

KERNFORSCHUNGSZENTRUM

KARLSRUHE

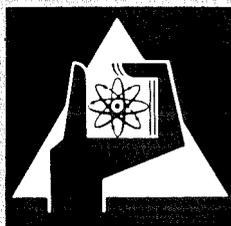
November 1972

KFK 1522

Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

**Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung des UO_2 - PuO_2 -
Brennstab-Bündels Mol-7A**

K. Kummerer, D. Geithoff, P. Weimar



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 1522

Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung des
UO₂-PuO₂-Brennstab-Bündels Mol-7A

von

K. Kummerer, D. Geithoff, P. Weimar

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

4.10.1972

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

Der in diesem Bericht beschriebene Bestrahlungsversuch basiert auf der Zusammenarbeit mehrerer Arbeitsgruppen im Kernforschungszentrum Karlsruhe und im Centre d'Etude de l'Energie Nucleaire in Mol/Belgien. Die vielfältige Mühe und Sorgfalt aller Beteiligten sei ausdrücklich anerkannt. Auch danken wir allen, die unmittelbar zur Abfassung dieser Dokumentation beitrugen, insbesondere Herrn F. Bauer für die Ausarbeitung der Faltblätter, Diagramme und Abbildungen sowie Frau B. Hauth für die Reinschrift des Manuskriptes und die redaktionelle Hilfe.

22.9.1972

K.Kummerer, D.Geithoff, P.Weimar

K U R Z F A S S U N G

Der im Rahmen der Brennstabentwicklung für schnelle Brutreaktoren durchgeführte Bestrahlungsversuch Mol-7A umfaßt die Bestrahlung eines Brennstab-Bündels mit 7 Stäben im epithermischen Neutronenfluß des belgischen Reaktors BR 2. Das Stabbündel war in dem Natrium-Kreislauf im Zentralkanal des BR 2, dem sog. MFBS-5-Loop, eingesetzt. Die Brennstäbe enthielten UO_2 - PuO_2 -Brennstoff und Hüllmaterial aus Edelstahl. Die Auslegung der Brennstäbe hinsichtlich Materialzusammensetzung und Geometrie sowie die betriebliche Beanspruchung der Stäbe stellen eine teilweise sehr weitgehende Simulation der Verhältnisse in einem Schnellbrüter-Prototyp wie etwa dem SNR-300 dar. Bei einem PuO_2 -Anteil von 20 Gew.-% betrug die Brennstoffschmierdichte 80 % der theoretischen Dichte. Die Stabhüllen aus 3 einander ähnlichen Typen hochwarmfester Edelstähle hatten eine Wandstärke von 0,38 mm. Der Stabdurchmesser war 6,0 mm. Hinsichtlich der Stablänge war wegen des begrenzten Bestrahlungsraumes die Simulation echter Schnellbrüterbedingungen nicht möglich, wohl aber etwa im Verhältnis von Brennstoffvolumen zu Spaltgasraum. Bei einer gesamten Stablänge von 108 cm schließen an einen 50 cm langen Brennstoffteil oben und unten je ein kurzes UO_2 -Brutstoffstück sowie jeweils ein Spaltgasplenum an.

Die betriebliche Beanspruchung während der Bestrahlung war mit 500 W/cm maximaler Stableistung und einer maximalen Hüllwandtemperatur von 630°C vorgesehen. Die tatsächlich im Experiment aufgetretene maximale Stableistung lag aber deutlich höher, nämlich bei etwa 590 W/cm. Der vorgesehene Zielabbrand des Experimentes war 60.000 MWd/t M. Tatsächlich erreicht wurde aber ein maximaler Abbrand von etwa 45.000 MWd/t M, da ein Brennstab defekt wurde und der Versuch daher schon vorzeitig beendet werden mußte.

Der vorliegende Bericht stellt eine Dokumentation dieses Bestrahlungsversuches dar. In ihr sind alle Einzelheiten über die Aufgabenstellung, die Auslegung, Konstruktion und Spezifikation der Stäbe und des Bündels, über die Stabherstellung, die Prüfungen vor der Bestrahlung, die gesamte Bestrahlungsgeschichte sowie schließlich über die zerstörungsfreie und zerstörende Nachuntersuchung der bestrahlten Stäbe zusammengestellt. Die Ursachen des aufgetretenen Stabschadens lassen sich nicht eindeutig angeben. Es wird in erster Linie ein Material- oder Fertigungsfehler vermutet, doch kann auch die nicht geplante betriebliche Überbeanspruchung auslösendes Moment gewesen sein.

A B S T R A C T

Design, Irradiation and Examination of the UO₂-PuO₂-Fuel-Pin-Bundle Mol-7A

Within the fuel pin development for fast breeder reactors the irradiation experiment Mol-7A comprises the irradiation of a fuel pin bundle with 7 pins in the epithermal neutron flux of the Belgian reactor BR 2. The bundle was loaded in the sodium circuit in the central channel of the BR 2, the so-called MFBS-5-Loop. The pins contained UO₂-PuO₂ fuel in a stainless steel cladding. The design of the pins with respect to material composition and geometry as well as the operational conditions are highly representative for the conditions in a fast breeder prototype like the SNR 300. Having a PuO₂-content of 20 w/o, the smeared density of the fuel was 80 % of theoretical density. The claddings which consisted of 3 quite similar types of high temperature resistant stainless steels, had a 0.38 mm wall thickness. The pin diameter was 6.0 mm. As far as the pin length is concerned the simulation of true fast reactor conditions was not possible due to the limited irradiation space in the BR 2. The ratio between fuel volume and fission gas plenum, however, is representative for a fast reactor pin. In a total pin length of 108 cm a 50 cm long fuel region is located between upper and lower small axial blankets, each accompanied by a separate gas plenum.

The operational conditions during irradiation were designed to be 500 watts/cm for the pin rating and 630°C for the maximum cladding temperature. In the course of the experiment the power happened to be remarkably higher, up to about 590 watts/cm. The target burnup was 60000 megawatt days/t M, but only about 45000 MWd/t were reached, when the experiment had to be terminated due to a pin failure.

This report is a documentation of this irradiation experiment, where all data and facts on the experimental objectives, pin design, specifications for pin and bundle, fabrication of the pins including preirradiational tests, the irradiation history, and, finally, the destructive and nondestructive post irradiation examination are compiled. The cause for the pin failure in the bundle could not be identified. Primarily a fault in material components or pin fabrication is suspected. But also the non-scheduled overpower during irradiation might have initiated the damage.

<u>Inhalt</u>	Seite
1. Einführung	1
2. Aufgabenstellung und Versuchsziel	3
3. Auslegung der Bündelbestrahlung	4
3.1 Stab- und Bündelgeometrie	4
3.2 Materialauswahl	5
3.3 Dichte des Brennstoffes	5
3.4 Stableistung, Temperatur, Abbrand	
3.5 Hüllrohrauslegung und -beanspruchung	6
4. Konstruktion der Brennstäbe und Spezifikationen	9
4.1 Der Aufbau der Brennstäbe	10
4.2 Brennstoffspezifikationen	12
4.3 Spezifikationen für den Brutstoff	14
4.4 Spezifikationen für die Hülle	14
4.5 Spezifikationen für den Brennstab	17
5. Herstellung der Brennstäbe	19
5.1 Ausgangspulver für Brennstoff und Brutstoff	20
5.2 Herstellung der Brennstoff-Tabletten	24
5.3 Herstellung der Brutstoff-Tabletten	24
5.4 Hüll- und Strukturmaterial	27
5.5 Tablettensäulen	27
5.6 Fertigung der Stäbe und Prüfungen	29
5.7 Abweichungen von den Spezifikationen	39
6. Brennstabbündel und Bestrahlungseinsatz	41
7. Ablauf der Bestrahlung	52
7.1 Reaktorzyklen	53
7.2 Neutronenfluß	53
7.3 Temperatur und Stableistung	56
7.4 Abbrand	56

8. Untersuchung und Demontage des Bündels	60
8.1 Partielle Zerlegung des Bestrahlungseinsatzes in Mol	60
8.2 Betatron-Durchleuchtung	61
8.3 Röntgen-Durchleuchtung	65
8.4 Sipping-Test	66
8.5 Vollständige Zerlegung des Stab-Bündels	70
9. Zerstörungsfreie Untersuchung der Stäbe	75
9.1 Visuelle Kontrolle und äußere Vermessung	75
9.2 Durchleuchtung	86
9.3 Gamma-Profile und Gamma-Spektren	86
10. Spaltgasbestimmungen	98
11. Keramografie	102
12. Radiochemische Abbrandbestimmungen	102
13. Schlußfolgerungen	106
Literatur	108
Liste der Tabellen	110
Liste der Abbildungen	111
Anhang I: Tablettenlisten	113
Anhang II: Dokumentation der Nachuntersuchung	123

1. Einführung

Bei den Entwicklungsarbeiten für Brennelemente schneller Brutreaktoren kommt nach der Erprobung einzelner oxidischer Brennstäbe das Verhalten ganzer Brennstabbündel ins Blickfeld. Im Schnellbrüter-Bestrahlungsprogramm des Kernforschungszentrums Karlsruhe nimmt der Bestrahlungsversuch Mol-7A eine Art Zwitterstellung ein. Er steht zwischen den Bestrahlungen einzelner Stabprüflinge, wie sie mit Parametervariation in zahlreichen Kapselversuchsgruppen im FR 2 und im BR 2 durchgeführt wurden [1, 2], und den eigentlichen Bündeltests nach Art des Versuches DFR-350 [3].

Die zu einem Hexagonalbündel zusammengefaßten 7 Stäbe sind identisch hinsichtlich Spezifikation und Fertigung, auch weitgehend in ihrer betrieblichen Beanspruchung im Bestrahlungskanal. Eine Beschränkung liegt aber darin, daß wegen der geringen Stabzahl vornehmlich die "Randeffekte" das Geschehen im Bündel bestimmen. Das durch ein Cadmium-Schild gehärtete Neutronenspektrum stellt ebenfalls einen Kompromiß dar.

Trotzdem kann aber festgestellt werden, daß dieser Bündelversuch bereits alle Züge eines "Brauchbarkeitstests" für Schnellbrüterbrennstäbe mit UO_2 - PuO_2 -Brennstoff in wesentlichen Ansätzen aufwies und eine Menge von Erkenntnissen bezüglich des Stab- und Bündelverhaltens, aber nicht zuletzt auch bezüglich des Brennstoffes und der Hülle selbst brachte.

Dieser Bericht faßt alle Einzelheiten der Auslegung, Spezifikation und Prüflingsherstellung zusammen und beschreibt den tatsächlichen Bestrahlungsablauf sowie die zerstörungsfreie und keramografische Nachuntersuchung in zusammenfassender Dokumentation. Die Zusammenstellung benützt neben den ausdrücklich zitierten Referenzen eine Vielzahl von internen Niederschriften und persönlichen Mitteilungen. Die Hauptarbeit an dem Versuch in all seinen Phasen verteilte sich auf die Jahre 1967 bis 1971, wobei erste Überlegungen bis ins Jahr 1966 zurückreichen. In der nachfolgenden Übersicht ist der Zeitablauf grob dargestellt. Außerdem sind die für jeden Teilaspekt hauptverantwortlichen Stellen bzw. Personen angegeben.

Zeitraum	Teilarbeit	Institution und Hauptbeteiligte
1967	Vorüberlegungen, Verhandlungen mit CEN Mol	IAR, Karsten IRE, Gast, Bojarsky
1967/68	Spezifikationen	IRE, Kleefeldt IAR, Karsten, Laue
1968	Herstellung der Stäbe	IMF, Dippel, Kummerer
1968	Assemblierung des Bündels	CEN Mol
1968/69	Organisation und Betreuung der Bestrahlung	IAR, Karsten, Borkowetz ⁺)
11.9.68 bis 11.9.69	Bestrahlung im BR 2	CEN Mol
1970/71	Organisation und Betreuung der Nachuntersuchung	IMF, Geithoff
1970	Zerlegung des Bündels und zerstörungsfreie Nachuntersuchung der Stäbe	RB/Z, Scheeder, Enderlein
1970	Spaltgasuntersuchungen	RB/CuM, Gräbner
1971	Keramografie in den Heißen Zellen	RB/CuM, Pejsa
1971	Abbrandbestimmungen	IRCH, Wertenbach
1972	Auswertung, Zusammenfassung und Dokumentation	IMF, Kummerer, Geithoff, Weimar

Die Konzipierung dieses Bestrahlungsversuches stand ziemlich am Anfang unseres Bestrahlungsprogramms, wobei der damalige Kenntnisstand und die damaligen experimentellen Randbedingungen maßgebend waren. Nach Erteilung des Projektierungsauftrages für ein 300 MWd-Prototypkernkraftwerk Ende 1966 an ein Industrie-Konsortium wurde dieser Bündelbestrahlungsversuch für die vorbereitenden Arbeiten zum Prototypreaktor SNR-300 auch in der Sicht der Industriepartner aktuell. Seit 1968 sind daher die Firmen Siemens AG. und Interatom GmbH., ab 1969 die Firma Interatom allein beteiligt, wobei die Federführung bei der Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe (GFK) verblieb.

⁺) delegiert von Fa. Interatom

2. Aufgabenstellung und Versuchsziel

In der Bündelbestrahlung Mol-7A kamen Brennstäbe mit UO_2 - PuO_2 -Mischoxid und Edelstahlhülle zum Einsatz. Im Aufbau der Prüflinge sowie in den Bestrahlungsbedingungen wurde eine Simulation der Verhältnisse bei Brennstäben in schnellen Na-gekühlten Reaktoren angestrebt. Insbesondere sollte realisiert werden

- ein integraler Stabaufbau mit Brennstoffzone, Brutstoff und Spaltgasplenum
- ein Stabdurchmesser von 6 mm
- 3 verschiedene hochlegierte austenitische Edelstähle als Hüllwerkstoffe
- funkenrodierte Abstandshalter
- ein Brennstoffgemisch mit repräsentativer UO_2 - PuO_2 -Zusammensetzung
- eine maximale (nominale) Stableistung von 500 W/cm
- eine maximale (nominale) Hüllwandtemperatur von 630°C
- Kühlung durch fließendes Natrium
- ein maximaler Abbrand von 60.000 MWd/t M
- ein durch Cd-Abschirmung gehärtetes Neutronenspektrum.

Die wesentlichen Unterschiede im Vergleich zu echten Schnellbrüter-Brennstäben liegen in folgenden Beschränkungen:

- Die Stablänge ist geringer, Brennstofflänge und Spaltgasraum sind nur etwa halb so lang wie bei den Brennstäben des Prototyp-Reaktors SNR-300 [4]. Beide axiale Brutzonen sind mit je 100 mm Länge erheblich kürzer als im richtigen Brennstab.
- Die nuklearen Verhältnisse sind deutlich verschieden. Das Intensitätsmaximum des Neutronenflusses liegt - infolge der Cd-Abschirmung - zwar im epithermischen Bereich. Der schnelle Flußanteil ist jedoch vergleichsweise gering.
- Die Neutronenschädigung der Metallhülle ist bei weitem nicht so ausgeprägt wie in einem "echten" schnellen Fluß.

- Die Kühlung der Stäbe erfolgt zwar im strömenden Natrium mit der Strömungsrichtung von unten nach oben. Wegen der geringen Stabzahl unterliegen aber fast alle Stäbe hinsichtlich der Strömungs- und Temperaturverteilung den Randeffekten im Bündel.

Die Untersuchungsziele während der Bestrahlung und bei den Nachuntersuchungen sind durch folgende Fragestellungen gegeben:

- Bleiben die Brennstäbe bis zum Zielabbrand intakt ?
- Ändert sich die äußere Geometrie der Stäbe, erfolgt insbesondere eine Hüllaufweitung ?
- Wie ist die radiale und axiale Strukturverteilung im Brennstoff nach der Bestrahlung ?
- Wie bildet sich der Zentralkanal im Brennstoff aus ?
- Wie groß ist die Spaltgasfreisetzung, welcher Anteil bleibt im Brennstoff in geschlossenen Poren oder im Gitter zurück ?
- Wie ist die Verteilung der Spaltprodukte ?
- Zeigen die verschiedenen Hüllmaterialien unterschiedliches Verhalten, gibt es einen Korrosionsangriff von innen her ?
- Wie verhalten sich die Brennstäbe im Kontakt mit den funkenerodierten Abstandshaltern ?

3. Auslegung der Bündelbestrahlung

In diesem Kapitel sind die Festlegungen und Auslegungsrechnungen bei der Versuchsvorbereitung zusammengefaßt. Diese bildeten die Basis für die Konstruktion der Brennstäbe und die Spezifikationen.

3.1 Stab- und Bündelgeometrie

Für die Brennstäbe des Bündels wurde als Außendurchmesser 6 mm festgelegt. Die Länge der Brennstoffzone ist den Verhältnissen im BR 2 und dem zur Bestrahlung vorgesehenen MFBS-Loop^{*)} angepaßt. Diese aktive Länge kann nicht mehr als etwa 500 mm betragen, da bei der angestrebten Stableistung von maximal 500 W/cm die Wärmeleistung des

^{*)}"Manipulation Franco Belge Sodium"

gesamten Bündels sonst zu hoch wird. Die Wärmetauscher des Na-Loops sind auf ca. 160 kW ausgelegt. Die weitere Längenverteilung im Stab orientiert sich an der Schnellbrüter-Auslegungsstudie Na 2 [5]. Damit das Verhältnis Spaltgasraum:Brennstoffvolumen das gleiche wird, ist für den Spaltgasraum im Mol-7A-Stab eine Länge von ca. 350 mm nötig. Die Stablänge soll insgesamt 1100 mm nicht überschreiten wegen des Einbaues in das MFBS-Loop im BR 2. Es bleiben somit ca. 200 mm für axiale Brutzonen - je eine zu 100 mm oberhalb und unterhalb des Brennstoffes - übrig. Um die Brennstoffzone - bei vorgegebener axialer Position des Loops im Reaktor - in das Neutronenflußmaximum zu bringen, ist eine Teilung des Spaltgasraumes nötig.

Im Stabbündel sind 7 Brennstäbe in Hexagonal-Anordnung mit funken-erodierten Abstandshaltern zusammengehalten. Der Stababstand im Bündel beträgt 7,9 mm. Über die Bündellänge verteilt sind 10 Abstandshaltergitter vorgesehen. Das Bündel ist von einem Mantelrohr umgeben.

3.2 Materialauswahl

Als Brennstoff wird mechanisch gemischtes, gesintertes UO_2 - PuO_2 genommen. Der PuO_2 -Gehalt ist 20 %. Der Brutstoff in den Brutzonen ist UO_2 natürlicher Isotopenzusammensetzung. Für das Hüll- und Strukturmaterial gibt es die 3 Edelstahl-Varianten:

- X 8 Cr Ni Mo V Nb 1613, Werkstoff-Nr. 1.4988 (3 Stäbe)
- X 8 Cr Ni Nb 1613, Werkstoff-Nr. 1.4961 (2 Stäbe)
- AISI 316 (2 Stäbe)

Dabei stellt der Edelstahl AISI 316 das Referenzmaterial dar.

3.3 Dichte des Brennstoffes

Als Schmierdichte des Brennstoffes ist 80 % th.D. vorgesehen. Die Tabletten sollen an einer Stirnfläche eine Einsenkung erhalten. Außerdem soll ein diametraler Spalt von 100 bis 200 μ m als Schwellraum zur Verfügung stehen. Nachstehend sind einige mögliche Wertekombinationen aufgeführt. Für die theoretische Dichte des Mischoxids (mit 80 % U-235 im Uran) wird hierbei der Wert $10,97 \text{ g/cm}^3$ angesetzt und für den Hüllinnendurchmesser der Wert 5,24 mm.

Schmierdichte (% th.D.)	Lineare Dichte (g/cm)	Diametraler Spalt (μm)	Materialdichte bei	
			Vollzylinder (% th.D.)	3 Vol.-% Einsenkung (% th.D.)
80	1,893	100	83,16	85,73
		150	84,80	87,43
		200	86,50	89,17
		250	88,24	90,97

3.4 Stableistung, Temperatur, Abbrand

Als Nominalwert der maximalen Stableistung wird 500 W/cm festgelegt. Bei Verwendung eines Cd-Schirmes um den Bestrahlungskanal zur Härtung des Neutronenspektrums ist dann eine U-235-Anreicherung im Uran von 80 % nötig.

Die maximale nominale Hüllwandtemperatur soll 630°C betragen. Als maximale Hüllmittenwandtemperatur ergibt sich daraus 600°C .

Für den maximalen Abbrand wird ein Wert von etwa 60.000 Mwd/t M angestrebt.

3.5 Hüllrohrauslegung und -beanspruchung

Als Wandstärke der Edelstahl-Hüllrohre wird 0,38 mm festgelegt. Bei 6,00 mm Außendurchmesser beträgt der Innendurchmesser dann 5,24 mm. Es soll hier abgeschätzt werden, wie groß der Spaltgasdruck auf die Hülle wird und welche Kriechverformungen dies (maximal) zur Folge hat.

Zuerst ist das freie Volumen innerhalb der Stabhülle zu ermitteln und die jeweils dazugehörige Temperatur. Es ergeben sich folgende Werte [6]:

	Volumen (cm^3)	Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)
Gasplenum oben	4,95	480
Gasplenum unten	1,36	650
Beide Brutzonen	0,24	565
Brennstoffzone	0,62	565
S u m m e	7,17	
Gewichteter Mittelwert		522

Unter der Annahme, daß 0,27 Gasatome pro Spaltung entstehen, ist am Ende der Bestrahlung bis zu 60.000 MWd/t M eine Gasmenge von $0,6 \cdot 10^{-2}$ Mol im Stab vorhanden. Unter der weiteren Annahme, daß das Spaltgas vollständig freigesetzt wird, ergibt sich daraus ein Druckaufbau bis zu etwa 55 atm. Wenn man noch das Füllgas und die im Brennstoff adsorbierten Gase hinzurechnet, kommt man näherungsweise am Ende der Bestrahlung auf einen

- Gesamtdruck von $p_G = 60$ atm.

Dieser Druck baut sich linear mit der Zeit auf. Er hat eine ebenfalls linear ansteigende Tangentialspannung in der Rohrwand zur Folge. Unter Benutzung des Norton'schen Kriechgesetzes und Integration über die veränderliche Kriechgeschwindigkeit ergibt sich die Kriechdehnung nach dem Ausdruck [6]:

$$\epsilon = \frac{K}{n+1} \left(\frac{p_G \cdot r_i}{s} \right)^n \cdot T$$

Zur Auswertung dieser Formel werden als Zahlenwerte benützt:

- Kriechkonstante und Kriechexponent als Mittelwerte aus den Zeitdehngrenzen $\sigma_{1/10\ 000}$ und $\sigma_{1/100\ 000}$
- Enddruck $p_G = 60$ atm
- Hüllinnenradius $r_i = 2,62$ mm
- Wandstärke $s = 0,29$ mm (Mindestmaß abzüglich 50 μ m für Korrosion)
- Bestrahlungszeit $T = 440$ Tage $\approx 10^4$ Stunden.

Tabelle I bringt die benützten Materialwerte und alle Ergebnisse und zwar für

- Fall 1 mit Mittelwerten der Zeitdehngrenze,
- Fall 2 mit Minimalwerten der Zeitdehngrenze, die zu Maximalwerten in der Dehnung führen.

Man sieht, daß bis zu den hier aktuellen Temperaturen von 650°C die Umfangskriechdehnung der Hülle weit unter 0,1 % bleibt.

Tabelle I Umfangskriechdehnung der Hülle

Material	Temperatur (°C)	Fall 1: mit Mittelwerten der Zeitdehnngrenze				Fall 2: mit Kleinstwerten der Zeitdehnngrenze			
		$\sigma_{1/10\ 000^+}$ $\sigma_{1/100\ 000}$ (kp/mm ²)	n	K (mm ²ⁿ /h·kp ⁿ)	ϵ (%)	$\sigma_{1/10\ 000^+}$ $\sigma_{1/100\ 000}$ (kp/mm ²)	n	K (mm ²ⁿ /h·kp ⁿ)	ϵ (%)
Werkstoff- Nr. 1.4961	620	9,7 7,0	7,06	$1,1 \cdot 10^{-13}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$				
	650	8,0 5,5	6,14	$2,9 \cdot 10^{-12}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	6,4 4,4	6,16	$1,1 \cdot 10^{-11}$	$5,1 \cdot 10^{-2}$
	700	5,0 3,0	4,5	$7,1 \cdot 10^{-10}$	$2,6 \cdot 10^{-1}$	4,0 2,4	4,5	$1,9 \cdot 10^{-9}$	$6,9 \cdot 10^{-1}$
Werkstoff- Nr. 1.4988	620	15,9 10,3	5,3	$1,4 \cdot 10^{-13}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$				
	650	12,0 7,5	4,9	$5,0 \cdot 10^{-12}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$	9,6 6,0	4,9	$1,5 \cdot 10^{-11}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$
	700	7,0 4,0	4,12	$3,3 \cdot 10^{-10}$	$6,8 \cdot 10^{-2}$	5,6 3,2	4,1	$8,7 \cdot 10^{-10}$	$2,6 \cdot 10^{-1}$
AISI 316	620	11,0 7,0	5,1	$4,8 \cdot 10^{-12}$	$4,4 \cdot 10^{-3}$				
	650	8,7 5,3	4,65	$4,25 \cdot 10^{-11}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$				
	700	4,9 3,16	5,26	$2,35 \cdot 10^{-10}$	$2,7 \cdot 10^{-1}$				

+) Werte für Edelstähle 1.4961 und 1.4988 aus Stahl-Eisen-Lieferbedingungen, Werkstoffblatt Nr. 670 (1965)

Werte für Edelstahl AISI 316 aus ASTM Data Series Publication DS 5-51, Fig. 53 (1965)

4. Konstruktion der Brennstäbe und Spezifikationen

In diesem Kapitel sind alle Festlegungen für die Konstruktion sowie für die Spezifikationen einschließlich der der Bestrahlung vorausgehenden Prüfungen zusammengefaßt. Der Brennstabaufbau geht aus Abb. 1 hervor, die wichtigsten Spezifikationen sind in nachfolgender Tabelle aufgeführt.

Tabelle II Spezifikationen für die Brennstäbe Mol-7A

Äußere und innere Geometrie	Stablänge	1080 ± 1 mm
	Brennstoffsäule	500 ± 3 mm
	Gesamte Tablettensäule	700 ± 3 mm
	Außendurchmesser	$6,0 \pm 0,03$ mm
	Hüllwandstärke	$0,38 \pm 0,03$ mm
Brennstoff	PuO ₂ -Anteil	20 ± 1 Gew.-%
	U-235 im Uran	$80 \pm 0,2$ Gew.-%
	O/Me-Verhältnis	$1,98 \pm 0,015$
	Tablettendichte	$87,5 \pm 1,5$ % th.D.
	Tablettendurchmesser	$5,1 \pm 0,050$ mm
	Tablettenhöhe	$6,0 \pm 0,5$ mm
Brutstoff	Einsenkung	$3 \pm 0,3$ %
	Tablettendichte	$95 \pm 1,5$ % th.D.
	Tablettendurchmesser	$5,1 \pm 0,050$ mm
	Tablettenhöhe	$6,0 \pm 0,5$ mm
	Gasfüllung	1 atm Helium
Oberflächen- kontamination	Wischtest oberflächlich fixiert	unter der Nachweisgrenze $<22 \alpha$ -Zerfälle/min \cdot cm ²

Die folgenden Abschnitte berichten die Einzelheiten, basierend auf internen Mitteilungen und Notizen [7, 8].

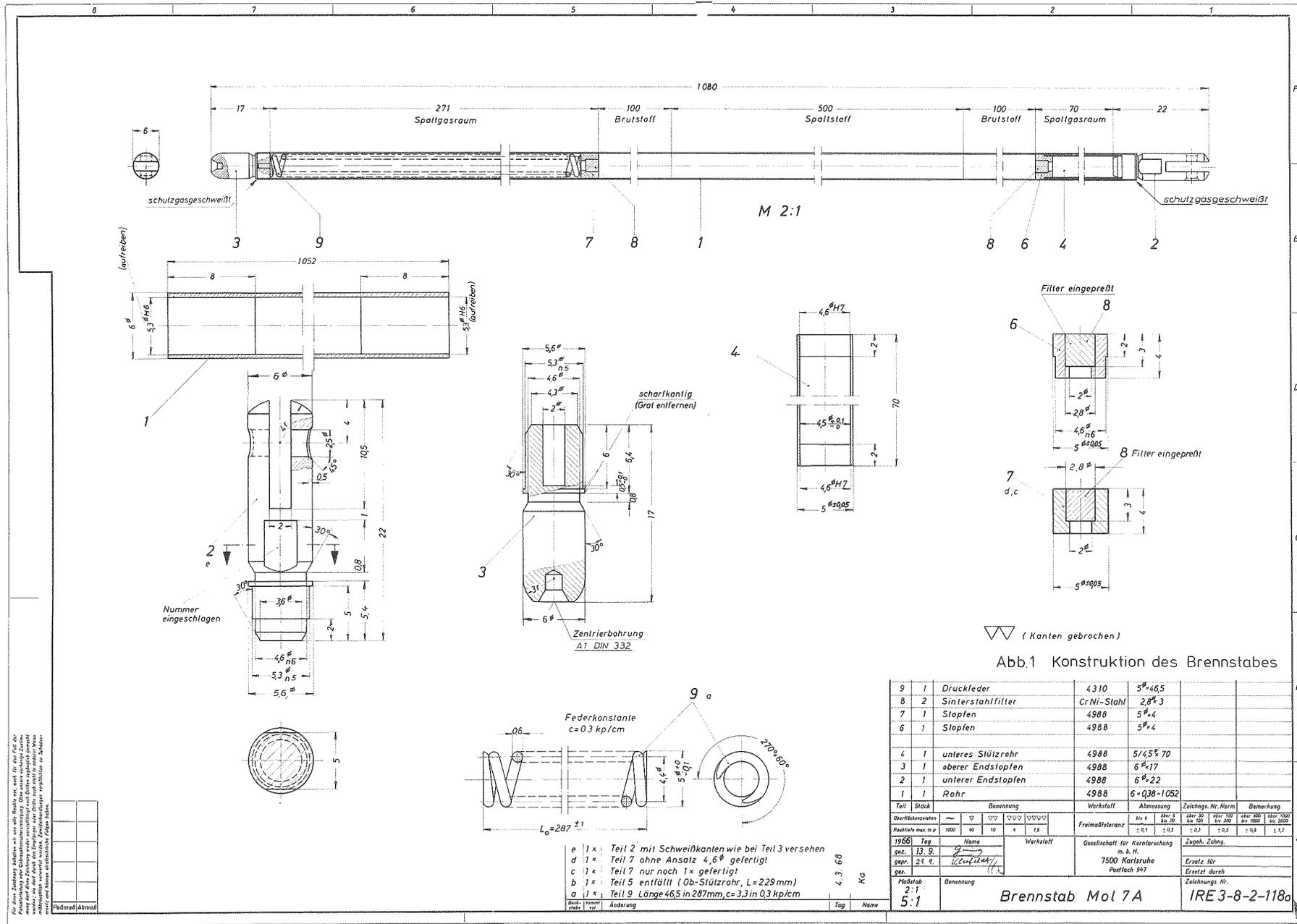
4.1 Der Aufbau der Brennstäbe

Der Brennstab hat bei einer Gesamtlänge von 1080 mm folgende Längenverteilung:

Oberer Endstopfen	17 mm
Spaltgasraum mit Feder und Zwischenstopfen	271 mm
Brutzone	100 mm
Brennstoffzone	500 mm
Brutzone	100 mm
Spaltgasraum mit Stützrohr	70 mm
Unterer Endstopfen	22 mm
<hr/>	
G e s a m t l ä n g e	1080 mm

Die Längenverteilung wurde so gewählt mit Rücksicht auf die axiale Flußverteilung im BR 2. Die Brennstoffzone befindet sich damit im Bereich des Neutronenflußmaximums.

Die Konstruktion des Brennstabes sowie seiner Einzelteile geht aus Abb. 1 hervor. Der Außendurchmesser der Stäbe ist 6,0 mm, die Hüllwandstärke beträgt 0,38 mm. An den unteren Endstopfen schließt ein kleiner Spaltgasraum an, der durch ein Stützrohr gesichert wird. Hierauf folgen untere Brutzone, Brennstoff und obere Brutzone. Der große obere Spaltgasraum enthält eine Druckfeder zur Fixierung der Brennstoff-/Brutstoffsäule bei Handhabung und Transport. An den beiden Grenzen zwischen Spaltgasraum und Brutstoff befindet sich jeweils ein Zwischenstopfen mit einem Sinterstahlfilter, durch den das Spaltgas in die Gasräume gelangen kann. Die Endstopfen haben in der Nähe der Schweißnaht aus schweißtechnischen Gründen eine Nut. Der obere Endstopfen hat zur Führung beim Schweißvorgang eine Zentrierbohrung an der Stirnfläche. Der untere Endstopfen ist speziell zur Fixierung des Stabes im Bestrahlungseinsatz ausgebildet. Er trägt auch die Stabbezeichnung. Beide Endstopfen werden unter Schutzgas mit dem Hüllrohr verschweißt.



▽ (Kanten gebrochen)

Abb.1 Konstruktion des Brennstabes

Teil	Stück	Benennung	Werkstoff	Abmessung	Zeichng. Nr. Norm	Bemerkung
9	1	Druckfeder	4310	5 [#] 46,5		
8	2	Sinterstahlfilter	Cr-Ni-Stahl	2,8 [#] 3		
7	1	Stopfen	4988	5 [#] 4		
6	1	Stopfen	4988	5 [#] 4		
4	1	unteres Stützrohr	4988	5/4,5% 70		
3	1	oberer Endstopfen	4988	6 [#] 17		
2	1	unterer Endstopfen	4988	6 [#] 22		
1	1	Rohr	4988	6 × 0,38-1 052		

Teil	Stück	Benennung	Werkstoff	Abmessung	Zeichng. Nr. Norm	Bemerkung
1	1	Rohr	4988	6 × 0,38-1 052		

1968	Tag	Name	Werkstoff	Gezeichnet für Kernforschung	Zugab. Zeichn.
gez.	13. 9.			Gesellschaft für Kernforschung	
gepr.	21. 9.			7500 Karlsruhe	Ersatz für
gez.				Postfach 947	Ersatz durch

Maßstab	Benennung	Zeichnungs Nr.
2:1	Brennstab Mol 7A	IRE 3-8-2-118a

Blatt	Form	Änderung	Tag	Name
5	1			

Die diese Zeichnung ablesende Person...
 Padmas Abmad

4.2 Brennstoffspezifikationen

Der Brennstoff ist aus UO_2 und PuO_2 durch mechanisches Mischen, Pressen zu Tabletten und Sintern herzustellen.

4.2.1 Chemische Zusammensetzung

- Der Mischoxidbrennstoff besteht aus 20 ± 1 Gew.-% PuO_2 und 80 Gew.-% UO_2 .
- Stöchiometrie des Mischoxids $O/M = 1,98 \pm 0,015$.
- Der Gesamtgehalt an Verunreinigungen soll 2500 ppm (entsprechend 4 ppm Boräquivalent) nicht übersteigen mit folgenden Einschränkungen:

Verunreinigung	Grenzwert (ppm)
C	150
Ca	25
Cl	25
F	25
Mg	25
N	100
H ₂ O	100

- Der gesamte Gasgehalt soll nicht höher als $0,1 \text{ Norm-cm}^3$ pro Gramm Brennstoff sein bei einer Freisetzungstemperatur von 1600°C .

4.2.2 Isotopenzusammensetzung

- Die Pu-Zusammensetzung ist spezifiziert zu
 - Pu-239: $90,90 \pm 0,20$ Gew.-%
 - Pu-240: $8,21 \pm 0,20$ Gew.-%
 - Pu-241: $0,85 \pm 0,05$ Gew.-%
 - Pu-242: $0,04 \pm 0,01$ Gew.-%
- Die U-Zusammensetzung ist:
 - U-235: $80 \pm 0,2$ Gew.-%
 - U-238: $20 \pm 0,2$ Gew.-%

4.2.3 Homogenität im Mischbrennstoff

Die größten PuO_2 -Partikel dürfen einen Durchmesser nicht über 100 μm haben.

4.2.4 Brennstoff-Form

Es kommen zylindrische Tabletten mit einseitiger Stirnflächeneinsenkung (dishing) zum Einsatz.

4.2.5 Brennstoffdichte

Die Materialdichte der Tabletten ist festgelegt zu $87,5 \pm 1,5 \%$ th.D.

4.2.6 Tablettengeometrie

- Tablettendurchmesser $5,10 \pm 0,05$ mm
- Tablettenhöhe $6,00 \pm 0,5$ mm
- Stirnflächeneinsenkung $3,00 \pm 0,3 \%$ des Tablettenvolumens.

4.2.7 Oberfläche der Tabletten

Auf den Oberflächen der Tabletten sind höchstens folgende Unregelmäßigkeiten zulässig:

- Kantenabplatzungen bis 0,3 mm Ausdehnung
- Risse von maximal 2 mm Länge und 0,1 mm Weite
- Flächenabplatzungen bis 1 mm Durchmesser.

4.2.8 Prüfungen am Brennstoff

Folgende Ausgangs-, Zwischen- und Endprüfungen müssen durch Protokolle belegt werden:

- BET-Oberfläche des Ausgangspulvers
- Stöchiometrie am Ausgangspulver und an fertigen Tabletten
- Größe der Primärpartikel und der Sekundäraggregate
- Mischungsverhältnis
- Chemische Analyse auf Verunreinigungen
- Isotopenanalyse
- Durchmesser, Höhe und Dichte an jeder 5. Tablette in einer Säule
- Fotografische Aufnahmen von Tablettenstirnflächen ohne und mit Einsenkung
- Schliffbilder in 200-facher Vergrößerung von Tablettenrand und -zentrum.

4.3 Spezifikationen für den Brutstoff

Die Brutstofftabletten bestehen aus UO_2 mit Natururan. Ihre Geometrie entspricht den Spezifikationen bei den Mischoxid-Tabletten. Abweichend vom Brennstoff ist beim Brutstoff die Materialdichte spezifiziert zu $95,0 \pm 1,5$ % th.D. Alle sonstigen Forderungen entsprechen den Brennstofftabletten.

4.4 Spezifikationen für die Hülle

4.4.1 Werkstoffe

Für die Hüllrohre und Endstopfen ist austenitischer Edelstahl nach 3 Werkstofftypen vorgesehen, nämlich

- X8CrNiMoVNb 1613, Werkstoff-Nr. 1.4988
- X8CrNiNb 1613, Werkstoff-Nr. 1.4961
- AISI 316

Die chemische Zusammensetzung ist in Tabelle III angegeben.

Tabelle III Chemische Zusammensetzung der Hüllwerkstoffe (Gew.-%)

Werkstoff-Nr.	Richtanalysen		Analyse n. Zeugnis
	1.4988	1.4961	AISI 316
C	$\leq 0,1$	$< 0,1$	0,05
Cr	15,5 - 17,5	15,0 - 17,0	16,88
Ni	12,5 - 14,5	12,0 - 14,0	13,30
Mo	1,1 - 1,5	-	2,34
V	0,6 - 0,85	-	Spuren
Nb + Ta	> 10 x % C < 10 x % C+0,4 max. 1,2	> 10 x % C < 10 x % C+0,4 max. 1,2	0
Si	0,3 - 0,6	0,3 - 0,6	0,48
Mn	1,0 - 1,5	1,0 - 1,5	1,81
N	0,1	-	0,014
P	$\leq 0,02$	$\leq 0,02$	0,012
S	$\leq 0,02$	$\leq 0,02$	0,04
Fe	Rest	Rest	Rest

4.4.2 Abmessungen der Hüllrohre

- Außendurchmesser: $6,00 \pm 0,03$ mm
- Innendurchmesser: $5,24 \pm 0,03$ mm
- Wanddicke: $0,38 \pm 0,03$ mm
- Geradheit: 1:1500, bezogen auf jeweils 30 cm Länge
- Ovalität: innerhalb der Außendurchmessertoleranz
- Wanddicken-Exzentrizität: $\leq 0,02$ mm, bezogen auf die Wanddicke

4.4.3 Materialbedingungen

- Vorbehandlung:
 - bei 1.4988 lösungsgeglüht 1100°C , kaltverformt 5 - 7 %, angelassen 1 h/ 800°C ,
 - bei 1.4961 lösungsgeglüht 1100°C , kaltverformt 5 - 7 %, bei AISI 316 lösungsgeglüht, kaltverformt 10 - 15 %.
- Korngröße: kleiner $2,5$ Körner/ cm^2 bei 100-facher Vergrößerung (ASTM Nr. 5)
- Mechanische Eigenschaften:
 - Nachweise für Zugfestigkeit, Streckgrenze und Bruchdehnung, maximale und minimale Werte bei Raumtemperatur und 650°C .
 - Nachweise für Abdruckversuch nach DIN 50104 mit 80 at Druck, Querfaltversuch nach DIN 50136, Aufweitversuch nach DIN 50135.
- Innere Fehler: kleiner 10 % der Wandstärke
- Einschlüsse: kleiner 0,05 mm oder 10^{-3} mm^2

4.4.4 Hüllrohroberfläche

- Rauigkeit: maximal 2 μm
- Oberflächenriefen und -fehler: maximal 20 μm oder kleiner 5 % der Wandstärke
- Oberflächenrisse: nicht zulässig
- Oberflächenbeschaffenheit: Innere und äußere Oberfläche muß frei von Anlauffarben, Öl, Schmutz, Metallspänen und sonstigen Fremdkörpern sein.

4.4.5 Hüllrohrprüfungen und Prüfzeugnisse

Die Rohre müssen nach einem einheitlichen Schema durchgehend nummeriert werden, wobei die Numerierung an der Stelle des Prüfbeginns der Ultraschallprüfung mit Aufklebestreifen licht- und waschecht anzubringen ist. Für jedes Rohr wird ein Prüfzeugnis erstellt. Die Prüfzeugnisse des Herstellerwerkes müssen den Werksabnahmezeugnissen nach DIN 50049/3B entsprechen und von unabhängigen Sachverständigen durchgeführt werden.

- Werkstoff: Chemische Analyse entsprechend Werksabnahmezeugnis

- Abmessungen:

Außendurchmesser mit geeigneten optischen oder mechanischen Verfahren.

Innendurchmesser mit einer pneumatischen Innendurchmesserprüfanlage über die ganze Rohrlänge.

Wanddicke mit Ultraschall-Vidigage-Verfahren.

Geradheit mit einem geeigneten mechanischen Verfahren, z.B. Drehen der Rohre in Rollenlagern und Messung der Abweichungen mit einer 1/100 mm-Meßuhr.

Ovalität mit einem pneumatischen Verfahren in Verbindung mit der Innendurchmesserprüfung.

Wanddicken-Exzentrizität mit Ultraschall-Vidigage-Verfahren, drei Messungen pro Rohr, in jeweils 30 cm Abstand.

- Materialbedingungen:

Vorbehandlung, bestätigt im Werksabnahmezeugnis.

Korngröße, metallografisch, Vergrößerung 100-fach (nach ASTM) an mindestens zwei Rohren pro Charge und Lot.

Mechanische Eigenschaften, Zugversuch, Verformungsgeschwindigkeit 0,1/min, Aufnahme eines Spannungs-Dehnungsdiagramms an mindestens 5 % der Rohre.

Innere Fehler mit Ultra-Schall-Vidigage-Verfahren.

Einschlüsse mit Ultra-Schall-Vidigage-Verfahren.

- Oberflächenbeschaffenheit:

Rauhigkeit, Prüfung mit Perth-O-Meter an einzelnen Rohren.

Oberflächenriefen und -fehler, Prüfung mit Ultraschall-Vidigage-Verfahren in Längs- und Querrichtung mit vorgegebenen Testfehlern.

Oberflächenrisse, Prüfung mit Farbeindringverfahren Diffutherm.

Oberflächengüte mit geeignetem optischen Verfahren, z.B. ausgeleuchteter Großflächenlupe bzw. Lichtschnittmikroskop.

4.5 Spezifikationen für den Brennstab

4.5.1 Brennstoff- und Brutstoffsäule im Stab

- Länge der Brennstoffsäule: 500 ± 3 mm
- Gesamtlänge der Tablettensäule: 700 ± 3 mm

4.5.2 Weitere Stabkomponenten

- Hüllrohr: spezifiziert in 4.4, Maße siehe Zeichnung in Abb. 1, Teil 1.
- Endstopfen: Material identisch zum Hüllrohr, Maße siehe Zeichnung in Abb. 1, Teile 2 und 3.
- Stützrohr im unteren Spaltgasraum: Material identisch zum Hüllrohr, Maße siehe Zeichnung in Abb. 1, Teil 4.
- Zwischenstopfen: Material identisch zum Hüllrohr, Maße siehe Zeichnung in Abb. 1, Teile 6 und 7.
- Sinterstahlfilter: Material Cr-Ni-Stahl, Maße siehe Zeichnung in Abb. 1, Teil 8.
- Druckfeder: Material der Werkstoff-Nr. 1.4310, Maße siehe Zeichnung in Abb. 1, Teil 9, Federkonstante 0,3 kp/cm.

4.5.3 Stabgeometrie

Länge des fertigen Stabes: 1080 ± 1 mm

4.5.4 Gasfüllung der Stäbe

Das Füllen des Brennstabes mit Brennstoff und die Montage der oberen Einbauteile geschehen unter Normaldruck mit Helium. In dieser Atmosphäre wird der obere Endstopfen aufgedrückt. Dann wird der Stab in eine Schweißkammer überführt.

4.5.5 Schweißnähte

Die Schweißungen erfolgen unter Schutzgasatmosphäre. Die Schweißverbindung zwischen dem unteren Endstopfen und der Hülle erfolgt nach Einbau des Stützrohres. Der Durchmesser der unteren Schweißnaht muß $\leq 6,05$ mm sein, bei der oberen Schweißnaht soll er 6,15 mm nicht überschreiten. Vor dem Schweißen der Brennstäbe muß die Güte der Schweißung durch Probeschweißungen nachgewiesen werden, von denen anschließend Röntgenaufnahmen und Querschliffe anzufertigen sind. Anhand der Querschliffe wird der Härteverlauf quer zur Naht (also in Achsrichtung des Stabes), die Schweißnahttiefe sowie auf Poren, Risse und Anlauffarben geprüft.

4.5.6 Dichtheit der fertigen Stäbe

Zum Nachweis der Dichtheit der Schweißnähte ist jeder Brennstab im Anschluß an die letzte Schweißung einem Helium-Dichtheitstest unter äußerem Vakuum zu unterziehen. Die Empfindlichkeit des Meßgerätes muß 10^{-9} Torr-liter/sec pro Skalenteil sein. Die Prüfung gilt als bestanden, wenn kein Zeigerausschlag des Meßinstrumentes erfolgt.

4.5.7 Kontamination

Die Oberflächenkontamination darf nicht mehr betragen als

$$\begin{array}{l} 22 \quad \alpha\text{-Zerfälle pro cm}^2 \text{ und Minute und} \\ 220 \quad \beta\text{-Zerfälle pro cm}^2 \text{ und Minute.} \end{array}$$

Diese Kontamination ist als obere Grenze für haftende Verunreinigungen zu betrachten. Der Wischtest dagegen soll keine Kontamination zeigen.

4.5.8 Kennzeichnung der Stäbe

Die Bezeichnung der Stäbe erfolgt an einer speziell dafür vorgesehenen Fläche am unteren Endstopfen mit Schlagzahlen und Buchstaben, fortlaufend von 7A-1 bis 7A-9.

4.5.9 Prüfungen an den fertigen Stäben

Folgende Prüfungen müssen durch Protokolle und Zertifikate belegt werden:

- Gesamtlänge
- Durchmesser am Hüllrohr, an den Endstopfen, an den Schweißnähten
- Durchbiegung und Rundheit, profilometrisch
- Gewicht
- Dichtheit
- Röntgen-Aufnahmen von den Schweißnähten und vom gesamten Stab
- Probeschweißungen mit mikrografischer Untersuchung
- Kontamination der Oberfläche

5. Herstellung der Brennstäbe

Die 7 Stäbe des Bündels haben gleichen Aufbau und gleiche äußere Abmessungen. Es gibt nur die Variation hinsichtlich des Hüllwerkstoffes. Insgesamt sollten 10 Stäbe hergestellt werden, 7 Stück für den Einsatz im Bündel und 3 als Reserve. Tatsächlich hergestellt wurden nur 9 Stäbe mit der Bezeichnung 7A-1 bis 7A-9. Davon waren 7 Stück für den Einsatz im Bündel bestimmt, 2 Stück dienten als Reserve. Tabelle IV zeigt die Zuordnung des Hüllmaterials sowie die Auswahl der zur Bestrahlung kommenden Stäbe.

Tabelle IV Bezeichnung und Verwendung der Brennstäbe

Brennstab-Nr.	Hüllwerkstoff	Verwendung
7A-1	1.4988	Bündel
7A-2	1.4988	Reserve
7A-3	1.4988	Bündel
7A-4	1.4961	Bündel
7A-5	1.4961	Bündel
7A-6	AISI 316	Bündel
7A-7	AISI 316	Bündel
7A-8	1.4961	Reserve
7A-9	1.4988	Bündel

Die Herstellung der Stäbe erfolgte im Plutonium-Laboratorium des Kernforschungszentrums Karlsruhe nach den in Kap. 4 gegebenen Spezifikationen. Die Hüllrohre wurden von der Fa. Siemens, Erlangen, beigestellt und geprüft. Die folgenden Abschnitte dieses Kapitels geben als Auszug aus dem Herstellungsbericht [9] die näheren Einzelheiten der Brennstoffherstellung und der Stabfertigung wieder einschließlich der Zwischen- und Endprüfungen.

Es sei hier bereits darauf hingewiesen, daß einige Spezifikationen nicht eingehalten werden konnten. So mußte z.B. auf die Stirnflächeneinsenkung der Tabletten verzichtet werden, da das erforderliche Preßwerkzeug nicht zeitgerecht beschafft werden konnte. Weitere Einzelheiten hierzu sind in Abschnitt 5.7 dargelegt.

5.1 Ausgangspulver für Brennstoff und Brutstoff

Als oxidische Ausgangspulver standen zur Verfügung:

- a) UO_2 mit Natururan, ADU-gefällt, von Fa. NUKEM
- b) UO_2 mit 93% angereichertem Uran, konvertiert von Fa. NUKEM aus UF_6 , das von der USAEC stammte
- c) PuO_2 mit nominell 7,7% Pu-240, oxalatgefällt, aus einer Lieferung der USAEC

Die genaue Isotopenzusammensetzung des angereicherten UO_2 und des PuO_2 ist in Tabelle V angegeben. Tabelle VI enthält die chemischen Verunreinigungen der Ausgangspulver. Um die spezifische Oberfläche dieser Pulversorten stark zu verringern, wurden sie kalziniert. PuO_2 wurde zu diesem Zweck 2 Stunden lang unter CO_2 auf $1100^\circ C$ erhitzt, die Uranoxide 2 Stunden lang unter Argon/5 % H_2 auf $1250^\circ C$. Die dadurch eingestellte BET-Oberfläche und das Sauerstoff/Metall-Verhältnis dieser sinterfähigen Pulver ist in Tabelle VII aufgeführt. Es waren insgesamt ca. 1000 Tabletten herzustellen. Die Mischung der Ausgangspulver erfolgte hierbei mechanisch in einem Lödige-Mischer in einer Charge, Mischzeit 2 Stunden. Hierfür ist das Mischprotokoll in Tabelle VIII angegeben. Das fertig gemischte Pulver wurde dann auf den Pu-Gehalt und auf die U-235-Anreicherung analysiert, Ergebnisse siehe Tabelle IX.

Tabelle V Isotopenzusammensetzung der Ausgangspulver für den Brennstoff

<u>Uran mit nominell 93 % Anreicherung</u>			
U-235-Gehalt laut Angabe des Lieferanten (USAEC/NUKEM): 93,183 Gew.-%			

<u>Pu mit nominell 7,7 % Pu-240</u>			
Die Pu-Zusammensetzung wurde in Hanford/USA und in Karlsruhe bestimmt (Angaben in Gew.-%)			
	Hanford/USA	Karlsruhe	
		Messung 1966	Messung 1968
Pu-239	90,845	90,850	90,96
Pu-240	8,301	8,240	8,18
Pu-241	0,813	0,867	0,82
Pu-242	0,040	0,044	0,04
S u m m e :	99,999	100,001	100,00

Tabelle VI Chemische Verunreinigungen der Ausgangspulver
(Angaben in ppm)

Element	UO ₂ mit Natururan	UO ₂ -anger. mit 93 % U-235	PuO ₂ mit 7,7 % Pu-240
Ag	< 10	0,7	-
B	< 0,5	0,18	≪ 10
C	200	40	-
Ca	< 10	< 20	170
Cd	< 1	< 0,07	-
Cl	-	< 3	-
Co	-	-	-
Cr	< 5	210	35
Cu	< 1	3,0	5
F	-	8,0	-
Fe	10	145	85
Mg	5	0,5	15
Mn		-	25
Mo	< 10	< 1,0	< 5
N	-	< 3,0	-
Ni	< 5	330	30
Pb	< 5	< 1,0	30
V	< 5	-	nicht nachweisbar

Tabelle VII Kenndaten der sinterfähigen Pulver

Material	Für Brennstoff			Für Brutstoff
	UO ₂ mit Natururan	UO ₂ mit 93 % U-235	PuO ₂ mit 7,7 % Pu-240	UO ₂ mit Natururan
Vorbehandlung	kalziniert	kalziniert	kalziniert	nicht kalziniert
BET-Oberfläche (m ² /g)	1,61	1,93	2,41	5,61
O/Me- Verhältnis	1,99	2,00	1,98	2,04
Maximale Teil- chengröße (mm)	0,063	0,063	0,032	0,063

Tabelle VIII Mischprotokoll für den Brennstoff

Hierbei wurde der Metallanteil mit 88,1 Gew.-% für alle Mischkomponenten als gleich angenommen

Mischkomponenten		Me-Anteil	
K_a	UO ₂ , Natururan mit 0,721 % U-235	88,1 Gew.-% U	
K_b	UO ₂ mit 93,183 % U-235	88,1 Gew.-% U	
K_{Pu}	PuO ₂	88,1 Gew.-% Pu	
Mischansatz für UO ₂		Oxid	
			U-235 U-238
K_a		119,68 g	0,760 g 104,678 g
K_b		719,57 g	590,725 g 43,216 g
$K_U = K_a + K_b$		839,25 g	591,485 g 147,894 g
Mischansatz für UO ₂ -PuO ₂		Oxid	
			U Pu
K_U		838,8 g	738,983 g
K_{Pu}		209,7 g	184,746 g
$K_M = K_U + K_{Pu}$		1048,5 g	738,983 g 184,746 g
Rechnerische Ergebnisse			
K_U	U-235-Anreicherung	79,998 Gew.-%	
K_M	$\frac{Pu}{U + Pu}$	20,000 Gew.-%	

Tabelle IX Analyse der Brennstoff-Pulvermischung

Isotopenanalyse des Urans an 2 Proben (Gew.-%) vor dem Mischen mit PuO ₂			
	Probe I	Probe II	
U-234	0,67	0,67	
U-235	80,08	80,06	
U-236	0,19	0,19	
U-238	19,05	19,07	
Chemische Analyse auf den Pu-Gehalt an 3 Proben (Gew.-%) nach dem Mischen			
	Probe I	Probe II	Probe III
$\frac{Pu}{U + Pu}$	20,24	20,37	20,49

5.2 Herstellung der Brennstoff-Tabletten

Die Pulvermischung konnte trocken, d.h. ohne Zugabe von Binde- und Gleitmitteln nicht verpreßt werden. Daher wurde sie unter Zusatz von 1,2 Gew.-% Polyvinylalkohol in wässriger Lösung und 1,0 Gew.-% Stearinsäure in alkoholischer Lösung im Lödige-Mischer granuliert. Nach dem Trocknen bei ca. 50°C wurde das Granulat durch ein Sieb mit 0,25 mm Maschenweite gestrichen, um es für den Preßvorgang vorzubereiten. Zum Pressen verwendete man eine Matrize mit 6,20 mm Durchmesser. Nach Volumendosierung des Pulvers erfolgte der Preßvorgang bei einem Preßdruck von 0,4 - 0,75 t/cm². Die Grünlinge wurden anschließend stichprobenweise hinsichtlich ihrer Dimensionen und ihres Gewichtes überprüft. Die Sinterung erfolgte in einem Stickstoff-Gasgemisch mit 8 % H₂ bei 1570°C, die Sinterzeit war 2 Stunden.

Die Meßergebnisse an den fertigen Tabletten auf Dichte und Geometrie sind bei der Zusammenstellung der Tablettensäulen (siehe 5.5) aufgeführt. Zur Charakterisierung der Brennstoffstruktur wurde von der Stirnseite einer repräsentativen Brennstofftablette ein keramografischer Schliff angefertigt (Schleiftiefe ca. 1 mm). Abb. 2 zeigt eine Autoradiografie dieses Schliffes, woraus hervorgeht, daß die PuO₂-Partikel (weiß) mit wenigen Ausnahmen kleiner als 100 µ sind. Die Abb. 3 und 4 bringen Schliffaufnahmen für eine Partie im Zentrum der Schlifffläche bzw. am Tablettenrand.

An mehreren Brennstofftabletten wurden schließlich chemische und Isotopenanalysen durchgeführt, Ergebnisse siehe Tabelle X. Nachdem bei der Untersuchung der ersten Tablette (A) im U-235-Gehalt eine wesentliche Abweichung festgestellt werden mußte, wurden noch an 2 weiteren Tabletten (B und C) Uran-Isotopenanalysen durchgeführt. Diese haben den Befund an der Tablette A bestätigt. Es ist ungeklärt, woher die Diskrepanz kommt. Eventuelle Meßfehler würden allenfalls eine Abweichung im U-235-Gehalt von ± 0,2 Gew.-% erklären.

5.3 Herstellung der Brutstoff-Tabletten

Der Herstellungsgang ist analog dem Verfahren bei den Brennstofftabletten. Allerdings wurde das UO₂-Ausgangspulver nicht kalziniert, da die Brutstofftabletten eine höhere Sinterdichte erreichen müssen, siehe Kenndaten in Tabelle VII. Zunächst wurde das Natururanoxidpulver

Abb.2
Autoradiographie einer
Brennstofftablette

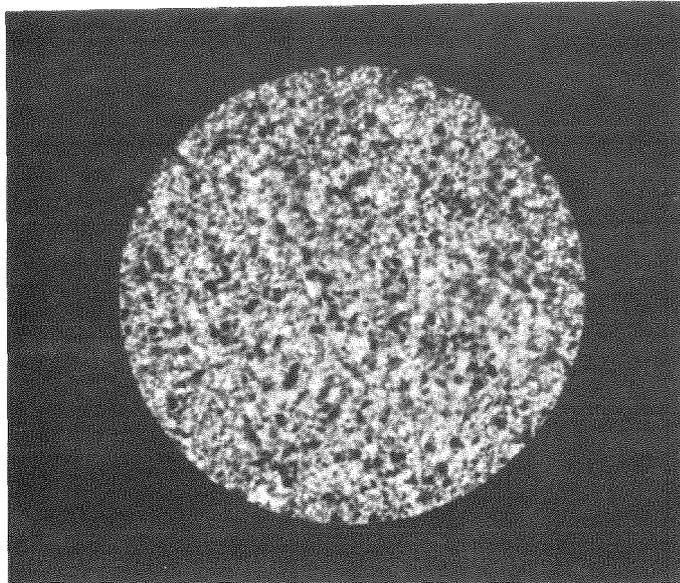


Abb.3
Schliffaufnahme vom
Zentrum der Tablette

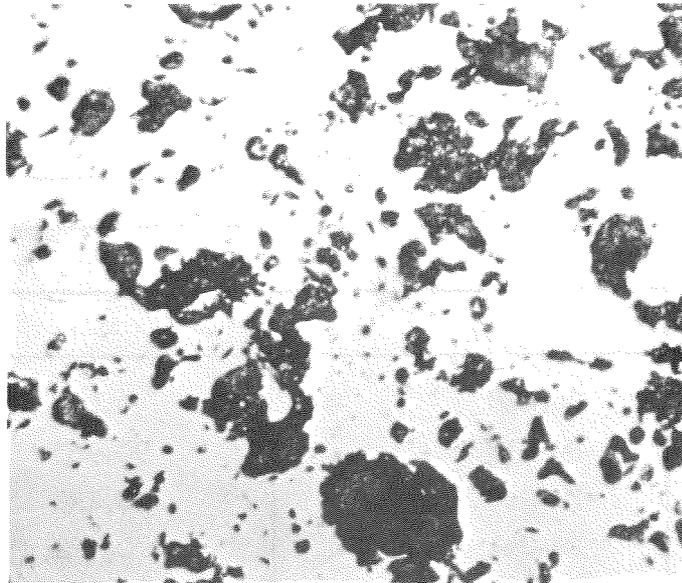
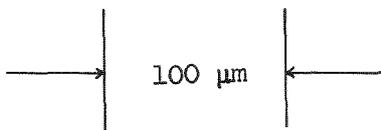


Abb.4
Schliffaufnahme vom
Tablettenrand

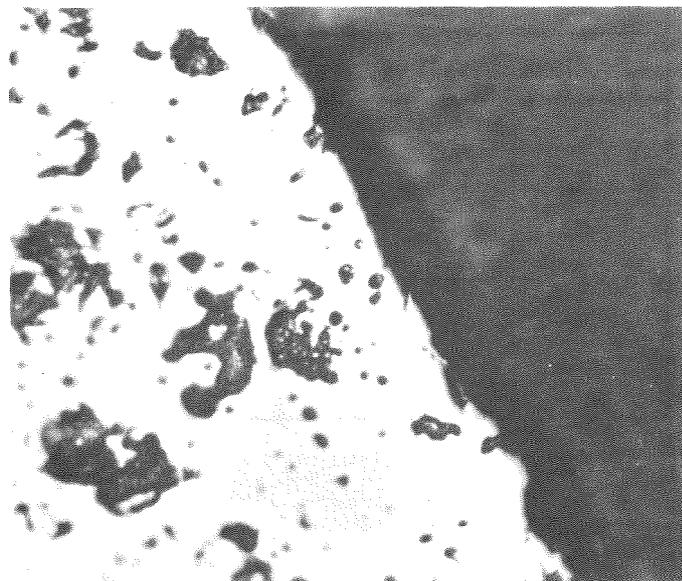
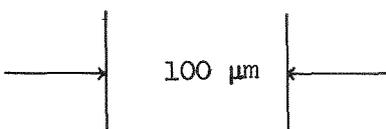


Tabelle X Analysen an Brennstofftabletten

1. U-Isotope im Uran (Gew.-%)					
	A (1. Messung)	A (2. Messung)	B	C	
U-234	0,674	0,668	0,659	0,662	
U-235	79,050	79,150	78,976	78,960	
U-236	0,196	0,197	0,194	0,192	
U-238	20,080	20,000	20,171	20,186	
2. Pu-Gehalt					
$\frac{\text{Pu}}{\text{U} + \text{Pu}} = 20,03 \text{ Gew.-%}$					
3. Pu-Isotope im Plutonium					
	B		C		
Pu-238	0,025		0,018		
Pu-239	90,963		90,951		
Pu-240	8,249		8,253		
Pu-241	0,722		0,738		
Pu-242	0,041		0,040		
4. Chemische Verunreinigungen (ppm)					
C	65	Ag	< 10	Fe	350
Ca	100	B	< 0,5	Mn	30
Cl	-	Cd	< 1	Mo	< 10
F	-	Co	-	Ni	110
Mg	50	Cr	110	Pb	< 5
		Cu	< 1	V	< 5

auf einem Sieb mit 0,063 mm Maschenweite abgeseibt. Das Granulieren, Trocknen, Pressen und Sintern erfolgte im Prinzip wie bei den Brennstofftabletten, dagegen war die Sintertemperatur 1600°C. Die Tabletten- und Säulendaten sind wieder bei den Tablettensäulen in 5.5 aufgeführt.

