

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

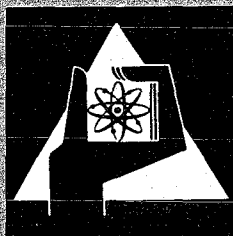
April 1973

KFK 1523

Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

**Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung
der UO_2 / PuO_2 -Brennstab-Bestrahlungsexperimente
der FR 2-Kapsel-Versuchsgruppe 4a**

D. Freund, Th. Dippel, 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 1523

Institut für Material- und Festkörperforschung

Projekt Schneller Brüter

Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung der
UO₂/PuO₂-Brennstab-Bestrahlungsexperimente der FR 2-Kapsel-Versuchsgruppe 4a

von

D. Freund, Th. Dippel, D. Geithoff, P. Weimar

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

21. März 1973

VORBEREMERKUNG

Der in dem vorliegenden Bericht dargestellte Bestrahlungsversuch basiert auf der Zusammenarbeit mehrerer Arbeitsgruppen im Kernforschungszentrum Karlsruhe. Die vielfältige Mühe und Sorgfalt aller Beteiligten sei ausdrücklich anerkannt. Die Autoren danken an dieser Stelle weiterhin allen, die unmittelbar zur Abfassung der Dokumentation beitrugen, insbesondere Herrn F. Bauer für die Ausarbeitung der Diagramme und Abbildungen und Frau B. Hauth für die Reinschrift des Manuskriptes sowie die redaktionelle Hilfe.

März 1973

D. Freund, Th. Dippel, D. Geithoff, P. Weimar

KURZFASSUNG

Im Rahmen der im Karlsruher Forschungsreaktor FR 2 durchgeführten Brennstabbestrahlungsexperimente stellt die Bestrahlung von 28 Prüflingen mit UO_2 - PuO_2 -Brennstoff - zusammengefaßt unter der Bezeichnung "Kapselversuchsgruppe 4a" - eine erste Erprobung des SNR-Brennstabgrundkonzeptes im thermischen Fluß dar.

Die Bestrahlung wurde in Na/PbBi-Doppelkapseln durchgeführt, wobei jeweils 3 bis 4 Kurzprüflinge mit 80 mm Brennstoffsäule übereinander angeordnet waren. Bei einem PuO_2 -Anteil von 15 Gew.-% betragen die Tablettendichten 85 und 92 % th.D., welche Schmierdichten von 81 bzw. 84 % entsprechen. Die Brennstabhüllen aus austenitischem Edelstahl der Werkstoff-Nr. 1.4988 haben bei einem Außendurchmesser von 7,4 mm eine Wandstärke von 0,5 mm. Die Länge der Prüflinge beträgt 172 mm.

Die Bestrahlung der insgesamt 9 Kapselversuchseinsätzen wurde auf normalen FR 2-Brennelement- bzw. Isotopenkanalpositionen durchgeführt. Bei Stableistungen bis max. 700 W/cm und Hülloberflächentemperaturen von max. 600°C wurden Abbrände von 10 bis etwa 90 Mwd/kg M erreicht. Die Bestrahlungszeiten lagen zwischen 57 und 578 Tagen Vollastäquivalent. Alle Prüflinge blieben trotz des vereinzelt auftretens zentralen Brennstoffschmelzens intakt.

In der vorliegenden Dokumentation wird nach Darstellung von Aufgabe und Ziel des Experimentes, Auslegung, Spezifikation und Herstellung der Prüflinge eine detaillierte Schilderung des Bestrahlungsablaufes gegeben. Hieran anschließend werden sämtliche Ergebnisse der zerstörungsfreien und der zerstörenden Nachuntersuchung dargestellt.

A B S T R A C T

Design, Irradiation and Post Irradiation Examination of the UO_2/PuO_2 Fuel Pin Irradiation Experiments of the FR 2 Capsule Group No. 4a

The irradiation of 28 fuel pin samples with UO_2 - PuO_2 fuel of the experiment called "Capsule Group No. 4a", irradiated in the thermal flux of the Karlsruhe research reactor FR 2, represents a first testing of the SNR basic fuel pin concept.

The irradiation has been carried out in 9 Na/PbBi double-capsules, where 3 - 4 samples are stacked one above the other. The fuel column of 80 mm length consists of pellets with a Pu-content of 15 w/o. Two different fuel densities of 85 and 92 % T.D., corresponding to smeared densities of 81 resp. 84 % T.D., have been realized. The austenitic stainless steel claddings have an outer diameter of 7.4 mm with a wall thickness of 0.5 mm. The total length of the fuel pin is 172 mm.

The capsules have been irradiated at normal fuel element or isotope canal positions. At linear rod powers up to 700 W/cm and clad surface temperatures of max. 600 °C the burnup lies between 10 and 90 MWd/kg Metal. The samples have been irradiated between 57 and 578 days full power (44 MW) equivalent. All fuel pins are intact in spite of single central fuel melting.

In the present documentation a compilation of design, specification and fabrication as well as a detailed description of irradiation and post irradiation examination results are given

I n h a l t :

	Seite
1. Einleitung	1
2. Aufgabe und Ziel des Experimentes	2
3. Auslegung und Spezifikation	4
3.1 Brennstoffspezifikation	7
3.2 Hüllrohrspezifikationen	9
3.3 Brennstabspezifikationen	11
4. Herstellung der Prüflinge	14
4.1 Ausgangspulver für die Brennstoffherstellung	14
4.2 Tablettenherstellung	14
4.3 Brennstoffeigenschaften	16
4.4 Prüfung des Hüllmaterials	16
4.5 Stabherstellung	16
4.6 Stabprüfung	
5. Bestrahlungseinrichtung	24
5.1 Versuchseinsatz	24
5.2 Bestrahlung im FR 2	24
6. Ablauf der Bestrahlung	29
6.1 Reaktorzyklen und Neutronenfluß	29
6.2 Temperatur und Stabileistung	32
6.3 Thermische Abbrandberechnung	57
7. Zerstörungsfreie Nachuntersuchung	59
7.1 Äußere Vermessung	59
7.2 Durchleuchtung	67
7.3 γ -Profile und γ -Spektren	68
8. Zerstörende Nachuntersuchung	70
8.1 Spaltgasbestimmungen	70
8.2 Keramografie	77
8.3 Radiochemische Abbrandbestimmungen	83
8.4 Vergleich der radiochemischen und berechneten Abbrandwerte	84
9. Dokumentation der zerstörungsfreien und zerstörenden Nachuntersuchung	87
10. Schlußbetrachtung	88
Literatur	90
Anhang A	91

Liste der Tabellen:

		Seite
Tabelle I	Auslegungsvarianten der Versuchsgruppe 4a	5
II	Kenndaten der Ausgangspulver	15
III	Brennstoffanalysen	15
IV	Bezeichnung und Zuordnung	18
V	Brennstoffdaten für die Prüflinge mit Brennstoff- nenndichte 90 % th.D.	19
VI	Brennstoffdaten für die Prüflinge mit Brennstoff- nenndichte 85 % th.D.	21
VII	Stabvermessung	23
VIII	Bestrahlungsablauf der Kapselversuchseinsätze der Kapselversuchsgruppe 4a	27
IX	Vertikaler Verlauf des thermischen Flusses in den Isotopenkanal-Positionen in Höhe der Prüflings- mitte	30
X	Instrumentierungsplan	34
XI	Mittlere und maximale Temperatur der Prüflinge	35
XII	Mittlere und maximale Stabileistung der Prüflinge	36
XIII	Thermische Abbrandwerte der Prüflinge	58
XIV	Stabdurchbiegung nach der Bestrahlung	65
XV	Änderung der Stablänge	66
XVI	Freies Spaltgas und Spaltgasdruck	71
XVII	Im Brennstoff gebundenes Spaltgas	72
XVIII	Spezifische Poren- und Gitterspaltgasausbeute V'	73
XIX	Spaltgasbilanz	75
XX	Xe/Kr-Verhältnis, partiell und gesamt	76
XXI	Vergleich der radiochemisch bestimmten und berechneten Abbrandwerte	85

1. Einleitung

Die Brennstab-Bestrahlungsexperimente zur Entwicklung von Brennstäben für den Natrium-gekühlten Schnellen Reaktor SNR-300 im Rahmen des Karlsruher Forschungs- und Entwicklungsprogramms finden ihren ersten Schwerpunkt in der Bestrahlung von Brennstabprüflingen mit Plutonium-haltigem, oxidischem Brennstoff [1]. In den einleitenden Stufen dieser Entwicklung wird das für die spätere Verwendung ausgewählte Brennstab-Grundkonzept zunächst im thermischen Fluß des FR 2 untersucht. Es sieht einen gasdicht verschlossenen Brennstab mit UO_2/PuO_2 -Brennstoff und ein sogenanntes Plenum zur Aufnahme des entstehenden Spaltgases vor. Die Brennstabhülle besteht aus austenitischem Edelstahl. Die ersten Prüflinge, in der "Kapselversuchsgruppe 4a" zusammengefaßt, werden in Na/PbBi-Bestrahlungskapseln auf Brennelement- und Isotopenkanalpositionen des FR 2 bestrahlt.

Die in dieser Versuchsgruppe erstmals in Deutschland bestrahlten Brennstabprüflinge mit UO_2/PuO_2 -Brennstoff stellen die erste Erprobung des Grundkonzeptes für den SNR-Brennstab dar. Gleichzeitig sollen diese Experimente die Methodik der Auslegung, Spezifikation, Herstellung, Nachuntersuchung sowie Auswertung derartiger komplexer Versuchsreihen in Gang bringen.

Im vorliegenden Bericht werden alle Einzelheiten über die 28 Prüflinge dieser Versuchsgruppe zusammengestellt. Er enthält neben Aufgabenstellung, Beschreibung von Auslegung, Spezifikation und Herstellung der Prüflinge die Darstellung des tatsächlichen Bestrahlungsablaufes sowie der gesamten zerstörungsfreien und zerstörenden Nachuntersuchung aller Prüflinge. Die Zusammenstellung basiert auf einer Vielzahl von internen Niederschriften und persönlichen Mitteilungen. In der folgenden Übersicht ist der Zeitablauf des Experimentes in groben Zügen dargestellt, weiterhin sind die für die einzelnen Abschnitte verantwortlichen Stellen bzw. Personen angegeben.

Zeitraum	Teilarbeit	Institution/Hauptbeteil.
1967/68	Vorüberlegungen und Versuchsauslegung	IAR; Karsten, Gerken
1967/68	Bestrahlungskapseln	IRE; Häfner, Bojarski
1967	Spezifikationen	IAR; Karsten, Gerken
1968	Herstellung der Prüflinge	IMF; Dippel, Kummerer
1968/70	Organisation der Bestrahlung und Betreuung	IAR; Gerken IRE; Häfner
1968/70	Bestrahlung im FR 2	Abt. Reaktorbetrieb FR 2
1969/71	Organisation der Nachuntersuchung und Betreuung	IAR; Geithoff
1970	Zerstörungsfreie Nachuntersuchung	RB/Z; Scheeder, Enderlein
1970/71	Spaltgasuntersuchungen	RB/CuM; Gräbner
1970/71	Keramografie	RB/Z; Pejisa
1971/72	Abbrandbestimmung	IRCH; Wertenbach
1972	Zusammenfassung und Dokumentation der Ergebnisse	IMF/LB; Freund, Dippel, Geithoff, Weimar

2. Aufgabe und Ziel des Experiments

Die Bestrahlung von Brennstabprüflingen mit UO_2/PuO_2 -Mischbrennstoff ist Hauptaufgabe der Bestrahlungsexperimente der Kapselversuchsgruppe 4a. Die in dieser Versuchsgruppe zum Einsatz kommenden Brennstabprüflinge stellen im Hinblick auf die verwendete Zylindergeometrie bzw. den gewählten Brennstabdurchmesser, den UO_2/PuO_2 -Brennstoff in Tablettenform sowie die Brennstabhülle aus austenitischem Edelstahl eine erste Realisierung des SNR-

Brennstab-Grundkonzeptes dar. Weiterhin sollen mit der Wahl der Betriebsbedingungen, charakterisiert durch Hülltemperatur, Stabileistung und Abbrand, die SNR-spezifischen Brennstabbelastungen erreicht werden (vergl. Kap. 3). Wie bei den vorangehenden Experimenten der Kapselversuchsgruppe 3 [2] wird auch bei dieser Versuchsgruppe eine Simulation der Verhältnisse für Brennstäbe in schnellen Reaktoren angestrebt. Diese Simulation weicht in folgenden Punkten von den Bedingungen für Schnellbrüter-Brennstäbe ab:

- Die Brennstab-Prüflinge besitzen nur einen Bruchteil der Stablänge echter Brüterbrennstäbe.
- Die Prüflinge enthalten keine axialen Brutstoff-Partien.
- Die Bestrahlung erfolgt in einem thermischen Fluß, d.h. es bestehen Unterschiede in der radialen Wärmequelllichtverteilung, der Spaltproduktproduktion sowie der Hüll- und Strukturmaterialbelastung unter Bestrahlung.
- Der Wärmetransport nach außen erfolgt durch stagnierendes Natrium, d.h. eine Brennstabbelastung durch strömendes Kühlmittel entfällt.

Unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen - im Hinblick auf die Übertragbarkeit dieser Experimente auf realistische Schnellbrüter-Brennstabbestrahlungen - kann die Aufgabenstellung der Versuchsgruppe folgendermaßen fixiert werden:

- Es sollen Brennstabprüflinge mit UO_2/PuO_2 -Brennstoff unter simulierten Schnellbrüterbedingungen bis zu hohen Abbränden bestrahlt werden.
- Die Bestrahlung soll an Brennstoffsäulen unterschiedlicher Dichte und Durchmesser durchgeführt werden.
- Die Zielabbrände werden variiert, wobei Abbrände bis 80 MWd/kg M erreicht werden sollen.

Als wichtige Voraussetzung zu diesen Punkten ist die spezifikationsgerechte Herstellung des Tablettenbrennstoffes und der Prüflinge als wesentliche Detailaufgabe anzusehen.

Die Bestrahlung der Prüflinge der Kapselversuchsgruppe 4a soll Aussagen zu folgenden Problemkreisen liefern:

- Ist das vorliegende Stab-Grundkonzept für Bestrahlungen bis zu hohem Abbrand geeignet, bleiben speziell die Stabprüflinge intakt ?

- Tritt bei der Bestrahlung eine Änderung der äußeren Geometrie der Stäbe auf ?
- Welche radialen und axialen Strukturänderungen erfährt der Brennstoff durch die Bestrahlung ?
- Welche Änderungen der Spaltstoffverteilung treten durch die Bestrahlung auf ?
- Wie ist die Verteilung der Spaltprodukte ?
- Wie groß ist der Anteil des freigesetzten Spaltgases, welcher Anteil befindet sich in den geschlossenen Poren ?

Schließlich sollen die Versuchsergebnisse durch besseres Verständnis des Verhaltens unter Bestrahlung zu weiteren, gezielten Experimenten sowie zu Verbesserungen von Auslegung, Spezifikation und Prüflingsherstellung führen.

3. Auslegung und Spezifikation

Im Rahmen der Versuchsgruppe 4a kommen 28 Prüflinge gleicher äußerer Abmessungen zur Bestrahlung. Die Prüflinge unterscheiden sich in der Brennstoffdichte, in der Größe des Spaltes zwischen Brennstoff und Hülle sowie im inneren Aufbau. In Tabelle 1 ist die Aufteilung der Prüflinge auf die einzelnen Auslegungsvarianten zusammengestellt.

Die Bestrahlungsbedingungen dieser Versuchsgruppe, die die Auswahlversuche der Gruppe 3 [2] fortführt, sind durch folgende Festlegung von Hüllwandtemperatur, Stableistung und Abbrand gegeben [3]:

- Maximale Nominalstableistung ca. 700 W/cm
- Mittlere Nominalstableistung ca. 650 W/cm
- Maximale Nominal-Hüllwandtemperatur (außen) 560 °C
- Mittlerer Abbrand 10 - 80 MWd/kg Metall

Die Bestrahlung der Prüflinge wird auf normalen Brennelement- bzw. Isotopenkanalpositionen des FR 2 durchgeführt. Bei einem ungestörten thermischen Fluß von maximal 1×10^{14} n/cm²sec sowie einem Flußabschwächungsfaktor von 0,85 für den verwendeten Kapseltyp ergeben die nuklearen Auslegungsrech-

Tabelle 1: Auslegungsvarianten der Versuchsgruppe 4a

Prüflingstyp	Anzahl Prüflinge	Bezeichnung der Prüflinge	Brennstoffdichte (% th.D.)	Mittlerer diam. Kaltspalt (μ)	Innerer Aufbau (s. Abb. 1)
I	7	B6, B7, B10, B11, B12, B13, B14	90	200	Isoliertabl. am oberen Säulenende Feder-Führungs- stück
IIa	7	4A/1, 4A/2, 4A/3, 4A/4, 4A/5, 4A/8, 4A/9	90	200	Je 1 Isoliertabl. oben und unten
IIb	14	4A/15, 4A/16 bis 4A/28	85	150	2 Isoliertabl. am oberen Säulen- ende

nungen eine Pu-Anreicherung von 15 Gew.-% für eine Brennstoffdichte von 90 % th.D. und einem Brennstoffdurchmesser von 6,2 mm, um eine mittlere Stableistung von 650 W/cm zu erreichen. Da die Flußverhältnisse in den einzelnen Bestrahlungspositionen aufgrund wechselnder Beladungs- oder Abbrandzustände in den umliegenden Positionen nicht genau bestimmt werden können, wird die obige Anreicherung für sämtliche Prüflingstypen festgelegt. Weiterhin empfiehlt sich eine einheitliche Anreicherung in den Prüflingen - aufgrund der unsicheren theoretischen Überlegungen bezüglich der Flußabschwächung in der Kapsel und im Prüfling selbst - im Hinblick auf die spätere Beurteilung der Ergebnisse, welche somit den Parameter Anreicherung zu eliminieren gestattet.

Wie die Wahl der Bestrahlungsbedingungen zeigt, zielt die Bestrahlung der Prüflinge der Versuchsgruppe auf die obere Grenze der thermischen Belastbarkeit. Bei einer mittleren Nominalstableistung von ca. 650 W/cm sowie einer mittleren Hülloberflächentemperatur von 500°C würde bei frischem Brennstoff zentrales Schmelzen erreicht werden. Daher ist vorgesehen, die Bestrahlung zu Beginn auf flußschwächeren Positionen durchzuführen, um eine Zentralkanalbildung zu erzielen, welche dann eine Bestrahlung bei 650 W/cm gestattet: Die Brennstoffzentraltemperatur liegt bei einem Zentralkanalradius von 1 mm bei obiger Stableistung sowie 500°C Hülloberflächentemperatur unter 2700°C.

Das mit den Prüflingen der Versuchsgruppe 4a zum Einsatz kommende Stabkonzept kann folgendermaßen beschrieben werden: Der Brennstab besteht aus einer Hülle mit verschweißten Endstopfen, dem Brennstoff in Tablettenform sowie der Transportsicherungsfeder mit Führungsstück(en). In den unteren Endstopfen wird ein Rh-Plättchen zur Absorption des axialen Flußanteils eingelegt und verstemmt. Das Spaltgas gelangt über den Spalt zwischen Führungsstück und Hüllrohr sowie durch ein Sinterstahlfilter im unteren Führungsstück in den Spaltgasraum. Durch ein weiteres Sinterstahlfilter im oberen Endstopfen wird gewährleistet, daß nach dem Anbohren des bestrahlten Prüflings nur gasförmige Spaltprodukte entweichen können.

Die Prüflinge sind am oberen Endstopfen dauerhaft gekennzeichnet.

3.1 Brennstoffspezifikation

3.1.1 Chemische Zusammensetzung

- Der Brennstoff ist ein UO_2/PuO_2 -Mischoxid
- Anreicherung (Gew.-%) 15 ± 1 % Pu, Rest U_{nat}
- Isoliertablette U_{nat}
- Stöchiometrie O/M-Verhältnis $1,98 \pm 0,015$
- Chemische Reinheit: Insgesamt maximal 2500 ppm, entsprechend 4 ppm Boräquivalent, mit folgenden Einschränkungen:

Verunreinigung durch	Grenzwert in (ppm)
C	150
Ca	25
Mg	25
H ₂ O	100

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

3.1.2 Isotopenzusammensetzung

- Gew.-% von Pu:	Pu-239	$90,90 \pm 0,2$
	Pu-240	$8,21 \pm 0,2$
	Pu-241	$0,85 \pm 0,05$
	Pu-242	$0,04 \pm 0,01$
- Gew.-% von U_{nat} :	U-235	$0,7 \pm 0,1$
	U-238	$99,3 \pm 0,1$

3.1.3 Homogenität im Mischbrennstoff

- Die Komponenten des Mischbrennstoffs sollen zu größtmöglicher Homogenität zusammengesintert werden.
- Die PuO_2 -Partikel sollen $\leq 0,1 \text{ mm}$ sein.

3.1.4 Brennstoff-Form

- Es kommen zylindrische, maßgesinterte Tabletten zum Einsatz.

3.1.5 Tablettendichte

- Brennstofftabletten	90 ± 2 % th.D.
	85 ± 2 % th.D.
- Isolierttabletten	95 ± 1 % th.D.

3.1.6 Tablettengeometrie

- Tablettendurchmesser (mm) für 90 % th.D.	6,2 ± 0,050
	für 85 % th.D. 6,25 ± 0,050
- Tablettenhöhe (mm) für 90 % th.D.	10 ± 0,5
	für 85 % th.D. 8 ± 0,5
- Isolierttablette (mm)	6,25 ± 0,03

3.1.7 Oberflächenbeschaffenheit der Tabletten

- Kantenabplatzungen $\leq 0,3$ mm
- Risse von maximal 2 mm Länge und 0,1 mm Weite
- Flächenabplatzungen bis 2 mm größter Durchmesser

3.1.8 Untersuchungen und Prüfungen am Brennstoff

- BET-Oberfläche (m^2/g)
- Stöchiometrie
- Primärpartikelgröße (max.)
- Größe der Sekundäragglomerate (max.)
- Chemische Analyse

Vom gemischten Brennstoff sowie an jeder Charge gesinterter Tabletten sind zwei Analysen zu machen, wobei speziell folgende Elemente bzw. Verbindungen anzugeben sind:

Ag	Fe
B	Mg
C	Mn
Ca	Mo
Cd	N ₂
Cl	Ni
Co	Pb
Cr	V
Cu	W
F	H ₂ O

Der Gesamtgehalt in ppm ist auch in Boräquivalenten anzugeben; die obere Grenze ist 4 ppm Boräquivalent.

- Mischungsverhältnis

Je gemischter Charge sind zwei Pu-Analysen zu machen. Außerdem ist das Isotopenverhältnis $\frac{U-235}{U-238}$ sowie das Verhältnis $\frac{Pu}{U + Pu}$ anzugeben und durch Mischprotokolle zu belegen.

- Dichte an jeder 5. Tablette in einer Säule
- Tablettenhöhe an jeder 5. Tablette in einer Säule
- Säulengewicht des Brennstoffes
- Säulenlänge des Brennstoffes
- Keramografische Untersuchungen an Tabletten

Folgende fotografische Aufnahmen sind zu machen:

- a) Die Stirnfläche von 10 Tabletten jeder Charge in der Vergrößerung von etwa 15 x.
- b) Je 2 Schliffbilder in 200-facher Vergrößerung für Tablettenrand und Zentrum des Radialschliffes.

3.2 Hüllrohrspezifikationen

3.2.1 Werkstoff

Die Hüllrohre werden aus dem Werkstoff

X8CrNiMoVNb1613 (Werkstoff-Nr. 1.4988)

hergestellt.

Chemische Zusammensetzung:

Element	Gew.-%
C	≤ 0,1
Si	0,3 - 0,6
Mn	1,0 - 1,5
Cr	15,5 - 17,5
Ni	12,5 - 14,5
Mo	1,1 - 1,5
V	0,6 - 0,85
N ₂	0,1
Nb - Ta	≤ 1,2
P	≤ 0,02
S	≤ 0,02
Fe	Rest

3.2.2 Abmessungen

- Außendurchmesser: $7,4 \pm 0,04$ mm
- Innendurchmesser: $6,4 \pm 0,025$ mm
- Wanddicke: $\geq 0,46$ mm
- Geradheit: 1:1500, bezogen auf jeweils
10 mm Länge
- Ovalität: innerhalb der Außendurchmesser-
toleranz

3.2.3 Oberflächenbeschaffenheit

- Rauigkeit: ≤ 2 μm
- Oberflächenriefen und -fehler: ≤ 20 μm
- Oberflächenrisse: nicht zulässig
- Oberflächenbeschaffenheit: Innere und äußere Oberfläche muß
frei von Anlauffarben, Öl, Schmutz,
Metallspänen und sonstigen Fremd-
körpern sein.

3.2.4 Materialbedingungen

- Vorbehandlung: 10 - 20 % kaltverformt und Wärme-
behandlung (40 h - 750°C)
- Korngröße: kleiner 2,5 Körner/ cm^2 bei 100-
facher Vergrößerung (ASTM Nr. 5)
- Mechanische Eigenschaften: Zugfestigkeit, Streckgrenze,
Bruchdehnung: max. und min. Werte
bei RT und 650°C
- Innere Fehler: kleiner 10 % der Wandstärke
- Einschlüsse: kleiner 0,05 mm oder 10^{-3} mm^2
- Abdruckversuch: nach DIN 50104 mit 200 at Druck
- Quersfaltversuch: nach DIN 50136
- Aufweitversuch: nach DIN 50135

3.2.5 Hüllrohrprüfungen

Für jedes Hüllrohr wird ein Prüfzeugnis erstellt. Die Prüfzeugnisse des Herstellerwerkes müssen den Werksabnahmezeugnissen nach DIN 50049/3B entsprechen. Die Prüfungen betreffen folgende Punkte:

- Werkstoff: Chemische Analyse entsprechend Werksabnahmezeugnis
- Abmessungen: Vermessung von Außen- und Innendurchmesser sowie Wandstärke mit geeigneten Verfahren, entsprechend für Geradheit und Ovalität
- Oberflächenbeschaffenheit: Durchführung einer Rib-, Rauigkeits- und Meßprüfung
- Materialbedingungen: Nachweis von Vorbehandlung, Korngröße, mechanischen Eigenschaften, Untersuchung auf innere Fehler und Einschlüsse, Durchführung von Abdrück-, Querfalt- und Aufweitversuchen

3.3 Brennstabspezifikationen

3.3.1 Innere Geometrie

- Länge der Brennstoffsäule (mm) 80 ± 1
- Länge einer Isoliertablette (mm) (vergl. Kap.4.5) $5 \pm 0,2 / 10 \pm 0,2$
- Im unteren Endstopfen ist ein Rh-Plättchen zur Absorption des axialen Flußanteils befestigt.
- Innerer Aufbau gemäß Zeichnung Nr. TA2K-16-07-3-3442 (Abb. 1) und Tabelle I (s. S. 5).

3.3.2 Äußere Geometrie

- Die Gesamtlänge des Stabes beträgt $172 \pm 0,5$ mm
- Außendurchmesser $7,4 \pm 0,04$ mm
- Schweißnahtdurchmesser $\leq 7,55$ mm

3.3.3 Füllgas

- Die Stabprüflinge erhalten vor dem Zuschweißen eine Heliumfüllung.

3.3.4 Schweißnähte

- Die Endkappen werden in die Hüllrohre unter Helium aufgeschweißt. Die Schweißnähte dürfen diametral um maximal 0,15 mm überstehen. Eine maximale He-Leckrate von 10^{-8} Torr-liter/sec ist zulässig.

3.3.5 Prüfung an den fertigen Brennstäben

- Länge
- Durchmesser, jeweils um 90° versetzt, bei b) um 60° versetzt
 - a) an den Endstopfen
 - b) an den Schweißnähten $\leq 6,15$ mm
 - c) am Hüllrohr, je 10 mm
- Durchbiegungen und Rundheit
Durchbiegungen und Rundheit werden auf einer besonders dazu geeigneten Meßeinrichtung profilometrisch gemessen und aufgezeichnet.
- Gewicht
- He-Lecktest:
Zum Nachweis der Dichtheit der Schweißnähte ist jeder Brennstab im Anschluß an die letzte Schweißung einem Helium-Dichtheitstest unter äußerem Vakuum zu unterziehen. Die Leckrate soll kleiner als 10^{-8} Torr-liter/sec sein.
- Röntgen-Prüfung:
Alle Schweißnähte werden einer Röntgenprüfung unterzogen. Von jedem Stabende werden 2 Aufnahmen (um 90° verdreht) senkrecht zur Stabachse angefertigt. An den Schweißnähten dürfen keinerlei Fehler erkennbar sein.

Desweiteren ist über die gesamte Brennstablänge ein Röntgenbild anzufertigen, aus dem die Lage der Innenteile, insbesondere auch die vorgespannte Länge der Schraubenfeder, eindeutig hervorgeht. Die Ergebnisse sind zu protokollieren.
- Kontamination:
Die Oberflächenkontamination darf nicht mehr betragen als
 22α -Zerfälle pro cm^2 und Minute
Diese Kontamination ist als obere Grenze für haftende Verunreinigungen zu betrachten. Der Wischtest dagegen soll keine Kontamination zeigen.

4. Herstellung der Prüflinge

4.1 Ausgangspulver für die Brennstoffherstellung

Zur Verarbeitung zu Tablettenbrennstoff standen als oxidisches Ausgangspulver folgende Produkte zur Verfügung:

- UO_2 mit Natururan, ADU-gefällt, von Fa. NUKEM
- PuO_2 mit nominell 8,3 % Pu-240, aus verschiedenen Chargen der Lieferung der USAEC.

Um die Sinteraktivität dieser Pulver zu reduzieren, wurde das UO_2 unter Argon/5 %-Wasserstoffgemisch bei 1250°C und das PuO_2 unter Kohlendioxid bei 1100°C je 2 Stunden lang geglüht. Alle für die Tablettenherstellung wesentlichen Pulverdaten sind in Tabelle II zusammengestellt.

4.2 Tablettenherstellung

In zwei Mischansätzen wurden abgewogene UO_2 - bzw. PuO_2 -Mengen mechanisch in einem Schaufelmischer trocken gemischt. Die Homogenität und das Verhältnis Pu/U+Pu wurde durch chemische Analyse kontrolliert. Diese Mischungen wurden mit Polyvinylalkohol und Stearinsäure zu preßbaren Granulaten verarbeitet. Da Tablettenhöhe und -durchmesser durch Maßsintern eingestellt werden mußten, wurde mit Vorversuchen die günstige Preßdichte und der Schrumpfungsgrad von Höhen und Durchmessern bestimmt. Mit den so gewonnenen Daten wurde das Granulat auf einer mechanischen Presse mit 2 to/cm^2 Druck verpreßt.

Eine stichprobenweise Prüfung der Preßlinge hinsichtlich der Dimensionen und ihrer Gewichte schloß sich an. Danach wurde das Gleit- und Bindemittel durch Erhitzen der Preßlinge unter Kohlendioxid entfernt. Die Sinterung erfolgte unter Stickstoff-8 %-Wasserstoffgemisch bei 1420°C , die Sinterzeit war 2 Stunden.

Die Isoliertabletten aus UO_2 mit Natururan waren nach einem Verfahren ähnlich dem beschriebenen hergestellt worden.

Tabelle II Kenndaten der Ausgangspulver

Pulver	UO ₂	PuO ₂ CO-25-1-2		PuO ₂ CO-25-10-23		PuO ₂ CO-26-6-8	
		Hanford	Karlsruhe	Hanford	Karlsruhe	Hanford	Karlsruhe
Isotopenanteil							
Pu-239	-	90,866	90,822	90,844	90,899	90,845	90,850
Pu-240	-	8,233	8,302	8,238	8,209	8,301	8,240
Pu-241	-	0,863	0,841	0,877	0,852	0,813	0,867
Pu-242	-	0,038	0,035	0,041	0,040	0,040	0,044
max. Teilchen- größe (mm)	0,063	0,045					

Tabelle III Brennstoffanalysen

Tablettentyp	Nenn-dichte 90 und 85 % Mischansatz I	Nenn-dichte 85 % Mischansatz II
$\frac{\text{Pu}}{\text{U} + \text{Pu}}$ 1. Analyse	14,80	14,67
(%) 2. Analyse	14,87	14,74
Chemische Verunreinigungen	(ppm)	(ppm)
Ag	5	5
B	0,2	0,3
C	122	53
Ca	50	100
Cd	+)	-
Cl	-	-
Co	-	-
Cu	3	3
F	-	-
Fe	70	70
Mg	20	20
Mn	10	10
Mo	65	30
N ₂	-	-
Ni	20	20
Pb	1	1
V	-	-
O/Me-Verhältnis	1,98 - 1,99 ⁺⁺)	

+) bedeutet: nicht analysiert
 ++) " : Angabe auf Grund späterer Messungen

4.3 Brennstoffeigenschaften

Aus den Tablettenmengen jeder Dichte wurden einige Stücke entnommen und mit diesen chemische Analysen durchgeführt. Diese Ergebnisse sind in Tabelle III zusammengestellt. Die Abb. 2 zeigt Autoradiografien, die die hinreichende Homogenität des Brennstoffes nachweisen.

4.4 Prüfung des Hüllmaterials

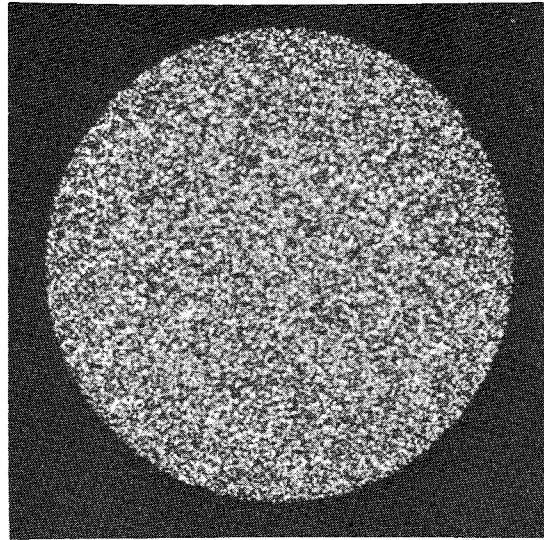
Die verwendeten Hüllrohrabschnitte waren im Rahmen einer größeren Rohrcharge geprüft worden [4]. Die Ultraschallprüfung wurde zur Messung der Wanddicke und zur Erkennung von Oberflächenfehlern ausgeführt. Der Rohrrinnendurchmesser wurde kontinuierlich mit einer pneumatischen Prüf-anlage ermittelt. Alle Prüfungsverfahren waren mit Hilfe von Standards geeicht worden.

4.5 Stabherstellung

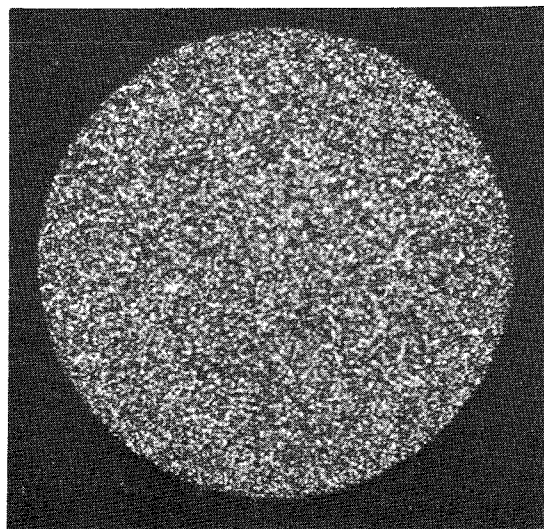
In Tabelle IV sind alle Bezeichnungen und Zuordnungen der 28 Prüflinge zusammengefaßt, die zur eindeutigen Identifikation erforderlich sind. Die Kennzeichnung der Prüflinge geschah durch Einschlagen von Ziffern in den oberen, an die Haltefeder anschließenden Endstopfen.

- Prüflinge mit Brennstoffnenndichte 90 % th.D.

Diese aus 14 Prüflingen bestehende Serie gliedert sich in zwei Gruppen auf. Die erste Gruppe besteht aus sieben Prüflingen gemäß Typ I. Sie enthalten nur eine Isoliertablette von 5 mm Höhe am oberen, der Feder zugewandten Ende der Brennstoffsäule. Die zweite Gruppe besteht aus sieben Prüflingen gemäß Typ IIa. Sie enthalten sowohl am oberen als auch am unteren Ende der Brennstoffsäule je eine 5 mm hohe Isoliertablette. In Tabelle V sind alle Daten der 14 Prüflinge der Nenndichte 90 % th.D. eingetragen. Jede Brennstoffsäule besteht aus acht Tabletten, deren Mittlerer Durchmesser 6,18 mm beträgt. Jede Tablette wurde einzeln vermessen und gewogen. Die Werte der Säulengewichte wurden durch Addition der Einzelgewichte der Tabletten gewonnen. Die Brennstoffdichten sind die Mittelwerte aus den Dichten jeder einzelnen Tablette der jeweiligen Säule.



(10x)
90% th.D.



(10x)
85% th.D.

Autoradiographien von Tabletten
verschiedener Dichte

Abb. 2

Tabelle IV Bezeichnung und Zuordnung

Prüflings- bezeichnung	Typ	Brennstoff- nenndichte (% th.D.)	Brennstoff- ansatz	Nenn Durchmesser der Tabletten (mm)	Hüllrohr- Nr.
B 6	I	90	1	6,20	30/1
B 7	I		1		15/1
B 10	I		1		15/4
B 11	I		1		30/4
B 12	I		1		15/6
B 13	I		1		30/5
B 14	I		1		25/5
4A1	IIa	90	1	6,20	13/1
4A2	IIa		1		14/1
4A3	IIa		1		14/5
4A4	IIa		1		18/4
4A5	IIa		1		18/5
4A8	IIa		1		19/6
4A9	IIa		1		21/1
4A15	IIb	85	1	6,25	2/1
4A16	IIb		1		2/2
4A17	IIb		1		14/3
4A18	IIb		1		2/6
4A19	IIb		1		13/2
4A20	IIb		1		13/4
4A21	IIb		1		13/5
4A22	IIb		1		13/6
4A23	IIb		1		22/1
4A24	IIb		2		22/2
4A25	IIb		2		22/3
4A26	IIb		2		22/4
4A27	IIb		2		22/6
4A28	IIb	2	26/1		

Tabelle V Brennstoffdaten für die Prüflinge mit Brennstoffnenndichte 90 % th.D.

Lfd. Nr.	Prüfling Nr.	Gewicht der Isoliertabletten (g)		Höhe der Isoliertabletten (mm)		Brennstoffgewicht (g)	Brennstoffhöhe (mm)	Brennstoffdichte (°/o th.D.)	Pu-Gehalt (g)
		unten	oben	unten	oben				
1	B - 6	-	1,504	-	4,81	24,356	80,02	92,02	3,222
2	B - 7	-	1,534	-	4,83	24,301	79,97	91,41	3,215
3	B - 10	-	1,546	-	4,86	24,354	80,07	91,57	3,222
4	B - 11	-	1,549	-	4,86	24,323	79,97	91,60	3,218
5	B - 12	-	1,566	-	4,88	24,256	79,75	91,59	3,209
6	B - 13	-	1,536	-	4,88	23,947	78,72	91,89	3,168
7	B - 14	-	1,540	-	4,89	24,208	80,05	ca. 91,9 ⁺)	3,203
8	4A - 1	1,537	1,577	4,80	4,91	24,385	80,15	92,02	3,226
9	4A - 2	1,531	1,572	4,82	4,92	24,373	79,97	92,13	3,224
10	4A - 3	1,564	1,579	4,89	4,92	24,489	80,12	92,22	3,240
11	4A - 4	1,541	1,559	4,82	4,92	24,477	80,08	92,31	3,238
12	4A - 5	1,535	1,565	4,82	4,94	24,415	80,06	92,18	3,230
13	4A - 8	1,521	1,564	4,84	4,94	24,332	80,01	91,60	3,219
14	4A - 9	1,541	1,578	4,85	4,95	24,246	80,02	91,60	3,208

+) wegen Kantenausbrüchen nicht genau zu ermitteln

- Prüflinge mit Brennstoffmündichte 85 % th.D.

Diese Serie besteht aus 14 Prüflingen gemäß Typ IIb. In Tabelle VI sind alle Daten zusammengefaßt. In den Prüflingen 4A-15 bis 4A-19 sitzt eine einheitliche Isoliertablette von 10 mm Höhe, die Isoliertablette in den übrigen Prüflingen besteht aus zwei 5 mm hohen Teilstücken. Das Brennstoffgewicht wurde direkt ausgewogen. Jede Brennstoffsäule besteht hier aus 10 Tabletten mit dem mittleren Durchmesser von 6,25 mm. Die angegebene Brennstoffdichte ist der Mittelwert aus der jeweils 5. und 10. Tablette der Brennstoffsäulen, die voll vermessen wurden. Einzelwerte dazu enthält Tabelle

Die Tablettensäulen wurden durch eine Kappe, die das offene Rohrende vor Kontamination schützte, in das Hüllrohr eingeschoben, nachdem zuvor der untere Endstopfen unter Helium-Schutzgas eingeschweißt worden war. Danach wurde die Kappe abgenommen, der Metalleinsatz mit dem Sinterfilter und die Haltefeder eingeführt, der Prüfling mit Helium gefüllt und unverzüglich mit dem oberen Endstopfen verschlossen. Nach sorgfältiger optischer Kontrolle des Stopfensitzes wurde dieser unter Helium mit dem Hüllrohr verschweißt.

4.6 Stabprüfung

- Dichtheitsprüfung und Schweißnahtkontrolle

Alle Prüflinge wurden mit Hilfe des Helium-Lecktests auf Dichtheit geprüft und die Schweißnähte der Röntgendurchstrahlung unterzogen. Die Prüfberichte Nr. 67/235, 39/68, 82/68 und 194/68 weisen die Dichtheit der fertig verschlossenen Prüflinge nach. Die Schweißnahtqualität an den unteren Endstopfen ist nach der Röntgenprüfung einwandfrei, siehe Prüfbericht Nr. Rö 19/68. Die obere Schweißnaht wurde ebenfalls durchstrahlt. Nach Prüfbericht Nr. Rö 1/68, 62/68, Rö 46/68 und Rö 76/68 ist die Beurteilung in allen Fällen gut.

- Kontaminationsprüfung

Bei der Prüfung auf Kontaminationsfreiheit war zwischen abwischbarer und an der Staboberfläche fixierter Aktivität zu unterscheiden. Abwischbare Aktivität konnte bei keinem Prüfling festgestellt werden. Punktförmig fixierte Aktivität konnte beim Prüfling 4a-18 nachgewiesen werden. Die Menge des fixierten radioaktiven Materials war jedoch ohne Bedeutung.

Tabelle VI

Brennstoffdaten für die Prüflinge der Brennstoffendichte 85 % th.D.

Lfd. Nr.	Prüfling Nr.	Gewicht der Isoliertablette	Höhe der Isoliertablette ⁺	Brennstoffgewicht (g)	Brennstoffhöhe (mm)	mittlere Brennstoffdichte (% th.D.)	Pu-Gehalt (g)
1	4A - 15	3,219	10,26 (1)	22,828	80,00	85,10	3,020
2	4A - 16	3,192	10,28 (1)	23,226	80,75	85,20	3,073
3	4A - 17	3,210	10,29 (1)	22,921	80,54	84,25	3,032
4	4A - 18	3,187	10,30 (1)	23,035	80,85	84,25	3,048
5	4A - 19	3,239	10,37 (1)	22,887	80,32	83,80	3,028
6	4A - 20	3,184	9,97 (2)	22,881	80,81	83,60	3,027
7	4A - 21	3,185	10,01 (2)	22,956	80,98	83,60	3,037
8	4A - 22	3,164	10,04 (2)	22,755	80,72	83,35	3,010
9	4A - 23	3,205	10,08 (2)	23,193	80,37	84,82	3,068
10	4A - 24	3,227	10,11 (2)	22,98	80,55	84,40	3,040
11	4A - 25	3,220	10,12 (2)	22,95	80,57	84,53	3,036
12	4A - 26	3,241	10,19 (2)	22,83	80,49	84,90	3,020
13	4A - 27	3,263	10,22 (2)	22,86	80,54	83,93	3,024
14	4A - 28	3,255	10,28 (2)	22,88	80,52	84,35	3,027

⁺(1) bedeutet: eine einheitliche Isoliertablette

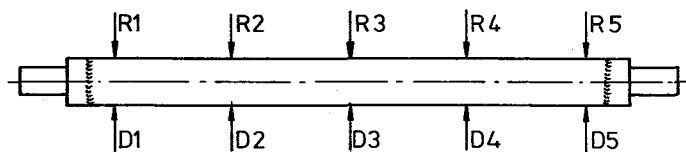
(2) bedeutet: bestehend aus 2 Teilstücken von je 5 mm Höhe

- Äußere Abmessungen der Prüflinge

Die Prüflinge wurden abschließend vollständig vermessen. Es wurde u.a. die Gesamtlänge, der Durchmesser an mehreren Stellen und der Rundlauf bestimmt. Die Ergebnisse sind in den Prüfberichten Nr. 67/252, Nr. 32/68, Nr. 79/68 und Nr. 176/68 zusammengestellt. Es ergaben sich nur wenige Überschreitungen der zulässigen Toleranzen. Zum Vergleich mit entsprechenden Messungen bei der Nachbestrahlungsuntersuchung sind die Meßwerte der Durchmesser- und Rundlaufprüfungen in Tabelle VII zusammengefaßt. Die schematische Darstellung des Prüflings gibt die Meßposition an.

Tabelle VII

Stabvermessung



Prüflings- bezeichnung	Meß- position	Durchmesser (mm)					Rundlauf (mm)				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
B 6	a)	7,368	-	7,365	-	7,366	0,07	-	0,16	-	0,21
	b)	7,368	-	7,365	-	7,364	-	-	-	-	
B 7	a)	7,365	-	7,369	-	7,359	0,04	-	0,15	-	0,19
	b)	7,370	-	7,368	-	7,370	-	-	-	-	
B 10	a)	7,370	-	7,364	-	7,372	0,04	-	0,038	-	0,105
	b)	7,370	-	7,368	-	7,364	-	-	-	-	
B 11	a)	7,364	-	7,360	-	7,364	0,025	-	0,165	-	0,205
	b)	7,369	-	7,362	-	7,360	-	-	-	-	
B 12	a)	7,366	-	7,364	-	7,362	0,088	-	0,092	-	0,142
	b)	7,370	-	7,366	-	7,372	-	-	-	-	
B 13	a)	7,364	-	7,364	-	7,358	0,05	-	0,095	-	0,22
	b)	7,372	-	7,364	-	7,366	-	-	-	-	
B 14	a)	7,366	-	7,366	-	7,366	0,14	-	0,20	-	0,215
	b)	7,384	-	7,368	-	7,366	-	-	-	-	
4A1	a)	7,375	7,368	7,368	7,366	7,368	0,06	0,04	0,04	0,075	0,13
	b)	7,374	7,364	7,369	7,368	7,364	-	-	-	-	-
4A2	a)	7,363	7,363	7,360	7,361	7,364	0,11	0,07	0,055	0,04	0,03
	b)	7,366	7,358	7,360	7,361	7,365	-	-	-	-	-
4A3	a)	7,366	7,356	7,361	7,358	7,363	0,07	0,1	0,13	0,07	0,02
	b)	7,367	7,372	7,364	7,361	7,363	-	-	-	-	-
4A4	a)	7,366	7,370	7,364	7,359	7,360	0,115	0,11	0,08	0,045	0,025
	b)	7,364	7,362	7,365	7,359	7,353	-	-	-	-	-
4A5	a)	7,370	7,366	7,360	7,362	7,360	0,03	0,035	0,035	0,02	0,05
	b)	7,368	7,364	7,360	7,365	7,360	-	-	-	-	-
4A8	a)	7,376	7,360	7,362	7,364	7,364	0,09	0,09	0,095	0,055	0,02
	b)	7,376	7,368	7,364	7,363	7,367	-	-	-	-	-
4A9	a)	7,364	7,360	7,361	7,353	7,367	0,065	0,07	0,06	0,05	0,045
	b)	7,363	7,364	7,361	7,367	7,371	-	-	-	-	-
4A15	a)	7,374	7,367	7,368	7,368	7,368	0,12	0,11	0,11	0,06	0,02
	b)	7,368	7,367	7,370	7,366	7,368	-	-	-	-	-
4A16	a)	7,361	7,365	7,366	7,368	7,373	0,125	0,125	0,10	0,08	0,11
	b)	7,370	7,364	7,365	7,368	7,370	-	-	-	-	-
4A17	a)	7,368	7,363	7,362	7,365	7,367	0,08	0,04	0,02	0,03	0,10
	b)	7,368	7,358	7,362	7,367	7,373	-	-	-	-	-
4A18	a)	7,370	7,367	7,367	7,365	7,372	0,20	0,185	0,17	0,18	0,18
	b)	7,360	7,362	7,370	7,365	7,364	-	-	-	-	-
4A19	a)	7,378	7,365	7,366	7,365	7,371	0,04	0,03	0,06	0,10	0,09
	b)	7,365	7,366	7,363	7,363	7,363	-	-	-	-	-
4A20	a)	7,378	7,366	7,364	7,367	7,364	0,07	0,06	0,04	0,05	0,06
	b)	7,366	7,368	7,364	7,365	7,366	-	-	-	-	-
4A21	a)	7,368	7,364	7,366	7,365	7,380	0,15	0,13	0,09	0,09	0,155
	b)	7,365	7,358	7,366	7,385	-	-	-	-	-	-
4A22	a)	7,377	7,362	7,360	7,360	7,382	0,155	0,14	0,105	0,07	0,045
	b)	7,367	7,361	7,362	7,372	-	-	-	-	-	-
4A23	a)	7,370	7,368	7,360	7,360	7,364	0,10	0,08	0,10	0,13	0,15
	b)	7,374	7,358	7,360	7,370	-	-	-	-	-	-
4A24	a)	7,373	-	7,355	-	7,372	0,09	-	0,04	-	0,04
	b)	7,382	-	7,368	-	7,375	-	-	-	-	-
4A25	a)	7,352	-	7,350	-	7,379	0,10	-	0,17	-	0,13
	b)	7,362	-	7,353	-	7,382	-	-	-	-	-
4A26	a)	7,357	-	7,362	-	7,363	0,14	-	0,05	-	0,06
	b)	7,486	-	7,361	-	7,367	-	-	-	-	-
4A27	a)	7,371	-	7,355	-	7,375	0,07	-	0,06	-	0,11
	b)	7,377	-	7,355	-	7,374	-	-	-	-	-
4A28	a)	7,375	-	7,359	-	7,372	0,15	-	0,08	-	0,03
	b)	7,381	-	7,362	-	7,368	-	-	-	-	-

5. Bestrahlungseinrichtung

5.1 Versuchseinsatz

Für das vorstehend beschriebene Bestrahlungsexperiment wurden Einsätze des seit Anfang 1967 laufenden Natrium-Blei-Wismut-Doppelkapseltypes eingesetzt. Nach Bewährung in Versuchsgruppe 3 (13 KVE) wurde dieser Kapseltyp für die Versuchsgruppe 4a voll übernommen.

Der Aufbau der Bestrahlungskapsel ist der folgende (Abb. 3):

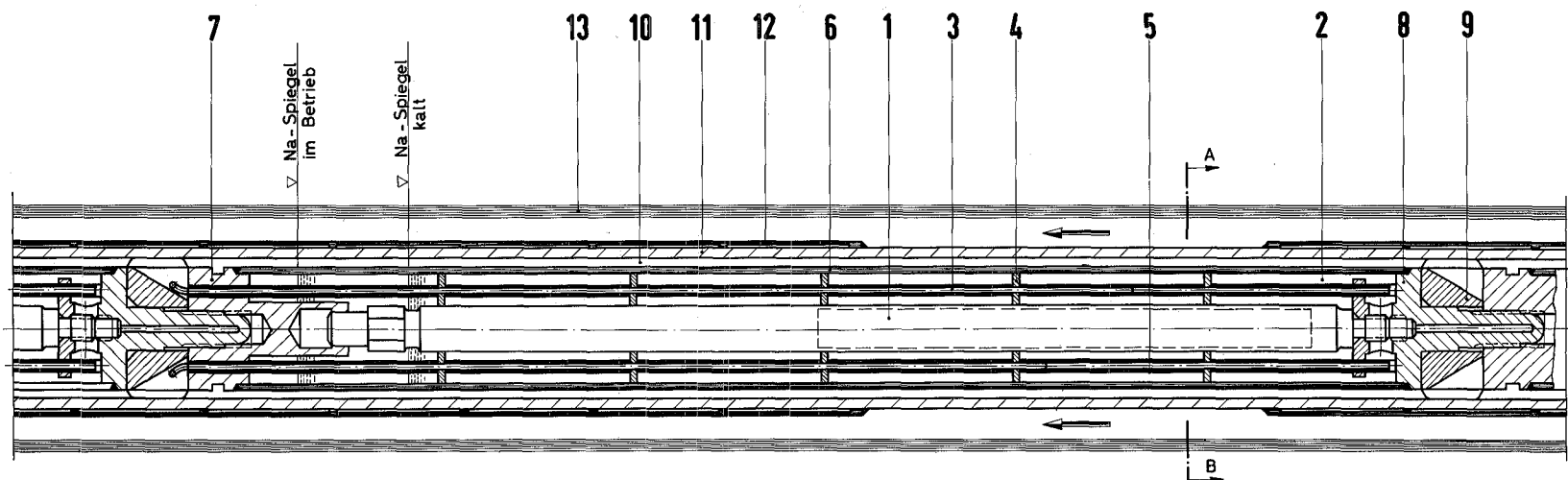
Der Brennstab befindet sich in einer Edelstahlkapsel von 20 mm Außendurchmesser und 1 mm Wandstärke. Der Ringspalt zwischen Prüfling und Kapsel ist mit Natrium gefüllt. Drei solche Na-Kapseln sitzen i.a. übereinander in einem ca. 3 m langen äußeren Zircaloy-2-Kapselrohr. Der 1,5 mm starke Spalt zwischen Innen- und Außenkapsel ist mit der eutektischen Blei-Wismut-Legierung ausgefüllt. Um eine starke Konvektion im Natrium zu vermeiden, wurde dieses durch Einbau von 2 dünnwandigen Edelstahl-Zwischenrohren in 3 radiale Zonen unterteilt. Die Zwischenrohre haben Durchmesser von 10 bzw. 14 mm, sie sind innerhalb bzw. außerhalb der Thermoelement-Tauchrohre angeordnet. In Abb. 4 ist der gesamte Kapselaufbau in schematischer Darstellung gezeigt.

5.2 Bestrahlung im FR 2

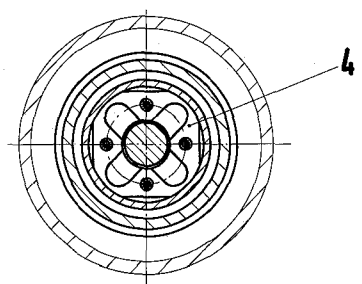
Der in 5.1 beschriebene Kapselversuchseinsatz (KVE) wurde im FR 2 in Karlsruhe auf verschiedenen Isotopen- und auf 6 Brennelement-Positionen (Tab. VIII) bestrahlt. Ein KVE kann maximal 4 Prüflinge aufnehmen. Die KVE 35, 36, 37 und 40 enthielten 4, die KVE 33, 34, 35, 38, 41 und 45 nur 3 Prüflinge. Bei den letzteren wurde jeweils der obere Prüfling durch eine Blindprobe ersetzt.

Die Bestrahlungszeiten schwankten je nach dem erwünschten Abbrand zwischen 57 und 578 Tagen (Vollastäquivalent).

In Abb. 5 ist eine Core-Positionskarte des FR 2 mit den Bestrahlungspositionen der 9 verschiedenen KVE's dargestellt. Die einzelnen KVE's wurden in den Abschaltphasen des Reaktors je nach den gewünschten Bestrahlungsdaten auf diesen Positionen umgesetzt; so befand sich z.B. der KVE 33 auf Position 34/18, einer BE-Position, während z.B. KVE 34 auf den Positionen 61/21, 53/31, 57/13 bestrahlt wurde.



Schnitt A-B



- 1 Brennstabsprüfling mit Spaltgasplenum 7,4mm Can^φ
- 2 Na- bzw. NaK-Spalt 5,3mm dick
- 3 Thermoelement 1mm^φ in Fingerhutröhrchen
- 4 Zentrierplatten
- 5 Distanzhalter
- 6 Edelstahlkapsel 20mm^φ x 1 mm Wand
- 7 Endstopfen
- 8 Na- Einfüllstopfen
- 9 Zwischenstück
- 10 Pb-Bi- Spalt 1,5mm dick
- 11 Äußere Kapsel 26mm^φ x 1,5mm Wand
- 12 Wärmedämmung
- 13 Wasserführungsrohr 40mm^φ x 2mm Wand

Abb. 3

Teil	Stück	Benennung	Werkstoff	Abmessung				Zeichungs-Nr. Norm	Bemerkung
				als 6	als 6	als 20	als 200		
0berflächenzeichn.	~	▽	▽▽	▽▽▽	▽▽▽▽	▽▽▽▽▽			
Rundheits anst. in n	1000	40	10	9	1,4				
1966	Tag	Name	Werkstoff	Gesellschaft für Kernforschung in. B. H.				Zugeh. Zeich.	
SPZ	23.9.	Spezialanfert.		7500 Karlsruhe Postfach 947				Ersatz für Ersatz durch	
SPZ								Zeichnungs-Nr. IRE.2- PSB41.06-2-2003	
Maßstab	Benennung		Ausschnitt aus der komb. Na-Pb/Bi-Kapsel						
2:1									

Die hier beschriebene Anlage ist ein Modell, das zur Darstellung der äußeren Form und der allgemeinen Anordnung der Bauteile dient. Es ist nicht für die Ausführung von Arbeiten geeignet. Die Ausführung der Anlage ist Sache der Auftraggeber. Die hier beschriebene Anlage ist ein Modell, das zur Darstellung der äußeren Form und der allgemeinen Anordnung der Bauteile dient. Es ist nicht für die Ausführung von Arbeiten geeignet. Die Ausführung der Anlage ist Sache der Auftraggeber.

Druck	Zeichn.	Änderung	Tag	Name

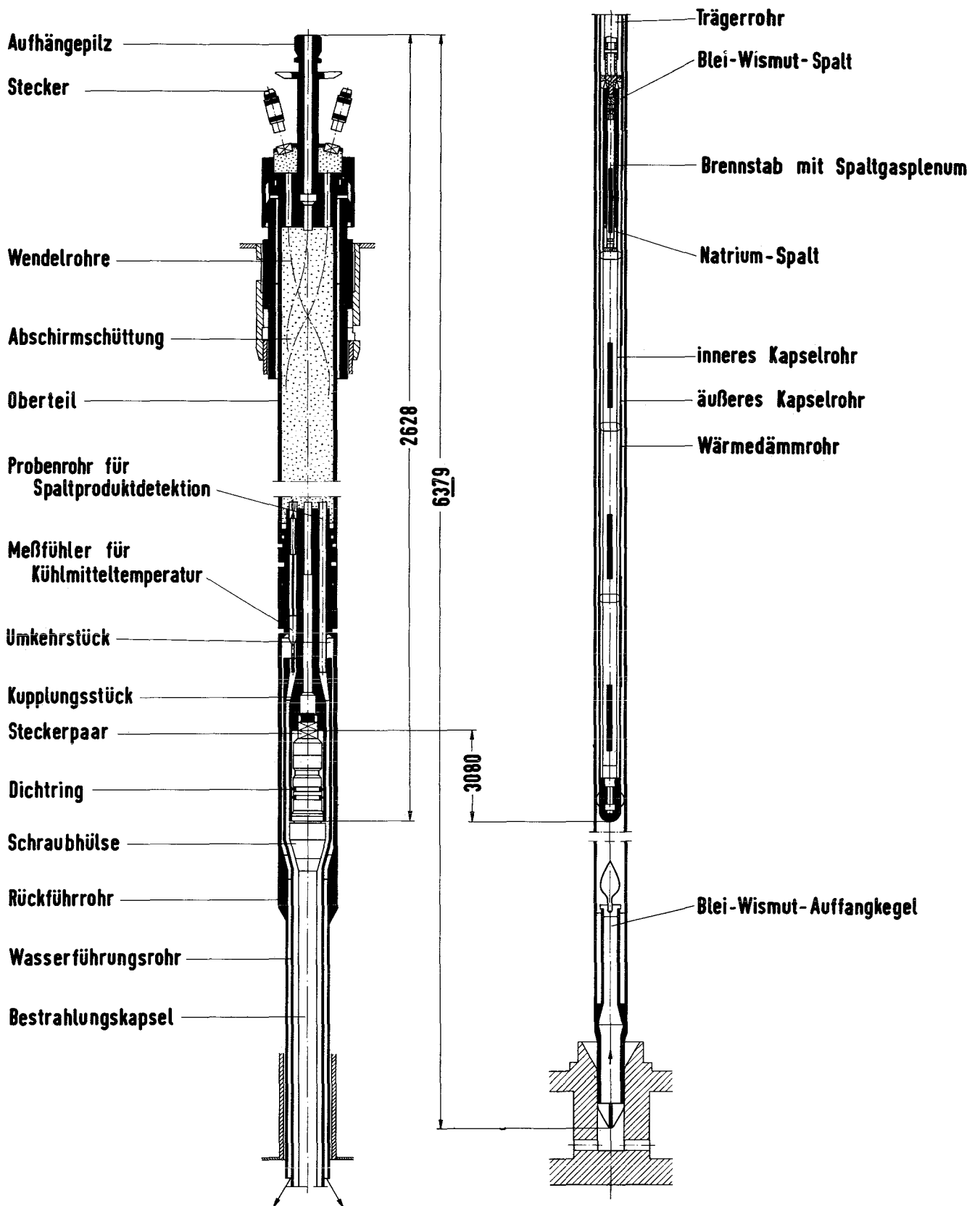


Abb. 4 Schematische Darstellung des FR 2-Kapselversuchseinsatzes

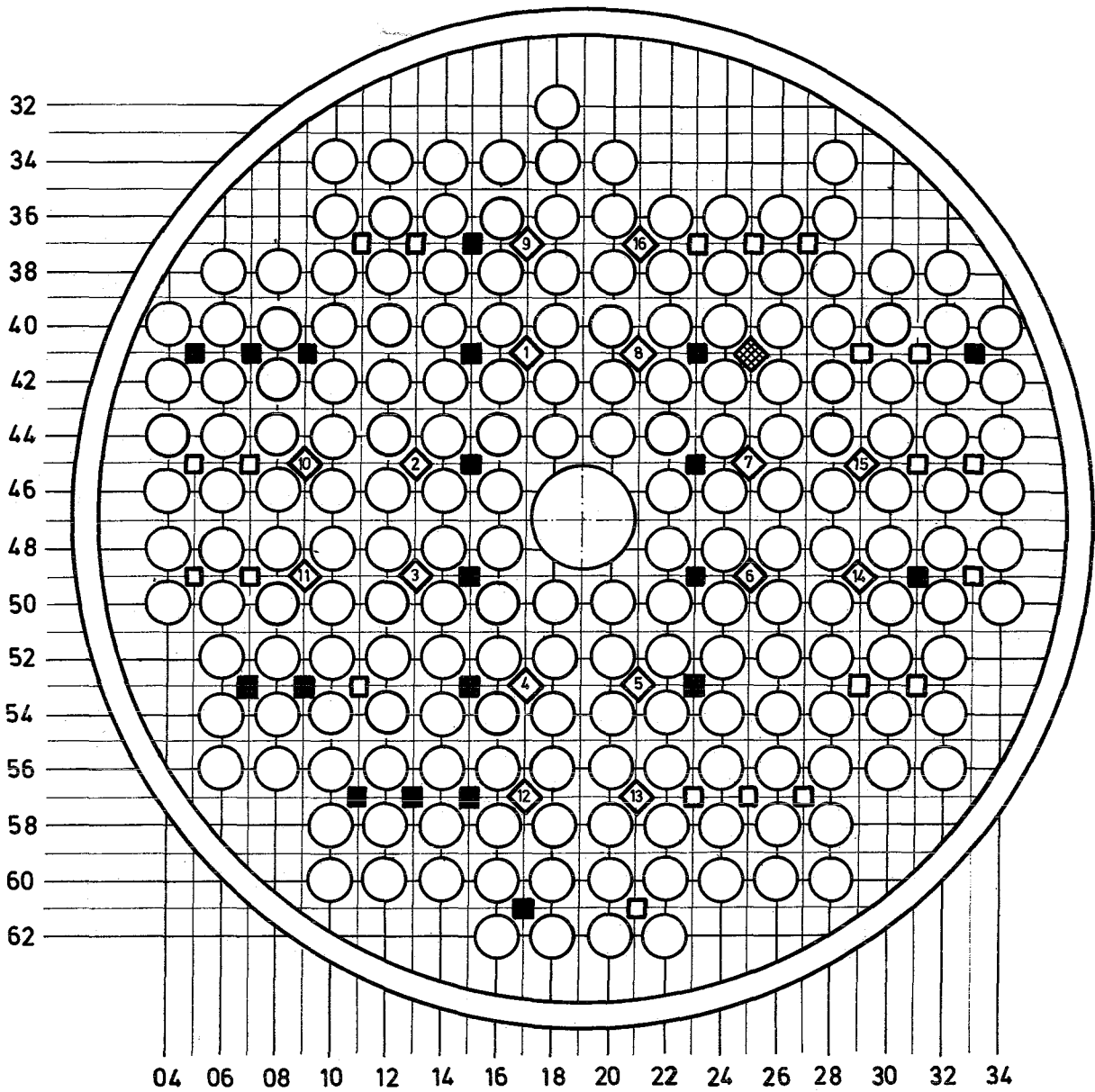
Tabelle VIII Bestrahlungsablauf der Kapselversuchseinsätze der Kapselversuchsgruppe 4a
(Bestrahlungspositionen im FR 2-Core)

Zyklus	1968										1969										1970				
	B	C	D	E	F	H	I	K	L	A	B	C	D	E	G	H	I	K	L	A	B	C	D	E	
Voll- last- tage	30,1	29,9	30,8	30,1	29,6	24,5	29,7	30,0	37,9	29,5	29,8	29,7	30,9	29,2	24,2	36,3	24,5	28,0	22,6	28,8	19,9	29,9	32,9	29,2	
KVE- Nr.	3-0	1-1	5-0	3-0	1-3	0-2	1-1	0-3	0-1	2-0	2-2	1-2	1-1	6-2	0-4	1-3	2-1	1-6	1-1	4-1	2-0	3-0	2-3	2-0	
33	34	34																							
	18	18																							
34	-	61	53	57	57	57	57																		
	-	21	31	13	13	13	13																		
35	-	49	45	45	45	45																			
	-	33	31	31	31	31																			
36			61	37	37	37	37	37																	
			21	13	13	13	13	13																	
37			53	53	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	50	50									
			31	31	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	22	22									
38			61	61	61	45	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	
			21	21	21	31	22	22	22	22	22	22	22	22	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	
40							61	57	57	57	50	50	50	50	50	44	37	44	44	44	44	44	44	44	
							21	13	13	13	12	12	12	12	12	22	18	22	22	22	22	22	22	22	
41							45	45	45	37	37	37	37	45	57	57	44	44							
							5	5	5	13	13	13	13	5	23	23	16	16							
45									45	44															
									31	26															

○ Brennelementposition
 ◇ Trimm-Abschaltstab
 ◆ Feinregelstab
 □ Isotopenkanal-Position
 ■ zu Flußmessungen benutzte Isotopenkanal-Positionen

Positionskarte FR 2-Core

†s = Schnellschluß
 A = Abschaltung anomal



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

Abb. 5: Positionskarte
FR 2 - Core

6. Ablauf der Bestrahlung

6.1 Reaktorzyklen und Neutronenfluß

Die Bestrahlung der Prüflinge der Kapselversuchsgruppe 4a begann mit dem Einsatz von KVE 33 am 29.1.1968 in Zyklus B/1968 und endete mit dem Ausbau von KVE 40 am 13.7.1970 (Zyklus E/1970). Die vorgesehenen Bestrahlungszeiten konnten lediglich bei zwei Kapseln (KVE 36 und 45) nicht erreicht werden, da infolge von Überhitzung die Bestrahlung abgebrochen werden mußte. In Tabelle VIII ist der Bestrahlungsablauf der einzelnen Kapselversuchseinsätze zusammengestellt. Der Bestrahlungsablauf ist gekennzeichnet durch den Bestrahlungszeitraum, die Core-Position, deren unterschiedliche Flußniveaus die verschiedenen Stableistungs- und Temperaturverläufe nach Umsetzen der KVE erklären sowie die Anzahl Reaktorzyklen und Abschaltungen bzw. Schnellschlüsse während dieser Zyklen, die ein qualitatives Maß für die thermisch-zyklische Belastung der Prüflinge darstellen. Bei den Abschaltungen sind sämtliche Leistungsreduktionen auf Leistungen $N < 10^{-3} N_{\text{nom}}$ mit $N_{\text{nom}} = 44 \text{ MW}$ Nominalleistungen berücksichtigt. Schließlich ist die Bestrahlungsdauer in Tagen Vollastäquivalent, bezogen auf 44 MW, angegeben, welche für die thermische Abbrandberechnung (s. Kap. 6.3) herangezogen wird.

Im Bestrahlungszeitraum der Versuchsgruppe 4a sind verschiedene Messungen des thermischen Flusses in den Isotopenkanal-Positionen des FR 2 (vergl. Abb. 5) durchgeführt worden [5]. Es handelt sich um Messungen des vertikalen Flußverlaufes, bei denen Co-Sonden als Flußdetektoren eingesetzt wurden. In Tabelle IX und Abb. 6 sind die Flußwerte der verschiedenen Messungen in den Isotopenkanälen in Höhe der Prüflingsmitten zusammengestellt. Unter den Flußwerten ist der Zeitpunkt der Messung sowie die Stellung der Trimmabschaltstäbe (TA) in mm angegeben.

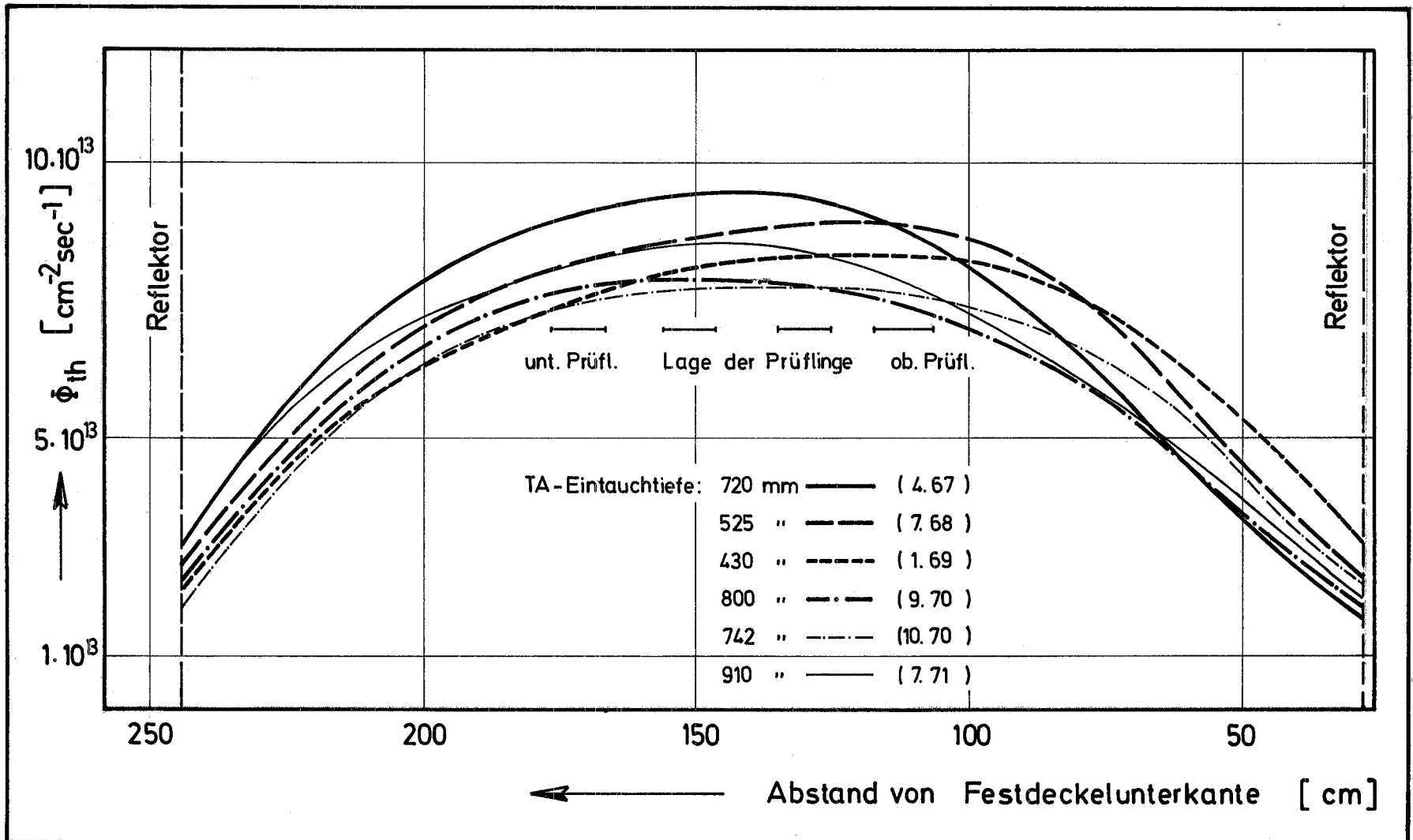
Die Auswertung der Messungen zeigt über einen längeren Zeitraum im Mittel keinen ausgeprägten Trend nach niedrigeren Flüssen. Den Messungen mit gleichmäßiger TA-Eintauchtiefe entnimmt man, wie der Fluß sich mit wachsender Eintauchtiefe in den unteren Core-Bereich verschiebt. Der Fluß kann sich hierbei um bis zu 50 % verändern (s. Spalte 49/23 der Tabelle IX).

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

Iso. $\dot{\phi}_{th}$	37/15	41/05	41/07	41/09	41/15	41/23	41/33	45/15	45/23	49/15	49/23	49/31	53/07	53/09	51/15	53/23	57/13	57/15	61/17
	7,9 (7/68) 525 mm	4,2 (3/67) 1020mm	6,2 (4/67) 720 mm	7,1 (4/67) 720 mm	8,9 (4/67) 720 mm	7,3 (4/67) 720 mm	4,4 (7/68) 525 mm	9,0 (4,67) 720 mm	7,8 (4/67) 720 mm	8,8 (4/67) 720 mm	8,3 (4/67) 635 mm	5,3 (4/67) 720 mm	6,9 (7/68) 525 mm	6,8 (4/67) 720 mm	8,2 (4/67) 720 mm	6,8 (4/67) 720 mm	6,3 (4/67) 720 mm	6,8 (4/67) 720 mm	5,0 (7/68) 525 mm
	7,5 (1/69) 430 mm	4,7 (4/67) 640 mm		7,4 (7/68) 525 mm	8,8 (7/68) 525 mm		4,9 (1/69) 430 mm	8,9 (7/68) 525 mm		8,9 (7/68) 525 mm	6,2 (3/67) 1020mm	6,5 (7/68) 525 mm		7,6 (7/68) 525 mm	8,6 (7/68) 525 mm	7,3 (7/68) 525 mm		7,3 (7/68) 525 mm	
				7,1 (1/69) 430 mm	7,9 (1/69) 430 mm			8,4 (1/69) 430 mm		8,3 (1/69) 430 mm								7,5 (1/69) 430 mm	
	8,2	5,0	6,7	8,1	9,6	8,6	4,6	9,6	8,7	9,4	8,6	6,4	7,1	7,4	8,7	7,4	6,8	7,3	5,1
	7,5	5,0		7,5	9,0		5,1	8,9		8,9	7,7	6,6		7,6	8,6	7,3		7,4	-30-
				7,1	8,0			8,3		8,3								7,7	
	8,1	5,4	6,8	8,2	9,8	9,3	4,6	9,7	9,1	9,4	8,6	7,0	7,0	7,4	8,8	7,6	6,9	7,4	5,1
	7,3	4,8		7,4	8,9		5,0	8,7		8,6	8,8	6,6		7,3	8,3	7,2		7,2	
				6,9	7,8			8,0		8,1							7	7,5	
	7,6	5,6	6,6	7,9	9,5	9,3	4,4	9,4	9,1	9,1	8,3	7,1	6,6	7,1	8,4	7,4	6,6	7,0	5,0
	6,8	4,7		7,0	8,3		4,7	8,2		8,3	9,4	6,3		6,8	7,8	7,0		6,7	
				6,5	7,3			7,5		7,6								7,1	

Erläuterung:

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



Vertikaler Verlauf des thermischen Flusses
 Isotopenkanal 49 / 15

Abb. 6

Wie neuere Rechnungen mit dem Zellprogramm WIMS [6] zeigen, beträgt die Flußabschwächung entgegen den Annahmen bei der Auslegung in der Na/PbBi-Doppelkapsel tatsächlich etwa 30 %. Die Flußmessungen zeigen weiterhin, daß der Fluß über die Prüflingslänge als nahezu konstant angenommen werden kann.

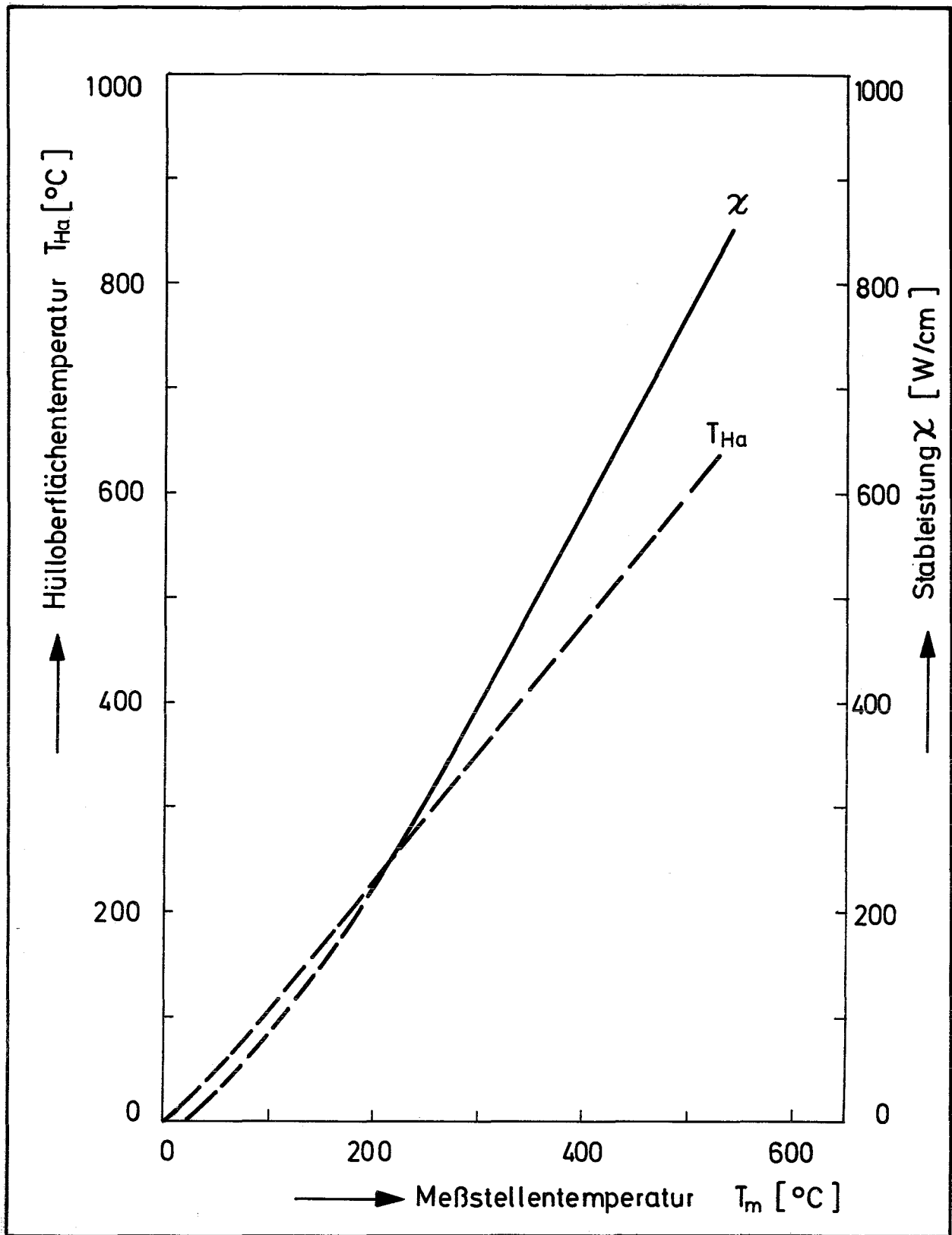
6.2 Temperatur und Stabileistung

Die bei den Bestrahlungen der Versuchsgruppe 4a verwendeten Na/PbBi-Doppelkapseln [7] sind mit Thermoelementen ausgestattet, welche die Messung der Na-Temperatur in Höhe der Bestrahlungsprüflinge gestatten. Aus diesem Meßwert kann die Hülloberflächentemperatur sowie die Stabileistung des Prüflings ermittelt werden. Wie Eichversuche zeigen, besteht gute Übereinstimmung zwischen experimentell und rechnerisch ermittelten Werten [8]. Abweichungen von maximal 20° rühren von der Einbringung der Thermoelemente in Tauchrohren mit 0,2 mm Spiel her. Der Gesamtfehler der Temperaturbestimmung wird auf $\pm 5\%$ abgeschätzt.

Die Umrechnung der Meßwerte erfolgt über die in Abb. 7 dargestellten Zusammenhänge zwischen Meßstellentemperatur T_m , Hülloberflächentemperatur T_{Ha} und Stabileistung X .

Die Auswertung der Meßwerte umfaßt tabellarische und grafische Darstellungen des zeitlichen und axialen Verlaufes der Hülloberflächentemperaturen und der Stabileistungen der einzelnen Prüflinge. Die geometrische Zuordnung der Meßwerte zu den Prüflingen ist aus dem Instrumentierungsplan (Tabelle X) ersichtlich. Die Zahlen neben den TE-Nummern bedeuten die Lage des Thermoelementes in mm vom unteren Prüflingsende entsprechend der Skizze.

