

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM  
KARLSRUHE**

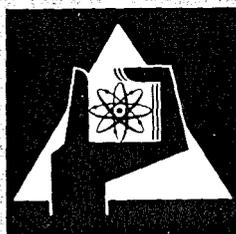
Februar 1973

KFK 1723

Institut für Reaktorbauelemente  
Institut für Material- und Festkörperforschung  
Projekt Schneller Brüter

**Untersuchungen des Langzeitverhaltens der Abstützstellen an einem  
Modell-Brennelement aus Hüllrohren mit sechs integralen Wendelrippen  
als Abstandshalter in einer isothermen Natrium-Strömung**

E. Baumgärtner, H.U. Borgstedt, G. Drechsler



**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 1723

Institut für Reaktorbauelemente  
Institut für Material- und Festkörperforschung  
Projekt Schneller Brüter

Untersuchungen des Langzeitverhaltens der Abstützstellen an einem Modell-Brennelement aus Hüllröhren mit sechs integralen Wendelrippen als Abstandshalter in einer isothermen Natrium-Strömung.

von

E. Baumgärtner, H.U. Borgstedt, G. Drechsler

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG MBH., KARLSRUHE



UNTERSUCHUNGEN DES LANGZEITVERHALTENS DER ABSTÜTZ-  
STELLEN AN EINEM MODELL-BRENNELEMENT AUS HÜLLROHREN  
MIT SECHS INTEGRALEN WENDELRIPPEN ALS ABSTANDSHAL-  
TER IN EINER ISOTHERMEN NARIUM-STRÖMUNG

In einer isothermen Natrium-Strömung wurde ein Modell-Brennelement aus 1.4961-Hüllrohren mit 6 integralen Wendelrippen als Abstandshalter in einem Langzeitversuch über 1900 Stunden untersucht. Das 6l-Stabbündel wurde bei Na-Temperaturen von 600°C und Na-Geschwindigkeiten von 4,7 m/s betrieben in hexagonalen Brennelementkästen verschiedener Schlüsselweiten. Das Betriebsverhalten der Abstützstellen und Korrosionseffekte an Oberflächen und Schweißnähten wurden untersucht.

ISOTHERMAL SODIUM FLOW EXPERIMENTS WITH A MODEL FUEL-  
ELEMENT COMPOSED OF RODS WITH 6 INTEGRAL FINS AS SPACERS

A model of a fuel element bundle composed of 1.4961 rods with 6 helical fins as spacers was investigated in an isothermal sodium flow over 1900 hours at temperatures of 600°C and sodium velocities of 4.7 m/sec. The 6l-rod cluster was installed in hexagonal shrouds of different widths. The behavior of the points of support of the fins and the corrosion effects on surfaces and welds were examined.

---

Wir danken den Herren H.Hoffmann und O. Jacobi sowie den Herren des Natrium-Labors für Ihre Mitarbeit.



## Inhaltsverzeichnis

1. Einführung
2. Aufgabenstellung
3. Testelement
4. Natriumkreislauf
5. Versuchsdurchführung
6. Versuchsergebnisse
  - 6.1 Ergebnisse der werkstoffkundlichen Auswertung
    - 6.11 Gewichtsänderungen
    - 6.12 Veränderungen an den Staboberflächen
    - 6.13 Metallographische Befunde
    - 6.14 Befunde an den Endstopfenverschweissungen
    - 6.15 Ergebnisse chemischer Analysen an Stabproben
    - 6.16 Ergebnisse der visuellen und mikroskopischen Untersuchungen der Staboberflächen
  - 6.2 Ergebnisse der profilometrischen Untersuchungen des Rohrmaterials
7. Zusammenfassung

Literatur



## 1. Einführung

Als Abstandshalter für Stabanordnungen in Bündelform sind wabenartige Gitter und wendelförmig an den Stäben angebrachte Drähte oder Rippen verwendbar. Das Betriebsverhalten von wabenartigen Gittern und Wendeldrähten ist in größerem Umfang untersucht worden. Im Stabverband stützen sich die Oberflächen benachbarter Stäbe unmittelbar am Gitter oder am Draht ab. Untersuchungen zum Verhalten von Wendelrippen im Stabverband sind bisher wenig bekannt geworden. Wendelrippen sind integraler Bestandteil des Hüllrohres und werden mit diesem im gleichen Arbeitsgang gefertigt. Benachbarte Stäbe stützen sich über die Rippenköpfe ab. Die für die Brennstäbe Schneller Reaktoren charakteristischen dünnen Hüllrohrwände der Stäbe werden daher nicht vom Abstandshalter berührt. Beim Auftreten von betriebsbedingten Relativbewegungen zwischen benachbarten Stäben bleibt ein möglicher mechanischer Metallabtrag auf die Rippenköpfe beschränkt.

Das Stabbündel, das in seiner Geometrie stark von jener der Proben in Korrosionsversuchen abweicht, bietet bei der Nachuntersuchung auf Korrosionseffekte die Möglichkeit, die Übertragbarkeit von Ergebnissen solcher Materialuntersuchungen auf andere Geometrien zu prüfen. Ferner liegt die Nachprüfung einer Positionsabhängigkeit der Korrosionsgeschwindigkeit ("Downstream-Effekt") nahe.

## 2. Aufgabenstellung

Die Abstützwirkung von Rippenrohren im Stabverband wurde bisher in einer isothermen Heissdampfströmung über 2x500 Std. Dauer mit den Betriebsbedingungen eines dampfgekühlten Schnellen Reaktors untersucht [1].

---

eingereicht am: 5.12.1972

Aus Vergleichsbetrachtungen ist bekannt, dass Bündel aus Rippenrohren gegenüber Wendeldrähten auch für die Betriebsbedingungen des natriumgekühlten Schnellen Reaktors thermo- und fluiddynamische Vorteile aufweisen [2]. Daher wurde ein isothermer Langzeitversuch über 2 x 1000 Stunden Dauer in einer Natrium-Strömung mit einem Bündel der spezifischen Abmessungen des Brennelementes des SNR-300 [3] durchgeführt. Hauptzweck des Versuches war wie in [1] die Bestimmung des Materialabtrages an den Abstützstellen der Rippen, sowie die Beurteilung der Übertragbarkeit der Ergebnisse aus Korrosionsuntersuchungen auf andere Geometrien. Folgende zusätzliche Messungen wurden am eingesetzten Material durchgeführt:

- gravimetrische Bestimmung der Gewichtsänderung jedes Stabes während und nach dem Einsatz,
- lichtmikroskopische Überprüfung der gesamten Stablänge und Photographie verschiedener mechanisch beanspruchter Auflagestellen in geringer Vergrößerung,
- metallografische Untersuchung und Fotografie der Metalloberfläche in hoher Vergrößerung,
- profilometrische Untersuchungen von erkennbaren Abstützstellen auf den Wendelrippen in einer Abtastrichtung parallel zur Rohrachse

### 3. Testelement

Das Stabbündel bestand aus 61 Rohren mit 6 integralen Wendelrippen, die in Dreieck-Anordnung in einem hexagonalen Brennelementkasten eingesetzt waren.

Abb. 1 zeigt das untersuchte Bündel in ausgebautem Zustand zusammen mit dem Brennelementkasten und einem Einzelstab, dessen Längsschnitt in Abb. 2 wiedergegeben ist. Die für

die Herstellung geforderten Abmessungen und Toleranzen des Rippenrohres sind in Abb. 3 angegeben. Die Geometrien und Abmessungen der gefertigten und beim Versuch eingesetzten Rohre betragen:

Innendurchmesser	5,22 mm	+0,04 -0	mm
Wanddicke:	0,38 mm	+0 -0,02	mm
Rippenkopfkreisdurchmesser:	7,9 mm	+0,03 -0,08	mm
Rippenhöhe:	0,94 mm		
Rippenbreite:	0,57 mm		
Steigungshöhe der Wendelrippen:	600 mm	+5 -14	mm
Anordnung der Rippen:		gleichmässig am Umfang	
Stablänge insgesamt:	1542 mm		
Hüllrohrlänge berippt:	1483 mm		
Nenn-Abstützlänge:	100 mm		
Hüllrohrmaterial:		Werkst. Nr. 1.4961	
Zusammensetzung: <sup>+</sup>			
C	0,07	Gew. %	
Mn	1,15	Gew. %	
Cr	15,925	Gew. %	
N <sub>i</sub>	12,50	Gew. %	
Nb	0,665	Gew. %	
N	0,039	Gew. %	
Fe	Rest		

Zustand: Anlieferungszustand, sorgsam gereinigt.

Gefüge: Gleichmässig feinkörnig, ASTM 6-8 (Abb. 21)

---

+Für die Ausführung der Analyse bedanken wir uns bei  
Frau Dr. H. Schneider.

Die geforderten Toleranzen wurden bei Innendurchmesser und Wanddicke gut eingehalten. Der Rippenkopfkreisdurchmesser war im Durchschnitt 0,08 mm gegenüber den Nennabmessungen zu klein. Die Steigungshöhe variierte von + 5 bis -14 mm, in einzelnen Fällen bis -22 mm und lag damit noch über der geforderten Toleranz von  $\pm 5$  mm. Diese durch das Herstellungsverfahren bedingten Mängel konnten durch ein neues in der Zwischenzeit entwickeltes Fertigungsverfahren, weitgehend beseitigt werden. Über den Einfluss der Toleranz von Steigung und Kopfkreisdurchmesser auf das Verhalten des Bündelverbandes wird in [1] und [4] ausführlich berichtet. Wie in [1] wurde auch hier der Versuch in zwei Abschnitte mit Brennelementkasten verschiedener Schlüsselweiten unterteilt. Im ersten Abschnitt betrug die Schlüsselweite  $62,8 \pm 0,2$  mm im zweiten  $64,0 \pm 0,2$  mm. Dadurch wurden im Versuchsbündel maximale hypothetische Gitterverschiebungen möglich, die wesentlich über jenen eines Reaktorburneementes lagen. Im zweiten Versuchsabschnitt wurde gegenüber dem ersten Versuchsabschnitt ein rund sechsmal grösseres mittleres Spiel zwischen benachbarten Brennstäben ermöglicht. Die Zahlenwerte des mittleren Spieles und der maximalen Gitterverschiebung im Versuchsbündel sind denen im Reaktorbündel (Originalbündel) in Tab. 1 gegenübergestellt.

Die Stäbe (Abb. 2) waren zur Simulierung des Brennstoffes mit Stahl-Pellets gefüllt. Die mit Pellets gefüllte Brennstablänge betrug 1080 mm. Am oberen Stabende befand sich ein Gasplenum von ca. 409 mm Länge. Zur Fixierung der Stahlpellets diente eine Feder und eine Distanzhülse im Plenum. Die Hüllrohre waren an beiden Enden durch eingeschweisste Stopfen verschlossen. Am oberen Ende waren die Stäbe auf Stegbleche genietet. Am unteren Ende wurden sie ebenfalls durch Stegbleche gehalten, die die individuelle axiale Ausdehnung ermöglichten und die Stäbe, deren Ab-

standshalter sich dort in exakter Abstützlage befanden, gegen Verdrehen sicherten. Abb. 4 zeigt für einen Bündelausschnitt die Abstützlage. In Abb. 5 ist das Bündel mit den unteren und oberen Stegblechen samt Tragring fotografisch wiedergegeben.

Der Aufbau des Bündels und sein Einbau im Führungsrohr ist aus Abb. 6 zu ersehen.

Der Versuch wurde in einem Natriumkreislauf durchgeführt. Das Bündel hing mit seinem kegelförmigen Kopfstück (Abb.6) in dem entsprechenden Gegenstück des Kreislauftestbehälters und wurde im unteren Teil frei ausdehnbar in einem Zentrierring geführt.

Die Versuche wurden unter folgenden Betriebsbedingungen durchgeführt:

Natriumtemperatur:	600°C
Natriumdruck (Gasdruck)	
Eintritt Teststrecke:	ca. 3 atü
Natriumdurchsatz:	5,85 kg/s
Strömungsgeschwindigkeit:	4,7 m/s
Mittlere Reynoldszahl im Bündel:	47200
Strömungsrichtung:	abwärts
Oxidgehalt:	15 ppm (nach Eichelberger)

Die versuchsmäßig verwirklichten Natriumtemperaturen übersteigen die an der höchstbelasteten Stelle in Coremitte eines Na-gekühlten Schnellen Brüters auftretenden Temperaturverhältnisse an den Rippenoberflächen. Dies ist aus Tab. 2 und Abb. 7 [5] zu erkennen.

#### 4. Natriumkreislauf

Der für die Versuche benutzte Natriumkreislauf besteht im wesentlichen aus dem Versorgungs- und Reinigungskreislauf und dem Schutzgassystem. Er besitzt die für Natriumkreisläufe spezifischen Komponenten und ist als 8er-Schleife aufgebaut. Abb. 8 zeigt das Schema dieses Kreislaufes. Elektromagnetische Pumpe, Durchflussmesser und Luftkühler sind in einem Teil des Kreislaufes angeordnet, dessen Maximaltemperatur  $550^{\circ}\text{C}$  beträgt, während Erhitzer und Teststrecke für maximale Temperaturen von  $600^{\circ}\text{C}$  ausgelegt sind. Den Knotenpunkt der 8er-Schleife bildet der Rekuperator. Die elektromagnetische Pumpe fördert stündlich bis zu  $60\text{ m}^3$  Natrium bei einer Druckdifferenz von 45 mWS über den primärseitigen Rekuperator-Teil durch den Erhitzer zum Testbehälter mit dem Bündeleinsatz und von diesem über den sekundärseitigen Rekuperator-Teil durch den Luftkühler zur Pumpe zurück. Ein Nebenkreis mit kleiner elektromagnetischer Pumpe, Kaltfalle, Kühler und Oxidmessgerät sorgt für die Reinheit des Flüssigmetalls und deren Messmöglichkeit.

Zur Sicherheit der Flanschverbindungen in Testteil und Erhitzer befindet sich Argon als Schutzgas über der freien Natrium-Oberfläche.

Der gesamte Kreislauf wurde in den Werkstoffen  
Nr. 1.4541 und Nr. 1.4961

als Schweisskonstruktion erstellt. Seine Hauptauslegungsdaten sind in Tab. 3 zusammengestellt.

#### 5. Versuchsdurchführung

Der Versuch wurde in zwei Abschnitten, von einmal ca. 1000 und einmal ca. 900 h durchgeführt, sodass sich Expositionszeiten von 900, 1000 und 1900 Stunden ergaben. Der

zeitliche Ablauf ist in Abb. 9 graphisch dargestellt, wobei die Na-Temperatur als Funktion der Zeit aufgetragen ist. Der Na-Durchsatz betrug im Mittel während der gesamten Versuchszeit etwa  $25 \text{ m}^3/\text{h}$ . Die kurzzeitigen Unterbrechungen wurden durch Betriebsstörungen des Kreislaufes verursacht.

Um eine eingehende Inspektion des Bündels durchzuführen, fand nach dem ersten Versuchsabschnitt eine längere Versuchsunterbrechung statt. Dabei wurde das ganze Bündel ausgebaut, mit Isopropanol, Methanol und Wasser gereinigt, zerlegt und 4 Stäbe einer eingehenden Untersuchung zugeführt. Diese Stäbe wurden durch neue ersetzt, wobei alle nicht ausgetauschten Stäbe ihre ursprünglichen Positionen behielten (Abb. 10 und 11).

Nach ca. 1900 Stunden Gesamtbetriebszeit wurde der Versuch beendet. Das Bündel wurde, wie oben beschrieben, wieder gereinigt und zerlegt. 3 Stäbe mit 1900 Stunden und 1 Stab mit 900 Stunden Expositionszeit wurden erneut einer eingehenden Untersuchung zugeführt.

#### Untersuchung der Stäbe:

Wie in der Aufgabenstellung gefordert, wurden die Stäbe nach jedem Versuchsabschnitt einer systematischen Untersuchung auf Reib- und Korrosionseffekte unterworfen.

