

KERNFORSCHUNGSZENTRUM

KARLSRUHE

April 1977

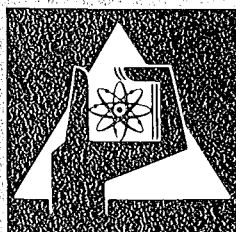
KFK 2442

Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

**Schnellbrüter-Hüllrohre mit Integralen
Wendelrippen**

- Entwicklung und Erprobung -

zusammengestellt von
O. Jacobi



**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

Institut für Material- und Festkörperforschung

Projekt Schneller Brüter

Schnellbrüter-Hüllrohre mit integralen Wendelrippen

- Entwicklung und Erprobung -

zusammengestellt von

O. Jacobi

mit Beiträgen von

E. Baumgärtner⁺⁺

E. Bojarsky

D. Freund

H. Hoffmann⁺⁺

O. Jacobi

W. Kathol⁺⁺⁺

M. Mayer⁺

H. Miller⁺⁺

G. Mühling⁺⁺⁺

H. Plitz⁺⁺⁺

H. Reiser

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

+ Interatom, Bensberg

++ Institut für Reaktorbauelemente

+++ Projektleitung Schneller Brüter

Kurzfassung

Die Entwicklung von Schnellbrüter-Hüllrohren mit integralen Wendelrippen begann etwa 1966. Wesentlicher Hintergrund für diese Entwicklung war die Suche nach einer vorteilhafteren Alternative zu den konventionellen Abstandshaltern wie Gitter und Wendeldraht. Dabei wurde zunächst die industrielle Herstellbarkeit untersucht. Parallel dazu erfolgten die ersten thermohydraulischen und fluiddynamischen Experimente bei AEG, GfK und Interatom. Neben der Herstellbarkeit wurden die Probleme der zerstörungsfreien Prüfungen auf Geometrie- und Materialfehler vorrangig behandelt.

Es werden in diesem Bericht die verschiedenen Entwicklungsstadien wiedergegeben, die dann mit der Beschreibung von zwei größeren Projekten ihren Abschluß finden. Diese Projekte sind die genehmigungsfähige Studie zur Bestrahlung von Rippenrohr-Oxid-Brennelementen in der KNK II und das bereits beendete 19-Stab-Brennelementbündel-Bestrahlungsexperiment Mol 7D der GfK im 500 kW-Na-Loop des belgischen Reaktors BR2. Bei diesem Experiment im BR2 wurde der maximale Zielabbrand von 85000 MWd/t Oxid ohne Komplikationen erreicht.

Abstract

Fast Breeder Cladding Tubes Provided with Helical Fins - Development and Testing

Development of fast breeder tubes with helical fins started around 1966. The development was initiated mainly by the search for a more favorable alternative to the conventional spacers such as grids and spiral wires. First of all the possibility was investigated of fabricating them on an industrial scale. The first thermohydraulic and fluiddynamic tests were made in parallel by AEG, GfK and Interatom. Besides the possibility of industrial fabrication the problems of non-destructive testing for geometry and material defects had to be treated with priority.

In this report the different stages of development are shown and, finally, two rather large projects are described. These projects are the study ready for the licensing procedure concerning the irradiation of finned tube oxide fuel elements in KNK II and the already completed 19-rod fuel element bundle irradiation experiment Mol 7D of GfK performed in the 500 kW sodium loop of the Belgian BR2 reactor. In this BR2 experiment the maximum target burnup of 85000 MWd/t. of oxide was attained without trouble.

V O R B E M E R K U N G

Im Institut für Material- und Festkörperforschung sowie im Institut für Reaktorbauelemente wurde die Entwicklung und Erprobung des Rippenrohr-Brennelementkonzeptes federführend betrieben. Der organisatorische Ablauf und die Verbindungen zu externen Partnern wurden von der Projektleitung Schneller Brüter betreut. Hier ist besonders die gute Zusammenarbeit mit den Firmen Interatom und Mannesmann zu erwähnen. Die vielfältige Mühe und Sorgfalt aller an der Entwicklung und Erprobung des Rippenrohrkonzeptes Beteiligten sei ausdrücklich anerkannt. Die Autoren danken an dieser Stelle weiterhin allen, die unmittelbar zur Abfassung der Dokumentation beitrugen sowie Frau W. Ratzel für die Reinschrift des Manuskriptes und die redaktionelle Hilfe.

Februar 1977

O. Jacobi

<u>Inhalt:</u>	<u>Seite:</u>
1. Einleitung (Hoffmann, Jacobi, Plitz)	1
2. Herstellung (Jacobi)	2
3. Zerstörungsfreie Prüfung	4
3.1 Materialfehler (Jacobi)	4
3.2 Geometrie (Jacobi)	6
4. Anwendung	9
4.1 Untersuchungen zur thermo- und fluiddynamischen Auslegung von Kernelementen (Hoffmann)	9
4.2 Interatom Arbeiten (Mayer)	13
4.3 AEG-Arbeiten (Plitz)	18
4.4 Brennstäbe für die KNK und Überlegungen zur Bündelkonstruktion (Bojarsky, Freund, Hoffmann, Kathol, Miller, Mühling, Reiser)	20
4.5 19-Stab-Brennelementbündel im BR2 (Freund, Baumgärtner, Jacobi)	24
5. Zusammenfassung (Jacobi)	29
Literatur	31
Tabelle	
Abbildungen 1 - 34	

1. Einleitung

Die geeignete Abstandshalterung einzelner Brennstäbe im Brennelementbündel eines Brutreaktors ist für die gesamte Reaktorauslegung von überragender Bedeutung. Die wesentlichen Kriterien zur Auswahl von Abstandshaltern für Brennelemente mit engen Kühlkanalquerschnitten sind die räumliche und zeitliche Konstanz der Stabteilung, die Kühlmittelquervermischung, der Kühlmitteldruckverlust und die Herstellbarkeit. Als Abstandshalter stehen gitterförmige Typen sowie um die Stäbe gewickelte Drähte oder integrale, auf das Hüllrohr aufgebrachte Wendelrippen zur Diskussion. In den verschiedenen Entwicklungsstadien wurden alle drei Möglichkeiten detailliert untersucht, wobei in Frankreich und in den USA Wendeldrähte, in England Gitterabstandshalter und in der UDSSR Wendeldrähte und Wendelrippen realisiert wurden. Für den SNR 300 ist der Einsatz aller drei Abstandshaltervarianten für die Kernelemente geplant, nämlich: Gitter für die Brenn-, Rippenrohre für die Absorber- und Wendeldrähte für die Brutstäbe.

Beim Übergang zu kleinen Stababständen, bei hohen Leistungsdichten und bei hoher Kühlmittelgeschwindigkeit, wurde bei den Entwurfsarbeiten für den dampfgekühlten schnellen Reaktor /1,2,3/ und für den Hochflußreaktor FR3 /4/, das Wendeldraht- oder das Rippenrohrkonzept erforderlich.

Ausgehend von dem positiven Ergebnis der theoretischen und experimentellen Untersuchungen zum Rippenrohrabstandshalterkonzept für den dampfgekühlten schnellen Reaktor /5,6,7, 37/ wurde bei der GfK mit einer Vielzahl von thermo- und fluiddynamischen Untersuchungen begonnen, um die Vorteile dieses Rippenrohrkonzepts auch für den schnellen natriumgekühlten Reaktor nutzbar zu machen. /8,9,23/. Bei diesen Rippenrohrbündeluntersuchungen im strömenden Natrium wurde gefunden, daß die Anwendung des Rippenrohrkonzeptes einen niedrigen Druckverlust, gleichmäßige Kühlmittel-Temperaturverteilung im Bündelquerschnitt, guten und gleichmäßigen Wärmeübergang Brennstab/Kühlmittel sowie vorteilhafte mechanische Stabilität bietet. Für die Beurteilung des Rippenrohrkonzeptes sind die Herstellung von Abstandshalter und Hüllrohr in einem Fertigungsprozeß sowie die besonders einfache, problemlose Assemblierung der Brennstäbe und deren Handhabung bei der Wiederaufarbeitung ein zusätzlicher Vorteil.

Grundlegende Untersuchungen zum Rippenrohrkonzept für Dampf bzw. Natrium als Kühlmedium wurden bei GfK und anderen Stellen ab 1966 durchgeführt. Bei verschiedenen Herstellern wurde die Fertigung aufgenommen, um Rippenrohre für die ersten fluiddynamischen Versuche bereit zu stellen.

Bisher wurden folgende wichtige Entwicklungsschritte abgeschlossen:

- Auswahl des Rippenrohrkonzeptes für den Referenzentwurf /1, 10/ eines dampfgekühlten schnellen 300 MWe-Prototypreaktors,
- Durchführbarkeitsstudie für den schnellen Hochflußreaktor FR3 /4/; Verwendung von Rippenrohren für die Brennstäbe,
- Vorstudie zur Bestrahlung von Rippenrohr-Oxid-Brennelementen im KNKII /11/ (s.a. Kapitel 4.4 dieses Berichts),
- Abschluß der Bestrahlung eines 19-Stab-Rippenrohrbündels im 500 KW-Loop des BR2 (s.a. Abschnitt 4.5 dieses Berichts), Experiment Mol 7D.

Aufgrund der Wichtung von Prioritäten im Bereich des Projektes Schneller Brüter wird zunächst die Entwicklung und Erprobung des Rippenrohrkonzeptes mit diesem Bericht abgeschlossen, wobei die qualitativen und quantitativen Ergebnisse des og. Bündelexperimentes Mol 7D nach dem Abschluß der Untersuchungen etwa Mitte 1977 veröffentlicht werden.

2. Herstellung

Ausgehend von der Notwendigkeit, stützende experimentelle Daten für die theoretischen Arbeiten /5,6,7/ zum Rippenrohrbündelkonzept für den schnellen dampfgekühlten Reaktor zu ermitteln, wurde die Entwicklung von Herstellungsverfahren für Hüllrohre mit integralen Wendelrippen begonnen /12/. Bei den ersten Fertigungsversuchen wurden die Rippen spanabhebend aus einem dickwandigen Rohr herausgearbeitet. Diese Rohre genügten zwar den Anforderungen für die thermohydraulischen Experimente, waren aber, schon allein wegen der Herstellungskosten langfristig, insbesondere im Hinblick auf die Bestückung ganzer Kernelemente, nicht verwendbar.

Mit einem Entwicklungsvertrag zwischen der Gesellschaft für Kernforschung und der Mannesmann AG wurde dann die industrielle Herstellung begonnen.

Es konzentrierte sich dabei die Entwicklung auf die Werkstoffe Incoloy 800, Inconel 625 und Hastelloy X280, die für den dampfgekühlten Brüter vorgesehen waren.

Da bereits bei der Herstellung von glatten Rohren aus dem Werkstoff Hastelloy X280 erhebliche Schwierigkeiten auftraten, wurde die weitere Verfahrensentwicklung zur Herstellung von unverdrallten Rippenrohren auf die anderen beiden Werkstoffe konzentriert. Beim Kaltziehen der Rohre durch Profilziehsteine ergab sich aufgrund der hohen Flächenpressung ein Abreißen des Schmiermittelfilms, weswegen die Vorrohrabmessungen geändert wurden. Aufgrund der daraus folgenden höheren Anzahl an Profilformungsschritten für den Werkstoff Inconel 625, wurde nur noch der Werkstoff Incoloy 800 weiterverarbeitet. Die Berechnung der Kalibrierung (Abb. 1) der Ziehsteine erfolgte so, daß der Verformungsgrad im Rippen- und Glattrohrteil annähernd konstant war, was dann eine gleichmäßige Korngröße über den gesamten Querschnitt ergab (Abb.2). Für die Herstellung von verdrallten Rippenrohren wurde eine neuartige Präzisionsziehbank konstruiert und gebaut, die folgende Besonderheiten aufwies:

- Das Ziehbett besteht aus einer spannungsfreigelegühten Schweißkonstruktion mit nachstellbaren Kugellängsführungen.
- Der Ziehwagen wird über zwei Spindeln verfahren, wobei die Ziehgeschwindigkeit kontinuierlich eingestellt werden kann.
- Die drehbar gelagerten, verdrallten Ziehmatrizen sind auf einem einstellbaren Lager befestigt.

Nach der Inbetriebnahme dieser Präzisionsziehbank wurden die ersten Rohre über einem Stangenzug verdrallend weiterverformt, wobei jedoch größere Drallsteigungsabweichungen an den fertigen Rohren entstanden. Bessere Ergebnisse wurden dann mit dem Verfahren des Stopfenzuges erzielt /13/. Ausgehend von theoretischen Überlegungen wurde im Rahmen eines systematischen Ziehprogramms bestätigt, daß durch unterschiedliche Ziehgeschwindigkeiten und zwar exponentielle Zunahme über die Rohrlänge, die geforderte Drallsteigungstoleranz von ± 5 mm bei einer Rippensteigung von 600 mm eingehalten werden konnte.

Zusätzlich wurde noch ein Verfahren zum Warmrichten erprobt, um die Drallsteigungstoleranzen bis auf $\pm 0,5$ mm zu verringern. Das Geradheits-Richten war wegen der Verletzungsgefahr für die Rippenköpfe nicht nach konventionellen Verfahren möglich. Hierfür wurde eine Vorrichtung gebaut, die entsprechend dem theoretischen Richtdreieck gekrümmt war.

Insgesamt wurden ca. 200 m Rippenrohr mit folgenden geometrischen Abmessungen hergestellt:

- Glattrohrdurchmesser: 7,0 mm
- Wanddicke: 0,4 mm
- Anzahl der Rippen: 6, je 60°
- Rippenhöhe: 0,6 mm
- Rippenbreite: 0,6 mm
- Übergangsradien: ca. 0,1 mm
- Rippensteigung: 600 mm / 360°
- Fixlänge: 3000 mm.

Nach Beendigung des Vertrages wurden von Mannesmann noch zahlreiche Rippenrohre hergestellt. In Tab. 1 sind die bisher produzierten Rippenrohre (für die Verwendung als Hüllrohre in Reaktoren), deren Abmessungen und Werkstoffe aufgeführt.

Es hat sich erwiesen, daß die Erfahrungen, die man während der Entwicklungsphase an den Rohren aus Incoloy 800 gesammelt hat, durchaus auch auf die austenitischen Edelmehle übertragen werden konnten (s.a. 4.5).

Neben den Aktivitäten bei der Firma Mannesmann wurde bei der englischen Firma Accles & Pollock die Fertigung von Rippenrohren aufgenommen, wobei hier die Herstellungsmethoden nicht bekannt sind.

3. Zerstörungsfreie Prüfung

3.1 Materialfehler

Im Rahmen eines Entwicklungsvertrages zwischen der Mannesmann-Röhrenwerke AG und der Gesellschaft für Kernforschung mbH wurde ein Ultraschall- und ein Wirbelstromprüfverfahren entwickelt und aufgebaut.

Beide Verfahren wurden an verschiedenen Rohrlieferungen erprobt und die erzielten Ergebnisse gegenübergestellt. Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit der beiden Verfahren dienten Rohre mit künstlichen Fehlern (Abb. 3).

Für die Ultraschallprüfung in Tauchtechnik wurde eine Anlage mit 18 Kanälen aufgebaut, d.h. 18 Ultraschallschwinger wurden simultan betrieben. Je 2 Längs- und 1 Querfehlerprüfkopf erfaßten dabei ein 60° -Segment eines 6 Rippenrohres und waren auf einer Prüfscheibe montiert (Abb.4). Insgesamt waren in der Prüfanlage 6 Prüfscheiben zu einem Prüfblock hintereinander aufgebaut (Abb.5).

Einerseits war die Führung der Rohre für die Ergebnisse der Ultraschallprüfung von überragender Bedeutung, denn Relativbewegungen zwischen Hüllrohr und Prüfkopf führten unweigerlich zu Fehlanzeigen, und andererseits durften die Führungen die Qualität und Form der Rohroberfläche nicht beeinträchtigen. Aus diesen Gründen wurden Rollenführungen mit je 3 um 120° versetzten Rollen verwendet, die das Rohr nur im Bereich zwischen zwei Rippen berührten. Von diesen 3 Rollen waren zwei fest und eine unter Vorspannung radial beweglich angeordnet, um Durchmesseränderungen aufzufangen. Die Prüfgeschwindigkeit lag bei ca. $7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Das bei der Wirbelstromprüfung verwendete Transmissionsverfahren benutzte außen am Rohr eine konzentrische Durchlauf-Sendespule und im Rohrinnern zwei koaxiale Empfangsspulen. Bei dieser Anordnung durchdringt das Wechselfeld der Sendespulen die Rohrwand und induziert in den beiden Empfangsspulen entgegengesetzt gerichtete Spannungen. Bei diskontinuierlichen Änderungen der Rohrwand, der elektrischen oder der magnetischen Leitfähigkeit werden in den Empfangsspulen nach Betrag und Phase unterschiedliche Spannungen induziert. Die Differenz der beiden Spannungen wird elektronisch aufbereitet und mit einem phasenempfindlichen Detektor gleichgerichtet. Bei der Anwendung dieses Transmissionsverfahrens ergaben sich etwa gleichgroße Anzeigen der innen und außen am Rippenrohr angebrachten künstlichen Fehler.

Abb.6 zeigt den Aufbau der gesamten Prüfanlage (Wirbelstrom- und Ultraschallprüfung). Eine Gegenüberstellung der Meßergebnisse zeigte, daß die Wirbelstromprüfung der Ultraschallprüfung überlegen war. Die Wirbelstromprüfung war einfacher zu bedienen und darüberhinaus empfindlicher. Zwar konnten mit dem Ultraschallverfahren die in Abb. 3 aufgeführten Testfehler nachgewiesen werden, wobei allerdings der Nachweis des Testfehlers unter der Rippe sehr schwierig war. Ebenso war bei der Ultraschallprüfung die Anzeige der künstlichen Außenfehler immer größer als die der Innenfehler. Messungen bei der GfK mit einer Vorrichtung, womit in einem Prüfdurchgang nur ein Rohrsegment von 60° untersucht wurde, bestätigten diesen Sachverhalt. Beim Nachweis von längsorientierten Fehlstellen (Länge $>$ 2-facher Spulenlänge),

wie sie z.B. Ziehriefen darstellen, konnte mit Wirbelstrom keine eindeutige Anzeige erzielt werden. Für diesen Fehlertyp müßten beide Prüfverfahren noch verbessert werden, um dann bei der Produktion von Rippenrohren angewendet werden zu können.

Mit den bei Mannesmann entwickelten Prüfverfahren wurden ca. 200 m Rippenrohr geprüft, wobei die Einstellung der Prüfeempfindlichkeit mit einem Testrohr nach Abb. 3 vorgenommen wurde. Mit beiden Verfahren wurden zahlreiche Fehler nachgewiesen. (Abb. 7, 8,9).

3.2 Geometrie

Davon ausgehend, daß für die Wandstärke, Innen- und Außendurchmesser beim Rippenrohr die gleichen engen Toleranzen Gültigkeit hatten wie für das unberippte Glattrohr des SNR-Brennstabs, wurden an die Meßgenauigkeit der Prüfapparaturen gleiche Anforderungen gestellt. Für die Kontrolle des Innendurchmessers konnte ohne jegliche Änderung die gleiche Meßmethode wie sie für Glattrohre angewendet wird, nämlich das pneumatische Hochdruckverfahren mit einem Zweipunkt-Düsensporn, benutzt werden. Für die Meßmethoden zur Bestimmung der Wanddicke und des Außendurchmessers im Bereich des Glattrohrteils konnten die bisher für die Glattrohrprüfung verwendeten Apparaturen benutzt werden /14/. Lediglich die Anzahl der Prüfspuren mußte entsprechend der Anzahl der Rippen vergrößert werden, wobei nur eine quasi translatorische Bewegung des Rohres während der Messung zulässig war, damit die Prüfköpfe nur einen definierten, azimutalen Bereich des Rippenrohres erfaßten. Für die Messung des Kopfkreisdurchmessers (max. Durchmesser über die Rippen) und die Kontrolle der Rippensteigung wurden bei der GfK neue Verfahren entwickelt /15/. Diese Entwicklungen wurden deswegen notwendig, um für out-of-pile Experimente größere Mengen kontinuierlich geprüfetes Material bereit zu stellen, wobei die Kenntnis des Kopfkreisdurchmessers für die Festlegung des radialen mechanischen Spiels im Brennelementkasten von großer Bedeutung war /16/.

Bei der Bestimmung des Kopfkreisdurchmessers bewegt sich das mit 300 U/min rotierende 6-Rippenrohr schraubenförmig mit 10 mm Vorschub pro Sekunde zwischen den diametral angeordneten Tastschneiden zweier induktiver Wegaufnehmer (Abb.10) hindurch. Die jeweils maximale Position der Tastschneiden zueinander entspricht dabei dem Kopfkreisdurchmesser und wird über ein Trägerfrequenzmeßsystem in eine proportionale elektrische Spannung umgewandelt.

Da bei 300 Umdrehungen pro Minute bei einem 6-Rippenrohr 30 Meßwerte in einer Sekunde anfallen, mußte eine Speicherelektronik aufgebaut werden, die jeden Maximalwert solange speichert, bis der nächste folgt, um die Hüll-Linie über die Kopfkreisdurchmesser zu erhalten. Würde man auf eine solche Speicherung verzichten, so ergäben sich kurze Impulse mit ca. 30 ms zeitlichem Abstand, deren Amplituden den Kopfkreisdurchmessern entsprächen. Diese Impulse lassen sich nur mit Schwierigkeiten registrieren und ergeben kein einfach lesbares Diagramm. Das Blockschaltbild des neuentwickelten Meßsystems mit den zugehörigen Impulsen ist in Abb. 11 wiedergegeben. Das Eingangssignal (U_e), welches entsprechend dem Kopfkreisdurchmesser und den Positionen der Tastschneiden der Wegaufnehmer jeweils auf einen Maximalwert ansteigt, wird auf den Eingang eines Analogspeichers (Abb. 11 rechts) gegeben, wobei der Speicherbefehl aus dem Eingangssignal selbst abgeleitet wird. Im linken Bildteil erkennt man die Gewinnung des Speicherbefehls aus der Eingangsspannung U_e . Durch Differenzieren der Eingangsspannung erhält man am Anfang und Ende des parabelförmigen Verlaufs schnelle Spannungsanstiege, von denen nur die positiv gerichteten zur Triggerung eines monostabilen Multivibrators benutzt werden. Die Verzögerung dieses Multivibrators wird so justiert, daß seine negative Flanke zeitlich mit dem jeweiligen Spannungsmaximum zusammenfällt. Durch weiteres Differenzieren, Invertieren und Gleichrichten erhält man einen positiven Impuls zum Zeitpunkt des jeweiligen Maximums. Dieser Impuls wird auf den Analogspeicher gegeben und bewirkt dort 1. das Löschen des vorherigen Speicherwertes und 2. das Speichern des neuen Wertes. So erhält man nun am Ausgang des Analogspeichers eine Spannung U_a , deren Verlauf der Hüll-Linie über die Kopfkreisdurchmesser entspricht. Die Abb. 12 zeigt einige Meßergebnisse. Zu Beginn einer jeden Messung wird eine Eichung über Rundendmaße vorgenommen. Vorteile des Meßsystems: Mit nur einem Wegaufnehmerpaar und nur einer Trägerfrequenzmeßbrücke gelingt es, auf nur einem Registrierkanal den Verlauf der 3 Kopfkreisdurchmesser über die Rohrlänge darzustellen. Die Messung des Kopfkreisdurchmessers an einem 3-Rippenrohr erfolgt auf die gleiche Weise, wobei allerdings 3 um 120° azimuthal versetzte Wegaufnehmer verwendet werden. Daraus ergibt sich dann - im Gegensatz zur Messung am 6-Rippenrohr - der Mittelwert der 3 Kopfkreisradien am Ausgang der Speicherschaltung.

Von großer Bedeutung für das mechanische Verhalten von Rippenrohrbündeln sind neben den Kopfkreisdurchmesser-Toleranzen die Abweichungen der Drallsteigungen. Eine exakte Einhaltung der Drallsteigung garantiert einen definierten Stabmittenabstand und Abstützpunkte der einzelnen Brennstäbe in einer zur Bündelachse senkrechten Ebene. Die Abb. 13 soll den Einfluß der Drallsteigungstoleranzen auf den Stabmittenabstand P veranschaulichen. Das bei GfK entwickelte Steigungsmeßgerät /17/ mißt nun die Steigungsabweichung am rotierenden Rohr in einem Durchgang mit der bereits beschriebenen Prüfung des Kopfkreisdurchmessers. Abb. 14 zeigt den Meßkopf der Steigungsmeßeinrichtung. In Bildmitte oben sieht man einen der beiden Taster. Der zweite Taster rechts daneben ist um 60 mm axial und um 36° azimuthal versetzt. Diese Daten ergeben sich aus den Soll-Steigungswerten eines häufig verwendeten Rippenrohrtyps mit 36° pro 600 mm Rohr, d.h. die Rippen drehen sich pro 600 mm Rohrlänge einmal um die Rohrachse.

Das mit 300 U/min rotierende Rippenrohr berührt mit seinen Rippen die beiden Taster immer dann gleichzeitig, wenn die Steigungsabweichungen Null sind. Liegen Abweichungen vor, so wird entweder der eine oder der andere Taster früher oder später berührt. Die örtlichen Steigungsdifferenzen werden so in Zeitdifferenzen umgewandelt.

Bei der Messung der Zeitdifferenzen muß das Vorzeichen beachtet werden, je nachdem, ob die Steigungsabweichungen positiv oder negativ sind. Das wurde impulstechnisch wie folgt gelöst (Abb.15): Bei der Berührung durch die Rippen legen die Tastschneiden einen Weg von ca. $50 \mu\text{m}$ zurück. Dieser Weg wird in eine elektrische Spannung umgewandelt und verstärkt. Die so erzeugten Impulse werden zur Messung ihrer zeitlichen Lage zueinander einer nachgeschalteten Elektronik zugeführt.

Abb.16 zeigt einige Diagramme der Steigungsmessung:

Im jeweils unteren Teil der Diagramme ist der Verlauf der örtlichen Steigungsabweichungen in Grad pro Millimeter über die Rohrlänge registriert; darüber der direkt durch Integration mit einem Analogrechner gewonnene Verlauf der Rippenmantellinie in Grad. Aus ihm geht die Ist-Position der Rippen an beliebigen Rohrstellen hervor. Zur Eichung der Apparatur dient ein Testrohr mit bekanntem Rippenverlauf. Dieser Rippenverlauf kann mit mechanischen Mitteln kontrolliert werden.

