

KERNFORSCHUNGSZENTRUM

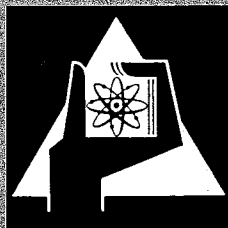
KARLSRUHE

Oktober 1970

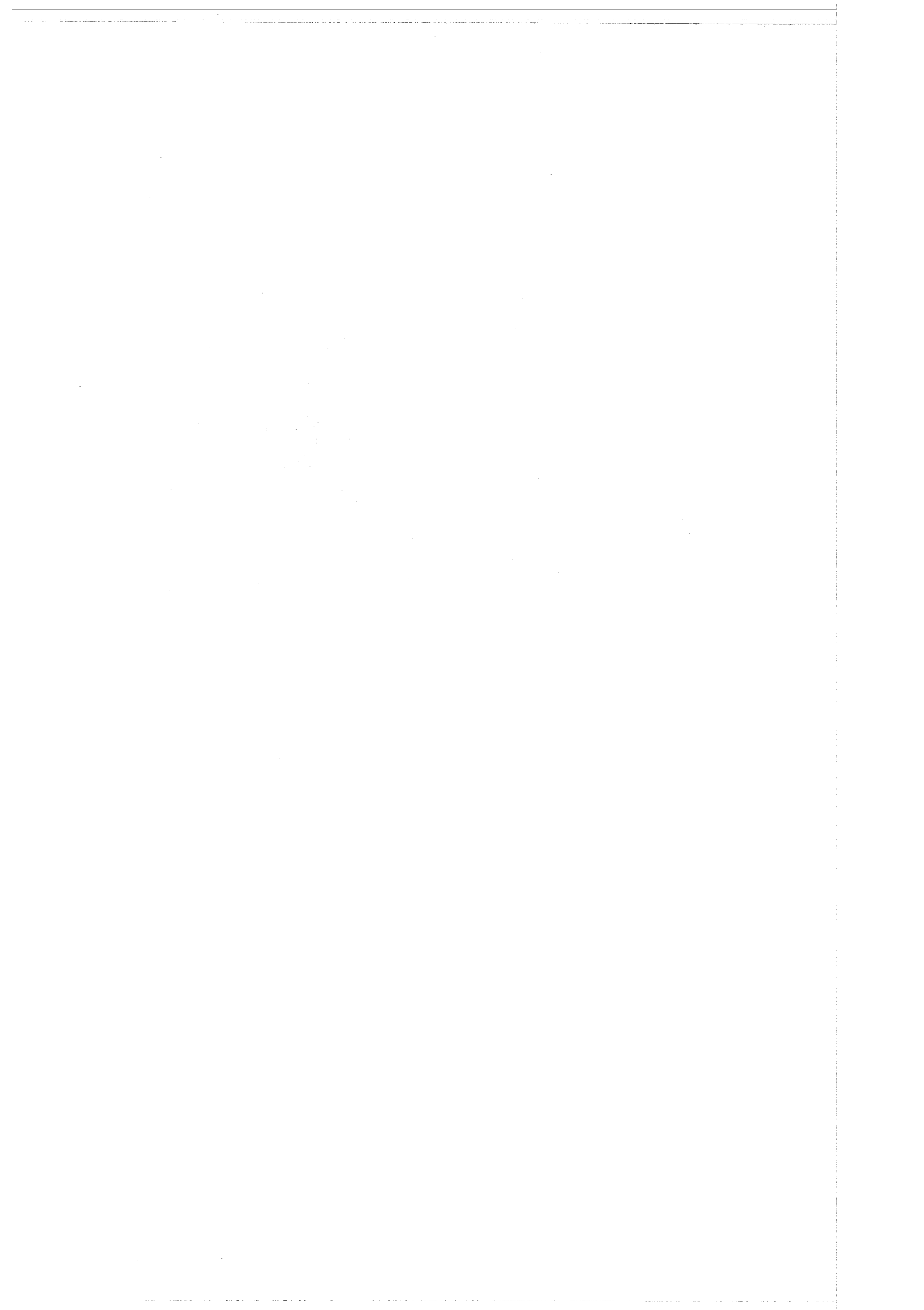
KFK 1270/2
EUR 4164 d

Projekt Schneller Brüter

2. Vierteljahresbericht 1970



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Oktober 1970

KFK 1270/2

EUR 4164 d

Projekt Schneller Brüter

2. Vierteljahresbericht 1970

Gesellschaft für Kernforschung mbH, Karlsruhe

Der vorliegende 2. Vierteljahresbericht 1970 beschreibt Arbeiten am Projekt Schneller Brüter, die von Instituten der GfK in Karlsruhe durchgeführt worden sind. Darüber hinaus enthält der Bericht Beiträge von Industriefirmen und von den deutschen, belgischen und niederländischen Kernforschungszentren, soweit sie am Koordinierten Karbidprogramm im Rahmen des Basisprogramms Schneller Brüter mitwirken.

Dieser Bericht ist zusammengestellt von R. Hüper.

Inhaltsübersicht ⁺⁾

- 111. Brennstab-Auslegung
- 112. Herstellung und Bestrahlung von Brennstäben
- 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 hydrodynamische Versuche in Gas und Dampf
- 128. Reaktorentwurfsarbeiten
- 130. Schneller Hochfluß-Testreaktor FR3

⁺⁾ Teilprojekte mit den zugehörigen PSB-Basisprogramm-Nummern.
Die Seiten sind innerhalb jedes Teilprojektes durchnummeriert.

111. Brennstab-Auslegung

1. Das Programm Saturn 1 (H.Elbel, H.Kämpf, IMF, F. Depisch, AEG)

Die Konzeption der Saturn-1 - Version wurde abgeschlossen und ihre logische Struktur detailliert erarbeitet. Die Programmierung einiger abgeschlossener Modelle wurde in Angriff genommen.

Saturn 1 erfaßt das mechanische und thermische Verhalten einer Scheibe eines Brennstabes für Na-Reaktoren in den Anfahrphasen, den Abfahrphasen und den Phasen konstanter Stabileistung.

Im folgenden werden die wichtigsten integrierten Modelle und Möglichkeiten skizziert. Die Verzweigungsmöglichkeiten des Programmes bzw. die möglichen Wege sind im Hinblick darauf gegeben, ob

- a) die Stabileistung zunimmt, abnimmt oder konstant bleibt,
- b) der Spalt Brennstoff-Hülle offen oder geschlossen ist,
- c) Kontaktdruck vorhanden ist oder nicht,
- d) Risse im Brennstoff vorhanden sind oder nicht.

Selbstverständlich sind nicht alle Kombinationen möglich. So kann z.B. Kontaktdruck nur auftreten, wenn der Spalt zwischen Hülle und Brennstoff geschlossen ist und im Sinne unserer Annahme keine Risse vorhanden sind. Eine thermische Rißbedingung definiert das Eintreten des Rißzustandes, der voraussetzungsgemäß durch sehr viele radiale Risse im Brennstoff charakterisiert ist. Bei Vorliegen eines Spaltes dehnen sich daher diese Keile durch thermische Ausdehnung oder durch Schwellen radial frei aus. Nach Schließen des Spaltes erfolgt die Ausdehnung dieser Keile ohne Kontaktdruck so lange, bis die zentralen Riß- und Kanalvolumina spannungsfrei gefüllt sind. Dann schlägt der Zustand, der durch geschlossenen Spalt, nicht vorhandenen Kontaktdruck und Vorliegen von Rissen gegeben ist, um in den rißfreien Zustand mit geschlossenem Spalt und Kontaktdruck. Durch die thermische Rißbedingung ist z.B. gewährleistet, daß im oxidischen Brennstoff beim Anfahren sofort Risse auftreten, während beim Abfahren von relativ hohen Temperaturen zunächst keine Risse auftreten, bis nach Unterschreiten einer mittleren Temperatur bei weiterem Abfahren die Rißbildung einsetzt.

Folgende mechanische Möglichkeiten können auftreten: Bei fehlendem Kontaktdruck ist der Spannungs- und Verformungszustand von Hülle und ungerissenem Brennstoff durch das gleichzeitige Auftreten von thermischer Ausdehnung, Schwellen und Kriechen unter Gasdruck gegeben. Gerissener Brennstoff wird als spannungsfrei vorausgesetzt und sein Verhalten durch freie lineare Volumenänderung erfaßt. Bei Auftreten von Kontaktdruck wird in jedem Falle für Hülle und Brennstoff der Spannungs- und Verformungszustand über die radiale und axiale mechanische Wechselwirkung bestimmt.

Folgende Phänomene werden in die Berechnung der zeitabhängigen Temperaturverteilung eingearbeitet:

- a) Die Kinetik der Porenwanderung mit Zentralkanalbildung und Verdichtung;
- b) Wärmedurchgang durch den offenen Spalt Brennstoff-Hülle;
- c) Wärmedurchgang durch den geschlossenen Spalt, insbesondere unter Berücksichtigung des Kontaktdruckes;
- d) Radiale Leistungsverteilung.

Die wesentliche Grundforderung einer Brennstab-Auslegungstheorie, die quantitative Verknüpfung der Materialphänomene im Brennstoff und Hülle, wird mit der Saturn 1-Version in einer ersten Näherung erreicht.

2. Modell für die mechanische Auslegung von Hüllrohren (F.Depisch⁺), AEG)

Aufbauend auf vereinfachten Modellvorstellungen wurde ein Rechenprogramm für die mechanische Auslegung von Brennstabhüllrohren erstellt.

Eingabedaten für das Programm sind lineare Stableistung, Hüllenaußentemperatur, Geometrie und Materialeigenschaften des Hüllrohres (Kriechdaten, Wärmeleitfähigkeit, E-Modul, Poissonzahl, Streckgrenze) sowie die Dauer des Vollast- bzw. Teillastbetriebes.

Das Programm berechnet den örtlichen Spannungsverlauf unter Berücksichtigung des Relaxierens infolge Kriechens oder plastischer Verformung und

⁺) Seit 1. Mai 1970 im Rahmen des koordinierten Karbidprogramms zum IMF delegiert.

untersucht das Rohr auf Stufendehnung beim Zyklieren. Verformungen infolge des differentiellen Schwellens im Hüllrohr können in Abhängigkeit von der Dosis berechnet werden.

3. Entwicklung einer Spezifikation für den Karbidbrüterstab (F.Edelmann, AEG)

Die Vorarbeiten zur Erstellung der Spezifikationen für den Brennstoff, das Natrium und das Füllgas wurden abgeschlossen.

Die Literaturlauswertung über die physikalischen Eigenschaften und das Bestrahlungsverhalten karbidischer Brennstoffe wurde in einen Bericht über Auslegungsdaten dieser Brennstoffe eingearbeitet. Da die gemessenen Daten, insbesondere für das Bestrahlungsverhalten, nur wenig gesichert sind, wurden ergänzende Auslegungsannahmen getroffen, die zum Teil auf Analogieüberlegungen zu Oxid beruhen.

Aus den physikalischen Eigenschaften, dem Bestrahlungsverhalten, den Herstellungsmöglichkeiten und den Konzeptüberlegungen wurde eine Spezifikation für (U, Pu)C - Mischkarbid für das Bestrahlungsvorhaben DFR 330 erarbeitet. Die Einzelheiten der Spezifikation wurden bereits weitgehend mit dem Hersteller abgesprochen, so daß keine grundlegende Änderungen in der Brennstoffspezifikation mehr zu erwarten sind.

Eine vorläufige Spezifikation für das Natrium der Bindungsschicht wurde erstellt. Dabei mußten Kompromisse geschlossen werden zwischen den Herstellungsmöglichkeiten des Natriums, den derzeit verfügbaren Analysenverfahren, der Fertigungstechnik für Karbidstäbe und den Forderungen, die sich aus dem Verhalten der Bindungsschicht ergeben. Es ist zu erwarten, daß insbesondere bezüglich der Fertigungstechnik und der verfügbaren Analysetechniken noch weitere Zugeständnisse gemacht werden müssen.

- 112. Herstellung und Bestrahlung von Brennstäben
- 1121. Probenherstellung, Laborversuche und Parametertests (Oxid.Brennst.)
- 1121.0 Herstellung von Brennstoffen und Brennstabprüflingen
- 1121.01 Herstellung im Labormaßstab

1. Einfluß der Sinterzeit auf die Sinterdichte von UO_2 -Tabletten

(E. Günther, J. Heger, IMF)

UO_2 -Pulver wurde granuliert, und mittels einer Siebanalyse wurden sechs verschiedene Teilchenfraktionen isoliert; dabei konnte festgestellt werden, daß das Granulat einen Anteil von 86 % der Teilchengröße $< 50 \mu$ besaß.

Aus dem Granulatgemisch wurden Tabletten mit verschiedener Dichte und aus den einzelnen Granulatfraktionen Preßlinge gleicher Dichte hergestellt und vermessen. Die Grünlinge wurden entwachst und nach einem genau definierten Programm bei $1500^\circ C$ im Ar/H_2 (5 %) - Strom gesintert:

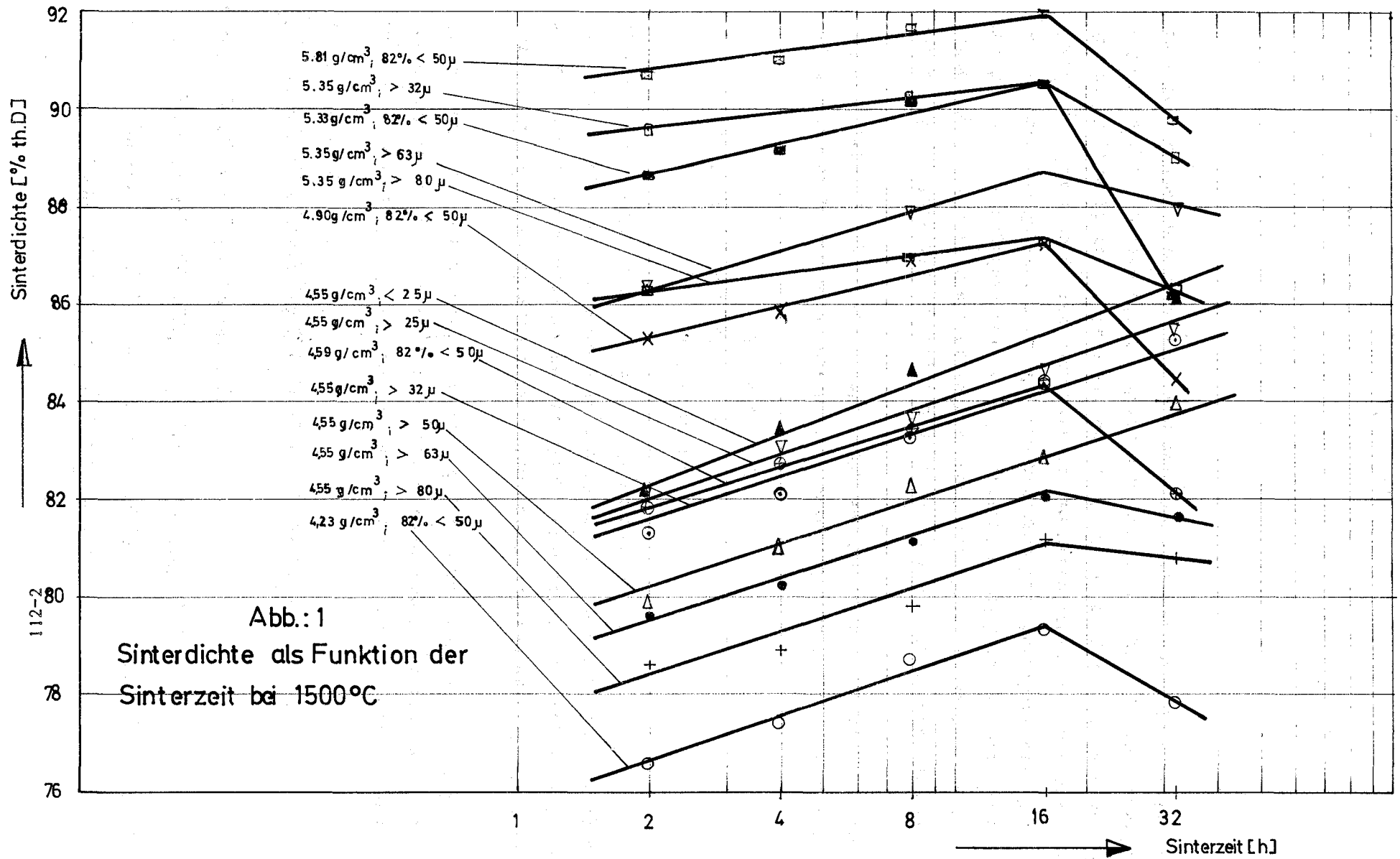
4 h aufheizen

2, 4, 8, 16 und 32 h sintern

2 h abkühlen.

Aus den geometrischen Daten der Pellets wurden die Mittelwerte errechnet und die Sinterdichte in Abhängigkeit von der Sinterzeit aufgetragen (Abb. 1).

Die grafische Darstellung zeigt, daß mit abnehmender Teilchengröße und zunehmender Sinterzeit die Sinterdichte ansteigt. Dabei erreichen die Pellets mit hohen Teilchengrößen bei 16 h Sinterzeit den Höchstwert ihrer Dichte, während bei den Tabletten aus Pulvern geringer Teilchengrößen bei 32 h Sinterzeit immer noch eine Dichtezunahme zu verzeichnen ist. Die aus dem Gemisch hergestellten Pellets mit nur 14 % Granulatanteil der Partikelgröße $> 50 \mu$ zeigen, ähnlich wie die Pellets hoher Teilchengröße, einen Anstieg zu einer maximalen Dichte, die dann bei Sinterzeiten über 16 h abnimmt.



2. Reproduzierbarkeit der Sinterdichte von UO_2/PuO_2 -Tabletten

(Th.Dippel, H.Nagel, M.Wittmann, IMF)

Die Reproduzierbarkeit der Sinterdichte bei der Herstellung größerer Tablettenmengen ist für die Festlegung und Einhaltung von Dichtetoleranzen von Bedeutung. Zur Prüfung, welche Möglichkeiten unser Herstellungsverfahren liefert, wurden 278 Tabletten gepreßt, in Partien zu ca. 40 Stück entwacht und je ca. 40 Stück auf der 1. und 2. Platte des Chargiergestelles des Sinterofens gesintert. Die Mittelwerte der Dichten sind in der Tabelle eingetragen. Die Auswertung ergibt, daß mit Ausnahme des Sinterergebnisses der 1. Platte in Spalte 6 die Streuung der mittleren Sinterdichten auf der Streuung der Einzelergebnisse beruht. Das Sinterergebnis der Spalte 6 unterliegt einem weiteren Einfluß, der in den übrigen Ergebnissen nicht wirksam ist. Möglicherweise waren hier zufällig Tabletten mit niedriger Grünlingsdichte zusammengekommen. Im Hinblick auf die üblichen Toleranzen von $\pm 2\%$ th.D. sind jedoch auch diese Tabletten durchaus verwertbar.

Die Reproduzierbarkeit der Sinterdichten ist somit hinreichend gesichert. Die Standardabweichungen ("Fehler des Verfahrens") über alle Tabletten beträgt $\pm 0,383\%$ th.D. Dieser Wert ist außerordentlich günstig.

Tabelle 1

Partie	Spalte 1 2. Platte	Spalte 2 1. Platte	Spalte 3 2. Platte	Spalte 4 1. Platte	Spalte 5 2. Platte	Spalte 6 1. Platte	Spalte 7 2. Platte
Sintertemp. +)	1540 °C	1540 °C	1540 °C	1540 °C	1540 °C	1540 °C	1540 °C
Anzahl der Tabletten	40	43	37	35	42	35	46
Mittelwert % th.D.	95,57	95,43	95,55	95,57	95,53	95,14	95,46
Standardabweichung % th.D.	0,351	0,367	0,294	0,609	0,316	0,457	0,231

+) mit Pyrometer gemessen bzw. eingestellt

Gesamtmittelwert: 95,464 % th.D.

Anzahl der Tabletten: 278

Standardabweichung
über alle Tabletten: $s = 0,383\%$ th.D.

3. Kurzbrennstäbe mit UO_2 - PuO_2 -Brennstoff kleinen Durchmessers zu Vorversuchen für das Brennstabkonzept des Schnellen Testreaktors

(Th.Dippel, H. Nagel, M. Wittmann, IMF)

Für Vorversuche zum Brennstabkonzept des Schnellen Testreaktors waren 18 Kurzbrennstäbe einheitlicher Brennstoffdichte herzustellen. Wie aus den Spezifikationen hervorgeht (vergl. Tabelle 2), sind die Materialwerte in üblicher Weise toleriert. Außer dem extrem kleinen Brennstoffdurchmesser, der extrem geringen Höhe und dem hohen PuO_2 -Anteil weisen sie keine Sonderheiten auf. Die Brennstofftabletten wurden durch Pressen und Sintern hergestellt und auf Durchmesser geschliffen. Die mit dem Schleifen sehr kleiner Durchmesser verbundenen Schwierigkeiten konnten durch Umbau des Auflagelineals der Schleifmaschine überwunden werden. Als typisches Beispiel für die Materialwerte der Tabletten sind in Tabelle 3 die Werte des Kurzbrennstabes 5b-7 zusammengestellt.

Tabelle 2: Auslegung und Spezifikation

Außenmaß:	Gesamtlänge (mm) Außendurchmesser (mm)	172,0 4,7
Einteilung der Stablänge:	Oberes Endstück (mm) Spaltgasraum (mm) Führungsstück (mm) Brennstoffsäule (mm)	15,5 45,0 7,0 80,0 ± 1,0
Hülle:	Material Innendurchmesser (mm) Wandstärke (mm)	Edelstahl 1,4988 4,1 ± 0,012 0,3
Brennstoff:	Material PuO ₂ -Anteil Tablettendichte (% th.D.) Tablettendurchmesser (mm) Tablettenhöhe (mm) Schmierdichte (% th.D.)	UO ₂ /PuO ₂ 35 % 86,2 ± 2,0 3,95 ± 0,015 5,00 ± 0,5 80,2
Gasfüllung:		1 atm Helium
Oberflächenkontamination:	Wischtest oberflächlich fixiert	unter Nachweisgrenze < 22 α-Zerf./cm ² · min

Tabelle 3: Tablettensäule für Kurzbrennstab 5b-7

Nr.	Gewicht	Höhe	Durchmesser	% th.D.
1	0,5860	4,980	3,947	86,37
2	0,5926	5,028	3,954	86,19
3	0,5852	5,002	3,940	86,18
4	0,5903	5,033	3,941	86,35
5	0,5866	5,002	3,946	86,12
6	0,5880	5,014	3,944	86,27
7	0,5937	5,033	3,954	86,27
8	0,5901	5,026	3,947	86,18
9	0,5923	5,026	3,950	86,37
10	0,5932	5,042	3,953	86,09
11	0,5934	5,039	3,954	86,13
12	0,5884	4,999	3,948	86,35
13	0,5900	5,014	3,954	86,06
14	0,5837	4,983	3,941	86,24
15	0,5863	5,007	3,941	86,21
16	0,5887	5,012	3,947	86,21
Gesamtgew. 9,4284 g				
Gesamthöhe		80,240 mm		
mittlerer Durchmesser			3,947 mm	
mittlere Dichte				86,22 % th.D.

1121.02 Herstellung im IndustrieverfahrenParameteranalyse der Herstellungskosten von Brennstäben

(K.Kummerer, IMF)

Eine neue Kostenstudie für die industrielle Herstellung von Brennstäben mit UO_2 - PuO_2 -Brennstoff wurde an die Industrie (Fa. Alkem) in Auftrag gegeben und vor kurzem fertiggestellt. Die dabei ermittelten Zahlenwerte lassen sich zu einer neuen numerischen Kostenformel zusammenfassen wie folgt:

$$F = \left(\frac{100}{C_F}\right)^{0,25} \cdot \left\{ 325 + \frac{1650}{d} \left(1 - \frac{L_F}{1035}\right) + \frac{7900}{d^2} \right\}$$

dabei bedeutet:

F Brennstabkosten (einschl. Assemblierung) in DM/kg

C_F Fabrikationskapazität in t Oxid/Jahr

d Brennstoffdurchmesser in mm

L_F Brennstofflänge in mm

Im Vergleich zu einer früher durchgeführten Parameteranalyse (KFK 576 und KFK 700/Beitrag XIII) können Kostensenkungen festgestellt werden. Andererseits ist die Abhängigkeit von der Fabrikationskapazität weniger ausgeprägt als bei den früheren Untersuchungen.

1121.1 Laborexperimente zur Brennstabauslegung1121.12 Untersuchung thermodynamischer EigenschaftenEntmischung von Uran und Plutonium in oxidischen Kernbrennstoffen unter Einwirkung eines Temperaturgradienten(M. Bober, C. Sari ⁺), G. Schumacher, INR)

Die letzten Arbeiten (1) ergaben, daß die mehrfach gefundene Anreicherung von Plutonium im Zentrum von Brennelementen mit oxidischem Kernbrennstoff auf eine Entmischung durch Thermodiffusion und Prozesse mit bevorzugter Verdampfung von Uranoxiden zurückzuführen ist. Mit Hilfe der Ergebnisse dieser Arbeiten erhält man für ein Brennelement mit 15 Mol % PuO_2 und 85 Mol % UO_2 bei einer Zentraltemperatur von 2300°C nach einer Standzeit von 10 Wochen aufgrund von Thermodiffusion im Zentrum eine Anreicherung auf 24,5 Mol % PuO_2 . Aus dieser Entmischung errechnet sich eine Erhöhung der Zentraltemperatur um 150°C .

Das erste Verdampfungsexperiment wurde an einer zylindrischen stöchiometrischen Probe aus $(\text{U}_{0,85}\text{Pu}_{0,15})\text{O}_2$ durchgeführt. Die Probe hatte einen Durchmesser von 6 mm und war mit einer axialen Bohrung von 2,2 mm Durchmesser und 3 mm Tiefe versehen. Sie wurde in einer dicht abgeschlossenen Wolfram-Kapsel 1 Stunde lang einem longitudinalen Temperaturgradienten von 2000/cm ausgesetzt. Die Temperatur an der heißeren, angebohrten Stirnfläche betrug 2400°C . Während des Experimentes verdampfte von der heißen Stirnfläche Material und kondensierte in der Bohrung, wobei aus der Gasphase auch Wolfram abgeschieden wurde, wie das Strukturbild (Abb. 2a) zeigt. Es fällt auf, daß das kondensierte Material über die Stirnfläche der Probe hinausragt. Das ist auf seine höhere Dichte und die faserigen Wolfram-Einlagerungen (Abb. 3) zurückzuführen, die dem Material eine bessere Wärmeleitfähigkeit verleihen. Der Verlauf der errechneten Isothermen in der Probe (Abb. 2b) zeigt, daß sich im Experiment über die Dampfphase die am heißen Probenende gefundene Materialverteilung einstellen muß.

⁺) Institut für Transurane, Euratom Karlsruhe

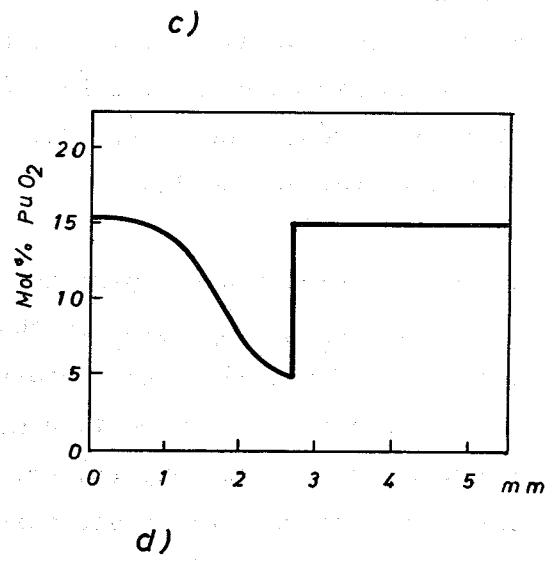
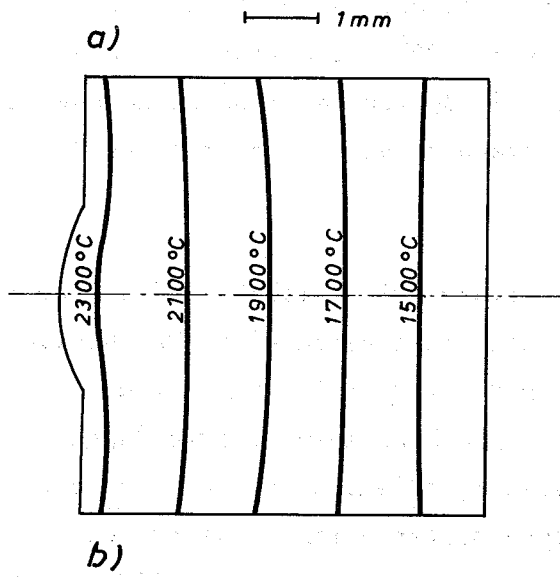
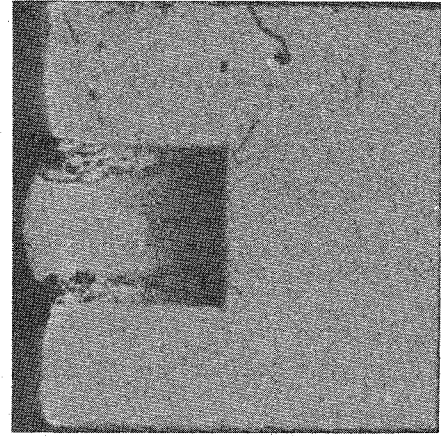
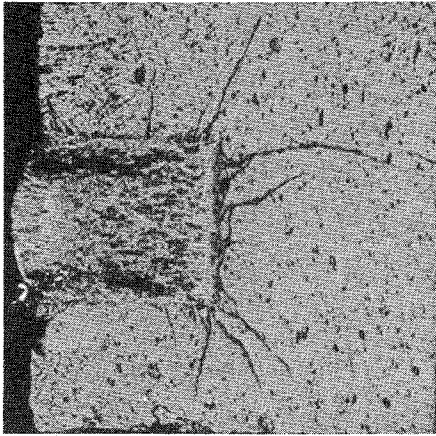


Abb. 2: Verdampfungsexperiment: a) Strukturbild der Probe,
 b) errechnete Isothermen,
 c) Autoradiografie,
 d) axiales Konzentrationsprofil des Plutoniums

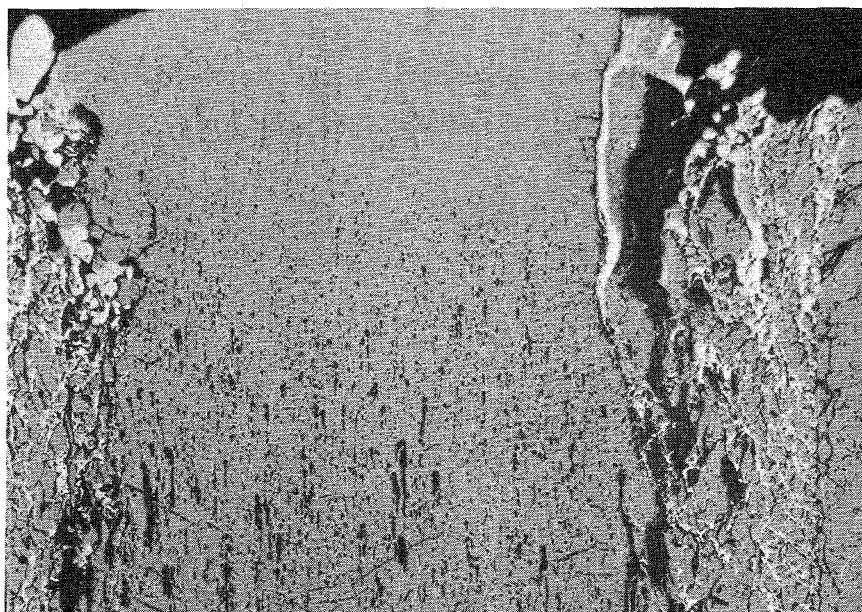
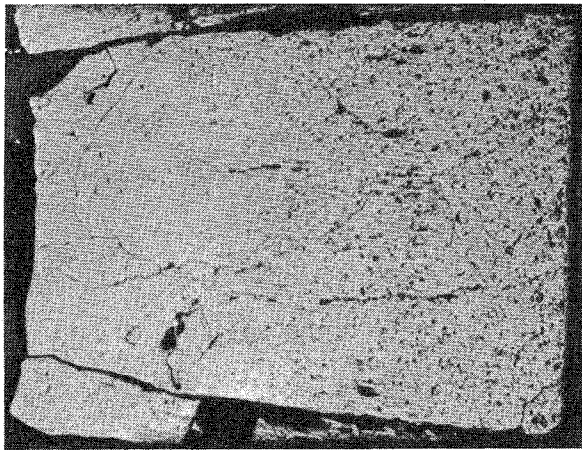
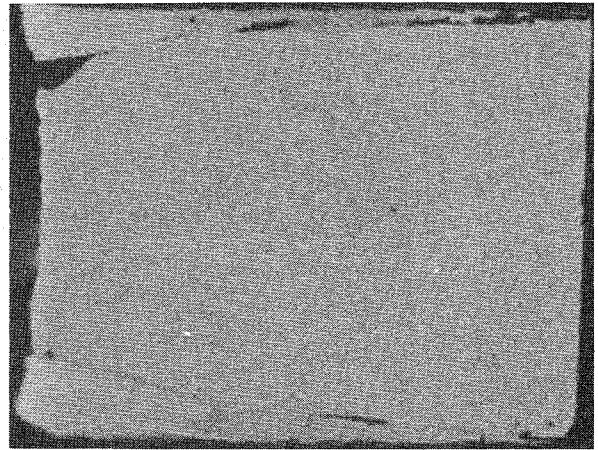


Abb. 3: Detail von Abb. 2a

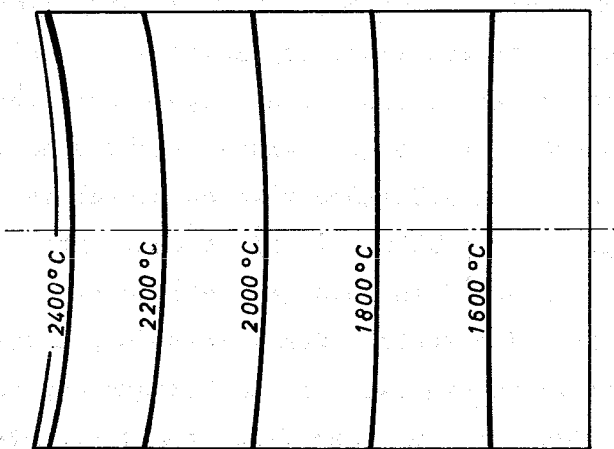
Der Konzentrationsverlauf des Plutoniums im kondensierten Material wurde autoradiografisch und durch Messung der α -Aktivität entlang der Probenachse an der Oberfläche des metallografischen Schliffes untersucht. Die Autoradiografie (Abb. 2c) und auch die Konzentrationskurve (Abb. 2d) zeigen, daß auf dem Boden der Bohrung die Pu-Konzentration sehr klein ist und zum Hochtemperaturrende hin bis auf die Ausgangskonzentration ansteigt. Daraus ergibt sich für den Verdampfungsprozeß, daß der Dampf über dem stöchiometrischen Mischoxid zunächst nur einen geringen Anteil Plutonium enthält. Mit wachsender Verdampfungszeit nimmt der Plutoniumanteil im Dampf zu, bis schließlich die Ausgangskonzentration und damit der stationäre Zustand der Verdampfung erreicht ist. Das entspricht dem Modell des Entmischungsvorgangs durch Verdampfung und Kondensation im Inneren von Hohlräumen (2), die in einem Temperaturgradienten zur höheren Temperatur wandern.

Die Thermodiffusionsexperimente werden an zylindrischen Proben aus $(U_{0,9982} Pu_{0,0018}^{238})O_2$ durchgeführt. Dieses Mischoxid stellt praktisch eine verdünnte Lösung von $Pu^{238}O_2$ in UO_2 dar und ist zur Bestimmung der Überführungswärme der Pu-Ionen geeignet. Im ersten Experiment wurde eine stöchiometrische

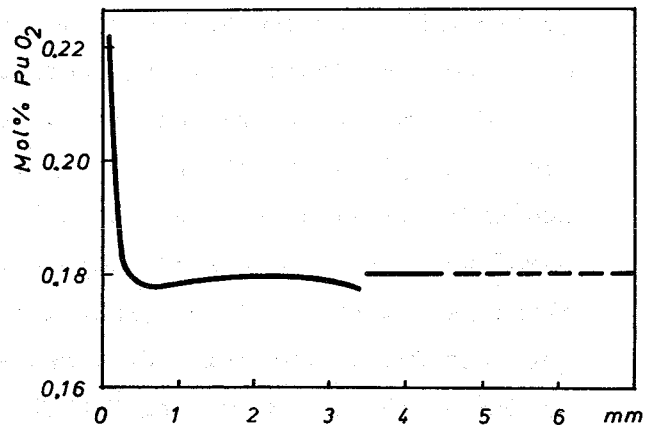
Probe eingesetzt und ebenfalls in einer abgeschlossenen Wolfram-Kapsel 120 Stunden einem longitudinalen Temperaturgradienten von $1500^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ ausgesetzt. Die Temperatur an der heißen Stirnfläche der Probe betrug dabei 2440°C , an der kälteren 1350°C .

a) |-----| 1 mm

c)



b)



d)

Abb. 4: Thermodiffusionsexperiment: a) Strukturbild der Probe, b) errechnete Isothermen, c) Autoradiografie, d) axiales Konzentrationsprofil des Plutoniums

Das Strukturbild der in der oberen Hälfte stark verdichteten Probe ist in Abb. 4a wiedergegeben. Abb. 4b zeigt die zugehörigen errechneten Isothermen. Den Konzentrationsverlauf des Plutoniums in der Probe erkennt man aus den Abbildungen 4c und 4d, welche die Autoradiografie und das Ergebnis der α -Detektion entlang der Probenachse auf der Oberfläche des metallografischen Schliffs darstellen. Die Konzentrationskurve in Abb. 4d zeigt, daß während der Glühung der Probe im Temperaturgradienten eine Verschiebung von Plutonium zum Hochtemperaturende stattgefunden hat. Dabei bildete sich unmittelbar vor dem steilen Konzentrationsanstieg am Probenende ein Konzentrationsminimum heraus, das durch Thermodiffusionstransport von Plutonium entstanden ist. Die Konzentrationsabsenkung bei 1900°C ist auf den Verdampfungs-Kondensations-Transport von Plutonium in wandernden Hohlräumen zurückzuführen. Das nächste Experiment wird mit einer unterstöchiometrischen Probe durchgeführt, um den Verdampfungs-Kondensationstransport von Plutonium zu unterbinden und dann die Überführungswärme der Plutonium-Ionen zu berechnen.

Veröffentlichungen zu 1121.1:

- (1) M. Bober, C. Sari, G. Schumacher
Trans. ANS 12,2 p. 603
Veröffentlichung in J.Nucl.Mat. vorbereitet
- (2) G. Schumacher
Externer Bericht INR-4/70, 27. Juli 1970
- (3) W. Dänner
Bestimmung der betriebsmäßigen Wärmeleitfähigkeit von keramischem Kernbrennstoff und der Wärmedurchgangszahl des Gasspaltes zwischen Brennstoff und Hüllrohr nach dem Balanced Oscillator Verfahren
KFK-Bericht Nr. 1125
- (4) W. Dänner
Ergebnisse der Fehleranalyse für in-pile Wärmeleitfähigkeitsbestimmung nach dem Balanced Oscillator Verfahren
KFK-Bericht Nr. 1140

1121.2 Bestrahlungsversuche, Einzelparameter-tests

1121.22 Kriechen von UO₂ unter Bestrahlung

(D.Brucklacher, IMF)

Über die FR2-Kriechversuche an Wechselstapel-Proben aus ringförmigen UO₂- und Molybdän (TZM)-Tabletten wurde in einer kurzen Veröffentlichung berichtet (1). Die folgenden Ausführungen sind ein Auszug aus dieser Veröffentlichung.

Die Kriechversuche wurden unter folgenden Bestrahlungsbedingungen durchgeführt:

Probenmaterial:	UO ₂ , relative Dichte 95 ± 1% TD
axiale Druckspannung:	0 - 3 kp/mm ²
Uran-Spaltungsrate:	(5 ± 1) · 10 ⁻⁹ /s
Leistungsdichte im UO ₂ :	370 W/gU ± 20%
Probenoberflächentemperatur:	250 - 410°C
max. Proben-Temperatur:	ca. 400 - 600°C
Bestrahlungsdauer:	1000 - 1500 h

Die bisher vorliegenden Ergebnisse sind in **Abb. 5** dargestellt. Die Längenänderungsgeschwindigkeit $\delta l/t$ wurde in Abhängigkeit von der axialen Druckspannung σ aufgetragen. Die positiven $\delta l/t$ -Werte bei niedrigen σ -Werten sind auf die Spaltproduktschwellung des UO₂ zurückzuführen. Jeder Messpunkt ergab sich als Mittelwert von mehreren Einzelwerten, die durch Auswertung verschiedener Abschnitte einer Messkurve von je einigen 100 h Versuchsdauer erhalten wurden. Die Streuung dieser Einzelwerte entsprach einem möglichen Fehler des Mittelwertes von $\pm 1,5 \cdot 10^{-6}$ /h. Sie stimmt demnach mit der Messgenauigkeit des Verlagerungsaufnehmers ($\pm 3 \mu\text{m}$) überein, wenn die einzelnen Auswertungsabschnitte eine Versuchsdauer von je 200 h erfassen (UO₂-Probenlänge 10 mm).

Jeder Messpunkt ist von einem schraffierten Ungenauigkeitsbereich umgeben. Die Breite dieses Bereiches in σ -Richtung ist im wesentlichen durch die Unsicherheit des in der Druckkapsel eingestellten Helium-Druckes bedingt. Als Parameter ist die Probenoberflächentemperatur angegeben; die maximale Brennstofftemperatur liegt, wie angegeben, um 150 - 200°C höher. Der zusätzlich in das Diagramm aufgenommene Messpunkt entstammt einer anderen Versuchsreihe mit Längenänderungs-Messungen nach Bestrahlung an in axialer Richtung federbelasteten UO₂-Stäbchen von ca. 2,5 mm Durchmesser und 7 mm Länge.

Die Lage der Messpunkte in **Abb. 5** rechtfertigt für die Längenänderung bei einer Probenoberflächentemperatur von ca. 400°C die Formulierung

$$\delta l/t = -(7,1 \cdot 10^{-6} / \text{h} \cdot \text{kp} \cdot \text{mm}^{-2}) (\sigma - \sigma_0)$$

σ_0 ist der Schwelldruck des UO_2 -Probenmaterials, bei dem die Kriechgeschwindigkeit gerade mit der linearen Schwellgeschwindigkeit übereinstimmt. Nach **Abb. 5** ist hier $\sigma_0 = 0,7 \pm 0,15 \text{ kp/mm}^2$.

Die eigentliche Kriechgeschwindigkeit bei einer mittleren Brennstofftemperatur von ca. 500°C kann dann in der Form

$$\dot{\epsilon}_{500^{\circ}\text{C}} = (3,9 \cdot 10^{-1} / \text{kp} \cdot \text{mm}^{-2}) \cdot \sigma \cdot R$$

dargestellt werden, wenn R die Uran-Spaltungsrate in Spaltungen/U-Atom-Zeiteinheit ist. Die Proportionalität mit der Spaltungsrate entspricht der Annahme, dass die Anzahl der Gitter-Punktdefekte, die je Spaltung erzeugt werden und an Defektclustern ausheilen, von der Spaltungsrate unabhängig ist. Diese Annahme konnte allerdings mit diesen Kriechversuchen nicht überprüft werden, weil die Spaltungsrate nicht systematisch und über hinreichend grosse Wertebereiche variiert wurde.

Die Gruppierung der Messpunkte in **Abb. 5** bezüglich der Probenoberflächentemperatur deutet darauf hin, dass die bestrahlungsbedingte Kriechgeschwindigkeit mit steigender Temperatur steigt. Die Zunahme ist jedoch äusserst gering im Vergleich zum Anstieg der rein thermisch bedingten Kriechgeschwindigkeit mit abnehmenden $1/T$ bei hohen Temperaturen. Sie widerspricht nicht dem theoretischen Ergebnis, dass die strahlungsinduzierte Kriechgeschwindigkeit bei niederen Temperaturen nur wenig temperaturabhängig ist.

Veröffentlichung zu 1121.22:

(1) D.Brucklacher, W.Dienst

J.Nucl.Mat. 36 (1970) No. 2, Aug.

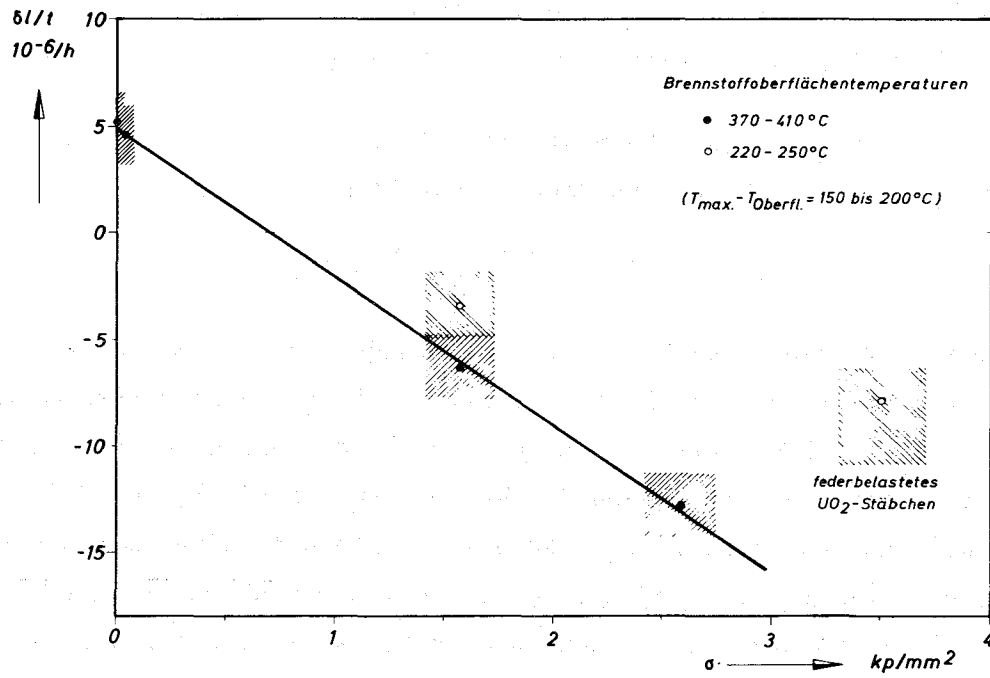


Abb. 5: Längenänderungsgeschwindigkeit der UO₂-Proben unter Bestrahlung in Abhängigkeit von der axialen Druckbelastung

1121.3 Integrale Parametertests

1121.32 BR2 Bestrahlungsversuche an Kernbrennstoffen

1. Projekt Mol 12 (H. Will, IRE)

Zur optimalen Auslegung eines Brennelements ist die Kenntnis der Kriechraten und Kriechgeschwindigkeiten bei den verschiedensten Betriebsparametern unbedingt notwendig.

Im Reaktor BR2, Mol, werden Versuche durchgeführt (Projekt Mol 12), die diese Zielrichtung haben.

Die Probe besteht aus einem Stapel von abwechselnd Brennstoff- und Molybdäntabletten. Sie sind auf das Tauchrohr des Zentralthermoelements aufgefädelt. Die Probe wird durch eine Druckkraft belastet, die als einstellbare Reaktionskraft von unterschiedlichen Drücken an einem Faltenbalg entsteht. Die Probe ist im Innern einer Kapsel angeordnet, die mit NaK gefüllt ist, und über einen Gasspalt im Bestrahlungseinsatz zentriert. Die Temperatur am Probenpaket kann durch Gasgemischsteuerung eingestellt werden.

Die sehr kleinen Längenänderungen des Probenpakets in der erwarteten Größenordnung von $1 \cdot 10^{-3}$ mm/h werden von einem speziellen Meßsystem - nach dem Hohlraum-Resonanzverfahren - gemessen.

Die Bestrahlungseinrichtung wurde bei dem CEN, Grenoble, entwickelt. Es sind neben den out-of-pile-Anlagen 2 Bestrahlungseinsätze käuflich erworben worden; an weitere Bestellungen ist gedacht, wenn die Bestrahlung der ersten Einsätze erfolgreich verläuft.

Mitte August findet in Mol der out-of-pile-Test statt. Bestrahlungsbeginn ist für den 8. 9. 70 vorgesehen.

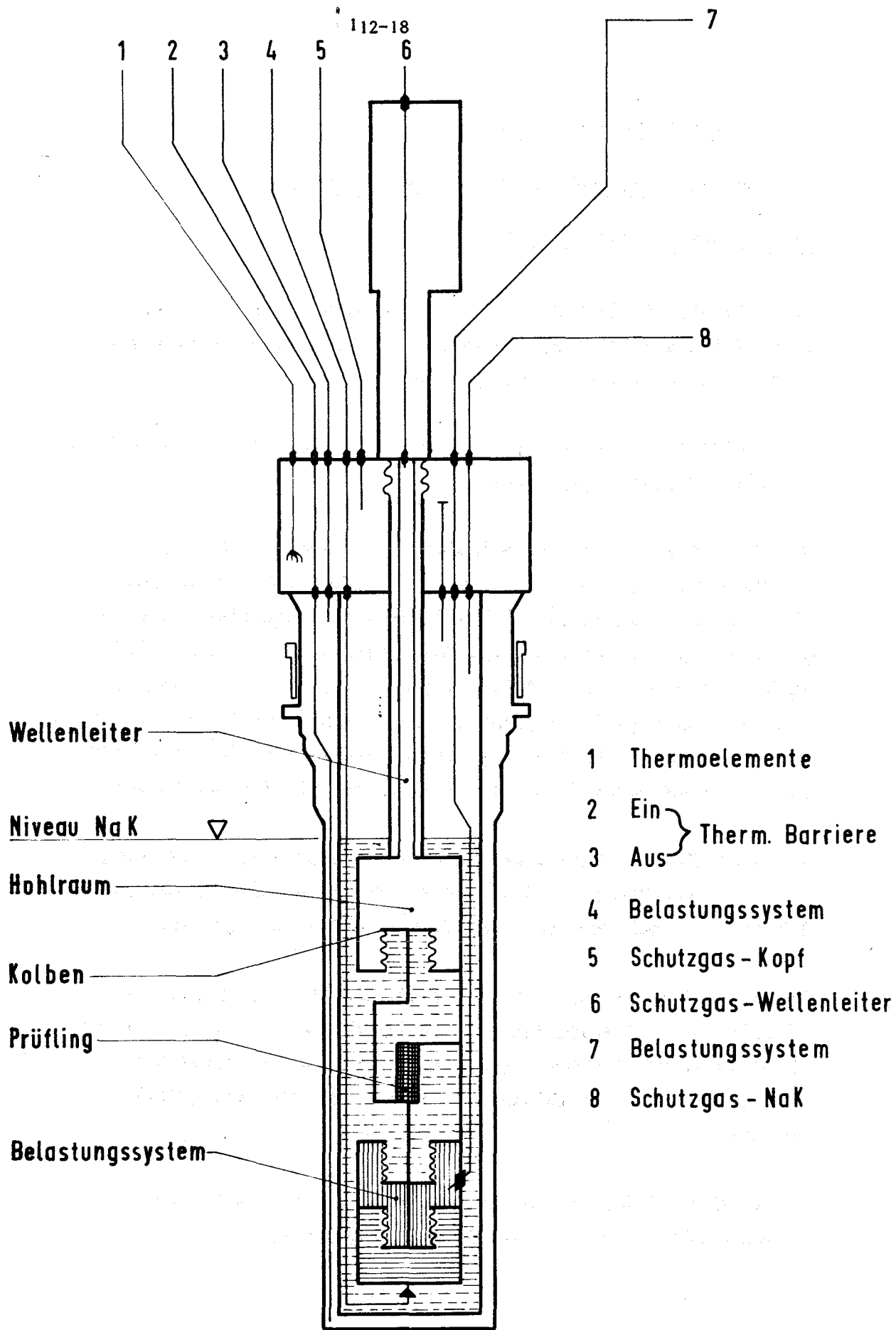


Abb. 6: **Bestrahlungseinsatz Mol 12**

2. Folienbestrahlung im BR2

Projekt Mol 1 F1 (W. Neumann, IMF)

Folien aus hochreinen Metallen werden zum Studium der Porenbildung bei Temperaturen von 300 - 450°C mit und ohne Kadiumabschirmung in den Reaktor BR2 in Mol eingesetzt. Als Versuchsparameter sind die Bestrahlungstemperatur, die Neutronendosis und das Neutronenspektrum gewählt.

Die Kapsel wurde konstruktiv so ausgebildet, daß sich möglichst eindeutige thermodynamische Verhältnisse ergeben, da die zentrale Proben-temperatur der uninstrumentierten Kapsel rechnerisch ermittelt wird. Vorgegebene Proben-temperaturen werden durch die Wahl eines bestimmten Gasspaltens zwischen äußerer und innerer Kapsel erhalten. Zur groben Kontrolle der Temperatur im Folienbereich sind Temperaturmonitore aus Reinmetallen eingesetzt.

Etwa 25 Folien mit einer Stärke von 30 - 50 µm und einem Durchmesser von 10 mm werden unter Heliumatmosphäre in die innere Kapsel eingeschweißt. Diese innere Kapsel wird von einer äußeren Kapsel gasdicht umschlossen. In die äußere Kapsel ist der Kadmiumschirm eingeschrumpft.

In einem Einsatz werden acht Kapseln übereinander angeordnet. Zur Ermittlung der Neutronendosis trägt jede Kapsel einen Flußdetektor (Fe, Co).

Voraussichtlicher Bestrahlungsbeginn wird November 1970 sein.

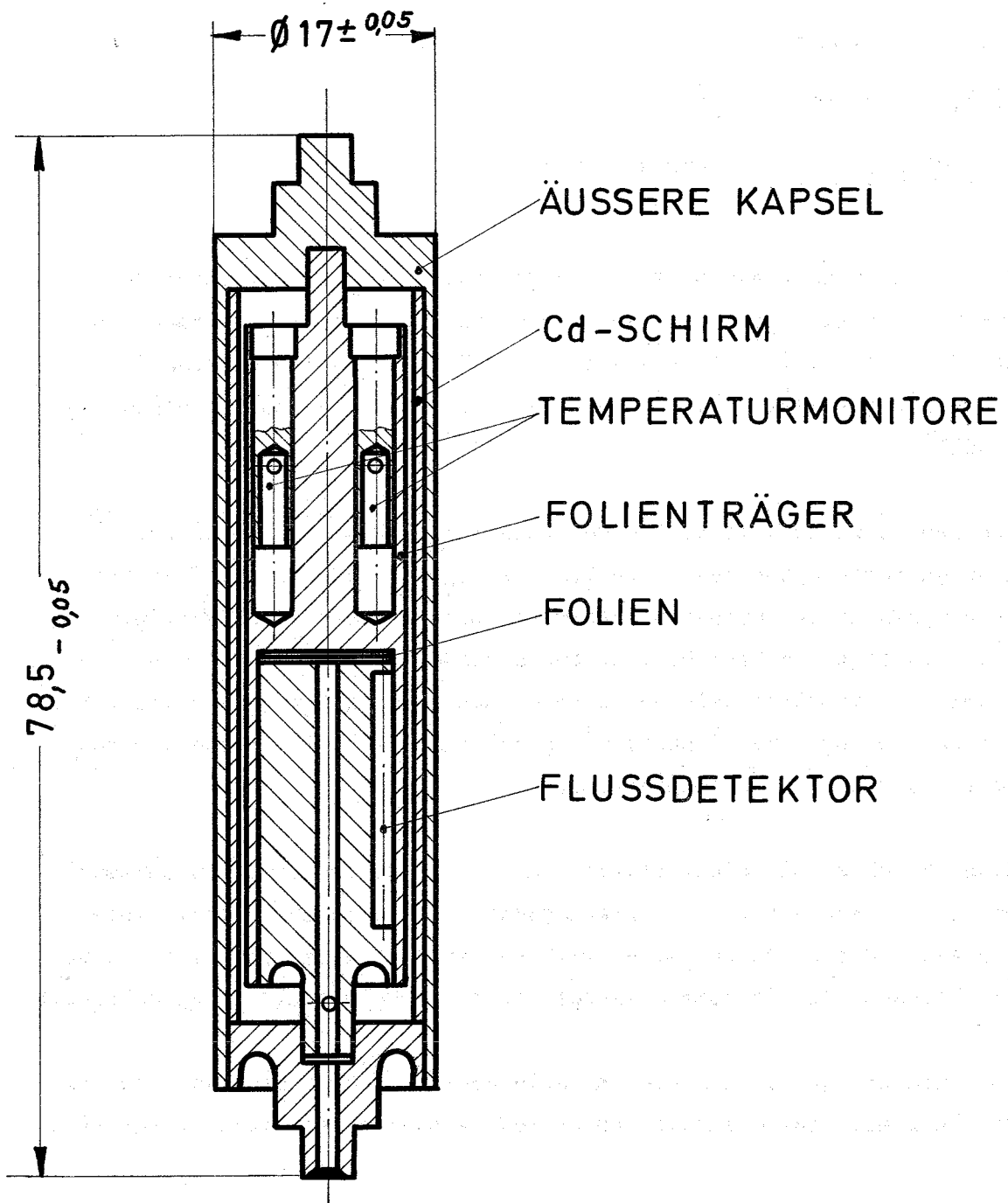


Abb. 7

FOLIENBESTRAHLUNG MOL 1 F

1121.34/5 FR2-KapselversucheZielabbrand von 90 000 MWd/t im FR2 erreicht

(H.Häfner, IRE)

Zum langfristigen Brennelement-Entwicklungsprogramm des PSB gehören auch Bestrahlungsexperimente an Brennstabproben in Bestrahlungskapseln im FR2.

Insgesamt wurden seit 1965 über 250 Testbrennstäbe und Brennstoffproben in verschiedenen Kapselbauarten bestrahlt (1, 2). Dabei hat sich ein Kapseltyp, der seit dem Frühjahr 1967 im Reaktor läuft, besonders bewährt. Bei dieser sog. Doppelkapsel sitzt der Brennstab in einer gasdichten inneren Edelstahl-Kapsel von 20 mm Außendurchmesser und 1 mm Wanddicke und ist von Natrium (Schmelzpunkt 98°C) oder der eutektischen Natrium-Kalium-Legierung (Schmelzpunkt -11°C) umgeben. Maximal vier solcher Na- bzw. NaK-Kapseln sind übereinander in einer äußeren Kapsel aus Zircaloy 2 von 26 mm Außendurchmesser x 1x5mm Wanddicke angeordnet. Der Ringraum zwischen den inneren Kapseln und dem äußeren Kapselrohr von 1,5 mm Breite ist von der eutektischen Blei-Wismut-Legierung (Schmelzpunkt 125°C) ausgefüllt. Auch die äußere Kapsel ist gasdicht und druckfest ausgeführt. Dadurch ist erreicht, daß das Na bzw. NaK wie auch der Brennstab selbst durch zwei relativ sichere Wände vom Reaktor-Kühlwasser getrennt sind.

Nach max. 14000 Betriebsstunden wurden mit diesem Doppelkapseltyp nun erstmals an 9 oxidischen Brennstäben Abbrände von 85 - 90 000 MWd/t Metall erreicht. Abbrände zwischen 60 und 80 000 MWd/tM haben z.Zt. etwa 30 Stäbe.

Eine Übersicht über die mit Doppelkapseln durchgeführten Bestrahlungsexperimente gibt Tabelle 4.

Veröffentlichungen:

(1) H.Häfner

Bestrahlung von Brennstäben in instrumentierten Blei-Wismut-Kapseln
Kerntechnik 10, Heft 3 (1968), KFK-Bericht 780

(2) H. Häfner

Bestrahlung von Brennstäben in instrumentierten Natrium-Bleiwismut-Doppelkapseln
Kerntechnik 12, Heft 5/6 (1970)

Tabelle 4

Zahl der Stäbe	Abmessungen	max. Stableistung W/cm	max. Hüllrohroberflächentemperatur °C	Brennstoff	erreichter spezifischer Abbrand MWd/t Met.
37	7,4 mm Außen- ϕ 172 mm lang	680	535 (Na)	UO ₂	max. 85 000
28	7,4 mm Außen- ϕ 172 mm lang	680	535 (Na)	UO ₂ -PuO ₂	max. 90 000
59	6,0 und 7,0 mm ϕ 172 mm lang	600	750 (NaK)	UO ₂ -PuO ₂	max. 85 000
18	4,7 mm Außen- ϕ 172 mm lang	500	470 (Na)	UO ₂ -PuO ₂	30 000
40	Kurzproben 6,2...7,5 mm ϕ 60 bis 120 mm lang	600	685 (NaK)	Cermets UO ₂ Coating Mo, Cr, V	50 000
25	Kleinkriechproben 6,4 mm ϕ , 35 mm lang	600	400 (NaK)	UO ₂ UO ₂ -PuO ₂ UN UC	50 000

1124. Brennstäbe mit karbidischem bzw. nitridischem Brennstoff1124.1 Probenherstellung1124.12 Herstellung im Industrieverfahren1. Stabtechnologie1.1 Kontaminationsfreies Einfüllen von TablettenNa-Einfülltechnik (Deppe, V. Meinhardt, AEG)

Die Vakuumkammer 1 mit den Einbauten zum Auspacken, Wiegen, Messen und Füllen der Hüllrohre mit Pellets wurde fertiggestellt, im Handschuhkasten montiert und im Vakuum erprobt. Bei der Erprobung wurden sämtliche notwendigen Arbeitsschritte in der Kammer 1 mit Stahlpellets durchgeführt.

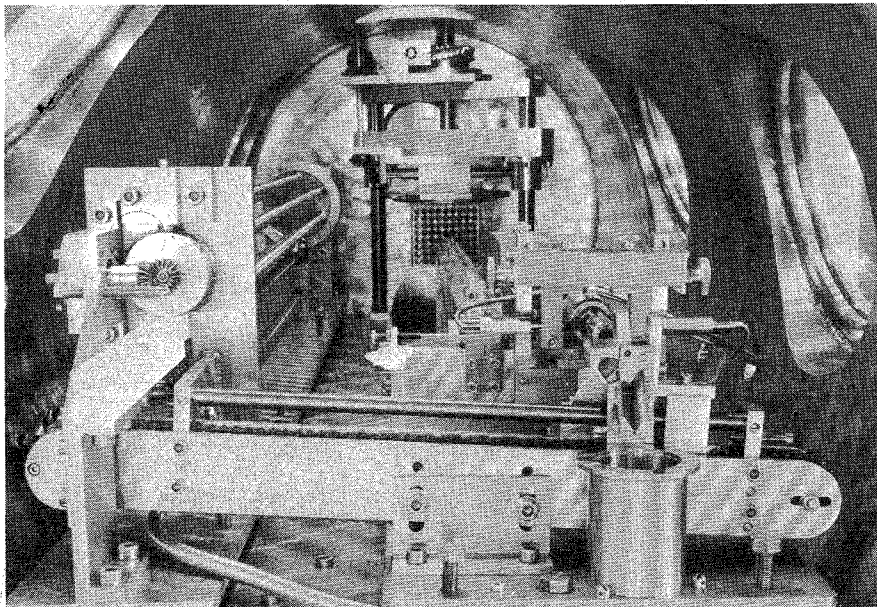


Abb. 8

In der Vakuumkammer 2 wurden die natriumführenden Leitungen mit den Begleitheizungen versehen. Sämtliche natriumführenden Leitungen wurden mit Natrium erprobt.

Gleichzeitig wurden weitere Vorversuche zur Dosierung der Na-Menge im Hüllrohr (volumetrische Bestimmung) durchgeführt. Mit dem Einbau der Kammer 2 in den Handschuhkasten und dem Anbringen der Meßleitungen, Durchführungen, elektr. Anschlüsse sowie der Montage der Vakuumanlage sind die wesentlichen mech. Arbeiten abgeschlossen.

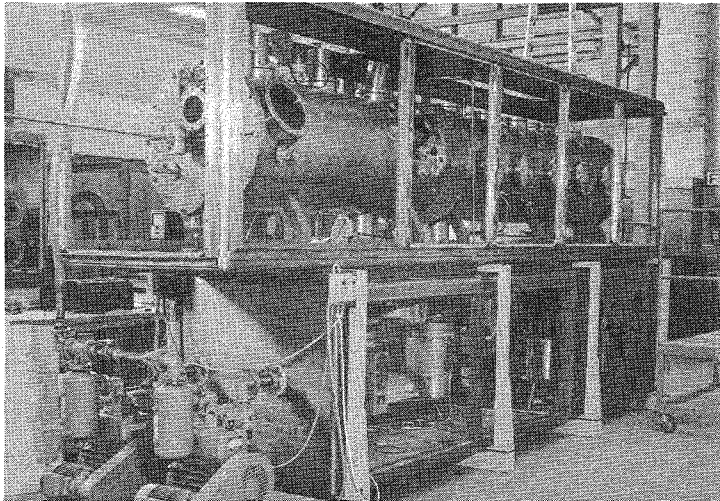


Abb. 9

Die zur Instrumentierung gehörenden Schaltschränke mit der elektr. Versorgung der Begleitheizung sowie der Regelung der einzelnen Heizstrecken werden z.Z. gefertigt, ebenso der Meßgeräteschrank.

1.2 Schweißtechnik (R.Güttler, AEG)

Mit dem Ausbau der neuen Stromquelle wurde begonnen. Der Leistungsanteil wurde so ausgebaut, daß sich der Strom in zehn Stufen regeln läßt. Da die Leistungstransistoren bei den gewählten Spannungen Ausfälle zeigten, mußte die maximal zulässige Spannung durch Versuche ermittelt werden. Die Stromquelle wurde auf 70 V ausgelegt.

In ersten Erprobungen kamen Ringelektroden mit 3 % Thoriumoxid zum Einsatz. Eine bessere Duktilität im Vergleich mit Elektroden mit 2 % Thoriumoxid wurde festgestellt.

Ein neuer Schweißkopf mit zwei symmetrisch angeordneten Ablenkspulen wurde entworfen und gefertigt. Die Versuche verliefen bisher zufriedenstellend und werden mit Nachdruck fortgeführt.

2. Prüftechnik

2.1 Neutronenradiographie (W. Mayer, AEG)

Im Berichtszeitraum wurden nur wenige einzelne Experimente durchgeführt. Zur Demonstration der Bildqualität wurde ein Testobjekt aus Uran-Sinterkörpern zusammengestellt. Die hohlzylindrischen Pellets hatten einen Außendurchmesser von 18 mm und einen Innendurchmesser von 7,5 mm. Einige Pellets waren in axialer Richtung mit 1 mm-Bohrungen versehen, und andere wiesen deutliche Abplatzungen auf. Die Abstände zwischen den Pellets wurden in Schritten von 0,05 mm zwischen 0 und 0,25 mm variiert. Für die Radiographie wurden Gadolinium- und Dysprosiumfolien zum Vergleich verwendet. Bei gleicher Belichtungszeit waren die Aufnahmen mit Gadolinium etwas stärker geschwärzt. Die geschilderten Abstände, Abplatzungen und Bohrungen waren scharf und deutlich zu erkennen.

Mit einem weiteren Testobjekt sollte untersucht werden, wie die Aufnahmequalität leidet, wenn ein Objekt in eine Aluminiumhülle gepackt wird. Zu diesem Zweck wurden 1 mm dicke Kadmiubleche mit Bohrungen zwischen 0,1 und 1 mm Durchmesser zwischen Aluminiumbleche von 1 mm bis 4 mm Dicke gepackt und radiographiert. Bei 4 mm Aluminium zu beiden Seiten des Kadmiums waren zwar die 0,1 - und 0,2 mm-Löcher nicht mehr zu erkennen, die größeren Löcher hatten jedoch nur wenig an Schärfe eingebüßt. Eine Hülle von 1 mm Aluminium ergab praktisch keine Beeinträchtigung der Abbildungsschärfe.

In einer Studie wurde untersucht, ob die vorhandenen Anlagen in der Kernenergieversuchsanlage in Großwelzheim zur Durchführung von Neutronenradiographien an radioaktiven Objekten geeignet sind. Es hat sich gezeigt, daß mit den Neutronen aus dem Prüfreaktor solche Untersuchungen möglich sind. Die heißen Objekte, z.B. Brennstoffstäbe von abgebrannten Brennelementen, werden in den heißen Zellen in einen Behälter eingepackt. Dieser Behälter wird in einer vorhandenen Bleiflasche zum Prüfreaktor transportiert. Am Prüfreaktor muß ein seitlicher Strahlenkanal für Neutronen geschaffen werden, der in einer Objektabschirmung endet. An diese Objektabschirmung wird die

Bleiflasche dicht angeschlossen. Der Aluminiumbehälter mit dem Objekt wird etappenweise vor den Neutronenstrahl gebracht. In einer Fotokammer kann eine Kassette mit der Dysprosiumfolie in die Nähe des Objektes gebracht werden. Wie die Vorversuche zeigten, leidet die Qualität der Aufnahmen nur wenig, wenn das Objekt in Aluminium eingepackt ist.

Der zur Zeit vorhandene Kollimator mit einem Kollimationsverhältnis von 1 : 20 (Öffnung zu Länge) ergibt bereits Bilder mit guter Qualität. Wenn man die Reaktorleistung um einen Faktor 10 erhöht, was durch eine Verstärkung der Abschirmung möglich ist, so kann das Auflösungsvermögen noch verbessert und die Belichtungszeit verkürzt werden. Die Neutronenradiographie an radioaktiven Objekten könnte eine wertvolle Ergänzung der Untersuchungen in den heißen Zellen darstellen.

2.2 Profilometer (U. Wittekindt, AEG)

Die bereits im 1. Vierteljahresbericht angedeutete Verbesserung des Meßrachsens zur Reproduzierbarkeit wurde realisiert. Das Ergebnis entspricht allerdings noch nicht ganz unseren Erwartungen. Evtl. muß für gleichmäßige Feststellkräfte noch eine Ratsche eingebaut werden.

Die beiden Loslager zur Spindelabstützung, ursprünglich als reine Gleitlagerkonstruktion ausgeführt, erhielten neue Pendelrollenlager, da die Gleitlagerlaufflächen schon nach kurzer Zeit durch den starken Wellendurchhang zerstört wurden. Die Funktion dieser Lager wurde damit wesentlich verbessert.

Für einen Vergleich der Meßergebnisse und der Dokumentation zwischen dem Profilometer und der entsprechenden Maschine in den Heißen Zellen wurde ein Hüllrohr der DSR-Geometrie vermessen. Die Übereinstimmung der Ergebnisse ist als gut zu bezeichnen, jedoch müßte die Art der Dokumentation für einen schnellen Vergleich beider Ergebnisse noch besser abgestimmt werden.

Zur 6. internationalen Tagung für zerstörungsfreie Prüfverfahren wurde ein Vortrag über das Profilometer ausgearbeitet, welcher später in einer einschlägigen Zeitschrift veröffentlicht werden wird.

3. Arbeitsbericht der Fa. ALKEM zum Koord. Karbidprogramm

(Zusammengestellt von P. Funke, ALKEM)

3.1 Einleitung

UC-PuC ist wegen seiner guten Wärmeleitfähigkeit und der hohen Schwer-elementdichte ein vielversprechender Brennstoff für Natrium-gekühlte schnelle Brutreaktoren. Die Entwicklung der Herstellungsmethoden und die Erprobung der Brenneigenschaften gewinnt daher immer stärkere Bedeutung. Mit dem Programm für Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der Brennelemente mit karbidischem Brennstoff der ALKEM sollen Arbeiten mit dem Ziel aufgenommen werden, erfolgversprechende Herstellungsmethoden im Technikums- und Industriemaßstab zu entwickeln und Brennstäbe für Bestrahlungen im thermischen und schnellen Neutronenfluß bereitzustellen. Im folgenden werden die im Rahmen dieses Programms vorgesehenen Arbeiten seitens der ALKEM näher erläutert.

Die gesamte Entwicklung gliedert sich dabei in folgender Weise auf:

- Auswahl eines Fertigungsverfahrens
- Aufbau einer Pelletlinie
- Entwicklung des Fertigungsverfahrens
- Aufbau einer Schmelz- und Vibrierlinie
- Herstellung von Reaktortestproben
- Aufarbeitung von Pu-haltigem Schrott

3.2 Entwicklung einer Tablettenlinie

3.2.1 Auswahl des Verfahrens

Zur Synthese von U-Pu-Mischkarbiden wurde von verschiedenen Instituten und Firmen eine Reihe von Verfahren entwickelt. Die untersuchten Verfahren lassen sich in 2 Gruppen unterteilen, die von verschiedenen Ausgangsmaterialien ausgehen.

Ausgangsmaterial Metalle

Die eine Gruppe verwendet als Ausgangsmaterial die Metalle Uran und Plutonium. Die Umsetzung zu den Karbiden wird entweder durch Schmelzen der Metalle mit Kohlenstoff im Lichtbogen durchgeführt, oder die Metalle werden zuerst mit Wasserstoff zu den Hydriden reagiert. Die Metallhydride können dann weiter mit einer Mischung aus Methan und Wasserstoff bei 800°C zu den Karbiden umgesetzt werden. Alle Verfahren, die von den Metallen ausgehen, haben aber den großen Nachteil, daß zuerst aus den Oxiden in mehreren Prozeßschritten die Metalle hergestellt werden müssen.

Ausgangsmaterial Oxide

Aus diesem Grund erscheint eine Synthese der Karbide ausgehend von den Oxiden vorteilhafter. Zur Reduktion werden die Oxide mit Graphitpulver vermischt und bei hohen Temperaturen reagiert. Vor allem zwei Verfahrensvarianten wurden näher untersucht.

Bei der karbothermischen Reduktion im Fließbett werden körnige Oxid-Graphitmischungen kontinuierlich in einen vertikalen Reaktionsofen eingebracht. Die Teilchen werden einem aufwärtsströmenden Argonstrom entgegengeführt, die Reaktionstemperatur beträgt $1450 - 1600^{\circ}\text{C}$. Das reagierte Material wird am unteren Ende des Ofens kontinuierlich ausgetragen. Am intensivsten untersucht wurde bisher die chargenweise Reduktion. Zu Tabletten verpreßte Oxid-Graphitmischungen werden bei $1500 - 1600^{\circ}\text{C}$ in einem geschlossenen Ofen reagiert. Zur Beschleunigung der Reaktion wird das entstehende CO entweder laufend abgepumpt oder durch einen Argonstrom ausgetragen. Dieses Verfahren scheint auf Grund der Literaturstudien am erfolgversprechendsten zu sein. Sowohl die thermodynamischen wie auch die kinetischen Grundlagen wurden untersucht. Daraus resultiert eine optimale Reaktionsführung. Zusätzlich können die Erfahrungen, die die Firmen NUKEM und UNC bei der Produktion von UC bzw. (U,Pu)C nach diesem Verfahren gewonnen haben, von ALKEM genutzt werden.

3.2.2 Beschreibung des Verfahrens

Synthese des Karbids

Die Verfahrensschritte, die bis zur Produktion des reagierten Karbids zu durchlaufen sind, werden im Fließschema der Abb. 10 gezeigt und im folgenden näher beschrieben.

Abwiegen und Mischen

Die Ausgangsmaterialien UO_2 , PuO_2 und C werden in eine Handschuhbox eingeschleust. Zur Charakterisierung der Substanzen werden schon vorher die BET-Oberfläche, die Korngrößenverteilung, der Gehalt an Verunreinigungen und zur Berechnung des Ansatzes das Sauerstoff-Metall-Verhältnis der Oxide bestimmt. Die berechneten Mengen der Oxide und des Graphits werden abgewogen und in einem Mischer homogenisiert. Aus der Mischung werden Stichproben gezogen und zur Kontrolle des Ansatzes noch einmal auf Gehalt an Metallen und Kohlenstoff analysiert.

Pressen

Die Synthesereaktion ist eine Reaktion zwischen Festkörpern. Daher müssen die Teilchen vorher durch Verpressen zu Tabletten in engen Kontakt gebracht werden. Eine zu hohe Verdichtung der Preßlinge ist zu vermeiden, da dadurch die Abgabe des CO verhindert wird. Die optimalen Preßbedingungen sind durch Vorversuche zu ermitteln.

Synthese

Die Preßlinge werden auf einem Chargiergestell in den Reaktionsofen gesetzt. Die zur Reaktion notwendigen Temperaturen liegen zwischen $1500 - 1600^\circ C$. Bei höheren Temperaturen werden die Verdampfungsverluste des Pu zu groß. Zwei Varianten werden erprobt werden, die Reaktion im Vakuum (ca. 10^{-4} Torr) und die Reaktion in strömendem Argon. Das Reaktionsende wird über das erreichte Endvakuum oder über die CO-Konzentration im Argon kontrolliert.

Herstellung von Sintertabletten

Schematisch werden die Verfahrensschritte im Fließschema der Abb. 11 gezeigt. Alle diese Operationen mit den synthetisierten Karbiden müssen unter Schutzgas durchgeführt werden. Durch Spuren von Sauerstoff und Wasser wird die Struktur der Karbide verändert. Als Schutzgase kommen die Edelgase Helium und Argon in Frage oder Stickstoff. Auf die in diesem Zusammenhang unternommenen Arbeiten wird gesondert noch eingegangen.

Brechen und Mahlen

Die reagierten Tabletten müssen zerkleinert werden, bevor Grünlinge zum Sintern gepreßt werden. Das Material wird in einem Backenbrecher gebrochen und in einer Kugelmühle fein gemahlen. Zur Charakterisierung der Pulver wird abgesiebt und die spezifische Oberfläche nach BET oder Blain gemessen. Bedingt durch die erhöhte Reaktivität der Pulver ist bei diesem Verarbeitungsschritt die größte Sorgfalt in Bezug auf die Reinheit der Gasatmosphäre erforderlich. Zur Qualitätskontrolle werden chemische Analysen des Pulvers durchgeführt. Bestimmt werden der Gehalt an Metallen, der gesamte Kohlenstoffgehalt, der Anteil an freiem Kohlenstoff, der Sauerstoff- und der Stickstoffgehalt.

