

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

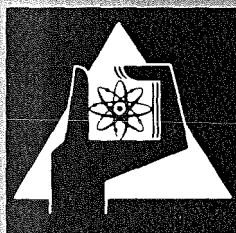
Januar 1977

KFK 2368

Institut für Reaktorbauelemente
Projekt Schneller Brüter

**Heizstäbe zur Simulation von Brennstäben für Natrium-
Siedeexperimente
Teil I**

V. Casal, A. Demski, 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 2368

Institut für Reaktorbauelemente

Projekt Schneller Brüter

Heizstäbe zur Simulation von Brennstäben für

Natrium - Siedeexperimente

Teil I

V. Casal, A. Demski, E. Graf, W. Hartmann

Gesellschaft für Kernforschung mbH, Karlsruhe

Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht beschreibt Auslegung, Entwicklung und Erprobung von elektrischen Heizstäben zur Durchführung von Siedeexperimenten in Brennelementattrappen Schneller-Natriumgekühlter Brutreaktoren. Diese Experimente werden zum Nachweis der Beherrschung von lokalem und integralem Sieden im Kern des SNR-300 benötigt.

Versuchsaufbau und Versuchsführung erfordern Heizstäbe, welche die angenommenen Störfälle des SNR-300 mit sehr hoher Betriebssicherheit, auch unter transienten Bedingungen, zu simulieren gestatten. Dabei müssen Heizflächenbelastungen von 170 W/cm^2 bei Kühlmitteltemperaturen von 950°C erreicht werden.

Das ausgewählte Heizstabkonzept stellt eine Weiterentwicklung von Heizstäben für einphasige Wärmeübergangsversuche dar. Die Wärme wird im Heizstab durch ohm'sche Beheizung einer Bandwendel erzeugt. Sie fließt über den Isolator, eine Schicht aus verdichtetem Bornitridpulver, zur Heizstabhülle. Stromleiterwerkstoff ist eine Nickelchromlegierung, Hüllenwerkstoff Edelstahl. Heizstabkonzept und Fertigungsverfahren haben sich gut bewährt. So liegt der Ausschuß bei der Fertigung einschließlich Instrumentierung unter 1%. Bei den Siedeexperimenten in zwei 7-Stabbündeln und einem 169-Stabbündel mit 88 beheizten Stäben ist bisher noch kein Heizstab ausgefallen.

Summary

Heater Rods for Simulation of Fuel Pins in Liquid-Metal-Boiling Experiments. Part. I

This report describes the design, development and testing of electrical heater rods allowing to perform boiling tests in fuel element dummies of Liquid-Metal-Cooled-Fast-Breeder-Reactors. The tests are required as a proof of the capability to control local and gross boiling in the core of SNR-300.

The setup and performance of the tests call for heater rods simulating with a very high operating reliability the assumed incidents of SNR-300, even under transient conditions. Loads of the heating surface of up to 170 W/cm^2 must be attained at coolant temperatures of 950°C .

The concept selected of the heater rod is an improvement of heater rods used in single-phase heat transfer tests. The heat is generated in the heater rod by ohmic heating of a tape helix. The heat passes the insulator, a layer made of compacted boron nitride powder, and reaches the cladding of the heater rod. The current conductor is made of a nickel-chromium alloy while the cladding material is stainless steel. The concept of the heater rod and the fabrication method have proved to be good. For instance, rejections in the fabrication process, including the instrumentation, are less than 1 %. In the boiling experiments performed on two 7-rod bundles and one 169-rod bundle containing 88 heated rods no heater rod has failed so far.

Inhalt

1. Einführung
2. Problemstellung
 - 2.1 Anforderungen an Heizstäbe für Na-Siedeexperimente
 - 2.2 Auswahl des Heizstabkonzeptes
3. Entwicklung
 - 3.1 Geometrischer Aufbau
 - 3.2 Werkstoffauswahl
4. Fertigung
 - 4.1 Fertigungsmethoden
 - 4.2 Diskussion gefertigter Heizstäbe
 - 4.3 Heizstabprüfung
5. Erprobung
 - 5.1 Leistungstests
 - 5.2 Beurteilung der Heizstäbe nach dem Versagen
6. Bewertung der Heizstäbe

1. Einführung

Sicherheitsüberlegungen zum Schnellen Natrium gekühlten Brutreaktor SNR-300 verlangen den Nachweis der Beherrschung von lokalem und integralem Sieden im Brennelement. Viele Parameter beeinflussen den Ablauf der Siedevorgänge im Brennelement. Ihr Zusammenwirken ist noch wenig bekannt. Deshalb geht man bei der Lösung des Problems in zwei Schritten vor. Man beobachtet die physikalischen Vorgänge des Natriumsiedens an einfachen Geometrien und überprüft die Übertragbarkeit erkannter Gesetzmäßigkeiten auf Bündelgeometrien. Versuche zur Übertragbarkeit werden an elektrisch beheizten Brennelementattrappen durchgeführt aus Sicherheitsüberlegungen, Kostengründen sowie wegen einfacher Experimentiertechnik. Bei den Siedeversuchen sollen die Heizflächenbelastungen des Reaktors bei stark erhöhten Kühlmitteltemperaturen erreicht werden; dabei kommt erschwerend hinzu, daß sogenanntes "dryout" extrem hohe Temperaturpulsationen in den Heizstäben erzeugen. Bei der GfK sind Siedeversuche an Bündeln mit maximal 91 beheizten Stäben geplant. Elektrische Heizstäbe sollen als Brennstabsimulatoren mit sehr hoher Betriebssicherheit zu betreiben sein damit Großbündelversuche realisierbar sind. Neben diesen Leistungsanforderungen müssen die Heizstäbe die Brennstäbe thermisch in befriedigender Weise simulieren, um aus dem Experiment übertragbare Ergebnisse zu erhalten. Die vorliegende Arbeit beschreibt Entwicklung und Erprobung von elektrischen Heizstäben für derartige Siedeexperimente. Sie baut auf Heizstäben für einphasige Wärmeübergangsversuche /1,2/ auf.

2. Problemstellung

2.1 Anforderungen an Heizstäbe für Natriumsiedeexperimente

Die Anforderungen an Heizstäbe zur thermischen Simulation von Kernbrennstäben wurde in /2/ diskutiert. Das thermodynamische Verhalten betreffend waren dies:

1. axiale Leistungsverteilung bekannt
2. 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 Wärmeezeugung)
3. azimutale Wärmeflußverteilung an der Hülle des Heizelementes bei vorgegebener örtlicher Temperaturverteilung im Kühlmittel nicht wesentlich von der des Brennstabes abweichend (thermische Ähnlichkeit).

Gegenüber den Stäben für einphasige Wärmeübergangsversuche kommt für Siedeveruche die Forderung nach vergleichbarer Wärmekapazität hinzu, da die Stäbe bei Wiederbenetzung nach einem "dryout" zusätzlich Speicherwärme abgeben. Da dabei hauptsächlich hochfrequente Pulsationen auftreten, ist im wesentlichen nur das Speichervermögen der Heizstabhülle von Bedeutung. Damit ist die Voraussetzung gegeben die für einphasige Wärmeübergangsversuche entwickelten Heizstäbe /2/, nach entsprechender Modifikation, auch für Siedeveruche einzusetzen; sie besitzen bei Simulation der Brennstäbe Schneller Brüter bei Auslegungsbedingungen große Leistungsreserven, so daß die Chance besteht mit ihnen auch Störfälle zu simulieren. Abb.1 zeigt diesen Heizstabtyp in schematischer Darstellung.

2.2 Auswahl des Heizstabkonzeptes

Experimente zum lokalen Sieden, ausgelöst durch Kühlkanalblockaden, weisen örtlich stark variierende und schwer voraussagbare Kühlmitteltemperaturen auf.

Voraussetzung für gut interpretierbare Versuche sind deshalb Heizstäbe, deren Wärmeproduktion von der Kühlmitteltemperatur unabhängig ist; d.h. der elektrische Widerstand des Stromleiters darf sich mit der Temperatur möglichst nicht ändern. Diese Bedingungen erfüllen die in /2/ beschriebenen Heizstäbe für Wärmeübergangsversuche, sie besitzen Stromleiter aus Nickelchromlegierungen.

Bei den angenommenen Störfällen können Kühlmitteltemperaturen bis zu 1050°C , Heizflächenbelastungen bis zu 250 W/cm^2 auftreten. Auf Grund der vorliegenden Erfahrungen würde ein Heizstab mit Bornitridisolation bei diesen Betriebsbedingungen eine Stromleitertemperatur von etwa 1300°C aufweisen.

Da der Schmelzpunkt von Nickelchromlegierungen bei 1380°C liegt, lassen sich mit den verfügbaren Heizstäben diese Betriebsbedingungen nicht mit der notwendigen Betriebssicherheit erreichen.

Es müssen entweder die Betriebsdaten reduziert, oder die Forderung nach temperaturkonstanter Wärmeproduktion aufgegeben werden; dann ließen sich nämlich hochschmelzende Metalle oder Graphit als Stromleiter verwenden, deren elektrische Widerstände stark von der Temperatur abhängen.

Wegen der Unerfüllbarkeit beider Forderungen wurde die Heizstabentwicklung in 2 Stufen getrennt:

- die erste Stufe erfüllt die Forderung nach temperaturunabhängiger Wärmeproduktion bei verminderten Leistungsdaten von 170 W/cm^2 und 950°C Kühlmitteltemperatur
- die zweite Stufe erfüllt die ursprünglichen Leistungsdaten bei temperaturabhängiger Wärmeproduktion von 250 W/cm^2 und 1050°C Kühlmitteltemperatur.

Der folgende Bericht beschreibt Heizstäbe der ersten Stufe.

Spezifikation

Die Abstimmung der Anforderungen der geplanten Experimente mit erzielbaren Leistungen von Heizstäben mit Nickelchromstromleiter führte zu folgender Spezifikation:

Auslegungsgesichtspunkte

- geeignet zur Verwendung in Bündeln mit 7 bis 91 beheizten Stäben (assemblierbar)
- instrumentierbar mit Thermoelementen in der äußeren Oberfläche des Hüllrohres
- verträglich mit Natrium mit einer Sauerstoffkonzentration von max. 20 ppm bei maximaler Hüllrohrtemperatur
- Stromleiter einseitig geerdet.

Leistung und Anschlusswerte

- | | |
|--|----------------------------|
| - max. Leistungsdichte | 170 W/cm ² ± 5% |
| - elektr. Widerstand | 1,6 Ω/m |
| - max. Restleistung im unbeheizten Na-Bereich | 20 W/cm |
| - max. Restleistung im Bereich des Bündelanschlusskopfes | 5 W/cm |

Betriebsbedingungen

- | | |
|--|-------|
| - max. Sättigungstemperatur des Kühlmittels | 950°C |
| - max. Temperaturen in den unbeheizten Bereichen, anschlußseitig | 600°C |
| - max. Aussendruck auf das Hüllrohr | 5 bar |
| - Standzeit bei 950°C und 170 W/cm ² | 10 h |
| - Zahl der Leistungszyklen von 0 auf Vollast in 1 min mit nachfolgender Schnellabschaltung | 100 |

Abmessungen

- Durchmesser	6 \pm 0,05 mm
- max. beheizte Länge	700 \pm 5 mm
- unbeheizte Länge anschlußseitig	300 mm
- max. unbeheizte Länge erdseitig	450 mm
- max. Rauhtiefe der Heizstabhülle	4 μ m

3. Entwicklung

3.1 Geometrischer Aufbau der Heizstäbe

Die obige Spezifikation erfordert eine Änderung des geometrischen Aufbaues der Heizstäbe gegenüber /2/.

Die dort beschriebenen Heizstäbe bestehen aus 2 konzentrischen Rohren, die gegeneinander durch eine Schicht aus Bornitridpulver isoliert sind. Das innere Rohr ist der Stromleiter; es ist in der beheizten Zone durch eine MgO-Füllung mechanisch abgestützt, in der unbeheizten Zone ist es zur Reduktion des Wärmeflusses mit Kupfer- oder Nickelbolzen gefüllt. Auf einer Seite sind Stromleiter und Hüllrohr geerdet, um einen Stromanschluß einzusparen. Abb.1 zeigt einen solchen Heizstab im Längsschnitt. Für diese Heizstäbe wurde ein rohrförmiger Stromleiter gewählt, weil sie dann eine homogene Wärmeflußverteilung aufweisen. Der oben geforderte elektrische Widerstand würde für Siedeheizstäbe mit rohrförmigen Stromleitern eine Wandstärke des Stromleiters von 0,05 - 0,1 mm ergeben. Solche Heizstäbe sind zwar herstellbar, ihre Betriebssicherheit erschien jedoch zur Durchführung von Siedeversuchen in Großbündeln zu gering.

Deshalb wurde von der aus thermodynamischer Sicht idealen, rohrförmigen Stromleiterform abgegangen und der Stromleiter in Form einer Bandwendel gewählt. Dadurch läßt sich der elektrische Widerstand an die Anforderungen anpassen.

Heizstäbe mit einem gewendelten Stromleiter weisen keine konstante Heizflächenbelastung an der Hülle auf. Im Bereich der Wendelspalte hat sie jeweils ein Minimum.

Diese unerwünschte Leistungsabsenkung ist um so kleiner, je enger die Wendelspalte und je dicker die Isolierschichten sind. Hohe Heizflächenbelastungen erfordern aber möglichst dünne Isolierschichten. Dünne Isolierschichten stützen auch die Forderung den azimuthalen Wärmefluß im gut leitenden BN bei ungleichen Kühlmitteltemperaturen klein zu halten.

Im Rahmen der technischen Möglichkeiten wurden die inneren Abmessungen des Heizstabes optimiert.

In schematischer Darstellung zeigt Abb.2 einen Längsschnitt durch den Heizstab.

- Der Stromleiter in Form einer Bandwendel ist weitgehend der Rohrform angepaßt und besteht aus einer Nickelchromlegierung.
- Die Stromzuführung über einen Kupfer-Nickel-Bolzen reduziert den Wärmefluß im Bereich des elektrischen Anschlusses sehr stark, läßt jedoch im Bereich des Nickelbolzens ein Einlöten von Mantelthermoelementen in die Hülle des Heizstabes mit Nickelbasislot zu.
- Durch einseitige Erdung kann eine Seite des Heizstabes dem zu simulierenden Brennstab geometrisch ähnlich nachgebildet werden.
- Die Isolierschicht besteht aus hochverdichtetem BN.
- Die Stützkeramik MgO in der beheizten Zone des Stromleiters besitzt annähernd die gleiche Wärmedehnung wie der Nickelchromstromleiter.