Die Wägungen zur Bestimmung der Gewichtsänderung wurden mit einer Analysewaage von  $\pm 0,1 \text{ mg}$  Genauigkeit bei 1300 g Maximalbelastung ausgeführt. Die lichtmikroskopische Kontrolle wurde für die Gesamtlänge mit einem Stereomikroskop, die Auflicht-Fotografie mit einer Kamera in Anpassung an ein entsprechendes Mikroskop in 40-facher Vergrößerung vorgenommen.

Die Messung der Rauhtiefe  $R_t$  wurde mit einem Perthometer mit Schreiber in Verbindung mit einem Bezugsebenentastsystem FTK 2 an den Stellen stärkster Beanspruchung jeweils in Richtung der Rohrlängsachse auf dem Rippenkopf, und auf dem glatten Rohrteil durchgeführt. Im Normalfall wurde mit folgender Geräteeinstellung gemessen:

Horizontalvergrößerung:            10 mm Diagramm = 250  $\mu$ m  
Vertikalvergrößerung:            10 mm Diagramm = 10  $\mu$ m

## 6. Versuchsergebnisse

### 6.1 Ergebnisse der werkstoffkundlichen Auswertung

#### 6.1.1 Gewichtsänderungen

Zur Kontrolle der durch Natrium-Korrosion bedingten Gewichtsänderung wurden zu Beginn und am Ende des ersten und zweiten Versuchslaufes Wägungen der einzelnen Stäbe durchgeführt.

Die Metallverluste aus rein gravimetrischer Bestimmung der Gewichtsänderung werden als Mittelwerte zahlreicher Messungen in Tab. 4 wiedergegeben.

Aus den in Tab. 4 angeführten Mittelwerten lässt sich ein Zeitgesetz der Korrosion errechnen.

$$\Delta W [\text{mg}/\text{cm}^2] = -0,13 - 2,32 \cdot 10^{-3} \cdot t [\text{h}]^+ \quad (1)$$

Zum Vergleich mit der Literatur wird mit Hilfe von Gleichung (1) auf den Korrosionsabtrag nach einem Jahr extrapoliert. Man erhält dann einen Abtrag von 18 [ $\text{mg}/\text{cm}^2$  a] oder 23 [ $\mu\text{m}/\text{a}$ ] was den Angaben von Thorley [6] für Korrosion in Natrium mit relativ hohen Sauerstoffgehalten gut entspricht, obwohl dort Stähle anderer Zusammensetzung untersucht wurden. Die Abtragung war in den zweiten 900 h der Exposition stärker als in den ersten 1000 h.

---

<sup>+</sup>)  $\Delta W$ : Korrosionsabtrag [ $\text{mg}/\text{cm}^2$ ]

t: Zeit [h]

### 6.12 Veränderungen an den Staboberflächen

Die Oberflächen der Rohre und Rippen waren nach der Versuchsunterbrechung (1000 h) und am Ende des Versuches metallisch blank. An den Rippen fanden sich nur geringfügige Spuren von gegenseitiger Reibung der Rippenköpfe. Dagegen wies der Stab Nr. 39 einige Stellen mit einem matten Belag auf (siehe Abb. 12), der nach längerer Versuchszeit nicht mehr beobachtet wurde. Dieser Belag liess sich mechanisch entfernen. Eine Röntgenanalyse zeigte, dass es sich im wesentlichen um feinkörniges  $\alpha$ -Fe handelte. Die Position dieser Ablagerungen war rund 50 cm vom Na-Eintritt in das Bündel entfernt, aber auch an anderen Positionen des Stabes waren derartige Stellen zu finden.

Metallisches Eisen wird vielfach in Form von festen Partikeln durch Natrium transportiert und wandert allgemein von den Zonen der höchsten Temperatur in Richtung des Temperaturgefälles, wo es in Filtern isoliert werden kann [7]. Es ist auch bei diesem Versuch damit zu rechnen, dass das anfänglich abgeschiedene Eisen später in andere Teile des Kreislaufes abtransportiert worden ist.

### 6.13 Metallographische Befunde

Die Untersuchung konnte nicht auf lokale quantitative Abtragungswerte gerichtet werden, da für genügend genaue Wägungen und Messungen der Dimensionen keine Möglichkeiten gegeben oder die Effekte zu klein waren. Dagegen konnten qualitative Korrosionsuntersuchungen mit metallographischen und chemischen Methoden vorgenommen werden.

Zur Nachuntersuchung auf Korrosionseffekte wurden folgende Brennelementstäbe ausgewählt:

<u>Stab-Nr.</u>	<u>Expositionszeit [h]</u>	<u>Na-Leckage</u>
39	1000	-
9	1000	-
41	1900	+
23	1900	-
63	900	-

Von den Stäben wurden Proben in verschiedenem Abstand zum Eintritt des Natriums in das Brennelementbündel untersucht.

Drei Proben vom Stab Nr. 39 vom Natriumeintritt, der Mitte des Hüllrohres und vom Austritt wurden metallografisch untersucht. An allen drei Proben waren sowohl in der Rohrwand als auch in den Rippenflanken Aufweitungen der Korngrenzen bis etwa 15  $\mu\text{m}$  Tiefe zu beobachten. In grösserer Tiefe zeigte das Gefüge ein der langzeitigen Auslagerung bei 600 $^{\circ}\text{C}$  entsprechendes Aussehen mit feinen Ausscheidungen in den Korngrenzen und in den Körnern.

Ein Vergleich der metallografischen Befunde an den Proben aus verschiedenen Abständen vom Natriumeintritt (Downstreampositionen) deutete an, dass die Korngrenzenaufweitung in der Nähe des Eintritts sehr deutlich war und mit zunehmendem Abstand geringer wurde (siehe Abbildung 13).

Von den rund doppelt so lange exponierten Stäben Nr. 23 und 41 wurden aus den gleichen Positionen Proben geschnitten. Die Schliffbilder deuteten ebenfalls vorwiegend an den Korngrenzen einsetzende korrosive Veränderungen an. Die Erscheinungen unterschieden sich jedoch von den am Stab Nr. 39 aufgefundenen. Eine Positionsabhängigkeit ("Downstream"-Effekt) fand sich auch an diesen Hüllrohren. Die Schliffbilder zeigten jedoch Änderungen gegenüber den früheren in folgenden Punkten: Die Korngrenzenaufweitungen wurden nicht mehr in grösserer Häufigkeit beobachtet. Statt dessen traten in den der Oberfläche nahen Korngrenzen Phasen auf, die im Inneren nicht zu finden waren. Dort

liessen sich die gewohnten Ausscheidungen, teilweise jedoch in gröberer Form, sichtbar machen (siehe Abbildung 14).

Den beschriebenen Beobachtungen glichen sehr weitgehend die Befunde an entsprechenden Proben von dem Stab Nr. 63, der nur die zweiten 900 h exponiert worden war. Die Unterschiede der Befunde an den Proben aus den Stäben 23, 41 und 63 gegenüber den am Stab 39 erhaltenen konnten also nicht aus der längeren Expositionszeit resultieren. Eher war anzunehmen, dass eine unkontrollierte Parameteränderung zwischen den Expositionsperioden von 1000 und 900 h Dauer oder Änderungen in den Prozeduren der Probenbergung die Unterschiede bewirkt haben könnten.

#### 6.14 Befunde an den Endstopfenverschweissungen

Der Stab Nr. 41 hatte ca. 5 g Natrium aufgenommen. Ausblühungen an der Schweissnaht der oberen Endkappe zeigten an, dass dort ein Leck gewesen sein musste (siehe Abb. 15).

Zur Untersuchung der Leckage wurden Querschliffe von den Endstopfenverschweissungen hergestellt. Der Schaden am Stab Nr. 41 verlief senkrecht zur Schweisszone (siehe Abb. 16). Die metallografischen Überprüfungen der Schweissnähte ergaben, dass vielfach in der Kontaktzone der beiden Teile - Hüllrohr und Stopfen - grosse Einschlüsse auftreten, die sich bis in die Oberflächenzone erstreckten. Dabei hatte es den Anschein, als ob diese zum Teil kettenförmig angeordneten Einschlüsse an der Oberfläche mit dem Natrium reagiert hätten (siehe Abb. 17).

Mikrosondenuntersuchungen an derartigen Einschlüssen in einem Endstopfen des Stabes Nr. 9 gaben schwache Hinweise auf Anreicherungen von Niob in diesen Inhomogenitäten der Schweissverbindungen. In der Tat ist über den Werkstoff Nr. 1.4961 berichtet worden, dass sich in Schweisszonen an Nb reiche Inclusionen bilden, die für eine Crack-

sensitivität des Werkstoffs in diesen Zonen Ursache sein sollen [8].

Die Untersuchung der Endstopfenverschweißungen der Stäbe aus Stahl Werkstoff Nr. 1.4961 brachte deutliche Hinweise, dass Inhomogenitäten in Schweissverbindungen bevorzugt mit Na reagieren könnten. Falls, wie im Falle der vorliegenden Proben derartige Inhomogenitäten kettenförmig tief in die Schweissnaht hineinreichen, ist die Gefahr einer Natriumreaktion bis in die Tiefe der Schweissnaht gegeben.

In den oberflächennahen Bereichen unterliegen die Schweissnähte ähnlichen Korrosionserscheinungen wie die Hüllrohre selbst, also vorwiegend Effekten an den Korngrenzen des Materials (siehe Abb. 18).

#### 6.15 Ergebnisse chemischer Analysen an Proben aus den Stäben.

Proben von der Natriumeinströmseite des Stabes 41 wurden auf die Gehalte an Stickstoff und Kohlenstoff in der Rohrwand und in den Wendelrippen analysiert. Die Ergebnisse deuteten an, dass keine selektive Lösung dieser Elemente, aber auch keine Abscheidung an dem Hüllrohr eingetreten war (s. Tabelle).

Tabelle: Ergebnisse von analytischen Untersuchungen auf C und N (BE-Modell 41)

Sollwerte	Rohrwand	Rippen
C 600 ppm	720 ppm	600 ppm
N 340 ppm	310 ppm	330 ppm

Chemische Analysen nach schichtweisem Abtrag von Material in Brom/Methanol-Mischungen [9] deuteten nur schwache Konzentrationsänderungen beim Element Ni an, das in den äussersten 5  $\mu$ m dicken Randschichten im Mittel von vier Analysen geringere Konzentrationen als im Inneren des Materials aufwies (siehe Abb. 19). Die Geringfügigkeit der Effekte steht im Einklang mit den metallografischen Befunden, nach denen nur in den Korngrenzen Veränderungen eingetreten waren.

In einer Probe des Stabes Nr. 23 wurde eine qualitative Mikrosondenuntersuchung vorgenommen. Sie zeigte einen Abfall der Chromkonzentration in der äussersten Schicht, ebenso verhielt sich Mn, während beim Ni sogar Bereiche relativer Anreicherung an der Oberfläche festgestellt wurden. Ein Konzentrationsprofil der äusseren 100  $\mu\text{m}$  der Rohrwand zeigte in guter Übereinstimmung mit den chemischen Analysen im wesentlichen Verluste an Ni an (s. Abb. 20).

In Einklang mit den Ergebnissen der Analysen konnte weder über Röntgenstrukturanalysen noch mit Hilfe metallographischer Methoden die Existenz ferritischer Anteile in den Oberflächenzonen nachgewiesen werden.

#### 6.16 Ergebnisse der visuellen und mikroskopischen Untersuchungen der Stab-Oberflächen

Nach beiden Versuchsläufen wurden die Stäbe einzeln einer visuellen und stereomikroskopischen Überprüfung der Oberflächen unterworfen, um einerseits den Zustand im allgemeinen, andererseits Zahl, Lage und Ausmass der Berührstellen festzustellen. Dabei zeigte sich, dass die Oberfläche der Rohre und Rippen durchweg metallisch blank waren. Lediglich die Rippenberührstellen haben sich durch leichte Dunkelfärbung abgezeichnet. Hierbei ist festzuhalten, dass zum Ende der Stäbe (Na-Austritt) hin grundsätzlich mehr Berührstellen sichtbar waren als am Anfang (Na-Eintritt).

An ausgewählten Stäben wurden Zahl und Ausmass der Berührstellen quantitativ untersucht und die Ergebnisse in Tab. 5 festgehalten. Danach wurden nach dem 1. Versuch überhaupt nur 17-44 und nach dem 2. Versuch 13-27 der theoretisch pro Stab vorhandenen 90 Berührstellen gefunden, nur wenige dieser waren ausgeprägt erkennbar.

Auf einigen Stäben wurden die Berührstellen in 40-facher Vergrößerung im Auflicht fotografiert. Zwei dieser Aufnahmen werden zusammen mit den profilometrischen Ergebnissen in den Abb. 24 u. 25 wiedergegeben. Die Bilder zeigen im allgemeinen flächenhaft ausgeprägte Berührspuren. Diejenigen aus dem 1. Versuchsabschnitt mit dem Brennelementkasten kleiner Schlüsselweite sind in ihrer Struktur, im Gegensatz zu den Ergebnissen nach [1] von denjenigen aus dem 2. Versuchsabschnitt mit einem Brennelementkasten größerer Schlüsselweite nicht zu unterscheiden.

## 6.2 Ergebnisse der profilometrischen Untersuchungen des Rohrmaterials.

Die profilometrischen Untersuchungen dienten der Kontrolle der Rauigkeitsveränderungen der Gesamtoberfläche durch Natrium-Korrosion sowie zur Bestimmung der Oberflächenveränderung durch Reibeffekte an den Berührstellen der Stäbe.

Die Überprüfung des Ausgangsmaterials (an jedem 10-ten Rohr) ergab in den Bereichen zwischen den Rippen (Glattrohrteil) am Rippenfuß und Rippenkopf einen Rauhtiefenwert, der im Durchschnitt mit  $5 \mu\text{m}$  relativ hoch lag. An einzelnen Rohren wurden fertigungsbedingte Risse bzw. Riefen in allen Bereichen der Rippenrohroberfläche festgestellt.

Nach der Exposition in Natrium wurden gegenüber der Beschaffenheit des Ausgangsmaterials am Anfang der Stäbe (Natrium-Eintritt) bedeutend geringere Oberflächenrauigkeiten von im Mittel  $R_t \leq 2 \mu\text{m}$  gemessen, die zum Ende der Stäbe (Natrium-Austritt) fast wieder auf die Ausgangswerte anstiegen (Downstreameffekt). (Abb. 22 und 23)

Zur profilometrischen Vermessung der Reibkorrosionseffekte an den Berührstellen wurde versucht, die Rauigkeitsunterschiede auf dem Rippenkopf parallel zur Rohrachse, d.h. senkrecht zu der transversalen Reibrichtung festzustellen.

Die aufgenommenen Profilometer-Diagramme zeigen entgegen den Ergebnisse nach [1] keinen Unterschied der Rauigkeiten zwischen der Abstützstelle und der übrigen Rohr- bzw. Rippenoberfläche trotz der in der Auflichtfotografie wahrnehmbaren Berührstellen.

Somit kann festgestellt werden, dass an den im Bündel eingesetzten Stäben kein messbarer Metallabtrag an den Abstützstellen der Stäbe im Bündel während des gesamten Versuches bei den vorliegenden Versuchsbedingungen auftrat.

## 7. Zusammenfassung

Um das Betriebsverhalten an den Abstützstellen von Brennstab-Hüllrohren mit 6 integralen Wendelrippen zu bestimmen, wurde ein 6l-Stabbündel während 1x1000 und 1x900 Stunden Betriebszeit in einer isothermen Natriumströmung bei Temperaturen von 600°C und einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von 4,7 m/s untersucht.

Der Brennelementkasten des zweiten Versuchsabschnittes hatte gegenüber dem des ersten eine um 1,2 mm grössere Schlüsselweite.

Die materialkundlichen Untersuchungen ergaben nach 1900 h Versuchszeit einen Verlust des Rohrmaterials von im Mittel 4,5 mg/cm<sup>2</sup> der metallischen Oberfläche durch Materialabtrag. Es konnte keine lokale, auf die Rippen-Abstützstellen begrenzte Aufrauhung der Oberfläche festgestellt werden.

