

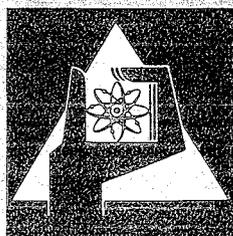
**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

Juni 1974

KFK 1274/1
EUR 4976 d

Projekt Schneller Brüter

1. Vierteljahresbericht 1974



**GESELLSCHAFT
FÜR
KERNFORSCHUNG M.B.H.**

KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 1274/1

EUR 4976 d

Projekt Schneller Brüter

1. Vierteljahresbericht 1974

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H. Karlsruhe

Zusammenfassung

Der Bericht beschreibt Arbeiten des 1. Vierteljahres 1974, die im Rahmen des Projektes Schneller Brüter (PSB) bei der Gesellschaft für Kernforschung m.b.H. Karlsruhe oder in deren Auftrag durchgeführt worden sind.

Als einige der wesentlichsten Ergebnisse aus den Teilprojekten seien genannt:

Brennstabentwicklung:

Verträglichkeitsuntersuchungen mit simuliertem abgebranntem Oxidbrennstoff haben nunmehr ergeben, daß der Stahl 1.4988 weniger stark angegriffen wird als der Stahl 1.4970. Auch werden seine mechanischen Eigenschaften in geringerem Umfang verändert. Eine Abhängigkeit des Hüllangriffes vom thermodynamischen Vorbehandlungszustand war nur am Stahl 1.4970 zu erkennen (vgl. auch "Materialuntersuchung").

Nachuntersuchungen an Brennstäben, die im DFR bis zu maximal 9.74% fima bestrahlt und defekt geworden waren, zeigten, daß trotz der geringen Breite der Hüllrohrrisse erhebliche Mengen von Brennstoff ausgetragen worden waren. Die möglichen Mechanismen dieses Vorganges werden diskutiert.

Die gemessene Porositätsverteilung bestrahlter oxidischer Brennstoffe wurde zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit und des Temperaturprofils verwendet.

Zur Weiterentwicklung des Konzeptes der Natriumbindung in Brennstäben mit karbidischen Brennstoffen im Labormaßstab ist der erste Abschnitt einer Anlage in Betrieb genommen worden, mit der erste Natriumtabletten hergestellt wurden.

Materialuntersuchung und -entwicklung:

Bei Langzeituntersuchungen des Stahles 1.4970 im sog. Industriezustand erwies sich besonders die sekundäre Kriechgeschwindigkeit als stark spannungsabhängig.

Rohrinnendruck-Zeitstandversuche an den Stählen 1.4970, 1.4988, 1.4981 und AISI 316 dienten zur Prüfung der Frage, welchen Einfluß die bevorzugt an den Korngrenzen ablaufende Innenkorrosion bei 700 °C auf die Hüllrohrfestigkeit hat. Bei 1.4970 zeigte sich im Gegensatz zu den übrigen Werkstoffen eine

zusätzlich schädigende "Fernwirkung" der korrodierten Schicht auf das optisch einwandfrei erscheinende Restmaterial.

Im DFR und BR 2 bestrahlte Proben des Stahls 1.4970 des Zustandes "lösungsgeglüht + ausgelagert + kaltverformt" (der vom "Industriezustand" abweicht) zeigen eine höhere Restduktilität als die anderen Werkstoffzustände und als die übrigen bestrahlten Werkstoffe. Die gemessenen Bruchdehnungen bei 600 °C sind von der Verformungsgeschwindigkeit fast völlig unabhängig.

Im Schwellverhalten unter Bestrahlung im RAPSODIE und VEC zeigte sich der Stahl 1.4970 des Zustandes "lösungsgeglüht + kaltverformt + ausgelagert" dem Stahl 1.4988 (1g) beachtlich überlegen.

Bereits in früheren Versuchen war eine Durchmesserzunahme von Hüllrohren durch die Einwirkung von Spaltcäsium am Beginn der Brutstoffsäule beobachtet worden. Weitere Versuche haben dies bestätigt.

Korrosionsversuche und Kühlmittelanalysen:

Metallkundliche Untersuchungen der bisher bis zu 5000 h im HT-Prüfstand exponierten Proben galten den selektiven Korrosionseffekten. Durch bevorzugte Lösung von Cr, Ni und Mn sowie der Stabilisierungselemente war eine durchgehende Ferritschicht entstanden. Im Bereich der ferritisierten Korngrenzen wurden vereinzelt mikroskopische Hohlräume gefunden. - Es ist kein Effekt des Natriums auf das mechanische Langzeitverhalten der drei untersuchten Hüllwerkstoffe feststellbar.

Arbeiten zum Brennstoffzyklus:

In zwei Extraktionszyklen an dem bereits früher aufgelösten DFR-Brennstoff wurde der Einfluß der hohen Spaltproduktkonzentrationen studiert, insbesondere die Niederschlagsbildung an den Phasengrenzen während der Extraktion und Rückextraktion. Die Versuche verliefen erfolgreich im Hinblick auf den vorgesehenen 3. Extraktionszyklus.

Sicherheit und Instrumentierung:

Zur Analyse der Predisassembly-Phase schwerer hypothetischer Störfälle ist eine in der Struktur vollkommen neue Version des Rechenprogramms CAPRI einsatzbereit gemacht worden. Für die Berechnung der transienten thermohydraulischen Änderungen, die auf die Reaktivität rückwirken, dienen Moduln zur Lösung der Kühlkanalgleichungen im einphasigen Bereich und der Wärmeleitgleichung im Brennstab, zur Brennstabdehnungsanalyse, zur Berechnung der Brennstoff-Natrium-Reaktion, der Siede- und der Slumpingvorgänge.

Für die Untersuchung der Verformung eines Brennelementes unter dynamischer Belastung wurden Laborversuche und modelltheoretische Entwicklungen weitergeführt. An einem Coremodell des SNR 300 wurden in Foulness bisher zwei Sprengversuche zur Simulation einer Brennstoff-Natrium-Reaktion durchgeführt. Vorläufiges Ergebnis: Ein Druckpuls von 79 atü mit etwa 12 ms Halbwertsdauer verursacht keine wesentlichen Deformationen der benachbarten Brennelement-Attrappen.

Bei Natrium-Siedeversuchen in einem 7-Stab-Bündel konnte kein Siedeverzug und demzufolge kein instabiles Sieden festgestellt werden, im Gegensatz zu früher durchgeführten Einzelstabversuchen.

Nach Ergebnissen der Entwicklung Na- und Na₂O-resistenter Abluftfilter sind Sandbettfilter wesentlich geeigneter als Faserfilter.

Technologie:

Aufgrund der hydraulischen Versuche am SNR 300-Absorber konnte u.a. festgestellt werden, daß der erforderliche Bündeldurchsatzanteil von 50% erreichbar und von der axialen Bündelposition und dem Absorberdurchsatz weitgehend unabhängig ist.

Im Hinblick auf gasgekühlte Schnellbrüter wurde nachgewiesen, daß bei Ringspalten die Turbulenzintensitäten und die kinetische Energie der Turbulenz stark vom Radienverhältnis abhängen. Man erwartet daher ähnliches für Strömungskanäle in Stabbündeln.

Der Bericht wurde zusammengestellt von R. Hüper.

Summary

This report contains a description of work performed in the 1st quarter of 1974 within the framework of the Fast Breeder Project at Gesellschaft für Kernforschung mbH, Karlsruhe, or on its behalf.

These are some of the most important results achieved in various areas:

Fuel Pin Development:

Compatibility studies with simulated spent oxide fuel now have indicated that 1.4988-type steel is attacked less severely than 1.4970-type steel. In addition, its mechanical properties are changed to a lesser extent. An influence upon the attack on the cladding of the thermodynamical conditions of a preliminary treatment was observed only in 1.4970-type steel (cf. Material Studies).

Post-irradiation examination of fuel pins irradiated to a maximum of 9.74% fima in the DFR until they had become defective, showed that despite the narrowness of the cracks in the cladding tubes major quantities of fuel had leaked out. The possible mechanisms of this process are discussed.

The porosity distribution measured of spent oxide fuels was used to determine the thermal conductivity and the temperature profile.

The first stage of a facility for fabrication of the first few sodium pellets has been commissioned with the purpose of advancing the sodium bonding concept in fuel pins with carbide fuel on a laboratory scale.

Material Studies and Development

Long-time studies of 1.4970-type steel in the so-called industrial condition proved the secondary creep rate to be particularly dependent on stress.

Creep-rupture tests on internally pressurized tubes were conducted with the 1.4970, 1.4988, 1.4981, and AISI 316-types of steel in order to find out the influence upon the stability of the cladding tube of the internal corrosion occurring at 700 °C preferably at the grain boundaries. In the case of 1.4970, contrary to the other materials, there was an additional damaging "remote effect" of the corroded layer on the residual material which optically appeared to be without any defect.

Specimens of the 1.4970-type steel irradiated in the DFR and the BR 2 reactors of the "solution annealed + age hardened + cold worked" condition (which is different from the "industrial condition") indicated a higher amount of residual ductility than the other material conditions and the other irradiated materials. The ultimate elongations measured at 600 °C are almost completely independent of the strain rate.

The swelling behavior under irradiation in RAPSODIE and VEC of 1.4970-type steel in the "solution annealed + cold worked + age hardened" condition was greatly superior to that of 1.4988 (solution annealed)-type steel.

In earlier experiments an increase in the diameter of cladding tubes had already been observed as a consequence of the action of fission product cesium at the beginning of the fuel column. Further experiments have corroborated this finding.

Corrosion Tests and Coolant Analyses

Metallurgical investigations of samples exposed up to 5000 h in the HT test rig were conducted to detect selective corrosion effects. The preferred solution of Cr, Ni, Mn, and the stabilizing elements had caused a continuous ferritic layer. A few microscopic voids were found in the area of the ferritized grain boundaries. No effect of sodium on the mechanical long time behavior of the three cladding materials studied has been found.

Work on the Fuel Cycle

In two extraction cycles of the DFR fuel dissolved earlier the influence of the high fission product concentrations was studied, especially the formation of precipitate along the grain boundaries during extraction and re-extraction. The experiments were successful with a view to the third extraction cycle planned.

Safety and Instrumentation

A completely reorganized version of the CAPRI computer program for analysis of the pre-disassembly phase of severe hypothetical accidents has been made available. Modules solving the cooling channel equations in the single-phase regime and the heat transfer equation in the fuel pin, for fuel pin strain

analysis, for calculation of the fuel-sodium interaction, of boiling and slumping processes are used for calculation of the transient thermohydraulic changes which have feedback upon the reactivity.

Laboratory experiments and developments of model theory were continued in studies of fuel element deformation under dynamic stresses. A core model of the SNR 300 at Foulness has so far been used for two explosion tests which simulated a fuel sodium interaction. The preliminary result is this: a pressure impulse of 79 atm with approximately 12 msec halfwidth does not cause any major straining of the adjacent dummy fuel elements.

In sodium boiling experiments in a seven-pin bundle no superheat and accordingly no unstable boiling conditions were detected. This contrasts with single pin experiments carried out earlier.

According to results achieved in the development of exhaust air filters resistant to sodium and Na_2O , sandbed filters are much more suitable than fiber filters.

Technology

From the hydraulic tests of the SNR 300 absorber it was found out that the required 50% fraction of the bundle flow can be achieved and is independent of the axial bundle position and the absorber flow.

With respect to gas cooled fast breeders it has been proved that the turbulence intensities and the kinetic energy of the turbulence in annular gaps are strongly dependent on the ratio of radii. Hence, a similar dependence is expected for flow channels in pin bundles.

This report has been compiled by R. Hüper

Erläuterungen

Die Einzelbeiträge sind durch *, F und/oder G gekennzeichnet, je nachdem ob sie vorwiegend dem Bauzugehörigen F+E-Programm des SNR 300, dem SNR-Folgeprogramm (für einen Demonstrations-SNR) oder dem Grundlagenprogramm (Hochleistungsbrüter, Gas- und Dampfkühlung, reaktorphysikalische Grundlagen) zuzuordnen sind.

Zur Erleichterung der Suche nach früheren Berichten, deren Fortsetzung der jeweils vorliegende Beitrag bildet, wird der betr. frühere PSB-Vierteljahresbericht zitiert. Fehlendes Zitat bedeutet stets, daß der letzte Beitrag im unmittelbar vorhergehenden PSB-Vierteljahresbericht erschienen ist.

Die folgenden Institute der GfK haben zu dem vorliegenden Vierteljahresbericht beigetragen:

- IASR = Institut für angewandte Systemtechnik und Reaktorphysik
- IHCh = Institut für Heiße Chemie
- IMF = Institut für Material- und Festkörperforschung
- INR = Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
- IRB = Institut für Reaktorbauelemente
- IRE = Institut für Reaktorentwicklung
- RBT = Reaktorbetrieb und Technik

Ferner liegt ein Beitrag von der Technischen Universität Hannover vor.

Inhaltsübersicht⁺⁾

- 112. Brennstabentwicklung
- 113. Materialuntersuchung und -entwicklung
- 114. Korrosionsversuche und Kühlmittelanalysen
- 115. Arbeiten zum Brennstoffzyklus
- 121. Physikalische Experimente
- 122. Reaktortheorie
- 123. Sicherheit schneller Reaktoren
- 124. Instrumentierung und Signalverarbeitung zur Kernüberwachung
- 125. Auswirkung von Reaktorstörfällen auf die Umwelt; Aktivitätsfreisetzung
- 126. Natrium-Technologie-Versuche
- 127. Thermo- und fluiddynamische Versuche in Gas
- 129. Entwurfsstudien für große Natriumbrüter

^{+) Teilprojekte mit den zugehörigen PSB-Kennzahlen.}

Die Seiten sind innerhalb jedes Teilprojektes durchnummeriert.

112 BRENNSTABENTWICKLUNG1121 Oxidischer Brennstoff - Laboruntersuchungen1121.0 Herstellung im Labormaßstab *1. Herstellung unterstöchiometrischer UO_2/PuO_2 -Tabletten mit axialer Bohrung im Rahmen der Versuchsgruppe MOL-8D

(H. Wedemeyer, H. Nagel, M. Wittmann, IMF)

Zur Messung der Zentraltemperatur beim Abbrand eines SNR-spezifischen Brennstoffs (MOL-8D) wurden unterstöchiometrische $UO_2/20$ Gew.% PuO_2 -Tabletten mit axialer Bohrung angefertigt. Entsprechend den in [1] beschriebenen Vorversuchen wurde die Herstellung der Brennstofftabletten mit mittleren Dichten von 85%TD bzw. 92%TD für 13 Prüflinge durchgeführt. Die axiale Bohrung wurde nach dem Sintern (1600 °C/2h) mit einem diamant-besetzten Hohlbohrer angebracht. Die chemische Analyse [2] ergab nach der Fertigstellung für die Restverunreinigung an Kohlenstoff weniger als 100 ppm. Die metallographische Untersuchung gab an der Wandung des Bohrlochs keine besonderen Ausbrüche oder besondere Rißstrukturen zu erkennen (Abb. 1).

2. Einlöten der Hochtemperaturthermoelemente in die Bestrahlungsprüflinge der Versuchsgruppe MOL-8D

(E. Günther, R. Hanselmann, R. Scherwinsky, IMF)

Zur Messung der Zentraltemperatur beim Abbrand des Brennstoffs der Versuchsgruppe MOL-8D wurden ummantelte Hochtemperatur-Thermoelemente (W5Re/W25Re) eingesetzt. Diese wurden durch den oberen Endstopfen in den mit UO_2/PuO_2 -Tabletten mit axialer Bohrung bestückten Prüfling eingeführt und unter Vakuum im Endstopfen verlötet. Hierzu wurde eine Lötapparatur mit Vakuumanlage entwickelt, in welcher nach mehreren Probelötungen insgesamt 13 Thermoelemente in die Bestrahlungsprüflinge eingelötet wurden (Abb. 2) [3]. Die Lötapparatur

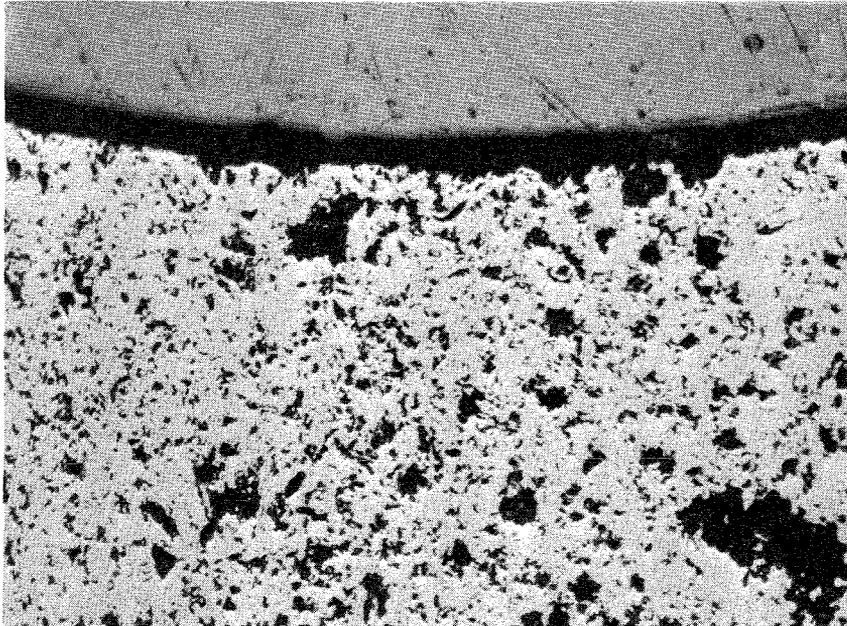
*BzFE-Nr. 322.1

[1] H. Wedemeyer u.a. in KFK 1273/2 (1973), S. 112-13

[2] Ausgeführt durch E. Mainka, IRCh

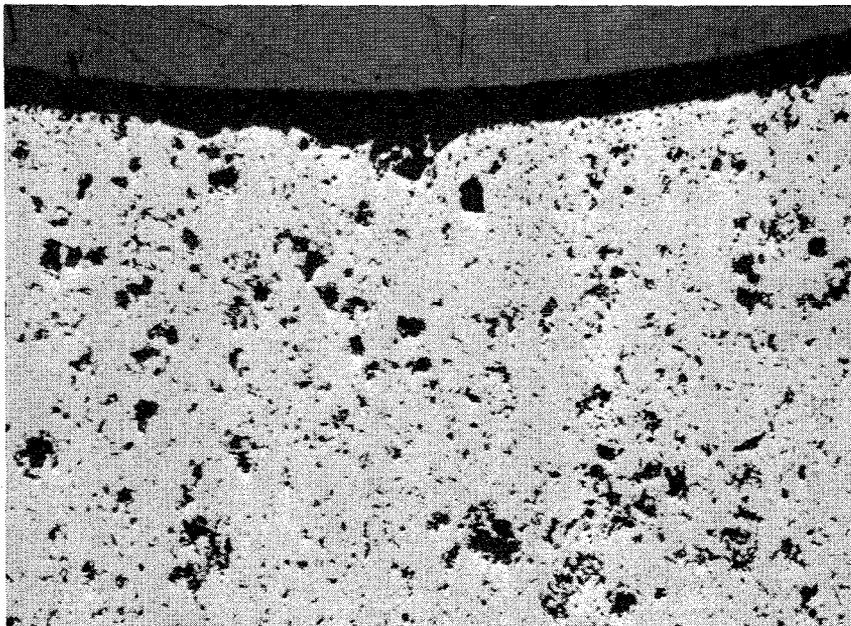
[3] D. Freund, O. Jacobi, KFK 1273/2 (1973), S. 112-66

Bohrung



Dichte 85 %TD

Bohrung



Dichte 92 %TD

Abb. 1 : UO_2/PuO_2 -Tabletten mit axialer Bohrung (MOL-8D)
Vergr. 200 x

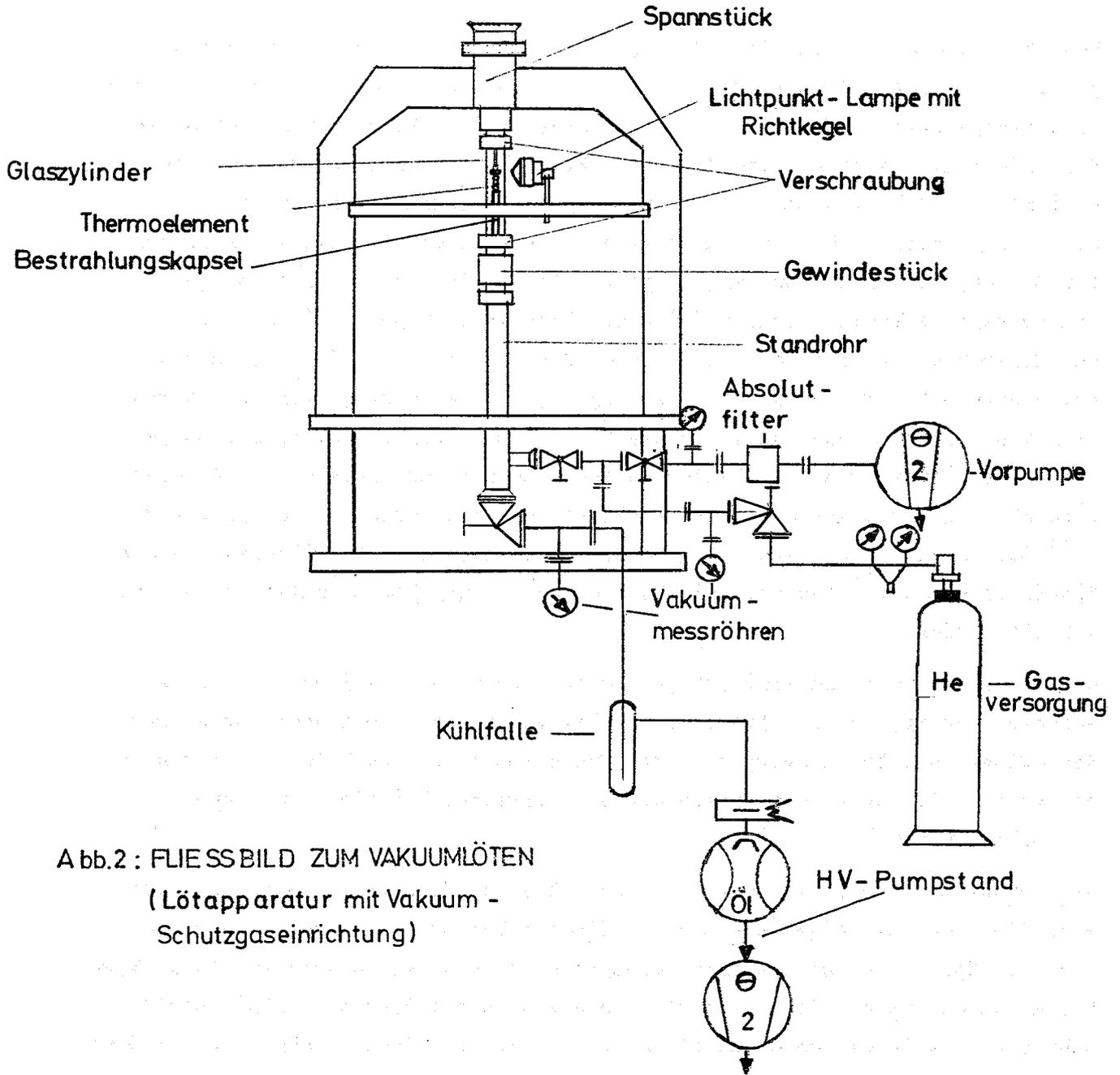


Abb.2 : FLIESSBILD ZUM VAKUUMLÖTEN
(Lötapparatur mit Vakuum -
Schutzgaseinrichtung)

besteht aus einem dreiarmigen Gestell mit Montagerring, das mit seiner Grundplatte auf einer Fußplatte verschraubt ist. In die Grundplatte ist ein Standrohr eingeschweißt, das im oberen Teil eine Gewindeplatte zum Einschrauben des Prüflings und am unteren Ende zwei Flanschanschlüsse zur Vakuumanlage besitzt. Mit dem Standrohr ist vakuumdicht über einen Glaszylinder das Spannstück verschraubt, in dem das Thermoelement, durch einen Gummistopfen mit Bohrung eingeführt und abgedichtet, mittels Justierschraube auf dem Sollabstand im Bestrahlungsprüfling gehalten wird. Ungefähr in die Mitte des Glasrohrs ragt der obere Endstopfen des Prüflings, in den der Thermoelementschaft mit drei auf dem Montagerring um 120° versetzten Lichtpunktstrahlern eingelötet werden kann. Für die Lötung wurde ein aus Diffusionspumpe und Drehschieberpumpe bestehender Hochvakuumstand eingesetzt, der über eine Kühlfalle die gesamte Lötvorrichtung auf einen Druck von weniger als 10^{-4} Torr absaugte. Gleichzeitig konnte durch geeignete Ventilschaltung die Apparatur vor dem Lötvorgang mit Helium gespült und danach unter Helium abgekühlt werden.

Um saubere Lötungen zu erzielen und Anlauffarben zu vermeiden, war es besonders wichtig, daß die Apparatur vorher gut mit Helium gespült wurde und daß während des Aufheizvorganges der Druck immer unterhalb 10^{-4} Torr gehalten wurde. Als Lot wurde "Nicrobraze 50" verwendet bei einer Löttemperatur von mehr als 850°C .

Die von der Lötstelle einiger Probeprüflinge angefertigten Längs- und Radialschliffe (Abb. 3) zeigen einen einwandfreien Verlauf des Lotes von 3-5 mm Länge im Spalt rund um den Thermoelementschaft und den Endstopfen. In analoger Weise lassen die von den Bestrahlungsprüflingen angefertigten Röntgenaufnahmen ebenfalls ein genügend tiefes Eindringen des Lötgutes ohne Porenbildung erkennen.

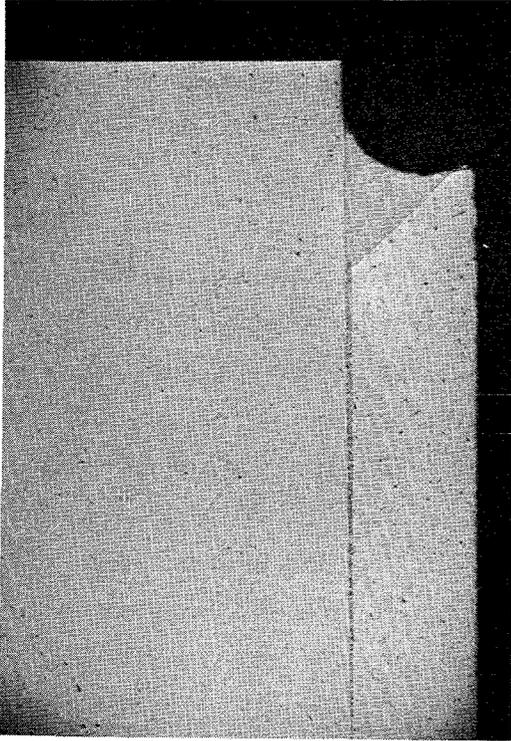
Abschließend wurden die Prüflinge über den mit einer Bohrung versehenen Endstopfen mit Helium geflutet und mit einem Edelstahlstift nach dem WIG-Verfahren zugeschweißt.

112-5

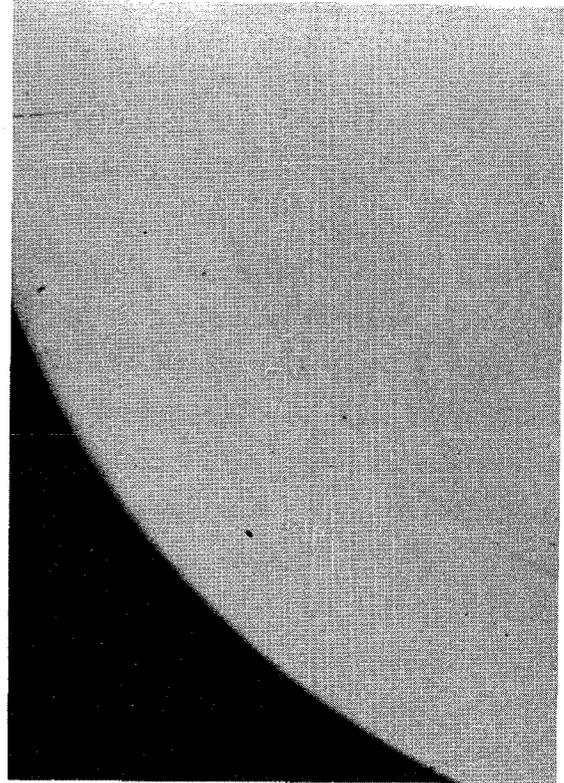
Abb.: 3

Lötstelle : Thermoelement - Endstopfen

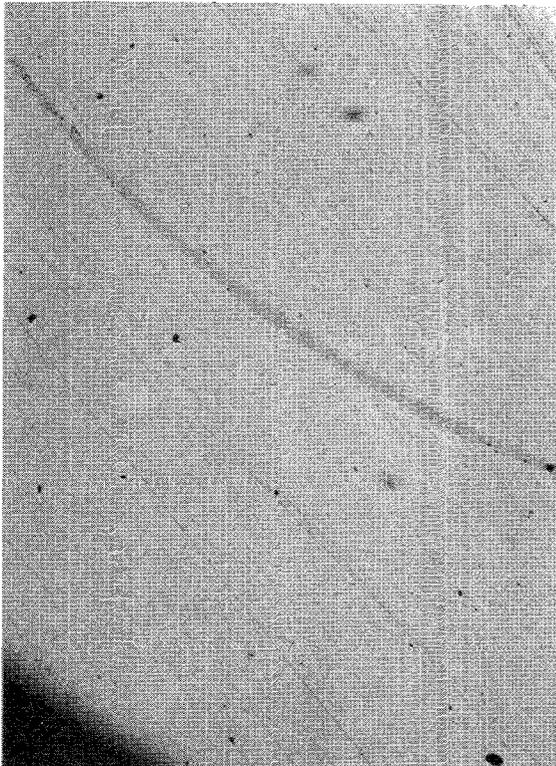
Längsschliff V: 25 x



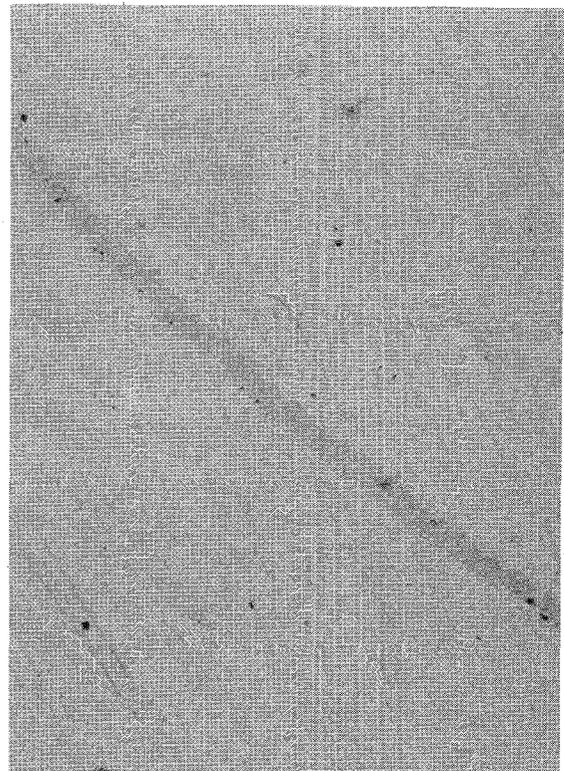
Radialschliff V: 50 x



Radialschliff V: 100 x



V: 200 x



1121.2 Verträglichkeitsuntersuchungen - Oxid*Zum Einfluß des Ausgangszustandes auf das Verträglichkeitsverhalten von austenitischen Stählen

(O.Götzmann, P.Hofmann, M.Lenz, IMF)

Die verschiedenen Untersuchungen im IMF zum Verträglichkeitsverhalten von oxidischem Brennstoff mit Hüllmaterialien haben erkennen lassen, daß neben der chemischen Zusammensetzung auch noch die Struktur des Hüllmaterials einen Einfluß auf das Angriffsverhalten haben muß. Zur Untersuchung dieses Einflusses wurden die beiden Stahltypen 1.4970 und 1.4988 mit drei verschiedenen Vorbehandlungszuständen, die unterschiedliche Strukturen ergeben sollten, im Kontakt mit überstöchiometrischem Oxidbrennstoff, dem die Spaltproduktelemente Cäsium, Jod und Tellur zugemischt wurden, geglüht. Die Spaltproduktzumischung entsprach einem Abbrand von 10 At.%. Außerdem wurden gleich vorbehandelte Proben noch im Kontakt mit Cs_2CO_3 und zu Vergleichszwecken auch unter einer reinen Argonatmosphäre geglüht. Cs_2CO_3 reagiert mit den Stählen sehr schnell, und man nahm daher an, daß mit Cs_2CO_3 als Reagenz solche Parameterversuche schneller und einfacher durchgeführt werden könnten als mit dem simulierten abgebrannten Brennstoff.

Die Hüllmaterialien kamen in Form von Flachzerreißproben zum Einsatz.

Die Vorbehandlungszustände waren:

lösungsgeglüht

lösungsgeglüht + ausgelagert

15 % kaltverformt + ausgelagert.

Die Auslagerung wurde beim 1.4970-Stahl nach der Lösungsglühung bei 800°C und nach der Kaltverformung bei 750°C über 2 h durchgeführt. Beim 1.4988-Stahl waren die Auslagerungstemperaturen jeweils 50° tiefer.

Die Verträglichkeitsglühung fand im Kontakt mit dem simulierten abgebrannten Brennstoff bei 700°C über 1000 h statt. In Kontakt mit Cs_2CO_3 wurde der 1.4970-Stahl bei 700°C über 200 h geglüht und der 1.4988-Stahl bei

* BzFE-Nr. 313.1

650°C über 200 h. Bei Vorversuchen hatte es sich herausgestellt, daß die Reaktion des 1.4970-Stahls bei 650°C noch zu gering war [1]. Nach den Verträglichkeitsglühungen wurden die mechanischen Eigenschaften der Proben in Zerreißversuchen ermittelt und die Reaktionszonen unter dem Lichtmikroskop ausgemessen. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 1 und 2 zusammengestellt.

Wie aus der Tab. 1 zu sehen ist, kann bei beiden Stahltypen kein Einfluß des Vorbehandlungszustandes auf die Tiefe der Reaktionszone nach Reaktion mit Cs_2CO_3 festgestellt werden. Beim 1.4970-Stahl liegt sie zwischen 80 und 90 μm , beim 1.4988-Stahl bei 40 μm . Der Unterschied zwischen den beiden Stählen ist evtl. auf die 50°C tiefere Reaktions-temperatur beim 1.4988-Stahl zurückzuführen. Bei den mechanischen Eigenschaften fällt die starke Zunahme der Streckgrenze bei den nicht-kaltverformten Proben auf. Bei den kaltverformten Proben war die Zunahme der Streckgrenze wesentlich geringer. Die Zugfestigkeit wurde durch die Reaktion mit dem Cäsiumcarbonat nur geringfügig verändert. Sehr stark reduziert wurde die Bruchdehnung bei allen korrodierten Proben. Am stärksten nahm sie bei den kaltverformten Proben ab.

Die Ergebnisse mit den Proben, die in Kontakt mit dem simulierten abgebrannten Brennstoff geglüht wurden, vermitteln ein deutlich schlechteres Verträglichkeitsverhalten des 1.4970-Stahls als des 1.4988-Stahls, wie aus der Tab. 2 zu sehen ist. Die Reaktionstiefen sind beim 1.4970-Stahl etwa doppelt so groß wie beim 1.4988-Stahl. Beim 1.4970-Stahl ist auch deutlicher ein Einfluß des Vorbehandlungszustandes auf das Angriffsverhalten zu erkennen. Am schlechtesten verhielten sich die Proben, die nach der Lösungsglühung noch ausgelagert wurden. Ein ähnliches Bild vermitteln auch die mechanischen Eigenschaften. Es fällt auf - vor allem im Vergleich mit den Proben, die in Kontakt mit Cäsiumcarbonat geglüht wurden -, daß sowohl die Streckgrenze, die Zugfestigkeit wie auch die Bruchdehnung abgenommen haben. Vor allem die Abnahme der Festigkeitswerte war beim 1.4970-Stahl bei allen Vorbehandlungszuständen größer als beim 1.4988-Stahl. Die Reduktion der Bruchdehnung war bei beiden Stahltypen vergleichbar.

[1] P. Hofmann, O. Götzmann, KFK 1273/3, 112-1

Der Unterschied, der in Bezug auf die mechanischen Eigenschaften durch die verschiedenen Reaktionsmedien erzielt wurde (Cs_2CO_3 gegenüber spaltprodukt-dotiertem Brennstoff), deutet daraufhin, daß durch das Cäsiumcarbonat nicht nur ein oxidativer Angriff, sondern auch eine Aufkohlung des Hüllmaterials stattfindet. Die Aufkohlung geht über die sichtbare Reaktionszone hinaus und versprödet den scheinbar intakt gebliebenen Teil des Hüllmaterials. Die starke Erhöhung der Streckgrenze bei den nicht kaltverformten Proben war die Folge. Cäsiumcarbonat ist deshalb kein geeignetes Korrosionsmedium, um in-pile Angriffe an den Stählen zu simulieren.

Der Stahl 1.4988 wird durch den simulierten abgebrannten Brennstoff weniger stark angegriffen als der Stahl 1.4970. Auch werden seine mechanischen Eigenschaften in geringerem Umfang verändert. Eine Abhängigkeit des Hüllangriffs vom thermomechanischen Vorbehandlungszustand war bei diesen Untersuchungen nur am 1.4970-Stahl zu erkennen.

Tabelle 1: Reaktionstiefe [in μm] sowie Änderung der mechanischen Eigenschaften [in %] von 1.4970 und 1.4988 nach Verträglichkeitsglühungen mit Cs_2CO_3 bei $700^\circ\text{C}/200\text{ h}$ bzw. $650^\circ\text{C}/200\text{ h}$

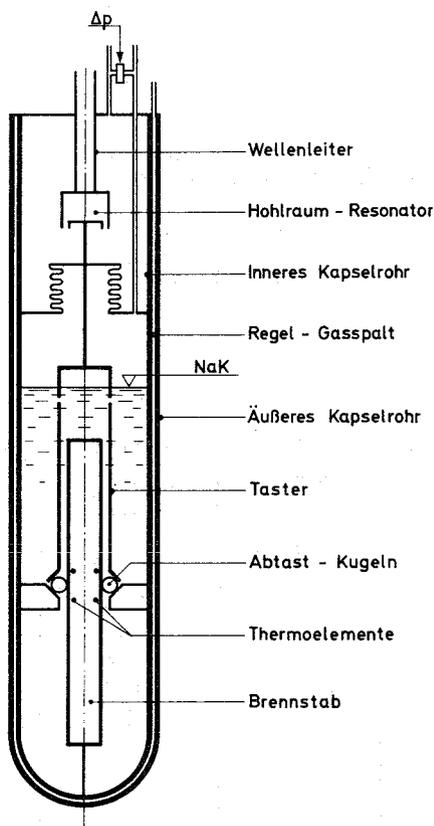
Vorbehandlungs-Zustand	Lösungsgeglüht		Lösungsgeglüht + ausgelagert		15 % kaltverformt + ausgelagert	
	1.4970	1.4988	1.4970	1.4988	1.4970	1.4988
Stahltyp						
Reaktionszone	90	40	90	40	80	40
$\sigma_{0,2}$	+ 64,6	+ 50,3	+ 63	+ 45	+ 2,8	+ 5,8
σ_B	- 0,4	+ 1,5	- 2	+ 2,6	+ 2,3	+ 4,4
δ_B	- 68,7	- 68,4	- 67,5	- 67,9	- 77	- 82

Tabelle 2: Reaktionstiefe [in μm] sowie Änderung der mechanischen Eigenschaften [in %] von 1.4970 und 1.4988 nach Verträglichkeitsglühungen mit $\text{UO}_{2,08}+\text{Cs}+\text{J}+\text{Se}+\text{Te}$ (sim. Abbrand 10 At.%) bei $700^\circ\text{C}/1000\text{ h}$

Vorbehandlungs-Zustand	Lösungsgeglüht		Lösungsgeglüht + ausgelagert		15 % kaltverformt + ausgelagert	
	1.4970	1.4988	1.4970	1.4988	1.4970	1.4988
Stahltyp						
Reaktionszone	125	60	170	70	130	60
$\sigma_{0,2}$	- 16	- 7,7	- 21	- 2	- 22	- 13
σ_B	- 46	- 29	- 53	- 29	- 33	- 26
δ_B	- 71	- 63	- 73	- 68	- 74,3	- 72

1122. Bestrahlungsexperimente - Oxid (Parameter-tests)VADIA, eine Bestrahlungskapsel zur Messung von Hüllrohraufweitungen im Siloe^F
(H. Häfner, IMF)

Für den französischen Reaktor Siloe wurde vom CEN-Grenoble ein Bestrahlungseinsatz entwickelt, der mittels eines Tastersystems die radiale Aufweitung eines Brennstabprüflings unter isostatischer Druckbelastung während des Betriebs zu messen gestattet. Bisher sind zwei Einsätze mit je einer Probe von 7 mm Hüllrohrdurchmesser und ca. 100 mm Länge bei ca. 500 W/cm Stableistung und Hüllrohrtemperaturen zwischen 600 und 700 °C bestrahlt worden [17]. Das Abtastsystem ist beim zweiten Siloe-Einsatz gegenüber dem ersten wesentlich verbessert worden. Das Kapselkonzept wird z.Zt. in Grenoble in Zusammenarbeit mit dem IMF für den belgischen Reaktor BR2 modifiziert (Projekt Mol 10).

Kurze Beschreibung der Probenkapsel
(Abb. 4)

Die Brennstabprobe sitzt, von NaK umgeben, in einer inneren Kapsel und kann durch Gaseinspeisung mit Außen- druck beaufschlagt werden. Über ein besonderes Abtastsystem werden radiale Aufweitungen der Brennstabhülle in eine axiale Verschiebung des Kolbens innerhalb eines Resonanzhohlraumes umgesetzt und können so mit dem Hohlraum- resonator erfaßt werden. Die Hüllrohr- temperatur wird durch direkt angelegte Thermolemente gemessen und kann durch Änderung der Gaszusammensetzung im Gasspalt zwischen innerer und äußerer Kapsel geregelt werden.

Abb. 4: "VADIA" Brennstoffschwellkapsel

[17] D. Brucklader, W. Dienst: Creep Behavior of Ceramic Nuclear Fuels under Neutron Irradiation; Journal of Nuclear Materials 42 (1972) p.285-296

Bisherige Erfahrungen

Der erste Bestrahlungseinsatz dieser Art, der über 3 Reaktorzyklen relativ zufriedenstellend lief, hatte ein Zweipunkt-Schneiden-Abtastsystem mit einer festen und einer beweglichen Schneide. Damit konnten Hüllrohraufweitungen nur in einer Winkellage erfaßt werden. Das hatte den Nachteil, daß man bei ungleichmäßiger Aufweitung der Hülle u.U. gerade die Winkellage mit minimaler Aufweitung erfaßte. Außerdem hatte dieses System ein relativ störanfälliges Hebelsystem zur Übertragung der Durchmesseränderung in eine Längenänderung.

Durch das jetzt verwendete Abtastsystem mit 3 um 120° versetzten Kugeln ist eine bessere Erfassung der Durchmesseränderungen möglich; auch ist hierbei das Umsetzen in eine axiale Bewegung einfacher. Mit dem zweiten Bestrahlungseinsatz wurden insbesondere Temperaturzyklen durchgeführt; er arbeitete ebenfalls über 3 Reaktorzyklen zufriedenstellend.

Die Bestrahlung des ersten der zwei für den BR2 bestellten Einsätze soll etwa zum Jahresende beginnen.

1123 Bestrahlung im schnellen Neutronenfluß: Nachuntersuchung DFR-435Austragung von Brennstoff aus den Brennstäben des Bestrahlungsexperimentes DFR-435 * (D. Geithoff, IMF)

Im Bestrahlungsexperiment DFR-435 wurde eine Anzahl von Mischoxid-Brennstäben aus dem Experiment DFR-350 im Dounreay Fast Reactor weiterbestrahlt. Die Bestrahlung wurde in Dreiergruppen in sogenannten Trefoils bis zu einem Abbrand von maximal 9,74% Fima durchgeführt. Von den acht Stäben, für die die GfK verantwortlich zeichnete, wurden fünf Stäbe im Ablauf der Bestrahlung defekt. Es traten Hüllrohr-Risse auf, deren Ursache zum Teil in der Behandlung lag, die die Stäbe während der jeweiligen Zwischenuntersuchungen erlitten hatten. Über die Schäden, wie sie sich in der zerstörungsfreien Nachuntersuchung darstellten, ist bereits berichtet worden [1, 2].

* BzFE-Nr. 462.9

[1] D. Geithoff: Abbrandbestrahlungen im schnellen Fluß - Experiment DFR-435; Beitrag in KFK-1272/2

[2] D. Geithoff, W. Ernst: unveröffentlichter Bericht

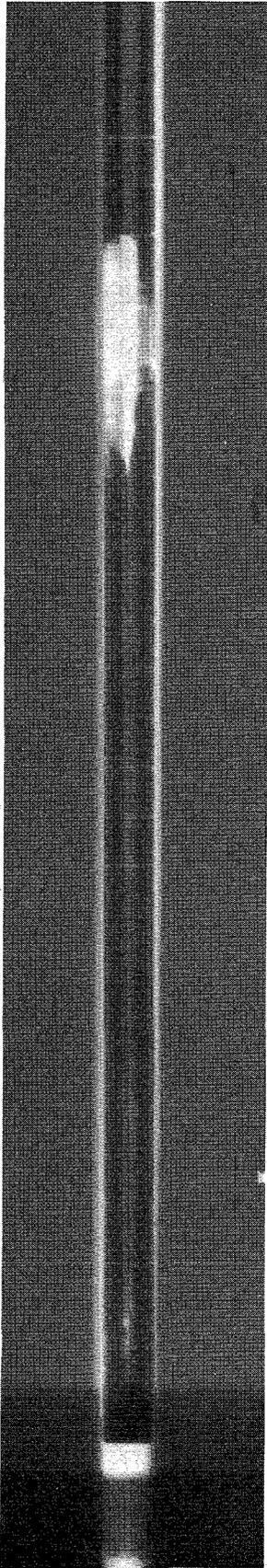
Besondere Aufmerksamkeit fand die Tatsache, daß trotz der geringen Breite der Hüllrohr-Risse erhebliche Mengen von Brennstoff ausgetragen worden waren. In einer ersten Gewichtsbestimmung in Dounreay ergaben sich für die Stäbe des Trefoils 435/7 folgende Gewichtsverluste:

Stab G 8	5,27 g
Stab G 12	3,52 g
Stab G 16	4,09 g

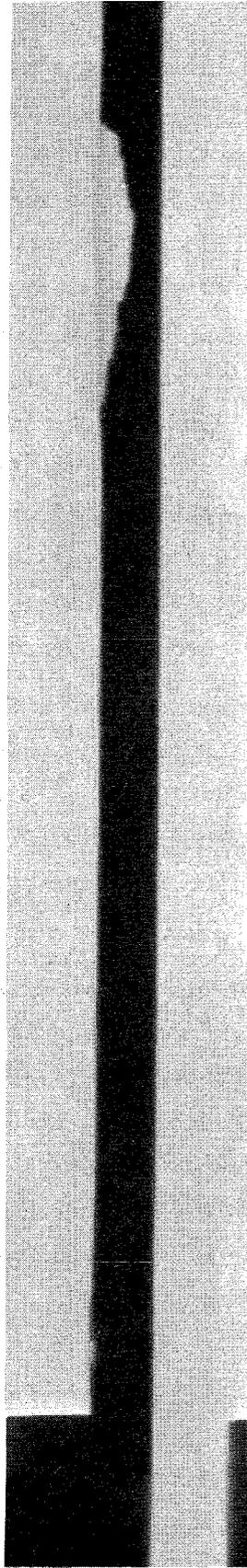
Allein aus den Gewichtsbestimmungen auf die Menge des verlorenen Brennstoffes zu schließen ist nicht zulässig, da eingedrungenes Kühlmittel (NaK) bzw. dessen Oxidationsprodukte einen Teil des Brennstoffverlustes kompensieren können. Auf der anderen Seite ist zu berücksichtigen, daß das freigesetzte Spaltgas sicherlich vollkommen entwichen ist, woraus sich je nach Annahmen über Freisetzung und Spaltgasausbeute ein zusätzlicher Verlust von etwa 0,5 g ergibt. Unter diesen Einschränkungen kann man die Mindestwerte für die Brennstoffverluste bei etwa 0,5 g unterhalb der oben angegebenen Werte ansetzen. Da in diesen Stäben die einzelnen Brennstofftabletten jeweils 1 g wogen, bedeutet der Verlust für Stab G8 4 bis 5 Tabletten, für Stab G12 3 und für Stab G16 3 bis 4 Tabletten.

Das Ausmaß des Brennstoffverlustes wird auch in der Stabdurchleuchtung sichtbar. Abb. 5 zeigt den Stab G16 im Bereich des oberen Risses in der Röntgendurchleuchtung. Der Umfang des Brennstoffverlustes kann daraus in Übereinstimmung mit dem Gewichtsverlust auf ca. 3 Tabletten abgeschätzt werden.

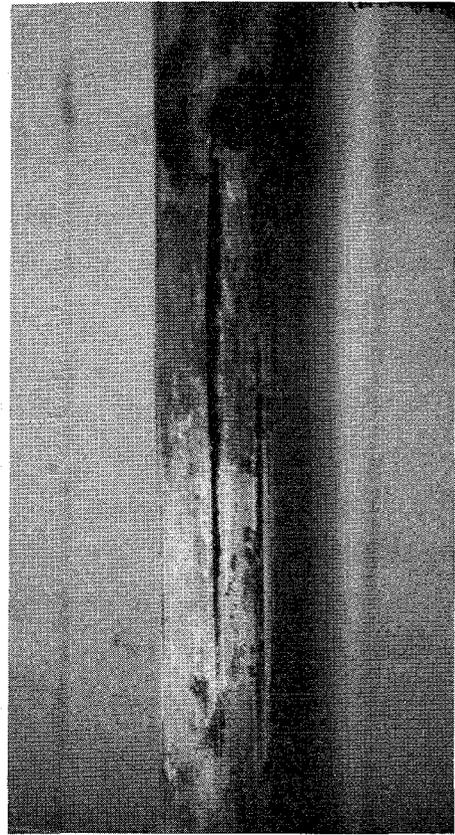
Die Frage nach dem Mechanismus der Austragung stellt sich gleichzeitig mit der Frage nach dem Zeitpunkt des Schadens bzw. der Betriebsdauer nach dem Ereignis. Für den in Abb. 5 gezeigten Stab G16 sind drei Zeitpunkte in seinem letzten Bestrahlungszyklus, die durch Radon-Ausbrüche im Schutzgas des DFR gekennzeichnet sind, möglich. Sie liegen jeweils 34 Tage, 13 Tage und 1 Tag vor Zyklusende. Ein plötzliches Austreiben des Brennstoffes etwa durch Spaltgas-Druckentlastung ist wenig wahrscheinlich, da der Riss im Maximum nur ca. 1mm breit aufklafft. Es kann vielmehr angenommen werden, daß der Hüllrohr-Riß zu einem frühen Zeitpunkt, also zum Beispiel 34 Tage vor Zyklusende, entstanden ist und während der weiteren Betriebszeit der Brennstoff ausgetragen wurde.