Der Heizstab besitzt die folgenden Abmessungen:

Hüllendurchmesser außen:	6,0 \pm 0,02 mm
Hüllrohrwandstärke:	0,65 \pm 0,05 mm
BN - Isolierschichtstärke:	0,60 \pm 0,2 mm
Bandwendelstärke:	0,29 mm
Bandwendelbreite:	4,2 mm
Wendelspalt:	0,55 \pm 0,2 mm

3.2 Werkstoffauswahl

Hüllrohr

Bei den Siedeexperimenten, besonders in Natrium, spielt die Mikrorauigkeit der Heizflächen für den Ablauf von Siedevorgängen eine wichtige Rolle. Aus diesem Grunde bevorzugt man vom Experiment her für Heizstäbe eine Hülle, die den Brennelementhüllen möglichst ähnlich ist. Deshalb wurde für Siedeheizstäbe der Werkstoff Nr. 1.4981 gewählt, der zum Zeitpunkt der Spezifizierung der Heizstäbe für die Hüllrohre des SNR-300 vorgesehen war. Die Durchmesserreduktion der Heizstäbe durch Rundhämmern führt allerdings zu einer geringeren Oberflächenrauigkeit als sie Brennstabhüllen aufweisen.

Die geringere Oberflächenrauigkeit bietet weniger Siedekeime; dadurch werden Siedeexperimente mit Heizstäben, deren Oberfläche nicht nachbearbeitet werden (z.B. durch Schleifen) pessimistischere Ergebnisse liefern, als die wirklichen Brennstäbe.

Stromleiterwerkstoff

Unter den verfügbaren Nickelchromlegierungen muß eine Legierung mit möglichst temperaturunabhängigem elektrischem Widerstand, mit guter Kaltverformbarkeit und möglichst hoher Festigkeit bei Temperaturen oberhalb 1000°C ausgewählt werden. Unter diesen Bedingungen wählten wir eine Legierung 70% Ni / 30% Cr.

Ihren Widerstand zeigt Abb.3, die Festigkeit Abb.4. Danach ändert 70% Ni / 30% Cr seinen elektrischen Widerstand zwischen 800 und 1200°C nur um 1,6%, die Zugfestigkeit beträgt bei 1100°C immerhin noch 5 kp/mm^2 und liegt deutlich über der bekannteren Legierung 80% Ni / 20% Cr.

Dagegen liegt die 1%-Dehngrenze für 100 h, zumindest für 80% Ni / 20% Cr, bei 1000°C nahe bei Null.

Isolator

Der Nachteil des Heizstabkonzeptes mit hohem elektrischem Widerstand liegt in der größeren Gefahr für elektrischen Durchschlag. Dies um so mehr, als bei hohen Kühlmitteltemperaturen von maximal 950°C der Isolator Bornitrid bereits einen recht niedrigen elektrischen Widerstand aufweist. Wichtig ist deshalb ein Bornitridpulver mit geringen Verunreinigungen zu wählen, da diese den Widerstand stark erniedrigen /2/.

Eine typische Analyse des für die hier beschriebenen Heizstäbe verwendete Bornitrid lautet:

Sauerstoff	< 0,8	Gew. %
Kohlenstoff	< 0,4	Gew. %
metall. Verunreinigungen	< 0,1	Gew. %
	(Ti < 0,02%, Ca < 40 ppm)	
BN	Rest	

Diese Qualität reicht nach den vorliegenden Erfahrungen zur sicheren Isolation von Siedeheizstäben.

Das Bornitrid wird im Heizstab nach den in /2/ beschriebenen Verfahren auf eine Dichte von $\sim 2,05 \text{ gr/cm}^3$ verdichtet.

Dabei erreicht man einen hervorragenden Wärmedurchgang vom Stromleiter zur Hülle.

Stützkeramik

Der Heizstab besitzt im Betrieb ein Temperaturgefälle von innen nach außen. Es erzeugt im Stromleiter Druckspannungen, welche die Heizstabhülle als Zugspannungen aufhängt. Diese Wechselwirkung zwischen Stromleiter und Hülle wird durch die Bornitridisolierschicht übertragen. Es werden dadurch Flächenpressungen an den Grenzflächen erzeugt. Da über die Grenzflächen die gesamte Wärme fließen muß, ist die Flächenpressung erwünscht, weil sie den Wärmeübergang steigert.

Leider weist der Stromleiter im Betrieb keine nennenswerte Festigkeit mehr auf; er kann daher die entstehenden Druckspannungen aus eigener Kraft nicht aufnehmen. Er würde sie durch Fließen abbauen.

Dieser unerwünschte Vorgang läßt sich recht gut durch Abstützung des Stromleiters mit einer Magnesiumoxydfüllung verhindern, da sie annähernd die gleiche Wärmedehnung wie 70% Ni / 30% Cr aufweist.

Kaltenden

Auf der Seite der Stromzuführung besteht das Kaltende aus einem zusammengesetzten Kupfer-Nickel-Bolzen, damit einerseits im Bereich des elektrischen Anschlusses die Wärmeentwicklung so niedrig wie möglich ist, andererseits nahe der beheizten Zone nach Fertigung des Heizstabes in seine Hülle Thermoelemente mit Nickellot eingelötet werden können, was Kupferkaltenden nicht zuließe.

Am anderen Ende des Heizstabes wird das Kaltende aus Nickel ausgeführt, weil hier Kühlmittelaustrittstemperaturen von 950⁰C vorliegen. Diese Temperatur liegt zu nahe am Schmelzpunkt des besser leitenden Kupfers. Als Kupfer wurde ein sauerstofffreies Elektrolytkupfer gewählt, als Nickel Reinnickel (99,6%).

4. Fertigung

4.1 Fertigungsmethoden

Durch die Wahl eines Stromleiters in Form einer Bandwendel, die der Rohrform weitgehend angepaßt ist, ließen sich die in /2/ näher beschriebenen Fertigungsmethoden mit geringer Modifikation auch für die Siedeheizstäbe verwenden.

Die wichtigsten Fertigungsschritte sind:

- Wickeln der Bandwendel
- Einvibrieren von MgO-Pulver
in die Bandwendel und Verschließen mit den Kaltenden.

- Einbau des Stromleiters in das Hüllrohr
- Einstampfen von Bornitrid in den Ringspalt zwischen Stromleiter und Hüllrohr.
- Rundhämmern des Heizstabes mit starker Durchmesserreduktion zum Verdichten des MgO- und BN-Pulvers.

Die Verbindungsstellen zwischen den einzelnen Bauteilen des Strompfades, also zwischen Kupferbolzen, Nickelbolzen, Bandwendel und Hüllrohr sind als reine Klemmverbindungen ausgeführt. Durch die starke Kaltverformung des Heizstabes beim Rundhämmern werden an allen Übergangsstellen ausgezeichnete temperatur- und schockbeständige elektrische Verbindungen erzielt.

4.2 Diskussion gefertigter Heizstäbe

Die wesentlichen Kriterien, die zu dem im vorstehenden Kapitel diskutierten Heizstabkonzept führten sind:

- Leistungskonstanz
- Leistungsdichte
- elektrischer Widerstand
- Einsatztemperatur
- Zuverlässigkeit
- Instrumentierbarkeit

Dabei stehen einzelne Forderungen gegenseitig im Widerspruch. Leistungskonstanz empfiehlt die Verwendung rohrförmiger Stromleiter; der geforderte elektrische Widerstand schließt diese aus. Der als Kompromiß gewählte Stromleiter in Form von Bandwendeln passen sich der Rohrform um so besser an, je kleiner die Wendelspalte sind; kleine Wendelspalte stehen aber ihrerseits im Widerspruch zur Zuverlässigkeit der Heizstäbe. Denn enge Wendelspalte ergeben sich bei geringer Durchmesserreduktion der Heizstäbe nach dem Einstampfen des Bornitrids. Geringe Durchmesserreduktion kann eine geringe Bornitrid-dichte in einzelnen Bereichen der Heizstäbe nicht ausschließen. Solche Stäbe würden infolge gemindertem Wärmedurchgang mit Sicherheit ausfallen.

Die Heizstäbe werden deshalb wie in /2/ etwa um das Doppelte des sogenannten kritischen Durchmesser-Verhältnisses reduziert (bei einer Durchmesserreduktion um das kritische Verhältnis wird das Bornitrid im Heizstab auf die erreichbare Enddichte von $\rho = 2,05 - 2,10 \text{ gr/cm}^3$ verdichtet; eine höhere Reduktion des Durchmessers bringt keine weitere Dichtezunahme).

Als Folge müssen Wendelspalte in Kauf genommen werden, die nach dem Gesichtspunkt der Leistungskonstanz zu groß sind. Abb.5 zeigt einige Heizstäbe mit Bandwendelstromleiter im Längsschnitt.

Es ist zu ersehen, daß die Hüllrohrwandstärke der gezeigten Heizstäbe nicht gleichbleibend ist, sondern im Bereich zwischen den Windungen der Bandwendel bis zu 10% stärker ist als im Bereich der Windung; außerdem wölbt sich die Bandwendel bei einigen Stäben seitlich leicht auf. Beide Effekte führen zu einer dünneren Isolierschicht an den Seiten des Bandes. Diese Wölbung ist nach den Ergebnissen zahlreicher Leistungstests unbedenklich. Sie mindert dagegen sogar die unerwünschte Absenkung der örtlichen Heizflächenbelastung außen an der Hülle im Bereich zwischen den Windungen.

In Tabelle 1 sind die inneren Abmessungen von Heizstäben und ihr elektrischer Widerstand aufgelistet.

Daraus ist zu ersehen, daß die Wendelspalte je nach Auslegung 0,25 - 0,7 mm betragen. Der geringste Wendelspalt von 0,25 mm wurde erzielt durch eine Durchmesserreduktion, die nur geringfügig über dem kritischen Wert lag. Im Interesse der anzustrebenden Betriebssicherheit wurde für die Siedeexperimente diese Auslegung mit geringstem Wendelspalt (Nr.8) nicht gewählt, sondern die Ausführung Nr.6. Diese Variante besitzt eine Hüllrohrwandstärke von 0,6 mm; in diese Hülle lassen sich Mantelthermoelemente von 0,25 mm Durchmesser einlöten. Der elektrische Widerstand des Stabes entspricht mit $1,6 \Omega/\text{m}$ den geforderten Werten.

Wärmedurchgang im Heizstab

Hohe thermische Belastbarkeit bei Heizstäben mit einem Stromleiter aus Nickelchrom setzt einen guten Wärmedurchgang im Heizstab voraus. Die verwendeten Werkstoffe und Fertigungsverfahren ergaben für Heizstäbe für Wärmeübergangsversuche bei Hüllentemperaturen kleiner als 700°C einen konstanten Wärmedurchgangskoeffizienten von etwa $k \approx 1 \text{ (W/cm}^2 \text{ }^{\circ}\text{C) /2/}$. Bei höheren Betriebstemperaturen ist aber mit einer Abnahme der Kontaktzahl zu rechnen. Diese wird verursacht durch Bildung von Spalten, weil BN eine geringere Wärmedehnung aufweist als der Hüllen- und Stromleiterwerkstoff.

Durch Erhöhung des Temperaturgefälles vom Stromleiter zur Heizstabhülle lassen sich diese Spalte wieder schließen. Mit wachsendem Temperaturniveau der Heizstabhülle werden wachsende Temperaturgradienten im Heizstab zur Verhinderung von Spaltbildungen erforderlich. Denn nur dann läßt sich der maximale Wärmedurchgangskoeffizient erreichen.

Bei Spaltbildung im Stab sinkt er ab.

Bei einer gegebenen Heizflächenbelastung gibt es deshalb eine Grenztemperatur der Heizstabhülle bei deren Überschreitung der Wärmedurchgang abnimmt. Erhöht man die Heizflächenbelastung so erhöht sich diese Grenztemperatur. Abb. 6 zeigt gemessene Wärmedurchgangszahlen vom Stromleiter zur Hülle bei einer Heizflächenbelastung von 170 W/cm^2 . Nach den vorliegenden Messungen liegt die Grenztemperatur der Heizstabhülle etwa bei 700°C .

Bei 950°C , der Einsatztemperatur der Siedeheizstäbe, hat sich der Wärmedurchgang annähernd halbiert.

Die Heizstäbe besitzen also bei den spezifischen Bedingungen von 170 W/cm^2 und 950°C Kühlmitteltemperatur statt der erhofften Stromleitertemperatur von nur 1120°C eine Temperatur von 1250°C ; damit vermindert sich aber der Abstand zum Schmelzpunkt des Stromleiters auf 130°C .

Orientierung des Bornitrids im Ringspalt zwischen Hülle und Stromleiter .

Aus dem gemessenen Wärmedurchgang im Heizstab lassen sich die Kontaktzahlen an den Grenzflächen im Heizstab (Stromleiter-Bornitrid bzw. Bornitrid-Hülle) nicht bestimmen, weil die Wärmeleitfähigkeit des BN unsicher ist. Diese hängt nämlich bei gegebener Dichte in starkem Maße von der Kristallorientierung des hexagonalen BN ab. Nimmt man bei Hüllentemperaturen der Heizstäbe kleiner 600°C die thermische Kontaktzahl als unendlich an, so ergibt sich die minimale Wärmeleitfähigkeit des BN. Diese beträgt $0,18 \text{ W/cm}^{\circ}\text{C}$.

Messungen der Wärmeleitfähigkeit an heißgepreßtem BN nach /3/ ergaben bei 600°C Werte von $0,27 \text{ W/cm}^{\circ}\text{C}$ senkrecht zur Preßrichtung und von $0,13 \text{ W/cm}^{\circ}\text{C}$ parallel dazu. Die Leitfähigkeit nimmt mit steigender Temperatur schwach ab. Die aus dem Wärmedurchgang der Heizstäbe berechnete nominale Wärmeleitfähigkeit des BN läßt den Schluß zu, daß der Orientierungsgrad des BN in den Heizstäben geringer sein muß als in dem heißgereßten BN, welches zur Messung der Leitfähigkeit verwendet wurde.