In den Tabellen XI und XII sind die mittleren und maximalen Hülloberflächentemperaturen und Stabileistungen der Prüflinge für die einzelnen Bestrahlungszyklen zusammengestellt, während in den Abb. 8 - 22 der zeitliche Verlauf der Hülloberflächentemperaturen dargestellt ist. Wie die Abb. zeigen, treten während der Bestrahlung trotz konstanter Reaktorleistung einzelne Temperaturspitzen auf, deren Ursachen in Lageänderungen des Thermoelement-Meßpunktes durch radiale und axiale Verschiebungen, in Fehlmessungen der Thermoelemente sowie in lokalen Zustandsänderungen des Reaktors (Änderung der TA-Stabstellung) zu suchen sind. In den Abb. 23 - 27 ist schließlich der axiale Verlauf der



(T - χ) - Diagramm Kapsel 4 (Na) Abb. 7

Tabelle X

Instrumentierungsplan der Versuchsgruppe 4a

KVE

Höhen der TE \pm 1 mm

	33	34	35	36	37	38	40	41	45	
80	Prüfling TE			<u>4A/9</u>	<u>4A/19</u>		<u>4A/28</u>			
0	-	-	-	7/40	7/40	-	7/40	-	-	
80	<u>B 10</u>	<u>B 13</u>	<u>4A/4</u>	<u>4A/8</u>	<u>4A/16</u>	<u>4A/22</u>	<u>4A/25</u>	<u>4A/18</u>	<u>4B/29</u>	
0	6/40	6/40	6/40	6/55	6/55	6/40	6/55	6/40	(Vg. 4b)	
80				5/25	5/25		5/25		6/42	
0	<u>B 7</u>	<u>B 12</u>	<u>4A/2</u>	<u>4A/5</u>	<u>4A/15</u>	<u>4A/21</u>	<u>4A/26</u>	<u>4A/23</u>	<u>4B/28</u>	
80	5/70	5/65	5/65	4/55	4/55	5/65	4/55	5/65	(Vg. 4b)	
0	4/40	4/40				4/40		4/40	5/67	
80	3/15	3/15	3/15	3/25	3/25	3/15	3/25	3/15	4/42	
0									3/17	
80	<u>B 6</u>	<u>B 11</u>	<u>4A/1</u>	<u>4A/3</u>	<u>B 14</u>	<u>4A/20</u>	<u>4A/27</u>	<u>4A/17</u>	<u>4A/24</u>	
0	2/60	2/60	2/60			2/60		2/60	2/60	
80				2/55	2/55		2/55			
0				1/25	1/25		1/25			
80	1/20	1/20	1/20			1/20		1/20	1/22	
0										

Erläuterung:

Beispiel: KVE 33, B 6, 2/60: Thermoelement Nr. 2 in 60 mm Abstand vom unteren Brennstoffsäulenende

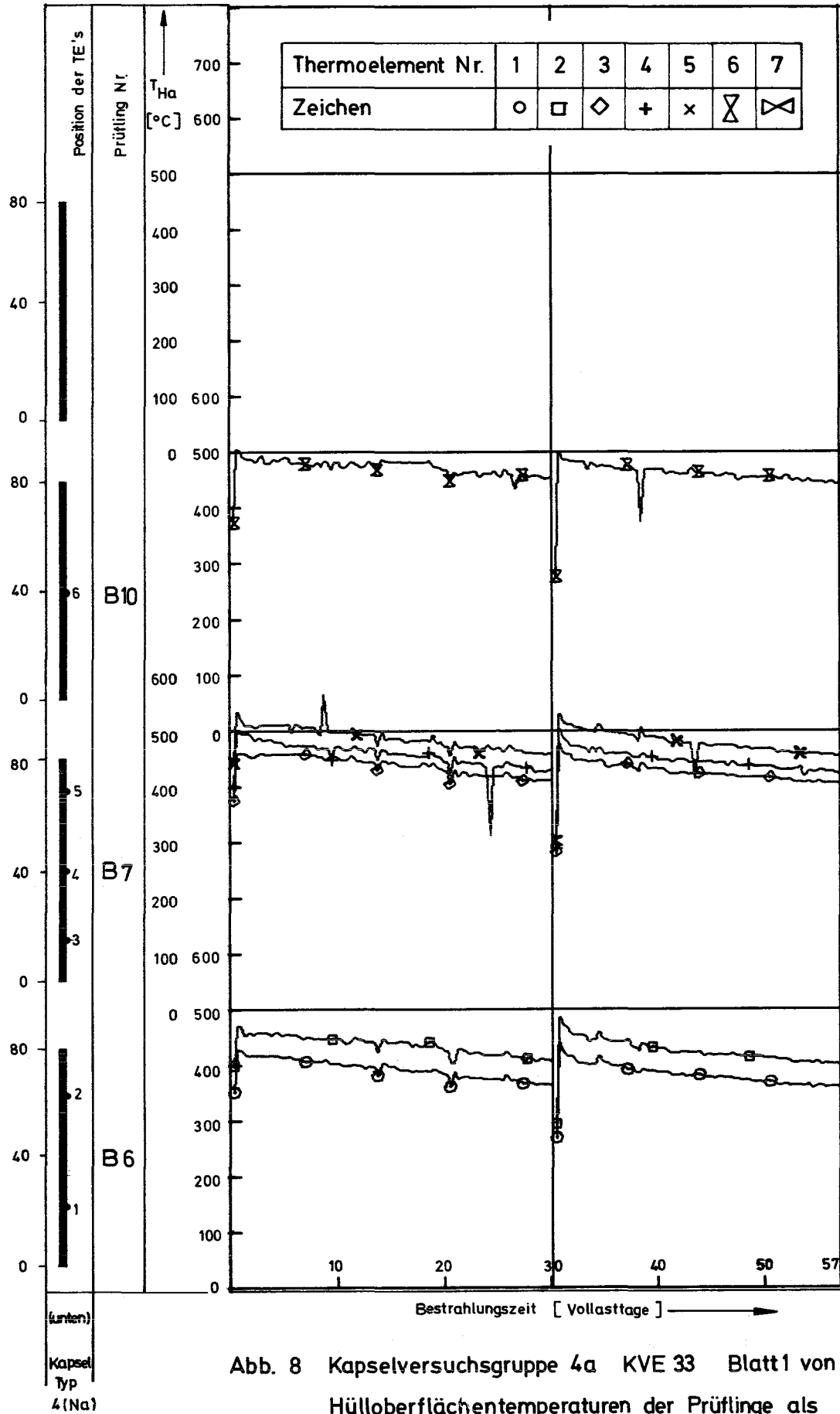
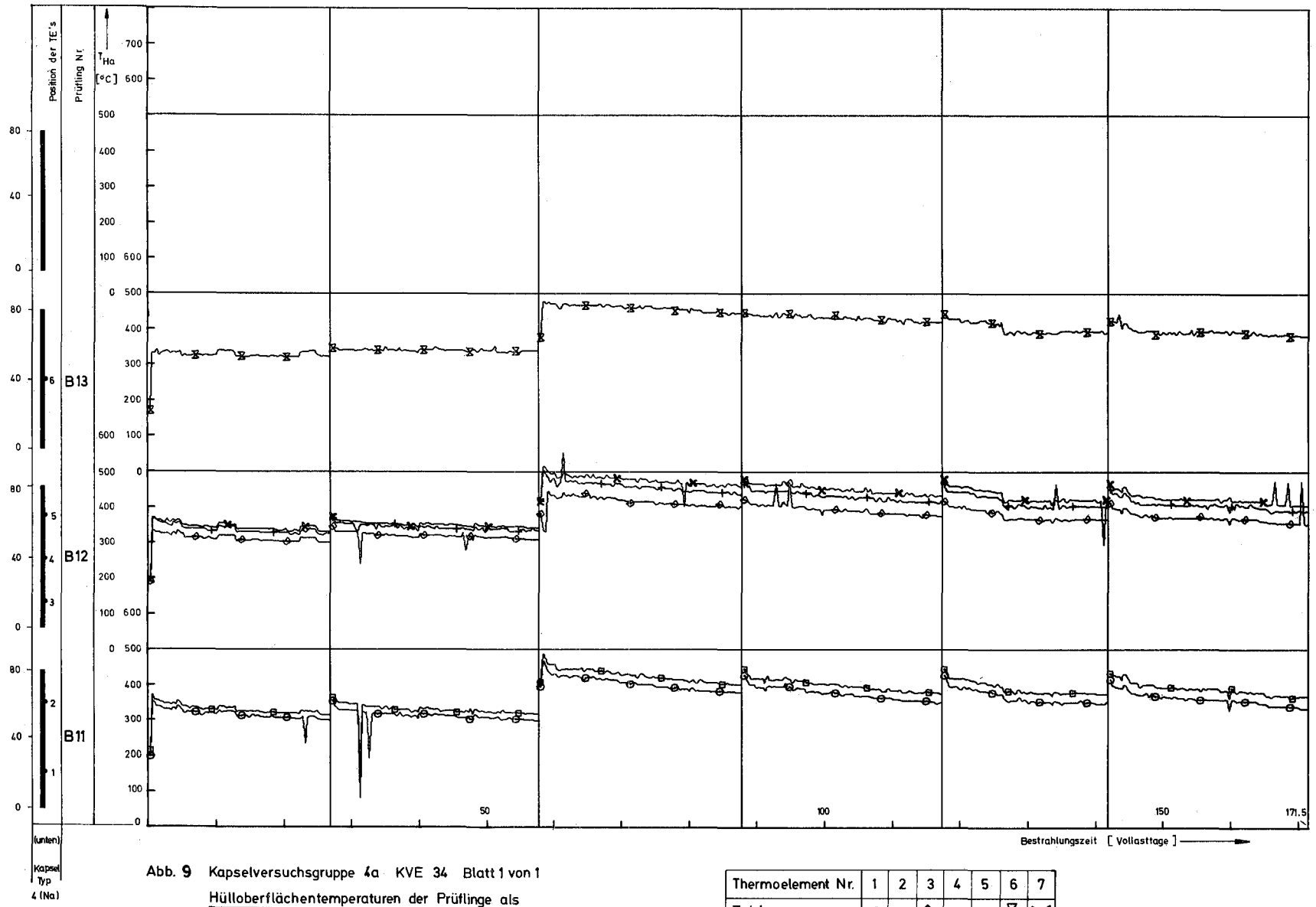


Abb. 8 Kapselversuchsgruppe 4a KVE 33 Blatt 1 von 1
Hüloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit



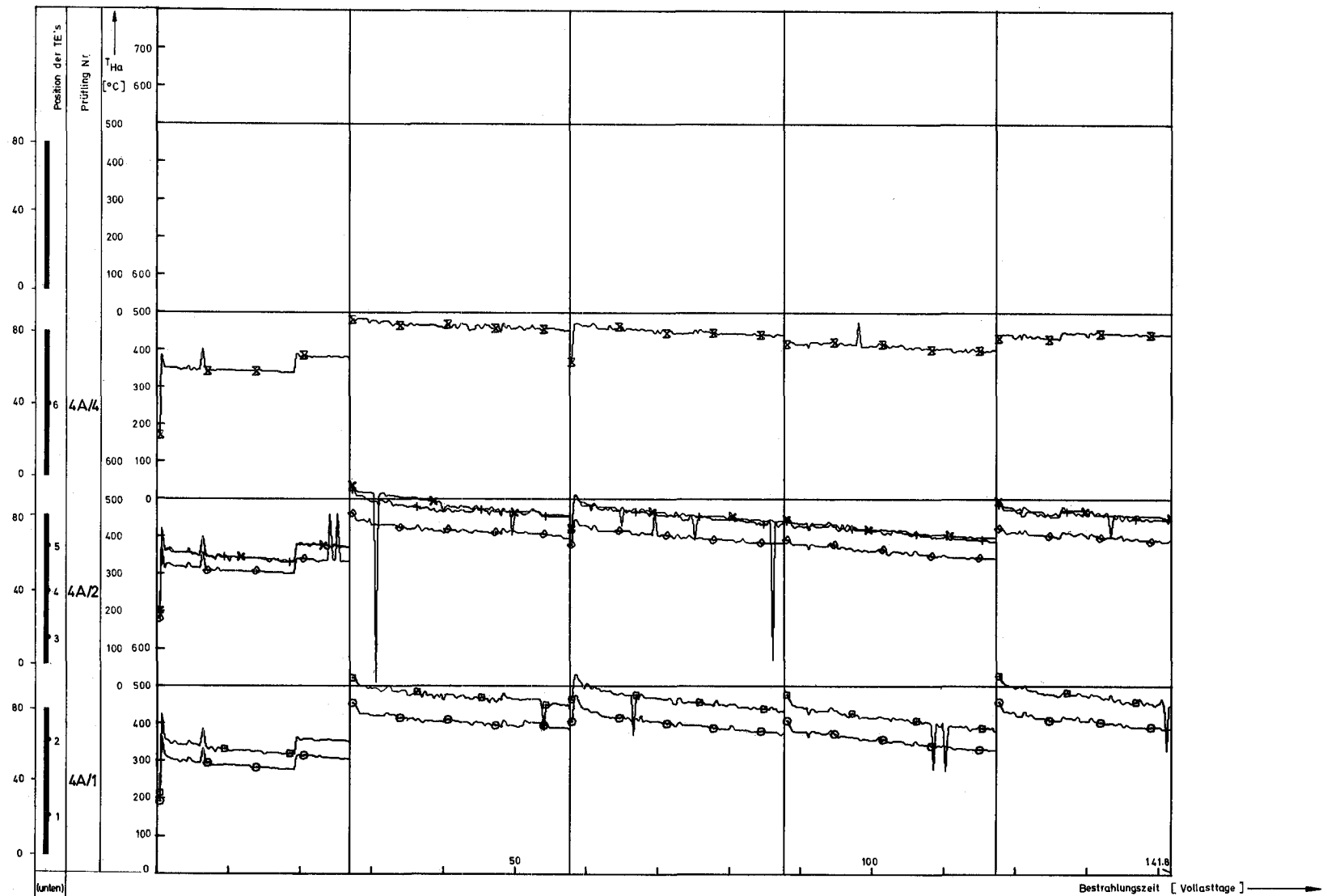


Abb. 10 Kapselversuchsgruppe 4a KVE35 Blatt1 von 1
Hülloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

Thermoelement Nr.	1	2	3	4	5	6	7
Zeichen	○	□	◇	+	x	⊗	⊙

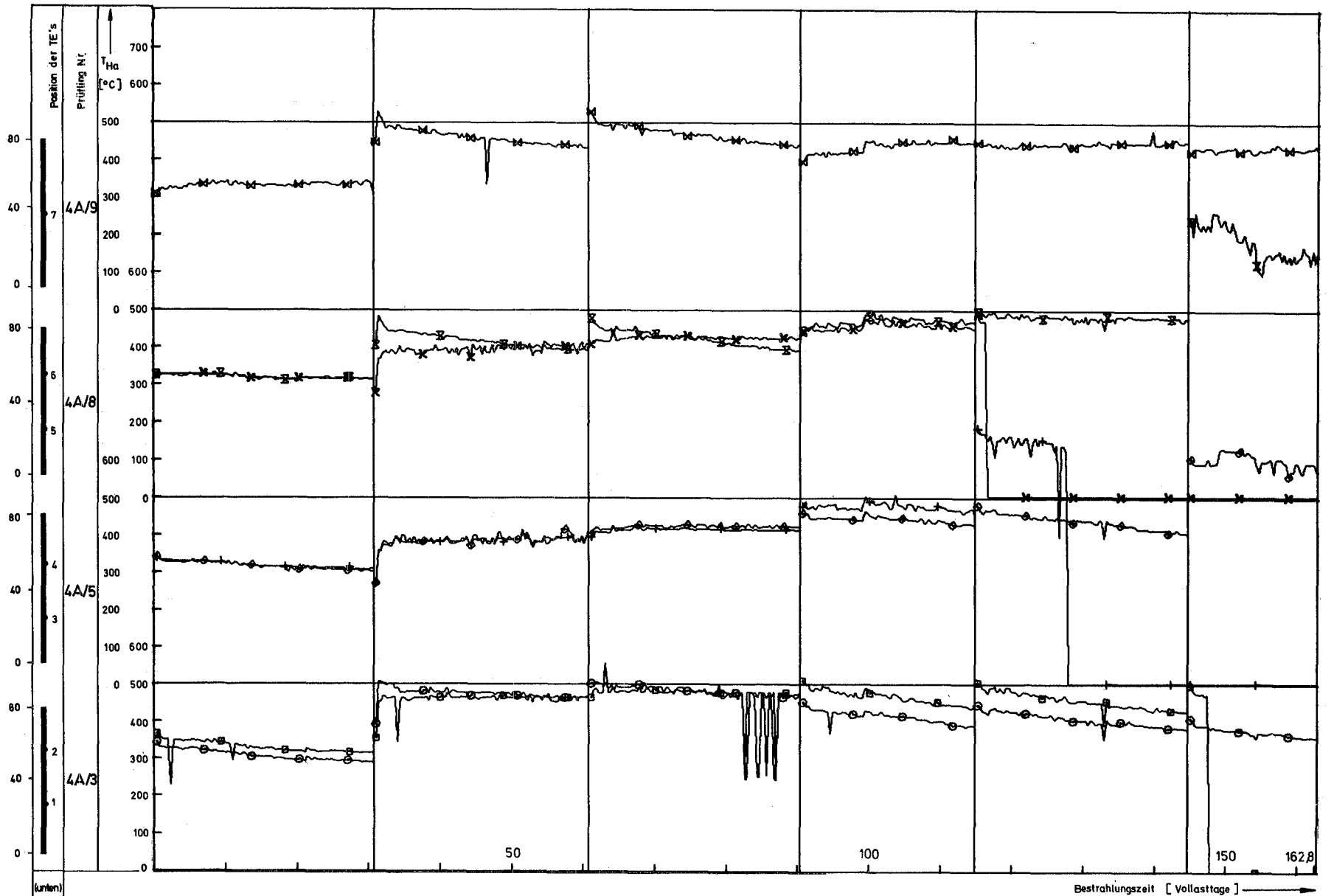
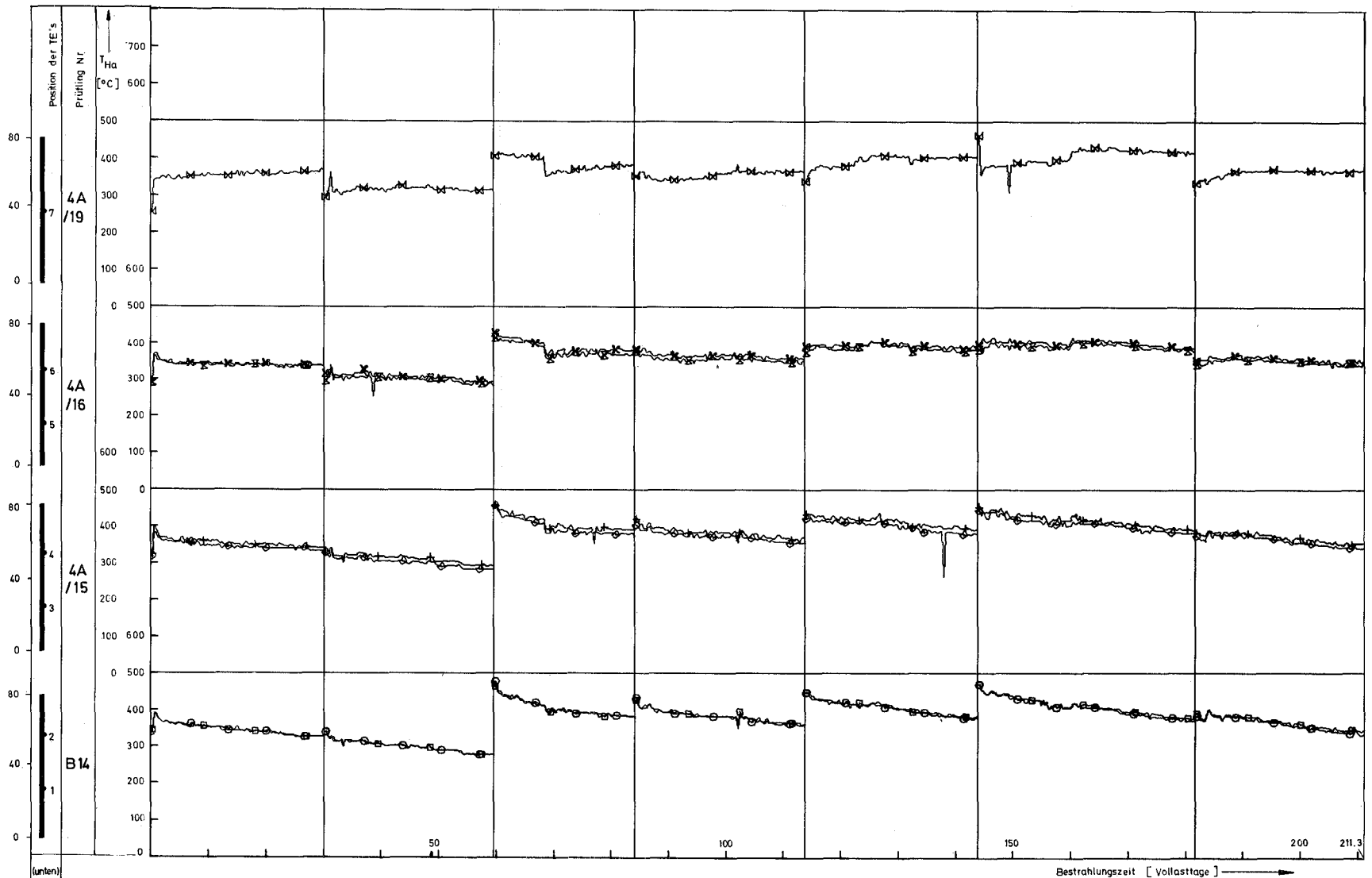


Abb. 11 Kapselversuchsgruppe KVE 36 Blatt 1 von 1
Hülloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

Thermoelement Nr.	1	2	3	4	5	6	7
Zeichen	○	□	◇	+	×	⊗	⊗



(unten)
Kapsel
Typ
4(Na)

Abb. 12 Kapselversuchsgruppe 4a KVE 37 Blatt 1 von 2
Hüloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

Thermoelement Nr.	1	2	3	4	5	6	7
Zeichen	○	□	◇	+	x	⊗	⊗

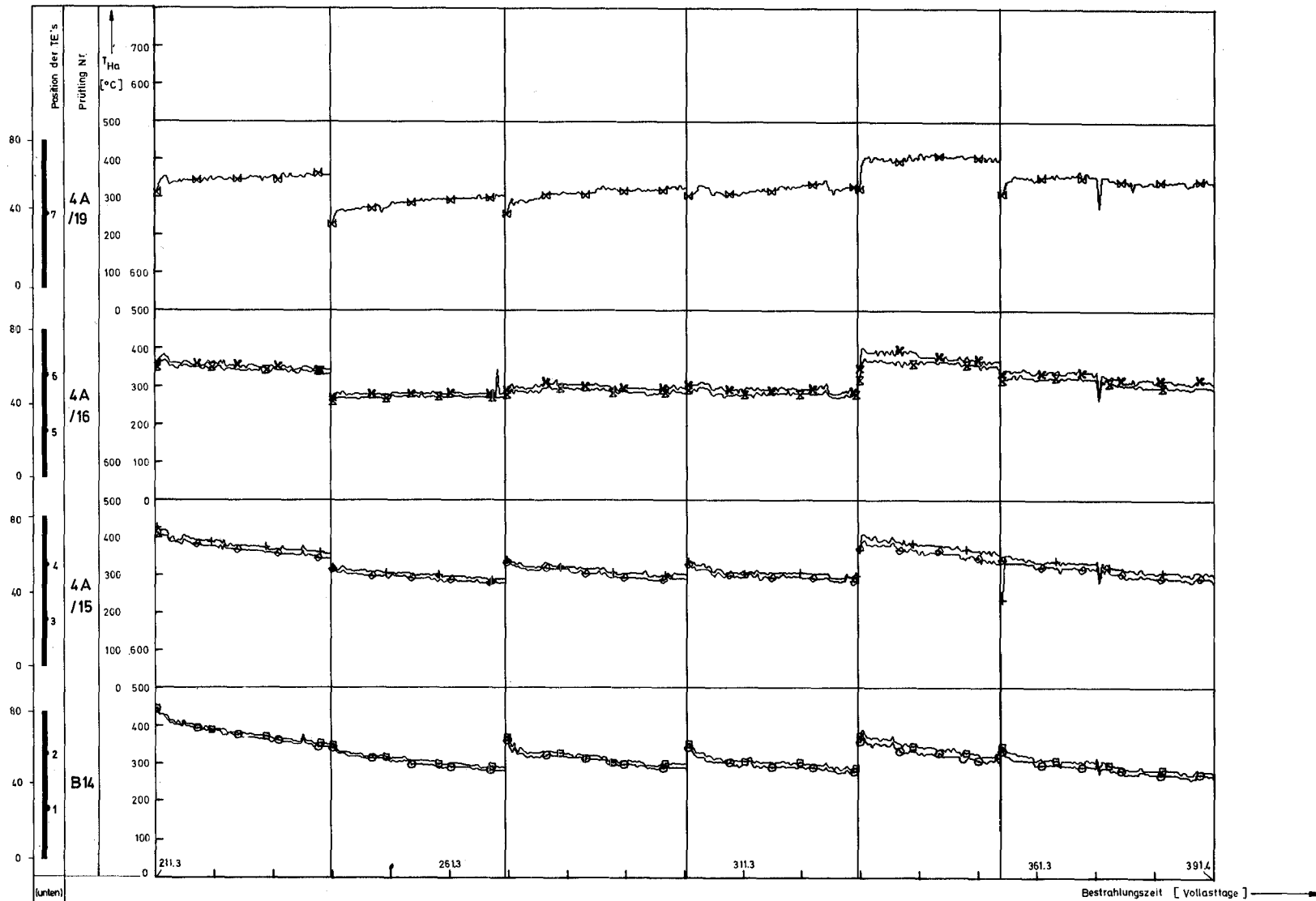


Abb. 13 Kapselversuchsgruppe 4a KVE 37 Blatt 2 von 2

Hüloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

Thermoelement Nr.	1	2	3	4	5	6	7
Zeichen	○	□	◇	+	x	⊗	⊗

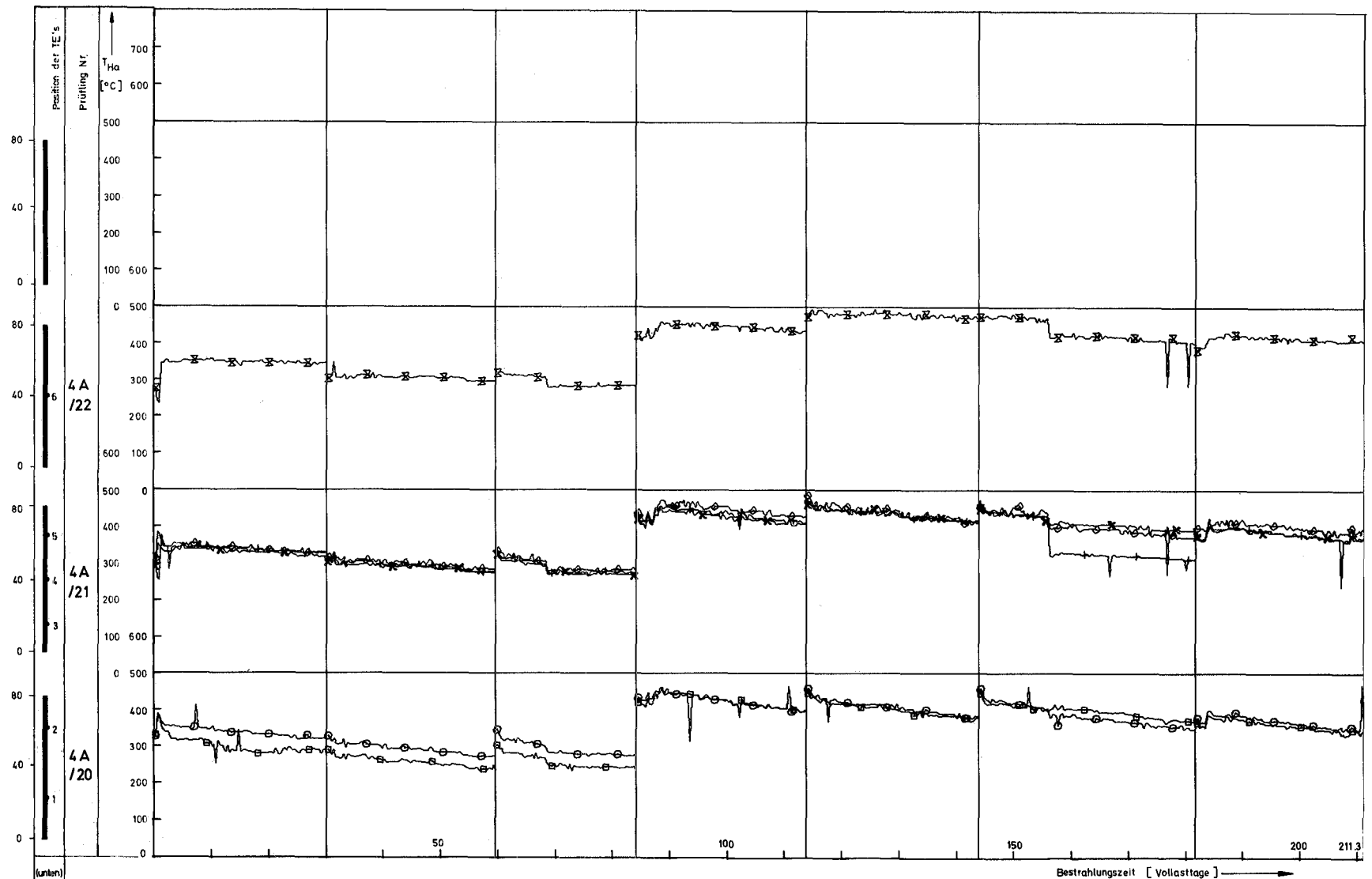


Abb. 14 Kapselversuchsgruppe 4a KVE 38 Blatt 1 von 3
Hüloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

Thermoelement Nr.	1	2	3	4	5	6	7
Zeichen	○	□	◇	+	×	⊗	⊗

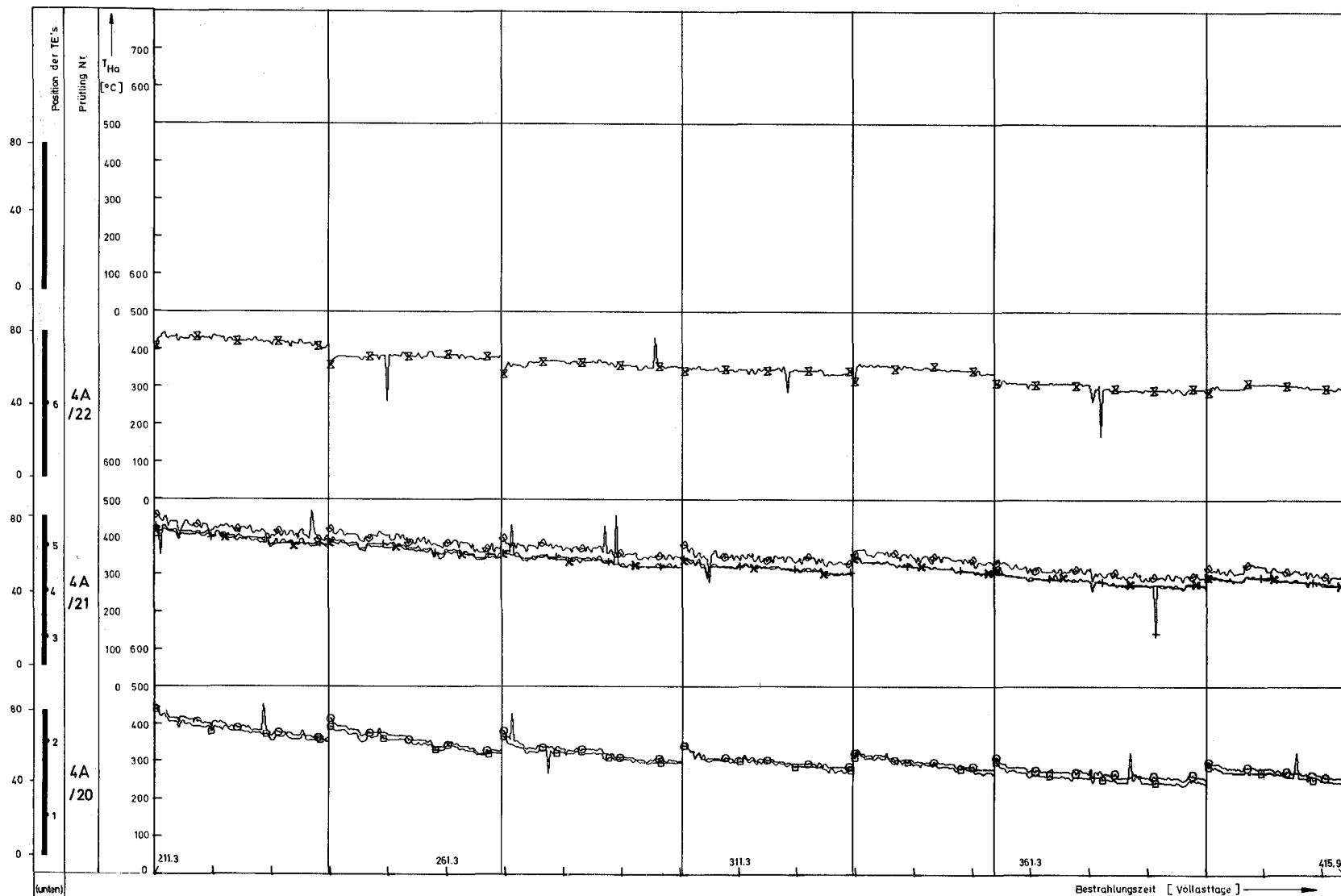


Abb. 15 Kapselversuchsgruppe 4a KVE 38 Blatt2 von 3
Hüloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

Thermoelement Nr.	1	2	3	4	5	6	7
Zeichen	○	□	◇	+	×	⊗	⊠

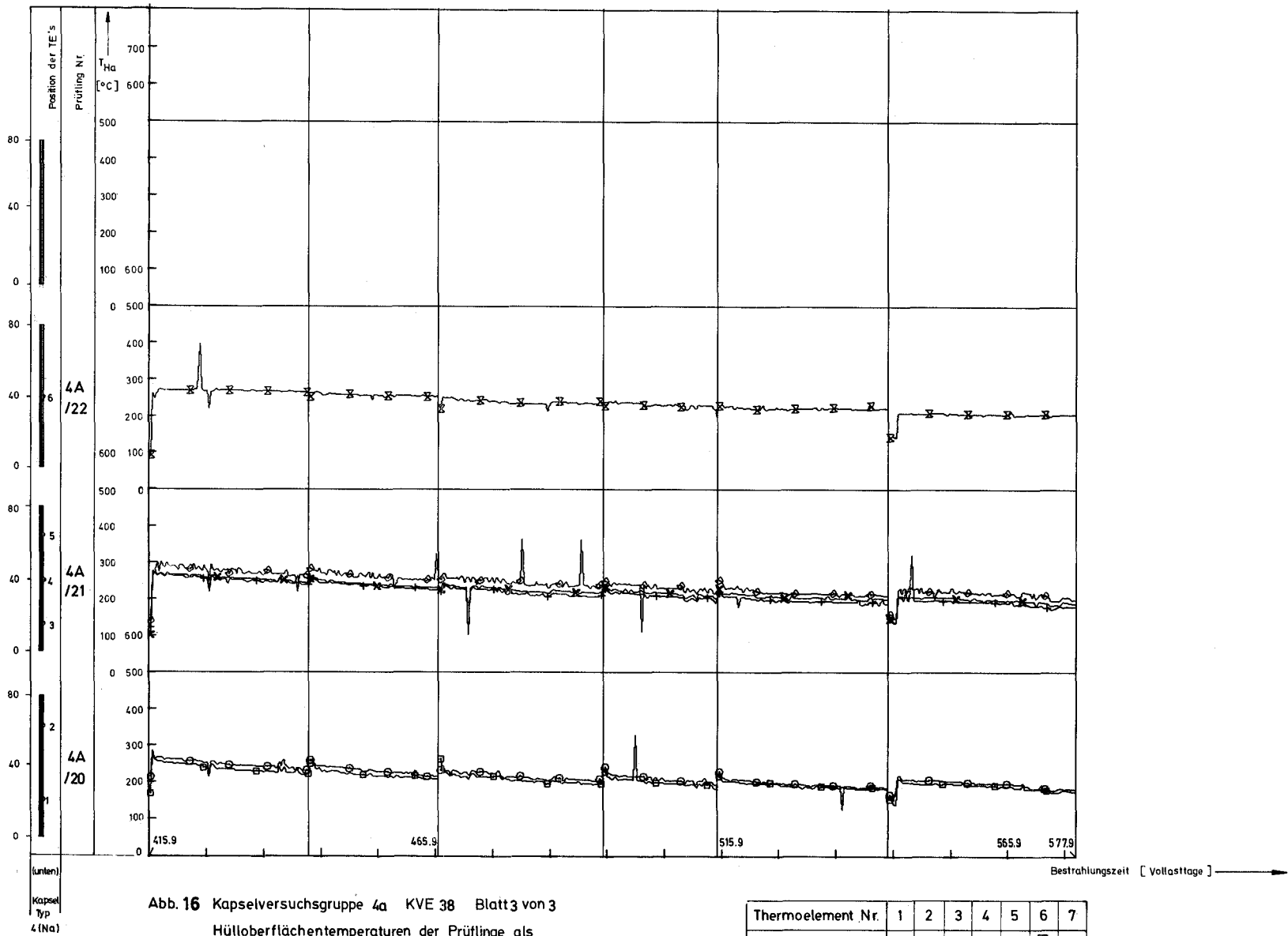


Abb. 16 Kapselversuchsgruppe 4a KVE 38 Blatt 3 von 3
 Hülloberflächentemperaturen der Prüflinge als
 Funktion der Zeit

Thermoelement Nr.	1	2	3	4	5	6	7
Zeichen	○	□	◇	+	x	⊗	⊗

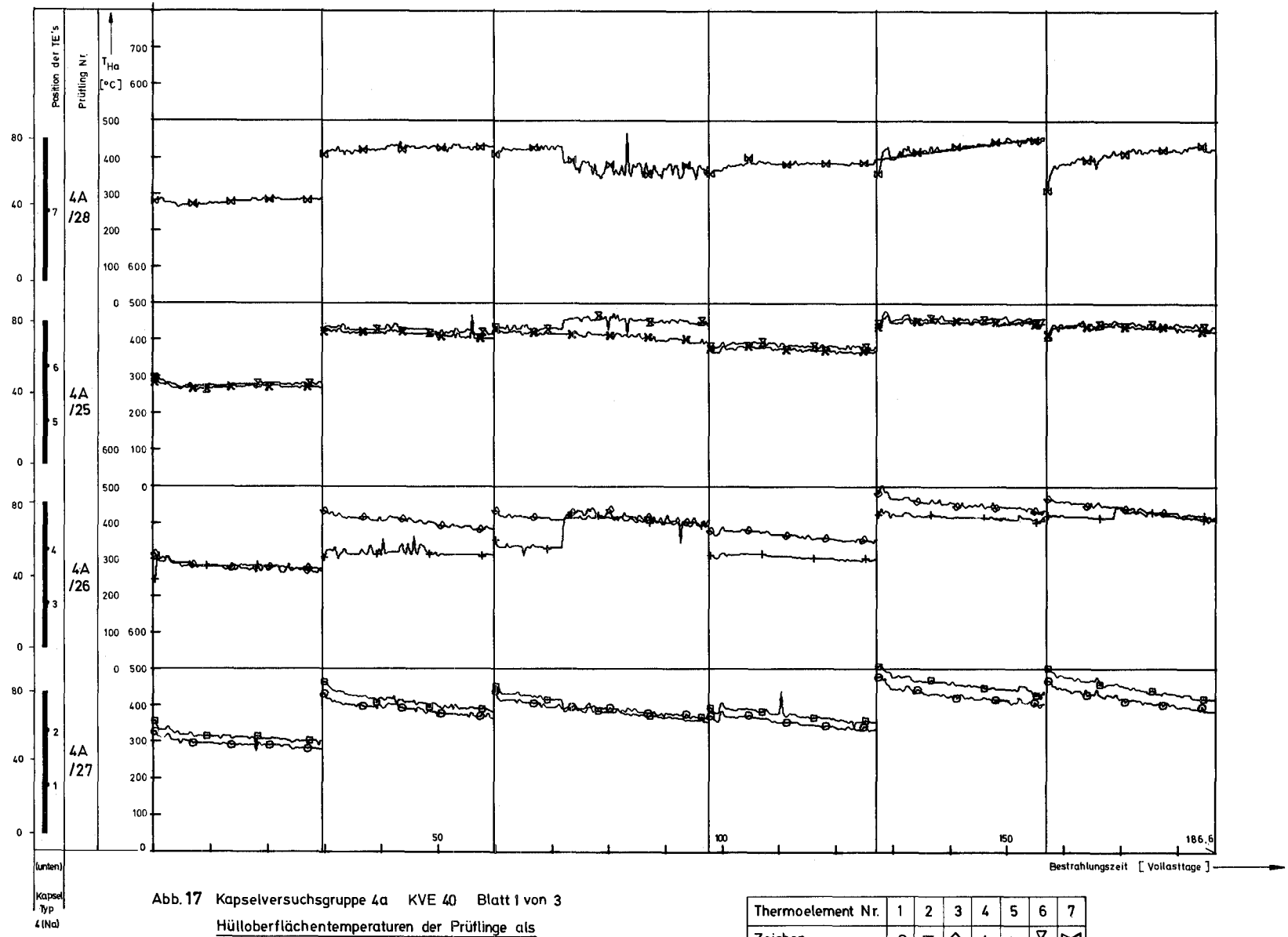


Abb. 17 Kapselversuchsgruppe 4a KVE 40 Blatt 1 von 3
Hüloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

Thermoelement Nr.	1	2	3	4	5	6	7
Zeichen	○	□	◇	+	×	⊗	⊗

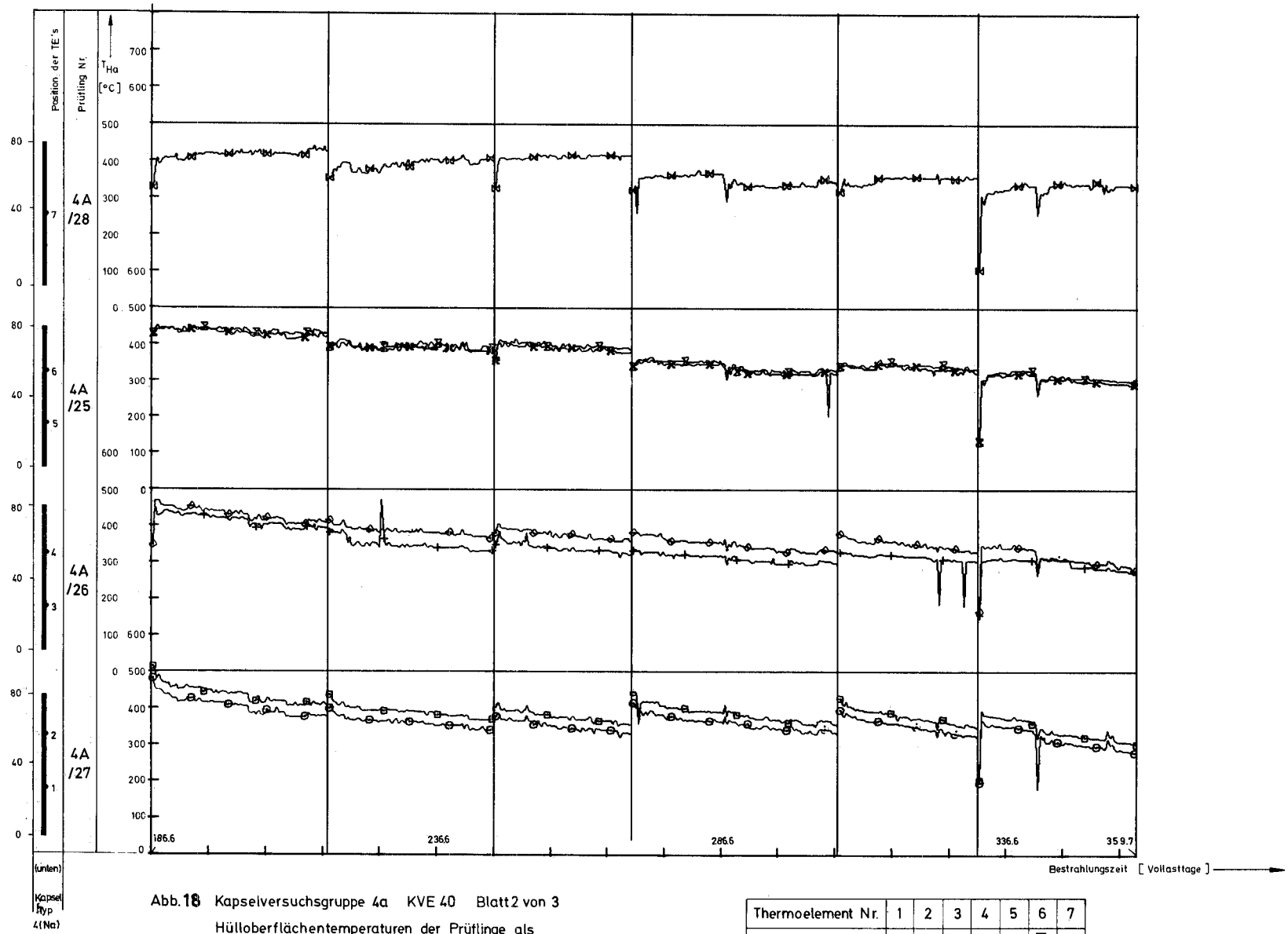


Abb.18 Kapselversuchsgruppe 4a KVE 40 Blatt 2 von 3
Hüloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

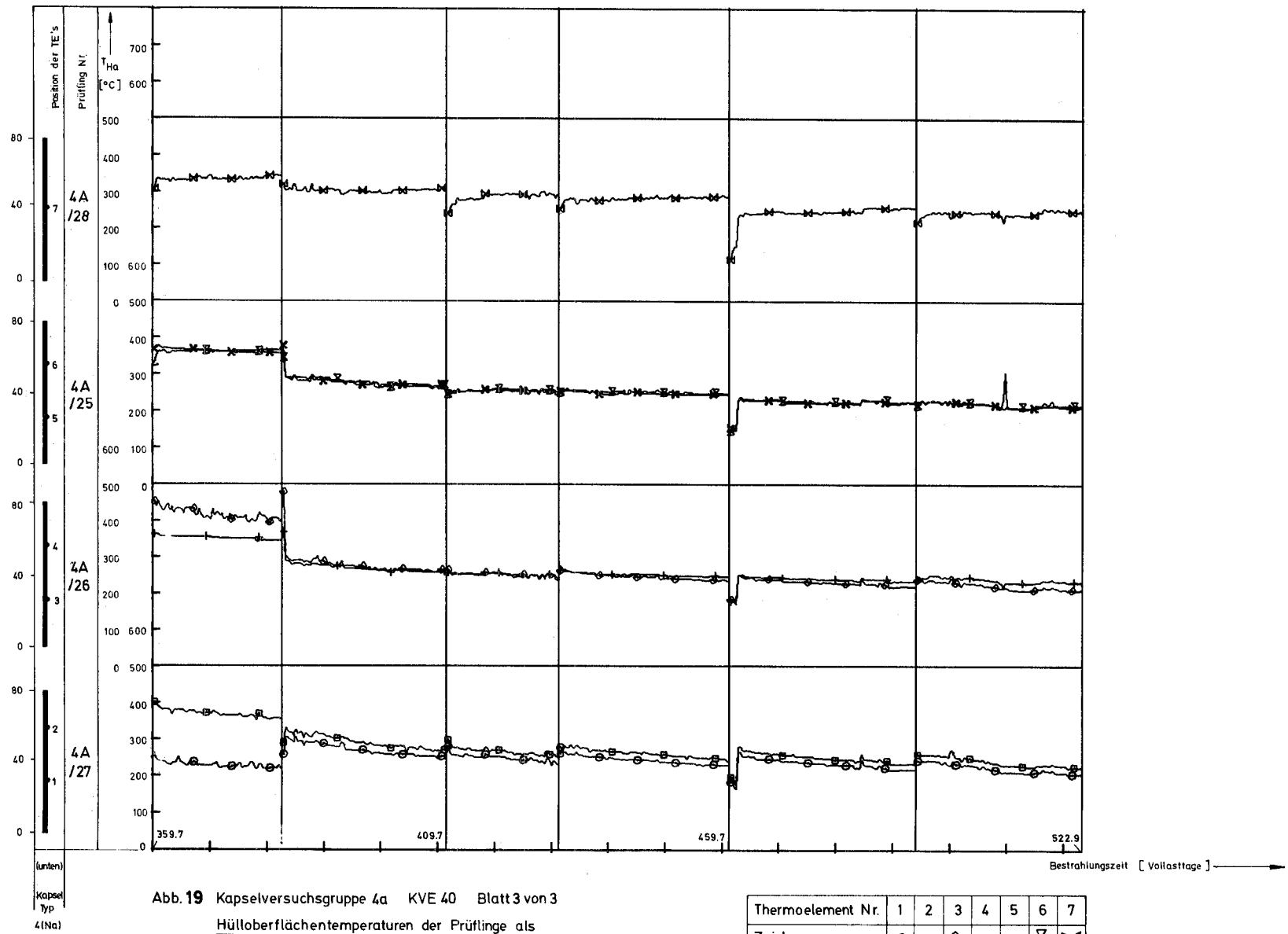
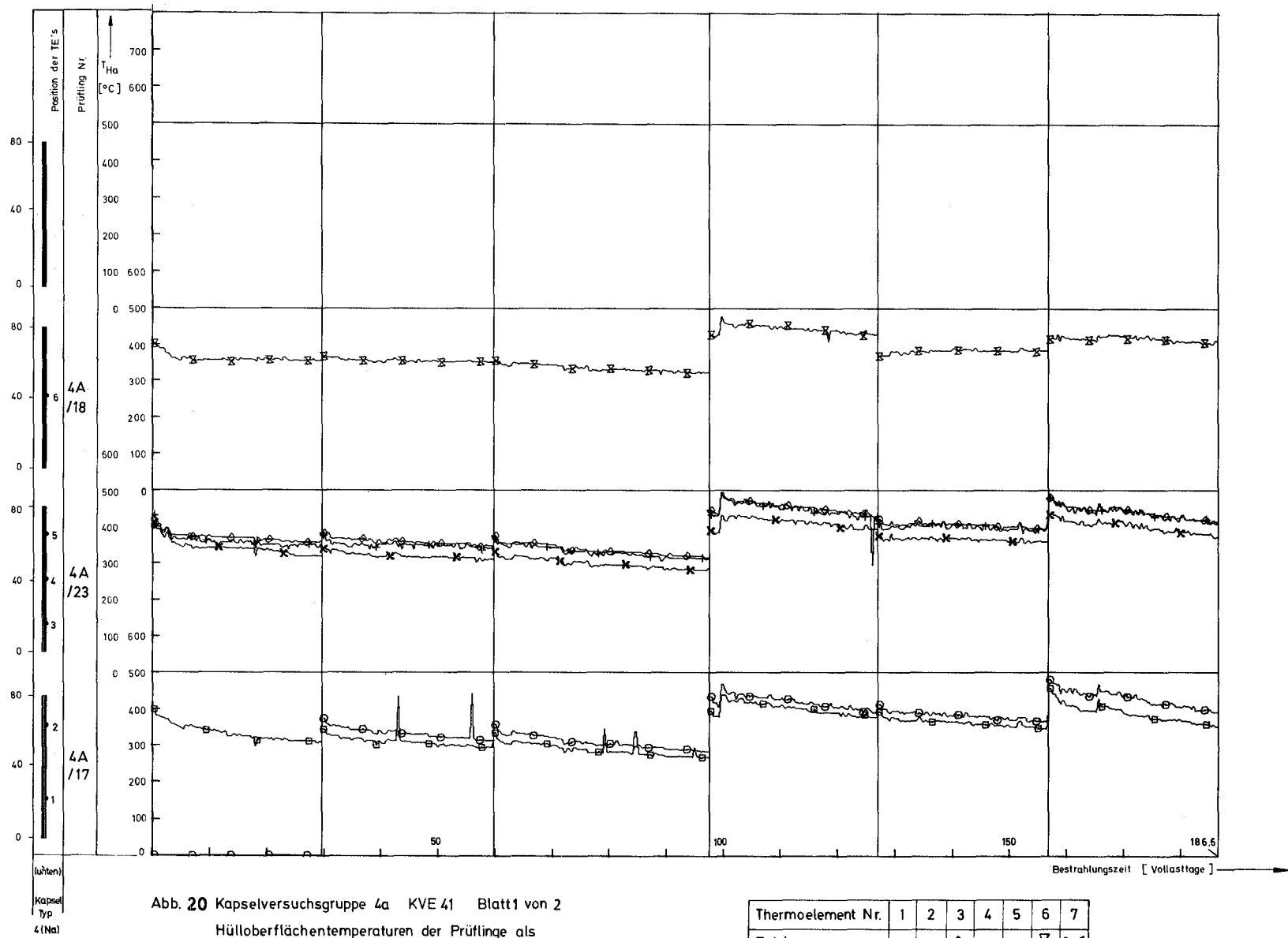


Abb. 19 Kapselversuchsgruppe 4a KVE 40 Blatt 3 von 3
Hüloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

Thermoelement Nr.	1	2	3	4	5	6	7
Zeichen	○	□	◇	+	x	⊗	⊗



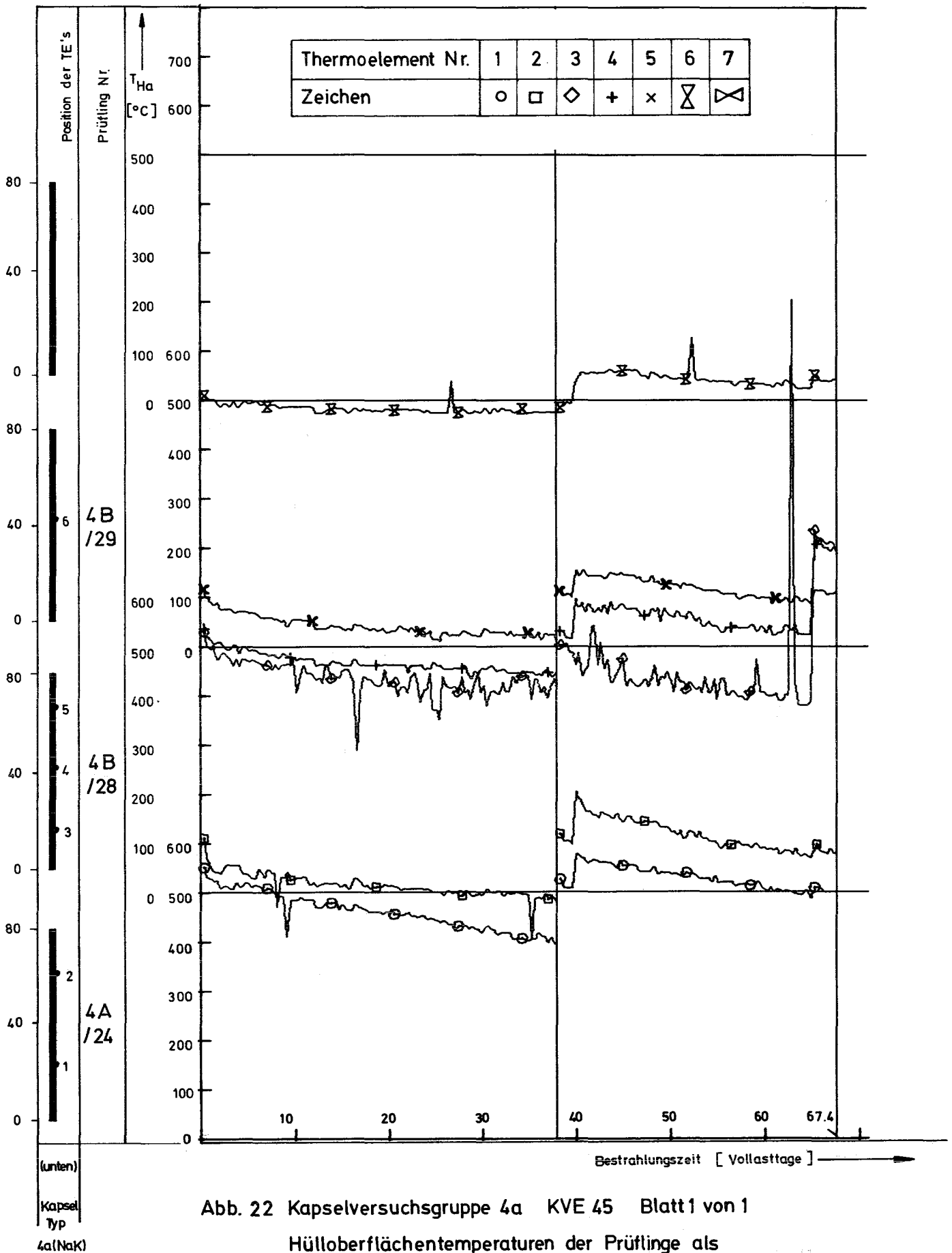
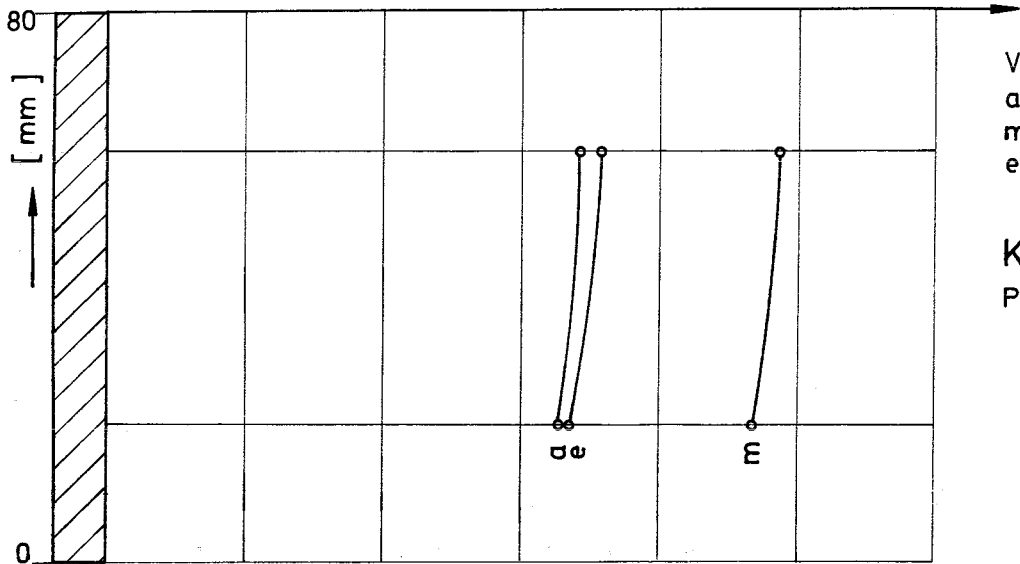
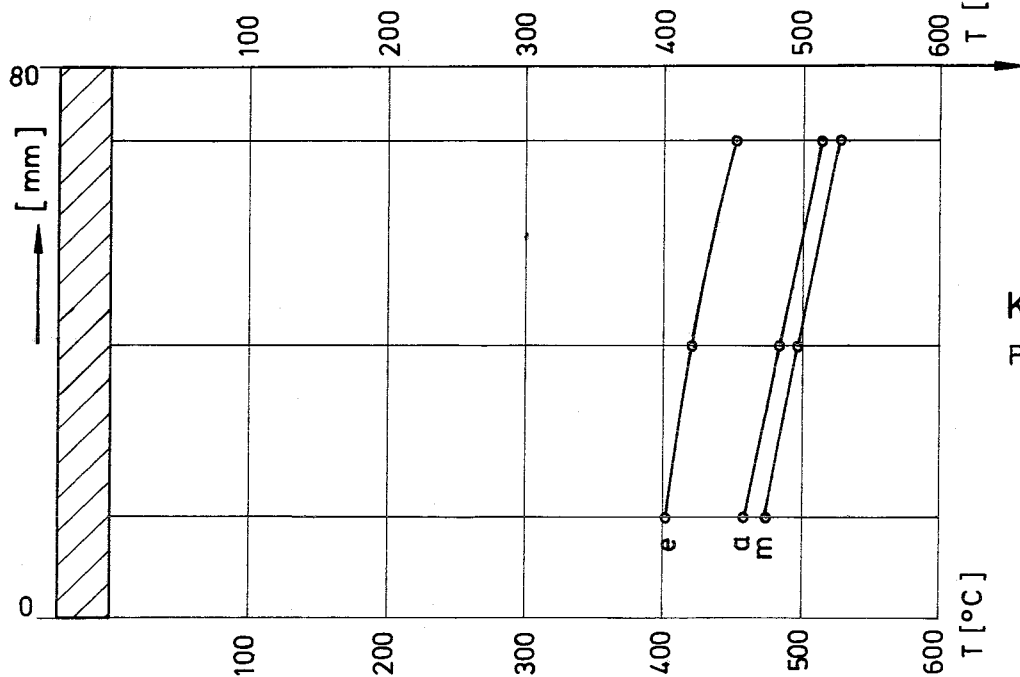
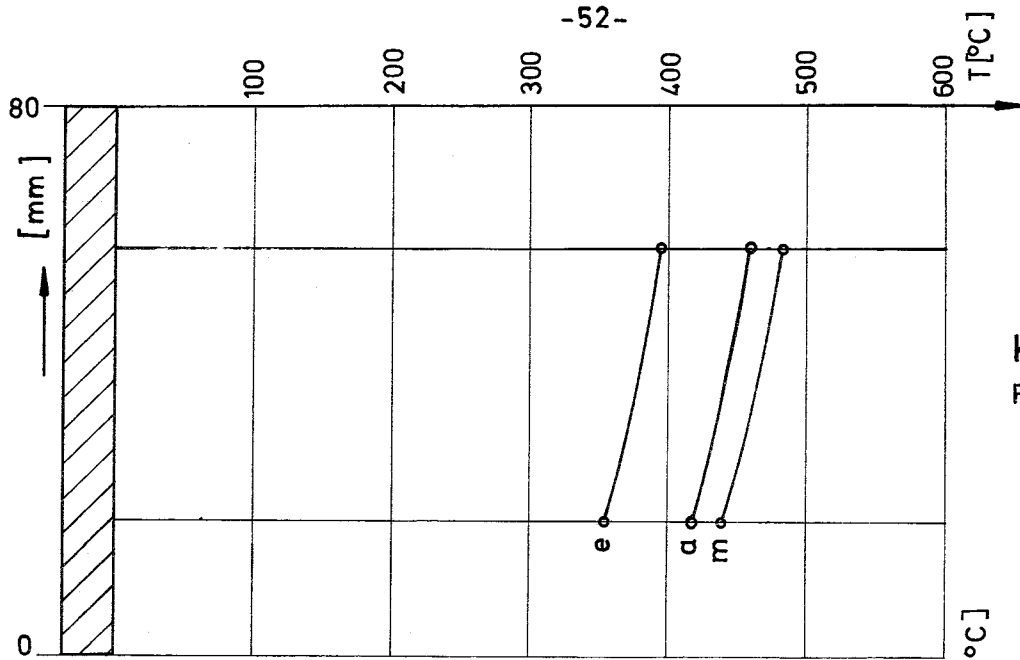
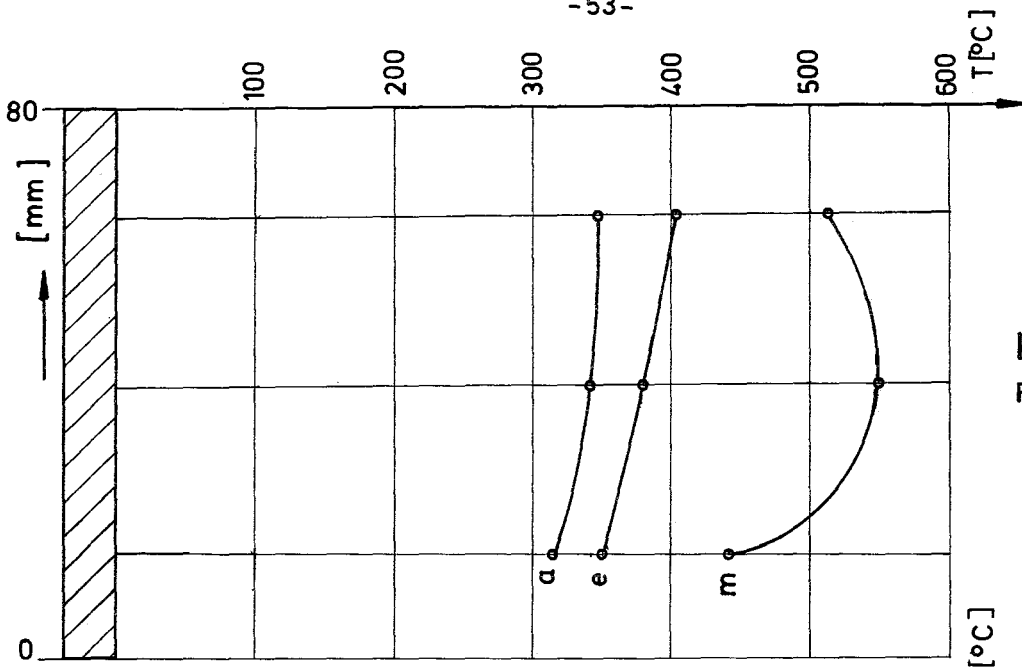


Abb. 22 Kapselversuchsgruppe 4a KVE 45 Blatt 1 von 1
Hüloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

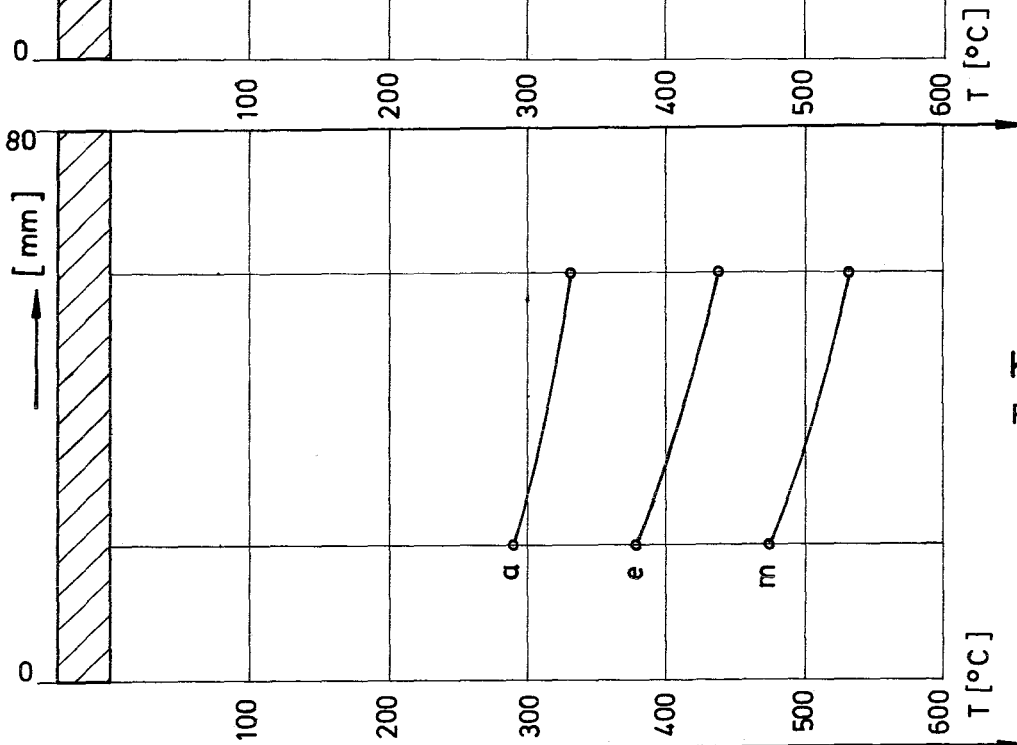


Kapselversuchsgruppe 4a
Axiale Temperaturverteilung (Hülloberfläche)

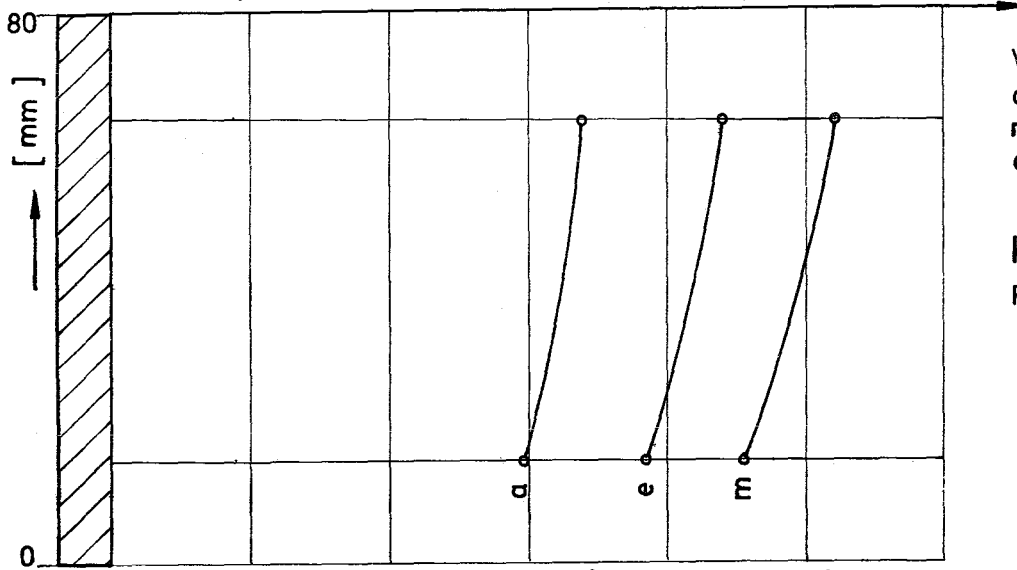
Abb. 23



KVE -Nr. 34
Prüfling B 12



KVE -Nr. 35
Prüfling 4A1

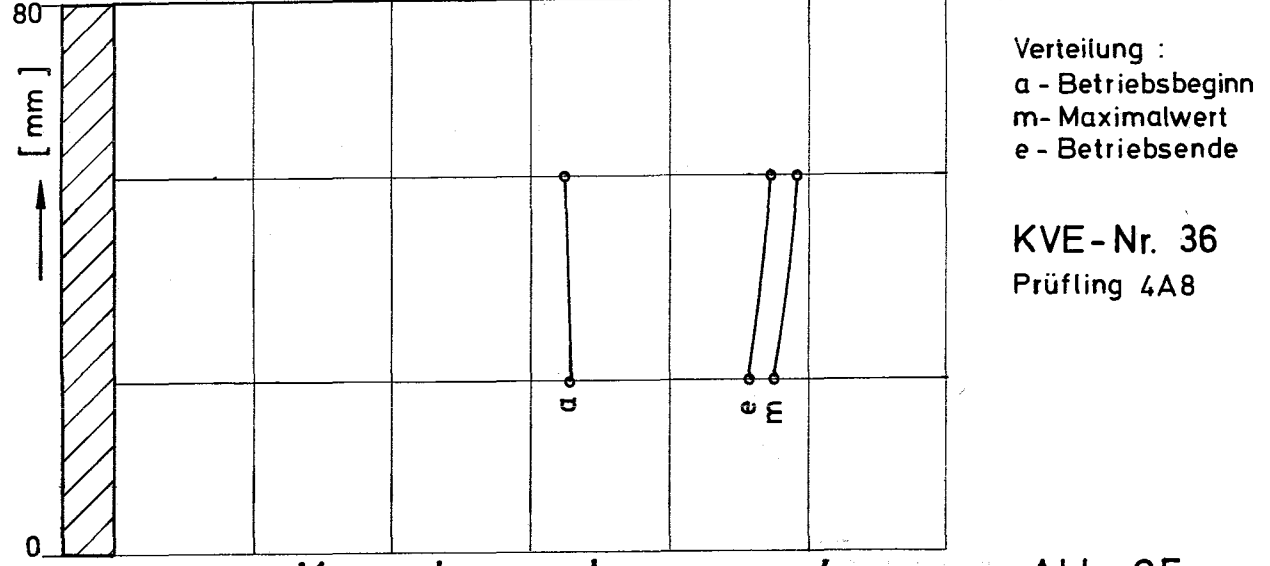
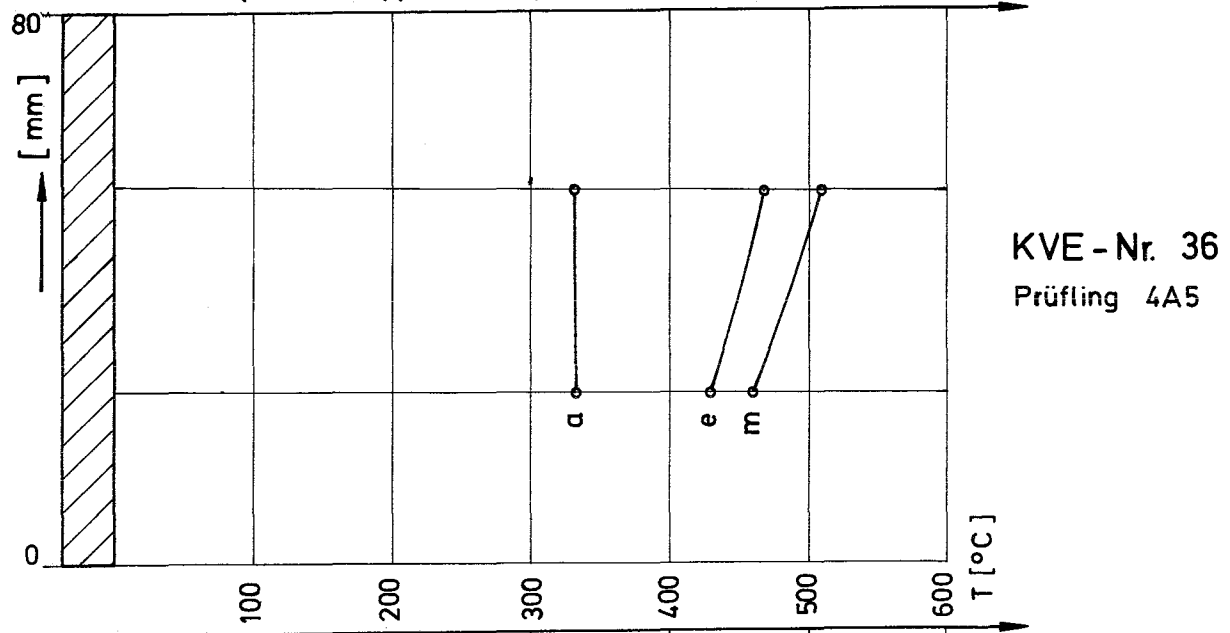
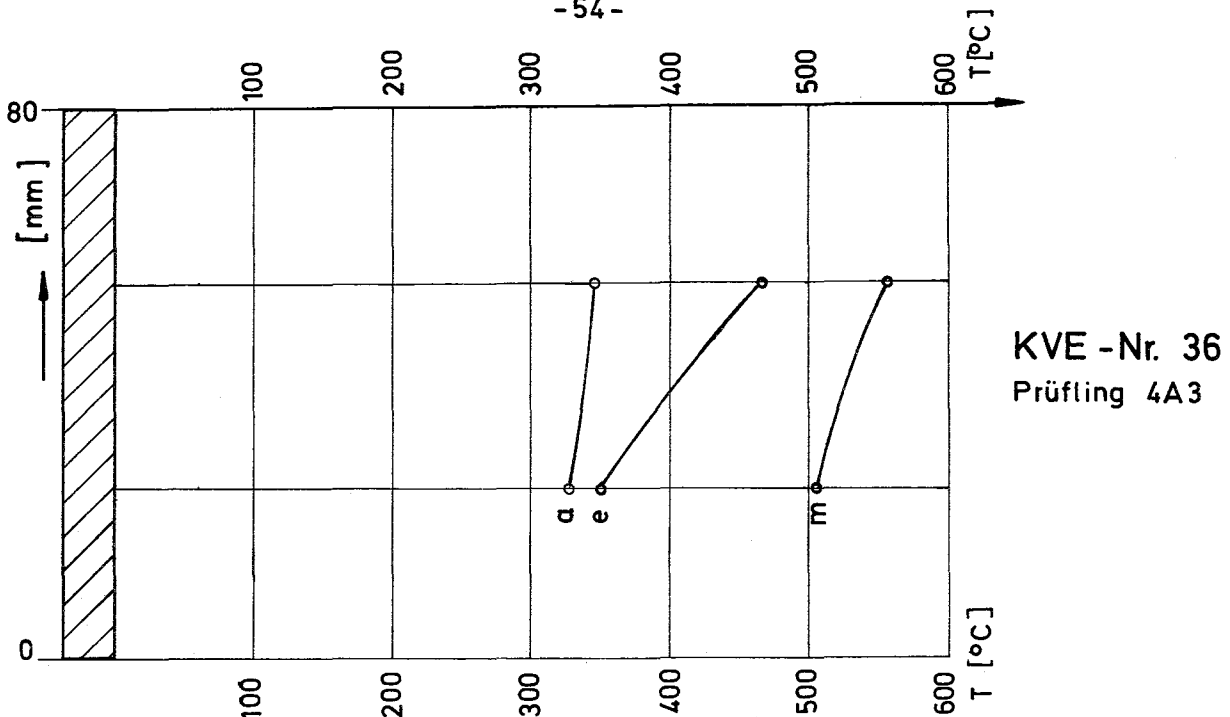


Verteilung :
a - Betriebsbeginn
m - Maximalwert
e - Betriebsende

KVE -Nr. 35
Prüfling 4A2

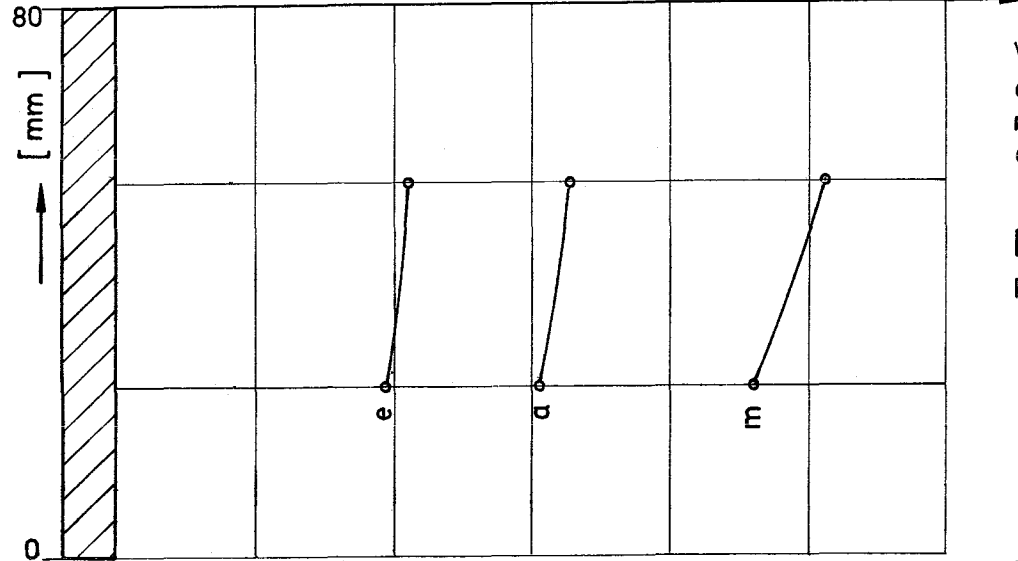
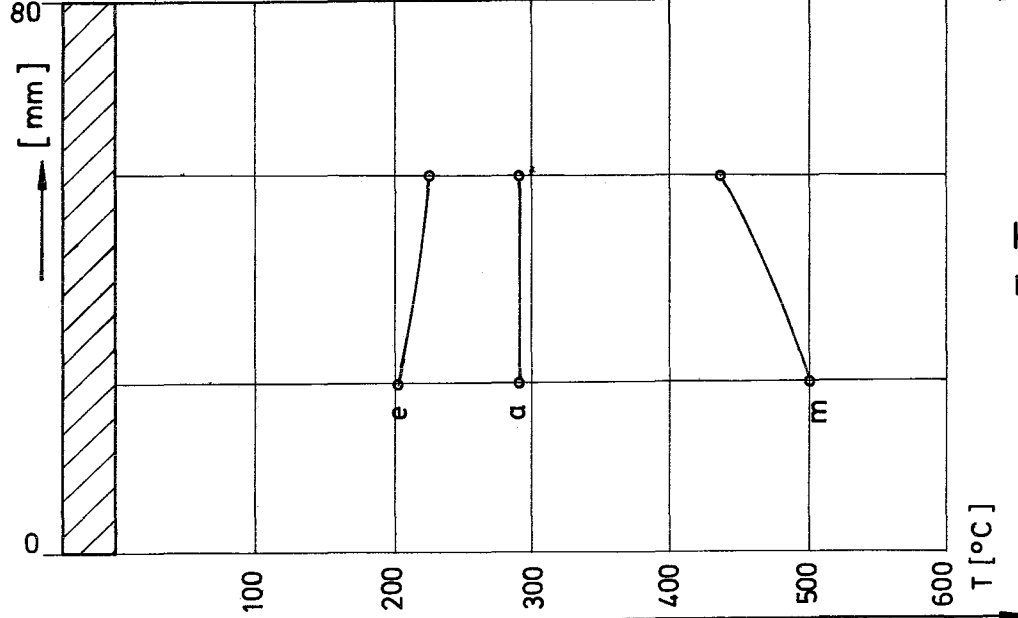
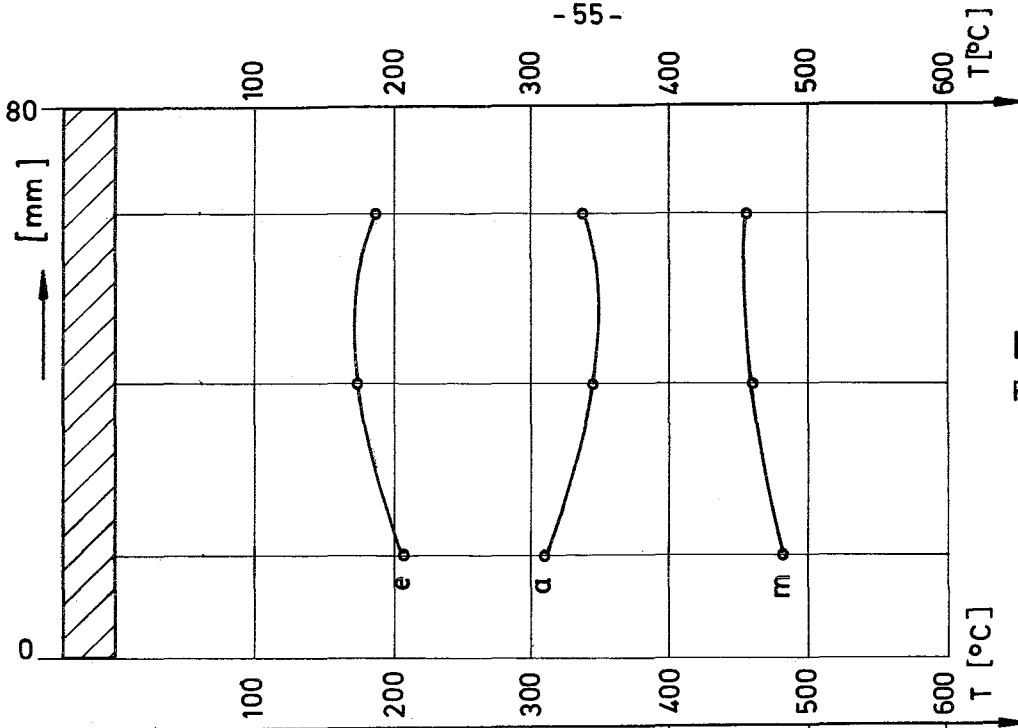
Kapselversuchsgruppe 4a
Axiale Temperaturverteilung (Hülloberfläche)

Abb. 24



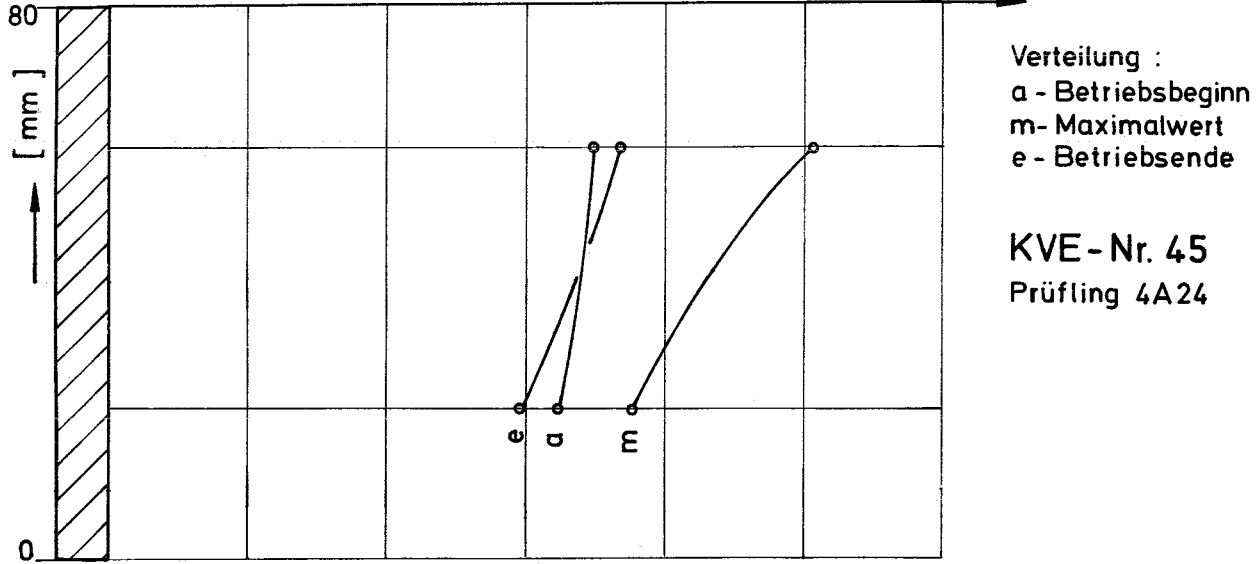
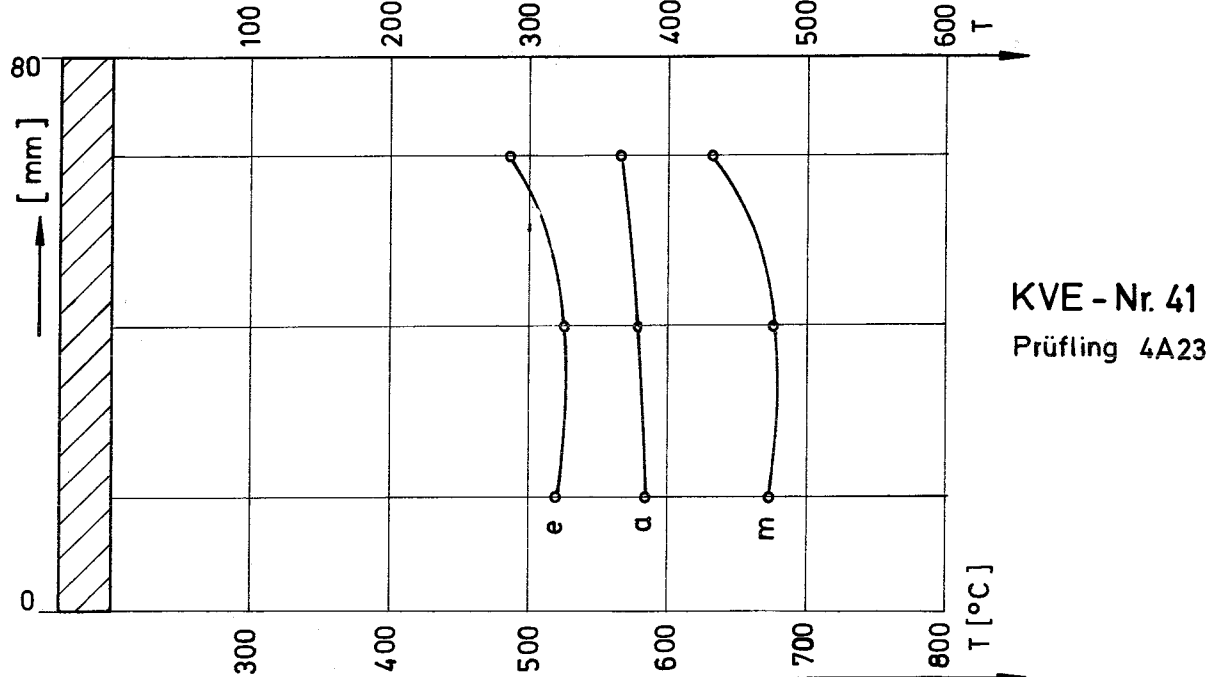
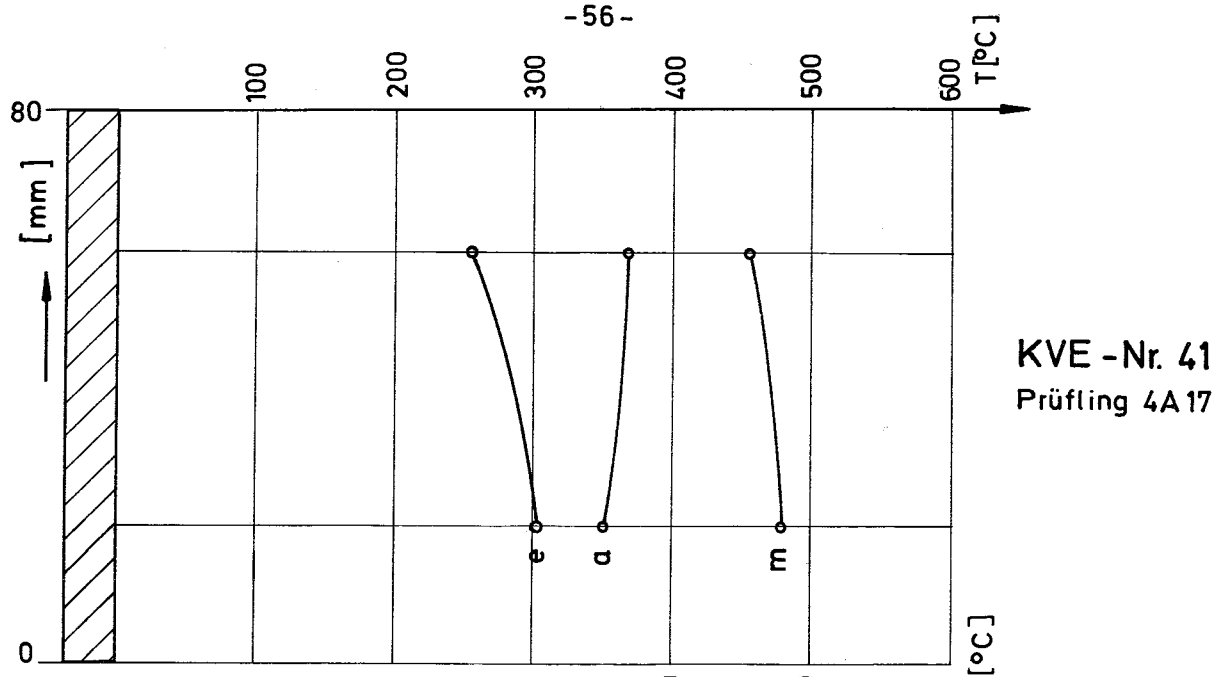
Kapselversuchsgruppe 4a
Axiale Temperaturverteilung (Hülloberfläche)

Abb. 25



Kapselversuchsgruppe 4a
Axiale Temperaturverteilung (Hülloberfläche)

Abb. 26



Kapselversuchsgruppe 4a
Axiale Temperaturverteilung (Hülloberfläche)

Abb. 27

Hüloberflächentemperatur einiger Prüflinge mit 2 bis 3 Thermoelementen dargestellt, wobei der Anfangs-, End- und Maximalzustand ausgewählt wurde.

6.3 Thermische Abbrandberechnung

Zur Berechnung des Abbrandes der Prüflinge werden die aus den Meßwerten nach obiger Umrechnungsvorschrift berechneten Stableistungen herangezogen. Der Abbrand ist bestimmt durch

$$A = \frac{\ell}{m} \cdot \chi \cdot t \quad \text{Mwd/kg M}$$

mit ℓ = Brennstofflänge (cm)
 m = Brennstoffgewicht (g)
 χ = Stableistung (W/cm)
 t = Bestrahlungszeit (Vollastäquivalent) (d)

In Tabelle XIII sind die aus den Meßwerten aller Thermoelemente berechneten Abbrände sowie die hieraus - bei Prüflingen mit mehreren Thermoelementen - resultierenden Mittelwerte zusammengestellt. Wie der Vergleich mit den radiochemisch bestimmten Werten zeigt besteht relativ gute Übereinstimmung, lediglich bei Prüflingen mit Strukturänderungen, hervorgerufen durch Schmelzen und axialen Brennstofftransport sind erwartungsgemäß höhere Abweichungen festzustellen (vergl. Kap. 8.4).

Tabelle XIII Thermische Abbrandwerte der Prüflinge

KVE Nr.	Prüfl. Nr.	Abbrand gemäß TE-Nr. (MWd/kg M)							mittl. Abbrand A (MWd/kg M)
		1	2	3	4	5	6	7	
33	B 6 B 7 B 10	9,60	10,99	11,00	11,62	12,62	12,08		10,29 11,75 12,08
34	B 11 B 12 B 13	26,82	29,10	26,56	29,85	31,25	28,06		27,96 29,22 28,06
35	4A1 4A2 4A4	22,80	27,55	23,27	27,19	27,62	26,72		25,17 26,03 26,72
36	4A3 4A5 4A8 4A9	29,25	31,53 ⁺	30,43	28,33 ⁺⁺	23,16 ⁺⁺⁺	33,03	31,10	30,39 29,38 28,09 31,10
37	B 14 4A15 4A16 4A19	57,04	58,33	60,56	63,20	59,58	57,19	61,97	57,68 61,88 58,38 61,97
38	4A20 4A21 4A22	75,20	71,28	84,00	76,62	77,73	85,23		73,24 79,45 85,23
40	4A27 4A26 4A25 4A28	75,61	84,35	81,18	73,26	79,04	81,77	81,26	79,98 77,22 80,40 81,26
41	4A17 4A23 4A18	52,64	49,85	60,35	59,77	52,36	55,72		51,24 57,49 55,72
45	4A24	11,08	12,85						11,97

+ TE defekt, geschätzt ca. 34,0
 ++ TE defekt, geschätzt ca. 30,8
 +++ TE defekt, geschätzt ca. 31,9

7. Zerstörungsfreie Nachuntersuchung

7.1 Äußere Vermessung

An allen Prüflingen wurden nach der Bestrahlung eine Vermessung der äußeren Dimensionen vorgenommen. Sie umfaßte die Bestimmung der Durchmesser entlang der Zylinderachse, die Durchbiegung und die Ermittlung der Länge.

Die Durchmesserbestimmungen wurden auf einer Meßbank mit Hilfe eines induktiven Wegaufnehmers als Meßtaster durchgeführt, wobei die Meßwerte kontinuierlich mit einem Makrograph-Formgestalt-Schreiber aufgezeichnet wurden. Der Meßkopf hatte die Form eines Keiles mit abgerundeten Schneiden. Es wurden jeweils vier Mantellinien im Winkelabstand von 90° an jedem Prüfling abgetastet und die einander gegenüberliegenden Meßlinien zur Ermittlung des Durchmessers herangezogen. Daneben wurde an drei Punkten entlang der Stabachse (Anfang - Mitte - Ende) mit der gleichen Meßeinrichtung ein Polardiagramm des Durchmessers geschrieben. Die relativen Messungen wurden durch Eichung mit einem Meisterbolzen in absolute Meßwerte umgewandelt.

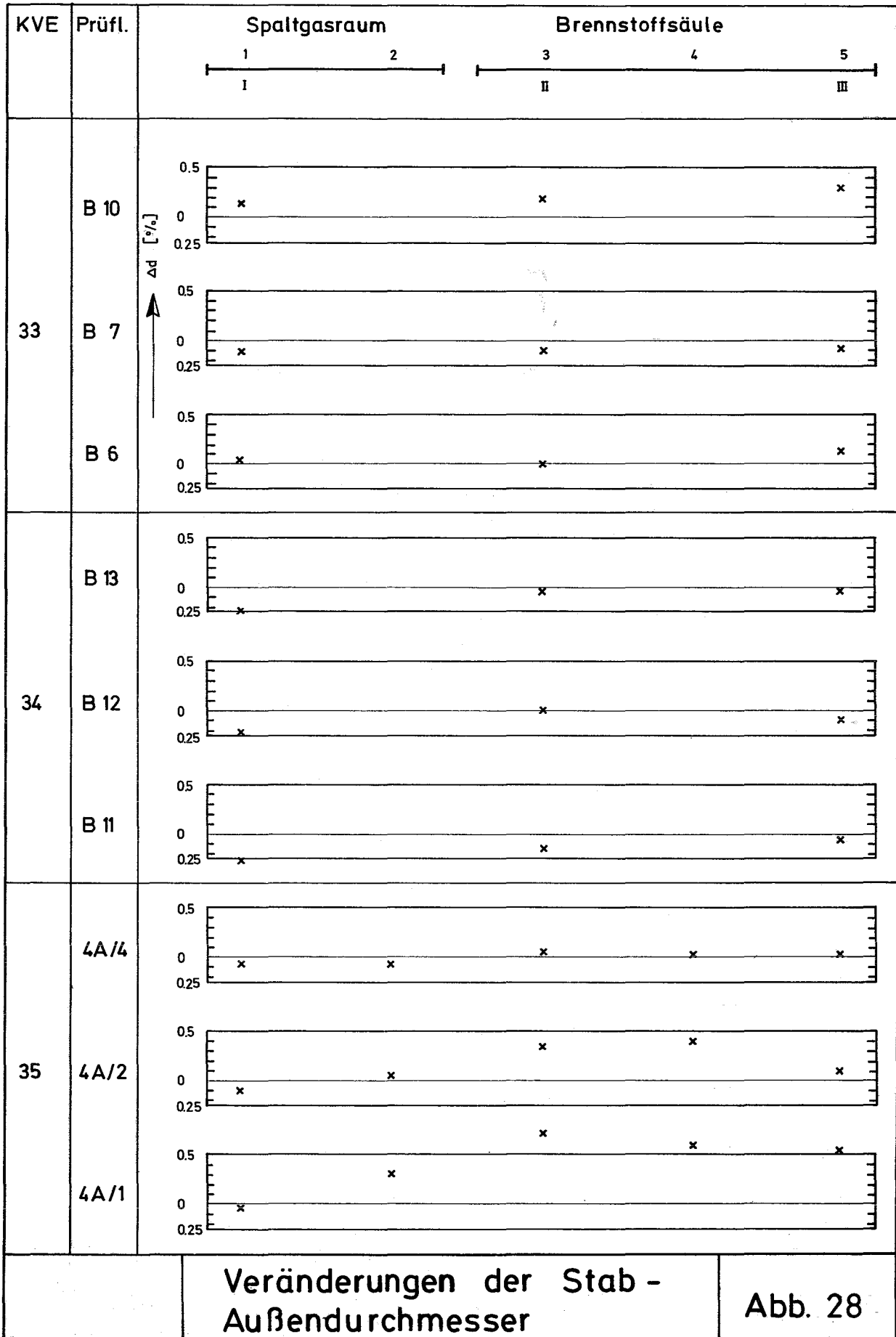
Bei der hier beschriebenen Vermessungsmethode ist es für eine genaue Messung unerläßlich, daß der Prüfling genau zentral zwischen zwei Dorne eingespannt wird. Schon geringe Abweichungen von der Ideal-Linie führen zu merklichen Ungenauigkeiten. Außerdem ergibt sich aus der geringen Breite des Schreiberpapiers, das mit 45 mm Gesamtbreite nur geringe Zeigerausschläge aufzuzeichnen gestattet, eine Einschränkung derart, daß die Meßwerte nur um den Faktor 50 vergrößert dargestellt werden können. Die Meßmethode wurde daher schon frühzeitig als ungeeignet angesehen und mit der Entwicklung einer neuen Anlage begonnen. Die neue Meßanlage konnte in dieser Versuchsgruppe nur noch für wenige Prüflinge (KVE 38 - KVE 41) eingesetzt werden. Sie gestattet eine direkte, sehr genaue Bestimmung des Durchmessers über sog. Wendelschriebe.

Eine besondere Schwierigkeit ergab sich beim Vergleich der Meßdaten, die nach der Bestrahlung aufgenommen wurden, mit den Vorbestrahlungsdaten. In der Vorvermessung war noch ein Meßtaster benutzt worden, der an Stelle einer Meßschneide einen Kugelkopf (Durchmesser der Kugel 2,5 mm) enthielt. Bei dieser Art der Vermessung müssen noch größere

Anforderungen an ein genau zentrisches Einspannen des Prüflings in der Meßbank gestellt werden, wenn nicht unzulässig hohe Ungenauigkeiten auftreten sollen. Um die Fehler bei den allein interessierenden Durchmesseränderungen klein zu halten, wurde daher von einer anderen Art der Vorvermessung ausgegangen. Vor der Bestrahlung war der Durchmesser der Stäbe an mehreren (3 bis 5) Orten entlang der Stabachse mit Hilfe eines Mikrometers zusätzlich bestimmt worden. Nur an diesen Orten wurden die Durchmesser, so wie sie sich aus der Auswertung der Makrograph- bzw. Wendelschriebe bei der Nachuntersuchung ergaben, verglichen. Damit wurden zumindest die Unsicherheiten der Vorvermessung eliminiert. Die Abb. 28 -31 zeigen die Veränderungen der Durchmesser bezogen auf die Vorbestrahlungs-Mikrometerdaten. Für die Prüflinge aus den KVE 38, 40 und 41 wurden Wendelschriebe, für die übrigen Makrograph-Schriebe zur Ermittlung des Nachbestrahlungs-Durchmessers herangezogen. Durchmesserergrößerungen wurden vornehmlich im Bereich der Brennstoffsäule beobachtet. Hier liegen die typischen Werte bei 0,2 bis 0,3 %, wobei eine Abbrand-Abhängigkeit nicht eindeutig sichtbar wird. Im Bereich des Spaltgasraumes sind teilweise auch Verminderungen des Durchmessers zu beobachten, die jedoch nicht als Bestrahlungseffekte anzusehen sind sondern durch Meßungenauigkeiten hervorgerufen wurden.

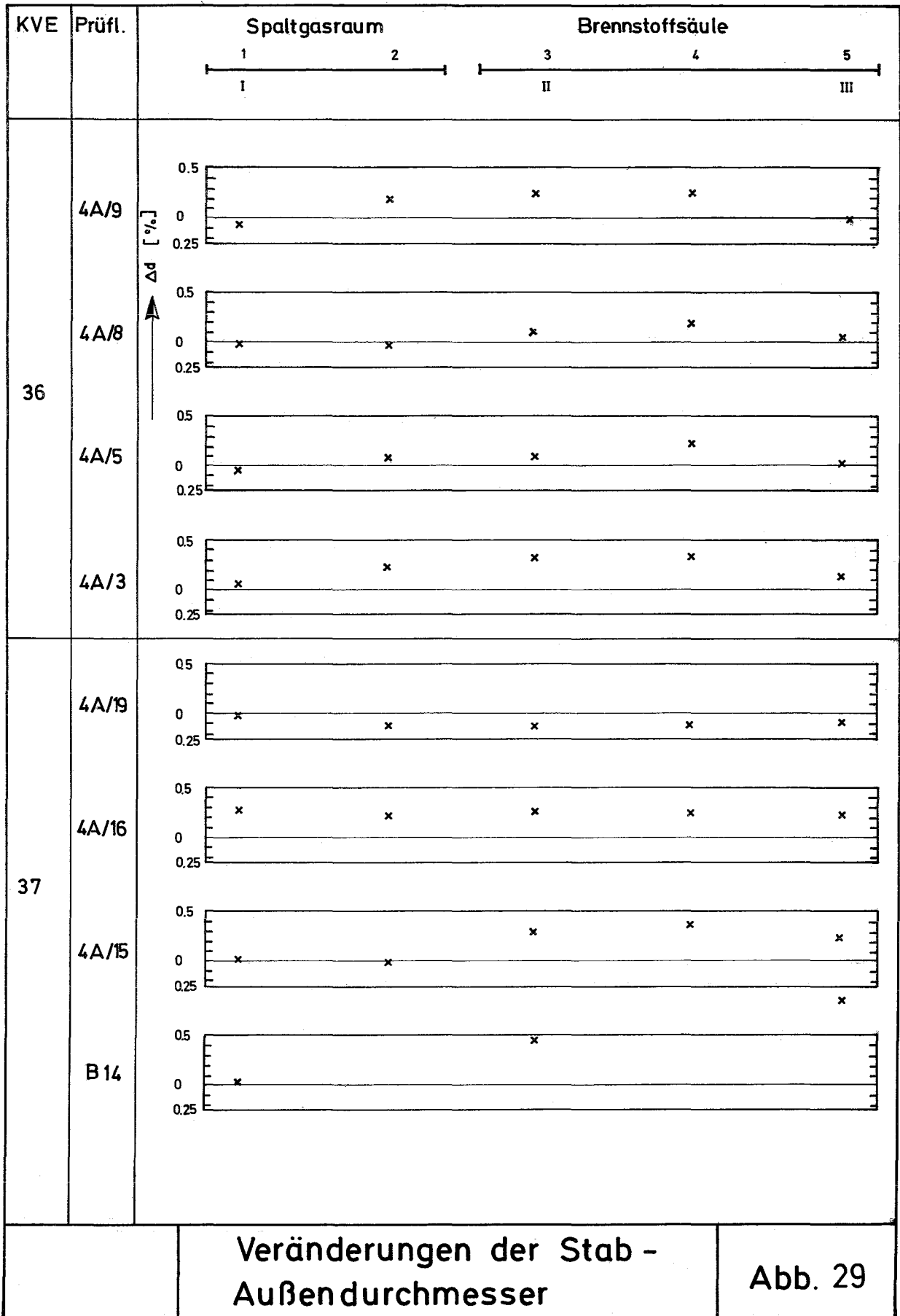
Die zusammen mit dem Durchmesser bestimmten Durchbiegungen der Prüflinge nach der Bestrahlung sind in Tabelle XIV wiedergegeben. Die Meßwerte beziehen sich auf 2 um 90° gegeneinander verdrehten Ebenen. Entsprechend der geringen Stablänge wurden für die Durchbiegung nur kleine Abweichungen von der Geradheit beobachtet.

