

KfK 4403  
April 1988

**Die Untersuchung des  
Anfahrverhaltens von  
Schnellbrüterbrennstäben im  
Bestrahlungsexperiment  
DUELL II**

D. Freund, D. Geithoff  
Institut für Material- und Festkörperforschung  
Projekt Schneller Brüter

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



**KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE**

Institut für Material- und Festkörperforschung  
Projekt Schneller Brüter

**KfK 4403**

**Die Untersuchung des Anfahrverhaltens von Schnellbrüterbrennstäben im  
Bestrahlungsexperiment DUELL II**

D. Freund, D. Geithoff

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH., Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt  
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

## Kurzfassung

In der Experimentserie DUELL II wurde das Anfahrverhalten von hochdichtem Brennstoff untersucht. Die Bestrahlung wurde in vier sogenannten DUELL-Kapseln durchgeführt, in denen jeweils zwei Prüflinge gleichzeitig bestrahlt wurden.

Zum Einsatz kamen Kurzprüflinge mit einer Gesamtlänge von 453 mm bei einer Brennstoffsäulenlänge von 150 mm. Der hochdichte Brennstoff mit einer Herstellungsporosität von ca. 4 % hatte einen Plutoniumanteil von 20,9 % Pu/U+Pu sowie einen Ausgangssauerstoffgehalt von 1,959. Der Brennstoffdurchmesser betrug 6,37 mm, der Hüllaußendurchmesser 7,6 mm. Die Hülle bestand aus Edelstahl der Werkstoff-Nr. 1.4970.

Die Bestrahlung bestand aus vier Phasen mit einer Vorbestrahlung bei 85 % Nominalleistung ( $\approx 550 \text{ W/cm}$ ) für Einsatz 1, einem anschließenden Hochfahren auf Vollast mit Abfahren für Einsatz 2, einer folgenden Haltezeit von einem Tag auf Vollast für Einsatz 3 sowie einer Haltezeit von ca. 10 Tagen auf Vollast für Einsatz 4.

Die Nachbestrahlungsuntersuchung ergab eine unvollständige Umstrukturierung für Einsatz 1 und 2 mit Zentralkanälen von ca. 800  $\mu\text{m}$  Durchmesser in der heißen Ebene und volle Umstrukturierung für Einsatz 4 mit einem Zentralkanal von ca. 1 mm Durchmesser. Die Restspalte für die einzelnen Prüflinge lagen zwischen 44 und 25  $\mu\text{m}$ . Untersuchungen der Hüllinnenoberfläche auf Korrosion zeigten lediglich leichte Verfärbungen (Oxidation), ein korrosiver Angriff durch Spaltprodukte war nicht erkennbar.

Zur Analyse der Brennstoffumstrukturierung wurden thermodynamische Rechnungen mit dem Programm SATURN-S durchgeführt. Die Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment ist sehr gut, wobei aus den Ergebnissen der Nachuntersuchung zahlreiche Modellmodifikationen, insbesondere zur Behandlung der Leervolumenumverteilung, bestehend aus Herstellungsporosität und Rißvolumina, resultierten.

Die Analyse der Experimentserie DUELL II hat gezeigt, daß die Experimente zum größten Teil erfolgreich durchgeführt worden sind und die Kenntnisse über das Verhalten von Schnellbrüterbrennstoffen bei Bestrahlungsbeginn weiter vertieft haben.

## The Investigation of Fast Reactor Fuel Pin Start Up Behaviour in the Irradiation Experiment DUELL II

### Abstract

The irradiation experiments DUELL-II within the SNR-300 operational Transient Experimental Program deal with the investigation of fresh mixed oxide fuel behaviour at start-up. The irradiation has been carried out in the HFR Petten in four so-called DUELL capsules with two fuel pin samples each.

The fuel pins with a total length of 453 mm contained a fuel column of 150 mm length, consisting of high dense (U,Pu)O<sub>2-x</sub> fuel with an initial porosity of 4 %, a Pu-content of 20.9 %, and an O/Me ratio of 1.96. The fuel pellet diameter was 6.37 mm, the outer diameter of the SS cladding, material No. 1.4970, was 7.6 mm.

The irradiation included four phases, consisting of préconditioning at 85 % nominal power ( $\approx 550$  W/cm), a following increase to full power, and two following full power periods of 1 and 10 days, respectively.

Post irradiation examination showed incomplete fuel restructuring in the first capsules with central void diameters of 800  $\mu$ m in the hot plane, complete restructuring in the last capsule, leading to central voids of approximately 1 mm diameter. The residual gaps between fuel and clad varied between 25 and 44  $\mu$ m. The clad inner surface did not show any corrosion attack.

The analysis of fuel restructuring has been carried out with the computer code SATURN-S showing good agreement with the PIE results.

The analysis led to a series of model improvements, especially for crack volume and relocation modelling.

The series DUELL-II has been successfully carried out leading to a deeper understanding of fresh mixed oxide fuel behaviour at start-up.

## **Inhalt**

	Seite
1. Einleitung	1
2. Zielsetzung der Experimentreihe DUELL II	2
3. Auslegung und Spezifikation	3
4. Herstellung der Teststäbe	6
5. Bestrahlungseinrichtung und Bestrahlungsablauf	10
6. Nachbestrahlungsuntersuchung	14
6.1 Zerstörungsfreie Untersuchung	15
6.2 Zerstörende Untersuchung	25
7. Modelltheoretische Analyse	32
7.1 Analyse des Stabes DO 17	33
7.2 Analyse des Stabes DO 19	36
7.3 Analyse des Stabes DO 22	38
7.4 Diskussion der Ergebnisse	42
8. Zusammenfassung	45
Literatur	46

## 1. Einleitung

Im Rahmen des Betriebstransientenprogramms des Projektes Schneller Brüter werden im Reaktor HFR in Petten Bestrahlungsexperimente durchgeführt, in welchen mögliche Betriebszustände, wie sie für den SNR-300 diskutiert werden, simuliert werden. Die Betriebszustände reichen von Startrampen über Lastwechsel bis hin zu stationären und transienten Überlastbedingungen. Die Experimente dieses Programms werden in Zusammenarbeit mit Belgonucléaire, INTERATOM, CEN-Mol, ECN-Petten und JRC-Petten durchgeführt.

In der Experimentserie DUELL-II wird die erste Kategorie der sogenannten Start-rampen, d.h. das erste Anfahren auf Leistung von Brennstäben mit frischem Brennstoff, untersucht. Während dieser Bestrahlungsphase finden im Brennstoff signifikante Veränderungen statt, deren Auswirkungen von besonderer Bedeutung für den thermischen Zustand des Brennstoffs sind.

Die Versuchsreihe wurde 1982 in der sogenannten "Pool Side Facility" des HFR in Petten durchgeführt. Bei den vier Experimenten wurden jeweils zwei Prüflinge in einer Bestrahlungskapsel unter den gewünschten Betriebsbedingungen bestrahlt. In den Kurzbrennstäben kam ein hochdichter Mischoxidbrennstoff des Typs OKOM der Firma Alkem zu Einsatz, der unterschiedlich langem Betrieb auf Vollastniveau nach einer Teillastvorbestrahlung (Präkonditionierungsphase) unterworfen wurde.

Die Schwerpunkte der Analyse liegen in der Beschreibung von Umstrukturierung und Umverteilung im Brennstoff, der Beschreibung der Entwicklung des Spaltes Brennstoff/Hülle sowie weiterer Aspekte wie z.B. der Hüllinnenkorrosion.

Die modelltheoretische Analyse wurde mit dem Rechenprogramm SATURN-S /1/ durchgeführt. In der vorliegenden Arbeit werden die Ergebnisse von Nachuntersuchung und Rechnung verglichen und diskutiert.

Die experimentellen Arbeiten zur Nachbestrahlungsuntersuchung wurden in den Heißen Zellen des ECN in Petten und im Kernforschungszentrum Karlsruhe durchgeführt. In der folgenden Tabelle sind die für die Teilaufgaben verantwortlichen Mitarbeiter beider Untersuchungsorte aufgeführt. Ihnen sei an dieser Stelle für die qualifizierte und engagierte Mitarbeit gedankt.

Untersuchungskomplex	Bearbeiter
Neutronen-Radiografie $\gamma$ -Spektrometrie in Petten	G. Dassel H. Kwast
Zerstörungsfreie Untersuchung in Karlsruhe	H. Enderlein P. Brunner B. Schweigel J. Tucek W.Kohnert B. Neufang
Zerstörende Untersuchung in Karlsruhe	Dr. O. Romer W. Hellriegel G. Weih

Weiterer Dank gilt Herrn W. Ernst, der die grafische Bearbeitung der Abbildungen übernommen hat.

## 2. Zielsetzung der Experimentreihe DUELL II

In der Experimentserie DUELL-II wird das Verhalten von Brennstabprüflingen mit SNR-300 typischen Mk-II-Merkmalen während der ersten Bestrahlungsphase untersucht. Zum Einsatz kamen Prüflinge mit Brennstoff der OKOM-Serie, einem Brennstoff, der aus den Forderungen nach hoher Dichte und Löslichkeit entwickelt wurde.

Die Hauptziele der Experimente bestehen darin, Erkenntnisse zur Umstrukturierung des hochdichten Brennstoffs sowie zur Entwicklung des Spaltes Brennstoff/Hülle zu gewinnen. Weitere Fragestellungen betreffen die Umverteilungen von Sauerstoff und Plutonium sowie die Hüllinnenkorrosion bei Bestrahlungsbeginn /2/.

Hieraus lassen sich die folgenden Aufgaben ableiten:

- Beschreibung des Spaltschließmechanismus in Abhängigkeit von der aufgeprägten Betriebsgeschichte durch thermische Differenzdehnung, Aufreißen des Brennstoffs.
- Beschreibung der Brennstoffumstrukturierung (Zentralkanalbildung, Strukturzonformation, Verdichtung).
- Analyse der O/Me- und Pu-Umverteilungen im Brennstoff sowie die
- Untersuchung von Hüllinnenkorrosion

### 3. Auslegung und Spezifikation

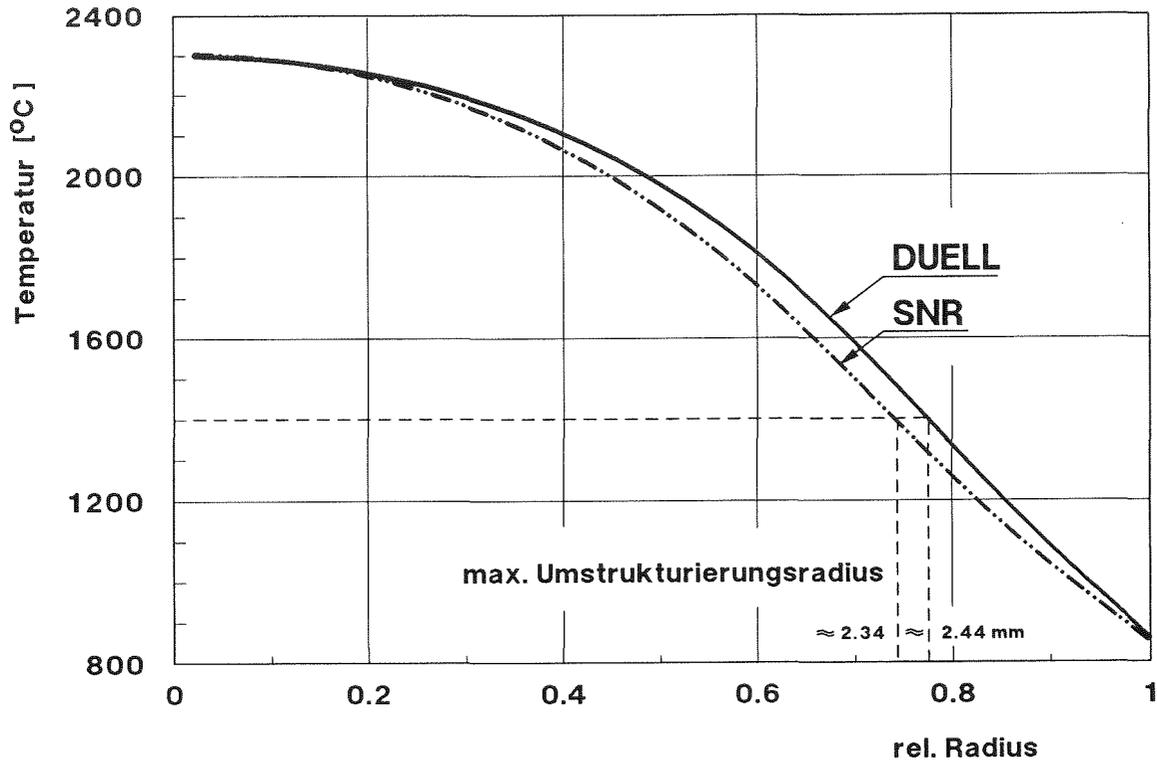
Die wesentlichen Auslegungsmerkmale für die Experimente werden aus den nachzubildenden SNR-Bedingungen abgeleitet. Aufgrund des überwiegend thermischen Flusses im HFR und der daraus resultierenden Flußabsenkung im Brennstoff müssen zur Einstellung entsprechender Temperaturen äquivalente Stableistungen bestimmt werden.

Die Flußabsenkung wird weitgehend durch das Neutronenflußspektrum und die Brennstoffzusammensetzung, d.h. die Anreicherungen von U-235 und Pu sowie durch die Brennstoffdichte bestimmt. Mit den entsprechenden Angaben über die Neutronenflußbedingungen im HFR /3,4/ und den Brennstoffdaten gemäß Tabelle II nach /5/ erhält man eine Flußabsenkung auf ca. 47 %. In Tabelle I sind die wichtigsten Daten hierzu zusammengestellt, die Flußabsenkung wurde mit dem Programm CHIFAK /6/ berechnet.

Tabelle I: DUELL-II, Flußabsenkung

Flüsse (bei 550 W/cm) (n/cm <sup>2</sup> sec)	Flußanteile (% $\phi_{tot}$ )	Brennstoff (%)
$\phi_{th} = 1,25 \cdot 10^{14}$	55,7	U-235/U: 0,72 ( $U_{nat}$ )
$\phi_{pi} = 0,60 \cdot 10^{14}$	26,8	Pu/U+Pu: 20,9
$\phi_s = 0,39 \cdot 10^{14}$	17,5	Dichte: 95,6 % th.D.
Flußabsenkung: $\phi/\phi_0(r) = 0,47 + 0,61 r^2 - 0,84 r^4$		

Zum Zeitpunkt der Auslegung wurde aufgrund höherer Pu- und U-235-Anreicherungen sowie unsicherer Flußverhältnisse eine Flußabsenkung auf ca. 20 % berechnet, die zu Äquivalenzleistungen von ca. 660 W/cm (entsprechend 450 W/cm im schnellen Fluß) führte. Neuere Rechnungen mit den obigen Werten führen auf 550 W/cm, entsprechend 450 W/cm  $\phi_{schn}$ , bzw. 470 W/cm für die 85 %-Phase im Prädiktionierungsbereich (380 W/cm  $\phi_{schn}$ ). Wie eine Vergleichsrechnung mit SATURN-S /1/ für schnellen und thermischen Fluß mit obiger Flußabsenkung zeigt, sind die Temperaturverteilungen der wesentliche Unterschied (Abb. 1). Die Abweichung in der Zentraltemperatur ist vernachlässigbar.



**Abb. 1:** Vergleich DUELL-SNR  
Radiale Temperaturprofile nach 1,0 h

Ähnlich gute Übereinstimmung zeigen die Entwicklungen von Radialspalt und Wärmedurchgangszahl. In Tabelle II sind die wichtigsten Ergebnisse der Rechnung von 0 auf 450 W/cm bzw. 570 W/cm innerhalb 1 Stunde Bestrahlungszeit zusammengestellt. Aufgrund der jedoch unterschiedlichen Temperaturverteilungen sind die Parameter der Relocation und Plastizität unterschiedlich, welches zu den Abweichungen in den unterschiedlichen Größen führt.

Unter diesen Bedingungen finden im Brennstoff nahezu gleiche Umstrukturierungen innerhalb der betrachteten Zeiträume statt, so daß die Simulation des SNR-Brennstabverhaltens trotz der ungünstigen Neutronenflußbedingungen recht gut gelingt.

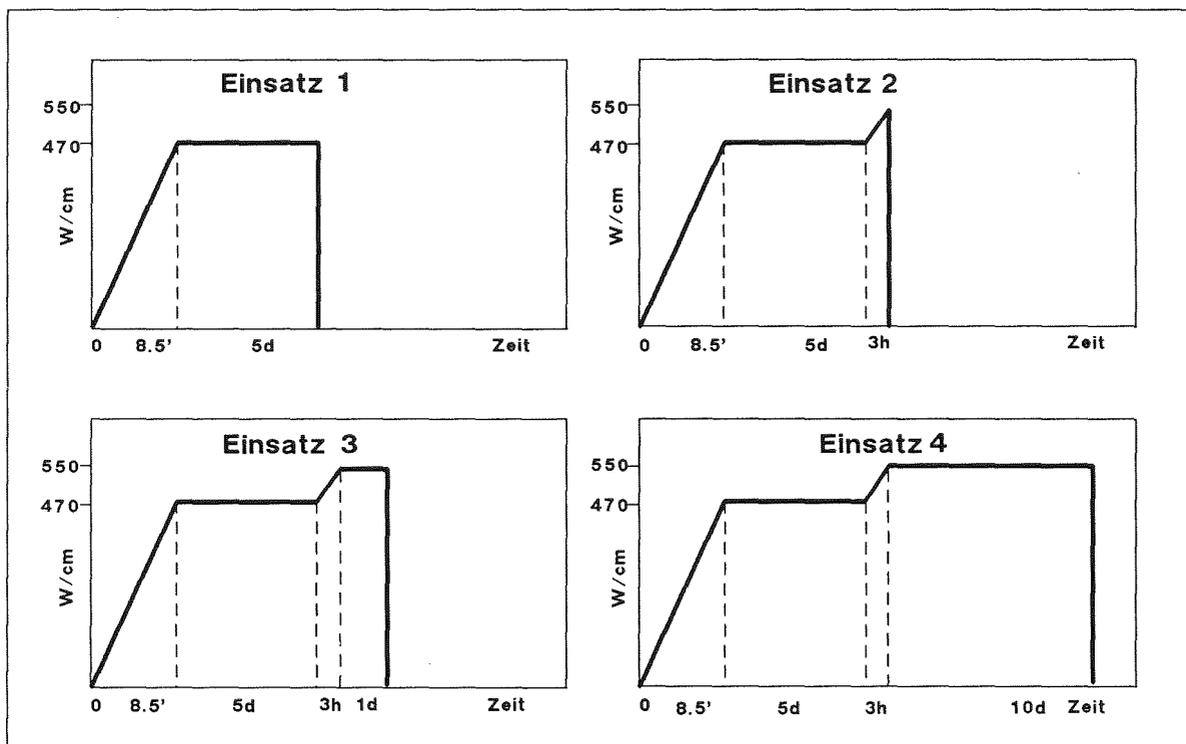
Für die Experimentserie DUELL II war folgendes Bestrahlungsprogramm vorgesehen:

1. Einsatz: Anfahren mit 10 %/min auf 85 % Nominalleistung, 5 d Bestrahlung, Abfahren
2. Einsatz: wie 1., zusätzlich Rampe mit 5 %/h auf 100 % Leistung, Abfahren
3. Einsatz: wie 2., zusätzlich 1 d Vollast
4. Einsatz: wie 2., zusätzlich 10 d Vollast.

In Abb. 2 ist der Bestrahlungsablauf schematisch dargestellt.

**Tabelle II:** Vergleich einer Startrampe (1h) für schnellen ( $\varnothing_s$ ) und thermischen Fluß ( $\varnothing_{th}$ )

	nach 0,85 h		nach 1 h	
	$\varnothing_s$ 380 W/cm	$\varnothing_{th}$ 470 W/cm	$\varnothing_s$ 450 W/cm	$\varnothing_{th}$ 550 /cm
Zentraltemperatur (°C)	2307	2303	2496	2506
Brennstoffoberflächen- temperatur (°C)	822	824	802	826
Heißspalt (μ)	22	12	16	3
Wärmedurchgangszahl (W/cm <sup>2</sup> K)	0878	1,137	1,209	1,396
Plastizitätsradius r <sub>1400°C</sub>	2,373	2,491	2,495	2,613
Relocation (μm)	37	44	44	55
Hüllinnentemperatur (°C)	613	626	623	636
Hüllaußentemperatur (°C)	572	575	574	577



**Abb. 2:** Schematischer Bestrahlungsablauf der 4 DUELL-Einsätze

Die Spezifikationen von Brennstoff, Hülle und Brennstab orientierte sich nach den Spezifikationen der Mk II-Brennstäbe des SNR-300. In Tabelle III sind die wesentlichen Spezifikationsmerkmale der Prüflinge von DUELL II zusammengestellt.