Messungen der Orientierung der BN-Kristalle an Heizstabproben und an einer Vergleichsprobe aus heißgepreßtem BN von W. Schneider /4/ zeigen eine starke Orientierung der c-Achsen des BN senkrecht zur Preßrichtung, also in radialer Richtung. Die blättchenförmigen BN-Kristalle sind bevorzugt parallel zur Oberfläche des Heizstabes bzw. zur Oberfläche des BN-Bolzens (beim heißgepreßten BN) angeordnet. Ergebnisse dieser Messungen zeigt Abb. 7.

Dort ist an Schnitten parallel zur Heizstabhülle bzw. parallel zur Achse des heißgepreßten BN-Bolzens (Vergleichsprobe) die relative Häufigkeit der c-Achse der BN-Kristalle in Abhängigkeit von der Richtung aufgetragen. Die angegebenen Winkelgrade sind die Abweichungen von der radialen Richtung. Bei 0° fallen die c-Achsen beim Heizstab mit der radialen Richtung zusammen.

Die Form der Kurve (nicht ihre absolute Höhe) ist ein Maß für die Orientierung des BN. Bei völliger Isotropie wären die Verteilungskurven eine horizontale Gerade. Die Werte zeigen, daß das BN von 4 Heizstabproben zu 67% ihre c-Achse innerhalb eines Winkels von $\pm 20^\circ$; $19,5^\circ$; $\pm 18^\circ$; $\pm 20^\circ$ ausgerichtet haben, es ist also stark anisotrop. Der Wert der Vergleichsprobe aus heißgepreßtem BN lautet $\pm 27^\circ$. Danach ist die Anisotropie des BN im Heizstab in der gleichen Größe wie in der untersuchten Probe aus heißgepreßtem BN. Entsprechend scheinen die aus Messungen bestimmten minimalen radialen Wärmeleitwerte des BN in Heizstäben zu hoch. Als Folge dieser Orientierung wird die Wärmeleitfähigkeit radial (also in Richtung des Wärmeflusses) kleiner sein als senkrecht dazu.

Diese Eigenschaft hat 2 Folgen:

- Die nicht optimale Ausrichtung des BN vermindert die Leitfähigkeit des Isolators in Richtung des Wärmeflusses; die maximal erreichbare Leistung könnte im Extremfall 16% höher sein;
- Die große Leitfähigkeit senkrecht zum Wärmefluß mildert die Inhomogenität des Wärmeflusses an der Heizstabhülle infolge der Verwendung eines Stromleiters in Form einer Bandwendel.

Änderung des elektrischen Widerstandes während des Betriebes

Bei stationärem Betrieb von Heizstäben liefert das Verhalten des Widerstandes wichtige Aufschlüsse über die Stäbe. Ursachen für Widerstandsänderungen können sein:

- Änderung des elektrischen Kontaktes an Übergangsstellen des Stromleiters.
- Änderung des thermischen Kontaktes auf dem Pfad des Wärmeflusses, so daß sich die Temperatur des Stromleiters stark ändert,
- starke Abnahme des elektrischen Widerstandes der BN-Isolation, so daß nenneswerte Leckströme auftreten.

- Entmischung im Stromleiter,
- chemische Veränderungen des Stromleiters durch BN, MgO oder durch vorhandene Gasreste (O_2),
- örtliche Querschnittsveränderungen des Stromleiters.

Abb.8 zeigt die zeitlichen Veränderungen des elektrischen Widerstandes von 6 Heizstäben. Folgendes läßt sich feststellen:

- In der Anfahrphase wächst der Widerstand um 5-10% an, infolge starker Temperaturerhöhung und infolge Beseitigung der Kaltverformung im Stromleiter,
- während des dann folgenden Betriebes ändert sich der Widerstand maximal um $\pm 1,5\%$,
- während des Dauerbetriebes wird sowohl eine Abnahme des Widerstandes, als auch eine Zunahme beobachtet,
- alle Stäbe zeigen vor ihrem Versagen eine Phase mit Zunahme des Widerstandes,
- während der zyklischen Erprobung nimmt der Widerstand meist ab; nur bei einem Stab ist eine Zunahme zu beobachten, dieser Stab brannte dann kurz nach Beendigung der Zyklen durch.

Aus diesen Beobachtungen lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Der elektrische Kontakt an den Klemmstellen des Stromleiters leidet während des Betriebes nicht. Dies müßte insbesondere zu einer deutlichen Erhöhung des Widerstandes während der Zyklen führen,
- das Anwachsen des Widerstandes vor dem Stabversagen ist vermutlich auf allmähliches Nachlassen des thermischen Kontaktes, vielleicht auch auf örtliche Querschnittsveränderungen zurückzuführen. Bemerkenswert ist, daß sich diese Effekte während der Zyklen in der Regel nicht beobachten lassen.

4.3 Heizstabprüfung

Die geplanten Siedeexperimente im Großbündel erfordern eine sehr hohe Betriebssicherheit der thermisch bis an die Belastungsgrenze beanspruchten Heizstäbe.

Alle für das Experiment ausgewählten Heizstäbe müssen den Anforderungen gewachsen sein.

Die Betriebssicherheit eines Heizstabtyps läßt sich sowohl durch die Fertigungskontrolle als auch durch eine entsprechende Abnahmekontrolle gewährleisten. Beides muß auf die Fertigungsmethoden, auf mögliche Heizstabfehler und auf deren Folgen abgestimmt sein. Diese Kontrollen erfordern zum einen sehr viel Zeitaufwand und können zum anderen ihrerseits das kontrollierte Produkt gefährden; so kann eine Abnahmekontrolle in Form eines Leistungstests die Lebenserwartung des Stabes im späteren Experiment einschränken.

Aus diesen Gründen wurde auf eine lückenlose Abnahmekontrolle verzichtet. Die Fertigungsmethoden wurden so ausgewählt und die verwendeten Ausgangsprodukte so vorgeprüft, daß gewisse Fehlerarten nicht auftreten können.

Dazu tragen unter anderem bei:

- Das Bornitrid wird durch chemische Analyse und durch elektrische Leitfähigkeitsmessungen auf seine Eignung untersucht.
- Alle verwendeten Hüllrohre haben eine Spezifikation ähnlich der Hüllrohrspezifikation von Brennelementen Schneller Natriumgekühlter Reaktoren. Ihre Einhaltung wird lückenlos überprüft.
- Die Werkstoffe für Stromleiter, Kaltenden und Stützkeramik sind spezifiziert. Ihre Einhaltung wird ebenfalls in den wichtigsten Eigenschaften überwacht.
- Die Fertigung ist - beginnend von den Anforderungen an den Arbeitsraum bis hin zur Produktverpackung - in viele Einzelschritte unterteilt mit formalisierten Zwischenkontrollen.
- Die Fertigungsverfahren schließen viele Fehlermöglichkeiten aus. Deshalb wurden u.a. alle Stromübergangsstellen als plastisch verformte Preßverbindungen ausgeführt, auf Löt- oder Schweißverbindungen wurde bewußt verzichtet.

Die Pulverzugabe beim Einstampfen des BN in den Ringspalt wird je Hub des Stampfers äußerst gering gehalten, so daß axiale Schwankungen der BN-Dichte je Verdichtungshub nicht auftreten.

Aus dem gleichen Grunde werden die Heizstäbe durch Rundhämmern im Durchmesser weit stärker reduziert, als zur Verdichtung des Pulvers und zur Verformung der Preßverbindung notwendig ist; dadurch lassen sich mit Sicherheit Zonen ungenügender Bornitridichte oder ungenügender Kontaktübergänge ausschließen.

- Die Abnahmekontrolle läßt sich unter diesen Bedingungen auf eine Reißprüfung der Hülle mittels Wirbelstrom, auf Röntgenprüfung und auf einen Leistungstest mit Wasserkühlung bei geringer Leistung beschränken. Letzterer liefert bei entsprechender Auswertung die benötigten Informationen über die Qualität der elektrischen Isolation und der elektrischen Kontakte an allen Verbindungsstellen.

5. Erprobung

5.1 Leistungstests

Die Heizstäbe für Siedeexperimente unterscheiden sich von den Heizstäben für Wärmeübergangsmessungen hauptsächlich durch die Form des Stromleiters; im ersten Fall ist er als Bandwendel ausgebildet, im zweiten Falle als Rohr. Da die verwendeten Werkstoffe und Fertigungsmethoden bei beiden gleich sind, kann etwa mit gleich gutem thermischem Verhalten gerechnet werden; aufgrund der axialen Bewegungsmöglichkeiten der Bandwendel ist bei den Siedeheizstäben eher noch eine bessere Schockbeständigkeit zu erwarten, als bei den Rohrheizern. Elektrisch sind die Siedeheizstäbe dagegen stärker belastet. Der höhere elektrische Widerstand erfordert höhere Betriebsspannungen.

Da Bornitrid mit wachsender Temperatur seine elektrische Leitfähigkeit extrem stark erhöht, besteht unter diesen Bedingungen erhöhte Gefahr des elektrischen Durchschlages durch die Bornitridisolation, was die Heizstäbe zerstören würde. Da Siedeheizstäbe bei Kühlmitteltemperaturen von 950°C betrieben werden, im Gegensatz zu 700°C bei Heizstäben für Wärmeübergangsversuchen, ist die Erhöhung der Betriebsspannung besonders gravierend.

Um unter diesen Bedingungen ein Höchstmaß an Betriebssicherheit zu erzielen, erfolgt die Stromeinspeisung in die Heizstäbe auf der Kühlmittelintrittseite, auf der Austrittseite ist der Stromleiter im Hüllrohr geerdet. Dadurch muß die Bornitridschicht nur bei niedrigem Temperaturniveau die volle Betriebsspannung isolieren; auf der Kühlmittelaustrittseite mit ihren hohen Temperaturen ist dagegen die Spannungsdifferenz zur Hülle gering. Aufgrund der bisherigen Überlegungen stellt die kritischste Erprobung der Heizstäbe die Erprobung im Siedeexperiment dar.

Eine Extrapolation der Versuchsergebnisse von Heizstäben für Wärmeübergangsversuche auf Natriumsiedebedingungen /2/ läßt für Siedeheizstäbe bei einer Kühlmitteltemperatur von 950°C eine zulässige Heizflächenbelastung von $150-200 \text{ W/cm}^2$ erwarten. Diese Extrapolation gilt unter der Annahme, daß bei 950°C Kühlmitteltemperatur im Heizstab gleiche Wärmedurchgangszahlen erreicht werden wie bei 700°C . Dann wäre bei der angestrebten Leistung mit einer Stromleitertemperatur von $1100-1150^{\circ}\text{C}$ zu rechnen.

Nimmt dagegen der Wärmedurchgang bei höheren Temperaturen ab, so ist das Erreichen der spezifischen Leistungsdaten in doppelter Hinsicht gefährdet, zum einen weil bei höheren Stromleitertemperaturen aufgrund der thermischen Belastung sich die zulässigen Standzeiten erniedrigen und zum anderen, weil bei einer höheren Arbeitstemperatur die Isolierfähigkeit des Bornitrids geringer ist, so daß die Gefahr des elektrischen Versagens ansteigt.

Infolge der sehr geringen Wärmedehnung von Bornitrid sind aber bei wachsendem Temperaturniveau wachsende radiale Temperaturgradienten im Heizstab erforderlich, (innen heißer als außen) um die Bildung von Spalten zu vermeiden. Eine Spaltbildung senkt den Wärmedurchgang im Heizstab ab.

Wie schon gezeigt wurde entstehen bei 950°C Kühlmitteltemperatur und einer Heizflächenbelastung von 170 W/cm^2 offenbar Spalte, der Wärmedurchgang im Heizstab vom Stromleiter zur Hülle vermindert sich.

Versuchsbedingungen

Die Versuchsbedingungen zur Erprobung der Heizstäbe wurden den späteren Einsatzbedingungen angepaßt.

Heizflächenbelastung:	170 W/cm ²
Kühlmitteleintrittstemperatur:	600 ⁰ C
Kühlmittelaustrittstemperatur:	950 ⁰ C

Da eine Erprobung der Heizstäbe unter Siedebedingungen sehr aufwendig ist, wurden 2 Versuchsreihen durchgeführt; eine in einem Natriumkreis mit Zwangskonvektion ohne Sieden, eine zweite in einem anderen Kreislauf mit Zwangskonvektion mit Sieden. Im zweiten Kreislauf wurden sowohl Einzelstäbe als auch Siebenstabbündel erprobt.

Die ergänzenden Versuchsbedingungen für diese beiden Reihen lauteten:

Ohne Natriumsieden:

Standzeit: 10 h bei Dauerbetrieb, zusätzlich 100 Ab- und Zuschaltungen bei Vollast. Bei der Abschaltung sinkt die Leistung in den ersten 25 msec auf 10% ab, die Restlast beträgt 0,1% und wird nach 600 msec erreicht. Beim Zuschalten steigt die Leistung asymptotisch an und erreicht nach 18 sec ihren Endwert. Haben die Stäbe dieses Programm überstanden, so haben sie die spezifizierten Anforderungen erfüllt. Trotzdem wurden sie in der Regel nach Erfüllung dieser Versuchsbedingungen höher belastet, um ihr Verhalten besser kennen zu lernen. Dabei wurde die Leistungsdichte in Schritten von 30 W/cm² erhöht und bei der erhöhten Leistung sowohl im Dauerbetrieb, als auch unter Ab- und Zuschalten erprobt.

Mit Natriumsieden:

Standzeit: max. 1 h Sieden nach vorangegangenem Dauerbetrieb ohne Sieden über 3h und 20 Ab- und Zuschaltungen bei Vollast.

Versuchsergebnisse

Ohne Natriumsieden

Die Ergebnisse der Heizstabprobung ohne Natriumsieden sind in Tabelle 2 zusammenfassend dargestellt. Danach wurden 28 Stäbe in Einzelstabtests untersucht.

Der größte Teil der Stäbe hat die Versuchsbedingungen erfüllt bzw. übertroffen, einige fielen vor Erreichen des vorgesehenen Versuchsprogrammes aus; diese Stäbe zeigten in der Regel nach Erprobung in der Versagenszone an der Heizstabhülle Spuren von Überhitzungen, die auf ungenügende örtliche Kühlung durch sogenannten dryout zurückzuführen ist. In diesen Fällen trat also unkontrolliertes Sieden auf.