Die qualitativen Veränderungen an dem Stahl Werkstoff-Nr. 1.4961 entsprechen den früher an Blechproben gemachten Beobachtungen [10]. Insgesamt waren die Effekte nach 1900 h bei 600°C und 4,7 m/sec. sehr geringfügig. Eine ferritische Oberflächenzone hatte sich noch nicht gebildet, die Konzentrationsverschiebungen waren noch sehr

klein. Veränderungen der Gehalte an Kohlenstoff und Stickstoff waren nicht eingetreten. Die Korrosionserscheinungen beschränkten sich weitgehend auf Korngrenzenbereiche.

Der Werkstoff Nr. 1.4961 hat ungünstige Schweisseigenschaften. Beim Schweißen entstehende Inhomogenitäten an der Naht schienen anfällig für Reaktionen mit Natrium zu sein. Ein aufgetretener Riss, der zur Natriumleckage Anlass gab, stand nicht erkennbar in Zusammenhang mit diesen Inhomogenitäten.

Die vorliegenden Untersuchungen wurden mit Rohren der ersten Versuchsfertigung durchgeführt und in beiden Versuchsabschnitten wurde ein mittleres freies Spiel zwischen benachbarten Stäben im Bündel realisiert, das wesentlich über das im Reaktoreinsatz mögliche hinausging.

Trotz dieser Versuchsbedingungen konnten an den Rippenabstützstellen keine Berührungsspuren mit zusätzlichen Aufrauungen oder Abtragungen festgestellt werden. Die Verwendbarkeit von Rippenrohren in natriumgekühlten Reaktoren wurde damit nachgewiesen.

Literatur

- [1] Hoffmann, H., Hofmann, G., Leistikow, S.:  
Experimentelle Untersuchungen des Druckverlustes  
und des Langzeitverhaltens der Abstützstellen an  
einem Modell-Brennelement aus Incoloy-800-Rohren  
mit sechs integralen Wendelrippen als Abstandshal-  
ter in einer isothermen Heißdampfströmung.  
KFK 1028, EUR 4304 d, September 1969
- [2] Baumann, W., Hoffmann, H., Rust, K.:  
Auswahl von Abstandshaltern für die Brennelemente  
Schneller Brutreaktoren.  
Int. Meeting on Fast Reactor Fuel and Fuel Elements,  
Karlsruhe, September 1970
- [3] Häfele, W., Kessler, G.:  
SNR: The German-Benelux Fast Breeder  
Nuclear News, March 1972
- [4] Baumann, W., Casal, V., Hoffmann, H., Möller, R.,  
Rust, K.:  
Brennelemente mit wendelförmigen Abstandshaltern für  
Schnelle Brutreaktoren.  
KFK 768, EUR 3694 d, April 1968
- [5] Bericht über Forschungs- und Entwicklungsarbeiten  
im Jahre 1969  
Gesellschaft für Kernforschung Karlsruhe, S. 94
- [6] Thorley, A.W., Tyzack, C. in  
"Alkali Metal Coolants"  
Wien 1967; 97-118

- [7] Meyer, R.J. in  
USAEC-Report ANL-RDP-6,  
June 1972, 4.3
  
- [8] Snykers, M., De Boeck, P., Menlemanns, M., Cook, A.  
Schrijvers, J.:  
Kernenergie 14 (1971) 290-297
  
- [9] Borgstedt, H.U., Frees, G.:  
Werkstoffe und Korrosion, 21 (1970) 435-439
  
- [10] Borgstedt, H.U., Frees, G., Drechsler, G.:  
Natriumkorrosionsversuche an Brennelementhüllstäben  
für einen natriumgekühlten schnellen Brutreaktor.  
KFK 991, Aug. 1969

	Versuchsbündel		Originalbündel
Stabzahl:	61		169 <sup>++</sup>
Versuchsabschnitt	1	2	
maximale hypothetische Gitterverschiebung unter Berücksichtigung des Abgleitens von Stäben in versetzte Anordnung (mm) <sup>+</sup>	2,87	6,0	1,4
mittleres Spiel zwischen benachbarten Brennstäben (mm)	0,266	0,57	0,094

<sup>+</sup>bezogen auf den Mittelwert der Stabmittenabstandsänderung durch Steigungstoleranzen nach [4]

<sup>++</sup>Diese Werte sind nach [4] für ein 169-Stabbündel theoretisch möglich, sofern folgende Toleranzen eingehalten werden:

Toleranz des Rippenkopfdurchmessers:	$\pm 0,02$ mm
Toleranz der Schlüsselweite des Brennelementkastens:	$\pm 0,2$ mm
Toleranz der Rippensteigung pro Steigungshöhe:	$\pm 5$ mm
Toleranz pro Stab zur Berücksichtigung von Brennstoff- und Hüllmaterial-schwellen:	$\pm 0,03$ mm

Tab. 1: Maximale hypothetische Gitterverschiebungen und mittleres Spiel zwischen benachbarten Stäben für Versuchs- und Original-Brennelement.

Lage der Rippe im Strömungskanal:	freie Lage	Abstützlage
Temperatur des Rippenkopfes in Coremitten-Lage [°C]	530	532
Temperatur des Rippen- kopfes an der Stelle max. Hüllrohrtempera- tur Stelle maximaler Kühlkanaltemperatur	Eckkanal: 625°C alle anderen Kühlkanäle: 600°C	

Tab. 2: Temperaturen des Rippenkopfes als Funktion  
der Lage der Rippen im Strömungskanal

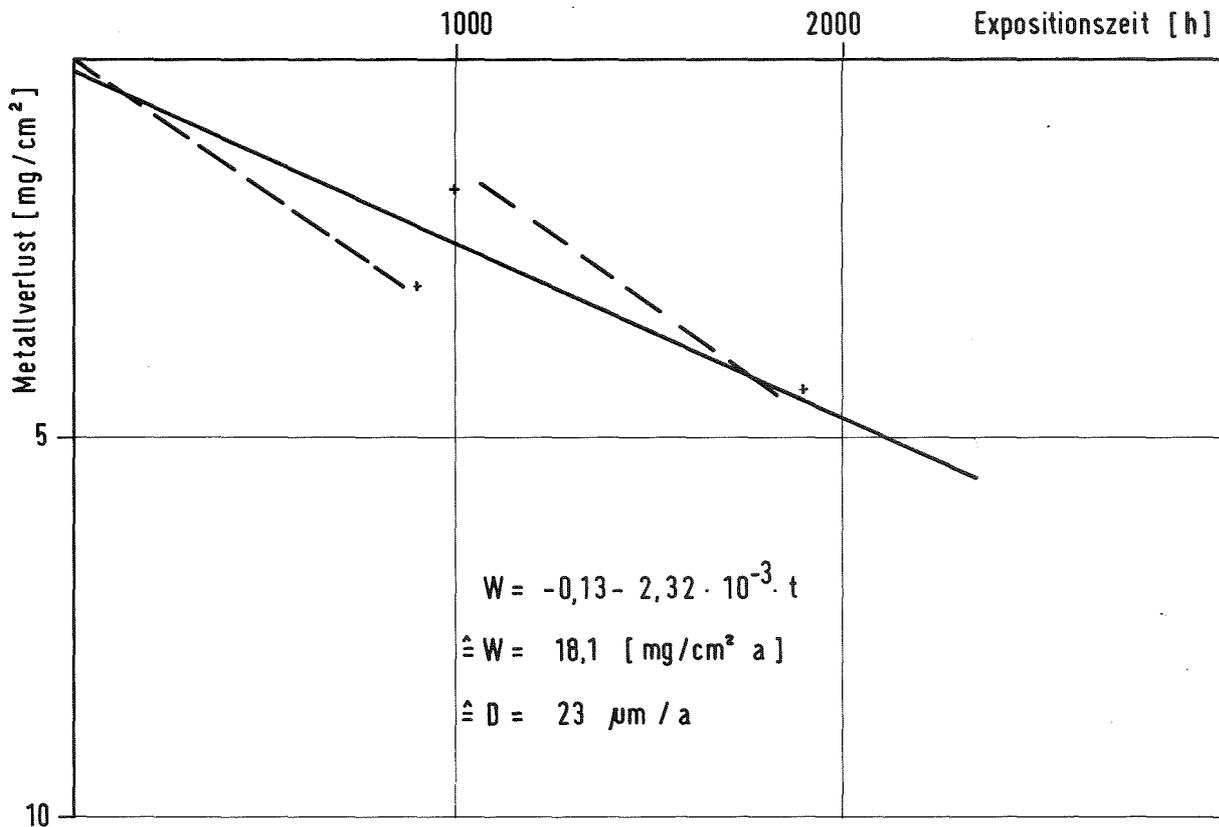
Rohrnennweite:	80 mm
max. Temperatur im Kreislauf	600 °C bzw. 550 °C
<u>Pumpentyp</u>	elektromagnetisch
max. Fördermenge bei	60 m <sup>3</sup> /h
max. Förderhöhe	45 mW.S.
<u>Erhitzertyp</u>	elektrisch
Leistung	280 kW
Heizleiter	je 6 Strahlungsheizkörper in 36 Taschen
<u>Luftkühler</u>	
Leistung	280 kW
Strömungsart	Kreuzstrom
Rohre	24 parallel von Na durchströmte Rohre in S-Form
<u>Rekuperator</u>	
Leistung	1500 kW
Bauart	Rohrbündel-Wärmetauscher in Haarnadelform
Strömungsart	Gegenstrom
Rohre	72 Rohre, mantelseitig vom kälteren Natrium gespült

Tab. 3: Auslegungsdaten des Brennelementkreislaufes

Metallverlust gemäss rein gravimetrischer Bestimmung  
der Gewichtsänderung

Einsatzdauer (Std.)	Stabzahl (Stck.)	Gewichtsabnahme (mg/cm <sup>2</sup> )
1000	55	1,824
1900	51	4,484
900	4	3,028

Graphisch dargestellt:



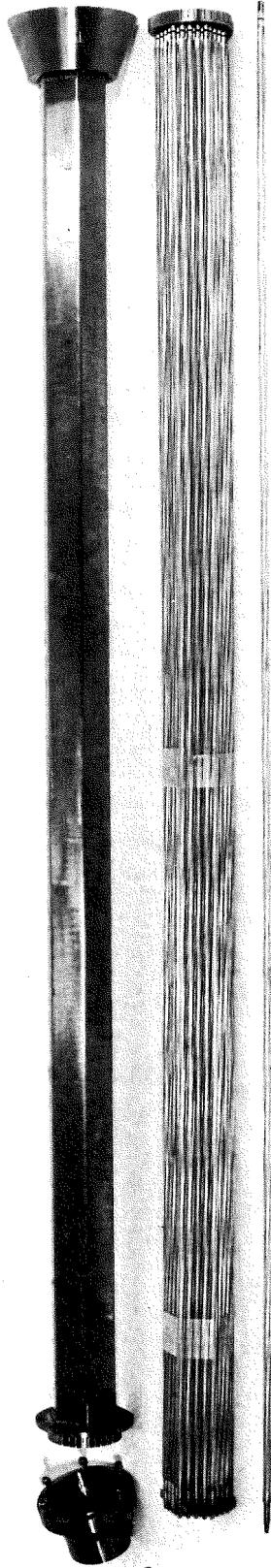
Tab. 4: Na-Korrosion der 1.4961-Stäbe nach  
1000, 1900 und 900 Versuchsstunden

Stab- Nr.	Einsatzdauer Std.					
	1000		1900		900 <sup>+</sup>	
	Berührstellen (Stück)					
	stark wahrnehmbar	schwach wahrnehmbar	stark wahrnehmbar	schwach wahrnehmbar	stark wahrnehmbar	schwach wahrnehmbar
14	4	32	3	19	-	-
23	2	17	2	16	-	-
37	5	44	4	27	-	-
41	3	30	2	13	-	-
48	3	26	3	20	-	-
62	-	-	-	-	2	22

<sup>+</sup>Versuchsstunden im 2. Lauf

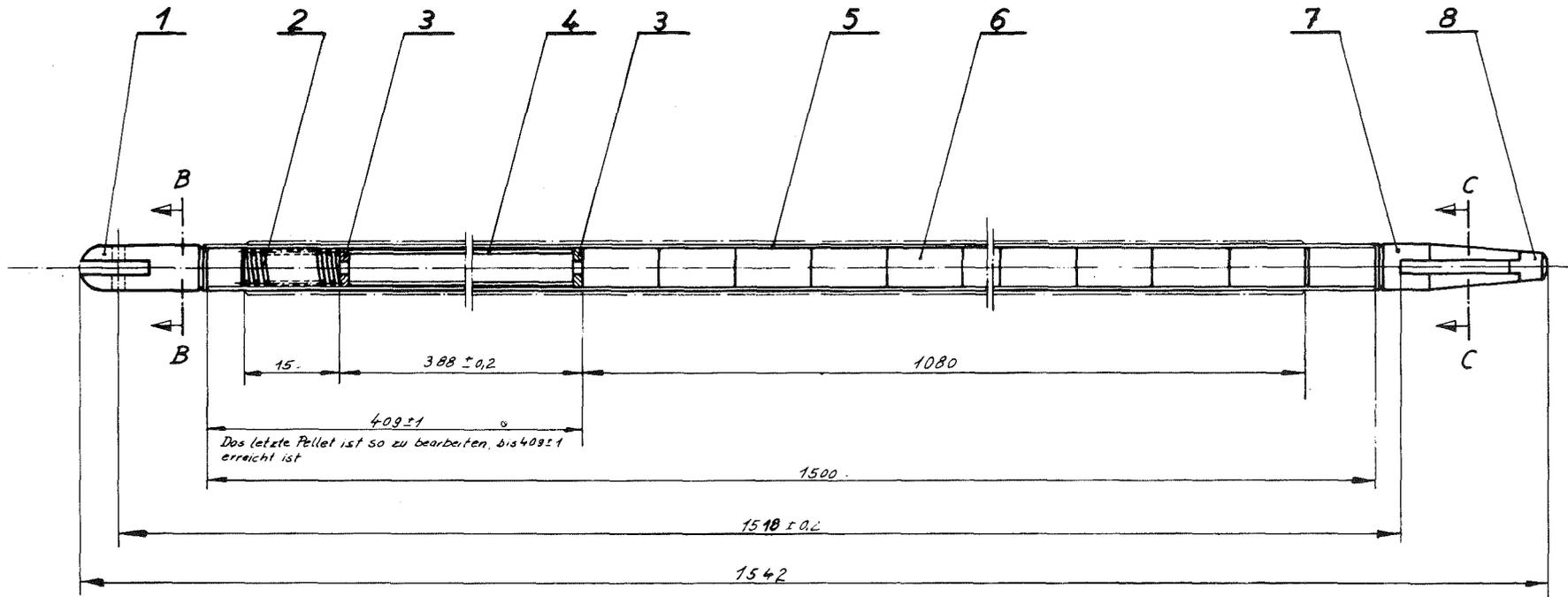
Tab. 5: Ergebnisse einer visuellen und mikroskopischen Überprüfung der Berührstellen an ausgewählten Stäben. Die theoretische Anzahl der Berührstellen beträgt pro Stab 90 Stück.



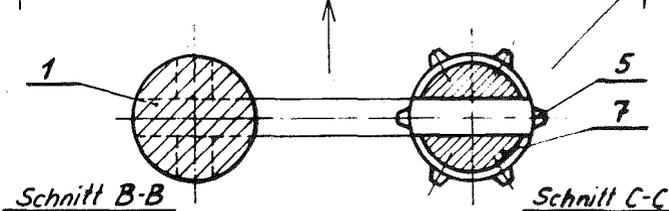


**Abb. 1**      *Brennelementkasten und Stabbündel  
aus Hüllrohren mit 6 integralen  
Wendelrippen als Abstandshalter*

Abb. 2 Brennstab



Der obere Endstopfen ist zuerst einzuschweißen. Dabei ist darauf zu achten, daß die Mittellinie durch den Schlitz mit der Mittellinie von 2 gegenüberliegenden Rippen des Hüllrohres übereinstimmt.  
 Vor Einschweißen des unteren Endstopfens ist dieser so auszurichten, daß die Flächen des Schlitzes im unteren Endstopfen mit den Flächen des Schlitzes im oberen Endstopfen genau parallel verlaufen.