Ein Vergleich der Stablänge vor und nach der Bestrahlung ergab als Mittelwert der gesamten Versuchsgruppe eine unwesentliche Verlängerung von 0,073 mm, entsprechend 0,044 %. Wie in Tabelle XV ersichtlich, ist bei zwei Stäben sogar eine geringfügige Verkürzung gemessen worden. Insgesamt liegen die Veränderungen jedoch so nahe an der erzielbaren Meßgenauigkeit, daß differenzierte Aussagen nicht möglich sind.



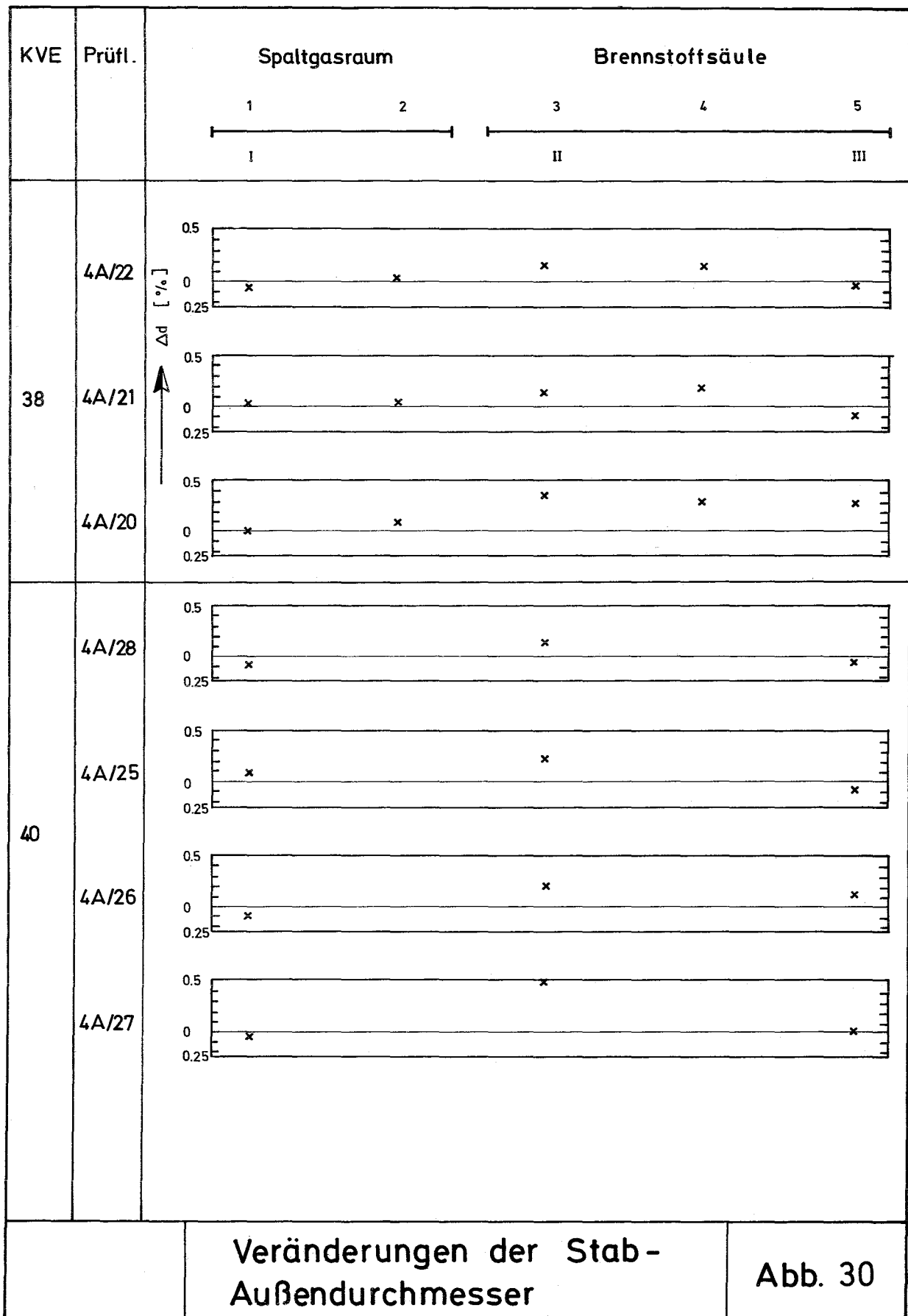
Veränderungen der Stab - Außendurchmesser

Abb. 28



Veränderungen der Stab - Außendurchmesser

Abb. 29



Veränderungen der Stab-
Außendurchmesser

Abb. 30

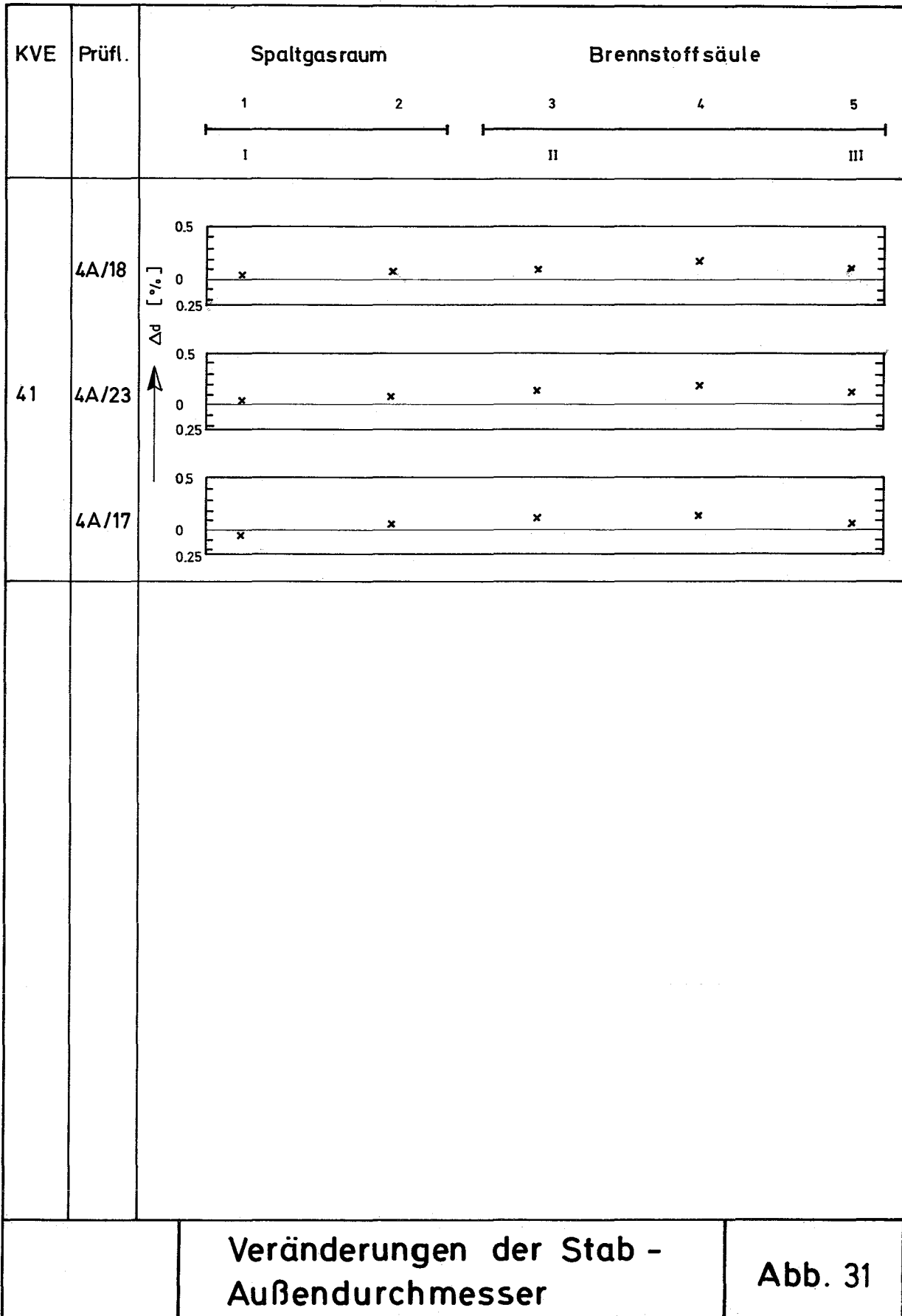


Tabelle XIV Stabdurchbiegung nach der Bestrahlung

K V E	Prüfling	Durchbiegung in beiden Meßebenen	M = Makrograph W = Wendelschrieb
33	B 6	40 / 40 μ	M
33	B 7	80 / 80 μ	M
33	B10	40 / 80 μ	M
34	B11	200/160 μ	M
34	B12	200/130 μ	M
34	B13	80/ 80 μ	M
35	4A/1	120/100 μ	M
35	4A/2	50/100 μ	M
35	4A/4	50/ - μ	M
36	4A/3	70/ 40 μ	M
36	4A/5	-/ 20 μ	M
36	4A/9	- / - μ	M
36	4A/8	80/ 20 μ	M
37	4A/15	40/ 20 μ	M
37	4A/16	60/ - μ	M
37	4A/19	10/100 μ	M
37	B14	160/ 30 μ	M
38	4A/20	90/ 80 μ	W
38	4A/21	30/ 40 μ	W
38	4A/22	20/ 40 μ	W
40	4A/26	50/ 20 μ	W
40	4A/27	60/ 60 μ	W
40	4A/28	100/50 μ	W
40	4A/25	70/ 30 μ	W
41	4A/23	40/ 60 μ	W
41	4A/18	70/ 10 μ	W
41	4A/17	130/ 50 μ	W
45	4A/24	10/ 10 μ	M

Tabelle XV

Änderung der Stablänge

K V E	Prüfling	Stablänge ohne Gewindepapfen		Differenz
		vor Bestrahlung	nach Bestrahlung	
33	B 10	166,95	167,01	+ 0,06
	B 7	166,90	166,96	+ 0,06
	B 6	166,85	166,92	+ 0,07
34	B 13	166,95	167,01	+ 0,06
	B 12	166,95	167,06	+ 0,11
	B 11	-	167,08	-
35	4A/1	167,10	167,18	+ 0,08
	4A/2	-	167,10	-
	4A/4	167,00	166,94	- 0,06
36	4A/5	167,10	167,18	+ 0,08
	4A/8	-	167,23	-
	4A/3	167,10	167,08	- 0,02
	4A/9	167,15	167,22	+ 0,07
37	B 14	-	166,97	-
	4A/16	166,80	166,86	+ 0,06
	4A/15	166,95	167,08	+ 0,13
	4A/19	167,00	167,05	+ 0,05
38	4A/22	167,10	167,24	+ 0,14
	4A/21	167,10	167,20	+ 0,10
	4A/20	167,00	167,12	+ 0,12
40	4A/28	167,00	167,02	+ 0,02
	4A/25	167,00	167,09	+ 0,09
	4A/26	167,00	167,08	+ 0,08
	4A/27	167,10	167,15	+ 0,05
41	4A/18	166,90	166,98	+ 0,08
	4A/23	167,05	167,13	+ 0,08
	4A/17	167,00	167,11	+ 0,11
arithm. Mittel:				+ 0,073
Δl				: + 0,044 %

7.2 Durchleuchtung

Die innere Geometrie des Brennstoffes wird bei den hier untersuchten Prüflingen aufgrund der hohen Zentraltemperatur während der Bestrahlung stark verändert. So bildet sich zum Beispiel im thermischen Zentrum der Brennstoffsäule ein als Zentralkanal bezeichneter langgestreckter Hohlraum, dessen Ausdehnung und Form Aufschluß über Vorgänge während der Bestrahlung liefert. Daneben wird die Brennstoffsäule beim Abkühlen durch Rißbildung bzw. Auseinanderbrechen bestimmter Brennstoffformationen verändert.

Für einen gerichteten Einsatz der zerstörenden Nachuntersuchungen, insbesondere der Keramografie, ist es unumgänglich die innere Geometrie der Brennstoffsäule zu kennen. Eine Durchleuchtung des Prüflings ist zu diesem Zwecke wünschenswert.

Wegen der starken Eigenstrahlung der Brennstoffprüflinge durch die bei der Bestrahlung gebildeten Spaltprodukte ist jedoch eine Röntgendurchleuchtung üblicher Art nicht durchführbar.

In unserem Falle wurde die Durchleuchtung mit einem Betatron vorgenommen, das eine harte γ -Strahlung von maximal 18 MeV aussendet. Für diese hohe γ -Energie ist das Element Eisen weitgehend transparent, so daß die Eigenstrahlung der Prüflinge mit Eisen gegen den Aufnahmeilm abgeschirmt werden kann, ohne die Intensität der Betatron-Strahlenquelle wesentlich zu schwächen. Die Technik dieser Durchleuchtungsmethode sieht noch vor, daß die Außenränder der zylinderförmigen Stäbe durch einen sogenannten Dickenausgleich aus Blei vor einer Überstrahlung geschützt werden. Damit wird eine gleichmäßige Massenbelegung der Bildfläche und eine ausreichende Bildschärfe im Bereich der Randzone erreicht. Daneben wirkt der Dickenausgleich noch als zusätzliche Abschirmung für die Aufnahmefilme.

Auf diese Art wurden bei Durchleuchtungszeiten zwischen 10 und 30 Minuten die in der angefügten Prüflingsdokumentation (Anhang A) wiedergegebenen Durchstrahlungsbilder hergestellt. Die durch die Betatron-Durchleuchtung erzeugten Aufnahmen weisen in den Originalfilmen einen hohen Schwärzungs-

grad auf. Sie sind damit nur unter Verlust einiger Details in der Zeichnung auf Fotopapier zu kopieren. Die in der Dokumentation dargestellten Aufnahmen sind daher in ihrer Bildqualität deutlich schlechter als die Original-Filme, die auch zur Beurteilung und Auswertung allein herangezogen wurden.

7.3 γ -Profile und γ -Spektren

Zur Charakterisierung der Brennstoffsäulen hinsichtlich der Rißstruktur, des axialen Leistungsverlaufes der Brennstoffverlagerung und der Spaltproduktwanderung wurden die Prüflinge γ -spektrometrisch untersucht. In dieser Untersuchung wurden zum einen die γ -Aktivität entlang der Stabachse als γ -Profil erstellt, zum anderen γ -Spektren von bestimmten Bereichen des Prüflings aufgenommen.

Als Detektor diente hierzu ein Halbleiterkristall (GeLi) mit nachgeschaltetem Multikanal-Analysator. Profile und Spektren wurden mit einem schlitzförmigen Kollimator mit den Maßen 0,5 mm x 20 mm x 700 mm durch die Abschirmwand der Heißen Zellen aufgenommen. Während der Messung rotierten die Prüflinge um ihre Längsachse. Hierdurch wurde erreicht, daß Aktivitätsansammlungen im Bereich der Brennstoffaußenzonen nicht durch eine zufällige ungünstige Orientierung des Prüflings zum Detektor unbeachtet blieben.

Die Standard-Untersuchung wurde mit den Aufnahmen eines typischen γ -Spektrums begonnen. Dazu wurde ein Brennstoffsäulenbereich ausgewählt, der eine möglichst geringe Konzentrationsänderung an Spaltprodukten erwarten ließ. Gewöhnlich war dies etwa die Mitte der Brennstoffsäule. An Hand des γ -Spektrums wurden dann die besonderen Energiebereiche für bestimmte γ -Profile ausgewählt. Unabhängig von γ -Spektren wurde von jedem Prüfling ein integrales Profil aufgenommen, das die γ -Linien im weiten Bereich zwischen 400 keV und 1700 keV umfaßte. Aus meßtechnischen Gründen mußte bei einer Anzahl von Prüflingen die obere Energiegrenze beim integralen Profil auf die Hälfte herabgesetzt werden. Dennoch kann man auch hier noch von einem integralen Profil sprechen, da die intensivsten γ -Strahler unter den Spalt nukliden in diesem Energiegebiet Quanten emittieren.

Zu den Profilen, die an allen Prüflingen gemessen wurden, zählte auch das Zr/Nb-95-Profil. Vom Spalt-Zirkon ist bekannt, daß es sich in Oxidbrennstoff unter den hier betrachteten Bestrahlungsbedingungen nicht an- oder abreichert. Somit kann das Zr/Nb-95-Profil in besonderem Maße als Brennstoff-Indikator zur Ermittlung von Brennstoffverlagerungen herangezogen werden. Bei kurzen Bestrahlungszeiten ist dem Profil auch der axiale Stableistungsverlauf zu entnehmen.

Je nach Abklingdauer wurden weitere Nuklid-Profile zur Bestimmung der Spaltproduktwanderung vermessen. Es waren dies insbesondere Profile für Cs/Ba-137 und Ba/La-140.

Zur Vervollständigung der Nuklidprofile in Bezug auf die Spaltproduktwanderung wurden, verteilt über die gesamte Prüflingslänge, zusätzliche Spektren aufgenommen, wo immer die Profile einen Hinweis auf anomale Spaltproduktverteilungen brachten. Im Mittel waren etwa 6 Spektren für die Charakterisierung der Spaltproduktwanderung ausreichend. In Einzelfällen (z.B. Prüfling 4A20 aus KVE 38) wurde die Zahl bis auf 11 erhöht. In Anhang A sind für jeden Prüfling zwei der wichtigsten γ -Profile wiedergegeben.

8. Zerstörende Nachuntersuchung

8.1 Spaltgasbestimmungen

Bei den experimentellen Spaltgasuntersuchungen an den bestrahlten Prüflingen werden Messungen durchgeführt [9] 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 abgebohrt und das freie Spaltgas abgezogen mit anschließender Helium-Spülung. Die Zusammensetzung des Spaltgases wird radio-gaschromatografisch ermittelt, wobei die Menge an Xe, Kr quantitativ bestimmt wird. Hierauf folgt eine manometrische Messung des freien Volumens (Hohlräume, offene Poren) innerhalb der Brennstabhülle.

Für die weiteren Spaltgasbestimmungen (Anteile in geschlossener Porosität bzw. 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 Partikelgröße von weniger als 1 μm erreicht wird. Das hierbei freigesetzte "Porensplaltgas" umfaßt alles Gas, das sich in geschlossener Porosität mit Porengrößen $\leq 1 \mu\text{m}$ befand. Nach der gaschromatischen Bestimmung dieses Anteils wird die gemahlene Brennstoffprobe schließlich in HNO_3 aufgelöst. Dabei wird sowohl der im Brennstoff gelöste Anteil, das "Gittersplaltgas", und der in den kleinen Poren ($< 1 \mu\text{m}$) enthaltene Anteil bestimmt.

Die für eine weitere Auswertung wichtigen Ergebnisse sind zusammenfassend in einigen Tabellen dargestellt. Tabelle XVI bringt für alle Prüflinge die gemessenen Mengen 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 XVII sind alle gemessenen Werte für das im Brennstoff gebundene Spaltgas (wieder aufgetrennt nach Krypton und Xenon) enthalten. Die Messungen wurden hierbei an kleinen Brennstoffproben ($\sim 1/8$ vom Brennstoff) durchgeführt und die Meßergebnisse auf die in einem Prüfling enthaltene Gesamtmenge an Brennstoff umgerechnet.

In Tabelle XVIII werden die spezifischen Spaltgasausbeuten angegeben.

Tabelle XVI Freies Spaltgas und Spaltgasdruck

KVE	Prüfl.	Abbrand ^{+) A (Mwd/kgM)}	Freies Spaltgas V _F (mm ³)			Xe/Kr- Verhält- nis	Freies Volumen (mm ³)	Spaltgas- druck bei 500°C (atm)
			Krypton	Xenon	Gesamt			
33	B10	12,1	160	2520	2680	15,7	1425	4,96
	B 7	≈11,7	130	2470	2600	19,6	1335	5,15
	B 6	10,3	130	2260	2390	17,5	1267	4,90
34	B13	28,1	270	8600	8870	32,3	1331	17,60
	B12	29,2	450	13000	13450	28,9	1723	20,60
	B11	28,0	820	13050	13870	16,0	1231	29,70
35	4A/4	26,7	410	2860	3270	7,0	1184	7,30
	4A/2	26,0	580	3240	3820	5,6	1308	7,70
	4A/1	25,2	630	3500	4130	5,6	1384	7,86
36	4A/9	31,1	640	6470	7110	10,2	1552	12,10
	4A/8	≈33,0	470	4400	4870	9,4	1709	7,50
	4A/5	≈30,4	400	9240	9640	23,0	1711	14,90
	4A/3	≈30,4	-	-	-	-	-	-
37	4A/19	62,0	-	-	-	-	-	-
	4A/16	58,4	1460	30100	31560	20,6	1400	55,90
	4A/15	61,9	1840	30750	32550	16,7	1493	57,50
	4B/14	57,7	1120	23100	24220	20,3	1422	44,90
38	4A/22	85,2	2450	45200	47650	18,5	1529	81,50
	4A/21	79,4	2930	51200	54130	17,5	1564	91,40
	4A/20	73,2	2260	40600	42860	17,9	1626	69,60
40	4A/28	81,3	1860	34700	36560	18,7	1587	60,80
	4A/25	80,4	1950	36400	38350	18,7	1602	63,20
	4A/26	77,2	2200	34000	36200	15,4	1558	61,20
	4A/27	80,0	1930	39800	41700	20,6	1573	70,00
41	4A/18	57,5	1980	36100	38080	18,3	1662	60,70
	4A/23	55,7	1980	35400	37380	17,9	1684	58,60
	4A/17	51,2	2120	36500	38620	17,2	1713	59,40
45	4B/29	17,1	-	-	-	-	-	-
	4B/28	17,1	340	6430	6770	18,9	1164	15,40
	4A/24	12,0	300	7080	7380	23,8	1663	11,70

+) berechneter Abbrand


Tabelle XVII Im Brennstoff gebundenes Spaltgas

KVE	Prüfl.	Abbrand ⁺ (Mwd/kg M)	Porensplattgas (mm ³)			Gittersplattgas (mm ³)			Xe/Kr- Verhältnis	
			Krypton	Xenon	Gesamt	Krypton	Xenon	Gesamt	Poren	Gitter
33	B10	12,1	150	2760	2910	94	1830	1924	18,4	19,5
	B 7	≈11,7	153	1923	2076	86	1884	1970	12,6	21,9
	B 6	10,3	140	2290	2430	87	1484	1571	16,4	17,1
34	B13	28,1	330	5880	6210	220	3204	3424	19,6	14,6
	B12	29,2	530	7220	7750	320	6980	7300	13,6	21,8
	B11	28,0	800	24560	(25360)	400	8463	8863	30,7	21,2
35	4A/4	26,7	360	6290	6650	160	3650	3710	17,5	22,8
	4A/2	26,0	370	5860	6230	150	3450	3600	15,8	23,0
	4A/1	25,2	410	6850	7260	160	3460	3620	16,7	21,6
36	4A/9	31,1	340	5970	6410	150	2770	2920	17,6	18,5
	4A/8	≈33,0	320	4843	5163	140	3048	3188	15,1	21,8
	4A/5	≈30,4	351	4920	5271	154	4688	4842	14,0	30,4
	4A/3	≈30,4	340	4714	5054	132	2047	2179	13,9	15,5
37	4A/19	62,0	220	5300	5520	30	1330	1360	24,1	44,3
	4A/16	58,4	246	5110	5356	48	1173	1221	20,8	24,4
	4A/15	61,9	443	9740	10183	34	1821	1855	21,9	53,6
	B14	57,7	660	13033	13693	250	3610	3860	19,7	14,4
38	4A/22	85,2	645	11494	12139	250	6145	6395	17,6	24,6
	4A/21	79,4	635	11200	11835	214	5045	5259	17,6	23,5
	4A/20	73,2	760	12927	13687	265	6029	6294	17,0	22,8
40	4A/28	81,3	810	13453	14263	315	7161	7476	16,6	22,7
	4A/25	80,4	1336	22460	23796	206	4607	4813	16,8	21,9
	4A/26	77,2	868	14623	15491	371	7899	8270	16,8	21,3
	4A/27	80,0	917	15225	16142	331	7658	7989	16,6	23,1
41	4A/18	57,5	-	-	-	-	-	-	-	-
	4A/23	55,7	-	-	-	-	-	-	-	-
	4A/17	51,2	-	-	-	-	-	-	-	-
45	4B/29	17,1	-	-	-	-	-	-	-	-
	4B/28	17,1	-	-	-	-	-	-	-	-
	4A/24	12,0	198	2436	2634	29	648	677	12,3	22,3

() Werte zu hoch, wahrscheinlich Fehlmessung

+ berechneter Abbrand

Tabelle XVIII Spezifische Poren- und Gitterspaltgasausbeute V' (mm³/g)



KVE	Prüf- ling	Z ₃ -Z ₄	Poren- Spaltgas	Gitter- Spaltgas	Gesamt	Z ₁ -Z ₂	Poren- Spaltgas	Gitter- Spaltgas	Gesamt
33	B10	54/63	131	86	217	17/28	108	72	180
	B 7	57/66	96	91	187	19/30	75	72	147
	B 6	58/67	100	68	168	17/27	100	62	162
34	B13	55/63	175	104	279	35/43	342	182	524
	B12	43/52	297	295	592	10/19	341	305	645
	B11	55/64	-	-	-	35/42	-	365	-
35	4A4	43/51	263	146	409	20/28	280	164	444
	4A2	52/60	276	162	438	42/50	235	133	368
	4A1	41/50	-	144	-	17/26	298	153	451
36	4A9	57/65	251	90	341	31/41	269	151	420
	4A8	56/64	196	132	328	30/40	229	130	359
	4A5	56/65	204	149	353	31/41	227	198	425
	4A3	57/65	185	93	278	31/41	229	85	313
37	4A19	56/63	201	62	263	22/30	281	57	338
	4A16	56/64	329	37	366	21/29	142	69	211
	4A15	55/64	398	72	470	24/32	532	94	626
	B14	58/66	520	168	688	22/30	545	151	696
38	4A22	57/64	654	283	937	7/17	374	278	652
	4A21	53/61	623	264	887	22/30	411	195	606
	4A20	45/54	607	304	911	15/24	588	246	834
40	4A28	59/67	506	311	817	27/34	742	344	1086
	4A25	59/67	1266	317	1583	27/34	817	102	919
	4A26	57/66	791	376	1167	28/35	567	349	916
	4A27	59/67	614	346	960	26/34	803	355	858
41	-	keine Spaltgasanalysen			-	-	-	-	-
45	4A24	55/64	115	29	144	-	-	-	-

Bemerkung: Die Z_i bedeuten den Abstand (bzw. die Länge) der zur Bestimmung des Spaltgases aus der Brennstoffsäule herausgeschnittenen Probe in mm vom unteren Brennstoffsäulenende.

In Tabelle XIX schließlich wird für jeden Prüfling die Spaltgasbilanz aufgestellt und mit der theoretisch aus dem Abbrand (kalorimetrisch) errechneten "Sollmenge" verglichen. Wie man sieht, überschreitet die gemessene Spaltgasmenge in einigen Fällen die theoretisch berechnete.

Vermutliche Gründe hierfür liegen in:

- Die Bestimmung des mittleren Abbrandes (s.a. Kap. 8.3) ist nach wie vor problematisch. Bei der Berechnung muß man sich immer auf eine endliche Anzahl (meist = 1) von Thermoelementen beziehen. Bei der radiochemischen Methode wird von einem kleinen Probenvolumen ($\sim 0,2 \text{ cm}^3$) auf die Gesamtprobe (hier $\sim 2,0 \text{ cm}^3$) extrapoliert.
 - Letzteres gilt ebenso für die Spaltgasproben; auch hier muß aus verständlichen Gründen von einem kleinen Volumen auf den gesamten Prüfling extrapoliert werden. Rein meßtechnisch bereitet die Erfassung des Porenspaltgases große Schwierigkeiten, da immer ein Teil des Gases nach der Mahlung an den Pulverpartikeln durch Adsorption gebunden bleibt und dadurch bei der Messung nicht erfaßt werden kann. Diese Fakten spiegeln sich recht eindrucksvoll bei den gebildeten Xe/Kr-Verhältnissen in Tabelle ~~XX~~ wieder. Die Werte für das Gesamtspaltgas liegen mit Ausnahme von KVE 33, 35 und 36 alle über dem theoretischen Xe/Kr-Verhältnis (13,3 für Pu-239) $\lceil 10 \rceil$. Hierbei muß allerdings auch die mit wachsendem Abbrand zunehmende Pu-241-Spaltung berücksichtigt werden. Hierdurch verschiebt sich das Xe/Kr-Verhältnis zu höheren Werten. Bei den partiellen Werten liegen die Werte noch stärker verschoben, was z.T. sich über Diffusion bzw. Blasenwanderung $\lceil 11 \rceil$ erklären läßt.
- Bei den KVE 33, 34, 36, 37, 38, 41 und 45 ist zu berücksichtigen, daß hier bei einigen Prüflingen lokales Brennstoffschmelzen auftrat. Durch Brennstofftransport sowie UO_2 - PuO_2 -Entmischung wird der stationäre Brennstoffzustand geändert, was sich in unterschiedlichen Abbrandzuständen und der damit verbundenen abweichenden Spaltgasproduktion äußert (vergl. 6.3).

Tabelle XIX Spaltgasbilanz

KVE	Prüfl.	Abbrand ⁺ A (Mwd/kgM)	Freies Spalt- gas V _F		Porenspalt- gas V _P		Gitterspalt- gas V _G		Gesamtspaltgas (mm ³)	
			(mm ³)	(%)	(mm ³)	(%)	(mm ³)	(%)	gem.	theor.
33	B10	12,1	2680	35,7	2910	38,7	1924	25,6	7514	8103
	B 7	≈11,7	2600	39,1	2076	31,2	1970	29,7	6646	7818
	B 6	10,3	2390	37,4	2430	38,0	1571	24,6	6391	6899
34	B13	28,1	8870	47,9	6210	33,6	3424	18,5	18504	18506
	B12	29,2	13450	47,2	7750	27,2	7300	25,6	28500	19480
	B11	28,0	13870	28,8	(25360)	52,7	8863	18,5	(48093)	18725
35	4A/4	26,3	3270	24,0	6650	48,8	3710	27,2	13630	17974
	4A/2	26,0	3820	28,0	6230	45,6	3600	26,4	13650	17424
	4A/1	25,2	4130	27,5	7260	48,4	3620	24,1	15010	16902
36	4A/9	31,1	7110	43,2	6410	39,0	2920	17,8	16440	20739
	4A/8	≈33,0	4870	36,8	5163	39,0	3188	24,2	13221	22097
	4A/5	≈30,4	9640	48,8	5271	26,7	4842	24,5	19753	20414
	4A/3	≈30,4	-	-	5054	-	2179	-	7233	20473
37	4A/19	62,0	-	-	5520	-	1360	-	6880	39026
	4A/16	58,4	31560	82,8	5356	14,0	1221	3,2	38137	37306
	4A/15	61,9	32550	73,0	10183	22,8	1855	4,2	44588	38860
	4B/14	57,7	24220	58,0	13693	32,8	3860	9,2	41773	38414
38	4A/22	85,2	47650	72,0	12139	18,3	6395	9,7	66184	53325
	4A/21	79,4	54130	76,0	11835	16,6	5259	7,4	71224	50131
	4A/20	73,2	42860	68,2	13687	21,8	6294	10,0	62841	46056
40	4A/28	81,3	36560	62,7	14263	24,5	7476	12,8	58299	51152
	4A/25	80,4	38350	57,3	23796	35,5	4813	7,2	66959	50741
	4A/26	77,2	36200	60,3	15491	25,8	8270	13,9	59961	48466
	4A/27	80,0	41700	63,3	16142	24,5	7989	12,1	65831	50290
41	4A/18	57,5	38080	-	-	-	-	-	-	36667
	4A/23	55,7	37380	-	-	-	-	-	-	35290
	4A/17	51,2	38620	-	-	-	-	-	-	32270
45	4B/29	17,1	-	-	-	-	-	-	-	7171
	4B/28	17,1	6770	-	-	-	-	-	-	7171
	4A/24	12,0	7380	69,0	2634	24,6	677	6,4	10691	7583

() Werte zu hoch, wahrscheinlich Fehlmessung

+ berechneter Abbrand

TabelleXX

Xe/Kr-Verhältnis, partiell und gesamt

KVE	Prüf- ling	Abbrand + (Mwd/kg M)	Freies Spaltgas	Poren- Spaltgas	Gitter- Spaltgas	Gesamt- Spaltgas
33	B10	12,1	15,7	18,4	19,5	17,6
	B 7	≈11,7	19,6	12,6	21,9	17,0
	B 6	10,3	17,5	16,4	17,1	16,9
34	B13	28,1	32,2	19,6	14,6	21,6
	B12	29,2	28,9	13,6	21,8	20,9
	B11	28,0	16,0	30,7	21,2	22,8
35	4A4	26,7	7,0	17,5	22,8	13,8
	4A2	26,0	5,6	15,8	23,0	11,4
	4A1	25,2	5,6	16,7	21,6	11,5
36	4A9	31,1	10,2	17,6	18,5	13,5
	4A8	≈ 33,0	9,4	15,1	21,8	13,2
	4A5	≈ 30,4	23,0	14,0	30,4	20,9
	4A3	≈ 30,4	-	13,9	15,5	(14,3)
37	4A19	62,0	-	24,1	(44,3)	(26,5)
	4A16	58,4	20,6	20,8	24,4	20,4
	4A15	61,9	16,7	21,9	53,6	18,3
	B14	57,7	20,3	19,7	14,4	19,6
38	4A22	85,2	18,5	17,6	24,6	18,8
	4A21	79,4	17,5	17,6	23,5	17,8
	4A20	73,2	17,9	17,0	22,8	18,1
40	4A28	81,3	18,7	16,6	22,7	18,4
	4A25	80,4	18,7	16,8	21,9	18,1
	4A26	77,2	15,4	16,8	21,3	16,4
	4A27	80,0	20,6	16,6	23,1	19,7
41	4A18	57,5	18,3	-	-	-
	4A23	55,7	17,9	-	-	-
	4A17	51,2	17,2	-	-	-
45	4B29	17,1	-	-	-	-
	4B28	17,1	18,9	-	-	-
	4A24	12,0	23,8	12,3	22,3	19,2

() Werte zu hoch, wahrscheinlich Fehlmessung

+ berechneter Abbrand

8.2 Keramografie

Die Keramografie nimmt unter den Untersuchungsmethoden für die hier besprochenen Brennstab-Prüflinge eine wichtige Stellung ein. Sie beginnt mit dem Festlegen der zu untersuchenden Bereiche, wobei im wesentlichen Schnitte durch die Brennstoffsäule untersucht werden. Folgende Gesichtspunkte sind bei der Auswahl berücksichtigt worden:

- 1.) Brennstabdaten
(Stabaufbau, Brennstoffspezifikationen)
- 2.) Bestrahlungsdaten
(Stableistungsverlauf entlang der Stabachse)
- 3.) Ergebnisse der zerstörungsfreien Nachuntersuchung
Durchleuchtung (Zentralkanal und Risik Konfiguration)
 γ -Spektrometrie (Brennstoff und Spaltprodukt-
Verlagerungen)

Das Ziel der Keramografie war einerseits eine typische Verhaltensweise für bestimmte Parameterkombinationen aufzuzeigen, andererseits Besonderheiten im Stabverhalten darzulegen. Für das erstere Ziel wurden in jedem Stab Schnittebenen ausgesucht, die in möglichst ungestörten, regelmäßigen Bereichen, meist in Stabmitte lagen. Untypische Brennstoffstrukturen wurden besonders häufig an den Säulenenden beobachtet und untersucht. Eine vergleichende Auswertung, bei der die Zentralkanalgröße, der Brennstoff/Hülle-Spalt und die konzentrischen Strukturzonen im Brennstoff vermessen wurde, ist praktisch nur an Querschliffen möglich, weshalb die als typisch angesehenen Brennstoffabschnitte als Querschliffe ausgeführt wurden. Für die Beobachtung spezieller Verhaltensweisen erwiesen sich Längsschliffe als besonders brauchbar. Sie erlauben den Verlauf eines Phänomens entlang der Stabachse bis zu einer Länge von 20 mm zu verfolgen.

Für die Dokumentation einer Schliffebene wurde bei den meisten Prüflingen folgendes Schema angewandt:

A u f n a h m e t y p		Ver- größerung	Verarbeitung der Untersuchungsfläche
1.	Totalaufnahme	15 x	a) poliert b) geätzt
2.	α - und $\beta\gamma$ -Autoradiografie	15 x	poliert
3.	Mittelergrößerung	25 x	a) poliert b) geätzt
4.	Panorama-Aufnahme über den Säulenradius	100 x	a) poliert b) geätzt
5.	Detailaufnahmen	100 x 200 x 500 x	a) poliert b) geätzt

Darüber hinaus wurden an den Quer- und Längsschliffen folgende Daten am Mikroskop ermittelt:

1. Radius des Zentralkanals
2. Radius der Stengelkornzone
3. Radius der gerichteten Kornwachstumszone
4. Radius der ungerichteten Kornwachstumszone
5. Spalt zwischen Brennstoff und Hülle

Soweit vorhanden wurden auch andere abgrenzbare Strukturzonen in ihrer Ausdehnung bestimmt.

In den Abb. 32 bis 35 sind die wichtigsten Daten dieser Auswertung numerisch und grafisch wiedergegeben. Die aufgeführten Radien beziehen sich auf die äußere Abgrenzung der Strukturzonen. Beim radialen Spalt ist der Mittelwert aus vier Einzelmessungen angegeben, die bei Querschliffen um 90° versetzt, bei Längsschliffen jeweils in Zweiergruppen einander gegenüber bestimmt wurden.

KVE	Prüfl.	Probe Quer- o. Längs	Zentralka- nalradius r [mm]	Säulenkrist- zone r [mm]	Kornwachs- tumszone r [mm]	rad. Spalt [μm]	ZK	Kornwachs-
							Säulenkrist.	rad.Spalt
							← Brennstoffradius →	
33	B 10	1 L	0,95	2,50	2,75	70		
		4 Q	0,83	2,85	2,95	90		
		6 Q	0,92	2,45	2,70	10		
	B 7	1 L	0,80	2,45	2,70	40		
		4 Q	0,83	2,55	2,75	60		
		6 Q	1,10	2,55	2,75	20		
	B 6	1 L	0,23	2,50	2,70	45		
		4 Q	0,96	2,35	2,60	40		
		6 Q	0,83	2,40	2,60	45		
34	B 13	1 L	0,80	2,40	2,70	20		
		3 Q	0,95	2,50	2,75	0		
		5 L	1,00	2,40	2,75	25		
		6 Q	1,00	2,50	2,80	35		
	B 12	1 L	1,15	2,30	2,55	20		
		2 Q	0,73	2,10	2,40	0		
		4 L	0,70	2,50	2,70	5		
		6 Q	0,85	2,50	2,75	5		
	B 11	1 L	0,70	2,50	2,75	10		
		3 Q	1,00	2,70	2,90	10		
		5 Q	0,75	2,40	2,70	10		

Abb. 32

Brennstoffstruktur

KVE	Prüfl.	Probe Quer- o. Längs	Zentralka- nalradius r [mm]	Säulenkrist- zone r [mm]	Kornwachs- tumszone r [mm]	rad. Spalt [µm]	ZK	Kornwachs.	
							Säulenkrist.	Brennstoffradius	rad.Spalt
35	4A4	1 L	1,15	2,40	-	20			
		3 Q	0,75	2,10	-	0			
		5 L	1,30	2,20	2,45	34			
	4A2	1 L	1,00	2,40	2,70	5			
		4 Q	0,60	2,30	2,60	10			
		5 Q	0,95	2,50	2,75	10			
		6 L	0,85	2,40	-	15			
	4A1	1 L	0,95	2,50	2,75	15			
		3 Q	1,00	2,40	2,70	0			
		5 L	0,95	2,40	-	20			
	36	4A9	1 L	1,30	2,35	2,60	30		
			3 Q	0,85	2,30	2,55	-		
5 Q			0,75	2,10	2,45	0			
6 L			0,80	2,20	2,50	10			
4A8		1 L	1,10	2,30	2,55	25			
		3 Q	1,05	2,40	2,60	0			
		5 Q	0,95	2,30	2,55	0			
		6 L	1,00	2,40	2,60	10			
4A5		1 L	1,30	2,40	2,65	15			
		3 Q	1,10	2,30	2,60	10			
		5 Q	0,95	2,30	2,50	5			
		6 L	1,00	2,20	2,50	10			

Abb. 33

Brennstoffsstruktur

KVE	Prüfl.	Probe Quer- o. Längs	Zentralka- nalradius r [mm]	Säulenkrist- zone r [mm]	Kornwachs- tumszone r [mm]	rad. Spalt [µm]	ZK	Kornwachs-
							Säulenkrist. ← Brennstoffradius →	rad. Spalt
36	4A3	1 L	1,30	2,40	2,65	30		
		3 Q	0,72	2,40	2,70	0		
		5 Q	0,90	2,30	2,65	5		
		6 L	0,85	2,25	2,55	10		
37	4A19	1 L	1,25	2,55	2,80	40		
		4 Q	1,08	2,60	2,85	15		
		6 Q	1,08	2,55	2,80	25		
	4A16	1 L	1,30	2,60	2,80	55		
		4 Q	-	2,60	2,85	30		
		6 Q	1,38	2,70	2,90	50		
	4A15	1 L	1,18	2,70	2,90	-		
		4 Q	1,15	2,70	2,90	0		
		6 Q	0,28	2,65	2,80	0		
		7 L	1,45	2,70	2,85	-		
	B 14	1 L	1,00	2,35	2,70	5		
		4 Q	0,92	2,40	2,75	0		
6 Q		0,95	2,45	2,80	0			
38	4A22	1 L	1,35	-	-	60		
		4 Q	1,14	2,75	3,00	0		
	4A21	2 Q	1,60	2,70	3,00	0		
		4 Q	-	2,80	3,10	0		

Abb. 34

Brennstoffstruktur

KVE	Prüfl.	Probe Quer- o. Längs	Zentralka- nalradius r [mm]	Säulenkrist- zone r [mm]	Kornwachs- tumszone r [mm]	rad. Spalt [µm]	ZK	Kornwachst.	
							Säulenkrist. ← Brennstoffradius →	rad. Spalt	
38	4A20	1 L	1,45	3,00	3,20	-			
		3 Q	1,00	3,75	2,95	5			
40	4A28	1 L	1,40	-	2,90	-			
		4 Q	1,10	2,70	2,95	0			
	4A25	1 L	1,40	-	2,65	0			
		4 Q	1,12	2,70	3,00	0			
	4A26	1 Q	1,50	2,85	3,20	-			
		4 Q	1,15	2,75	3,20	0			
	4A27	1 L	1,30	-	2,85	20			
		4 Q	1,15	2,60	2,90	0			
	41	4A18	1 L	1,55	2,50	2,80	10		
			4 Q	1,23	2,75	3,20	0		
4A23		1 L	1,10	3,00	3,20	10			
		2 Q	1,35	3,10	-	0			
		4 Q	0,90	2,70	3,00	0			
4A17		1 L	1,40	3,00	3,20	-			
		2 Q	0,35	3,00	3,20	15			
		4 Q	0,59	2,50	2,80	0			
45	4A24	1 L	1,30	2,80	-	0			
		3 Q	1,25	2,80	-	0			
		4 L	-	2,80	-	0			
		5 L	0,34	2,90	-	0			

Abb. 35

Brennstoffstruktur

8.3 Radiochemische Abbrandbestimmungen

Aus den Temperaturanzeigen der Thermoelemente in den Kapselversuchseinsätzen wurde für jeden Prüfling die Stableistung und, integriert über die Bestrahlungszeit, der Abbrand errechnet.

Zur Stützung dieser Ergebnisse wurden zusätzlich die Abbrände durch radiochemische Isolierung und quantitative Analyse bestimmter Spaltprodukte ermittelt.

Hierzu wurden aus dem Bereich der Brennstoffsäule 8 bis 10 mm lange Abschnitte herausgetrennt. Sie enthielten gewöhnlich etwa 2 g Brennstoff. Die Lage der Probe innerhalb der nur 80 mm langen Brennstoffsäule wurde im wesentlichen dadurch festgelegt, daß weitere Untersuchungen große Teile der Brennstoffsäule beanspruchten und somit nur Zwischenstücke für die Abbrandanalyse zur Verfügung standen. Die ebenfalls verfügbaren Enden der Brennstoffsäulen wurden hingegen nie verwendet, da höchst unsicher ist, inwieweit konstruktive Details wie Isoliertabletten und Rhodium-Endscheiben den Abbrand örtlich verändert haben. Dem Mangel an geeignetem Untersuchungsmaterial wurde teilweise dadurch begegnet, daß aus zur Spaltgas-Bestimmung aufgelösten Brennstababschnitten Proben der Abbrandanalyse zugeführt wurden.

Als Abbrandindikator wurde für die meisten Prüflinge das Spaltprodukt Ce-144/Pr-144 verwendet. Eine Begründung für diese Wahl ist an anderer Stelle [2] dargelegt. Die Berechnung des Abbrandes wird erschwert durch die Tatsache, daß vier verschiedene Nuklide im Brennstoff gespalten werden und somit vier Quellen für die Bildung des Ce-144/Pr-144 berücksichtigt werden müssen und zwar alle mit unterschiedlichen Ausbeuten.

Bei einem typischen Brennstoffprüfling lagen die Anteile der Einzelquellen, gemittelt über die Bestrahlungszeit, etwa wie folgt:

Pu-239	thermische Spaltung	86 %
Pu-241	thermische Spaltung	8 %
U-235	thermische Spaltung	5 %
U-238	schnelle Spaltung	1 %

In dieser Aufstellung sind geringere Beiträge anderer Spaltquellen (z.B. Schnellspaltung von Pu-240) noch nicht berücksichtigt. Die entsprechenden Spaltausbeuten für das Ce-144/Pr-144 sind [12]:

y für Massenzahl 144	thermisch gespaltener Atomkern
3,78 ± 0,08	Pu-239
4,13 ± 0,11	Pu-241
5,42 ± 0,02	U-235

Aus ihnen wurde als gewichteter Mittelwert \bar{y} zu 3,87 bestimmt und für alle Abbrandrechnungen zugrundegelegt. Die Korrekturen für Aufbau und radioaktiven Zerfall des Ce-144 wurden mit der Halbwertszeit von 285 Tagen durchgeführt. Als Bezugsgröße für die ermittelte Menge an Ce-144 wurden in der Probe jeweils die Elemente Uran und Plutonium analysiert und eine Korrektur für den Abbrand angebracht. Im Ergebnis der Primär-Rechnung wurde der Abbrand in Prozent der ursprünglich vorhandenen schweren Atome (FIMA) erhalten. Wo notwendig, wurde dieser Wert in Mwd/t umgerechnet. Hierzu wurden 10 000 Mwd/t = 1,07 % FIMA gleichgesetzt.

Im späteren Verlauf der Abbrand-Analysen wurde an Prüflingen von 2 Kapselversuchseinsätzen (KVE 38 und KVE 40) zusätzlich Nd-148 als Abbrandindikator massenspektrometrisch bestimmt. Da die Spaltausbeuten für dieses Nuklid bei den hier zu betrachtenden spaltbaren Kernen keine großen Unterschiede aufweisen und weitgehend unabhängig von der Energie der Spaltneutronen sind, wurde diesen Abbrandbestimmungen größere Genauigkeit zugemessen, zumal bei dem stabilen Nd-148 auch noch die Notwendigkeit einer Korrektur für den radioaktiven Zerfall entfiel. In der nachfolgenden Tabelle XXI ersetzen bei KVE 38 und KVE 40 die Nd-148-Werte die nicht mehr erwähnten Ce-144-Werte.

8.4 Vergleich der radiochemischen und berechneten Abbrandwerte

In Tabelle XXI werden die radiochemischen und berechneten Abbrandwerte sowie die Abweichungen gegenübergestellt. Es wurden willkürlich die radiochemisch bestimmten Werte als 100 % angenommen. In Abb. 36 schließlich wurde die Abweichung der berechneten Abbrände gegenüber den radiochemisch bestimmten aufgetragen. Wie man sieht, ergibt sich nahezu unabhängig von der Höhe des Abbrandes ein Streuband von $\pm 9,5$ %, wenn man die mit Sicherheit nicht geschmolzenen Prüflinge nur berücksichtigt. H. Hoffmann et al. [13] geben für kalometrisch bestimmte

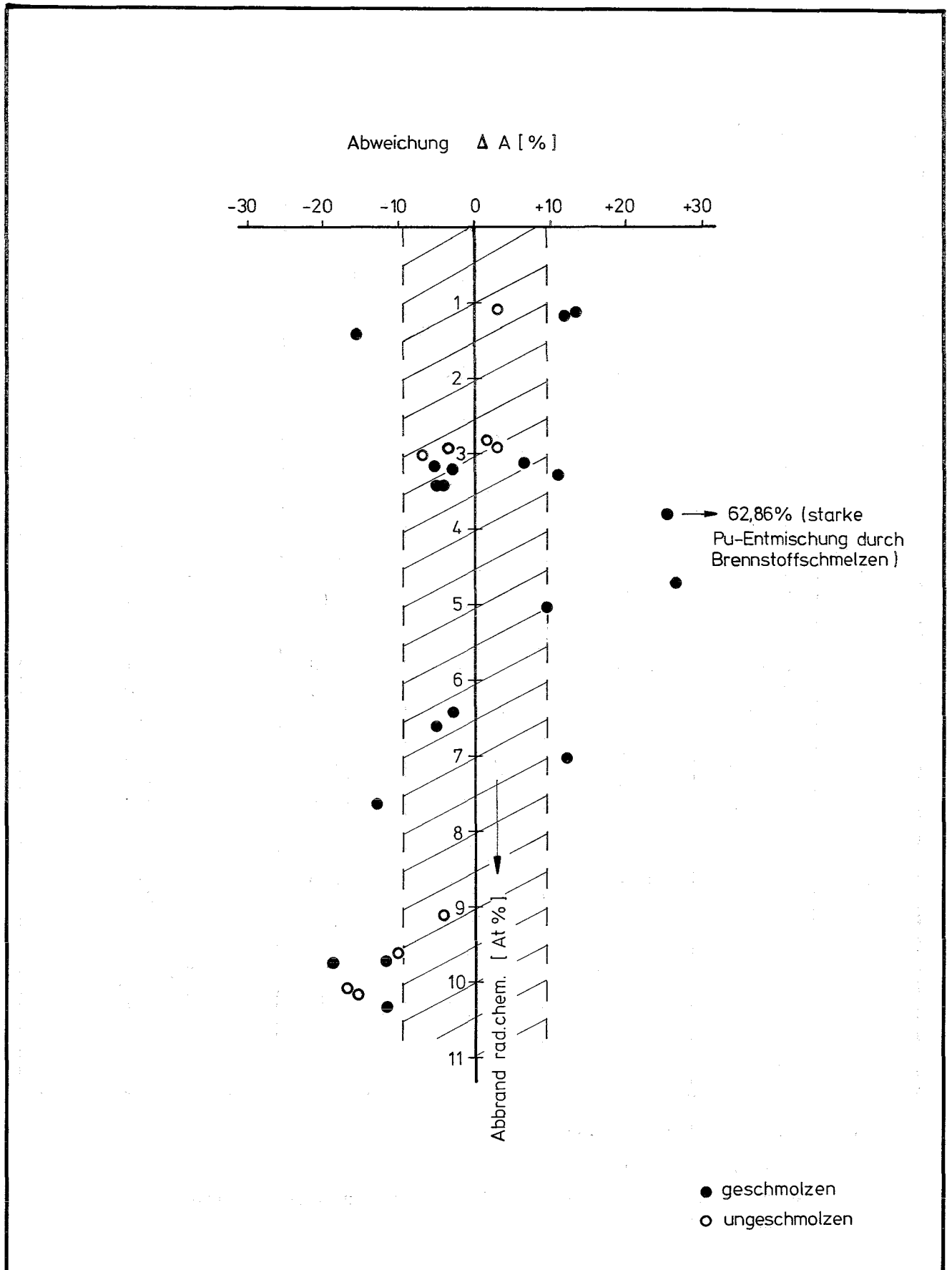
Tabelle XXI Vergleich der radiochemisch bestimmten und berechneten Abbrandwerte (Basis: 1 % Abbrand = 9,35 MWd/kg M)

KVE-Nr.	Prüfling Nr.	Abbrand radiochem. (At %)	Abbrand berechnet (At %)	ΔA (At %)	ΔA (%) (A radiochemisch=100)
33	B 10 +	1,16	1,30	+ 0,14	+ 12,07
	B 7 +	1,10	1,25	+ 0,15	+ 13,64
	B 6	1,07	1,10	+ 0,03	+ 2,80
34	B 13 +	3,17	3,00	- 0,17	- 5,36
	B 12 +	3,21	3,12	- 0,09	- 2,80
	B 11	2,91	3,00	+ 0,09	+ 3,09
35	4A/4	2,81	2,85	+ 0,04	+ 1,42
	4A/2	2,90	2,78	- 0,11	- 3,79
	4A/1	3,02	2,80	- 0,22	- 7,28
36	4A/9 +	3,12	3,32	+ 0,20	+ 6,41
	4A/8 +	3,24	3,56	+ 0,35	+ 10,80
	4A/5 +	3,42	3,25	- 0,16	- 4,68
	4A/3 +	3,43	3,25	- 0,18	- 5,25
37	4A/19+	6,43	6,63	+ 0,20	- 3,11
	4A/16+	6,58	6,24	- 0,34	- 5,17
	4A/15+	7,61	6,62	- 0,99	- 13,00
	B 14	7,03	6,17	- 0,86	- 12,23
38	4A/22+	10,34	9,12	- 1,22	- 11,80
	4A/21+	9,68	8,50	- 1,18	- 12,19
	4A/20+	9,67	7,81	- 1,86	- 19,23
40	4A/28	9,10	8,70	- 0,40	- 4,40
	4A/25	9,64	8,60	- 1,04	- 10,79
	4A/26	10,04	8,25	- 1,79	- 17,83
	4A/27	10,14	8,55	- 1,59	- 15,68
41 ⁺⁺	4A/18+	(3,77)	6,14	+ 2,37	+(62,86)
	4A/23+	4,70	5,95	+ 1,25	+ 26,60
	4A/17+	5,00	5,47	+ 0,47	+ 9,40
45	4A/24+	1,42	1,20	- 0,22	- 15,49

+ Prüflinge mit lokalem Brennstoffschmelzen

++ 1 % A = 9,60 MWd/kg M

() Starke Pu-Entmischung an der Stelle der Abbrandprobe durch Brennstoffschmelzen



Abweichung der gerechneten gegenüber den radiochemisch-bestimmten Abbrand-Werten

Abb. 36

Abbrände bei Temperaturen oberhalb 500°C Werte einen mittleren Fehler von ca. $\pm 6\%$, für die radiochemische Methode über Ce-144 einen von $\pm 4,5\%$, für die über Nd-148 bestimmten Werte einen von $\pm 2,5\%$ an. Die schwarz markierten Punkte stellen Prüflinge dar, bei denen es infolge Brennstoffschmelzen zu starken lokalen Entmischungen kam und die radiochemische Bestimmung mit Extrapolation zu falschen Werten führen mußte. Die offenen Kreise markieren die Prüflinge mit intakter (ungeschmolzener) Brennstoffstruktur.

9. Dokumentation der zerstörungsfreien und zerstörenden Nachuntersuchung

Im folgenden Abschnitt wird eine umfassende Dokumentation der zerstörungsfreien und zerstörenden Nachuntersuchung gegeben, welche eine Auswahl der wichtigsten Ereignisse für jeden der 28 Prüflinge enthält. Die Ergebnisse sind auf einem dreiseitigen Faltblatt zusammengestellt, welches folgende Aufteilung aufweist (von links nach rechts):

- Gamma-Profile des bestrahlten Prüflings:
 - a) integrales γ -Profil (Energiebereich 400 - 1700 keV),
 - b) differentielles γ -Profil für Teilenergiebereiche (isotopspezifisch, z.B. für Zr/Nb-95 700 bis 790 keV, Cs/Ba-137 640 bis 680 keV).

- Keramografische Übersicht:
 - a) technische Zeichnung des Prüflings (Maßstab 1:1) mit Markierung der Schnittebenen,
 - b) keramografische Übersichtsaufnahmen entsprechend der Schnittzahl,
 - c) α -Autoradiografie zur Darstellung der Pu-Verteilung nach Ablauf der Bestrahlung,
 - d) γ -Autoradiografien zur Charakterisierung der Spaltproduktverteilung,
 - e) Betatron-Durchleuchtung des Prüflings,
 - f) schematische Darstellung des Prüflings mit Hervorhebung des Zentralkanalverlaufes.

- Titelblatt:

Kurze Zusammenfassung der Material- und Bestrahlungsdaten des Brennstabprüflings.

Auf weiteren Einzelblättern werden weiterhin signifikante Details wie beispielsweise axiale und radiale Materialversetzungen oder -entmischungen des Brennstoffs, Nachweise für Hüllinnenkorrosion etc. in höheren Vergrößerungen gezeigt.

Abschließend sei an dieser Stelle vermerkt, daß es sich bei den angeführten Beispielen um eine nicht detailspezifische Auswahl aus einer großen Anzahl von keramografischen Aufnahmen handelt.

10. Schlußbetrachtung

Nach Abschluß der Bestrahlung und Nachuntersuchung der 28 Prüflinge der FR 2-Kapselversuchsgruppe 4a, welche der Erprobung von Brennstabprüflingen mit UO_2/PuO_2 -Mischbrennstoff unter simulierten Schnellbrüterbedingungen im thermischen Fluß dienen, kann eine Bilanz im Hinblick auf die in Kap. 2 formulierten Aufgaben und Ziele des Experimentes durchgeführt werden:

1. Die nach Auslegung und Spezifikation vorgesehenen Stableistungen von maximal 700 W/cm wurden ebenso wie die angestrebten maximalen Hülloberflächentemperaturen von $560^{\circ}C$ erreicht.
2. Die von den Prüflingen erreichten Abbrände liegen spezifikationsgemäß in einem Bereich von 10 bis 80 Mwd/kg Metall, wobei lokal Spitzenabbrände von ca. 85 bis 90 Mwd/kg Metall erzielt wurden.
3. Alle Brennstabprüflinge blieben intakt, obwohl infolge von Temperaturüberhöhung die Bestrahlung zweier Kapselversuchseinsätze - vermutlich infolge eines Kapsel Fehlverhaltens - abgebrochen werden mußte. Extreme Dimensionsänderungen konnten bei keinem Prüfling festgestellt werden.
4. In den Prüflingen treten die durch Temperatur, Stableistung und Abbrand bewirkten Strukturänderungen wie Zentralkanal und Ausbildung von Strukturzonen (Stengelkorn, gerichtetes Kornwachstum) auf. Bei einigen Prüflingen wurde zentrales Brennstoffschmelzen beobachtet, welches teilweise zu einer vollständigen Entmischung von UO_2 und PuO_2 sowie durch axiale

Brennstoffverlagerung zu einem Zusetzen des Zentralkanals führte. In keinem Falle sind jedoch Hinweise auf ein bevorstehendes Stabversagen zu erkennen.

5. Bei Prüflingen mit Abbränden von ca. 30 MWd/kg Metall ist bereits eine deutliche Pu-Anreicherung um den Zentralkanal zu erkennen, welche bei höheren Abbränden weiter zunimmt.
6. Bedingt durch die hohen Brennstofftemperaturen hat in den meisten Prüflingen eine axiale Umverteilung bestimmter Spaltprodukte stattgefunden. Typisch für die Änderungen sind Anreicherungen von Cs-137 am oberen, dem Spaltgasraum zugewandten Ende der Brennstoffsäule sowie Metallreguli mit Ru-106 als wesentlichsten aktiven Bestandteil im Innern des Zentralkanals; vornehmlich an seinem unteren Ende.
7. Für die Spaltgasfreisetzung und -verteilung im Brennstoff ergibt sich folgendes Bild: Mit zunehmendem Abbrand erhöht sich der Anteil des freigesetzten Spaltgases auf bis zu 80 %. Das im Brennstoff verbliebene Rest-Spaltgas findet sich bei niedrigem Abbrand noch zu einem erheblichen Teil (25 %) im Gitter, bei hohem Abbrand ist es dagegen vornehmlich in den Poren zu finden.

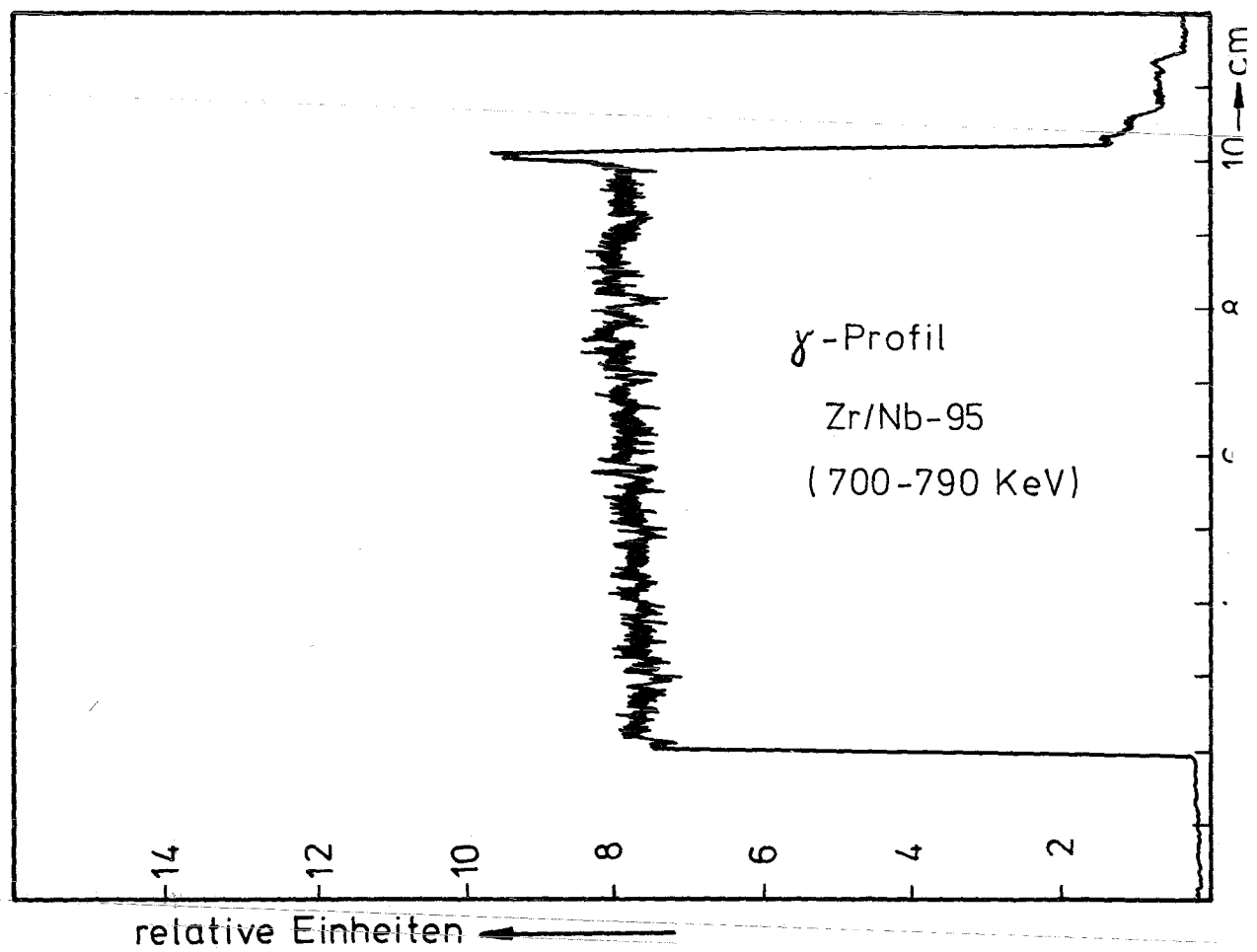
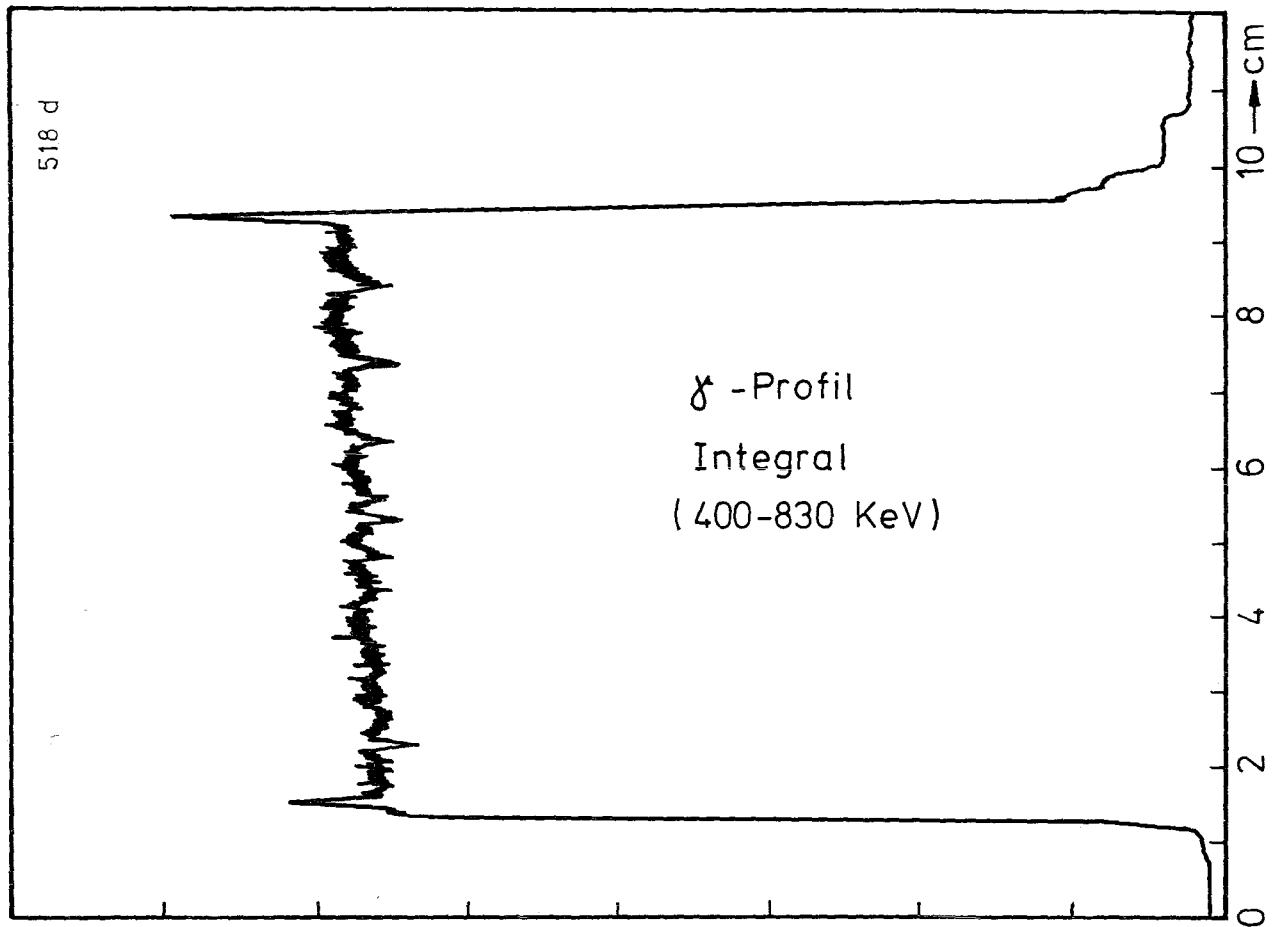
Die in der vorliegenden Dokumentation zusammengefaßten Versuchsergebnisse wurden bereits an anderer Stelle zu gezielter Auswertung für die Beantwortung einer Vielzahl von Detailfragen, z.B. hinsichtlich der Verteilung von U und Pu sowie der Spaltprodukte im Brennstoff, der Verträglichkeit des Brennstoffes mit der Hülle, der thermischen Analyse, der Spaltgasfreisetzung und -rückhaltung sowie der Leervolumenverlagerung [14, 15] herangezogen.

Literatur:

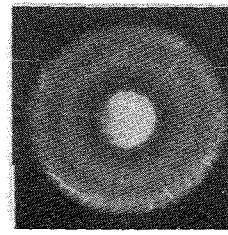
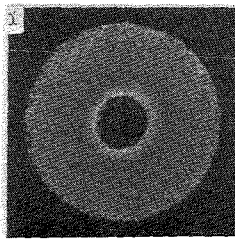
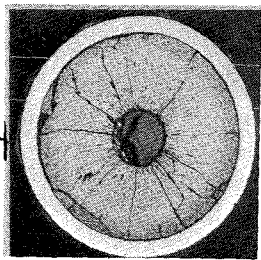
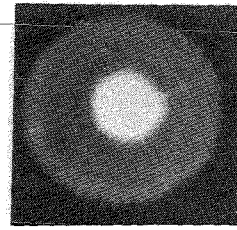
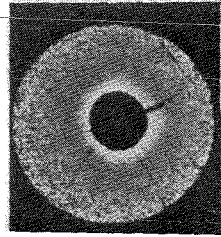
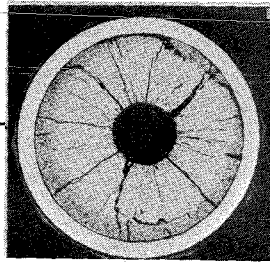
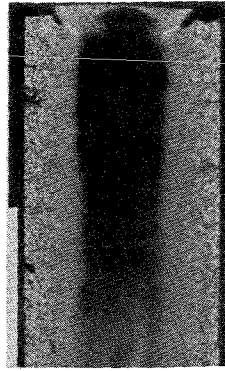
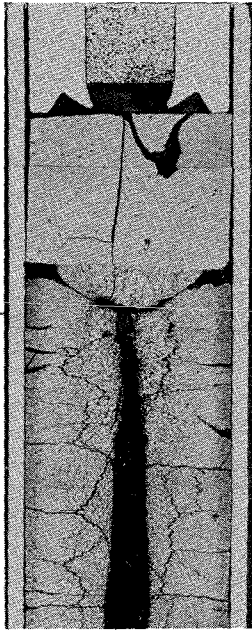
- [1] D. Freund:
Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung der Oxidbrennstabproben im FR 2, KFK-Bericht 1376, Mai 1972
- [2] D. Geithoff, D. Freund, K. Kummerer:
Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung der UO_2 -Brennstab-Prüflinge in der FR 2-Kapsel-Versuchsgruppe 3, KFK-Bericht 1239, August 1971
- [3] G. Karsten, A. Gerken:
Spezifikation des Brennstabes für FR 2-Kapsel-Experimente, Versuchsgruppe 4a (unveröffentlicht)
- [4] W. Otto:
Die Herstellung von Bestrahlungsproben für Kapselexperimente in der Versuchsgruppe 3 im FR 2, Prüfbericht Nr. 6, Dez. 1966, Fa. NUKEM
- [5] S. Hagen, H. Malauschek:
Messungen des thermischen Flusses in den Isotopenkanälen des FR 2 (unveröffentlicht)
- [6] M.J. Roth et al.:
The preparation of input data for WIMS, Winfrith, Report AEEW-R 538, August 1967
- [7] H.E. Häfner:
Bestrahlung von Brennstäben in instrumentierten Natrium-Bleiwismut-Doppelkapseln, Kerntechnik 12, 1970
- [8] H.E. Häfner:
persönliche Mitteilung
- [9] H. Gräbner:
Spaltgasmessungen, Jahresbericht der Heißen Zellen 1970, (unveröffentlicht)
- [10] K. Varteressian, L. Burris:
Fission Product Spectra from Fast and Thermal Fission of U-235 and Pu-239, ANL 7678, 1970
- [11] P. Hofmann:
Spaltproduktausbeuten bei der Spaltung von U-235, U-238, Pu-239 und Pu-241 mit Neutronen verschiedener Energien, Ext.-Bericht 6/70-2, 1970
- [12] F.L. Lisman et al.:
Burnup Determination of Nuclear Fuels, IN 1277
- [13] H. Hoffmann, H. Wertenbach:
Abbrandbestimmungen an Kernbrennstoffprüflingen aus dem FR 2, KFK-Bericht 1704, 1973
- [14] H. Huber, H. Kleykamp:
Nachbestrahlungsuntersuchungen mit der Mikrosonde an UO_2 - und $(U,Pu)O_2$ -Brennstäben der Versuchsgruppen 3 und 4a der FR 2-Kapselbestrahlungen, KFK-Bericht 1324, Februar 1972
- [15] W. Dienst, O. Götzmann, H. Kleykamp, et al.:
Auswertung der Untersuchungsergebnisse an den bestrahlten UO_2 - PuO_2 -Brennstäben der Versuchsgruppe FR 2-4a, KFK-Bericht 1727, Jan. 1973

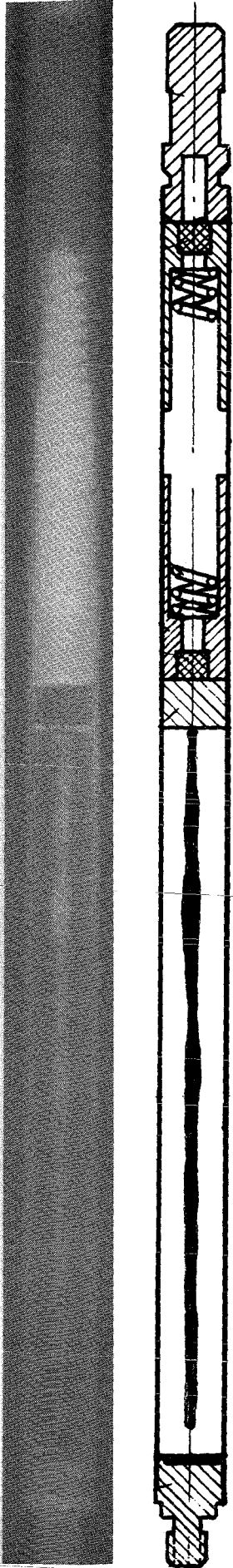
AN H A N G A

Dokumentation der zerstörungsfreien und
zerstörenden Nachuntersuchung



A





Prüfling B6

Brennstoff:

Form : Tabletten
Zusammensetzung : UO_2/PuO_2
Tablettendichte : 90,02% th.D.

Hülle:

Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,5 mm

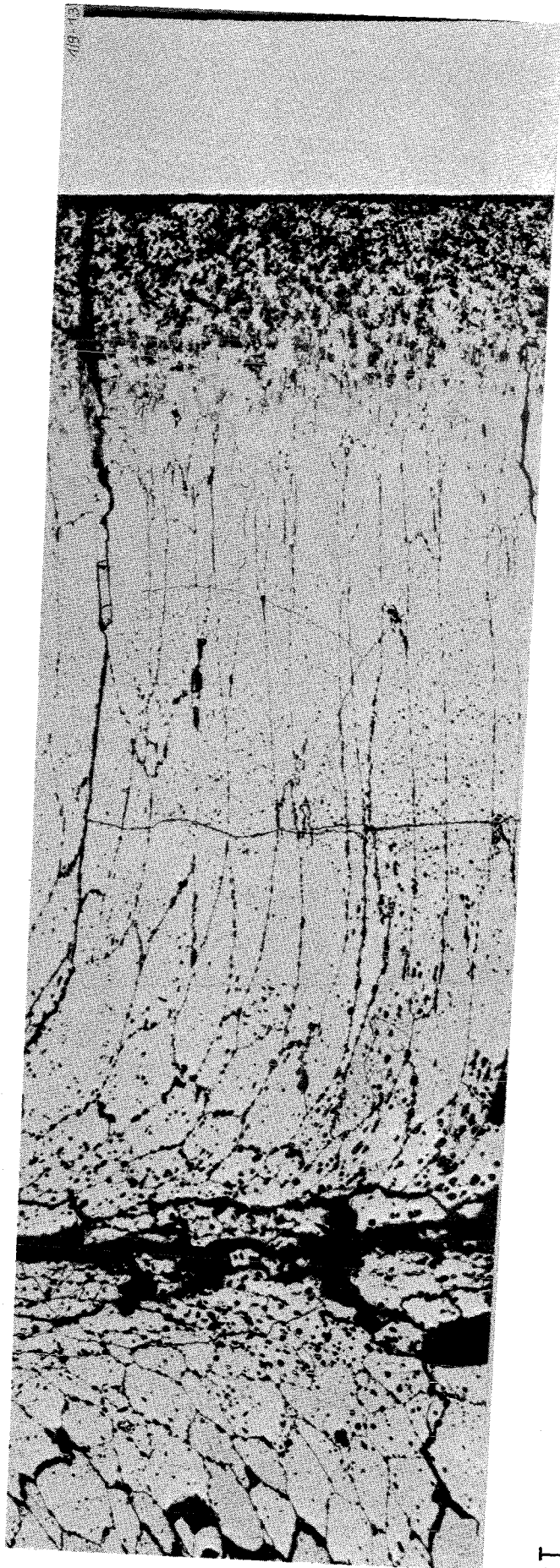
Geometrie:

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,1 mm
Schmierdichte : 86,4% th.D.

Bestrahlung:

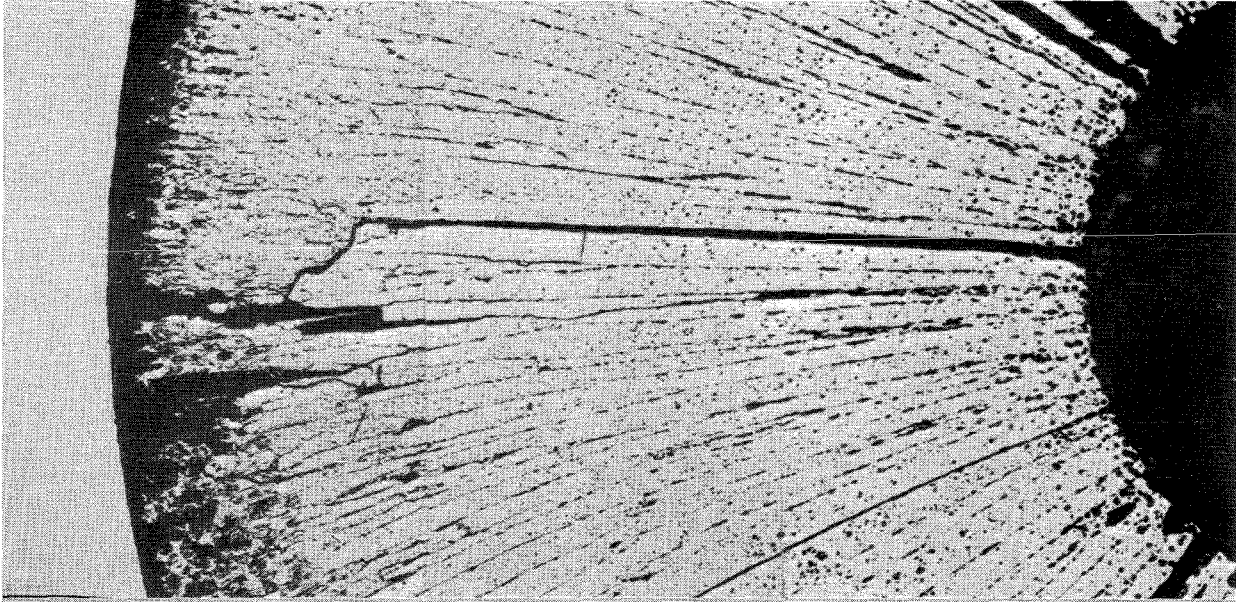
Einrichtung : Na/PbBi-Doppel-
Kapsel Typ 4
Dauer : 57 Vollasttage
Ende : 8. 4. 68
Rechn. Abbrand mittl. : 10,3 MWd/kg
Stableistung max./mittl. : 601/484 W/cm

-A/95-
zu Prüfling B7
A1



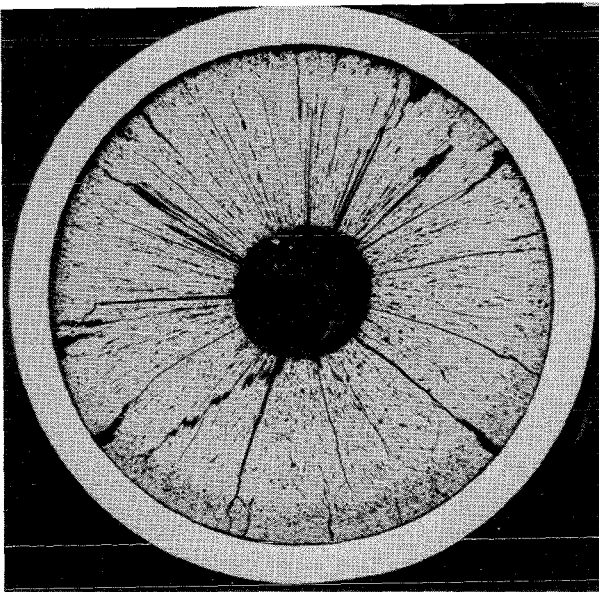
┌
0,1mm

-A/96-
zu Prüfling B7
A2

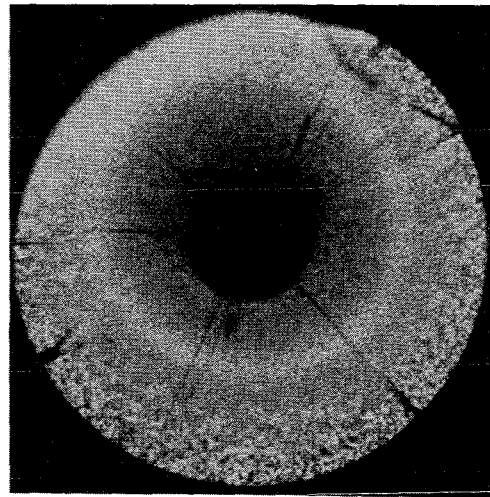


0,1mm

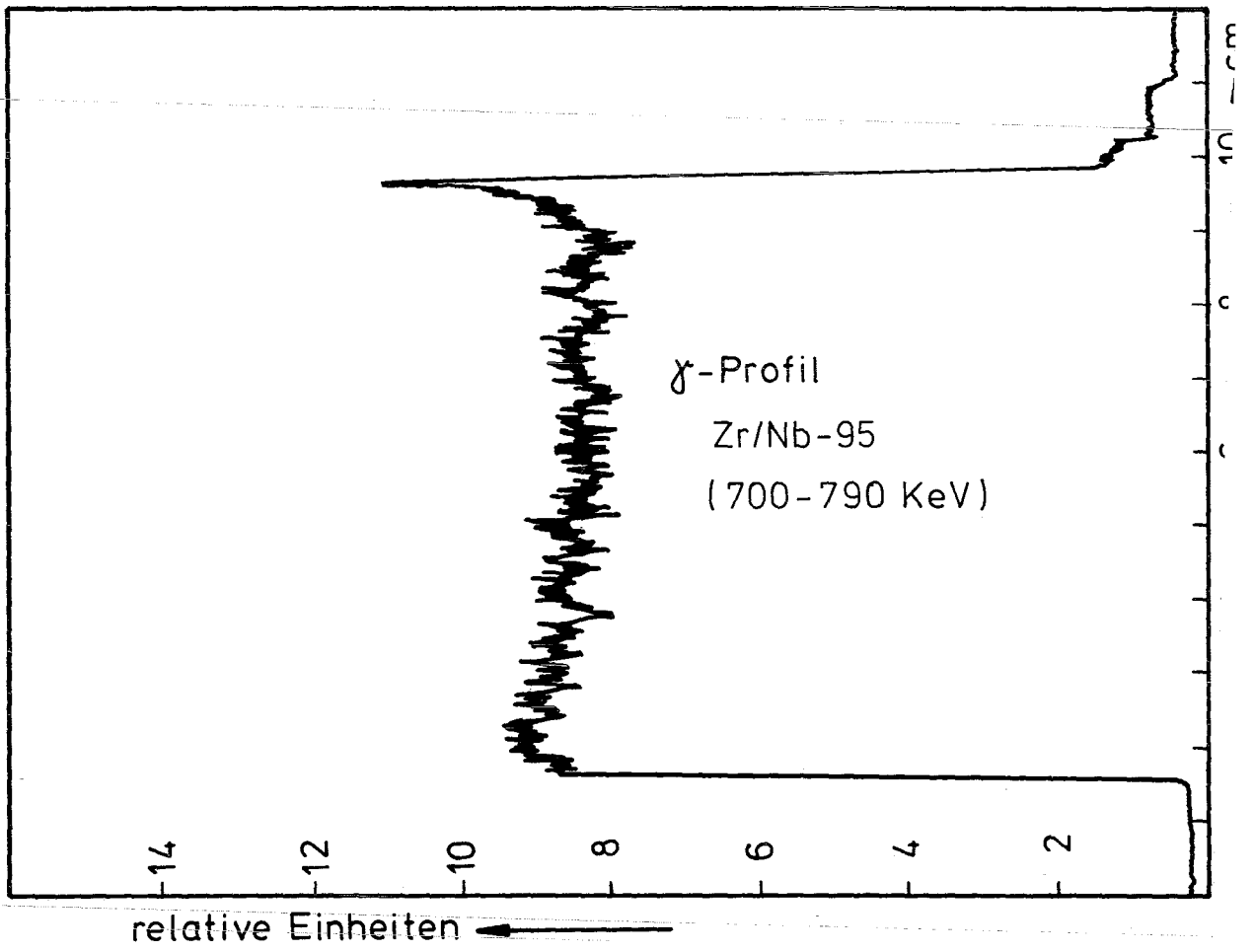
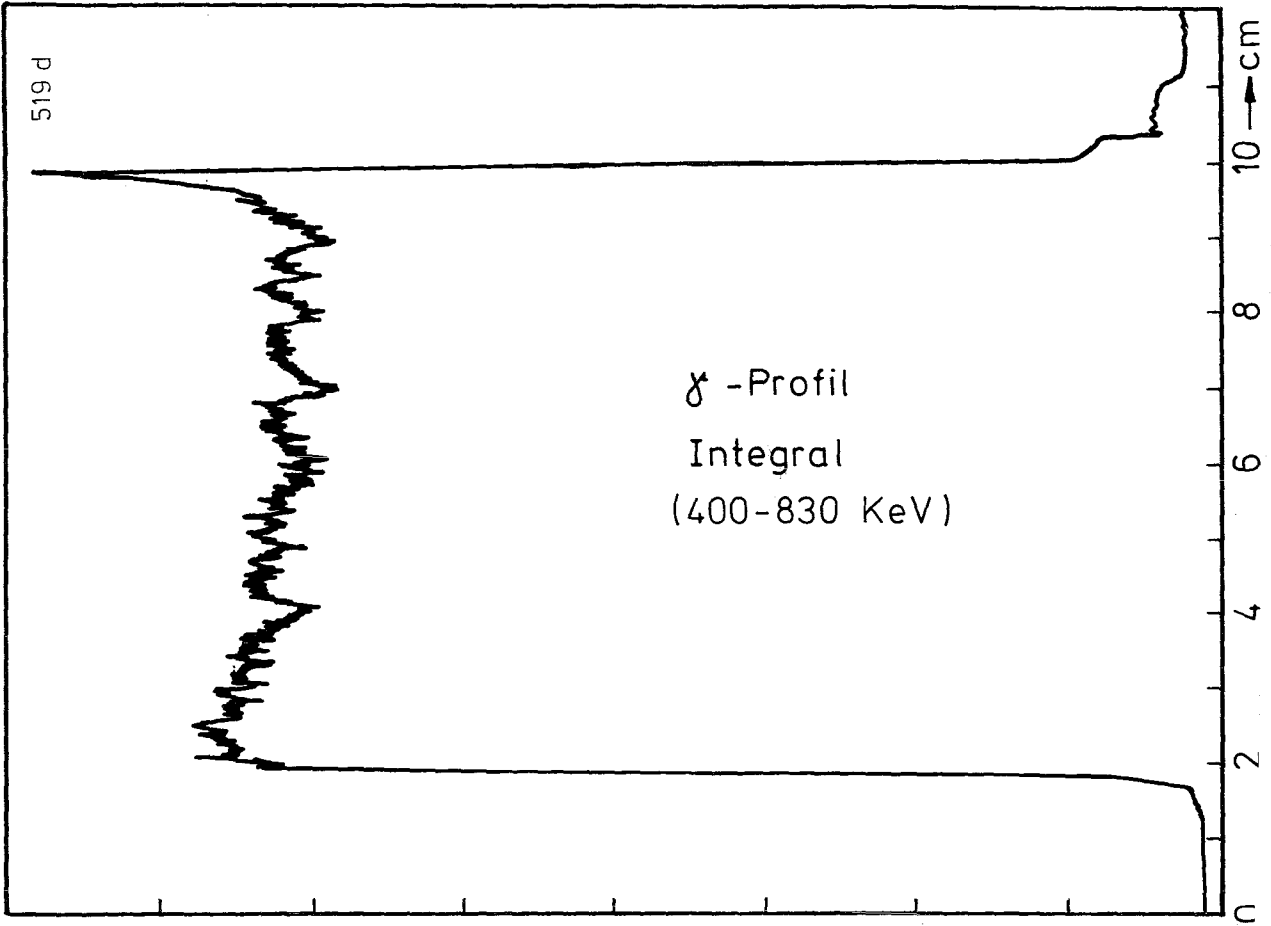
A2



B2

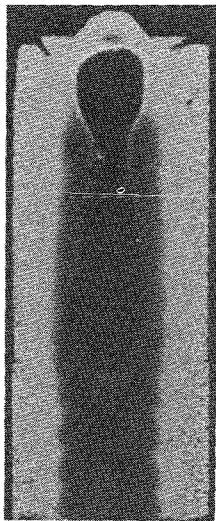
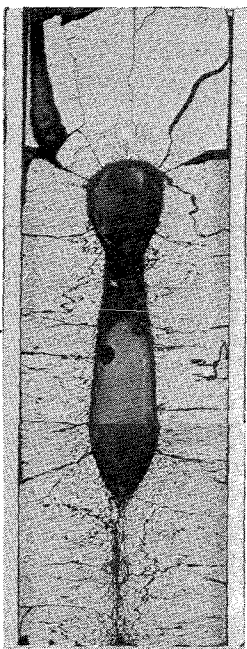


1mm

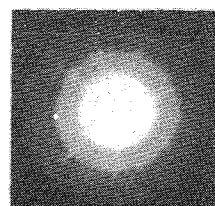
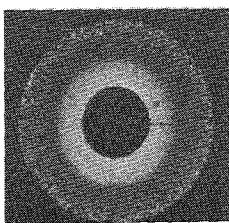
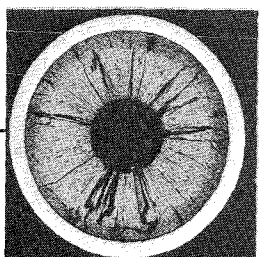
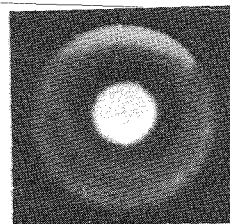
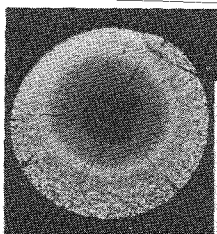
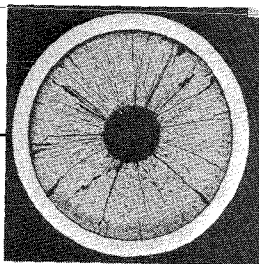


A

B



1





Prüfling B7

Brennstoff :

Form : Tabletten

Zusammensetzung : UO_2/PuO_2

Tablettendichte : 91,41% th.D.