Die Aufnahmen in der Abb.9 zeigen matte Zonen auf der Heizstabhülle, ein Indiz dafür, daß diese Stellen kurzzeitig überhitzt waren. Auffallend ist die beachtliche Schockbeständigkeit der Stäbe. Bei Nennlast (170 W/cm^2) ist kein Heizstab bei zyklischer Belastung ausgefallen. Diese Eigenschaft ist von besonderer Bedeutung für die Lebensdauer der Stäbe unter Siedebedingungen, einmal weil beim Sieden selbst starke Temperaturpulsationen auftreten und zum anderen, weil bei Versuchen zum transienten Sieden völliges Versagen der Kühlung eintritt, bei dem dann die Stabileistung abgeschaltet werden muß. Nach den Versuchsergebnissen lassen sich die Stäbe bei einer maximalen Kühlmitteltemperatur von 950°C auch mit einer Heizflächenbelastung von 200 W/cm^2 noch mit recht großer Betriebssicherheit sowohl im Dauerbetrieb als auch bei zyklischem Betrieb belasten.

Mit Natriumsieden

Die Erprobung der Stäbe mit Natriumsieden wurde von den Herren Kaiser, Mattes, Pepler und Schleisiek durchgeführt /5/. Über die Bewährung der Stäbe bei Natriumsieden läßt sich folgendes angeben:

Untersucht wurden 4 Einzelstäbe; alle überstanden die Versuchsphasen ohne Natriumsieden.

Beim nachfolgenden Sieden fielen die Einzelstäbe frühestens nach 4-5 Minuten, spätestens nach 20 Minuten aus. Während des Siedens wurden Siedeverzüge bis zu 75°C gemessen. Als Folge wurde bei schlagartigem Siedebeginn das Kühlmittel ausgetrieben, deshalb war sogenannter "dryout" in der Regel die Ursache des Stabversagens. Abb. 10 zeigt die Versagenszone eines Stabes. Nach dem "dryout" hat sich die Heizstabhülle bis zum Schmelzpunkt von 1400°C erhitzt und ist teilweise weggeflossen. Die Bornitridisolierschicht ist deutlich zu sehen. Da der Heizstab zum Zeitpunkt des "dryout" mit einer Heizflächenbelastung von 170 W/cm^2 betrieben wurde, und da der Schmelzpunkt des Stromleiters ebenfalls bei 1400°C liegt, muß sich der Stromleiter zum Zeitpunkt des Hüllenschmelzens selbst stark überhitzt im schmelzflüssigen Zustand befunden haben.

Um die Heizstäbe unter relevanteren Siedebedingungen zu erproben, wurden 2 Siebenstabbündel unter Natriumsieden erprobt /6,7/. Das erste Bündel wurde bisher ohne Heizstabausfall insgesamt 1 h mit stationärem Sieden bei 173 W/cm^2 Heizflächenbelastung betrieben, etwa über die gleiche Zeit wurden Siedeversuche mit geringerer Leistung durchgeführt. Der Systemdruck wurde zwischen 0,8 und 1,5 bar variiert. Das zweite Bündel wurde mit einer maximalen Heizflächenbelastung von 177 W/cm^2 betrieben; der Siededruck betrug 1,5 bar entsprechend 950°C Siedetemperatur. Mit dem Bündel wurden insgesamt 60 Siedeversuche durchgeführt, 12 unter transienten Bedingungen, die jeweils bis zum "dryout" führten. Dryout wurde durch Messung des zeitlichen Temperaturverlaufs in der Heizstabhülle mit Thermoelementen bestimmt. Bei einer Hüllentemperatur von knapp 1100°C wurde das Bündel jeweils abgeschaltet. 50% der stationären Siedeversuche wurden mit verminderten Heizflächenbelastungen durchgeführt. Die gesamte Siedezeit liegt bisher zwischen 1/2 und 1 h. Auch dieses Bündel hat die Versuche ohne Heizstabausfall überstanden.

Inzwischen befindet sich ein 169-Stabbündel mit 88 beheizten Stäben unter Siedebedingungen im Institut für Reaktorentwicklung der GfK im Einsatz /8/. Zum Zeitpunkt der Abfassung dieses Berichtes war es bereits 1/2 h ohne Ausfall eines Heizstabes im Siedebetrieb.

5.2 Beurteilung von Heizstäben nach dem Versagen

Die Erprobung von Einzelstäben wurde - von einer Ausnahme abgesehen - bewußt bis zum Versagen der Heizstäbe betrieben. Wichtige Informationen liefern visuelle, röntgenologische und metallurgische Nachuntersuchungen. Sie geben Aufschluß über Ort und Umfang des Schadens und liefern Aussagen über mögliche Schadensursachen und über das Verhalten der einzelnen Bauteile des Heizstabes während der Erprobung. Eine visuelle Prüfung der Heizstabhülle liefert Aussagen, ob unkontrolliertes Sieden zum Heizstabausfall geführt hat. Tritt Natriumsieden mit großem Siedeverzug ein, so kann es zum sogenannten "dryout" an der Heizstabhülle kommen. Die trockene, ungekühlte Partie des Heizstabes gibt dann keine Wärme mehr ab, deshalb heizt sich der Heizstab mit großer Geschwindigkeit auf (ca. 350⁰C/sec). Da die untersuchten Einzelstäbe im Gegensatz zu den beiden Siebenstabbündeln keine Dedektion für "dryout" hatten, führten diese Ergebnisse bei den Einzelstäben regelmäßig zum Heizstabversagen. Abb.10 zeigt typische Aufnahmen von "dryout" - Zonen an Heizstäben. In diesem Fall ist die Heizstabhülle lokal weggeschmolzen, die Bornitridisolierschicht ist noch intakt. Andere Stäbe zeigen im Bereich der Zerstörung des Stromleiters einseitig an der unzerstörten Hülle matte Zonen die durch kurzfristige Überhitzung erzeugt wurden /Abb. 9/. Eine röntgenologische Prüfung zeigt Ausmaß und Ort der Heizstabbeschädigung beim Unfall. Während der Ort des Schadens entweder an der höchst belasteten Stelle (höchste Kühlmitteltemperatur), oder im Bereich mit Fertigungsfehlern auftritt, hängt sein Ausmaß meistens von einer Reihe zusätzlicher Faktoren ab.

Zu nennen sind hauptsächlich das einleitende Ereignis des Versagens und die Gesamtzeit vom einleitenden Ereignis bis zur Abschaltung des elektrischen Stromes. Abb.11 zeigt Röntgenaufnahmen der Schadenszone einer Reihe von Stäben. Daraus läßt sich folgendes erkennen:

- Die Heizstäbe brennen in der Regel in der Nähe des oberen Endes der beheizten Zone auf der Kühlmittelaustrittseite durch. Diese Seite ist thermisch am höchsten belastet (höchste Kühlmitteltemperatur).
- In der Regel ist der Stromleiter der beschädigten Stäbe unterbrochen.
- Bei manchen Stäben ist in der Durchbrennzone die Hülle beschädigt, andere weisen eine intakte Hülle auf.

Daraus lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Da die Heizstäbe im Bereich großer thermischer Belastung durchbrennen, sind Fertigungsfehler als Ursache für den Ausfall auszuschließen.
- Da alle Heizstäbe eine fast völlige Trennung des Stromleiters in der Schadenszone aufweisen, ist zu vermuten, daß häufig am Ende der Lebensdauer des Heizstabes eine Zone des Stromleiters sich bis zur Schmelztemperatur erwärmt; der Stromleiter wird durch Schmelzen unterbrochen.

Nach Unterbrechung des Leiters liegt nun plötzlich die volle Betriebsspannung an der überhitzten Schadensstelle an, was dann als Sekundäreffekt zum elektrischen Durchschlag zur Hülle und Aufschmelzen der Hülle führt. Diese Vermutung wird durch die Tatsache erhärtet, daß Stäbe die während der Erprobung besonders gut mit einem elektrischen Sicherheitssystem überwacht wurden, meistens keine Beschädigung der Hülle aufweisen.

Die Abb.12 und 13 zeigen Schliffe zweier erprobter Stäbe. Die beiden Stäbe unterscheiden sich durch den verwendeten Hüllenwerkstoff und durch die Instrumentierung. Stab 45 (Abb.12) aus einer frühen Fertigungsphase besitzt eine Hülle aus 72% Ni / 16% Cr entsprechend Inconel 600. Das Gefüge des Kaltendes hat sich während der Erprobung nicht wesentlich geändert, auffällig ist das recht grobe Gefüge der Hülle.

Der Schliff des Heizstabes in der Durchbrennzone weist starkes Kornwachstum der Hülle mit groben Ausscheidungen an den Korngrenzen auf. Der Stromleiter zeigt ein aus der Schmelze erstarrtes Gefüge. Demgegenüber ist das Gefüge der Hülle von Stab 113 (Abb.13), sehr feinkörnig (Anfang beheizte Zone). Selbst in der Durchbrennzone hat es noch eine feinere Kristallstruktur als Stab 45, obwohl infolge eines "dryout" Hülle und Hüllenthermoelement angeschmolzen sind. Korngrenzenausscheidungen sind nicht zu erkennen. Als Hüllenwerkstoff diente 1.4981. Dieser Werkstoff wurde für alle weiteren Stäbe als Hüllenwerkstoff verwendet. Abb.14 zeigt Längsschliffe der Übergangszone Stromleiter-Kaltende eines Heizstabes nach der Erprobung.

Der Stromleiter, der auf seinem Strompfad nur kaltverformte Preßverbindungen besitzt, zeigt auch nach der Erprobung keine Anzeichen einer wachsenden Sperrschicht an den Preßverbindungen. Vielmehr ist der Stromleiter (70% Ni / 30% Cr) und der Nickelbolzen an der Kontaktstelle während des Betriebes kaltverschweißt; nur noch an perlenschichtartigen Ausscheidungen ist die ehemalige Preßverbindung zu erkennen.

6. Bewertung der Heizstäbe

Der eingeschlagene Weg, nämlich Heizstäbe, die für Wärmeübergangsversuche entwickelt wurden auch für Siederversuche in Großbündel einzusetzen, hat sich nach den vorliegenden Erfahrungen als richtig herausgestellt.

Dadurch ist die Möglichkeit gegeben, Versuche zum lokalen Sieden in teilweise blockierten Bündeln durchzuführen. Diese Versuche sind mit Heizstäben, deren Stromleiter aus hochschmelzenden Metallen bestehen, wegen der starken Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes nur sehr schwer interpretierbar. Die Stäbe haben in der Erprobung eine große Standfestigkeit bewiesen, so daß die Voraussetzungen auch zu solchen Siedeeperimenten in Großbündeln gegeben sind, die bis zum "dryout" führen.

Die gewählten Fertigungsmethoden sind einfach, erfordern geringe Fertigungszeiten und schließen zusätzlich viele Fehlermöglichkeiten aus. Dadurch war es möglich, die Fertigung aus der institutsinternen Entwicklung in die zentrale Werkstatt der GfK zu übertragen, wo die Stäbe heute zu großen Stückzahlen mit einem Ausschuß von nur 1% gefertigt werden.

Literatur:

- /1/ V. Casal
Heizstäbe mit indirekter Widerstandsbeheizung zur
Simulation von Kernbrennstäben.
KFK 894, 1968
- /2/ V. Casal, E. Graf, W. Hartmann
Heizstäbe zur Simulation von Brennstäben für ein-
phasige Wärmeübergangsuntersuchungen in Flüssigmetall-
strömungen.
KFK 2258, 1976
- /3/ Goldsmith, Watermann, Hirschhorn
Handbook of Thermophysical Properties of Solid
Materials. Vol III, S. 963
McMillan Company New York, 1961
- /4/ W. Schneider, GfK, persönliche Mitteilung, 1976
- /5/ A. Kaiser, K. Mattes, W. Pepler, K. Schleisiek,
GfK, persönliche Mitteilungen 1973
- /6/ A. Kaiser, W. Pepler
Steady State Boiling Experiments in a 7-Pin Bundle.
Meeting of the Liquid Metal Boiling Working Group,
Risley, Oct. 1 st - 3 rd, 1975
- /7/ W. Pepler, K. Schleisiek
Boiling Experiments in a 7-Pin Bundle under Loss of
Flow Conditions.
Meeting of the Liquid Metal Boiling Working Group,
Risley, Oct. 1 st - 3 rd, 1975
- /8/ F. Huber, W. Pepler, K. Schleisiek, A.J. Brook
Temperature Distribution and Local Boiling Behind a
Central Blockage in a Simulated FBR-Subassembly
Int. Meet. Fast React. Safety and Rel.Phys. Chicago
5. - 8. Okt. 1976

/9/ Handbuch Heizleiterwerkstoffe Vacuumschmelze
Hanau 1964 - 1967.

Nr.	Außendurchmesser [mm]	Hüllrohrwandstärke [mm]	Isolierschichtstärke [mm]	Bandwendelstärke [mm]	Wendelbreite [mm]	Wendelspalt [mm]	elektr. Widerstand [Ω/m]
1	6,0	0,44	0,7	0,5	6,4	0,6	0,70
2	6,0	0,44	0,7	0,4	5,4	0,6	0,90
3	6,0	1,0	0,55	0,29	4,3	0,8	1,44
4	6,0	0,44	0,7	0,4	4,4	0,6	1,45
5	6,0	0,85	0,7	0,29	4,3	0,7	1,60
6	6,0	0,60	0,6	0,29	4,2	0,55	1,6
7	6,0	0,44	0,7	0,4	3,9	0,6	1,70
8	6,0	0,53	0,75	0,3	4,1	0,25	2,0
9	6,0	0,45	0,7	0,4	3,2	0,6	2,2

TABELLE 1: ABMESSUNGEN UND WIDERSTAND VON HEIZSTÄBEN

Stab Nr.	Leistungsst. I		Leistungsst. II		Leistungsst. III		Bemerkungen
	Dbtr.	Zykl.	Dbtr.	Zykl.	Dbtr.	Zykl.	
42	24	280					
61	7	33					
66	30	131					
81	9,5	120	5,5				
141	8,5						davon 6,5 bei 980°C
151	-	-	6				Pumpenausfall
177	6		6				
178	10,5	100	10	4			
179	10		1,2				Überhitzung
180	10	100	10	100			
181	10	100	4				Überhitzung
188	11	120	11	100	1		
189	10	117	4				
190	10,5	118	10,5	100	3		
191	10,5	101	10	91	1		
192	1,3		10				Überhitzung
198	1		10	100	2,5		
200			10	100	0,2		
236	16	100	10				
237	3,3	100	10,5	100			
238	10,3	100	6,6				Überhitzung
239	9,7	100	1,3				
240	8,5						Überhitzung
241	10,2	100	0,5				Überhitzung
265	11	100	8				
266	9,5	100	3,5				Überhitzung
267	9	100					Pumpenausfall
267 A	10	100	10,5				

Kühlmitteleintrittstemperatur: 560 - 600°C

Kühlmittelaustrittstemperatur: 950°C

Leistungsstufe I = 170 - 180 W/cm²

Leistungsstufe II = 200 - 210 W/cm²

Leistungsstufe III = 225 - 235 W/cm²

Dbtr. = Dauerbetrieb in /h/

Zykl. = Anzahl der Ab- und Zu-
schaltungen bei Nennlast.