4. Anwendung

4.1 Untersuchungen zur thermo- und fluiddynamischen Auslegung von Kernelementen

Für die Auswahl von Abstandshaltern der Kernelemente Schneller Reaktoren ist neben der Herstellbarkeit, Betriebssicherheit und Wirtschaftlichkeit das thermo- und fluiddynamische Verhalten von ausschlaggebender Bedeutung. Als thermo- und fluiddynamisch optimal kann dabei jener Abstandshaltertyp bezeichnet werden, welcher für eine maximal zulässige Hüllrohrwandtemperatur eine möglichst hohe mittlere Kühlmittelaustrittstemperatur ermöglicht und gleichzeitig einen geringen Druckabfall ergibt. Diese Problematik wurde untersucht und dazu umfangreiche Temperaturfeld- und Druckabfallsrechnungen für die wendelförmigen Abstandshaltertypen (1 Wendeldraht, 3-, 6-Wendelrippen) durchgeführt. Für die Rechenmethode wurden Kenngrößen für die Kühlmittelquervermischung und den Druckabfallbeiwert der jeweiligen betrachteten Bündel- und Abstandshaltergeometrie benötigt. Diese Kenngrößen waren aus der Literatur nur unvollständig zu entnehmen. Sie wurden daher in umfangreichen Experimenten bestimmt. Danach wurde die Auswahl des Abstandshalters nach thermo- und fluiddynamischen Gesichtspunkten durchgeführt und die so optimierte Bündelgeometrie in einem out-of-pile Test hinsichtlich des mechanisch dynamischen Verhaltens der Abstützstellen der Stäbe im Bündel über 2 x 1000 Betriebsstunden untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen waren maßgebend für die Untermauerung und Stützung der Auslegung und Durchführung des 19-Stab-Rippenrohrbündel-Bestrahlungsexperimentes Mol 7D im BR2 und bei der Planung von zwei Brennelementen mit je 127 Brennstäben für die Testzone der zweiten Core-Beladung der KNKII.

Kühlmittelquervermischung

Die Kühlmittelquervermischung und die sie kennzeichnende Mischrate wurde in 61-Stabbündelgeometrien mit den spezifischen Abmessungen der Brennelemente des SNR 300 in turbulent strömendem Natrium ermittelt /8/.

Es wurden folgende Bündel untersucht:

Abstandshalter	3-Rippen	6-Rippen
P/D-Verhältnis	1,32	1,32
Steigungshöhe		
H (mm)	300 450	600

In Abb. 17 sind die Ergebnisse dieser Untersuchungen aufgetragen und in Abb.18 die Mischrates als Funktion der Steigungshöhe H für Wendeldraht und Wendelrippen als Abstandshalter. Daraus ist zu entnehmen, daß mit zunehmender Steigungshöhe die Mischrates abnimmt und für $H \rightarrow \infty$ die Werte für Gitterabstandshalter erreicht werden.

Druckverlust

Die Druckverlustbeiwerte wurden in turbulent strömender Luft mit den gleichen Bündeln, wie sie zur Untersuchung an Kühlmittelquervermischung verwendet wurden, bestimmt. Die Ergebnisse sind auf Na-Strömung anwendbar.

Dabei wurden folgende Stabbündel mit Wendelrippenrohren eingesetzt /8,18/

Abstandshalter	3 - Rippen	6 - Rippen	
P/D-Verhältnis	1,32	1,17	1,32
Steigungshöhe			
H (mm)	300 450	600	
Stabzahl	61	37	61

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in der modifizierten Darstellungsweise $\lambda' = f(Re')$ nach /19/ in Abb.19 dargestellt und mit Ergebnissen aus Untersuchungen mit Wendeldrahtabstandshaltern verglichen. Es zeigt sich, daß sich die Ergebnisse trotz der andersartigen Versuchsmethoden, Strömungsmedien und Bündelabmessungen gegenüber /19/ durch die dort gefundene Beziehung gut wiedergeben lassen.

Schiefplastverhalten

Zur Stützung von Auslegungsrechnungen von Bündeln mit großen radialen Leistungsgradienten (schiefe Belastung) waren die verwendeten Rechenprogramme experimentell zu untermauern. Dies ist im Falle von Wendelabstandshaltern von besonderer Bedeutung, weil die Abstandshalter unmittelbar an der Kastenwand eine Wendelströmung erzeugen, welche die Richtung der Abstandshalter besitzt. Hierzu wurden Schiefplastexperimente durchgeführt. Dabei sind 2 Stäbe beheizt (Zentral- und Wandstab) und das Temperaturprofil über den Bündelquerschnitt am Ende der beheizten Zone gemessen und mit vorausgerechneten Profilen verglichen worden.

Typische Ergebnisse einer solchen Untersuchung sind für ein Bündel aus 6-Rippenrohren in Abb. 20 dargestellt. Es zeigt sich, daß die gemessenen Temperaturen durch die rechnerisch ermittelten Werte gut wiedergegeben wurden.

SNR-300-Kernelemente

Mit Hilfe der vorgenannten experimentellen Ergebnisse und der experimentell gestützten Rechenprogramme (z.B. /20/) konnten Vergleichsrechnungen zur Auswahl wendelförmiger Abstandshalter durchgeführt werden, und zwar in /8/ für die Brennelemente des SNR-300 und in /21/ für die Brutelemente des SNR-300.

Die Betrachtungen wurden für folgende Abstandshaltertypen durchgeführt:

- 1 Wendeldraht (Steigungshöhen: 100, 300 mm)
- 3 Wendelrippen (Steigungshöhe : 300 mm)
- 6 Wendelrippen (Steigungshöhe: 600 mm)

Dabei wurde gleiche Wärmefreisetzung im Kernelement angenommen. Die Berechnungen wurden ohne und mit Leistungsgradienten über dem Bündelquerschnitt für folgende Voraussetzungen durchgeführt:

- gleiche mittlere Kühlmittel-Ein- bzw. Austrittstemperaturen
- gleiche max. Kühlmittel- oder Wandtemperaturen im Brennelementquerschnitt
- gleicher Druckabfall bei gleicher mittlerer Kühlmittel-eintrittstemperatur
- gleicher Druckabfall bei gleicher max. Kühlmittelaustrittstemperatur.

Hier sollen nur die wichtigsten Ergebnisse wiedergegeben werden /8/:

- Bei konstant gehaltener mittlerer Kühlmittel-Ein- bzw. Austritts-temperatur ergeben die Bündel mit Wendeldrahtabstandshaltern die höchsten Kühlmitteltemperaturen im Bündelinnern. Sie liegen für das Brennelement bei den vorliegenden Betriebsbedingungen rund 30°C über jenen für die Rippenrohrbündel (Abb. 21).
- Bei konstant gehaltener maximaler Kühlmitteltemperatur im Bündelquerschnitt ergeben sich die höchsten mittleren Kühlmittelaustritts-temperaturen für die Rippenrohrbündel (Abb. 22).
- Bei gleichem Druckabfall und konstant gehaltener Kühlmittel-Eintrittstemperatur besitzt das Rippenrohrbündel die niedrigste mittlere Kühlmittelaustrittstemperatur (Abb. 23).
- Konstant gehaltener Druckabfall und gleiche maximale Kühlmitteltemperatur im Bündelquerschnitt ergeben für das Bündel mit Rippenrohren die höchsten mittleren Austrittstemperaturen (Abb. 24).

Diese Aussagen gelten sowohl für Bündel-Gleich- und Schiefkast, als auch für die geometrischen und betrieblichen Bedingungen des Brenn- und Brutelements des SNR 300. Man erkennt also, daß das Kernelement aus Rippenrohren für eine maximal zulässige Elementwandtemperatur die höchste mittlere Kühlmitteltemperatur ermöglicht und gleichzeitig den geringsten Druckabfall aufweist. Dies ist ein wichtiger Gesichtspunkt für die Erhöhung des thermischen Wirkungsgrades einer Reaktoranlage.

Im sicherheitstechnischen Sinne interpretiert: Für vorgegebene mittlere Ein- und Austrittstemperaturen ergeben Kernelemente aus Rippenrohren den höchsten Sicherheitsabstand zur maximal zulässigen Hüllrohrtemperatur.

Der Vergleich rechnerisch ermittelter Wandtemperaturen für Rippen-, Wendeldraht und Gitterabstandshalter (Abb. 25) wurde in /22/ durchgeführt. Es zeigt sich auch hierbei, daß die geringste Temperaturvariation am Stabumfang durch die Rippenrohr-Abstandshalter bewirkt werden.

Mechanisches Verhalten

Um das Verhalten der Rippenrohr-Abstandshalter in Natrium unter extremen Temperaturverhältnissen an der Abstützstelle der Stäbe im Bündel sowie unter extremen Abmessungstoleranzen zu untersuchen, wurde ein 2 x 1000 Stunden-Langzeitversuch in Natrium durchgeführt /23/:

Na-Temperatur: 600°C

Na-Strömungsgeschwindigkeit im Bündel: 4,6 m/s

Abmessungen des Bündels: SNR-300 Brennelement,
61 Stäbe, 6-Rippenrohr (Abb.26).

Stabdurchmesser: 6 mm

Teilungsverhältnis: 1.317

Der Versuch wurde so durchgeführt, daß sich an der Abstützstelle der Stäbe im Bündel Temperaturen ergaben, die 40°C über der zu erwartenden höchsten Rippenkopftemperatur im Brennelement lagen, und daß gleichzeitig das freie Spiel benachbarter Stäbe größer war, als es im Brennelement eines Schnellen Reaktors spezifiziert ist.

Ergebnis: - Das Abstützverhalten der Stäbe war einwandfrei.
- Die Abstützstellen der Stäbe im Bündel zeigten weder merkbare Korrosion noch mechanischen Abrieb.

4.2 Interatom Arbeiten

Grundüberlegungen zum projektmäßigen Einsatz von Rippenrohren in Kernelementbündeln

Hüllrohre mit integralen Rippen als Abstandshalterung (3 und 6 Rippen) wurden zwischen 1970 und 1973 für Stäbe von folgenden Kernelementen untersucht:

- Brennelemente,
- Brutelemente,
- Absorberelemente.

Diese Arbeiten sind, soweit die industrielle Verfolgung des Konzeptes betroffen, ausschließlich Beiträge von Interatom zu der im allgemeinen gemeinsam von Interatom und Belgonucleaire durchgeführten Kern- und Kernelementauslegung.

Die Vorteile, die das Rippenrohr versprach, waren:

- Enge Packung der Stäbe in einem Element,
- Vermeidung der Überkühlung von Randkanälen des Bündels, d.h. Verringerung von Umfangstemperaturdifferenzen als Ursache von Spannungen und Verbiegungen,
- geringer Druckverlust,
- langfristig günstige Fertigungskosten durch Herstellen von Hülle und Abstandshalter in einem Arbeits- und Prüfgang,

wobei die enge Packung und die Preisgünstigkeit auch vom Wendeldraht geleistet wird.

Die Argumente gegen den Einsatz, die zum Zeitpunkt der Kernelement-Festlegungen bekannt waren und vom Partner Belgonucleaire besonders stark gesehen wurden, sind:

- Selbst langfristig ist die Preisgünstigkeit nicht absehbar,
- Monopolstellung der Firma Mannesmann als Hersteller,
- Prüfbarkeit nicht gewährleistet,
- Herstellbarkeit von kaltverformten Rohren nicht gewährleistet.

Damit wurde vom Einsatz von Rippenrohren für Brenn- und Brutelemente auf absehbare Zeit Abstand genommen, obwohl ein Teil der obigen Argumente durch die weitere Entwicklung nicht mehr gilt. Andererseits steht inzwischen wenigstens für Brennelemente mit dem Konzept des am Kasten mit "Schürzen" befestigten funkenerodierten Abstandshalters ein sicher herstellbares und vom Gesamtverhalten sehr günstiges System zur Verfügung.

Für Absorberelemente, die ausschließlich in der Verantwortung von Interatom liegen, wurden für die Regel-, Trimm- und Zweitabschalt-elemente der KNK II und des SNR-300 (6-)Rippenrohre gewählt.

Brennelemente

Der Vergleich von Rippenrohren gegenüber Gitterabstandshaltern aus thermohydraulischer Sicht ist in /24/ beschrieben. Es ist deutlich, daß das Rippenrohrbündel geringere Druckverluste als der Gitter-Abstandshalter in konventioneller hexagonaler Geometrie aufweist und durch geringere Temperaturformfaktoren als das Wendeldrahtbündel gekennzeichnet ist.

Ebenso deutlich ist, daß die damals entwickelte und heute gültige Abstandshaltergeometrie, die im Funkenerosionsverfahren herstellbar ist, auch dem Rippenrohrkonzept überlegen ist: Der Bündeldruckverlust ist kleiner und das Problem der Temperaturdifferenz über die Randstäbe ist über die Optimierung der Randverstellung möglich - eine Freiheit, die nur das Funkenerosionsverfahren bietet.

Die Entwicklungsarbeiten zum Mark II-Brennelement haben dies bestätigt, wobei die Einführung der Schürze mit ihrer Funktion der Gitterbefestigung und Randverstellung ein entscheidender Schritt in Richtung der Verbesserung von Brennelementeigenschaften war.

Überlegungen, Rippenrohre in Brennelementen einzusetzen, gibt es bis auf weiteres nicht. Die beiden entscheidenden Argumente sind:

- Rippenrohre waren bis vor kurzem nicht in kaltverformtem Zustand herstellbar,
- Im Sinne einer Straffung der Entwicklungsvorhaben wurde neben der unbestrittenen Referenzlösung (f.g. Gitter mit Schürze) das international breit verfolgte Wendeldraht-Konzept als "back-up"-Lösung gewählt. Hier spielt die möglicherweise beim Rippenrohr schwer überschaubare Fertigungs-, Prüf- und Preissituation eine Rolle.

Brutelemente

Die Auswahl des Brutelementkonzeptes erfolgte nicht nach den vorrangigen Gesichtspunkten einer möglichst hohen mittleren Brennelement Austrittstemperatur, sondern wird primär von der Forderung nach einfacher Herstellbarkeit (=Preisgünstigkeit) und dichter Packung (= hoher Brutstoffeinsatz) bestimmt. Zum Zeitpunkt der Festlegung für den SNR-300 (1972) wurden diese Anforderungen in projektmäßig vertretbarer und durchsetzbarer Weise nur von Bündeln mit Wendeldraht-Abstandshaltern erfüllt. Trotzdem wurden bzw. werden die sehr frühzeitig geplanten out-of-pile-Versuche an Rippenrohr-Brutelementbündeln zum Abschluß gebracht /25/ und zwar - neben dem Gesichtspunkt der Vollständigkeit - aus zwei Gründen:

- Das Rippenrohrbündel könnte für Brutelemente weiterhin interessant sein und sei es für He-gekühlte Reaktoren.
- Eine gewisse Absicherung des Einsatzes von Rippenrohr-Brutelementbündeln in der 1. Reflektorreihe der KNK.

Dieser Einsatz von bestrahlungsmäßig allerdings nur wenig beanspruchten Brutelementen mit Rippenrohren in der KNK II (3 Stück, zusätzlich 2 Elemente mit Wendeldraht) hat das Ziel, ein Minimalprogramm zum Rippenrohrkonzept abzuwickeln. Darauf kann zurückgegriffen werden, wenn neben einer dichteren Brutstabpackung die Forderung nach Standzeiterhöhung erhoben wird und dies nur durch Reduktion der Stab-Umfangstemperaturdifferenz erfüllt werden kann.

Abschalt- und Blindelemente

Bereits die Auslegungsarbeiten zu den KNK II-Abschalteinrichtungen zeigten deutlich die Überlegenheit des Rippenrohrbündels gegenüber anderen Konzepten, wobei die vorliegenden konstruktiven Konzepte und Dimensionen der Bündel sich vor allem ergaben aus den Forderungen nach

- geringem Druckverlust
- geringer Umfangstemperaturdifferenz an Randstäben
- hohem B_4C -Einsatz
- Aufbau eines Bündels mit rundem (statt sechseckigem) Querschnitt

Rippenrohrbündel werden eingesetzt für:

KNKII:	Regel-Trimmm-Stab	(5 Einheiten)
	Zweitabschalteinrichtung	(3 Einheiten)
SNR 300/Ia:	Regel-Trimmm-Stab	(9 Einheiten)
	Zweitabschalteinrichtung	(3 Einheiten)
	B_4C -Blindelemente	(6 Einheiten)

Den Stand der technologischen Arbeiten an Rippenrohren zum I. Quartal 1975 gibt /26/. Entsprechend der Wichtigkeit der Absorberstäbe und des vergleichsweise geringen Kenntnisstandes wird ein Bestrahlungsexperiment im DFR an zwei Absorberstabbündeln durchgeführt (DFR 510/1 und 2), und zwar mit je 3 Stäben /27/. Das Bündel DFR 510/2 enthält Rippenrohre aus 1.4988, l.g.; das Bündel /1 glatte Rohre. Bisher wurde ein Abbrand von B_4C von ca. $2,5 \cdot 10^{21}$ capt/cm³ erreicht, das ist 50 % des Zielabbrandes.

Die Werkstoffauswahl für Absorberstäbe war bis in die jüngste Zeit ein zentrales Thema der Absorberstabauslegung. Obwohl für den Normalbetrieb sowohl in KNK II wie SNR-300 die Festigkeit des bis dahin (Mitte 1975)

gewählten Referenzwerkstoffes 1.4981 (l.g. + 15 % kv) ausreichte, zeigten sich bei der Festigkeitsanalyse der Absorberstäbe der KNK II bei den Temperaturen unter Notkühlbedingungen (= Pumpenausfall, Kernkühlung durch Naturumlauf) die Grenzen für 1.4981.

Die höheren Beanspruchungen beim SNR-300 /28/ erforderten die kurzfristige Umstellung auf den wesentlich schwieriger zu verarbeitenden Werkstoff 1.4970 (k.v.).

Hersteller für alle Rippenrohre des SNR-300/Ia wird Accles & Pollock, Birmingham, sein. Die Qualifizierung verläuft bisher positiv /29/.

Die B_4C -Blindelemente des SNR-300 werden ebenfalls mit Rippenrohren ausgerüstet und zwar primär zur Vereinfachung der Abwicklung durch Verwendung möglichst vieler identischer Komponenten.

Stand der Entwicklung

- Rippenrohre sind auch aus kaltverformtem Material herstell- und prüfbar, jedoch ist die Preisentwicklung vorerst nicht abschätzbar.
- Der Projektstand im Na-Brüterprojekt und die entsprechenden Entwicklungsarbeiten schließen den Einsatz von Rippenrohren für Brennelemente aus, die Entwicklung konzentriert sich auf am Kasten befestigte Gitter bzw. als "back-up"-Lösung auf den international breit eingeführten Wendeldraht-Abstandshalter.
- Für Abschaltelemente werden weiterhin Rippenrohrbündel vorgesehen, ebenso wie für die B_4C -Blindelemente.
- Für Brutelemente wäre langfristig der Einsatz von Rippenrohrbündeln zu prüfen, und zwar im Hinblick auf noch dichtere Packung und geringere Beanspruchung durch Stabverbiegung, sofern letzteres eine Standzeiterhöhung ermöglicht. Dies gilt sowohl für He- wie für Na-gekühlte Brüter.

4.3 AEG-Arbeiten

In den Jahren 1966 bis zur Einstellung des Dampfbrüterprojektes 1971 wurden bei der Firmengruppe AEG/GHH/MAN Arbeiten zur Entwicklung eines 300 MW-Prototyp-Kernkraftwerks mit dampfgekühltem schnellen Reaktor durchgeführt. Bereits im Jahre 1969 sind die weiterführenden Arbeiten eingestellt worden, sodaß die wesentlichen Entwicklungsarbeiten bis 1969 abgeschlossen waren. Die Arbeitsergebnisse wurden dokumentiert und in einer abschließenden Sicherheitsstudie 1973 verwendet. Für die Abstandshalterung der Brennstäbe waren Rippenrohre vorgesehen, die insbesondere bei Dampfkühlung mit hohen Kühlmittelgeschwindigkeiten vorteilhaft beurteilt wurden /1, 2/.

Abstandshalteruntersuchung

Die Anforderungen an Stababstandshalter sind im wesentlichen:

- Fixierung der einzelnen Brennstoffstäbe in ihren Positionen.
- Verhinderung von Vibrationen.
- Minimale Behinderung des Wärmeübergangs vom Brennstab zum Kühlmittel.
- Minimale Korrosionsablagerungen im Abstandshalterbereich.
- Geringer Druckverlust des Kühlmittels.
- Gegebenenfalls Erzeugung einer Turbulenz zur Erzielung eines besseren Wärmeübergangs.
- Die Reibkorrosion infolge von Relativbewegungen zwischen Abstandshalter und Hüllrohr soll zu keinen unzulässigen Schäden am Hüllrohr führen.
- Die axiale und radiale thermische Expansion darf nicht behindert werden.
- Die Neutronenabsorption soll möglichst gering sein.
- Die Herstellkosten sollen möglichst gering sein.
- Die exakte Abstandshalterform soll sich reproduzieren lassen.
- Die Inspektion der Bündel soll möglichst wenig beeinträchtigt werden.
- Während des Transportes und nach der Bestrahlung soll der Abstandshalter die Brennstäbe in ihrer Lage fixieren.
- Die Abstandshalterung soll das Zerlegen der Brennstabbündel und die Wiederaufarbeitung nicht erschweren.

Anhand der vorstehenden Anforderungen wurden verschiedene Abstandshalter-typen einer Bewertung unterzogen und darüberhinaus auch gefertigt, um die fertigungstechnischen Fragen sowie die Kosten bei Kleinserie bzw. Großserie beantworten zu können.

Theoretische Arbeiten

Eine umfassende Auslegung der Brennelementbündel setzt eine komplette Analyse der Beanspruchungen und Verformungen voraus. Hierzu gehörte insbesondere eine Studie über den Einfluß der Leistungsverzerrung über das Bündel, auf die Verbiegung und Abstützung der Stäbe gegeneinander und die Kastenwand sowie eine Untersuchung des Schwingungsverhaltens während des Betriebes. Die Untersuchungen hierüber hatten bei Beendigung der DSR-Arbeiten in vielen Detailgebieten erst begonnen. Ein integraler Bündeltest in einem out-of-pile-Versuchsstand lag im Konzept vor.

Da das Reaktorkonzept die Verwendung von Turbulenzförderern vorsah, erfolgte die Abstandshalterung zweckmäßig durch Hüllrohre mit integralen Wendelrippen. Die Herstellbarkeit der Rippenrohre ist heute grundsätzlich gelöst; die erreichten Toleranzen entsprachen damals jedoch nicht voll den Reaktoranforderungen. In verschiedenen Studien wurde in diesem Zusammenhang der Einfluß der Rippenzahl auf die Stab- und Bündel-eigenschaften untersucht. Zur Diskussion standen Ein- bis Sechscrippenrohre. An Einflußgrößen wurden untersucht: Steigung der Rippen, Anzahl der Stützpunkte, Fixierung im Verband, maximale Abstützlänge, Ausgleichsmöglichkeit bei thermischer Ausdehnung, effektive Schwingungslänge der Abstützebenen, Reibkorrosion, Druckverlustverhalten, Quervermischung, Wärmeübertragung, zulässige Steigungstoleranz, Strukturmaterialanteil und Einbaumöglichkeit der Stäbe im Bündel. Eine Analyse der einzelnen Einflußgrößen führte jedoch nicht zu einer eindeutigen Entscheidung für eine bestimmte Rippenrohrvariante. Aus Fertigungsgründen wurde letztlich die Entscheidung für das 6-Rippenrohr getroffen. Bei dem 6-Rippenrohr ist das Problem der Steigungstoleranz fertigungstechnisch noch am ehesten beherrschbar. Es bleiben jedoch die Nachteile des 6-Rippenrohres im Vergleich zum 3-Rippenrohr zu berücksichtigen, geringe Ausgleichsmöglichkeit für die thermische Ausdehnung und höherer Druckverlust im Kern.

4.4 Brennstäbe für die KNK und Überlegungen zur Bündelkonstruktion

Die Planung von 2 Rippenrohrbündeln mit oxidischem Brennstoff wurde mit einer Vorstudie /30/ im Mai 1975 abgeschlossen. Die Ausführung dieser Bündelbestrahlungen wurde zurückgestellt, da einerseits die termingerechte Beschaffung der spezifizierten Hüllrohre Schwierigkeiten bereitete und andererseits die Bestrahlung von zwei Bündeln mit karbidischem Brennstoff als vorrangig betrachtet wurde.

Die KNK-Rippenrohrbündel sollten "in-pile" das Rippenrohrabstandshalter-Konzept bestätigen, wobei die gleichen Betriebsbedingungen wie für die Brennstäbe mit glatten Hüllrohren vorausgesetzt wurden.

Konstruktive Ausführung des Brennelements

Für das Bündel (Abb. 27) sollte ein Hüllkasten verwendet werden, dessen Querschnitt dem des SNR 300-Brennelements entspricht. Es handelt sich also um denselben Hüllkasten, wie er für das Testelement in der KNK II-Zentralposition vorgesehen ist. In dem Sechseckquerschnitt von 105,05 mm innerer Schlüsselweite können 127 Stäbe in regelmäßiger Sechseckanordnung untergebracht werden.

Bei der Ermittlung der Gittergeometrie muß berücksichtigt werden, daß das 6-Rippenrohr-Bündel - im Gegensatz zum 3-Rippenrohr-Bündel oder zum Drahtabstandshalter - nicht elastisch ist, da in jeder Abstützebene sich jeder Stab gegen jeden seiner Nachbarstäbe abstützt. Dadurch wirken sich alle möglichen Abweichungen vom Nennmaß, die die Brennstäbe bei der Herstellung und während des Betriebes erfahren, auf die Bündelschlüsselweite aus.

Bei der Festlegung des freien Spiels im Bündel müssen deshalb folgende Abweichungen vom Nennmaß betrachtet werden:

- Hüllkastentoleranz

Die Maßgenauigkeit der Innen-Schlüsselweite beträgt beim SNR-Hüllkasten $\pm 0,25$ mm. Damit wird $\delta_H = \pm 0,25$ mm.

- Toleranz der Kopfkreisdurchmesser

Die Hüllrohre sind mit einer Toleranz des Kopfkreisdurchmessers von maximal $\pm 0,03$ mm lieferbar. Da mit einer gewissen Streuung der Kopfkreisdurchmesser gerechnet werden kann, soll als realistischer Mittelwert für die Abweichung aller Stäbe vom Nennmaß $h = \pm 0,02$ mm angenommen werden.

Beim 127-Stabbündel (mit $r = 6$ Stabringen um den Mittelstab) ergibt sich damit: $\delta_K = h (1 + 2 r \sin 60^\circ) = \pm 0,23$ mm.