98	1	Kappe	45 7 1	Rd 5 x 7	RO.15.38-4-10		
97	1	oberer Endstopfen	45 7 1	Rd 6 x 30	-4-11		
96	90	Pellet	45 4 1	Rd 6 x 12	-4-16		
95	1	Hüllrohr	ATI 316	Rippenrohr	-4-15	Material v. 288 gel.	
94	1	Dilatationsrohr	45 4 1	Rd 6 x 120	-4-17		
93	2	Platte	45 4 1	Rd 8 x 15	-4-13		
92	1	Druckfeder	Inconel 718	Rd 0.8	-4-12	Material v. 288 gel.	
91	1	unterer Endstopfen	45 7 1	Rd 6 x 30	RO.15.38-4-11		
Teil		Stück	Benennung	Verhältnis	Abmessung	Zeichnungs-Nr. Norm	Bemerkung
Übermaßzahlen		h7	f7	f7/f7	f7/f7		
Toleranz		± 0.01	± 0.01	± 0.01	± 0.01		
1958 Tag		Name		Werkstoff	Qualitätsstufe für Kernforschung m. B. H.	Zugab. Zeichn.	
Zug		J. B. Schulz			7800 Karlsruhe		
Zug					Postfach 947		
Maßstab		Benennung		Ersetzt für		Ersetzt durch	
2:1		BE - Modell				Zeichnungs-Nr.	
						RO.15.38-2-10	

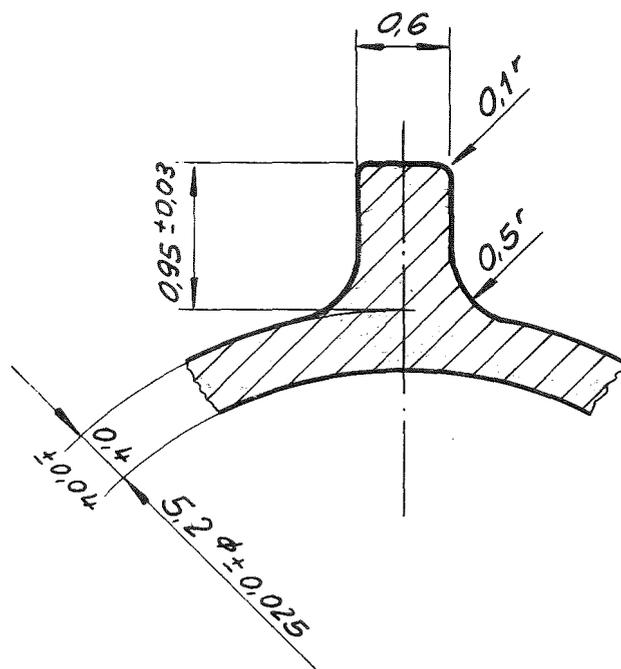
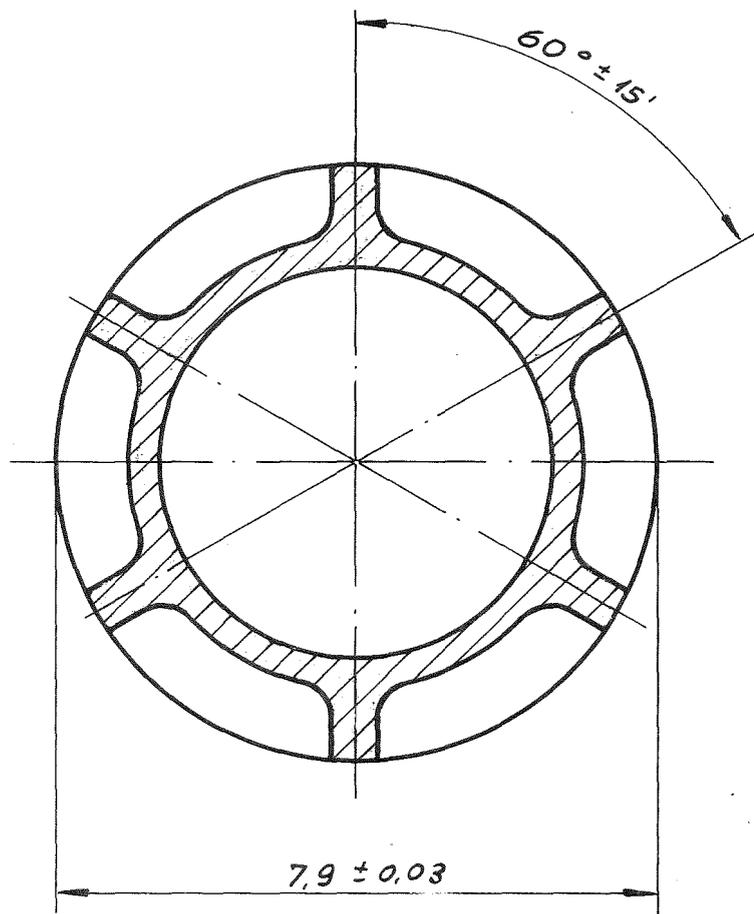


Abb. 3 6-Rippenrohr

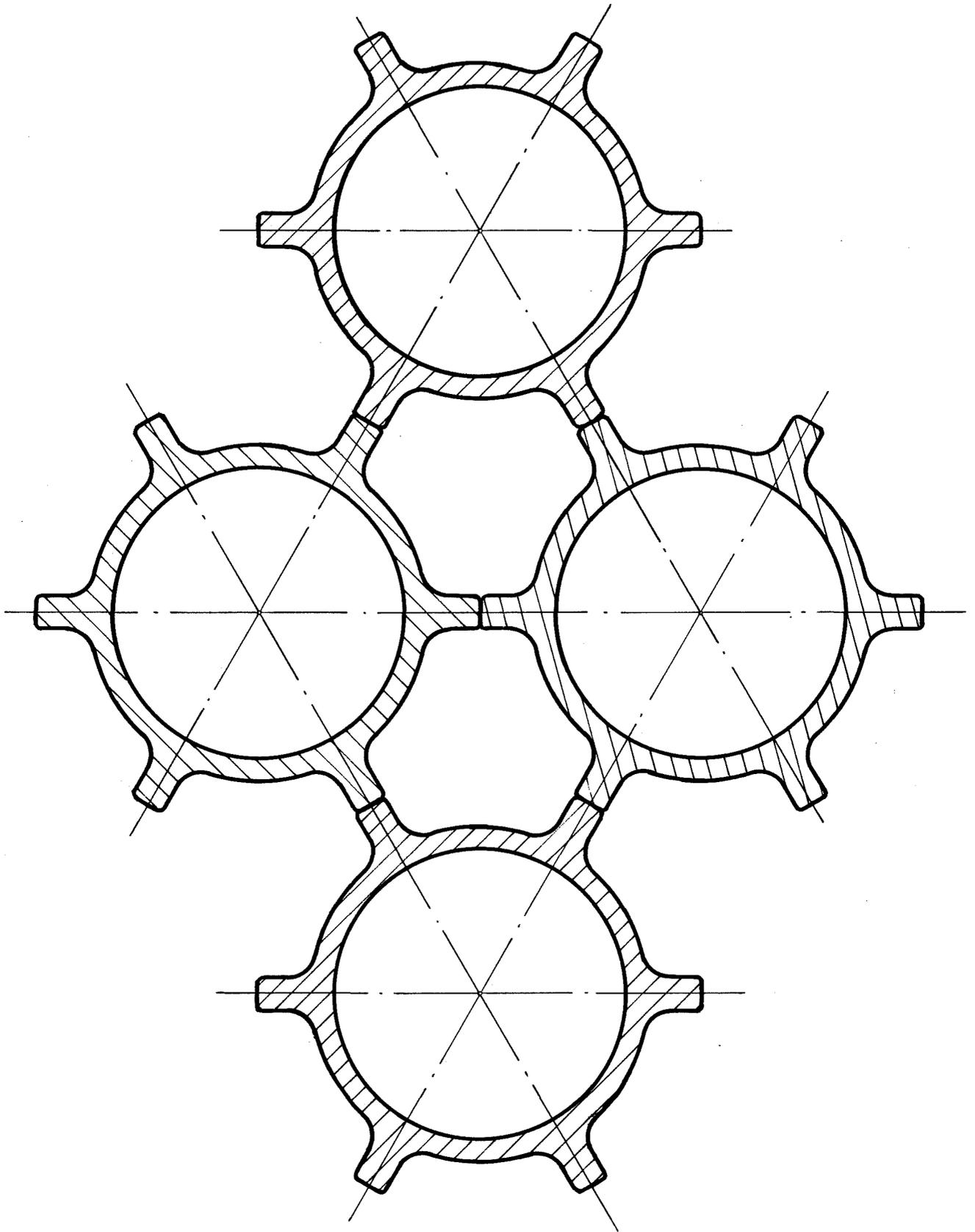


Abb. 4 Ausschnitt eines Brennelementes aus Rohren mit 6 integralen Wendelrippen

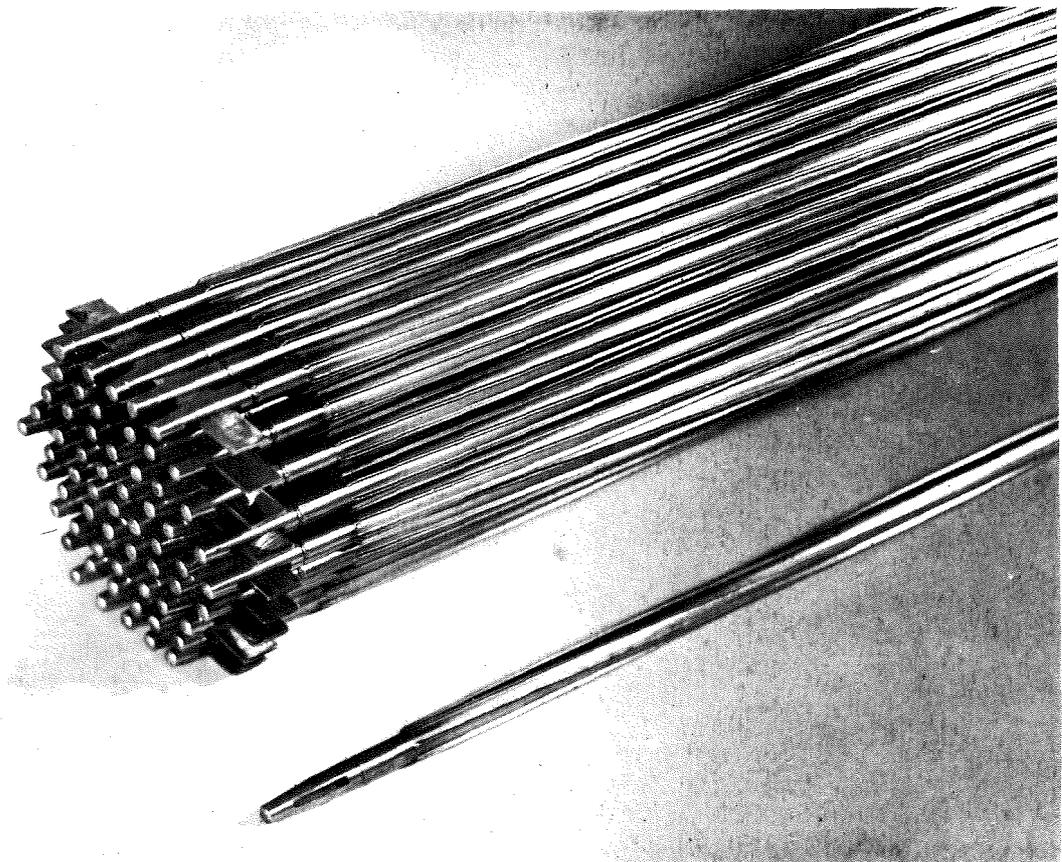
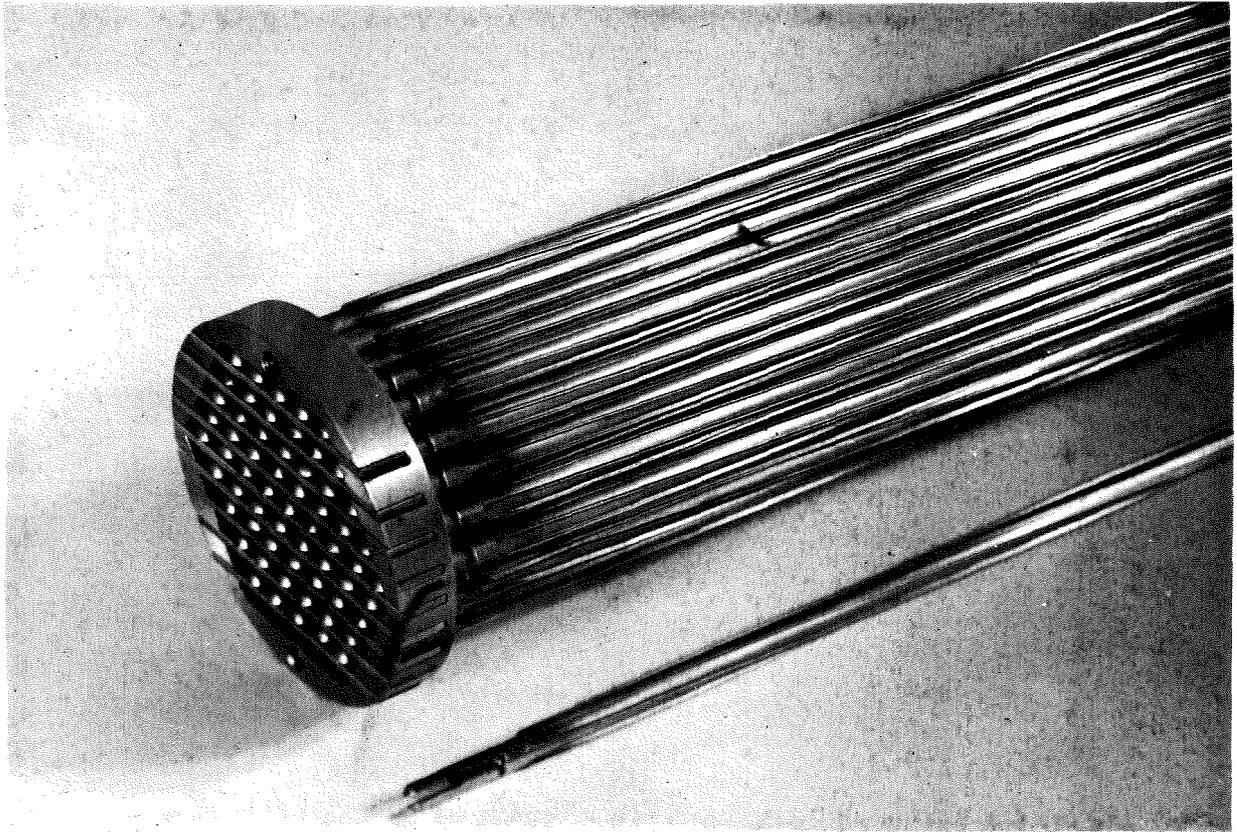
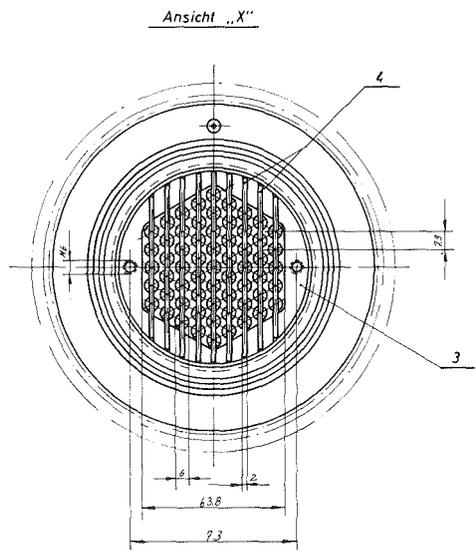
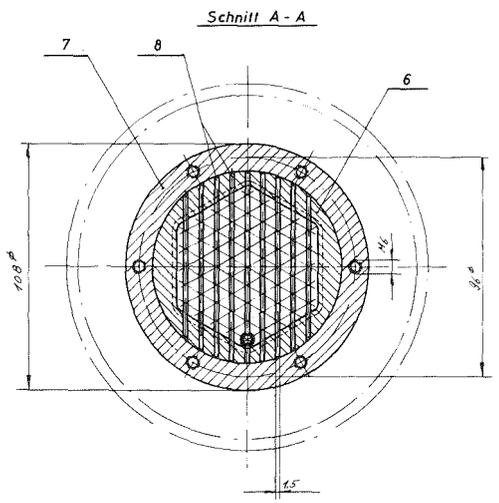
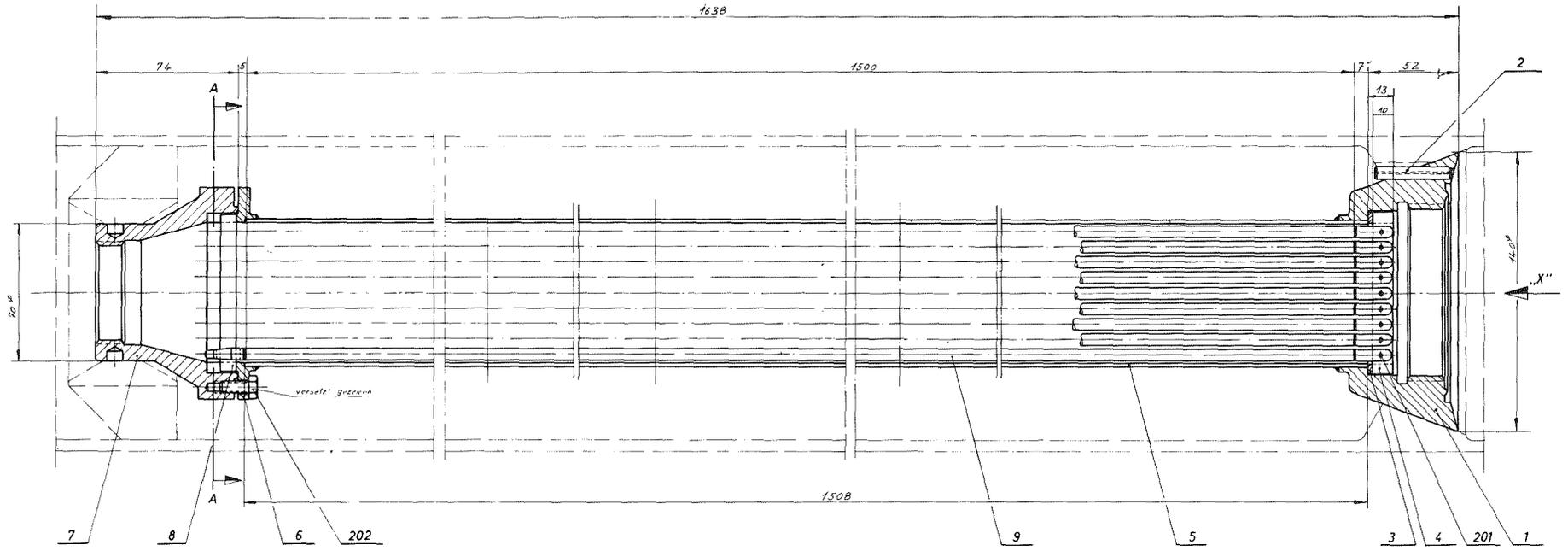