Hülle :

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 7,4 mm

Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : 0,1 mm

Schmierdichte : 86,4% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : Na/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4

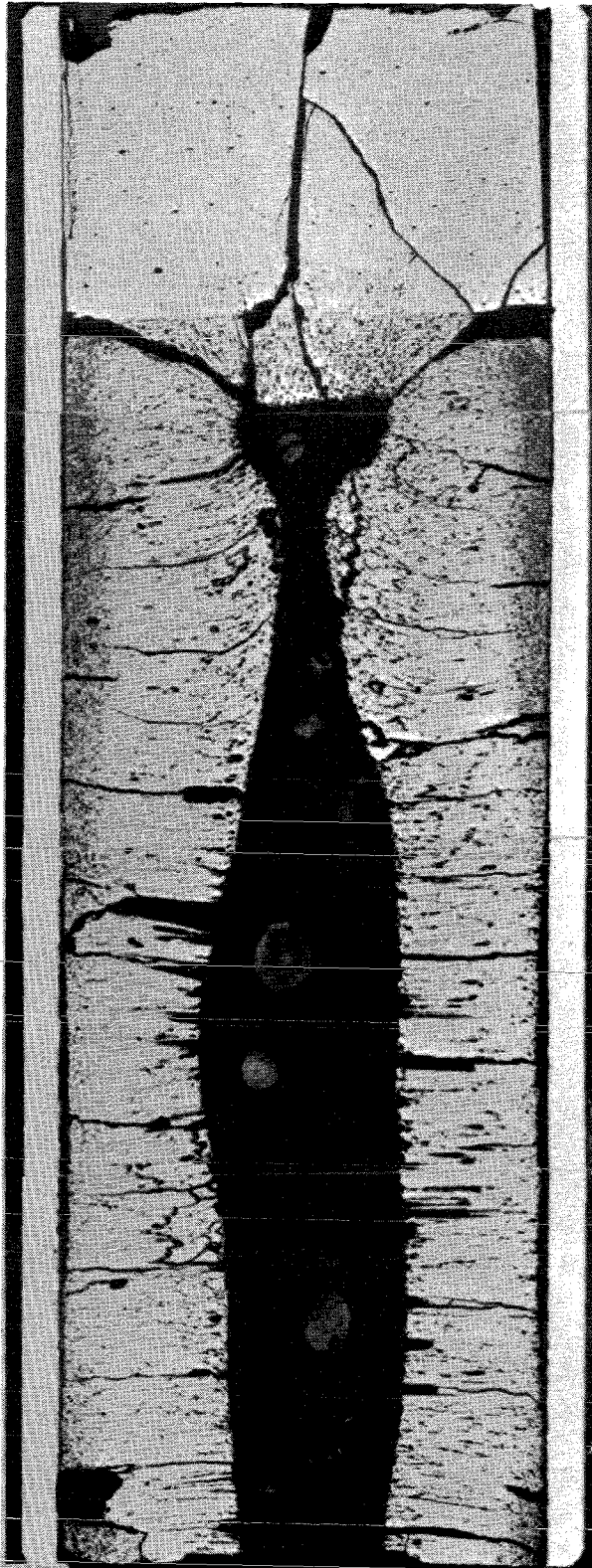
Dauer : 57 Vollasttage

Ende : 8. 4. 68

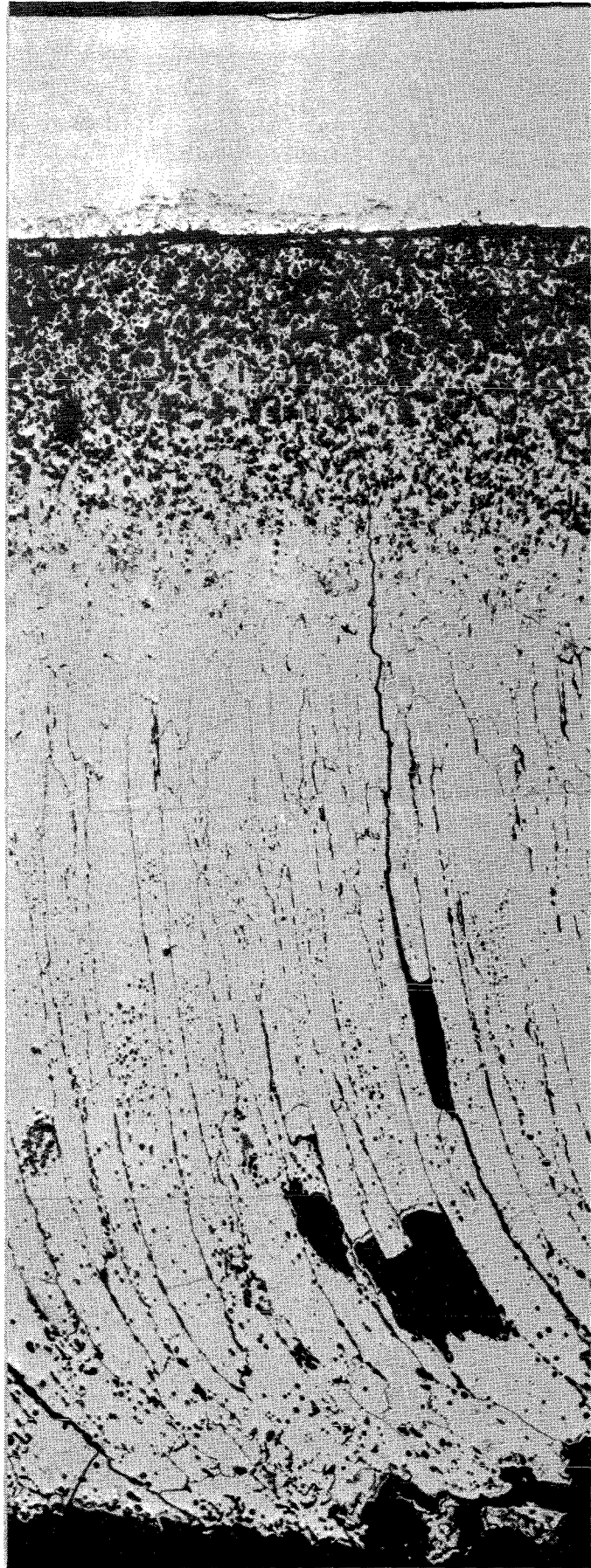
Rechn. Abbrand mittl. : 11,7 MWd/kg

Stableistung max./mittl. : 720/552 W/cm

- A /99 -
zu Prüfling B 10
A1

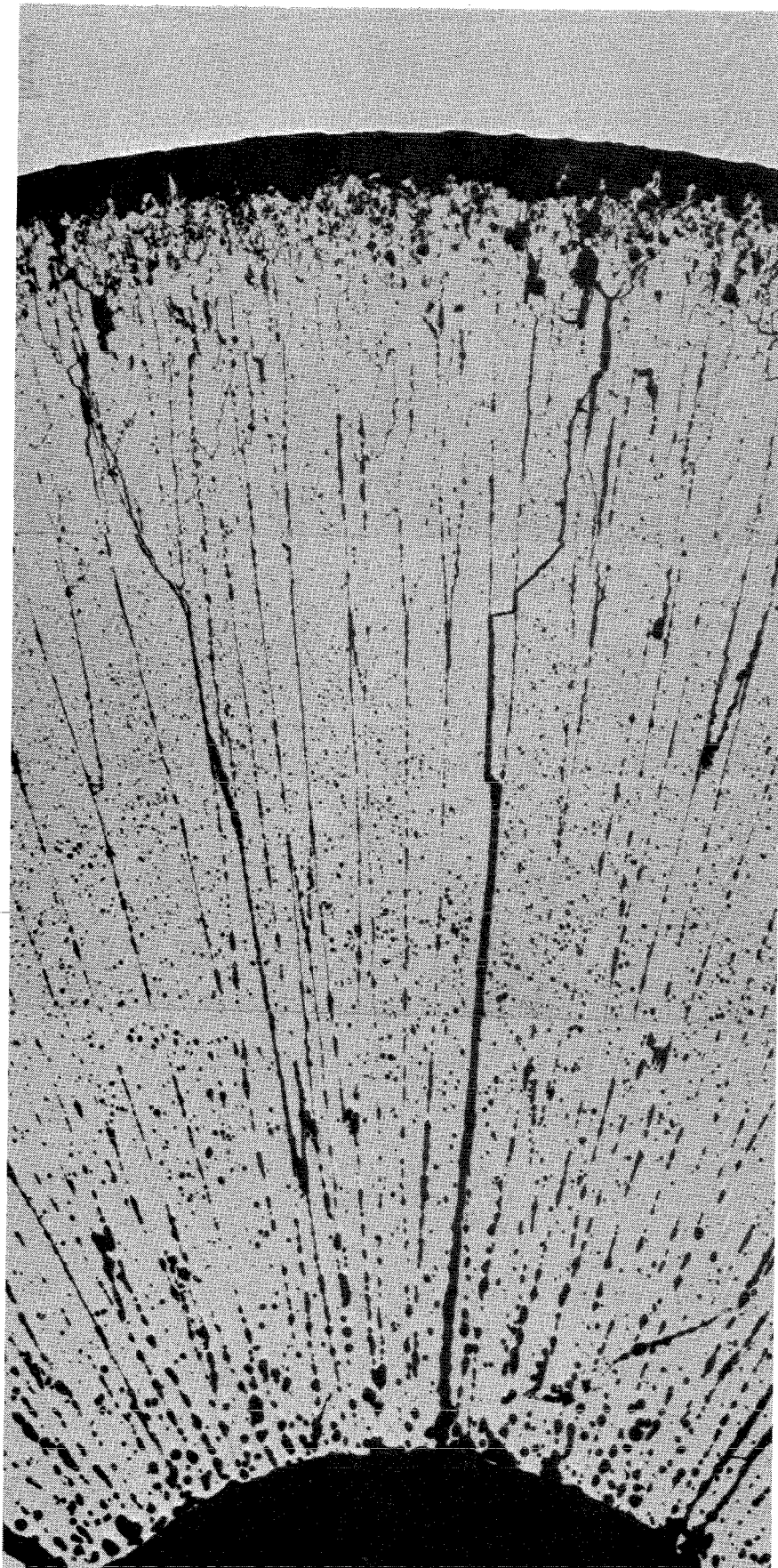


1mm

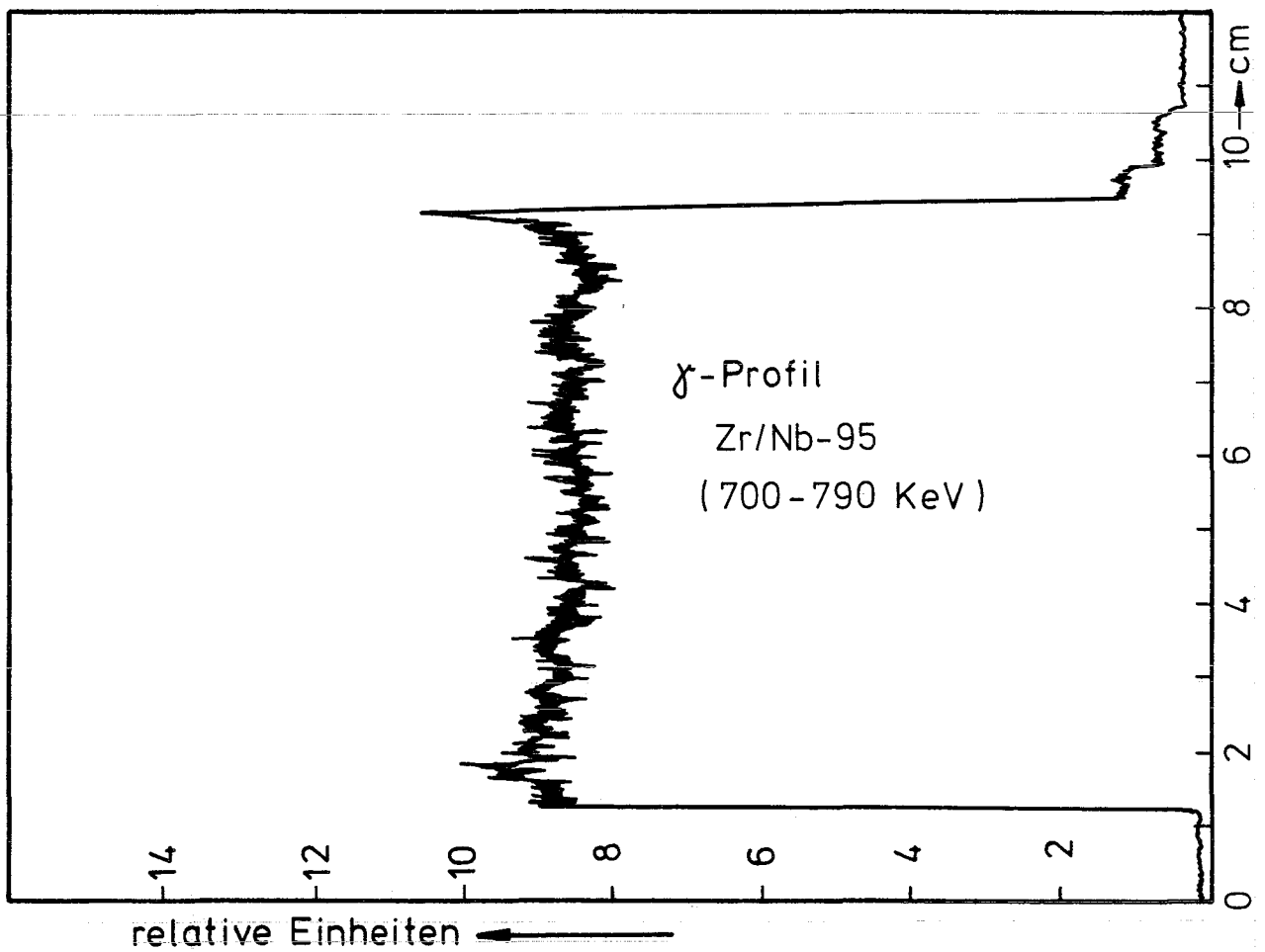
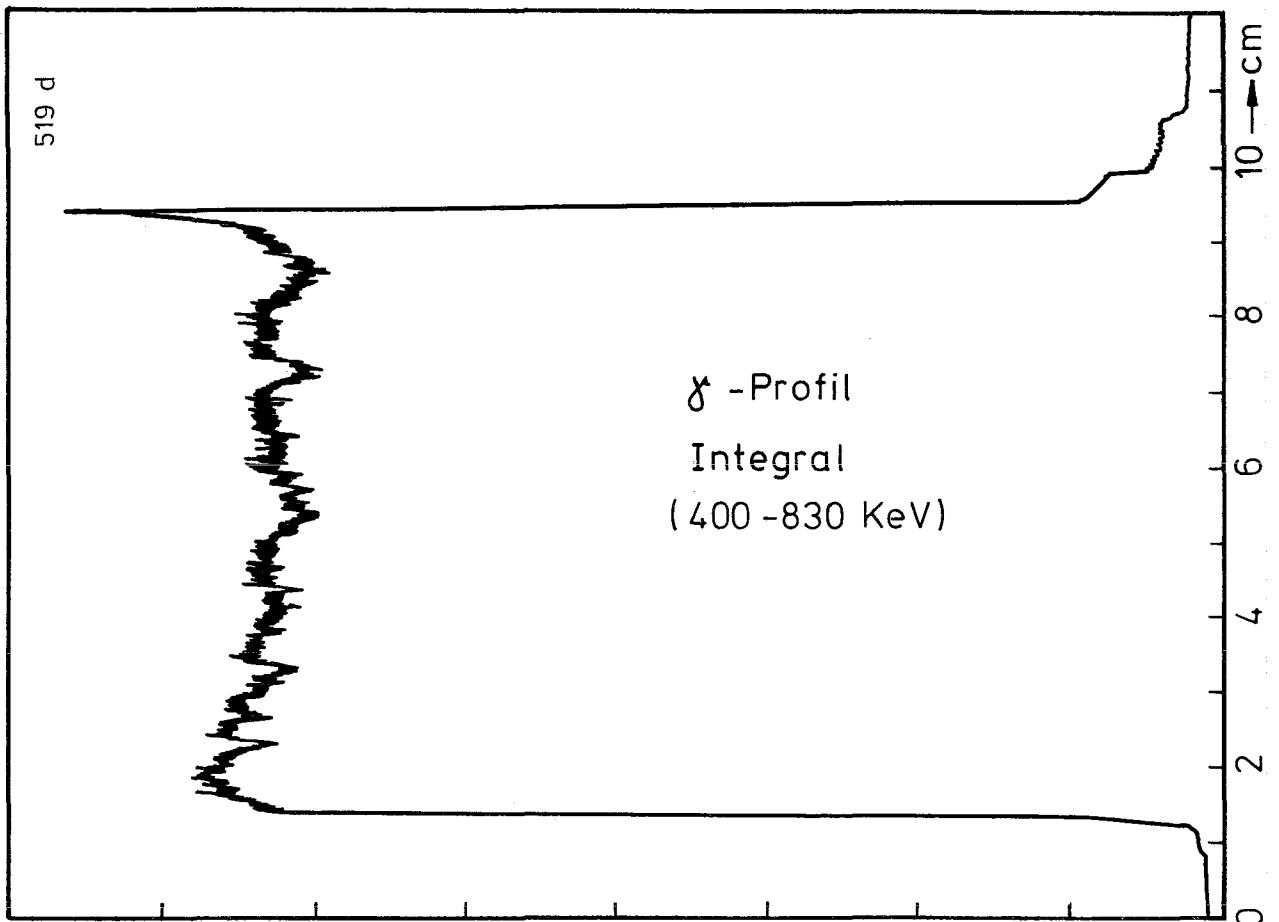


0,1mm

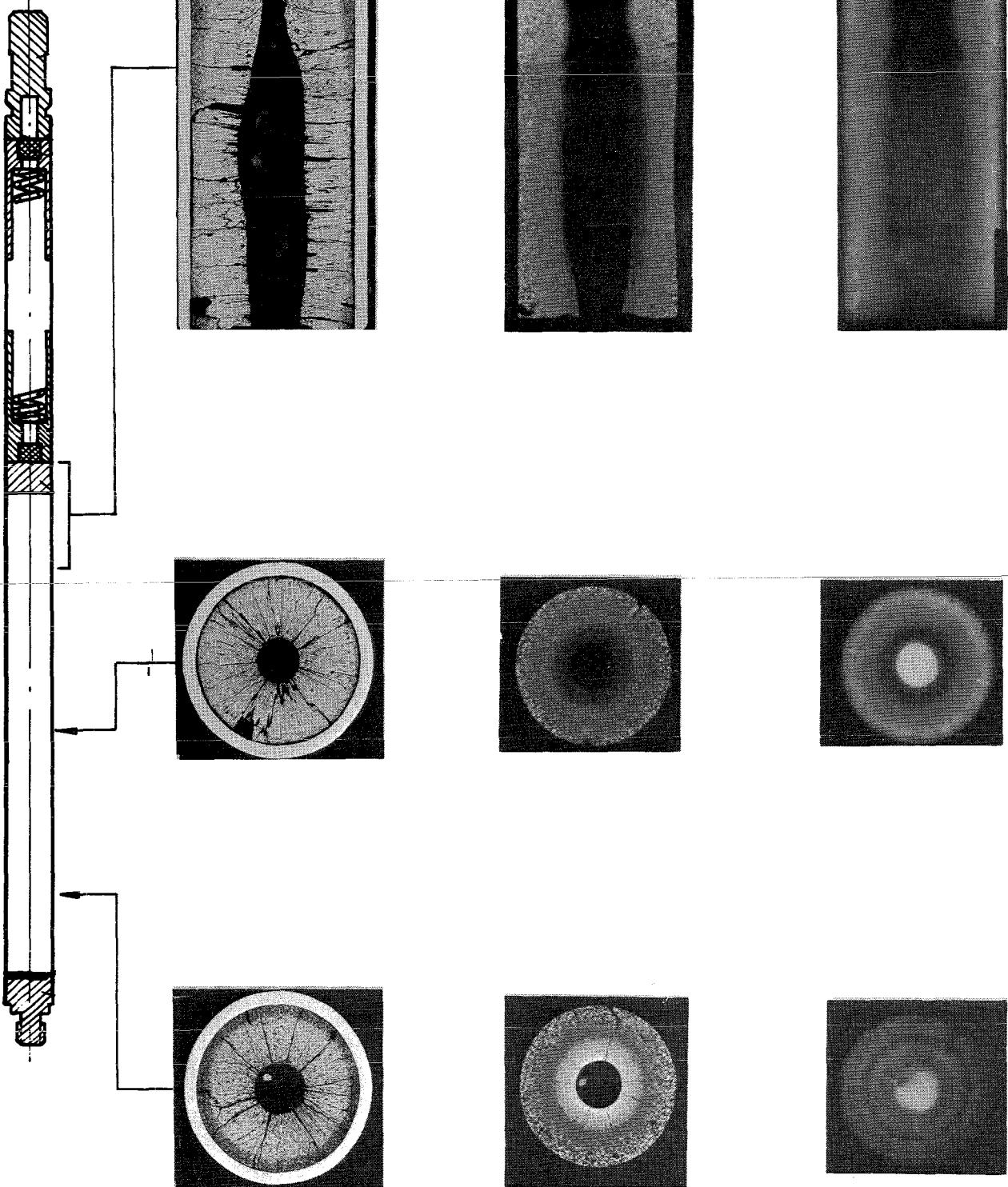
- A/100 -
zu Prüfling B 10
A2



—|—
0,1mm



A





Prüfling B10

Brennstoff :

Form : Tabletten
Zusammensetzung : UO_2/PuO_2
Tablettendichte : 91,57% th.D.

Hülle :

Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,5 mm

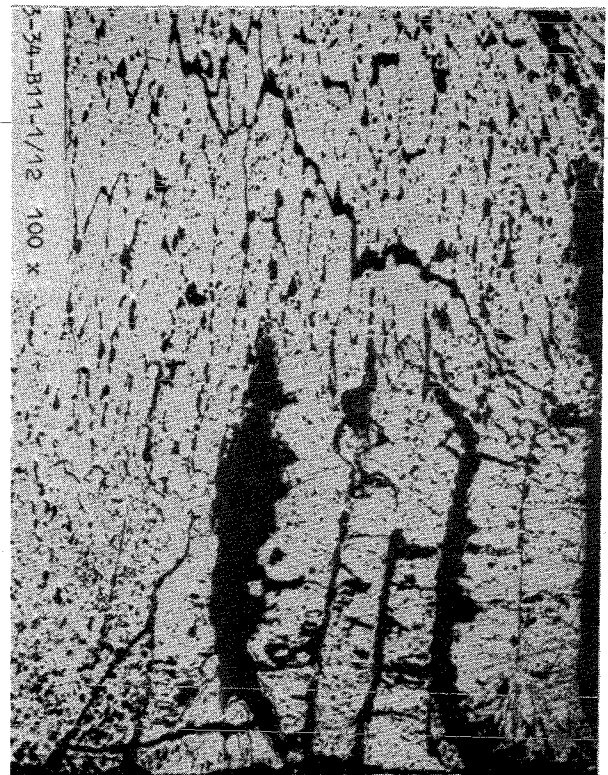
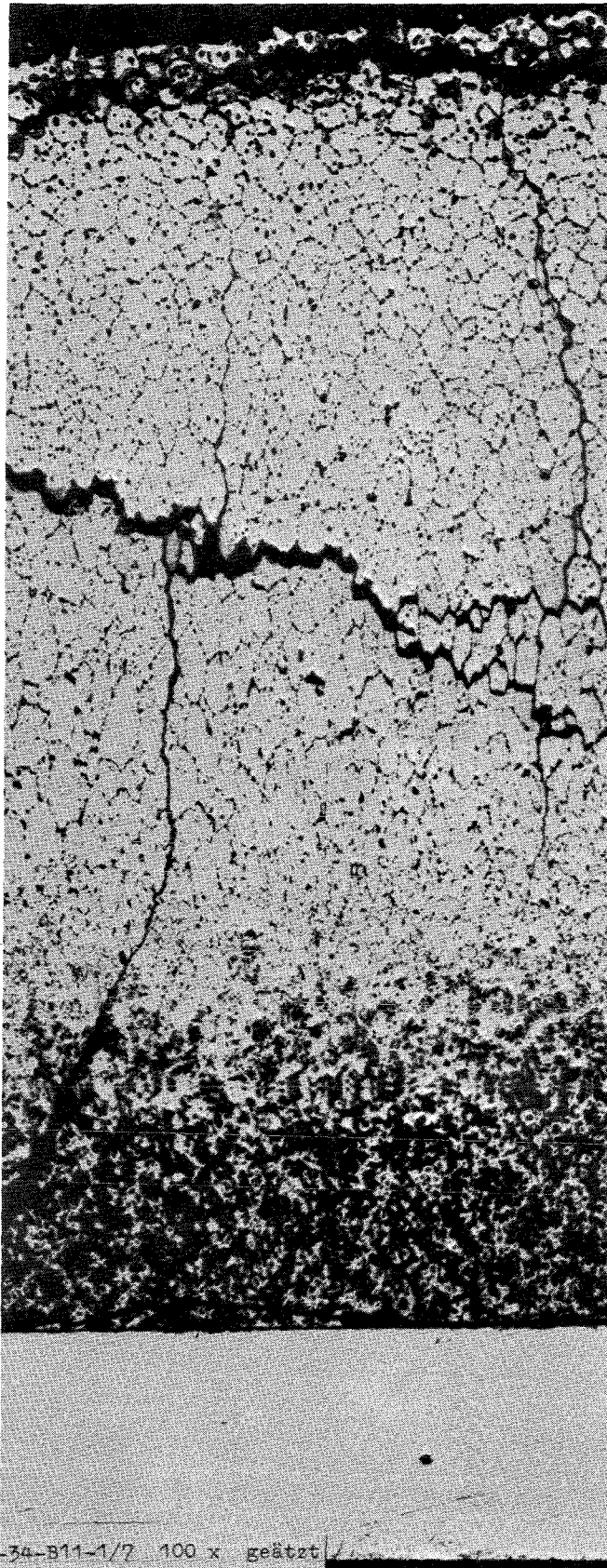
Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,1 mm
Schmierdichte : 86,4% th. D.

Bestrahlung :

Einrichtung : Na/PbBi-Doppel-
Kapsel Typ 4
Dauer : 57 Vollasttage
Ende : 8. 4. 68
Rechn. Abbrand mittl. : 12,1 MWd/kg
Stableistung max./mittl. : 627/568 W/cm

-A/103-
zu Prüfling B11
A1

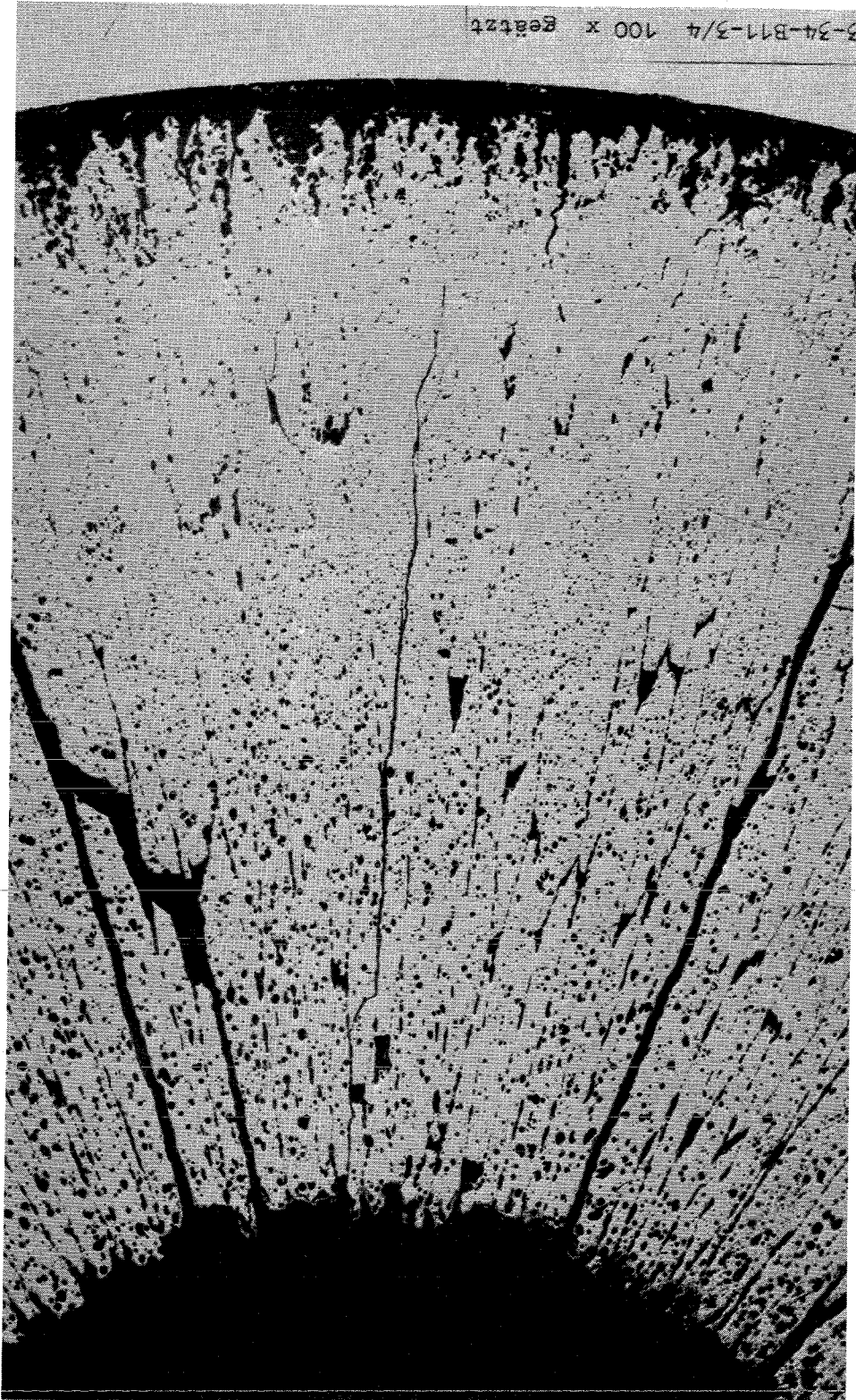


0,1mm

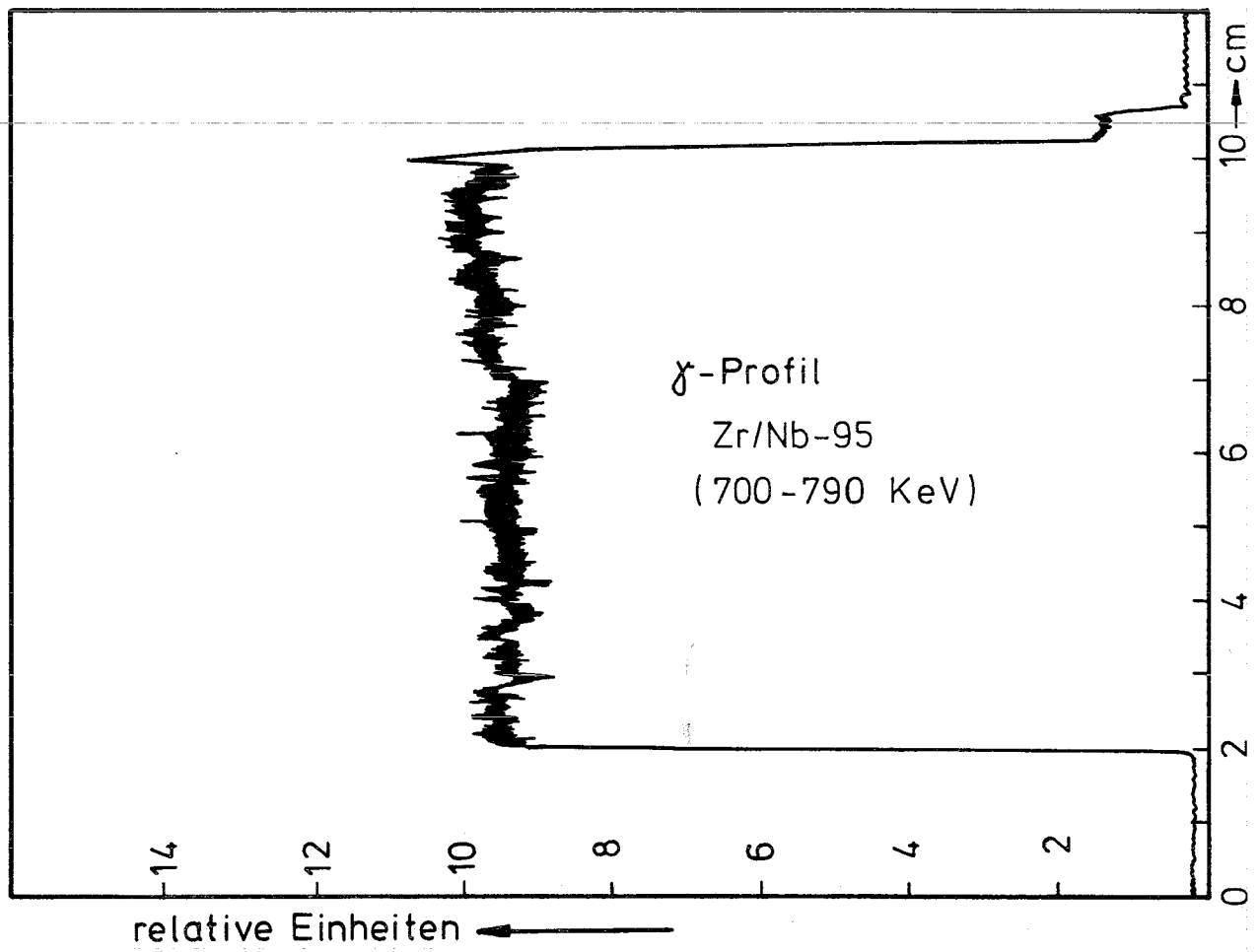
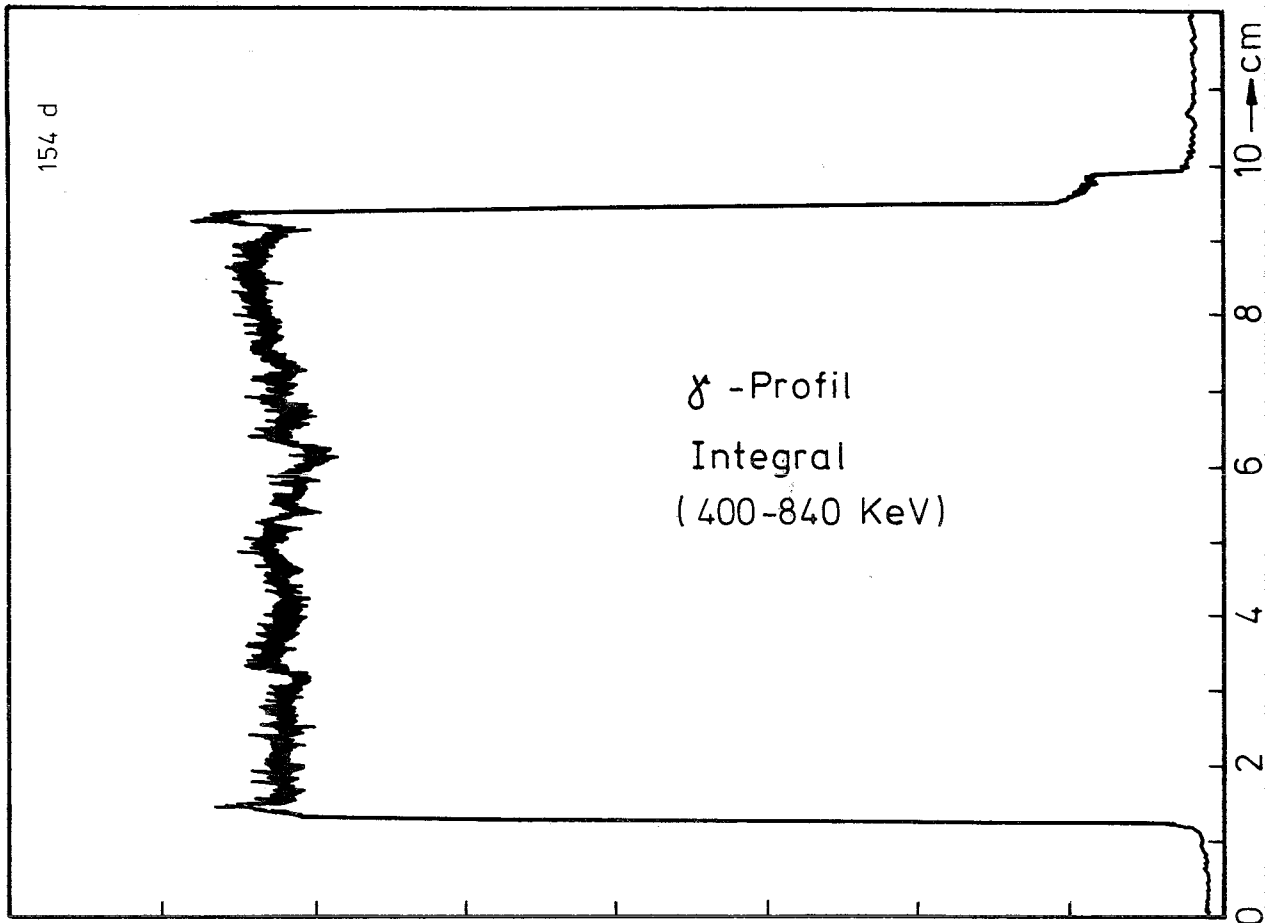
- A/104 -

zu Prüfling B11

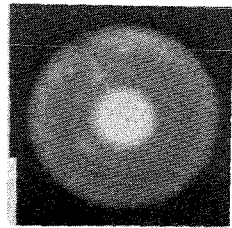
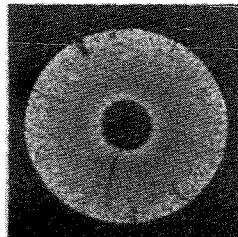
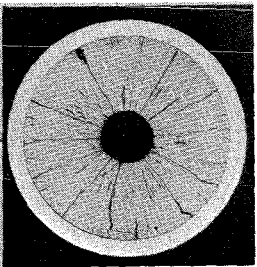
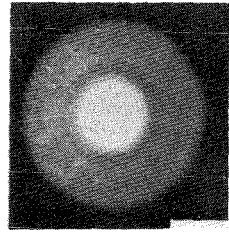
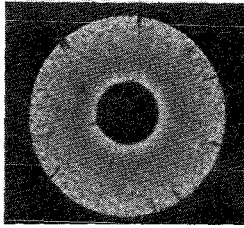
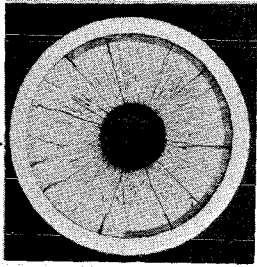
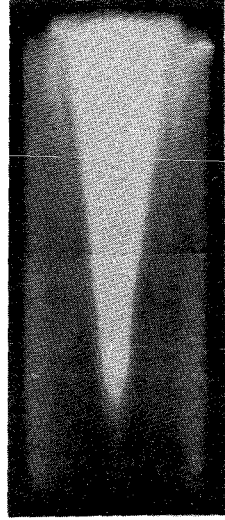
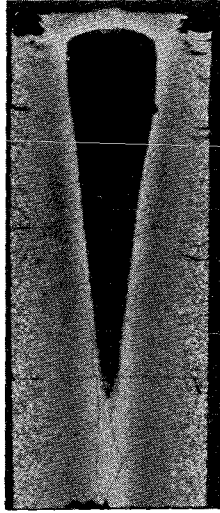
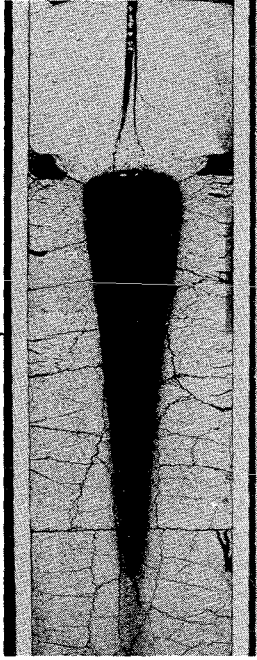
A2



—
0,1mm



A





Prüfling B11

Brennstoff :

Form : Tabletten
Zusammensetzung : UO_2/PuO_2
Tablettendichte : 91,60% th.D.

Hülle :

Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,5 mm

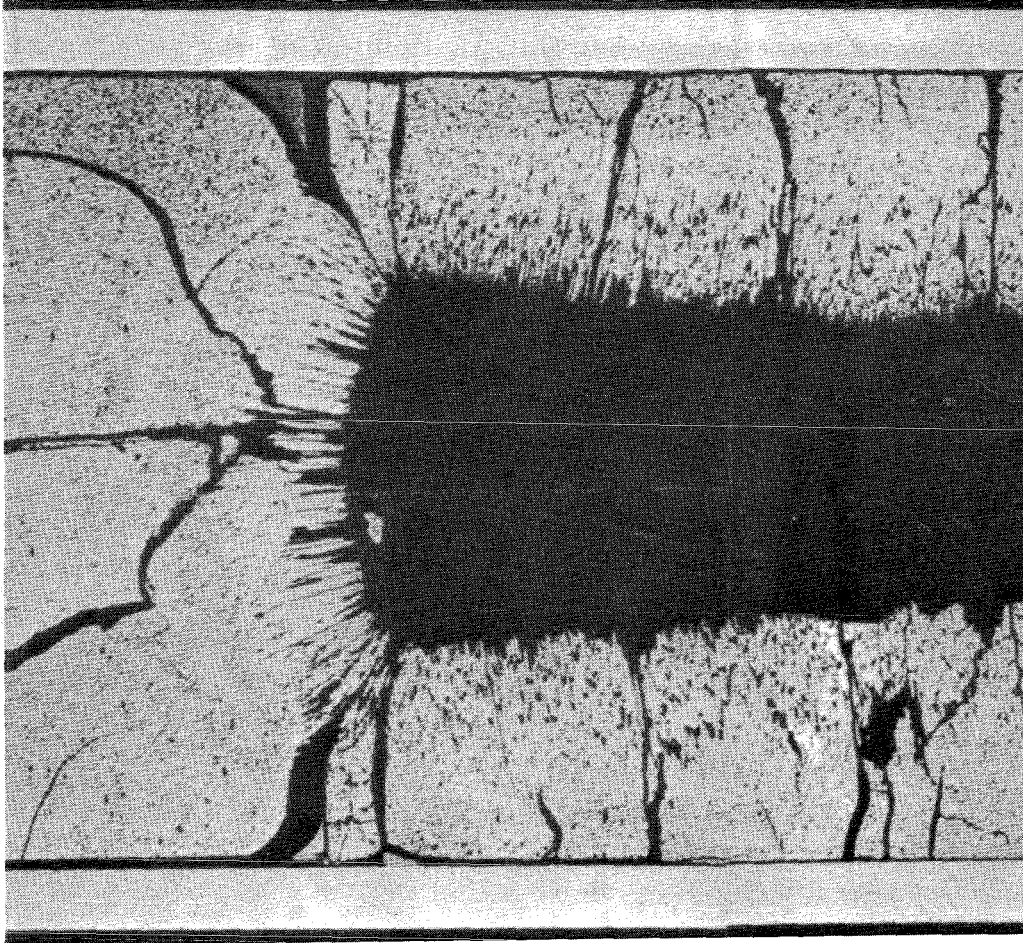
Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,1 mm
Schmierdichte : 86,4% th.D.

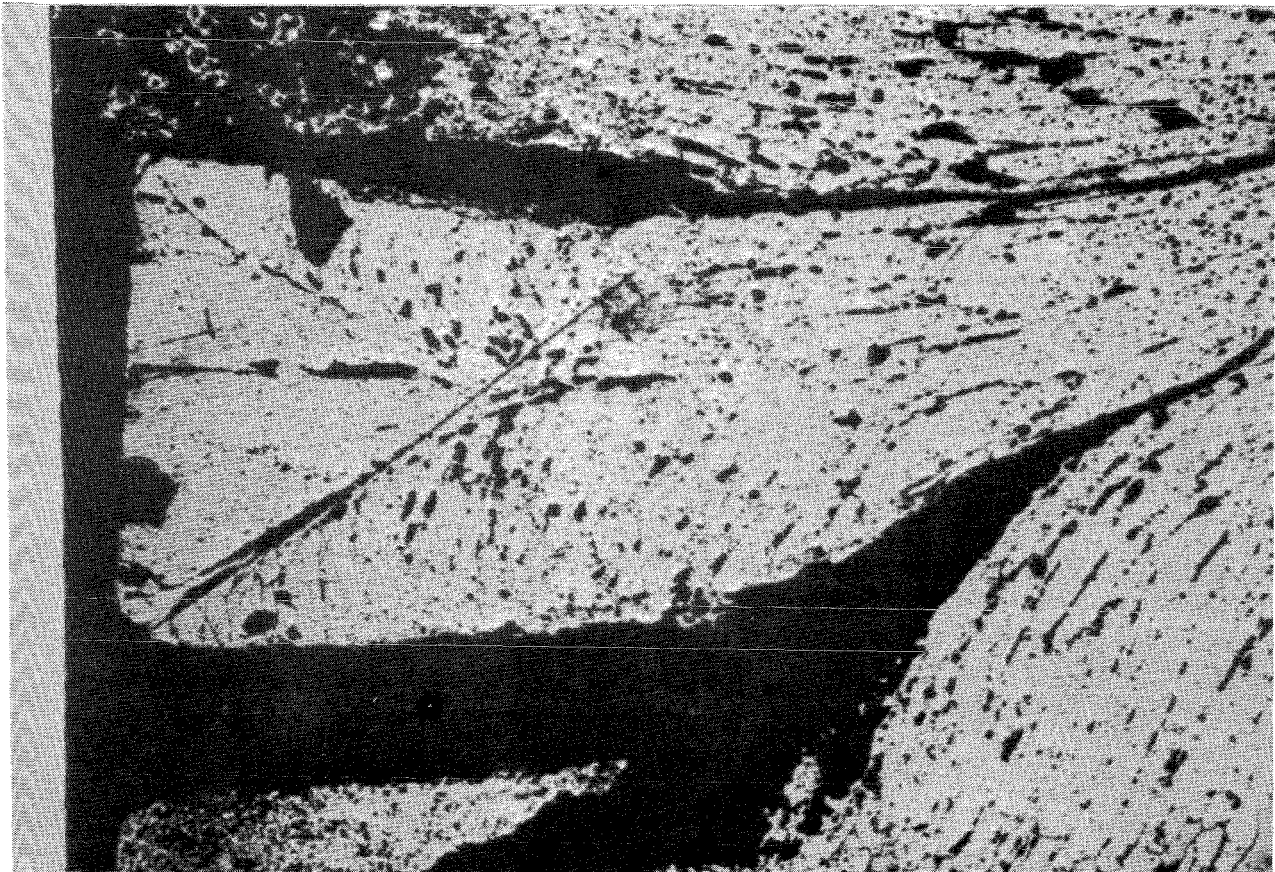
Bestrahlung :

Einrichtung : Na/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4
Dauer : 171,5 Vollasttage
Ende : 25. 10. 68
Rechn. Abbrand mittl. : 28,0 MWd/kg
Stableistung max./mittl. : 606/419 W/cm

- A/107 -
zu Prüfling B12
A1

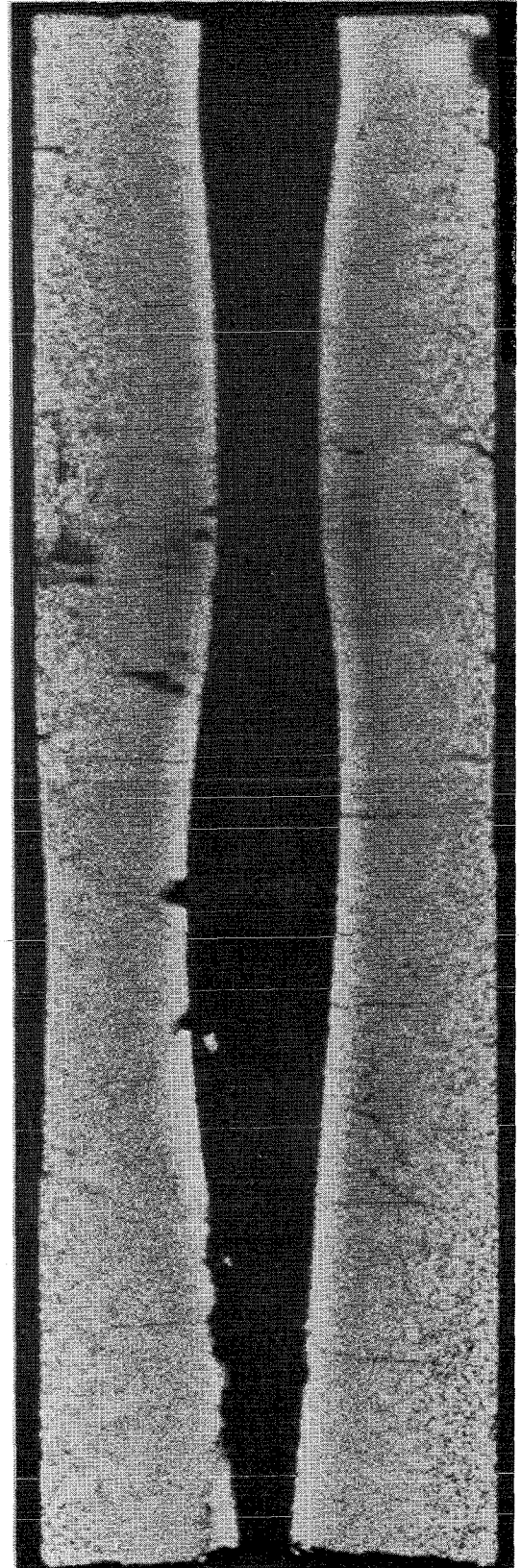
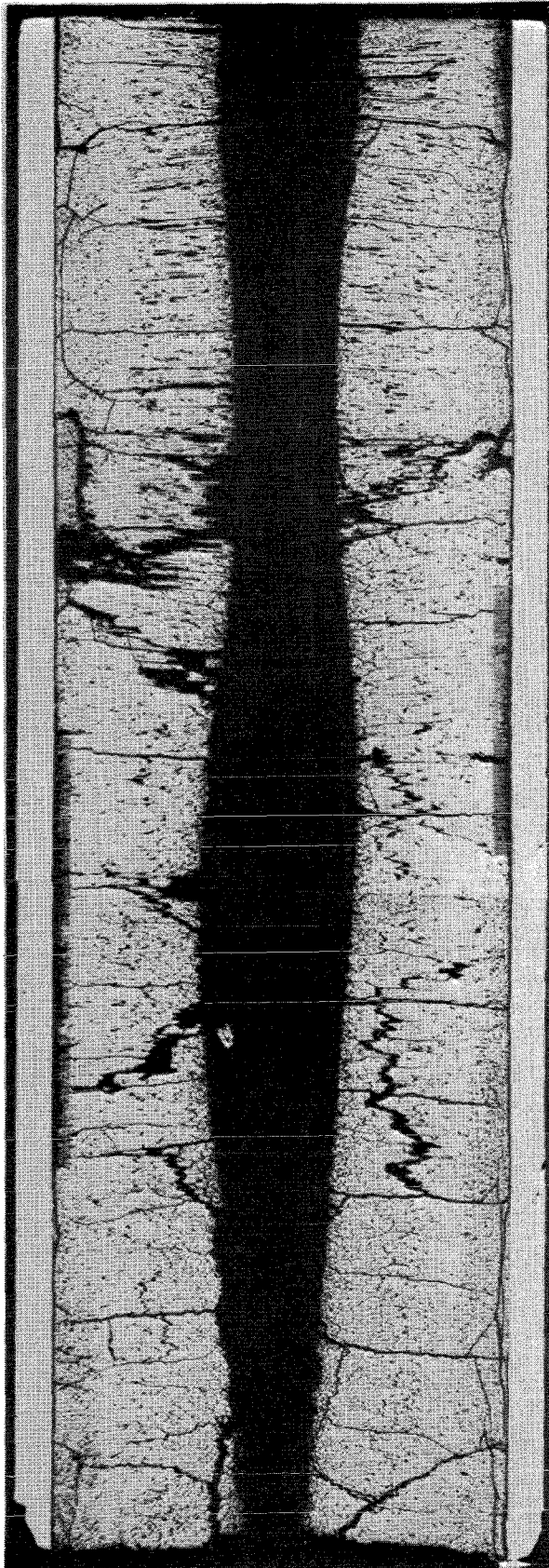


1mm

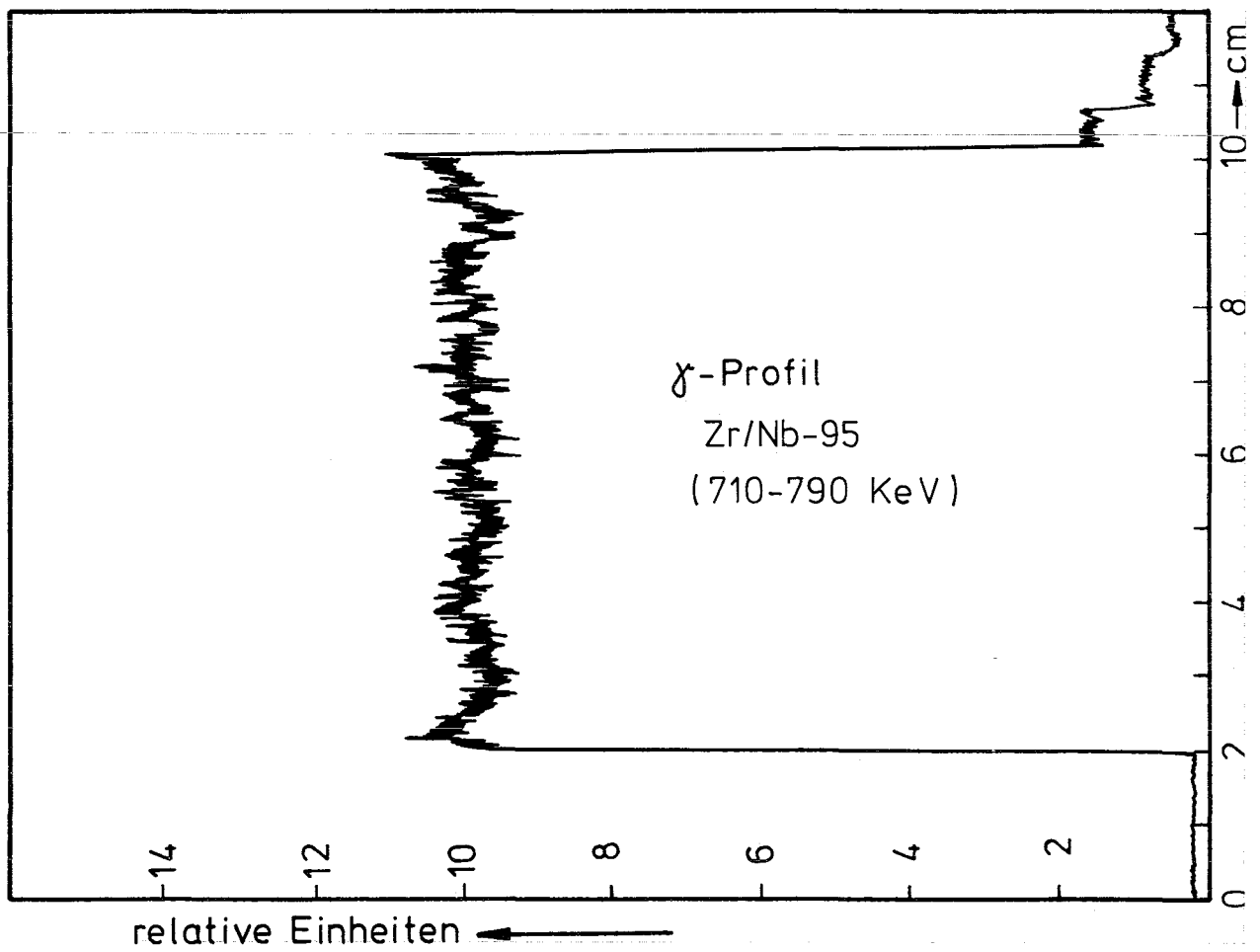
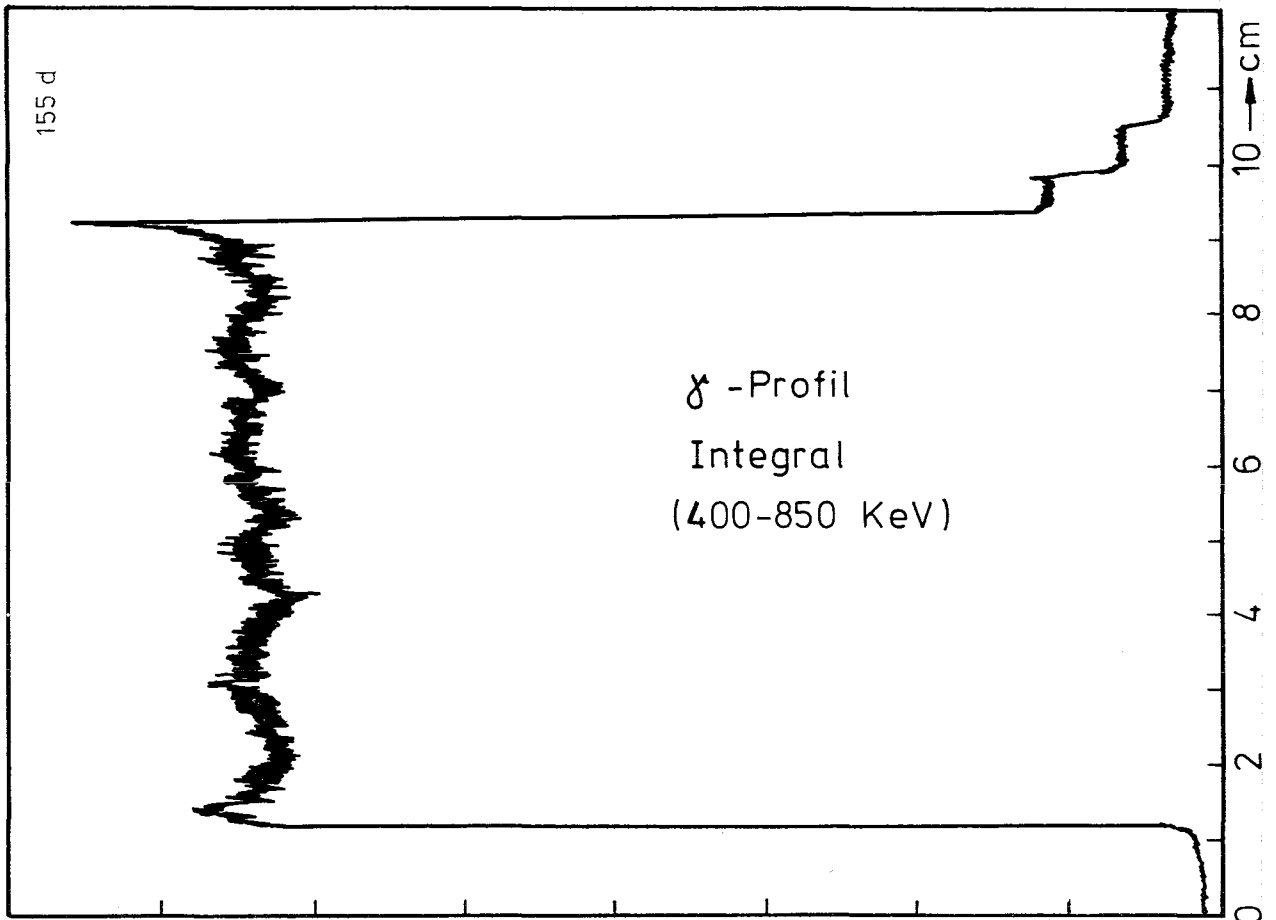


0,1mm

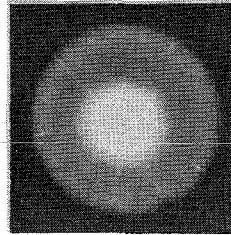
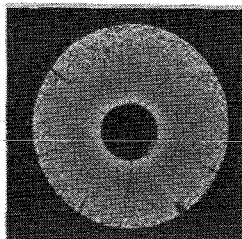
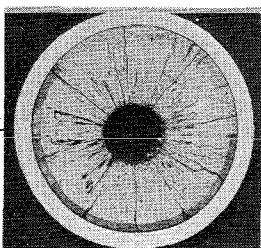
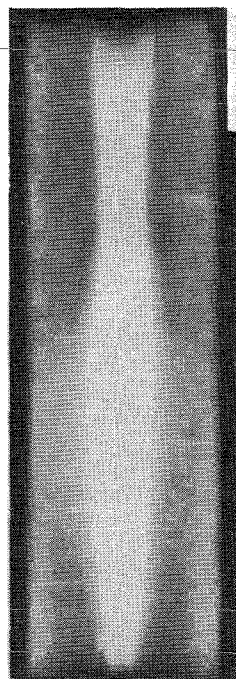
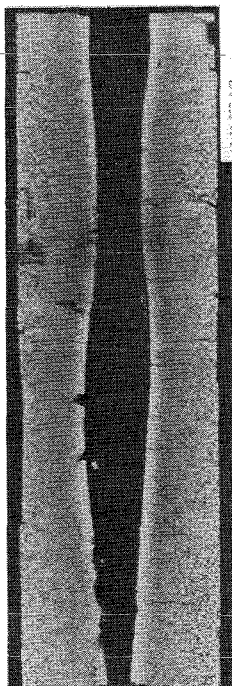
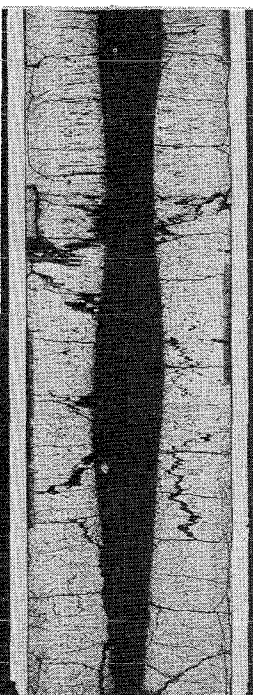
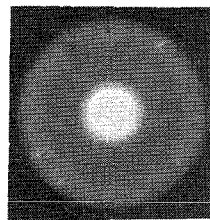
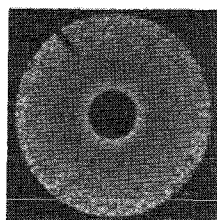
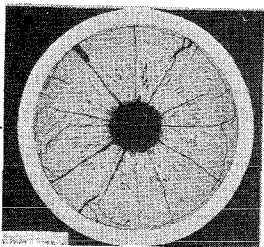
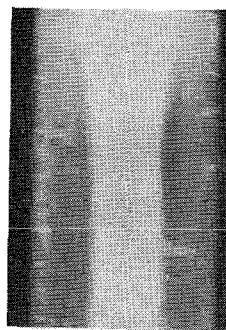
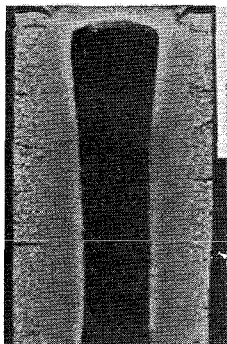
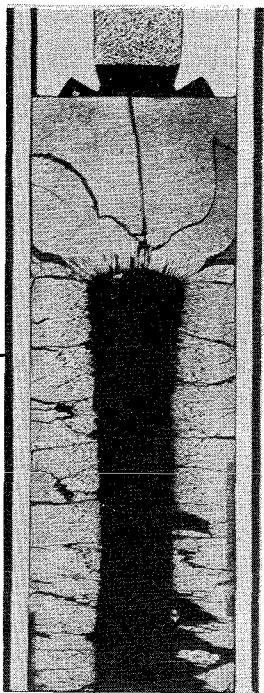
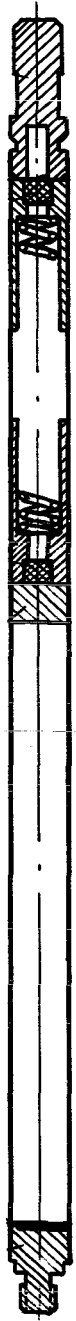
-A/108-
zu Prüfling B12
A3

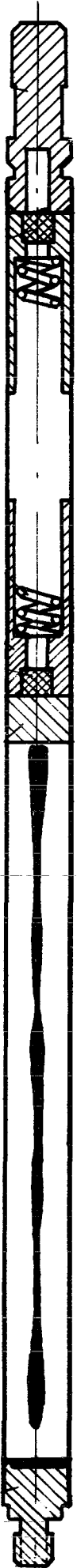


1mm



A





Prüfling B12

Brennstoff :

Form	:	Tabletten
Zusammensetzung	:	UO ₂ /PuO ₂
Tablettendichte	:	91,59% th.D.

Hülle :

Material	:	1.4988
Aussendurchmesser	:	7,4 mm
Wandstärke	:	0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings	:	172 mm
Länge der Brennstoffsäule	:	80 mm
Radiale Spaltweite	:	0,1 mm
Schmierdichte	:	86,4% th.D.

Bestrahlung :

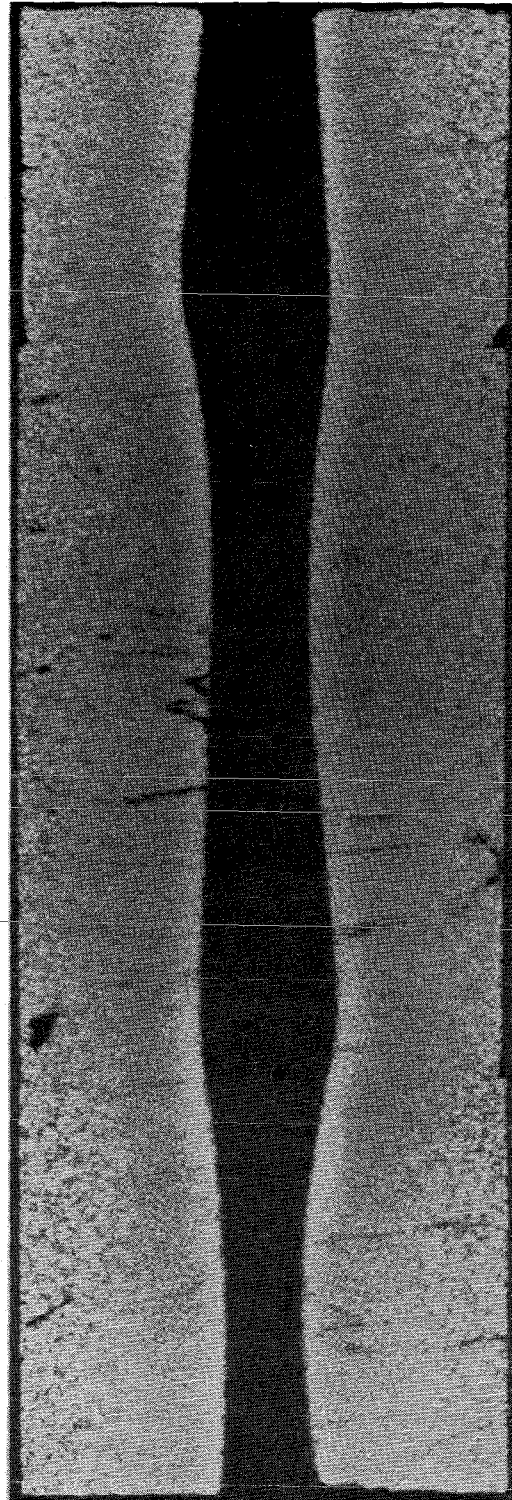
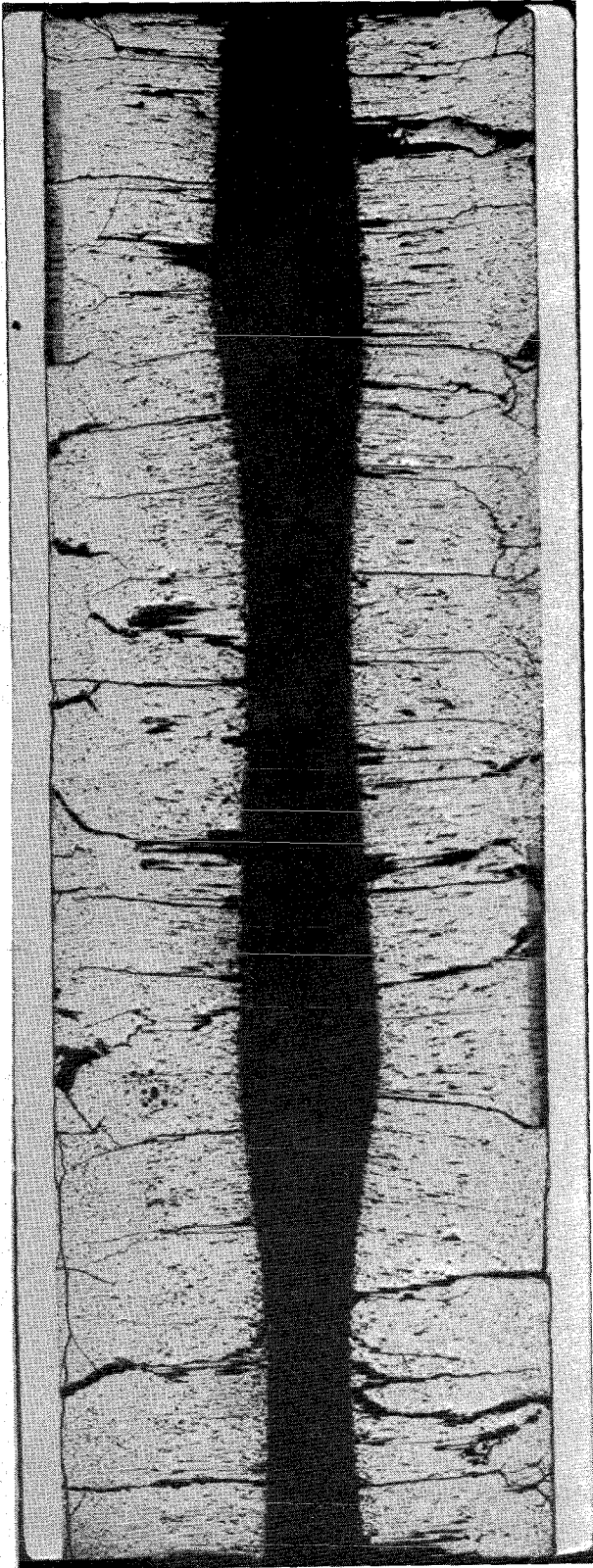
Einrichtung	:	Na/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4
Dauer	:	171,5 Volllasttage
Ende	:	25. 10. 68
Rechn. Abbrand mittl.	:	29,2 MWd/kg
Stableistung max./mittl.	:	701/456 W/cm



-A/111-

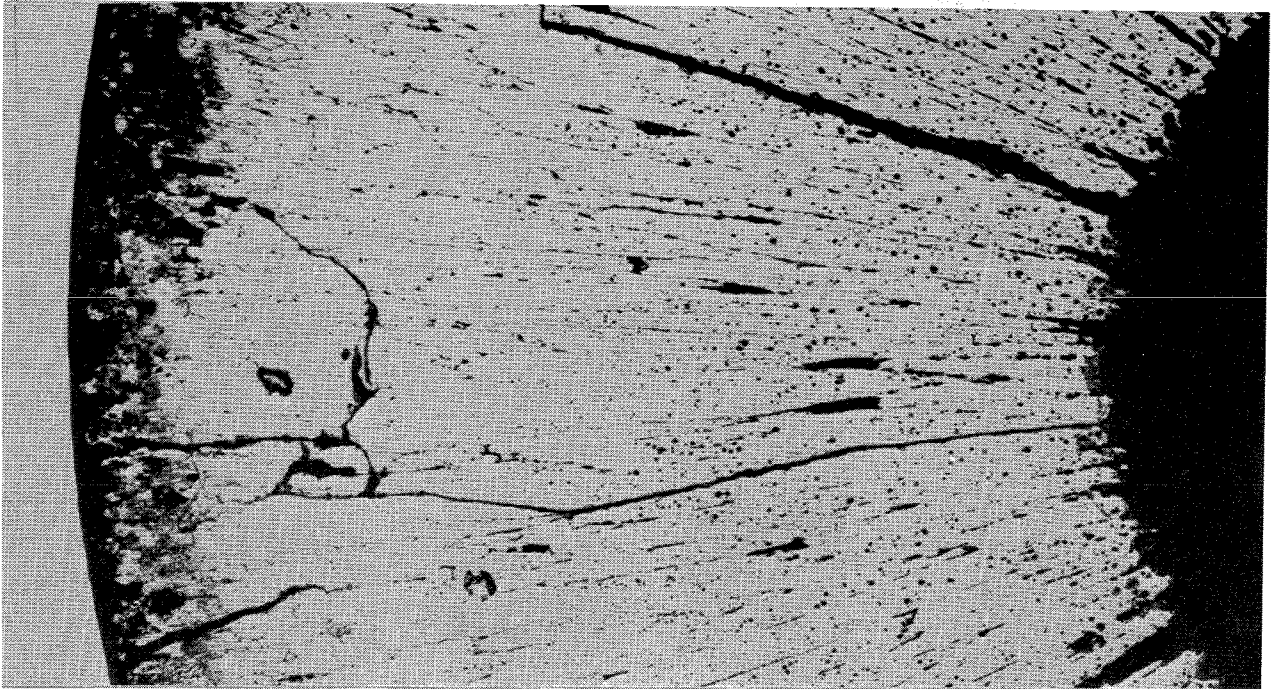
zu Prüfling B 13

A3



1mm

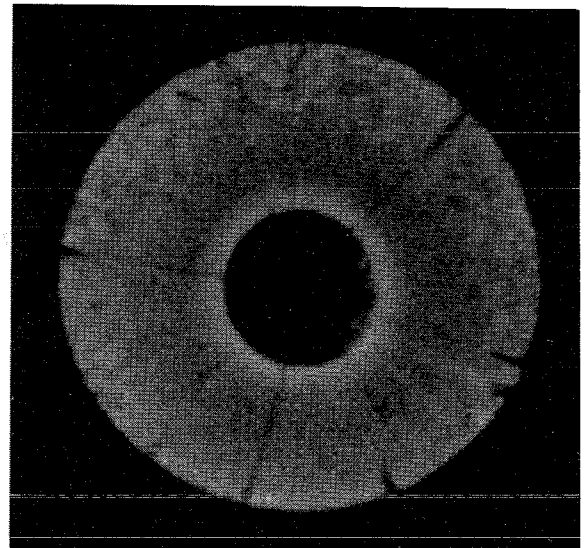
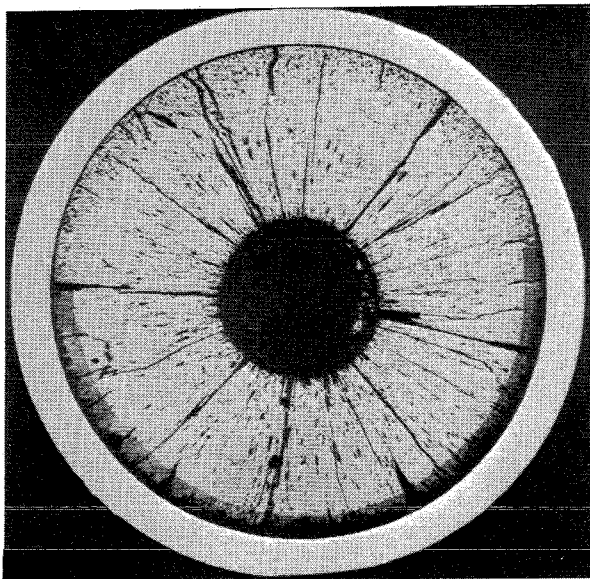
-A/112 -
zu Prüfling B13
A4



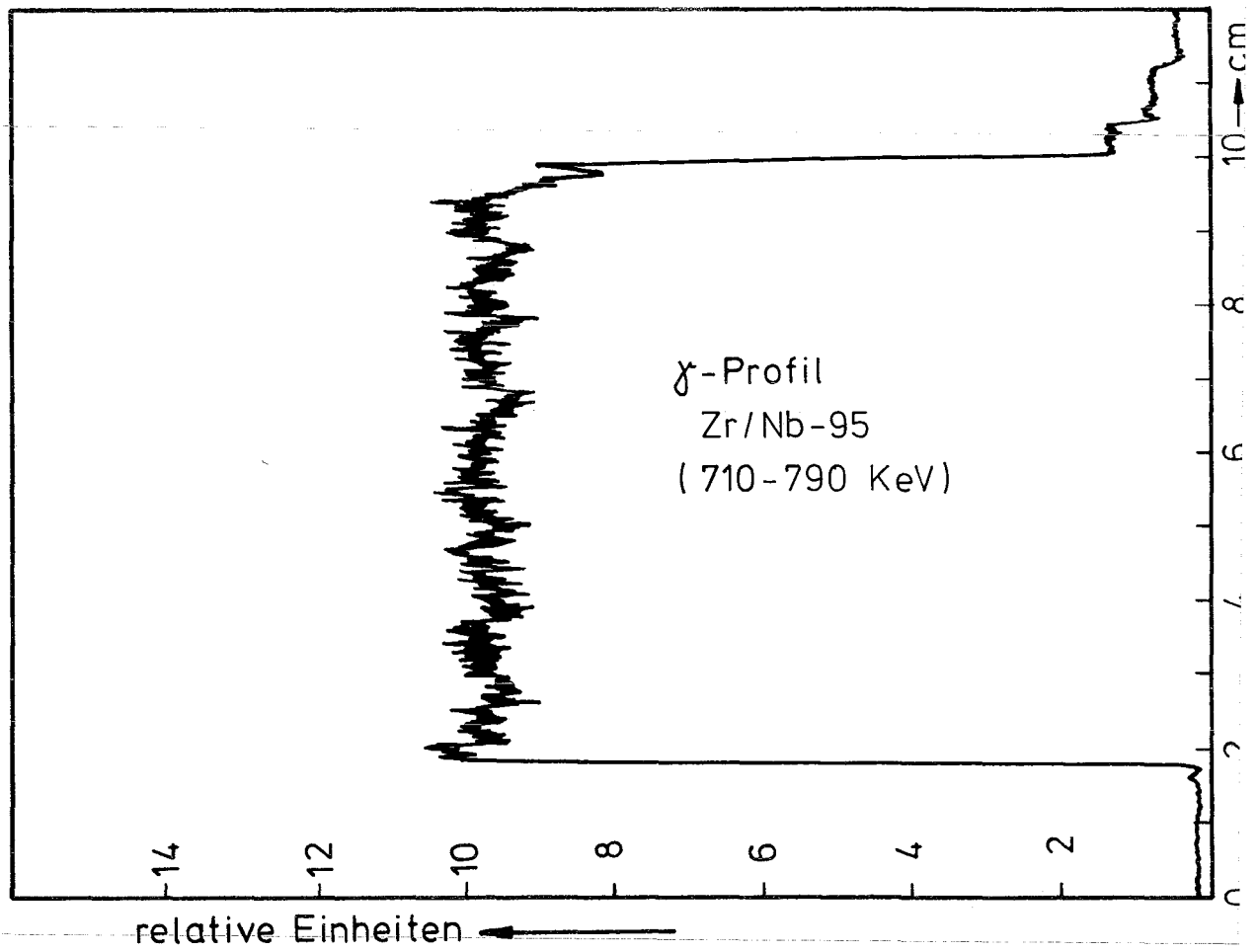
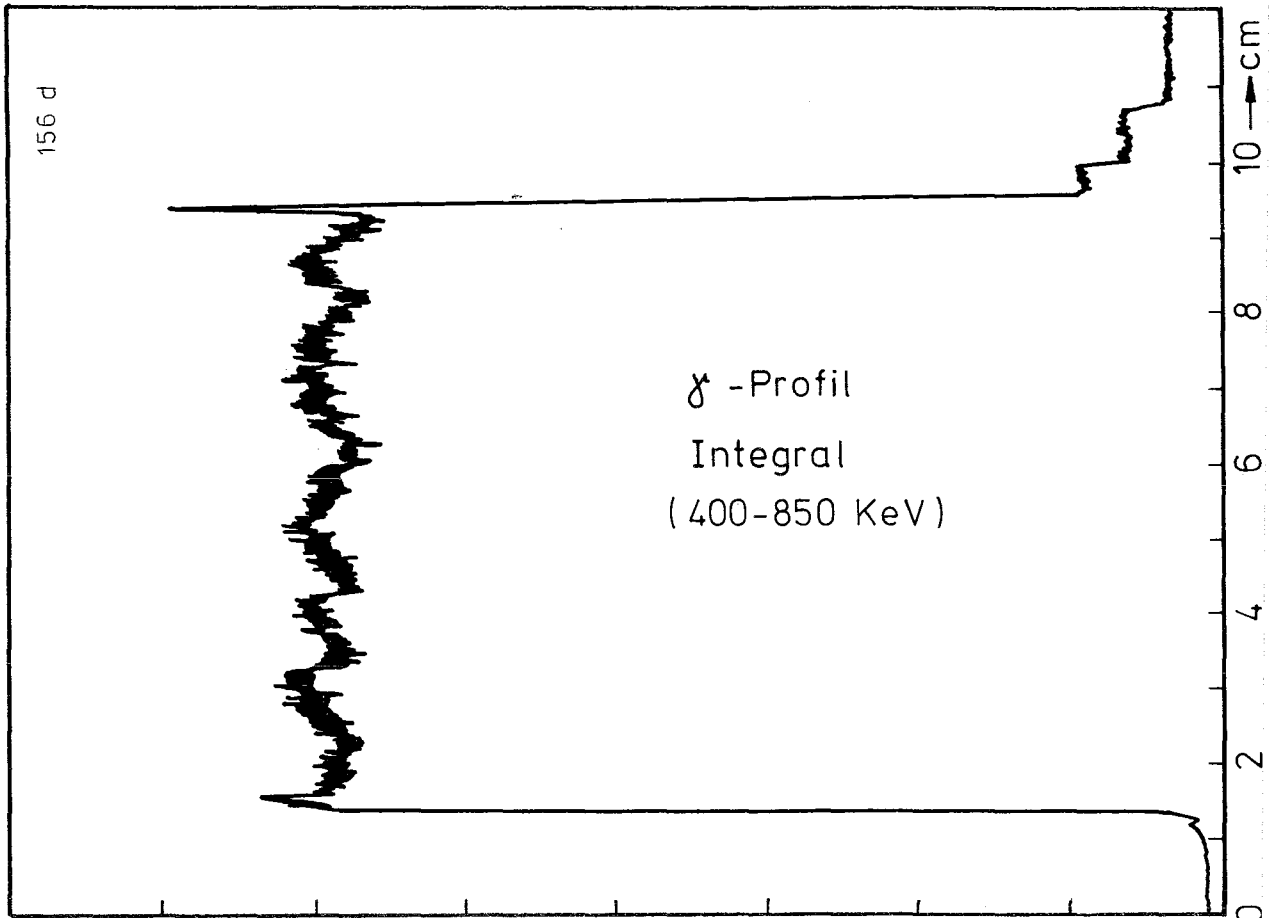
0,1mm

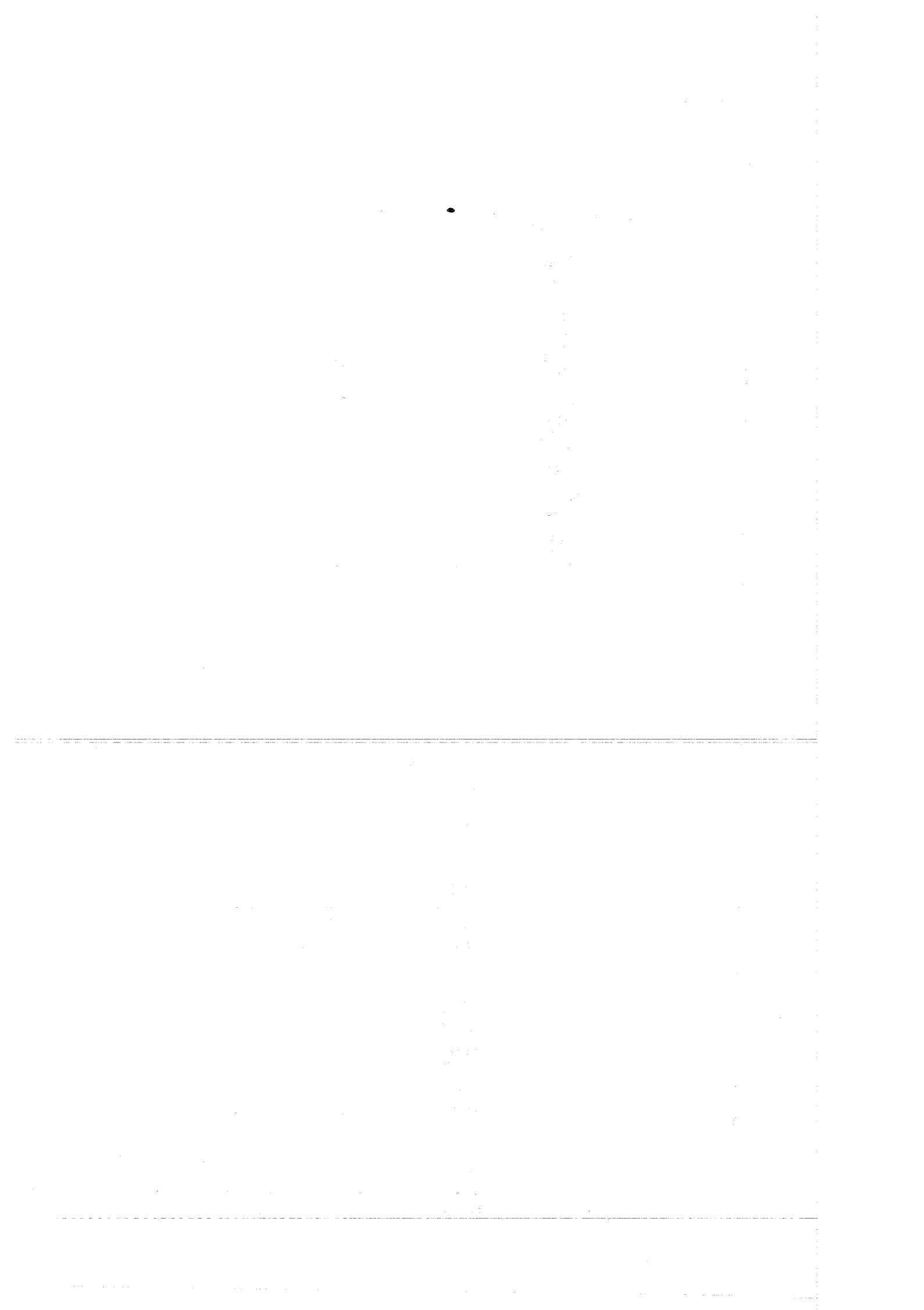
A4

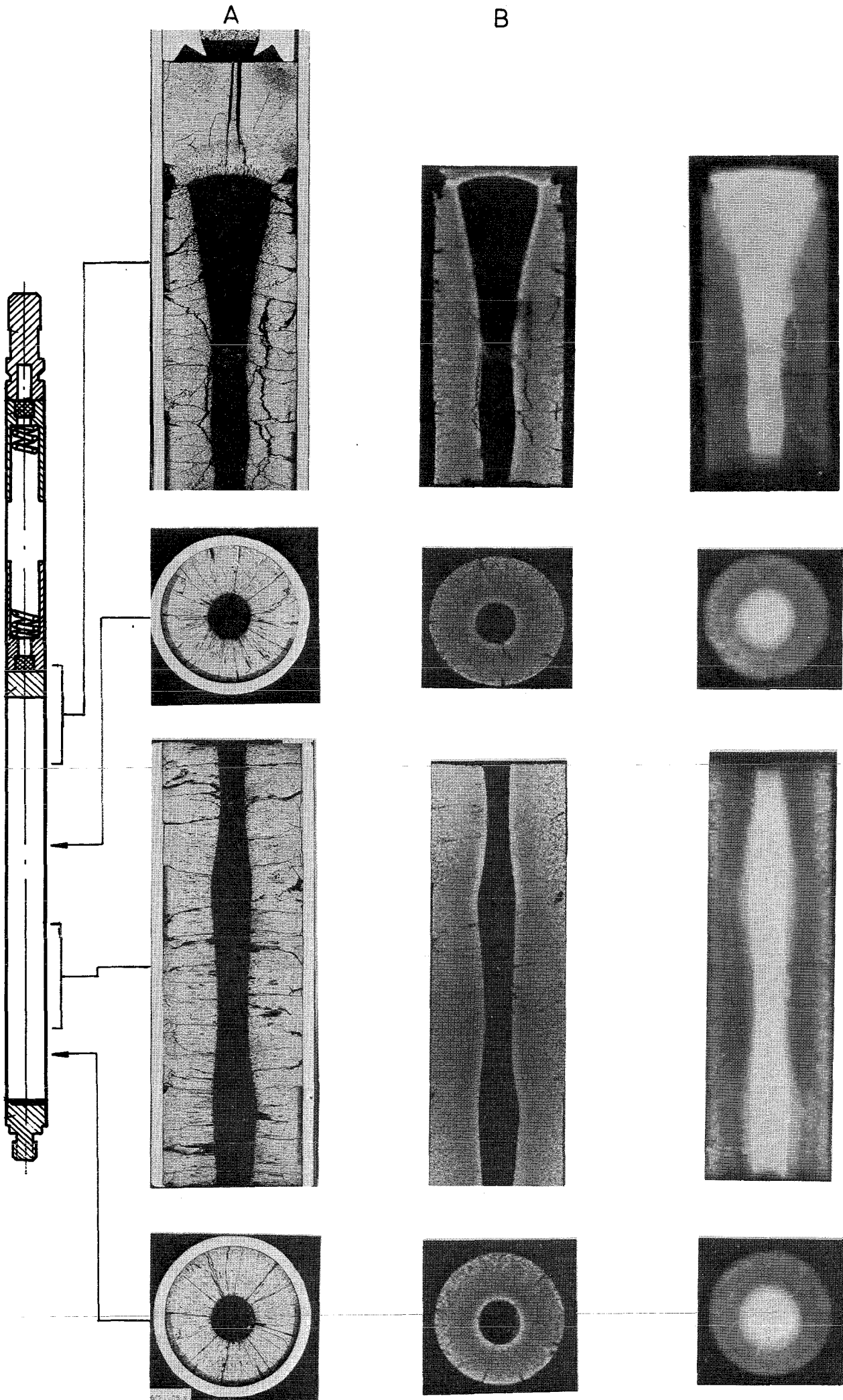
B4



1mm









Prüfling B13

Brennstoff :

Form : Tabletten
Zusammensetzung : UO_2/PuO_2
Tablettendichte : 91,89% th.D.