Röntgen -
Durchleuchtung



Röntgen -
Umleuchtung



Außenansicht
des Risses

GfK Karlsruhe
IMF / III

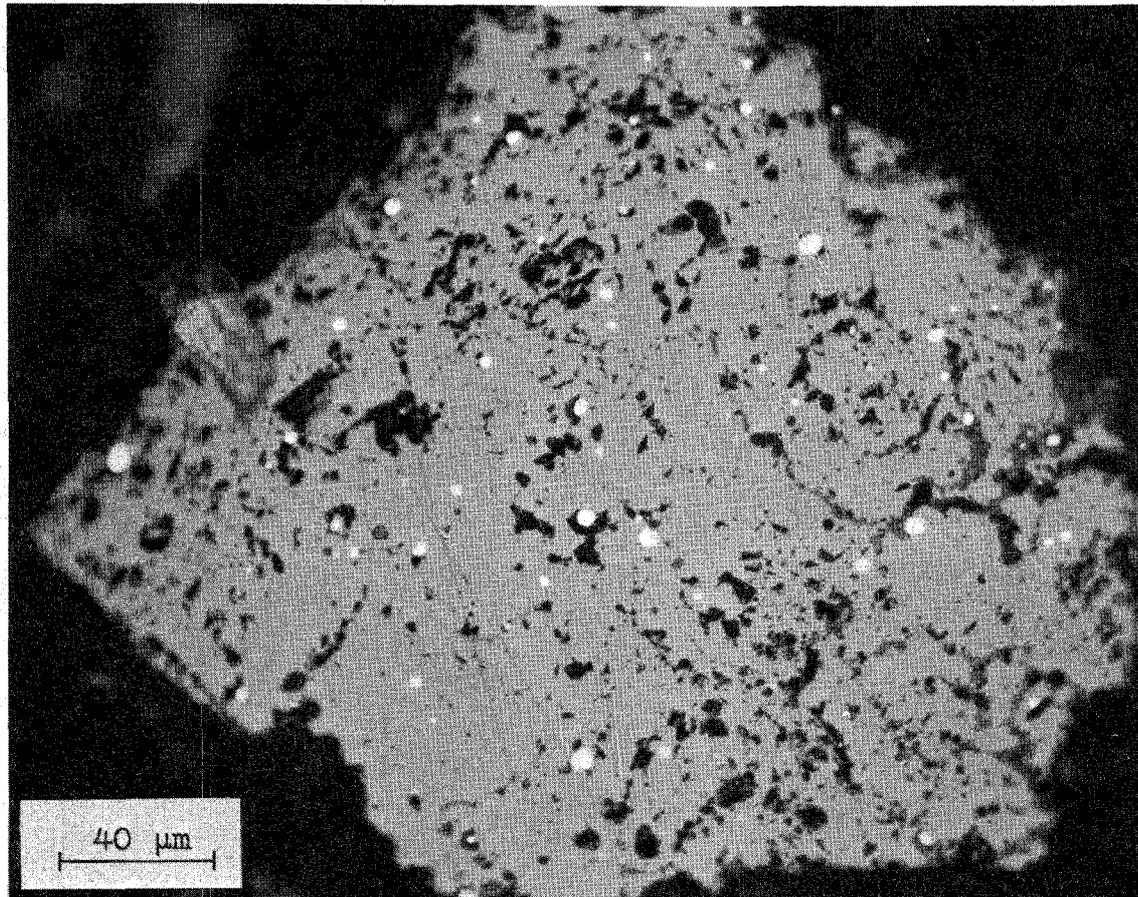
DFR - 435 Stab G 16
Brennstoffverlust am oberen Hüllriss

Abb. 5

Für die Art des Brennstofftransportes ist ein rein mechanisches Modell und ein gemischt chemisch-mechanisches Modell denkbar. Beim ersten wird der Brennstoff in seiner ursprünglichen chemischen Form, also als Oxid, mechanisch nach einer Zerkleinerung herausgespült. Der zweite Fall sieht zunächst eine chemische Wechselwirkung des Kühlmittels mit dem Brennstoff vor, auf die dann ein Ausschwemmen des Reaktionsproduktes erfolgt. Bei der keramografischen Untersuchung der Defektzone wurde daher besonders intensiv nach Reaktionsprodukten von der Art des Natriumuranats gesucht, jedoch keine entsprechende Phase gefunden. Daraus ist abzuleiten, daß das Austragen des Brennstoffes rein mechanisch, d.h. durch das vorbeiströmende Kühlmittel, erfolgt. Ferner wurden im sogenannten Catchpot, einem im Trefoil eingebauten Sieb, unterhalb der Stäbe Partikel gefunden, die sich eindeutig als chemisch unveränderter Brennstoff identifizieren ließen (Abb. 6). Somit darf man mit Sicherheit auf einen rein mechanischen Austragungsprozeß schließen.

Einen Einblick in den Ablauf dieses Prozesses geben die Bilder in Abb. 7. Sie zeigen übereinanderliegende Brennstab-Ebenen im Bereich des vorher erwähnten Risses. Nimmt man an, daß der Riß nicht plötzlich auf seine endgültige Länge aufgeplatzt ist, so lassen sich die Bilder auch als ein zeitliches Nacheinander verstehen. Den Ablauf der Brennstoffaustragung kann man sich dann folgendermaßen vorstellen:

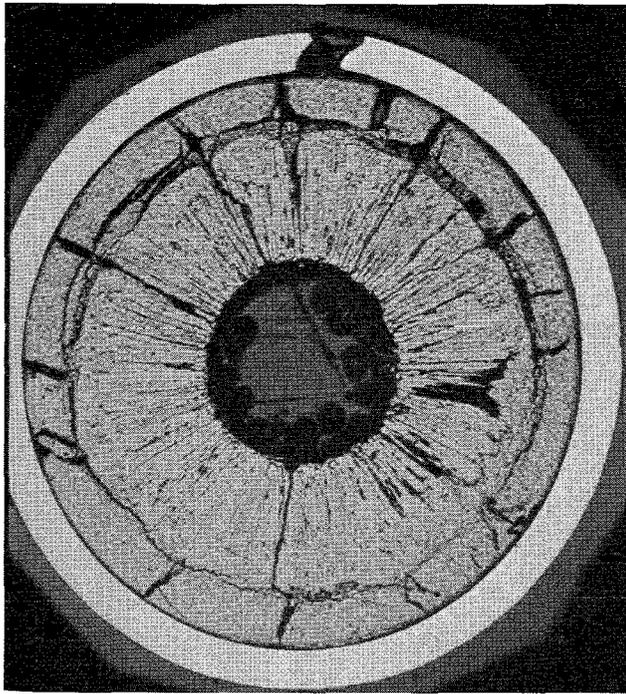
Eine erste Auflockerung des Brennstoff-Gefüges vollzieht sich in einer ringförmigen Zone, die sich um den Außenrand der Säulenkristalle zieht. Hier finden sich auch sonst, d.h. bei der Untersuchung intakter Stäbe, häufig Umfangsrisse, die beim Abkühlen entstanden sind. Eine ähnliche Ursache, nämlich Abkühlen des Brennstoffes durch eindringendes Kühlmittel, kann auch in diesem Fall angenommen werden. Zusätzliche Keilrisse in der Brennstoffaußenzone liefern dann Oxidpartikel, die durch weiteres Zerrütteln klein genug sind, daß sie ausgeschwemmt werden können. Auf diese Weise wird ein kranzförmiger Hohlraum um das Stabzentrum mit seinen Säulenkristallen erzeugt. Später kommt es dann zum Einbruch des noch stehenden Säulenkristallkamins (siehe Detailbild IV), wobei ein Brennstoff-Segment auf der dem Riß gegenüberliegenden Seite zurückbleibt. Offenbar ist die Bindung des Brennstoffes an die Hülle so fest, daß diese Schale nicht herausbricht. Haftet der Brennstoff noch fester an der Hülle, zum Beispiel infolge starker Innenkorrosion, so kann das Herausschwemmen noch weiter erschwert werden. In Abb. 8 ist dies am zweiten Hüllrohrriß des Stabes G16 demonstriert.



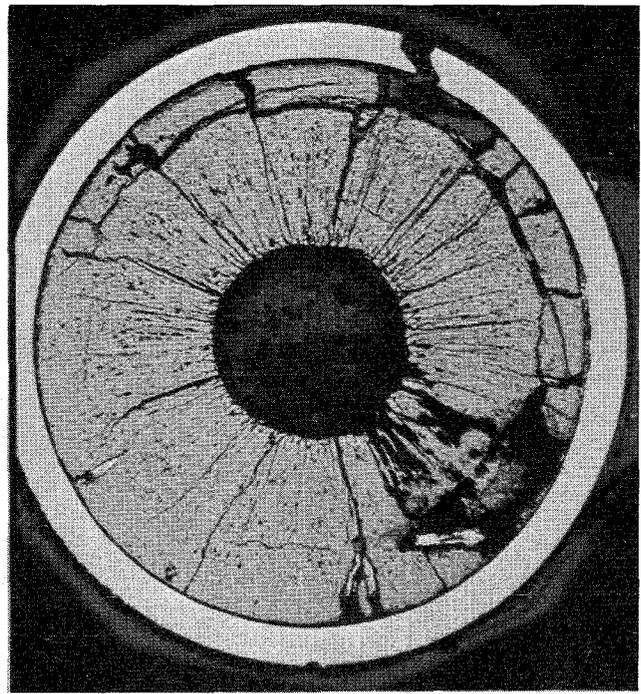
GfK Karlsruhe
IMF / III

Ausgetragener Brennstoff im Catchpot des
Treffs DFR-435/7

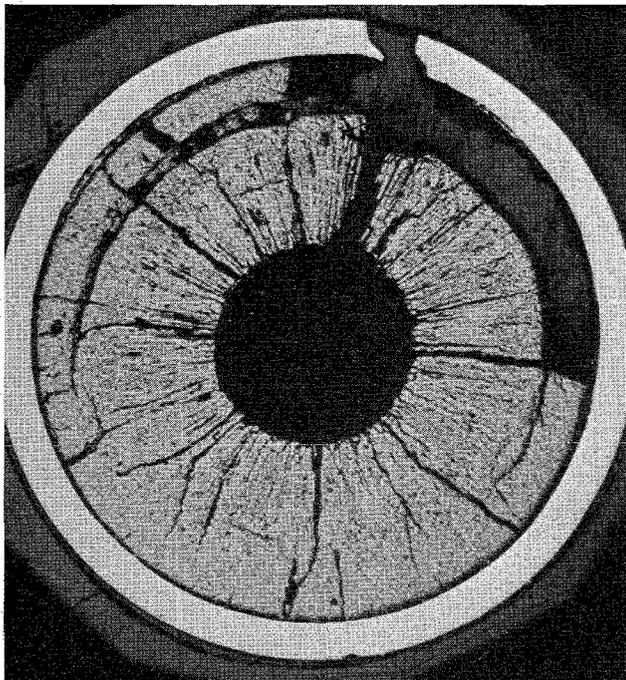
Abb. 6



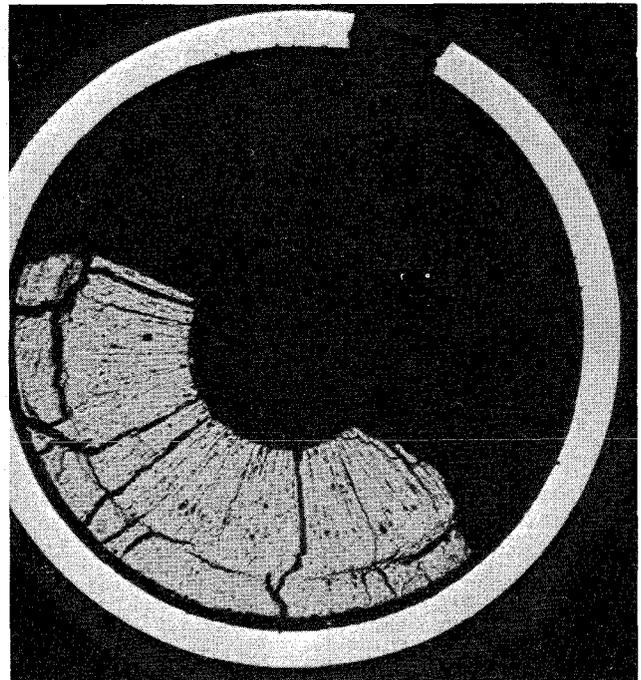
I



II



III

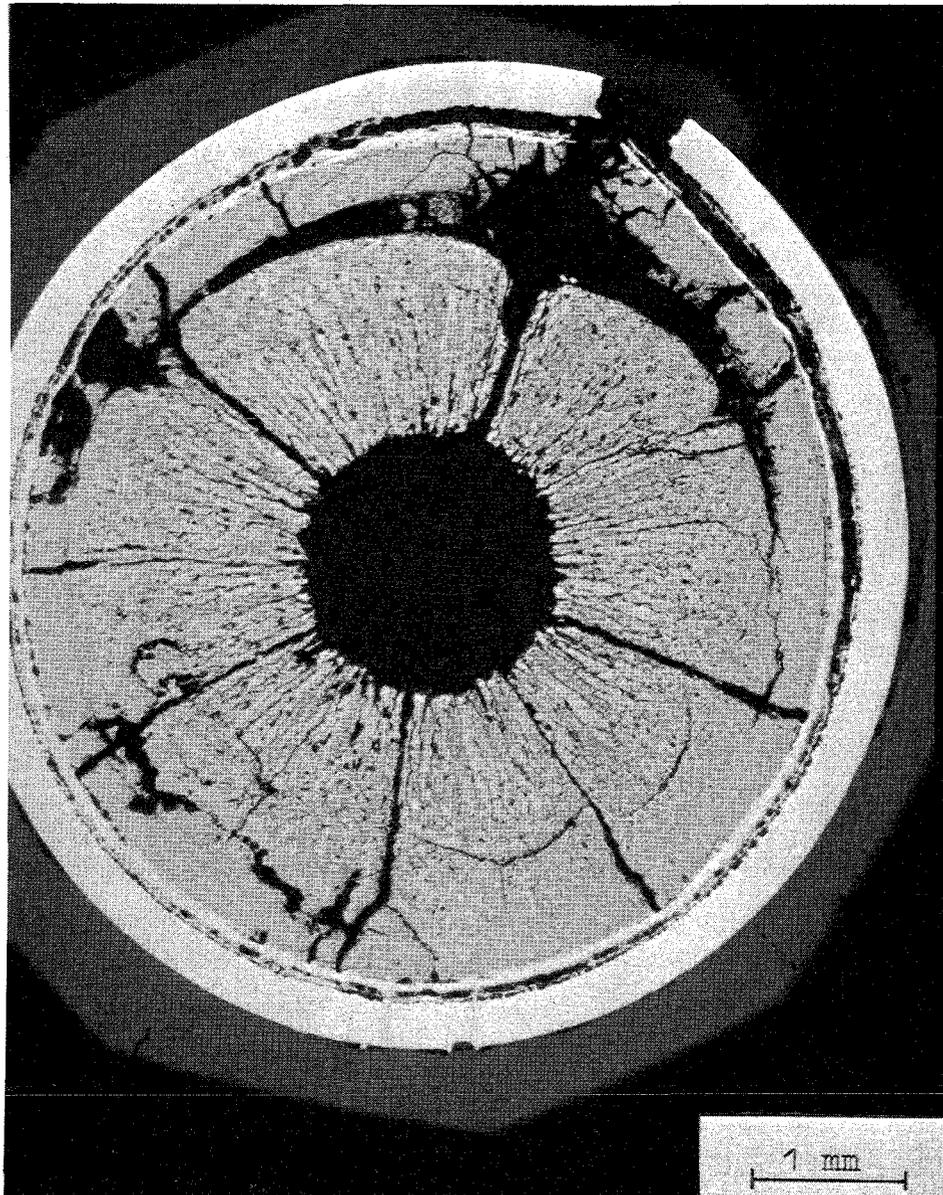


IV

GfK Karlsruhe
IMF/III

Austragung von Brennstoff aus ei-
nem Hüllrohr-Riss.
DFR-435 Stab G 16

Abb. 7



GfK Karlsruhe
IMF/III

Haften des Brennstoffs an der
Hülle infolge von Innenkorrosion
DFR-435 Stab G 16

Abb. 8

Eine entscheidende Rolle bei der Brennstoffaustragung spielen sicher die Strömungsverhältnisse des Kühlmittels. Im vorliegenden Experiment lagen die Strömungsgeschwindigkeiten für das Kühlmittel mit Werten von < 1 m/sec relativ niedrig. Es muß erwartet werden, daß bei den höheren Strömungsgeschwindigkeiten im SNR-300 die Austragung von Brennstoff aus Hüllrohrrißen in noch größerem Umfang erfolgt. Aus den derzeitigen Bestrahlungsexperimenten lassen sich der Realität näherliegende Ergebnisse jedoch nicht erzielen, da die zwangsläufig kurzen Brennstoffsäulen der Versuchsstäbe die geringen Strömungsgeschwindigkeiten bedingen.

1123.2 Auswertung der Nachuntersuchung von bestrahlten Oxidbrennstäben

Die gemessene Porositätsverteilung bestrahlter oxidischer Brennstoffe und ihr Einfluss auf das Temperaturprofil*

(G. Ondracek, B. Schulz, IMF)

Die Wärmeleitfähigkeit des Brennstoffs beeinflusst die Wirtschaftlichkeit und Auslegung von Schnellbrüterbrennelementen. Porosität und Porenverteilung im oxidischen Brennstoff (83 - 94% T.D.) unter Bestrahlung beeinflussen ihrerseits die Wärmeleitfähigkeit bzw. das Temperaturprofil im Brennstoff.

Ausgehend von gemessenen Porositätsverteilungen in bestrahlten Mischoxidbrennstäben verschiedener Versuchsgruppen, wurden diese nach äußeren, fassbaren Parametern, wie Ausgangsdichte des Brennstoffs, Abbrand und Stabilität, geordnet, um sie dann in der Berechnung des Temperaturprofils zu verarbeiten (1).

Vermessen wurden Segmentausschnitte von Querschliffen bestrahlter Proben im Bildanalysator mit Epidiaskop, die als fotografische Positivabzüge vorlagen. Durch Vergleichsmessungen an Standardproben bekannter Dichte wurde geprüft, mit welcher Genauigkeit die in Querschliffen gemessene Porosität die echte Porosität wiedergibt [1]. Es ergab sich, daß diese Genauigkeit

* BzFE Nr. 462.9

Zuletzt berichtet in KFK 1273/2, S. 112-24.

[1] J. Biel, B. Schulz; Prakt.Metallographie, demnächst

von der Mikroskopvergrößerung unabhängig ist, stark beeinflusst wird von der Präparation der Proben [2, 3] und am größten ist bei hoher Bildschirmvergrößerung und "weicher" Papiergradation. Die Unsicherheit der Einzelmessung (+ 3,5% Porosität) wurde aus der Streuung der Einzelmesswerte bei wiederholter Messung (+ 1,5% Porosität) und der Schwankungsbreite der Messungen an zwei verschiedenen Segmenten (+ 2% Porosität) ermittelt.

Nach den Ergebnissen findet eine Porenverteilung oberhalb 0,67% Abbrand statt, jedoch besteht kein erkennbarer systematischer Zusammenhang zwischen den Porositätskurven und den variierten Größen. Ein allgemein gültiges Porositätsprofil erhält man daher durch Zusammenfassung aller bisherigen Messergebnisse zu einer mittleren Porositätsverteilung, wobei der mittlere Fehler der Mittelwerte kleiner sein muß als die oben bestimmte Unsicherheit der Einzelmessung, und der statistisch ermittelte Fehler der Einzelmessung in der Größenordnung dieser Messunsicherheit liegen muß. Abb. 9 (oben) zeigt die mittlere radiale Porositätsverteilung. Für drei Radien wurde der Fehler berechnet. Mit den berechneten Werten in Tab. 3 stützt die Fehleranalyse die Zusammenfassung der Messdaten zu einem Mittelwert

Radius $r' = \frac{r-r_z}{r_b-r_z}$	Anzahl der Messungen	Mittl.Fehler d. Mittelwertes (in % absolute Porosität)	Mittl.Fehler d. Einzelmessung
0,1	22	±0,8	±3,7
0,5	22	±0,5	±2,3
1,0	22	±0,8	±3,7

Tab. 3: Mittlerer Fehler in Abhängigkeit vom Ort im Brennstoff

für die jeweiligen normierten Radien (r'). Die Kurve in Abb. 9 (oben) ist als die z.Zt. repräsentativste für das Phänomen der Porenverteilung in bestrahlten oxidischen Brennelementen anzusehen. Ihre Verarbeitung für die Berechnung von Temperaturprofilen erfolgte, indem zunächst entsprechend den im Experiment bewährten multiplikativen Ansatz für die Wärmeleitfähigkeit

[2] H. Hellriegel, G. Hoffmann, K. Spieler; KFK-Ext. 6/71-3
[3] H. Hoffmann; persönl. Mitteilung

$$\lambda (P,T) = f (P\langle r \rangle) \cdot f (T) \quad (1)$$

(Symbole s. Schluss des Beitrages) der Einfluss der Porosität berücksichtigt wurde (2). Abb. 9 (unten) gibt diesen Einfluss als Funktion des normierten Radius (r') wieder. - Die Integration der Wärmeleitungsgleichung für den eindimensionalen stationären zylindergeometrischen Fall mit Trennung der Variablen liefert

$$\int_{T_b}^T f(T) dT = \frac{Q}{2\pi(r_b^2 - r_z^2)} \left[\int_{r_b}^r \frac{r dr}{f(P\langle r \rangle)} - r_z^2 \int_{r_b}^r \frac{dr}{r f(P\langle r \rangle)} \right] \quad (2)$$

Hierbei wurde die Wärmequellendichte als konstant angenommen. Die quantitative Plutoniumverteilung unter Bestrahlung ist bisher weder nach ihrer Parameterabhängigkeit noch nach ihrem Betrag genügend gut bekannt, um sie berücksichtigen zu können [5]. Die berechneten Temperaturverteilungen bei gegebener Temperaturfunktion der Wärmeleitfähigkeit [4] für einen oxidischen Brennstoff mit 20 Gew.-% PuO_2 (5,2 mm \emptyset ; 1 mm Zentralkanalradius) zeigt Abb. 10 mit der Stableistung als Parameter. - Abb. 11 zeigt einen interessanten Vergleich berechneter Temperaturprofile für eine Stableistung von 433 W/cm. Kombiniert man eine nach den hier ermittelten Daten zu niedrige Porosität bestimmter Verteilung mit einem - physikalisch nicht haltbaren (1) - Ansatz zur Porositätskorrektur der Wärmeleitfähigkeit (SATURN-Code), so erhält man das gleiche Temperaturprofil wie dasjenige nach Gleichung (2) für die - höhere - Porosität mit einer Verteilung entsprechend Abb. 9 (unten). Durch diesen Zufall sind die bisher gehandhabten Temperaturprofile näherungsweise richtig. Würde man jedoch mit dem höheren Porositätsprofil und der bisher im SATURN-Code verwendeten Porositätskorrektur [6] rechnen, so ergäben sich die deutlich höheren Temperaturen der entsprechenden Kurve in Abb. 11. Diese Temperaturen liegen bereits nahe den in der vorläufigen Spezifikation enthaltenen Maximaltemperaturen des SNR 300 [7].

[4] B. Schulz, S. Nazaré; in KFK 1273/2 (1973), S. 112-47

[5] H. Kleykamp; KFK 1736 (1973)

[6] H. Kämpf, G. Karsten; Nucl.Appl.Techn. 9 (1970), 288

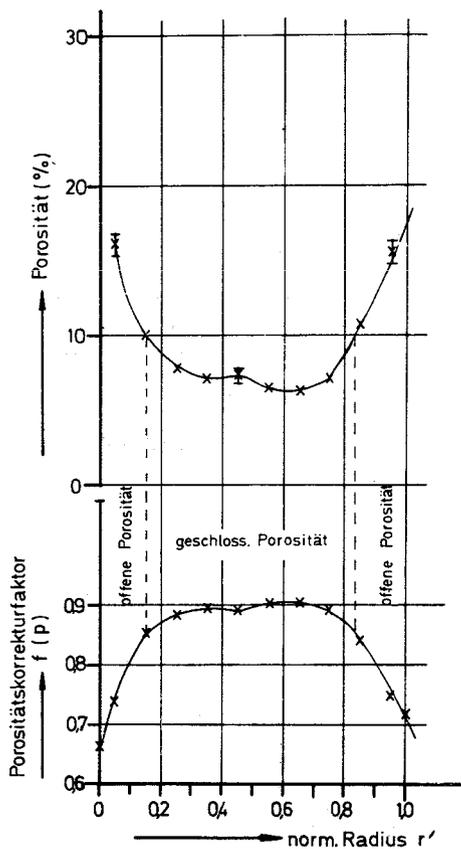
[7] K. Kummerer; persönl. Mitteilung

Symbole:

$f(P)$	=	Porositätskorrekturfaktor;
λ	=	Wärmeleitfähigkeit;
P	=	Porosität;
Q	=	Stableistung;
r	=	Radius, gezählt vom Mittelpunkt des Stabquerschnittes;
r'	=	normierter Radius;
r_z, r_b	=	Zentralkanal- bzw. Brennstoffradius;
T_b	=	Temperatur der Brennstoffoberfläche;
TD	=	theoretische Dichte der Brennstoffoberfläche.

Veröffentlichungen:

- (1) C. Ondracek, B. Schulz
Die gemessene Porositätswerte bestrahlter ox.Brennstoffe und ihr Einfluß auf das Temperaturprofil.
Reaktortagung Berlin 2.-5.4.1974. Seite 265
- (2) G. Ondracek, B. Schulz
J.Nucl.Mat. 46 (1973), 253

Abb. 9:

Repräsentatives Porositätsprofil im Brennstoff

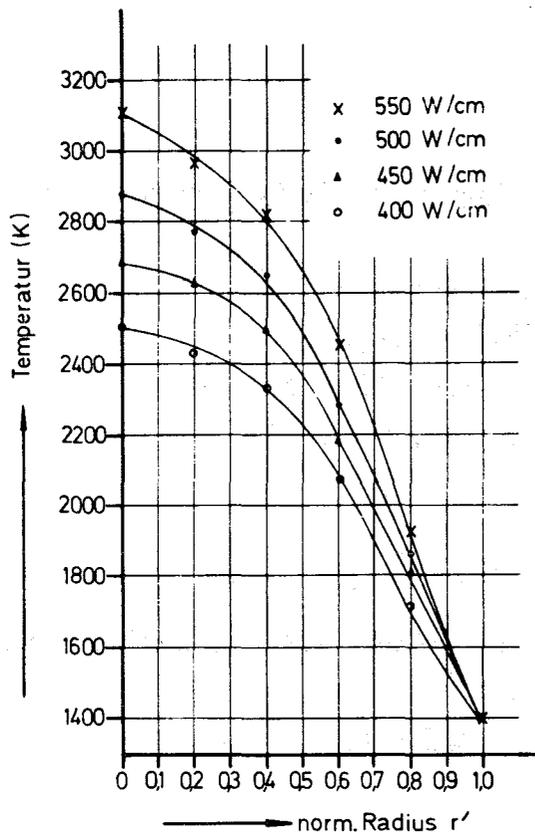


Abb. 10:

Brennstofftemperaturprofile bei verschiedenen Stableistungen

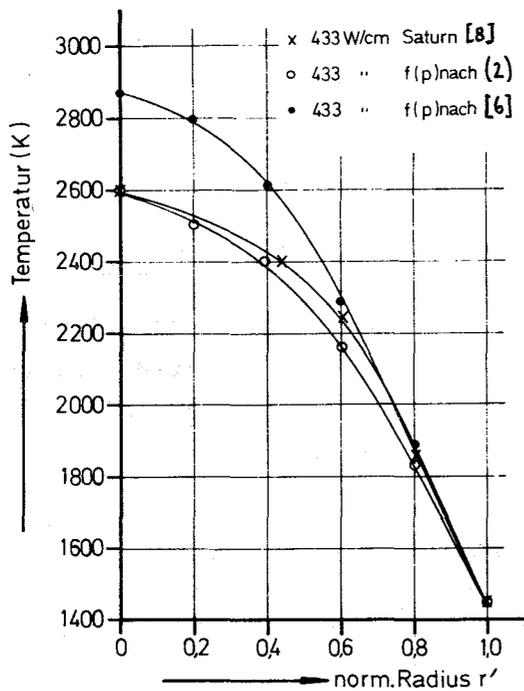


Abb. 11:

Temperaturprofile bei verschiedenen Ansätzen für die Porositätskorrektur der Wärmeleitfähigkeit

1124 Brennstäbe mit karbidischem Brennstoff^G1124.1 Herstellung im LabormaßstabNatriumbindungsanlage - Inbetriebnahme der Füllbox

(W. Jahraus, IMF)

Die Inbetriebnahme des ersten Abschnittes der Natriumbindungsanlage sowie deren Einzelkomponenten wurde vorgenommen, und erste Natrium-Tabletten wurden hergestellt.

Für die inaktiven Natrium-Arbeiten wird eine hochdichte Edelstahlbox mit einer Leckrate $< 0,01$ Vol.-%/h bei 100 mm WS verwendet. Sie wird unter Schutzgas mit einer Gasreinigung im Umwälzverfahren unter einem geringen Überdruck von 0-5 mm WS betrieben. Die Gasreinigungsanlage besitzt zwei Reineinheiten, wodurch jeweils eine unabhängig vom Umwälzbetrieb regeneriert werden kann. Da die Boxatmosphäre durch das in der Box befindliche Natrium-Schmelzbad stark erwärmt wird, ist es notwendig, das gereinigte Gas im Vorlauf zu kühlen, so daß sich eine Temperatur von maximal 24°C einstellt. Bei einem eventuellen Ausfall des Umwälzbetriebes kann eine Hilfsspülung zugeschaltet werden. Dabei wird Inertgas durch die Box in die Abluft geführt; mit einem mechanischen Regelventil wird der Druck in der Box geregelt.

Zum Schmelzen des Natriums wird eine herkömmliche 1500 W Laborkochplatte verwendet, mit der ein Nickelbehälter fest verbunden ist. Für die Herstellung der Natrium-Tabletten dient eine Gießvorrichtung, in welche wahlweise Matrizen mit den Durchmessern 5, 6 und 8 mm eingesetzt werden können.

Da Natrium an Luft bei einer Temperatur von etwa 130°C selbstentzündlich ist, wird aus Gründen der Sicherheit bei 120°C das Schmelzbad über ein Kontaktthermometer abgeschaltet.

Der Druck in der Box wird durch eine Sicherheitsschaltung überwacht, die beim Überschreiten der eingestellten Maximalwerte die Anlage abschaltet und akustisch Alarm meldet. Der Wassergehalt der Atmosphäre wird mit einem Hygrometer im Vor- und Rücklauf der Schutzgasumwälzung gemessen; die gemessenen Werte liegen bei < 1 ppm H_2O im Vorlauf.

THE HISTORY OF THE UNITED STATES

CHAPTER I

The first European settlement in North America was made by Christopher Columbus in 1492.

The discovery of America by Columbus opened a new era in the history of the world. The continent was discovered by Christopher Columbus in 1492, and the first European settlement was made by John Cabot in 1498.

The first European settlement in North America was made by John Cabot in 1498. The first permanent settlement was made by the Pilgrims in 1620.

The Pilgrims were a group of English Puritans who sought religious freedom in the New World. They arrived in Massachusetts in 1620 and established the Plymouth Colony.

The Pilgrims were a group of English Puritans who sought religious freedom in the New World. They arrived in Massachusetts in 1620 and established the Plymouth Colony.

The Pilgrims were a group of English Puritans who sought religious freedom in the New World. They arrived in Massachusetts in 1620 and established the Plymouth Colony.

The Pilgrims were a group of English Puritans who sought religious freedom in the New World. They arrived in Massachusetts in 1620 and established the Plymouth Colony.

The Pilgrims were a group of English Puritans who sought religious freedom in the New World. They arrived in Massachusetts in 1620 and established the Plymouth Colony.

The Pilgrims were a group of English Puritans who sought religious freedom in the New World. They arrived in Massachusetts in 1620 and established the Plymouth Colony.

The Pilgrims were a group of English Puritans who sought religious freedom in the New World. They arrived in Massachusetts in 1620 and established the Plymouth Colony.

113 MATERIALUNTERSUCHUNG UND -ENTWICKLUNG1131 Materialuntersuchungen an technischen Legierungen1131.1 Mechanische und physikalische Eigenschaften*

(H. Böhm, L. Schäfer, M. Schirra, IMF)

Schon vor Jahren wurden Bestrahlungsversuche (FR2) an einem ferritischen 12%igen Cr-Stahl durchgeführt, die zeigten, daß bis zur α - γ -Umwandlung ($\approx 830^\circ\text{C}$) keine Hochtemperaturversprödung auftrat /1/. Stähle dieses Typs sind als potentieller Kastenwerkstoff im Gespräch. Im Rahmen einer Tieftemperaturbestrahlung (Mol-1A1) und einer Hochtemperaturbestrahlung (Mol-3B6) werden von zwei Stählen Proben bestrahlt:

- | | | |
|----|------------------|--------------|
| 1) | X22 CrMoV 121 | (W-Nr. 4923) |
| 2) | X18 CrMoV Nb 121 | (W-Nr. 4914) |

Von jedem Stahl werden Proben in zwei Vergütungszuständen eingesetzt:

- a) gehärter + 600°C 2h/L angelassen
- b) gehärtet + 750°C 2h/L angelassen

Während von dem unter 2) aufgeführten Stahl im Zusammenhang mit früheren Untersuchungen das Zugfestigkeitsverhalten bekannt ist, wurden umfangreiche Zugversuche an der Charge des unter 1) genannten Stahles durchgeführt.

Gehärtete Proben wurden im Temperaturbereich von $500 - 800^\circ\text{C}$ 2h/L angelassen und anschließend bei Raumtemperatur im Zugversuch getestet. Abb. 1 zeigt die Zugfestigkeitseigenschaften in Abhängigkeit von der Anlastemperatur.

Anhand dieser Ergebnisse wurden für die Bestrahlungsversuche die zwei Vergütungszustände festgelegt. Durch ein Anlassen bei 600°C wird eine Festig-

* BzFE-Nr. 221.1

/1/ H. Böhm, G. Hauck, KFK 536 (1967)

keit von $\approx 120 \text{ kp/mm}^2$ erreicht und $\approx 90 \text{ kp/mm}^2$ durch eine Anlaßbehandlung bei 750°C 2h/L.

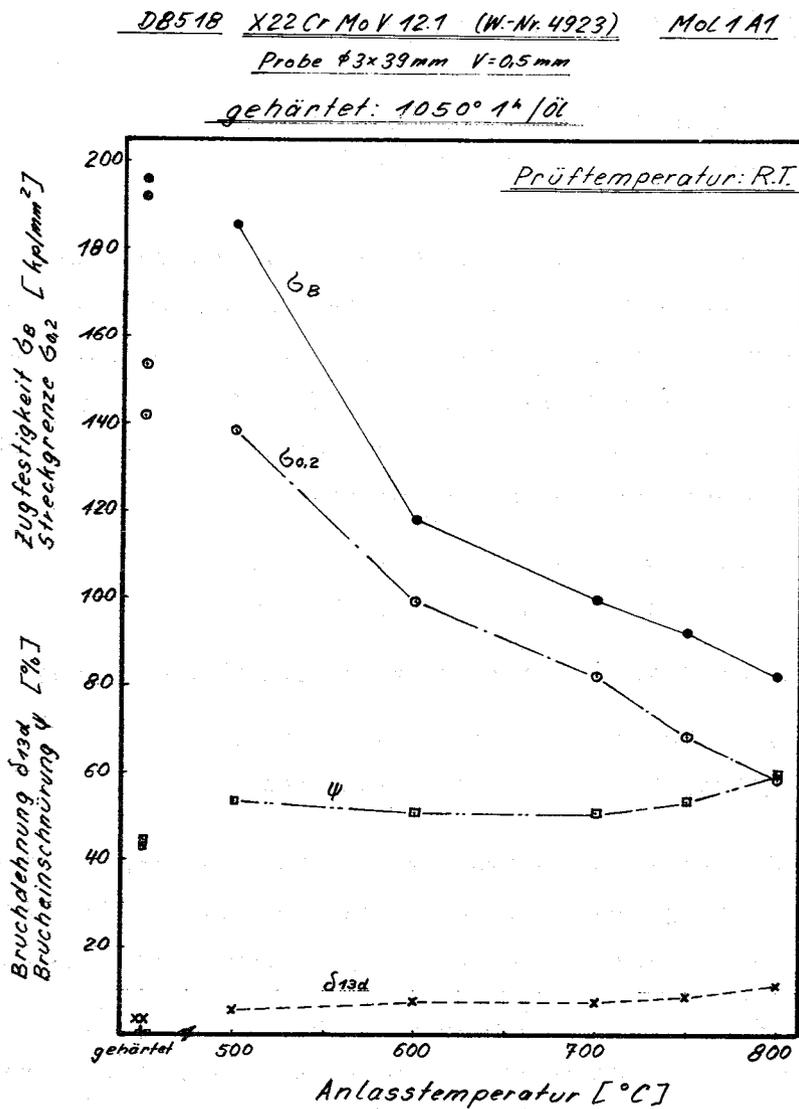


Abb. 1 Zugfestigkeitseigenschaften in Abhängigkeit von der Anlaßtemperatur.

Proben dieser beiden Vorbehandlungszustände wurden bei Raumtemperatur und im Temperaturbereich von $400\text{--}750^\circ\text{C}$ untersucht. Die Zugversuchsergebnisse sind in Abb. 2 in zwei Teilbildern dargestellt.

D8518 X22CrMoV12.1 (W-Nr. 4923) Mol 1A1

Probe $\varnothing 3 \times 39$ $V = 0.5 \text{ mm/min}$

Zustand: $1050^\circ \text{A} / \text{Öl} + 600^\circ \text{Z} / \text{L}$

$1050^\circ \text{A} / \text{Öl} + 750^\circ \text{Z} / \text{L}$

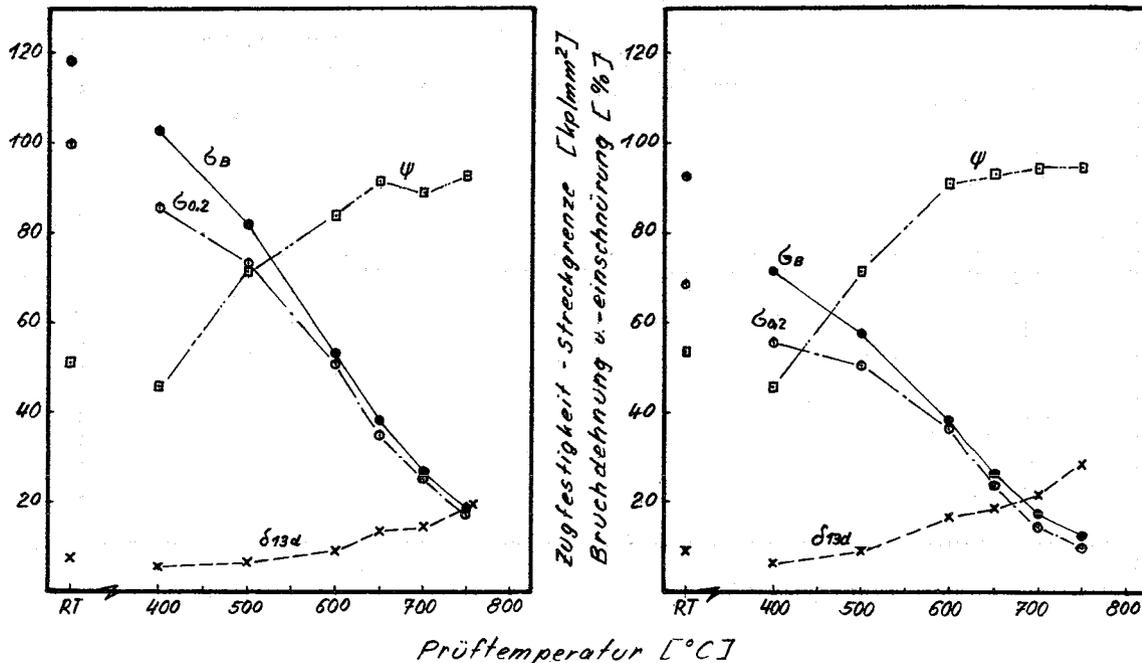


Abb. 2 Zugfestigkeitseigenschaften in Abhängigkeit von der Prüftemperatur bei zwei verschiedenen Vergütungszuständen.

Hüllwerkstoff

Es wurde der Einfluß mechanisch-thermischer Vorbehandlungen auf das Langzeitverhalten des austenitischen 15/15 CrNi-Stahles mit der Werkstoff-Nr. 1.4970 an einer von der Firma Röchling umgeschmiedeten Charge untersucht. Die Vorbehandlung der Proben entspricht dem sogenannten "Industriezustand", wie er für die Brennelemente des SNR 300 evtl. vorgesehen ist (lösungsgeglüht + kaltverformt + ausgelagert und in Luft abgekühlt).

Die Korngröße liegt bei 30-80 μm und die Härte zwischen HV 30 = 214-216 kp/mm^2 . Die Kaltverformung wurde durch Recken der Proben in einer Zerreißmaschine aufgebracht.

Die chemische Zusammensetzung der untersuchten Charge liegt außer Bor innerhalb der IA-Spezifikation. Der Borgehalt von 30 ppm liegt knapp unter der unteren Grenze (40 ppm).

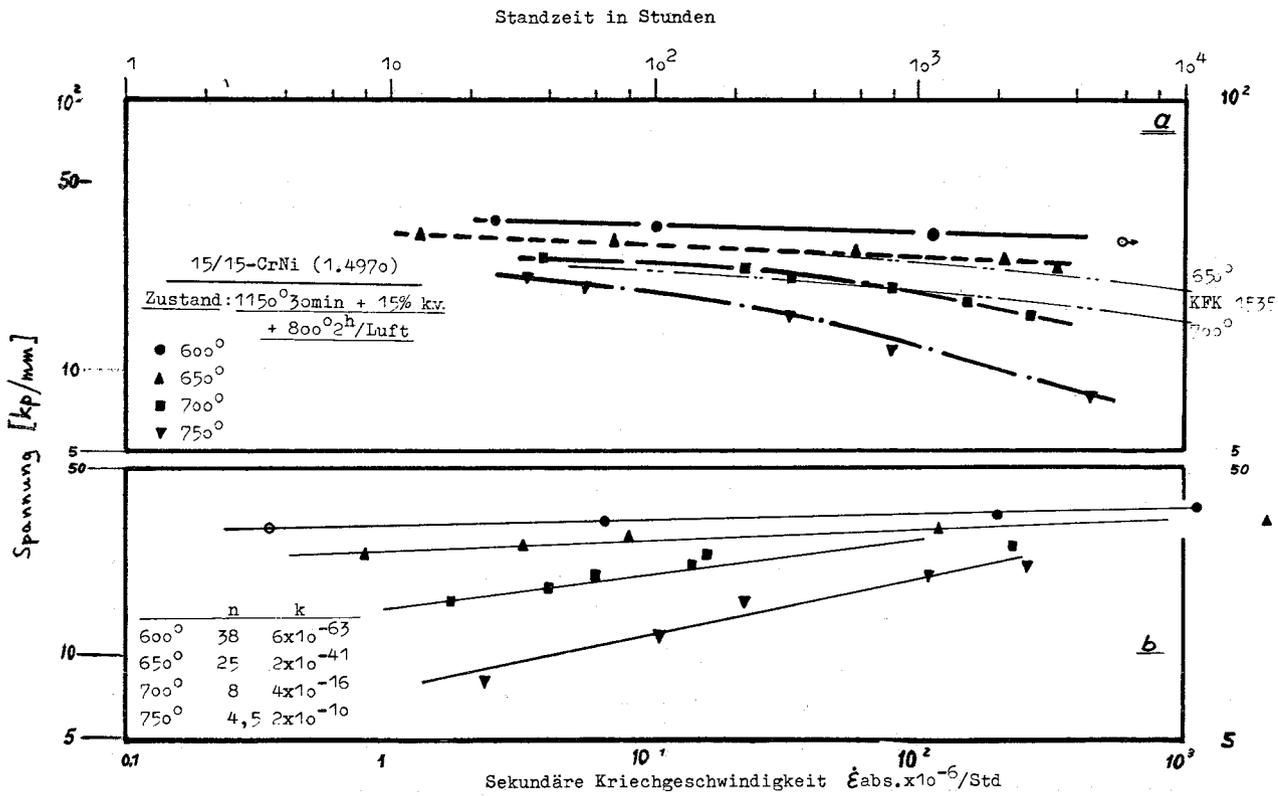


Abb. 3 Standzeit und sekundäre Kriechgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Spannung.

Die bei 600–650–700^oC und 750^oC erzielten Standzeiten sind in der Abb. 3a in Abhängigkeit von der Spannung eingezeichnet. Im Vergleich zu den Werten eines Zustandes, der nach der Kaltverformung bei 830^oC ausgelagert wurde und in einer früheren Arbeit beschrieben wurde (KFK-1535), ergeben sich bei der hier untersuchten Charge bei 650^oC um 1–2 kp/mm² höhere Zeitstandfestigkeitswerte. Dagegen tritt bei 700^oC bei Standzeiten > 10³ Std. in stärkerem Maße Entfestigung auf.

Die in Abb. 3b in Abhängigkeit von der Spannung eingetragenen Werte für die sekundäre Kriechgeschwindigkeit $\dot{\epsilon}$ zeigen in Übereinstimmung mit zahlreichen anderen Resultaten verschiedener Versuchsprogramme bei 600^oC und 650^oC eine sehr starke Spannungsabhängigkeit besonders der sekundären Kriechgeschwindigkeit. Dies führt zu extrem hohen Werten für den Spannungsexponenten n (n. Norton).

Die Bruchdehnung liegt ziemlich temperatur- und zeitunabhängig zwischen 10 und 20% und die Brucheinschnürung zwischen 50 und 70%. Das Bruchverhalten ist im untersuchten Temperaturbereich transkristallin.

Hüllrohre aus den Werkstoffen 1.4970 (Chg. 8-29052), 1.4988 (Chg. 25116), 1.4981 (Chg. HV 139) und AISI 316 (Chg. T 4921) wurden, wie im KFK-Bericht 1273/2 (S. 112-34 bis 40) beschrieben, mit Cäsium-Karbonat geglüht, um den Korrosionsangriff des reaktivsten Spaltproduktes Cäsium zu simulieren. In anschließenden Rohrrinnendruck-Zeitstandversuchen wurde geprüft, welchen Einfluß diese bevorzugt an den Korngrenzen ablaufende Korrosion auf das Zeitstandverhalten der Rohre bei 700°C hat. Die Prüftemperatur von 700°C wurde gewählt, um die Auswirkungen der Korngrenzenkorrosion bei dem zu erwartenden interkristallinen Bruch eindeutig erkennen zu können.

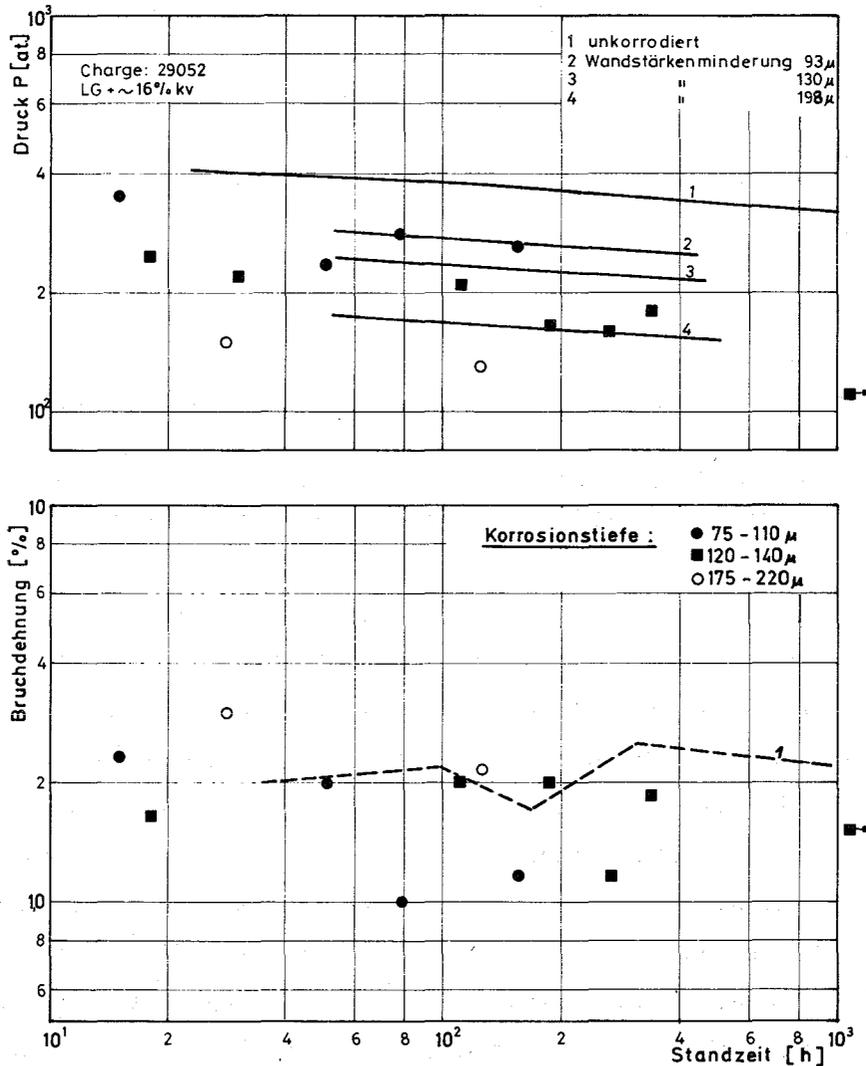


Abb. 4 Zeitstandfestigkeit und Bruchdehnung von Rohren aus dem Stahl 1.4970 in Abhängigkeit von der Korrosionstiefe bei 700°C.

