

KERNFORSCHUNGSZENTRUM

KARLSRUHE

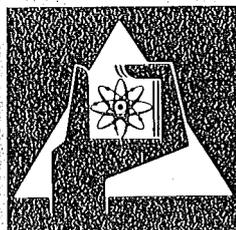
September 1976

KFK 2258

Institut für Reaktorbauelemente
Projekt Schneller Brüter

**Heizstäbe zur Simulation von Brennstäben für
einphasige Wärmeübergangsversuche in
Flüssigmetallströmungen**

V. Casal, E. Graf, W. Hartmann



**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

KFK 2258

Institut für Reaktorbauelemente

Projekt Schneller Brüter

HEIZSTÄBE ZUR SIMULATION VON BRENNSTÄBEN
FÜR EINPHASIGE WÄRMEÜBERGANGSVERSUCHE IN
FLÖSSIGMETALLSTRÖMUNGEN.

V. Casal, E. Graf, W. Hartmann

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG MBH, KARLSRUHE

Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht befaßt sich mit der Entwicklung von Heizstäben zur thermischen Simulation von Brennelementen "Schneller Natriumgekühlter Reaktoren" (SNR).

Beginnend mit den experimentellen Anforderungen thermodynamischer Untersuchungen zum einphasigen Wärmetransport im Kühlmittel werden die verschiedenen Beheizungsverfahren diskutiert.

Daraus leitet sich ein bevorzugter Heizstabtyp zur Simulation von SNR-Brennstäben ab, über dessen Fertigung, seine Eigenschaften und sein Betriebsverhalten berichtet wird.

Abstract

Heaters to simulate fuel pins for heat transfer tests in single-phase liquid-metal-flow

The development of heaters for thermal simulation of the fuel elements of liquid metal cooled fast breeder reactors (SNR) is reported. Beginning with the experimental demands various heating methods are discussed for thermodynamic investigations of the heat transfer in liquid metals.

Then a preferred heater rod is derived to simulate the fuel pins of a SNR.

Finally it is reported on the fabrication and the operation practice.

- I Einführung
- II Anforderungen an Heizstäbe für stationäre Wärmetransport-
untersuchungen in Flüssigmetallen
 - 1. Bedingungen
 - 2. Auswahl möglicher Heizstabkonzepte
 - a) Ohm'sche Strahlungsheizstäbe
 - b) Ohm'sche Heizstäbe mit Wärmetransport durch
Leitung
- III Auslegung eines Ohm'schen Heizstabes mit Wärmetransport
durch Leitung für thermodynamische Versuche
 - 1. Werkstoffauswahl
 - a) Stromleiter
 - b) Isolierschicht
 - c) Hülle
 - d) Werkstoff der Kaltenden
 - e) Stützkeramik im Stromleiter
 - 2. Geometrischer Aufbau
 - 3. Vorteil von pulverförmigem Bornitrid gegenüber
heißgepreßtem für den Einsatz in Heizstäben
 - 4. Fertigung von Heizstäben mit einer Isolation aus
verdichtetem Bornitridpulver
 - a) Wahl der Bornitridichte
 - b) Auswahl des Verdichtungsverfahrens
 - 5. Heizstabdimensionierung
 - 6. Toleranzen von Heizstäben
 - a) Toleranz der beheizten Länge
 - b) Toleranz der Isolierschichtstärke
 - c) Toleranz der Stromleiterwandstärke
 - d) Toleranz der Bornitridichte
 - e) Auswirkung der Toleranzen auf die Leistungsver-
teilung an der Heizstabhülle
- IV Heizstaberprobung
- V Instrumentierung der Heizstäbe
- VI Literatur

I. Einführung

Die Hülle eines Brennelementes ist das am stärksten belastete Bauelement eines Reaktors. Ihre wichtigste Aufgabe ist die zuverlässige Trennung des Kernbrennstoffes vom Kühlmittel. Diese Hüllen werden durch hohe Temperaturen, Spaltgasdrücke und Neutronenflüsse belastet. Trotzdem können sie aus Gründen der Neutronenökonomie und wegen Wärmespannungen nur dünnwandig und aus wenig absorbierenden Werkstoffen hergestellt werden.

Diese Anforderungen bedingen eine sehr präzise thermodynamische Kernauslegung, die durch experimentelle Untersuchungen zu stützen ist. Solche Experimente werden in der Regel *out - of - pile* durchgeführt. Dazu muß das Brennelement als beheizbare Attrappe geometrisch ähnlich nachgebildet werden. Durch geeignete Instrumentierung ist das interessierende Temperaturfeld zu ermitteln.

In /7/ sind elektrische Heizstäbe beschrieben, die für thermodynamische Experimente in der G.f.K. entwickelt wurden. Sie besaßen zur elektrischen Isolation des rohrförmigen Stromleiters im Hüllrohr Ringpellets aus heißgepreßtem Bornitrid.

Durch Änderung der Fertigungsmethoden wurde in der G.f.K. das heißgepreßte Bornitrid durch Bornitridpulver ersetzt. Neben Fertigungsvorteilen gewinnt man dadurch größere Freiheit in der Gestaltung und Dimensionierung von Heizstäben. Anforderungen, Auslegung, Erprobung und Instrumentierung derartiger Heizstäbe werden in dieser Arbeit diskutiert.

Die Auslegung der Heizstäbe ist auf die Anforderungen abgestimmt, die die Untersuchungen zum Wärmetransport natrium-

gekühlter Brennelemente bei Einphasenströmung stellen. Abmessungen und Leistungsdaten entsprechen den Auslegungsdaten des Schnellen Natriumgekühlten Reaktors SNR-300.

II. Anforderungen an Heizstäbe für stationäre Wärmetransportuntersuchungen in Flüssigmetallen

1. Bedingungen zur Simulation des SNR-300 Brennelementes:

- a) Durchmesser $d = 6 - 7,5$ mm, beheizte Länge $L = 1000$ mm
- b) hohe Heizflächenbelastung zur Erzeugung gut meßbarer Temperaturfelder im Fluid ($n = 250$ W/cm² bei 700 °C Hüllentemperatur).
- c) axiale Leistungsverteilung **bekannt**
- d) keine örtliche Variation der Leistungsdichte bedingt durch:
 - den inneren Aufbau der Heizstäbe
(keine Geometrieeffekte, keine Dichteschwankungen im Isolator)
 - starke Rückkopplung der örtlichen Kühlmitteltemperatur auf die örtliche Wärmefreisetzung im Stab
(kein Temperatureffekt der Wärmezeugung)
- e) azimutale Wärmeflußverteilung an der Hülle des Heizelementes bei vorgegebener örtlicher Temperaturverteilung im Kühlmittel, nicht wesentlich von der des Brennstabes abweichend (thermische Ähnlichkeit)
- f) instrumentierbar mit Thermoelementen in der Heizstabhülle
- g) Eignung für Bündelversuche hinsichtlich Ausführung der Stromzuführung, des elektrischen Widerstandes sowie hinsichtlich des Wärmeflusses in den sogenannten Kaltenden im Bereich der Anschlüsse und Behälterdurchführungen
- h) realisierbar mit vertretbarem Aufwand

2. Auswahl möglicher Heizstabkonzepte :

Die Auswahl möglicher Beheizungsarten muß an den oben aufgezählten Kriterien erfolgen. Zur thermischen Simulation von

Brennstäben natriumgekühlter Reaktoren sind verschiedene Beheizungsverfahren möglich:

- zylindrische Brennstäbe könnten durch Rohre ersetzt werden, die von innen durch kondensierende Dämpfe oder durch Flüssigmetall beheizt werden. Diese Lösung erfordert komplizierte Sekundärkreisläufe und weist eine wenig bekannte Wärmeflußverteilung auf (Pkt. c,h).
- zylindrische Brennstäbe könnten durch "heat-pipes" ersetzt werden. Ihnen wird außerhalb der Teststrecke Wärme zugeführt, die sie aufgrund ihrer sehr hohen axialen Wärmeleitung ins Testteil transportieren und freisetzen. Bei den Abmessungen und den hohen Heizflächenbelastungen der Brennelemente Schneller Brutreaktoren lassen sich damit nur wenige Zentimeter Brennstablänge simulieren.
- Beheizung des Hüllrohres durch Elektronenbombardement, durch eine in Rohrachse angebrachte Elektrode. Dabei ist im Hüllrohr Hochvakuum erforderlich. Wegen des dafür notwendigen Entwicklungsaufwandes kann diese Methode zur Zeit nicht zur thermischen Brennstabsimulation verwendet werden.
- Ohm'sche Beheizung eines Stromleiters im Inneren des Hüllrohres, der durch Strahlung seine Wärme an die Hülle überträgt.
- Ohm'sche Beheizung eines Stromleiters im Inneren des Hüllrohres, der durch Leitung durch einen elektrischen Isolator seine Wärme an die Hülle überträgt.

Die beiden zuletzt genannten Beheizungsverfahren wurden in der G.f.K. erfolgreich erprobt.

Im folgenden wird die Beheizung des Hüllrohres durch Strahlungswärme kurz besprochen, über die Beheizung des Hüllrohres durch Wärmeleitung dagegen ausführlich berichtet.

a. Ohm'sche Strahlungsheizstäbe

Überträgt der Stromleiter die Wärme durch Strahlung an die Hülle, so muß der Heizstab zur Erzeugung von hohen Leistungsdichten sehr hohe Stromleitertemperaturen besitzen. Graphit bietet sich hierfür an. Bei diesen Heizstäben ist die zulässige Leistungsdichte nahezu unabhängig von der Hüllentemperatur, weil der Strahlungsaustausch zwischen Stromleiter und Hülle proportional T^4 ist.

Folgendes Rechenbeispiel verdeutlicht dies:

Ein Heizstab von 6 mm Durchmesser, 0,5 mm Hüllendicke besitze im Inneren eine Elektrode von 4 mm Durchmesser. Die Emissionszahl der Elektrode betrage $\epsilon \approx 1$ und die der Hülle $\epsilon = 0,6$ (oxidiert); die Heizflächenbelastung an der Hülle (n /W/cm²/) in Abhängigkeit von Hüllen - (T_H) und Elektrodentemperatur (T_{el}) zeigt folgende Tabelle:

n [W/cm ²]	T_{el} [°C]				
	3573	3578	3583	3588	3593
T_H [°C]					
673	431,6				
1073	430,2	432,8	435,5	438,1	441,0
1473	424				

Die rechnerisch ermittelten Werte zeigen, daß eine Änderung der Hüllentemperatur von 1073 auf 1473 °C die Leistungsdichte lediglich um 1,5 % verändert. Bei konstanter Hüllentemperatur dagegen bedarf es lediglich einer Änderung der Elektrodentemperatur von etwa 10°C, um die 1,5 % -ige Änderung der Leistungsdichte zu erzielen. Daraus läßt sich folgende Konsequenz

ziehen: Strahlungsheizter sind zu empfehlen für Experimente, die einen sehr konstanten Wärmefluß erfordern.

Als Elektrodenmaterial kommt für diese Heizstäbe bei hoher Leistungsdichte hauptsächlich Graphit in Frage. Die starke Änderung des elektrischen Widerstandes von Graphit mit der Temperatur (Abb.1) hat auf die Leistungskonstanz von Strahlungsheizstäben keinen nachteiligen Einfluß, da große Schwankungen der Hüllentemperatur (z.B. 400 °C) durch sehr geringe Schwankungen der Elektrodentemperatur (10 °C) aufgefangen werden. Deshalb wird die Graphitelektrode eines Strahlungsheizstabes auch bei örtlich stark unterschiedlichen Hüllentemperaturen eine nahezu konstante Temperatur aufweisen.

Der Nachteil dieses Heizstabtypes besteht in der Beschränkung der beheizbaren Länge. Der Stromleiter muß bei geringem Gasspalt einwandfrei im Hüllrohr zentriert werden. In der G.f.K. wurde ein Heizstab mit einer beheizten Länge von 150 mm bei 120 °C Hüllentemperatur mit einer Heizflächenbelastung von 300 W/cm² betrieben. Wegen seiner beschränkt beheizten Länge kommt er als Brennstabsimulator nur in Sonderfällen zum Einsatz, seine Entwicklung wurde deshalb nicht weiter verfolgt.

b. Ohm'sche Heizstäbe mit Wärmetransport zwischen Stromleiter und Hülle durch Wärmeleitung.

Derartige Heizstäbe (Abb.2) bestehen beispielsweise aus zwei konzentrischen Rohren. Das äußere ist die Heizstabhülle, das innere der Stromleiter. Zwischen beiden befindet sich der Isolator. In der beheizten Zone ist das Stromleiterrohr mit Keramik gefüllt, in den sogenannten Kaltenden mit Metallbolzen zur Reduktion der Wärmeentwicklung. Geeignete Isolationsstoffe mit hoher Wärmeleitfähigkeit sind verfügbar. Heizstäbe lassen sich damit in den notwendigen Längen herstellen. Der

Isolator übernimmt bei diesem Heizstabtyp sowohl die Aufgabe des Wärmeleiters zwischen Stromleiter und Hülle, als auch die Aufgabe der mechanischen Abstützung des Stromleiters im Hüllrohr. Die Überlegungen, die zur Wahl dieses Aufbaues führten, die Auswahl der Werkstoffe sowie gewonnene Betriebserfahrungen werden im folgenden beschrieben.

III. Auslegung eines Ohm'schen Heizstabes mit Wärmetransport durch Leitung für thermodynamische Versuche

1. Werkstoffauswahl:

a) Stromleiter:

Die eingangs gestellte Forderung nach thermischer Ähnlichkeit an der Heizstabhülle wäre am ehesten gesichert, wenn diese Ähnlichkeit auch im Inneren des Heizstabes hergestellt werden könnte. Dann würde bei örtlicher Änderung der Kühlmitteltemperatur die Wärme flußverteilung von Brennstab und Heizstab einander entsprechen. Da Untersuchungen des Wärmetransportes in Natrium eine hohe Heizflächenbelastung erfordern, mitunter die Nennleistung des Brennstabes, bedeutet dies bei innerer thermischer Ähnlichkeit gleiche Maximaltemperaturen. Diese können 2000 - 2500 °C betragen.

Als Stromleiterwerkstoffe, die bei diesen Temperaturen sicher zu betreiben sind, kommen Graphit, Wolfram, Tantal, Molybdän und Niob in Frage. Diese Werkstoffe haben alle eine stark temperaturabhängige, elektrische Leitfähigkeit (Abb.3). Daher verstoßen sie gegen die wichtige Forderung nach temperaturunabhängiger Wärmeproduktion und scheiden deshalb als Stromleiterwerkstoffe aus. Die Werkstoffe mit temperaturkonstanter elektrischer Leitfähigkeit und gleichzeitig hoher Schmelztemperatur sind die bekannten Nickelchromlegierungen, mit einem Schmelz-

punkt von ungefähr 1400 °C.