**Tabelle III:** DUELL II-Spezifikation

A. Materialdaten		Brennstoff	Brutstoff	Hülle
Materialbezeichnung		(U,Pu)O <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>	1.4970
Innendurchmesser	(mm)	0,000	0,000	6,600
Außendurchmesser	(mm)	6,350	6,350	7,600
Herstellungsdichte	(g/cm <sup>3</sup> )	10,490	10,500	
theoretische Dichte	(g/cm <sup>3</sup> )	10,971	10,959	
Herstellungsporosität	(%)	4,385	4,192	
Herstellungs-O/Me		1,970	2,000	
U-235-Anteil	(%)	0,720	0,200	
Pu-Anteil	(%)	20.900	0,000	
B. Stabdaten				
Untere Plenumlänge	(mm)	101,00		
Untere Brutstoffsäule	(mm)	16,00		
Brennstoffsäule	(mm)	150,00		Brennstablänge (mm):
Obere Brutstoffsäule	(mm)	16,00		453,00
Obere Plenumlänge	(mm)	130,00		

#### 4. Herstellung der Teststäbe

Die Fertigung der Teststäbe wurde in zwei Etappen durchgeführt Die Herstellung von Bren- und Brutstoff erfolgte bei der Fa. ALKEM, die Brennstäbe wurden im Pu-Labor des IMF gefertigt /5/.

Der Mischoxidbrennstoff wurde nach dem sogenannten OKOM-Verfahren (optimiertes Ko-Mahlverfahren) gefertigt. Hiernach werden UO<sub>2</sub>- und PuO<sub>2</sub>-Originalpulver sowie gemahlener und gesinterter Fertigungsrücklauf im vorgegebenen U/Pu-Verhältnis eingewogen. Nach Zugabe eines Mahlhilfsmittels erfolgt eine Mischmahlung mit anschließender Granulation durch Aufbauagglomeration in einem Freifallmischer. Die aus dem Granulat gepreßten Tabletten wurden bei 2000 K in reduzierender Atmosphäre gesintert und abschließend auf Maß geschliffen.

Die Ergebnisse der Prüfungen an den Brennstofftabletten zeigte in allen Punkten Übereinstimmung mit den vorgegebenen Spezifikationswerten. Nach einer Lagerdauer von ca. 4 Monaten wurden die Tabletten in die Brennstäbe eingefüllt. Da durch die Lagerung sich insbesondere das O/Me-Verhältnis zu höheren Werten verändern kann, bei gleichzeitiger Änderung der H<sub>2</sub>- und evtl. Restgasgehalte, wurden die Prüfungen im Pu-Labor wiederholt /7,8/. In Tabelle IV sind die Prüfergebnisse zusammengestellt. Man erkennt u.a., daß die O/Me-Drift durch Lagerung nur zu geringfügig höheren Werten geführt hat.

**Tabelle IV:** DUELL II-Brennstoff, Prüfergebnisse

Merkmal	Spezifikation	ALKEM	KfK/IMF
Dichte	10,49±0,11 g/cm <sup>3</sup>	10,57 ± 0,019	10,579 ± 0,024
Pu-Gehalt Pu/U+Pu	20 ± 1 %	20,9	20,88
Pufiss/U+Pu	16 ± 1 %	15,9	-
U-235/U <sub>tot</sub>	U <sub>nat</sub>	0,721/0,776	-
Stöchiometrie O/Me	1,97 ± 0,015	1,958	1,959 ± 00,004
Gasgehalt	≤ 0,150 Ncm <sup>3</sup> /g	0,018	0,034/0,036
Durchmesser	6,35 ± 0,05 mm	6,38 ± 0,02	6,371 ± 0,003
Oberflächenrauigkeit	Ra ≤ 1 µm	1	-
Löslichkeit	> 99 %	99,2 - 99,3	-

Bei der Assemblierung der Tablettensäulen wurden sogenannte Säulenlegepläne erstellt, aus welchen die jeweilige Lage der individuell vermessenen Brennstofftabletten erkennbar ist. Dies ist wichtig im Hinblick auf die spätere Nachuntersuchung, um eventuelle Anomalien erklären zu können.

In Tabelle V sind die Mittelwerte der charakteristischen Daten der einzelnen Prüflinge zusammengestellt. Neben Werten für den Brennstoff sind noch die Ergebnisse der Prüfungen für die oberen und unteren Isoliertabletten aus UO<sub>2</sub> aufgeführt.

Die Hüllrohre wurden einer Lieferung der Fa. Mannesmann, Schmelzcharge Nr. 53544 entnommen. Der metallurgische Zustand ist folgendermaßen charakterisiert:

Lösungsglühen: 1080 - 1120 °C, ca. 5 - 10 min

Kaltverformung: 16 ± 4 %

Auslagerung: 800 ± 10 °C, 2 h

Kaltverformung durch Richten: ≤ 5 %

**Tabelle V:** Versuchsgruppe DUELL II, mittlere Werte der Brennstabprüflinge (nach /7/)

Stab-Nr.	Brennstofftabletten					Isolierttabletten			
	Gew. (g)	Tabl.-Säule (mm)	Tabl.- Durchm. (mm)	Längen- gewicht (g/cm)	Tabletten- Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	Gew. (g)	Tabl.-Säule (mm)	Tabl.- Durchm. (mm)	Tabletten- Dichte (g/cm <sup>3</sup> )
D016	50,522	149,884	6,371 ± 0,003	3,371 ± 0,008	10,575 ± 0,022	10,474	32,217	6,329 ± 0,006	10,605 ± 0,042
D017	50,579	149,884	6,372 ± 0,003	3,375 ± 0,006	10,583 ± 0,017	10,721	32,216	6,328 ± 0,005	10,583 ± 0,033
D018	50,511	149,881	6,371 ± 0,003	3,370 ± 0,009	10,570 ± 0,032	10,712	32,226	6,331 ± 0,008	10,559 ± 0,039
D019	50,558	149,884	6,372 ± 0,002	3,373 ± 0,007	10,578 ± 0,025	10,742	32,216	6,336 ± 0,008	10,575 ± 0,024
D020	50,528	149,882	6,371 ± 0,002	3,371 ± 0,006	10,575 ± 0,021	10,736	32,221	6,333 ± 0,003	10,580 ± 0,040
D021	50,596	149,884	6,370 ± 0,002	3,376 ± 0,008	10,592 ± 0,025	10,698	32,216	6,329 ± 0,008	10,557 ± 0,025
D022	50,524	149,882	6,370 ± 0,003	3,371 ± 0,008	10,578 ± 0,025	10,732	32,224	6,332 ± 0,005	10,577 ± 0,028
D023	50,537	149,883	6,371 ± 0,003	3,372 ± 0,009	10,575 ± 0,029	10,769	32,219	6,340 ± 0,010	10,587 ± 0,020
D024	50,558	149,883	6,372 ± 0,003	3,373 ± 0,005	10,578 ± 0,020	10,755	32,219	6,336 ± 0,006	10,589 ± 0,030
D025	50,557	149,883	6,372 ± 0,002	3,373 ± 0,008	10,578 ± 0,023	10,771	32,218	6,336 ± 0,007	10,605 ± 0,031
D026	50,588	149,883	6,372 ± 0,003	3,374 ± 0,009	10,584 ± 0,026	10,713	32,218	6,324 ± 0,007	10,587 ± 0,025
D027	50,585	149,883	6,372 ± 0,002	3,375 ± 0,007	10,584 ± 0,022	10,761	32,218	6,336 ± 0,007	10,594 ± 0,023

Die wichtigsten Daten aus dem Werkszeugnis nach DIN 500 49/3.1B sind in Tabelle VI zusammengefaßt. Nach einer wiederholten Prüfung auf Materialfehler mit Wirbelstrom- und Ultraschallmethoden wurden die qualitativ besten Rohre ausgesucht. Die Rohre wurden auf der rechnergesteuerten Vermessungsanlage auf ihre Abmessungen geprüft, die Ergebnisse für die zum Einsatz gekommenen Prüflinge sind in Tabelle VII zusammengefaßt.

**Tabelle VI:** Auszug aus dem MRW-Abnahmeprüfzeugnis MRW-Nr. 837/1372

<u>Chemische Analyse ( in Gew.-%)</u>					
		Ni	14,74		
B	0,0041	P	0,003		
C	0,097	S	0,005		
Ca	0,001	Si	0,40		
Co	0,010	Ti	0,43		
Cr	15,15	V	0,01		
Cu	0,02	Fe	Rest		
Mn	1,57	Borgehalt in einer Oberfläche von			
Mo	1,16	0,05 ± 0,01 Dicke	0,0033		
N <sub>ges</sub>	0,007	Ta	0,01		
<b>Mechanische Eigenschaften</b>		Sollwert	Istwert		
<u>Zugversuch bei RT</u> im Lieferzustand		R <sub>p</sub> 450-650 N/mm <sup>2</sup> R <sub>m</sub> 600-800 N/mm <sup>2</sup> A = 15 %	616 751 25,7	615 751 25,3	623 752 25,3
<u>Zugversuch bei 500 °C</u> im Lieferzustand		R <sub>p0,2</sub> 300 N/mm <sup>2</sup>	420	429	430
Kriechen bei 700° ± 3°C		R <sub>pz</sub> 170 N/mm <sup>2</sup>	0,360	0,540	0,316
		nach 250 h beim Bruch diam. Dehnung ≤ 0,5 % (≤0,3 % ist anzustreben)	0,760	0,488	0,303
Bersten bei 700° ± 3°C		diam.Dehnung AB ≥ 1,04 %	2,19	2,39	2,52
<u>Oberflächenrauigkeit</u> (in µm)		<u>Innere Beschaffenheit</u>			
		<u>längs</u>		<u>quer</u>	
R <sub>t</sub> (außen)	1,90	Korngröße (µm)	9	9	8,5
R <sub>t</sub> (innen)	3,10	Nichtmet.			
R <sub>a</sub> (außen)	0,19	Einschlüsse	≤ 0,1-9,1		≤ 0,1-9,1
R <sub>a</sub> (innen)	0,23	Primärkarbide	≤ 20 µm		≤ 20 µm
		Mikrohärte HV	244-274		254 - 244
			245-296		257 - 313
			262-303		228 - 296

**Tabelle VII:** Brennstäbe DUELL II, Serie Ø 7,6 x 0,5, Ch 53544

DUELL Nr.	Außen-Ø		Innen-Ø		Wand	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.
D 16	7,592	7,594	6,589	6,590	0,503	0,505
D 17	7,591	7,593	6,587	6,589	0,503	0,505
D 18	7,592	7,593	6,589	6,591	0,503	0,505
D 19	7,592	7,593	6,588	6,591	0,493	0,506
D 20	7,591	7,592	6,587	6,590	0,494	0,508
D 21	7,590	7,591	6,586	6,588	0,494	0,508
D 22	7,590	7,591	6,586	6,588	0,496	0,506
D 24	7,590	7,591	6,586	6,587	0,495	0,507

In Abb. 3 ist der Aufbau der Prüflinge dargestellt. Hierzu ist zu bemerken, daß das sogenannte Druckstück im oberen Plenum lediglich zur Einstellung des zu SNR-Brennstäben relevanten Verhältnisses Plenumvolumen/Brennstoffvolumen dient.

### 5. Bestrahlungseinrichtung und Bestrahlungsablauf

Die Durchführung der Experimente erfolgte in der sogenannten "Pool Side Facility" (PSF) des HFR Petten. Hierbei werden die Prüflinge, die in Bestrahlungseinsätzen des Typs DUELL C eingebaut sind, radial an den Reaktorkern und somit in den Neutronenfluß herangefahren. Der schematische Aufbau der DUELL-Kapsel ist in Abb. 4 dargestellt, je zwei dieser Kapseln bilden den Bestrahlungseinsatz gemäß Abb. 5 /3,9/.

Zur Einstellung des axialen Temperaturgradienten ist der Ringspalt zwischen dem ersten und zweiten Containment strukturiert, d.h. axial von unterschiedlicher Breite (ca. 0,07 - 0,110 mm). In diesen Ringspalt wird entsprechend den geforderten Temperaturen eine He/Ne/N<sub>2</sub>-Gasmischung eingefüllt, die während des Betriebes geändert werden kann, um Temperaturregelungen zu ermöglichen /4/.



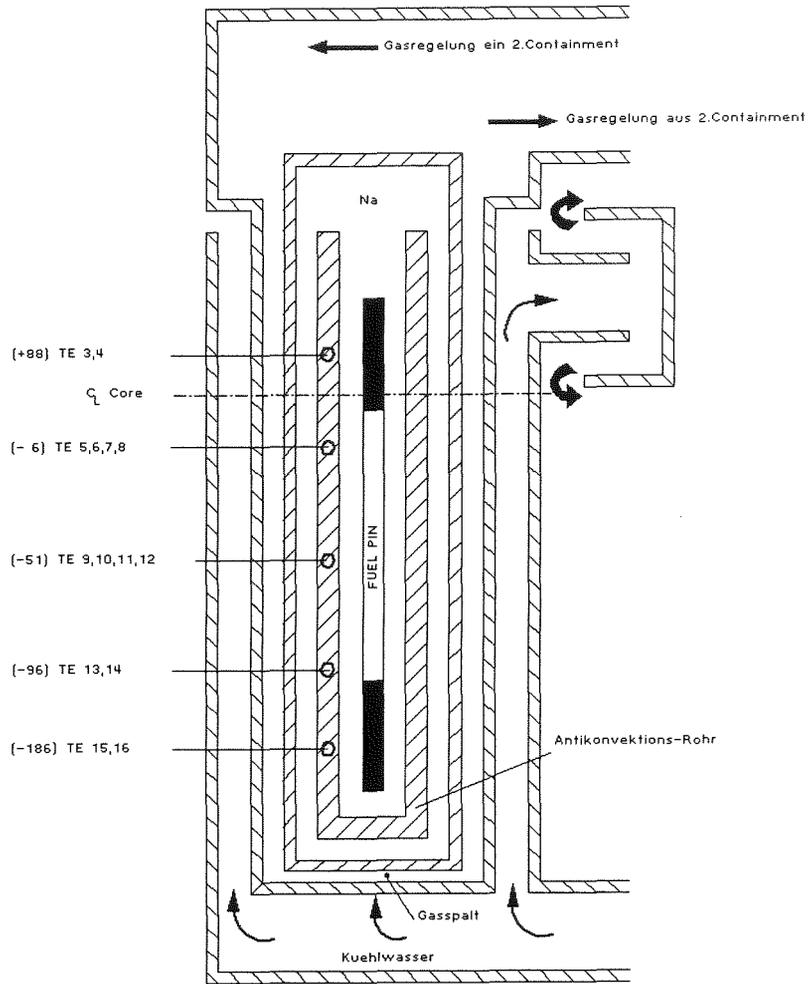


Abb. 4: DUELL Bestrahlungskapsel, Längsschnitt

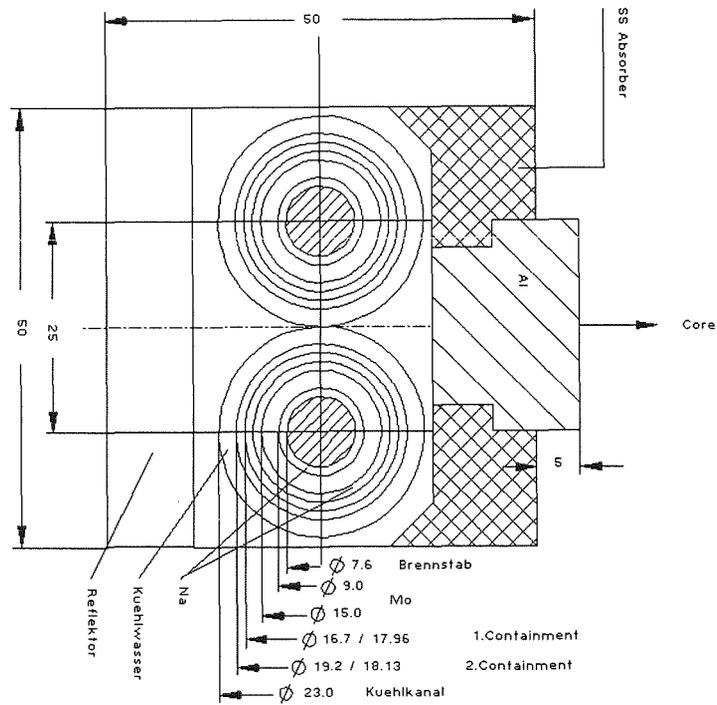


Abb. 5: DUELL-II Bestrahlungseinsatz, Querschnitt

Jede Kapsel ist mit 16 Thermoelementen instrumentiert zur Messung des axialen und azimutalen Temperaturverlaufs. Die Thermoelemente sind in dem Mo-Antikonvektionsrohr angebracht und gestatten über Eichmessungen die Bestimmung der Kühlmittel- und Hülltemperaturen. Weitere Instrumentierungen sind Flußdektoren, Durchfluß- und Druckmesser für die Messung von Neutronenfluß, Kühlmitteldurchsatz und Regelgasdruck für die Bestimmung von Leistung und Wärmefluß.

Die Bestrahlung der insgesamt vier Einsätze erfolgte in dem Zeitraum vom 18.5. bis 3.7.1982. In Tabelle VIII ist die Kapselbezeichnung, die Stabzuordnung sowie die Einsatzzeit im Reaktor entsprechend dem Bestrahlungsprogramm (siehe Kap. 3) zusammengestellt.

**Tabelle VIII:** DUELL II, Zuordnung und Einsatzzeit

Einsatz Nr.	Kapselbezeichnung	Stabzuordnung	Einsatzzeit
1	D 173-20/21	D 17 / D 16	18.05. - 23.05.1982
2	D 173-22/23	D 19 / D 18	26.05. - 31.05.1982
3	D 173-24/25	D 20 / D 21	27.06. - 03.07.1982
4	D 173-26/27	D 22 / D 24	10.06. - 26.06.1982

Die Bestrahlung der Einsätze verlief ohne besondere Vorkommnisse. Die angestrebten Stableistungen von 470 bzw. 550 W/cm wurden in allen Stäben weitgehend erreicht, die mittleren Abweichungen im Stableistungmaximum lagen zwischen 1 - 22W/cm. Die Einstellung des axialen Kühlmitteltemperaturverlaufs zwischen 400 und 600 °C wurde in einem Schwankungsbereich von  $\pm 5\%$  über den überwiegenden Zeitraum erreicht. Die vorgeschriebenen Rampensteilheiten von 10 %/min auf 85 % bzw. 5 %/h von 85 auf 100 % der Nominalleistung wurden im unteren Leistungsbereich deutlich unterschritten ( $\leq 2$  h), im Bereich zwischen 85 und 100 % sehr gut eingehalten.

In Tabelle IX sind die wichtigsten Kenndaten der Bestrahlung für die einzelnen Prüflinge zusammengestellt /4/.