Hülle :

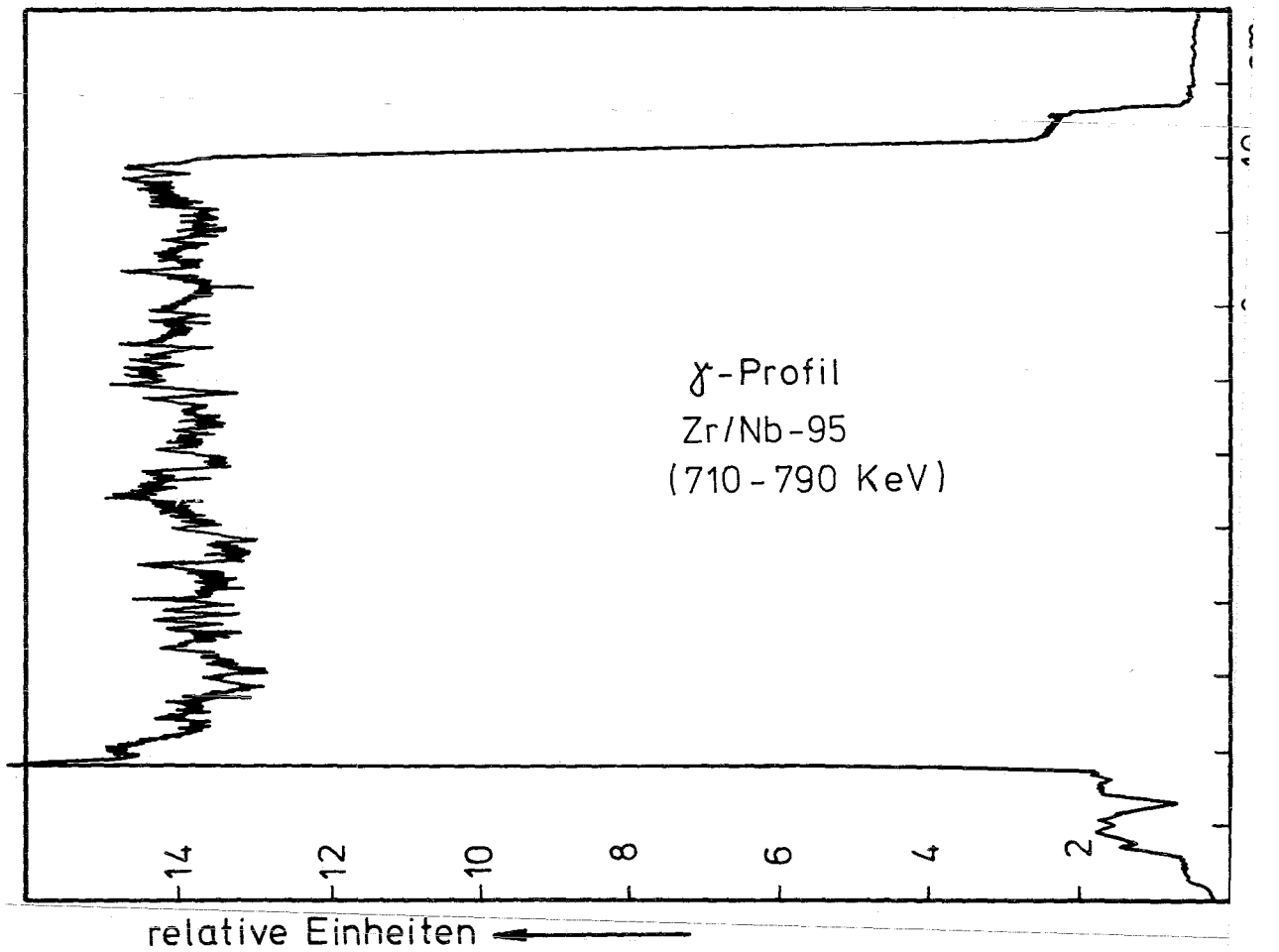
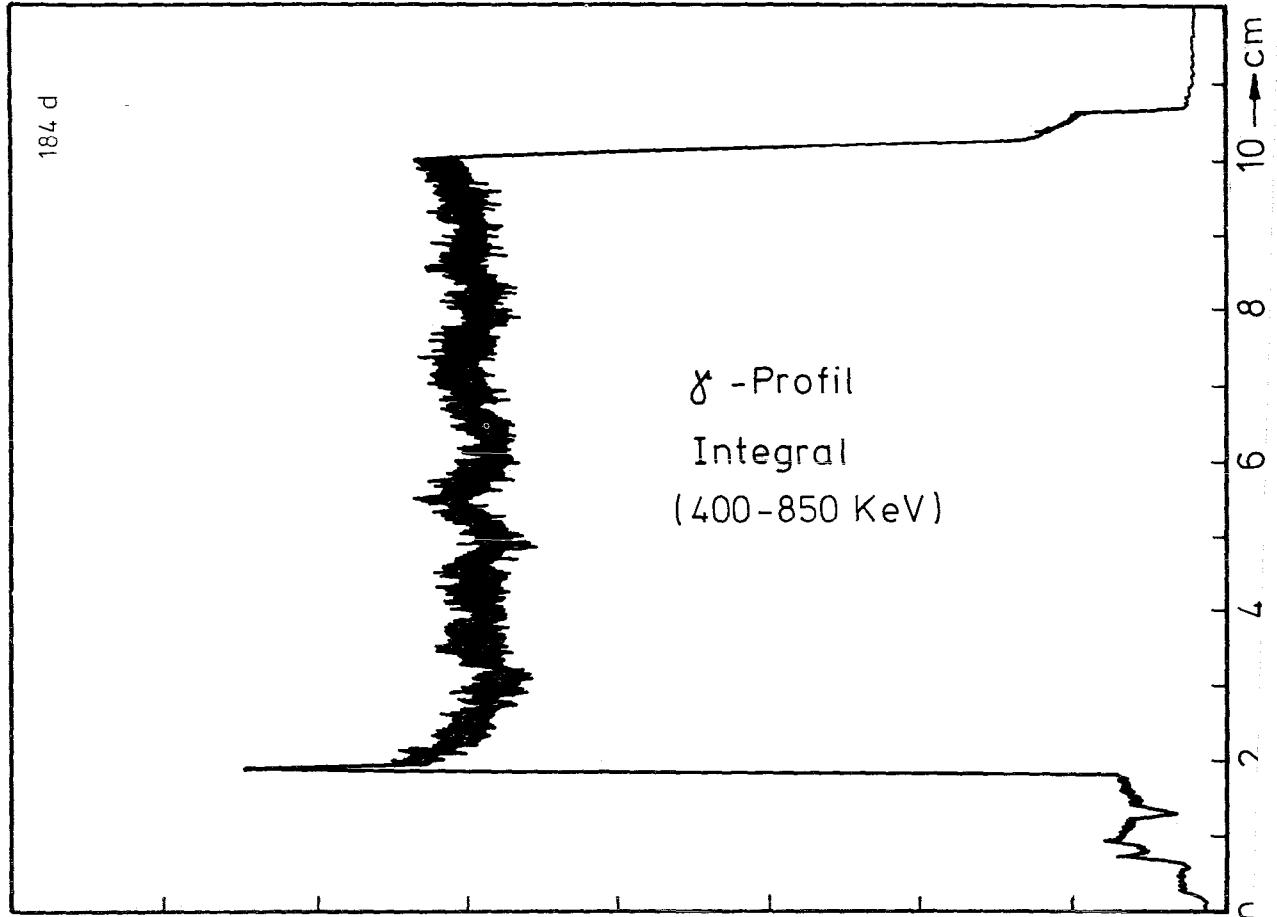
Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

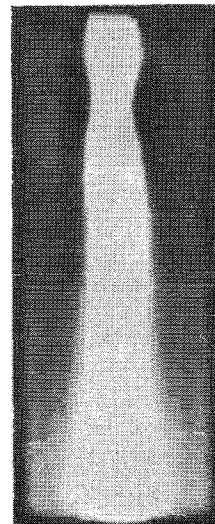
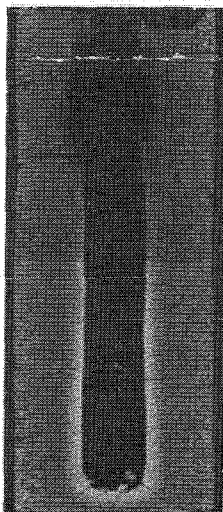
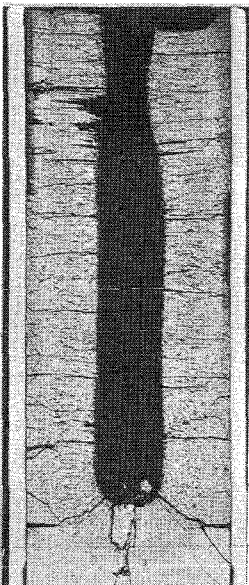
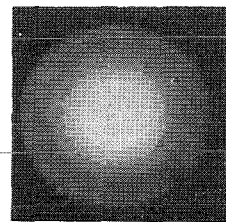
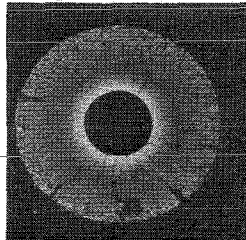
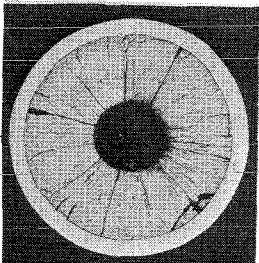
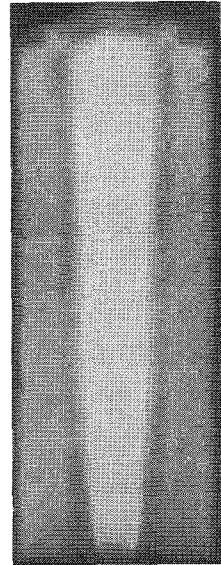
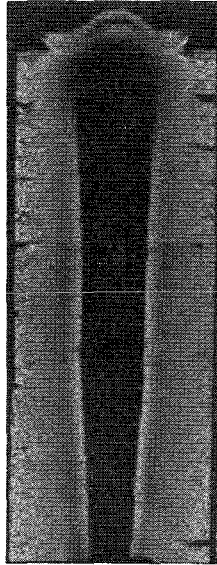
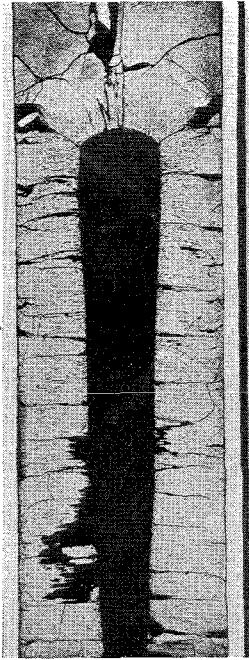
Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,1 mm
Schmierdichte : 86,4% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : Na/PbBi-Doppel-
Kapsel Typ 4
Dauer : 171,5 Vollasttage
Ende : 25. 10. 68
Rechn. Abbrand mittl. : 28,1 MWd/kg
Stableistung max./mittl. : 587/457 W/cm



A



6



Prüfling 4A1

Brennstoff :

Form : Tabletten

Zusammensetzung : UO_2/PuO_2

Tablettendichte : 92,02% th.D.

Hülle :

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 7,4 mm

Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : 0,1 mm

Schmierdichte : 86,4% th.D.

Bestrahlung :

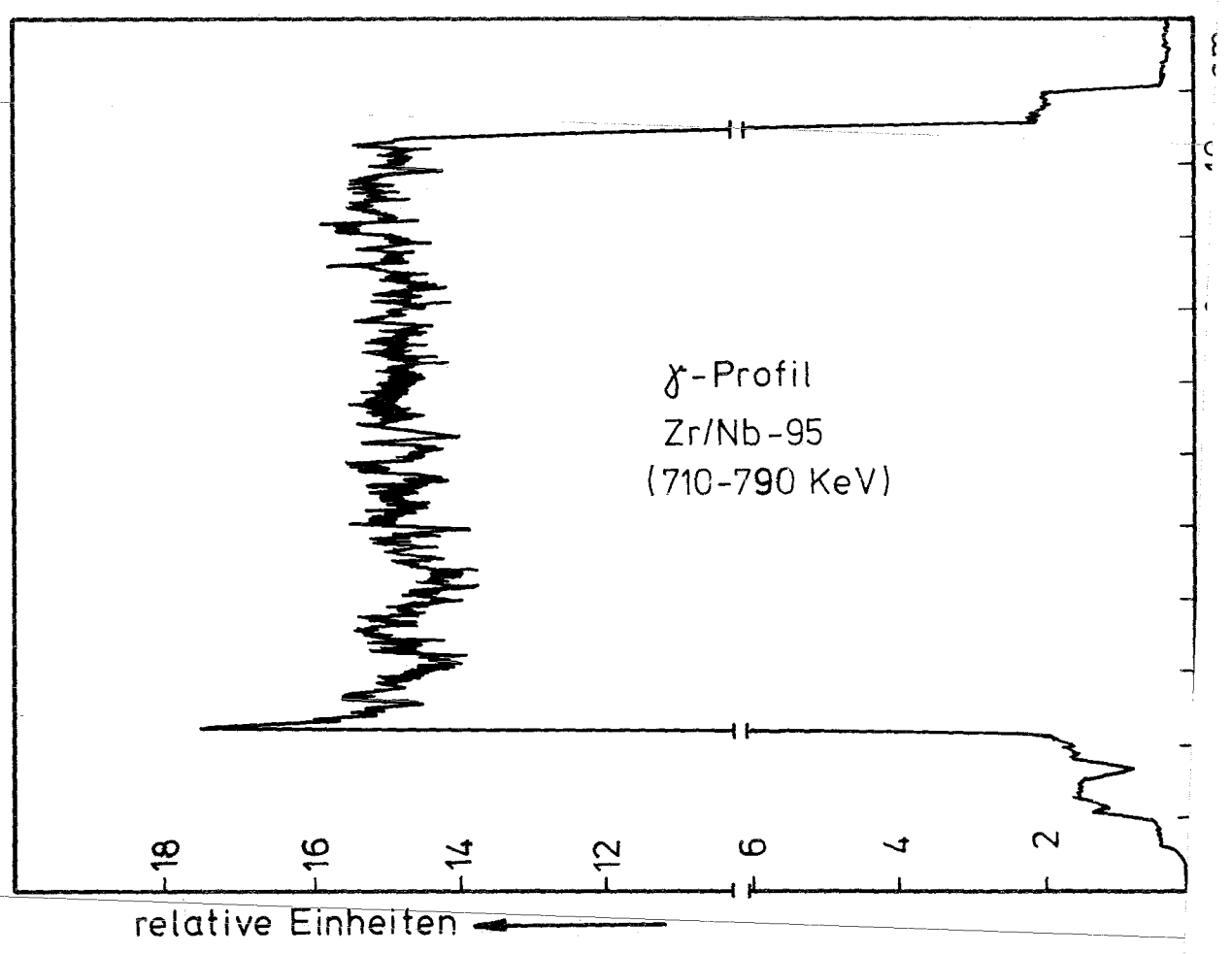
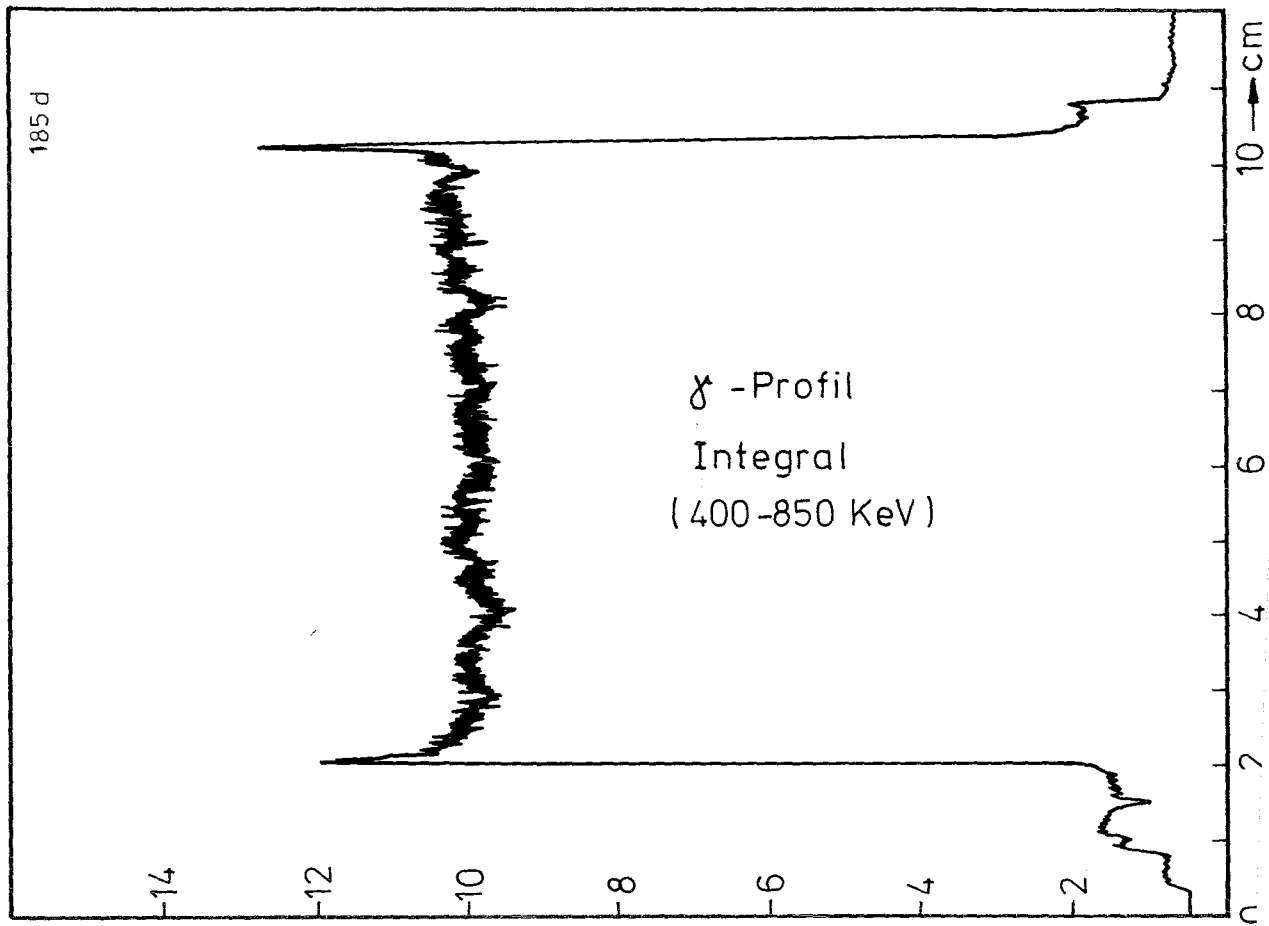
Einrichtung : Na/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4

Dauer : 141,8 Vollasttage

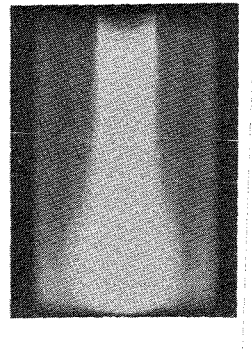
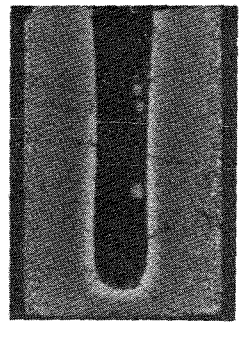
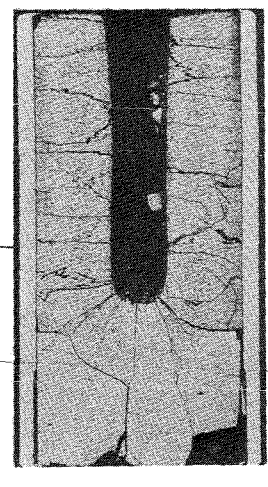
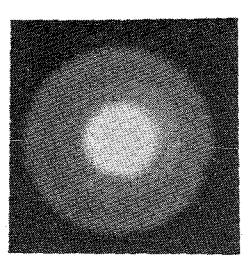
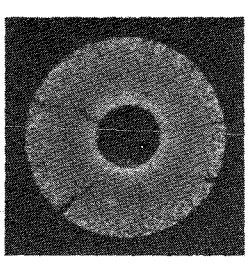
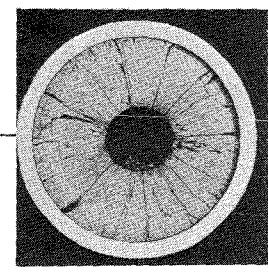
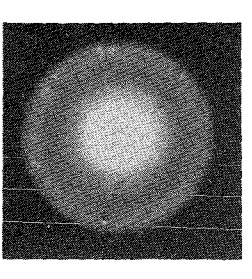
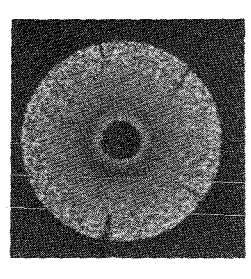
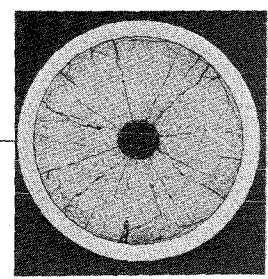
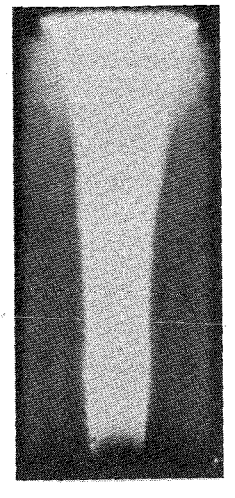
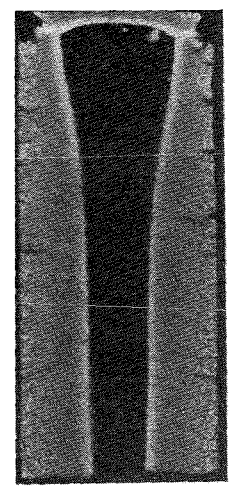
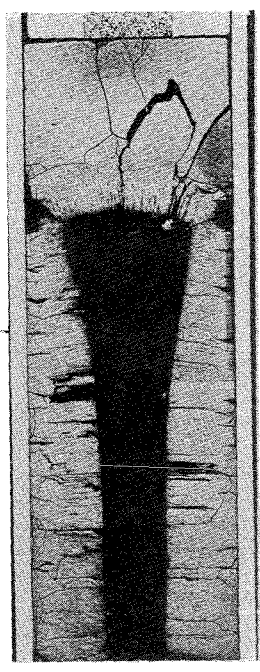
Ende : 15. 9. 68

Rechn. Abbrand mittl. : 25,2 MWd/kg

Stableistung max./mittl. : 673/476 W/cm



A



1



Prüfling 4A2

Brennstoff :

Form : Tabletten
Zusammensetzung : UO_2/PuO_2
Tablettendichte : 92,13% th.D.

Hülle :

Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,1 mm
Schmierdichte : 86,4% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : Na/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4
Dauer : 141,8 Vollasttage
Ende : 15. 9. 68
Rechn. Abbrand mittl. : 26,0 MWd/kg
Stableistung max./mittl. : 675/493 W/cm

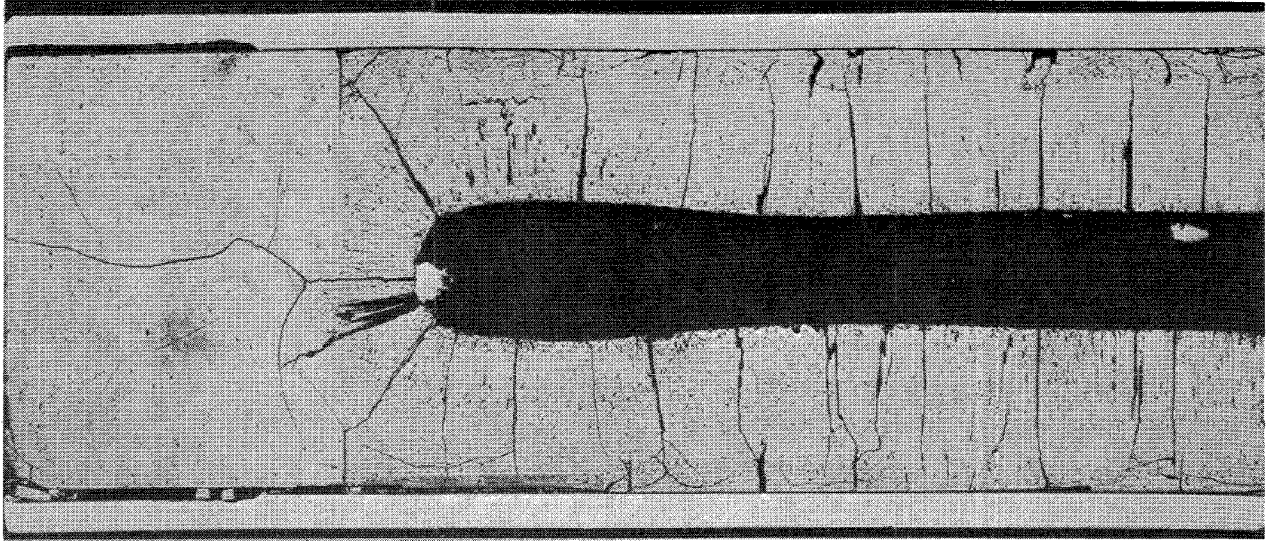
-A/119-
zu Prüfling 4A/4
A2



3-35-4A/4-3/4 100 x Geätzt

—|—
0,1 mm

-A/120 -
zu Prüfling 4A/4
A3

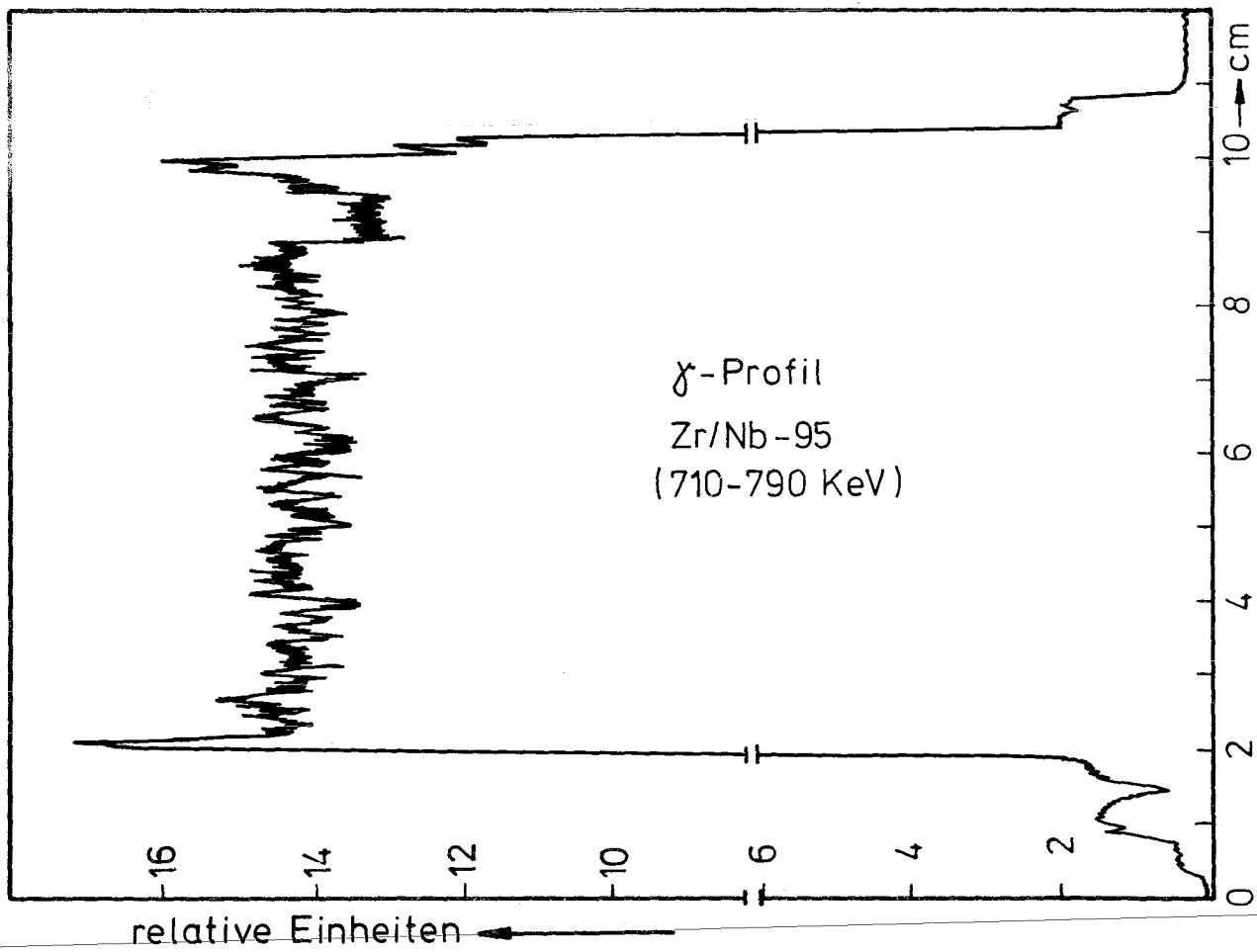
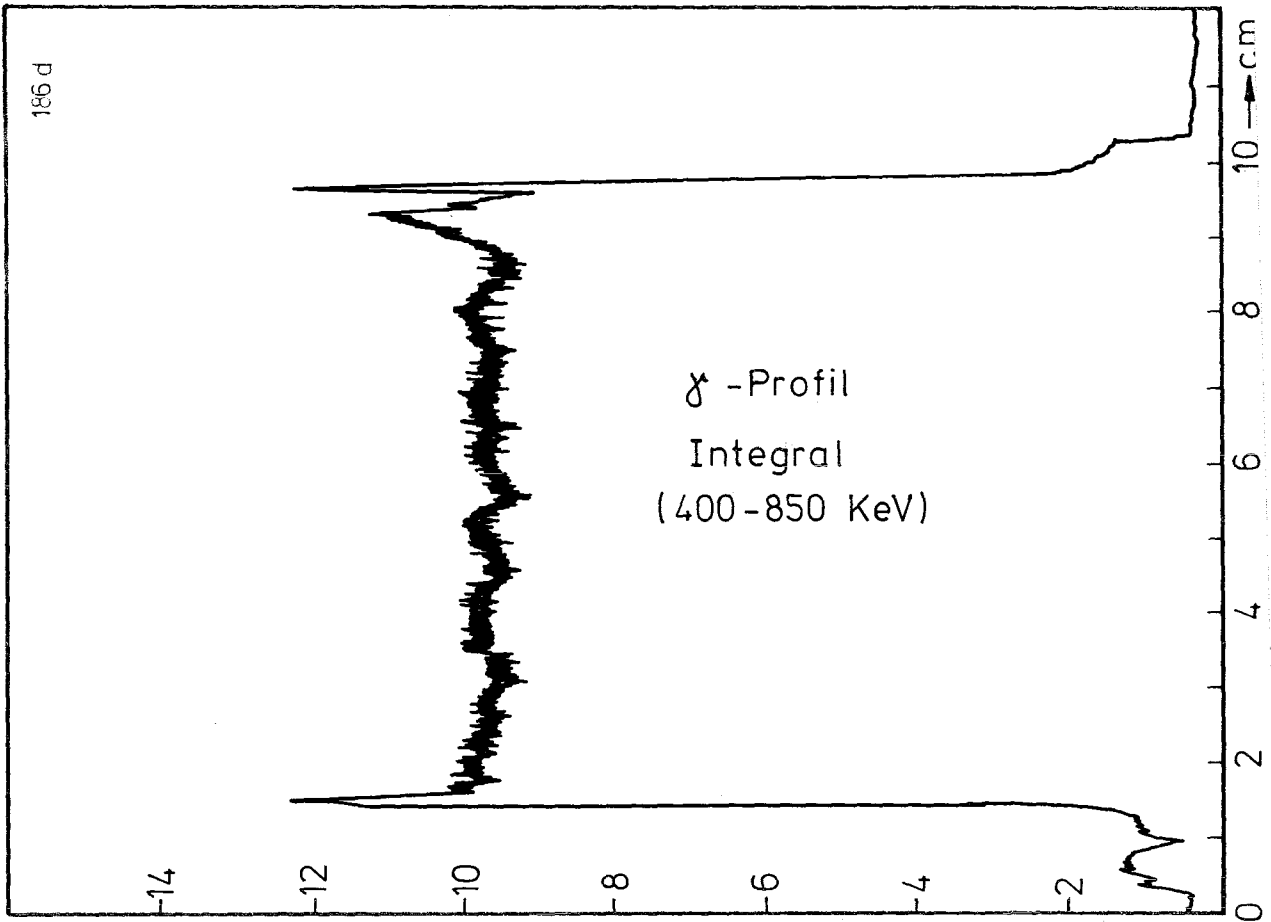


1mm

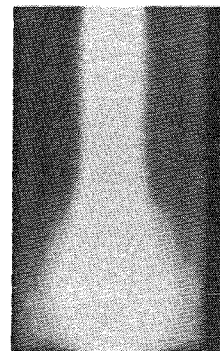
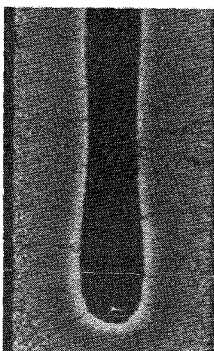
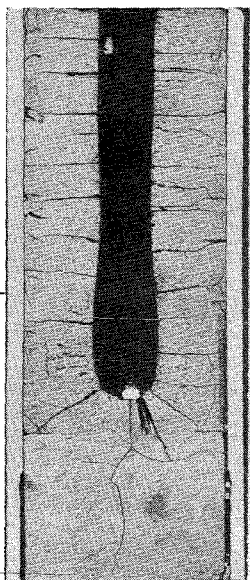
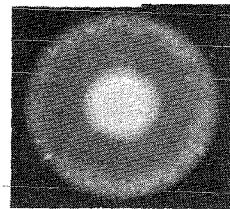
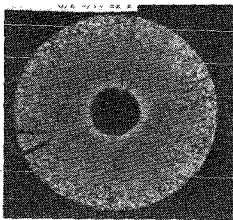
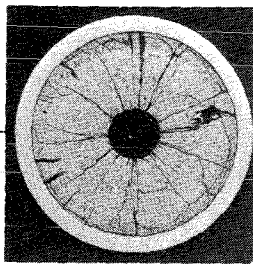
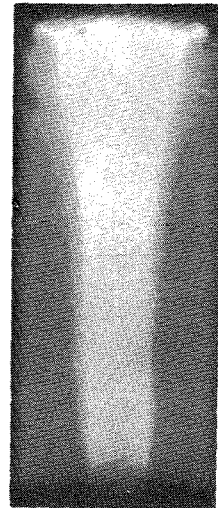
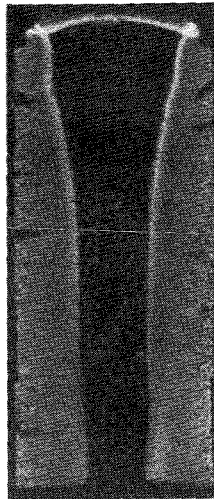


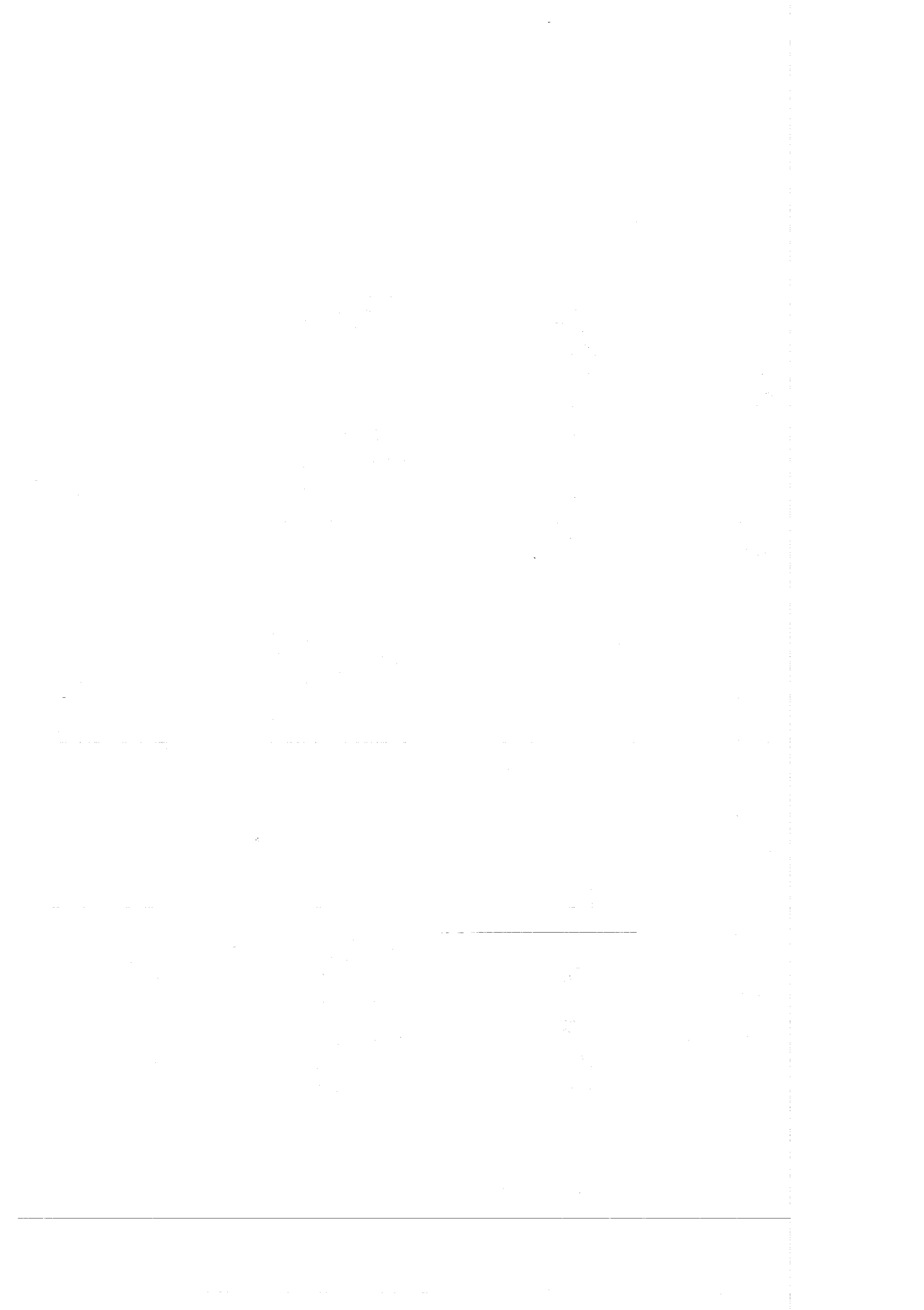
3-35-4A/4-5/12 100 x geätzt

0,1mm



A







Prüfling 4A4

Brennstoff :

Form : Tabletten
Zusammensetzung : UO_2/PuO_2
Tablettendichte : 93,31% th.D.

Hülle :

Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,5 mm

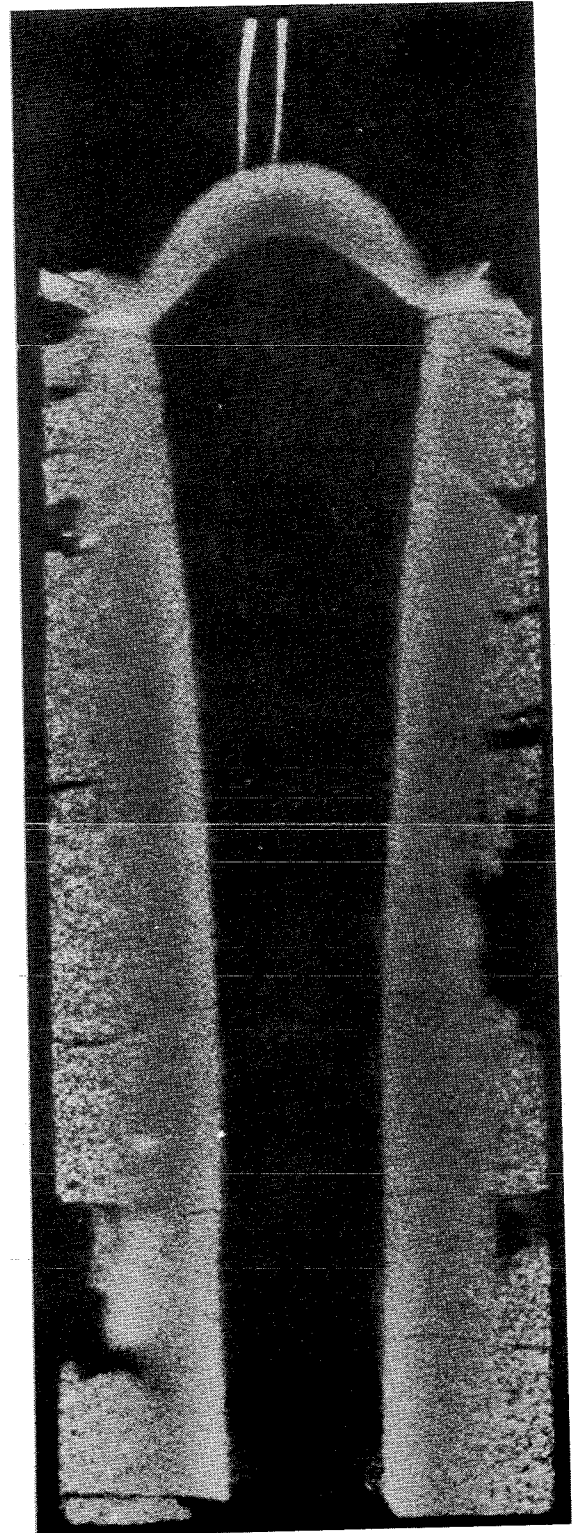
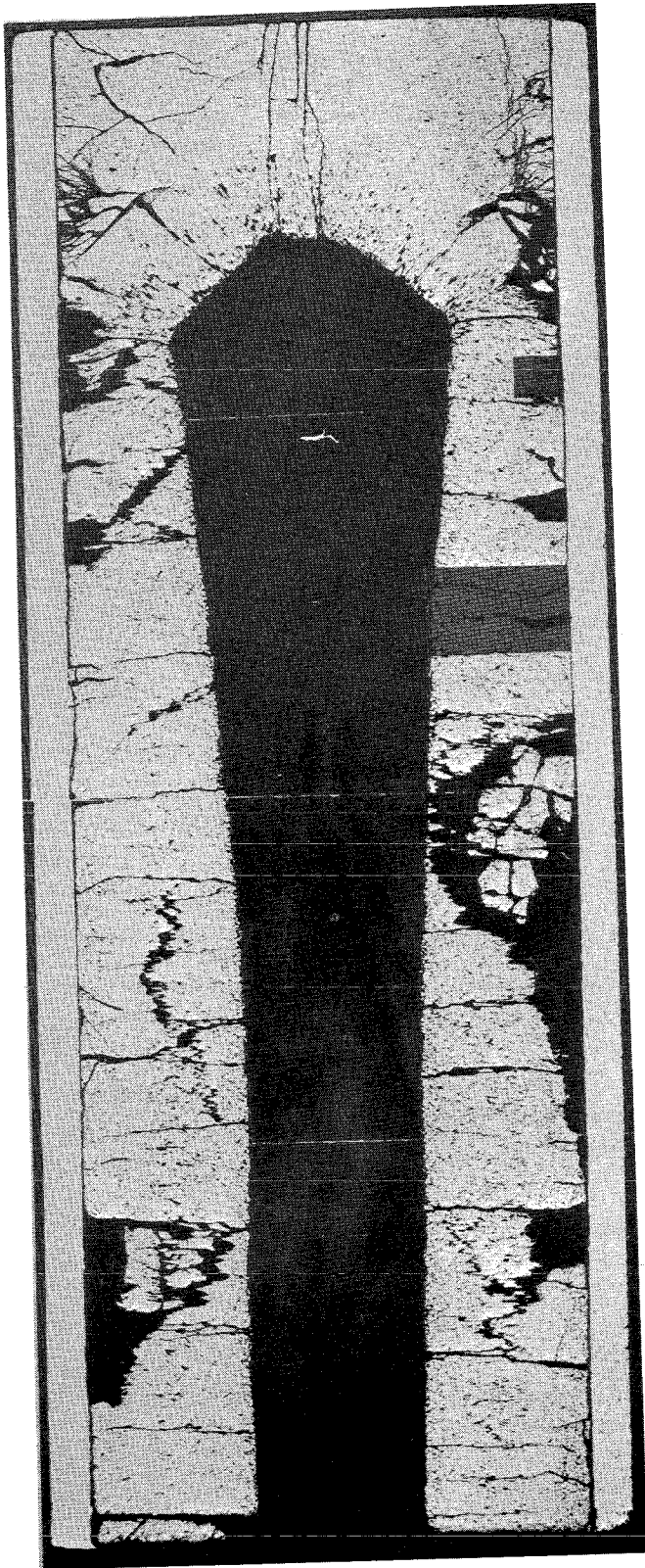
Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,1 mm
Schmierdichte : 86,4% th.D.

Bestrahlung :

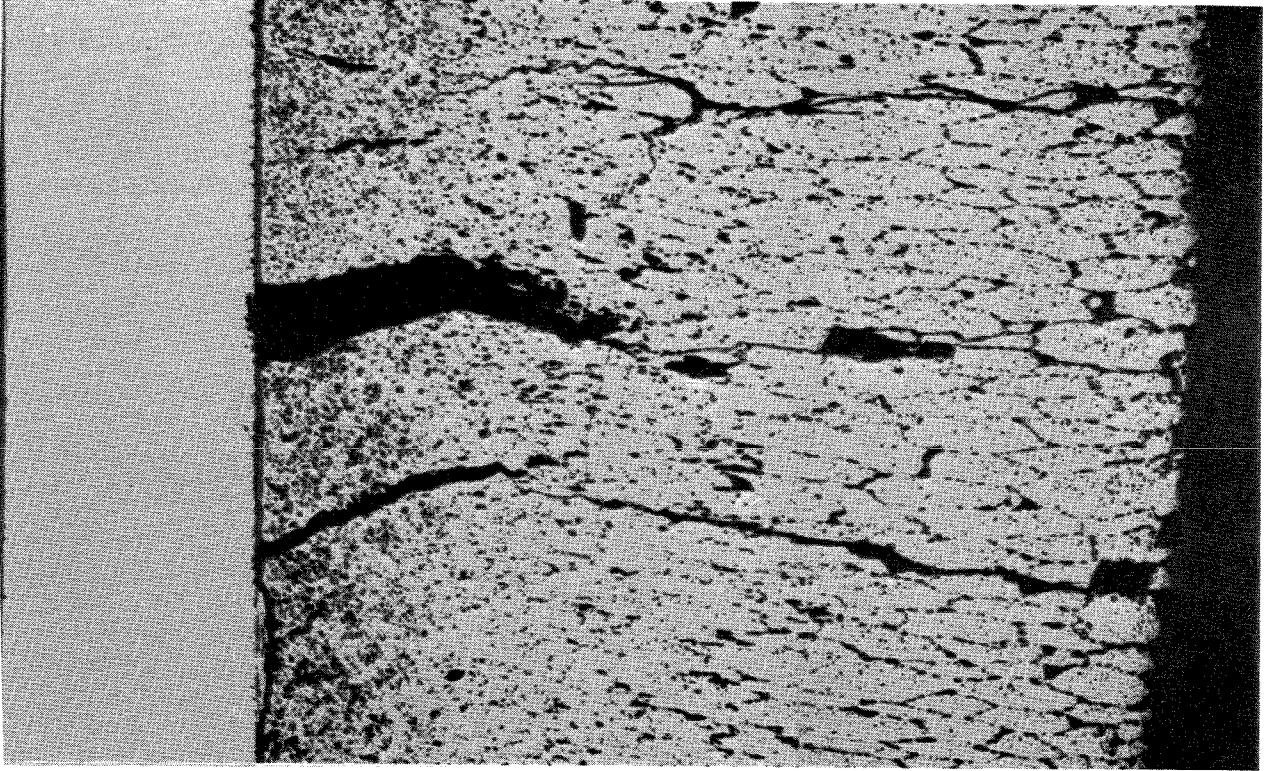
Einrichtung : Na/PbBi-Doppel-
Kapsel Typ 4
Dauer : 141,8 Vollasttage
Ende : 15. 9. 68
Rechn. Abbrand mittl. : 26,7 MWd/kg
Stableistung max./mittl. : 597/508 W/cm

- A/123 -
zu Prüfling 4A/3
A1

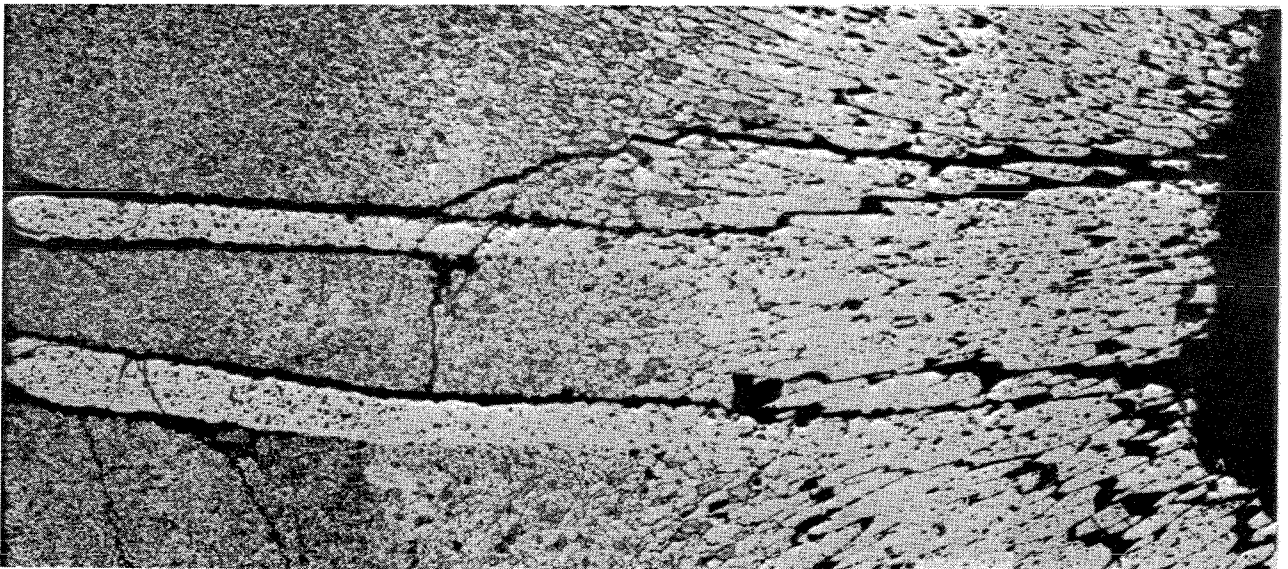


1mm

- A/124 -
zu Prüfling 4A/3
A1

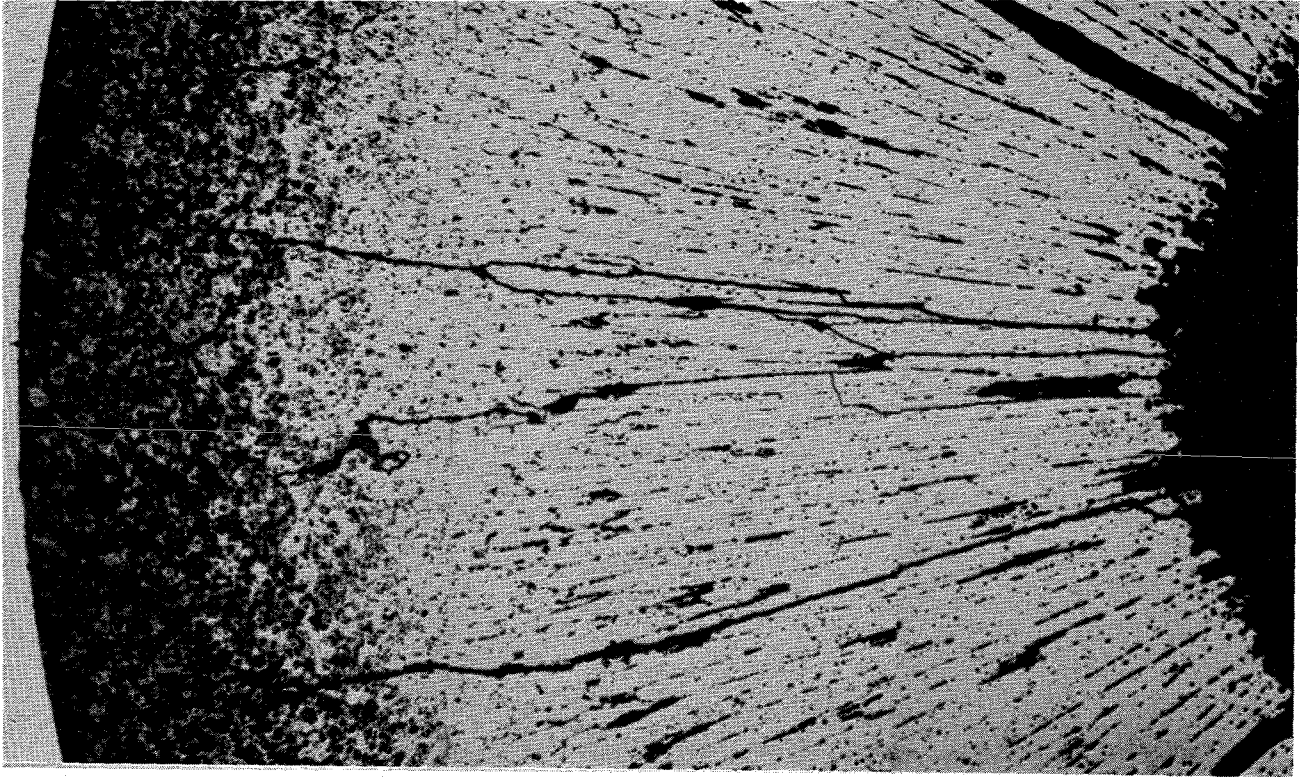


┌─┐
0,1mm



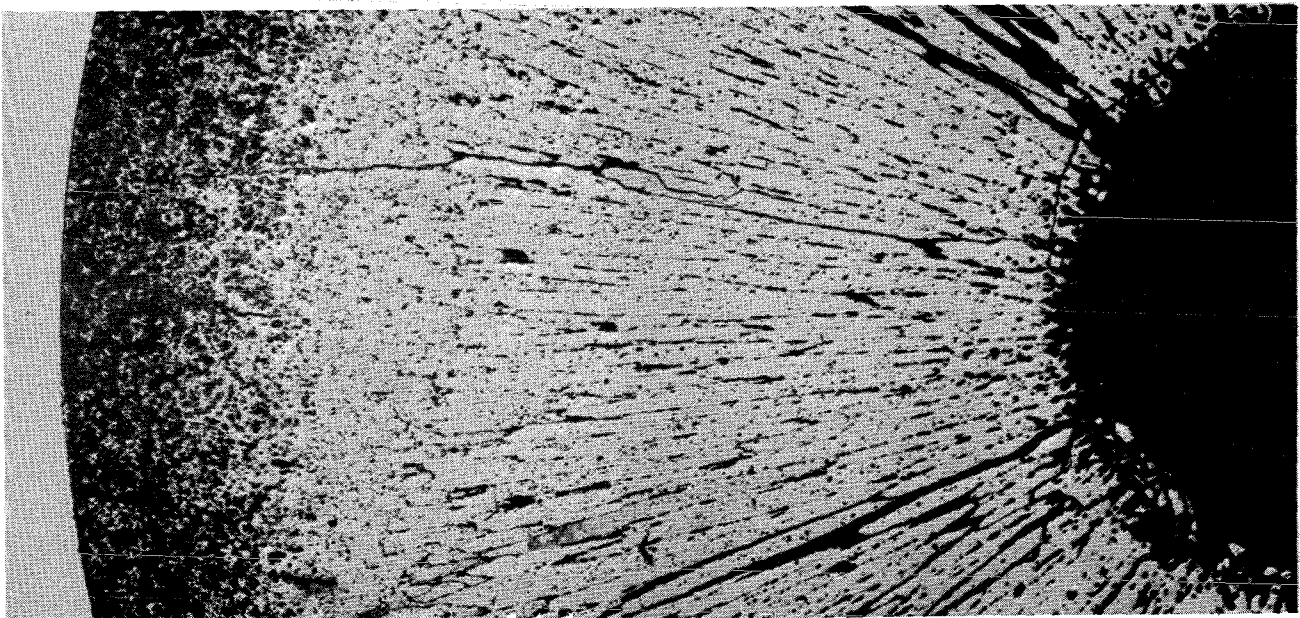
┌─┐
0,1mm

- A/125 -
zu Prüfling 4A/3
A2



0,1mm

A3

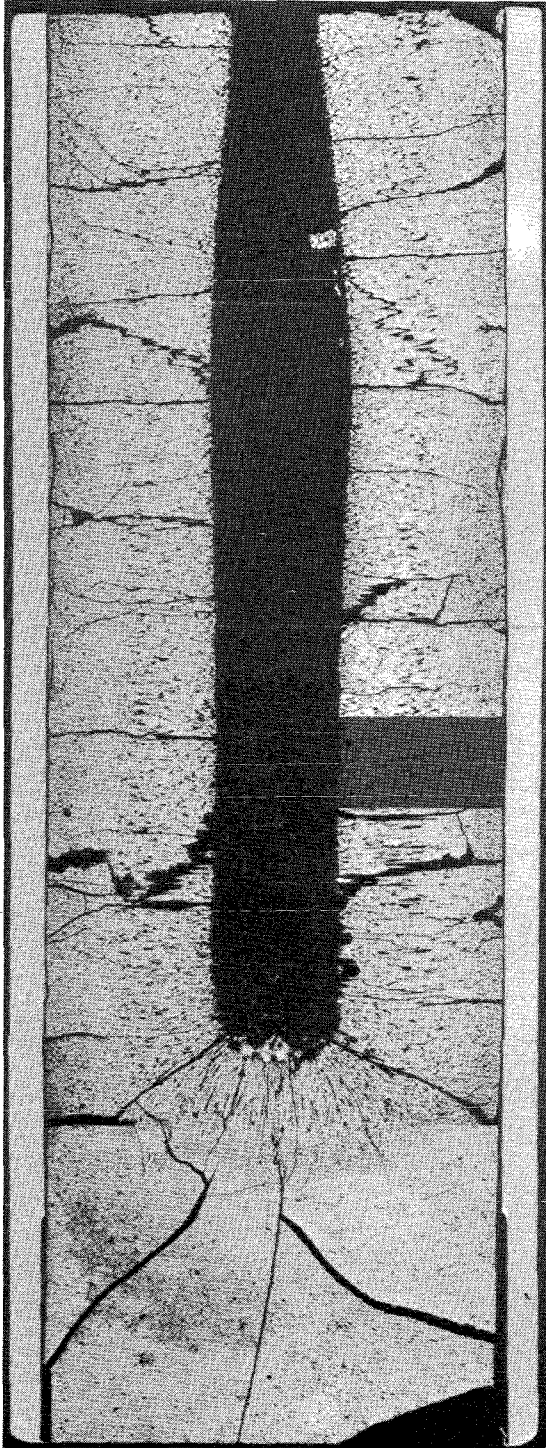


0,1mm

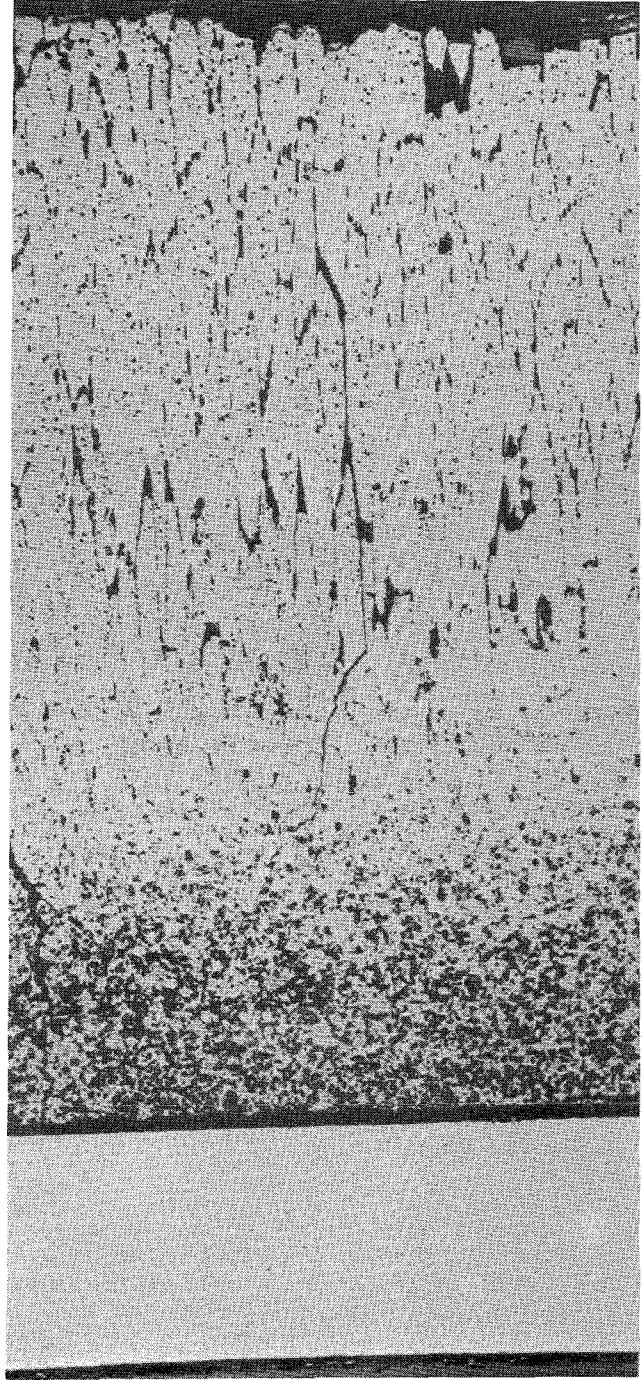
- A/126 -

zu Prüfling 4A/3

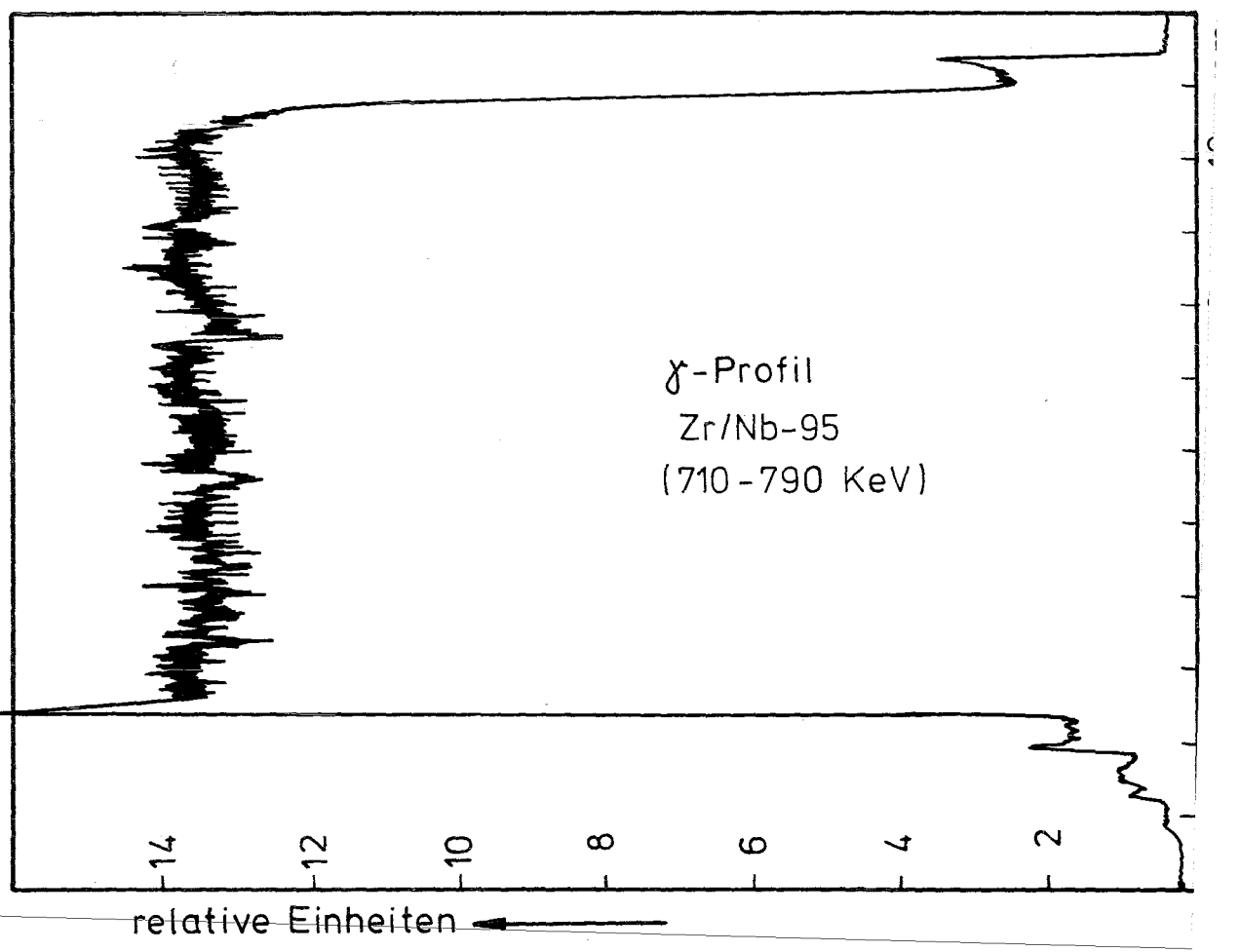
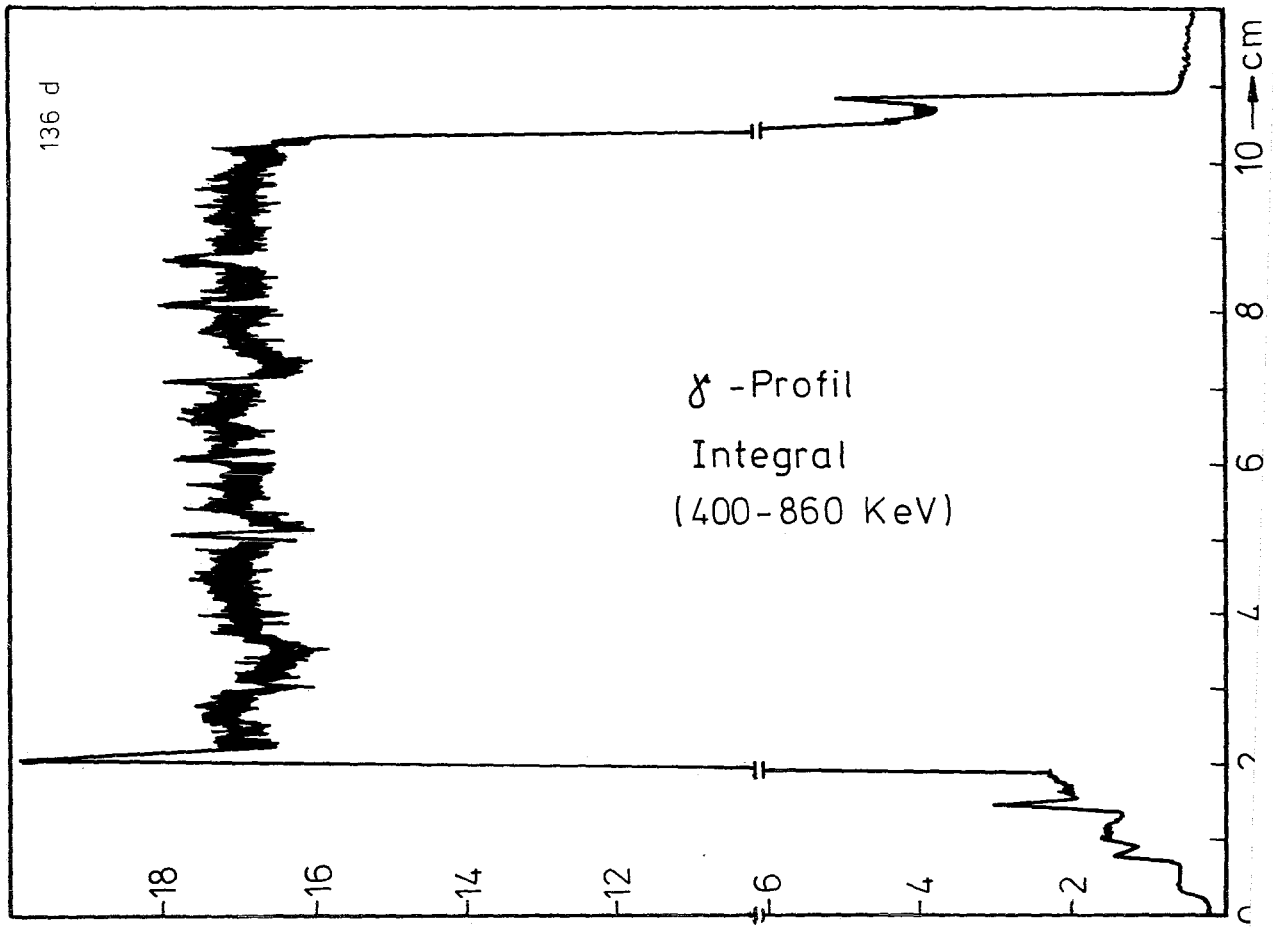
A4



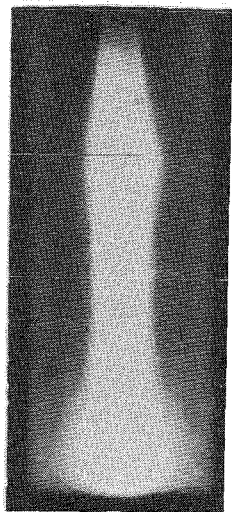
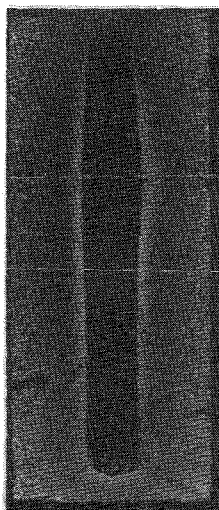
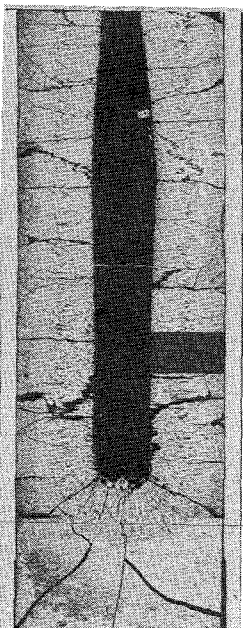
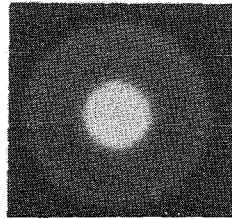
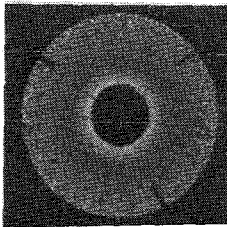
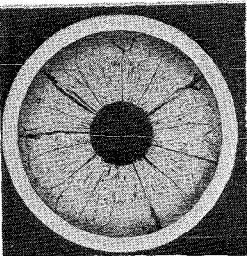
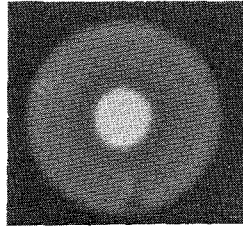
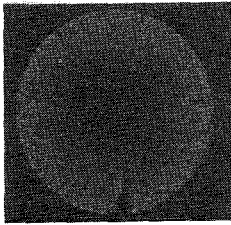
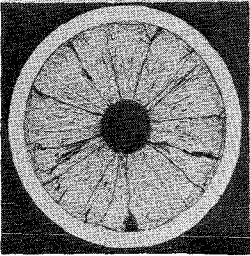
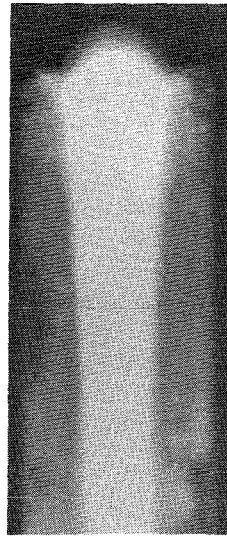
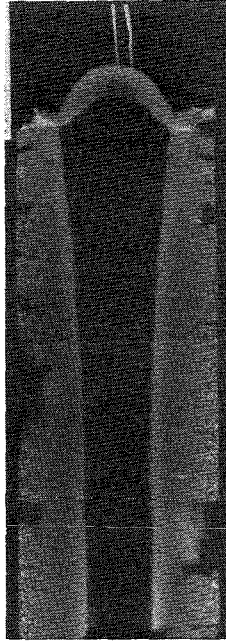
1mm



0,1mm



A





Prüfling 4A3

Brennstoff :

Form : Tabletten
Zusammensetzung : UO_2/PuO_2
Tablettendichte : 92,22% th.D.

Hülle :

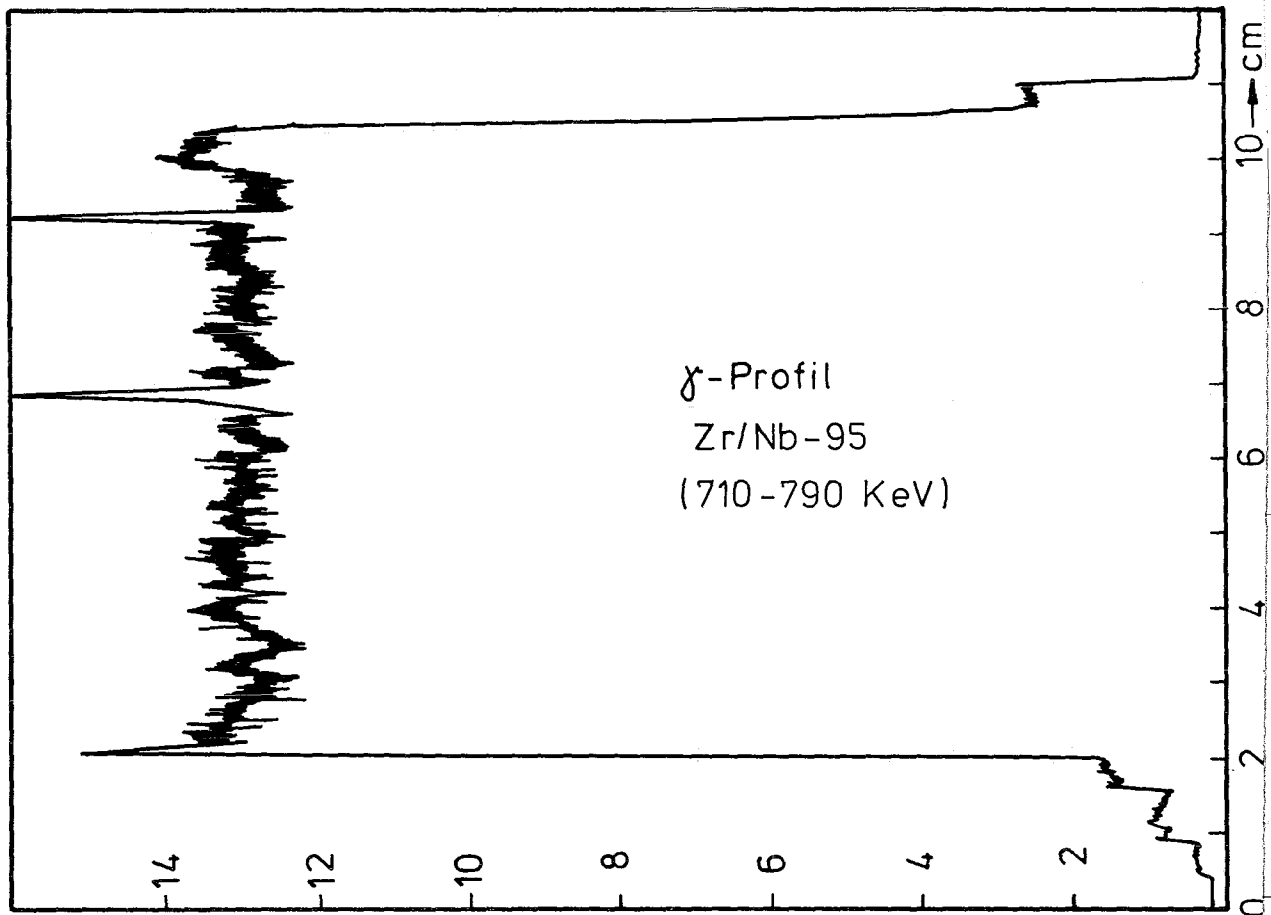
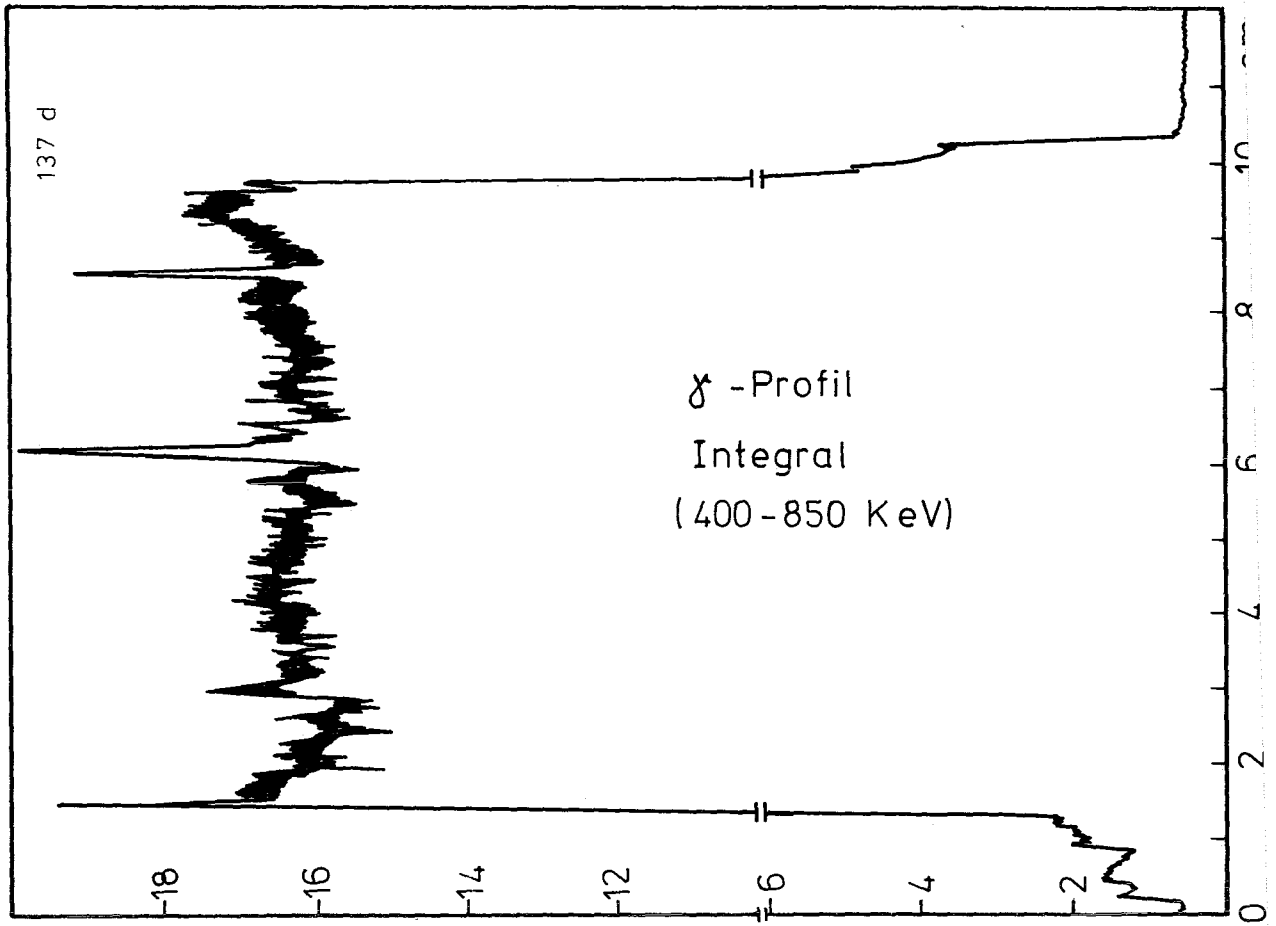
Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,1 mm
Schmierdichte : 86,4% th.D.

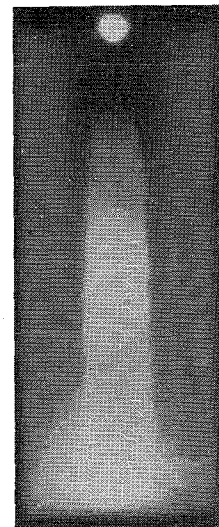
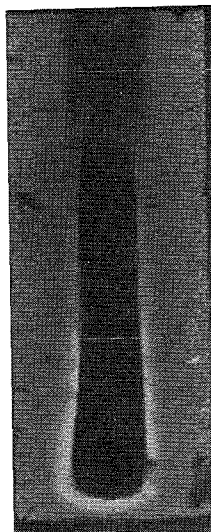
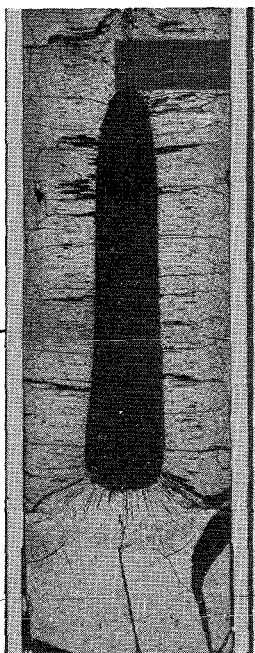
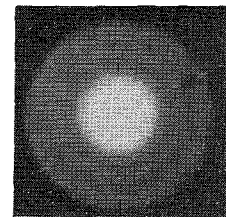
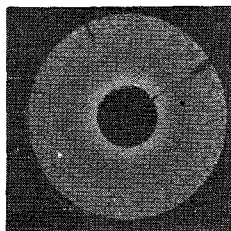
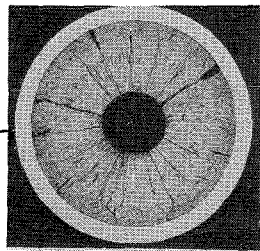
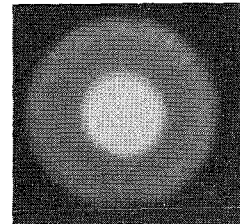
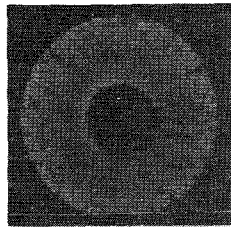
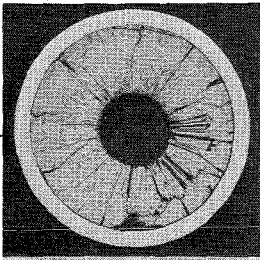
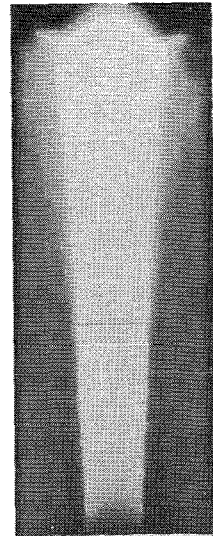
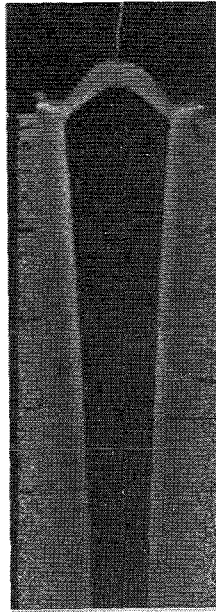
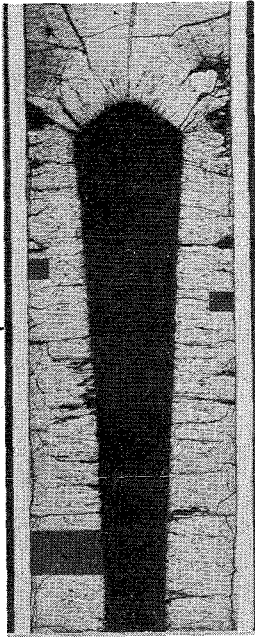
Bestrahlung :

Einrichtung : Na/PbBi-Doppel-
Kapsel Typ 4
Dauer : 162,8 Vollasttage
Ende : 13. 11. 68
Rechn. Abbrand mittl. : 30,4 MWd/kg
Stableistung max./mittl. : 710/508 W/cm

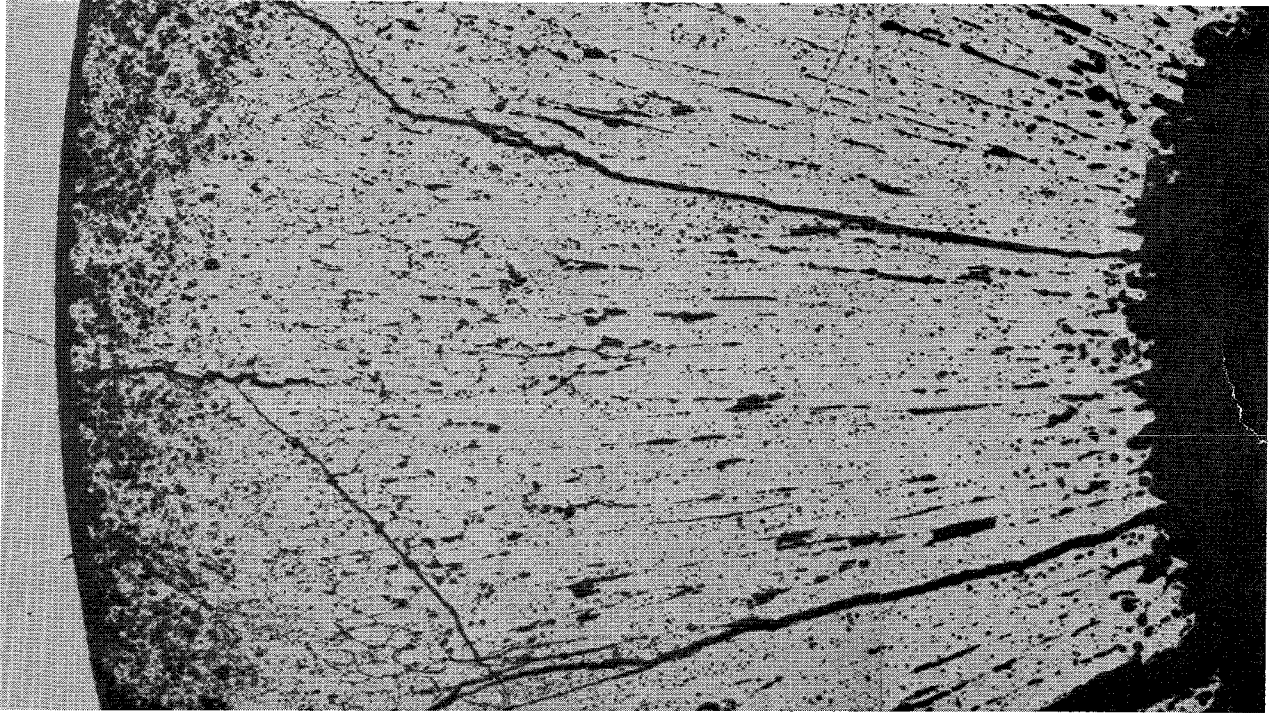


relative Einheiten

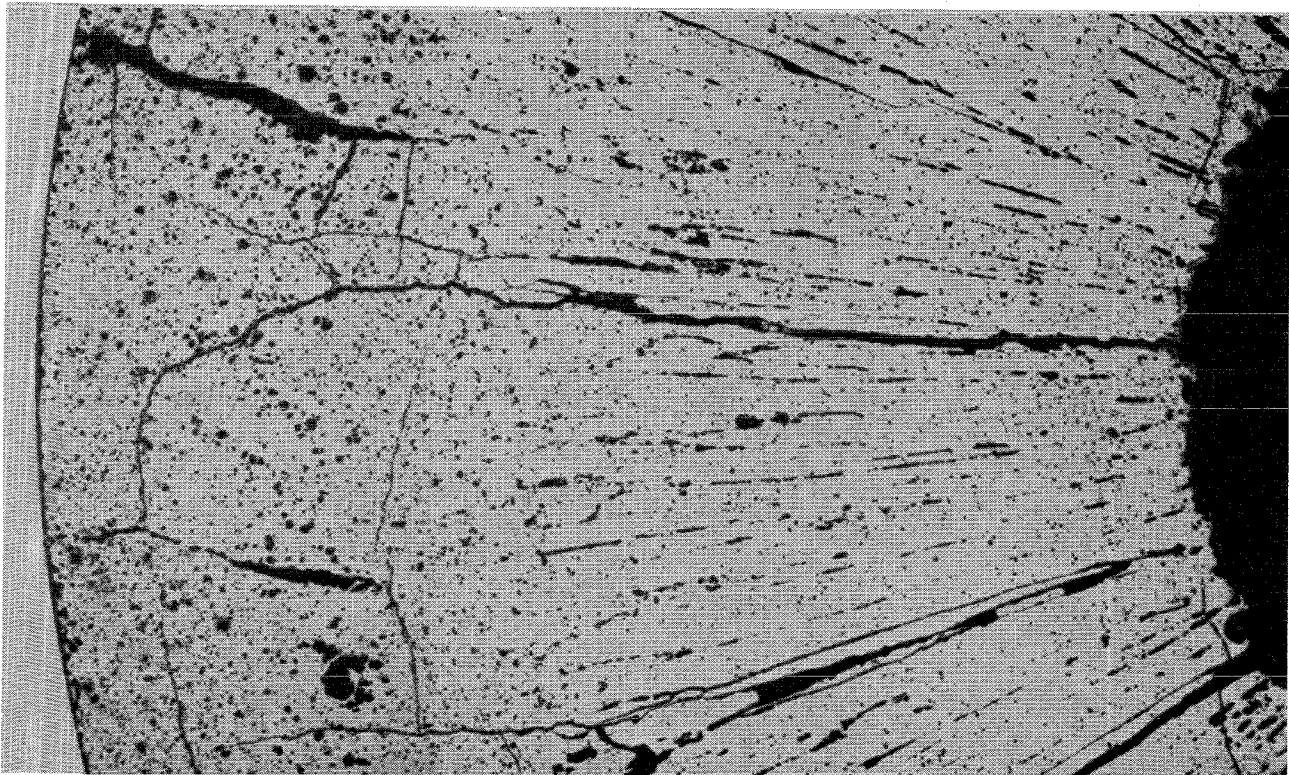
A



- A/129 -
zu Prüfling 4A/5
A2

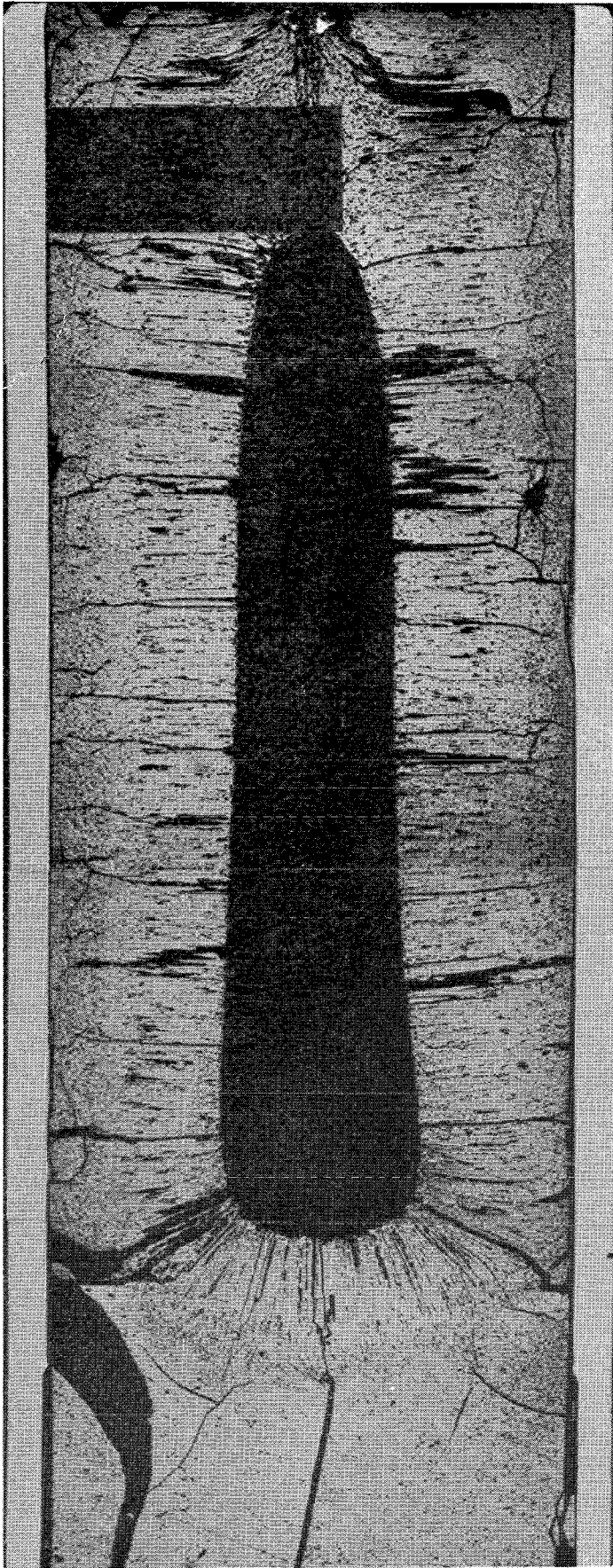


A3

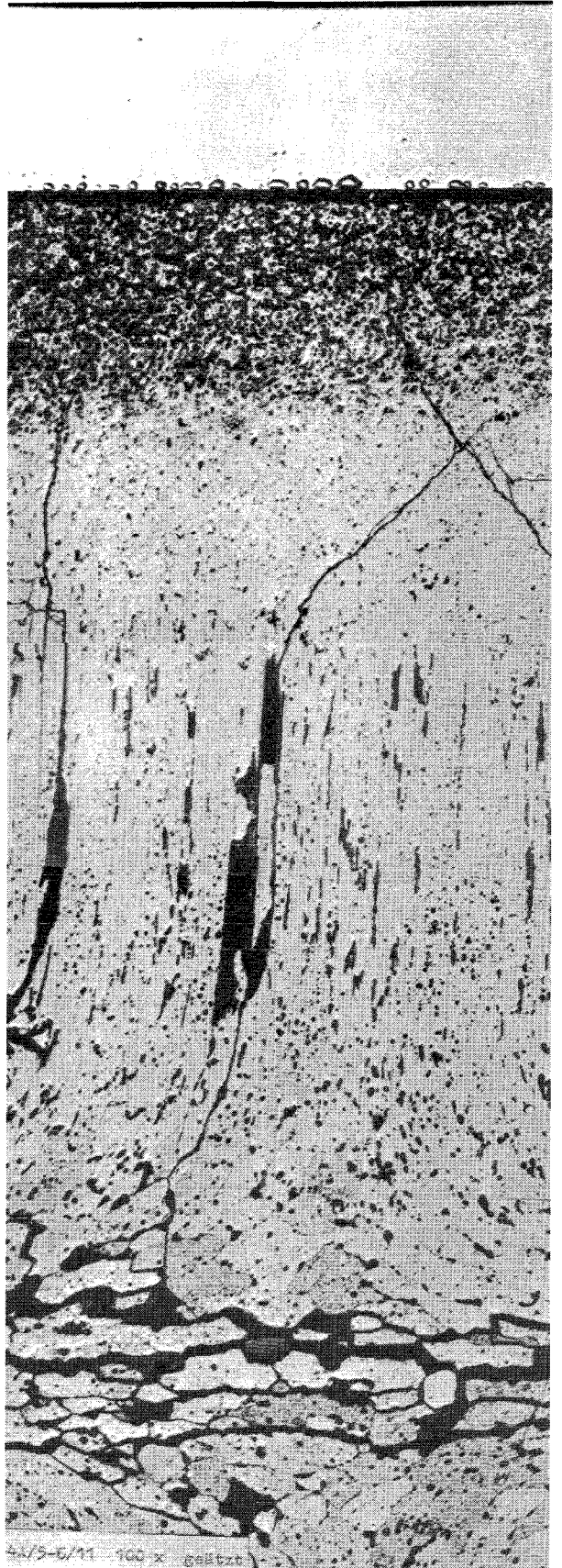


┌─┐
0,1mm

- A/130 -
zu Prüfling 4A/5
A4



1mm



0,1mm



Prüfling 4A5

Brennstoff :

Form : Tabletten
Zusammensetzung : UO_2/PuO_2
Tablettendichte : 92,18% th.D.

