

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

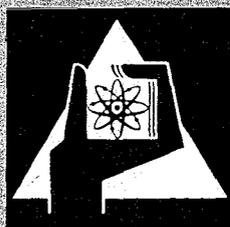
Mai 1972

KFK 1376

Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung
der Oxidbrennstabproben im FR 2

D. Freund



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Mai 1972

KFK 1376

Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung der Oxidbrennstabproben
im FR 2

von

D. Freund

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

1. The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions and activities. It emphasizes the need for transparency and accountability in financial reporting.

2. The second part of the document outlines the various methods and techniques used to collect and analyze data. It includes a detailed description of the experimental procedures and the statistical tools employed.

3. The third part of the document presents the results of the study, including a comparison of the different methods and a discussion of the implications of the findings. It also includes a section on the limitations of the study and suggestions for future research.

4. The final part of the document provides a summary of the key findings and conclusions, along with a list of references and a list of figures and tables.

Kurzfassung

Die Bestrahlung von Brennstabprüflingen mit oxidischem Brennstoff und Edelstahlumhüllung im thermischen Reaktor FR 2 im Kernforschungszentrum Karlsruhe stellt die erste Phase eines umfangreichen Bestrahlungsprogrammes zur Entwicklung von Brennelementen für schnelle Brutreaktoren dar. In dieser Phase wurden insgesamt 292 Prüflinge in Kapselversuchseinsätzen auf Brennelement- und Isotopenkanalposition sowie im Kurzzeitbestrahlungseinsatz des zentralen Helium-Reaktorkreislaufes bestrahlt.

Dieser Programmteil umfaßt die Bestrahlung von Prüflingen mit UO_2 -Brennstoff, z.T. mit verschiedenen Zusätzen (Mo, CeO_2) sowie von Prüflingen mit UO_2 - PuO_2 -Mischbrennstoff verschiedener Anreicherungen und Dichten. Als Hüllmaterial kommen verschiedene austenitische Edelstähle, wie z.B. 1.4541, 1.4550, 1.4970, 1.4981 und 1.4988, zum Einsatz. Bei unterschiedlichen Stabdurchmessern von 4,7 - 12 mm liegen die Brennstoffsäulen zwischen 80 und 225 mm Länge.

Die Prüflinge wurden von einigen Minuten im Kurzzeitbestrahlungseinsatz bis zu 600 Tagen (Vollastäquivalent) in Kapselversuchseinsätzen bestrahlt. Die Stabileistungen variierten hierbei zwischen 300 und 1000 W/cm bei Hülltemperaturen zwischen 340 und 800°C. Die maximalen erzielten Abbrände liegen bei 120 MWd/kg Me.

Im vorliegenden Bericht werden die Aufgaben und Ziele der einzelnen Experimentgruppen erläutert. Weiterhin wird über die Spezifikation und Herstellung der Prüfling, die Bestrahlungseinrichtungen am FR 2, den Bestrahlungsablauf sowie über einige Ergebnisse der Bestrahlungsnachuntersuchungen berichtet.

Abstract

The irradiation of fuel pin samples with oxide fuel and stainless steel cladding in the Karlsruhe thermal reactor FR 2 represents the first phase of an extensive irradiation program dealing with the development of fuel elements for fast breeder reactors. During this phase a total of 292 samples has been irradiated in irradiation rigs in core positions as well as in the short term irradiation facility in the FR 2 helium loop.

This phase of the program includes irradiation of samples with UO_2 fuel, partially with different admixtures (Mo, CeO_2), and with UO_2 - PuO_2 fuel of various enrichments and densities. The cladding materials of these samples consist of the austenitic stainless steels 1.4541, 1.4550, 1.4970, 1.4981, and 1.4988. The fuel pin outer diameters vary in the range of 4.7 - 12.0 mm, with fuel lengths between 80 and 225 mm.

The irradiation time of the samples covers the range of from some minutes up to 600 days (full power equivalent). The linear rod power lies between 300 and 1000 W/cm at clad temperatures from 340 to 800°C. Maximum burnup values of about 120 MWd/kg Metal have been achieved.

This report summarizes the problems and objects of the different irradiation groups. Furthermore, specifications and production of the samples, irradiation data and some results of post irradiation examination are reported and discussed.

I n h a l t

Seite

1.	Einleitung	1
2.	Aufgaben und Ziele der Bestrahlungsexperimente	2
2.1	Die Kapselversuchsgruppen	2
2.2	Die He-Loop-Versuchsgruppen	5
2.3	Der Vergleich Experiment - Anwendung	7
3.	Auslegung, Spezifikation und Herstellung der Brennstabprüflinge	8
3.1	KVE-Prüflinge	8
3.1.1	Kapselversuchsgruppe 1	8
3.1.2	Kapselversuchsgruppe 2	12
3.1.3	Kapselversuchsgruppe 3	13
3.1.4	Kapselversuchsgruppe 4a	16
3.1.5	Kapselversuchsgruppe 4b	19
3.1.6	Kapselversuchsgruppe 4c	22
3.1.7	Kapselversuchsgruppe 5a	25
3.1.8	Kapselversuchsgruppe 5b	29
3.2	Loop-Prüflinge	32
3.2.1	Loop-Versuchsgruppe 1 und 2 Z	32
3.2.2	Loop-Versuchsgruppe 2	35
3.2.3	Loop-Versuchsgruppe 3	36
4.	Bestrahlungseinrichtungen im FR 2	42
4.1	Die Kapselversuchseinsätze (KVE)	42
4.2	Die Bestrahlungseinrichtung im He-Loop	45
5.	Der Bestrahlungsablauf	48
5.1	Reaktorbetriebsbedingungen	48
5.2	Bestrahlungsdaten der Kapselversuchsgruppen	50
5.3	Bestrahlungsdaten der Loop-Versuchsgruppen	54
6.	Bestrahlungsnachuntersuchung	59
6.1	Der Ablauf der Bestrahlungsnachuntersuchung	59
6.2	Die Nachuntersuchung der Kapselversuchsgruppen	60
6.3	Die Nachuntersuchung der Loop-Versuchsgruppen	70
7.	Zusammenfassung	74
	Literatur	76

1. Einleitung

Eine der zentralen Aufgabenstellungen im Karlsruher Entwicklungsprogramm für den Schnellen Natriumgekühlten Reaktor SNR 300 ist die Entwicklung von Brennelementen für schnelle Brutreaktoren. Im Rahmen eines umfangreichen Bestrahlungsprogrammes wurden im Karlsruher Forschungsreaktor FR 2 neben Brennstoff- und Hüllmaterialbestrahlungen Untersuchungen an Brennstabproben mit oxidischem Brennstoff und Edelstahlumhüllungen durchgeführt. Diese Bestrahlungsexperimente lassen sich nach den im FR 2 bestehenden Bestrahlungseinrichtungen in zwei Klassen einteilen, den sogenannten Kapsel- und Loopversuchsgruppen. Während die Brennstabprüflinge der ersten Klasse in den sogenannten Kapselversuchseinsätzen (KVE) auf Brennelement- oder Isotopenkanalpositionen des FR 2 bestrahlt werden, kommen die Prüflinge der zweiten Klasse in dem Helium-Loop in Coremitte zum Einsatz.

In der folgenden Übersicht sind die einzelnen Versuchsgruppen der beiden Klassen zusammengestellt.

KVE-Versuchsgr.	Anzahl Prüflinge	Brennstoff	Bestrahlungszeitraum
1	24	UO ₂ , UO ₂ -Mo	1965
2	31	UO ₂ , UO ₂ -CeO ₂	1966 - 1967
3	34	UO ₂ , UO ₂ -CeO ₂	1967 - 1968
4 a	28	UO ₂ -PuO ₂	1968 - 1970
4 b	35	UO ₂ -PuO ₂	1968 - 1971
4 c	12	UO ₂ -PuO ₂	1969 - 1971
5 a	9	UO ₂ -PuO ₂	1970 - 1971
5 b	18	UO ₂ -PuO ₂	1970 - 1971
Loop-Versuchsgr.	Anzahl Prüflinge	Brennstoff	Bestrahlungszeitraum
1	11	UO ₂	1966
2	43	UO ₂	1966 - 1968
2 Z	13	UO ₂	1968
3	34	UO ₂ -PuO ₂	1969 - 1970

In dem vorliegenden Bericht werden die Aufgaben und Ziele dieser Bestrahlungsexperimente dargestellt. Für die einzelnen Versuchsgruppen werden weiterhin die wichtigsten Spezifikations- und Herstellungsparameter aufgeführt, denen sich eine Beschreibung der Bestrahlungseinrichtungen im FR 2 sowie des Bestrahlungsablaufes und der Bestrahlungsnachuntersuchung, soweit diese bereits durchgeführt ist, anschließen.

Die in diesem Bericht vorliegende Gesamtdarstellung des Karlsruher Bestrahlungsprogramms, welches mit seinen Anfängen auf das Jahr 1961 zurückgeht, zitiert eine Reihe von unveröffentlichten Arbeiten aller Entwicklungsphasen dieses Programms. Hierdurch soll die Zusammenarbeit einer Vielzahl von Personen, die zur erfolgreichen Durchführung eines derart komplexen Unternehmens erforderlich ist, dokumentiert werden.

2. Aufgaben und Ziele der Bestrahlungsexperimente

2.1 Die Kapselversuchsgruppen

Da die Brennelemente schneller Brutreaktoren aus Gründen der Wirtschaftlichkeit auf hohe Leistungsdichten und hohe Abbrände ausgelegt werden müssen, werden sie ganz besonders harten Betriebsbedingungen unterworfen. Um zu einem Verständnis des komplexen Verhaltens eines Brennstabes unter solchen Bedingungen zu kommen, muß eine Vielzahl spezieller Probleme untersucht werden, deren Beantwortung zur Auslegung, Spezifikation und Herstellung von Brennstäben des schnellen Reaktors führen soll.

Die erste Aufgabe im Hinblick auf die Zielsetzung des Bestrahlungsprogrammes liegt - da die Experimente in einem thermischen Reaktor durchgeführt werden - in der Erstellung einer Bestrahlungsvorrichtung, welche den Versuchsablauf unter den gewünschten Betriebsbedingungen gestattet. Im Rahmen der Versuchsgruppen 1 und 2 sollen verschiedene Modelle von Kapselversuchseinsätzen (KVE) erprobt werden, mit der Maßgabe, eine optimale, instrumentierbare Kapsel für die kommenden Bestrahlungsversuche an Mischoxidbrennstäben mit Schnellbrütergeometrie bereitzustellen. Des weiteren dienen diese Experimente der Sammlung erster praktischer Erfahrungen von Brennstabbestrahlungen sowie von Bestrahlungsnachuntersuchungen. Bei diesen Modellversuchen kommen Brennstäbe mit relativ großen Durchmessern von 10 und 12 mm

zum Einsatz, die bis zu Abbränden von ca. 20 MWd/kg Me bestrahlt werden. Der Brennstoff besteht aus mit U-235 angereichertem Uran-dioxid, dem teilweise Mo- und CeO_2 -Zusätze zur Untersuchung des thermischen Verhaltens verschiedener Brennstoffmischmengen im Hinblick auf eventuelle Beeinflussung des radialen Temperaturgradienten sowie auf spätere UO_2/PuO_2 -Bestrahlungen beigemischt werden. Der Brennstoff liegt in Form von Tabletten und einvibrierten Brennstoffpartikeln vor. Als Hüllmaterial kommen austenitische Stähle zum Einsatz. (Nähere Einzelheiten s. Kap. 3.1.1 und 3.1.2.)

Die aus diesen ersten Bestrahlungsexperimenten resultierenden Ergebnisse führen konsequent zu der Auslegung der Kapselversuchsgruppe 3. Die Aufgabenstellung läßt sich folgendermaßen skizzieren: In der letzten Modellgruppe vor der Bestrahlung von Pu-haltigem Brennstoff werden Oxidstabproben, z.T. mit CeO_2 -Beimischung als PuO_2 -Simulation, unter simulierten Schnellbrüterbedingungen bis zu hohen Abbränden bestrahlt. Als Versuchsparameter werden Brennstoff-Form und -Dichte sowie der Zielabbrand variiert. Die bisherigen Kapseltypen mit Pb-Bi-Legierung als Wärmeübertrager, die sich nicht bewährt haben, werden durch eine neue Kapsel mit Wärmeübertragung durch Na ersetzt, die erstmals am Prüfling erprobt werden soll. Die Untersuchungsziele betreffen die Funktionssicherheit der Prüflinge und der Kapseln, Aussagen über Geometrie- und Strukturänderungen der Prüflinge und des Brennstoffs, der Spaltgasfreisetzung, der Spaltproduktverteilung sowie der Eignung von CeO_2 als PuO_2 -Simulation (s. Kap. 3.1.3).

Die Bestrahlung von Brennstabproben mit UO_2 - PuO_2 -Mischbrennstoff ist Hauptaufgabe der Versuchsgruppe 4a. Diese ersten in Deutschland bestrahlten Pu-haltigen Prüflinge sollen gleichzeitig die Methodik der Nachuntersuchung sowie die Auswertung derartig komplexer Experimente weiterentwickeln helfen. Weiterhin ist erstmals die Auslegung derartiger Prüflinge und ihre spezifikationsgerechte Herstellung im Labormaßstab praktisch durchzuführen. Die Bestrahlung dieser Prüflinge bei Stabileistungen um 500 W/cm bis zu hohen Abbränden um 90 MWd/kg Me sowie Aussagen über das Verhalten des Prüflings mit Mischbrennstoff in den Bestrahlungskapseln ist Ziel dieses Experiments. (S. Kap. 3.1.4)

Die Brennstabprüflinge der vorangegangenen Versuchsreihen unterscheiden sich von den Schnellbrüterbrennstäben neben der durch die Kapselkonstruktion vorgegebenen Länge im wesentlichen im Durchmesser. In der Versuchsgruppe 4b werden UO_2 - PuO_2 -Brennstäbe mit dem für den

SNR-Brennstab vorgesehenen Durchmesser von 6 mm bestrahlt. Die weiteren Unterschiede zu den Prüflingen der Versuchsgruppe 4a liegen in der höheren Anreicherung von 20 Gew.-% Pu (Vg. 4a: 15 Gew.-%), welches der Anreicherung der inneren Spaltzone des SNR entspricht, sowie in der Stirnflächeneinwölbung der Brennstofftabletten. Die Bestrahlung wird in modifizierten Kapseln der Versuchsgruppe 4a (Wärmeübertragungsmedium NaK) durchgeführt. Diese Versuchsgruppe setzt die Abbrandversuche der Versuchsgruppe 4a mit geänderten Prüflingen fort (Kap. 3.1.5).

Das Ziel der Versuchsgruppe 4c ist die Untersuchung des radialen Schwellens von Brennstäben unter Bestrahlung. Um merkliche Schwellraten zu erzielen, wird hochdichter Brennstoff in die Prüflinge eingesetzt, der bei mittleren Stableistungen um 400 W/cm Abbrände von 30 und 60 MWd/kg Me erreichen soll und der an seiner axialen Ausdehnung gehindert ist (axial restraint). In dieser Versuchsgruppe kommen verschiedene Hüllrohrmaterialien zum Einsatz, um Aussagen über die auf die Hülle ausgeübten radialen Kräfte, die dadurch auftretenden Verformungen und unterschiedlichen Eignungen der Materialien zu gewinnen. Abgesehen von der höheren Tablettendichte und der fehlenden Stirnflächeneinwölbung unterscheiden sich die Prüflinge nicht von denen der Versuchsgruppe 4b, ebenso wird die Bestrahlung in den gleichen Kapseln durchgeführt. (Kap. 3.1.6)

Werden Prüflinge derselben Versuchsgruppe in verschiedenen Kapselversuchseinsätzen und Reaktorpositionen bestrahlt, so ist aufgrund der unterschiedlichen Bestrahlungsgeschichte ein unmittelbarer Vergleich der Ergebnisse untereinander schwierig oder gar unmöglich. Um diese direkte Vergleichbarkeit zu erzielen, ist die "Einheit des Ortes und der Zeit" zu verwirklichen. Dies geschieht in den Bestrahlungsexperimenten der Versuchsgruppe 5a. In diesen sogenannten integrierten Dichteversuchen werden in jedem der Prüflinge drei verschiedene Brennstoff-Dichtestufen untergebracht, die einmal die Beschreibung des Verhaltens von Brennstabprüflingen unterschiedlicher Dichte bei nahezu identischen Bestrahlungsbedingungen in eindeutiger Weise gestatten, zum anderen noch zusätzlich Informationen über axiale Wechselwirkungen untereinander erwarten lassen. Eine der wichtigsten Aufgaben bei diesem Parametertest ist die Prüflingsherstellung mit weit schärferen Toleranzen als bei den bisherigen

Versuchsgruppen. Die Bestrahlungen werden in NaK-Kapseln bei Stableistungen bis 550 W/cm bis zu den drei Abbrandstufen von 5, 15 und 50 MWd/kg Me durchgeführt. (Kap. 3.1.7)

Um zu einer Beurteilung des Anfahr- und Abbrandverhaltens von Brennstäben mit höheren Leistungsdichten, Temperaturgradienten und Oberflächenbelastungen der Brennstabhülle, wie sie für das Brennstabkonzept des schnellen Testreaktors FR 3 signifikant sind, zu kommen, werden in der Versuchsgruppe 5b Brennstäbe mit 4,7 mm Außendurchmesser und einem Brennstoffdurchmesser von 4 mm bei Stableistungen um 400 W/cm bis zu Abbränden zwischen 20 und 120 MWd/kg Me bestrahlt. Diese Bestrahlungsexperimente sollen Fragen zur Strukturänderung, thermischen Stabilität, zum Brennstoffschwellen sowie zur Spaltgasfreisetzung und Spaltprodukt-diffusion unter extremen Betriebsbedingungen beantworten helfen (Kap. 3.1.8).

2.2 Die He-Loop-Versuchsgruppen

Der Betriebsablauf eines Reaktors kann im wesentlichen in zwei Betriebsphasen, den stationären und instationären Betrieb, eingeteilt werden. Während man den Betrieb unter Vollast als stationäre Phase bezeichnet, können alle anderen Zustände wie Anfahr- und Abschaltphase, Lastwechsel und Reaktorabschaltungen zur instationären Phase zusammengefaßt werden. Die Untersuchung des Verhaltens von Brennstäben unter instationären Betriebsbedingungen ist Aufgabe der Bestrahlung in den Loop-Versuchsgruppen. Im Gegensatz zu den Prüflingen in den KVE, die, abgesehen von Störungen, nur jeweils am Ende eines Reaktorzyklus ausgebaut werden können, gestattet die Bestrahlungsvorrichtung in der zentralen Helium-Kreislaufanlage (He-Loop) zyklusunabhängige Bestrahlungen.

Die ersten Bestrahlungseinsätze der Loop-Versuchsgruppe 1 dienen im wesentlichen der Loop-Erprobung sowie der Untersuchung der Verhaltensweise von Prüflingen mit UO_2 -Brennstoff bei geringem Abbrand. Die Bestrahlungen erstrecken sich über Zeiträume von 5, 21 und 24 Tagen (Kap. 3.2.1).

Die Kurzzeitbestrahlungen der Versuchsgruppe 2 sollen Aufschluß über das Verhalten des Brennstoffs während der Bestrahlungszeit, in der er die Form und Struktur des unbestrahlten Zustandes verliert, liefern. In einem ersten Bestrahlungszeitraum von 10 Minuten wird der Beginn der Strukturänderungen untersucht, dem sich zur Abschätzung der Geschwindigkeit dieser Veränderungen von Form, Struktur und physikalischer Eigenschaften eine weitere Bestrahlungszeit von 2 Stunden anschließt. Die Untersuchungen nach einer Bestrahlung von 24 Stunden sollen schließlich den weitgehenden Abschluß dieser Umwandlungen nachweisen. Die Kopplung dieser drei Bestrahlungszeiten mit drei Stableistungen von ca. 500, 750 und 1000 W/cm soll weiterhin auf die Abhängigkeit der Strukturänderung - einschließlich zentralem Schmelzen - von der Stableistung und damit vom Temperaturgradienten zielen. Als weitere Variante erfolgt die Bestrahlung von Brennstäben in aufeinanderfolgenden Leistungsbereichen über eine Gesamtzeit von etwa 10 Tagen. Außerdem soll ein Konzept zur kontinuierlichen Messung des Spaltgasdruckaufbaus erprobt werden (Kap. 3.2.2).

Um das Verhalten von UO_2 -Brennstabprüflingen unter Lastwechsel zu untersuchen, werden in der Loop-Versuchsgruppe 2 Z Brennstabprüflinge zyklisch bestrahlt. Die Bestrahlungszeiten liegen zwischen 2 und 18 Tagen mit 2 bzw. 4 Stunden Abklingzeit je Bestrahlungszyklus bei Stableistungen von 500 und 700 W/cm. Die zyklische Belastung wird durch Ein- und Ausfahren des Prüflings in die Bestrahlungsposition erreicht. Das Ziel dieser Versuchsgruppe ist die Untersuchung des Einflusses instationärer Lastzustände auf das Brennstabverhalten (Kap. 3.2.1).

In Weiterführung der Loop-Versuchsgruppen 2 und 2 Z soll das Anfahrverhalten und der Einfluß des zyklischen Betriebes auf Brennstäbe mit UO_2 - PuO_2 -Tablettenbrennstoff näher untersucht werden. Neben den Untersuchungen der Strukturänderungen im Mischbrennstoff in Abhängigkeit von Temperatur, Temperaturgradient und Bestrahlungszeit liegt das Ziel der Experimente der Loop-Versuchsgruppe 3 in der Bestimmung des Einflusses zyklischer Betriebsbedingungen auf die Änderung des Spaltes Brennstoff-Hülle. Bei den Bestrahlungsexperimenten dieser Gruppe werden die Parameter Bestrahlungszeit (10 min - 144 h), Stableistung (500 - 1000 W/cm), Brennstoffdichte (83 % und 90 % th.D.) und Spaltweite (50 μ und 150 μ radial) variiert (Kap. 3.2.3).

2.3 Der Vergleich Experiment - Anwendung

Wie bereits erwähnt, stellen die oben aufgeführten Versuche eine Simulation sowohl der Brennstäbe als auch der Betriebsbedingungen schneller Reaktoren dar, deren wesentliche Unterschiede, abgesehen vom Brennstoff und dessen Anreicherung, in der Stabgeometrie, den Bestrahlungsbedingungen und den daraus resultierenden Abweichungen liegen. Der Stabaufbau der Brennstabprüflinge unterscheidet sich von dem SNR-Prototyp in der Gesamtlänge, der Länge der Brennstoffsäule, dem Durchmesser (bis auf die Prüflinge der Gruppe 4b) und in dem Fehlen der axialen Brutstoff-Partien. Da die Bestrahlung in einem thermischen Fluß erfolgt, ist infolge der dadurch bedingten Flußabsenkung mit einer unterschiedlichen Wärmequelllichtverteilung und Temperaturverteilung zu rechnen. Ebenso ist bei der Bewertung der Experimente das unterschiedliche Energiespektrum der Neutronenflüsse und die entsprechende Strahlendosis im thermischen und schnellen Reaktor zu berücksichtigen. Ein weiterer wichtiger Unterschied liegt in der Wärmeübertragung. Bei den Experimenten wird die im Betrieb erzeugte Wärme durch die stagnierende Na- bzw. NaK-Schicht der Kapseln bzw. durch das Helium im Loop abgeführt, im Gegensatz zu strömendem Natrium im SNR, welches einen Einfluß durch unterschiedliche Hülloberflächenbeanspruchung auf das Brennstabverhalten haben kann.

Trotz dieser zum Teil erheblichen Abweichungen gestatten die gesamten Bestrahlungsexperimente detaillierte Aussagen und Schlüsse auf das Verhalten von Brennstäben schneller Reaktoren, da einige Phänomene wie z.B. Strukturänderungen und mechanische Wechselwirkungen zwischen Brennstoff und Hülle durch Rißbildung im Brennstoff auf rein thermische bzw. thermisch-zyklische Bedingungen zurückzuführen sind. Außerdem liefern diese Experimente die Grundlagen zur Auslegung, Spezifikation, Herstellung und Nachuntersuchung von Bestrahlungsexperimenten in schnellen Versuchsreaktoren, der logischen Fortführung des Programms zur Entwicklung schneller Brutreaktoren.

3. Auslegung, Spezifikation und Herstellung der Brennstabprüflinge

Nach Festlegung von Aufgabe und Ziel des Experimentes wird mit Auslegung und Spezifikation der Brennstabprüflinge die Voraussetzung für deren Herstellung geschaffen. In der Auslegung der Versuchsgruppe wird neben dem Versuchsvolumen der Prüfling durch Angabe von Brennstoffzusammensetzung, -form und -dichte sowie des Hüllmaterials im wesentlichen festgelegt. Weiterhin werden die Bestrahlungsbedingungen durch Festlegung von Stableistung, Hüllwandtemperatur und Abbrand gegeben. In der Spezifikation wird Brennstoff, Hülle und Prüflingsaufbau in allen Einzelheiten exakt beschrieben. Die Brennstoffspezifikation umfaßt genaue Angaben über die gewünschte chemische Zusammensetzung, die Isotopenzusammensetzung, die Homogenität von Mischbrennstoffen sowie über die Brennstoff-Form, dessen Geometrie und Dichte. Entsprechendes gilt für die Hüll- und Brennstabspezifikation. Zusätzlich werden Untersuchungen und Prüfungen an den fertiggestellten Einzelkomponenten sowie am Prüfling selbst festgelegt, um die Einhaltung der Forderungen der Spezifikation nachzuweisen. Im Herstellungsbericht schließlich wird neben der Darstellung der Brennstoffherstellung eine genaue Analyse und Vermessung von Brennstoff, Hülle und Brennstab gegeben, welche den Anfangszustand der Prüflinge festlegen und eine Beschreibung der Zustandsänderungen durch Bestrahlung ermöglichen.

In den folgenden Abschnitten werden die wichtigsten Auslegungs-, Spezifikations- und Herstellungsmerkmale der Prüflinge der einzelnen Versuchsgruppen zusammengestellt.

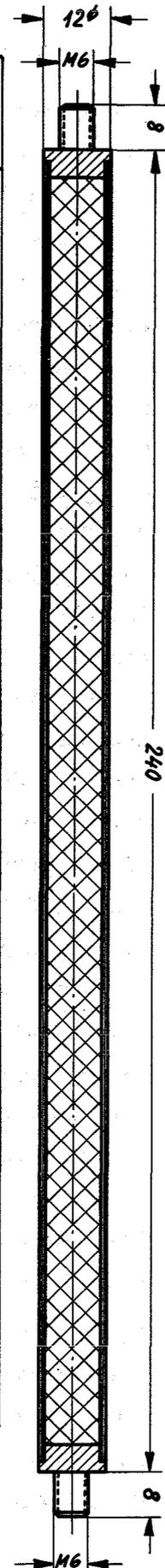
3.1 KVE-Prüflinge

3.1.1 Kapselversuchsgruppe 1

In sechs Kapselversuchseinsätzen werden 24 Prüflinge auf normalen Brennelementpositionen des FR 2 bestrahlt. Die Prüflinge unterscheiden sich in der Brennstoffzusammensetzung, der Brennstoff-Form und dessen Dichte. Als Brennstoff kommt angereichertes UO_2 sowie Mischungen aus UO_2 , Mo und CeO_2 zum Einsatz. Die Anreicherung beträgt in allen Fällen 12,5 % U-235. Als Brennstoff-Form werden Tabletten sowie einvibrierte Proben in Form von abgerundeten Partikeln gewählt. Die Brennstoffdichten betragen 85 und 91 % th.D. Bei Stableistungen um 360 W/cm, bedingt durch den 12 MW-Betrieb des Reaktors sowie durch die Kapselkonstruktion, sollen die Brenn-

Tabelle I Beschreibung der Prüflinge der Kapselversuchsgruppe 1
(Auswahl der wichtigsten Daten)

KVE Nr.	Prüfling Nr.	Brennstoff, Form	Dichte (% th.D.)	Kaltspalt, diametral (μ)	UO ₂ -Gewicht (g)
3	5	UO ₂ -Pulver, vibriert	85,27	-	167,6
	3		85,12	-	167,3
	2		85,22	-	167,5
	1		84,97	-	167,0
4	D	UO ₂ -Tabletten		55	170,5
	C		91	55	170,5
	B		$\pm 1,5$	60	170,5
	A			55	170,9
5	F	UO ₂ -Tabletten	91	70	171,0
	E		$\pm 1,5$	75	170,8
	7	UO ₂ -Pulver, vibriert	85,07	-	167,2
	6		85,12	-	167,3
6	M6	UO ₂ +10 % Mo Pulver vibr.	82,2	-	141,9
	M5		84,0	-	143,9
	M2	UO ₂ + 10% Mo Tabletten	90	60	146,3
	M1		± 2	60	146,4
7	8	UO ₂ -Pulver	85,12	-	167,3
	M7	UO ₂ +10% Mo Pulver	84,0	-	144,1
	M3	UO ₂ +10% Mo Tabletten	90 \pm 2	60	146,3
	G	UO ₂ -Tabl.	91 \pm 1,5	65	170,4
	M9	UO ₂ +10 % Mo Pulver	83,5	-	142,0
	M4	UO ₂ +10 % Mo Tabletten	90 \pm 2	65	146,4
	C2	UO ₂ +10 % CeO ₂ Tabletten	86 \pm 2	70 \pm 10	136,6
	C1				136,6



Anmerkung: Die Reihenfolge der Prüflinge entspricht ihrer Anordnung in der Kapsel von oben nach unten.

Abb. 1 Brennstabprüfling der Kapselversuchsgruppe 1

stabprüflinge bis zu Abbränden zwischen 1 und 6 MWd/kg Me bestrahlt werden. Die Hüllrohrflächentemperatur soll 500°C nicht übersteigen [1].

Die Prüflinge der Versuchsgruppe 1 wurden bei der Firma Nukem, Nuklear-Chemie und -Metallurgie in Wolfgang bei Hanau hergestellt [2, 3, 4]. Die Untersuchung der fertigen Brennstäbe ergab, daß die Spezifikation eingehalten wurde. Die Dichte des UO_2 -Tablettenbrennstoffes beträgt $91 \pm 1,5 \%$ th.D. Die einseitige Stirnflächeneinsenkung entspricht 2,7 - 2,8 % des Tablettenvolumens. Die Tablettendurchmesser sind auf Durchmesser von $9,95 \pm 0,01$ mm geschliffen, um die spezifizierten diametralen Spaltweiten von $65 \pm 10 \mu$ zu erreichen. Die gesamten Tablettensäulen haben eine Länge von $225 \pm 0,5$ mm. Die Brennstoffdichte der Prüflinge mit vibriertem UO_2 -Pulver beträgt $85 \pm 0,5 \%$ th.D., wobei axiale Dichteschwankungen unter $\pm 3 \%$ th.D. liegen. Die Pulversäulenlänge dieser Prüflinge ist $228 \pm 0,5$ mm bei einem Durchmesser von 10 mm. Bei einer Hüllrohrwandstärke von $1 \pm 0,1$ mm ist der Außendurchmesser der Prüflinge 12 mm. Die Prüflinge mit der $\text{UO}_2 + 10$ Gew.-% Mo-Mischung unterscheiden sich neben der Brennstoff-Form durch die Art der Mischung. Während bei den Tabletten der Mo-Zusatz als Pulver untergemischt wird, werden bei den Prüflingen mit Pulverbrennstoff UO_2 -Partikel, die mit Mo beschichtet sind, verwendet. Der Tablettendurchmesser beträgt $9,850 \pm 0,005$ mm, die Dichte $90 \pm 2 \%$ th.D., die Stirnflächeneinsenkung $2 \pm 0,3 \%$ des Tablettenvolumens. Zwischen Tabletten und Hülle besteht ein diametraler Spalt von 60μ . Die Vibrationsdichte der Pulverprüflinge liegt zwischen 82 und 84 % th.D. Die Brennstoff-Säulenlängen entsprechen denen der UO_2 -Prüflinge. Die letzten zwei Prüflinge C1 und C2 (frühere Zuordnung zur Versuchsgruppe 2), die der Vereinfachung halber zur Versuchsgruppe 1 gezählt werden, bestehen aus einer $\text{UO}_2 + 10$ Gew.-% CeO_2 -Mischung in Tablettenform. Die Tabletten besitzen einen Durchmesser von $9,850 \pm 0,005$ mm, eine Dichte von $86 \pm 2 \%$ th.D. Der diametrale Spalt beträgt 60μ .