Plastifizieren und Pressen

Ein bindemittelfreies Pressen wird wahrscheinlich nicht möglich sein. Plastifizierungsmittel wie Carbowax 6000 oder Paraffinwachs werden, gelöst in einem Lösungsmittel, in einem Mischer mit dem Pulver homogenisiert. Das feuchte Material wird in einem Trockenschrank vom Lösungsmittel befreit und in der Presse zu Grünlingen verpreßt. Zum Entwachsen (Entfernen des Bindemittels) wird ein spezieller Entwachsungssofen verwendet.

Sintern

Um die erwünschte hohe Brennstoffdichte zu erhalten, werden die Grünlinge im Sinterofen bei 1500 - 1600°C gesindert. Je nachdem, welches Verfahren sich als günstig erweist, werden die Grünlinge im Vakuum oder in strömendem Argon gesindert. Die genauen Prozeßdaten werden auf Grund von

Vorserien, die die genaue Korrelation zwischen Grünlingsdichte und Sinterdichte mit der Sintertemperatur und -zeit als Parameter ergeben sollen, festgelegt.

Kontrolle und Säulenlegen

Repräsentative Proben der Sinterlinge werden metallographisch untersucht. Durch diese Untersuchungsmethode können qualitative und quantitative Aussagen über die vorliegenden Phasen gemacht werden. Erwünscht ist ein einphasiges (U,Pu)C, ohne (U,Pu) Metall, ohne (U,Pu)₂C₃ oder (U,Pu)C₂. Durch chemische Analysenverfahren werden der Äquivalentkohlenstoffgehalt $(C + \frac{12}{16} O + \frac{12}{14} N)$ sowie die Metalle bestimmt. Über die geometrischen Abmessungen und das Gewicht wird die Dichte bestimmt, Tabletten mit Abplatzungen und Rissen werden aussortiert. Spezifikationsgerechte Tabletten werden zu Säulen zusammengestellt. Das Einfüllen der Tabletten in die Hüllrohre und das Schweißen des 2. Endstopfens erfolgt außerhalb der eigentlichen Karbidlinie.

3.2.3 Aufstellungsplan der Handschuhkästen

Die in Abb. 12 wiedergegebene Aufstellung der Boxen ist das Ergebnis einer Studie des Arbeitsablaufs in Zusammenhang mit den notwendigen Kontrolluntersuchungen. Nach den Anforderungen, die an die Gasatmosphäre gestellt werden, können 3 verschiedene Bereiche unterschieden werden:

- a) Handschuhkästen, in denen Luft als Arbeitsatmosphäre vorliegt,
- b) Handschuhkästen, die mit Argon als Schutzgas betrieben werden,
- c) Handschuhkästen, in denen Stickstoff als Schutzgas verwandt wird.

Luft kann überall verwendet werden, wo Oxide hantiert werden, ebenso bei verschiedenen Analysenverfahren. In den Boxen, in denen die Karbide hantiert werden, muß hochreines Argon vorliegen. Verschiedene Untersuchungen (Metallographie und Analytik) kommen mit Stickstoff als Schutzgas aus. Wie durch die Studie ebenfalls deutlich wurde, können bei geeignetem Arbeitsablauf die gleichen Geräte für verschiedene Prozeßstufen verwendet werden. Zum Verdichten der Ausgangsmaterialien wie zum Pressen

der Grünlinge kann die gleiche Presse benutzt werden, der Reaktionsofen ist auch als Sinterofen verwendbar, für verschiedene Funktionen wird der gleiche Trockenschrank benutzt.

3.2.4 Detailbeschreibung der Handschuhkästen mit installierten Geräten

Karbidlinie, Boxen 13-19

Box 13 und 14 sind die üblichen Luftboxen; die Verfahrensschritte Abwiegen, Mischen und Trocknen werden hier durchgeführt. In Box 14 steht zur Korngrößenbestimmung eine elektromagnetische Siebmaschine (Firma Fritsch, Analysette 3), zum Abwiegen der Pulver eine Waage (Firma Mettler, Typ P 1200) und ein Mischer (Firma Lödige, Typ M1). Box 13 enthält einen Trockenschrank (Firma Heraeus). Aus Box 13 wird die Mischung mittels Sacktechnik ausgeschleust. Die Boxen 15 - 19 werden mit hochreinem Argon aus einer Gasreinigungsanlage gespült. Box 15 enthält einen Vakuum-Trockenschrank (Firma Heraeus, Typ VT 250 K). Er dient verschiedenen Zwecken: Chemisch und physikalisch absorbierte Reste von Sauerstoff werden bei höheren Temperaturen im Vakuum aus der Ausgangsmischung entfernt, ebenso Lösungsmittel nach der Zugabe von Plastifizierungsmitteln. Box 16 enthält einen Backenbrecher (Firma NUKEM, Typ M 1949) zum Zerkleinern der reagierten Preßlinge, weiterhin eine Schwingmühle (Firma Siebtechnik, Typ Vibratom) und eine elektromagnetische Siebmaschine (Firma Fritsch, Typ Analysette, 3). Zur Charakterisierung der Pulver ist ein Gerät zur Bestimmung der Blain-Zahl vorhanden (Gerät der Firma Ton-technik).

Box 17 ist die Preßbox. Installiert ist eine hydraulische Laborpresse (Firma Weber, Typ PW 20 E). Meßlehren zum Ausmessen der Preßlinge befinden sich ebenfalls in der Box (Meßlehren der Firma Mauser).

Box 18 enthält den Reaktions- und Sinterofen sowie den Entwachsungs- ofen. Der Sinterofen (Firma IOB, Typ VSL 10/18) kann über eine Ölratationspumpe (Firma Leybold, Typ D 12) und eine Öldiffusionspumpe (Firma Leybold, Typ Leybodiff 1000) bis zu einem Endvakuum von 10^{-5} Torr evakuiert werden; ebenso ist es möglich, Argon durch den Ofen zu schicken. Die Steuerung des Ofens kann von Hand wie über Programmscheibe erfolgen.

Der Entwachsungssofen (Firma IOB, Typ VSR 6/20) wird über Thermoelemente gesteuert. Zum Abscheiden der den Ofen verlassenden Gase befindet sich ein System von hintereinander geschalteten Absorptionsgefäßen in der Box.

Box 19 ist die letzte der Boxen der Karbidlinie. Endkontrolle der Tabletten und Zusammenstellen zu Brennstoffsäulen werden hier durchgeführt. Es befindet sich eine Mettler-Waage in der Box (Typ H 110 W) sowie wiederum Meßlehren zur Bestimmung der geometrischen Abmessungen und der Orthogonalität (Firma Mauser).

Analytikboxen, Boxen 4 - 9

Die Boxen 4 - 6 werden mit Stickstoff aus einem Kaltvergaser gespült. In diesen Boxen werden die Bestimmungen von Sauerstoff, von Gesamtkohlenstoff und von freiem Kohlenstoff durchgeführt. In Box 4 ist ein Hochfrequenz-Induktionsofen eingebaut (Firma Leco), in Box 5 ein Röhrenofen sowie eine Schwingmühle (Firma Retsch), Box 6 enthält eine Analysenwaage (Firma Mettler, Typ H20T). Die Boxen 7 - 9 sind ebenfalls für die Analytik vorgesehen, sie werden aber mit Luft gespült. Box 7 enthält eine Apparatur zur Pyrohydrolyse der Tabletten oder Pulver, Box 8 eine Einrichtung zur Bestimmung des Stickstoffs nach Kjeldahl, Box 9 Geräte zur potentiometrischen Bestimmung der Metalle.

Metallographieboxen, Boxen 10 - 12

Diese Boxen werden mit Stickstoff gespült. In Box 10 befinden sich die zur Vorbereitung der Proben notwendigen Geräte, eine Schleif- und eine Polierscheibe. Box 11 ist für Ätzversuche vorgesehen, Box 12 enthält das metallurgische Mikroskop (Typ Leitz MM 5).

3.2.5 Derzeitiger Stand der Arbeiten

Nach dem Aufbau der Boxen und dem Einbau der Geräte ist seit dem 15.4.1970 die Erprobung aller Geräte im Gange. Zunächst erfolgte eine kalte Erprobung der Geräte auf Funktionsfähigkeit und Leistungsdaten.

Dabei wurden schon Erkenntnisse gewonnen bezüglich zweckmäßiger Aufstellung und verschiedener Umbauten. So mußte unter anderem die Arbeitshöhe der Presse verändert werden, um eine handlichere Bedienung unter Boxbedingungen zu ermöglichen. Die Lödigmischer wurden mit Schutzvorrichtungen versehen, die eine Verletzung ausschließen. Von besonderer Wichtigkeit waren die Dichtheit der Inertgas-Boxen und Schleusen. Auch hierzu wurde eine Reihe von Versuchen und Änderungen notwendig, die schließlich zu einer konstruktiven Lösung führten, die sich bisher bewährt hat. Danach erfolgte eine Erprobung der Geräte mit Uranradioxid unter Plutonium-Bedingungen. Dieses Vorgehen hat sich schon früher bewährt, da Ein-, Aus- und Umbauten noch immer möglich sind. Der Zweck der bisherigen Arbeiten ging also nicht so sehr dahin, wissenschaftlich interessante Ergebnisse zu erarbeiten, als die Geräte einzeln und im Zusammenhang mit dem Arbeitsablauf zu testen, ebenso die Zusammenarbeit mit Analytik und Metallographie.

3.3 Entwicklungsarbeiten zur Schmelz- und Vibrierlinie

Neben der Herstellung tablettengefüllter Stäbe sind in dem Programm auch Arbeiten zur Herstellung vibrierter Stäbe vorgesehen. Das Verfahren der Vibrationsverdichtung hat gegenüber der Herstellung gesinterter Tabletten den Vorteil einer kleineren Anzahl von Verarbeitungsschritten. Es entfallen die Verarbeitungsschritte des Plastifizierens, des Pressens und des Sinterns von Grünlingen. Vor allem aber entfallen die aufwendigen Endbearbeitungsschritte zur Einhaltung der Spezifikation der Tabletten.

3.3.1 Verfahrensauswahl

Zur Vibration gelangen UC-PuC-Pulver in verschiedenen Kornfraktionen. Die in der Literatur gefundenen Verfahren unterscheiden sich durch eine verschiedene Vorbehandlung des zum Einsatz kommenden UC-PuC-Pulvers:

a) Vibrationsverdichtung von reagierten Pulvern

Dieses einfachste Verfahren wurde von der UKAEA untersucht. Die nach einem Verfahren hergestellten (U,Pu)C-Granulate werden ohne weitere Verdichtung der Ausgangsmaterialien in das Hüllrohr einvibriert. Die dabei erreichten Schmierdichten von 60 - 65% theor. Dichte sind aber sehr unbefriedigend.

- b) Eine höhere Ausgangsdichte erhält man dadurch, daß gesinterte Tabletten gebrochen und gemahlen werden. Dies ist ein Verfahren, das zwar gute Ergebnisse in Bezug auf die Schmierdichte bringt, aber doch gewisse Nachteile hat. So entfällt der entscheidende Vorteil der Vibration und die geringere Anzahl von Herstellungsschritten.
- c) Als günstigstes Verfahren erscheint nach Durchsicht der vorhandenen Literatur die Vibrationsverdichtung geschmolzener Partikel.

3.3.2 Beschreibung des Verfahrens

Das Ausgangsprodukt zum Schmelzen ist das reagierte Karbid. Bevor es zum Einsatz nach einem der im folgenden beschriebenen Verfahren gelangt, muß es gebrochen werden. Das Schmelzen selbst bedarf noch einiger Untersuchungen bezüglich Plutonium-Verlusten bei hohen Temperaturen. Von den 3 in der Literatur beschriebenen Schmelzverfahren - Schmelzen im Lichtbogen, Schmelzen im Plasma und Schmelzen im direkten Stromdurchgang - wird von der ALKEM das letztere vorgezogen. Wieder können hier die Erfahrungen der NUKEM genutzt werden.

Aufgrund des geschlossenen Ofenraums sowie der kurzen Schmelzzeiten, die dieses Verfahren auszeichnen, treten nur sehr geringe Pu-Verluste auf. Das geschmolzene Karbid muß gebrochen werden, ein Teil des gebrochenen Materials wird weiter gemahlen. Die Partikelgrößen der verschiedenen Kornfraktionen sind von den im Prinzip gleichen Bedingungen bei der Oxidvibration her gut bekannt. Abb. 13 zeigt ein Fließschema des Verfahrens.

3.3.3 Derzeitiger Stand der Entwicklung

Eine ähnliche Anlage, wie sie sich bei der Firma NUKEM schon bewährt hat, wurde in Caisson 5 aufgebaut. Die Vibrationsbox wird, zusammen mit einer Dekontaminationsbox und einer Schweißbox, mit Helium gespült. Das Helium wird im Kreislauf umgepumpt, die Reinigung des Gases von Sauerstoff und Wasser wird nach dem gleichen Verfahren durchgeführt, wie dies bei der mit Argon betriebenen Anlage der Fall ist. (siehe Abschnitt 3.4)

Die Arbeitsbedingungen bei der Vibration wie Druck am Vibrator, Einfüllzeit werden noch untersucht. Da jedoch die Voraussetzung zur Herstellung vibrierter, karbidgefüllter Stäbe ein gutes Produkt der Synthesereaktion ist, können diese Entwicklungsarbeiten bisher, in Ermangelung dieses Produktes, nicht mit dem Nachdruck betrieben werden, wie dies bei der Tablettenlinie der Fall ist.

3.4 Inertgasversorgung

Wie schon in den vorigen Abschnitten des öfteren erwähnt, ist bei der Produktion karbidischen Brennstoffes eine Inertgasversorgung notwendig. Stickstoff als Inertgas scheint zwar keine allzu große Reaktionsfähigkeit gegenüber dichten Karbidproben zu haben, aber bei Pulvern und porösen Tabletten wird N_2 merklich aufgenommen. Deshalb sind Edelgase als Schutzgas vorzuziehen. Eine durchgeführte Kostenrechnung zeigte, daß im Betrieb Argon als Schutzgas etwas billiger als Helium ist.

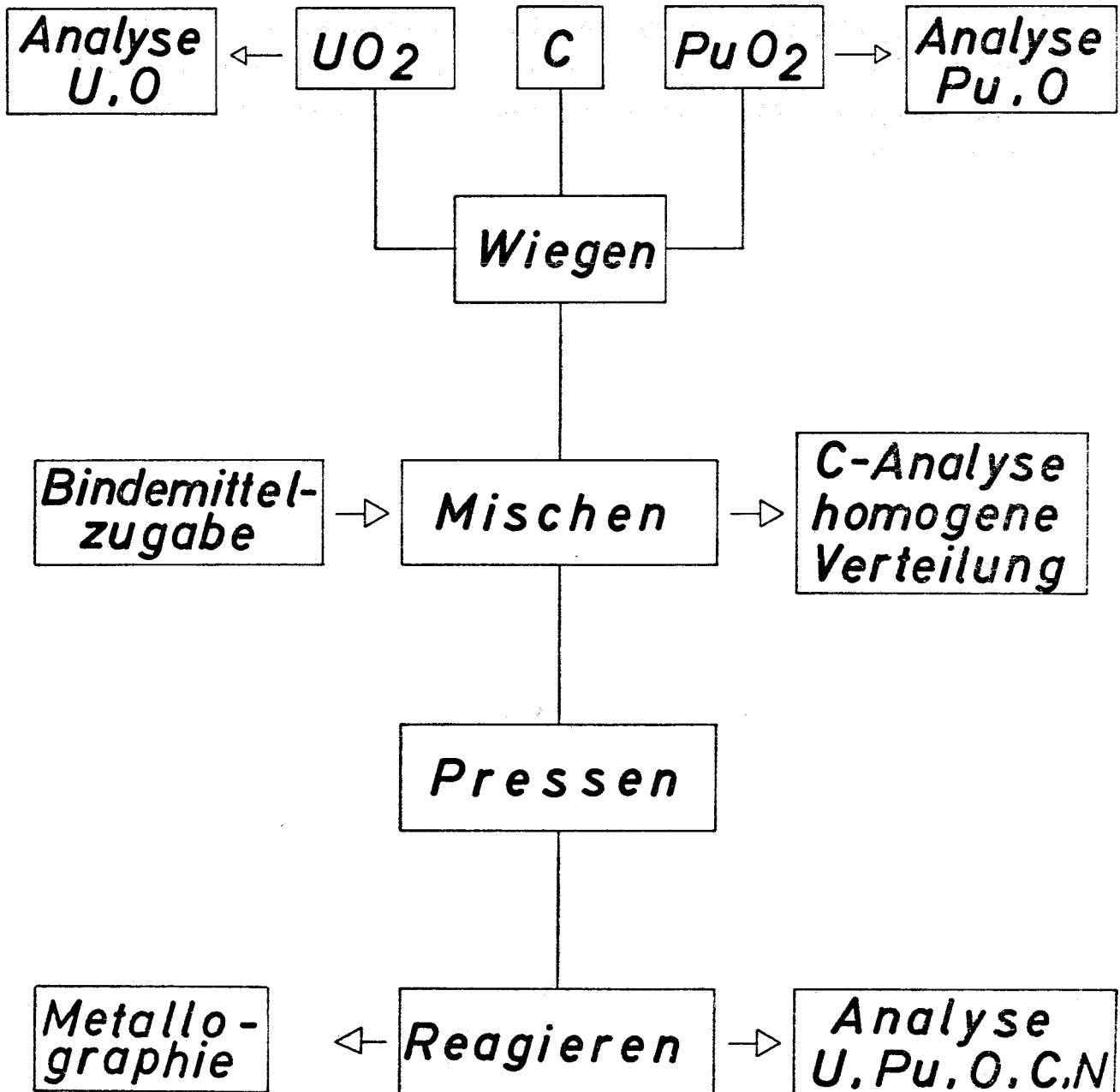
3.4.1 Gasreinigungsanlage

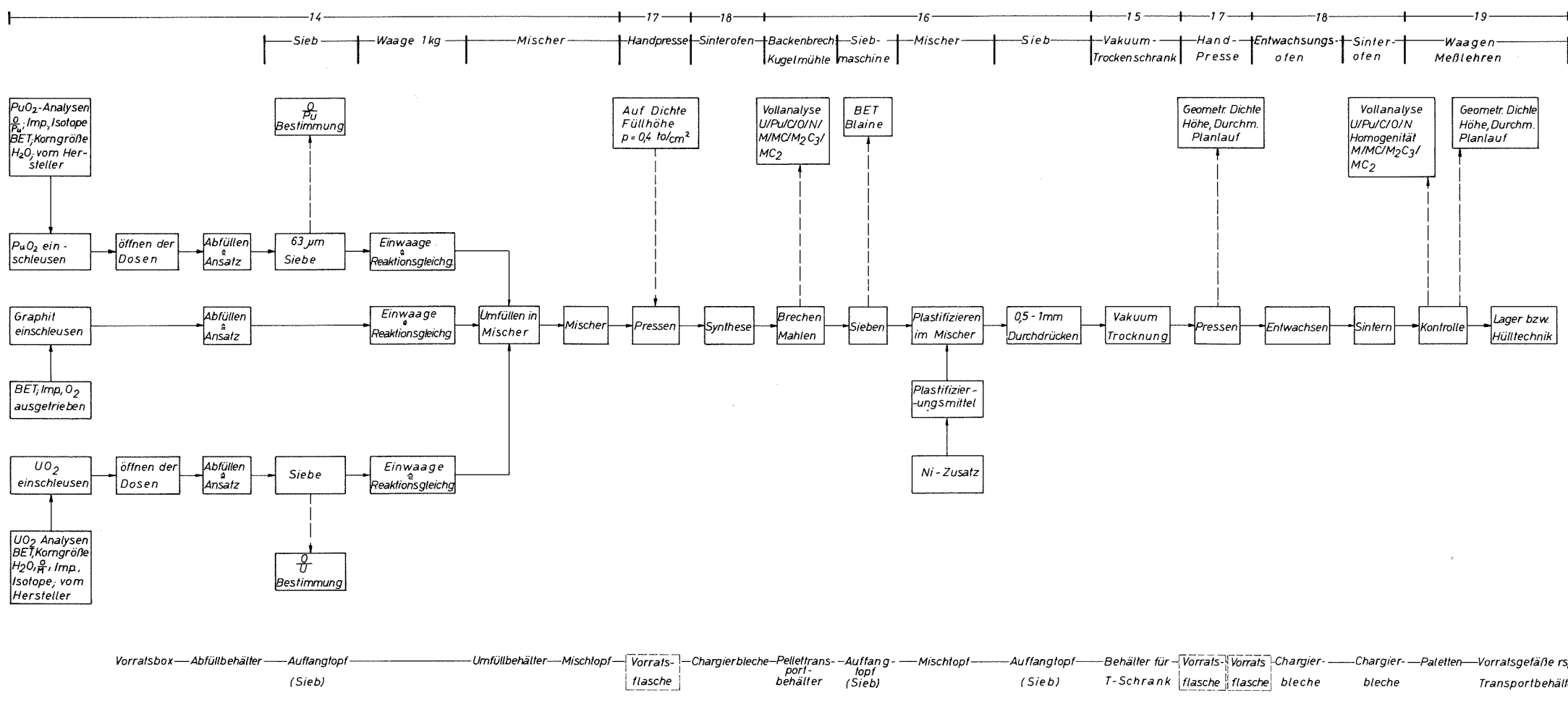
Die Gasreinigungsanlage wurde so dimensioniert, daß ein 10-facher Gaswechsel pro Box und Stunde erreicht wird. Dieser Wert wurde in Vorversuchen als anzustrebender Wert ermittelt. In Abb. 14 wird ein Blockschema wiedergegeben. Die Reinigung des aus den Boxen kommenden Gases von Wasserspuren wird in einem Adsorptionsbehälter durchgeführt, der mit Molekularsieb gefüllt ist. Zwei solcher Behälter stehen zur Verfügung, die wechselweise betrieben werden können. Zur Regeneration wird das adsorbierte Wasser bei erhöhten Temperaturen im Vakuum ausgetrieben. Sauerstoff und Stickstoff werden durch Reaktion mit Ti-Schwamm bei Temperaturen um $900^{\circ}C$ entfernt. Diese Reaktion ist irreversibel, die Füllung eines Ofens muß erneuert werden, wenn sie verbraucht ist. Die Drucke in den Sammelleitungen für Zu- und Abluft sind beliebig einstellbar, eine automatische Druckregelung sorgt für konstante Druckverhältnisse. Wegen der hohen Toxizität des Plutoniums sind die Drucke so bemessen, daß bei Normalbedingungen ein Unterdruck von - 20 mm WS in den Boxen vorliegt. Um Druckschwankungen auszugleichen, die durch das Hantieren in den Handschuhen einer Box entstehen, befindet sich an jeder Box ein separates Druckregelungssystem. Dieses Regelungssystem ist eine eigene Entwicklung der Firma ALKEM. In Abb. 15 findet sich hiervon eine schematische Darstellung.

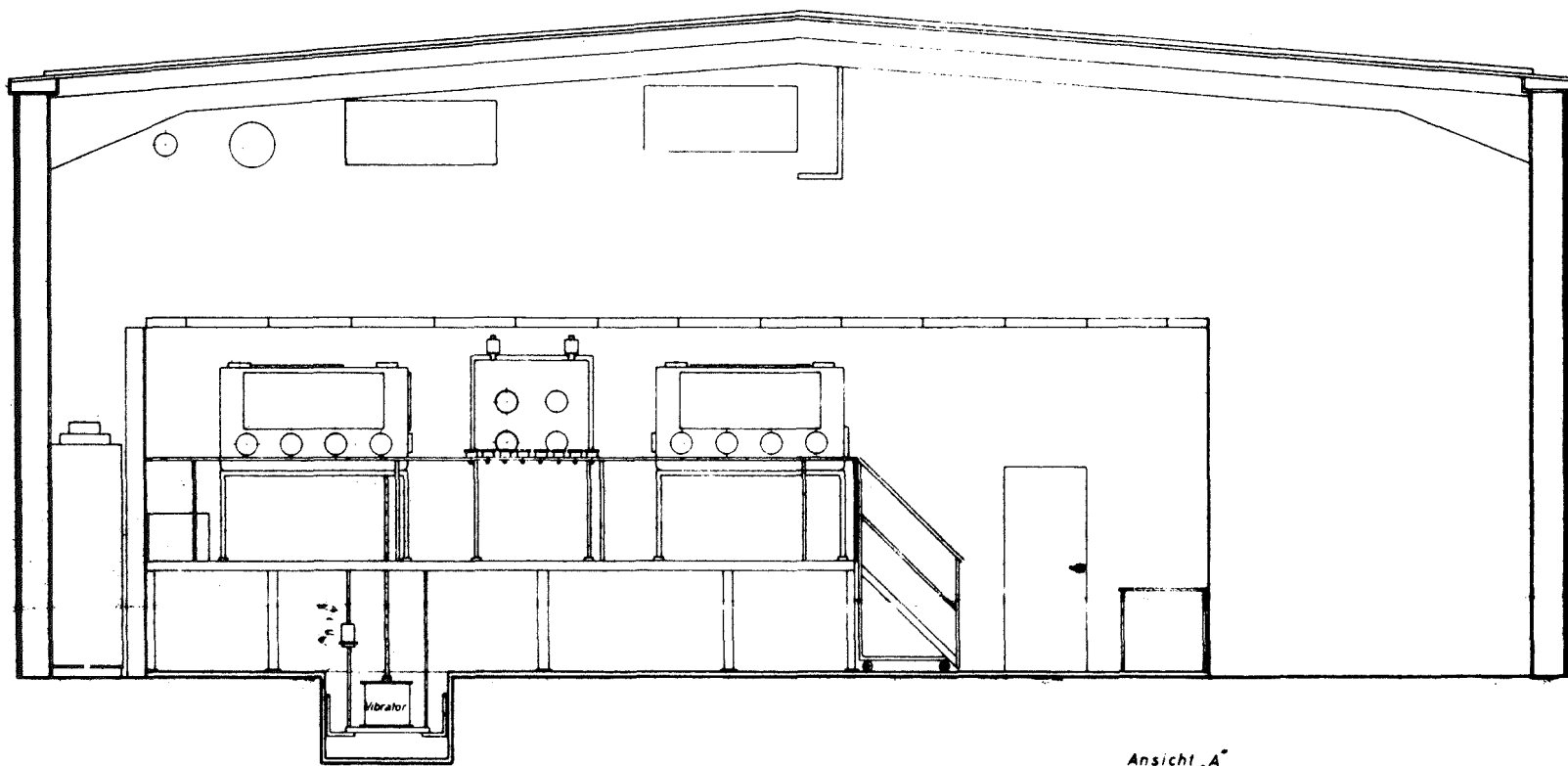
3.4.2 Gasüberwachung

Zur Kontrolle der Verunreinigungsgehalte in jeder Box wurde ein System entwickelt, das es erlaubt, aus jeder Box Gasproben zur Analyse zu entnehmen. Es werden die Verunreinigungen der Probe an Sauerstoff und Wasser gemessen und auf einem Schreiber registriert. Entweder wird der Verunreinigungsgehalt einer Box kontinuierlich gemessen, oder es wird in bestimmten zeitlichen Abständen die Probe aus jeweils einer anderen Box entnommen. Der Meßgeräteschrank, in dem zentral alle Meß- und Registriergeräte untergebracht sind, wurde von der Firma Chemie-Technik geliefert.

Herstellen von Karbid (Pulversynthese)

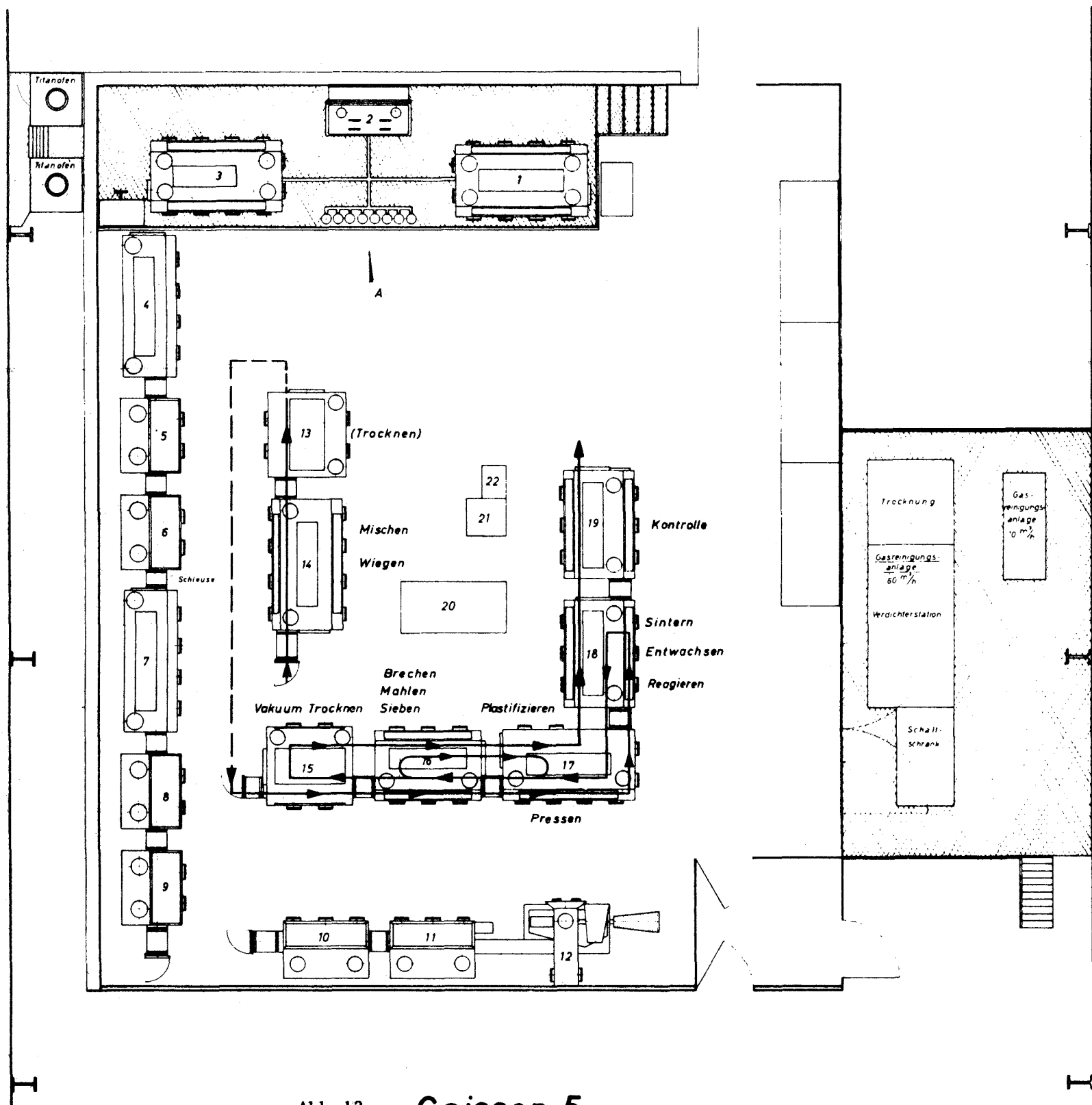






Ansicht „A“

112-40

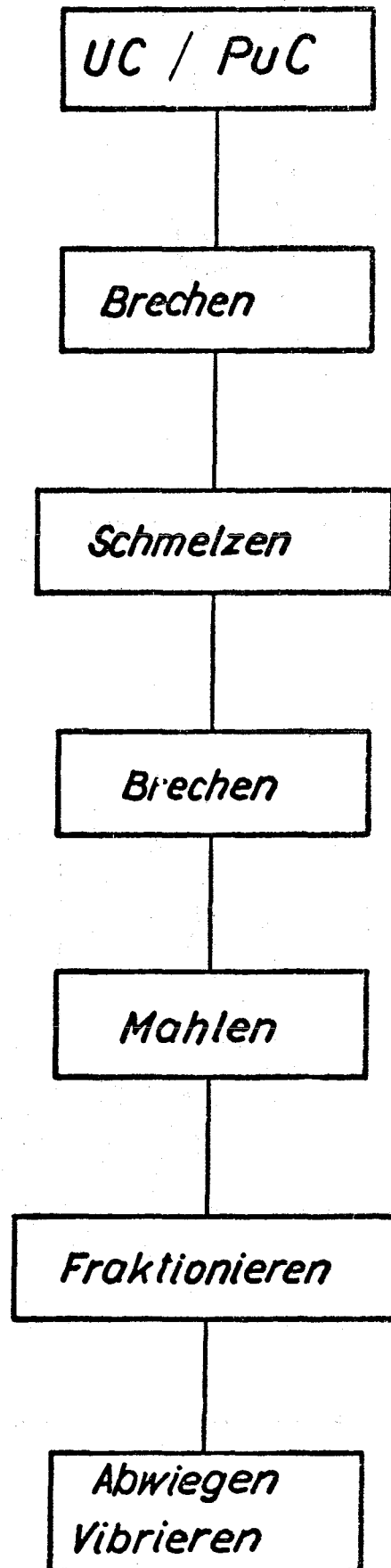


- ① Schweiß-Box
 - ② Dekontaminations-Box
 - ③ Vibrer-Box
 - ④ Ofenbox C-O-Bestimmung
 - ⑤ Ofenbox O₂-Bestimmung
 - ⑥ Waagebox
 - ⑦ Lesebox
 - ⑧ Stickstofffreie Rohstoffbestimmungsbox
 - ⑨ Potentiometrische Titrationsbox U + Pu
 - ⑩ Schleif- und Polierbox
 - ⑪ Präparationsbox
 - ⑫ Mikroskop MFS Pa =
 - ⑬ Trocken-Box
 - ⑭ Misch-Sieb-Waage-Box
 - ⑮ Trocken-Box
 - ⑯ Brechen-Mahlen-Sieb-Box
 - ⑰ Pressen-Box
 - ⑱ Sinter- und Entwachsungs-Box
 - ⑲ Box für Säulenlegen und Kontrolle
 - ⑳ Analysenschrank
 - ㉑ Steuerstrahl von Sinterofen
 - ㉒ Steuerstrahl von Entwachsungsboxen
- Luft
 - Stickstoff
 - Argon
 - Helium

Abb. 12 Caisson 5

Maßstab: 1:25

Herstellung von Vibrationspartikeln



Inertgasreinigungsanlage 60 m³/h

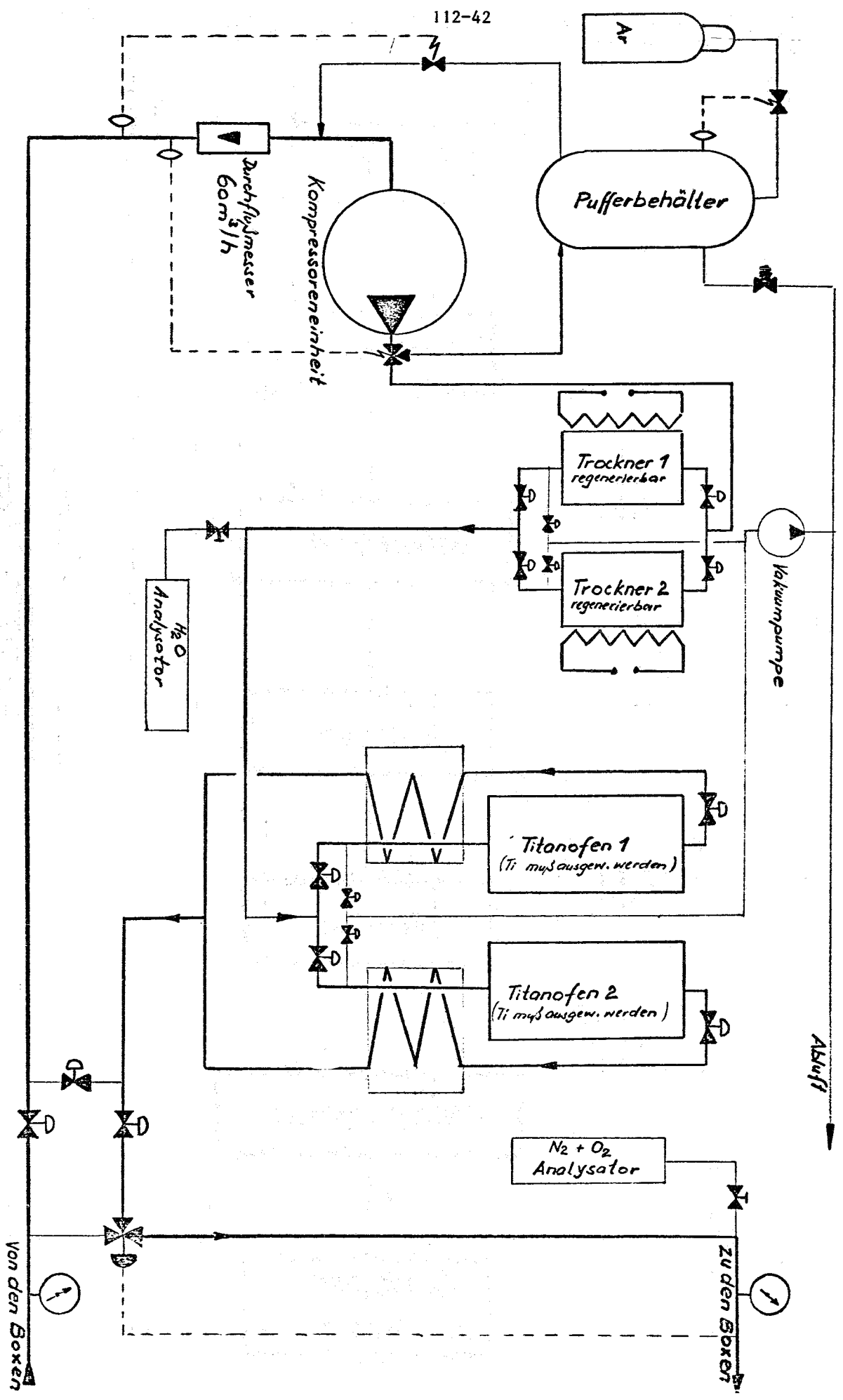


Abb. 14

Inertgasboxen mit Druckregelungssystem

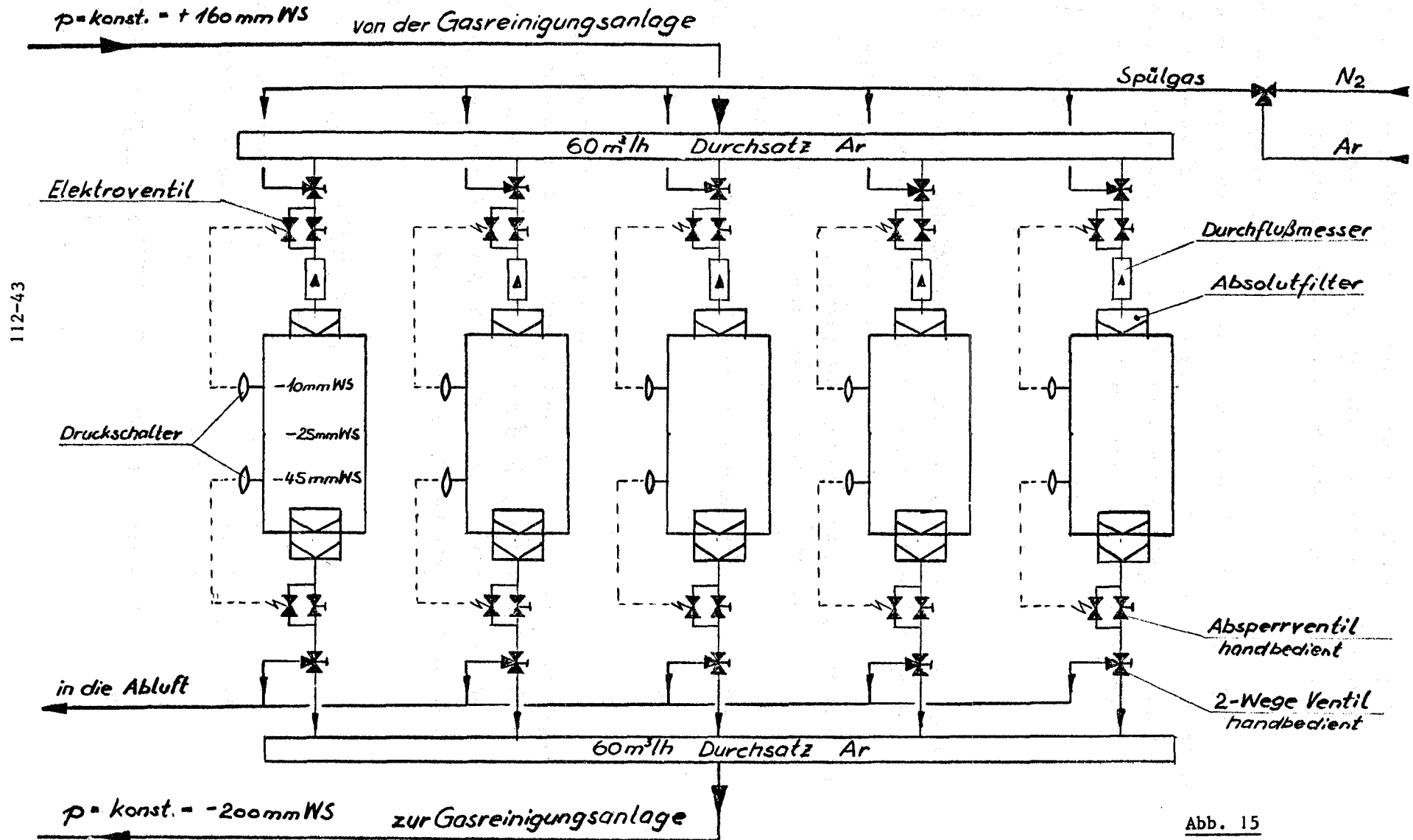


Abb. 15

4. Arbeiten der Fa. NUKEM zum Koord. Karbidprogramm (A.Krauth, NUKEM)

Für diesen Bericht sind aus dem NUKEM-Arbeitsprogramm zwei Themen herausgegriffen worden: Das Pressen und Sintern von UC-Pulvern, ferner die Messung der Kinetik des O_2 - und H_2O -Pickup durch UC.

4.1 Pressen und Sintern von Urankarbidpulvern

4.1.1 Einleitung

Um in dem großen Feld der Pulver-, Preß- und Sinterparameter einen für die technische Herstellung von Karbid-Brennstofftabletten sinnvollen Bereich abzustecken, wurden erste Preß- und Sinterversuche mit Urankarbid durchgeführt. An diese Voruntersuchungen sollen sich später die notwendigen Parameterstudien anschließen.

4.1.2 Pulverherstellung

Für die hier beschriebenen Press- und Sinterversuche wurden zwei Urankarbidpulver verwendet.

Pulver Nr. 1 wurde hergestellt durch Reaktion von UO_2 mit Kohlenstoff unter Vakuum bei $2000^\circ C$ und anschließendem Brechen und Mahlen. Die Oberfläche des Materials betrug $1,2 \text{ m}^2/\text{g}$.

Pulver Nr. 2 wurde durch Karboreduktion bei $2000^\circ C$ und anschließendes Schmelzen im Lichtbogenofen hergestellt. Nach dem Mahlen betrug die Oberfläche des Pulvers $1,9 \text{ m}^2/\text{g}$.

4.1.3 Pressen der Grünlinge

Die Grünlinge wurden mit einer hydraulischen Laborpresse der Fa. Weber PW 20 gepresst. Bei dieser Presse sind Presslast, Vordruck und Haltezeit wählbar. Eine Höhenbegrenzung für die Pellets ist nicht vorhanden, gepresst wurde bindemittelfrei, die Matrizenschmierung erfolgte von Hand, und die Pulvermenge wurde abgewogen.

Die Variation des Preßdruckes an Pulver Nr. 2 ergab, wie Tab. 5 zeigt, daß bei einem Pressdruck von 2000 kp/cm^2 die optimale Grünlingsdichte mit der geringsten Schwankungsbreite der einzelnen Dichten erreicht wird.

Tabelle 5

Preßdruck $[\overline{\text{kp/cm}^2}]$	1200	2000	2800
mittlere Dichte $[\overline{\text{g/cm}^3}]$	8,4	8,8	9,0
mittlere Dichte $[\% \text{ th.D.}]$	61,5	65,0	66,0
Schwankungsbreite der Einzeldichten $[\% \text{ th.D.}]$	1,4	1,0	3,0

Mit diesem Preßdruck wurden Pulver Nr. 1 und Pulver Nr. 2 gepreßt. Tab. Nr. 6 zeigt die erhaltenen Preßergebnisse, die an jeweils 20 Pellets ermittelt wurden.

Tabelle 6

	Pulver Nr. 1 aus reagiertem Mat. Spez. Oberfläche $1,2 \text{ m}^2/\text{g}$	Pulver Nr. 2 aus geschmolzenem Mat. Spez. Oberfläche $1,8 \text{ m}^2/\text{g}$
Preßdruck $[\overline{\text{kp/cm}^2}]$	2000	2000
mittlere Dichte $[\overline{\text{g/cm}^3}]$	8,4	8,8
mittlere Dichte $[\% \text{ th.D.}]$	61,5	65,0
Schwankungsbreiten der Einzeldichten $[\% \text{ th.D.}]$	1,5	1,0

Diese Ergebnisse zeigen, daß das geschmolzene Material, obwohl es eine um $0,7 \text{ m}^2/\text{g}$ höhere Oberfläche besitzt, eine größere Grünlingsdichte mit einer geringeren Schwankungsbreite der Einzeldichten erreicht als Pulver Nr. 1. Abb. 16 zeigt die Verteilung der Grünlingsdichten an den Pulvern Nr. 1 und Nr. 2, die mit einem Preßdruck von 2000 kp/cm^2 hergestellt wurden. Die Verteilungskurven wurden aus jeweils 80 Pellets ermittelt. Wie bei einer hydraulischen Presse nicht anders zu erwarten, sind die Grünlingsdichteverteilungskurven relativ schmal.

4.1.4 Sintern der UC-Grünlinge

Zur Ermittlung der Sintercharakteristik eines Urkarbidpulvers wurde zunächst das Pulver Nr. 1 bei verschiedenen Temperaturen und unter verschiedenen Atmosphären gesintert. Heizleiter und Pelletgestell des Sinterofens waren aus Wolfram. Die Aufheizzeit betrug $650 \text{ }^\circ\text{C/h}$, die Haltezeit 3 Stunden. Tabelle 7 gibt die bei verschiedenen Sintertemperaturen und Sinteratmosphären erreichten mittleren Dichten und die lineare Schrumpfung bezogen auf die Grünlingsabmessungen an.

Tabelle 7

Sintertemp. [$^\circ\text{C}$]	Sinteratmosphäre	mittlere Dichte [% th.D.]	mittlere lineare Schrumpfung [%]
1600	Vakuum	78,0	9,0
	Argon	78,2	9,0
1800	Vakuum	90,0	12,3
	Argon	90,2	12,5
2000	Vakuum	93,6	13,6
	Argon	90,2	13,2

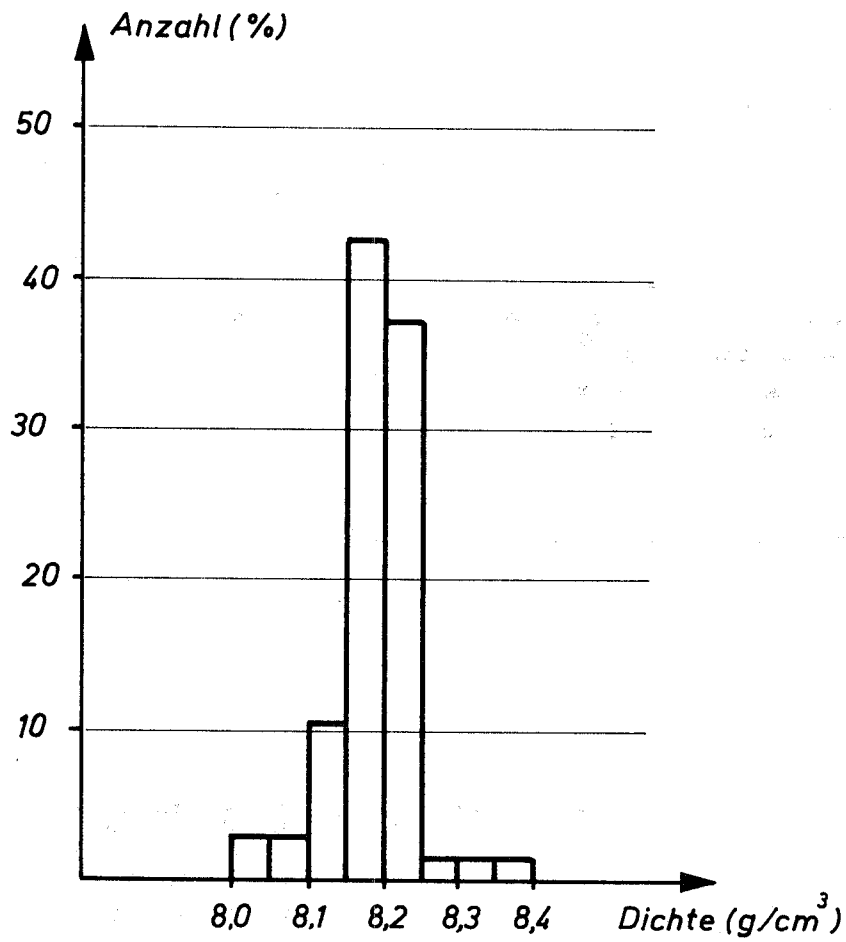
Die Mittelwerte wurden hier aus 20 Einzelpellets bestimmt. Wie die ersten Sinterergebnisse zeigen, spielt die Sinteratmosphäre bis zu einer Sinterdichte von 90 % th.D. keine Rolle, d.h. Vakuum- oder Argonsinterung ist gleichwertig. Sollten Dichten über 90 % ohne Nickelzusatz erreicht werden, erscheint die Vakuumsinterung günstiger.

Anschließend an diese Vorversuche sollte nun aus Pulver Nr. 1 und Pulver Nr. 2 Pellets mit einer Sinterdichte um 90 % th.D. hergestellt werden. Abb. 17 zeigt das Sinterdichte-/ Grünlingsdichtediagramm für Pulver Nr. 1, Abb. 18 dasselbe für Pulver Nr. 2. Wie aus diesen Abbildungen hervorgeht, wurde eine mittlere Schwankungsbreite der Sinterdichten von etwa 3 % th.D. für beide Pulver erreicht. Dies bedeutet, daß die größere Grünlingsdichteschwankung des Pulvers Nr. 1 auf die Sinterdichteschwankung keinen merklichen Einfluß hat, wenn diese Werte pauschal betrachtet werden. Geht man jedoch den Ursachen dieser hohen Sinterdichteschwankung nach, so kann festgestellt werden, daß diese von einer inhomogenen Temperaturverteilung im Sinterofen herrührt. Werden die einzelnen Etagen des Chargiengestelles getrennt betrachtet, so liegen die Sinterdichteschwankungen je nach der Etagennummer zwischen 1 und 2 % th.D. Abb. 19 zeigt die pauschale Sinterdichteverteilung für Pulver Nr. 1 und Pulver Nr. 2. Die relativ große Breite dieser Verteilung wird sich bei einer homogenen Temperaturverteilung im Ofen wesentlich verringern und die Breite der Grünlingsdichteverteilung erreichen können.

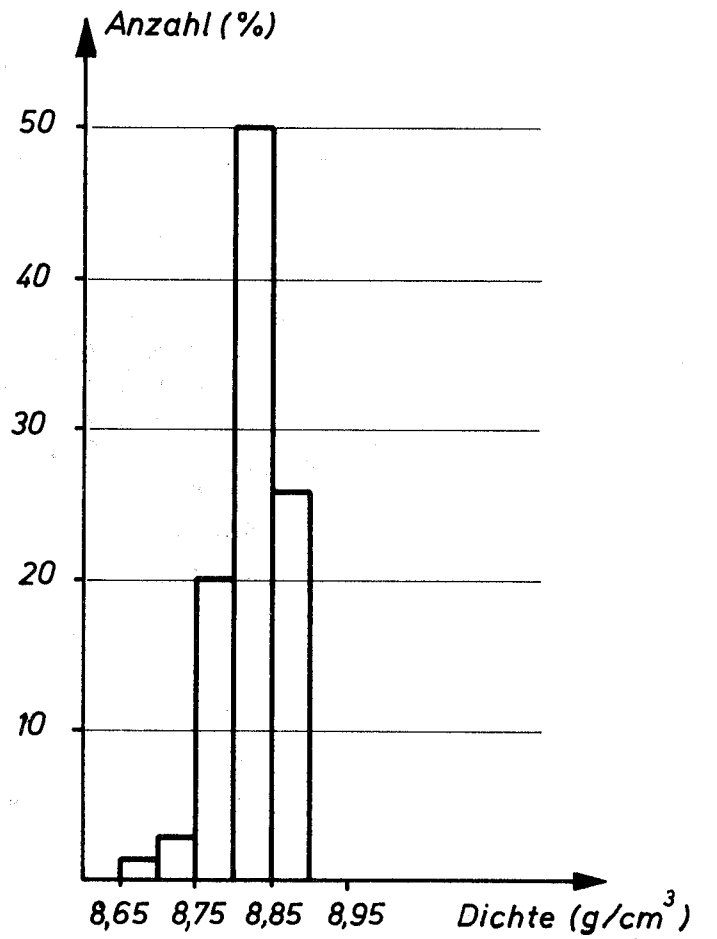
Abb. Nr. 20 zeigt die Anschliffe zweier Pellets hergestellt aus Pulver Nr. 1 und Pulver Nr. 2 entsprechend den Sinterdaten aus Abb. Nr. 17 und 18. Bei Pulver Nr. 1 ist eine relativ homogene Porenverteilung zu erkennen, während bei Pulver Nr. 2 größere porenfreie Gebiete zu erkennen sind. Diese porenfreie Gebiete sind ehemals geschmolzene Teilchen, die beim Mahlvorgang nicht vollständig zerkleinert wurden.

4.1.5 Schlußbemerkungen:

Die ersten Untersuchungen zeigten, daß Grünlinge mit relativ geringen Dichteschwankungen bindemittelfrei hergestellt werden können. Ein Preßdruck von 2 t/cm^2 erscheint dafür am günstigsten. Bei Sintertemperaturen um $1800 \text{ }^\circ\text{C}$ unter Vakuum können solche Grünlinge zu Pellets mit theoretischen Dichten bis zu 94 % gesintert werden. Die Sinterdichteschwankung der so hergestellten Pellets beträgt etwa 3 % th.D., könnte jedoch bei einer homogenen Temperaturverteilung im Ofen wesentlich verbessert werden.



Pulver Nr. 1
reagiertes Material



Pulver Nr. 2
geschmolzenes Material

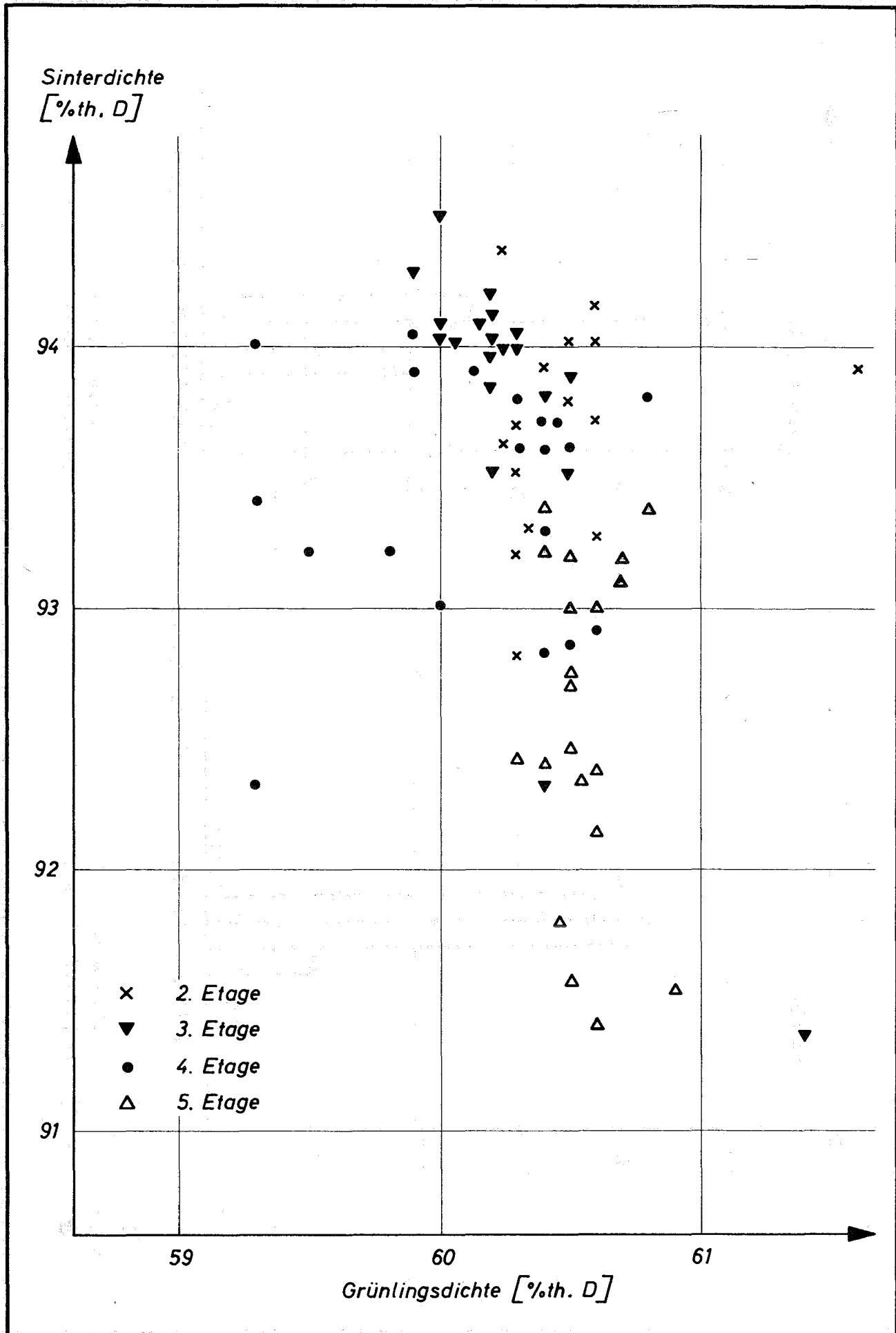


Abb. 17

Sintern von UC reagiert. (Pulver Nr. 1)
 Temp.: 1800°C, Zeit: 4h, Druck: 10⁻⁵Torr

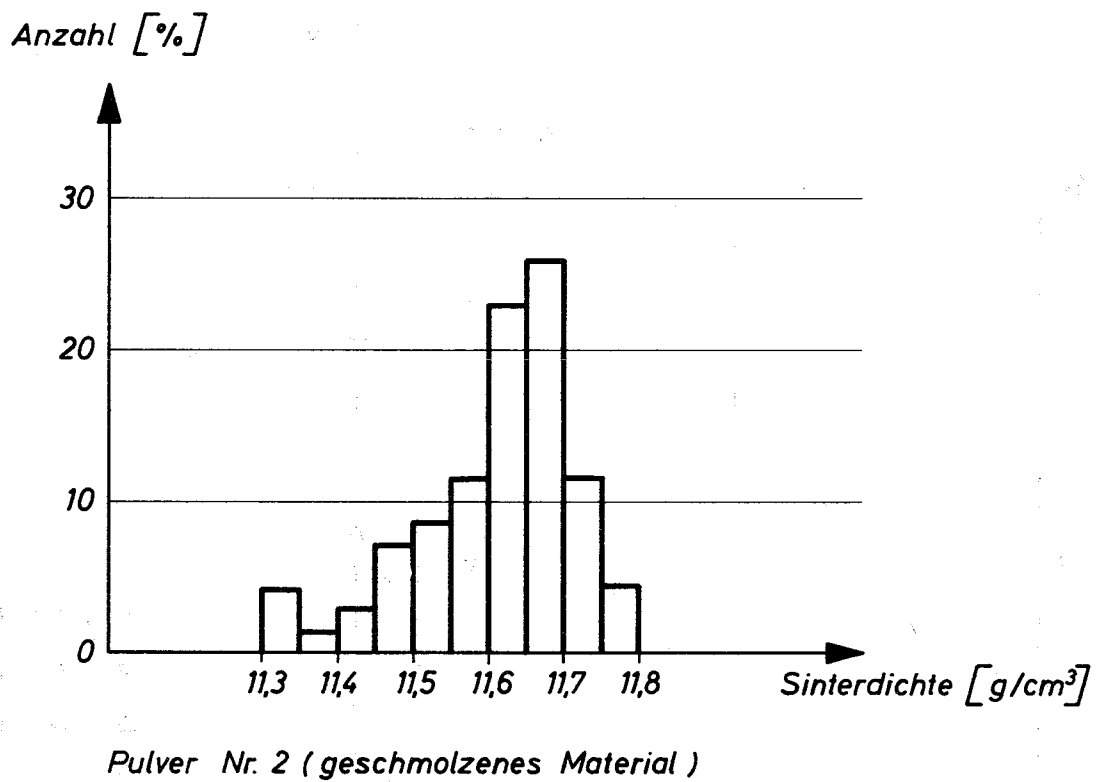
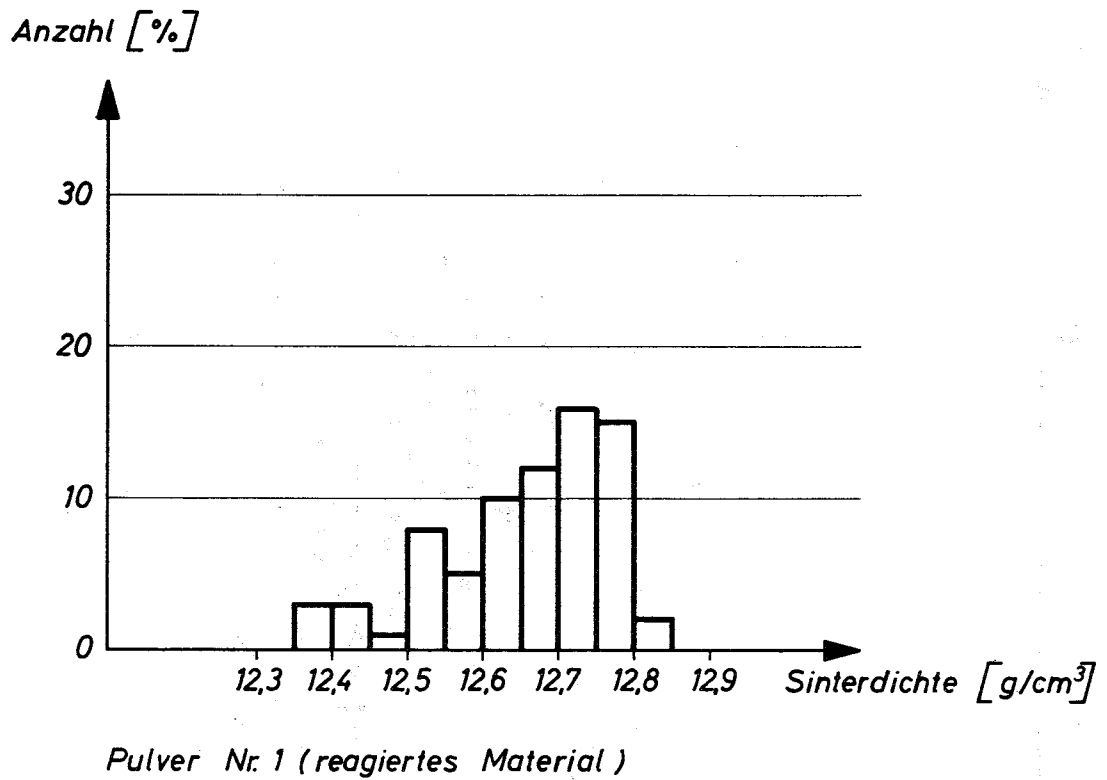
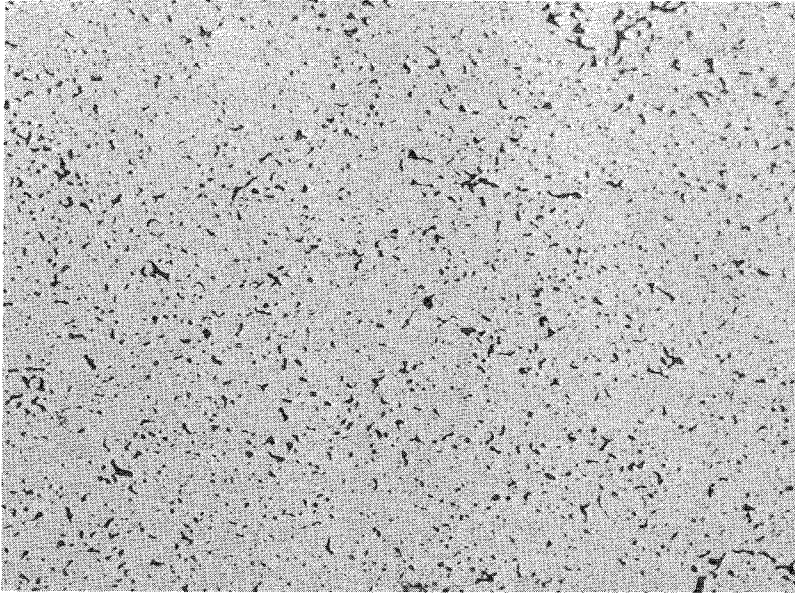
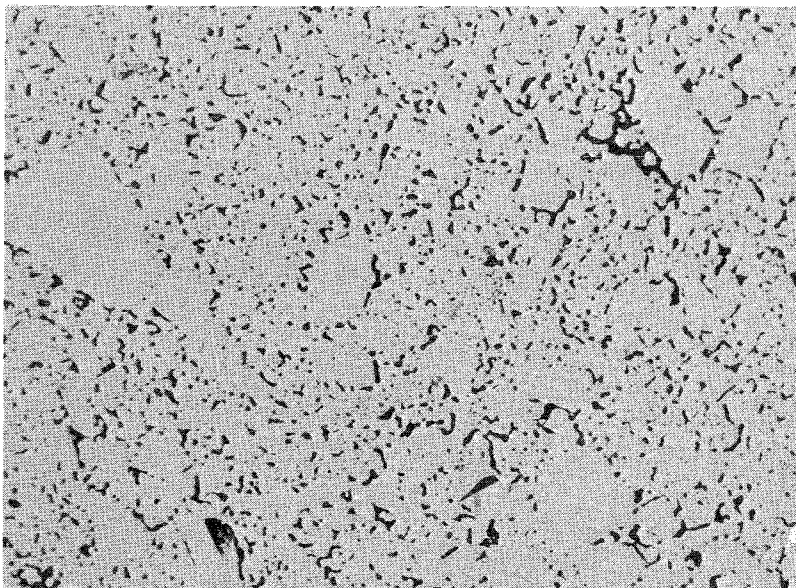


Abb. 20: Sinterlinge aus reagiertem und geschmolzenem Material (Pulver Nr. 1 und Nr. 2)



Pulver Nr. 1

Vergr. 300 x



Pulver Nr. 2

Vergr. 300 x

4.2. O₂- und H₂O-Pick-up von karbidischem Brennstoff

4.2.1 Einleitung

Die Güte eines Brennstoffkarbides und die Sinterfähigkeit eines Karbidpulvers hängt stark vom Sauerstoffgehalt ab. Dieser wird zu einem beträchtlichen Teil durch die O₂-Aufnahme aus der Boxenatmosphäre während der einzelnen Fertigungsschritte bestimmt und schwankt je nachdem ob ein reagiertes Pellet, ein feines Pulver, ein Grünling oder ein Sinterling vorliegt. Die Aufnahme des O₂ erfolgt aus dem O₂- bzw. H₂O-Anteil der Schutzgasatmosphäre und die Höhe des Verunreinigungsgehaltes bestimmt die aufgenommene Menge an O₂ bzw. die Abnahme des Kohlenstoffgehaltes durch die Bildung von Methan aus der Reaktion des Karbides an Wasser. Die Bestimmung des O₂- bzw. H₂O-Pick-up durch das Brennstoffkarbid während der einzelnen Fertigungsschritte soll einmal der genauen Einstellung des äquivalent Kohlenstoffgehaltes und zum andern einer optimalen Auslegung der Schutzgasanlage für eine spätere Fertigung dienen.

4.2.2 Apparatur zur definierten Einstellung des H₂O bzw. O₂-Gehaltes mit Inertgas.

Bei dieser Anordnung wird ein definierter durch Elektrolyse erzeugter H₂O bzw. O₂-Anteil einer zeitlich konstanten Menge Inertgas zudosiert. Diese Anlage läßt sich in drei Teile gliedern:

- a) Erzeugung eines definierten O₂-Gehaltes
- b) Erzeugung eines definierten H₂O-Gehaltes
- c) Meßgeräte zur Bestimmung des O₂- bzw. H₂O-Gehaltes.

a) Erzeugung eines definierten O₂-Gehaltes:

Ein konstanter Gasstrom fließt über eine mit BTS-Material gefüllte O₂-Entfernungskolonnen Abb. 21(7). Das von O₂ befreite Gas

durchströmt dann eine Elektrolytzelle (6), die aus zwei kommunizierenden Röhren besteht. Hier wird durch Elektrolyse eine definierte Menge H_2O und O_2 erzeugt. Während das O_2 vom Gasstrom in die anschließenden H_2O -Entfernungskolonnen mitgeführt wird, entweicht das entstandene H_2 durch einen Seitenschenkel ins Freie. Das aus den beiden H_2O -Entfernungskolonnen (8,9) austretende Gas hat nun einen definierten O_2 -Gehalt. Dieser Gehalt ist zwischen 1 und 1000 ppm O_2 einstellbar.

b) Erzeugung eines definierten H_2O -Gehaltes:

Zur Erzeugung eines definierten H_2O -Gehaltes wird aus dem Inertgas zunächst der Sauerstoff durch eine BTS-Kolonne Abb. 21 (7) entfernt. Danach durchströmt das O_2 -freie Gas eine Elektrolytzelle (5). Hier wird O_2 und H_2 definiert und einstellbar erzeugt und vom Gasstrom weitergeführt. Der Rest H_2O -Gehalt aus der Flasche sowie das in der Elektrolytzelle aufgenommene H_2O wird in zwei anschließenden H_2O -Entfernungskolonnen (8 und 9) entfernt. An dieser Stelle besitzt das Gas den in (5) eingestellten O_2 bzw. H_2 -Gehalt. Dieses Gas durchströmt nun eine Katalysatorkolonne (10) in der die Umsetzung des O_2 und H_2 in Wasser erfolgt. Der Katalysator besteht aus mit Palladium bedampfter Asbestwatte, die sich auf einer Temperatur von etwa $220^\circ C$ befindet. Der H_2O -Gehalt kann zwischen 1 und 1000 ppm H_2O variiert werden. Werden diese aus beiden Erzeugerteilen austretenden Gas mengen gemischt, so kann ein Gas mit beliebigem O_2 - und H_2O -Gehalt erzeugt werden.

c) Meßgeräte zur Bestimmung des O_2 - und H_2O -Gehaltes:

Messung des H_2O -Gehaltes

Zur Messung des H_2O -Gehaltes dient ein kommerzielles, kontinuierlich messendes Wasserspurenmeßgerät. Die Messanordnung besteht aus der eigentlichen Meßzelle, einem Anzeigegerät und einem Schreiber. Die Meßzelle wird von dem zu messenden Gas

durchströmt. Im Inneren befindet sich ein Glasstab mit einer Doppelwicklung aus Platindraht. Stab und Drähte sind mit einer dünnen Phosphorschicht belegt. Das im Gas enthaltene Wasser wird von der Phosphorsäure aufgenommen und durch einen elektrischen Strom zerlegt. Gleichzeitig wird die Phosphorsäure elektrolytisch durch Zerlegung des Wassers in H_2O und O_2 vom Wasser befreit. In kurzer Zeit bildet sich ein Gleichgewicht zwischen aufgenommenem und zersetztem Wasser aus. Der dabei fließende Strom ist der aufgenommenen Wassermenge proportional solange die Strömungsgeschwindigkeit konstant gehalten wird.

Messung des O_2 -Gehaltes

Zur Messung des O_2 -Gehaltes dient ein kommerzielles, kontinuierlich messendes O_2 -Spurenmessgerät. Die Messung erfolgt nach dem Prinzip der kathodischen Sauerstoffreduktion, wobei eine galvanische Meßkette, bestehend aus einer Silberkatode und einer Bleianode in einem Elektrolyten verwendet wird. Die Stromstärke dieser Meßzelle hängt von der Konzentration des im Elektrolyten gelösten O_2 und dem Partialdruck in der Gasphase ab und stellt somit ein reproduzierbares Maß für den Sauerstoffgehalt des zu untersuchenden Gases dar.

Die gesamte Anlage ist in einem fahrbaren Laborwagen installiert. Eine Ansicht dieses Wagens zeigt Abb. 22.

4.2.3 Meßergebnisse:

Um den O_2 - bzw. H_2O -Pick-up an einem Karbidpulver oder einem Karbidgrünling messen zu können, wird eine bestimmte Menge an Material in einen gasdichten Probenbehälter eingewogen. Danach wird ein konstanter O_2 - bzw. H_2O -Gehalt des Schutzgases eingestellt und direkt gemessen. Ist ein konstanter H_2O - und O_2 -Gehalt erreicht so wird das Gas durch den Probenbehälter geleitet. Nach dem Überleiten des Schutzgases wird der Verunreinigungsgehalt gemessen. Aus der Differenz der Verunreinigungsgehalte vor und nach dem Überleiten über die Probe kann die Kinetik der O_2 - und

H_2O -Aufnahme getrennt und kontinuierlich gemessen werden. Aus der Differenz der O_2 -Werte kann dann die Sauerstoffaufnahme berechnet werden. Der Sauerstoff lagert sich an der Oberfläche der Pulver oder Grünlinge an und wird beim Sintern zum Teil in das Kristallgitter eingebaut und zum anderen Teil als CO entweichen und damit den Kohlenstoffgehalt des Karbides herabsetzen.

Aus der Differenz der H_2O -Werte wird einmal die weitere Sauerstoffaufnahme berechnet und zum anderen die durch die Entstehung von CH_4 hervorgerufene Verminderung des Kohlenstoffgehaltes bestimmt.

Abb. 23 zeigt die Kinetik der Sauerstoffaufnahme aus dem O_2 - und dem H_2O -Gehalt des Schutzgases am Beispiel eines Urankarbidpulvers mit einer Oberfläche von $0,66 \text{ m}^2/\text{g}$ und von Urankarbidgrünlingen aus diesem Pulver mit einer Grünlingsdichte von 9 g/cm^2 . Bei dem Pulver handelt es sich um geschmolzenes Material, welches in einer Vibrationskugelmühle auf die genannte Feinheit gebracht wurde.

Die Kurven mit dem Index 1 zeigen die Gesamtaufnahme von Sauerstoff aus dem O_2 - und H_2O -Gehalt des Schutzgases, die Kurven mit dem Index 2 die Aufnahme von Sauerstoff aus dem O_2 -Gehalt, und die Kurven mit dem Index 3 die Aufnahme von Sauerstoff aus dem H_2O -Gehalt des Schutzgases. Die Kurve mit dem Index 1 ist somit die Summenkurve aus 2 und 3.

Die mit der Sauerstoffaufnahme aus dem H_2O -Gehalt verbundene Abnahme des Kohlenstoffgehaltes zeigt Abb. Nr. 24. Bei der Berechnung dieser Kurven wurde von der Annahme ausgegangen, daß der gesamte Wasserstoff durch die Bildung von CH_4 verbraucht wird.

Eine Zusammenstellung der Sauerstoffaufnahme durch Urankarbidpulver und Urankarbidgrünlinge in Abhängigkeit vom Verunreinigungsgehalt des Schutzgases findet sich in Abb. Nr. 25. Bei den eingetragenen Kurven handelt es sich dabei um die Aufnahme von Sauerstoff aus dem O_2 und dem H_2O -Gehalt des Schutzgases. Aus einem Vergleich der Kurven wird deutlich, daß wie erwartet ein Pulver wesentlich mehr O_2 aufnimmt, als ein Grünling. Des wei-

teren kann festgestellt werden, daß die O_2 -Aufnahme bei Anwesenheit von H_2O sowohl bei Pulver als auch bei Grünlingen wesentlich erhöht wird.

2.4 Schlußbemerkung

Bei den beschriebenen Versuchen handelt es sich um erste Versuchsergebnisse, die möglicherweise noch revisionsbedürftig sind. Aus diesem Grund werden auch keine weiteren Deutungen ausgeführt.