5.4 Hüll- und Strukturmaterial

Zur Stabherstellung wurden insgesamt 14 Hüllrohre in den spezifizierten Abmessungen bereitgestellt, nämlich

- 5 Stück der Werkstoff-Nr. 1.4988 (Lieferer Mannesmann)
- 4 Stück der Werkstoff-Nr. 1.4961 (Lieferer Mannesmann)
- 5 Stück aus Werkstoff AISI 316 (Lieferer Accles u. Pollock)

Alle Rohre trugen eine Nummern- und Buchstabenbezeichnung. Mit Ausnahme von 2 Rohren aus AISI 316 entsprachen alle Rohre den Spezifikationen. Dies wurde durch Ultraschall-Rißprüfung sowie durch Innen- und Außendurchmesserprüfung nachgewiesen. Die ausgewählten Hüllrohre sowie ihre Zuordnung zu den Stäben ist in Tabelle XI angeführt. Dort sind außerdem die Ergebnisse der von der Fa. Siemens, Erlangen, durchgeführten Rohrprüfung eingetragen.

Für die End- und Zwischenstopfen sowie für das Stützrohr wurde jeweils das gleiche Material gewählt wie für das Hüllrohr. Die Stopfen wurden aus Rundmaterial gedreht.

Die Druckfeder sowie die beiden Sinterstahlfilter waren ebenfalls spezifikationsgerecht.

5.5 Tablettensäulen

Die Tablettensäule jedes Brennstabes setzt sich aus 90 (bei Stab 7A-2 aus 89) Brennstofftabletten zusammen. Die Zusammenstellung der Tablettensäulen ist durch die Datenlisten in den Tabellen im Anhang I charakterisiert. Entsprechend den Forderungen der Spezifikation wurden Dichte, Höhe und Durchmesser an jeder fünften Tablette ermittelt. Dazu sind in den Listen der einzelnen Säulen die Einzelwerte angegeben. Die Lage der geprüften Tabletten ist hierbei von oben gezählt.

Tabelle XI Hüllrohre und Hüllrohrprüfung

Stab-Nr.	Hüllmaterial	Hüllrohr-Nr.	Wanddicke (mm)		Innendurchmesser (mm)		Außendurchmesser (mm)	
			spez.: $\geq 0,38 \pm 0,03$ max.	min.	spez.: $5,24 \pm 0,03$ max.	min.	spez.: $6,00 \pm 0,03$ max.	min.
7A-1	1.4988	221 B/a	0,396	0,384	5,250	5,243	6,002	5,993
7A-2	1.4988	214 B/a	0,388	0,371	5,248	5,241	6,002	5,992
7A-3	1.4988	211 B/b	0,392	0,374	5,245	5,239	6,003	5,994
7A-4	1.4961	143 B/a	0,357	0,342	5,273	5,256	5,982	5,965
7A-5	1,4961	701 B/a	0,389	0,364	5,249	5,240	6,001	5,992
7A-6	AISI 316	55 b	0,409	0,372	5,259	5,251	6,017	5,996
7A-7	AISI 316	56 b	0,405	0,375	5,256	5,250	6,013	6,002
7A-8	1.4961	685 B/a	0,386	0,378	5,246	5,236	6,006	5,996
7A-9	1.4988	294 B/b	0,396	0,378	5,244	5,235	6,000	5,990

Gewicht, Säulenhöhe, Durchmesser und Dichte sind sowohl für den Brennstoff als auch für den Brutstoff durch Mittelung berechnet worden. Dabei liegen beim Brennstoff die 18 (bzw. 17 in Stab 7A-2) ausgemessenen Tabletten zugrunde, beim Brutstoff die jeweils 3 ausgemessenen Tabletten (Einzelangaben in den Listen im Anhang I). Die sich so ergebenden Gesamtwerte sind in den Tabellen XII und XIII zusammengefaßt. Tabelle XII enthält außerdem den Pu-Gehalt und den U-235-Gehalt der Brennstoffsäulen. Als Faktoren wurden für die Umrechnung von PuO_2 auf Pu der Wert 0,882, für die Umrechnung von UO_2 auf U der Wert 0,874 benützt.

Zur Kontrolle der berechneten Säulenhöhen wurde bei den Brutstoffsäulen die Einzelhöhe aller Tabletten gemessen und addiert. Es zeigte sich gute Übereinstimmung mit den Rechenwerten. Bei den Brennstoffsäulen konnte das berechnete Säulengewicht durch einige Kontrollwägungen gut bestätigt werden.

5.6 Fertigung der Stäbe und Prüfungen

5.6.1 Einfüllen und Verschweißen der Stäbe

Die neun Brennstäbe tragen die Bezeichnung 7A-1 bis 7A-9, mit Schlagziffern eingestanzt am unteren Endstopfen. Die Hüllrohre wurden so orientiert, daß ihr Ende mit der Rohrnummer an das obere Stabende kam. Die Zuordnung der Stabnummern zu den Rohrnummern bzw. zum Hüllrohrmaterial ist aus Tabelle XI zu ersehen.

Zur Stabfertigung wurde zuerst der untere Endstopfen unter Helium-Schutzgas in das Hüllrohr eingeschweißt. Dann wurden das untere Stützrohr, der Zwischenstopfen und das Sinterstahlfilter eingesetzt. Beim Füllen der Hüllrohre mit Brenn- und Brutstoff wurden die einzelnen Tabletten der betreffenden Tablettensäule durch eine am Rohrende angebrachte Schutzkappe eingeschoben, nachdem sie vorher über einer Staubsaugerdüse abgepinselt worden waren. Nach dem Einfüllen wurde die Schutzkappe entfernt, der obere Zwischenstopfen mit Sinterstahlfilter sowie die Druckfeder eingeführt und das Rohr mit einer Vakuumkammer verbunden. Nun folgte zweimaliges Evakuieren auf ca. 1 Torr und Fluten mit Helium. Abschließend wurde der obere Endstopfen aufgesetzt und wiederum unter Helium verschweißt.

Tabelle XIII Gesamtwerte für die Brennstoffsäulen

Brennstab-Nr.	Gewicht (g)	Höhe (mm)	Durchmesser (mm)	Dichte (%th.D.)	Pu-Gehalt (g)	U-235-Gehalt (g)
7A-1	95,68	500,31	5,013	88,17	16,88	53,52
7A-2	94,04	502,00	5,063	84,72	16,59	52,57
7A-3	95,88	498,96	5,008	88,80	16,91	53,63
7A-4	95,69	499,32	5,000	88,80	16,88	53,52
7A-5	95,63	498,96	5,014	88,36	16,87	53,49
7A-6	95,45	499,77	5,011	88,08	16,84	53,39
7A-7	95,72	500,31	5,026	87,79	16,89	53,54
7A-8	97,66	504,27	5,032	88,65	17,23	54,62
7A-9	96,28	500,22	5,013	88,71	16,98	53,86

Tabelle XIII Gesamtwerte für die Brutstoffsäulen

Brennstab-Nr.	Untere Brutzone				Obere Brutzone			
	Gewicht (g)	Höhe (mm)	Durchmesser (mm)	Dichte (%th.D.)	Gewicht (g)	Höhe (mm)	Durchmesser (mm)	Dichte (%th.D.)
7A-1	21,19	99,87	5,072	95,80	21,16	99,92	5,070	95,76
7A-2	21,37	100,59	5,083	95,67	21,07	99,81	5,068	95,54
7A-3	21,37	100,89	5,072	95,71	21,30	100,50	5,075	95,63
7A-4	21,43	100,57	5,056	96,65	21,20	100,03	5,052	96,51
7A-5	21,17	100,08	5,048	96,21	21,22	100,21	5,053	96,35
7A-6	20,99	99,76	5,042	96,19	21,10	100,03	5,040	96,95
7A-7	21,35	100,40	5,057	96,65	21,41	100,48	5,062	96,62
7A-8	21,28	100,29	5,048	96,79	21,23	100,29	5,040	96,94
7A-9	21,10	99,89	5,052	96,16	21,04	99,89	5,052	95,89

5.6.2 Dichtheit und Schweißnahtkontrolle

Im Anschluß an die Fertigung wurde die Röntgenprüfung der Schweißnähte sowie der Helium-Lecktest an den Stäben durchgeführt. Ein Prüfbericht weist die Dichtheit der in die leeren Hüllrohre eingeschweißten Endstopfen nach, ein weiterer Prüfbericht die Dichtheit der fertig verschlossenen Brennstäbe. Ein Auszug aus diesen Prüfberichten ist in Tabelle XIV wiedergegeben.

Die Schweißnahtqualität an den unteren Endstopfen ist nach der Röntgenprüfung einwandfrei. Die abschließende Schweißnaht wurde ebenfalls durchstrahlt. Nach dem entsprechenden Prüfbericht ist die Beurteilung in den meisten Fällen gut, während 2 Einzelmessungen wegen Poreneinschlüssen nur die Beurteilung "brauchbar" erhielten. In Tabelle XV sind einige Angaben aus den Röntgen-Prüfberichten zusammengefaßt. Als zusätzliche Kontrolle wurden auch noch Schlifffbilder von Schweißnähten an Originalmaterial der spezifizierten Abmessungen hergestellt, siehe Abb. 5.

Tabelle XIV Dichtheitsprüfung an den Brennstäben mit He-Lecksuch-Massenspektrometer

Prüfungen an den unteren Endstopfen	
Eichleck	$1,7 \cdot 10^{-8}$ Torr L/sec
Empfindlichkeit	$4 \cdot 10^{-11}$ Torr L/sec·Skalenteil
Leckrate (in jedem Rohr)	$< 10^{-9}$ Torr L/sec
Prüfungen an den fertigen Stäben	
Eichleck	$5,2 \cdot 10^{-8}$ Torr L/sec
Empfindlichkeit	$2,3 \cdot 10^{-10}$ Torr L/sec·Skalenteil
Leckrate (in jedem Stab)	$< 4,6 \cdot 10^{-10}$ Torr L/sec

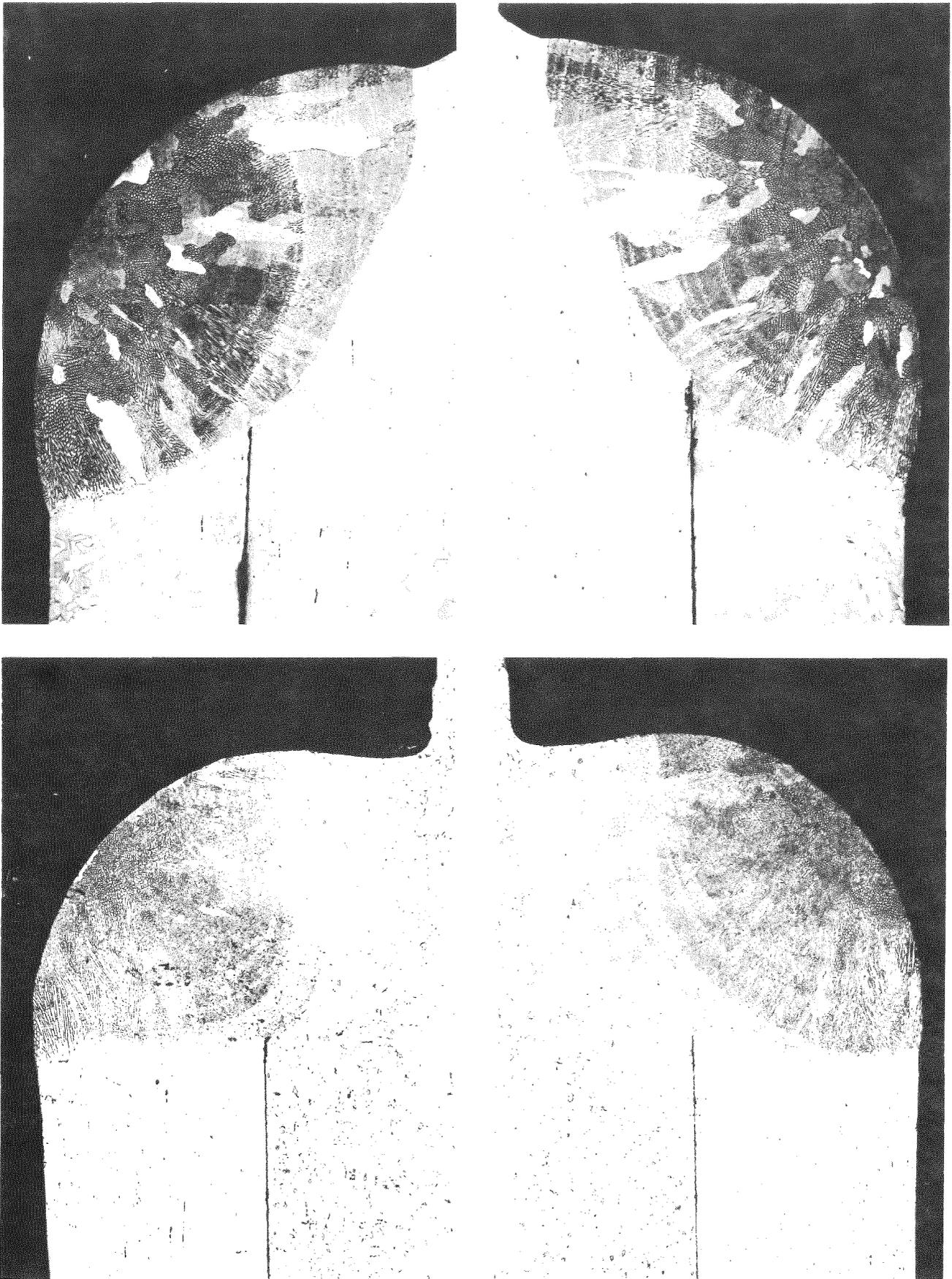


Abb. 5 Schliffbilder der Schweißnähte
oben: Werkstoff AISI 316
unten: Werkstoff Nr. 1.4988

5.6.3 Kontaminationsprüfung

Im Hinblick auf die Pu-Kontamination auf der Oberfläche ist zwischen einer abwischbaren Verschmutzung und einer oberflächlich fixierten Aktivität zu unterscheiden.

Zur Bestimmung der wischbaren Alpha-Kontamination erfolgten an allen Oberflächen der Brennstäbe, insbesondere aber an der Schweißnaht beim oberen Endstopfen Wischteste, deren Ausmessung ein empfindliches Zählrohr (ca. 40 % Zählhausbeute) besorgte. Alle Wischteste blieben ohne Befund, d.h. es konnte keine wischbare Aktivität nachgewiesen werden.

Dagegen ist bei einigen Stäben in der oberen Schweißnaht eine punktförmig fixierte Alpha-Aktivität nachweisbar, die nach folgender Formel ermittelt wurde:

$$A = \frac{J}{f_a \cdot f_g \cdot F}$$

Darin bedeutet:

- J die Impulsrate am Zählrohr (Impulse pro Minute)
- f_a die Wirksamkeit des Zählrohres (%)
- f_g den Geometriefaktor
- F die Oberfläche des Brennstabes (cm²)

und als Ergebnis

- A die Alpha-Zerfälle pro Minute und cm²

Zum Geometriefaktor ist zu bemerken, daß durch ihn der Tatsache Rechnung getragen wird, daß auf einem planen Zählrohr ein zylinderförmiger Körper ausgemessen wird. Dabei trägt eine ringförmig um die Schweißnaht verteilte Aktivität umso weniger zur Impulsrate bei, je weiter sich die Zylinderfläche von der Zählrohrfläche abkrümmt. Wir sind davon ausgegangen, daß im vorliegenden Fall nur ein Viertel des gesamten Umfangs voll zur Impulsrate beiträgt ($f_g = 0,25$).

Die Tabelle XVI bringt die einzelnen Meßergebnisse für die wischbare und die fixierte Aktivität.

Tabelle XVI Kontamination der Staboberflächen
(o.B. = ohne Befund)

Stab-Nr.	Wischtest (Zerfälle/min.)	Fixierte Aktivität (Zerfälle/min.·cm ²)
7A-1	o.B.	16
7A-2	o.B.	o.B.
7A-3	o.B.	o.B.
7A-4	o.B.	5
7A-5	o.B.	o.B.
7A-6	o.B.	o.B.
7A-7	o.B.	o.B.
7A-8	o.B.	o.B.
7A-9	o.B.	5

5.6.4 Äußere Abmessungen und Gewicht

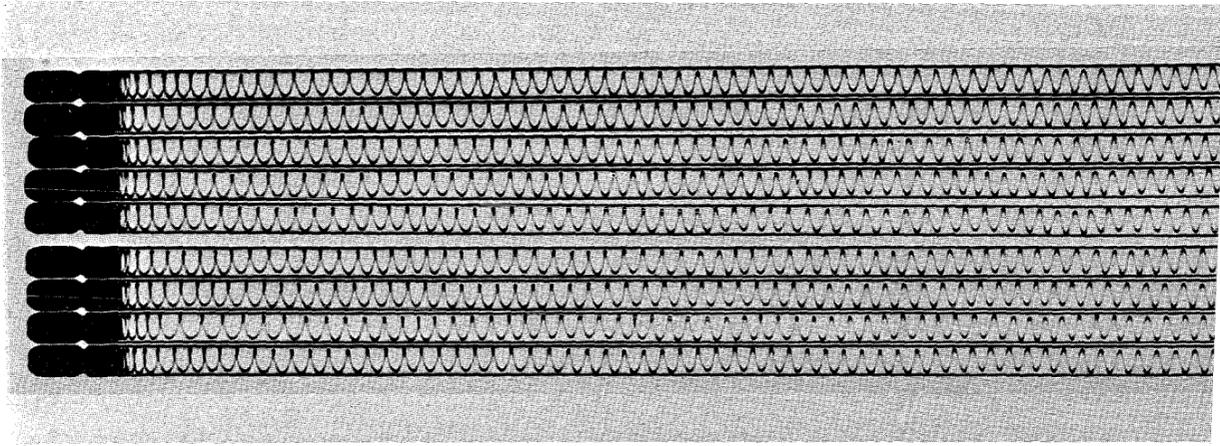
Zur Kontrolle der äußeren Abmessungen der fertigen Stäbe wurde außer der Gesamtlänge der Durchmesser an 10 der Länge nach verteilten Stellen gemessen sowie zusätzlich an den beiden Schweißnähten. Die Ergebnisse sind in Tabelle XVII zusammengestellt. An den Schweißnähten zeigten sich lokale Durchmesserüberschreitungen.

5.6.5 Innere Geometrie

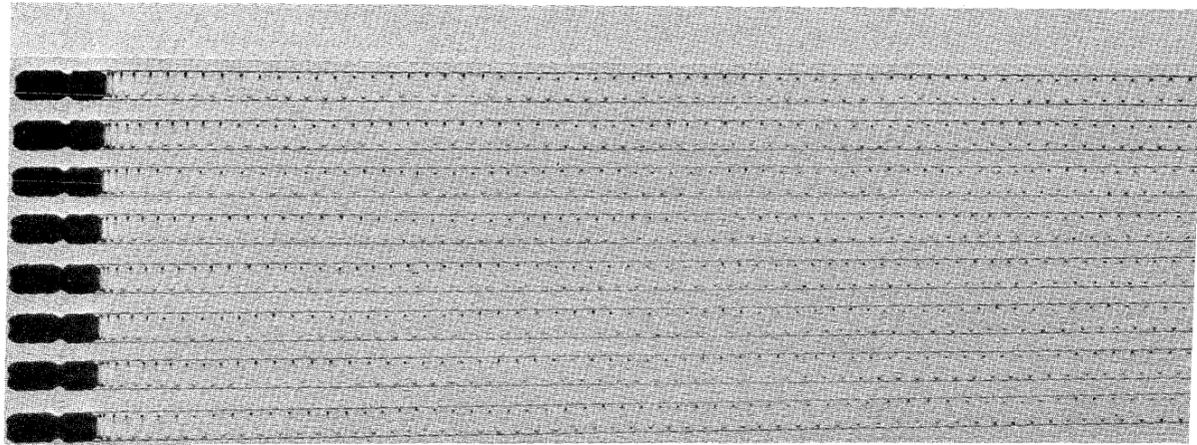
Die innere Geometrie der fertigen Stäbe wurde mit Röntgenaufnahmen nachgeprüft. Abb. 6 gibt die Durchstrahlung unmittelbar nach der Herstellung der Stäbe in Karlsruhe wieder. Abb. 7 bringt die Röntgenaufnahmen, die nach dem Transport in Mol angefertigt wurden. In Tabelle XVIII sind den berechneten Werten der Tabletensäulenlänge (nach Tabellen XII und XIII) die nach den Röntgen-Aufnahmen vermessenen Säulenlängen gegenübergestellt [10]. Beim Stab 7A-9 ist eine wesentliche Diskrepanz festzustellen. Die Lage der Tabletten und sonstigen Einbauten ist auch nach dem Transport einwandfrei.

Tabelle XVII Äußere Abmessungen und Gewichte der fertigen Stäbe

Stab-Nr.	Meß- stelle	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	d ₃ (mm)	d ₄ (mm)	d ₅ (mm)	d ₆ (mm)	d ₇ (mm)	d ₈ (mm)	d ₉ (mm)	d ₁₀ (mm)	L (mm)	Gewicht (g)		
7A-1	a	6,022	5,994	5,996	5,993	5,995	5,995	5,996	5,993	5,996	6,005	1080,00	205,50	x	6,070
	b	5,998	5,994						5,994					y	6,106
7A-2	a	6,028	5,996	5,995	5,996	5,995	5,995	5,995	5,994	5,994	6,014	1079,95	204,38	x	6,110
	b	5,984	5,995						5,993					y	6,145
7A-3	a	6,028	5,996	5,993	5,996	5,995	5,995	5,993	5,994	5,996	5,997	1080,00	205,72	x	6,080
	b	6,000						5,994			5,998			y	6,040
7A-4	a	6,042	5,970	5,970	5,972	5,972	5,972	5,972	5,996	5,996	6,012	1080,00	202,44	x	6,050
	b	5,991	5,972	5,974		5,973	5,968	5,968	5,972	5,971	6,013			y	6,060
7A-5	a	6,037	5,995	5,996	5,995	5,993	5,991	5,994	5,991	5,997	6,010	1080,00	206,10	x	6,060
	b	5,996	5,996				5,992		5,992	5,992	6,012			y	6,098
7A-6	a	6,016	6,002	6,003	6,002	6,004	6,002	6,004	6,003	6,002	6,014	1080,00	205,66	x	6,059
	b	6,000	6,003	6,001		6,006	6,003			6,004	6,012			y	6,060
7A-7	a	6,014	6,002	6,003	6,001	6,002	6,002	6,001	6,002	6,002	6,016	1080,00	206,12	x	6,060
	b	5,996	6,001	6,001	6,002	6,001								y	6,080
7A-8	a	6,015	5,996	5,996	5,996	5,996	5,997	5,997	5,997	5,998	5,997	1080,00	206,48	x	6,080
	b	5,990	6,000				5,998							y	6,070
7A-9	a	6,028	5,995	5,991	5,992	5,994	5,994	5,994	5,992	5,993	6,010	1080,00	2,07,40	x	6,070
	b	6,002	5,993	5,990		5,995	5,994	5,993	5,990					y	6,060



oberer Sta



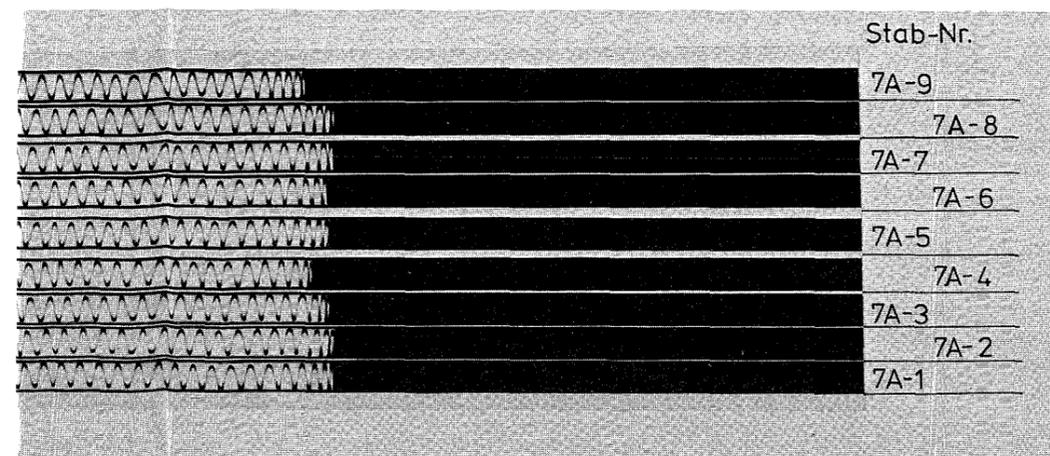
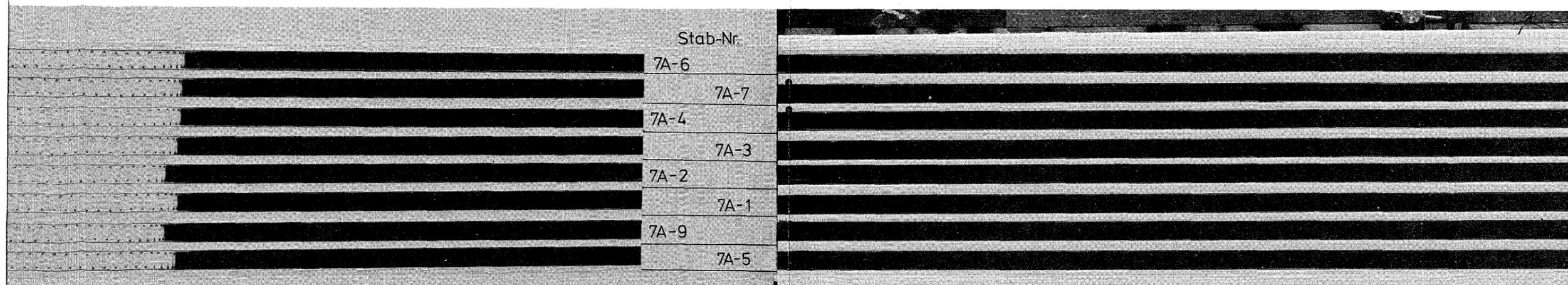


Abb. 6 Röntgen-Aufnahmen der 9 Stäbe nach der Fertigung in Karlsruhe (Oberer Stabteil)

Mittelstück



unterer Stabteil

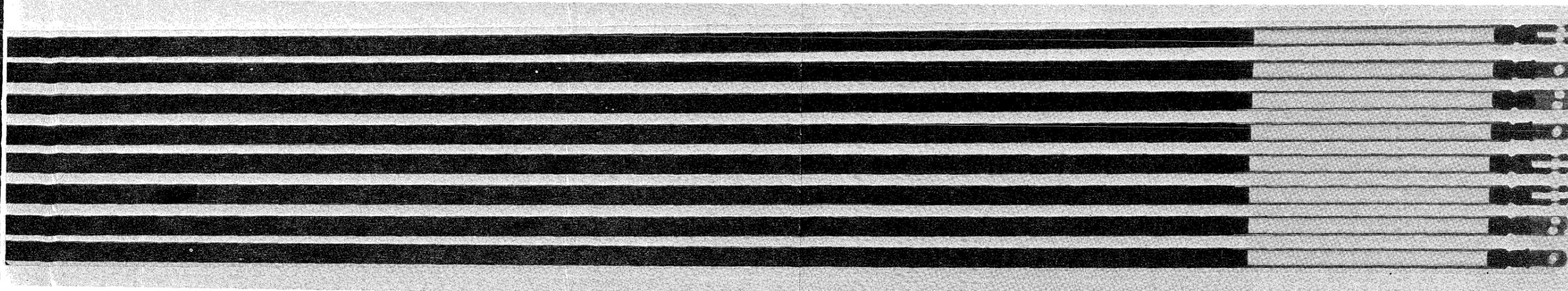


Abb. 7 Röntgen-Aufnahmen der 8 nach Mol transportierten Stäbe vor der Bestrahlung

Tabelle XVIII Länge der Tablettensäulen vor der Bestrahlung

Stab-Nr.	Länge der Tablettensäule (mm)	
	Berechnete Werte	Gemessene Werte
7A-1	700,10	700,0
7A-2	702,40	
7A-3	700,35	700,0
7A-4	699,92	
7A-5	699,25	699,5
7A-6	699,56	700,0
7A-7	701,19	699,5
7A-8	704,85	
7A-9	700,00	704,0

5.7 Abweichungen von den Spezifikationen

In einigen Punkten wurden die Spezifikationen nicht oder nicht vollständig erfüllt. Dies soll hier kurz diskutiert werden:

- Die abschließende Isotopenanalyse an einigen fertigen Tabletten ergab einen U-235-Gehalt von nur ca. 79 %, während bei der Analyse der Pulvermischung ziemlich genau 80 % gemessen wurden. Diese Differenz konnte nicht geklärt werden.
- Die Höhe der Brennstofftabletten liegt mit Werten um 5,5 mm einige Male unterhalb der unteren Toleranzgrenze. Dies ist aber unwesentlich, da es auf die Höhe der Brennstoff- bzw. Tablettensäule ankommt.
- Die Höhe der Brennstoff- bzw. Tablettensäulen ist nach den Herstellungsprotokollen spezifikationsgerecht mit Ausnahme von Stab 7A-8. In den Auswertungen nach den Röntgen-Aufnahmen gibt es allerdings weitere (nicht sehr erhebliche) Abweichungen.
- Entgegen den Spezifikationen erhielten die Brennstofftabletten keine Stirnflächeneinsenkung, da dem Hersteller kein geeignetes Preßwerkzeug zeitgerecht zur Verfügung stand. Das Fehlen dieses

"äußeren" Leervolumens wird weitgehend kompensiert durch die (ebenfalls nicht spezifikationsgerechte) Unterschreitung des Tablettendurchmessers um Werte meist zwischen 50 und 100 µm.

- Die Spezifikation für die Tablettendichte ist im wesentlichen erfüllt worden. Mit Ausnahme von Stab 7A-2 liegen die Mittelwerte für alle Stäbe im Toleranzbereich. Einzelne gemessene Tabletten überschreiten die obere Toleranzgrenze geringfügig. Die Brennstoffdichte im Stab 7A-2 ist zu niedrig. Wegen Materialmangels konnten diese deutlich außerhalb der Toleranz liegenden Brennstofftabletten nicht ausgeschieden werden.
- Der Auslegungswert für die Brennstoff-Schmierdichte hingegen ist bei allen Stäben ziemlich gut angenähert. Die Tabelle XIX zeigt die rechnerisch ermittelten tatsächlichen Werte für alle 9 Stäbe.
- Beim UO₂-Brutstoff sind einige Tabletten in der Dichte zu hoch.
- Bei den abschließenden Prüfungen am Brennstoff konnte das O/Me-Verhältnis, der Gasgehalt und der Wassergehalt nicht gemessen werden.

Tabelle XIX Innere Geometrie der Stäbe und Brennstoffdichte

Brennstab-Nr.	Hüllinnen-durchmesser (mm)	Brennstofftabletten-durchmesser (mm)	Brennstoffdichte (% th.D.)	Schmierdichte (% th.D.)
7A-1	5,247	5,013	88,17	80,50
7A-2	5,245	5,063	84,72	78,94
7A-3	5,242	5,008	88,80	81,05
7A-4	5,265	5,000	88,80	80,09
7A-5	5,245	5,014	88,36	80,75
7A-6	5,255	5,011	88,08	80,09
7A-7	5,253	5,026	87,79	80,37
7A-8	5,241	5,032	88,65	81,72
7A-9	5,240	5,013	88,71	81,19

6. Brennstabbündel und Bestrahlungseinsatz

Die 7 Stäbe sind mit 10 Abstandshaltern zu einem Hexagonalbündel zusammengefaßt. Dieses Bündel steckt in einem Bündelrohr. Zum Einbau wurden die Stäbe von oben in diese Brennstabhalterung geschoben und sitzen mit den Schlitzten ihrer Fußstücke auf den unteren Haltestegen. Sie sind dort mit Stiften befestigt. Das obere Ende der Stäbe ist axial frei beweglich. Die geometrische Anordnung der Stäbe und Abstandshalter wird in Abb. 8 deutlich. In Abb. 9 sind in einem skizzierten Bündelquerschnitt die Stabnummern angegeben. Von den 9 hergestellten Stäben wirklich eingesetzt wurden die Stäbe Nr. 1, 3, 4, 5, 6, 7 und 9. Der Stab 8 war als Reserve in Karlsruhe verblieben. Der Stab 2 wurde beim Einbau in Mol ausgeschieden, da der Durchmesser der oberen Stopfenschweißnaht überhöht war. Die Stabteilung im Bündel ist 7,9 mm und der kleinste Stababstand somit 1,9 mm.

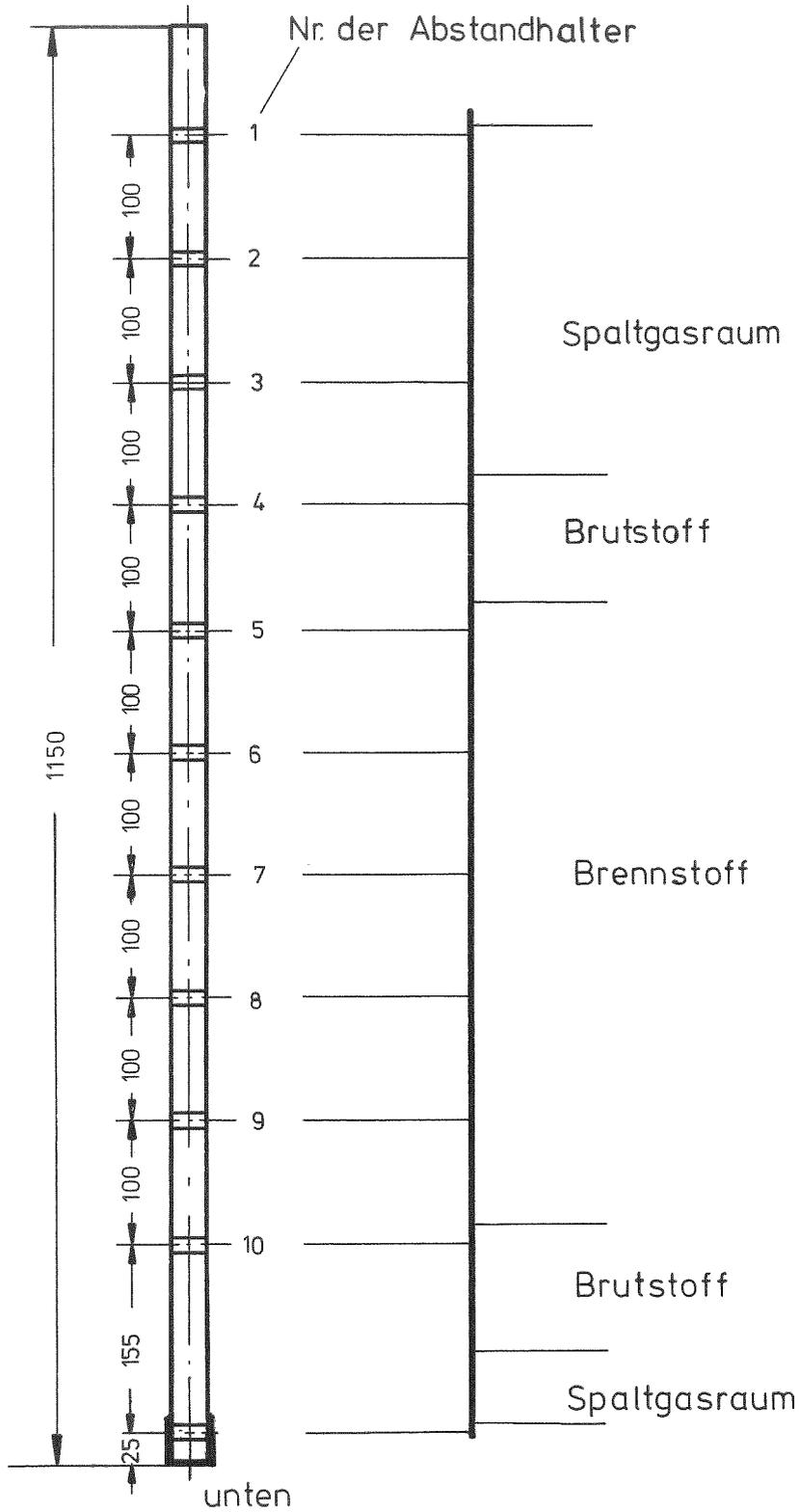
Die Konstruktion der Brennstabhalterung wurde von der Fa. Siemens AG. ausgeführt. Sie geht aus der Siemens-Werkszeichnung in Abb. 10 hervor. Die wabenförmigen Abstandshalter - Konstruktion siehe Abb. 11 - wurden bei der Fa. Siemens durch ein Funkenerosionsverfahren hergestellt. Für die 10 Abstandshalter wurden drei verschiedene Edelmstähe, nämlich die Werkstoffe Nr.

- 1.4981 für 6 Abstandshalter
- 1.4961 für 2 Abstandshalter
- 1.4988 für 2 Abstandshalter

verwendet. Die Anordnung der verschiedenen Typen im Bündel geht aus Tabelle XX hervor.

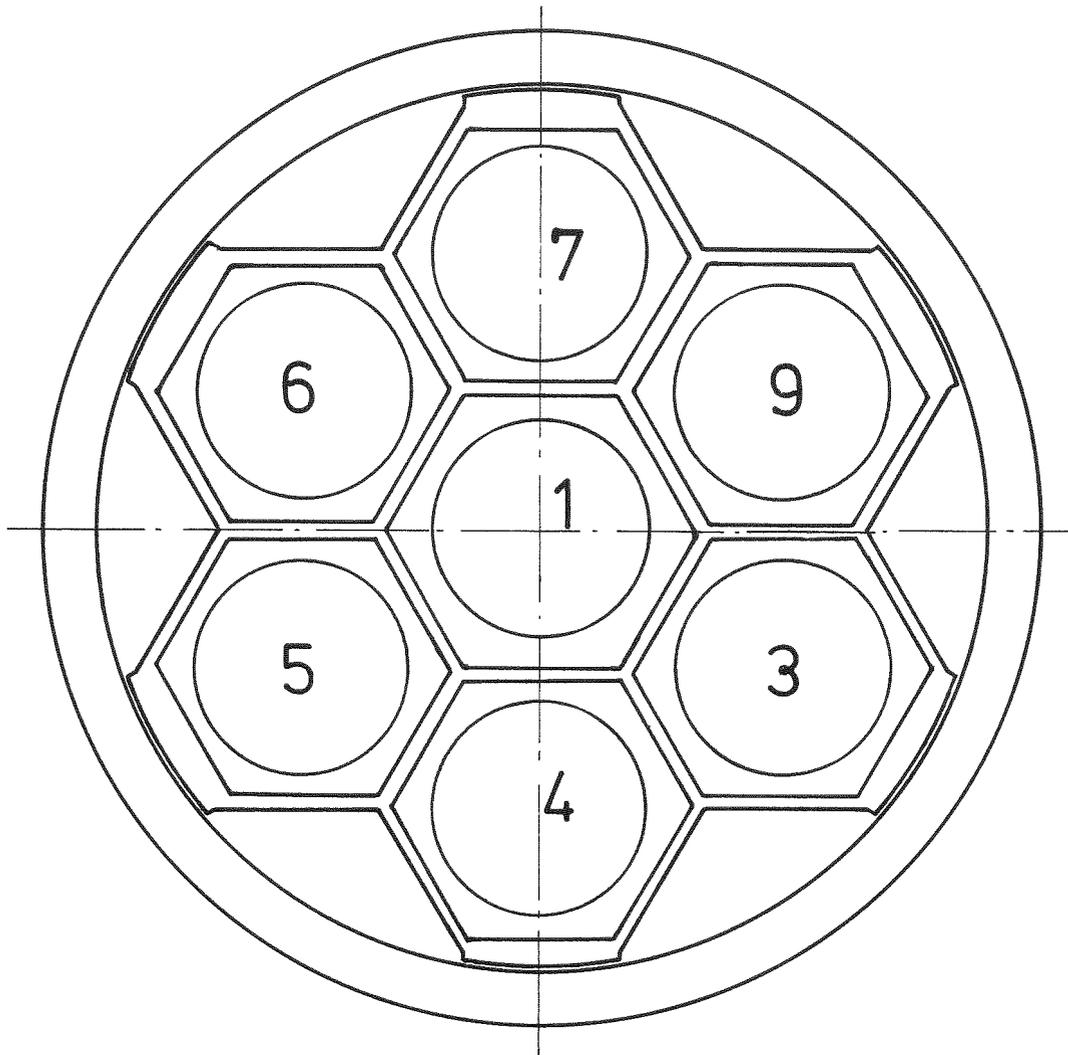
Tabelle XX Abstandshalter

Abstandshalter Orientierung	Nr.	Werkstoff-Nr.
oben	1	1.4981
	2	1.4981
	3	1.4988
	4	1.4961
	5	1.4981
	6	1.4988
	7	1.4981
	8	1.4988
	9	1.4981
unten	10	1.4981



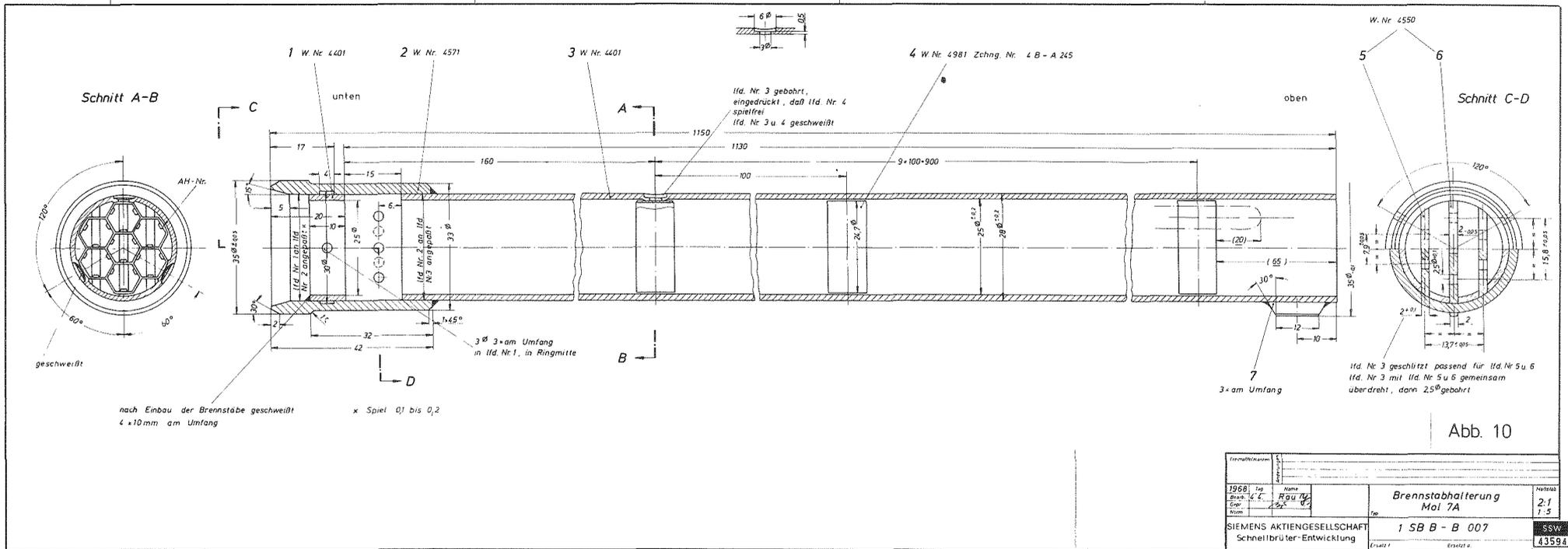
Anordnung der Stäbe und
Abstandhalter im Bündel

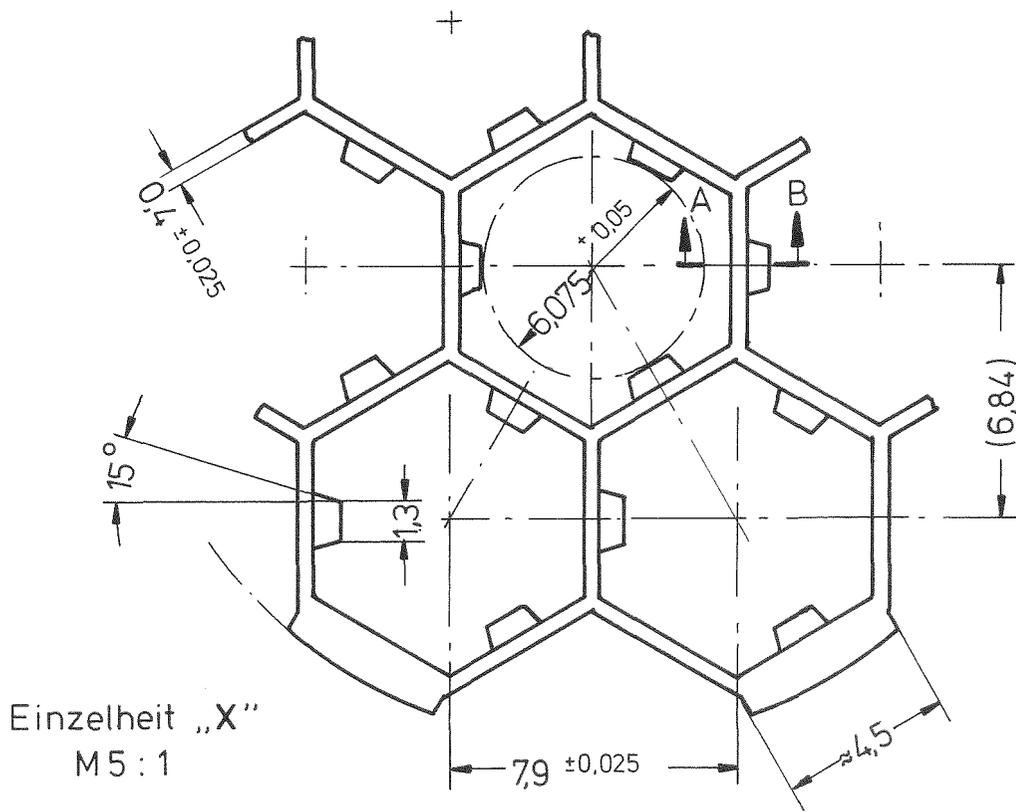
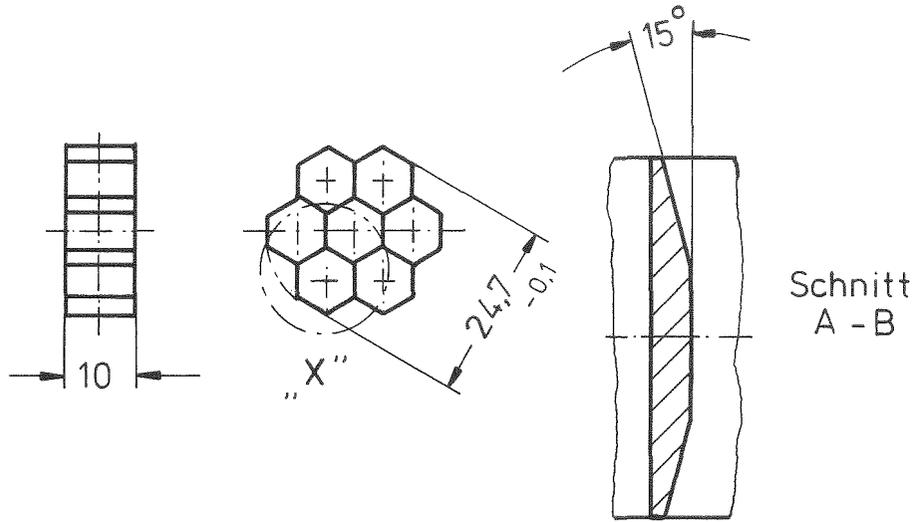
Abb. 8



Bündelquerschnitt

Abb. 9





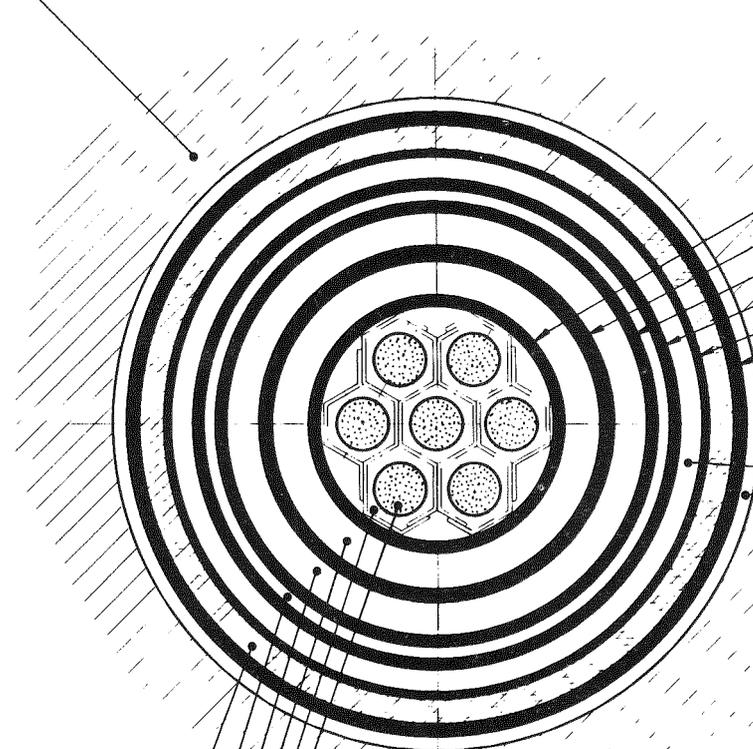
Abstandhalter

Abb. 11

Die Bestrahlung des Brennstabbündels erfolgte im sogenannten MFBS-5-Loop des BR 2. Diese Bestrahlungseinrichtung wurde speziell für Brennstab-Bestrahlungen unter simulierten Schnellbrüterbedingungen gebaut und bereits seit 1965 erfolgreich betrieben [11]. Das Loop sitzt im durchgehenden, 200 mm weiten Zentralkanal des BR 2 und enthält einen primären Natrium-Kreislauf, der über einen CO₂-Zwischenkreislauf die Wärmemenge an Kühlwasser abgibt. Dieser Loop-Einsatz ist weiterhin noch von einem zylindrischen Cadmium-Schirm umgeben, durch den das Neutronenspektrum "gehärtet" wird. Abb. 12 zeigt einen Querschnitt durch den Loop-Einsatz in Höhe des Stabbündels. (Der dort skizzierte Abstandhalter entspricht nicht der wirklichen Ausführung.)

Die Strömung des Na-Kühlmittels erfolgt im Brennstabbündel von unten nach oben, Strömungsgeschwindigkeit ca. 3 bis 4 m/sec. Die Führung des Kühlmittelstromes wird aus dem Längsschnitt des Loopeinsatzes in Abb. 13 deutlich. Die Position des MFBS-Loops im BR 2 geht aus der Übersichtszeichnung in Abb. 14 hervor. Der ringförmige Zwischenraum zwischen Loop-Einsatz (Außendurchmesser 67 mm) und der Innenwand des Zentralkanals (200 mm Durchmesser) ist mit einem Al-Körper und Spezialbrennelementen ausgefüllt. Im MFBS-Loop gibt es zahlreiche Temperaturmeßstellen, deren Meßwerte zur Temperaturberechnung in Bündel und Stab herangezogen werden. Abb. 15 zeigt die Position der Thermoelemente im Bündelbereich. Die Abb. 16 schließlich gibt die axiale Position von Bündel und Stab relativ zur BR 2-Mittelebene an.

15 "ø 200 mm CHANNEL" SPECIAL REACTOR PLUG IN AL.



- 3 FUEL ASSEMBLY CASING ø 25/28 (AISI 316)
- 5 CENTRAL TUBE ø 35/38 (AISI 316)
- 7 Na CONTAINMENT TUBE ø 45/48 (AISI 316)
- 9 PRESSURE TUBE ø 50/53 (AISI 316)
- 11 INSIDE Cd CLADDING ø 57/59 (Al)
- 13 OUTSIDE Cd CLADDING ø 64/67 (Al)

WATER OF REACTOR

- 10 H₂O ø 53/57
- 14 H₂O ø 67/70

- 1 7 FUEL PINS ø 6 - TRIANGULAR PITCH = 7,9
- 2 CIRCULATION Na ø 25
- 4 INTERMEDIATE Na ø 28/35
- 6 CIRCULATION Na ø 38/45
- 8 STAGNANT CO₂ ø 48/50
- 12 Cd ø 59/64

B	27-10-67	TRIANGULAR PITCH = 7,9		
A	26-10-67	CENTRAL TUBE		
Inc	dat	Modifications - Wijzigingen	Par	Appr.

GROUPE D'EXPLOITATION DU REACTEUR BR2 ET DE SES INSTALLATIONS CONNEXES			GROEP VOOR EXPLOITATIE VAN DE REACTOR BR2 EN ZIJN BIJHOORENDE INSTALLATIES	Abb. 12
Service - Dienst : TECHN. STUDIES		Dossier : 715475		
Dessiné : <i>Dekkers</i>	dat : 17-8-67	GfK-CEN IN PILE SODIUM LOOP		
Getekend : <i>Swinnen J.</i>	dat : 21-08-57	"MOL 7A"		
Approb : <i>M. SOENEY</i>	dat : 21-8-57	Echelle : <i>2/1</i>	N° GEX 23 325 B	

CROSS SECTION (at reactor mid-plane) through experimental hole in "ø 200 mm channel"

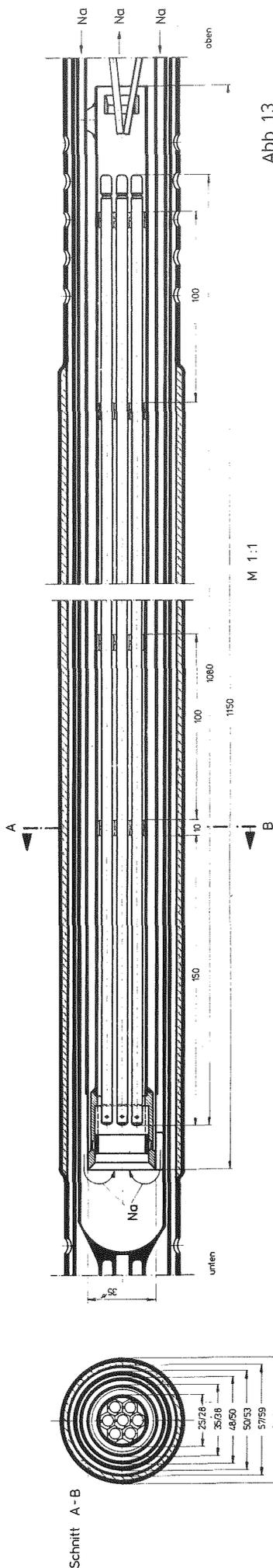


Abb. 13

Teil		Bezeichnung		Material		Abmessung			Toleranz		
1	1	5	27	1.4308	1.4308	2	3	4	1	2	3
2	2	10	30	1.4308	1.4308	10	15	20	1	2	3
3	3	15	45	1.4308	1.4308	15	25	35	1	2	3
4	4	20	60	1.4308	1.4308	20	35	50	1	2	3
5	5	25	75	1.4308	1.4308	25	45	65	1	2	3
6	6	30	90	1.4308	1.4308	30	55	85	1	2	3
7	7	35	105	1.4308	1.4308	35	65	100	1	2	3
8	8	40	120	1.4308	1.4308	40	75	115	1	2	3
9	9	45	135	1.4308	1.4308	45	85	130	1	2	3
10	10	50	150	1.4308	1.4308	50	95	145	1	2	3
11	11	55	165	1.4308	1.4308	55	105	160	1	2	3
12	12	60	180	1.4308	1.4308	60	115	175	1	2	3
13	13	65	195	1.4308	1.4308	65	125	190	1	2	3
14	14	70	210	1.4308	1.4308	70	135	205	1	2	3
15	15	75	225	1.4308	1.4308	75	145	220	1	2	3
16	16	80	240	1.4308	1.4308	80	155	235	1	2	3
17	17	85	255	1.4308	1.4308	85	165	250	1	2	3
18	18	90	270	1.4308	1.4308	90	175	265	1	2	3
19	19	95	285	1.4308	1.4308	95	185	280	1	2	3
20	20	100	300	1.4308	1.4308	100	195	295	1	2	3
21	21	105	315	1.4308	1.4308	105	205	310	1	2	3
22	22	110	330	1.4308	1.4308	110	215	325	1	2	3
23	23	115	345	1.4308	1.4308	115	225	340	1	2	3
24	24	120	360	1.4308	1.4308	120	235	355	1	2	3
25	25	125	375	1.4308	1.4308	125	245	370	1	2	3
26	26	130	390	1.4308	1.4308	130	255	385	1	2	3
27	27	135	405	1.4308	1.4308	135	265	400	1	2	3
28	28	140	420	1.4308	1.4308	140	275	415	1	2	3
29	29	145	435	1.4308	1.4308	145	285	430	1	2	3
30	30	150	450	1.4308	1.4308	150	295	445	1	2	3

Bundel und Brennstab Mol 7A

00 EQUIPMENT OF "Ø 200 CHANNEL"

- 01 ALUMINUM PLUG
- 02 SUPPORT
- 03 Cd SCREEN
- 04 SPECIAL GUIDE TUBE
- 05 SPECIAL FUEL ELEMENTS

100 PRESSURE TUBE

200 PRIMARY CIRCUIT

- 201 FUEL BUNDLE
- 202 CENTRAL TUBE
- 203 BLOCK VALVE
- 204 Na CONTAINMENT TUBE
- 205 DOUBLE PASSAGE
- 206 REDUCTION TANK
- 207 HEAT EXCHANGER
- 208 Na TUBE BETWEEN HEAT EXCHANGER AND ENTRY PUMP
- 209 ELECTROMAGNETIC PUMPS
- 210 MAGNETIC FLOWMETER
- 211 Na TUBE BETWEEN PUMP AND REDUCING TANK
- 212 PNEUMATIC VALVE
- 213 PNEUMATIC VALVE COMMAND
- 214 He STAND-BY TUBE
- 215 VAPOUR AND OVERFLOW TRAP
- 216 He PRESSURE TUBE
- 217 CO₂ OUTLET
- 218 CO₂ INLET
- 219 CO₂ BY-PASS

500 SHIELDING

- 502 TUNGSTEN SHIELDING
- 503 Cd SHIELDING
- 504 " " "
- 505 " " "
- 506 " " "
- 508 Pb SHIELDING
- 509 " " "
- 510 TUNGSTEN SHIELDING

600 WATER TIGHT CONNECTION

- 601 CONNECTION BOX (FIXED PART)
- 602 DOUBLE CONNECTION (He)
- 603 DOUBLE CONNECTION (He)
- 604 OUTLET CO₂
- 605 INLET CO₂

700 POOL

- 701 CONNECTION BOX (CONNECTOR CAP)
- 702 DOUBLE CONNECTION (He)
- 703 DOUBLE CONNECTION (He)
- 706 LIFTING HEAD

800 REACTOR

- 801 REACTOR TOP NOZZLE
- 802 TOP COVER
- 803 PRIMARY WATER INLET
- 804 REACTOR PRESSURE VESSEL
- 805 PRIMARY WATER OUTLET
- 806 BOTTOM COVER
- 807 BOTTOM NOZZLE
- 808 GUIDE TUBE
- 809 MATRIX UPPER EXTENSION PIECE
- 810 Be MATRIX
- 811 MATRIX LOWER EXTENSION PIECE
- 812 MATRIX SUPPORT TUBE
- 813 GRID
- 814 INFERIOR PLUG