Die Analyse der Brennstoffe ergab ein O/U-Verhältnis von ca. 2,01 für den UO_2 - und UO_2 -Mo-Brennstoff, von ca. $2,1 \pm 0,05$ für die UO_2 - CeO_2 -Mischung. Das Boräquivalent der chemischen Verunreinigungen ist $\leq 0,6$ ppm. Das Hüllmaterial der Brennstabprüflinge besteht aus dem austenitischen Stahl Nr. 1.4550. Die Endstopfen der Stäbe tragen

Tabelle II Beschreibung der Prüflinge der Kapselversuchsgruppe 2
(Auswahl der wichtigsten Daten)

KVE Nr.	Prüfling Nr.	Brennstoff, - Form, - Anreicherung - Durchmesser	Dichte (% th.D.)	Hüllrohr, Material Abmessungen (mm)
9	A 32	UO ₂ , vibriert	84,1	1.4541
	A 30	geschmolzene	84,0	10 mm \varnothing x 0,7
	A 29	Partikel	85,3	8,6 mm \varnothing \pm 0,05
	A 31	3,4 % U-235	85,2	0,7 mm \pm 0,07
10	A 12	UO ₂ , vibriert	84,0	1.4988
	A 11	geschmolzene	84,9	12 mm \varnothing x 1,0
	A 10	Partikel	84,4	10 mm \varnothing \pm 0,05
	A 9	2 % U-235	84,3	1 mm \pm 0,01
11	A 8	UO ₂ -Tabletten,	92,0	1.4988
	A 7	ungeschliffen	91,9	12 mm \varnothing x 1,0
	A 6	9,74 \pm 0,02 \varnothing	91,9	
	A 5	2 % U-235	92,1	
12	A 27	UO ₂ , vibriert	85,3	1.4541
	A 26	gesinterte P.	85,5	10 mm \varnothing x 0,7
	A 25	3,4 % U-235	85,5	
13	A 3	UO ₂ -Tabletten	92,0	1.4988
	A 2	geschliffen	92,0	12 mm \varnothing x 1,0
	A 1	9,85 \pm 0,01 \varnothing	92,0	
14	A 15	UO ₂ -CeO ₂ , vibr.	85,8	1.4988
	A 14	geschm. Partikel	85,6	12 mm \varnothing x 1,0
	A 13	2 % U-235	85,9	
15	A 22	UO ₂ -CeO ₂ , vibr.	77,4	1.4541
	A 21	gesinterte P.	76,8	10 mm \varnothing x 0,7
16	A 24	UO ₂ -CeO ₂ , vibr.	77,4	1.4541
	A 23	gesinterte P.	76,7	10 mm \varnothing x 0,7
17	25 V	UO ₂ , vibr.,	85,5	1.4541
	29 V	ges. P., 3,4 % UO ₂ , vibr., geschm. P. 3,4 %	86,0	10 mm \varnothing x 0,7
18	A 17	UO ₂ -CeO ₂ , Tabl.	91,5	1.4541
	17 V	geschliffen	91,5	10 mm \varnothing x 0,7
19	A 19	UO ₂ -CeO ₂ , Tabl.	91,5	1.4541
	A 18	geschliffen	91,5	10 mm \varnothing x 0,7

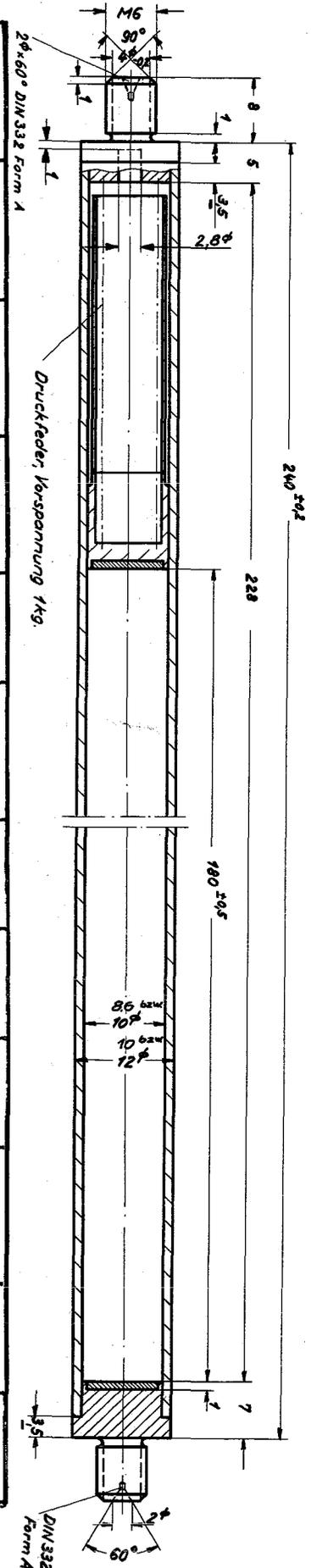


Abb. 2 Brennstabprüfling der Kapselversuchsgruppe 2

zur Vermeidung der Flußaufwölbung eine 1,5 mm dicke Scheibe aus Rhodium. Die Gesamtlänge der Stäbe, die vor dem Verschweißen mit Helium geflutet werden, beträgt 240 mm. In Tabelle I ist die Verteilung der Stäbe auf die Auslegungsvarianten sowie eine Auswahl der wichtigsten Prüflingsdaten zusammengestellt. Abb. 1 zeigt den schematischen Aufbau der Prüflinge.

3.1.2 Kapselversuchsgruppe 2

Die Versuchsgruppe 2 (frühere Bezeichnung 2a) stellt die Fortsetzung der Bestrahlungsexperimente der Gruppe 1 dar. Sie besteht aus den KVE 9 - 19 und enthält 31 Brennstabprüflinge mit UO_2 - und UO_2-CeO_2 -Brennstoff in Tabletten- und Pulverform. Die Bestrahlung wird bei Stabileistungen um 400 W/cm bis zu Abbränden von ca. 20 MWd/kg Me in Brennelementpositionen durchgeführt. Im Rahmen dieser Versuchsgruppe werden einige Kapselmodifikationen untersucht, die wesentlich zur Weiterentwicklung der Bestrahlungskapseln führen.

Die in der Auslegung und Spezifikation [5] festgelegten Proben werden von der Firma Nukem hergestellt [6]. Im folgenden werden die wesentlichen Prüflingsparameter aufgezählt. In Tabelle II ist eine Zusammenstellung der wichtigsten Daten für die einzelnen Prüflinge gegeben. Abb. 2 zeigt den generellen Aufbau der Prüflinge.

Im Rahmen der Versuchsgruppe kommen eine Reihe von Brennstoff-Formen zum Einsatz. Es handelt sich hierbei um geschliffene und ungeschliffene UO_2 - und UO_2 -10 Gew.-% CeO_2 -Tabletten sowie um vibrierten Brennstoff aus UO_2 und UO_2-CeO_2 , der aus geschmolzenen oder gesinterten Partikeln besteht (vergl. Tabelle II). Die Tabletten sind an einer Stirnseite mit einer Einsenkung von 2 % des Tablettenvolumens versehen. Die Brennstoffdichten liegen zwischen 77 und 92 % th.D., die Anreicherungen des Brennstoffs mit U-235 bei 2 und 3,4 Gew.-%. Die Länge der Brennstoffsäule beträgt $180 \pm 0,1$ mm. Zur Bestrahlung kommen Prüflinge mit Außendurchmessern von 10 mm bei 0,7 mm Hüllrohrwandstärke sowie von 12 mm bei 1,0 mm Wandstärke. Als Hüllrohrmaterialien werden die austenitischen Stähle 1.4541 und 1.4988 verwendet. Die unteren Endstopfen sowie die Hülsen für die Druckfedern in den Prüflingen, die mit Helium geflutet sind, sind auf den brennstoffseitigen Stirnflächen mit 1 mm starken Rhodiumscheiben zur Vermeidung der Flußaufwölbung versehen (s. Abb. 1).

Die chemische Analyse ergibt für die UO_2 -Brennstoffe Verunreinigungen mit einem Gesamtboräquivalent $\leq 2,5$ ppm. Auf Grund der Verunreinigungen des CeO_2 mit hauptsächlich Seltenen Erden bis zu einigen 100 ppm kann das Gesamtboräquivalent dieser Prüflinge nicht exakt angegeben werden. Es muß mit ebenfalls einigen 100 ppm gerechnet werden. Das O/U-Verhältnis der UO_2 -Brennstoffe liegt in den vorgeschriebenen Grenzen von $2,00 \pm 0,01$. Das O/Me-Verhältnis des UO_2 - CeO_2 -Brennstoffes kann wegen nicht hinreichend genauer Analysenverfahren lediglich zu $2,1 \pm 0,05$ angegeben werden. Im Gegensatz zur Spezifikation entfällt die Brennstoffvariante mit UO_2 -Mo-Partikeln.

3.1.3 Kapselversuchsgruppe 3

Die 34 Prüflinge der Versuchsgruppe haben gleichen Aufbau und gleiche äußere Abmessungen (Abb. 3). Ihre Auslegung unterscheidet sich in der Brennstoffzusammensetzung, seiner Form und Dichte sowie im Hüllmaterial. Die Verteilung der Prüflinge auf diese Auslegungsvarianten zeigt Tabelle III. Die wesentlichen Bestrahlungsbedingungen sind durch Stableistung, Hüllwandtemperatur und Abbrand gegeben. Die Prüflinge sollen bei maximalen Hülloberflächentemperaturen von $700^\circ C$, maximalen Stableistungen von 700 W/cm bis zu Abbränden im Bereich von 10 - 80 MWd/kg Me bestrahlt werden. Für die Bestrahlung sind normale Brennelementpositionen des FR 2 vorgesehen. Die Prüflinge werden in einer neuartigen Kapsel mit Na als Kühlmedium bestrahlt. (Kapseltyp 4, Kap. 4.1)

Der Brennstoff besteht aus UO_2 -Tabletten mit geschliffener und ungeschliffener Oberfläche sowie aus vibriertem Pulver mit gesinterten bzw. geschmolzenen Partikeln. Der UO_2 - CeO_2 -Brennstoff mit 10,1 Gew.-% CeO_2 liegt in Form von geschliffenen Tabletten sowie vibriertem Pulver mit obigen zwei Partikelmodifikationen vor. Die Brennstoffsäule, die bei sämtlichen Prüflingen eine Länge von 80 mm hat, ist am oberen Ende mit einem Isolierpellet sowie beidseitig mit Rhodium-Plättchen abgeschlossen (s. Abb. 3). In dem Einsatzstück am oberen Brennstoffsäulenende ist weiterhin ein Sintermetallfilter eingelassen, welches Brennstoffstaub vom Spaltgasraum bzw. vom Hohlraum im oberen Endstopfen fernhalten soll. Die Anreicherung beträgt in sämtlichen Prüflingen $11,5 \pm 0,1$ Gew.-% U-235 im Uran-Anteil. Für die Tablettengeometrie ist lediglich der Tablettendurchmesser spezifiziert und zwar zu $6,25 \pm 0,01$ mm bei den geschliffenen Tabletten und zu $6,25 \pm 0,05$ mm bei den ungeschliffenen Tabletten.

Tabelle III Beschreibung der Prüflinge der Kapselversuchsgruppe 3
(Auswahl der wichtigsten Daten)

KVE Nr.	Prüfling Nr.	Brennstoff, - Form	Dichte (% th.D.)	Kaltspalt diametral (μ)	Hüllmaterial
20	1	UO ₂ -Tabletten	92,65	179	Cr Ni Nb 2025 7,4 mm ϕ x 0,5
	5	ungeschliffen	92,83	174	
	7	geschliffen	93,72	174	
21	13	UO ₂ - ungeschl.	92,75	175	
	11	Tabl. geschliffen	93,68	174	
22	19	UO ₂ -CeO ₂ , Tabletten	91,51	185	1.4988 7,4 mm x 0,5
	18	geschliffen	88,26	181	
23	MM	UO ₂ -CeO ₂ , vibr., geschm. Partikel	84,03	-	Cr Ni Nb 2025 7,4 mm ϕ x 0,5
	9	UO ₂ , Tabl., ungeschl.	92,91	177	
	3	" " , geschl.	93,44	174	
24	6	UO ₂ -Tabl., geschl.	88,29	181	
	4	" " , ungeschl.	88,28	198	
25	MS	UO ₂ -CeO ₂ , vibr., gesinterte Partikel	81,21	-	
	2	UO ₂ , Tabl., geschl.	88,12	181	
26	10	UO ₂ , Tabl. geschl.	88,86	181	
	8	" " ungeschl.	88,31	196	
27	14	UO ₂ , Tabl. geschl.	88,56	181	
	12	" " ungeschl.	88,37	198	
28	B4	UO ₂ , Tabl. ungeschl.	87,88	195	
	16	" " ungeschl.	88,08	195	
29	D4	UO ₂ , Tabl., ungeschl.	92,49	178	
	CG	" " geschl.	93,67	174	
	AG	" " "	88,95	181	
	15	" " "	93,63	174	
30	36	UO ₂ , vibr., geschm. Partikel	83,28	-	
	35	" vibr., ges.	85,38	-	
	34	" " geschm.	83,64	-	
	33	" " ges.	85,63	-	
31	39	UO ₂ , vibr., ges. P.	85,69	-	
	38	" " geschm.	85,35	-	
	37	" " ges.	85,99	-	
32	IS	UO ₂ , vibr., ges. P.	85,39	-	
	KM	" " geschm.	84,86	-	
	40	" " ges.	83,14	-	

Die Herstellung der Stäbe einschließlich der Zwischen- und Endprüfungen erfolgte bei der Firma Nukem [7]. Die chemische Analyse liefert ein Gesamtboräquivalent der Verunreinigungen von weniger als 4 ppm für den UO_2 -Brennstoff. Bei den UO_2 - CeO_2 -Mischungen ist mit einem Boräquivalent von mehreren 100 ppm aufgrund von Verunreinigungen an Seltenen Erden von ca. 500 ppm zu rechnen. Das O/M-Verhältnis liegt bei $2,00 \pm 0,01$ für UO_2 , für die UO_2 - CeO_2 -Mischungen werden keine genauen Werte angegeben. Die Prüfung der Hüllrohre aus Cr Ni Nb 2025 und Cr Ni Mo V Nb 1613 (1.4988) zeigt, daß die Rohrabschnitte frei von unzulässigen Oberflächenfehlern sind.

Eine Gesamtdarstellung der Prüflinge der Versuchsgruppe 3 ist in einer Dokumentation [8] gegeben, welche eine detaillierte Darstellung der Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung enthält.

3.1.4 Kapselversuchsgruppe 4a

Die Versuchsgruppe 4a umfaßt 28 Brennstabprüflinge mit UO_2/PuO_2 -Brennstoff. Sie führt die Abbrandversuche der Versuchsgruppe 3 fort und unterscheidet sich von ihr im wesentlichen hinsichtlich des Pu-haltigen Brennstoffes sowie der ausschließlichen Verwendung von Tablettenbrennstoff. Die Prüflinge werden in 9 Kapseln des gleichen Types wie in Versuchsgruppe 3 bestrahlt, die sich gut bewährt haben (s. Kap. 4.1). Bei Stabileistungen von ca. 650 W/cm und maximalen Hülloberflächentemperaturen von $560^\circ C$ sollen Abbrände bis ca. 85 MWd/kg M erreicht werden [9].

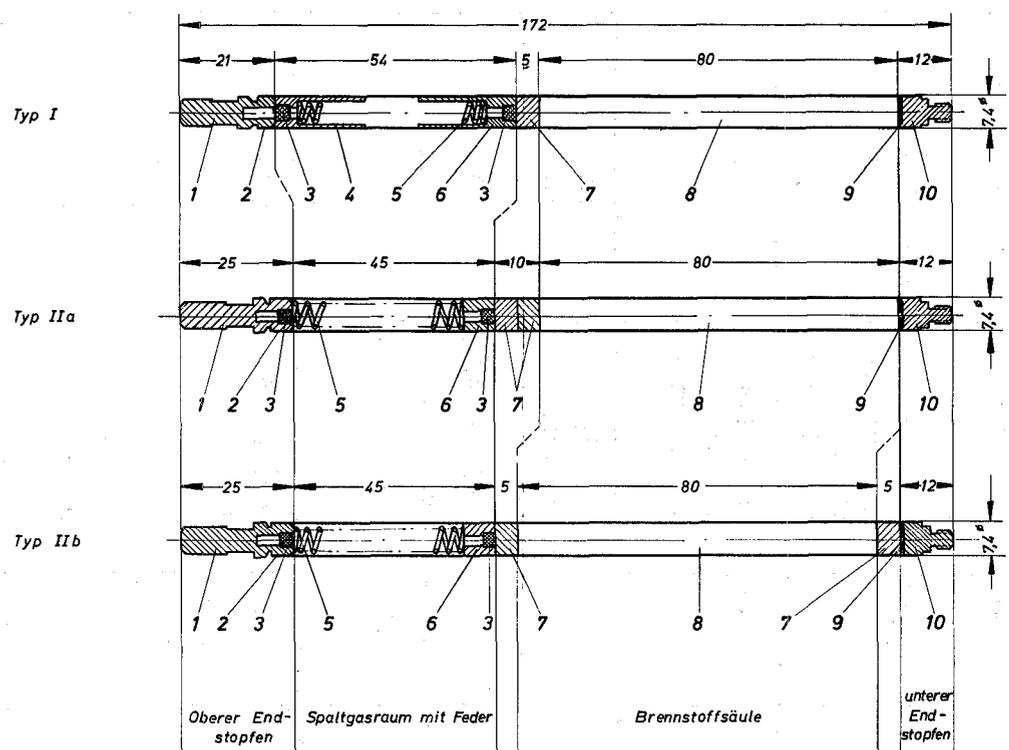
Die Brennstabprüflinge bestehen aus Edelstahlhüllen des Materials 1.4988 (Außendurchmesser 7,4 mm, Wandstärke 0,50 mm) mit verschweißten Endstopfen, dem UO_2 -15 Gew.-% PuO_2 in Tablettenform sowie der Brennstoff-Transportsicherungsfeder mit Hülsen (s. Abb. 4). Die Brennstoffsäulenlänge beträgt 80 mm. Die Brennstabprüflinge, die im Pu-Labor des Kernforschungszentrums Karlsruhe hergestellt werden [10], unterscheiden sich in der Dichte des Brennstoffes (85 und 90 % th.D.), dem Tablettendurchmesser (6,20 und 6,25 mm) sowie der Anordnung der UO_2 -Isoliertabletten am oberen Ende bzw. an beiden Enden der Tablettensäule. Ein Rhodium-Plättchen im unteren Endstopfen dient zur Absorption des axialen Flußanteils. Im Führungsstück am oberen Brennstoffsäulenende sowie im oberen Endstopfen sind Sintermetallfilter eingelassen, die die Zurückhaltung von Brenn-

Tabelle IV Beschreibung der Prüflinge der Kapselversuchsgruppe 4a
(Auswahl der wichtigsten Daten)

KVE Nr.	Prüfling Nr.	Brennstoff- Dichte, -Durchmesser		Stab- aufbau	Mittlerer Kalt- spalt, diametral (μ)
		(% th.D.)	(mm)		
33	B 10	91,57	6,20	1 Isolier- tablette, oben	280
	B 7	91,41			
	B 6	92,02			
34	B 13	91,89	6,20	1 Isolier- tablette, oben	280
	B 12	91,59			
	B 11	91,60			
35	4A/4	92,31	6,20	je 1 Isolier- tablette oben und unten	280
	4A/2	92,13			
	4A/1	92,02			
36	4A/9	91,60	6,20	je 1 Isolier- tablette oben und unten	280
	4A/8	91,60			
	4A/5	92,18			
	4A/3	92,22			
37	4A/19	83,80	6,28	2 Isolier- tabletten oben	200
	4A/16	85,20	6,28		200
	4A/15	85,10	6,25		230
	B14	91,9	6,20	1 Isoliertabl. oben	280
38	4A/22	83,35	6,25	2 Isoliertabl. oben	230
	4A/21	83,60	6,27		210
	4A/20	83,60	6,27		210
40	4A/28	84,35	6,25	2 Isoliertabl. oben	230
	4A/25	84,53	6,26		220
	4A/26	84,90	6,25		230
	4A/27	83,93	6,25		230
41	4A/18	84,25	6,27	2 Isoliertabl. oben	210
	4A/23	84,82	6,26		220
	4A/17	84,25	6,28		200
45 Kaps. Typ 4a (NaK)	4B/29 4B/28	Prüflinge der Versuchsgruppe 4b (s. Tab. V)			
	4A/24	84,40	6,26	2 Isoliertabl. oben	140

Bemerkung: Isoliertablette UO_2 , 95 % th.D., 6,25 mm ϕ , ca. 5 mm hoch

8 7 6 5 4 3 2 1



1	Oberer Endstopfen	4988	7 [#] = 21	7 [#] = 25
2	Hüllrohr	4988	7,4 [#] = 146	7,4 [#] = 144
3	Sinterstahlfilter	Cr Ni - Stahl	2,8 [#] = 3	
4	Oberes Führungsstück	4988	6,4 [#] = 20	
5	Druckfeder	4310	4,4 [#] = 45	6 [#] = 46,5
6	Unteres Führungsstück	4988	6,2 [#] = 22	6,2 [#] = 7
7	Isolierplatte	UO ₂	6,2 [#] = 5	
8	Brennstoffsäule	UO ₂ -PuO ₂	6,2 [#] = 80	
9	Absorberscheibe	Rhodium	5,9 [#] = 1	
10	Unterer Endstopfen	4988	7 [#] = 12	

Teil	Stück	Benennung	Werkstoff	Abmessung						
				Typ I		Typ II				
Oberflächenzeichen				~	▽	▽▽	▽▽▽	▽▽▽▽		
Rauhtiefe max. in µ				1000	40	10	4	1,6		
Freimaßtoleranz				bis 6		über 6 bis 30	über 30 bis 100	über 100 bis 300	über 300 bis 1000	über 1000 bis 2000
				± 0,1	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2	

1968	Tag	Name	Werkstoff	Gesellschaft für Kernforschung m. b. H. 7500 Karlsruhe Postfach 947	Zugeh. Zeichn.
gez.	7.10.	<i>A. B. B.</i>			Ersatz für
gepr.					Ersatz durch
ges.					Zeichnungs-Nr.
Maßstab	Benennung			1:1	
	BE-Prüfling für Versuchsgruppe			4a der FR2 - Kapselbestrahlungen	
				TA2K-16-07-3-3442	

Abb. 4 Brennstabprüfling der Kapselversuchsgruppe 4a

Paßmaß	Abmaß

Buch-	Kommi	Änderung	Tag	Name
stabe	vor			

Für diese Zeichnung behalte ich mir alle Rechte vor, auch für den Fall der Patentierung oder Abnahme von Rechten. Die Ausführung der Zeichnung darf ohne meine Genehmigung nicht veröffentlicht werden. Die Ausführung der Zeichnung darf ohne meine Genehmigung nicht veröffentlicht werden. Die Ausführung der Zeichnung darf ohne meine Genehmigung nicht veröffentlicht werden.

stoffpartikeln gewährleisten. Die Brennstäbe werden vor dem Verschließen mit Helium geflutet. Die chemische Analyse des Brennstoffes, der nach mechanischem Mischen von UO_2 und PuO_2 durch Pressen und Sintern zu Tabletten hergestellt wird, weist ein O/Me-Verhältnis von $1,98 \pm 0,015$ nach. Die chemischen Verunreinigungen entsprechen einem Gesamtboräquivalent von 4 ppm. Die Isotopenzusammensetzung des Pu ergibt sich zu 90,9 Gew.-% Pu-239, 8,21 Gew.-% Pu-240, 0,85 Gew.-% Pu-241 sowie 0,04 Gew.-% Pu-242. Der U-235-Anteil im Uran beträgt 0,007 Gew.-%.

Im Hinblick auf die Verwendung Pu-haltigen Brennstoffes kommt der Kontaminationsprüfung der fertigen Prüflinge besondere Bedeutung zu. Die Untersuchung auf abwischbare Verunreinigungen darf keine Kontamination zeigen, wohingegen die Oberflächenkontamination für haftende Verunreinigungen die obere Grenze von 22 α -Zerfällen pro cm^2 und Minute ($\hat{=} 1 \times 10^{-11} Ci$) nicht übersteigen darf.

In Tabelle IV ist eine Beschreibung der Prüflinge dieser Versuchsgruppe gegeben. Eine zusammenfassende Darstellung dieser Bestrahlungsexperimente ist in Vorbereitung [11].

3.1.5 Kapselversuchsgruppe 4b

Die Versuchsgruppe 4b besteht aus 35 Prüflingen, die in 11 Kapselversuchseinsätzen des Typs 4a mit NaK als Wärmeübertragungsmedium auf Brennelement- und Isotopenkanalpositionen des FR 2 bestrahlt werden. Die Prüflinge enthalten UO_2 - PuO_2 -Brennstoff verschiedener Dichte in Form von Tabletten und als einviбриerten Brennstoff. Die Anreicherung beträgt 20 Gew.-% Pu. Die Bestrahlung soll bei mittleren Nominalstabelleistungen um 500 W/cm bis zu mittleren Abbränden von ca. 80 MWd/kg Me geführt werden [12].

Der Brennstab besteht aus einer Hülle des austenitischen Stahls 1.4988 mit verschweißten Endstopfen, der Brennstoffzone, welche von UO_2 -Isoliertabletten abgeschlossen wird, einem Führungsstück und der Transportsicherungsfeder im Spaltgasraum. Je ein Rhodium-Plättchen im unteren Endstopfen und im Führungsstück dienen zur Absorption des axialen Flußanteils (Abb. 5). Die Sinterstahlfilter dienen der Zurückhaltung von Brennstoffstaub. Mit der Bestrahlung dieser Prüflinge mit dem SNR-spezifischen Stabdurchmesser von 6 mm werden die Abbrandversuche der Versuchsgruppe 4a fortgesetzt.

Tabelle V Beschreibung der Prüflinge der Kapselversuchsgruppe 4b
(Auswahl der wichtigsten Daten)

KVE Nr.	Prüfling Nr.	Brennstoff-Form			Diametr. Spalt (μ)
		-Dichte, (% th.D.)	-Durchmesser (mm)		
42	4B/27	vibriert	81,03	5,22	-
	4B/26	"	82,14	bis	-
	4B/25	"	81,46	5,26	-
43	4B/34	"	79,97	5,23	-
	4B/32	"	80,97	bis	-
	4B/30	"	80,44	5,235	-
44	4B/35	"	81,01	5,23	-
	4B/33	"	80,01	bis	-
	4B/31	"	81,48	5,235	-
45	4B/29	"	80,39	5,22	-
	4B/28	"	80,90	-5,26 5,225	-
	4B/24	Prüfling der Vg. 4a (s. Tab. IV)			
47	4B/4	Tabletten	89,68	5,08	150
	4B/3	"	89,59	5,08	150
	4B/2	"	90,00	5,07	160
	4B/1	"	90,04	5,06	170
48	4B/9	"	89,53	5,11	120
	4B/8	"	89,68	5,10	130
	4B/7	"	89,85	5,09	140
	4B/5	"	89,57	5,08	150
49	4B/12	"	89,34	5,12	120
	4B/11	"	89,53	5,13	110
	4B/10	"	89,26	5,11	130
	4B/6	"	89,23	5,09	140
55	4B/15	"	84,31	5,10	140
	4B/14	"	84,12	5,10	140
	4B/13	"	83,40	5,11	130
56	4B/18	"	84,59	5,10	140
	4B/17	"	84,66	5,10	140
	4B/16	"	84,37	5,09	150
57	4B/21	"	84,04	5,12	110
	4B/20	"	84,23	5,12	120
	4B/19	"	84,24	5,11	130
58	4B/24	"	84,34	5,11	120
	4B/23	"	84,57	5,10	130
	4B/22	"	84,20	5,12	110

Die Prüflinge mit Tablettenbrennstoff sowie der Pulverbrennstoff wurden im Pu-Labor des Kernforschungszentrums hergestellt [13]. Das Einvibrieren und Verschließen der Pulverprüflinge wird vom Institut für Transurane, Euratom, Karlsruhe, durchgeführt [14]. Die Analyse des Brennstoffes erbrachte folgende Ergebnisse: Die Isotopenzusammensetzung des Pu unterscheidet sich nur unwesentlich von der der Versuchsgruppe 4a (Kap. 3.1.4), die chemischen Verunreinigungen liegen weit unter der maximal zulässigen Verunreinigung mit einem Gesamtboräquivalent von 4 ppm, das O/U-Verhältnis des Mischbrennstoffs entspricht mit $1,98 \pm 0,02$ der Spezifikation. Die Prüflinge mit Tablettenbrennstoff enthalten je 13 Brennstofftabletten. Jede Tablette wird einzeln vermessen hinsichtlich Gewicht und Dimension. Die in Tabelle V angegebenen Durchmesser sind Mittelwerte, die um ca. $\pm 5 \mu$ schwanken können. Die Höhe der Brennstofftabletten beträgt etwa 6,1 mm, die Länge der Brennstoffsäule 80 ± 1 mm. Die Tabletten der Prüflinge 4B/1 - 4B/6 und 4B/19 - 4B/24 haben eine beidseitige, die Tabletten der restlichen Prüflinge je eine einseitige Stirnflächeneinsenkung von insgesamt 3 % des Tablettenvolumens. Nach Einfüllen der Tabletten bzw. Einvibrieren des Pulvers werden die Prüflinge mit Helium geflutet und verschweißt. Nach Prüfung der Dichtheit mittels eines He-Lecktests, einer Röntgenprüfung der Schweißnähte und der Kontaminationsprüfung werden sämtliche Prüflinge in ihrer ganzen Länge geröntgt, um die Höhe der Tablettensäule zu kontrollieren. Aufgrund von Verkanten von Tabletten, Oxidstaubkörnern zwischen den Tabletten und dergleichen ergibt sich eine um 0,6-1,2 mm größere Säulenlänge als durch Aufsummieren der einzelnen Tablettenhöhen, die jedoch noch innerhalb der Spezifikationen liegt.