Hülle :

Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,5 mm

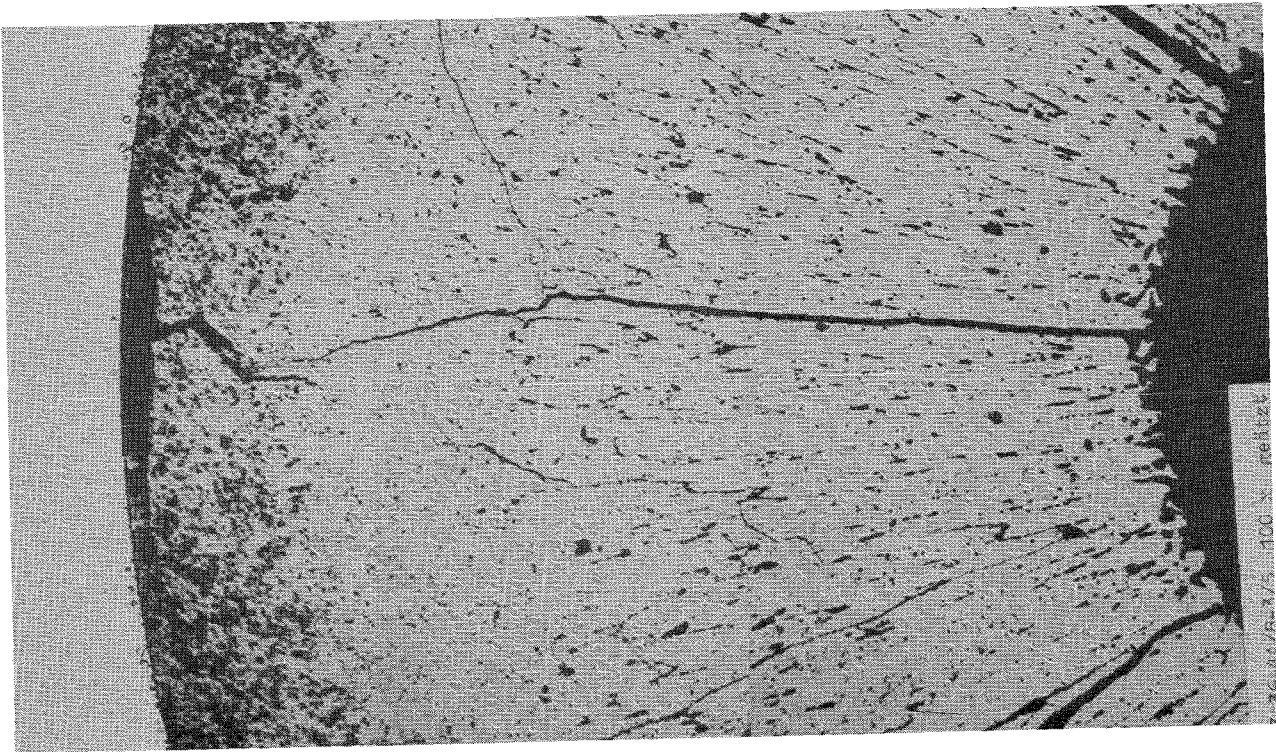
Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,1 mm
Schmierdichte : 86,4% th.D.

Bestrahlung :

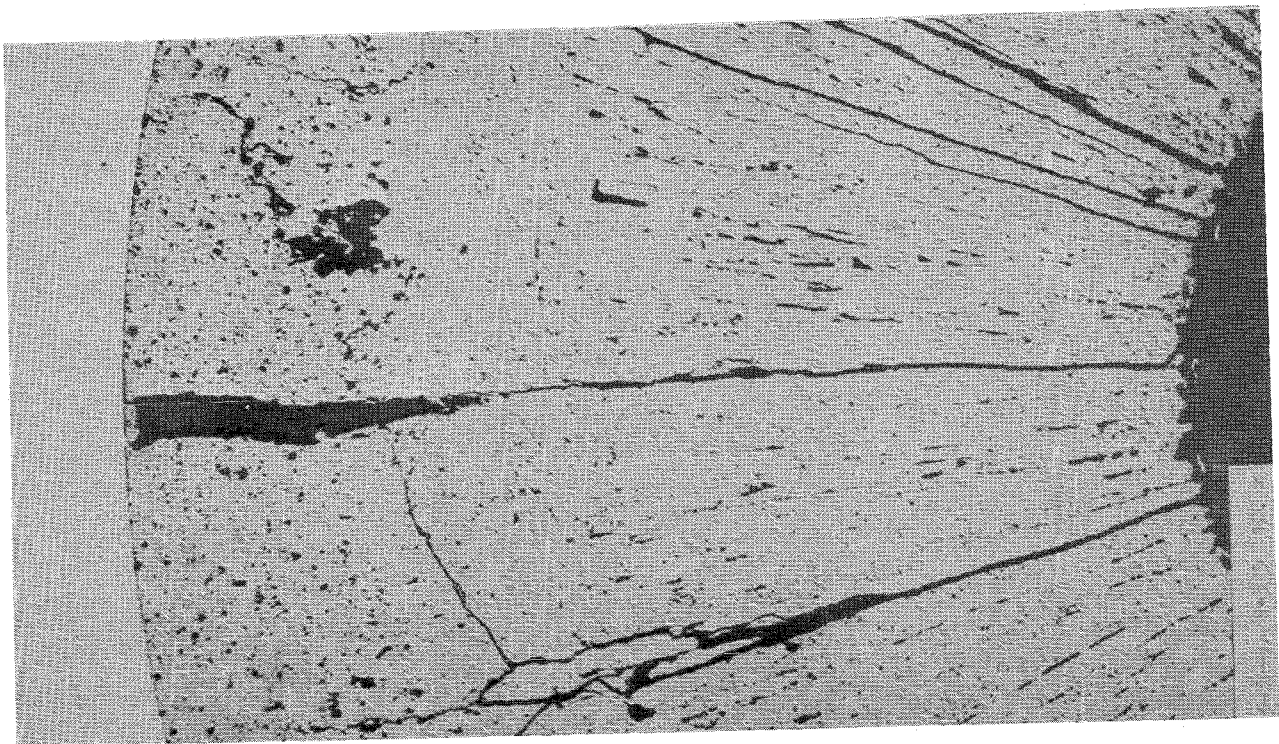
Einrichtung : Na/PbBi-Doppel-
Kapsel Typ 4
Dauer : 162,8 Vollasttage
Ende : 13. 11. 68
Rechn. Abbrand mittl. : 30,4 MWd/kg
Stableistung max./mittl. : 900/491 W/cm

-A/ 133 -
zu Prüfling 4A/8
A2



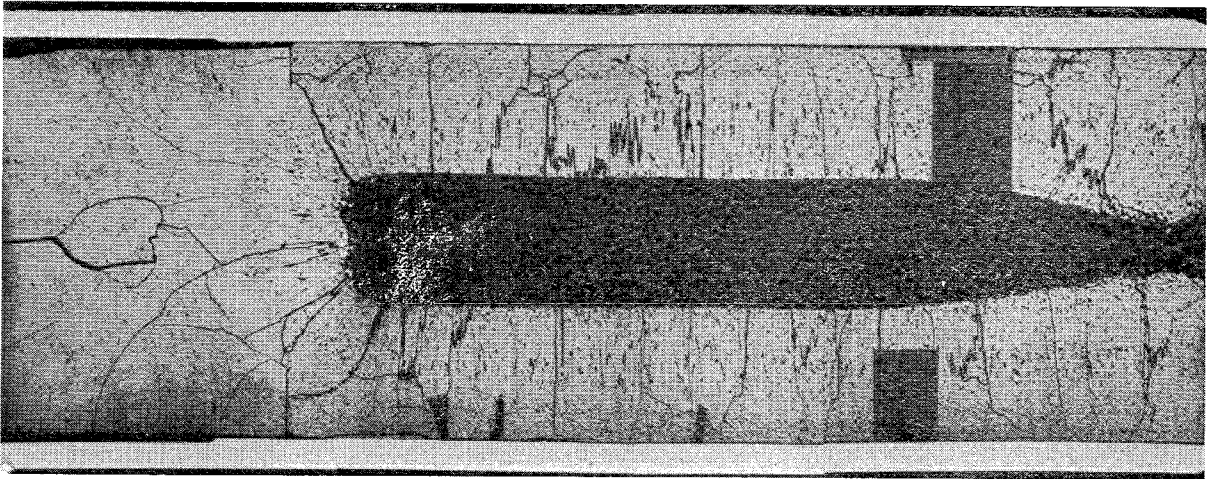
0,1mm

A3

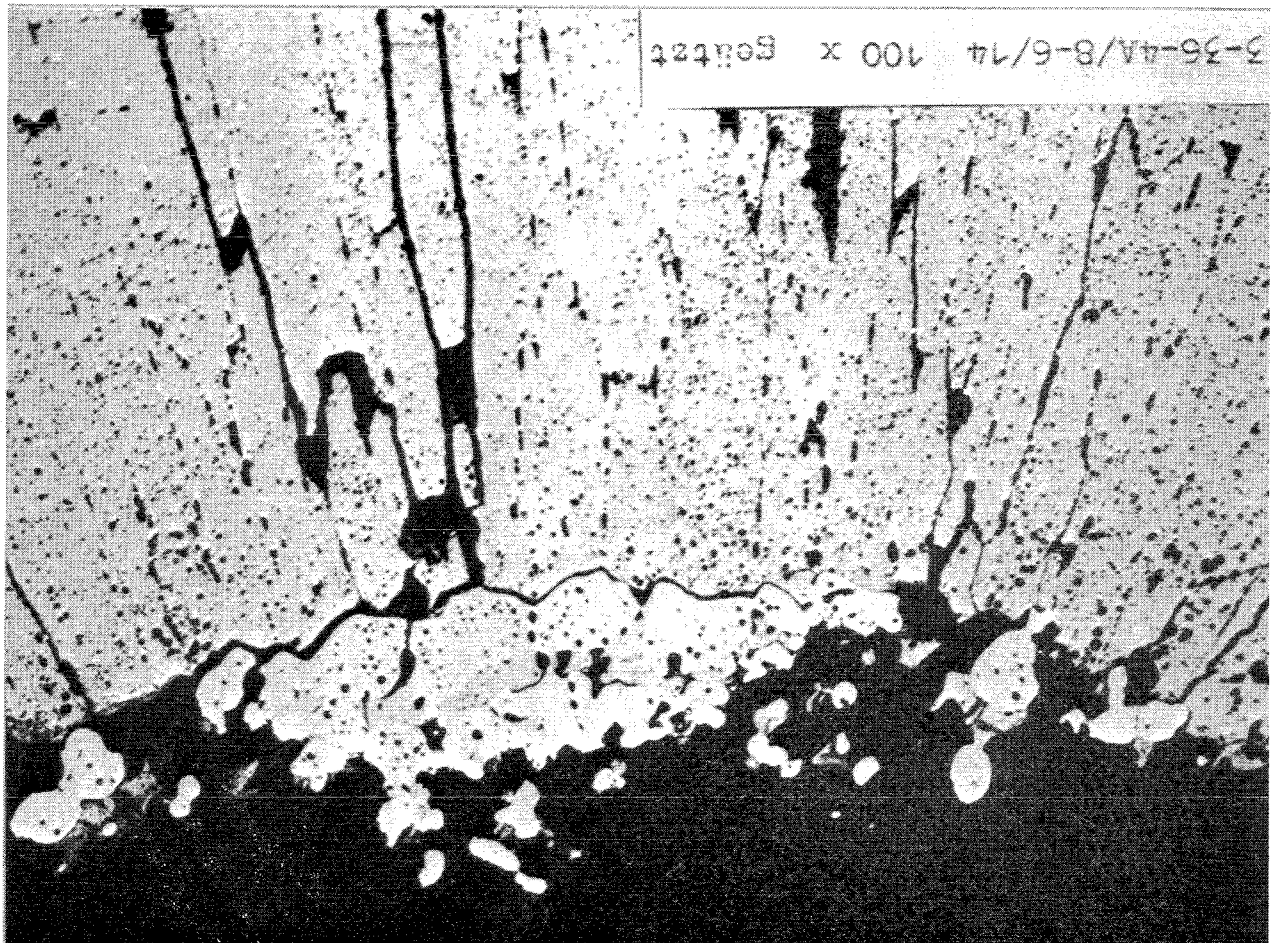


0,1mm

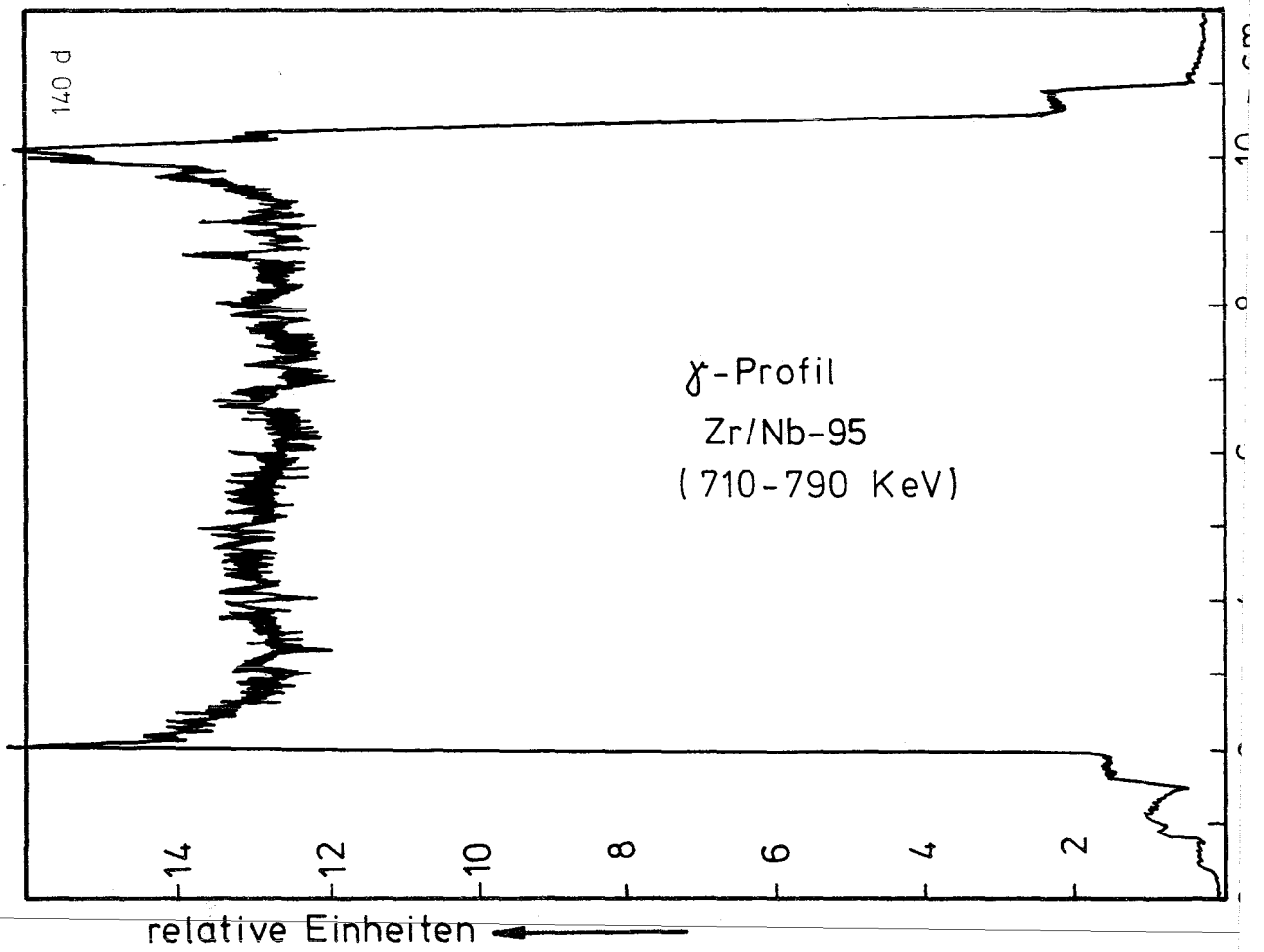
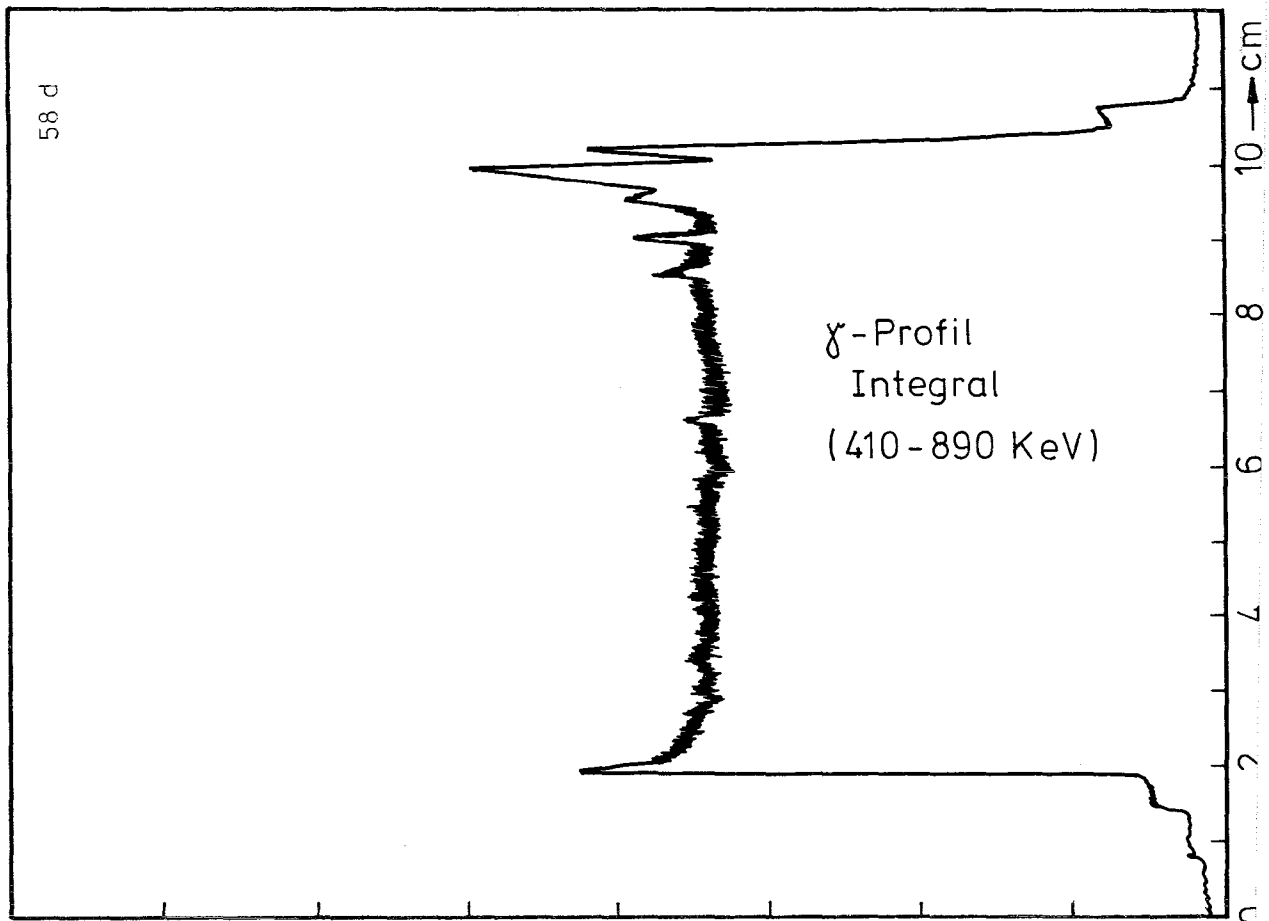
- A/134 -
zu Prüfling 4A/8
A4



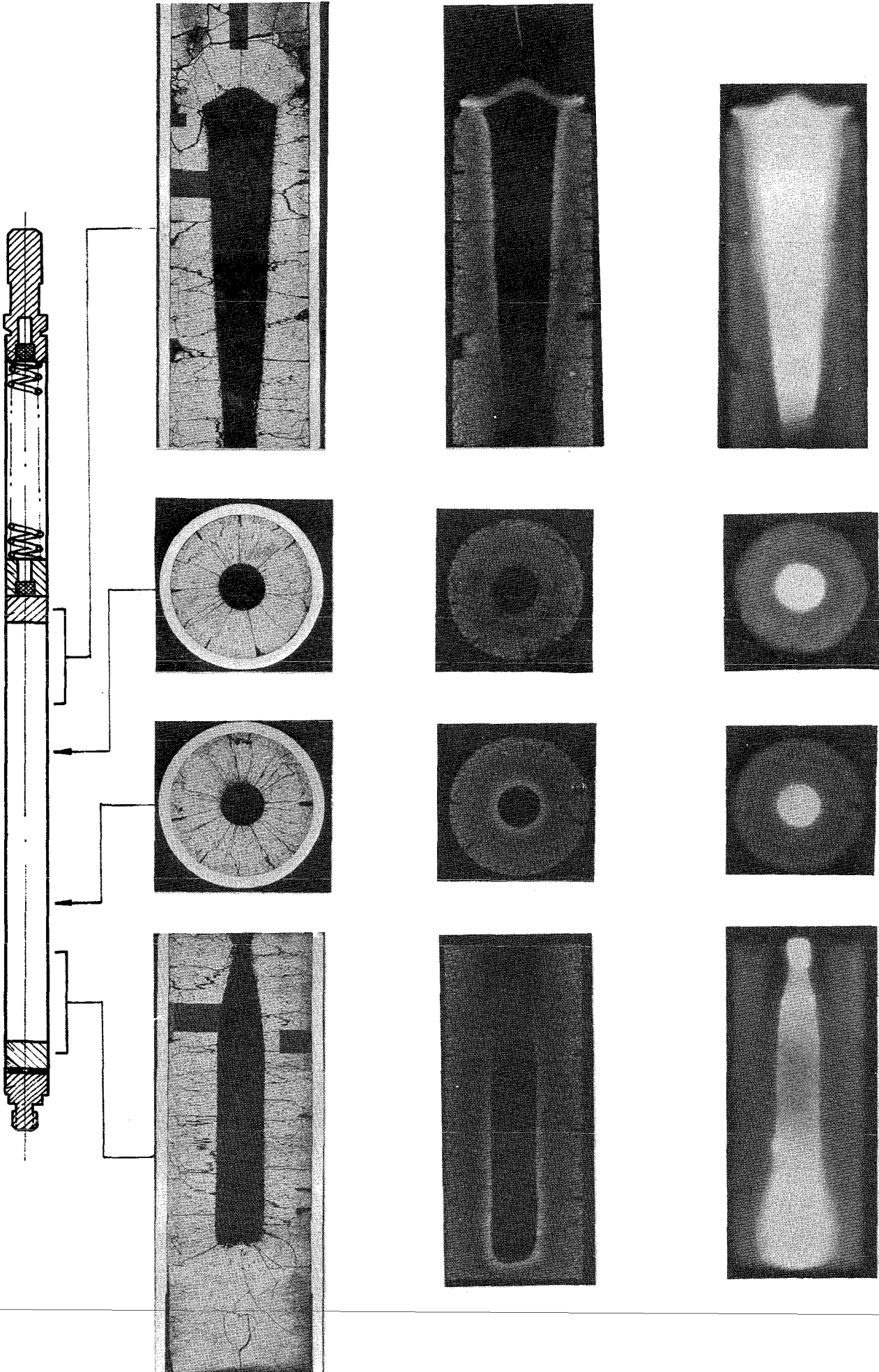
1mm



0,1mm



A





Prüfling 4A8

Brennstoff :

Form : Tabletten

Zusammensetzung : UO_2/PuO_2

Tablettendichte : 91,60% th.D.

Hülle :

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 7,4 mm

Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : 0,1 mm

Schmierdichte : 86,4% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : Na/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4

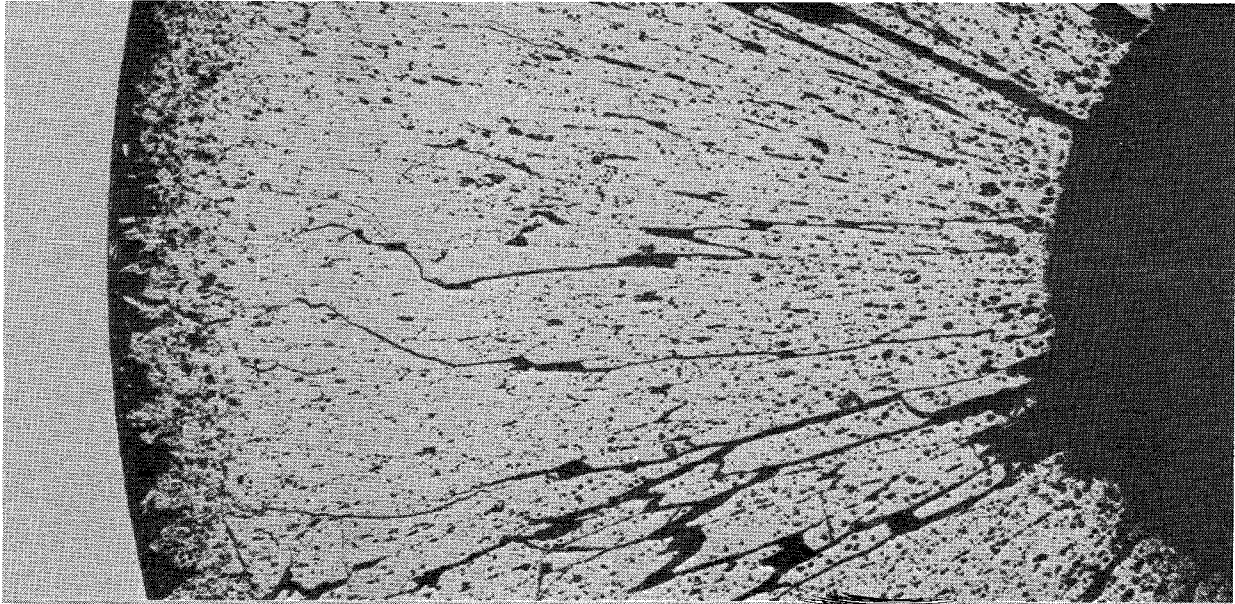
Dauer : 162,8 Vollasttage

Ende : 13. 11. 68

Rechn. Abbrand mittl. : 33,0 MWd/kg

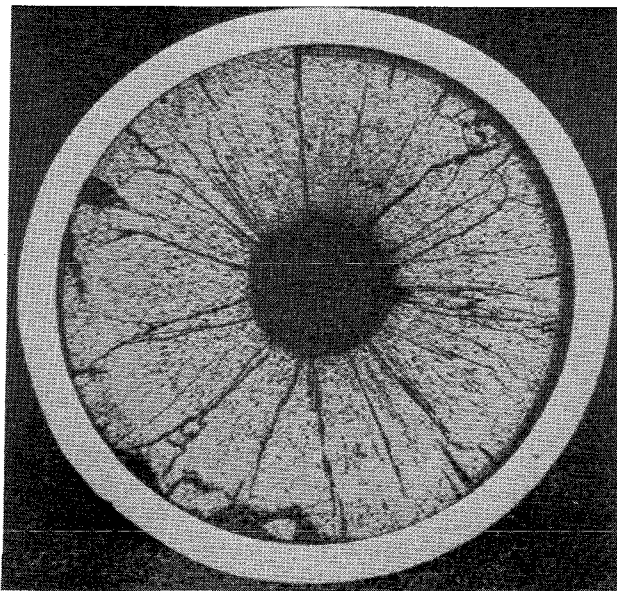
Stableistung max./mittl. : 1014/488 W/cm

- A/137-
zu Prüfling 4A/9
A2



┌
0,1mm

A2

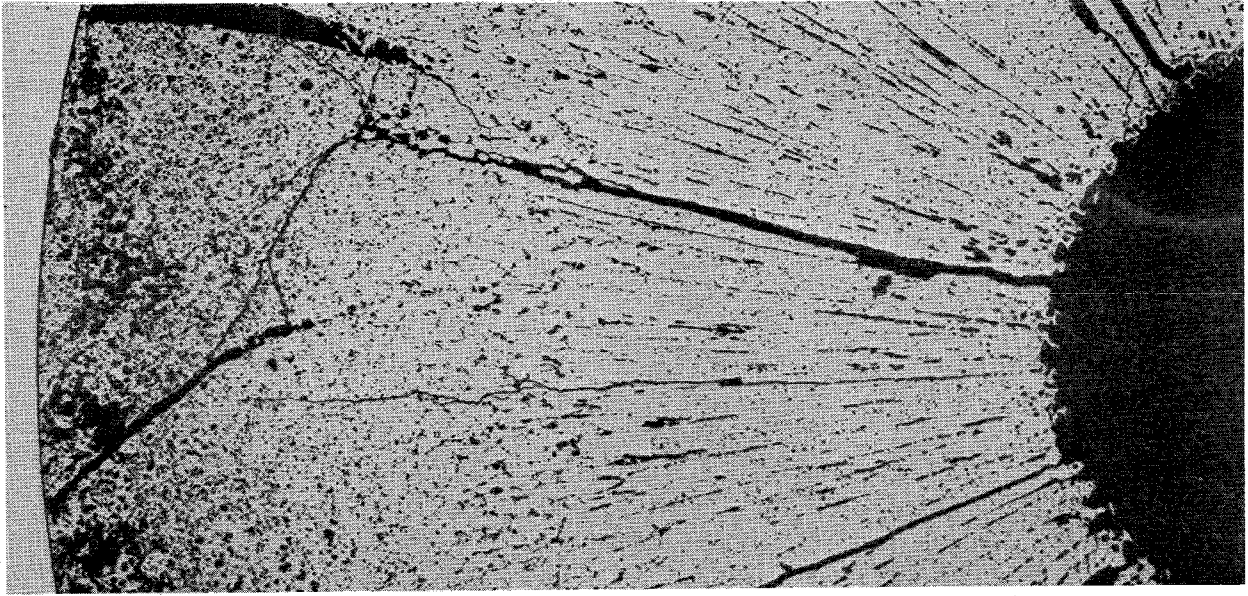


B2



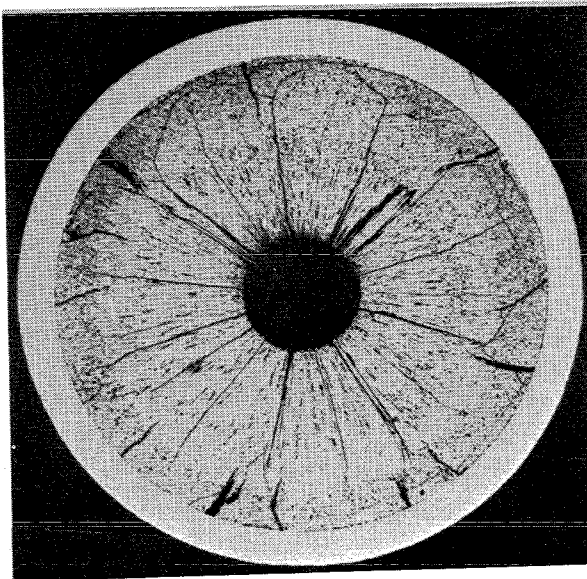
┌
1mm

- A/138 -
zu Prüfling 4A/9
A3

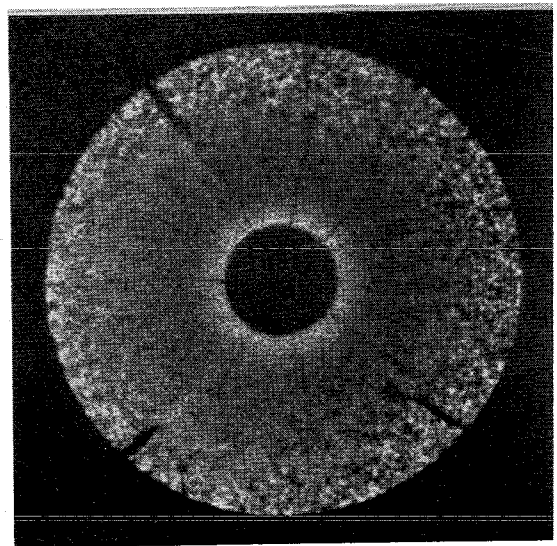


0,1mm

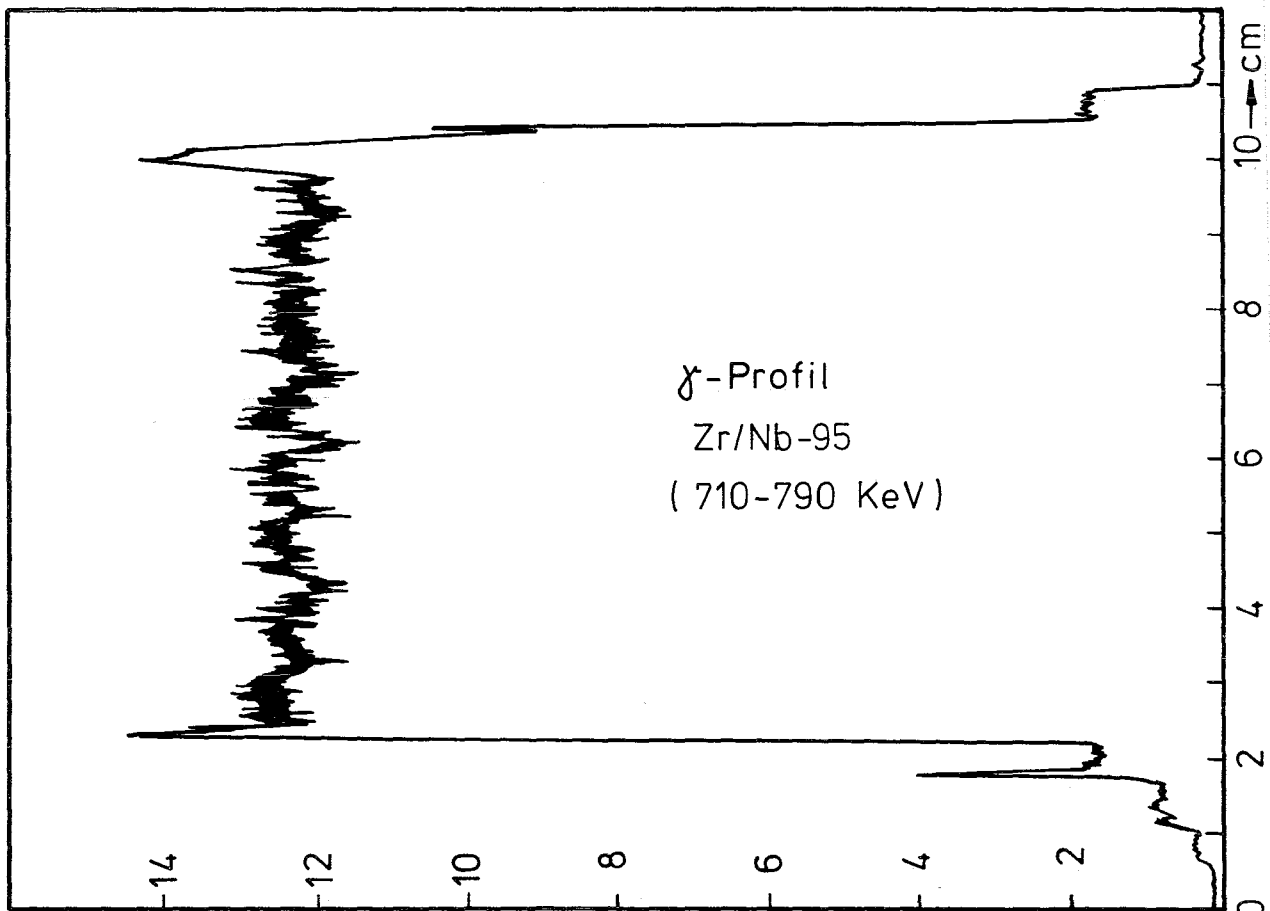
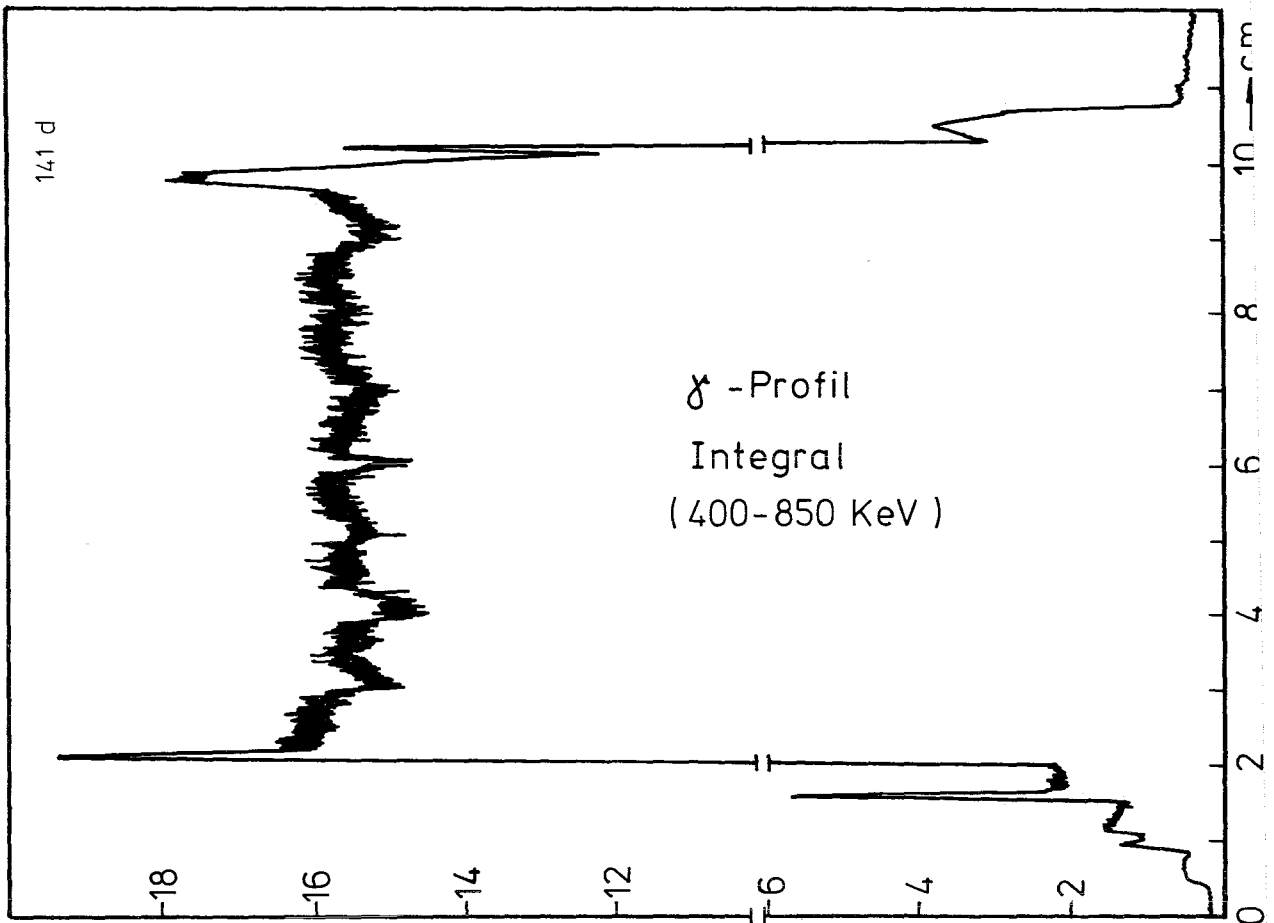
A3



B3



1mm

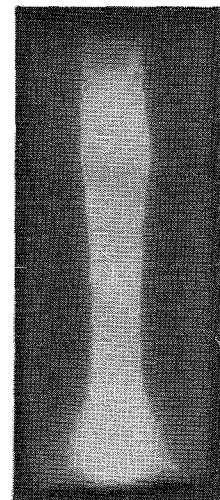
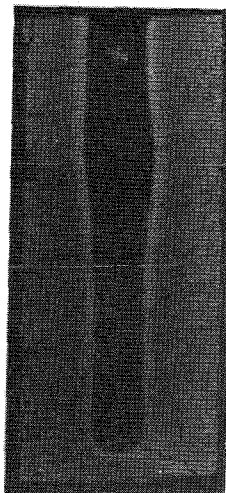
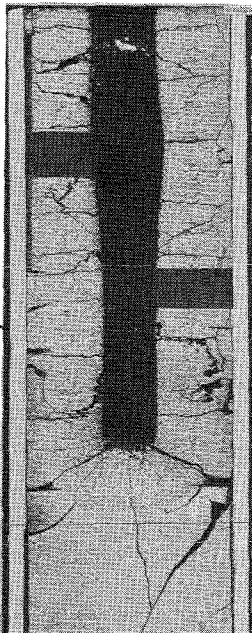
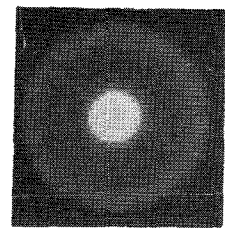
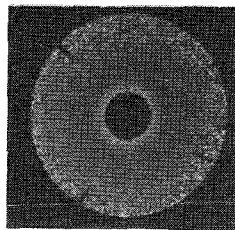
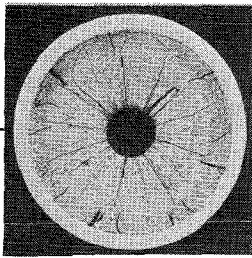
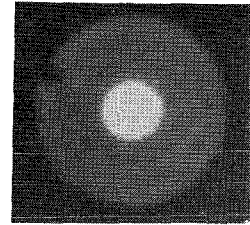
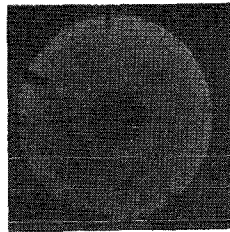
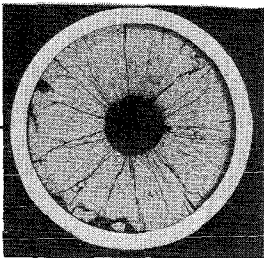
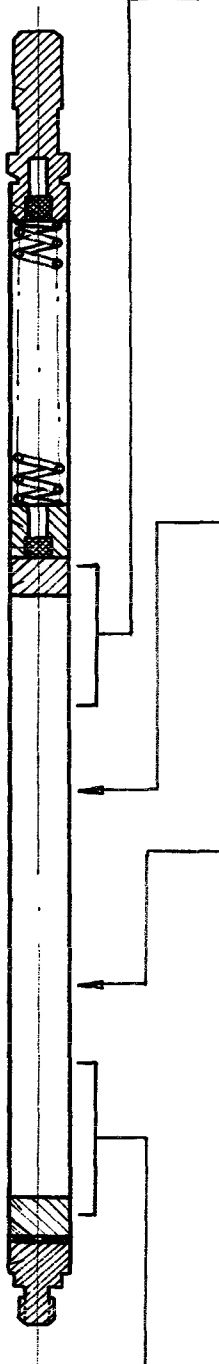
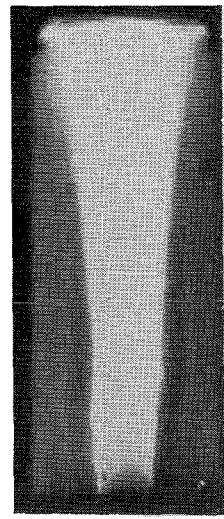
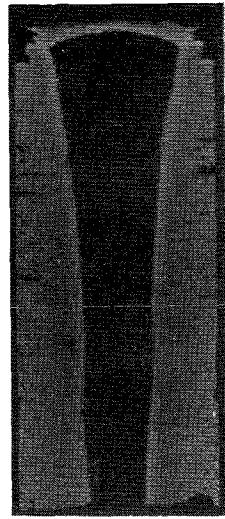


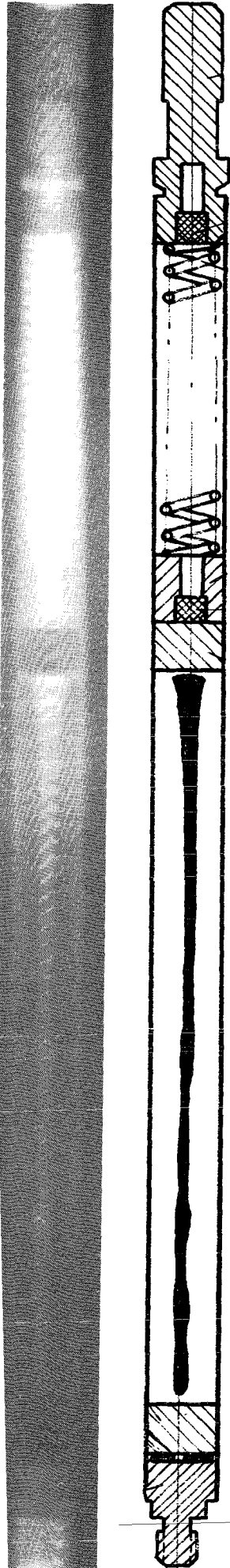
relative Einheiten \uparrow

A



B





Prüfling 4A9

Brennstoff :

Form	:	Tabletten
Zusammensetzung	:	UO ₂ /PuO ₂
Tablettendichte	:	91,60% th.D.

Hülle :

Material	:	1.4988
Aussendurchmesser	:	7,4 mm
Wandstärke	:	0,5 mm

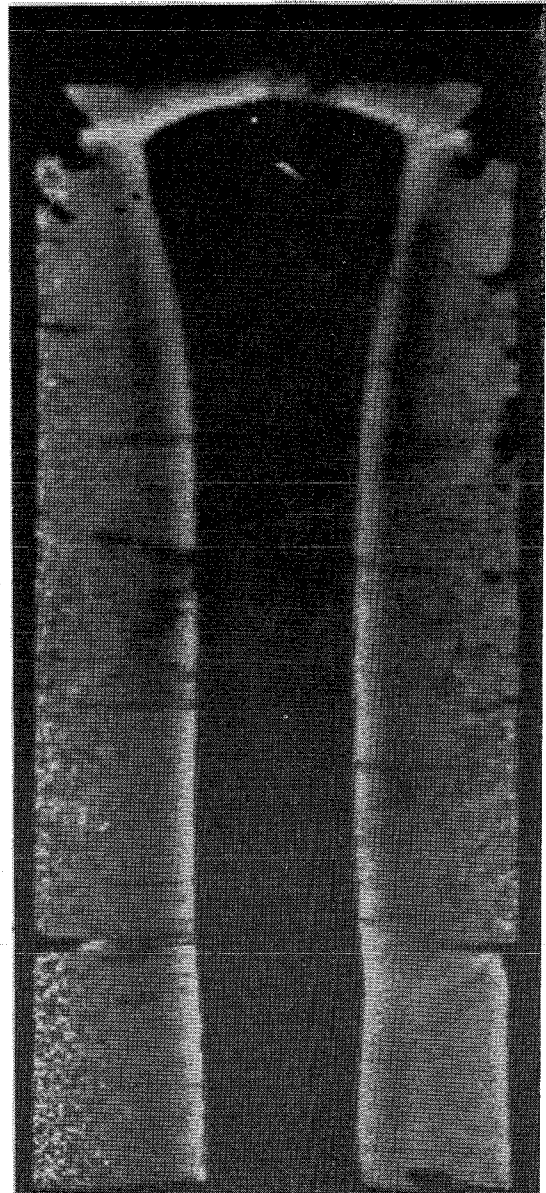
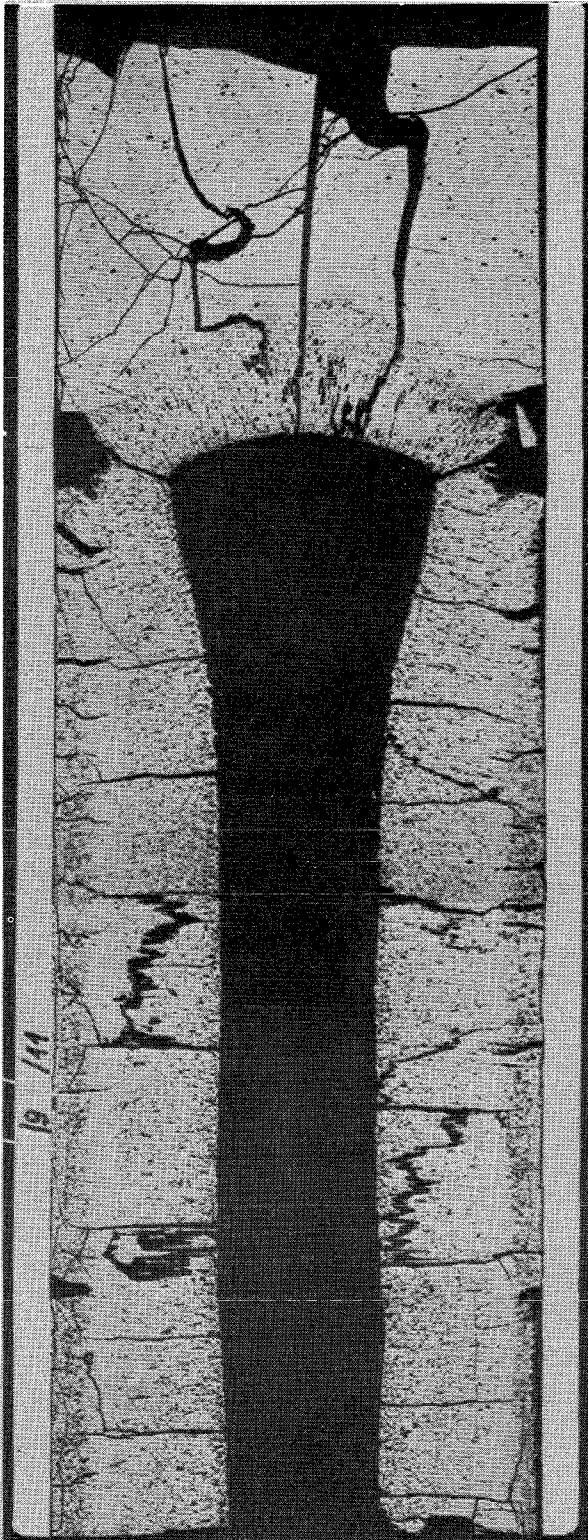
Geometrie :

Länge des Prüflings	:	172 mm
Länge der Brennstoffsäule	:	80 mm
Radiale Spaltweite	:	0,1 mm
Schmierdichte	:	

Bestrahlung :

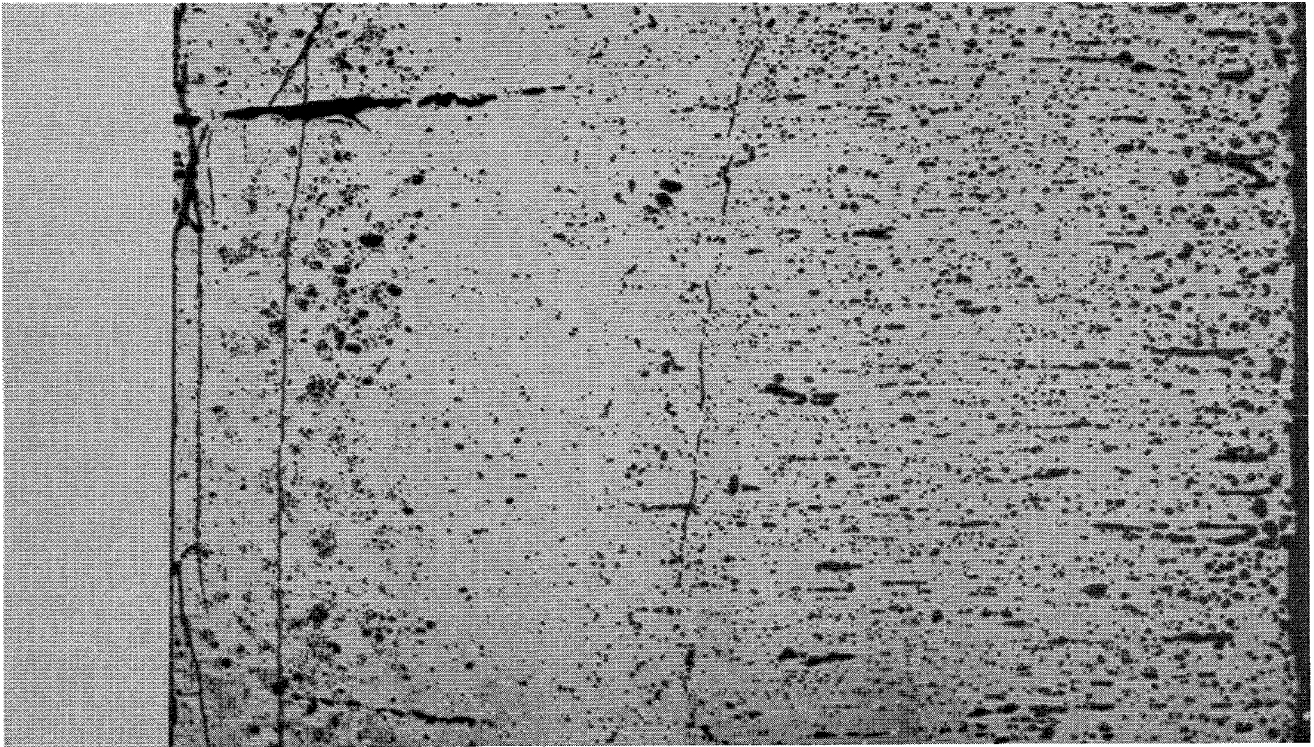
Einrichtung	:	Na/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4
Dauer	:	162,8 Vollasttage
Ende	:	13. 11. 68
Rechn. Abbrand mittl.	:	31,1 MWd/kg
Stableistung max./mittl.	:	663/510 W/cm

-A/141-
zu Prüfling B14
A1

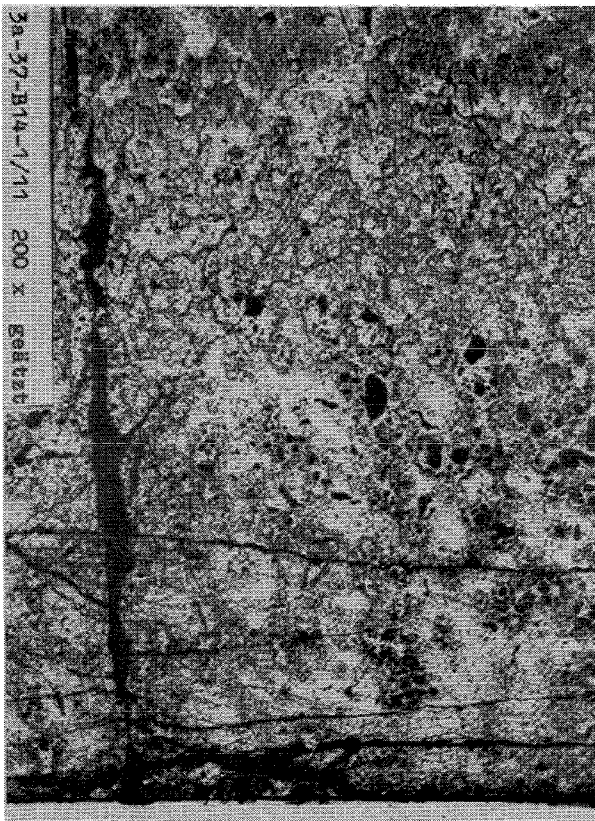


1mm

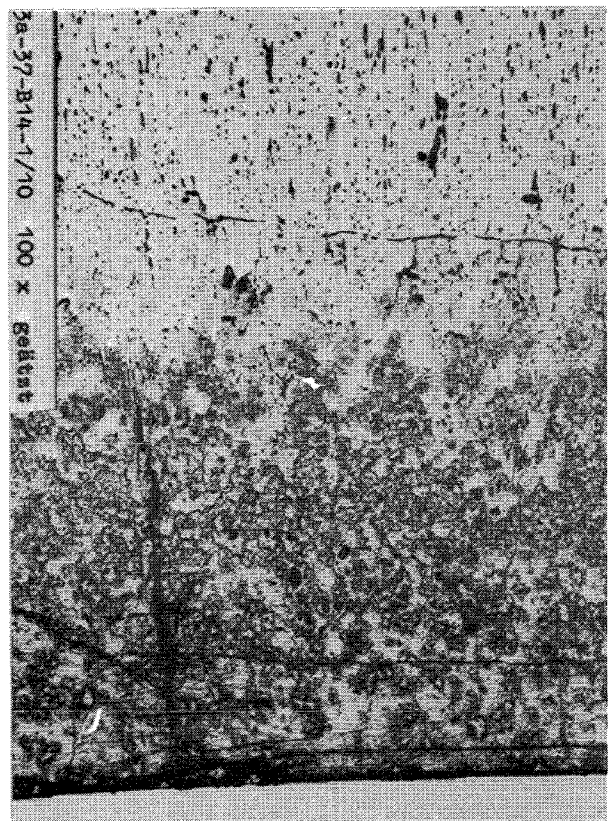
-A/142-
zu Prüfling B14
A1



0,1mm

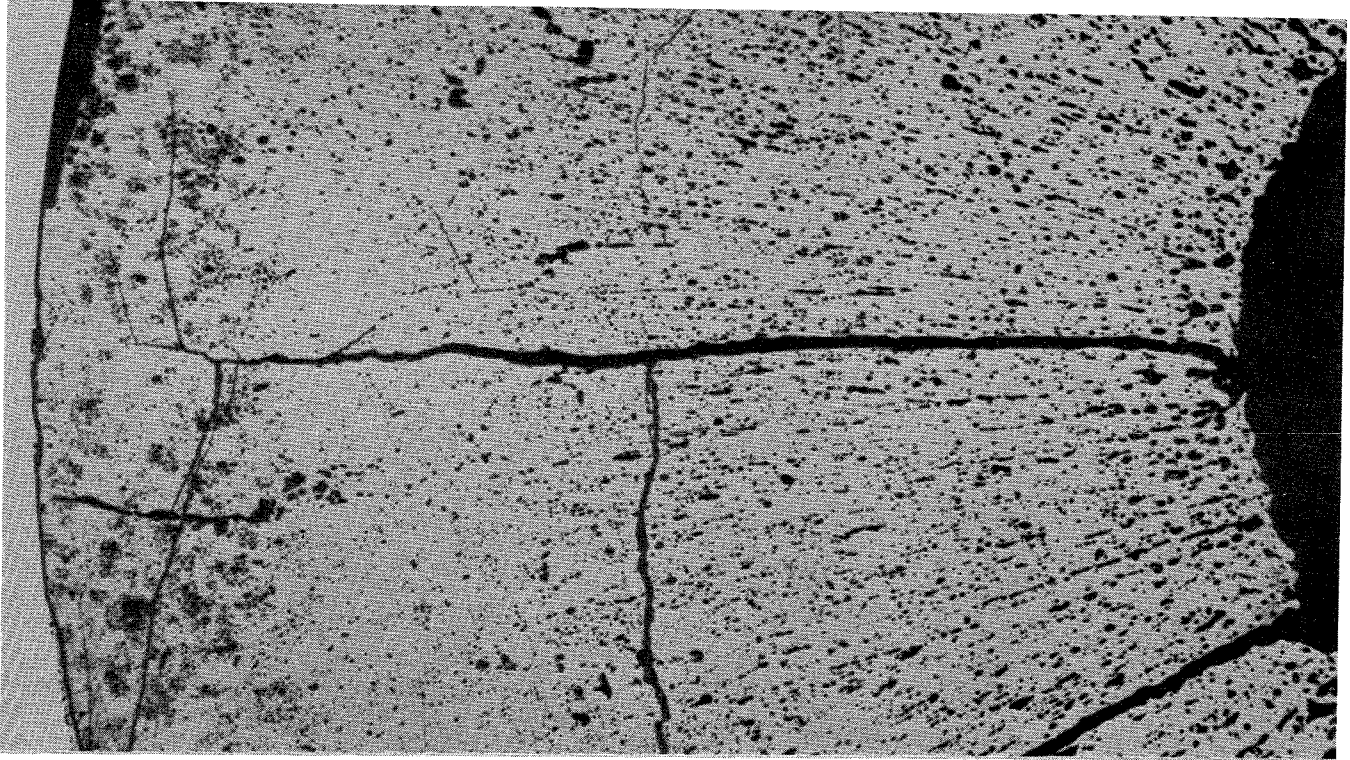


0,1mm

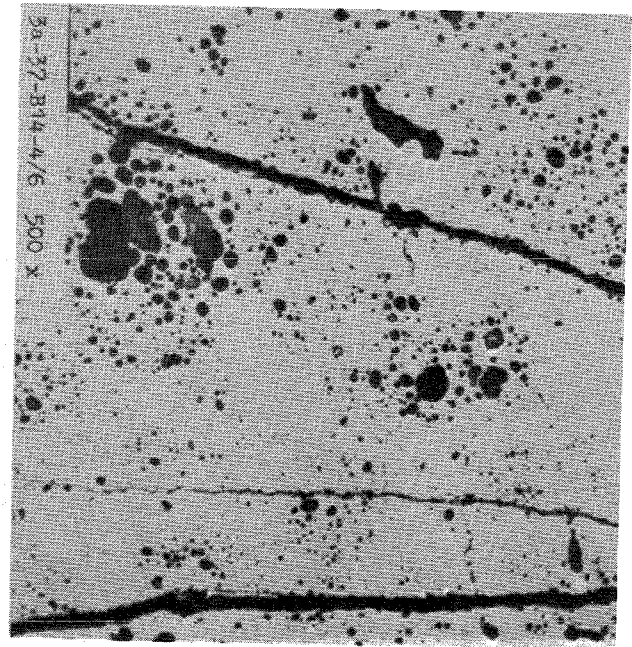
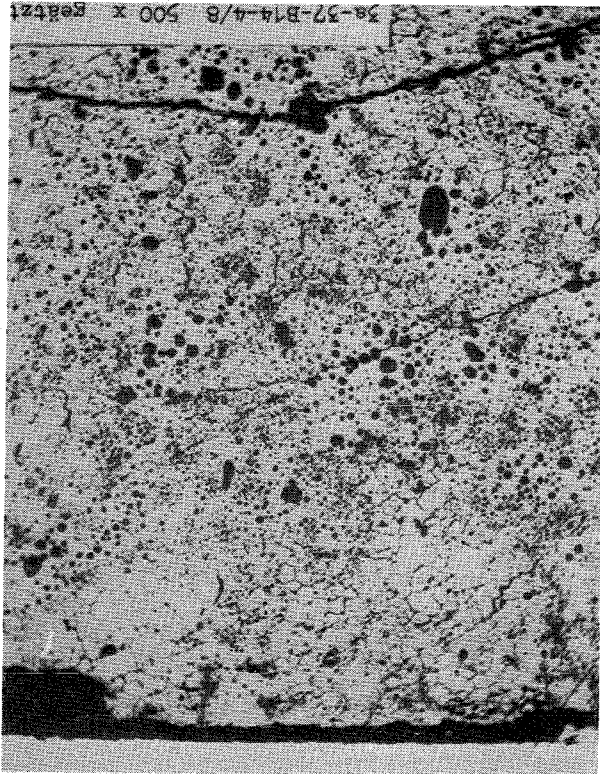


0,1mm

-A/143-
zu Prüfling B14
A2

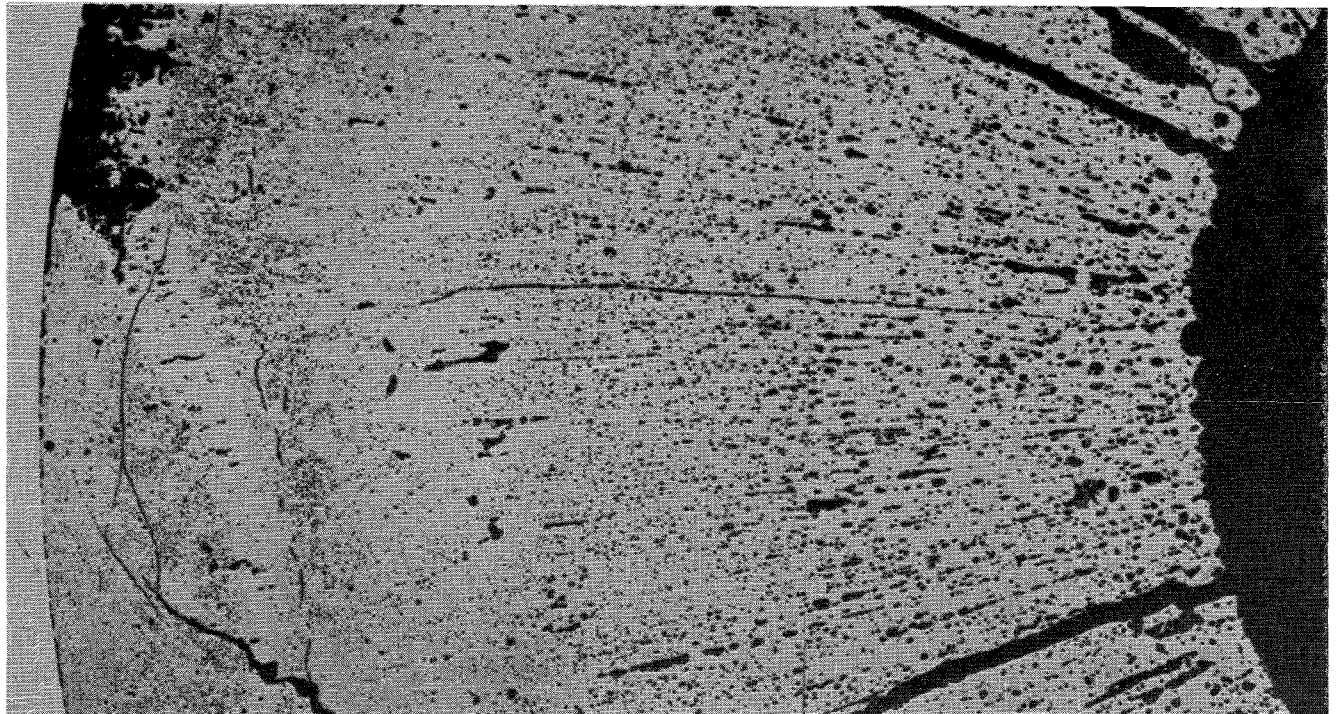


0,1 mm



0,1 mm

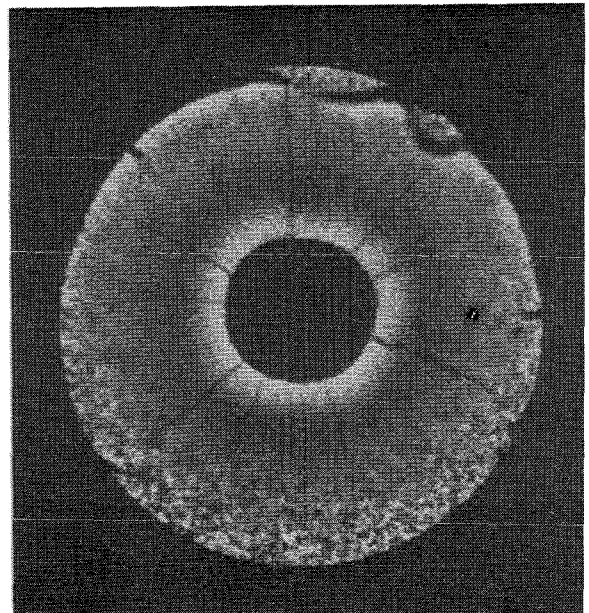
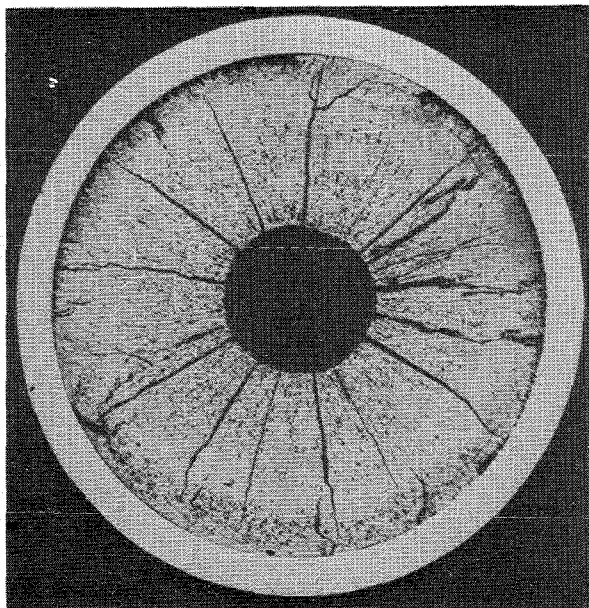
-A/144-
zu Prüfling B 14
A3



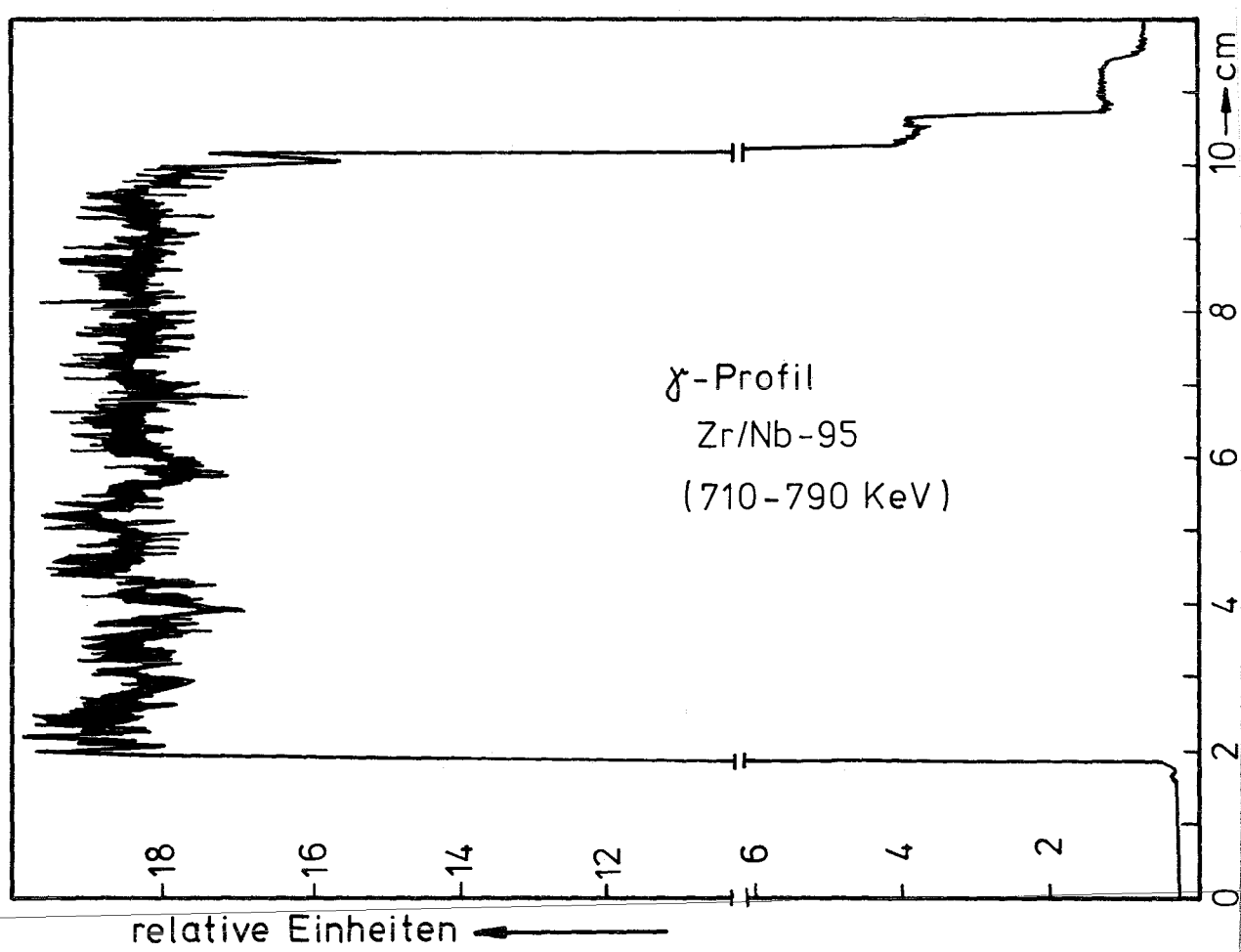
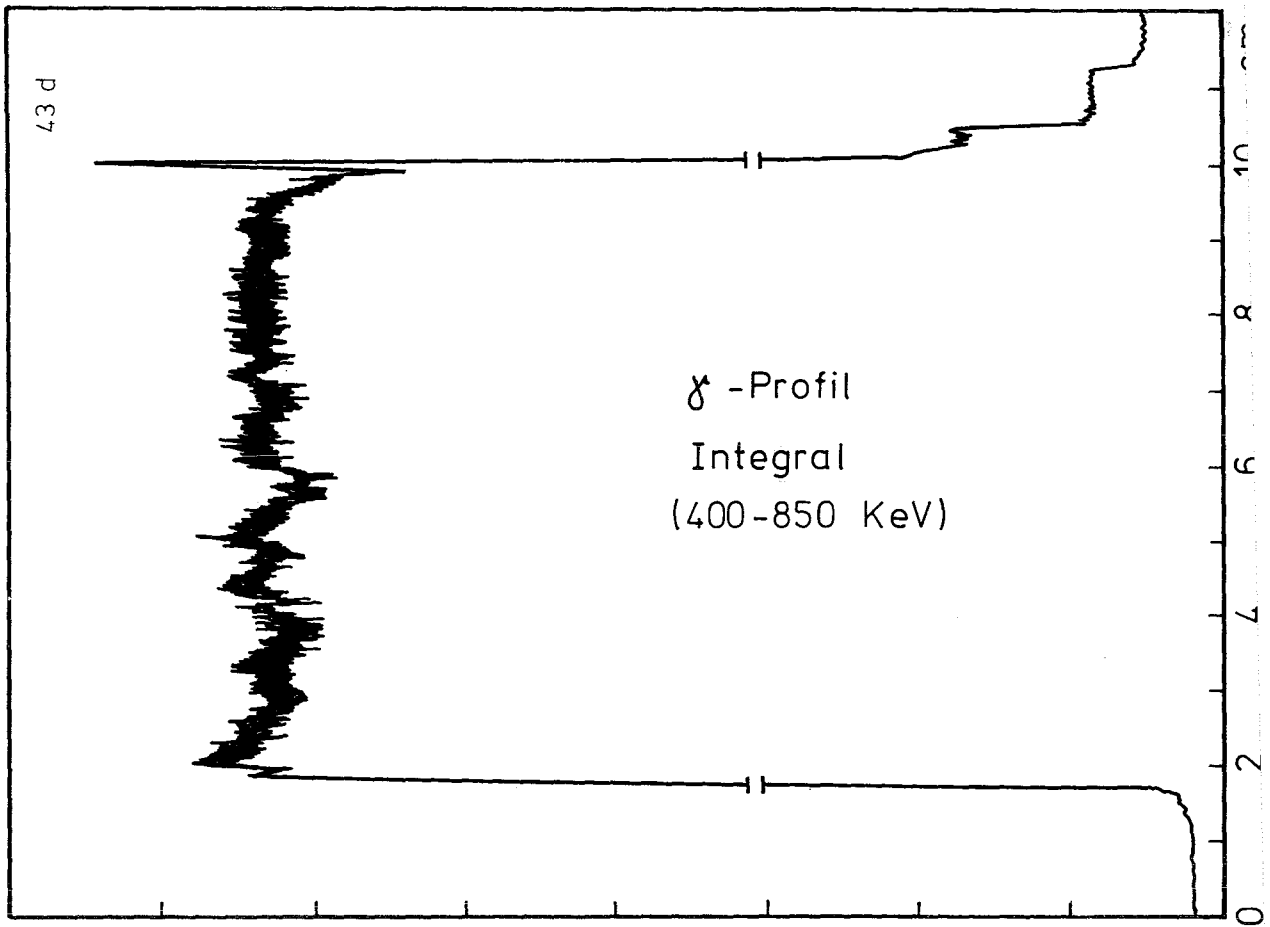
┌──┐
0,1mm

A 3

B 3

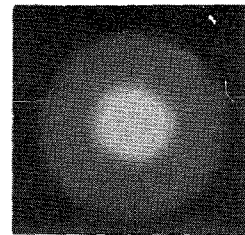
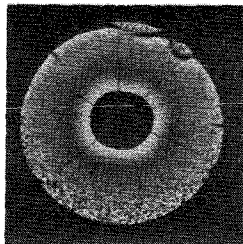
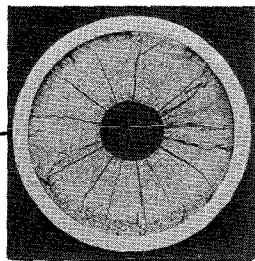
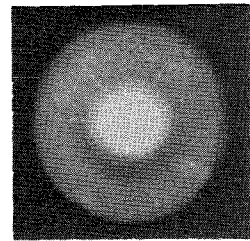
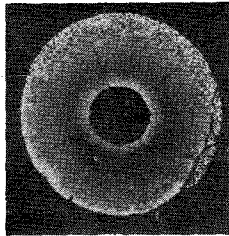
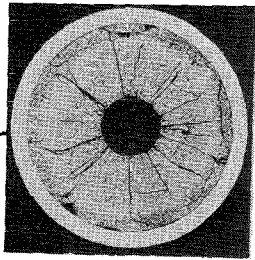
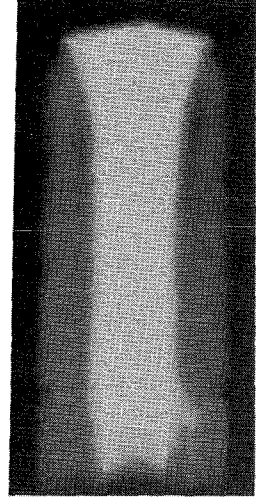
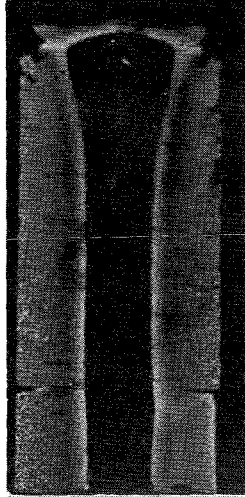
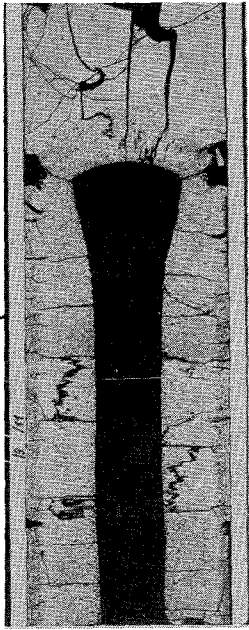


┌──┐
1mm



A

B



2

3



Prüfling B14

Brennstoff :

Form : Tabletten
Zusammensetzung : UO_2/PuO_2
Tablettendichte : 91,9% th.D.

Hülle :

Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,1 mm
Schmierdichte : 86,4% th.D.

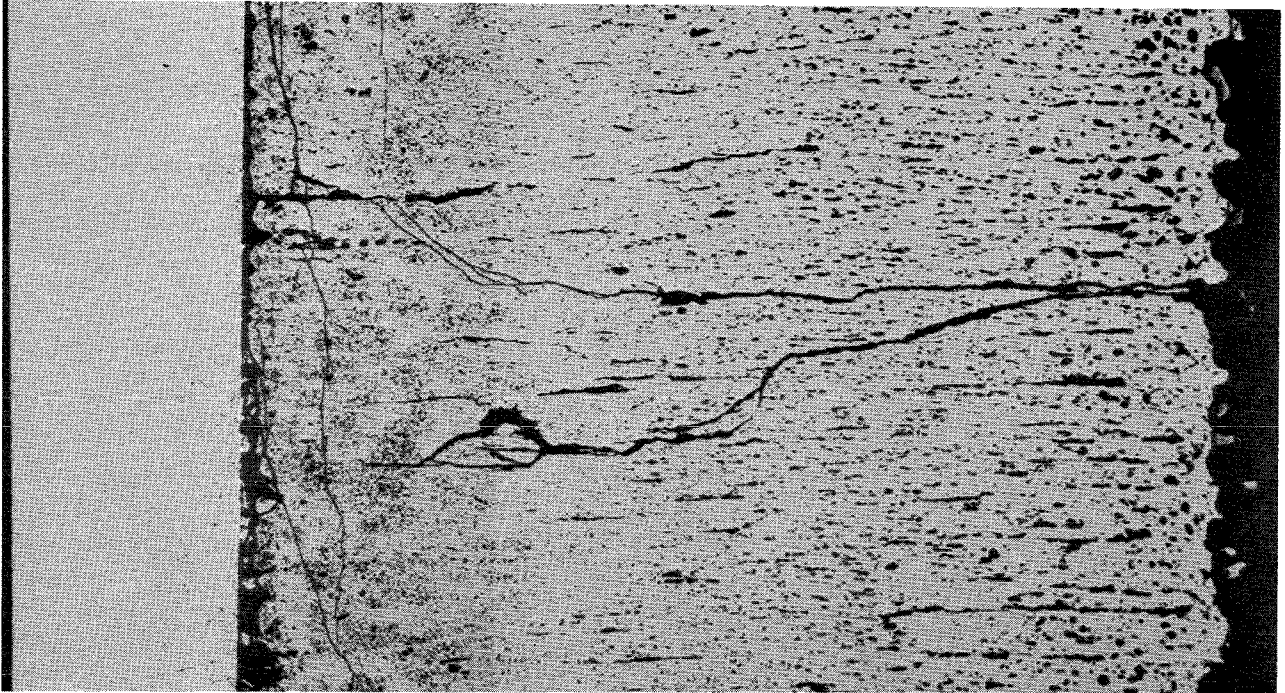
Bestrahlung :

Einrichtung : Na/PbBi-Doppel-
Kapsel Typ 4
Dauer : 391,4 Vollasttage
Ende : 6. 10. 69
Rechn. Abbrand mittl. : 57,7 MWd/kg
Stableistung max./mittl. : 587/392 W/cm

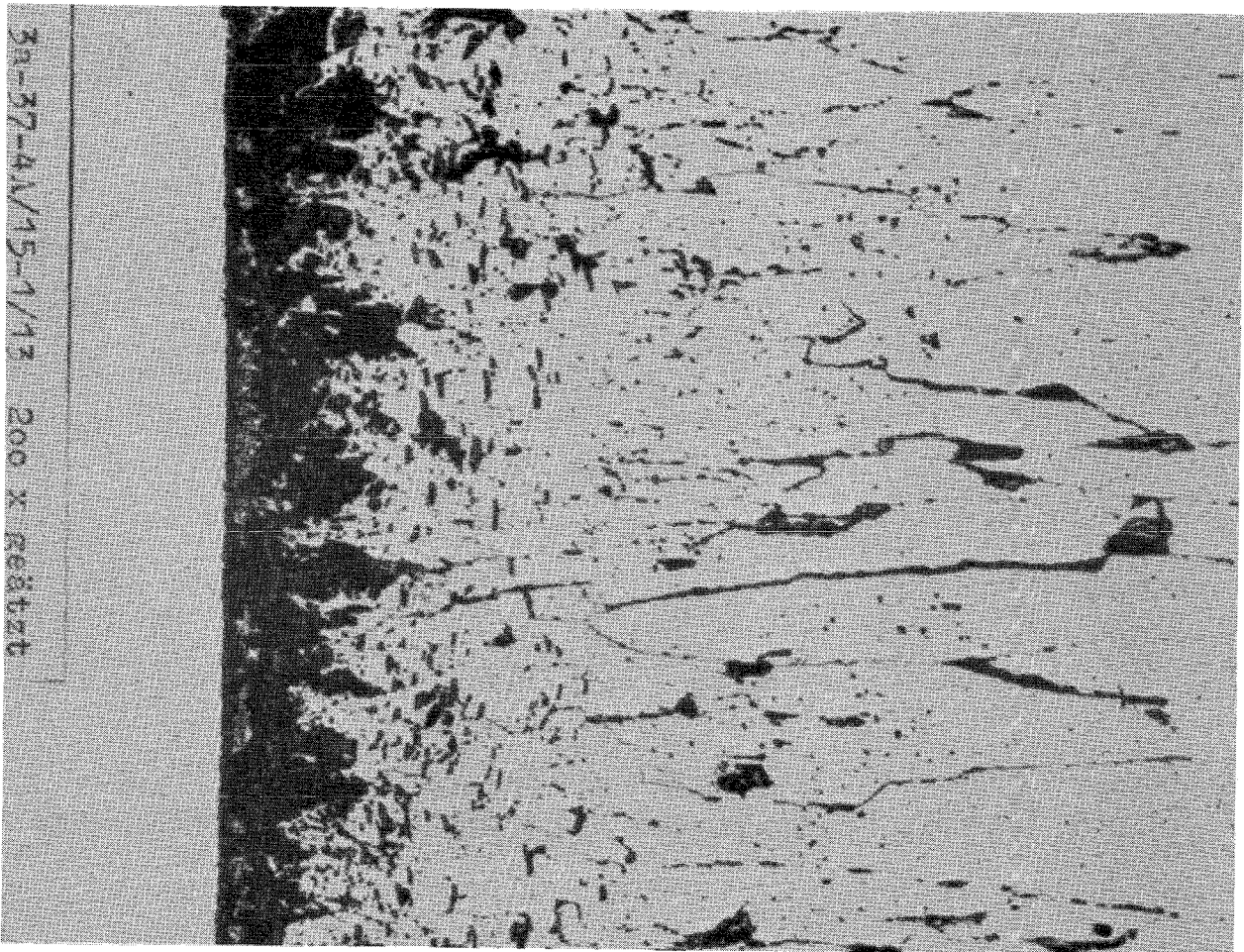
-A/147-

zu Prüfling 4A/15

A1



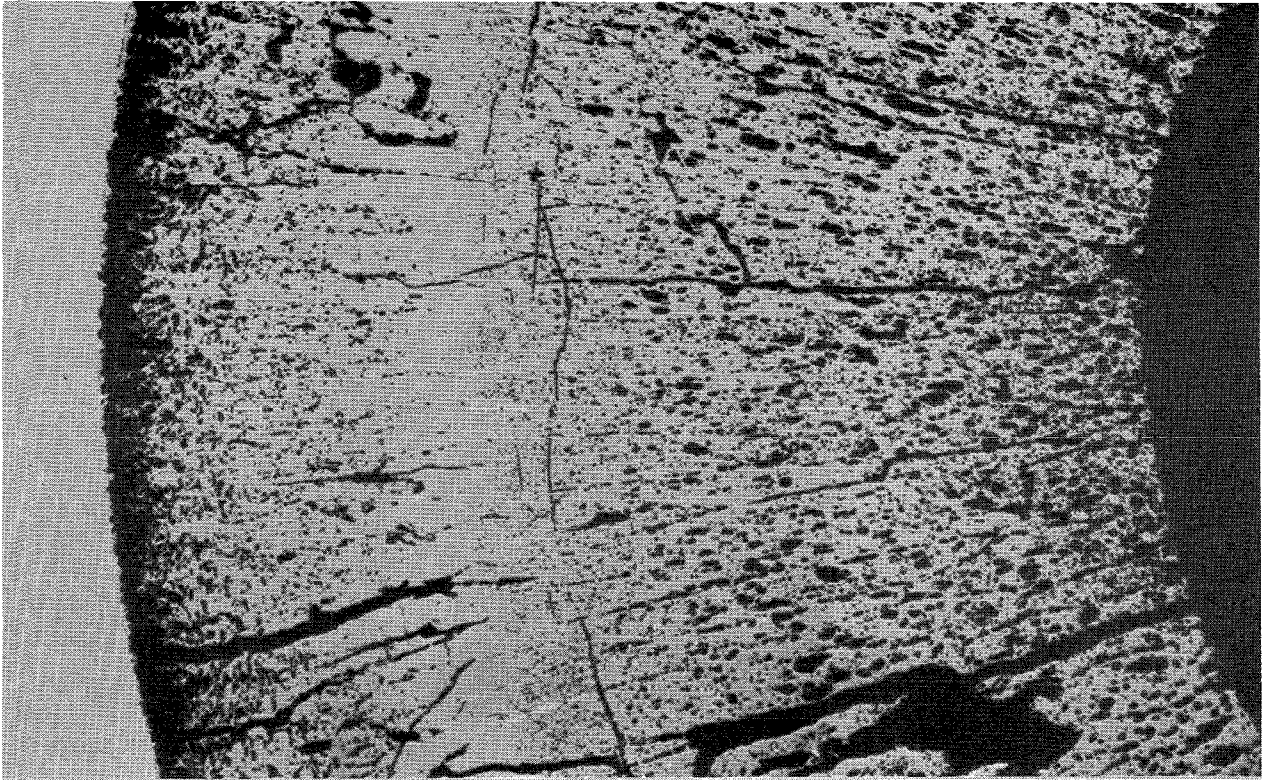
0,1mm



0,1mm

3n-37-4A/15-1/13 200 X Geätzt

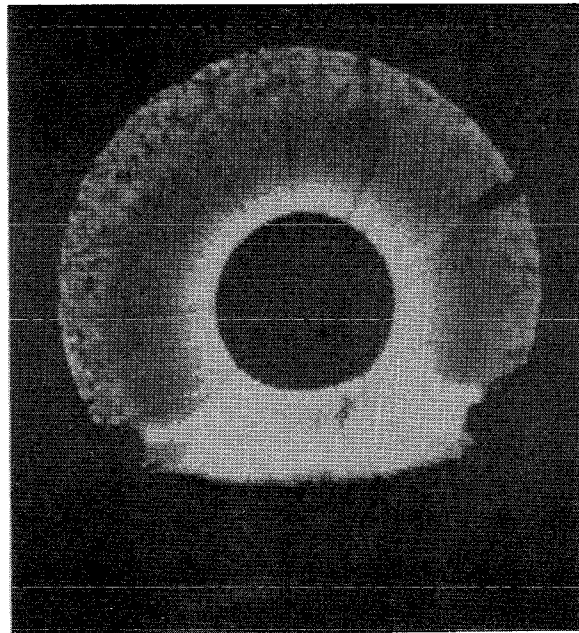
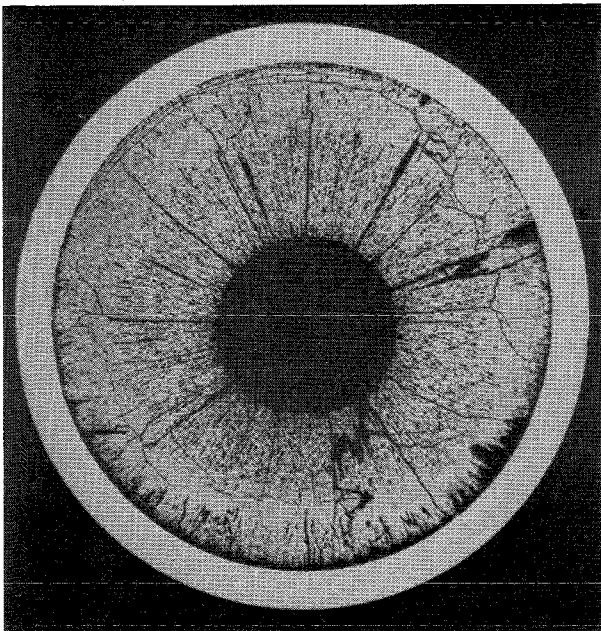
-A/148-
zu Prüfling 4A/15
A2