- Spiel durch Rippensteigungstoleranz

Eine Annäherung der Stäbe auf Werte unterhalb des Kopfkreisdurchmessers ist nicht möglich, wenn die Summe der Abweichung zweier sich gegenseitig abstützender Rippen von der Verbindungsgeraden der Stabachse $\leq 7^\circ$ beträgt. Diese Bedingung wird mit den spezifizierten Steigungstoleranzen mit Sicherheit eingehalten, so daß gesetzt werden kann: $\delta_s = 0$.

- Thermische Dehnung

Der Unterschied zwischen der mittleren Temperatur der Brennstabhüllen und der Hüllkastentemperatur beträgt maximal ca. 60°C . Unter Berücksichtigung der Wärmedehnungszahlen für die Hüllmaterialien von $18,0 \cdot 10^{-6}$ (1.4988) und $17,6 \cdot 10^{-6}$ (1.4970) gegenüber der des Hüllkastenmaterials 1.4981 von $19,4 \cdot 10^{-6}$ ergibt sich im warmen Zustand (z.B. 600°C Natriumtemperatur, 660°C mittlere Hülltemperatur) eine relative Durchmesserzunahme des Bündels von maximal: $\delta_T = 0,03 \text{ mm}$.

- Spiel für Schwellen

Für das Bündel ist eine Gesamtneutronendosis ($E > 0,1 \text{ MeV}$) von etwa $5 \cdot 10^{22}$ bis $6 \cdot 10^{22} \text{ n/cm}^2$ zu erwarten. Gemäß der Abbildung 28 /31/ liegt die Volumen-Schwellrate im Temperaturbereich maximalen Schwellens für den Stahl 1.4988 in lösungsgeglühtem Zustand im Bereich von 4 - 5 %. Das heißt, es muß maximal eine Vergrößerung des Stabdurchmessers von $5/3 = 1,67 \%$ angenommen werden. Für den Stahl 1.4970 liegen zwar im lösungsgeglühten Zustand keine Schwellwerte im Temperaturbereich unter 600°C vor, jedoch zeigen Variable Energy Cyclotron-Simulationsexperimente und Bestrahlungsversuche über 600°C , daß sich der Stahl 1.4970 besser verhält als der Stahl 1.4988 /32/.

Als Material des Hüllkastens wird der Werkstoff 1.4981 in kaltverformtem Zustand verwendet, dessen Schwellrate erheblich unter der des Hüllrohrmaterials liegt. Ferner liegt die Hüllkastentemperatur um ca. 50°C unter der mittleren Hülltemperatur, d.h. in einem gewissen Temperaturbereich kann die Schwellrate des Hüllkastens gegenüber der des Hüllrohrmaterials vernachlässigbar klein sein.

Aus den angegebenen Gründen wird es erforderlich sein, sowohl bei Einsatz von 1.4988 als auch von 1.4970 als Hüllmaterial mit einer linearen Schwellrate der Stäbe von $f_{sw} = 1,67 \%$ zu rechnen und gleichzeitig das Schwellen des Hüllkastens zu vernachlässigen; $\delta_{sw} = 1,7 \text{ mm}$.

Das erforderliche rechnerische Gesamtspiel δ_{ges} , zwischen dem Brennstab**ü**ndel und dem Hüllkasten im frischen Zustand, ergibt sich als die Summe der Einzelspiele

$$\delta_{\text{ges}} = +\delta_{\text{H}} + \delta_{\text{K}} + \delta_{\text{T}} + \delta_{\text{sw}} = 2,7 \text{ mm}$$

Die Nennabmessungen der Bündelbauteile sind also so zu wählen, daß bei Addition aller Toleranzen im ungünstigsten Fall ein Spalt zwischen Bündel und Hüllkasten von 2,7 mm entstehen könnte. Unter diesen Umständen würde sich eine extrem ungleichmäßige Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit und der Kühlmitteltemperatur über den Bündelquerschnitt ergeben. Außerdem wäre das Bündel sicher schwingungsanfällig.

Es wird aus diesen Gründen davon ausgegangen, daß das Rippenrohrbündel durch federnde Elemente im Hüllkasten zentriert werden muß. Diese Federelemente sollen so ausgeführt sein, daß der Spalt zwischen Bündel und Hüllkasten für den Natriumdurchfluß weitgehend versperrt ist. Die Federelemente sollen in dem Bereich, in dem Maßtoleranzen ausgeglichen werden müssen, eine relativ weiche Kennlinie aufweisen, damit wird in Kauf genommen, daß in einem gewissen Bereich (bis ca. $\pm 0,5$ mm) das Bündel aus der Mitte auswandern kann. In dem Bereich des Spaltes aber, der zur Aufnahme der Schwellbeträge vorzusehen ist, müssen die Federelemente in der Lage sein, relativ große Kräfte zu übertragen. Damit soll sichergestellt werden, daß auch bei Verbiegen des Bündels relativ zum Hüllkasten noch eine Zentrierwirkung erhalten bleibt.

Abb. 29 zeigt eine mögliche Ausführung der Federelemente. Es ist schematisch ein Schnitt durch einen Teil der Federbleche dargestellt, die in allen 6 Innenflächen des Hüllkastens über annähernd die ganze Stablänge verlaufen sollen. Die Federbleche werden unten durch Stifte am Hüllkasten befestigt und oben - über der Oberkante der Brennstäbe - axial geführt. Die Auslängung der Federbleche, die infolge des Schwellens der Brennstäbe auftritt, erfolgt damit in dieselbe Richtung wie die Längenzunahme der Stäbe selbst.

Am unteren Ende werden alle Stäbe des Bündels an den Blechstegen des Stabhaltegitters befestigt. Das Stabhaltegitter wird aus einem steifen Sechskantrahmen, in den die Stegbleche eingeschweißt sind, gebildet. Am oberen Ende des Bündels ist eine zusätzliche Fixierung der Stäbe gegeneinander - mit Hilfe von Stegblechen ähnlich der unteren Anordnung - vorgesehen.

Das untere Stabhaltegitter ist, wie bei dem Original-KNK II-Brennelement, am Fußstück befestigt; das Fußstück selbst wie auch die Verwirbelungseinrichtung und das Kopfstück sind identisch mit dem KNK II-Brennelement.

In der folgenden Tabelle sind die Hauptdaten des Rippenrohr-Oxidbündels zusammengestellt:

Hüllkasten-Innen-Schlüsselweite	105,05 ± 0,25 mm
Stärke der Federbleche	0,4 mm
verfügbare Schlüsselweite minimal	104,0 mm
freies radiales Spiel maximal (kalt)	1,4 mm
freies diametrales Spiel minimal (heiß) (nach Bestrahlungsablauf)	0,1 mm

Thermo-hydraulische Auslegung des Bündels

Die ersten Arbeiten auf diesem Gebiet liefern zwei Ergebnisse:

- a) den Druckverlust im Brennelement (einschließlich Kopf- und Fußstück) in Abhängigkeit vom Durchsatz (Abb. 30)
- b) den Temperaturformfaktor in Abhängigkeit vom radialen Leistungsformfaktor des Brennstabbündels (Abb. 31).

Die Rechnungen wurden mit dem Code MISTRAL-II /20/ durchgeführt, der Mittelwerte der Unterkanaltemperaturen liefert. Dabei war zu gewährleisten, daß die Wandmittentemperatur des Hüllmaterials $T_{\max, \text{EXTR}}$ an keiner Stelle des Bündels 685°C /33/ überschreitet.

Schlußfolgerung

Diese Studie hat gezeigt, daß ein genehmigungsfähiges Rippenrohr-Testbrennelement für den Einsatz in der KNK II ausgelegt werden kann. In dem vorgesehenen Brennstabbündel aus Hüllrohren mit Wendelrippen muß für Fertigungstoleranzen und für differentielles Materialschwellen ein ausreichendes freies Spiel zur Verfügung stehen. Dadurch wird es erforderlich, zwischen Bündel und Hüllkasten federnde Elemente vorzusehen. Im übrigen entsprechen der konstruktive Aufbau und die Ausführung der Einzelkomponenten des Testelements weitgehend denen der normalen KNK II-Brennelemente.

4.5 19-Stab-Brennelementbündel im BR2

Einleitung

Neben den Untersuchungen zum Verhalten von SNR-spezifischen Einzelbrennstäben unter Bestrahlung werden Experimente durchgeführt, welche dem Nachweis des sicheren Funktionierens einer Vielzahl von Brennstäben in einem Brennstabbündel dienen.

Bei den bisherigen Bündelexperimenten, die in den Reaktoren BR2 (Mol 7-A, Mol-7B) DFR (350 und 455) sowie RAPSODIE durchgeführt wurden, kamen ausnahmslos Brennstäbe mit Glattrohren und gitterförmigen Abstandshaltern zum Einsatz.

Im vorliegenden Bestrahlungsexperiment, in dem unter der Bezeichnung Mol-7D ein Bündel mit 19 Stäben im 500 kW/Na-Loop des BR2 bestrahlt wurde, kamen zum ersten Mal Rippenrohre zum Einsatz (Abb. 32).

Für die Erprobung des Konzeptes wurde das 6-Rippenrohr verwendet, da hier der technische Stand in Bezug auf Herstellung und Prüfung am weitesten fortgeschritten war.

Die pauschale Aufgabenstellung, ein Brennelement aus Hüllrohren mit integralen Wendelrippen zu untersuchen, wurde folgendermaßen detailliert:

Stabverhalten

- Untersuchung der geometrischen Veränderung der Stäbe mit Rippen bei unterschiedlicher thermischer Belastung
- Untersuchung lokaler Veränderungen an den Stützstellen nach der Bestrahlung

Bündelverhalten

- Untersuchung des geometrischen Zustandes des Bündels nach der Bestrahlung
- Untersuchung der axialen und radialen Temperaturverteilung des Kühlmittels im Bündel während der Bestrahlung

Das Versuchsziel liegt in der Beschreibung des Verhaltens des Bündels sowie der Rippenrohr-Brennstäbe während der Bestrahlung sowie des Zustandes nach der Bestrahlung. Die thermo- und fluiddynamische Auslegung des Experimentes sowie die Spezifikationen wurden seitens GfK/IRB/IMF erstellt.

Die für das Bündel verwendeten Hüllrohre wurden von der Firma Mannesmann hergestellt und bei GfK/IMF geprüft und ausgewählt.

Die Brennstäbe wurden bei der Firma Alkem gefertigt und bei der GfK/IMF assembliert. Nach der Montage des Bündels an den Loopeinsatz begann im Mai 1975 die Bestrahlung, die nach einem störungsfreien Betrieb im Oktober 1976 beendet werden konnte. Nach ca. 300 Volllasttagen betrug der Abbrand der Bündel-Eckstäbe 85000 MWd/t Oxid. Es wurde keine Spaltproduktfreisetzung im Covergas des Loopeinsatzes beobachtet, so daß man davon ausgehen kann, daß alle Stäbe intakt sind. Nach einer Abklingzeit von ca. 35 Wochen wird mit der zerstörungsfreien und zerstörenden Nachuntersuchung begonnen.

Spezifikation

Für Brennstoff, Brutstoff und Brennstab wurde die Spezifikation der der KNK II-Brennstäbe für die Testzone angepaßt. Die wichtigsten Daten für den Brennstab sind im folgenden wiedergegeben:

Brennstoff

- Chemische Zusammensetzung:

Material	UO ₂ -PuO ₂ -Mischoxid
Pu-Anteil	30 ± 1 Gew.-%
O/Me-Verhältnis	1,98 ± 0,02

- Tablettengeometrie:

Durchmesser	5,05 ± 0,01 mm
Höhe	5,10 ± 0,05 mm

- Tablettendichte:

86,5 %

Brutstoff

- Chemische Zusammensetzung:

Material	UO ₂ , abgereichert
O/Me-Verhältnis	2,00 ± 0,020

- Tablettengeometrie:

Durchmesser	5,05 ± 0,02 mm
Höhe	5,05 ± 0,05 mm

- Tablettendichte:

96,5 ± 2 % TD

- Tablettensäulenlänge:

Brennstoff	500 ± 2 mm
Brutstoff (unten)	6 ± 1 mm
Brutstoff (oben)	60 ± 1 mm

Hüllmaterial

- Werkstoff-Nr.	1.4988
- Abmessungen:	
Außendurchmesser	6,0 ± 0,03 mm
Innendurchmesser	5,2 ± 0,03 mm
Wandstärke	0,4 ± 0,03 mm
Rippenhöhe	0,95 ± 0,03 mm
Rippenbreite	0,60 ± 0,03 mm
Rippensteigung	600 mm
Kopfkreisdurchmesser	7,9 ± 0,03 mm

Brennstäbe

- Innerer Aufbau:

Der Stabaufbau orientiert sich an dem Experiment Mol-7B, wonach sich folgender Aufbau ergibt:

Oberer Endstopfen	20 mm
Führungsstück mit Feder	228 mm
Oberer Spaltgasraum	85 mm
Oberes Blanket	60 mm
Brennstoffsäule	500 mm
Unteres Blanket	6 mm
Unterer Spaltgasraum	162 mm
Unterer Endstopfen	<u>24 mm</u>
Gesamtlänge	1085 mm

- Füllgas: >90 % He

Bündelstruktur

- Aufbau:

Das Bündel besteht aus einer hexagonalen Anordnung von 19 Brennstäben (s. Abb. 32) /38/. Die Brennstäbe sind in einem Fußstück fest montiert und von einem Sechskant-Bündelrohr umschlossen. In Höhe der oberen Endstopfen der Stäbe befindet sich ein Gitter zur Aufnahme von Thermoelementen für die Messung der Unterkanaltemperaturen.

- Abmessungen:

Gesamtlänge	1170 mm
Stabdurchmesser	6 mm
Stabteilung	7,9 mm
Schlüsselweite	39,6 mm
Wandstärke Bündelrohr	2,0 mm

Auslegungsdaten

- Brennstoff:

Für die Auslegungsrechnungen wurde das Rechenprogramm SATURN-1 /34/ verwendet.

- Hülle:

Die Auslegungsrechnungen bezogen sich auf das Glattrohr. Hierzu wurden die im SATURN-Programm angegebenen Standardwerte für das Hüllmaterial der Werkstoff-Nr. 1.4988 verwendet.

- Bündel:

In Abb. 33 ist die innere Geometrie des Na-Loops mit Angabe der Stableistung mit dem thermisch isolierten Bündel gemäß der Anordnung Mol-7B dargestellt. Die Auslegungsrechnungen beschränkten sich auf thermohydraulische Aussagen, wobei von den Erfahrungen hinsichtlich Temperaturen und Stableistungen sowie Kühlmitteldurchsätzen des Experimentes Mol-7B ausgegangen wurde.

- Betriebsbedingungen für die Auslegungsrechnungen:

	Eckstab	Wandstab	Innenstab
Stableistung (W/cm)	450	419	358
Hülloberflächentemperatur (°C)	593	590	584
Kühlmittleintritt (°C)		460	
Durchsatz (kg/s)		1,0	1,9
Bestrahlungszeit (h/Vollast)		8000	
Abbrand, mittel (MWd/kg M)		80	

Abb. 33 zeigt auch die Verteilung der Stableistungen auf die Einzelstäbe, wobei in erster Näherung der Zentralstab die gleiche Stableistung wie die Innenstäbe hat.

Auslegungsrechnungen

Thermische Brennstabauslegung :

Mit den angegebenen Betriebsbedingungen wurden für die drei unterschiedlich belasteten Stäbe Rechnungen bis zur Vollastbetriebsdauer von 8000h ohne thermische Zyklen durchgeführt. Bei einer Anfahrtdauer von 10 h, obigen Bedingungen und Zeiten ergeben sich die im folgenden zusammengestellten Temperaturverteilungen und Brennstabstrukturänderungen. Aufgeführt sind für die einzelnen Stäbe jeweils die zu Beginn der Bestrahlung auftretenden Maximalwerte sowie der Endzustand nach 8000 h:

		Eckstab	Wandstab	Innenstab
Stableistung	(W/cm)	450	419	358
Temperatur T_{Ha}	(°C)	593	590	584
$\Delta T_{H\ddot{u}lle}$		46	43	37
T_{Hi}	(°C)	639	633	621
$\Delta T_{Spalt, maximal}$		200	181	149
$T_{Ba, t 10 h}$	(°C)	839	814	770
$T_{Bi, t 10 h}$	(°C)	2536	2476	2255
$T_{Ba, t = 8000 h}$	(°C)	835	809	766
$T_{Bi, T = 8000 h}$	(°C)	1765	1733	1790
$r_{Z, maximal}$	(mm)	1,54	1,48	1,02

In allen Fällen schließt sich der Spalt Brennstoff-Hülle nach der Zeit von $\sim 10^2$ h, wesentliche Kontaktdrucke treten jedoch selbst nach längeren Zeiten nicht auf.

Mit dem im Brennstab enthaltenen Füllgas ergibt sich bei einer mittleren Plenumtemperatur von 600 °C und 80 %-iger Spaltgasfreisetzung ein Gesamtdruck von: $P = 75$ at.

Hüllrohrbeanspruchung:

Es treten keine Beanspruchungen durch Brennstoffkontaktdruck auf. Ebenso kann ein Gasdruck von ca. 80 at als unkritisch angesehen werden.

Thermohydraulische Bündelauslegung:

Die in /30/ und /38/ durchgeführten vorläufigen Rechnungen basieren auf den mit Mol-7B gemachten Erfahrungen. Mit Hilfe des Programmes MISTRAL-II sind die Kühlmitteltemperaturen am Ende der Brennstoffsäule berechnet worden. Die Ergebnisse sind in der Abb. 34 dargestellt, wobei Kühlmitteldurchflüsse von 1,0 und 1,9 kg/sec angenommen wurden. (Die thermische Auslegung bezieht sich auf den zweiten Fall). Bei einem mittleren hydraulischen Durchmesser von 2,889 mm beträgt der Druckverlust $0,37 \text{ kp/cm}^2$. Die detaillierte thermodynamische Auslegung ist in /38/ enthalten.

5. Zusammenfassung

Hüllrohre mit integralen Wendelrippen können sowohl für Brenn- und Brutelemente als auch für Absorberelemente verwendet werden. Neben ausführlichen Studien zur Herstellung, zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung, zum thermohydraulischen und mechanischen Verhalten /35, 36/ von Rippenrohren wurden anhand von theoretischen Arbeiten und experimentellen Untersuchungen die Vor- und Nachteile des Rippenrohrkonzepts im Vergleich zum Wendeldraht- und Gitterabstandshalterkonzept nachgewiesen.

Bei den Firmen AEG und Interatom wurden ebenfalls zahlreiche theoretische und experimentelle Untersuchungen zu diesem Thema durchgeführt.

Unter den bereits angeführten Vorteilen des Rippenrohres wie

- geringer Druckverlust im Bündel
- günstige Temperaturverteilung im Bündelquerschnitt
- kleiner Stabmittenabstand
- Fertigung von Hülle und Abstandshalter in einem Arbeitsgang
- einfache, kostensparende Assemblierung
- sichere Fixierung der Stabmittenachsen während des Betriebes
- Abstützstellen am kältesten Punkt des Stabumfangs
- Günstige Wiederaufarbeitung abgebrannter Bündel

hat der Vorteil der Verringerung des Stabmittenabstandes für das Brennelement eines Hochleistungsbrüters hohes Gewicht. Für die Brennelemente der KNK II und des SNR 300 werden zur Zeit Gitter- und Wendeldrahtabstandshalter bevorzugt, da dafür die Herstellungstechnologien besonders gut entwickelt sind. Für die Regel-, Trimm- und Zweitabschaltelemente sowie für die Brutelemente der KNK II und des SNR 300 wird jedoch das Rippenrohr vorgesehen.

Da die besonders großen Vorteile des Rippenrohres im Vergleich zu anderen Abstandshalterkonzepten erst bei kleinem Brennstabdurchmesser und -abstand für das Brennelement des Hochleistungsbrüters zur Geltung kommen, wurde der Einsatz von zwei Oxidbrennelementen mit Rippenrohren in der KNK II zunächst verschoben. Die Studie dazu hat aber gezeigt, daß mit diesem Konzept eine genehmigungsfähige Bündelkonstruktion zu erstellen ist.

Das 19-Stab-Bündel-Experiment Mol 7D im BR2 mit brüterspezifischem Stabaufbau (erreichter Abbrand ca. 85000 MWd/t Oxid) hat durch seinen fehlerfreien Bestrahlungsablauf gezeigt, daß auch bei einem SNR-300-typischen Stabmittlenabstand das Rippenrohrkonzept sicher funktioniert und große Vorteile mit sich bringt.

Literatur:

- /1/ B. Affelt u.a.:
Dampfgekühlter Schneller Reaktor 300 MWe-Prototyp, 1. Teil:
Technische Beschreibung, (1970) unveröffentlicht
- /2/ F. Ammentorp-Schmidt u.a.:
Entwicklungsprogramm "Dampfgekühlter Schneller Reaktor", Zusammenfassender
Bericht, 3. Teil: Brennelemententwicklung und Kreislaufkontamination,
BMBW-FB K 72-18, Oktober 1972
- /3/ P. Engelmann u.a.:
Bericht über die im Kernforschungszentrum Karlsruhe durchgeführten
Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zum dampfgekühlten schnellen Brüter,
KFK-1970, Dezember 1970
- /4/ M. Fischer:
Durchführbarkeitsstudie für den Schnellen Hochflußtestreaktor FR-3,
KFK-1356, März 1971
- /5/ H. Hoffmann, G. Hofmann, S. Leistikow:
Experimentelle Untersuchungen des Druckverlustes und des Langzeitver-
haltens der Abstützstellen an einem Modell-Brennelement aus Incoloy 800-
Rohren mit sechs integralen Wendelrippen als Abstandshalter in einer
isothermen Heißdampfströmung, KFK-1028, September 1969
- /6/ W. Baumann, V. Casal, H. Hoffmann, R. Möller, K. Rust:
Brennelemente mit wendelförmigen Abstandshaltern für Schnelle Brut-
reaktoren, KFK-768, April 1968
- /7/ H. Hoffmann, K. Rust:
Temperatur- und Spannungsverteilungen in Brennstabhüllen mit wendelförmigen
Abstandshaltern für dampfgekühlte Schnelle Brutreaktoren,
KFK-805, Juni 1968
- /8/ H. Hoffmann:
Experimentelle Untersuchungen zur Kühlmittelquervermischung und zum Druck-
abfall in Stabbündeln mit wendelförmigen Abstandshaltern. Einfluß der Er-
gebnisse auf die Auslegung von Brennelementen Schneller Natriumgekühlter
Reaktoren, KFK-1843, Dezember 1973

- /9/ H. Hoffmann, E. Baumgärtner:
Experimental Investigations of the Thermodynamic Behaviour of Fast Breeder Reactor Fuel Elements with Different Spacer Types,
IAEA-SM-173/20, Brüssel, 2. - 6. Juli 1973
- /10/ P. Engelmann, F. Erbacher, G. Karsten, L. Ritz:
Bericht über die im Kernforschungszentrum Karlsruhe durchgeführten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zum Dampfgekühlten Schnellen Brüter, KFK-1370, Dezember 1970
- /11/ D. Freund u.a.:
Vorstudie zur Bestrahlung von Rippenrohr-Oxid-Brennelementen in KNK II,
unveröffentlicht
- /12/ K.H. Witt:
Rippenrohre für Brennelementhüllen, Kolloquium über Reaktorrohre,
Mannesmann-Werke, Düsseldorf, 9. November 1971
- /13/ N. Niehaus:
Rohrfertigung, Kolloquium über Reaktorrohre, Mannesmann-Werke,
Düsseldorf, 9. November 1971
- /14/ D. Vollath, O. Jacobi:
Qualitätskontrolle an Brennstoffen, Hüllrohren und Brennstäben,
Beitrag XV. im KFK 1999, September 1974
- /15/ O. Jacobi:
Hüllrohre mit integralen Wendelrippen und deren geometrische Vermessung,
KTG Reaktortagung Karlsruhe, April 1973, S.271-74
- /16/ O. Jacobi:
Einrichtung zum kontinuierlichen Messen des Kopfkreisdurchmessers,
PT-OS-2113141, September 1972
- /17/ O. Jacobi:
Steigungsmeßgerät, Patent Nr. 2226961, Juli 1973

- /18/ H. Tschöke:
Experimentelle Bestimmung des Druckverlusts an einem 37-Stabbündel aus
Röhren mit integralen Wendelrippen pro Stab als Abstandshalter,
KFK-1038, Februar 1970
- /19/ K. Rehme:
Systematische experimentelle Untersuchung der Abhängigkeit des Druckver-
lusts von der geometrischen Anordnung für längsdurchströmte Stabbündel
mit Spiraldrahtabstandshaltern, Dissertation, Technische Universität
Karlsruhe, 1967
- /20/ W. Baumann;
MISTRAL II, Thermohydraulischer Mischströmungsalgorithmus für Stabbündel
KFK-1605, Juni 1972
- /21/ H. Hoffmann, H.H. Frey, E. Baumgärtner:
(1972) unveröffentlicht
- /22/ W. Baumann, H. Hoffmann, K. Rust:
Auswahl von Abstandshaltern für die Brennelemente Schneller Brutreaktoren
Proceedings, Int. Meeting "Fast Reactor Fuel and Fuel Element", ANS/KTG,
Kernforschungszentrum Karlsruhe, September 1970, S.248-69
- /23/ E. Baumgärtner, H.U. Borgstedt, G. Drechsler:
Untersuchungen des Langzeitverhaltens der Abstützstellen an einem Modell-
Brennelement aus Hüllrohren mit sechs integralen Wendelrippen als Abstands-
halter in einer isothermen Natriumströmung, KFK-1723, September 1973
- /24/ J. Heinecke:
(1971) unveröffentlicht
- /25/ B. Hess, H.J. Blumberg:
(1975) unveröffentlicht
- /26/ H. Braun:
Stand Rippenrohre für Absorber, (1975) unveröffentlicht

- /27/ H. Miemczyk:
(1974) unveröffentlicht
- /28/ H. Többe:
(1974) unveröffentlicht
- /29/ H. Braun, J. Wessels:
(1976) unveröffentlicht
- /30/ D. Freund u.a.:
(1975) unveröffentlicht
- /31/ K. Ehrlich, K. Herschbach, W. Schneider:
Schwellen und Kriechen von Hüllwerkstoffen unter Bestrahlung
KFK-1999, September 1974
- /32/ K. Ehrlich:
(1976) unveröffentlicht
- /33/ SNR 300 Sicherheitsbericht, (1971) unveröffentlicht
- /34/ H. Kämpf, H. Elbel, F. Depisch:
Das Rechenprogramm SATURN 1a für Brennstäbe, KFK 1575, September 1972
- /35/ K. Laßmann:
Untersuchungen zum mechanischen Verhalten von zylindrischen Brennstäben
eines Kernreaktors, KFK-1853, November 1973
- /36/ R. Krieg:
Zur Berechnung der Spannungen und Verzerrungen in zweifach zusammen-
hängenden prismatischen Körpern mit Rechenbeispielen für ein längs-
beripptes Brennstabhüllrohr, KFK-1665, Oktober 1972
- /37/ W. Baumann, R. Möller:
Experimental Study of Coolant Cross Mixing in Multirod-Bundles,
Atomkernenergie 14-56, 1969
- /38/ E. Baumgärtner, H. Hoffmann, K. Rust:
Thermo- und fluiddynamische Auslegung des 19-Stabbündels mit 6 Rippen-
rohren - Mol 7D, unveröffentlicht, 1975

Tabelle 1: Zusammenstellung der Rippenrohrlieferungen (Stand April 1976)

Glattrohr-Abmessung: Außendurchmesser u. Wanddicke (mm)	Anzahl der Rippen	Rippenhöhe (mm)	Werkstoff-Nr.	Hersteller	Geplante Verwendung
4,7 x 0,30	6	0,50	1.4988	MW	Brennstab
6,0 x 0,40	3	0,95	1.4401	MW	Th.hydr.Exp.
6,0 x 0,40	6	0,95	1.4988	MW	Brennstab
6,0 x 0,38	3	0,95	AISI 316	A&P	Brennstab
7,0 x 0,40	6	0,60	Incoloy 800	MW	Brennstab
7,0 x 0,40	6	0,90	Incoloy 800	MW	Brennstab
7,0 x 0,40	6	0,90	1.4988	MW	Brennstab
7,1 x 0,55	3	0,90	1.4988	MW	Fert.Experimente
9,5 x 0,50	6	0,60	1.4981	MW	Brutstab
9,5 x 0,50	6	0,60	1.4981	MW	Brutstab
10,3 x 0,80	6	0,25	1.4981	MW	Regelstäbe
10,3 x 0,80	6	0,25	1.4550	MW	Regelstäbe
16,1 x 0,50	3	0,45	1.4981	MW	Regelstäbe
16,1 x 0,50	3	0,45	1.4981	MW	Regelstäbe
15,5 x 1,50	6	0,55	1.4981	A&P	Regelstäbe
16,1 x 0,65	6	0,25	1.4981	MW	Brutstäbe
18,1 x 0,50	6	0,50	1.4981	MW	Brutstäbe

A&P $\hat{=}$ Accless & Pollock, England

MW $\hat{=}$ Mannesmann-Röhrenwerke AG.