3.1.6 Kapselversuchsgruppe 4c

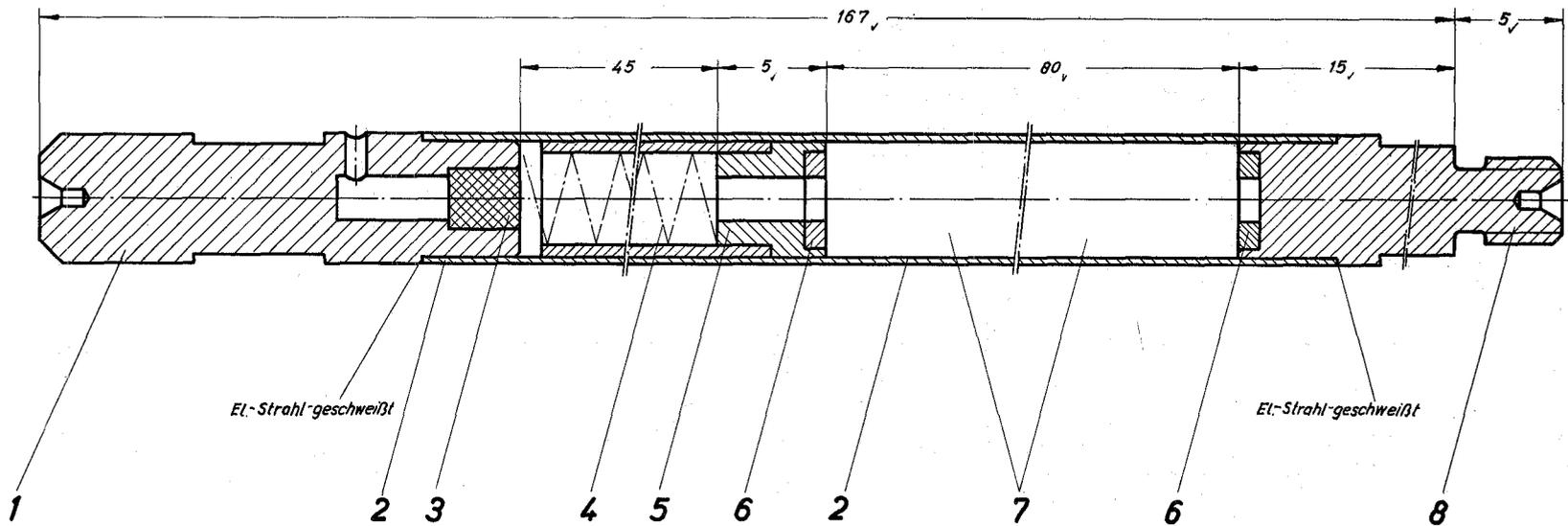
In 4 Kapselversuchseinsätzen des Typs 4a mit NaK werden insgesamt 12 Prüflinge der Versuchsgruppe 4c auf Brennelement- und Isotopenkanalpositionen des FR 2 bestrahlt. Bei mittleren Stabileistungen von 300 und 500 W/cm und bei maximalen Hülloberflächentemperaturen zwischen 400 und 570°C sollen die Prüflinge mit hochdichtem Mischbrennstoff Abbrände von 30 bzw. 60 MWd/kg Me erreichen. In der vorliegenden Versuchsgruppe unterscheiden sich die Prüflinge mit UO_2 -20 Gew.-% PuO_2 -Brennstoff in Tablettenform der Dichte $93,3 \pm 0,1$ g/cm³ lediglich in den Hüllmaterialien sowie im Spalt Brennstoffhülle (s. Tabelle VI) [15].

Tabelle VI Beschreibung der Prüflinge der Kapselversuchsgruppe 4c
(Auswahl der wichtigsten Daten)

KVE Nr.	Prüfling Nr.	Brennstoff-Dichte (% th.D.)	Diametral-spalt (μ)	Hüllmaterial
61	4c/43/1	93,3	29	1.4981/Bor
	4c/540/1	93,3	35	1.4970
	4c/583/2	93,2	24	1.4981
62	4c/583/5	93,3	25	1.4981
	4c/43/5	93,3	29	1.4981/Bor
	4c/540/3	93,3	32	1.4970
64	4c/540/2	93,3	34	1.4970
	4c/583/4	93,1	24	1.4981
	4c/43/2	93,3	29	1.4981/Bor
67	4c/540/5	93,1	73	1.4970
	4c/583/3	93,4	70	1.4981
	4c/43/4	93,3	76	1.4981/Bor

Tabelle VIA Chemische Zusammensetzung der Hüllwerkstoffe

Element	1.4970	1.4981	1.4981/Bor
B	0,008	-	ca. 70ppm Bll
C	0,1	0,1	
Si	0,5	0,3 - 0,6	
Mn	1,8	1,0 - 1,5	
Cr	15	15,5 - 17,5	
Ni	15	15,5 - 17,5	
Mo	1,2	1,6 - 2,0	
Nb-Ta	-	max. 1,2	
Ti	0,45	-	
P	0,02	-	
S	0,015	-	
Fe	Rest	Rest	



El.-Strahl-geschweißt

El.-Strahl-geschweißt

Abb. 6

Brennstabprüfling der Kapselversuchsgruppe 4c

Paßmaß	Abmaß

Buchstabe	Kennwert	Änderung

Tag	Name

8	1	Unterer Endstopfen	Siehe Spez. 5.21	φ 6 x 20	TA2K-16-07-4-3592 ✓				
7	2	Tablettenbrennstoff	(U ₉₈ Pu ₂) O ₂	eingepoßt	ohne Zeichnung				
6	2	Rhodium-Plättchen		φ 4,5 x 1	ohne Zeichnung ✓				
5	1	Stützrohr mit Federteller	4308	φ 5 x 7	TA2K-16-07-4-3591 ✓				
4	1	Druckfeder	4 310	φ 4 x 50	ohne Zeichnung ✓				
3	2	Sinterstahlfilter	Cr-Ni-Stahl	φ 2,8 x 3	ohne Zeichnung				
2	1	Hüllrohr	Siehe Spez. 5.21	φ 6 x 0,38 x 139	TA2K-16-07-4-3590				
1	1	Oberer Endstopfen	Siehe Spez. 5.21	φ 6 x 22	TA2K-16-07-4-3589				
Teil	Stück	Benennung	Werkstoff	Abmessung	Zeichungs-Nr. Norm	Bemerkung			
Oberflächenzeichen		~	▽	▽▽	▽▽▽	▽▽▽▽			
Rauhtiefe max. in μ		1000	40	10	4	1,6			
Freimaßtoleranz				bis 6	über 6 bis 30	über 30 bis 100	über 100 bis 300	über 300 bis 1000	über 1000 bis 2000
				± 0,1	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2
1969	Tag	Name	Werkstoff	Gesellschaft für Kernforschung m. b. H.		Zughef. Zeichn.			
gez.	11. 3.	Ka.		7500 Karlsruhe Postfach 947		Ersatz für			
gepr.						Ersatz durch			
gez.						Zeichnungs-Nr.			
Maßstab	Benennung		BE-Prüfling		TA2K-				
5:1			Versuchsgruppe 4c		16-07-3-3588				

Für diese Zeichnung beibehalten wir uns alle Rechte vor, auch für den Fall der
 Auslieferung dieser Zeichnung wieder unverändert nach Dritten vollständig gemacht
 werden, sie darf durch den Empfänger oder Dritte auch nicht in anderer Weise
 mittelbar oder unmittelbar weitergegeben werden. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schaden-
 ersatz und können strafrechtliche Folgen haben.

Die Herstellung und Prüfung der Brennstäbe erfolgt im Institut für Transurane, Euratom, Karlsruhe [16]. Der Brennstab besteht aus einer Hülle mit verschweißten Endstopfen, der Brennstofftabletten-säule, welche von 1 mm starken Rhodiumplättchen stirnseitig abgeschirmt wird, einem Stützrohr mit Federteller und der Transport-sicherungsfeder (s. Abb. 6). Die Länge der Brennstoffsäule beträgt $80 \pm 0,1$ mm, die Gesamtlänge des Prüflings $172 \pm 0,1$ mm. Der Tablet-tendurchmesser wurde dem jeweiligen Hüllrohrinnendurchmesser und dem gewünschten Spalt mit einer Genauigkeit von $\pm 5 \mu$ angepaßt. Auf-grund der durch die Versuchsaufgabe geforderten axialen Brennstoff-rückhaltung ist das axiale Spiel der Brennstoffsäule im Einbauzustand auf ca. 3 mm beschränkt. Der Außendurchmesser der Brennstäbe beträgt 6 mm bei einer Wandstärke von 0,34 mm.

Bei der Bestrahlung kommen als Hüllmaterialien die Stähle 1.4970 (12R72HV), 1.4981 und 1.4981 mit Bor-Zusatz zum Einsatz. Die Auf-teilung auf die einzelnen Prüflinge ist aus Tabelle VI ersichtlich. Der Borzusatz bei der 1.4981-Modifikation beträgt ca. 70 ppm B-11. Alle drei Werkstoffe sind lösungsgeglüht, die Kaltverformung beträgt 10 - 20 % bei Werkstoff 1.4970 und 5-7 % bei den beiden anderen Hüllmaterialien. Die chemische Zusammensetzung der einzelnen Hüll-materialien ist in Tabelle VIa angegeben. Die Angabe für die einzel-nen Elemente erfolgt in Gew.-%.

Die Brennstoffanalyse ergibt ein spezifikationsgerechtes O/M-Ver-hältnis von $1,98 \pm 0,02$. Die Gesamtverunreinigung des Brennstoffes liegt unter 4 ppm Boräquivalent.

3.1.7 Kapselversuchsgruppe 5a

In drei PbBi/NaK-Doppelkapseln des Typs 4a werden 9 Prüflinge der Versuchsgruppe 5a, dem sogenannten integrierten Dichteversuch, bestrahlt. Die Bestrahlung, die in Brennelement- und Isotopenkanal- positionen durchgeführt wird, soll bei maximaler Stabileistung von 550 W/cm und Hülloberflächentemperaturen von 645°C bis zu Abbränden von ca. 5, 15 und 50 MWd/kg Me durchgeführt werden [17].

Der Aufbau der stabförmigen Prüflinge entspricht im Prinzip den Brennstäben für die Versuchsgruppen 4a bzw. 4b. Abb. 7 zeigt den schematischen Aufbau des Prüflings mit einer Brennstoffsäule von 80 mm Höhe. Die Brennstoffsäule besteht aus 12 Tabletten mit 4 Dichtestufen (s. Tab. VII). Die 4 Sorten an Brennstofftabletten aus UO_2 - PuO_2 -Brennstoff mit 19,5 Gew.-% PuO_2 sind für die Dichtestufen 84, 87, 90 und $93 \pm 0,3$ % th.D. spezifiziert. Die Tabletten-säule enthält 3 Tabletten jeder Dichtestufe unmittelbar übereinander, so daß selbst bei eventueller Beeinflussung der Dichtestufen an ihrer Grenze in der jeweils mittleren Tablette das spezifische Phänomen störungsfrei ausgebildet sein müßte. In zwei Prüflingstypen sind die Tabletten in kontinuierlich ansteigenden Dichtestufen von unten nach oben und umgekehrt angeordnet. In dem dritten Typ sind möglichst große Dichtesprünge verifiziert, um eine evtl. gegenseitige Beeinflussung der Dichtestufen deutlicher zu machen.

Die Herstellung der Prüflinge erfolgt im hiesigen Pu-Labor [18]. Die Hülle der Prüflinge besteht aus austenitischem Edelstahl Nr. 1.4988 mit eingeschweißten Endstopfen. Sie umhüllt die Brennstoffsäule, die oben und unten durch ein Rhodiumplättchen begrenzt ist. An die Brennstoffsäule schließt sich ein Spaltgasraum mit Haltefeder an. Die einzelnen Tabletten der Säule werden genau vermessen und sortiert, so daß jede Tabletten-sortenart in einem Prüfling nur innerhalb $\pm 0,1$ % th.D. und ± 5 μ Durchmesser schwankt. Die zum Einsatz kommenden Hüllrohre genügen ebenfalls sehr scharfen Toleranzforderungen (Innendurchmesser $6,215 \pm 0,01$ mm, Wandstärke $0,415 \pm 0,005$ mm). Der diametrale Spalt beträgt 95 ± 20 μ .

Die chemische Analyse des Brennstoffs zeigt, daß die ebenfalls sehr engen Toleranzen eingehalten worden sind. Der Anteil der chemischen Verunreinigungen ist kleiner als 1000 ppm, der Feuchtigkeitsgehalt liegt unter 100 ppm. Der Stöchiometriewert ist in allen Tabletten einheitlich $1,98 \pm 0,02$. Die Isotopenzusammensetzung des Pu entspricht der in Versuchsgruppe 4a.

Tabelle VII Beschreibung der Prüflinge der Kapselversuchsgruppe 5a
(Auswahl der wichtigsten Daten)

KVE Nr.	Prüfling Nr.	Brennstoff		Hüllrohr- innendurchm.
		-Dichtestufen,	-Durchmesser	
72	5A/4	89,74	6,117 ± 0,005	6,218 bis 6,228
		83,74	6,119 ± 0,006	
		93,04	6,125 ± 0,003	
		86,83	6,120 ± 0,504	
	5A/5	89,90	6,120 ± 0,003	6,203 bis 6,207
		84,03	6,120 ± 0,002	
		93,08	6,121 ± 0,007	
		86,84	6,118 ± 0,002	
	5A/2	83,87	6,118 ± 0,003	6,209 bis 6,215
		86,43	6,118 ± 0,002	
73	5A/6	89,97	6,121 ± 0,001	6,224 bis 6,230
		84,20	6,119 ± 0,002	
		93,15	6,124 ± 0,002	
		86,91	6,120 ± 0,001	
	5A/7	90,27	6,119 ± 0,002	6,225 bis 6,227
		84,28	6,116 ± 0,002	
		93,32	6,127 ± 0,001	
		87,06	6,117 ± 0,002	
	5A/1	83,26	6,120 ± 0,005	6,225 bis 6,230
		86,35	6,120 ± 0,001	
		89,32	6,122 ± 0,002	
		92,46	6,121 ± 0,002	
74	5A/8	90,44	6,117 ± 0,003	6,220 bis 6,230
		84,37	6,118 ± 0,002	
		93,38	6,125 ± 0,001	
		87,36	6,120 ± 0,002	
	5A/9	90,75	6,118 ± 0,001	6,211 bis 6,215
		84,63	6,116 ± 0,003	
		93,51	6,123 ± 0,002	
		87,47	6,118 ± 0,002	
	5A/3	83,64	6,119 ± 0,001	6,210 bis 6,215
86,62		6,118 ± 0,002		
89,64		6,120 ± 0,003		
92,91		6,127 ± 0,001		

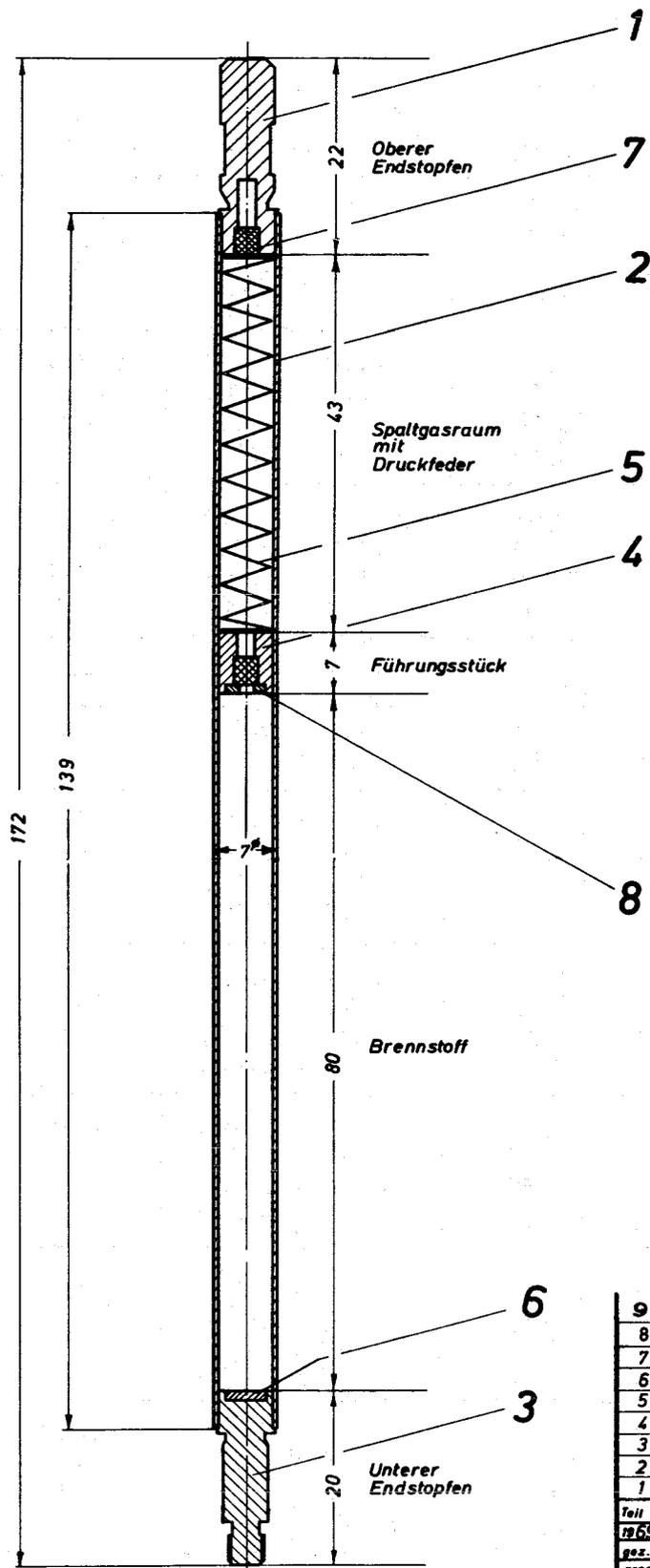


Abb. 7 Brennstabprüfling der Kapselversuchsgruppe 5a

Teil	Stück	Benennung	Werkstoff
9	12	Schutzkappe	Al
8	15	Rhodium - Scheibe	Rh
7	22	Sinterstahlfilter	Cr Ni
6	15	Rhodium - Plättchen	Rh
5	10	Druckfeder	4310
4	12	Führungsstück	4988
3	15	Unterer - Endstopfen	4988
2	15	Hüllrohr $\phi 7-0,4$	4988
1	15	Oberer - Endstopfen	4988

1969	Tag	Name	LB - Z 6.00
gez.	23.04.	<i>Kauf</i>	
geg.			
ges.			

Durchm. v. oberem Endstopfen geändert! Zeichnungssatz erweitert!
 Änderung v. Paßmaßen vorgenommen! 25.7.69 Jankó

2 : 1

BE-Prüfling

3.1.8 Kapselversuchsgruppe 5b

In der Versuchsgruppe 5b werden Stäbe mit Stableistungen um 500 W/cm bis zu Abbränden von ca. 30 MWd/kg Me sowie mit Stableistungen um 400 W/cm bis zu sehr hohen Abbränden (ca. 120 MWd/kg Me) bestrahlt. Insgesamt kommen sechs Kapseln mit je drei Brennstabprüflingen zum Einsatz.

Aufgrund des extrem dünnen Brennstoff- (4 mm) bzw. Brennstabdurchmessers (4,7 mm bei 0,3 mm Wandstärke) wird dem Anfahrverhalten (Brennstoffstrukturänderung, thermische Stabilität) sowie dem Abbrandverhalten (Schwellen, Spaltgasfreisetzung, Brennstoff- und Spaltprodukt-diffusion) besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Somit kommt der nuklearen und thermischen Auslegung des Brennstabes sowie seiner Herstellung eine größere Bedeutung zu [19].

Die Auslegungsrechnungen werden mit den Rechenprogrammen WIMS (nukleare Auslegung) und CRASH (Hüllrohrauslegung) durchgeführt. Bei einer Pu-Anreicherung von 35 % können wegen der Flußverhältnisse im FR 2 bei Stableistungen um 500 W/cm lediglich Abbrände von ca. 30 MWd/kg Me erreicht werden. Für die oben angeführte obere Abbrandgrenze muß die Stableistung auf 400 W/cm reduziert werden. Die Zentraltemperaturen erreichen je nach Abbrandzustand, Wärmeübergangszahl und Stableistung Werte zwischen ca. 1900° und 2500°C. Die Berechnungen der Hüllrohrverformungen für den Werkstoff 1.4988 zeigen, daß diese nach Standzeiten von 10000 h (120 MWd/kg Me) unter den zulässigen Grenzen von 0,15 % für die Kriechverformung bzw. 0,2 % für die plastische Verformung liegen. In der Rechnung wird der Brennstoffschwellendruck nicht berücksichtigt, für den Spaltgasdruckaufbau wird mit 100 % Spaltgasfreisetzung gerechnet, welches nach obiger Standzeit einem Innendruck von ca. 70 kp/cm² entspricht. Die maximale Hüllrohrspannung beträgt 12 kp/mm².

Die Gegenüberstellung der Spezifikations- und Herstellungswerte zeigt die Einhaltung der Spezifikation in allen Punkten. Die Tablettdichte beträgt $86,2 + 1,54 - 0,96$ % th.D., wobei die Schwankungen je Stab maximal $\pm 0,35$ % th.D. betragen. Der Pu-Gehalt ist zu 34,89, das O/Me-Verhältnis zu $1,98 \pm 0,02$ angegeben. Die Toleranz des Tablettendurchmessers (s. Tab. VIII) ist bei allen Tabletten eingehalten ($\leq 15 \mu$). Die Prüfung der Hüllrohrdimensionen ergibt bei zwei Chargen Innendurchmesser von 4,090 - 4,105 bzw. 4,094 - 4,116

Tabelle VIII Beschreibung der Prüflinge der Kapselversuchsgruppe 5b
(Auswahl der wichtigsten Daten)

KVE Nr.	Prüfling Nr.	B r e n n s t o f f	
		-Dichte (% th.D.)	-Durchmesser (mm)
77	5B/4	86,54	3,945 ± 0,008
	5B/3	86,59	3,945 ± 0,007
	5B/2	86,58	3,947 ± 0,008
80	5B/7	86,22	3,947 ± 0,006
	5B/6	86,57	3,943 ± 0,007
	5B/5	86,88	3,944 ± 0,009
81	5B/9	86,19	3,946 ± 0,007
	5B/8	86,20	3,946 ± 0,009
	5B/1	87,44	3,945 ± 0,008
82	5B/12	86,21	3,944 ± 0,010
	5B/11	86,26	3,945 ± 0,005
	5B/10	86,18	3,945 ± 0,007
83	5B/15	85,82	3,947 ± 0,008
	5B/14	85,82	3,942 ± 0,006
	5B/13	86,23	3,946 ± 0,006
86	5B/18	85,42	3,945 ± 0,013
	5B/17	85,72	3,945 ± 0,009
	5B/16	85,80	3,950 ± 0,008

Tabelle VIIIa Chemische Zusammensetzung
des Werkstoffs 1.4988 (in Gew.-%)

C	max. 0,1
Ni	12,5 - 14,5
Cr	15,5 - 17,5
Mo	1,1 - 1,5
Nb	max. 10xC+0,4 %
V	0,60 - 0,85
Mn	1,0 - 1,5
S	max. 0,2
Si	0,3 - 0,6
B	max. 20 ppm
N	0,1 %
Fe	Rest

bei entsprechenden Wandstärkenbereichen von 0,300 - 0,315 resp. 0,295 - 0,310. Damit ergibt sich ein diametraler Gasspalt von $150 \pm 35 \mu$. Der Istwert der Tablettensäulenhöhe liegt mit einem Maximum von 80,58 mm ebenfalls innerhalb der Toleranzen. Der Vollständigkeit halber ist in Tabelle VIIIa die chemische Zusammensetzung des Hüllrohrmaterials angegeben. Abb. 8 zeigt den Aufbau des Prüflings.

3.2 Loop-Prüflinge

3.2.1 Loop-Versuchsgruppe 1 und 2Z

Im Rahmen der Versuchsgruppe 1 sollten ursprünglich 24 Brennstabprüflinge zur Bestrahlung im Helium-Loop zum Einsatz kommen. Diese 24 Prüflinge werden jedoch in zwei Gruppen aufgeteilt, nämlich Versuchsgruppe 1 mit 11 Prüflingen und Versuchsgruppe 2Z mit 13 Prüflingen. Da die Spezifikations- und Herstellungsberichte [20, 21, 23] alle 24 Prüflinge betreffen, ist es sinnvoll, die beiden Versuchsgruppen hinsichtlich der Prüflingsbeschreibung zusammenzufassen.

Während in Versuchsgruppe 1 11 Brennstabprüflinge im He-Loop zur Erprobung des ersten Loop-Einsatzes sowie zur Untersuchung des Verhaltens der Prüflinge bei kurzer Bestrahlungsdauer eingesetzt werden, sollen 13 Brennstabprüflinge bis zu 18 Tagen zyklisch bestrahlt werden, um das Lastwechselverhalten untersuchen zu können [22].

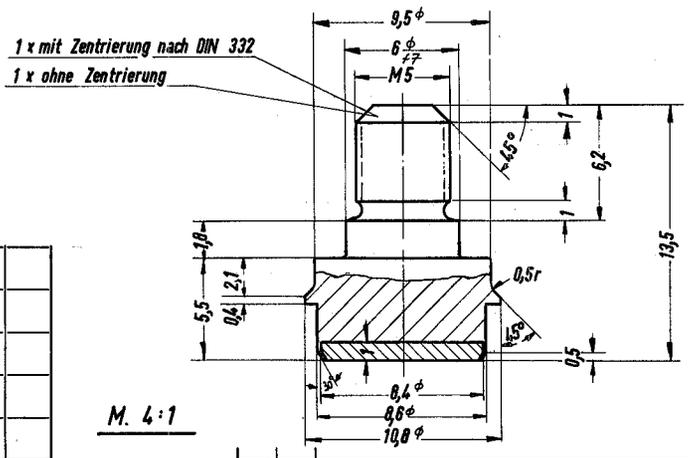
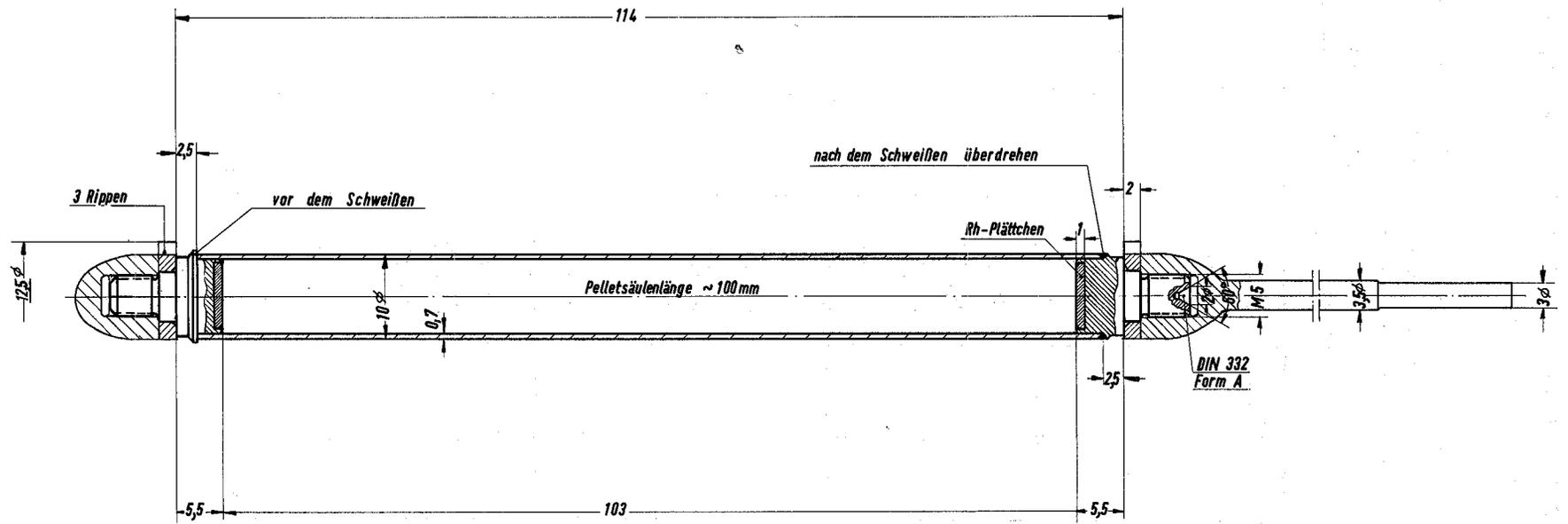
In beiden Versuchsgruppen sollen die Bestrahlungen bei Stabileistungen von 500 und 700 W/cm und Hülloberflächentemperaturen von 400 und 550°C durchgeführt werden. Zum Einsatz gelangt UO_2 -Brennstoff in Tablettenform bzw. als vibrierfähige, abgerundete, gesinterte Partikel mit U-235-Anreicherungen von 4,2 und 7,8 Gew.-% (s. Tab. IX). Die Tabletten tragen an einer Stirnfläche eine Einsenkung von $2 \pm 0,3$ % des Tablettenvolumens. Als Hüllmaterial wird der Werkstoff 1.4541 (CrNiTi 18/9) verwendet [20].

Die Prüflinge können in 4 Klassen je nach Ausführung des UO_2 -Brennstoffes eingeteilt werden [23]: UO_2 -Tabletten mit 4,2 Gew.-%, U-235 mit 90 % th.D., vibrierte UO_2 -Partikel, ebenfalls mit 4,2 % U-235 und 86 % th.D. sowie in mit 7,8 Gew.-% U-235 angereicherte UO_2 -Tabletten (90 % th.D.) und -Partikel (86 % th.D.). Die Brenn-

Tabelle IX Beschreibung der Prüflinge der Loop-Versuchsgruppen 1 und 2 Z
(Auswahl der wichtigsten Daten)

Prüfling Nr.	Versuchs- gruppe	B r e n n s t o f f		
		Form	Dichte (%th.D.)	Anreicherung (U-235 Gew.-%)
J 1	2 Z	Tabletten	89,6	4,2
J 2	1	"	89,8	"
J 3	1	"	90,1	"
J 4	1	"	89,5	"
J 5	1	"	90,1	"
J 6	1	vibriert	86,21	"
J 7	1	"	86,52	"
J 8	1	"	85,29	"
J 9	2 Z	"	85,13	"
J 10	2 Z	"	86,06	"
J 11	1	Tabletten	91,4	7,8
J 12	2 Z	"	91,1	"
J 13	2 Z	"	91,6	"
J 14	2 Z	"	90,3	"
J 15	1	"	90,3	"
J 16	2 Z	"	91,4	"
J 17	2 Z	"	91,5	"
J 18	2 Z	vibriert	85,90	"
J 19	1	"	85,29	"
J 20	2 Z	"	86,52	"
J 21	1	"	85,60	"
J 22	2 Z	"	86,06	"
J 23	2 Z	"	86,06	"
J 24	2 Z	"	86,06	"

8 7 6 5 4 3 2 1



Für diese Zeichnung Anfertiger ist nur ein Prototyp vor, auch für den Fall der
 Falschfertigung oder Geringmengenherstellung. Ohne unsere vorherige Zustim-
 mung darf diese Zeichnung weder vervielfältigt noch Dritten zugänglich gemacht
 werden; sie darf durch den Empfänger oder Dritte auch nicht in anderer Weise
 missbräuchlich verwendet werden. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schad-
 ersatz und können strafrechtliche Folgen haben.

Paßmaß	Abmaß

M. 4:1

Buch- stabe	kommt vor	Änderung	Tag	Name

Teil	Stück	Benennung	Werkstoff	Abmessung	Zeichng. Nr. Norm	Bemerkung
Oberflächenzeichen	~	▽▽	▽▽▽	▽▽▽▽		
Rawtiefe max. in µ	1000	40	10	4	1,6	Freimaßtoleranz
						bis 6 ± 0,1 über 6 bis 30 ± 0,2 über 30 bis 100 ± 0,3 über 100 bis 300 ± 0,5 über 300 bis 1000 ± 0,8 über 1000 bis 2000 ± 1,2
1965	Tag	Name	Werkstoff	Gesellschaft für Kernforschung m. b. H.	Zugeh. Zeichng.	
gez.	19. 5.	<i>Leue</i>		7500 Karlsruhe Postfach 947	Ersatz für	
ges.					Ersetzt durch	
Maßstab	Benennung			Zeichng. Nr.		
2:1 4:1	Bestrahlungsprobe			IRE 2-PSB-40.02-3-532		

-34-

stoffsäule von ca. 100 mm Länge wird an den Enden durch Rh-Scheiben abgeschlossen (Abb. 9). Das O/U-Verhältnis der Tabletten und Partikel liegt in den vorgeschriebenen Grenzen von $2,0 \pm 0,01$. Die Anteile der Verunreinigungen im UO_2 werden an den Ausgangspulvern sowie den fertigen Tabletten und Partikeln festgestellt. Die Grenze für das Boräquivalent von 2,5 ppm ist nicht überschritten.