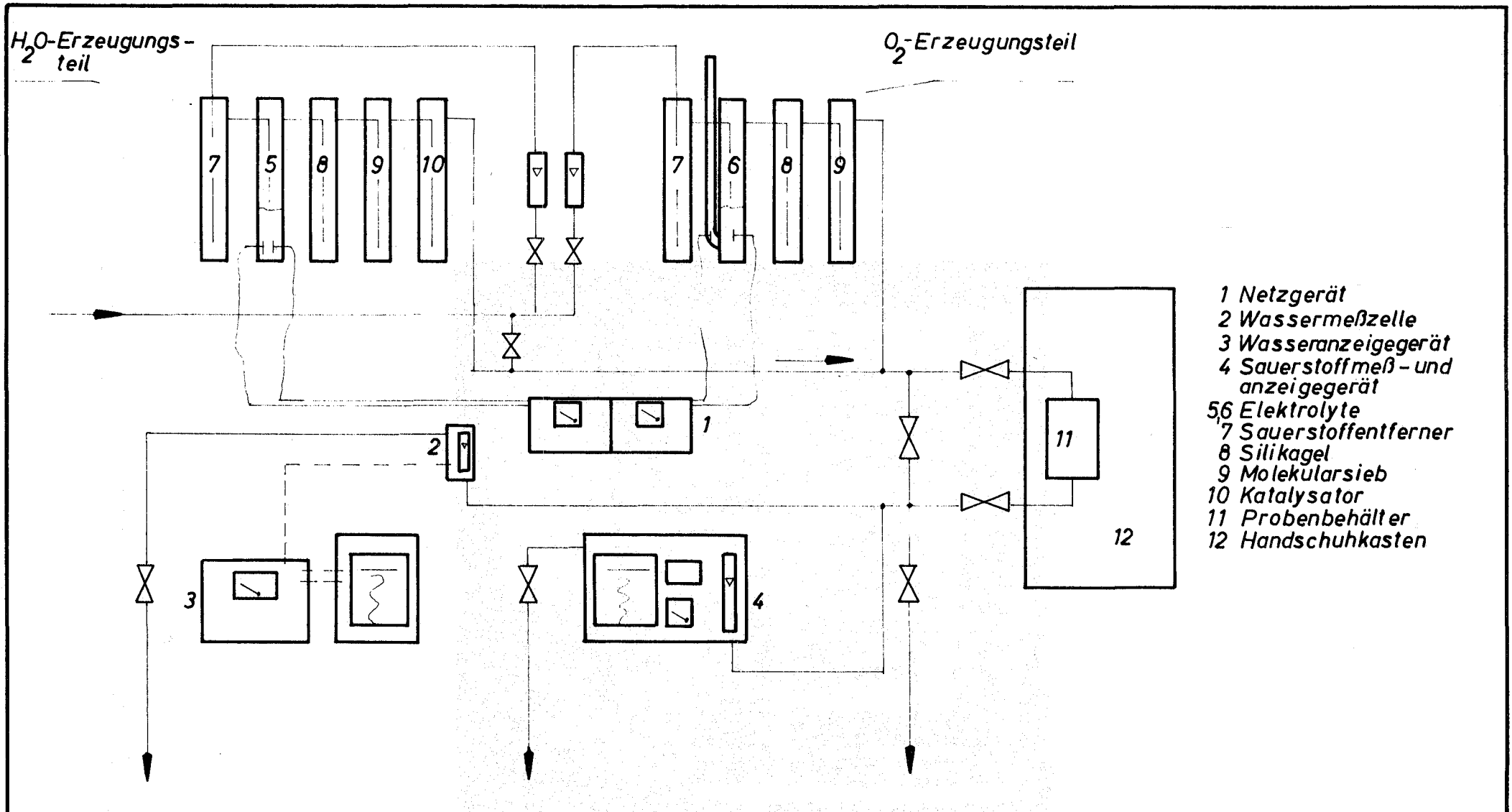


Abb. 21

Prinzipskizze des Laborwagens zur Erzeugung definierter H₂O- und O₂-Mengen in Gasen

112-60

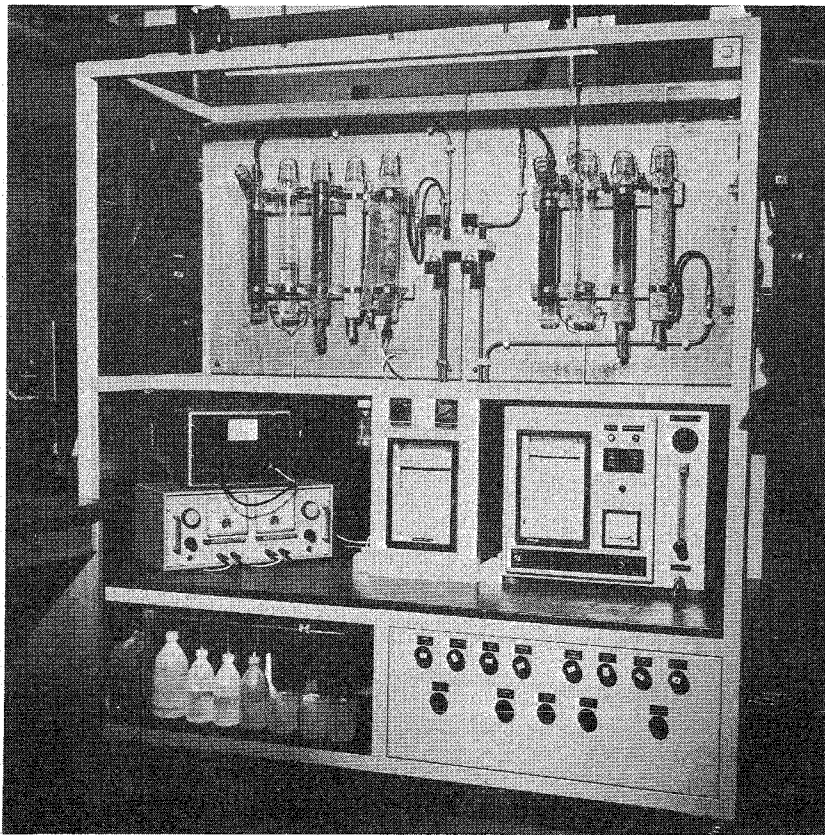
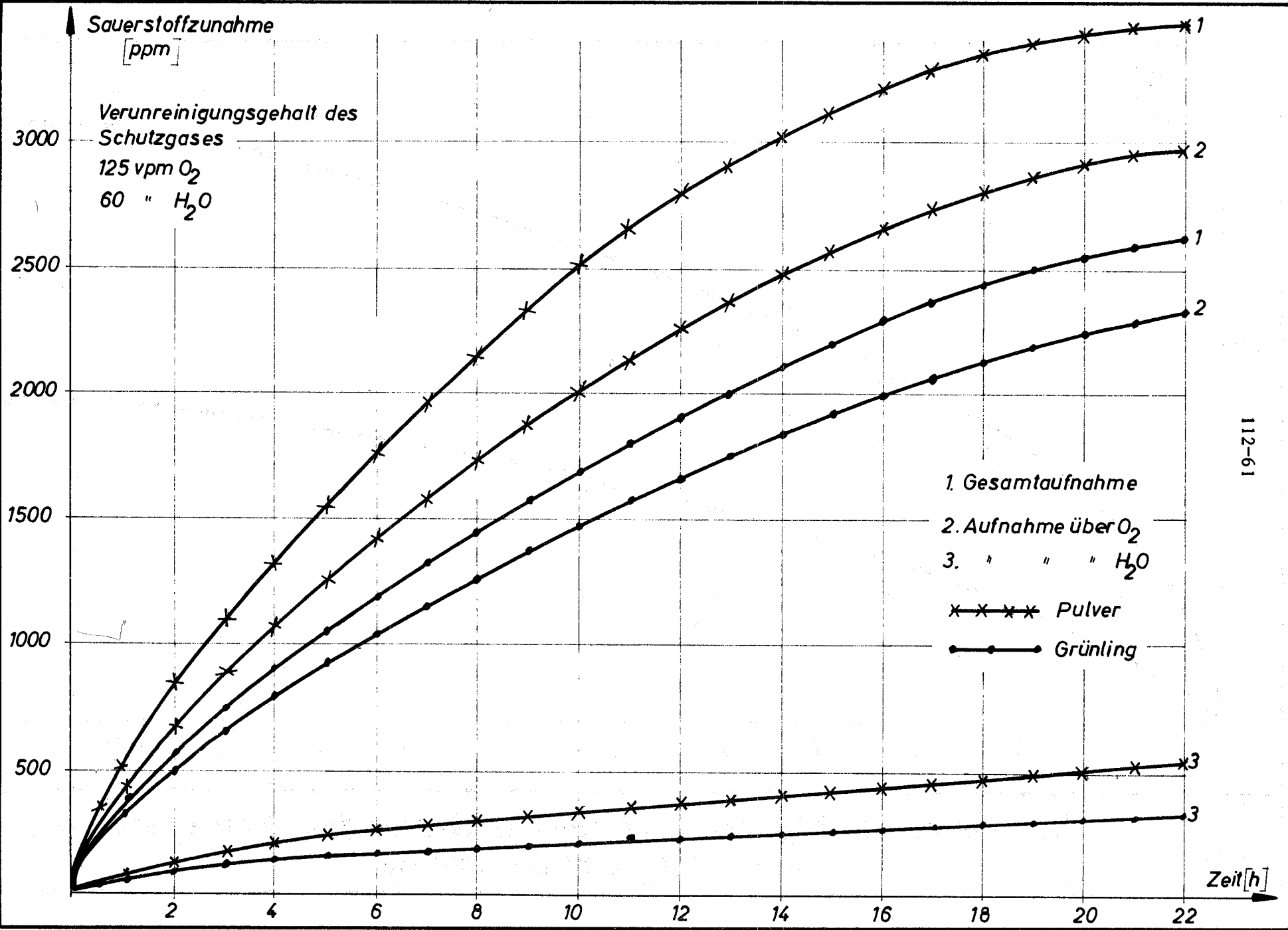


Abb. 22: Laborwagen zur Messung des O_2 - und H_2O -Pick-up.



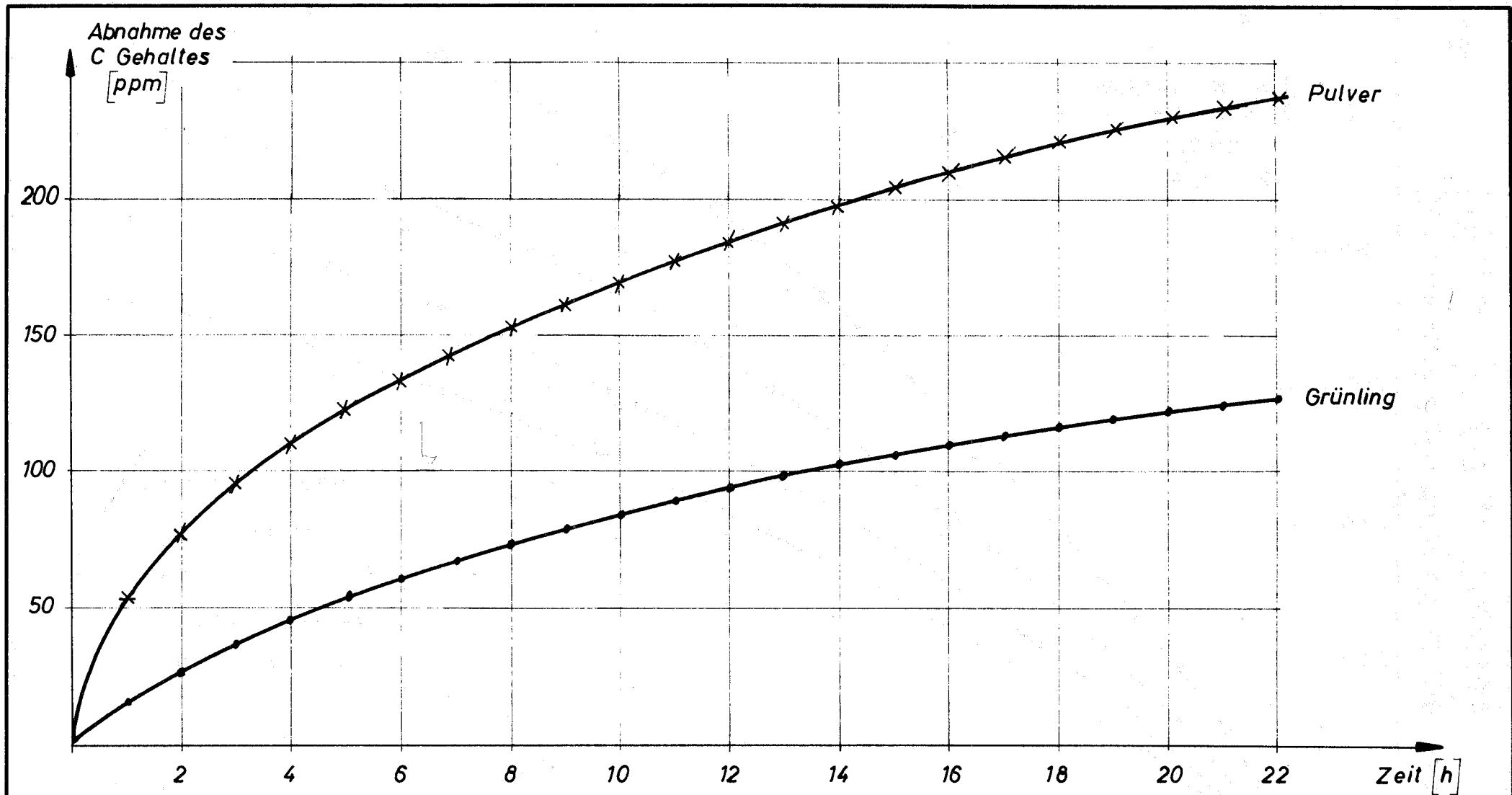


Abb. 24

Kinetik der C-Abgabe durch den H_2O -Gehalt des Schutzgases bei
125 Vpm O_2 und 60 Vpm H_2O

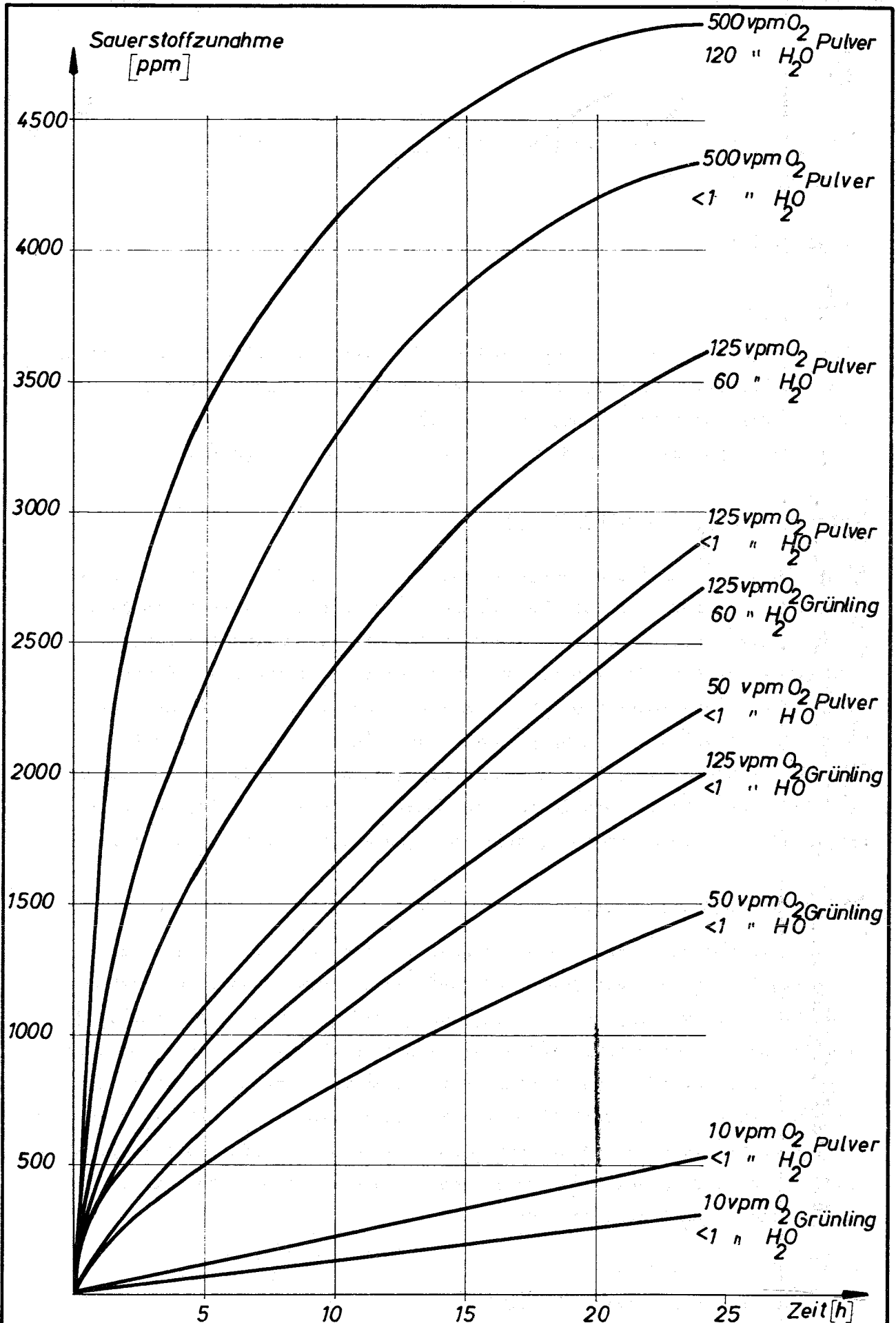


Abb. 25

Sauerstoff-Pick-up von UC-Pulvern und Grünlingen bei verschiedenen Verunreinigungsgraden des Schutzgases

5. Carbide and mixed carbide fuel development at the SCK/CEN (Mol, Belgium) (J.J. Huet, SCK/CEN)

5.1 Uranium Carbide

5.1.1 Fabrication

The period was mostly devoted to the fabrication of irradiation specimens on specifications resulting from the previous fabrication studies.

Three types of irradiations are planned:

the "POM-STUC" devices and the "CIRCE" and "Rabbit" capsules.

Fabrication of POM-STUC pellets

The POM-STUC⁺⁾ device is derived from the original design for oxide fuel irradiation, developed at the Euratom Trans-Uranium Institute in Karlsruhe; only minor modifications were necessary for making the device suitable for carbide irradiation. In order to evaluate the influence of oxygen contamination on the irradiation behaviour of carbides, two separate capsules are being prepared, one with low oxygen content (about 400 ppm) and another with high oxygen content (2000 and 4000 ppm). In the 18 pellets of each device, the amount of sesquicarbide and that of vanadium or chromium as stabilizing agents are studied as variables.

a) Low oxygen content pellets.

Because of the very small quantity needed for each composition, a batch of slightly hyperstoichiometric enriched carbide was prepared by carbo-reduction, arc melting, and grinding; each composition was then adjusted and the pellets were then pressed and sintered. To obtain high densities with uranium carbides, the sintering was done under vacuum, either at 1650°C with 0,1 % Ni addition or at 1800°C. The vanadium stabilized pellets were sintered under argon at 1600°C and the chromium ones under argon at 1400°C. Table 8 shows the very good agreement between the obtained compositions and the specifications.

⁺⁾ Series of UC pellets in a "POM" device

b) High oxygen content pellets

The same general fabrication scheme as for the low oxygen content pellets was adopted. The oxygen was added as UO_2 in the mixing of components for each pellet. High temperature sintering under vacuum or even under flowing argon however reduces the oxygen content below the specified value of 4000 or 2500 ppm. It was thus necessary to sinter under reduced pressure of CO gas the high density pellets for which the nickel sintering aid was not desired.

Table 9 gives the comparison between the specifications and the obtained compositions.

Fabrication of CIRCE pellets.

Two sets of each composition had to be prepared, one for the real irradiation capsule in BR2, the other for the mock-up for the experiment in the BR02 zero power reactor (for the second, all specifications are much looser). The results of the analysis are given in Table 10.

The non stabilized pellets were sintered with 0.2 wt% Ni as sintering aid. For all pellets the shrinkage is about 12 to 14%; it is very regular in each batch. All the pellets for the BR2 experiment were made too large for the purpose of allowing the centerless grinding.

Fabrication of Rabbit capsules.

As the enrichment needed for the rabbit capsules is very close to that of natural uranium, it was decided to use the natural uranium blank tests for these experiments. The material for six capsules is thus ready.

5.1.2 Irradiation and post-irradiation examination.Irradiation of POM-STUC capsules.

All the accepted pellets containing 35% enriched uranium carbide were machined to dimensions $(9.0 \pm 0.1 \text{ mm } \varnothing \times 1.50 \pm 0.02 \text{ mm})$ by the electro-erosion technique; the first and the last pellet in the column are 22 % enriched and will serve for compatibility studies. The fuel was loaded in the capsule in a purified argon glove box. The POM STUC 1 capsule was loaded in the BR2 reactor on July 8, 1970.

Irradiation of CIRCE 1 capsule

The fabrication of the capsule mock-up has been finished and measurements are to begin in BRO2 in July, 1970.

Post-irradiation examination

A first series of six Rabbit capsules was examined in the T.U. Institute in Karlsruhe. These capsules were filled with vibro-compacted carbide and it was intended to select an adequate temperature monitor for the next irradiations. With pure UC, an addition of a small quantity of chromium powder provides a good temperature monitor by the formation of the UC-Cr eutectic at 1425°C; the iron powder is not adequate. The recrystallisation of a stainless steel wire at 775°C is very sharp and provides also a good temperature monitor, which can be applied to alloyed UC and to sintered material.

Thermal calculation permits a first approximation of the mean thermal conductivity of the vibro-compacted carbides:

$$\begin{array}{ll} \text{for pure UC} & : k = 0,102 \text{ W.}^{\circ\text{C}^{-1}} \text{ cm}^{-1} \\ \text{for vanadium stabilized UC} & : k = 0,063 \text{ W.}^{\circ\text{C}^{-1}} \text{ cm}^{-1} \end{array}$$

5.1.3. Physical properties.The U-V-C system

The ternary U-V-C system has been further analysed by thermal analysis up to 2200°C. The solidus surface was especially examined. The lowest melting point in the UC-VC-UC₂ triangles is at 2020°C; eutectics have been found between UC₂ and VC at 2340°C and between UC and VC at 2140°C. Special attention has been paid to the UVC_x compound. A nearly pure compound has been found very close to the UVC₂ composition.

Thermal conductivity

Various modifications are being brought to the General Electric apparatus for the measurement of thermal diffusivity at high temperatures developed by J. WHEELER, in order to improve the reproducibility of measurement

results. Simultaneously, the theoretical work by R.D. COWAN is being studied in detail for obtaining a suitable computer programme for the apparatus. Calibration of the SCHRÖDER apparatus for room temperature measurement is in progress.

Reduction of carbides by hydrogen

Efforts are being made in order to clear up some difficulties encountered during reduction reactions (irregular BET-curves, long-time poisoning effect).

5.1.4. Compatibility

Ferritic steels of composition Fe-13Cr-2Mo-1W containing or not a TiO_2 dispersion are fully compatible with uranium carbide containing up to 15 % U_2C_3 even with a sodium bond at 800°C .

LOW OXYGEN URANIUM CARBIDE PELLETS AS LOADED IN THE POM-STUC 1 EXPERIMENT

Table 8

Pellet No.	Specifications				Results									
	Composition (at.%)			Density %T.D.	Composition (at.%)							Phases		Density %T.D.
	C eq	V	Cr		U	C	O	N	C eq	V	Cr	X ray	Metall	
1	48,5 ± 0,1	10,1 ± 0,1	-	95 ± 2	41,8	47,7	0,6	0,1	48,4	9,8	-	UC + VC	UC + VC + V ₂ C	94,6
2	58,5 ± 0,5	-	-	95 ± 2	41,5	58,1	0,2	0,2	58,5	-	-	U ₂ C ₃ + UC	U ₂ C ₃ + UC + "UC"	95,8
3	47,7 ± 0,1	-	5,0 ± 0,2	95 ± 2	47,3	46,9	0,9	0,2	48,0	-	4,7	UC	UC + eutectic	97,1
4	45,6 ± 0,1	-	10,0 ± 0,2	95 ± 2	44,8	46,3	0,3	0,2	46,8	-	8,4	UC + Cr ₂₃ C ₆	UC + Cr ₂₃ C ₆	94,4
5	51,5 ± 0,5	-	-	95 ± 2	47,0	52,4	0,4	0,2	53,0	-	-	UC + U ₂ C ₃	UC + U ₂ C ₃	98,1
6	49,3 ± 0,1	5,0 ± 0,1	-	95 ± 2	45,6	48,8	0,5	0,2	49,5	4,9	-	UC + VC	UC + VC	95,3
7	48,1 ± 0,1	10,5 ± 0,15	-	95 ± 2	43,3	47,6	0,4	0,2	48,2	8,5	-	UC + VC + V ₂ C	UC + VC + V ₂ C	96,8
8	48,8 ± 0,1	10,1 ± 0,1	-	95 ± 2	41,1	48,6	0,4	0,1	49,1	9,8	-	UC + UVC ₂	UC + VC + UVC ₂	95,8
9	50,1 ± 0,1	-	-	95 ± 2	49,9	49,6	0,3	0,2	50,1	-	-	UC	UC	91,1
10	50,1 ± 0,1	-	-	85 ± 2	49,8	49,4	0,6	0,2	50,2	-	-	UC	UC + h.UC ₂	84,9
11	51,5 ± 0,5	-	-	85 ± 2	48,5	51,1	0,2	0,2	51,5	-	-	UC + UC ₂	UC + UC ₂	87,1
12	48,1 ± 0,1	10,05 ± 0,15	-	95 ± 2	43,3	47,6	0,4	0,2	48,2	8,5	-	UC + VC + V ₂ C	UC + VC + V ₂ C	96,7
13	48,8 ± 0,1	10,1 ± 0,1	-	95 ± 2	41,1	48,6	0,4	0,1	49,1	9,8	-	UC + UVC ₂	UC + VC + UVC ₂	95,0
14	51,5 ± 0,5	-	-	85 ± 2	47,5	52,1	0,1	0,2	52,5	-	-	UC + U ₂ C ₃	UC + U ₂ C ₃ + "UC"	84,8
15	49,3 ± 0,1	5,0 ± 0,1	-	95 ± 2	45,6	48,8	0,5	0,2	49,5	4,9	-	UC + VC	UC + VC	94,7
16	58,5 ± 0,5	-	-	85 ± 2	42,3	57,4	0,1	0,2	57,7	-	-	U ₂ C ₃ + UC	U ₂ C ₃ + UC + "UC"	85,5
17	58,5 ± 0,5	-	-	95 ± 2	41,5	58,1	0,2	0,2	58,5	-	-	U ₂ C ₃ + UC	U ₂ C ₃ + UC	96,8
18	58,5 ± 0,2	10,1 ± 0,1	-	95 ± 2	41,8	47,7	0,6	0,1	48,5	9,8	-	UC + VC	UC + VC + V ₂ C	95,2

HIGH OXYGEN URANIUM CARBIDE PELLETS FOR POM-STUC 2 EXPERIMENT

Table 9

pellet n	Specified Composition (at %)					Obtained results (at %)						phases observed
	U	C	O	Cr	V	U	C	O	C	Cr.	V	
1	50,0	46,93 [±] 0,05	3,12	-	-	49,82	46,61	3,57	50,18	-	-	UC + traces UC ₂
2	47,05	50,05 [±] 0,05	2,95	-	-	47,35	49,91	2,74	52,65	-	-	UC + traces UC ₂
3	50,0	46,93 [±] 0,05	3,12	-	-	50,00	46,57	3,43	50,00	-	-	UC
4	44,50	42,60 [±] 0,25	2,90	10 [±] 0,5	-	43,65	42,24	4,04	46,28	10,07	-	UC + Cr ₂₃ C ₆
5	47,2	47,8 [±] 0,1	3,00	5 [±] 0,3	-	46,30	44,53	4,18	48,71	4,98	-	UC + Cr ₂₃ C ₆
6	41,1	46,1 [±] 0,1	2,17	-	10,1 + 0,1	41,18	46,37	2,61	48,98	-	9,83	UC + VC
7	38,53	48,8 [±] 0,1	2,57	-	10,1 [±] 0,1	39,06	49,05	2,01	51,06	-	9,87	UC + UVC ₂ + UC ₂
8	42,0	45,33 [±] 0,1	2,76	-	10,1 [±] 0,1	41,72	45,55	3,02	48,57	-	9,70	UC + VC (x)
9	39,39	48,1 [±] 0,1	2,62	-	10,1 [±] 0,1	39,80	48,11	2,11	50,22	-	9,97	UC + UVC ₂ + VC + V ₂ C
10	45,7	46,4 [±] 0,1	2,92	-	5 [±] 0,3	45,65	46,52	2,77	49,29	-	5,06	UC + VC
11	45,7	46,4 [±] 0,1	2,92	-	5 [±] 0,3	45,49	46,68	2,83	49,51	-	5,06	UC + VC
12	42,93	49,3 [±] 0,1	2,77	-	5 [±] 0,3	43,40	49,58	1,68	51,26	-	5,34	UC + UVC ₂ + VC + UC ₂
13	39,46	48,8 [±] 0,1	1,64	-	10,1 - 0,1	39,49	48,71	1,64	50,35	-	10,16	UC + UVC ₂ + VC
14	40,33	48,1 [±] 0,1	1,67	-	10,1 [±] 0,1	40,44	47,98	1,73	49,71	-	9,85	UC + UVC ₂ + VC (x)
15	43,94	49,3 [±] 0,1	1,76	-	5 [±] 0,3	44,03	49,14	1,34	50,48	-	5,48	UC + UVC ₂ + VC + UC ₂
16	41,5	45,8 [±] 0,6	2,74	-	10 [±] 0,6	41,39	45,71	3,00	48,71	-	9,90	UC + VC (x)
17	44,5	42,6 [±] 0,25	2,90	10 [±] 0,5	-	44,33	42,84	3,65	46,49	9,18	-	UC + Cr ₂₃ C ₆
18	47,2	47,8 [±] 0,1	3,00	5 [±] 0,3	-	46,70	44,66	3,80	48,46	4,84	-	UC + Cr ₂₃ C ₆
19	38,53	48,8 [±] 0,1	2,57	-	10 [±] 0,1	38,99	49,08	1,78	50,86	-	10,15	UC + UVC ₂ + UC + UC ₂
20	42,93	49,3 [±] 0,1	2,77	-	5 [±] 0,3	43,02	49,24	2,50	51,74	-	5,24	UC + UVC ₂ + UC + UC ₂

Table 10
PELLETS FOR CIRCE IRRADIATION

Type	Specifications					Results									
	Composition (at.%)		diameter mm	height mm	density %T.D.	Composition (at.%)					diameter mm	height mm	density %T.D.	phases detected metallog.	
	C eq	V				U	C	O	N	V					C eq
BR02 UC BR2	50,05 [±] 0,05	-	5,4 [±] 0,05 5,4 [±] 0,01	5 ± 1	95 [±] 1	49,8	49,6	0,4	0,2	-	50,2	5,44 [±] 0,01 6,08 [±] 0,01	5,1 [±] 0,4 4,9 [±] 0,4	94,1 94,0	UC + "UC ₂ " platelets
UC BR02 + 0,5%U ₂ C ₃ BR2	51,5 [±] 0,1		5,4 [±] 0,05 5,4 [±] 0,01	5 ± 1	98 [±] 1	48,4	50,9	0,4	0,3	-	51,6	5,45 [±] 0,02 6,12 [±] 0,01	5,2 [±] 0,6 5,0 [±] 0,4	97,7 98,1	UC + U ₂ C ₃ + "UC ₂ " platelets
BR02 Vanadium stabilized UC BR2	49,3 [±] 0,1	5 [±] 03	5,4 [±] 0,05 5,4 [±] 0,01	5 ± 1	95 [±] 1	45,7 44,9	48,7 47,9	0,4 0,7	0,3 0,2	4,9 6,3	49,4 48,8	5,40 [±] 0,02 6,07 [±] 0,01	5,3 [±] 0,2 5,1 [±] 0,8	94,2 95,4	UC+VC +UVC ₂ Uc+VC +V ₂ C

x The dimensions are measured on each batch in the as sintered state

5.2. Mixed (U, Pu) carbides

Installation of glove-boxes for the preparation of mixed (U, Pu) carbides has been completed, except for some improvements which will be brought in the next future to the purity of the internal atmosphere in the glove-boxes.

The performances of the equipments located inside the glove-boxes have been determined. One has simultaneously started with a study of the lubrication of compression tools. Preparation and sintering technique for 15 w/o Pu-enriched mixed carbides have been further examined. One has performed sintering operations at 1400, 1600 and 1800°C.

Metallographic and radiocrystallographic examinations on pellets treated at 1800°C only reveal the monocarbide phase.

6. Arbeiten des RCN Petten zum Koord. Karbidprogramm

(W.W. Nijs, Reactor Centrum Nederland)

At RCN the effort was directed towards fabrication procedures of uranium carbonitride fuel ($UC_{1/2}N_{1/2}$) and the measurement of thermodynamic properties. For irradiation experiments we had planned to prepare large diameter pellets - 15 mm - in order to study recrystallisation during irradiation and possibly nitrogen migration. The fabrication of those pellets has caused some difficulties, mainly in the pressing step since very often pellets had faults which showed up as cracks after sintering.

For a large part those difficulties could be overcome by grinding the starting materials to different degrees and afterwards blending various powder fractions.

In this way we could just as well prepare pellets of 8 mm as of 15 mm diameter.

The technique used consists of mixing uranium nitride powder with carbon powder in a slight excess and ball milling the mixture in an inert atmosphere for various length of time. Of the ground powders a new mixture is prepared and this is used to press the pellets at a pressure of 3 tons/cm². A lubricant is added to the mixture.

Pellets are sintered in argon for 6 hours at 1700°C. For the large diameters densities of 12.8 - 13 g/cm³ are obtained.

Pellets of 8 mm sinter to slightly higher density.

The UN starting material contains on the average 0.15 % oxygen.

In the sintered carbonitride pellets this impurity is reduced to 0.05 - 0.1 %.

For our thermodynamic studies the need was felt to exclude any possibility to contaminate products by oxygen or water. A large glove box was constructed in which we can maintain a very pure argon atmosphere.

Continuous measurement of oxygen content (E.M.F. measurement) and water vapour (panametric cell) is installed in this box.

The equipment includes an automatic press.

The solid solution U (CN) is prepared in general by reaction of UN and UC at 1400°C.

At the moment we are measuring thermodynamic properties of UN and U(C,N) of various compositions in the temperature range 600 - 1100°C using E.M.F. techniques.

In this range no measurements have been done yet and the available values obtained at room temperature do not fit the very high temperature values. Only preliminary results have been obtained as yet.

1124.2 Laborexperimente zur Brennstabauslegung (Karbid. Brennst.)1124.22 Untersuchung thermodynamischer Eigenschaften1. Untersuchungen am U-C-O-System (C.Kouhsen, A.Naoumidis, H. Nickel, KFA, Institut für Reaktorwerkstoffe)

Uranmonocarbid wird z.Zt. als möglicher Brennstoff für schnelle Brüter diskutiert. UC wird im technischen Maßstab aus UO_2 und Kohlenstoff hergestellt. Dabei ist es unvermeidlich, daß geringe Mengen Sauerstoff im Urankarbid gelöst bleiben. Der Einfluß des Sauerstoffs auf die Eigenschaften karbidischer Brennstoffe wird im IRW der KFA als Teil der laufenden Untersuchungen an Hochleistungsbrennstoffen ermittelt. Außerdem werden zur weiteren Klärung der thermodynamischen Daten von Urankarbiden eingehende Untersuchungen am U-C-O- und U-C-N-System im Bereich zwischen UC und UC_2 durchgeführt.

Im Rahmen der bisherigen Arbeiten wurde am $U(C,O)$ mit Hilfe thermodynamischer Berechnungen der Stabilitätsbereich von einphasigem $U(C_{1-x}O_x)$ als Funktion des Sauerstoffgehaltes und des CO-Zersetzungsdruckes abgeschätzt. Zur Untersuchung des U-C-O-Systems wurden sog. Abschreckversuche sowie Abbauexperimente vorgenommen.

Alle bisherigen Untersuchungen erfolgten bei $1700^\circ C$, da diese Ergebnisse mit denen von Henry et al.¹⁾ verglichen werden sollten. Bei den Abschreckversuchen wurden Reaktionen von UC mit CO und von UO_2 mit Kohlenstoff (mit variablem C-Verhältnis) durchgeführt. Der zu einem vorgegebenen CO-Druck gehörende Gleichgewichtszustand wurde durch Trennung der Probe von der Gasphase und schnelle Abkühlung in einem kalten Ölbad eingefroren. Anschließend wurde die Probe chemisch analysiert sowie röntgenographisch und metallographisch untersucht. Bei den Abbauversuchen in einer modifizierten Sieverts-Apparatur wurde - ausgehend von UO_2 -Gemischen - sukzessiv CO aus dem System abgesaugt und gemessen. Zwischen den einzelnen Entgasungsschritten wurde das für $1700^\circ C$ sich einstellende Gleichgewicht bestimmt. Aus der Abhängigkeit des CO-Druckes vom Sauerstoffgehalt der festen Phase war es

1) Henry, J.L., Danton, L.P., Blickensderfer, R., Kelly, H.J.:
Phase relations in the uranium monocarbide region of the system uranium-carbon-oxygen at $1700^\circ C$;
BM-RI-6968 (1968)

möglich, eine erste Aussage über den einphasigen $U(C,O)$ -Bereich sowie über die Phasengrenze zwischen $U(C,O)$, UO_2 , CO und UC_2 , $U(C,O)$, CO zu machen (Abb. 26).

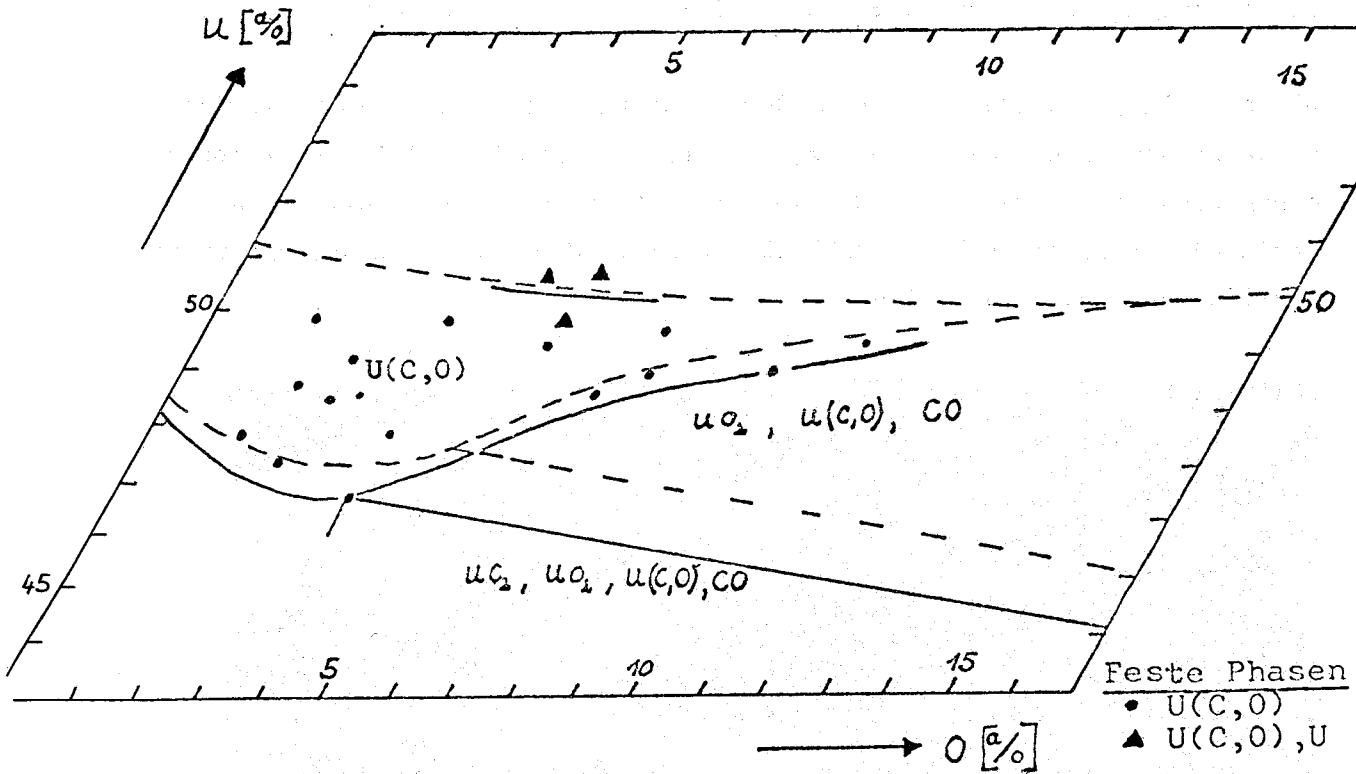


Abb. 26: U-C-O-Phasendiagrammausschnitt mit dem $U(C,O)$ -Phasengebiet und der Phasengrenze $U(C,O)$, UO_2 , CO / UC_2 , UO_2 , $U(C,O)$, CO bei 1700°C (gestrichelt: Literaturdaten)

Die Abbildung zeigt das $U(C,O)$ -Phasengebiet, wie es mit Hilfe von Abschreckversuchen ermittelt wurde. Die Phasengrenze UO_2 , $U(C,O)$, CO/UC_2 , UO_2 , $U(C,O)$, CO wurde aus den Knickpunkten von Abbaukurven bestimmt. Beide Methoden deuten auf eine größere Phasenbreite zum überstöchiometrischen Bereich hin, als von Henry et al. angegeben wurde.

Es wurden Versuche unternommen, einphasiges $U(C,O)$ im 1 kg-Maßstab mit geringem Sauerstoffgehalt (etwa 10 Mol - % UO) durch carbothermische Reduktion von UO_2 im Argonstrom bei Temperaturen zwischen 1500 und 1800°C herzustellen.

Dabei läßt sich die abgebaute Co-Menge kontinuierlich bestimmen. Unter diesen Bedingungen ist es allerdings schwierig, einphasiges $U(C,O)$ darzustellen. Entweder werden dann neben dem $U(C,O)$ noch Uranausscheidungen oder restliches UO_2 beobachtet. Diese Schwierigkeit läßt sich dadurch umgehen, daß unter dem zugehörigen Co-Gleichgewichtsdruck gearbeitet wird.

Die Experimente wurden bei etwa $1900^{\circ}C$ durchgeführt. Da es über die Temperaturabhängigkeit des CO-Druckes von einphasigem $U(C,O)$ bisher keine Angaben gibt, wurde der zu $1900^{\circ}C$ gehörende CO-Gleichgewichtsdruck aus den Daten der Experimente bei $1700^{\circ}C$ abgeschätzt. Ein für die Reaktionsprodukte typisches Ergebnis zeigt Abb. 27.

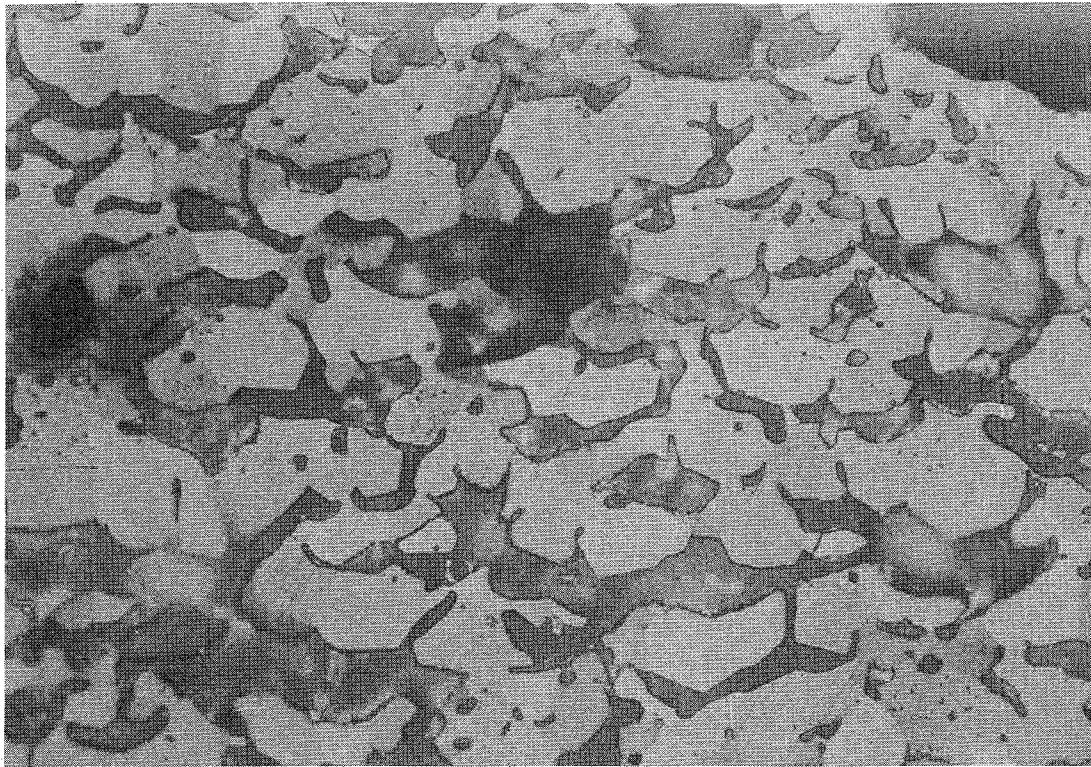


Abb. 27: Einphasiges $U_{0,49}C_{0,45}O_{0,05}N_{0,01}$, hergestellt durch carbothermische Reduktion von UO_2 bei $1900^{\circ}C$ unter einem CO-Gleichgewichtsdruck von 15 Torr.

Zukünftig sollen untersucht werden:

- 1.) die maximalen Sauerstoffgehalte sowie die Phasengrenzen der im Gebiet von UC bis UC₂ vorkommenden Phasen, und zwar für verschiedene Temperaturen,
- 2.) die Abhängigkeit der Gitterkonstanten vom Sauerstoffgehalt von einphasigen U(C,O)-Mischkristallen,
- 3.) die Abhängigkeit des CO-Zersetzungsdruckes von der Zusammensetzung der festen U-C-O-Phase,
- 4.) das Bestrahlungsverhalten von einphasigem U(C,O).

2. Zum Einfluß des Sauerstoffs auf die Stabilisierung von Karbiden der Seltenen Erden (H.Holleck, E.Smailos, IMF)

Die Existenz kohlenstoffarmer Karbide der Seltenen Erden wird durch andere Metalloide (N, O, H) offensichtlich stark beeinflusst. Da die Frage, welche Karbide die Spaltprodukte aus der Reihe der Seltenen Erden in einem hochabgebrannten Karbidbrennofen bilden, für eine Stöchiometriebetrachtung von entscheidender Bedeutung ist, wurden Versuche in Angriff genommen, die die Existenz von Oxikarbiden klären sollen. In den Systemen Y-C-O, La-C-O, Ce-C-O, Pr-C-O und Nd-C-O existieren neben kohlenstoffreichen Oxikarbiden der Formel S.E.₂O₂C₂ kohlenstoffarme Verbindungen mit einer Zusammensetzung von etwa S.E.₃O₂C. Diese Phasen existieren für La und Ce als Punktverbindungen und zeigen für Pr und besonders Nd einen homogenen Bereich, der sich in Richtung auf reines "NdC_{1-x}" erstreckt. Ob und wieviel Sauerstoff für die Existenz von "NdC_{1-x}" nötig ist, konnte noch nicht endgültig geklärt werden.

1124.23 Chemische Eigenschaften und Analytik (Karbid. Brennst.)1. Chemisch-analytische und präparative Untersuchungen

(H. Schneider, D. Schönwald, IMF)

Im II. Quartal 1970 wurden wieder zahlreiche Uranverbindungen (UCS, US in UC, UN mit ThO_2 -Zusatz) auf U, N, O, C, S und Th analysiert. In verschiedenen U_3O_8 -Al- und UO_2 -Cu-Mischungen in unterschiedlichen Mischungsverhältnissen wurden die Gehalte an U, Al bzw. Cu bestimmt. Die Zusammensetzungen einiger nichtrostender Stähle wurden analytisch überprüft sowie in einigen V-Legierungen der Sauerstoff- und Silizium-Gehalt bestimmt.

Auf dem Gebiet der Natrium-Analyse wurden zahlreiche Natrium-Destillationsrückstände auf ihren Na_2O -Gehalt untersucht und in Na-Metall die Al- und Fe-Mengen bestimmt. Von den Natrium-Korrosions-Versuchen kamen laufend zahlreiche Brom-Methanol-Lösungen zur Analyse auf Fe, Cr und Ni, die vom stufenweisen Abtrag der Korrosions-Proben herrühren. Für die Beschichtungsversuche von UO_2 mit Vanadin mußten zahlreiche V-Analysen zur Feststellung der abgeschiedenen V-Mengen durchgeführt werden.

An präparativen Arbeiten für die isostatischen Heißpreßversuche wurden etwa 500g UO_2 und etwa 250g angereichertes UO_2 mit Vanadin und etwa 200g UO_2 mit Cr beschichtet.

2. Zur Kinetik der Karbidausscheidungen in Verträglichkeitsproben

(W. Schäfer, IMF)

Im Rahmen der Untersuchungen der Verträglichkeit zwischen stöchiometrischem UC und dem austenitischen Stahl X8CrNiMoNb1616 (W.-Nr. 4981) wurden Hüllrohrabschnitte mit UC-Pulver gefüllt und in einem Temperaturbereich von 700 bis 850°C bis zu 1504 h geglüht. Aus den Proben wurden metallografische Schliffe angefertigt und auf Karbidausscheidungen angeätzt. Die Menge der Karbidausscheidungen (in Volumenprozent) gilt als ein Maß für die Unverträglichkeit zwischen Hülle und UC-Brennstoff. Die Menge wurde an den metallografischen Schliffen mit einem Leitz-Integramaten gemessen und in Abb. 28 in Abhängigkeit von der Glüh Temperatur und der Glühzeit dargestellt.

Der Ablauf der Karbidausscheidungen erfolgt in diesem speziellen Fall unter den angegebenen Versuchsbedingungen nach der Beziehung

$$M = M_0 + A \cdot \exp(-B/T) \cdot \tanh(t \cdot C)$$

Die Symbole bedeuten:

M = Menge der Karbidausscheidungen (Vol/o)

M_0 = " " " im Anfangszustand = 0,1 Vol/o

A = $4,64 \cdot 10^{12}$

B = $2,955 \cdot 10^4$

C = $5,0 \cdot 10^{-4}$

T = Versuchstemperatur ($^{\circ}$ K)

t = Versuchszeit (h)

Aus dem Vergleich der gemessenen und errechneten Menge der Karbidausscheidungen ist ersichtlich, daß die vorgeschlagene Beziehung für praxisnahe Bedingungen (niedere Temperaturen und lange Glühzeiten) etwas konservative Ergebnisse liefert. Kontrollversuche für diese Bedingungen sind geplant.

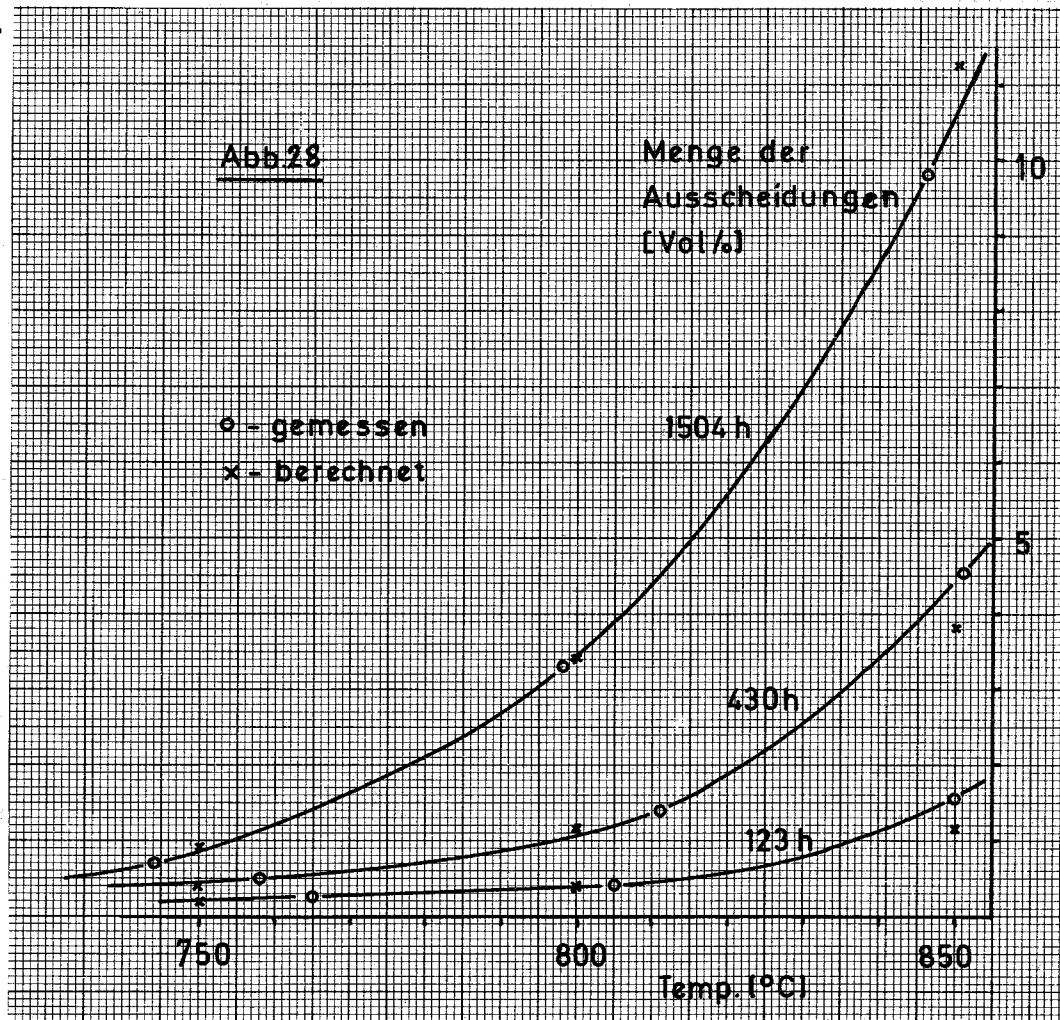


Abb. 28: Menge der Karbidausscheidungen

3. Verträglichkeitsuntersuchungen an UC und (U,Pu)C (H.Schönfeld, AEG)

Die Arbeiten zur Untersuchung der Verträglichkeit Hülle/karbidischer Brennstoff werden im wesentlichen mit den Hüllrohrwerkstoffen 4981, 4988, 12R72HV und AISI 316 durchgeführt. Als Grundlage dafür wurden die mechanischen Eigenschaften vor und nach Bestrahlung von 12R72HV und AISI 316 zusammengestellt; für 4981 und 4988 wurden solche Zusammenstellungen begonnen. Im interessanten Temperaturbereich von 650 bis 730°C ist der Stahl 12R72HV den Stählen AISI 316, 4981, 4988 in den Langzeiteigenschaften überlegen; jedoch sind die Eigenschaften von 12R72HV sehr stark konditionsabhängig.

	σ_B 100 000h , 650°C	$\sigma_{1\%}$ /100 000h , 650°C
AISI 316	7,0 kp/mm ²	5,0 kp/mm ²
4981	8,5 kp/mm ²	6,5 kp/mm ²
4988	10,0 kp/mm ²	7,5 kp/mm ²
12R72HV	13,0 kp/mm ²	9,0 kp/mm ²

Mit Hilfe von metallographischen und Röntgenfeinstrukturuntersuchungen wurde die Ausscheidungscharakteristik von Stahl nach Werkstoff Nr. 4981 ermittelt; an Stahl nach Werkstoff Nr. 4988 wurde damit begonnen. Die thermischen Auslagerungsbedingungen wurden so gewählt, daß die Untersuchungsergebnisse als Vergleichsbasis für das Ausscheidungsverhalten dieser Stähle während der Verträglichkeitstests verwendet werden können. Strukturveränderungen durch Langzeit-Zug-Belastungen bei hohen Temperaturen wurden zunächst an 4981-Blechproben untersucht, da die Lieferung von Rohrmaterial nicht fristgerecht erfolgte. Aus demselben Grunde konnten bisher keine experimentellen Untersuchungen des Ausscheidungsverhaltens von 12R72HV sowie der mechanischen Eigenschaften der oben genannten Werkstoffe durchgeführt werden.

Bei 4981 liegt neben Primär-Nb-Karbonitriden im Ausgangszustand nur wenig $M_{23}C_6$ vor, nach 1600 h/600°C und 1000 h/700°C wurde M_6C gefunden. Mit steigenden Temperaturen und Zeiten tritt zunächst die Laves-Phase auf, danach die σ -Phase. Während die Mengen der Laves-Phase, ebenso wie die von Nb(C,N) und $M_{23}C_6$ wieder abnehmen, treten nach 3000 h/600°C die Z- und χ -Phase auf. Diese beiden, sowie die σ -Phase sind die nach 3000 h/600°C am stärksten vertretenen. Im Zeitstandversuch werden die $M_{23}C_6$ -Auflösung sowie die σ - und Laves-Phasenbildung beschleunigt.

Bis Anfang 1970 wurden 27 Karbidkapseln (je 9 mit unter-, über- und stöchiometrischem UC, Hülle: 4981, He-Bindung) bei 700- 1000°C bis 3000 h geglüht, z.T. in einem Druckofen, der es erlaubte, die Hülle auf den Brennstoff aufkriechen zu lassen. Ein Teil der Kapseln wurde jetzt nachuntersucht. Nach Analysen des Füllgases wurden Keramographien des Brennstoffes angefertigt, um eventuelle Veränderungen des Brennstoffes während der Auslagerung festzustellen; und metallographische Untersuchungen der Hülle dienten zur Ermittlung der Veränderungen im Ausscheidungsverhalten, zur Bestimmung der Aufkohlungscharakteristik bzw. der anderen Wechselwirkungsschichten.

Veränderungen in der Stöchiometrie des Brennstoffes wurden nicht beobachtet. Nach 100 h/1000°C wurden Wechselwirkungsschichten von maximal 8 μ gefunden. Überstöchiometrischer Brennstoff führte zu maximal 100 μ starken aufgekohlten Schichten in der Hülle, denen brennstoffseitig bis 15 μ starke ausscheidungsfreie Zonen vorgelagert sind.

Mit einer mit überstöchiometrischem UC gefüllten, aus 4981 bestehenden und He-gebundenen Kapsel wurde der Langzeitbetrieb des Druckofens bei 3000 h erfolgreich getestet.

1124.3 Bestrahlungsexperimente (Karbid.Brennst.)

1124.31 Bestrahlung eines UN-Tabletten-Stabes im FR2

(W. Dienst, H. Zimmermann, IMF)

Ein etwa 10 cm langer UN-Tabletten-Stapel von 10 mm Durchmesser und 95% TD wurde in einer dickwandigen Molybdän (Mo-0,5 Ti)-Hülle, die von einem He-Gasspalt umgeben war, im FR 2 bis zu einem Abbrand von 10 000 MWd/t U bestrahlt. Die Stableistung lag bei etwa 1000 W/cm, die Zentraltemperatur, die mit einem W-Re-Thermoelement gemessen wurde, zwischen 1550 und 1200°C.

Der radiale Spalt zwischen Brennstoff und Hüllrohr betrug zu Beginn der Bestrahlung 15 - 20 μ m. Aus dem Verlauf der Zentraltemperatur ließ sich folgern, daß der Spalt nach einem Abbrand von etwa 3000 MWd/t im wesentlichen geschlossen war. Der Wärmeübergangskoeffizient zwischen Brennstoff und Hülle stieg dadurch von 1,5 W/cm²·°C (bei Bestrahlungsbeginn) auf etwa 4,5 W/cm²·°C.

Aus den Ergebnissen der Gefügeuntersuchung kann geschlossen werden, daß bei der Bestrahlungsdauer (ca. 2000 h) und den Brennstofftemperaturen ($T_c = 1550 - 1200^\circ\text{C}$) in diesem Versuch Volumendiffusionsvorgänge noch keine wesentliche Rolle für das Brennstoffverhalten gespielt haben. Das ergibt sich aus dem nur geringen Kornwachstum (UN-Korngröße $\sim 15 \mu\text{m}$ $\rightarrow 20 \mu\text{m}$) und der Temperaturunabhängigkeit der Bestrahlungshärtung (HV $0,05 = 750 \text{ kp/mm}^2 \rightarrow 930 \text{ kp/mm}^2$), deren radialer Verlauf keinen thermischen Erholungseffekt erkennen läßt. Dagegen hatten Korngrenzen- und Oberflächen-diffusionsvorgänge im Temperaturgefälle bereits einen erheblichen Einfluß auf die Gefügeänderung unter Bestrahlung und führten zur Umlagerung der Oxideinschlüsse (5-10 Vol.-%) bzw. zur Spaltgasblasenwanderung an die Korngrenzen (Abb. 29).

Die Spaltgasblasen an den Korngrenzen sind relativ klein ($d \leq 1 \mu\text{m}$) und zeigen noch keine wesentliche Tendenz, sich miteinander zu vereinigen. Sie spielten daher auch noch keine Rolle für die Spaltgasfreigabe aus dem Brennstoff, die bei etwa 0,5 % lag.

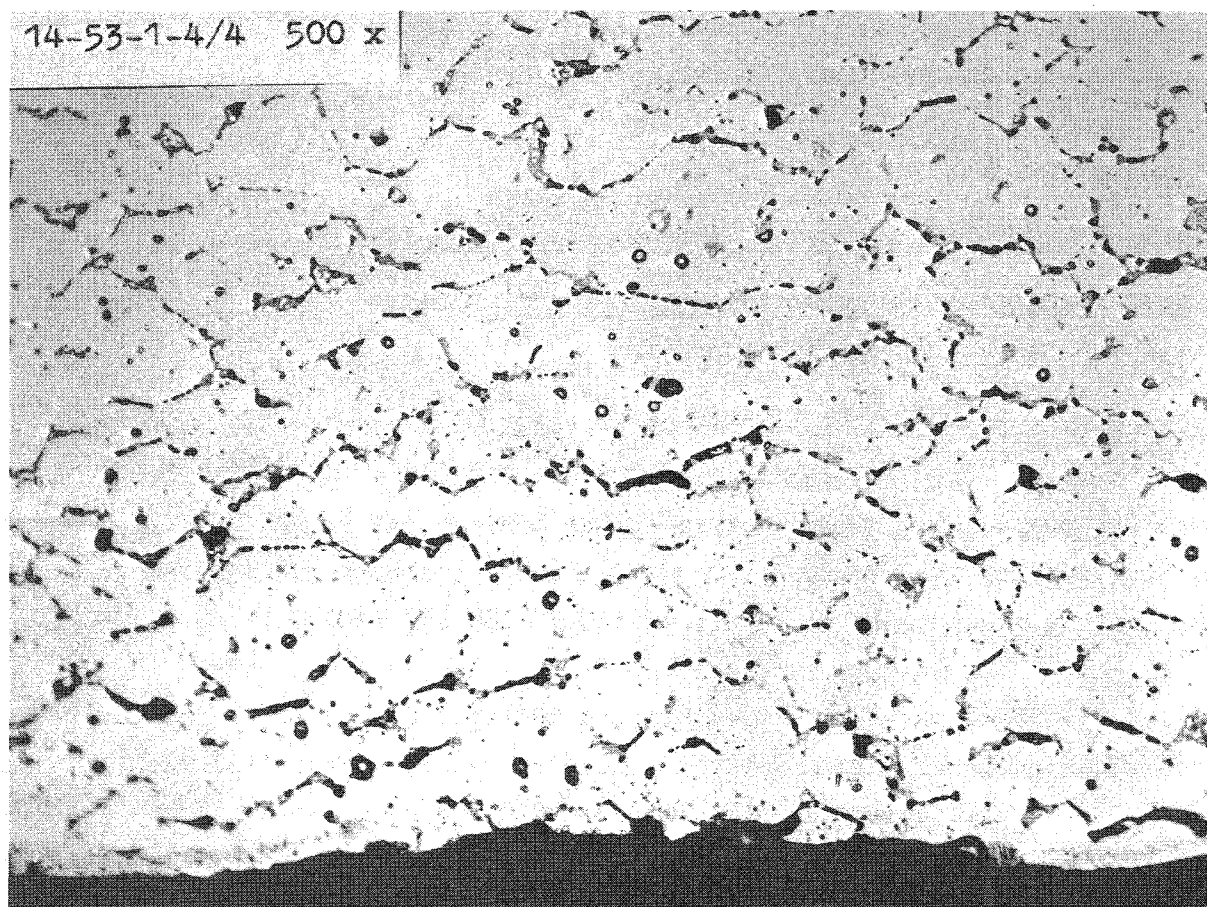


Abb. 29: Gefüge des UN-Brennstoffes nach Bestrahlung in der Umgebung der zentralen Bohrung

1124.32 Abbrandbestrahlungen karbid. Brennstabproben1. Experimente im schnellen und thermischen Fluß (R.Antoni, R.von Jan, AEG)FR-2

Die Aktivitäten im Berichtszeitraum beschränkten sich auf die Überwachung von Terminplanung und Fertigungsvorbereitung der Versuchsgruppen L 4a und 6. Im Rahmen der Entwicklung des Schweißverfahrens mit rotierendem Lichtbogen wurden neue Endstopfenformen entworfen.

MZFR

Zur Fortsetzung der Spezifikationsarbeiten an der Versuchsgruppe LI/K7-1 wurden erste Entwürfe der Brennstoff- und Brennstabspezifikation vorbereitet. Die Arbeiten wurden jedoch im Mai 1970 abgebrochen, da sich eine Terminverzögerung des Bestrahlungsbeginns bis Ende 1971 abzeichnete. Eine Wiederaufnahme der Arbeiten ist für Januar 1971 vorgesehen.

DFR

Hinsichtlich der Parametervariation, der sicherheitstechnischen Anforderungen, der Bestrahlungs- und Inspektionsintervalle, der Bündelkonzeption und der Bestrahlungspositionen fand eine Abstimmung mit dem Reaktorbetreiber statt. Im Anschluß daran wurden die Aktivitäten auf den Gebieten der Komponentenspezifikation und Beschaffung verstärkt. Dabei wurde in Zusammenarbeit mit dem Hersteller eine Brennstoffspezifikation erstellt. Erste Hüllrohre wurden nach den Standard-Anforderungen für schnelle Reaktoren angeliefert. Zur Fertigung der Stäbe wurden die Detailkonstruktion in Angriff genommen und die Ausführungsanforderungen in einer Rahmenspezifikation zusammengefaßt.

Infolge Straffung des Karbidprogrammes wurde eine geringfügige Verschiebung des Bestrahlungsbeginnes vorgesehen. Danach werden nicht mehr alle Elemente gleichzeitig Anfang 1971 in den Reaktor eingesetzt, sondern zunächst nur ein Element. Die beiden anderen werden jeweils um einen Reaktorzyklus verschoben zugeladen.

2. Auslegung und Spezifikation der Bestrahlungsversuche im BR 2 in den Kapseltypen Mol 11A und Mol 11B (H.Pollanz, K.Kummerer, IMF)

Das Bestrahlungsprogramm umfaßt die Versuchsgruppen K1, K2 und K3 zur Bestrahlung von Karbid-Brennstoff und N1 von Nitrid-Brennstoff. Die Versuche werden in den Kapseltypen Mol 11A mit Hüllwand-Temperaturmessung und Mol 11B mit zusätzlicher Spaltgasdruckmessung durchgeführt. Versuch K1 soll mit hochangereichertem UC der Erprobung des Kapsel-Prototyps dienen und unter Ausschluß von Stöchiometrie-Einflüssen durch Pu einen mittleren Abbrand bei Stableistungen bis 1500 W/cm ermöglichen.

Alle übrigen Versuche wurden bezüglich der Toleranzen von Hüllrohr und Brennstoff sehr eng spezifiziert. Es handelt sich hierbei um Einzelstäbe mit jeweils wechselnden Parametern wie Kapseltyp, Art der Bindung (He oder Na), Größe der Stableistung, Brennstoffporosität und Abbrandziel. Eine Übersicht über die Zuordnung der Brennstäbe und Kapseln sowie über die wichtigsten Kenndaten zeigt Tabelle 11. Die Werte der Detailauslegung des Versuches K1-1 und der noch nicht endgültigen Spezifikationen für die Versuchsgruppen K2, K3 und N1 sind in Tabelle 12 gegenübergestellt.

Abb. 30 gibt den Aufbau eines Brennstabes am Beispiel von Versuch K1-1 an.

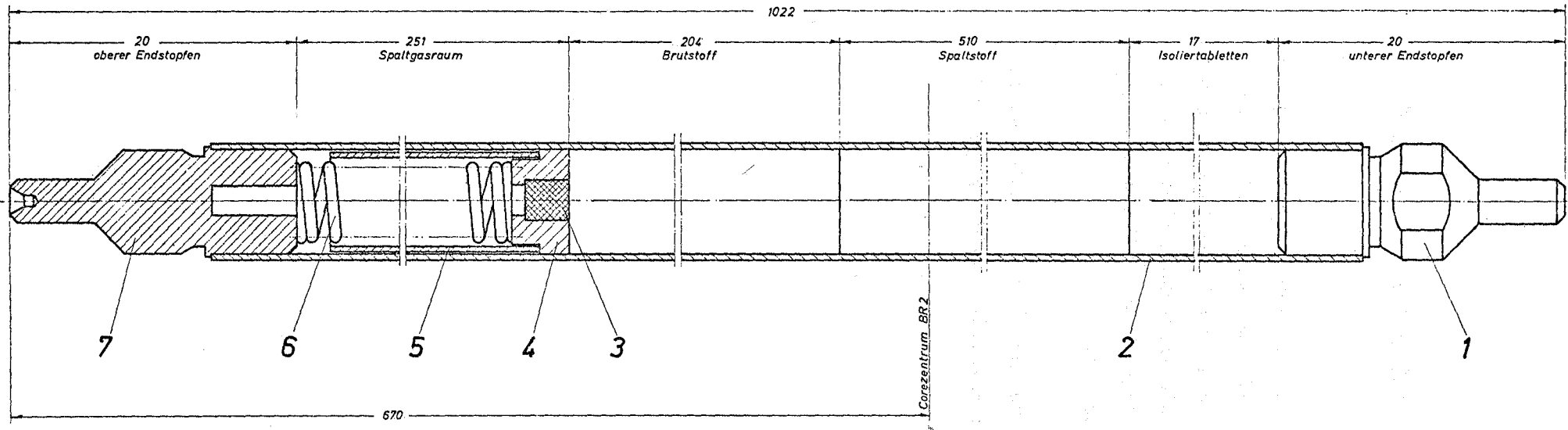
Tabelle 11:

Kenndaten der Bestrahlungsversuche im BR 2 in den Kapseltypen Mol 11A und Mol 11B

Versuchsgruppe	Stab-Nr. Vers.-Nr.	Brennstoff	Bindung	Hülle	Hüllaußen- Temperatur (°C)	Stableistung max., nom. (W/cm)	Abbrand (Mwd/kg)	Kapsel-Nr.
K 1	K 1 - 1	UC	He	4988	bis 575	bis 1500	35	11 A - 1
K 2	K 2 - 1	UC-PuC	He	4988	515-575	1300-1500	35	11 A - 2
	K 2 - 2						70	11 B - 2
	K 2 - 3						70	11 B - 3
K 3	K 3 - 1	UC-PuC	Na	4988	425-485	1000-1200	35	11 A - 4
	K 3 - 2						70	11 B - 4
N 1	N 1 - 1	UN-PuN	He	4988	515-575	1300-1500	35	11 A - 3
							70	11 B - 1

Tabelle 12: Detailauslegung der einzelnen Bestrahlungsversuche

Bezeichnung des Versuches	Brennstoff			Brutst. (U _{nat})	Brennstab								radialer Spalt		Temperaturabfall im Spalt		Brennstoff-zentral-Temperatur bei mittlerer Stableistung (°C)	max. Hüllrohraufweitung (%)			Versuchsziel				
	Materialdichte in %	U-235 im U Anreicherung in %	Pu-Anreicherung im Brennstoff in %		Materialdichte in %	Hüllrohr			Brennstoffsäule (mm)	Brutstoffsäule (mm)	Isolierplatten (mm)	Tabl.-Durchm. (Brenn-u.Brutstoff) (mm)	Gesamte Tabletten-Säule (mm)	Spaltgasraum (cm ³)	Bindung	kalt (µm)		heiß (zu Beginn) (µm)	bei Kontakt zw. Brennstoff u. Hülle (°C)	bei maximalem Spalt (°C)		Brennstoff-zentral-Temperatur bei mittlerer Stableistung (°C)	durch Kriechen	durch plastische Verformung	
						Außen-φ (mm)	Innen-φ (mm)	Länge (mm)																im 1. Zyklus	nach dem 1. Zyklus
K1-1	90	93	0	90	8,0 ± 0,03	7,1 ± 0,01	994	510 ± 3	204 ± 2	17 ± 0,5	7,00 ± 0,02	731 ± 3	7,56	He 1 atm	50 ⁺ 15	28 ⁺ 15	ΔT (mittel) = 720	2106 °C	nicht berechnet	nicht berechnet	nicht berechnet	Test der Prototypkapsel und des Stabes bis 1500 W/cm ohne Verträglichkeits-Problematik			
K2-1	83,3	93	15	83,3	8,0 ± 0,03	7,1 ± 0,01	994	510 ± 4	204 ± 4	17 ± 1	6,96 ± 0,02	731 ± 4	7,56	He 1 atm	70 ⁺ 15	22 ⁺ 15	576 °C	720 °C	2068 °C bis 2196 °C	0,245	0,223	0,127	Erprobung der Helium-Bindung bei definiertem Gasspalt. Verträglichkeit mit Hüllmaterial, Schwellen		
K2-2	83,3	93	15	83,3													665 °C	831 °C		0,248	0,223	0,223			
K2-3	83,3	93	15	83,3													665 °C	831 °C		0,248	0,223	0,223			
K3-1	94	93	15	94	8,0 ± 0,03	7,1 ± 0,01	994	510 ± 3	204 ± 2	17 ± 0,5	6,54 ± 0,02	731 ± 3	7,56 bis 4,35	Na 3,66 cm ³ 3,54 g	280 ⁺ 15	275 ⁺ 15	444 °C	18 °C	1181 °C bis 1597 °C	0,009	0	0,011	Erprobung der Natrium-Bindung. Verträglichkeit chemische Verträglichkeit der Hülle		
K3-2	94	93	15	94													533 °C	21 °C		0,028	0	0,03			
N1-1	83,3	93	15	83,3	8,0 ± 0,03	7,1 ± 0,01	994	510 ± 3	204 ± 2	17 ± 0,5	6,96 ± 0,02	731 ± 3	7,56	He 1 atm	70 ⁺ 15	26 ⁺ 15	576 °C	720 °C	2142 °C bis 2292 °C	0,245	0,223	0,127	Erprobung der Helium-Bindung bei definiertem Gasspalt. Verträglichkeit mit Hüllmat., Schwellen		
N1-2	83,3	93	15	83,3													665 °C	831 °C		0,248	0,223	0,223			



112-87

Teil	Stück	Bezeichnung	Werkstoff	Abmessung	Züchtlg. Nr./Norm	Bemerkung
7	1	Oberer Endstopfen	4988		LBZ 11/07	
6	1	Druckfeder	4310	$L_s = 255, l_0 = 60 \text{ Wdg}, d = 0,8, D_a = 5,8^{\text{H}}$		
5	1	Stützrohr	4988	$6,9^{\text{H}} \times 0,35 \times 241$		
4	1	Führungsstück	4988		LBZ 11/04	
3	1	Sinterstahlfilter	Cr Ni	$2,8^{\text{H}} \times 3$		
2	1	Hüllrohr	4988		LBZ 11/02	
1	1	Unterer Endstopfen	4988		LBZ 11/01	
Oberflächenrauhheit		~	10	100	1000	10000
Raumtol. max. in μ		1000	40	10	4	1,5
1970		Top	Name	Werkstoff	Gesellschaft für Kerneforschung m. b. H. 7500 Karlsruhe Postfach 947	
gez. 05.04.		Name		Zueh. Zueh.		
gepr. 24.04.		Name		Ersatz für		
Maßstab		Benennung		Ersatz durch		
5:1		Brennstab Mot 11A-1		Zeichnungs Nr.		LBZ 11/00

Abb. 30

1125. Brennelemente für gasgekühlte Brüter1125.1 Isostatisches Heißpressen von Cermet-Brennstoffstäben mit niedrigem Metallanteil (H.Bumm, P.Weimar, IMF)

Nach Klärung der technologischen Bedingungen für die Herstellung isostatisch heißgepreßter UO_2 -V-Cermets mit 20 und 30 Vol.-% V wurden Prüflinge hergestellt und an ihnen sowohl mechanische als auch physikalische Eigenschaften in Abhängigkeit von der Temperatur gemessen. Die Versuchsergebnisse werden in einem Vortrag auf der ANS-KTG-Tagung über "Fast Reactor Fuels and Fuel Elements" in Karlsruhe im September 1970 mitgeteilt.

Weitere technologische Arbeiten mit den Heißpreß-Autoklaven konnten wegen der Erweiterungsarbeiten am Autoklavengebäude vorläufig nicht durchgeführt werden.

Betr. präparativer Arbeiten vgl. 1124.23.

113 Materialuntersuchung und -entwicklung1131 Materialuntersuchungen an technischen Legierungen1131.1 Hüllmaterial1131.11 Mechanische Eigenschaften1. Zeitstand- und Kriechverhalten

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

Ältere Zeitstandversuche an zwei 18/14 CrNi-Stählen hatten ergeben, daß es grundsätzlich möglich ist, durch Erhöhung des N-Gehaltes die Festigkeitseigenschaften ohne nennenswerte Einbuße an Duktilität zu verbessern. Untersucht wurden zwei Chargen der Legierung AlC 183 mit 0,04% und 0,13% Stickstoff im Temperaturbereich von 650-800°C.

Bei Standzeiten bis zu 10^3 Stunden und Temperaturen zwischen 650 und 700°C ist zu beobachten, daß die Charge mit dem höheren N-Gehalt (0,13%) die zwei- bis dreifache Standzeit erreicht. Oberhalb 10^3 Std. ist die Standzeiterhöhung nicht mehr so ausgeprägt. Bei höheren Temperaturen ($>700^\circ\text{C}$) werden mit der N-reicheren Charge durchweg um den Faktor 5 höhere Standzeiten erzielt, und diese sind mit der Legierung 4988 vergleichbar. Bei 750°C liegt der $\sigma_B/10^3 \text{ Std}$ -Wert für die Charge mit dem höheren N-Gehalt bei 9,5 kp/mm² und bei 6-7 kp/mm² für die Charge mit 0,04% Stickstoff. Zum Vergleich mit dem Stahl 4988 liegt der entsprechende Wert bei ~ 7 kp/mm². Die erreichten Bruchdehnungswerte sind gerade bei längeren Standzeiten ziemlich unabhängig vom N-Gehalt. Ebenso ist ab 700°C kein Einfluß auf den Spannungsexponenten n erkennbar, der bei der Charge mit 0,04% Stickstoff bei 650°C und 700°C etwas höher liegt.