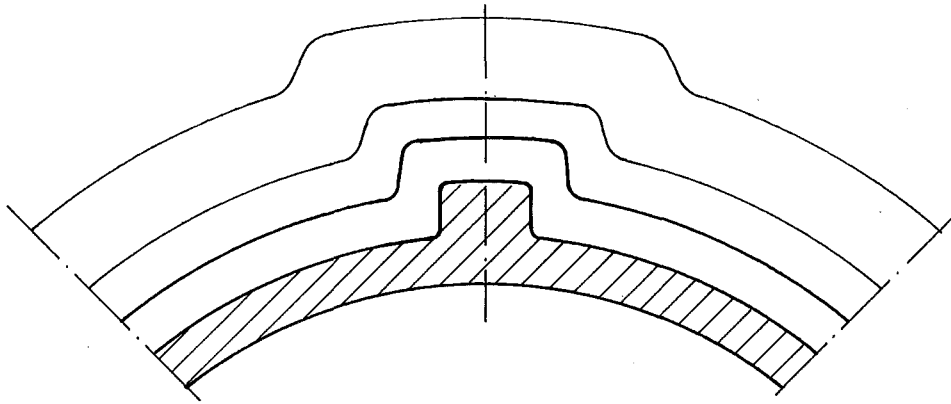
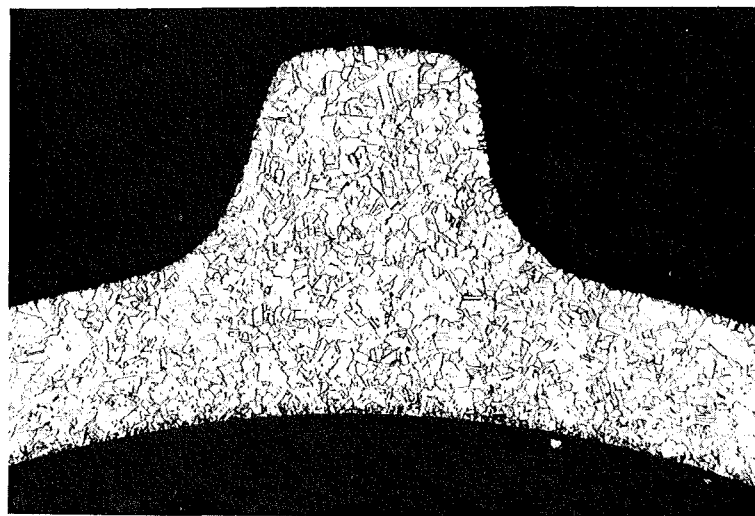


Abb. 1 Kalibrierung einer einzelnen Rippe vom ersten bis zum letzten Profildzug



100 : 1

Abb. 2 Gefüge und Korngröße von 6-Rippenrohren

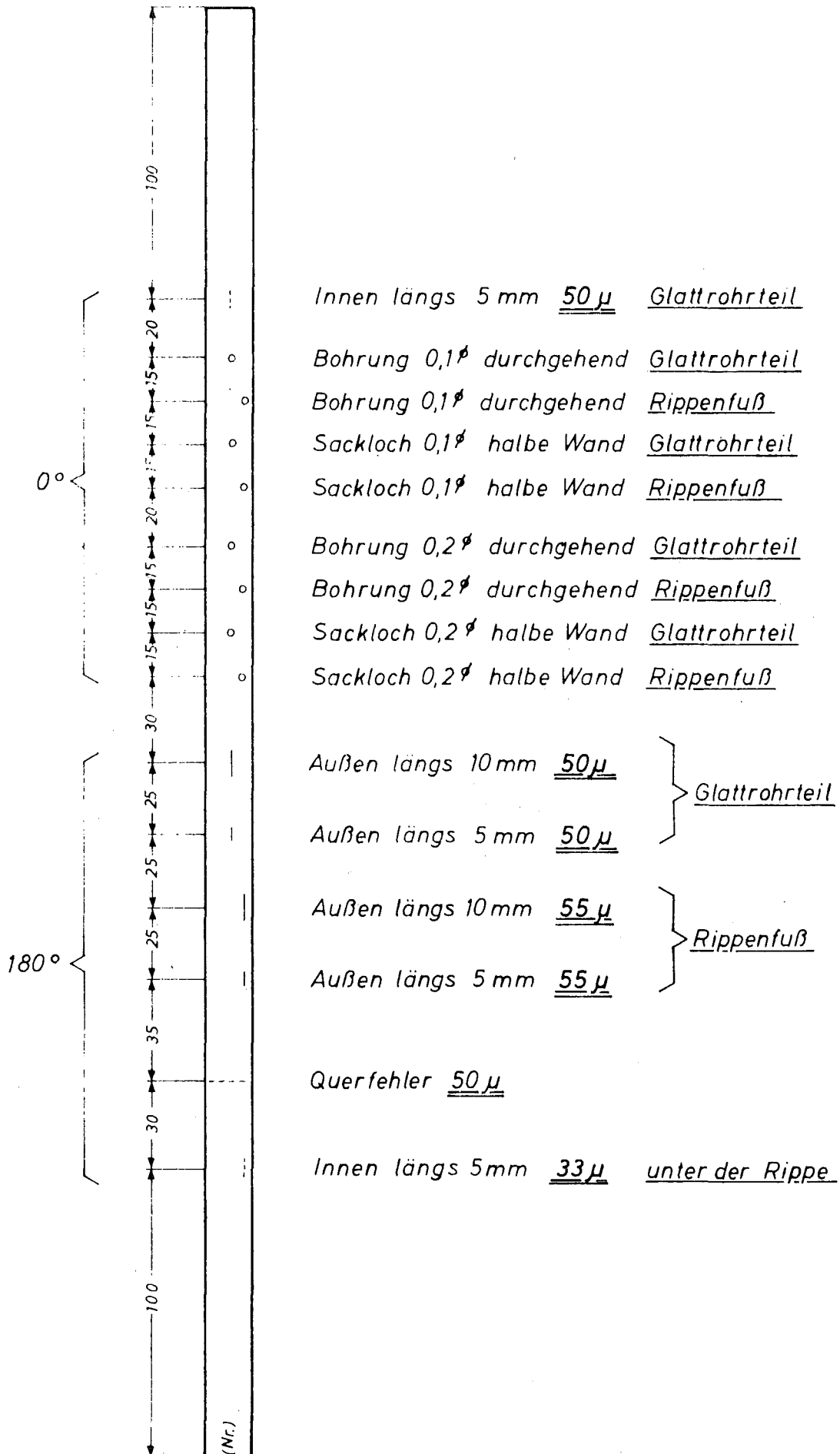


Abb. 3 Anordnung der Testfehler in einem 6 Rippenrohr

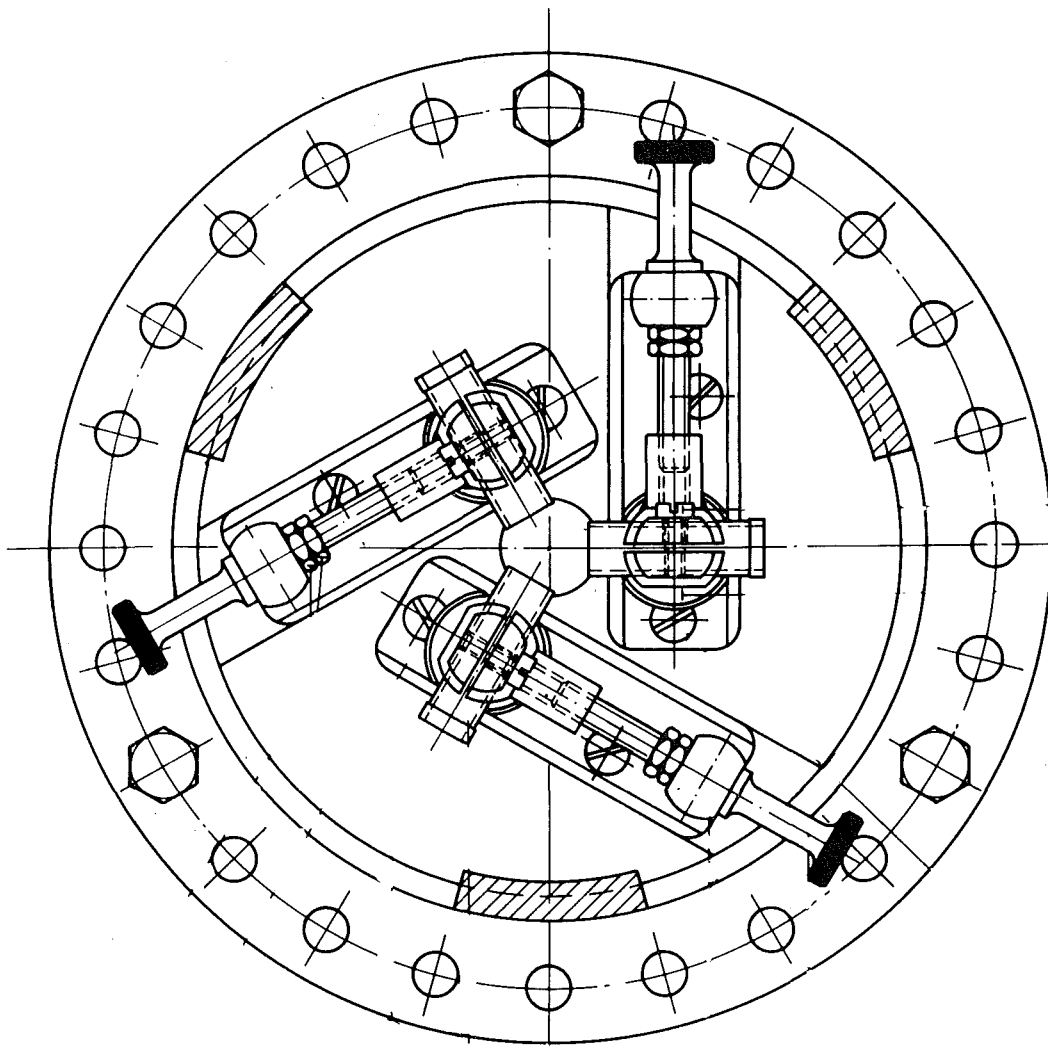


Abb. 4 Prüfscheibe für Längs- und Querfehler-Prüfung

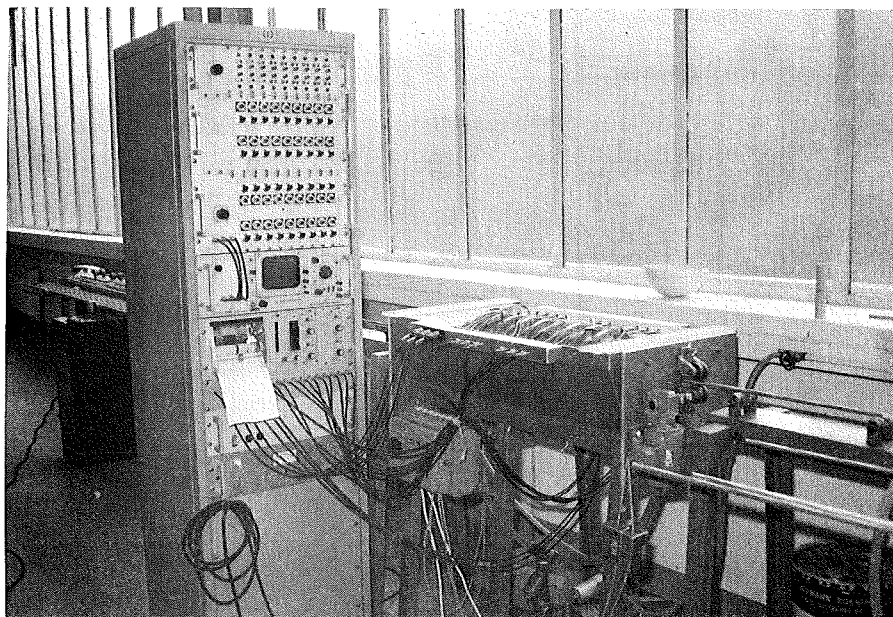
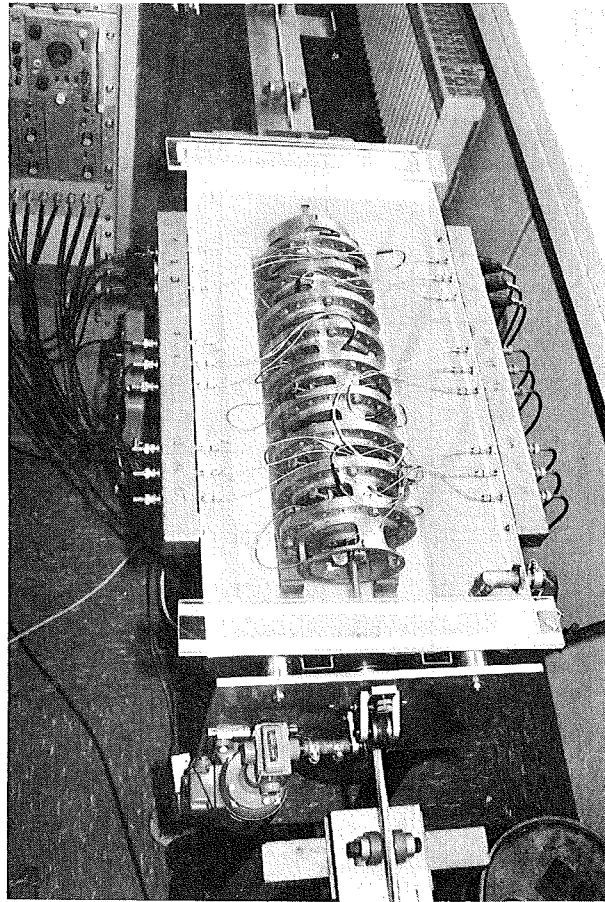


Abb. 5 Ultraschall - Prüfblock und Prüfanlage

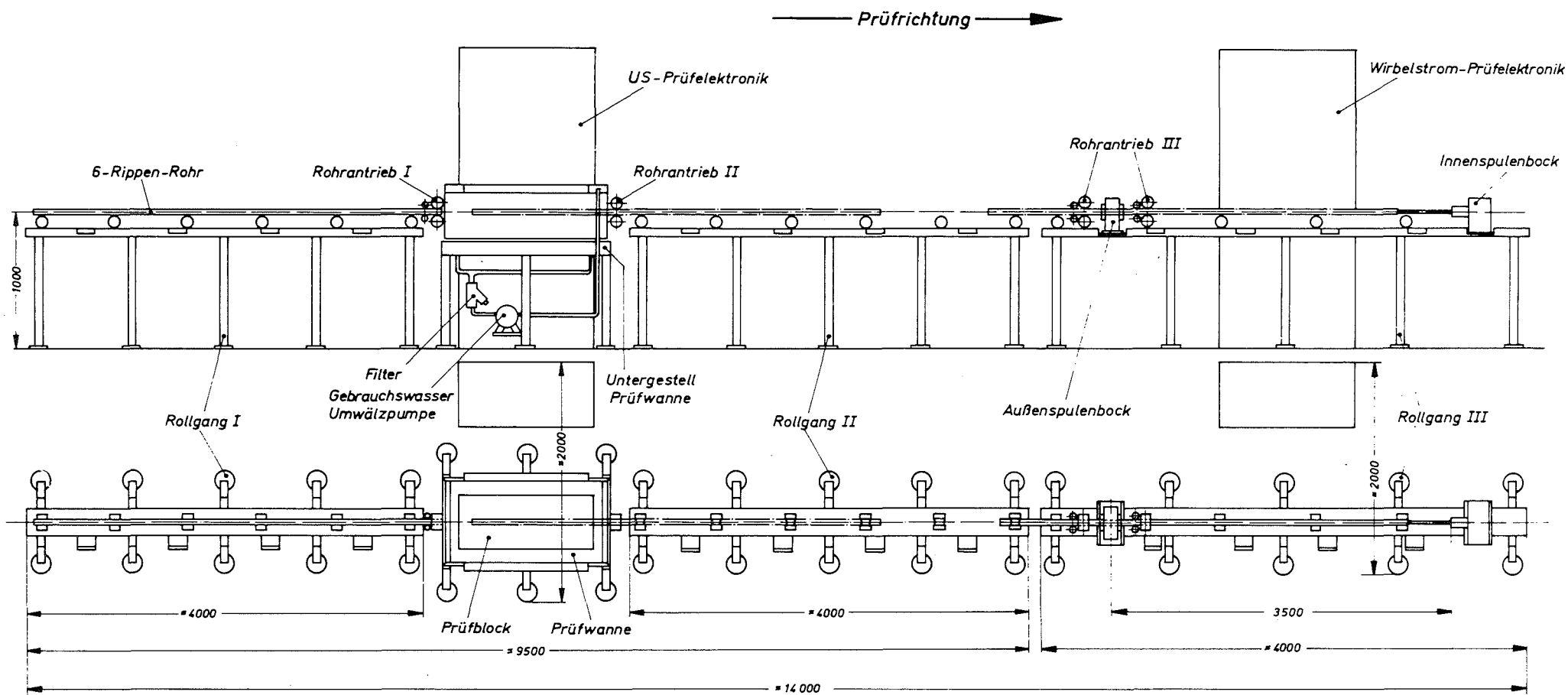


Abb. 6 Rippenrohr - Prüfanlage, Ultraschall und Wirbelstrom

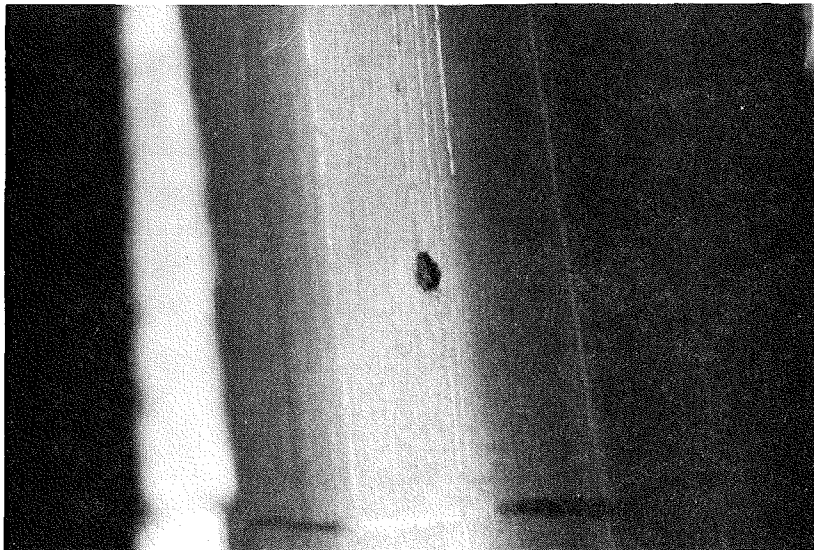
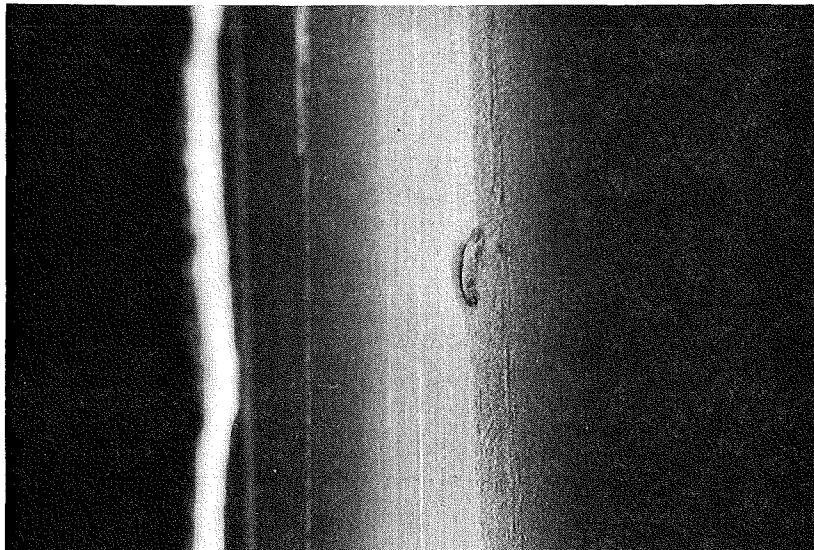
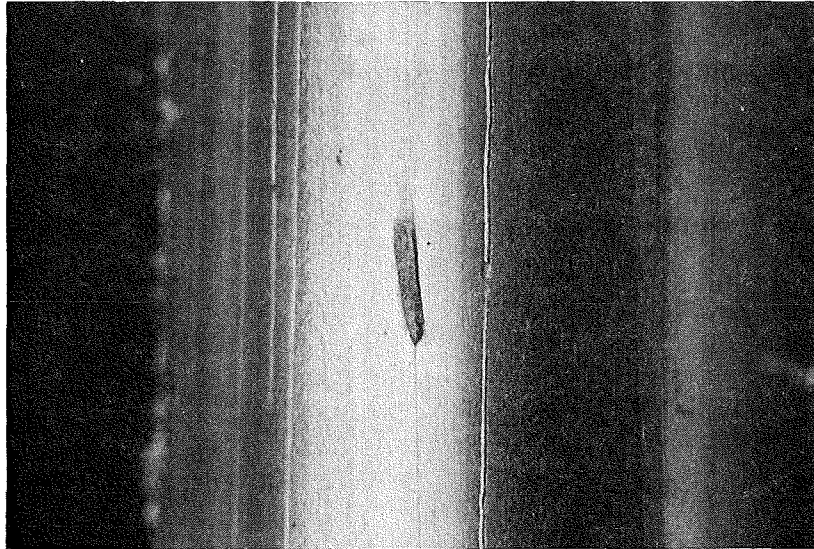
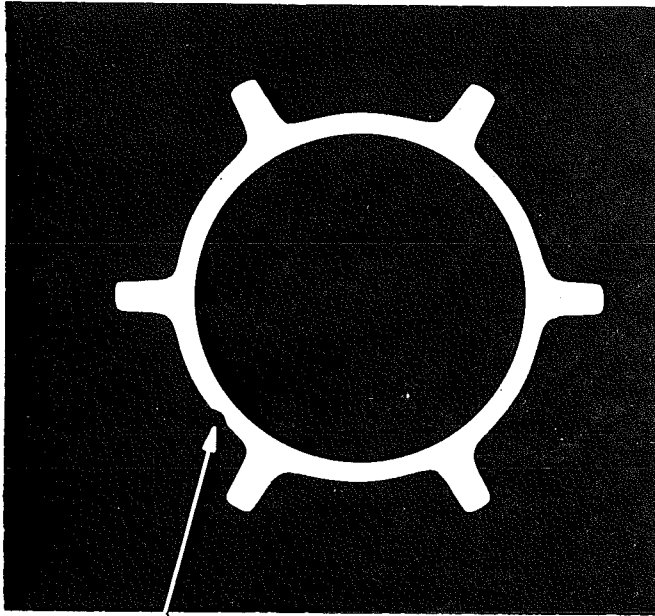
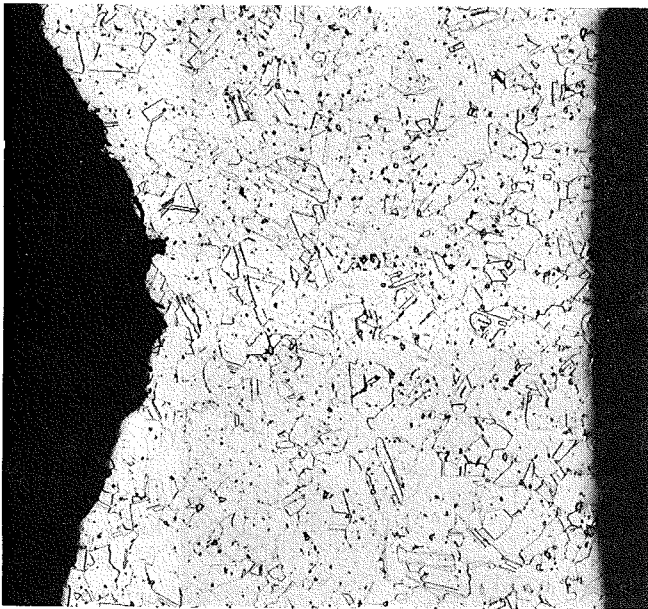
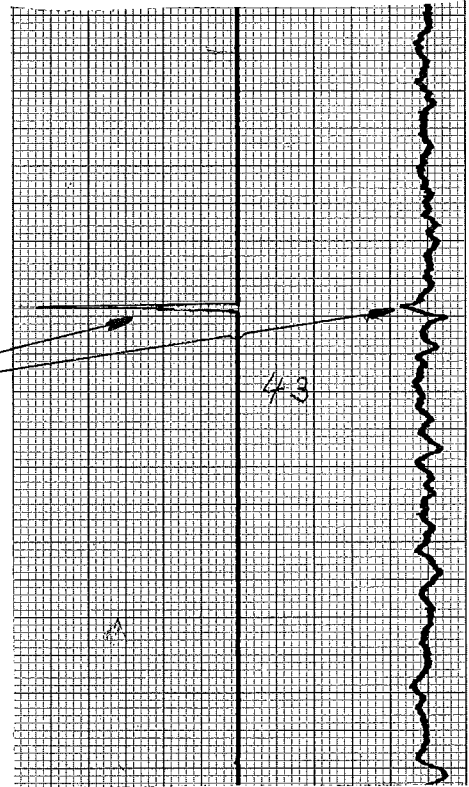