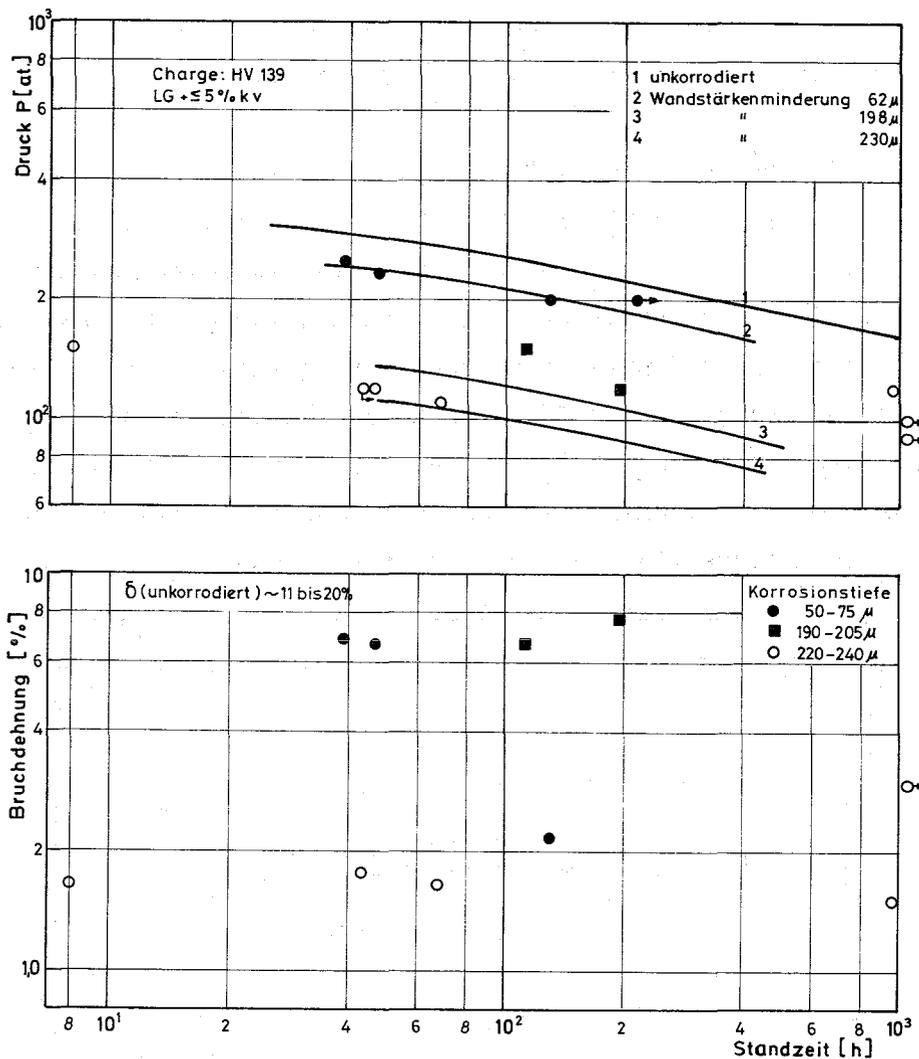


Abb. 5 Zeitstandfestigkeit und Bruchdehnung von Rohren aus dem Stahl 1.4981 in Abhängigkeit von der Korrosionstiefe bei 700°C.

Die Abbildungen 4 bis 7 zeigen die gemessenen Zeitbruchlinien (1) der unkorrodierten Rohre sowie die berechneten Zeitbruchlinien (2, 3, und 4) für Rohre, deren Wandstärke um bestimmte Beträge, die der mittleren Korrosionstiefe von Probenruppen entsprechen, vermindert sind. Die Zeitstandschabilder zeigen, daß die gemessenen Punkte im allgemeinen höher liegen als die für entsprechende Wandstärkenminderung berechneten Zeitbruchlinien. Daraus ist auf eine gewisse Restfestigkeit der korrodierten Schicht zu schließen. Der Stahl 1.4970 macht hier eine Ausnahme. Bei Korrosionstiefen über 90 μ liegen die gemessenen Punkte unterhalb der berechneten Zeitbruchlinie, d.h. die korrodierte Schicht hat über ihren im Lichtmikroskop erkennbaren Ausbreitungsbereich eine zusätzlich schädigende "Fernwirkung" auf das optisch einwandfrei erscheinende Restmaterial.

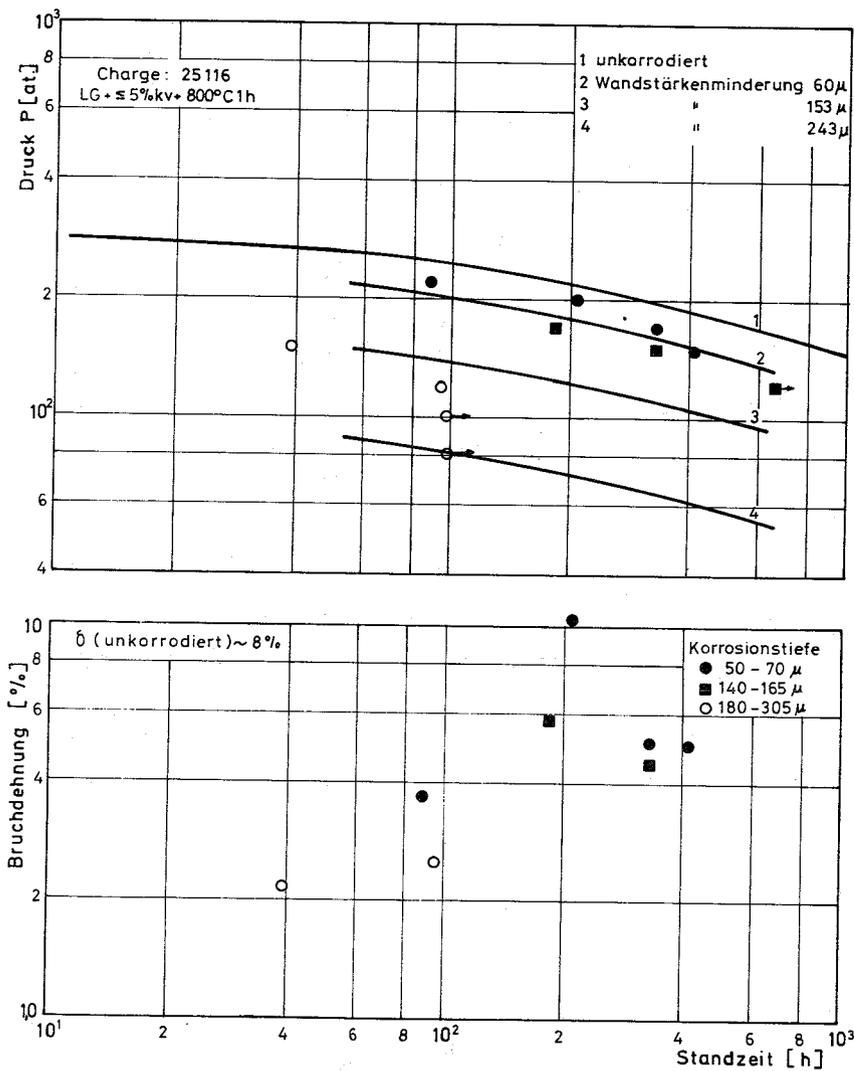


Abb. 6 Zeitstandfestigkeit und Bruchdehnung von Rohren aus dem Stahl 1.4988 in Abhängigkeit von der Korrosionstiefe bei 700°C.

Als Ursache dafür sind die Kerbwirkungen der mit Korrosionsprodukten belegten Korngrenzen und eine größere als im Lichtmikroskop erkennbare Eindringtiefe der Korrosionsprodukte denkbar, aber noch nicht nachgewiesen. Man kann annehmen, daß bei allen genannten Werkstoffen sowohl eine gewisse Restfestigkeit als auch eine schädigende "Fernwirkung" der Korrosionsschicht vorhanden ist. Der Grund, weshalb die schädigende Fernwirkung beim Stahl 1.4970 gegenüber der Restfestigkeit so stark überwiegt, könnte darin liegen, daß dieser Stahl mehr als die übrigen seine Zeitstandfestigkeit aus sehr kriechfesten Korngrenzen bezieht, die infolge der Korngrenzenkorrosion auch relativ am stärksten geschädigt sind.

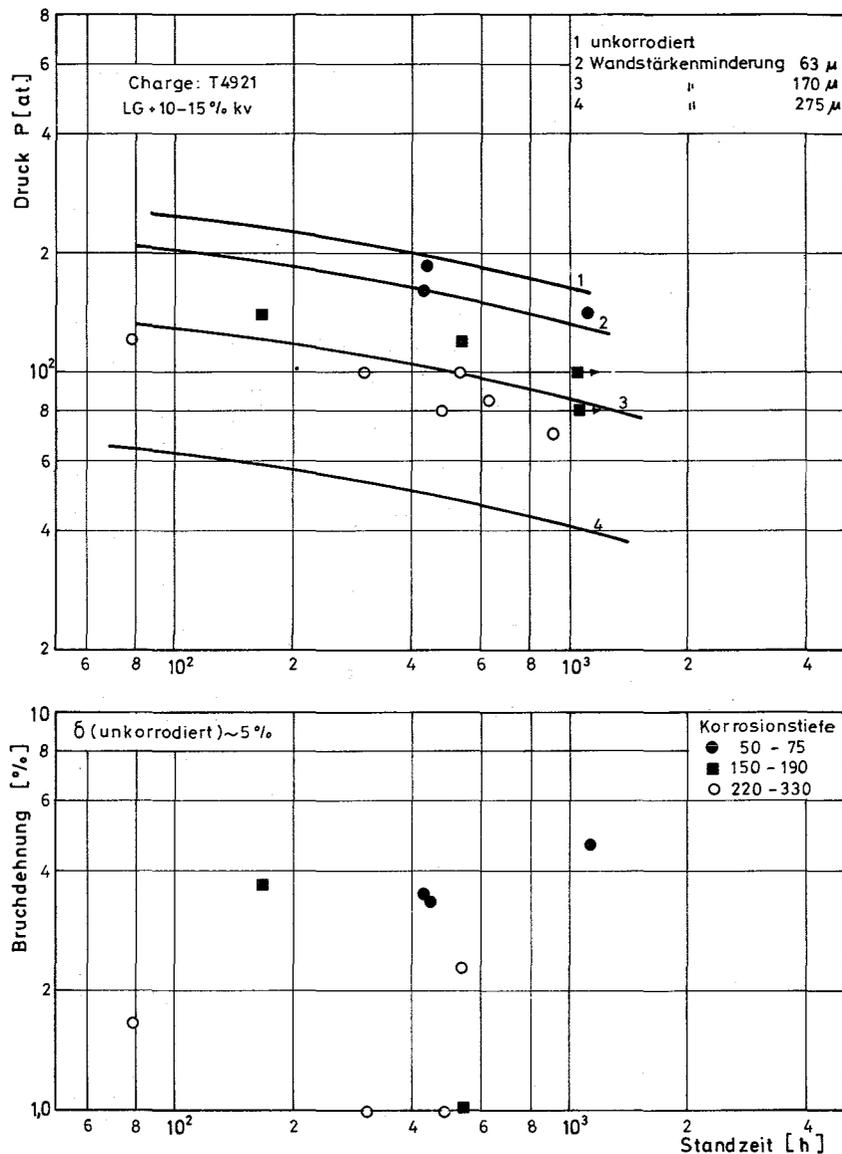


Abb. 7 Die Zeitstandfestigkeit und Bruchdehnung von Rohren aus dem Stahl 1.4401 (AISI 316) in Abhängigkeit von der Korrosionstiefe bei 700 °C

Die Bruchdehnung der korrodierten Rohre beträgt bei den beiden kaltverformten Stählen 1.4970 und AISI 316 etwa $2 \pm 1\%$ und bei den lösungsgeglühten Stählen 1.4988 und 1.4981 etwa $4 \pm 2\%$. Die Abnahme der Bruchdehnung infolge Korrosion ist beim Stahl 1.4981 am stärksten und beim Stahl 1.4970 am schwächsten. Nach den bisherigen Ergebnissen scheint es, als würde die beschriebene Korrosion zu einer Nivellierung der Zeitstandeigenschaften bei den verschiedenen Stählen führen.

In Abb. 8 ist dargestellt, welchem theoretischen Wandstärkenverlust die Zeitstandergebnisse der einzelnen korrodierten Proben entsprechen. Die

wirkliche Korrosionstiefe ist bei den Werkstoffen 1.4988, 1.4981 und AISI 316 mit dem Faktor 0,88 und bei dem Werkstoff 1.4970 mit dem Faktor 1,5 zu multiplizieren, wenn der ihr entsprechende und konservativ ausgelegte theoretische Wandstärkenverlust des Rohres berechnet werden soll.

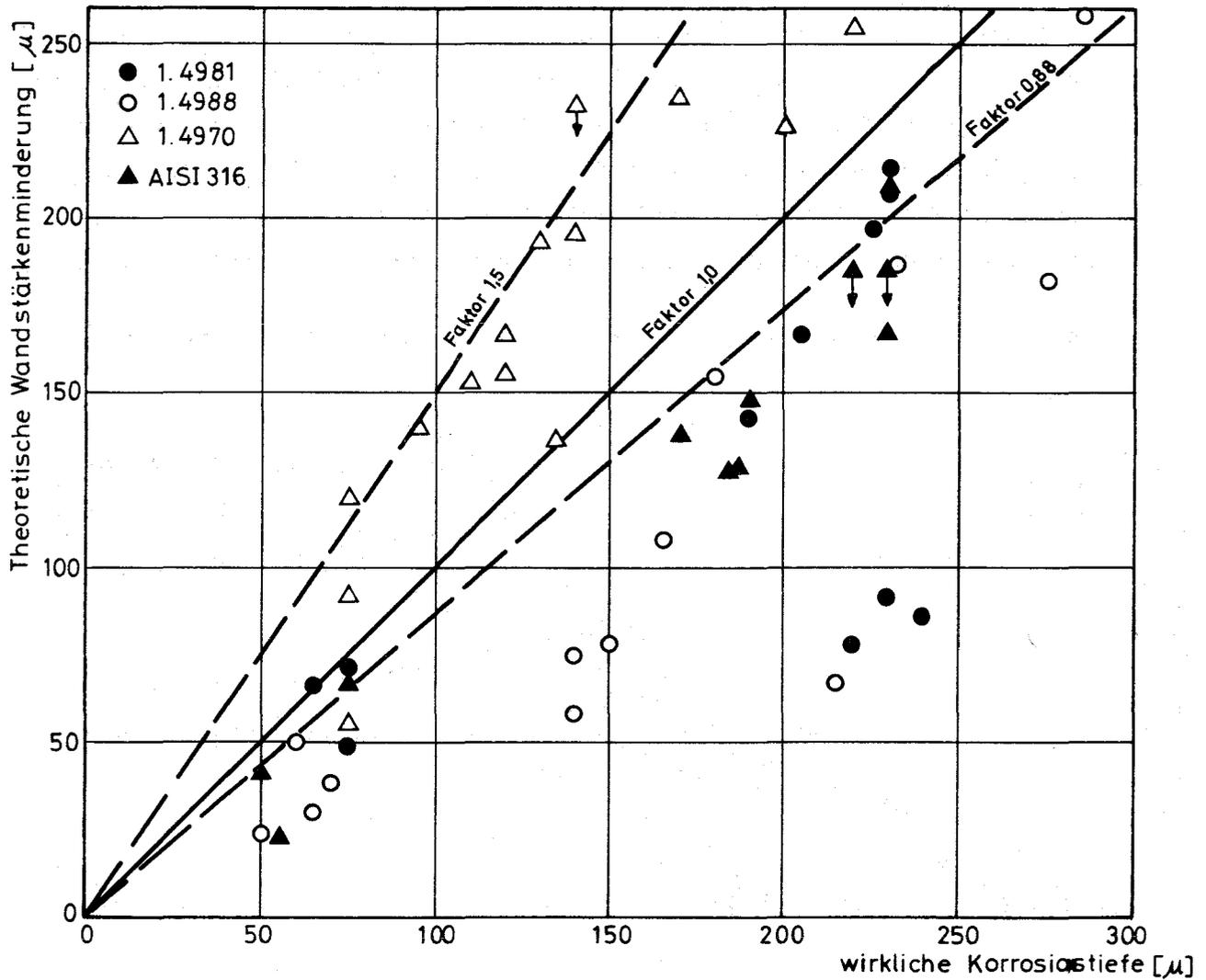


Abb. 8 Aus Zeitstandversuchen errechnete Verringerung der tragenden Rohrwand.

1131.4 Bestrahlungsversuche1. Mechanische Eigenschaften nach Bestrahlung*

(L. Schäfer, Ch. Wassilew, IMF)

In Zeitstand- und Zugversuchen wurden die mechanischen Eigenschaften von Brennstababschnitten aus dem Bestrahlungsexperiment DFR-350 geprüft. Als Hüllmaterialien waren die austenitischen Stähle X8 CrNiNb 1613 (Werkst.-Nr. 1.4961) und X8 CrNiMoNb 1613 (Werkst.-Nr. 1.4988) eingesetzt. Die Bestrahlung fand bei Temperaturen zwischen 240 und 600°C bis zu einer maximalen Dosis von $3,8 \cdot 10^{22} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0,1 \text{ MeV}$) statt. Da die Bestrahlungsbedingungen entlang des Brennstabes unterschiedlich sind, werden die mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit vom Ort des Stabes, an dem die jeweiligen Proben entnommen wurden, als sogenanntes Stabprofil dargestellt.

Abb. 9 stellt das Stabprofil des Zeitstandfestigkeitsquotienten dar.

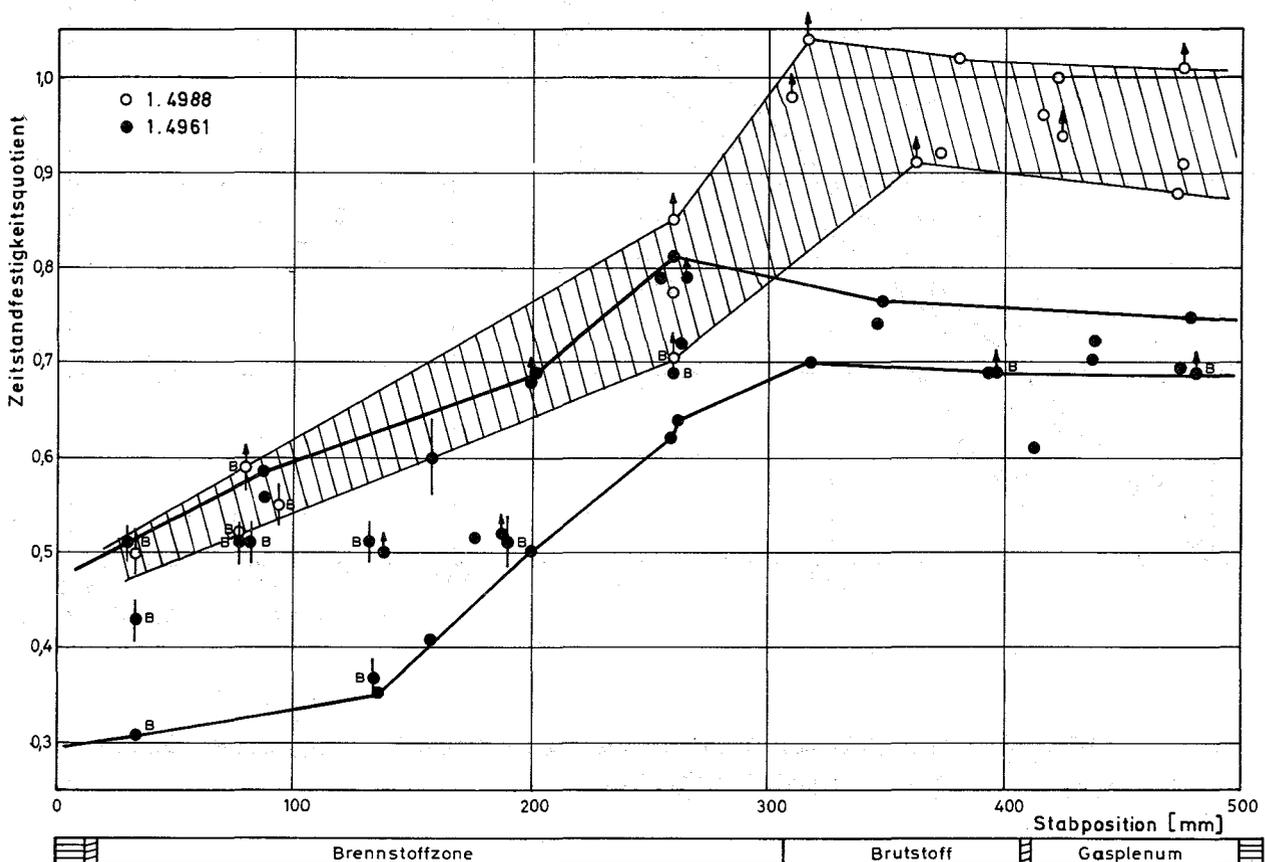


Abb. 9 Stabprofil des Zeitstandfestigkeitsquotienten der Stähle 1.4988 und 1.4961

Man versteht darunter den Quotienten aus der Zeitstandfestigkeit einer bestrahlten Probe und der zur gleichen Standzeit gehörenden Zeitstandfestigkeit einer unbestrahlten Probe. Die Stabprofile weisen als schwächste Stelle des Brennstabes diejenige mit der höchsten Bestrahlungstemperatur aus, was auf den überwiegenden Einfluß der Innenkorrosion mit Spaltprodukten schließen läßt. Der Stahl 1.4988 ist dem Stahl 1.4961 überlegen. Die Zeitstand-Bruchdehnung des Stahles 1.4961 beträgt etwa $1 \pm 0,5\%$.

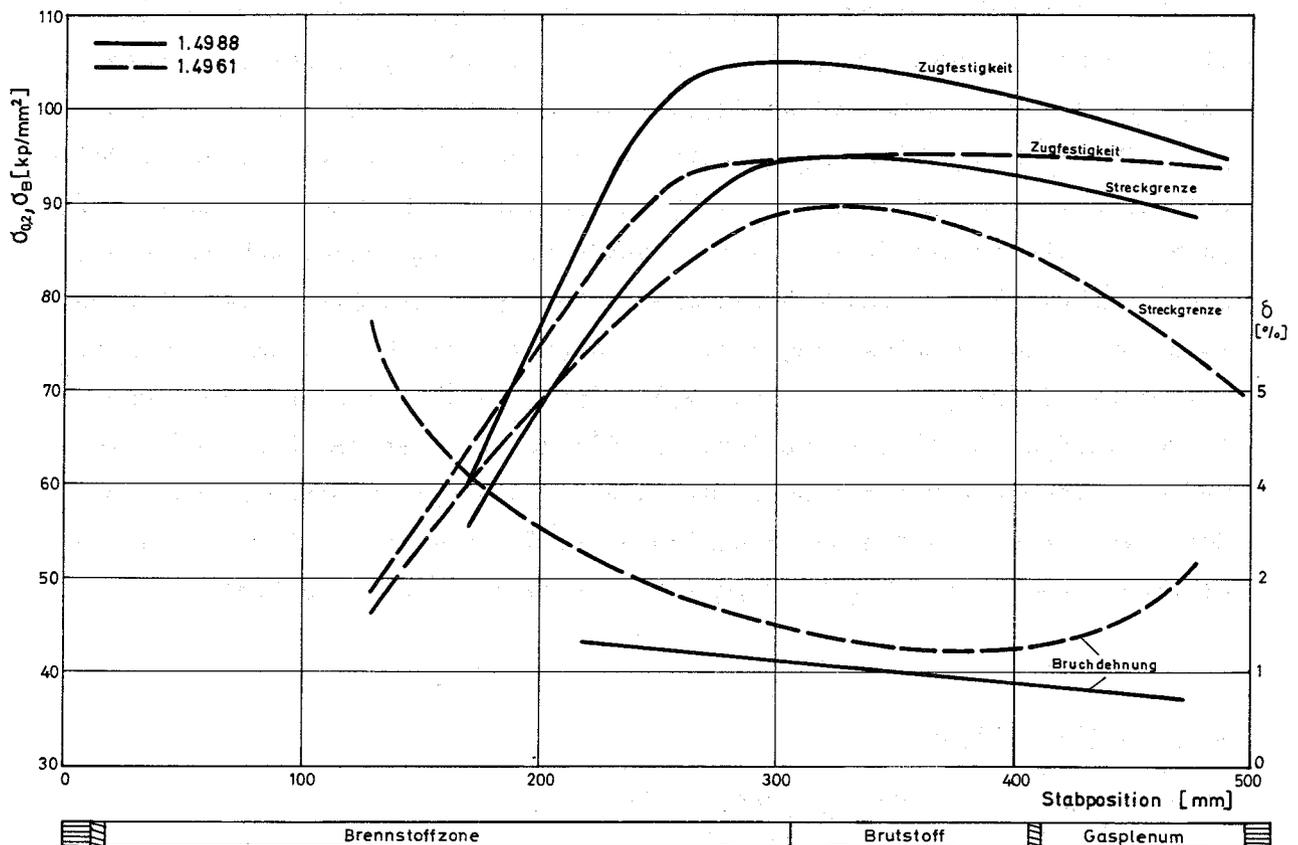


Abb. 10 Stabprofile der mechanischen Kurzzeiteigenschaften der Stähle 1.4988 und 1.4961.

Abb. 10 stellt die Stabprofile der mechanischen Kurzzeiteigenschaften der beiden Stähle dar. Hervorzuheben sind die stellenweise sehr hohen Streckgrenzen und niederen Duktilitäten der Stäbe.

Die Zeitstand- und Kriechuntersuchungen an Proben der Stähle 1.4970, 1.4981, 1.4988 und eines niedrig gekohlten 1616 CrNi-Stahles aus dem Bestrahlungsprogramm DFR-397 wurden während des Berichtszeitraumes weitergeführt. Die bereits bei einer Prüftemperatur von 650°C für den lösungsgeglühten und

600°C für die übrigen drei Zustände experimentell abgeschlossenen und ausgewerteten Versuche an bestrahlten sowie ein Teil der unbestrahlten Proben des Stahles 1.4970 zeigen teilweise wesentlich niedrigere Zeitstandfestigkeiten im Vergleich zum Bestrahlungsexperiment Mol 3 B/2. Mit Ausnahme des ausgelagerten Zustandes wurden hierbei auch deutlich höhere Kriechraten, ebenfalls im Vergleich zum Mol 3 B/2, gemessen.

Die bereits zu Beginn der Untersuchungen sich andeutende bessere Strahlenresistenz des Zustandes lsg. + ausgelagert + kaltverformt dieses Stahles konnte inzwischen durch die Langzeitversuche bestätigt werden. Ähnlich wie beim Bestrahlungsprojekt Mol 3 B/2 zeigt dieser Zustand gegenüber den anderen Werkstoffzuständen sowie der übrigen im Bestrahlungsprojekt DFR-397 bestrahlten Werkstoffe die höchsten Restduktilitäten im Zeitstandversuch. Die gemessenen Bruchdehnungen bei 600°C sind von der Verformungsgeschwindigkeit fast völlig unabhängig. Die im Zugversuch ermittelte Bruchdehnung für die bestrahlten Proben beträgt 3,2%. Die im Zeitstandversuch gemessenen Bruchdehnungen für Standzeiten zwischen 12 und 3000 Std. liegen bei 3,52% für $t_B = 12$ und 3,51% für $t_B = 3000$ Std. Für den Stahl 1.4988 wurden im Zeitstandversuch für die bestrahlten und bei 600°C getesteten Proben Bruchdehnungen zwischen 1,4 und 0,7% ermittelt. Die im Zeitstandversuch gemessenen Bruchdehnungen für die bestrahlten Proben des Stahles 1.4981 bei 600°C Prüftemperatur liegen bei 0,2 bis 0,3%.

2. Schwellverhalten*

(K. Ehrlich, R. Groß, H. Venker, IMF)

An den Stählen 1.4988 und 1.4970 wurde die Porenbildung nach Bestrahlung mit Ni⁶⁺ Ionen am Variable Energy Cyclotron untersucht und mit den bereits früher erhaltenen Daten nach C²⁺-Ionenbestrahlung verglichen.

Bei gleicher Schädigungsrate (40 Verlagerungen/Atom), gleicher Bestrahlungstemperatur (575°C) und gleicher vorimplantierter Heliummenge (10 ppm Helium) wurde für den Stahl 1.4988 das folgende Resultat gewonnen: Die Porendurchmesser gehorchen in beiden Fällen einer Gauß'schen Normalverteilung, der mittlere Porendurchmesser ist bei Nickel-Ionenbestrahlung beträchtlich größer ($\sim 200 \text{ \AA}$), die Porenkonzentration reduziert sich auf

* BzFE-Nr. 225.1

1/5 bis 1/3. Daraus ergibt sich eine etwa gleich große Schwellrate bei Verwendung von Nickel- und Kohlenstoff-Ionen.

Eine Erhöhung der vorimplantierten Heliummenge von 10 auf 40 ppm Helium bei gleicher Schädigungsrate ergibt im Stahl 1.4988 eine Vervierfachung der Porenkonzentration und eine Reduzierung des Porendurchmessers auf die Hälfte.

Im Werkstoff 1.4970 beobachtet man bei gleicher Versuchsführung nur eine Verdoppelung der Porenkonzentration, was die bereits früher geäußerte These stützt, daß in dem titanstabilisierten Stahl von vornherein genügend gasförmige Verunreinigungen zur Nukleation bereitstehen. Abweichend von den bisherigen Beobachtungen wird in diesem Fall auch festgestellt, daß die Quadrate der Porendurchmesser einer Gauß'schen Normalverteilung folgen.

Die wenigen bisher vorliegenden Daten lassen beim Vergleich der verschiedenen Bestrahlungsquellen noch keine allgemeinen Gesetzmäßigkeiten erkennen. Es scheint jedoch, als ob das Verhalten bezüglich Nukleation und Porenwachstum sehr materialspezifisch ist.

In früheren VEC-Experimenten hatte sich bereits angedeutet, daß der titanstabilisierte Stahl 1.4970 in dem Zustand lösungsgegüht + kaltverformt + ausgelagert ($800^{\circ}/2h$) ein günstiges Schwellverhalten zeigt. Bei den bisher durchgeführten Nachuntersuchungen neutronenbestrahlter Hüllsegmente der Experimente Rapsodie-Material und -Pin ist dieser Trend bestätigt worden. In Abb. 11 sind die Volumenzunahmen der Stähle 1.4988 (lg) und 1.4970 (lg + kv + A) als Funktion der Bestrahlungstemperatur aufgetragen. Die Neutronendosis variiert stark über die Brennstabllänge. Der beachtliche Unterschied im Schwellverhalten beider Stähle kann sowohl auf der unterschiedlichen chemischen Zusammensetzung, dem differenzierenden Grad der Kaltverformung als auch der unterschiedlichen Stabilisierung bzw. dem Stabilisierungsgrad beruhen. Für das letztere Argument spricht, daß die im Stahl 1.4988 beobachtete Bildung von $M_{23}C_6$ -Ausscheidungen im titanstabilisierten Material fast völlig unterdrückt wird.

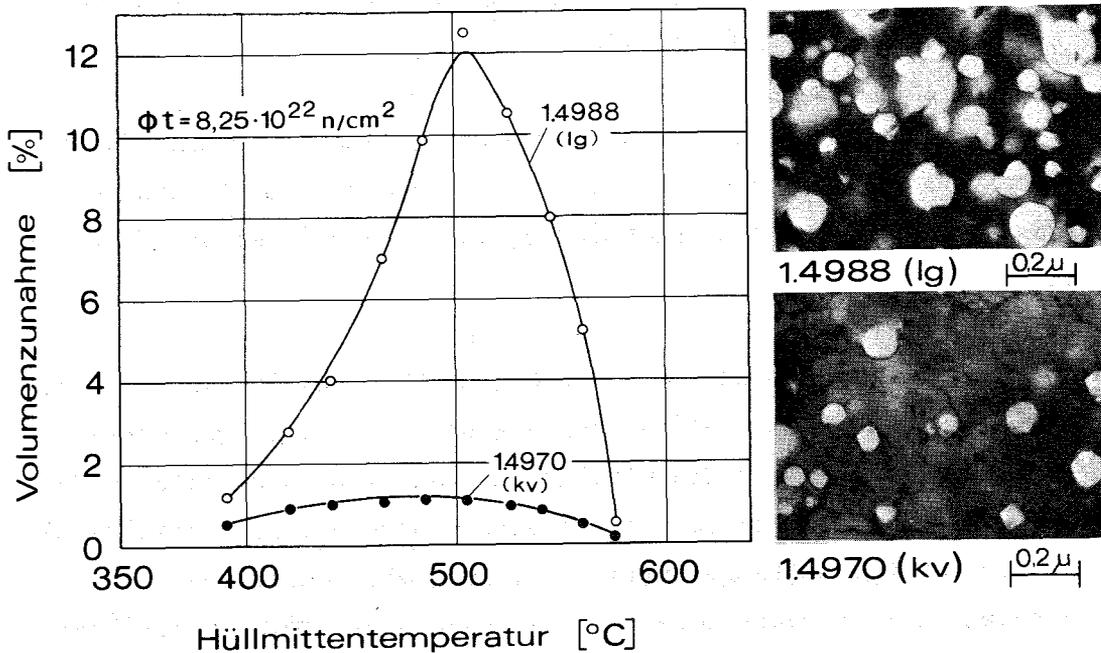


Abb. 11 Volumenzunahme der Stähle 1.4988 (lg) und 1.4970 (lg + kv + A) als Funktion der Bestrahlungstemperatur im Experiment Rapsodie-Pin.

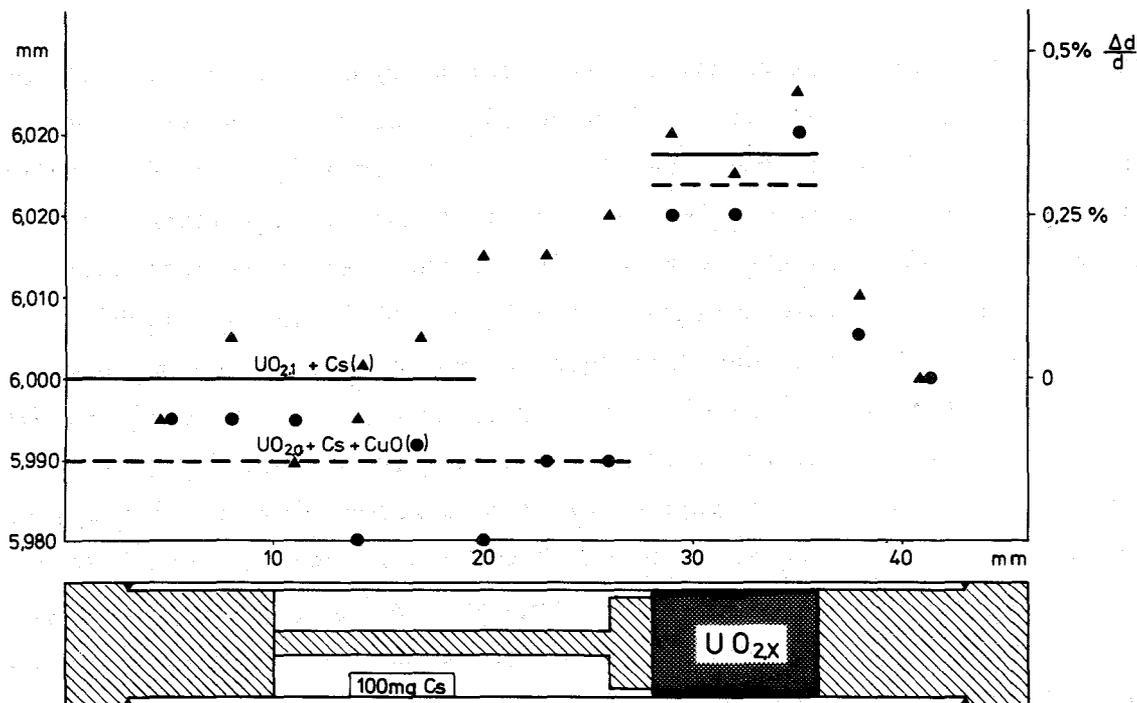


Abb. 12 Durchmesserzunahme von Stahlkapseln als Folge der Wechselwirkung von Cäsium mit UO_2 -Pellets.

Wie früher berichtet, konnte die Hüllrohraufweitung am heißen Ende des Brennelementes (Übergang Brennstoff - Brutstoff) nur zu einem kleinen Teil auf das Schwellen des Hüllrohrmaterials zurückgeführt werden. Die von verschiedenen Autoren beobachtete Cäsiumansammlung am Beginn der Brutstoffsäule legte eine Untersuchung des Einflusses der Wechselwirkung Cs-UO₂ auf das Verhalten des Hüllrohres nahe.

Bei der Bildung von Cs₂UO₄ aus Cs, UO₂ und O₂ tritt eine Volumenvergrößerung um den Faktor 3 auf. In zwei Kapseln aus dem Stahl 1.4988 wurden entsprechend Abb. 12 UO₂-Pellets Cäsium sowie Sauerstoff zugegeben. Die Sauerstoffzugabe erfolgte in einem Falle über CuO, im anderen Falle durch vorherige Erhöhung der UO₂-Stöchiometrie um 0,1. Nach Glühung beider Kapseln bei 700°C und 160 Stunden wurde im Bereich der UO₂-Tablette eine Hüllrohraufweitung von ca. 0,4% beobachtet (Abb. 12), die unter diesen spezifischen Bedingungen nur auf die oben angeführte Reaktion des Brutstoffes mit Cäsium zurückzuführen ist. Es ist zu erwarten, daß die Spaltprodukte Barium und Strontium einen ähnlichen Einfluß auf das Hüllrohrverhalten haben.

3. Physikalische Untersuchungen und Strahlenschäden⁶

(K. Ehrlich, D. Kaletta, IMF)

Die elektronenmikroskopische Untersuchung der mit 240-keV-He⁺-Ionen im Konzentrationsbereich von 30 bis 30.000 appm He zwischen 0,3 und 0,5 T_s (T_s Schmelzpunkttemperatur in K) bestrahlten V- und V-20%Ti-Proben führte zu folgenden Ergebnissen. Bei der Schwellwerttemperatur von 516°C für reines Vanadium wird dominant ein black-dot-Schaden beobachtet und einzeln entlang den Korngrenzen He-Bläschen. Die He-Blasen werden bei höheren Temperaturen gleichmäßig über das Korn verteilt und führen zu Volumenschwellwerten bis 7%. Der mittlere Blasendurchmesser wächst mit der Probenschichttiefe, die Konzentration mit der Temperatur; bei der höchsten Temperatur beträgt er ca. 400 Å. Die Blasenkonzentration variiert zwischen 5 · 10¹⁴ und 5 · 10¹⁵ cm⁻³. Die Schwellwertdosis für die Blasenbildung fällt mit wachsender Temperatur.

In den V-20%Ti-Proben wird eine generelle Abnahme der Blasenkonzentration unter denselben Bestrahlungsbedingungen beobachtet. Die Blasenbildung erfolgt bevorzugt an Korngrenzen und Präzipitaten, und die Blasen wachsen in einer Vorzugsrichtung.

114 KORROSIONSVERSUCHE UND KÜHLMITTELANALYSEN1141 Natriumkühlung1141.1 Korrosion austenitischer Stähle*

(H. U. Borgstedt, Helga Schneider, IMF;

G. Drechsler, G. Frees, IRB)

Die Versuchsserie im Hochtemperaturkreislauf des IRB an Hüllrohrinnen-druckproben hat das Ziel, auf der Basis von 10.000-Stunden-Ergebnissen für die Hüllrohre des SNR-300 Auslegungskennwerte hinsichtlich der Natriumkorrosion und der Beeinflussung der mechanischen Festigkeit durch Natrium zu gewinnen.

Versuchsergebnisse nach 5000 h Versuchsdauer können nun vorgelegt werden. Der zeitliche Verlauf des korrosiven Abtrags durch Natrium bei 600 und 700°C ist in Abb.1a/b dargestellt. Die Abhängigkeit der Korrosionsgeschwindigkeit vom Sauerstoffgehalt des Natriums entspricht in etwa den Literaturangaben. Aus den Versuchsergebnissen errechnet sich ein maximaler Wandstärkenverlust von 0,014 mm/a.

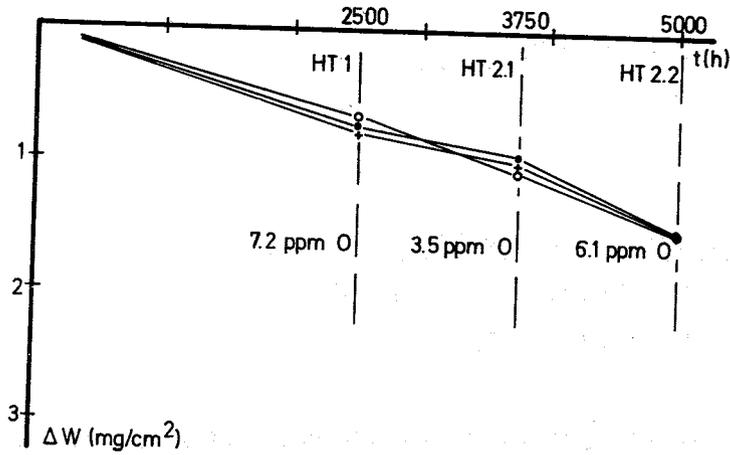
Die metallkundlichen Untersuchungen galten den selektiven Korrosionseffekten. Durch die bevorzugte Lösung des Cr, Ni und Mn sowie der Stabilisierungselemente (siehe auch 1141.3) entstand eine durchgehende Ferritschicht (Ferrit I), die bei den drei Werkstoffen unterschiedlich stark war (siehe Tabelle 1), und eine darauf folgende Zone mit ferritischen Korngrenzen und teils austenitischen, teils in der Umwandlung begriffenen Körnern. Abb. 2 zeigt diese Erscheinungen am Beispiel einer Probe aus 1.4970.

Tabelle 1: Tiefe der Ferritschichten in den Korrosionsproben
5000 Stunden, 700°C, 5 m/s, 5,5 ppm O

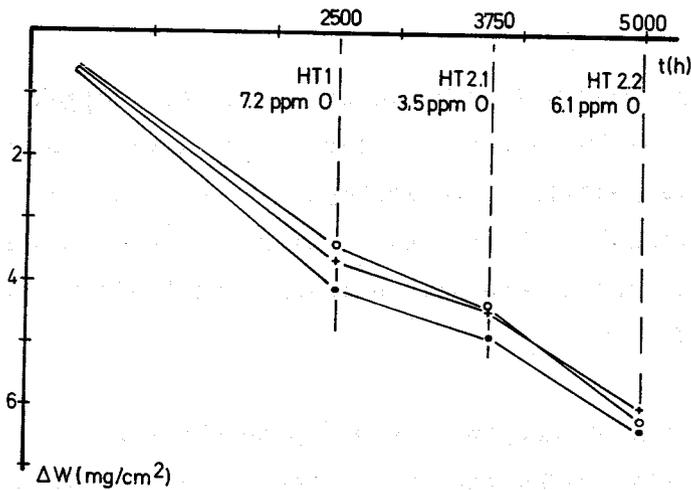
Tiefe der Zone in	1.4970	1.4981	1.4988
	µm	µm	µm
Ferritschicht (I)	4	1-2	8
Korngrenzenferrit (II) ⁺	28	20	33
Korngrenzenferrit (II) ⁺⁺	35	40	35

+) Oxalsäureätz./REM

++) Interferenzverf.



a) Gewichtsverluste der Korrosionsproben aus Teststr. 1 (600°C) ○ 1.4970 + 1.4981 • 1.4988

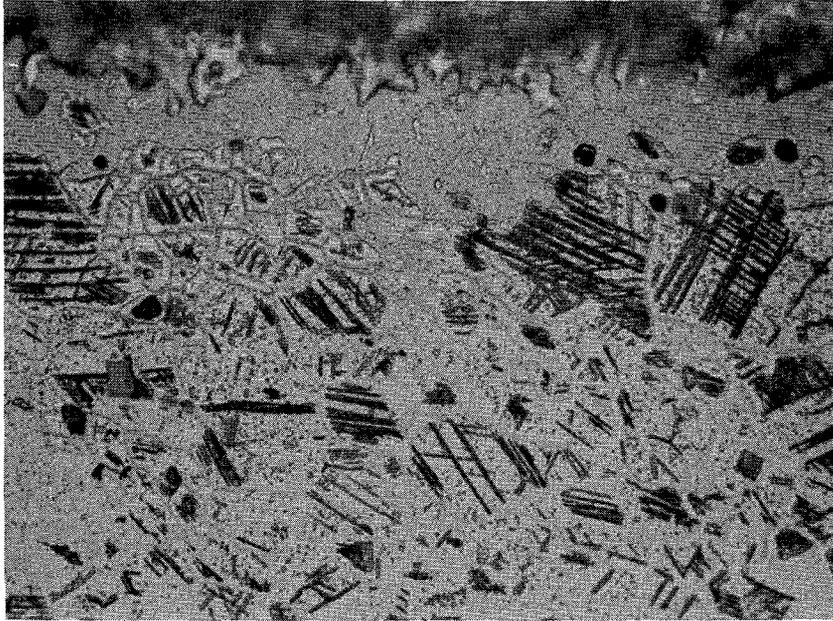


b) Gewichtsverluste der Korrosionsproben aus Teststr. 2 (700°C) ○ 1.4970 + 1.4981 • 1.4988

Abb. 1 Zeitlicher Verlauf der Natriumkorrosion an Hüllrohrproben in Pos. 1 der Teststrecken. a) 600°C b) 700°C

Im Bereich der ferritisierten Korngrenzen werden vereinzelt mikroskopische Hohlräume gefunden. Es ist zu vermuten, daß diese von den auf den Oberflächen feststellbaren Löchern ausgehend in die Tiefe des Materials eindringen.

Die Konzentrationen an Cr, Ni und Mn in den ferritischen Randschichten und Korngrenzen werden durch die Lösungseffekte drastisch reduziert, Cr etwa auf die Hälfte, Ni auf ein Viertel des Ausgangswertes der Konzentration. 1.4970 und 1.4981 wiesen auf den Oberflächen an Mo reiche Partikel auf, 1.4988 dagegen nicht.



Vergr. ca. 100x

Abb. 2 Schrägschliff der Probe OA20K (1.4970), mit Oxalsäure geätzt. Na-Einsatz: 5000 h, 700°C, 5 m/s, 5,5 ppm O

Die Gehalte an B im 1.4970 nahmen deutlich ab, dagegen stieg bei allen Werkstoffen der C-Gehalt an (s. 1141.3).

Die Kriechgeschwindigkeit der belasteten Innendruckproben hatte im Vergleich zu im Vakuum ausgelagerten Kontrollproben nicht zugenommen (s. Abb. 3). Für die Dauer des 5000-Stunden-Versuchs ist also kein Effekt des Natriums auf das mechanische Langzeitverhalten der drei Hüllwerkstoffe feststellbar, obwohl große Anteile des Hüllrohrquerschnittes von Korrosionseffekten betroffen sind.

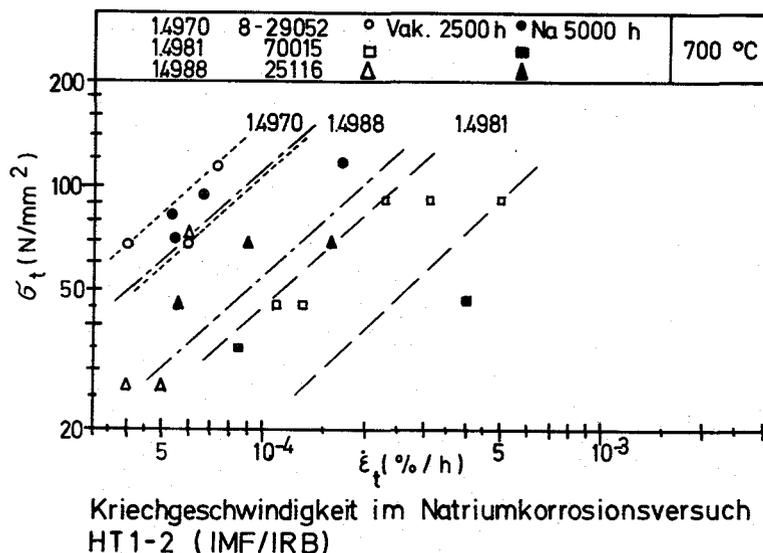


Abb. 3 Vergleich der Kriechgeschwindigkeit der Hüllrohrproben im Natriumversuch und im Kontrollversuch im Vakuum

1141.2 Natriumkorrosionsuntersuchungen an verschleißfesten Werkstoffen*

(H. U. Borgstedt, IMF; G. Drechsler, G. Frees, IRB)

Der Einfluß langzeitiger Einwirkung von Natrium auf Werkstoffoberflächen, die wegen ihres Gleit-, Reib- und Verschleißverhaltens im SNR-300 Einsatz finden sollen, ist zu untersuchen, um Informationen über die möglichen Veränderungen der Oberflächeneigenschaften zu erhalten.

Im MT-3 erreichte die Exposition der Proben 5000 h bei den Parametern $T = 600^{\circ}\text{C}$, $v = 1 \text{ m/s}$ und $c_0 = 10 \text{ ppm}$. Abb. 4 zeigt den zeitlichen Verlauf des korrosiven Abtrags an den Werkstoffen NIMONIC 90 und INCONEL 718 und den Einfluß der Probenposition ("Downstream"-Effekt). Die Abtragungsgeschwindigkeit hat mit der Zeit abgenommen, für NIMONIC 90 stärker als für INCONEL 718. Die Oberflächen von NIMONIC 90 sind durch die Bildung von metallischen Schichten, die an Cr, Fe und Co angereichert sind, gekennzeichnet, auf INCONEL 718 entsteht eine an Mo und Fe reiche Korallenstruktur.

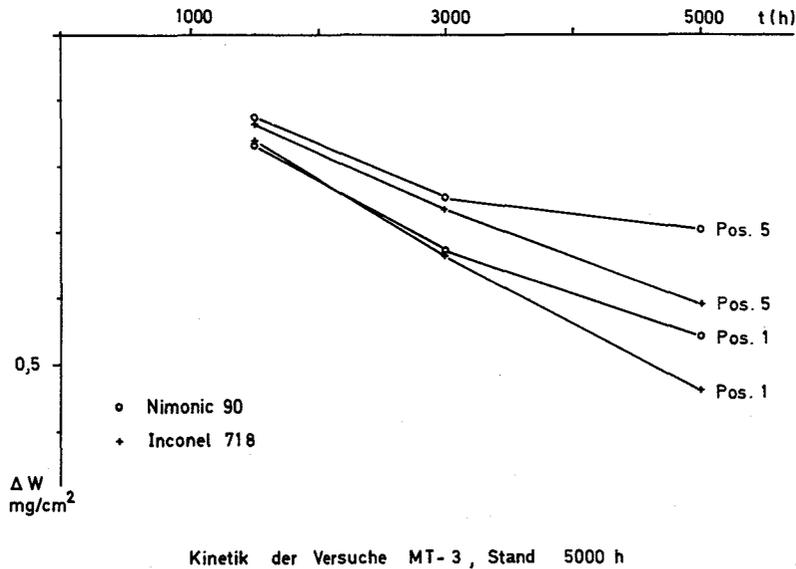


Abb. 4 Zeitlicher Verlauf der Natriumkorrosion an Blechproben aus NIMONIC 90 und INCONEL 718 (600°C, 1 m/s)

Im MT-2 erreichte die Korrosionsuntersuchung an STELLIT 6H, aufgeschweißt auf Stahl 1.4541, und STELLIT 6 B eine Versuchszeit von 1500 Stunden. Unter den gleichen Bedingungen wie im Versuch MT-3 verloren alle Proben an Gewicht (jeweils in der 1ten Position):

STELLIT 6 H	0,125 mg/cm ²
STELLIT 6 B	0,33 mg/cm ²

1141.3 Reinheit und Reinheitskontrolle des Natriums*

1. Prüfung von Monitoren zur Reinheitsüberwachung

(H. U. Borgstedt, G. Wittig, IMF)

Die von der WESTINGHOUSE ELECTRIC CORP., Baltimore, Md., USA, gelieferte elektrochemische Sauerstoffsonde wurde in einem statischen Versuchsaufbau mit Hilfe der Vanadiumgettergleichgewichtsmethode kalibriert. Sie zeigte sowohl im Zusammenhang zwischen Sauerstoffaktivität und EMK als auch im Temperaturgang eine geringe Abweichung vom theoretischen Verhalten. Außerdem benötigte der inzwischen über 1000 Stunden betriebene Meßkopf nahezu 500 Stunden, bis eine Stabilität der Anzeige eingetreten war.