TAB. 2 ERGEBNISSE DER ERPROBUNG VON EINZELSTÄBEN OHNE NATRIUMSIEDEN.

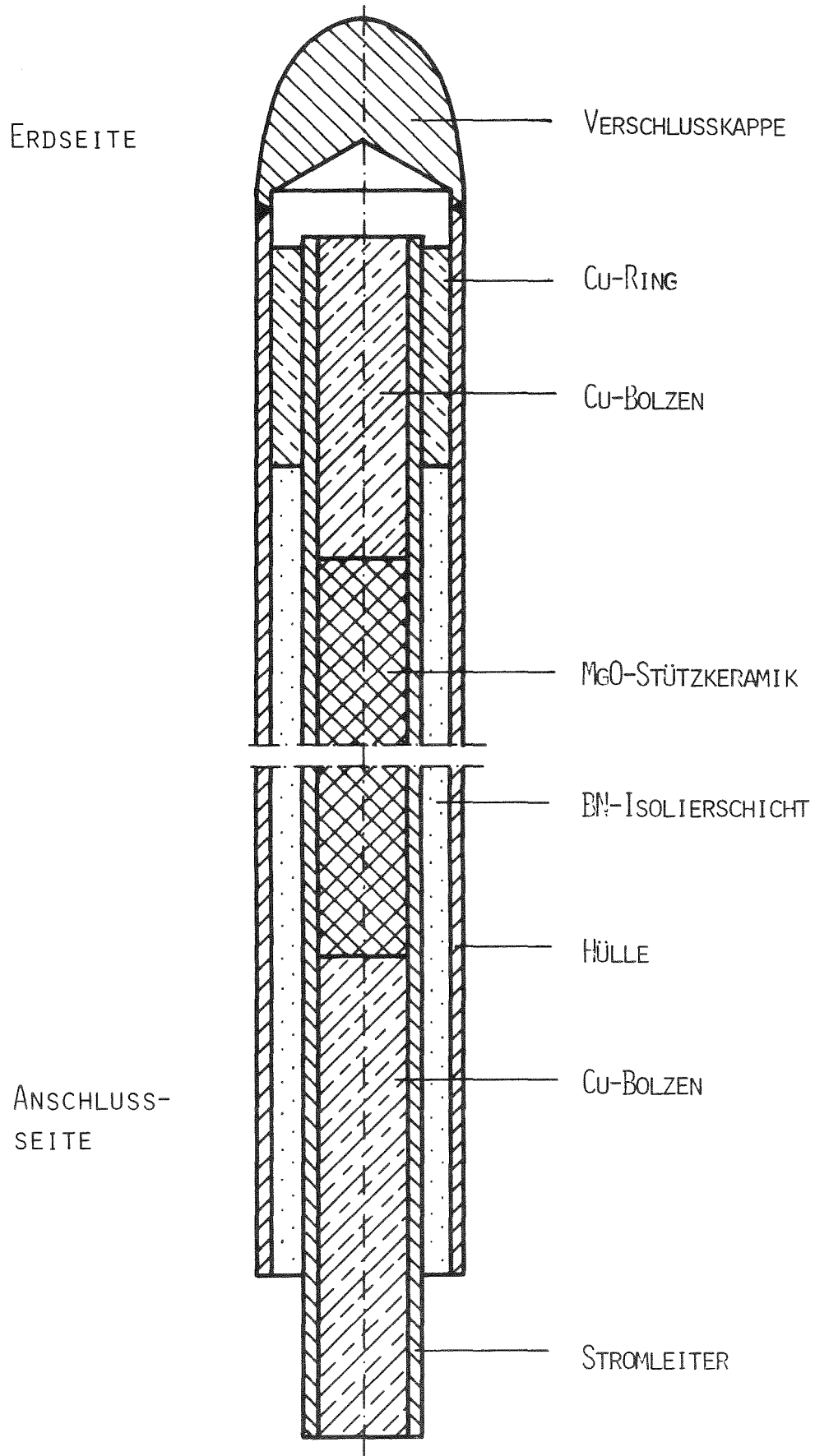


ABB. 1: SCHEMATISCHER LÄNGSSCHNITT DURCH EINEN HEIZSTAB FÜR EINPHASIGE WÄRMEÜBERGANGSVERSUCHE.

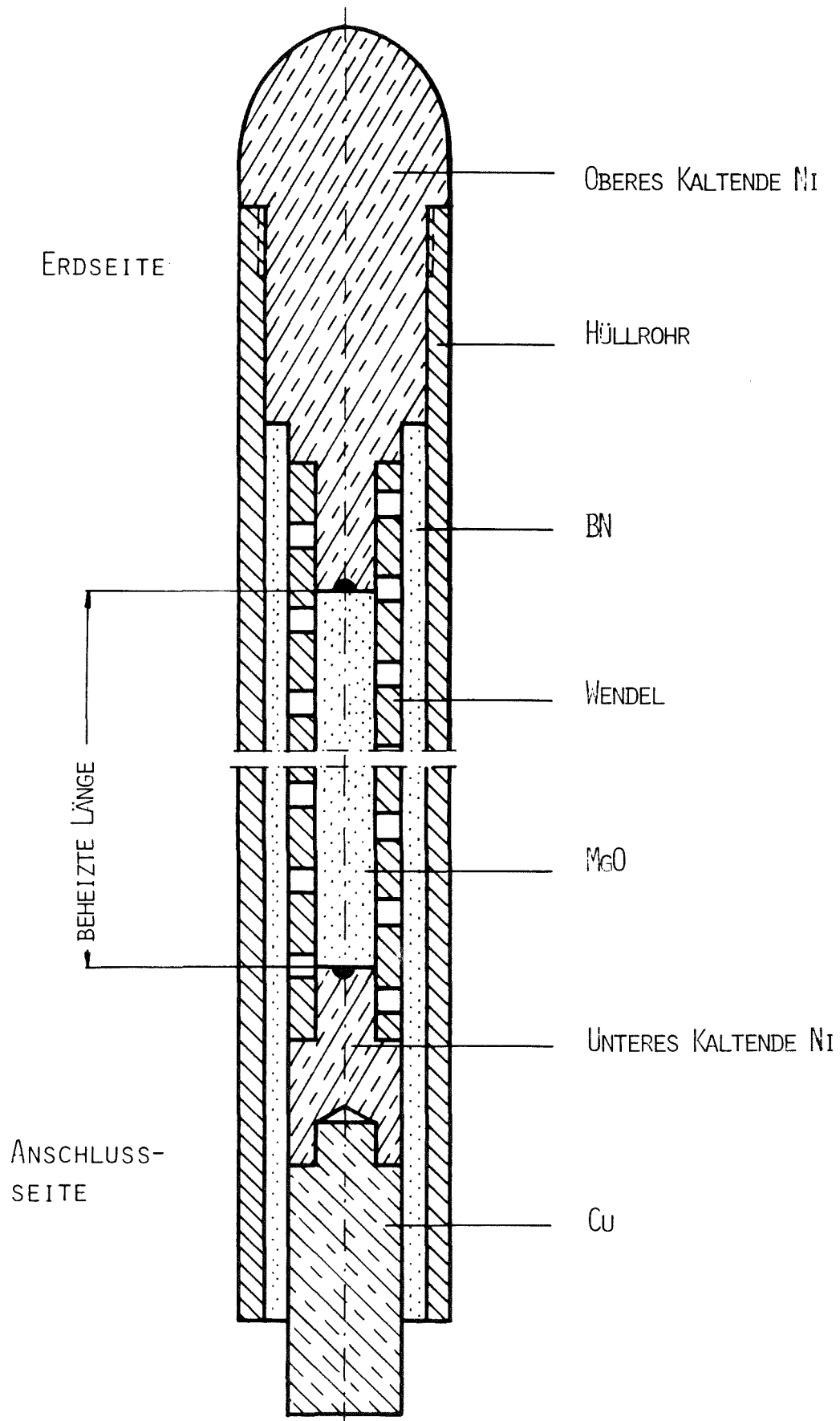


ABB. 2: SCHEMATISCHER LÄNGSSCHNITT DURCH EINEN HEIZSTAB FÜR SIEDEVERSUCHE IN FLÜSSIG METALLGEKÜHLTEN VIELSTABBÜNDELN.

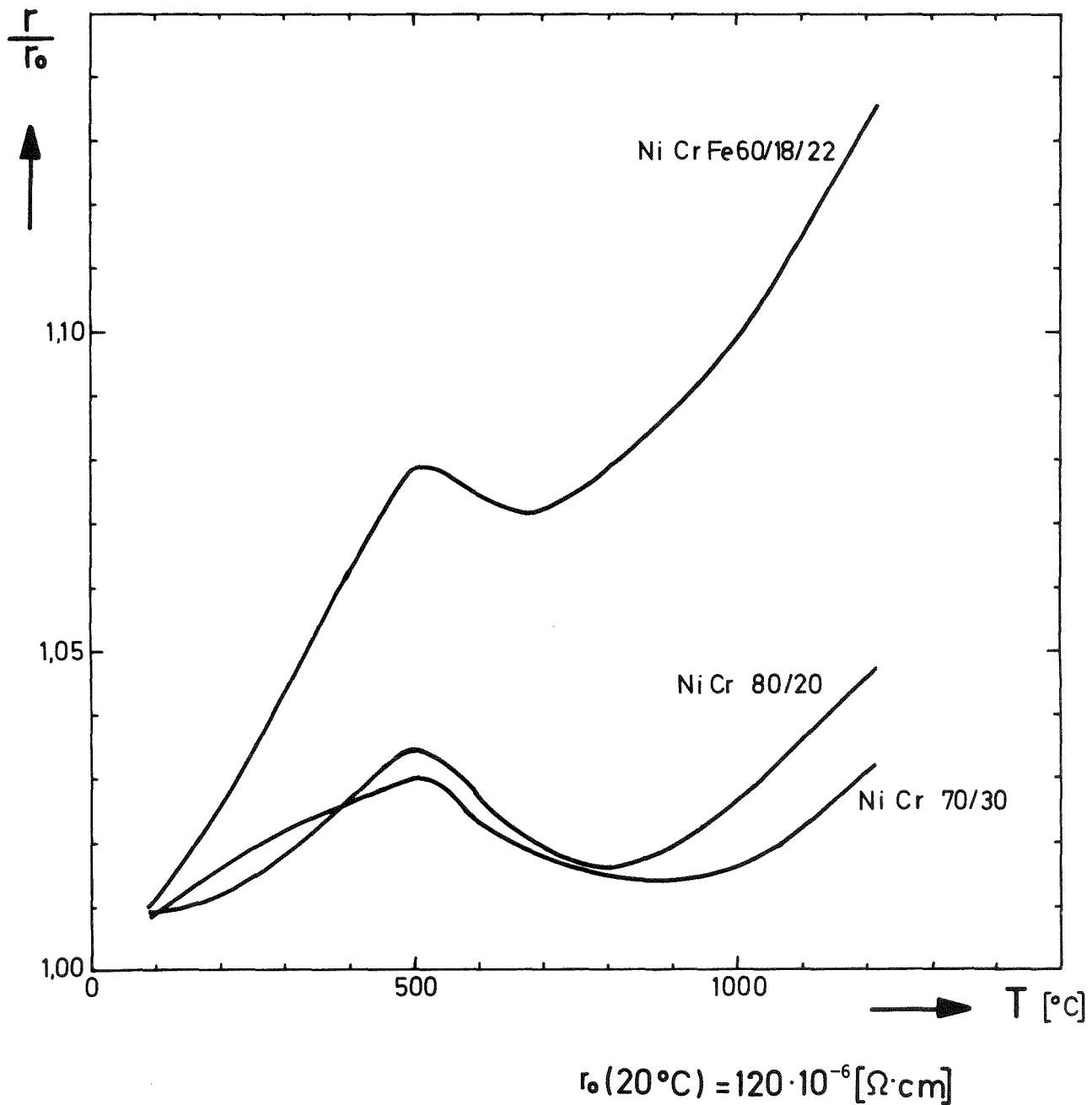


ABB. 3: ELEKTRISCHER WIDERSTAND VON NI-CR-LEGIERUNGEN
IN ABHÄNGIGKEIT VON DER TEMPERATUR NACH /9/.