Abb. 5 61-Stabbündel aus Hüllrohren mit 6 integralen  
Wendelrippen, obere und untere Brennelementhalterung.

Stabdurchmesser : 6,0 mm  
Stablänge : 1500 mm  
p/d -Verhältnis : 1,317

Abb.6 Versuchseinsatz mit 61- Stabbündel



Pos.	Bezeichnung	Menge	Material	Norm	Abmessung	Abweichung
202	6	SAI-Schraube	4,5x7	M6 x 15	DIN 933	
201	45	Stift	4,5x5	2,0 x 4	DIN P	v. 128 spez.
314	65	Kappe	4,5x7	R45 x 7	R015 38-14-18	
319	65	schwere Endstopfen	4,5x7	R45 x 30	-4-17	
311	1500	Polier	4,5x4	R41 x 12	-4-16	
315	65	Hülfsrohr	A153 3 1/2		-4-15	118 spez.
316	45	Dünnrohr	4,5x4	R45 x 30	-4-14	
312	150	Stange	4,5x4	R45 x 15	-4-13	
317	45	Dichtkegel	3,0mm x 3,0	R45	-4-12	118 spez.
311	45	unterer Endstopfen	4,5x4	R45 x 28	-4-11	
3	65	BLE-Abstreif	4,5x4	R45 x 12	-4-10	
8	8	Stegbleche	4,5x4	R45 x 8	-4-09	
7	1	Fußblech	4,5x4	R410 x 78	-3-08	
6	2	BLE-Aufnahme	4,5x4	R410 x 30	-3-07	
5	2	Stützhalter	4,5x4	R45	-4-06	
415	1	Stegblech	4,5x4	R2 x 10 x 82	-4-05	
414	2	"	4,5x4	R2 x 10 x 81	-4-05	
413	2	"	4,5x4	R2 x 10 x 79	-4-05	
412	2	"	4,5x4	R2 x 10 x 50	-4-05	
411	2	"	4,5x4	R2 x 10 x 40	-4-05	
3	1	Stegbleche	4,5x4	R45 x 18	-4-04	
2	2	Polierblech	4,5x4	R47 x 42	-4-03	
1	2	Kopfblech	4,5x4	R410 x 70	R015 38-3-02	

1:1 Versuchseinsatz für den Natriumkreislauf R015.38-1-01

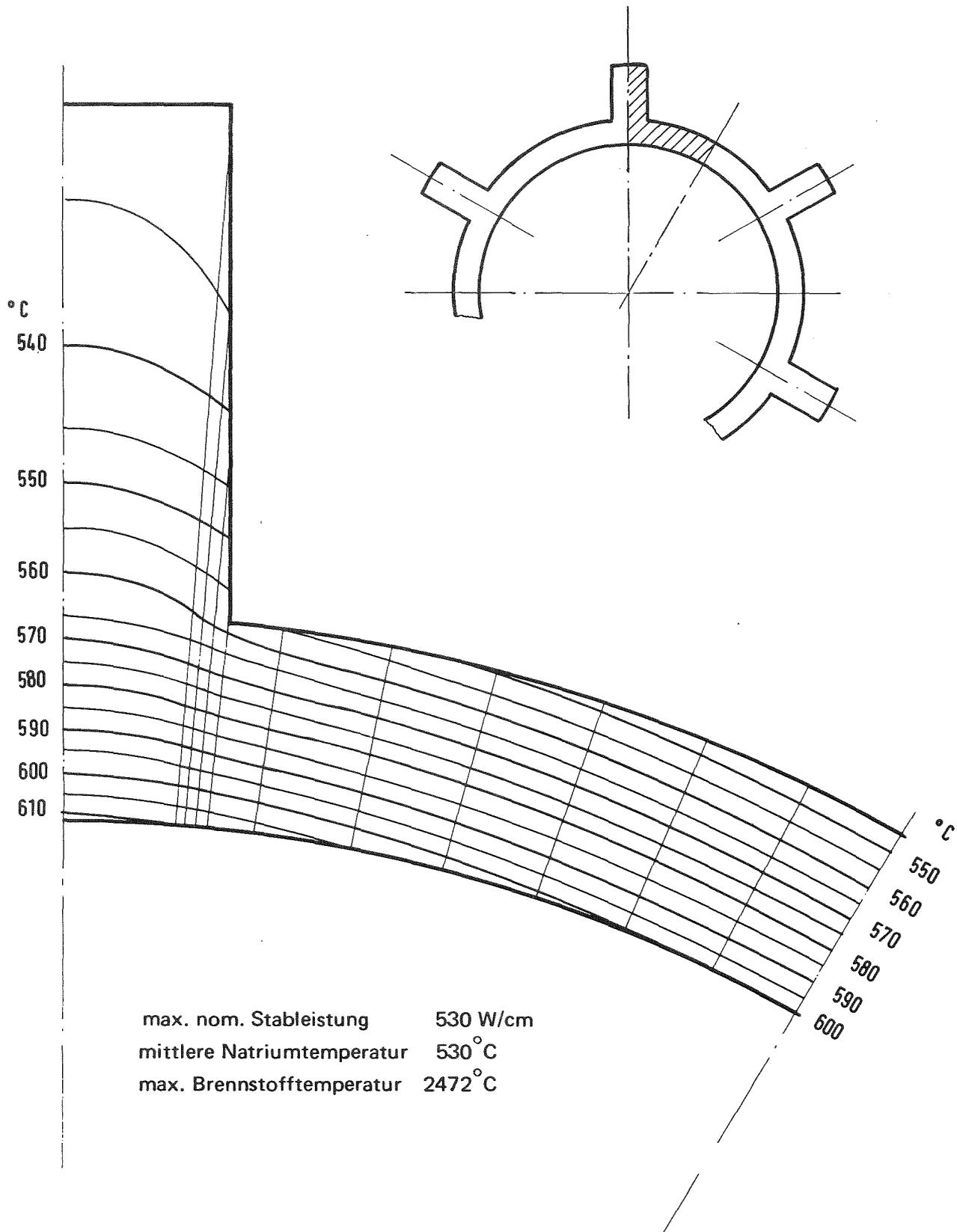


Abb. 7 Temperaturfeld in einem natriumgekühlten Hüllrohr mit sechs integralen Wendelrippen