* BzFE Nr. 622.3

2. Nachuntersuchung von Korrosionsproben

(H.Schneider, H.Schumann, IMF)

Im Rahmen des bauzugehörigen SNR-300-Versuchsprogramms werden Korrosionsversuche an Hüllrohrmaterialien in Natrium von 700°C durchgeführt, wobei durch eine in der Hüllrohrprobe eingeschlossene Gasmenge der Spaltgasdruck simuliert wird. Korrosionsproben aus dem Versuch HT 2.2 (siehe 1141.1) wurden nach 5000 h Einsatz in Natrium von 700°C auf Kohlenstoff und Stickstoff bzw. Bor analysiert. Die gefundenen Werte wurden mit den Gehalten der Ausgangsmaterialien verglichen. Kohlenstoff- und Borgehalte wurden auch an Parallelproben bestimmt, die ohne Berührung mit dem Natrium in den Hüllrohrproben in Helium 5000 h bei 700°C ausgelagert worden waren.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengestellt:

1.4970 Ch. 8-29052

	Ausgangsmat.	Pr.0 A 20 K	Parallelprobe
C	0,1%	0,15%	0,11%
B	55/52/55 ppm	20/23 ppm	18/22 ppm
N	0,01%/0,015%	0,025%/0,026%	

1.4981 Ch. 70703

	Ausgangsmat.	Pr.1 A 18 K	Parallelprobe
C	0,062%/0,058%	0,106%	0,064%
N	0,005% - 0,015%	0,01%/0,015%	

1.4988 Ch. 25116

	Ausgangsmat.	Pr.8 A 32 K	Parallelprobe
C	0,059%	0,124%	0,059%
N	0,09%/0,08%	0,10%/0,10%	
	0,09%	0,09%	

Ausserdem wurde an diesen Proben und den entsprechenden Ausgangsmaterialien der Konzentrationsverlauf verschiedener Elemente in den oberflächennahen Zonen spektralanalytisch unter Einsatz der Glimmentladungs-

lampe von RSV bestimmt. Die Ergebnisse sind in den Abb. 5-8 zusammengefasst.

In den Diagrammen ist der Verlauf der Konzentration der jeweiligen Elemente in der korrodierten Probe und im Ausgangsmaterial stets mit dem gleichen Symbol, jedoch im Ausgangsmaterial kleiner und mit geringerer Strichstärke, gekennzeichnet. Es wurden in den Diagrammen stets Elemente in verschiedenen Konzentrationsbereichen zusammengefasst, was verschiedene Masstäbe beim Auftragen der Konzentrationen erforderlich machte. Es sind daher in den meisten Diagrammen links und rechts verschiedene Konzentrationseinteilungen, die sich sinngemäss auf die dargestellten Elemente beziehen. Im einzelnen zeigen die Diagramme folgendes Bild:

Bei allen drei untersuchten Werkstoffsorten ist in den oberflächennahen Zonen eine starke Ni- und Cr-Verarmung zu beobachten, die bis in einen Bereich von ca. 3 - 7 μm reicht (1.4970 ca. 5 - 6 μm , 1.4981 ca. 3 - 4 μm , 1.4988 ca. 6 - 7 μm). Es folgt eine Zone geringer Verarmung, die beim Ni nach ca. 30 - 40 μm und beim Cr nach ca. 35 - 40 μm die Matrixwerte erreicht. Einen ähnlichen Verlauf zeigen die Elemente Mn, Nb, V und Ti, während Mo bei allen drei Materialien in den oberflächennahen Zonen angereichert ist, wobei beim Material 1.4981 und 1.4988 deutlich ein Konzentrationsmaximum bei ca. 4 - 5 μm Tiefe zu beobachten ist.

Bor ist im Material 1.4970 in der korrodierten Probe und auch im Ausgangsmaterial deutlich abgereichert. Der Matrixwert von ca. 55 ppm ist beim Ausgangsmaterial auch in 35 μm Tiefe noch nicht erreicht. In der korrodierten Probe liegt er in 150 μm Tiefe bei einem Wert von 22 ppm. Wie aus Tab. 2 zu ersehen ist, entspricht dieser Wert dem ungefähren Durchschnittswert der korrodierten Probe.

Interessant ist der Verlauf der Kohlenstoffkonzentration. Nach Abreicherung in den ersten μm -Schichten unter der Oberfläche zeigt er bei allen drei Materialien einen Konzentrationsanstieg auf über das Doppelte seines Gehaltes im Ausgangsmaterial, der in einem Bereich von ca. 30 - 35 μm seinen höchsten Wert erreicht. Von da ab wird ein allmählicher, mehr oder weniger gleichmässiger Konzentrationsabfall beobachtet, der jedoch auch in einer Tiefe von 140 μm noch nicht den Gehalt im Ausgangsmaterial erreicht (s. Abb.8). Wie die in der Tab.2 ausgeführten Werte

zeigen, liegen die über die Gesamtwandstärke bestimmten Kohlenstoffgehalte in den korrodierten Proben deutlich über den Gehalten in den Ausgangsmaterialien.

Neben den in den Diagrammen aufgeführten Elementen wurde beim Werkstoff 1.4981 und 1.4988 auch der Verlauf der Co-Konzentration bestimmt. Es zeigte sich, dass eine Co-Anreicherung auf etwa das Doppelte des Matrixwertes in den oberflächennahen Zonen erfolgt ist. Beim 1.4981 reicht diese Anreicherung bis in eine Tiefe von ca. 3 μm , beim 1.4988 ca. 7 μm tief. Bei den entsprechenden Ausgangsmaterialien war kein Co-Konzentrationsgefälle zu beobachten.

Veröffentlichungen zu 1141:

- (1) H.U. Borgstedt, W. Dietz
Korrosions- und mechanisches Langzeitverhalten von Hüllrohren in Natrium von 700 °C
KFK-1932
- (2) H.U. Borgstedt, Z. Perić, G. Wittig
Anlage zur Natriumdestillation für analytische Zwecke
"NADESTAN 4"
KFK-1941

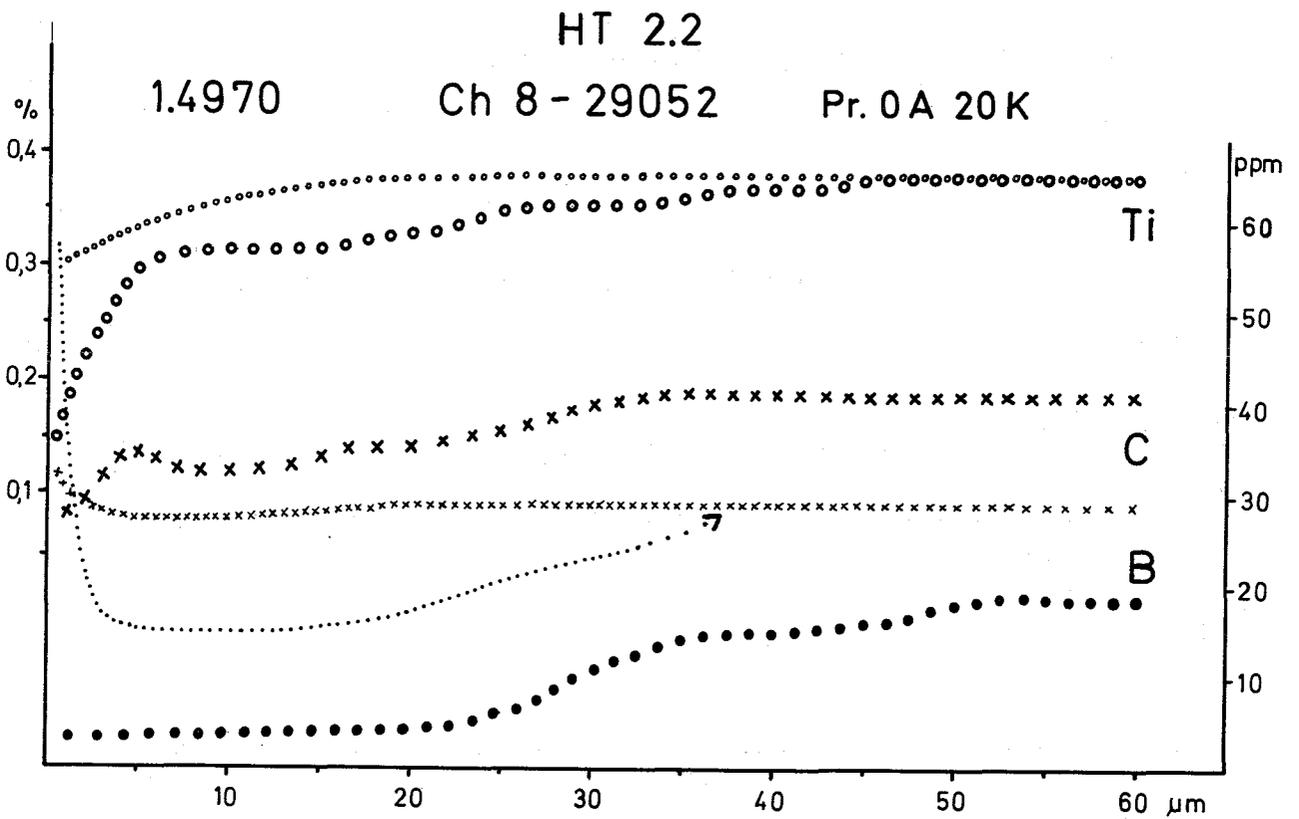
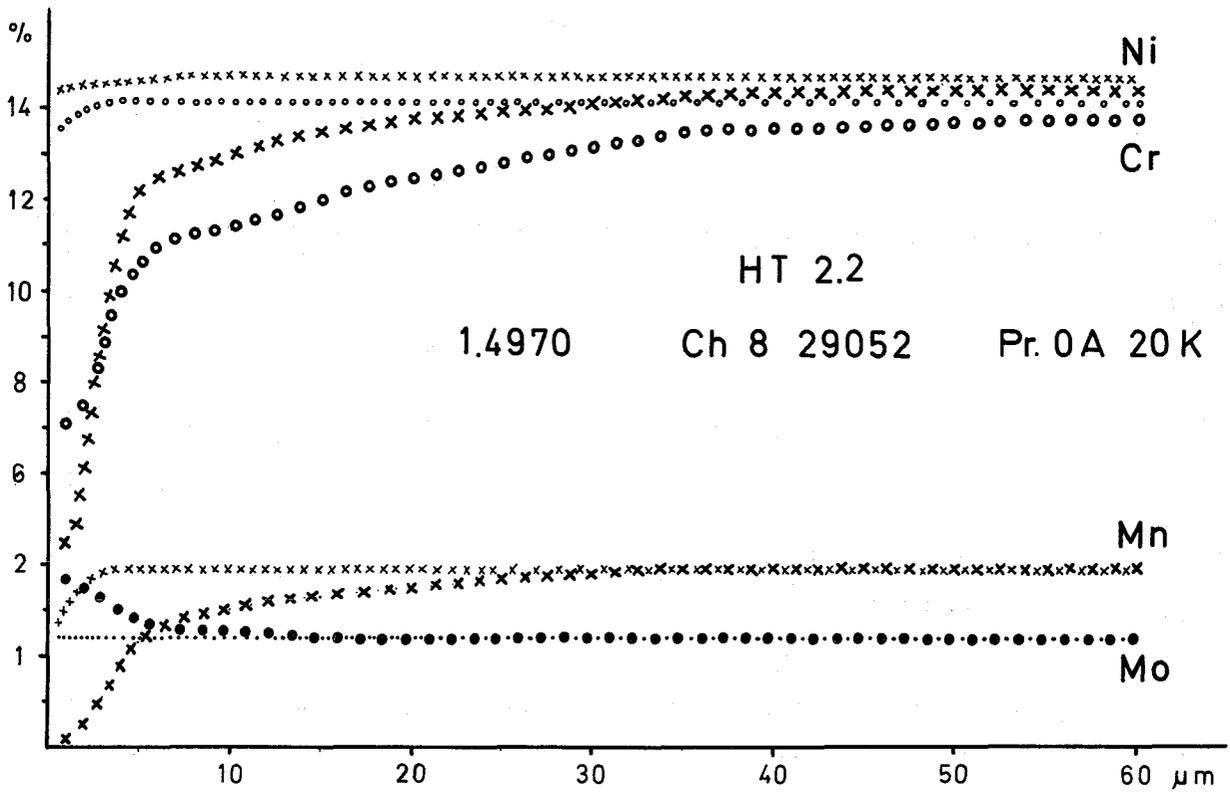


Abb. 5

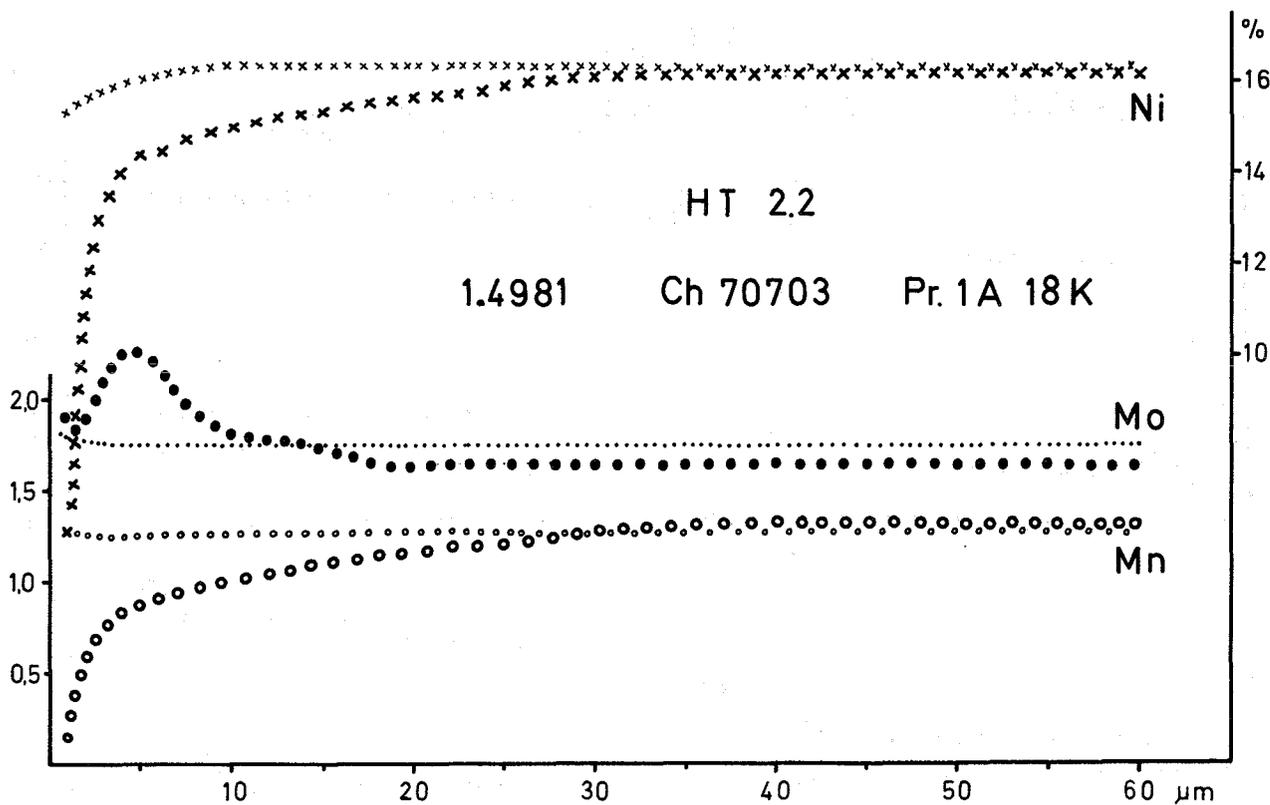
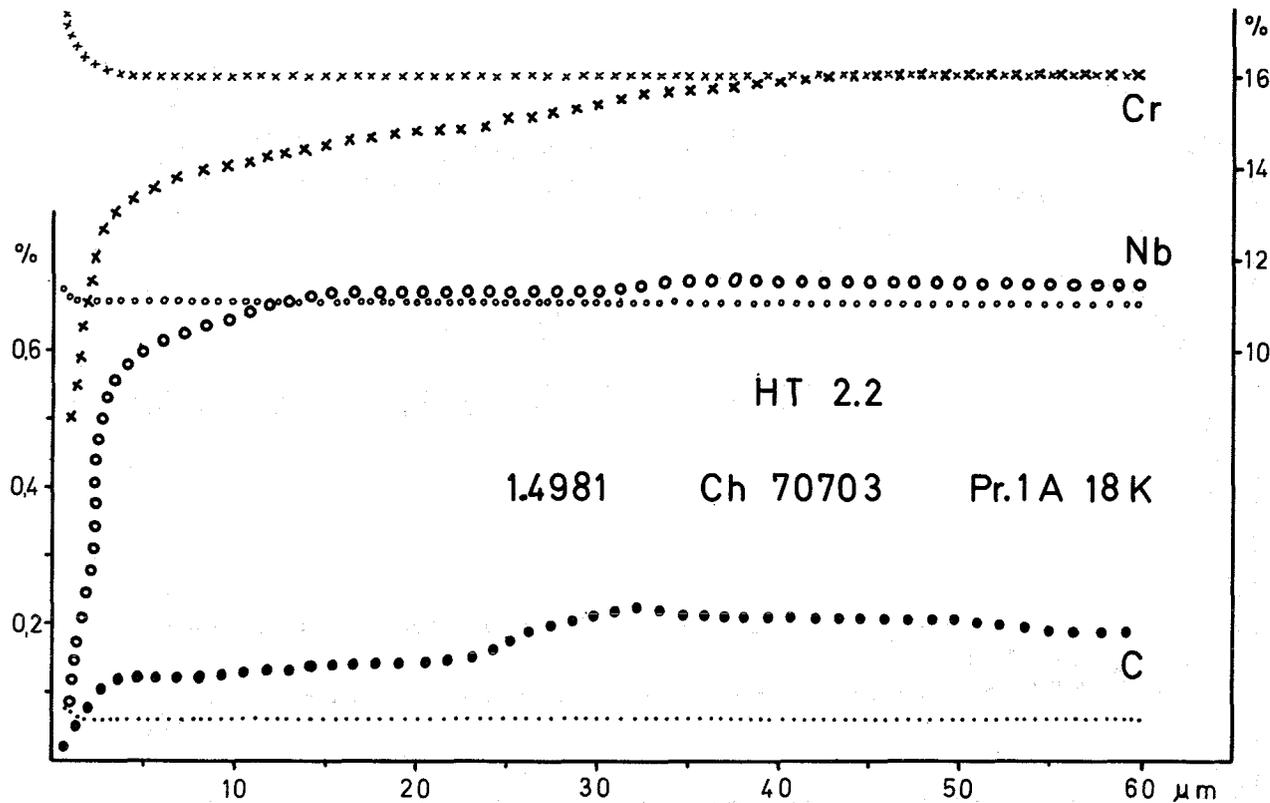


Abb. 6

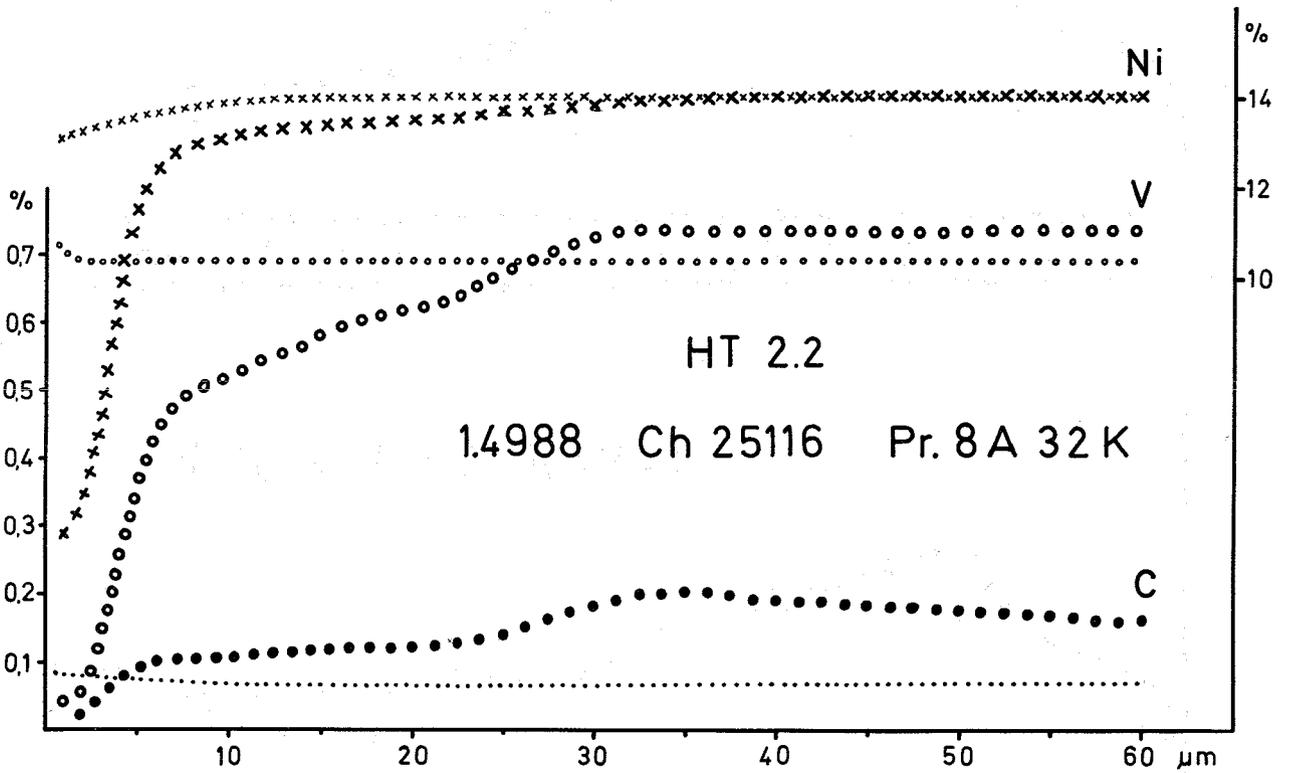
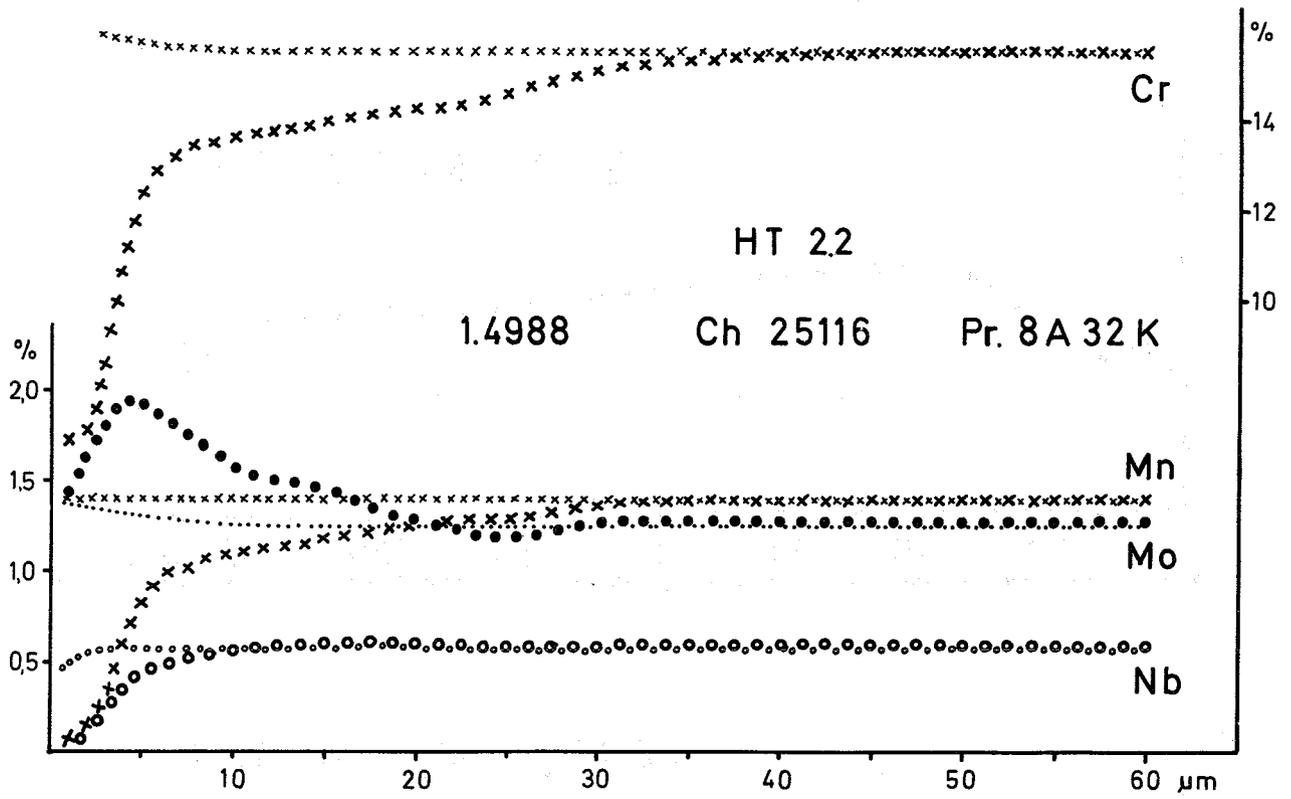
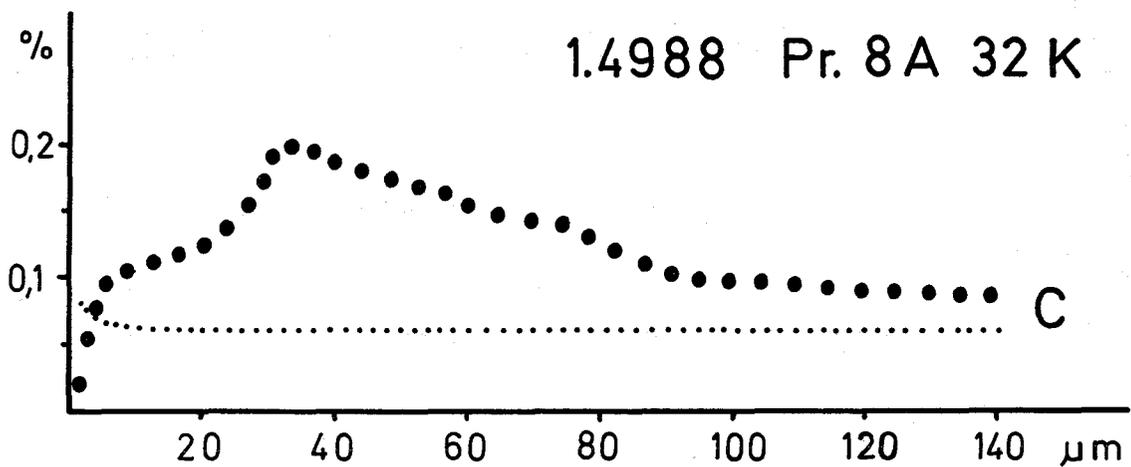
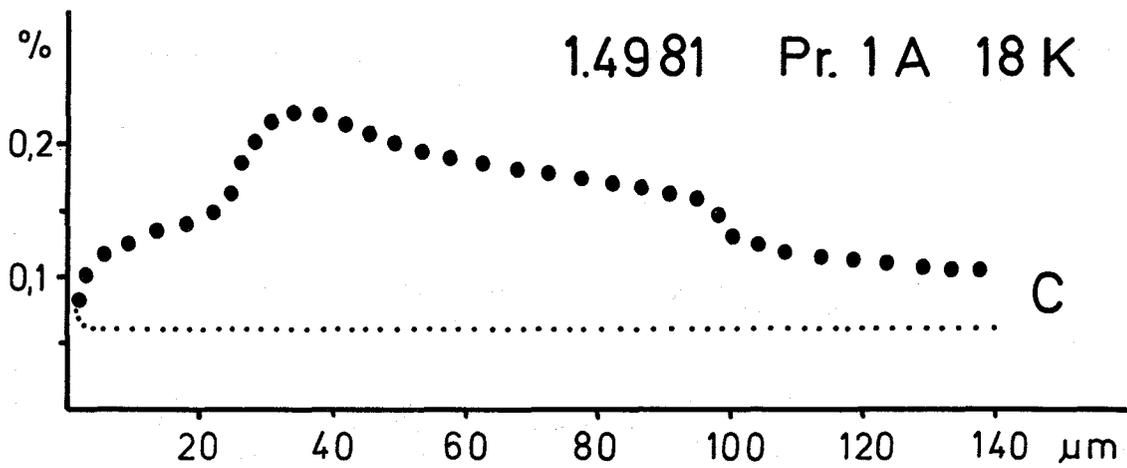
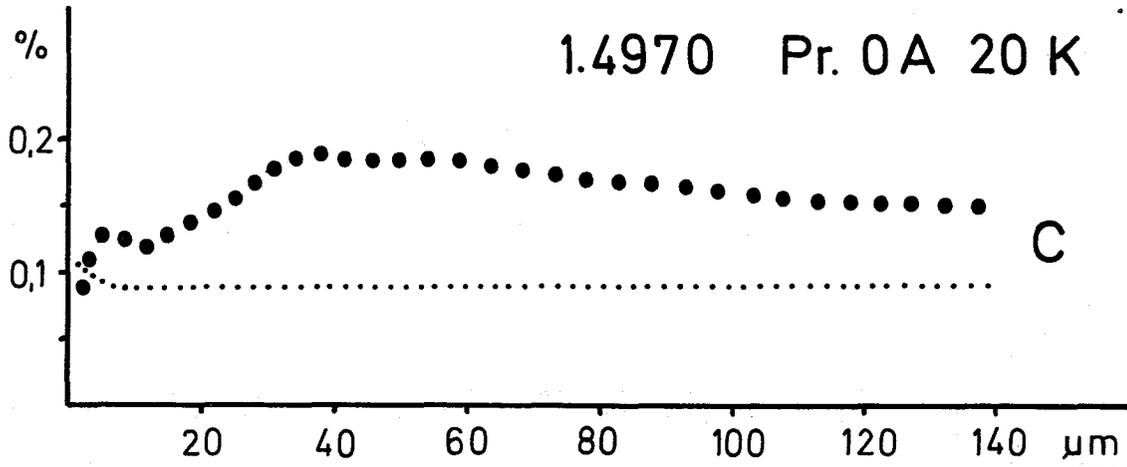


Abb. 7

HT 2.2



1142 Gaskühlung^G1142.3 Gas-Korrosion

(S. Leistikow, IMF)

Im Zuge der Untersuchungen zur Gasreinigung und Gasdosierung wurden folgende Ergebnisse erzielt:

- Das Gasreinigungsverfahren von Messer-Griesheim durch Chemisorption mit Oxisorb erwies sich für unsere Zwecke als unzureichend. Die Gasreinigung soll jetzt durch Molekularsieb erfolgen, das sich in einer durch flüssigen Stickstoff gekühlten Rohrschlange befindet, so daß gleichzeitig Feuchtigkeit ausgefroren wird.
- Die Dosierung des Wasserdampfgehaltes wurde durch Reduktion von CuO mit Wasserstoff bei 400°C vorgenommen. Diese erfordert jedoch die Feindosierung von Wasserstoff, die mit Vorteil über die temperaturabhängige Diffusion durch Reinnickel hindurch ausgeführt wird. Versuche zur Eichung dieser Methode zeigen bisher gute Ergebnisse. Feindosierung durch Ventile resp. Plastikfolien erwies sich als nicht zweckmäßig.

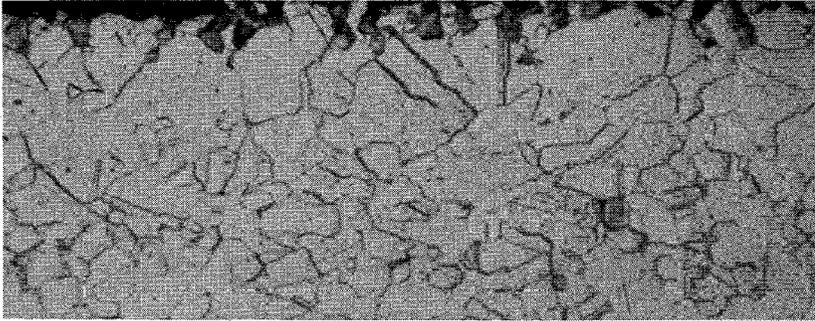
Die im letzten Berichtszeitraum begonnenen vergleichenden Helium-Korrosionsversuche bei 800°C und (ab 150 Std.) 4 vpm H₂O, <1 vpm O₂, 2 vpm N₂ wurden fortgesetzt und ergaben die folgenden Gewichtszunahmen (mg/dm²):

Versuchszeit (Std.)	Werkstoff-Nr.		
	1.4970	1.4981	1.4988
74	12,5	5,57	3,75
150	16,6	7,18	4,32
504	43,0	12,5	14,4

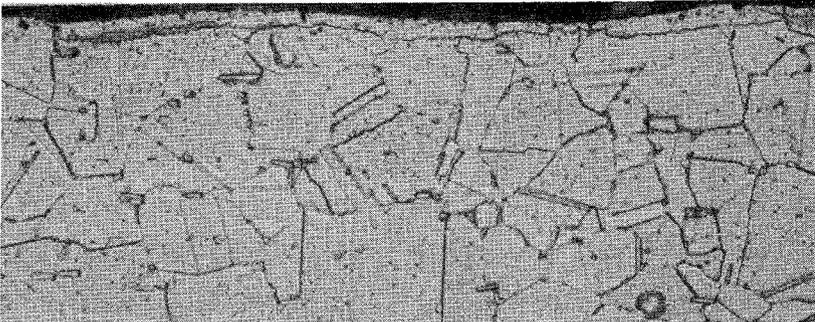
Damit wurde erneut die bessere Korrosionsbeständigkeit der Nb-stabilisierten Stähle gezeigt, bei denen im Gegensatz zu den Ti-stabilisierten keine korngrenzenselektive Durchdringung festgestellt werden konnte.

(Abb. 9a-c).

114-14



1.4970



1.4981



1.4988

Abb. 9: Hochtemperatur-Oxidation austenitischer
CrNi-Stähle in hochreinem Helium
(500 Std., 800 °C, 1,5 at) 500x

115 ARBEITEN ZUM BRENNSTOFFZYKLUS1151. Naßchemische Extraktionsverfahren*1151.2 Purex Fließschemata

(W. Ochsenfeld, E. Hamburger, G. Höffle, W. Riffel, P. Schwab, IHCh)

In Fortsetzung der Arbeiten mit dem Dounreay-Brennstoff wurden Extraktionsversuche mit dem im vorangegangenen Vierteljahr aufgelösten Brennstoff durchgeführt. Da es sich - wie berichtet - um lang gekühltes, hoch abgebranntes Material mit 15% Pu handelt, war die Möglichkeit gegeben, den Einfluß der hohen Spaltproduktkonzentrationen bei verhältnismäßig geringer Aktivität zu studieren. Um das durch die lange Abklingzeit entstandene stabile Zr radiometrisch zu erfassen, wurde den Ausgangslösungen Zr^{95} zugegeben.

Das Material wurde in der Laboranlage MILLI in zwei aufeinander folgenden Kodekontaminationszyklen, in denen das Pu und U gemeinsam extrahiert wurden, gereinigt, um dann im 3. Extraktionszyklus das gemeinsam extrahierte Pu und U durch elektrolytische Reduktion im Mischabsetzer zu trennen.

1. Extraktionszyklus:

Das Hauptinteresse galt dem 1. Extraktionszyklus. Primäres Ziel der Versuche war das Studium der Niederschlagsbildung an den Phasengrenzen während der Extraktion und Rückextraktion und der Dekontaminationsfaktoren im 1. Zyklus.

Das von der Auflösung kommende Material mit 15% Pu wurde im 1. Zyklus bei zwei verschiedenen Versuchsbedingungen extrahiert.

Wie dies schon in schwach aktiven Versuchen mit Zr^{95} -markiertem Zr und ca. 100-200 mg/l HDBP + HMBP enthaltendem 30% TBP/Alkan von uns beobachtet wurde, kommt es bei einer geringen Sättigung der organischen Phase an U+Pu zur Niederschlagsbildung, hauptsächlich bei der Rückextraktion, wo das extrahierte Zr durch die verdünnte Säure in die wässrige Phase zurückgeholt wird. Bei einer 45%-igen Sättigung des 30% TBP im hochaktiven Versuch in der Versuchsanlage MILLI kam es zu starker Niederschlagsbildung bei der Rückextraktion. Die Niederschläge führten zuerst zu hydraulischen Störungen im Mischabsetzer. Nach

* BzFE-Nr. 351.3, 351.4

30 Stunden mußte der Versuch infolge Verstopfungen unterbrochen werden. Auch in dem Extraktionsteil waren um den Feedpunkt Niederschläge aufgetreten, die den Betrieb aber noch nicht behinderten. An den Ausläufen der Misch-Absetzer konnten die Niederschläge abgesaugt und zur Analyse gegeben werden. Die beiden Extraktoren für die Extraktion und Rückextraktion wurden dann durch Zugabe von HF in Salpetersäure freigespült.

Der zweite Versuch (Tab. 1), bei einer sehr hohen Sättigung der organischen Phase am Feedpunkt von 85% ($97.8 \text{ g U}/_1 + 23.2 \text{ g Pu}/_1$) und 78% ($91.4 \text{ g U}/_1 + 18.8 \text{ g Pu}/_1$) nach der Wäsche, konnte ohne geringste Störungen über 35 Stunden bis zu Ende geführt werden. Geringfügige Niederschläge wurden nach Leer-saugen der Kammern in der Extraktion beim Feedpunkt, bei der Rückextraktion im Produktauslauf festgestellt.

Die bei diesem Versuch im 1. Zyklus erreichten summarischen Dekontaminationsfaktoren von $5.6 \cdot 10^3$ für die gesamten Gamma-Strahler waren sehr gut (Tab. 1). Die Dekontaminationsfaktoren (DF) für Cs und Ce waren groß. Infolge der hohen Säurekonzentration in der Ausgangslösung (Feed) und der Waschlösung waren die Dekontaminationsfaktoren für Ru besser als die für Zr. Die in der organischen Phase gefundene Dibutylphosphat (HDBP)-Konzentration von 100 mg/l war höher als erwartet. Bei geringerer Sättigung der organischen Phase an Uran und Plutonium in Versuch 1 war die Akkumulation des HDBP im Waschteil 2-3 mal größer. Der DF für Gesamt-Gammas in Versuch 1 war um etwa 2 Zehner-Potenzen geringer. Der DF für Zr^{95} etwa 30 mal, für Ru^{106} etwa 300 mal schlechter als bei der höheren Sättigung. Da bei Versuch 1 sowohl im Feed als in der Waschlösung eine niedrigere Säurekonzentration von ca. 2 M HNO_3 verwendet wurde, ist der schlechtere DF für Ru gegenüber Versuch 2 zu erklären.

Außer dem bekannten Einfluß der Sättigung der organischen Phase auf die Dekontaminationsfaktoren für Spaltprodukte, ist die hohe Sättigung zur Verdrängung der Bildung störender Niederschläge in den Extraktoren von großem Vorteil. Gegenüber einer Verwendung von Komplexbildnern zur Vermeidung der Niederschläge wäre dies ein Weg, der nicht die Nachteile der Verwendung des infrage kommenden Komplexbildners Fluor hätte.

2. Extraktionszyklus:

Um eine Verdünnung des zu 60% U-235 angereicherten Urans zu vermeiden, wurde der 2. Zyklus als Kodekontaminationszyklus gefahren. Durch die Reduktion des Pu im elektrolytischen Mischabsetzer des 3. Zyklus wurde das Pu von dem angereicherten Uran ohne Änderung der Isotopenzusammensetzung des Urans getrennt.

Im 2. Extraktionszyklus wurde eine Konzentration von etwa 2 M HNO_3 im Feed und der Waschlösung gewählt, hauptsächlich um eine gute Dekontamination von Zr zu erreichen. Während der gesamten Versuchsdauer von 40 Stunden traten keine Niederschläge auf. Die Dekontaminationsfaktoren für die Gamma-Strahler lagen bei 35. Die Dekontaminationsfaktoren der Hauptaktivitäten Cs^{137} , Ce^{144} und Ru^{106} waren jeweils größer als 100.

Die Auswertung der Reinigung und Trennung von Pu/U im 3. Zyklus ist nicht abgeschlossen. Über diese Ergebnisse soll im nächsten Vierteljahr berichtet werden.

Tab. 1 I. Kodekontaminationszyklus

	Hohe Sättigung der org. Phase			
	Feed HAF	Org. Phasen		Produkt HCP 2.2-1-A
		Feedp. 2.1-100	HAF 2.1-160	
M HNO ₃	3.9	-	-	0.16
U g/l	86.5	97.7	91.4	56.7
Pu g/l	17.1	23.2	18.8	8.75
Zr g/l	0.85			-
HDBP mg/l		~100	102	-
Cs ¹³⁷ mCi/l	16700	2.5	1.55	1.2
Ce ¹⁴⁴ mCi/l	310	-	<0.01	-
Ru ¹⁰⁶ mCi/l	140	1.4	0.30	0.08
Zr ⁹⁵ mCi/l	5	0.3	0.017	0.01
γ dpm/l	1.33.10 ¹⁴	6.77.10 ¹⁰	2.41.10 ¹⁰	1.56.10 ¹⁰
DF		Extraktion	Extr.+ Scrub	Produkt
Cs ¹³⁷		7550	11400	9100
Ce ¹⁴⁴		-	>33000	-
Ru ¹⁰⁶		113	500	1150
Zr ⁹⁵		19	310	330
γ gross		1.9.10 ³	5.8.10 ³	5.6.10 ³

HAF: 350 ml/h

HAS: 70 ml/h, 3 M HNO₃

HAX: 335 ml/h, 30% TBP/Alkan

HCX: 490 ml/h, 0.01 M HNO₃

121 PHYSIKALISCHE EXPERIMENTE1213 SNEAKMessungen in der Anordnung SNEAK-9C*

(W. Scholtyssek, IASR)

1. SNEAK-9C-1

Die Experimente an der Anordnung SNEAK-9C-1, die ein reines Urancore darstellte /1/, wurden Anfang März 1974 abgeschlossen. Mit der Auswertung der Resultate und mit Nachrechnungen wurde begonnen.

2. Umladung zu SNEAK-9C-2

Wie vorgesehen wurde die Umladung zu dem Plutoniumcore SNEAK-9C-2 sektorweise durchgeführt. Das Ziel war eine Überprüfung der Sektorsubstitutionsmethode.

Abb. 1 zeigt eine vorläufige Auswertung der Substitution bis zum 90° -Sektor. Aufgetragen ist die Reaktivitätszunahme in % Δk als Funktion der mit $\phi^+\phi$ gewichteten ersetzten Elemente. Die Extrapolation zum vollen Plutoniumcore ergibt bei einem Randelementwert von 0.125% eine kritische Größe von 136 Elementen für SNEAK-9C-2 (9C-1: 150 Elemente).

Abb. 2 zeigt die Anordnung SNEAK-9C-2 nach der vollständigen Substitution. Das Core wurde mit 139 Elementen kritisch.

* BzFE Nr. 412.1

/1/ W. Scholtyssek

Aufbau und Meßprogramm der Anordnungen SNEAK-9C
KFK-1273/4, Seite 121-8

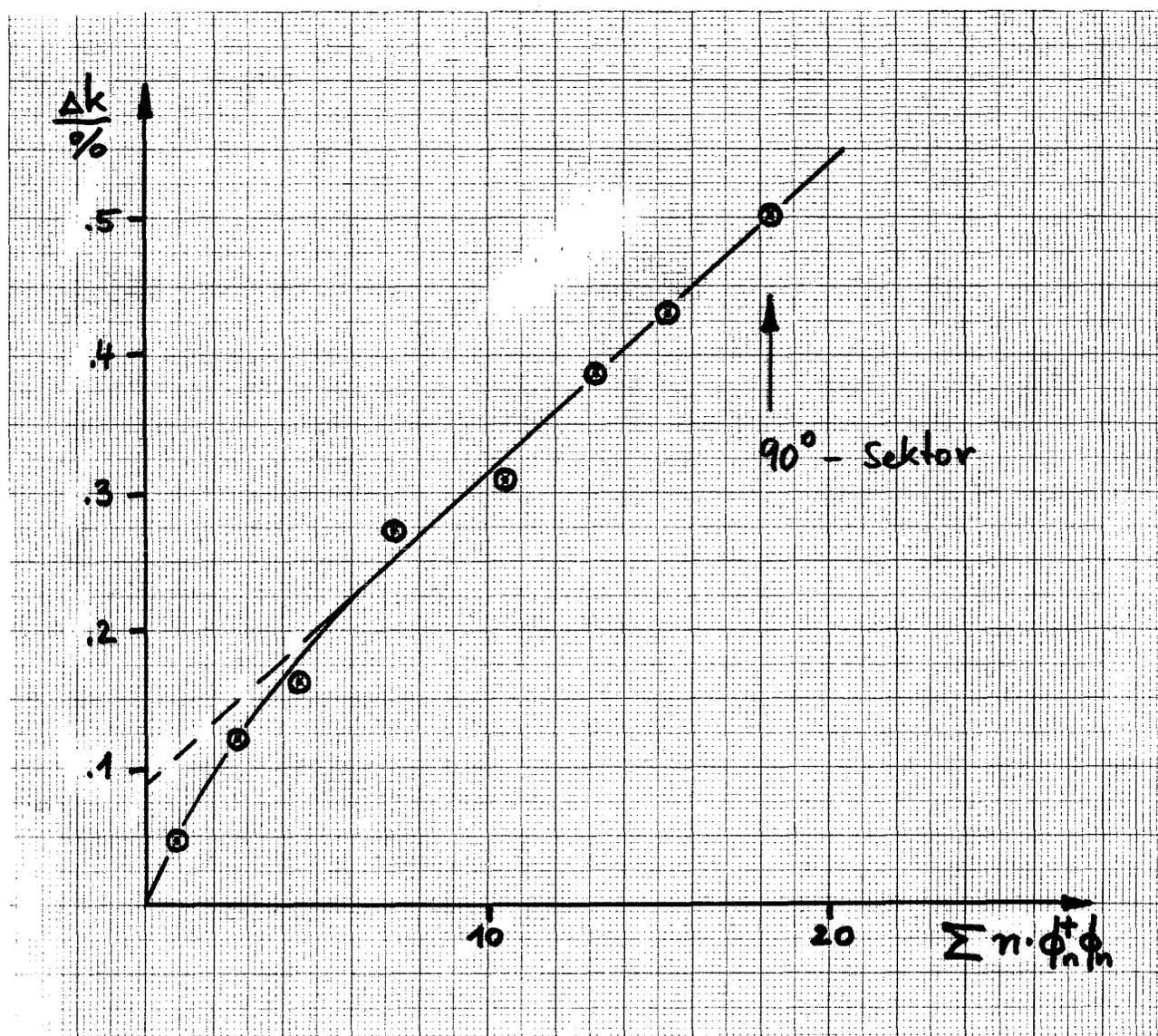
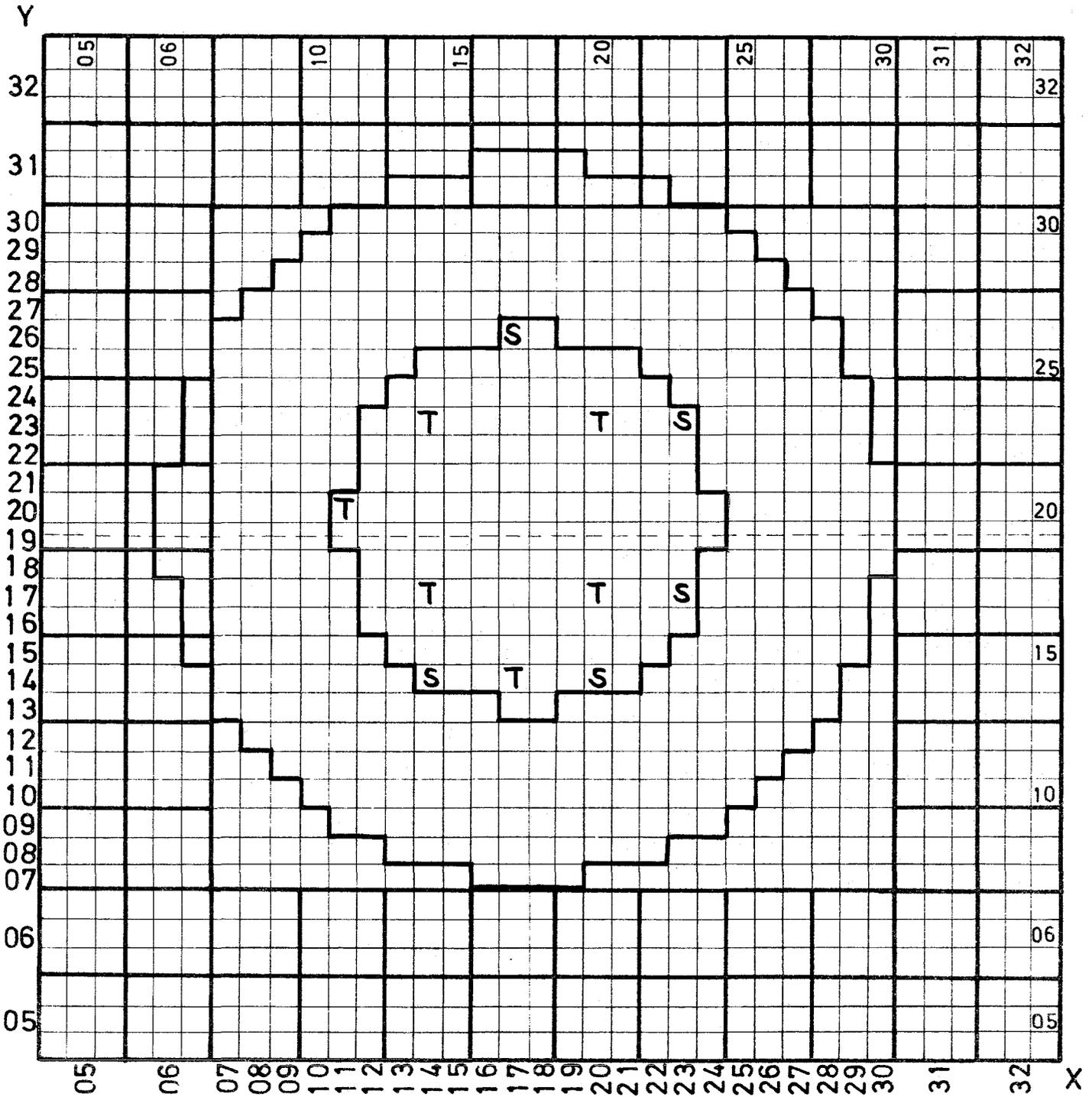


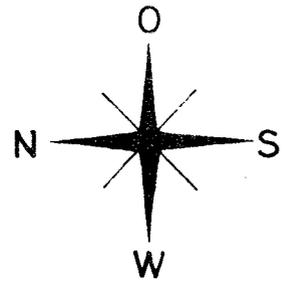
Abb. 1 Reaktivitätszunahme als Funktion der substituierten mit ϕ^+ gewichteten Elemente



SNEAK- 9C-2

Abb. 2 Coreplan SNEAK-9C-2

T: SNEAK-Trimmsstab
 S: SNEAK-Sicherheitsstab



Maßstab 1:10

3. SNEAK-9C-2

Die experimentellen Schwerpunkte der Anordnung SNEAK-9C-2 wurden schon in /1/ skizziert. Nach einer Serie von Experimenten zur Bestimmung grundlegender Reaktorparameter (k_{eff} , B_m^2 , Materialwerte) wird eine Zone mit "schmutzigem" Plutonium (ca. 18% ^{240}Pu) aufgebaut werden, die bei voller Corehöhe (60 cm) einen Radius von ca. 25 cm haben wird. k_{eff} -, Na-void- und Reaktionsratenmessungen sind die wichtigsten Experimente.