Tabelle IX: DUELL II, Betriebsdaten

Merkmal	Prüfling Nr.							
	16	17	18	19	20	21	22	24
Stableistung 85 %								
max.	485	480	505	462	487	495	477	484
min. (W/cm)	474	464	467	428	444	451	432	445
mittel	480	471	487	448	467	474	460	473
Stableistung 100 %								
max.	-	-	-	-	572	564	560	567
min. (W/cm)	-	-	-	-	534	534	525	542
mittel	-	-	578	533	551	555	544	555
Hülltemperaturen* (°C) bei 85 % Leistung								
TE 13,14: 31 mm	448	445	460	464	440	434	428	439
TE 9-12: 76 mm	502	505	523	521	497	521	480	495
TE 5-8: 127 mm	535	576	561	559	565	559	535	556
(°C) bei 100 % Leistung								
31 mm	-	-	-	-	439	433	457	464
76 mm	-	-	-	-	498	491	507	520
127 mm	-	-	-	-	564	542	565	582
Anfahren auf								
85 %	2 h 18'		22', 44'		33', 50'		45', 1h, 10'	
von 85 % auf 100 %	-		3 h 47'		3 h		45', 30', 9'	
							3 h 8', 2h 55'	
*mm-Angabe: Abstand vom unteren Brennstoffsäulenende								

## 6. Nachbestrahlungsuntersuchung

Zur Analyse des Bestrahlungsverhaltens der Stäbe wurde eine umfangreiche Nachuntersuchung durchgeführt. Am Ort der Bestrahlung in Petten wurden in einer zerstörungsfreien Kurzuntersuchung die Bestrahlungskapseln durchleuchtet und anschließend  $\gamma$ -spektrometrische Messungen vorgenommen. Später wurden die Stäbe aus den Kapseln ausgebaut und nach Karlsruhe transportiert, wo eine vollständige zerstörungsfreie und zerstörende Untersuchung stattfand.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Befunde der Einzeluntersuchungen beschrieben. Im Sinne einer besseren Lesbarkeit wird darauf verzichtet, alle Aus-

sagen durch Bildmaterial zu belegen. Ein Teil der Untersuchungsergebnisse und Auswertungen liegt bereits in Form von internen Berichten vor (/10/ bis /16/).

## 6.1 Zerstörungsfreie Untersuchung

### Visuelle Inspektion

Die visuelle Inspektion aller acht Stäbe mit Hilfe eines Periskops ergab erwartungsgemäß keine Befunde, die für das Bestrahlungsverhalten von Bedeutung sind. Der hellgraue Belag, der die ursprünglich metallisch blanke Oberfläche bedeckte, zeigte eine dunklere Farbe im Bereich der Brennstoffsäule. Bei Stab DO 17 fand sich eine kleine Druckstelle im Abschnitt des unteren Spaltgasplenums, die auch später bei der Dimensionskontrolle zu erkennen war. Sie ist vermutlich auf die Handhabung in den Heißen Zellen zurückzuführen. Insgesamt zeigten sich die Hüllrohroberflächen in einem guten Zustand.

### Radiografie

Die Stäbe wurden im Verlauf des Experiments insgesamt viermal durchleuchtet, je zweimal vor und nach der Bestrahlung. Hieraus konnte ein gutes Bild über den geometrischen Zustand und die bestrahlungsinduzierten Veränderungen der Brennstoffsäule gewonnen werden. Im einzelnen ergaben sich folgende Befunde:

#### Röntgendurchleuchtungen der KfK-Fertigungskontrolle:

Als Teil der Stabfertigungskontrolle wurden die Stäbe nach der Herstellung im IMF III/Pu-Labor durchleuchtet, um den inneren Stabaufbau kontrollieren zu können. Überraschenderweise wurde gefunden, daß entgegen den Angaben im Fertigungsbericht die Tabletten-Säulenlängen erheblich schwankten und zwar um bis zu 2,5 mm /10/. Im Fertigungsbericht dagegen waren alle Brennstoffsäulen auf weniger als 0,1 mm untereinander gleich. Diese Diskrepanz konnte mit dem Hersteller nicht geklärt werden. Sie hatte jedoch zur Folge, daß die Veränderungen der Brennstoffsäulenlänge später nicht auf die Fertigungsdaten bezogen werden durften, wie irrtümlich geschehen. /11/.

#### Neutronenradiografie vor Bestrahlung:

Nach dem Einbau in die Bestrahlungskapseln wurden die Stäbe in Petten vor der Bestrahlung abermals durchleuchtet. Der einwandfreie Zustand der Brennstoffsäulen hatte sich durch Transport und Einbau nicht verändert, mit Ausnahme von Stab DO 19, wo im oberen Säulendrittel eine leichte Tabletten-Trennung zu

sehen war und auch unterhalb der untersten Isoliertablette sich ein Spalt (ca. 1 mm Weite) vorfand. Der Befund wurde jedoch für die Bestrahlung als unerheblich eingestuft.

Neutronenradiografie nach Bestrahlung:

Im Anschluß an die Bestrahlung wurden die Stäbe noch in ihren Kapseln mit thermischen Neutronen durchleuchtet. Die Brennstoffsäulen ließen in ihrem Innern einen kleinen Zentralkanal erkennen, der als Beweis für die erreichte Stableistung angesehen wurde. In Stab DO 19 hatte sich die Tabletten-Trennung vergrößert, auf Kosten des weiter unten liegenden Spaltes bei den Isoliertabletten. Eine Vermessung der Brennstoff-Säulenlängen war durch den guten Kontrast der Aufnahmen mit der üblichen Genauigkeit möglich. Im einzelnen wurden folgende Werte ermittelt:

Stab-Nr.	vor Bestrahlung (mm)	nach Bestrahlung (mm)	Veränderung (mm)
16	149,3	149,0	- 0,3
17	149,8	149,8	± 0
18	149,7	149,7	± 0
19	150,1	150,3	+ 0,2
20	149,6	149,8	+ 0,2
21	148,4	148,6	+ 0,2
22	148,4	147,7	- 0,7
24	151,2	149,6	- 1,6

Unter Berücksichtigung der Randbedingungen (Ablesegenauigkeit, Vergrößerungs-Korrektur) kann folgende Aussage gemacht werden: Die Brennstoff-Säulenlängen der Stäbe 16 bis 21 haben sich durch die Bestrahlung nicht erkennbar verändert. Bei den Zwillingsstäben 22 und 24 ist eine leichte Schrumpfung von etwa einem Millimeter festzustellen. Sie dürfte als Folge einer Brennstoffverdichtung durch Nicksintern zu verstehen sein. Der Befund steht im Einklang mit dem Bestrahlungsablauf der Gesamtserie, in dem die Stäbe 22 und 24 die längste Bestrahlungszeit bei der Nominal-Stableistung durchlaufen haben.

## Betatron-Radiografie

Eine weitere Durchleuchtung der Stäbe erfolgte nach dem Transport in die Heißen Zellen nach Karlsruhe. Vorher waren die Brennstäbe in Petten noch aus den Bestrahlungskapseln herausgenommen worden.

Als wichtigster primärer Befund wurde an drei Stäben eine Zerstörung der Brennstofftablettensäule festgestellt. Bruchstücke der Brennstofftabletten lagen regellos im Hüllrohr, die restliche Tablettensäule hatte sich um mehrere Zentimeter nach oben (gegen die Niederhaltefeder) verschoben. Die Ursache dieser Zerstörung konnte nicht eindeutig geklärt werden. Es wird jedoch angenommen, daß die Handhabung während der Stab-Entnahme aus den Bestrahlungskapseln zu den Schäden geführt hat. Bei einem früheren Experiment (DUELL-I) war ähnliches passiert und der Zeitpunkt der Schädigung festzustellen gewesen.

Die intakten fünf Brennstäbe wiesen folgende gemeinsame Merkmale auf, die sich - soweit nicht zerstört - auch in den geschädigten Stäben fanden:

- A. Alle Stäbe zeigten im Bereich der Brennstoffsäule einen Zentralkanal, der stets in der obersten Brennstofftablette begann und nach unten zu enger wurde, eine Folge des axialen Leistungsgradienten.
- B. Entsprechend den unterschiedlichen Stableistungen waren die Zentralkanäle der geringer belasteten Stäbe (16/17 und 18/19) im unteren Säulenbereich nur noch als Fadenlunker erkennbar.
- C. Anders als aufgrund der Stableistung erwartet, zeigte das Stabpaar 20/21 die schwächste Ausbildung der Zentralkanäle, die in ihrem Verlauf nach unten bereits in Stabmitte völlig verschwanden.
- D. Das obere Ende der Zentralkanäle war jeweils keulenförmig aufgeweitet, eine Folge der Erhöhung der Stablängenleistung durch die Flußaufwölbung. Die Aufweitung beschränkte sich auf die obere Hälfte der obersten Tablette. Am unteren Stabende war dieser Effekt nur bei den höchstbelasteten Stäben (22/24) schwach zu sehen.
- E. Die Tablettenstoßstellen im Bereich der Brennstoffsäulen waren sporadisch als Querrisse erkennbar.
- F. Längs- und Querrisse waren sowohl bei den Brennstoff- wie auch bei den Brutstofftabletten zu sehen und zwar in dem üblichen Ausmaße.
- G. Die hochgeschobenen Brennstoffsäulenabschnitte in den geschädigten Stäben waren für sich intakt. Sie zeigen an, daß nach der Bestrahlung der Spalt

Brennstoff/Hülle noch groß genug war, um eine Verschiebung der Tabletten- säule zu gestatten.

In Abb. 6 sind die Betatron-Aufnahmen der acht Stäbe wiedergegeben. Die Un- tersuchungsergebnisse der Radiografie, insbesondere der Betatron-Durchleuch- tung bildeten die Basis für die späteren zerstörenden Nachuntersuchungen.

#### Dimensionskontrolle

Die Stabdurchmesser wurden über die gesamte Stablänge als Wendelschrieb ver- messen mit einer Steigung von 5 mm pro Umdrehung. Wie üblich war der Vergrö- ßerungsmaßstab für den Durchmesser auf 1000-fach eingestellt.

In der Auswertung der Kurvenzüge konnte keine bestrahlungsbedingte Änderung des Hüllrohrdurchmessers festgestellt werden. Sporadisch auftretende Ovalisie- rungen im ganzen Längenbereich des Stabes blieben sehr klein ( $\pm 5 \mu\text{m}$ ). Eine größere Ovalisierung von  $\pm 50 \mu\text{m}$  im Bereich des unteren Spaltgasplenums von Stab DO 17 geht vermutlich auf einen Handhabungsfehler zurück und ist als Druckstelle auch in der visuellen Inspektion erkannt worden. Weitere Ovalitäten ( $\pm 10 \mu\text{m}$ ) liegen im Bereich der Endstopfen.

Nach diesen Befunden sind die Stäbe als unverändert in ihren Außendimensionen angesehen worden. Weitere Messungen zur Dimensionskontrolle wurden nicht vorgenommen.

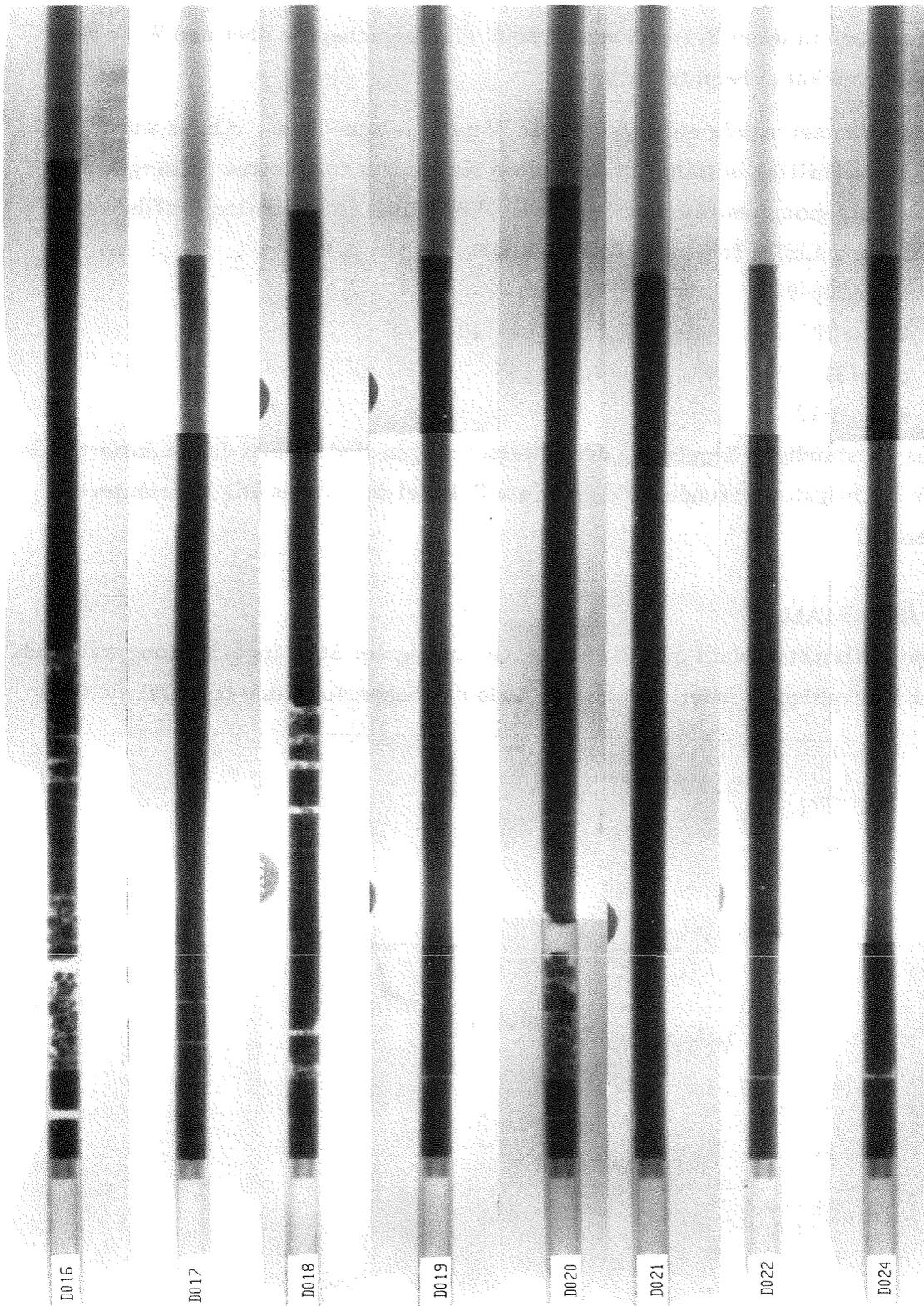
#### Wirbelstrom-Untersuchung

Mit einer Ringsonde wurde die Integrität der Brennstabhüllen nach der Wirbel- strom-Methode untersucht, wobei die Frage der Innenkorrosion im Vordergrund stand.

Signifikante Signale im Bereich der Tabletten säule zeigte nur der Stab DO 17. Dies ist umso bemerkenswerter, als seine Bestrahlungszeit und Stableistung auf der untersten Stufe der Experimentserie lagen. Auch zeigte der Zwillingstab DO 16 dieses Phänomen nicht. Da es sich nach allgemeiner Vorstellung um eine Unregelmäßigkeit auf der Hüllrohrinnenseite handelt, wurde eine in diesem Be- reich liegende keramografische Querprobe besonders sorgfältig untersucht. Es fanden sich jedoch keine Befunde (z.B. Innenkorrosion), die die Wirbelstrom- Signale erklären konnten.

Der Tablettenbereich der Stäbe ist durch metallische Einsätze (s.Abb. 3) inner- halb der Hülle begrenzt, die als Ausschläge großer Amplitude die Länge der

Tablettensäule anzeigen. Auf diese Weise wurden die durch Zerstörung verlängerten Brennstoffsäulen der Stäbe DO 16, DO 18 und DO 20 erkannt.



**Abb. 6:** DUELL-II, Betatron-Durchleuchtung der Brennstoffsäule

### $\gamma$ -Spektrometrie

Die ersten  $\gamma$ -spektrometrischen Messungen konnten schon wenige Tage nach Bestrahlungsende in Petten erfolgen. Allerdings waren zu diesem Zeitpunkt die Stäbe noch in ihren Bestrahlungskapseln, ein Tatsache, die aber den Wert der Messungen kaum beeinträchtigte.

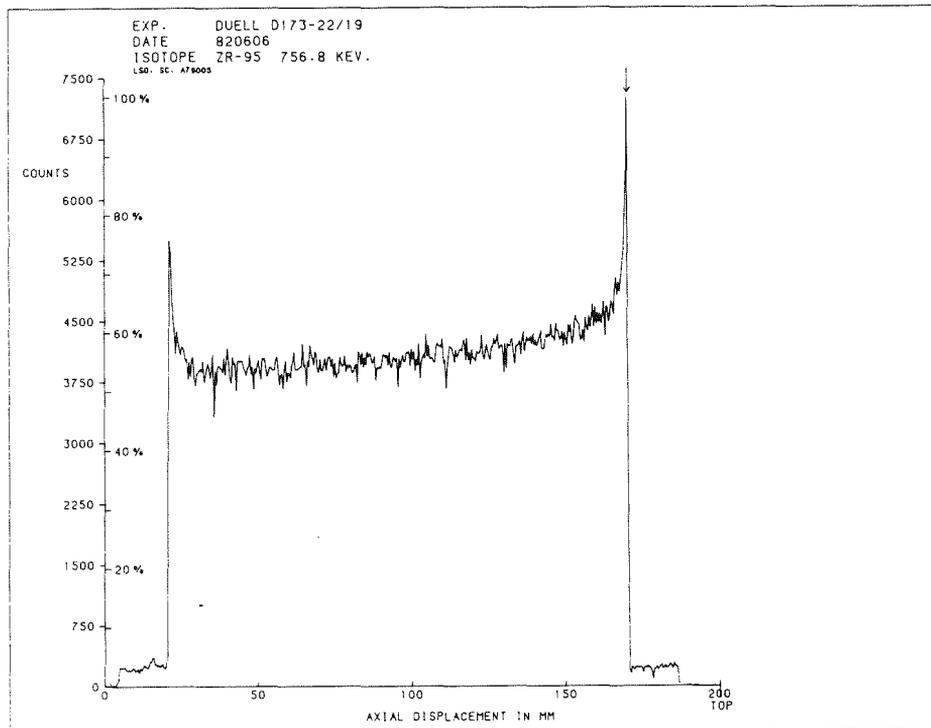
Aufgenommen wurde ein sogenannter "Multi-Isotope-Scan", d.h. es wurde in 0,4 mm Schritten entlang der Stabachse jeweils ein komplettes  $\gamma$ -Energie-Spektrum aufgenommen. Auswertbar für die Erstellung eines axialen Profils waren dann die  $\gamma$ -Linien folgender Radionuklide:

- |             |              |
|-------------|--------------|
| 1. Zr/Nb-95 | 5. I-133     |
| 2. Ru-103   | 6. Ba/La-140 |
| 3. I-131    | 7. Ce-141    |
| 4. Te/I-132 |              |

Die vollständigen Ergebnisse der Untersuchungen sind bereits dokumentiert /10/. Die wichtigsten Befunde sollen hier am Beispiel des Stabes DO 19 erläutert werden.

Zr/Nb-95 (Abb. 7):

Der Aktivitätsverlauf gibt die axiale Verteilung der Stablängenleistung während der Bestrahlung wieder. Am oberen Ende der Brennstoffsäule befindet sich das

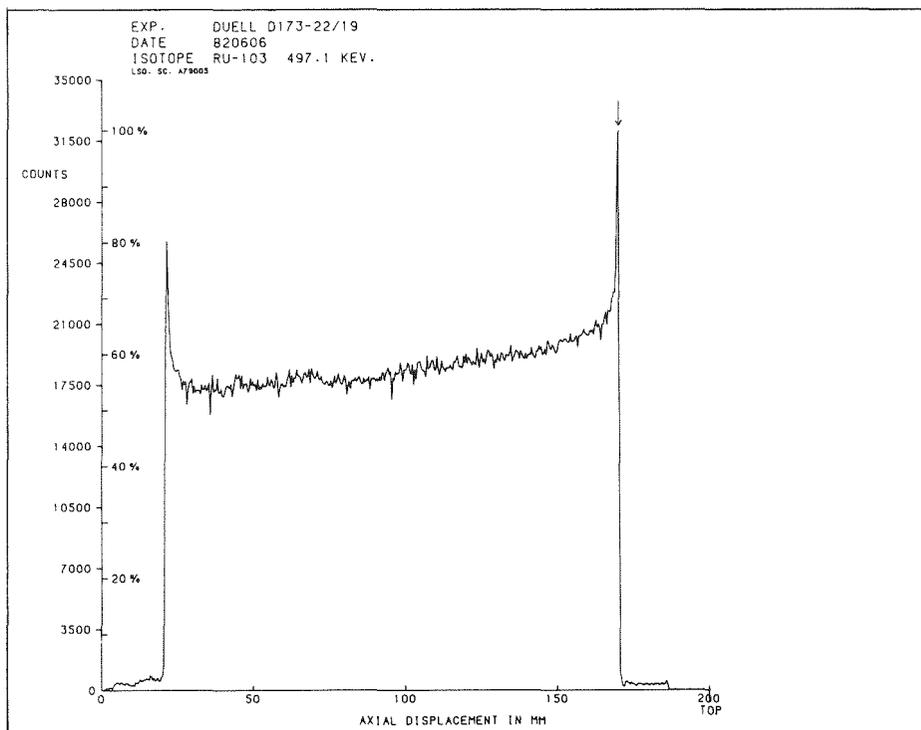


**Abb. 7:** Stab DO 19,  $\gamma$ -Profil Zr-95

Maximum. Beide Enden der Brennstoffsäule zeigen die starke Aktivitätserhöhung durch Flußaufwölbung. Unter Ausschluß dieses Effektes beträgt das Leistungsverhältnis max/mittl. 1,13.