Aufgrund der Wichtigkeit temperaturunabhängiger Wärmeproduktion wurde für die Heizstäbe als Stromleiterwerkstoff Nickelchrom gewählt, seine maximale Betriebstemperatur beträgt 1200 °C. Somit läßt sich die Forderung nach thermischer Ähnlichkeit an der Hülle durch thermische Ähnlichkeit im Heizstab nicht verwirklichen. Sie muß durch konstruktive Maßnahmen hergestellt werden, welche in Abschnitt III.2 beschrieben werden.

b) Isolierschicht

Soll der Brennstab die Leistungsdaten des SNR simulieren, so muß er bei 700 °C Kühlmitteltemperatur maximal 250 W/cm² Leistungsdichte erzeugen. Dabei stehen dann für den gesamten Temperaturabfall durch Stromleiter Isolierschicht mit 2 Kontaktflächen (zwischen der Isolierschicht und der Hülle bzw. dem Stromleiter) sowie Hülle lediglich 500 °C zur Verfügung gegenüber ca. 1500 °C beim Brennstab.

Als Isolator zwischen Stromleiter und Hülle des Heizstabes muß also ein Werkstoff gewählt werden, der einerseits über geringe elektrische Leitfähigkeit, andererseits über eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit verfügt und zusätzlich an Grenzflächen einen guten thermischen Kontakt ermöglicht.

Abb. 4 zeigt die Wärmeleitfähigkeit einiger als elektrische Isolatoren verwendbare Keramiken in Abhängigkeit von der Temperatur bei jeweils 100% der theoretischen Dichte. Die in der Abbildung angegebene Leitfähigkeit von Bornitrid (BN) gilt dagegen für heißgepreßtes BN mit 93% der theoretischen Dichte. In Heizstäben wird

der Isolator in der Regel als Pulver eingebracht und durch geeignete Verfahren meistens auf etwa 80 - 85% der theoretischen Dichte verdichtet. Bei dieser Dichte besitzen die Stoffe nur einen Bruchteil der in Abb.4 angegebenen Wärmeleitfähigkeit. Abb.5 verdeutlicht die starke Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Dichte am Beispiel von Magnesiumoxid. Bornitrid dagegen läßt sich aufgrund seiner geringen Härte ohne große Schwierigkeiten auf 93% der theoretischen Dichte komprimieren und besitzt damit die in dem Diagramm angegebene Wärmeleitfähigkeit, die etwa der von Edelstahl entspricht. Ein Nebeneffekt der geringen Härte von BN ist die Möglichkeit bei geeignetem Fertigungsverfahren ein inniges Anschmiegen der Keramik an Hülle und Stromleiter zu erreichen, sodaß extrem hohe Kontaktzahlen an den Grenzflächen erreicht werden, die es gestatten, den Temperatursprung an diesen Übergängen fast zu vernachlässigen.

Die thermische Simulation von Kernbrennstäben bis 700 °C Kühlmitteltemperatur und einer Leistungsdichte von bis zu 250 W/cm² läßt sich bei Isolierschichtstärken von \sim 0,5 mm und einer maximal zulässigen Stromleitertemperatur von 1200 °C mit Bornitrid u.U. mit Berylliumoxid verwirklichen. Der letztgenannte Isolator wird jedoch u.a. wegen seiner Toxizität nicht gerne verwendet. Für diese Heizstäbe wird als Isolator BN verwendet.

c) Hülle

Als Hüllen für Heizstäbe sollte ein Werkstoff gewählt werden, dessen Wärmedehnungskoeffizient etwa dem des Stromleiterwerkstoffes entspricht. Dann wirkt nämlich im Heizstab aufgrund des treibenden Temperaturgefälles eine Flächenpressung an den Grenzflächen, die den Wärmewiderstand klein hält. Deshalb werden Edelstahl- oder Nickellegierungen als Hüllrohrwerkstoff verwendet.

d) Werkstoff der Kaltenden

Zur Simulation unbeheizter Brennstabbereiche sowie im Bereich der Stromzufuhr, müssen die Heizstäbe mit unbeheizten Enden ausgerüstet sein. Sie müssen also in diesen Zonen einen sehr geringen elektrischen Widerstand besitzen. Die hier beschriebenen Heizstäbe haben in den Kaltenden Kupfer- oder Nickelbolzen als Stromleiter.

e) Stützkeramik im Stromleiter

Der Nickelchromstromleiter steht im Betrieb infolge des Temperaturgefälles im Heizstab unter Druckspannungen. Da er bei hohen Temperaturen keine nennenswerte Festigkeit aufweist, könnten diese sich durch plastische Deformation des Stromleiters leicht abbauen. Dadurch würde u.U. der Wärmewiderstand an den Grenzflächen im Heizstab anwachsen. Um dies zu vermeiden, wird der Stromleiter mit Magnesiumoxid gefüllt; es besitzt fast die gleiche Wärmedehnung wie Nickelchrom und stützt so den Stromleiter im Betrieb mechanisch gut ab.

2. Geometrischer Aufbau :

Verschiedene geometrische Ausbildungen des Stromleiters sind je nach Anforderungen an die Heizstäbe möglich:

- Draht- und Bandwendel
- mehrere axial gespannte Drähte, Bänder oder Profilstangen
- Vollstab
- Rohr

Für thermodynamische Untersuchungen ist eine möglichst homogene Wärmeflußverteilung erwünscht. Dies führt zu einem Heizstabkonzept mit rohrförmigem Stromleiter. Der rohrförmige Stromleiter gewährleistet eine gleichmäßige Wärmeproduktion im Heizstab und infolge gleicher Wärmeflußwege zur Hülle die geforderte homogene Leistungsverteilung an der Heizstabhülle.

Durch den Übergang auf Vollstäbe aus Kupfer oder Nickel läßt sich der Wärmefluß an den Enden des Heizstabes in genügendem Maße reduzieren.

Stromleiter in Form eines Vollstabes besitzen zwar ebenfalls eine gleichmäßige Wärmeproduktion, wegen folgender Nachteile scheidet sie jedoch aus:

- elektrischer Widerstand ist zu klein
- unbeheizte Enden nur schwer ausführbar
- unnötig hoher Temperaturanstieg im Stromleiter, sodaß wegen der maximal zulässigen Stromleitertemperatur das nutzbare treibende Temperaturgefälle im Heizstab - von der Stromleiterhülle zur Heizstabhülle - und damit die erzeugbare Leistungsdichte unnötig reduziert würde.

Die Anforderungen des Experimentes führten zu dem gleichen geometrischen Aufbau der Heizstäbe wie in /7/, bei denen wegen der verwendeten heißgepreßten BN-Hülsen ein rohrförmiger Stromleiter sinnvoll war.

Der Aufbau der Heizstäbe ist in Abb.2 schematisch dargestellt. Das Temperaturfeld des Brennstabes und des Heizstabes dieser Bauart bei gleicher Stabileistung zeigt die gleiche Abbildung.

3. Vorteil von pulverförmigem BN gegenüber heißgepreßtem BN für den Einsatz in Heizstäben

Wie eingangs erwähnt, läßt sich BN-Pulver zur Isolation von Heizstäben verwenden. Der unmittelbare Vorteil - freie Gestaltung des Stromleiters - führte bei Heizstäben für Wärmeübergangsversuche nicht zur Änderung des Heizstabaufbaues.

Bornitrid in Pulverform bietet jedoch eine Reihe von Vorteilen, sodaß der Einsatz heißgepreßten Bornitrids als Isolator aufgegeben wurde.

Die Gründe hierfür sind:

- Heißgepreßtes BN ist in Stangenform erhältlich; aus diesem relativ brüchigen Werkstoff mußten Ringpellets von ca. 0,5 mm Wandstärke durch spanabhebende Bearbeitung mit sehr engen Toleranzen hergestellt werden. Dieser Arbeitsgang ist personalintensiv und führt zu sehr hohen Fertigungskosten.
- Bei den in /7/ beschriebenen Heizstäben wurden die zur Heizstabmontage erforderlichen Spalte zwischen den BN-Ringen und dem Stromleiterrohr bzw. dem Hüllrohr durch Rundhämmern des Heizstabes geschlossen. Dadurch wurde ein einwandfreier thermischer Kontakt an den Grenzflächen erreicht, ohne die Montage durch zu enge Spalte zu erschweren. An den Stoßstellen der Pellets traten örtliche Störungen des Wärmeflusses auf.
- Heißgepreßtes BN besitzt als Bindemittel Boroxid. Dieses reduziert den elektrischen Widerstand des BN erheblich. Eine reduzierte elektrische Isolation birgt die Gefahr des elektrischen Durchschlages, besonders mit wachsenden Betriebstemperaturen, bei welchen BN in seiner Isolations-eigenschaft stark nachläßt. Abb. 6 zeigt den elektrischen Widerstand von BN, gemessen an Heizstäben mit Ringpellets aus heißgepreßtem BN (Oxidanteil 3,9%) sowie an Heizstäben, deren Isolation aus verdichtetem BN-Pulver (Oxidanteil 0,5%) besteht.

Die Isolationswiderstände von Heizstäben mit heißgepreßtem bzw. pulververdichtetem BN unterscheiden sich danach ungefähr um den Faktor 100; dieser ist jedoch möglicherweise sowohl auf den höheren elektrischen Widerstand von BN-Pulver im Anlieferungszustand, als auch auf inzwischen verbesserte Heizstabherstellung zurückzuführen.

Die Vorteile von pulverförmigem BN sind also:

- Homogener Wärmefluß, da im Isolator keine Stoßstellen vorhanden sind.

- Höhere elektrische Isolation infolge geringeren B_2O_3 - Anteils im BN (0,5% gegenüber 3,9% bei mechanisch gut bearbeitbaren Qualitäten).
- Geringe Materialkosten
- Geringere Fertigungskosten
- Freiheit in der Gestaltung der Stromleiterform je nach Einsatzbedingungen, sodaß bei geänderten Anforderungen an die Heizstäbe dann auch andere Heizstabkonzepte z.B. mit Stromleitern in Form von Draht- oder Bandwendel realisierbar sind.

4. Fertigung von Heizstäben mit pulververdichtetem Bornitrid als Isolator

Nach der Festlegung des Heizstabkonzeptes soll nun über die Fertigung der Heizstäbe berichtet werden. Zentrales Problem hierbei ist das Verdichten des Bornitridpulvers im Ringspalt zwischen Stromleiter und Hülle. Das Verfahren zum Einfüllen und Verdichten des Bornitridpulvers läßt sich aber erst festlegen, wenn die gewünschte Bornitridichte im fertigen Heizstab bekannt ist.

a) Wahl der Bornitridichte

Durch die Verwendung von Nickelchrom als Stromleiterwerkstoff wurde das Konzept aufgegeben, äußere thermische Ähnlichkeit durch innere thermische Ähnlichkeit zu verwirklichen. Die Wahl dieses Werkstoffes beschränkt die Stromleitertemperatur auf etwa 1200 °C (III.1. a). Durch geeignete Wahl der Bornitridichte, der Stärke der Isolierschicht und des Wärmewiderstandes an den Kontaktstellen (zwischen der Bornitridisolierschicht und dem angrenzenden Stromleiter bzw. dem angrenzenden Hüllrohr) ist es möglich, das zulässige Temperaturgefälle voll auszunutzen. Damit wäre der technisch realisierbare Grad der inneren thermischen Ähnlichkeit zwischen dem Brennstab und dem Heizstab hergestellt. Geht man davon aus, daß

die hier beschriebenen Heizstäbe das Brennelement des SNR bei seinen Auslegungsdaten simulieren sollen, so sollten die Heizstäbe bei 700 °C Hüllentemperatur und einer Heizflächenbelastung von 250 W/cm² dann die mögliche Stromleitertemperatur von 1200 °C aufweisen. Aus diesen Werten läßt sich die geforderte Wärmedurchgangszahl k vom Stromleiter zur Hülle bestimmen zu :

$$k = 0,5 \quad \left(\frac{\text{W}}{\text{cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}} \right)$$

Die in /7/ beschriebenen Heizstäbe mit heißgepreßtem Bornitrid als Isolator besaßen demgegenüber eine Wärmedurchgangszahl von $k = 1 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$. Die wünschenswerte

Halbierung der Wärmedurchgangszahl läßt sich grundsätzlich durch Verlängerung des Wärmeleitweges (dickere Schichten) oder durch Verminderung der spezifischen Wärmeleitfähigkeit erreichen.

Die erste Möglichkeit (dickere Schichten) wird in einem späteren Kapitel behandelt. Hier soll zunächst die zweite betrachtet werden, den Wärmedurchgang durch Änderung der Bornitridichte an den geforderten Wert anzupassen.

Wie Abb.5 am Beispiel von MgO - Pulver zeigt, ändert sich die Leitfähigkeit von Pulvern sehr stark mit der Dichte. Es müßte also im vorliegenden Falle möglich sein, durch Wahl der Bornitridichte den gewünschten Wärmedurchgang zu erzielen. Um diese Abhängigkeit zwischen Bornitridichte und Wärmedurchgang zu ermitteln, wurden an beheizten Heizstäben Leiter - und Hüllentemperatur gemessen und daraus der Wärmedurchgang ermittelt. Zwischen den einzelnen Versuchen wurde die Bornitridichte variiert.

Abb.7 zeigt den relativen Wärmedurchgang von der Stromleiteraußenwand bis zur Hüllrohrinnenwand in Abhängigkeit von der Bornitridichte bei konstanter Isolierschichtstärke.

Der dargestellte Wärmedurchgang enthält also den Wärmeübergang vom Stromleiter zur Isolierschicht, die Wärmeleitung in der Isolierschicht und den Wärmeübergang von der Isolierschicht an die Hülle. Es fällt auf, daß der Wärmedurchgang mit anwachsender Dichte unmittelbar vor Erreichen der Enddichte von $\rho = 2,05 \text{ g/cm}^3$ sich extrem stark ändert.

Die in /7/ beschriebenen Heizstäbe mit heißgepreßtem Bornitrid besitzen die in Abb.7 angegebene Durchgangszahl von 100 % mit einer Bornitridichte von $\rho = 2,05 \text{ g/cm}^3$,

Die Verdichtungsversuche an Heizstäben mit pulverförmigem Bornitrid zeigten, daß eine maximale Dichte von $\rho = 2,05 \text{ g/cm}^3$ leicht zu erreichen ist. Eine höhere Dichte läßt sich dagegen mit unserem Verfahren nur sehr schwer erzielen. Damit wäre es grundsätzlich möglich die Bornitridichte so zu wählen, daß der Wärmedurchgang vom Stromleiter zur Hülle gegenüber den Stäben aus /7/ halbiert werden kann.

Abb.7 zeigt jedoch, daß zur Halbierung des Wärmedurchganges bei dem gewählten Verdichtungsverfahren des Bornitridpulvers die Dichte des Bornitrids nur etwa um 5 % reduziert werden muß. Die Solldichte müßte danach also in einen Bereich gelegt werden, in dem sich der Wärmedurchgang mit der Dichte sehr stark ändert. Die Fertigung der Heizstäbe müßte dann Dichteschwankungen praktisch ausschließen. Deshalb ist eine Auslegung von BN-Heizstäbe mit einer Dichte in diesem Bereich - auch wenn sie dem Experiment entgegenkommen - nicht ratsam. Infolge unvermeidbarer Dichteschwankungen hätte der Heizstab im Betrieb örtlich stark unterschiedliche Stromleitertemperaturen, die zu einem nicht mehr zu übersehenden Verhalten des Heizstabes führen würde. Aus diesem Grunde wurde bei der Heizstabentwicklung mit verdichtetem BN-Pulver auf die Erzielung der definierten Enddichte des BN Wert gelegt, da nur ein konstanter Wärmedurchgang ein überschaubares Verhalten des Heizstabes gewährleistet.