Anschließend werden Absorbermessungen mit größeren Mengen Eu_2O_3 und Bor in verschiedenen Anreicherungen sowie größere Na-void-Messungen im sauberen Core SNEAK-9C-2 folgen.

Veröffentlichungen:

(1) O. Sotic

Interpretation of substitution experiments performed in the fast critical facilities MASURCA and SNEAK

KFK-1930

(2) E.A. Fischer, GfK; J.P. Chaudat, M. Darrouzet, CEA de Cadarache

Experiments in Pure Uranium Lattices with unit k_{∞} . Assemblies

SNEAK-8/8Z; UK1 and UK5 in ERMINE and HARMONIE

KFK-1865; CEA-R-4552

122. REAKTORTHEORIE1221 Überprüfung von Kerndaten und Methoden F 1)Genauigkeit der Berechnung von ^{238}U -Spaltraten traversen in Plättchen-Zellen
(E. Kiefhaber, INR)Einleitung

In /1/ wurde darauf hingewiesen, daß bei Zellrechnungen in Plattengeometrie die Winkelstützstellen in den S_N -Rechnungen mit dem Programm DTK modifiziert werden müssen, da mit der in Karlsruhe höchstmöglichen S_N -Ordnung für Plattengeometrie (S_{16}) unter Beibehaltung der üblichen Stützstellen keine zuverlässigen Ergebnisse für den ortsabhängigen Neutronenfluß im MeV-Bereich (und für entsprechende Reaktionsraten z.B. Spaltung in ^{238}U) erzielt werden können. Außerdem wurde bei Verwendung des Querschnittes $\partial\text{STOT } \partial$ als Transportquerschnitt ($\partial\text{STRTR}\partial$) in DTK befriedigende Übereinstimmung zwischen den DTK-Ergebnissen und den mit dem Stoßwahrscheinlichkeitenprogramm ZERA berechneten Ergebnissen für die oben erwähnten Größen festgestellt; ZERA verwendet zur Berechnung der Stoßwahrscheinlichkeiten einen totalen Querschnitt, der vom Programm aus den Einzelquerschnitten zusammengesetzt wird und im MeV-Bereich nahezu identisch mit $\partial\text{STOT } \partial$ ist.

Für den ^{238}U -Spaltratenverlauf in der ZPR III-55 Zelle wurde in /1/ unter den vorangehend erläuterten Voraussetzungen gute Übereinstimmung zwischen ZERA- und DTK-modifizierter S_8 -Rechnung gefunden. Aus der in /1/ erwähnten Diskrepanz zwischen berechneten und gemessenen ^{238}U -Spaltraten-Zelltraversen wurde auf Mängel in den Gruppenkonstanten des MOXTOT-Satzes geschlossen.

Bei Benutzung des KFKINR-Satzes ergibt sich eine bessere Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment. Die verbleibende Diskrepanz ist jedoch noch wesentlich größer als die experimentelle Unsicherheit.

Im folgenden soll eine mögliche Ursache für die verbliebene Diskrepanz diskutiert werden.

1) Zuletzt berichtet in KFK 1273/2

/1/ E. Kiefhaber

Bemerkungen zur Genauigkeit von S_N -Rechnungen für Zellanordnungen.
KFK 1270/4, p. 122-1, (1970)

Es konnte zunächst gezeigt werden, daß Einflüsse der REMO-Korrektur, der Benutzung eines geeigneteren Spaltspektrums, der Berücksichtigung eines plausiblen Feuchtigkeitsgehalts der Graphitplättchen, der Reduktion der Teilchenzahldichten im Uran-Plättchen um 10% und eines u.U. energieabhängigen Bucklings nur geringfügige oder jedenfalls nicht genügend große Änderungen im ^{238}U -Spaltratenverlauf ergaben.

Die Berechnungsverfahren wurden daher nochmals genauer analysiert, um herauszufinden, ob sie Unzulänglichkeiten aufweisen, die für die Abweichung zwischen Theorie und Experiment verantwortlich sein könnten. Die Überlegungen sollen hier hauptsächlich am Beispiel der S_N -Rechnungen erläutert werden: die Schlußfolgerungen können auch auf die Stoßwahrscheinlichkeitsprogramme ZERA und KAPER übertragen werden.

Ergebnis der Analyse

Zunächst wurde durch Transport-Rechnungen mit modifizierten S_8 -Stützstellen der Unterschied festgestellt, der sich ergibt bei der Benutzung des Transportquerschnitts ($\partial\text{STRTR}\partial$) anstelle des totalen Querschnitts ($\partial\text{STOT}\partial$), der etwa in dieser Form in ZERA und KAPER bei der Berechnung der Stoßwahrscheinlichkeiten verwendet wird. Die mit $\partial\text{STRTR}\partial$ bestimmte Spaltratentraverse zeigt einen flacheren Verlauf (bei Normierung auf den Maximalwert wie in Abb. 1) bzw. eine geringere Überhöhung (bei Normierung auf den Minimalwert oder auf einen Zellmittelwert) als das entsprechende, unter Verwendung von $\partial\text{STOT}\partial$ berechnete Ergebnis. Die in Abb. 1 gezeigte maximale Differenz beträgt etwa 1/3 der Diskrepanz zwischen Experiment und ZERA-Ergebnis, das etwa der zu $\partial\text{STOT}\partial$ gehörenden Kurve in Abb. 1 entspricht.

Einen genaueren Einblick in die möglichen Ursachen der Diskrepanzen vermittelt Abb. 2. Sie zeigt den winkelabhängigen Neutronenfluß für die erste Gruppe (6,5 - 10,5 MeV) an ausgewählten Positionen der ZPR-III-55 Zelle. Die Ergebnisse stammen aus einer S_N -Rechnung mit modifizierten S_8 -Stützstellen. Die gezeigten Abhängigkeiten erklären sich physikalisch dadurch, daß die parallel zu den Plättchengrenzen fliegenden Neutronen in Abb. 2 durch $\phi(\mu = 0)$ dargestellt werden. Die zu $\mu = 0$ nächstgelegene Stützstelle für die modifizierte S_8 -Rechnung liegt bei $|\mu| = 0.05$. Innerhalb der vorhandenen Stützstellen beträgt die Anisotropie des winkelabhängigen Neutronenflusses für den ausgeprägtesten Fall fast einen Faktor 10. Wie groß die Anisotropie und die Größe der Unstetigkeit bei $\mu = 0$ in Wirklichkeit sind, könnte nur durch zukünftige S_N -Rechnungen ermittelt werden, für die modifizierte Stützstellen in höherer Ordnung als S_8 (z.B. S_{16} oder S_{32}) zur Verfügung stehen müßten.

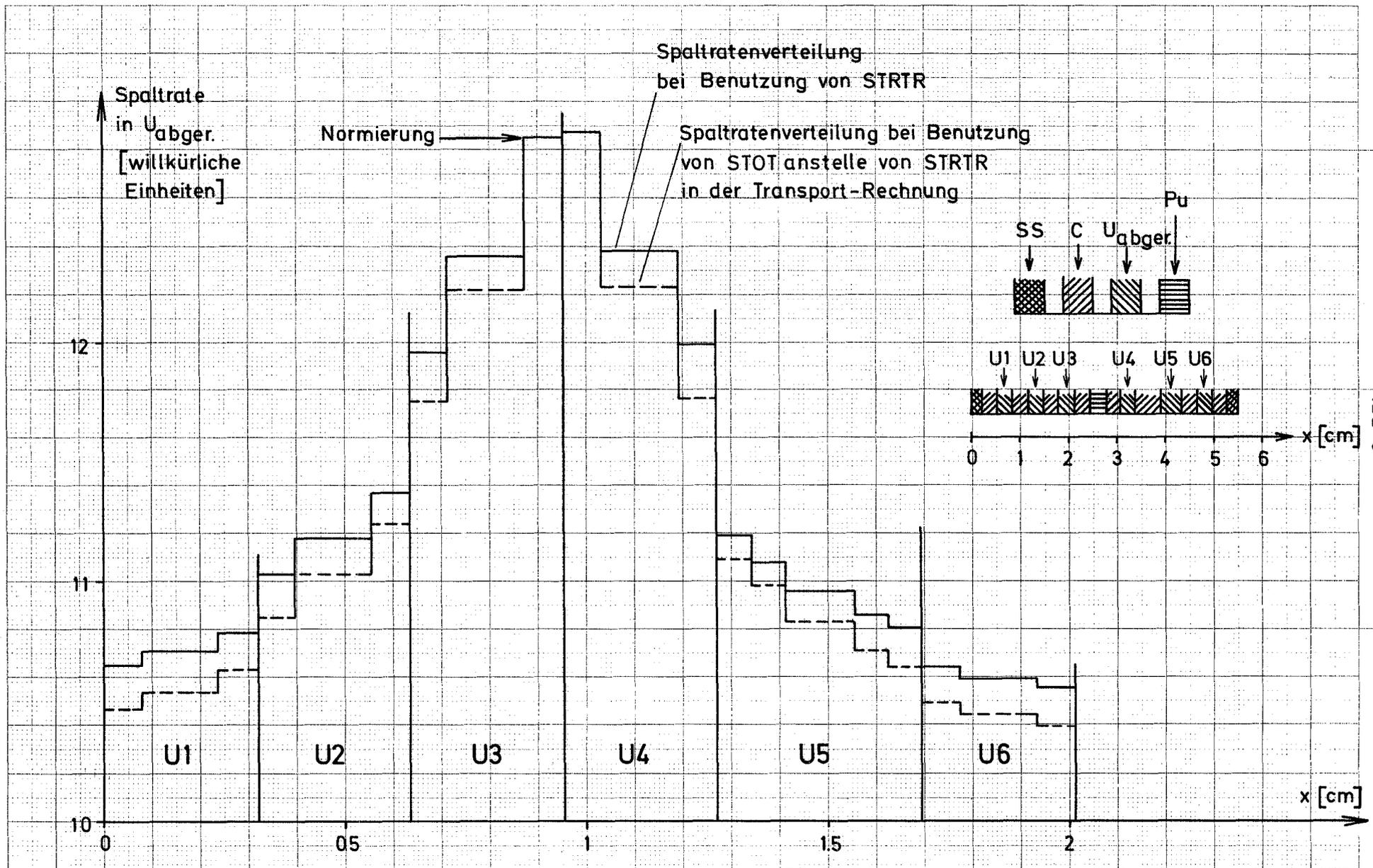


Abb. 1: Verteilung der Spaltrate in abgereichertem Uran in der ZPR III-55-Zelle;
 Ergebnisse von S_8 -Rechnungen mit modifizierten Winkelstützstellen

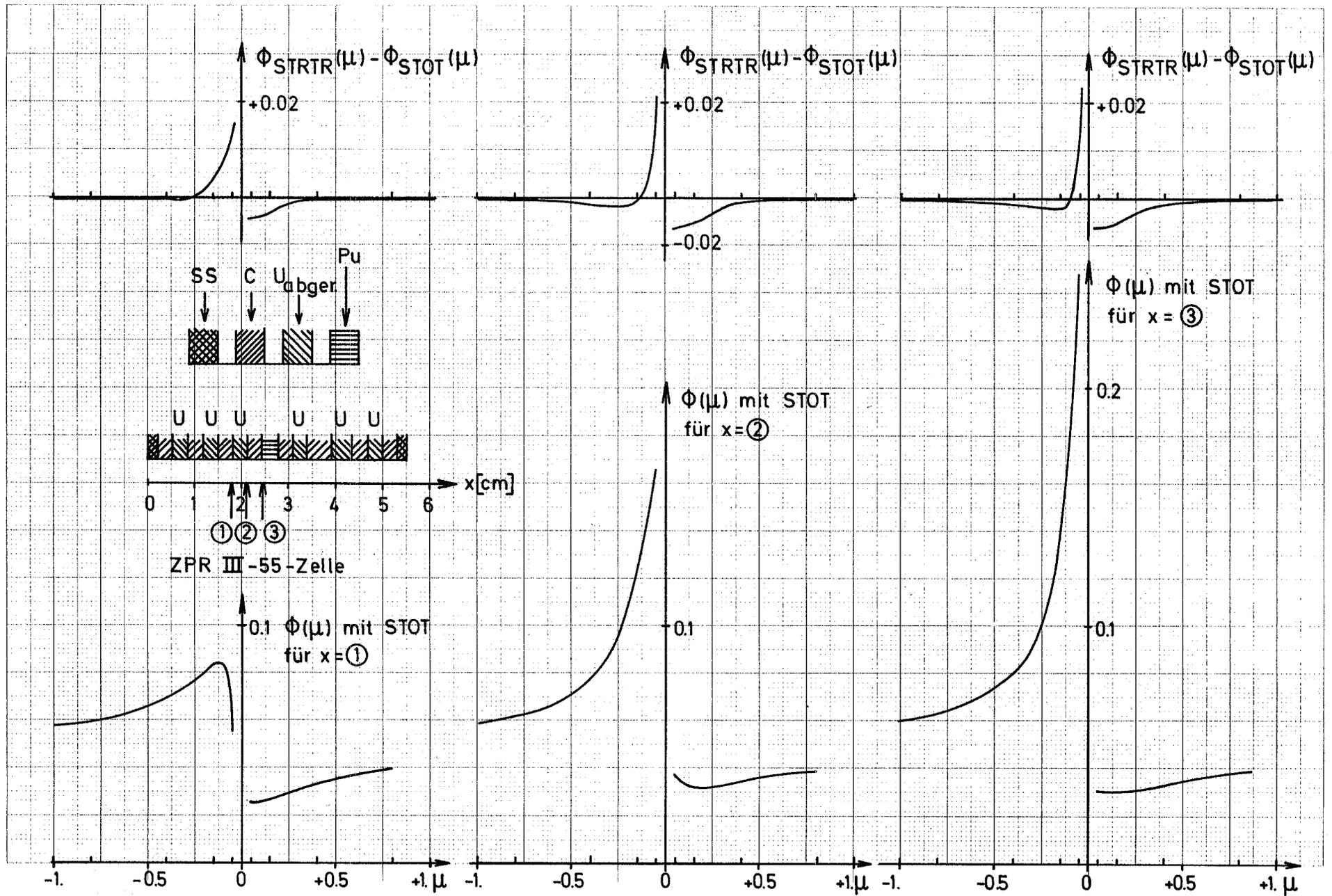


Abb. 2: Winkelabhängige Neutronenflüsse in Gruppe 1 (6.5 - 10.5 MeV) an einigen Stellen der ZPR III-55-Zelle; Ergebnisse von S_8 -Rechnungen mit modifizierten Winkelstützstellen

Im oberen Teil der Abb. 2 sind die Unterschiede gezeigt, die sich in den Winkelverteilungen ergeben, wenn man in den S_N -Rechnungen von ∂STOT zu ∂STRTR als Transportquerschnitt übergeht. Erwartungsgemäß treten die größten Abweichungen bei $\mu \approx 0$ auf.

Da sich in der Nähe von $\mu = 0$ auch bei der modifizierten S_8 -Rechnung nur relativ wenige Stützstellen befinden, ist die Zuverlässigkeit der ermittelten Abweichungen fraglich. Dies gilt sowohl für die Winkelverteilungen in Abb. 2 als auch für die Ortsverteilungen in Abb. 1.

Die bereits ermittelte starke Anisotropie des winkelabhängigen Neutronenflusses in der Nähe des Spaltstoffplättchens läßt es als fraglich erscheinen, ob die Anwendung der Transportnäherung zur Beschreibung der Winkelverteilung der elastisch gestreuten Neutronen noch zulässig ist. Durch detaillierte Untersuchungen müßte geklärt werden, welche Veränderungen in der Orts- und Winkelverteilung der Neutronen sich ergeben, wenn die Winkelverteilung der Neutronenstreuung genauer berücksichtigt wird, z.B. durch die Verwendung von Legendre-Momenten höherer Ordnung. Zur Durchführung derartiger Studien wäre die Verfügbarkeit modifizierter S_N -Stützstellen relativ hoher Ordnung eine absolut notwendige Voraussetzung.

Bezüglich der Stoßwahrscheinlichkeiten-Programme ZERA und KAPER ergeben sich folgende Gesichtspunkte:

1. Vermutlich würde, zumindest im MeV-Bereich, die Verwendung des Transportquerschnitts anstelle des totalen Querschnitts bei der Berechnung der Stoßwahrscheinlichkeiten eine Stufe der Verbesserung darstellen.
2. Ebenso wie bei den S_N -Rechnungen ist es fraglich, ob die Anwendung der Transportnäherung gerechtfertigt und ausreichend ist, oder ob die Einbeziehung der höheren Legendre-Momente des Streukerns erforderlich wäre.
3. Die Annahme isotrop verteilter Quellen müßte, zumindest im MeV-Bereich, vermutlich aufgegeben werden. Stattdessen müßten z.B. zusätzlich richtungsabhängige Quellen und entsprechende Stoßwahrscheinlichkeiten eingeführt werden.

Schlußfolgerung

Gegenwärtig steht in Karlsruhe kein geeignetes Programm zur Verfügung, das es erlaubt, die Verteilung des MeV-Neutronenflusses in einer relativ großen Zelle mit ausgeprägter Flußüberhöhung genau und zuverlässig zu bestimmen. Solange dieser Mangel nicht behoben ist, wird es kaum möglich sein, aus den festgestellten Diskrepanzen zwischen Theorie und Experiment z.B. für das hier betrachtete k_{∞} -Experiment in ZPR-III-55, oder für ZPR-6-7 /2/ und SNEAK-8Z (siehe z.B. Fig. 3 in /3/) auf Mängel in den Kerndaten bzw. Gruppenkonstanten zu schließen. Außerdem besteht die Möglichkeit, daß auch merkliche Änderungen in der Heterogenitätskorrektur beim Einsatz eines verbesserten Stoßwahrscheinlichkeitsprogramms auftreten können, da ein Teil der Heterogenitätskorrektur durch die in den Spaltstoffplättchen auftretende Flußüberhöhung im MeV-Bereich hervorgerufen wird. In geringerem Ausmaß könnten auch die berechneten zellgemittelten Reaktionsratenverhältnisse beeinflusst werden, sofern Reaktionen betrachtet werden, deren Energieschwellen im MeV-Bereich liegen, wie z.B. die Spaltung in ^{238}U . Ein möglicher Einfluß auf Reaktivitätswerte kann ebenfalls nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Aus den genannten Gründen erscheint es notwendig:

- a) die Anwendbarkeit der Transportnäherung in den erwähnten Fällen genauer zu untersuchen (z.B. in S_N -Rechnungen mit modifizierten Stützstellen der Ordnung 16 oder höher unter Verwendung der höheren Legendre-Momente).
- b) aufbauend auf den unter (a) gewonnenen Erfahrungen, die Stoßwahrscheinlichkeits-Programme, z.B. ZERA und KAPER, entsprechend zu erweitern.

-
- /2/ W.J. Oosterkamp; The Calculation of ZPR-6-6A and 6-7 with Karlsruhe Data and Methods.
Trans.Am.Nucl.Soc. 16, p. 261 (1973)
 - /3/ P.E. McGrath: KAPER - Lattice Program for Heterogeneous Critical Facilities (User's Guide).
KFK 1893 (1973)

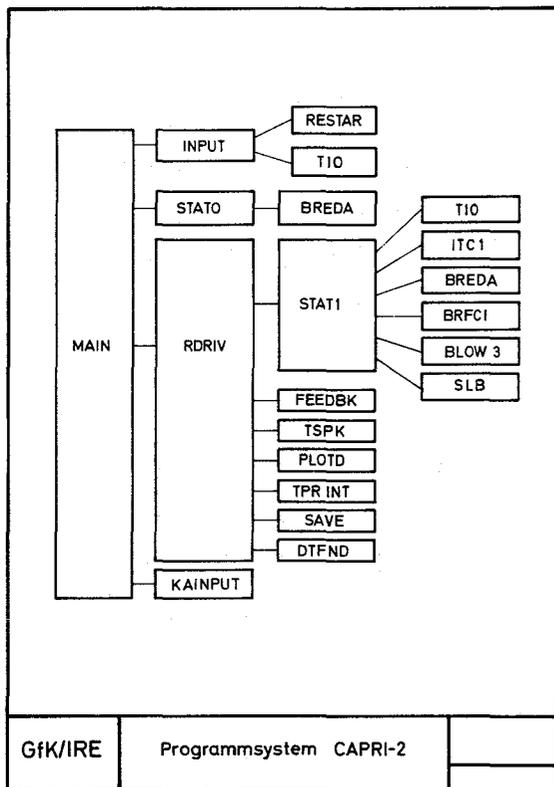
123 SICHERHEIT SCHNELLER REAKTOREN1231 Theoretische Arbeiten zur Reaktordynamik1231.1 Das Dynamik Programmsystem CAPRI-2 *

(P. Roysl, P. Wirtz, K. Doetschmann, IRE)

Zur Analyse der Predisassembly-Phase schwerer hypothetischer Störfälle bei natriumgekühlten schnellen Reaktoren wurde das Programmsystem CAPRI-1 entwickelt. Seit Mai 1973 wird an einer allein auf der Punktkinetik basierenden und in der Programmstruktur vollkommen neuen Version -CAPRI-2- gearbeitet, die seit Januar 1974 einsatzfähig ist.

Abb. 1 zeigt den modularen Aufbau von CAPRI-2. Das Programm besteht aus vier Hauptteilen: einem Ein- und Ausgabeteil (INPUT), dem Programmteil zur stationären Darstellung des Reaktors (STATO), dem transienten Vielkanalsteuerprogramm (RDRIV) sowie einem Kopplungsprogramm für den Übergang zur Disassembly-Rechnung (KAINPUT).

Durch das Eingabeprogramm werden die verschiedenen in CAPRI-2 verwendeten Moduln einheitlich mit Eingabedaten versorgt. Auch bei einem Restart kann dadurch jede beliebige Eingabegröße ohne Programmänderung verändert werden.



Zur Störfallsimulation kann der Reaktor durch bis zu 30 charakteristische Kühlkanäle dargestellt werden, die jeweils eine Gruppe von Brennelementen (z.B. einen Brennelementring) repräsentieren, die bzgl. des nuklearen und thermohydraulischen Verhaltens als annähernd gleich angesehen werden können.

* BzFE-Nr. 541.3

In STATO wird aus den Eingabegrößen (Geometrie, Reaktorleistung, radiale und axiale Leistungsformfunktionen, Betriebsgrößen etc.) der stationäre Zustand des Reaktors berechnet, d.h. für alle Kühlkanäle der Massendurchsatz, Druck und Temperatur im Kühlmittel sowie die Temperaturfelder in Brennstoff, Hülle und Strukturmaterial.

Die Berechnung transienter Größen, die den Gesamtreaktor betreffen, wird durch RDRIV gesteuert. Die wichtigsten sind die Reaktivitätsrückwirkung (FEEDBK) und die transiente Reaktorleistung (TSPK) [1]. Ebenfalls werden durch RDRIV die Routinen PLOTD (Erzeugung von Plot-Datensätzen), TPRINT (detaillierte Ausgabe von Zwischenergebnissen), SAVE (Erzeugung von Restart-Files) und DTFND (Zeitschrittautomatik) aufgerufen.

Die Berechnung der transienten thermohydraulischen Änderungen in den einzelnen Kühlkanälen, die dann rückwirkend die Reaktivität beeinflussen, wird durch das Einkanalsteuerprogramm STATI verwaltet. Die Kanäle werden darin sequentiell unter Verwendung externer Datenspeicher bearbeitet.

Die sich auf einen Kanal beziehenden Daten werden von einer generalisierten Ein- und Ausgaberroutine (TIO) blockweise gelesen und nach Beendigung der Rechnung für diesen Kanal wieder blockweise auf den externen Datenspeicher geschrieben. Um diesen Datentransfer rationell zu gestalten, wurden sämtliche Common-Blöcke des Systems neu geordnet und in global gültige, d.h. alle Kanäle betreffende, und Einkanal-Commonblöcke aufgeteilt.

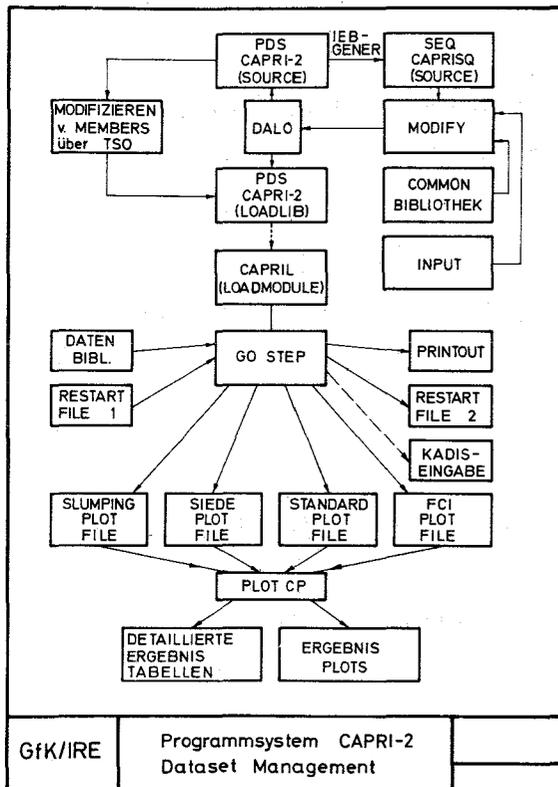
Die zur Beschreibung der physikalischen Vorgänge in den einzelnen Kühlkanälen wichtigen Moduln, die von STATI aufgerufen werden, sind ITC1 (Lösung der Kühlkanalgleichungen im einphasigen Bereich sowie der Wärmeleitgleichung im Brennstab), BREDA (1) (Brennstabdehnungsanalyse unter transienter Belastung), BRFCI [2] (Berechnung der Brennstoff-Natrium-Reaktion), BLOW 3 (2) (Beschreibung der Siedevorgänge durch ein Mehrblasenmodell) und SLB (3) (Beschreibung der Slumping-Vorgänge).

Sobald die Brennstofftemperaturen während des Unfalls einen vorgegebenen Grenzwert überschreiten, bei dem Brennstoffdampfdrücke nicht mehr vernachlässigbar sind, wird mit dem Zustand des Reaktors zu diesem Zeitpunkt im Modul KAINPT die weitere Simulation des Unfallablaufs mit dem Disassembly Code KADIS initiiert.

[1] J. Carter, G.J. Fischer et al.
SAS1A, A Computer Code for the Analysis of Fast Reactor Power and Flow Transients. ANL-7607, Oct. 1970

[2] E.A. Fischer: unveröffentl. Bericht

Zur Programmverwaltung und Durchführung von Rechnungen wurde ein umfangreiches und in Anbetracht der Größe des Programmsystems (ca. 20 000 Karten) unbedingt notwendiges Datenmanagement aufgebaut, das in Abb. 2 dargestellt ist:



Ein wichtiges Merkmal der Datenverwaltung ist das Vorhandensein einer zentral verwalteten Common-Bibliothek, die erhebliche Vorteile bei der Ankopplung neuer Moduln und beim Einbringen neuer Common-Größen bietet und dabei mögliche Fehler ausschließt. Ermöglicht wird dieses Verfahren durch das Programm MODIFY [3], das sämtliche im System befindliche Common-Blöcke auszutauschen gestattet und sie durch die neuen Blöcke der Bibliothek ersetzt.

Bei Anwendungsrechnungen dient als Eingabe die Datenbibliothek, bei einem Restart-Problem zusätzlich der letzte Restart-File der vorausgehenden Rechnung. Die Rechenergebnisse werden in den verschiedenen Ergebnis-Files abgelegt, die dann wahlweise in einem einzigen Folgelaufr zu Plots (Programm PLQ/TCP [4] unter

Verwendung von CALCOMP Software) verarbeitet werden können. Zusammen damit werden die wichtigsten zeitabhängigen Größen in Ergebnistabellen zusammengestellt, was die Auswertung von Störfallrechnungen wesentlich erleichtert.

Das Programmsystem CAPRI 2 wird zur Zeit zu umfangreichen Störfallsimulationen für den Mark I- und Mark Ia-Kern des SNR 300 eingesetzt (4).

[3] K. Doetschmann: unveröffentl. Bericht

[4] W. Zimmerer: unveröffentl. Bericht

Veröffentlichungen zu 1231.1:

- (1) B. Kuczera
 BREDA, Ein Rechenmodell für die Verformung des Brennstabes eines natriumgekühlten schnellen Brutreaktors unter transienter Belastung.
 KFK-1729, Dez. 1972
 Vgl. auch Pkt. 1234.2 des vorliegenden Berichtes
- (2) P. Wirtz
 Ein Beitrag zur theoretischen Beschreibung des Siedens unter Störfallbedingungen in natriumgekühlten schnellen Reaktoren.
 KFK-1858, Okt. 1973
- (3) G. Angerer
 Transport von Kernmaterialien während Unfällen in schnellen natriumgekühlten Brutreaktoren (Slumping).
 KFK-1935, Dez. 1973
- (4) D. Struwe, P. Royl, P. Wirtz et al.
 CAPRI - A Computer Code for the Analysis of Hypothetical Core Disruptive Accidents in the Pre-Disassembly Phase.
 Procs. of the ANS Conf. on Fast Reactor Safety, Beverly Hills,
 April 2-4, 1974

1232 Spannungs- und Verformungsanalysen von Reaktorbauteilen1232.4 Verhalten von Reaktorbauteilen unter dynamischer BelastungVerformung eines Brennelements durch äußere statische / dynamische Querlasten - Experimente und einfache Theorie*

(R. Liebe, H. Zehlein, R. Alexas, IRE)

1. Experimente

Die Fertigung der Belastungseinrichtung wurde abgeschlossen, Funktionsprüfung und Abnahme beim Hersteller stehen bevor. Für die benötigten 280 SNR-typischen Abstandshalter ist ein geeignetes Herstellungsverfahren erprobt worden, so daß die Fertigung der BE-Modelle anlaufen konnte.

*BzFE-Nr. 537.0

Die Arbeiten zur Erweiterung der für die Vorbereitung und Auswertung der dynamischen Belastungsversuche vorgesehenen Programme aufgrund eines Feder/Dämpfer/Massen-Modells [1] wurden fortgeführt.

Ein wichtiges Ergebnis der bisher durchgeführten statischen Abplattungsversuche [1] ist die Erkenntnis, daß die Stützwirkung des Brennstabbüdels und insbesondere der Abstandshalter erheblich stärker als erwartet ist (1).

2. Modelltheorie

Fortgeführt wurde die Entwicklung eines 2 D-Modells zur detaillierten Berechnung der dynamischen Kastenabplattung, welches das im IRE entwickelte Simulations-Programmsystem DYSYS [2] verwendet.

Dieses Modell wird zusammen mit dem vorhandenen Bündelmodell [1, 3] zur Analyse der Wechselwirkung Kasten-Bündel benötigt. Die zur Kopplung beider Modelle noch fehlenden Programme wurden erstellt. Mit einigen Ergänzungen konnten sie auch zur Auswertung der statischen Abplattungsversuche (z.B. zur Darstellung der Querschnittsprofile - s. Abb. 3 - und der dort vorliegenden Dehnungen und Spannungen) herangezogen werden.

Wegen der in den Versuchen festgestellten großen Stützwirkung des Bündels und der Abstandshalter erscheint es angebracht, die Kompaktierung des Bündels detaillierter zu beschreiben als ursprünglich vorgesehen. Zu diesem Zweck wurde ein Abplattungsversuch mit einem in Ton eingebetteten Zweireihenbündel durchgeführt und ausgewertet (Abb. 4). In Versuch und Rechnung wurde der vollkompaktierte Zustand des Bündels (= Beginn der Stützwirkung!) noch nicht erreicht. Die bisherigen Versuchsergebnisse legen Erweiterungen des Bündelmodells nahe: Das Ersatzfachwerk zur Simulation der Stützwirkung sollte als diskretes System mit zeitlich variabler Geometrie und Topologie dargestellt werden können (2, 3). Mit der Programmierung dieser Ergänzungen wurde begonnen.

[1] KFK 1273/4, S. 123-1

[2] E.G. Schlechtendahl: DYSYS-A Dynamic System-Simulator for Continuous and Discrete Changes of State
KFK 1209, Juli 1970

[3] KFK-Bericht 1273/3, S. 123-1

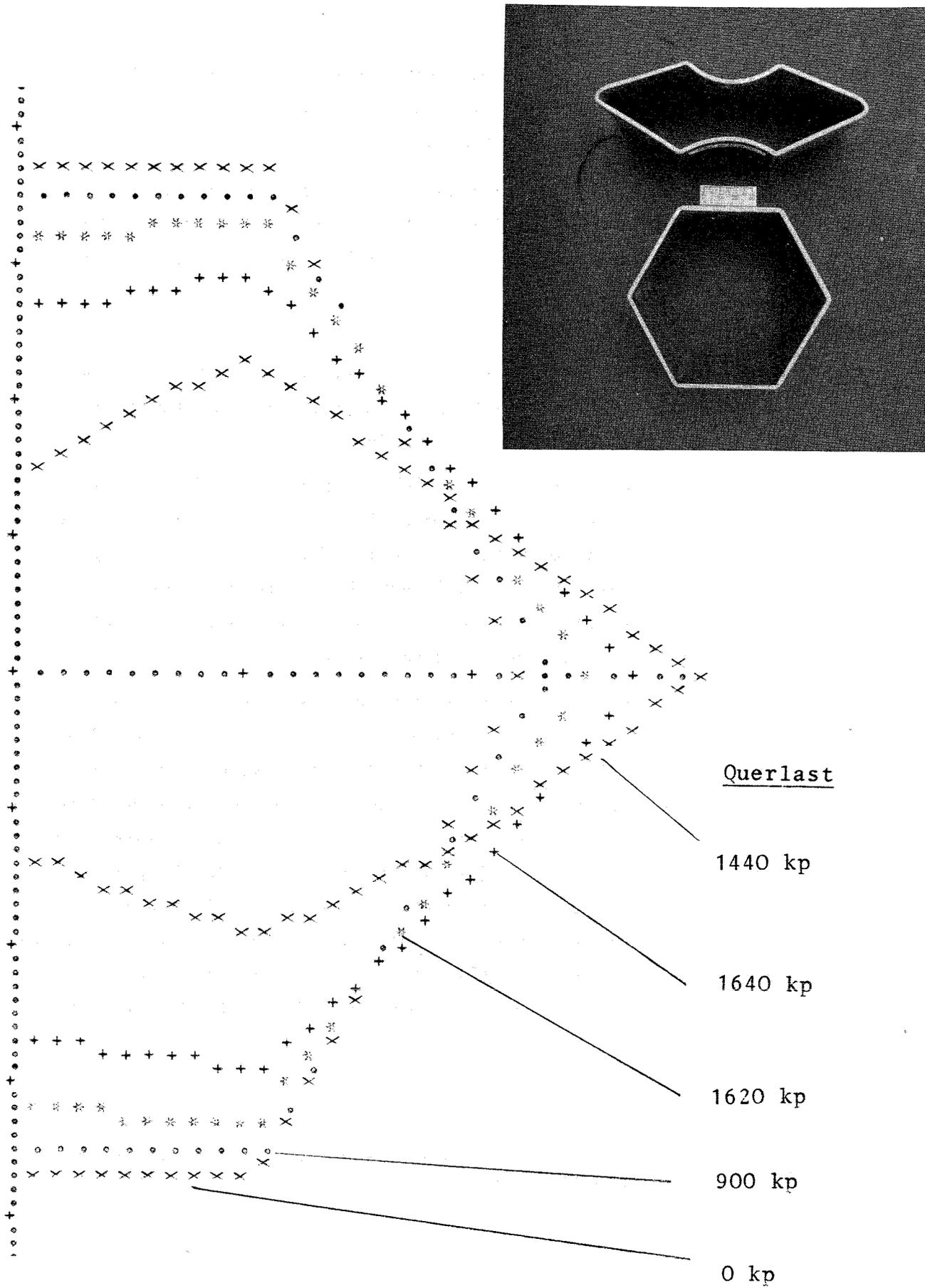
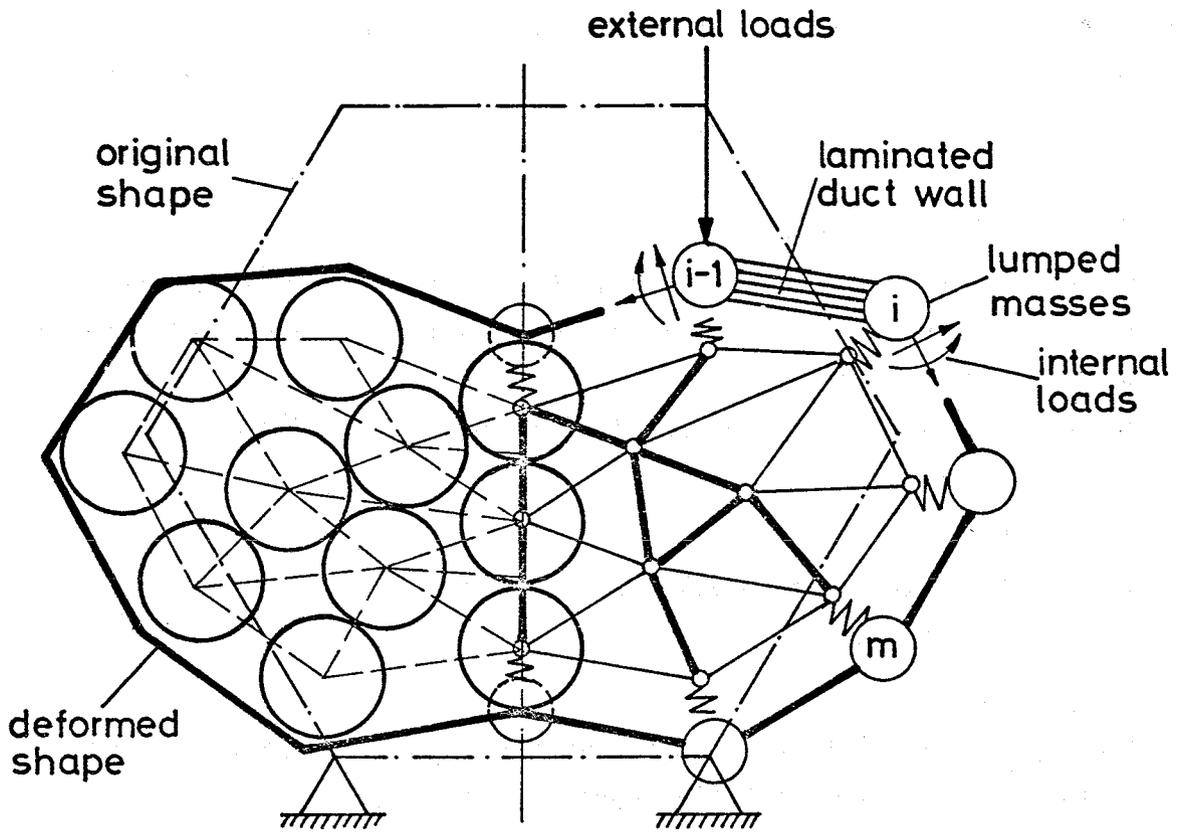
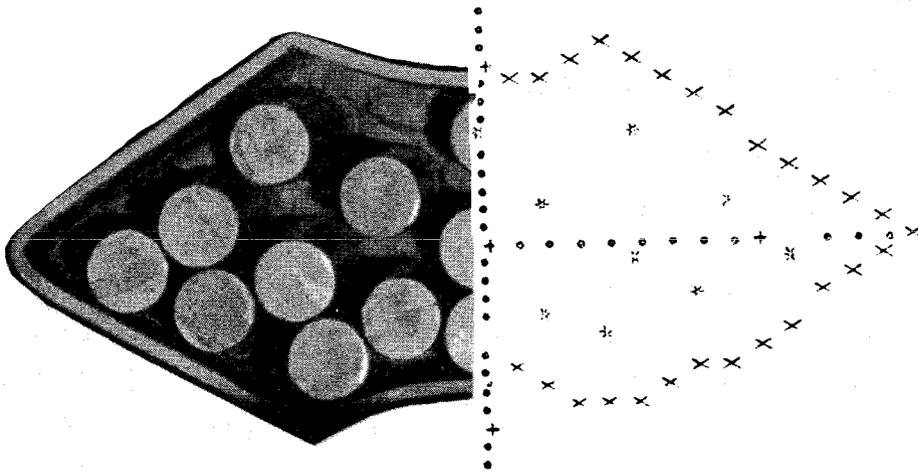


Abb. 3: Auswertung der Abplattungsversuche:
Querschnittsform bei verschiedenen Laststufen



pin location and distorted original mesh

truss configuration
bold lines: pin contacts



Experiment

Discrete Model

Abb. 4 : Modelle zur Wechselwirkung Kasten-Bündel

Dagegen wurde die Erstellung von Programmen zur Zeitintegration [3] bis auf einige wenig arbeitsintensive Vorbereitungen (Literaturstudie, Formulierung von Testbeispielen) zugunsten anderer Arbeiten bis April 1974 zurückgestellt. Es wurde beschlossen, die Eignung des im DVZ vorhandenen IBM-Systems CSMP ebenfalls zu prüfen.

Veröffentlichungen zu 1232.4:

- (1) K. Gast, R. Liebe, H. Will, H. Zehlein, N.J.M. Rees, G.R. Warren
Simulated Vapor Explosion Experiments and Dynamic Elastoplastic Response of SNR Core
Proc. ANS Topical Conf. on Fast Reactor Safety, Beverly Hills, Calif., USA, April 2-4, 1974
- (2) H. Zehlein
Hexagonale Netze und Fachwerke
KFK 1947, März 1974
- (3) H. Zehlein
Topologische Aspekte hexagonaler Netze für Ersatzfachwerke zur Simulation der Verformung von Stabbündeln unter Querkraft
erscheint in "Atomkernenergie"

1233 Untersuchung von Kühlungsstörungen

1233.2 Experimentelle Untersuchungen zum Na-Sieden *

Siederversuche im Siebenstabbündel

(W. Peppler, K. Schleisiek, K. Mattes, IRE)

Die ersten Siederversuche mit dem in den Natriumsiedekreislauf (NSK) des IRE eingebauten Siebenstabbündel wurden durchgeführt. Hierbei handelte es sich um fünf Einzelversuche mit je einer Siedezeit von 4 min. Die maximale Leistungsdichte der Heizstäbe betrug 150 W/cm^2 und die maximale Siedetemperatur $950 \text{ }^\circ\text{C}$. Im Gegensatz zu den Tests, die mit Einzelheizstäben durchgeführt wurden, konnte in dem Siebenstabverband kein Siedeverzug und demzufolge kein instabiles Sieden festgestellt werden.

* BzFE-Nr. 531.3

Die Instrumentierung des Bündels, insbesondere die in das Hüllrohr der Heizstäbe eingelöteten Thermoelemente, und die beiden Verfahren zur Blasesendekennung (Jodel- und Chenprinzip) haben sich gut bewährt.

Im 2. Quartal 1974 sind weitere Siederversuche, insbesondere mit einer Leistungsdichte der Heizstäbe von 170 W/cm^2 (max. Leistungsdichte der Heizstäbe der Entwicklungsstufe I), sowie ein Dauertest über 24 Stunden ohne Sieden bei verminderter Leistung, geplant.

Veröffentlichung zu 1233:

K. Schleisiek

Natriumexperimente zur Untersuchung lokaler Kühlungsstörungen in brennelement-ähnlichen Testanordnungen

KFK 1914, Februar 1974

1234 Störfallverhalten von Brennstäben

1234.1 Experimentelle Untersuchungen zum Brennstabversagen, Erste Experimente im He-Loop*

(A. Alexas, W. Lindner, IASR/RPU)

Die Versuche am EPBF-Versuchsstand wurden fortgesetzt. Neuere Versuche und Messungen des funktionalen Zusammenhanges Stableistung-Zeit und Einleitung der Exkursion ergaben, daß die Leistung hierbei dem exponentiellen Ansatz

$$N = N_0 \cdot e^{t/\tau}$$

genügt. Die Zeitkonstante τ hängt in bestimmtem Umfang von der Anfangsleistung N_0 ab. In Abb. 5 ist der Verlauf der elektrischen Größen als Funktion der Zeit für einen typischen Exkursionsversuch dargestellt. Parallel dazu wurden die Versuche im He-Loop intensiv fortgesetzt. Das primäre Ziel dabei war, einen stationären Betriebszustand zu erreichen, wobei folgende Betriebsdaten angestrebt waren:

Hülloberflächentemperatur	$T_{HA} = 592 \text{ }^\circ\text{C}$
Stableistung	$q_{st} = 150 \text{ w/cm}$

* BzFE-Nr. 535.3

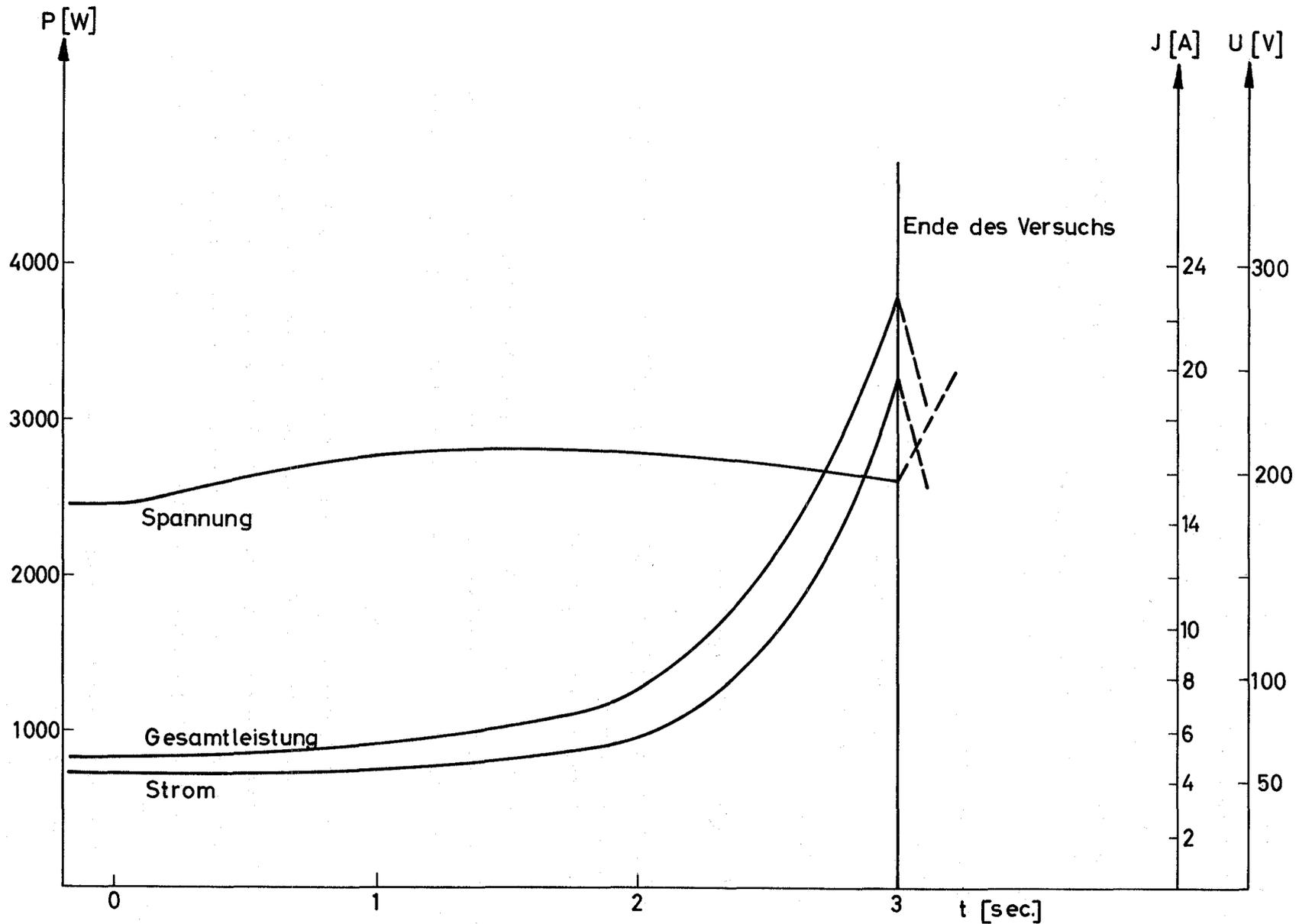


Abb. 5 Leistungsverlauf als Funktion der Zeit für einen typischen Exkursionsversuch mit Leistungsregelung.

Unter diesen Randbedingungen ergab die Rechnung:

$$\begin{array}{ll} \text{Brennstoffaußentemperatur} & T_{BA} = 875 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ \text{Brennstoffzentraltemperatur} & T_{B7} = 2682 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{array}$$

Der erreichte Zustand variierte nur geringfügig von den angestrebten Daten.

Es wurden gemessen:

$$\begin{array}{ll} \text{Hüloberflächentemperatur} & T_{HA} = 657 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ \text{Stableistung} & q_{st} = 150 \text{ W/cm} \end{array}$$

und rechnerisch ermittelt:

$$\begin{array}{ll} \text{Brennstoffaußentemperatur} & T_{BR} = 920 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ \text{Brennstoffzentraltemperatur} & T_{B7} = 2701 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{array}$$

In Abb. 6 wird dargestellt, wie die verschiedenen Größen bis zur Erreichung des stationären Zustandes sich verändern.

Für einen Versuch, bei dem nach Erreichen des stationären Zustandes dieser ca. 15 Min. lang aufrechterhalten wurde, ergaben sich die im folgenden dargestellten Effekte an den Tabletten:

In Abb. 7 sind Übersichtsaufnahmen von zwei Tabletten dieses Versuchsstabes zu sehen (a. in Querschliff, b. in Längsschliff).