Die Hüllrohre werden mit Ultraschall auf Wanddicke und Fehlerfreiheit geprüft, indem jedes Rohr (10 x 0,7 mm) mit einem Testrohr verglichen wird, welches mit künstlichen Fehlern bekannter Tiefe versehen ist. Die Rohrwandstärken liegen innerhalb des Toleranzmaßes $0,7 \pm 0,07$ mm. Die Innendurchmesser der Hüllrohre liegen an der oberen Grenze des vorgeschriebenen Toleranzbereiches von $8,6 \pm 0,05$ mm. Bei einem Teil der Rohre lag eine Ovalität von 0,03 bis 0,04 mm vor. Diese Rohre wurden für partikelgefüllte Proben verwendet.

3.2.2 Loop-Versuchsgruppe 2

Die Versuchsgruppe 2 enthält 43 Prüflinge mit UO_2 -Brennstoff in Tablettenform und als einivibriertes Granulat. Die Bestrahlungen dieser Brennelementproben werden in dem Loop-Einsatz des FR 2 durchgeführt. Mit diesen Bestrahlungen sollen die Strukturänderungen des Brennstoffs als Funktion von Zeit und Stabileistung untersucht werden. Hierdurch werden folgende Bestrahlungsbedingungen festgelegt: Die Prüflinge werden bei Stabileistungen von 500, 750 und 1000 W/cm 10 Minuten, 2 und 24 Stunden lang bestrahlt. Eine weitere Variation ist die Bestrahlung zweier Prüflinge in zwei Stabileistungsstufen von 500 und 850 W/cm bzw. 500 und 650 W/cm über eine Zeit von ca. 10 Tagen [24]. Zusätzlich soll bei einigen Prüflingen die Zentraltemperatur bis 1800°C sowie der Spaltgasdruckaufbau in Zeitabhängigkeit gemessen werden.

Die 43 Bestrahlungsproben bestehen aus 31 Stabproben mit UO_2 -Tabletten verschiedener Ausführungen und 12 Proben mit gesinterten bzw. geschmolzenen UO_2 -Partikeln [25]. Je ein Brennstoffstab der verschiedenen Ausführungsvarianten der Tabletten Säulen ist zum Teil mit gebohrten Tabletten versehen und durch die abweichende Gestaltung des Verschlußstopfens für Zentraltemperaturmessungen vorgerichtet. Die vier oberen Tabletten der Prüflinge mit Zentraltemperaturmessung sind mit einer

zentralen Bohrung von $1,8 \pm 0,05$ mm Durchmesser versehen. Drei der partikelgefüllten Proben sind mit durchbohrten Endstopfen für den Anschluß von Druckmeßkapillaren versehen (Tab. X, Abb. 10). Die Anreicherung der Brennstoffe beträgt einheitlich 7,5 % U-235 im Urananteil. Die Brennstabhüllrohre und die Endstopfen bestehen aus Edelstahl Nr. 1.4988 (CrNiMoVNb 1613) mit einem Außendurchmesser von 12 mm und einer Wandstärke von 1 mm. Die Brennstoffsäulenlänge beträgt bei Tablettenbrennstoff 140 ± 1 mm, bei vibriertem Brennstoff $150 + 0,5 - 1,0$ mm. Die Stirnseite der Brennstoffsäulen sind mit 1 mm starken Rhodium-Endscheiben abgedeckt.

Die Tablettenbrennstoffe bestehen aus Tabletten der Dichten 88, 90 und 93 % th.D. mit den Durchmessern 9,90 und 9,75 mm. Die Tabletten sind auf diese Durchmesser mit einer Toleranz von $\pm 10 \mu$ geschliffen. Ein Teil der Tabletten ist mit einer beidseitigen Stirnflächeneinsenkung von insgesamt 5 Vol.-% versehen (s. Tab. X). Das Gesamtboräquivalent der chemischen Verunreinigungen liegt mit ca. 0,3 ppm unter dem vorgeschriebenen Grenzwert. Das O/M-Verhältnis liegt bei 2,00 - 2,01, der Feuchtigkeitsgehalt unter 100 ppm. Die Prüflinge werden vor dem Verschließen mit Helium geflutet. Die Prüfungen an den fertigen Proben zeigt, daß die zulässigen Längentoleranzen von $\pm 0,5$ mm sowie die Durchbiegung von $< 0,1$ mm nicht überschritten werden.

Eine zusammenfassende Darstellung der Versuchsgruppe 2 erscheint demnächst [26].

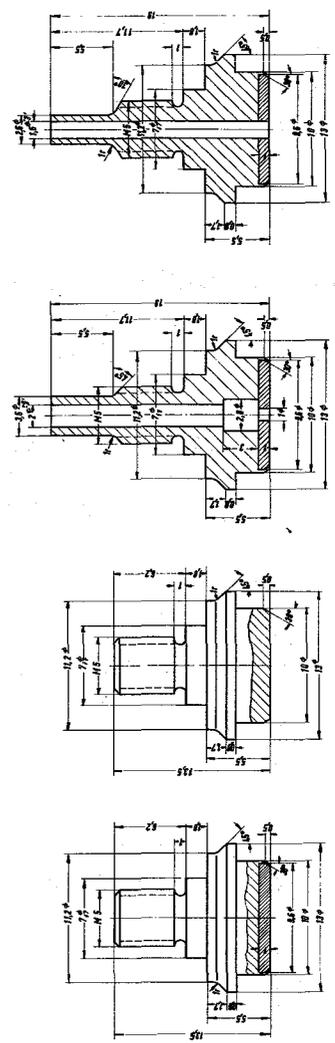
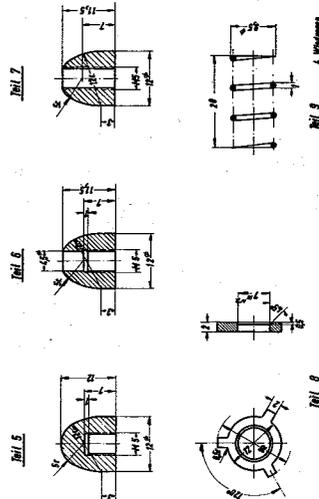
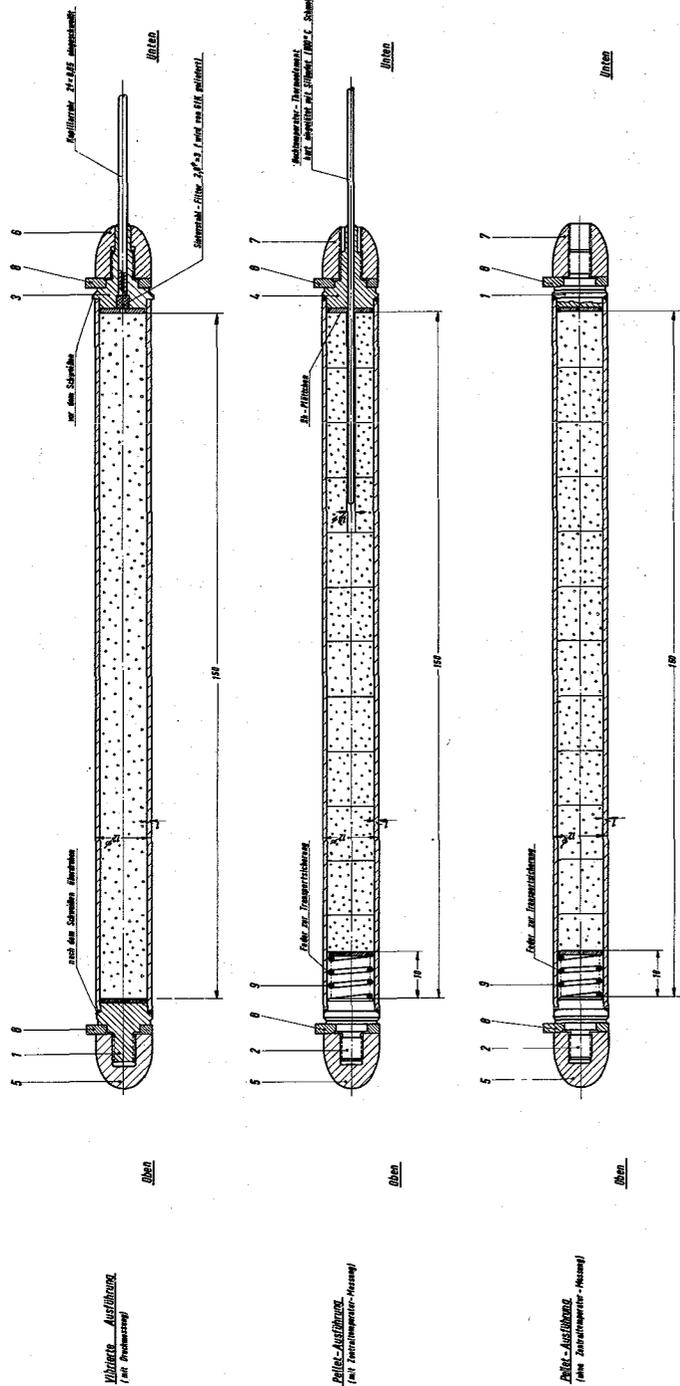
3.2.3 Loop-Versuchsgruppe 3

Diese Versuchsgruppe umfaßt insgesamt 34 Brennstäbe mit UO_2 - PuO_2 -Brennstoff mit zwei Dichte- und Spaltvarianten, die bei Stabileistungen zwischen 500 und 1000 W/cm und Bestrahlungszeiten von 10 min bis 144 h im He-Kurzzeitloop eingesetzt werden [27].

Der Brennstab besteht aus einer Hülle aus austenitischem Stahl Nr. 1.4988 mit verschweißten Endstopfen. Er enthält eine Brennstoffzone mit UO_2 - PuO_2 -Tabletten, eine kleine Spaltgaszone mit Druckfeder und Federteller. Die Brennstoffsäule wird unten durch ein Rhodiumplättchen begrenzt. Bei einer Brennstoffsäulenlänge von 140 mm, einem

Tabelle X Beschreibung der Prüflinge der Loop-Versuchsgruppe 2
(Auswahl der wichtigsten Daten)

Prüfling Nr.	B r e n n s t o f f			Bemerkung
	Form	Dichte (% th.D.)	Durchmesser (mm)	
L 1 L 1X L 1Z L 2 L 2X L 2Z L 3	Tabletten geschliffen	93,4 92,8 93,2 93,3 93,2 93,1 92,7	9,90 ± 0,01	Diametral- spalt 100 µ Temperatur- Meßanschluß f. Prüfling L 3
L 4 L 5 L 6 L 7 L 8 L 9 L 10 L 11 L 12 L 13	Tabletten geschliffen	88,4 88,0 88,0 88,0 88,0 88,5 88,0 88,0 88,0 88,0	9,90 ± 0,01	Diametral- spalt 100 µ Temperatur- Meßanschluß f. Prüfling L 13
L 14 L 15 L 16 L 17	Tabletten geschliffen	93,9 93,0 93,0 93,9	9,90 ± 0,01	Stirnflächen- einsenkung (5 Vol.-%) Temp.-M. L 17
L 18 L 19 L 20 L 21 L 22	Tabletten geschliffen	90,4 90,6 90,0 90,0 90,0	9,75 ± 0,01	Diametralspalt 250 µ Temp.M. L 22
L 23 L 24 L 25 L 26 L 27	Tabletten geschliffen	90,1 89,9 90,1 89,9 89,9	9,75 ± 0,01	Stirnflächen- einsenkung (5 Vol.-%) Diametralspalt 250 µ Temp.-M. L 27
L 28 L 29 L 30 L 31 L 32 L 33 L 34	vibrierter Brennstoff	86,1 84,6 85,3 84,7 85,0 85,0 85,0	10,0	Druckmessung an Prüfling L 29, L 32
L 35 L 36 L 37 L 38 L 39	vibrierter Brennstoff	84,6 84,9 85,1 85,1 85,0	10,0	geschmolzene Partikel Druckmessung an Prüfl. L 38



Technische Zeichnung		Zusammenfassung	
Bezeichnung	Material	Stückzahl	Einheit
1	St 35	1	Stück
2	St 35	1	Stück
3	St 35	1	Stück
4	St 35	1	Stück
5	St 35	1	Stück
6	St 35	1	Stück
7	St 35	1	Stück
8	St 35	1	Stück
9	St 35	1	Stück

Abb. 10 Brennstabprüfung der Loop-Versuchsgruppe 2

Alle Maße sind in mm angegeben, wenn nicht anders angegeben.
Alle Winkel sind in Grad angegeben, wenn nicht anders angegeben.
Alle Oberflächen sind zu polieren, wenn nicht anders angegeben.
Alle Bohrungen sind zu reifen, wenn nicht anders angegeben.
Alle Gewinde sind nach DIN zu fertigen, wenn nicht anders angegeben.
Alle Maße sind mit 0,1 mm abzurunden, wenn nicht anders angegeben.
Alle Maße sind mit 0,2 mm abzurunden, wenn nicht anders angegeben.
Alle Maße sind mit 0,5 mm abzurunden, wenn nicht anders angegeben.
Alle Maße sind mit 1 mm abzurunden, wenn nicht anders angegeben.
Alle Maße sind mit 2 mm abzurunden, wenn nicht anders angegeben.
Alle Maße sind mit 5 mm abzurunden, wenn nicht anders angegeben.
Alle Maße sind mit 10 mm abzurunden, wenn nicht anders angegeben.
Alle Maße sind mit 20 mm abzurunden, wenn nicht anders angegeben.
Alle Maße sind mit 50 mm abzurunden, wenn nicht anders angegeben.
Alle Maße sind mit 100 mm abzurunden, wenn nicht anders angegeben.
Alle Maße sind mit 200 mm abzurunden, wenn nicht anders angegeben.
Alle Maße sind mit 500 mm abzurunden, wenn nicht anders angegeben.
Alle Maße sind mit 1000 mm abzurunden, wenn nicht anders angegeben.

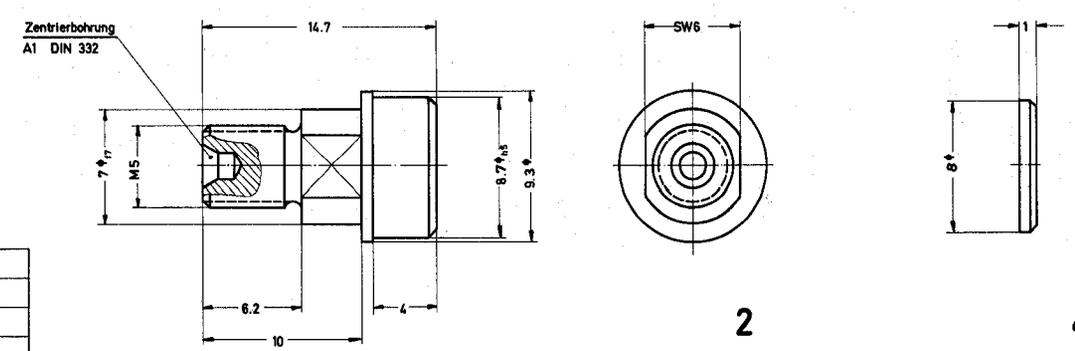
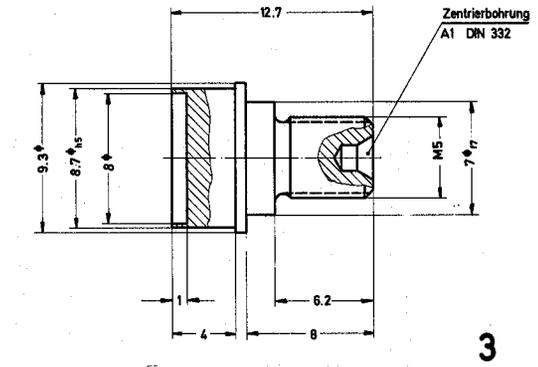
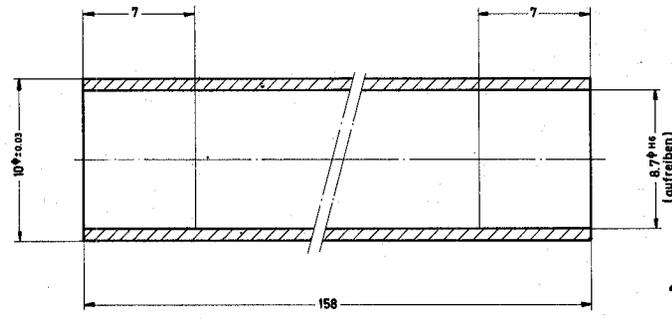
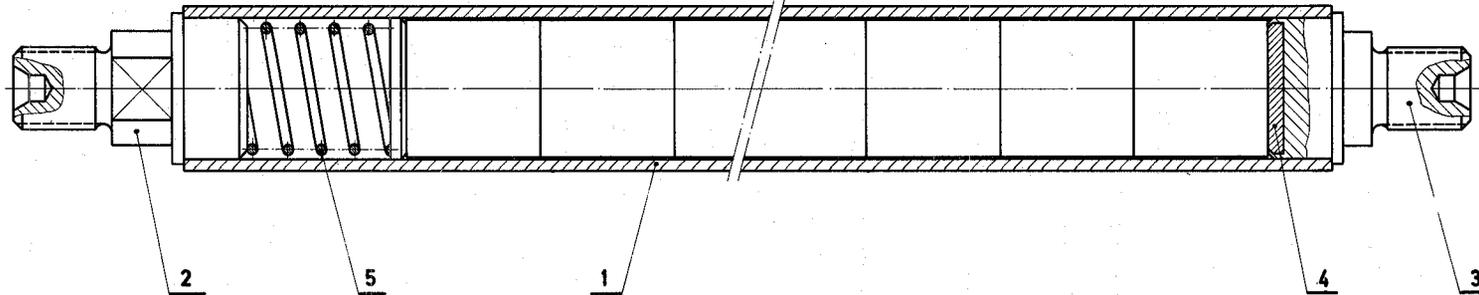
Spaltgasraum von 10 mm Länge beträgt die Gesamtlänge des Brennstabes mit eingeschweißten Endstopfen ca. 177 mm und der Brennstabaußendurchmesser 10,0 mm (Abb. 11).

Die Fertigung der Brennstäbe erfolgt im Pu-Labor des Kernforschungszentrums [28]. Der Brennstoff wird aus UO_2 - und PuO_2 durch mechanisches Mischen, Pressen zu Tabletten und Sintern hergestellt. Die Anreicherung des Brennstoffs beträgt 11,5 Gew.-% Pu mit einer Isotopenzusammensetzung von (in Gew.-%) 90,942 Pu-239, 8,190 Pu-240, 0,828 Pu-241 und 0,040 Pu-242. Die gesamten chemischen Verunreinigungen der Tabletten liegen unter 1000 ppm, das O/Me-Verhältnis liegt bei 1,98.

Die Prüflinge enthalten je 14 Brennstofftabletten. Jede Tablette wird einzeln hinsichtlich Gewicht und Dimensionen vermessen, um die Toleranzen von Durchmesser ($\pm 20 \mu$) und Dichte ($\pm 2 \%$ th.D.) nicht zu überschreiten. Die Tabletten werden in zwei Dichtestufen von 83 und 90 % th.D. mit Durchmessern von 8,30 und 8,50 mm hergestellt (s. Tab. XI). Nach Spezifikation und Qualitätskontrolle von Hüllrohren [29, 30] kommen Hüllrohre mit sehr engen Toleranzen zum Einsatz: Die Innendurchmesser variieren in dem Bereich 8,585 bis 8,610, so daß die diametralen Spalte lediglich um ca. 30 μ schwanken.

Tabelle XI Beschreibung der Prüflinge der Loop-Versuchsgruppe 3
(Auswahl der wichtigsten Daten)

Prüfling Nr.	B r e n n s t o f f -		Spaltweite diametral (μ)
	Dichte (% th.D.)	Durchmesser (mm)	
L3-1	88,77	8,485	100
2	89,88	8,492	
3	89,53	8,491	
4	89,16	8,507	
5	89,61	8,495	
6	89,58	8,494	
7	89,37	8,496	
8	89,57	8,492	
9	89,56	8,495	
10	90,22	8,494	
11	90,02	8,497	
12	90,09	8,496	
13	90,24	8,493	
16	89,70	8,296	300
17	89,55	8,297	
18	89,30	8,290	
19	89,56	8,294	
20	89,17	8,295	
21	89,13	8,297	
22	89,66	8,305	
24	89,83	8,293	
25	83,45	8,488	100
26	84,12	8,490	
27	84,34	8,487	
28	84,36	8,491	
29	83,83	8,490	
30	84,42	8,492	
31	83,60	8,495	
32	83,68	8,497	
33	83,80	8,493	
34	83,85	8,491	
35	83,80	8,492	
36	83,20	8,487	
37	84,58	8,500	



▽ (Kanten brechen)

5	1	Druckfeder	W.Nr. 4310	ic=4, Lo=16, d=0.6, Da= 8.3, c=0.6Kp/cm		
4	2	Plättchen	Rh	8 φ x 1		
3	1	unterer Endstopfen	W.Nr. 4988	9.3 φ x 12.7		
2	1	oberer Endstopfen	W.Nr. 4988	9.3 φ x 14.7		
1	1	Hülle	W.Nr. 4988	10 φ x 158		
Teil	Stück	Benennung	Werkstoff	Abmessung	Zust.-Nr. Norm	Bemerkung
Überflussschicht	▽	▽▽	▽▽▽	▽▽▽▽		
Reinheits max. in μ	1000	10	10	10	10	10
1988	Tag	Name	Werkstoff	Gesellschaft für Kernforschung m. b. H. 7500 Karlsruhe Postfach 907	Zugab. Zeich.	
gez.	8.5.				Ersetzt für	
gepr.					Ersetzt durch	
gepr.					Zeichnungs-Nr.	
5:1 Brennstab Loop - 3				TA2K-16-07-2-3211		

Abb. 11 Brennstabprüfling der Loop-Versuchsgruppe 3

Die hier gezeigten Zeichnungen sind nur als Richtlinie für die Ausführung zu verstehen. Die Ausführung ist dem Zeichner überlassen. Die Zeichnung ist nur für die Ausführung zu verwenden. Die Zeichnung ist nur für die Ausführung zu verwenden. Die Zeichnung ist nur für die Ausführung zu verwenden.

4. Bestrahlungseinrichtungen im FR 2

4.1 Die Kapselversuchseinsätze (KVE)

In den Jahren 1963/64 wurde in einer ersten Phase des Karlsruher Programms zur Entwicklung von Schnellbrüter-Brennstäben die Bestrahlung von oxidischen Testbrennstäben von 10 bis 12 mm Hüllrohr-äußendurchmesser im FR 2 konzipiert [31].

Die seinerzeit an das Bestrahlungsexperiment gestellten Forderungen führten zu einer relativ einfachen und sicheren Bestrahlungskapsel für mäßige Leistungsdichten und Hüllrohrtemperaturen, bei der als Wärmeübertragungsmedium die eutektische Blei-Wismut-Legierung (Schmelzpunkt 125°C) eingesetzt wurde [32]. Abb. 12 zeigt eine schematische Darstellung dieses Kapseltyps. Über einige Erfahrungen mit dieser Kapsel wird in Kap. 5.2 berichtet.

Mit zunehmender Erfahrung wurde 1965/66 in einer zweiten Phase eine FR 2-Bestrahlungskapsel geplant, in der realistische Brüter-Brennstabproben eingesetzt werden können. Aus den bereits gewonnenen Erfahrungen, den vorhandenen Einrichtungen für die Handhabung von PbBi sowie den sicherheitstechnischen Bedürfnissen am FR 2 resultiert ein Doppelkapseltyp, der in [33] ausführlich beschrieben wird. Entsprechend den sich ändernden Erfordernissen hinsichtlich Stababmessungen, Stableistung, Hülltemperatur kommen verschiedene Modifikationen dieses Flüssigmetall-Doppelkapseltyps zum Einsatz.

Bei dieser Bestrahlungskapsel sitzt der Brennstab je nach gewünschter Leistungsdichte und Temperatur in einem Natrium- oder Natrium-Kalium-Bad, umgeben von der inneren Edelstahlkapsel. Diese wiederum ist von einer äußeren Kapsel unter Zwischenschaltung einer Bleiwismutschicht umschlossen (Abb. 13). Dadurch ist erreicht, daß das reaktionsfreudige Alkalimetall wie auch der Brennstab selbst durch zwei relativ sichere Wände vom Reaktor-Kühlwasser getrennt sind. Entlang des äußeren Kapselrohres sind an den Stellen geringer Wärmeerzeugung, also in Höhe der Spaltgasplena und Verbindungsstopfen, sog. Wärmedämmrohre aufgeschweißt, um auch hier die Wärmeübertragungsmedien Na bzw. NaK und PbBi flüssig zu halten und damit Lunkerbildung und Spannungsbeanspruchungen an den Innenkapseln in Grenzen zu halten. Die Kapsel ist mit Thermoelementen in Tauchrohren im mittleren Na- bzw. NaK-Spalt ausgerüstet.

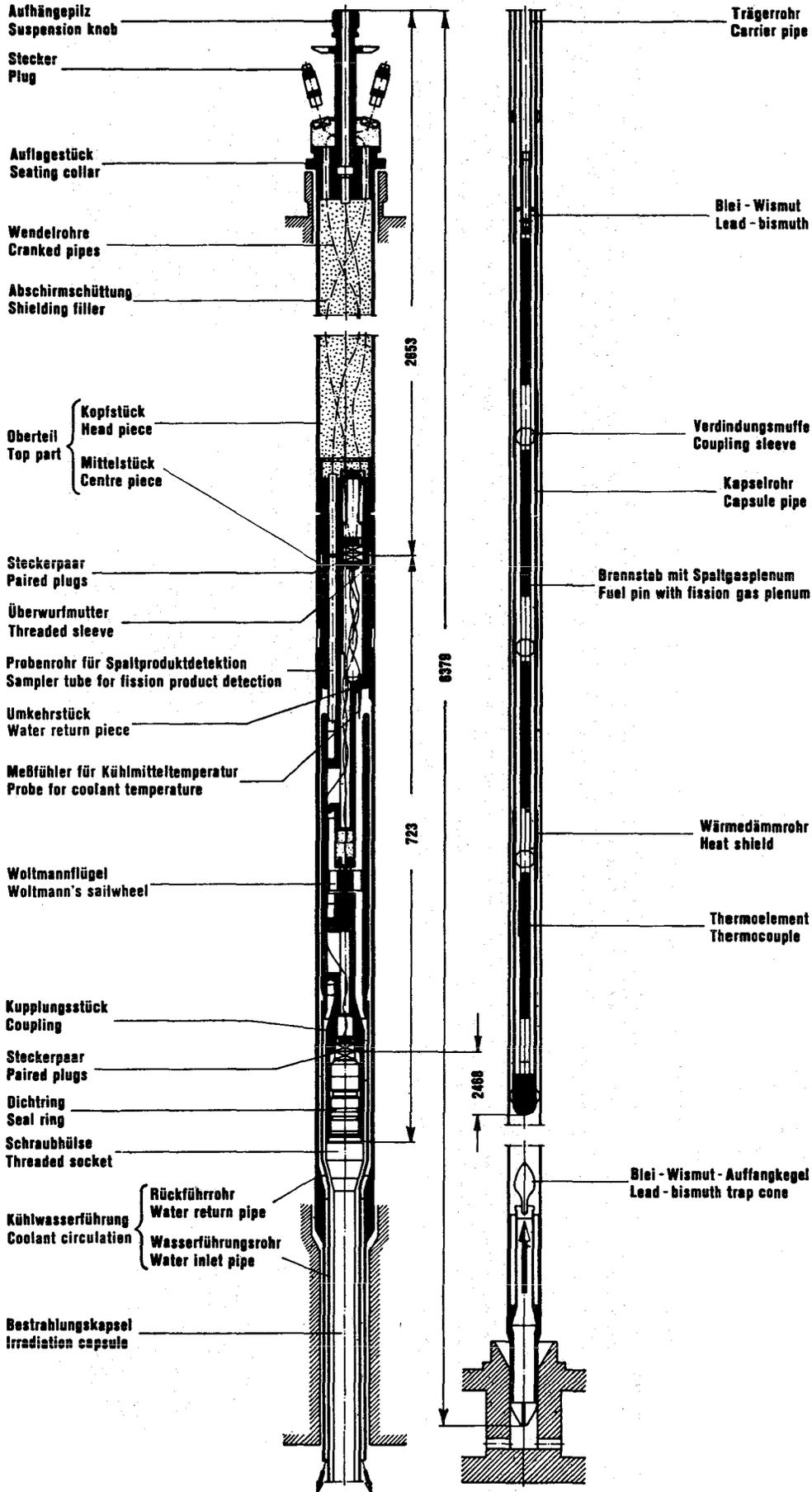
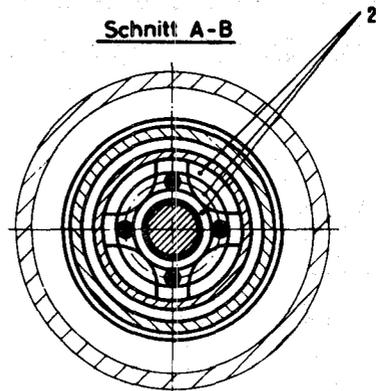
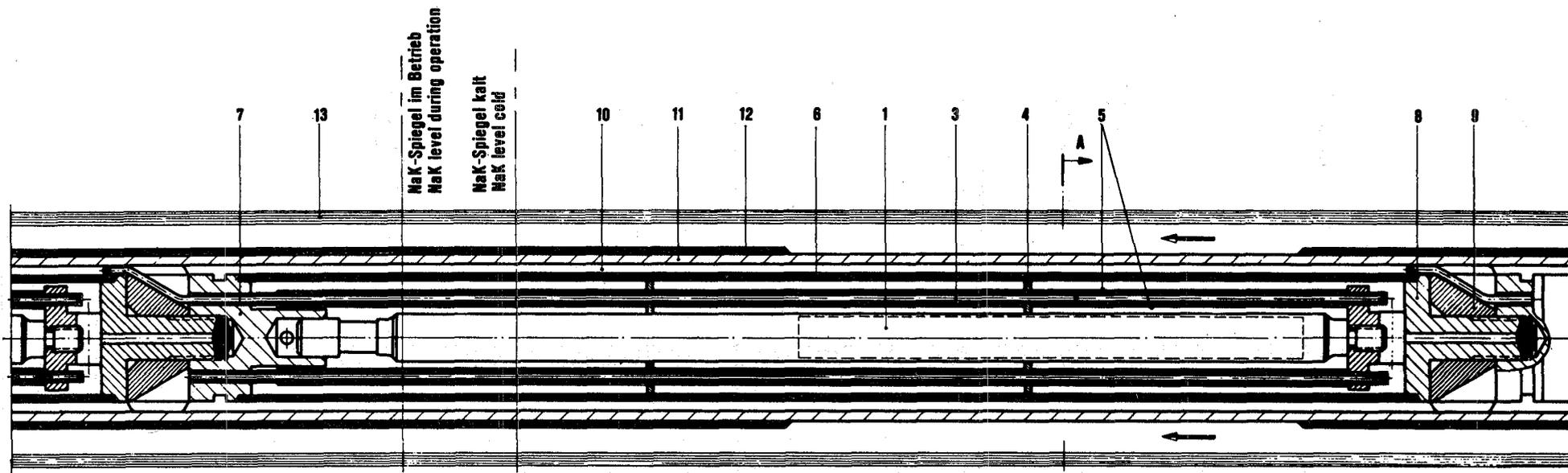


Abb. 12

Kapseltyp mit Bleiwismut-Legierung



- | | |
|--|---|
| 1 Brennstabprüfling mit Spaltgasplenum | 1 Fuel pin specimen with fission gas plenum |
| 2 NaK-Spalte | 2 NaK annular space |
| 3 Tauchrohr mit Thermoelement 1mm ^ø | 3 Immersion tube with thermocouple 1 mm dia. |
| 4 Zentrierplatte | 4 Centering plate |
| 5 Zwischenrohre 0,1 mm dick | 5 Intermediate tube 0,1 mm thick |
| 6 Edelstahlkapsel 20 mm ^ø ×1 mm Wand | 6 Stainless steel capsule 20 mm dia.×1 mm thick |
| 7 Endstopfen | 7 End plugs |
| 8 NaK-Einfüllstopfen | 8 NaK filling plug |
| 9 Zwischenstück | 9 Intermediate piece |
| 10 PbBi-Spalt 1,5 mm dick | 10 PbBi annular space 1,5 mm wide |
| 11 Zirkaloy-2-Kapsel 28 mm ^ø ×1,5 mm Wand | 11 Zircaloy-2 capsule 28 mm dia.×1,5 mm thick |
| 12 Wärmedämmrohr | 12 Thermal insulation tube |
| 13 Wasserführungsrohr 40 mm ^ø ×2 mm Wand | 13 Water inlet tube 40 mm dia.×2 mm thick |

Abb. 13 Ausschnitt aus der NaK/PbBi-Doppelkapsel

In Abb. 14 ist das Temperaturprofil innerhalb einer NaK/PbBi-Doppelkapsel für eine Stableistung von 550 W/cm bei einem Brennstabdurchmesser von 7 mm aufgetragen. Über Betriebserfahrungen mit dieser Kapsel wird in Kap. 5.2 berichtet.

