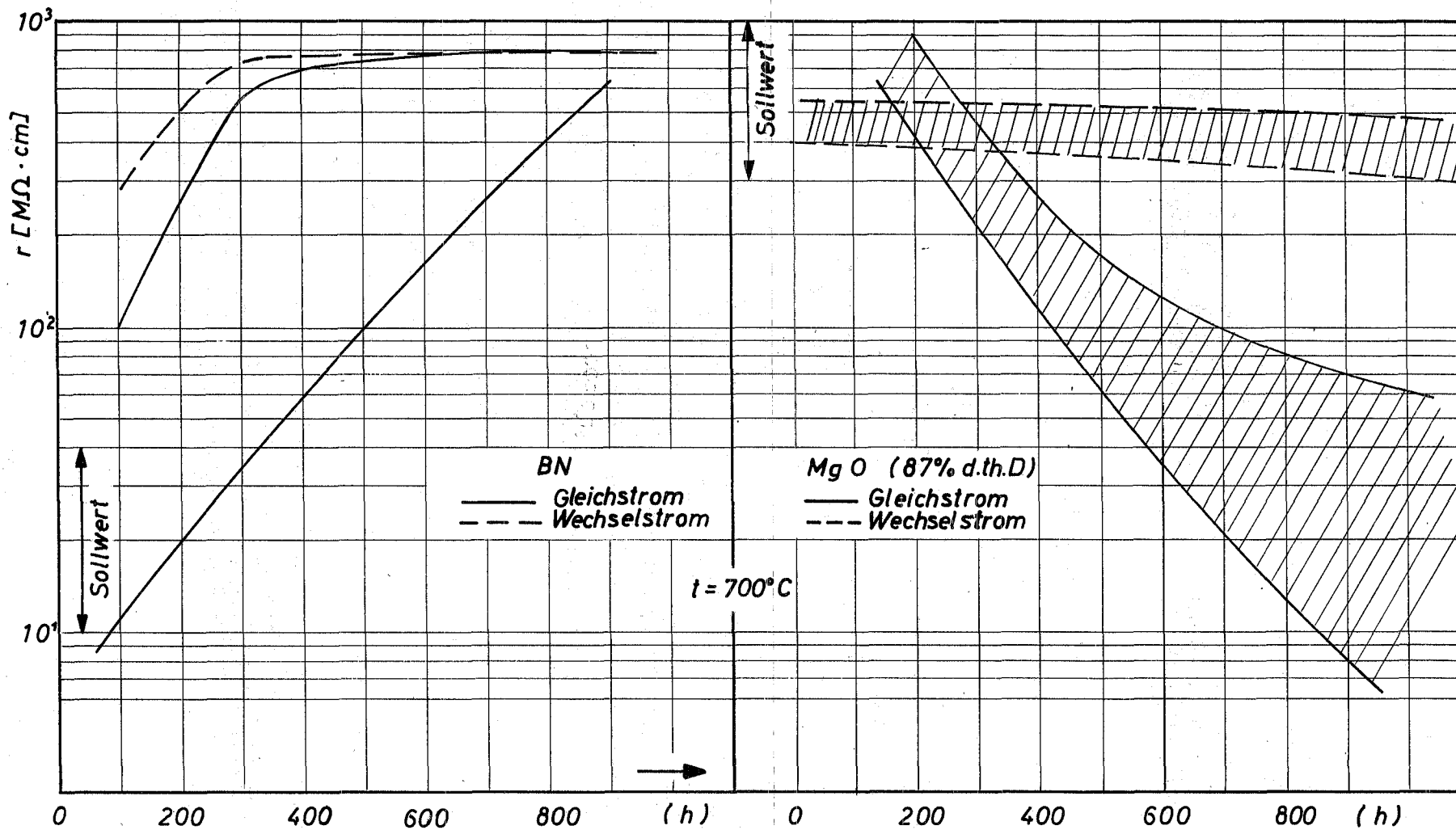
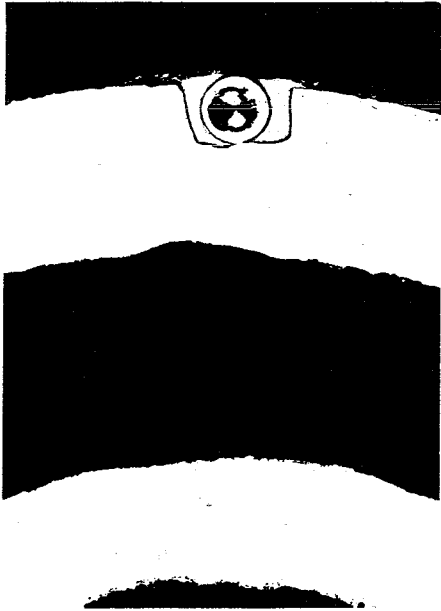
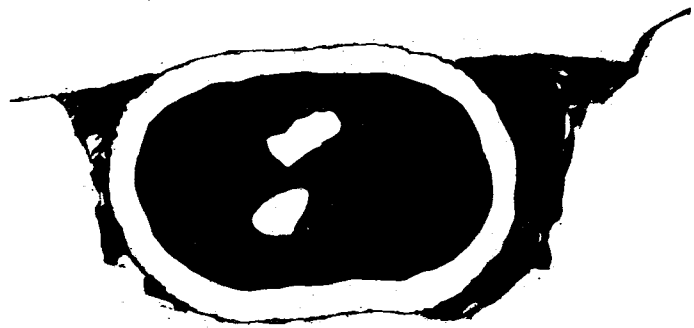