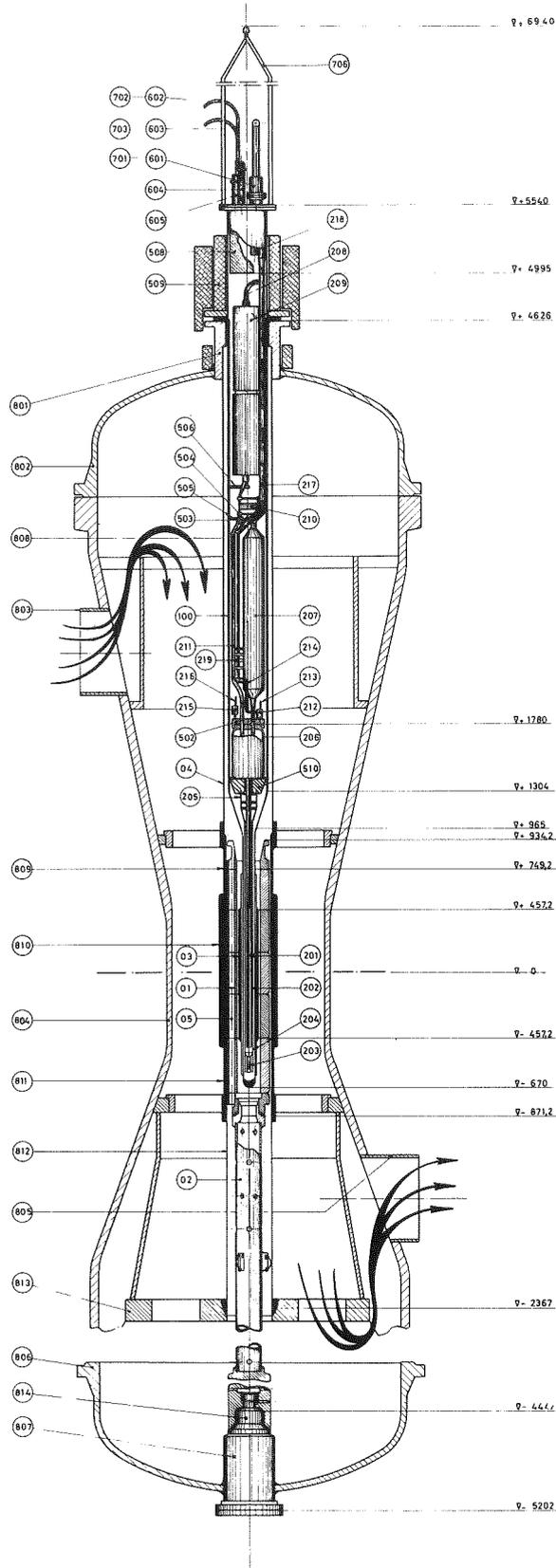
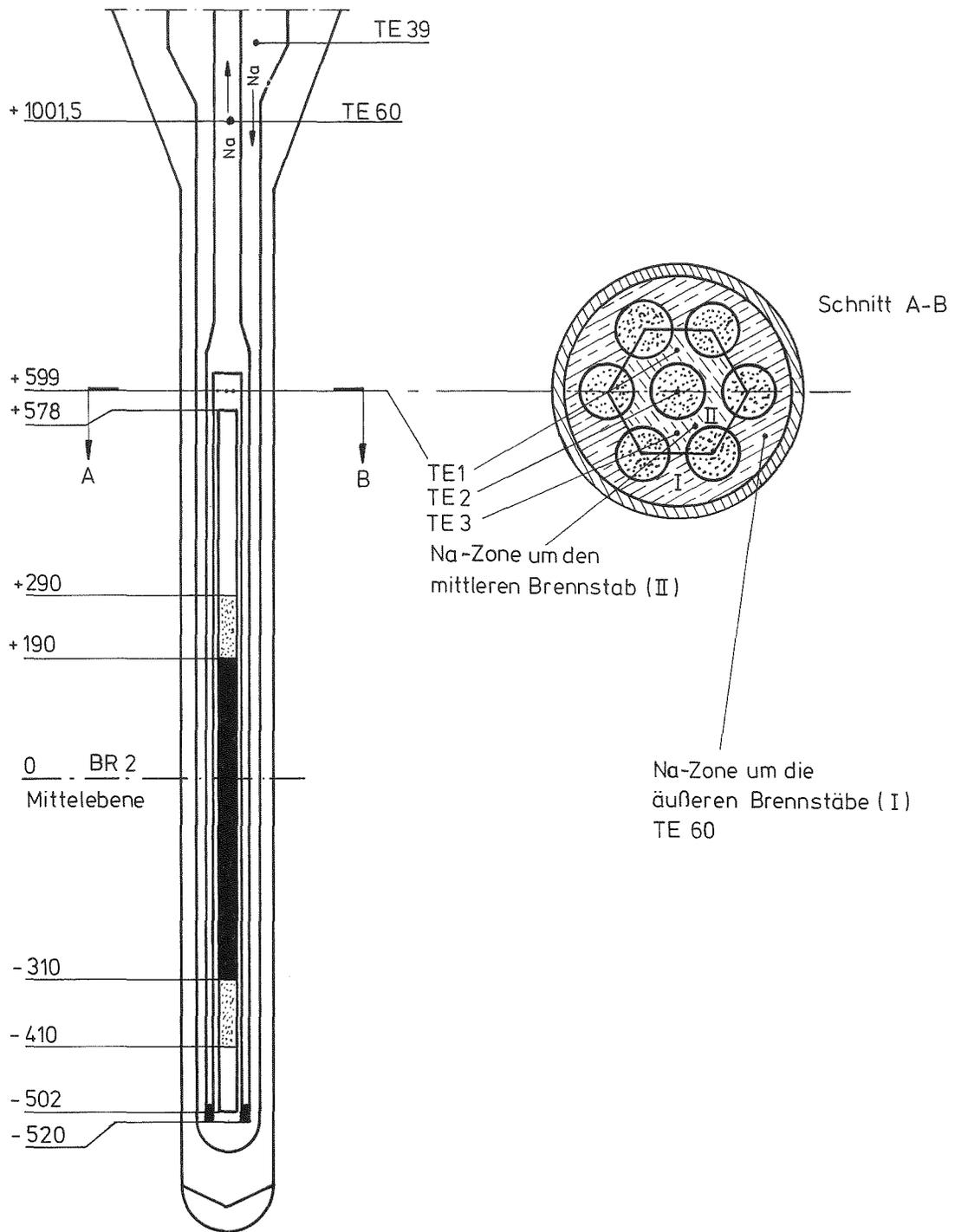


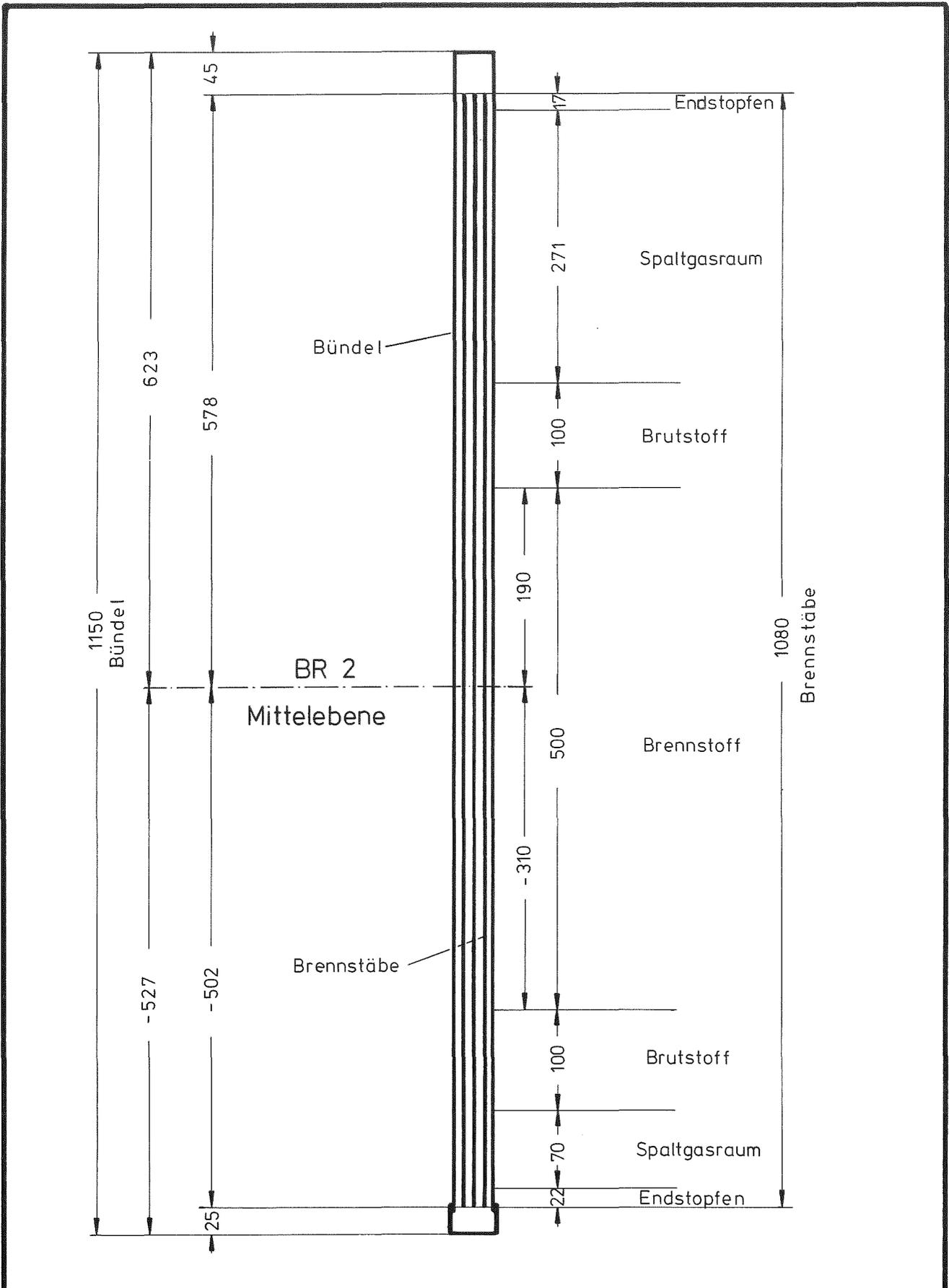
Abb. 14

Etat de surface :	Cones non tolérances	< 4	4 - 30	30 - 100	100 - 200	200 - 500
Absorptions :	Mises sous tolérances	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3
GROUPE D'EXPLOITATION DU REACTEUR BR 2 ET DE SES INSTALLATIONS CONNEXES Service - Dienst : TECH. STUDIES				GROUPE VOOR EXPLOITATIE VAN DE REACTOR BR 2 EN ZIJN BIJHORENDE INSTALLATIES Dienst : 715475		
Dessiné : LAURENT S.		dat. : 28-10-67		GIK-CEN. IN PILE SODIUM LOOP		
Vérif. : S. JANSSEN		dat. : 30-10-67		MOL 7 A		
Approuv. : F. S. GENEEN		dat. : 31-10-67		Echelle : 1/1		
GENERAL DISPOSITION OF THE LOOP IN THE REACTOR CHANNEL						N° GEX 23367 A



Meßstellen im Na zur Bestimmung der Hülltemperaturen der Prüflinge

Abb. 15



Axiale Position von Bündel
und Brennstab im BR 2

Abb. 16

7. Ablauf der Bestrahlung

Im BR 2 in Mol sollte das 7-Stabbündel bei einer Stableistung von 500 W/cm bis zu einem Abbrand von 60.000 Mwd/t M bestrahlt werden. Aufgrund einer Unzulänglichkeit bei der Berechnung des epithermischen Flusses und der Reaktionsraten für die Cd-abgeschirmte Zone des Loops erreichte die maximale lineare Stableistung Werte bis zu 590 W/cm anstelle des spezifizierten Wertes von 500 W/cm. Nach Erreichen von ca. 35.000 Mwd/t M während des 10. Bestrahlungszyklus wurde Spaltgas im Cover-Gas des primären Na-Kreislaufes festgestellt, was einen Stabschaden anzeigte. Der Spaltgasausbruch ereignete sich nach dem Wiedereinsetzen von Treiberstäben, wobei die Leistung von 450 W/cm am Ende des vorangegangenen Zyklus auf den Anfangswert von 560 W/cm des neuen Zyklus erhöht wurde. Die Bestrahlung konnte jedoch fortgesetzt werden, da die Aktivität die Sicherheitsgrenze in der Primärkühlung nicht überschritt. Die Situation änderte sich, als während des gleichen Zyklus, kurz nachdem das Spaltgas festgestellt war, Undichtigkeiten an einem Federbalg festgestellt wurden, durch die das sekundäre Kühlmittel CO_2 in das Cover-Gas des primären Na-Kühlkreislaufes eindringen konnte. Aus Sicherheitsgründen wurde das Loop am Beginn des 11. Bestrahlungszyklus (= Reaktorzyklus 05/69) entladen und eine Ermittlung der Leckgröße im Federbalg des Cover-Gas-Systems durchgeführt. Durch Abdruckversuche wurde der Nachweis erbracht, daß beim Bruch der CO_2 -Leitung das He-Cover-Gas, das dann unter einem Überdruck gegenüber der Umgebung von 6 atü steht, nur mit der gemessenen Leckrate in die Umgebung (Reaktorhalle) austreten kann.

Es wurde eine Apparatur konstruiert, die es gestattet, die Gesamtaktivität des Cover-Gases durch direkte Probenahme zu bestimmen. Nach Fertigstellung dieser Apparatur wurde gegen Ende des Reaktorzyklus 09/69 das Loop wieder eingesetzt. Die Analyse des Cover-Gases ergab einen CO_2 -Gehalt von ca. 50 % und eine Gesamtaktivität unterhalb der zulässigen Grenze, die für plötzliche Freisetzung des gesamten Cover-Gases festgesetzt worden war.

Nach sechs Tagen Probetrieb bei Vollast wurde das Loop vor Beginn des nächsten Zyklus noch einmal einem Drucktest unterzogen (16 atm Überdruck). Es war nur eine geringe Vergrößerung der Leckrate festzustellen. Das Loop wurde deshalb für den Betrieb im Reaktorzyklus 10/69 freigegeben.

Nach einem Tag Vollast wurde ein starker Anstieg des Cover-Gas-Drucks durch eindringendes CO_2 festgestellt. Um eine Reaktion des Na mit CO_2 und eine Beschädigung der Hüllrohre durch Korrosion zu vermeiden, wurde daraufhin der Versuch abgebrochen [12].

7.1 Reaktorzyklen

Das 7-Stabbündel wurde im BR 2 in Mol während 139 Vollaasttagen (= 13 Zyklen) bestrahlt. Infolge eines Spaltgasausbruches beim 10. Zyklus wurde - nach einigen Versuchen, um die geplante Bestrahlungszeit ($\hat{=}$ 60.000 MWd/t M Abbrand) einzuhalten - der Versuch im Zyklus 12/69 abgebrochen.

In Tabelle XXI sind u.a. die Zeit- und Leistungsdaten während der BR 2-Zyklen dargestellt [15].

7.2 Neutronenfluß

In [16] wird das Maximum des Spaltneutronenflusses mit

$$\phi_f = 2,09 \cdot 10^{14} \text{ (n} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}\text{)}$$

(gemessen durch die Fe 54 (n,p) Mn 54-Reaktion) angegeben.

Die relative Lage dieses Flußmaximums und die axiale Verteilung zur Position der 7 Prüflinge (- 310 bis + 190 Spaltstoff) kann aus Abb. 17 entnommen werden. Das Flußmaximum liegt für Mol-7A bei Position - 100 mm.

Das Maximum des integrierten Flusses ist

$$\phi_f \cdot t = 2,54 \cdot 10^{21} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \quad [16]$$

Die radiale Flußverteilung im MFBS-5-Loop (Durchmesser 200 mm) ist durch eine Flußabsenkung von ca. 10 % im Zentrum charakterisiert. Tabelle XXII zeigt die Fluß- und Dosismaxima für 3 Energiebereiche.

Tabelle XXII Fluß- und Dosismaxima für 3 Energiebereiche

Energie	Fluß ϕ (n/cm ² sec)	Dosis D ⁺) (n/cm ²)	Dosis D ⁺⁺⁾ (n/cm ²)
> 0,414 eV	$9,9 \cdot 10^{14}$	$1,18 \cdot 10^{22}$	$1,2 \cdot 10^{22}$
> 1,25 keV	$7,6 \cdot 10^{14}$	$9,1 \cdot 10^{21}$	-
> 0,11 MeV	$5,3 \cdot 10^{14}$	$6,3 \cdot 10^{21}$	$7,0 \cdot 10^{21}$

⁺) aus 139 Vollaasttagen gerechnet [12]

⁺⁺⁾ Angabe aus Mol

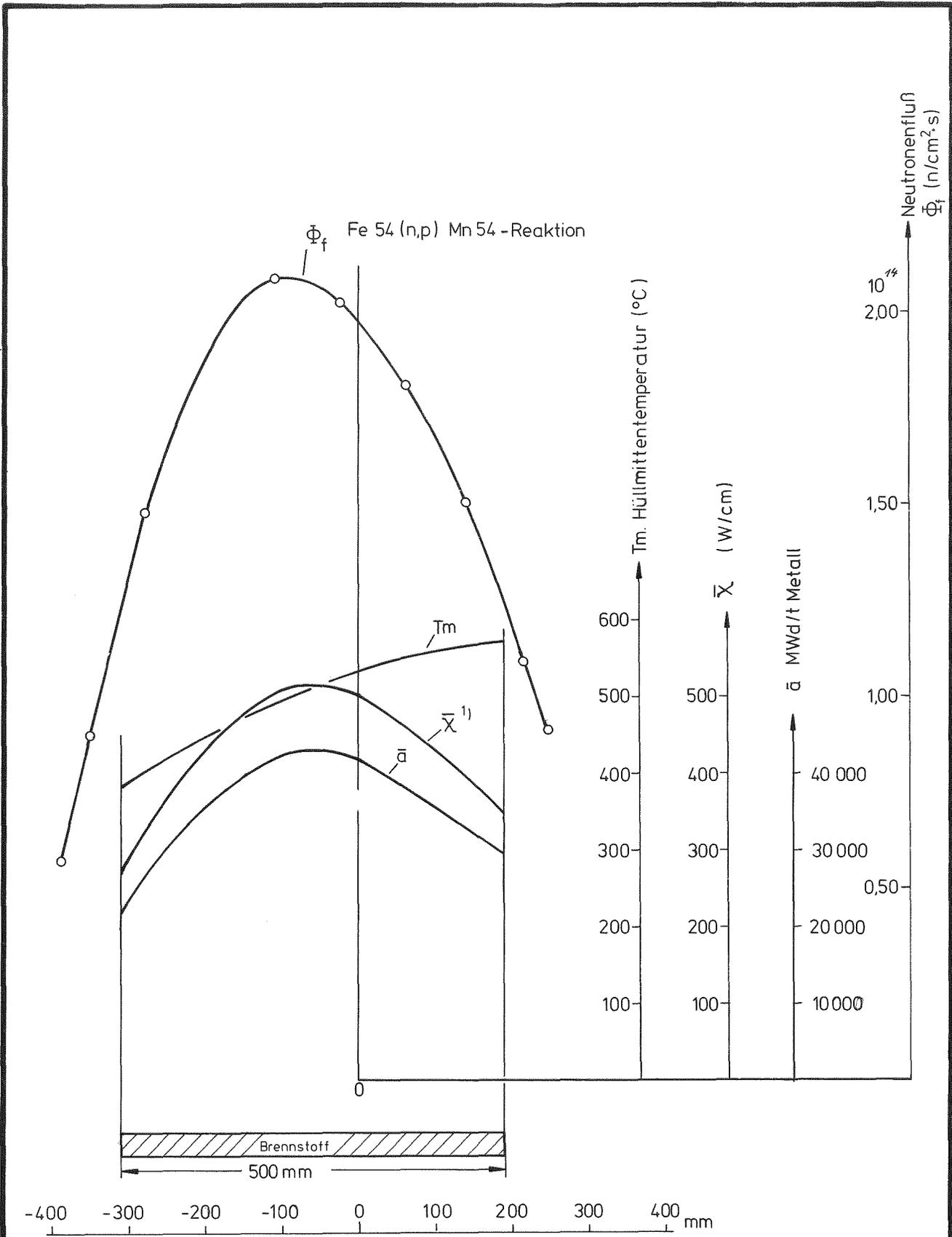
Tabelle XXI

Ablauf der Bestrahlung

BR 2 Zyklus	Beginn Ende	Vollast Tage ⁺)	Zahl der Abschal- tungen	Maximale Leistung des BR 2		MW-Tage im Zyklus (MWd)	Berechneter mittlerer Abbrand ⁺⁺⁾		Äußere Stäbe (MWd/t Metall)
				in (%)	Zyklus (MW)		äußere Stäbe (MWd/t)	innerer Stab (MWd/t)	
12/68	11.09.68 28.09.68	16,06	2	90	63		3525,92	3161,11	4001,9
13/68	04.10.68 18.10.68	13,63	1	97	68	867,7	2989,81	2680,55	3393,4
14/68	26.10.68 08.11.68	12,43	1	98	68,7	817,6	2670,37	2393,51	3030,9
15/68	14.11.68 26.11.68	12,23	1	94	65,8	770,1	2970,37	2662,96	3371,4
16/68	02.12.68 13.12.68	10,72	1	100	70	694,1	2442,59	2189,81	2772,4
17/68	19.12.68 30.12.68	10,78	1	100	70	725,5	2370,37	2125,00	2690,4
01/69	07.01.69 24.01.69	13,94	1	100	70	939,6	3423,14	3068,51	3885,2
02/69	30.1.69 11.2.69	11,29	1	100	70	862,2	2694,44	2498,14	3058,1
03/69	18.02.69 08.03.69	12,86	2	90	63	811,8	2539,81	2274,07	2882,7
04/69	15.03.69 31.03.69	11,67	2	100	70	808,6	2887,96	2589,81	3277,7
05/69	04.04.69 06.04.69	1,14	1	95	66,5	855,9	268,51	248,14	304,7
11/69	23.08.69 29.08.69	5,80	1	100	70	1230,8	1233,33	1105,55	1399,8
12/69	05.09.69 11.09.69	5,40	1	100	70	910,4	1051,85	942,59	1193,9
S u m m e		139,0	17				31.068,0	27.940,0	35.262,5

+) oberhalb 90 % Nennleistung des Reaktors.

++) MWd durch Spaltung in den Brennstäben, bezogen auf $UO_2 + PuO_2$ [13] (Umrechnung: 0,881). Werte aus [13] um 8 % erniedrigt lt. [14]



1) aus [14] übernommen

Axiale Verläufe von Fluß, mittlerer Stableistung, -
Hüllmittentemperatur und-Abbrand über alle
Zyklen der 6 äußeren Stäbe

Abb. 17

7.3 Temperatur und Stabileistung

Die Stabileistung wurde jeweils für Zyklusbeginn und -ende aus den kontinuierlichen Temperaturen der verschiedenen Meßstellen (Abb. 18) über die Leistungsbilanz über Primär- und Sekundärkreislauf [15] mit dem Programm MISTRAL berechnet.

In Abb. 19 wird die Hüllmitten-Temperatur der äußeren Stäbe gezeigt. Die maximal errechnete Stabileistung betrug 590 W/cm (Zyklus 01/69) [17]. Mit diesem Wert wurde der ursprünglich spezifizierte Wert von 500 W/cm um fast 20 % überschritten. Die Ursache hierfür lag in einer Unzulänglichkeit bei der Berechnung des epithermischen Flusses im BR 2.

Die Lage der Thermoelementmeßstellen im Natrium (Zone II), mit deren Hilfe die Hüllaußen-, Mitt- und Innentemperaturen der Außenstäbe gerechnet wurden, kann aus Abb. 15 entnommen werden. Weiterhin ist hier die Position des Thermoelementes TE 60 zur Bestimmung der Hüllaußentemperaturen der äußeren Stäbe eingezeichnet. Abb. 17 zeigt weiterhin den axialen Verlauf des Neutronenflusses, der mittleren Stabileistung, des mittleren Abbrandes und den Verlauf der Hüllmitten-Temperatur der Außenstäbe. Die Temperaturprofile für den inneren Stab liegen um 3 bis 6°C niedriger.

Die maximale Hüllmittentemperatur der Außenstäbe betrug $600 \pm 10^\circ\text{C}$, sie wurde - wie aus Abb. 19 hervorgeht - ebenfalls im Zyklus 1/69 erreicht. Die Temperaturverteilung der Außenstäbe ist nicht einheitlich über den Umfang. Die Temperaturangaben auf Abb. 19 beziehen sich auf die nach innen gekehrte heißere Seite der Außenstäbe.

7.4 Abbrand

Die Berechnung des mittleren Abbrandes \bar{A} der Prüflinge wird über die aus den Temperaturwerten gewonnenen mittleren Stabileistung \bar{X} der Außenstäbe nach der folgenden Gleichung

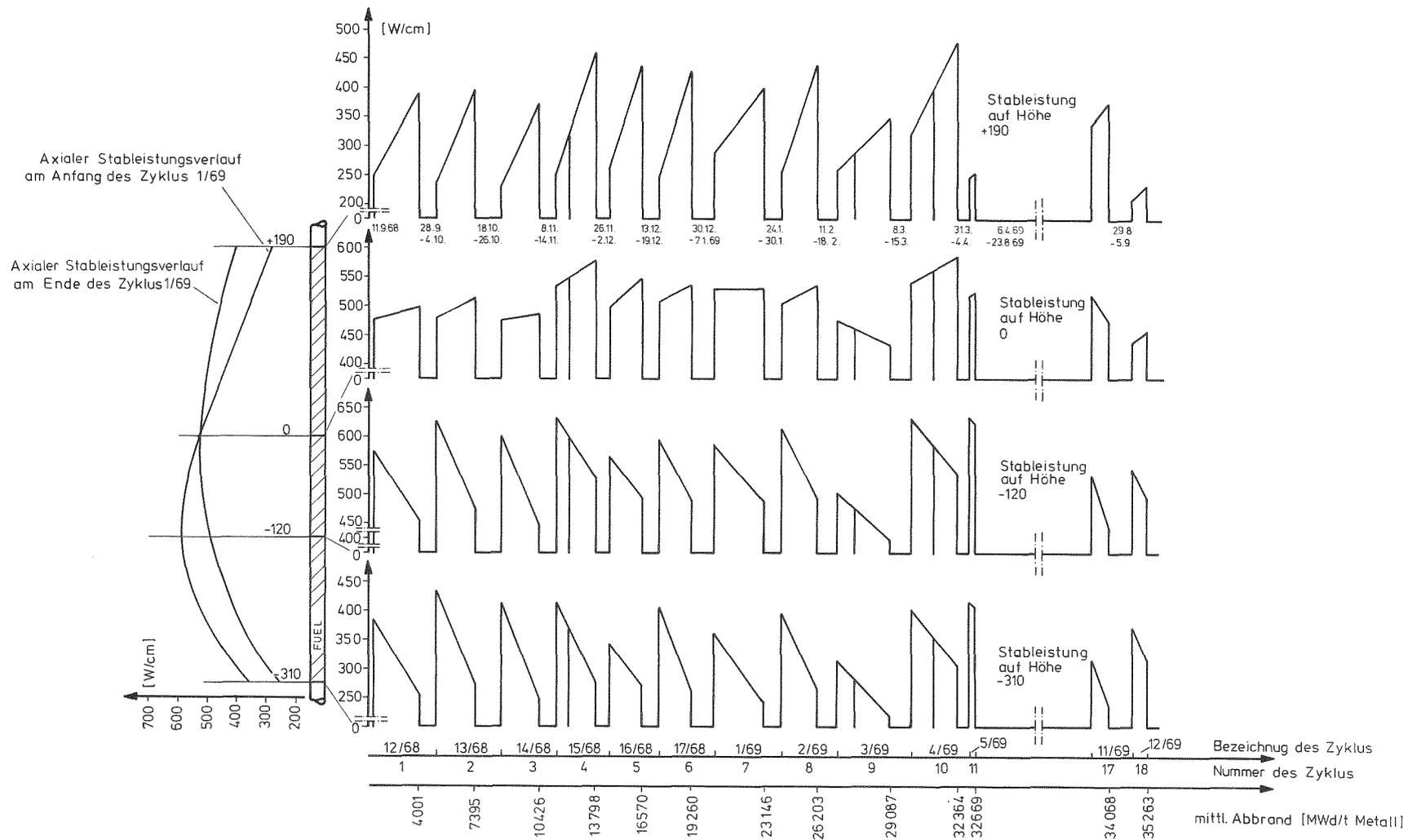
$$\bar{A} = \bar{X} \cdot \frac{l}{G} \cdot t_v$$

mit l = Brennstofflänge (cm)

t_v = Bestrahlungszeit (Vollastäquivalent) (d)

G = Brennstoffgewicht (Metall) (g)

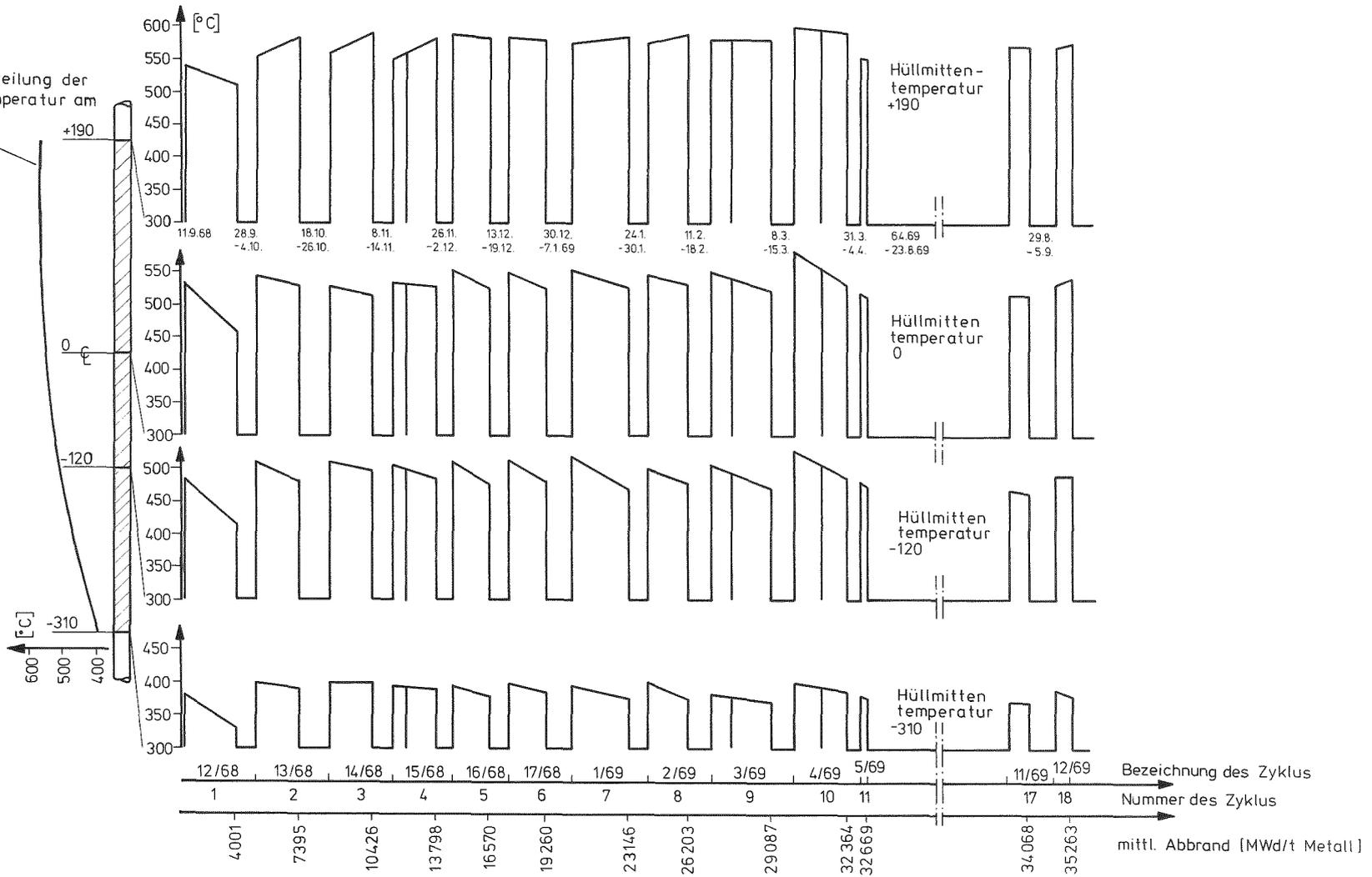
vorgenommen (Abb. 17).



mittlere Stableistung der äußeren Stäbe
für verschiedene Querschnitte

Abb. 18

Axiale Verteilung der Hüllmittentemperatur am Anfang des Zyklus 1/69



Hüllmittentemperatur der äußeren Stäbe

Abb. 19

Während der 13 Betriebszyklen (139 Vollaustage) des BR 2 wurden mittlere Abbrände von 35, 26 (Außenstäbe) und 31, 70 MWd/kg M (Innenstab) erreicht. Die Werte wurden aus Temperatur- und Stableistungsdaten der BR 2-Betriebsprotokolle berechnet (s.a. Tabelle XXI).

Tabelle XXIII zeigt die axiale Verteilung des Abbrandes über die Spaltstofflänge von 500 mm (-300 bis +190). Derselbe Verlauf ist grafisch in Abb. 17 im Vergleich mit mittlerer Stableistung, Hüllwandtemperatur des Außenstabes und Flußverlauf im BR 2 dargestellt.

Tabelle XXIII Axiale Verteilung des Abbrandes der Außenstäbe

Höhenkote (mm)	-300	-200	-100	-50	0	+100	+190
Abbrand (MWd/kg M)	21,60	35,60	42,34	42,76	41,50	35,30	29,10

Durch Ausplanimetrieren der Fläche unterhalb der Abbrandkurve (Abb. 17, Tabelle XXIII) erhält man den schon in Tabelle XXI angegebenen Wert von 35262 MWd/t M. Berücksichtigt man eine Gesamtenergiefreisetzung bei der Spaltung von 200 MeV und das Maximum der mittleren Stableistung von 520 W/cm (Abb. 17), so ergibt sich der in [14] angegebene maximale Abbrand von 46,5 MWd/kg M.

8. Untersuchung und Demontage des Bündels

8.1 Partielle Zerlegung des Bestrahlungseinsatzes in Mol

In den mit Inertgas gefüllten Hochaktivitätszellen ATHA in Mol wurde vom gesamten Bestrahlungseinsatz der Abschnitt mit den Brennstäben abgetrennt. Dazu wurde zunächst oberhalb der Brennstäbe (1350 mm vom unteren Ende des Einsatzes) ein Schnitt durch das Rohr mit den Durchmessern 53/50 geführt. Der Natriumkreislauf wurde dabei noch nicht geöffnet. Das getrennte Außenrohr wurde nach unten abgezogen. Der nächste Schnitt erfolgte mit einem Rohrschneider kurz unterhalb der Stäbe (105 mm vom unteren Ende des Einsatzes), wobei der Natriumkreislauf geöffnet wurde. Aus dem kurzen abgetrennten Teil wurden zwei Na-Proben zur Analyse entnommen, um die Kontaminationsgefahr durch im Natrium vorhandene Spaltprodukte und Brennstoff abzuschätzen.

In den Proben wurde kein Brennstoff, jedoch erhebliche Mengen von Spaltcäsium gefunden (110 mC Cs-137, 40 mC Cs-134). Als letzter Schnitt wurden oberhalb der Stäbe (1150 mm über Schnitt Nr. 2) die beiden Natriumführungsrohre (Durchmesser 48/45 und 38/35) mit einem Rohrschneider durchgetrennt.

Der abgetrennte Abschnitt bestand nun aus drei konzentrischen Edelstahlrohren mit dem Sieben-Stab-Bündel in der Mitte. Alle Zwischenräume waren mit festem Natrium gefüllt. Der Außendurchmesser dieses Zylinders betrug 48 mm, seine Länge 1150 mm.

Zum Schutz des Natriums wurde der Abschnitt mit Endkappen versehen und in einen Argon-gefüllten Primärbehälter für den Transport geladen.

8.2 Betatron-Durchleuchtung

Aus dem zeitlichen Ablauf des Schadenfalles sowie der in den Kreislauf freigesetzten Spaltgasmenge war es nicht möglich zu entscheiden, ob ein oder mehrere Stäbe defekt geworden waren. Weiterhin war unbekannt, ob es sich nur um eine kleine Leckstelle, etwa im Bereich der Schweißnähte oder um einen großen Hüllrohrriß bzw. einen Stabbruch handelt.

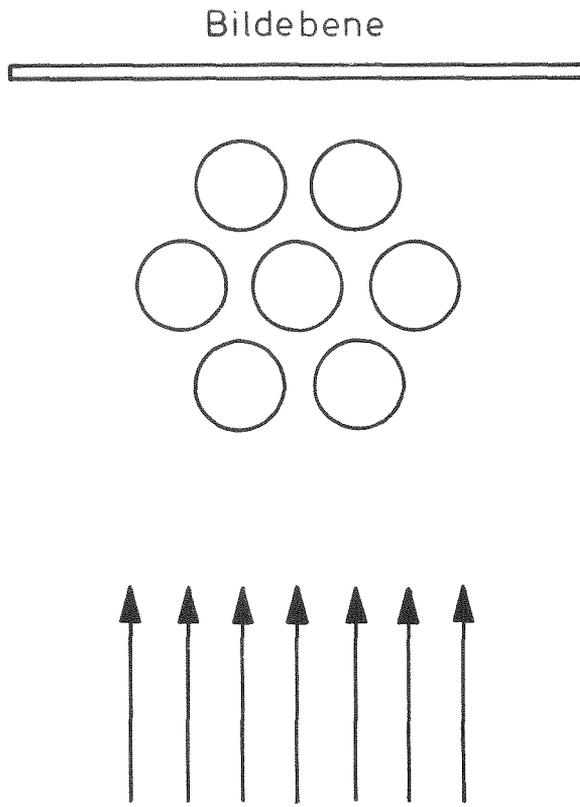
Das primäre Ziel der Betatron-Durchleuchtung war daher, das Ausmaß des Schadens festzustellen, um eine geeignete Zerlegung des Bündels vorzubereiten. Daneben sollte die grundsätzliche Frage geklärt werden, ob mit Hilfe einer Betatron-Durchleuchtung Stabdefekte in einer Bündel-Konfiguration sichtbar gemacht werden können [18].

Die Durchleuchtung des Bündels wurde noch im Transportbehälter, einem beidseitig verschraubtem Rohr mit 53 mm Außendurchmesser, vorgenommen. Die Einzelaufnahmen umfaßten jeweils einen Abschnitt von etwa 150 mm. Bei einer leichten Überlappung der Bildränder waren über die Bündellänge 12 Aufnahmen zur vollständigen Abbildung erforderlich. Aufgrund der großen Länge mußte nach 6 fortlaufenden Aufnahmen das Rohr um 180° gekippt und von der anderen Seite mit den Aufnahmen weitergefahren werden. Damit ergeben sich 2 Aufnahmeserien, in denen die Stabposition rechts-links spiegelbildlich vertauscht ist. Die Gesamtlänge des Bündels wurde mit 2 verschiedenen Stabgitterorientierungen durchleuchtet (Abb. 20). In Orientierung I liegen in dem hexagonalen Gitter außen zwei, in der Mitte drei Stäbe im Bild übereinander. Zwischen den Stabgruppen liegt jeweils ein Spalt. Damit lassen sich besonders gut verbogene oder aufgeschwollene Stäbe und ausgetretener Brennstoff erkennen. Bei Orientierung II sind die Stäbe im Bild ohne Spalt nebeneinander zu sehen. Da nun drei Stäbe ohne Abschirmung durch ihre Nachbarn allein abgebildet werden und nur vier Stäbe jeweils zu zweit hintereinander stehen, kann hier besser die innere Struktur, d.h. der Zentralkanal bzw. zentrale Hohlräume im Brennstoff beurteilt werden.

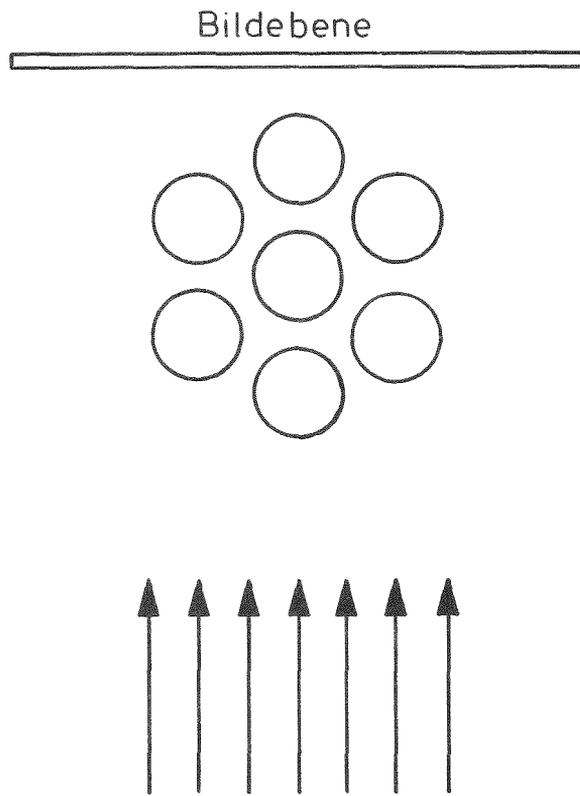
In Abb. 21 ist eine Bildserie dargestellt, die mit der Stabgitterorientierung I aufgenommen wurde.

Eine Auswertung aller Betatron-Aufnahmen ergab für das Stabbündel folgendes Bild:

Stabgitterorientierung II



Stabgitterorientierung I.

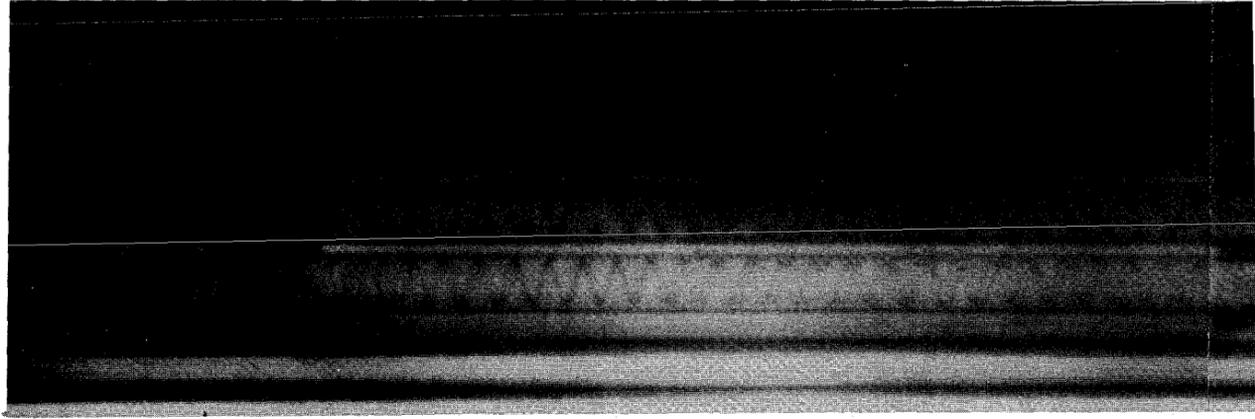


Mol-7A

Orientierung der Betatron - Durchleuchtung

Abb. 20

ob

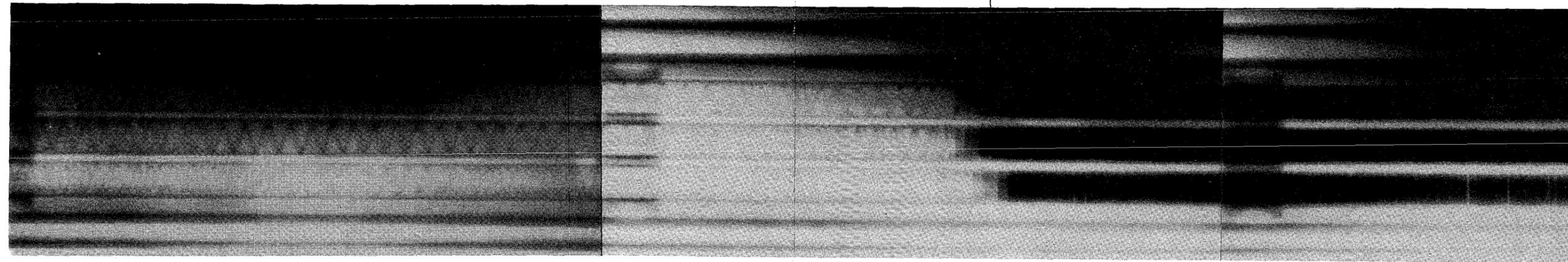


△ Abstandhalter

*

erer Spaltgasraum

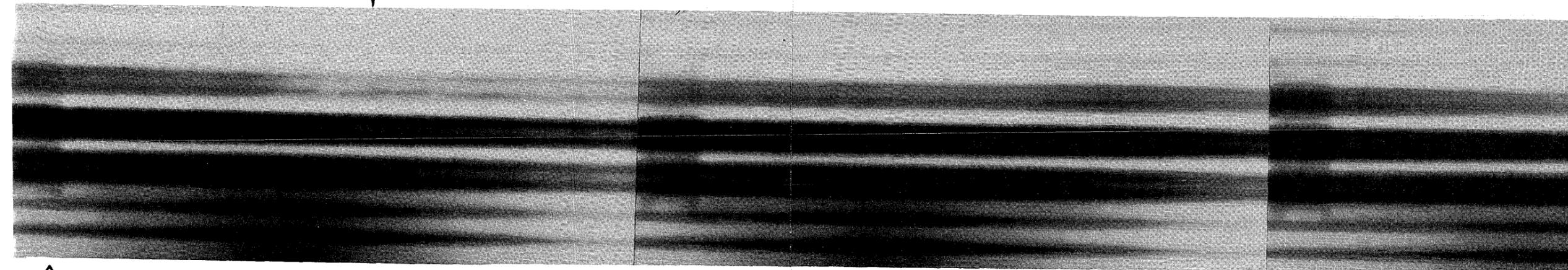
obere Brutstoffsäule



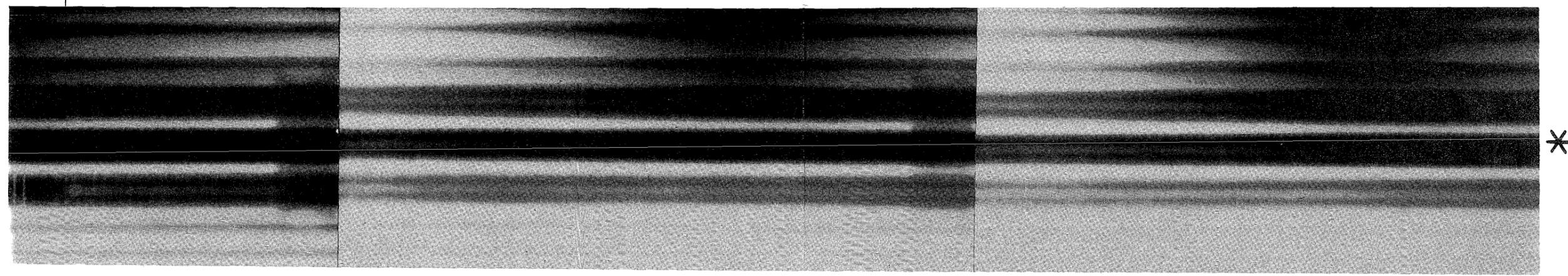
Schadensstelle



Spaltstoffsäule



Spaltstoffsäule

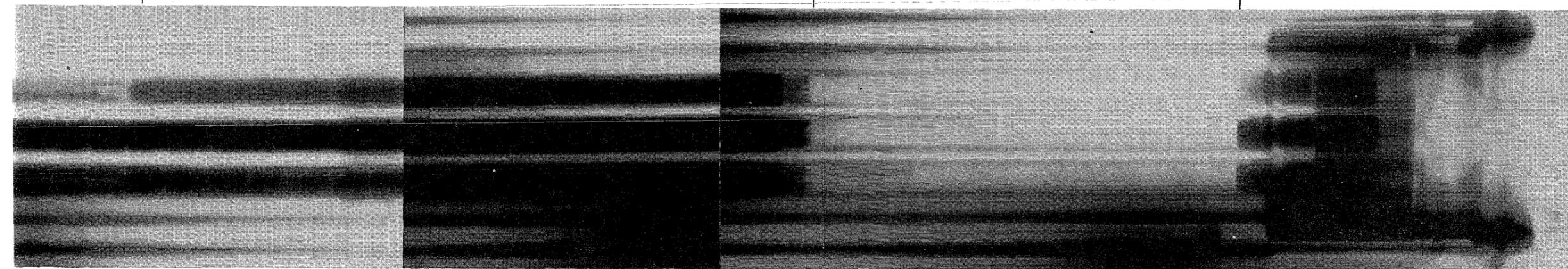


△

△

untere Brutstoffsäule

unterer Spaltgasraum



△

atron-Durchleuchtung des Stab-Bündels Mol-7A

- 1.) Nur an einem Stab sind auffällige Besonderheiten zu sehen. Dieser Stab ist einer der 6 Außenstäbe. Eine Ausbreitung des Schadens hat nicht stattgefunden.

- 2.) Die Brennstoffsäule dieses Stabes zeigt etwa in der Mitte zwischen den Abstandshaltern 7 und 8 eine deutliche zigarrenförmige Vergrößerung des Zentralkanals, die sich über mehrere Zentimeter erstreckt. Der übrigbleibende Brennstoffkamin ist ungleichmäßig dick und von Rissen durchzogen. Der Verdacht eines Stabschadens an dieser Stelle liegt nahe.

Ferner weist das untere (kalte) Ende der Brennstoffsäule einen walzenförmigen ca. 6 mm langen zentralen Hohlraum auf, der nach oben zu verstopft ist. Ein weiterer Schaden in der Nähe dieser Stelle kann nicht ausgeschlossen werden, obwohl er wegen der niedrigen Hüllwandtemperatur unwahrscheinlich ist.

- 3.) Zwischen den Stäben sind keine ausgeschwemmten Brennstoffpartikel zu sehen. Es ist daher anzunehmen, daß der Brennstoff auch an der Schadensstelle noch von der Hülle umgeben ist.

- 4.) Das Bündel zeigt insgesamt einen regelmäßigen Aufbau. Stäbe und Abstandshalter sind nicht verbogen.

Der als beschädigt angesehene Stab konnte aufgrund der Betatron-Aufnahmen nicht eindeutig identifiziert werden. Es fehlten hierzu drehorientierte Merkmale am Bündel.

8.3 Röntgen-Durchleuchtung

Um die Fehlererkennbarkeit zweier Durchleuchtungsmethoden miteinander vergleichen zu können, wurde das Bündel in der gleichen Umhüllung mit einer 400 keV-Röntgenanlage durchleuchtet⁺⁾. Wegen der geringen

^{+) Die Durchleuchtung mit der 400 keV-Röntgenanlage wurde am Europäischen Institut für Transurane, Karlsruhe, durchgeführt.}

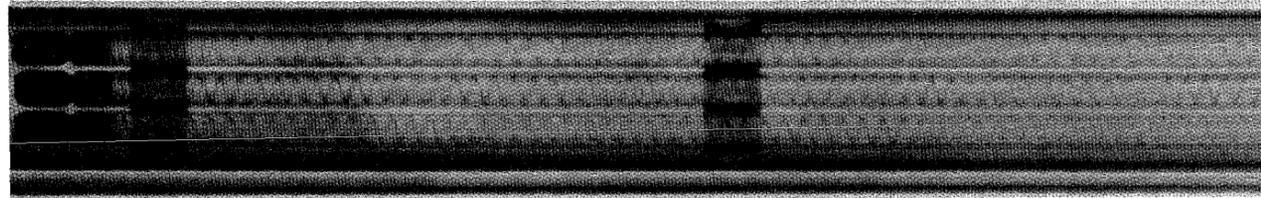
Durchdringungsfähigkeit der Röntgen-Strahlen war eine Brennstoffdurchleuchtung zur Sichtbarmachung des Zentralkanals nicht möglich. Es wurde deshalb in der Stabgitterorientierung I (s. Abb. 22) eine Umleuchtung der Stäbe vorgenommen. Hierbei ließ sich ein besonders starker Kontrast zwischen den Konturen der Brennstäbe und den dazwischenliegenden Spalten erzielen. Die Auswertung der Röntgen-Bilder hinsichtlich eines Stabschadens führte zu folgendem Ergebnis:

- 1.) Als einzige Anomalie läßt sich im Bündel, etwa in der Mitte zwischen den Abstandshaltern 7 und 8, eine einseitige Verengung des Spaltes zwischen den Brennstäben erkennen. Die Form und Größe dieser Verengung läßt vermuten, daß ein Stab ca. 1 mm aufgeschwollen ist. Eine Schadensausbreitung ist nicht erkennbar.
- 2.) In den Spalten zwischen den Brennstäben sind keine Brennstoffpartikel vorhanden. Vermutlich wurde kein Brennstoff aus der Schadensstelle ausgetragen.
- 3.) Der anomale Stab ist ein Außenstab.

Durch weitere Aufnahmen, in denen das Bündel um 60° gedreht wurde, konnte der anomale Stab als Außenstab identifiziert werden. Die Größe der beobachteten lokalen Aufschwellung änderte sich in den anderen Aufnahmen nur unwesentlich. Sie lag bei allen Aufnahmen jeweils auf der Innenseite des Bündels.

8.4 Sipping-Test

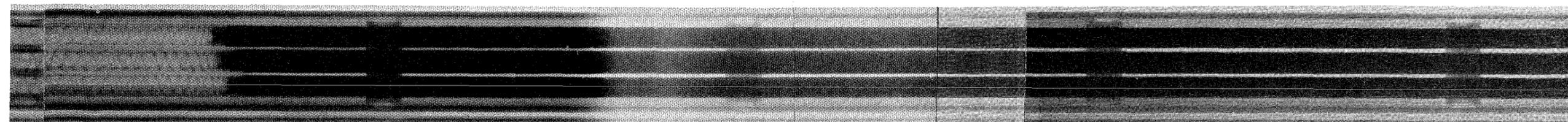
Von der Fa. Belgonucleaire wurde der Vorschlag gemacht, am defekten Bündel die Durchführbarkeit eines sogenannten Sipping-Tests zu erproben. Dieser Test, der bei Brennelement-Bündeln aus Wasser-Reaktoren zur Erkennung von Leckagen üblich ist, besteht in einem leichten Aufheizen der Stäbe und Bestimmen des ausgetretenen Spaltgases durch Messung seiner Radioaktivität. Dabei wird zwischen "Dry Sipping" (Aufheizen ohne flüssiges Kühlmittel) und "Wet Sipping" (Aufheizen im flüssigen Kühlmittel) unterschieden.



△ Abstandhalter

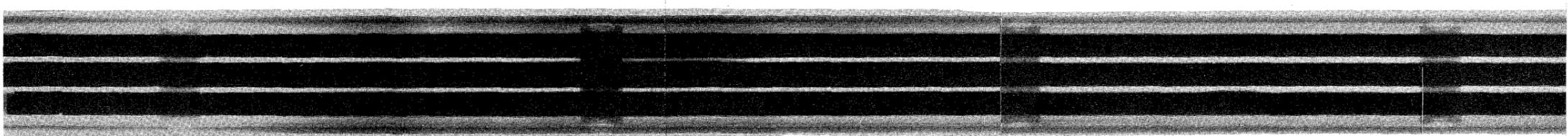


oberer Spaltgasraum



Schade

Tablettensäule

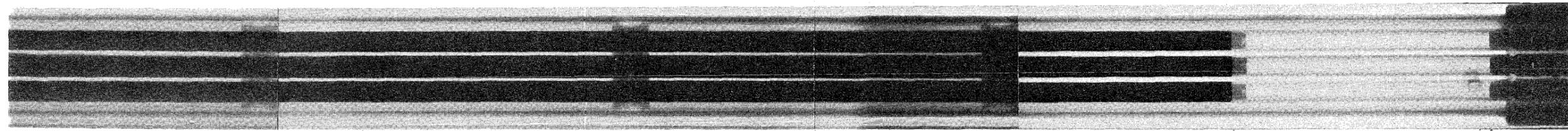
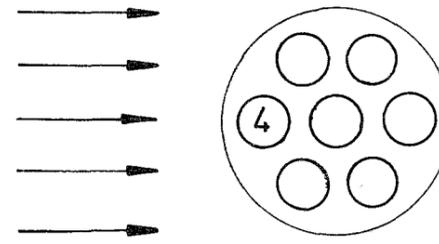


Sc



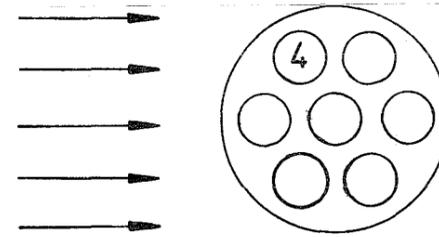
△ Abstandhalter

Abb.: 22 Rör

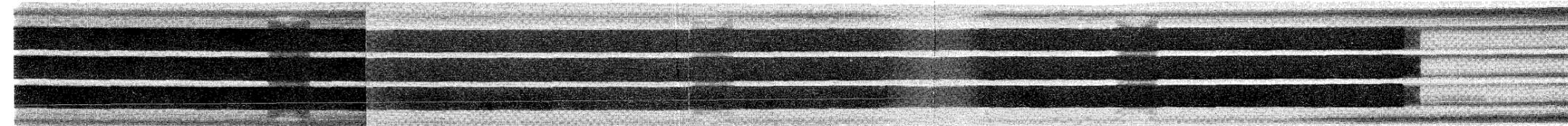


sstelle

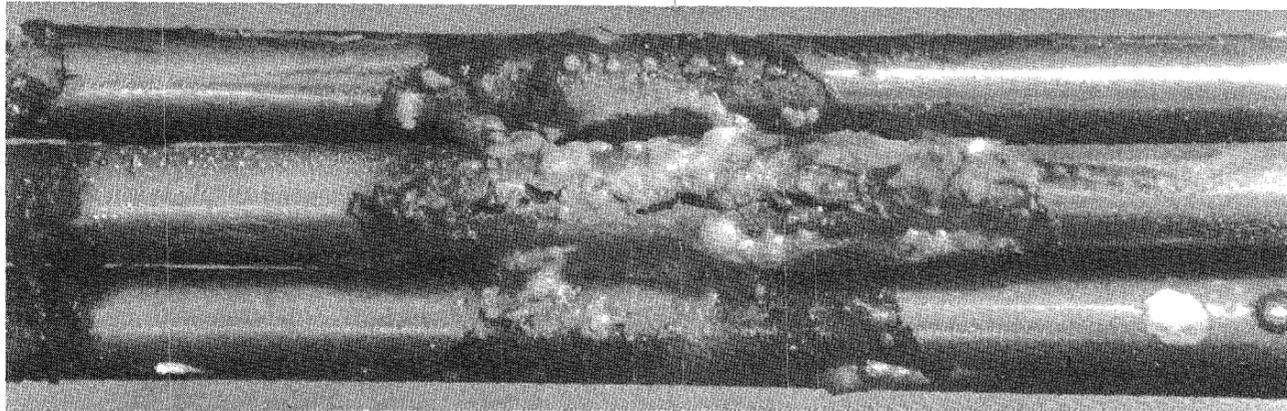
unterer Spaltgasraum



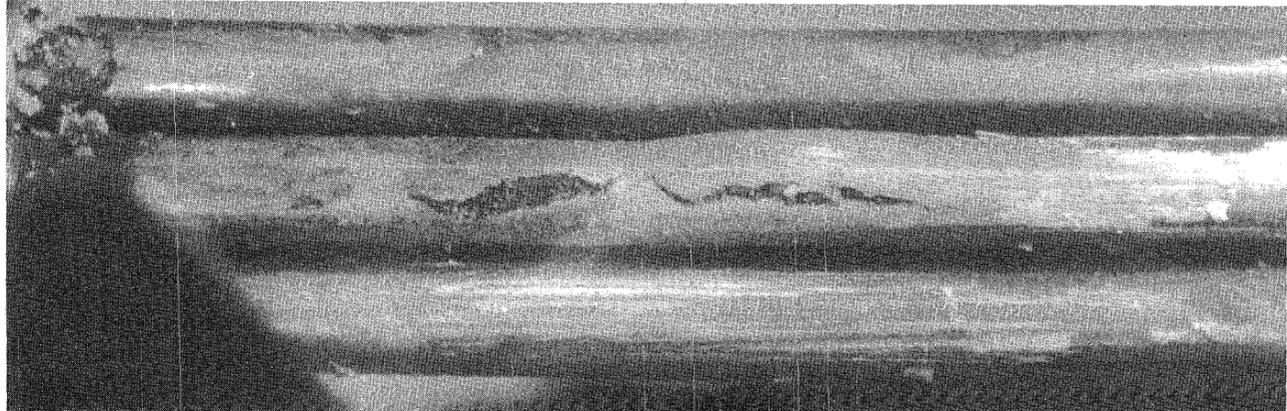
idenssstelle



igen-Umleuchtung des Stab-Bündels Mol-7A



Vor der
Reinigung



Nach der
Reinigung

Mbl - 7 A
Stabschäden zwischen Abstandshalter 7 und 8

Abb. 25

Für das Mol-7A-Bündel wurde eine Serie von 13 Sipping-Tests durchgeführt, die abwechselnd mit und ohne Kühlmittel vorgenommen wurden. Die Maximaltemperatur wurde bei diesen Experimenten auf 400°C festgelegt. Dabei ging man von der Überlegung aus, daß die Hülle beim Test nicht höher erwärmt werden sollte als während der Bestrahlung. Für den kältesten Abschnitt des Stabes (unteres Ende) lag während der Bestrahlung bei einer Kühlmittel-Eintrittstemperatur von etwa 370°C die Hüllmittentemperatur am Anfang der Brennstoffsäule bei 400°C .

In den Einzelversuchen wurde das Bündel jeweils langsam bis zur Versuchstemperatur aufgeheizt. Während dieser Phase sollten vor allem thermische Schocks im Brennstoff vermieden werden. Anschließend wurde die Versuchstemperatur ca. 20 Minuten gehalten und das in dieser Zeit austretende Spaltgas im Heliumstrom weggespült. Die Abkühlung erfolgte ebenfalls wieder ohne Temperaturschocks. Um das Natrium während der gesamten Versuchsserie stets flüssig zu halten, wurde die Temperatur von 175°C auch in den Zwischenzeiten nicht unterschritten. Die ersten Sipping-Tests wurden bei 240°C Maximaltemperatur durchgeführt und erst in den letzten 6 Experimenten wurde die weiter oben erwähnte Temperaturgrenze von 400°C erreicht.

Neben der thermischen Behandlung wurde noch der Frage nachgegangen, ob und in welchem Maße während der Sipping-Tests die Stäbe einem korrosiven Außenangriff ausgesetzt waren. Die Verwendung von hochreinem Helium für das Dry-Sipping sowie der niedrige Sauerstoffgehalt des verwendeten Natriums lassen zusammen mit der niedrigen Temperatur einen korrosiven Angriff von außen als unerheblich erscheinen.

Insgesamt wird bei der weiteren Untersuchung davon ausgegangen, daß die intakten Stäbe im Sipping-Test keine Veränderung hinsichtlich des Brennstoffes und des Hüllmaterials erfahren haben. Für den defekten Stab wird neben der bewußt verstärkten Spaltgasfreisetzung lediglich eine geringe mechanische Wirkung des aus- und einströmenden Natriums auf den Brennstoff im Bereich der Schadensstelle erwartet.

Die Ergebnisse des Sipping-Tests wurden an anderer Stelle veröffentlicht [19].

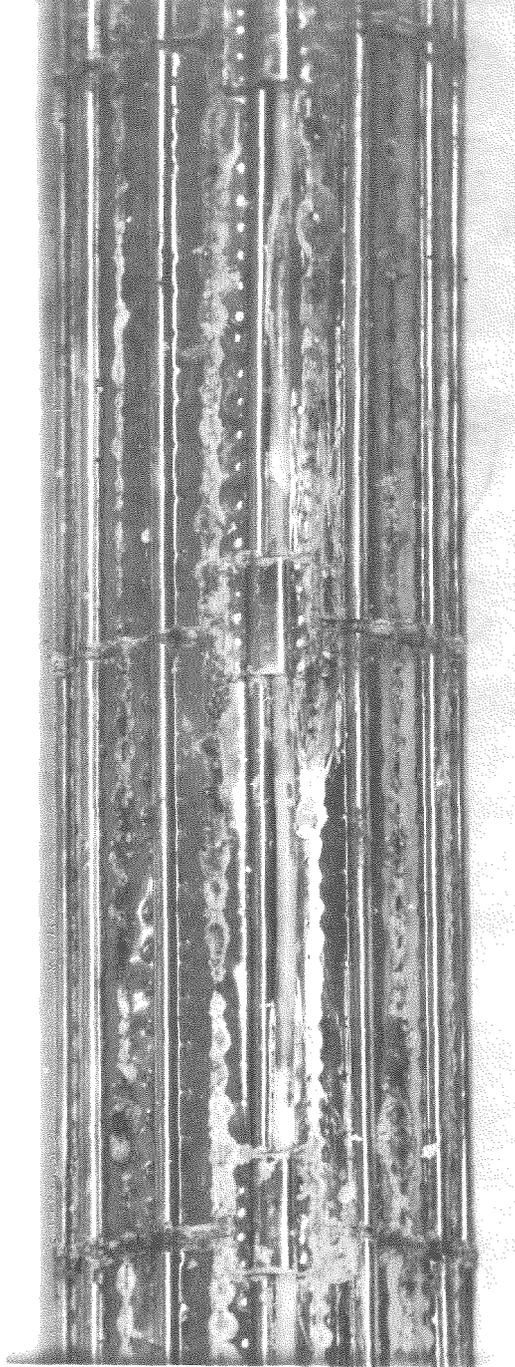
8.5 Vollständige Zerlegung des Stab-Bündels

Der herausgesägte Abschnitt des Bestrahlungseinsatzes enthielt das Stabbündel, umgeben von drei konzentrischen Rohren, deren Zwischenräume noch teilweise mit Natrium gefüllt waren. Von einem generellen Entfernen des Natriums durch Auslösen mit Alkohol bzw. Wasser wurde Abstand genommen, um die Schadensstelle durch aufquellendes Hydroxid nicht zu verändern.