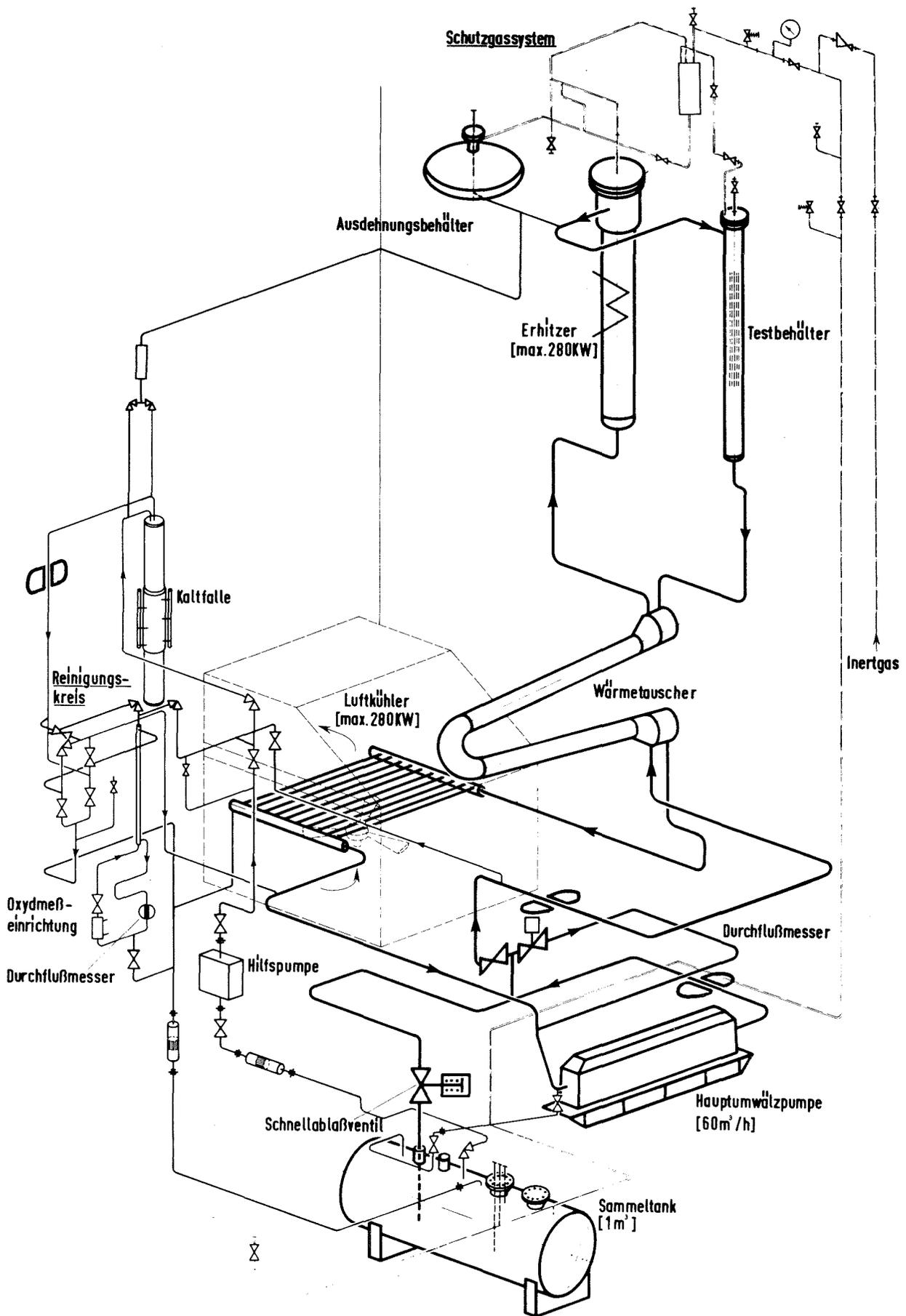


Abb. 8 Na-Prüfstand zur Untersuchung an Brennelementmodellen

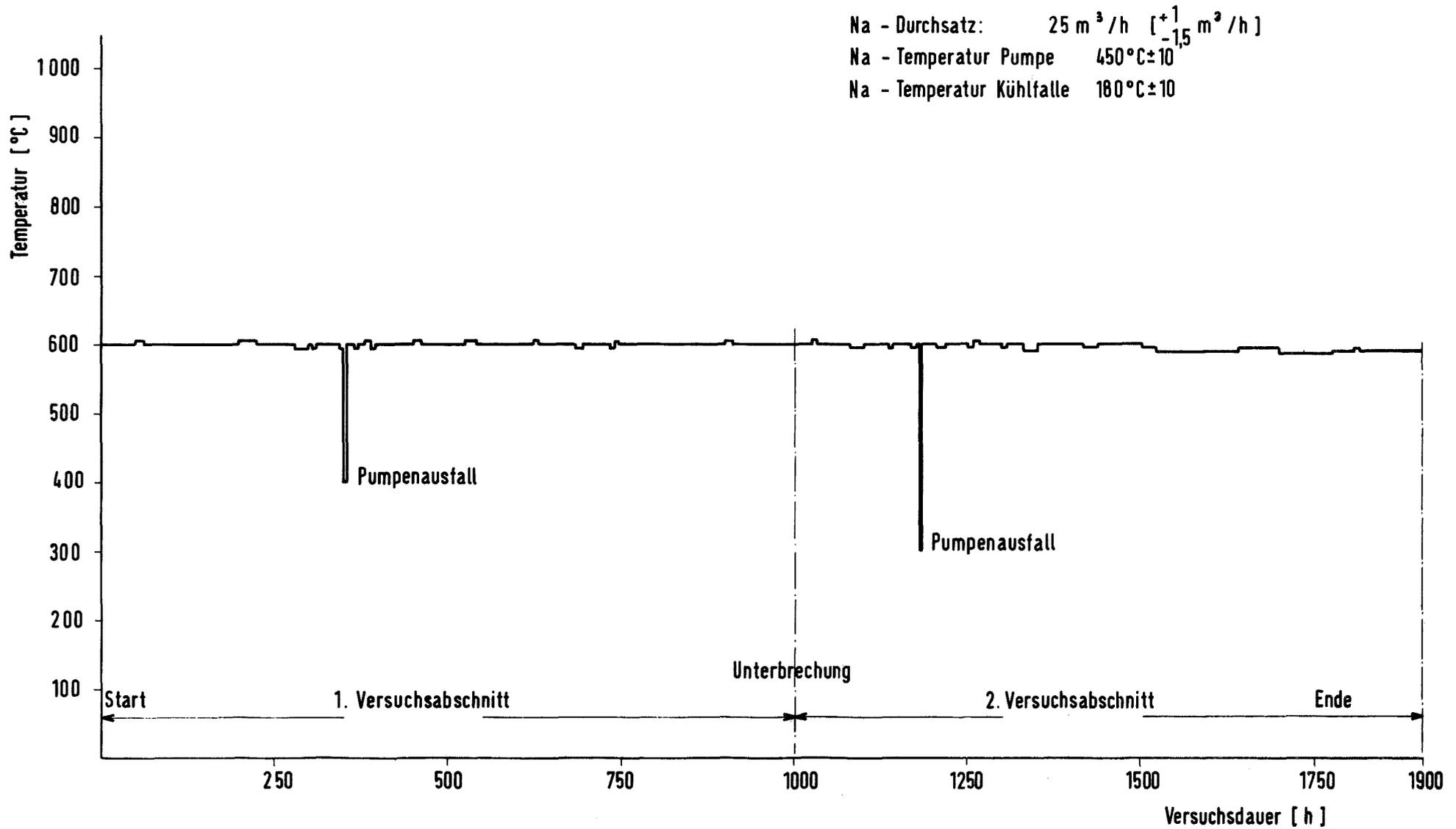


Abb. 9 Zeitlicher Temperaturverlauf des 1. und 2. Versuchsabschnittes

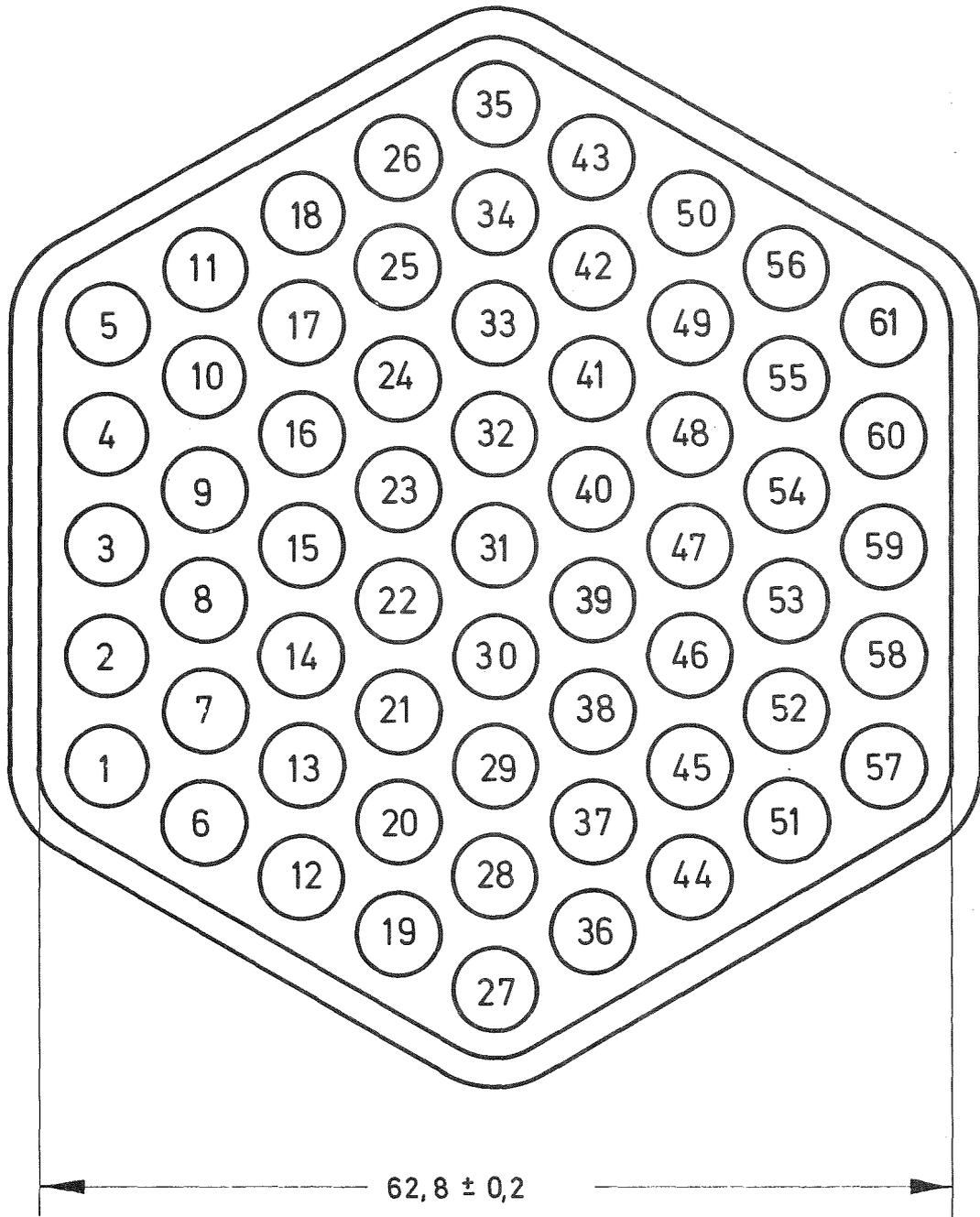


Abb.10 Stabanordnung im Dauerversuch 1  
 Stäbe im Anlieferungszustand eingesetzt

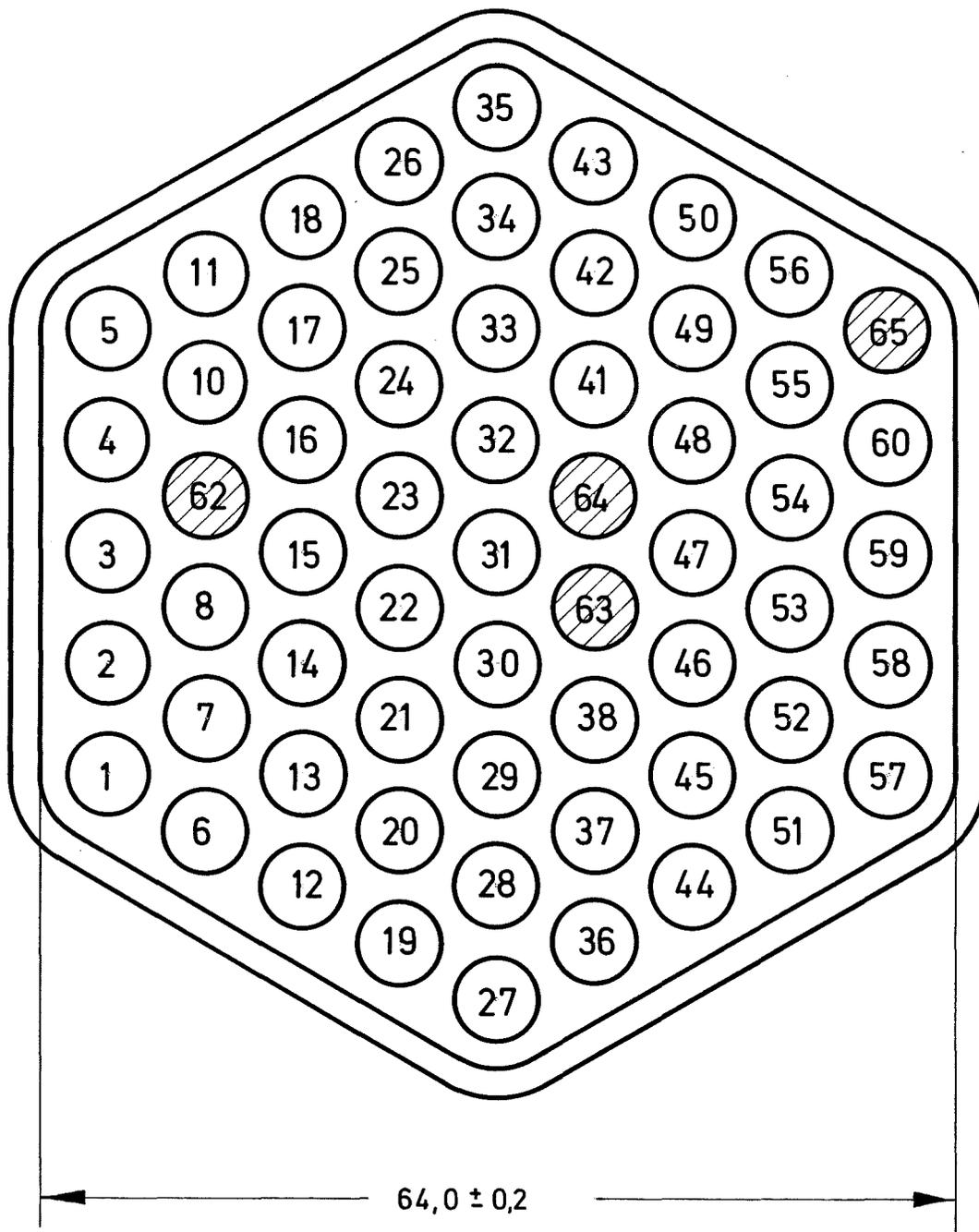


Abb.11 Stabanordnung im Dauerversuch 2.  
 Stäbe: 62 ... 65; neue Stäbe, im Anlieferungszustand eingesetzt, alle weiteren Stäbe aus Dauerversuch 1

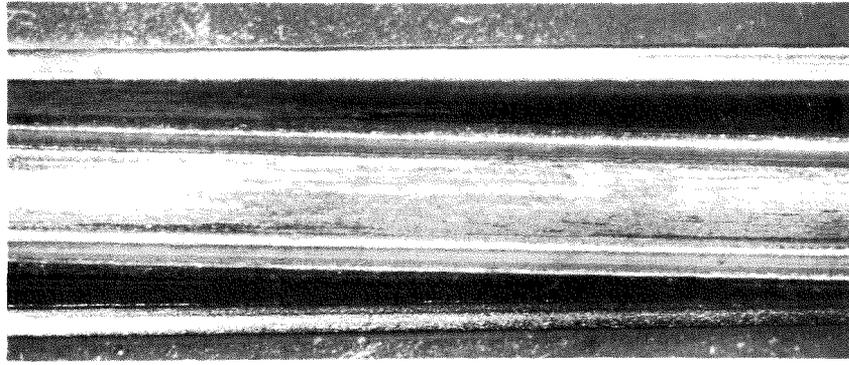


Abb. 12: Abscheidungen von Eisen auf der Fläche des Stabes Nr. 39 nach 1000 Stunden im Kreislauf bei 600 °C und 4,7 m/s

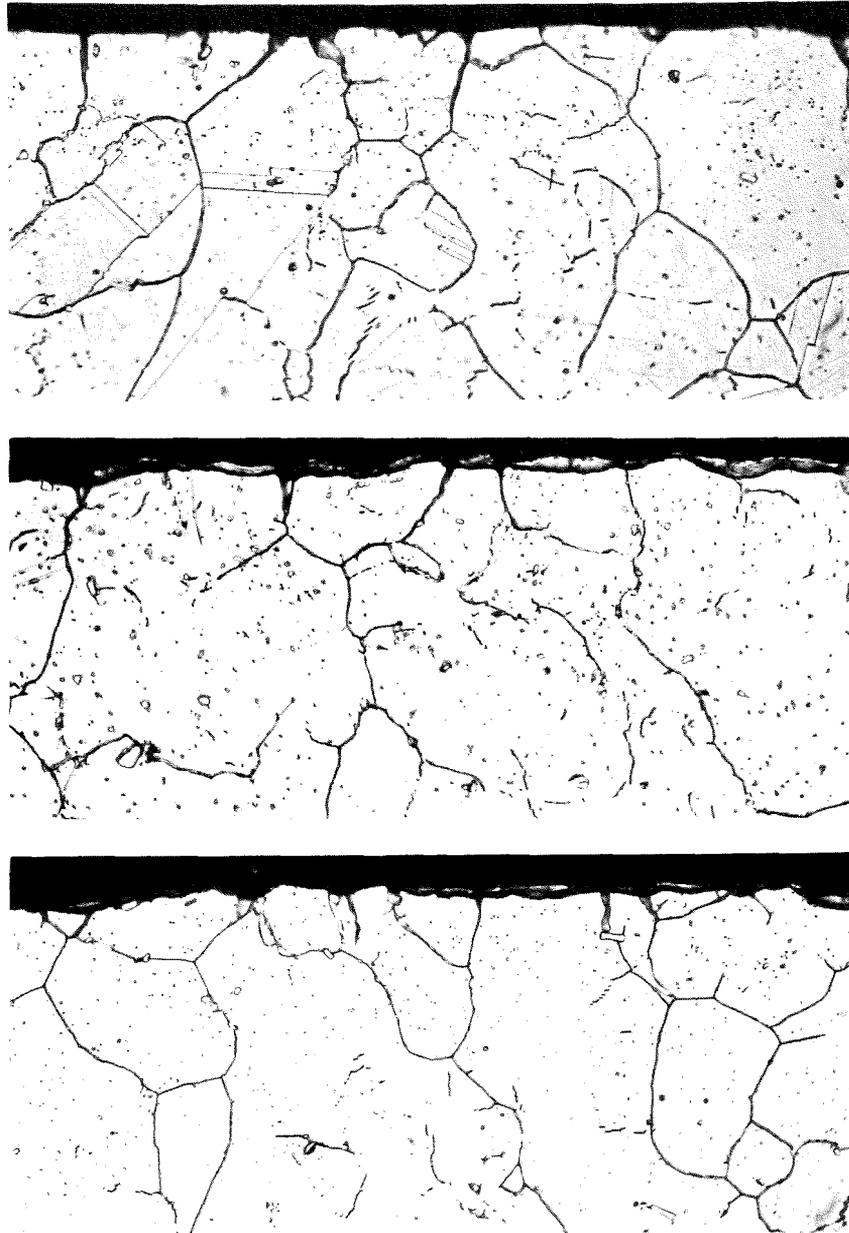


Abb. 13: Metallografische Befunde an Stab Nr. 39 an Proben, die am Na-Eintritt, von der Mitte des Stabes und am Na-Austritt genommen wurden. Die Tiefe der interkristallinen Korrosion nimmt mit der "Downstream-Position" ab. Ferritische Schichten sind nicht zu erkennen. (500-fach)