Ru-103 (Abb. 8):

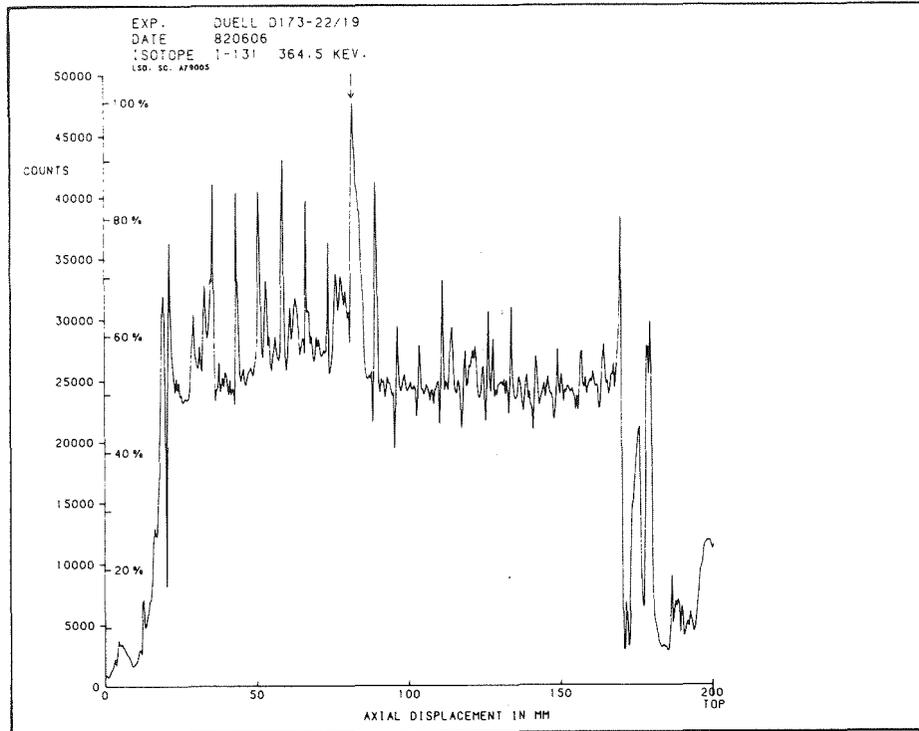
Der höhere Aktivitätspegel dieses hier ortsstabilen Radionuklides läßt den axialen Leistungsverlauf sowie die Flußaufwölbung noch genauer erkennen. Abbrand und Stabileistung reichten nicht aus, um eine Wanderung des Spalt-Rutheniums einzuleiten.



**Abb. 8:** Stab DO 19,  $\gamma$ -Profil Ru-103

I-131 (Abb. 9):

Das Spalt-Jod zeigte eine starke Neigung zur Wanderung. Im Bereich der Brennstoffsäule finden sich Jod-Anreicherungen an den Tabletten-Stoßstellen, aber auch eine allgemeine Fluktuation der Jod-Aktivität mit einem Maximum in der unteren Säulenhälfte. Besonders bemerkenswert ist die Wanderung aus der Brennstoffsäule heraus in die oberen Isoliertabletten, wo zwei breite Aktivitätsspitzen eine erhebliche Ansammlung des Spaltnuklids anzeigen. Die unteren Isoliertabletten enthalten ausgewandertes Spalt-Jod in geringerem Maß.



**Abb. 9:** Stab DO 19,  $\gamma$ -Profil I-131

#### Te/I-132 (Abb. 10)

Die Wanderung des Spalt-Telluriums (gemessen am Tochternuklid I-132) beschränkt sich auf die Brennstoffsäule. Hier finden sich an den Tabletten-Stoßstellen die Tellur-Ansammlungen als Aktivitätsspitzen so ausgeprägt, daß nicht nur die Anzahl der Brennstofftabletten daraus ermittelt werden kann, sondern sogar ihre individuelle Höhe. Da Spalt-Tellurium bei der Hüllinnenkorrosion eine wichtige Rolle spielt, unterstützen die hier beobachteten Wanderungsphänomene die Deutung dieser chemischen Wechselwirkung /16/.

#### Ba/La-140 (Abb. 11)

Das Spalt-Barium (gemessen am Tochternuklid La-140) zeigt nur schwache Wanderungstendenzen. Lediglich in der oberen Hälfte der Brennstoffsäule finden sich kleine Anreicherungen im Bereich der Tabletten-Stoßstellen. Ansonsten entspricht die Aktivitätsverteilung dem Stableistungsverlauf einschließlich der Flußaufwölbung. Da bei der hohen gemessenen  $\gamma$ -Energie die Selbstabschirmung im Brennstoff vernachlässigt werden kann, ist dieses  $\gamma$ -Profil für die Ermittlung der axialen Leistungsverteilung besonders geeignet.

Eine Unregelmäßigkeit wurde bei den  $\gamma$ -Profilen des Stabes DO 21 beobachtet /12/. Hier war der Stableistungsverlauf genau entgegengesetzt, d.h. mit seinem

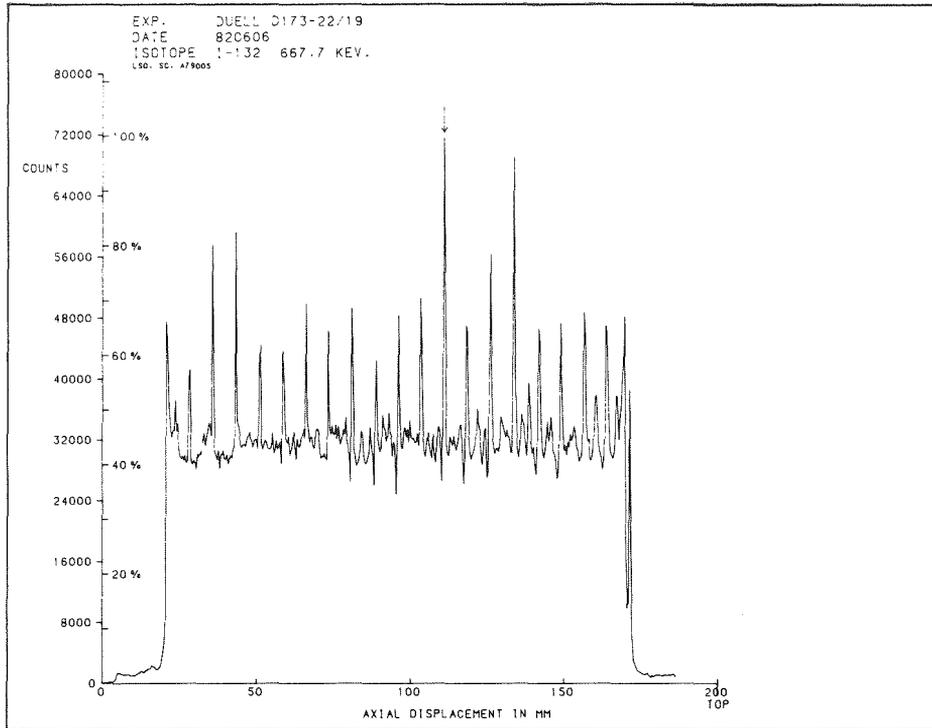


Abb. 10: Stab DO 19,  $\gamma$ -Profil I-132

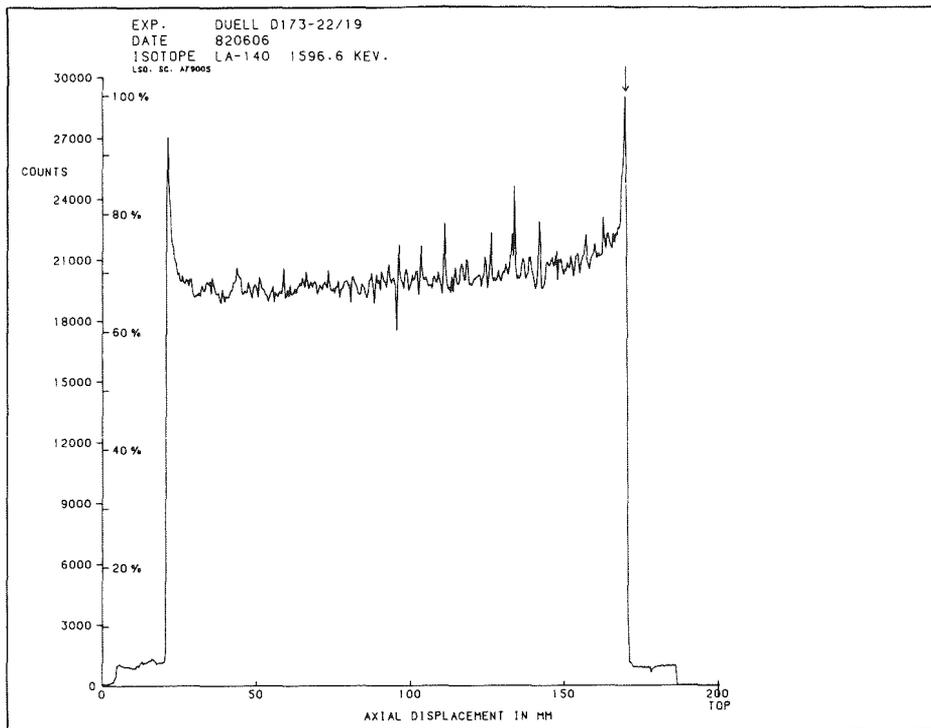


Abb. 11: Stab DO 19,  $\gamma$ -Profil Ba/La-140

Maximum am unteren Ende der Brennstoffsäule (-Profile von Zr-95, Ru-103 und La-140). Eine Überprüfung ergab, daß bei der Messung keinesfalls Ober- und Unterende miteinander vertauscht worden waren. So muß davon ausgegangen

werden, daß die vorgegebenen Bestrahlungsbedingungen nicht eingehalten wurden. Im Einklang mit diesem Befund steht auch die Beobachtung bei der Betatron-Durchleuchtung und bei der Keramografie, wonach das Stabpaar 20/21 eine viel zu geringe Umstrukturierung des Brennstoffs zeigt.

In Karlsruhe wurden ca. 9-10 Monate nach Bestrahlungsende nochmals  $\gamma$ -spektrometrische Messungen durchgeführt. Wegen der langen Abklingzeit konnten nur noch die Profile von Zr/Nb-95, Cs/Ba-137 und ein integrales Profil aufgenommen werden. Bestätigt wurden die Leistungsprofile und die Flußaufwölbung. Zum Zeitpunkt der Messungen in Karlsruhe waren die Brennstoffsäulen der drei früher genannten Stäbe bereits zerstört, was sich natürlich in den  $\gamma$ -Profilen bemerkbar machte. Abb. 12 zeigt im integralen Profil des Stabes DO 20 starke Einbrüche im unteren Drittel der Brennstoffsäule. Die Säule hat sich von ca. 150 mm auf 167 mm verlängert. Spektrale Messungen im Bereich der Einbrüche ergaben, daß hier die relative Spalt-Cäsium-Konzentration (Cs-137) zunimmt. Daraus ist zu schließen, daß ein Teil des Cs-137 an der Hüllinnenseite konzentriert ist und nicht zusammen mit den Brennstoff-Bruchstücken axial verschoben werden kann.

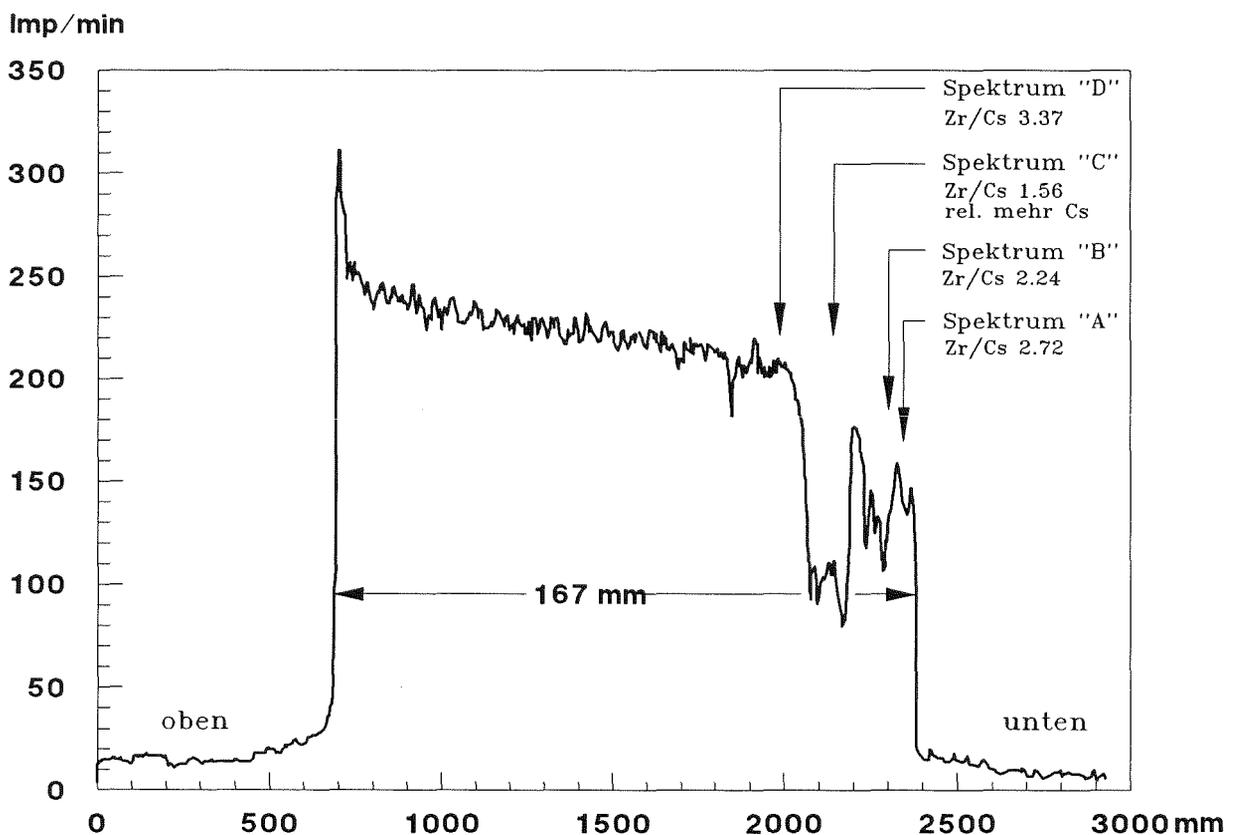


Abb. 12: Stab DO 20, Integrales  $\gamma$ -Profil mit Einbrüchen

## 6.2 Zerstörende Untersuchung

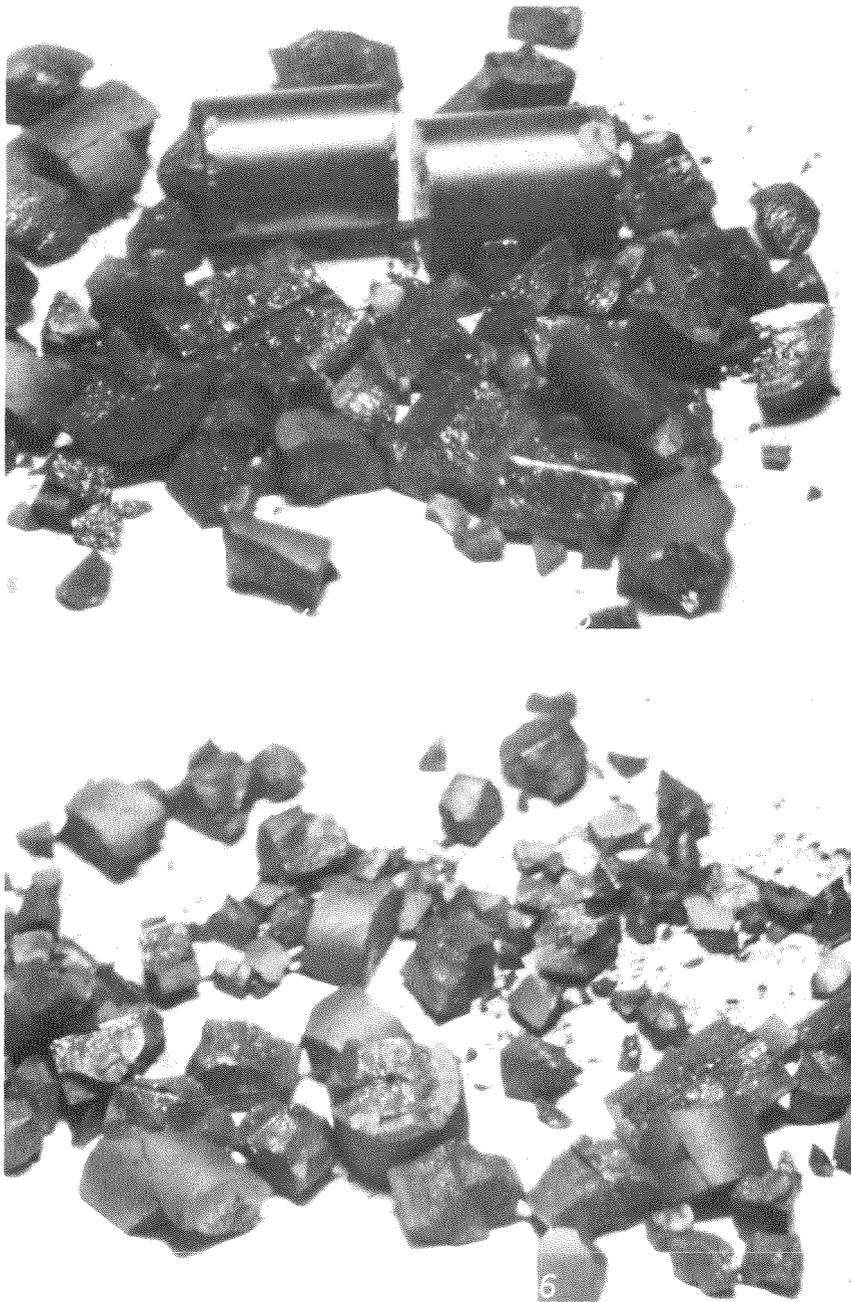
Aufgrund der Befunde bei der Betatron-Durchleuchtung und  $\gamma$ -Spektrometrie wurden die acht Teststäbe in zwei Untersuchungskategorien eingeteilt. Der Kategorie 1 wurden die drei Stäbe mit den zerstörten Brennstoffsäulen zugeordnet. Hier sollte der Zustand der Hüllinnenfläche durch unmittelbare visuelle Inspektion untersucht werden (Clamshell-Technik). Kategorie 2 umfaßte die fünf Stäbe mit den unzerstörten Brennstoffsäulen. Zur Charakterisierung des Stabzustandes wurden jeweils zwei Querschliffe festgelegt. Bei der kurzen Brennstoffsäule und dem geringen axialen Leistungsgradienten war es sinnvoll, die Proben in das obere und untere Säulendrittel zu setzen, mit ausreichender Entfernung zum Ende der Säule. An allen Stäben wurden die gleichen Höhenpositionen gewählt. Darüber hinaus wurde an zwei Stäben der Übergang zwischen Brennstoff und Brutstoff mit einem Längsschliff belegt, um die Auswirkung der Flußaufwölbung beurteilen zu können.

### Hüllrohr-Inneninspektion

Die Stäbe DO 16, DO 18 und DO 20 wurden jeweils oberhalb und unterhalb der Tablettensäulen quer durchgetrennt, so daß sich für die Untersuchung ca. 220 - 230 mm lange Abschnitte ergaben, aus denen anschließend der Brenn- und Brutstoff entfernt wurde. Dies gelang durch einfaches Herausschütteln, zum Teil unter Zuhilfenahme eines Vibrators.