Die Demontage begann mit dem Abziehen des äußersten Rohres, das im Bestrahlungseinsatz die äußere Begrenzung des Natriumkreislaufes gebildet hatte. Das Außenrohr konnte ohne Schwierigkeiten abgezogen werden. In Abb. 23 ist ein Abschnitt des Bündels nach diesem Demontageschritt zu sehen.

Die darauffolgende Entfernung des mittleren Rohres (zentrales Natriumleitrohr) bereitete große Schwierigkeiten. Zunächst wurde das Rohr von außen mehrfach angebohrt und anschließend erwärmt, um das noch eingeschlossene Natrium abfließen zu lassen. Danach wurde am unteren Ende eine Scheibe abgesägt. Der Schnitt wurde dabei so gelegt, daß die Brennstäbe oberhalb ihrer Verstiftung in der Gitterplatte durchtrennt wurden und damit herausziehbar waren. Abb. 24 zeigt das untere Bündelende mit der abgetrennten Scheibe. Durch einen weiteren Schnitt am oberen Rohrende wurden die Distanznocken des innersten Rohres mit abgeschnitten. Danach sollte das zentrale Natriumleitrohr nunmehr abziehen sein. Ein entsprechender Versuch blieb jedoch ohne Erfolg. Durch weitere Schnitte wurde das Rohr dann stückweise entfernt. Dabei zeigte sich, daß trotz vorangegangener partieller Auslöseversuche noch immer Natrium bzw. Oxidreste im Spalt zwischen Leitrohr und Innenrohr ein Abziehen blockierten. Außerdem mußte eine vorher nicht bekannte Verstiftung, die die Demontage ebenfalls behinderte, entfernt werden.

Am freigelegten Innenrohr wurden nun die 10 mal drei Schweißstellen der Abstandshalter durch Abfräsen gelöst und das Rohr längsgeschlitzt. Darauf konnte das Stabbündel aus den Halbschalen herausgenommen werden. Abb. 25 zeigt das Bündel zwischen den Abstandshaltern 7 und 8. An einem Stab ist ein mehrere Zentimeter langer Längsriß zu erkennen, der nach der Außenseite des Bündels gekehrt ist. Im Bereich dieses Hüllschadens ist der Stab aufgeschwollen. Die wabenförmigen Abstandshalter konnten über diese Schadensstelle nicht hinweggezogen werden. Sie wurden daher nacheinander nach oben und unten vom Stabbündel abgezogen. Abb. 26 zeigt die Abstandshalter nach dem Ausbau.

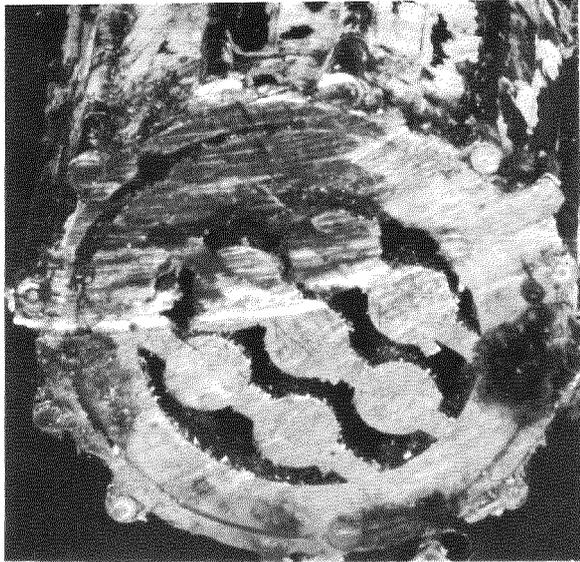


Mol-7A

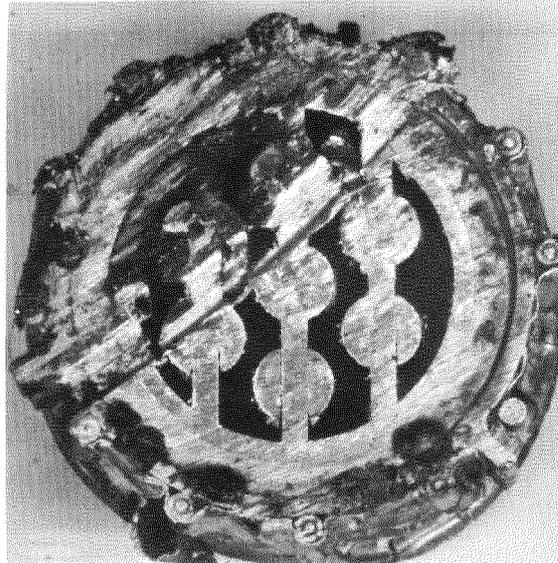
Mittleres Na-Leitrohr mit Heizleitern,
Thermoelementen und Na-Resten

Pos: etwa 100mm von der unteren Rohrkante

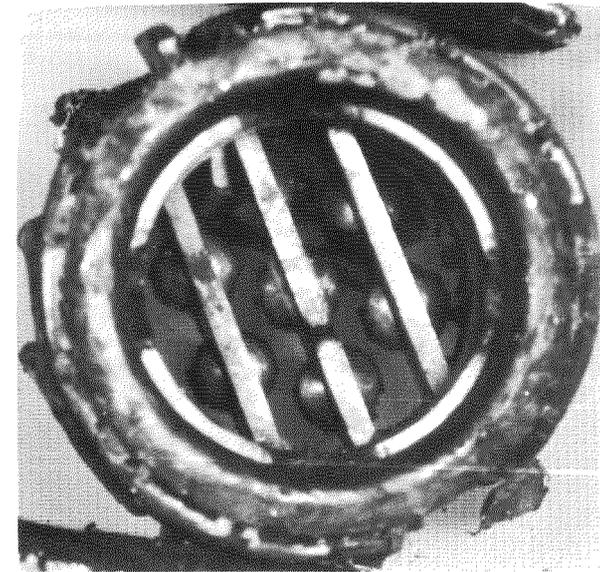
Abb. 23



Unteres Bündelende



von der Schnittfläche gesehen



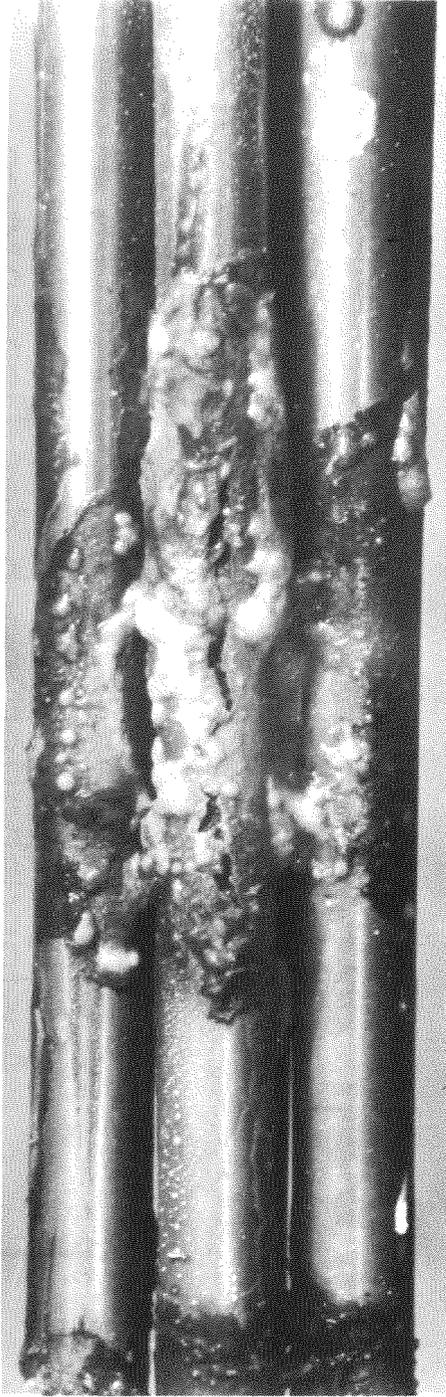
vom unteren Ende gesehen

Abgetrennte Scheibe

Mol-7A

Unteres Bündelende während der Zerlegung

Abb. 24



Vor der
Reinigung

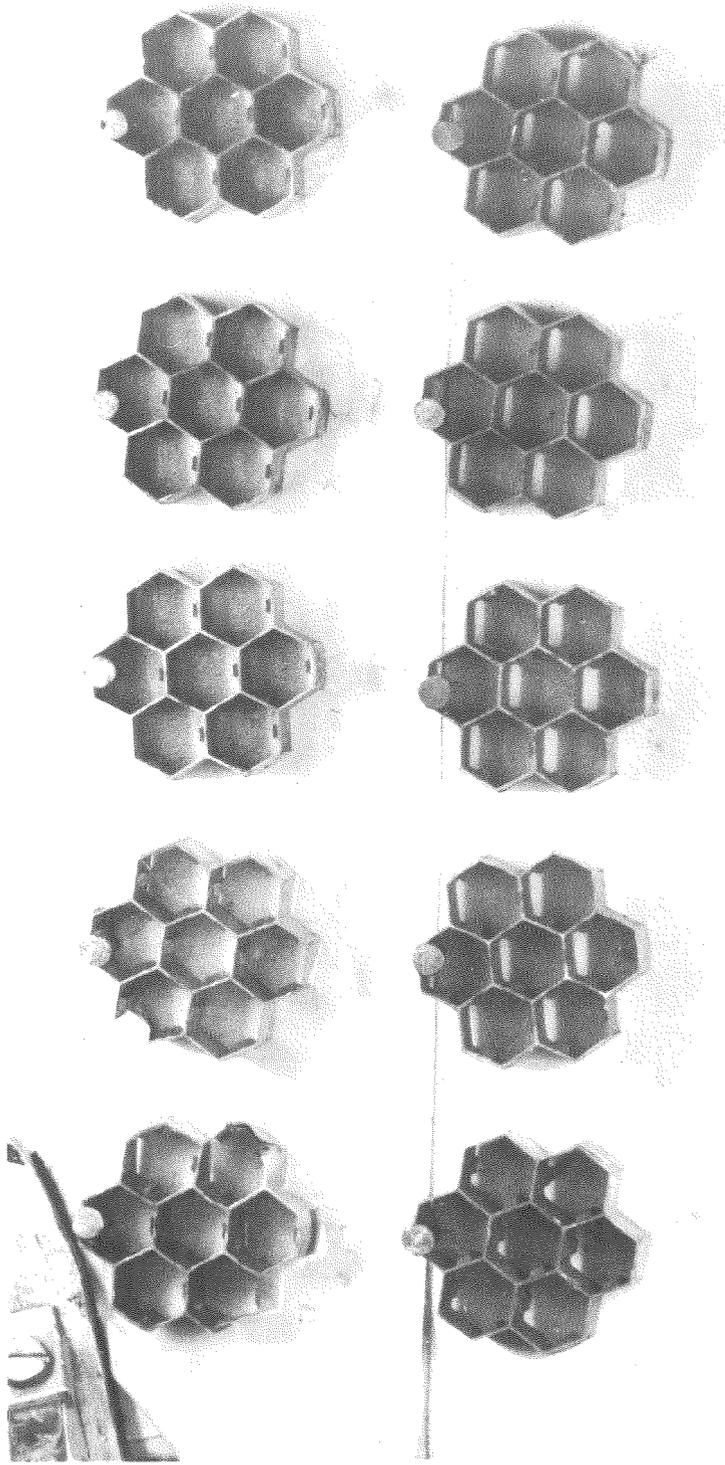


Nach der
Reinigung

Mol - 7 A

Stabschäden zwischen Abstandshalter 7 und 8

Abb. 25



Mol-7A

Abstandshalter nach der Demontage
des Stab-Bündels

Abb. 26

9. Zerstörungsfreie Untersuchung der Stäbe

9.1 Visuelle Kontrolle und äußere Vermessung

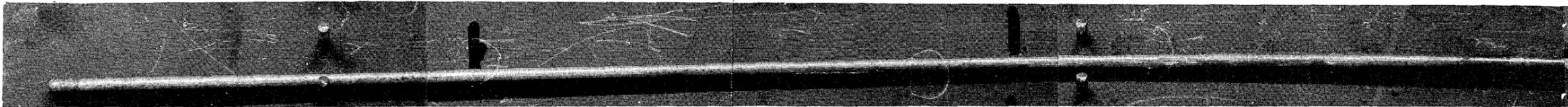
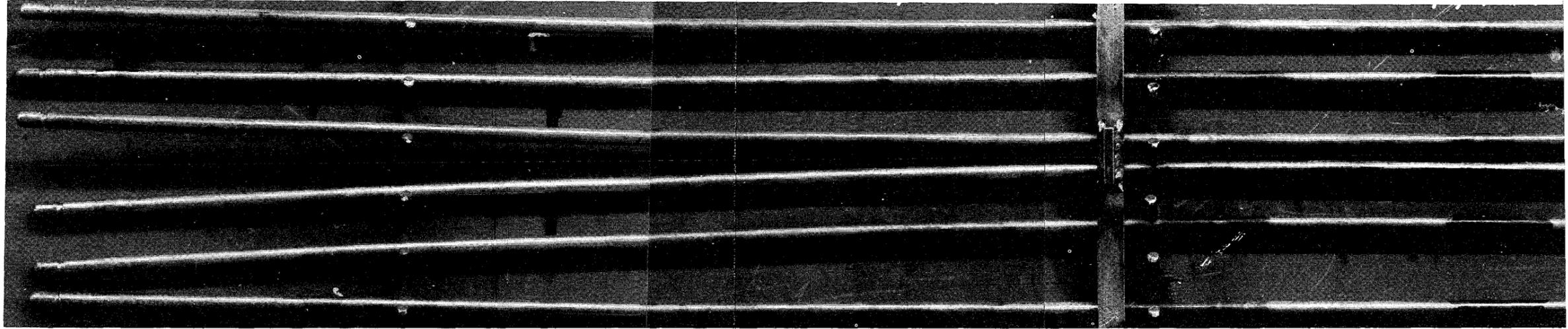
Die 6 intakten Stäbe sind in Abb. 27, der aufgeplatzte Stab in Abb. 28 zu sehen. Äußerlich hatten die unversehrten Stäbe ein metallisch blankes Aussehen, bis auf die Positionen der Abstandhalter, die durch eine dunklere Färbung gekennzeichnet sind [20].

9.1.1 Tablettensäulenlänge

Die Bestimmung wurde an den Negativen der Röntgen- und Betatron-Durchleuchtungen vorgenommen. Die 500 mm langen Brennstoffsäulen der Mol-7A-Stäbe haben sich während der Bestrahlung um etwa 1,5 mm, das sind 0,3 % ausgedehnt. Eine Ausnahme bildet Stab 3, bei dem eine axiale Ausdehnung von 5 mm entsprechend 1 % gemessen wurde. Die Länge der Brutstoffsäulen blieb durch die Bestrahlung unverändert [10].

In Tab. XXIV sind die Änderungen von Brennstoff- und Brutstoff-Säulenlänge wiedergegeben. Die Vergleiche konnten zum Teil nur mit den Angaben aus dem Prüfbericht vorgenommen werden, da in den Röntgenaufnahmen vor der Bestrahlung der Übergang zwischen Brennstoff und Brutstoff nicht immer eindeutig erkennbar war. Die Notwendigkeit, mit errechneten Längenangaben aus dem Prüfbericht zu arbeiten, führte bei Stab 9 zu einem Fehler. Wie sich aus der Gesamtvermessung ergibt, war die Brennstoffsäule vor der Bestrahlung um etwa 4 mm länger als im Prüfbericht angegeben. Korrigiert man diesen Wert, so reduziert sich die Längenänderung auf ca. 1 mm. Die starke Säulenverlängerung von Stab 3 (~ 5 mm) ist durch die Gesamtsäulen-Vermessung bestätigt und stellt eine Ausnahme unter den 6 vermessenen Stäben dar.

Die unteren Brutstoffsäulen, die zwischen ein Stützrohr und die Brennstoffsäule eingespannt sind, schwanken in ihrer Längenänderung um etwa $\pm 0,5$ mm. Dies dürfte die Fehlergrenze der



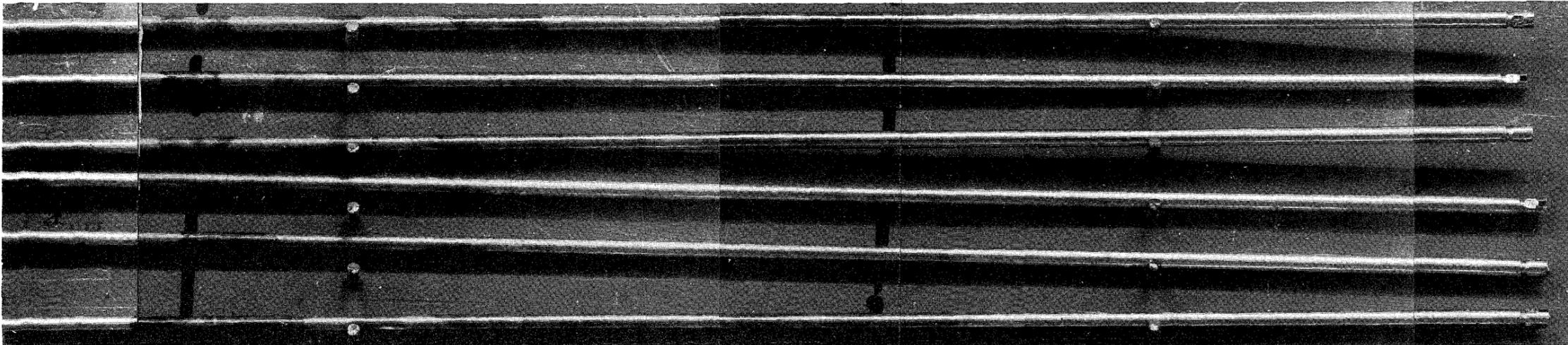


Abb. 27 6 intakte Stäbe nach der Bündelzerlegung

Schadensstelle

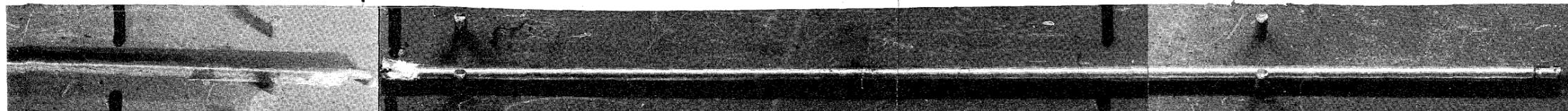


Abb. 28 Defekter Stab 4 nach der Bündelzerlegung

Tabelle XXIV

Vermessung der Brennstoff- und Brutstoff-Säulenlängen

Stab - Bezeichnung 7A-		1	3	5	6	7	9
Länge der Brennstoffsäule in mm	A) laut Prüfbericht	500,31	498,96	498,96	499,77	500,31	500,22
	B) Vermessung nach Bestrahlung	502,00	503,90	500,40	501,20	501,60	505,00
Ä n d e r u n g (B - C)		+ 1,69	+ 4,94	+ 1,44	+ 1,43	+ 1,29	+ 4,78
Länge der Oberen Brutstoffzone in mm	A) laut Prüfbericht	99,92	100,50	100,21	100,03	100,48	99,89
	B) Vermessung vor Bestrahlung	100,50	101,50	101,50	101,00	100,50	101,00
	C) Vermessung nach Bestrahlung	104,00	101,80	101,50	100,50	101,00	101,30
Ä n d e r u n g (C - B)		+ 3,50	+ 0,30	0	- 0,50	+ 0,50	+ 0,30
Länge der Unteren Brutstoffzone in mm	A) laut Prüfbericht	99,87	100,89	100,08	99,76	100,40	99,89
	B) Vermessung nach Bestrahlung	100,30	100,30	100,00	100,30	100,10	100,60
Ä n d e r u n g (B - A)		+ 0,43	- 0,59	- 0,08	+ 0,54	- 0,30	+ 0,71

optischen Bestimmung sein. Die Länge der Stäbe blieb danach also unverändert. Das gleiche gilt auch für die oberen Säulen. Da diese jedoch nur einseitig eingespannt sind und sich nach oben gegen eine erschlaffte Feder bewegen können, ist eine Verlagerung der Tabletten möglich. In Stab 1 hat eine solche Verlagerung zu einer scheinbaren Verlängerung von 3,5 mm geführt.

Aus Tabelle XXV ist zu entnehmen, daß durch die Bestrahlung die Gesamtsäulenlänge aller Stäbe um 2 bis 6 mm gewachsen ist. Während die Meßwerte von 4 Stäben zwischen 2 und 3 mm liegen, zeigen 2 Stäbe mit 6 mm ungewöhnlich große Längenänderungen.

9.1.2 Stabdurchmesser und Durchbiegung

Im Rahmen der zerstörungsfreien Nachuntersuchung wurde an den sieben Stäben der Versuchsgruppe Mol-7A eine Dimensionskontrolle vorgenommen [10]. Hierbei wurde der Stabdurchmesser und die Durchbiegung der Stäbe vermessen. Auf die Bestimmung der Stablänge mußte verzichtet werden, da ein Teil der Endkappen während der Demontage des Bündels abgeschnitten wurde.

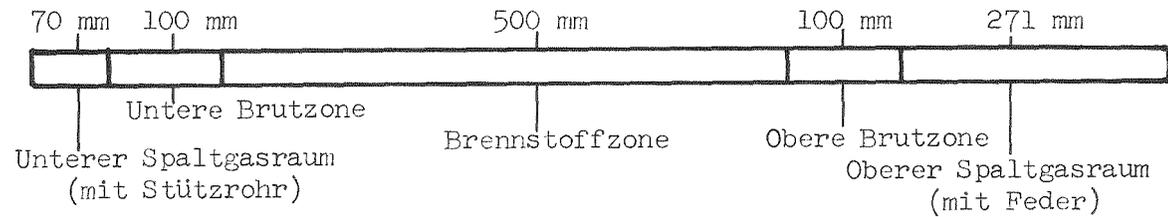
Der Durchmesser der Stäbe wurde zwischen zwei Meßschneiden schraubenförmig mit Hilfe eines Wegaufnehmers abgetastet und das Meßergebnis als sogenannter Wendelschrieb aufgezeichnet. Der Mittelwert zwischen den Maximal- und Minimalausschlägen des Wendelschriebes stellt den mittleren Stabdurchmesser dar. Durch Vergleich mit den auf die gleiche Weise gewonnenen Vorbestrahlungsdaten wurde die Durchmesser-Vergrößerung bestimmt, die in den Abb. 29 bis 31 über der Stablänge wiedergegeben ist. Vor- und Nachvermessungen sind mit verschiedenen Meßanordnungen durchgeführt worden, die sich auch hinsichtlich der Schraubensteigung unterschieden. So betrug die Steigung bei der Vorvermessung 3,3 mm, bei der Nachvermessung 5,0 mm. Beide Meßanordnungen wurden mit Hilfe eines Meisterbolzens vergleichbar gemacht.

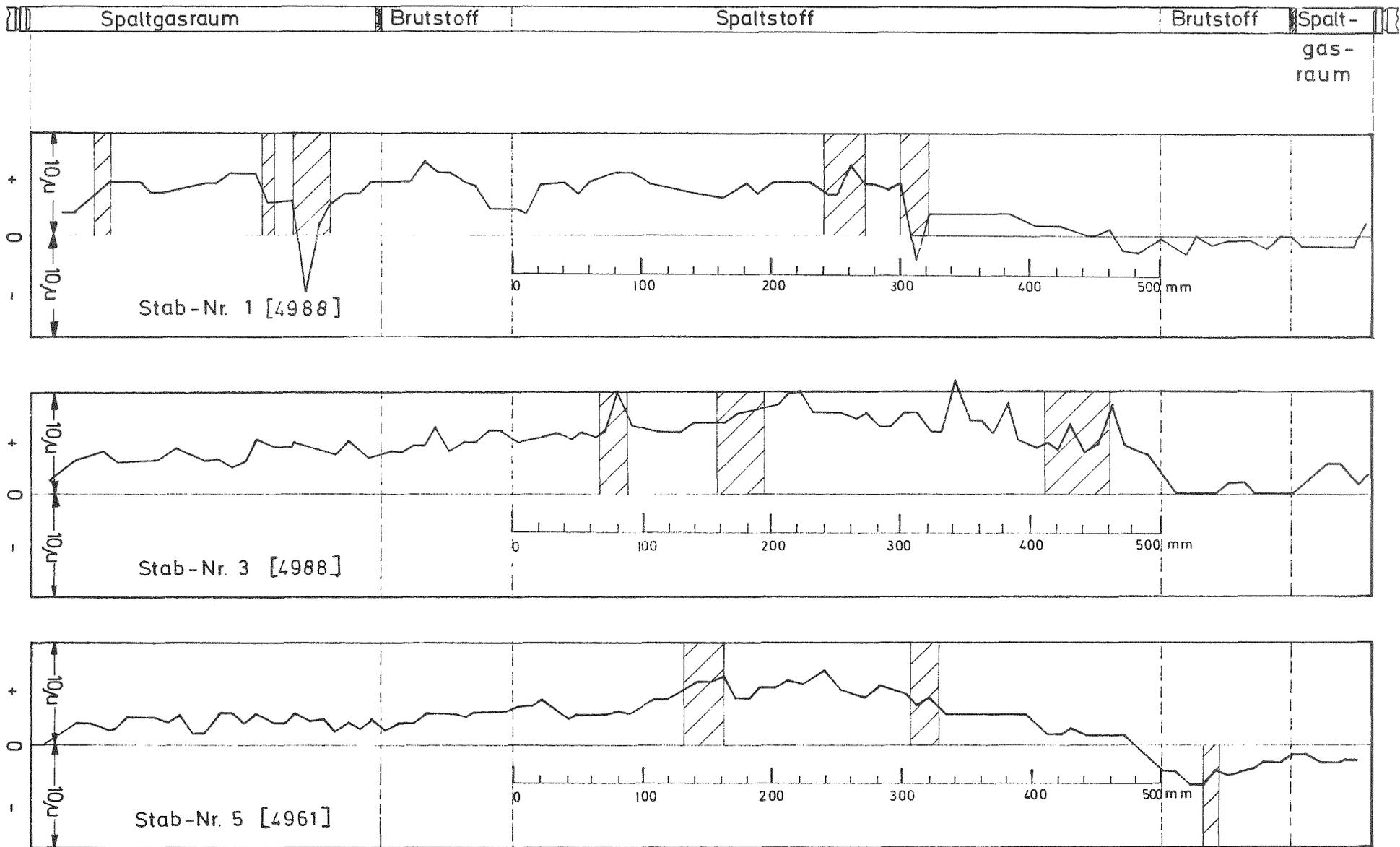
Die Durchbiegung wurde durch Auflegen der Stäbe auf eine ebene Unterlage als maximale Abweichung von der Bogensehne gemessen. Tabelle XXVI gibt die maximalen Durchbiegungswerte zusammen mit der Lage der Maxima bezüglich der Stablänge wieder.

Tabelle XXV

Vermessung der Gesamtsäulenlängen

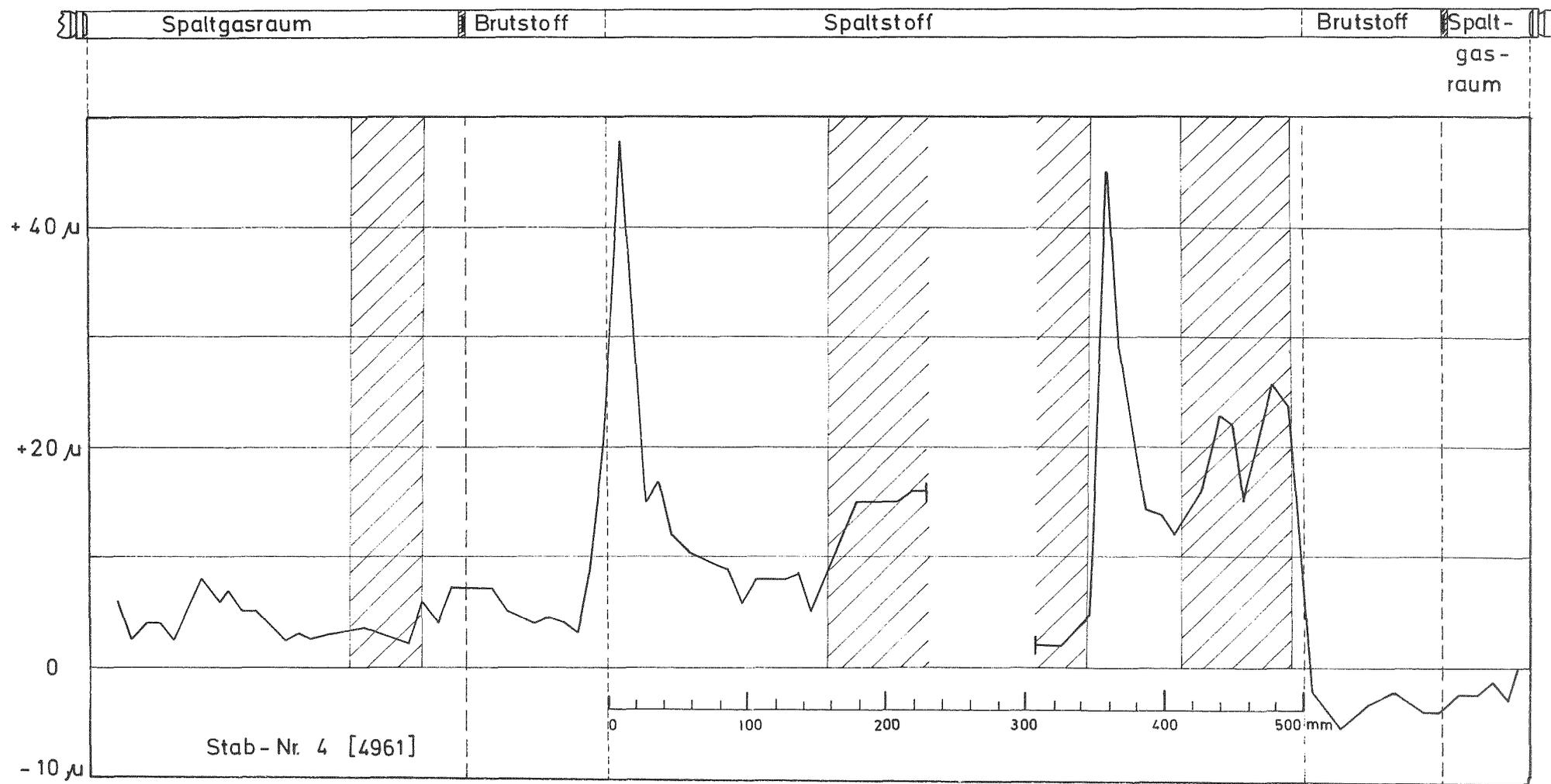
Stab-Bezeichnung		7A-	1	3	5	6	7	9
Gesamtsäule in mm (Brennstoff und Brutstoff)	A) laut Prüfbericht		700,10	700,35	699,25	699,56	701,19	700,00
	B) Vermessung vor Bestrahlung		700,00	700,00	699,50	700,00	699,50	704,00
	C) Vermessung nach Bestrahlung		706,30	706,00	701,90	702,00	702,70	706,90
Ä n d e r u n g (C - B)			+ 6,30	+ 6,00	+ 2,40	+ 2,00	+ 3,20	+ 2,90





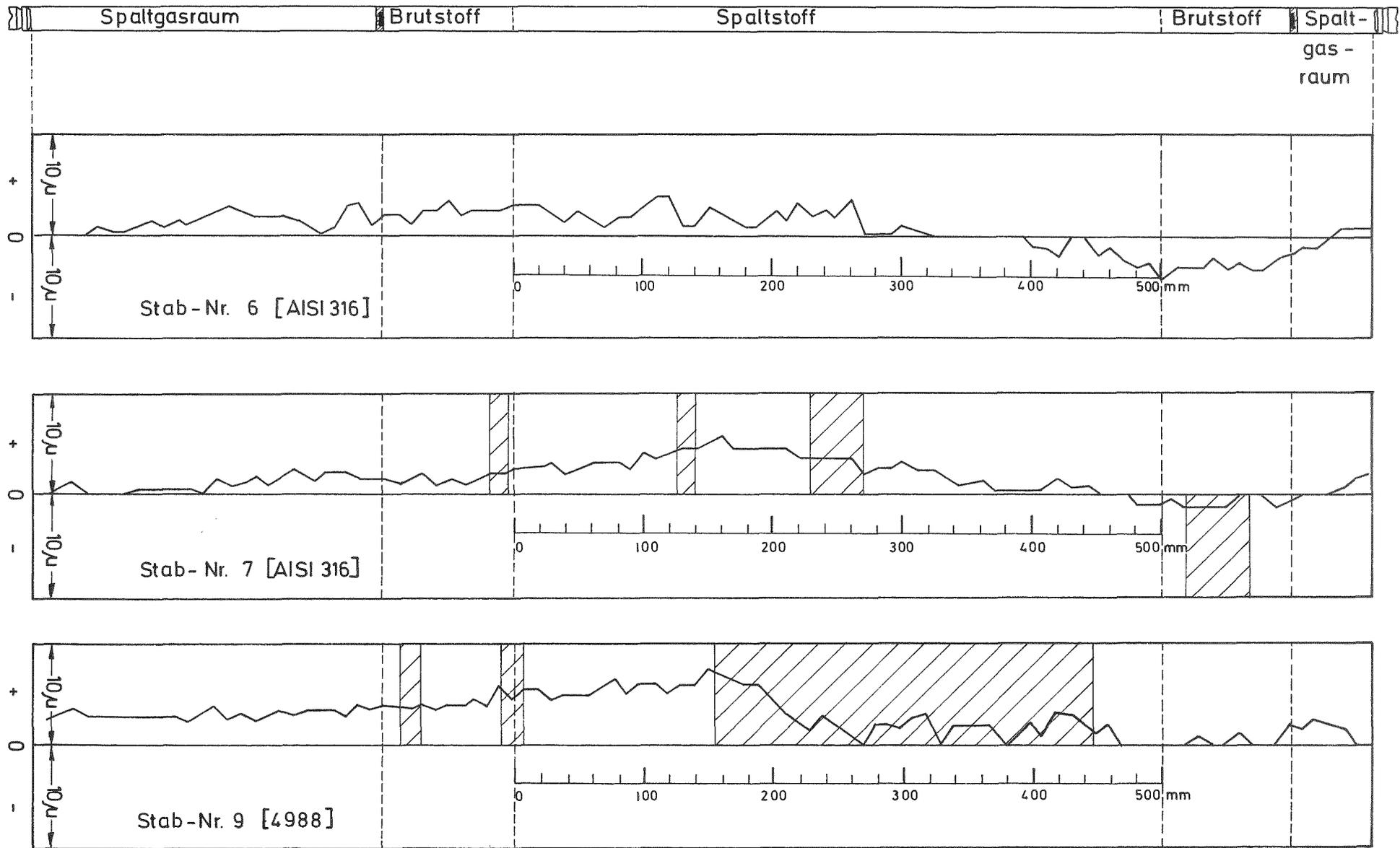
Durchmesserveränderung der Stäbe 1,3 und 5 nach der Bestrahlung

Abb. 29



Durchmesseränderung von Stab 4 nach der Bestrahlung

Abb. 30



Durchmesserveränderung der Stäbe 6, 7 und 9 nach der Bestrahlung

Abb. 31

Tabelle XXVI Durchbiegung der Stäbe Mol-7A

Stab	Maximale Durchbiegung (mm)	Abstand des Maximums vom unteren Stabende (mm)
1	30	620
3	10	560
4	25	625
5	15	630
6	5	700
7	22	640
9	10	650

Bei allen sieben Stäben sind die Außendurchmesser im Bereich der Brennstoffsäule sowie der oberen Brutstoffsäule und des oberen Spaltgasraumes gewachsen. Abgesehen von dem defekten Stab Nr. 4 liegen die maximalen Aufweitungswerte im Bereich von 0,1 - 0,2 % (bei 6 mm Außendurchmesser). Die Stäbe mit den Hüllmaterialien der Werkstoff-Nr. 1.4988 und 1.4961 unterscheiden sich hierbei nicht. Wohl aber kann man eine geringere Aufweitung von maximal nur 0,1 % bei den Stäben mit dem Hüllmaterial AISI 316 beobachten. Der defekte Stab war zum Zeitpunkt der Vermessung bereits zerbrochen. Da die aufgeweiteten Bruchstellen durch Verkleben mit Araldit-Gießharz geschützt werden mußten, konnten sie nicht in die Messung miteinbezogen werden. Das Vermessungsdiagramm des Stabes Nr. 4 enthält deshalb eine Lücke. Aber auch außerhalb der Bruchzone sind große lokale Aufweitungen (bis zu 0,8 %) zu beobachten. Die im unteren Stabbereich bei allen Stäben auftretenden negativen Meßwerte drücken wahrscheinlich die Unsicherheit der Vermessung aus und sollten nicht als Durchmesser-Verkleinerungen aufgefaßt werden.

Einzelne Bereiche innerhalb der Stablänge, die durch eine Schraffur in den Abbildungen gekennzeichnet sind, zeigen stärkere Ovalitäten. Da nicht ausgeschlossen werden kann, daß sie sekundär durch die Handhabung bei der Nachuntersuchung entstanden sind, ist hieraus nichts für das Stabverhalten abzuleiten.

9.2 Durchleuchtung

Die Stäbe wurden zum Teil beim Europäischen Institut für Transurane geröntgt (Stäbe 1, 4, 5 und 7) und alle in den Heißen Zellen des Kernforschungszentrums Karlsruhe mit Hilfe des Betatrons durchstrahlt. Letztere Aufnahmen sind in der Dokumentation im Anhang II enthalten.

Die Aufnahmen haben durch die notwendige Verkleinerung bei der Reproduktion einigen Aussagewert verloren, erkennbar sind jedoch der Zentralkanal im Brennstoff, die Brutstoffsäulen sowie in einigen Fällen die Tabletten im Brutstoffteil und Rißstrukturen.

9.3 Gamma-Profile und Gamma-Spektren

Zur Ermittlung von Brennstoffverlagerungen und Spaltproduktwanderungen und um den Leistungsverlauf entlang der Stabachse zu überprüfen, wurden die Stäbe γ -spektrometrisch untersucht. Die Untersuchung erfolgte etwa 10 bis 12 Monate nach Bestrahlungsende. Zu diesem Zeitpunkt waren im γ -Spektrum im Energiebereich zwischen 250 keV und 2 MeV noch folgende Nuklide identifizierbar:

Im Brennstoff:	Zr/Nb-95	
	Ru/Rh-106	
	Cs/Ba-134	
	Cs/Ba-137	
	Ru/Rh-103	} nur noch schwach erkennbar
	Ce/Pr-144	
Im Hüllmaterial:	Mn/Cr-54	
	Co/Ni-60	

Von jedem Stab wurden vier γ -Profile aufgenommen mit folgenden Energiebereichen:

-	Integrales Profil	400 - 1700 keV
-	Profil für die isobare Reihe Zr/Nb-95	700 - 785 keV
-	Profil für die isobare Reihe Ru/Rh-106	500 - 540 keV
-	Profil für die isobare Reihe Cs/Ba-137	640 - 690 keV

Darüber hinaus wurden an auffallenden Positionen entlang der Stabachse sowie an einigen ungestörten Bereichen vollständige γ -Spektren aufgenommen. Im Mittel entfielen auf jeden Stab etwa 8 Spektren.

Als Detektor für die Aufnahme der Profile und Spektren diente ein Ge-Li-Halbleiter.

Bei der Auswertung der integralen γ -Profile (Abb. 32 bis Abb. 38) zeigte sich, daß erhebliche Spaltproduktwanderungen innerhalb der gesamten Brennstoff-Brutstoffsäule stattgefunden hatten.

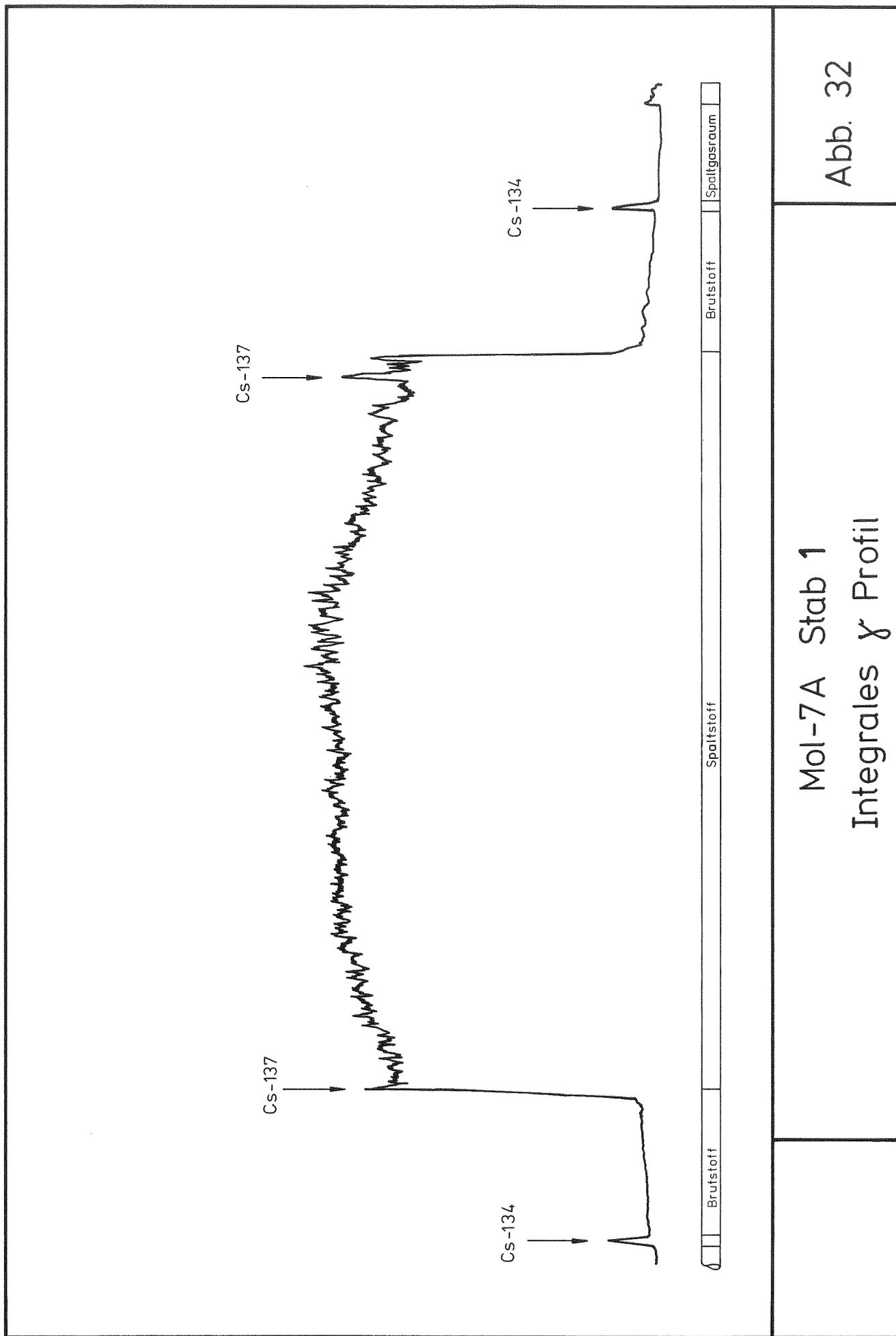
Ansammlungen von Ru/Rh-106 wurden insbesondere bei dem defekten Stab Nr. 4 festgestellt. Sie konnten bei der nachfolgenden keramografischen Untersuchung als Metallreguli im Zentralkanal der Brennstoffsäule identifiziert werden. Auch der dem defekten Stab benachbarte Stab Nr. 3 zeigte zwei Ruthen-Ansammlungen, jedoch von kleinem Ausmaß an. Da gewöhnlich überhitzte Stäbe bevorzugt Ruthen-Reguli enthalten, ist es möglich, daß durch die noch nicht ermittelte Ursache für den Defekt an Stab 4 auch der benachbarte Stab beeinflusst wurde.

Die stärksten Konzentrationsveränderungen zeigten die Nuklide Cs-134 und Cs-137. Eine bevorzugte Wanderung zum oberen Ende (heiße Kühlmittelseite) ließ sich für das Cs-137 bei allen Außenstäben des Bündels feststellen. Mehrere Stäbe zeigten auch am unteren Säulenabschluß größere Cs-137-Konzentrationen. Über die Brennstoffsäule hinaus in die beiden Brutstoffsäulen und die anschließenden Sinterstahlstopfen war das Cs-134 bei allen Stäben gedrungen. Abb. 39 zeigt in einem Ausschnitt die lokalen Anreicherungen von Cs-134. Das Ausmaß und der Mechanismus dieser Wanderung wurden bereits an anderer Stelle beschrieben [18, 21].

Die Profile für die isobare Reihe Zr/Nb-95 sind bei allen intakten Stäben regelmäßig (s. Abb. 40). Ihr Verlauf entspricht jedoch nicht dem mittleren Stableistungsverlauf, da die Stableistungen in jedem Bestrahlungszyklus im oberen Säulenbereich zu-, im unteren Säulenbereich dagegen abnahmen. Die Regelmäßigkeit der Profile läßt darauf schließen, daß kein axialer Brennstofftransport durch Schmelzen stattgefunden hat. Vergleicht man nach einer Korrektur für die unterschiedlichen Aufnahmezeiten die Profile untereinander, so ist erkennbar, daß der zentrale Stab im Bündel (Stab 1) eine um etwa 10 % geringere maximale Stableistung hatte, was im Einklang mit den vorausgerechneten Stableistungen für das Bündel steht.

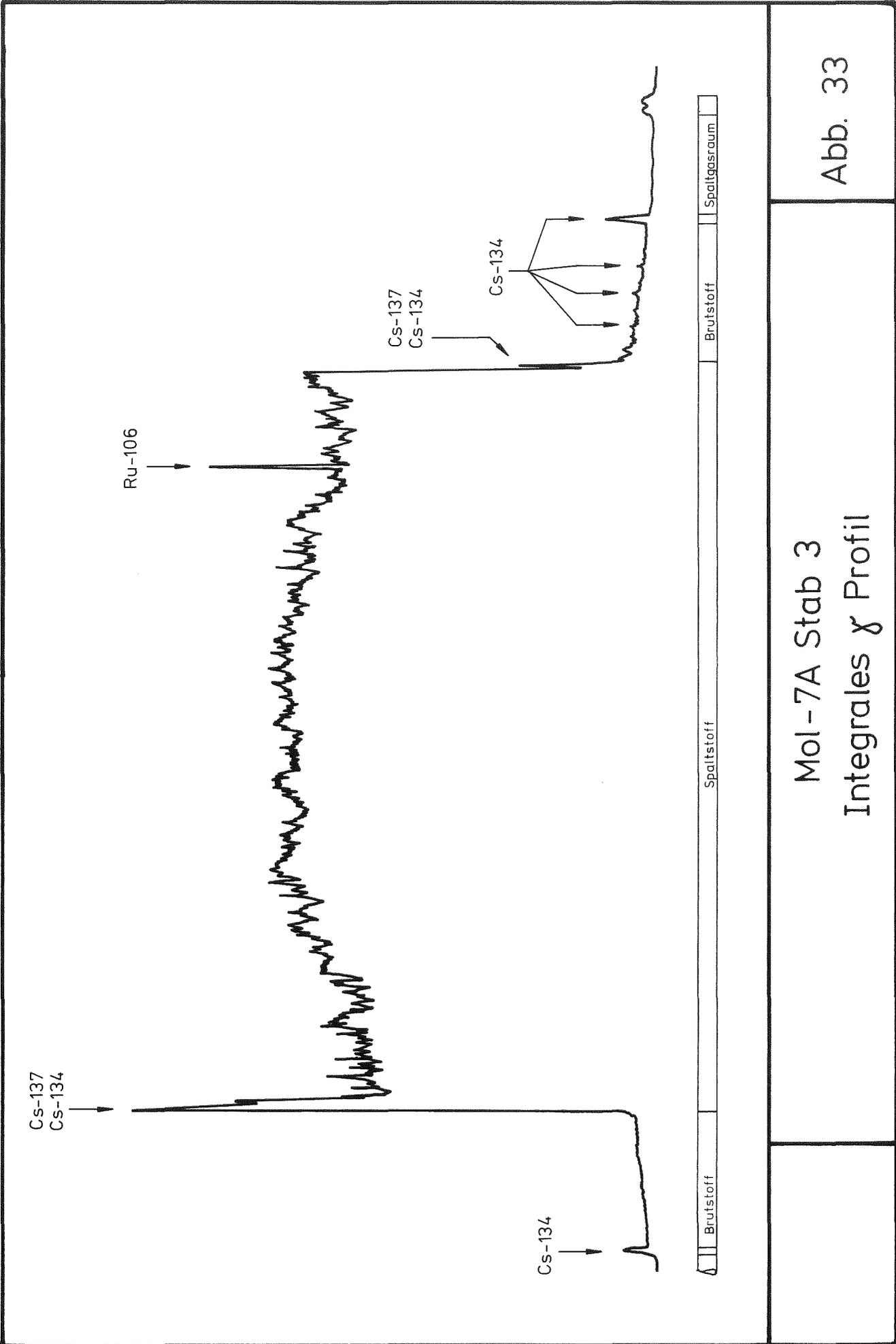
Die starken Unregelmäßigkeiten im Zr/Nb-95-Profil des defekten Stabes Nr. 4 sind Ausdruck der Brennstoffverlagerungen, wie sie besonders im Nahbereich der Schadensstelle aufgetreten sind.

Ein Versuch, für die isobaren Reihen Cs/Ba-137 und Ru/Rh-106 ebenfalls γ -Profile aufzunehmen, führte nicht zu dem gewünschten Erfolg. Die gewonnenen qualitativen Aussagen gingen nicht über das hinaus, was bereits in den integralen Profilen sichtbar wurde. Für eine sinnvolle quantitative Auswertung waren die gemessenen Aktivitäten zu gering. Als einzige zusätzliche Information wurde festgestellt, daß die Ru-106-Verteilung nicht dem mittleren Stableistungsverlauf entspricht, was bei der langen Halbwertszeit des Ru-106 zu erwarten gewesen wäre. Im oberen Stabbereich wurde gleichmäßig verteilt eine höhere Ru-106-Konzentration als erwartet angetroffen.