Abb. 8 zeigt die Dichteänderung von BN in einem Heizstab bei Durchmesserreduktion des Heizstabes durch Hämmern. Dabei verdichtet sich das BN-Pulver relativ schnell auf 93 % der theoretischen Dichte. Weitere Durchmesserreduktionen ergeben keine weiteren Dichtesteigerungen. Das heißt, reduziert man den Heizstab im Durchmesser genügend über ein sogenanntes "kritisches Durchmesser-Verhältnis", so erhält man in allen Bereichen eine gleichmäßige hohe Dichte von $\sim 2,05 \text{ g/cm}^3$. Dann besitzen Heizstäbe die Wärmedurchgangszahl der in /7/ beschriebenen Heizstäbe von $k = 1 \text{ W/cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$. Aus den genannten Gründen halten wir Heizstäbe mit einer zu hohen aber konstanten Wärmedurchgangszahl für die geeignetste Lösung zur thermischen Simulation der Brennstäbe.

Eine Anpassung an die angestrebte Wärmedurchgangszahl von $k = 0,5 \text{ W/cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ließe sich durch Zumischen eines schlecht leitenden Pulvers (z.B. MgO) zum BN erreichen. Da man dabei neue Unsicherheiten - Schwankungen des Mischungsverhältnisses - einhandelt, wurde auf diese Möglichkeit der Heizstabherstellung verzichtet.

b) Auswahl des Verdichtungsverfahrens des Bornitridpulvers im Ringspalt zwischen Stromleiter und Hülle

Nach den in Kapitel 4.a durchgeführten Überlegungen muß das Bornitrid, das Stromleiter und Hülle voneinander trennt, auf die erreichbare Enddichte komprimiert werden, um voraussagbare Wärmedurchgangszahlen zu erhalten.

Wie bereits berichtet, läßt sich Bornitridpulver in Heizstäben wegen seiner geringen Härte durch Durchmesserreduktion der Heizstäbe im angestrebten Maße verdichten. Trotzdem müssen gewisse Einfüllerdichten des Pulvers eingehalten werden, wenn der geometrische

Aufbau der Heizstäbe - Zentrität von Stromleiter und Hüllrohr, sowie Rundheit des Stromleiters - nach dem Hämmern erhalten bleiben soll.

Nach den vorliegenden Erfahrungen genügt dazu eine Anfangsdichte des Bornitridpulvers von $\rho \geq 1,2 \text{ g/cm}^3$. Diese Anfangsdichte läßt sich auf zwei Wegen erreichen:

- Durch Einstampfen des Pulvers in den Ringspalt zwischen Stromleiter und das Hüllrohr durch einen Stampfer mit Hub in Achsrichtung des Heizstabes. Dabei muß die Pulverzufuhr je Hub und ihre Verteilung am Umfang so gewählt werden, daß keine azimutale und axiale Dichteschwankungen auftreten. Dieses Verfahren eignet sich bei BN-Pulver, dessen Klopfdichte (=Dichte des Pulvers nach leichtem Klopfen an das Meßgefäß) größer als $0,25 \text{ g/cm}^3$ ist. Eine Stampfvorrichtung zum Einstampfen des Bornitrids zeigt Abb. 9.
- Durch Einvibrieren von Bornitridpulver in den Ringspalt zwischen Stromleiter und Hüllrohr. Dabei zentriert ein Zentrierrohr den Stromleiter im Hüllrohr. Vibratoren am Heizstab sorgen für eine genügende Vorverdichtung des Pulvers. Während des Einvibrierens wird das Zentrierrohr unmittelbar oberhalb der Verdichtungsebene langsam nach oben aus dem Heizstab gezogen.

Voraussetzung zur Erzielung einer genügenden Anfangsdichte des einvibrierten BN-Pulvers ist ein Pulver mit einer Klopfdichte von mindestens $0,9 \text{ g/cm}^3$. Beide Verdichtungsverfahren wurden erfolgreich verwendet.

5. Heizstabdimensionierung

Bei der Diskussion der Wärmedurchgangszahl vom Stromleiter zum Hüllrohr wurde eine Änderung der Isolierschichtstärke nicht erwogen. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, eine gewünschte Wärmedurchgangszahl durch Wahl einer geeigneten

Isolierschichtstärke zu erzielen. Dieser Weg kann jedoch aus anderen Gründen nicht beschritten werden, wie im folgenden noch angezeigt wird.

Die Entscheidung für Stromleiter aus Edelstahl oder Nickelbasislegierung beschränkt die Stromleitertemperatur auf 1200°C . Um doch die hohen Leistungsdichten von Brüterbrennelementen erzeugen zu können, wurde der gut leitende Isolator BN gewählt, der zudem aufgrund seiner geringen Härte bei den verwendeten Fertigungsmethoden extrem hohe thermische Kontakte an den Grenzflächen gewährleistet. Als Folge besitzen die hier beschriebenen Heizstäbe eine Wärmedurchgangszahl von $k \approx 1 \text{ [W/cm}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}]$, d.h. bei 250 W/cm^2 Heizflächenbelastung herrscht im Heizstab nur ein Temperaturgefälle von $\approx 250^{\circ}\text{C}$ gegenüber $\approx 1500^{\circ}\text{C}$ beim Brennstab. Sind nun eng benachbarte Bereiche der Hülle des Brennstabes oder des Heizstabes infolge unterschiedlicher Kühlung auf unterschiedlicher Temperatur, so hat dieses axiale oder azimutale Temperaturgefälle einen entsprechenden axialen oder azimutalen Wärmefluß zur Folge; d.h. sowohl beim Brennstab als auch beim Heizstab bewirkt eine örtlich veränderliche Kühlung örtlich veränderliche Heizflächenbelastungen an der Hülle. Ein gegebenes örtlich auftretendes, axiales oder azimutales Temperaturgefälle im Kühlmittel beeinflußt das kleine treibende Temperaturgefälle des Heizstabes wesentlich stärker als das große Gefälle des Brennstabes. Als Folge wird der Heizstab örtlich schwankende Kühlmitteltemperaturen wesentlich stärker durch Variation der Wärmestromdichte ausgleichen als der Brennstab. Dieses vom Brennstab abweichende Verhalten läßt sich an den zu simulierenden Brennstab annähern, wenn die Wärmeleitquerschnitte in axialer und azimutaler Richtung klein gehalten werden. D.h. Hülle, Isolierschicht und Stromleiterrohr sind möglichst dünn auszuführen, die Stützkeramik im Stromleiter schlecht leitend. Dieser Forderung kommt das als Stützkeramik verwendete MgO entgegen, das aus Gründen

der Wärmedehnung gewählt wurde.

Andere Anforderungen an die Heizstäbe schränken die mögliche thermische Anpassung an Brennstäbe wieder ein, so muß

- die Hülle mit Mantelthermoelementen instrumentierbar sein, die nicht aus ihr herausragen;
- die Isolierschicht eine hohe Sicherheit gegen elektrischen Durchschlag besitzen;
- der Stromleiter trotz Abstützung durch eine MgO-Füllung eine genügende mechanische Festigkeit aufweisen.

Die Forderung nach Instrumentierung der Hülle setzt eine Mindestwandstärke der Hülle von etwa 0,6 mm voraus. Für nicht zu instrumentierende Stäbe läßt sich die Wandstärke der Hülle reduzieren. Wie Tab. 1 zeigt, wurden minimale Isolierschichtstärken von 0,15 mm und Wandstärken des Stromleiterrohres von 0,05 mm erreicht. In Versuchen wurde nachgewiesen, daß diese Stäbe grundsätzlich den Anforderungen gerecht werden. Im Interesse eines sicheren Versuchsbetriebes sollte die Isolierschichtstärke jedoch nicht unter 0,4 mm, die Wandstärke des Stromleiters nicht unter 0,25 mm reduziert werden. Sonst ist die Gefahr des Heizstabversagens bei kleinen Inhomogenitäten relativ groß. Trotzdem können Heizstäbe mit dünneren Isolierschichten bzw. Stromleiterwandstärken in Ausnahmefällen eingesetzt werden, wenn eine besonders gute Anpassung des Heizstabes an den Brennstab erforderlich ist. Eine an sich gewünschte Erniedrigung der Wärmedurchgangszahl vom Stromleiter zur Hülle durch eine dickere Isolierschicht kommt nach den hier ausgeführten Überlegungen also nicht in Frage.

In /8/ wurde Temperatur- und Leistungsfeld von Heizstab und Brennstab mit verschiedenen inneren Abmessungen verglichen. Wie die Rechnungen zeigen, variiert die Leistungs-

dichte bei örtlich veränderlichen Kühlverhältnissen beim Heizstab stärker als beim Brennstab. Jedoch betragen die Abweichungen der örtlichen Heizflächenbelastung zwischen Brenn- und Heizstab im Rechenbeispiel mit einem exzentrisch in einem natriumdurchströmten Ringraum angeordneten Brennstab bzw. Heizstab nur 6 %. Diese Abweichung, die für Stärken von Hülle, Isolierschicht und Stromleiterrohr von 0,4 - 0,6 mm gelten, ist bei den meisten thermodynamischen Experimenten tolerierbar.

In Abb. 10 und 11 sind Querschliffe von Heizstäben verschiedener Abmessungen wiedergegeben. Außen (weiß) die Hülle, diese umschließt die Isolierschicht aus verdichtetem Bornitridpulver (schwarz). Innerhalb der Isolierschicht befindet sich der rohrförmige Stromleiter (weiß), im Stromleiter Magnesiumoxid (schwarz). Bei 3 der 4 abgebildeten Heizstäben befindet sich im Stromleiter je ein Zentralthermoelement, die in die Heizstäbe der Entwicklungsphase eingebaut wurden, um die Stromleitertemperatur überwachen zu können.

Durch Variation der Wandstärke des Stromleiterrohres läßt sich der elektrische Widerstand dieses Heizstabtyps in gewissen Grenzen variieren. Abb. 11 zeigt, daß bei Stromleiterwandstärken von 0,05 mm ein sinnvoller Mindestwert wohl bereits unterschritten wurde.

Tab. 1 zeigt eine Auflistung bisher gefertigter Heizstababmessungen und ihre technischen Daten. Die Heizstäbe lassen sich auch mit größerem, oder kleinerem Außendurchmesser herstellen. Nach Tabelle 1 betrug die größte bisher gefertigte Stablänge 2000 mm. Diese Länge kann ohne Änderung des Fertigungsverfahrens weiter erhöht werden. Dabei ist es gleichgültig, welcher Teil der Gesamtlänge als beheizte Länge auszuführen ist.

6. Toleranzen von Heizstäben

Wegen Maßabweichungen in den Halbzeugen (Stromleiter- und Hüllrohr) und in der Fertigung weisen die Heizstäbe Toleranzen auf.

a) Toleranz der beheizten Länge

Die Heizstäbe weisen Längentoleranzen von maximal ± 5 mm auf.

b) Toleranz der Isolierschichtstärke

Nach den vorliegenden Messungen besitzen Heizstäbe mit rohrförmigem Stromleiter eine Toleranz der Isolierschichtstärke von maximal $\pm 0,05$ mm.

c) Toleranz der Stromleiterwandstärke

Die Toleranz der Stromleiterwandstärke wird alleine durch die Wandstärkentoleranz im Anlieferungszustand bestimmt. Azimutale Variationen der Wandstärke von ± 10 % sind daher möglich.

d) Toleranz der Bornitridichte

Die Heizstäbe werden doppelt so stark im Durchmesser reduziert, als zur Erzielung der Enddichte des Pulvers erforderlich ist. Deshalb können Toleranzen der Bornitridichte ausgeschlossen werden.

e) Auswirkungen der Toleranzen auf die Leistungsverteilung an der Heizstabhülle.

Schwankungen der Bornitridschichtstärke oder Wandstärke des Stromleiterrohres führen zu Schwankungen der Wärmestromdichte an der Hülle von Heizstäben. Diese lassen sich jedoch quantitativ ohne Berücksichtigung der äußeren Kühlungsbedingungen nicht angeben. Zu einem späteren Zeitpunkt wird ihre Auswirkung und ihre meßtechnische Erfassung ausführlich diskutiert.

IV. Heizstaberprobung

Die Begrenzung der thermischen Belastung von Heizstäben liegt primär in der maximal zulässigen Stromleitertemperatur. Da die Wärme im Heizstab ausschließlich durch Wärmeleitung zur Hülle transportiert wird, läßt sich die Heizflächenbelastung $n = k (T_{e1} - T_H)$ angeben, wobei k die Wärmedurchgangszahl darstellt. Bei konstanter Wärmedurchgangszahl nimmt mit steigender Hüllentemperatur (T_H) und konstanter Stromleitertemperatur (T_{e1}) die Heizflächenbelastung linear ab. Deshalb kann die Ermittlung der zulässigen Stromleitertemperatur sowohl bei hohen Hüllentemperaturen und niedrigen Heizflächenbelastungen, oder bei niedrigen Hüllentemperaturen und entsprechend hohen Heizflächenbelastungen erfolgen. Für thermodynamische Experimente in einphasigem Flüssigmetall interessiert die Erprobung der Heizstäbe in einem Temperaturbereich von ca. 400 - 700 °C. Da die Erprobung der Heizstäbe in diesem Bereich relativ aufwendige Prüfstände erfordert, wurden sie ergänzt durch Leistungstests in einem Wasserprüfstand mit sehr hohen Heizflächenbelastungen. Die Leistungsdichte wurde in diesen Versuchen so gesteigert, daß die zulässige Grenztemperatur für die Stromleiter ermittelt werden konnte.

Diese mit geringen Kosten durchführbaren Erprobungen in Wasser sind jedoch nur bedingt auf den geplanten Einsatz in dem interessierenden Temperaturbereich übertragbar.

Denn bei der Erprobung in kaltem Wasser mit hoher Leistungsdichte sind die Außenzonen der Isolierschicht kalt. Da BN seine elektrische Leitfähigkeit mit wachsender Temperatur sehr stark erhöht, ist diese Erprobung hinsichtlich der Güte der Isolation - Gefahr des elektrischen Durchschlages - weniger kritisch als bei höheren Temperaturen. Andererseits treten bei den Wassertests mit hoher Leistungsdichte sehr hohe Temperaturgradienten im Heizstab auf. Da nun die Heizstabhülle auf niedrigem Temperaturniveau eine sehr hohe

Festigkeit aufweist, stellen die aus dem hohen Temperaturgradienten resultierenden Wärmespannungen - verbunden mit elastischer und plastischer Stromleiterdeformation - für den Heizstab eine wesentlich höhere Belastung dar, als eine Erprobung unter den geplanten Einsatzbedingungen. Deshalb liefert die Erprobung sowohl bei den geplanten Einsatztemperaturen als auch im kalten Wasser mit höherer Leistungsdichte ein gutes Bild über die Leistungsfähigkeit der Heizstäbe. In der Tabelle 2 und 3 sind die Ergebnisse der Leistungstests von Heizstäben mit BN-Isolation und rohrförmigem Stromleiter zusammengestellt. Daraus läßt sich folgendes entnehmen.