Die Untersuchungen an der Legierung Inconel 718 wurde in zwei Wärmebehandlungszuständen untersucht. Der Zustand I (lösungsgeglüht und ausgehärtet) gewährleistet eine maximale Zeitstandfestigkeit bis zu Temperaturen von 750°C . So liegt z.B. die $\sigma_B/10\ 000 \text{ Std}$ -Zeitstandfestigkeit für 650°C bei ~ 42 kp/mm² mit Bruchdehnungswerten um 8%. Der Zustand II erbringt bis 700°C bessere Kurzzeitfestigkeitswerte und höhere Duktilität. So werden für 650°C - 700°C Prüftemperaturen bei Standzeiten bis $\sim 10^4$ Std 40-60% Dehnung erreicht. Unter Zugrundelegung des Verhältnisses $\sigma_{1\%}/\sigma_B$ kann für den ausgehärteten Zustand für 650°C mit ~ 41 kp/mm² gerechnet werden, ohne daß 1% Dehnung überschritten wird. Für den homogenisierten Zustand erniedrigt sich dieser Wert auf ~ 36 kp/mm².

Das Bruchverhalten im Temperaturbereich 650-800°C ist bei den Proben des ausgehärteten Zustandes eindeutig interkristallin. Dagegen treten bei den Proben des homogenisierten Zustandes überwiegend Mischbrüche auf. Oberhalb 650°C scheiden sich mit zunehmender Standzeit in stärkerem Maße verschiedene Phasen aus.

Um die Wirkung des Druckaufbaues durch Spaltgas im Brennelement auf die Zeitstandfestigkeit der Hüllrohre zu untersuchen, wurden Zeitstandversuche an Hüllrohren aus X8CrNiMoNb 1616 (Werkstoff-Nr. 4981) mit ansteigendem Innendruck bis 700°C gemacht. Die Standzeit bei ansteigendem Innendruck ist gegenüber der bei konstantem Enddruck in dem untersuchten Bereich von 2000 h etwa um den Faktor 1,5 höher, Vorausberechnungen der Standzeit bei ansteigendem Innendruck nach der "life-fraction"-Regel von Robinson scheinen möglich zu sein, wenn man als Summe der Einzelschädigungen $\left(\sum_{i=1}^n t_i/t_{i, \text{Bruch}} = k\right)$ den Wert $k = 0,43$ benutzt.

Es wurden die Zeitstandfestigkeit und Bruchdehnung an zwei Sorten Hüllrohre aus X8CrNiMoVNB 1613 (Werkstoff-Nr. 4988) miteinander verglichen. Eine Sorte war relativ stark kaltverformt (ca. 20%), während die andere Sorte unverformt war. Das stark kaltverformte Material zeigte aufgrund stärkerer Niobkarbidbildung eine erhöhte Zeitstandfestigkeit, die infolge der Erholung in eine erniedrigte Standzeit und eine langsam zunehmende Bruchdehnung (ca. 2% - 3,5%) überging. Demgegenüber zeigte das nicht kaltverformte Material, das erst später die Sigmaphase bildet, bei langen Standzeiten keine Erholung, was mit dem linearen Verlauf der Zeitstandkurve und der konstanten Bruchdehnung (ca. 5,5%) übereinstimmt.

2. Die kontinuierliche Vermessung des Kopfkreisdurchmessers von Rippenrohren (O.Jacobi, R. Scherwinsky, IMF)

Bisher konnte an den Rohren mit Außenrippen, wie sie z.Zt. für den SNR und FR 3 diskutiert werden, der Kopfkreisdurchmesser nur punktweise manuell mit einer Mikrometerschraube kontrolliert werden. Um zu einer schnellen, kontinuierlichen Messung zu gelangen, werden die Rohre nun - wie bei der Glattrohrprüfung - durch die Meßschneiden zweier induktiver Wegaufnehmer schraubenförmig mit einer Drehzahl von 300 U/min und einem Vorschub von 2 mm/U bewegt (Abb. 1). Die Verlagerungen der Tastschneiden werden über ein Trägerfrequenzmeßsystem in ein proportionales, elektrisches Signal umgewandelt und von einem

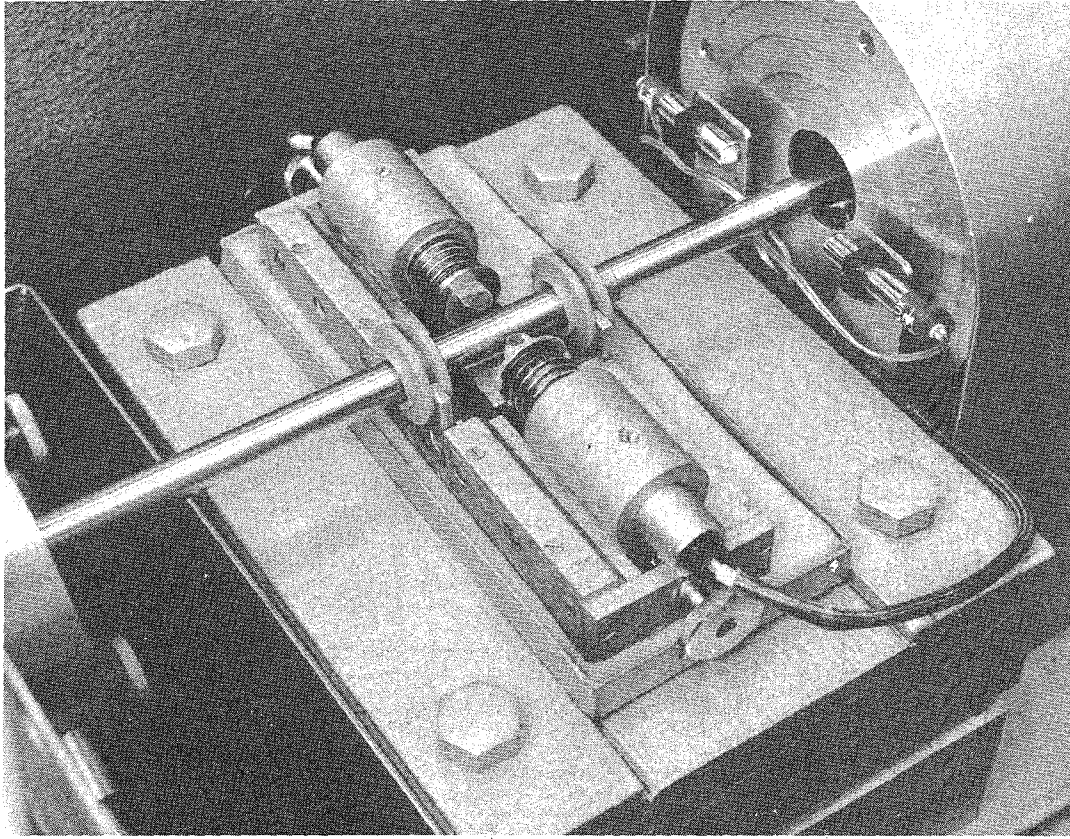
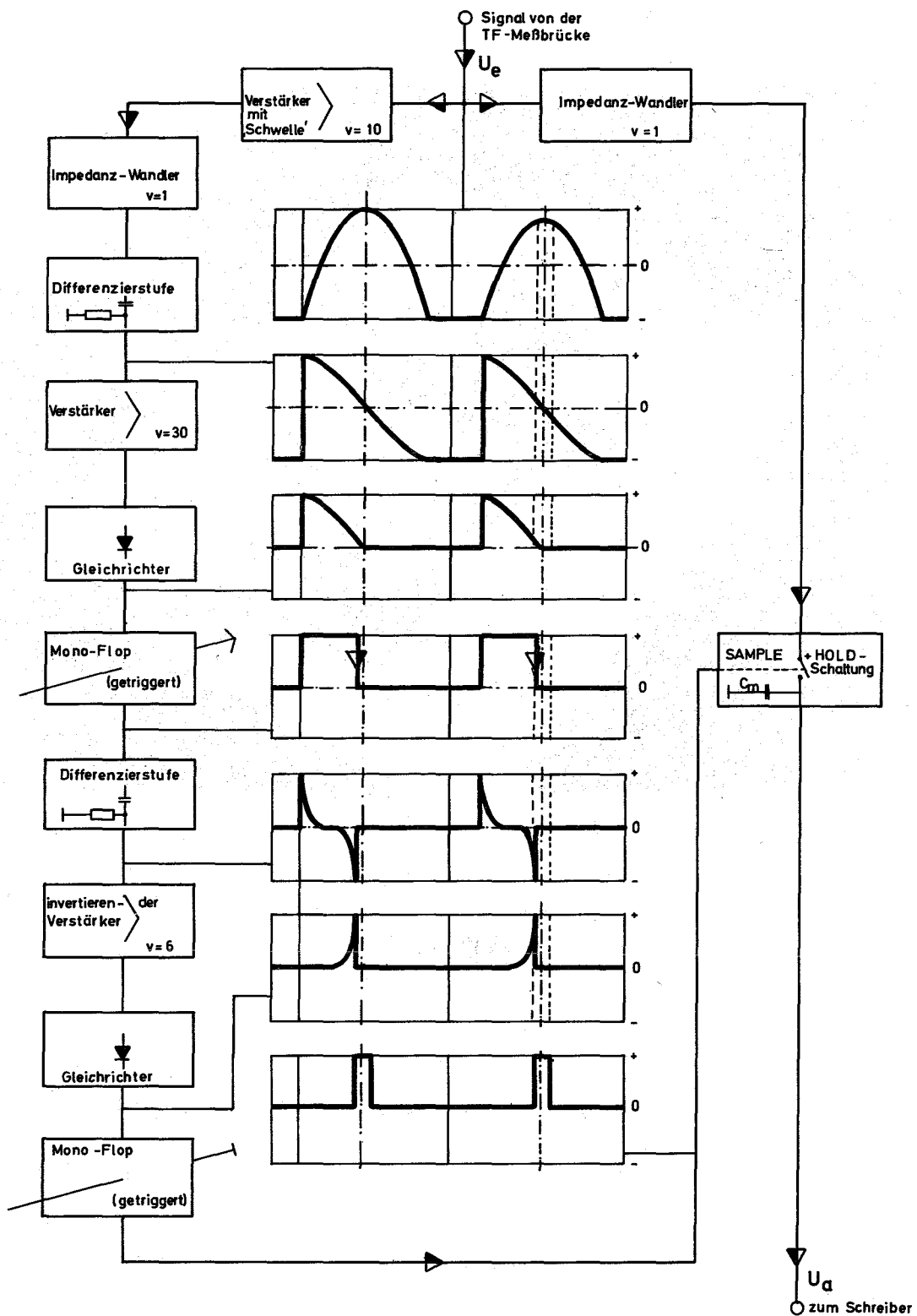


Abb. 1



4.7.99 Jaa

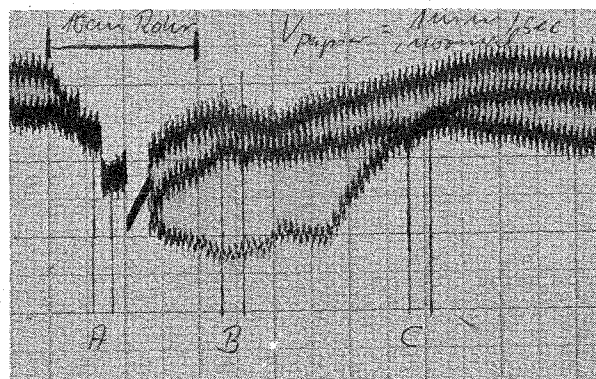
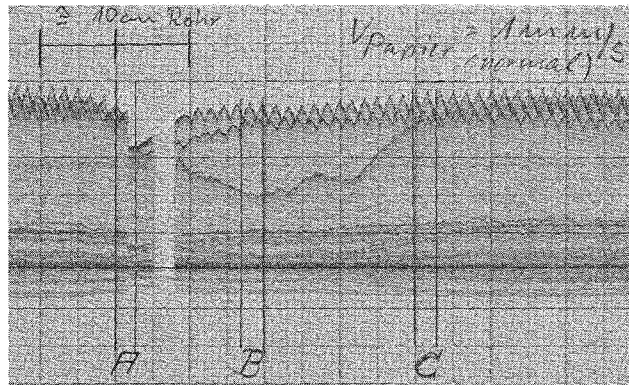


Abb. 3

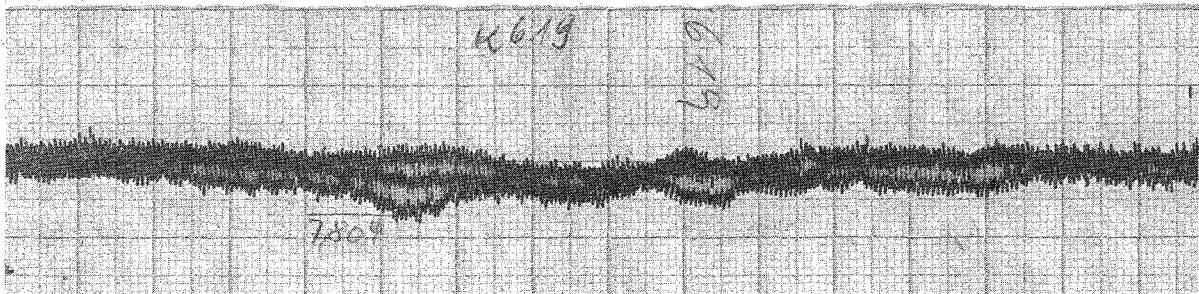
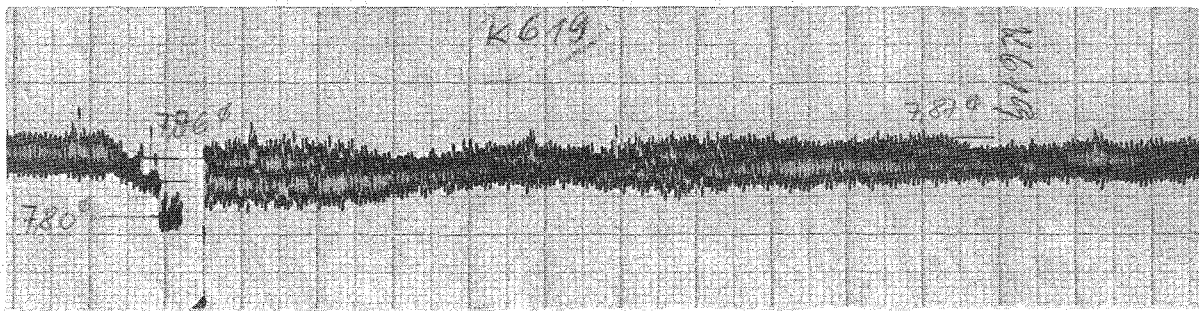
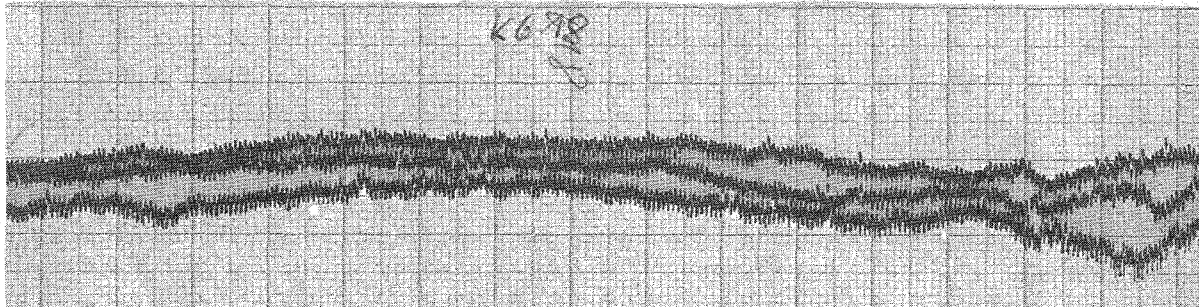
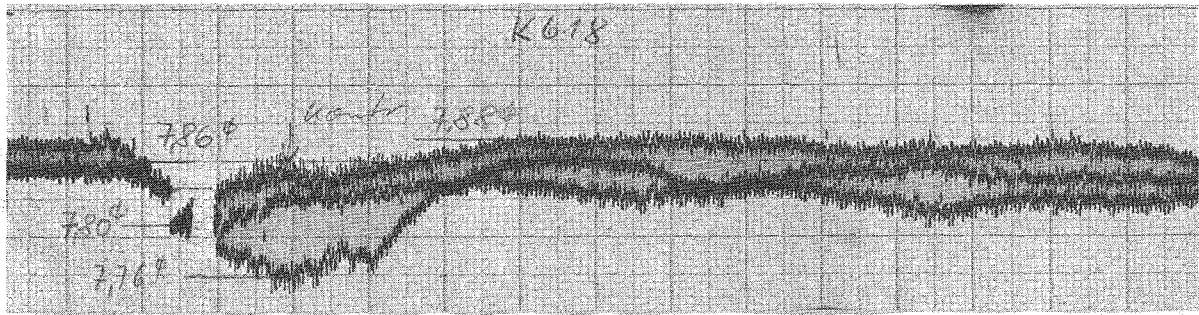
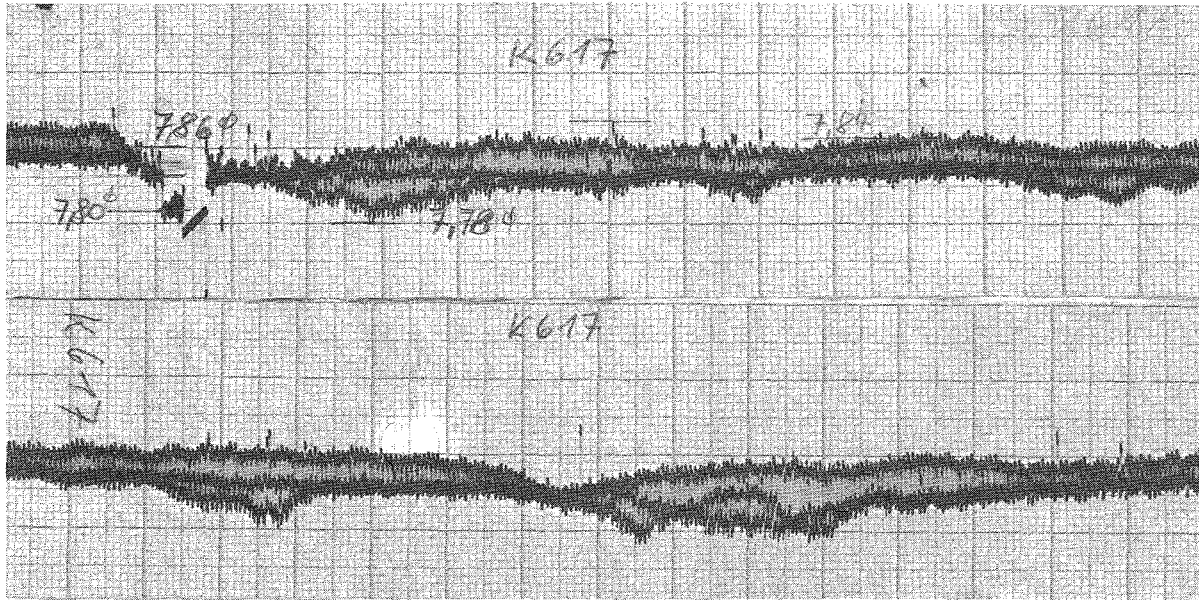


Abb. 4

Registriergerät aufgezeichnet. Dabei steigt dann der Meßwert von einem elektrisch und mechanisch begrenzten Minimum auf das jeweilige Maximum, entsprechend dem jeweiligen Kopfkreisdurchmesser.

Um nun zu verhindern, daß bei der Registrierung der Schreibzeiger nach jedem Meßwert auf "Null" zurückgeht und erst bei Erreichen des nächsten Maximums sehr schnell ausgelenkt wird, wurde eine Sample- und Hold-Schaltung benutzt. Die dabei notwendige Steuerelektronik wurde dazu entwickelt und aufgebaut.

Diese Schaltung gestattet es, einen Meßwert solange zu speichern, bis der nächste relativ maximale Meßwert folgt. Abb. 2 zeigt das Blockschaltbild. Das Eingangssignal wird differenziert und gleichgerichtet und zum "Anstoßen" eines monostabilen Multivibrators benutzt, der eine einstellbare Vergrößerungszeit hat. Dabei wird die negative Flanke des Signals zeitlich bis kurz vor das Maximum der Eingangsspannung gestellt. Durch Differenzieren, Invertieren und Gleichrichten dieser negativen Flanke erhält man nun einen scharfen Impuls, welcher kurz vor dem Maximum der Eingangsspannung (U_e) steht. Dieser Impuls wird noch in einem Rechteckimpuls mit kurzer Haltezeit umgewandelt und gibt somit den Steuerbefehl für die Sample- und Hold-Schaltung. Abb. 3 zeigt die Folge der Meßwerte mit und ohne Auswerteelektronik. Abb. 4 zeigt einen Auszug von Prüfdiagrammen der Kopfkreisdurchmesser von 6-Rippen-Rohren, einer Lieferung der englischen Firma Accless und Pollock.

1131.12 Bestrahlungsversuche

1. Kurzzeitfestigkeit (H.Böhm, G.Heß, W.Scheibe, IMF)

Im Bestrahlungsprojekt Mol 3 B/1 wurden die austenitischen Stähle (4961), (4981) und (4988) im Zustand "10 % kaltverformt + Glühung 850°C - 1 Stunde" bis zu einer Dosis an schnellen Neutronen von $6 \times 10^{21} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$ bei 650°C im BR 2 bestrahlt und Zugversuche im Temperaturbereich zwischen 650°C und 900°C durchgeführt.

Obwohl der Stahl (4961) im unbestrahlten Zustand die höchste Bruchdehnung zeigte, trat bei den bestrahlten Blechproben der Bruch bereits in der Hooke'schen Geraden ein, d.h. bei allen Versuchen wurde keine plastische Verformung erreicht. Die Legierung (4988) brachte nur geringfügig bessere Ergebnisse. Bei 650°C wurden 2,6% Bruchdehnung gemessen, die aber zu höheren Temperaturen stark abfiel (700°C = 0,3%, ab 750°C = 0%). Die beste Duktilität zeigte der Stahl (4981), obwohl im unbestrahlten Zustand die geringsten Dehnungswerte gemessen wurden. Die Bruchdehnungen ergaben bei 650°C - 2,7%, bei 700°C - 1,6% und bei 750°C - 1,5%. Bei höheren Temperaturen war auch hier keine plastische Verformung erkennbar.

Im Bestrahlungsprojekt DIDO M4 wurde der Stahl (4981) in drei verschiedenen Gefügeständen eingesetzt. Die Dosis betrug etwa $3 \cdot 10^{20} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$ schnell und $6,6 \cdot 10^{20} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$ thermisch bei einer Bestrahlungstemperatur von 650°C. Zugversuche wurden zwischen 650°C und 900°C durchgeführt.

Als relativ günstig erwies sich der homogenisierte Zustand. Hier wurden bei 650°C - 7,6%, bei 700°C - 6,9% und bei 750°C - 6,5% Bruchdehnung gemessen. (Streckgrenzwerte: 650°C = 23 kp/mm², 700°C = 22,1 kp/mm², 750°C = 17,3 kp/mm²). Schlechter war der Zustand "10% kaltverformt + 850°C - 1 Stunde" (Dehnungen: 650°C - 4,5%, 700°C - 1,2%). Allerdings lagen die Streckgrenzen durch die 10%ige Kaltverformung höher (650°C = 32,5 kp/mm², 700°C = 31,8 kp/mm²). Als schlechtesten Zustand erwies sich erwartungsgemäß der Zustand "10% kaltverformt". Die geringen Bruchdehnungen (650°C = 3%, 700°C = 1,3% und 750°C = 0,85%) dürften aber ebenfalls auf die Kaltverformung zurückzuführen sein, die ohne die nachfolgende Glühung 850°C - 1 h noch höhere Streckgrenzwerte bedingt (650°C = 40,5 kp/mm², 700°C = 37,2 kp/mm², 750°C = 32,5 kp/mm²).

2. Zeitstand- und Kriechverhalten (H. Böhm, D. Cloß, W. Scheibe, C. Wassilew, IMF)

Im Rahmen des Bestrahlungsprojektes Mol 2 (in-pile Zeitstandfestigkeit von Rohren unter Innendruck) wurden Röhren mit den Abmessungen 6 mm \varnothing x 0,38 mm aus dem austenitischen Stahl X8CrNiMoVNb 1613 (Werkstoff-Nr. 4988) bei 700°C bestrahlt.

Nach Abb. 5 zeigt dieses Material bereits im unbestrahlten Zustand gegenüber den früher eingesetzten Röhren mit den Abmessungen 7 mm ϕ x 0,4 mm einen weniger starken Abfall der Zeitstandfestigkeit bei langen Versuchszeiten. Da beide Chargen fast die gleiche chemische Zusammensetzung aufweisen, muß dieses Verhalten auf die unterschiedliche Kaltverformung der Rohre zurückgeführt werden.

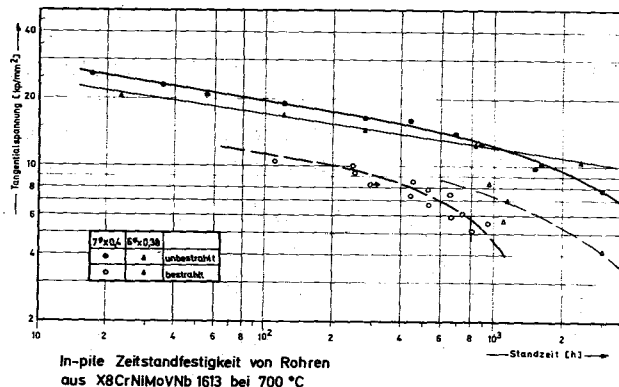


Abb. 5

Während die Rohre mit den Abmessungen 6 mm ϕ x 0,38 mm weniger als 5% kaltverformt waren, wurde bei den Rohren mit den Abmessungen 7 mm ϕ x 0,4 mm zwischen 15 und 20% Kaltverformung gemessen.

Auch unter Bestrahlung zeigen die weniger stark kaltverformten Röhren ein besseres Zeitstandverhalten. Über die Bruchdehnungen kann erst nach Abschluß der Nachuntersuchungen im Herbst 1970 berichtet werden.

3. Theoretische Arbeiten (K.Ehrlich, D.Kaletta, W.Schneider, IMF)

Im Rahmen der Untersuchung der Porenbildung wurden die Möglichkeiten der Anwendung eines Schwerionenbeschleunigers geringer Energie ($E \leq 100$ keV) erörtert. Als wichtigster Teilaspekt ist die Eindringtiefe von Nickelionen in verschiedenen Materialien (Ni, V, Mo) nach verschiedenen Potentialansätzen und Modellberechnungen in Angriff genommen worden. Die nachfolgende - vereinfachte Tabelle - gibt die wichtigsten Resultate.

Veröffentlichung zu 1131.12:

K.D. Closs, H.J. Laue

Das in-pile Zeitstandverhalten einiger austenitischer Stähle und Nickellegierung unter mehrachsiger Beanspruchung - Ergebnisse der Mol 2-Versuche -
KFK-Bericht 1152

Tabelle 1 Eindringtiefe d in \AA von Ni^+ -Ionen ($E = 100 \text{ keV}$) in Ni, Mo und V in Abhängigkeit verschiedener Modelle

Potential	Statistische Modelle						Gittermodell					
	Harte Kugel Näherung			Energieverlust Approximation			Kanal <110>			Kanal <111>		
	d (\AA)			d (\AA)			d (\AA)			d (\AA)		
	Ni	Mo	V	Ni	Mo	V	Ni	Mo	V	Ni	Mo	V
Inverses Pot. $\phi \sim \frac{1}{r^2}$	355	487	484	436	586	606	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Bohr-Potential $\phi \sim \frac{1}{r} \cdot e^{-r/a_b}$	800	-	-	-	-	-	1,6	1,2	1,1	5	3,7	3,3
							$\times 10^{10}$				$\times 10^6$	
Born-Mayer $\phi \sim e^{-r/a_{BM}}$	-	-	-	-	-	-	7,6	9,3	4,7	15,9	19,1	9,8
							$\times 10^4$				$\times 10^3$	
Thomas Fermi $\phi \sim \frac{1}{r} \times \left(r/a_{TF} \right)$	-	-	-	391	568	553	-	-	-	-	-	-

Tab. 1

1132 Entwicklung neuer Legierungen

1132.1 Vanadinlegierungen

1132.12 Mechanische Eigenschaften (H. Böhm, M. Schirra - IMF)

Die Untersuchungsergebnisse von V-Zr-Cr-Legierungen hatten gezeigt, daß diese **zwar** korrosionsbeständiger als die V-Ti-Nb-Legierungen sind, jedoch in Bezug auf die Zeitstandfestigkeit wesentlich ungünstiger liegen und auch den austenitischen Stählen nicht überlegen sind. (1).

In einem weiteren Versuchsprogramm wurden Zeitstandversuche an mehreren Legierungen mit Ti-Gehalten von 0-5% und Cr-Gehalten von 2-15% untersucht. Bei 650° ergibt sich für 10^3 Std Standzeit bei Legierungen mit 15% Cr und 1-3% abgestuftem Ti-Gehalt eine Zeitstandfestigkeit von 42-50 kp/mm^2 , wobei die Legierung mit 3% Ti die besseren Werte zeigt. Zu 10^4 Std. Standzeit extrapoliert werden

34-44 kp/mm^2 erreicht. Bei 700°C liegt die $\sigma_{\text{B}/1000 \text{ Std}}$ -Zeitstandfestigkeit bei 32-35 kp/mm^2 und für 10^4 Std. Standzeit bei 22-25 kp/mm^2 . Sowohl bei 650°C als auch bei 700°C Prüftemperatur deutet sich an, daß die Abnahme der Zeitstandfestigkeit mit zunehmender Standzeit bei den Ti-ärmeren Legierungen nicht so ausgeprägt ist, d.h. im Standzeitbereich um 10^4 Std dürften die optimalen Werte von V- (1-2)Ti-15Cr erreicht werden. Diese Werte liegen nur knapp unter denen der besten V-Ti-Nb-Legierungen und wesentlich über denen der V-Zr-Cr-Gruppe und der austenitischen Stähle. Die Bruchdehnung liegt ziemlich unabhängig vom Ti-Gehalt bei 650°C zwischen 20 und 25 % und bei 700°C zwischen 25 und 30%. Bei V-5Ti-2Cr zeigt sich, daß durch Erhöhung des Ti-Gehaltes und Erniedrigung des Cr-Gehaltes keine Verbesserung der Zeitstandfestigkeit zu erreichen ist. Die Werte liegen für $\sigma_{\text{B}/1000 \text{ h}}$ für 650°C bei 29 kp/mm^2 und für 700°C bei 22 kp/mm^2 . Versuche mit einer binären V-15Cr-Legierung verliefen nicht zufriedenstellend, weil bei dieser Kombination das Ausgangsmaterial so spröde war, daß noch nicht einmal Rundstäbe gefertigt werden konnten.

An zwei verschiedenen V-Ti-Nb-Legierungen wurde der Einfluß einer Kaltverformung (28-80%) sowie einer Glühung ($700-1100^\circ\text{C}$) nach Kaltverformung auf das Zeitstand- und Kriechverhalten bei 650°C untersucht. Die Kaltverformung führt zu einer mit dem Verformungsgrad zunehmenden Erhöhung der Kriechgeschwindigkeit und Erniedrigung der Standzeit bei gleichzeitig starker Erhöhung der Bruchdehnung. Zugleich verringert sich durch die Kaltverformung der Spannungsexponent n in der Beziehung $\dot{\epsilon} = k \cdot \sigma^n$. Die Glühung kaltverformter Proben vor dem Kriechversuch hat eine mit der Glühetemperatur zunehmende Erhöhung der Standzeit und Verringerung der Kriechgeschwindigkeit zur Folge.

Veröffentlichung:

H.U. Borgstedt, B.Kegel

Untersuchung der Korrosionseffekte von flüssigem Natrium an Legierungen V-Ti-Cr und V-Zr-Cr mit der Mikrosonde

Corros. Sci. 10 (1970) 51-54

- 114 Korrosionsversuche und Kühlmittelanalysen
1141. Natriumkühlung
- 1141.1 Korrosionsverhalten bei Na-Kühlung
- 1141.15 Korrosionsverhalten von Hartmetallen, Lötlegierungen etc.
(H.U. Borgstedt, IMF, G. Frees, G. Drechsler, IRB)

Inconel 625 bietet sich wegen seiner guten Warmfestigkeit als Werkstoff für Abstandshalter und Hilfskonstruktionen im Core des SNR an. Die durch Natrium hervorgerufenen Korrosionseffekte bei Strömungsgeschwindigkeiten von 0,5 m/sec und Sauerstoffgehalten um 5 ppm nehmen mit steigender Temperatur stärker zu als bei austenitischen Stählen, wie ein Vergleich der Korrosionskonstanten in Tabelle 1 zeigt.

Tabelle 1: Konstanten der Korrosion durch Natrium nach 4000 h

Temperatur [°C]	$k_{\text{Inconel 625}}$ [mg/cm ² h]	$k_{\text{aust. Stahl}}$ [mg/cm ² h]	$k_{\text{Inc.}}/k_{\text{St.}}$	Bemerkungen
500	$6,0 \times 10^{-6}$	$5,1 \times 10^{-6}$	1,2	
550	$20,4 \times 10^{-6}$	$8,7 \times 10^{-6}$	2,3	
600	$85,0 \times 10^{-6}$	$13,7 \times 10^{-6}$	6,2	
650	$300,0 \times 10^{-6}$	$21,0 \times 10^{-6}$	14,3	extrapoliert

Die Unterschiede bei hohen Temperaturen dürften bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten des Natriums noch höher sein. Nach Extrapolationen mit Hilfe von Literaturangaben (A.W.Thorley u. C.Tyzack, "Alkali Metal Coolants", p.97) kann bei 650°C und 6 m/sec mit 100 µm/a gerechnet werden. Die qualitativen Änderungen am Werkstoff sind nur geringfügig.

1141.3 Reinheit und Reinheitskontrolle des Natriums1141.31 Laborverfahren zur Bestimmung des Sauerstoffgehalts im Natrium

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

Das von TNO ausgearbeitete Destillationsverfahren zur Bestimmung von Sauerstoff wurde an Proben von bei der Entnahme mit Sauerstoff gesättigtem Natrium geprüft. Wie Abb. 1 zeigt, besteht gute Übereinstimmung mit der Löslichkeitskurve von Eichelberger (AI-AEC-12685, 1969). Die geringen Abweichungen sind durch die Versuchstechnik bedingt. Die Sättigungskurve von Claxton (J.Nucl.Energy A/B 19 (1965) 849) ist im Bereich niedriger Temperaturen nach unseren Messungen zu ungenau.

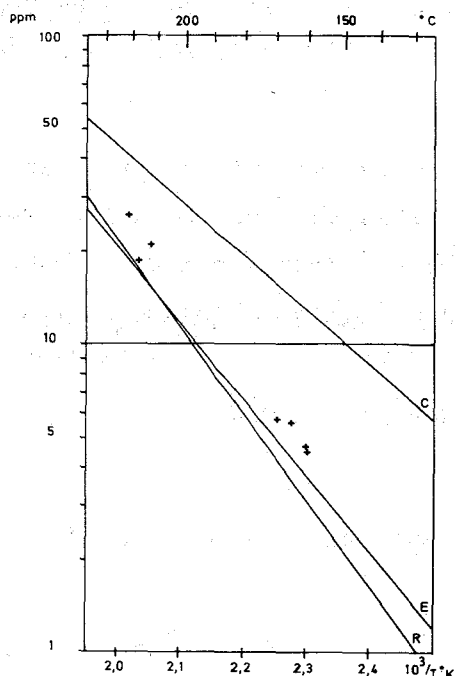


Abb. 1: Sauerstoffanalysen und Löslichkeitskurven

1141.32 Monitorverfahren zur Bestimmung des Sauerstoffs in Natrium

(H.U. Borgstedt, G. Drechsler, IMF-IRB)

Die von der United Nuclear Corporation gelieferte Zelle Nr. TPE-1/224 wurde mit einer 500 mC Gammaquelle bestrahlt. Dabei trat eine reversible Verschiebung der EMK bei konstanter Sauerstoffaktivität um rund 10 mV ein. Der Versuch läßt eine systematische Untersuchung der Strahlungsempfindlichkeit notwendig erscheinen.

Veröffentlichung zu 1141.3:

(1) H.U. Borgstedt, G. Frees

Die Oxydation von als Umhüllungen für Brennelemente in schnellen Reaktoren verwendeten Metallen durch sauerstoffhaltiges flüssiges Natrium
Werkstoffe und Korrosion 21 (1970) Heft 6

1141.4 Verschleißuntersuchungen in Natrium

(E. Wild, IRB)

Mit dem Ziel, für Halterungen, Lagerungen und Führungen im SNR-Regelstab-system geeignete Gleitpaarungen zu finden, wurden in Abstimmung mit der Firma Interatom folgende nach technologischen Gesichtspunkten zusammengefaßte Werkstoffgruppen untersucht:

1. Unbeschichtete Strukturwerkstoffe mit gleichen Gleitpartnern
2. Schweißauftragslegierungen mit unbeschichteten Strukturwerkstoffen
3. Schweißauftragslegierungen mit Hartwerkstoffen.

Das untersuchte Werkstoffsortiment bestand aus:

- Strukturwerkstoffen: 4961, 4981, Inconel 718
- Schweißauftragswerkstoffe: Akrit Fe Cr 50, Stellite 1, Stellite 6H, Colmonoy 5, Colmonoy 6; Colmonoy 56
- Hartwerkstoffe: Ferro-TiC-T, Hartmetall 1

Bei den Auswahlversuchen unter Standardbetriebsbedingungen (Na-Temperatur: 600°C; spez. Belastung der Proben: 12 kp/cm²; Gleitweg: 11 · 10³m) zeigte die Kombination Inconel 718 mit Stellite 6H ein sehr günstiges Gleit- und Verschleißverhalten. Mit dieser Paarung wurde daher eine Reihe von Parameter-Untersuchungen durchgeführt, wobei folgende Größen variiert wurden:

Belastung: 12, 18, 24 kp/cm²
 Gleitweg: 11, 22, 33 · 10³ m

Diese Werkstoffpaarung zeigte sowohl unter Variation der Belastung als auch des Gleitweges eine relativ geringe Verschleißrate auf der Inconelseite. Auch bei Vertauschung der Probengeometrie war die Verschleißwirkung an den Stellite 6H-Proben um ein Mehrfaches höher als an den Inconel-Partnern (Abb. 2 und 3). Bis zu der untersuchten spezifischen Belastung von 24 kp/cm² ergaben sich noch keine Symptome für Kaltverschweißung. Eine Verdoppelung der Flächenpressung bewirkte die gleiche absolute Erhöhung der Verschleißrate an den Inconel-Stempeln

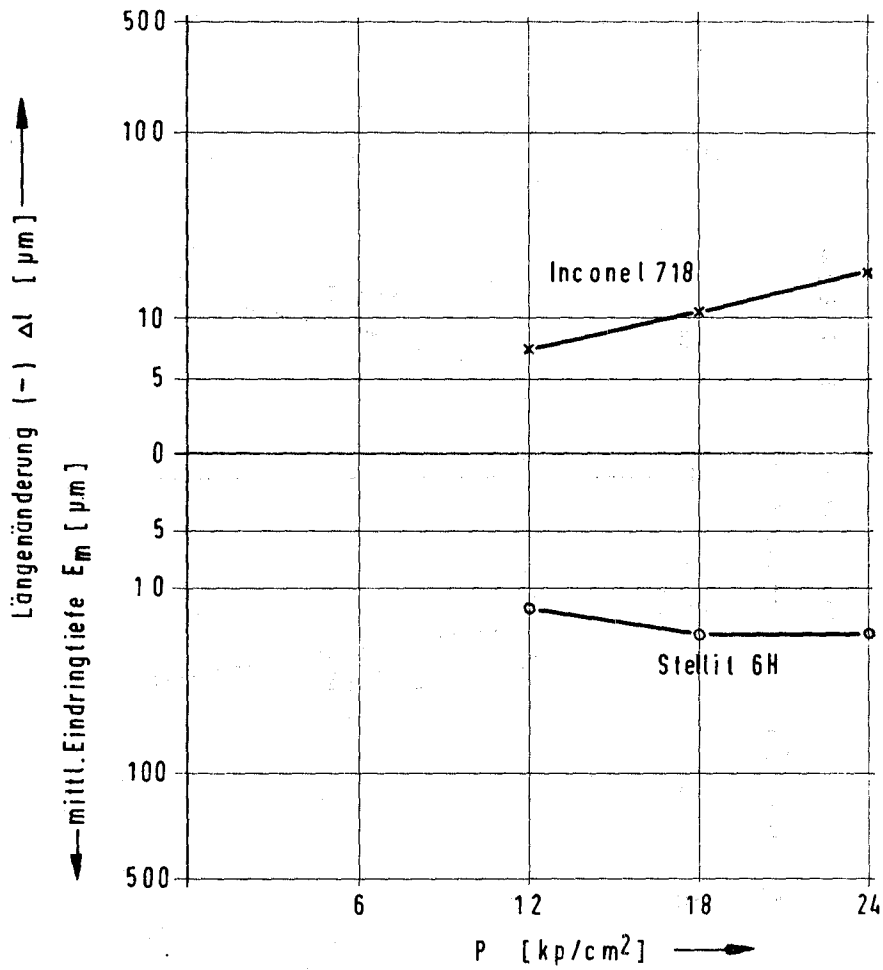
wie die Erhöhung des Gleitweges von $11 \cdot 10^3$ m auf $33 \cdot 10^3$ m. Eine exakte Linearität zwischen dem Parameter Gleitweg und dem Abrieb konnte nur bedingt nachgewiesen werden. Der aufgetragene Wert für die Längenänderung der Stellit 6H-Proben bei $33 \cdot 10^3$ m stellt das Mittel aus drei weit streuenden Einzelergebnissen dar.

Ein zusammenfassender Bericht über diese Untersuchungen befindet sich im Druck (1).

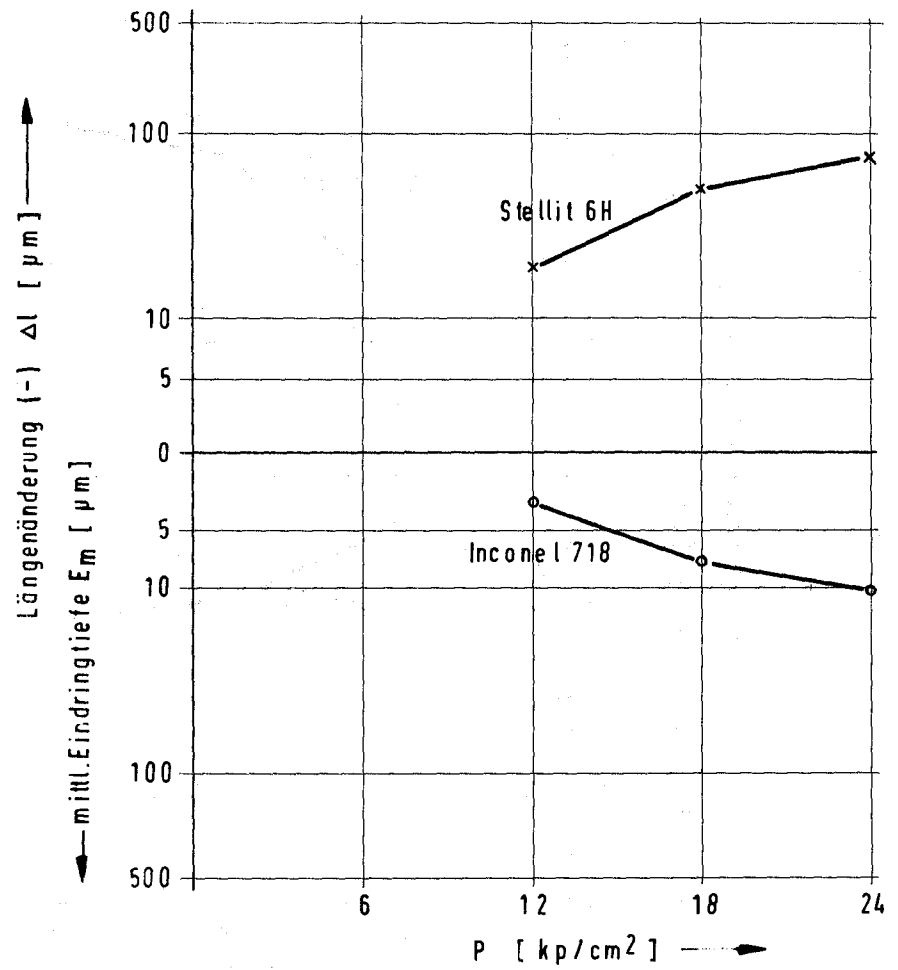
Veröffentlichung zu 1141.4:

(1) E. Wild, K. Mack, H. Hoffmann

Experimentelle Untersuchungen des Verschleißverhaltens von Stählen
und Legierungen in flüssigem Natrium
KFK-Bericht 1251, Juli 1970



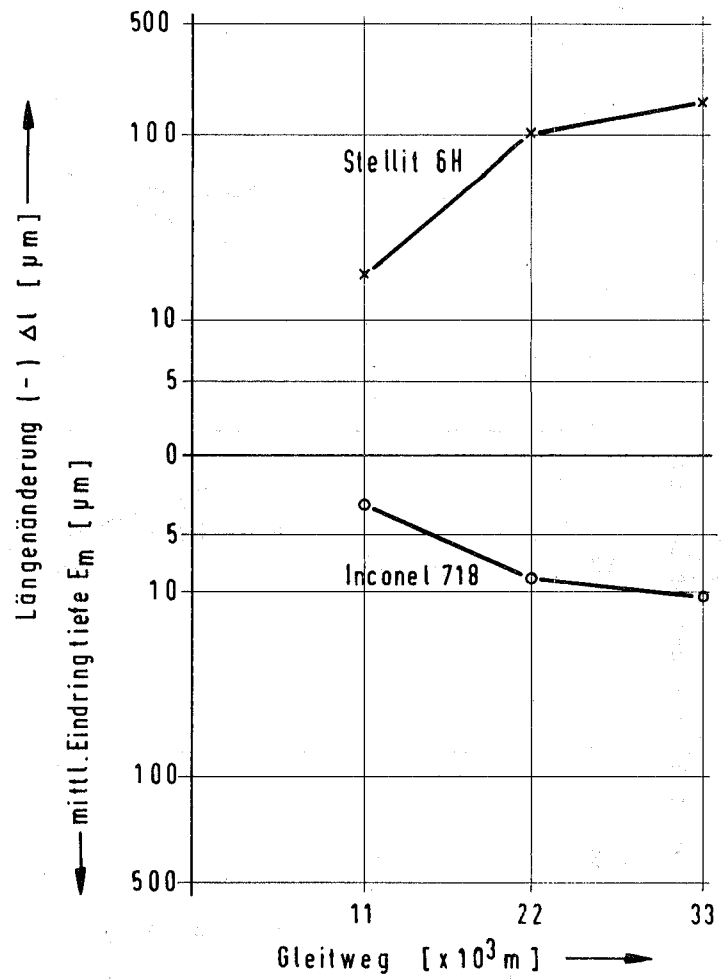
Das Verschleißverhalten als Funktion der Belastung
(Gleitweg $11 \times 10^3 \text{ m}$)



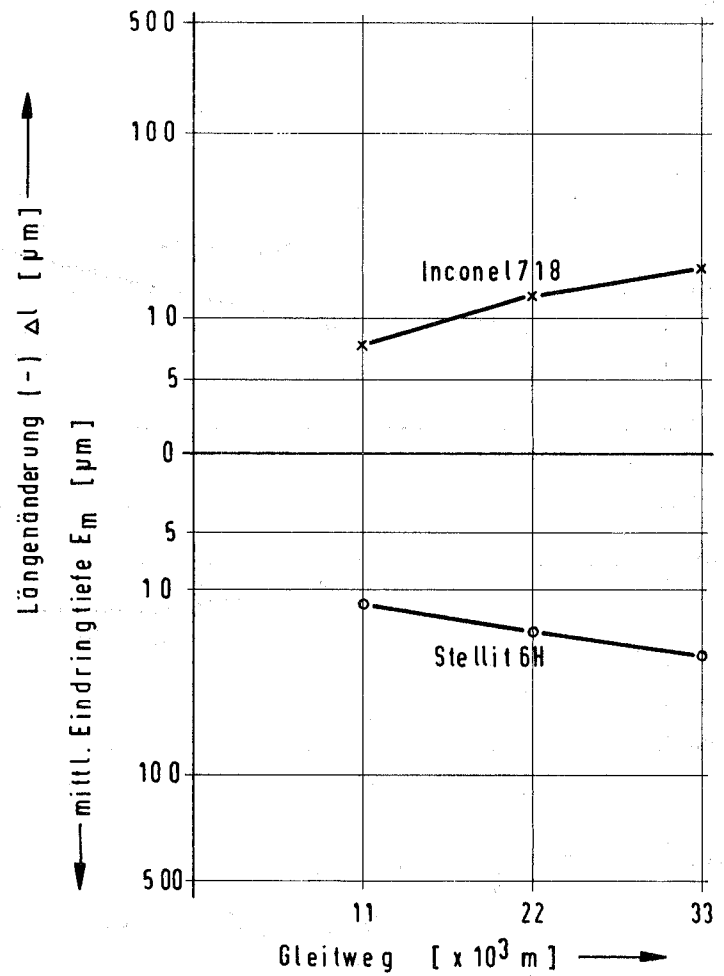
Das Verschleißverhalten als Funktion der Belastung
(Gleitweg $11 \times 10^3 \text{ m}$)

Abb. 2

114-5



Das Verschleißverhalten als Funktion des Gleitweges
(Spez.-Belastung 12 kp/cm^2)



Das Verschleißverhalten als Funktion des Gleitweges
(Spez.-Belastung 12 kp/cm^2)

Abb. 3

1142. Gaskühlung (S. Leistikow, IMF)

1142.1 Korrosionsverhalten unter isothermen Bedingungen

Austenitische Stähle

In Fortsetzung der Heißdampf-Korrosionsuntersuchungen von austenitischen CrNi-Stählen im Autoklaven bei 600°C, 70 atm wurde inzwischen der durch schmirgelnde Oberflächenüberarbeitung an Incoloy 800-Blechproben erzielte Beständigkeitsgewinn auch durch Versuche an kaltgewalzten Blechen hohen Verformungsgrades eingestellt. Die über 1000 Versuchsstunden registrierten Gewichtszunahmen (Abb. 4) der 60, 70 und 90 % kaltverformten Materialien weisen - in Ergänzung der für 10-50 % Kaltverformung bereits mitgeteilten Resultate - eine weitere, schrittweise Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit aus. Gemäß dem funktionellen Zusammenhang zwischen Kaltverformung und Gewichtszunahme (Abb. 5) konnte der Grad der Kaltverformung oberflächlich geschmirgelter Bleche auf 80 - 90 % geschätzt werden.

Letzte Korrosionsuntersuchungen von Materialien unterschiedlichen Kaltverformungsgrades wiesen selbst bei 800°C, nach Lösungsglühung in Wasserstoff und nach Entzunderung noch einen deutlichen Beständigkeitsgewinn aus.

Abb. 4:

HEISSDAMPF-KORROSION VON INCOLOY 800-BLECHPROBEN UNTERSCHIEDLICHEN KALTVERFORMUNGSGRADES WÄHREND 1000 Std BEI 600°C, 70 atm

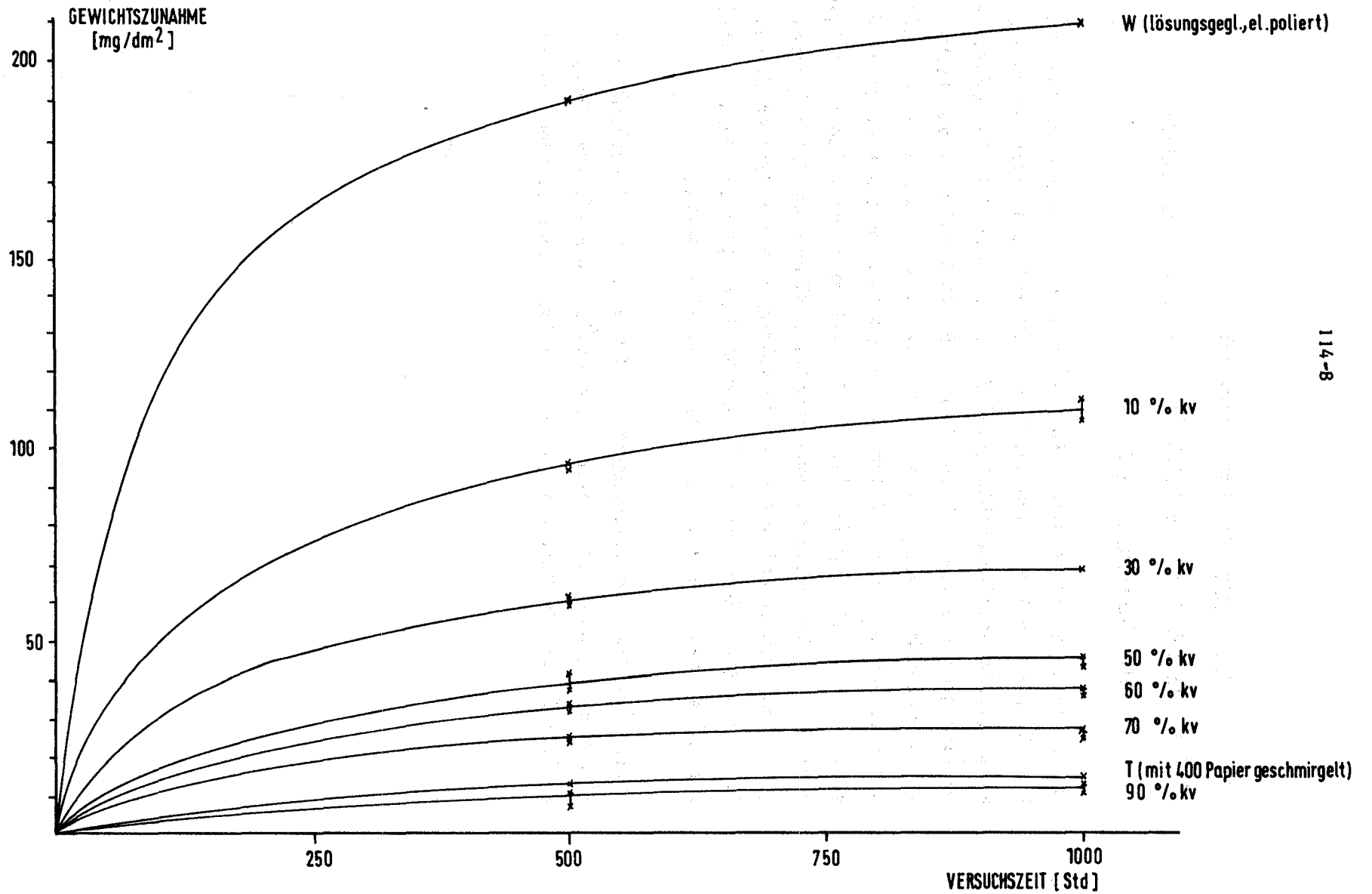
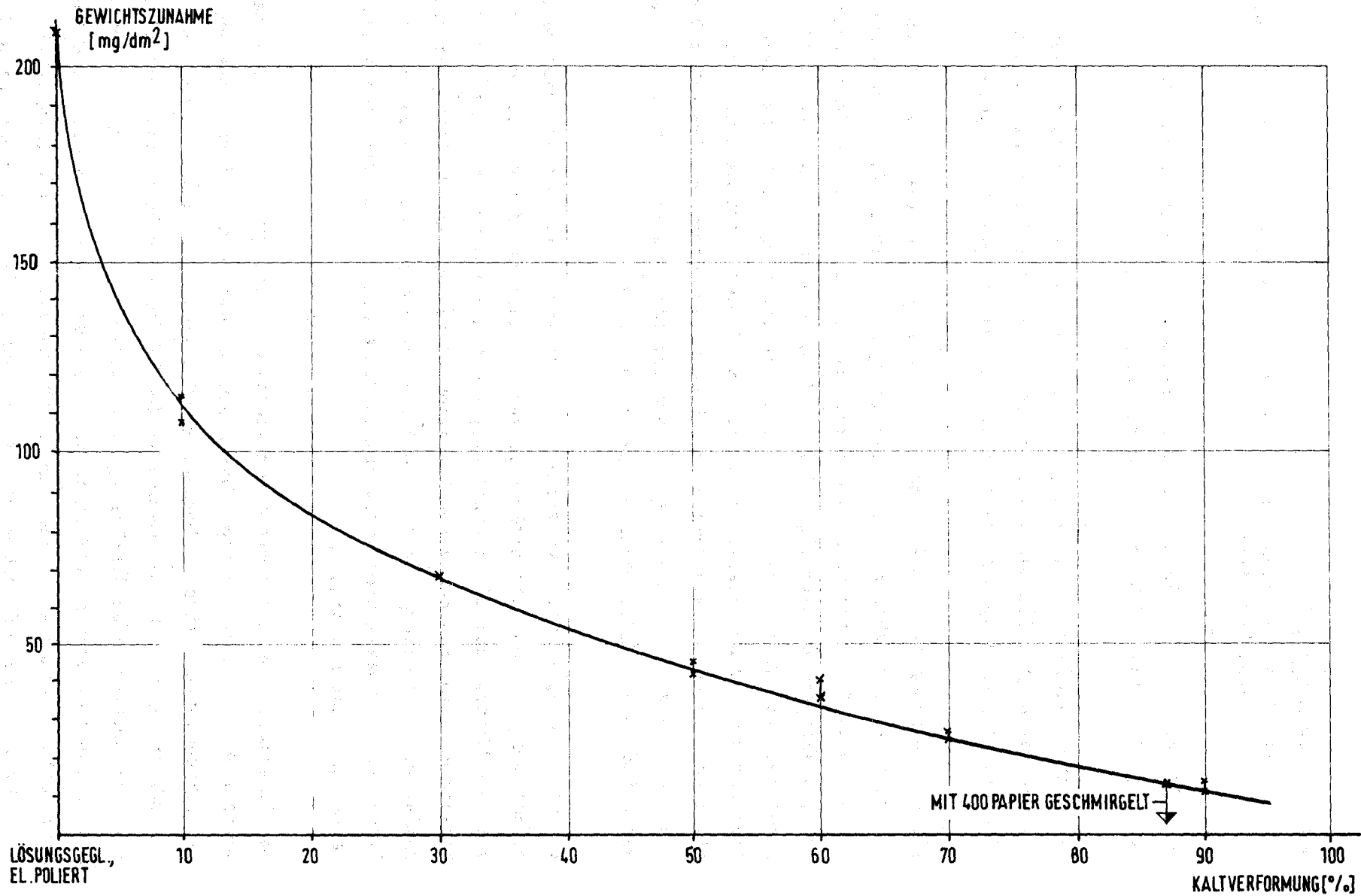


Abb. 5:

HEISSDAMPF-KORROSION VON INCOLOY 800-BLECHPROBEN ABHÄNGIGKEIT DER GEWICHTSZUNAHME VOM GRAD DER KALTVERFORMUNG NACH 1000 STUNDEN IM AUTOKLAV BEI 600°C, 70 atm



1142.2 HKW-Kreislauf

(V. Casal, F. Erbacher, K. Marten, K. Rust, J. Vasarhelyi, IRB,
S. Leistikow, IMF)

Der HKW-Kreislauf im IRB ist ein großtechnischer Prüfstand zur Untersuchung der Heißdampf-Korrosion unter Wärmeübergang.

Die Montage sowie die Isolierung des Prüfstandes wurden abgeschlossen. Der Dampferzeuger, die Speisewasserpumpen sowie die Steuerung für die elektrische Beheizung der Teststrecken wurden in Betrieb genommen.

Die Hochleistungsheizstäbe in den sechs parallelen Teststrecken werden mit Wechselstrom beheizt. Die Leistungsregelung erfolgt durch Phasenschnitt mittels Thyristoren. Hierdurch wird der sinusförmige Wechselstrom je nach abgegebener Leistung bei einem Phasenwinkel $< 150^\circ$ bzw. $< 330^\circ$ einer Periode unterbrochen. Diese stoßweise Leistungszufuhr mit einer Frequenz von 100 Hz erzeugt im Stromleiter Temperaturschwankungen mit gleicher Frequenz. - Die Temperaturschwankungen wurden mit dem RELAX-Programm ermittelt. Sie betragen etwa $\pm 8^\circ\text{C}$ pro Periode im Heizleiter bei einem Wärmefluß an der Heizstaboberfläche von 300 W/cm^2 .

In der Prototyp-Teststrecke wurde die Erprobung eines Hochleistungs-Heizstabes unter echten Betriebsbedingungen fortgesetzt. Die Beheizung erfolgte wie im HKW-Kreislauf mit thyristorgesteuertem Wechselstrom. In einem Dauer-versuch über 100 Stunden wurde bei einem Wärmefluß von 300 W/cm^2 und einer maximalen Hüllrohrtemperatur von 600°C nachgewiesen, daß die durch die Thyristoren im Heizleiter verursachten Temperaturwechsel die Lebensdauer der Heizstäbe nicht beschränken.

Zur Interpretation der ermittelten Korrosionsraten muß die Hüllrohrtemperatur während der Versuchszeit möglichst genau bekannt sein. Auf eine Messung der Hüllrohrtemperatur mittels Thermoelementen wurde jedoch verzichtet, da durch die Anbringung der Thermoelemente an den Hüllen eine Schwächung der Hüllrohre und infolgedessen eine Verkürzung ihrer Standzeit nicht auszuschließen ist. Die Hüllrohrtemperatur wird daher mit Hilfe der gemessenen Werte für die Dampfaustrittstemperatur, den Dampfdurchsatz und die Oberflächenbelastung, d.h. Heizleistung, auf rechnerischem Wege ermittelt. Dazu wurde ein Rechen-

programm erstellt, welches zur thermodynamischen Auslegung, zur Erstellung von Leistungsnomogrammen für den Betrieb des Kreislaufes sowie zur nachträglichen Auswertung der Versuche geeignet ist. Die Abb. 6 zeigt für einen speziellen Fall ein mittels des Rechenprogrammes ermitteltes Leistungsnomogramm, aus dem die max. Hüllrohraußentemperatur direkt abgelesen werden kann. Die Berechnungen ergaben, daß die Hüllrohrtemperatur stetig und linear vom Dampfeintritt bis zum Dampfaustritt ansteigt, was die Auswertung der Versuche zur Ermittlung der temperaturabhängigen Korrosionsraten erleichtert. Die Ermittlung der Genauigkeit dieses semiempirischen Verfahrens zur Ermittlung der Hüllrohrtemperatur erfolgt in einem sich in Vorbereitung befindlichen Vorversuch, bei dem die Hüllrohrtemperatur zur Kontrolle gemessen wird.



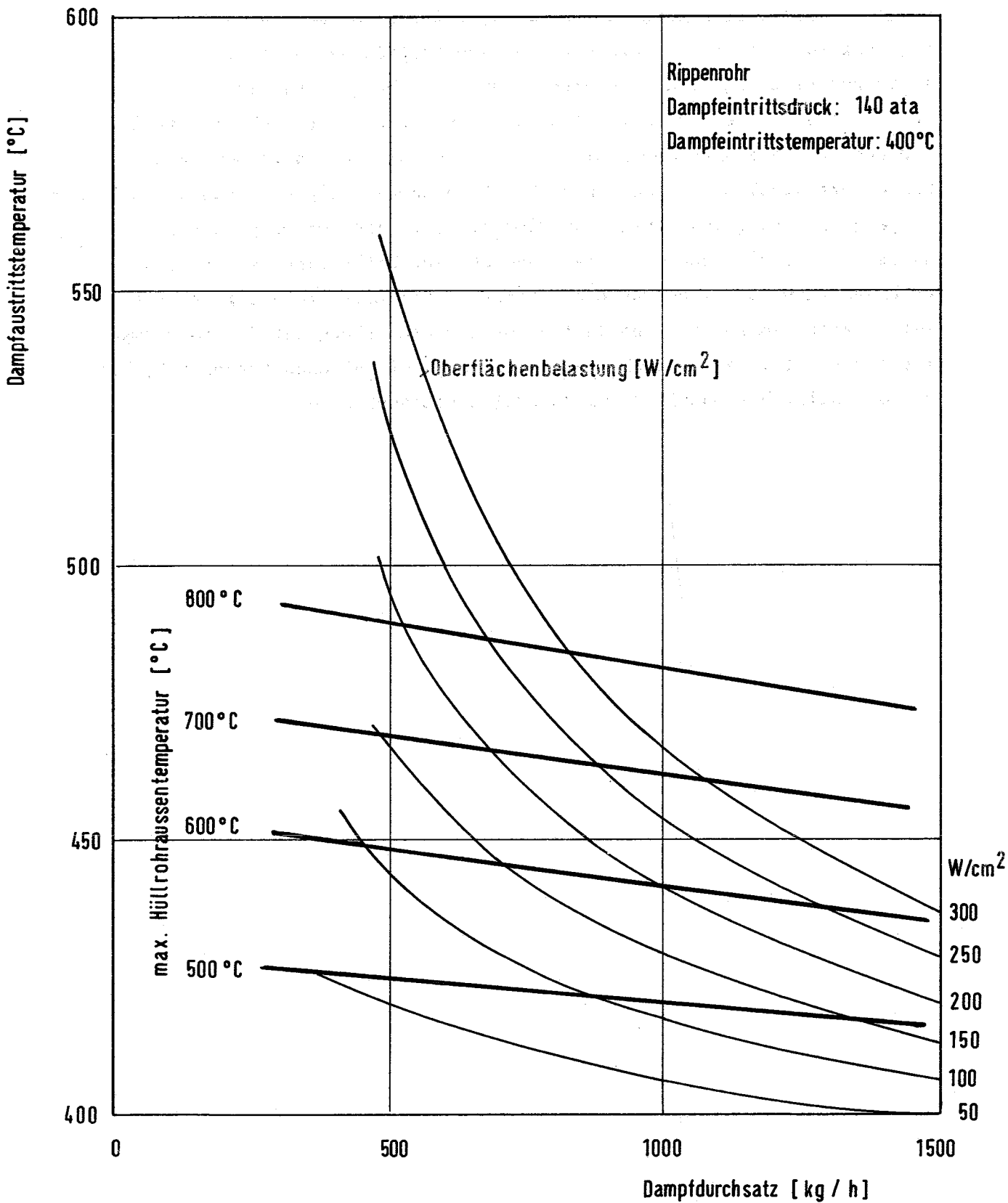


Abb. 6 Leistungsnomogramm der HKW - Prototyp - Teststrecke

115 Arbeiten zum Brennstoffzyklus1151.3 Laboranlage zur Wiederaufarbeitung bestrahlter Brüter-Brennstoffe

(C.H. Leichsenring, IHCh)

Nach erfolgreichem Abschluß des kalten Probetriebes in der Laboranlage MILLI konnte mit den Vorbereitungen für den heißen Betrieb begonnen werden. Beim kalten Betrieb stellten sich Fehler und Störungen heraus, für deren Abänderung Teile bestellt und einige Rohrleitungsführungen neu geplant werden mußten. Die Manipulatoren an den Heißen Zellen wurden verbessert und Schutzbezüge mit Wechselvorrichtung bestellt.

Die Abfüllstation für die kontaminationsfreie Abfüllung der verschiedenen hochaktiven Abfallösungen wurden konstruiert und die Transporteinrichtungen komplettiert.

Veröffentlichung zu 115

D. Ertel, W. Wettstein

Röntgenspektrometrische Simultanbestimmung von Uran und Plutonium in Lösungen bestrahlter Schnellbrüterbrennstoffe

KFK-Bericht 1121

121. Physikalische Experimente1211. Experimentelle Reaktor- und Neutronenphysik1211.1 Meßmethoden für Nulleistungsreaktoren1211.11 Entwicklung und Erprobung eines He³-Halbleiter-Sandwich-Spektrometers mit γ -Diskriminierung (H. Bluhm, INR)

Die bisher zur Messung schneller Neutronenspektren verwendeten He³-Halbleiter-Sandwich-Spektrometer sind im Energiebereich unterhalb 2,5 MeV nicht verwendbar⁺⁾, weil sich hier dem Neutronenspektrum das i.a. viel intensivere γ -Untergrund-Spektrum überlagert.

Es wurde ein He³-Halbleiter-Sandwich-Spektrometer entwickelt und erprobt, das a) eine Diskriminierung gegen den γ -Untergrund und b) eine Korrektur der Energieverluste von Protonen und Tritonen im He³-Gasvolumen erlaubt. Dadurch ist es möglich, den meßbaren Energiebereich bis hinunter zu 100 keV auszuweiten.

Gegenüber dem Li⁶-Halbleiter-Sandwich-Spektrometer ergeben sich wesentliche Vorteile:

1. Die Neutronenempfindlichkeit des He³-Spektrometers ist um einen Faktor 20 - 50 größer als die eines Li⁶-Spektrometers vergleichbarer Größe und Auflösung.
2. Das energetische Auflösungsvermögen des He³-Spektrometers ist inhärent besser.
3. Der Wirkungsquerschnitt der He³-Reaktion zeigt einen glatten Verlauf, während die Li⁶-Reaktion bei 270 keV eine breite Resonanz aufweist.

Aus 1. folgen zwei weitere wichtige Punkte: a) der (n, α)- und (n,p)-Untergrund im Si der Detektoren ist für das He³-Spektrometer von wesentlich geringerer Bedeutung und b) die in einem schnellen Neutronenfluß prinzipiell begrenzte Lebensdauer der Si-Detektoren erhöht sich um den gleichen Faktor wie die Empfindlichkeit.

<sup>+) Lee M.E. and Awcock M.L.: A He³-filled semiconductor counter for the measurement of fast neutron spectra. Neutron Dosimetry Pt.I, IAEA, Wien (1963)
Silk M.G.: The determination of the fast neutron spectrum in thermal reactors by using Li⁶ and He³ semiconductor spectrometers. AERE-R 5183, 1966.</sup>

Den Aufbau des Spektrometers zeigt die Abbildung 1. Der Zwischenraum der beiden kreisförmigen 0,6 cm voneinander entfernten 200 mm^2 großen Si-Oberflächensperrschichtzähler ist als Proportionalzähler ausgebildet. Der exakt in der Mitte gelegene 40μ dicke Zähl draht bildet die Anode, die Halbleiterdetektoren einen Teil der Kathodenwand. Infolge der unvorteilhaften Geometrie kann das Zählrohr nur bei kleinen Spannungen (≈ 400 Volt) mit geringer Multiplikation betrieben werden.

Das Spektrometer zählt nur solche Ereignisse, die sowohl in beiden Halbleiterdetektoren als auch im Proportionalzähler Impulse erzeugt haben, deren Amplituden gewisse vorgegebene Schwellen überschreiten. Die Diskriminierungsmöglichkeit gegenüber γ -Untergrund beruht auf folgendem; Die spezifische Ionisation der von den γ -Quanten (hauptsächlich im Silizium) erzeugten Comptonelektronen im He^3 -Gas ist bedeutend geringer als die der Protonen und Tritonen. Entsprechend sind die Energieverluste der letzteren im He^3 -Gas i.a. erheblich größer als die von Elektronen gleicher Energie.

Es wurden zwei elektronische γ -Diskriminierungssysteme untersucht. Der Block, der die Impulse der Halbleiterdetektoren verarbeitet, ist in beiden Fällen gleich und nahezu identisch mit der für das Li^6 -Sandwichspektrometer verwendeten Elektronik⁺⁾ . Er ist in sich abgeschlossen und arbeitet völlig unabhängig von der übrigen Elektronik. Der Vorteil dieses Aufbaus liegt darin, daß die gute Zeitauflösung der Halbleiter voll genutzt werden kann und daß die Anzahl der Impulse durch die schnelle Koinzidenzschaltung bereits vor der Summation mit den Proportionalzählerimpulsen bedeutend reduziert wird. Dadurch verringert sich die Anzahl der Pile-up-Impulse erheblich. Infolge des großen Unterschieds in der spezifischen Ionisation zwischen Elektronen und Protonen bzw. Tritonen kann eine sehr weitgehende Diskriminierung gegen den γ -Untergrund bereits durch eine Einkanal-Diskriminator-Schwelle im Proportionalzählrohrkreis erreicht werden. Die Schwelle des Einkanalanalysators wird so gelegt, daß γ -Impulse, die übrigens nur selten das Rauschniveau des Verstärkers überschreiten, weitgehend unterdrückt werden (Abb. 2a). Der vom Einkanal diskriminator erzeugte logische Impuls triggert den Koinzidenzeingang des Vielkanal analysators. Die dadurch erreichte Trennung zwischen γ -Untergrund und Neutronen ist für die meisten Anwendungen völlig ausreichend. Da jedoch die spezifische Ionisation mit wachsender Teilchenenergie abnimmt, ist es möglich, daß sehr energiereiche Protonen, die das Proportionalzählrohr auf kurzen Wegen durchqueren, einen ebenso geringen

⁺⁾ Blum H. and Stegemann D.: Theoretical and experimental investigations for an improved application of Li^6 -semiconductor sandwich spectrometer. Nucl.Instr.Meth.70 (1969), 141.

Energieverlust erleiden wie relativ energiearme Elektronen, die es auf langen Wegen durchsetzen. Eine Trennung von γ -Untergrund und Neutronenspektrum allein mit dem Einkanaldiskriminator ist in diesem Fall nicht mehr möglich. Für diesen Fall wurde das aufwendigere aber auch wesentlich wirksamere System der Abb. 3 untersucht. Durch Multiplikation des Proportionalzählerimpulses, mit dem aus allen drei Zählern aufsummierten Impuls, erhält man eine vollständige Trennung auch zwischen relativ niederenergetischen Elektronenimpulsen und relativ hochenergetischen Protonenimpulsen. Die Multiplikation der Impulse geschieht mit einem logarithmischen Verstärker, der auch für die Diskriminierung von γ -Impulsen in Protonenrückstoßzählern verwendet wurde⁺⁾ . Abb. 2b zeigt die Diskriminierung für thermische Neutronen und für das Spektrum einer Am-B-Quelle, das Neutronen mit Energien bis zu 5 MeV enthält.

Zur Berechnung des Neutronenspektrums aus dem gemessenen Impulshöhenspektrum muß die Empfindlichkeit des Spektrometers als Funktion der Energie bekannt sein. Diese setzt sich zusammen aus dem Wirkungsquerschnitt der $\text{He}^3(n,p)t$ -Reaktion und der geometrischen Empfindlichkeit, die den Einfluß der Reaktionskinematik auf die Nachweiswahrscheinlichkeit beschreibt. Zur Berechnung der geometrischen Empfindlichkeit ξ_g wurde ein Monte-Carlo-Programm geschrieben, das es gestattet, ξ_g als Funktion der geometrischen Parameter (Abstand und Größe der Detektoren), des He^3 -Gasdrucks, der Schwellen in den Halbleiterkreisen und im Proportionalzählerkreis, mit zwar für isotrop und für aus beliebiger Richtung parallel einfallende Neutronen zu berechnen. Das Programm berücksichtigt den exakten Energieverlust der Sekundärteilchen beim Durchqueren des Gases und ermöglicht daher auch die Berechnung der Spektrometerantwortfunktion vor der Addition des Proportionalzählerimpulses. Die Streuung im Schwerpunktsystem kann sowohl isotrop als auch anisotrop gerechnet werden. Die geometrische Empfindlichkeit und die Antwortfunktionen für das in den folgenden Messungen verwendete Spektrometer sind in den Abbildungen 4 und 5 dargestellt. Die Veränderung der Halbwertsbreite der Spektrometerantwortfunktion mit wachsender Energie und ihre Asymmetrie unterstreichen die Bedeutung der Addition der Proportionalzählerimpulse, die eine erheblich verbesserte und gleichmäßige Auflösung über den gesamten Energiebereich garantiert. Um die Zuverlässigkeit der Berechnungen zu überprüfen, ist eine Messung der geometrischen Empfindlichkeit im Energiebereich 100 keV bis 2 MeV am van de Graaf geplant.

⁺⁾ Fieg G. und Werle H.: Erprobung eines Analog-Pulshöhen-Rechners zur Impulsformdiskrimination bei Rückstoßprotonen-Proportionalzählrohren.
INR Arbeitsbericht Nr. 294/67.

Zum Nachweis der Zuverlässigkeit des Spektrometers wurden Spektrumsmessungen an SNEAK und SUAK sowie die Messung eines Am-B-Quellspektrums durchgeführt. Bei der Messung des Spektrums im Zentrum der Anordnung SNEAK-6A erwies es sich als sehr vorteilhaft, daß der Reaktor infolge der relativ hohen Empfindlichkeit des Spektrometers nur bei kleinen Leistungen (0,1 Watt) gefahren werden brauchte. Dadurch konnte die Wahrscheinlichkeit von Pile-up zwischen γ - und neutroneninduzierten Impulsen in den Halbleiterkreisen stark reduziert werden. Bei einer Meßzeit von 4 Stunden ist die statistische Genauigkeit im gesamten Meßbereich (100 keV-5 MeV) besser als 2 %. Die mit dem He^3 -Spektrometer und mit Rückstoßprotonenzählern gemessenen Spektren stimmen gut überein (Abschnitt 1213.2).

An der SUAK wurde die sowohl in Karlsruhe als auch in Aldermaston und Harwell bereits mehrfach untersuchte Anordnung SUAK-UHC (bzw. Vera 7A) für die Erprobung des He^3 -Spektrometers ausgewählt⁺⁾ . Anstelle des 14 MeV-Neutronengenerators wurde für diese Messung eine 5C Am-Be-Quelle verwendet, die einen erheblich geringeren (n, α) und (n,p)-Untergrund in den Si-Detektoren verursacht, die jedoch bei früheren Messungen mit dem Li^6 -Spektrometer aus Intensitätsgründen nicht verwendet werden konnte. Die Übereinstimmung mit anderen experimentellen Ergebnissen ist im Energiebereich unterhalb 3 MeV zufriedenstellend und liegt innerhalb der für die Harwellmessung angegebenen Fehlergrenzen von + 10 % (Abschnitt 1211.4).