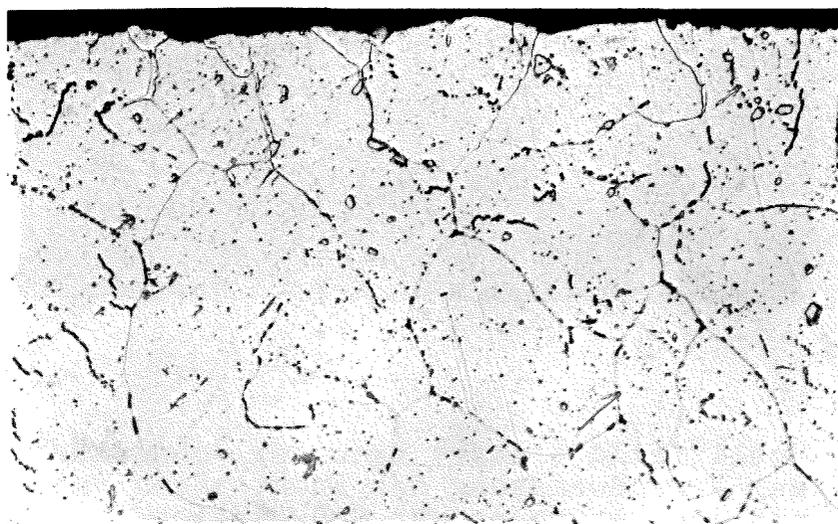
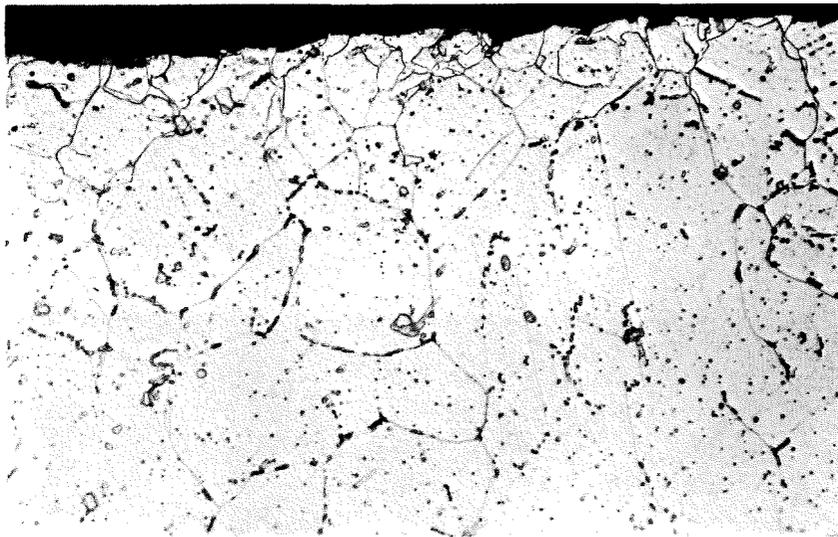
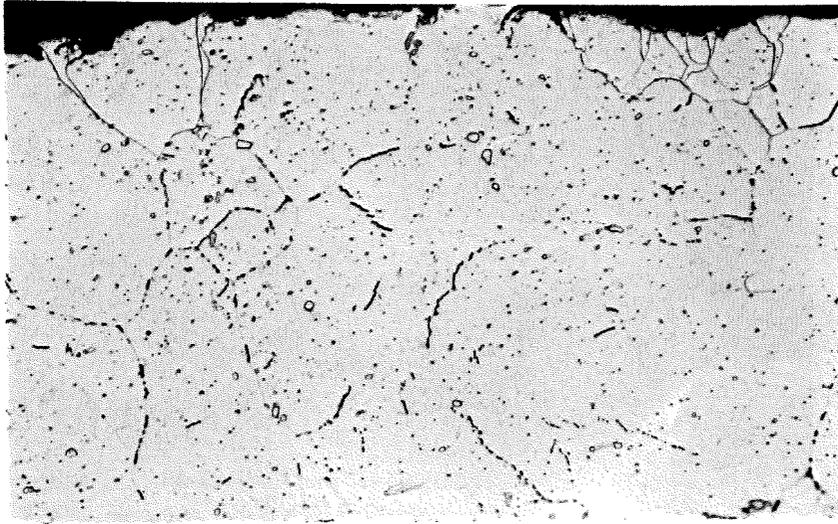


Abb. 14: Metallografische Befunde an Stab Nr. 41. Die Proben sind am Na-Eintritt, in der Mitte des Hüllrohres und am Na-Austritt genommen worden. Keine so starke interkristalline Korrosion wie in Abb. 2, aber deutliche Veränderungen an den Korngrenzen in Oberflächennähe. 500-fach

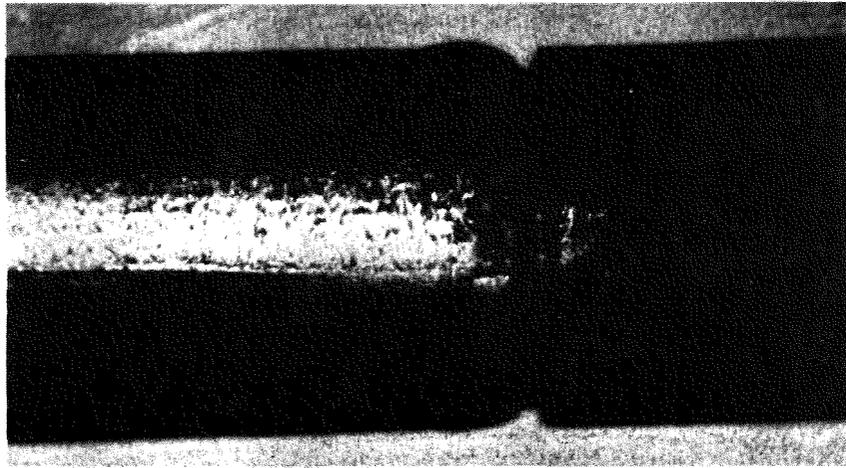


Abb. 15: Endstopfen des Stabes Nr. 41 mit Natriumausblühung in der Schweissnaht (etwa 10-fach)



Abb. 16: Schliffbild (längs) nahe der Schadensstelle an der Verschweissung des Endstopfens von Stab Nr. 41 mit dem senkrecht zur Schweisszone entstandenen Riss (200-fach)



Abb. 17: Schlibfbild der Schweissnaht am Endstopfen des Stabes Nr. 39 (500-fach). Deutlich sichtbare Gefügeinhomogenitäten in der Verschweissungszone von Hüllrohr und Stopfen. Anzeichen für Reaktionen der Inhomogenitäten mit dem Natrium.

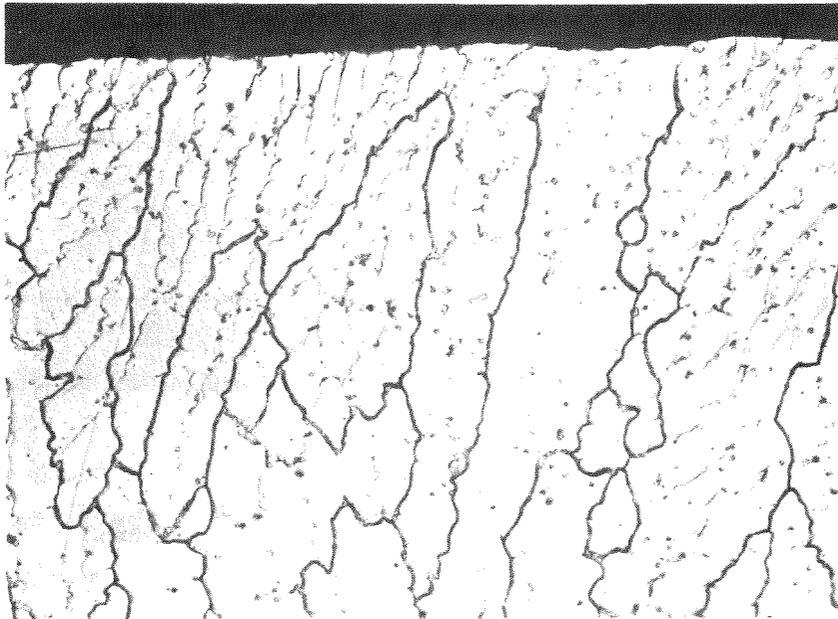


Abb. 18: Schlibfbild der natriumexponierten Verschweissungszone des Stabes Nr. 39 (500-fach). In den oberflächennahen Zonen Korrosionserscheinungen an den Korngrenzen

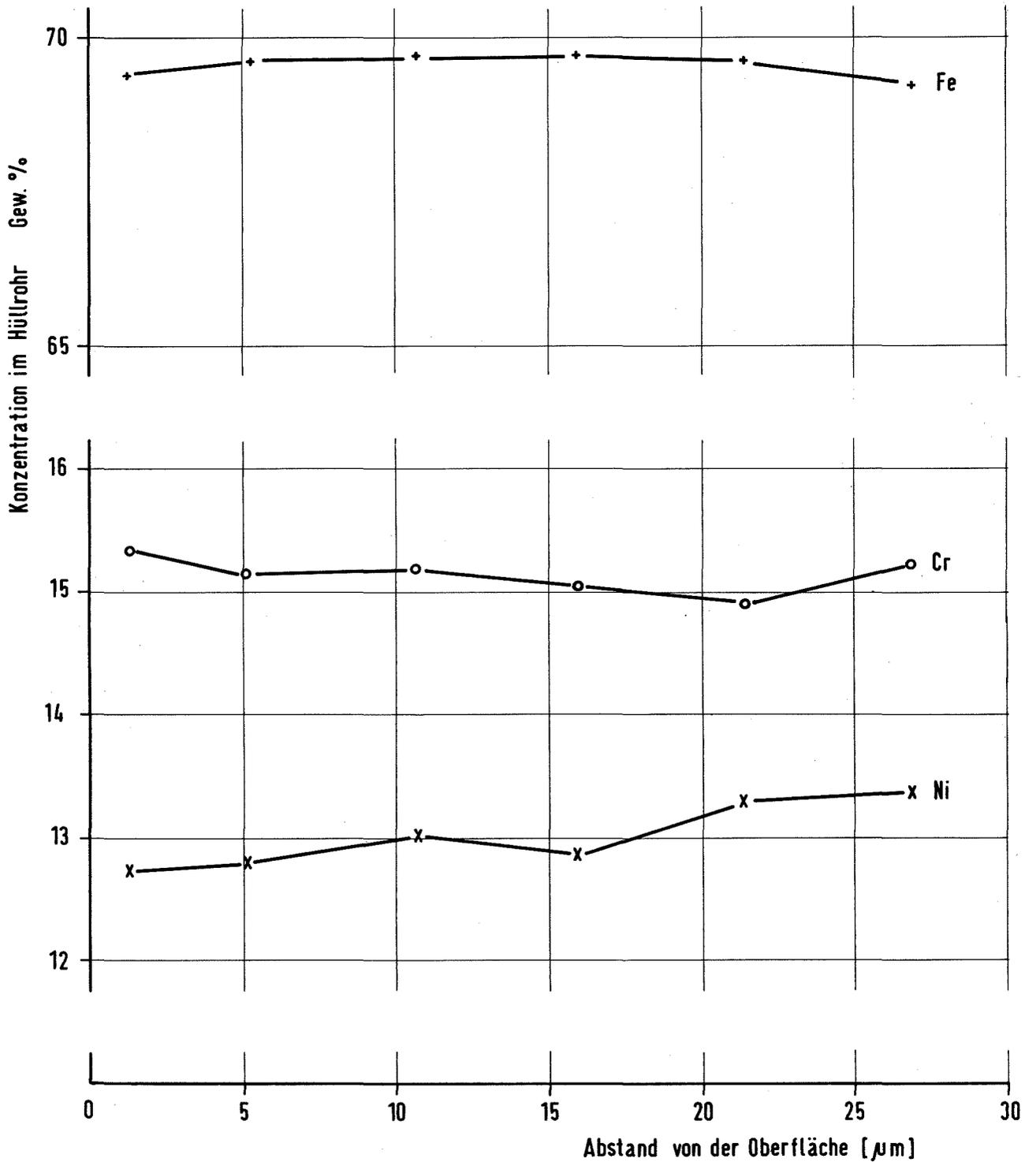


Abb. 19: Oberflächenschichtanalysen nach chemischem Abtrag von vier Proben des Stabes Nr. 41. Die Konzentrationsveränderungen sind so schwach, dass man lediglich beim Nickel geringfügige Verarmung in der Randzone konstatieren kann.

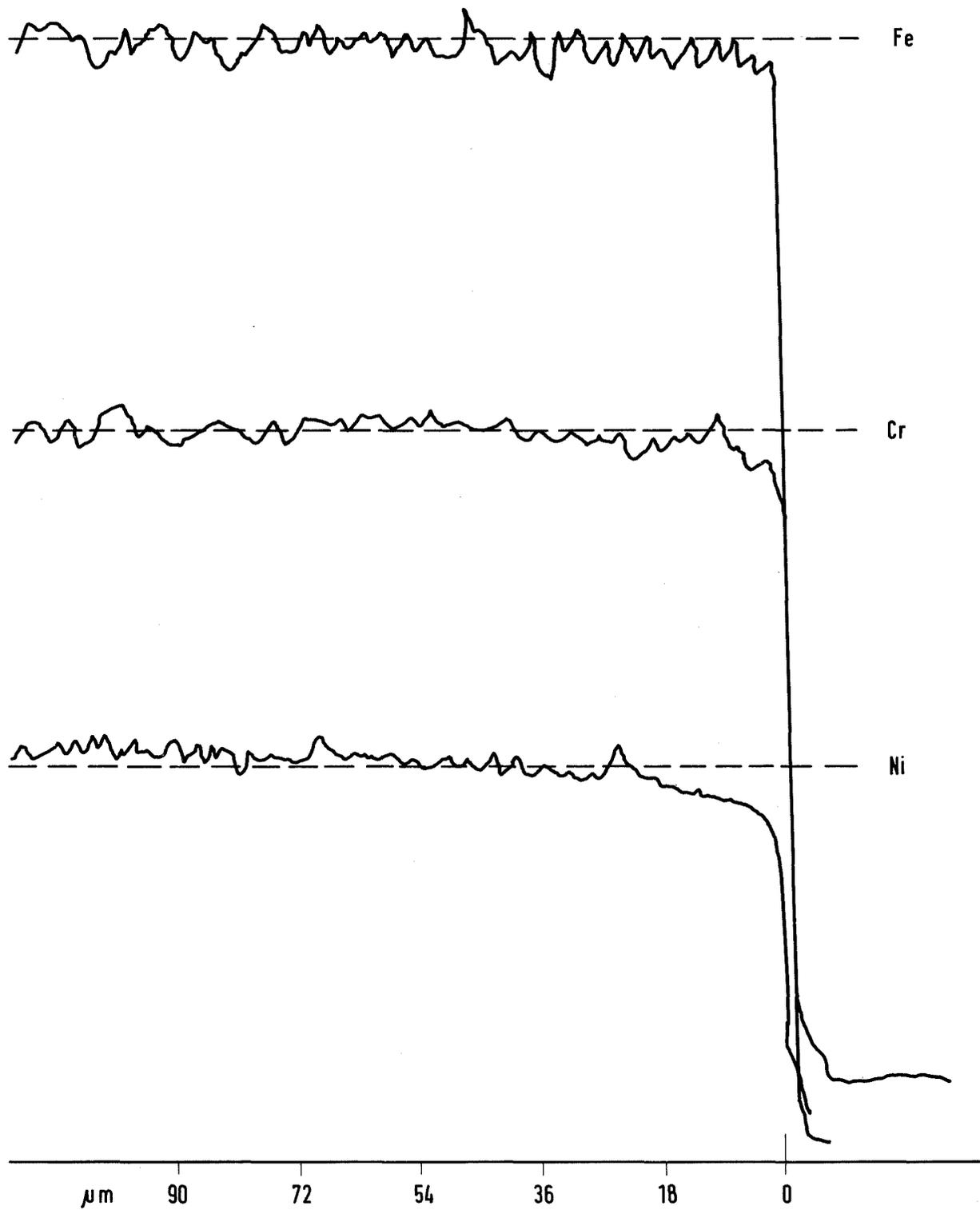


Abb. 20: Konzentrationsprofile der Elemente Eisen, Chrom und Nickel in der Oberflächenzone einer Probe aus dem Stab Nr. 23, aufgenommen mit der Mikrosonde.