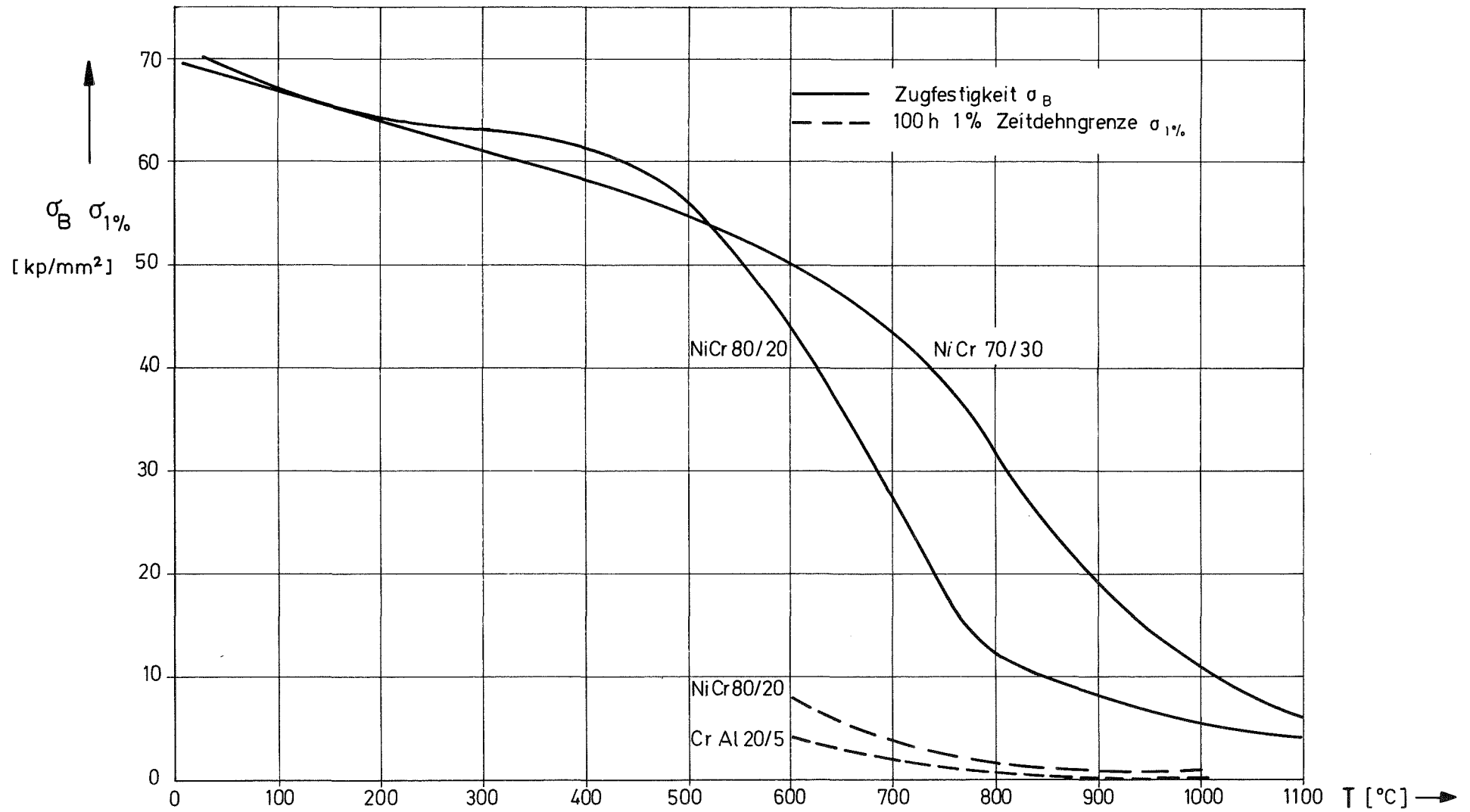


ABB. 4 ZUGFESTIGKEIT σ_B ZEITDEHNGRENZE $\sigma_{1\%}$ ALS FUNKTION DER TEMPERATUR VERSCHIEDENER KONVENTIONELLER HEIZLEITERLEGIERUNGEN NACH /9/.

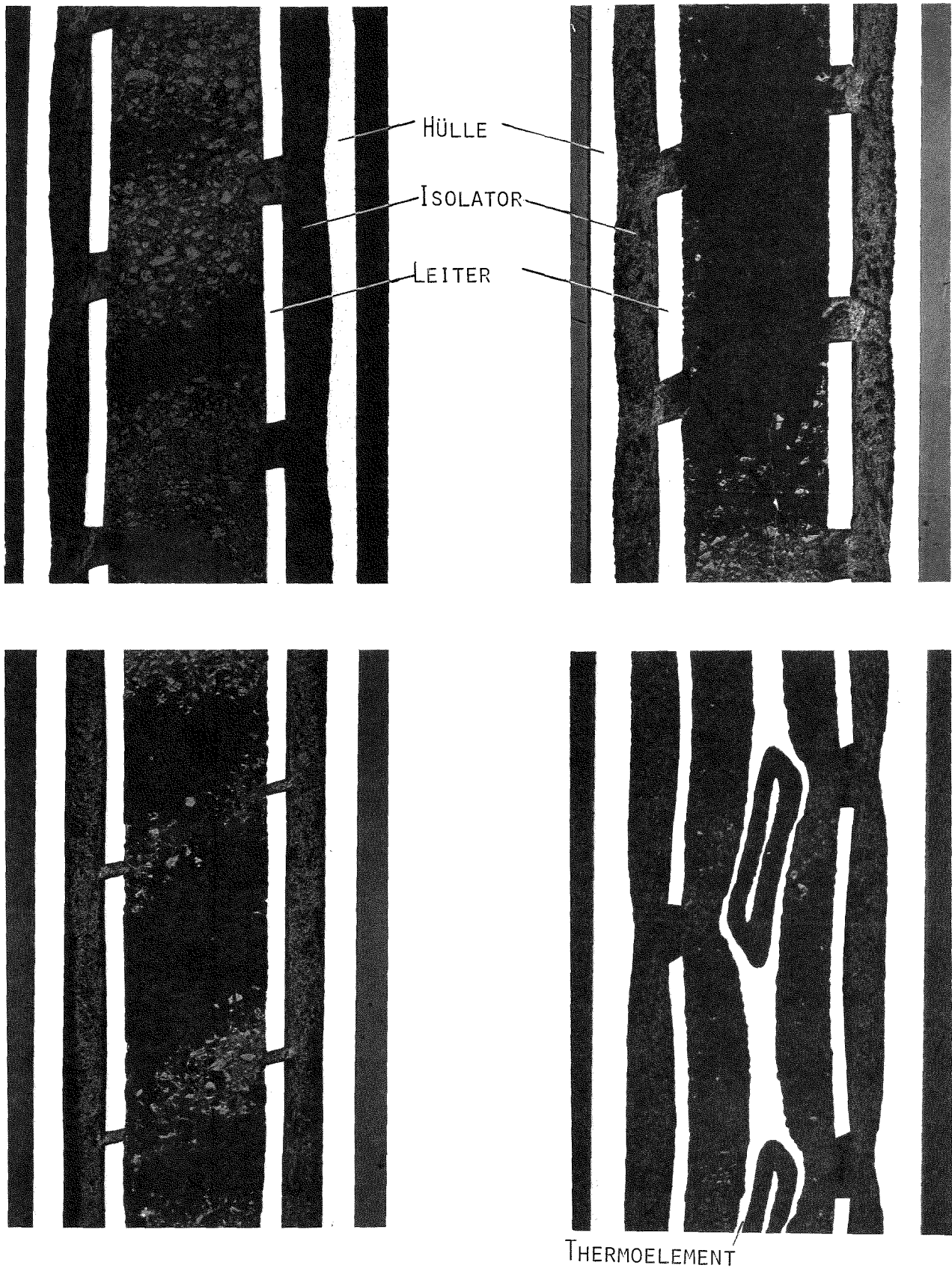


ABB. 5: LÄNGSSCHLIFFE DURCH HEIZSTÄBE

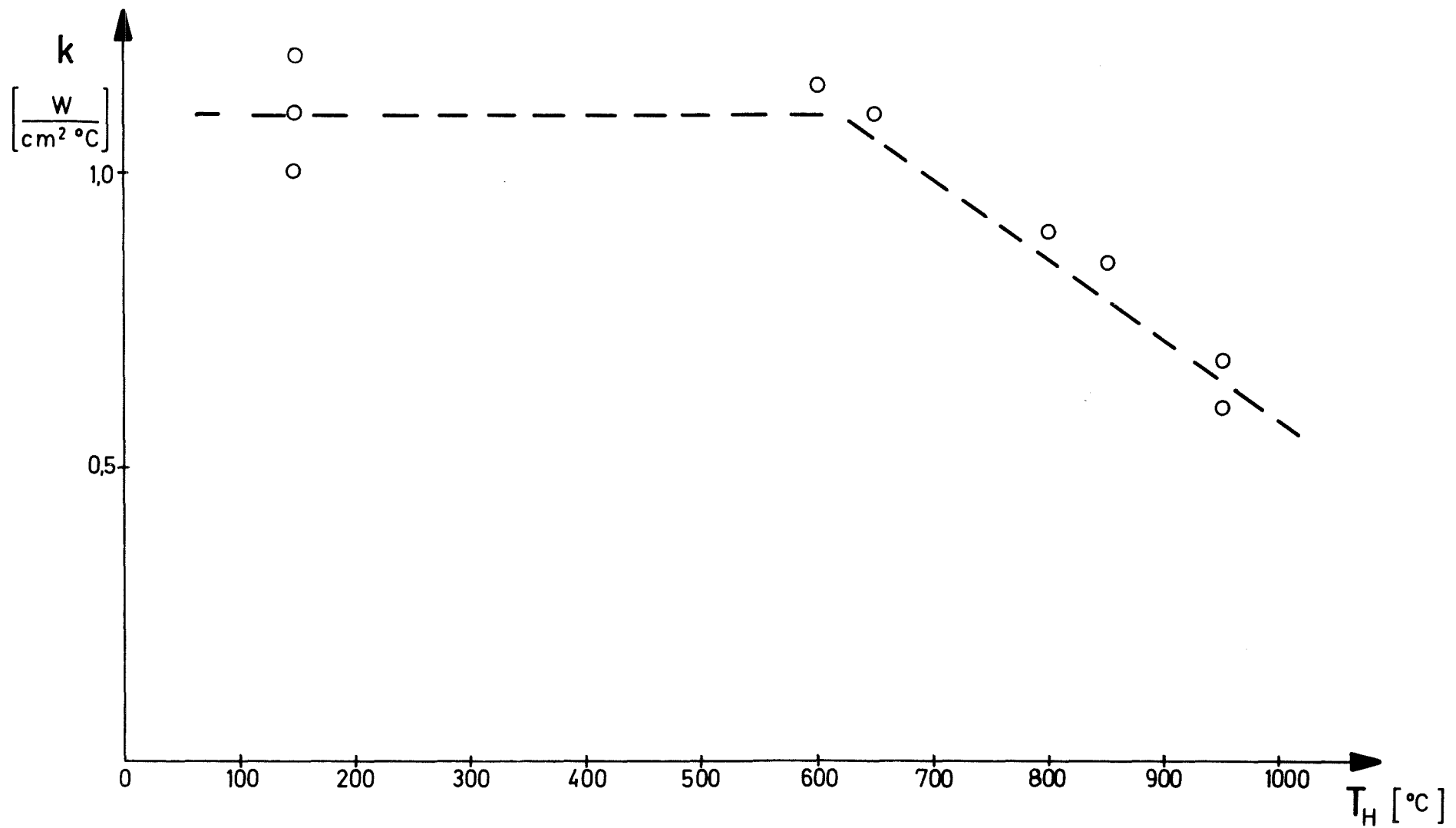


ABB. 6 WÄRMEDURCHGANG k IN HEIZSTÄBEN (STROMLEITERINNENSEITE \rightarrow HÜLLEN-OBERFLÄCHE) IN ABHÄNGIGKEIT VON DER HÜLLENTEMPERATUR T_H BEI EINER HEIZFLÄCHENBELASTUNG VON $n = 170 \text{ W/cm}^2$

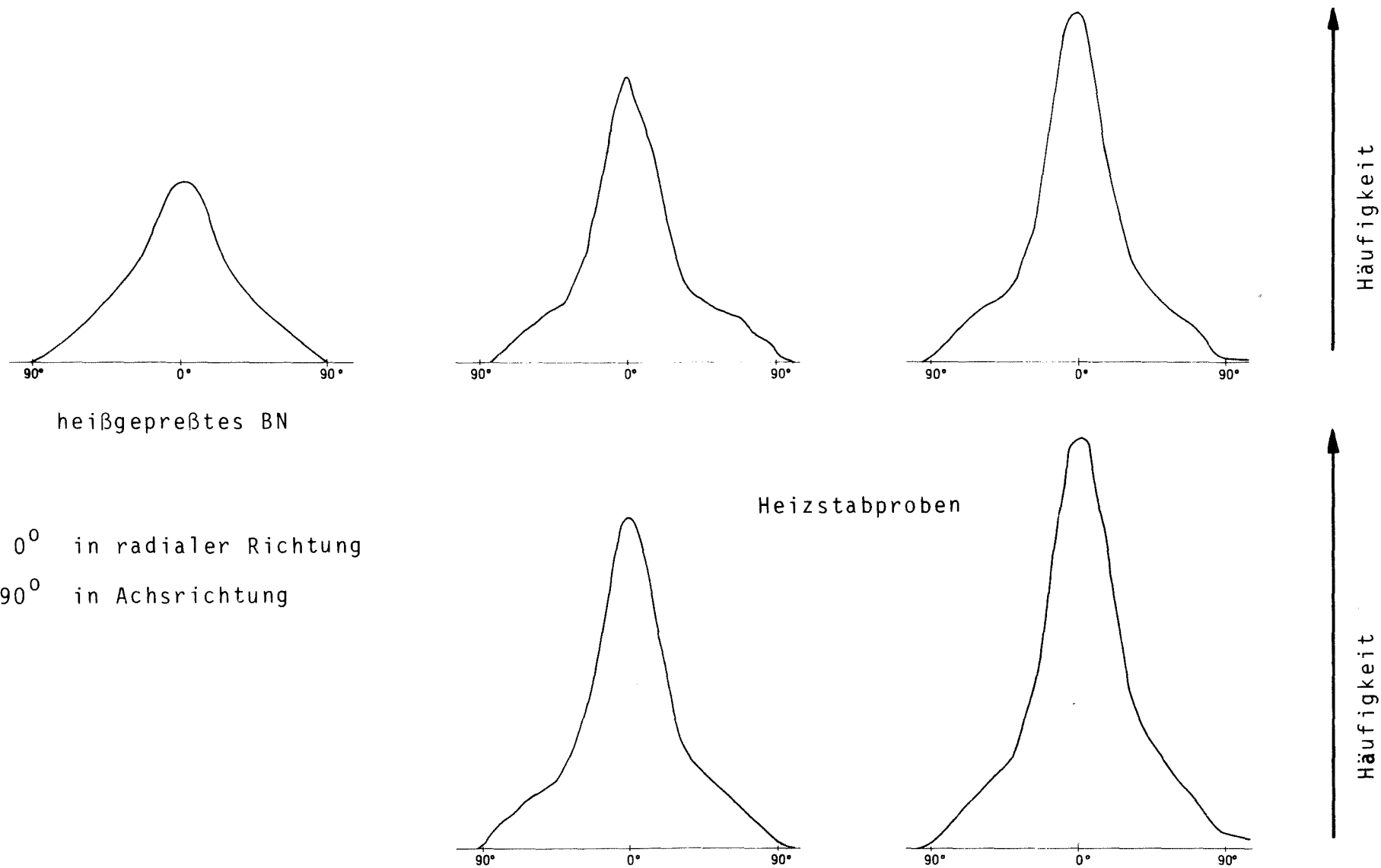


ABB. 7 RELATIVE HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER C-ACHSEN DES BN IN HEIZSTÄBEN BZW. IN EINER VERGLEICHSPROBE AUS HEISSGEPRESSTEM BN, NACH /4/