Sowohl bei der SNEAK-Messung als auch bei der SUAK-Messung war der (n, α) und (n,p) Untergrund sehr gering und unterhalb etwa 3 MeV Neutronenenergie vernachlässigbar; oberhalb 3 MeV überschritt er nie 10 %.

Schließlich wurde das Spektrum einer Am-B-Quelle erneut gemessen. Diese Quelle bot sich aus zwei Gründen an: 1. Ihr Energiespektrum ist derart, daß Si-Untergrund mit Sicherheit vernachlässigbar ist. 2. Bei neueren Messungen wurde von WERLE⁺⁺⁾ bei etwa 300 keV ein noch ungeklärter Peak gefunden. Die Auflösung des He^3 -Spektrometers betrug 60 keV, war also ausreichend um diesen Peak identifizieren zu können. Abb. 6 zeigt das mit dem He^3 -Spektrometer gemessene Spektrum. Oberhalb etwa 1,5 MeV stimmt es mit dem von WERLE gemessenen Spektrum innerhalb der abgeschätzten Fehler von etwa 15 % überein. Ein Peak bei 300 keV ist jedoch weder im gemessenen Impulshöhenspektrum, noch im daraus gewonnenen Neutronenspektrum erkennbar. Dagegen weist das Spektrum bei etwa

⁺⁾ Bluhm H. et al.: Neutron spectrum measurements in various SUAK assemblies. BNES Int.Conf.Fast Reactors, Juni 1969.

⁺⁺⁾ Werle H.: Spektrumsmessungen radioaktiver Neutronenquellen im Energiebereich von 10 keV bis 10 MeV mit Protonenrückstoß-Proportionalzählrohren. KFK Ext.Bericht, INR-4/70-25.

1 MeV einen flachen Buckel auf. Für seine Entstehung könnte eine der folgenden drei Ursachen oder eine Kombination aus ihnen verantwortlich sein:

1. Ein größerer Prozentsatz der Übergänge als bisher angenommen führt zum 2. angeregten Niveau des N^{14} -Kerns. Aus Berechnungen⁺⁾ läßt sich schließen, daß eine Anregung dieses Niveaus etwa 10 % zur Erklärung des Buckels ausreichen würde.
2. Da es sich um eine Borquelle natürlicher Isotopenzusammensetzung handelt, stammt ein gewisser Anteil der Neutronen aus der $B^{10}(n,\alpha)N^{13}$ Reaktion. Dieser ist zwar mit 5 % sehr klein, besetzt jedoch gleichfalls bei etwa 1 MeV ein Maximum.
3. Die geometrische Empfindlichkeit ist bei 1 MeV zu niedrig.

Das Quellspektrum wurde mit der Empfindlichkeit für einen parallel zur Achse einfallenden Neutronenstrahl ausgewertet und diese Annahme ist, wenn sich die Quelle wie hier unmittelbar neben dem Spektrometer befindet wahrscheinlich eine zu grobe Näherung. Dieser Punkt wird noch untersucht. Die SNEAK und SUAK-Spektren jedoch wurden mit der geometrischen Empfindlichkeit für isotrope Flußverteilung berechnet, die eine gute Näherung sein dürfte. Da die Empfindlichkeit jedoch von den differentiellen Querschnitten abhängen, ist eine experimentelle Überprüfung der berechneten Werte in jedem Falle wünschenswert. Die gute Übereinstimmung der mit dem He^3 -Spektrometer gemessenen SNEAK- und SUAK-Spektren mit anderen Messungen läßt jedoch vermuten, daß die Abweichungen nicht groß sein werden.

Zusammenfassend kann man sagen, daß die Spektrumsmessungen an SNEAK und SUAK die Zuverlässigkeit des beschriebenen He^3 -Spektrometers mit γ -Diskriminierung bewiesen haben. Wenn es gelingt, in einer sorgfältigen und exakten Messung die relative Empfindlichkeit des Spektrometers für verschiedene Einfallsrichtungen zu bestimmen, so ist damit ein sehr genaues Spektrometer geschaffen, das den Meßbereich der Protonenrückstoßzähler zu einem großen Teil überdeckt (bis 100 keV) und das daher einen besseren Vergleich von gemessenen Spektren untereinander ermöglicht.

⁺⁾ Hess N.N.: Ann.Phys.6 (1959) 115.

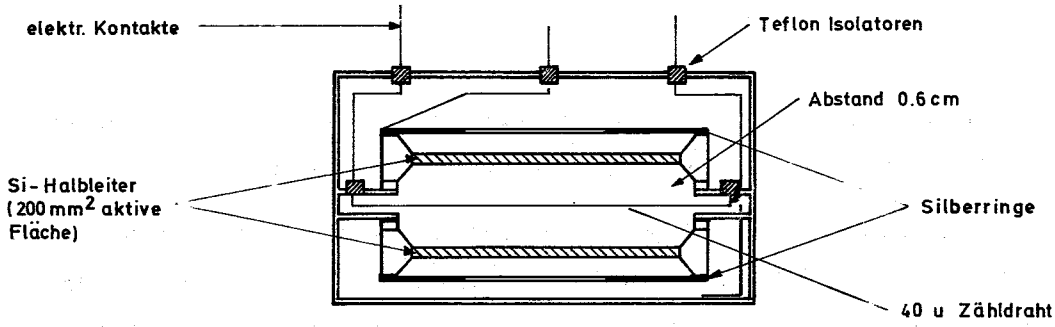


Abb. 1: He³ - Spektrometer

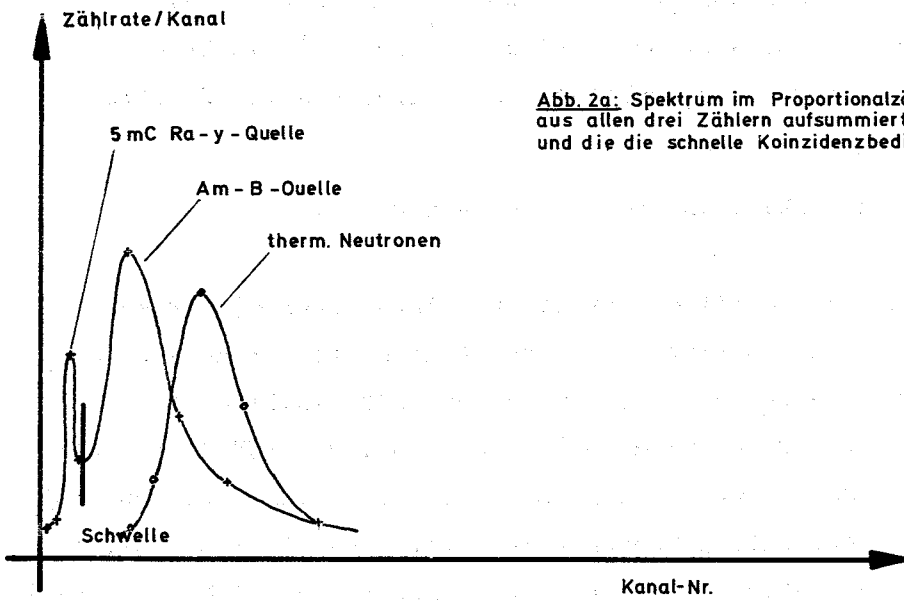


Abb. 2a: Spektrum im Proportionalzähler gemessen in Koinzidenz mit den aus allen drei Zählern aufsummierten Impulsen, die 764 keV überschreiten und die die schnelle Koinzidenzbedingung des Halbleiterblockes erfüllen.

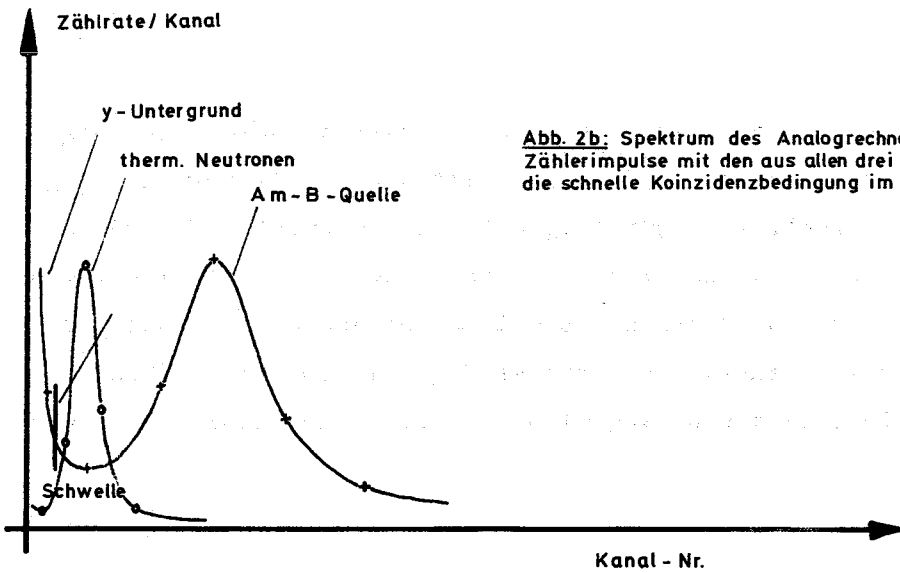


Abb. 2b: Spektrum des Analogrechners nach Multiplikation der Proportionalzählerimpulse mit den aus allen drei Zählern aufsummierten Impulsen, die die schnelle Koinzidenzbedingung im Halbleiterblock erfüllen.

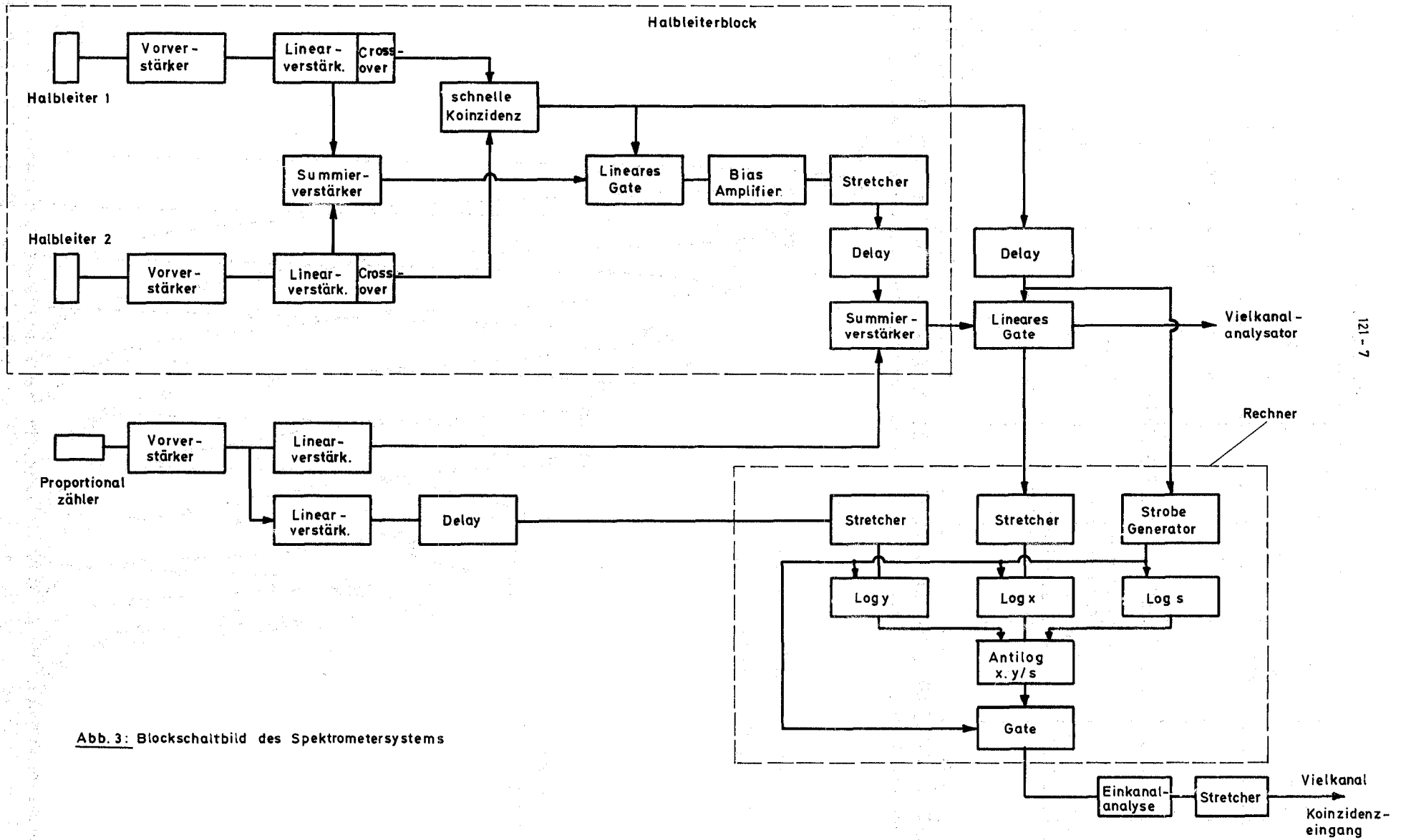


Abb. 3: Blockschaubild des Spektrometersystems

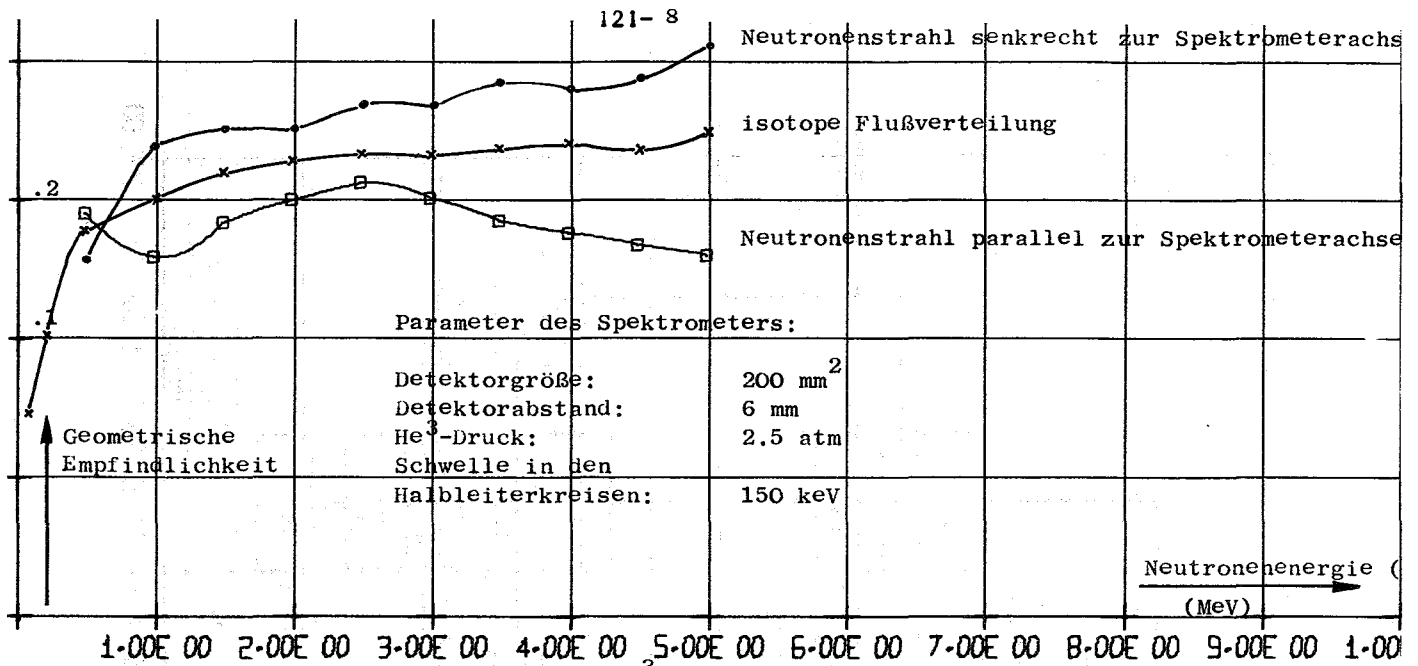


Abb. 4: Geometrische Empfindlichkeit des He³-Spektrometers für anisotrope Streuung im S-System

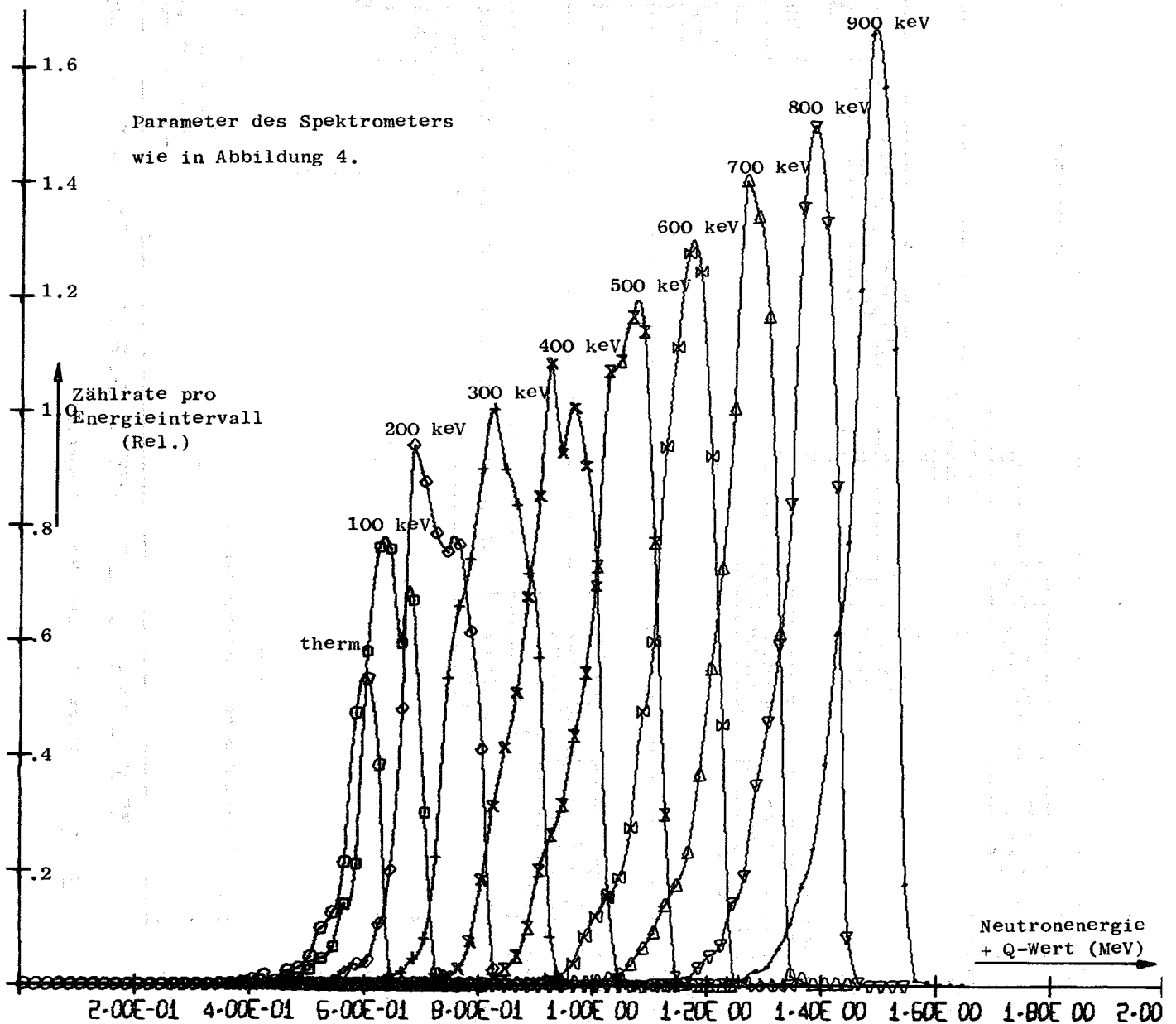


Abb. 5: Spektrometerantwortfunktionen für einen Neutronenstrahl parallel zur Spektrometerachse

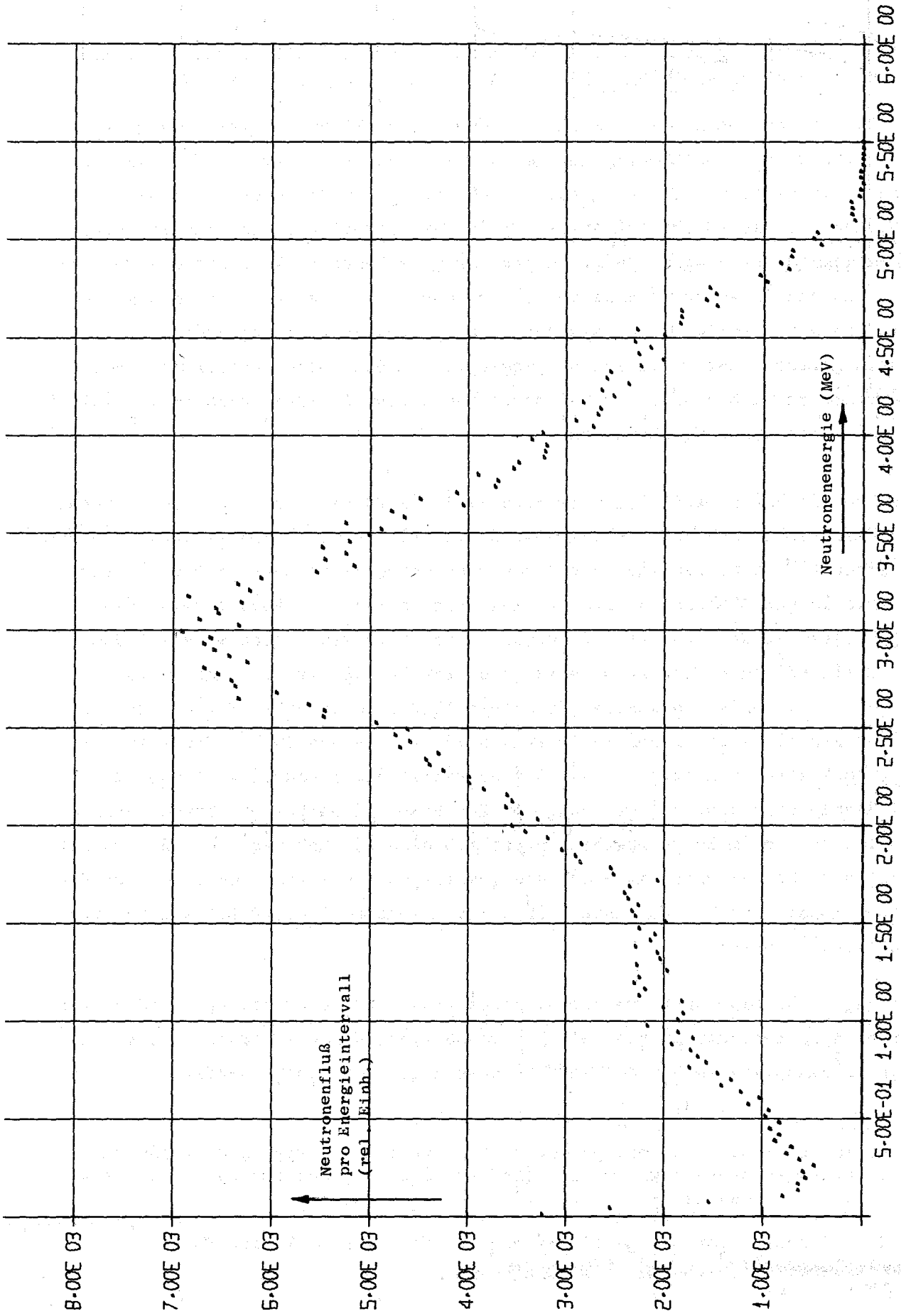


Abb. 6: Neutronenspektrum der Am-B-Quelle

1211.12 Spezifischer Energieverlust von Protonen für Wasserstoff und Methan im Energiebereich 1 bis 20 keV. (W.Breitung, H.Werle, INR)

Mit Rückstoßprotonenzählern kann das Neutronenspektrum bei Verwendung der γ -n-Diskriminationsmethode prinzipiell bis hinunter zu etwa 1 keV gemessen werden. Im Bereich unterhalb etwa 10 keV ist jedoch der Energieverlust der Protonen pro gebildetem Ionenpaar (W) in Wasserstoff energieabhängig. Diese Abhängigkeit muß bekannt sein, um aus der gemessenen Rückstoßprotonenverteilung das Neutronenspektrum berechnen zu können. Für den niederen Energiebereich werden normalerweise Wasserstoff-Füllungen benutzt, allerdings werden häufig geringe Mengen von Methan zugesetzt, um die Löscheigenschaften der Zählrohre zu verbessern. Diese Zusätze haben sicher einen erheblichen Einfluß auf die Energieabhängigkeit von W.

Die Energieabhängigkeit von W im Bereich 1 bis 20 keV für Wasserstoff, Methan und Wasserstoff-Methan-Mischungen wird mit Hilfe eines Bremszeitspektrometers untersucht⁺). Gemessen wird die durch monoenergetische Neutronen bekannter Energie in den Zählrohren erzeugte maximale Ionisation. Abb. 7 zeigt die Ergebnisse für Wasserstoff und Methan. (Die Ionisationswerte sind auf den durch die He^3 (n,p)T-Reaktion erzeugten Peak bei 764 keV bezogen). Die (normierten) Ionisationswerte für Methan liegen im gesamten Meßbereich viel tiefer als die zugehörigen Energiewerte (z.B. erzeugen 10 keV Protonen nur eine Ionisation von etwa 7 keV). Das bestätigt die bekannte Tatsache, daß bei Methan eine starke Abweichung von der Proportionalität zwischen Energie und Ionisation im Energiebereich unterhalb etwa 100 keV vorliegt. Bei Wasserstoff sind bis hinunter zu 5 keV die gemessenen Ionisationswerte der Energie proportional, der Verlauf unterhalb 5 keV stimmt qualitativ mit anderen Ergebnissen⁺⁺) überein.

Messungen für Mischungen werden am Bremszeitspektrometer gerade durchgeführt. Der Bereich oberhalb 20 keV soll mit monoenergetischen Neutronen aus der Li^7 (p,n) Be^7 -Reaktion am Van de Graaff-Beschleuniger untersucht werden.

⁺) H. Werle et al.: Investigation of the specific energy loss of proton in hydrogen above 1 keV with regard to neutron spectrometry, Nucl.Instr. Meth. 72 (1969) 111.

⁺⁺) E.F. Bennett: Low-Energy Limitations on Proton Recoil Spectroscopy ANS-Transactions, Juni 1970, S.269.

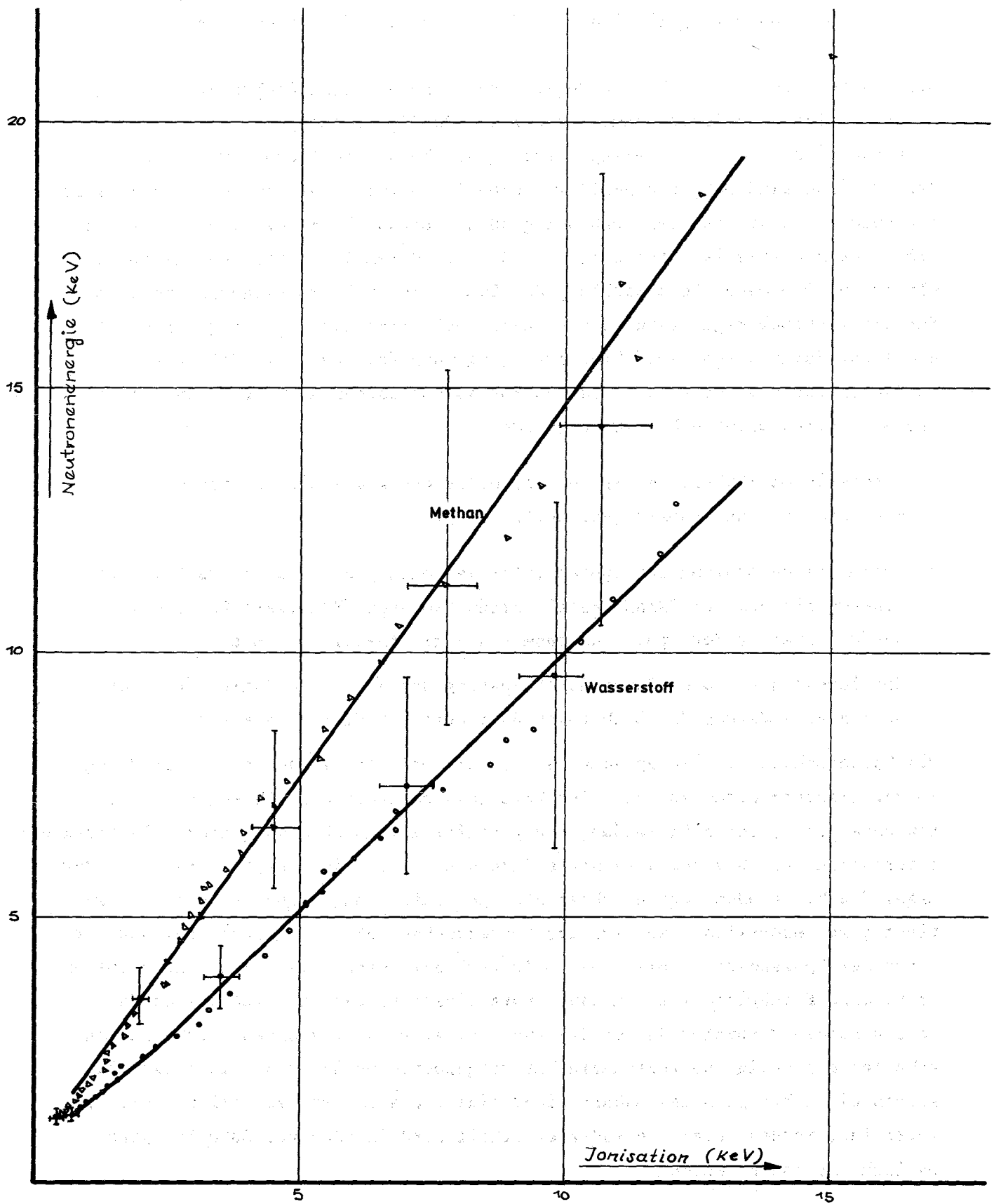


Abb. 7: Abhängigkeit der Ionisation von der Protonenenergie für Methan und Wasserstoff

1211.13 Spaltratenmessungen mit Spaltspurdetektoren und automatischer Bildauswertung (G. Günther, E. Korthaus, W. Oosterkamp, IAR)

Mit Spaltspurdetektoren können Spaltraten in heterogenen Reaktorgittern mit guter örtlicher Auflösung gemessen werden. Da die Detektoren sehr klein sind, verursachen sie nur eine geringe Störung des Neutronenflusses. Mit dieser Methode kann eine Meßgenauigkeit von etwa 1 % erreicht werden, wenn es gelingt, die Anzahl der Spaltspuren auch bei großen Spurendichten, wie sie im Interesse einer guten Statistik erforderlich sind ($> 5 \cdot 10^3/\text{mm}^2$), hinreichend genau zu bestimmen. Die manuelle Auszählung der Spuren ist sehr zeitraubend und kommt für die routinemäßige Auswertung größerer Meßserien nicht in Frage. Man ist daher auf automatische Verfahren zur Bestimmung der Spurendichten angewiesen. Im Rahmen des PSB werden 3 Verfahren zur automatischen Auswertung der Spaltspurdetektoren untersucht bzw. entwickelt.

1. Automatische Zählung der Spuren mit Hilfe des kommerziellen Spurenzählgerätes "Integramat" (Fa. Leitz)
2. Automatische Zählung der Spuren unter Verwendung des "Integramat" in Verbindung mit dem bei SNEAK installierten Computer "Honeywell DDP 124", der die Analyse der Spuren übernimmt und die Anzahl bestimmt.
3. Bestimmung der Spurendichte durch Messung der durch die Spaltspuren verursachten Änderung der Lichtdurchlässigkeit mit Hilfe eines Photometers.

Das Spurenzählgerät "Integramat" steht seit Mai dieses Jahres zur Verfügung. In Vorversuchen wurde es auf seine Leistungsfähigkeit bei höheren Spurendichten untersucht, unter Verwendung von Lexanfolien und Phosphatgläsern als Detektormaterialien. Durch seine eingebaute Impuls-Logik ist das Gerät begrenzt in der Lage, die bei großen Spurendichten häufiger auftretenden Spurenüberlappungen richtig zu berücksichtigen. Aus den Vorversuchen läßt sich entnehmen, daß das Gerät bei Spurendichten bis etwa $5 \cdot 10^3/\text{mm}^2$ bei relativ geringen Zählverlusten brauchbare Ergebnisse liefern kann, vorausgesetzt, daß die Einstellung der verschiedenen Parameter des Geräts auch bei etwas variierenden Detektoreigenschaften eindeutig und reproduzierbar vorgenommen werden kann. In diesem Fall können die Zählergebnisse anhand einer einmal bestimmten Zählverlustfunktion korrigiert werden. Diese Reproduzierbarkeit wird in nächster Zukunft systematisch untersucht werden.

Eine bessere Berücksichtigung der Überlappungseffekte wird mit Hilfe des Computers möglich sein, der im Gegensatz zum "Integramat" die gesamte Bildinformation d.h. Größe, Form und Lage der Spuren, auswerten kann. Auf diese Weise wird auch eine wirksamere Unterdrückung des Untergrundes, der durch Verunreinigungen oder Beschädigungen der Detektoroberfläche verursacht wird, ermöglicht werden.

Um die Bildinformation in den Kernspeicher des Computers zu bringen, wurde ein DMA-Kanal (Direct Memory Access) installiert, der alle 1.7 μ sec. ein 24 bit - Wort übertragen kann. Für die Umwandlung des aus der Fernsehkamera des "Integramat" kommenden Video-Signals in aufeinanderfolgende 24-bit-Worte, die vom DMA-Kanal übernommen werden können, wurden Schieberegister und Synchronisationsschaltungen aufgebaut und erfolgreich getestet.

Eine erste Version eines Auswerteprogrammes, das die Anzahl der Spuren unter Berücksichtigung von Überlappungen bestimmt, wurde fertiggestellt und erprobt.

Die dritte Methode zur Bestimmung der Spurendichten, die Photometrie, ist hinsichtlich der erreichbaren Genauigkeit noch schlecht zu beurteilen. Diese Methode kommt nur für Relativmessungen, d.h. Messung der Feinstruktur der Spaltratenverteilungen in Frage, nicht jedoch für absolute Spaltratenmessungen. Bisherige Untersuchungen haben noch keine befriedigenden Ergebnisse erbracht. Das Hauptproblem liegt hier in der Beschaffung von Detektormaterialien mit sehr sauberer Oberfläche, da eine Untergrunddiskrimination bei dieser Methode prinzipiell nicht möglich ist.

Für die Leistungsfähigkeit aller Auswertemethoden ist generell die günstigste Wahl des Detektormaterials und dessen Behandlung, d.h. Reinigen, Ätzen, Anfärben von großer Bedeutung. Daher wurden systematische Untersuchungen an verschiedenen Detektormaterialien durchgeführt und sind noch im Gange.

1211.14 Ratenmessungen mit Halbleiterdetektoren (W. Scholtyssek, IAR)1. Ausbau der Anlage

Ein zweiter Ge (Li) Detektor (40 cm^3 aktives Volumen, 7 % Ausbeute für die 1332 keV Linie des Co 60, relativ zu einem 3"x3" NaJ Detektor) wurde in Betrieb genommen.

Die Interface Elektronik für den Anschluß zweier ADC's an den Rechner (Honeywell DDP 124) ist weitgehend fertiggestellt. Damit werden in Kürze 2 x 4096 Kanäle für die Messungen zur Verfügung stehen.

2. Messungen2.1. Spaltraten

Bei Änderungen der Härte des Neutronen-Spektrums in einer Spaltraten-traverse mit Folien, die z.B. mit γ -Detektoren ausgewertet werden, können Yield-Änderungen der Spaltprodukte Fehler verursachen. Ein Ziel der Messungen mit Halbleiterdetektoren war die Untersuchung dieses Effektes und Abschätzung seiner Größe.

Bisher wurden Bestrahlungen in Anordnungen mit großen Härteunterschieden der Neutronenspektren (SNEAK, SUAK, thermische Zone des STARK) durchgeführt. Die Auswertung für einige Spaltprodukte mit isolierten γ -Linien zeigt eine Änderung der Ausbeute in der Größenordnung von 5 %. Bei den relativ kleinen Härteänderungen in einer Traverse liegen mögliche Effekte bisher innerhalb der Fehlergrenzen des Auswerteverfahrens.

2.2. Einfangraten

Die Anwendung von Ge (Li) Detektoren bietet einen direkten Zugang zur U 238-Einfangrate über die Intensitätsbestimmung von Np 239 Linien. Von den prominentesten γ -Linien des Np 239 sind die 228,2 keV und 277,5 keV Linien zur Auswertung besonders geeignet. In Anwesenheit von Spaltprodukten wird die 228,2 keV Linie durch die 228,4 keV Linie des Te 132 überlagert. Die Absoluteichung kann z.B. mit einem Am 243-Präparat bekannter Aktivität erfolgen.

Ein Vergleich mit der γ -X-Koinzidenzmethode zeigt, daß die Ereignisraten für beide Methoden bei den gegebenen Geometrien etwa gleich groß sind. Die Korrekturen für Selbstabsorption in den Folien liegt

dabei für die Messung mit Halbleiterdetektoren um einen Faktor 14 niedriger (ca. 5 % gegenüber ca. 80 %).

Bestrahlungen wurden bisher in der schnellen Zone des STARK ausgeführt. Eine Parallelmessung mit der γ -X-Methode zeigt dabei größere Diskrepanzen in den Ergebnissen, die noch nicht geklärt werden konnten. Bestrahlungen in der SNEAK sind in Vorbereitung.

2.3. Einfang-zu-Spaltratenverhältnisse

Bei Verwendung von U8-U5- bzw. U8-Pu9 Folien können die Verhältnisse von σ_{c8}/σ_{f5} bzw. σ_{c8}/σ_{f9} bestimmt werden, wenn zusätzlich zu den Np-Linien Spaltproduktlinien absolut gemessen werden. Als solche bieten sich die La 140 Linie (1595 keV) und, im Energiebereich der Np-Linien, die 250 keV Xe 135-Linie und die 228,4 keV Te 132-Linie an. Untersuchungen hierzu sind im Gange.

3. Auswertung der Messungen

Das bisher verwendete Rechenprogramm (Gsfrit, DVZ) zur Auswertung von Halbleiterspektren zeigt größere Fehler in der Intensitätsbestimmung von γ -Linien. Sie betragen bis zu 5 % bei Einzelpeaks und 20 % und mehr bei überlappenden Linien. Die Ursache ist in der ungenauen Anpassung der analytischen Funktion an die Peakform, insbesondere am Übergang Peak-Untergrund, zu suchen.

Ein Programm ist in Vorbereitung, das die Intensität von Einzellinien aus der Summe der Kanalhalte berechnet. Für den Untergrund ist dabei eine optimale Form zu finden.

Die Auswertung von sich überlappenden Linien kann dagegen nur durch Anpassung einer optimalen analytischen Funktion erfolgen. Untersuchungen hierzu werden durchgeführt.

1211.2 Ergänzungsexperimente zu den Nulleistungsanordnungen.Spektren verzögerter Spaltneutronen (G. Fieg, INR)

Die Energiespektren der verzögerten Spaltneutronen von U-235 und Pu-239 wurden mit Rückstoßprotonenzählern gemessen. Die Bestrahlung der Uran- bzw. Plutoniumproben erfolgte in einem thermischen Neutronenfeld.

Durch Variation der Bestrahlungs-, Abkühl- und Meßzeiten wurde nacheinander jeweils die relative Intensität der verschiedenen verzögerten Neutronengruppen optimiert. Aus den so erhaltenen gemischten Spektren werden rechnerisch durch eine Iterativ -Methode die einzelnen Gruppenspektren isoliert.

In Abb. 8 sind die Spektren von U-235 und Pu-239 für den Fall langer Bestrahlungs-, kurzer Abkühl- und langer Meßzeiten dargestellt. Bis auf eine kleine Korrektur ($\approx 10\%$) entsprechen diese Spektren dem integralen verzögerten Neutronenspektrum. (Der Anteil der einzelnen Gruppen ist in Abb. 8 angegeben.) Als Vergleich dazu ist ein in HARWELL⁺ gemessenes integrales U-235 Spektrum miteingetragen. (Die Pu-239-Messungen im Bereich unterhalb 200 keV sind noch nicht ausgewertet. Ein vorläufiger Vergleich der U-235- und Pu-239-Ergebnisse zeigt, daß sich die beiden Spektren nicht erheblich voneinander unterscheiden.

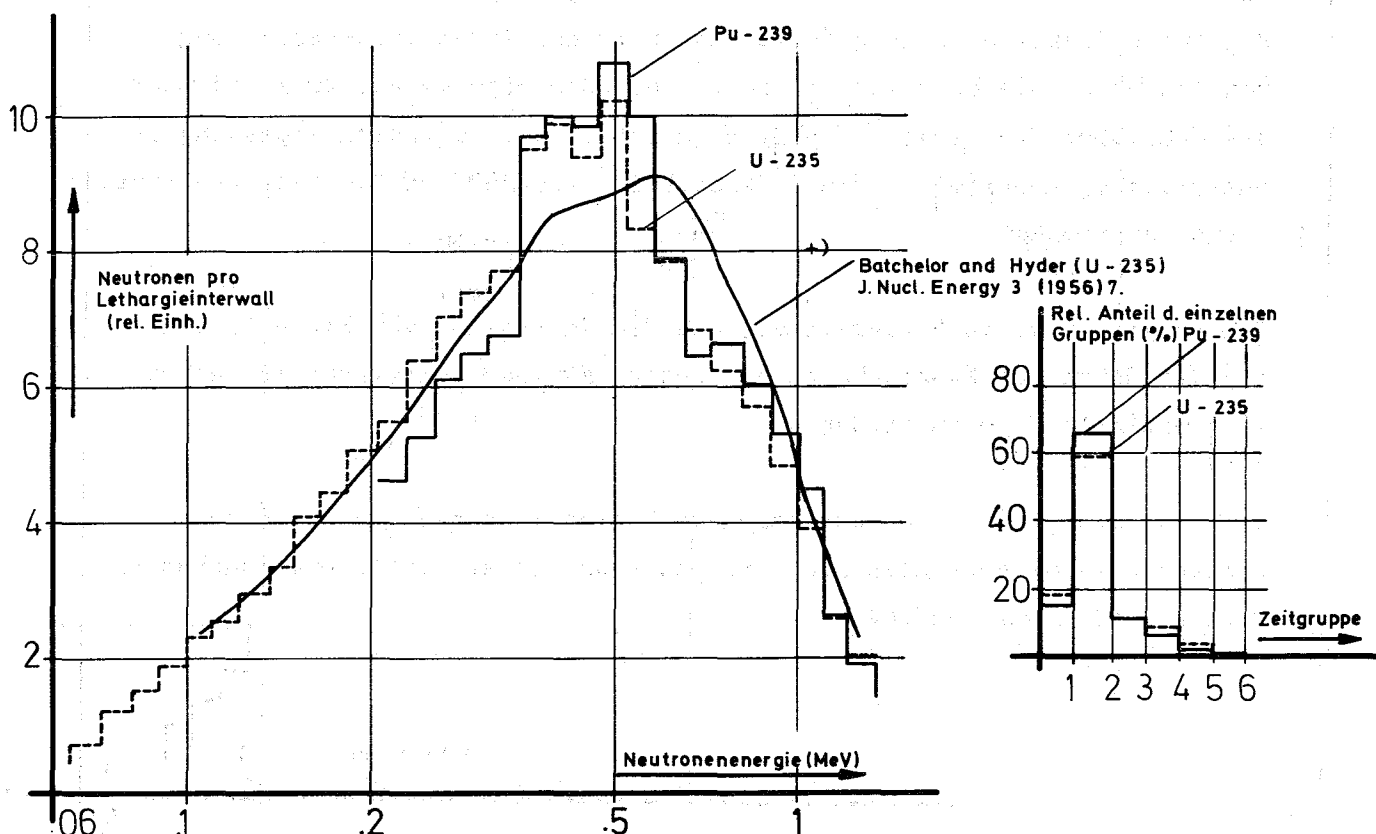


Abb. 8: Integrale verzögerte Neutronenspektren von U-235 und Pu-239

1211.4 Spektrumsmessungen an SUAK (H. Bluhm, H. Werle, INR)

An SUAK wurden die Messungen am CORE UHC, das weitgehend dem englischen VERA 7A-Core entspricht, und dessen Neutronenspektrum sowohl in HARWELL als auch in ALDERMASTON⁺) eingehend untersucht wurde, wiederholt. Die ersten Messungen mit Rückstoßprotonenzählern und dem Li^6 -Halbleiterspektrometer zeigten überraschenderweise im Bereich von 1 bis 3 MeV einen nahezu konstanten Verlauf des Neutronenspektrums (pro Lethargieintervall)⁺⁺), In Abb. 9 sind die neueren Messungen (Rückstoßprotonenzähler und He^3 -Halbleiterspektrometer) zusammen mit den neuesten Ergebnissen aus ALDERMASTON dargestellt. Die Meßergebnisse stimmen im gesamten Energiebereich (100 keV bis 8 MeV) relativ gut überein. Das bei etwa 600 keV liegende Maximum des Spektrums ist in den Messungen von ALDERMASTON etwas flacher. Nur im Bereich zwischen 3,4 und 5 MeV ist die Diskrepanz zwischen den Messungen größer als die systematischen Fehler, die hier bei etwa 15 % liegen.

⁺) Coates M.S. et al. J.Nucl.Energy 22 (1968) 547

⁺⁺) Bluhm H. et al. BNES-Int.Conf. Fast Reactors, Juni 1969

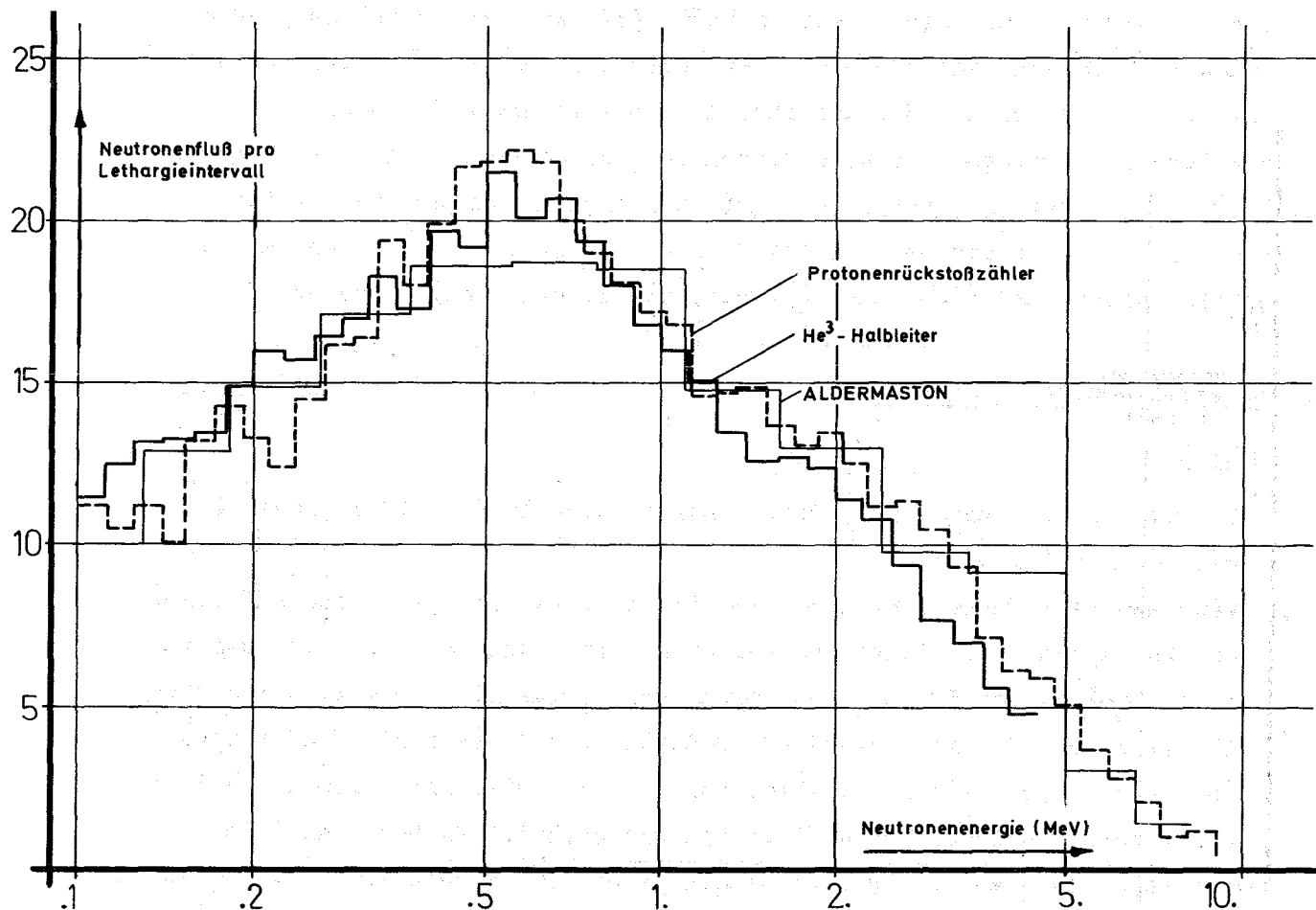


Abb. 9: Neutronenspektrum im Zentrum von SUAK UHC (VERA 7A)

1213. SNEAKVersuche mit den Anordnungen SNEAK-6A und SNEAK-6B(W. Bickel, R. Buyl, E. Fischer, F. Helm, G. Jourdan, M. Müller, F. Plum,
G. Wittek, IAR)1. Einleitung

Die Anordnung SNEAK-6 ist in 3 Untereinrichtungen gegliedert, in denen die in SNEAK-2-SNR begonnenen Untersuchungen der Eigenschaften eines natriumgekühlten schnellen Leistungsreaktors fortgesetzt werden. Während in SNEAK-2-SNR eine annähernde Wiedergabe der radialen Struktur des SNR angestrebt wurde, zielt die Auslegung von SNEAK-6 auf detaillierte axiale Untersuchungen und auf die Erstellung einer möglichst großen störungsfreien zentralen Zone. Aus diesen Gründen ist eine dem SNR angenäherte Corehöhe von 90 cm gewählt worden. Das axiale Blanket wird ebenfalls möglichst genau an die Zusammensetzung des SNR angeglichen. Die Zonenanordnung ist zylindrisch; die zu untersuchende Zusammensetzung befindet sich in der zentralen Zone. Die äußeren Corezonen sind so gewählt, daß das Spektrum im Corezentrum möglichst wenig durch Transienten gestört wird. Das radiale Blanket besteht aus abgereichertem Uran. Die zwei ersten Anordnungen der SNEAK-6 Serie sind schon beendet, und über die vorliegenden Ergebnisse soll berichtet werden. Sie beziehen sich auf folgende Versuche:

Kritisches Experiment, Reaktionsratentraversenmessungen, Na-Void-Experimente, Pu-240-Experimente, Materialwert- und Spektrumsmessungen. Für Kavitäten- und Kontrollstabexperimente liegt noch keine vollständige Auswertung vor, hierfür beschränkt sich daher der Bericht auf qualitative Ergebnisse.

2. Beschreibung der Anordnungen2.1. SNEAK - 6A

Das Core dieser Anordnung, deren Längsschnitt in Fig. 10 zu sehen ist, besteht aus 4 Zonen:

Eine zentrale Pu-Zone wird von SNEAK-Plättchen gebildet. Eine Pufferzone aus Pu, die uns von Cadarache geliehen wurde, schließt sich an. Das Pu liegt in Form von 60 cm hohen Stäben vom Radius 12,7 mm vor. Durch diese Zone wird die Gesamt-Pu-Zone vergrößert, so daß spektrale Transienten im Core-Zentrum weitgehend eliminiert werden. Dies ist besonders bei der Bestimmung von Na-void-Koeffizienten und materiellem Buckling in der zentralen Zone wesentlich. Da die Stäbe nur 60 cm hoch sind, die Corehöhe aber 90 cm beträgt, werden oben und unten je 15 cm SNEAK-R1-Material angebracht. Aus demselben R1-Material besteht auch die Urandrinnerzone,

die sich in radialer Richtung anschließt. Die Anreicherung der Uranzonen wurde so gewählt, daß das materielle Buckling dem der Pu-Zone gleicht.

2.2. SNEAK - 6B

Beim Übergang von SNEAK -6A zu SNEAK -6B wird die Pufferzone mit dem MASURCA-Pu entfernt und dafür RI-Material eingebaut. In diesem 2-Zonen-Core werden nochmals die wichtigsten Experimente von SNEAK -6 wiederholt, um die Wertung der Pufferzone studieren zu können. Fig. 11 zeigt einen Längsschnitt von SNEAK-6B. In Fig. 10 und 11 sind die Maße des kritischen Experimentes angegeben. Fig. 12 zeigt einen Querschnitt von SNEAK-6A. In Tabelle 1 werden die geometrischen kritischen Daten, die zur Berechnung des kritischen Experimentes verwendet wurden, zusammengestellt. In Tab. 2a und 2b stehen die zur Berechnung verwendeten Teilchenzahl-dichten für die einzelnen Zonen. Es sind homogenisierte Teilchenzahl-dichten, die für k_{eff} -Rechnungen verwendet werden. Die Teilchenzahlen der reinen Corezellen sind mit denen der in der Zone vorkommenden Trimm- und Sicherheitsstabzellen verschmiert. Die Teilchenzahlen der SNEAK-6A Z1A Zone und der SNEAK-6B Z1A-Zone sind identisch und deshalb nicht mehr gesondert aufgeführt.

Tab. 1 Geom. Krit. Daten für die Anordnungen SNEAK-6A und SNEAK-6B.

	<u>SNEAK - 6A</u>				<u>SNEAK - 6B</u>				
	Z1A	Z1MAS	RI	Blanket		Z1A	RI	Blanket	
				axiales	radiales			axiales	radiales
Radius	37,34	49,11	59,2			37,46	59,03		
Höhe	89,39	89,44	89,32		150,0	89,39	89,33		150,0
Dicke				40,4	32,25			40,4	32,95

(Alle Zahlenangaben in cm.)

Tab. 2a Teilchenzahlen ($10^{22}/\text{cm}^3$) für k_{eff} -Rechnungen
(Core-Zone)

	SNEAK - 6A				SNEAK - 6B		
	Z I A	Z I MAS	R I oberhalb unterhalb	ZIMAS	R I	Z I A	R I
Al	0,02085	0,04908	0,83048	0,84053		0,8477	
C	0,01160	0,01841	0,61574	0,63017		0,6201	
Cr	0,30802	0,33170	0,34118	0,34239		0,3406	
Fe	1,18792	1,23929	1,22489	1,22408		1,2181	
Mn	0,01493	0,01000	0,02269	0,02263		0,0226	
Na	0,83279	0,84374	0,26188	0,28626		0,2855	
Ni	0,22523	0,16895	0,19127	0,18984		0,1898	
O	1,19172	1,14325	0,57354	0,51683		0,5187	
Pu 239	0,1170	0,11096	0,00630				
Pu 240	0,0105	0,01022	0,00057				
Pu 241	0,00096	0,00097	0,00005				
Pu 242	0,00005	0,00012					
Si	0,01528	0,00587	0,01994	0,02014		0,0201	
Ti	0,00105	0,00042	0,00404	0,00403		0,0040	
U 235	0,01087	0,01726	0,18760	0,18929		0,1879	
U 238	0,68129	0,60916	0,69421	0,66291		0,6592	

121-20

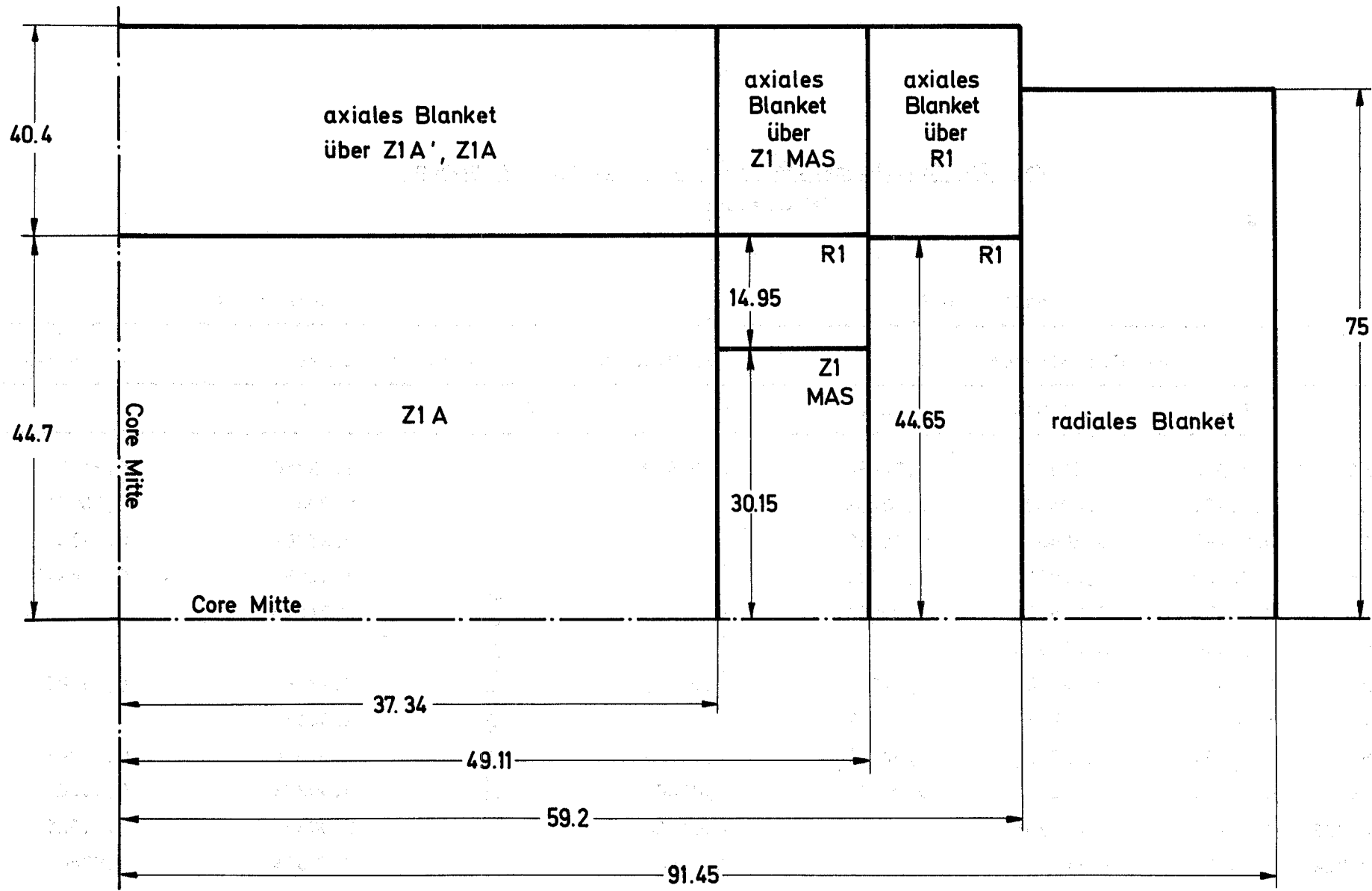
Identisch mit SNEAK-6A ZIA

Tab. 2b Teilchenzahlen ($10^{22}/\text{cm}^3$) für k_{eff} Rechnungen
(Blanketzone)

121-21

	SNEAK - 6 A			SNEAK - 6 B		
	axiales Blanket		rad.Blanket	axiales Blanket		rad.Blanket
	Z I A	Z I MAS	R I	Z I A	R I	
Al	0,29507	1,23579	1,22960		1,23950	0,3117
C	0,00471	0,00430	0,00438		0,0043	0,00054
Cr	0,25497	0,28466	0,28962		0,28761	0,04729
Fe	0,90300	1,01055	1,02734		1,0203	0,15647
Mn	0,01271	0,01859	0,01879		0,01879	
Na	0,64446	0,02464				
Ni	0,14319	0,14438	0,14537		0,14481	0,06385
O	1,38478	1,35988	1,34529		1,34174	
Si	0,01486	0,02307	0,02372		0,02348	0,00249
Ti	0,00013	0,00226	0,00227		0,00232	0,00004
U 235	0,00499	0,00496			0,00520	0,01625
U 238	0,68791	0,68449			0,75674	3,9940

Identisch SNEAK 6 A



121-22

Fig.10

Längsschnitt durch SNEAK - 6A

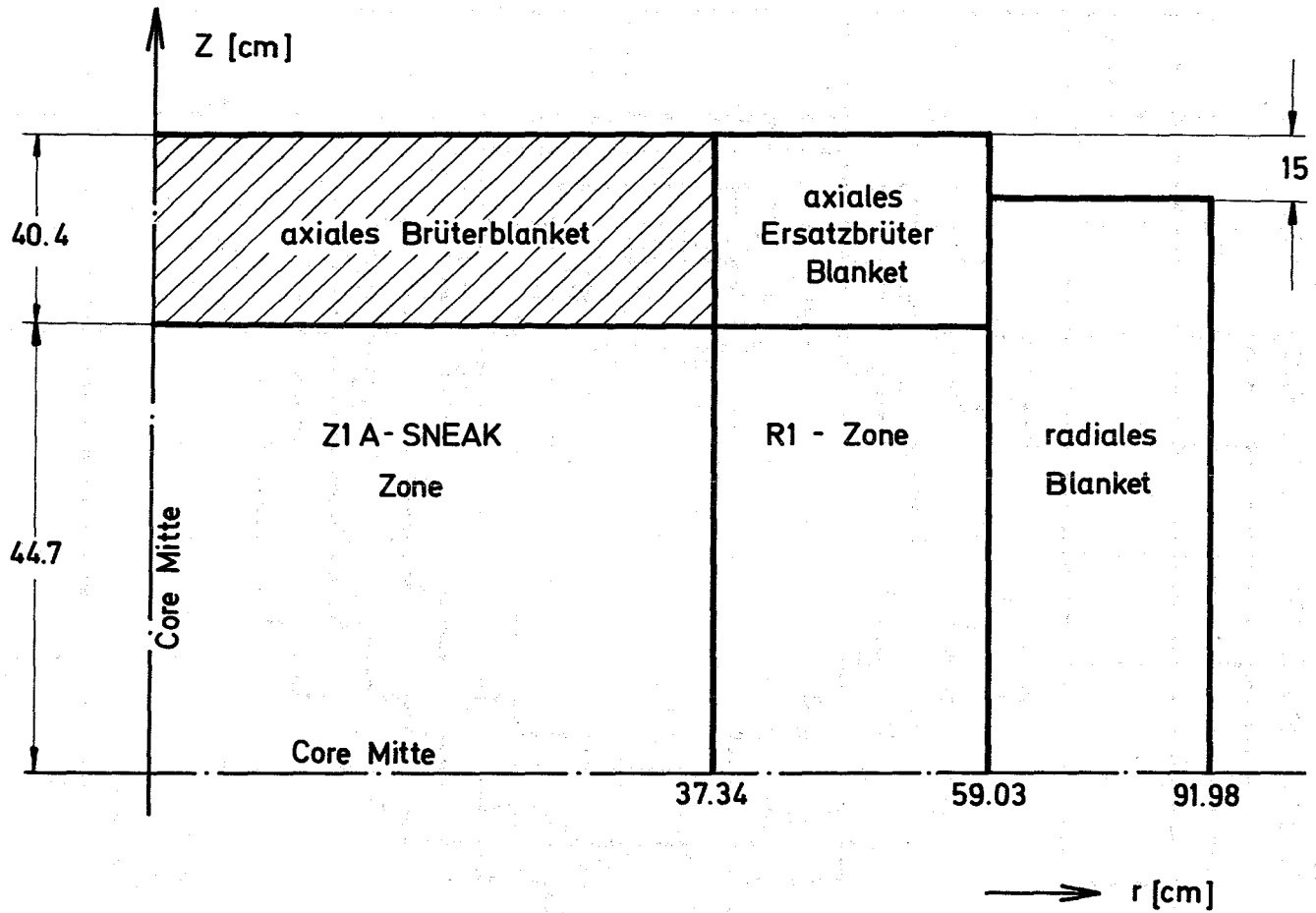


Fig.11 Längsschnitt durch SNEAK-6B

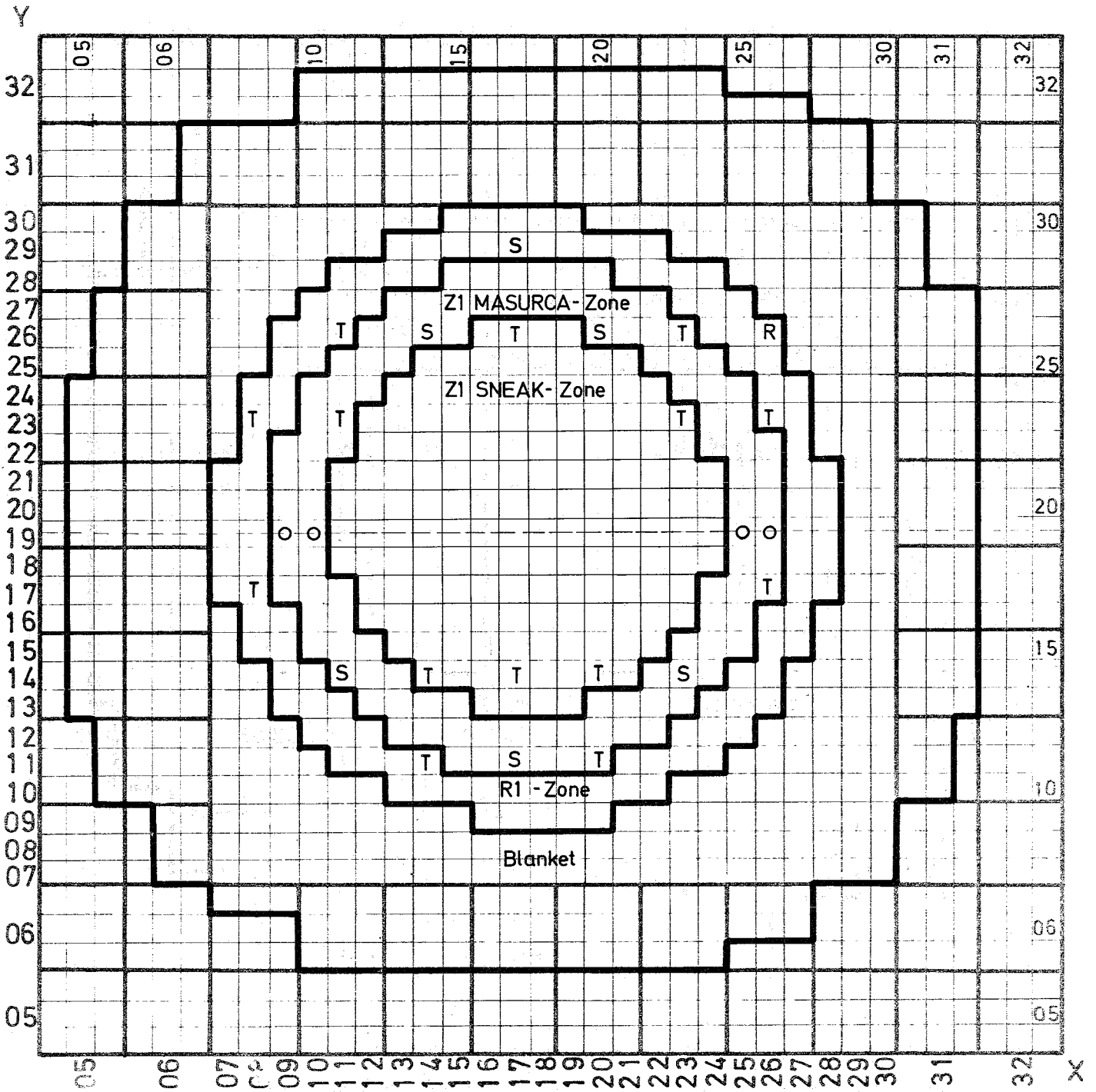
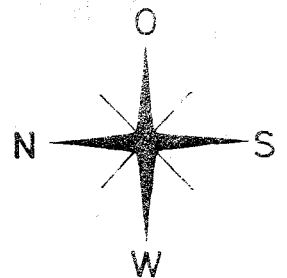


Fig.12 SNEAK-6A Querschnitt (krit. Anordnung)

- O SNEAK - Plättchen - Fensterelement in der MASURCA-Zone
- S Sicherheitsstab
- T Trimmstab
- R Regelstab



Maßstab 1:10

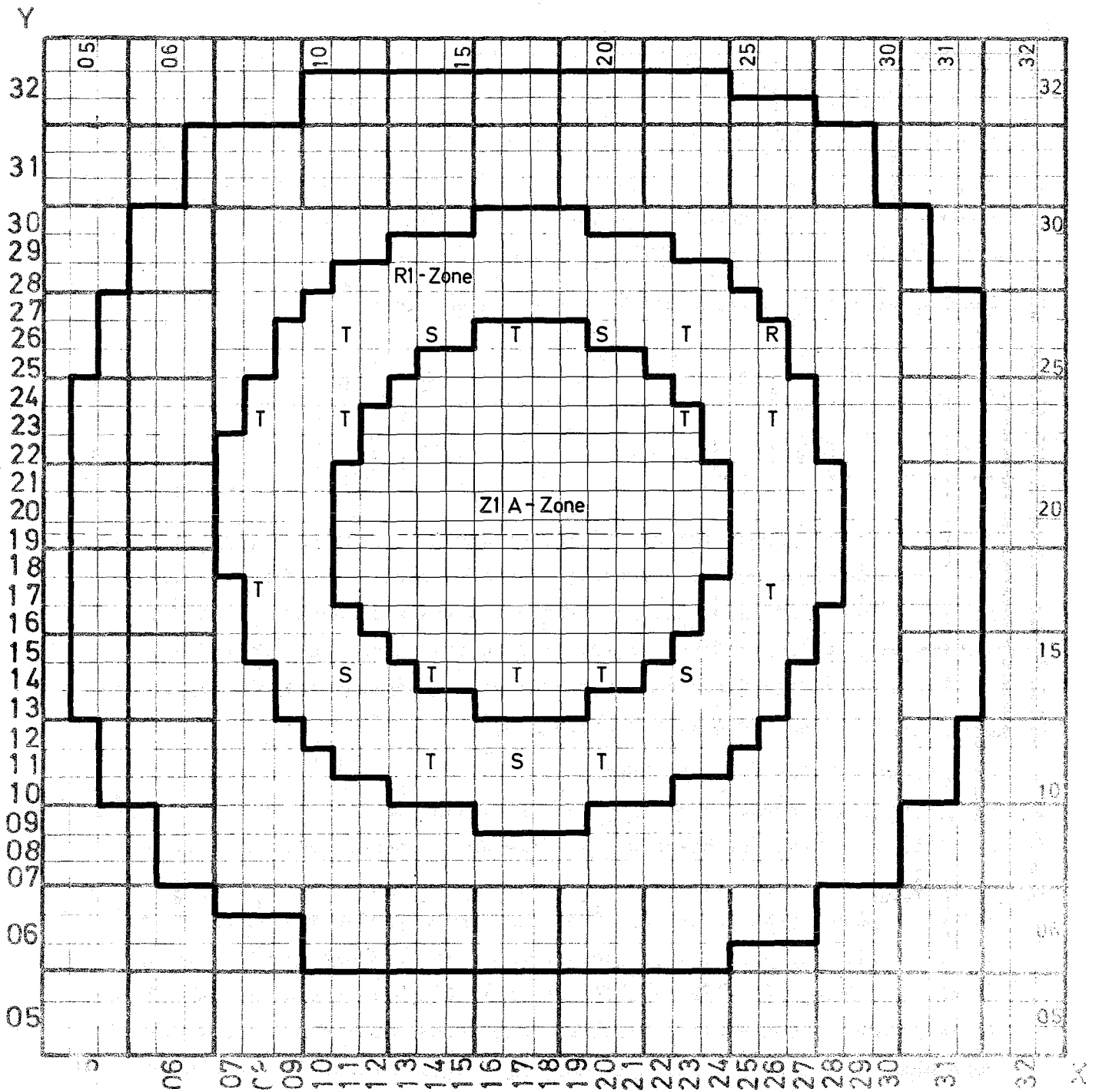
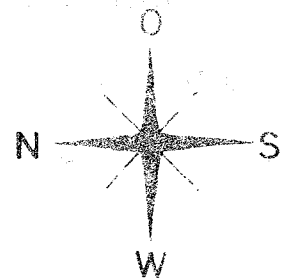


Fig. 13 SNEAK-6B Querschnitt (krit. Anordnung)

- S = Sicherheitsstab
- T = Trimmstab
- R = Regelstab



Maßstab 1:10

3. Experimente

3.1. Kritische Experimente

Der Querschnitt des kritischen Cores von SNEAK -6A ist in Fig. 12, der von SNEAK - 6B in Fig. 13 zu sehen. Alle Trimmstäbe waren dabei eingefahren (in Stellung größter Reaktivität). Bei voll eingefahrenem Trimmstab ergaben sich folgende Werte für k_{eff} :

Experimentelle k_{eff} -Werte der kritischen Anordnungen:

	SNEAK - 6 A	SNEAK - 6 B
k_{eff}	1.0003	1.0000 ₄

Tab. 1 gibt die geometrischen kritischen Daten für die Nachrechnung. Für die Nachrechnungen beider Anordnungen wurden jeweils zweidimensionale R-Z-Diffusionsrechnungen mit 26 Gruppen als Basisrechnungen verwendet. Die verwendete Schrittweite betrug im Core etwa 1 cm, im Blanketbereich 2 - 3 cm. An diesen Grundrechnungen wurden mit Hilfe von 1-dimensionalen Codes verschiedene Korrekturen angebracht

- Transportkorrektur (S_8 -Korrektur)
- Heterogenitätskorrektur (Einfluß der Zellstruktur)
- Remo-Korrektur (Verbesserung der bremselastischen Querschnitte in den ersten 14 Gruppen).

Außerdem wurde durch Vergleich einer zweidimensionalen x-y-Rechnung mit einer eindimensionalen Zylinderrechnung der Einfluß der nichtzylindrischen Zonen- und Coregrenzen berücksichtigt. Alle Ergebnisse sind in Tab. 3 zusammengefaßt. Hauptsächlich wurde mit dem Gruppenquerschnittsatz MØXTØT gerechnet. Nur einige Vergleichsrechnungen wurden sowohl für den Querschnittsatz MØXTØT als auch für den Satz NAPPMB gemacht.

Tab. 3 Ergebnisse der Nachrechnung des kritischen Experimentes

	SNEAK - 6 A		SNEAK - 6 B	
	MØXTØT	NAPPMB	MØXTØT	NAPPMB
2d R-Z Rechnung Diffusionsrechng.	0,9897		0,9965	0,9732
1d - Vergleichs- rechnung MØXTØT-NAPPMB		-0,0179		
Zylinderkorrek- tur	-0,0050	(-0,0050) ^{+))}	-0,0030	(-0,0030) ^{+))}
Transportkorrek- tur	+0,0041	(+0,0041) ^{+))}	0,0041	(+0,0041) ^{+))}
Heterogenitäts- korrektur	+0,0027	+0,0034	+0,0012	0,0016
REMØ-Korrektur	+0,0038	+0,0093	0,0026	+0,0069
Endresultat	0,995	0,984	1,001	0,983

+) übernommen von MØXTØT-Rechnung

3.2. Reaktionsratentraversen-Messungen

In den Anordnungen SNEAK-6A, 6B wurden Spaltraten mit Pu-, Np-, U-235- und U-238-Spaltkammern französischer Konstruktion gemessen. Der Durchmesser der Kammern beträgt 8 mm. Die genaueren und detaillierteren Messungen wurden in diesen Anordnungen in axialer Richtung durchgeführt. Gemessen wurde in der oberen Corehälfte und im oberen axialen Brüterblanket. Der Abstand der Meßpunkte betrug im Corebereich 1 cm, die Meßgenauigkeit 3 %. Diese Meßmethode wurde auch am Übergang Core-Blanket

und noch 5 cm ins axiale Brüterblanket hinein verwandt. Im weiteren Blanketbereich betrug der Meßpunkteabstand 3 cm, die Meßgenauigkeit 7 %.

Außer Kammermessungen wurden die U_5 - und U_8 -Spaltrate und die U_8 -Eingangsrates wiederum mit Uranfolien (20 % und 0,4 % U 235) gemessen.

Die Basisrechnungen für diese Messungen sind zweidimensionale r-z-Diffusionsrechnungen mit 26 Gruppen. An den Ergebnissen dieser Rechnungen wurden Korrekturfaktoren angebracht. Diese Korrekturfaktoren für Transportnäherung und Einfluß der Heterogenität wurden mit eindimensionalen Rechnungen berechnet.

Außer den einzelnen Reaktionsratentraversen ist die Gesamtleistung im Hinblick auf den SNR von größtem Interesse. Zum Meßzeitpunkt standen jedoch keine geeichten Kammern zur Verfügung; das hat zur Folge, daß die gemessenen Ratenverläufe nur relativ sind. Um trotzdem einen Vergleich mit den gerechneten Leistungstraversen zu bekommen, wurde mittels der im Corezentrum berechneten Verhältnisse: σ_{f5}/σ_{f9} , σ_{f8}/σ_{f9} und σ_{f40}/σ_{f9} eine äquivalente gemessene Leistungstraverse gebildet und mit der gerechneten verglichen.

In Tab. 4 sind die für SNEAK - 6A und SNEAK - 6B mit dem MØXTØT-Satz berechneten Verhältnisse eingetragen. Die berechneten und gemessenen Leistungstraversen für beide Corekonfigurationen sind sehr ähnlich. In Abb. 14 wird die für SNEAK - 6A gemessene Leistungstraverse mit der gerechneten verglichen.