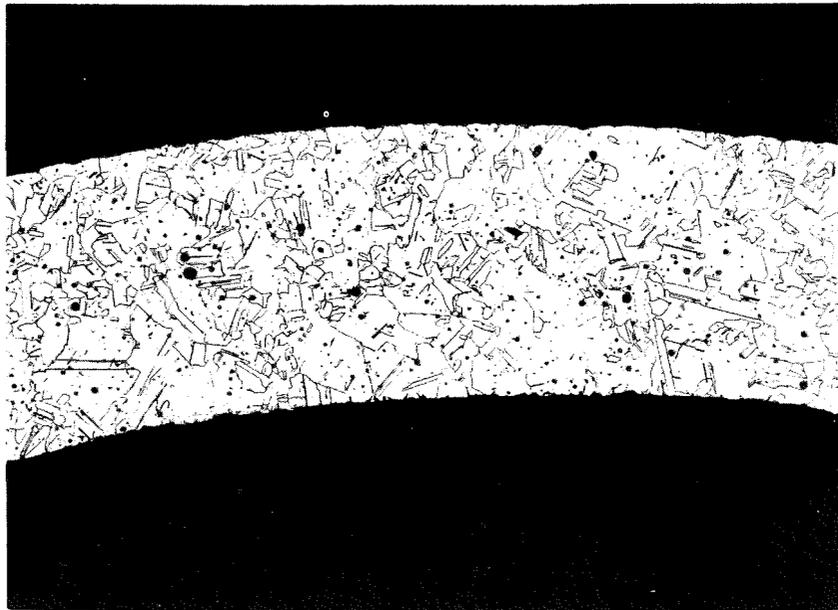
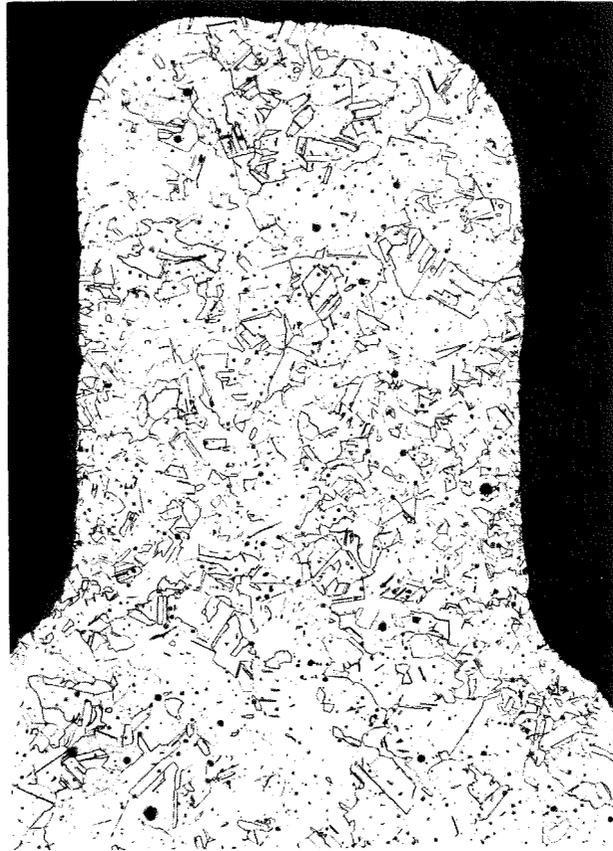
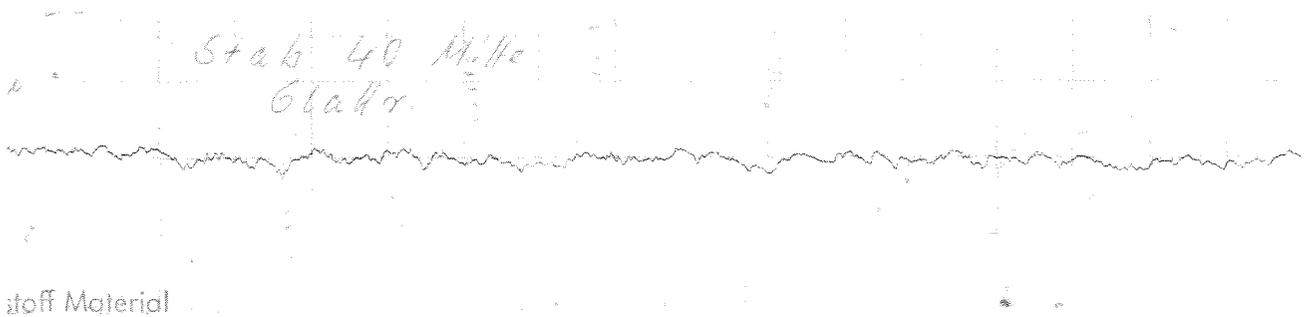


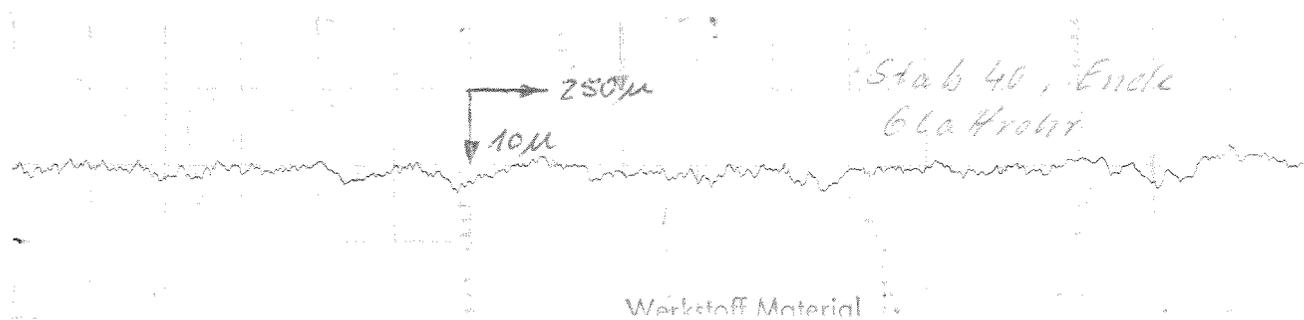
Abb. 21: Metallographische Darstellung (100 x) von Rippenkopf und Rohrwandung im elektrolytisch geätzten Querschliff



Stab Anfang (Natrium Eintritt)



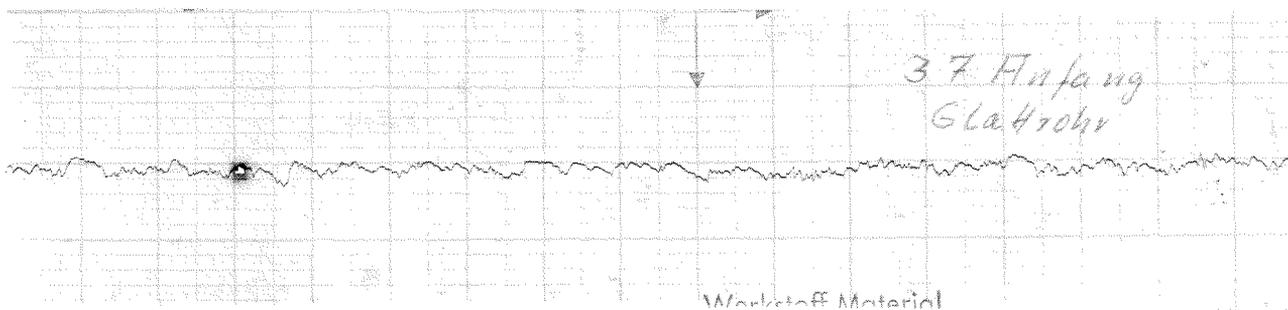
Stab Mitte



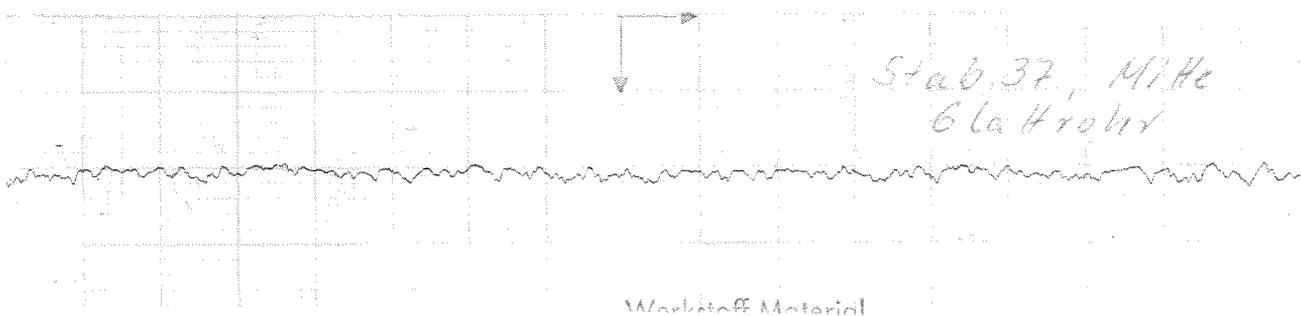
Stab Ende (Natrium Austritt)

Abb. 22 Oberflächenrauigkeit des Glattrohrteils in profilometrischer (40 x) Darstellung

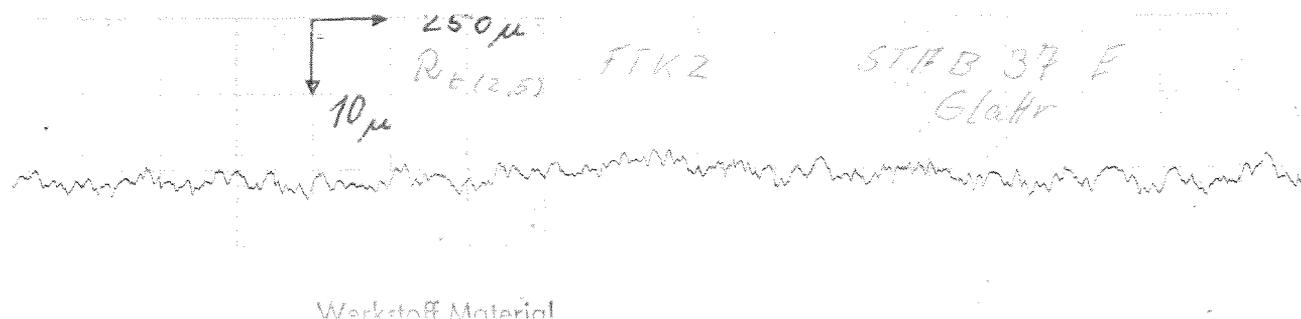
Stab Nr. 40: Einsatz 1000 Stunden  
1. Versuchsabschnitt



Stab Anfang (Natrium Eintritt)



Stab Mitte



Stab Ende (Natrium Austritt)

Abb. 23 Oberflächenrauigkeit des Glattrohrteils in profilometrischer (40x) Darstellung  
 Stab Nr. 37: Einsatz 1900 Stunden

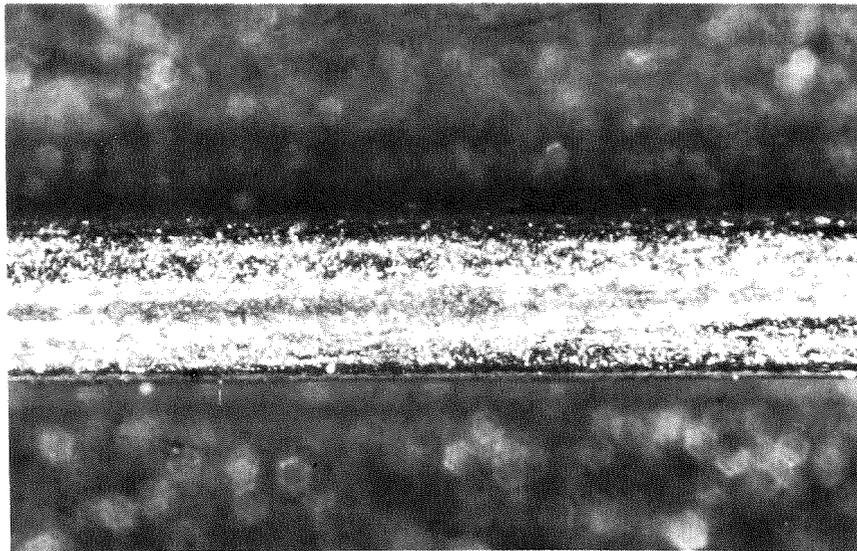
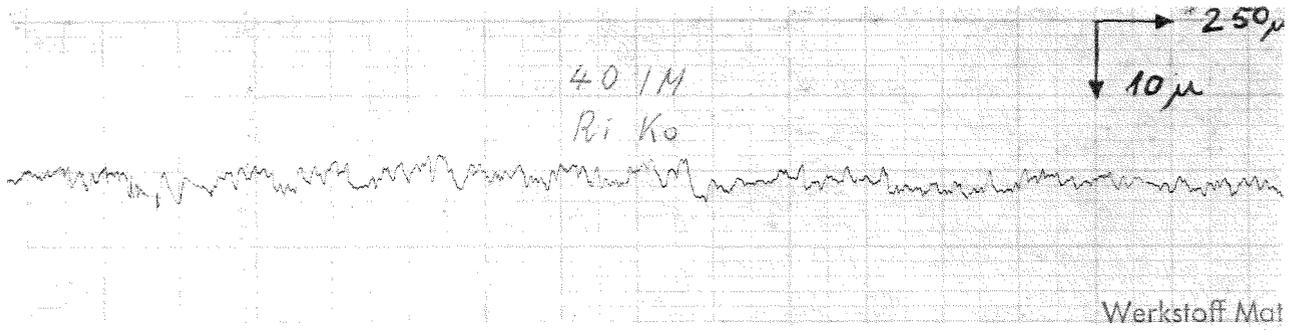


Abb. 24: Abstützstelle in profilometrischer (40x) und mikroskopischer (40x) Darstellung  
Stab Nr. 40: Einsatz 1000 Stunden  
1. Versuchsabschnitt

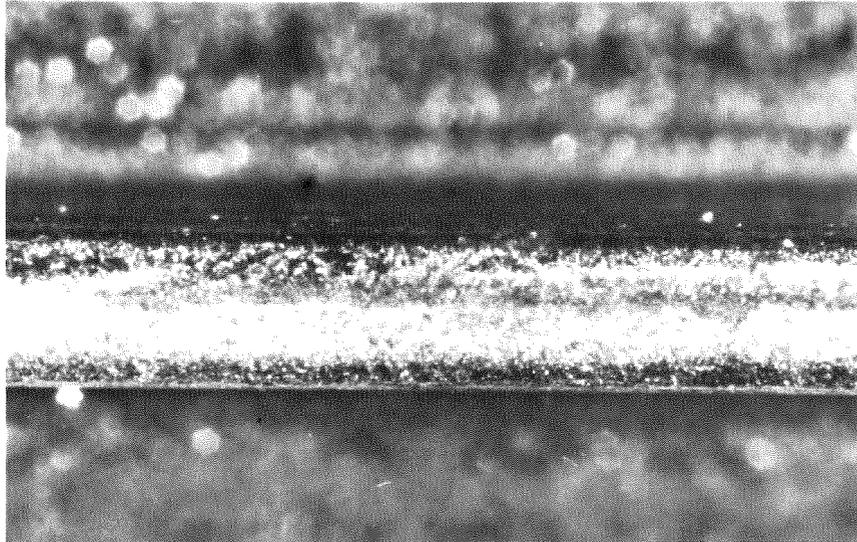
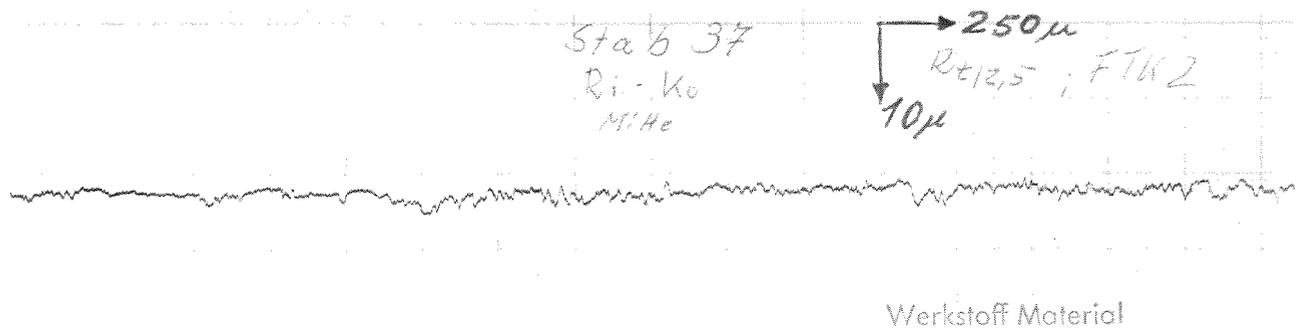


Abb. 25: Abstützstelle in profilometrischer (40x)  
und mikroskopischer (40x) Darstellung  
Stab Nr. 37: Einsatz 1900 Stunden  
1. und 2. Versuchsabschnitt