1. Kurzzeiterprobung in Wasser

In der Kurzzeiterprobung in Wasser von 20 - 30°C bei ca. 150°C Heizstabhüllentemperatur konnten die Stäbe mit maximalen Heizflächenbelastungen von 1000 - 1330 W/cm² belastet werden. Die Zentraltemperatur bei dieser Leistung lag zwischen 1120°C and 1360°C, die maximale Gesamtbetriebszeit bei 5-6 Stunden. Die Versuche zeigen, daß Stromleitertemperaturen von 1100°C zulässig sind; im Einzelfalle läßt sich die Stromleitertemperatur fast bis auf die Schmelztemperatur des Stromleiterwerkstoffes von ca. 1400°C (Werkstoff Nr. 2.4861) steigern. Aus den Meßwerten läßt sich eine mittlere Wärmedurchgangszahl vom Stromleiter zur Hülle des Heizstabes von $k \approx 1 [W/cm^2 \text{ } ^\circ C]$ (bezogen auf den Hüllenaußendurchmesser) ermitteln.

2. Langzeiterprobung in Wasser

Um die Beständigkeit des Stromleiters bei hohen Betriebstemperaturen zu erproben, wurden Langzeiterprobungen über jeweils ca. 700 h bei verschiedenen Leistungsstufen durchgeführt. Dabei zeigte sich, daß bei Erprobung in kaltem Wasser von 20 - 30°C und Hüllentemperaturen von ca. 150°C 700 h-Läufe noch mit Heiz-

flächenbelastungen von 850 W/cm^2 durchführbar sind. Die Zentraltemperatur liegt dann bei ca. $1000\text{-}1100 \text{ }^\circ\text{C}$. Wurde die Heizflächenbelastung auf 880 bzw. 950 W/cm^2 erhöht, so brannten die Stäbe nach $400 - 500 \text{ h}$ durch. Die Zentraltemperatur lag in diesem Falle bei $1050\text{-}1150 \text{ }^\circ\text{C}$.

Das Ergebnis der Erprobung der Heizstäbe in Wasser von $20 - 30 \text{ }^\circ\text{C}$ läßt sich wie folgt zusammenfassen: Bei den gegebenen großen Temperaturgradienten im Heizstab - verbunden mit betriebsbedingten Abschaltungen - sind Standzeiten größer 700 h bei Stromleitertemperaturen kleiner $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ möglich. Stromleitertemperaturen zwischen 1050 und $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ lassen noch Standzeiten von ca. $400 - 500 \text{ h}$ zu. Im Kurzzeitversuch brennen Heizstäbe bei Stromleitertemperaturen zwischen 1100 und $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ durch. Die Überlappung der zulässigen Stromleitertemperaturen für Kurzzeitbelastung und mehrere hundert Betriebsstunden deutet an, daß die Langzeitbelastung den Stromleiter relativ wenig schwächt.

3. Zyklische Belastung im Wasser

Hohe Leistungsdichten im Heizstab führen zu hohen Relativdehnungen im Heizstab, die zu plastischen Deformationen des Stromleiters führen. Folglich müssen zyklische Belastungen unter diesen Bedingungen eine außerordentlich hohe Heizstabbeanspruchung zur Folge haben. Die plastische Stromleiterdeformation ist bei gegebener Stromleitertemperatur um so höher, je niedriger die Hüllentemperatur und - damit gekoppelt - je höher die Leistungsdichte ist. Die zyklische Erprobung der Heizstäbe im Wasser unter hoher Leistungsdichte stellt deshalb die größte Heizstabelastung dar. Wie Tabelle 2 zeigt, lassen die Heizstäbe bei Leistungsdichten von rund 1100 W/cm^2 bei $150 \text{ }^\circ\text{C}$ Hüllentemperatur noch einige hundert Leistungszyklen zu. Die Zyklen wurden durch Zu- und Abschaltung der Erregung des als Stromquelle dienenden Generators gefahren. Dabei sank die Leistung

beim Abschalten in 1 sec auf 50 % der Maximalleistung; die gemessenen Temperaturgradienten im Zentrum des Stromleiters betragen $200 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{sec}$.

Die hohe zulässige Leistungsdichte bei zyklischer Belastung, die nur wenig unter der zulässigen Kurzzeitbelastung liegt, beweist die Unempfindlichkeit der Heizstäbe gegen schockartige Beanspruchung.

4. Erprobung der Heizstäbe bei der geplanten Einsatztemperatur von $600 - 700 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Wie Tabelle 3 zeigt, wurden eingehende Langzeiterprobungen der Heizstäbe bei einer Hüllentemperatur von 700°C durchgeführt. Als Kühlmittel wurde in diesem Fall Dampf verwendet. Da die Belastung der Heizstäbe ausschließlich durch die Leistungsdichte und die Höhe der Betriebstemperaturen gegeben ist, sind diese Versuchsergebnisse ohne jede Einschränkung auf andere Kühlmittel übertragbar. Nach den umfangreichen vorliegenden Meßwerten lassen sich die Heizstäbe bei 700°C Hüllentemperatur über einige hundert bis einige tausend Betriebsstunden mit einer Heizflächenbelastung von $200 \text{ W}/\text{cm}^2$ belasten. Die Wärmedurchgangszahl vom Stromleiter zur Hülle wurde mit $k \approx 1 [\text{W}/\text{cm}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}]$ ermittelt. Die Relativdehnungen zwischen Stromleiter und Hülle bei Beheizung des Stabes reichen offenbar auch bei diesem Temperaturniveau noch aus, um einen guten thermischen Kontakt an den Grenzflächen zu erzeugen.

Nachlassende thermische Kontakte würden sich durch ein Abnehmen der Wärmedurchgangszahl k bemerkbar machen. Dieses wird bei noch höheren Hüllentemperaturen eintreten, weil sich dann infolge der sehr geringen Wärmedehnung des BN an den Grenzflächen im Heizstab Spalte bilden.

Mit den bisher durchgeführten Leistungstests läßt sich das in Abb. 12 dargestellte Leistungsdiagramm aufstellen,

da zum einen in dem untersuchten Bereich der Hüllentemperatur ($T_H \leq 700^\circ\text{C}$) der Wärmedurchgang konstant ist und zum anderen die Stromleitertemperatur (T_{e1}) die zulässige Leistungsdichte des Heizstabes bestimmt. Wie man sieht, stellen die Grenzkurven der Belastung eine Gerade dar. Sie ist eine Kurve gleicher Stromleitertemperatur. Oberhalb 700°C muß sie infolge der sich bildenden Spalte von der Geraden nach unten abbiegen. Nach dieser Abbildung sind die nominellen Belastungen des SNR für diese Heizstäbe noch weit von der Grenzkurve entfernt. Deshalb ist die Verwendung dieser Heizstäbe durch entsprechende Modifikationen sogar für Natriumsiedeexperimente möglich.

5. Beurteilung des Einflusses der Heizstabdimensionierung auf die zulässige Heizstabelastung.

Heizstäbe simulieren den Brennstab umso genauer, je dünnwandiger Hülle, Isolierschicht und Stromleiter ausgeführt werden. Da die Heizstabhülle instrumentiert werden muß, läßt sie sich nicht unter $0,6\text{ mm}$ ausführen. Deshalb wurden lediglich Isolierschicht und Stromleiterwandstärke verändert.

Die BN-Isolierschichtstärke wurde bis auf $0,15\text{ mm}$ reduziert, die Wandstärke des Stromleiterrohres sogar bis auf $0,05\text{ mm}$. Wie in den Kurzzeitversuchen gezeigt, lassen sich mit diesen Heizstäben - sowohl mit dünner Isolierschicht als auch mit sehr dünnwandigem Stromleiterrohr - fast ähnlich hohe Belastungen erreichen wie mit den Heizstäben mit Isolierschichten von $0,4 - 0,6\text{ mm}$ und Stromleiterwandstärken von $0,4 - 0,5\text{ mm}$. Trotzdem wurde auf die breitangelegte Erprobung von Heizstäben mit minimalisiertem Stromleiter und Isolierschicht verzichtet. Denn die Fertigung dieser Heizstäbe ist wesentlich aufwendiger, die Betriebssicherheit geringer. Immerhin zeigen die Versuche, daß Heizstäbe auch mit minimaler Stärke von Isolierschicht bzw. Stromleiter für Sonderaufgaben realisierbar sind.

V. Instrumentierung der Heizstäbe

Thermodynamische Versuche an Brennstabmodellen erfordern Heizstäbe mit Temperaturmeßfühlern in der Heizstabhülle. Hierzu finden ausschließlich Thermoelemente Verwendung. Im folgenden werden die Instrumentierungsarten der Heizstabhülle diskutiert.

Dabei werden hauptsächlich die folgenden Anforderungen gestellt:

- keine geometrische Veränderung der Heizstaboberfläche;
- keine unzulässige Beeinflussung des Wärmeflusses durch den Meßfühler;
- Einbau dicht unter der Heizstaboberfläche, damit schnelle Temperaturschwankungen registrierbar sind;
- schnell ansprechende Meßfühler;
- geringe Abmessungen des Meßfühlers, um dünne Isolierschichten und dünne Hüllen realisieren zu können.

Als Lösungen des Meßproblems bieten sich an:

1. Nackte Thermodrähte, elektrisch getrennt in der BN-Isolierschicht geführt, werden von innen an der Hülle des Heizstabes festgepunktet.

Vorteil:

- Die Thermodrähte besitzen etwa gleiche Leitfähigkeit wie das BN, in dem sie eingebettet sind, sie stören also den örtlichen Wärmefluß nicht.

Nachteile:

- Große Temperaturdifferenz vom Ort des Meßfühlers bis zur Heizstabhülle, da weit von der wärmeabgebenden Außenwand entfernt;
- Drähte verlaufen in BN-Schichten und gefährden dadurch die elektrische Isolation;
- Beim fertigungsbedingten Rundhämmern der Stäbe reißen Drähte leicht ab.

2. Mantelthermoelemente laufen in Innennuten des Hüllrohres.

Vorteil:

- Keine Beeinträchtigung der Isolierschicht.

Nachteile:

- Hülle durch Nuten geschwächt;
- Größerer Durchmesser als nackte Drähte;
- Bei MgO-Füllung der Thermolemente Störung des örtlichen Wärmeflusses;
- Ungewisser Kontakt zur Hülle, nur durch BN-Zwischenschicht gewährleistet, damit große Unsicherheit in der Bestimmung der Hüllentemperatur des belasteten Heizstabes;
- Durchmesserreduktion des Heizstabes durch Hämmern zum Verdichten des BN-Pulvers erschwert.

3. Mantelthermoelemente laufen im Hüllrohr, das als übereinandergezogenes Doppelrohr ausgeführt ist (Abb. 13).

Vorteile:

- Thermolemente dichter unter der Hülle als nach Einbauart 1. und 2.;
- Keine Beeinträchtigung der BN-Isolierschicht;
- Thermolemente können nach der Heizabfertigung in die Hülle eingebettet werden.

Nachteile:

- Hülle durch Nuten geschwächt;
- Bei MgO-Füllung der Thermolemente Störung des lokalen Wärmeflusses;
- Im Doppelrohr Kontaktstelle mit unbekanntem Kontaktkoeffizienten, daher rechnerische Bestimmung der Hüllentemperatur aus der gemessenen Temperatur im Hüllrohr nicht möglich.

4. Mantelthermoelemente laufen in Außennuten des Hüllrohres, die nach dem Einlegen der Thermoelemente durch plastische Hüllrohrverformung in der Nut gehalten werden (Abb. 14).

Vorteile:

- Thermoelemente dichter unter der Hülle als nach Lösung 1. und 2.;
- Keine Beeinträchtigung der BN-Isolierschicht;
- Thermoelemente können nach der Heizstabfertigung in die Hülle eingebettet werden.

Nachteile:

- Hülle durch Nuten geschwächt;
- Zwischen Hülle und Thermoelement existiert ein Spalt mit unbekanntem thermischen Kontaktkoeffizienten. Rechnerische Bestimmung der Hüllentemperatur aus den gemessenen Temperaturen daher nicht möglich.
- Bei MgO-Füllung der Thermoelemente zusätzlich Störung des örtlichen Wärmeflusses.

5. Mantelthermoelemente laufen in Außennuten des Hüllrohres und sind mit einem Nickelbasislot mit dem Hüllrohr verlötet (Abb. 14).

Vorteile:

- Thermoelement sehr dicht unter der Hülle;
- Keine Beeinträchtigung der BN-Isolierschicht;
- Durch Lot einwandfreie thermische und mechanische Verbindung zur Hülle;
- Thermoelemente können nach Fertigung der Heizstäbe in Hülle eingebaut werden.

Nachteile:

- Hülle durch Nuten geschwächt;
- Bei MgO-Füllung der Thermoelemente Störung des lokalen Wärmeflusses.

Von den diskutierten Lösungen erscheint uns Lösung 5 die geeignetste.

Sie erfordert die geringste Korrektur zur Bestimmung der Hüllenoberflächentemperatur aus der gemessenen Temperatur in der Rohrwand.

Die im Handel erhältlichen Mantelthermoelemente besitzen MgO als Isolationsmaterial. Diese Keramik besitzt eine erheblich geringere Wärmeleitfähigkeit als die Edelstahlhülle des Heizstabes, in die sie eingebettet werden. Als Folge ist der Wärmestrom gerade im Bereich der eingebetteten Thermoelemente gestört. Um diesen Mangel zu beheben, wurden in der GfK Mantelthermoelemente mit BN-Isolation im Bereich der Meßspitze entwickelt /9/. Durch Durchmesserreduktion wird das eingefüllte BN-Pulver so verdichtet, daß es die Leitfähigkeit des Edelstahls besitzt. Diese Thermoelemente, in die Edelstahlhülle mit Nickelbasislot verlötet, lassen nach /10/ eine eindeutige Bestimmung der Hüllentemperatur ohne Störung im Bereich der Meßspitze zu. Diese Thermoelemente konnten bisher mit einem Durchmesser von 0,40 mm hergestellt werden. Zur zuverlässigen Einbettung der Thermoelemente in der Heizstabhülle muß diese eine Stärke von mindestens 0,70 mm aufweisen.

Diese Art der Instrumentierung wird in der GfK erfolgreich eingesetzt. Wird aus Simulationsgründen eine dünnere Heizstabhülle gefordert, so läßt sie sich nur mit Mantelthermoelementen von 0,25 mm Außendurchmesser mit MgO-Isolation instrumentieren. Die Hüllrohrwandstärke kann dann auf $\sim 0,6$ mm reduziert werden. Da ihre Einbettung in die Heizstabhülle den örtlichen Wärmefluß stört, läßt sich in diesem Fall, die Hüllentemperatur des beheizten Stabes nicht aus der Kenntnis der Tiefenlage der Thermoelemente ermitteln. Die Temperaturkorrektur muß dann mit Hilfe eines geeigneten Eichverfahrens /15/ am beheizten Stab bestimmt werden.