Abb. 13 zeigt Brennstoff-Bruchstücke sowie die zwei oberen Brutstofftabletten aus Stab DO 16. Man erkennt vorwiegend Längsbrüche, die entweder über den Zentralkanal durch den gesamten Tablettendurchmesser verlaufen, oder Kreis-sektoren von unterschiedlicher Höhe. Totale quergebrosene Tabletten ohne Längsspaltung sind selten. Insgesamt bestätigen Größe und Form der Bruchstücke das aus den üblichen Keramografie-Bildern zu konstruierende Brennstoffbild. Für die Brutstofftabletten hat sowohl die thermische Belastung als auch die spätere Handhabung (Herausschütteln) nicht ausgereicht, die Tabletten zu zerstören. An der Stirnseite einer Brutstofftablette ist noch der angebackene Kegel der angrenzenden Brennstofftablette erkennbar. Durch die hohe lokale Stableistung infolge der Flußaufwölbung ist diese Verbindung fixiert worden.

Die leeren Hüllrohr-Abschnitte wurden nach dem Entfernen des Brennstoffs längsgetrennt und so die Hüllinnenseite für eine Inspektion zugänglich gemacht. Diese als "Clamshell-Technik" bekannte Untersuchungsmethode ist bei der Analyse von Brennstäben aus Leichtwasser-Reaktoren bekannt, jedoch bei Schnell-



**Abb. 13** Stab DO 16, Bruchstücke von Brennstoff- und Brutstofftabletten

brüter-Stäben noch nicht eingeführt. Abb. 14 zeigt Hüllrohrabschnitte mit einem für diese Versuchsserie typischen Aussehen. Man erkennt in dem Zeichnungsmuster deutlich die Tabletten- und die Rißstruktur der Brennstoffsäule. Die Zeichnungen sind auf die Brennstoffsäule beschränkt und zeigen sich nicht im Bereich der Brutstoffsäulen. Außerdem ist die Intensität der Markierungen von der Stableistung bzw. Hülltemperatur abhängig. In Stab DO-20, der aufgrund einer Reihe von Nachuntersuchungsbefunden nur eine verminderte Stableistung erreicht hat,

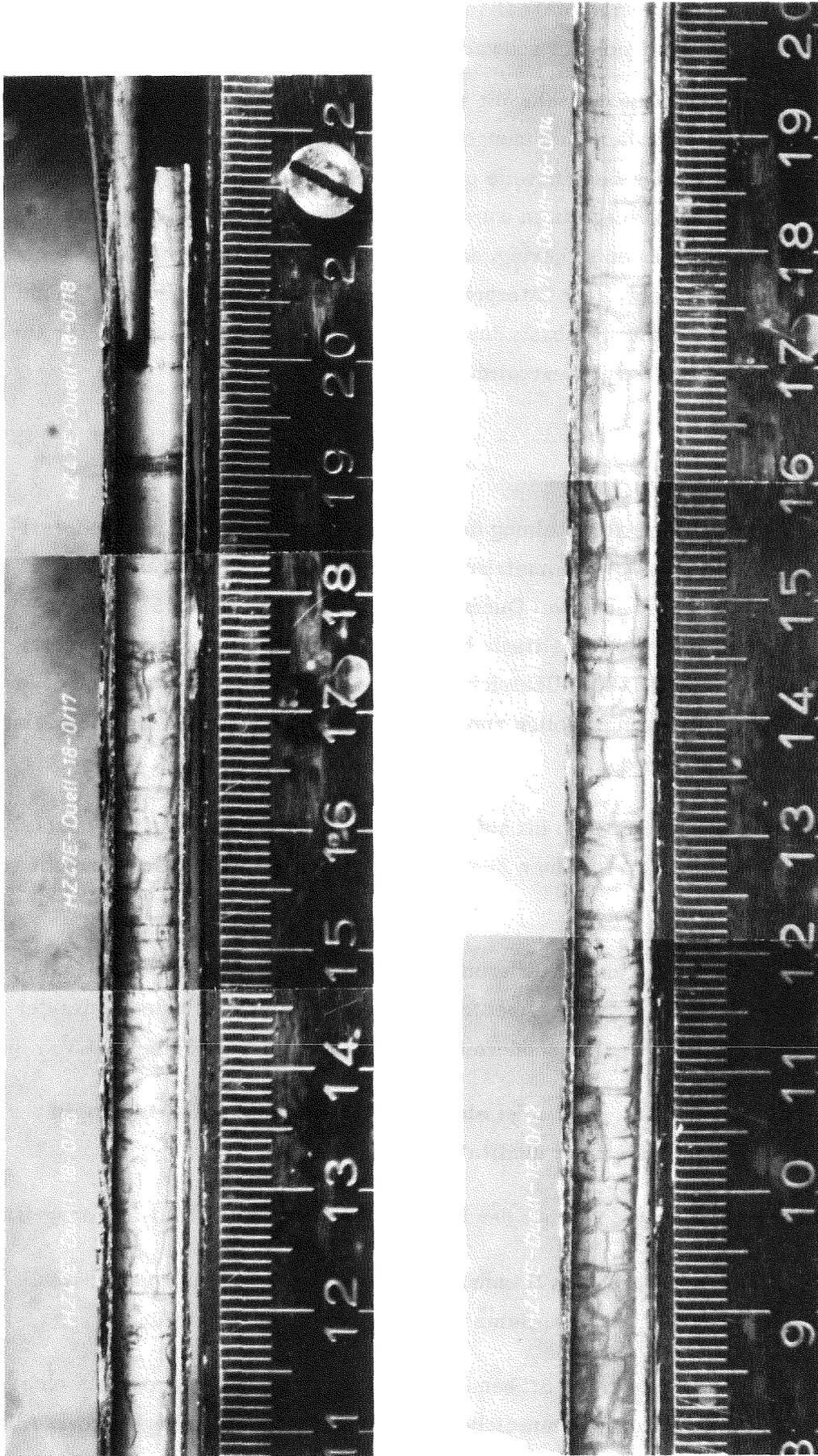


Abb. 14 Hüllinnenflächen der Stäbe DO-16 und DO-18

ist die Hülle in der unteren Stabhälfte ohne Markierungen geblieben und im oberen Bereich finden sich nur schwache Spuren.

Eine chemische Analyse der sehr gut sichtbaren Markierungen wurde nicht durchgeführt. Die dunklen Zeichnungen werden aber dahingehend interpretiert, daß sie durch flüchtige Bestandteile aus dem Brennstoff (Spaltprodukte oder Verunreinigungen) hervorgerufen wurden. Allerdings sind die Eindringtiefen bei diesen Wechselwirkungen so gering, daß sie in metallografischen Analysen nicht erkennbar sind. Eine weitere Interpretation der Markierungen erscheint denkbar, wenn die Untersuchungsbasis durch eine zukünftige Ausweitung dieser Untersuchungsmethode vergrößert wird.

### Keramografie

Entsprechend der Aufgabenstellung des Experiments war bei den keramografischen Untersuchungen die geometrische Umstrukturierung des Brennstoffs das vorrangige Ziel. In jeweils zwei Querschliffen (Lage siehe Abb. 15) wurde die Nachbestrahlungsstruktur qualitativ begutachtet und verschiedene Parameter quantitativ vermessen. Eine Übersicht der zehn Querschliffe zeigt Abb. 16. In nachstehender Beurteilung sollen zunächst die für alle Querproben gemeinsamen Befunde erläutert werden.

1. Alle untersuchten Ebenen bis auf eine (Probe 21/1) sind soweit thermisch umstrukturiert, daß sie einen Zentralkanal aufweisen. Seine Größe reicht von 0,3 bis 1,2 mm.
2. Das Zentrum der Umstrukturierung liegt in allen untersuchten Ebenen außerhalb der Stabmitte. Diese Exzentrizität korreliert nicht mit der Weite der Brennstoff/Hülle-Spalte, sondern ist eine Folge nuklearer Schiefbelastung.
3. Aus den  $\beta$ -Autoradiografien ist eine Flußdepression im Tabletteninnern abzuleiten, die jedoch nur qualitativ feststellbar ist.
4. Die Stabhülle zeigt in keiner der Proben einen korrosiven Hüll-Innenangriff.
5. Die Umstrukturierung des Brennstoffs ist z.T. noch nicht abgeschlossen. Linsenblasen und Riß-Hohlräume im Gefüge sind Indizien dafür.
6. Bei den höchstbelasteten Stäben 22 und 24 ist im Leistungsmaximum eine ganz schwache Plutoniumanreicherung um den Zentralkanal erkennbar. Alle übrigen Stäbe zeigen keine Pu/U-Entmischung in den  $\alpha$ -Autoradiografien.

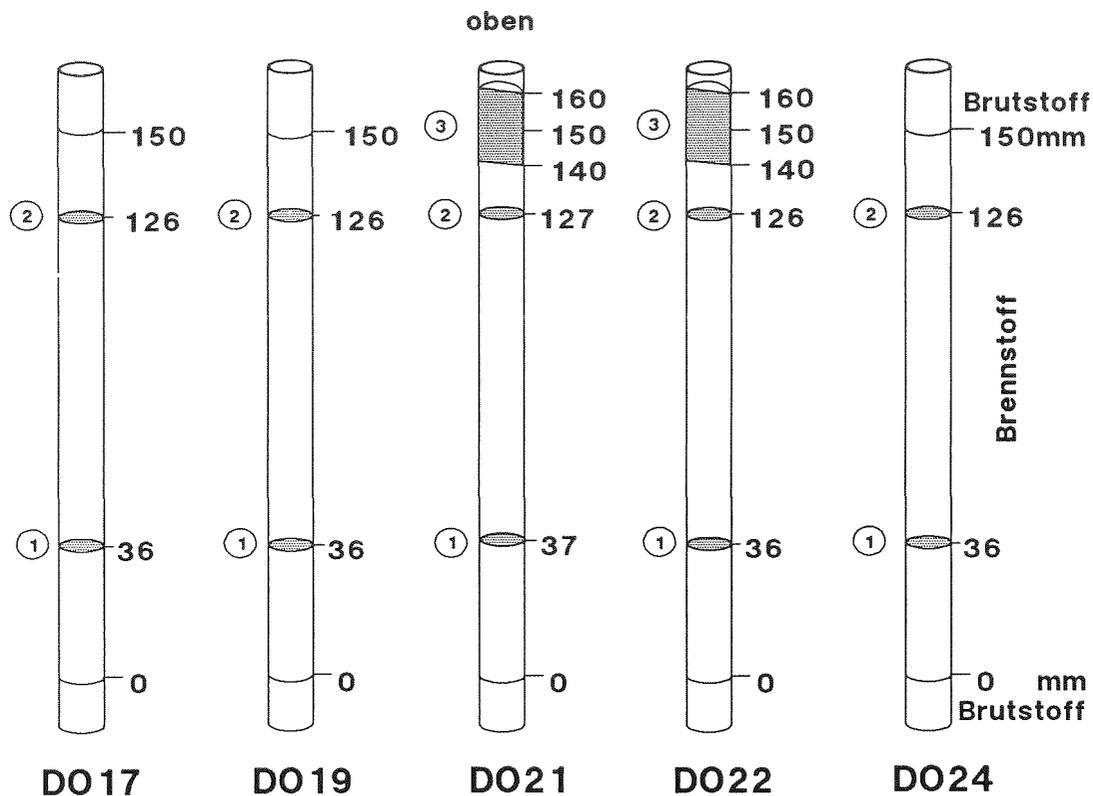


Abb. 15 Schnittplan für die keramografische Untersuchung von fünf DUELL-II Teststäben

7. Die Brennstofftabletten sind von zahlreichen Rissen durchzogen und in getrennte Bruchstücke aufgeteilt. Diese Bruchstücke sind zum Teil gegen die Peripherie verschoben und verengen dort den Brennstoff/Hülle-Spalt. Daraus resultieren sehr stark schwankende Werte bei der Vermessung dieser Größe.

Bei der quantitativen Analyse der Brennstoffstruktur wurden am Mikroskop der Durchmesser des Zentralkanals, die Außenradien der Stengelkornzone und der Zone mit regellosem Kornwachstum sowie die Weite des Brennstoff/Hülle-Spalts ermittelt. Durch ein Mißverständnis kam es zu einem Fehler bei der Bestimmung der Zone mit regellosem Kornwachstum. Diese Meßwerte werden daher nicht weitergegeben. In Tabelle X sind die Einzelmeßwerte der quantitativen Bestimmung aufgeführt.

Hinausgehend über die generelle Beschreibung der untersuchten Brennstoff-Proben und die quantitativen Strukturdaten finden sich eine Reihe von Einzelbeobachtungen, die für die Beurteilung des Brennstabverhaltens ebenfalls wesentlich sind. In der folgenden Kurzbeschreibung sollen solche Phänomene für jede Probe erläutert werden.

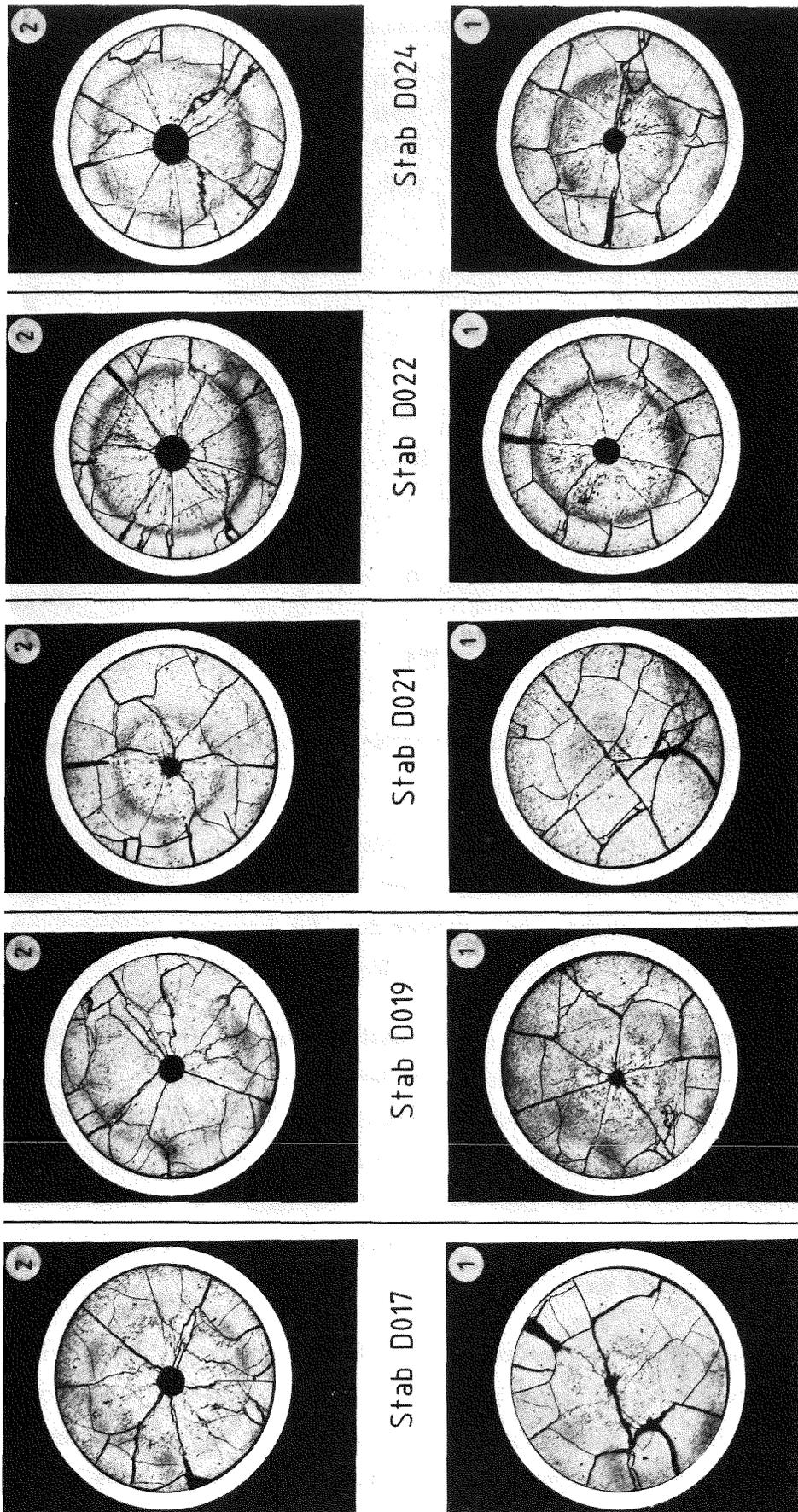


Abb. 16 Keramografien der Brennstäbe DO 17, 19, 21, 22, 24

**Tabelle X:** Quantitative Bestimmung der Brennstoffstrukturen

Stab-bez.	Pro-ben-Nr.	Spaltweite in $\mu\text{m}$		Außenradius der Stengelkornzone		Zentralkanal-Durchmesser (mm) min./max.
		Einzelwert	Mittelwert	in mm	Mittelwert	
DO-17	1	65/70/30/10	44	0,7/0,77/0,8/0,8	0,77	0,28/0,36
	2	70/60/50/40	55	1,67/1,48/1,50/1,80	1,62	0,82/0,83
DO-19	1	100/20/50/90	65	1,0/0,9/1,1/1,05	1,01	0,40/0,48
	2	40/80/80/25	56	1,56/1,75/1,57/1,55	1,61	0,80/0,87
DO-21	1	80/60/50/20	52	-	-	-
	2	50/80/30/35	49	1,2/1,3/1,4/1,45	1,34	0,55/0,57
DO-22	1	40/30/40/30	35	1,65/1,70/1,75/1,75	1,71	0,77/0,80
	2	15/35/20/30	25	2,20/2,10/2,15/2,15	2,15	1,03/1,05
DO-24	1	75/20/15/20	33	0,75/1,0/1,10/0,95	0,95	0,68/0,72
	2	40/25/50/30	36	1,6/1,9/1,85/2,1	1,86	1,11/1,18

Stab/Probe

- 17/1 Nur geringe Umstrukturierung. Exzentrizität des sehr kleinen Zentralkanals fällt auf. Breiter Diagonalriß vergrößert eine Achse des sonst runden Zentralkanals und verkleinert den Brennstoff/Hülle-Spalt.
- 17/2 Regelmäßige Brennstoffstruktur mit ausgeprägten Radialrissen.
- 19/1 Besonders große Schwankungen der Brennstoff/Hülle-Spaltweite. Typische Radialrisse. Tangentialrisse im Stadium des Ausheilens.
- 19/2 Regelmäßige Brennstoffstruktur mit zahlreichen ausgeheilten Radialrissen.
- 21/1 Einziger Schliff ohne Zentralkanal. Keine Säulenkristallzone vorhanden. Brennstoff/Hülle-Spalt lokal deutlich größer (100  $\mu\text{m}$ ) als in der quantitativen Bestimmung angegeben. Ausheilende Radialrisse.
- 21/2 Exzentrische Struktur mit breiten, im Zentrum ausgeheilten Radialrissen. Keine starke Verschiebung von Bruchstücken.

- 21/3 Der Zentralkanal ist durch seine exzentrische Lage schräg angeschnitten und damit scheinbar nach unten zu geschlossen. Er reicht bis ca. 2 mm an den Brutstoff heran.
- 22/1 Regelmäßige Brennstoffstruktur mit zahlreichen, im Innern ausgeheilten Radialrissen und einem Ring aus Tangentialrissen.
- 22/2 Regelmäßige Brennstoffstruktur mit zahlreichen, im Innern ausgeheilten Radialrissen . Lange Säulenkristalle. Keine Linsenblasen. Umstrukturierung im Brennstoff abgeschlossen.  $\beta$ -Autoradiografie zeigt deutlich Schiefplast an.
- 22/3 Zentralkanal zum Ende ausgezackt mit maximalem Durchmesser von 1,6 mm. Feste Verbindung von Brenn- und Brutstoff. Hitzekegel im Brutstoff abgesprengt. Brutstofftablette gespalten.
- 24/1 Regelmäßige Brennstoffstruktur mit z.T. breiten Radialrissen. Die Ausheilungsspuren dieser Risse im Tablettenzentrum sind noch deutlich zu verfolgen. Linsenblasen im Bereich der Säulenkristalle.  $\beta$ -Autoradiografie zeigt deutlich Schiefplast an.
- 24/2 Regelmäßige Brennstoffstruktur mit zahlreichen Radialrissen. Lange Säulenkristalle, die noch Linsenblasen enthalten.  $\beta$ -Autoradiografie zeigt deutlich Schiefplast an.