4.2 Die Bestrahlungseinrichtung im He-Loop

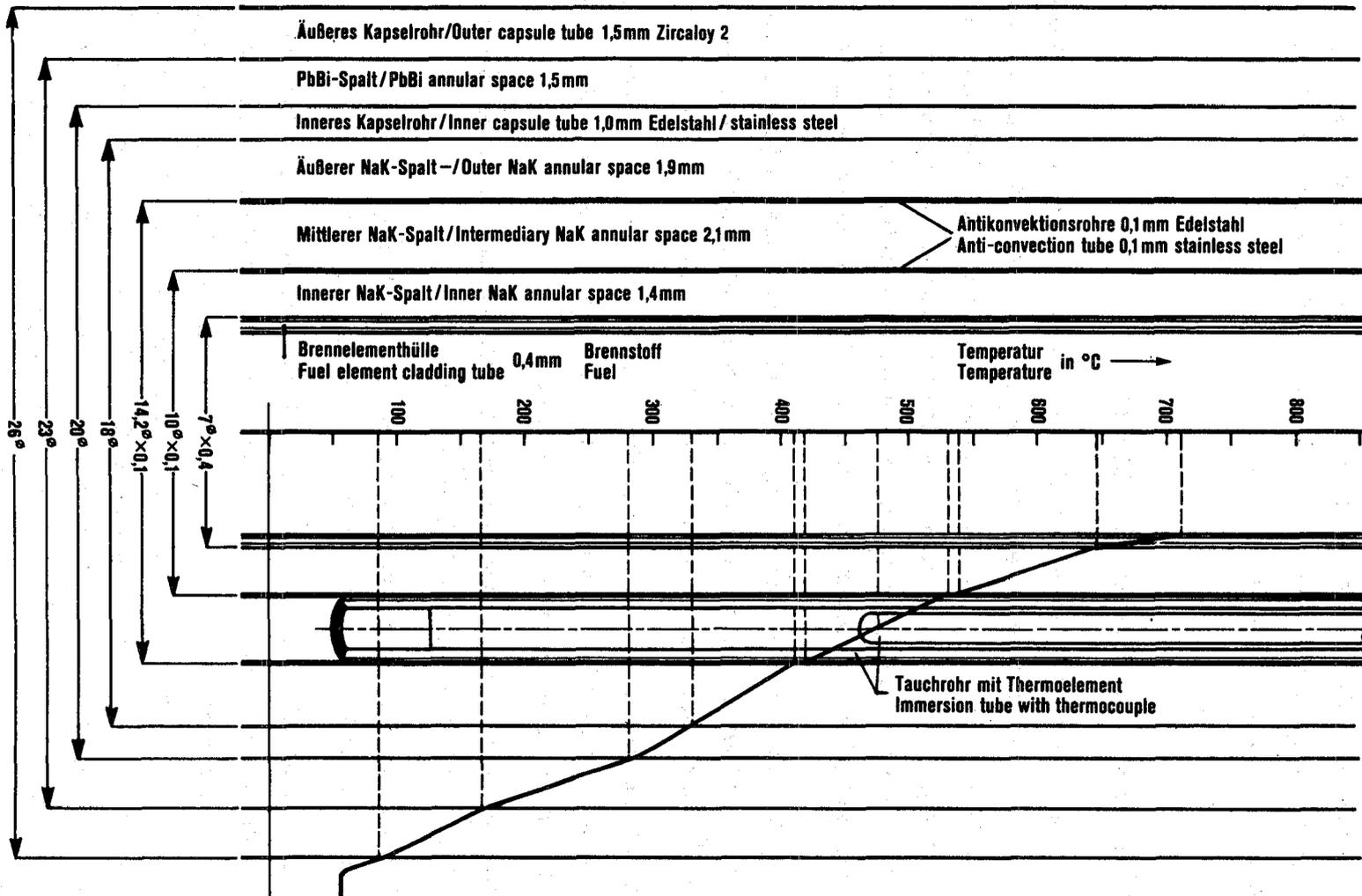
Zur Bestrahlung von Brennstabprüflingen unter besonderen Bestrahlungsbedingungen dient eine Experimentieranlage im FR 2, die aus dem Helium-Versuchskreislauf und dem Bestrahlungseinsatz mit den instrumentierten Prüflingen, der in die zentrale Reaktorposition eingeführt wird, besteht. Die besondere Konzeption dieser Experimentieranlage resultiert aus den Aufgabenstellungen für spezielle Bestrahlungsexperimente [34]:

- Die Kühlung muß geeignet sein, die Prüflingsaußentemperatur für einen weiten Leistungsbereich auf einen Wert zwischen ca. 400 und 750°C mit hoher Genauigkeit konstant zu halten.
- Die Stableistung soll - innerhalb der durch den Neutronenfluß und dessen Gradienten vorgegebenen Grenzen - durch axiales Verfahren des Prüflings einstellbar sein.
- Die beherrschbare maximale Wärmestromdichte an der Brennstaboberfläche soll bis etwa 400 W/cm² betragen.
- Die Einrichtung muß geeignet sein, Brennstabproben über Zeiten von einigen Minuten bis Wochen bestrahlen zu können.

Das He-Kreislaufsystem, das sog. FR 2-Abbrandloop, ist eine geschlossene, weitgehend selbständige Anlage mit zwei hintereinandergeschalteten Verdichtern, mit Filtern, Kühler, Meß- und Regeleinrichtungen im Hauptkühlkreis sowie mit einem umfangreichen Gasreinigungssystem im Nebenkreis. Bei einem maximalen Betriebsdruck im Loop-System von etwa 30 kp/mm², einer He-Eintrittstemperatur am Anfang der Teststrecke von etwa 100°C beträgt die maximale Gasgeschwindigkeit am Prüfling 130 m/s. Die maximale Wärmeleistung der Prüflinge kann 45 kW betragen.

Der Bestrahlungseinsatz ist im zentralen Vertikalkanal des Reaktors installiert. Das Zentrallooprohr weist im Corebereich einen Innendurchmesser von 130 mm auf. Der Bestrahlungseinsatz wird in das

Abb. 14 Temperaturverlauf innerhalb der Bestrahlungskapsel bei 550 W/cm Stableistung



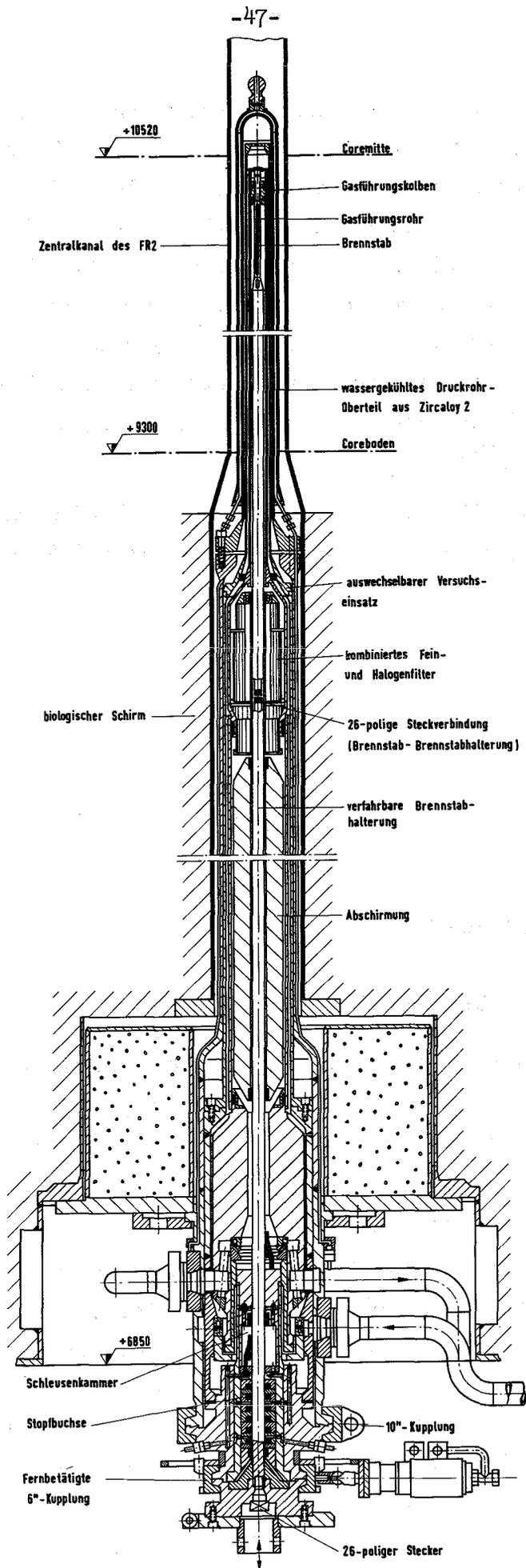


Abb. 15 Bestrahlungseinsatz
FR 2 He-Loop

Druckrohr und den eigentlichen Versuchseinsatz aufgeteilt (Abb. 15), wobei ersteres fest im Reaktor eingebaut ist. Während des Betriebes werden vom Gasstrom zwei Ringplattenventile geöffnet, das Kühlgas strömt im äußeren Ringkanal hoch, kühlt die Prüflinge im Abwärtsstrom und passiert danach eine Staub- und Halogenfilterkombination, bevor es durch den Abschirmungsteil und das Ringplattenventil den Loop-Einsatz verläßt. Im normalen Bestrahlungseinsatz haben die Prüflinge eine feste Position im Gegensatz zu einer Sonderausführung (speziell für Kurzzeitexperimente), bei der eine axiale Probenbewegung während des Betriebes möglich ist [35].

Mit Hilfe von Thermoelementen können die Oberflächentemperaturen der Prüflinge sowie die Gastemperaturen an verschiedenen Stellen gemessen werden.

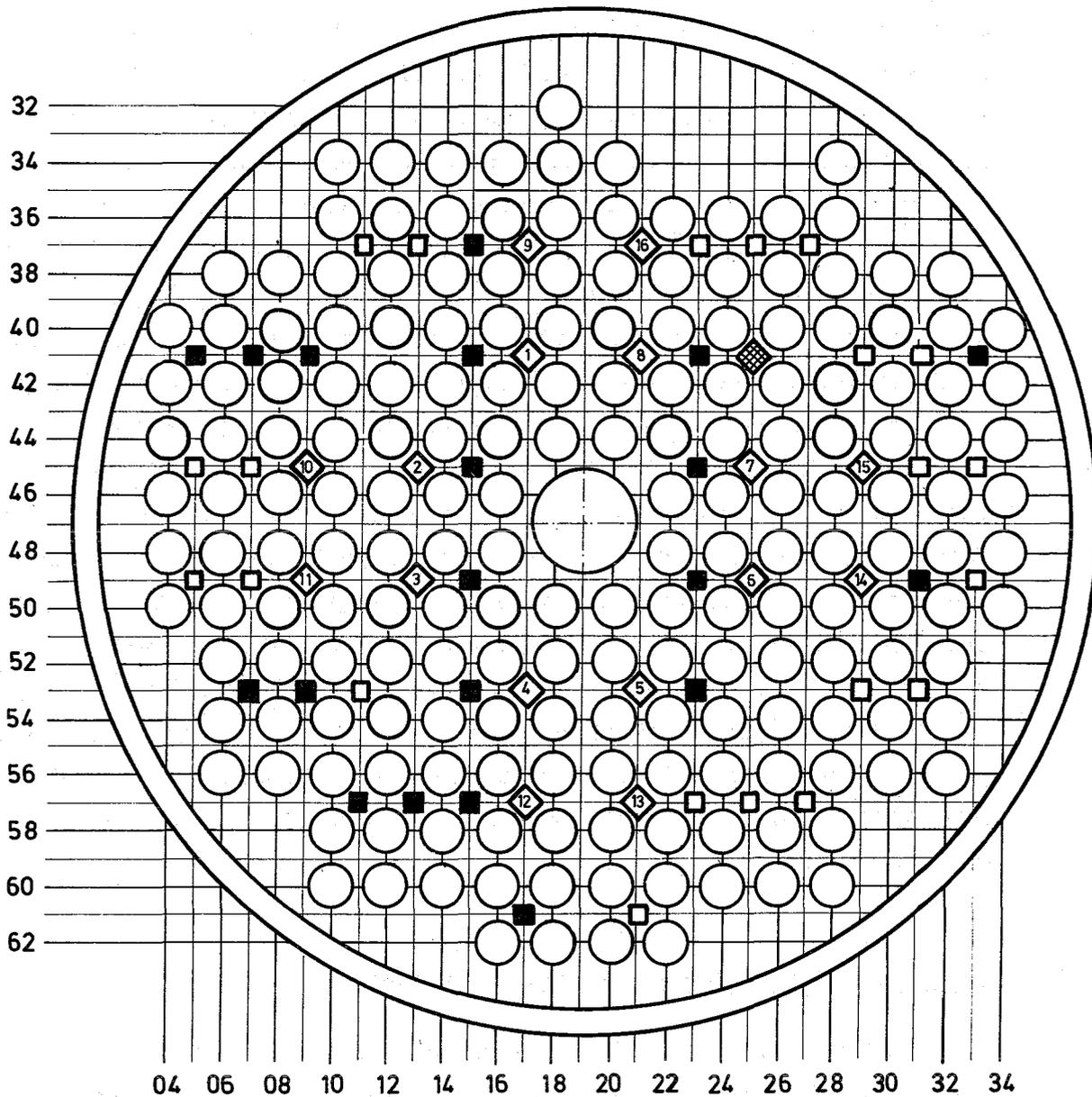
5. Der Bestrahlungsablauf

5.1 Reaktorbetriebsbedingungen

Die im vorliegenden Bericht aufgezählten Bestrahlungsexperimente erstrecken sich über den Zeitraum von 1965 bis 1971. Der Reaktor wurde bis Ende 1965 mit einer Leistung von 12 MWth gefahren. Nach einer stufenweisen Leistungserhöhung im Jahre 1966 beträgt die Reaktorleistung nunmehr 44 MWth.

Der Jahresbetrieb des FR 2 wird unterteilt in ca. 10 Zyklen zu 4 bis 5 Wochen. Bezogen auf Vollastbetrieb entspricht jeder Zyklus etwa 30 Vollasttagen. Bei einer Reaktorleistung von 44 MWd beträgt die mittlere Energieabgabe je Zyklus etwa 1320 MWd. Im Berichtszeitraum entfällt auf den Jahresbetrieb eine Abschaltzeit von etwa 3 bis 7 Wochen, hervorgerufen durch routinemäßige Abschaltungen sowie durch Störungen.

Das FR 2-Core besteht aus 190 Brennelementpositionen, 41 Isotopenkanalpositionen, der zentralen Position für das He-Loop sowie 16 Trimmabschaltstäbe (TA) und 1 Feinregelstab (Abb. 16). in den



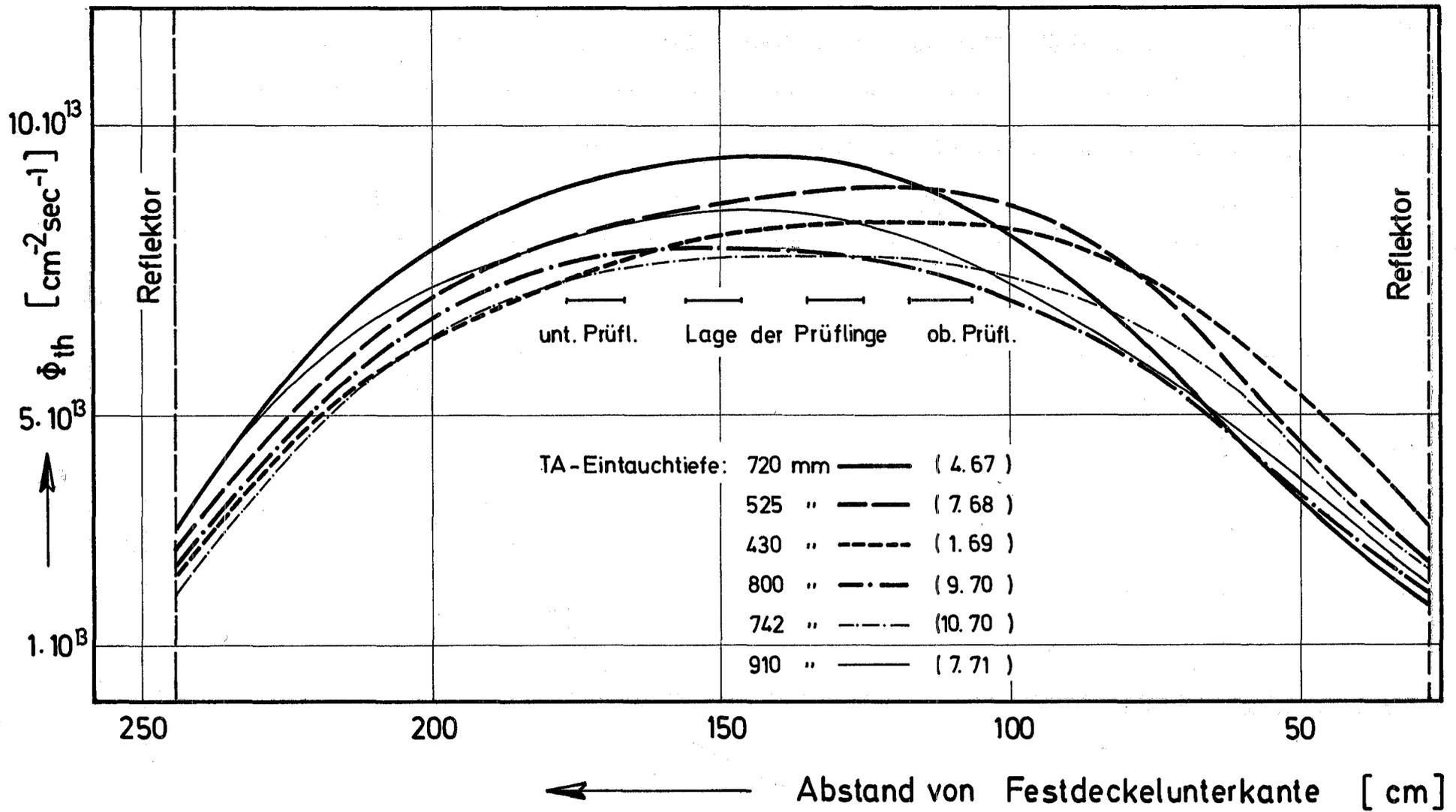
- Brennelementposition
- ◇ Trimm - Abschaltstab
- ▣ Feinregelstab
- Isotopenkanal-Position
- zu Flußmessungen benutzte Isotopenkanal - Positionen

Abb.16: Positionskarte
FR 2 - Core

Isotopenkanalpositionen sowie im Zentral-Loop wurden im Bestrahlungszeitraum zahlreiche Messungen des Neutronenflusses durchgeführt. Es handelt sich um Messungen des vertikalen Flußverlaufes, bei denen Co-Sonden als Flußdetektoren eingesetzt werden. In Abb. 17 ist der vertikale Verlauf des thermischen Flusses in dem Isotopenkanal 49/15 entsprechend den Messungen aus den Jahren 1967 bis 1971 [36, 37] wiedergegeben. Dem maximalen thermischen Fluß von ca. $9 \cdot 10^{13}$ n/cm²sec bei 44 MW-Betrieb steht ein maximaler Fluß von ca. $2 \cdot 10^{13}$ n/cm²sec bei 12 MW-Betrieb gegenüber [38], der zum Core-Rand auf etwa $0,5 \cdot 10^{13}$ abfällt. Die axiale Flußverteilung im Zentral-Loop ist in Abb. 18 [39] dargestellt. In den Abbildungen ist die ungefähre Lage der Kapsel- bzw. Loop-Prüflinge markiert. In Tabelle XII sind schließlich die Flußwerte der verschiedenen Messungen in den Isotopenkanälen in Höhe der Prüflingsmitten zusammengestellt. Unter den Flußwerten ist der Zeitpunkt der Messung sowie die Stellung der Trimmabschaltstäbe in mm angegeben. Das Verhältnis zwischen maximalem thermischen und vertikal gemitteltem thermischen Fluß variiert je nach Isotopenkanal zwischen 1,25 und 1,57 [37, 39]. Die Messungen zeigen, daß über einen längeren Zeitraum im Mittel kein ausgeprägter Trend nach niedrigeren Flüssen zu beobachten ist. Mit wachsender TA-Eintauchtiefe verschiebt sich der Fluß in den unteren Core-Bereich.

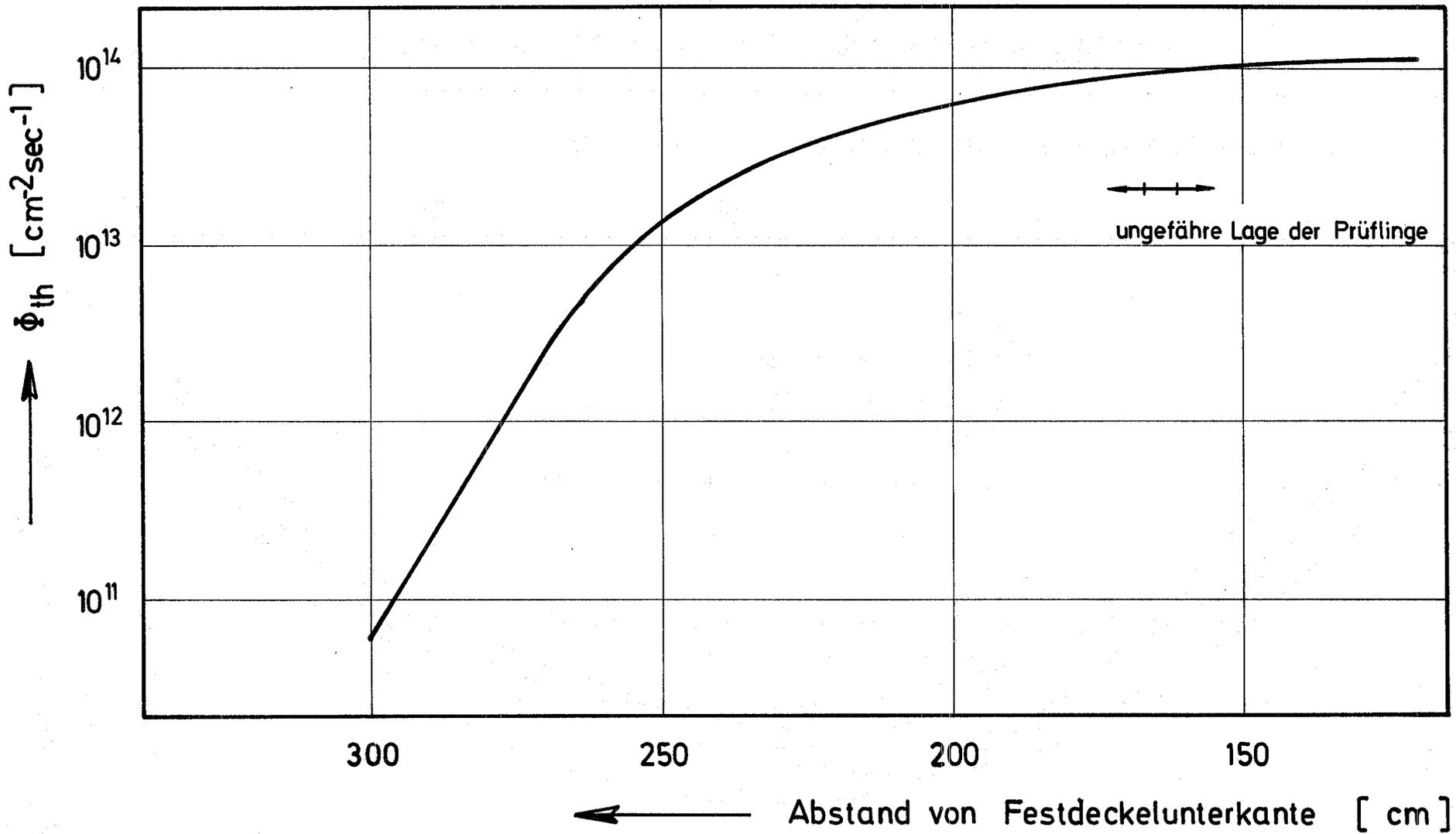
5.2 Bestrahlungsdaten der Kapselversuchsgruppen

Die Instrumentierung der Bestrahlungskapseln (Kap. 4.1) gestattet die Bestimmung der Hülloberflächentemperatur, der Stabileistung und des Abbrandes der einzelnen Prüflinge aus den Meßwerten der Thermoelemente (vergl. Abb. 14), wobei der Temperaturverlauf für jeden Kapseltyp und Brennstabdurchmesser bestimmt ist. Wie Eichversuche zeigen, besteht gute Übereinstimmung zwischen experimentell und rechnerisch ermittelten Werten [40]. Abweichungen von maximal 20° rühren von der Einbringung der Thermoelemente in Tauchrohren mit 0,2 mm Spiel her. Der Gesamtfehler der Temperaturbestimmung wird auf $\pm 5\%$ abgeschätzt.



Vertikaler Verlauf des thermischen Flusses
Isotopenkanal 49 / 15

Abb. 17



Vertikaler Verlauf des thermischen Flusses im
 Zentralloop (Messung am 1. 2. 67)

Abb. 18

Tabelle XII: Vertikaler Verlauf des thermischen Flusses in den Isotopenkanal-Positionen in Höhe der Prüflingsmitte
 ($\phi_{th} \times 10^{-13} / \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1} /$)

Iso. ϕ_{th}	37/15	41/05	41/07	41/09	41/15	41/23	41/33	45/15	45/23	49/15	49/23	49/31	53/07	53/09	51/15	53/23	57/13	57/15	61/17
	7,9 (7/68) 525 mm	4,2 (3/67) 1020mm	6,2 (4/67) 720 mm	7,1 (4/67) 720 mm	8,9 (4/67) 720 mm	7,3 (4/67) 720 mm	4,4 (7/68) 525 mm	9,0 (4,67) 720 mm	7,8 (4/67) 720 mm	8,8 (4/67) 720 mm	8,3 (4/67) 635 mm	5,3 (4/67) 720 mm	6,9 (7/68) 525 mm	6,8 (4/67) 720 mm	8,2 (4/67) 720 mm	6,8 (4/67) 720 mm	6,3 (4/67) 720 mm	6,8 (4/67) 720 mm	5,0 (7/68) 525 mm
	7,5 (1/69) 430 mm	4,7 (4/67) 640 mm		7,4 (7/68) 525 mm	8,8 (7/68) 525 mm		4,9 (1/69) 430 mm	8,9 (7/68) 525 mm	8,9 (7/68) 525 mm	6,2 (3/67) 1020mm	6,5 (7/68) 525 mm		7,6 (7/68) 525 mm	8,6 (7/68) 525 mm	7,3 (7/68) 525 mm			7,3 (7/68) 525 mm	
				7,1 (1/69) 430 mm	7,9 (1/69) 430 mm			8,4 (1/69) 430 mm		8,3 (1/69) 430 mm									7,5 (1/69) 430 mm
	8,2	5,0	6,7	8,1	9,6	8,6	4,6	9,6	8,7	9,4	8,6	6,4	7,1	7,4	8,7	7,4	6,8	7,3	5,1
	7,5	5,0		7,5	9,0		5,1	8,9		8,9	7,7	6,6		7,6	8,6	7,3		7,4	
				7,1	8,0			8,3		8,3									7,7
	8,1	5,4	6,8	8,2	9,8	9,3	4,6	9,7	9,1	9,4	8,6	7,0	7,0	7,4	8,8	7,6	6,9	7,4	5,1
	7,3	4,8		7,4	8,9		5,0	8,7		8,6	8,8	6,6		7,3	8,3	7,2		7,2	
				6,9	7,8			8,0		8,1							7	7,5	
	7,6	5,6	6,6	7,9	9,5	9,3	4,4	9,4	9,1	9,1	8,3	7,1	6,6	7,1	8,4	7,4	6,6	7,0	5,0
	6,8	4,7		7,0	8,3		4,7	8,2		8,3	9,4	6,3		6,8	7,8	7,0		6,7	
				6,5	7,3			7,5		7,6									7,1

Erläuterung:

Spalte 1: $\phi_{th} = 7,9 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{sec}$ bei TA-Stellung 525 mm, gemessen Juli 1968 in Iso.-Kanal 37/15 in Höhe der oberen Prüflingsmitte
 $\phi_{th} = 7,5 \times 10^{13} \text{ " " " " 430 mm, " Jan. 1969 " " " "$
 (entsprechend für die folgenden Prüflinge und Iso.-Kanäle)

Die Auswertung der Meßdaten erfolgt für die Kapselversuchsgruppen 3 bis 5b mit Hilfe eines digitalen Rechenprogramms [41]. Die Angaben für die Versuchsgruppen 1 und 2 beziehen sich auf die heißeste Stelle eines KVE entsprechend der Stelle maximalen Flusses [42]. Wie der Bestrahlungsablauf während eines Reaktorzyklus zeigt, kann der zeitliche Verlauf von Hülltemperatur und Stableistung gut linear approximiert werden. In Abb. 19 ist der typische Stableistungsverlauf für drei Prüflinge der Versuchsgruppe 4a dargestellt. Der Abfall von Stableistung bzw. Temperatur während des Zyklus ist auf den Abbrand sowie auf Flußänderungen durch Variation der TA-Stäbe zurückzuführen. Bei Prüflingen mit 2 bis 3 Thermoelementen können axiale Temperaturverteilungen dargestellt werden. An Prüflingen mit Brennstoffsäulen von 80 mm werden Gradienten bis zu 2°/mm je nach Bestrahlungsposition und Höhe des Prüflings im Core festgestellt. Zur Berechnung des mittleren Abbrandes \bar{A} der Prüflinge wird die mittlere Stableistung $\bar{\lambda}$ herangezogen gemäß

$$\bar{A} = \bar{\lambda} \cdot \frac{l \cdot t_v}{G} \quad (\text{MWd/kg Metall}),$$

wobei l die Brennstoffsäulenlänge, G das Brennstoffgewicht (Metall) und t_v die Bestrahlungszeit in Vollasttagen bedeuten. Die Berechnung wird für jeden Zyklus getrennt durchgeführt, die Teilabbrände werden aufsummiert. Die Abbrandwerte für die Versuchsgruppen 1 und 2 stellen entsprechend obiger Angabe Maximalwerte dar.