0,1mm

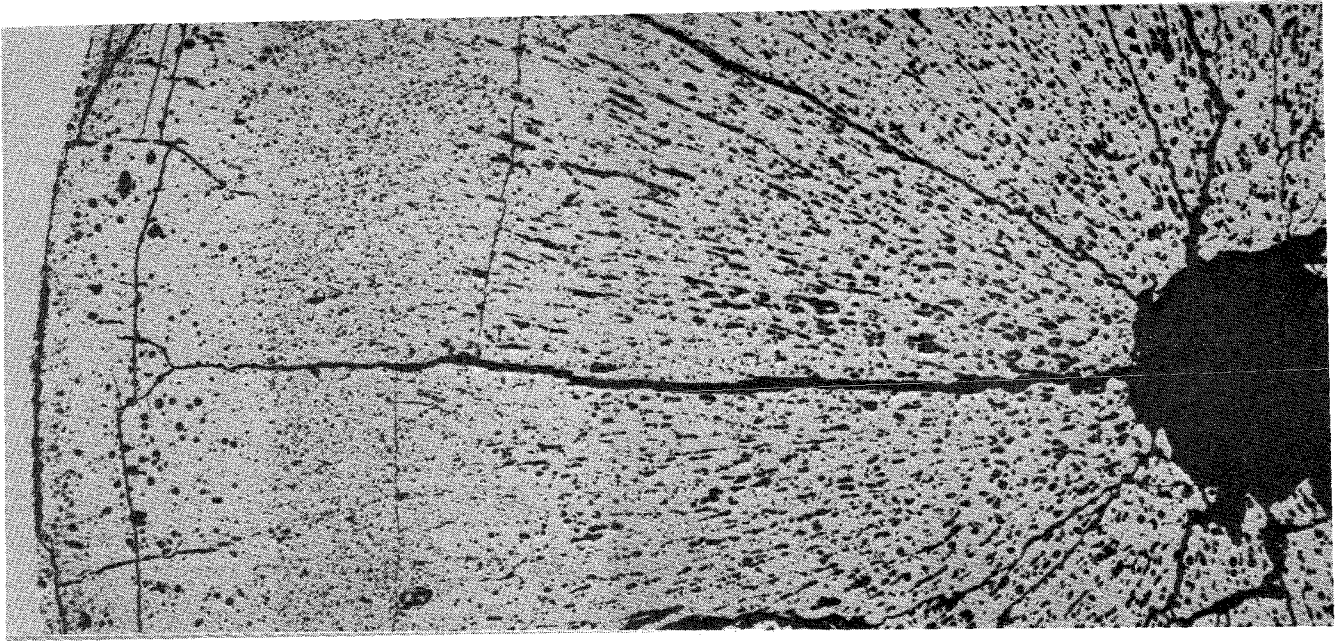
A2

B2



1mm

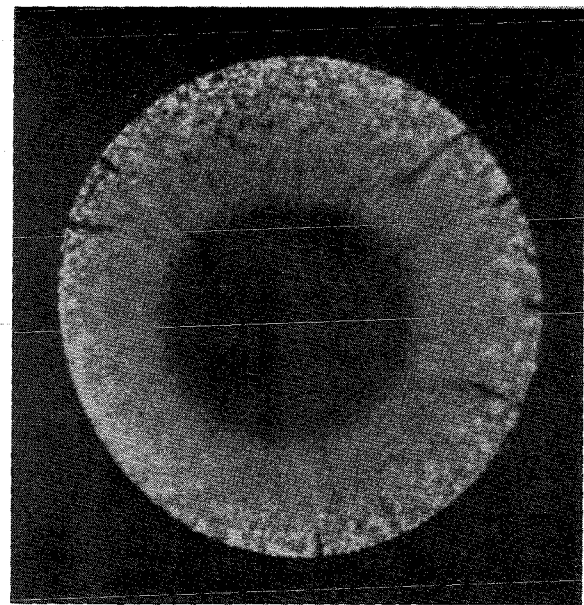
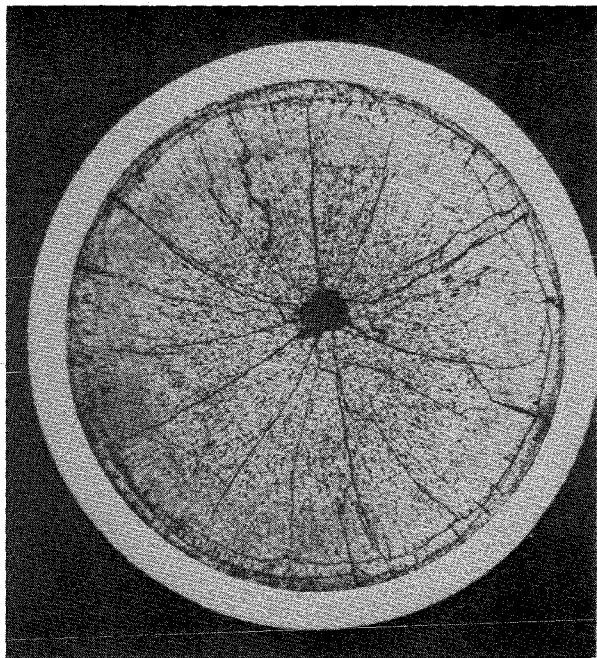
-A/149-
zu Prüfling 4A/15
A3



┌─┐
0,1 mm

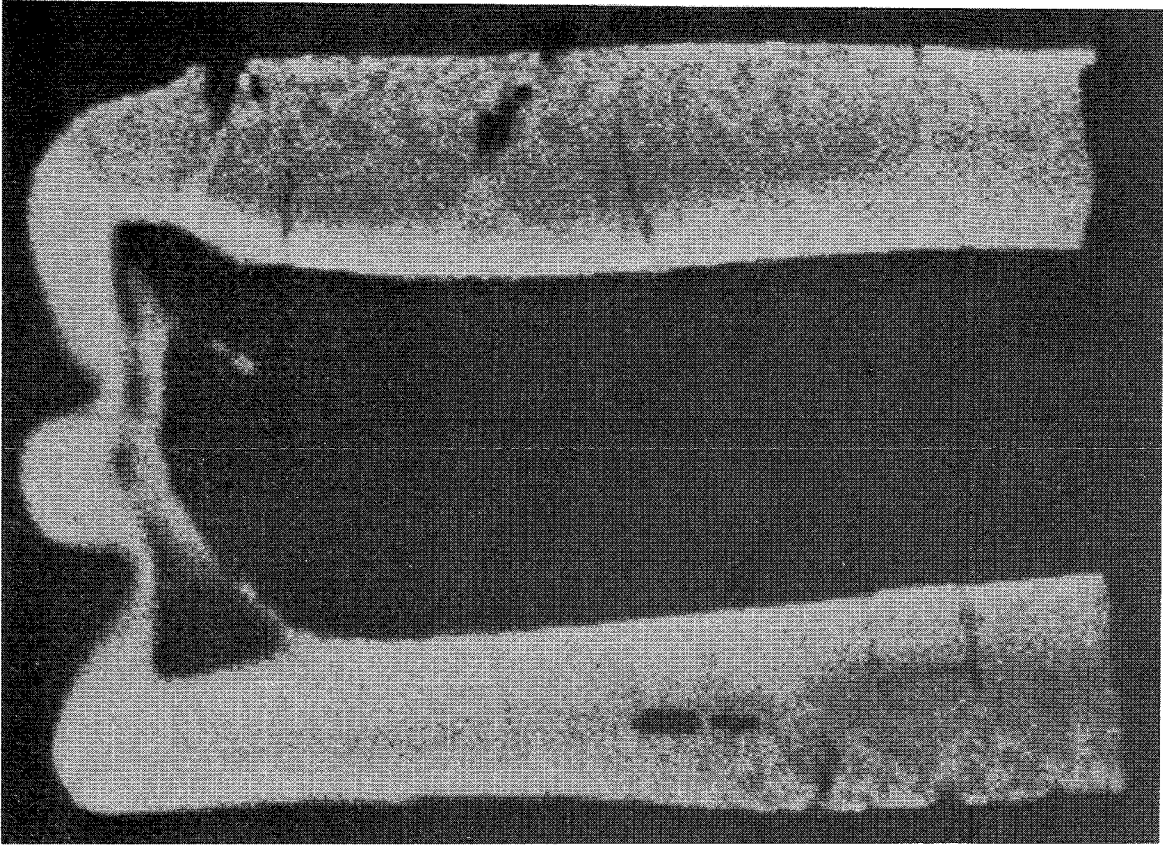
A3

B3

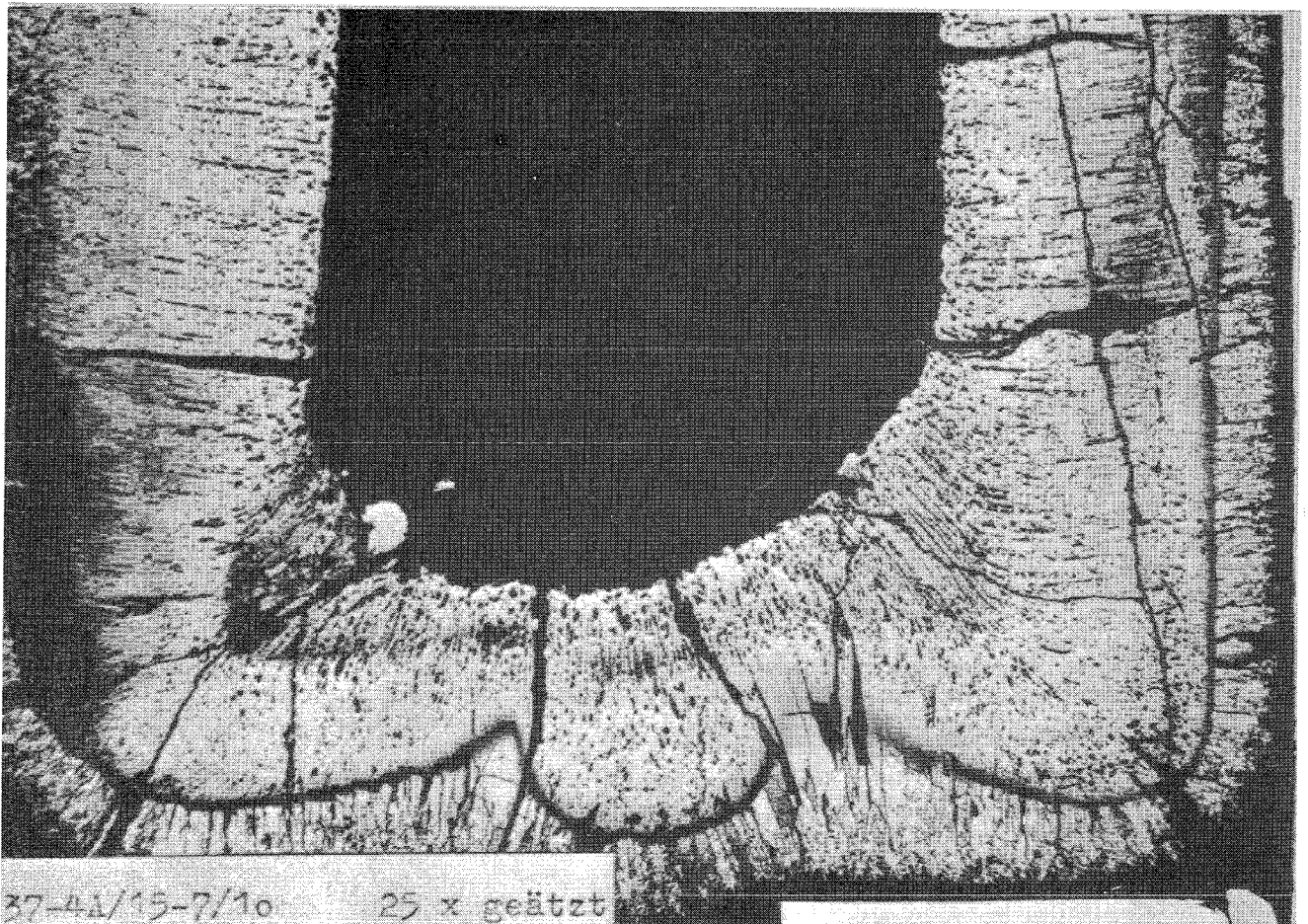


┌─┐
1 mm

-A/150-
zu Prüfling 4A/15
A4



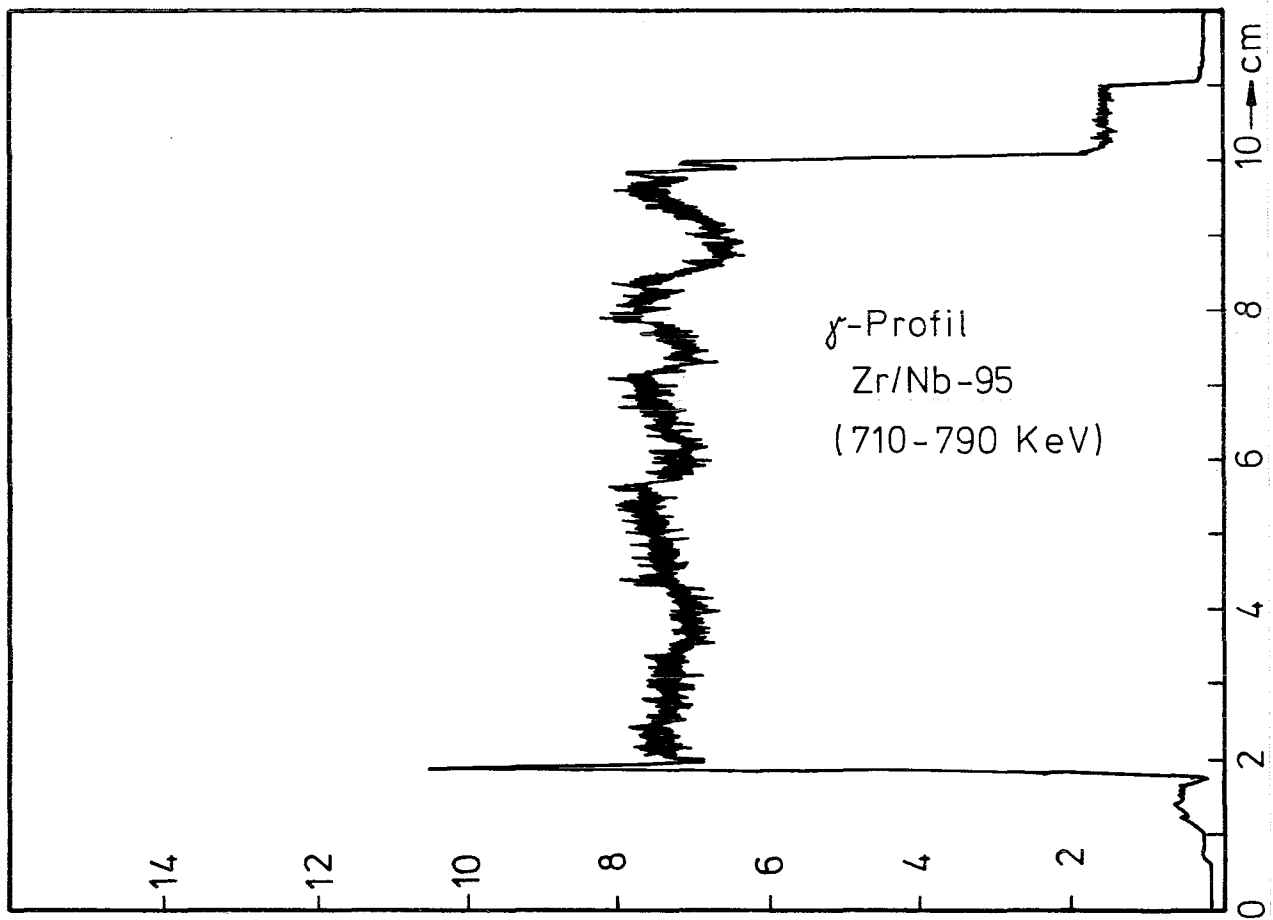
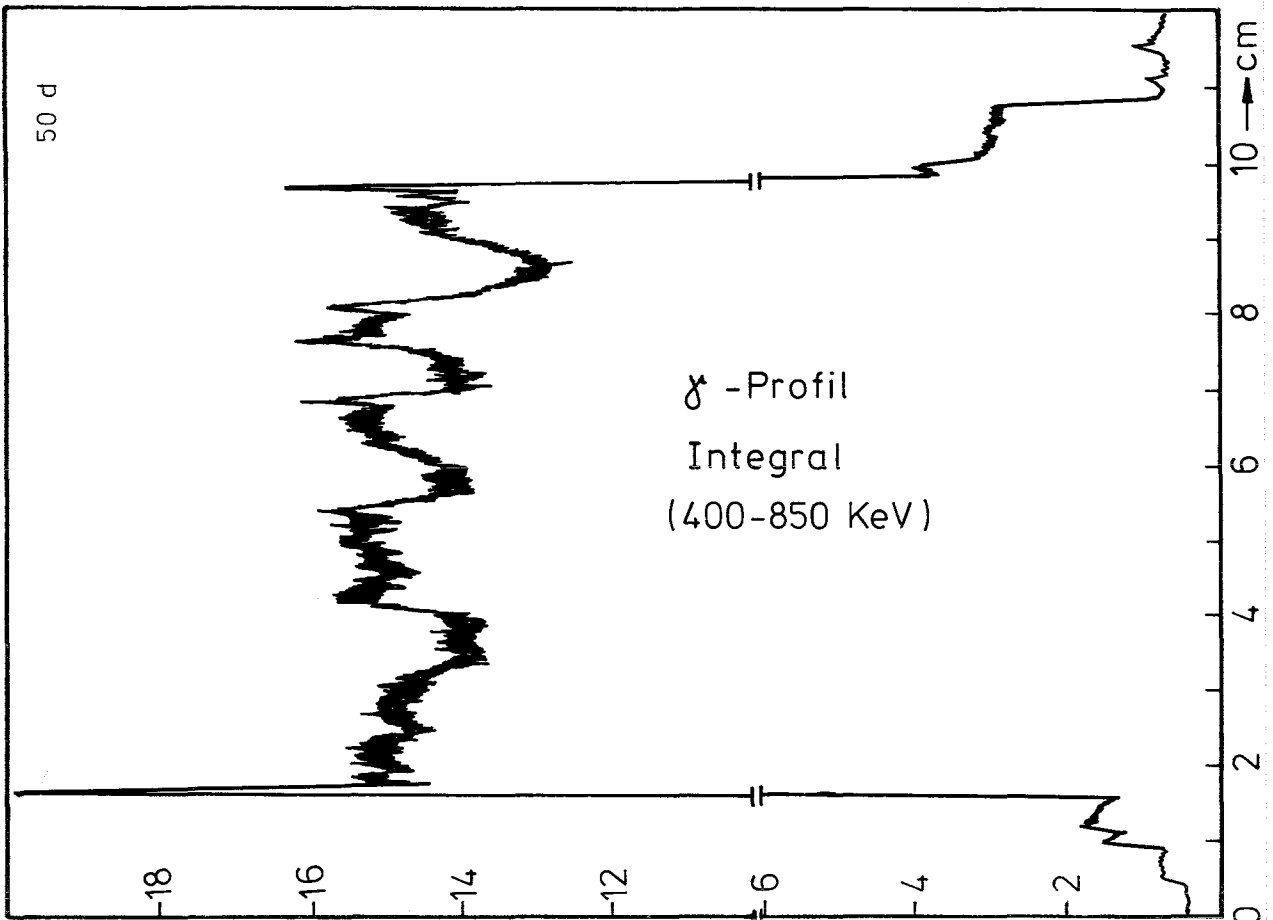
1mm



37-4A/15-7/10

25 x geätzt

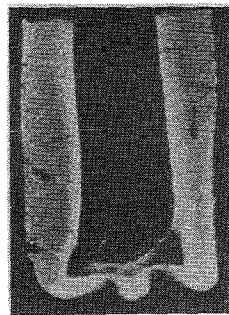
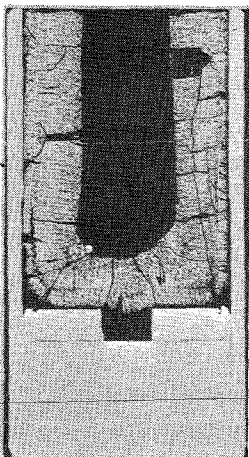
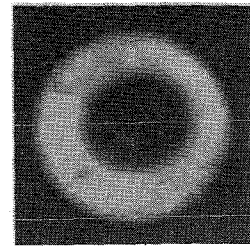
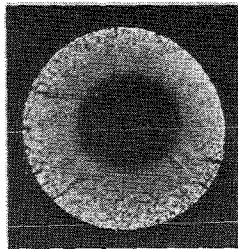
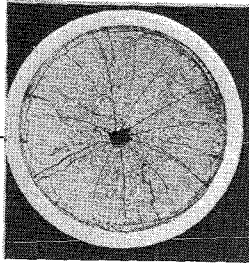
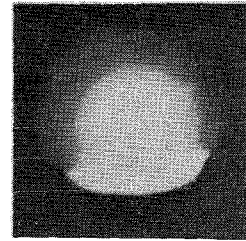
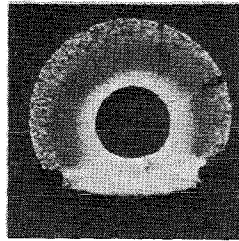
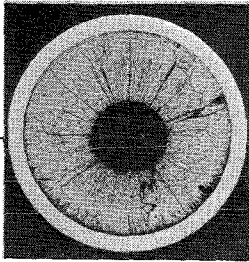
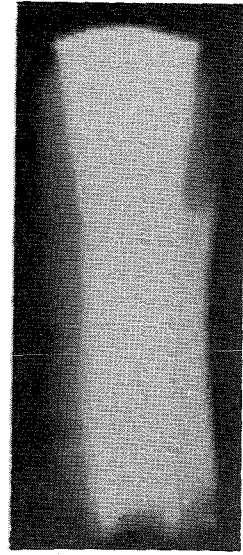
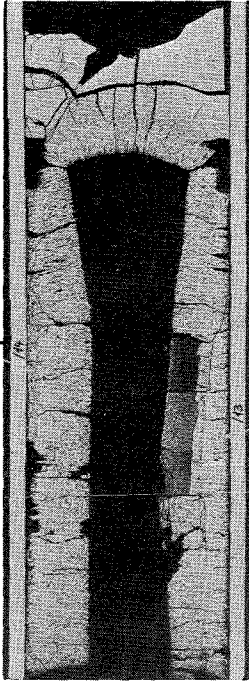
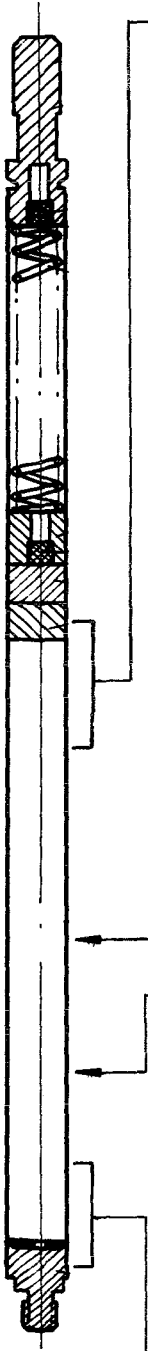
1mm



A

B

C





Prüfling 4A15

Brennstoff :

Form : Tabletten

Zusammensetzung : UO_2/PuO_2

Tablettendichte : 85,10% th.D.

Hülle :

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 7,4 mm

Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : 0,07 mm

Schmierdichte : 80,4% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : Na/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4

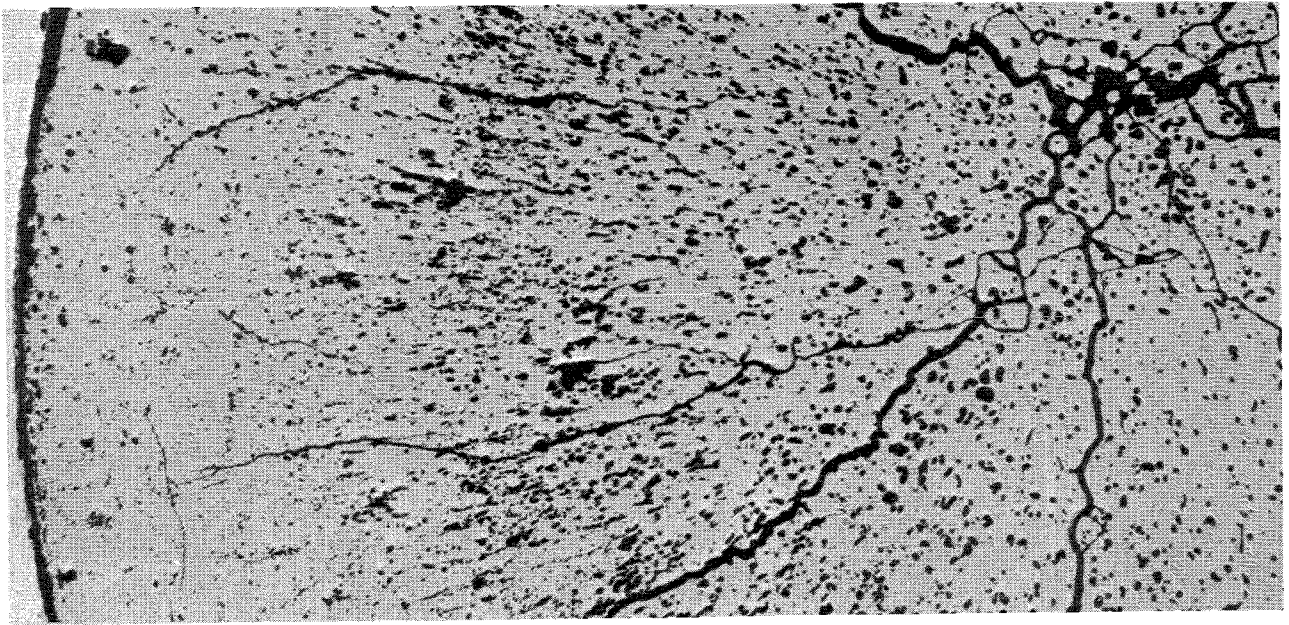
Dauer : 391,4 Vollasttage

Ende : 6. 10. 69

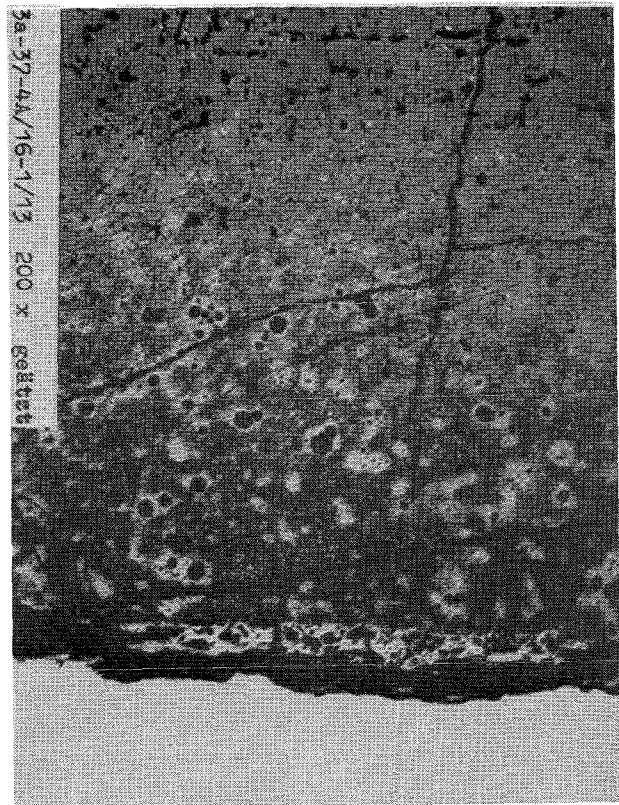
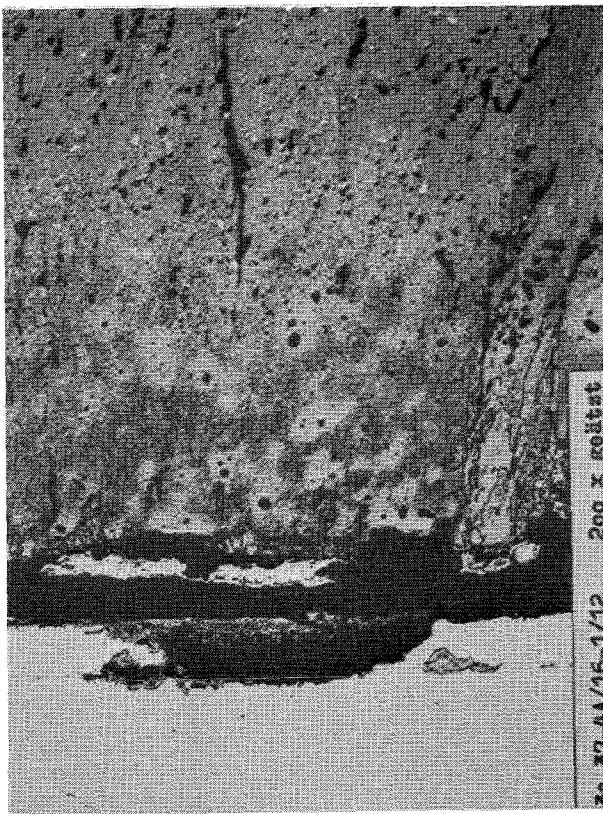
Rechn. Abbrand mittl. : 69,9 MWd/kg

Stableistung max./mittl. : 559/397 W/cm

-A/153-
zu Prüfling 4A/16
A1

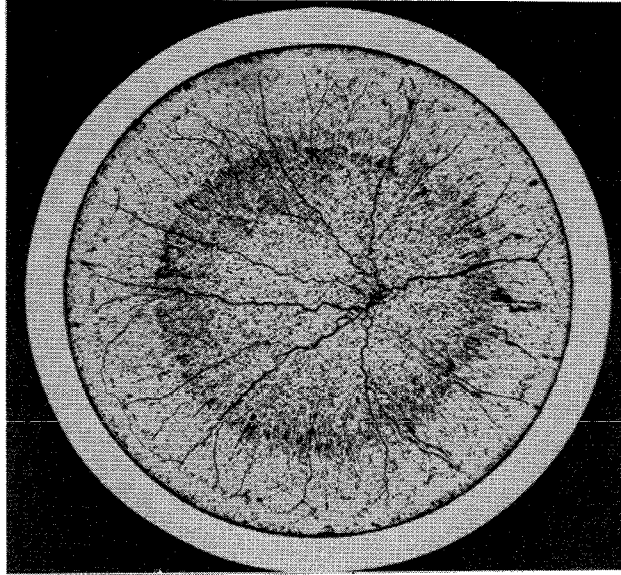


I
0,1mm

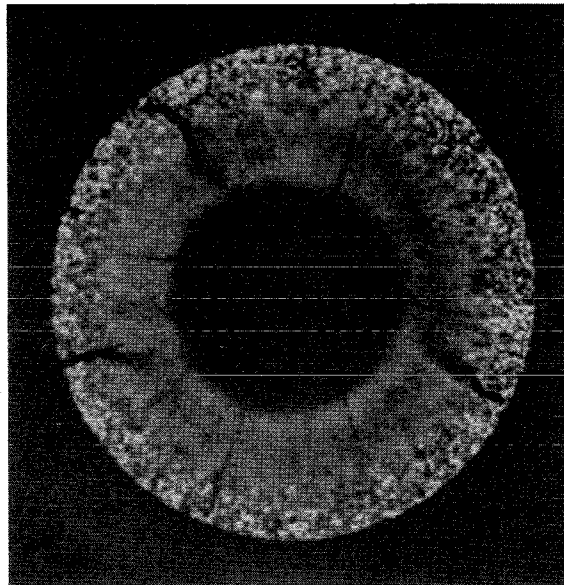


I
0,1mm

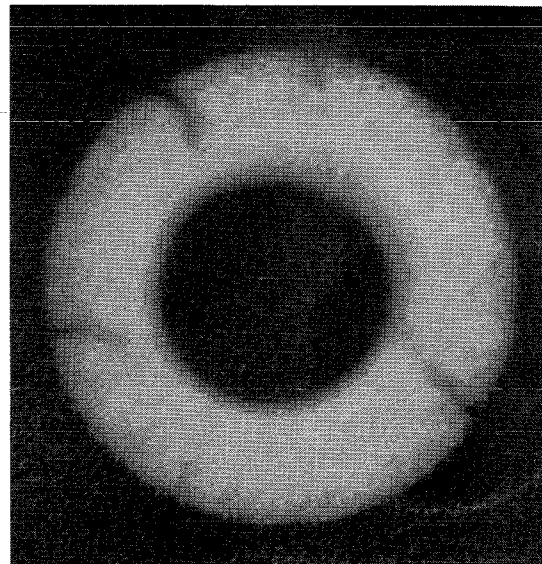
-A/154-
zu Prüfling 4A/16



A2



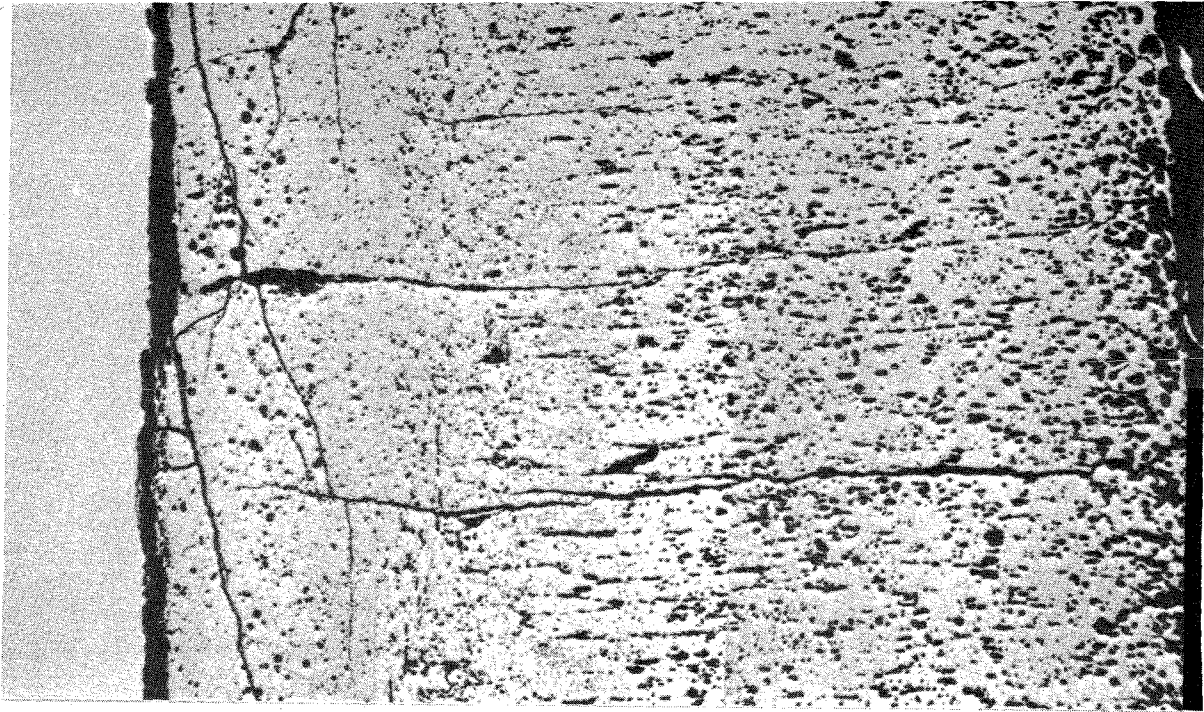
B 2



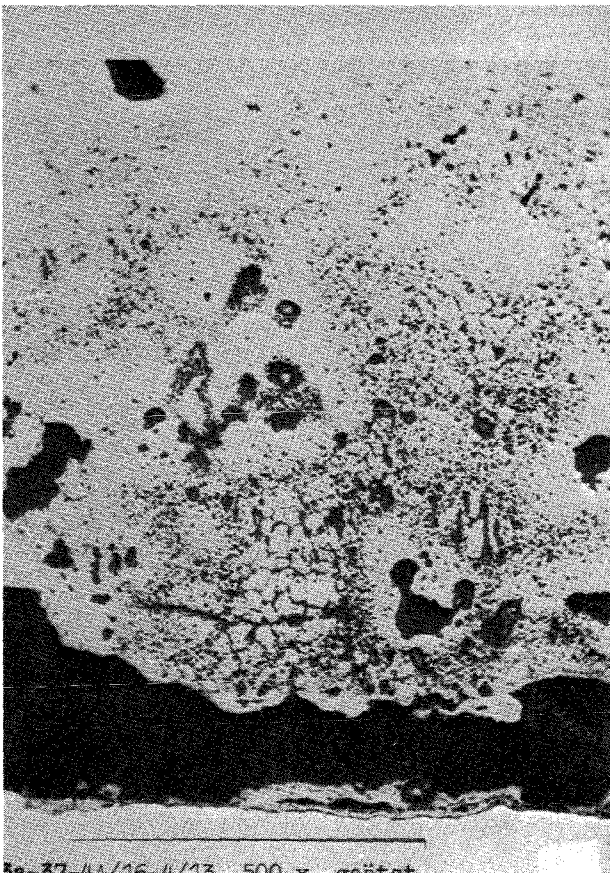
C2

1mm

- A/155 -
zu Prüfling 4A/16
A2

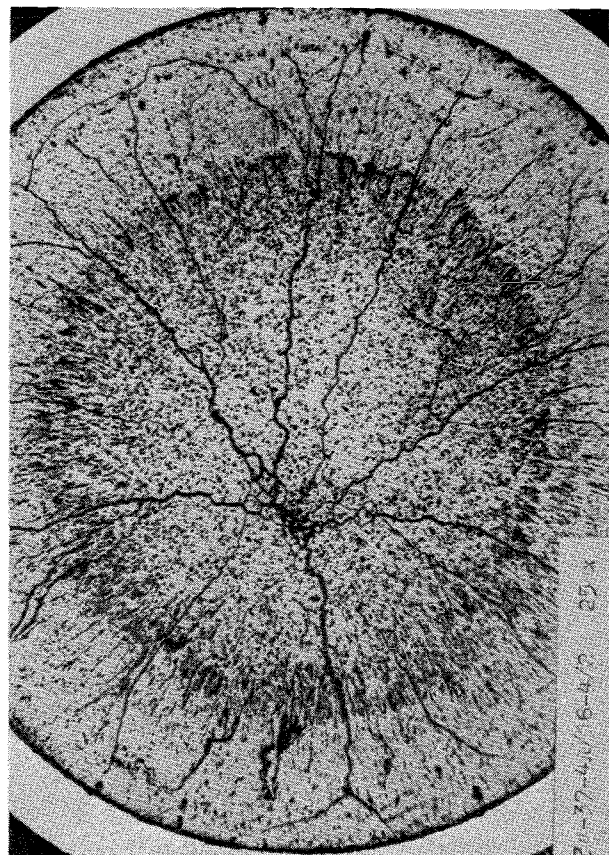


┌
└ 0,1mm



5a-37-4A/16-4/13 500 x geätzt

┌
└ 0,1mm

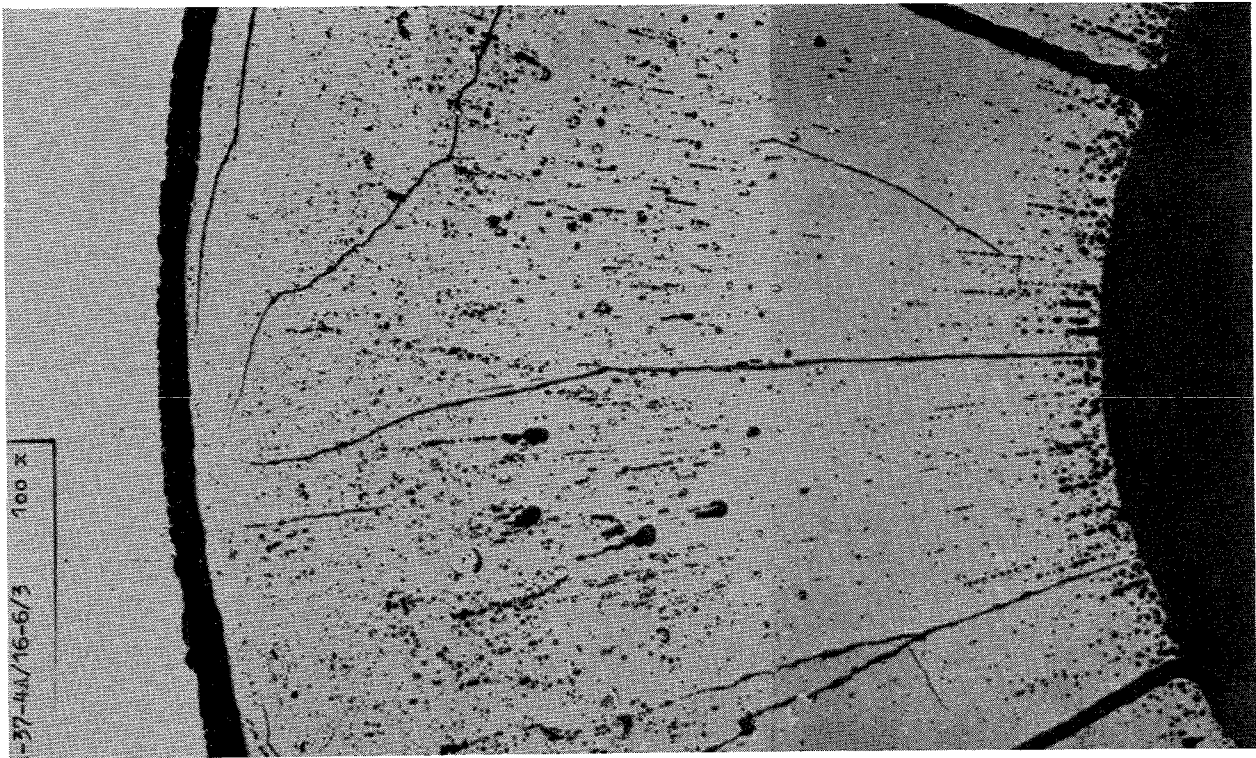


┌
└ 1mm

-A/156-

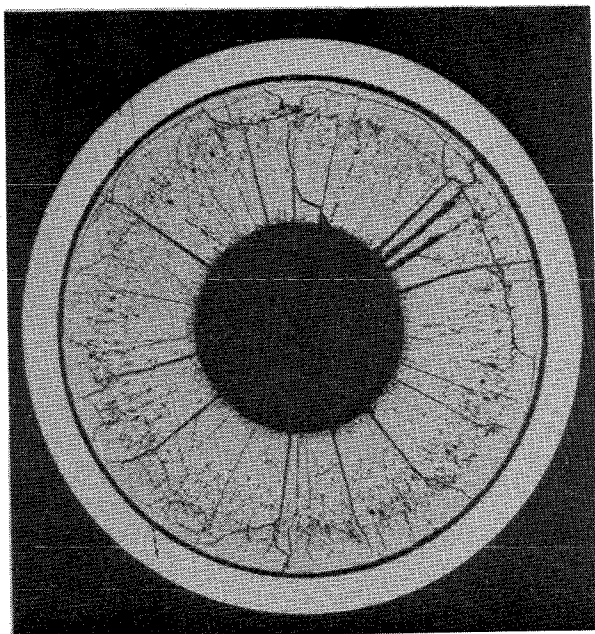
zu Prüfling 4A/16

A3

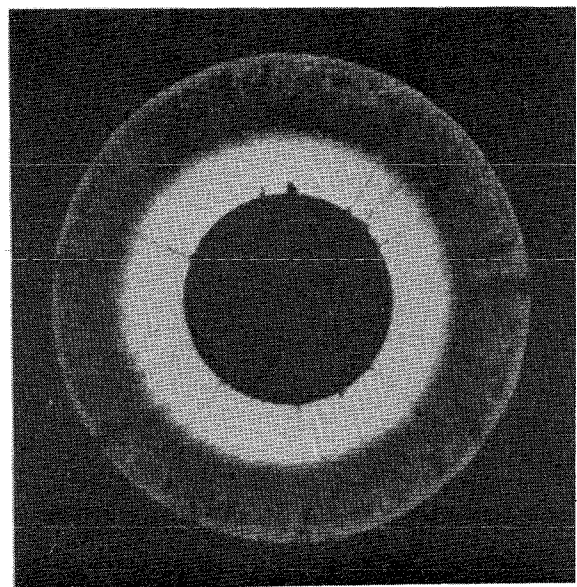


0,1 mm

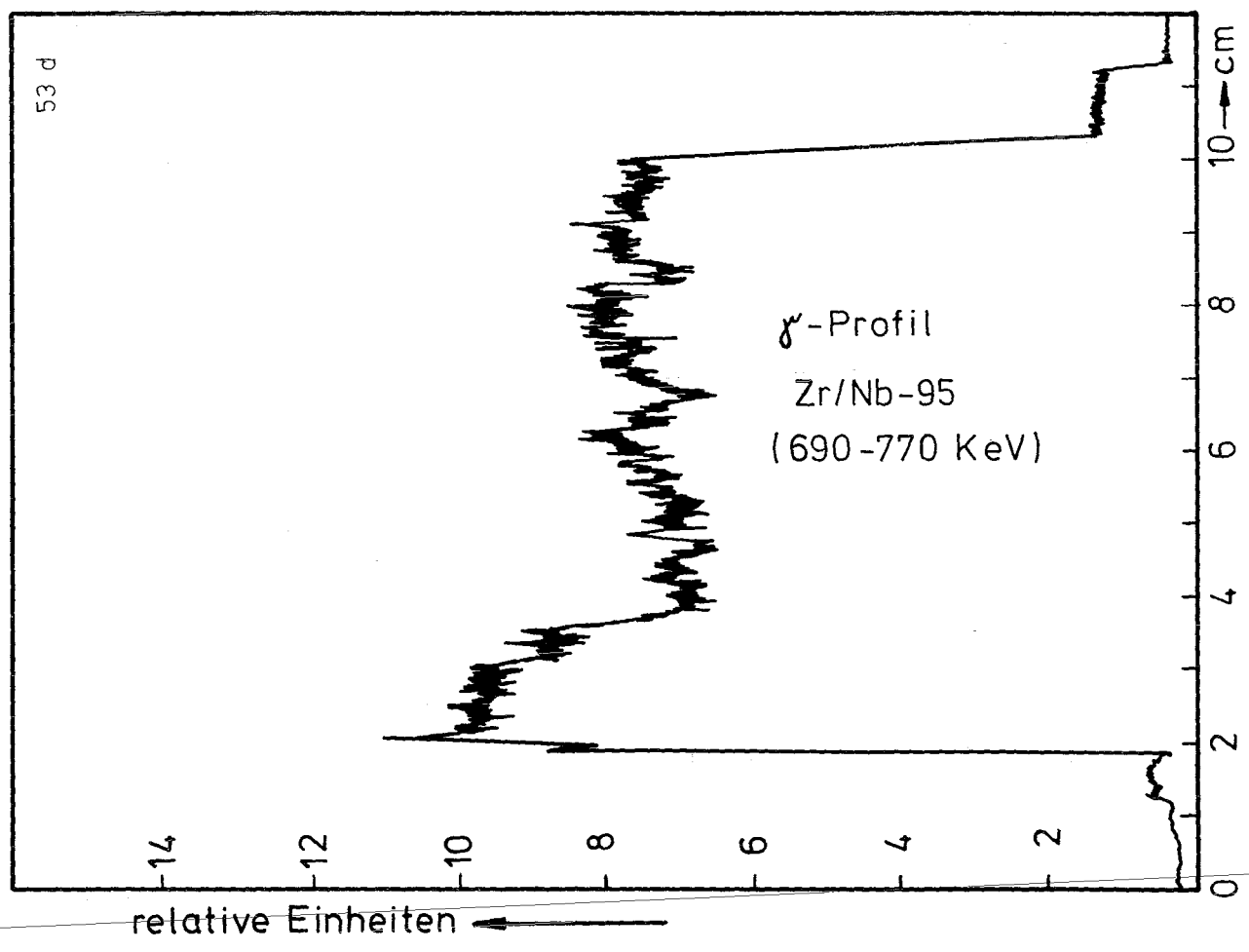
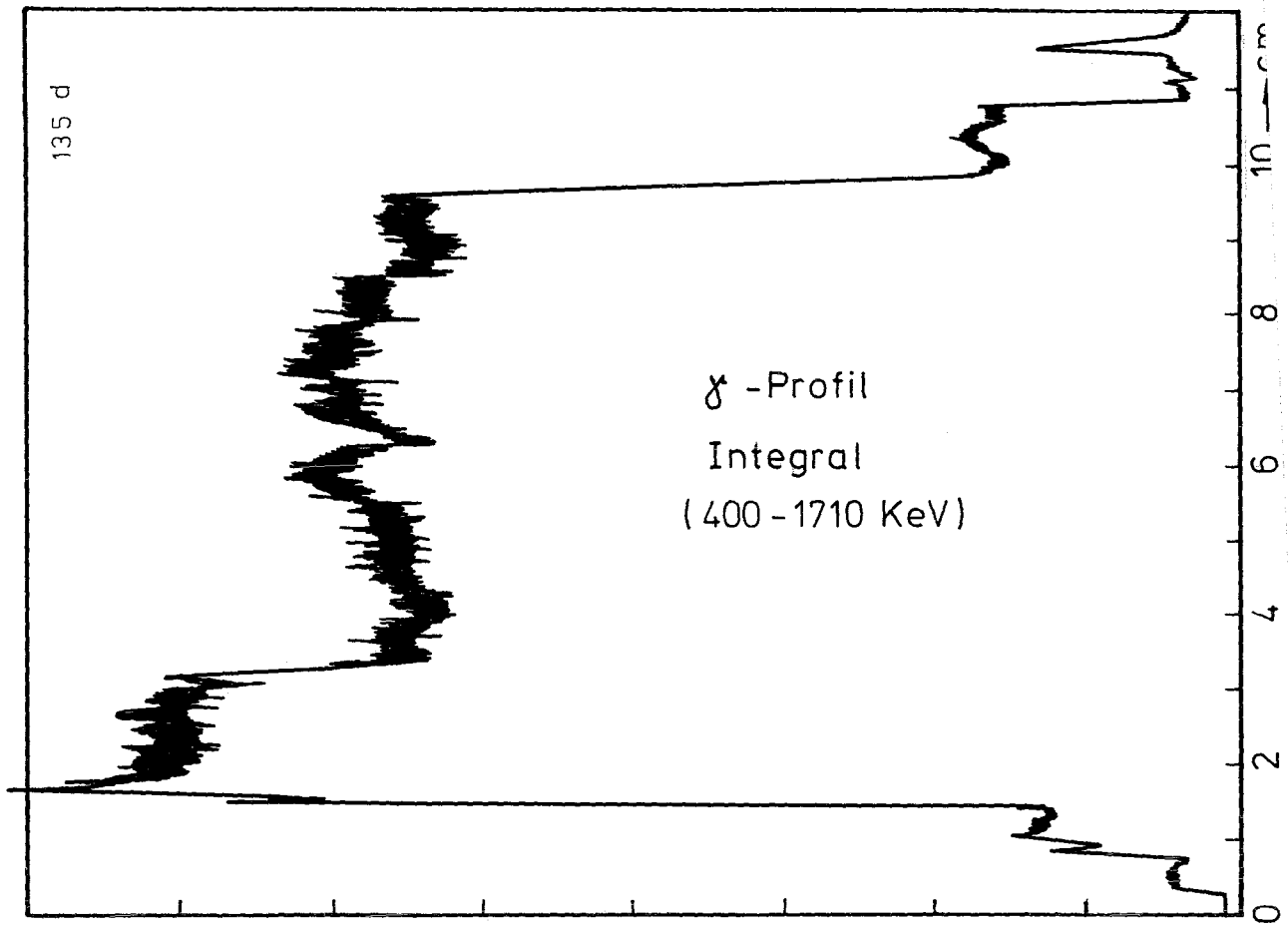
A3



B3

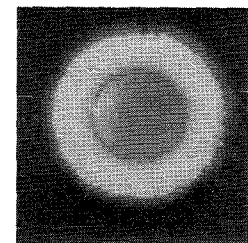
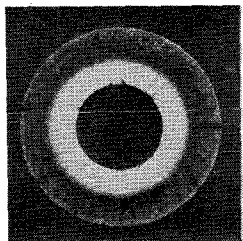
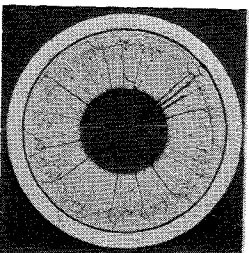
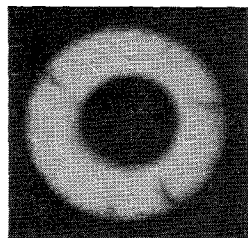
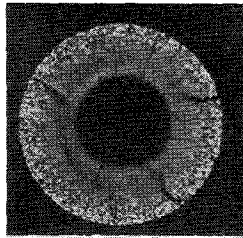
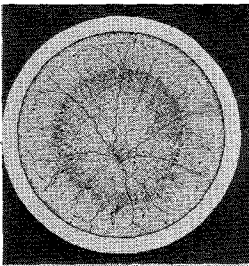
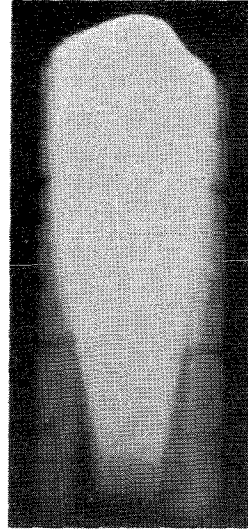
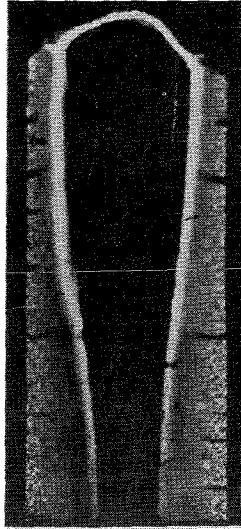
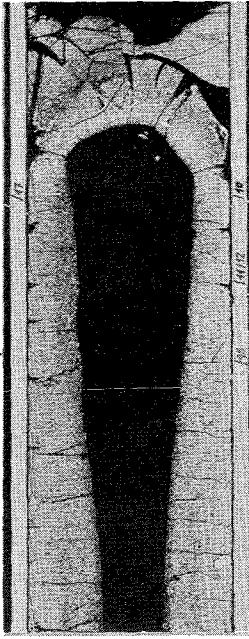


1mm



A

B





Prüfling 4A16

Brennstoff :

Form : Tabletten
Zusammensetzung : UO_2/PuO_2
Tablettendichte : 85,20% th.D.

Hülle :

Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,06 mm
Schmierdichte : 80,4% th.D.

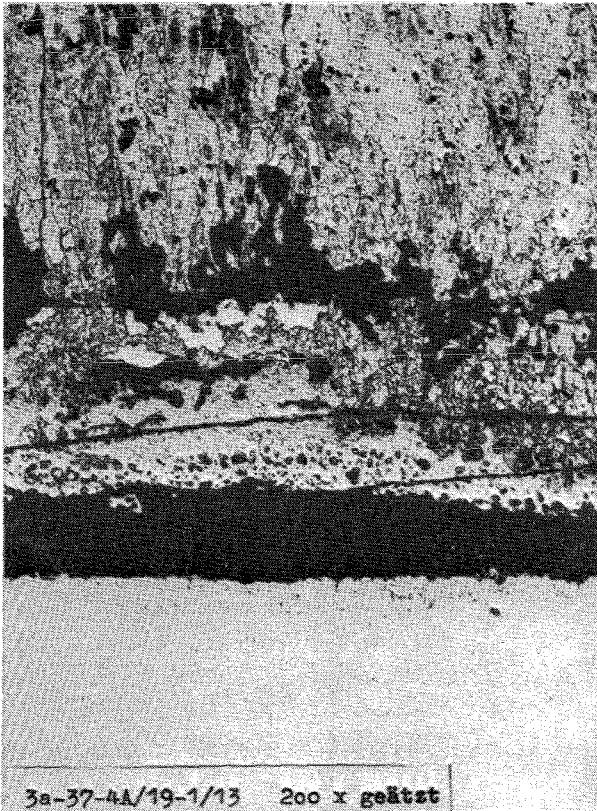
Bestrahlung :

Einrichtung : Na/PbBi-Doppel-
Kapsel Typ 4
Dauer : 391,4 Volllasttage
Ende : 6. 10. 69
Rechn. Abbrand mittl. : 58,4 MWd/kg
Stableistung max./mittl. : 512/378 W/cm

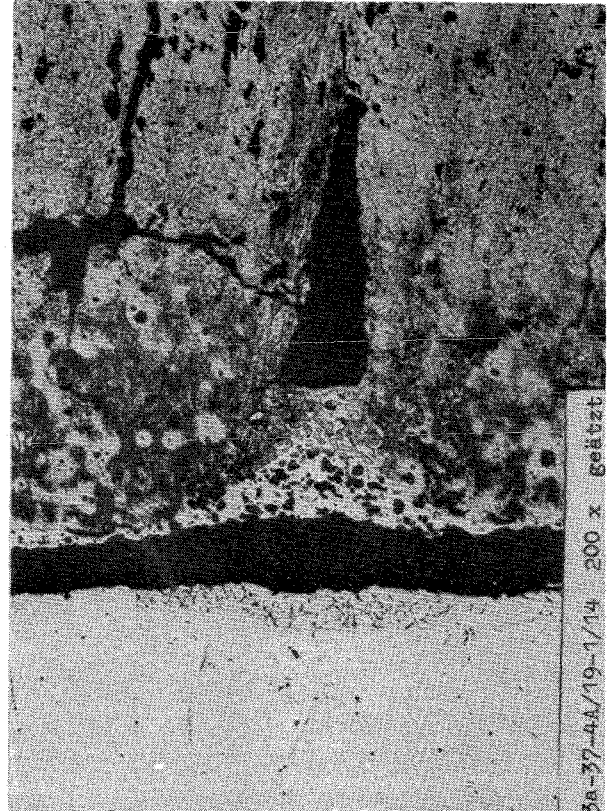
- A/159 -
zu Prüfling 4A/19
A1



—|—
0,1 mm



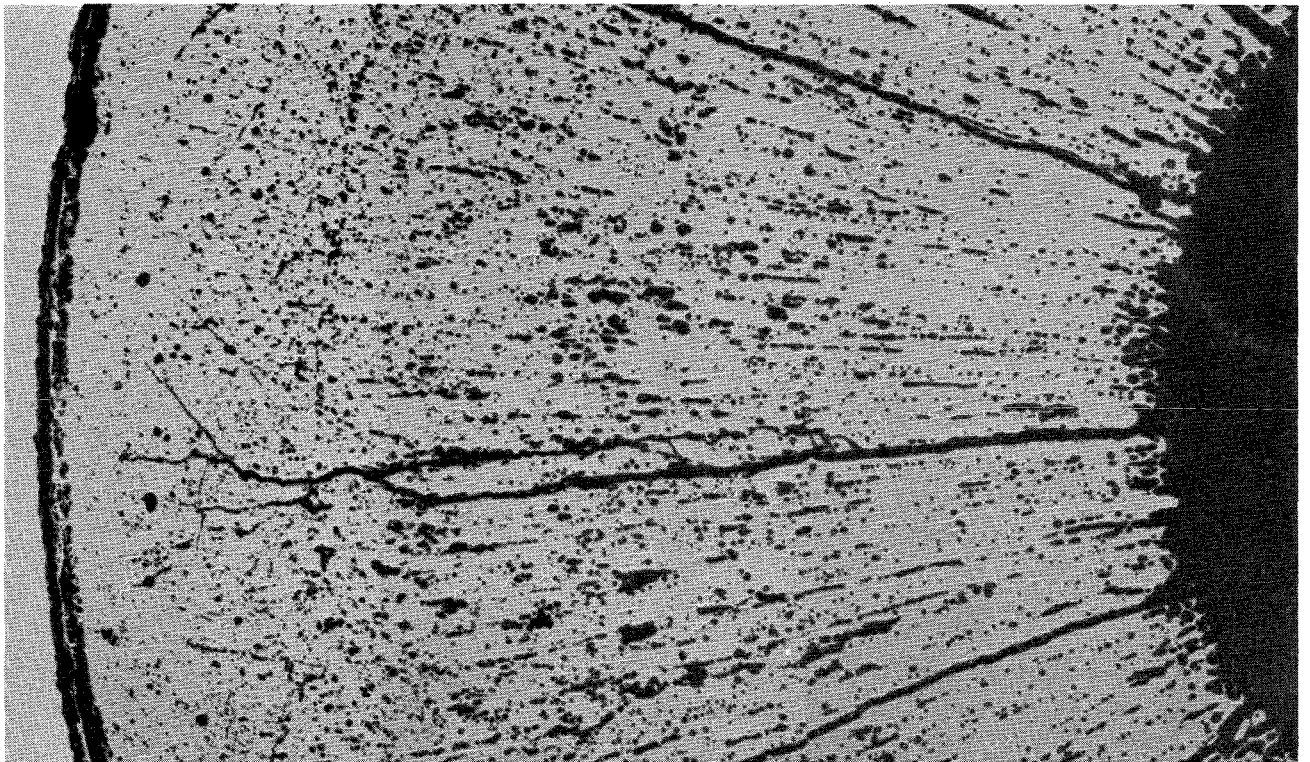
3a-37-4A/19-1/13 200 x geätzt



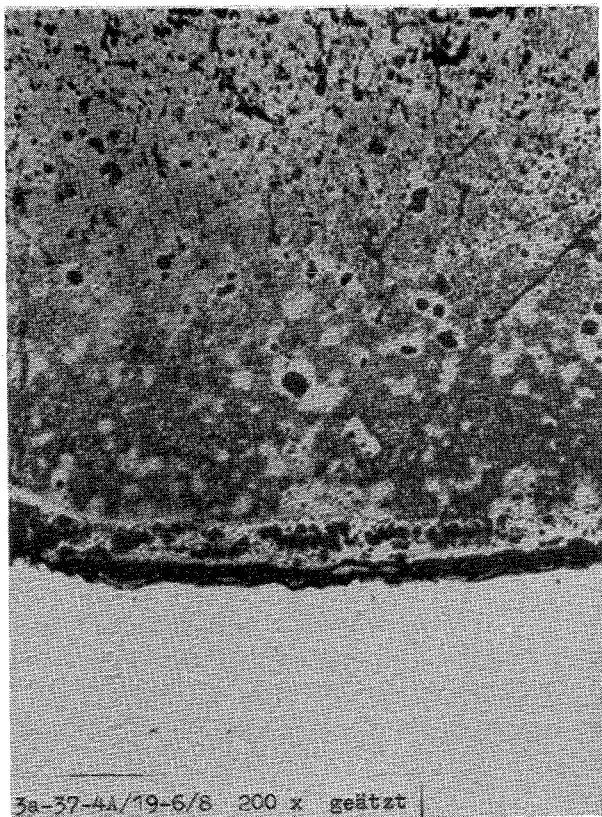
3a-37-4A/19-1/14 200 x geätzt

—|—
0,1 mm

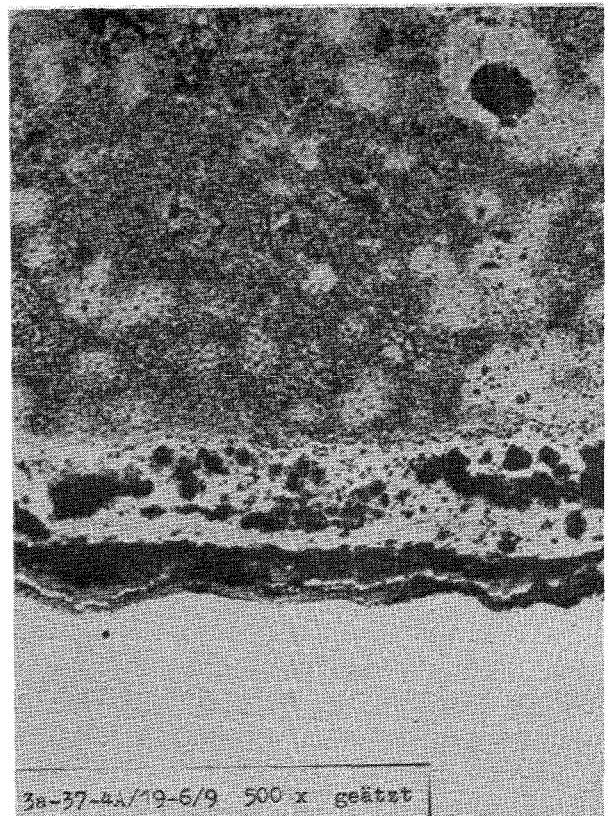
- A/160 -
zu Prüfling 4A/19
A3



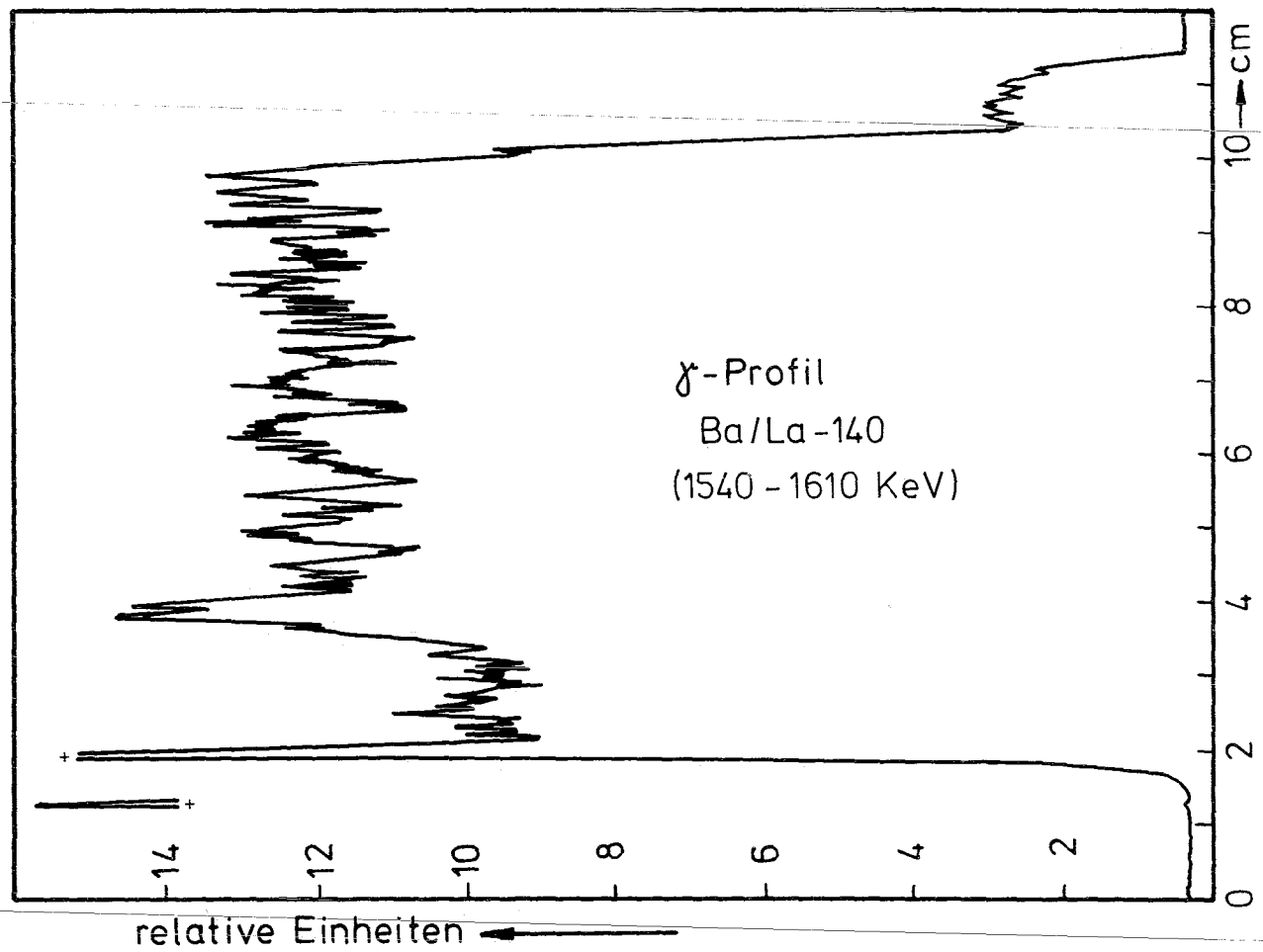
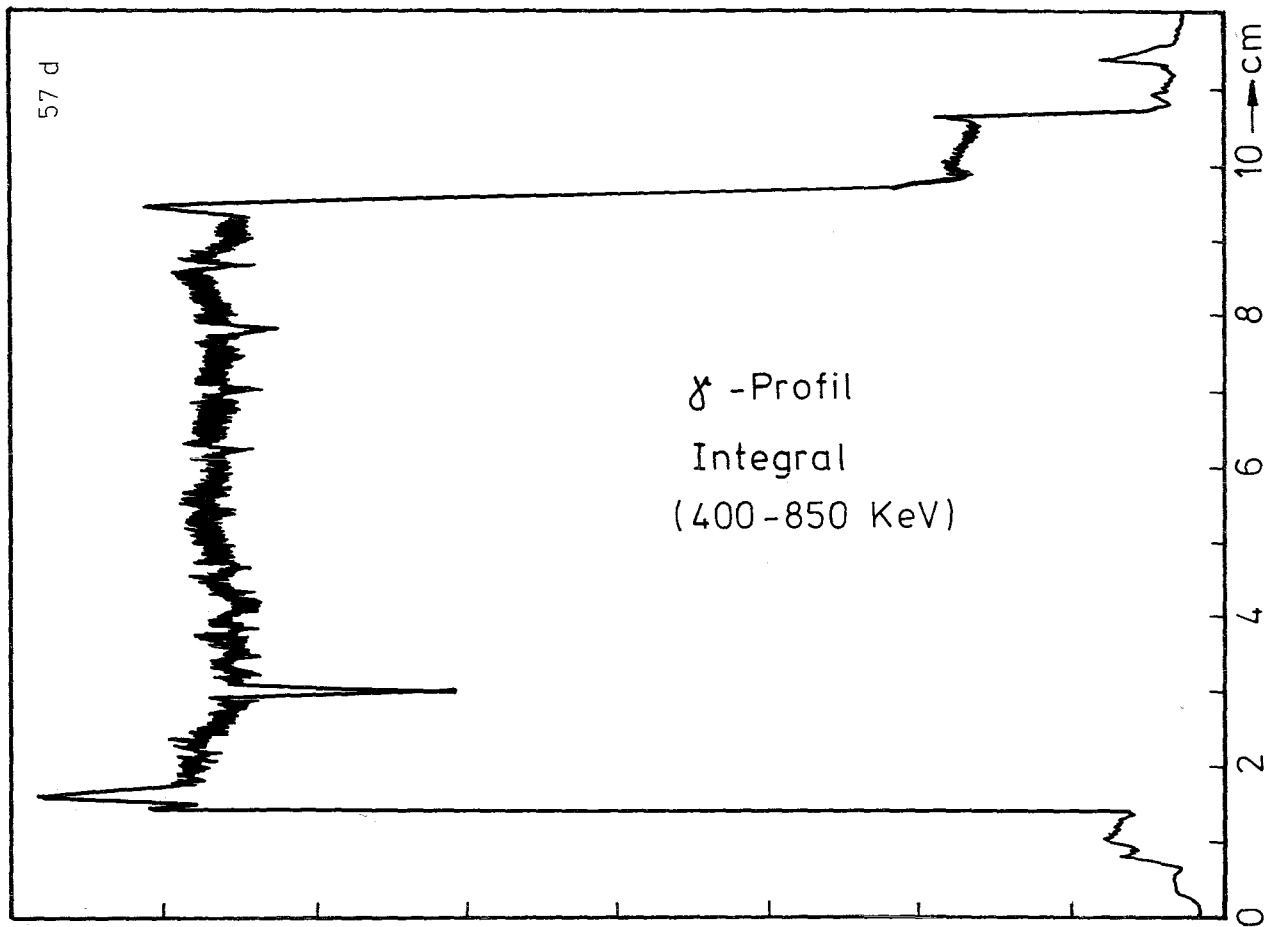
0,1mm



0,1mm

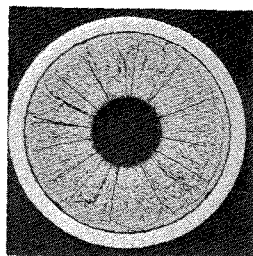
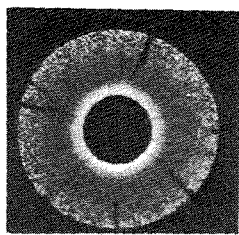
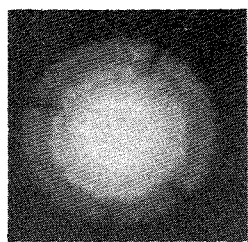


0,1mm

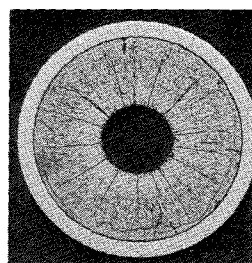
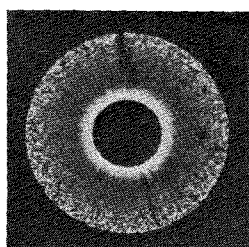
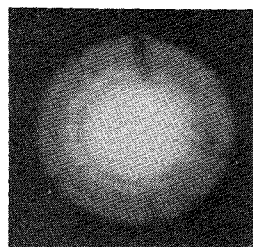




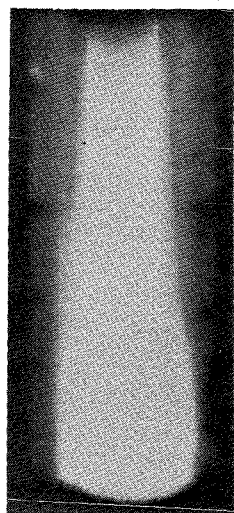
3



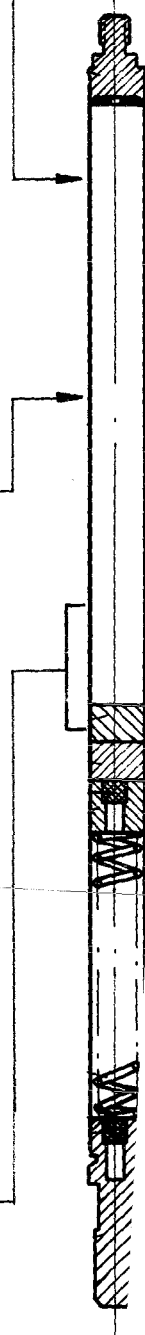
2



1



A





Prüfling 4A19

Brennstoff :

Form : Tabletten

Zusammensetzung : UO_2/PuO_2

Tablettendichte : 83,80% th.D.

Hülle :

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 7,4 mm

Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : 0,06 mm

Schmierdichte : 80,4% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : Na/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4

Dauer : 391,4 Volllasttage

Ende : 6. 10. 69

Rechn. Abbrand mittl. : 62,0 MWd/kg

Stableistung max./mittl. : 561/398 W/cm

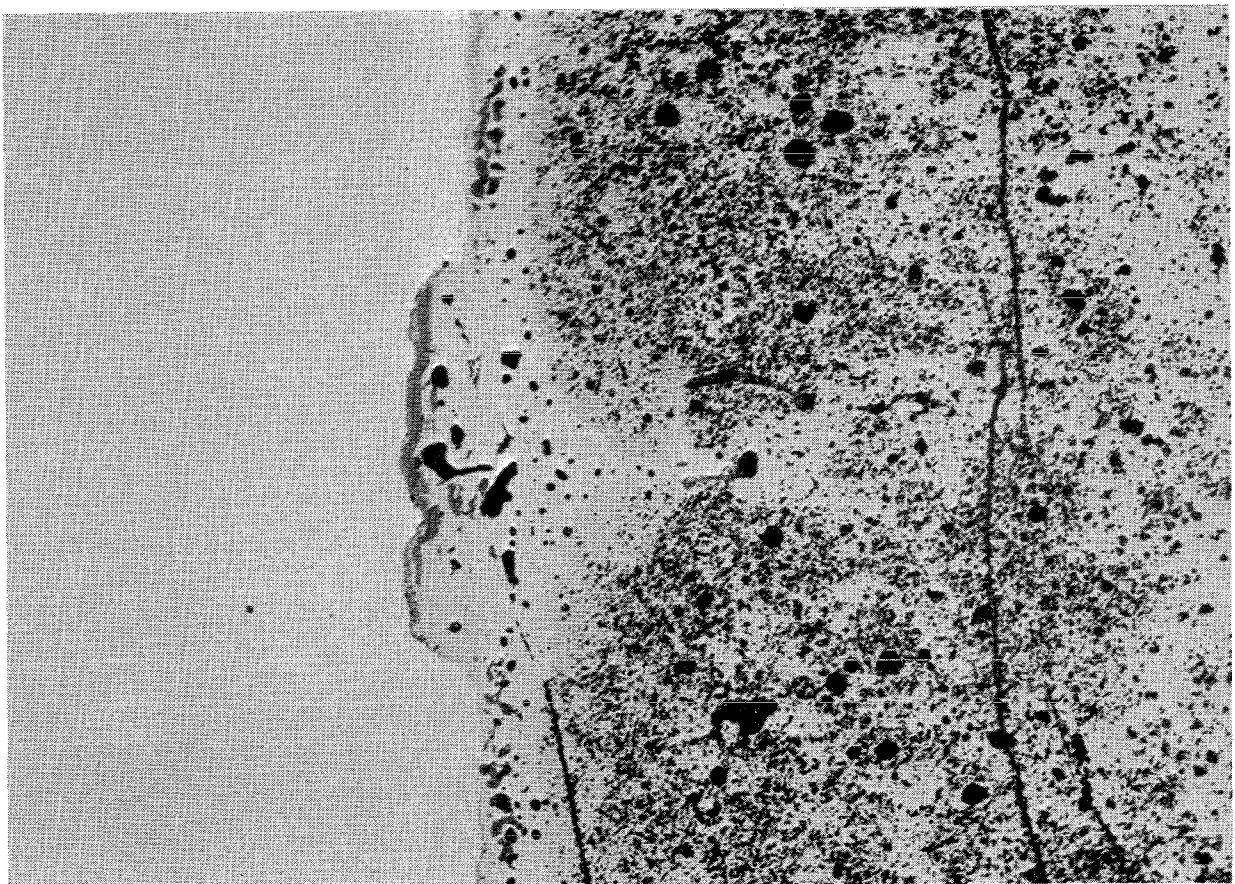
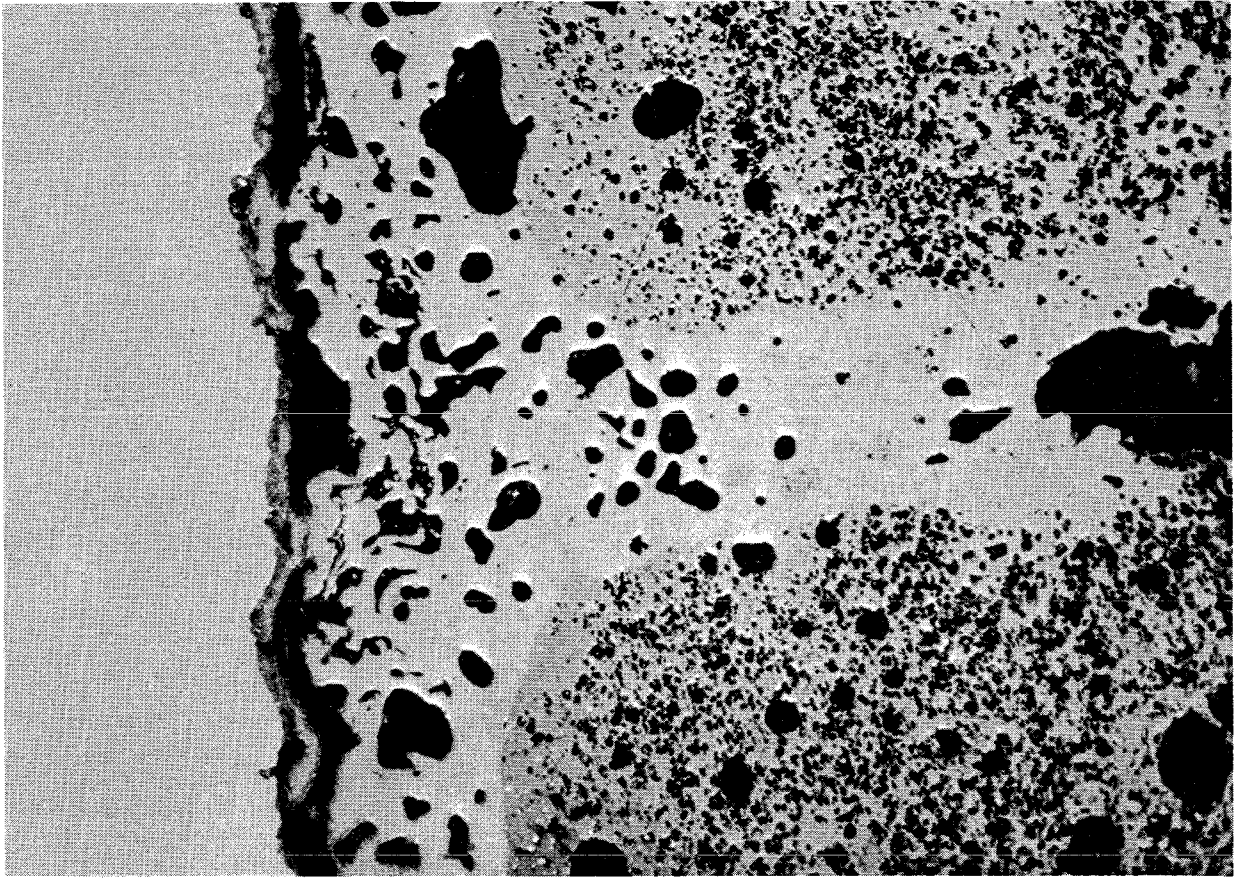


-A/163-
zu Prüfling 4A/20
A2

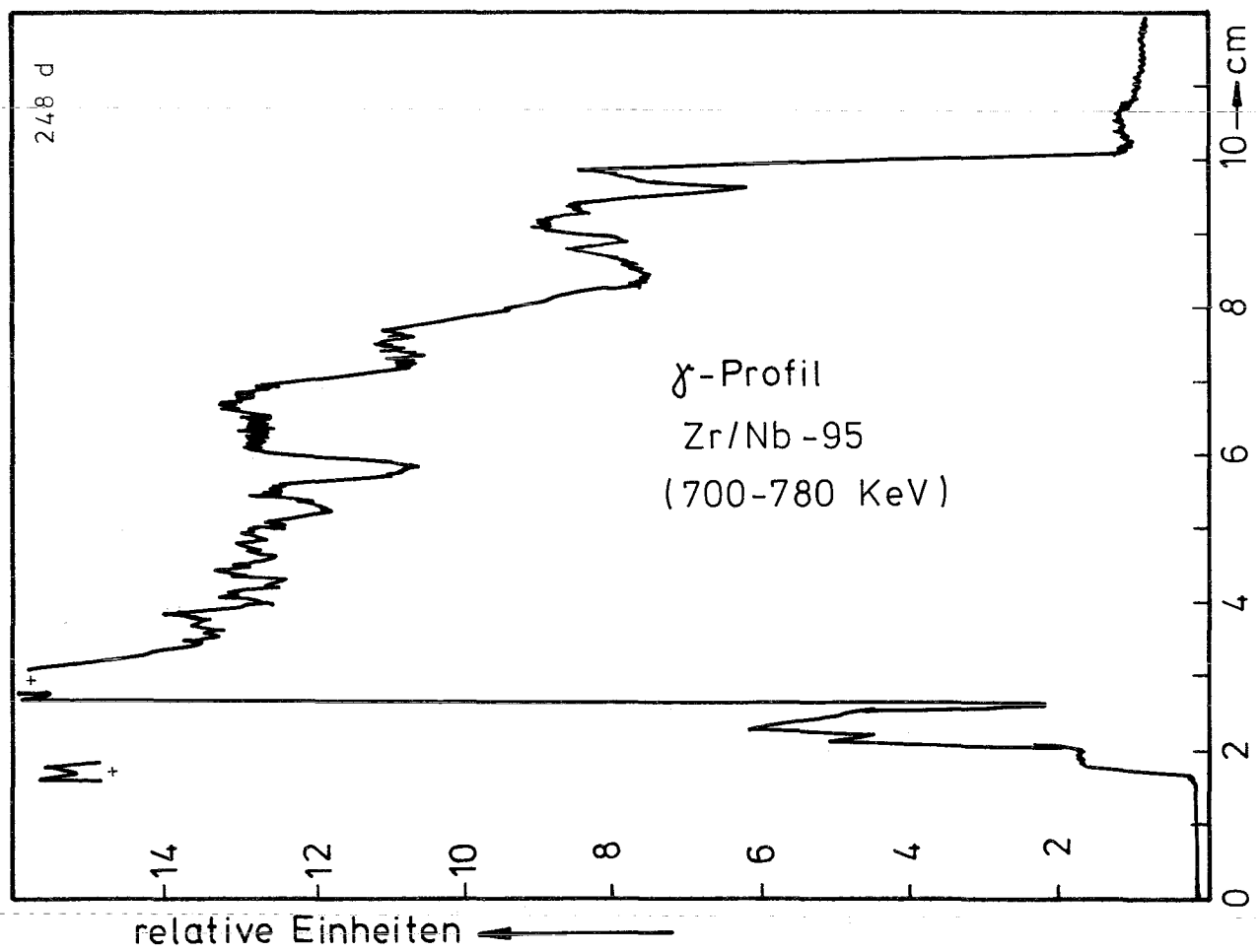
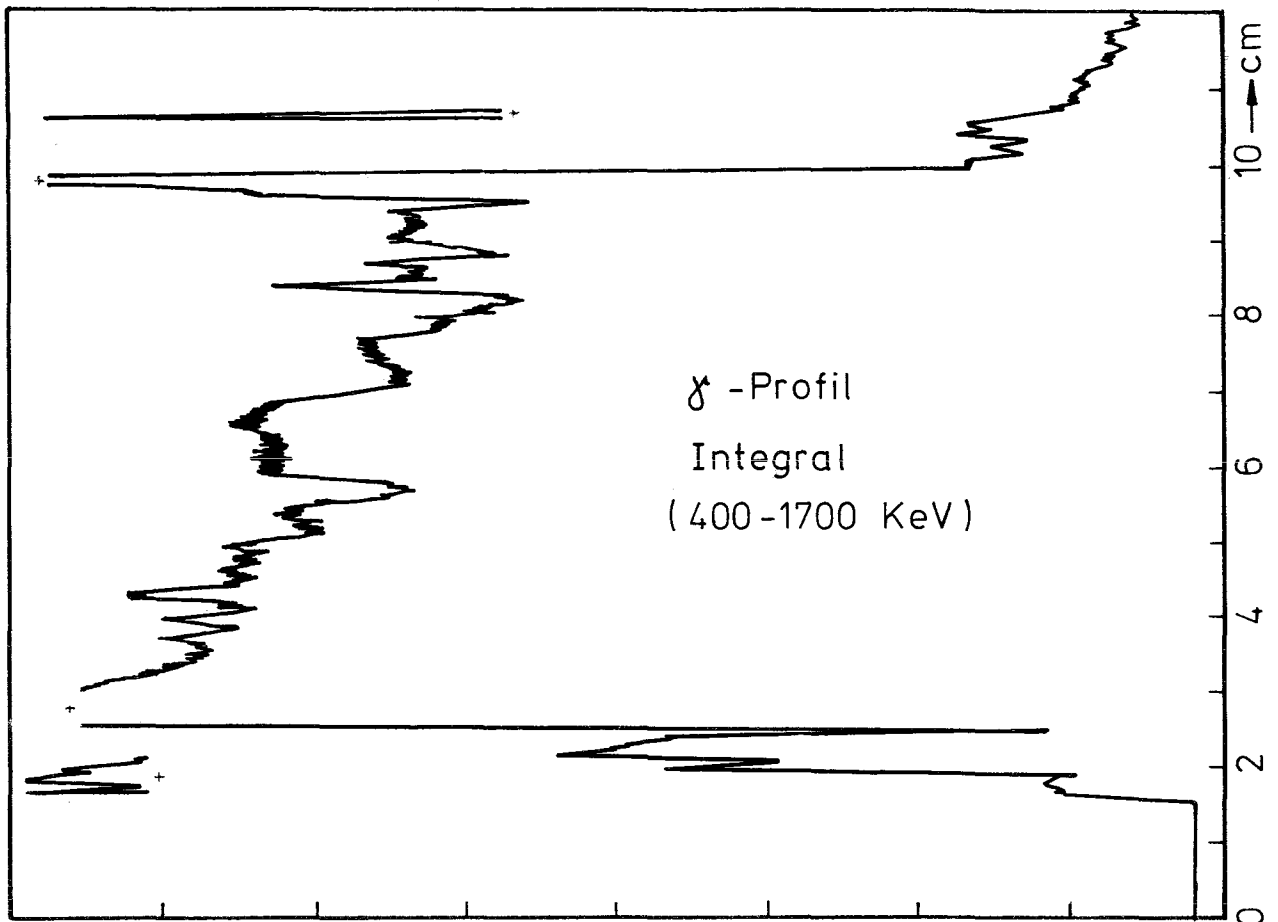


0,1mm

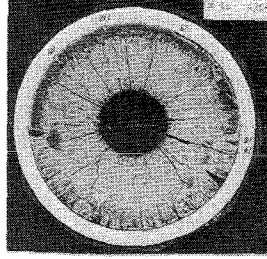
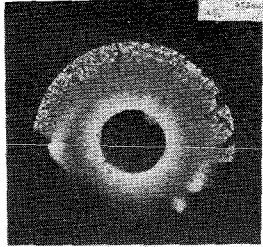
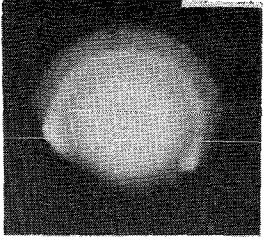
-A/164 -
zu Prüfling 4A/20
A2



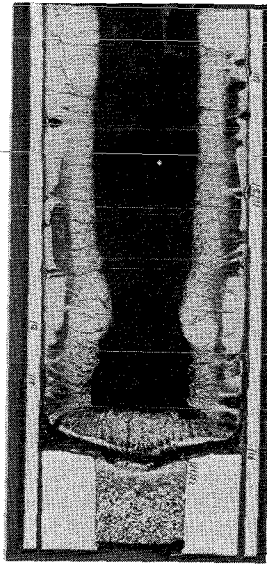
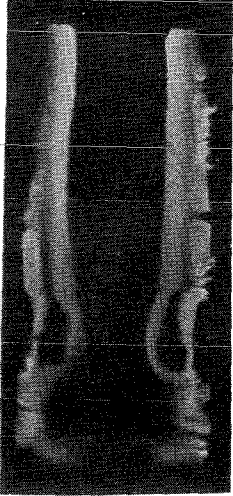
0,1 mm



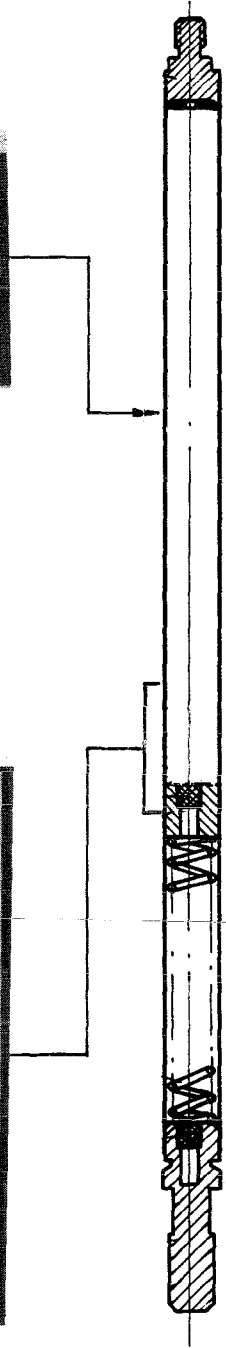
2



1



A





Prüfling 4A20

Brennstoff :

Form : Tabletten
Zusammensetzung : UO_2/PuO_2
Tablettendichte : 83,60% th.D.

Hülle :

Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,5 mm

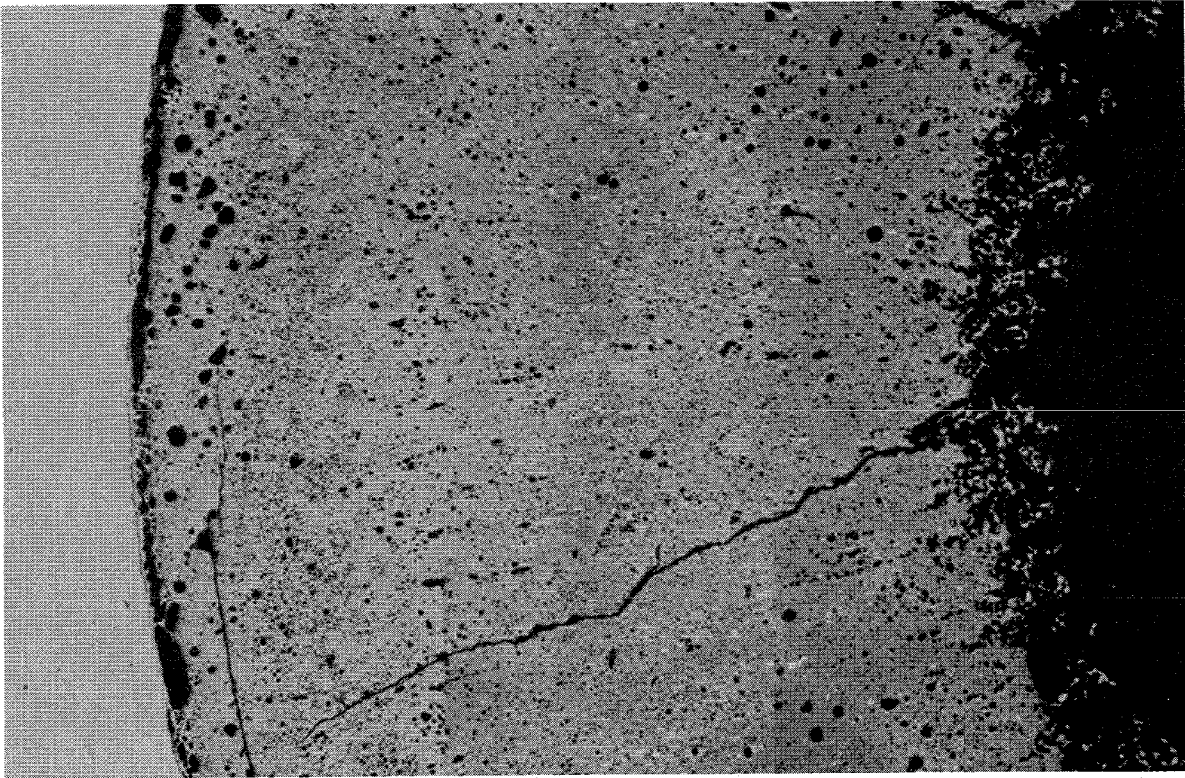
Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,07 mm
Schmierdichte : 80,4% th.D.