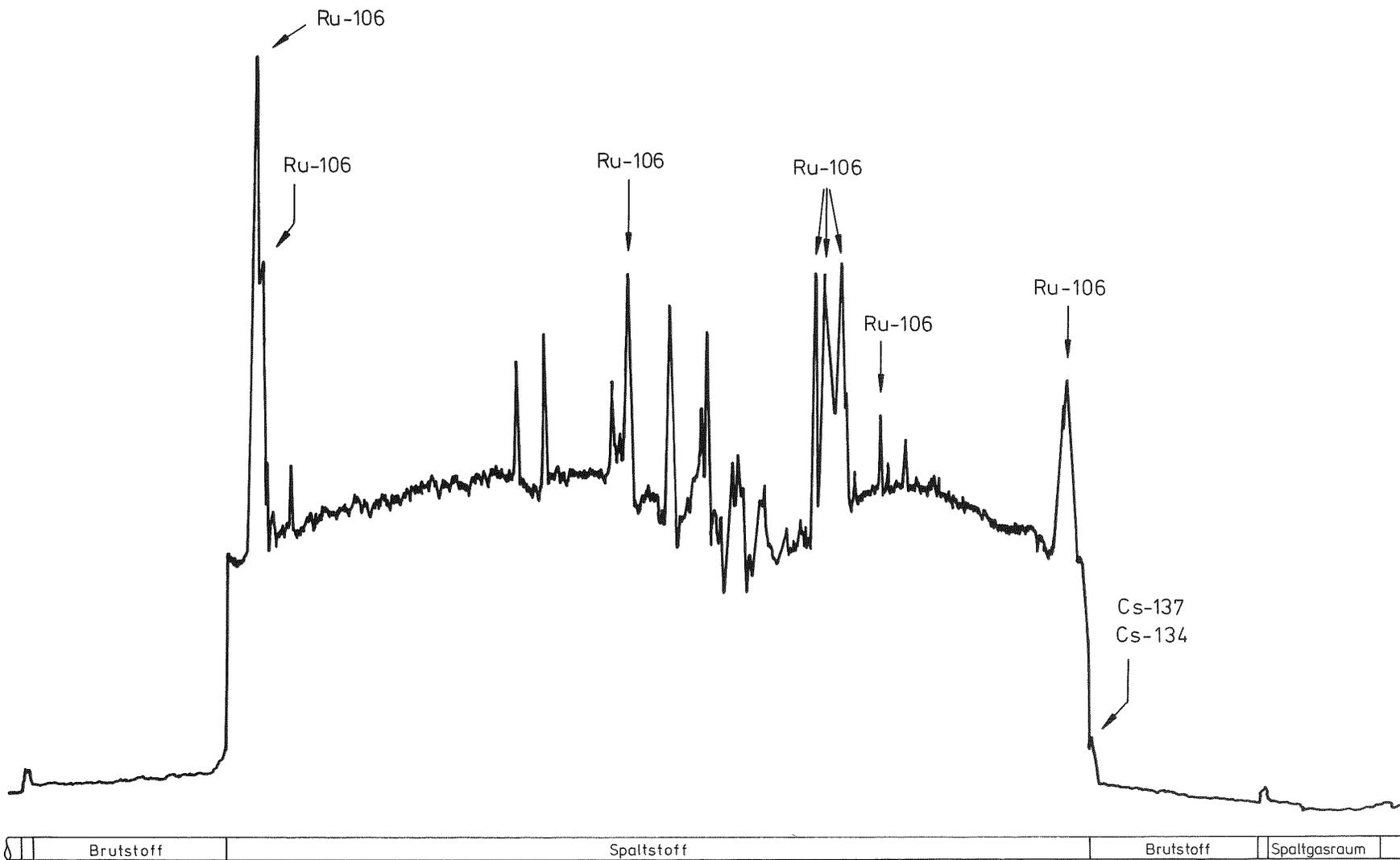
Mol-7A Stab 1
Integrales γ Profil

Abb. 32



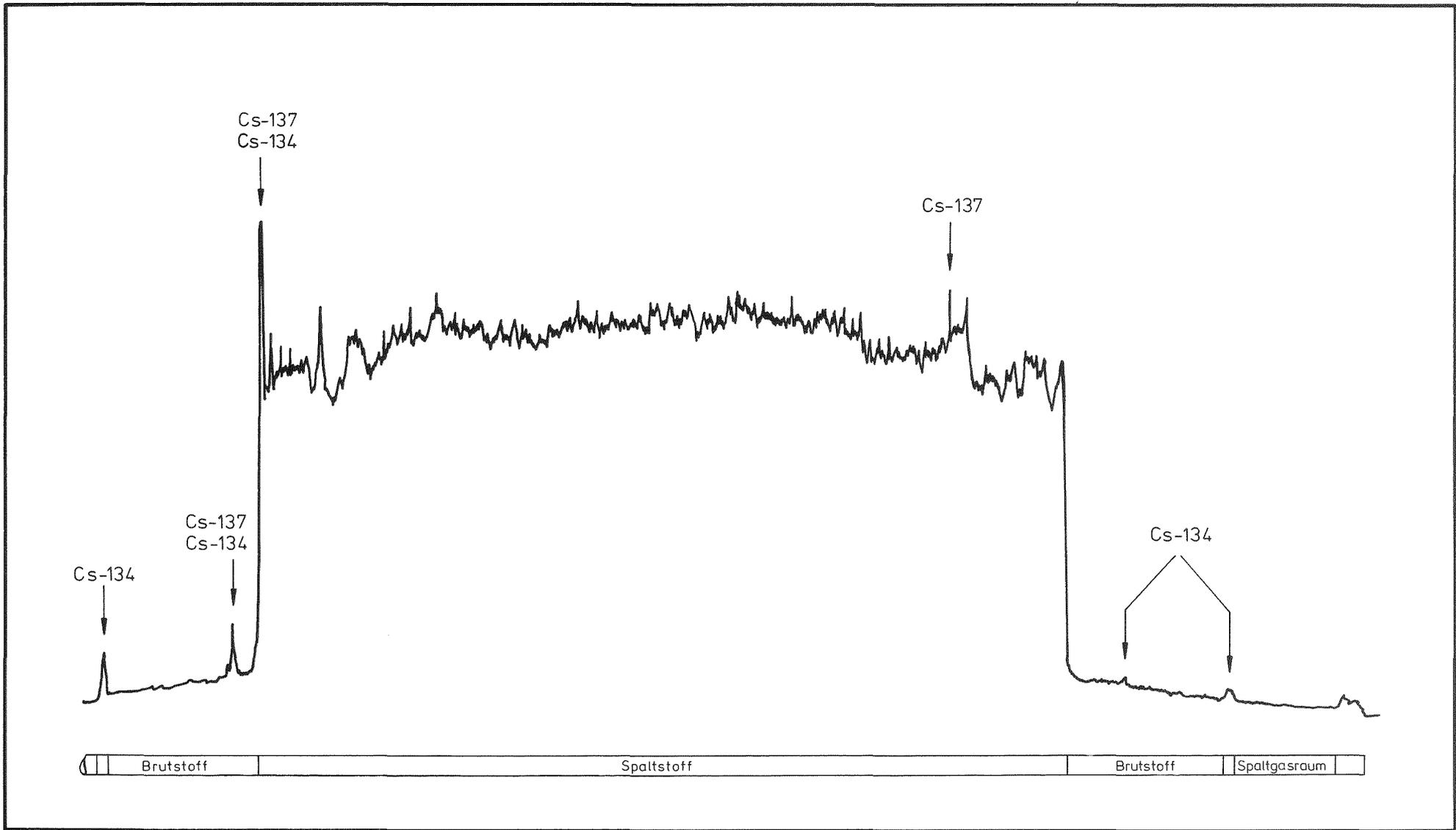
Mol-7A Stab 3
Integrales γ Profil

Abb. 33



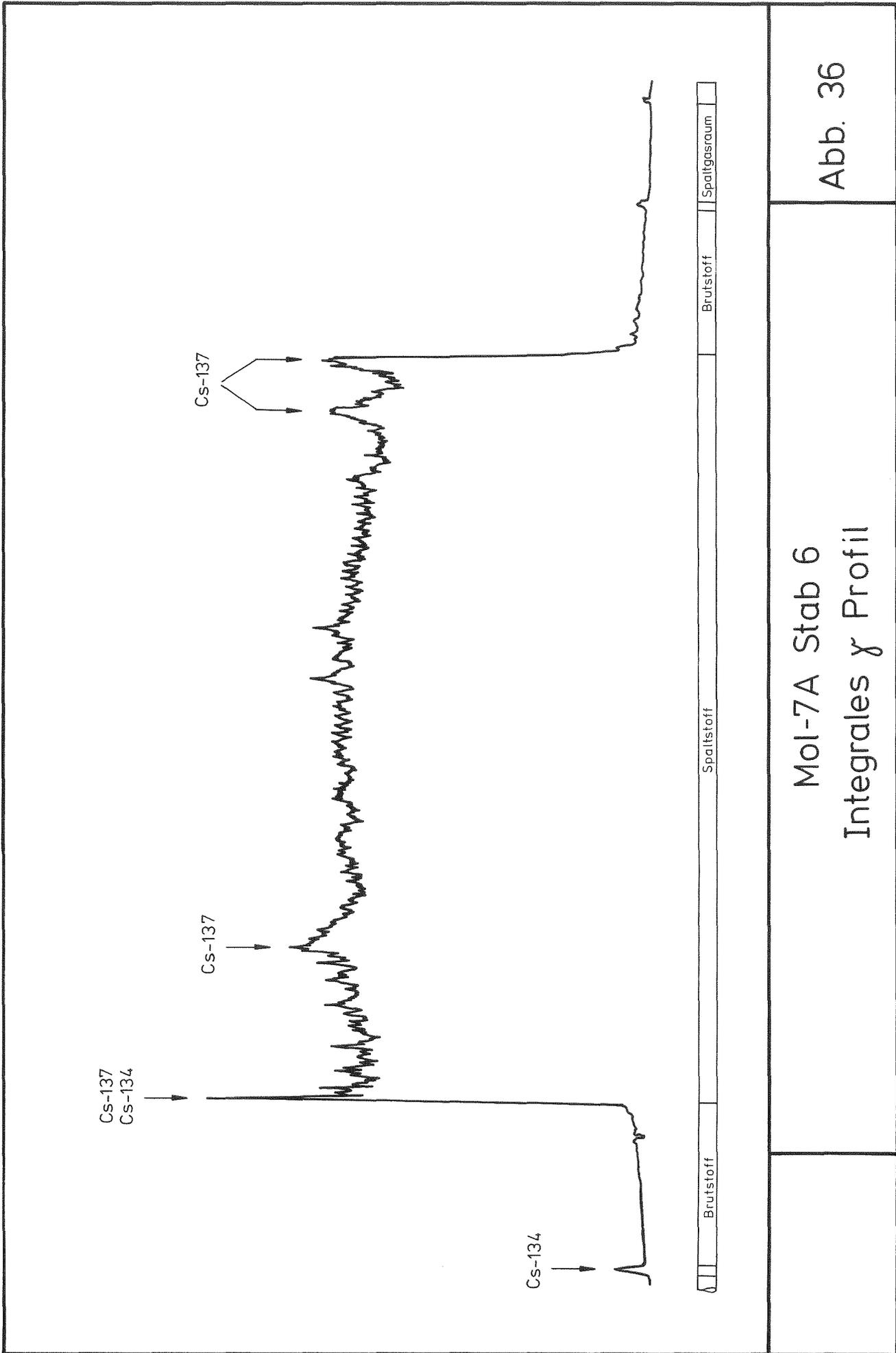
Mol-7A Stab 4
 Integrales γ Profil

Abb. 34



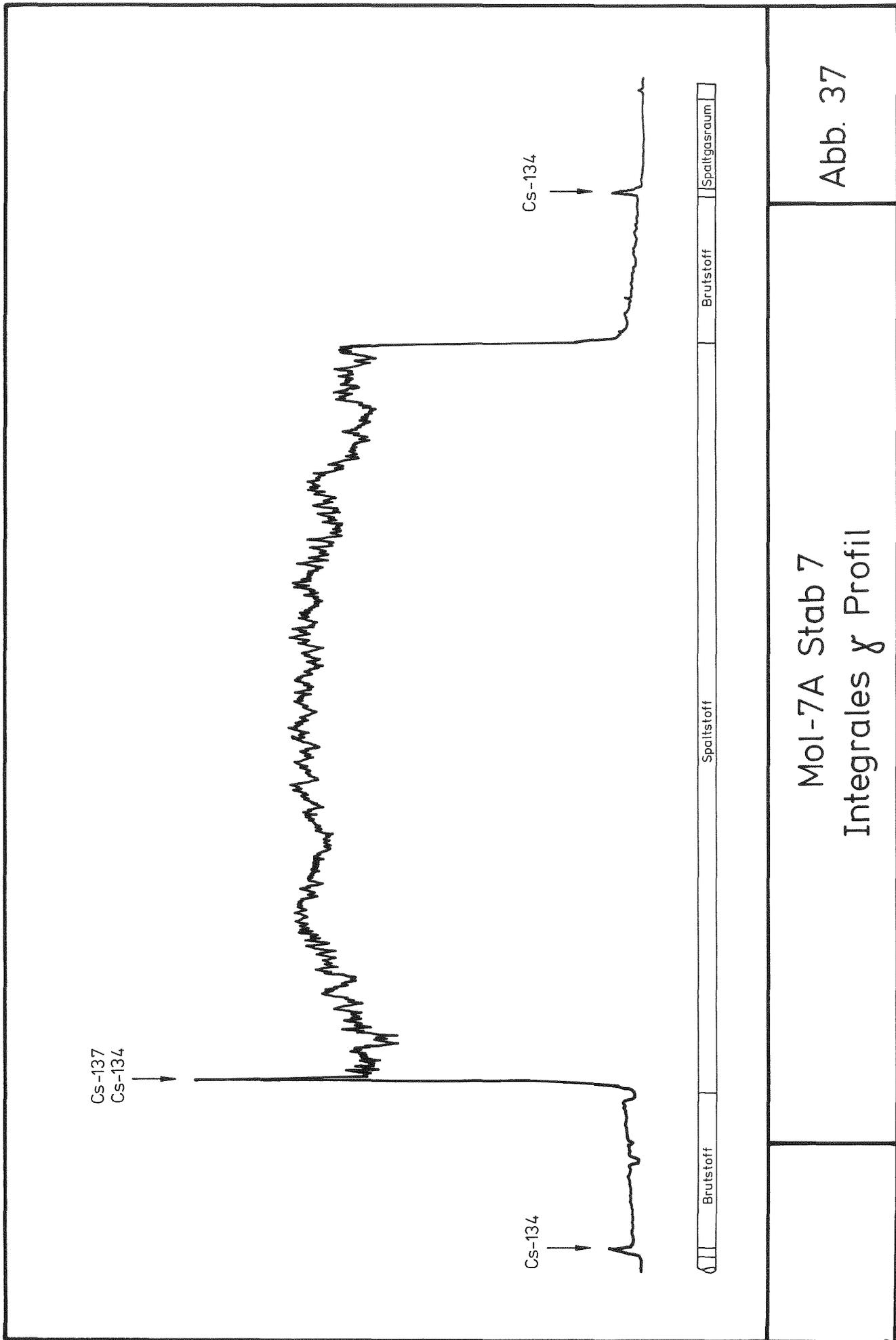
Mol-7A Stab 5
 Integrales γ Profil

Abb, 35



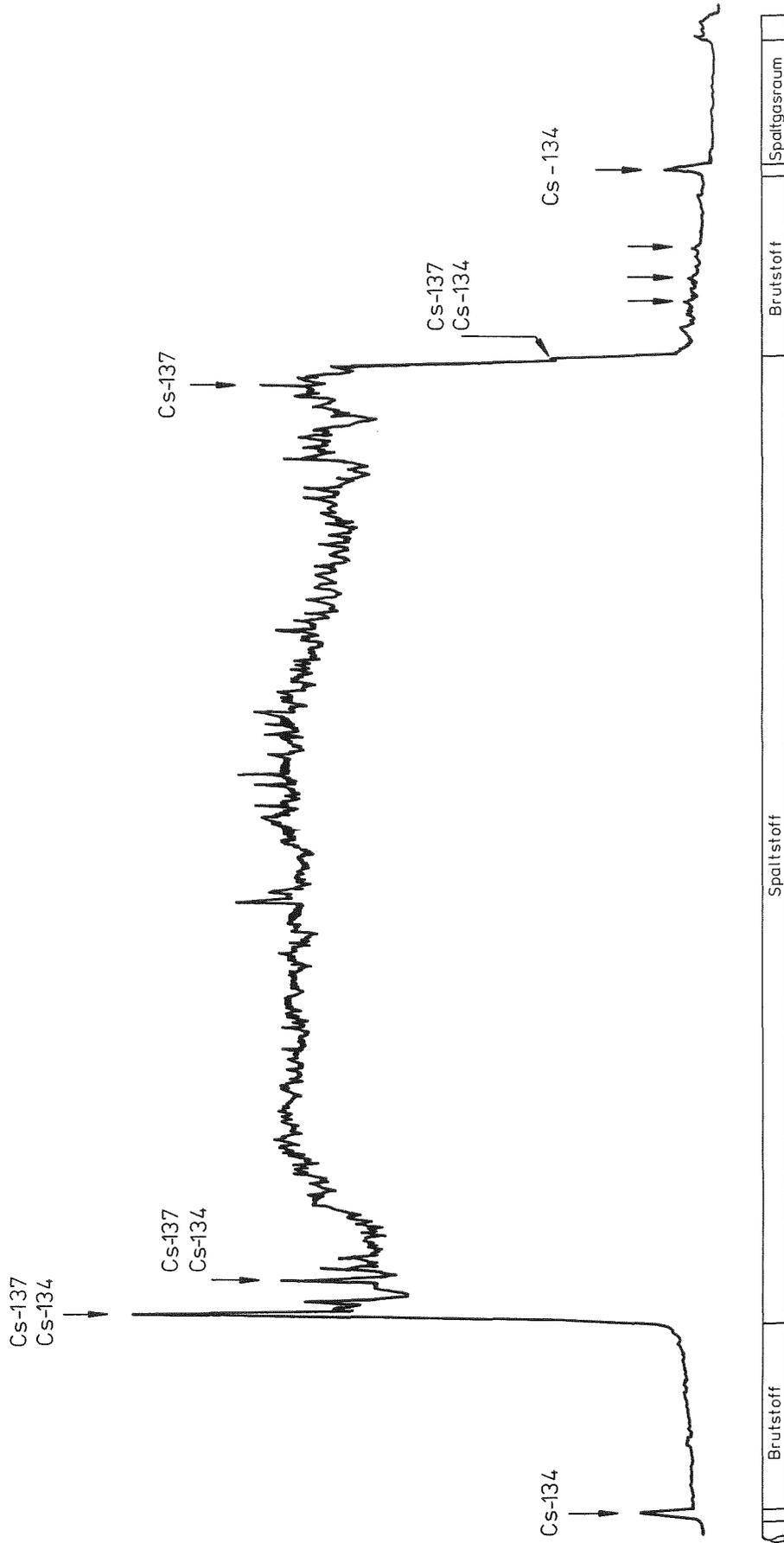
Mol-7A Stab 6
Integrale γ Profil

Abb. 36



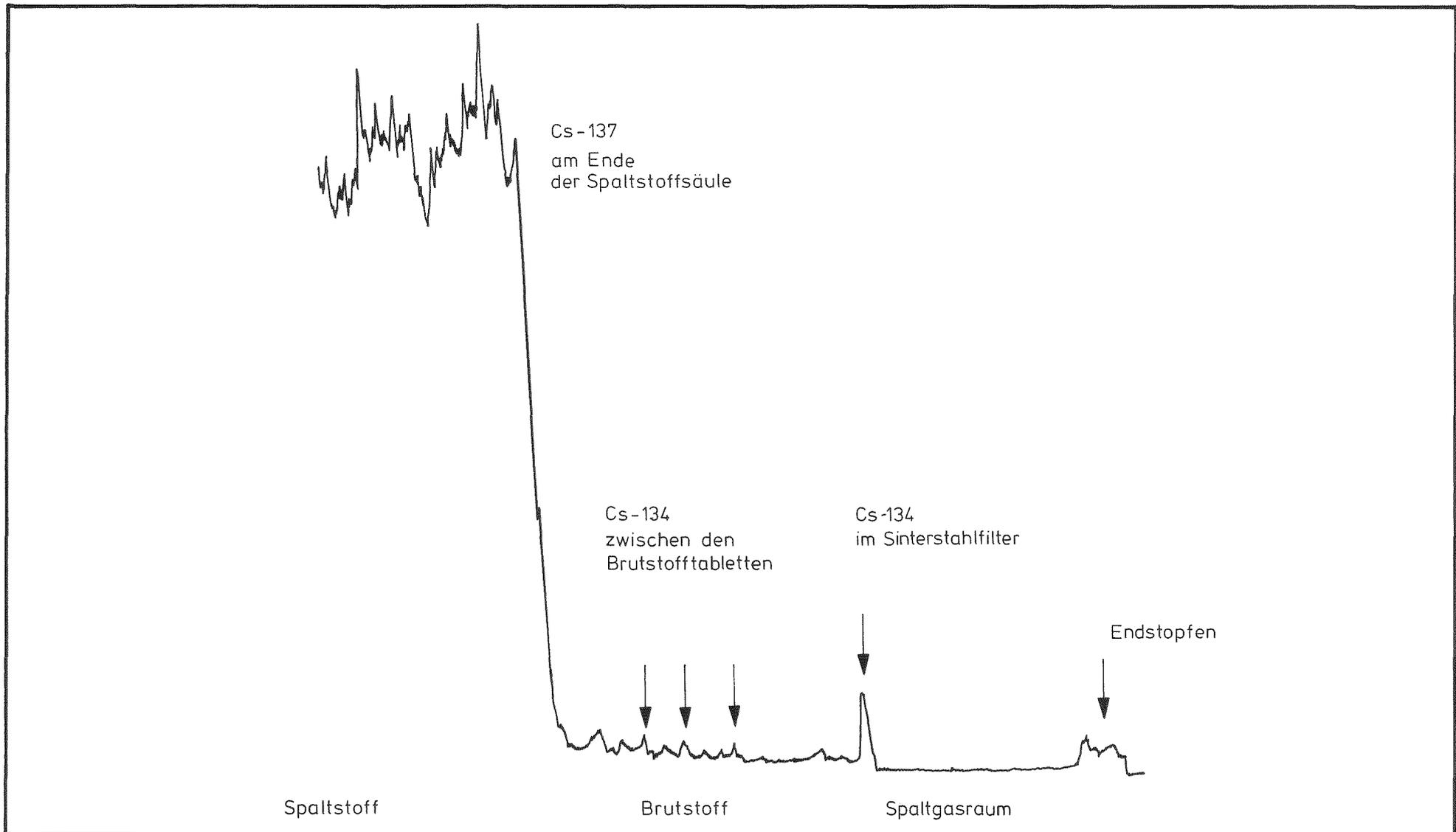
Mol-7A Stab 7
Integrales γ Profil

Abb. 37



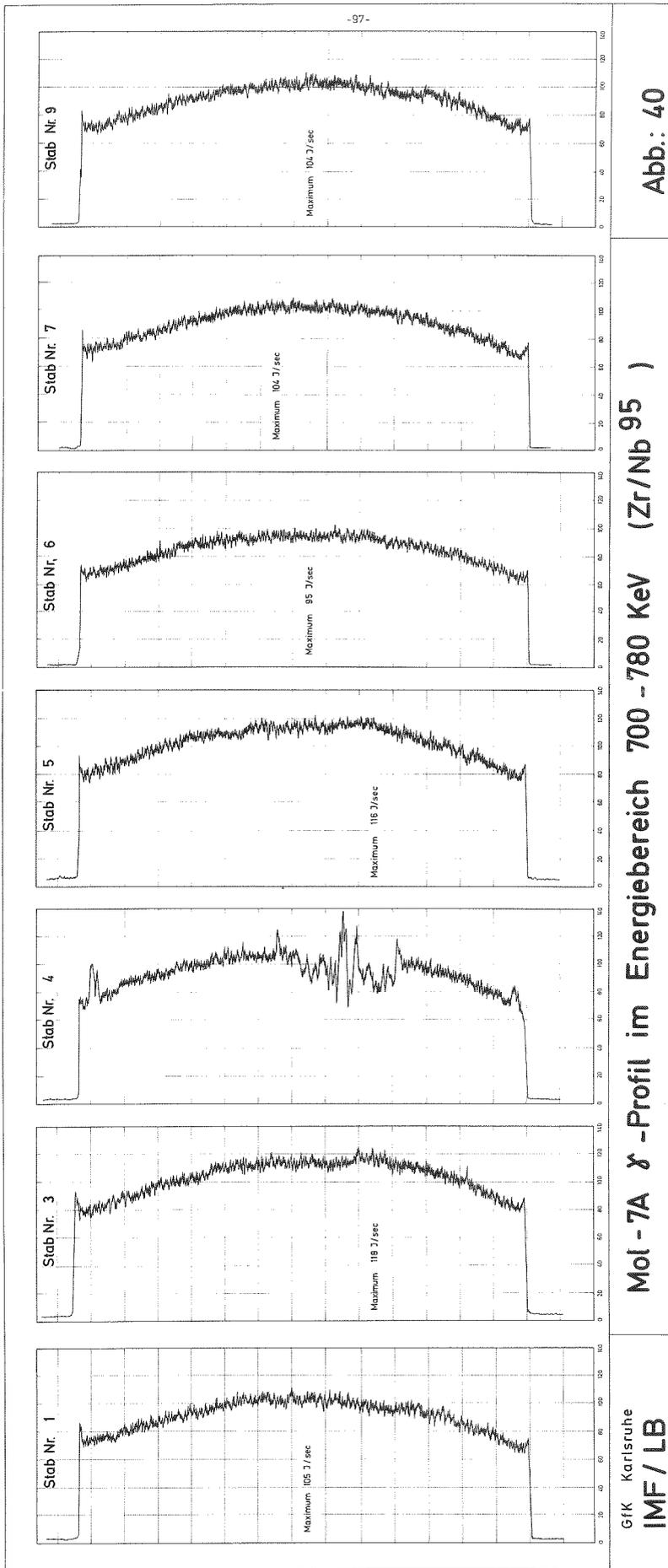
Mol-7A Stab 9
Integrales γ Profil

Abb. 38



Stab 9 Integrales γ -Profil
 Untere Brutstoffsäule mit Sinterstahlfilter

Abb. 39



Mol - 7A γ -Profil im Energiebereich 700 - 780 KeV (Zr/Nb 95)

GfK Karlsruhe
IMF / LB

Abb.: 40

10. Spaltgasbestimmungen

Bei den experimentellen Spaltgasuntersuchungen an den bestrahlten Prüflingen werden Messungen durchgeführt [22] zur Bestimmung

- der freien Spaltgasmenge V_F
- des freien Volumens innerhalb der Hülle
- der Spaltgasmenge in geschlossenen Poren V_P
- der im Brennstoff gelösten Spaltgasmenge V_G .

Zu diesem Zweck wird der Prüfling zuerst an der Stirnseite des oberen Stopfens angebohrt und das freie Spaltgas abgezogen mit anschließender Helium-Spülung. Die Zusammensetzung des Spaltgases wird gaschromatografisch ermittelt, wobei die Menge an Xe, Kr quantitativ und Kr-85 über die β -Aktivität bestimmt wird.

Für die weiteren Spaltgasbestimmungen (Anteile in geschlossener Porosität beziehungsweise im Brennstoffgitter gelöst) werden bei der Aufteilung des Prüflings zwei Brennstoffproben von etwa 3 g Gewicht bereitgestellt. Jede Probe wird zuerst in einer gasdichten Kugelmühle aus Edelstahl ca. 2 Stunden gemahlen, wobei eine Mahlfeinheit von weniger als 1 μm erreicht wird. Das hierbei freigesetzte "Porenspaltgas" umfaßt alles Gas, das sich in geschlossener Porosität mit Porengrößen $\geq 1 \mu\text{m}$ befand. Nach der gaschromatografischen Bestimmung dieses Anteils wird die gemahlene Brennstoffprobe schließlich in HNO_3 aufgelöst. Dabei wird der im Brennstoff gelöste Anteil, das "Gitterspaltgas", freigesetzt und bestimmt.

Die für eine weitere Auswertung wichtigen Ergebnisse sind zusammenfassend in einigen Tabellen dargestellt. Tabelle XXVII bringt für alle Prüflinge die gemessene Menge an freiem Spaltgas sowie den Spaltgasdruck bei einer (angenommenen) mittleren Betriebstemperatur von 500°C . Die Gasmengenangaben in mm^3 beziehen sich auf 20°C und 760 Torr.

In Tabelle XXVIII sind alle gemessenen Werte für das im Brennstoff gebundene Spaltgas (wieder aufgeteilt nach Krypton und Xenon) enthalten. Die Messungen wurden hierbei an kleinen Brennstoffproben durchgeführt und die Meßergebnisse auf die in einem Prüfling enthaltene Gesamtmenge an Brennstoff umgerechnet.

In Tabelle XXIX schließlich wird für jeden Prüfling die Spaltgasbilanz aufgestellt.

Tabelle XXVII

Freies Spaltgas und Spaltgasdruck

Prüfling	max. Abbrand ⁺⁺) (MWd/kg M)	Freies Spaltgas V_F (mm ³)			Xe/Kr- Verhältnis	Freies Volumen (mm ³)	Spaltgasdruck bei 500°C (at)
		Krypton	Xenon	Gesamt			
7A-1	41,8	5350	48150	53500	9,0	_+)	_+)
7A-3	46,5	10100	68400	78500	6,8	7527	27,51
7A-5	46,5	9360	53100	62460	5,7	_+)	_+)
7A-6	46,5	9750	65600	75350	6,7	_+)	_+)
7A-7	46,5	7400	63750	71150	8,6	_+)	_+)
7A-9	46,5	9400	62800	72200	6,7	7443	25,59

+) wurde nicht bestimmt

++) nach [14]

Tabelle XXVIII

Poren- und Gitterspaltgas

Prüfling	max. Abbrand ^{+))} (Mwd/kg M)	Porenspaltgas (mm ³)			Gitterspaltgas (mm ³)			Xe/Kr-Verhältnis	
		Krypton	Xenon	Gesamt	Krypton	Xenon	Gesamt	Poren	Gitter
7A-1	41,8	2205	12980	15180	620	5130	5750	5,90	10,1
7A-3	46,5	1900	11880	13780	660	6690	7350	5,70	10,1
7A-5	46,5	2700	15150	17850	520	4750	5250	5,60	9,1
7A-6	46,5	2125	1321	15340	880	8340	9190	6,00	9,8
7A-7	46,5	2089	13020	15110	530	4530	5060	6,25	8,7
7A-9	46,5	2400	17400	19800	480	4520	5000	7,40	8,9

^{+))} nach [14]

Tabelle XXIX

Spaltgasbilanz

Prüfling	max. Abbrand ^{+))} (Mwd/kg M)	Freies Spaltgas V _F		Porenspaltgas V _P		Gitterspaltgas V _G		Gesamtspaltgas gemessen (mm ³)
		(mm ³)	(%)	(mm ³)	(%)	(mm ³)	(%)	
7A-1	41,8	53500	71,9	15180	20,4	5750	7,7	74430
7A-3	46,5	78500	78,8	13780	13,8	7350	7,4	99630
7A-5	46,5	62460	73,0	17850	20,9	5250	6,1	85560
7A-6	46,5	75350	75,4	15340	15,4	9190	9,2	99880
7A-7	46,5	71150	77,9	15110	16,5	5060	5,6	91320
7A-9	46,5	72200	74,4	19800	20,4	5000	5,2	97000

+) nach [14]

11. Keramografie

Bei der Festlegung der Untersuchungsflächen (Quer- und Längsschliffe) wurden lokal die Stellen der maximalen Hüllwandtemperatur und der maximalen Stabileistung bevorzugt. Weiterhin wurden noch zusätzliche Schliffe an die Stellen gelegt, die durch die Röntgen- bzw. Betatronaufnahmen Unstetigkeiten der Brennstoffgeometrie vermuten ließen. Eine vergleichende Auswertung, bei der die Zentralkanalgröße, der Tablettenspalt zur Hülle und die konzentrischen Strukturzonen im Brennstoff vermessen werden, ist nur an Querschliffen möglich, weshalb die wichtigsten Untersuchungsebenen als Querschliffe ausgeführt wurden.

Für die Dokumentation einer Schliffebene wurde folgendes Schema angewandt:

1. Totalaufnahme der Untersuchungsebene in 5-facher Vergrößerung (poliert).
2. β - γ - und α -Autoradiografien in 5-facher Vergrößerung (poliert).
3. Panorama-Aufnahmen über einen Radius (Vergrößerung 100-fach) poliert und geätzt.
4. Detailaufnahmen in 200-facher und 500-facher Vergrößerung poliert und geätzt.

Eine Untersuchung der Hülle wurde nur für den Fall vorgesehen, daß im Brennstoffschliff Hinweise auf eine Wechselwirkung mit dem Brennstoff oder dem Kühlmittel vorlägen. Weiterhin wurden Hüllrohrabschnitte an der Stelle des Flußmaximums (Pos. -100) für elektronenmikroskopische Untersuchungen der Porenbildung entnommen.

In Anhang II sind alle keramografischen Längs- und Querschliffe dokumentarisch zusammengestellt.

12. Radiochemische Abbrandbestimmungen

Aus den Anzeigedaten der Thermoelemente wurde über die thermische Leistung des Bündels der maximale und mittlere Abbrand für die Stäbe errechnet. Für die Außenstäbe, die hinsichtlich der Leistung als gleichwertig angesehen wurden, ergaben sich folgende Werte [14]:

- | | | |
|---------------------|--------------|------------------|
| - Maximaler Abbrand | 46.500 MWd/t | schwere Elemente |
| - Mittlerer Abbrand | 35.200 MWd/t | schwere Elemente |

Beim zentralen Stab liegen die entsprechenden Abbrände um etwa 10 % niedriger.

Zur Stützung dieser Rechenwerte wurden insgesamt 10 Abbrand-Bestimmungen auf radiochemischem Wege durchgeführt. Bei zwei Stäben wurde versucht, ein Abbrandprofil durch 3 Analysen zu ermitteln, während 4 weitere nur im Abbrandmaximum mit einer Probe belegt wurden. Der defekte Stab Nr. 4 wurde von den Abbrandanalysen ausgenommen, da in ihm partielles Brennstoffschmelzen aufgetreten war, wodurch eine Abbrandbestimmung über die Spaltprodukte wegen der zu erwartenden Entmischungseffekte unzuverlässig wurde.

Als Abbrandindikatoren für die chemische Analyse wurden die 2 Spaltnuklide Nd-148 und Ce/Pr-144 eingesetzt. Hierbei wurde das Nd-148 als stabiles Nuklid massenspektrometrisch und das aktive Ce/Pr-144 über eine γ -Messung bestimmt.

Die Umrechnung der chemischen Analysenwerte in Abbrandwerte wurde erschwert durch die Tatsache, daß einerseits ein Mischbrennstoff mit mehreren spaltbaren Nukliden vorlag und andererseits das Neutronenspektrum in den Stäben nicht genügend genau bekannt war. Als Basis für die Umrechnung wurden deshalb folgende Daten festgelegt:

- 1.) Spaltung des U-235 = 78 %
Spaltung des Pu-239 = 22 %

Hierbei wurden die anderen Uran- und Plutonium-Isotope hinsichtlich der veränderten Spaltausbeute für die Abbrandindikatoren vernachlässigt. Die Spaltraten dieser Isotope sind jedoch in den obigen Werten enthalten.

- 2.) Spaltraten: 11 % aus Spaltung mit thermischen Neutronen
89 % aus Spaltung mit epithermischen und schnellen Neutronen.

- 3.) Spaltausbeuten bei gewichtetem Neutronenspektrum:

	<u>Ce/Pr-144</u>	<u>Nd-148</u>
U-235	5,18 %	1,74 %
Pu-239	3,26 %	1,71 %

- 4.) Gewichtete Spaltausbeuten für den Mischbrennstoff bei gewichtetem Neutronenspektrum:

\bar{y} für Ce/Pr-144	4,76 %
\bar{y} für Nd-148	1,73 %

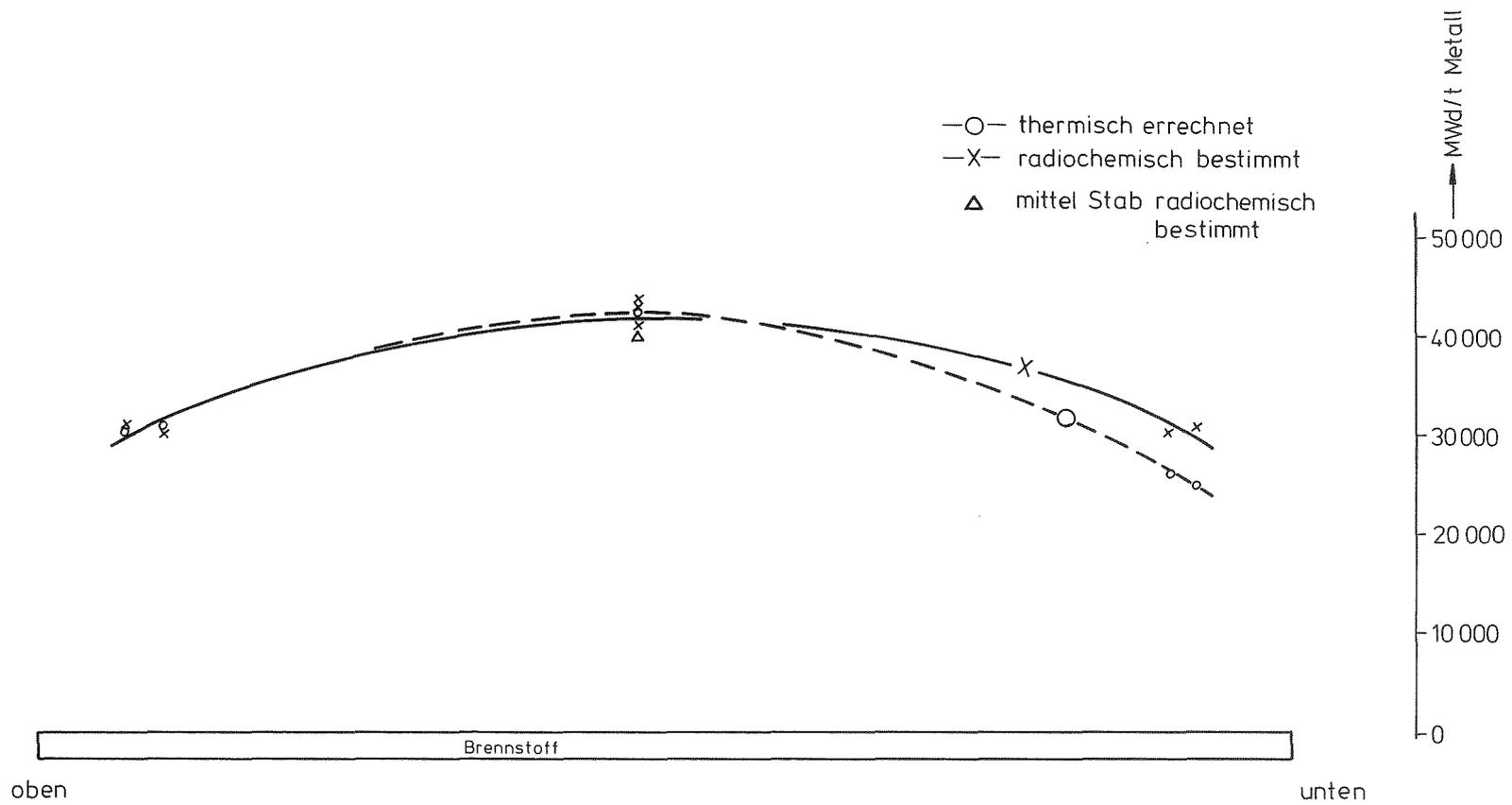
Für die Umrechnung von Prozent gespaltener Atome in MWd/t schwere Elemente wurde 1,07 % Abbrand dem Wert von 10.000 MWd/t gleichgesetzt. Tabelle XXX gibt die Ergebnisse der Abbrandbestimmungen wieder. Die Proben aus dem Abbrandmaximum sind mit einem Stern gekennzeichnet.

Tabelle XXX Radiochemisch bestimmte Abbrandwerte
* Proben aus dem Abbrandmaximum

Stab 7A-	Probe	Abbrand in MWd/t schwere Elemente Ce-144	Abbrand in MWd/t schwere Elemente Nd-148
1	7*	40.500	40.400
3	4	31.300	31.500
	8*	42.800	43.900
	14	31.300	31.000
4	-		
5	8*	42.200	43.000
6	5a	30.800	30.300
	9*	43.800	43.030
	15a	29.400	30.480
7	8	42.200	41.000
9	11*	42.400	43.400

Eine bemerkenswert gute Übereinstimmung zeigt sich zwischen den Abbränden die aus den Ce/Pr-144 und den Nd-148-Analysen ermittelt wurden. Zieht man in Betracht, daß insbesondere für die Ce/Pr-144-Abbrände mehrere gewichtete Mittelungen sowie Korrekturen für radioaktiven Zerfall durchgeführt werden, mußten, so ist die hier erzielte Übereinstimmung wohl eher zufällig. Sie gibt aber doch eine Aussage über die Genauigkeit der Nuklid-Analysen.

Ein Vergleich zwischen den aus den thermischen Daten berechneten Abbränden und den Nd-148-Abbrandwerten ist in Abb. 41 dargestellt. Im Abbrandmaximum liegen die thermischen Werte um etwa 8 % über den radiochemischen. Hierbei ist noch zu berücksichtigen, daß die thermischen Werte den Abbrand als "MWd produced by fission in the fuel pins" ohne Berücksichtigung der γ -Strahlung infolge Spaltung und Neutroneneinfang beinhalten.



Brennstoff

oben

unten

Mol - 7 A

Vergleich der radiochemischen (Nd-148) u. thermisch errechneten Abbrände

Abb. 41

Bei der Umrechnung der radiochemischen Analysen wurden hingegen etwa 200 MeV als nutzbare Energie pro Spaltung eingesetzt (Umrechnungsfaktor 1,07 % Abbrand = 10.000 MWd/t M). Die auf die Nd-148-Analysen aufbauende radiochemische Abbrandbestimmung kann als besonders zuverlässig angesehen werden.

13. Schlußfolgerungen

Eine zusammenfassende Wertung dieses Bestrahlungsversuches hat sich an der Aufgabenstellung und am Versuchsziel, wie sie in Kap. 2 formuliert sind, zu orientieren. Es lassen sich folgende Feststellungen treffen:

- 1.) Die vorgesehene maximale Stableistung von 500 W/cm wurde deutlich überschritten, da zum Zeitpunkt der Auslegungsrechnungen der tatsächliche Neutronenfluß im Bestrahlungseinsatz nicht genau genug bekannt war.
- 2.) Die vorgesehene Hüllwandtemperatur von 630°C wurde betriebsmäßig tatsächlich erreicht.
- 3.) Der vorgesehene maximale Abbrand von 60.000 MWd/t M wurde nicht erreicht. Bei einem Abbrandstand von ca. 35.000 MWd/t M trat im Stab-bündel eine Undichtigkeit auf. Bei einem maximalen Abbrand von ca. 45.000 MWd/t M wurde der Bestrahlungsversuch dann vorzeitig abgebrochen.
- 4.) Beim Zerlegen des bestrahlten Bündels wurde festgestellt, daß der Stab 7A-4 aufgerissen ist. Alle anderen Stäbe blieben intakt. Die Ursache des Schadens in Stab 7A-4 ist nicht bekannt. Es wird aber angenommen, daß dieser Schaden nicht konzeptbedingt ist, sondern infolge eines Material-, Fertigungs- oder Betriebsfehlers aufgetreten ist.
- 5.) Die sechs intakten Stäbe zeigen nach Bestrahlung nur eine geringfügige Durchmesserergrößerung um 0,1 %. Da ein Stahlschwellen infolge Porenbildung in diesem Neutronenfluß ausgeschlossen ist,

haben wir es mit einer geringfügigen Kriechaufweitung infolge des Brennstoffschwelldruckes zu tun.

- 6.) In der Brennstoffsäule, die in ihrer regelmäßigen Konfiguration erhalten blieb, entstand überall ein gleichmäßiger Zentralkanal. Jede Brennstoffsäule zeigt eine Längsausdehnung von ca. 1 mm.
- 7.) Die Spaltgasfreisetzung war ziemlich gleichmäßig in allen (intakten) Stäben. Sie betrug 70 - 80 %, während etwa 15 - 20 % in den Poren des Brennstoffes und etwa 5 - 10 % im Brennstoffgitter nachgewiesen wurden.
- 8.) Bei den festen Spaltprodukten fällt vor allem die Wanderung des Cäsium nach dem heißen Ende der Brennstoffsäule auf. Diese Cs-Ansammlungen stellen sicher den Ausgangspunkt erhöhter Innenkorrosion dar.
- 9.) Im Verhalten der 3 verschiedenen Hüllmaterialien sind keine wesentlichen Unterschiede festzustellen.
- 10.) Im Stabbündel ist an den Berührungsstellen zwischen Brennstäben und Abstandshaltern keinerlei Reibkorrosion festzustellen. Im strömenden Natrium (mit etwa Prototypreaktor-ähnlichen Bedingungen) trat an den Berührungsstellen lediglich eine gewisse Dunkelfärbung der Hüllrohr-oberfläche auf.

Weitere Ergebnisse, vor allem hinsichtlich der Spaltgasfreisetzung, der Riß- und Porenverteilung sowie der Innenkorrosion werden zur Zeit in einer detaillierten Auswertung der einzelnen Bestrahlungsphänomene erarbeitet. Ein entsprechender Abschlußbericht ist in Vorbereitung [23].

Literatur

- [1] D. Geithoff, D. Freund, K. Kummerer:
Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung der UO₂-Brennstab-
Prüflinge in der FR 2-Kapselversuchsgruppe 3, KFK 1239 (1971)
- [2] D. Freund:
Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung der Oxidbrennstab-
proben im FR 2, KFK 1376 (1972)
- [3] D. Geithoff, K. Kummerer:
Auslegung, Bestrahlung und zerstörungsfreie Nachuntersuchung des
UO₂-PuO₂-Brennstab-Bündels DFR-350, KFK 1377 (1972)
- [4] K. Kummerer:
Brennstäbe für Schnellbrüter-Prototypreaktoren, Atomwirtschaft 17
(1972), erscheint demnächst
- [5] K. Gast, E.G. Schlechtendahl et al.:
Schneller Natriumgekühlter Reaktor Na 2, KFK 660 (1967)
- [6] W. Borkowetz:
Ergänzung zur Spezifikation der Brennstäbe für die Bündelbestrah-
lung Mol-7A im BR 2, nicht veröffentlicht
- [7] K. Kleefeldt:
Spezifikation und technische Liefer- und Abnahmebedingungen für
Brennstabbündel Mol-7A, nicht veröffentlicht
- [8] G. Karsten, H.J. Laue:
Spezifikation des Brennstabes für die Bündelbestrahlung Mol-7A
im BR 2-Reaktor, nicht veröffentlicht
- [9] Th. Dippel, K. Kummerer, K.H. Triemer:
Herstellung von Brennstäben für die Bündelbestrahlung Mol-7A,
nicht veröffentlicht
- [10] H. Herrmann, D. Geithoff:
Verlängerung der Brennstoffsäulen in den Brennstäben der Ver-
suchsgruppe Mol-7A, nicht veröffentlicht
- [11] M. Soenen:
Experience Gained with the In-pile Sodium Loop for Fast Neutron
Irradiation after the First Run in the BR 2 Reactor, IAEA Symposium
on Alkali Metal Coolants, Corrosion Studies and System Operating
Experience, Wien 1966

- [12] W. Borkowetz, C. Heyne:
Bestrahlungsablauf Mol-7A, nicht veröffentlicht
- [13] BR 2-Test Report, nicht veröffentlicht
- [14] BR 2-Calculating Note, nicht veröffentlicht
- [15] BR 2-Test Reports, nicht veröffentlicht
- [16] N. Maene:
Dosimetry of BR 2-Irradiations, nicht veröffentlicht
- [17] D. Geithoff:
Berichtigung der Bestrahlungsdaten für das Siebenstab-Bündel
Mol-7A, nicht veröffentlicht
- [18] W. Borkowetz, D. Geithoff:
Die Bestrahlung von SNR-typischen Brennstäben in einem Sieben-
Stab-Bündel, Proc. Int. Meet. Fast Reactor Fuel and Fuel
Elements, Karlsruhe 1970, 296
- [19] M. De Donder, J. Prévot:
Detection of Failed Fuel Subassemblies by the Sipping Technique,
Tagungsbericht Reaktortagung Bonn 1971, 453
- [20] H. Enderlein:
Übersicht Nachbestrahlungsuntersuchung Mol-7A-Bündel,
nicht veröffentlicht
- [21] D. Geithoff:
Die Bestrahlungs-Nachuntersuchung von SNR-Prototyp-Brennstäben
aus einem Sieben-Stab-Bündel, Tagungsbericht Reaktortagung
Bonn 1971, 586
- [22] H. Gräbner:
Spaltgasmessungen, nicht veröffentlicht
- [23] W. Dienst et al.:
Auswertung der Untersuchungsergebnisse an dem Brennstab-Bündel
Mol-7A, KFK-Bericht, demnächst

Liste der Tabellen

Tabelle	Thema	Seite
I	Umfangskriechdehnung der Hülle	8
II	Spezifikationen für die Brennstäbe Mol-7A	9
III	Chemische Zusammensetzung der Hüllwerkstoffe	14
IV	Bezeichnung und Verwendung der Brennstäbe	20
V	Isotopenzusammensetzung der Ausgangspulver für den Brennstoff	21
VI	Chemische Verunreinigungen der Ausgangspulver	22
VII	Kenndaten der sinterfähigen Pulver	22
VIII	Mischprotokoll für den Brennstoff	23
IX	Analyse der Brennstoff-Pulvermischung	23
X	Analysen an Brennstofftabletten	26
XI	Hüllrohre und Hüllrohrprüfung	28
XII	Gesamtwerte für die Brennstoffsäulen	30
XIII	Gesamtwerte für die Brutstoffsäulen	30
XIV	Dichtheitsprüfung an den Brennstäben mit He-Lecksuch-Massenspektrometer	31
XV	Schweißnahtprüfung mit Röntgen-Durchstrahlung	32
XVI	Kontamination der Staboberflächen	35
XVII	Äußere Abmessungen und Gewichte der fertigen Stäbe	36
XVIII	Länge der Tablettensäulen vor der Bestrahlung	39
XIX	Innere Geometrie der Stäbe und Brennstoffdichte	40
XX	Abstandshalter	41
XXI	Ablauf der Bestrahlung	54
XXII	Fluß- und Dosismaxima für 3 Energiebereiche	53
XXIII	Aximale Verteilung des Abbrandes der Außenstäbe	59
XXIV	Vermessung der Brennstoff- und Brutstoff-Säulenlängen	79
XXV	Vermessung der Gesamtsäulenlängen	81
XXVI	Durchbiegung der Stäbe Mol-7A	85
XXVII	Freies Spaltgas und Spaltgasdruck	99
XXVIII	Poren- und Gitterspaltgas	100
XXIX	Spaltgasbilanz	101
XXX	Radiochemisch bestimmte Abbrandwerte	104

Liste der Abbildungen

Abb.	T i t e l	Seite
1	Konstruktion des Brennstabes	11
2	Autoradiographie einer Brennstofftablette	25
3	Schliffaufnahme vom Zentrum der Tablette	25
4	Schliffaufnahme vom Tablettenrand	25
5	Schliffbilder der Schweißnähte	33
6	Röntgen-Aufnahmen der 9 Stäbe nach der Fertigung in Karlsruhe	37
7	Röntgen-Aufnahmen der 8 nach Mol transportierten Stäbe vor der Bestrahlung	37
8	Anordnung der Stäbe und Abstandshalter im Bündel	42
9	Bündelquerschnitt	43
10	Brennstabhalterung Mol-7A	44
11	Abstandshalter	45
12	GfK-CEN In-Pile Sodium Loop "Mol-7A"	47
13	Bündel und Brennstab Mol-7A	48
14	General Disposition of the Loop in the Reactor Channel	49
15	Meßstellen im Na zur Bestimmung der Hülltemperaturen der Prüflinge	50
16	Axiale Position von Bündel und Brennstab im BR 2	51
17	Axiale Verläufe von Fluß, mittlerer Stableistung, -Hüllmittentemperatur und -Abbrand über alle Zyklen der 6 äußeren Stäbe	55
18	Mittlere Stableistung der äußeren Stäbe für verschiedene Querschnitte	57
19	Hüllmittentemperatur der äußeren Stäbe	58
20	Orientierung der Betatron-Durchleuchtung	62
21	Betatron-Durchleuchtung des Stab-Bündels Mol-7A	63
22	Röntgen-Umleuchtung des Stab-Bündels Mol-7A	67
23	Mittleres Na-Leitrohr mit Heizleitern, Thermoelementen und Na-Resten	71
24	Unteres Bündelende während der Zerlegung	72
25	Stabschäden zwischen Abstandshalter 7 und 8	73

Abb.	T i t e l	Seite
26	Abstandshalter nach der Demontage des Stab-Bündels	74
27	6 intakte Stäbe nach der Bündelzerlegung	77
28	Defekter Stab 4 nach der Bündelzerlegung	77
29	Durchmesseränderung der Stäbe 1, 3 und 5 nach der Bestrahlung	82
30	Durchmesseränderung von Stab 4 nach der Bestrahlung	83
31	Durchmesseränderung der Stäbe 6, 7 und 9 nach der Bestrahlung	84
32	Mol-7A Stab 1, Integrales γ -Profil	89
33	" Stab 3, " " "	90
34	" " Stab 4, " " "	91
35	" Stab 5, " " "	92
36	" Stab 6, " " "	93
37	" Stab 7, " " "	94
38	" Stab 9, " " "	95
39	" Stab 9, " " "	
	Untere Brutstoffsäule mit Sinterstahlfilter	96
40	Mol-7A, γ -Profil im Energiebereich 700 - 780 keV	97
41	Mol-7A, Vergleich der radiochemischen (Nd-148) und thermisch errechneten Abbrände	105

A n h a n g I

Tablettenlisten, Tabellen 1 bis 9

Tabelle 1 Tablettensäule für Stab 7A-1
Hüllrohr-Nr. 221 B/a

	Lage der geprüften Tabletten	T a b l e t t e n d a t e n			
		Gewicht (g)	Höhe (mm)	Durchmesser (mm)	Materialdichte (% th.D.)
Obere Brutzone 16 Tabletten	5	1,3374	6,25	5,09	95,90
	10	1,3087	6,23	5,05	95,70
	15	1,3221	6,25 ₅	5,07	95,50
Brennstoff- zone 90 Tabletten	5	1,0638	5,55 ₅	5,02 ₅	87,90
	10	1,0670	5,56	5,02	88,20
	15	1,0755	5,58 ₅	5,02	88,50
	20	1,0606	5,55	5,01	88,10
	25	1,0760	5,58	5,02 ₅	88,50
	30	1,0668	5,58	5,01	88,20
	35	1,0611	5,56	5,00	88,40
	40	1,0547	5,55	5,01	87,70
	45	1,0750	5,58	5,02	88,50
	50	1,0619	5,55	5,01	88,20
	55	1,0673	5,57 ₅	5,01	88,30
	60	1,0565	5,56	5,01 ₅	87,50
	65	1,0626	5,54 ₅	5,01	88,40
	70	1,0572	5,55	5,01	87,50
	75	1,0500	5,54	5,00	87,80
	80	1,0513	5,51 ₅	5,00	88,30
	85	1,0673	5,58	5,01	88,00
90	1,0628	5,55	5,02	88,00	
Untere Brutzone 16 Tabletten	5	1,3196	6,22	5,07	95,70
	10	1,3251	6,25 ₅	5,06 ₅	95,95
	15	1,3277	6,25	5,07 ₅	95,80

Tabelle 2 Tablettensäule für Stab 7A-2
Hüllrohr-Nr. 214 B/a

	Lage der geprüften Tabletten	T a b l e t t e n d a t e n			
		Gewicht (g)	Höhe (mm)	Durchmesser (mm)	Materialdichte (% th.D.)
Obere Brutzone 16 Tabletten	5	1,3114	6,23 ₅	5,07	95,45
	10	1,3282	6,26	5,07 ₅	95,70
	15	1,3110	6,22	5,06	95,60
Brennstoff- zone 89 Tabletten	5	1,0597	5,64	5,07	84,60
	10	1,0563	5,63 ₅	5,06	84,80
	15	1,0523	5,64	5,05	84,75
	20	1,0395	5,63	5,05 ₅	83,70
	25	1,0538	5,64 ₅	5,07	84,00
	30	1,0567	5,64	5,06 ₅	84,60
	35	1,0631	5,65	5,05 ₅	85,20
	40	1,0562	5,64 ₅	5,06 ₅	84,50
	45	1,0490	5,64 ₅	5,05 ₅	84,20
	50	1,0709	5,65	5,06 ₅	85,60
	55	1,0612	5,64	5,06	85,10
	60	1,0706	5,65	5,07	85,30
	65	1,0660	5,66 ₅	5,05	85,40
	70	1,0514	5,62	5,08	84,50
	75	1,0514	5,64	5,07 ₅	83,80
80	1,0486	5,61	5,07	84,20	
85	1,0555	5,65	5,06	84,50	
Untere Brutzone 16 Tabletten	5	1,3278	6,27	5,08 ₅	95,15
	10	1,3516	6,33	5,09 ₅	95,60
	15	1,3273	6,26	5,07	95,80

Tabelle 3 Tablettensäule für Stab 7A-3
Hüllrohr-Nr. 211 B/b

	Lage der geprüften Tabletten	T a b l e t t e n d a t e n			
		Gewicht (g)	Höhe (mm)	Durchmesser (mm)	Materialdichte (% th.D.)
Obere Brutzone 16 Tabletten	5	1,3353	6,29	5,07	95,95
	10	1,3318	6,28 ₅	5,07 ₅	95,50
	15	1,3260	6,27	5,08	95,20
Brennstoff- zone 90 Tabletten	5	1,0655	5,54	5,01	88,70
	10	1,0706	5,55	5,01 ₅	88,30
	15	1,0659	5,54	5,02	88,40
	20	1,0693	5,56	5,00	88,70
	25	1,0760	5,55	5,00	89,90
	30	1,0495	5,51	5,00	88,10
	35	1,0774	5,55	5,03	88,90
	40	1,0687	5,56 ₅	5,02	88,20
	45	1,0618	5,54	4,99	89,00
	50	1,0740	5,58	5,01	88,80
	55	1,0657	5,55	5,01	88,20
	60	1,0559	5,51	5,00	88,70
	65	1,0664	5,55	5,00	89,00
	70	1,0479	5,47	5,00	88,70
	75	1,0789	5,57	5,01	89,30
	80	1,0479	5,51	4,99	88,40
85	1,0683	5,60	5,05	86,60	
90	1,0650	5,55	4,98	89,60	
Untere Brutzone 16 Tabletten	5	1,3382	6,32	5,07 ₅	95,45
	10	1,3285	6,29	5,06 ₅	95,60
	15	1,3400	6,31	5,07 ₅	95,75

Tabelle 4 Tablettensäule für Stab 7A-4
Hüllrohr-Nr. 143 B/a

	Lage der geprüften Tabletten	T a b l e t t e n d a t e n			
		Gewicht (g)	Höhe (mm)	Durchmesser (mm)	Materialdichte (% th.D.)
Obere Brutzone 16 Tabletten	5	1,3231	6,25	5,04 ₅	96,50
	10	1,3300	6,26	5,06 ₅	96,20
	15	1,3220	6,24 ₅	5,04 ₅	96,60
Brennstoff- zone 90 Tabletten	5	1,0603	5,53	5,00	88,90
	10	1,0617	5,56	5,01	88,10
	15	1,0745	5,62	5,02	87,90
	20	1,0645	5,54	5,01	88,60
	25	1,0707	5,57	5,01	88,70
	30	1,0630	5,55	5,00	88,80
	35	1,0740	5,56	5,00	89,50
	40	1,0696	5,56 ₅	5,00	89,00
	45	1,0700	5,56	5,00	89,10
	50	1,0640	5,57	5,00	88,70
	55	1,0645	5,55	4,99	89,10
	60	1,0446	5,47	4,98	89,10
	65	1,0640	5,52	5,00	89,20
	70	1,0585	5,53	5,00	88,60
	75	1,0600	5,52	5,00	88,90
80	1,0500	5,53	4,99	87,90	
85	1,0788	5,59	5,00	89,40	
90	1,0563	5,54	5,00	88,30	
Untere Brutzone 16 Tabletten	5	1,3382	6,32	5,05	96,40
	10	1,3427	6,27	5,05	97,50
	15	1,3377	6,27	5,07	96,40

Tabelle 5 Tablettensäule für Stab 7A-5
Hüllrohr-Nr. 701

	Lage der geprüften Tabletten	T a b l e t t e n d a t e n			
		Gewicht (g)	Höhe (mm)	Durchmesser (mm)	Materialdichte (% th.D.)
Obere Brutzone 16 Tabletten	5	1,3293	6,27	5,06 ₅	96,00
	10	1,3209	6,25	5,04 ₅	96,45
	15	1,3292	6,27	5,05	96,50
Brennstoff- zone 90 Tabletten	5	1,0738	5,57 ₅	5,01	88,85
	10	1,0459	5,47	5,00	88,60
	15	1,0634	5,58	5,01 ₅	87,80
	20	1,0685	5,54 ₅	5,01	88,90
	25	1,0590	5,61	5,04	86,00
	30	1,0735	5,59 ₅	5,02	88,20
	35	1,0699	5,55	5,01	89,00
	40	1,0755	5,56 ₅	5,02	88,90
	45	1,0431	5,47	4,99	88,70
	50	1,0609	5,58	5,06	86,00
	55	1,0604	5,50 ₅	4,99	89,50
	60	1,0591	5,50	5,00	89,10
	65	1,0691	5,59	5,01	88,20
	70	1,0725	5,60	5,02	88,00
	75	1,0718	5,52 ₅	5,01	89,50
	80	1,0360	5,48	4,99	87,90
85	1,0425	5,50	5,04	86,40	
90	1,0810	5,56 ₅	5,01	89,60	
Untere Brutzone 16 Tabletten	5	1,3253	6,27	5,05	96,30
	10	1,3099	6,22 ₅	5,03 ₅	96,40
	15	1,3342	6,27	5,06	96,50

Tabelle 6 Tablettensäule für Stab 7A-6
Hüllrohr-Nr. 55 b

	Lage der geprüften Tabletten	T a b l e t t e n d a t e n			
		Gewicht (g)	Höhe (mm)	Durchmesser (mm)	Materialdichte (% th.D.)
Obere fBrutzone 16 Tabletten	5	1,3238	6,26	5,04 ₅	96,50
	10	1,3305	6,26	5,04	97,30
	15	1,3181	6,24	5,03 ₅	96,80
Brennstoff- zone 90 Tabletten	5	1,0703	5,55	5,00	89,25
	10	1,0661	5,55 ₅	5,01	88,50
	15	1,0693	5,55	5,00	89,20
	20	1,0681	5,54	5,00	89,80
	25	1,0516	5,52	4,99	88,60
	30	1,0465	5,54 ₅	5,01	87,00
	35	1,0633	5,57 ₅	5,03	86,80
	40	1,0505	5,55	5,00	87,20
	45	1,0500	5,57	5,03 ₅	86,00
	50	1,0585	5,56	5,01	87,30
	55	1,0565	5,53	5,00	88,40
	60	1,0643	5,53	5,00	89,10
	65	1,0648	5,55 ₅	5,00	88,85
	70	1,0626	5,55	5,00	88,70
	75	1,0739	5,58 ₅	5,04	87,70
	80	1,0645	5,57	5,02 ₅	87,70
85	1,0746	5,56 ₅	5,04	88,00	
90	1,0643	5,56	5,00	88,20	
Untere Brutzone 16 Tabletten	5	1,3140	6,24	5,04 ₅	96,20
	10	1,3105	6,23	5,03 ₅	96,40
	15	1,3103	6,23 ₅	5,04 ₅	95,90

Tabelle 7 Tablettensäule für Stab 7A-7
Hüllrohr-Nr. 56 b

	Lage der geprüften Tabletten	T a b l e t t e n d a t e n			
		Gewicht (g)	Höhe (mm)	Durchmesser (mm)	Materialdichte (% th.D.)
Obere Brutzone 16 Tabletten	5	1,3254	6,27	5,06	95,90
	10	1,3387	6,30	5,05	96,70
	15	1,3506	6,27	5,08	96,90
Brennstoff- zone 90 Tabletten	5	1,0724	5,56	5,02	88,70
	10	1,0611	5,56	5,01	88,00
	15	1,0500	5,58 ₅	5,02 ₅	86,20
	20	1,0662	5,56	5,03 ₅	87,60
	25	1,0400	5,48	4,99	88,20
	30	1,0635	5,58	5,04	86,90
	35	1,0754	5,60	5,02 ₅	88,10
	40	1,0708	5,57 ₅	5,01	88,60
	45	1,0736	5,60	5,05	87,00
	50	1,0690	5,58 ₅	5,02	88,00
	55	1,0542	5,53 ₅	5,00	88,20
	60	1,0809	5,58	5,01	89,30
	65	1,0570	5,50	5,00	89,00
	70	1,0493	5,49 ₅	5,06	86,30
	75	1,0522	5,60	5,02	86,30
	80	1,0728	5,55	5,07	87,00
85	1,0808	5,56	5,05	88,20	
90	1,0543	5,56	5,03 ₅	86,60	
Untere Brutzone 16 Tabletten	5	1,3303	6,27 ₅	5,05	96,50
	10	1,3370	6,28	5,06 ₅	96,40
	15	1,3355	6,27	5,05 ₅	96,80

Tabelle 8 Tablettensäule für Stab 7A-8
Hüllrohr-Nr. 685 B/a

	Lage der geprüften Tabletten	T a b l e t t e n d a t e n			
		Gewicht (g)	Höhe (mm)	Durchmesser (mm)	Materialdichte (% th.D.)
Obere Brutzone 16 Tabletten	5	1,3213	6,26	5,04 ₅	96,35
	10	1,3286	6,27	5,04	96,90
	15	1,3312	6,26 ₅	5,03 ₅	97,20
Brennstoff- zone 90 Tabletten	5	1,0878	5,60	5,03	88,90
	10	1,0714	5,65	5,05	86,10
	15	1,0957	5,60	5,02	89,90
	20	1,0829	5,63	5,04	87,85
	25	1,0866	5,63	5,05	87,70
	30	1,0869	5,60	5,01	89,55
	35	1,0812	5,60 ₅	5,02 ₅	88,50
	40	1,0839	5,60 ₅	5,03	88,50
	45	1,0882	5,57	5,01	89,00
	50	1,0853	5,59 ₅	5,03	88,80
	55	1,0624	5,55 ₅	5,01 ₅	87,95
	60	1,0798	5,58	5,03	88,60
	65	1,0828	5,59	5,06	87,60
	70	1,0906	5,59	5,03	89,25
	75	1,1014	5,75	5,06	86,65
	80	1,0900	5,63	5,06	87,60
85	1,0786	5,58	5,02	88,90	
90	1,0959	5,59	5,01	90,40	
Untere Brutzone 16 Tabletten	5	1,3386	6,26 ₅	5,04	97,60
	10	1,3259	6,27	5,04 ₅	97,00
	15	1,3270	6,27	5,06	96,00

Tabelle 9 Tablettensäule für Stab 7A-9
Hüllrohr-Nr. 294 B/b

	Lage der geprüften Tabletten	T a b l e t t e n d a t e n			
		Gewicht (g)	Höhe (mm)	Durchmesser (mm)	Materialdichte (% th.D.)
Obere Brutzone 16 Tabletten	5	1,3208	6,26	5,04 ₅	96,40
	10	1,3162	6,25	5,05	95,30
	15	1,3082	6,23	5,04	96,00
Brennstoff- zone 90 Tabletten	5	1,0771	5,58 ₅	5,04 ₅	87,80
	10	1,0680	5,57	5,01	88,50
	15	1,0698	5,55	5,01	88,90
	20	1,0700	5,56	5,00 ₅	89,20
	25	1,0808	5,57 ₅	5,00	90,00
	30	1,0778	5,54	5,01	89,80
	35	1,0588	5,48	5,00	89,50
	40	1,0599	5,54 ₅	5,00	88,60
	45	1,0784	5,57	5,01 ₅	89,10
	50	1,0685	5,54	5,01 ₅	88,80
	55	1,0614	5,51	4,99 ₅	89,40
	60	1,0784	5,53 ₅	5,01	89,90
	65	1,0547	5,57 ₅	5,01 ₅	87,10
	70	1,0683	5,59	5,00 ₅	88,30
	75	1,0699	5,59 ₅	5,04	87,10
	80	1,0802	5,58	5,02	89,00
85	1,0635	5,59	5,05	86,30	
90	1,0684	5,57	4,99	89,20	
Untere Brutzone 16 Tabletten	5	1,3214	6,24	5,04 ₅	96,60
	10	1,3203	6,25	5,05	96,20
	15	1,3151	6,24	5,06	95,50

A n h a n g II

Dokumentation der Nachuntersuchung

Es wurde pro Stab ein fünfseitiges Faltblatt zusammengestellt. Die Titelseite (Seite ganz rechts) enthält die Material- und Bestrahlungsdaten für den Prüfling. Nach links schließen sich 4 DIN A4-Seiten mit der eigentlichen Dokumentation an. Hierin sind dargestellt:

- a) eine Betatrondurchstrahlung der Spaltstoffsäule,
- b) eine Zeichnung des gesamten Stabes,
- c) in 3 Zeilen angeordnet: keramografische Längs- und Querschliffe (als Übersichtsaufnahmen) und hierzu die α - und β -Autoradiografien.

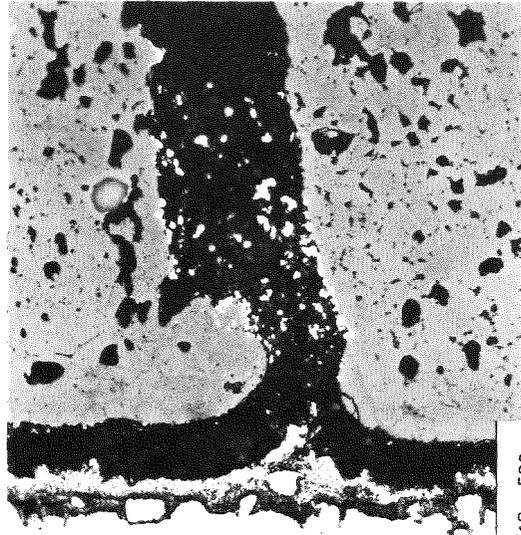
Die Lage der Schliffe ist durch Pfeile in der Stabzeichnung markiert. Vor jedem dieser 7 Faltblätter sind auf mehreren Seiten Detailaufnahmen der dargestellten Keramografien (in Vergrößerung) eingefügt.

Auf einem weiteren Faltblatt sind außerdem die Röntgenaufnahmen von 4 Prüflingen (7A-1, -4, -5 und -7) dargestellt. Man erkennt auf dieser Seite z.T. sehr gut die einzelnen Tabletten und deren Schädigung (z.B. Stab 7A-1 im Brutstoff).