Abb. 7 Natürliche Fehler in Rippenrohren (x 10)



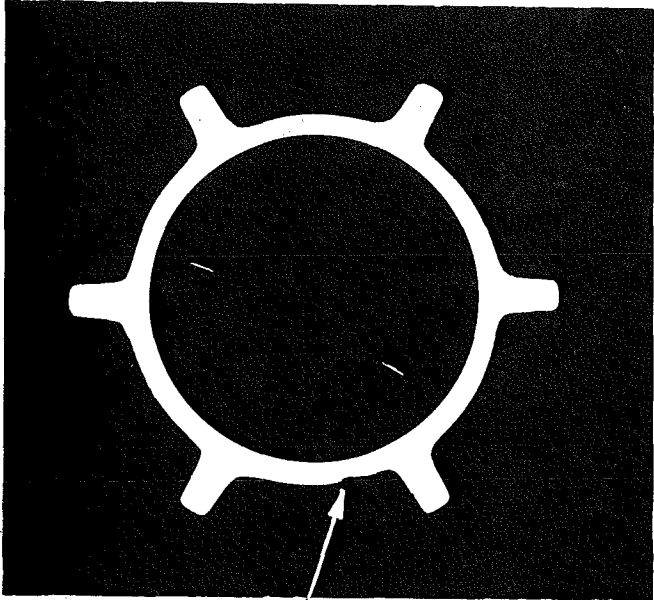
x 8

Fehlerstelle



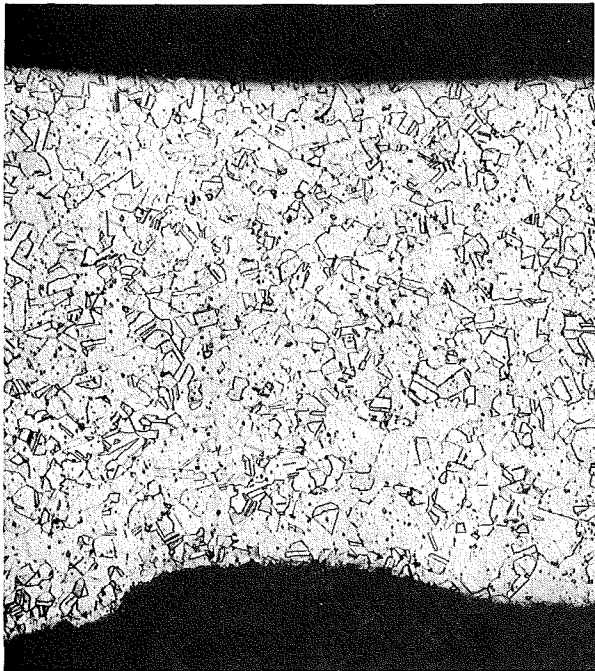
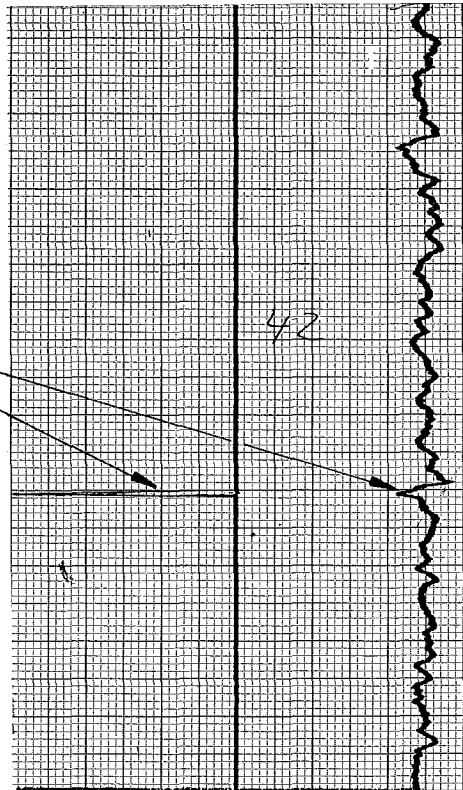
x 200

Abb. 8 Wirbelstromprüfung, Stab D3 Mol 7 D



x 8

Fehlerstelle



x 200

Abb. 9 Wirbelstromprüfung, Stab B6 Mol 7D

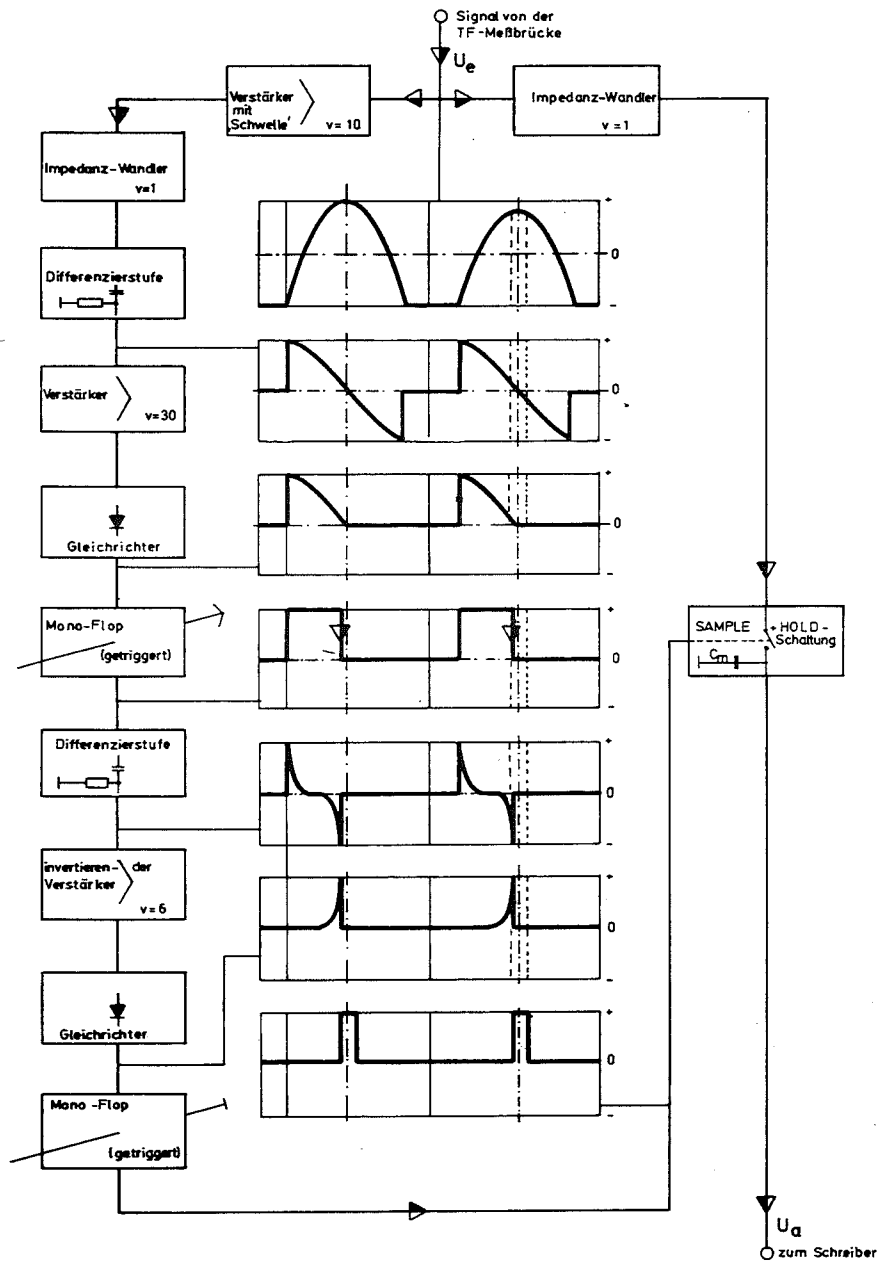


Abb. 11 Blockschaltbild: Meßgerät zur kontinuierlichen Messung des Kopfkreisdurchmessers

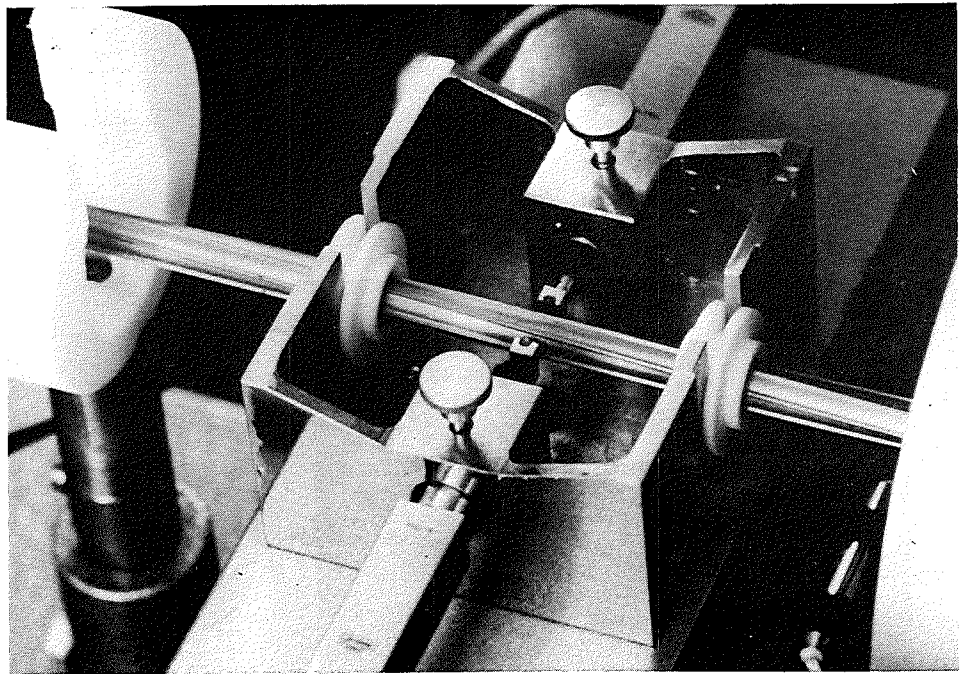


Abb. 10 Meßvorrichtung: Kopfkreisdurchmesser

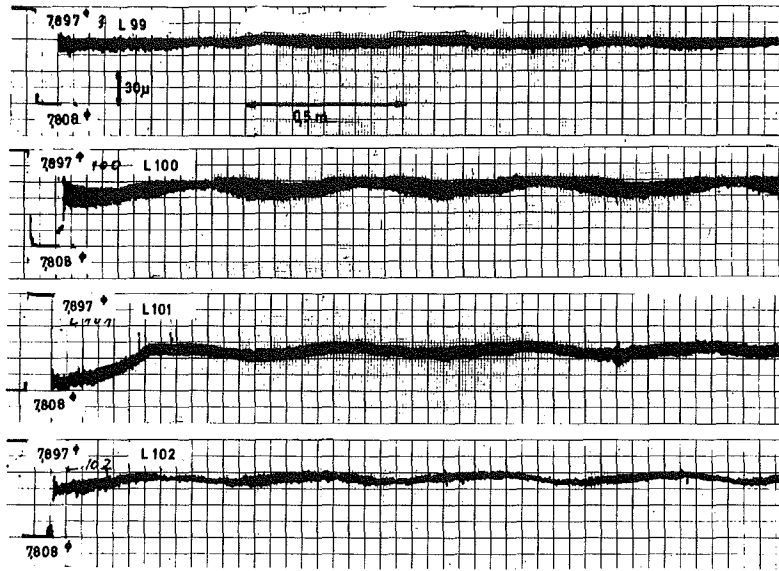


Abb. 12 Kopfkreisdurchmesser

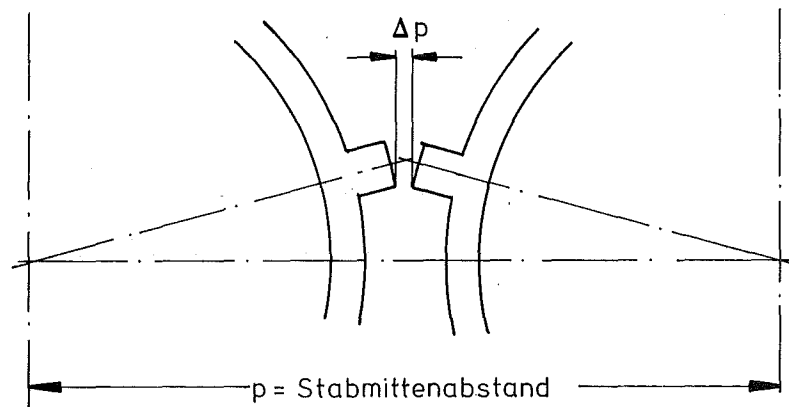


Abb. 13 Einfluß von Steigungsabweichungen

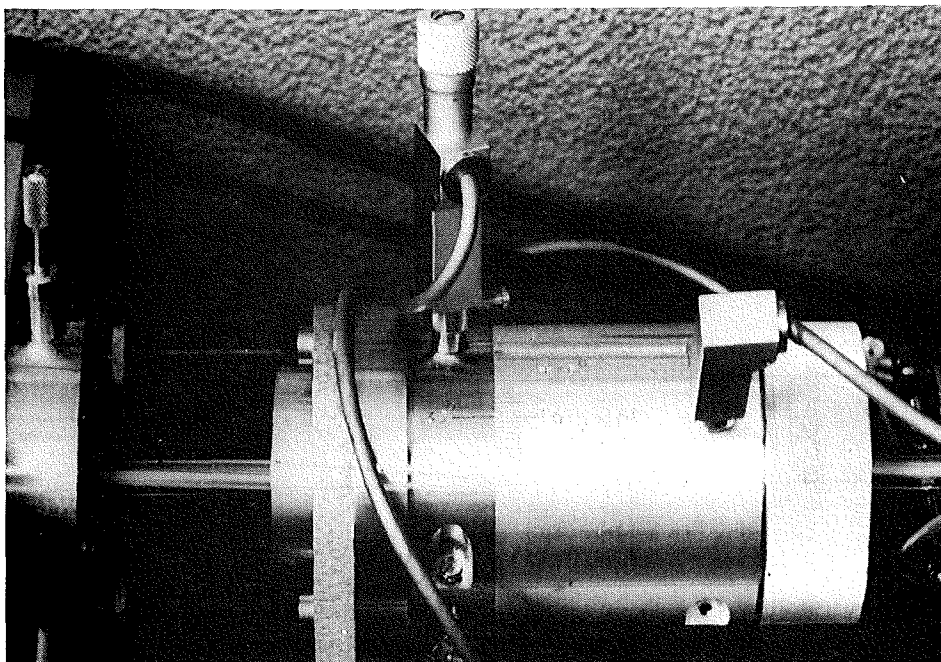
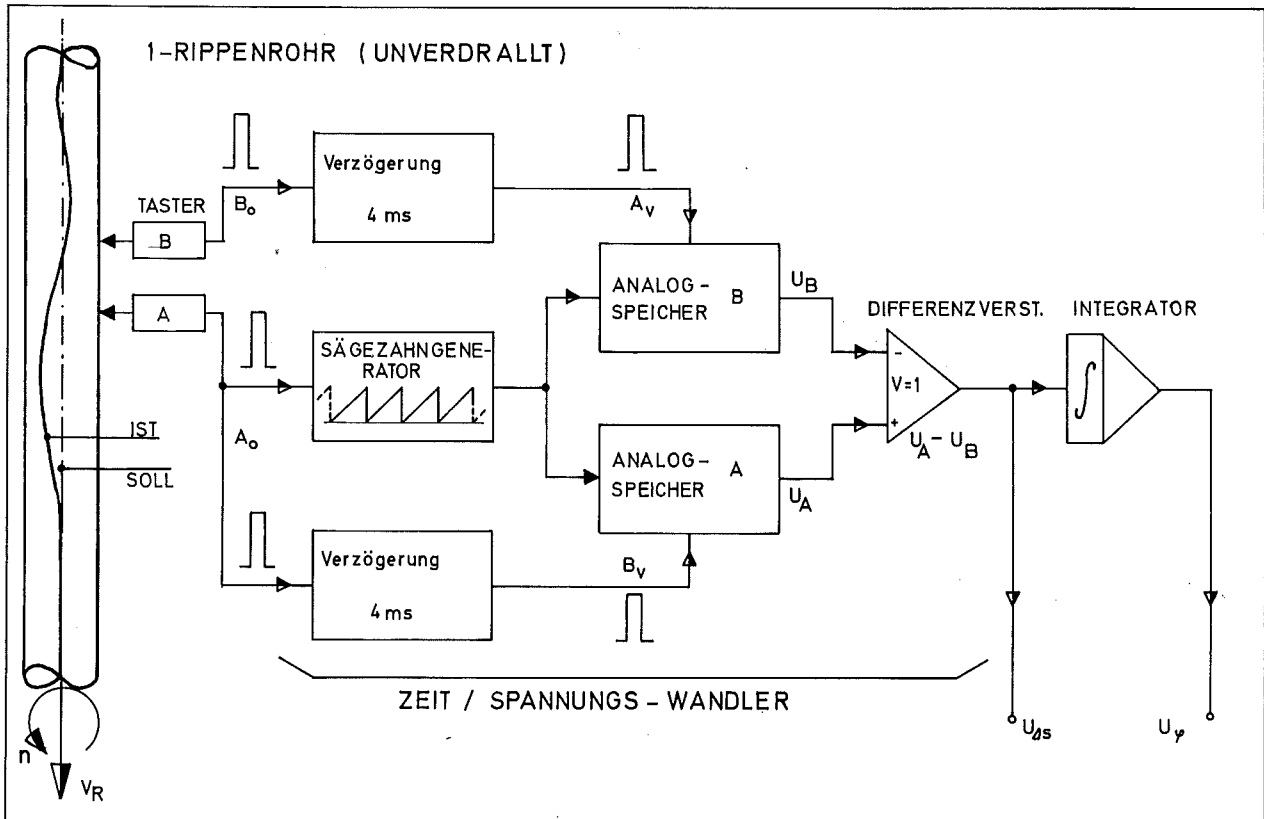
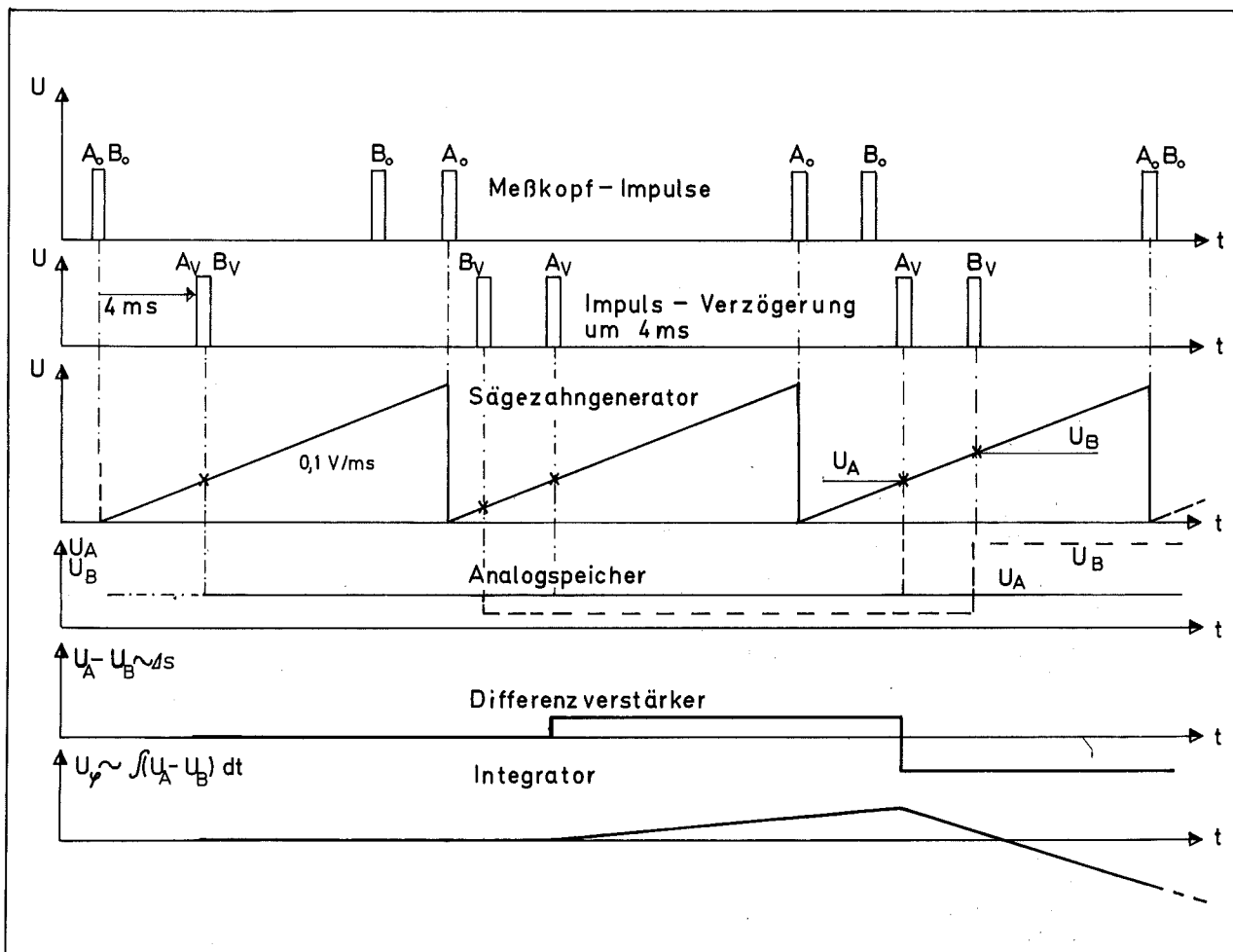