## 7. Modelltheoretische Analyse

Das Hauptaugenmerk der modelltheoretischen Analyse liegt bei diesen Experimenten auf der Beschreibung der Umstrukturierungen des Brennstoffs, wobei hier generell die Umverteilung der Herstellungsporosität sowie die Behandlung des durch die beim Anfahren entstehenden Risse zur Umverteilung zur Verfügung stehenden Leervolumens (aus dem Spalt) gemeint ist.

Die treibende Kraft für diese Umstrukturierung ist die Brennstofftemperatur und ihre radiale Verteilung. Diese hängt wiederum über die Wärmeleitfähigkeit von der Sauerstoffumverteilung und der Porosität sowie von der radialen Wärmequellverteilung ab, die ihrerseits wiederum von der Brennstoffdichte- und Plutoniumverteilung beeinflusst wird. Diese Phänomene werden bei der Berechnung des zeitabhängigen Temperaturverlaufs berücksichtigt.

Ein wichtiges Kriterium für die thermodynamische Behandlung des Brennstoffs ist die Bestimmung des Wärmedurchgangs im Spalt, der durch die Spaltweite selbst und durch den Gaszustand im Spalt (Zusammensetzung, Druck und Temperatur der Gas-mischung) berechnet werden kann.

Die von außen aufgeprägte Stableistung in Verbindung mit der Kühlmitteltemperatur ist der Ausgangspunkt für die Rechnung und liefert die ersten Randbedingungen in Form von Hüllaußen- und Hüllinnentemperatur.

Die Rechnungen wurden mit dem Rechenprogramm SATURN-S durchgeführt /1/. Für die Auswertung wurden die Stäbe DO 17 , DO 19 und DO 22 als repräsentativ ausgewählt, der Stab DO 21 liegt aufgrund zu niedriger Leistung innerhalb der durch die anderen Stäbe abgedeckten unteren Lastbereiche. Im folgenden werden die Rechen-ergebnisse für die obigen Brennstabprüflinge vorgestellt und mit den Befunden der Nachbestrahlungsuntersuchung verglichen

### 7.1 Analyse des Stabes DO 17

Der Ablauf der Bestrahlung ist in Abb. 17 wiedergegeben. Die Stableistung im Leistungsmaximum betrug ziemlich konstant 471 W/cm über eine Gesamtbestrahlungszeit von 123 h. Die Kühlmitteltemperaturen betragen 439 °C am unteren Stabende und 585 °C am oberen Ende. Im Flußmaximum lag die Hülloberflächen-temperatur bei 525 °C. In den Abb. 18 bis 20 ist die zeitliche Entwicklung von Zentraltemperatur, Radialsplitt und Zentralkanalradius wiedergegeben.

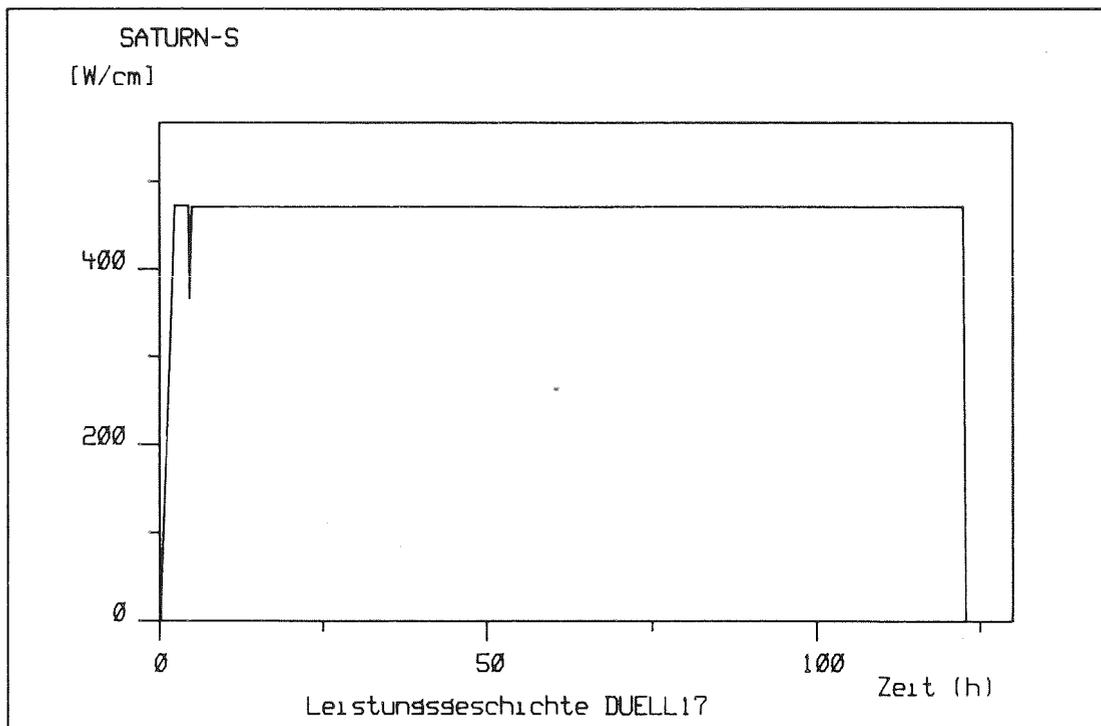


Abb. 17 Stab DO 17, Ablauf der Bestrahlung

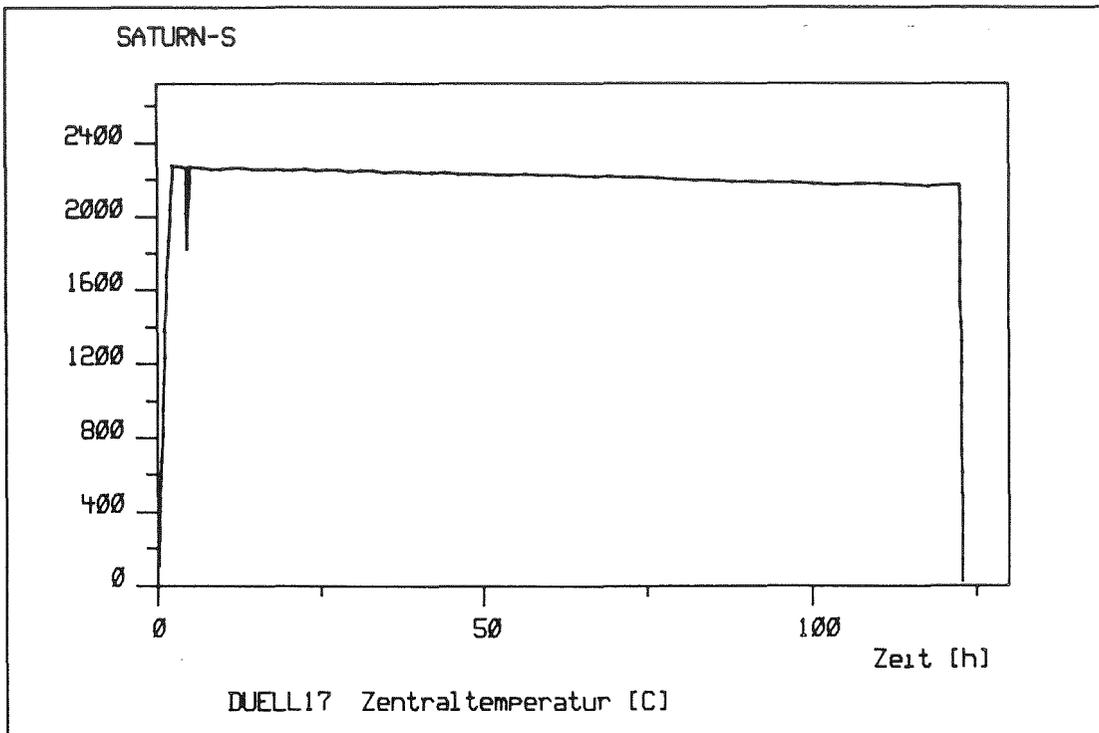


Abb. 18 Stab DO 17, zeitlicher Verlauf der Zentraltemperatur

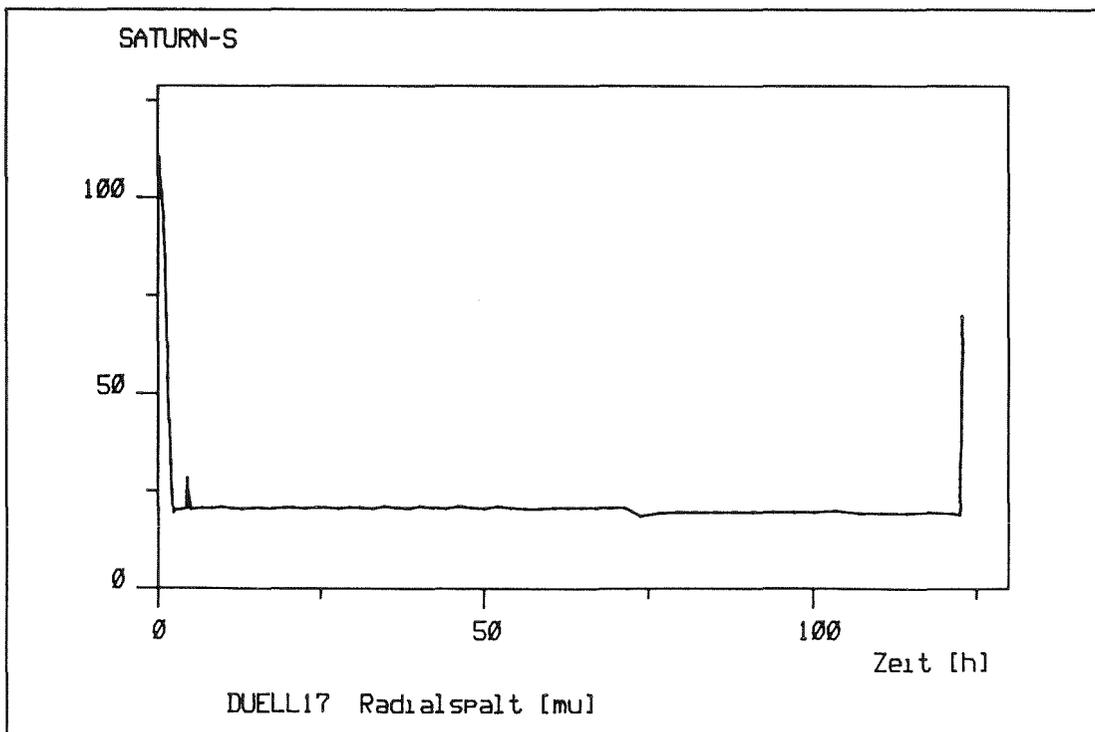


Abb. 19 Stab DO 17, Entwicklung des Radialspaltes

Nach dem ersten Heißzustand fällt die Brennstoffzentraltemperatur durch Porositätsumverteilung von anfänglich 2275 °C auf 2173 °C ab, d.h. der Verdichtungsprozeß bedingt einen Temperaturrückgang in dieser Bestrahlungsphase von etwa 100 Grad. In Tabelle XI sind die wesentlichen Merkmale des Brennstoffzustandes

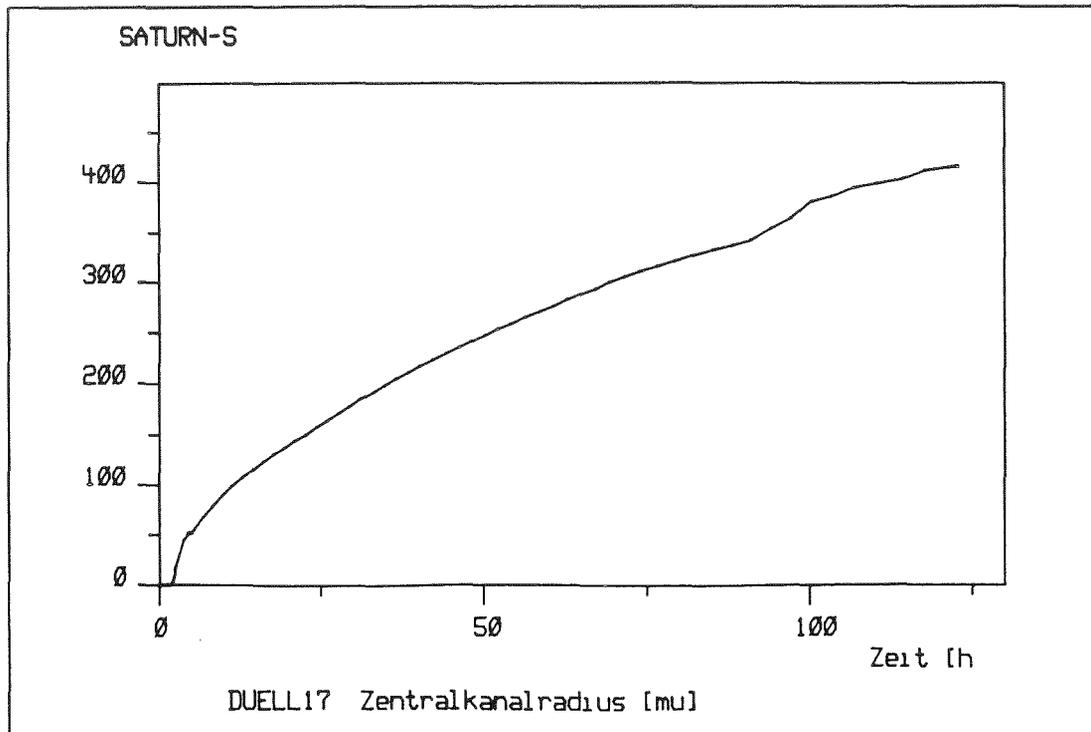


Abb. 20 Stab DO 17, Entwicklung des Zentralkanals

für Probe Nr. 1 und 2 (siehe Kap. 6, Tabelle X) nach dem Abschalten zusammengefaßt.

Tabelle XI: Brennstoffzustand von DO 17 nach der Bestrahlung (berechnet)

Probe Nr.	Zentralkanal-durchmesser (mm)	Radius 1900°C-Zone (Stengelkorn) (mm)	Radius 1350°C-Zone (Kornwachstum) (mm)	Spaltweite rad. (μm)	Pu-Gehalt mittel innen (%)
2	0,83	1,62	2,49	70	21,2
1	0,31	1,36	2,37	77	21,0

Die radiale Porositätsverteilung (Abb. 21) zeigt im Inneren noch einen nicht umverteilten Porositätsvorrat, d.h. die Umstrukturierung ist noch nicht abgeschlossen.

Die Plutoniananreicherung um den Zentralkanal von ca. 21,2 % liegt nur unwesentlich höher als der Ausgangswert von 20,9 %.

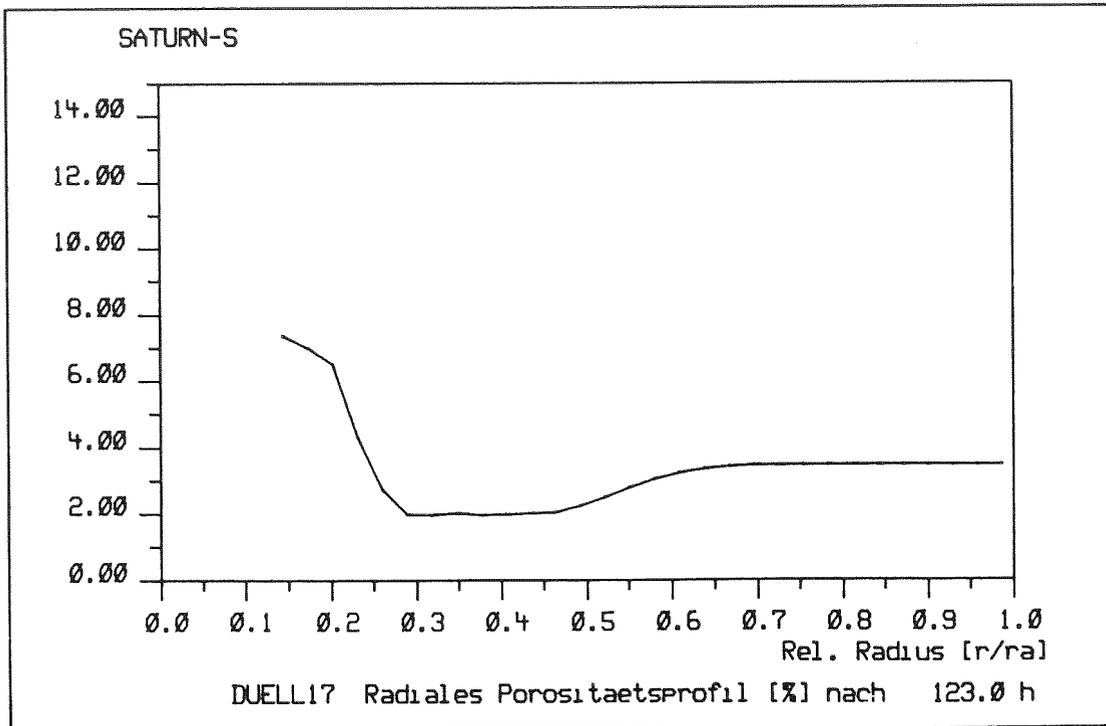


Abb. 21 Stab DO 17, Radiales Porositätsprofil nach Bestrahlung

## 7.2 Analyse des Stabes DO 19

Der Prüfling wurde im wesentlichen der gleichen Leistung wie Stab DO-17 unterworfen bis auf die Leistungsrampe von 545 W/cm (Abb. 22).

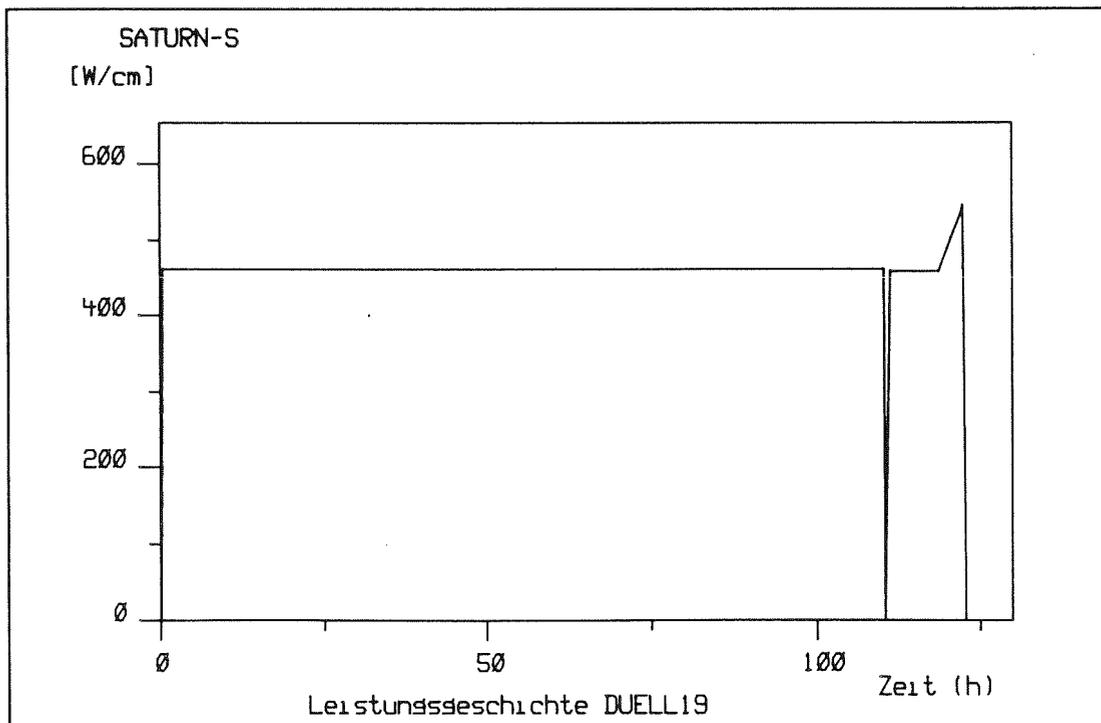


Abb. 22 Stab DO 19, Ablauf der Bestrahlung

Nach anfänglichen 2294 °C Brennstoffzentraltemperatur, die auf 2178 °C nach der Vorbestrahlungsphase abfallen, werden nach Erreichen der Vollast von 545 W/cm 2390° C erreicht (Abb. 23).