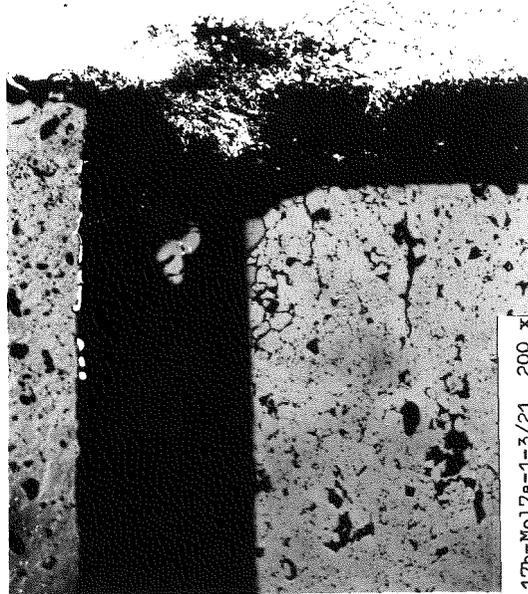
zu Prüfling 7A-1
A1



0,1mm



0,1mm



0,1mm

17b-Mo17a-1-3/1R 500 x

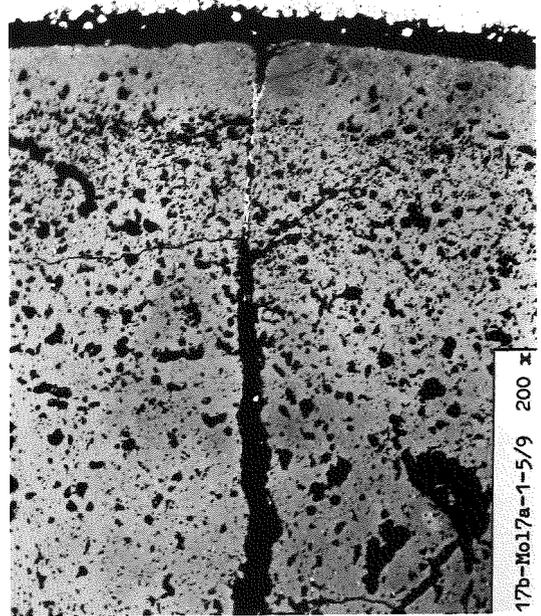
17b-Mo17a-1-3/21 200 x

zu Prüfling 7A-1

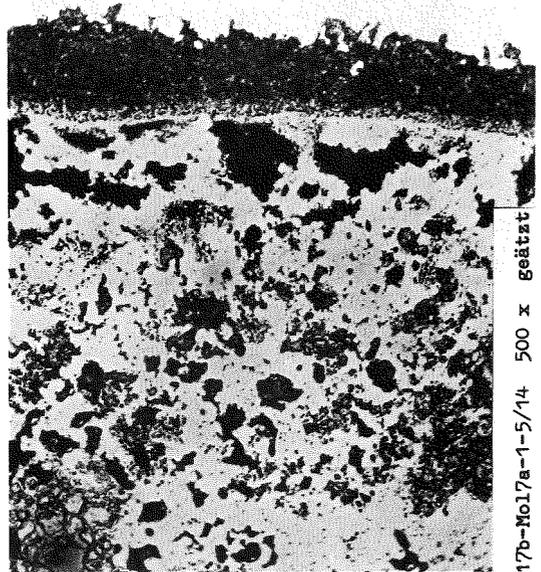
A2



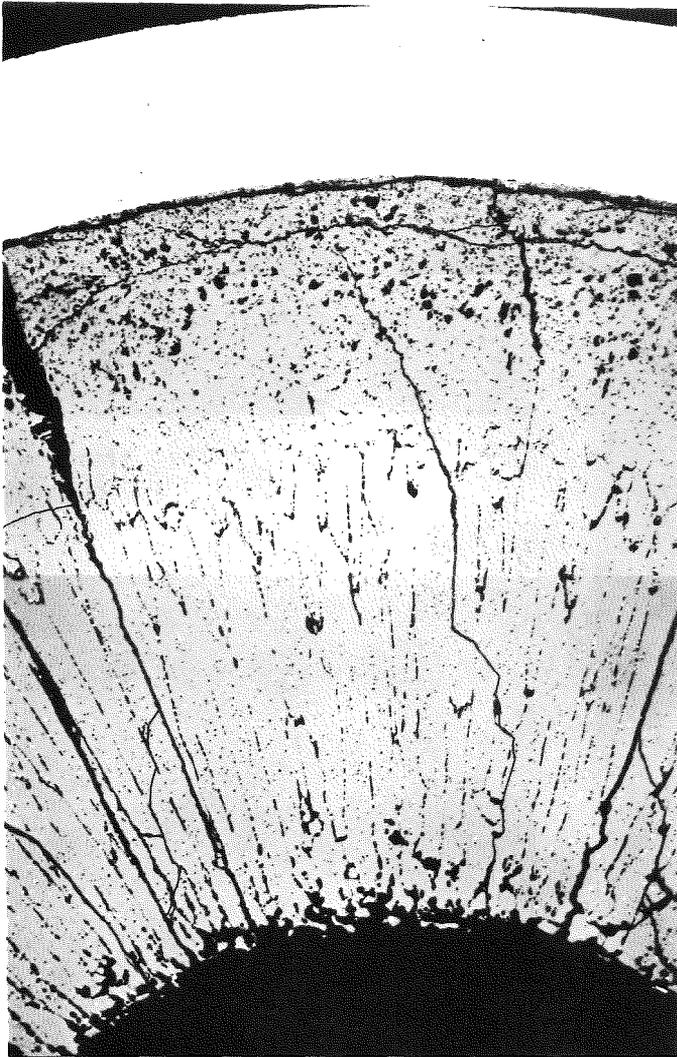
0,1mm



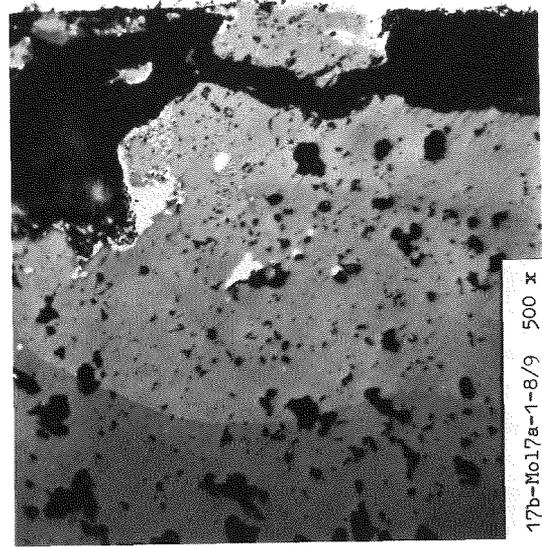
0,1mm



0,1mm

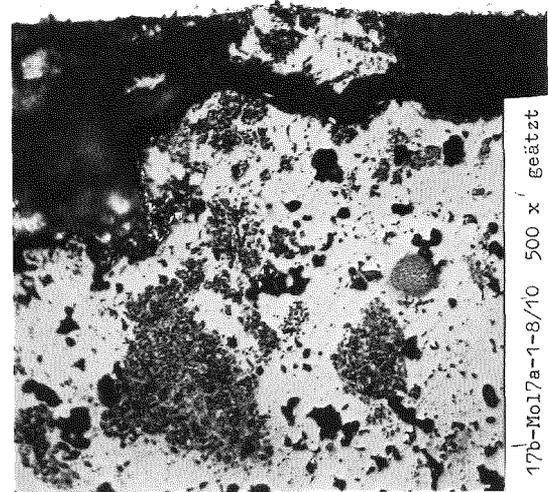


0,1 mm



17b-Mo17a-1-8/9 500 x

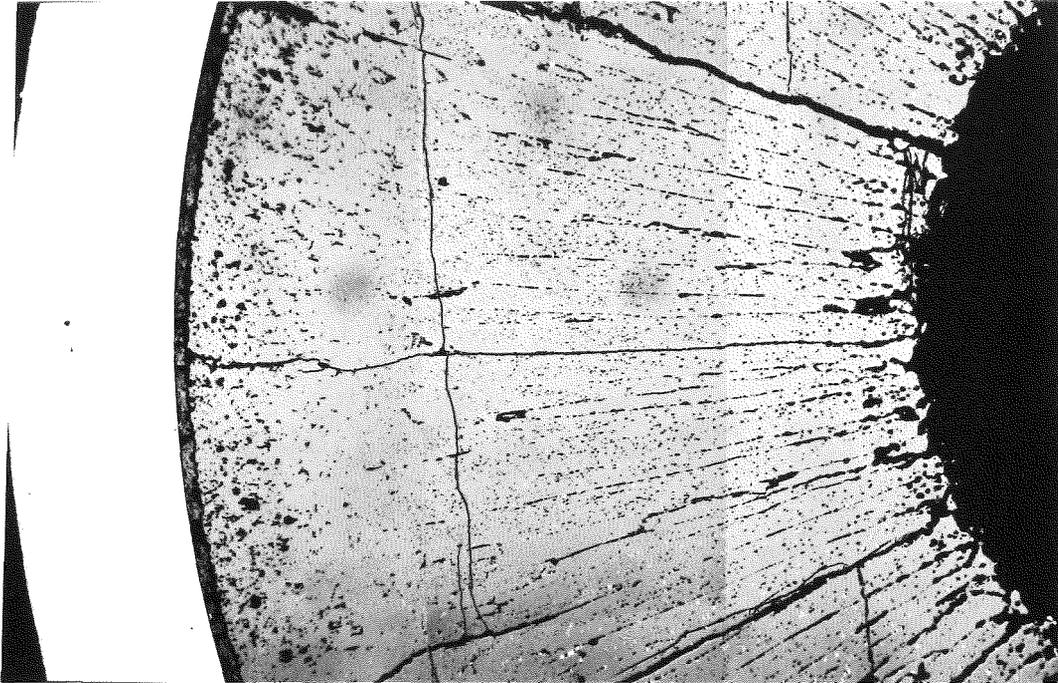
0,1mm



17b-Mo17a-1-8/10 500 x geätzt

0,1mm

A4

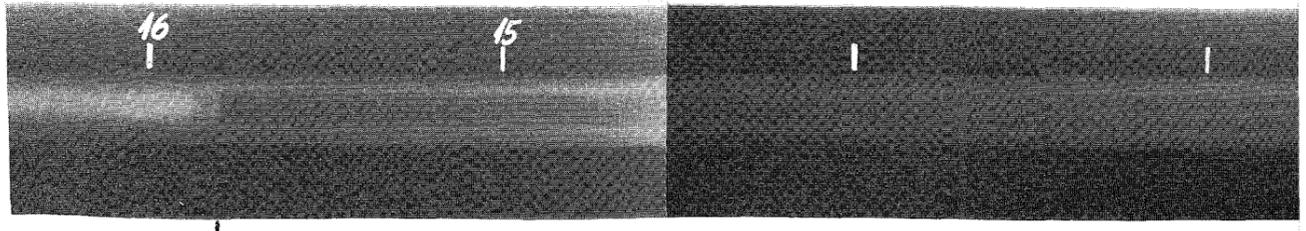


A5

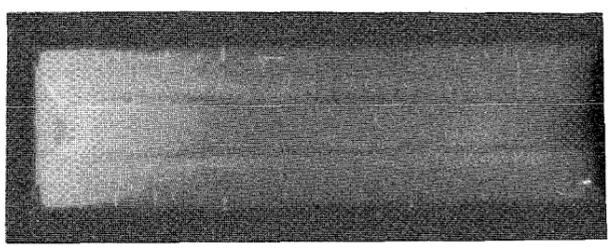
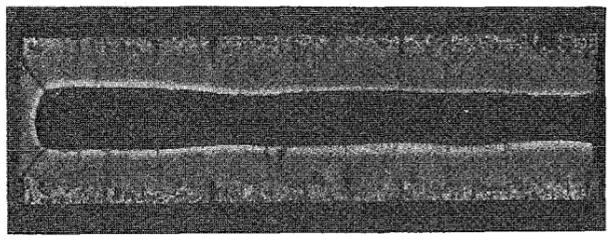
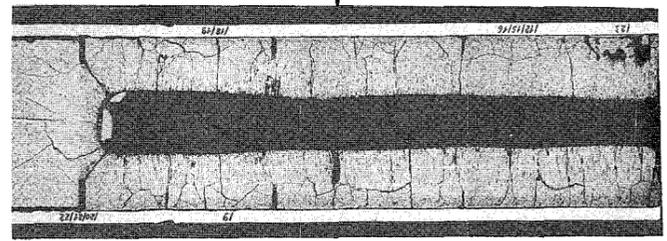
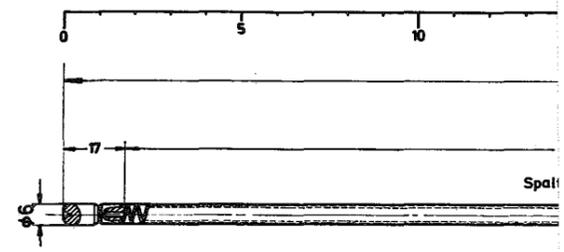


17b-Mo17a-1-11/6 100 x

I
0,1mm

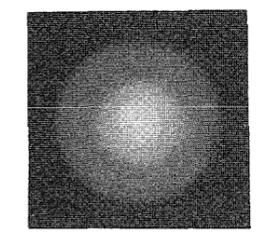
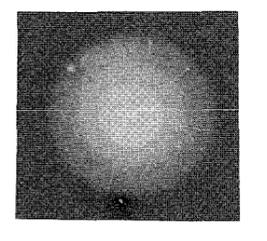
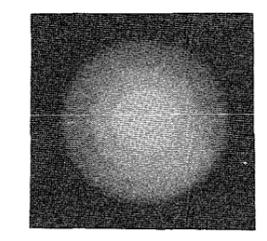
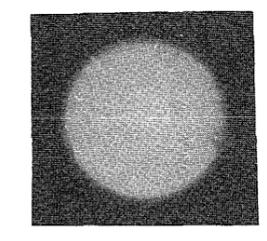
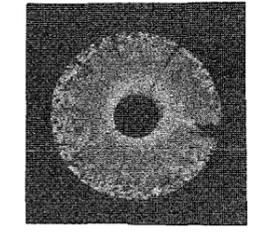
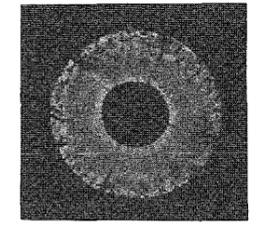
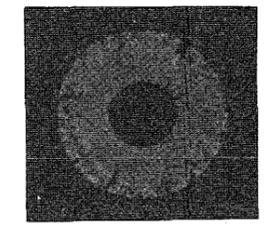
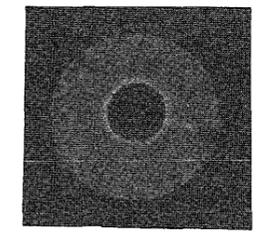
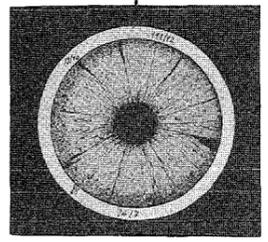
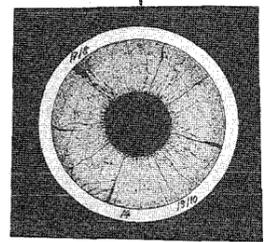
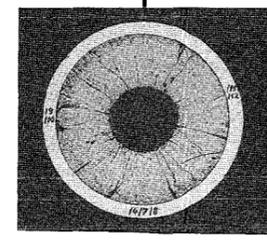
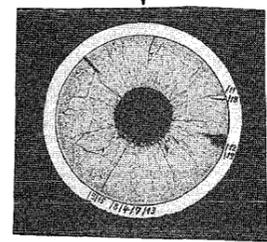
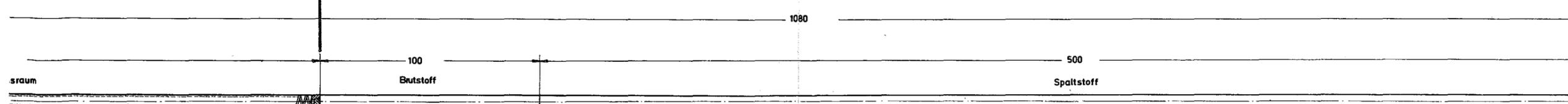
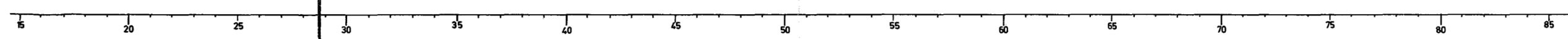
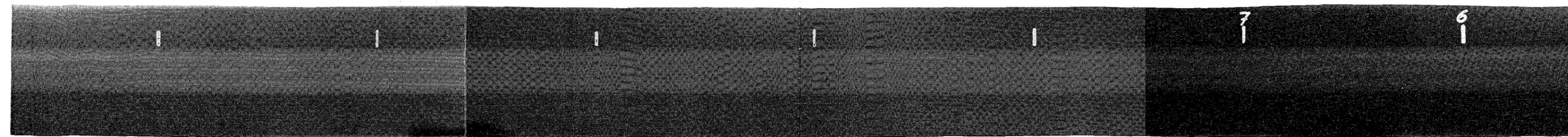


oben



1

1mm



2

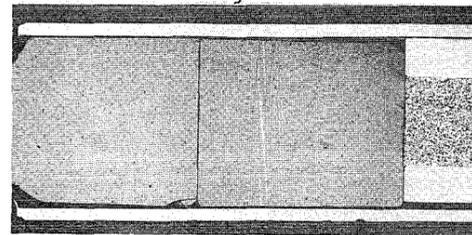
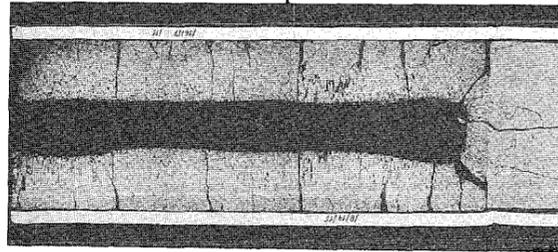
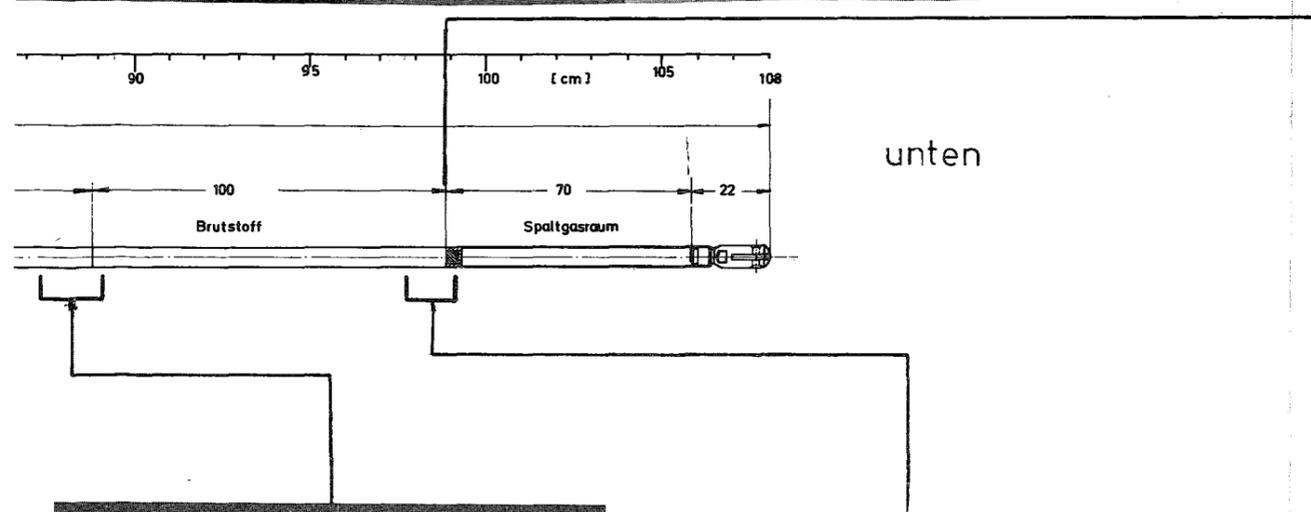
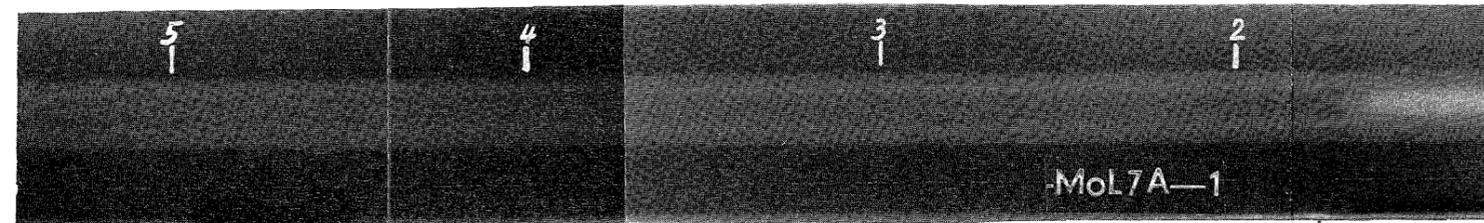
3

1mm

4

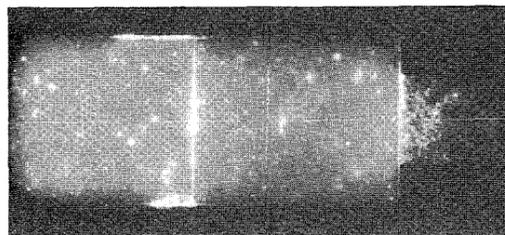
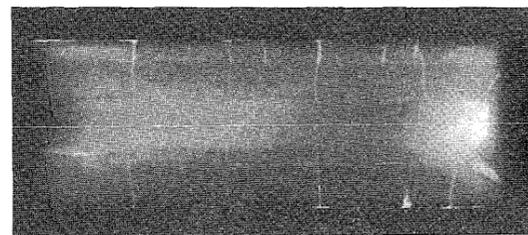
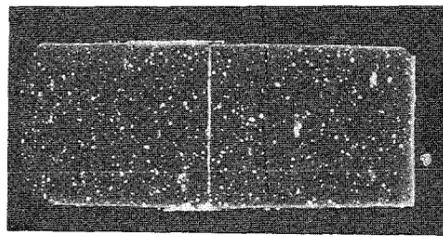
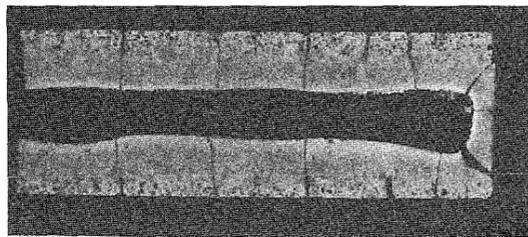
5

1mm



A

1mm



6

7

1mm

Prüfling 7A - 1

Brennstoff :

Form : Tabletten

Zusammensetzung : $UO_2 - PuO_2$

Tablettendichte : 88,17% th.D.

Hülle :

Material : 4988

Aussendurchmesser : 6,0 mm

Wandstärke : 0,384 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 1080 mm

Länge der Brennstoffsäule : 700 mm

Radiale Spaltweite : 0,233 mm

Schmierdichte : 79,95% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : BR2 Natrium Loop
GEX 5475

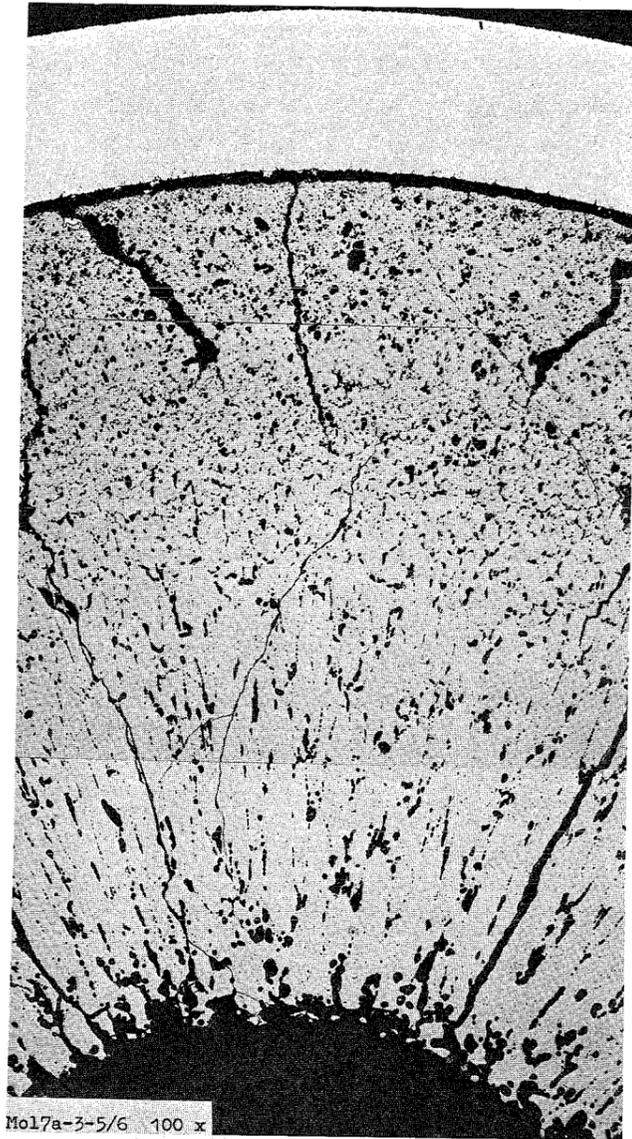
Dauer : 139 Vollasttage

Ende : 11. Sept. 1970

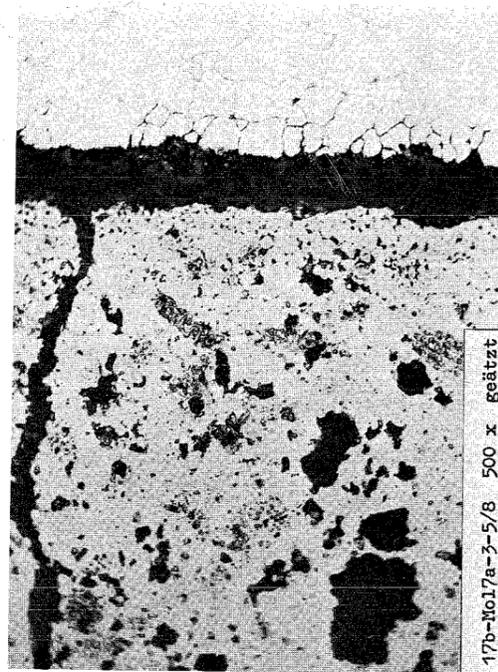
Rechn. Abbrand mittl. : 31,7 MWd/kg Metall

Stableistung max./mittl. : 530 / 390 W/cm

zu Prüfling 7A-3
A2

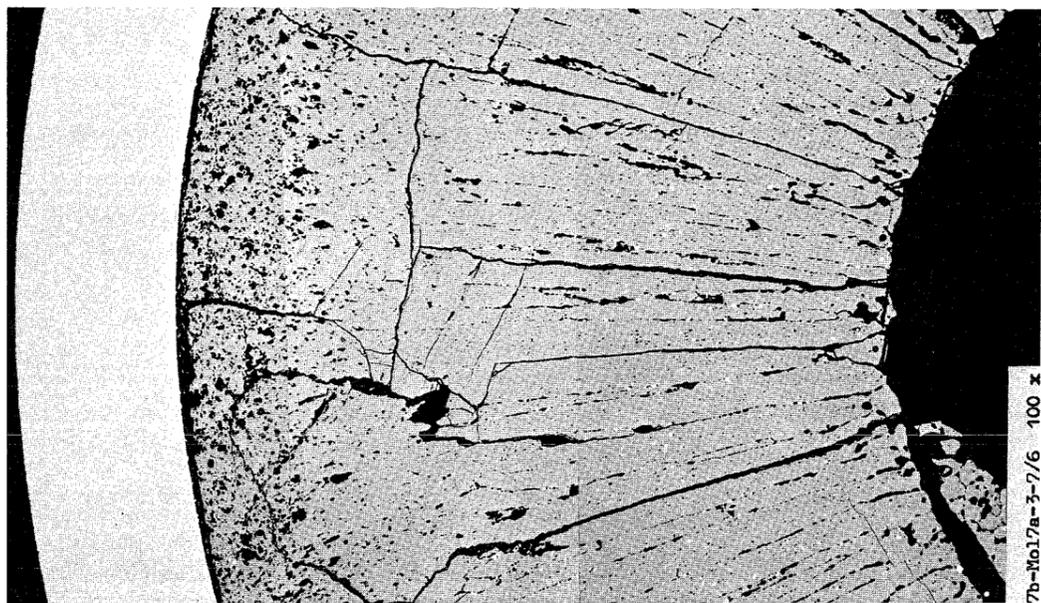


0,1mm

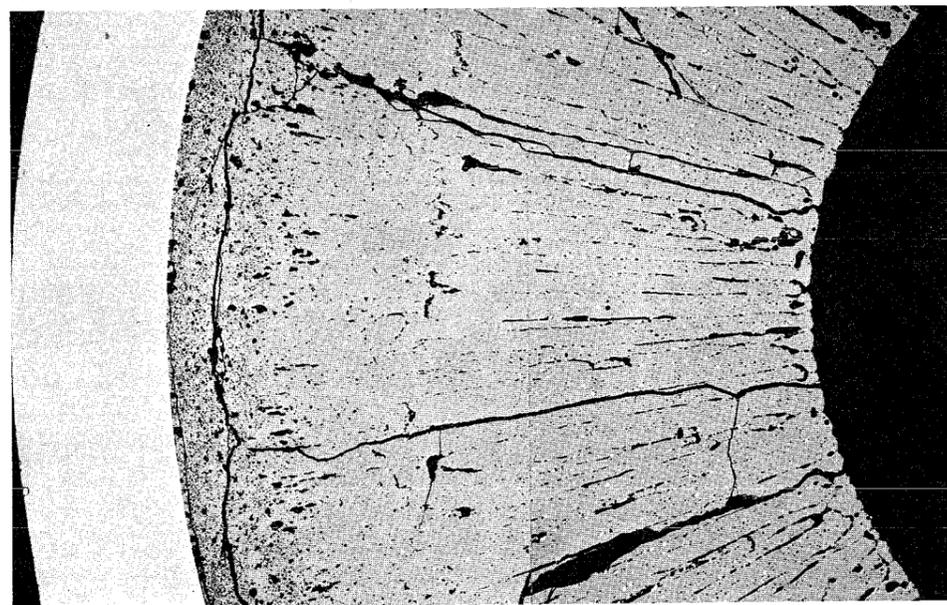


0,1mm

A3

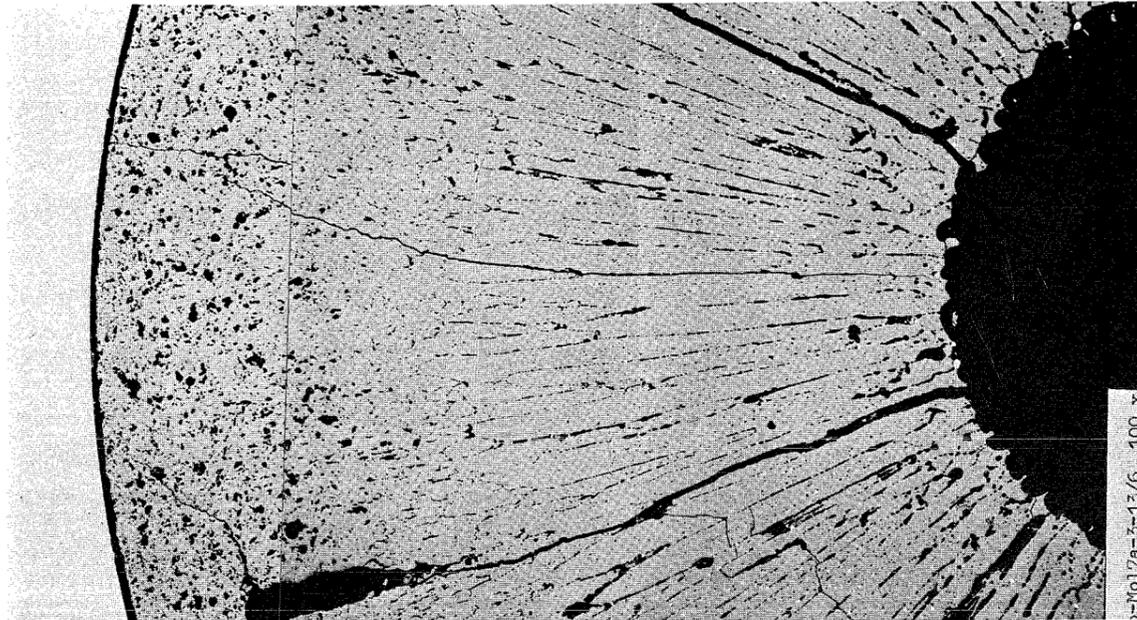


A4

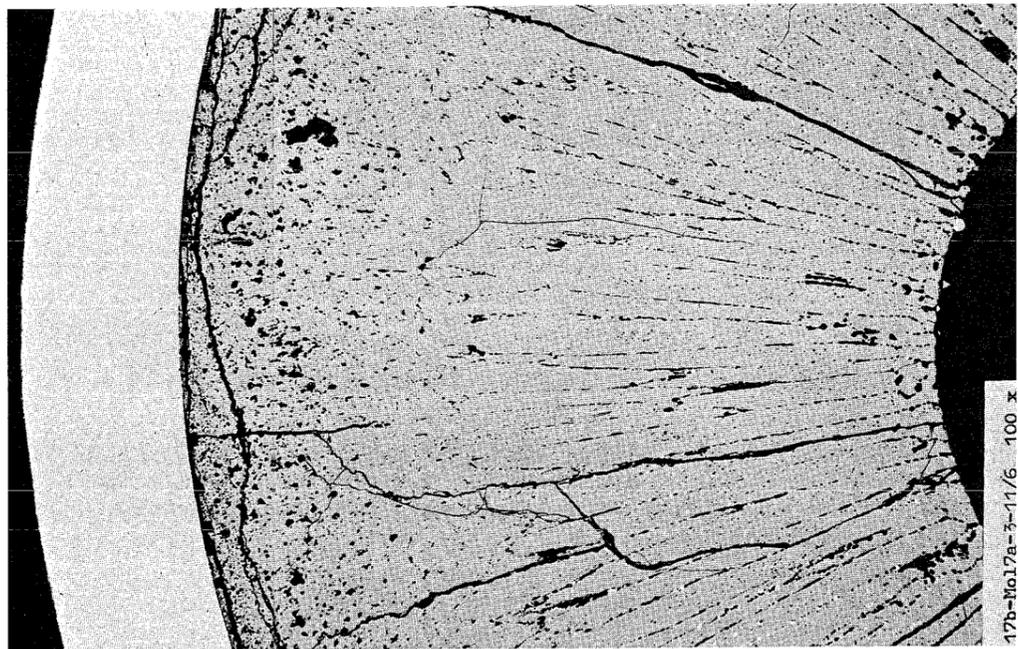


I
0,1mm

A5

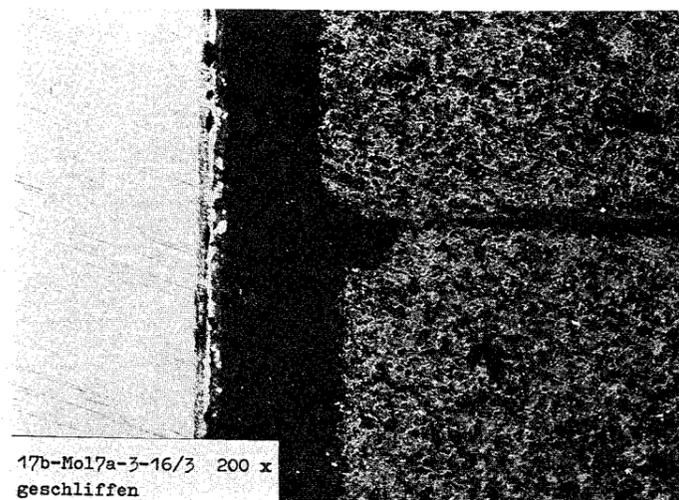


A6



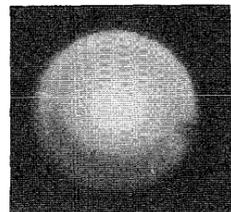
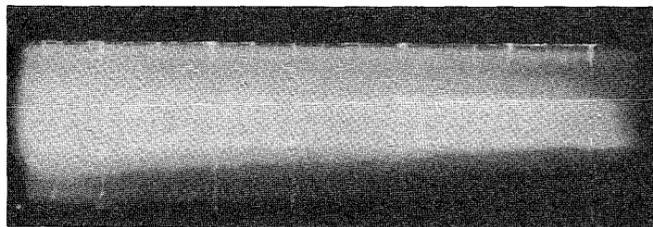
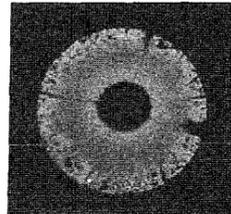
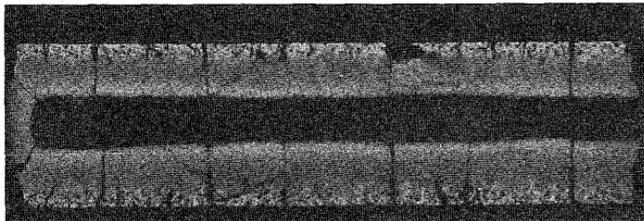
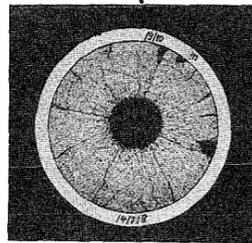
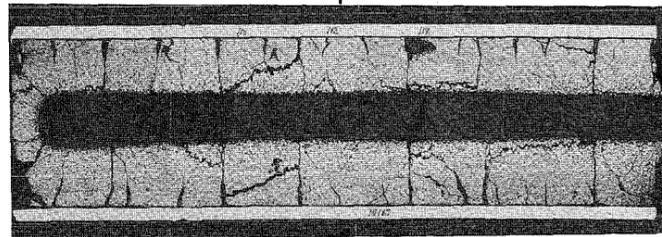
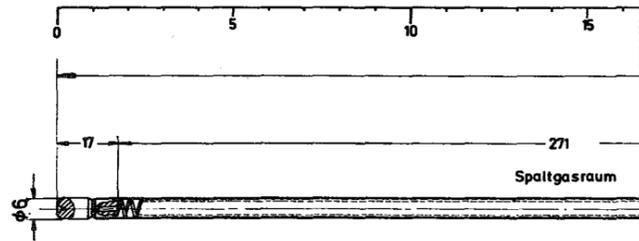
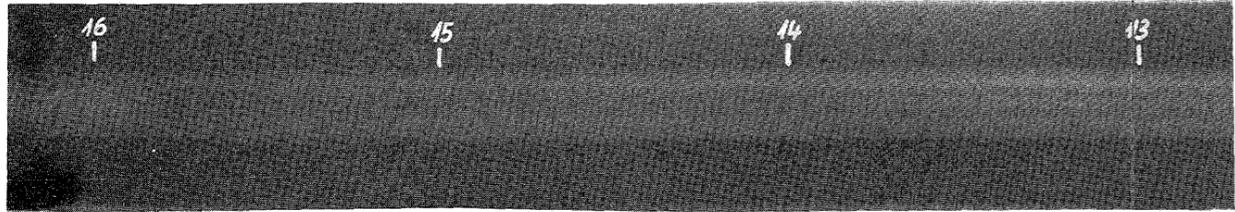
I
0,1mm

A8



A9

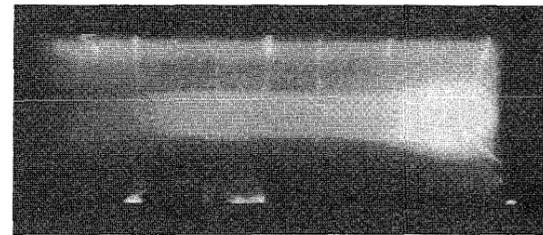
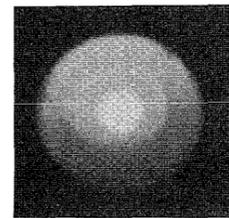
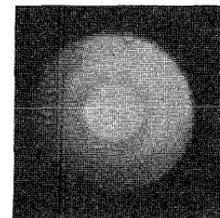
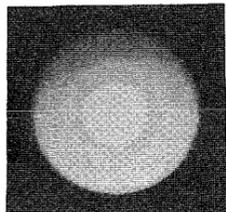
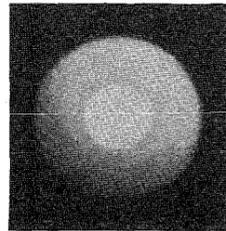
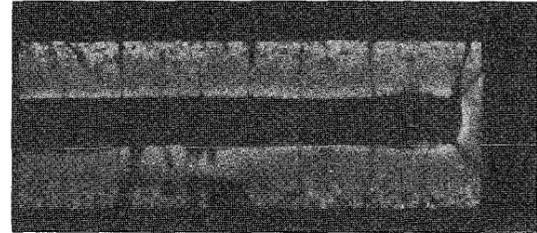
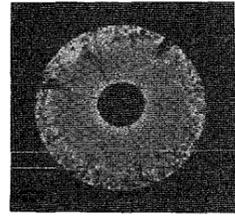
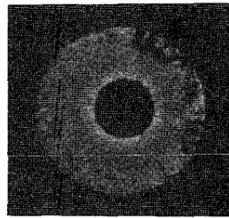
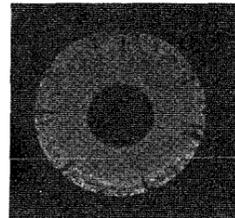
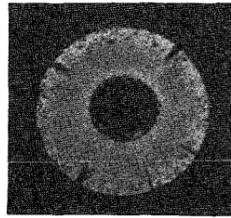
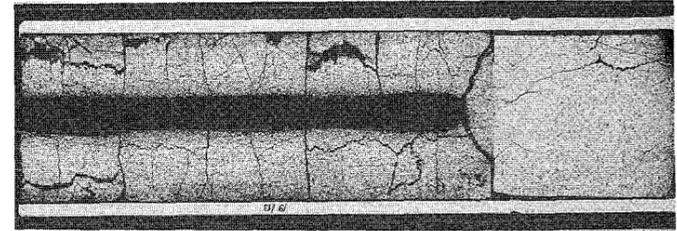
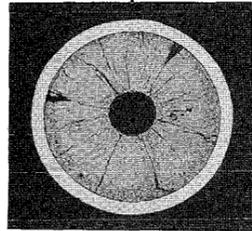
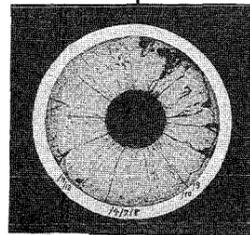
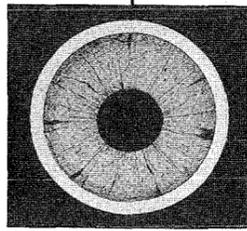
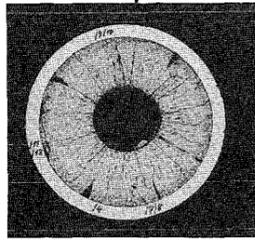
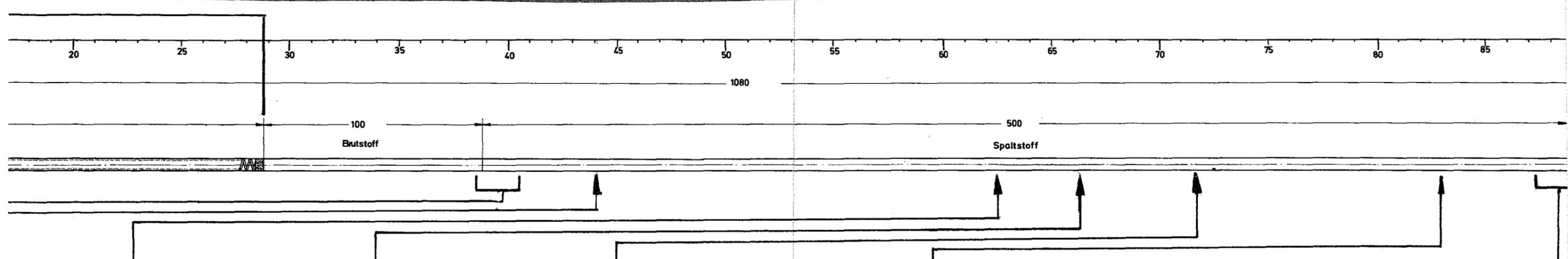
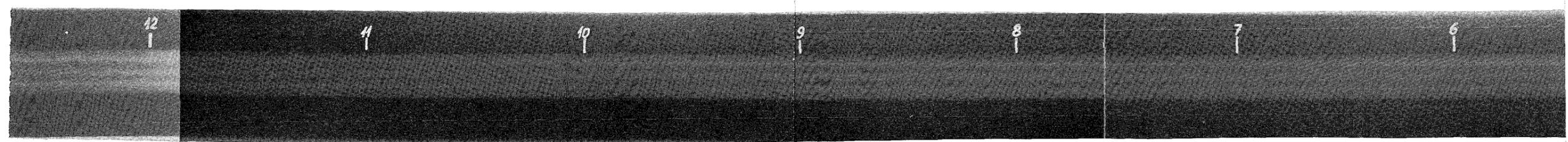




1

2

1mm



3

4

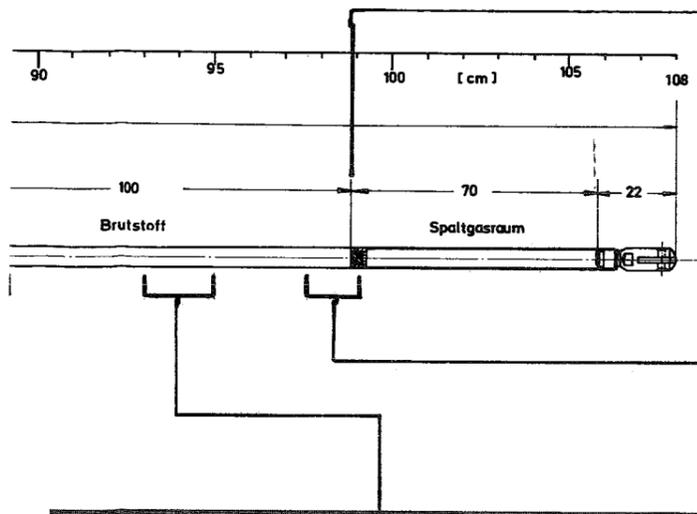
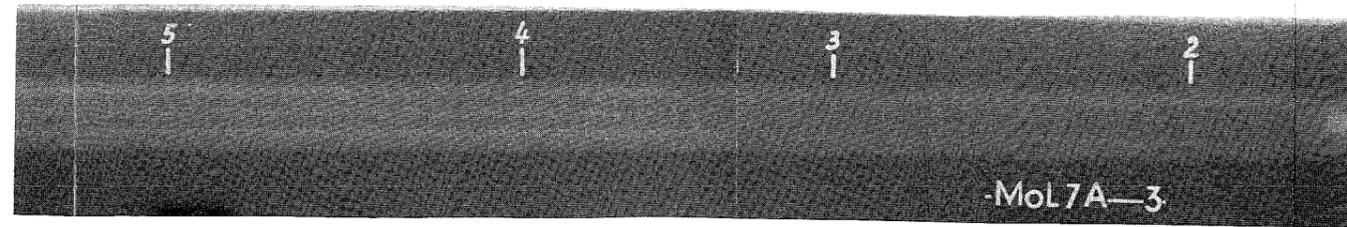
5

1mm

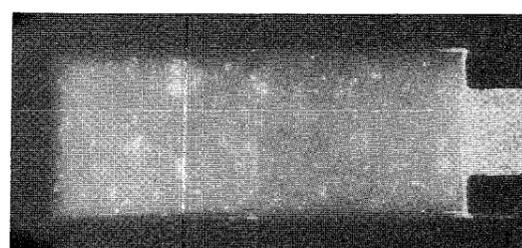
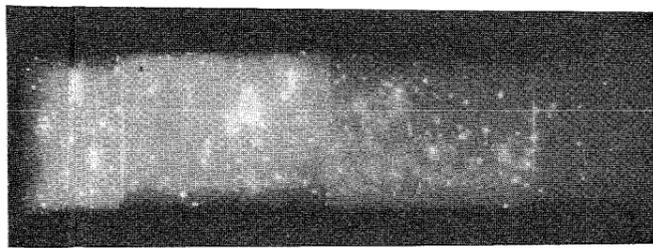
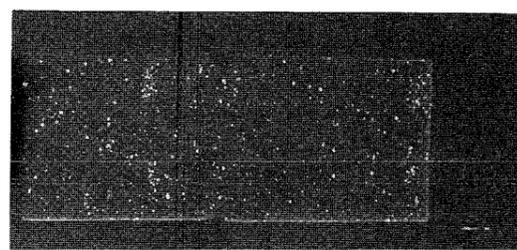
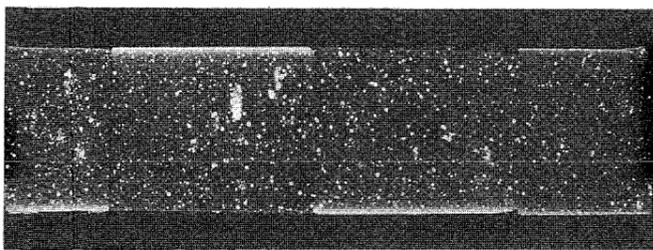
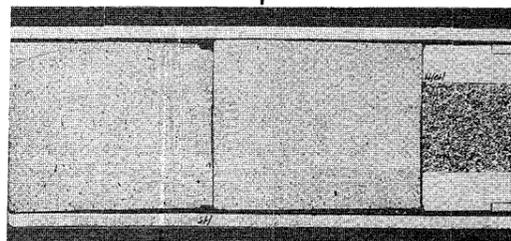
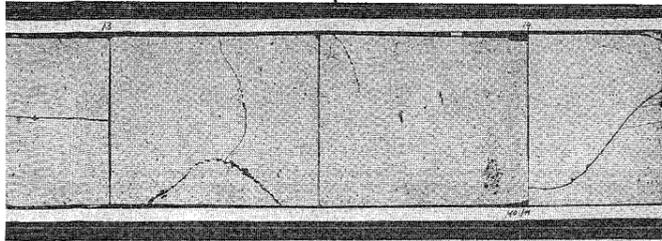
6

7

1mm



unten



8

9

1mm

Prüfling 7A - 3

Brennstoff:

Form : Tabletten

Zusammensetzung : UO_2 - PuO_2

Tablettendichte : 88,80% th.D.

Hülle:

Material : 4988

Aussendurchmesser : 6,0 mm

Wandstärke : 0,374 mm

Geometrie:

Länge des Prüflings : 1080 mm

Länge der Brennstoffsäule : 700 mm

Radiale Spaltweite : 0,234 mm

Schmierdichte : 81,03% th.D.

Bestrahlung:

Einrichtung : BR2 Natrium Loop
GEX 5475

Dauer : 139 Volllasttage

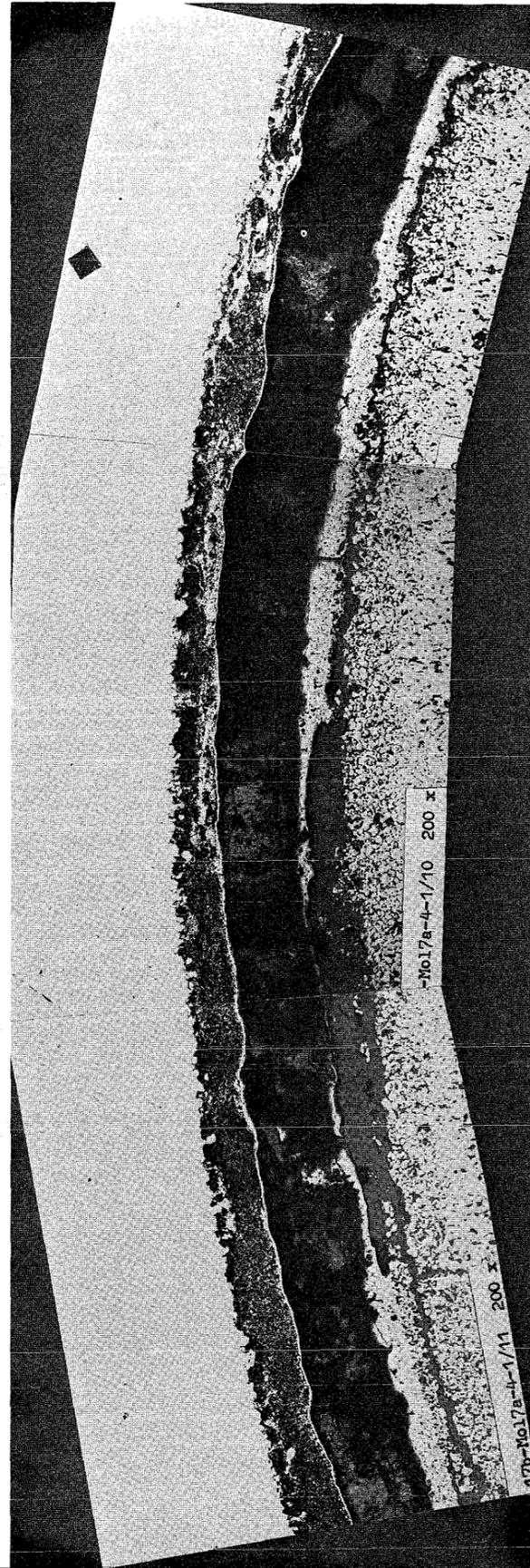
Ende : 11. Sept. 1970

Rechn. Abbrand mittl: : 35,2 MWd/kg Metall

Stableistung max./mittl.: 590 / 430 W/cm



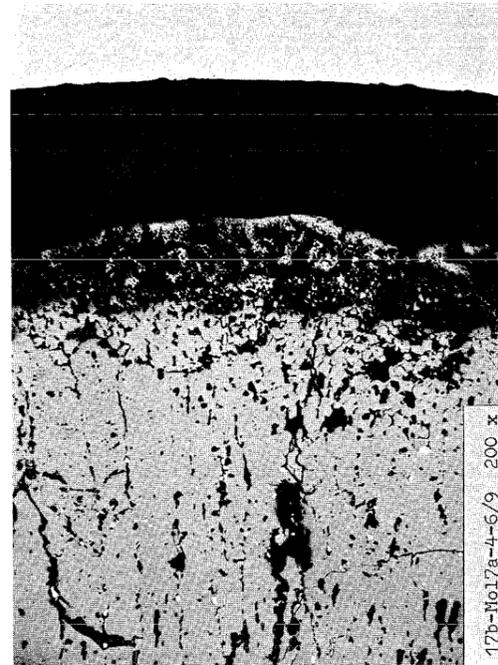
0,1mm



0,1mm



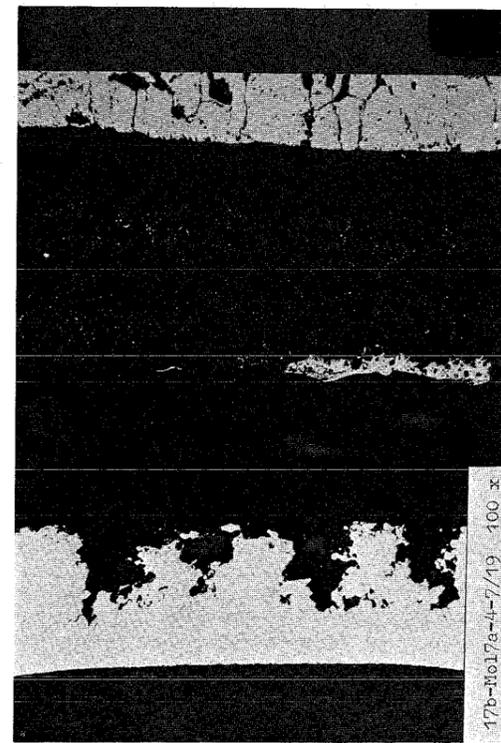
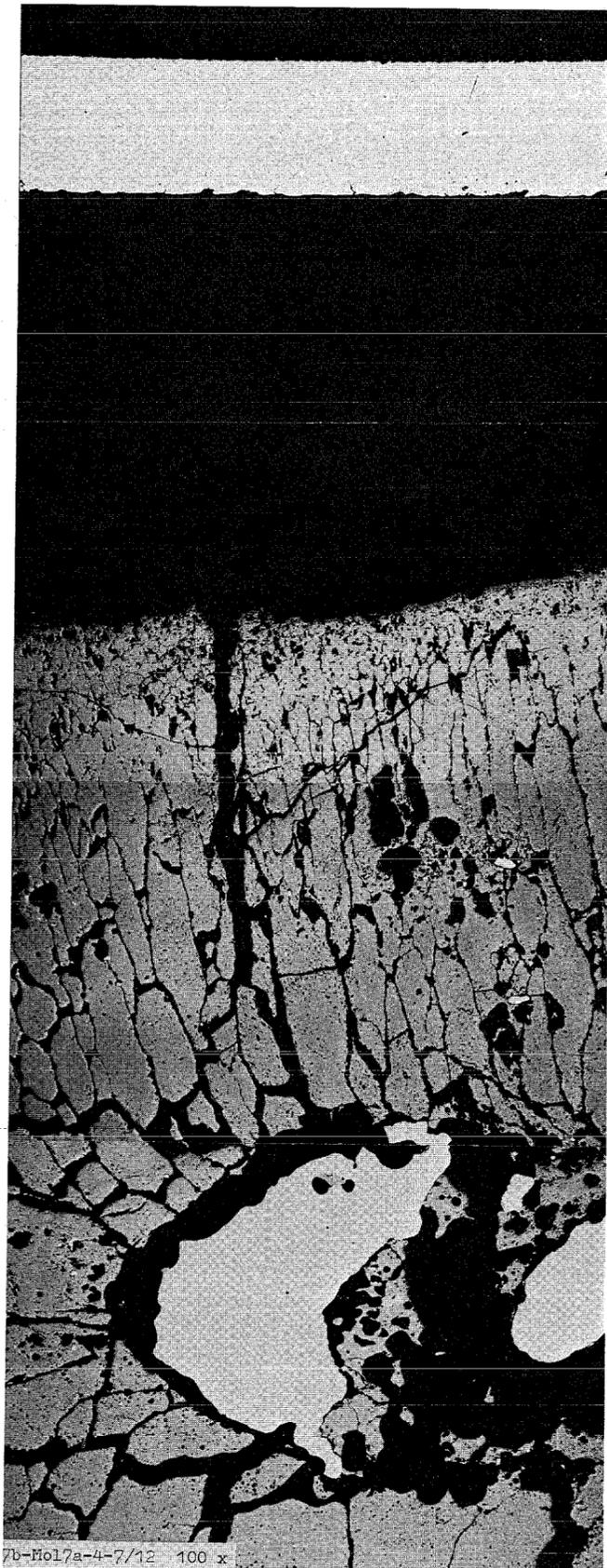
0,1mm



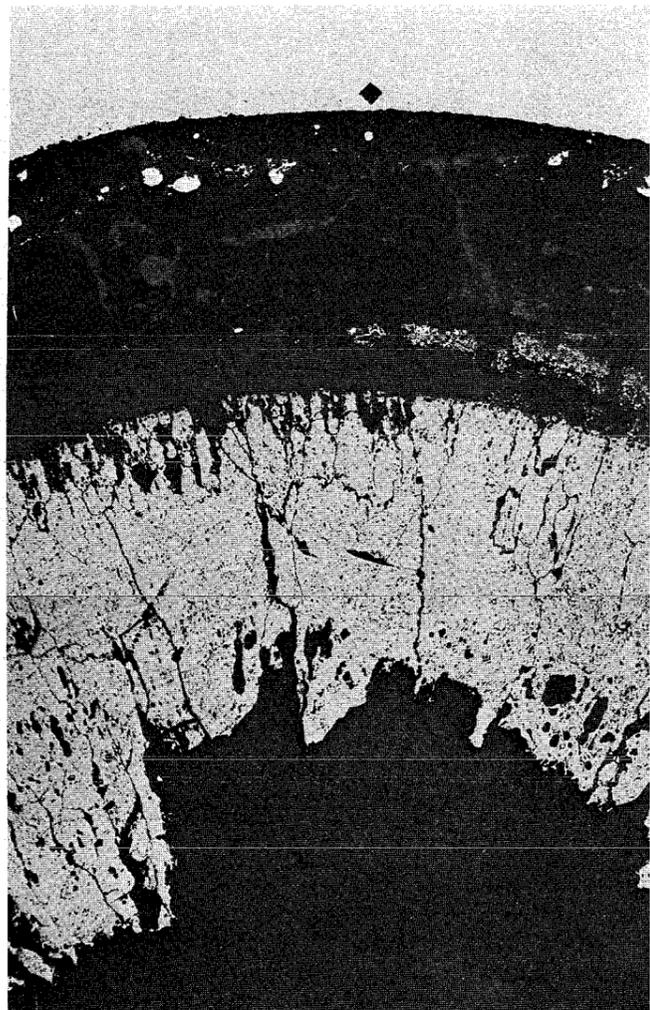
0,1mm



0,1mm



I
0,1mm



0,1mm



17b-Mo17a-4-9/10 200 x
geschliffen

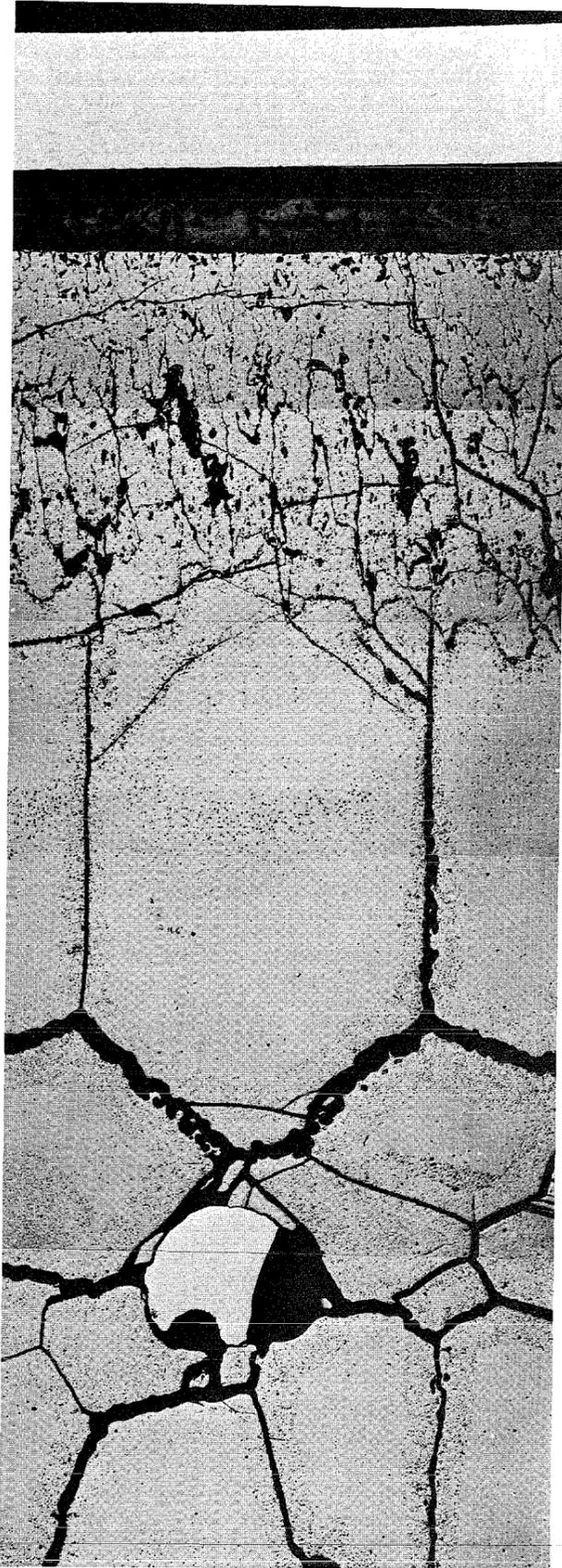


17b-Mo17a-4-9/11 200 x

0,1mm

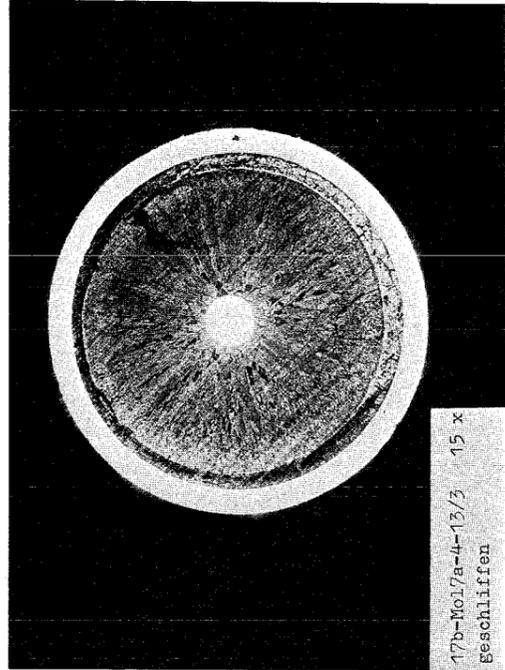
A7

A8

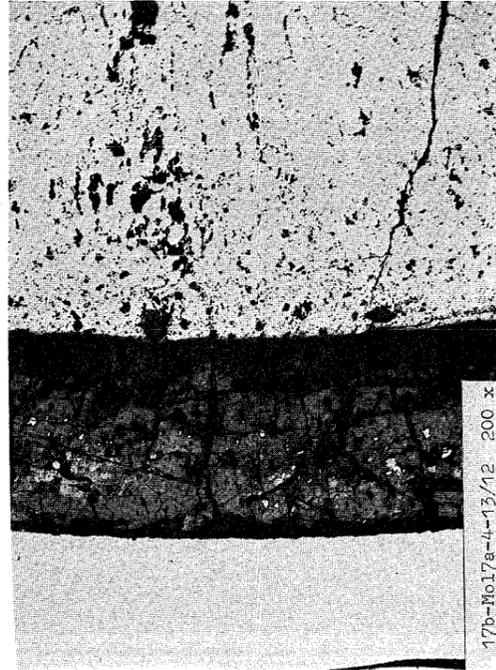


0,1mm

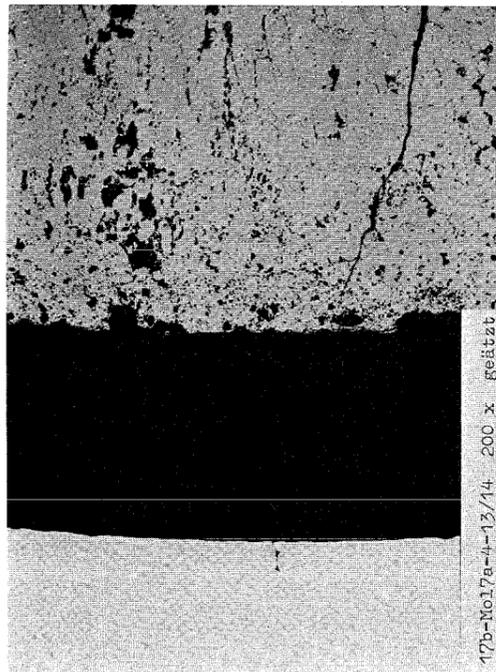
zu Prüfling 7A-4
A9



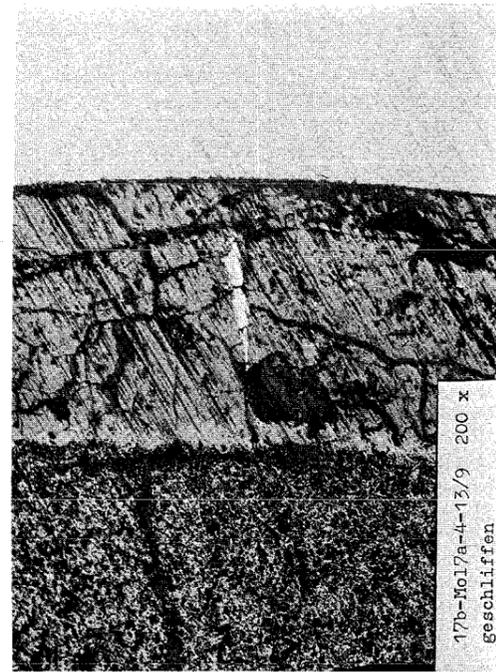
1mm



0,1mm



0,1mm

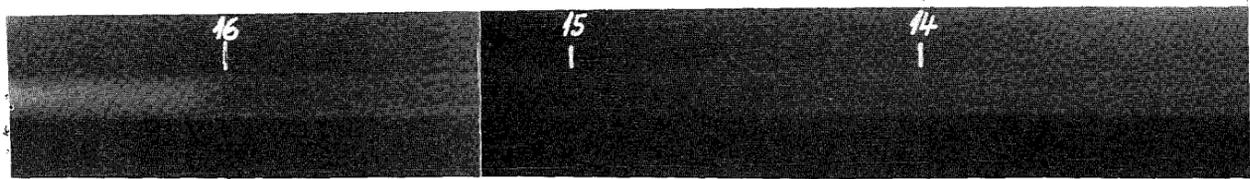


0,1mm

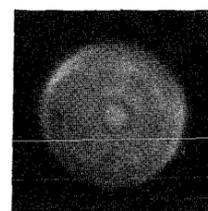
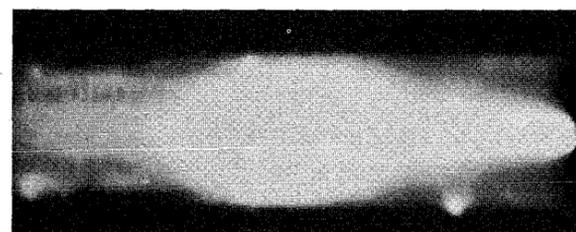
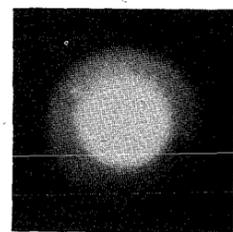
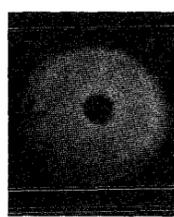
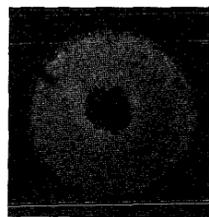
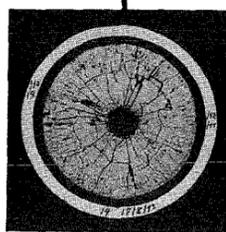
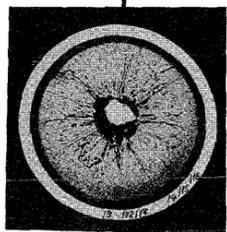
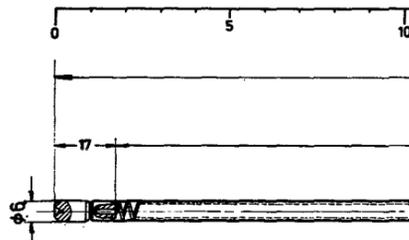
-143-
zu Prüfling 7A-4
A10