VI. Literatur

- /1/ Goldsmith, Watermann, Hirschhorn:
Handbook of Thermophysical Properties of Solid
Materials
McMillan Company New York, 1961

- /2/ J.N. Smith jr. H. Saltsburg
Journal of Chem. Phys. Bd40 Juni 64, S. 3585

- /3/ Landolt-Börnstein
Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie,
Astronomie, Geophysik und Technik
IV. Bd. Technik Teil 2, S. 218 - Springer Verlag 1964

- /4/ Handbuch Heizleiterwerkstoffe
Vacuumschmelze Hanau 1964 - 1967

- /5/ ORNL-TM-3900, May/June 1972 S. 38

- /6/ ORNL-TM-3670, Nov/Dez 1971 S. 56

- /7/ V. Casal:
Heizstäbe mit indirekter Widerstandsbeheizung zur
Simulierung von Kernbrennstäben,
KFK 894, 1968

- /8/ S. Malang, K. Rust, H. Tschöke:
The Influence of Heating Method and Rod Eccentricity
on the Measurement in Sodium Experiments.
Int. Meeting on Heat Transfer in Liquid Metals,
Paper Nr. 21 - Trogir Yugoslavia, Sept. 1971

- /9/ S. Malang:
Mantelthermoelemente mit Bornitrid-Isolation
Atomwirtschaft-Atomtechnik, 17 (1972) S. 155-156

- /10/ R. Möller, H. Tschöke:
Theoretische Untersuchungen zur Wandtemperatur-
messung an simulierten Brennstäben für thermo-
dynamische Experimente in Natrium
KFK 1555, April 1972
- /11/ W.D. Kingery, Mc Quarrie:
Thermal Conductivity-Concept of Measurement and
Factors Affecting, Thermal Conductivity of Ceramic
Material,
J. Am. Cer. Soc. Bd. 37,2 (1954) S. 67 - 72
- /12/ M.v.Kiss:
Messung und theoretische Bestimmung der Wärme-
leitfähigkeit von gut leitenden Pulvern.
Würenlingen, Ber.d.Eidgen.Inst. für Reaktor-
forschung Nr. 46 1963
- /13/ Krischer, Kroll:
Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungs-
technik,
Springer Verlag 1963 Berlin, Göttingen, Heidelberg
- /14/ The Industrial Graphite Engineering Handbook;
Union Carbide Int. Comp. 1964
- /15/ S. Malang, R. Möller, K. Rust, H. Tschöke:
Fehlermöglichkeiten bei der thermischen Simulation
von Brennstäben durch Heizstäbe und bei der Be-
stimmung lokaler Oberflächentemperaturen
KTG-Fachtagung: Stand und Erfordernisse der
Vorhersage physikalischer Kenngrößen für Thermische
und Schnelle Leistungsreaktoren,
Jülich, Jan. 23 - 25, 1973

Nomenklatur

d	[mm]	Heizstabdurchmesser
k	[W/cm ² °C]	Wärmedurchgangszahl
K	[%]	bezogene Wärmedurchgangszahl
n	[W/cm ²]	Heizflächenbelastung
r	[Ω·cm]	spezifischer elektrischer Widerstand
R	[Ω]	elektrischer Widerstand
s	[mm]	Wandstärke der Heizstabhülle
T	[°C]	Temperatur
z	[—]	Zyklenzahl
α	[%]	Dichte bezogen auf die theoretische Dichte
ε	[—]	Emissionszahl
λ	[W/cm °C]	Wärmeleitfähigkeit
ρ	[gr/cm ³]	Dichte

Indices

e1	Elektrode betreffend (Stromleiter)
H	Hülle betreffend
o	Ausgangsgröße
x	laufende Größe

Außendurchmesser	6,2	6,0	6,0	6	6	6	5,55	9,0	6,5	7,55	6,0	6,0	6,0
Gesamtlänge	~600	~600	~600	600	1000	600	~400	1500	1400	1400	500	500	500
beheizte Länge	300	~300	300	300	400	320	~150	1000	1000	1000	210	250	250
Hüllrohr - wandstärke	0,46	0,42	0,49	0,46	0,39	0,38	0,40	0,95	0,35	0,8	0,6	0,4	0,45
Isolierschicht- stärke	0,7	0,53	0,63	0,46	0,605	0,42	0,15	0,53	0,8	0,7	~0,5	0,63	0,60
Stromleiter- wandstärke	0,3	0,42	0,42	0,4	0,4	0,4	0,36	0,36	0,31	0,45	0,05	0,47	0,19
Elektrischer Widerstand [Ω/m]	0,38	0,20	0,20	0,22	0,22	0,22	0,23	0,14	0,24	0,18	1,90	0,18	0,53

Tabelle 1 Heizstababmessungen (Maße in mm)

Nr	Zeit [h]	n [W/cm ²]	T _{el} [°C]	T _H [°C]	d _H [mm]	s _H [mm]	s _{is} [mm]	s _{BN} [mm]	Bemerkung.
1		1340	1330	150					Kurzzeit
2		1030	1200	100	6,2	0,42	0,42	0,53	"
3		1220	1220	100	6,05	0,38	0,4	0,42	"
4		1315	1290	100	6,05	0,38	0,4	0,42	"
5		1250	1250	100	6,1	0,38	0,4	0,42	"
6		1260	1360	150	5,5	0,40	0,3	0,15	"
7		1202	1317	150	6	0,45	0,19	0,6	"
8		1008	1120	150	6,2				"
9		1095		150	6,2				"
10		1138	1170	150	6	0,45	0,19	0,6	"
11		1062		150	6	0,6	0,05	0,5	"
12		1060		150	6	0,6	0,05	0,5	"
13	100	510	650		6,2	0,42	0,42	0,53	
14	729	740	764	150	6,2	0,38	0,4	0,42	
15	730	744	960	100	6,2	0,38	0,4	0,42	
16	750	700	1000	100	6,2	0,38	0,4	0,42	
17	740	850	911	100	6,2	0,38	0,4	0,42	
18	620	660	850	100	6,2	0,38	0,4	0,42	
19	480	900		100	6,2	0,38	0,4	0,42	
20	456	880	1170	100	6,1	0,38	0,4	0,42	
21	478	950	1130	100	6,1	0,38	0,4	0,42	
22		700/	840	100	6,1	0,38	0,4	0,42	1600Z
23		720/	790	100	6,1	0,38	0,4	0,42	1170Z
24		750/ 840	850 850		6,1 6,1	0,38 0,38	0,4 0,4	0,42 0,42	2350Z 80Z
25		888/ 960/ 1090/	1000 1050 1150		6,2 6,2 6,2	0,38 0,38 0,38	0,4 0,4 0,4	0,42 0,42 0,42	2500Z 1900Z 400Z
26		960/ 1000/ 1100/ 1180/	1020 1160 1180 1260		6,2				1940Z 2400Z 1200Z 340Z

Heizflächenbelastung... n
 Stromleitertemperatur... T_{el}
 Hüllentemperatur... T_H
 Heizstabaußen φ... d_H

Heizstabhüllenwandstärke s_H
 Stromleiterwandstärke... s
 Isolierschichtstärke... s_{BN}
 Zyklenzahl: Z

Tabelle 2

Heizstaberprobung in Wasser

Stab Nr.	Stunden	Stab Nr.	Stunden
A - 1	380	A - 34	473
2	290	35	648
3	390	36	310
4	120	37	203
7	2279	39	119
8	916	40	250
9	1276	41	542
11	2110	x 42	1202
12	200	43	436
13	176	44	323
21	1073	45	455
22	142	46	377
23	142	47	639
24	1178	48	-
25	923	49	-
26	275	50	-
27	1366	51	-
28	1410	x 53	401
29	674	54	386
31	858	x 56	500
32	506	x 58	322
33	1404	61	375

Heizflächenbelastung 200 Watt/cm²
 Hüllentemperatur 700 °C
 Stromleitertemperatur 900 - 950 °C
 Heizstab außen durchmesser 6,5 mm
 Heizstabhüllenwandstärke 0,35 mm
 Isolierschichtstärke 0,65 bzw. 0,8
 Stromleiterwandstärke 0,31
 mit x bezeichnete stäbe: Hüllentemp. = 622 °C
 n = 200 Watt/cm²
 T_H = 622 °C

Tabelle 3 Heizstaberprobung in Dampf

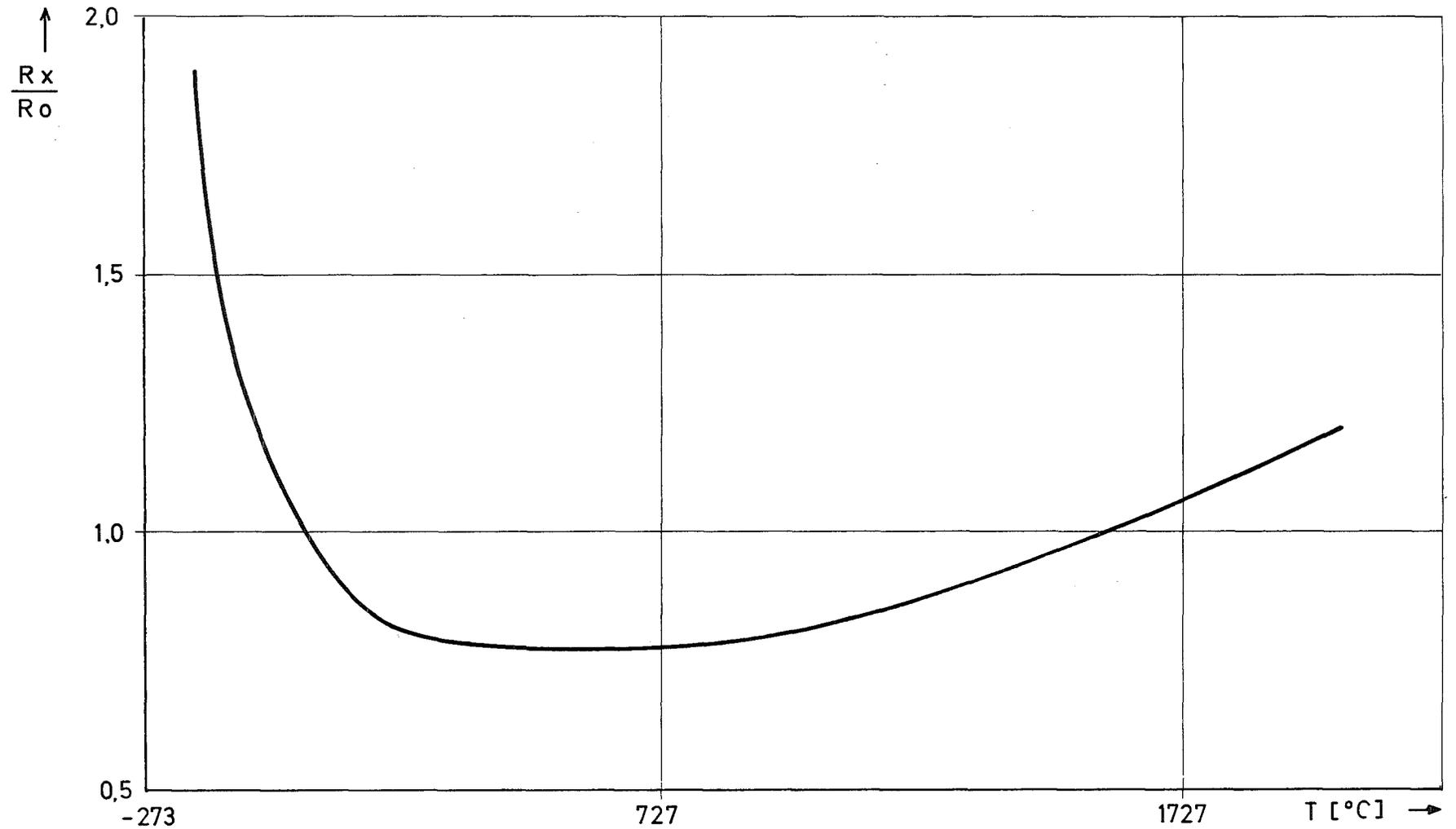


Abb.1 Bezogener elektrischer Widerstand von Graphit als Funktion der Temperatur nach [14]