Tab. 4

Ratenverhältnisse

	SNEAK - 6A	SNEAK - 6B
σ_{f5}/σ_{f9}	1,109	1,109
σ_{f8}/σ_{f9}	0,027	0,027
σ_{f40}/σ_{f9}	0,207	0,207

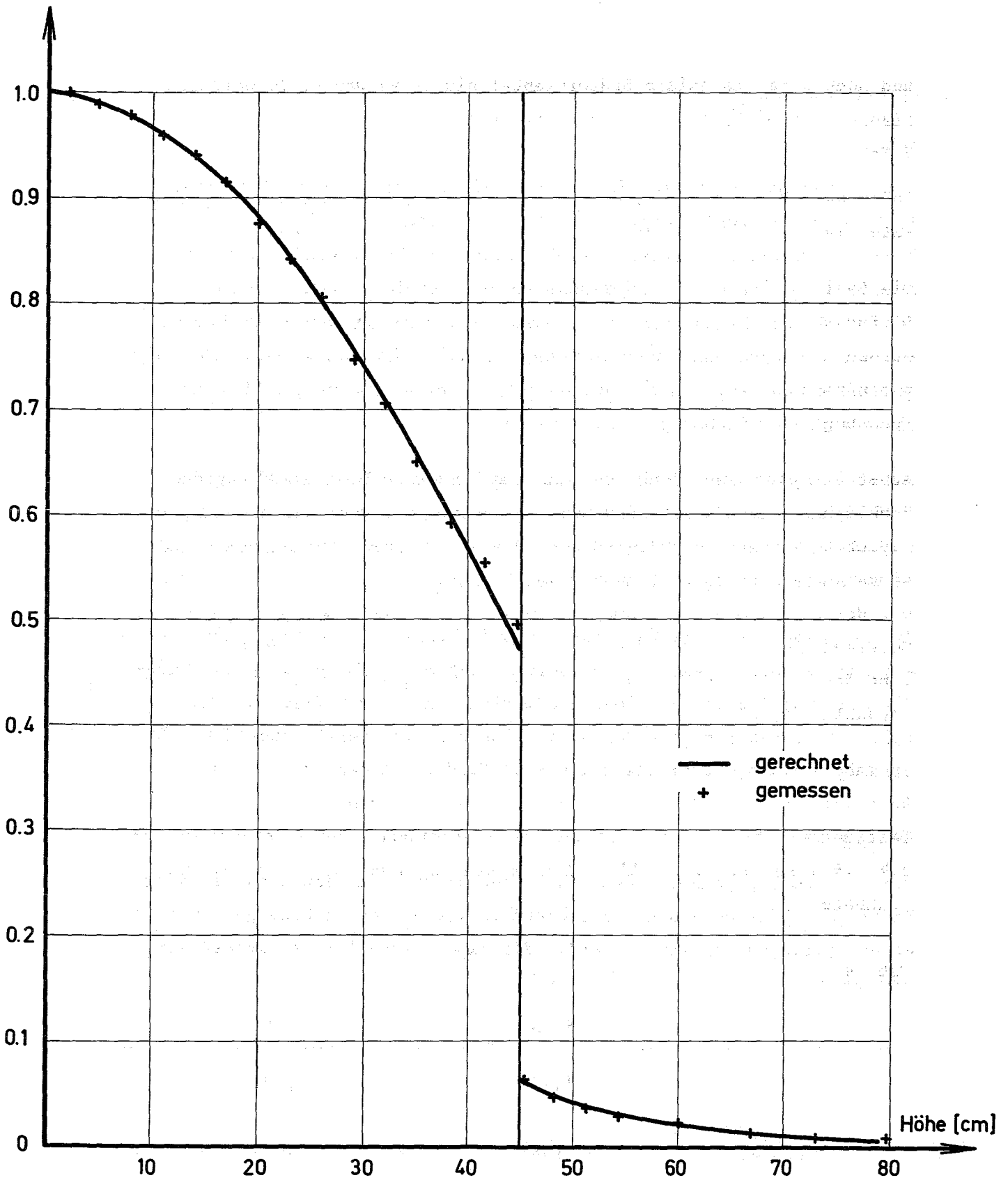


Fig. 14 Leistungstraverse SNEAK - 6A

3.3. Na-Void Experimente

SNEAK - 6A

Gemessen wurde in SNEAK - 6A zunächst eine axiale Na-void-Traverse. In 4 Elementen wurden erst in 3, dann in weiteren Schritten in 5, 7, 9 und 13 Zellen symmetrisch zur Coremitte die Na-Plättchen durch Leerschachteln ersetzt. Die experimentellen Ergebnisse stehen in Tab. 5 zusammen mit den Ergebnissen einer homogenen und heterogenen Rechnung. Für die Rechnung wurde der Gruppenquerschnittsatz MØXTØT verwendet, eine Remo-Korrektur wurde nicht gemacht. Das Normierungsintegral kam aus einer radialen Rechnung ebenso wie das β_{eff} .

Aus den Ergebnissen sieht man, daß die homogenen Rechnungen ungefähr 17 % zu hoch im Zentrum sind, während die heterogenen Rechnungen gut mit dem Experiment übereinstimmen. Für die größeren Void-Zonen unterschätzt die heterogene Rechnung den Effekt.

Mit Benutzung der Pile-Oszillortechnik wurde eine Materialwerttraverse entlang der Achse gemessen. Um beide Experimente zu vergleichen, wurden die Pile-Oszillator-Experimente numerisch integriert (Tab. 5). Es zeigt sich, daß die Pile-Oszillator-Experimente überall ungefähr 7 % niedriger als die Ergebnisse der Void-Traverse liegen.

SNEAK - 6B

Die Na-void Experimente waren ähnlicher Natur. Ein Vergleich Rechnung - Experiment kann noch nicht durchgeführt werden, da Rechenergebnisse noch nicht vorliegen. In Tab. 6 werden die experimentellen Ergebnisse beschrieben.

Tabelle 5

Ergebnisse der Na-Void Traversen (SNEAK-6A)

Experimentelle Ergebnisse				Rechnungen ($\beta_{\text{eff}} = 0.00417$)	
Höhe d. Voidzone (cm)	entferntes Na (g)	Void Experiment $\delta k/k$ (‰)	Integrierte Pile Oszillator Erg. $\delta k/k$ (‰)	Hom	Het
18,36	706	2,32	2,13	2,72	2,30
30,62	1178	3,58	3,32	4,19	3,56
42,86	1649	4,62	4,24	5,18	4,36
55,10	2120	5,00	4,65	5,59	4,55
79,60	3063	4,24	3,91	4,48	3,06

Tabelle 6Exp. Ergebnisse der Na-Void Traversen (SNEAK - 6B)

Höhe der gevoideten Zone	entferntes Na (g)	Exp. Ergebnisse ($\beta_{\text{eff}} = 0.00516$) $\delta k/k$ (‰)
18,37 cm	706,98	2.0 ‰
42,86 cm	1649	3.9 ‰
55,11 cm	2120	4.3 ‰
90,118 cm	3440	2.65 ‰

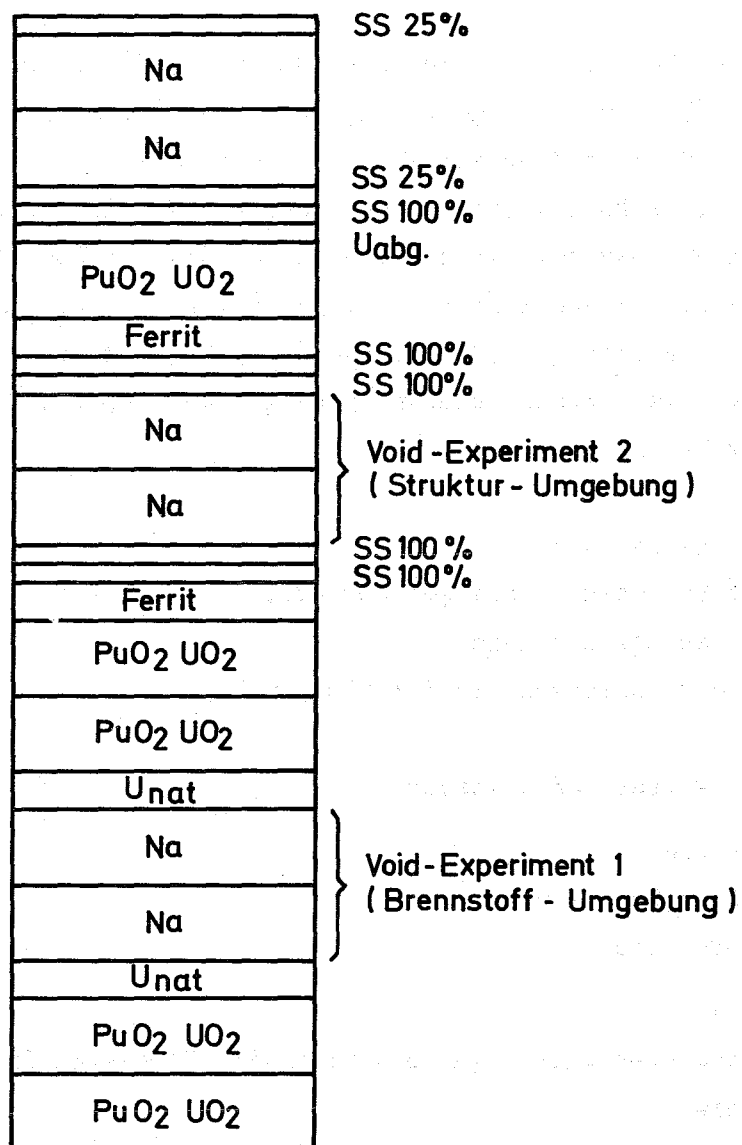


Abb.15 Gebündelte Zelle im Pile-Oszillator-Element
(für Na - Void - Experiment)

3.4 Pu - 240 Experiment und Zusatzexperimente

In SNEAK - 6A wurden Materialwerte in einer Umgebung, die eine höhere Anreicherung von Pu-240 enthält, gemessen. Zu diesem Zweck wurde im Zentrum von SNEAK - 6A eine Zone aufgebaut, in der Pu-Plättchen verwendet wurden, die 22 % Pu-240 enthielten anstatt 7 %, wie die normalen Pu-Plättchen. Eine Pufferzone, die nicht ganz so hoch mit Pu-240 angereichert ist, soll eine bessere Trennung gegen das Core-Spektrum ergeben. Die Höhe der Zone betrug 18,37 cm, außerdem oben und unten je 6,12 cm Pufferzone. Die radiale Ausdehnung zeigt Abb. 16, die Teilchenzahlen der Zone stehen in Tab. 7.

Gemessen wurde mit dieser Zone:

- a) Reaktivitätseffekt beim Einbringen der Zone
 - α) Einbringen der kleinen Zone
 - β) Einbringen der Pufferzone zu der kleinen Zone (große Zone)

- b) Messung des Na-Wertes und B-Wertes
 - α) im Referenzcore
 - β) in der kleinen Zone (nur Na)
 - γ) in der großen Zone

Zur Messung des Na-Wertes wurden in je 4 zentralen Elementen in 3 Zellen die Na-Plättchen entfernt.

Der B-Wert wurde gemessen durch Einbringen von 3 Zellen, in denen je 1 Na-Plättchen durch ein B_4C -Plättchen ersetzt wurde. Das in dem B_4C -Plättchen enthaltene Al ersetzt das herausgenommene Na.

Gerechnet wurden diese Effekte mit Störungsrechnung in Kugelgeometrie. Benutzt wurde der Gruppenquerschnittssatz $M\bar{\sigma}T\bar{\sigma}T$. Den Vergleich von Rechnung und Experiment ersieht man aus Tab. 8.

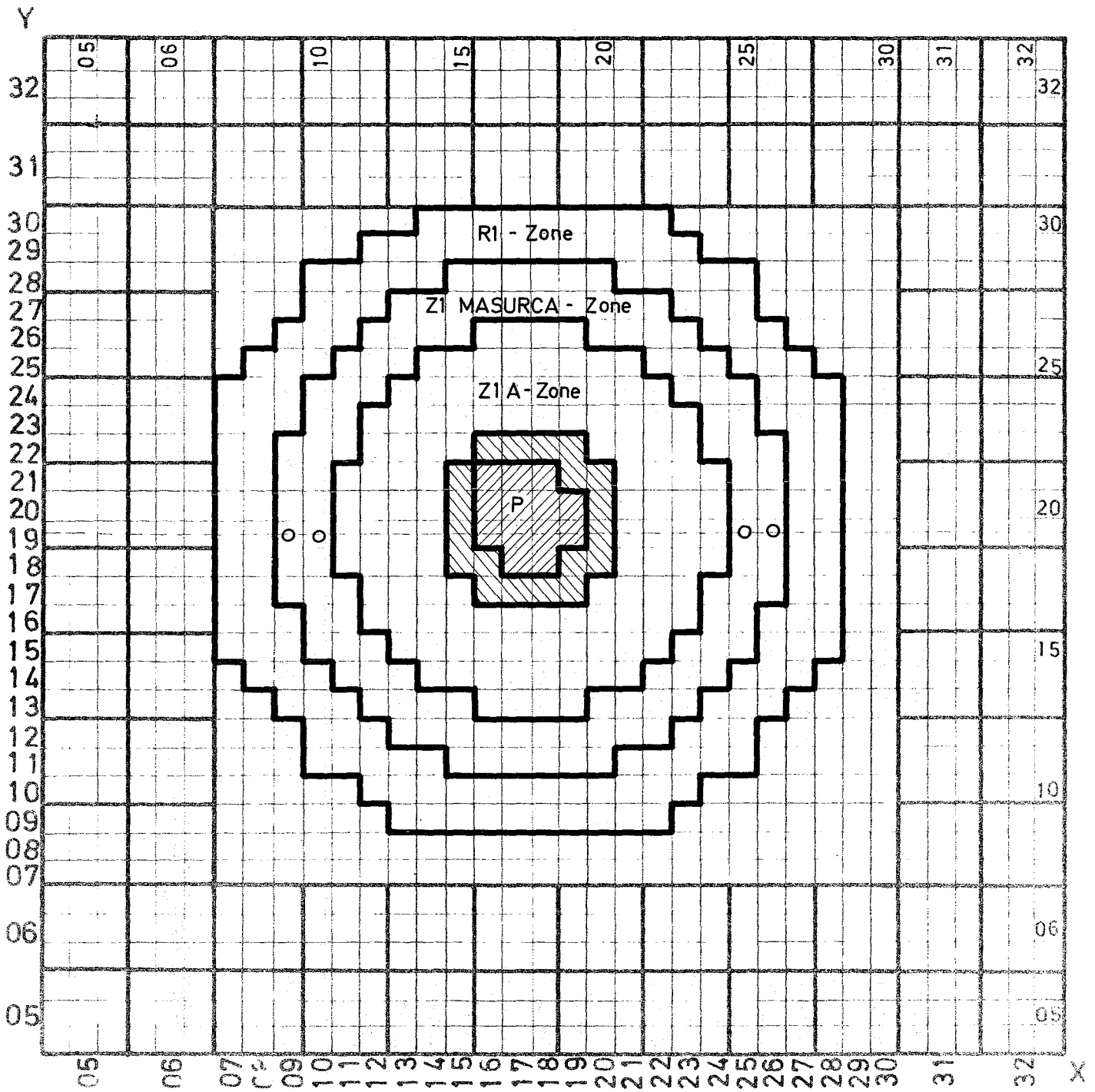


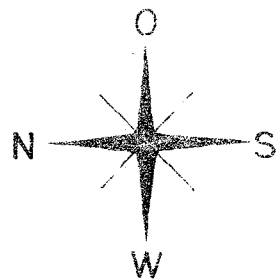


Abb. 16 SNEAK-6A Pu 240 - Experiment Querschnitt

- P Pile Oszillator
- o SNEAK - Plättchen - Fensterelement in der MASURCA-Zone
-  Pu 240 - Vergiftungszone
-  Pufferzone (VAK - Pu)



Maßstab 1:10

Tab. 7

Teilchenzahldichten ($10^{22}/\text{cm}^3$) für das Pu²⁴⁰-Experiment

Isotope	Zelle	Z i A Normalzelle	Pu-240 Zelle	Pu-240 Pufferzone
Al		0,00037		0,00059
C		0,00495	0,00402	0,00487
Cr		0,30881	0,30896	0,30010
Fe		1,19161	1,19236	1,23394
Mn		0,01478	0,01479	0,01509
Na		0,85517	0,85559	0,85498
Ni		0,22677	0,22807	0,23213
∅		1,19981	1,20354	1,21871
Pu-239		0,12154	0,11700	0,11539
Pu-240		0,01092	0,03603	0,03010
Pu-241		0,00099	0,00636	0,00981
Pu-242		0,00005	0,00143	0,00228
Si		0,01529	0,01530	0,01605
Ti		0,00092	0,00092	0,00092
U-235		0,00461	0,00439	0,00447
U-238		0,67427	0,64909	0,66067

Tab. 8

Ergebnis der Pu-240 Experimente

	Experiment $\beta_{\text{eff}} = 0,0042$	Rechnung $\beta_{\text{eff}} = 0,0042$	<u>Rechnung</u> Experiment
<u>Referenzcore</u>			
Na-Wert	2,32 ¢	2,61 ¢	1,12
B -Wert	- 3,68 ¢	- 4,19 ¢	1,14
<u>Kleine Pu²⁴⁰-Zone</u>			
Einbringen der Zone	12,1 ¢	15,1 ¢	1,25
Na-Wert	2,50 ¢	2,71 ¢	1,08
<u>Große Pu²⁴⁰-Zone</u>			
Einbringen der Zone	77,1 ¢		
Na-Wert	2,88 ¢	2,72 ¢	0,94
B -Wert	- 3,66 ¢	- 4,2 ¢	1,15

3.5. Materialwert-Messungen

In SNEAK - 6A wurden Materialwerte von Brennstoffisotopen, Absorbern und Strukturmaterial mit dem Pile-Oszillator gemessen. Einige der wichtigen Isotope wurden ebenfalls in 6B gemessen, um den Einfluß des Masurca-Puffers zu untersuchen. Zusätzlich wurde in 6B der Wert von Natrium in einer "gebündelten" Beladung des Pileoszillators gemessen, und zwar in 2 Positionen, nämlich einmal umgeben von Brennstoff, das andere Mal von Strukturmaterial (Fig. 16).

SNEAK - 6A

Die Rechnungen für 6A wurden mit dem MØXTØT-Satz einmal mit dem Störprogramm, zum andern mit dem REAC-Programm von Oosterkamp (KFK-Bericht 1036) durchgeführt. Zum Vergleich wurde mit dem Störprogramm auch mit dem NAPPMB-Satz gerechnet. Die Ergebnisse wurden auf das statistische Gewicht einer DIXY-Rechnung normiert. Der Wert für $\beta_{\text{eff}} = 0,00421$ wurde ebenfalls einer DIXY-Rechnung entnommen.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 9 dargestellt. Insgesamt ergibt sich etwa folgendes Bild:

a) Brennstoffisotope:

Die Verhältnisse REAC-Rechnung/Experiment liegen 6 - 8% höher als bei SNEAK - 2A. Eine Ausnahme bildet Pu-240, wo das Meßergebnis in 6A nicht gut zu verstehen ist (siehe unten). Diese 6 - 8% sind vermutlich auf Unsicherheiten in β_{eff} bzw. dem Normierungsintegral zurückzuführen.

b) Die Absorber Ta und B_4C liegen ähnlich wie in 2A, d.h. B_4C wird unterschätzt, Ta überschätzt. Eu_2O_3 wird von der homogenen Rechnung überschätzt.

c) Na und SS werden relativ gut berechnet. Fe_2O_3 zeigte einen sehr kleinen Meßeffect, und deshalb einen sehr hohen Fehler.

SNEAK - 6B

Für 6B wurden nur Rechnungen mit dem Störprogramm durchgeführt. Es zeigte sich, daß die Ergebnisse besser als auf 1% mit den Rechenergebnissen von 6A (unter Umrechnung der statistischen Gewichte)

übereinstimmen. Die Verhältnisse REAC/Störprogramm wurden deshalb von 6A übernommen. Der Wert $\beta_{\text{eff}} = 0,00485$ wurde wieder aus einer DIXY-Rechnung entnommen. Das Verhältnis der statistischen Gewichte beträgt $6B/6A = 1,015$. Die Ergebnisse sind in Tabelle 10 zusammengestellt.

Insgesamt sind die Ergebnisse mit den Messungen in 6A verträglich, d.h. das Verhältnis der gemessenen Materialwerte stimmt auf etwa 5 % mit dem Verhältnis der gerechneten Werte überein. Eine Ausnahme ist das Verhältnis R/E für Pu-240, das hier 0,63 beträgt, was besser zu älteren Messungen in SNEAK - 2A paßt. Außerdem zeigt sich, daß der "Umgebungseffekt" des Na-Wertes sehr schlecht berechnet wird.

Tabelle 9 Materialwerte in SNEAK - 6A

	Gewicht der Probe, [g]	Meßergebnis [$\mu\$/g$]	Rechnung/Exp.		
			MØXTØT Störprogr.	Reac.	NAPPMB Störprogr.
U-235	3,3	512 \pm 10	1,22	1,16	1,18
U-238	62	- 33,2 \pm 0,5	1,25	1,07	1,36
Pu-239	4	740 \pm 7	1,05	1,02	1,10
Pu 240	2,7	107 \pm 10	0,99	0,99	0,27
Ta	220	- 143 \pm 0,2	1,90	1,04	1,86
B ₄ C	6	- 1720 \pm 5	1,11	0,96	1,09
Eu ₂ O ₃	4	- 705 \pm 8	1,18		
Na	30	- 31,3 \pm	1,14		1,28
SS	17	- 27,2 \pm 2	0,89	0,98	0,97
Fe ₂ O ₃	3	- 10 \pm 10	3,1	3,3	3,5

Tabelle 10

Materialwerte in SNEAK - 6B

Experiment			Rechnung REAC (MØXTØT)	
	[μ g/g]	Verh. 6B/6A	[μ g/g]	Verh. 6B/6A
U 235	435	0,85	509	0,855
U 238	-26,4	0,80	-30,3	0,855
Pu 239	601	0,81	645	0,855
Pu 240	145	1,35	90,5	0,855
B ₄ C	-1380	0,80	-1410	0,855
Na im Brenn- stoff	- 25,5		- 30,3	
Na im Struktur- material	- 19,0		- 29,4	

3.6. Neutronenspektrumsmessungen an SNEAK 6A (H.Bluhm, H.Werle, INR, G.Jourdan, IAR)

Im Zentrum von SNEAK 6A (Pos. 17/20) wurde das Neutronenspektrum mit Rückstoßprotonenzählern, einem Li⁶- und einem He³-Halbleiter-Sandwich-Spektrometer gemessen. Bei den Messungen mit den Halbleiterspektrometern wurde der Reaktor kritisch gefahren, während die Messungen mit den Rückstoßprotonenzählern, um die Zählrate genügend klein zu halten, bei vollkommen abgeschaltetem Reaktor (Trimm- und Regelstäbe ausgefahren, Sicherheitsstäbe abgefallen) durchgeführt wurden.

Die experimentellen Ergebnisse sowie die rechnerischen Daten sind in Abb. 17 zu sehen. Für die Rechnung wurde der MØXTØT-Satz benutzt. Das berechnete Spektrum ist mit einer Remo-Korrektur versehen. Für den niederenergetischeren Teil wurden als experimentelle Methode Sandwichmessungen benutzt. Abb. 18 zeigt gerechnetes und gemessenes Spektrum. Auch hier wurde der MØXTØT-Satz benutzt und eine Remo-Korrektur angebracht.

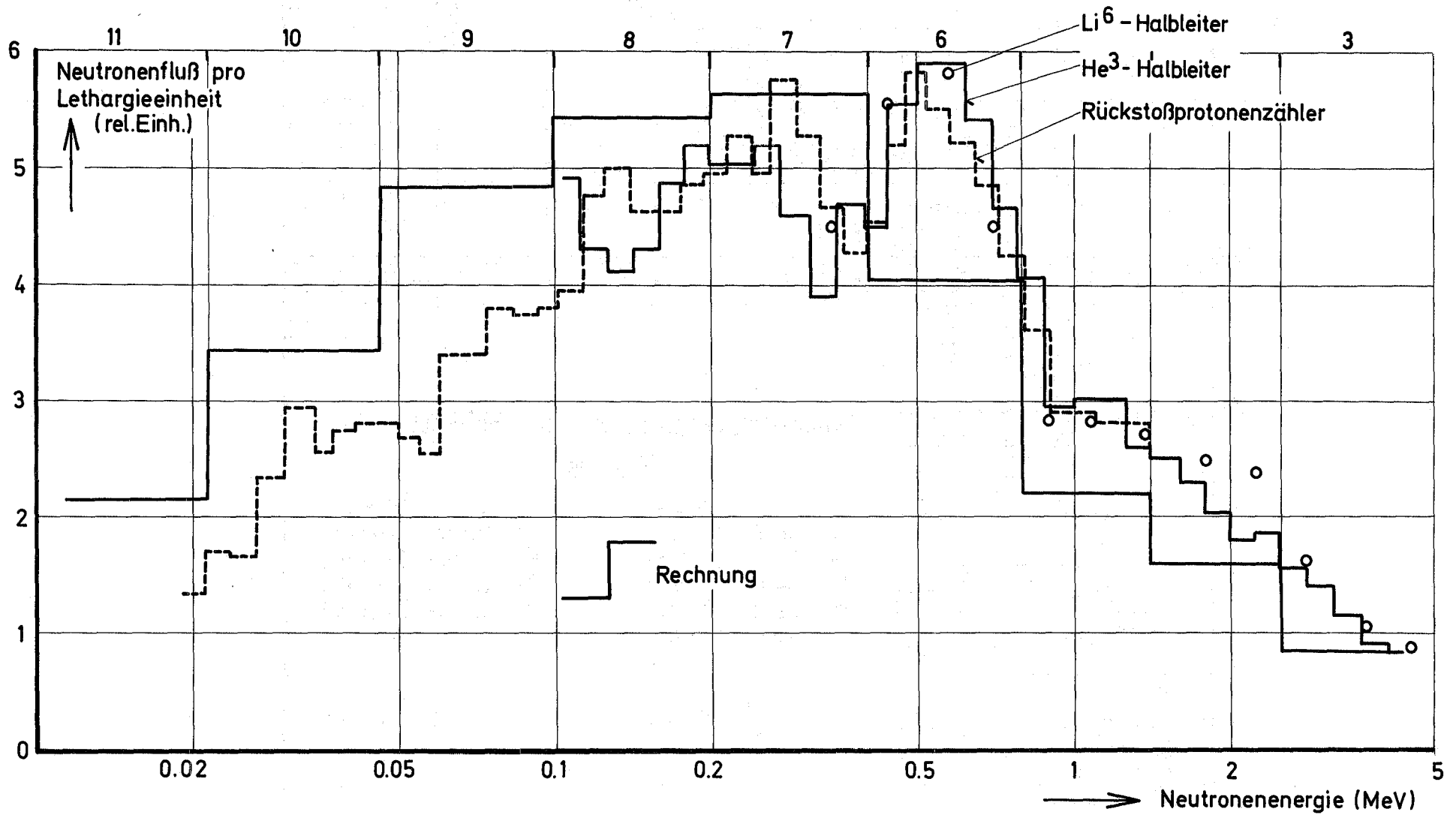
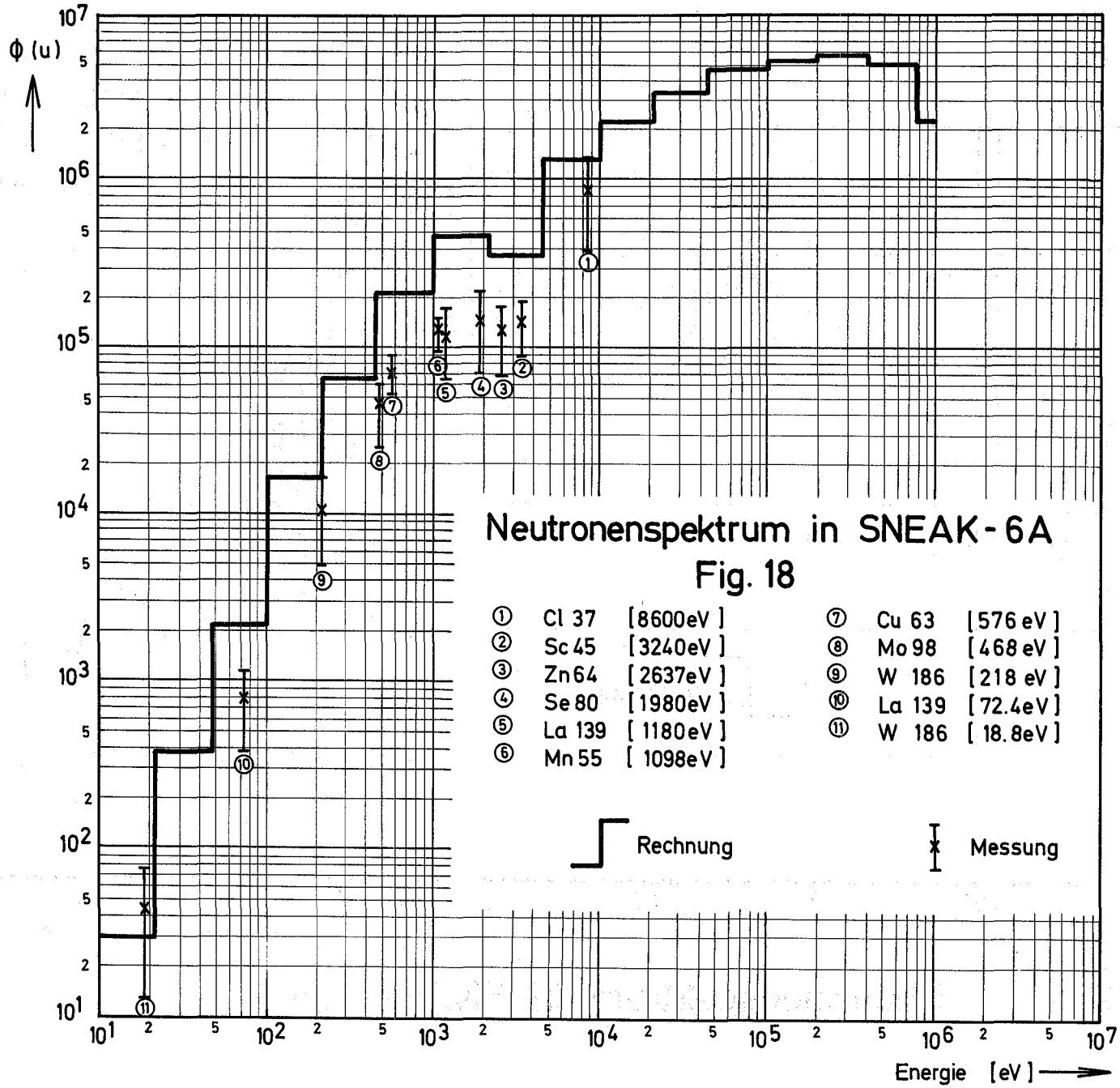


Fig. 17 Neutronenspektrum in SNEAK - 6A



3.7. Das Kavitäten-Experiment

Aufgabenstellung

In diesem Experiment soll der Fall simuliert werden, daß es durch direkten Kontakt von Natrium mit heißem Brennstoff in einem bestimmten Core-Bereich zu explosionsartiger Na-Verdampfung kommt. Hierbei werden alle Corematerialien in der Verdampfungszone nach außen gedrückt. Es entsteht also eine innere Leerzone, an der im wesentlichen alle Materialien entfernt werden, und eine umgebende Kompressionszone, die zusätzlich zu den ursprünglich dort vorhandenen Corematerialien nun auch die aus der Leerzone verdrängten Materialien enthält und dafür einen entsprechend geringen Natriumvolumenanteil aufweist.

Im kritischen Experiment wurden der gesamte Reaktivitätseffekt eines solchen Vorkommnisses sowie die Effekte der einzelnen Komponenten (Na-void, Verschiebung von Brennstoff, Verschiebung von Strukturmaterialien) an zwei Modellfällen untersucht.

Beschreibung des Experiments

Die Leerzone umfaßte in einem Bündel von 4 SNEAK-Elementen die 7 mittleren Zellen jedes Elements. Sie war also 42,9 cm hoch und 10,9 cm im Quadrat. Die Kompressionszone umfaßte alle Zellen, die der Leerzone horizontal und vertikal direkt (d.h. nicht diagonal) benachbart waren.

Die Kavität wurde einmal im Core-Zentrum und einmal in exzentrischer Position 27,2 cm radial vom Core-Zentrum entfernt untersucht. Das Experiment wurde jeweils in 5 Schritten durchgeführt.

1. Na-void in der Leerzone. Die Natriumschachteln wurden durch Leerschachteln ersetzt.
2. Partielles Na-void in der Kompressionszone. An 84 gleichmäßig verteilten Positionen wurden Na-Schachteln durch Leerschachteln ersetzt.
3. Verschieben aller Brennstoffplättchen aus der Leerzone in die Kompressionszone und auf die in Schritt 2 mit Leerschachteln besetzten Plätze. Die Leerschachteln werden in die ursprünglichen Plätze der Brennstoffplättchen eingesetzt.

4. Verschieben aller verbleibenden Materialien (außer dem Elementrohrstahl) in die Kompressionszone. Um den nötigen Platz zu schaffen, werden weitere 84 Na-Plättchen aus der Kompressionszone entfernt. Es werden hierbei so viele Stahlplättchen in die Kompressionszone eingesetzt, daß die Stahlbilanz nach Entfernen der Leerschachteln aus der Leerzone und der 84 Na-Schachteln aus der Kompressionszone erhalten bleibt. In der Leerzone wird als Abstandshalter in jedes Element ein Aluminiumrohr mit 3 mm Wandstärke eingesetzt.
5. Die Abstandshalterrohre werden durch andere mit nur 1 mm Wandstärke ersetzt. Dadurch wird es möglich, auf vollständige Entleerung der Elementrohre (im Leerzonenbereich) zu extrapolieren.

Ergebnisse

Tabelle 11 zeigt die gemessenen Reaktivitätsänderungen:

Tabelle 11

Ergebnisse Kavitätenexperiment, Reaktivitätseffekt (ϵ)			
Schritt Nr.	Konfiguration	zentrale Kavität	exzentrische Kavität
1	Na-void in Leerzone	4,6	1,4
2	Partielles Na-void (84 Plättchen in Kompressionszone)	2,6	0,7
3	Alle 84 PuO ₂ UO ₂ aus Leerzone in die Kompressionszone	- 0,8	- 1,1
4 + 5	Strukturmaterial in die Kompressionszone (extrapoliert zu unendlich dünnen Abstandshalter)	1,7	- 1,9
Gesamteffekt		8,1	- 0,9

Man kann diese Ergebnisse folgendermaßen qualitativ zusammenfassen:

1. Den Hauptbeitrag liefert der Na-void-Effekt
2. Der Effekt der Brennstoffverschiebung wurde immer negativ gemessen
3. Der Effekt der Strukturmaterialverschiebung hängt stark von der Position ab. Er ist von der gleichen Größenordnung wie der Effekt der Brennstoffverschiebung.

3.8. Kontrollstabexperimente

Die Kontrollstabexperimente für den SNR wurden in SNEAK-2C begonnen und waren in diesem Core so entworfen, daß die radialen Positionen im SNR-Core so gut wie möglich simuliert wurden. Eine Konsequenz davon war aber, daß das Core SNEAK-2C relativ kompliziert wurde und die gemessenen Effekte mit rechnerischen Methoden sehr schwer zu interpretieren waren. Als eine Ergänzung ist deshalb eine neue Reihe von Kontrollstabexperimenten im Zentrum des einfacheren und dem SNR in axialer Richtung ähnlicheren Core SNEAK-6A entworfen worden.

Es wurden für den Aufbau der Kontrollstäbe die gleichen Materialien ($\text{Na-B}_4\text{C}$ und Al-Ta) wie in SNEAK-2C genommen. Zusätzlich zu den beiden extremen Tauchtiefen (Absorber bzw. Nachfolger voll ins Core gezogen) hat man auch Experimente mit dem 1/4, 1/2 und 3/4 eingefahrenen Absorber gemacht. Für alle diese Fälle wurden die Reaktivitätsänderungen und Spaltkammertraversen gemessen. Außerdem wurde versucht, den Abschattungseffekt zu bestimmen. Die 4 zentralen mit B_4C oder Ta gefüllten SNEAK-Elemente wurden schrittweise diagonal auseinandergesetzt. Bei jedem Schritt wurden die Reaktivitätsänderungen bestimmt.

3.9. B_4C -Vergiftungszone

In der Z1A-Zone in SNEAK-6A wurde eine einen höheren Abbrand simulierende vergiftete Zone eingebracht. Die Vergiftung wurde mit B_4C bewirkt.

Ziel dieses Experimentes war es, das Verhalten der SNR-Kontrollstäbe und des Na-void-Effektes in einer Zone höheren Abbrandes zu studieren. Für dieses Experiment liegen noch keine ausgewerteten Ergebnisse vor.

1215. Wirkungsquerschnittsmessungen

1215.1 Van-de-Graaff-Generator

1215.11 Betrieb des Beschleunigers (M.Kraatz, S.Liese, D.Roller, IAK)

Der Van-de-Graaff-Beschleuniger arbeitete im Berichtszeitraum sehr zuverlässig: 1950 Stunden Strahlzeit (alles gepulst), davon etwa 90 % für das PSB.

1215.12 Gesamtquerschnitte mittelschwerer Kerne

(K.N.Müller, M.Cho, M.Kazerouni, F.H. Fröhner, IAK)

Die Ergebnisse unserer hochauflösenden Transmissionsmessungen an Ti^{47} , Ti^{48} , Ni^{61} (Resonanzparameter einschl. Spins, spinabhängige Niveaustatistik-Parameter, s. KFK-Bericht 1270/1) wurden zusammen mit älteren Ergebnissen für Sc^{45} , Ti^{49} und Cr^{53} bei der Kerndatenkonferenz in Helsinki vorgetragen (1). Ein neuer Probenwechsler für Läufe mit 4 Proben (3 Proben+ Blindprobe) wird gebaut. Er soll bei den bevorstehenden Messungen an den Struktur- und Hüllmaterialien Fe^{54} , $Ni^{62,64}$, $Cr^{50,52,53,54}$ eine bessere Ausnutzung der Strahlzeit ermöglichen.

1215.13 Einfangquerschnitte mittelschwerer Kerne (A.Ernst, F.H.Fröhner, IAK)

Die Auswertung der im vorigen Vierteljahr gemessenen Einfangdaten von Ti^{47} , Fe^{56} , $Ni^{58,60,61}$ ist im Gange. Dazu wurde ein Flächenanalysen-Rechenprogramm (F.H.Fröhner, GA-6909 (1966) so modifiziert, daß bei bekanntem Spin J und bekannter Streubreite Γ_n die Resonanzfläche durch Adjustieren der Strahlungsbreite Γ angepaßt wird. Besonders sorgfältig mußte das Problem der Selbstabschirmung und Vielfachstreuung behandelt werden, da Streuung für die meisten Resonanzen um Größenordnungen wahrscheinlicher ist als Einfang. Bei dieser Resonanzanalyse ist es ferner äußerst wichtig, daß gute Transmissionsergebnisse (Spins, Streubreiten) herangezogen werden können. Mit unseren Werten (s. (1)) gelang es - erstmals in diesem Massenbereich - bei Ni^{61} und Ti^{47} eine große Zahl von Strahlungsbreiten zu bestimmen. Bei Ni^{60} und Fe^{56} , wo keine eigenen Transmissionsergebnisse benutzt

werden konnten, gelang wenigstens die γ -Bestimmung bei den breitesten s-Wellen-Resonanzen. Tab. 12 zeigt die bisherigen Resultate (2). Bemerkenswert sind die durchweg sehr großen Werte der Strahlungsbreiten und die (wegen der geringen Niveaudichten nicht unerwarteten) Schwankungen von Resonanz zu Resonanz. Die Analyse wird fortgesetzt.

Tabelle 12

Vorläufige Ergebnisse der Auswertung von Einfangdaten.

Targetkern	Resonanz- energie (keV)	Strahlungsbreite (eV)	Vielfachstreubeitrag zur primären Einfangrate (%)
Ti ⁴⁷	8,11	1,4 \pm 0,3	5
	8,33	2,0 \pm 0,4	27
	10,5	1,6 \pm 0,2	3
	12,2	2,1 \pm 0,5	6
	12,8	2,5 \pm 0,5	5
	16,4	2,0 \pm 0,4	11
	17,4	2,0 \pm 0,3	1
	19,0	2,5 \pm 0,5	1
	21,2	1,7 \pm 0,3	1
	Mittel:	1,81 \pm 0,11	
Fe ⁵⁶	27,8	1,4 \pm 0,2	59
Ni ⁶⁰	12,5	3,4 \pm 0,7	159
	28,5	1,2 \pm 0,4	54
	65,5	2,2 \pm 0,3	5
Ni ⁶¹	7,16	2,5 \pm 0,4	11
	7,55	2,3 \pm 0,6	70
	8,75	2,6 \pm 0,8	2
	12,6	1,7 \pm 0,3	7
	13,6	1,6 \pm 0,4	7
	14,0	3,1 \pm 0,5	7
	16,7	2,2 \pm 0,4	3
	17,9	1,6 \pm 0,5	10
	18,9	0,9 \pm 0,3	12
	24,6	1,4 \pm 0,3	2
	28,2	3,0 \pm 1,0	1
	29,1	2,4 \pm 0,4	25
	33,7	2,8 \pm 0,5	1
	37,1	3,0 \pm 0,5	1
	Mittel:	1,94 \pm 0,12	

1215.14 Spaltquerschnittsmessungen (F.Käppeler, F.H.Fröhner, IAK)

Der neuentwickelte Rückstoßprotonen-Zähler zur Flußbestimmung wurde bei einer ersten Absolutmessung von σ_f (U^{235}) eingesetzt. Mit monoenergetischen Neutronen wurde bei 440 keV der Wert σ_f (U^{235}) = $(1,16 \pm 0,07)$ b gemessen. Dieser Wert liegt ungefähr halbwegs zwischen den hohen Werten von White bzw. Allen und Ferguson einerseits und den niedrigen Werten von Pönitz andererseits (3). Weitere Messungen von 1 MeV abwärts sind in Vorbereitung.

Das Verhältnis der Spaltquerschnitte von Pu^{241} und U^{235} wurde mit derselben Methode und bei denselben Energien (10 keV - 1,2 MeV) gemessen wie im letzten Jahre das Verhältnis zwischen U^{233} bzw. Pu^{239} und U^{235} (4). Die endgültigen Werte können erst berechnet werden, wenn die genaue Massenbestimmung der benutzten Folien in Geel (BCMN) abgeschlossen sein wird.

1215.15 Verhältnis von Einfang- zu Spaltquerschnitt bei Pu^{239}
(R.Bandl, H.F.Fröhner, IAK)

Die Messungen von η bzw. $\alpha = \sigma_\gamma : \sigma_f$ für Pu^{239} werden mit verbessertem Detektorsystem fortgeführt. Die bisher erreichte statistische Genauigkeit soll durch längere Meßzeiten soweit gesteigert werden, daß α zwischen 10 und 60 keV auf etwa 10 % genau bestimmt werden kann.

1215.16 Temperatureinfluß nichtaufgelöster Resonanzen auf die mittlere Transmission dicker Proben (E.Schneider, F.H. Fröhner, IAK)

Die im letzten Vierteljahresbericht (KFK-Bericht 1270/1) beschriebenen Messungen wurden ausgewertet (5). Es wurde gefunden:

1. Die auf Niveaustatistik gegründeten Rechnungen geben den Temperatureffekt gut wieder, wenn außer der Dopplerverbreiterung thermische Probenausdehnung genügend exakt berücksichtigt wird.
2. Interferenzeffekte zwischen verschiedenen Niveaus gleichen Spins und gleicher Parität sind für den Temperatureffekt bedeutungslos.

Veröffentlichungen zu 1215.1 (Van-de-Graaff)

- (1) M. Cho et al.
Total Cross Sections of ^{45}Sc , ^{47}Ti , ^{49}Ti , ^{53}Cr , and ^{61}Ni in the keV Region
KFK-Bericht 1230 (1970)
- (2) A. Ernst, F.H. Fröhner, D. Kompe
High Resolution Measurements of Radiative Neutron Capture in ^{47}Ti , ^{56}Fe , ^{58}Ni and ^{61}Ni between 7 and 200 keV
KFK-Bericht 1231 (1970)
- (3) F. Käppeler, F.H. Fröhner
Absolute Neutron Flux Determination
KFK-Bericht 1226 (1970)
- (4) F. Käppeler, E. Pflutschinger
Measurement of the Fission Cross Section of Pu^{241} relative to U^{235}
KFK-Bericht 1227 (1970)
- (5) E. Schneider, F.H. Fröhner
The Temperature Dependence of the average Transmission of Gold
KFK-Bericht 1229 (1970)

Die Ergebnisse in (1) bis (5) wurden auf der Kerndatenkonferenz in Helsinki (15. - 19.6.1970) vorgetragen.

1215.2 Zyklotron1215.21 Ausbau und Betrieb des Spektrometers

(G.Schmalz, S.Cierjacks, G.J.Kirouac, D.Kopsch, L.Kropp, J.Nebe, F.Voß, IAK)

Im Berichtszeitraum wurden Arbeiten am 200 KHz-Ablensystem zur Verbesserung der Stabilität und Erhöhung der Ablenkspannung durchgeführt. Die verbesserte Version dieses Systems soll ab Mitte Juli während einer vierwöchigen Strahlzeit eingesetzt werden.

1215.22 Totale Neutronen-Wirkungsquerschnitte

(S.Cierjacks, G.J.Kirouac, D.Kopsch, J.Nebe, IAK)

Die Ergebnisse hoch aufgelöster totaler Wirkungsquerschnitte an ^{238}U und ^{16}O zwischen 0,5 und 4,4 MeV bzw. 0,5 und 32 MeV ebenso wie die Ergebnisse der Resonanzparameteranalyse an ^{40}Ca und ^{23}Na wurden bei der Kerndatenkonferenz in Helsinki vorgetragen (1, 2, 3). Die Fluktuationsanalyse der totalen Wirkungsquerschnitte für 13 Kerne mit $A < 60$ konnte abgeschlossen werden (4).

1215.23 Inelastische Neutronenwirkungsquerschnitte

(F.Voß, S.Cierjacks, L.Kropp, IAK)

Die Apparatur zur Messung der inelastischen Neutronenstreuung an ^{27}Al und ^{56}Fe (zur Normierung) wurde im Berichtszeitraum vervollständigt, und abschließende Labortests wurden durchgeführt. Eine Strahlzeit am Zyklotron konnte daher für Mitte Juli festgesetzt werden.

1215.24 Differentielle elastische Neutronenstreuquerschnitte

(J.Nebe, G.J. Kirouac, IAK)

Die Auswertung der differentiellen Streuquerschnitte von ^{40}Ca wurde abgeschlossen (s. (3), (5) und KFK-Bericht 1270/1). Diese Arbeit stellt zusammen mit der Analyse des totalen Neutronenwirkungsquerschnitts eine sehr weitgehende Untersuchung der ^{40}Ca (n,n)-Reaktion dar (6).

1215.25 Wirkungsquerschnitte der (n, α) Reaktionen (L.Kropp, IAK)

Die Ergebnisse der Messungen differentieller Wirkungsquerschnitte der ^9Be (n, α)-Reaktion im Energiebereich zwischen 8 und 30 MeV wurden in einer

ausführlichen graphischen Darstellung zusammengestellt (7). Die Auswertung der Meßdaten wurde damit abgeschlossen (8). Die über einen großen Winkelbereich integrierten Wirkungsquerschnitte für den Grundzustandsübergang sind in Tabelle 13 zusammengefaßt. Die Wirkungsquerschnitte sind mit einer Genauigkeit von 8 - 10 % bestimmt worden. Eine detaillierte Beschreibung der Meßanordnung und der Art der an der ${}^9\text{Be}$ (n, α)-Reaktion beteiligten Mechanismen ist in Vorbereitung.

(Corrigendum zum KFK-Bericht 1270/1):

Statt "Niveau im ${}^{10}\text{Be}$ Compoundkern bei (23 ± 8) MeV" muß es heißen
 "Niveau im ${}^{10}\text{Be}$ Compoundkern bei $(23 \pm 0,8)$ MeV".

Tabelle 13

Wirkungsquerschnitte für den Grundzustandsübergang ${}^9\text{Be}$ (n, α) ${}^6\text{He}$

Mittlere Energie (MeV)	ϑ_{\min} , (Grad)	ϑ_{\max} (Grad)	Wirkungsquerschnitt (mb) integriert von ϑ_{\min} - ϑ_{\max}
30 \pm 1,6	10,	160	1,69
28	10,	160	1,89
26	10,	160	2,18
24,3	10,	160	2,94
21,9	10,	160	3,76
19,8 \pm 0,90	10,	160	4,19
17,9	10,	130	4,19
17,0	10,	130	3,52
16,0	10,	130	4,29
14,0	10,	130	4,67
12,0	10,	130	6,07
10,0 \pm 0,32	10,	85	5,15
8,5	10,	85	5,62

Veröffentlichungen zu 1215.2 (Flugzeitspektrometer, Zyklotron)

- (1) D.Kopsch, S.Cierjacks, G.J.Kirouac
New Total Neutron Cross Section Measurement of Uranium between
0.5 - 4.35 MeV
KFK-Bericht 1199, CN-26/12, IAEA
- (2) S. Cierjacks
Neutron Total Scattering and (n,x) Reaction Cross Section above the
Resonance Region
KFK-Bericht 1201, IAEA - CN-26/113
- (3) J.Nebe, G.J.Kirouac
Multilevel Resonance Analysis of the Total Neutron Cross Section
of ^{23}Na and Ca below 1 MeV
KFK-Bericht 1195, IAEA - CN-26/13
- (4) D.Kopsch
Bestimmung mittlerer Niveau-Dichten und Niveau-Breiten aus Fluktuations-
analysen des totalen Neutronenwirkungsquerschnittes einiger Kerne im Mas-
senbereich $A < 60$ zwischen 0,8 und 14 MeV
Dissertation, in Vorbereitung
- (5) G.J. Kirouac, J. Nebe
eingesandt zur Veröffentlichung in Nucl. Phys.
- (6) J.Nebe
Untersuchung der Niveaustuktur von Ca^{41} oberhalb der Neutronenbindungs-
energie
Dissertation in Vorbereitung
- (7) L. Kropp, P. Forti
Excitation Functions and Differential Cross Sections for the Be^9 (n, α)
Reaction with 8 to 30 MeV Neutrons
KFK-Bericht 1190
- (8) L. Kropp
Untersuchungen der Reaktion Be^9 (n, α) He^6 im Energiebereich 8 - 30 MeV
mit Hilfe eines 4-Parameter-Experiments
Dissertation Universität Karlsruhe, in Vorbereitung

1216. Analyse von SEFOR - Experimenten (D.Wintzer, H.G.Bogensberger, F.Plum, IAR)Reaktivitätsrechnungen für Core 1-C und Core 1-D

Für die Corebeladungen 1-C (kleinstes kritisches Core) und 1-D (Experimentiercore für die meisten Nullenergieexperimente) wurden mit heterogenitätskorrigierten 26-Gruppen-Querschnitten des MOXTOT-Satzes zweidimensionale Diffusionsrechnungen durchgeführt und brachten die in Tab. 14 aufgeführten Ergebnisse für k_{eff} :

Tabelle 14 Reaktivitätsresultate für Core 1-C und Core 1-D

Core	1-C	1-D
26 Gr., 2 dim., het.	0.977	0.983
Korrekturen	+ 0.009	+ 0.003
k_{eff} mit Korrekturen	0.987	0.986

Die Korrekturen enthalten Temperatur-, Transport- und Überschußreaktivitätskorrekturen. Eine REMO-Korrektur ist noch nicht eingeschlossen.

Die berechneten Reaktivitätswerte sind konsistent mit Reaktivitätsunterschätzungen von 1 bis 2 %, die Kiefhaber ¹⁾ bei Verwendung des MOXTOT-Satzes für eine Reihe von Pu-haltigen Nullenergieanordnungen fand.

Tabelle 15 ermöglicht einen Vergleich der mit verschiedenen Querschnittssätzen gewonnenen Resultate.

Tabelle 15 Vergleich von Reaktivitätsresultaten für Core 1-C mit verschiedenen Querschnittssätzen

Querschnittssatz	26 Gruppen		4 Gruppen
	Radial	Axial	2-dimensional
MOXTOT	0.9662	0.9589	0.9830
NAPPMB	0.9594	0.9506	0.9800
SNEAKSET	0.9529	0.9462	0.9698
KFKSET	0.9873	0.9825	0.9961

1) E.Kiefhaber et al: "Evaluation of Critical Experiments by Use of Recent Methods and Data" BNES-Conference, London, June 1969

Tabelle 16 demonstriert den Einfluß unterschiedlicher Querschnittssätze auf die radiale Leistungsverteilung in Core 1-C. P_r/\hat{P} ist das Verhältnis zwischen Leistungsdichte am radialen Corerand und der maximalen Leistungsdichte in der Nähe des Corezentrums.

Tabelle 16 Vergleich von Leistungsverteilungen mit verschiedenen Querschnittssätzen

Querschnittssatz	P_r/\hat{P}
MOXTOT	0.449
NAPPMB	0.457
SNEAKSET	0.447
KFKSET	0.416

Prozentual ähnliche Unterschiede wurden bei den axialen Leistungsverteilungen gefunden.

Vergleichende Rechnungen mit unterschiedlichen Geometriemethoden für SEFOR zeigten, daß die Beschreibung geometrischer Details der Materialverteilung außerhalb des Cores von einiger Bedeutung für die Berechnung der Reaktivität und der Leistungsverteilung in SEFOR ist.

122. Reaktortheorie1221. Wirkungsquerschnitte und Gruppenkonstanten (B.Hinkelmann, INR)

Die in den letzten Jahren durchgeführten Messungen von Kerndaten für Pu 239 und die Wichtigkeit dieser Daten für die Reaktorphysik ließen eine Überprüfung der KEDAK-Daten für dieses Isotop und teilweise eine Neuauswertung sinnvoll erscheinen.

Primäre Änderungen wurden für folgende Kerndatentypen in den angegebenen Energiebereichen durchgeführt:

$$\sigma_f : 1 \text{ KeV} - 10 \text{ MeV}$$

$$\alpha : 100 \text{ eV} - 30 \text{ KeV}$$

$$\bar{\nu} : 3 \text{ MeV} - 10 \text{ MeV}$$

Diese primären Änderungen hatten Änderungen in den anderen Querschnittstypen zur Folge, die in Tab. 1 aufgezeigt sind. Der totale Querschnitt ist im ganzen Energiebereich unverändert geblieben. Die Bedeutung der Querschnittstypen ist dieselbe wie in Referenz (1) angegeben.

Was den Spaltquerschnitt betrifft, wurden im Bereich 1 KeV - 10 KeV die von James und Patrick (2) ausgewerteten Querschnittsdaten übernommen. Die im Bereich 10 KeV - 2 MeV empfohlenen σ_f -Werte basieren auf den sehr sorgfältig durchgeführten Messungen des Verhältnisses

$$\frac{\sigma_f \text{ (Pu 239)}}{\sigma_f \text{ (U 235)}} \quad \text{von}$$

1. Pflutschinger, Käppeler (3)
2. Poenitz (4)
3. Nesterov, Smirenkin (5)
4. White et al. (6)
5. White, Warner (7)

Tabelle 1: Änderungen von Pu 239-Daten auf KEDAK

Querschnittstyp	Änderungen in den ABN-Gruppen
ALPHA	18 - 10
ETA	18 - 10; 3 - 1
CHIF	unverändert
MUEL	unverändert
NUE	3 - 1
SGA	18 - 1
SGALP	unverändert
SGF	15 - 1
SGG	18 - 1
SGI	4 - 1
SGN	18 - 4
SGP	unverändert
SGT	unverändert
SGTR	18 - 4
SG2N	unverändert
SGX	18 - 4

Die Ergebnisse dieser Messungen sowie die angepaßte Kurve sind in Abb. 1 eingezeichnet. Die Absolutwerte des Spaltquerschnittes für Pu 239 wurden in diesem Energiebereich durch Multiplikation mit den KEDAK-Werten für den Spaltquerschnitt von U 235 erhalten. Im oberen MeV-Bereich wurde unter Berücksichtigung der dort noch vorhandenen experimentellen Werte von White, Warner (7) eine glatte Kurve durch die Meßdaten von Smith, Henkel, Nobles gelegt. Diese Daten wurden in der von Hansen, Mc Guire, Smith (8) korrigierten Form benutzt.

In Abb. 2 ist ein Vergleich der neuen KEDAK-Daten für den Spaltquerschnitt mit den alten KEDAK-Werten gegeben.

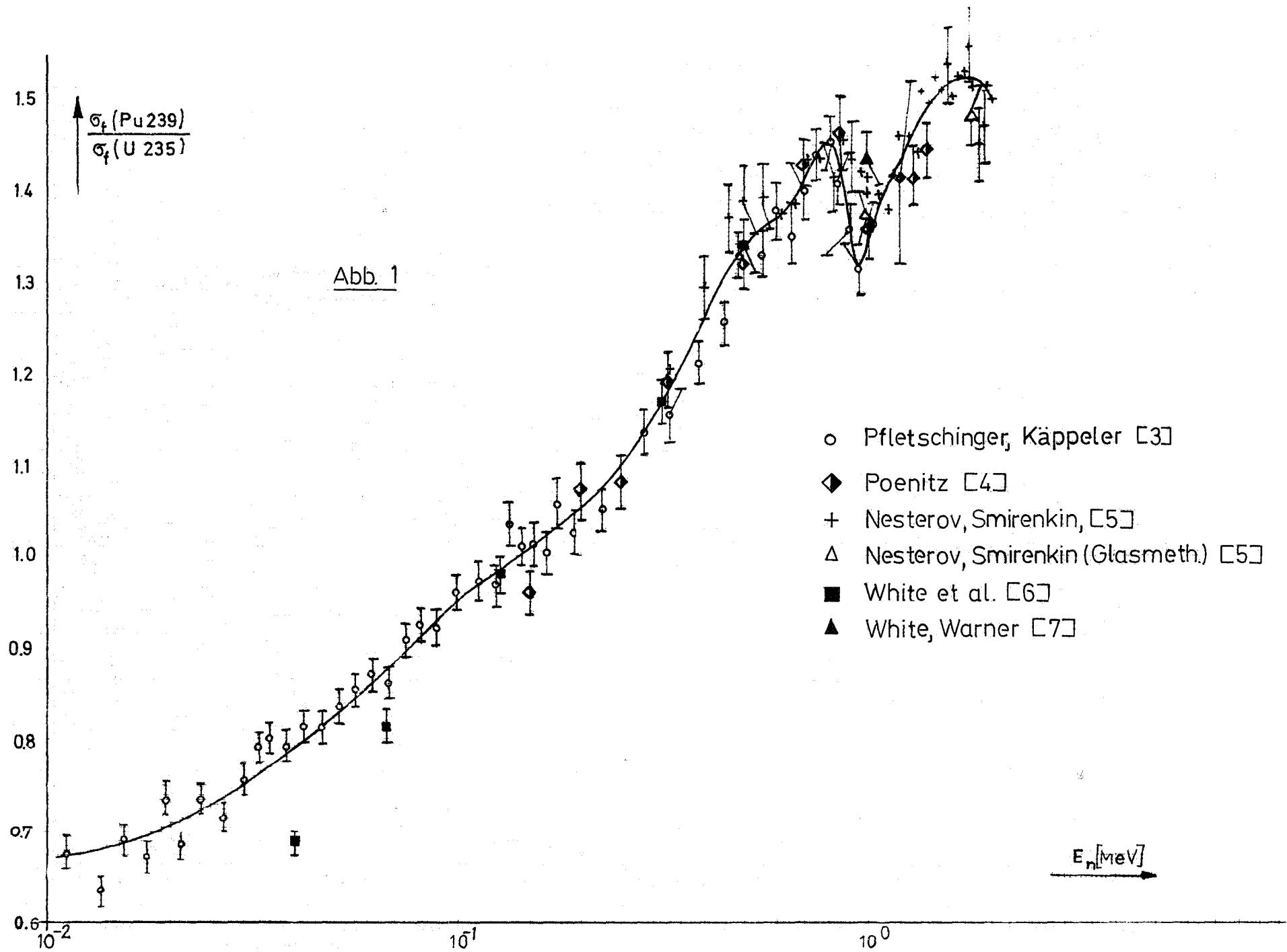
Als neue α -Werte für Pu 239 wurden in dem hier betrachteten Energiebereich die Werte von Gwin (9) übernommen. Ein Vergleich zwischen alten und neuen KEDAK-Werten ist in Abb. 3 gegeben.

Für die mittlere Anzahl der Neutronen pro Spaltung gab es im Energiebereich oberhalb 4 MeV bis vor wenigen Jahren keine Experimentaldaten. Durch neuere Messungen von Condé et al. (10) und Soleilhac et al. (11), die relativ zu den aus der spontanen Spaltung von Cf 252 stammenden durchgeführt wurden, und die diesen Energiebereich überdecken, wurde nach Umnormierung ein linearer least square fit gelegt. Es wurde einheitlich für alle Experimentaldaten ein Wert von $\bar{\nu}_{sp}^P$ (Cf 252) = 3.764 angenommen. In Abb. 4 ist $\bar{\nu}(E)$ für Pu 239 eingezeichnet.

Die aus den neuen Pu-Daten ermittelten 26-Gruppenkonstanten und f-Faktoren sind unter dem Gruppensatznamen "Pu9NEW" verfügbar. Die f-Faktoren dieses Gruppensatzes im statistischen Bereich sind für Spaltung aus mittleren Spaltbreiten bestimmt worden, die im Bereich von 100 eV - 30 KeV an die Gwin α -Werte angepaßt wurden.

Referenzen:

- (1) I. Langner, J.J. Schmidt, D. Woll
Tables of evaluated neutron cross sections for fast reactor materials,
KFK 750, Januar 1968
- (2) G.D. James, B.H. Patrick
AERE-M 2065
- (3) E. Pfletschinger, F. Käppeler
private Mitteilung, veröffentlicht in Nucl. Science Engineering 40,
1970, 375
- (4) W.P. Poenitz
private Mitteilung an J.J. Schmidt
- (5) V.G. Nesterov, G.N. Smirenkin
Bulletin des Obninsker Datenzentrums ICD-4, 1968, pp. 339
- (6) P.H. White, J.G. Hodgkinson, G.J. Wall
IAEA-Symposium on Physics and Chemistry of Fission, Salzburg, März 1965,
Vol. I, 219
- (7) P.H. White, G.P. Warner,
Journal of Nucl. Energy 21, 1967, 671
- (8) G. Hansen, S. McGuire, R.K. Smith
private Mitteilung von L. Stewart
- (9) R. Gwin et al.
ORNL-TM-2598, Okt. 1969
- (10) H. Condé, J. Hansen, M. Holmberg
Journal of Nucl. Energy 22, 1968, 53
- (11) M. Soleilhac, J. Fréhaut, J. Gauriau
Journal of Nucl. Energy 23, 1969, 257



122 - 6

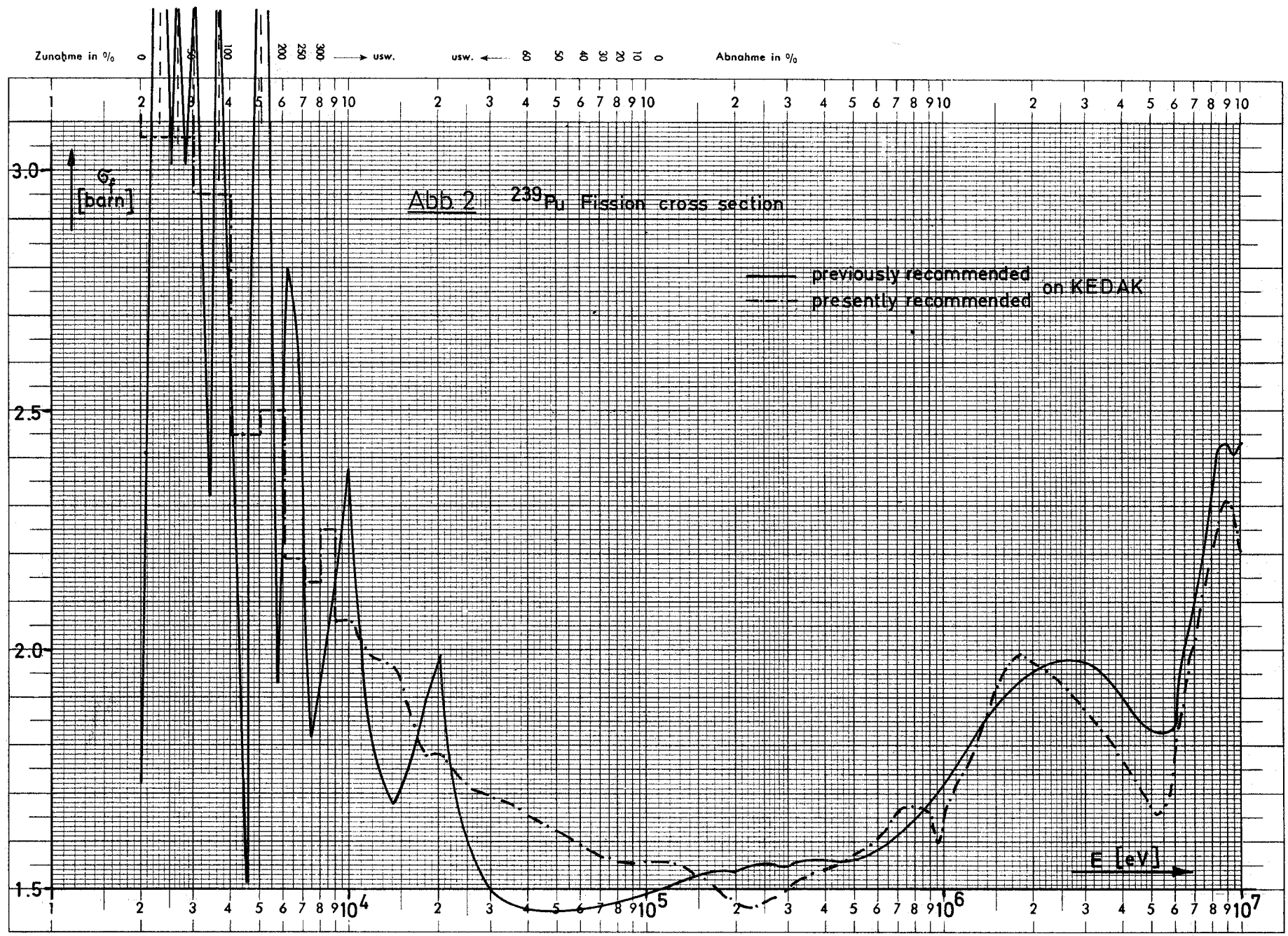


Abb 2 ^{239}Pu Fission cross section

— previously recommended
- - - presently recommended on KEDAK

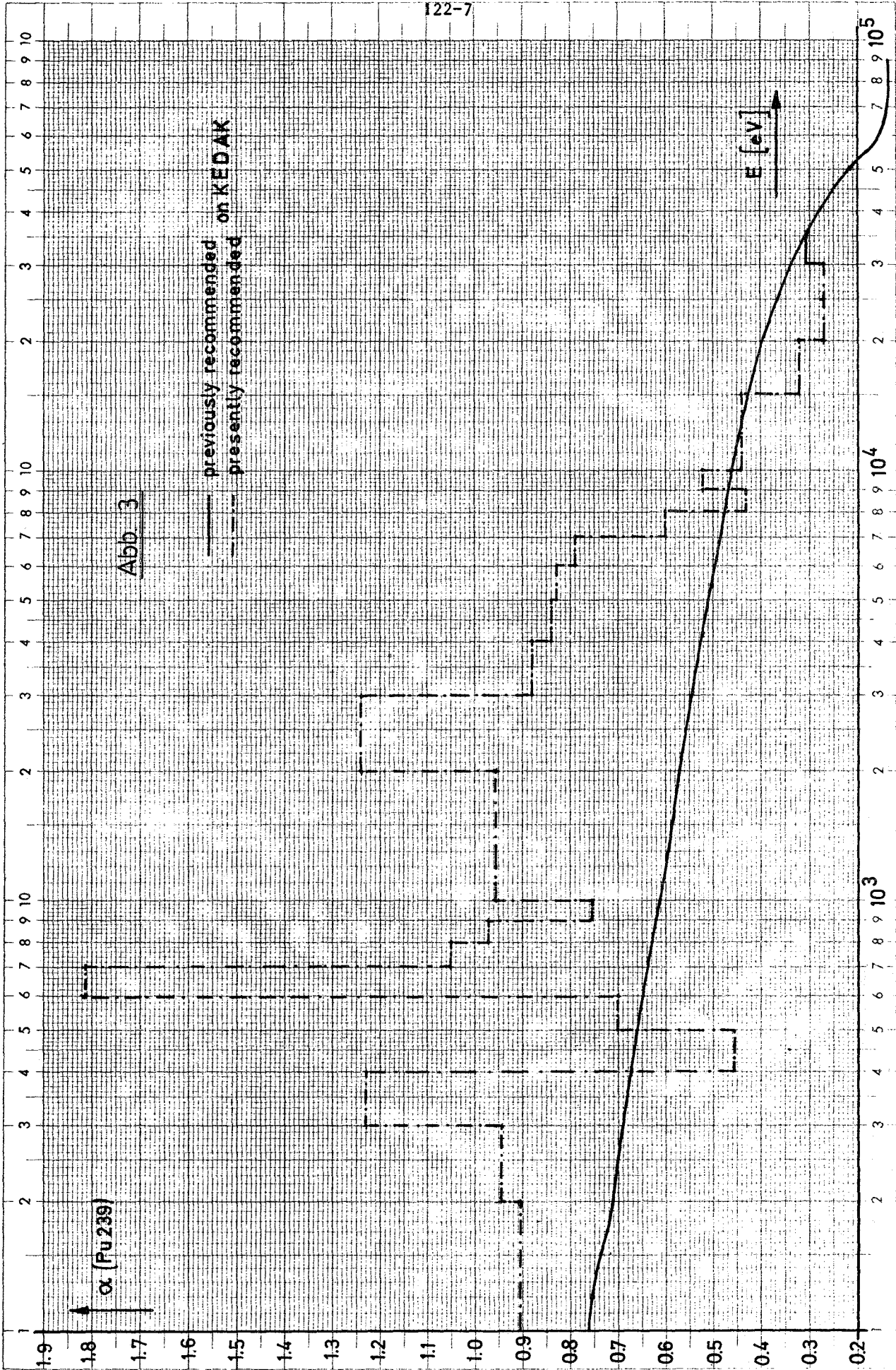
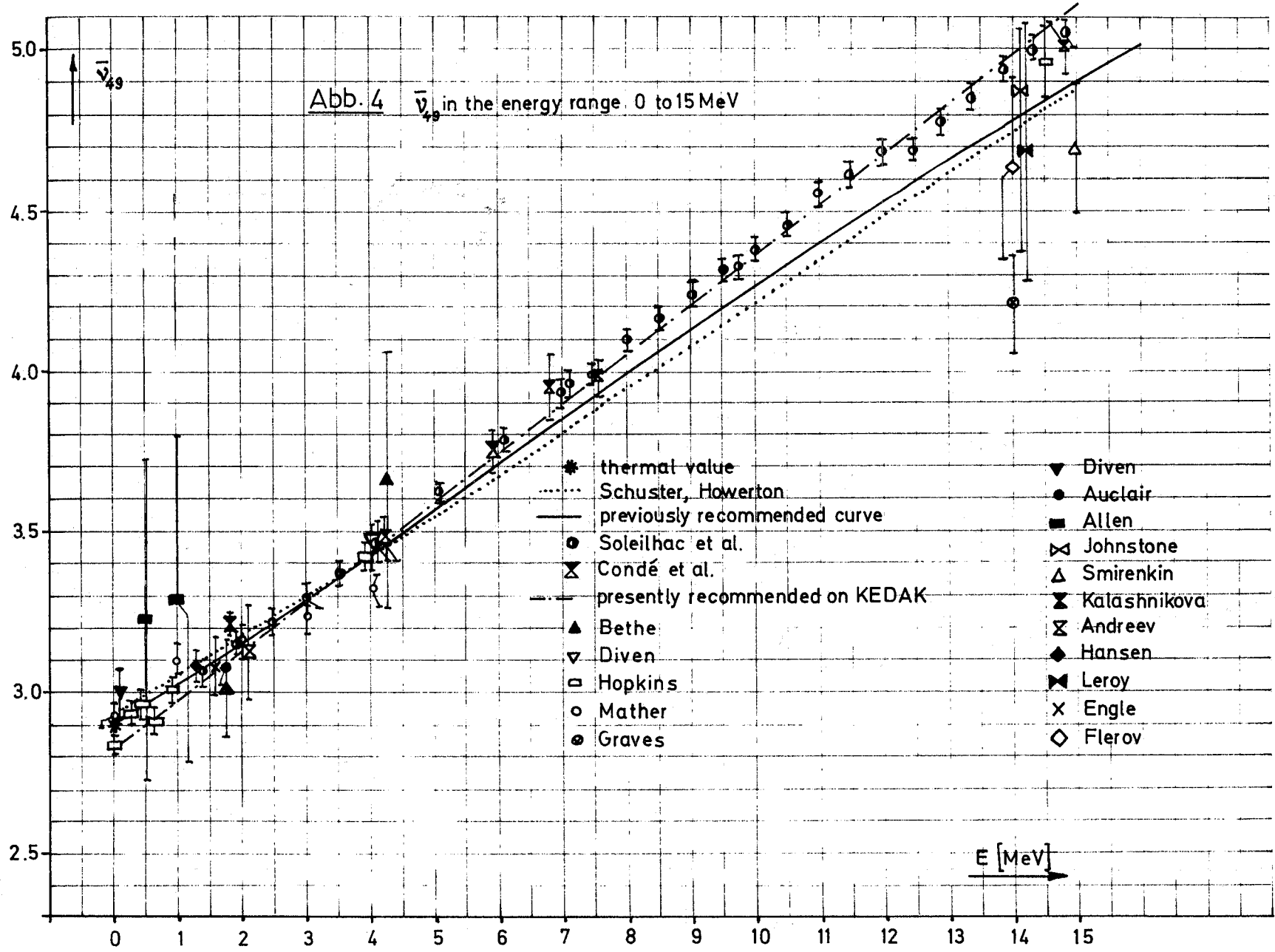


Abb 3

122-8



1222. Flußberechnungen1222.1 Entwicklung dreidimensionaler Multigruppendiffusionscodes

(W. Höbel, G. Jacobs, B. Stehle, INR)

Bei der Entwicklung dreidimensionaler Multigruppendiffusionscodes werden zwei Wege beschritten:

- 1) auf der Basis einer Überrelaxationstechnik (SØR)
- 2) auf der Basis eines dreidimensionalen ADI-Verfahrens.

Die Entwicklung des SØR-Verfahrens wurde aufgenommen wegen der ermutigenden Erfahrungen mit dem Karlsruher zweidimensionalen Diffusionsprogramm DIXY. DIXY ist seit 1966 in Gebrauch, und seine letzte FØRTRAN-Version, bestimmt für Computer der dritten Generation, insbesondere für die Karlsruher IBM/360-65, hat zwei bemerkenswerte Eigenschaften, was das Datamanagement betrifft:

- DIXY nutzt den ganzen freien Kernspeicher durch eine spezielle Dimensionierungstechnik.
- In Abhängigkeit von der Speicherzuteilung werden gewisse Matrixelemente wieder berechnet während der Iteration. Infolgedessen wird nur eingeschränkt Gebrauch von äußeren Speichern gemacht.

Diese beiden Prinzipien sind für das dreidimensionale Programm übernommen worden, ebenso wie die DIXY zugrunde liegende Iterationsmethode mit einer zyklisch reduzierten Vierzeilenblocküberrelaxation, die sich zumindest für Berechnungen schneller Reaktoren, wo Aufwärtsstreuung unwichtig ist, als sehr wirkungsvoll erwiesen hat.

Im Gegensatz zum DIXY-Programm ist der dreidimensionale SØR-Code nur für große und schnelle Computer bestimmt, z.B. für die IBM/360-85, um in vernünftigen Rechenzeiten brauchbare Ergebnisse zu erhalten. Ist L die Anzahl der zweidimensionalen Ebenen im dreidimensionalen Netz, M die Anzahl der Zeilen in einer Ebene und N die Anzahl der Maschenpunkte in einer Zeile, erfordert ein Problem mit $N \times M \times L$ Maschenpunkten mindestens einen Speicherplatz von ungefähr $N \times M \times L \times 15$ Kernspeicherworten und einen äußeren Speicher von grob $N \times M \times L \times \text{NGP} \times 8$ Worten; NGP=Anzahl der Energiegruppen.

Die numerische Lösungsmethode basiert auf der Siebenpunktformel und besteht aus der Kombination der sogenannten äußeren und inneren Iteration. Die Effektivität des Verfahrens wird verbessert durch:

(E1) Beschleunigung der äußeren Iteration (Potenzmethode). Die Erfahrungen mit dem zweidimensionalen DIXY-Programm zeigten, daß eine Einsparung von ungefähr 50% der Rechenzeit erreicht werden kann, wenn die folgende einfache und wirksame Beschleunigung in den dreidimensionalen Code eingebaut wird:

Vom ursprünglichen feinen Netz werden automatisch grobe Netze konstruiert und Quellen für die groben Netze berechnet, die schließlich durch Interpolation zu einer guten Quellschätzung für das feine Netz führen.

(E2) Schnelle innere Iteration

Die innere Iteration wird ausgeführt durch ein Blocküberrelaxationsverfahren mit vorausberechneten Beschleunigungsparametern, wobei die Blockgrößen der Koeffizientenmatrix gegeben sind durch die Zahl der Maschenpunkte in einer Koordinatenebene. Da diese "Ebeneniteration" wiederholt Inversionen von Matrizen von einem Umfang von $N \times M$ (gewöhnlich mehr als 1000) erfordert, wird eine zweite Iteration für diese Inversionen angewandt. Diese "Punktiteration" hat genau dieselbe Form wie in DIXY, was vernünftige Rechenzeiten verspricht.