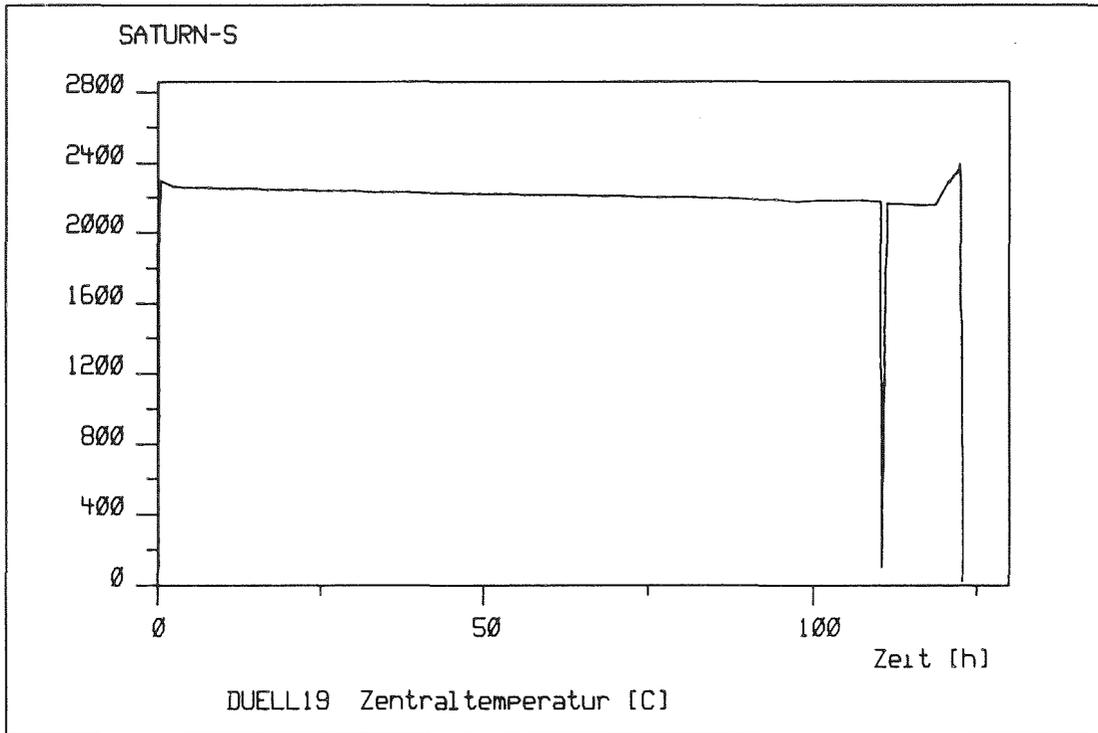


Abb. 23 Stab DO 19, Zeitlicher Verlauf der Zentraltemperatur

Innerhalb der ca. 4-stündigen Phase des Hochfahrens auf Vollast findet so gut wie keine weitere Umstrukturierung statt, die Zentralkanaländerung beträgt ca. 15 µm (Abb. 24).

In Tabelle XII sind die wesentlichen Merkmale des Brennstoffzustandes bei Bestrahlungsende im Leistungsmaximum zusammengestellt.

Tabelle XII: Brennstoffzustand von DO 19 nach der Bestrahlung (berechnet)

Zentralkanal-Durchmesser (mm)	Radius 1900 °C-Zone (Stengelkorn) (mm)	Radius 1350 °C (Kornwachstum) (mm)	Spaltweite radial (µm)	Pu-Gehalt mittel, innen (mm)
0,802	1,60 (458 W/cm)	2,49 (458 W/cm)	-	21,1
0,832	1,92 (545 W/cm)	2,64 (545 W/cm)	60	21,1

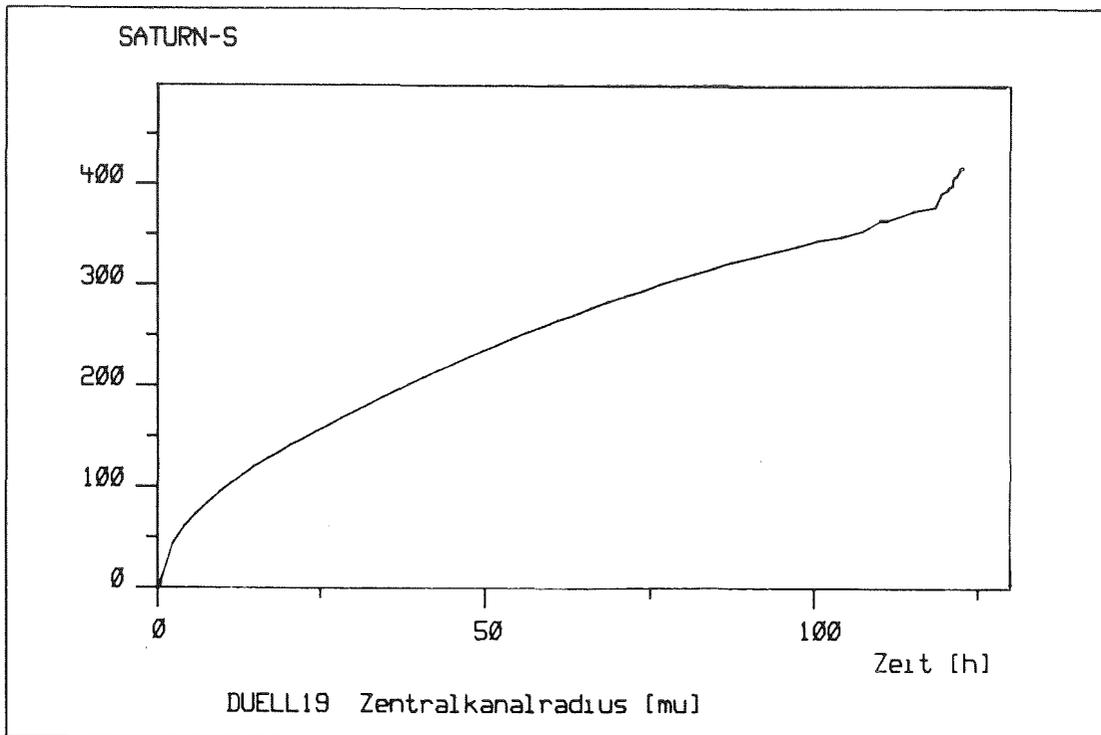


Abb. 24 Stab DO-19, Entwicklung des Zentralkanals

Wie im Falle des Prüflings DO 17 ist auch hier die Umstrukturierung noch nicht abgeschlossen, die kurze Dauer bei erhöhter Leistung hat keine signifikanten Umstrukturierungen bewirkt.

### 7.3 Analyse des Stabes DO 22

Der Prüfling DO 22 wies mit seinem Nachbarstab DO 24 die längste Bestrahlungszeit von 368 h aus. Nach einer Vorbestrahlungsphase von 122,8 h auf ca. 460 bis 462 W/cm wurde die Leistung für die Restbestrahlung auf 540 - 545 W/cm gesteigert (Abb. 25).

Die Brennstoffzentraltemperatur zeigte im Verlauf der Bestrahlung die folgende Entwicklung (Abb. 26): Nach anfänglichen 2238 °C fiel sie in der ersten Bestrahlungsphase auf 2170 °C ab, einen Temperaturbereich, in dem die Umstrukturierung noch unvollständiger war als bei den Vorläufern. In der Vollastphase erreichten die Temperaturen 2353 °C bei 541 W/cm, sie fielen durch die nun voll einsetzende Umstrukturierung bei Bestrahlungsende auf 2249 °C ab.

In den Abb. 27 und 28 ist die Bildung des Zentralkanals sowie die Entwicklung des Radialspaltes wiedergegeben. Man erkennt die massive Zunahme der Umstrukturierung durch die Temperaturerhöhung.

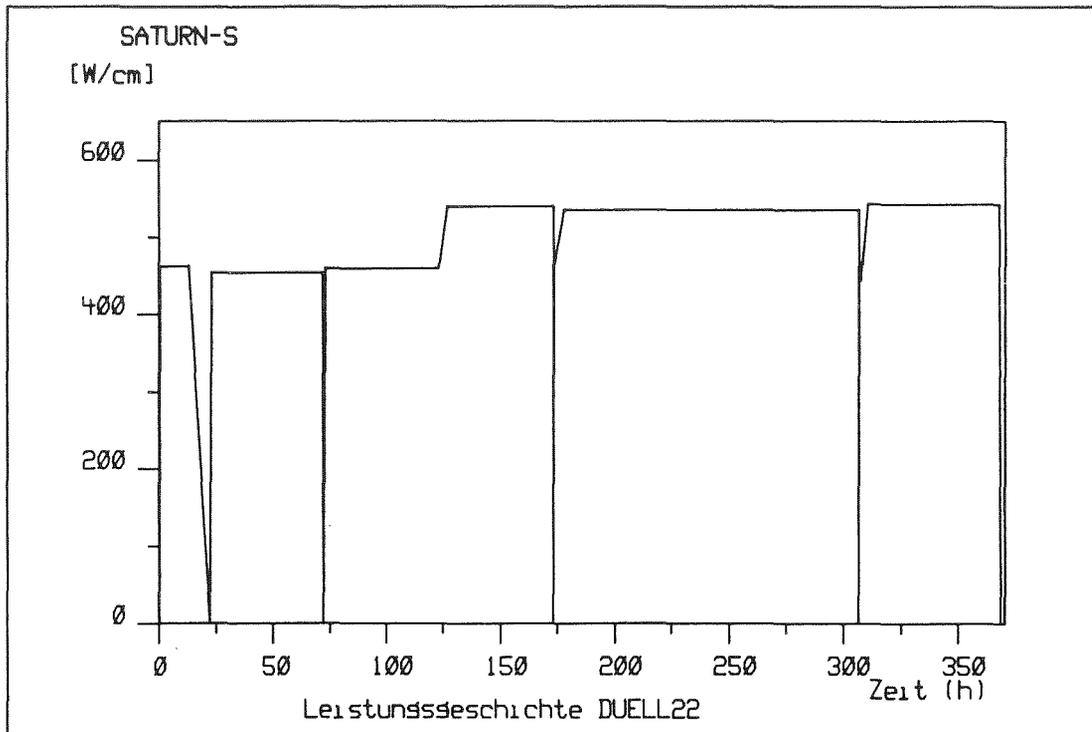


Abb. 25 Stab DO 22, Ablauf der Bestrahlung

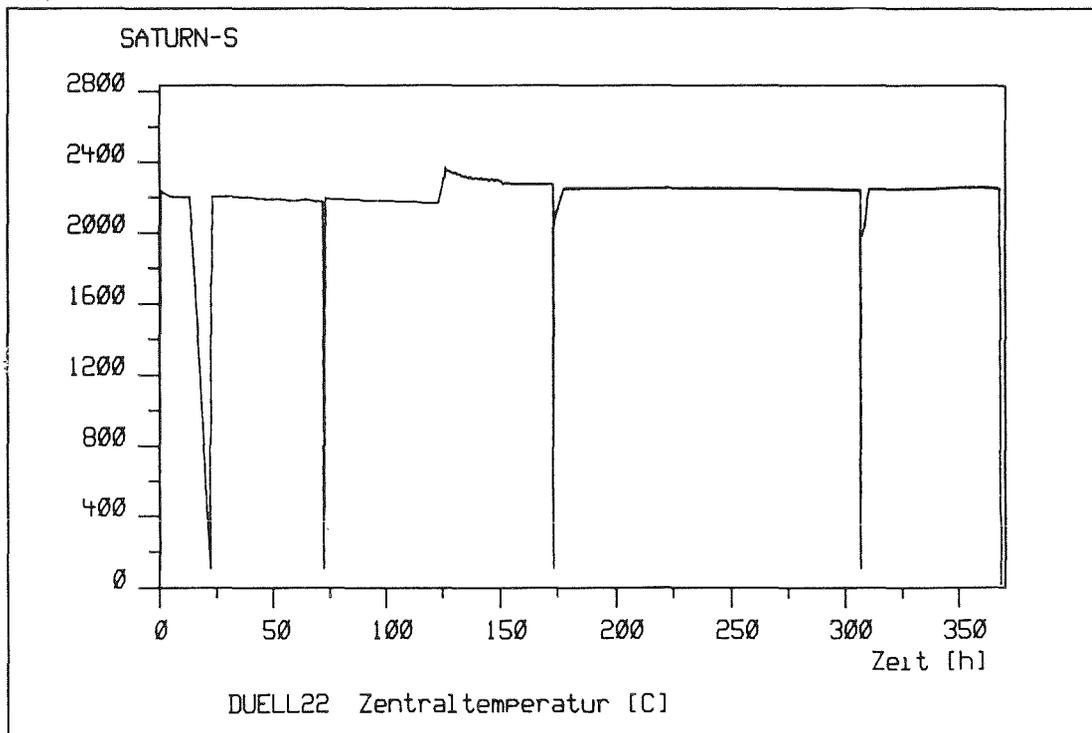


Abb. 26 Stab DO 22, Zeitlicher Verlauf der Zentraltemperatur

In Abb. 29 ist schließlich das Brennstoffporositätsprofil nach Ablauf der Bestrahlung wiedergegeben. Die Porosität um den Zentralkanal liegt nur wenig über der (im Programm festgelegten) Minimalporosität von 2 %

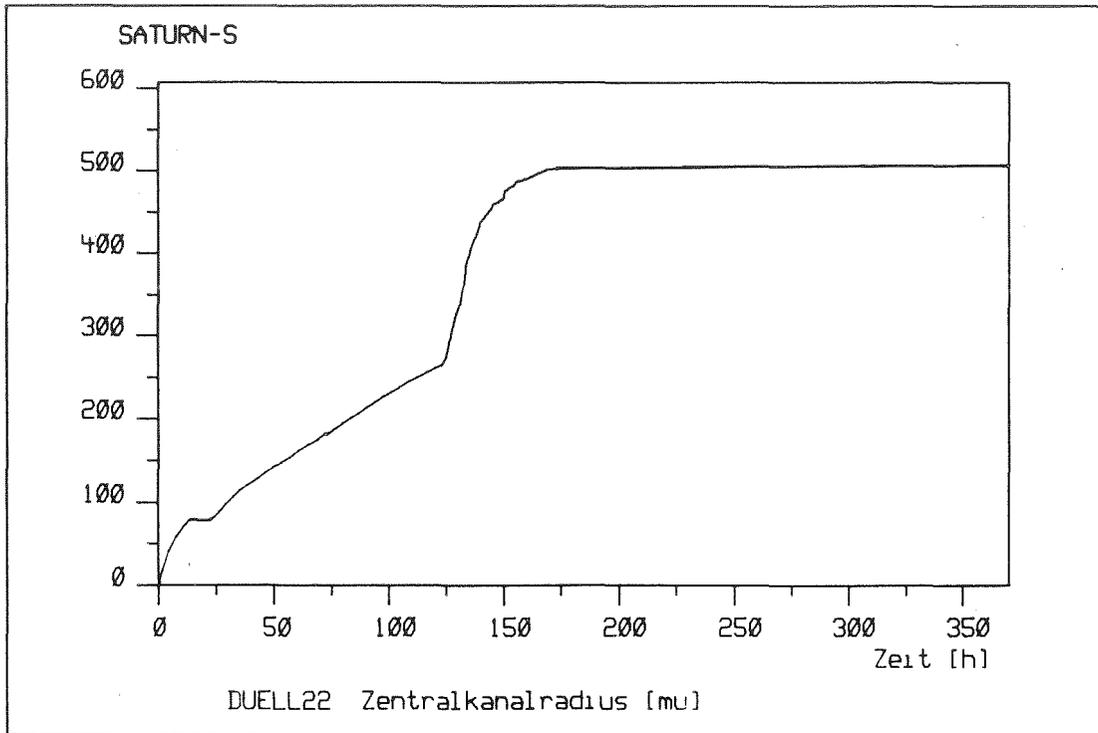


Abb. 27 Stab DO 22, Entwicklung des Zentralkanalradius

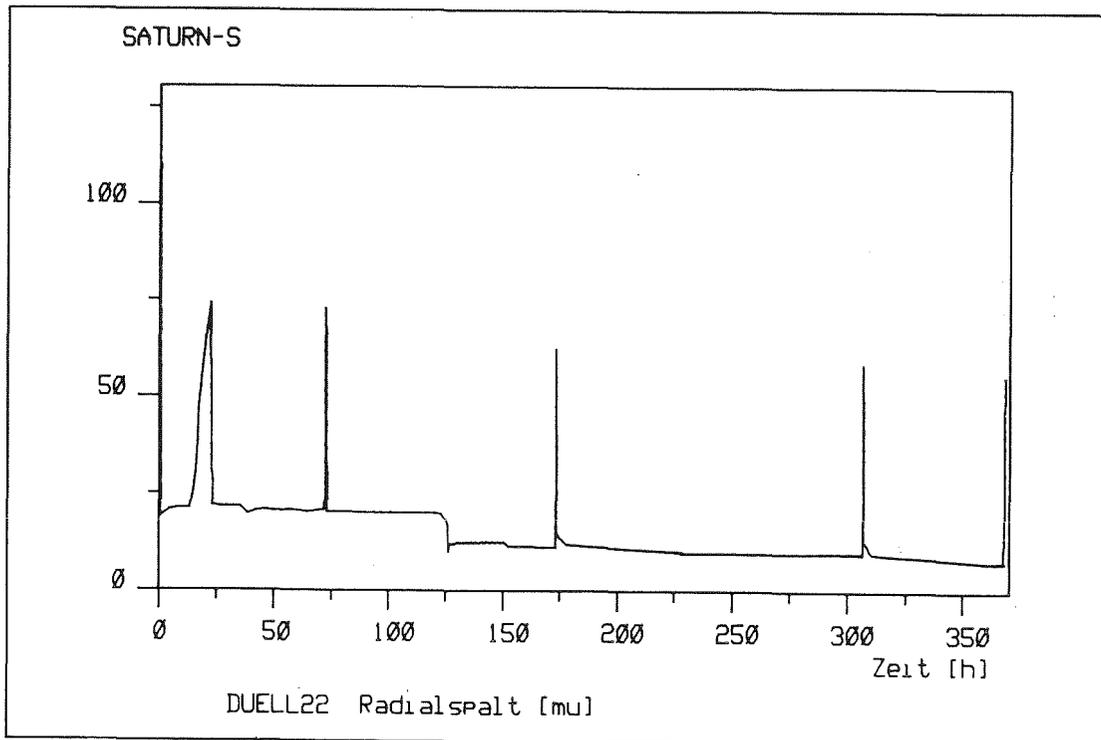


Abb. 28 Stab DO 22, Entwicklung des Radialspaltes

Im Gegensatz zu den anderen Prüflingen ist im Falle DO 22 eine höhere Pu-Anreicherung um den Zentralkanal berechnet worden. Sie ist mit 21,5 % zwar nicht wesentlich größer, jedoch ist der Anreicherungsbereich deutlich gestiegen, er

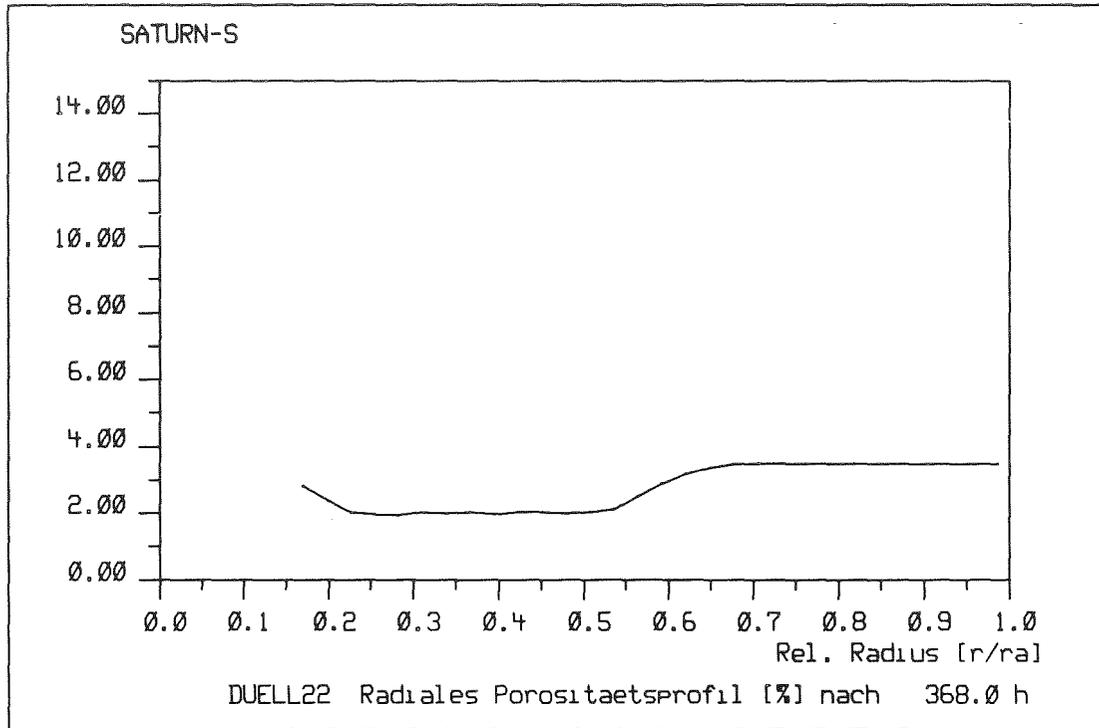


Abb. 29 Stab DO 22, Radiales Porositätsprofil nach Bestrahlung

reicht bis etwa 1 mm vom Zentralkanal in den Brennstoff hinein (im Gegensatz zu etwa 0,4 mm im Stab DO 17) (Abb. 30).