1mm



oben

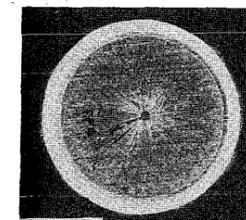
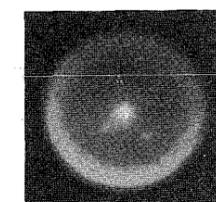
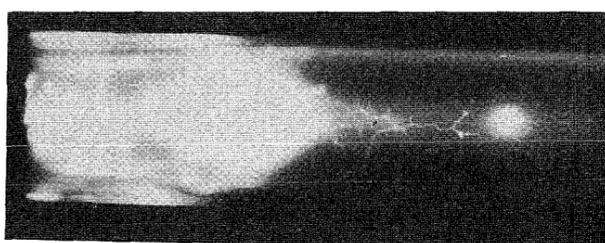
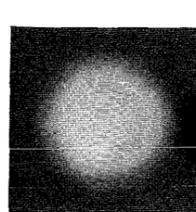
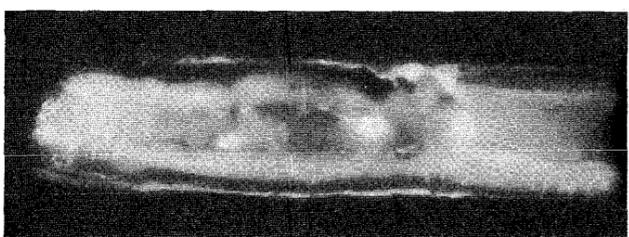
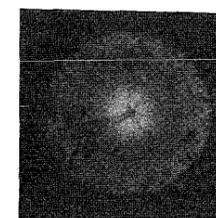
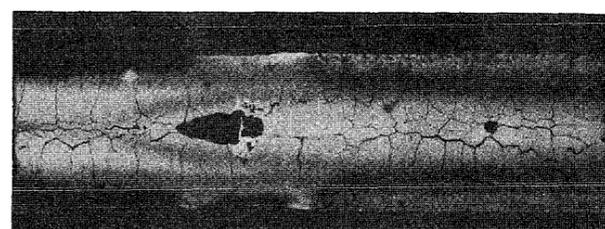
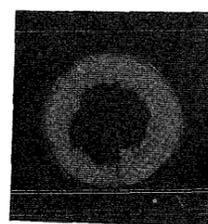
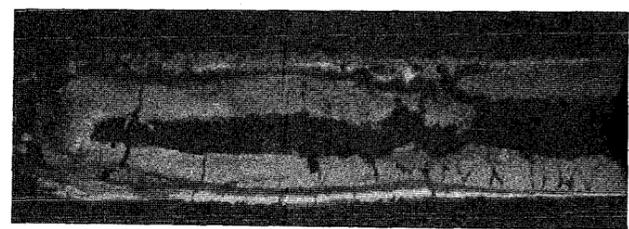
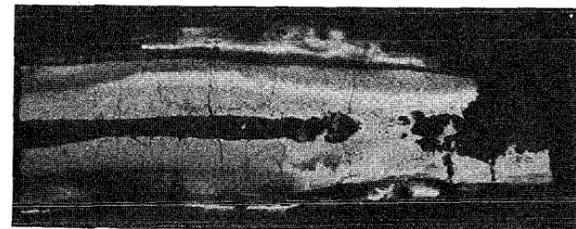
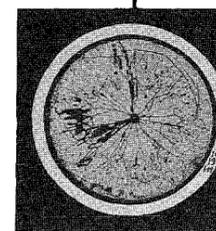
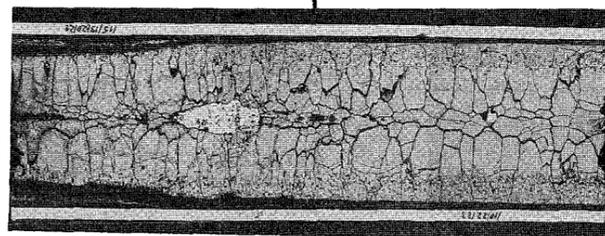
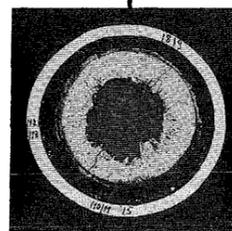
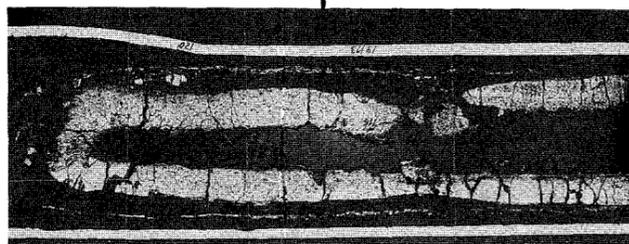
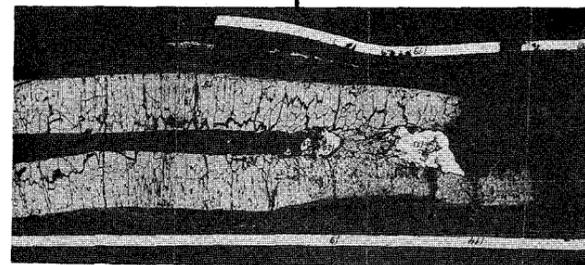
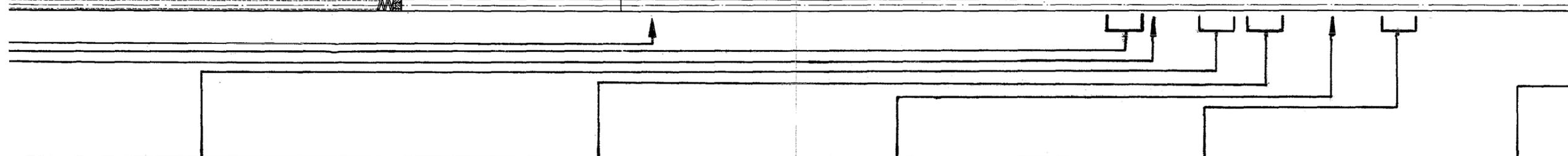
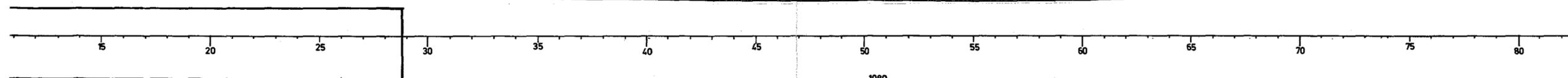
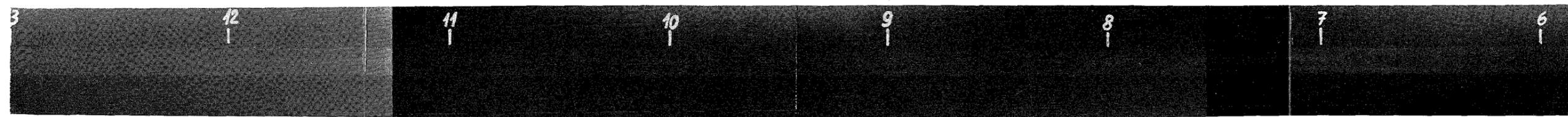


1

2

3

1mm



4

5

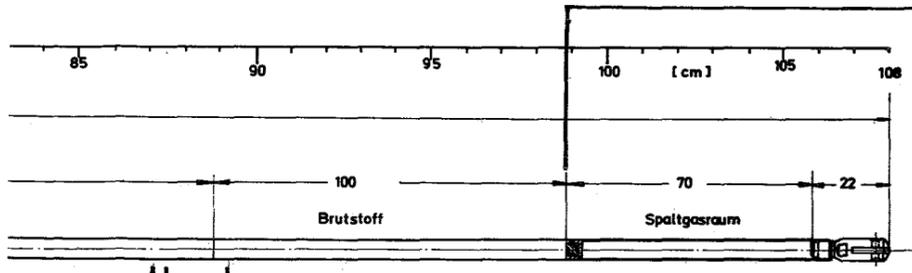
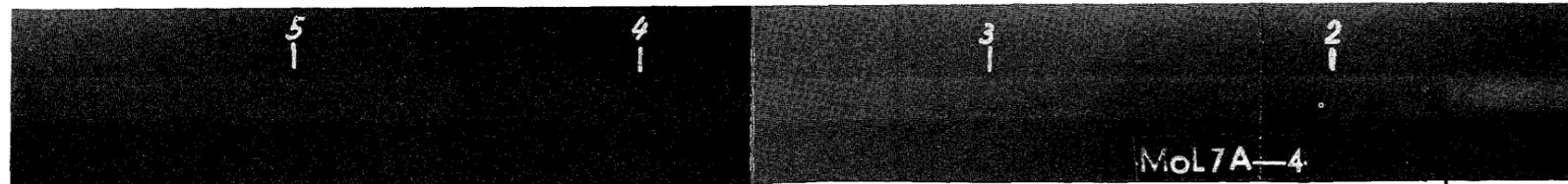
1mm

6

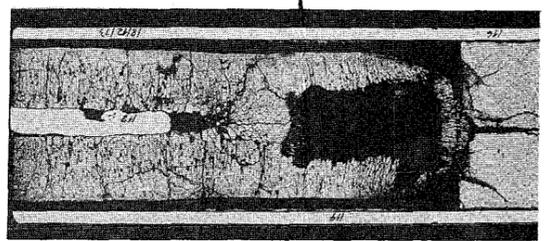
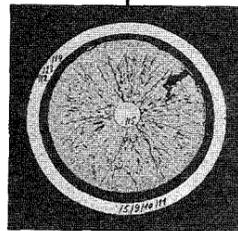
7

8

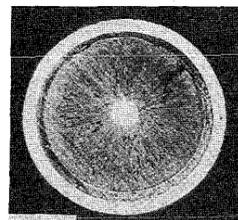
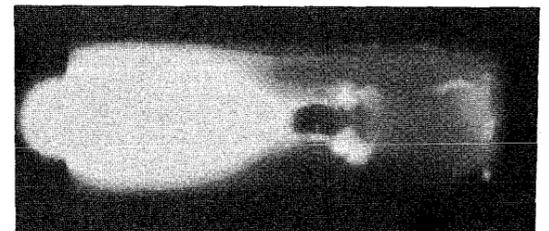
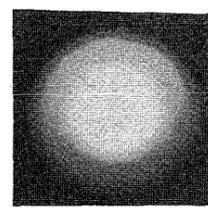
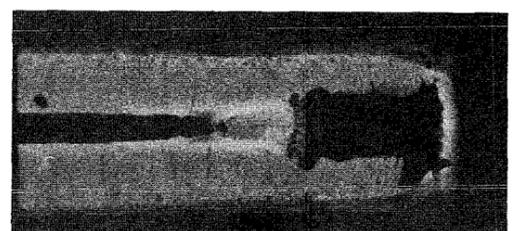
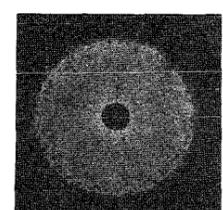
1mm



unten



A



9

10

1mm

Prüfling 7A - 4

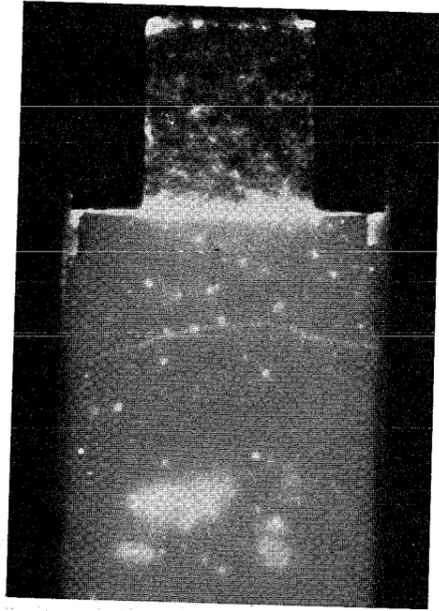
Brennstoff :
 Form : Tabletten
 Zusammensetzung : UO_2-PuO_2
 Tablettendichte : 88,80% th.D.

Hülle :
 Material : 4961
 Aussendurchmesser : 6,0 mm
 Wandstärke : 0,342 mm

Geometrie :
 Länge des Prüflings : 1080 mm
 Länge der Brennstoffsäule : 700 mm
 Radiale Spaltweite : 0,265 mm
 Schmierdichte : 80,07% th.D.

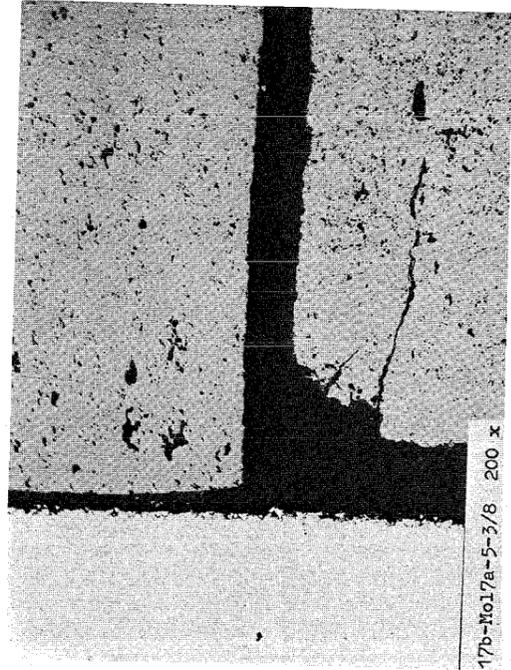
Bestrahlung :
 Einrichtung : BR2 Natrium Loop
 GEX 5475
 Dauer : 139 Vollasttage
 Ende : 11. Sept. 1970
 Rechn. Abbrand mittl. : 35,2 MWd/kg Metall
 Stableistung max./mittl. : 590 / 430 W/cm

A1

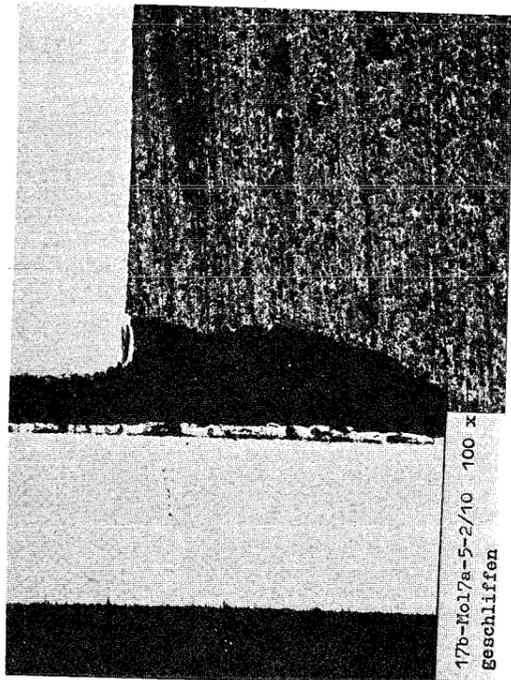


1mm

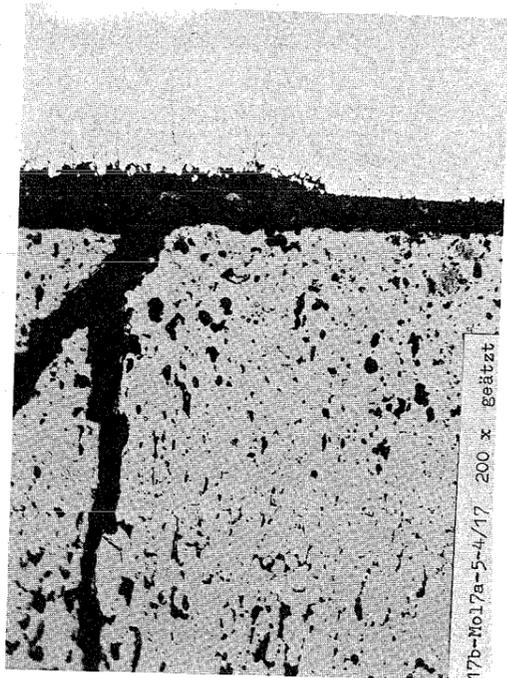
A2



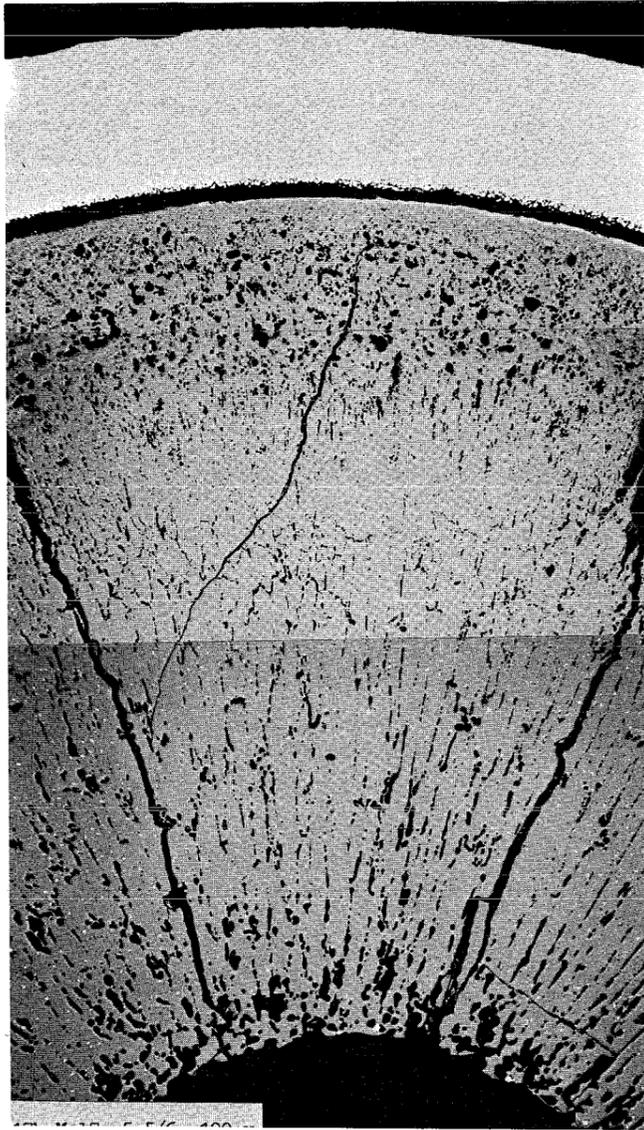
A3



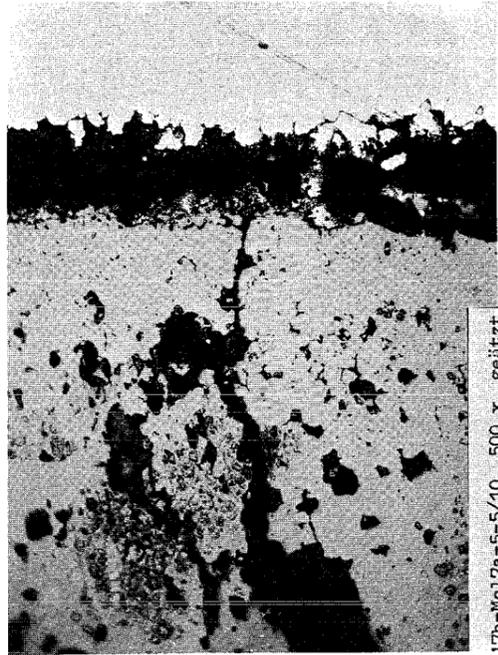
0,1mm



0,1mm



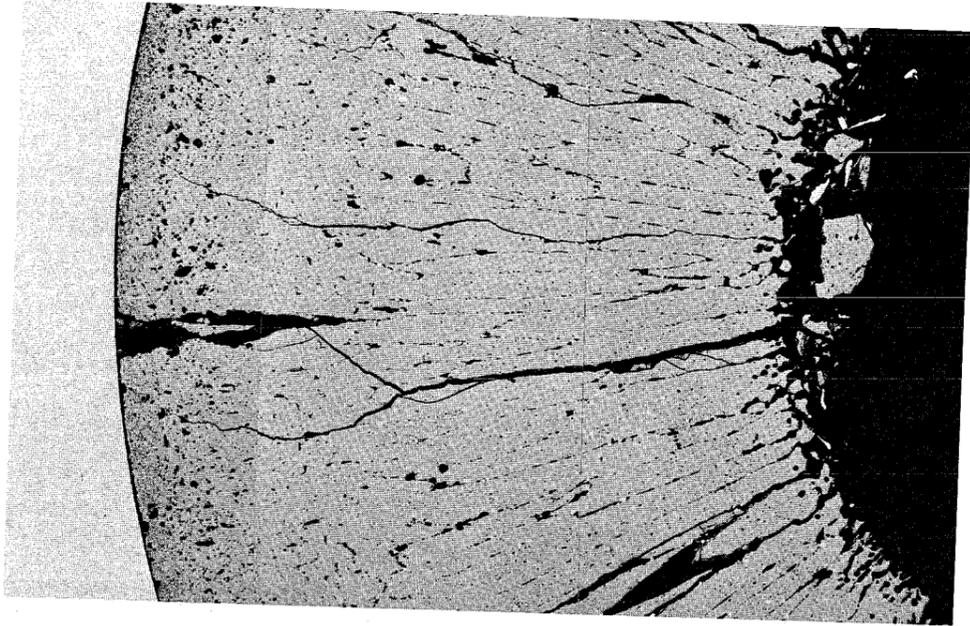
0,1mm



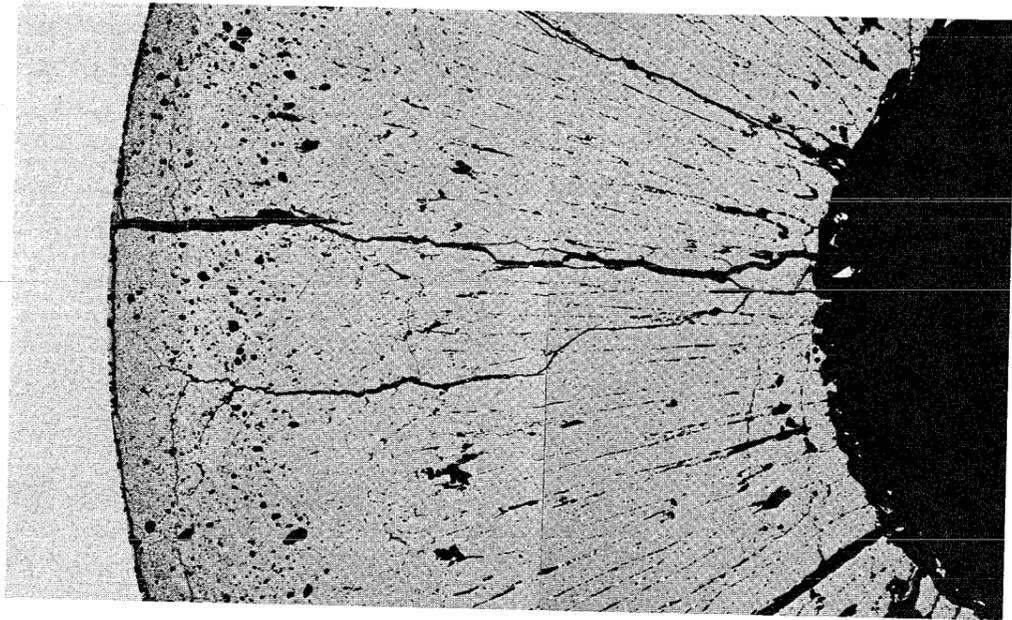
0,1mm

-149-
zu Prüfling 7A-5

A5



A6

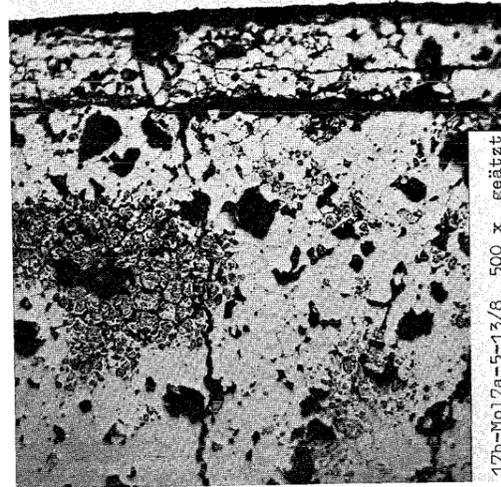


I
0,1mm

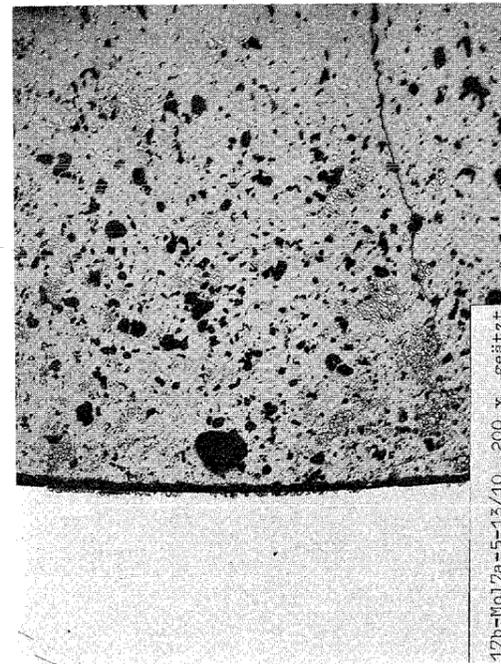
zu Prüfling 7A-5
A7



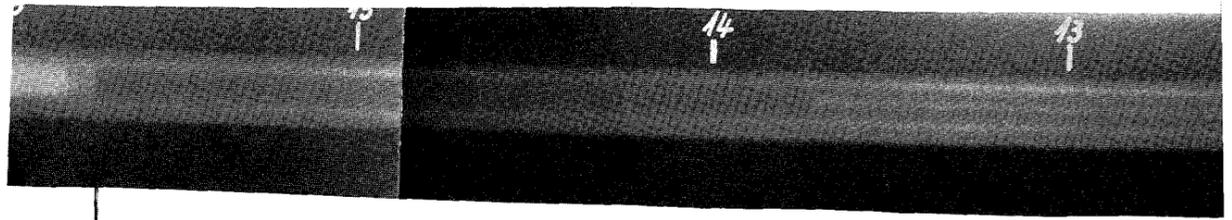
0,1mm



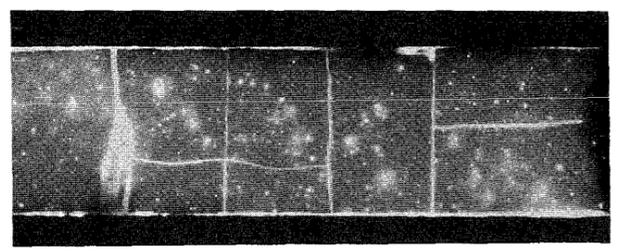
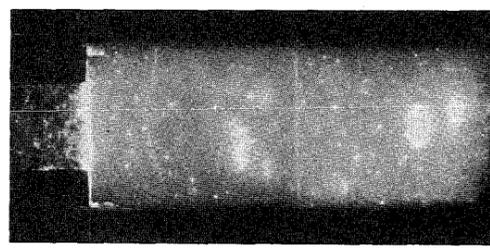
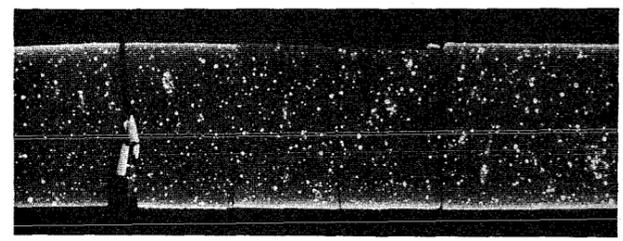
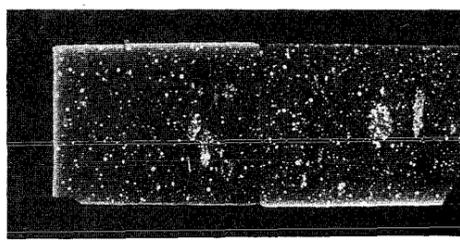
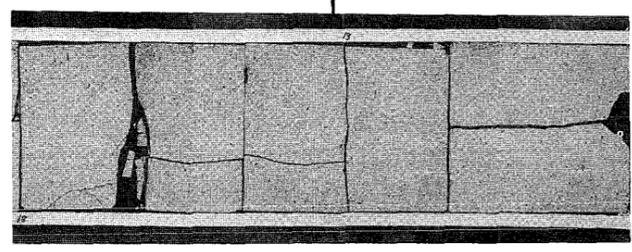
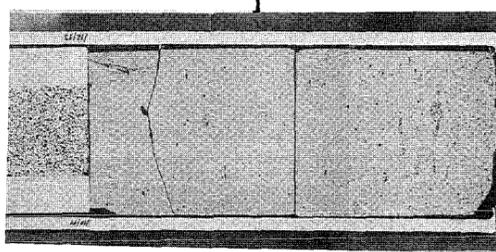
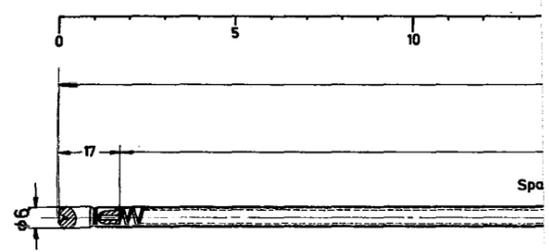
0,1mm



0,1mm



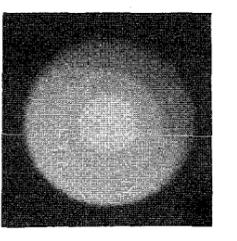
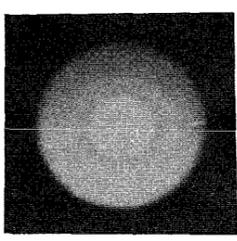
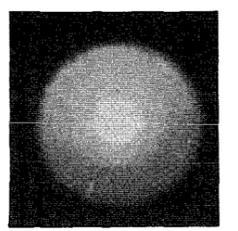
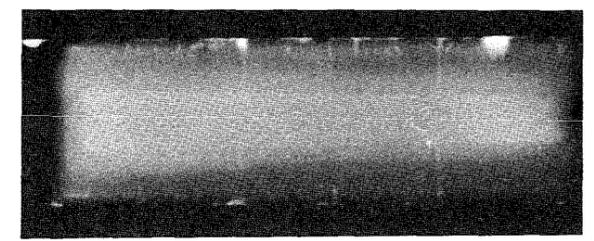
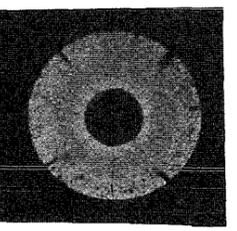
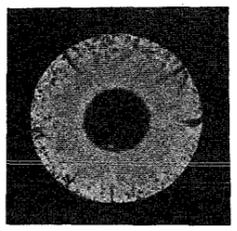
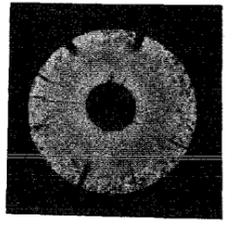
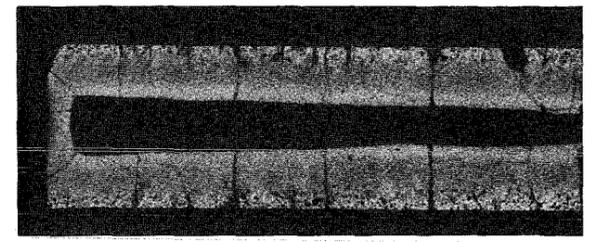
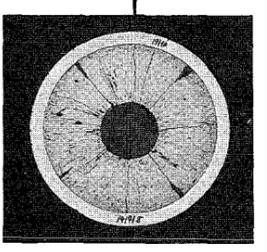
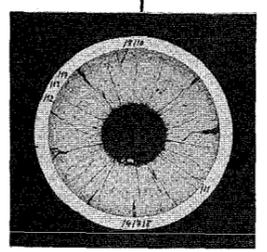
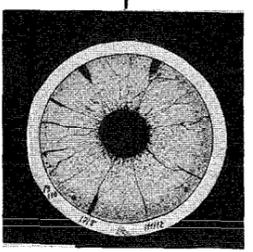
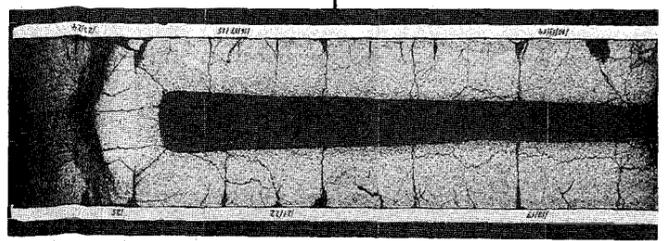
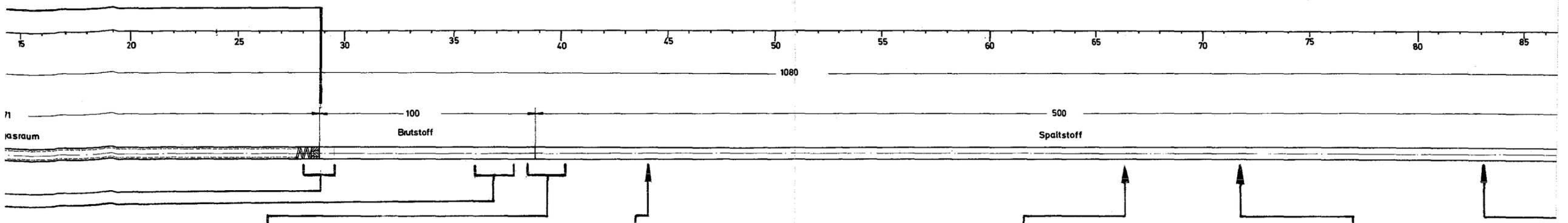
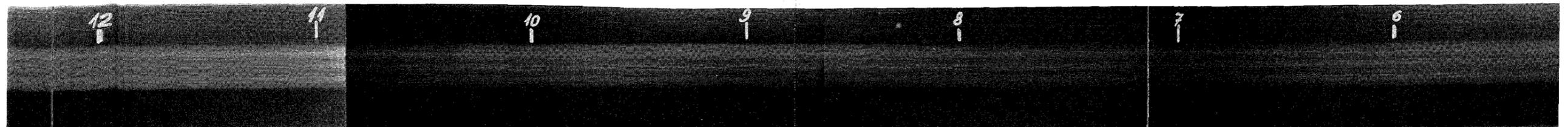
oben



1

2

1mm

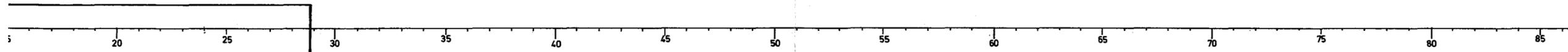
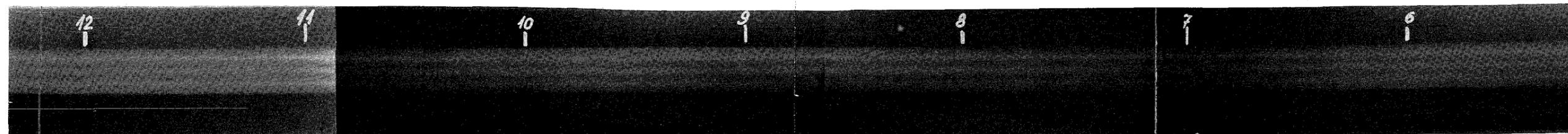


3

4 1mm

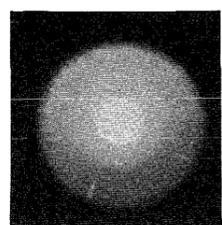
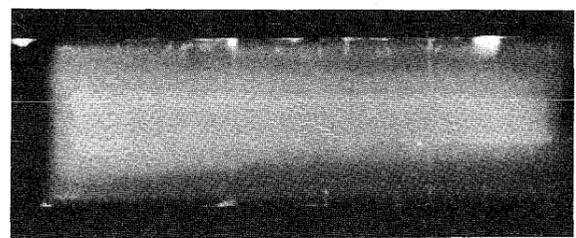
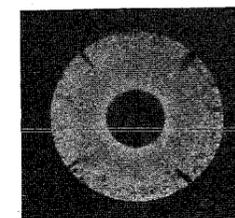
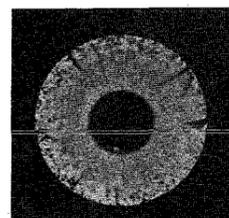
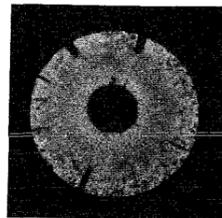
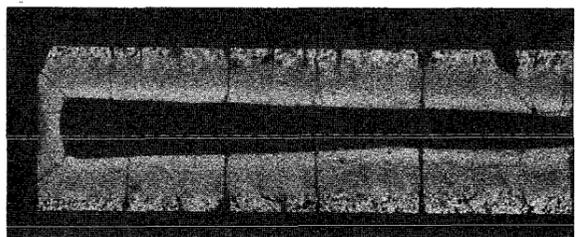
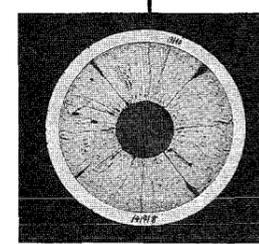
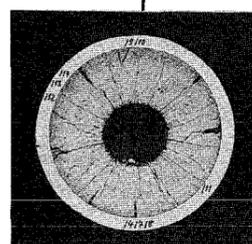
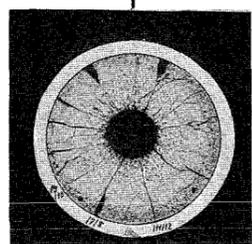
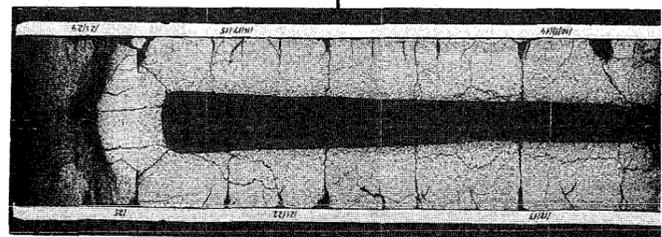
5

6 1mm



1000

100 Butstoff 500 Spaltstoff



3

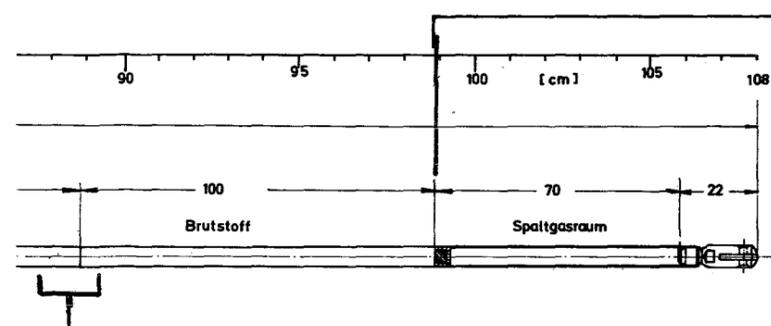
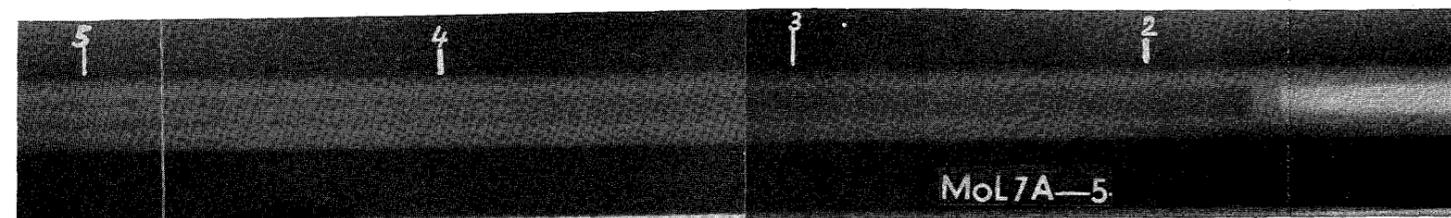
4

1mm

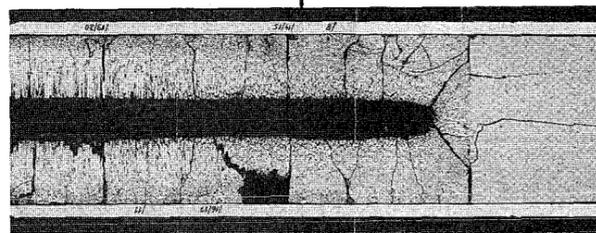
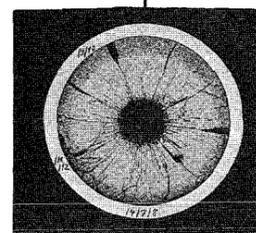
5

6

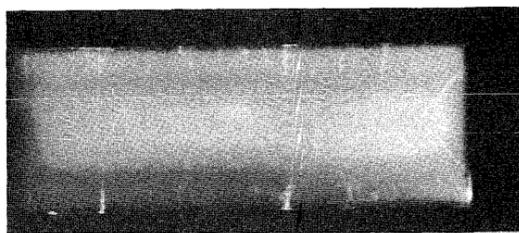
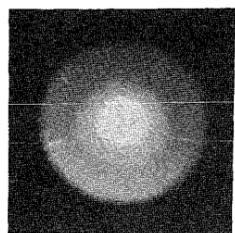
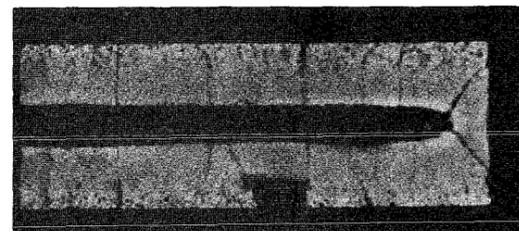
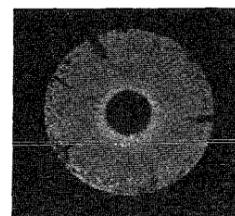
1mm



unten



A



7

8

1mm

Prüfling 7A - 5

Brennstoff :

Form : Tabletten

Zusammensetzung : UO_2 - PuO_2

Tablettendichte : 88,36% th.D.

Hülle :

Material : 4961

Aussendurchmesser : 6,0 mm

Wandstärke : 0,364 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 1080 mm

Länge der Brennstoffsäule : 700 mm

Radiale Spaltweite : 0,223 mm

Schmierdichte : 80,99% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : BR2 Natrium Loop
GEX 5475

Dauer : 139 Vollasttage

Ende : 11. Sept. 1970

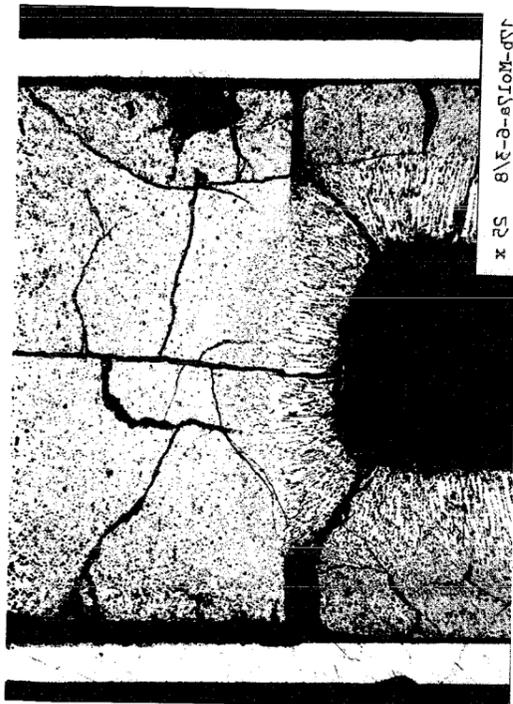
Rechn. Abbrand mittl: : 35,2 MWd/kg Metall

Stableistung max./mittl. : 590 / 430 W/cm

A1

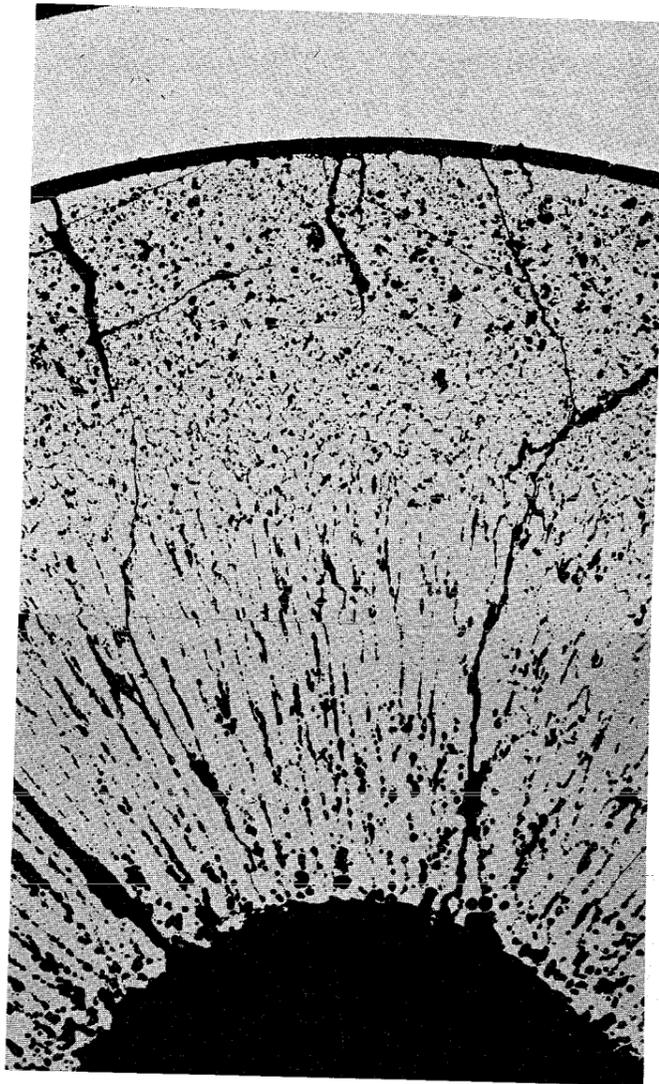


I
0,1mm

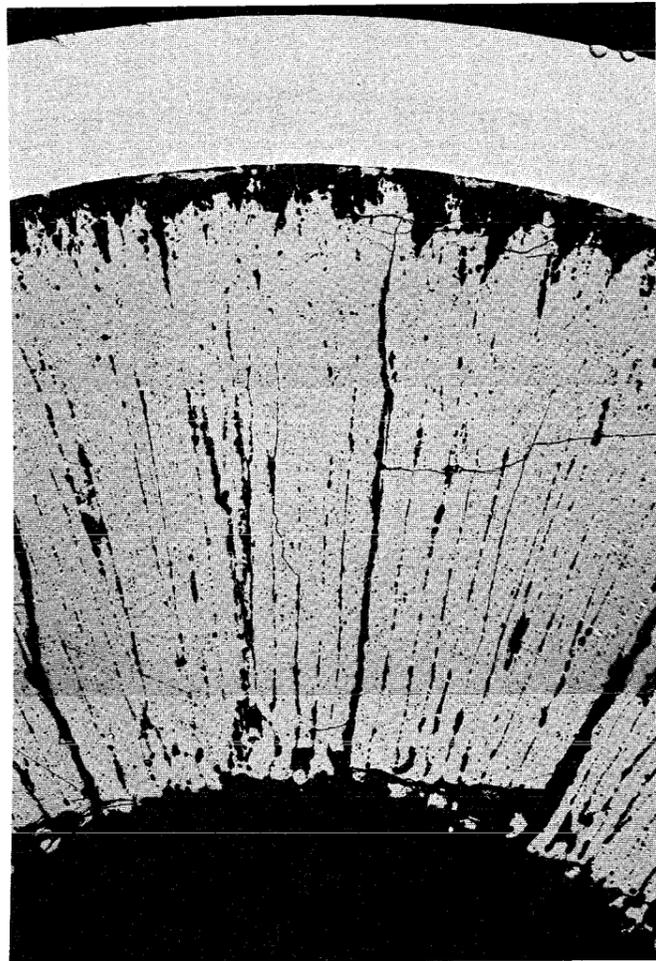


I
1mm

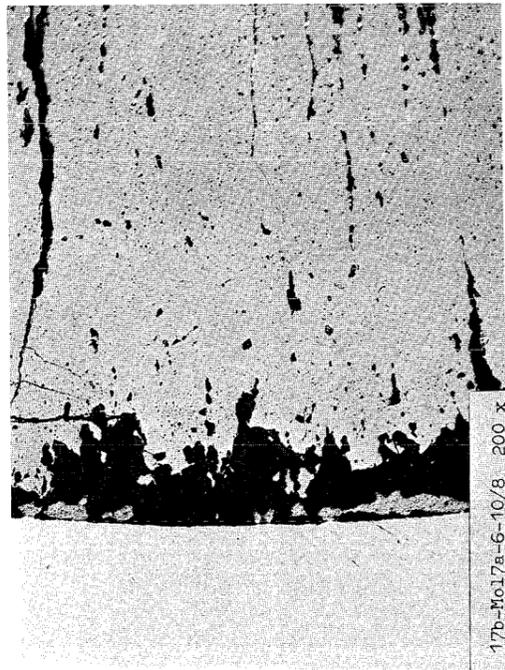
A2



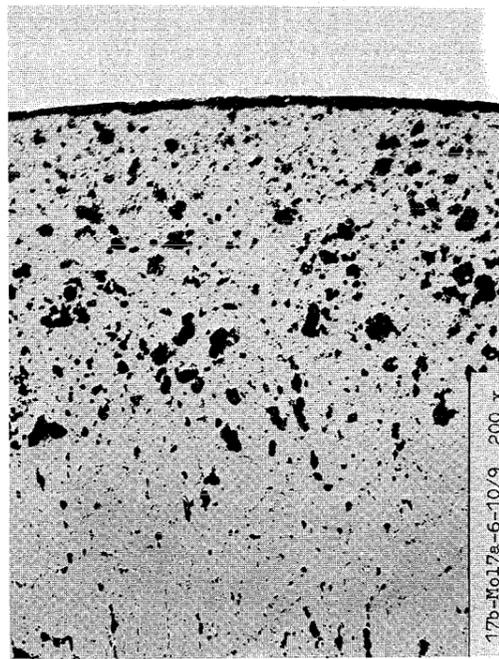
I
0,1mm



0,1mm



17b-Ko17a-6-10/8 200 x

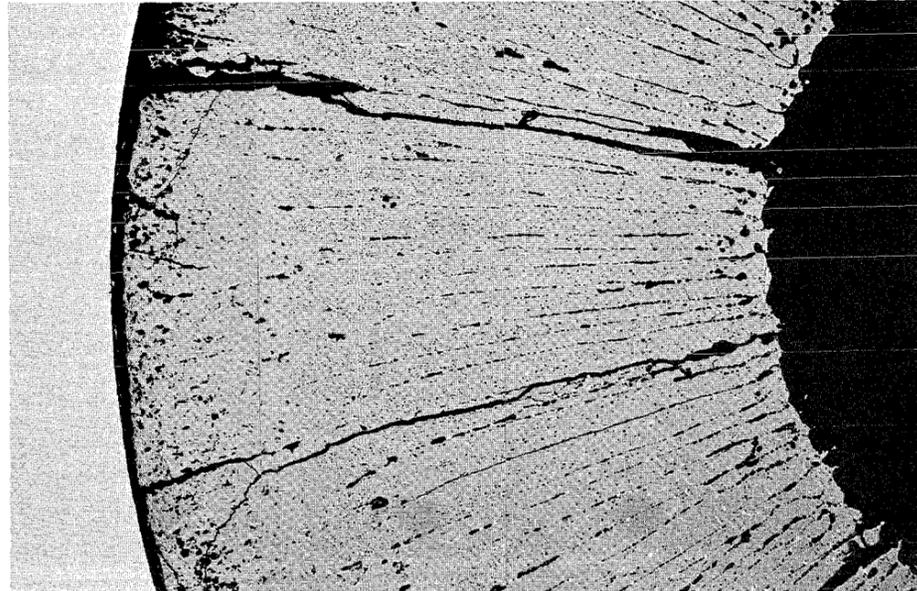


17b-Ko17a-6-10/9 200 x

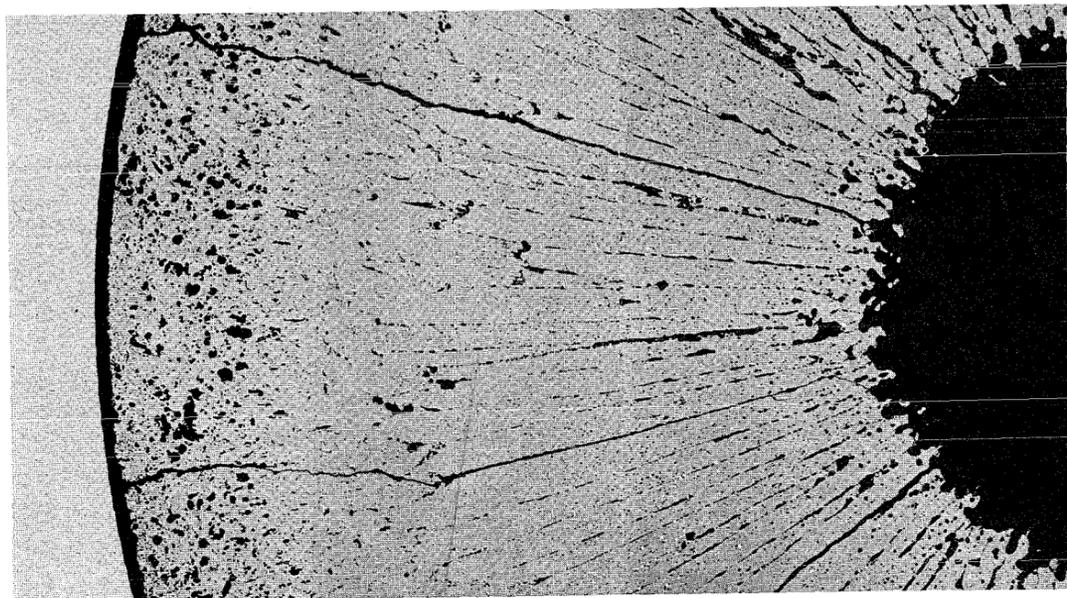
0,1mm

-155-
zu Prüfling 7A-6

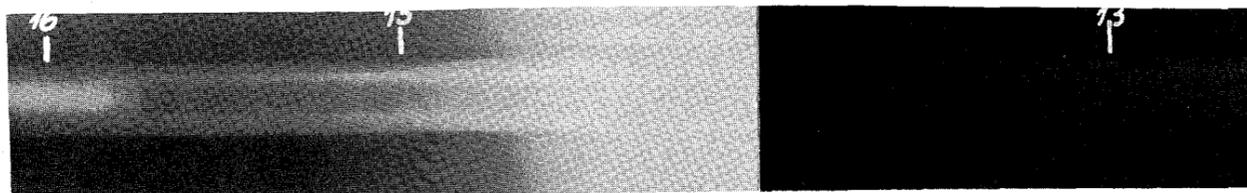
A4



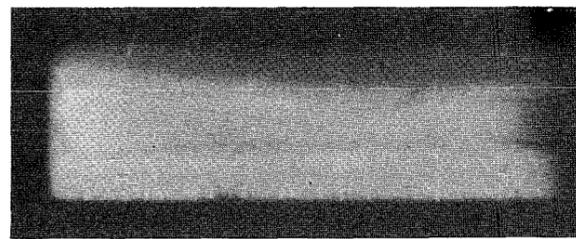
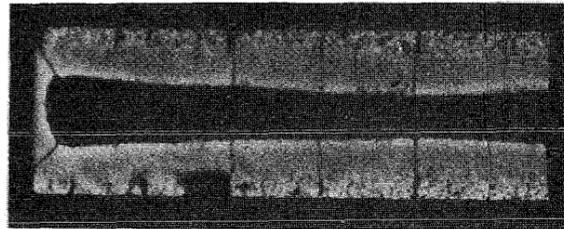
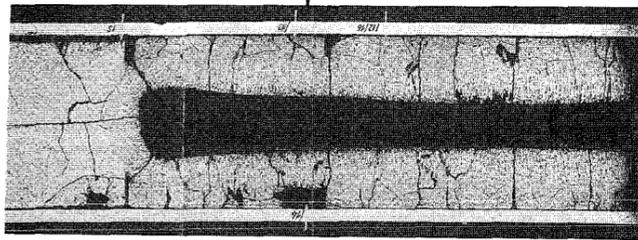
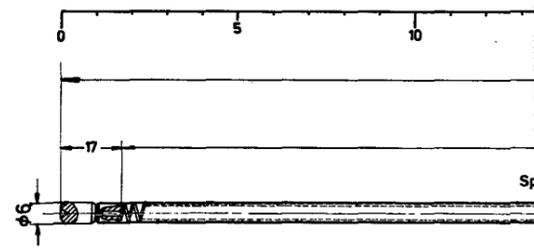
A5



I
0,1mm

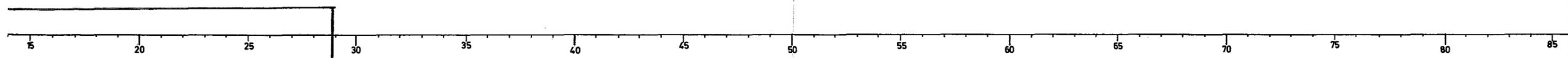
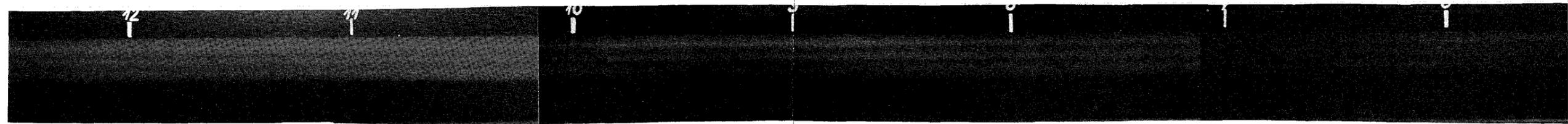


oben



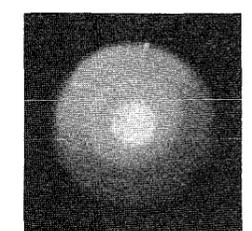
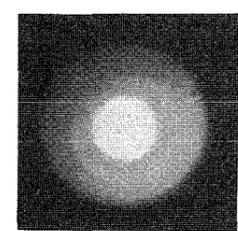
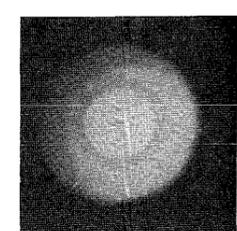
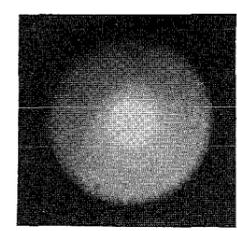
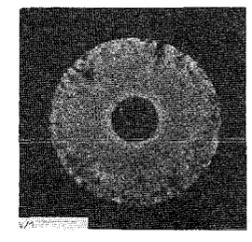
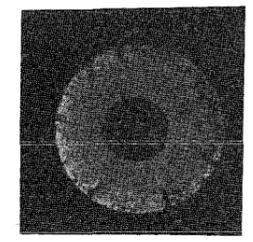
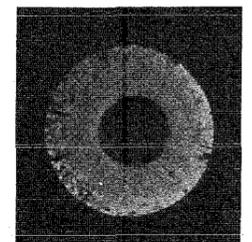
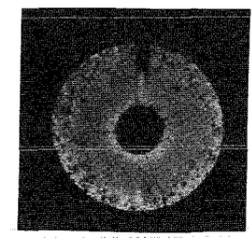
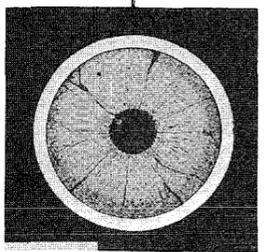
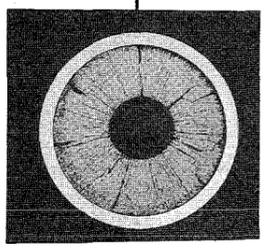
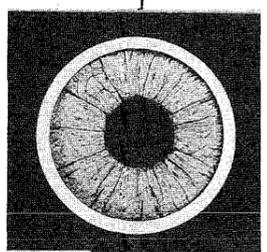
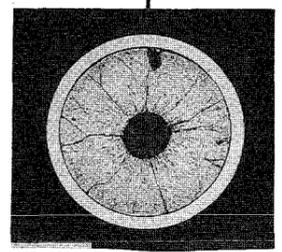
1

I
1mm



1080

271 gasraum 100 Butstoff 500 Spaltstoff



2

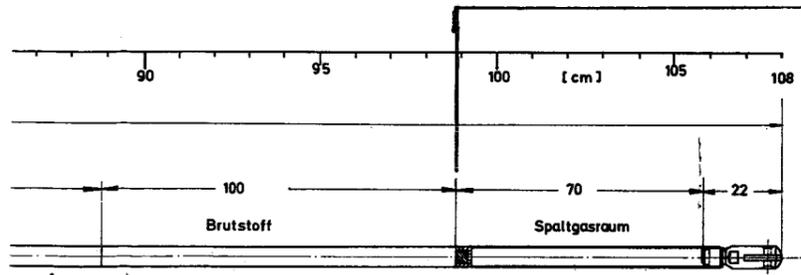
3

1mm

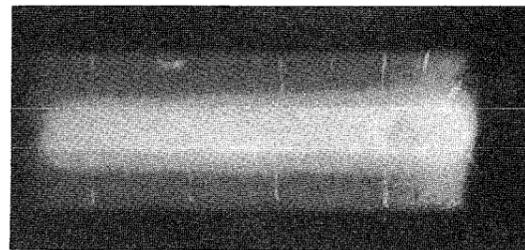
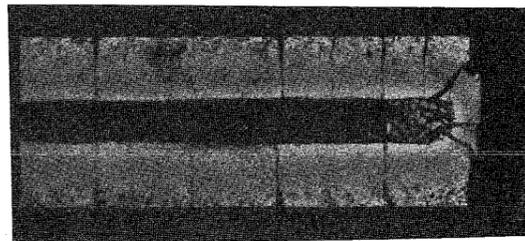
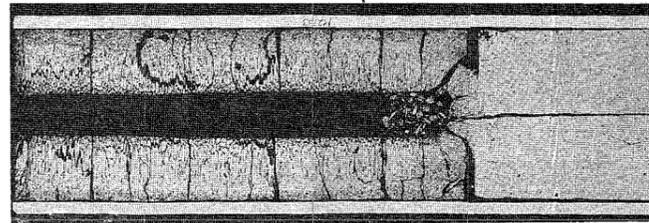
5

1mm

Mol.7A-6



unten



6

1mm

Prüfling 7A - 6

Brennstoff :

Form : Tabletten

Zusammensetzung : UO_2 - PuO_2

Tablettendichte : 88,08% th.D.