(E3) Optimale Koeffizientenberechnung

Alle Koeffizienten und Matrixelemente werden ohne überflüssige numerische Operationen berechnet. Zu diesem Zweck werden alle Regionen mit konstanten Schrittweiten und homogenen physikalischen Eigenschaften ausgezeichnet, und Tafeln mit elementaren Ausdrücken werden für sie vorbereitet und gespeichert, so daß alle anderen Größen mit wenig Operationen berechnet werden können.

(E4) Optimales Datamanagement

Das Datamanagement kann optimalisiert werden durch Reduktion der Zahl der Daten. Da die Matrixelemente der Streu- und Spaltterme aus in (E2) erwähnten Tafeln mit nur wenigen Operationen bestimmt werden können, werden sie während der äußeren Iteration wiederberechnet. Alle anderen Matrixelemente

und Transformationsmatrizen der "Punktiteration" werden extern gespeichert, wenn der Kernspeicher zu klein ist. Dabei wird die Zahl der Daten eingeschränkt, indem nur ein Repräsentant für alle nebeneinanderliegenden Ebenen mit identischen Koeffizienten gespeichert wird. Andererseits werden die externen Datenmengen durch direkten Zugriff (direct access) verwaltet, und alle Ein- und Ausgabeoperationen sind in einer Subroutine zusammengefaßt. So muß nur diese Routine geändert werden, falls sich die Methode des direkten Zugriffs als ineffektiv herausstellt.

Im Augenblick ist das Karlsruher dreidimensionale SØR-Programm nahezu beendet und in Teilen getestet, und voraussichtlich kann bis zum Ende des Jahres ein Beispiel erfolgreich gerechnet werden.

Das zweite, eingangs erwähnte, dreidimensionale Multigruppendiffusionsprogramm verwendet zur Diskretisation ebenso wie das besprochene SØR-Programm der Sieben-Punkte-Formel, als äußere Iteration wieder die Potenzmethode, als innere Iteration jedoch eine kürzlich von A. Hadjidimo (1969) untersuchte Variante des Mehrschrittverfahrens in alternierenden Richtungen ('Alternating direction implicit iteration'-Verfahren, oder kurz 'ADI'-Verfahren).

Die oben in den Abschnitten E1, E3 und E4 dargelegten zeit- und platzsparenden Techniken werden größtenteils ebenfalls verwendet. Bekanntlich ist die Anwendung des ADI-Verfahrens auf allgemeine, dreidimensionale Probleme theoretisch nicht voll abgesichert. Auch fehlt es an numerischen Erfahrungen. Trotzdem sind wir zuversichtlich hinsichtlich der Wirksamkeit des 'ADI'-Verfahrens, weil wir vom gestellten Originalproblem zunächst ein sogenanntes Modellproblem ableiten, für letzteres die von J. Douglas (1962) vorgeschlagenen Iterationsparameter bestimmen und diese dann auf das Originalproblem anwenden. Die erste Version des Programms, von der wir bis Ende des Jahres numerische Ergebnisse erwarten, enthält das reine 'ADI'-Verfahren. Die bevorstehende Installation einer größeren Rechenmaschine (IBM/360-85) erlaubt es uns, in der zweiten Version des Programms das 'ADI'-Verfahren mit der Iteration von Lanczos zu koppeln. Diese Kombiiteration hat eine bessere theoretische Grundlage.

1222.2 Zur Berechnung des Neutronenflusses in sehr vielen (208) Energiegruppen (H.Huschke, D.Sanitz, D.Woll, J.Braun, INR)

1. Einleitung

Mit den bisherigen 26-Gruppenkonstantensätzen wurden gute Erfahrungen bei der Berechnung von Reaktoren gemacht. Es gibt aber eine Reihe von Problemen, die sich nur in einem sehr viel feineren Energiegruppenbild lösen lassen. Dazu gehören in erster Linie Vergleiche mit gemessenen Spektren. Geht man davon aus, daß im gesamten Energiegebiet eine Genauigkeit von 5 % in der Energieauflösung bei Messungen möglich ist, so kommt man zu Gruppenbreiten von $\Delta u \sim 0,05$, gemessen in Lethargieeinheiten.

Recht problematisch ist die Behandlung der Bremsung der Neutronen durch elastische Streuung in einem 26-Gruppenbild. Für nahezu alle wichtigen Streu- und Moderatormaterialien ist der maximale Lethargiegewinn pro Stoß wesentlich kleiner als die Gruppenbreiten. Eine befriedigende Beschreibung der Bremsung der Neutronen läßt sich erreichen, wenn die Gruppenbreiten kleiner sind als der maximale Lethargiegewinn pro Stoß für die wichtigsten Streuisotope. Dieser ist beispielsweise für Sauerstoff gleich 0,25, für Natrium gleich 0,174, für Eisen gleich 0,072, für Nickel gleich 0,077.

In einem 26-Gruppenbild läßt sich ferner die Spaltschwelle von U238 nur sehr ungenau erfassen. Sehr viel Energiegruppen schaffen hier Abhilfe.

In einem sehr feinen Gruppenbild ist die Diffusionsnäherung, die eine nicht konsistente P_1 -Näherung darstellt, nicht mehr ausreichend. Eine konsistente P_1 -Näherung ist erforderlich, da sich der Neutronentransport nicht mehr in jeder Energiegruppe für sich durch das Fick'sche Gesetz beschreiben läßt. Die Wechselwirkung mit den benachbarten Energiegruppen muß berücksichtigt werden.

2. Makroskopische Gruppenkonstanten für 208 Energiegruppen

Der Energiebereich, den die bisherigen Karlsruher Gruppenkonstantensätze in 26 Energiegruppen beschreiben, wird in 208 Energiegruppen aufgeteilt. Unterhalb 1KeV wird die Grobgruppeneinteilung der 26-Gruppenkonstantensätze beibehalten. Für Energien größer als 1KeV werden die bisherigen Grobgruppen in je 14 Feingruppen unterteilt. Die Unterteilung erfolgt jeweils äquidistant

in der Lethargie. Man erhält auf diese Weise 196 Feingruppen oberhalb 1KeV und 12 Grobgruppen unterhalb 1KeV. Die Gruppenbreiten in Lethargieeinheiten sind in Tab. 2 angegeben.

Gruppennummern	1 - 42	43 - 60	61 - 112	113 - 196	197 - 208
Gruppenbreiten	0,0343	0,0407	0,0493	0,055	0,77

Tabelle 2:

Die Feingruppen oberhalb KeV sind in je fünf Intervalle aufgeteilt. Man erhält auf diese Weise 980 Intervalle. Damit lassen sich die Wirkungsquerschnitte der leichten und mittelschweren Isotope in voller Energieabhängigkeit beschreiben. Die arithmetischen Mittelwerte über die Intervalle sind für alle Querschnittstypen auf der Datei GRUBA gespeichert. Für die schweren Isotope werden auf GRUBA die Feingruppenmittelwerte und f-Faktoren gespeichert.

Die Berechnung der makroskopischen 208-Gruppenquerschnitte erfolgt unter der Annahme einer konstanten Stoßdichte in einer Feingruppe. Das bedeutet eine Wichtung der Multigruppenkonstante mit dem reziproken totalen makroskopischen Querschnitt der Mischung. Das σ_0 -Konzept wird nur noch für die schweren Elemente beibehalten. Die Berechnung der makroskopischen Gruppenquerschnitte für konsistente P_1 -Rechnungen erfolgt im Programm GRUCAL.

Die Datei GRUBA enthält die notwendige Information für sämtliche Isotope, die in den bisherigen 26-Gruppenkonstantensätzen enthalten sind. Folgende Isotope sind bis jetzt zugänglich:

H, C, N, O, Na, Mg, Al, Si, Cl, Ti, Cr, Fe, Ni, Nb, Mo, U 235, U 238, Pu 239.

3. Das Programmsystem KARCOS

Im Zusammenhang mit der Aufgabe, den Neutronenfluß schneller Reaktoren in vielen Energiegruppen zu berechnen, ist in einer ersten Aufbaustufe eine Reihe von Programmen und Dateien entstanden, die unter dem Namen KARCOS

zusammengefaßt sind. KARCOS wird zur Zeit auf einer IBM 360/65 betrieben. Kennzeichnend für KARCOS ist einerseits die durch die Multigruppenstrukturen bedingte, relativ große Anzahl zum Teil sehr heterogener Daten und andererseits die konsequente Berücksichtigung der Konsistenten P_1 -Approximation.

Im Einzelnen enthält KARCOS zur Zeit:

- a) Die Kerndaten-Datei GRUBA, die vorgesehen ist zur Berechnung makroskopischer 208-Gruppenkonstanten. GRUBA enthält Daten von etwa 50 Isotopen.
- b) Das Programm zur Berechnung makroskopischer Gruppenkonstanten GRUCAL. GRUCAL zeichnet sich durch die Verwendung einer Kontrolldatei, die die konkreten Berechnungsvorschriften extern festlegt, durch große Flexibilität aus. GRUCAL berechnet materialabhängige 208-Gruppenkonstanten. An der Erweiterung auf isotonenabhängige 208-Gruppenkonstanten wird gearbeitet.
- c) Ein OD-Programm zur konsistenten und inkonsistenten P_1 -Rechnung. Es berechnet für beliebige Gruppennzahlen Eigenwert, Fluß und div Strom.
- d) Ein ID-Programm zur konsistenten und inkonsistenten P_1 -Rechnung. Es berechnet für beliebige Gruppennzahlen Eigenwert, Fluß div Strom sowie zonen- und energiegruppenabhängige Bilanzen (KFK 1258).
- e) Ein Programm zur Kondensation makroskopischer Gruppenkonstanten. Es werden makroskopische Gruppenkonstanten bei Vorgabe von Spektren -z.B. aus dem OD oder dem ID-Programm stammend - und neue Gruppengrenzen kondensiert. Die Kondensation geschieht P_1 -Konsistent, d.h. der Transportquerschnitt und die ersten Legendre-Momente der elastischen Streuung können über ein eigenes Spektrum, wie $\text{div } j$, kondensiert werden. Insbesondere können aus 208-Gruppenkonstanten 26-Gruppenkonstanten der ABN-Gruppenstruktur erstellt werden.
- f) Einige Hilfs- und Auswerteprogramme (z.B. Drucken von Gruppenkonstanten, Vergleich von Gruppenkonstanten, graphische Darstellung von Spektren, graphische Darstellung von ortsabhängigen Reaktionsraten).

4. Einige Ergebnisse

Für eine Reihe von Isotopen wurden 208-Gruppenspektren für das unendlich ausgedehnte Medium berechnet. Dabei wurde eine Neutronenquellverteilung der Form des Spaltspektrums von U 235 angenommen. Als Beispiel sind in Abb. 5a, b die Neutronenflußdichte und der totale Wirkungsquerschnitt von Eisen, $\phi(u)$ und Σ_t über der Lethargie u wiedergegeben (über der Abszisse ist die Gruppeneinteilung der Karlsruher 26-Gruppenkonstantensätze aufgetragen, unterhalb die Lethargie mit Bezugsenergie $E_0 = 10,5$ MeV). Die gewählte 208-Gruppendarstellung erlaubt eine gute Wiedergabe der wichtigsten Resonanzen der leichten und mittelschweren Elemente.

In Abb. 6 ist die Neutronenflußdichte für die Core-Mischung von SNEAK-3A2 dargestellt. Es wurde eine OD P_1 -Rechnung durchgeführt. In Abb. 7 ist der makroskopische totale Wirkungsquerschnitt der Core-Mischung wiedergegeben.

Die in Abb. 8 wiedergegebene Stoßdichte für die Core-Mischung von SNEAK-3A2 hat eine Resonanzstruktur. Dies zeigt deutlich, daß für die wichtigsten Resonanzen der leichten und mittelschweren Elemente die NR-Näherung nicht gültig ist.

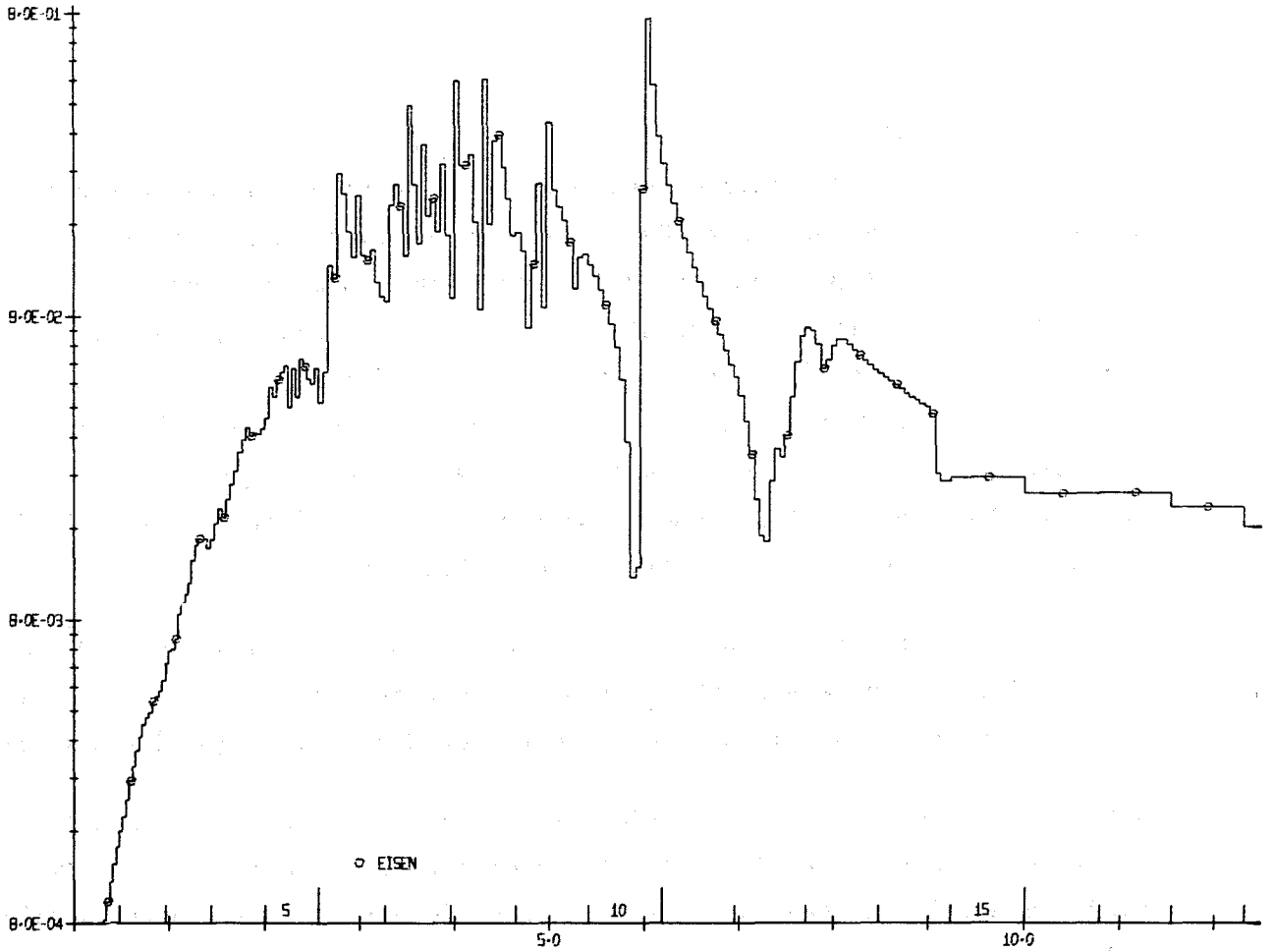


Abb. 5a:

0-DIM. 200-GR.-SPEKTRUM, 300 GRAD K.

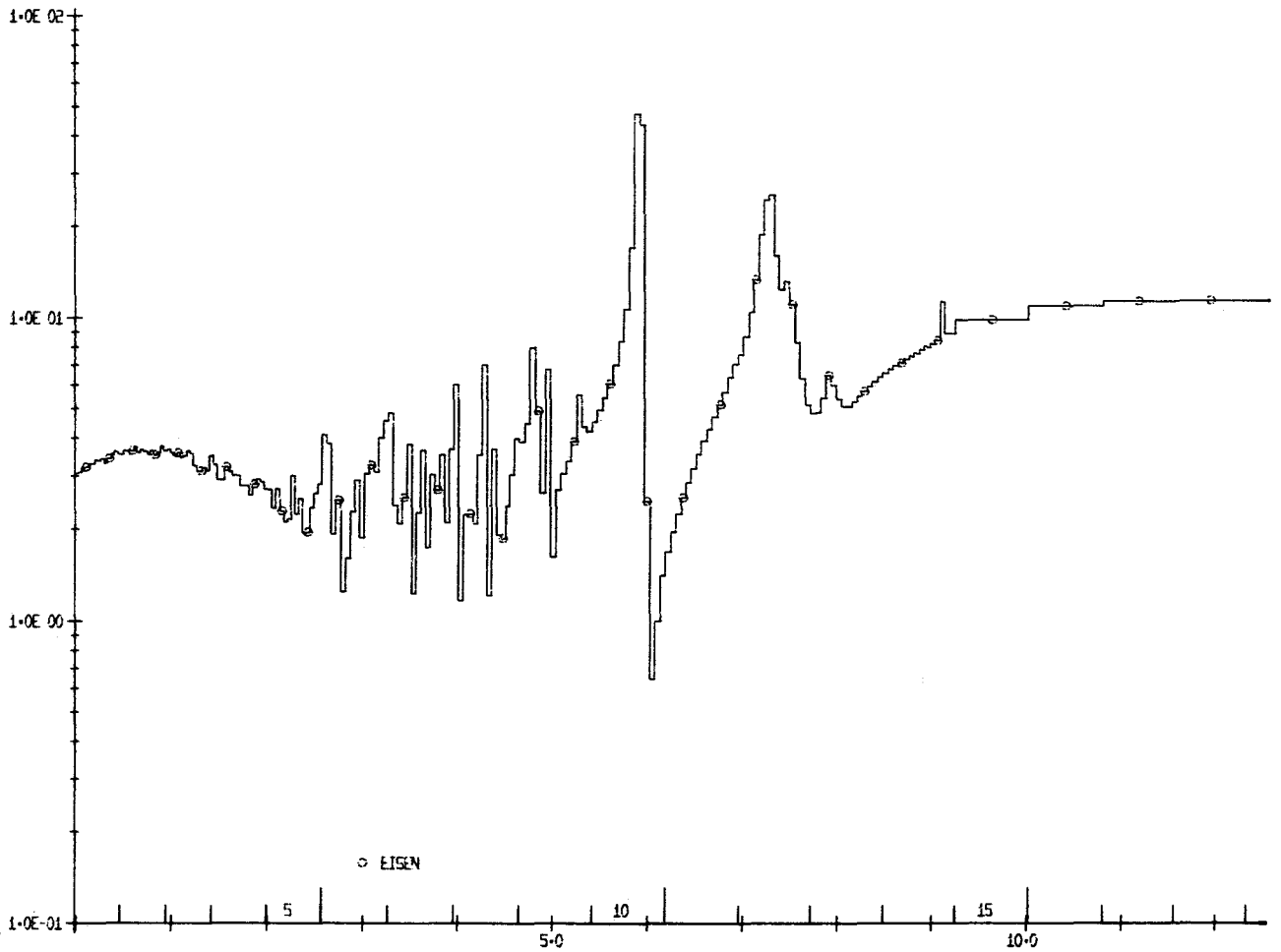


Abb. 5b:

200-GR.- 300 GRAD K.- STOT

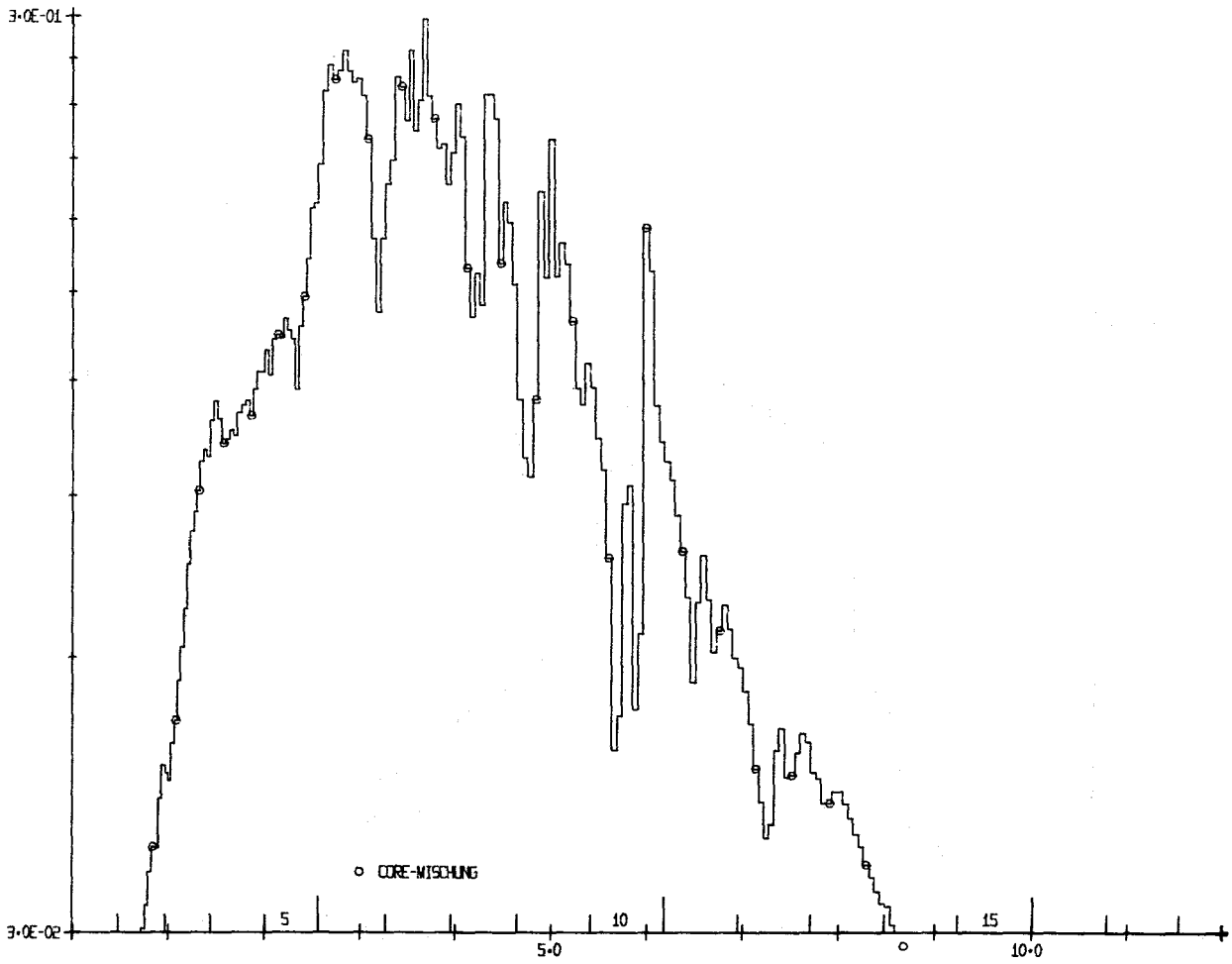


Abb. 6:

0-DIM. ZOB-GRUPPENSPEKTRUM, 300 GRAD K., SNEAK 3A-2

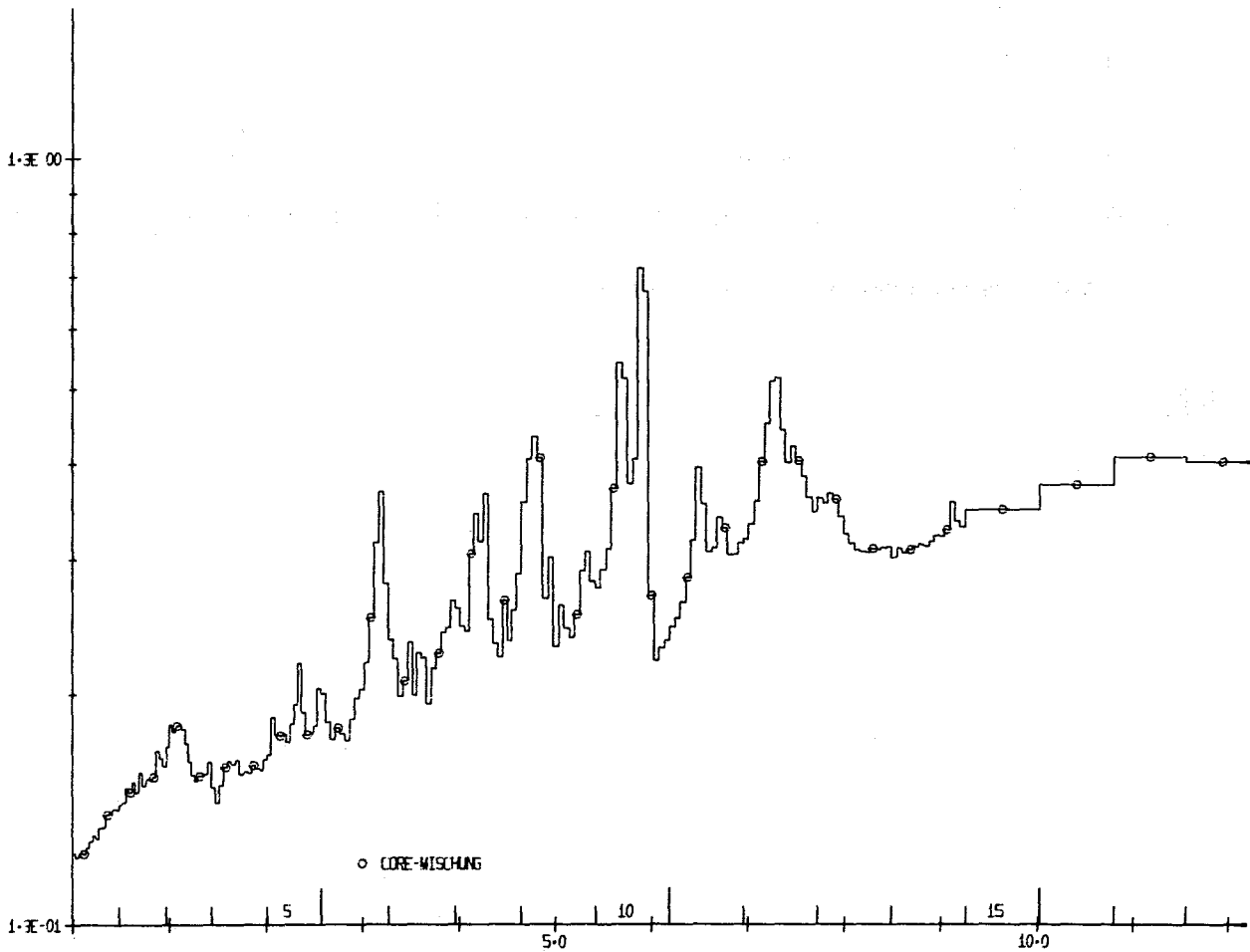


Abb. 7:

ZOB-GRUPPEN, 300 GRAD K., SNEAK 3A-2, STOT

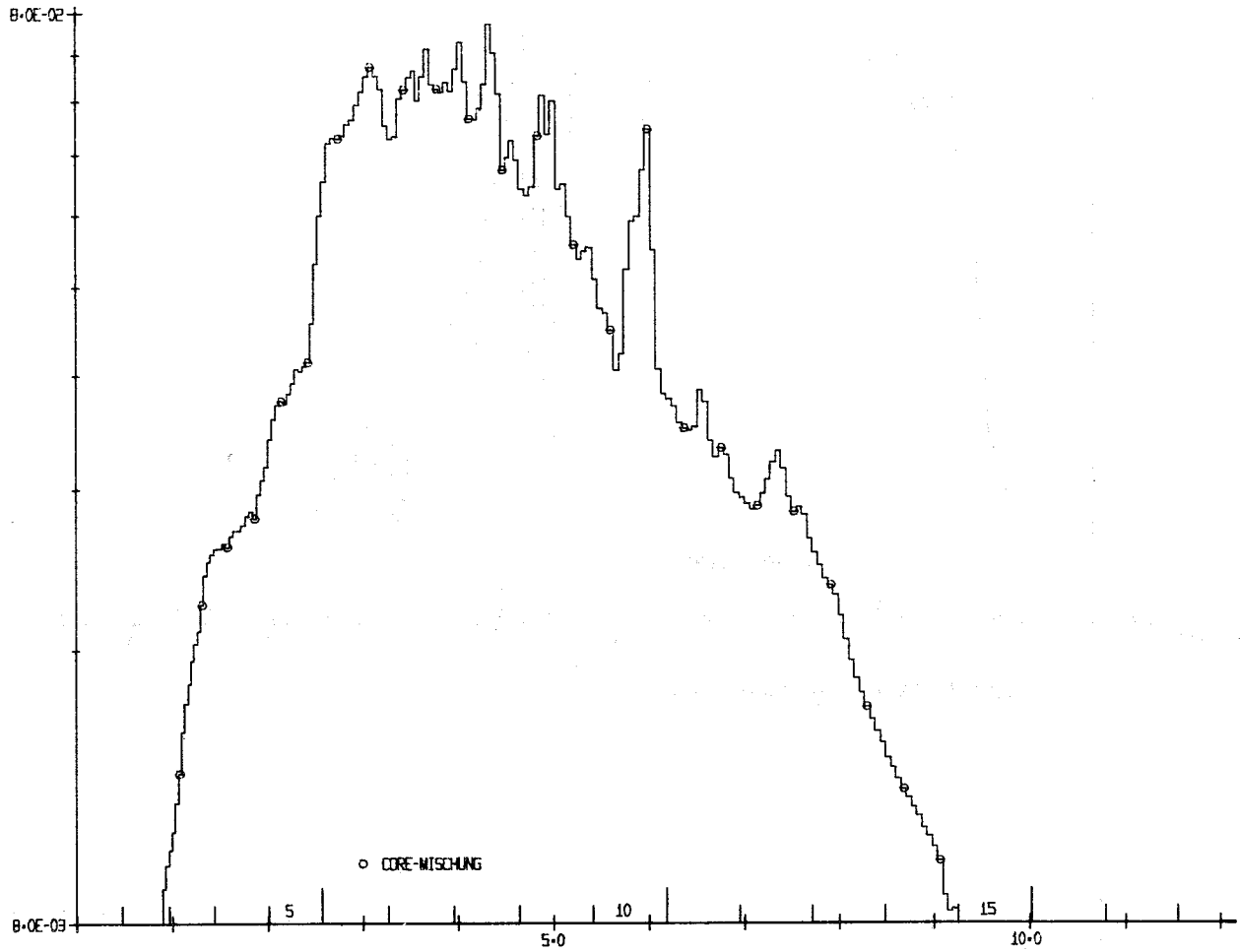


ABB-00008 0-DIM- 208-GRUPPENSPEKTRUM • STDT, 300 GRAD K., SNEAK 3A-2

Abb. 8:

123. Sicherheit schneller Reaktoren1231. Theoretische Untersuchungen1231.1 Untersuchungen zur ortsabhängigen Dynamik des Brutreaktors

(H. Bachmann, L. Mayer, INR)

Zweidimensionaler quasistatischer Kinetikcode:

Mit dem zur Zeit in Arbeit befindlichen Programm soll eine erste Codefassung erstellt werden, die zwar einige Effekte nur näherungsweise oder gar nicht berücksichtigt, die jedoch so aufgebaut ist, daß eine Erweiterung und die Integration neuer Programmteile organisatorisch keine großen Probleme bietet. Aufgrund der Komplexität der Methode und der Vielfalt der benützten Programme handelt es sich eigentlich um die Erstellung eines kleinen Programmsystems.

Der Vorteil der quasistatischen Näherung beruht auf ihrer Flexibilität, die z.B. eine Berücksichtigung von Coreverformungen gestattet, verbunden mit ihrer Rechengeschwindigkeit im neutronenphysikalischen Teil, der mit den null-dimensionalen Kinetikgleichungen arbeitet unter Neuberechnung von Flußformfunktionen nach großen Zeitintervallen. Im Gegensatz zu einem vollnumerischen Code wird daher die Berücksichtigung der thermodynamischen Rückwirkungen einen wesentlichen Beitrag zur Rechenzeit leisten.

Das Programm zerfällt in einen "statischen" Teil, in dem die Eingabe verarbeitet wird, und den eigentlichen "Dynamik"-Teil. Als Eingabe verlangt das Programm in seiner jetzigen Form die Koeffizienten von Näherungskurven für die Temperaturableitungen der Wirkungsquerschnitte, die zur Berechnung der Doppler-Rückwirkung gebraucht werden. Zur automatisierten Erstellung dieser Näherungskurven wird ein unabhängiges Vorprogramm erstellt, das im Rahmen von Nusys unter Benutzung des Doppler-Programms von R. Fröhlich¹⁾ arbeitet.

Das Dynamik-Programmsystem arbeitet mit einer Reihe von Modulen, die bereits existieren und z.T. für diesen Zweck angepaßt werden: DIXY zur Berechnung der zweidimensionalen Flußformfunktionen, AIREK²⁾ zur Lösung der null-dimensionalen Kinetikgleichungen, den Nusys-Querschnittsprogrammen, den zweidimensionalen Störungsprogrammen und dem Thermodynamikteil der RADYVAR-Fassung von 1968³⁾.

Die Verbindung zwischen diesen Modulen und den neu geschriebenen Programmteilen stellt das bereits erwähnte kleine Programmsystem her, das unter Benutzung der Erfahrungen erstellt wurde, die mit Nusys und den Weiterentwicklungen von Nusys gewonnen werden. Die wichtigsten Einschränkungen der ersten Fassung sind folgende:

1. Im Anfangszustand müssen die Reaktoren kritisch sein.
2. Voiding kann nicht behandelt werden.
3. Platzen von Brennelementen kann nicht berücksichtigt werden.

Alle zur ersten Fassung gehörenden Programme sind geschrieben. Ausgetestet ist bis jetzt der "statische" Teil des Programms, während der "Dynamik"-Teil noch längere Testrechnungen erfordert. Die ersten Produktionsläufe mit dem Code werden in erster Linie dem Sammeln von Erfahrungen mit der quasistatischen Näherung und dem Vergleich mit anderen Methoden dienen.

- 1) R. Fröhlich, PSB-Bericht Nr. 99/64
- 2) L.R. Blue, M. Hoffman, AMTD-131 (1963)
- 3) G. Kessler, KFK-Bericht 781 (1968)

1232. Spannungs- und Verformungsanalysen von Reaktorbauteilen

(T. Malmberg, R. Krieg, IRE)

Ziel dieser Arbeiten ist es, unter Berücksichtigung des elastischen, plastischen und viskosen Materialverhaltens Methoden zur Spannungs- und Verformungsanalyse von Reaktorbauteilen zu entwickeln sowie Computerprogramme für spezielle Probleme bereitzustellen.

1232.1 Festigkeitsanalysen von Brennstabhüllrohren

1. Hüllrohre für Na-gekühlte Reaktoren

Eine halbanalytische Methode zur Behandlung des ebenen Verzerrungszustandes unter Berücksichtigung des thermoelastischen, plastischen und viskosen Materialverhaltens wurde entwickelt. Auf dieser Grundlage wurde ein Computerprogramm zur Untersuchung von Hüllrohren mit integralen Rippen codiert, um demnächst Anwendung für die Spannungsanalyse der FR3-Hüllrohre zu finden.

Bisher ist das Programm auf das thermoelastische Materialverhalten beschränkt. Eine Erweiterung zur Berücksichtigung viskosen Materialverhaltens ist vorgesehen.

2. Hüllrohre für gas- oder dampfgekühlte Reaktoren

Ausgehend von allgemeinen Variationsprinzipien der Kriechmechanik für kleine Verzerrungen, aber nicht verschwindene Rotationen, wurden spezielle Variationsprinzipie für dünnwandige Flächentragwerke abgeleitet. Diese Prinzipie wurden dazu verwandt, um halbanalytische und rein numerische Verfahren zur Behandlung des Kriechbeulverhaltens von Hüllrohren zu entwickeln.

Ein Computerprogramm zur Untersuchung des Einflusses eines rotations-symmetrischen Temperaturfeldes auf die Standzeit wurde codiert. Es wurden Rechnungen zum Vergleich mit der Theorie von Hoff et al. durchgeführt, und der Einfluß der Wärmespannungen und der Temperaturabhängigkeit der Kriechparameter wurde untersucht.

Eine weitere Methode zur Untersuchung des Einflusses eines nicht-rotations-symmetrischen Temperaturfeldes ist in Vorbereitung.

1232.3 Spannungs- und Verformungsanalysen für Rohrleitungssysteme

Ein Verfahren zur Abschätzung des Einflusses von Toleranzen in den Abmessungen und elastischen Materialkennzahlen eines Rohrleitungssystems auf die Spannungen wurde erstellt.

1233. Lokale Kühlungsstörungen

Die begonnenen theoretischen und experimentellen Untersuchungen zielen auf die Beantwortung folgender Fragen:

- Unter welchen Bedingungen führen lokale Strömungshindernisse in einem Brennelement zu örtlichen Sieden?
- Wird der Kühlmitteldurchsatz durch das betroffene Brennelement bei örtlichem Sieden meßbar verändert?
- Kommt es in der Siedezone zur Überhitzung und zum Versagen von Hüllrohren infolge Dryout?

Eine erste Gruppe von Untersuchungen bezieht sich auf die Strömungs- und Temperaturverhältnisse in der kühlungsgestörten Zone, eine zweite auf die Vorgänge bei lokalem Sieden.

1233.1 Strömungs- und Temperaturverteilung hinter lokalen Verstopfungen

1. Theoretische Untersuchungen lokaler Kühlungsstörungen in Brennelementen

(W. Baumann, H. Hoffmann, IRB)

Der Einfluß lokaler Kühlungsstörungen auf die Strömungs- und Temperaturverteilungen im Brennelement wurde für einen Bündelausschnitt (61 Stäbe) in SNR-Abmessungen mit Hilfe des modifizierten MISTRAL-Programmes ermittelt. Dabei wurden folgende Parameter variiert:

- Abstandshaltergeometrien und die damit verbundene Größe der Kühlmittelquervermischung,
- Lage der Störung in verschiedenen Kanälen des Bündelquerschnittes,
- axiale Lage einer 10 cm langen Störung,
- Schichtstärke der im Kanal aufgetragenen Störung,
- Anzahl der gestörten Kanäle.

Die Untersuchungen werden z.Zt. ausgewertet. Die Ergebnisse werden bei der Auslegung der speziellen Versuchsvorhaben des IRB berücksichtigt.

2. Versuche zur Strömungs- und Temperaturverteilung hinter lokalen Verstopfungen

(D. Kirsch, R. Meyder, G.F. Schultheiß, P.Wirtz, IRE)

Nach Vorversuchen mit Luft sind Experimente mit einem Modell des SNR-Brennstabbündels im Wasserkreislauf des IRE in Vorbereitung. Ziel der Versuche ist, die Totwasserabgrenzung sowie die Geschwindigkeits- und Temperaturfelder im Totwasser zu bestimmen. Die Ergebnisse sollen, wenn möglich, mit existierenden Codes ausgewertet werden. Dazu wurden verschiedene Codes auf ihre Eignung untersucht.

1233.2 Untersuchungen zum lokalen Sieden im Natriumsiedekreislauf

(K. Schleisiek, IRE)

Der Ablauf der Siedevorgänge bei lokalen Kühlungsstörungen soll zunächst am sogenannten Negativbündel untersucht werden. Hierbei handelt es sich um eine Teststrecke, bei der in einem induktiv beheizten Rohr ein profilierter Verdrängerkörper angebracht ist. Dadurch werden miteinander zu einem Kreisring verbundene Unterkanäle erzeugt, die in ihren Abmessungen denen des SNR-Brennelementes entsprechen. Die erste Teststrecke dieser Art befindet sich in der Fertigung. Sie hat 6 Unterkanäle, von denen 4 durch eine eingeschweißte Platte vollständig verschlossen werden.

Die Instrumentierung besteht aus einer Anzahl von Thermoelementen zur Temperaturmessung und Blasendetektion, aus zwei Durchflußmessern und einem Quarzkristall-Druckaufnehmer zur Messung der Durchsatz- und Druckpulsationen.

Ziel der Versuche ist

- Die Messung der Temperaturfelder im Bereich der Störung bei reiner Flüssigkeitsströmung.
- Untersuchung der Siedephänomene:
Siedeform, Blasenwachstum und Kondensation, Blasengröße, Frequenz, Dryout-Bedingungen.

Außerdem ist vorgesehen, die Temperaturfelder an einer gleichen Teststrecke mit Wasser zu bestimmen. Diese Versuche werden über die Übertragbarkeit der Ergebnisse von Analogieexperimenten (s. 1233.1) auf Natrium Aufschluß geben. Erste Versuchsergebnisse werden bis zum Jahresende vorliegen.

1233.3 Brennelementverhalten unter Siedeverzug (BEVUS), Untersuchung in der Natrium-Behälter-Anlage (NABEA) (M.Cramer, F.Huber, IRE)

Die Montage der Versuchsapparatur (Abb. 1) wurde abgeschlossen, und die Inbetriebnahmetests wurden durchgeführt. Auf Verlangen des TÜV kamen noch einige zusätzliche Sicherheitseinrichtungen, z.B. gegen Temperaturüberschreitung des Versuchsbehälters und gegen Erdschluß der Begleitheizung, zum Einbau.

Im Rahmen der Inbetriebnahme wurden zunächst ohne Natriumfüllung alle elektrischen Systeme überprüft und das Heizelement für 30 Sekunden mit Nennleistung belastet. Zur Prüfung und Eichung der Druckmesseinrichtung (4 Quarzdruckfühler, Registrierung über Ladungsverstärker mit Lumiscrypt) wurde der Versuchsbehälter unter 3 atü Schutzgasdruck gesetzt und der Druck schnell entspannt.

Die Druckentlastungsvorrichtung wurde nach Einfüllen des Natriums erstmals bei niedriger Natriumtemperatur und ohne Natriumüberdruck getestet. Mit diesem Versuch sollten die Auslegung und die mechanische Funktion dieser Vorrichtung sowie die Beschleunigungsmeßeinrichtung und der entstehende Geräuschpegel in der Versuchshalle überprüft werden. Der Versuch erbrachte eine gute Übereinstimmung mit den Auslegewerten. Nach 50 msek. wurde ein Weg von 31 cm zurückgelegt, der daran anschließende Bremsweg betrug 19 cm. Die gemessene Beschleunigung deckt sich sehr gut mit den rechnerisch ermittelten Werten. Der Geräuschpegel blieb unterhalb 128 dB, so daß die Einwirkung auf das Personal der Warte in zumutbaren Grenzen bleibt.

Während des Aufheizens des Versuchsbehälters auf die vorgesehene Betriebstemperatur von 600°C wurde die im oberen Temperaturbereich erforderliche Kühlung der Druckfühler mit der Schutzgas-Umwälzanlage erprobt; sie erwies sich als ausreichend. Auch die Dichtlippe des Druckentlastungskolbens ist bei einer Temperatur von 600°C und einem Natriumüberdruck von 5 atü verhältnismäßig gut dicht (Leckrate ca. 0,1 l/min.). Die Abkühlung der Apparatur unter Verwendung der in der NABEA vorhandenen Installationen konnte wie vorgesehen durchgeführt werden. Der erforderliche Zeitbedarf ist allerdings infolge einer im Versuchsbehälter entstehenden Temperaturschichtung größer als erwartet.

Die Meßdatenerfassung mit der ERA-Anlage bereitete zunächst einige Schwierigkeiten, da den Meßwerten starke Störungen überlagert waren. Durch Einbau von zusätzlichen Filtern wurden diese Störeinflüsse weitgehend reduziert.

Der erste volle BEVUS-Versuch, bei dem das unter 5 atü Druck stehende Natrium im Heizelement, ausgehend von 600°C schnell auf über 1000°C aufgeheizt und dann durch plötzliche Druckentlastung zur Verdampfung gebracht werden soll, mußte infolge einer Störung in der Stromzuführung zum Heizelement vorzeitig abgebrochen werden. Nach Einschalten der Elementheizung kam es zum gleichzeitigen Ausfall von ca. 95 % aller Heizersicherungen, ohne daß die Heizer Störungen aufwiesen, wie eine spätere Kontrolle ergab. Bei weiteren Versuchen unter etwas geänderten Randbedingungen trat die gleiche Erscheinung erneut auf, zum Teil allerdings weniger stark ausgeprägt.

Einzelne Heizer (oder deren Zuleitungen) erwiesen sich danach meist als defekt.

Diese Erscheinung wird zur Zeit auf ein sehr geringes Natriumleck, entweder in der Tragplatte, in einem Heizermantelrohr oder in den verbindenden Schweißnähten zurückgeführt. Hier hatten sich bereits bei der Fertigung erhebliche Schwierigkeiten ergeben, die geforderte Dichtheit zu erreichen. Es kann angenommen werden, daß das eingedrungene Natrium zunächst eine Brückenbildung zwischen einer Stromzuführung und der Masse verursacht, die zu einem Lichtbogen führt. Die dabei gebildeten Ionen zünden dann wegen der vorliegenden sehr beengten Raumverhältnisse weitere Lichtbogen an den benachbarten Elementen, d.h. es kommt zu einer Propagation. Hierbei ist nicht auszuschließen, daß auch bei der Ionisierung das Natrium eine maßgebende Rolle spielt. Weitere Anhaltspunkte über die Störungsursache, bzw. den Störungsmechanismus wird die nach dem Ausbau des Heizelementes mögliche Besichtigung und Nachuntersuchung ergeben.

Um die aufgetretene Störung in Zukunft zu vermeiden, wird die Anlage ergänzt. Der gesamte Raum, in dem die Zuleitungen zu dem Heizelement verlegt sind, soll während des Versuches unter einem Schutzgasdruck gehalten werden, der über dem Natriumdruck liegt, so daß Natriumlecks in diesen Raum ausgeschlossen werden können. Außerdem werden die Anschlüsse der Zuleitungen an die einzelnen Heizer bei dem nächsten Versuchselement zusätzlich isoliert.

Druckentlastungs =
vorrichtung

SB. = Schutzbehälter
VB. = Versuchsbehälter

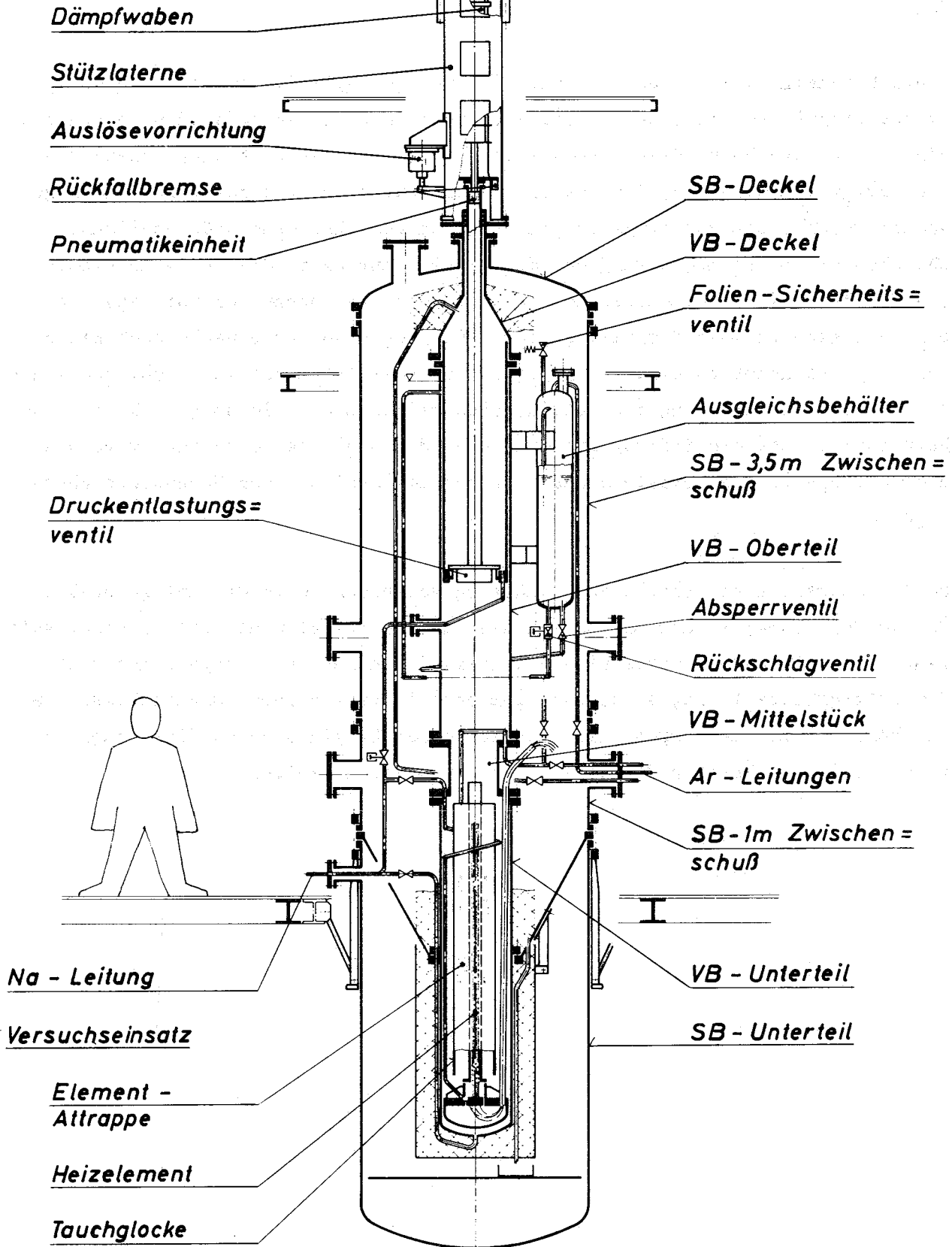


Abb. 1 Schema des BEVUS - Versuchsstandes

1233.5 Theoretische Untersuchungen zum lokalen Sieden (K.Gast, IRE)

Es wurde ein theoretisches Modell zum Wachstum und zur Rekondensation einzelner Siedebblasen in einem Brennstabbündel entwickelt. Dieses Modell gilt für den Fall, daß das Blasenwachstum im wesentlichen durch die Siedeüberhitzung in einem als kugelsymmetrisch angenommenen Temperaturfeld und durch Reibungs- und Massenkräfte der verdrängten Flüssigkeit bestimmt wird. Als Parameter wurden die Siedeüberhitzung, der radiale Temperaturverlauf bei Siedebeginn und der axiale Ort der Siedezone im Kern variiert. Erste Ergebnisse liefern folgende Aussagen:

1. Bei Überhitzungen von mehr als 20°C verursacht lokales Sieden deutlich meßbare Durchsatzschwankungen am Brennelementaustritt; das gilt insbesondere auch für solche Kühlungsstörungen, die vor Siedebeginn über die Messung des Gesamtdurchsatzes oder der mittleren Austrittstemperatur noch nicht nachweisbar sind.
2. Die Lebensdauer von Siedebblasen bis zu ihrer vollständigen Kondensation beträgt maximal etwa 30 ms. Mit einer Überhitzung der Hüllrohre infolge Dryouts ist nicht zu rechnen.

Diese Aussagen bedürfen noch einer experimentellen Bestätigung. Für geringen Siedeverzug von nur wenigen $^{\circ}\text{C}$ ist dieses Modell nicht anwendbar.

1233.6 Sonstige Untersuchungen

(I. Kornelson, K.Thormeier, IRE)

Im letzten Quartal wurde am Na-Reinigungsstand ein im IRE konstruierte, automatisch arbeitende Füllstandsmeßeinrichtung mit Erfolg in Betrieb genommen.

Nach Abschluß der Versuche zur Bestimmung des zeitlichen Lösungsverhaltens von Edelgasen in Natrium ist ein Bericht erschienen.

Veröffentlichung zu 123:

(1) K. Thormeier

Die Löslichkeit von Edelgasen im Reaktorkühlmittel Natrium und sich daraus ergebenden Sicherheitsaspekte

KFK-Bericht 1166, Mai 1970

124. Entwicklung von Instrumenten und Signalverarbeitung zur Kernüberwachung1241. Nachweis von Durchflußstörungen an Brennelementen1241.1 Thermoelement-Entwicklung für SNR (H. Twelmeier, Siemens,
Wernerwerk für Meßtechnik)

Im Rahmen der Bestrahlungsversuche wurde der Bestrahlungseinsatz Mol-IT, der 60 Thermoelemente von 1,5 mm und 20 Thermoelemente von 3,0 mm Durchmesser enthält, nach Erhalt einer Neutronendosis von etwa $2 \cdot 10^{21}$ Neutronen/cm² aus dem BR-2 herausgenommen. Im weiteren wurden für die geplanten Bestrahlungen bei hoher Temperatur Vorarbeiten begonnen mit dem Ziel, die Verwendbarkeit des Schmelzpunktes von Magnesium (650°C) als Temperaturnormal für die Bestrahlungskapsel Mol-3G nachzuweisen.

Im konventionellen Teil der Arbeiten wurden Untersuchungen zu folgenden Punkten durchgeführt:

Dichte des Isolationsmaterials, Dichtigkeit der Thermoelemente, Isolationswiderstand und Zeitkonstante.

1242 Hüllschadenüberwachung von Brennelementen1242.1 Abscheidung und Nachweis von Spaltgas am Brennelementaustritt

(R. Bartholomay, K. Gast, IRE)

Die Versuche zur Entwicklung eines schnell ansprechenden Hüllschadendetektions-systemes im Wasserkreislauf des IRE wurden mit der erfolgreichen Erprobung der Referenzanordnung vorläufig abgeschlossen. Diese Anordnung besteht aus einem Spaltgasvorabscheider im Brennelementaustritt, in dem Gasblasen im Kühlmittel zur Strömungsachse hin konzentriert werden, und einem Endabscheider in der Instrumentenplatte, der mit dem bei Interatom entwickelten Meßkopf kombiniert ist. Im Endabscheider werden Blasen zu einer geschlossenen Gassäule gesammelt und mit einer elektrisch beheizten Temperaturmeßsonde nachgewiesen.

Die Nachweisgrenze variiert im Bereich von 50% bis 100% des Nennkühlmitteldurchsatzes zwischen etwa 2 cm³ und 10 cm³ eingespeister Gasmenge. Sie ist nur wenig abhängig von der Gasfreisetzungsrate und der Größe bzw. Verteilung der Gasblasen im Kühlmittel. Das gilt für Injektionszeiten zwischen 0,05 s und einigen Sekunden und Blasendurchmesser oberhalb etwa 0,3 mm. Die Temperaturanstiegsgeschwindigkeit der Sonde beträgt 400°C/s bei einer Heizleistung von 150 W.

Es wird erwartet, daß mit diesem Gerät einzelne Hüllrohrschäden innerhalb von 1 s nachgewiesen werden können, und zwar weitgehend unabhängig von der Größe des Lecks.

Ein Abschlußbericht ist in Vorbereitung.

Nach Umbau des Wasserkreislaufes sind noch folgende Untersuchungen geplant:

- Bestätigende Versuche bei erhöhter Wassertemperatur und damit verbesserter hydraulischer Ähnlichkeit.
- Kühlmittelvermischung im Zyklonabscheider. Es wird erwartet, daß Temperaturgradienten im Kühlmittel durch Vermischung genügend weit abgebaut werden, und daß deshalb eine spezielle Mischstrecke im Brennelementaustritt überflüssig wird.

1244. Ultraschall-Meßverfahren in Natrium

(H. Rohrbacher, R. Bartholomay, H. Arnswald, IRE)

Die Ultraschall-Dämpfung in Natrium bei Temperaturen im Bereich von 120°C bis 370°C wurde in Abhängigkeit von der Frequenz gemessen. Gleichzeitig wurden die akustischen Widerstände und die mechanischen Impedanzen am Übergang von den Koppelstäben (Werkstoff 4571) in das Flüssignatrium ermittelt. Die Meßergebnisse zeigen, daß die Schalldämpfung im Mittel um 4 db / 100°C zu höheren Temperaturen hin ansteigt, jedoch sehr stark vom Anpaßgrad der piezoelektrischen Wandler an das mechanische Koppelsystem abhängig ist.

Die Übertragungsfunktion der Ultraschall-Teststrecke weist im Bereich der Wandler-Resonanzen einen Rückgang der Dämpfungswerte um 20 db auf. Dabei wurden Resonanz-Bandbreiten von 5 bis 100 % der eingestellten Ultraschall-Frequenz gemessen. Im Falle der Resonanz konnten Anpaßgrade von 50 % erreicht werden, d.h., daß die Hälfte der vom Generator erzeugten elektrischen Energie in mechanische Energien (Schallenergie und Wärme) umgewandelt wird.

Die Durchgangs-Dämpfung einer MHz-Ultraschall-Welle in einem Na-Testbehälter mit 150 mm Durchmesser bei 350°C und unter Berücksichtigung der beiden VA-Koppelstäbe samt Wandlerquarze wurde zu -56 db ermittelt. Dieser Wert entspricht einer Abschwächung der Schallenergie auf 1,59 %.

Die Ergebnisse zeigen, daß im Bereich der Schallwandler-Resonanzen gearbeitet werden muß, da hier die Minima der Übertragungsdämpfung mit den bestmöglichen Anpaßgraden der mechanischen und elektrischen Koppelheiten zusammentreffen.

In einer weiteren Ausbaustufe wurde die Abtastelektronik für ein facettiertes Detektorbündel eines Ultraschall-Bildwandler-Systems fertiggestellt und erprobt. Die Teststrecke wurde zunächst für das Ersatzmedium Wasser aufgebaut und verfügt über insgesamt 12 Einzeldetektoren. Abb. 1 zeigt den mechanischen Aufbau zusammen mit Teilkomponenten der Elektronik. Erste Versuche zeigten bereits, daß nicht nur Blasen oder im Testmedium vorhandene Störpartikel detektiert werden, sondern daß auch Turbulenzen zu einem Meßsignal führen. Durch eine entsprechende Absenkung der Detektorempfindlichkeiten konnte der ggf. störende Einfluß der Turbulenzen oder Dichteschwankungen im Testraum ausgeblendet werden. Die hier vorgenommenen Versuche bestätigten erneut, daß die Wahl der Ultraschallfrequenz ausschließlich nach Gesichtspunkten der Wandlerresonanzen und der damit verbundenen optimalen Anpassungen erfolgen sollte.

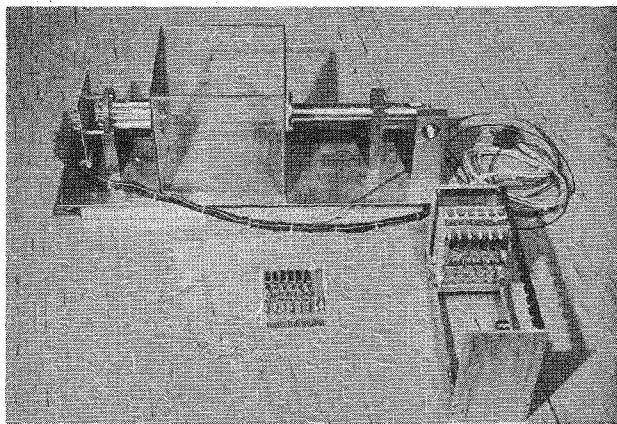


Abbildung 1

125. Auswirkung von Reaktorstörfällen auf die Umwelt, Aktivitäts-
freisetzung

1253. Untersuchungen an nuklearen Aerosolen (W.Schikarski, H.Wild, IAR)

Mit den Experimenten zur Abnahme der Teilchenkonzentration und der Massenkonzentration von reinen UO_2 -Aerosolen im TUNA-Kessel ($2,2 \text{ m}^3$) und in der TUNA-Aerosolerzeugungskammer (Glocke: $0,02 \text{ m}^3$) wurde eine erste Phase des Aerosol-Programms abgeschlossen (1). In Fortführung des Programms wurde die Partikelgrößenverteilung und deren Abhängigkeit von der Zeit näher untersucht.

Außerdem wird über die Durchführung weiterer Versuche und experimenteller Methoden berichtet, die den Störfall des Reaktors in einem weitergehenden Maße simulieren, insbesondere über

- die Tablettenversuche mit direkter Vorheiztechnik
- die Versuche der Aerosolerzeugung im Millisekundenbereich und
- die Abhängigkeit der selbsttätigen Reinigung der Kesselatmosphäre bei erhöhten Temperaturen.

Tablettenversuche

Das Ausgangsmaterial für die UO_2 -Aerosole war bisher ein stranggepreßtes UO_2 -Stäbchen von 4 mm Durchmesser und 40 mm Länge. Durch eine geeignete Haltevorrichtung ist es möglich geworden, eine den Reaktorbedingungen entsprechende Säule von UO_2 -Tabletten als Probe zu verwenden. Dabei werden 6 Tabletten mit einem Durchmesser von 5,1 mm (SNR-Abmessungen) zu einer Säule von 39 mm Länge aneinandergereiht. Zudem wird durch eine geeignete Hochspannungsschaltung (2) auch die Tablettenprobe direkt elektrisch vorgeheizt. Der Vorteil besteht dabei in der einfachen und sicheren Handhabung. Im Aerosolverhalten ergaben die Versuche keine signifikanten Unterschiede zwischen den Stäbchen- und Tablettenproben.

Millisekunden-Experimente

Die Aerosole werden mit Hilfe der Stoßstromtechnik erzeugt. Die untere Schranke für die Einbringzeit der in der Kondensatorbank gespeicherten Energie in die Probe war bisher bestimmt durch die Mindestinduktivität des Stromkreises von 10 μH , entsprechend einer Entladezeit von 0,1 msec. Durch Hinzuschalten von größeren Induktivitäten (bis zu 40 mH) kann die Entladezeit bis auf 100 msec gedehnt werden. Diese Zielrichtung wird aus drei Gründen notwendig und verständlich:

- Exkursionen von schnellen Reaktoren spielen sich im Zeitbereich bis zu einigen 10 msec (3) ab.
- Die Primärteilchen-Größenverteilung hängt neben der Energie auch von der Energieeinbringzeit ab. Hierüber wird ein eigenes Versuchsprogramm durchgeführt.
- Durch eine Verlängerung der Energieeinbringzeit kann die Anfangsmassenkonzentration erhöht werden. Der Mechanismus dieses Effekts ist noch nicht restlos geklärt.

Partikelgrößenverteilung als Funktion der Zeit

In allen bisher beobachteten Fällen stellt die Primärpartikelgrößenverteilung (4) eine logarithmisch normale Häufigkeitsverteilung über dem Durchmesser dar. Dieser Typ der Verteilung ändert sich nicht mit der Variation verschiedener Parameter (z.B. Energie, Energieeinbringzeit, Abstand vom Entstehungszentrum u.a.) und ändert sich auch nicht mit der Zeit. Es ändern sich jedoch der mittlere geometrische Durchmesser d_g und die geometrische Standardabweichung σ_g mit der Zeit. Im folgenden wird über die Änderung von d_g als Funktion der Zeit berichtet.

Die Partikelgrößenverteilung wird mit drei verschiedenen Methoden gemessen:

- Die Primärpartikel-Größenverteilung mit der Methode der Auffang-Folien (4),
- der weitere zeitliche Verlauf mit dem elektrostatischen Aerosolabscheider nach Morrow und Mercer (5)
- und mit dem Laser-Aerosol-Spektrometer (6).

Die ersten Ergebnisse der Folien-Auffang-Methode sind: $d_g = 0,07 \mu\text{m}$
 $\sigma_g = 1,85$

Die Meßergebnisse der beiden anderen Methoden sind in den Abbildungen 1 und 2 dargestellt.

Mit der Folien-Auffang-Methode wird die Primärpartikel-Größenverteilung gemessen, d.h. die Messung erfolgt einige μsec nach dem Aerosolerzeugungsprozeß, für die graphische Darstellung liegt dieser Meßpunkt also auf dem Nullpunkt der Zeitachse.

Der Vergleich des obigen Meßwertes ($0,07 \mu\text{m}$), gewonnen mit der Folien-Auffang-Methode, mit der Abbildung 1 macht deutlich, daß sich der mittlere geometrische Durchmesser zu Beginn (ca. 1 Stunde) sehr stark ändert, um dann im wesentlichen konstant zu bleiben.

Bei der in Abbildung 2 dargestellten relativen Häufigkeitsverteilung, die mit dem Laser-Aerosol-Spektrometer gemessen worden ist, läßt sich aus der Parameterdarstellung ebenfalls das zu Beginn starke Anwachsen der Teilchengröße mit der Zeit (7) ablesen. So wird die relativ höchste Konzentration der Teilchen von z.B. $0,36 \mu\text{m}$ Durchmesser nach 2 Stunden erreicht, um dann nach 6 Stunden und 24 Stunden wieder schwach abzusinken.

Im Rahmen der Meßgenauigkeit ist die Übereinstimmung mit den Ergebnissen des elektrostatischen Aerosolabscheiders sehr gut.

Temperaturabhängigkeit

Mit dem Ziel einer noch besseren Simulation eines Reaktorunfalls sind Experimente bei erhöhten Kesseltemperaturen durchgeführt worden (1). Dabei wird der Kessel, der das Reaktorcontainment darstellen soll, an seiner Außenwand mit einer Heizmatte auf eine bestimmte Temperatur aufgeheizt. Die Temperatur wird durch eine elektrische Regelung konstant gehalten und an mehreren Stellen im Kesselinneren durch Halbleiterthermoelemente gemessen und registriert.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 3 dargestellt. Es zeigt sich, daß mit zunehmender Temperatur die Halbwertszeit (t_H) der Konzentrationsabnahme rasch absinkt. Zwischen 150°C und 200°C wird die Kurve vermutlich gegen einen asymptotischen Wert für t_H von etwa 0,35 Stunden gehen.

Qualitativ läßt sich dieser Effekt der Verkürzung der Halbwertszeit aus der Tatsache verstehen, daß mit zunehmender Temperatur die Diffusionskonstante und damit die Diffusionsabscheidung zunimmt. Eine quantitative Übereinstimmung kann jedoch nicht gefunden werden. Dies läßt den Schluß zu, daß zur Konzentrationsverminderung noch andere Prozesse in einem wesentlichen Maße beitragen. Dies dürften die auf Grund von Temperaturgradienten auftretenden Konvektionsströmungen sein. Diese Vorgänge sind noch theoretisch zu klären.

Zusammenfassung

Die neu eingeführten experimentellen und technischen Methoden, Verwendung einer Tabletten-Säule als Probe und direkte elektrische Vorheiztechnik, zielen auf eine bessere Simulation des Reaktorunfallgeschehens ab. Sie sind einfach und sicher in der Handhabung.

Die Meßergebnisse des neuen Laser-Aerosol-Spektrometers bestätigen in sehr guter Weise die Resultate der zeitabhängigen Teilchengrößenverteilung, die mit einem elektrostatischen Aerosolabscheider gewonnen wurden. Der mittlere geometrische Durchmesser der logarithmisch normalen Verteilung wächst zu Beginn (ca. 1 Stunde) sehr rasch von Werten unter $0,1 \mu\text{m}$ auf ca. $0,4 \mu\text{m}$, um dann etwa konstant zu bleiben.

Die Verkürzung der Halbwertszeit der Teilchenkonzentrationsabnahme mit zunehmender Temperatur ist bis ca. 100°C sehr stark. Zwischen 150°C und 200°C dürfte ein asymptotischer Wert für die Halbwertszeit von etwa 0,35 Stunden erreicht werden. Diffusion allein erklärt diesen Effekt nicht. Vermutlich trägt der konvektive Transport wesentlich dazu bei, die Konzentration der Schwebstoffe rasch zu vermindern.

Literatur

- (1) W. Schikarski, H. Wild
Das Verhalten von UO_2 -Aerosolen in geschlossenen Systemen
KFK-Bericht 1032, 1969
- (2) D. Freund, W. Schikarski
Der direkt elektrisch geheizte UO_2 -Brennstab
KFK-Bericht 1031, 1970

- (3) D. Braess, K. Thurnay
Theoretische Behandlung hypothetischer schwerer Unfälle bei schnellen Leistungsreaktoren
KFK-Bericht 813, 1968
- (4) W. Schikarski, D. Freund, H. Wild
Untersuchungen an durch Stoßströme erzeugten Metall- und Metalloxid-Aerosolen
Arbeitstagung Schwebstofftechnik 23. - 25.10.1968, Universität Mainz
- (5) P.E. Morrow, T.T. Mercer
A point-to-plane electrostatic precipitator for particle size sampling
American Ind. Hyg. Assoc. J. 25/1964/8-14
- (6) J. Gebhart, J. Bol, W. Heinze, W. Letschert
Ein Teilchengrößenspektrometer für Aerosole unter Ausnutzung der Kleinwinkelstreuung der Teilchen in einem Laserstrahl
Staub-Reinhaltung der Luft 30/6/1970/238-246
- (7) W. Schikarski, H. Wild
Zum Zusammenhang der Konzentrationsabnahme von nuklearen Aerosolen mit Aerosolprozessen
Staub-Reinhaltung der Luft 30/1970/6/251-255

Veröffentlichungen im Berichtszeitraum

- (1) W. Schikarski, H. Wild
Das Verhalten nuklearer Aerosole in geschlossenen Systemen
Bericht über eine Fachtagung im Kernforschungszentrum Karlsruhe
Staub-Reinhaltung der Luft 30/1970/No. 4/167
- (2) W. Schikarski, H. Wild
Zum Zusammenhang der Konzentrationsabnahme von nuklearen Aerosolen mit Aerosolprozessen
Staub-Reinhaltung der Luft 30/1970/No. 6/251

(3) W. Schikarski, H. Wild

Experimentelle Untersuchungen über das Verhalten nuklearer Aerosole
Beitrag zum Tagungsbericht Schwebstofftechnik
Bettelle-Frankfurt Informationen 8/Juni 1970/67

(4) H. Wild

Some recent results on the behaviour of nuclear aerosols observed in TUNA
Beitrag zum KFK-Bericht 1206/Juni 1970

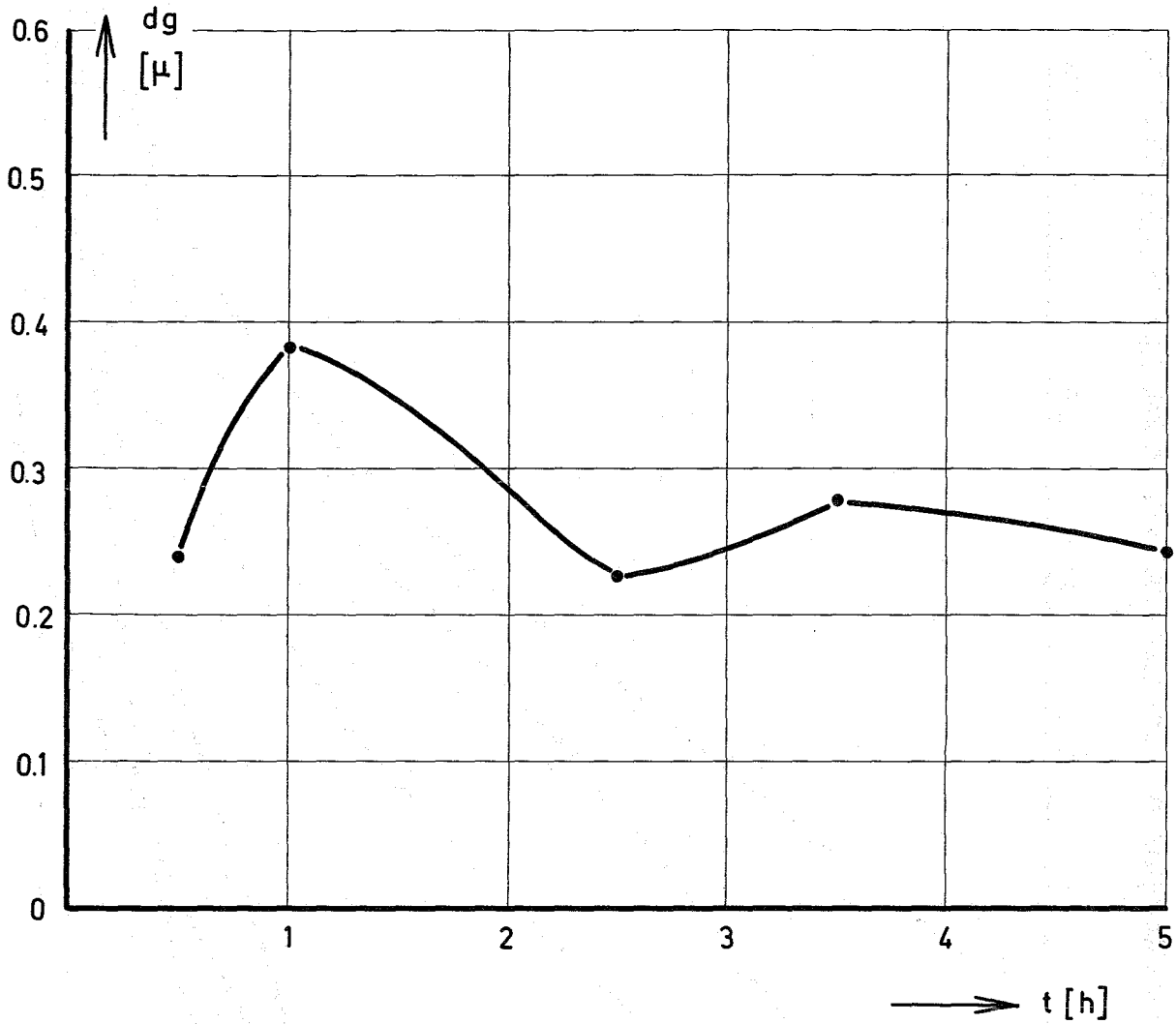


Abb.1 Mittlerer geometrischer Durchmesser
des UO_2 - Aerosols
(elektrostatisher Abscheider, PtP)

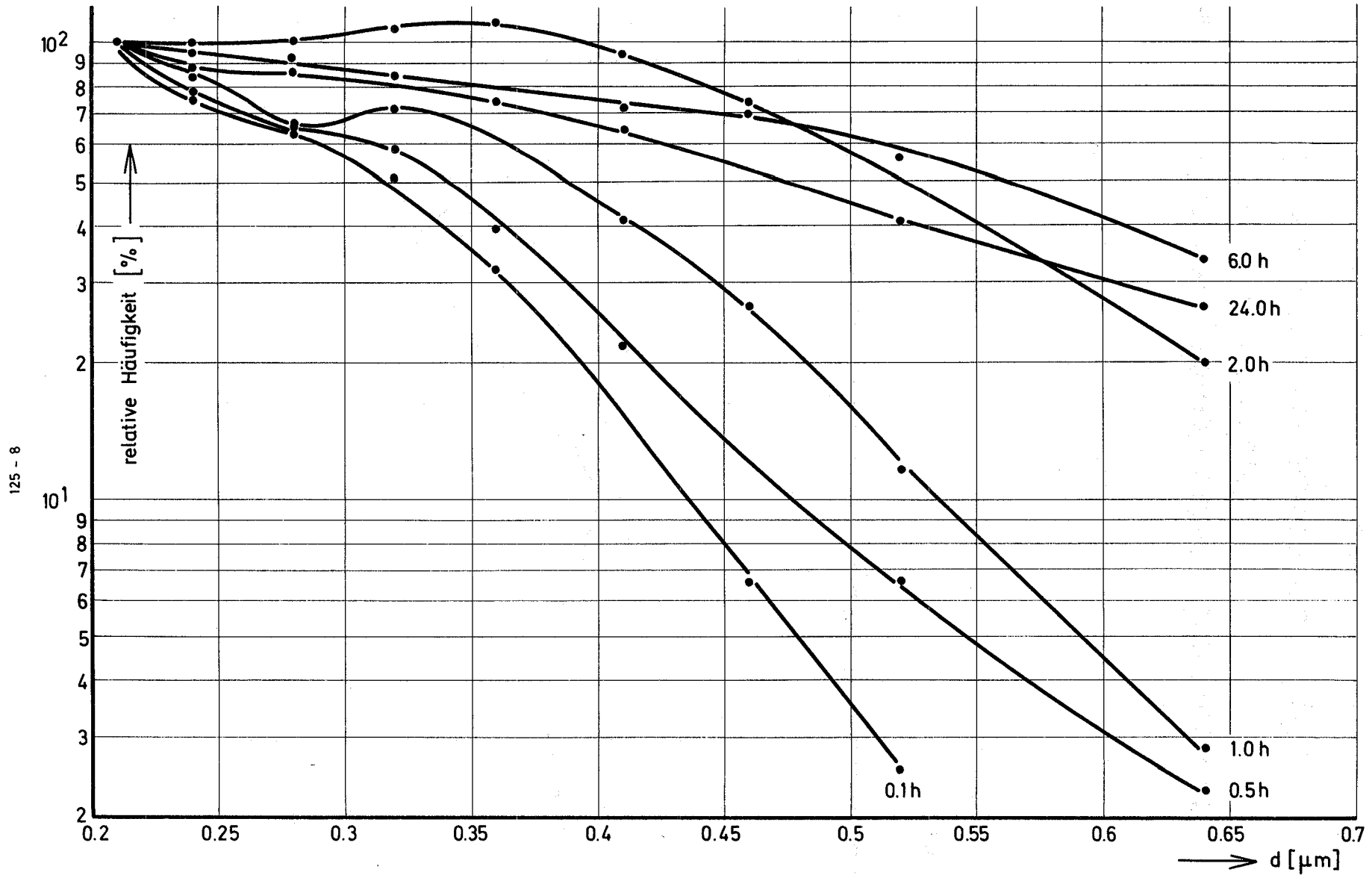


Abb.2 Relative Teilchengrößenverteilung normiert auf die Anfangskonzentration, gemessen mit dem Laser - Aerosol - Spektrometer. Parameter ist die Zeit.