Abb. 9

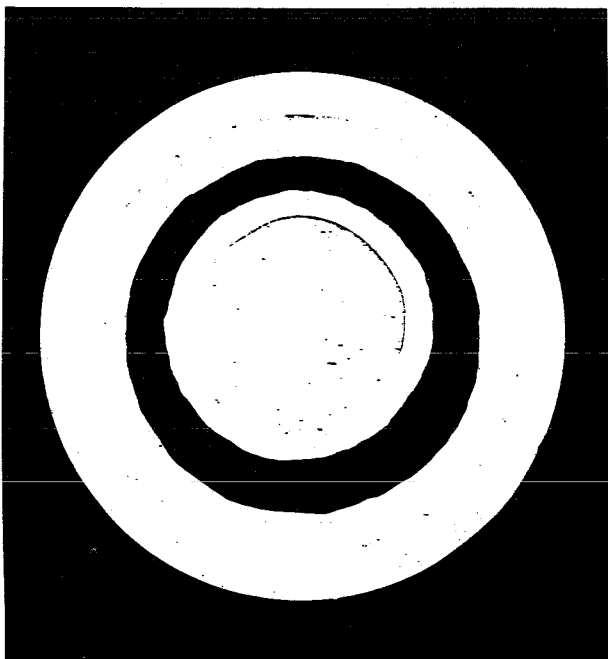
Zeitliche Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes von BN und Mg O bei Gleich- und Wechselstrom



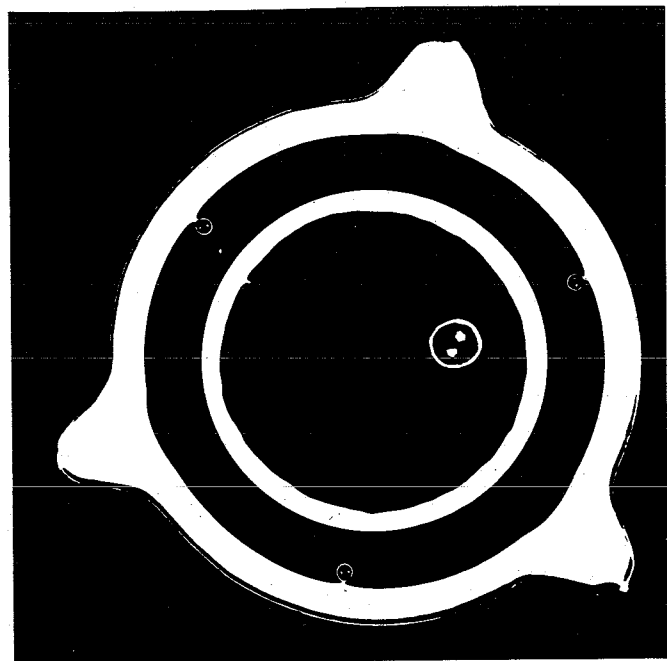
**Abb. 10**  
*Heizstabausschnitt mit  
verlötetem Thermoelement*



**Abb. 11**  
*Heizstabausschnitt mit  
eingelegtem Thermoelement*



**Abb. 12**  
*Heizstab mit ver-  
lötetem Außenrohr*



**Abb. 13**  
*Heizstab mit 1 Zentralthermo-  
element und 3 Thermoelemen-  
ten unter der Heizstabhülle*