Das zur längsgeschliffenen Tablette gehörige Temperaturprofil wurde über das Korngrößenspektrum in dieser Tablette ausgerechnet (Abb. 8). Dabei wurde einmal von der linken Seite (obere Kurve) und zum anderen von der rechten Seite (untere Kurve) der Tablette aus zur Mitte hin das Korngrößenwachstum $\bar{1}$ gemessen und der Temperaturberechnung zugrundegelegt. Die Übereinstimmung zwischen beiden Kurven kann als gut angesehen werden, ein Hinweis dafür, daß das radiale Temperaturprofil im Stab relativ symmetrisch ausgebildet war.

Während des Versuchs wurde pyrometrisch ein axiales Temperaturgefälle beobachtet. Jedoch zeigte die Auswertung des Schliffes einer weiteren Tablette, daß dabei in der Stabmitte Temperaturdifferenzen von ca. 100 °C - 150 °C aufgetreten waren, eine Schwankung, die innerhalb der Fehlergrenzen liegt.

Eine Diskrepanz zeigt sich jedoch beim Vergleich der Ergebnisse der metallurgischen Untersuchungen mit denen von MASTER 1. Die nach MASTER 1 errechnete Temperaturkurve liefert einen Brennstoffzentraltemperaturwert von $T_{BZ} = 2701 \text{ }^{\circ}\text{C}$,

$\bar{1}$ H. Pejša, H. Hellriegel, RB/Z, haben die metallurgische Auswertung und die Bestimmung der Korngrößenverteilung durchgeführt.

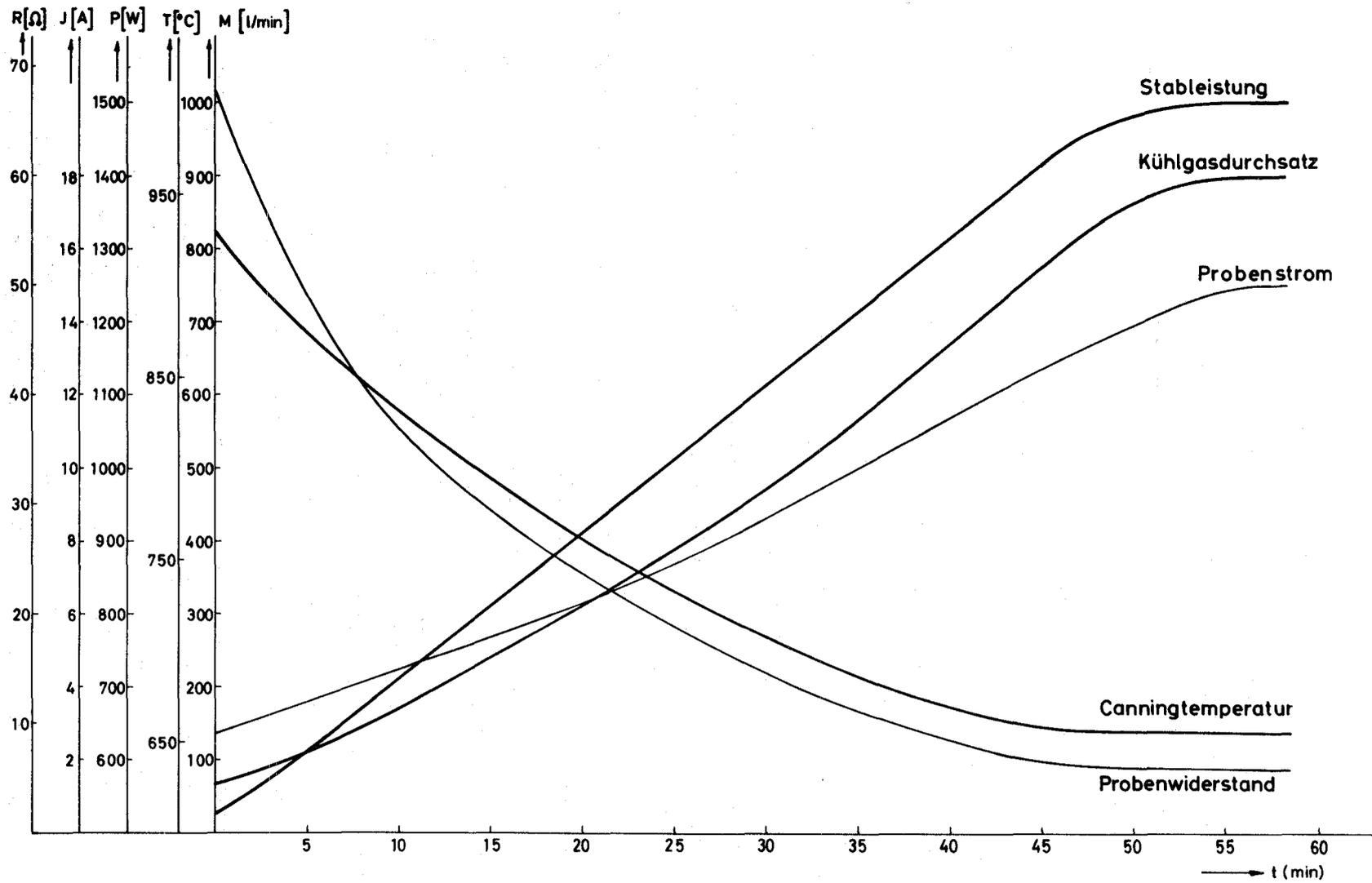
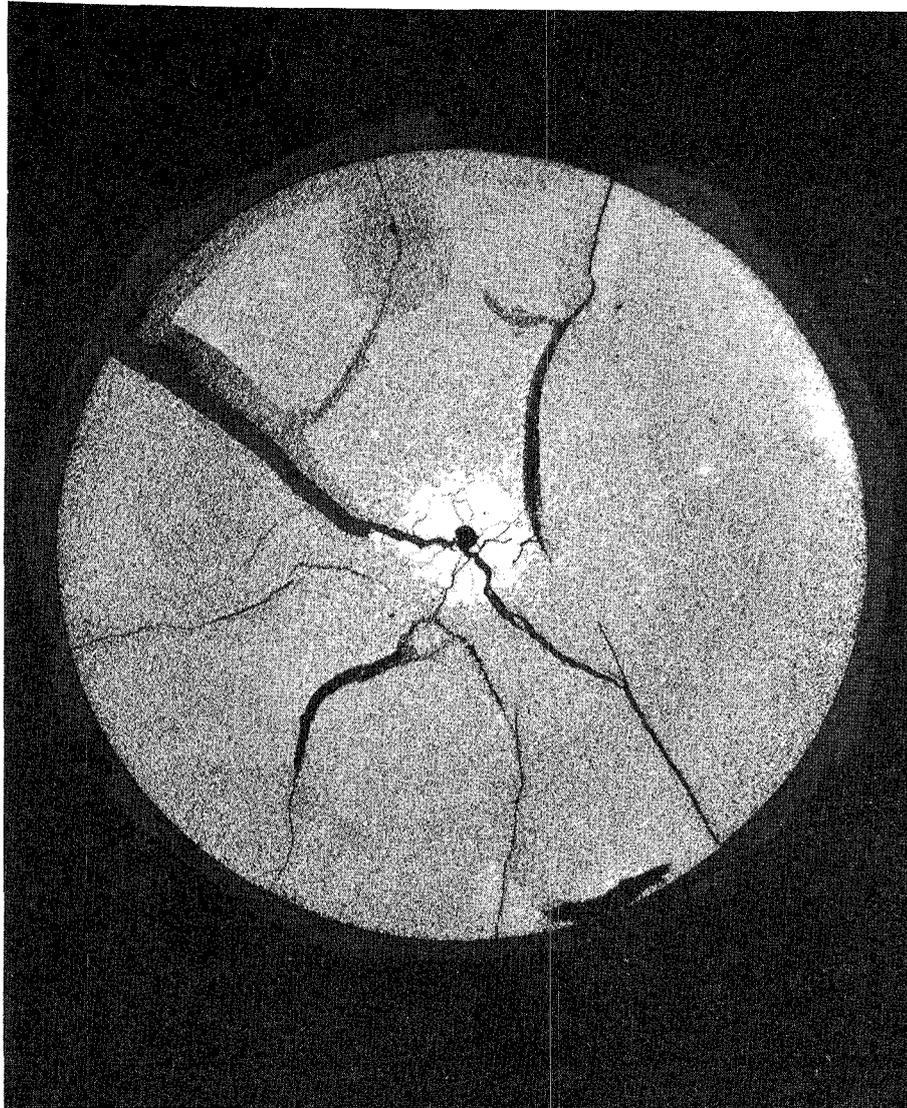
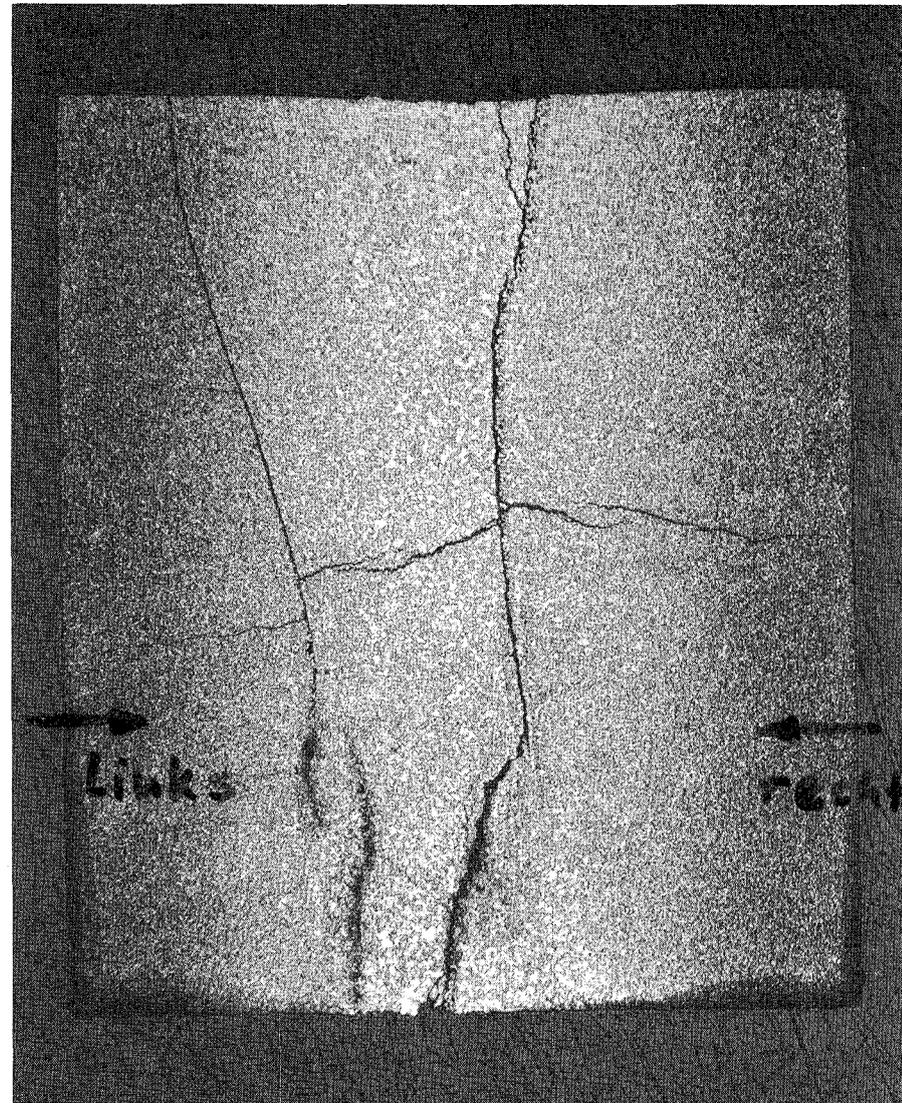


Abb. 6 Variation der Einflußparameter und - Größen zur Erreichung des stationären Zustandes bei einem typischen Versuch im He-Loop.



HZ-44a-0-0-1/2 20 x geätzt 1 mm

a. Querschliff



HZ-44a-0-5-2/2 20 x geätzt 1 mm

b. Längsschliff

Abb. 7: Übersichtsaufnahmen zweier Pelletschliffe nach einem Versuch im He - Loop

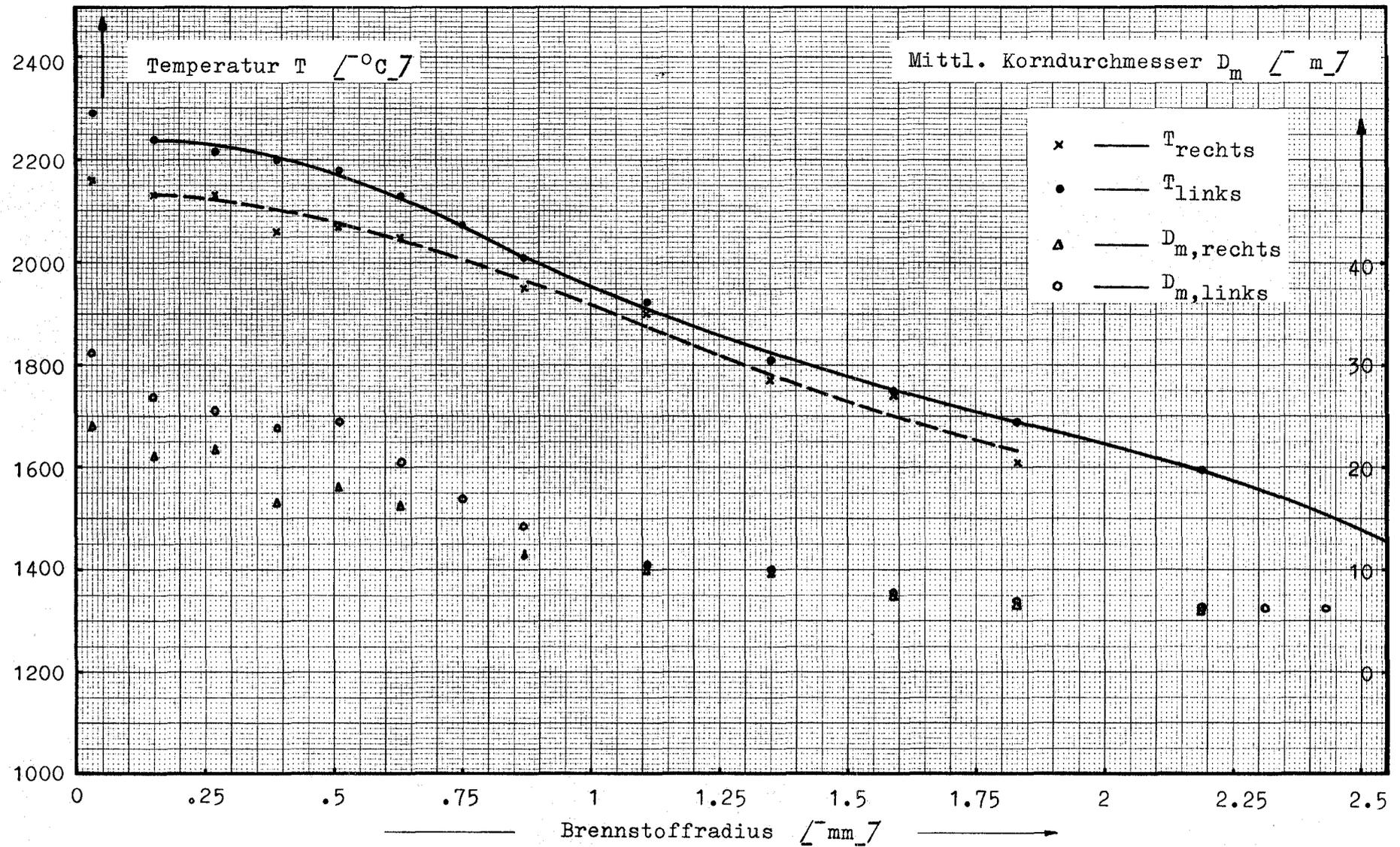


Abb. 8: Temperaturverteilung in radialer Richtung während eines charakteristischen Versuchs im He - Loop; stationärer Zustand. Die Temperaturberechnung erfolgte über die Korngrößen.

verläuft steiler nach außen hin, und somit ergibt sich auf der Brennstoffoberfläche der Wert von $T_{BA} = 920 \text{ }^\circ\text{C}$, während die Berechnung aus dem Korngrößenspektrum Werte von $T_{BZ} = 2300 \text{ }^\circ\text{C}$ und $T_{BA} = 1450 \text{ }^\circ\text{C}$ liefert.

Zur Erklärung dieser Diskrepanz muß man die Tatsache heranziehen, daß in MASTER 1 stationär gerechnet wird und somit Langzeiteffekte, insbesondere Temperaturausgleich mit dem Kühlmittel, der natürlich eine Abflachung des Temperaturprofils mit sich zieht, nicht berücksichtigt werden.

Eine Erweiterung des Rechenprogramms MASTER 1, die diese Effekte berücksichtigt, ist in Arbeit.

1234.2 Brennstabversagensmodell*

(B. Kuczera, IRE)

Die Arbeiten zum Brennstabversagensmodell wurden weitgehend abgeschlossen und in (1) ausführlich dokumentiert. Die neue Modellversion BREDA-II ermöglicht die Einbeziehung spezieller Abbranderscheinungen bei der Beschreibung des Brennstabverhaltens unter transienter Belastung.

Anhand der in (1) wiedergegebenen Resultate der Modellrechnungen konnte gezeigt werden, daß das transiente Verhalten bestrahlter Brennstäbe sich in folgender Weise von dem Verhalten frischer Stäbe unterscheidet:

- Brennstoff- und Hüllrohrschwellen verändert die stationäre Brennstabgeometrie und fördert damit die Unterschiede in der Hüllrohrbelastung der axialen Brennstabsegmente,
- der stationäre Spaltgasdruck beeinflusst als Anfangsbedingung den transienten Druckaufbau im Zentralkanal,
- das im Brennstoff zurückgehaltene Spaltgas verursacht bei instationärer Brennstoffaufheizung transientes Schwellen und trägt mit der Spaltgasfreisetzung wesentlich zum Druckanstieg im Zentralkanal bei,
- durch die radiale Porositätsverteilung im Brennstoff kann die Volumenexpansion bei fortschreitendem Brennstoffschmelzen in entsprechendem Maß kompensiert und dadurch der Druckanstieg im Zentralkanal reduziert werden.

Mit Hilfe des BREDA-II-Modells lassen sich diese Abbrandphänomene in die Sicherheitsanalyse hypothetischer Unfallabläufe einbeziehen.

* BzFE-Nr. 541.3

Veröffentlichung zu 1234.2:

(1) B. Kuczera

Modelltheoretische Untersuchungen zum transienten Verhalten von natriumgekühlten Schnellbrüter-Brennstäben unter Einbeziehung spezieller Abbrandeinflüsse.

KFK 1964, März 1974

1235 Sprengeversuche an Core-Modellen*

(H. Will, IRE)

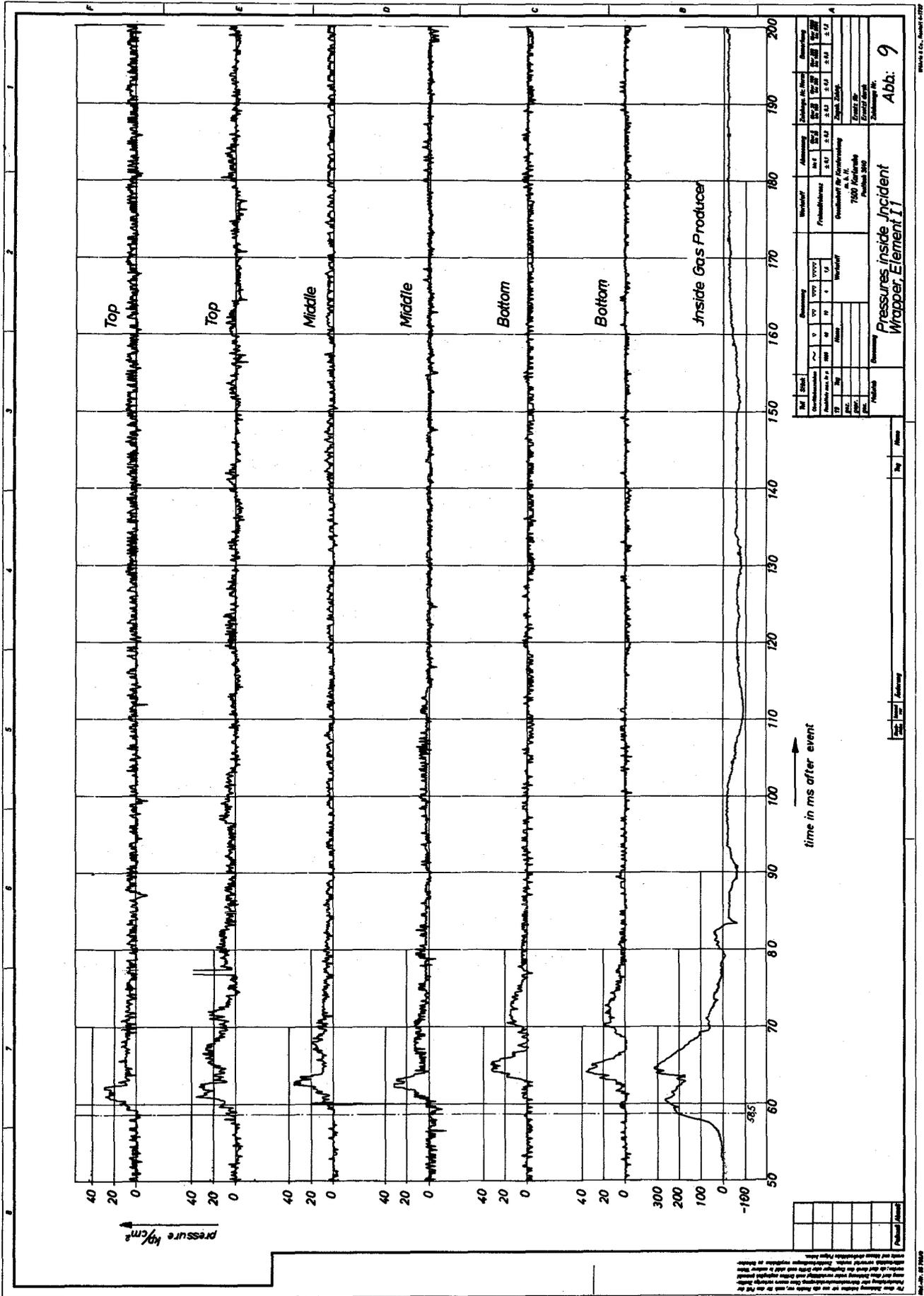
Der erste Versuch an einem Core-Modell des SNR 300 ist mit einer Treibmittel-Charge durchgeführt worden, die in overstrong-wrapper-Geometrie (d.h. radiale Verdämmung) einen Spitzendruck von 125 atü lieferte, der zweite Versuch mit einem Druckpuls von 250 atü in gleicher Geometrie. Die zugehörigen Drücke im Modell waren 35 bzw. 79 atü. Dieser niedrigere Druck ist auf zusätzlichen radialen Strömungsweg im Modell zurückzuführen. In beiden Versuchen konnten keine Deformationen an den umliegenden Brennelementkästen festgestellt werden. Lediglich die äußerste BE-Reihe wies in Höhe der oberen Verspannungsebene geringfügige Verformungen auf, die zurückzuführen sind auf das diametrale Spiel der Elemente in dieser Ebene in Verbindung mit der Starrheit der Verspannungsebene selbst.

Die im Modell angeordneten Meßwertaufnehmer lieferten wertvolle Daten bezüglich:

- zeitlichen Druckverlauf
- zeitlicher Druckverteilung
- Belastungen auf Stützzylinder und Verspannungsebenen
- Beschleunigung einzelner Kästen
- elastischer Verformung verschiedener Brennelemente
- Auftriebsgeschwindigkeit der Flüssigkeit.

Als typisches Beispiel zeigt Abb. 9 den Druckverlauf im "Unfall"-Element, gemessen mit je 2 Meßwertaufnehmern in 3 Ebenen. Diese Daten wurden während des ersten Versuches gewonnen.

* BzFE-Nr. 537.0



Stichting									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
101	102	103	104	105	106	107	108	109	110
111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
121	122	123	124	125	126	127	128	129	130
131	132	133	134	135	136	137	138	139	140
141	142	143	144	145	146	147	148	149	150
151	152	153	154	155	156	157	158	159	160
161	162	163	164	165	166	167	168	169	170
171	172	173	174	175	176	177	178	179	180
181	182	183	184	185	186	187	188	189	190
191	192	193	194	195	196	197	198	199	200

Abb: 9

Pressures inside Incident Mapper Element 11

At the following location or on the following date, the following information was obtained: [illegible text]

Die Versuche sollen in Kürze mit einem Spitzendruck von 380 atü in overstrong wrapper-Geometrie fortgesetzt werden. Im eigentlichen Modellversuch werden Drücke von 130 - 140 atü erwartet, die zu Deformationen zumindest an den benachbarten Brennelement-Attrappen führen dürften. Dieser nunmehr gewählte Druck-Zeit-Verlauf ist ausreichend konservativ im Hinblick auf den nach einem theoretischen Modell berechneten Druck von 250 atü bei einer BNR in der nachakustischen Phase in einem overstrong wrapper.

1236 Untersuchungen zur Brennstoff-Natrium-Reaktion (BNR)*

1. Thermo-hydrodynamische Beschreibung der BNR

(H. Jacobs, K. Thurnay, INR)

Um eine noch realistischere theoretische Beschreibung denkbarer Brennstoff-Natrium-Reaktionen zu ermöglichen, wurde aufgrund von BRENDY II [1] ein Programm erstellt, das wesentliche Neuerungen enthält:

- 1) Die Mischzone ist unterteilt in mehrere Sektionen. In jeder werden von einem vorgegebenen Zeitpunkt an der Wärmeaustausch und der Druckaufbau wie in BRENDY berechnet. Zwischen den Sektionen findet kein Wärmeaustausch statt. Die Bewegung der Sektionsgrenzen wird mit Hilfe eines für die Sektionen repräsentativen Druckes wie die Bewegung der Zellgrenzen innerhalb der Sektionen aus den Navier-Stokes-Gleichungen berechnet. Damit wird es möglich:
 - den Brennstoff in mehreren Teilmengen zeitlich gestaffelt die Reaktion mit dem Natrium beginnen zu lassen,
 - eine ungleichmäßige Verteilung des Brennstoffs in der Mischzone (auch als Funktion der Zeit) zu beschreiben,
 - die axiale Variation des Druckes in der Mischzone zu beschreiben.
- 2) Jede Sektion kann ein Gasvolumen enthalten. Der anfängliche Druck dieses Gases ist eine Eingabegröße.

Das Programm ist weitgehend ausgetestet. Die Anwendung auf den Fall des Natriumwiedereintritts in ein blockiertes und daher niedergeschmolzenes Brennelement ist in Vorbereitung.

* BzFE-Nr. 534.2

[1] KFK 1273/4, S. 123-18

Das System von Zustandsgleichungen für Natrium wurde durch Extrapolation der Wärmeleitfähigkeiten bis zum kritischen Punkt vervollständigt. Es wurde ein Programm erstellt, das die Zustandsdaten im gesamten Zweiphasengebiet und auf den Sättigungslinien als Funktion von Dichte und Temperatur liefert. Zur Zeit wird ein Näherungsansatz für den überkritischen Bereich entwickelt.

2. Theoretische Untersuchungen zur BNR*

(L. Caldarola, IASR)

Im Rahmen der Untersuchungen des IASR zur BNR wurde eine Studie über den Wissensstand bzgl. der thermischen Wechselwirkung zwischen geschmolzenem Brennstoff und Natrium durchgeführt (1).

Der Bericht enthält einen Überblick über die Vorträge der 2. CREST-Fachtagung über "Sodium/Fuel Interaction in Fast Reactors" in Ispra, November 1973, eine Diskussion der experimentellen und theoretischen Ergebnisse und Schlußfolgerungen daraus, sowie einen Hinweis auf Bereiche, in welchen weitere Untersuchungen notwendig sind.

Wichtigste Ergebnisse: Keines der bisherigen Experimente, bei denen geschmolzenes UO_2 mit Natrium in Berührung gebracht wurde, gibt einen Hinweis auf die Möglichkeit einer großen zusammenhängenden Brennstoff-Natrium-Reaktion und damit eines hohen Wirkungsgrades. Eine Erklärung dieses Ergebnisses mag darin liegen, daß die von Fauske (AWL) angegebenen Vorbedingungen für eine Dampfexplosion infolge Siedeverzugs nicht durch die UO_2/Na -Systeme erfüllt waren, im Gegensatz zu ebenfalls untersuchten Al/H_2O - und Sn/H_2O -Systemen.

Es sind jedoch andere Mechanismen denkbar, wie z.B. "Fragmentationsexplosion", u.U. ausgelöst durch eine homogene Keimbildung der kälteren Flüssigkeit. Als wichtigste Fragmentationsmechanismen erscheinen a) Blasenwachstum mit nachfolgender Kollabierung in der kälteren Flüssigkeit, b) schnelle Erstarrung des heißen Materials.

Die in dem Bericht vorgeschlagenen weiteren Untersuchungen zielen auf ein genaueres Verständnis des Fragmentationsmechanismus, der Art der möglichen Berührung zwischen heißer und kalter Flüssigkeit, insbes. der Vorgänge bei Einschluß von Natrium in UO_2 , sowie des Einflusses, den die Größenordnung durchgeführter Versuche auf die Ergebnisse hat.

Veröffentlichung:

(1) L. Caldarola

Current Status of Knowledge of Molten Fuel/Sodium Thermal Interactions.

KFK-Bericht 1944, Februar 1974



124 ENTWICKLUNG DER INSTRUMENTIERUNG UND SIGNALVERARBEITUNG
ZUR KERNÜBERWACHUNG

1241 Nachweis von Durchflußstörungen am Brennelement*

1. Messung der Temperatur- und Durchsatzfluktuation an elektrisch beheiztem Brennelement (L. Krebs, G. Weinkötz, IRB)

Zur Ergänzung der bisherigen Untersuchungen am Natrium-Versuchskreislauf NW 80 des IRB wurde eine weitere Versuchsreihe durchgeführt. Im Unterschied zu vorangegangenen Versuchsreihen wurden ein 6l-Stabbündel mit $p/d = 1,2$ sowie zwei Meßebenen in geringerem Abstand vom Bündelende (Abb. 1) eingesetzt. Zusätzlich waren in etwas größerem Abstand erstmals vier Stahl-Natrium-Sonden eingebaut, von denen allerdings nur die erste voll funktionsfähig war. Der Abstandshalter bestand aus einem Wendeldraht mit 100 mm Steigung. Nachteilig war die durch den nachträglichen Einbau der Sonden bedingte unvermeidliche Änderung des Strömungsquerschnitts von NW 50 auf NW 80 oberhalb der ersten Stahl-Natrium-Sonde.

Folgendes Versuchsprogramm konnte abgewickelt werden (Tab. 1):

zugeführte Leistung N [$\overline{\text{KW}}$]			Durchsatz Q [$\overline{\text{m}^3/\text{h}}$]
Zentralstab	Eckstab	Wandstab	
4	-	-	5
6	-	-	5
8	-	-	5
10	-	-	5
12	-	-	5
2	2	-	5
4	4	-	5
6	6	-	5
8	8	-	5
10	10	-	5
2	2	2	5; 13,4; 20,3
4	4	4	5; 9,8; 13,5; 19,0
6	6	6	5; 9,6; 14,3; 20,4;
8	8	8	5; 9,5; 14,3; 19,9
10	10	10	5; 9,8; 14,2; 19,9
2	-	2	5,2
4	-	4	5,3
6	-	6	5,3
8	-	8	5,3
10	-	10	5,4
-	2	2	5,5
-	4	4	5,1
-	6	6	5,1
-	8	8	5,2
-	10	10	5,1

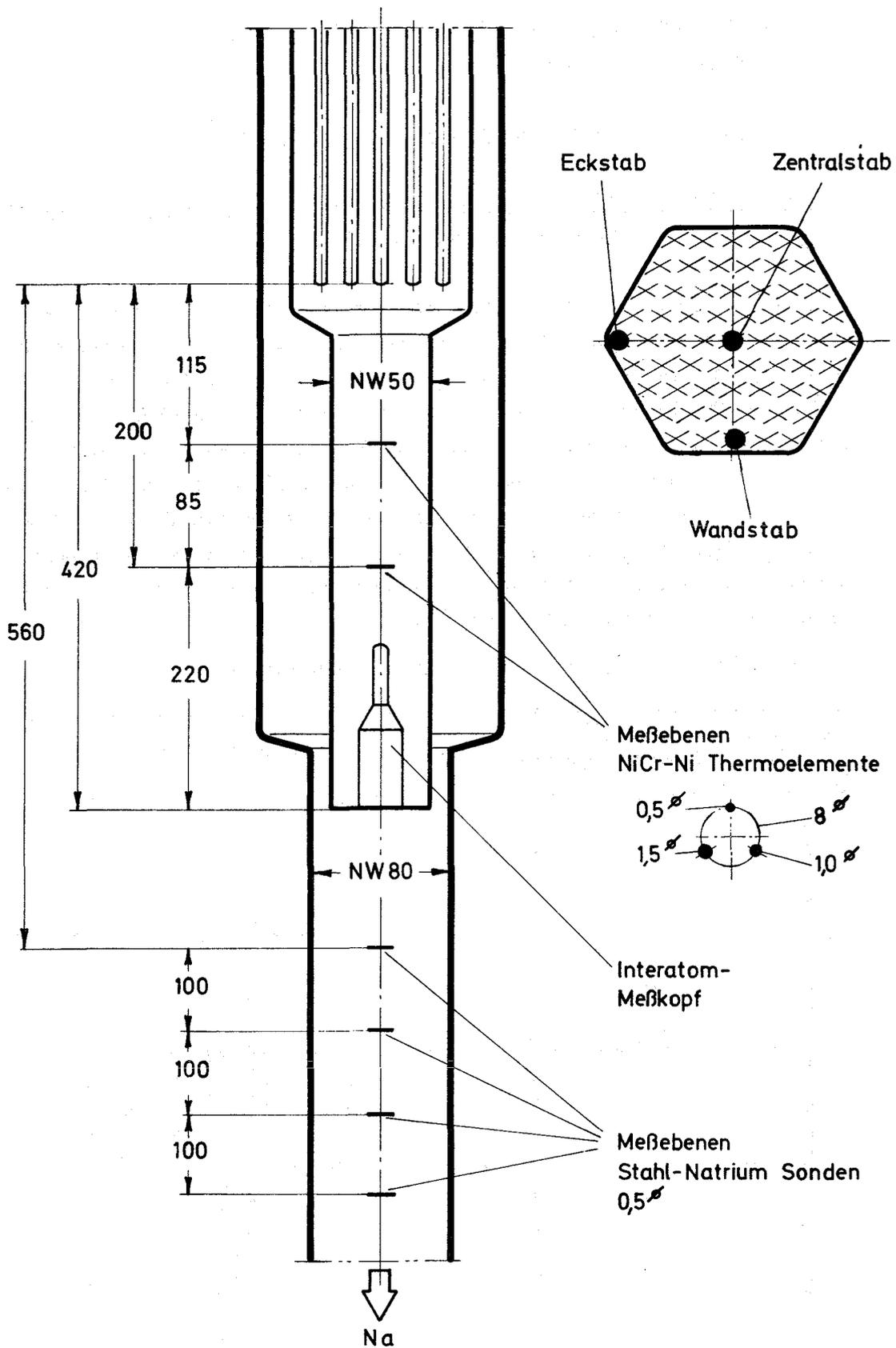


Abb.1 Instrumentierung: 61-Stabbündel, NW 80

Die Signale der in den beiden Meßebenen eingebauten NiCr-Ni Thermoelemente sowie der ersten Stahl-Natrium-Sonde wurden gleichzeitig mit einem Analog-Magnetband aufgezeichnet.

Zusätzlich wurde eine Versuchsreihe mit der neu entwickelten Frequenzanhebung durchgeführt. Hierbei wurden die Signale des 0,5 mm Ø Ni-Cr-Ni-Thermoelementes mit und ohne Anhebung sowie des Stahl-Natriumelementes der ersten Sonde aufgenommen.

Erste Auswertungen der Messungen ergaben, daß bei mit je 4 bzw. 8 kW beheiztem Eck- und Wandstab und einem Durchsatz von 5 m³/h im Abstand von 560 mm vom Bündelende Frequenzen über 30 Hz nahezu vollständig abgebaut sind. Die Auswertungen werden gegenwärtig fortgesetzt.

2. Vorversuche zur Kühlmitteldurchsatzmessung in Natrium mit der Temperaturrauschenanalyse

(zusammengestellt von K.-H. Raes, Institut für Kerntechnik, TU Hannover)

In den Vierteljahresberichten [1] und [2] wurden Versuche zur Geschwindigkeitsmessung in einem mit verschiedenen schnellen Thermoelementen bestückten, von außen beheizten natriumdurchströmten Rohr im WÜP-I des IRB vorgestellt. In diesen Zwischenberichten konnten Aussagen über die Eignung verschiedener Thermoelementbauarten zur Messung von Temperaturschwankungen in Flüssigmetallströmungen gemacht werden. Die ausführliche Analyse der auf Magnetband gespeicherten Signale zeigte zwei weitere interessante Ergebnisse.

So ist aus dem Vergleich der Messungen des Durchflusses mit den im Kreislauf installierten Durchflußmessern und der Korrelationsanalyse der Thermoelementsignale festzustellen, daß die mit der Korrelationsanalyse ermittelten Durchsätze das 1,5-fache der mit dem großen Durchflußmesser (NW 50) und das 1,15-fache der mit dem kleinen Durchflußmesser (NW 25) gemessenen Werte ergeben (Tabelle 2). Der Grund für die Durchsatzabweichungen kann in einer Verschmutzung und einem dadurch erhöhten elektrischen Übergangswiderstand an den Rohrrinnenflächen der Durchflußmesser zu suchen sein.

[1] KFK-Bericht 1272/4, Pkt. 1241

[2] KFK-Bericht 1273/4, Pkt. 1241

Eine weitere Aussage kann über den Einfluß einer Blockade auf die Form des Temperaturrauschspektrums gemacht werden. Das für die Messung zur Verfügung stehende Thermoelement ist von der vor der beheizten Strecke liegenden - vom IRB zur Verfügung gestellten - verstellbaren Blockade (Abb. 2) mit Blockadegraden von 0 bis 37% und 1400 mm entfernt. Die Abklingzeit für die durch die Blockade induzierten Turbulenzen bis zu ihrer Detektion im Thermoelement betrug bei der Geschwindigkeit 2,72 m/sec 0,51 sec und bei 0,85 m/sec 1,65 sec. Der Einfluß der Blockade bei 0,85 m/sec Strömungsgeschwindigkeit auf die Form des Temperaturrauschspektrums ist kaum nachweisbar. Die Abklingzeit von 1,65 sec ist offenbar zu schnell. Bei der größeren Geschwindigkeit läßt sich wenigstens im niederfrequenten Bereich eine Zunahme der spektralen Leistungsdichte bis zu 4 db nachweisen (Abb. 3). Die hinter der Blockade sicher viel stärkeren Turbulenzen sind auch in diesem Fall auf dem Weg zur Meßstelle stark reduziert worden. Aufschlußreich dürfte eine Versuchsanordnung sein, bei der die Thermoelemente in geringerem Abstand zur Blockade eingebaut sind und der Blockadegrad über 37,5% hinaus erhöht werden kann.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, daß es durchaus möglich sein dürfte, eine Blockade in der Natriumströmung mit Hilfe der stochastischen Analyse von Thermoelementensignalen zu erkennen. Eine ausführliche Beschreibung der Versuche und der Ergebnisse in einem KFK-Bericht ist in Vorbereitung.

\bar{v}	aus Kreuzkorr.		EM-Durchfl.m.	F e h l e r	
	m/s	\dot{m}_{KK} m ³ /h	\dot{m}_{EM} m ³ /h	$\dot{m}_{KK}/\dot{m}_{EM}$	$\dot{m}_{EM}/\dot{m}_{KK}$
2,62		14,8	10,0	1,48	0,675
2,72		15,4	10,0	1,54	0,645
1,225		6,92	4,6	1,50	0,664
0,565		3,20	2,15	1,48	0,672
0,556		3,14	2,15	1,46	0,685

0,213		1,20	1,0	1,20	0,833
0,196		1,10	1,0	1,10	0,91
0,0965		,545	0,46	1,18	0,844
0,0533		,30	0,26	1,15	0,866

Tab. 1: Fehler der EM-Durchflußmesser

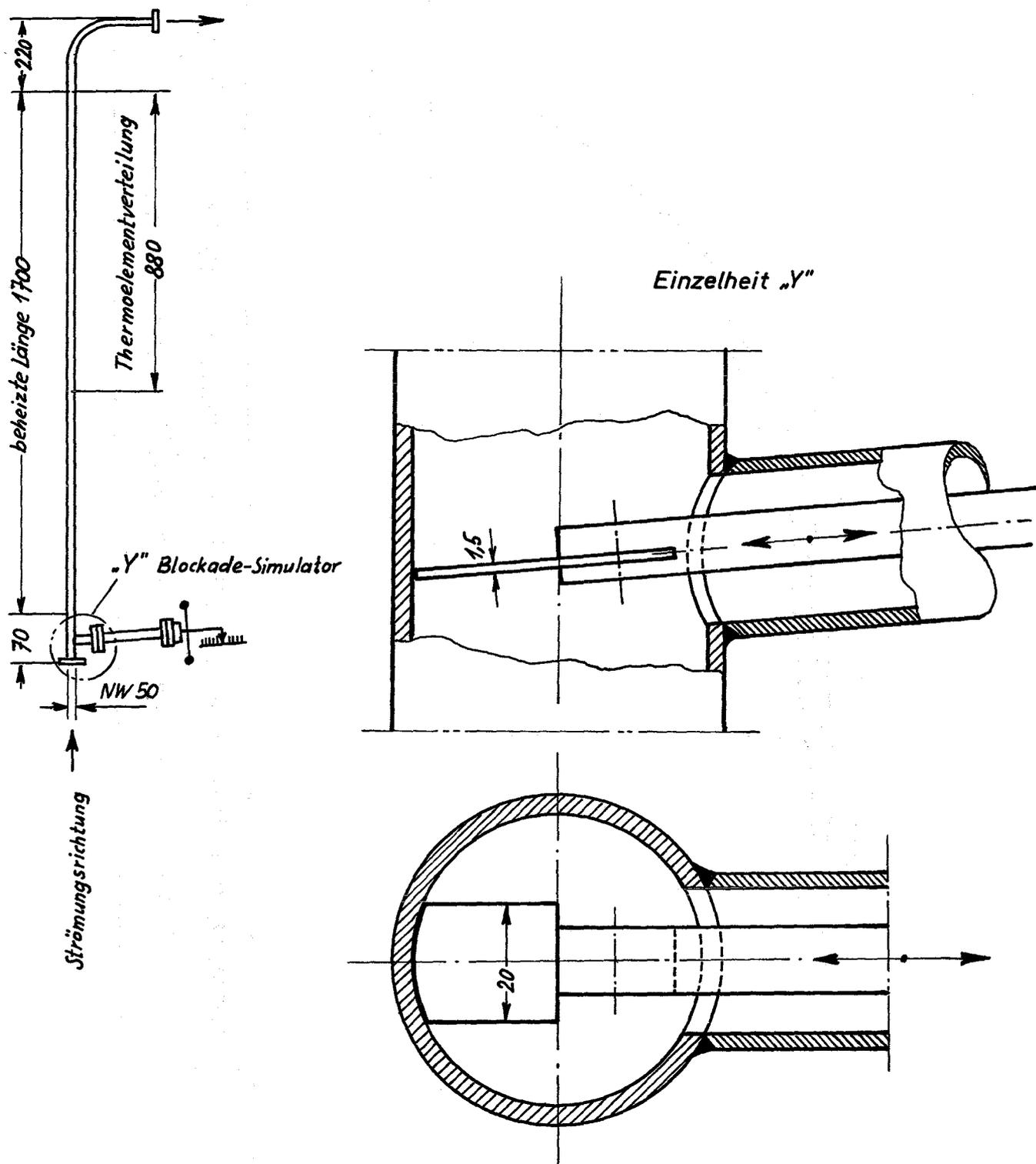
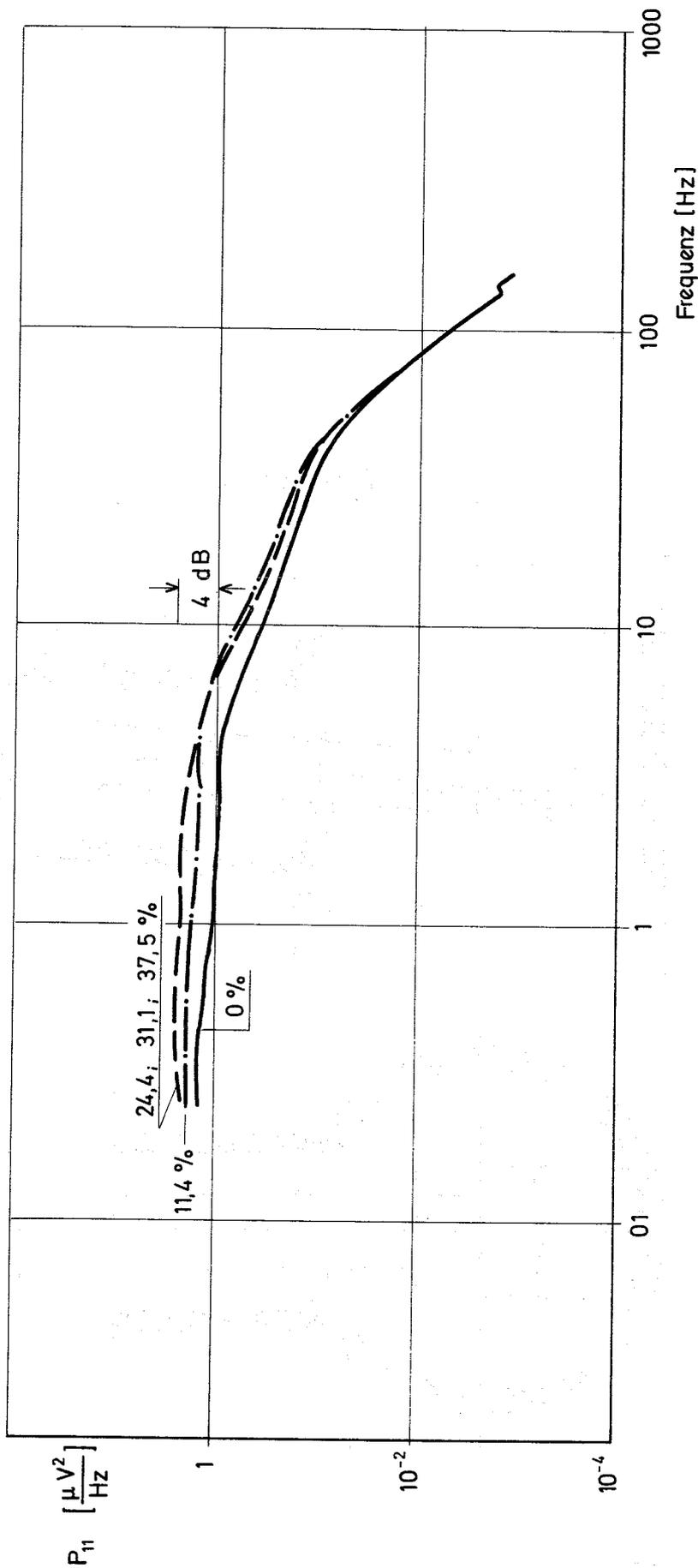


Abb. 2 Blockade-Simulator



Autospektren bei unterschiedlichem Blockadegrad ($\dot{m} = 15,37 \text{ m}^3 / \text{h}$, Abb. 3

$\dot{q} = 11,2 \text{ W} / \text{cm}^2$) (Versuche im WÜP - I des IRB / GfK)

Institut für
Kerntechnik
TU - Hannover

125 AUSWIRKUNGEN AUF DIE UMWELT

1252 Versuche zum Natriumbrand

Versuche zum Verhalten von Sandbettfiltern gegenüber Natrium-
bzw. Natriumoxid-Aerosolen *

(L. Böhm, S. Jordan, IASR/RPU)

1. Einleitung

Die Möglichkeit von Störfällen durch auslaufendes Natrium an natriumgekühlten schnellen Brutreaktoren bedingt den Einbau von Natrium- und Natriumoxid-resistenten Filteranlagen in die Abluftsysteme.

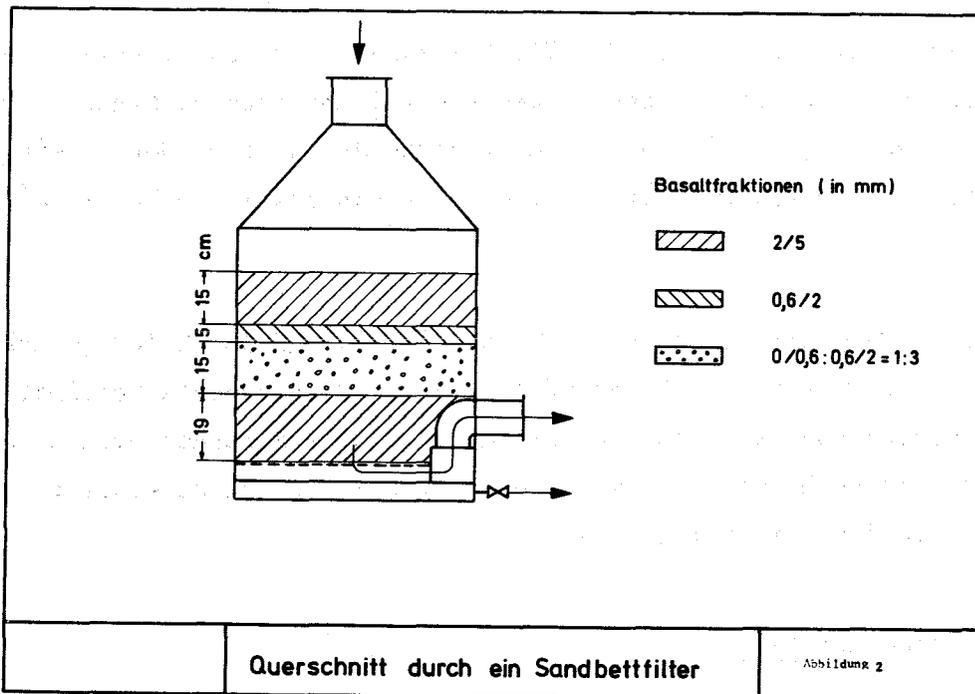
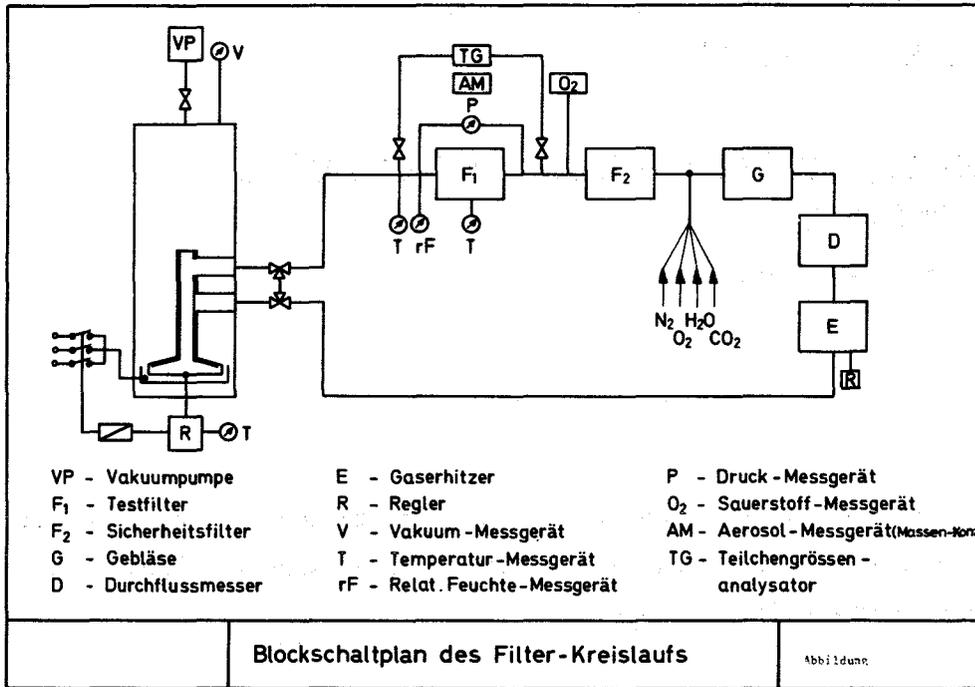
Im Rahmen eines längerfristigen Programms wird das Verhalten verschiedener Filtertypen, insbesondere von Faserfiltern und Sandbettfiltern, gegenüber chemisch reaktiven Natriumoxid-Aerosolen untersucht.