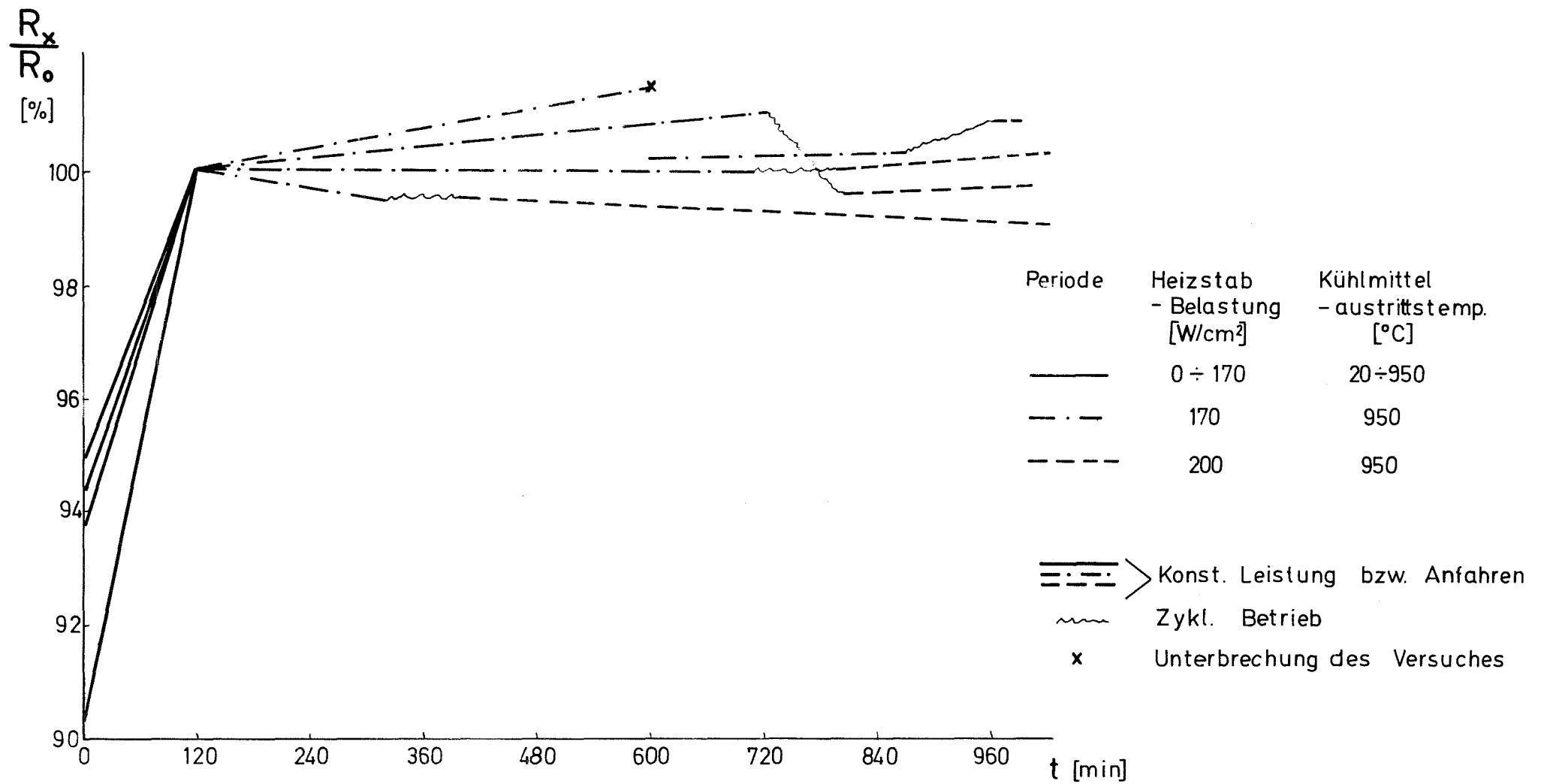


ABB. 8 ZEITLICHE ÄNDERUNG DES ELEKTRISCHEN WIDERSTANDES VON 6 HEIZSTÄBEN WÄHREND DER ERPROBUNG.

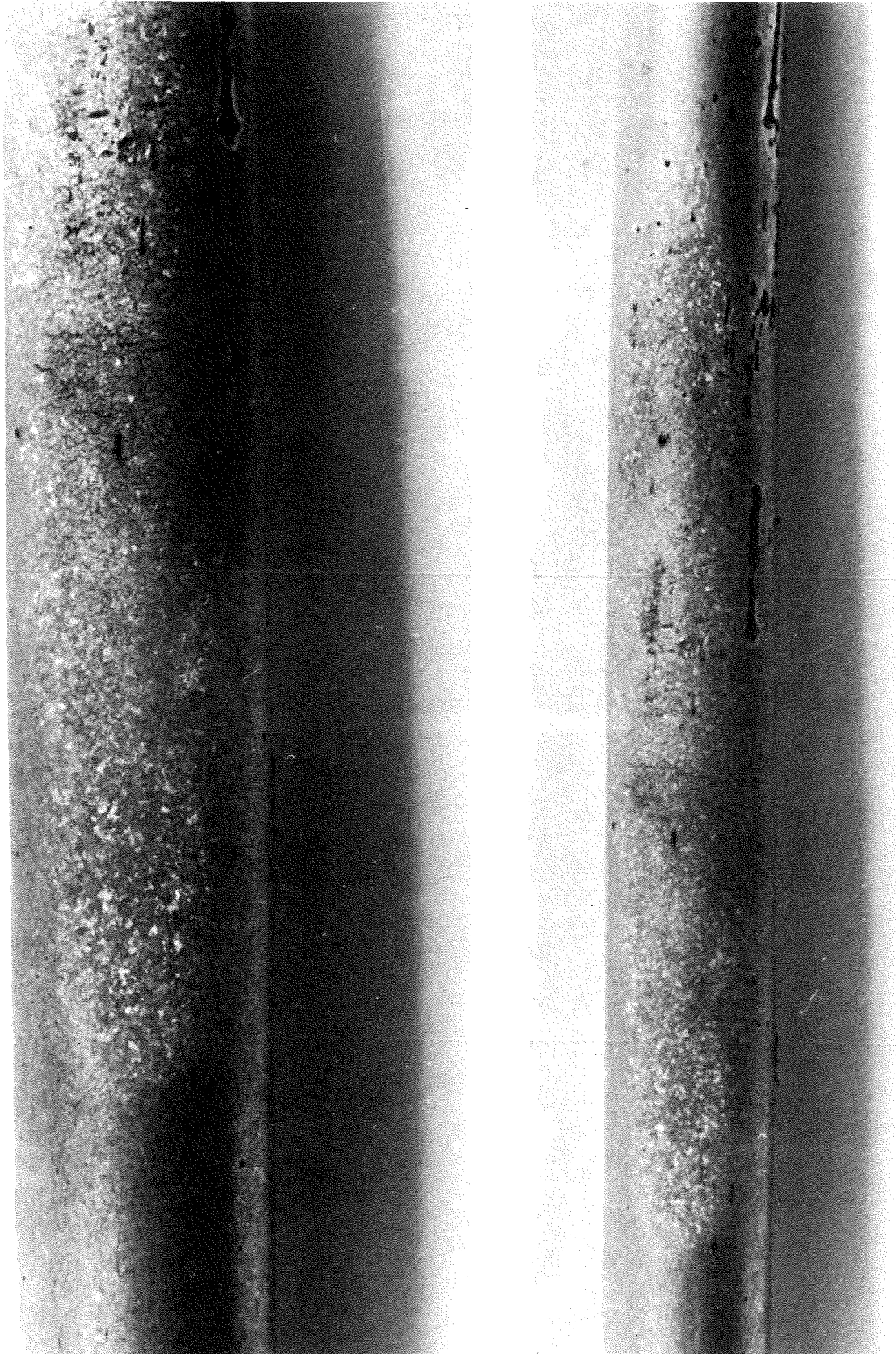


ABB. 9: HEIZSTAB NACH EINTRETEN EINES DRYOUT MIT ANSCHLIESSENDER WIEDERBENETZUNG OHNE LEISTUNGSABSCHALTUNG.

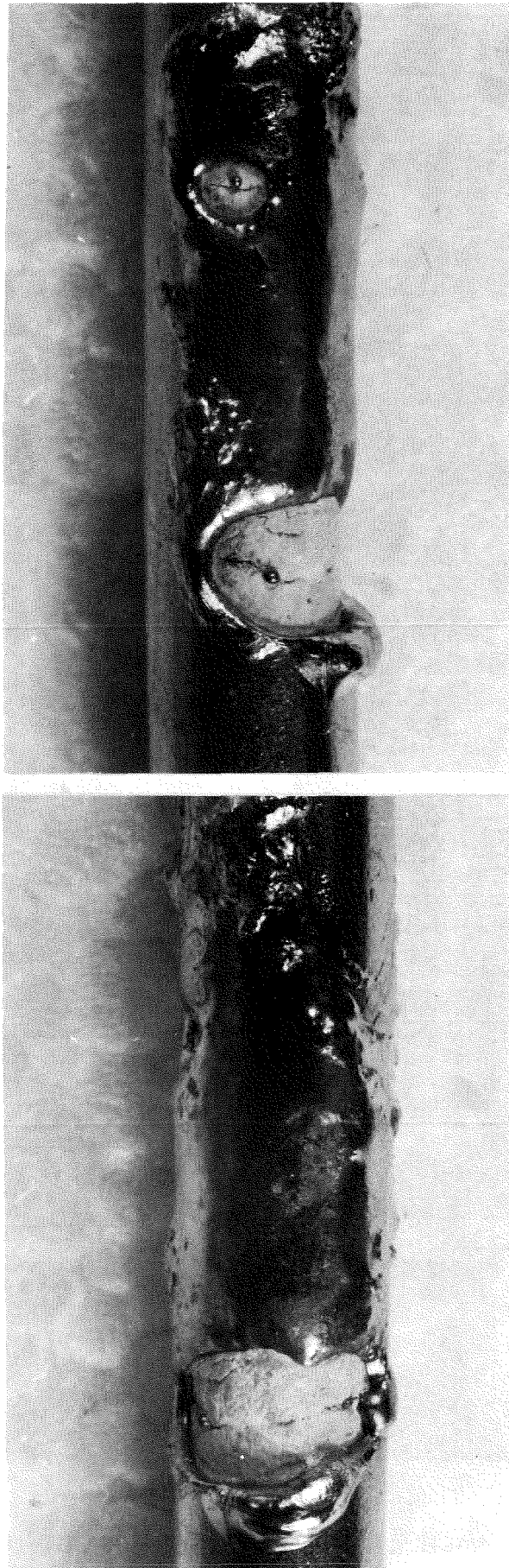


ABB.10: HEIZSTAB NACH EINTRETEN EINES DRYOUT OHNE LEISTUNGS-
ABSCHALTUNG.