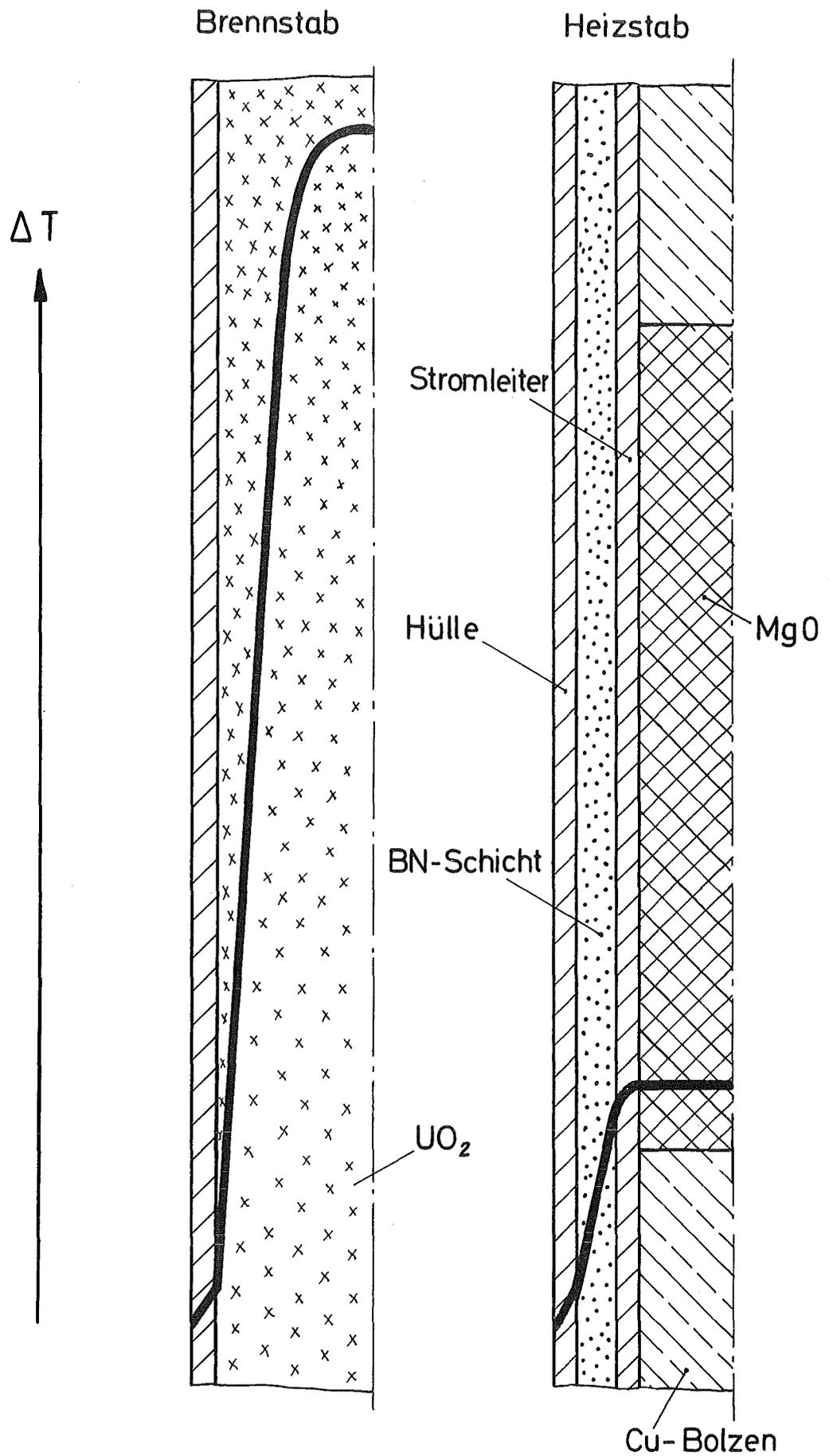
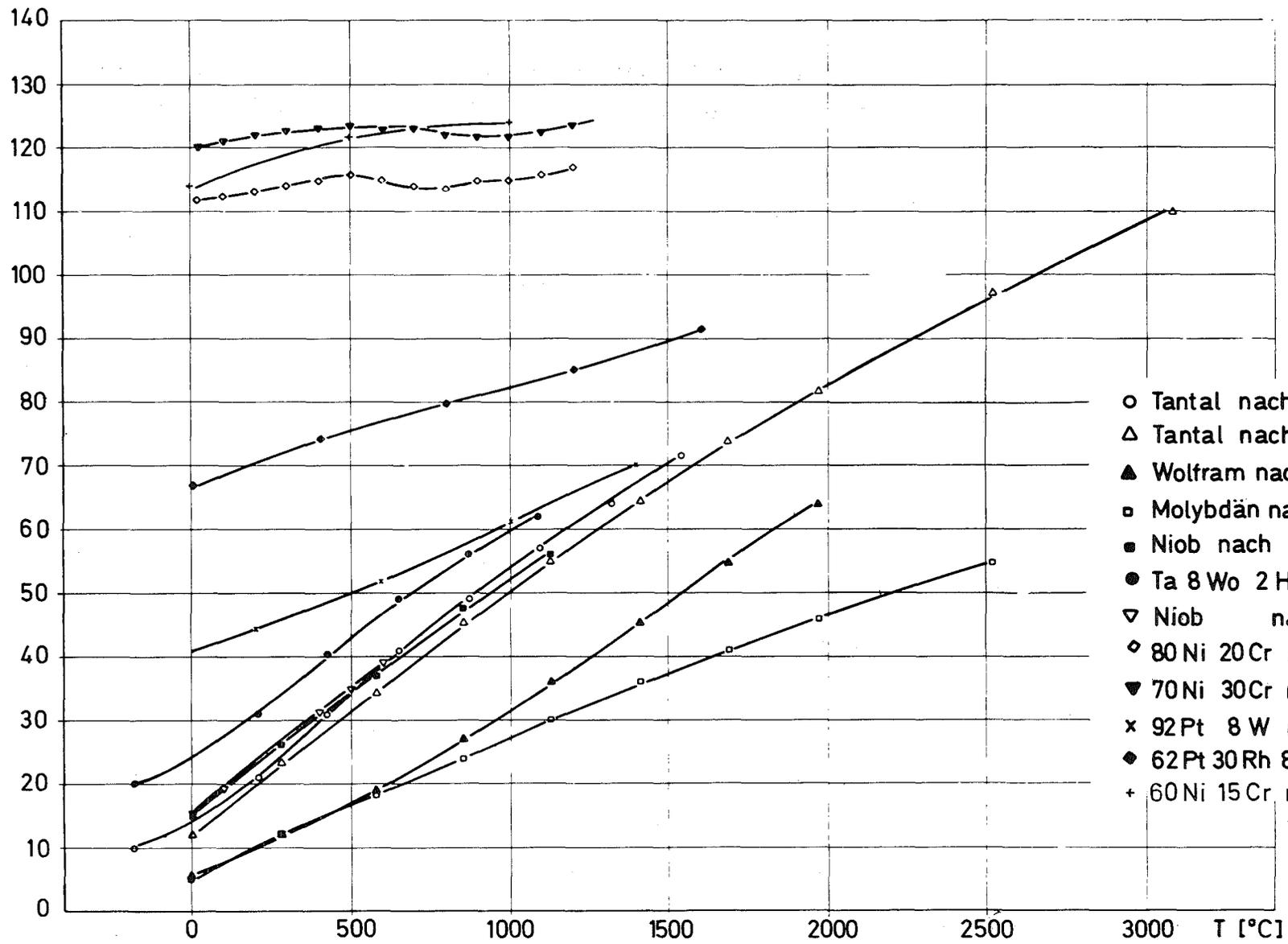


Abb. 2 Schematische Darstellung des Aufbaues von Brennstab und Heizstab im Längsschnitt jeweils mit Temperaturprofil bei einer Leistungsdichte von 200 W/cm^2

$r \cdot 10^6$
[$\Omega \cdot \text{cm}$]



- Tantal nach [1]
- △ Tantal nach [2]
- ▲ Wolfram nach [1]
- ◻ Molybdän nach [1]
- Niob nach [1]
- Ta 8 Wo 2 Hf nach [2]
- ▽ Niob nach [3]
- ◇ 80 Ni 20 Cr nach [4]
- ▽ 70 Ni 30 Cr nach [4]
- × 92 Pt 8 W nach [5]
- ◆ 62 Pt 30 Rh 8 W nach [6]
- + 60 Ni 15 Cr nach [4]

Abb. 3 Elektrischer Widerstand metallischer Werkstoffe

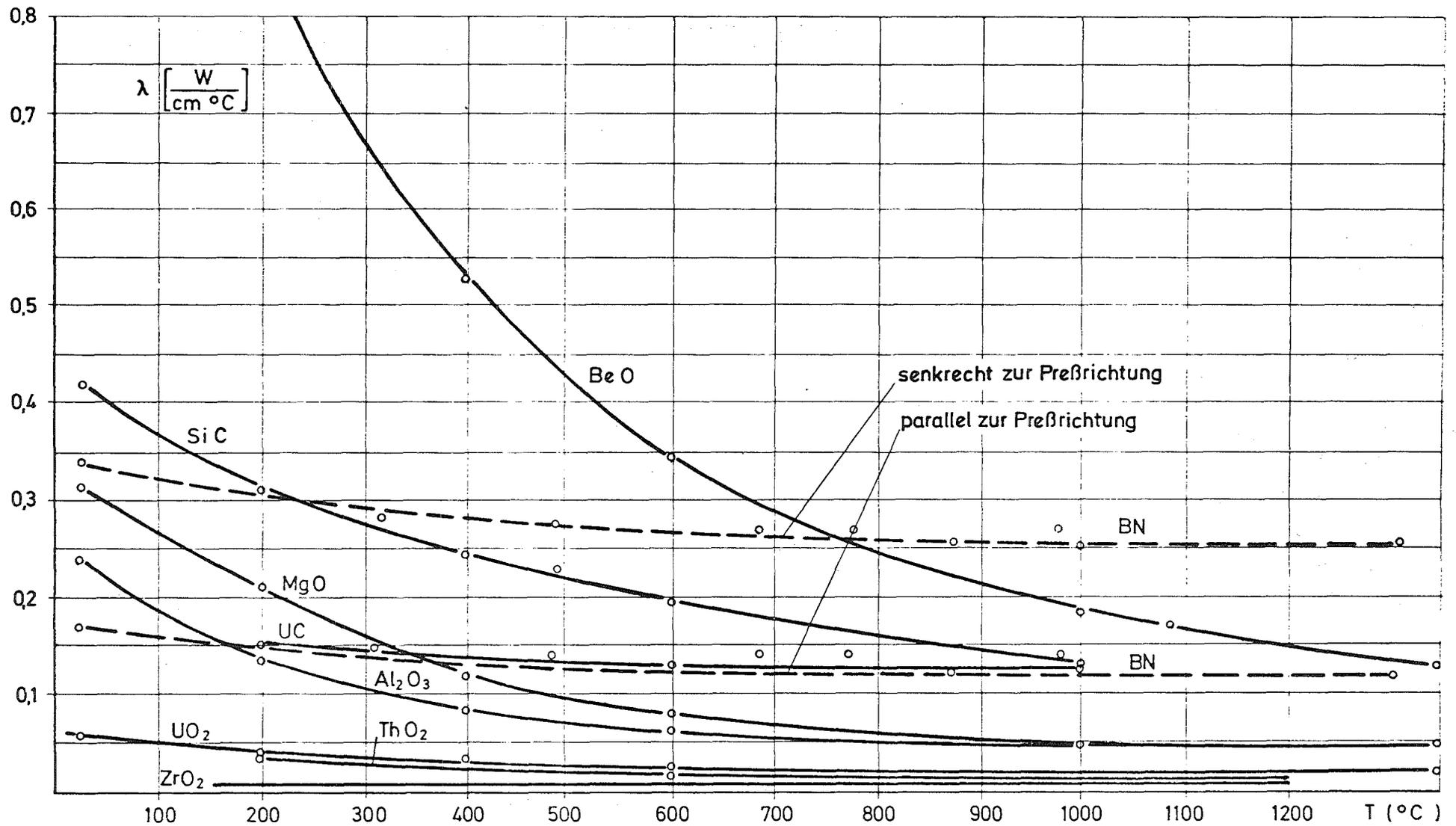


Abb.4 Wärmeleitfähigkeit keramischer Werkstoffe als Funktion der Temperatur bei theoret. Dichte (BN mit 93% d.th.Dichte) nach [1,11]

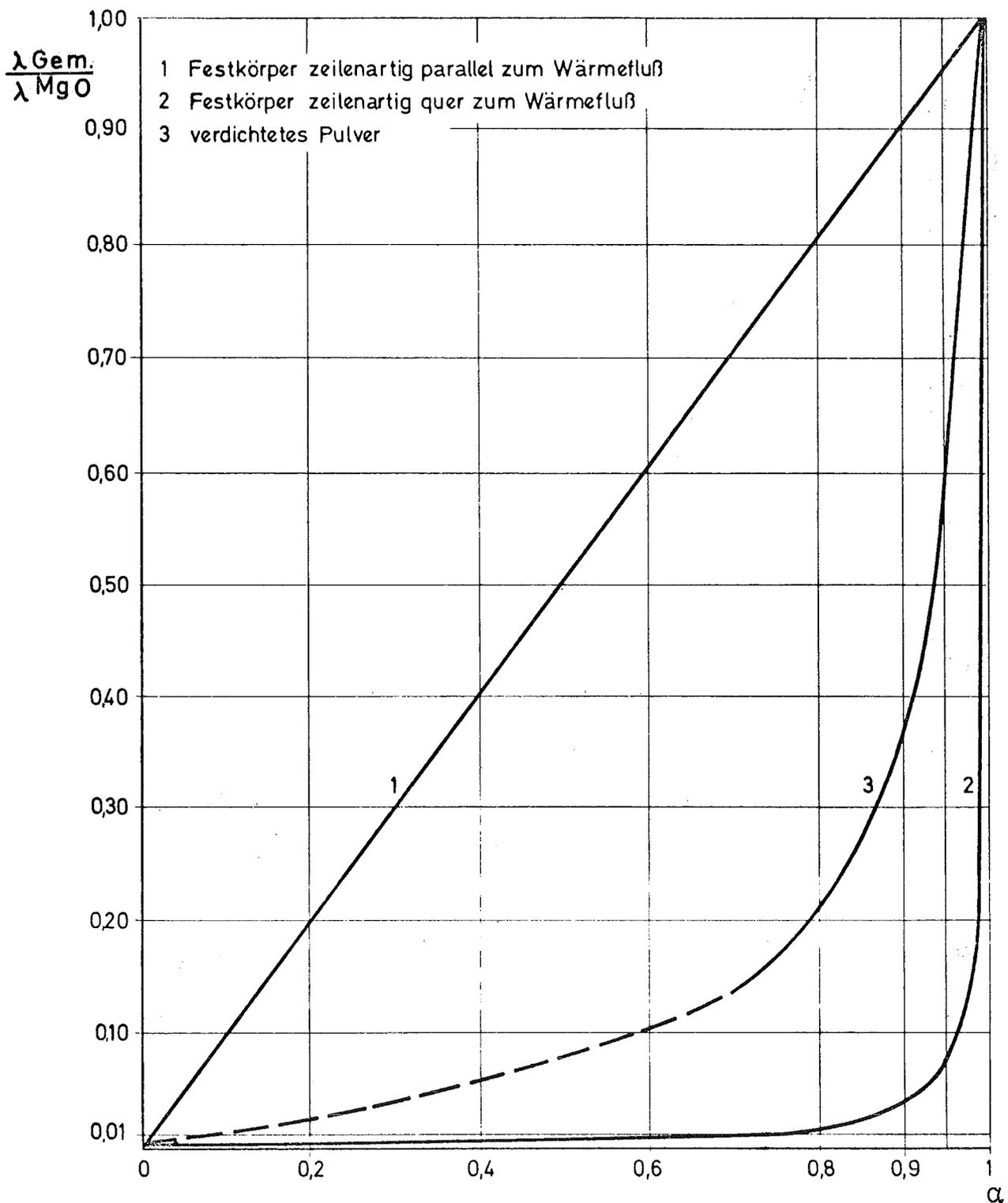


Abb. 5 Leitfähigkeit eines Gemisches von MgO und Luft bei 500°C als Funktion der Anordnung und des volumetrischen MgO -Anteils α nach [12] und [13]