Abb. 14 Steigungsmeßkopf



BLOCKSCHALTBIKD : STEIGUNGSMESSGERÄT
ROHRPRÜFUNG



Impulsschema STEIGUNGSMESSGERÄT

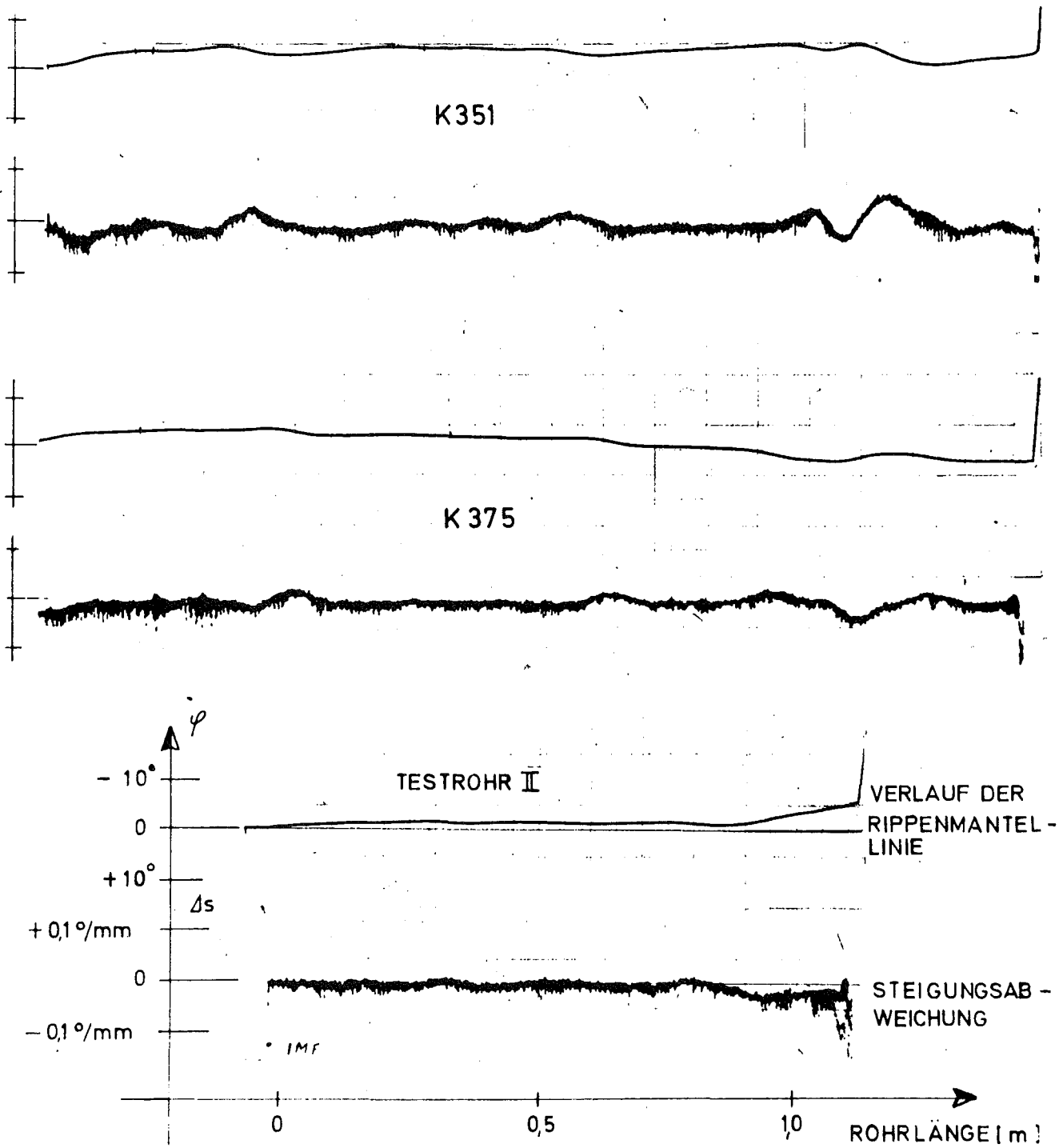


Abb. 16 Meßdiagramme: Steigungsmessung

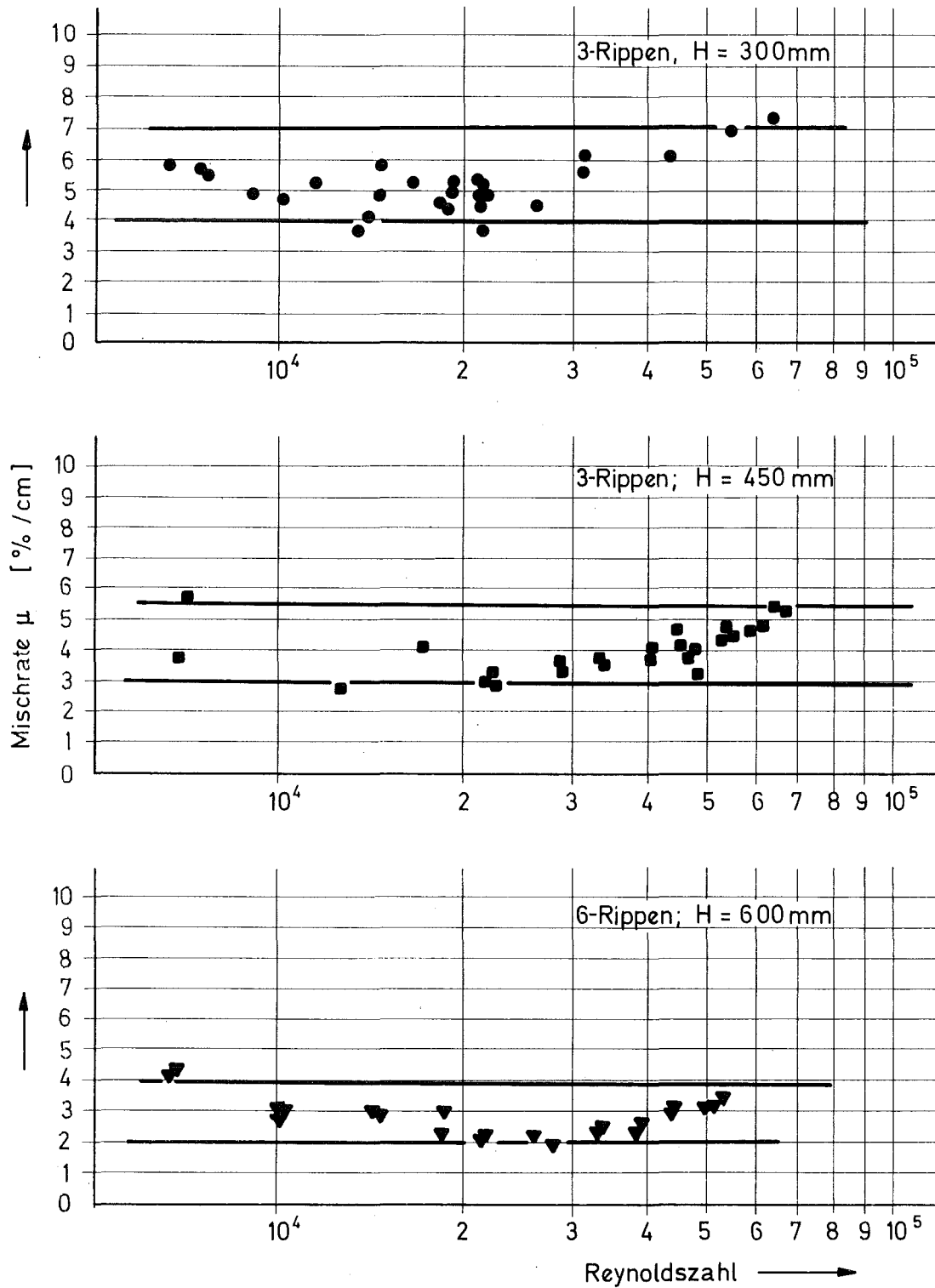


Abb. 17 Mischrate als Funktion der Reynoldszahl für 61-Stabbündel aus Rohren mit 3 und 6 Rippen pro Stab als Abstandshalter ($P/D=1,32$)

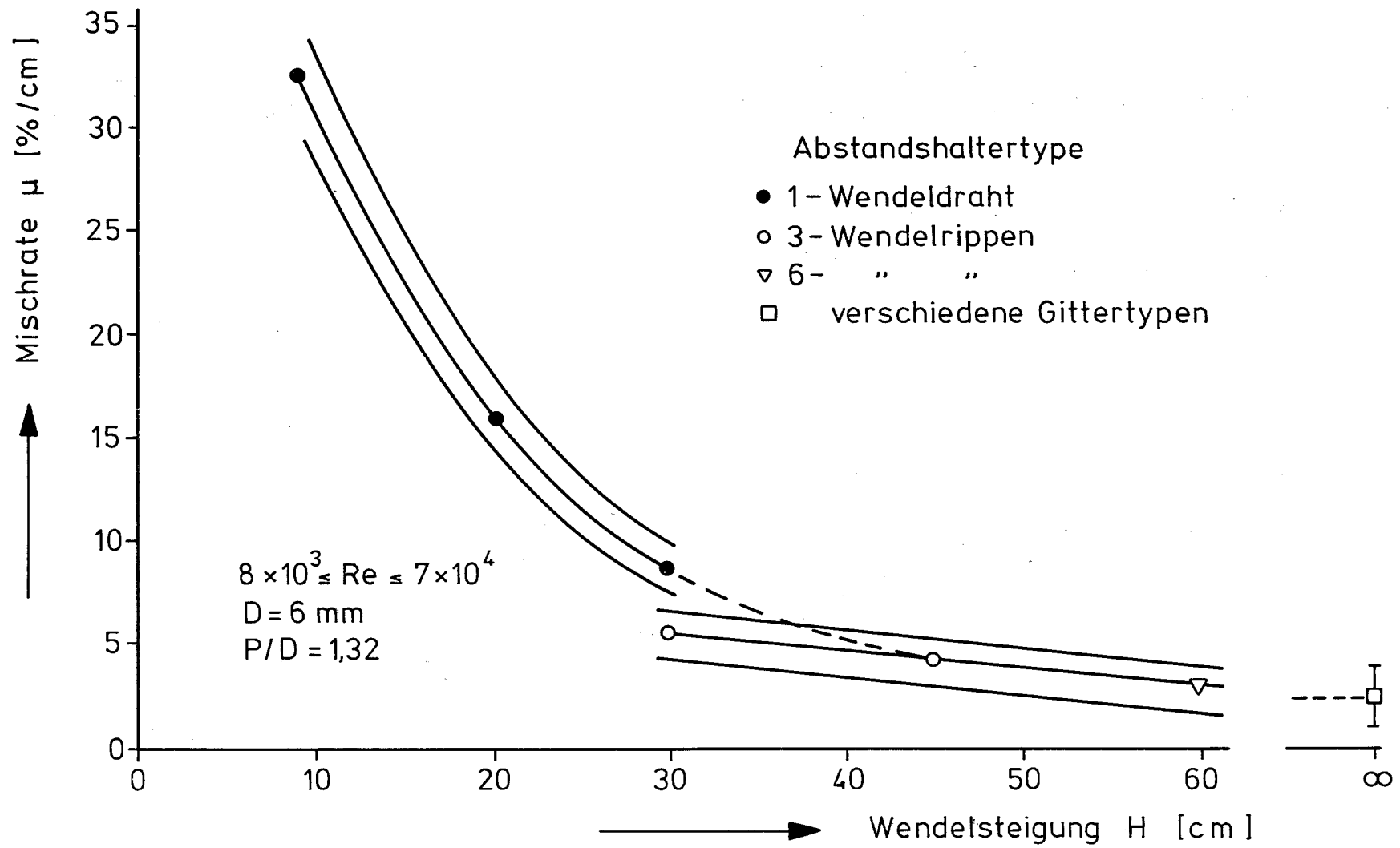


Abb. 18 Die Mischrate als Funktion der Steigung für Wendeldraht- und 3 (6) -Wendelrippenabstandshalter

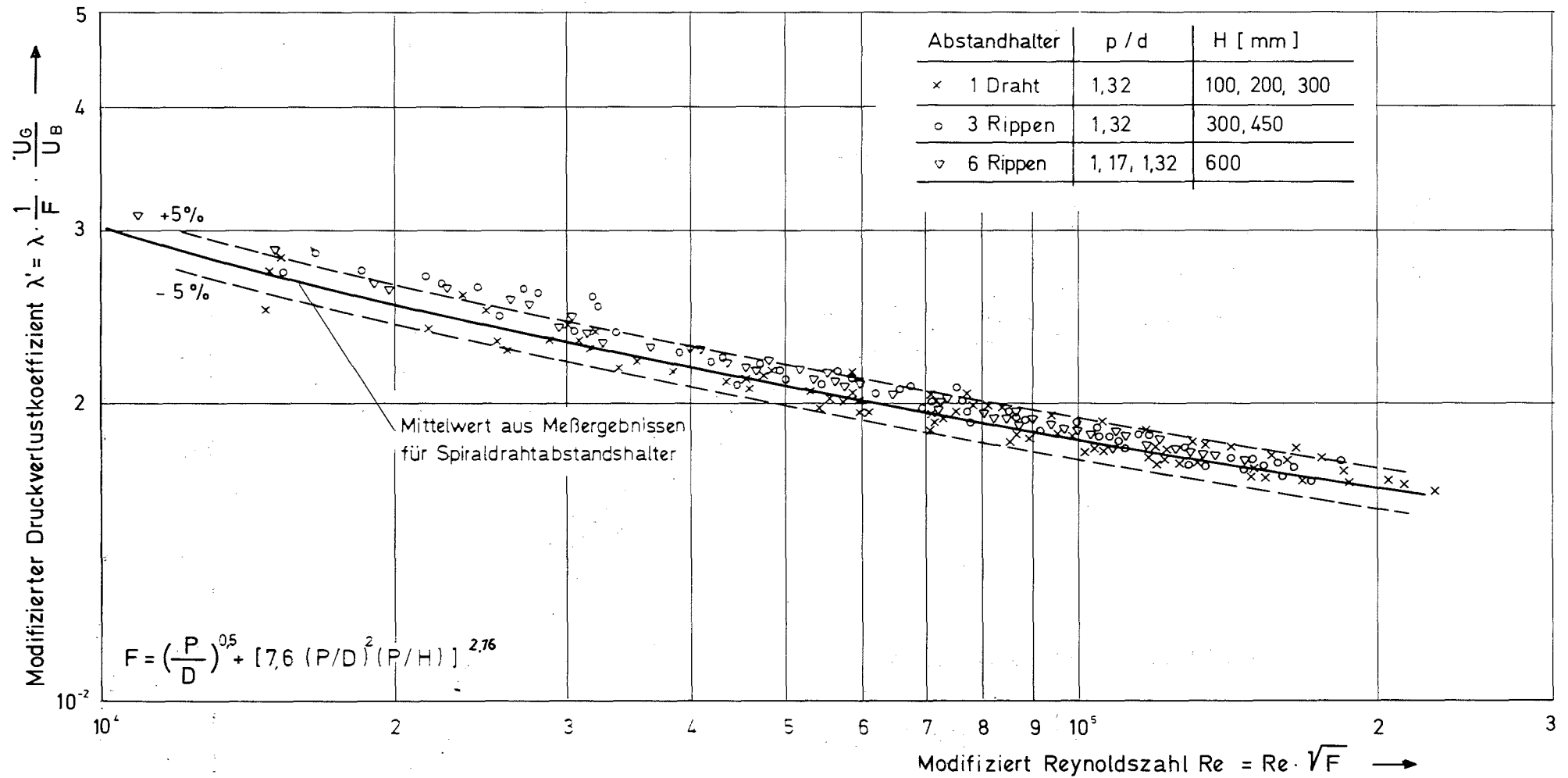


Abb. 19 Vergleich der Ergebnisse aus Druckverlustmessungen für Bündel mit hexagonaler Stabanordnung und 1 Draht, 3-Rippen und 6-Rippen pro Stab als Abstandhalter

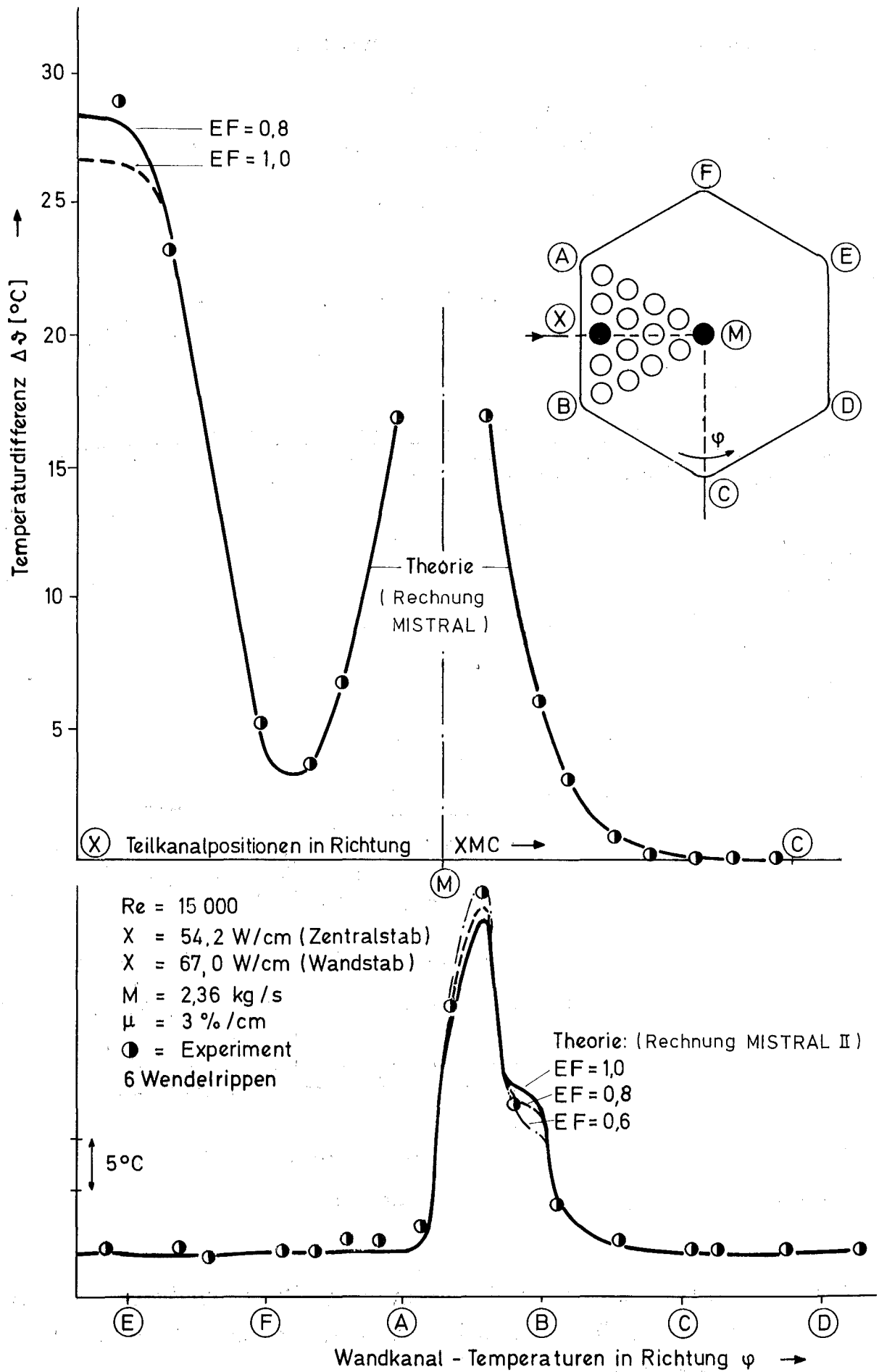
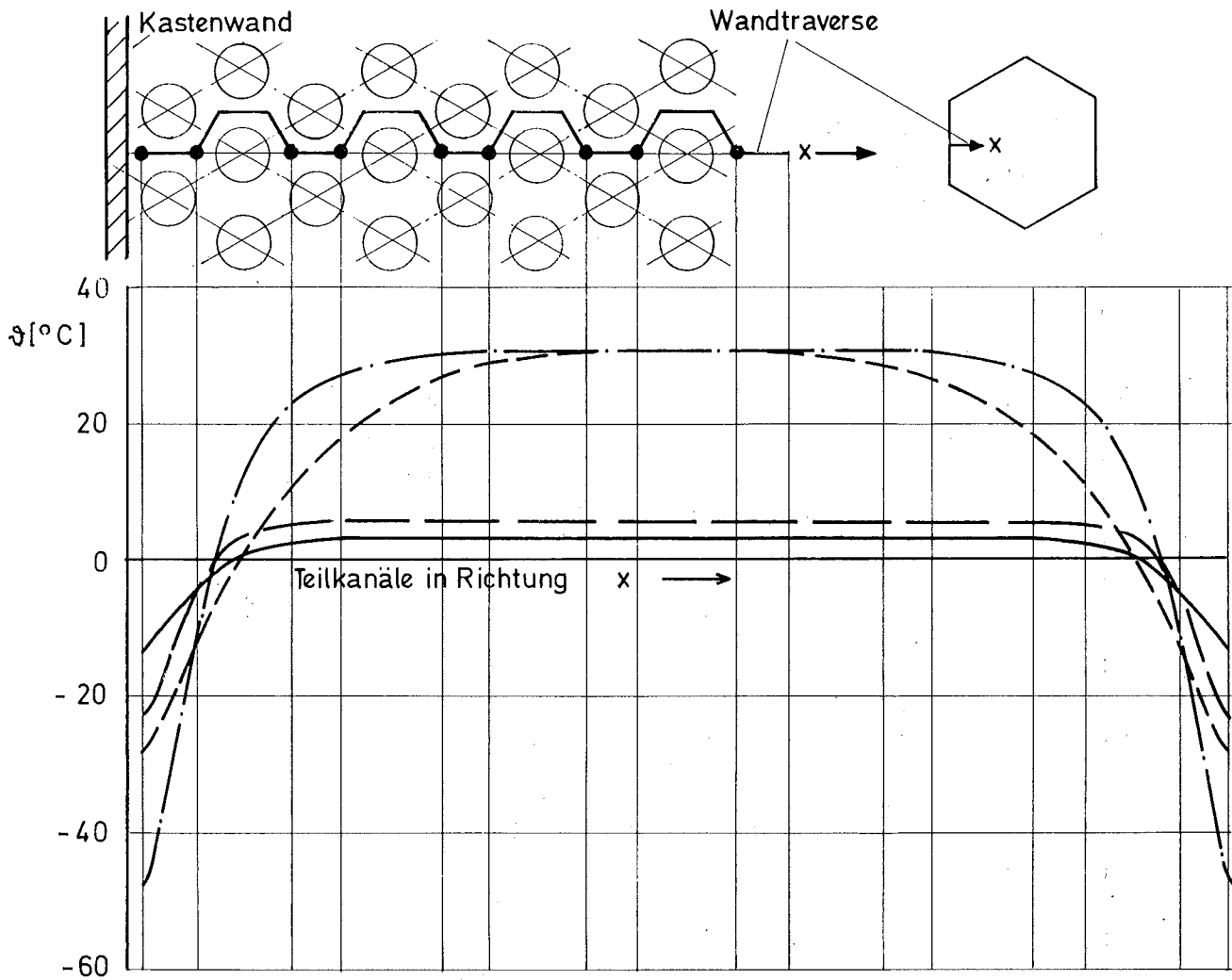


Abb. 20 Temperaturverteilung im Bündelquerschnitt
 Vergleich Theorie - Experiment



Abstandhalter	H	μ	t_1	t_2	t_{max}	Δp
	mm	%/cm	°C	°C	°C	kp/cm ²
--- 1 Draht	100	30	380	560	590,0	3,424
— · — 1 Draht	300	10	380	560	590,5	2,080
— — — 6 Rippen	600	3	380	560	565,8	3,303
— — — 3 Rippen	300	5	380	560	563,4	2,338

Optimierung

1. Art

Abmessungen:

SNR 300

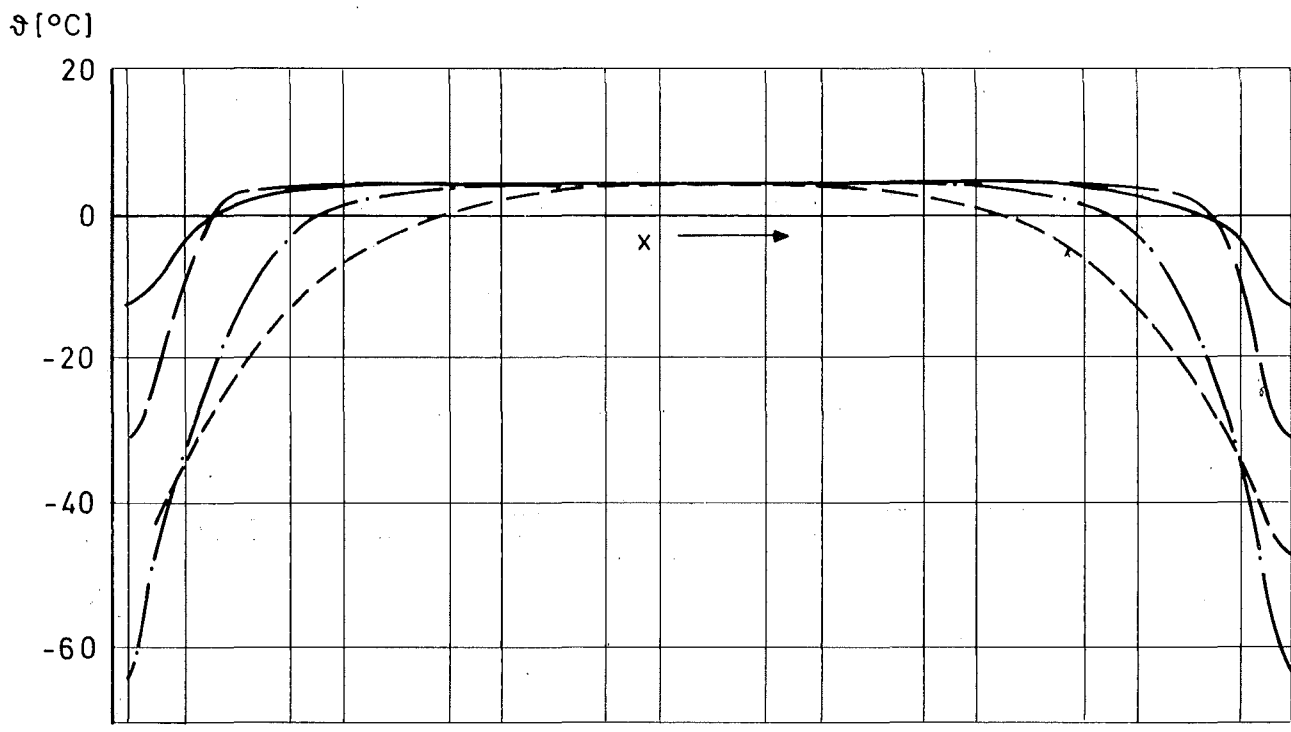
Belastung:

gleich

Stabzahl:

169

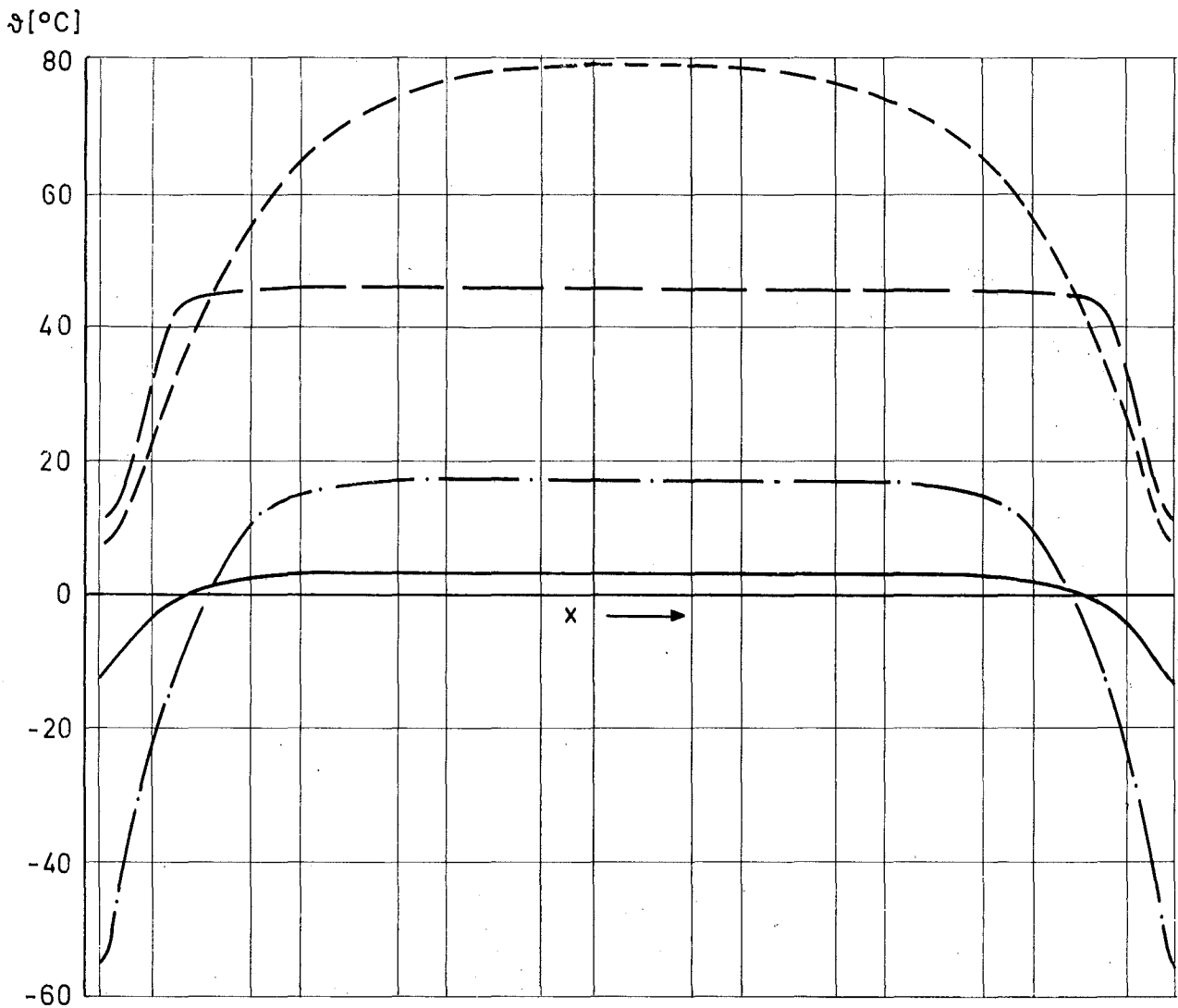
Abb. 21 Kühlmittel-Temperaturen im Austrittsquerschnitt eines Brennelementes $\vartheta = t_{aus} - (t_{aus})_m$ für verschiedene Abstandhalter; Wandtraverse.