In Tabelle XIII sind Maximalwerte für Hülloberflächentemperaturen und Stableistungen sowie Abbrandwerte für die KVE der Versuchsgruppen 1 und 2 und die einzelnen Prüflinge der restlichen Versuchsgruppen zusammengestellt. Die Angaben der Bestrahlungszeiten bedeuten Gesamtbestrahlung (in Tagen) für Versuchsgruppe 1 und 2 sowie Vollasttage für alle anderen Versuchsgruppen.

5.3 Bestrahlungsdaten der Loop-Versuchsgruppen

An den Brennstabprüflingen im Bestrahlungseinsatz des He-Loops können insgesamt 13 Meßwerte erfaßt werden [35]. Es handelt sich hierbei um Eintritts- und Austrittstemperaturen des Kühlgases, Hülloberflächen- und Zentraltemperatur des Brennstabes bzw. Brennstoffs sowie um den Spaltgasdruck im Prüfling. Außerdem kann selbstverständlich der Kühlgasdruck gemessen werden.

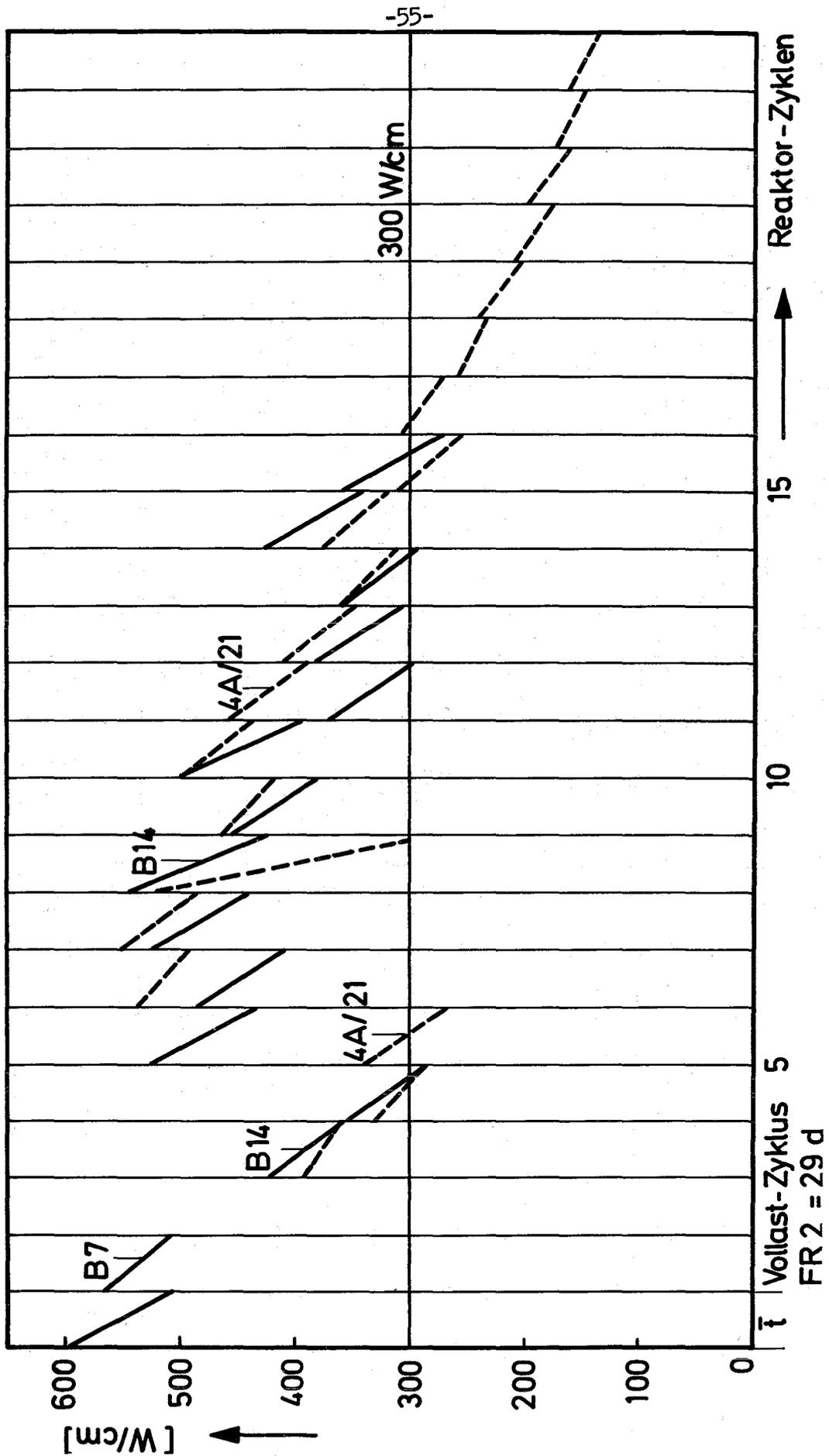


Abb. 19 Kapsel-Versuchsgruppe 4a
Stableistung λ (t) der Prüflinge B 7, B 14 und 4A/21

Tabelle XIII Bestrahlungsdaten der Kapselversuchsgruppen (Hüloberflächentemperatur T_{Ha} , Stableistung X , Abbrand A)
(t_{ges} = Gesamtbestrahlungszeit, t_v = Gesamtbestrahlungszeit in Volllasttagen)

Versuchsgruppe 1					
KVE Nr.	t_{ges} (d)	Prüfl. Nr.	$T_{Ha, max}$ (°C)	X_{max} (W/cm)	A_{max} (MWd/kg)
3	14	1,2,3,5	480	480	0,82
4	14	A,B,C,D	ca.450	ca.370	ca.0,75
5	150	6,7,E,F	ca.450	ca.370	ca.8,10
6	2h	M1,M2, M5,M6	ca.275	ca.300	-
7	105	8, G, M3,M7	ca.480	ca.400	ca.6,10
8	23	C1, C2, M4, M9	ca.450	ca.370	ca.1,20

Versuchsgruppe 2					
KVE Nr.	t_{ges} (d)	Prüfl. Nr.	$T_{Ha, max}$ (°C)	X_{max} (W/cm)	A_{max} (MWd/kg)
9	3,5	A29-A32	ca.450	ca.430	ca.0,3
10	36	A9-A12	" 450	" 400	" 2,0
11	58	A5-A8	" 510	" 450	" 3,8
12	196	A25-A27	" 510	" 500	" 18,0
13	131	A1-A3	" 510	" 450	" 8,5
14	67	A13-A15	" 510	" 450	" 4,0
15	204	A21,A22	" 510	" 500	" 19,0
16	109	A23,A24	" 340	" 300	" 5,7
17	207	25V,29V	" 440	" 420	" 16,5
18	235	A17,17V	" 400	" 370	" 16,5
19	235	A18,A19	" 400	" 370	" 16,5

Versuchsgruppe 3 [8]					
"	t_v	"	"	"	\bar{A}
20	30	1 5 7	469 538 460	580 630 585	6,25 6,35 5,60
21	87,5	13 11	455 475	550 585	16,8 17,1
22	606,8	19 19	448 452	557 576	86,0 76,9
23	87,0	MM 9 3	468 560 475	575 640 585	18,3 16,2 17,7
24	609,6	6 4	455 450	545 550	65,4 68,3
25	280,2	MS 2	481 550	593 725	53,3 48,3
26	220,5	10 8	487 506	634 630	44,1 39,7
27	399,4	14 12	456 500	576 633	59,2 55,7
28	542,8	B4 16	420 455	503 550	66,0 60,6
29	132,5	DU CG AG 15	462 536 487 494	604 688 625 635	25,4 24,9 24,7 24,3
30	223	36 35 34 33	412 448 444 440	508 549 549 585	35,5 37,1 37,1 35,4
31	371,3	39 38 37	436 475 412	530 487 492	57,1 52,1 51,7
32	45,5	IS KM 40	477 588 448	598 754 586	9,46 8,81 8,43

Versuchsgruppe 4a [11]					
KVE Nr.	t_v (d)	Prüfl. Nr.	$T_{Ha, max}$ (°C)	X_{max} (W/cm)	\bar{A} (MWd/kg)
33	57,0	B 10 B 7 B 6	501 ≈565 484	627 640 601	12,1 11,7 10,3
34	171,5	B 13 B 12 B 11	475 550 487	587 701 606	28,1 29,2 28,0
35	141,8	4A/4 4A/2 4A/1	481 532 531	597 675 673	26,7 26,0 25,2
36	162,8	4A/9 4A/8 4A/5 4A/3	525 ≈600 ≈600 556	663 700 700 620	31,1 ≈33,0 ≈30,4 30,4
37	391,4	4A/19 4A/16 4A/15 B 14	457 425 456 475	561 512 559 587	62,0 58,4 61,9 57,7
38	577,9	4A/22 4A/21 4A/20	487 481 468	606 597 578	85,2 79,4 73,2
40	522,9	4A/28 4A/25 4A/26 4A/27	462 475 500 512	568 587 625 644	81,3 80,4 77,2 80,0
41	359,7	4A/18 4A/23 4A/17	475 494 478	587 616 593	55,7 57,5 51,2
45	67,4	4B/29 4B/28 4A/24	siehe Vg. 4b 704	621	12,0

Versuchsgruppe 4b					
KVE Nr.	t_v	Prüfl. Nr.	$T_{Ha, max}$ (°C)	X_{max} (W/cm)	\bar{A}
42	99,6	4B/27 4B/26 4B/25	534 614 602	457 534 523	23,2 22,0 21,6
43	46,2	4B/34 4B/32 4B/30	582 ≈800 704	503 ≈770 621	10,3 9,8 9,7
44	127,2	4B/35 4B/33 4B/31	445 543 509	371 466 433	25,1 25,4 23,8
45	67,4	4B/29 4B/28 4A/24	624 616 siehe Vg. 4a	544 536 17,1	17,1 17,1
47	484,3	4B/4 4B/3 4B/2 4B/1	520 520 575 609	444 444 496 529	85,3 74,6 76,3 ≈60
48	425,3	4B/9 4B/8 4B/7 4B/5	500 500 527 543	424 424 450 466	79,1 71,5 76,4 69,1
49	637,1	4B/11 4B/12 4B/10 4B/6	616 554 625 606	536 477 545 527	99,9 ≈110 110,3 ≈80,0
55	247,0	4B/15 4B/14 4B/13	719 700 774	579 563 627	55,9 65,8 55,9
56	305,5	4B/18 4B/17 4B/16	560 585 594	442 463 471	59,2 61,3 61,6
57	460,4	4B/21 4B/20 4B/19	569 563 582	450 445 461	79,4 83,1 84,8
58	517,5	4B/24 4B/23 4B/22	684 661 737	549 529 595	93,3 104,2 86,2

Versuchsgruppe 4c					
KVE Nr.	t_v (d)	Prüfl. Nr.	$T_{Ha, max}$ (°C)	X_{max} (W/cm)	\bar{A} (MWd/kg)
61	320,6	43/1 540/1 583/2	510 665 616	375 517 473	45,2 49,7 49,7
62	370,5	583/5 43/5 540/3	≈600 543 649	≈500 405 503	≈52,6 54,1 49,0
64	375,4	540/2 583/4 43/2	584 453 546	443 323 408	52,6 ≈45,0 45,1
67	251,8	540/5 583/3 43/2	827 722 812	666 570 653	≈55,6 ≈47,7 ≈54,0

Versuchsgruppe 5a					
KVE Nr.	t_v	Prüfl. Nr.	$T_{Ha, max}$ (°C)	X_{max} (W/cm)	\bar{A}
72	32,9	5A/4 5A/5 5A/2	608 617 698	511 521 600	5,8 6,0 6,0
73	91,4	5A/6 5A/7 5A/1	598 ≈600 756	502 ≈500 657	≈16 ≈17 ≈19
74	276,0	5A/8 5A/9 5A/3	668 664 702	571 567 604	43,6 47,4 49,4

Versuchsgruppe 5b					
KVE Nr.	t_v	Prüfl. Nr.	$T_{Ha, max}$ (°C)	X_{max} (W/cm)	\bar{A}
77	321,6	5B/4 5B/3 5B/2	432 440 491	453 462 522	108,6 113,2 116,6
80	342,7	5B/7 5B/6 5B/5	446 452 423	469 476 443	114 113 110
81	265,8	5B/9 5B/8 5B/1	394 451 515	411 478 553	90,1 92,0 90,5
82	265,8	5B/12 5B/11 5B/10	442 448 448	468 475 475	93,1 90,3 ≈90,0
83	29,5	5B/15 5B/14 5B/13	413 437 452	433 461 480	11,5 11,7 11,5
86	72,5	5B/18 5B/17 5B/16	427 452 441	449 480 466	27,1 26,7 24,7

Anmerkung:

Bei einigen Prüflingen sind Thermoelemente ausgefallen bzw. es besteht die Annahme, daß Fehlmessungen vorliegen. Die bei diesen Prüflingen angegebenen Schätzwerte des Abbrandes beruhen auf Extrapolation bis zum Bestrahlungsende.

Die Bestimmung der Brennstableistung muß genau und so schnell möglich sein, daß die Bestrahlungsprobe ohne Verzögerungen direkt in die der gewünschten Leistung entsprechende vertikale Position des Reaktorkerns eingefahren werden kann. Dazu wird ein Rechengerät eingesetzt, mit dessen Hilfe die Leistung aus dem bezüglich Gasdruck und Gastemperatur korrigierten Durchflußmeßwert und der Kühlmittel-aufheizspanne berechnet wird. Der gesamte Meßfehler der Leistungsmeßeinrichtung liegt - abhängig vom Absolutbetrag - zwischen 2 und 4 % des Meßwertes [35].

Während die Prüflinge der Loop-Versuchsgruppe 1 in dem feststehenden Bestrahlungseinsatz bestrahlt werden, kommen die Prüflinge der anderen Gruppen in dem Spezialeinsatz, der eine vertikale Positionsänderung gestattet, zum Einsatz. Je nach Änderung der TA-Stabstellung und der dadurch hervorgerufenen Flußänderung werden die Prüflinge um ca. 20 bis 50 mm relativ zu ihrer Coreposition vertikal verschoben, um die gewünschte Stableistung beizubehalten.

Die Messung der Hülloberflächentemperaturen wird mit Mantelthermoelementen durchgeführt, die zur sicheren Erfassung der Temperatur auch bei hohen Kühlmittelgeschwindigkeiten auf den Brennstab geschweißt sind [35]. Die Differenz zwischen wahrer Hülloberflächentemperatur und Thermoelementmeßwert wird in out-of-pile-Versuchen als Funktion der Stableistung gemessen. Je nach Stableistung liegt die Hülloberflächentemperatur um 50°C (bei 400 W/cm) bzw. um 72° (bei 700 W/cm) höher als der Meßwert.

In Tabelle XIV sind die Bestrahlungsdaten der Prüflinge der Loop-Versuchsgruppen zusammengestellt. Aufgeführt sind Hülltemperaturen, Stableistungen und Bestrahlungszeiten. Für die Zykliversuche sind die Zyklen mit Bestrahlungs- und Abkühlzeit für jeden Prüfling erfaßt.

Der Abbrand, der nach obigem Formalismus berechnet wird, beträgt bei maximaler Bestrahlungsdauer von ca. 29 Tagen etwa 2,5 MWd/kg Me.

Tabelle XIV

Bestrahlungsdaten der Loop-Versuchsgruppen (Hüloberflächentemperatur T_{Ha} ,
Stableistung \bar{X} , Bestrahlungsdauer \bar{t})

Versuchsgruppe 1			
Prüfl.	\bar{T}_{Ha} (°C)	\bar{X} (W/cm)	\bar{t}
J 2	400	462	24 d
J 3	400	461	24 d
J 4	400	460	24 d
J 5	400	459	24 d
J 6	400	478	5 d
J 7	400	472	5 d
J 8	400	465	5 d
J 11	520	655	21 d
J 15	520	653	21 d
J 19	520	649	21 d
J 21	520	652	21 d

Versuchsgruppe 2 Z				
Prüfl.	\bar{T}_{Ha} (°C)	\bar{X} (W/cm)	\bar{t} (h)	Zyklen
J 1	460	500	4,2	-
J 9	460	520	44	2 ²² ₄₄
J 10	460	505	88	2 ⁴ ₄₄
J 12	550	715	44	2 ²² ₄₄
J 13	550	700	88	2 ⁴ ₄₄
J 14	550	700	176	4 ⁴⁴ ₄₄
J 16	550	695	264	6 ⁴ ₄₄
J 17	550	700	396	9 ⁴ ₄₄
J 18	550	720	44	2 ²² ₄₄
J 20	550	700	88	2 ⁴ ₄₄
J 22	550	715	176	4 ⁴ ₄₄
J 23	550	690	264	6 ⁴ ₄₄
J 24	550	710	396	9 ⁴ ₄₄

Erläuterung:

Die Angabe 4₄₄ bedeutet:

4 Zyklen zu je 44 h Bestrahlung mit
4 h Abkühlzeit zwischen jedem Zyklus

Versuchsgruppe 2 [26]			
Prüfl.	\bar{T}_{Ha} (°C)	\bar{X} (W/cm)	\bar{t}
L 1	≈ 500	500	10 min
L 1X	450	710	9 "
L 1Z	520	950	11 "
L 2	500	680	2 h
L 2	500	680	2 h
L 2X	550	940	1 "
L 2Z	480	380	2 "
L 3	520	469	24 "
L 4	530	510	10 min
L 5	510	370	2 h
L 6	520	560	2 "
L 7	550	740	10 min
L 8	520	500	2 h
L 9	540	750	24 h
L 10	540	975	11 min
L 11	≈ 500	≈ 900	2 h
L 12	≈ 500	960	24 h
L 13	≈ 500	500,850	ca. 10 d
L 14	530	510	2 h
L 15	500	610	2 "
L 16	530	890	2 "
L 17	440	500	24 "
L 18	510	845	12 min
L 19	550	740	2 h
L 20	550	1000	24 "
L 21	490	960	2 "
L 22	≈ 480	500,650	ca. 10 d
L 23	500	540	25 h
L 24	530	710	31 min
L 25	480	760	3 h
L 26	450	660	2 "
L 27	≈ 510	500,850	ca. 10 d
L 28	480	486	2 h
L 29	420	500	49 min
L 30	≈ 510	740	12 "
L 31	≈ 500	780	2 h
L 32	530	720	24 "
L 33	550	1000	10 min
L 34	550	950	2 h
L 35	530	550	2 "
L 36	550	725	14 min
L 37	540	760	2 h
L 38	550	730	24 "
L 39	580	1000	2 h

Versuchsgruppe 3			
Prüfl.	\bar{T}_{Ha} (°C)	\bar{X} (W/cm)	\bar{t}
L3-1	505	600	1 d
2	425	586	1 "
3	495	600	3 "
4	495	600	3 "
5	475	600	9 "
6	485	600	9 "
7	465	700	8 h
8	500	700	8 "
9	510	620	1 d
10	482	700	1 "
11	500	700	3 d
12	470	490	3 "
13	540	1000	4 h
16	480	500	≈ 9 d
17	465	500	9 "
18	440	400	≈ 9 "
19	480	505	9 "
20	495	505	9 "
21	475	505	9 "
22	490	500	9 "
24	485	500	≈ 10 d
25	470	410	3 "
26	500	500	3 "
27	480	495	9 "
28	475	500	9 "
29	465	505	27 "
30	475	505	28,5 d
31	500	600	3 d
32	475	585	3 "
33	500	585	3 "
34	455	700	8 h
35	480	700	8 "
36	470	700	1 d
37	490	700	1 "

6. Bestrahlungsnachuntersuchung

6.1 Der Ablauf der Bestrahlungsnachuntersuchung

Nach Ablauf der Bestrahlung und Lagerung im Abklingbecken, wobei sich die Lagerzeit im groben an der Aktivität der Proben, d.h. am Abbrand, orientiert, werden die Prüflinge einer umfangreichen Untersuchung unterworfen. Diese Untersuchung kann in zwei Gruppen unterteilt werden, die zerstörungsfreie und die zerstörende Nachuntersuchung [43, 44, 45].

Im Rahmen der zerstörungsfreien Nachuntersuchung werden die Prüflinge äußerlich nachvermessen, um Dimensionsänderungen feststellen zu können. Die folgende zerstörungsfreie Untersuchung der inneren Geometrie bzw. Struktur der Brennstabprüflinge ist für einen gerichteten Einsatz der zerstörenden Nachuntersuchung erforderlich. Diese Durchleuchtung wird mit einem Betatron, welches eine harte γ -Strahlung mit einer Maximalenergie von 18 keV aussendet, durchgeführt. Zur Charakterisierung der Brennstoffsäulen hinsichtlich Struktur, axialem Leistungsverlauf, Brennstoffverlagerung und Spaltproduktverteilung werden die Prüflinge γ -spektrometrisch untersucht, wobei ein integrales Profil für den Energiebereich von 400 bis 860 keV sowie ein weiteres für die γ -Linien der Radio-Nuklide Zr-95/Nb-95 (720 - 770 keV) aufgenommen wird. Während das integrale Profil Spaltproduktwanderungen sichtbar werden läßt, erlaubt das Profil des nicht mobilen Zr-95/Nb-95 die Beurteilung der Brennstoffverteilung unter Berücksichtigung des axialen Leistungsverlaufes.

Die zerstörende Nachuntersuchung beginnt mit der Bestimmung des freien Spaltgases innerhalb der Brennstabhülle. Nach Aufstellung des Schnittplanes für den Prüfling werden dann die Bestimmungen des Spaltgases in geschlossenen Brennstoffporen bzw. im Brennstoffgitter durch Mahlen (Porengas) und chemische Behandlung (Gittergas) an Brennstoffproben von ca. 3 g durchgeführt. Die Untersuchung der Brennstoffstruktur durch Längs- und Querschnitte gehört zu den wichtigsten Punkten der zerstörenden Nachuntersuchung. Sie gestattet die Analyse der Brennstoffstruktur in Abhängigkeit von der Bestrahlungsgeschichte. Die Vermessung der keramografischen Schliche betrifft den Zentralkanal, die Stengelkristallzone, die Zone gerichteten Kornwachstums, evtl. Schmelzbereiche, den Restspalt-Brennstoff-Hülle und erlaubt somit u.a. eine Beschreibung des Temperaturprofils im Brennstoff. In der

zerstörenden Nachuntersuchung werden weiterhin radiochemische Abbrandbestimmungen anhand der wichtigen Abbrand-Indikatoren Nd-148 und Ce-144/Pr-144 an Brennstoffproben durchgeführt.

Die bisher durchgeführten Untersuchungen erstrecken sich zum augenblicklichen Zeitpunkt auf die Kapselversuchsgruppen 1 bis 4a sowie auf die Loop-Versuchsgruppen 1 bis 3. Im Rahmen des vorliegenden Berichtes werden in den folgenden Kapiteln zusammenfassende Darstellungen der Ergebnisse der einzelnen Experimentgruppen, soweit diese bereits untersucht wurden, gegeben.

6.2 Die Nachuntersuchung der Kapselversuchsgruppen

Das Hauptaugenmerk bei der Nachuntersuchung der Versuchsgruppen 1 und 2 liegt auf den Bestrahlungskapseln sowie auf dem integralen Verhalten der Prüflinge dieser Gruppen. Nach Schwierigkeiten während der Bestrahlung durch Ausfall von Thermoelementen infolge Masseschluß und Bruch zeigten sich Brennstabdefekte, die auf die Kapselkonzeption zurückzuführen sind [32]. In 4 von 17 bestrahlten und nachuntersuchten Kapseln war jeweils der oberste Brennstab an seinem oberen Ende infolge von Überhitzung, die durch Lunker und Korrosions- bzw. Entmischungsprodukte im Bleiwismut verursacht wurden, durchgebrannt (Abb. 20). Die Lunker treten bei Abschalten des Reaktors durch Erstarrungsschrumpfen auf, die bei Wiederanfahren nicht sofort wieder aufschmelzen. Bei Bestrahlungszeiten von 1 bis 2 Monaten bilden sich weiterhin im PbBi beträchtliche Mengen von Korrosionsprodukten (Fe, Cr, Ni, Zr), die im schwereren PbBi aufschwimmen und in Höhe des Füllstandes einen Pfropfen bilden, dessen Schmelzpunkt mit ca. 600°C weit über dem Schmelzpunkt von PbBi (125°C) liegt. An einigen Brennstäben war außerdem das Hüllrohr in Höhe des Spaltgasplenums eingebault (Abb. 21), was auf Druckkräfte, wie sie beim ersten ungleichmäßigen Aufschmelzen des noch lunkerfreien PbBi auftreten können, zurückzuführen ist. Die zerstörende Nachuntersuchung zeigt ansonsten das übliche Bild der Strukturänderungen im Brennstoff, die Zentralkanal- und Stengelkristallbildung sowie die Zone gerichteten Kornwachstums (Abb. 22).

Mit dem Abschluß der Bestrahlungen in den PbBi-Kapsel-Serien kommen die Prüflinge der Kapselversuchsgruppen 3 bis 5b in den Doppelkapseln mit PbBi/Na bzw. NaK zur Bestrahlung. Beim Betrieb dieser Einsätze

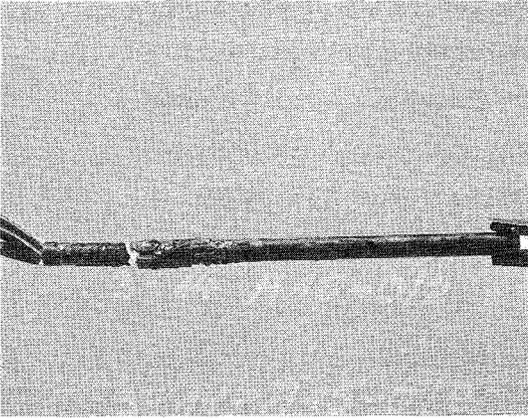


Abb. 20 Kapselversuchsgruppe 2
Prüfling A 15

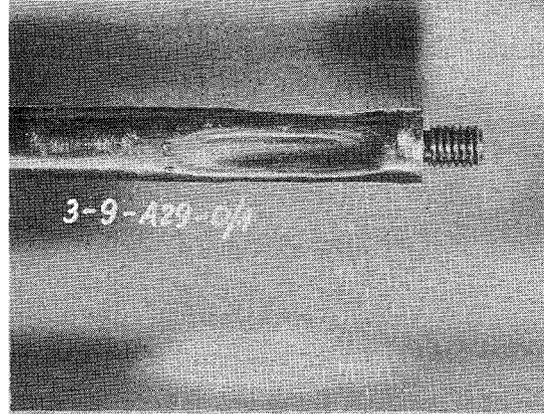


Abb. 21 Kapselversuchsgruppe 2
Eingebeultes Spaltgas-
plenum des Prüflings A 29

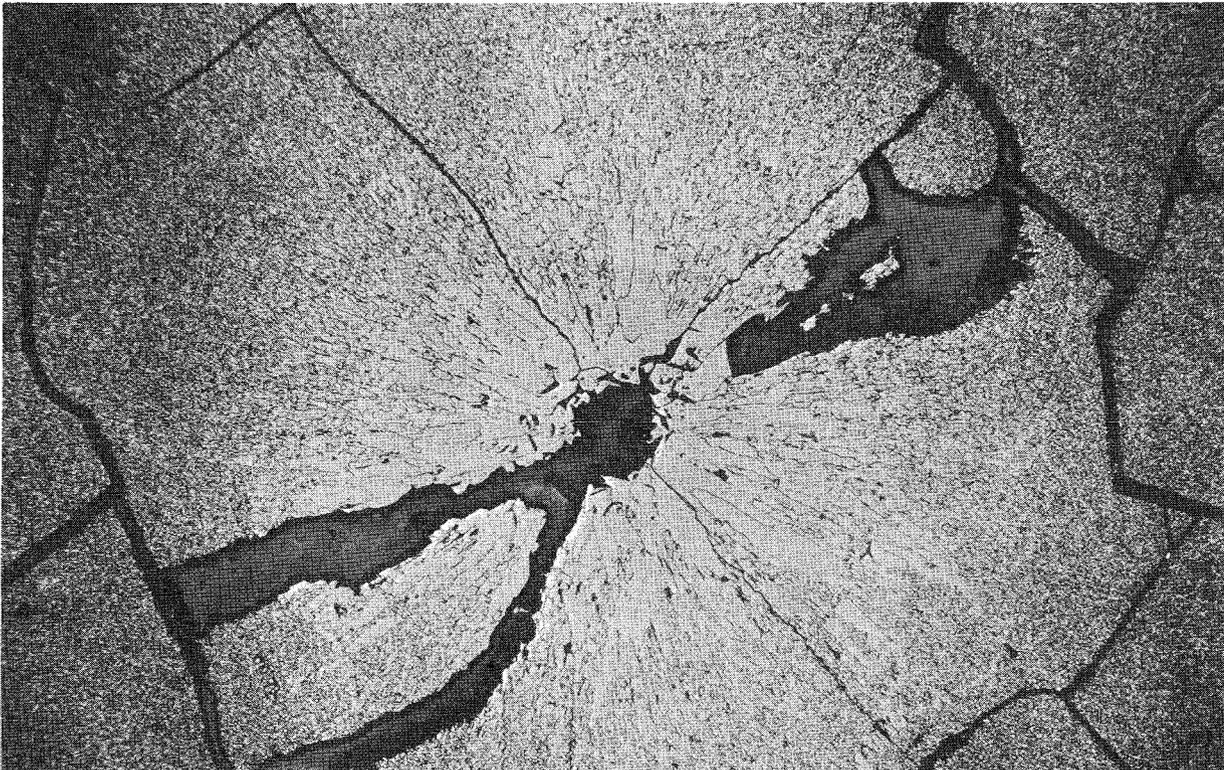


Abb. 22 Kapselversuchsgruppe 2, Prüfling A 2
Brennstoffstrukturänderungen

sind kaum nennenswerte Störungen aufgetreten. Lediglich 4 der insgesamt 46 Kapseln mußten wegen erhöhter Temperaturanzeige vorzeitig aus dem Reaktor genommen werden. Zwei weitere Einsätze wurden wegen Ausfall von Thermoelementen des "2-von-3"-Systems vorzeitig ausgebaut. Die maximale Betriebsdauer eines KVE betrug etwa 2,5 Jahre oder 640 Vollasttage.

Bei fast allen KVE zeigte sich an der äußeren Kapselwand aus Zircaloy-2 eine lokal sehr begrenzte Korrosion unter den Wärmedämmrohren (Abb. 13) oberhalb des Brennstoffbereiches. Die Korrosionsstelle findet sich immer dann, wenn hier die Temperatur 400°C überschritten hatte [33]. Wie bei den PbBi-Kapseln treten auch hier durch das ungleichmäßige Aufschmelzen und Erstarren der PbBi-Säule, entsprechend dem axialen Leistungsverlauf, bei Anfahren und Abschalten des Reaktors Druckkräfte auf, die jedoch, von geringem Einbeulen der inneren Kapsel abgesehen, zu keiner Beeinträchtigung der Bestrahlungsversuche führten.