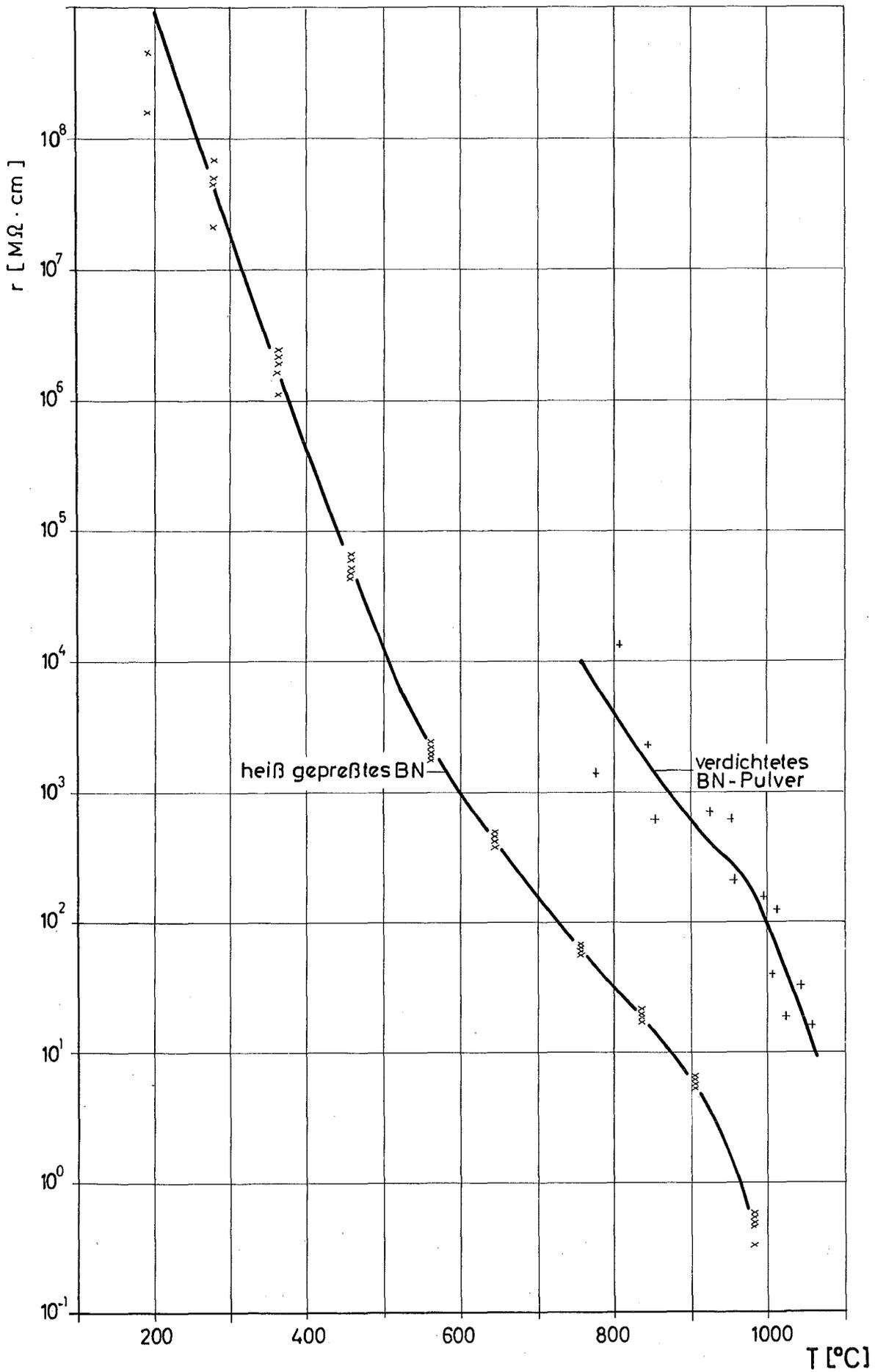


Abb.6 Isolationswiderstand von BN gemessen an Heizstäben
 BN - Dichte: $\rho \approx 2,05 \text{ g/cm}^3$

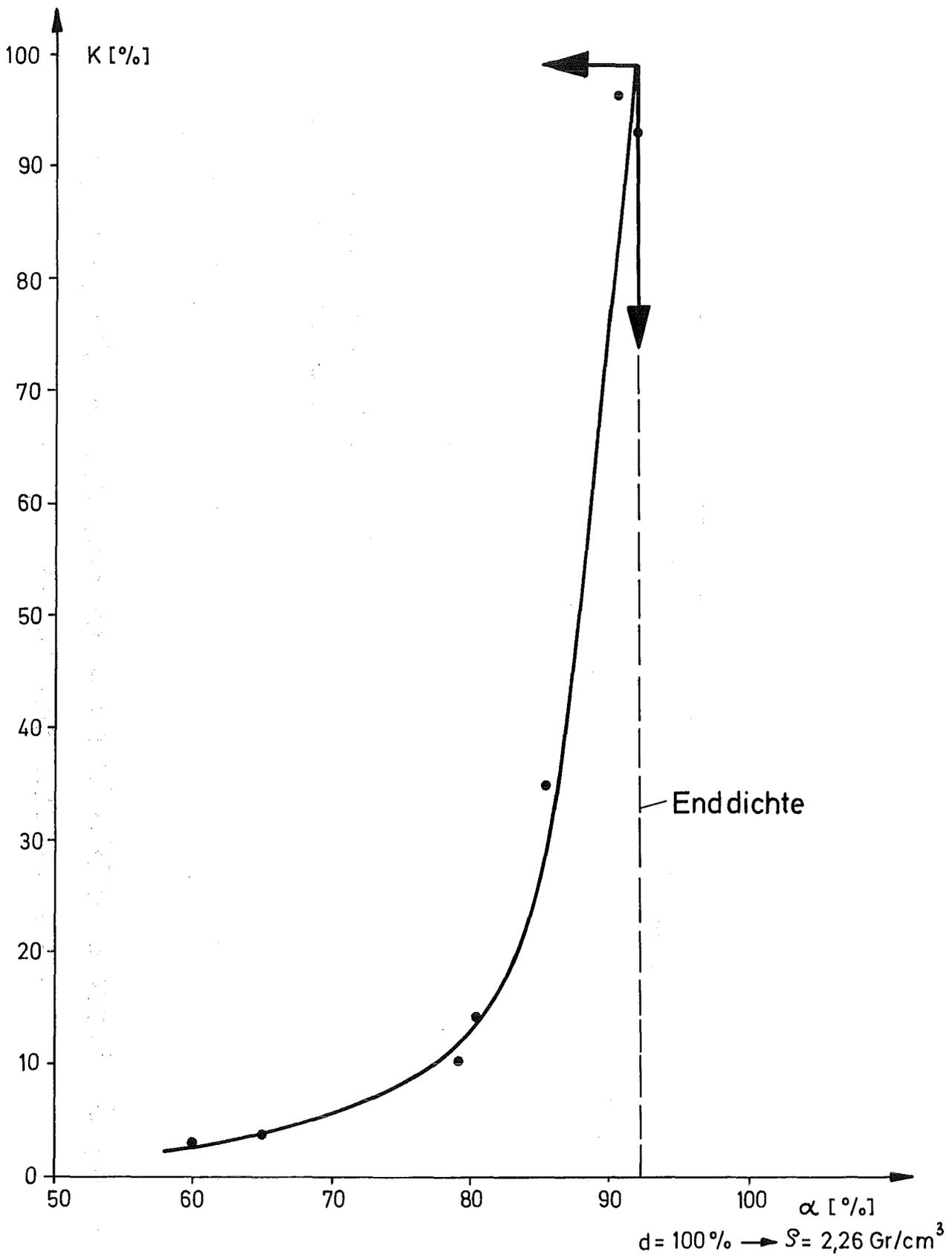


Abb. 7 Bezogener Wärmedurchgang K Stromleiter-Hülle in Abhängigkeit von der relativen BN-Dichte α im Ringspalt zw. Stromleiter und Hülle.

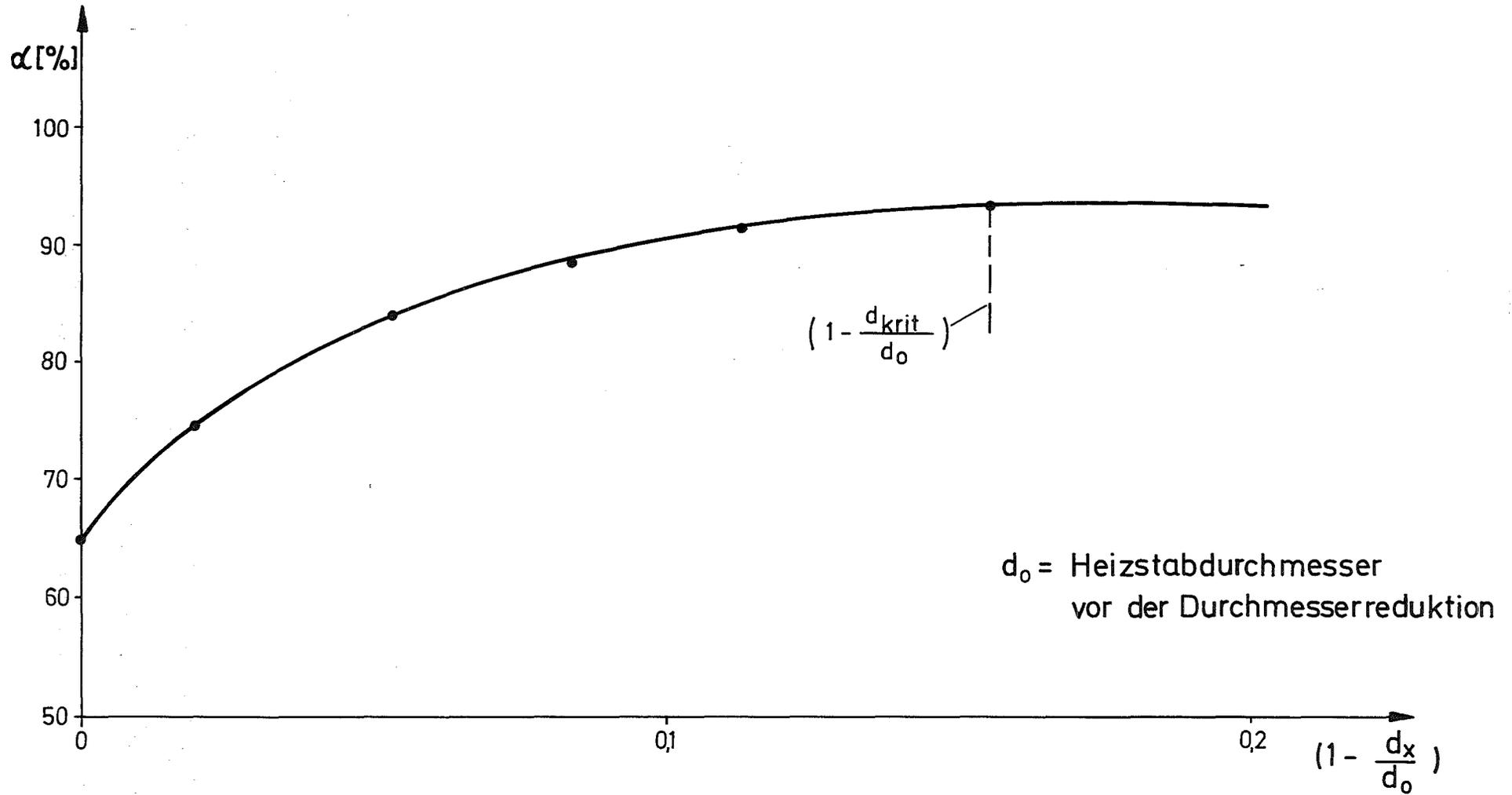


Abb.8 Änderung der bezogenen BN-Dichte α im Heizstab bei Durchmesserreduktion des Heizstabes

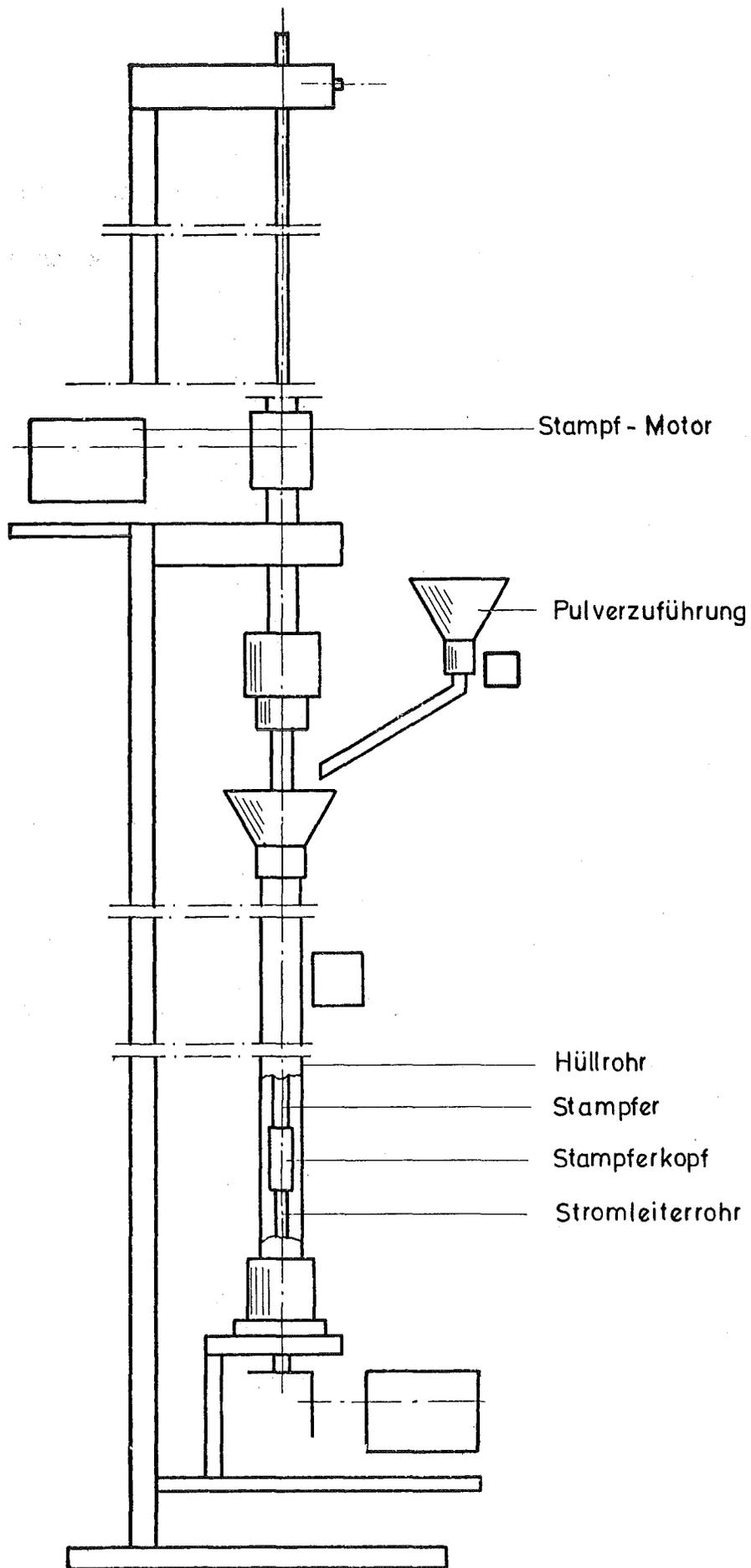
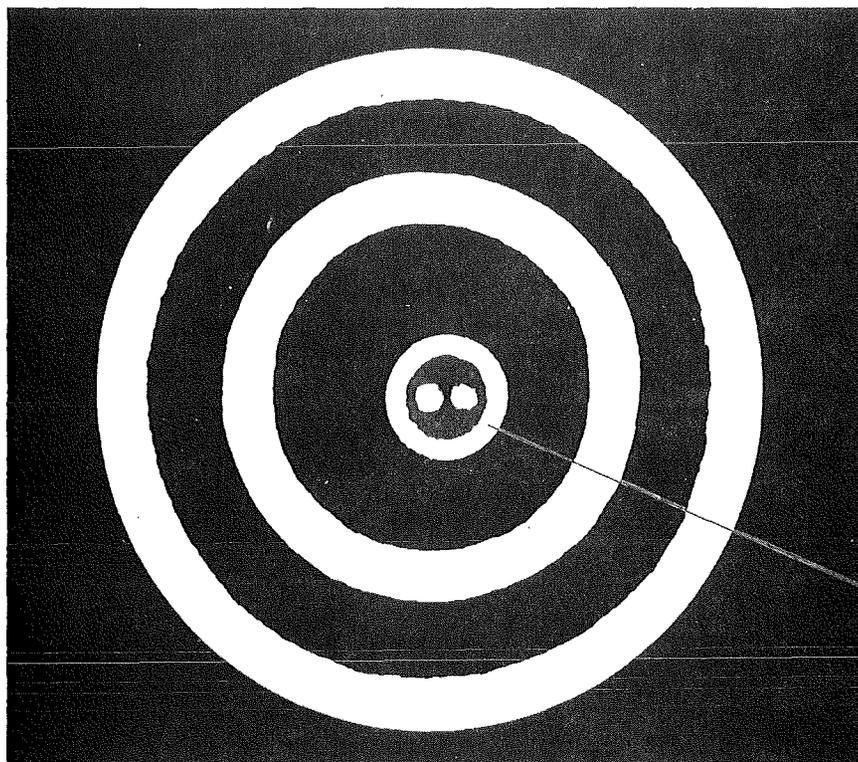