Die Versuchsanlage wurde bereits im KFK 1273/3 (1252) beschrieben. Faser- und Sandbettfilter wurden in einem geschlossenen Gaskreislauf untersucht. Einen Blockschaltplan der Anlage zeigt Abbildung 1. Natriumoxid-Aerosole wurden in einer heizbaren Brandpfanne mit einer vorher ermittelten Rate von ca. 20 kg Na pro m² und Stunde erzeugt.

Im Kreislauf wurden Temperatur, Sauerstoffkonzentration und Durchfluß gemessen. Am Testfilter konnten Temperatur, Druckabfall und relative Feuchte bestimmt werden. Die Aerosolmassenkonzentration und Teilchengrößenverteilungen wurden vor und hinter dem Testfilter gemessen. Die Sauerstoffkonzentration wurde während des Versuches im Gaskreislauf konstant gehalten.

2. Versuche an Sandbettfiltern

Für die Sandbettfilterversuche wurde ein Filtergehäuse konstruiert und gebaut, dessen äußere Abmessungen aus Abb. 2 zu ersehen sind. Das Gehäuse ist gasdicht und kann bis zu 2 m³ Sand aufnehmen. Die Durchströmgeschwindigkeit war von oben nach



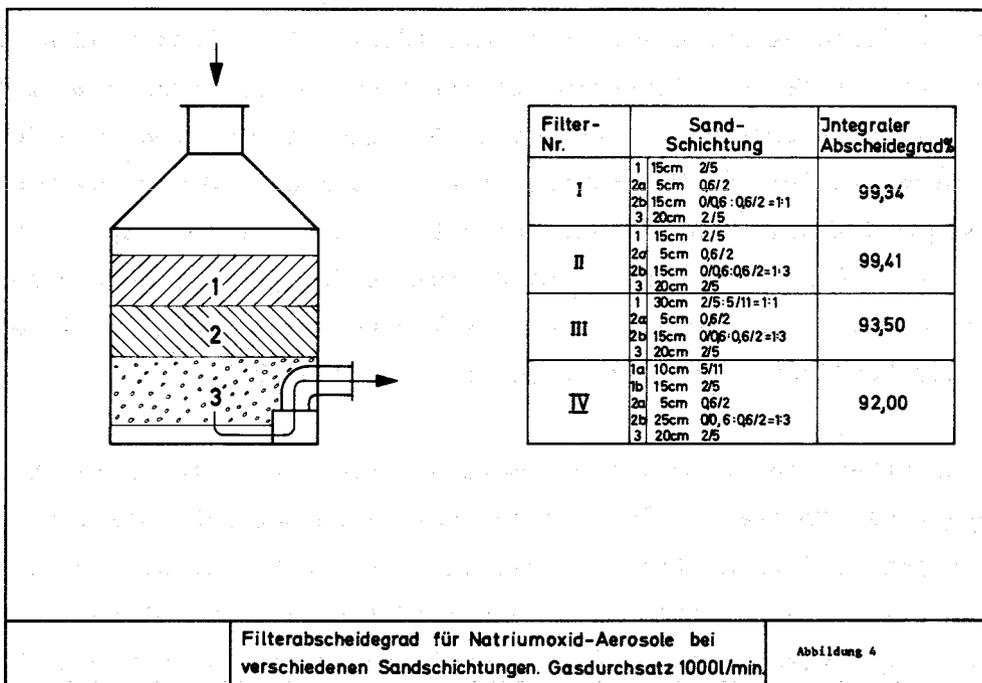
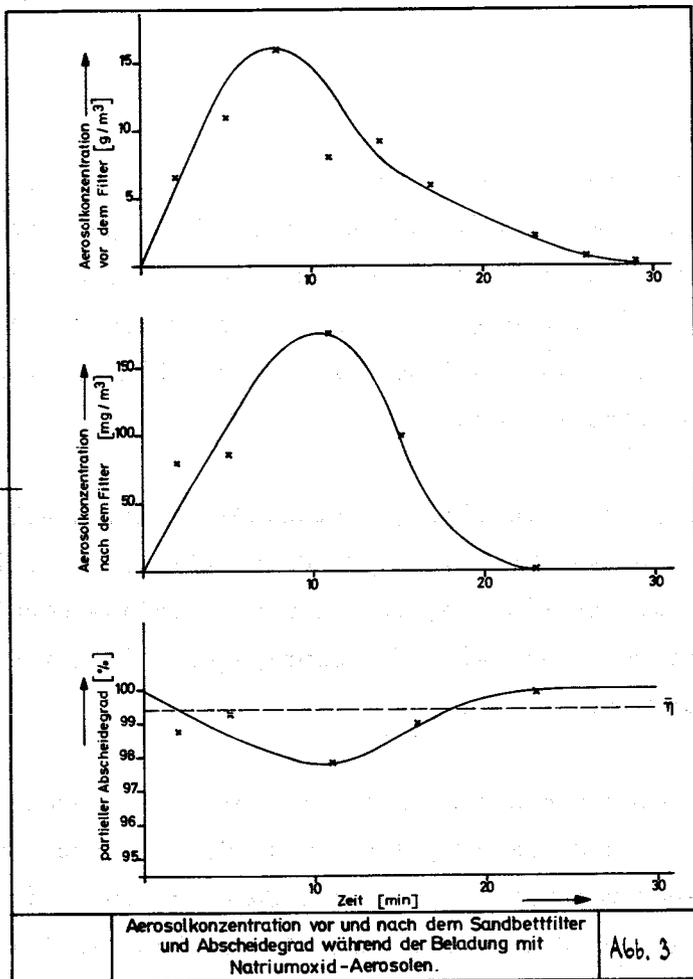
unten gerichtet. Die Anströmfläche betrug $0,76 \text{ m}^2$. Für die Schüttungen wurde Basaltsplit verwendet (da bei Brechsanden aufgrund ihrer kantigen Struktur ein relativ hoher Rückhaltegrad zu erwarten war). Vier Sandfraktionen standen zur Verfügung: 0,0/0,6, 0,6/2, 2/5, 5/11. Die gemessenen dazugehörigen Medianwerte der 4 Fraktionen betragen 0,37, 1,5, 2,9 und 8 mm Durchmesser. Eine typische Sand-schüttung ist in die Abb. 3 eingezeichnet.

Der Boden des Filters besteht aus U-förmigen, ineinander geschachtelten Blechen, die einen ungestörten Gasabfluß gewährleisten. Darüber befindet sich im allgemeinen eine ca. 10 - 20 cm dicke Stützfraktion, an die sich eine Feinsandschicht anschließt. Die oberste Schicht des Filters bildet eine Grobsandschicht, in der der Hauptanteil des Aerosols abgefangen werden soll.

Es wurden Versuche mit verschiedenen Sandschüttungen bei einer Sauerstoffkonzentration von 21 % durchgeführt. Jeweils 5 kg Natrium wurden während eines Versuches verbrannt. Die Aerosolmassenkonzentration wurde als Funktion der Zeit vor und nach dem Filter gemessen, und zwar vor dem Filter durch Auswaschen der Aerosole in Wasser und spätere Titration und nach dem Testfilter durch den Massmonitor der Firma Thermo-Systems (Massenwaage). Zu jedem Zeitpunkt konnte somit aus beiden Massenkonzentrationen ein partieller Abscheidegrad ermittelt werden. Über den gesamten Versuch integriert ergibt sich dann ein Gesamtabscheidegrad $\bar{\eta}$.

Beispielhaft für die Filterversuche wurden in Abbildung 3 für einen Sandbettfilterversuch die gemessenen Aerosol-Massenkonzentrationen vor und nach dem Filter als Funktion der Zeit aufgetragen. Wie es bei Na-Bränden in geschlossenen Behältern stets beobachtet wird, steigt die Massenkonzentration auf ca. $10 \text{ g/m}^3 \text{ Na}_2\text{O}$ an, um dann langsam gegen 0 abzufallen. Dieser Konzentrationsverlauf spiegelt sich nach dem Filter wieder. Das Filter weist zum Zeitpunkt des größten Aerosolangebotes den niedrigsten Wirkungsgrad auf. Noch vor Versuchsende steigt η wieder schnell an und liegt bei fast allen Versuchen besser als 99,9 %.

In einer ersten Versuchsserie wurde die optimale Sandschichtung im Filter hinsichtlich des Wirkungsgrades ermittelt. Eine Auswahl der Versuchsergebnisse für 4 verschiedene Schichtungen wird in Abbildung 4 gezeigt. Die Stützschiicht mit der Fraktion 2/5 wurde hierbei nicht verändert. Die Schüttungen I und II unterscheiden sich nur durch einen veränderten Feinkornanteil der mittleren Schicht. Trotz



Verringerung des Feinkornanteils von 1 : 1 auf 1 : 3 in Versuch II wurde annähernd der gleiche Wirkungsgrad erzielt, wobei die Schüttung II den Vorteil geringeren Differenzdruckes am Filter hat. Bei den Schüttungen III und IV wurde im wesentlichen die oberste Schicht vergrößert, um möglicherweise eine größere Beladung des Filters zu erzielen. Hier sank der Wirkungsgrad aber unter tolerierbare Werte ab. Eine größere Beladung des Filters konnte nicht erreicht werden, sie lag bei allen Versuchen bei ca. $100 - 200 \text{ g/m}^2$ Filteroberfläche.

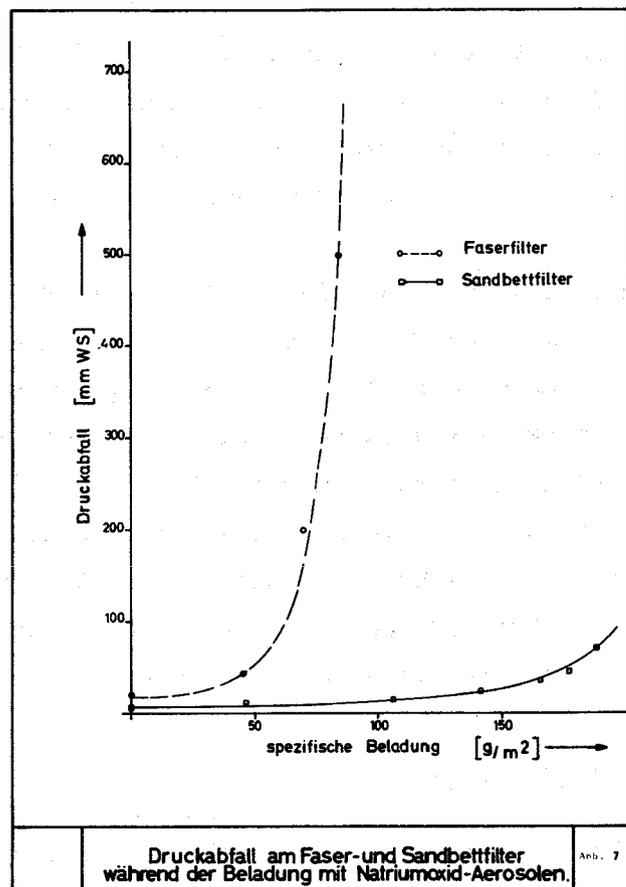
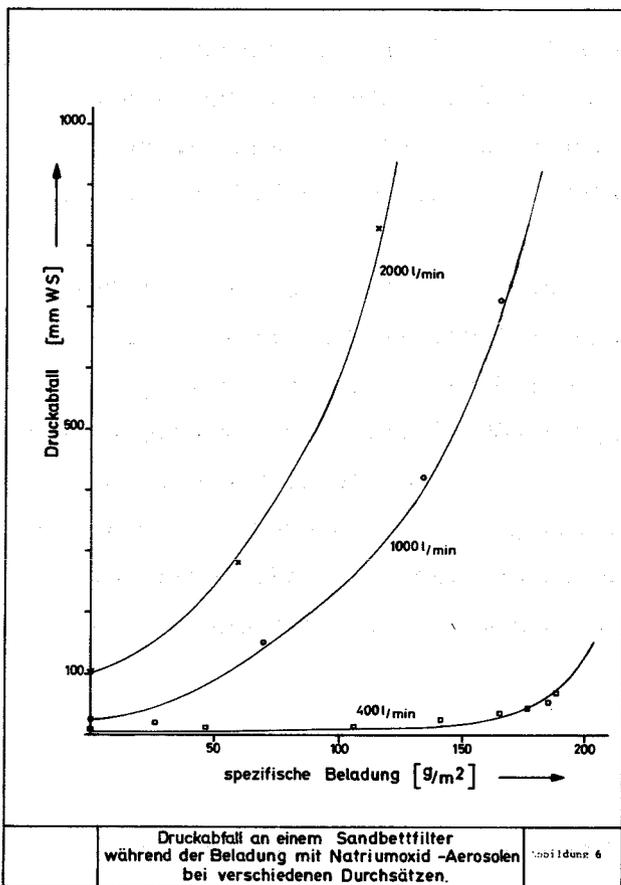
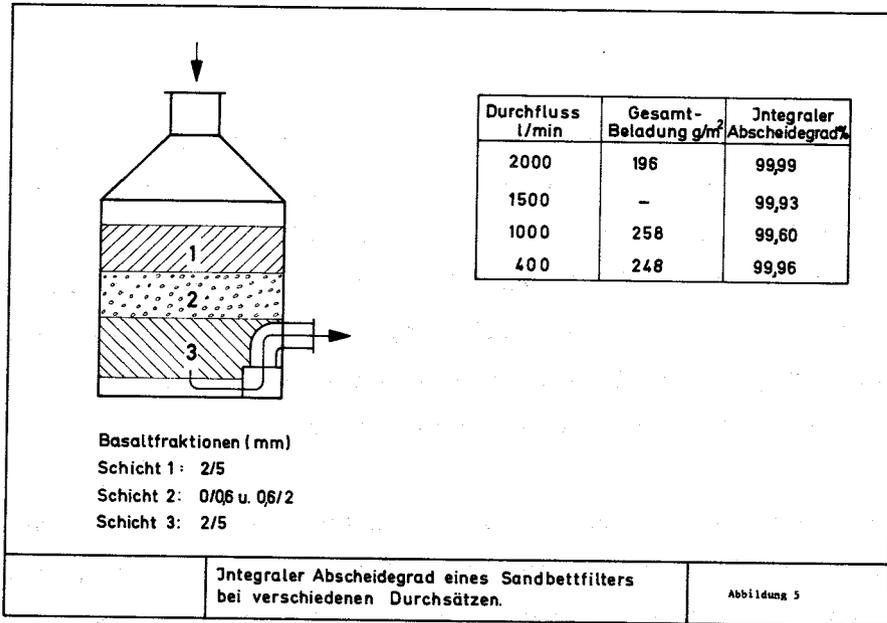
In einer zweiten Versuchsserie wurde für die ermittelte optimale Sandschüttung in mehreren Versuchen der Durchfluß verändert. Die Abbildung 5 zeigt Abscheidegrad und Gesamtbeladung bei Durchflüssen zwischen 2000 und 400 l/min. Dem entsprechen Anströmgeschwindigkeiten zwischen 4,4 und 0,9 cm/sec. Hohe Abscheidegrade wurden bei großen und kleinen Durchflüssen beobachtet. Bei geringeren Durchflüssen wurde außerdem eine hohe Beladungsfähigkeit beobachtet.

Die Abb. 6 zeigt für diese Versuche den Druckabfall am Filter als Funktion der spezifischen Beladung aufgetragen. Bei geringem Durchfluß wurde erst bei einer Beladung von 160 g/m^2 ein merklicher Druckanstieg beobachtet, während bei Durchflüssen um und über 1000 l/min der Druck kontinuierlich mit der Beladung anstieg.

Zum Vergleich wurde ein Glasfaserfilter der Sonderstufe S mit abgedichtetem Metallrahmen der Größe 305 x 305 x 150 mm und einer effektiven Filterfläche von $2,6 \text{ m}^2$ unter den gleichen Bedingungen mit Natriumoxid-Aerosolen beladen. Der Durchfluß betrug entsprechend der Herstellerangabe 4000 l/min. Dem entspricht eine Anströmgeschwindigkeit von 2,6 cm/sec. Die Abb. 7 zeigt die Druckdifferenz am Filter in Abhängigkeit von der spezifischen Beladung. Es ist zu erkennen, daß nach einer spezifischen Beladung von ca. 60 g/m^2 die tolerierbare Druckdifferenz am Faserfilter erreicht war. Vergleichsweise wurde in Abb. 7 der Differenzdruck an einen Sandbettfilter eingezeichnet.

Zusammenfassung

- Sandbettfilter sind gegenüber chemisch aggressiven Aerosolen praktisch inert.
- Eine Beladbarkeit bis 200 g/m^2 ist erreichbar. Sandbettfilter sind auch bei hohem Differenzdruck unempfindlich gegen Durchbrüche.
- Sandbettfilter haben eine hohe Wärmekapazität und können als Wärmepuffer gegenüber nachgeschalteten Filterkomponenten dienen.
- Der Abscheidegrad geeigneter Sandbettfilter liegt nicht unter 99,9 %.



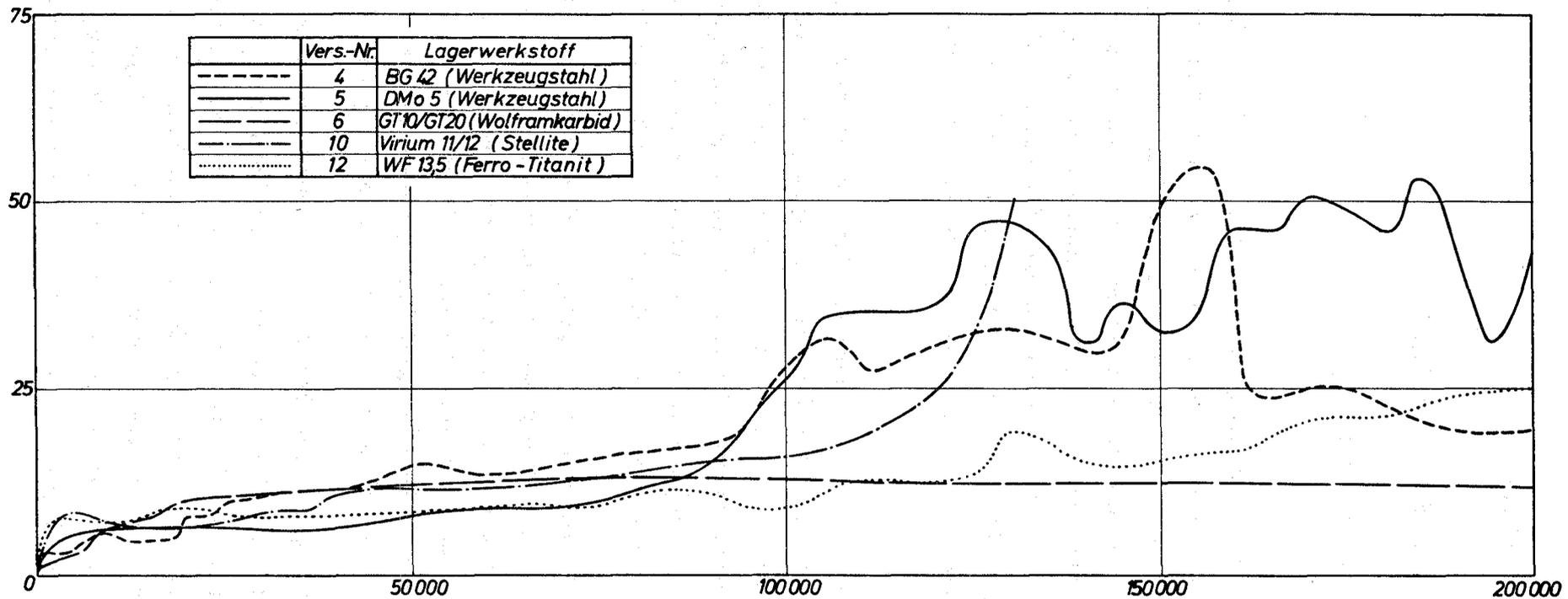
126 Na-TECHNOLOGIE-VERSUCHE1262 Untersuchungen von Reaktorbauteilen1262.2 Betriebsverhalten von Wälzlagern^F

(K. Kleefeldt, IRE)

Die Standardversuche der 1. Versuchsphase zum Vergleich des Reibungs- und Verschleißverhaltens von Kugellagern aus verschiedenen Werkstofftypen wurden im Berichtszeitraum durch die Versuche Nr. 7 bis 12 abgeschlossen. Tab. 1 gibt Auskunft über die verwendeten Werkstoffe sowie über den Verschleiß und das Reibmoment am Ende der Versuchsdauer. Eine vergleichende Bewertung der Werkstoffe kann erst nach Abschluß der jetzt laufenden Nachuntersuchungen erfolgen, in denen im wesentlichen Art und Umfang der Beschädigungen erfaßt werden. Die bisherigen Ergebnisse können wie folgt zusammengefaßt werden:

- 1) Die Reproduzierbarkeit des experimentellen Befundes (Verschleiß, Reibmoment, Oberflächenveränderungen) ist bei Lagern aus derselben Fertigungsserie (d.h. gleicher Werkstoff) relativ gut, so daß die für jeden Werkstoff jeweils zweifach durchgeführten Versuche für den Werkstoffvergleich als hinreichend angesehen werden können. Große Verschleißunterschiede traten nur bei den Lagern aus Werkzeugstahl auf (vgl. KFK 1273/2).
- 2) Das Reibmoment zeigt i.a. eine ansteigende Tendenz mit zunehmender Betriebszeit, wobei ab ca. 100.000 Umdrehungen eine deutliche Erhöhung um den Faktor 2 bis 4 mit starken unregelmäßigen Schwankungen auftritt. Eine Ausnahme stellt der Werkstoff Wolframkarbid dar, bei dem das Reibmoment bis zum Versuchsende einen gleichmäßig niedrigen Wert behält. Die Lager aus TiC weisen einen relativ geringen Anstieg auf (Abb. 1).
- 3) Die geringste Beschädigung wurde bei den Kugellagern aus WC beobachtet, wenngleich auch hier eine Pittingbildung den beginnenden Verschleiß anzeigt. Das Verschleißgewicht kann hier wegen des kleinen Wertes nicht mehr als Maß für die Beschädigung gewertet werden. Einen mäßigen Verschleiß mit starken Oberflächenaufrauungen weisen die Lager aus TiC auf, jedoch ist die Funktionsfähigkeit noch erhalten. Im Vergleich hierzu ist bei den übrigen Lagern ein starker Verschleiß aufgetreten.

↑ Reibmoment
für das Lagerpaar
(kpcm)



→ Gelaufene Umdrehungen

Parameter:
 Drehzahl : 200 min⁻¹
 Na-Temperatur : 400 °C
 Axiallast : 280 kp

G f K

Untersuchungen an Wälzlagern in Natrium

Reibmoment in Abhängigkeit der Betriebsdauer für
Kugellager 6207 aus verschiedenen Werkstoffen

Abb. 1

Ein Zusatzversuch (Nr. 9) sollte erste Hinweise über das statische Verhalten von Kugellagern (Verschweißung, plastische Verformung) geben. Außerdem wurde bei diesem Versuch das Reibmoment für Belastungen bis zu ca. 600 kp und für Drehzahlen bis zu 500 min^{-1} gemessen. Es ergab sich:

- 1) Das Reibmoment beim Start nach einer Stillstandszeit von 3,5 bis 23 h unter Axialbelastungen von 300 bis 480 kp bei 400°C ließ keine Verschweißung oder lokale plastische Verformungen erkennen.
- 2) Bis zu einer Drehzahl von 200 min^{-1} nimmt das Reibmoment mit steigender Drehzahl stark, oberhalb 200 min^{-1} nur sehr wenig ab.
- 3) Zwischen Reibmoment und Axialbelastung wurde im untersuchten Bereich ein nahezu linearer Zusammenhang gefunden.

Tab. 1: Verschleiß und Reibmoment bei den Versuchen 7 - 12

Vers. Nr.	Lager-Werkst.	Lagerposition	Verschleißgew. (mg)			Integr. Axialverschiebg. (mm)	Reibmom. f. Lagerpaar (kpcm)
			OR	IR	Kugel		
7	GT 10/20 (WC)	oben	0,6	0	-0,3	0,01	12
		unten	1,3	0,8	0,2		
8	Virium 11/12 (Stellite)	oben	keine Messung, da nicht zerlegbar (Käfig)			0,09	8-200
		unten					
9	BG 42 (Werkzeugst.)	oben	keine Messung, da stat. Vers.				$M_R(F_a, n)$
		unten					
10	Virium 11/12 (Stellite)	oben	6	34	-18	0,13	15-50
		unten	17	40	+18		
11	WF 13,5 (TiC)	oben	4	14	6	0,07	15-25
		unten	4	10	3		
12	WF 13,5 (TiC)	oben	70 ?	13	3	0,09	15-25
		unten	5	7	-1,4		

1262.3 Versuche zur Werkstoffpaarung unter Natrium1262.31 Verschweißversuche*
(K. Mattes, H. Huber, IRE)

Im Berichtszeitraum wurden die folgenden Werkstoffpaarungen auf Selbstverschweißen getestet:

Stellit 6/Stellit 6
 Stellit 6/Inconel 718
 Stellit 6/Colmonoy 4
 Inconel 718/Colmonoy 4

Die Testbedingungen waren:

Anpreßtemperatur	700°C
Anpreßzeit	72 h
Anpreßkraft	500 kp
Kontaktfläche	100 mm ²
max. (W + R _t)	> 4 µm (gedreht)
Zerreißtemperatur	700°C
Pluggingtemperatur	< 150°C

Es wurden die folgenden Haftkräfte gemessen:

Paarung	mittlere Haftkraft bei 700°C F_{hm} [kp]
Stellit 6/Stellit 6	600
Stellit 6/Inconel 718	120
Stellit 6/Colmonoy 4	2070
Inconel 718/Colmonoy 4	2070

Es zeigte sich, daß die Paarung Stellit 6/Inconel 718 am wenigsten selbstverschweißte. Diese geringe Verschweißneigung wurde durch einen weiteren, gleichartigen Versuch jedoch mit einer höheren Anpreßkraft von 1000 kp bestätigt ($F_{hm} = 200$ kp).

*BzFE Nr. 212.4

Eine hohe Neigung zum Selbstverschweißen besitzen die getesteten Paarungen mit Colmonoy 4. Dieser Werkstoff ist daher als Paarungswerkstoff an Stellen, an denen Selbstverschweißen auftreten kann, ungeeignet.

Veröffentlichung

F. Huber, K. Mattes, H. Weinhold

Selbstverschweißen von Strukturwerkstoffen in flüssigem Natrium

KFK 1903, Februar 1974

1262.32 Verschleißuntersuchungen in Natrium*

(E. Wild, K.J. Mack, IRB)

Nach einer Betriebsdauer von ca. zwei Jahren wurde der Natrium-Verschleißprüfstand NVP II Anfang Dezember 1973 abgeschaltet. Alle Lager in den Bewegungsmechanismen sowie alle Dichtungen an den Wellendurchführungen wurden erneuert. Ein zusätzliches Sicherheits-Abschaltsystem, das den weitgehend automatischen Betrieb des Prüfstandes ermöglicht, wurde installiert. Alle Teststrecken wurden mit einem zweiten Reibkraftmesser ausgestattet, wodurch zusätzlich die genaue Erfassung jeglicher Störeinflüsse möglich wurde.

Nach der Wiederinbetriebnahme des Prüfstandes (Ende Januar 1974) wurde die Versuchsserie zur Auswahl von Pflasterwerkstoffen mit niedrigen Reibkoeffizienten fortgesetzt.

Bei den von Interatom gelieferten Proben war die Stellite-Beschichtung erstmals in Form von Blechen aufgebracht, die nur am Umfang mit dem Grundmaterial verschweißt sind. Diese Bleche sind in kaltem Zustand (bei Raumtemperatur) aufgebeult und lassen sich durch Schleifen nur sehr schlecht bearbeiten. Aufgrund der geringeren Wärmedehnung von Stellite ist zu erwarten, daß sich die Bleche bei Betriebstemperatur (600 °C) an den austenitischen Grundkörper anlegen.

Die erzielten Ergebnisse aus Versuchen bei variierten Temperaturen entsprechen in etwa jenen, die mit (im WIG-Verfahren) aufgeschweißten Proben erzielt wurden. Der vom Reaktorhersteller geforderte, maximale Reibwert $\mu \leq 0,5$ wurde nicht überschritten. Nach dem Ausbau wurde festgestellt, daß die Proben z.T. nicht auf ihrer ganzen Fläche mit dem Gleitpartner Berührung hatten.

* BzFE-Nr. 212.7

Dadurch lagen hinsichtlich der Flächenpressung undefinierte Bedingungen vor. Für weitere Versuche werden zur Zeit neue Proben bei verbessertem Schweißverfahren angefertigt.

1263 Untersuchungen zur thermo- und fluiddynamischen Kernausslegung

1263.2 Untersuchungen im exzentrischen Ringraum*

(P. Donath, H. Völler, D. Weinberg, IRB)

Parallel zu den Geschwindigkeitsmessungen im exzentrischen Ringraum - deren Auswertung und Vergleich mit anderen Messungen und Rechnungen durchgeführt wird - konnte eine erste Versuchsreihe mit Messung der Temperaturprofile im exzentrischen Ringraum bei turbulenter Na-Strömung abgeschlossen werden. Dabei lagen folgende Parameter vor bzw. wurden variiert:

Radienverhältnis	r_1/r_2	=	0,25
Exzentrizität	ϵ	=	0,0; 0,10; 0,15; 0,25; 0,30
axiale Länge	l/d_h	=	37,2; 28,2; 19,4 (teilweise); 10,5
Wärmestromdichte	q	=	80 W/cm^2
Reynolds-Zahl	Re	=	$1,4 \cdot 10^4$; $4,6 \cdot 10^4$
Prandtl-Zahl	Pr	=	$5,7 \cdot 10^{-3}$

Erste Ergebnisse zeigt Abb. 2. Deutlich ist der Anstieg des Temperaturgradienten im engen und Abfall des Gradienten im weiten Spalt des exzentrischen Ringraumes mit steigender Exzentrizität zu erkennen. Dadurch bedingt ergibt sich bei $\epsilon = 0,30$ eine deutliche Oberflächentemperatur-Differenz am Heizleiter. Die Ergebnisse werden weiter ausgewertet.

Weiterhin wurden mit der in [1] beschriebenen Meß- und Auswerte-Kette Temperaturfluktuationen für den zentrischen und exzentrischen Ringraum aufgenommen und mit der Auswertung begonnen. Die Abb. 3 zeigt rms-Werte für den zentrischen Ringraum $r_1/r_2 = 0,25$. Das Maximum des rms-Wertes der Temperaturfluktuation ist leicht zur beheizten Wand hin verschoben. Die Lage

* BzFE Nr. 451.8

[1] L. Krebs, G. Weinkötz: KFK-Bericht 1273/1 bis 4, Pkt. 1241.3

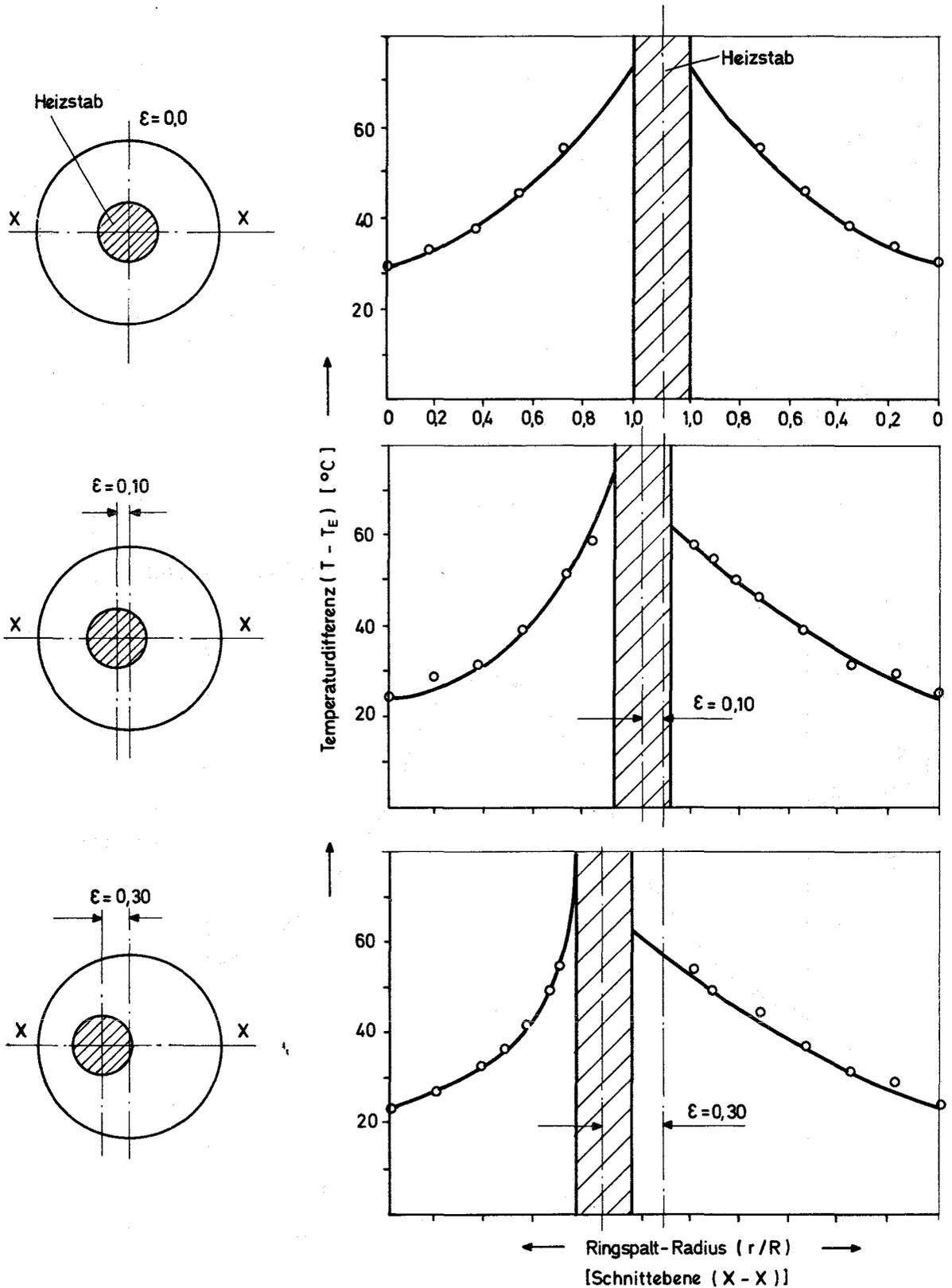


Abb.2 Experimentell ermittelte Temperaturverteilung im zentrisch / exzentrischen Ringraum für Natrium ($Pr=0,0057$; $Re = 4,6 \cdot 10^4$ $r_1/r_2 = 0,25$; $q = 80 \text{ W/cm}^2$; $\dot{m} = 1,58 \text{ m}^3/\text{h}$; $l/d_h = 37,2$)

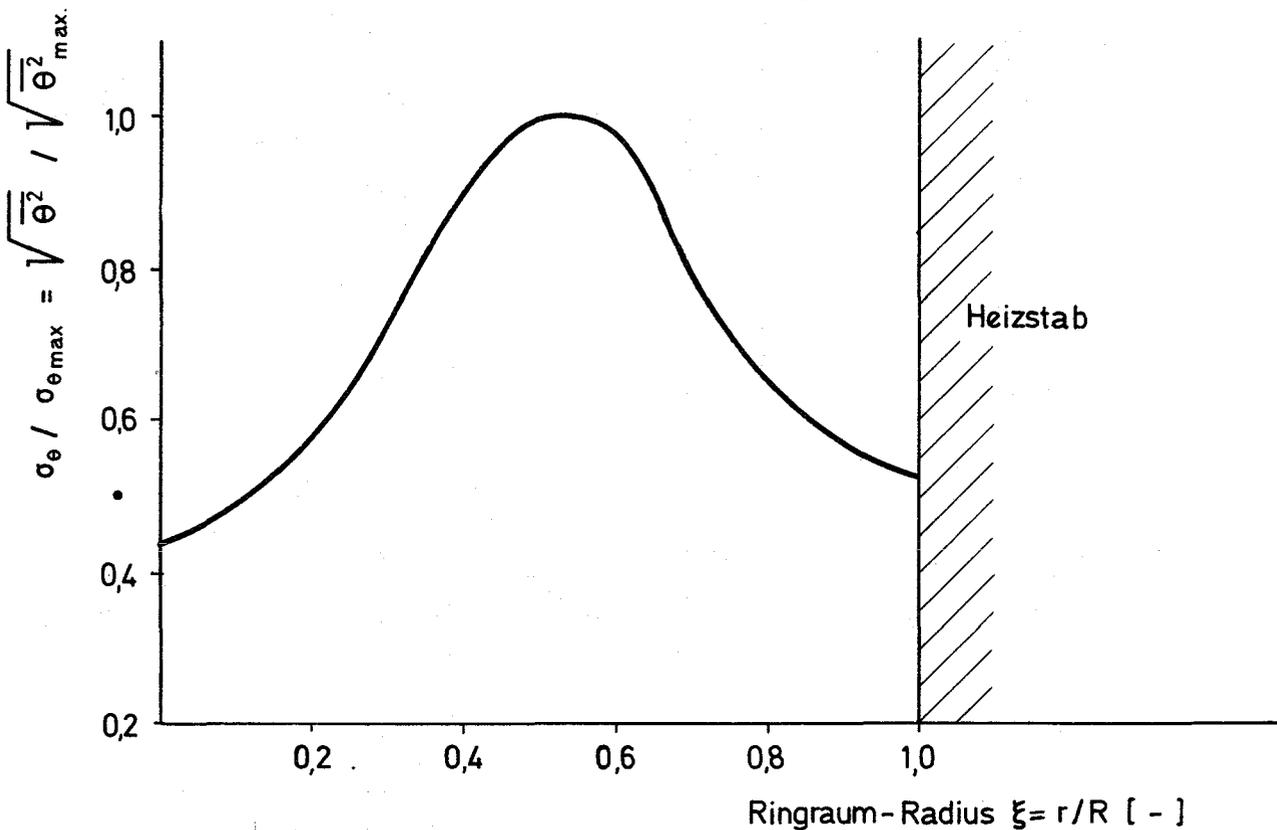
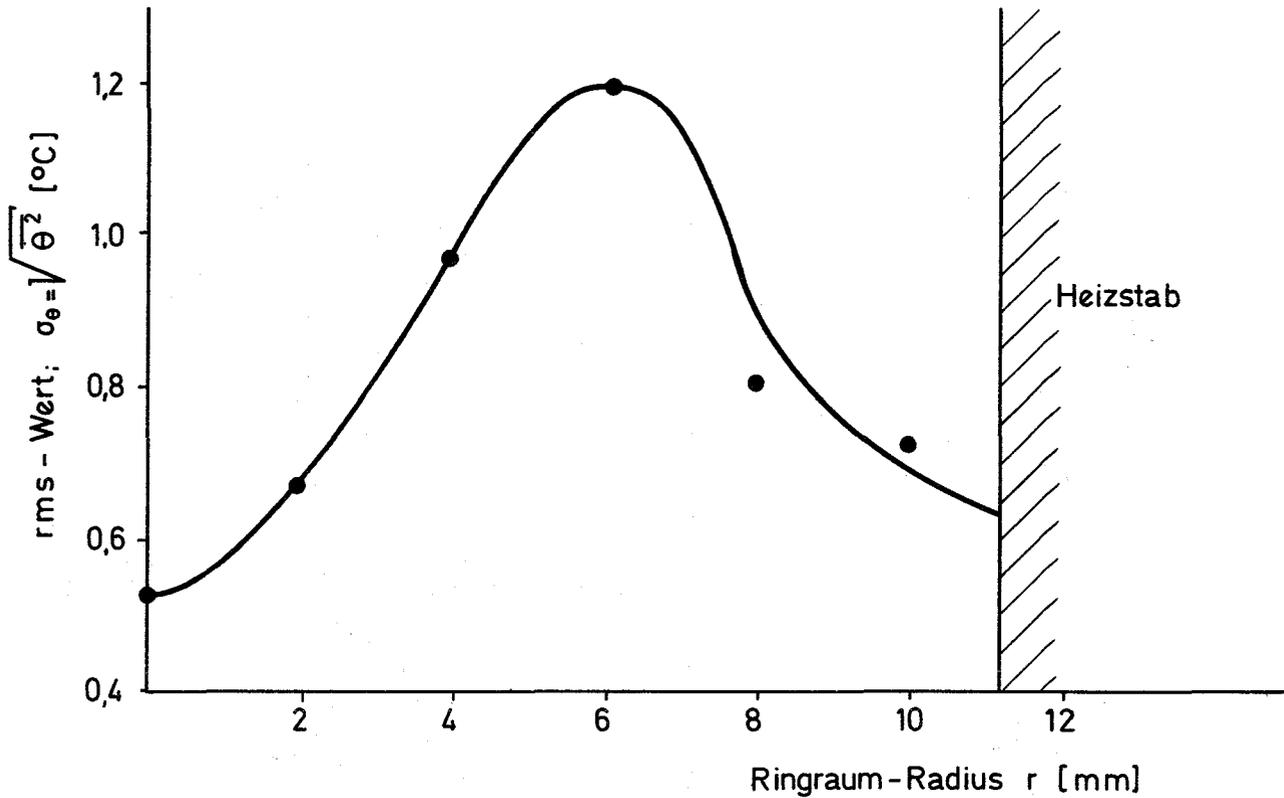


Abb. 3 rms - Werte der Temperaturfluktuation im zentrischen Ringraum. $r_1/r_2 = 0,25$; $q = 80 \text{ W/cm}^2$; $Re = 1,4 \cdot 10^4$; $Pr = 5,7 \cdot 10^{-3}$; $l/d_h = 37,2$

des Maximums ist abhängig von der Stärke der Temperaturschicht und der Verlauf des rms-Wertes proportional zum Temperaturgradienten, wie in [2, 3] gezeigt werden konnte. Danach und unter Berücksichtigung der Ringraumgeometrie wäre im Bereich des Heizstabes ein anderer Verlauf der rms-Kurve als angegeben denkbar gewesen. Weitere Messungen sollen den Sachverhalt klären.

1263.3 Lokale Wärmeübergangsmessungen an Bündelgeometrien*

(G. Drechsler, M. Kolodziej, R. Möller, D. Schlindwein,
H. Tschöke, IRB)

Der Na-Wärmeübergangsprüfstand WÜP-II (techn. Daten: 60 m³/h, 45 m FlS, 550 °C, 520 kW) wurde zu ca. 80% aufgebaut. Rohrmontage, Röntgenprüfungen und Dichtheitsprüfungen sind erfolgt, sodaß mit dem Aufbringen der Begleitheizungen auf das Rohrleitungssystem und auf die Komponenten begonnen werden konnte. Für die noch ausstehende Lieferung der EM-Pumpe wurde vom Hersteller für die Inbetriebnahmephase (ggf. auch für erste Experimente) eine Ersatzpumpe (30 m³/h, 25 m FlS) beschafft und eingebaut.

Der 200 Ltr.-Ausdehnungsbehälter soll gleichzeitig als Eichbehälter zur Eichung bzw. Nacheichung der drei Durchflußmesser des Kreislaufes verwendet werden. Die Eichvolumen wurden mit Hilfe eines selbstgebauten Höhenstandsmessers durch Auswiegen mit 10 °C warmem Wasser im auf 95 °C erwärmten System auf $\leq \pm 0,5\%$ ermittelt.

1263.4 Untersuchung zur Kühlmittelquervermischung**

(H. Hahn, IRB)

Die Versuchsstrecke zur Ermittlung von Geschwindigkeitsprofilen im 19-Stab-bündel [1] (D = 25 mm, P = 32 mm, P/D = 1.32) wurde fertiggestellt (Abb. 4) und an den Wasserprüfstand angeschlossen. Damit sind Untersuchungen bis zu Reynolds-Zahlen $\leq 60\ 000$ möglich.

[2] L.E. Hochreiter, HMT 12 (1969) 114-118

[3] J.H. Rust, HMT 9 (1966), 215-227

* BzFE Nr. 451.1

** BzFE Nr. 451.5

[1] KEK-Bericht 1272/3, S. 126-19

Die Teststrecke mit den 3 Meßeinheiten (Abb. 5) wurde in Betrieb genommen. Dabei ergab sich, daß die Wasserqualität des Prüfstandes großen Einfluß auf die Meßwerte bei dem Einsatz der Anemometer-Sonden hat.

Der Betrieb mit entkarbonisiertem Wasser hatte bereits nach 10 Minuten eine Verschmutzung der Sonde (Abb. 6) zur Folge, sodaß keine brauchbaren Meßergebnisse erzielt werden konnten.

Durch Filtereinbauten konnte erreicht werden, daß ein neueingesetztes Anemometer auch nach längerer Meßdauer frei von jeder Verschmutzung blieb. Darüberhinaus wurden Reinigungsmethoden für verschmutzte Sonden entwickelt. Abb. 7 zeigt eine gereinigte Sonde.

Es wurden Geschwindigkeitsprofile im Zentral-, Rand- und Eckkanal des 19-Stabbündels mit Röhrchenabstandshalter (Bauart Interatom) gemessen. Die bisherigen Ergebnisse ($H/D_H = 5,9$) zeigen eindeutig den Abstandshalter-Einfluß.

Zur Zeit wird die Teststrecke für weitere Messungen vorbereitet und ein Vergleich zwischen Experiment und Theorie angestellt.

1263.5 Entwicklung elektrischer Heizelemente *

(V. Casal, A. Demski, E. Graf, W. Hartmann, IRB)

Die Fertigung der Siedeheizstäbe der Entwicklungsstufe I (Heizflächenbelastung 170 W/cm^2 bei $950 \text{ }^\circ\text{C}$ Kühlmitteltemperatur) wurde in die Hauptwerkstatt übertragen. Die erfolgreiche Erprobung von bisher 6 Stäben aus der ersten Fertigungsserie der Hauptwerkstatt im Heizleiterprüfstand des IRB zeigt, daß die dort gefertigten Heizstäbe die an sie gestellten Anforderungen erfüllen.