Die Bestrahlungsnachuntersuchung der Prüflinge der Kapselversuchsgruppe 3, die in [8] dokumentiert ist, erbringt folgende Ergebnisse:

- Bei Abbränden bis 86 MWd/kg Me (s. Tab. XIII) sind alle 34 Prüflinge intakt geblieben. Eine Änderung der äußeren Geometrie konnte bei keinem Prüfling festgestellt werden.
- Die radiale und axiale Struktur des Brennstoffs nach Bestrahlung ist typisch für die Brennstab-Betriebsbedingungen. Die Spaltgasfreisetzung streut im Bereich zwischen 30 und 70 %.
- Die Beimischung von CeO_2 kann durch dessen geringe Dichte und die daraus resultierende Porositätsverteilung während und nach der Bestrahlung, die nicht typisch für UO_2 - PuO_2 -Brennstoff ist, nicht als hinreichende PuO_2 -Simulation gewertet werden (Abb. 23 und 24).

Im Rahmen der zerstörungsfreien Nachuntersuchung der Prüflinge der Versuchsgruppe 4a zeigt es sich, daß alle Prüflinge intakt und ohne signifikante Dimensionsänderungen sind. Die Brennstabhüloberfläche war in allen Fällen sauber und metallisch glänzend. Die keramografischen Untersuchungen weisen in allen bisher untersuchten Prüflingen Zentralkanäle auf, die sich z.T. keulenförmig am oberen und unteren Prüflingsende aufweiten (Abb. 25) [11], welches seinen Grund in

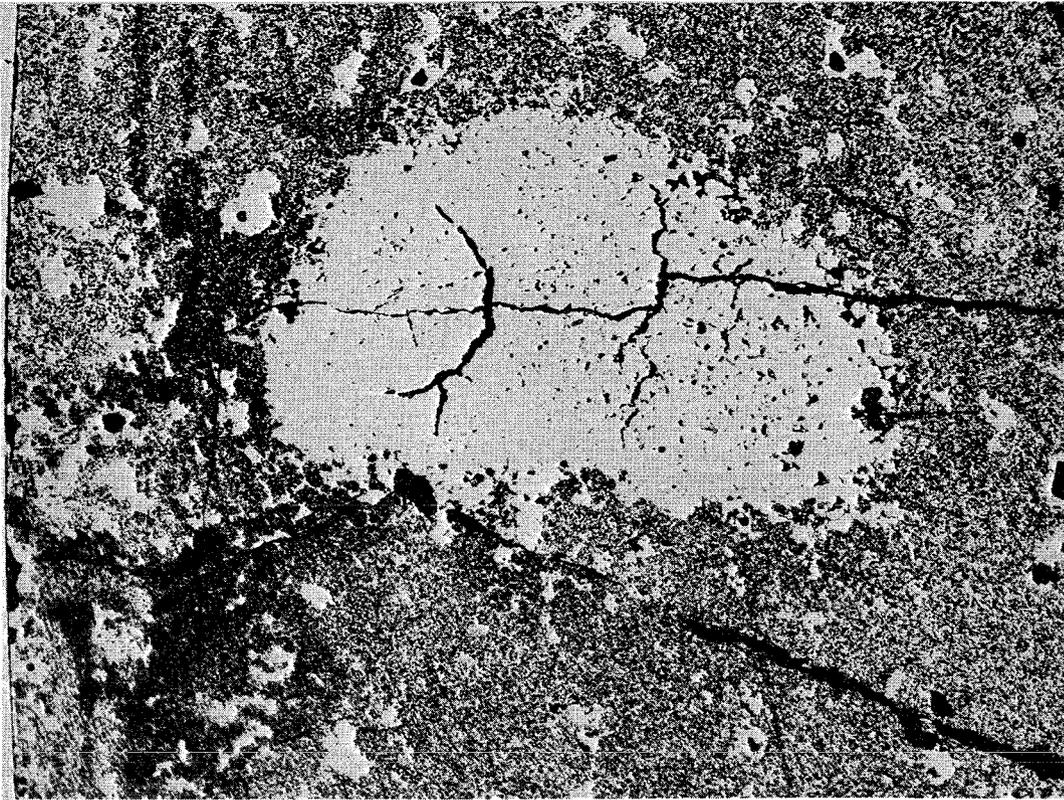


Abb. 23 Kapselversuchsgruppe 3, Prüfling L 9, Radialschliff
(UO_2 - CeO_2 -Brennstoff)

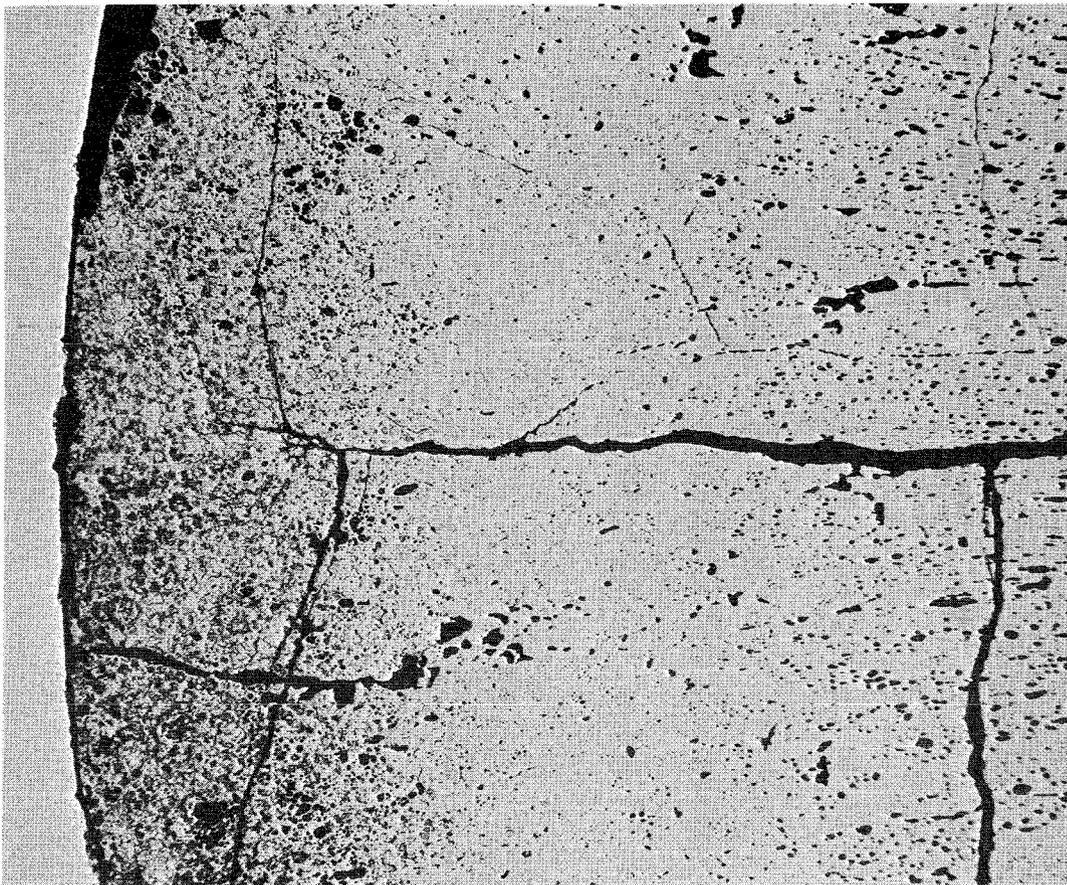


Abb. 24 Kapselversuchsgruppe 4a, Prüfling B 14, Radialschliff
(UO_2 - PuO_2 -Brennstoff)

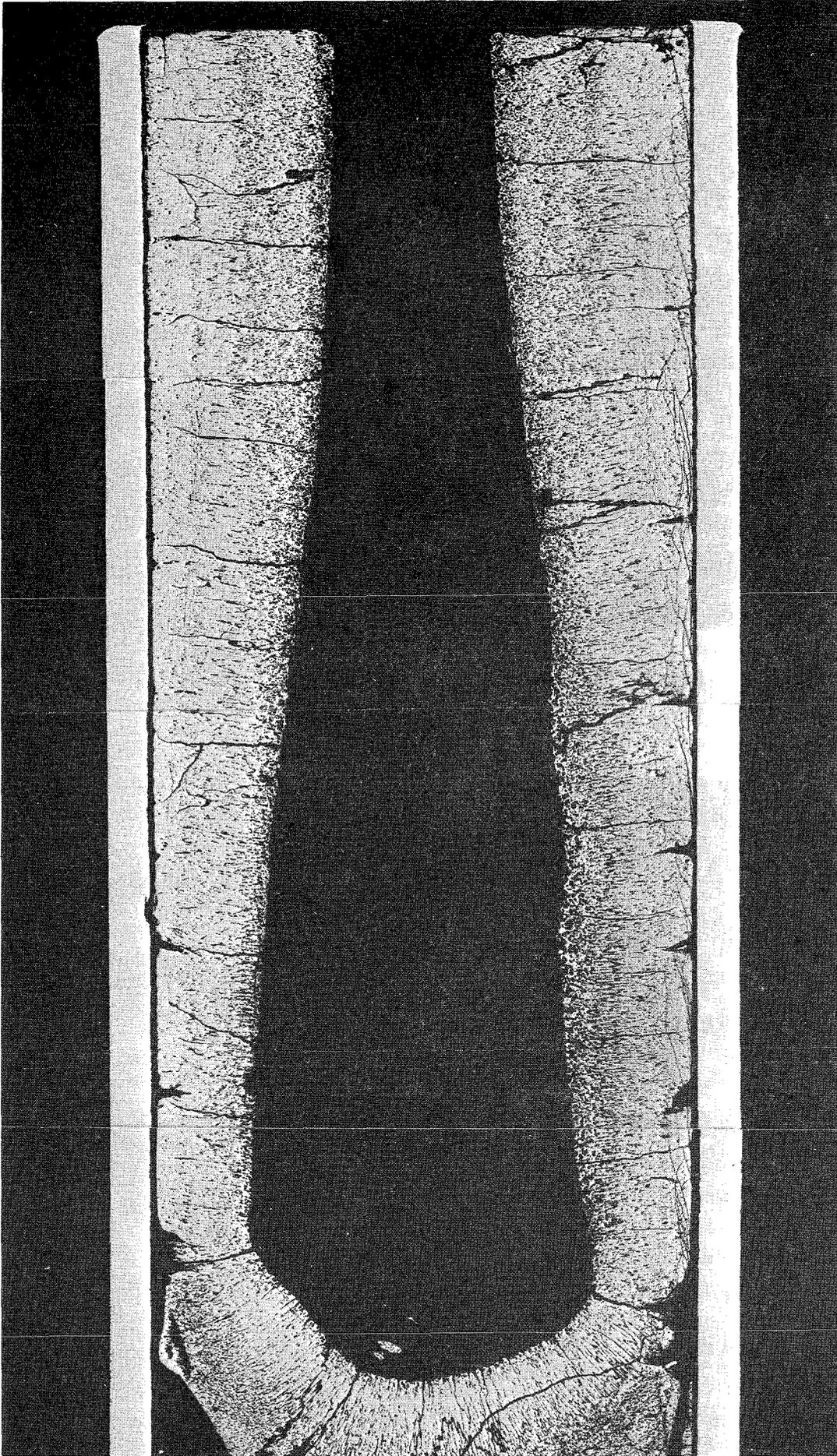


Abb. 25 Kapselversuchsgruppe 4a, Prüfling 4A/16, Längsschliff
Keulenförmige Zentralkanalaufweitung am Prüflingsende

der unterschiedlichen Wärmeableitung, hervorgerufen durch Führungsstücke, Sinterstahlfilter und Endstopfen, hat. Bei einigen Prüflingen sind die Zentralkanäle nicht durchgehend (Abb. 26, Röntgendurchleuchtung). Die bisher durchgeführte Untersuchung am Prüfling 4A/21 (KVE 38) zeigt, daß der Kanal durch axialen Transport geschmolzenen Brennstoffs, der zudem eine nahezu vollständige PuO_2 -Entmischung aufweist, zugeschüttet ist (vergl. α -, β - γ -Autoradiografie in Abb. 26). Die weitere Untersuchung der Pu-Verteilung in Ebenen über und unter dem Schnitt in Abb. 26 zeigen eine sehr starke Pu-Anreicherung um den Zentralkanal. Insgesamt ist dieser Effekt bisher bei drei Prüflingen deutlich zu erkennen. Die normale Pu-Entmischung aufgrund der Diffusion im Temperaturgradienten ist bei den Prüflingen dieser Versuchsgruppe bereits bei Abbränden bis ca. 30 MWd/kg Me (KVE 33 bis 36) deutlich zu erkennen. Bei höheren Abbränden bzw. längeren Bestrahlungszeiten nimmt die Pu-Anreicherung noch weiter zu (Abb. 27).

Die bisher durchgeführten Untersuchungen an der Grenze Brennstoff-Hüllrohr zeigen, daß die Hüllrohrinnenwand zum Teil angegriffen und abgetragen ist. Die Korrosionstiefe liegt bei den Prüflingen mit hohem Abbrand zwischen 25 und 80 μ . Das abgetragene Hüllmaterial findet sich im Restspalt zwischen Brennstoff und Hülle sowie in der äußeren Brennstoffzone wieder: Wie Untersuchungen mit der Mikrosonde zeigen, besteht die hellere Phase in dem in Abb. 26 abgebildeten A Ausschnitt im wesentlichen aus den Elementen Fe, Cr und Ni, dreieckförmig vom Brennstoff umschlossen.

Mit Hilfe des Rechenprogramms SATURN [46] wurde die Bestrahlungsgeschichte einiger Prüflinge der Gruppe 4a nachvollzogen [47]. Die Rechnungen zeigen, daß der größte Anteil des Zentralkanals bei Stableistungen um 450 W/cm entsteht. Die Porenwanderung trägt bei 300 W/cm aufgrund des flachen Temperaturprofils selbst über längere Zeiten nur wenig zur Bildung des Kanals bei. Die Übereinstimmung zwischen Rechnung und Experiment ist für Prüflinge mit einfacher und kurzer Bestrahlungsgeschichte sehr gut, der Grund für größere Abweichungen bei Prüflingen mit komplizierter Bestrahlungsgeschichte

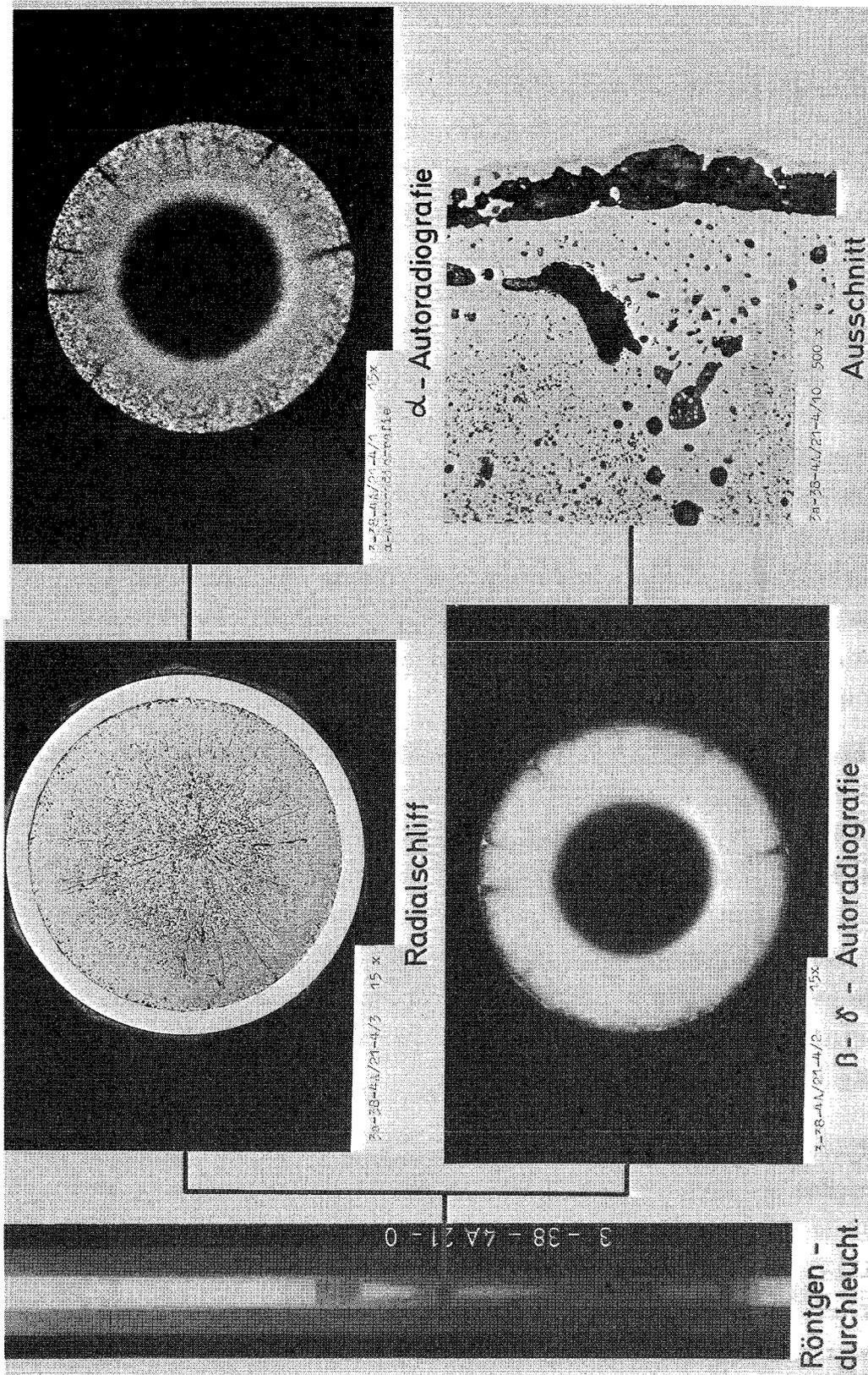


Abb. 26 Kapselversuchsgruppe 4a
KVE 38, Prüfling 4A/21

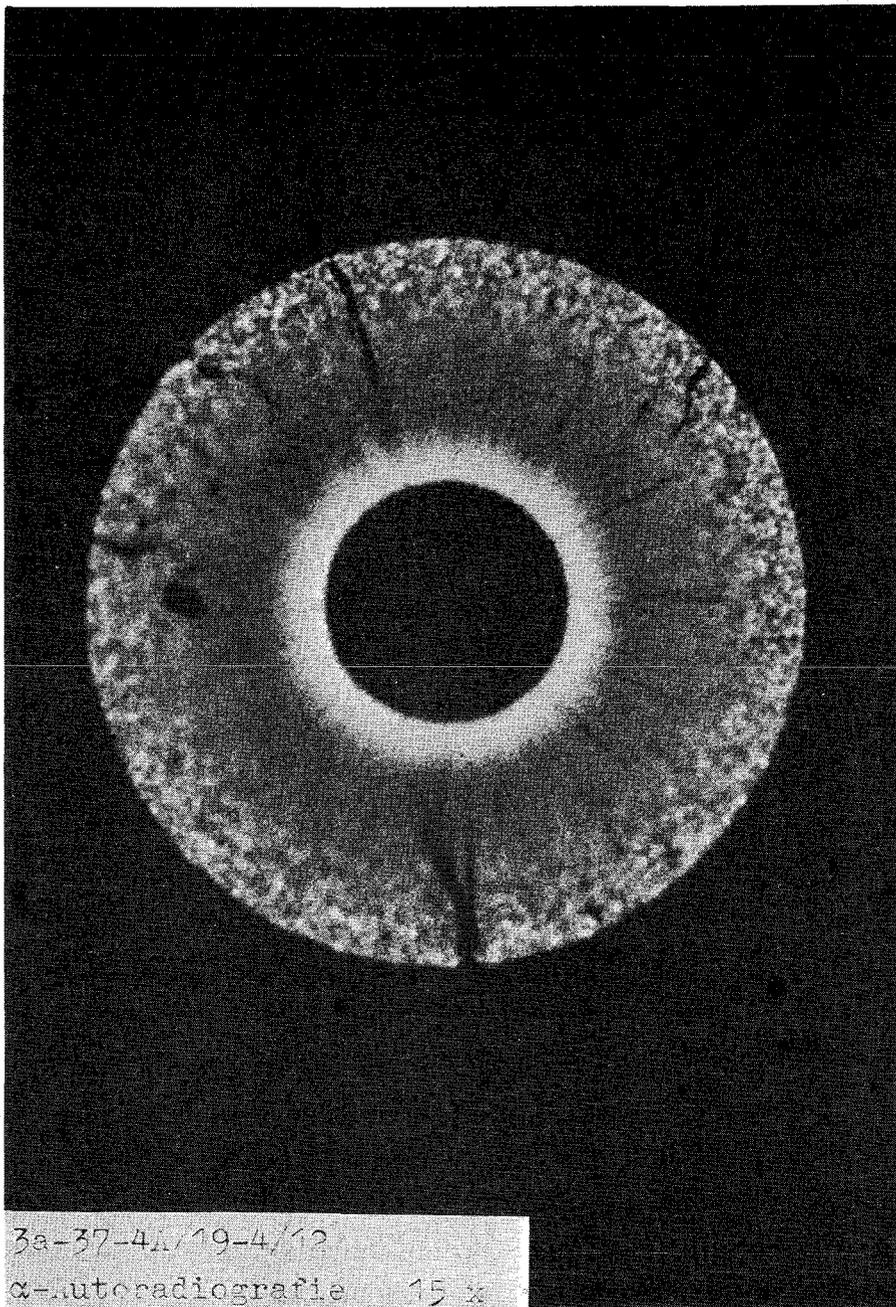


Abb. 27 Kapselversuchsgruppe 4a, Prüfling 4A/19
Änderung der Pu-Verteilung
(am Rand ist die Anfangsverteilung zu erkennen)

(viele Reaktorzyklen mit unterschiedlichen Stabileistungen) ist im wesentlichen in dem Wärmeübergang bei Kontakt zwischen Brennstoff und Hülle zu suchen, der das Temperaturprofil stark beeinflusst. Weitere Untersuchungen hierzu sind im Gange.

Bei Versuchsgruppe 4b mußte die Bestrahlung der Kapselversuchseinsätze 42, 43, 44 und 45 infolge überhöhter Temperaturen und Thermoelementausfall vorzeitig abgebrochen werden. Die bisher durchgeführte Nachuntersuchung zeigt, daß 2 der insgesamt 35 Prüflinge beschädigt sind. Es handelt sich hierbei um die Prüflinge 4B/30 und 4B/32, ausnahmslos Prüflinge mit einivibriertem Brennstoff, deren Brennstoffsäulen nach der γ -spektrometrischen Vermessung bis zu 14 mm (Prüfling 4B/32) gewachsen sind. Die beiden Prüflinge zeigen am oberen Ende der Brennstoffsäule eine Aufbauchung mit einem bzw. mehreren axialen Rissen (Abb. 28). Ein weiterer Prüfling (4B/29) zeigt in Höhe der Brennstoffsäule eine kleine linsenförmige Ausbuchtung, die jedoch nicht zum Stabversagen führt. Bei einigen Prüflingen wird leichte bis starke Korrosion an der Hüllinnenseite beobachtet (Abb. 29) [48].

Die Nachuntersuchung der Prüflinge der Kapselversuchsgruppe 4c erstreckt sich zum bisherigen Zeitpunkt auf die Einsätze 61 und 67. Während die Prüflinge von KVE 61 unbeschädigt sind, weisen alle drei Prüflinge von KVE 67 starke Beschädigungen auf, die wahrscheinlich auf ein Fehlverhalten der Kapsel (starke Lunkerbildung im PbBi) zurückzuführen sind. Die Hüllrohre der Prüflinge 4c/43/4 und 4c/583/3 sind in Höhe der Brennstoff-Füllung aufgerissen, der Brennstoff ist teilweise ausgetreten und NaK in das Prüflingsinnere eingedrungen [49]. Ein körniger Belag bedeckt die nähere Umgebung der Schadenstelle (Abb. 30). Der Prüfling 4c/540/5 ist 60 mm oberhalb der unteren Schulterfläche abgebrochen. Über die gesamte mit Brennstoff belegte Länge des unteren Teilstückes verläuft ein weit aufklaffender Axialriß, größere Mengen Brennstoff fehlen. Im oberen Teilstück klafft ein bogenförmiger Riß von ca. 20 mm Länge auf.

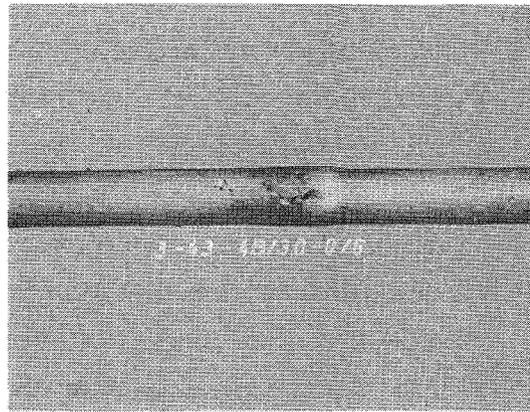
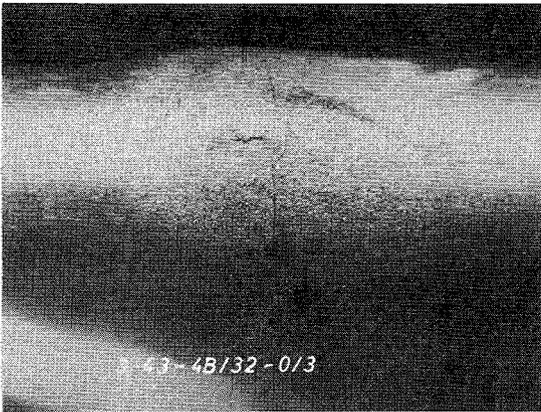


Abb. 28 Kapselversuchsgruppe 4b, Prüfling 4B/32 (links) und 4B/30
Hüllrohrschaden

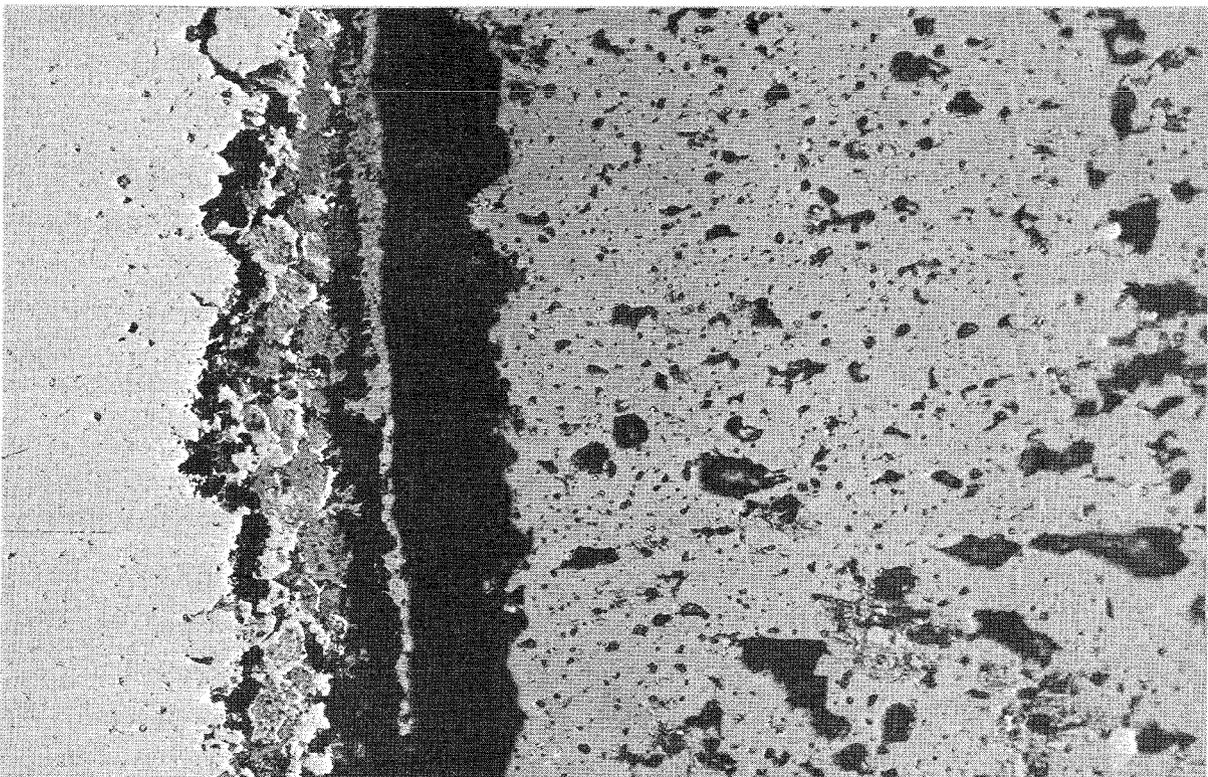
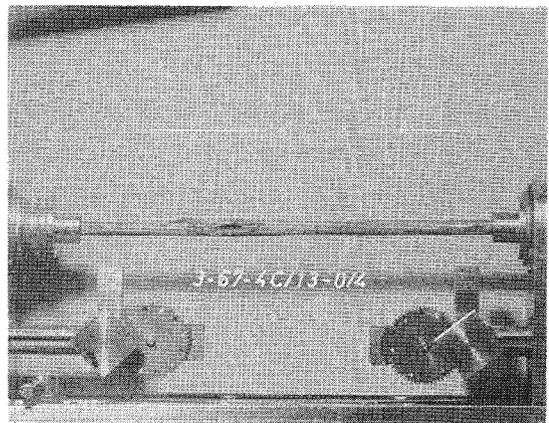


Abb. 29 Kapselversuchsgruppe 4b, Prüfling 4B/33, Korrosion an der
Hüllrohrinnenseite

Abb. 30
Kapselversuchsgruppe 4c,
Prüfling 4C/13



Die bisherige Nachuntersuchung der KVE 72 und 73 der Versuchsgruppe 5a zeigt, daß bis auf die Prüflinge 5A/5 (KVE 72) und 5A/9 (KVE 74) alle anderen Prüflinge intakt geblieben sind. Der mittlere Prüfling 5A/5 ist in 57 mm Abstand von der Prüflingsunterkante in Höhe der 6. Tablette (93 % th.D.) durchgeschmolzen (Abb. 31) [50]. Innerhalb der ersten zwei Bestrahlungswochen sind bei diesen KVE mehrere der jeweils 10 eingesetzten Chromel/Alumel-Miniatur-Mantelthermoelemente ausgefallen: Die Nachuntersuchung an den Thermoelementen zeigt eine außergewöhnliche Grobkornbildung (Abb. 32) in den Thermoelementdrähten, die offensichtlich zur Unterbrechung der Adern führt. Außerdem weisen einige Thermoelementmäntel eine bis zu 30 μ tiefe Korrosionszone, von Bleiwismut hervorgerufen, auf. Das Auftreten der Grobkornbildung kann nicht eindeutig auf Temperatureinflüsse zurückgeführt werden, vielmehr scheinen mechanische Beanspruchungen vor oder während der Bestrahlung vorgelegen zu haben [51].

Im Rahmen der Nachuntersuchung der Kapselversuchsgruppe 5b sind bisher lediglich die Kapseln 83 und 86 demontiert worden. Es zeigt sich, daß sämtliche Prüflinge dieser KVE intakt sind.