Abb. 9 Schematische Darstellung der Stampfmaschine



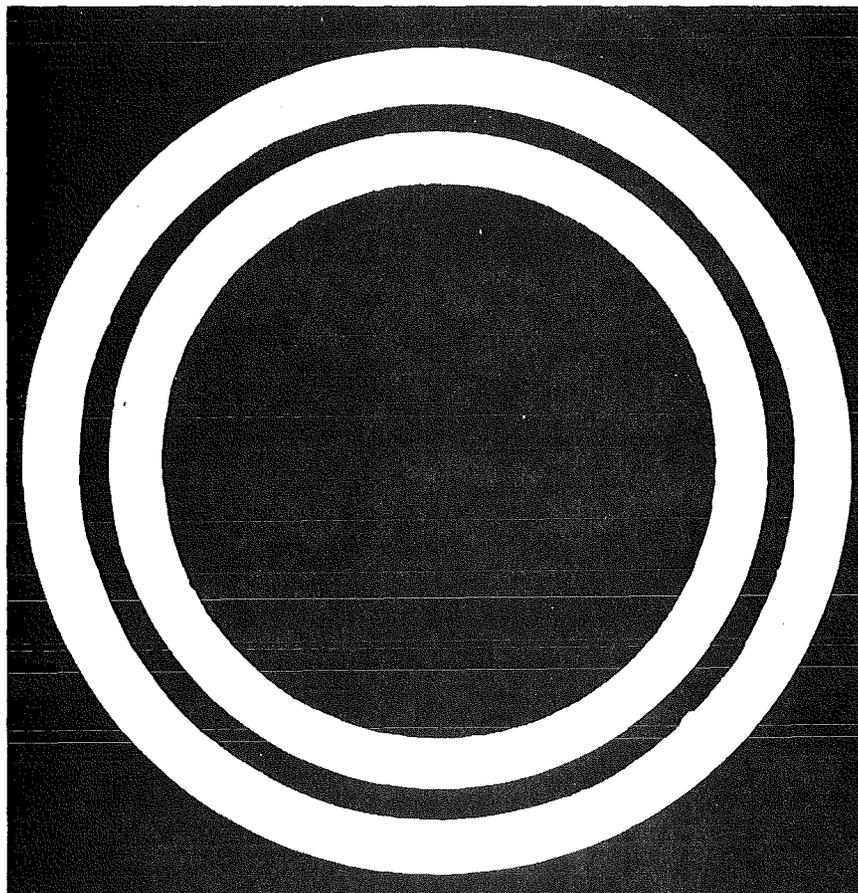
Außendurchmesser: 6,0 mm

Hüllenwandstärke: 0,4 mm

Isolierschichtstärke: 0,63 mm

Stromleiterwandstärke: 0,47 mm

Zentralthermoelement



Außendurchmesser: 5,5 mm

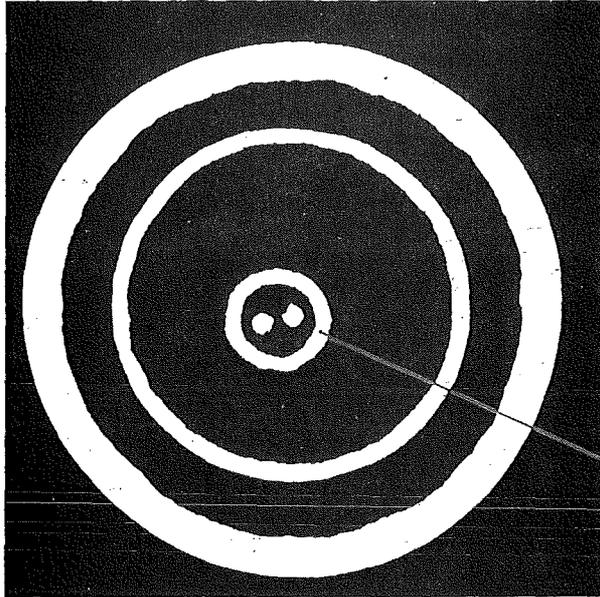
Hüllenwandstärke: 0,39 mm

Isolierschichtstärke: 0,17 mm

Stromleiterwandstärke: 0,35 mm

Abb. 10 Heizstäbe im Querschliff

oben: Normalausführung mit Zentralthermo-
element; unten: Heizstab mit minimaler
Isolierschicht



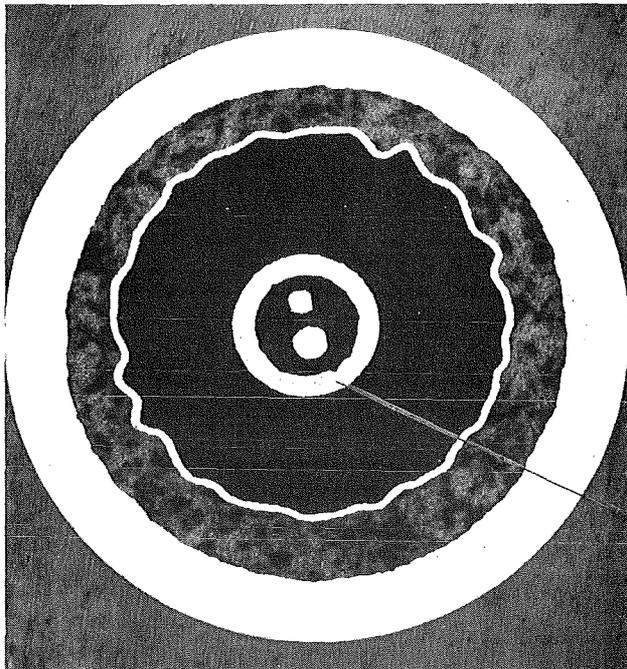
Hüllendurchmesser außen : 6,00 mm

Hüllenwandstärke: 0,45 mm

Isolierschichtstärke: 0,60 mm

Stromleiterwandstärke: 0,19 mm

Zentralthermoelement



Hüllendurchmesser außen : 6,0 mm

Hüllenwandstärke: 0,6 mm

Isolierschichtstärke: ~ 0,5 mm

Stromleiterwandstärke: 0,05 mm

Zentralthermoelement

Abb.11 Heizstäbe im Querschliff mit reduzierter Stromleiterwandstärke

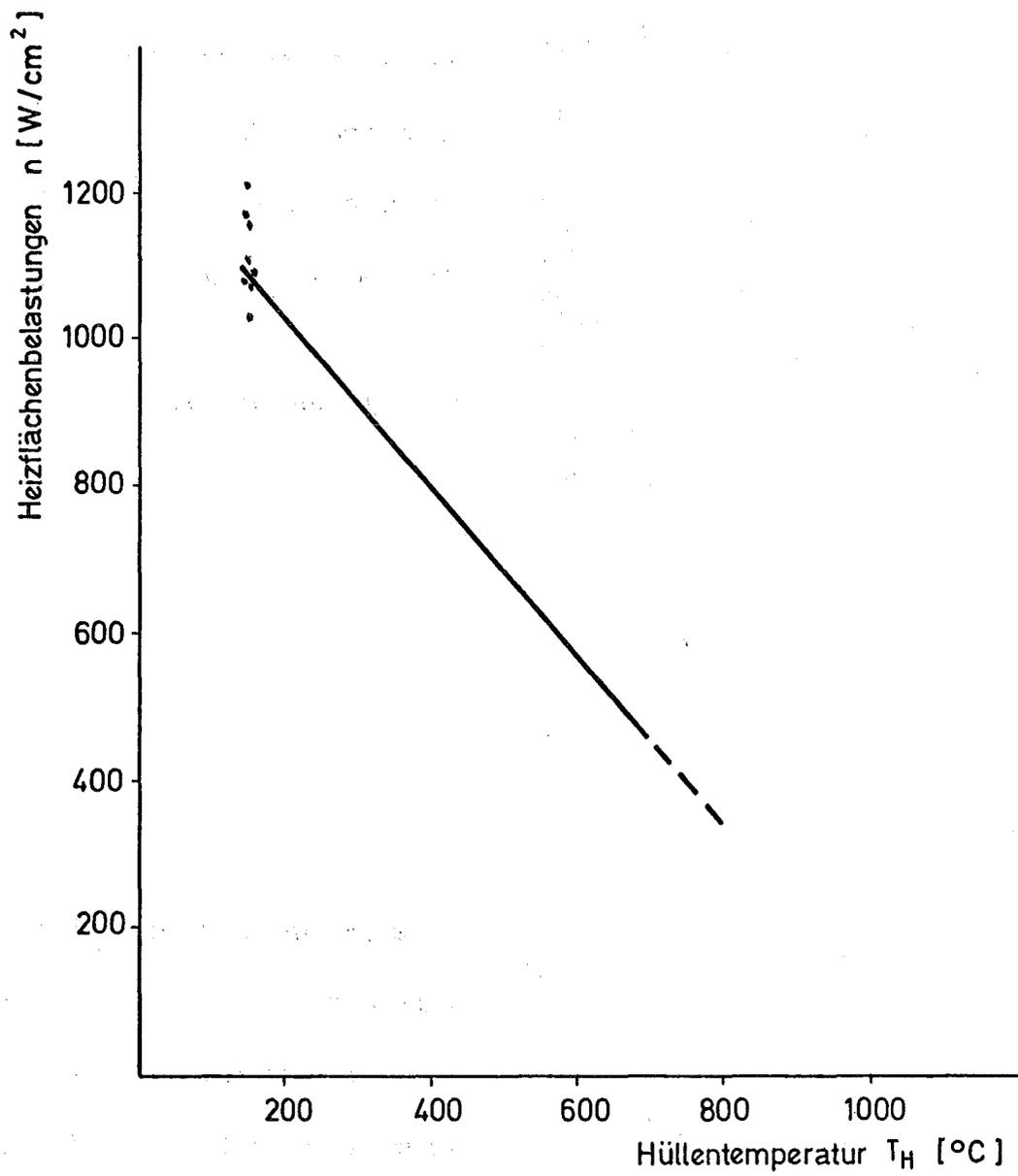


Abb. 12 Leistungsdiagramm für Heizstäbe

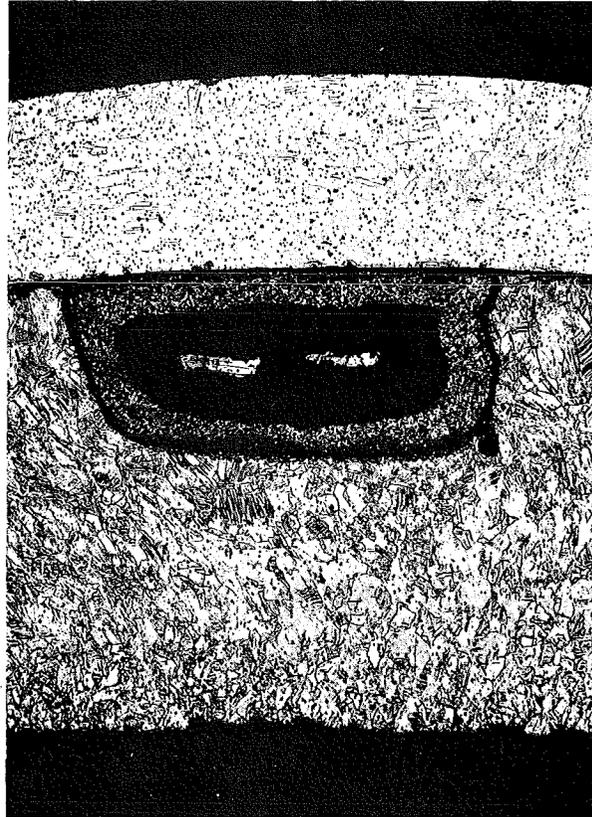
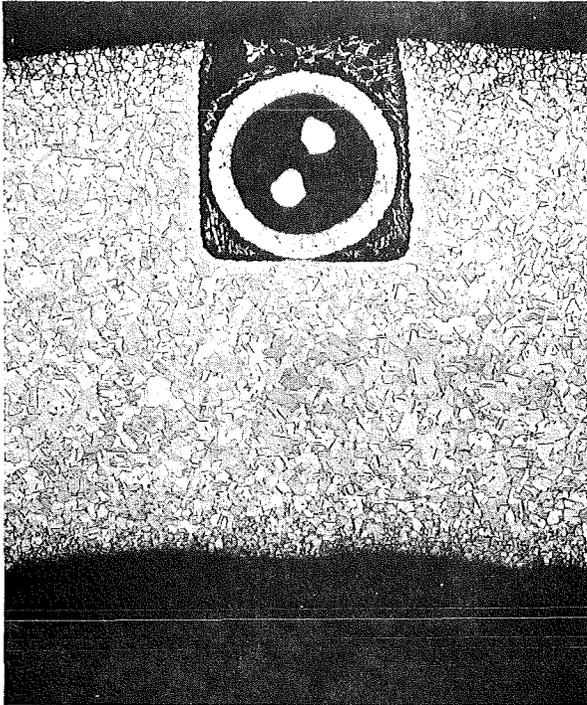
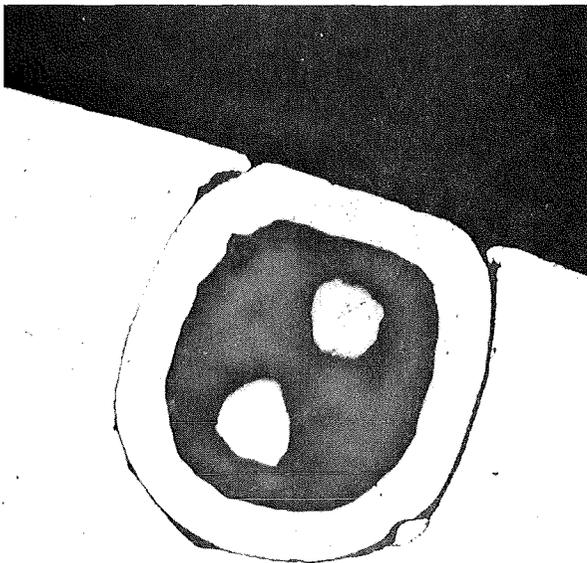


Abb.13 Ausschnitt aus der Heizstabhülle, Mantelthermo-
element im Heizstab mit Doppelrohrhülle eingebaut.



TE (0,25 mm)
mit Nickelbasislot verlötet



TE (0,25 mm)
durch plastische Heizstabumformung
in der Heizstabhülle eingebaut.

Abb. 14 Ausschnitt aus der Heizstabhülle; Mantelthermo-
element in Außennut eingebettet