* BzFE Nr. 933.2

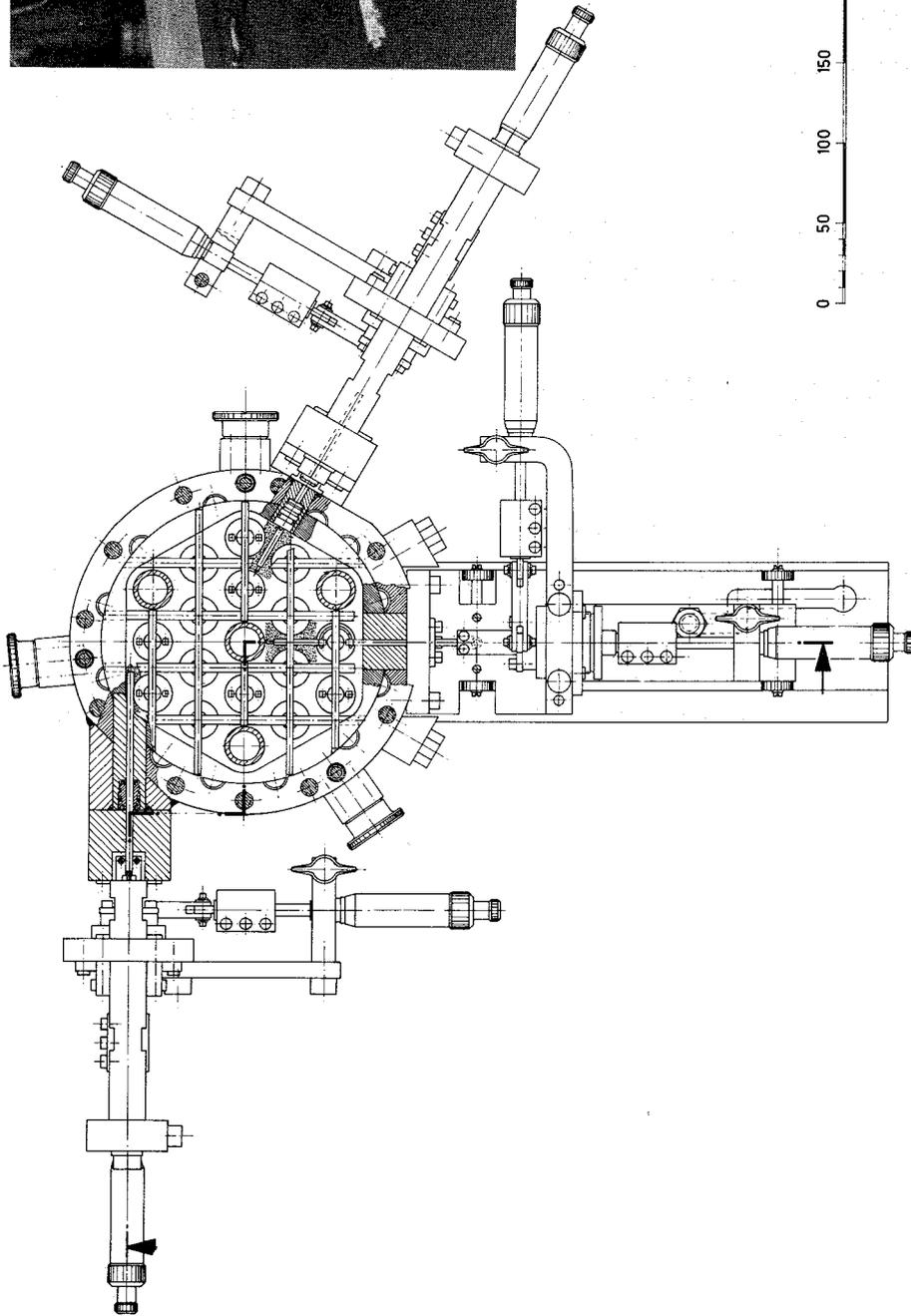
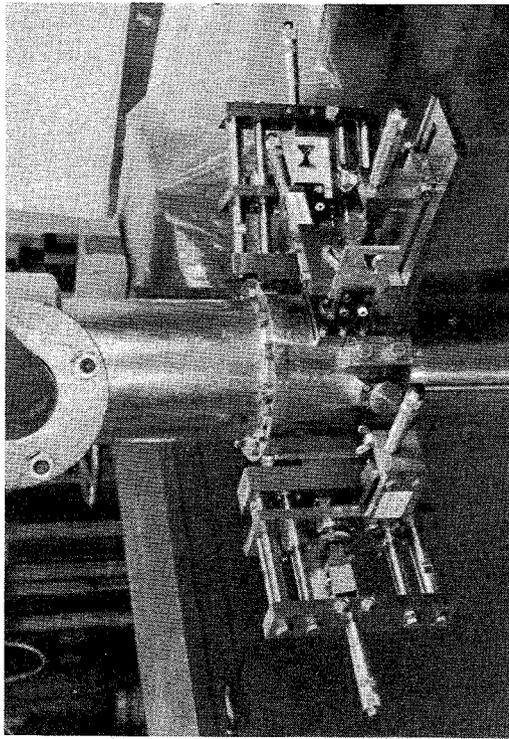


Abb. 5: Einrichtungen zur Geschwindigkeitsprofilmessung in Bündelteilkanälen

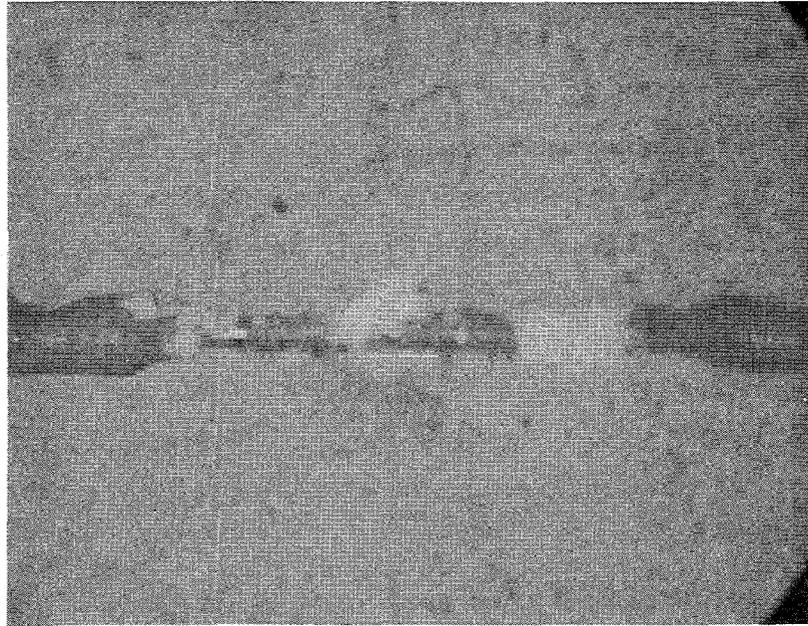


Abb. 6: Anemometersonde verschmutzt (120 - fach)

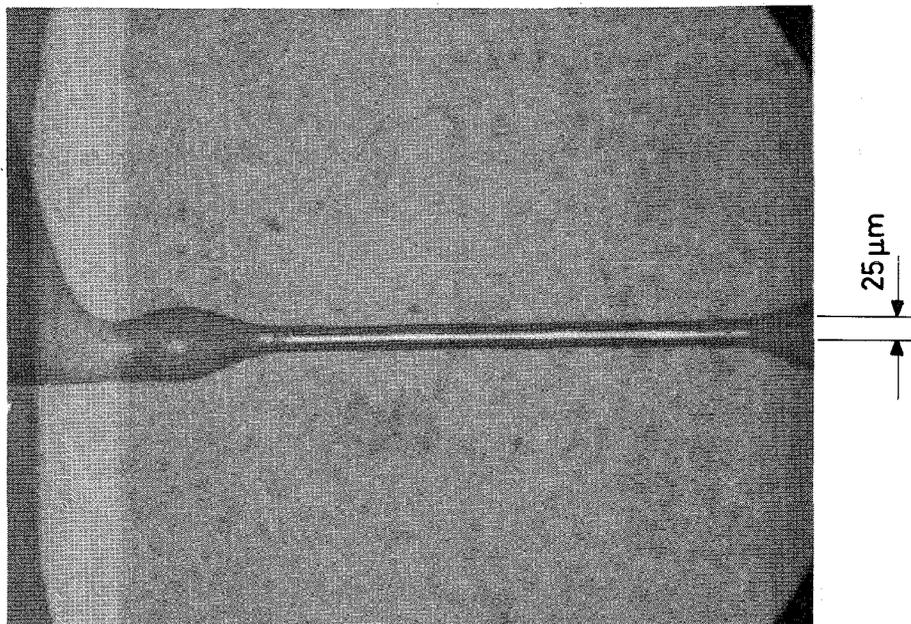


Abb. 7: Anemometersonde gereinigt (120 - fach)

1264 Hydraulische Untersuchungen am SNR-300-Absorber*

(K. Marten, IRB)

In [1] wurden die Ergebnisse der Experimente mit der mehrstufigen Labyrinthdrossel im Ringraum zwischen Bündel und Führungsrohr vorgestellt. Die geforderte Durchsatzverteilung zwischen Bündel und Ringraum wurde zwar mit dieser Variante des Absorbermodells erreicht, jedoch klapperte die im Führungsrohr mittels Faltenbalg radial beweglich befestigte Drossel. Deshalb wurde die Ringraumdrossel so gestaltet, daß beim Durchströmen radial wirkende Kräfte wirksam werden, die die Drossel gegenüber dem Bündel hydrodynamisch zentrieren. Zur Stabilisierung des Bündels im Führungsrohr wurde auch der Fuß des Bündels umgestaltet.

Mit dieser neuen Absorbermodell-Variante wurde ebenfalls die geforderte Durchsatzverteilung zwischen Bündel und Ringraum erreicht. Dies ist aus den Ergebnissen der Untersuchungen des Bündeldurchsatzanteils (\dot{m}_B/\dot{m}_{ges}) und des Gesamtdruckverlustes (Δp_{ges}) in Abhängigkeit vom Absorberdurchsatz (\dot{m}_{ges}) und den axialen Bündelpositionen (BP) zu ersehen, die in Abb. 8 dargestellt sind. In der Abbildung werden die Ergebnisse aus den Versuchen mit der neuen Absorbermodell-Variante jenen aus den Untersuchungen am Absorbermodell ohne Ringraumdrossel gegenübergestellt.

Aufgrund der Meßergebnisse kann folgendes festgestellt werden:

- Der erforderliche Bündeldurchsatzanteil von 50% wurde erreicht.
- Er ist weitgehend unabhängig von der axialen Bündelposition (BP 2-5) und dem Absorberdurchsatz.
- Der Gesamtdruckverlust ist nur in der ganz eingefahrenen Bündelposition (BP 5) ca. 15% höher als bei den übrigen Bündelpositionen (BP 4; 3; 2 $\hat{=}$ 500; 700; 900 mm Hub).
- Die Lage der Ausströmöffnungen des Absorbers haben keinen Einfluss, weder auf den Gesamtdruckverlust noch auf den Bündeldurchsatzanteil.

*BzFE Nr. 455.2

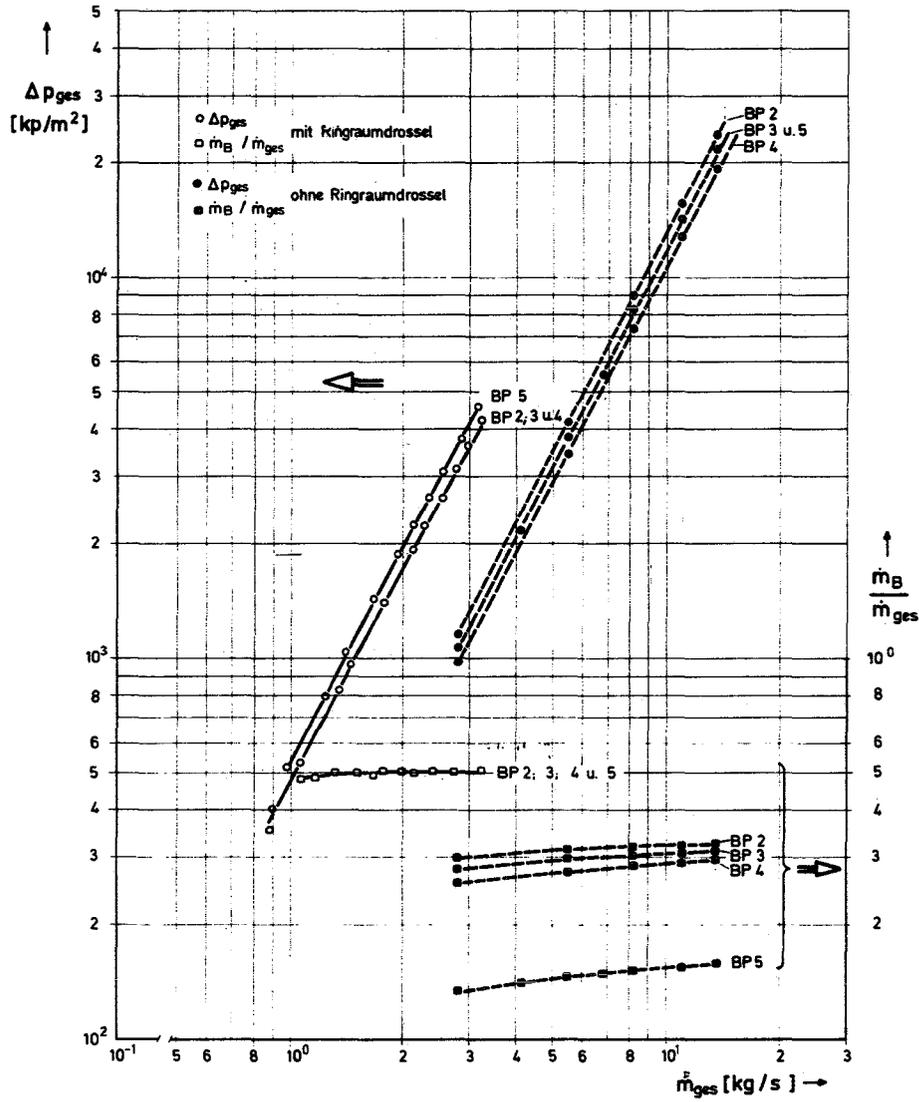


Abb. 8 Gesamtdruckverlust und Bündeldurchsatzanteil als Funktion des Gesamtdurchsatzes bei konzentrischer Bündellage und 80° Wassertemperatur
 Parameter: Axiale Bündelposition und Ringraumgeometrie

- 127 THERMO- UND HYDRODYNAMISCHE VERSUCHE IN GAS
- 1271 Experimentelle Arbeiten an den wärmetechnischen Versuchs-
ständen (Helium, Luft)⁶
- 1271.1 Arbeiten für gasgekühlte Schnelle Brüter

Experimentelle Untersuchung der Temperaturverteilung an
glatten und rauhen Rohren unter Abstandshaltern

(J. Marek, A. Roth, INR)⁺

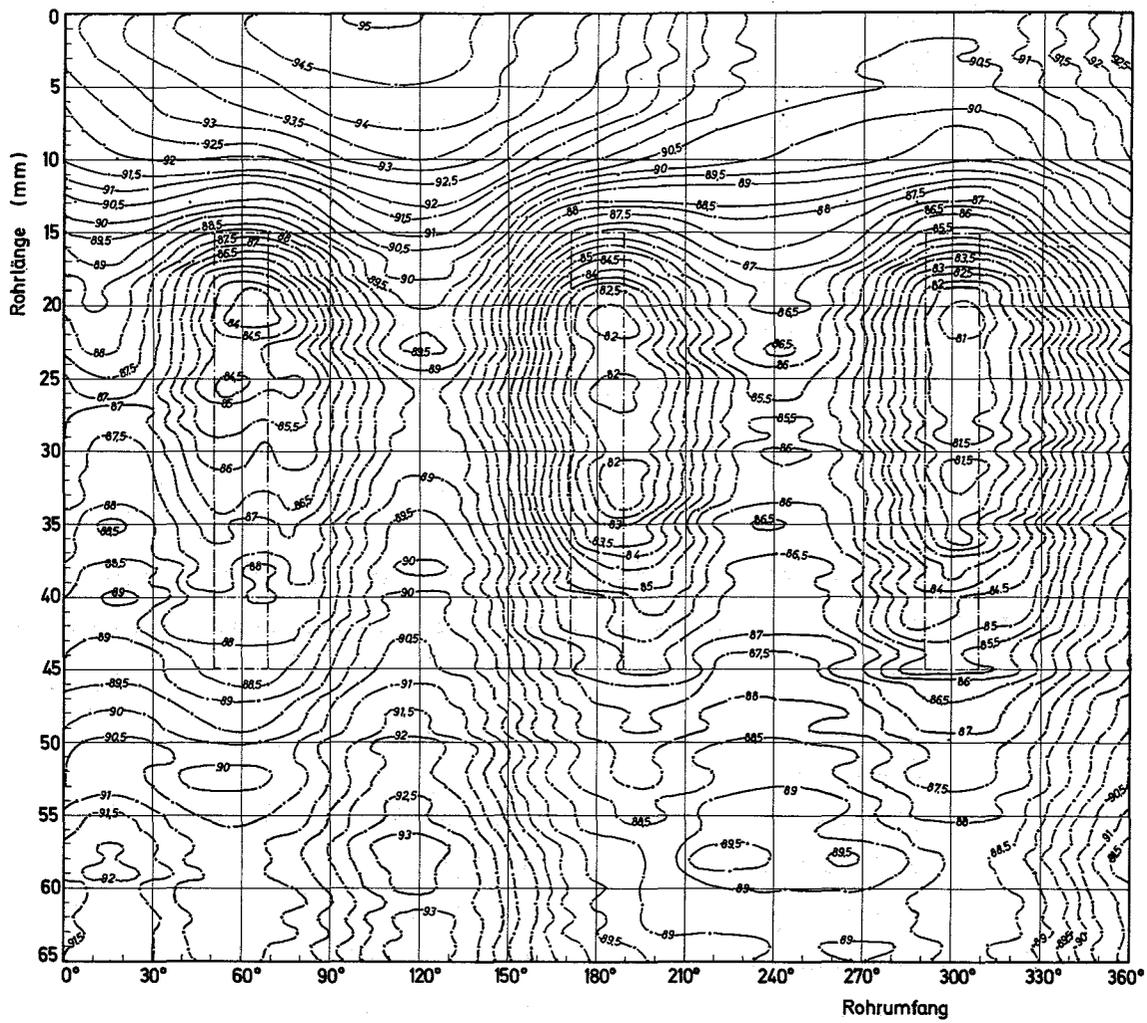
Die am Luftversuchsstand (s. KFK 1273/3) durchgeführten Messungen an dem Abstandshaltertyp B2 (Breite der Rippen 3 mm) wurden abgeschlossen. Der Versuchsbereich war:

Kühlmittel	Luft
Reynoldszahl	$2.8 \cdot 10^4 < Re < 1.5 \cdot 10^5$
Wandtemperatur max.	170°C
Heizleistung	4 ± 22 KW
Flächenleistung max.	± ~ 10 W/cm ²
Stableistung max.	± ~ 66 W/cm

Durch Variation der Flächenleistung und Reynoldszahl wurde der Einfluß dieser Parameter auf das Temperaturfeld ermittelt, wodurch weitere Versuche an anderen Abstandshaltern gezielter und mit geringerem Aufwand durchgeführt werden können.

Damit der Einfluß der Oberflächenrauigkeit ermittelt werden kann, wurden Vergleichsmessungen an glatten und rauhen Rohren mit zwei verschiedenen Rauigkeiten bei gleicher Reynoldszahl und annähernd gleichem Temperaturniveau durchgeführt. Die gemessene Temperaturverteilung für die Rauigkeit R2 ist in Form von Isothermen in Abb. 1 dargestellt. Der deutliche Temperaturabfall im Abstandshalterbereich ist bei glatten Rohren etwa doppelt so groß. Das kann dadurch erklärt werden, daß beim

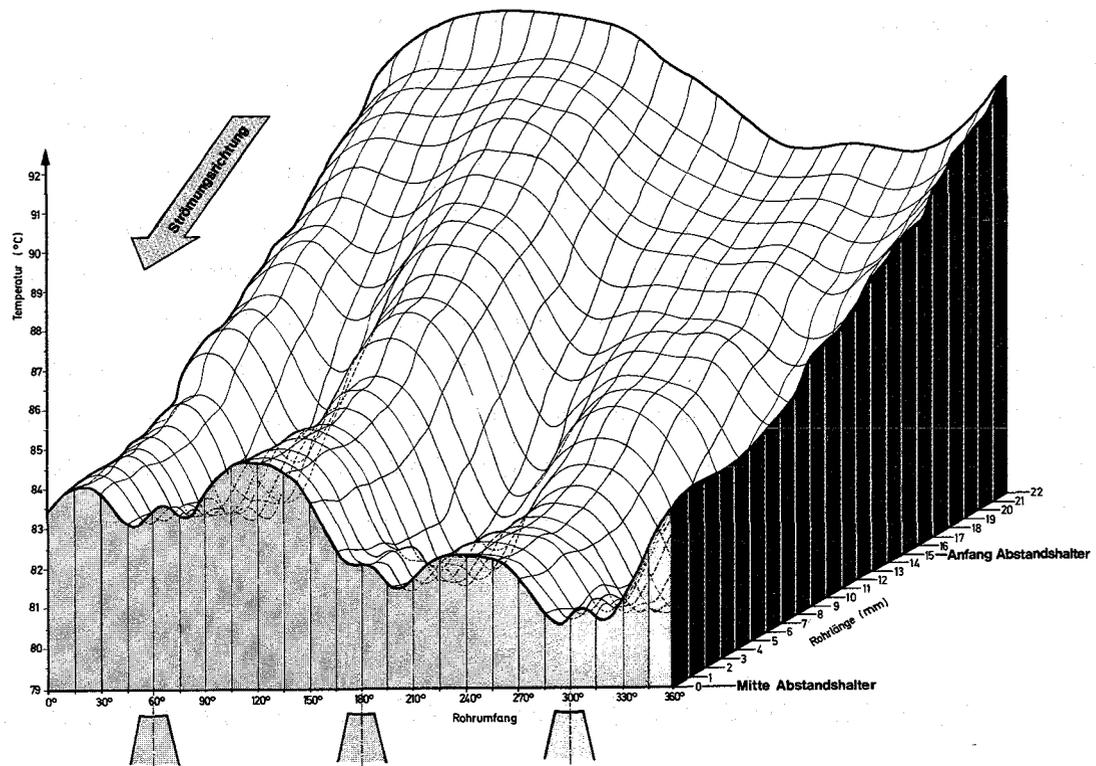
⁺) Letzter Bericht KFK 1273/3



Reynoldszahl : $Re = 1,26 \cdot 10^5$
Rauhigkeitsform : R 2
Abstandshalter : B 2
Flächenleistung : $q = 4,3 \text{ W/cm}^2$

Isothermen in der Abstandshalterebene

Abb. 1



Reynoldszahl: $Re = 1,26 \cdot 10^5$
 Rauigkeitsform: R 1
 Abstandshalter: B2
 Flächenleistung: $q = 3,96 \text{ W/cm}^2$

Temperaturverteilung im Bereich des Abstandshalters

Abb. 2

rauen Rohr durch die Oberflächenrauigkeit bereits eine Erhöhung der Turbulenz vorliegt, so daß die zusätzliche Turbulenzerhöhung durch die mit der Querschnittsversperrung durch den Abstandshalter verbundene Geschwindigkeitserhöhung nur noch eine geringere Verbesserung des Wärmeübergangs bewirkt, als es beim glatten Rohr der Fall ist.

Die Versuche haben gezeigt, daß sich auch bei Rohren mit künstlicher Rauigkeit keine "hot spots" unter dem untersuchten Abstandshaltertyp B2 ergeben. Nur unmittelbar unter den Kontaktflächen zwischen Abstandshaltern und Rohren ergeben sich kleine lokale Temperaturerhöhungen.

Abb. 2 zeigt eine dreidimensionale Darstellung der Temperaturverteilung unter dem Abstandshalter. In diesem Bild wird deutlich, wie stark die Temperatur abfällt (cold spot). Gleichzeitig erkennt man die leichten Temperaturanstiege unter den Abstandshalterrippen. Es ist anzunehmen, daß die Größe dieser lokalen Temperaturerhöhungen von der Rippenbreite des Abstandshalters abhängt, was durch weitere Versuche noch zu klären ist.

1271.2 Grundlagenexperimente zum Impuls- und Wärmetransport in Stabbündeln

Die Abhängigkeit der axialen Turbulenzintensität vom Radienverhältnis bei Ringspalten

(K. Rehme, INR)⁺

Die an drei Ringspalten mit den Radienverhältnissen $\alpha = 0.1$; 0.04 und 0.02 durchgeführten Strömungsuntersuchungen (s. KFK 1272/3) wurden abgeschlossen. Die Untersuchungen des Geschwindigkeitsprofils und der Schubspannungsverteilung wurden durch die Messung der Turbulenzintensitäten in den drei Richtungen ergänzt. Für die Entwicklung von Rechenverfahren für die turbulente Strömung, d.h. zum Testen entsprechender Turbulenzmodelle, ist es wichtig, sich auf zuverlässige Meßergebnisse

⁺) Letzter Bericht: KFK 1273/3

auch für die Turbulenzintensitäten und die kinetische Energie der Turbulenz, die sich aus der Summe der Intensitäten ergibt, abzustützen. Kjellström /1/ hatte 1972 eine Analyse der vorhandenen Turbulenzmeßergebnisse an Ringspalten durchgeführt (aus den Untersuchungen von Brighton /2/, Lawn /3/ und seinen eigenen /4/ bzw. denen von Durst /5/, die bekanntlich am gleichen Kanal durchgeführt wurden). Aufgrund dieser Analyse hatte Kjellström festgestellt, daß ein signifikanter Einfluß des Radienverhältnisses auf den Turbulenztransport nicht vorliegt.

Die in dieser Untersuchung gemessenen Turbulenzintensitäten in der Außenzone für die Strömungsrichtung (die axiale Komponente) zeigt Abb. 3. Über dem auf die Profillänge bezogenen Wandabstand sind die mit der Wandschubspannungsgeschwindigkeit dimensionslos gemachten Turbulenzintensitäten aufgetragen. Dabei sind von unten nach oben die Ergebnisse für die verschiedenen Ringspalte jeweils um eine Einheit auf der Ordinate verschoben. Als Orientierungslinie ist jeweils der Verlauf der Ergebnisse nach den Kreisrohr-Untersuchungen von Laufer /6/ gestrichelt eingetragen. Die Lauferschen Meßergebnisse wurden gewählt, weil sie allgemein bekannt sind und sozusagen als Standard-Ergebnisse gelten, obwohl gerade für die axiale Turbulenzintensität die Ergebnisse von Laufer im Vergleich mit Meßergebnissen anderer Autoren sehr niedrig liegen. Für alle drei Durchmesser-Verhältnisse liegen die Meßergebnisse in der Außenzone höher als die Vergleichskurve. Dabei läßt sich eine Abhängigkeit von der Reynoldszahl nicht eindeutig feststellen, abgesehen vom Durchmesser-Verhältnis $\alpha = 0.04$, wo es eine Tendenz zu höheren Turbulenzintensitäten mit Reynoldszahl zu geben scheint.

Für die Innenzone (Abb. 4) sehen die Ergebnisse ganz anders aus. Mit kleiner werdendem Durchmesser-Verhältnis sinken die Meßwerte mehr und mehr unter die Vergleichskurve ab. Auch für die Innenzone läßt sich ein Einfluß der Reynoldszahl nicht feststellen. Ganz ähnlich sehen die Ergebnisse für die beiden anderen Richtungen aus. Es ergibt sich jeweils für die Innenzone, daß die Turbulenzintensitäten erheblich unter die entsprechenden Werte für die Außenzone fallen /7/.

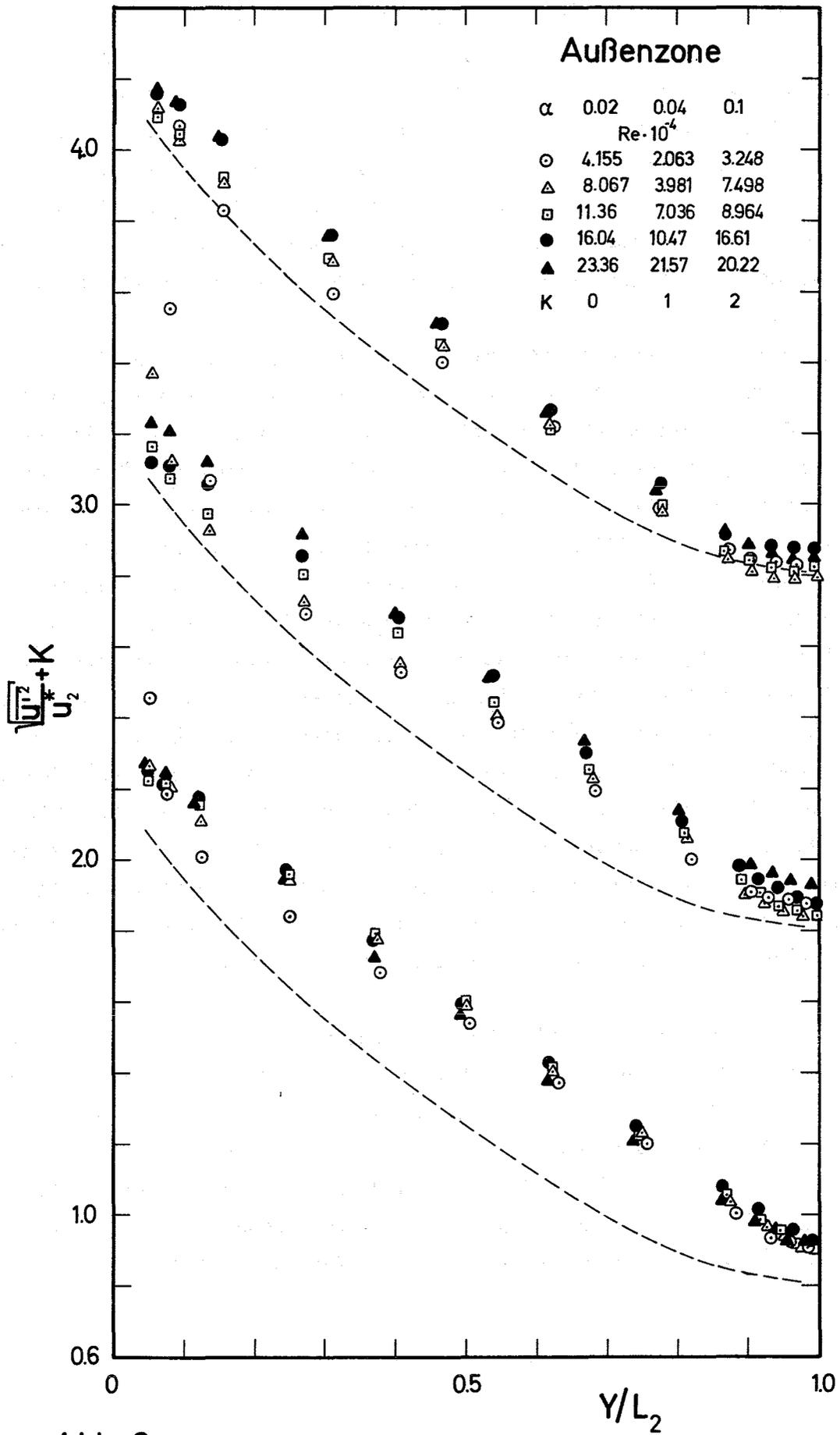


Abb. 3

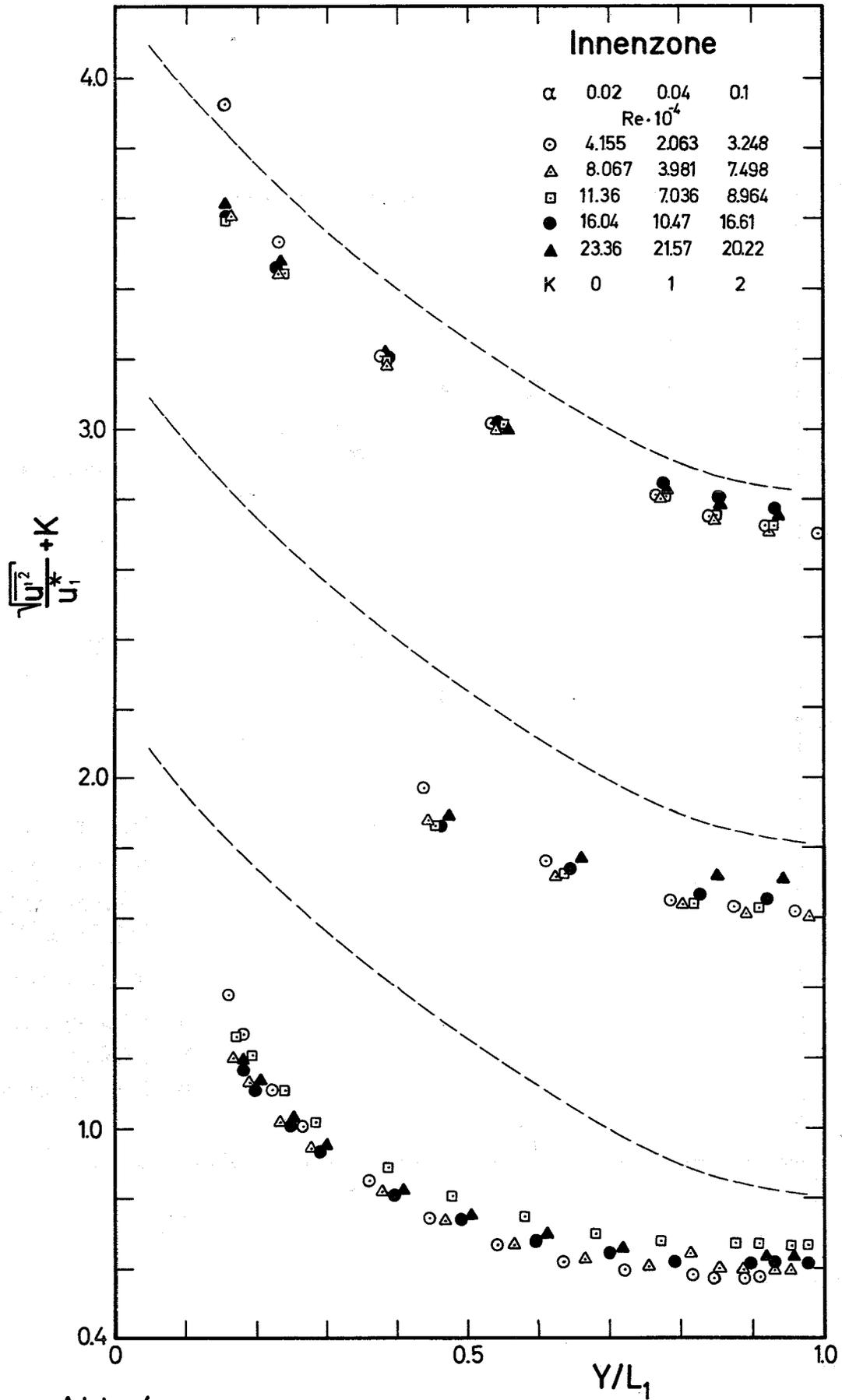


Abb. 4

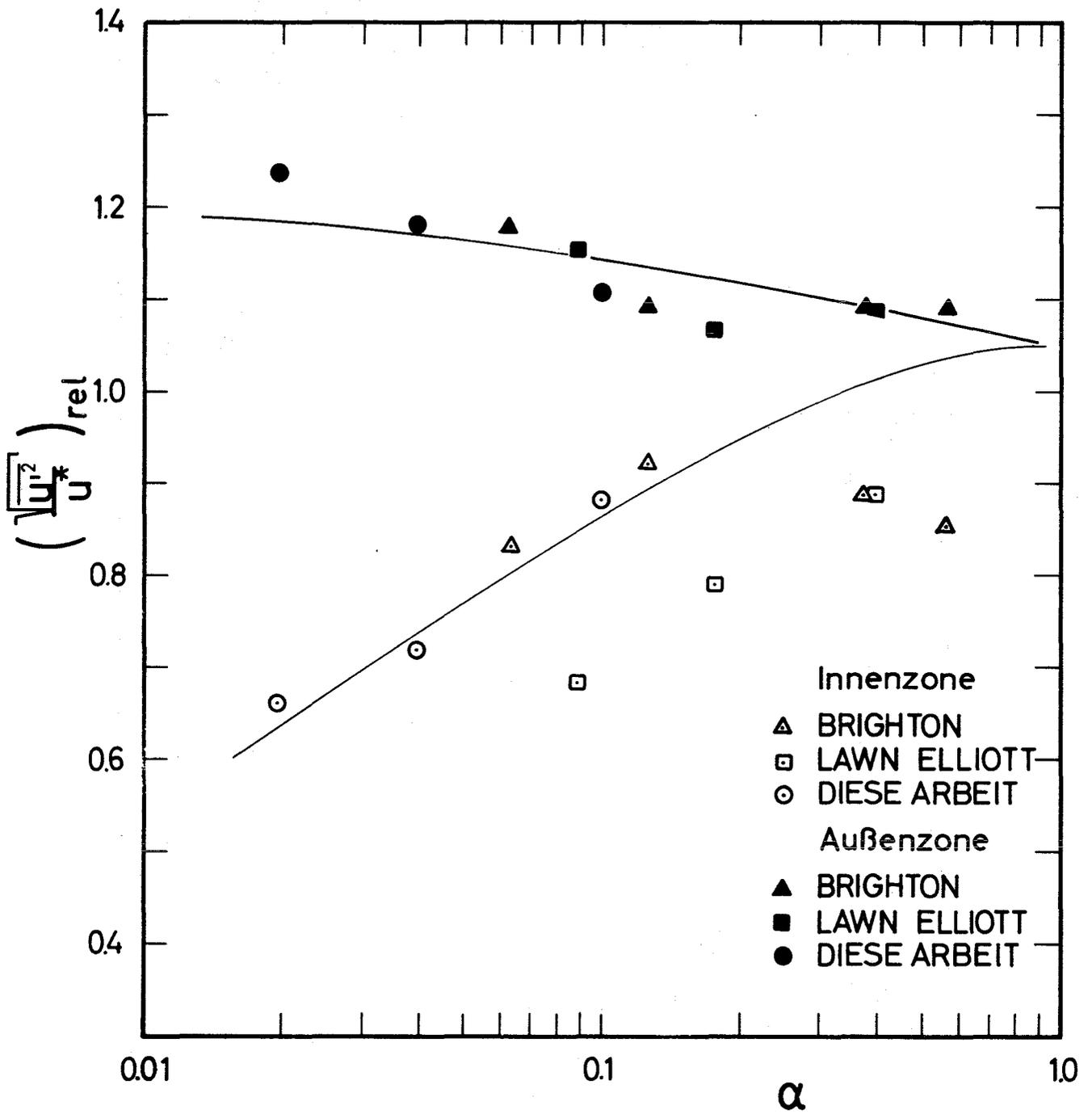


Abb.5

Damit nun eine Aussage über die Abhängigkeit der Turbulenzintensitäten vom Durchmesser Verhältnis getroffen werden kann, wurden die Meßergebnisse zweifach gemittelt. Zunächst wurden die Meßergebnisse für die verschiedenen Reynoldszahlen gemittelt und auf die Laufer'schen Meßwerte für Kreisrohre bezogen. Anschließend wurde nochmals ein Mittelwert über die Strömungszone gebildet, also jeweils für die Innen- und die Außenzone. Dabei wurde der Mittelwert aus 3 Werten, nämlich bei 20 %, 50 % und 80 % der Strömungszone ermittelt. In gleicher Weise wurde bei den Meßergebnissen von Brighton und Lawn verfahren, wobei diese Werte zusätzlich noch korrigiert wurden im Hinblick auf die Wandschubspannungsgeschwindigkeit. Für die Ermittlung der Wandschubspannung wurde dabei der Verlauf der Nullschubspannungsposition aufgrund der neuen Ergebnisse verwendet (s. KFK 1273/2). Das Ergebnis zeigt Abb. 5, es sind die relativen Werte für die axiale Turbulenzintensität über dem Durchmesser Verhältnis dargestellt. Für die Außenzone, das sind die vollen Punkte, ergibt sich eine sehr schwache Abhängigkeit zwischen Kreisrohr und Platte. In der Innenzone dagegen fällt die Turbulenzintensität zu kleineren Durchmesser Verhältnissen hin sehr stark ab.

Damit ist nachgewiesen, daß die Turbulenzintensitäten sowie die kinetische Energie der Turbulenz stark vom Radienverhältnis abhängen. Man kann daher erwarten, daß für Strömungskanäle in Stabbündeln ebenfalls stark unterschiedliche Turbulenzintensitäten in Abhängigkeit von der Geometrie vorliegen.

Literatur

- /1/ B. Kjellström, Transport processes in turbulent channel flow, Report AE-RL-1344 (1972)
- /2/ J.A. Brighton, The structure of fully developed turbulent flow in annuli, Ph.D.Thesis, Purdue University (1963)
- /3/ C.J. Lawn and C.J. Elliott, Fully developed turbulent flow through concentric annuli, C.E.G.B. Report RD/B/N 1878 (1971)
- /4/ B. Kjellström, On shear stress distribution for flow in smooth or partially rough annuli, Report AE-243 (1966)
- /5/ F. Durst, On turbulent flow through annular passages with smooth and rough cores, M.SC. Thesis, Imperial College, London (1968)
- /6/ J. Laufer, The structure of turbulence in fully developed pipe flow, NACA TN 1174 (1954)
- /7/ K. Rehme, Turbulente Strömung in konzentrischen Ringspalten KFK Bericht (in Vorbereitung)

Veröffentlichungen im Berichtszeitraum

- (1) K. Maubach and K. Rehme, Pressure drop for parallel flow through a roughened rod cluster, Nucl. Engng. Design 25, pp. 369-378 (1973)
- (2) J. Marek, K. Maubach and K. Rehme, Heat transfer and pressure drop performance of rod bundle arranged in square arrays, Int. J. Heat Mass Transfer 16, pp. 2215-2228 (1973)
- (3) H. Hoffmann, F. Hofmann, D. Markfort, K. Rehme, P. Voj, Thermal performance and hydraulic activities with respect to the fast breeder reactor development (survey), Conf. on Fast Reactor Power Stations, BNES, London (1974)

- (4) K. Rehme, Untersuchungen zur Strömungs- und Turbulenzverteilung in Ringspalten, Vortrag Seminar für Fragen der Strömungslehre und Strömungsmaschinen, Univ. Karlsruhe (1974)

Beiträge zu

128 ENTWURFSSTUDIEN FÜR GASGEKÜHLTE BRUTREAKTOREN

erscheinen voraussichtlich wieder im nächsten
PSB-Vierteljahresbericht

129 ENTWURFSSTUDIEN FÜR GROSSE NATRIUMBRÜTER1291 Forschungsarbeiten zur Reaktorkern-AuslegungUntersuchung der Austauschkoefizienten für Impuls und Enthalpie in turbulenter Kanalströmung^{G 1)}

(G. Grötzbach, G. Lörcher, U. Schumann, IRE)

Für die Berechnung des Impuls- und Wärmetransportes im Reaktorkern mit "Bündelprogrammen" ist die genaue Kenntnis der Austauschkoefizienten (eddy diffusivities) für Impuls und Enthalpie erforderlich. Hierbei interessiert außer dem Betrag der Austauschkoefizienten insbesondere ihre Richtungsabhängigkeit (Anisotropie) sowie das Verhältnis der Austauschkoefizienten für Impuls zu dem für Enthalpie, der sogenannten turbulenten Prandtl-Zahl Pr_t .

Will man das eddy-diffusivity-Konzept durch genauere, aber kompliziertere Turbulenzmodelle ersetzen, so benötigt man für zahlreiche weitere Turbulenz-Parameter empirische Angaben.

Zur Untersuchung der Austauschkoefizienten für Impuls und Enthalpie in einfachen glatten Kanälen (Platte, Ringspalt) wurde mit der Entwicklung eines Rechenprogramms (TURBIT-2) begonnen. TURBIT-2 ist die Weiterentwicklung von TURBIT-1, das mittels eines Differenzenverfahrens die direkte Simulation des turbulenten Impulstransportes bei hohen Reynoldszahlen für einen axial durchströmten unendlich langen konzentrischen Ringspalt- bzw. Plattenkanal in seinen instationären und dreidimensionalen Einzelheiten ermöglicht /1/. Hierbei werden für den Impulstransport in der turbulenten Feinstruktur, die infolge des endlichen Maschennetzes (bis zu $32 \times 32 \times 64 = 65536$ Maschen) nicht aufgelöst werden kann, Modelle verwendet, die im wesentlichen auf

1) Bisher noch nicht berichtet

der Annahme lokalisotroper Turbulenz und der Gültigkeit des Kolmogorov-Spektrums bei großen Wellenzahlen k beruhen:

$$E(k) = \alpha \varepsilon^{2/3} k^{-5/3} \quad (1)$$

$E(k)$ Spektrum der kinetischen Energie der Turbulenz

ε Dissipation

k Wellenzahl

$\alpha \approx 1,5$ Kolmogorov-Konstante

Die hieraus ableitbare Aussage ist vereinfacht wiedergebbar durch folgende Modellgleichung für die Reynolds-Spannung $\overline{u_i' u_j'}$ infolge der Feinstruktur:

$$\overline{u_i' u_j'} = -c h (\overline{E'})^{1/2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{1}{3} \overline{u_k' u_k'} \delta_{ij} \right) \quad (2)$$

Der Mittelungsstrich bezeichnet eine Mittelung über eine einzelne Differenzenetzmasche (keine zeitliche Mittelung!). Der Strich bezeichnet die Abweichung einer Größe von seinem jeweiligen Maschenmittelwert.

$c \approx 0,1$ α Feinstruktur-Konstante für Impuls

h charakteristische Maschenkantenlänge

u_i Geschwindigkeitskomponenten, $i = 1, 2, 3$

x_i Ortskoordinaten

$\overline{E'} = \frac{1}{2} \overline{u_i'^2}$ kinetische Energie der Feinstruktur

δ_{ij} Kronecker-Delta

Im Berichtszeitraum wurde das entsprechende Feinstrukturmodell für den Enthalpietransport abgeleitet:

$$\overline{u_j' T'} = -c_T h (\overline{E'})^{1/2} \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (3)$$

Für das Spektrum $E_T(k)$ der Temperaturschwankungen T' gilt im Bereich der Gültigkeit des Kolmogorov-Spektrums bei hohen Péclet-Zahlen /2/:

$$E_T(k) = \beta \varepsilon_T \varepsilon^{-1/3} k^{-5/3} \quad (4)$$

$\beta \approx 0,5$ Temperatur-Spektrums-Konstante

$$\epsilon_T = \left\langle \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x_j} \right)^2 \right\rangle$$

λ Wärmeleitfähigkeit

Hieraus folgt für c_T

$$c_T = \frac{2}{3} \frac{\alpha}{\beta} c \approx 2 c \quad (5)$$

Die turbulente Prandtl-Zahl der Feinstruktur liegt damit bei $Pr_t \approx 0,5$

Auch das Feinstrukturmodell des Enthalpietransportes ist also allein eine Funktion von Spektrumsparametern, die als universell angesehen werden können. TURBIT-2 wird auf diesem Feinstrukturmodell basieren.

Die Gültigkeit des Kolmogorov-Spektrums gemäß Gleichung (1) und die Existenz lokaler Isotropie soll experimentell überprüft werden.

Dazu wurde eine Meßeinrichtung erstellt, die es ermöglicht, in einem Rechteckkanal mit dem Seitenverhältnis 1:6 (\approx Plattenkanalgeometrie) solche Messungen durchzuführen. Es sind Messungen bei Reynoldszahlen bis zu $1,2 \cdot 10^5$ sowie bei Wandabständen bis zu $\frac{y}{h} = 0,95$ ($2h =$ Plattenabstand) möglich. Die Bestimmung der Reynoldszahl geschieht mit einer Blendenmessung. Der Kreislauf ist geschlossen, da bei der verwendeten Meßmethode es notwendig ist, Streuteilchen (z.B. TiO_2 -Pulver) zuzufügen.

Gemessen wird die Geschwindigkeit an einem Ort in Abhängigkeit von der Zeit. Dies geschieht mit der Laser-Doppler-Methode, da hiermit Messungen hoher örtlicher Auflösung ohne Störung der lokalen Strömung möglich sind. Es besteht ein direkter linearer Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit der mit der Strömung mitbewegten Streuteilchen und der durch Überlagerung zweier Streustrahlen entstehenden Frequenz bzw. der Ausgangsspannung des Frequenz zu Spannungswandlers. Die Ausgangsspannung entspricht somit zu jedem Zeitpunkt der Geschwindigkeit der Strömung, sie wird auf Band gespeichert und danach digitalisiert. Mit geeigneten Programmen werden dann das Spektrum und weitere zur Analyse des Spektrums notwendige Größen berechnet (Abb. 1).

Bisher wurden Messungen bei einer Re-Zahl von $8 \cdot 10^4$ durchgeführt. Der aus den Messungen berechnete Turbulenzgrad in Kanalmitte, bezogen auf den zeitlichen Mittelwert der Geschwindigkeit in Kanalmitte, wurde mit der von

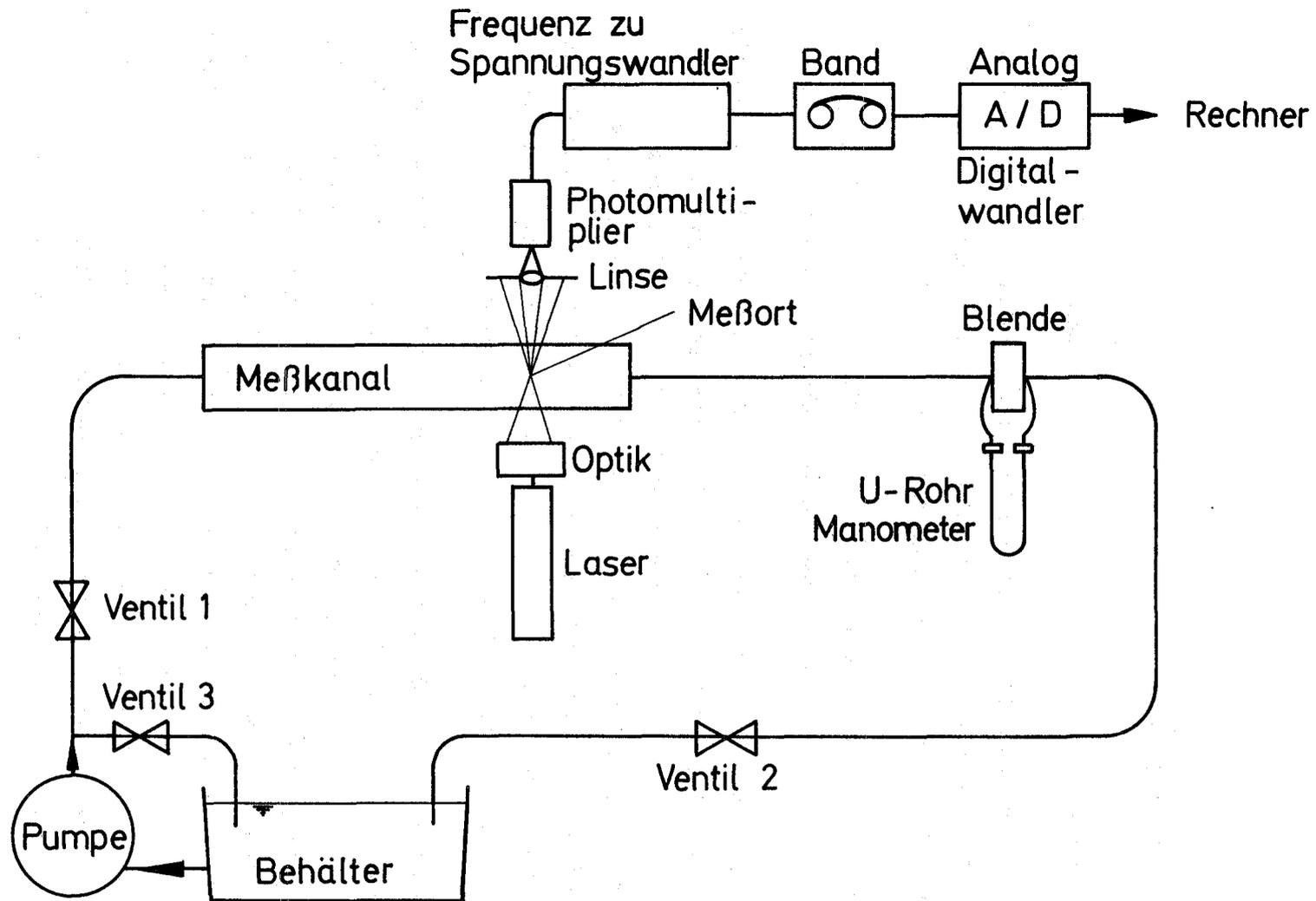


Abb. 1 Prinzip-Skizze des Meßaufbaus

Rehme /3/ angegebenen Abhängigkeit von Re_{\max} (Reynoldszahl gebildet mit dem Mittelwert in Kanalmitte) verglichen. Die Übereinstimmung mit diesem Wert, mit Messungen mit der Blende sowie mit bekannten Geschwindigkeitsprofilen ist zufriedenstellend.

Die gemessenen Spektren haben bei hohen Wellenzahlen den erwarteten Verlauf mit dem Exponenten $-\frac{5}{3}$. Die Abweichung bei niedrigen Wellenzahlen läßt sich durch eine Korrektur beschreiben, deren quantitative Festlegung durch weitere Messungen noch genauer ermittelt werden muß.

Literatur

/1/ U. Schumann:

Ein Verfahren zur direkten numerischen Simulation turbulenter Strömungen in Platten- und Ringspaltkanälen und über seine Anwendung zur Untersuchung von Turbulenzmodellen.

Dissertation TH Karlsruhe, KFK 1854 (Okt. 1973)

/2/ H. Tennekes, J.L. Lumley:

A First Course in Turbulence.

The MIT Press (1972)

/3/ K. Rehme:

Untersuchungen der Turbulenz- und Schubspannungsverteilung an einem Kreisrohr mit einem Hitzdraht-Anemometer.

KFK 1642, (Juli 1972)