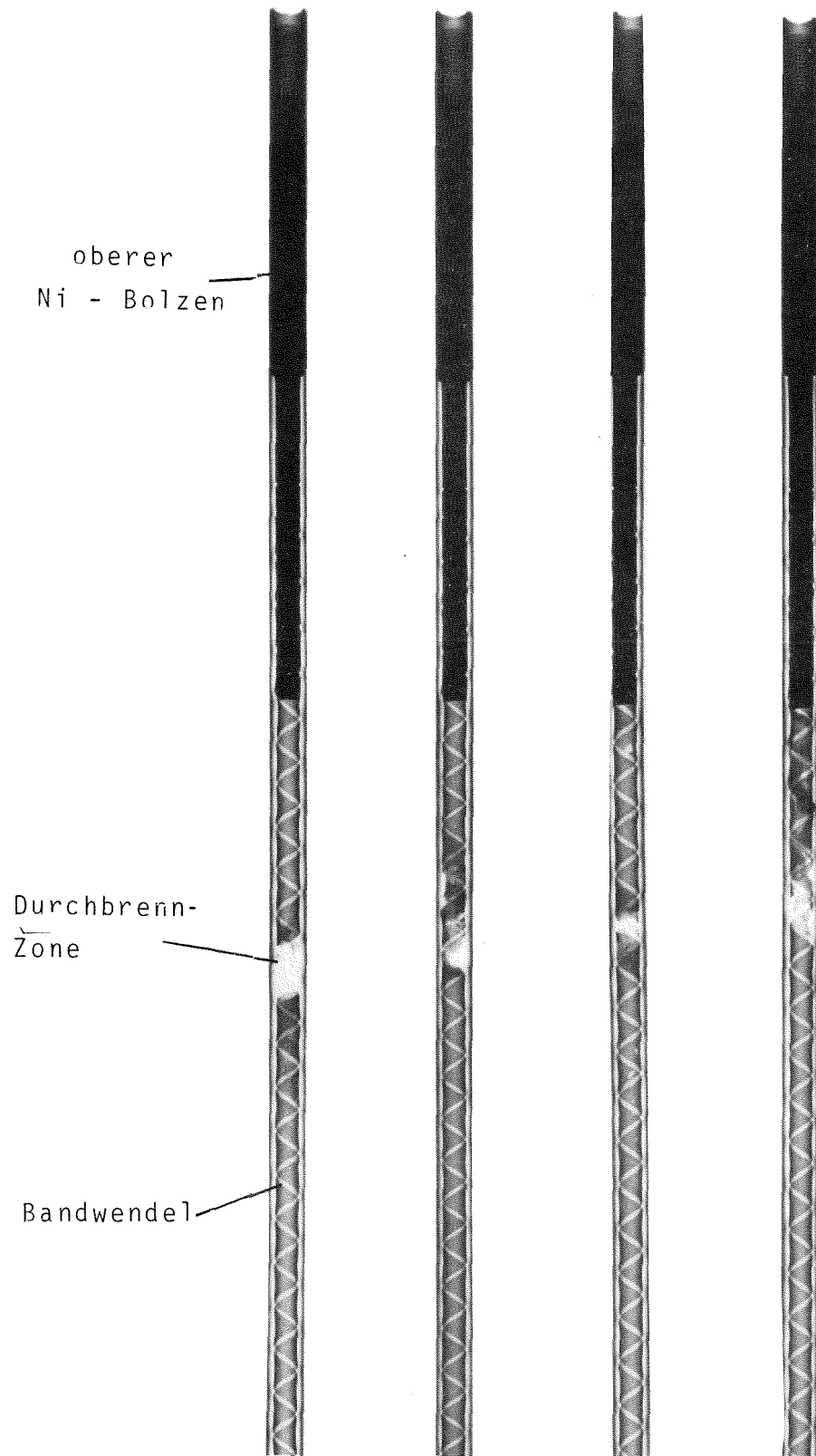


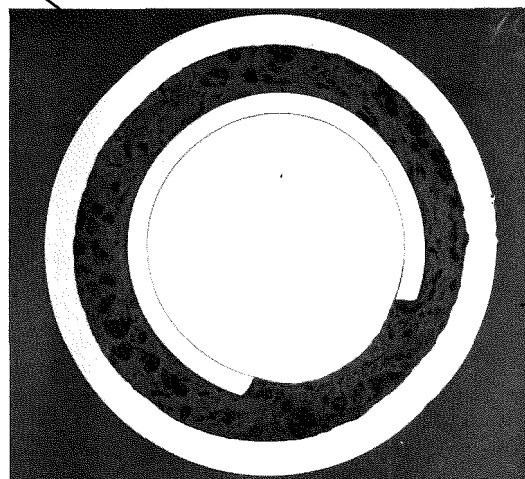
ABB.11 RÖNTGENAUFNAHMEN BESCHÄDIGTER HEIZSTÄBE

Schmelzzone
Kühlmittelaustrittseite

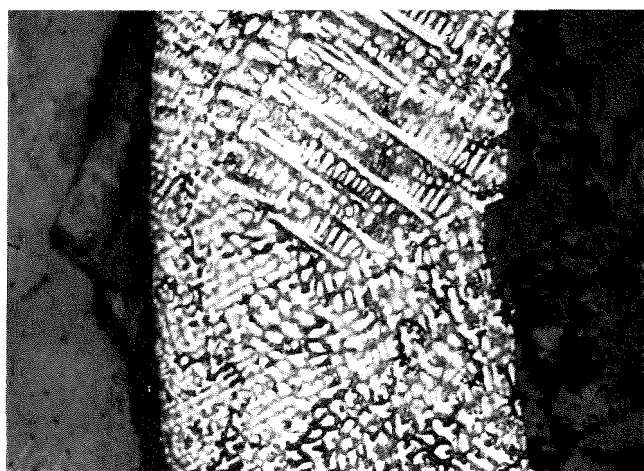


Querschnitt

Kühlmitteleintrittseite
(unbeheizt)



Stromleiter (70 Ni/30 Cr)



Hülle (2.4816)

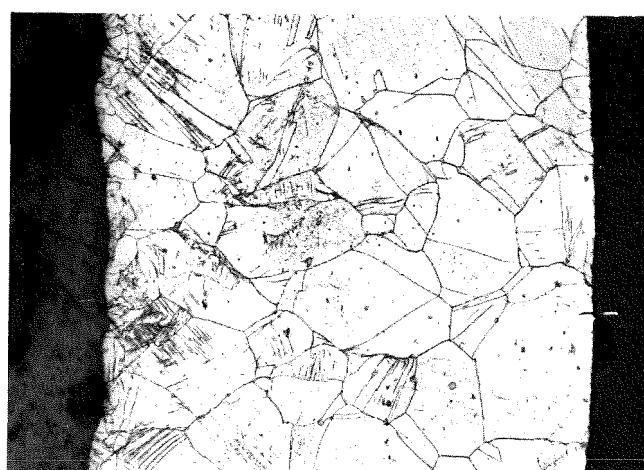
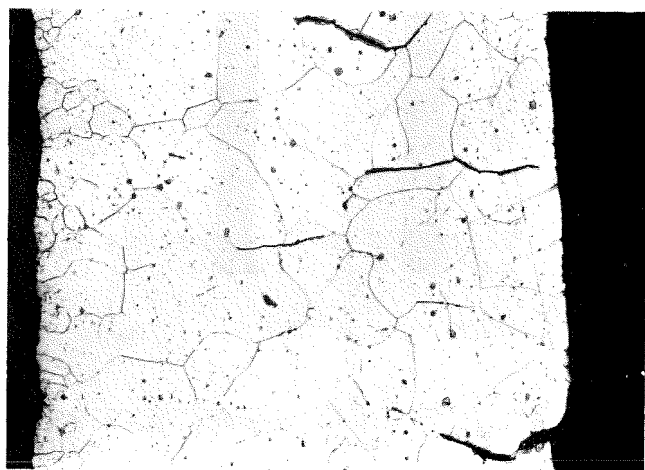
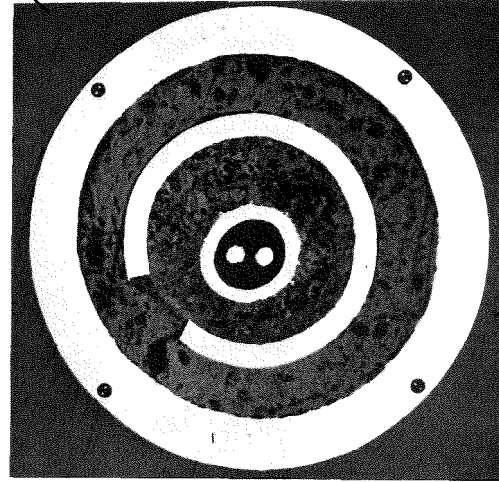


ABB. 12 SCHLIFFE DES HEIZSTABES NR. 45

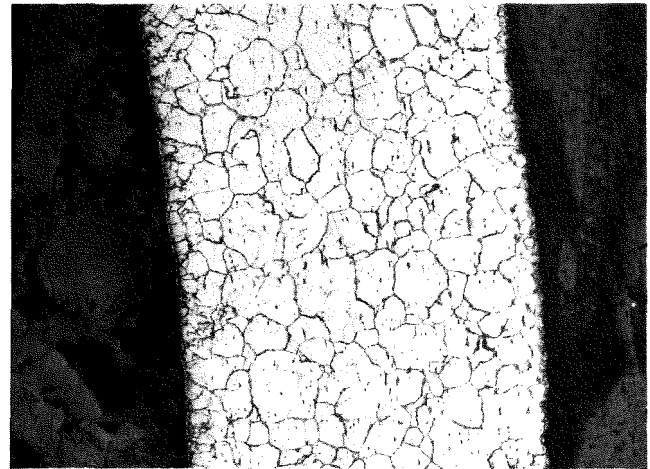
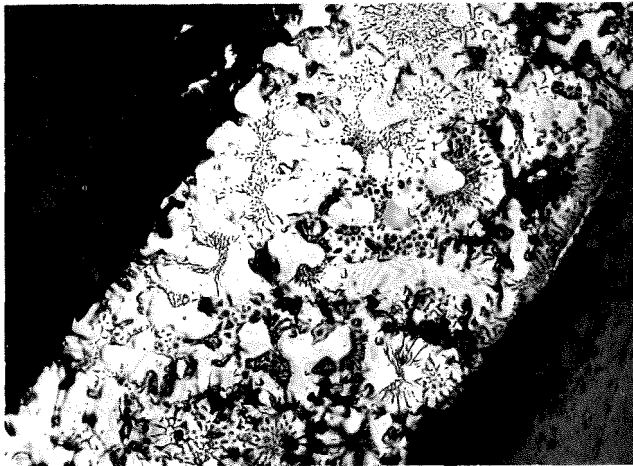
Schmelzzone
Kühlmittelaustrittseite

Kühlmitteleintrittseite
(beheizt)

Querschnitt



Stromleiter (70 Ni/30 Cr)



Hülle (1.4981)

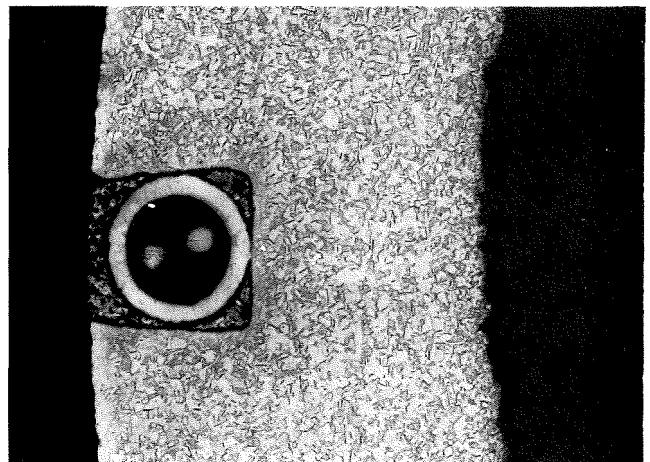
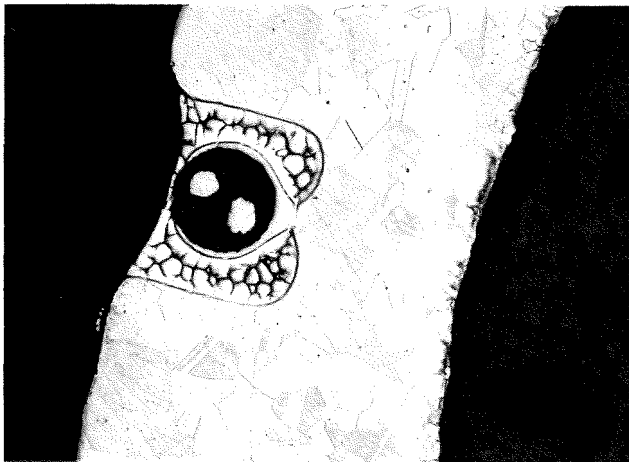
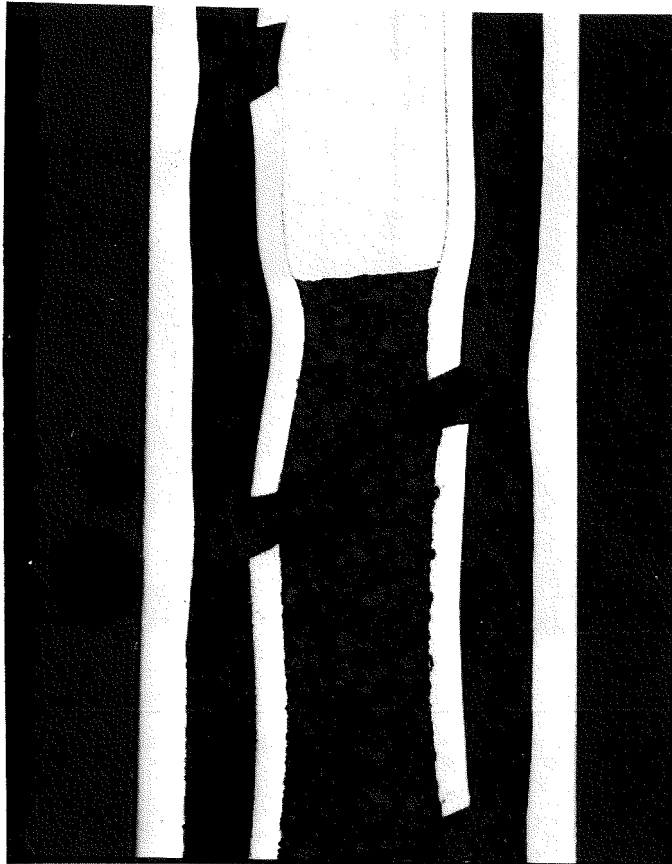
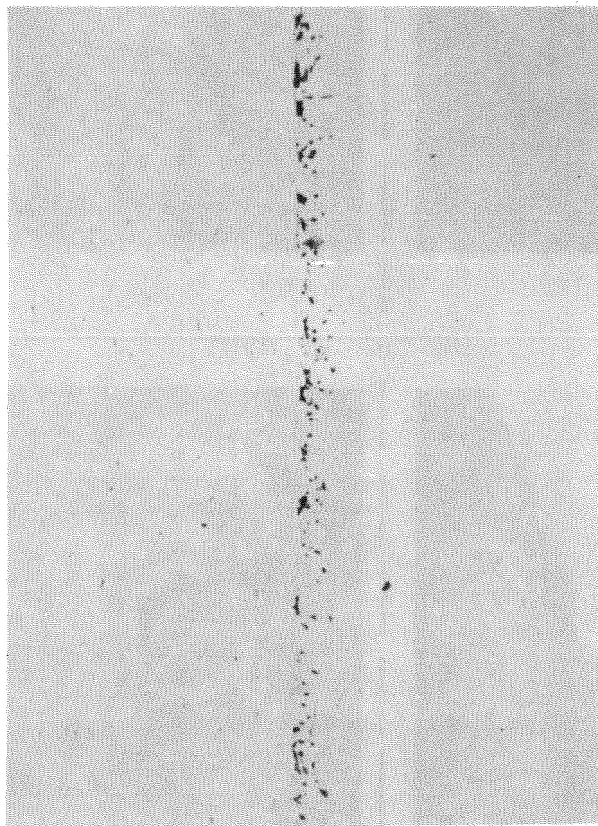


ABB. 13 SCHLIFF DES HEIZSTABES NR. 113



Übersicht
10 fach



Ausschnitt der
Kontaktstelle
200 fach

ABB. 14: LÄNGSSCHLIFF DES VERBINDUNGSELEMENTES WENDEL-
NICKELBOLZEN NACH 18-STÜNDIGEM BETRIEB UNTER
VOLLAST.