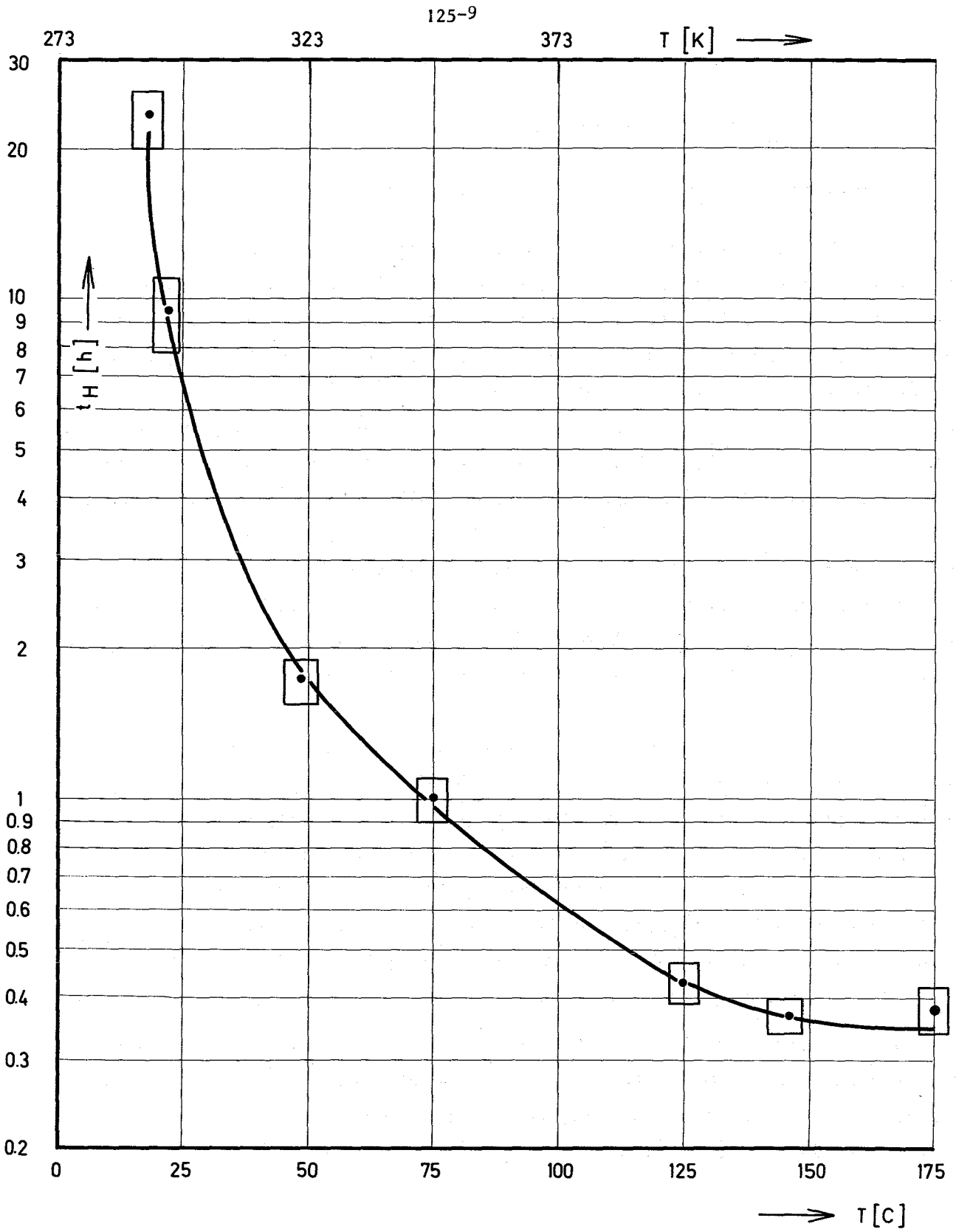


Abb.3 Halbwertszeit der Konzentrationsabnahme über der Kesseltemperatur

1254. Kontamination von Kühlkreisläufen

1254.2 Kontamination von Materialproben (H.H. Stamm, IRCh)

Der FR2-Heißdampfkreislauf war eine Reaktor-Betriebsphase ohne Brennstabprüfling in Betrieb. In der Kontaminationskammer II des Loops befanden sich Metallproben (Serie K), die 734 Stunden von kontaminiertem Dampf aus dem Reaktoreinsatz angeströmt wurden. Auf den ausgebauten Edelstahlproben waren Sb-122, Sb-124 und Cr-51 dominant; Die Aktivitäten von anderen, aktivierten Korrosionsprodukten (Fe-59, Co-60, Ta-182, Mn-54) und von Spaltprodukten (Ru-103, Ba-140/La-140, Ce-141, Ce-144) lagen um den Faktor 50-100 niedriger. Auf Coupons aus anderem Material waren die Verhältnisse etwas verschoben; auf Pt-Coupons hatte z.B. Cr-51 die höchste Aktivität, gefolgt von den Spaltprodukten Te-132/J-132, J-133, J-135, J-131 und Te 131. Der Nachweis von Spaltprodukten auf den Kontaminationsproben spricht dafür, daß geringe Mengen UO_2 aus den absichtlich beschädigten Brennelementprüflingen (Tab. 1) ausgetreten und im Reaktoreinsatz verblieben sein müssen.

In Kammer I (zwischen Überhitzer und Reaktoreinsatz) wurden zur gleichen Zeit "Dekontaminationsversuche" (Serie H) durchgeführt. Dazu wurden Materialproben, die bei früheren Experimenten (Serie C und Serie E, vgl. KFK-Bericht 1270/1) in Kammer II kontaminiert worden waren, dem praktisch aktivitätsfreien Heißdampf aus dem Überhitzer exponiert. Der Effekt war bei allen eingesetzten Materialien (Platin, Inconel 625, Edelstähle W. Nr. 4301, 4120 und 4961) und allen Oberflächenvorbehandlungen (gebeizt, geschmirgelt, elektroliert) nur gering.

Im Heißdampfversuchskreislauf VKL wurden GfK-Proben aus Edelstahl 4961 mit unterschiedlicher Vorbehandlung mehr als 1000 Stunden kontaminiertem Dampf exponiert, Ende Juni ausgebaut und zu Messungen und Dekontaminationsversuchen nach Karlsruhe gebracht.

Tab. 1:

HDR-Stab-Prüflinge

	1	2	3	4
Brennstoff	UO ₂ -Ringtabletten		UO ₂ -Pulver, vibrationsverdichtet	
Anreicherung	2,6 % U 235		3,17 % U 235	
Leistungs- dichte	21 kW/kg U		23 kW/Kg U	
Mittl. Stab- leistung	360 W/cm		360 W/cm	
Leckbohrung (1,1 mm Ø)	Spaltgasraum	Brennstoffzone	Spaltgasraum	Brennstoffzone
<u>Einsatz:</u>				
von-bis	24.10.-15.12. 1969	21.12.69- 12.1.1970	18.1.-16.2 1970	24.2.-16.3. 1970
bei Volleist. (eff.Stunden)	1253	538	689	474

126. Natrium-Technologie-Versuche1262.2 Untersuchungen von Reaktorbauteilen in Natrium und Natriumdampf1262.22 Die Belastbarkeit von Wälzlagern in Natrium (K.Kleefeldt, IRE)

Für die Beschickungseinrichtungen und ähnliche bewegte Bauteile des Reaktors bietet sich häufig von der Konstruktion her die Verwendung von Wälzlagern an. Es wurden daher Versuche zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Wälzlagern in Verbindung mit ihrer Lebensdauer für verschiedene Lagertypen geplant.

Nach einer Reihe von Vorversuchen, die hauptsächlich zur Werkstoffauswahl sowie zur Bestimmung der Schmiereigenschaften des Na dienen, erfolgt der Hauptversuch an axialbelasteten Schrägkugellagern und Kegelrollenlagern. Die Versuchsparameter sind Belastung, Drehzahl, Temperatur und ggf. Werkstoffpaarung. Ferner wird das Reibmoment gemessen.

Zur Durchführung dieser Aufgabe wurde eine Prüfvorrichtung für den Einsatz in die Natrium-Behälteranlage des IRE konstruiert und in Auftrag gegeben (Abb. 1). Ihre wesentlichen Kenndaten sind:

Antrieb: Thyristor-gesteuerter GS - Motor/10⁺)
mit Drehzahl $n = 10$ bis 1000 min^{-1} .
Nenn Drehmoment 500 kp cm

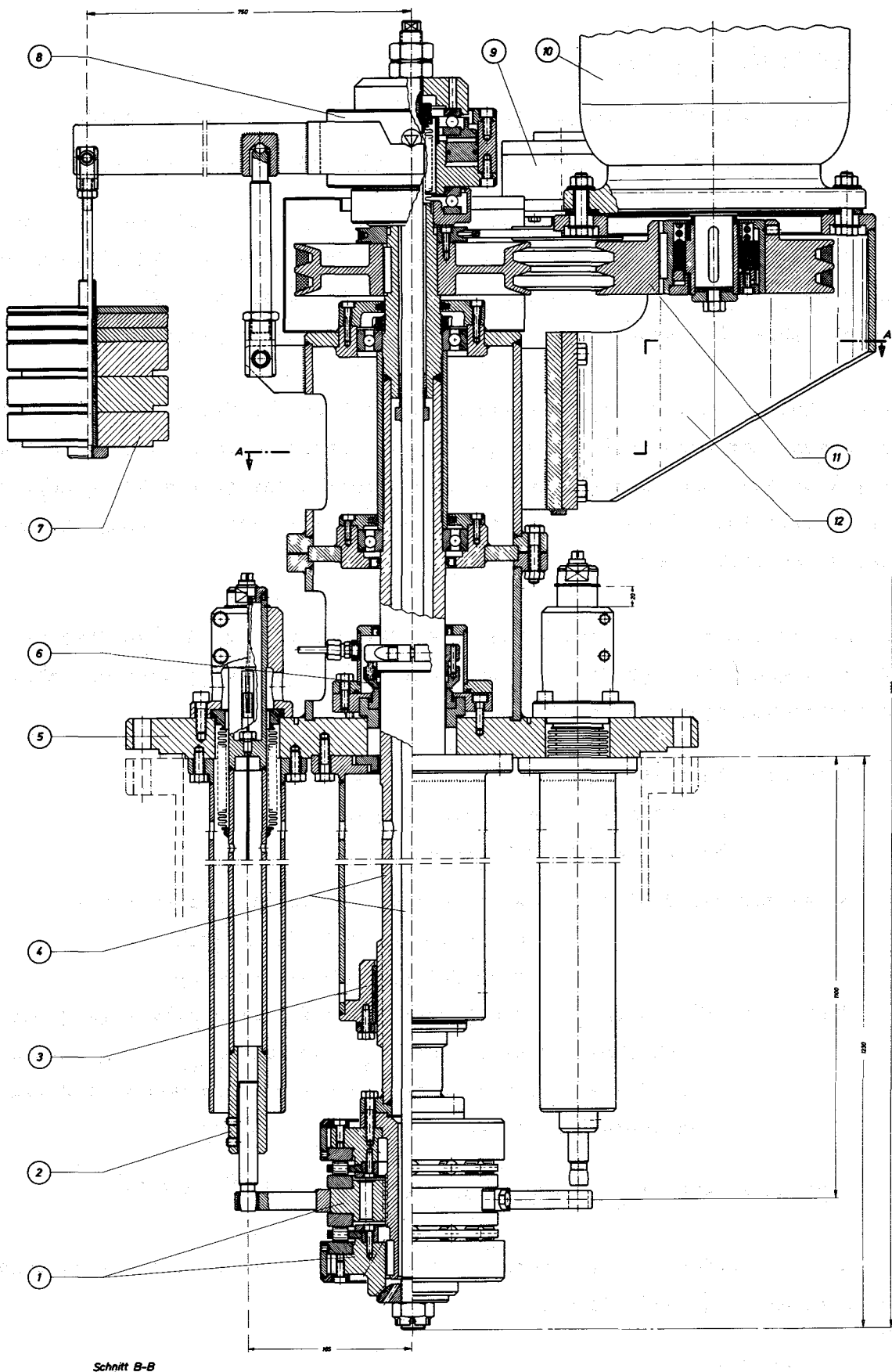
Belastung der Prüflager: axial mit mechanischer Vorrichtung/7/
0 bis 100 kp und pneumatischer Vorrichtung /8/ 100 bis 4000 kp.

Prüflager: Mit entsprechenden Lagerhaltern (1) sind alle Lagertypen im Durchmesserbereich $d_{\text{Welle}} \geq 30 \text{ mm}$, $D_{\text{außen}} \leq 200 \text{ mm}$ prüfbar. (Vorgesehen ist hauptsächlich die Prüfung von Kegelrollen- und Schrägkugellagern mit $d_{\text{Welle}} = 45 \text{ mm}$).

Prüftemperatur: $T_{\text{zul}} = 400^{\circ}\text{C}$, ggf. bis zu $T = 600^{\circ}\text{C}$ möglich.

Die Reibmomentmeßstäbe /2/ sind vorab fertiggestellt worden. Sie werden gegenwärtig instrumentiert und geeicht.

⁺) Die in Schrägstrichen eingeschlossenen Nummern beziehen sich auf die Positionsnummern in Abb. 1.



Schnitt B-B

Abb. 1: Prüfvorrichtung für Untersuchungen
an Wälzlagern in Natrium

1263. Versuche zur thermo- und hydrodynamischen Core-Auslegung1263.1 Thermo- und hydrodynamische Untersuchungen1263.10 Theoretische Untersuchungen (W. Baumann, H. Hoffmann, K. Rust, D. Weinberg, IRB)

In den bisherigen Untersuchungen zur Auswahl von Abstandshaltern wurden verschiedene Brennstababmessungen, gitter- und wendelförmige Abstandshaltertypen (Wendeldrähte, Wendelrippen) im Hinblick auf geringen Druckverlust und einheitliche Temperaturprofile am Bündelausgang bei konstanter Stabileistung betrachtet (2). Die Ergebnisse zeigen geringen Druckverlust und ausgeglichene Temperaturverteilung im Bündelquerschnitt bei Hüllrohren mit Wendelrippen als Abstandshalter.

Diese Untersuchungen wurden mit Hilfe des für die Berechnung eines 91-Stabbündels erweiterten MISTRAL-Programmes ergänzt. Das Programm ermöglicht die Eingabe beliebiger Stabileistungen und die Berücksichtigung der Kühlmittelquervermischung. Es wurden die Kühlmitteltemperaturprofile bei Anwendung verschiedener Abstandshalter für eine extreme Schiefast von $\pm 17\%$ der mittleren Belastung berechnet. Es zeigt sich, daß auch im Schiefastfall das Bündel aus Rippenrohren die ausgeglichene Temperaturverteilung im Bündelquerschnitt ergibt (Abb. 2), obwohl bei der Berechnung des Bündels mit Wendeldraht eine Quervermischung von $30\%/cm$ angesetzt wurde. Darüberhinaus wurden die Temperaturprofile über den Bündelquerschnitt berechnet für folgende Fälle:

- ohne Wärmeleitung, ohne Kühlmittelquervermischung,
- mit Wärmeleitung, ohne Kühlmittelquervermischung,
- mit Wärmeleitung, mit Kühlmittelquervermischung.

Als Ergebnis dieser Untersuchungen zeigt Abb. 3, daß die Kühlmittelquervermischung bei der Auslegung der Brennelemente nicht vernachlässigt werden darf. Das Rechenprogramm wird z.Zt. für die Berechnung von 169-Stabbündeln modifiziert.

Für die verschiedenen Abstandshaltertypen wurden die Temperaturprofile von Kühlmittel, Abstandshalter und Hüllrohrwand in der Abstützebene mit Hilfe des RELAX-Programmes (KFK-Bericht 1053) ermittelt. Die Berechnung wurde für 'slug-flow' durchgeführt. Die Ergebnisse werden z.Zt. ausgewertet.

1263.11 Wärmeübergangsuntersuchungen im zentrischen und exzentrischen Ringraum (D. Hennrich, H. Hoffmann, H. John, IRB)

Die Auswertung der Versuche, die mit einer einfachen Teststrecke für zentrisch/exzentrische Ringraumanordnung durchgeführt wurden (s. KFK-Bericht 1270/1), ergab folgendes Bild:

Wegen zu großer Fertigungstoleranzen und Versagen der provisorischen Abstandshalter hatte der Heizstab beim zentrischen Versuch eine mittlere Exzentrizität von 1,3 mm eingenommen. Bei einer Stableistung von 200 W/cm, einem Radienverhältnis von 7,5/5 und der Exzentrizität von 1,3 mm traten am Ende des Stabes azimutale Temperaturunterschiede im Kühlmittel auf, die je nach Na-Geschwindigkeit (0,7 bis 3,8 m/s) 46 - 84% der gesamten axialen Aufheizspanne betrugten. Diese Werte sind nicht ohne weiteres extrapolierbar, weil durch die Konstruktion der Teststrecke unkontrollierbare Wärmeflüsse außerhalb des Ringraumes einen Teil des genannten Effektes aufhoben.

Eine neue Teststrecke wurde entworfen und wird zur Fertigung vorbereitet. Diese Anordnung gestattet eine kontrollierbare Einstellung des Stabes bei einem Minimum an unkontrollierbaren Wärmeverlusten.

1263.12 Lokale Wärmeübergangsmessungen an Bündelgeometrien (K. Bätke, H. Hoffmann, IRB)

Mit Hilfe eines heizbaren 19-Stabbündels sollen mittlere und lokale Wärmeübergangszahlen für verschiedene Stabpositionen ermittelt werden.

Der Teststreckeneinsatz wurde spezifiziert und die Kühlmöglichkeiten der unbeheizten Stabenden (2 - 3 % Gesamtwärmefreisetzung) bearbeitet.

1263.13 Untersuchungen zur Kühlmittel-Quervermischung im Na-gekühlten Brennelement (W. Baumann, E. Baumgärtner, H. Hoffmann, IRB)

Die Untersuchungen der Kühlmittel-Quervermischung in Natrium-Strömung werden mit Hilfe eines 61-Stabbündels in den SNR-Abmessungen durchgeführt. Der Zentralstab des Bündels wird beheizt und das sich im Bündelaustrittsquerschnitt ergebende Temperaturprofil registriert. Die radiale Temperaturverteilung liefert ein Maß für die Größe der Kühlmittel-Quervermischung.

Im Berichtszeitraum wurden die Ergebnisse aus Untersuchungen des Bündels mit geschweißten, wabenartigen Abstandshaltern ausgewertet. Die Abstandshalter waren in Abständen von $l = 150$ mm eingebaut. Ferner wurden die Experimente an Bündeln mit Wendeldrähten als Abstandshalter (Abstützlänge $l = 100$ mm) abgeschlossen. Die Ergebnisse sind in Abb. 4 dargestellt. Gleichzeitig eingezeichnet sind die Ergebnisse aus Untersuchungen eines 61-Stabbündels in Luftströmung. Die Mischrate für das Na-Bündel ist größer als für das luftdurchströmte Bündel, das die kleinere Stabteilung aufwies.

Die Gründe hierfür sind einmal größere Austausch-Querschnitte zwischen den Teilkanälen, zum anderen die vollkommene axiale Abdeckung des freien Strömungsquerschnittes durch die Wendeldrähte beim größeren p/d -Verhältnis. Die Na-Strömung erhält hierdurch eine größere radiale Komponente.

1263.14 Entwicklung und Erprobung von Hochleistungsheizstäben (V.Casal, IRB)

Die im IRB entwickelten Heizstäbe (KFK-Bericht 894) besitzen als Isolator heißgepreßtes BN. Sie ermöglichen bei Oberflächentemperaturen von 700°C Oberflächenbelastungen bis 350 W/cm^2 und übertreffen damit die Leistung der Brennstäbe Schneller Reaktoren.

Zur Senkung der Fertigungskosten und zur Verbesserung der elektrischen Isolation wurde im Berichtszeitraum die Entwicklung BN-isolierter Heizstäbe mit pulverförmigem BN begonnen. Es zeigte sich, daß mit den gewählten Verdichtungsverfahren für das BN-Pulver die gleiche Dichte erzielt wird wie bei heißgepreßtem BN. In ersten Versuchen in einem Wasserprüfstand wurden die Stäbe bei ca. 150°C Hüllentemperatur bis zu 1000 W/cm^2 Heizflächenbelastung erprobt.

Veröffentlichungen zu 126:

- (1) J.Kadlec, W. Lang
Flow Induced Temperature and Pressure Pulsations in Rod Bundles
KFK-Bericht 1157
- (2) W. Baumann, H. Hoffmann, R. Möller
Fuel Rod Bundles with Various Spacer Designs for Sodium Cooled Fast Reactors.
KFK-Bericht 1154, IAEA-SM 130/38, März 1970

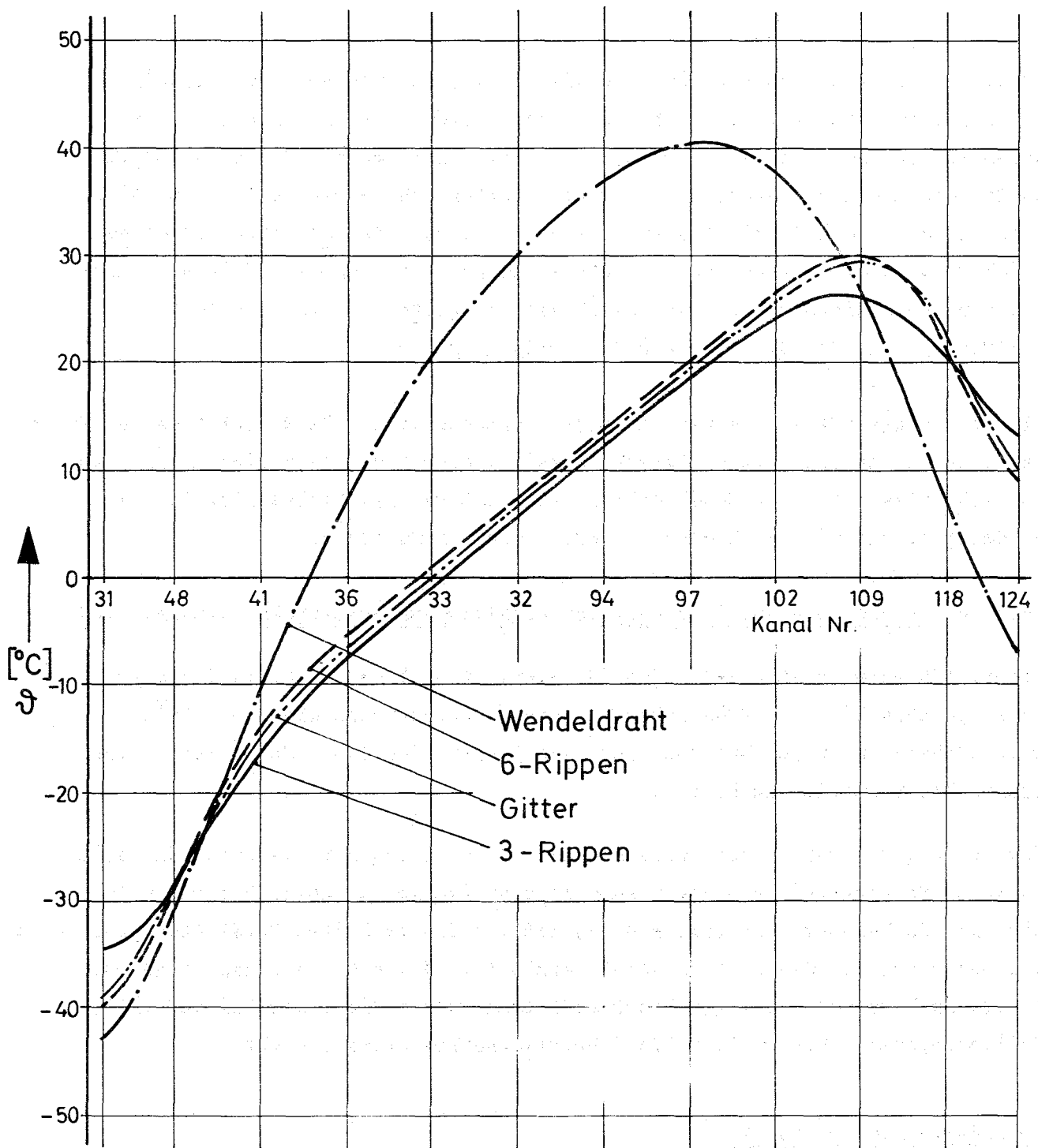


Abb. 2 Kühlmitteltemperatur im Austrittsquerschnitt eines Brennelementes $\vartheta = t_{\text{aus}} - (t_{\text{aus}})_m$ für verschiedene Abstandshaltertypen.
 (Ecktraverse, 30° zum Lastgradienten gedreht)
 Belastungsart: Schiefast $\pm 16,7\%$; 600 W/cm
 Abmessungen: SNR

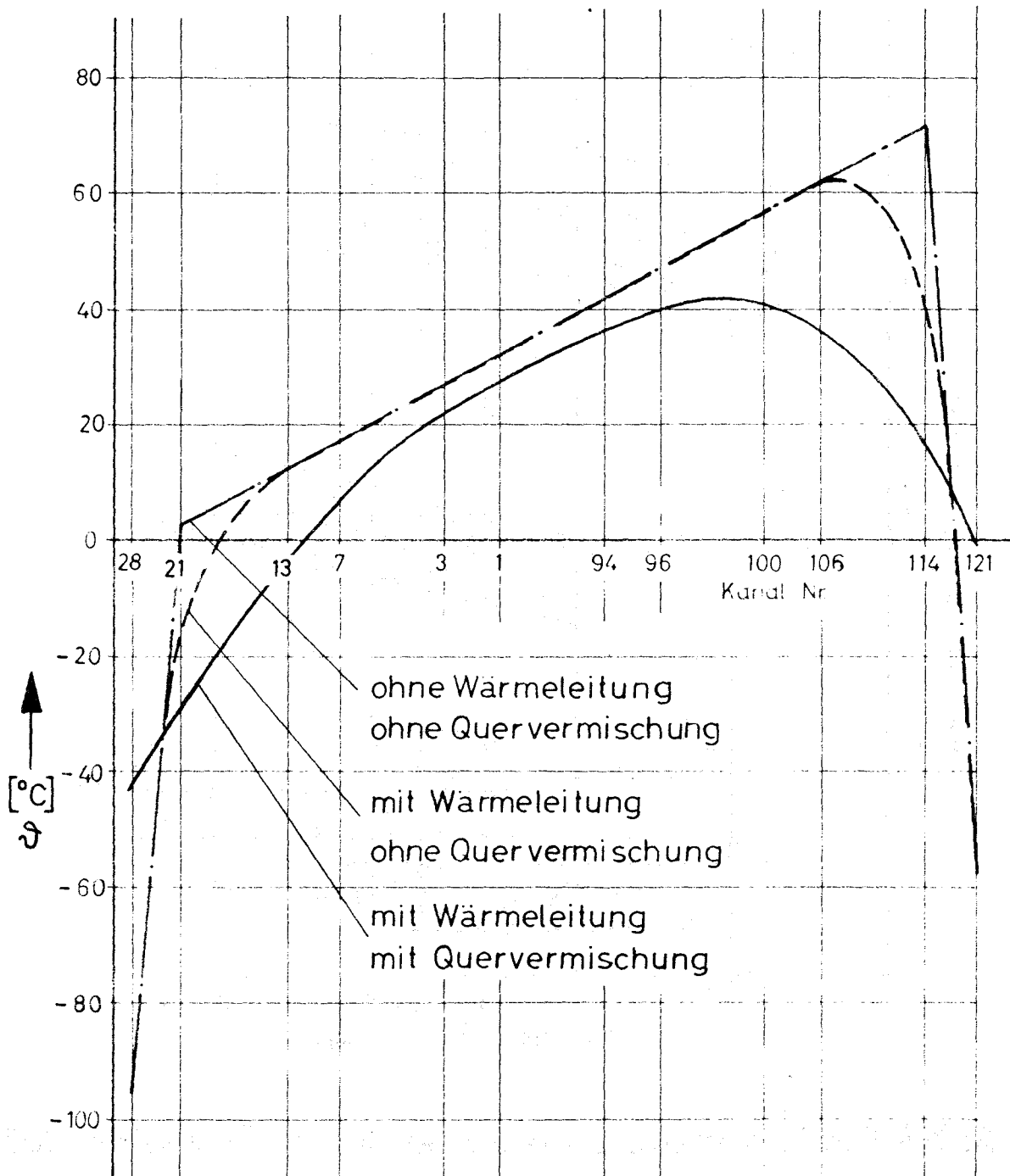


Abb.3 Kühlmitteltemperatur im Austrittsquerschnitt
eines Brennelementes $\vartheta = t_{\text{aus}} - (t_{\text{aus}})_m$

Abstandshalter: 1 Draht pro Stab (Mischrate $\mu = 30\%/cm$)

Belastungsart: Schiefast

Abmessungen: SNR

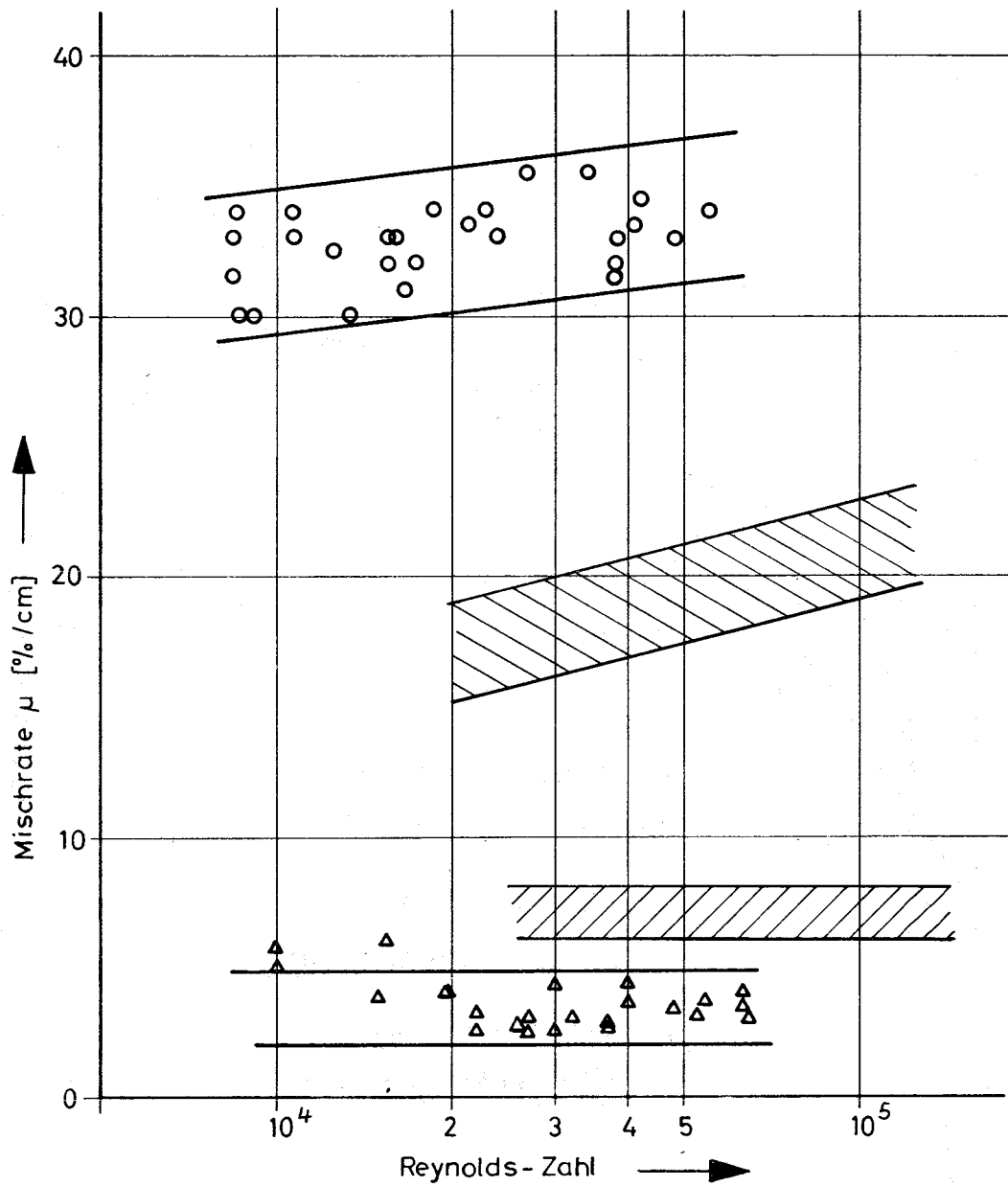


Abb.4 Die Mischrate μ als Funktion der Reynolds-Zahl

	Abstandshaltertyp	d mm	p/d	l [mm]
○ - Na-Strömung	1Wendeldraht/Stab	6	1,32	100
△ - Na-Strömung	Wabengitter	6	1,32	150
//// - Luft-Strömung.	1Wendeldraht/Stab	6	1,17	100
//// - Luft-Strömung.	ohne Abstandshalter	6	1,17	-

127. Thermo- und hydrodynamische Versuche in Gas und Dampf1271. Helium-Versuche1. Hochtemperaturwärmeübergangsversuchstand (H.-J. Pfriem, INR)

Bei diesem Versuchsstand wird Helium durch ein elektrisch beheiztes Molybdänrohr ($d_i = 0,23$ cm, $d_a = 0,35$ cm, $l = 20$ cm) geschickt und dabei erwärmt. Ziel der Versuche ist es, die Wärmeübergangszahlen bei hohen Wandtemperaturen und damit hohen $T_{\text{Wand}}/T_{\text{Gas}}$ - Verhältnissen zu bestimmen.

Die bisherige Arbeit bestand im Aufbau und in der Inangangsetzung des Versuchsstandes. Es waren dabei Probleme der beweglichen Stromzuführung, der Verbindung des Molybdänrohres mit dem Flansch und der Temperaturmessung mit Thermoelementen und Pyrometern zu lösen. Diese Arbeiten sind abgeschlossen. Der Versuchsstand kann bis zu einem Druck von 25 atü betrieben werden.

Es wird damit gerechnet, in der nächsten Zeit mit den Messungen beginnen zu können.

2. Stoffwerte für Heliumgas (H.-J. Pfriem, INR)

Aufgrund einer Durchsicht der Literatur wurde folgender Vorschlag für die spezifische Wärme, Prandtl-Zahl, Zähigkeit und Wärmeleitfähigkeit von Helium im Bereich $500 - 3000^\circ\text{K}$, 1 atm gemacht: ¹⁾

$$c_p = 1.242 \text{ cal/g}^\circ\text{K}$$

$$\text{Pr} = 0.667$$

$$\mu = 18.84 (T/T_0)^{0.66} \cdot 10^{-5} \text{ g/cm s}$$

$$k = 35.1 (T/T_0)^{0.66} \cdot 10^{-5} \text{ cal/cm s}^\circ\text{K} \quad T_0 = 273.16^\circ\text{K}$$

Dieser Vorschlag basiert auf den von Guevara und Wagemann²⁾ gemessenen Zähigkeitswerten ($500 - 3000^\circ\text{K}$) und der Festlegung einer konstanten Prandtl-Zahl und einer konstanten spezifischen Wärme.

1) Properties of Helium Gas, Vortrag auf dem "Zürich Club" Gas Cooled Fast Reactor Heat Transfer Meeting, von H.J.Pfriem, Sept. 10, 1970

2) Guevara, F.A., Wagemann, W.E.: Measurements of Helium and Hydrogen viscosities to 2300°K . LA 3319 (1965)

3. Wärmeübergang und Druckverlust an Rohren mit künstlicher Rauigkeit bei hohen Temperaturen.

(M. Dalle Donne, E. Meerwald, INR)

Die Verbesserung des Wärmeübergangs von den Brennelementen an das Kühlmedium in einem schnellen gasgekühlten Reaktor kann durch Aufrauung der Oberfläche geschehen. Zur Bestimmung der Erhöhung der Wärmeübergangskoeffizienten und des Druckverlustes ist es notwendig, Experimente durchzuführen, die eine möglichst universelle Kenntnis der Wirkung der Rauigkeitsparameter ermöglichen.

Es wurde ein Rauigkeitstyp mit gewindeartigem Profil gewählt; diese Rauigkeit kann durch das sogenannte "Wirbelverfahren" in einem Arbeitsgang in das Rohr eingeschnitten werden und eignet sich deshalb für die Herstellung einer größeren Stückzahl.

Die Experimente wurden an 15 Rohren unterschiedlicher Rauigkeitsparameter durchgeführt. Als geometrische Anordnung wurde der Ringspalt mit beheiztem aufgerauhten Zentralstab gewählt. Diese Wahl wurde bestimmt von Überlegungen der Ähnlichkeit mit der in der Spaltzone benutzten Geometrie (Bündel paralleler zylindrischer Stäbe) und der Einfachheit der Experimente. Um Werte zu erhalten, die man unmittelbar für eine Anordnung einer großen Zahl von aufgerauhten Stäben benutzen kann, ist es notwendig, den Einfluß des glatten Außenrohres auf den rauhen Zentralstab zu separieren.

Es konnte gezeigt werden, daß die hierfür angewandte Methode auch für den Ringspalt mit Temperaturprofil gilt, wenn man die mittleren Temperaturen der beiden Zonen kennt.

Die Trennung der Zonen basiert auf den von Nikuradse (1), (2) gefundenen Beziehungen für das Geschwindigkeitsprofil in einem glatten Rohr:

$$U^+ = 2,5 \cdot \ln y^+ + 5,5 ;$$

in einem Rohr mit Sandrauigkeit:

$$U^+ = 2,5 \cdot \ln \frac{y_1}{h} + R(h^+) ,$$

wobei U^+ die dimensionslose Geschwindigkeit, y^+ der dimensionslose Wandabstand, y_1 die Breite der inneren rauhen Zone ist, h die Rauigkeitshöhe und $R(h^+)$ die Rauigkeitsfunktion. In (3), (4) und (5) ist gezeigt, wie die Rechnung im einzelnen durchgeführt wird.

Die aus den 15 Teststrecken unterschiedlicher Rauigkeit gewonnene Rauigkeitsfunktion $R(h^+)$ läßt sich in einer Kurve über dem Verhältnis Steigung/Breite mal Steigung/Höhe mit nur sehr geringen Abweichungen ($\pm 5\%$) darstellen und durch folgende Gleichungen beschreiben:

$$R(h^+) = 35,1 \left[\frac{P^2}{h \cdot b} \right]^{-0,585} \quad \text{für } 8 \leq \frac{P^2}{h \cdot b} \leq 50$$

$$R(h^+) = 4,47 - 2,25 \cdot 10^{-2} \left[\frac{P^2}{h \cdot b} \right] + 8,33 \cdot 10^{-5} \left[\frac{P^2}{h \cdot b} \right]^2 \quad \text{für } 50 \leq \frac{P^2}{h \cdot b} \leq 150$$

Aus dem Zusammenhang von Geschwindigkeitsprofil und Temperaturprofil folgt die Beziehung [6]:

$$G(h^+) = R(h^+) + \frac{\frac{f_1}{2 St_1} - 1}{\sqrt{\frac{f_1}{2}}}$$

Für die untersuchten Geometrien läßt sich $G(h^+)$ durch folgende Gleichung darstellen:

$$G(h^+) = 5,8 (h^+)^{0,2} \cdot Pr_1^{0,44} \cdot (T_{W_1}/T_E)^{0,2}$$

wobei $h^+ = \frac{h \cdot U^*}{\nu}$ die dimensionslose Rauigkeitshöhe ist. ($U^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$ = Schubspannungsgeschwindigkeit, ν = Zähigkeit)

T_{W_1} ist die Wandtemperatur des beheizten Rohres,
 T_E die Gaseintrittstemperatur.

Damit besteht die Möglichkeit, in Abhängigkeit von der Stabanordnung für verschiedene Rippengeometrien durch Kenntnis der $R(h^+)$ -Werte die Koeffizienten des Druckverlustes und des Wärmeübergangs zu berechnen.

Literaturverzeichnis

- (1) Nikuradse, J., Gesetzmäßigkeiten der turbulenten Strömung in glatten Rohren, VDI Forsch., 1932, 356.
- (2) Nikuradse, J., Strömungsgesetze in rauhen Rohren, VDI Forsch., 1933, 361.
- (3) Dalle Donne, M., and E. Meerwald, Heat Transfer Surface Roughened by Thread-Type Ribs at High Temperatures, Proceedings of the 1970 Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute, Stanford University Press, Stanford, California.
- (4) Maubach, K., Reibungsgesetze turbulenter Strömung in geschlossenen glatten und rauhen Kanälen von beliebigem Querschnitt, Externer Bericht INR-4/69-22, Kernforschungszentrum Karlsruhe, West Germany, March 1969.
- (5) Wilkie, D., Calculation of Heat Transfer and Flow Resistance of Rough and Smooth Surfaces Contained in a Single Passage, paper presented at the 3rd Int.Heat Transfer Conf., Chicago, August 1966, AIChE.
- (6) Dipprey, D.F., and R.H. Sabersky, Heat and Momentum Transfer in Smooth and Rough Tubes, Int.J. Heat Mass Transfer, 1963, 6, 329 - 353.

Veröffentlichung zu 1271:

Vgl. (3) im obigen Literaturverzeichnis.

1272. Thermo- und hydrodynamische Versuche in Gas und DampfMittlerer Wärmeübergang und Druckverlust in Brennstabbündeln

(R.Möller, H. Tschöke, IRB)

Bei der Auswertung der Wärmeübergangsversuche muß die Oberflächentemperatur bekannt sein. Eine Wandtemperatur wird mit Thermoelementen, die in Nuten der Heizstabhülle eingelötet sind, gemessen. Die Oberflächentemperatur muß in dem von der Meßstelle ungestörten Bereich rechnerisch bestimmt werden. Dazu wurde das Temperaturfeld im Bereich der Meßstelle ermittelt für die Randbedingungen, wie sie bei Wärmeübergangsmessungen in Luft vorliegen. Hierzu wurde das Relax-Rechenprogramm (KFK-Bericht 1053) benutzt.

Die wichtigsten Ergebnisse sind:

- Die Tiefenlage der Meßisotherme im ungestörten Bereich ist etwa gleich der halben Nuttiefe. (Thermoelement mit Lot Degussa 7000 eingelötet).
- Die Tiefenlage der Meßisotherme ist unabhängig von der spezifischen Oberflächenbelastung. (Hier: $q \leq 30 \text{ W/cm}^2$)
- Die Lage der Meßisotherme kann mit dieser Rechenmethode relativ genau ermittelt werden.

Diese Rechenmethoden werden zur Zeit auf die spezifischen Bedingungen des Wärmeüberganges in turbulent strömendem Natrium angewendet (1263.1).

128. Reaktorentwurfsarbeiten1282. Arbeiten zu natriumgekühlten schnellen ReaktorenEntwurf und Anordnung des primären Kühlsystemes (R.A.Müller, IRE)

Im Rahmen der Konzeptstudien zur Klärung des Entwicklungspotentials natriumgekühlter Brutreaktoren und der Untersuchungen über alternative Ausführungsformen wurden an Hand der 1968/69 veröffentlichten umfangreichen amerikanischen 1000 MWe LMFBR FOLLOW-ON STUDIES und der verfügbaren SNR-Unterlagen erneut die Eigenschaften der verschiedenen Kühlkreisausführungen, im wesentlichen von Loop- und Pool-Ausführungen, beurteilt und mit verschiedenen neu konzipierten Multipool-Ausführungen verglichen.

Bekanntlich ist bisher eine eindeutige Entscheidung zugunsten des Loop- oder Poolsystemes noch nicht möglich, da sich einerseits beide Systeme in ihrem gesamten Bauaufwand, d.h. den Kapitalkosten, nur unwesentlich unterscheiden und sie andererseits sehr unterschiedliche herstellungs-betriebs- und sicherheitstechnische Merkmale aufweisen, deren Wichtung ohne echte Bau- und Betriebserfahrungen nur unzureichend möglich ist. Es ist deshalb zu erwarten, daß eine Kompromisslösung insgesamt eine bessere Lösung für die recht vielschichtige Erfordernisse des Kühlkreises eines natriumgekühlten Reaktors darstellt, wenn

1. eine genügend große Anzahl der positiven Merkmale beider Systeme in ihr vereinigt werden können, ohne daß gleichzeitig neue schwerwiegende negative Merkmale eingeführt werden,
2. der gesamte Bauaufwand der neuen Lösung nicht größer ist.

Dieser Gedanke liegt den Multipool-Ausführungen zugrunde.

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß die bisher betrachtete Multipool-Ausführung (1) noch nicht allen Anforderungen genügt. Sie bot zwar den Vorteil einer niedrigen, gleichmäßigen Temperatur der Außenwände, so daß hierfür die Verwendung billiger feritischer Werkstoffe in Betracht gezogen werden konnte, hatte aber den Nachteil einer streckenweise vom Pumpendruck belasteten Außenwand, so daß es, ähnlich wie bei den meisten Loop-Entwürfen, bei einem Leck in diesem Bereich und bei weiterlaufender Pumpe zu einem unzulässig großen Natriumverlust kommen konnte. Außerdem war bei dieser Ausführung die Nachwärmeabfuhr über die Hauptkreise durch Naturumlauf nicht möglich.

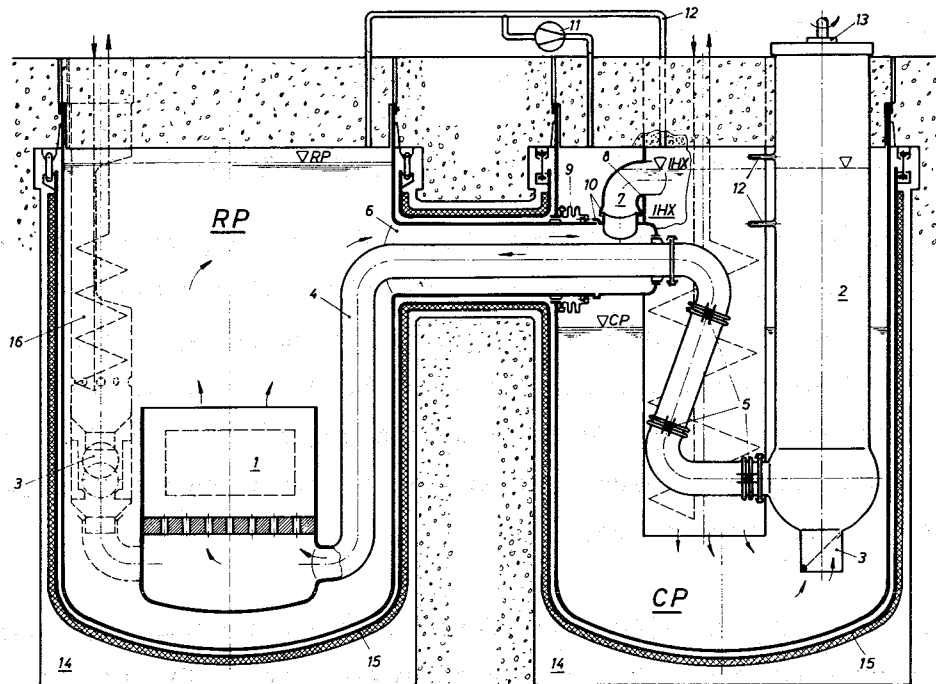


FIG. 1. Basic principle of the partly integrated cooling system.

- | | |
|---------------------------------|---|
| 1. Core | 9. Axial bellows |
| 2. Circulating pump | 10. Sliding sleeve-joint |
| 3. Check-valve | 11. Pressure step-up device |
| 4. Pressure pipe | 12. Surge pipe |
| 5. Linked bellows | 13. Pump shaft seal |
| 6. Annular channel | 14. Shielded vault |
| 7. Cross channel | 15. Containment jacket |
| 8. Overflow edge | 16. Emergency cooling system |
| RP Reactor pool | ∇IHX Coolant level in the intermediate heat exchanger |
| CP Component pool | ∇RP Coolant level in the reactor pool |
| IHX Intermediate heat exchanger | ∇CP Coolant level in the component pool |

Es wurde deshalb unter Verzicht auf die einheitliche niedrige Wandtemperatur die auf Abb. 1 dargestellte neue Ausführung konzipiert, die vor allem den sicherheitstechnischen Erfordernissen voll Rechnung trägt (2). Der unter Druck stehende Kühlkreisabschnitt liegt jetzt gänzlich innerhalb des Niederdruck-Kühlmittels, so daß ein exzessiver Kühlmittelverlust auch bei weiterlaufenden Pumpen nicht mehr möglich ist. Durch die Anwendung eines abgestuften Schutzgasdruckes zwischen dem Reaktorpool und den Komponentenpools ist außerdem sichergestellt, daß der Kühlkreislauf auch bei abgeschalteten Pumpen mit Kühlmittel gefüllt bleibt und die Nachzerfallswärme mit Naturumlauf über die Hauptkühlkreise abgeführt werden kann. Im übrigen macht die neue Ausführung, ähnlich wie der bisherige Multipoolentwurf, von Bauelementen Gebrauch, die in ähnlicher Form auch bei den meisten Pool-Entwürfen benötigt werden. (Innere Wärmeisolierung, Schieberverbindungen, Wellrohrkompensatoren). Der Multipool-Entwurf bietet jedoch den Vorteil, daß alle evtl. störanfälligen Komponenten relativ leicht zugänglich und auswechselbar sind.

Das neue System wurde auf der IAEA-Konferenz in Monaco, März 1970 vorgestellt und diskutiert (3).

Veröffentlichungen:

- (1) Deutsches Patentamt, Offenlegungsschrift 1564054
- (2) KFK-Bericht 1156
- (3) IAEA - SM - 130/42

1283. Entwurfsautomatisierung

Programmsystem für technischen Reaktorentwurf (FRED) (U.Schumann, IRE)

Es wird untersucht, inwieweit das vom MIT erstellte Programmsystem ICES geeignet ist, ein Subsystem für den technischen Reaktorentwurf aufzunehmen. Hierzu wurde zunächst die Methode der Generierung vom ICES Subsystem studiert. Um die Vor- und Nachteile von Programmen, die in ICERTRAN geschrieben sind und unter ICES-Kontrolle laufen, kennenzulernen, wird gegenwärtig das Programm THESTS von Herrn Doetschmann (IRE) als Subsystem in ICES integriert. Die bisherigen Erfahrungen haben bei zahlreichen Vorzügen von ICES keine unüberwindlichen Probleme aufgeworfen.

130. FR 3-Referenzentwurf1320. Entwurfsarbeiten

FR 3 - Core-Entwurf (G.Class, K.Kleefeldt, R.Krieg, F.Schmidt¹⁾, IRE)

Für ein außenberipptes FR 3 -Brennstabhüllrohr mit 6 Rippen am Umfang sowie für ein glattes FR 3-Hüllrohr wurden unter der Voraussetzung linear-elastischen Materialverhaltens die Spannungsverteilungen (Innendruck, Wärmespannungen und Spannungen infolge des Strukturmaterialschwellens) berechnet. Die numerische Behandlung des Rippenrohres erfolgte mittels eines neuen im IRE erstellten Computer-Codes. Das glatte Rohr ließ sich in bekannter Weise behandeln (Timoshenko and Goodier, Theory of Elasticity; 2 nd Ed., Int. Student Edition, 1951). Die Materialdaten entsprechen dem Werkstoff Nr. 4988 unter FR 3-Auslegungsbedingungen (Nominelle Auslegung). Das Strukturmaterialschwellen wurde mittels des linearen Schwelldruckkoeffizienten ($d_{Sch} = 175 \cdot 10^{-6} \text{ grad}^{-1}$) berücksichtigt, der dem linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten ($d_T = 17,6 \cdot 10^{-6} \text{ grad}^{-1}$) direkt entspricht.

Für die festigkeitsmäßige Beurteilung zeigten sich die Tangentialspannungen als maßgebend, deren Größtwerte beim Rippenrohr 180 Kp/mm^2 (Rohrteil zwischen den Rippen) bzw. 205 Kp/mm^2 (Rippenfuß, Kerbwirkung) betragen. Beim glatten Rohr ergaben sich 140 Kp/mm^2 . Der Einfluß des Innendruckes (hier 100 at) auf die Spannungen ist recht klein. Den Zahlenwerten ist zu entnehmen, daß bei hohen schnellen Dosen ($\geq 10^{23} \text{ n/cm}^2$) und hohen Stabileistungen (z.B. 526 W/cm) in großen Bereichen der Hüllrohrquerschnittsfläche plastisches Stoffverhalten vorliegen wird. Das Maximum der plastischen Dehnung wird insbesondere beim Rippenrohr am Rippenfuß sehr hoch liegen. Große Hüllrohrstandzeiten lassen sich demnach nur bei ausreichend hoher Werkstoffduktilität erreichen, weshalb auch hier die Werkstoffversprödung besonders zu beachten ist.

Fertigungstoleranzen des Rippenrohrbündels und des Sechskantkastens sowie Volumenänderungen während des Betriebes erfordern bei der BE-Auslegung ein Spiel zwischen dichtestgepacktem Bündel und Kasten. Die Einflußgrößen, die für die Bemessung des Spieles im Neuzustand berücksichtigt werden müssen, wurden abgeschätzt. Es sind dies im wesentlichen Fertigungstoleranzen für Rippenkopfkreisdurchmesser, Rippensteigung und Kastenschlüsselweite, sowie die Volumenänderungen

+) Delegiert von AEG

durch Strukturmaterialswellen, Wärmeausdehnung, Brennstoffschwellen und Korrosionsabtrag. Für die Fertigungstoleranzen wurden dabei an Hand der z.Zt. vorliegenden Erfahrungen über die Herstellung von Rippenrohren statistische Mittelwerte bestimmt.

Es wurde gefunden, daß ein Nennspiel von 1,1 mm zwischen dem dichtestgepackten Bündel und dem Kasten im Neuzustand erforderlich ist, wenn man fordert, daß das Spiel im ungünstigsten Fall gerade verschwindet. Dann ist ein größtes Spiel von 1,4 mm ohne bzw. 1,9 mm mit Berücksichtigung des Korrosionsabtrages denkbar. Dieses soll ggf. durch elastisches Auffedern des Bündels infolge Ungeradheit der Stäbe ausgefüllt werden.

In Abb. 1 sind die Toleranzfelder quantitativ dargestellt. Für das Schwellen und die Wärmeausdehnung sind die Differenzbeträge der Kasten- und Bündeländerungen berücksichtigt (nicht die absoluten Beträge, die erheblich größer sind).

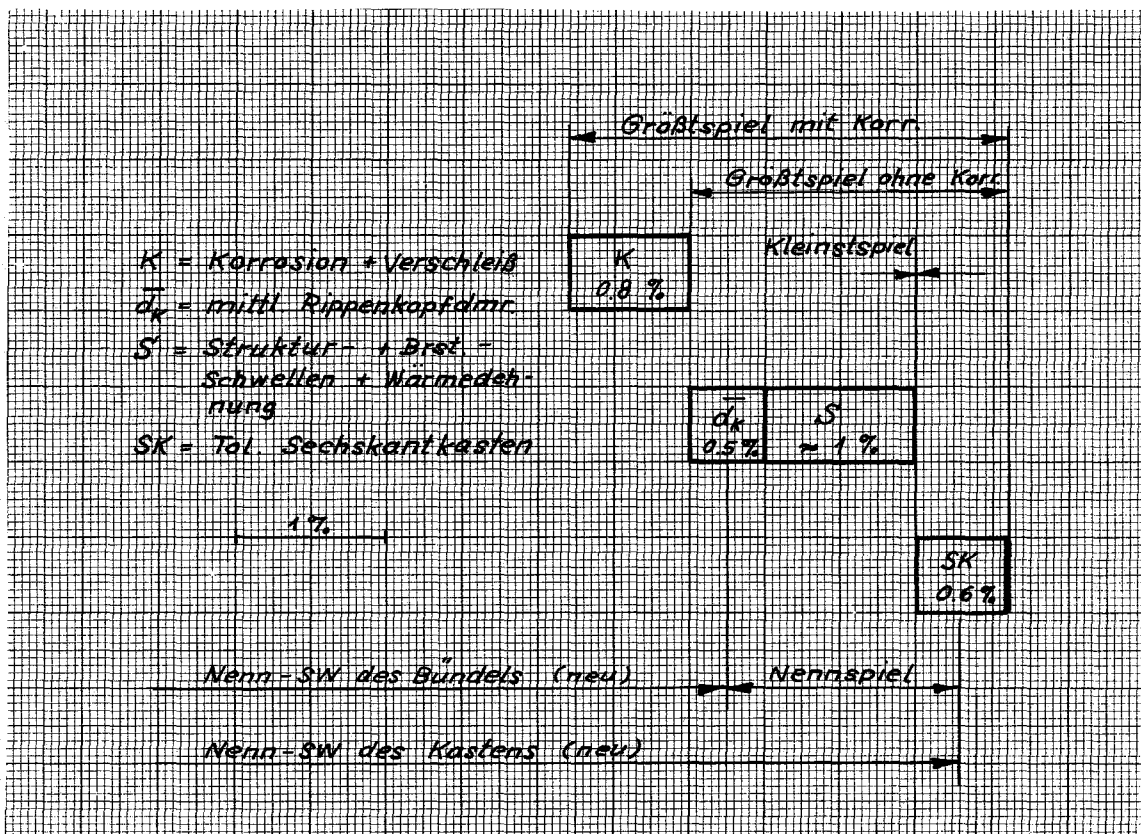


Abb. 1: Toleranzfelder für Bündel und Kasten des FR 3-Brennelementes.

An Hand dieser Überlegungen wurden die Abmessungen des FR 3 - BE-Kastens für künftige Rechnungen neu festgelegt:

Schlüsselweite der Zelle	73,0 mm,
Schlüsselweite des Kastens	70,0 mm,
Wandstärke des Kastens	2,0 mm.

Die thermischen und hydraulischen Verhältnisse sowie die freie Verbiegung eines außen wärmeisolierten und "kalt" gefahrenen Coreelementes durch Strukturmaterialschwellen wurden am Beispiel eines Trimmstabführungskastens untersucht. Bei einer mittleren Stableistung von 385 W/cm (Absorberanteil = 0.387) beträgt die mittlere Natriumaustrittstemperatur für das 7-Stabbündel (Tantal) bei Kühlmitteldurchsätzen > 3kg /s weniger als 280°C. Solche Kühlmitteldurchsätze sind bei dem zur Verfügung stehenden Druck und den erwarteten Druckverlusten durchaus realisierbar. Die mittleren Wandtemperaturen des Führungskastens liegen unter Berücksichtigung der γ -Wärme und des radialen Wärmeflusses durch eine 1 mm starke äußere Isolationsschicht mit der Wärmeleitfähigkeit 0,0075 W/cm°C noch unter 300°C.

Die freie Verbiegung eines Führungskastens bei den berechneten Temperaturen beträgt für die volle Standzeit von 210 Tagen am oberen Ende des axialen Blankets 0,5 bis 5 mm je nach Schwellformel. Derartige Verbiegungen lassen sich durch geringe Spannkkräfte beherrschen. Der Minimale Krümmungsradius für den verbogenen Führungskasten ist mit $s = 200$ m so groß, daß keine konstruktiven Schwierigkeiten hinsichtlich der Gängigkeit des Absorberbündels im Führungskasten zu erwarten sind.

Von der erwähnten Möglichkeit, Coreelemente mit Natriumtemperaturen unter 300°C zu fahren (wozu die äußere Wärmeisolation zur thermischen Trennung von benachbarten heißeren Elementen Voraussetzung ist) wurde bei den Trimmstabführungsrohren, den Abschaltstabführungsrohren, den Bestrahlungs-Rigs und dem inneren Kranz der Reflektorelemente Gebrauch gemacht. Dadurch kann der gesamte Reflektor "kalt" gefahren und frei von Schwellverbiegungen gehalten werden, so daß der Reflektor bezüglich der Coreverspannung die Funktion eines Stütz- mantels übernehmen kann, welcher nur in Höhe der Elementköpfe von außen verspannt zu werden braucht.

Etwas unterhalb der Core-Mittelebene wird eine zweite Verspannungsebene eingefügt, in der die auftretenden Kräfte im wesentlichen nach innen gerichtet sind. Diese Verspannungsebene braucht daher nur bis zu den inneren Reflektorreihen geführt zu werden. Die Elementfüße werden (angenähert) "frei drehbar" in der Core-Tragplatte gelagert, so daß sich eine Dreipunktlagerung aller Elemente ergibt. Die Schlüsselweiten der Elemente werden so eingestellt, daß die Verspannungsebenen im Betriebszustand (angenähert) spielfrei sind und die Schnittpunkte der Elementachsen mit den Verspannungsebenen sich auf Geraden befinden. Hierdurch wird es in guter Näherung möglich, die Verbiegungsrechnungen für jedes Element unabhängig von den übrigen durchzuführen. Die Öffnungen im Core, in die die Bestrahlungsloops eingesetzt werden, müssen mit Stützringen versehen werden, welche die Verspannungskräfte aufnehmen. Die Stützringe können über die Loop-Öffnungen im Reaktordeckel ausgewechselt werden.

Beim Übergang von konventionellen auf geteilte Brennelementkästen wird lediglich eine weitere Verspannungsebene in das Core eingefügt, um eine Zweipunktlagerung der Kopfstücke der geteilten Brennelemente zu erreichen. Durch entsprechende Vorkehrungen wird auch ein sukzessiver Übergang von ungeteilten auf geteilte Brennelementkästen möglich.

Obwohl die Effekte des Strukturmaterialschwellens in der Verspannungsebene dicht unterhalb der Core-Mittelebene beim FR 3 relativ klein sind, ergibt sich daraus doch bereits eine merkliche Störung der hexagonalen Gitteranordnung, aus der Unbestimmtheiten der räumlichen Brennstoffanordnung folgen. Wegen des vorgesehenen Dreier-Zyklus bei der Brennstoffbehandlung mit azimuthaler 180° -Drehung der Elemente mit 1/3-Abbrand folgt ein Wechsel von einer nach außen zu einer nach innen dichtesten Brennstoffpackung. Die damit zusammenhängenden Probleme werden mit in die laufenden Untersuchungen einbezogen.

1330. Untersuchungen zur FR-3-Sicherheit

Mechanische Explosion des zentralen Testloops des Reaktors

(J.L.de Francisco-Sainz, INR)

Die folgenden Berechnungen sind durchgeführt worden:

1. Berechnungen in 2 Dimensionen mit (r-z)-Geometrie und Diffusions-Theorie.

Das Core wird in zwei radiale Zonen unterteilt. In der inneren sind die 12 Regelstäbe, in der äußeren Abschaltstäbe und periphere Loops homogenisiert. Axial wird das Core von einem 25 cm dicken Nickelreflektor begrenzt. Radial sind das Core und der axiale Reflektor von einem 40 cm dicken Blanket umgeben (s. Abb. 2).

Das Trennrohr des zentralen Testloops besteht aus zwei konzentrischen Röhren mit einem Helium-Ringraum. Die inneren bzw. äußeren Radien des Trennrohres betragen 10.1 bzw. 13.0 cm. Im zentralen Testloop steht ein karbidisches Brennelement.

Die folgenden Fälle werden berücksichtigt:

Ein Referenz-Core und drei Fälle mit verschiedenen Störungen oder Brüchen des zentralen Testloops als Folge einer Explosion des Loops. Die Brüchen werden dargestellt als drei verschiedene Ausdehnungen des Rohres:

- a) Referenz-Core. - Die Abmessungen und sonstige Angaben sind in der Abb. 2 aufgeführt.
- b) Kleiner Bruch. - Das innere Rohr des Trennrohres wird ausgedehnt bis zum äußeren Rohr (das innerere Rohr berührt das äußere). Das Helium des Ringraums wird entfernt. Der innere bzw. äußere Radius des Trennrohres beträgt 11.449 bzw. 13.0 cm. Alle anderen Abmessungen bleiben.
- c) Mittlerer Bruch. - Von Fall b) aus werden beide Röhren des Trennrohres weiter ausgedehnt. Der innere bzw. äußere Radius beträgt 15.297 bzw. 16.49 cm. Das Trennrohr umgebendes Natrium wird entfernt.
- d) Großer Bruch. - Er besteht in einer noch größeren Ausdehnung des Trennrohres als im vorhergehenden Fall. Der innere bzw. äußere Radius des Trennrohres beträgt 18.46 bzw. 19.46 cm. Ein Teil des Cores (Zone I) und des Ni-Reflektors werden zusammengeschoben. Das Natrium wird aus den zusammengeschobenen Teilen des Cores und Reflektors ejektiert. Die Teilchenzahldichten von Brennstoff- und Strukturmaterialien bleiben in allen drei Störfällen erhalten.

Die Resultate von k_{eff} und die Werte der mittleren freien Weglänge des zentralen Testloops mit dem karbidischen Brennelement werden für die wichtigsten Gruppen in der Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1

Resultate: Kritikalität und mittlere freie Weglänge für die untersuchten Fälle

Fall	k_{eff}	l_3 (cm)	l_4 (cm)	l_5 (cm)	obere Gruppengrenze ^(eV)
Referenz	1.084 ⁺	11.35	9.09	6.39	Gruppe (i) $i = 1 - 10.5 \times 10^6$
kleiner Bruch	1.079 ⁺⁺	16.11	11.90	8.31	2 - 4.0×10^6 3 - 1.4×10^6 4 - 4.0×10^5
mittlerer Bruch	1.062 ⁺⁺	28.78	21.25	14.84	5 - 1.0×10^5 6 - 2.15×10^4
großer Bruch	1.029	41.87	30.92	21.59	7 - 4.65×10^3 8 - 1.0×10^3
großer Bruch	1.037 ⁺	29.27	29.10	20.79	9 - 2.15×10^2 10 - 21.5×10^0

⁺ mit He im zentralen Testloop.

⁺⁺ ohne He im zentralen Testloop.

2. Eindimensionale radiale Störungsrechnungen.

Mit diesen lokalen Störungsrechnungen soll der Einfluß einer Natriumdichteänderung auf k_{eff} in Abhängigkeit von Höhe und radialen Ort der Störprobe ermittelt werden.

Das axiale Buckling für die radiale Rechnung wurde so bestimmt, daß sich das gleiche k_{eff} einstellt, wie in der zweidimensionalen Rechnung.

Die Natriumdichte wurde in der Störprobe um 10% herabgesetzt.

Die Störungen erstreckten sich über das die Trennröhre umgebende Natrium und die sich nach außen anschließenden beiden Core-Zonen (Abb. 2).

In Abbildung 3 ist die relative k_{eff} -Änderung dargestellt in Abhängigkeit vom radialen Ort der Störprobe und von ihrer Höhe.

Durch Integration der lokalen Störungswerte über die Natriumzone und Core-Zone I und durch lineare Extrapolation der Natriumdichtestörung auf einen totalen Void wurde anschließend in grober Näherung die Abhängigkeit der k_{eff} -Änderung von der Höhe der Natriumdampfblase bestimmt (Abb. 4).

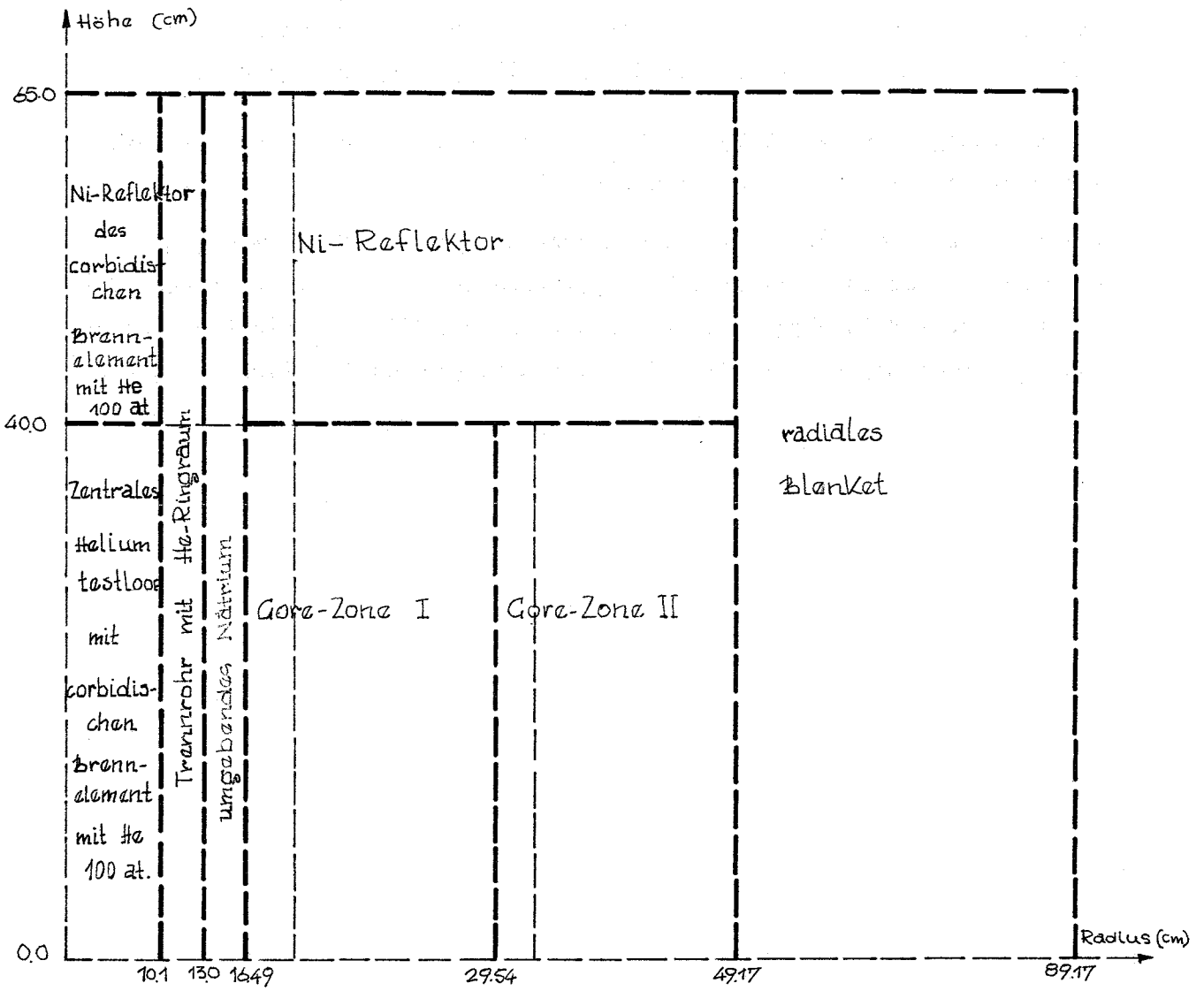


Abb. 2 Skizze der Reaktorgeometrie.

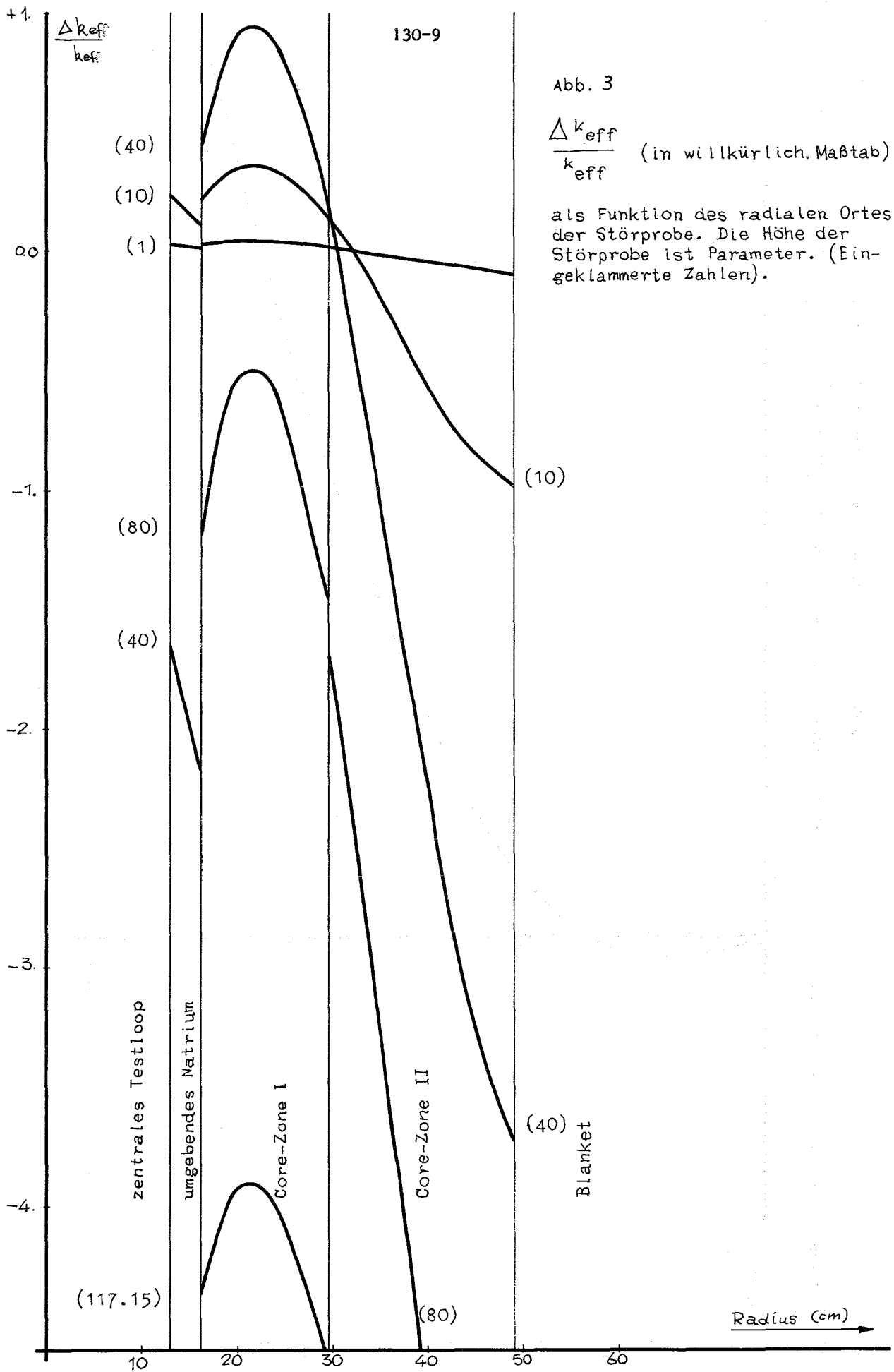


Abb. 3

$\frac{\Delta k_{eff}}{k_{eff}}$ (in willkürlich. Maßstab)

als Funktion des radialen Ortes der Störprobe. Die Höhe der Störprobe ist Parameter. (Eingeklammerte Zahlen).

130-10

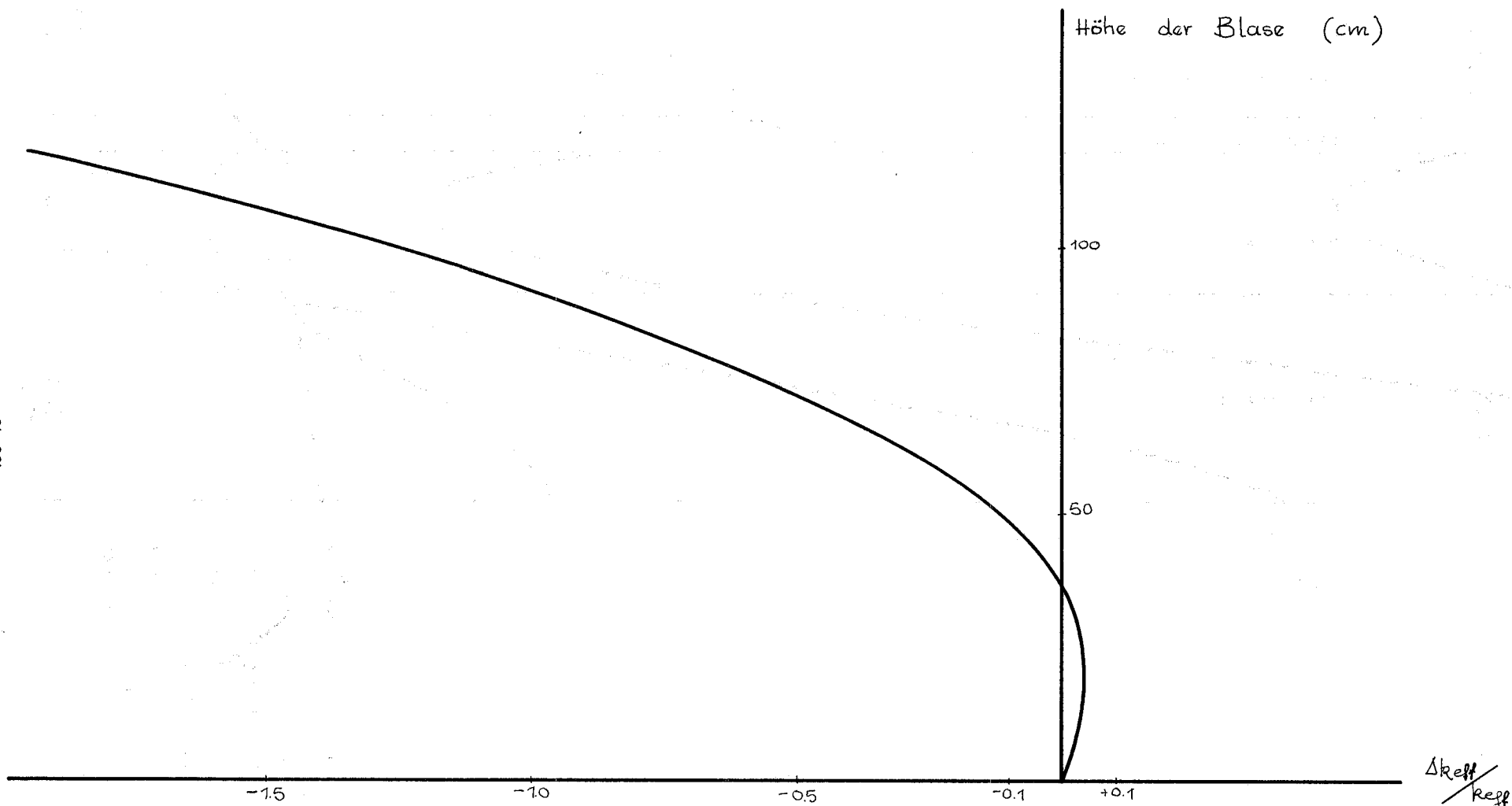


Abb. 4

$$\frac{\Delta k_{eff}}{k_{eff}}$$

als Funktion der Höhe einer zylindrischen Natriumdampfblase, die sich über die an das Trennrohr nach außen anschließende Natriumzone und die Core-Zone I erstreckt.