Hülle :

Material : AISI 316

Aussendurchmesser : 6,0 mm

Wandstärke : 0,390 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 1080 mm

Länge der Brennstoffsäule : 700 mm

Radiale Spaltweite : 0,244 mm

Schmierdichte : 80,07% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : BR2 Natrium Loop
GEX 5475

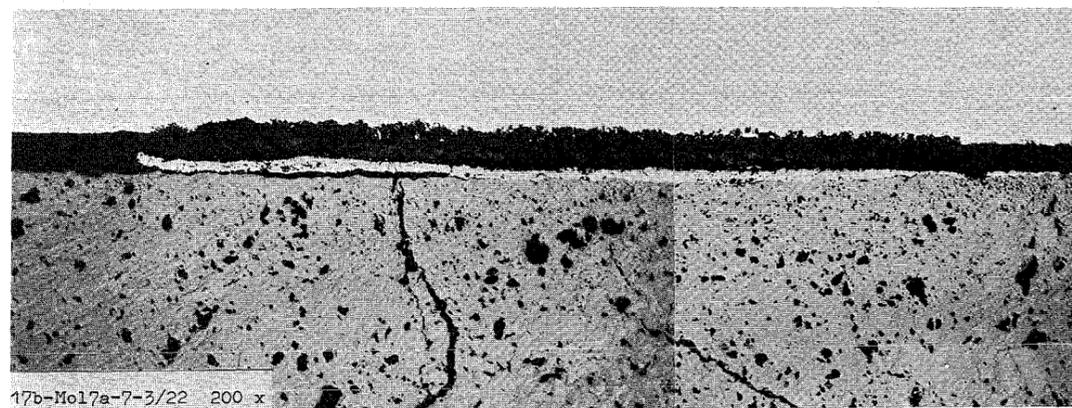
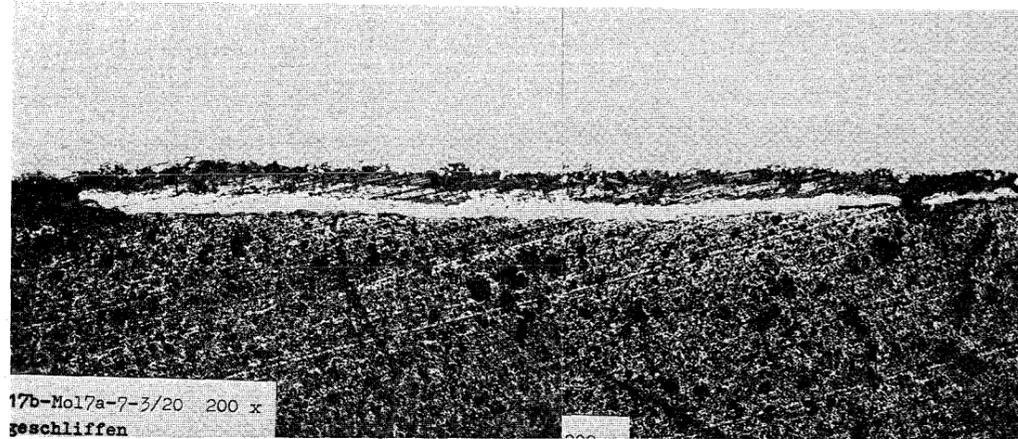
Dauer : 139 Vollasttage

Ende : 11. Sept. 1970

Rechn. Abbrand mittl: : 35,2 MWd/kg Metall

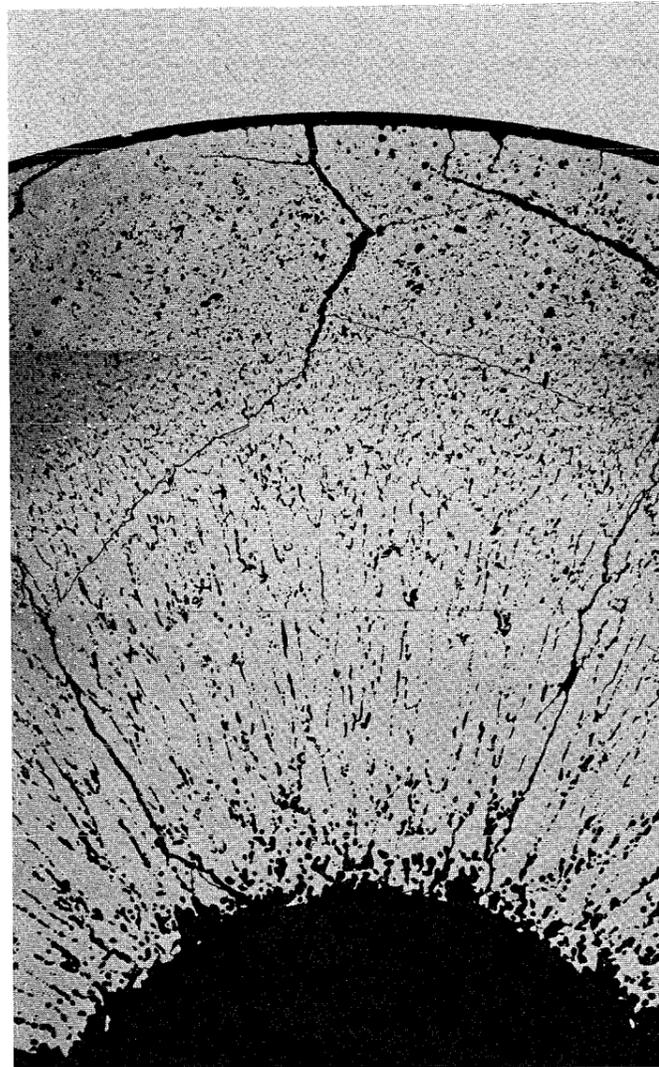
Stableistung max./mittl.: 590 / 430 W/cm

- 159 -
zu Prüfling 7A-7
A1

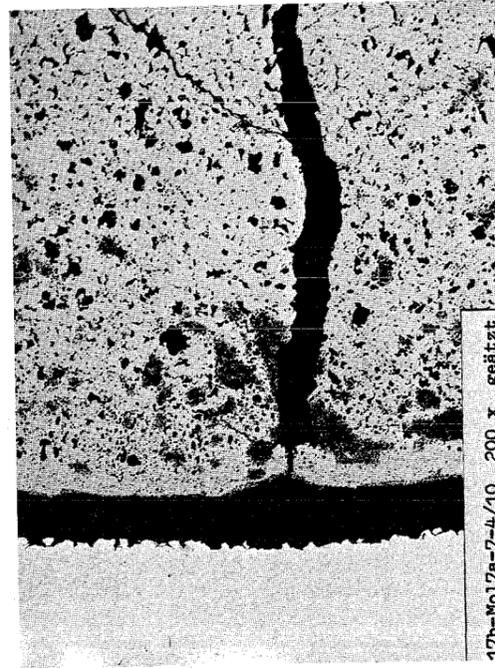


0,1mm

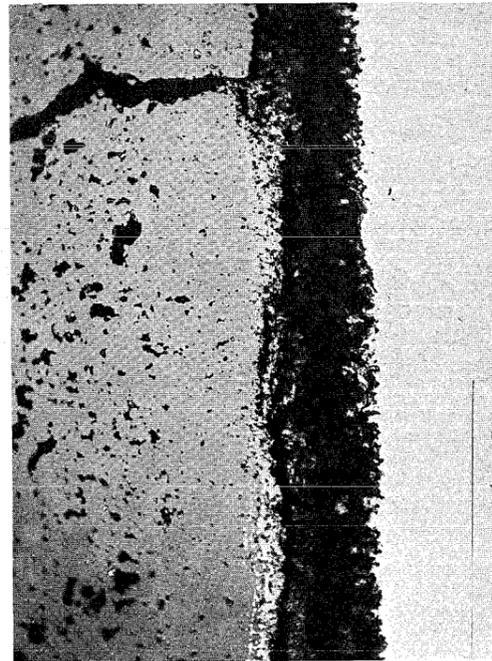
-160-
zu Prüfling 7A-7
A 2



0,1mm

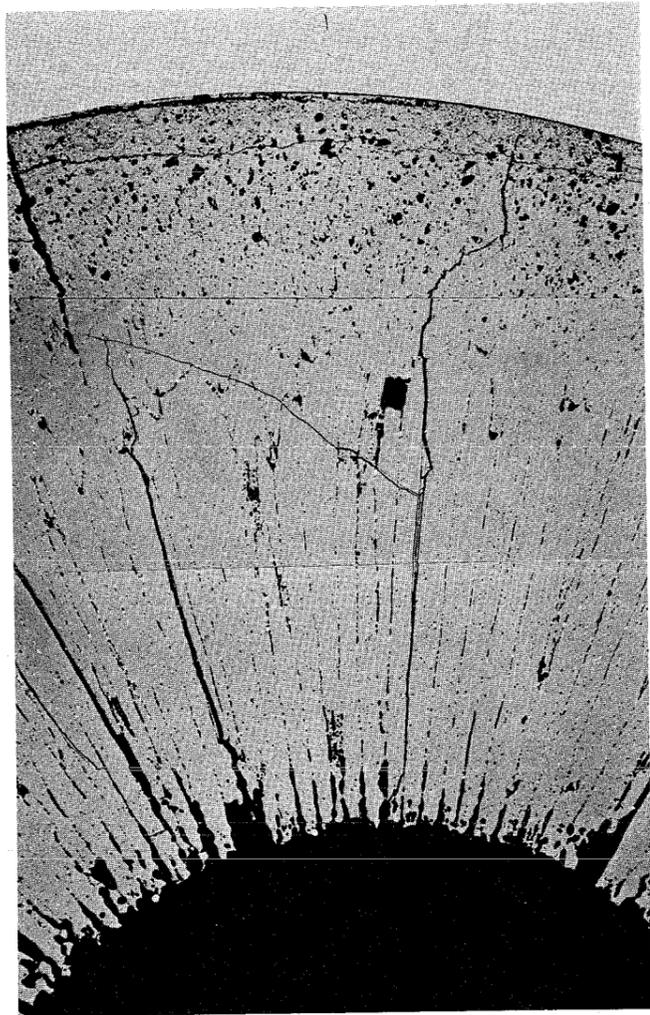


0,1mm

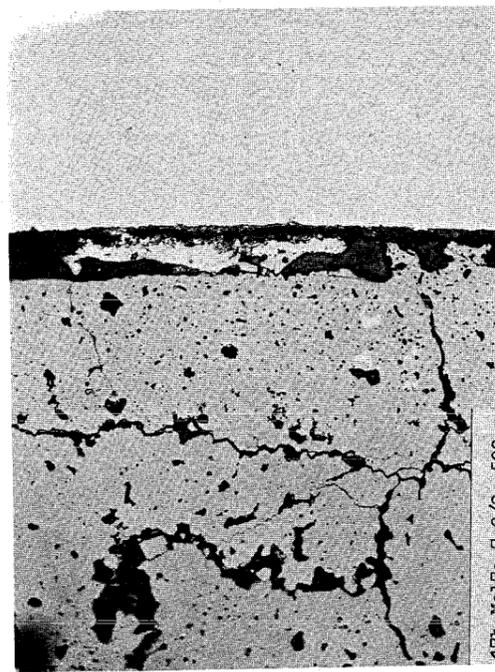


0,1mm

-161-
zu Prüfling 7A-7
A3

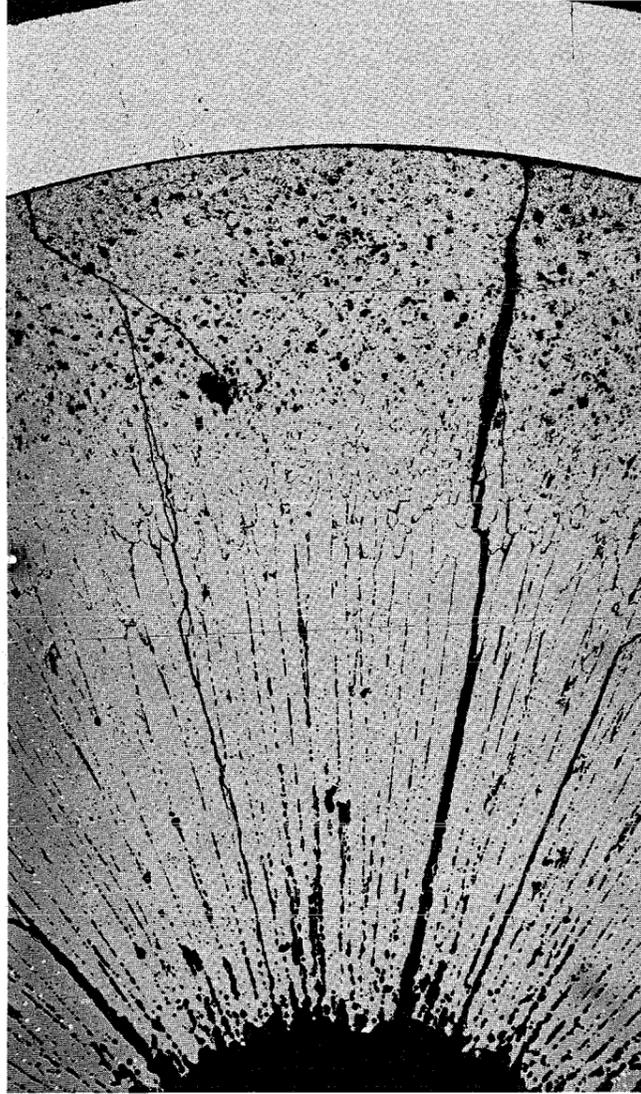


0,1mm

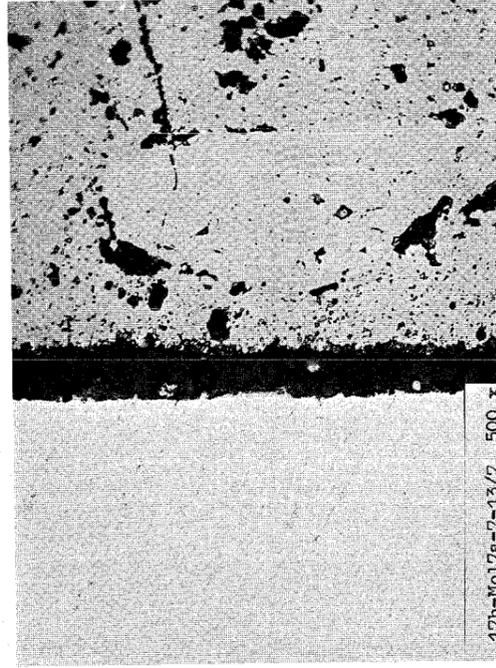


0,1mm

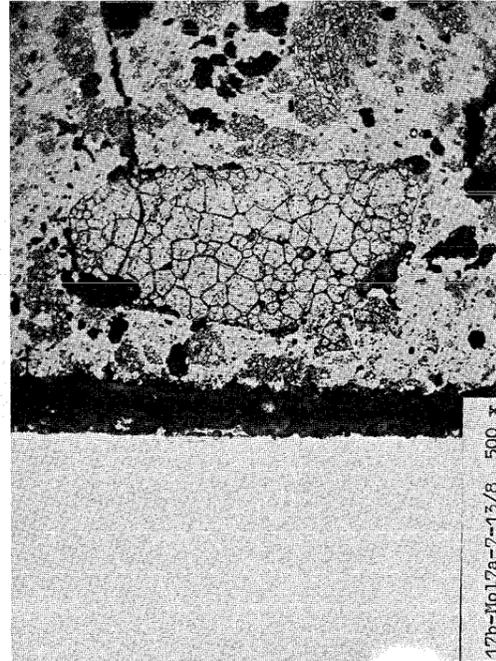
-162-
zu Prüfling 7A-7
A 5



0,1mm

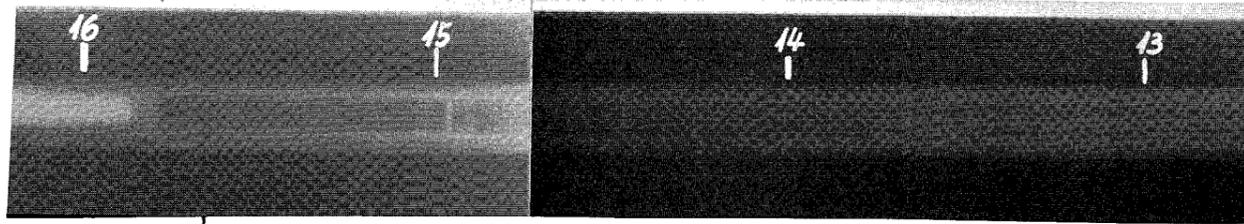


17b-Mo17a-7-13/7 500 x

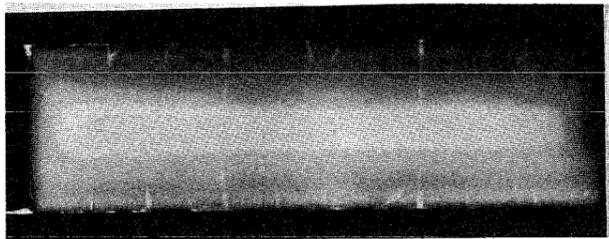
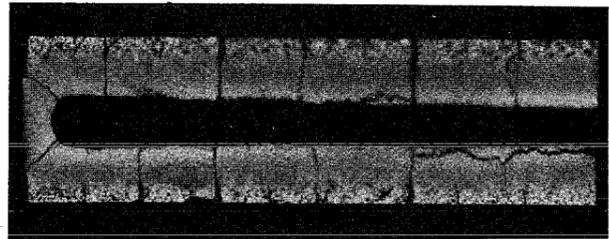
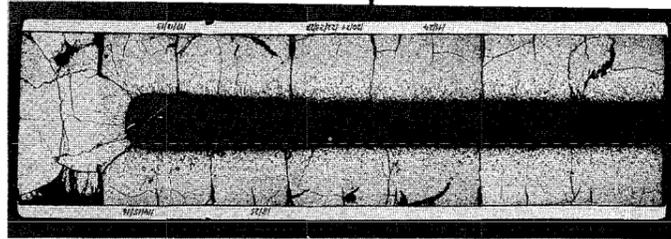
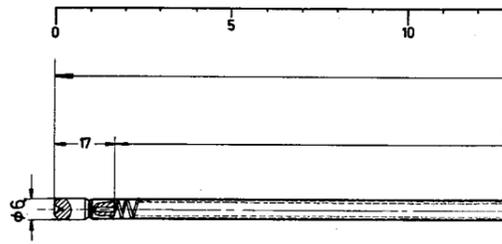


17b-Mo17a-7-13/8 500 x

0,1mm

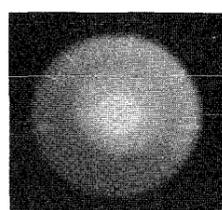
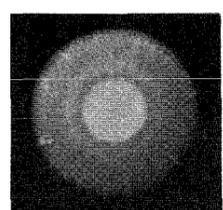
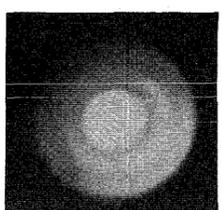
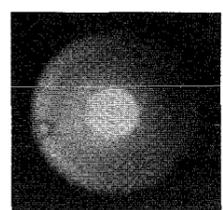
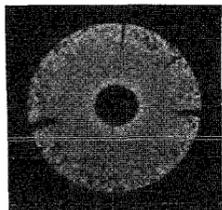
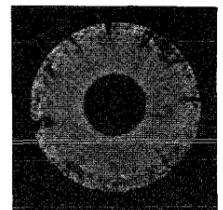
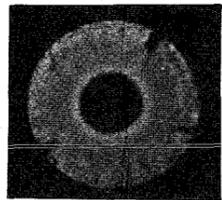
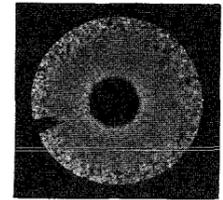
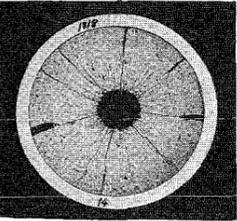
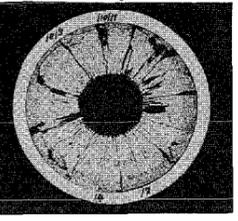
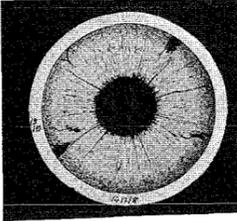
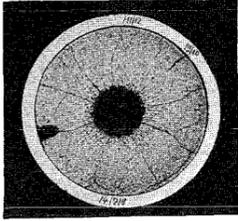
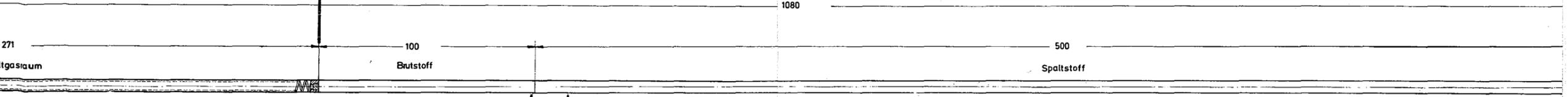
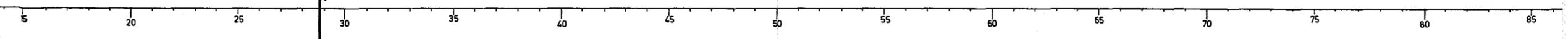
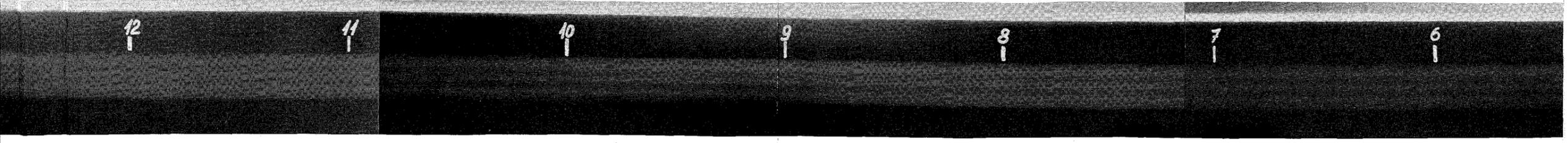


oben



1

1mm



2

3

1mm

4

5

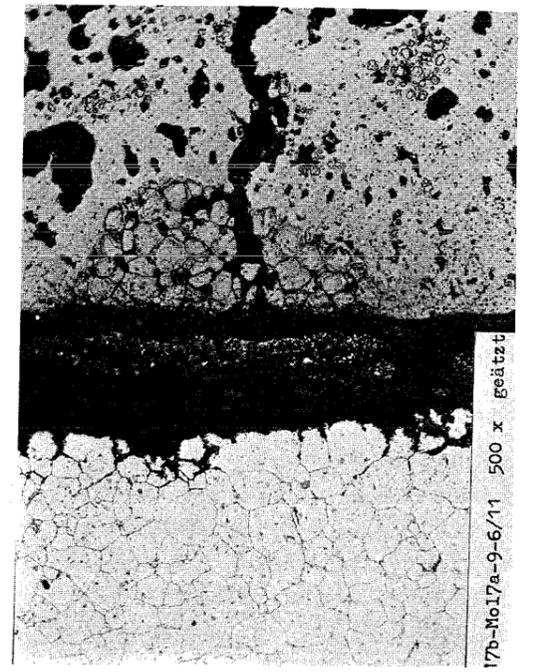
1mm



0,1mm

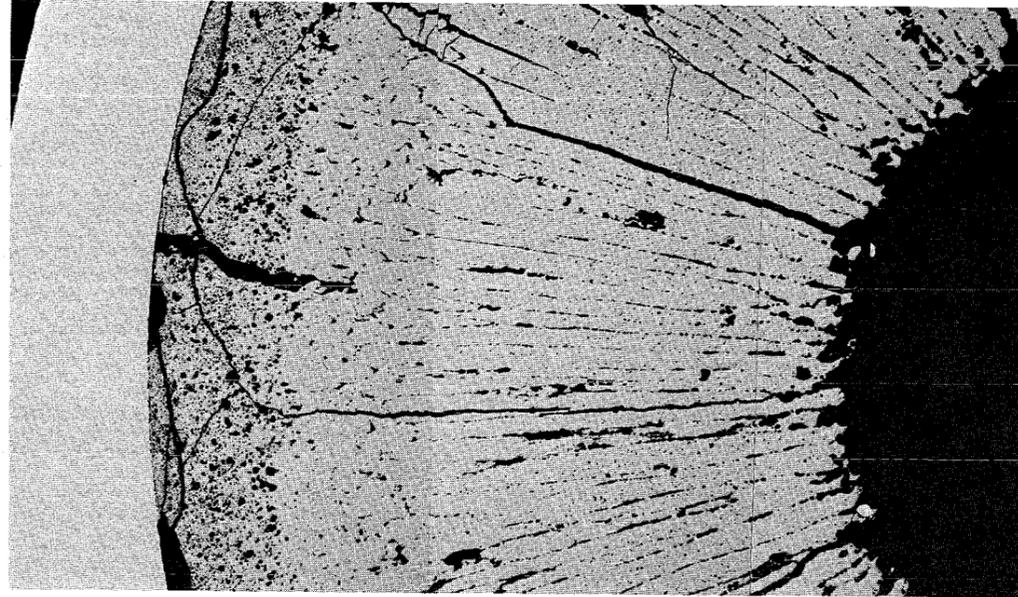


0,1mm

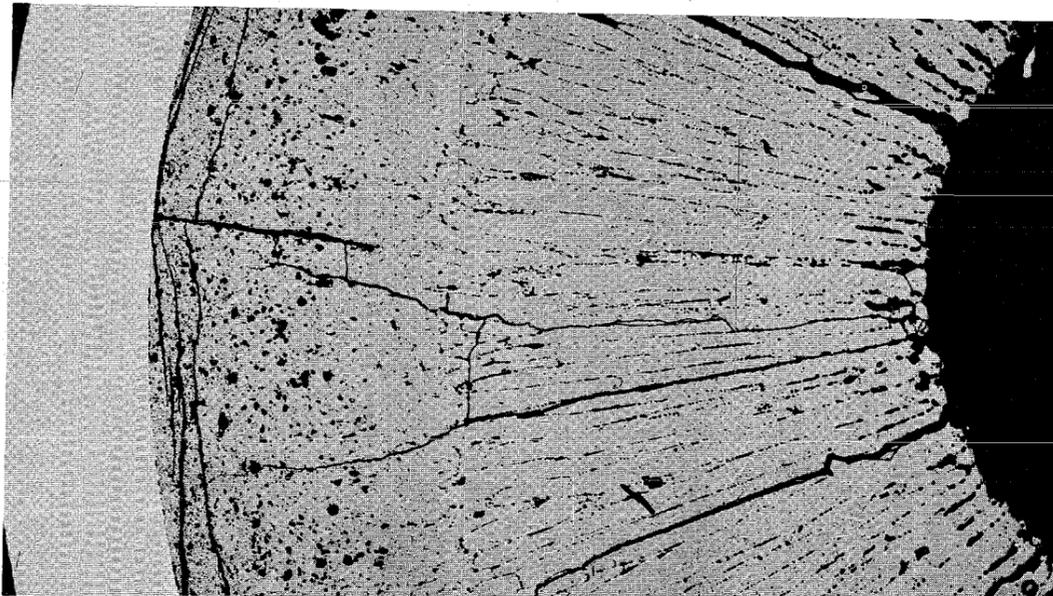


0,1mm

A4

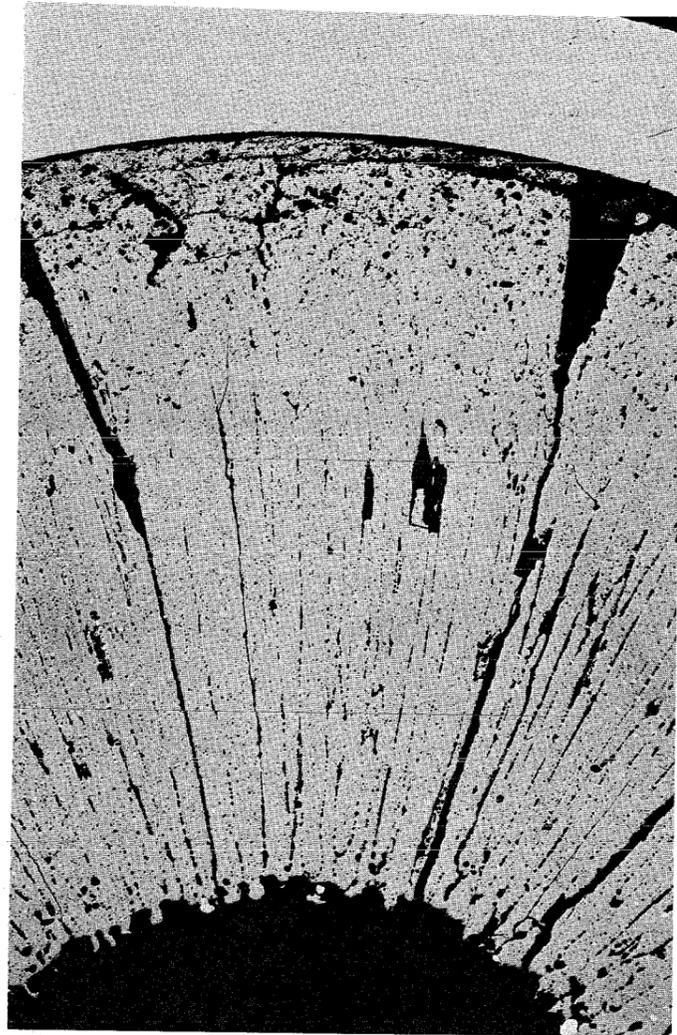


A5

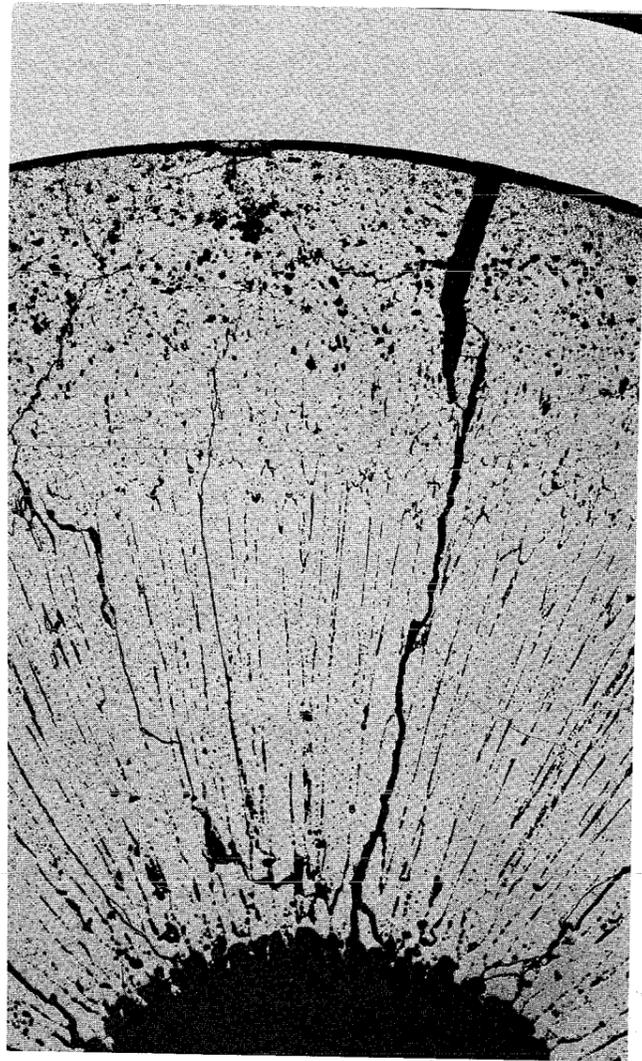


0,1mm

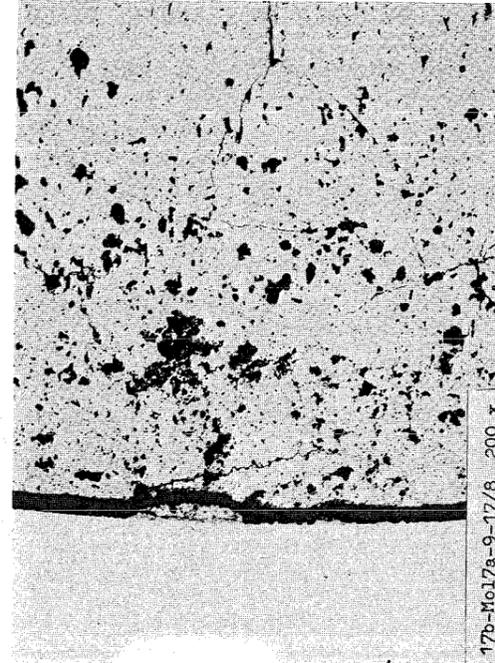
-167-
zu Prüfling 7A-9
A6



┌
0,1mm

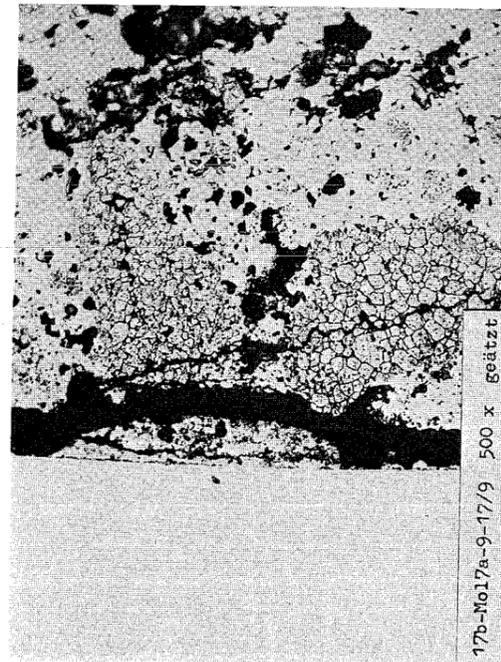


0,1mm



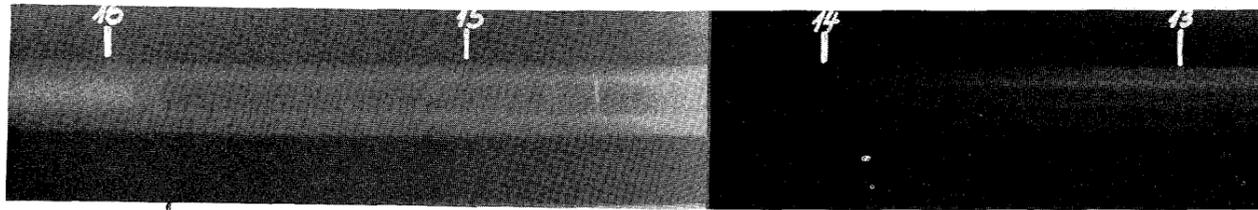
17b-Mol7a-9-17/8 200 x

0,1mm

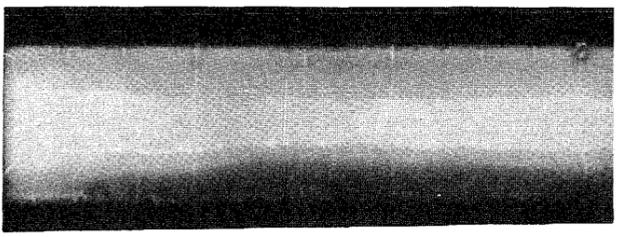
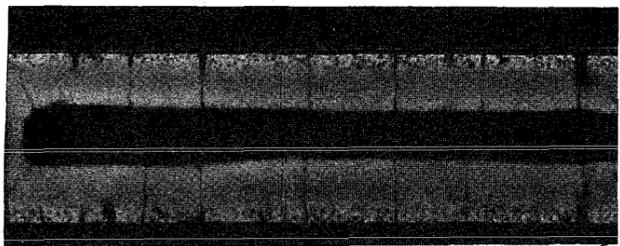
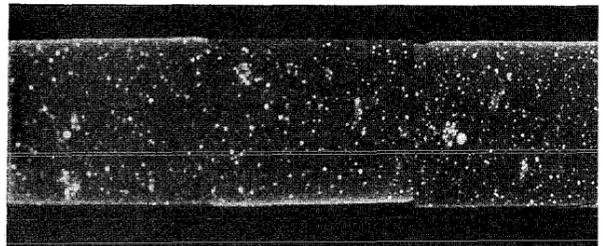
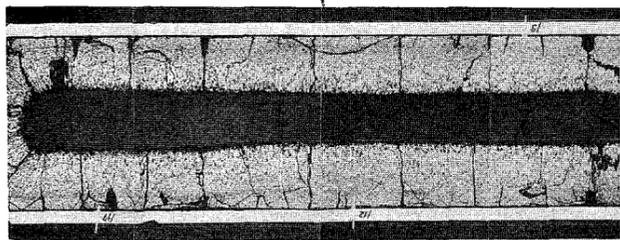
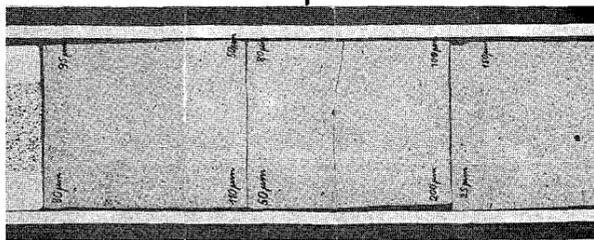
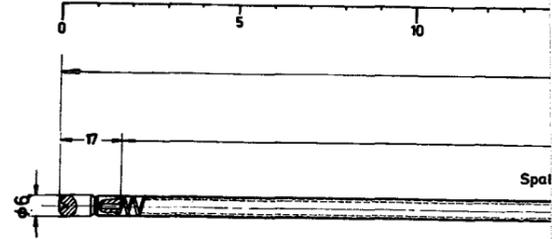


17b-Mol7a-9-17/9 500 x geätzt

0,1mm



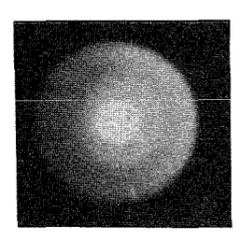
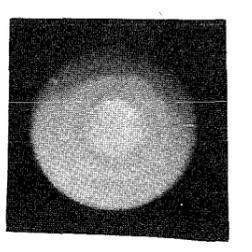
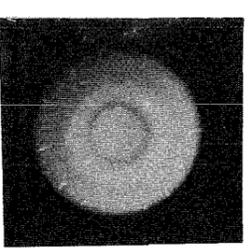
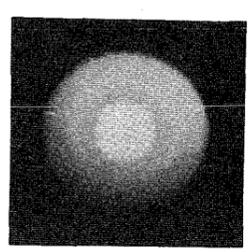
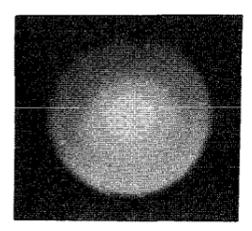
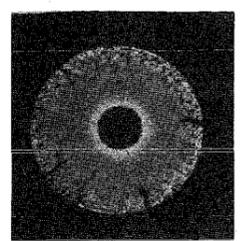
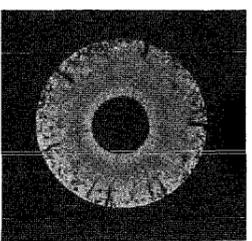
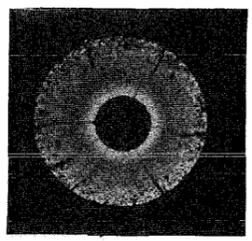
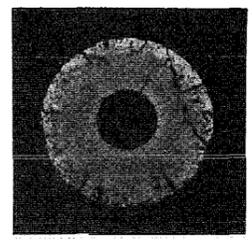
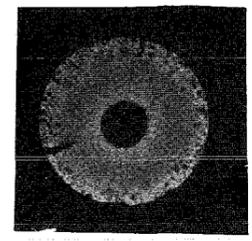
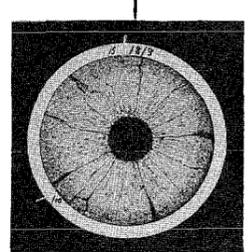
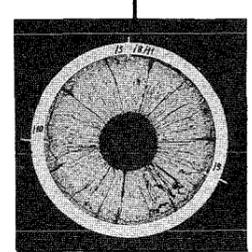
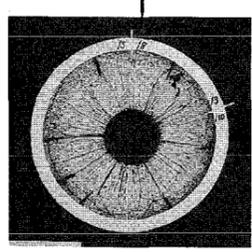
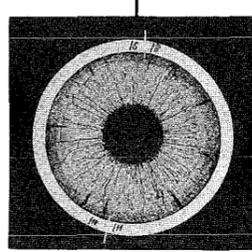
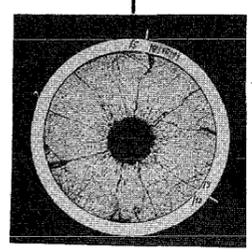
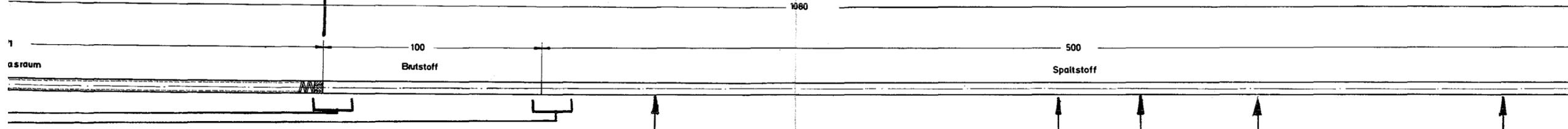
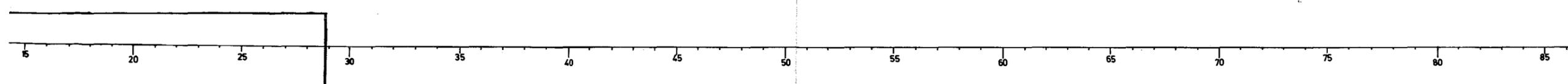
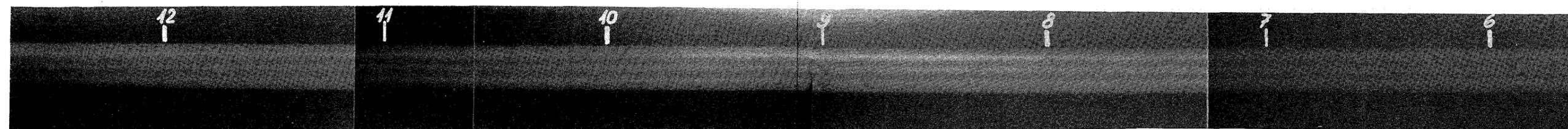
oben



1

2

1mm



3

4

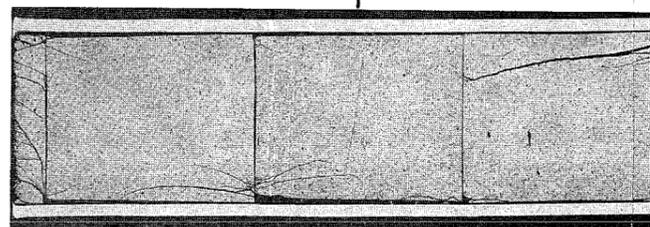
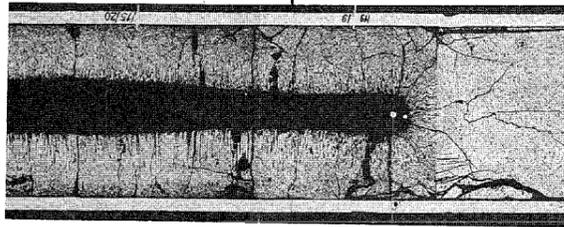
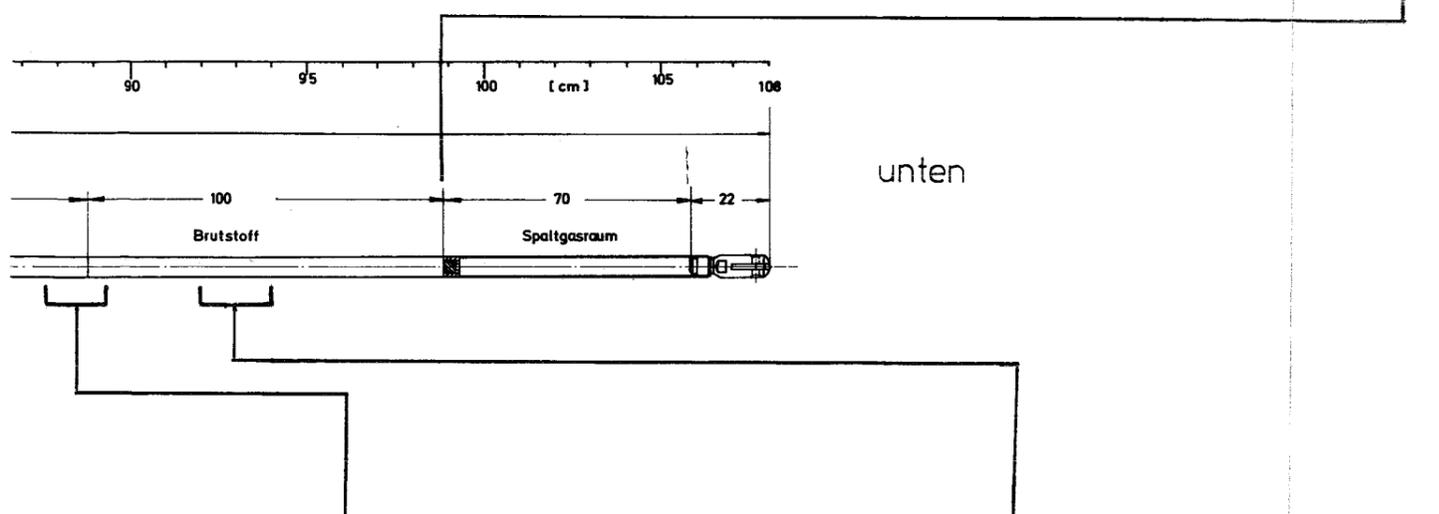
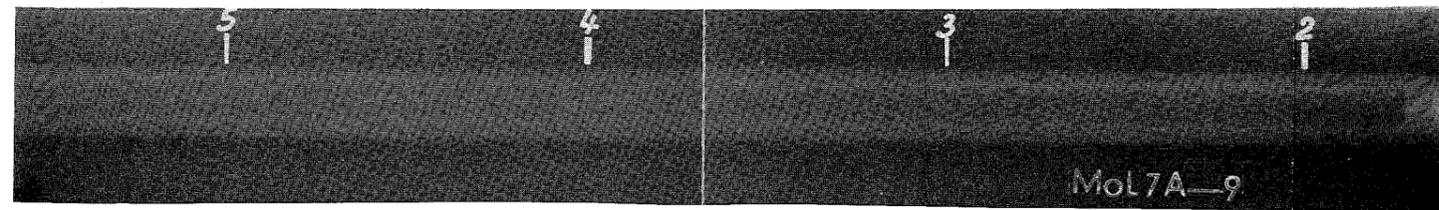
5

I
1mm

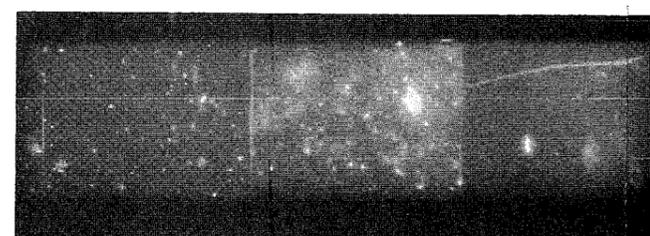
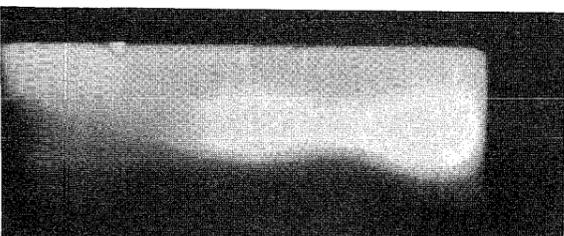
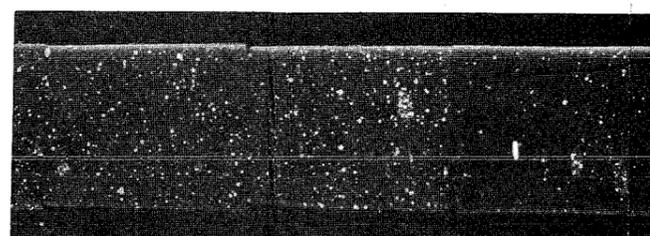
6

7

I
1mm



A



8

9

1mm

Prüfling 7A - 9

Brennstoff :

Form : Tabletten

Zusammensetzung : UO_2 - PuO_2

Tablettendichte : 88,71% th.D.

Hülle :

Material : 4988

Aussendurchmesser : 6,0 mm

Wandstärke : 0,378 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 1080 mm

Länge der Brennstoffsäule : 700 mm

Radiale Spaltweite : 0,227 mm

Schmierdichte : 81,17% th.D.

Bestrahlung :

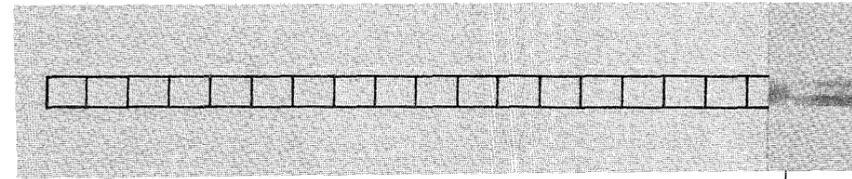
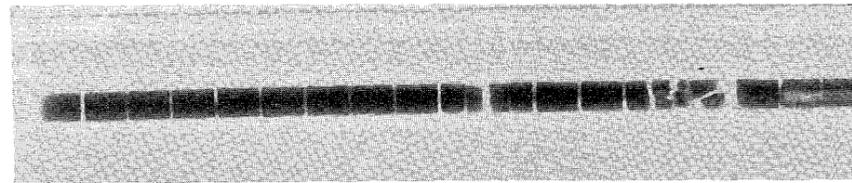
Einrichtung : BR2 Natrium Loop
GEX 5475

Dauer : 139 Volllasttage

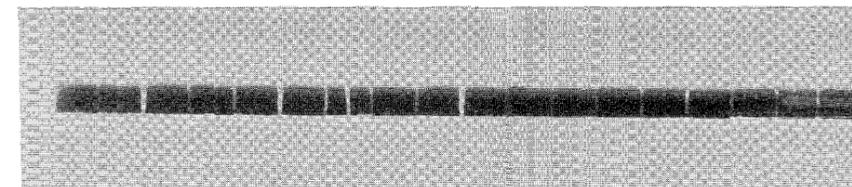
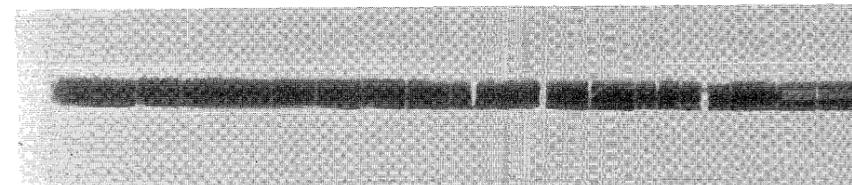
Ende : 11. Sept. 1970

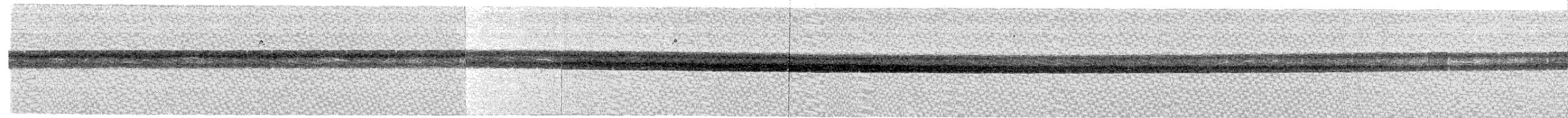
Rechn. Abbrand mittl. : 35,2 MWd/kg Metall

Stableistung max./mittl. : 590 / 430 W/cm

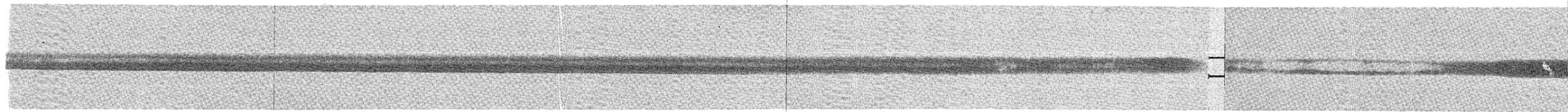


oben

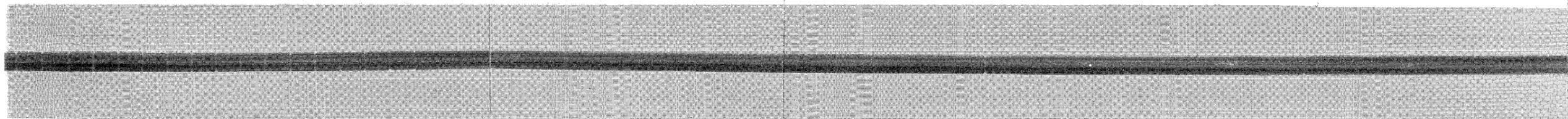




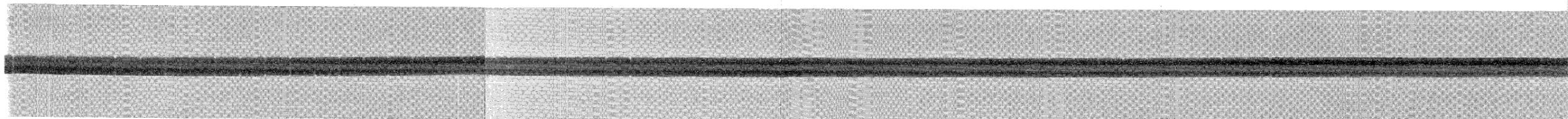
Spaltstoff



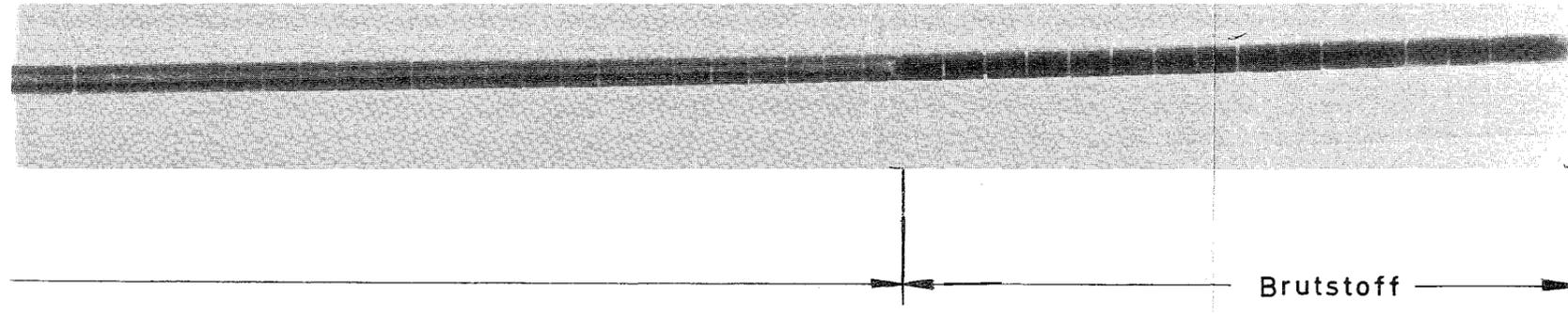
Spaltstoff



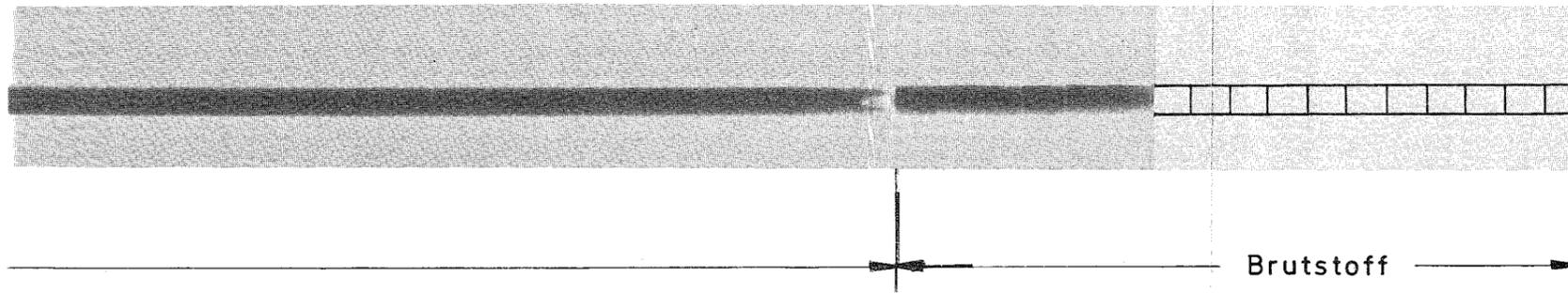
Spaltstoff



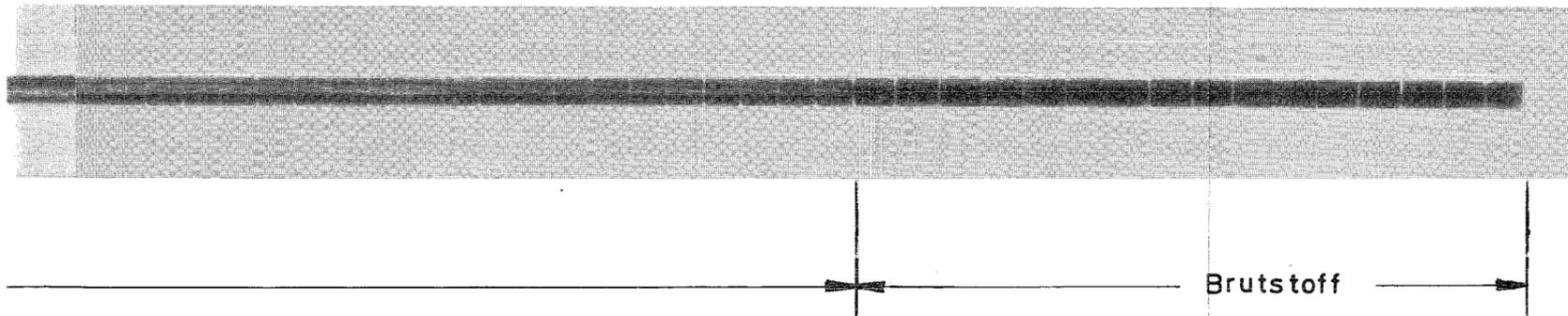
Spaltstoff



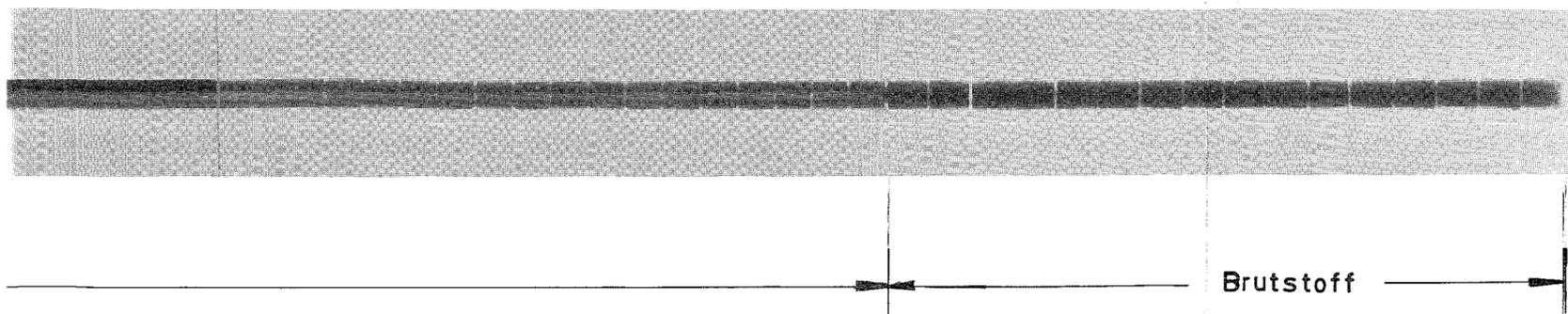
Prüfling 7A-1



Prüfling 7A-4



Prüfling 7A-5



Prüfling 7A-7

unten