Abstandhalter	H	μ	t_1	t_2	t_{max}	Δp
	mm	%/cm	°C	°C	°C	kp/cm ²
---- 1 Draht	100	30	380	537,25	563,4	4,380
- · - 1 Draht	300	10	380	537,0	563,5	2,667
— — — 6 Rippen	600	3	380	556,5	563,6	2,279
— — — 3 Rippen	300	5	380	560	563,4	2,338

Optimierung: 2. Art Abmessungen: SNR 300
 Belastung: gleich Stabzahl: 169

Abb. 22 Kühlmittel-Temperaturen im Austrittsquerschnitt eines Brennelementes $\vartheta = t_{aus} - (t_{aus})_m$ für verschiedene Abstandhalter; Wandtraverse.

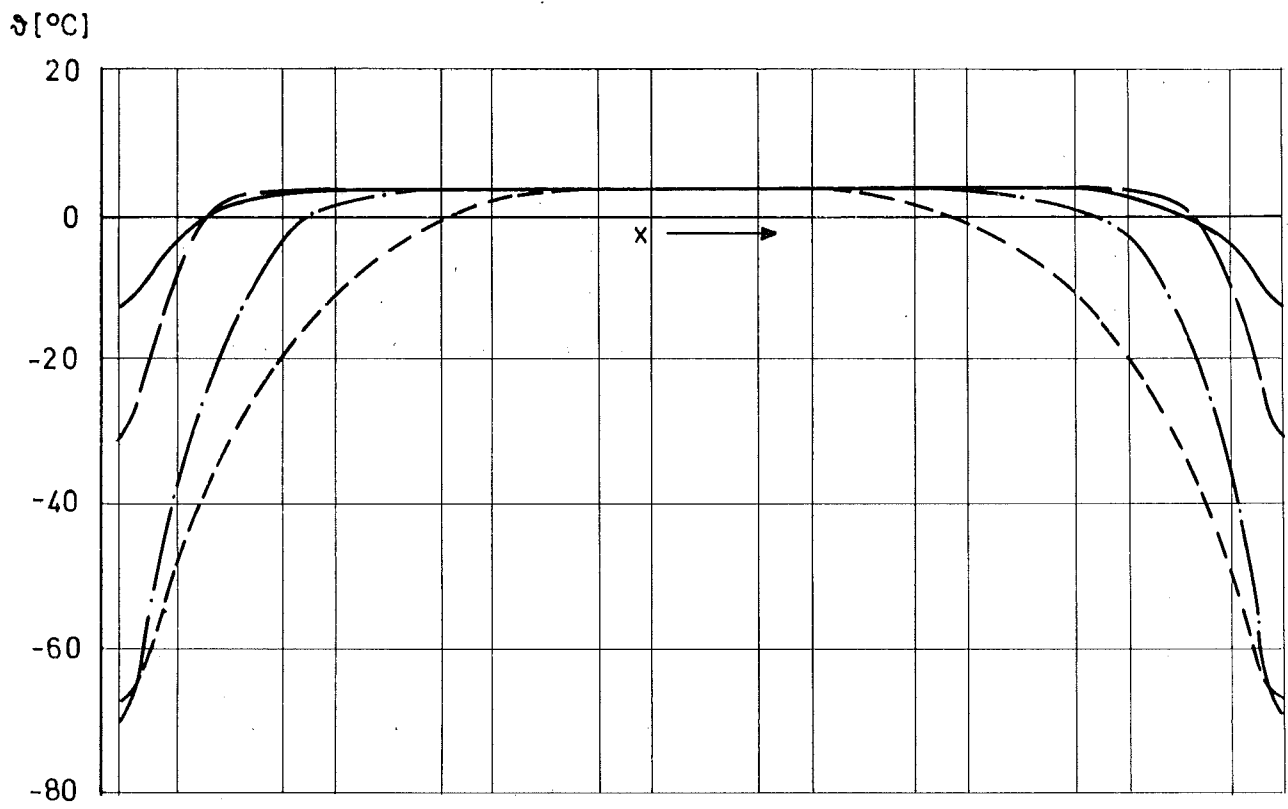


Abstandhalter	H	μ	t_1	t_2	t_{max}	Δp
	mm	%/cm	°C	°C	°C	kp/cm ²
--- 1 Draht	100	30	380	602	639	2,338
-·- 1 Draht	300	10	380	549	577,6	2,333
--- 6 Rippen	300	3	380	598,5	605,6	2,344
— 3 Rippen	600	5	380	560	563,4	2,338

Optimierung: 3. Art Abmessungen: SNR, 300

Belastung: gleich Stabzahl: 169

Abb. 23 Kühlmittel - Temperaturen im Austrittsquerschnitt eines Brennelementes $\vartheta = t_{aus} - (t_{aus})_m$ für verschiedene Abstandhalter; Wandtraverse.



Abstandhalter	H mm	μ %/cm	t_1 °C	t_2 °C	t_{max} °C	Δp kp/cm ²
---- 1 Draht	100	30	307	526,8	563,6	2,332
- · - 1 Draht	300	10	366,4	534,8	563,3	2,339
----- 6 Rippen	600	3	338,5	556,3	563,3	2,339
———— 3 Rippen	300	5	380	560	563,4	2,338

Optimierung: 4. Art Abmessungen: SNR 300
 Belastung: gleich Stabzahl: 169

Abb. 24 Kühlmittel-Temperaturen im Austrittsquerschnitt eines Brennelementes $\vartheta = t_{aus} - (t_{aus})_m$ für verschiedene Abstandhalter; Wandtraverse.

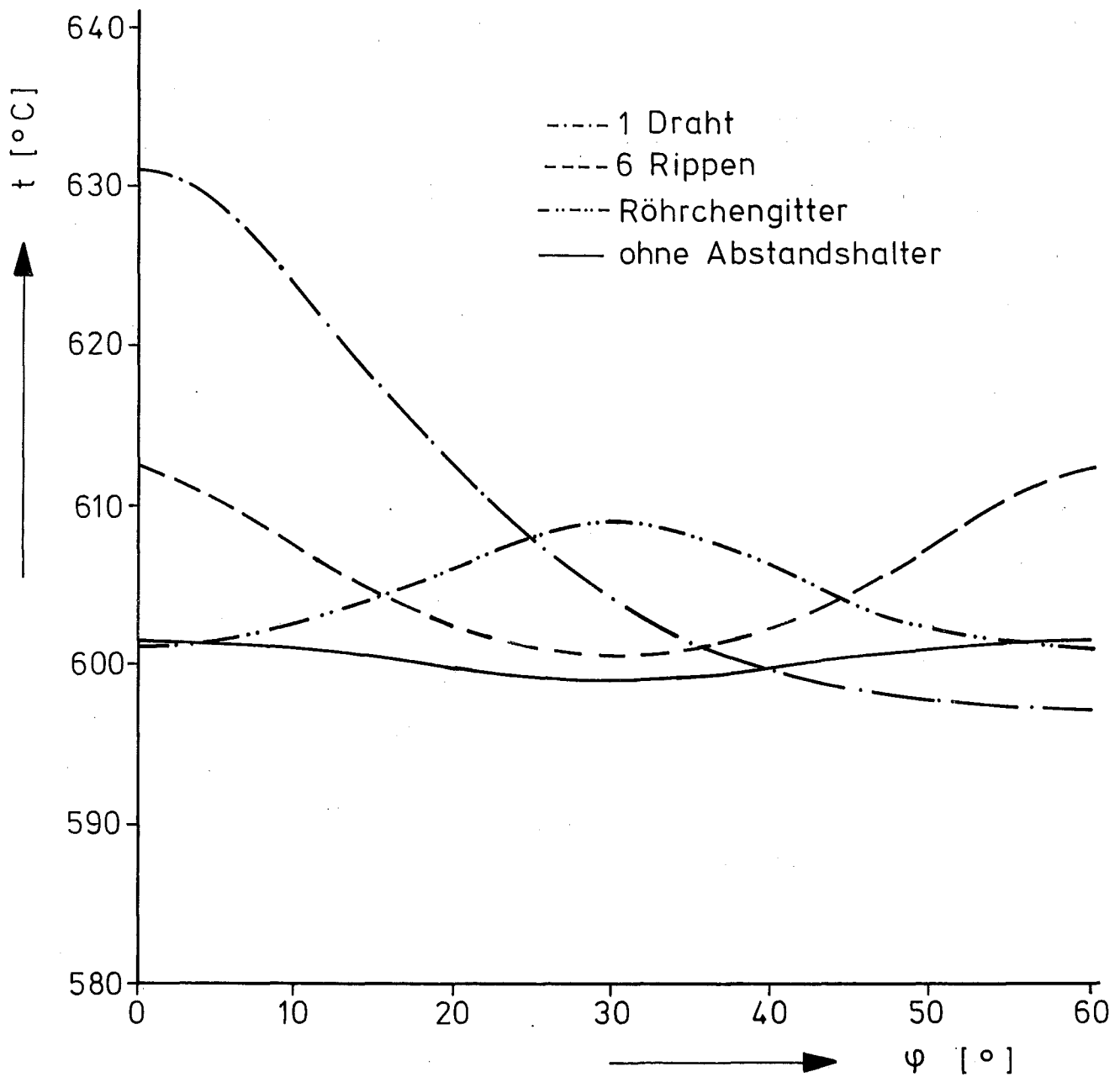
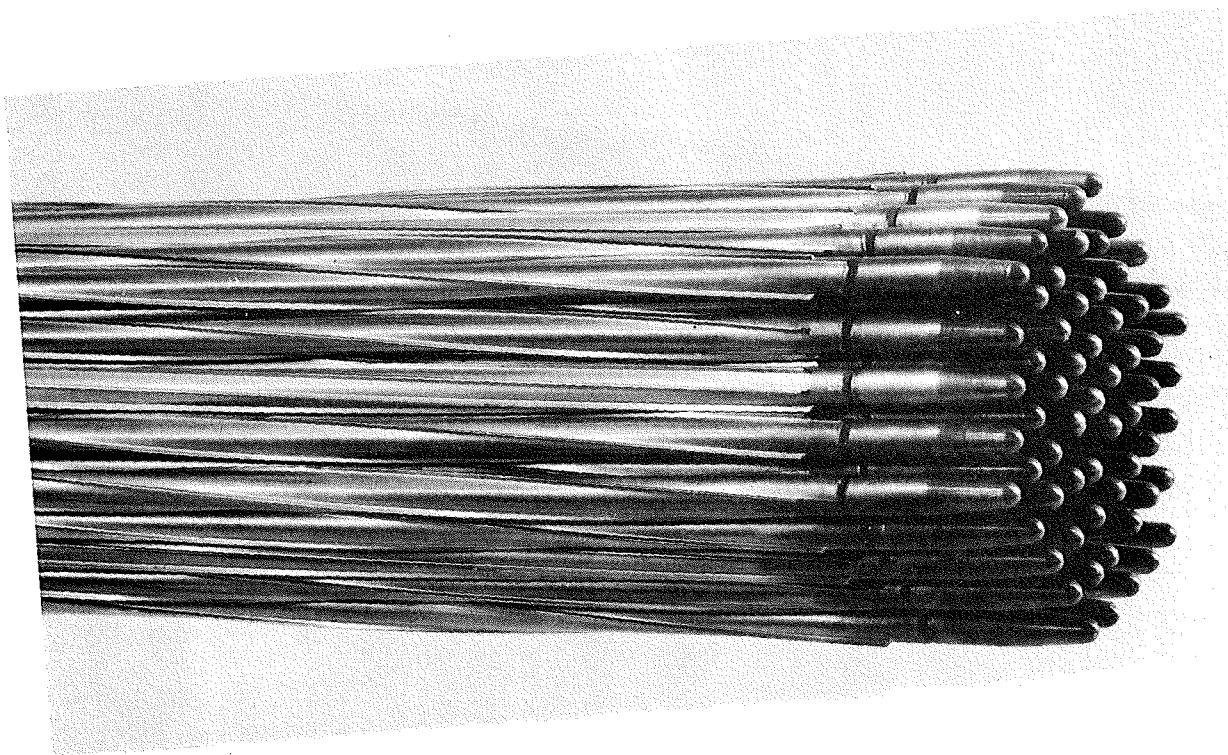


Abb. 25 Temperaturverteilung im „Heißen Kanal“ am inneren Hüllrohrumfang für verschiedene Abstandshaltertypen.

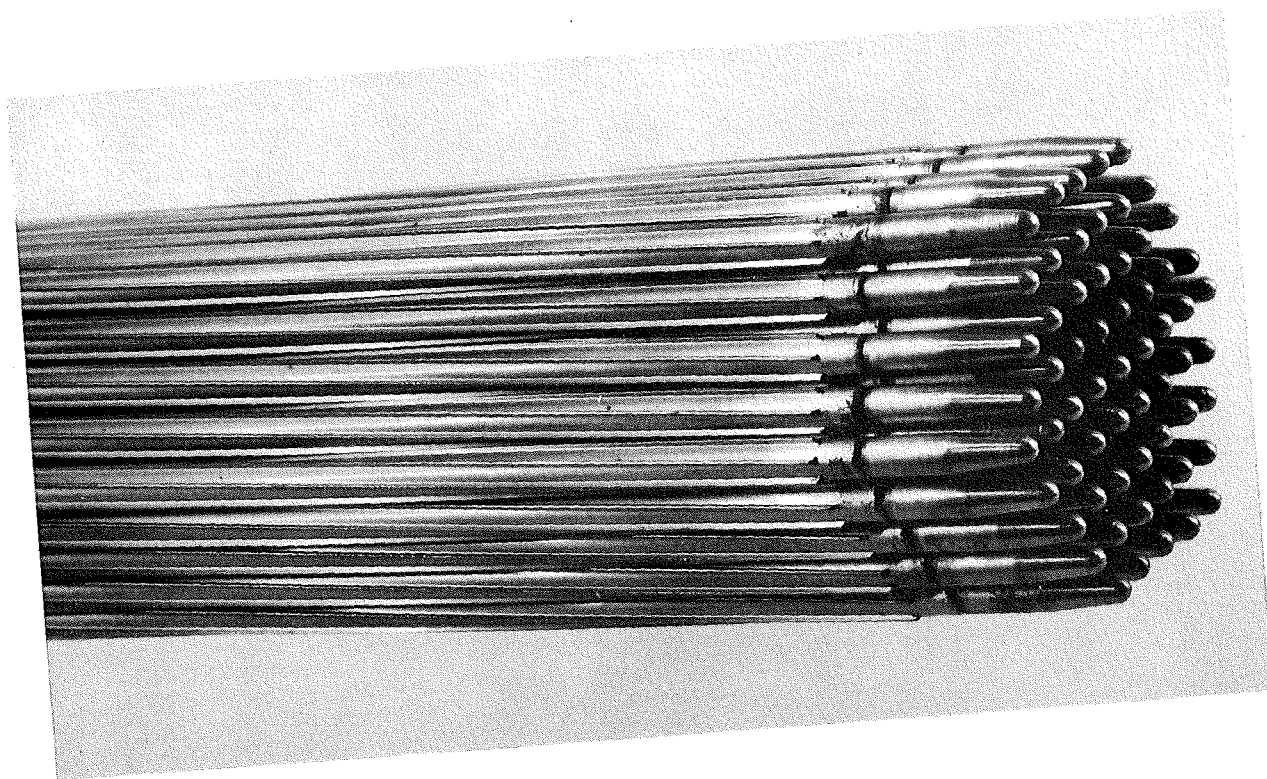
Na - Temperatur : 530 °C

max Stableistung : 530 W/cm

$\varphi = 0$: Engste Stelle eines Kühlkanals



Hüllrohr mit 3 Wendelrippen



Hüllrohr mit 6 Wendelrippen

Abb. 26

61-Stabbündel aus Hüllrohren mit integralen Wendelrippen als Abstandshalter

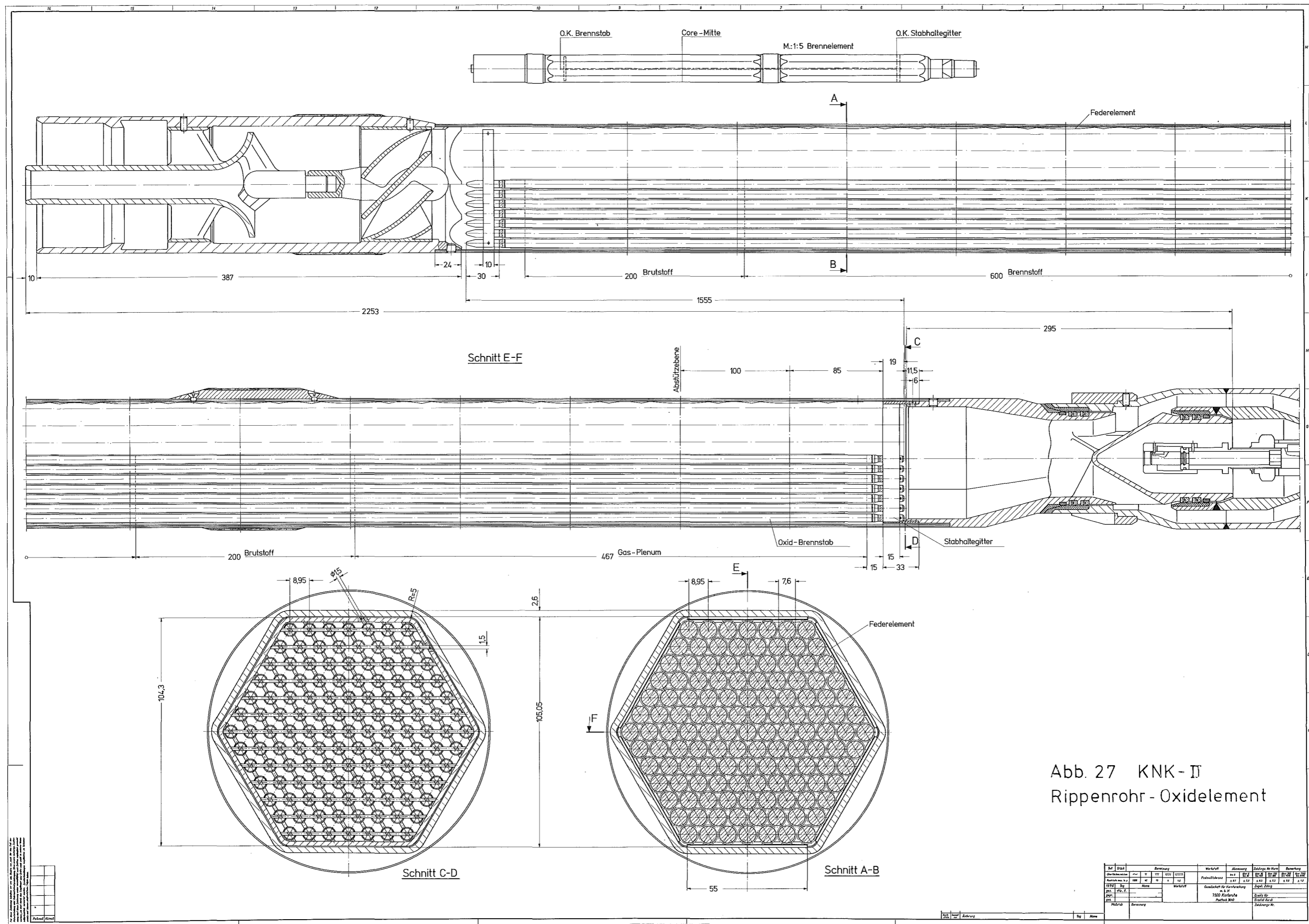


Abb. 27 KNK-I
Rippenrohr - Oxidelement

Nr.	Zust.	Änderung	Werkstoff	Abmessung	Zust.	Bemerkung
1	1					
2	2					
3	3					
4	4					
5	5					
6	6					
7	7					
8	8					
9	9					
10	10					