6.3 Die Nachuntersuchung der Loop-Versuchsgruppen

Die Nachuntersuchung der Prüflinge der Loop-Versuchsgruppe 1 zeigt, daß sämtliche Prüflinge unbeschädigt sind. Während die Dimensionskontrolle bei den Prüflingen mit Stableistungen um 460 W/cm (s. Tab. XIV) maximale Aufbauchungen bis 240 μ ergibt, ist dies bei den Prüflingen mit $X \approx 650$ W/cm nicht festzustellen. Die Röntgengrobstrukturprüfung ergibt bei sämtlichen Prüflingen mehr oder weniger ausgeprägte Zentralkanäle mit z.T. starken Erweiterungen (Kavernen, Abb. 33). Die Keramografie weist in sämtlichen Prüflingen ausgeprägte Säulenkristalle aus, die aus der Brennstoffstruktur deutbaren Temperaturen liegen im Zentrum im Mittel zwischen 2100 und 2400°C. Die γ -spektrometrische Untersuchung zeigt, daß die Impulsraten von Zr-95/Nb-95 bei den meisten Prüflingen gleichmäßig zum oberen Prüflingsende hin auf 5 bis 20 % des Anfangswertes ansteigen. Als Hauptziel der Versuchsgruppe konnte das sichere Funktionieren der Bestrahlungseinrichtung nachgewiesen werden.

Abb. 31

Kapselversuchs-
gruppe 5a
Prüfling 5A/5

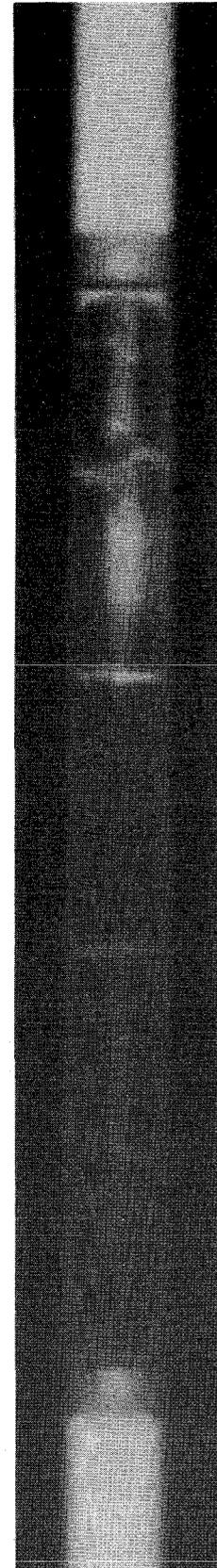
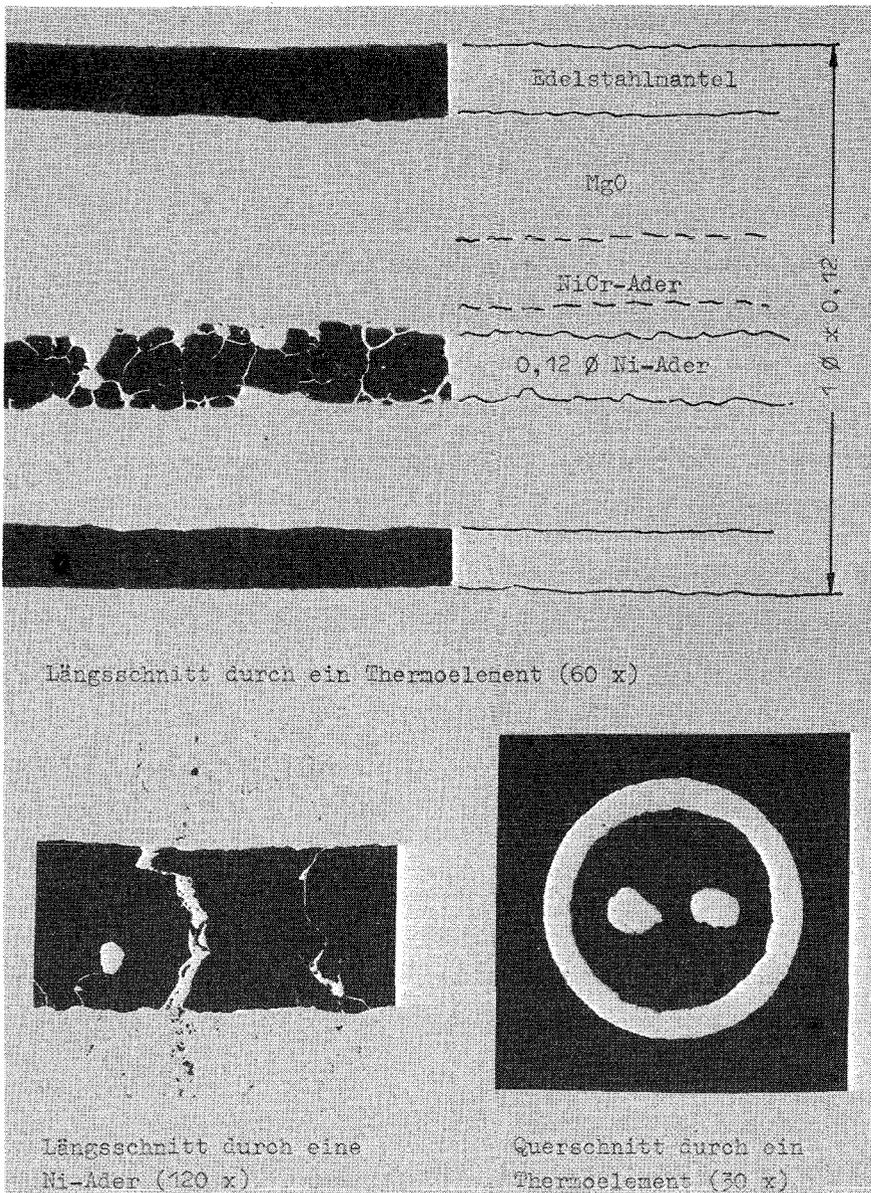
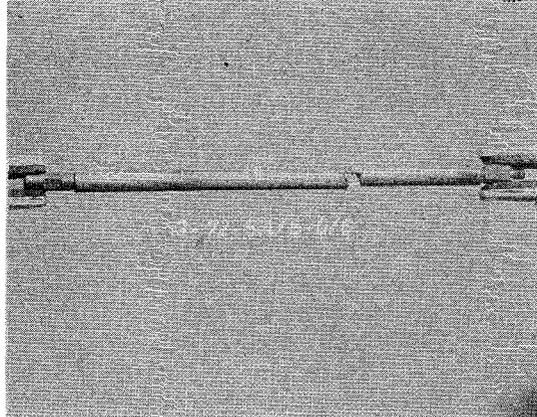


Abb. 32

Nachuntersuchung bestrahlter Thermoelemente der
Versuchsgruppe 5a
starke Grobkornbildung in der Ni-Ader

Abb. 33

Loop-Versuchs-
gruppe 1
Prüfling J 11
Röntgendurchleuchtung

Die Nachuntersuchung der Prüflinge der Loop-Versuchsgruppe 2, die die Bestrahlung unbeschädigt überstanden haben und deren Dokumentation und Auswertung [26] in Vorbereitung ist, gestattet bereits einige qualitative Aussagen [52]. Die Prüflinge, die bei Stableistungen ≈ 500 W/cm im Minutenbereich bestrahlt wurden, zeigen, von Wärmespannungsrissen abgesehen, keine wesentlichen Gefügeveränderungen im Brennstoff. Bei gleichen Stableistungen und Bestrahlungszeiten von bis zu 24 h bilden sich Rekristallisationsbereiche und Zonen mit Stengelkristallen aus. Die Breite dieser Zonen ist abhängig von Stableistung, dem sich dadurch einstellenden Temperaturgradienten, der Dichte und der Bestrahlungsdauer. Die Hülloberflächentemperatur ist bei allen Prüflingen nahezu gleich (vergl. Tab. XIV). Bei Stableistungen bis etwa 750 W/cm sind bereits bei Bestrahlungszeiten bis 2 Stunden deutliche Gefügeveränderungen erkennbar: Von außen nach innen ist Rekristallisation, gerichtetes Kornwachstum, die Bildung von Säulenkristallen und dichtem porenfreiem Gefüge sowie stellenweises Schmelzen zu beobachten (Abb. 34). Bei noch höheren Stableistungen (bis 1000 W/cm) nimmt die Geschwindigkeit der Strukturänderungen weiter zu: Bereits im Minutenbereich sind sämtliche Änderungen erkennbar.

Bei zyklischer Bestrahlung im He-Loop bis zu 396 h blieben die Prüflinge der Loop-Versuchsgruppe 2Z intakt und zeigten darüber hinaus keine wesentlichen Änderungen ihrer Geometrie. In einigen Prüflingen wird aufgrund der starken Kavernenbildung (Abb. 35) lokales Schmelzen vermutet. Die meisten Prüflinge zeigen sehr unregelmäßige Zentralkanäle.

Die Nachuntersuchung der Prüflinge der Loop-Versuchsgruppe 3 wird in den Heißen Zellen der Firma AEG [53] durchgeführt. Die bisher untersuchten Prüflinge zeigen keine Hüllaufweitungen. Bei den Prüflingen mit Stableistungen um 600 und 700 W/cm kann zentrales Schmelzen nachgewiesen werden. Hierdurch sowie durch Verlagerung der Schmelze kommt es zu Aufweitungen bzw. Einschnürungen des Zentralkanals, der bei einigen Prüflingen stark exzentrisch ist. Die modelltheoretische Analyse dieser Versuchsgruppe mit dem Rechenprogramm SATURN ist in Vorbereitung [54].

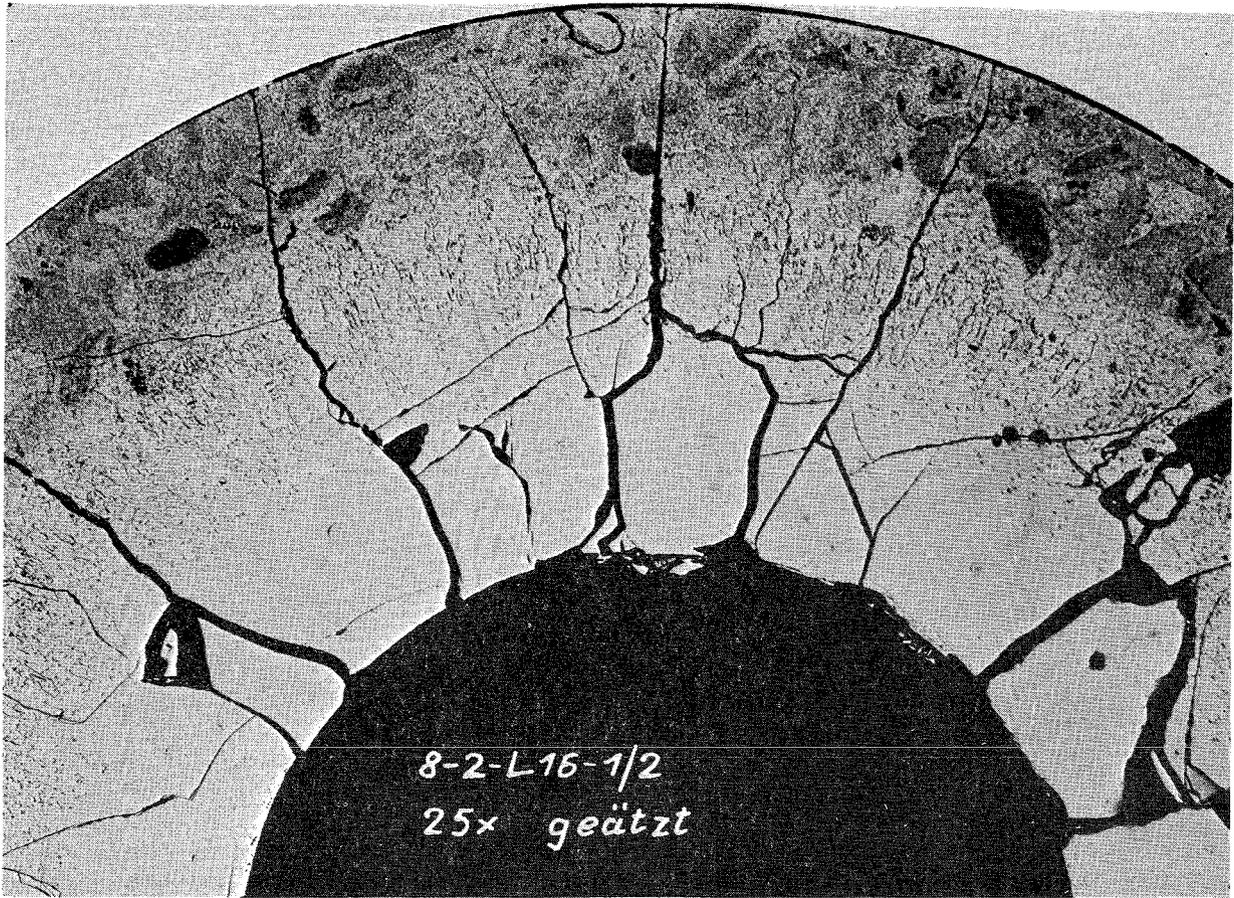


Abb. 34 Loop-Versuchsgruppe 2, Prüfling L 16

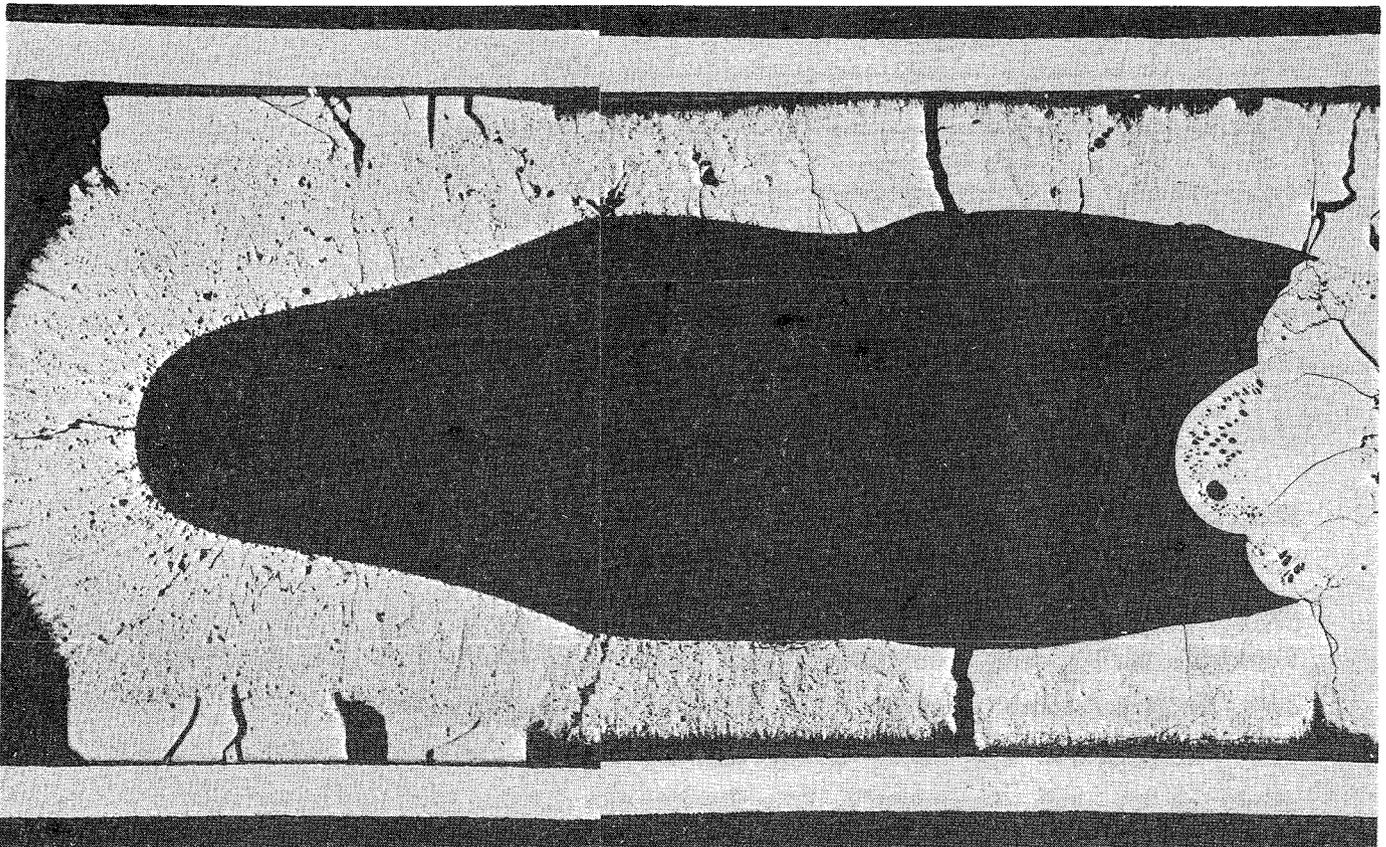


Abb. 35 Loop-Versuchsgruppe 2Z, Prüfling J 16

7. Zusammenfassung

Im vorliegenden Bericht wird eine Darstellung der bisher im FR 2 durchgeführten Bestrahlungsexperimente im Rahmen des Entwicklungsprogramms des SNR-300 gegeben. Sie enthält neben den Aufgaben und Zielen der einzelnen Kapsel- und Loop-Versuchsgruppen die wichtigsten Einzelheiten der Auslegung, Spezifikation und Herstellung der einzelnen Prüflinge, der Bestrahlungseinrichtungen sowie des Bestrahlungsablaufes und der Nachuntersuchungen, soweit diese bisher durchgeführt wurden und die in der folgenden Übersicht zusammengefaßt sind.

Versuchsgruppe	Anzahl Prüflinge	Brennstab					Betriebsbedingungen		
		Material	Form	Dichte (%th.D.)	Anreicherung (Gew.-%)	Hülle (Abm.)	Hülltem. T _{Ha} max. (°C)	Stableistung X _{max.} (W/cm)	Abbrand \bar{A} (Mwd/kg)
Bestrahlungskapseln	1	UO ₂ , UO ₂ -Mo	Tabl., Pulver	91 85	12,5 U-235	1.4550 12 x 1,0	375 - 480	370 - 480	0 - 8,1
	2	UO ₂ , UO ₂ -CeO ₂	Tabl., Pulver	92, 77, 85	2, 3,4 U-235	1.4541 (10x0,7) 1.4988 (12x1)	340 - 510	300 - 500	0,3 - 19
	3	UO ₂ , UO ₂ -CeO ₂	Tabl., Pulver	92 85	11,5 U-235	CrNiNb 2o25 (7,4x0,5) 1.4988 (7,4x0,5)	412 - 588	487 - 754	5,6 - 86
	4a	UO ₂ -PuO ₂	Tabl.	92 85	15	1.4988 (7,4x0,5)	425 - 600	512 - 701	10,3 - 85,2
	4b	UO ₂ -PuO ₂	Tabl., Pulver	84, 90 80	20	1.4988 (6x0,38)	445 - 800	424 - 770	9,7 - 110
	4c	UO ₂ -PuO ₂	Tabl.	93	20	1.4970 1.4981 1.4981/Bor (6x0,38)	510 - 827	323 - 666	45 - 54
	5a	UO ₂ -PuO ₂	Tabl.	84, 87 90, 93	19,5	1.4988 (7x0,4)	598 - 756	500 - 657	5,8 - 49,4
	5b	UO ₂ -PuO ₂	Tabl.	86	35	1.4988 (4,7x0,3)	394 - 515	411 - 553	24,7 - 117
FR 2 - He - Loop	1	UO ₂	Tabl., Pulver	81 86	4,2 7,8 U-235	1.4541 (10x0,7)	400 - 520	460 - 655	(5d - 24d)
	2	UO ₂	Tabl., Pulver	88-93 85	7,5 U-235	1.4988 (12x1)	440 - 580	370 - 1000	(1o min - 10 d)
	2 Z	UO ₂	Tabl., Pulver	91 86	4,2 7,8 U-235	1.4541 (10x0,7)	460 - 550	500 - 715	(2d - 17d)
	3	UO ₂ -PuO ₂	Tabl.	83 90	11,5	1.4988 (10x0,7)	425 - 500	400 - 1000	(4h - 29d)

Nach den einführenden Versuchsgruppen 1 und 2, die in der Hauptsache zur Entwicklung einer Na- bzw. NaK-PbBi-Doppelkapsel führten, wurden in der Versuchsgruppe 3 Brennstabprüflinge mit UO₂- und UO₂-CeO₂-Brennstoff als Vorstufe zu UO₂-PuO₂-Mischbrennstoff bestrahlt. Hierbei zeigte es sich, daß CeO₂ aufgrund seiner physikalisch-chemischen Eigenschaften keine geeignete PuO₂-Simulation darstellt. Die folgenden Bestrahlungsgruppen enthalten sämtlich UO₂-PuO₂-Brennstoff. Die Ergebnisse dieser Experimente, deren Nachuntersuchung und Auswertung in vollem Gange ist, zeigen, abgesehen von wenigen

Brennstabdefekten, deren Ursache in den meisten Fällen im Fehlverhalten der Bestrahlungskapseln zu suchen ist, ein sicheres Funktionieren der Prüflinge bis zu sehr hohen Abbränden.

Die Kurzzeitbestrahlungen in den sog. Loop-Versuchsgruppen, die in der Bestrahlungsvorrichtung des FR 2-Helium-Kreislaufes durchgeführt wurden, gestatten Aussagen über die zeitlichen Brennstoffstrukturänderungen sowie über das Verhalten von Brennstabprüflingen bei zyklischer Bestrahlung und bei sehr hohen Stableistungen. Die zyklische Bestrahlung führt bei den in der Loop-Versuchsgruppe 2Z spezifizierten Prüflingen zu keinen wesentlichen Dimensionsänderungen, ebenso bleiben Prüflinge der Versuchsgruppen 2 und 3, die bei Stableistungen bis zu 1000 W/cm bestrahlt wurden und bei denen zentrales Schmelzen beobachtet wurde, intakt.

Die quantitative Auswertung und modelltheoretische Behandlung der Bestrahlungsexperimente mit dem Programm SATURN beschränkt sich zum augenblicklichen Zeitpunkt auf die Kapselversuchsgruppe 4a sowie auf die Loop-Versuchsgruppe 3, deren Nachuntersuchung z.T. bereits abgeschlossen ist. Weitere modelltheoretische Untersuchungen betreffen die Porenverteilung der Kurzzeitprüflinge der Loop-Versuchsgruppe 2.

Literatur

- [1] H. Beißwenger: Bestrahlungsprogramm für die 1. Phase der FR 2-Kapselexperimente, unveröffentlicht
- [2] Prüfbericht 1, Fertigung der Brennelement-Bestrahlungsproben für FR 2-Kapselversuche, Versuchsgruppe 1, Fa. Nukem (unveröffentlicht)
- [3] Prüfbericht 2, Fertigung der Brennelement-Bestrahlungsproben für FR 2-Kapselversuche, Versuchsgruppe 1, Fa. Nukem (unveröffentlicht)
- [4] Prüfbericht 3, Fertigung der Brennelement-Bestrahlungsproben für FR 2-Kapselversuche, Versuchsgruppe 2, Fa. Nukem (unveröffentlicht)
- [5] G. Karsten: Spezifikationen und Bestrahlungsprogramm von Bestrahlungsproben für FR 2-Kapselexperimente, Versuchsgruppe 2a (unveröffentlicht)
- [6] W. Otto: Die Herstellung von Bestrahlungsproben für Kapselexperimente in der Versuchsgruppe 2a im FR 2, Prüfbericht Nr. 5, Fa. Nukem (unveröffentlicht)
- [7] W. Otto: Die Herstellung von Bestrahlungsproben für Kapselexperimente in der Versuchsgruppe 3 im FR 2, Prüfbericht Nr. 6, Fa. Nukem (unveröffentlicht)
- [8] D. Geithoff, D. Freund, K. Kummerer: Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung der UO_2 -Brennstab-Prüflinge in der FR 2-Kapsel-Versuchsgruppe 3, KFK 1239, August 1971
- [9] G. Karsten, A. Gerken: Spezifikation des Brennstabes für FR 2-Kapselexperimente - Versuchsgruppe 4a (unveröffentlicht)
- [10] Th. Dippel, K. Kummerer, K.H. Triemer: Herstellung Pu-haltiger Prüflinge für Versuchsgruppe 4a der FR 2-Kapselbestrahlungen (unveröffentlicht)
- [11] D. Freund, D. Geithoff, P. Weimar: UO_2/PuO_2 -Brennstab-Bestrahlungsexperimente der FR 2-Kapselversuchsgruppe 4a, Auslegung - Bestrahlung - Nachuntersuchung, KFK 1523, in Vorbereitung
- [12] G. Karsten, A. Gerken: Spezifikation des Brennstabes für FR 2-Kapselexperimente - Versuchsgruppe 4b (unveröffentlicht)
- [13] Th. Dippel, K. Kummerer, K.H. Triemer: Herstellung Pu-haltiger Prüflinge für Versuchsgruppe 4b der FR 2-Kapselbestrahlungen (unveröffentlicht)
- [14] J.F. Geugnon, K. Richter: Bericht über die Herstellung der Brennstäbe für FR 2-Kapselexperimente, Versuchsgruppe 4b (unveröffentlicht)
- [15] W. Borkowetz: FR 2-Kapselexperimente - Versuchsgruppe 4c (unveröffentlicht)
- [16] K. Richter, J.F. Geugnon: Bericht über die Herstellung von 12 Prüflingen für FR 2-Kapselexperimente - Versuchsgruppe 4c (unveröffentlicht)

- [17] K. Kummerer: Auslegung und Spezifikation eines Bestrahlungsversuches mit integrierter Variation der Brennstoffdichte (FR 2-Kapselversuchsgruppe 5a) (unveröffentlicht)
- [18] Th. Dippel, K. Kummerer: Herstellung Pu-haltiger Prüflinge für Versuchsgruppe 5a der FR 2-Kapselbestrahlungen (Integrierter Dichteversuch) (unveröffentlicht)
- [19] D. Vollath, F. Depisch, Th. Dippel: Spezifikation und Herstellung von UO_2 - PuO_2 -Stabprüflingen mit 4 mm-Brennstoffdurchmesser, FR 2-Kapselversuchsgruppe 5b, Ext.-Bericht 6/71-2 (Nov. 1971)
- [20] G. Karsten: Spezifikationen und Bestrahlungsprogramm von Bestrahlungsproben für FR 2-Loop-Experimente, Versuchsgruppe 1 (unveröffentlicht)
- [21] A. Reymann: Anhang I zum Sicherheitsbericht für FR 2-Abbrand-Loop (FR 2-Projekt 26) (unveröffentlicht)
- [22] G. Karsten: Daten zum PSB-Bestrahlungsprogramm für den FR 2 von 1967 - 1969 (unveröffentlicht)
- [23] W. Otto: Die Herstellung von Bestrahlungsproben für Loop-Experimente in der Versuchsgruppe 1 im FR 2, Prüfbericht Nr. 4 der Fa. Nukem (unveröffentlicht)
- [24] G. Karsten: Neufassung des Bestrahlungsprogrammes und der Spezifikationen von Bestrahlungsproben für FR 2-Loop-Experimente, Versuchsgruppe 2, Kurzzeitbestrahlungen (unveröffentlicht)
- [25] W. Otto: Die Herstellung von Bestrahlungsproben für Loop-Experimente in der Versuchsgruppe 2 im FR 2, Prüfbericht Nr. 7 der Fa. Nukem (unveröffentlicht)
- [26] H. Hoffmann, D. Geithoff, A. Gerken: Kurzzeitbestrahlung oxidischer Brennstabprüflinge der FR 2-He-Loop-Versuchsgruppe 2, Auslegung-Bestrahlung-Nachuntersuchung-Auswertung, KFK 1521, in Vorbereitung
- [27] A. Gerken, G. Karsten: Spezifikation des Brennstabes für die FR 2-Kurzzeit-Loop-Versuchsgruppe 3 (unveröffentlicht)
- [28] Th. Dippel, K. Kummerer: Herstellung Pu-haltiger Prüflinge für Versuchsgruppe 3 der FR 2-Loop-Bestrahlungen (unveröffentlicht)
- [29] O. Jacobi: Die Qualitätskontrolle von Hüllrohren für Brennstäbe (unveröffentlicht)
- [30] O. Jacobi: Lieferbedingungen und Spezifikationen für Hüllrohre aus Edelstahl (unveröffentlicht)
- [31] H.E. Häfner: persönliche Mitteilung
- [32] H.E. Häfner: Bestrahlung von Brennstäben in instrumentierten Bleiwismut-Kapseln, Kerntechnik 10, Heft 3 (1968), KFK 780 (1968)

- [33] H.E. Häfner: Bestrahlung von Brennstäben in instrumentierten Natrium-Bleiwismut-Doppelkapseln, Kerntechnik 12, Heft 5/6 (1970)
- [34] E. Bojarsky: Helium-Kreislaufanlage für Bestrahlungsversuche mit Brennstoffstäben im Reaktor FR 2, Kerntechnik 10. Jahrgang (1968) Nr. 6
- [35] H. Deckers, H. Reiser: Versuchseinrichtung für die Kurzzeitbestrahlung von Brutreaktor-Brennstäben im Reaktor FR 2, Kerntechnik 11, Jahrgang (1969), Nr. 7
- [36] S. Hagen, H. Malauschek: Messungen des thermischen Flusses in den Isotopenkanälen des FR 2 (unveröffentlicht)
- [37] H. Schülken: Thermische Neutronenflußdichte in den Isotopenkanälen des FR 2, Betriebsphase E 1971 (unveröffentlicht)
- [38] H. Kapulla: persönliche Mitteilung
- [39] S. Hagen, G. Weickelt: Flußmessungen am BE5-Core des FR 2 (unveröffentlicht)
- [40] H.E. Häfner: persönliche Mitteilung
- [41] D. Freund: Auswertung von Bestrahlungsdaten der Kapselversuchsgruppen (unveröffentlicht)
- [42] H.E. Häfner: Übersicht über die im FR 2 bestrahlten Brennstab-Bestrahlungskapseln vom PbBi-Typ (unveröffentlicht)
- [43] K. Kummerer, D. Geithoff: Nachuntersuchungsprogramm für bestrahlten Brennstoff (unveröffentlicht)
- [44] D. Geithoff: Die Nachuntersuchung bei Brennelement-Bestrahlungsexperimenten, Beitrag XII in KFK 700, Dez. 1967
- [45] D. Geithoff, K. Kummerer: Einzelvorhaben im Arbeitsgebiet Brennstabbestrahlungsnachuntersuchung (unveröffentlicht)
- [46] H. Kämpf, H. Elbel, F. Depisch: Die Behandlung des mechanischen und thermischen Verhaltens von Brennstäben in SATURN 1, KFK 1477, November 1971
- [47] D. Freund, Th. Dippel, K. Kummerer: Das Verhalten von UO_2 - PuO_2 -Brennstabprüflingen unter Bestrahlung im thermischen Fluß bis zu sehr hohen Abbränden, Vortrag auf der Reaktortagung 1972, Hamburg
- [48] Nachuntersuchungsberichte KVE 42 - 45 (unveröffentlicht)
- [49] " " KVE 67 (unveröffentlicht)
- [50] " " KVE 72 (unveröffentlicht)
- [51] H.E. Häfner: Nachbestrahlungsuntersuchungen an Thermoelementen KFK 1271/2 (1971)
- [52] H.L. Krautwedel: Auswertung der Schliffbilder von Brennelement-Prüflingen, (unveröffentlicht)
- [53] Nachuntersuchung der Prüflinge der Loop-Vg. 3, Fa. AEG, in Vorbereitung
- [54] H. Fiedler: Nachrechnungen zur Loop-Vg. 3 mit SATURN 1, KFK-Bericht in Vorbereitung