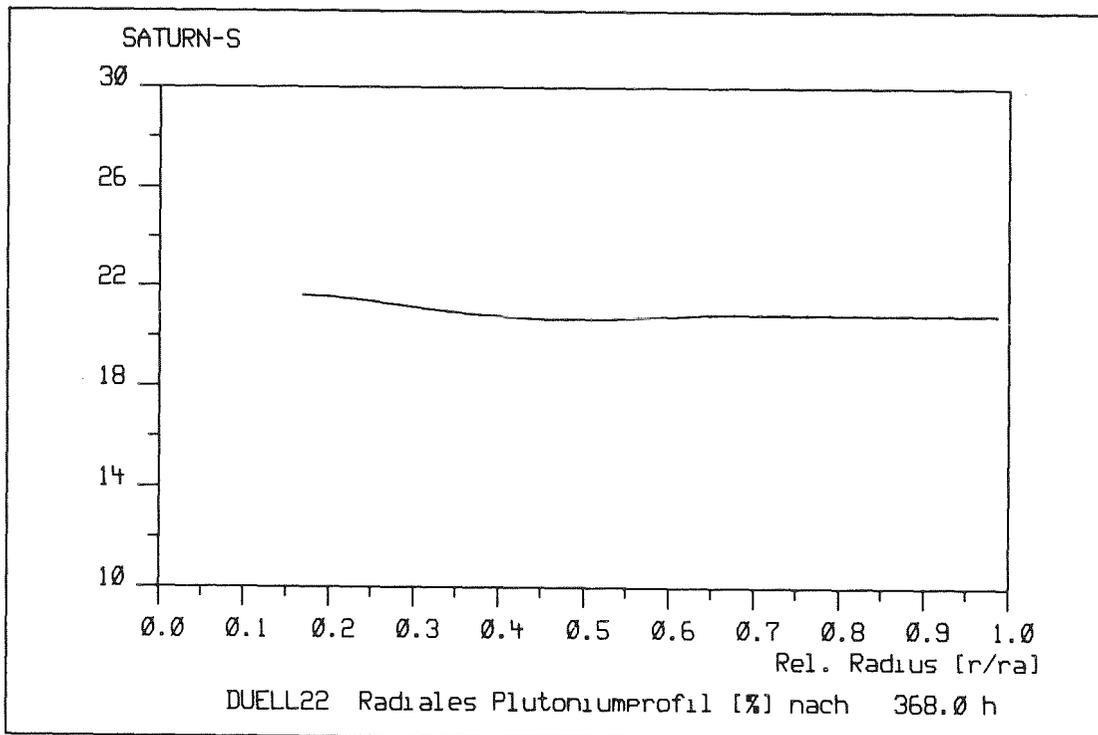


Abb. 30 Stab DO 22, Radiales Plutoniumprofil nach Bestrahlung

In Tabelle XIII sind schließlich einige Zustandsgrößen für Probe Nr. 2 (heiße Ebene) nach der Bestrahlung zusammengestellt.

**Tabelle XIII:** Brennstoffzustand von DO 22 nach der Bestrahlung

Zentralkanal-Durchmesser (mm)	Radius 1900 °C-Zone (Stengelkorn) (mm)	Radius 1350 °C (Kornwachstum) (mm)	Spaltweite radial (µm)	Pu-Gehalt mittel, innen (mm)
1,04	1,91	2,52	55	21,5

Einen Überblick über die zeitlichen Änderungen von Zentraltemperatur- und Porositätsverteilung gibt Abb. 31.

#### 7.4 Diskussion der Ergebnisse

Wie ein Vergleich mit den Ergebnissen der keramografischen Untersuchung des Brennstoffs zeigt, ist die Übereinstimmung von Rechen- und Meßwerten in den meisten Fällen sehr gut. Zur besseren Übersicht sind in Tabelle XIV die wesentlichen Resultate aus Theorie und Experiment gegenübergestellt.

**Tabelle XIV:** Vergleich modelltheoretischer und experimenteller Ergebnisse

Stabbezeichnung/ Probe	Radialspalt (µm)		Zentralkanal-Durchmesser (mm)		Stengelkornzone Radius (mm)	
	Experiment	Rechnung	Experiment	Rechnung	Experiment	Rechnung
DO 17/1	+ 26 44 - 34	77	0,32±0,04	0,306	+ 0,03 0,77 - 0,07	1,36
DO 17/2	55± 15	70	0,825±0,015	0,832	+ 0,18 1,62 - 0,14	1,62
DO 19/2	+ 24 56 - 31	61	0,835±0,035	0,832	+ 0,14 1,61 - 0,06	1,60/1,92 (545 W/cm)
DO 22/2	25± 10	55	1,04±0,01	1,038	2,15± 0,05	1,91

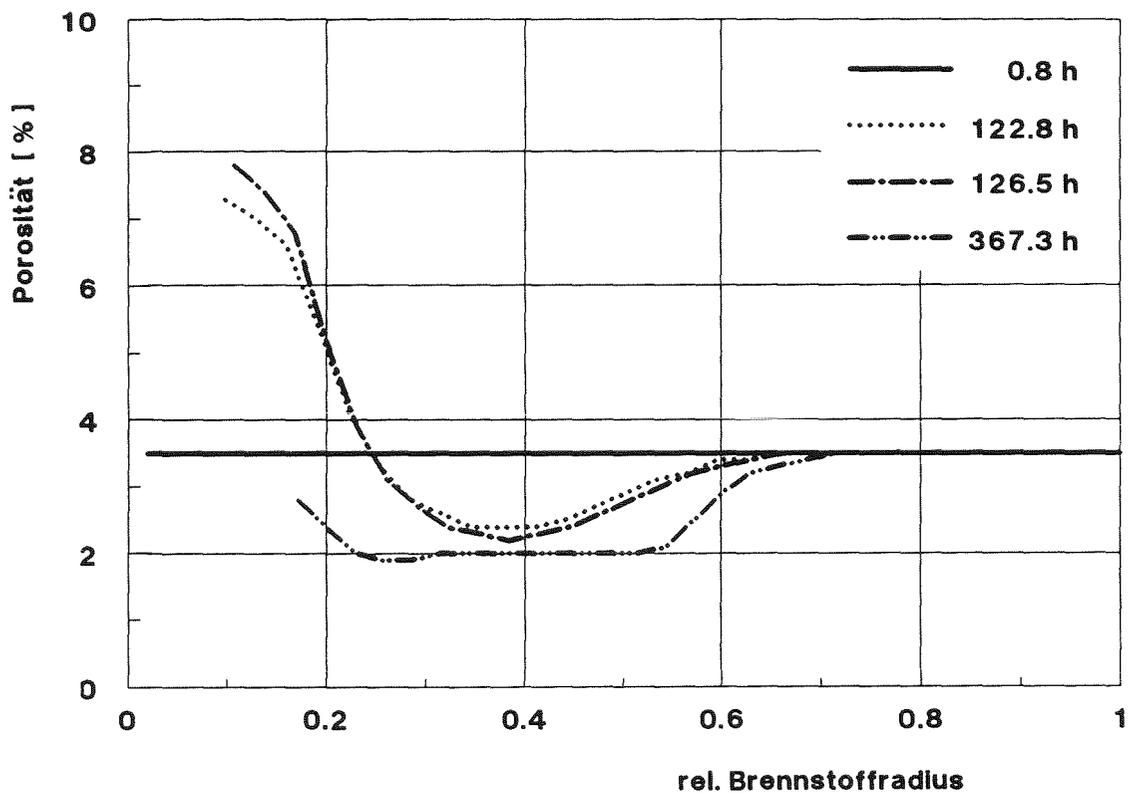
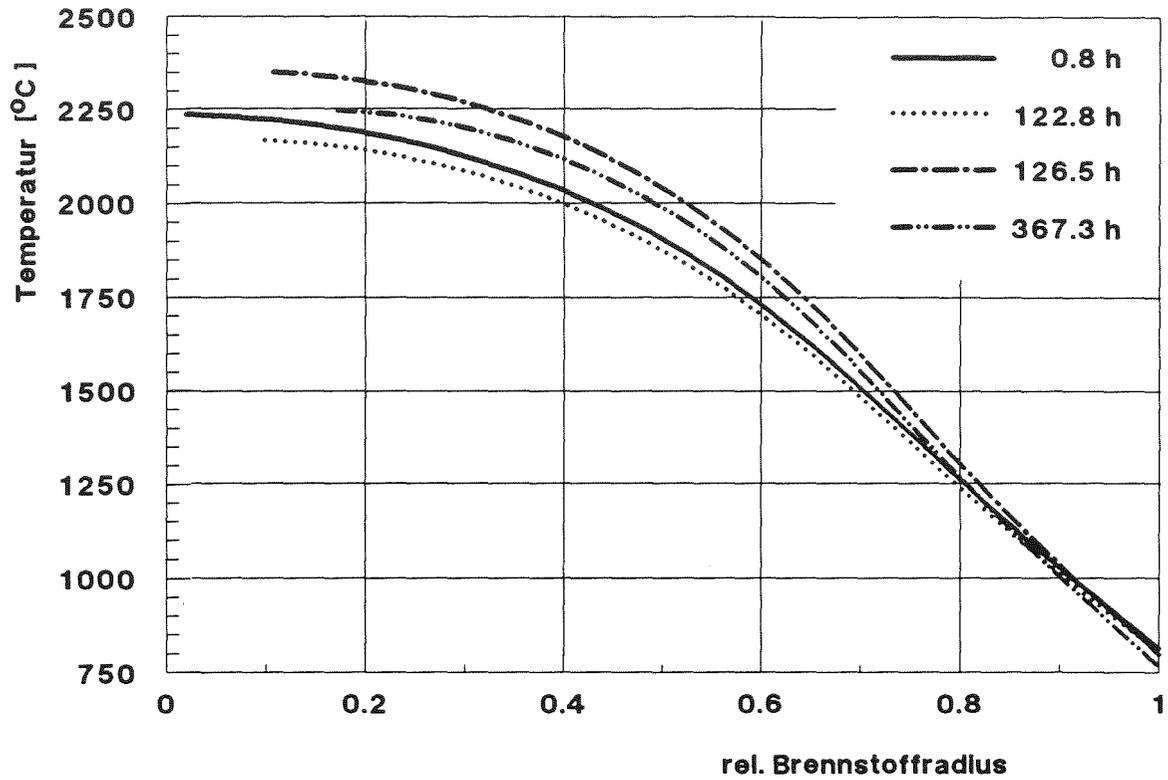


Abb. 31: Stab DO 22, Radiale Verteilungen von Brennstofftemperatur und Porosität zu verschiedenen Zeitpunkten

Zur Berechnung des Zentralkanals wird in SATURN-S die Herstellungsporosität sowie ein Teil des Spaltes über die Rißbildung herangezogen. Bei den verwendeten hochdichten Brennstoffen wird der größte Teil des Zentralkanals (bis ca. 70%) durch das Rißvolumen, welches ähnlich wie die Herstellungsporosität durch Porenwanderung eingebracht wird, gebildet. Das Einbringen von Spaltleervolumen führt über die Massenbilanz zur Vergrößerung des Brennstoffdurchmessers, dem sogenannten "relocation" (Verlagerung von Bruchstücken, Rißbildung). Das so berechnete relocation beträgt 36  $\mu\text{m}$  für DO 17 (29  $\mu\text{m}$  in der kälteren Ebene der Probe 1) und 45  $\mu\text{m}$  in den Fällen DO 19 und DO 22 (heiße Ebene). In Tabelle XIV fällt auf, daß bei dem Stab DO 22 der gemessene Radialspalt deutlich kleiner ist als der berechnete, gleichzeitig ist der gemessene Radius der Stengelkornzone deutlich größer als der berechnete. Dies deutet u.U. auf höhere Leistungen als den bei den Rechnungen verwendeten hin.

Ergänzend wird an dieser Stelle noch festgestellt, daß in allen Fällen der berechnete Spalt während der Bestrahlung offen ist, die Spaltweiten liegen zwischen 20  $\mu\text{m}$  (DO 17) und 8  $\mu\text{m}$  (DO 22).

Die angegebenen Rechenwerte für den Radius der Stengelkornzone entsprechen den Radien der 1900 °C-Isotherme. Auch hier ist die Übereinstimmung gut bis auf die Proben DO 17/1 und DO 22/2. Im Falle DO 19/2 ist der zweite angegebene Wert die 1900 °C-Isotherme bei 545 W/cm. Die kurze Haltezeit in diesem Leistungsbereich reicht offensichtlich zur Bildung von Stengelkörnern in dem Außenbereich (> 1,6 mm) nicht aus, so daß die Stengelkornzone nur in der Vorbestrahlungsphase bei 460 W/cm gebildet wurde. Bei der Probe DO 17/1 (kalte Ebene) ist der niedrige Wert mit dem bei Probe DO 19/1 zu vergleichen, der deutlich größer ist. In diesen Bereichen mit relativ flachen Temperaturverteilungen und niedrigeren Temperaturen findet offenbar die Ausbildung von Stengelstrukturen noch wesentlich langsamer statt. Legt man in diesen Fällen die Stengelkornzone in den Bereich berechneter Verdichtungszone, so werden hier Werte von 0,92 - 1,23 mm als Radien gefunden. Da somit die Ausbildung der Stengelkornzonen zeitabhängig ist, ist eine sichere Zuordnung nur nach nahezu vollständiger Umstrukturierung möglich.

Weitere Effekte wie die Plutoniumumverteilung, die abbrandabhängige Stöchiometrieverschiebung, Brennstoffschwellen und Spaltgasproduktion und -freisetzung, die erst bei längeren Bestrahlungszeiträumen das Brennstoffverhalten beeinflussen, spielen bei diesen Experimenten eine untergeordnete Rolle. Der Prüf-

ling DO 22 erreicht bei einer Standzeit von 368 h einen lokalen maximalen Abbrand von 0,27 %, die mittlere Spaltgasfreisetzungsrates beträgt 4,4 %, welches bei einer Gesamtgasproduktion von 3,2 cm<sup>3</sup> einem freigesetzten Gasvolumen von 0,14 cm<sup>3</sup> entspricht, einem Beitrag, der das Ausgangsfüllgas nur unwesentlich beeinflusst. Das freie Brennstoffschwellen erreicht bei Prüfling DO 17 etwa 3 µm, im Falle DO 22 9 µm.

Abschließend kann festgestellt werden, daß mit der Experimentserie DUELL II wertvolle Erkenntnisse über das Anfahrverhalten von frischen Brennstoffen gewonnen werden konnten, die zu einer Reihe von Modellmodifikationen führten. Die Beschreibung des Verhaltens der bei diesen Experimenten eingesetzten Brennstoffe mit dem Programm SATURN-S führt zu sehr guter Übereinstimmung mit den experimentellen Befunden.

## 8. Zusammenfassung

In der Experimentserie DUELL II wurde das Anfahrverhalten von hochdichtem Brennstoff untersucht. Die Bestrahlung wurde in vier sogenannten DUELL-Kapseln durchgeführt, in denen jeweils zwei Prüflinge gleichzeitig bestrahlt wurden.

Zum Einsatz kamen Kurzprüflinge mit einer Gesamtlänge von 453 mm bei einer Brennstoffsäulenlänge von 150 mm. Der hochdichte Brennstoff mit einer Herstellungsporosität von ca. 4 % hatte einen Plutoniumanteil von 20,9 % Pu/U+Pu sowie einen Ausgangssauerstoffgehalt von 1,959. Der Brennstoffdurchmesser betrug 6,37 mm, der Hüllaußendurchmesser 7,6 mm. Die Hülle bestand aus Edelstahl der Werkstoff-Nr. 1.4970.

Die Bestrahlung bestand aus vier Phasen mit einer Vorbestrahlung bei 85 % Nominalleistung ( $\approx 550$  W/cm) für Einsatz 1, einem anschließenden Hochfahren auf Vollast mit Abfahren für Einsatz 2, einer folgenden Haltezeit von einem Tag auf Vollast für Einsatz 3 sowie einer Haltezeit von ca. 10 Tagen auf Vollast für Einsatz 4.

Die Nachbestrahlungsuntersuchung ergab eine unvollständige Umstrukturierung für Einsatz 1 und 2 mit Zentralkanälen von ca. 800 µm Durchmesser in der heißen Ebene und volle Umstrukturierung für Einsatz 4 mit einem Zentralkanal von ca. 1 mm Durchmesser. Die Restspalte für die einzelnen Prüflinge lagen zwischen 44 und

25 µm. Untersuchungen der Hüllinnenoberfläche auf Korrosion zeigten lediglich leichte Verfärbungen (Oxidation), ein korrosiver Angriff durch Spaltprodukte war nicht erkennbar.

Zur Analyse der Brennstoffumstrukturierung wurden thermodynamische Rechnungen mit dem Programm SATURN-S durchgeführt. Die Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment ist sehr gut, wobei aus den Ergebnissen der Nachuntersuchung zahlreiche Modellmodifikationen, insbesondere zur Behandlung der Leervolumenumverteilung, bestehend aus Herstellungsporosität und Rißvolumina, resultierten.

Die Analyse der Experimentserie DUELL II hat gezeigt, daß die Experimente zum größten Teil erfolgreich durchgeführt worden sind und die Kenntnisse über das Verhalten von Schnellbrüterbrennstoffen bei Bestrahlungsbeginn weiter vertieft haben.

#### Literatur:

- /1/ R. Pesl, D. Freund, H. Gärtner, H. Steiner:  
SATURN-S, Ein Programmsystem zur Beschreibung des thermomechanischen Verhaltens von Kernrteaktorbrennstäben unter Bestrahlung,  
KfK-Bericht 4272, Juli 1987
- /2/ B. Steinmetz, R. Häbel:  
interne Mitteilung (Fa. INTERATOM), unveröffentlicht
- /3/ F. Mason, P. Zeisser:  
interner Bericht (unveröffentlicht), 1982
- /4/ F. Mason, P. Zeisser:  
interner Bericht (unveröffentlicht), 1984
- /5/ D. Freund, D. Hanus, O. Jacobi, H. Wedemeyer:  
interner Bericht KfK (unveröffentlicht), 1982
- /6/ H. Gärtner:  
interne Mitteilung (unveröffentlicht)
- /7/ H. Wedemeyer:  
interner Bericht KfK (unveröffentlicht), 1982
- /8/ H. Elbel, H. Wedemeyer:  
interner Bericht KfK (unveröffentlicht), 1982
- /9/ Characteristics of facilities and standard irradiation devices HFR Petten,  
Report EUR 5700, revised edition 1981-1982

- /10/ H. Kwast, G. Dassel:  
Neutron Radiographs and Gamma Scans of DUELL-Experiments D 173-20/21,  
22/23 and 26/27,  
ECN-82-16, Dezember 1982
- /11/ D. Geithoff:  
interner Bericht KfK (unveröffentlicht), 1983
- /12/ D. Geithoff:  
interner Bericht KfK (unveröffentlicht), 1983
- /13/ D. Geithoff:  
interner Bericht KfK (unveröffentlicht), 1983
- /14/ D. Geithoff:  
interner Bericht KfK (unveröffentlicht), 1983
- /15/ D. Geithoff:  
interner Bericht KfK (unveröffentlicht), 1983
- /16/ O. Götzmann  
interner Bericht KfK (unveröffentlicht), 1986