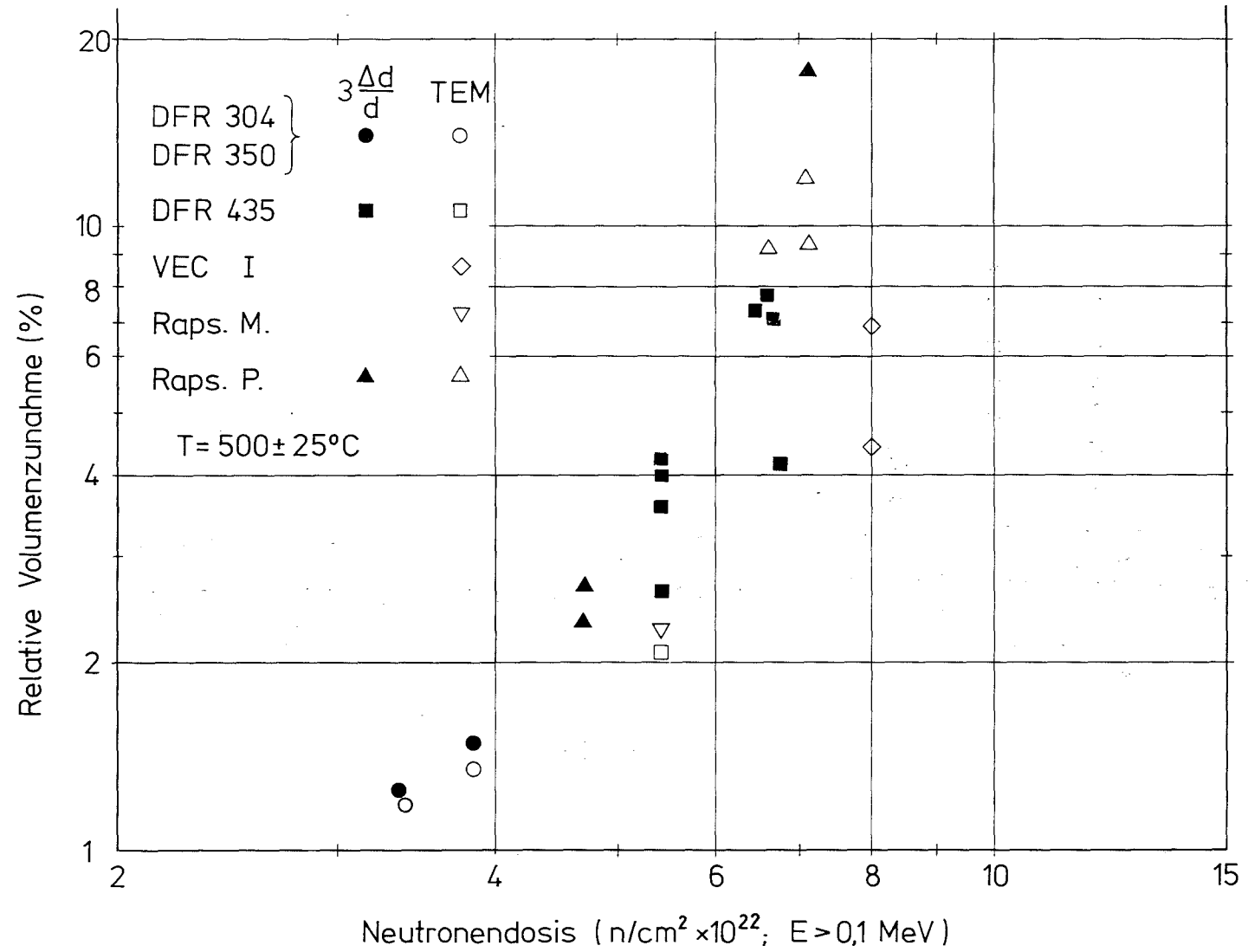


Abb. 28 Dosisabhängigkeit der Porenbildung

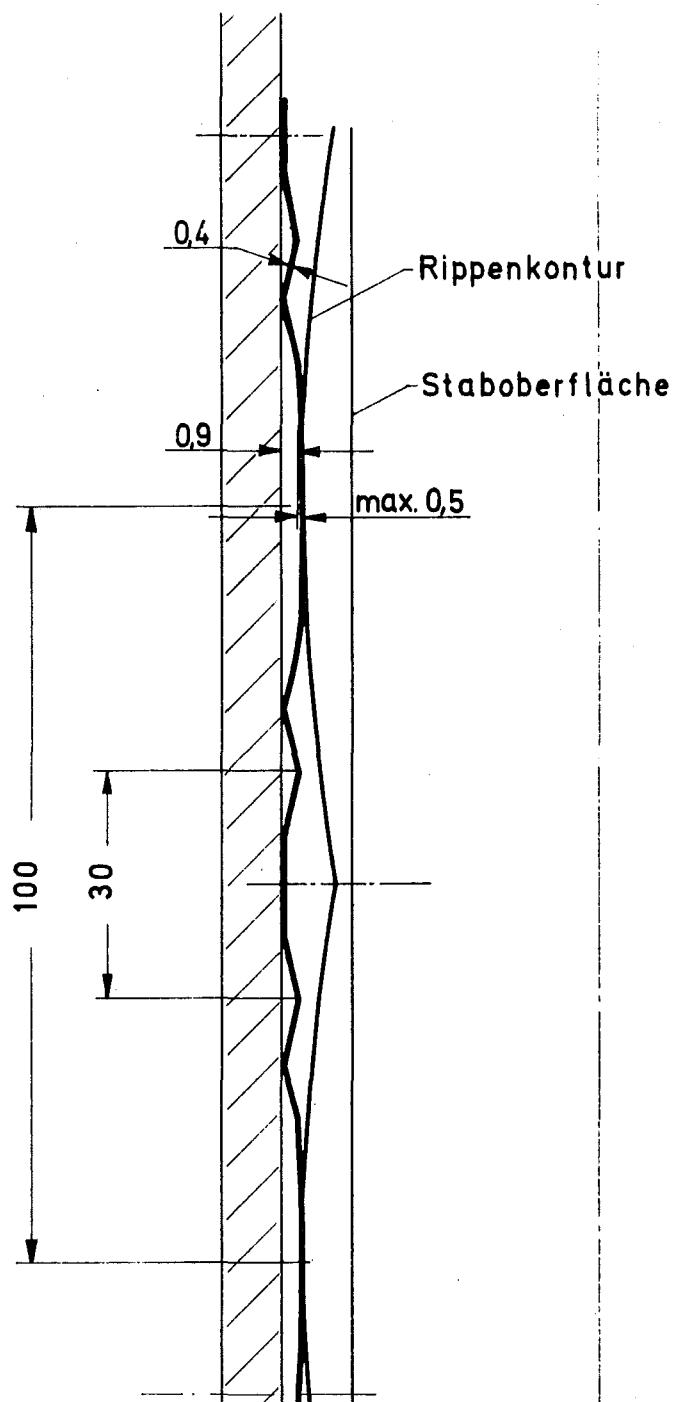


Abb. 29 Federelement für Rippenrohrbrennelement

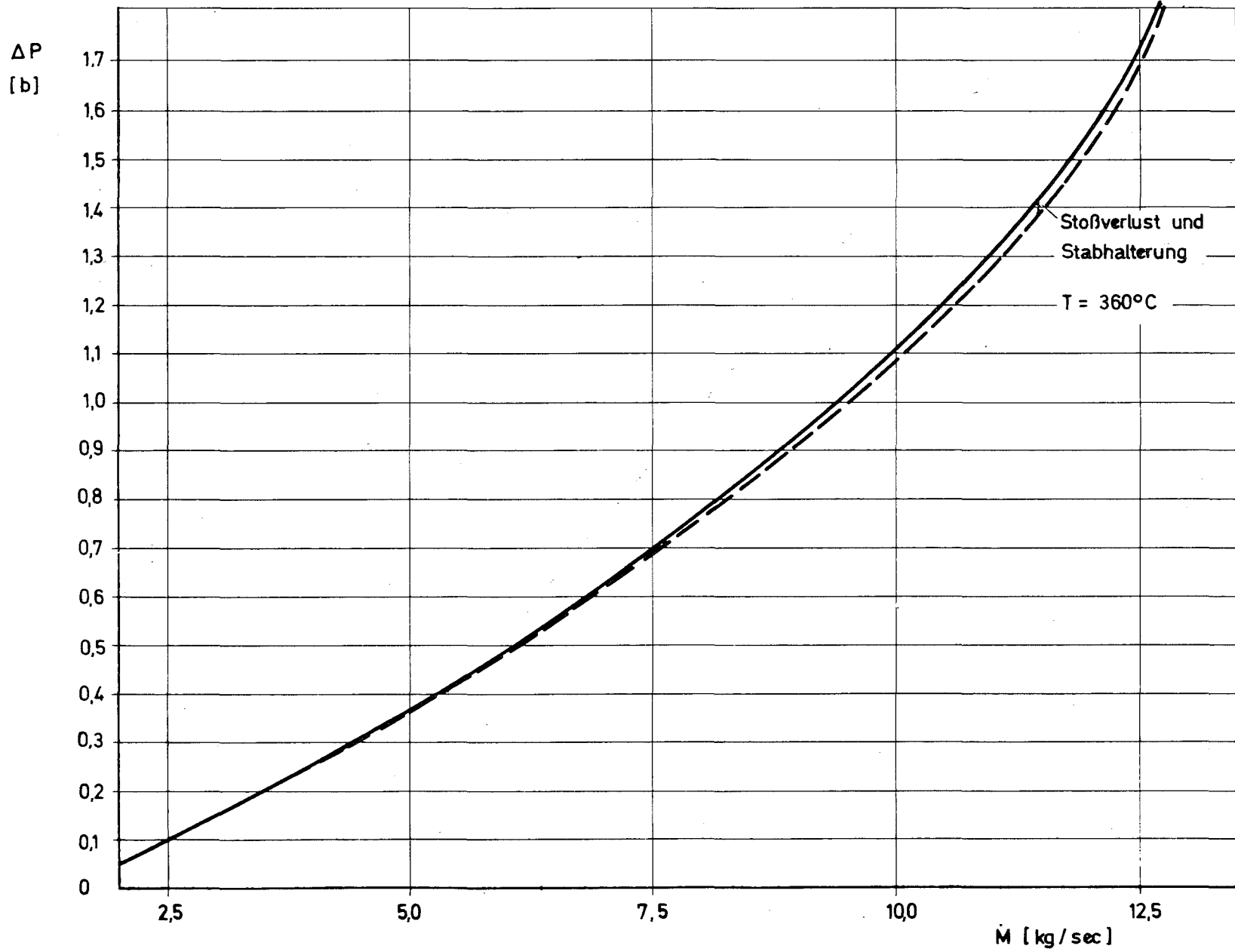


Abb. 30 Gesamtdruckverlust des Brennelements

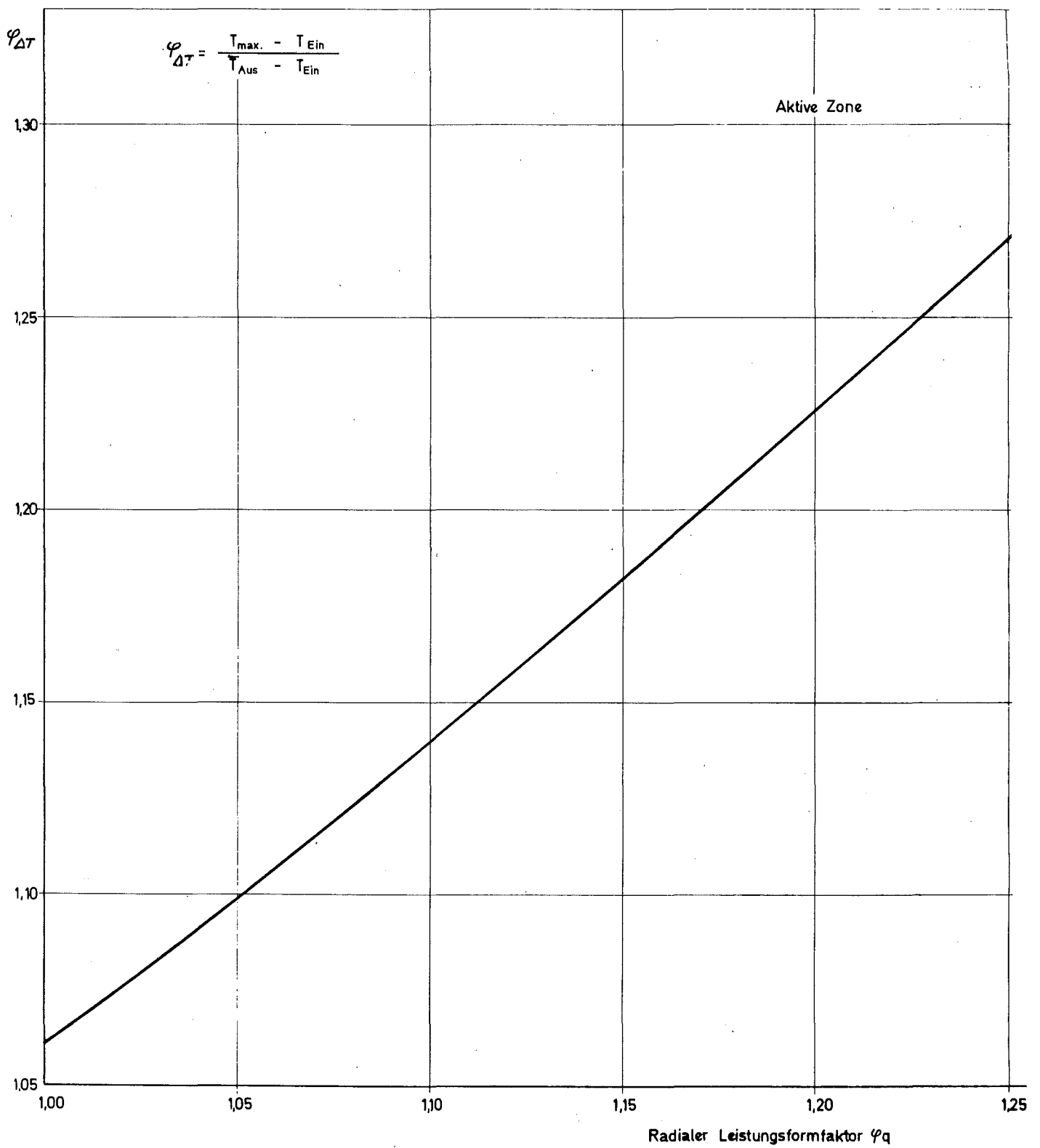
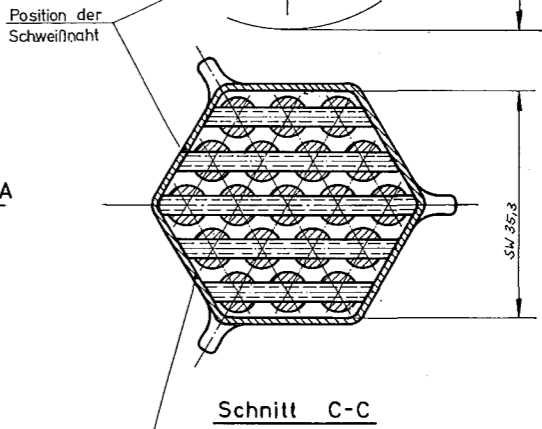
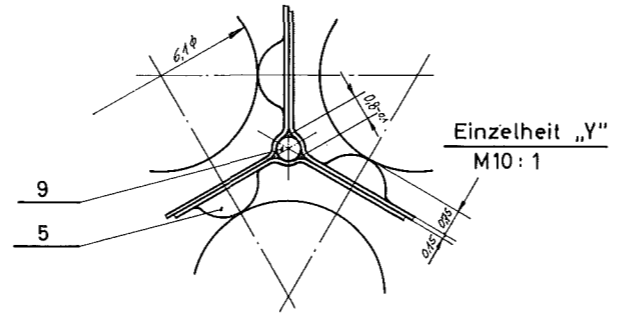
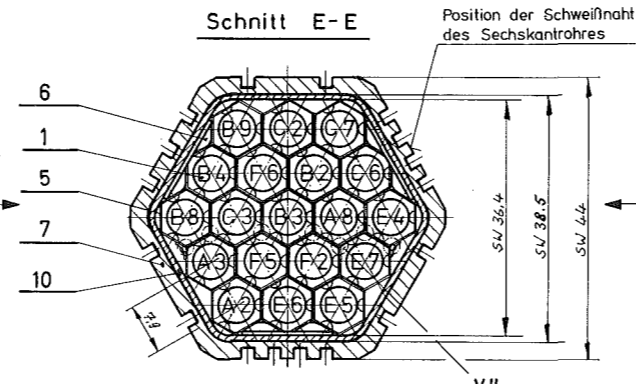
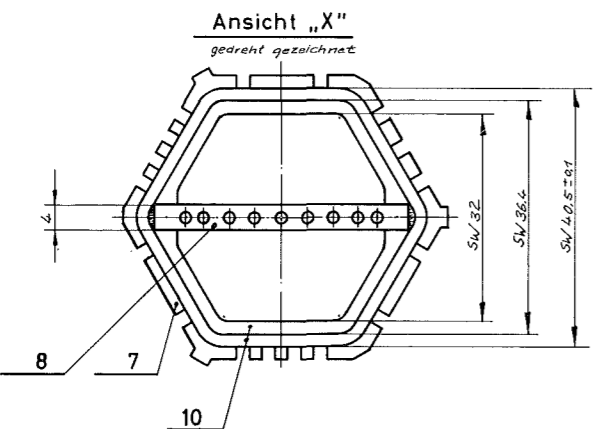
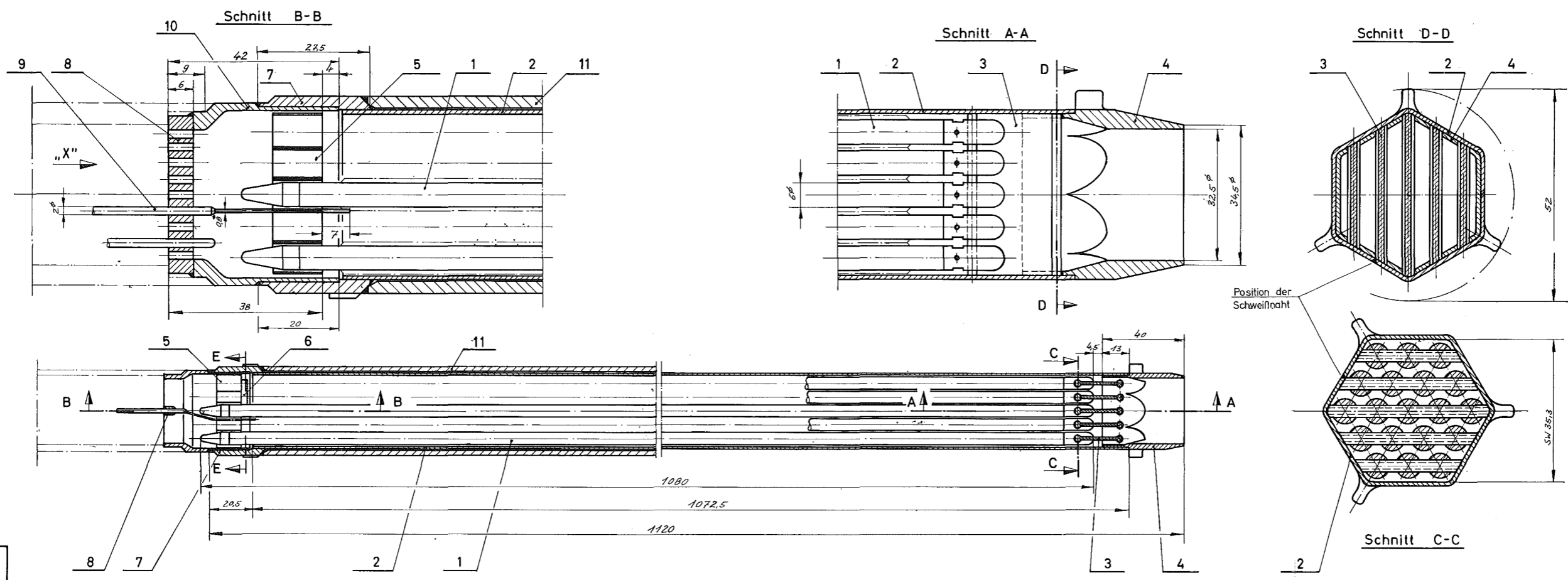


Abb. 31 Temperaturformfaktor als Funktion des Leistungsformfaktors



Bündelmontage gemäß dieser Zeichnung am 11.3.75 in Mol vorgenommen!

Abb. 32

Nr.	Stück	Bezeichnung	Zeichn. Nr. Norm	Werkstoff	Abmessung	Zugzug	Bemerkung
11		Isoliermantel					GEX
10		Zwischenstück					GEX
9		Thermoelement					GEX
8		TE - Führungssteg					GEX
7	1	Übergangstück	1.4301		Ro22.38-3-18a		
6	3	Halblech	1.4541		Ro22.38-4-17a		
5	1	Meßgitter	1.4541		4-16a		
4	1	Fußstück	1.4301		3-15a		
3/3	1	Stegblech	1.4571		4-16a		
3/2	2	Stegblech	1.4571		4-16a		
3/1	2	Stegblech	1.4571		4-16a		
3		Stegbleche			4-16a		
2	1	Sechskantrohr	1.4301		4-13b		
1		Brennstab Mol 7D mit Prüfverschriften			INF/MOL 7D-3-01		
1/1/2	19	Hüllrohr mit Endstopfen			3-12a		
1/10	10	Sinterfilter					
1/18	18	Brennstofftablette	UO ₂ PuO ₂		4-11a		
1/19	18	Brutofl. tablette	UO ₂		4-10		
1/17	19	Feder	1.4310		4-08b		
1/16	19	Stützhalter	1.4988		4-08		
1/15	19	Stützplatte	1.4988		4-07		
1/14	19	Distanzrohr	1.4988		4-06a		
1/13	19	Obere Endstopfen	1.4988		4-05a		
1/12	19	Hüllrohr	1.4988		3-02		
1/11	19	Untere Endstopfen	1.4988		4-03		
1	19	Brennstab MOL 7D			Ro22.38-3-02		

Nr.	Stück	Bezeichnung	Zeichn. Nr. Norm	Werkstoff	Abmessung	Zugzug	Bemerkung
1	1	Bestrahlungseinheit (6-Rippenrohr-Bündel) MOL 7D	Ro22.38-1-01				

Alle Zeichnungen sind im Maßstab 1:1 zu lesen. Bei Abweichungen von den angegebenen Maßen sind die Zeichnungen zu prüfen. Die Zeichnungen sind im Maßstab 1:1 zu lesen. Bei Abweichungen von den angegebenen Maßen sind die Zeichnungen zu prüfen.

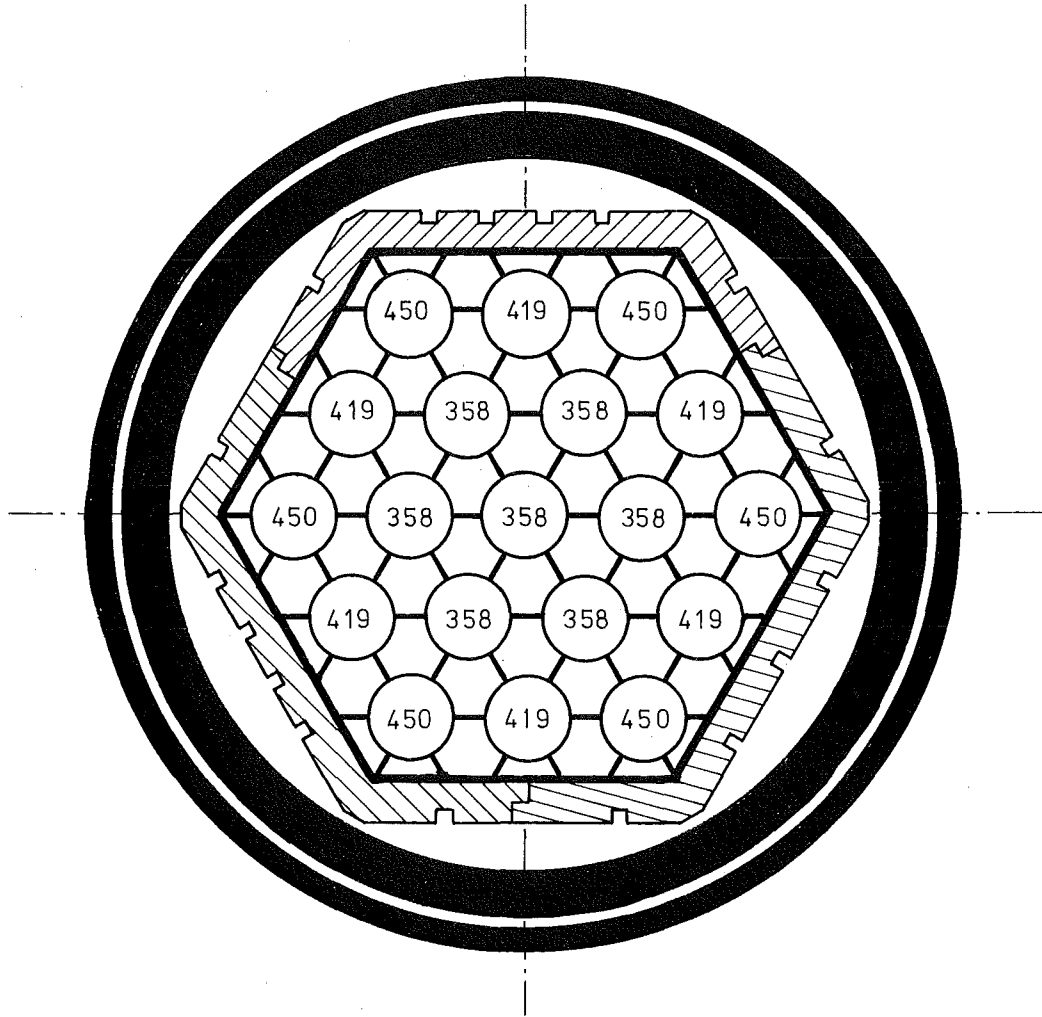


Abb. 33 Innere Geometrie des Na-Loops und
 Stableistungen der Einzelstäbe X_{max} [W/cm]

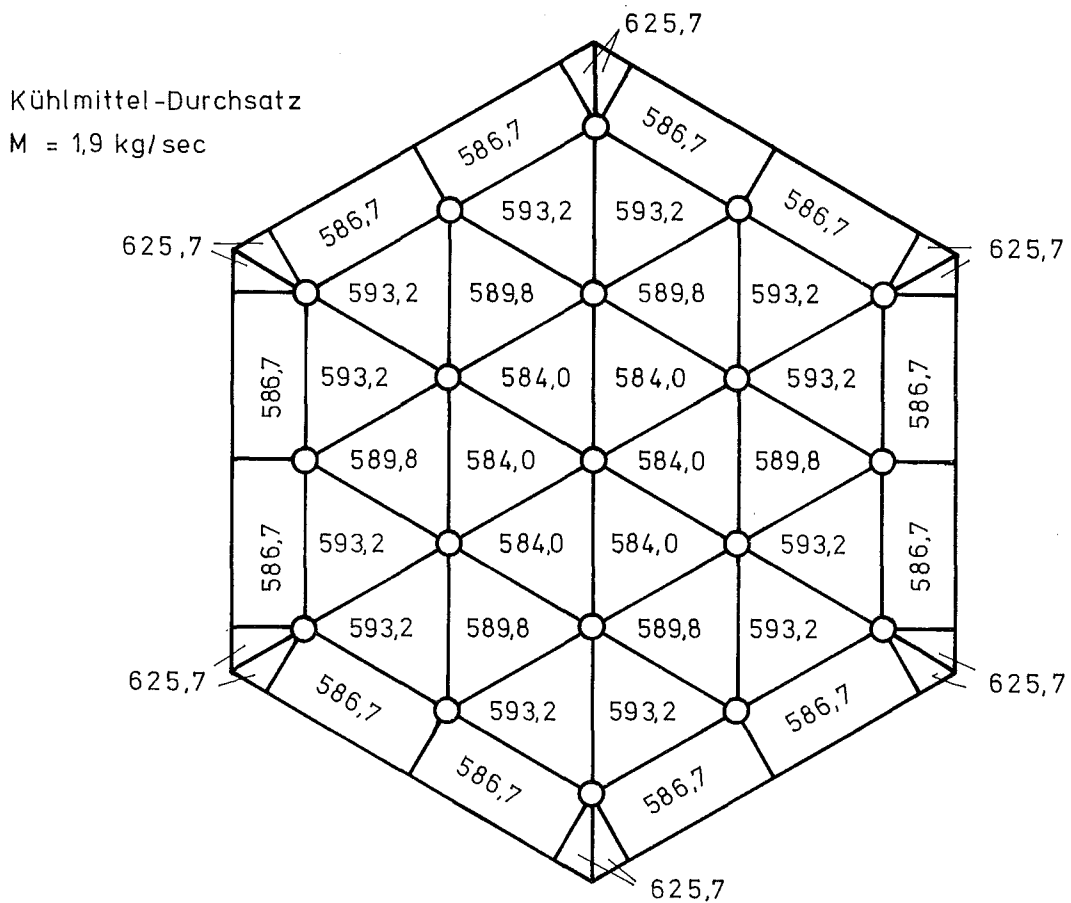
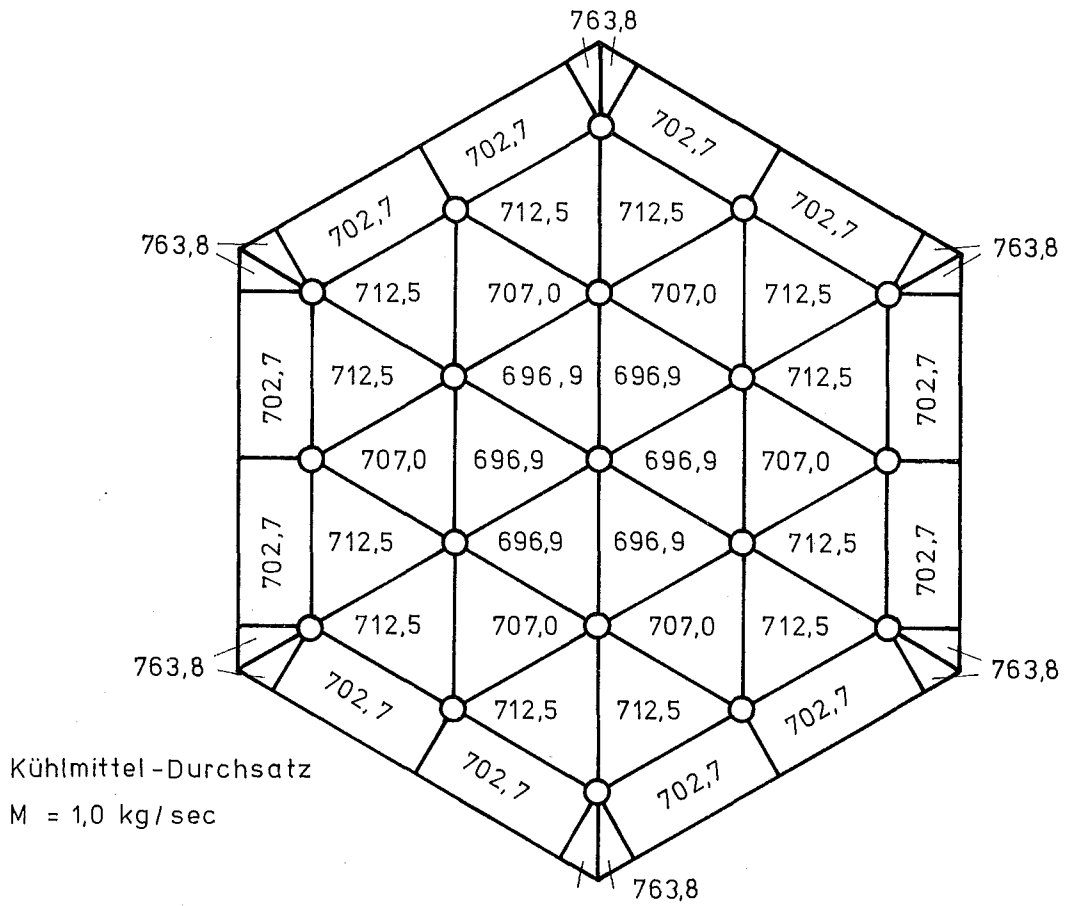


Abb. 34 Kühlmittel-Austrittstemperaturen in den Unterkanälen bei einer Eintrittstemperatur $T_{ec} = 460 \text{ }^\circ\text{C}$