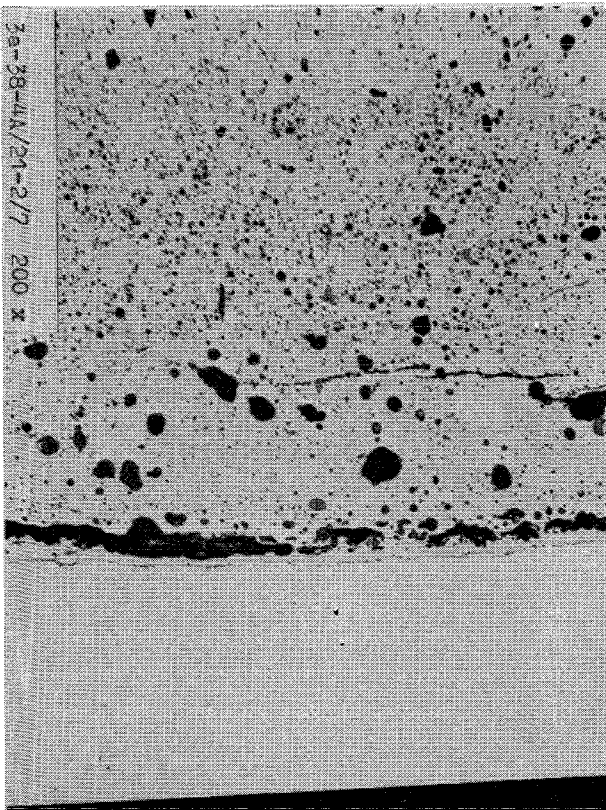
Bestrahlung :

Einrichtung : Na/PbBi-Doppel
Kapsel Typ 4
Dauer : 577,9 Vollasttage
Ende : 1. 6. 70
Rechn. Abbrand mittl. : 73,2 MWd/kg
Stableistung max./mittl. : 578/316 W/cm

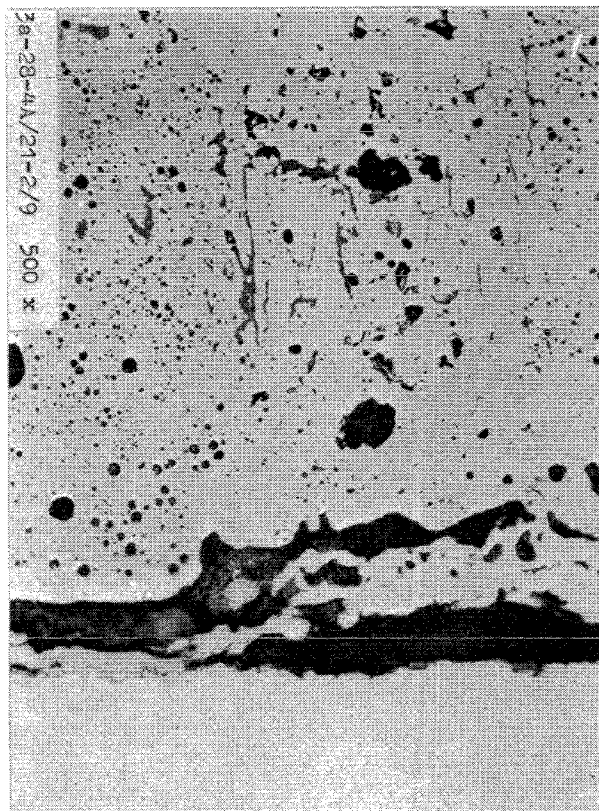
-A/167-
zu Prüfling 4A/21
A1



0,1mm

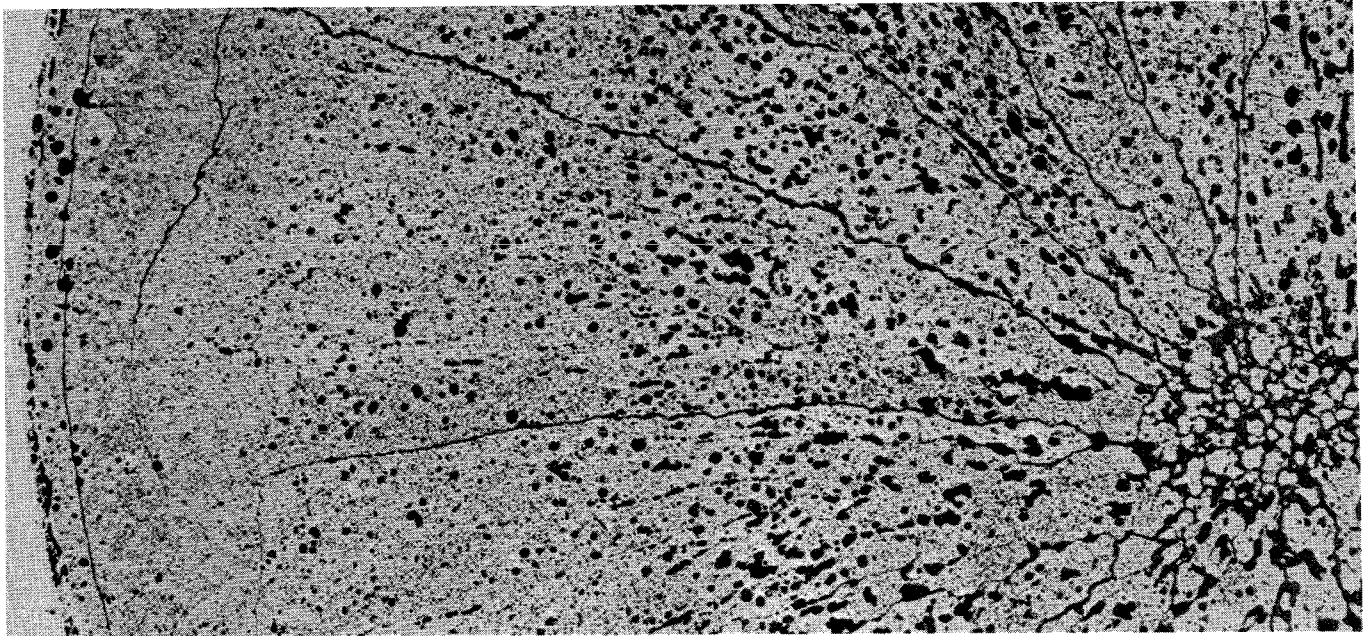


0,1mm



0,1mm

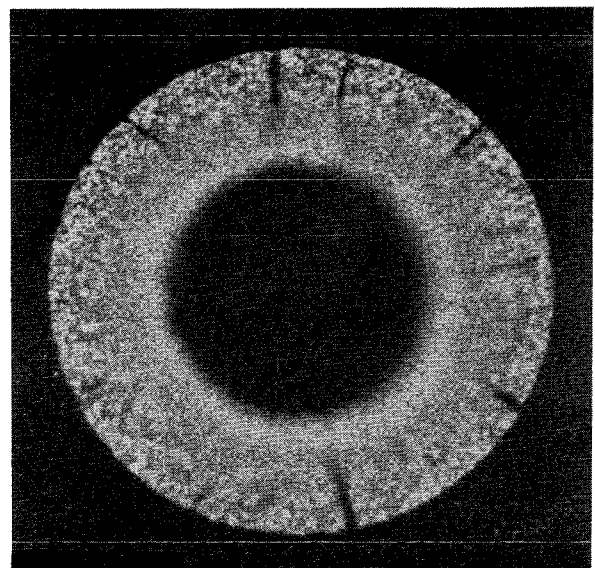
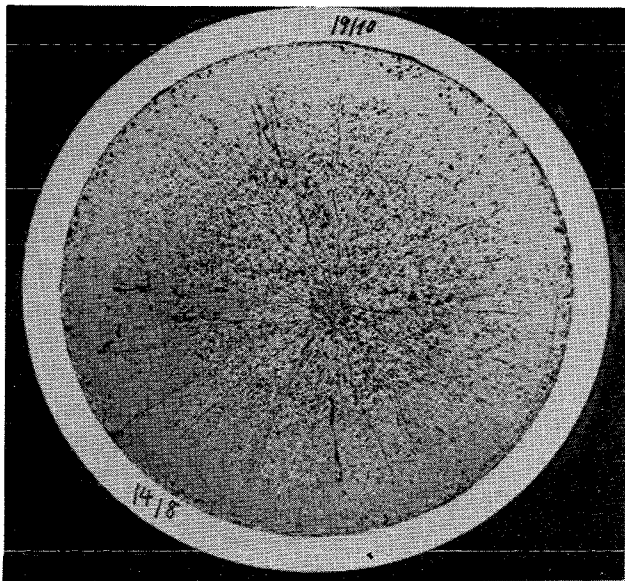
- A/168 -
zu Prüfling 4A/21
A2



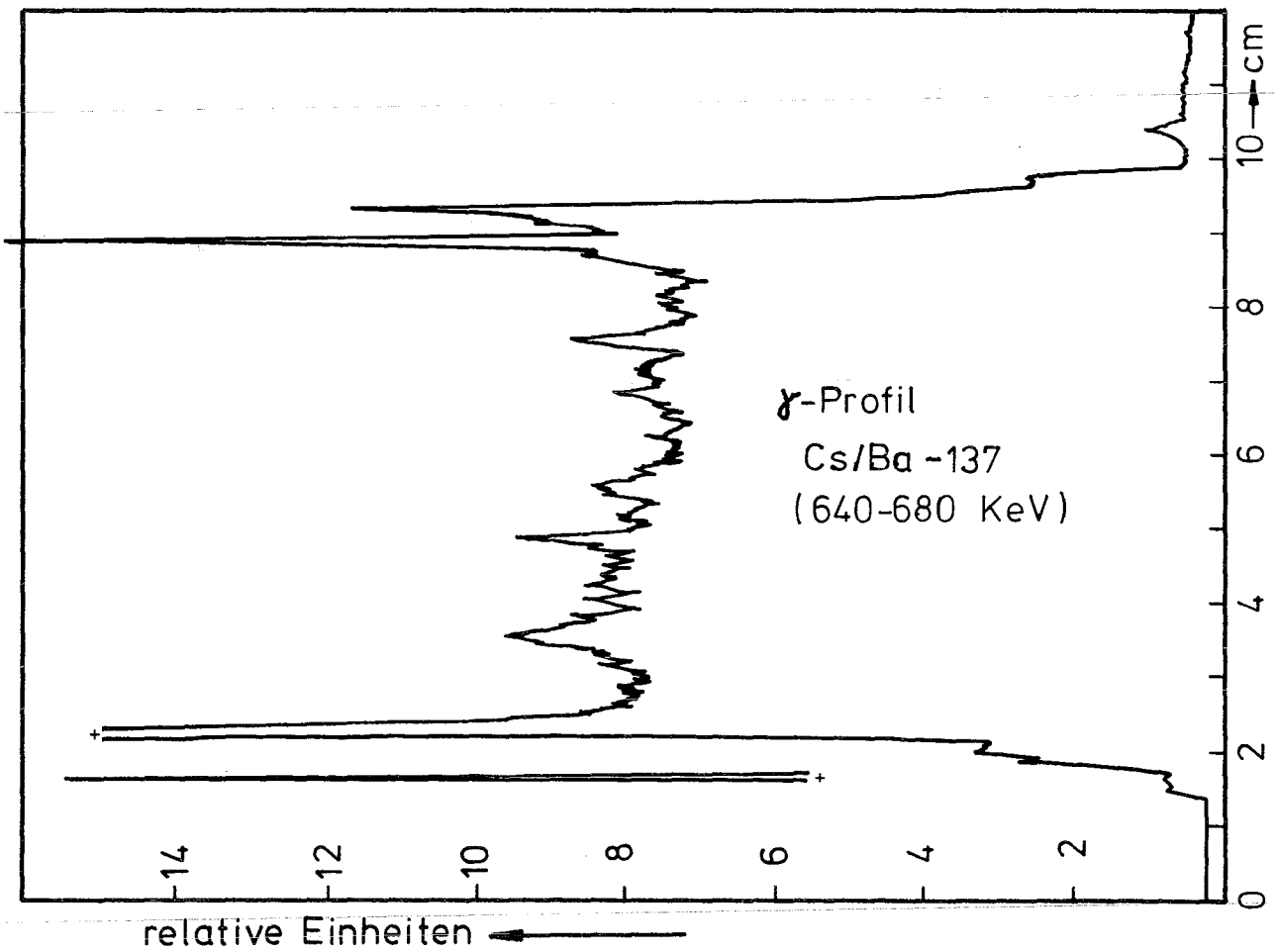
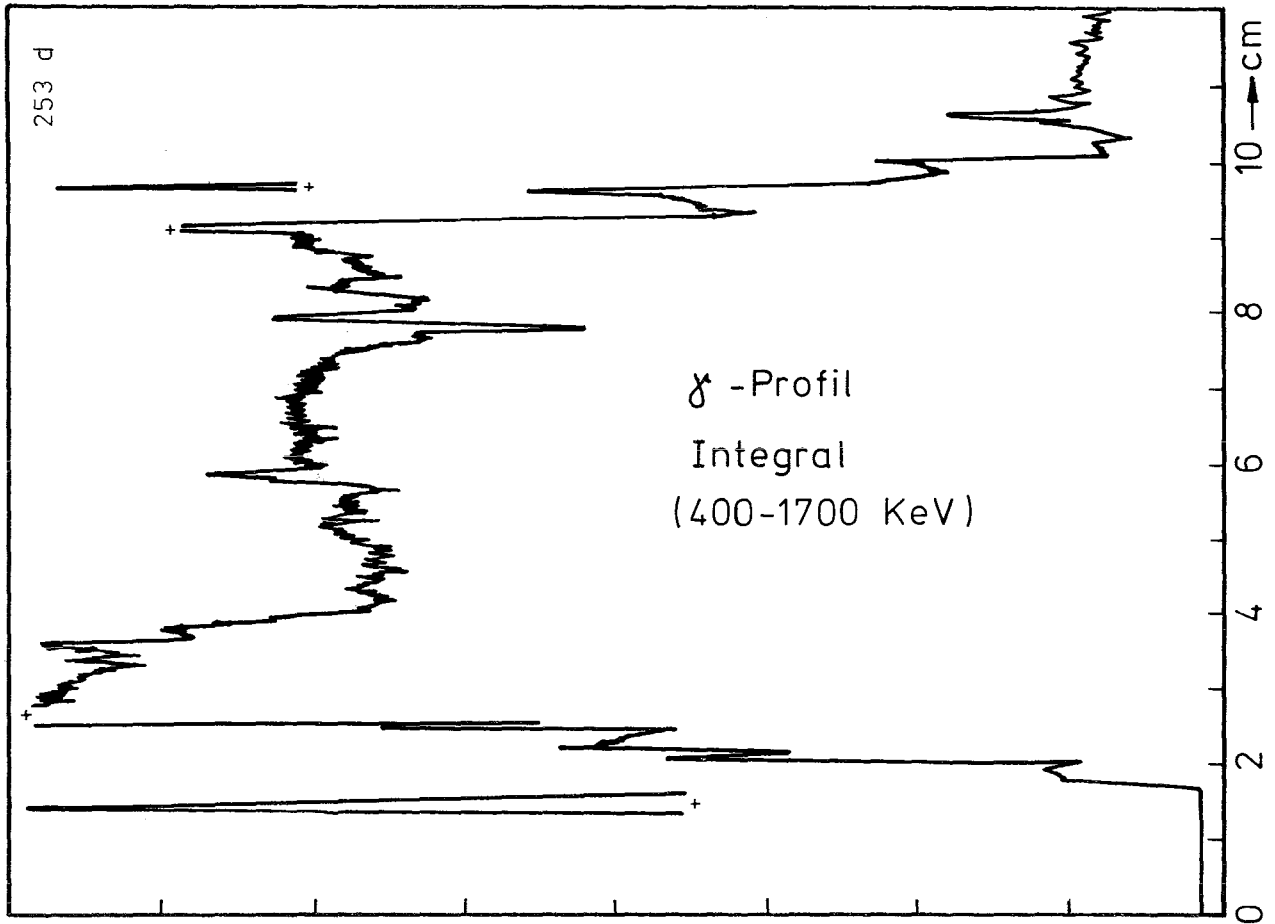
┌─┐
0,1mm

A2

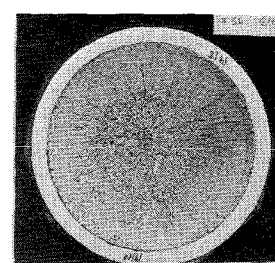
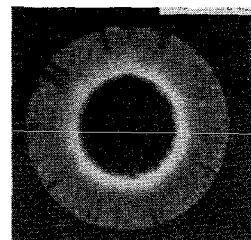
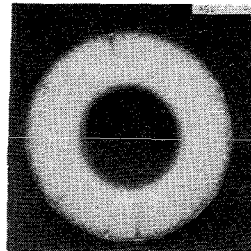
B2



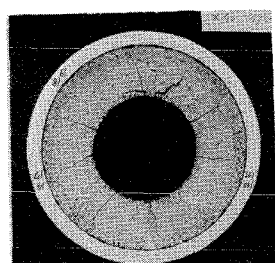
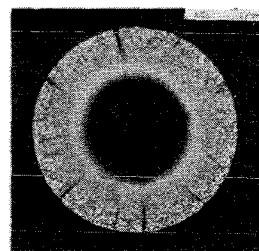
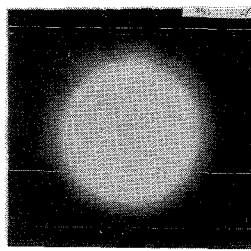
┌─┐
1mm



2



1



B

A





Prüfling 4A21

Brennstoff :

Form : Tabletten

Zusammensetzung : UO_2/PuO_2

Tablettendichte : 83,60% th.D.

Hülle :

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 7,4 mm

Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : 0,07 mm

Schmierdichte : 80,4% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : Na/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4

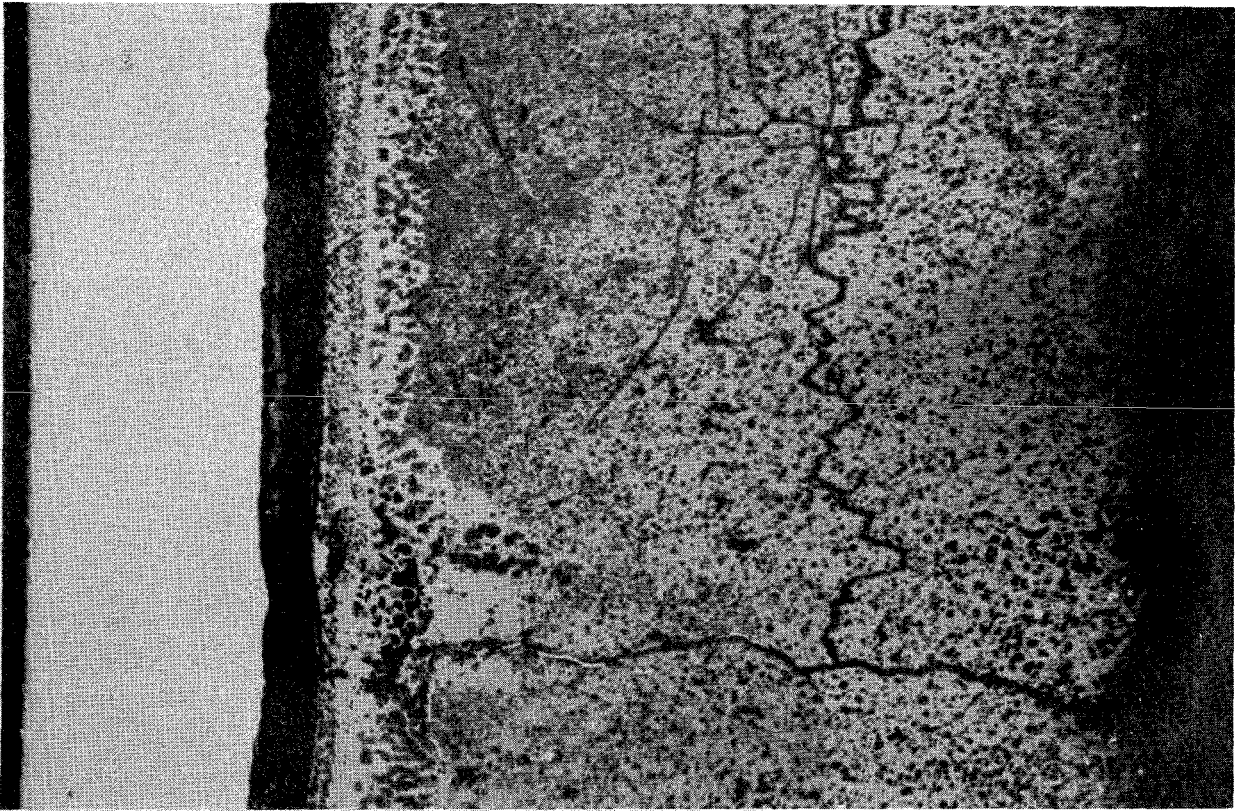
Dauer : 577,9 Vollasttage

Ende : 1. 6. 70

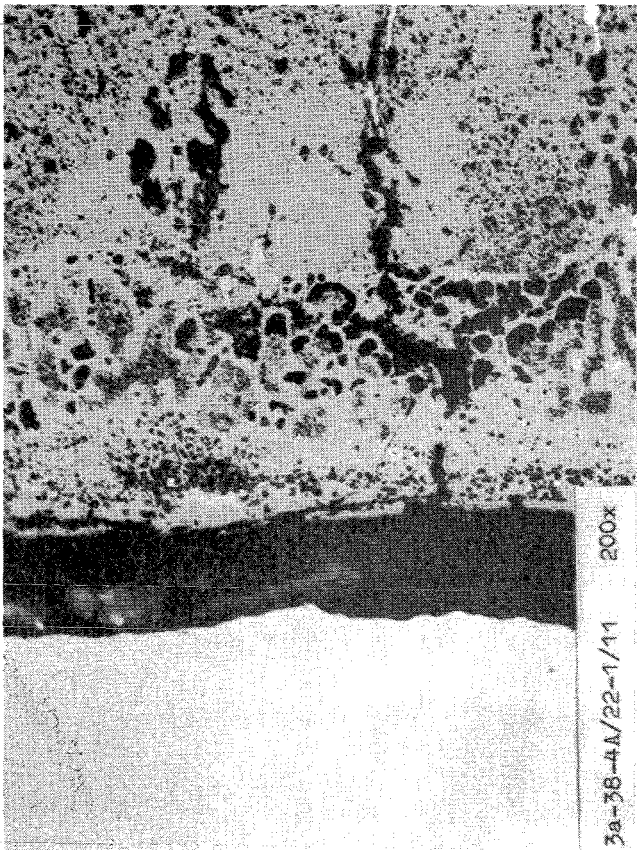
Rechn. Abbrand mittl. : 79,4 MWd/kg

Stableistung max./mittl. : 597/344 W/cm

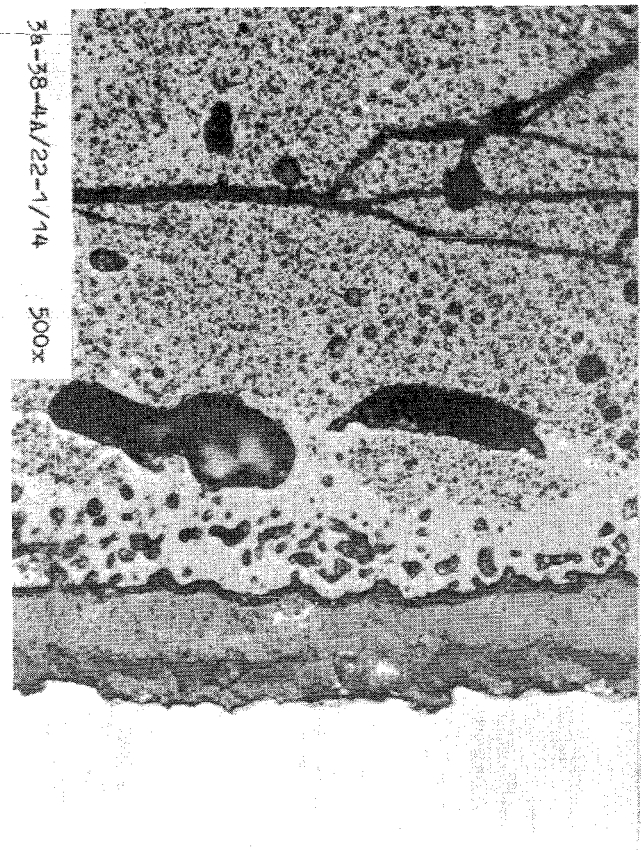
-A/171-
zu Prüfling 4A/22
A1



0,1mm



0,1mm

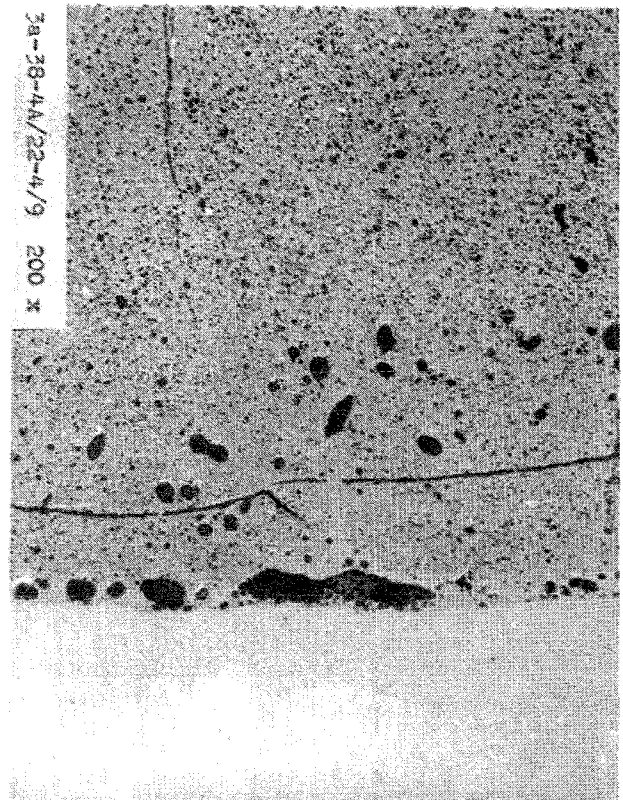
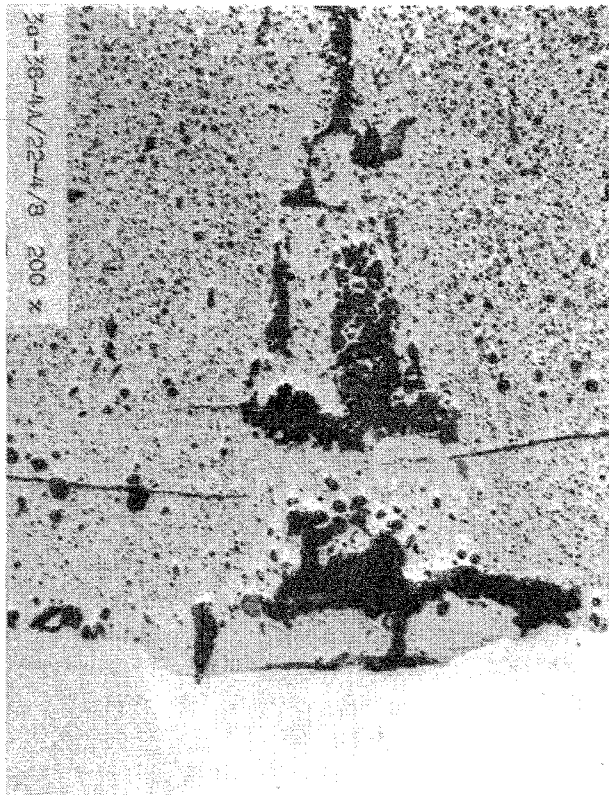


0,1mm

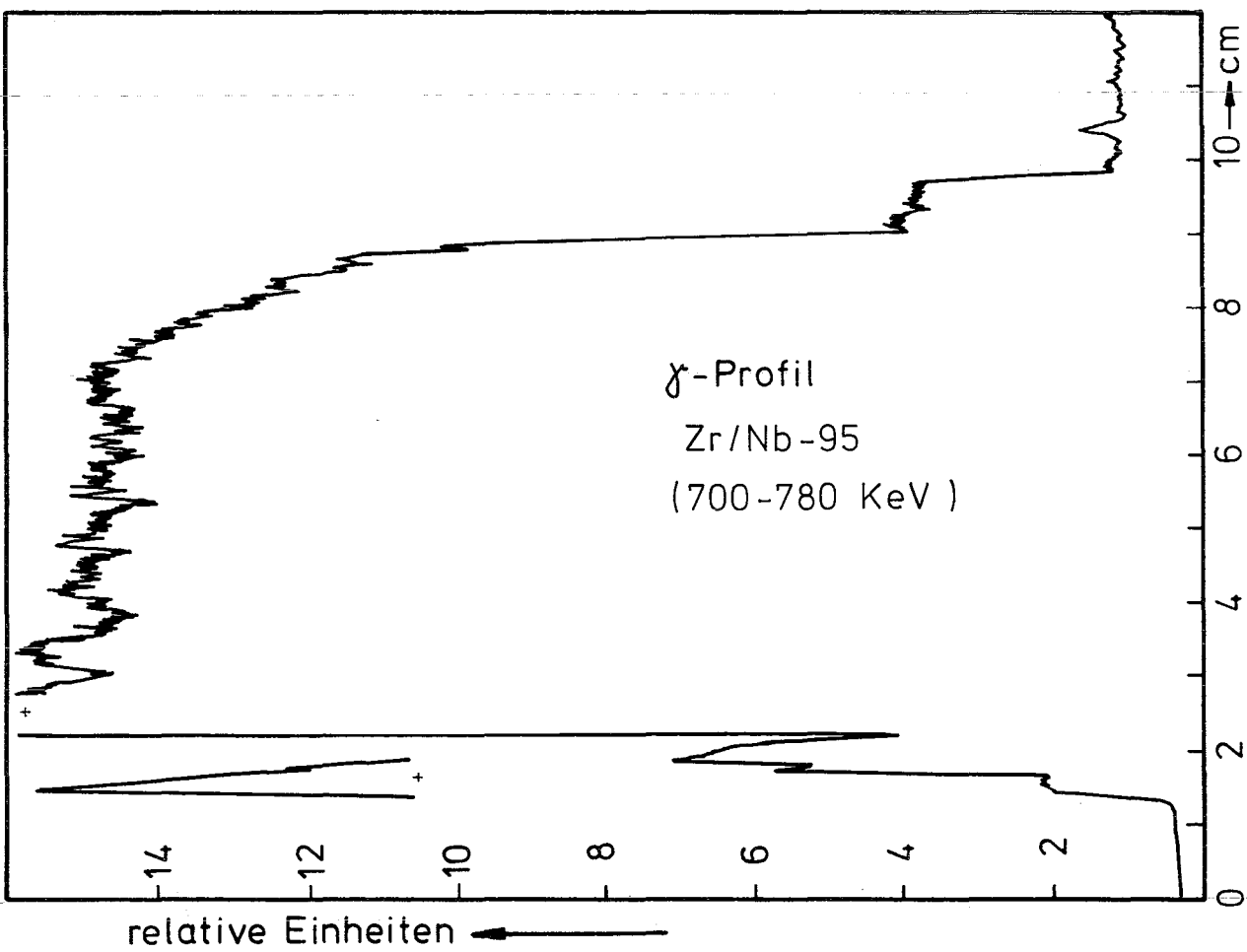
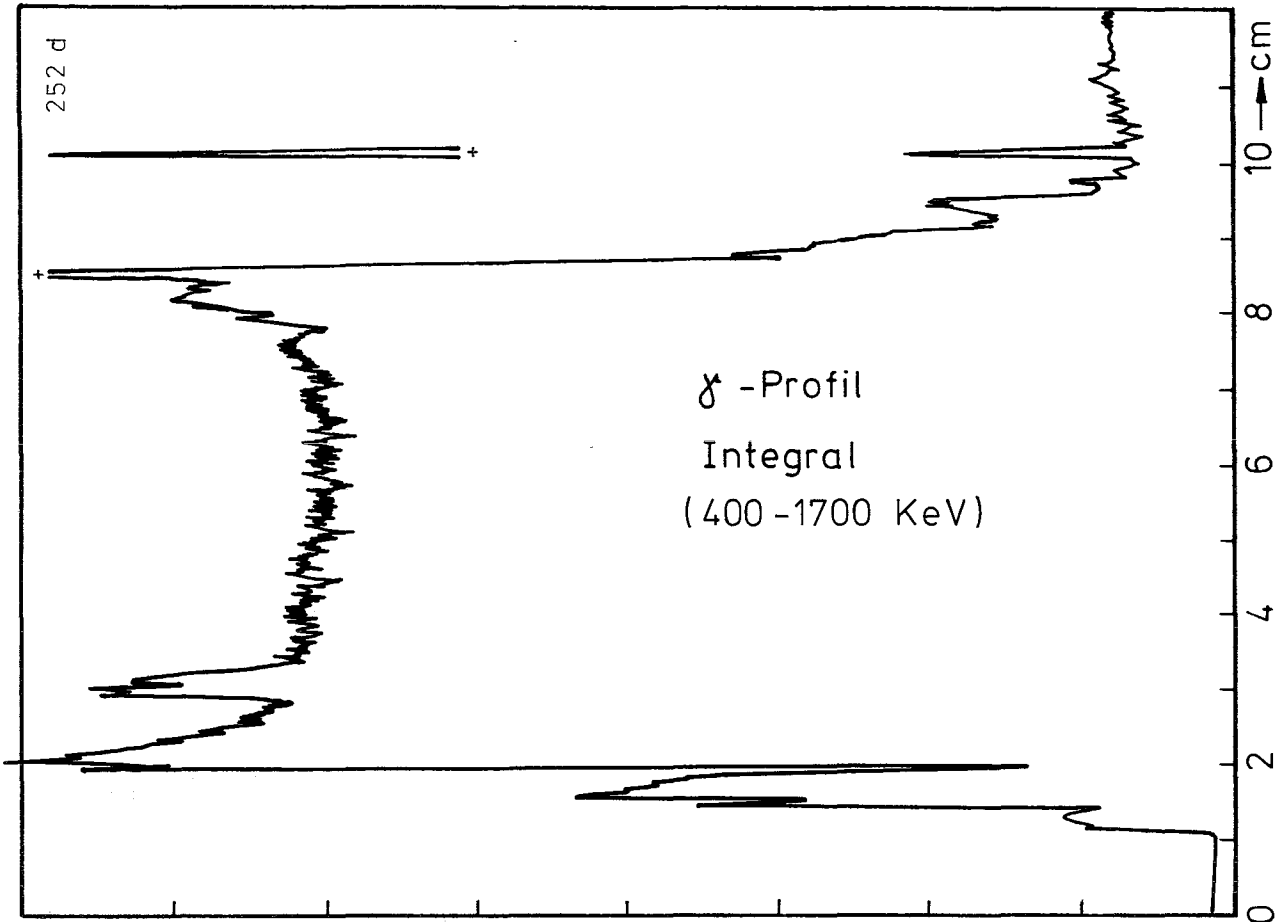
-A/172-
zu Prüfling 4A/22
A2



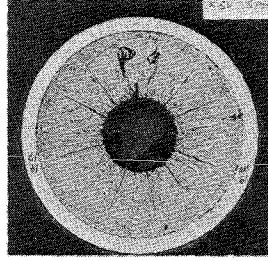
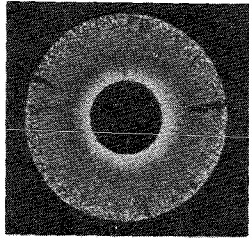
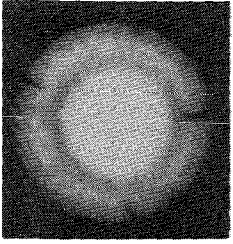
0,1mm



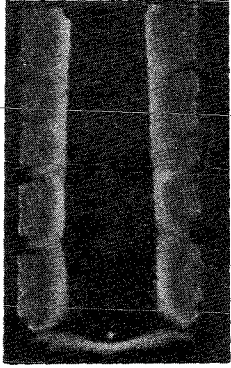
0,1mm



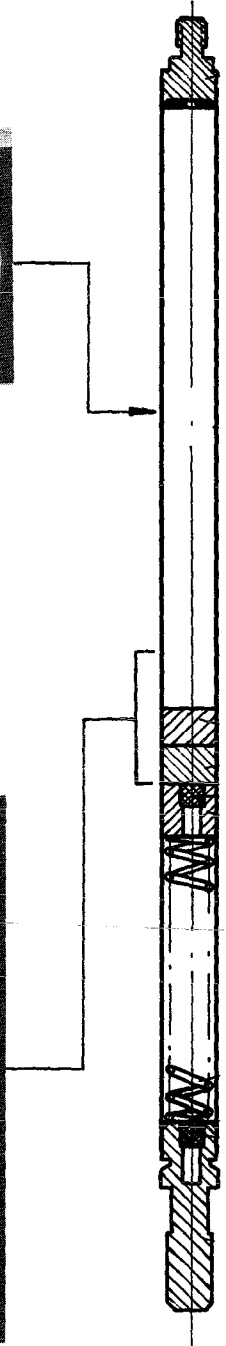
2



1



A





Prüfling 4A22

Brennstoff :

Form : Tabletten
Zusammensetzung : UO_2/PuO_2
Tablettendichte : 83,35% th.D.

Hülle :

Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,07 mm
Schmierdichte : 80,4% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : Na/PbBi-Doppel-
Kapsel Typ 4
Dauer : 577,9 Volllasttage
Ende : 1. 6. 70
Rechn. Abbrand mittl. : 85,2 MWd/kg
Stableistung max./mittl. : 606/367 W/cm

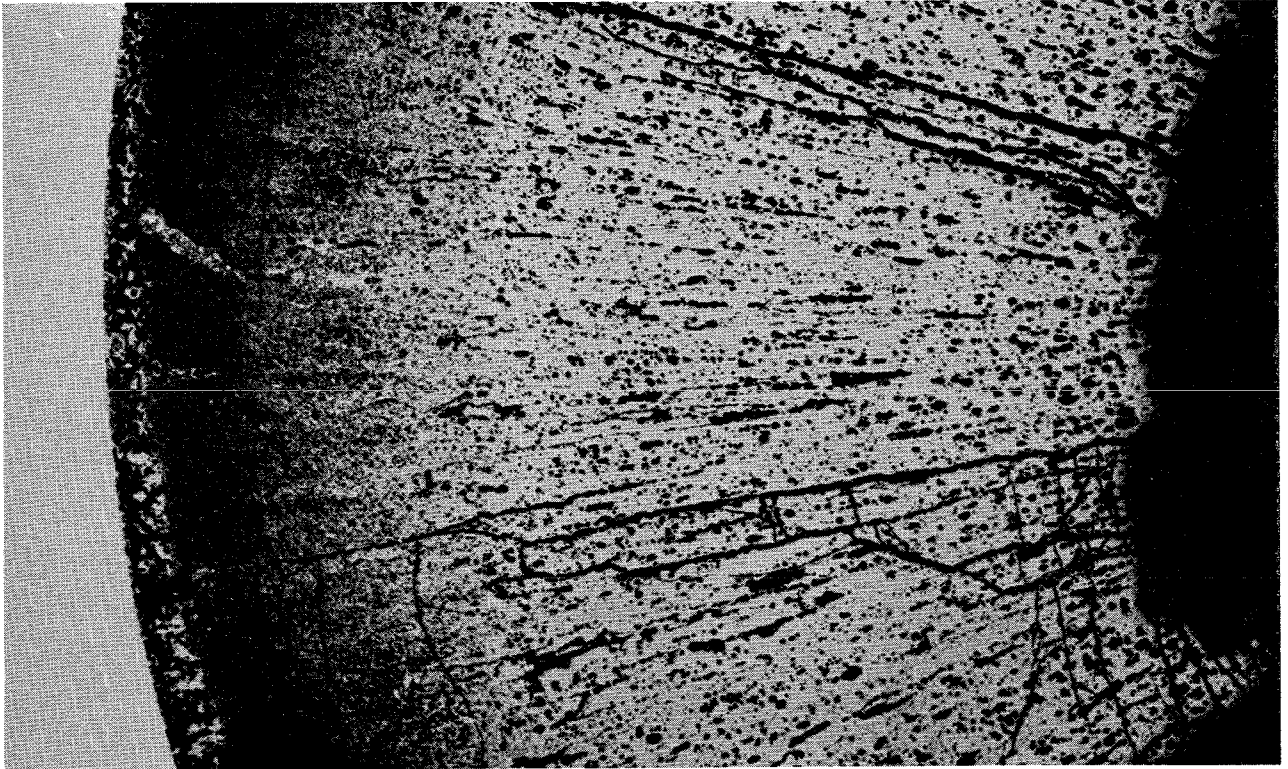
- A/175 -
zu Prüfling 4A/27
A1



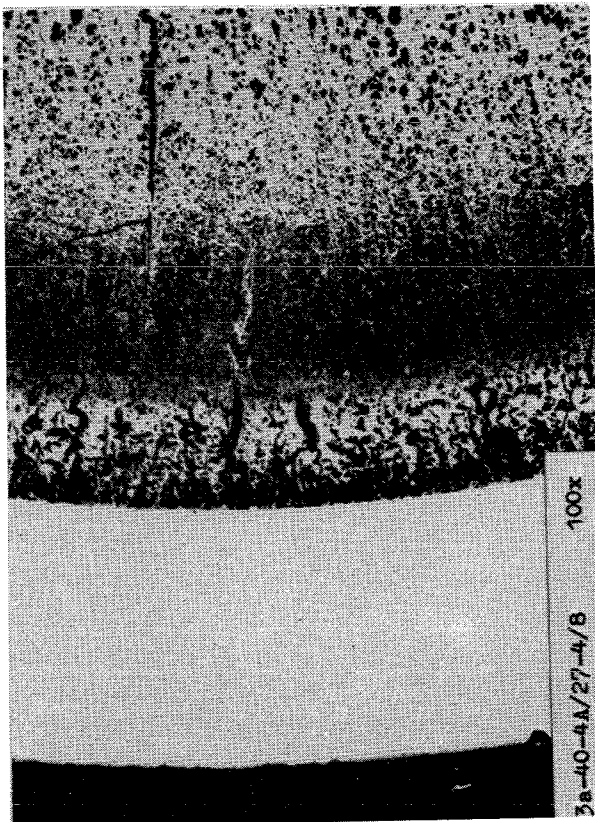
B-40-4A/27-1/14 100x

0,1mm

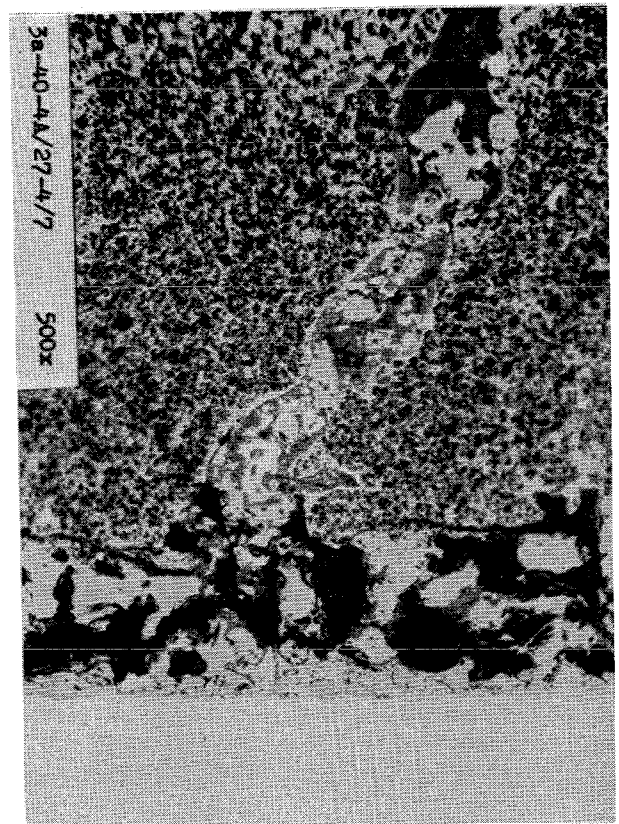
- A/176 -
zu Prüfling 4A/27
A2



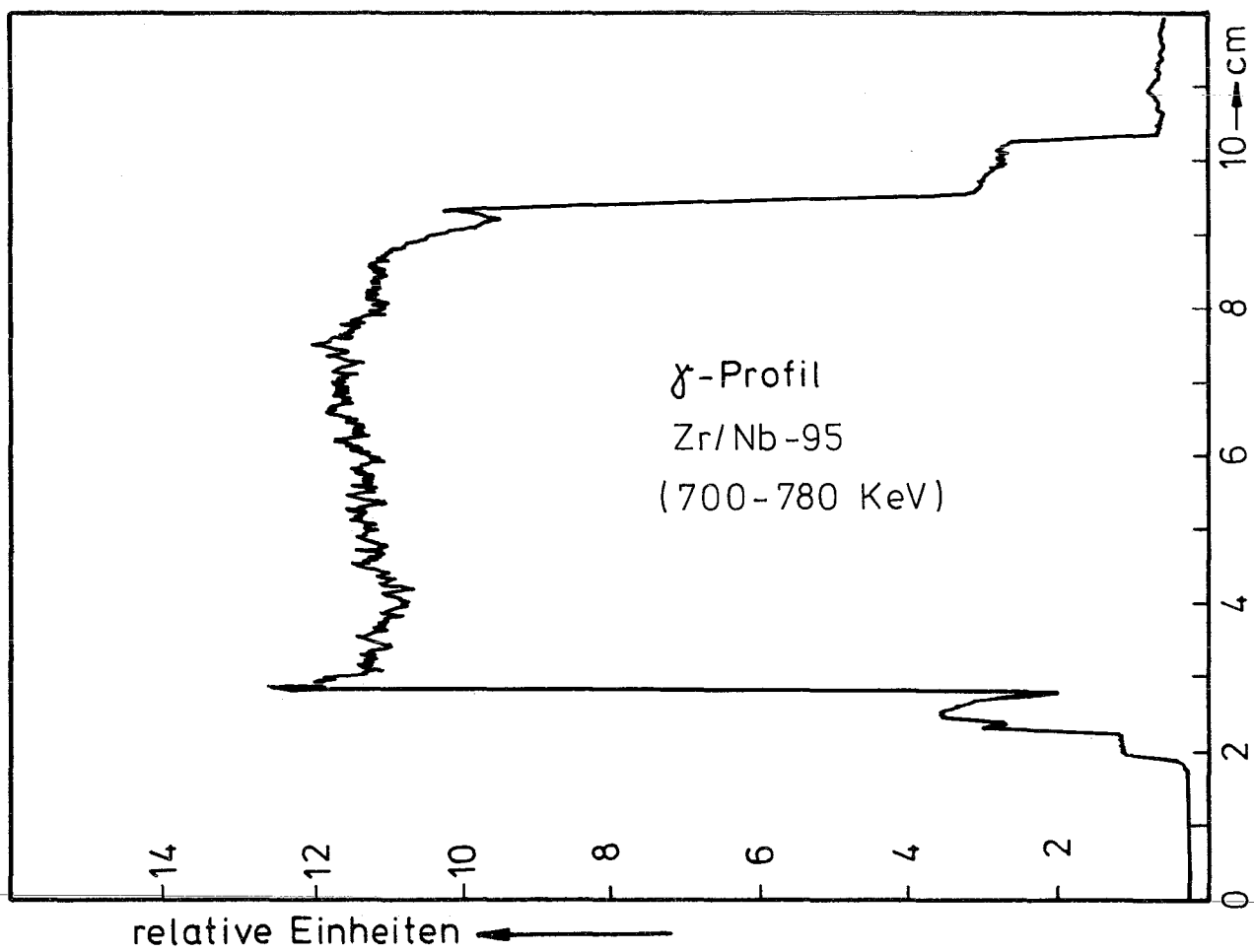
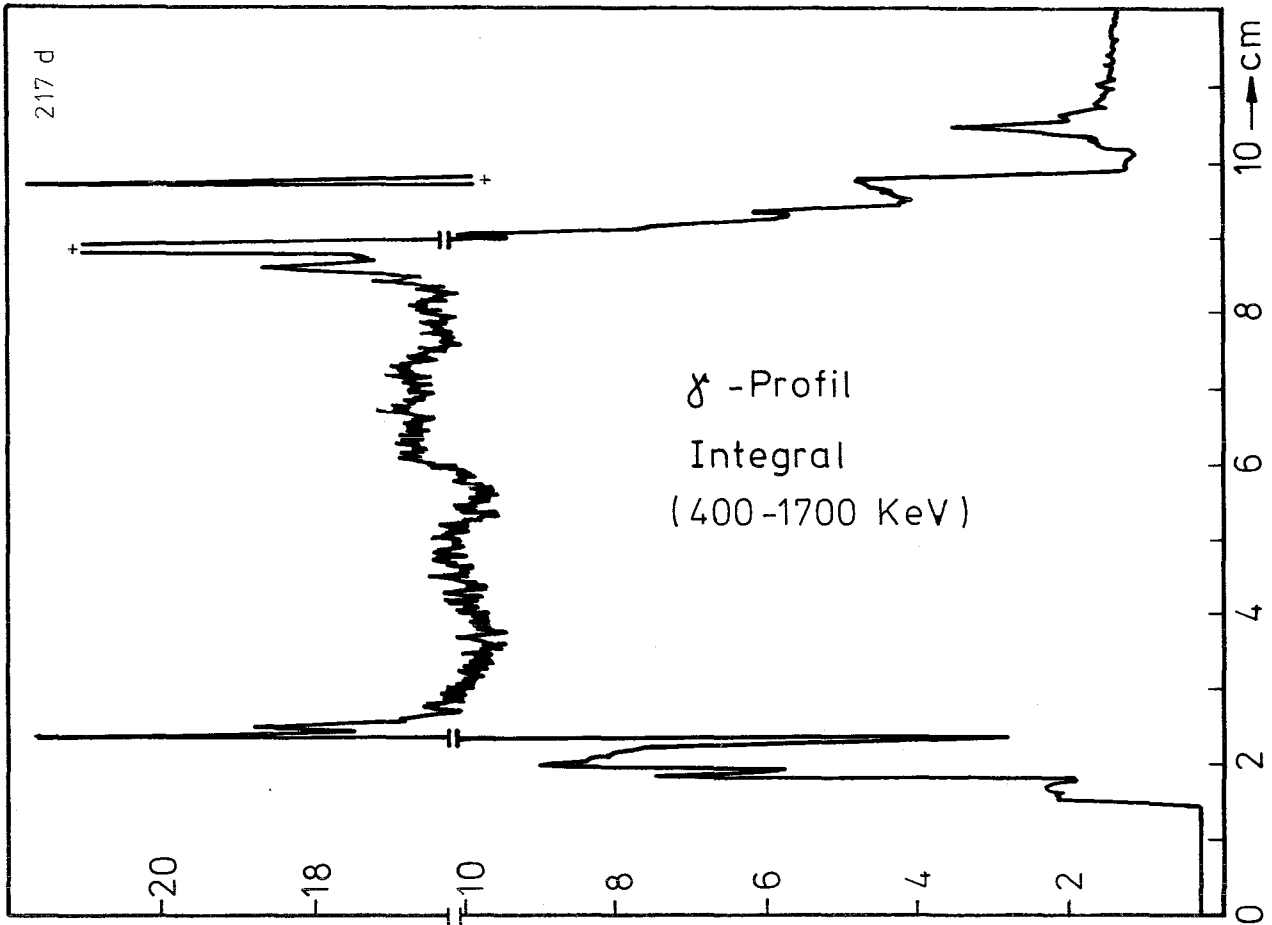
0,1mm



0,1mm

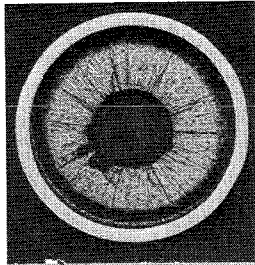
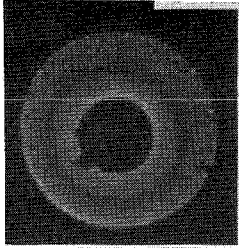
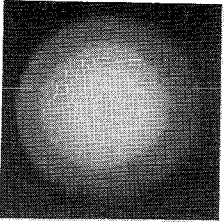


0,1mm

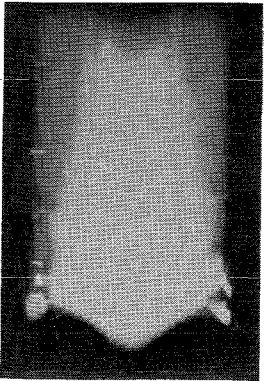




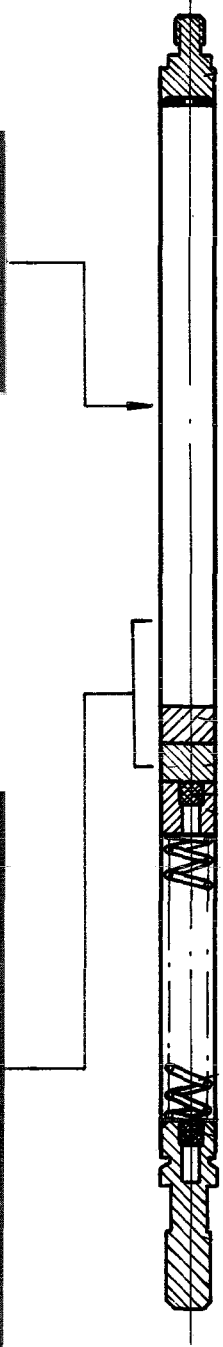
2



1



A





Prüfling 4A27

Brennstoff :

Form : Tabletten
Zusammensetzung : UO_2/PuO_2
Tablettendichte : 83,93% th.D.

Hülle :

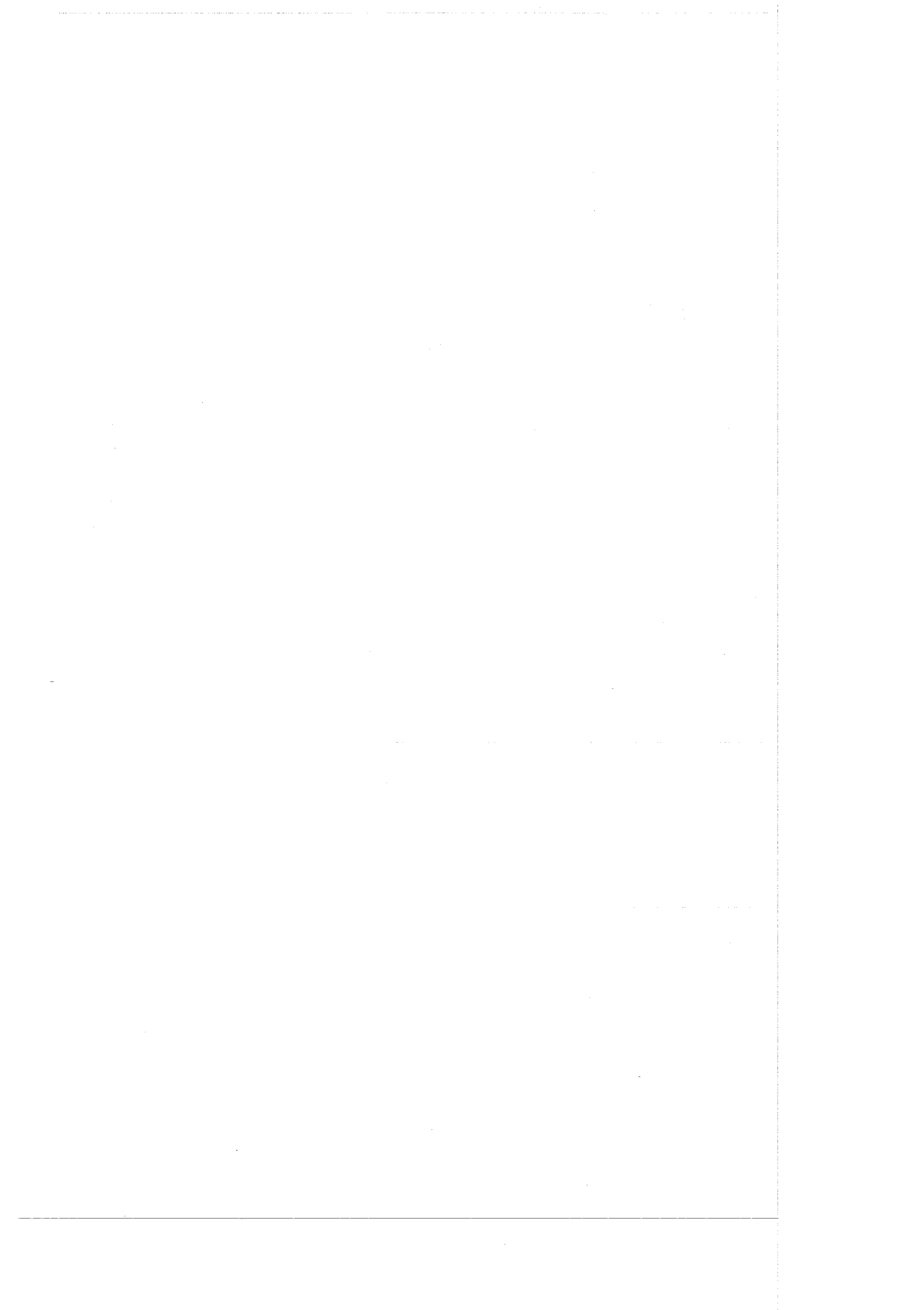
Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

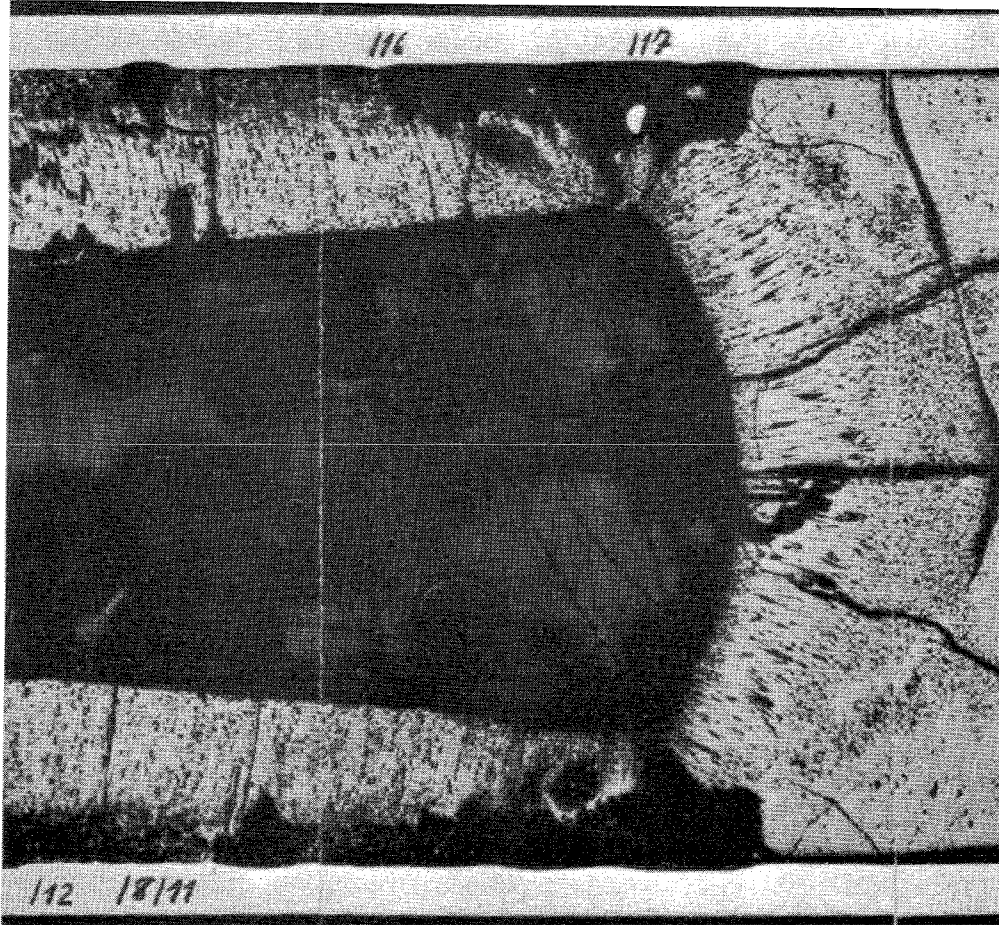
Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,07 mm
Schmierdichte : 80,4% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : Na/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4
Dauer : 522,9 Vollasttage
Ende : 13. 7. 70
Rechn. Abbrand mittl. : 80,0 MWd/kg
Stableistung max./mittl. : 644/383 W/cm



-A/179-
zu Prüfling 4A/26
A1

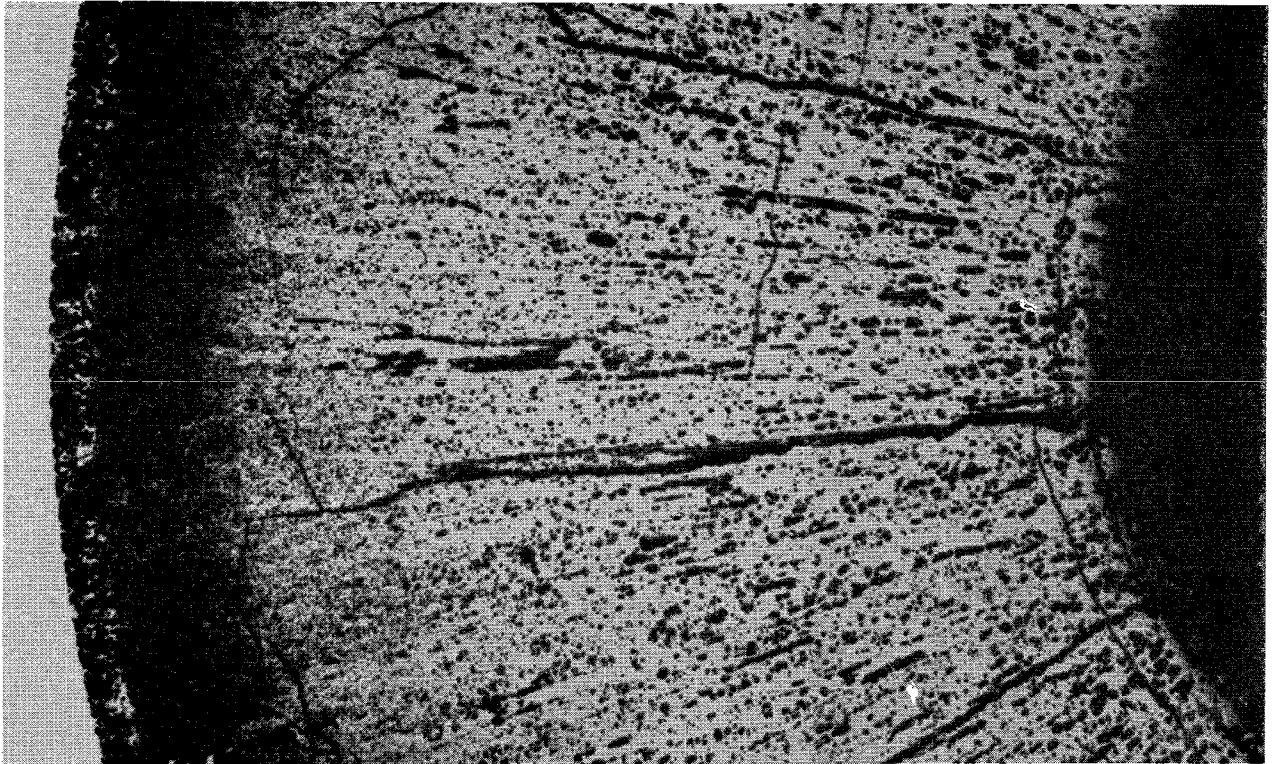


1mm

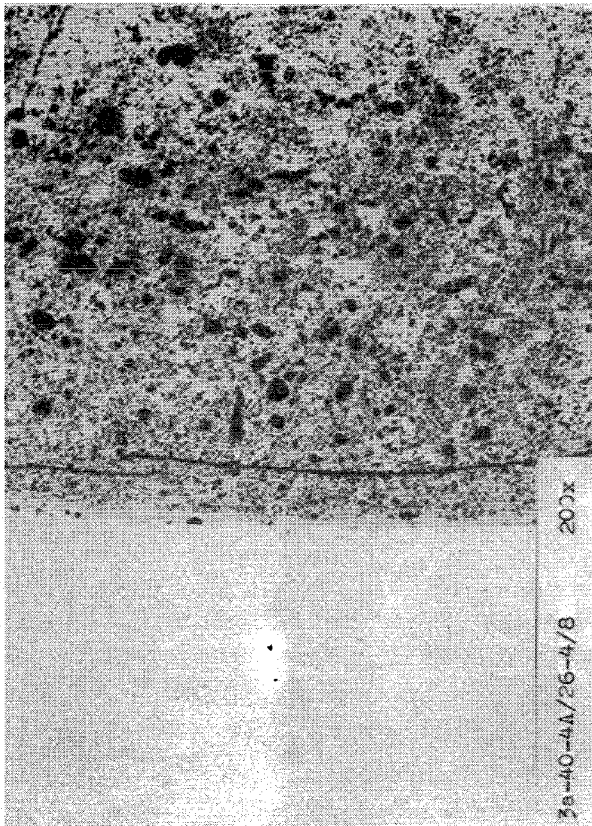


0,1 mm

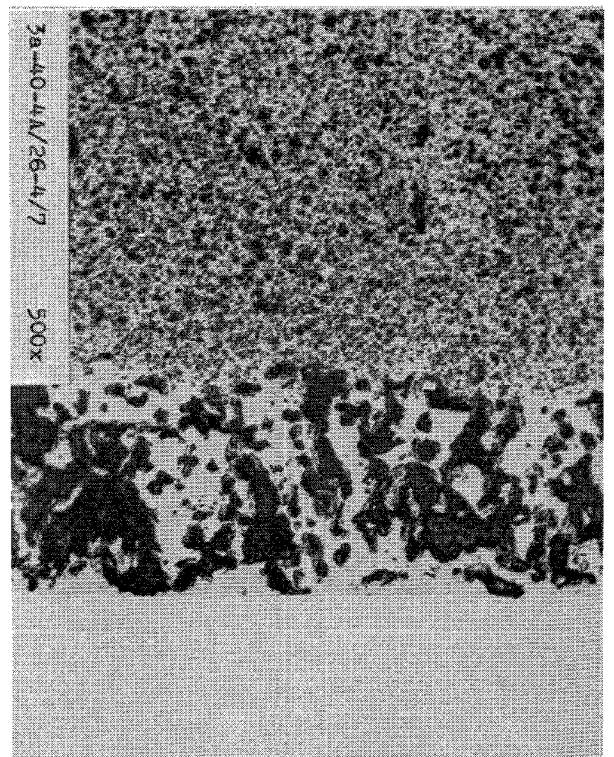
-A/180-
zu Prüfling 4A/26
A2



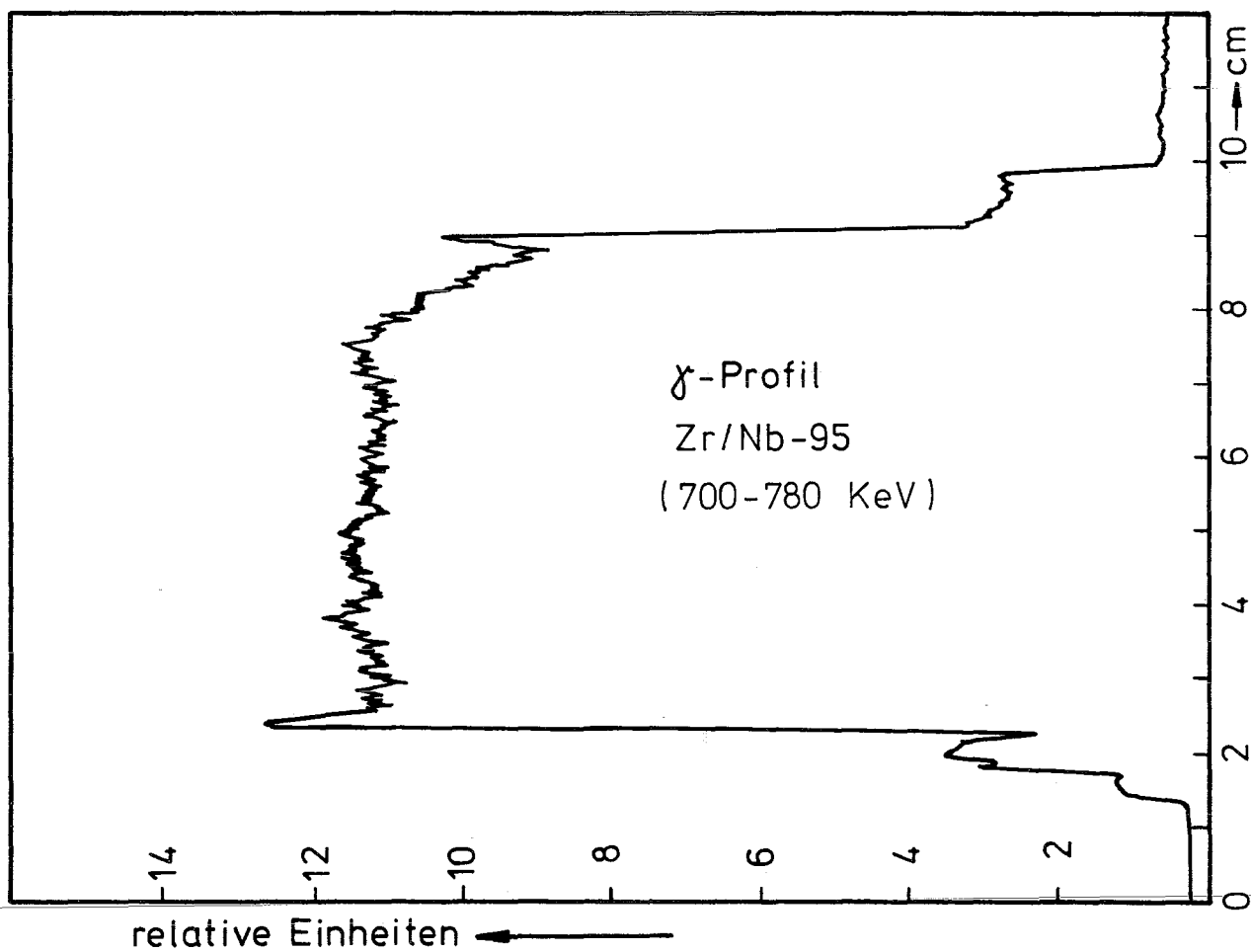
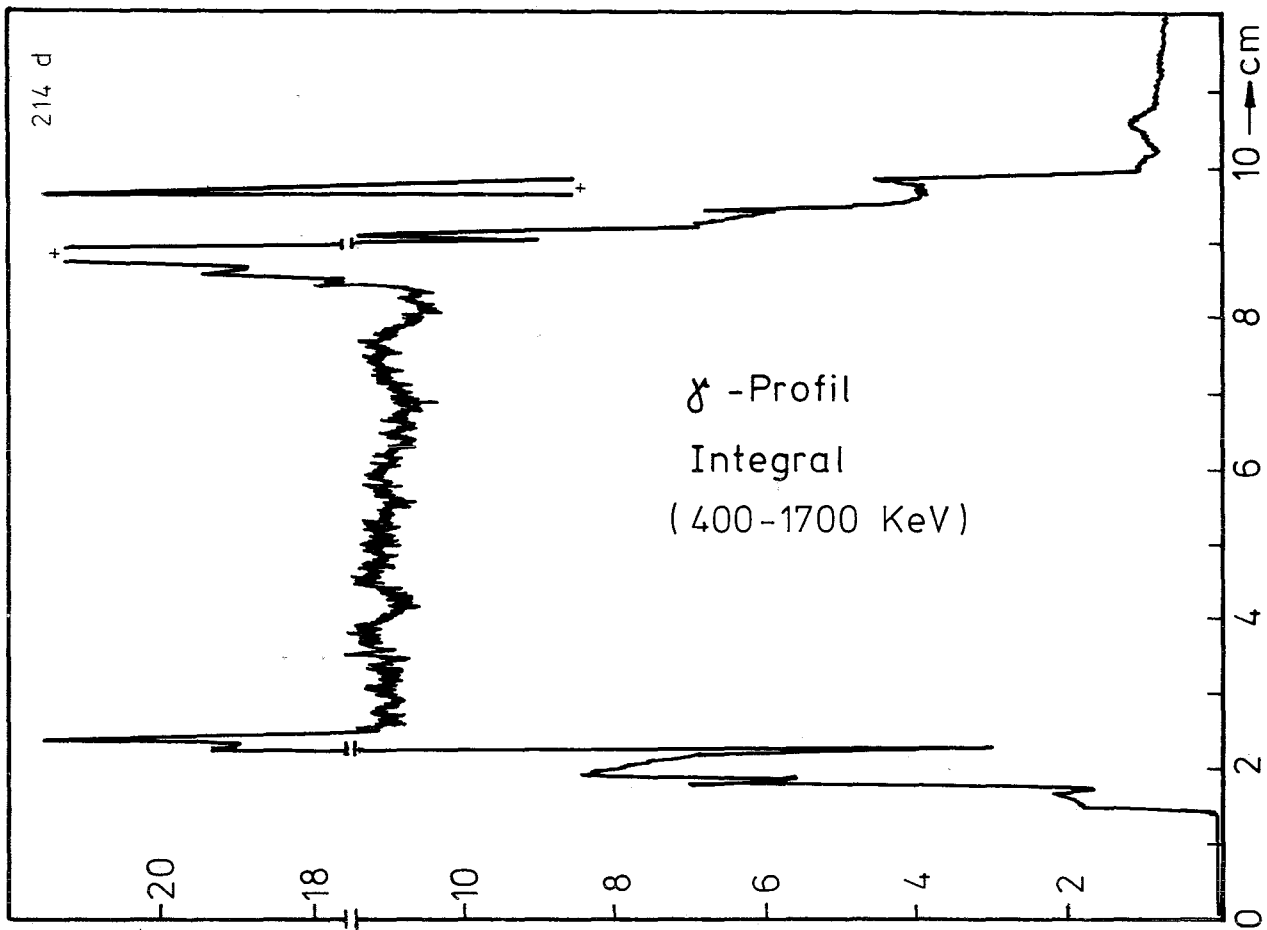
0,1mm



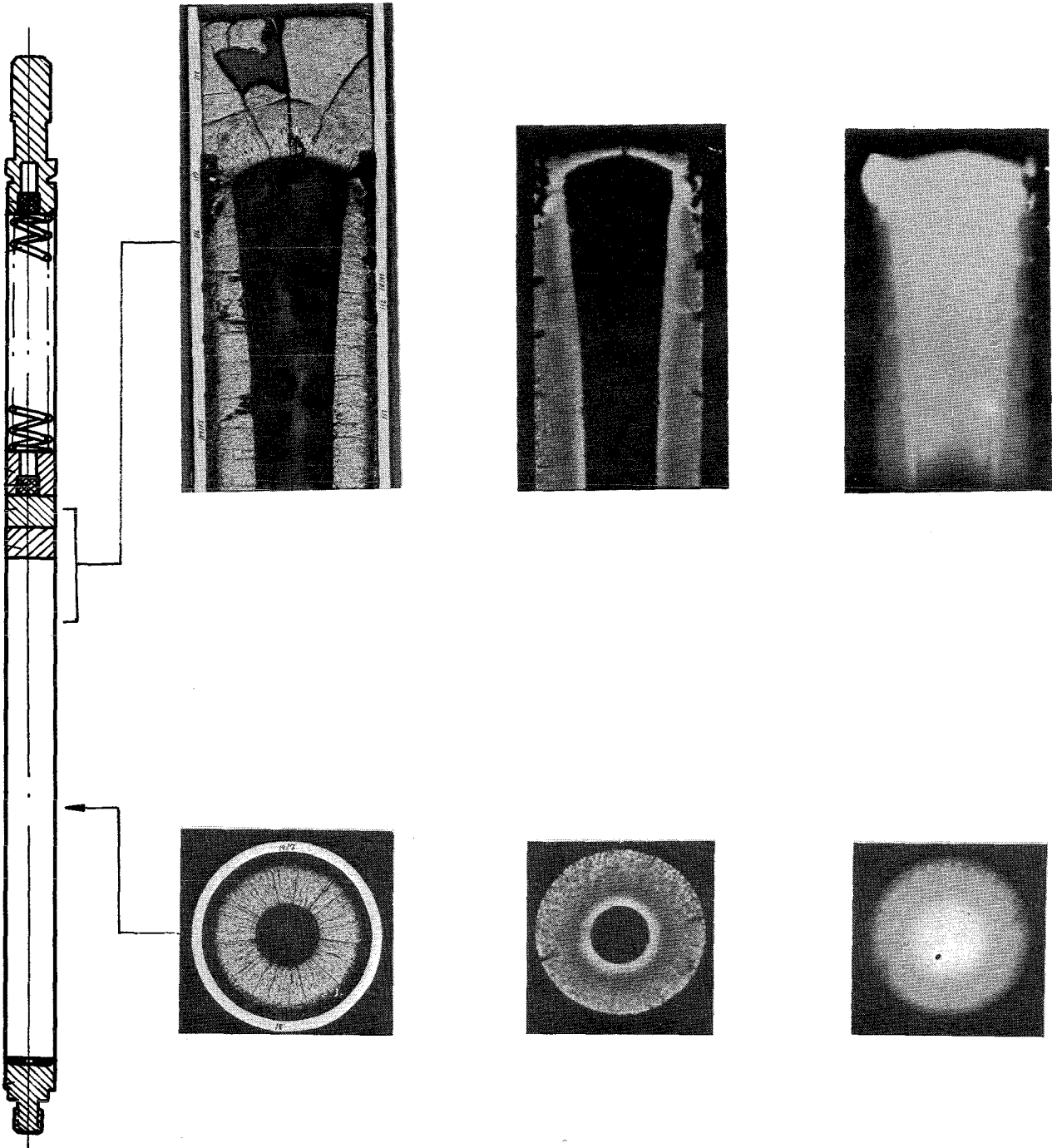
0,1mm

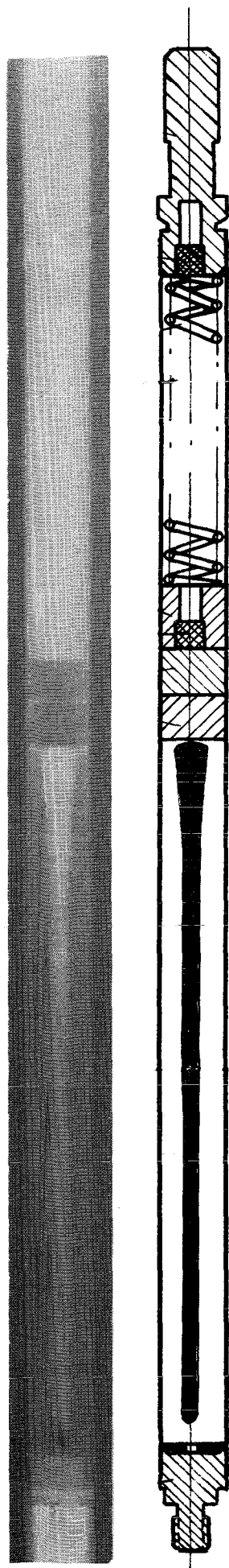


0,1mm



A





Prüfling 4A26

Brennstoff :

Form : Tabletten

Zusammensetzung : UO_2/PuO_2

Tablettendichte : 84,90% th.D.

Hülle :

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 7,4 mm

Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : 0,07 mm

Schmierdichte : 80,4% th.D.

Bestrahlung :

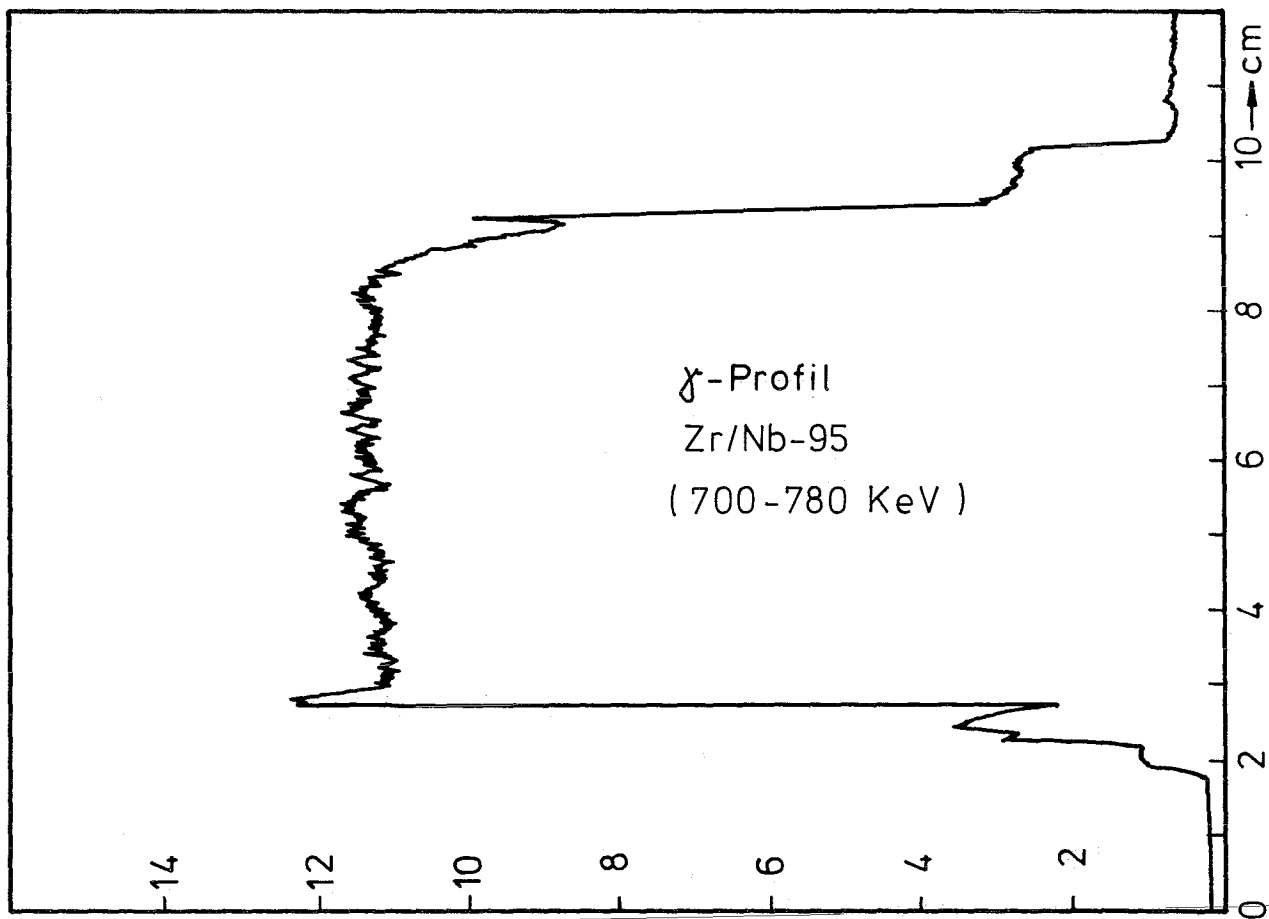
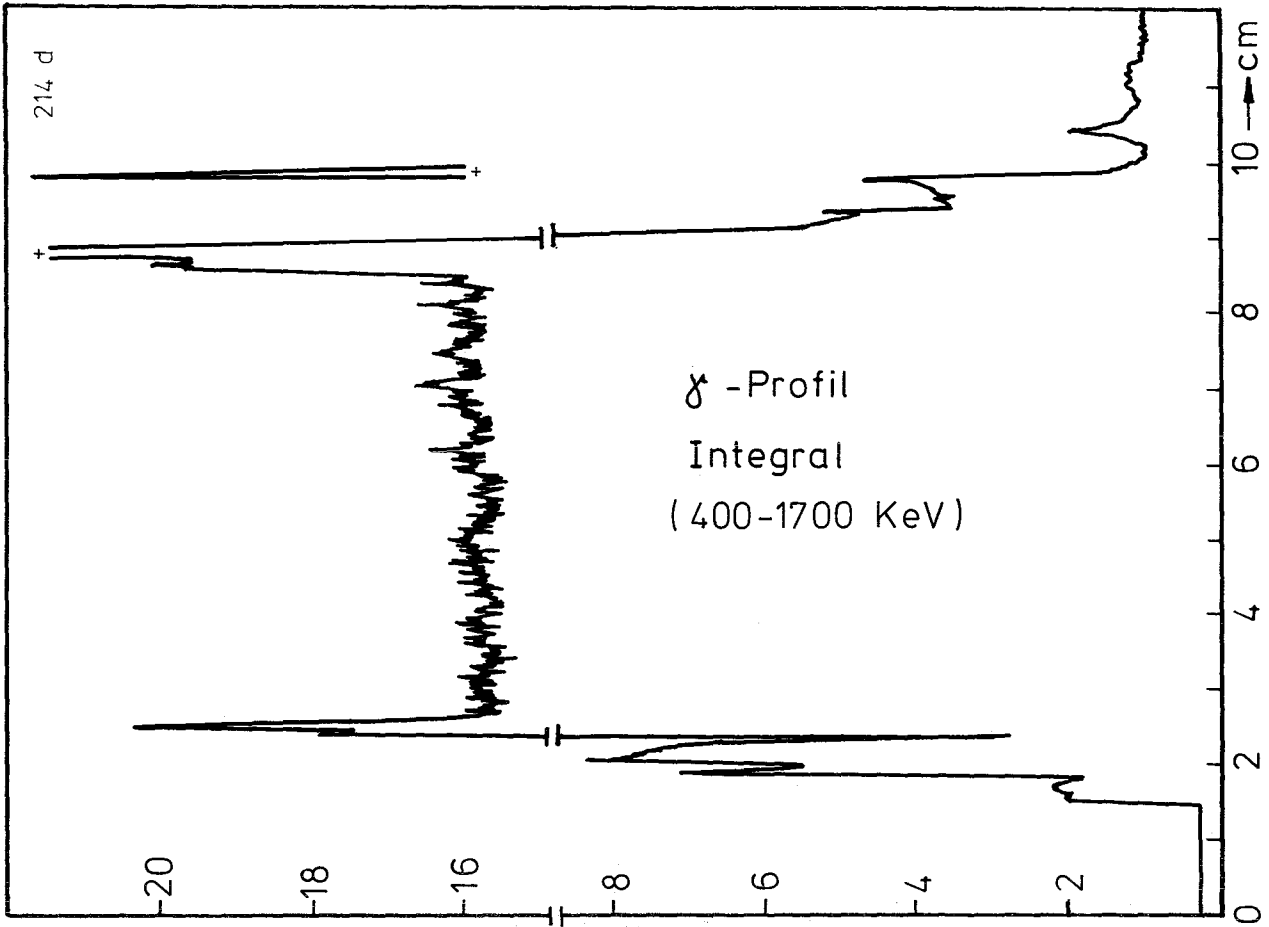
Einrichtung : Na/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4

Dauer : 522,9 Vollasttage

Ende : 13. 7. 70

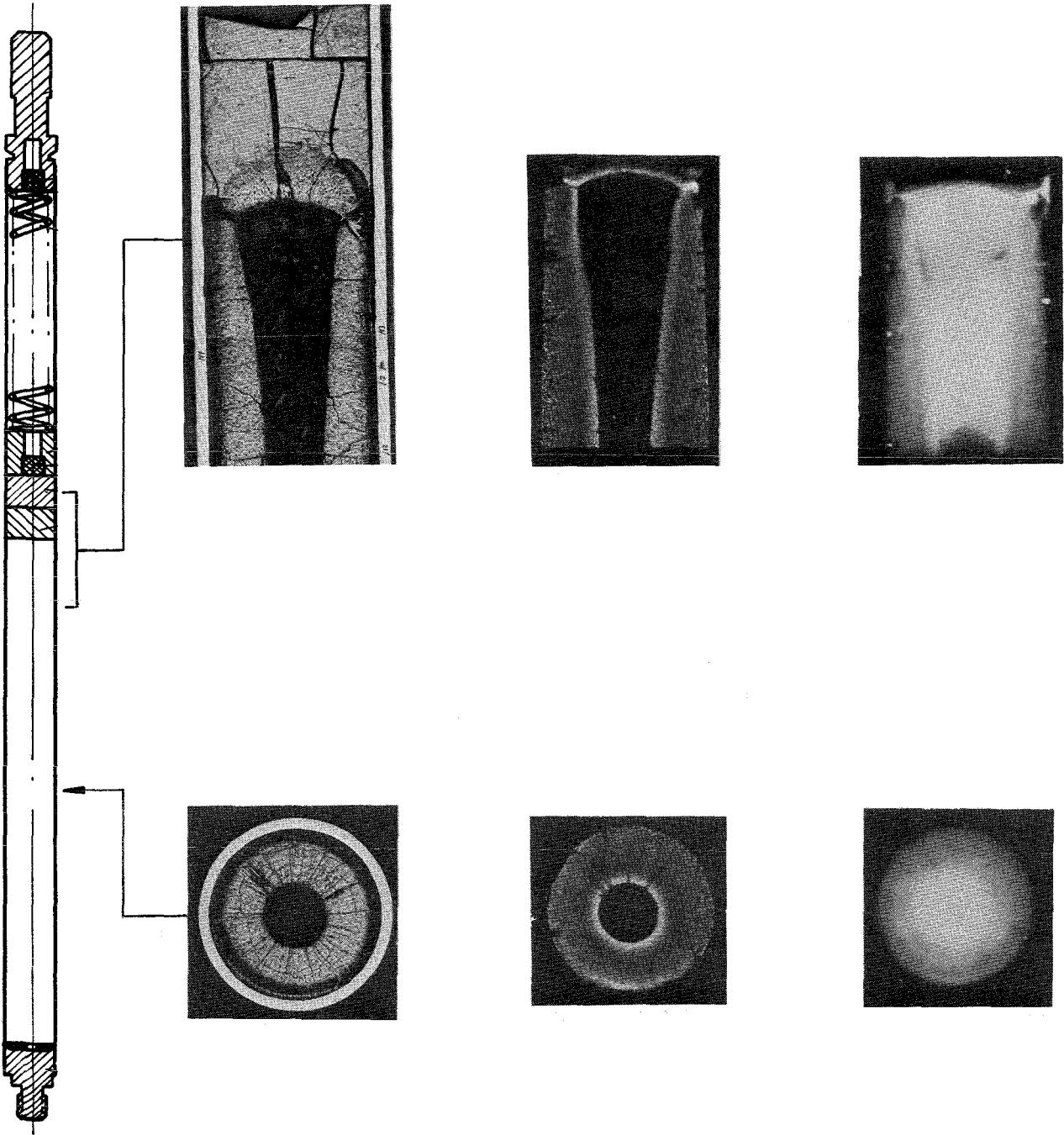
Rechn. Abbrand mittl. : 77,2 MWd/kg

Stableistung max./mittl. : 625/369 W/cm



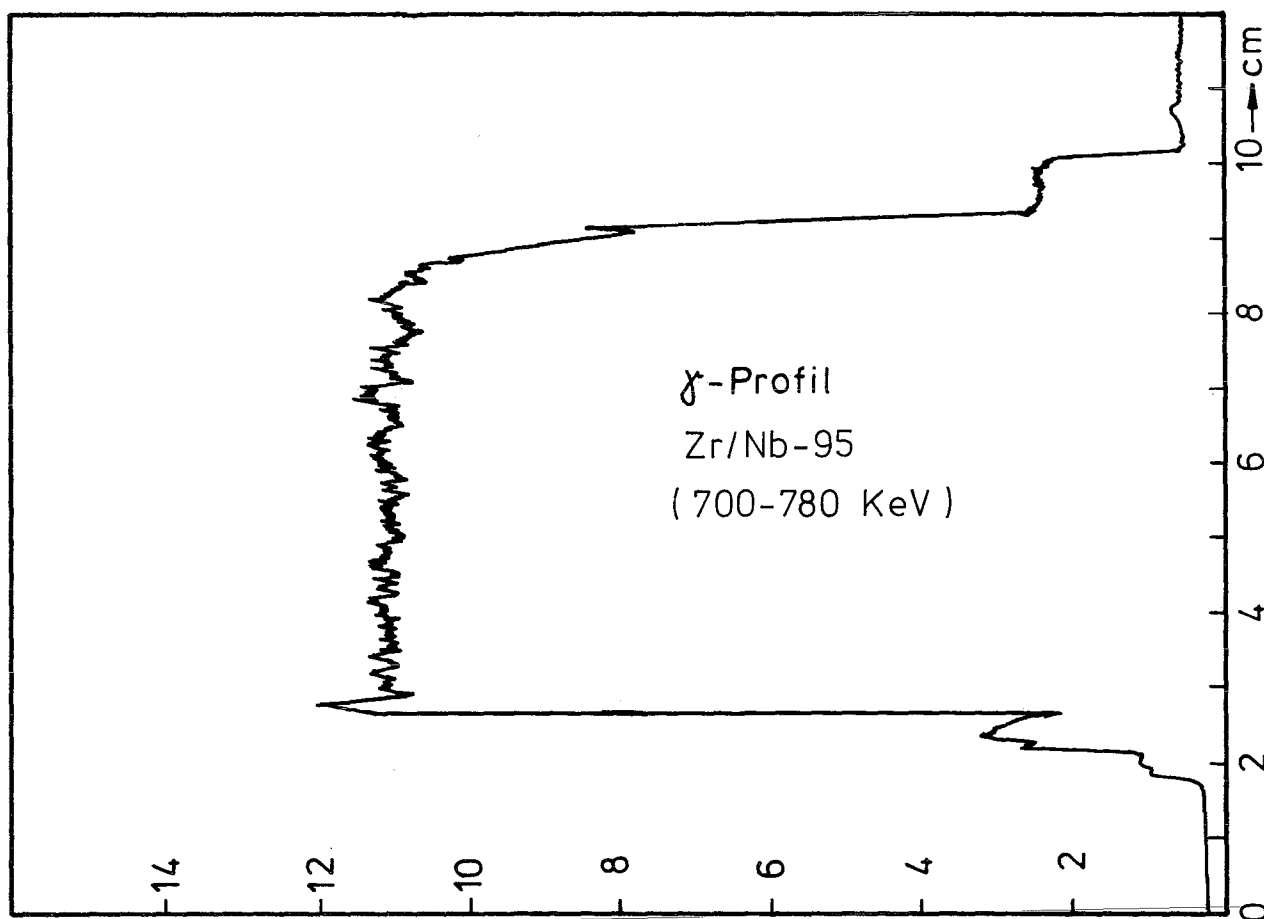
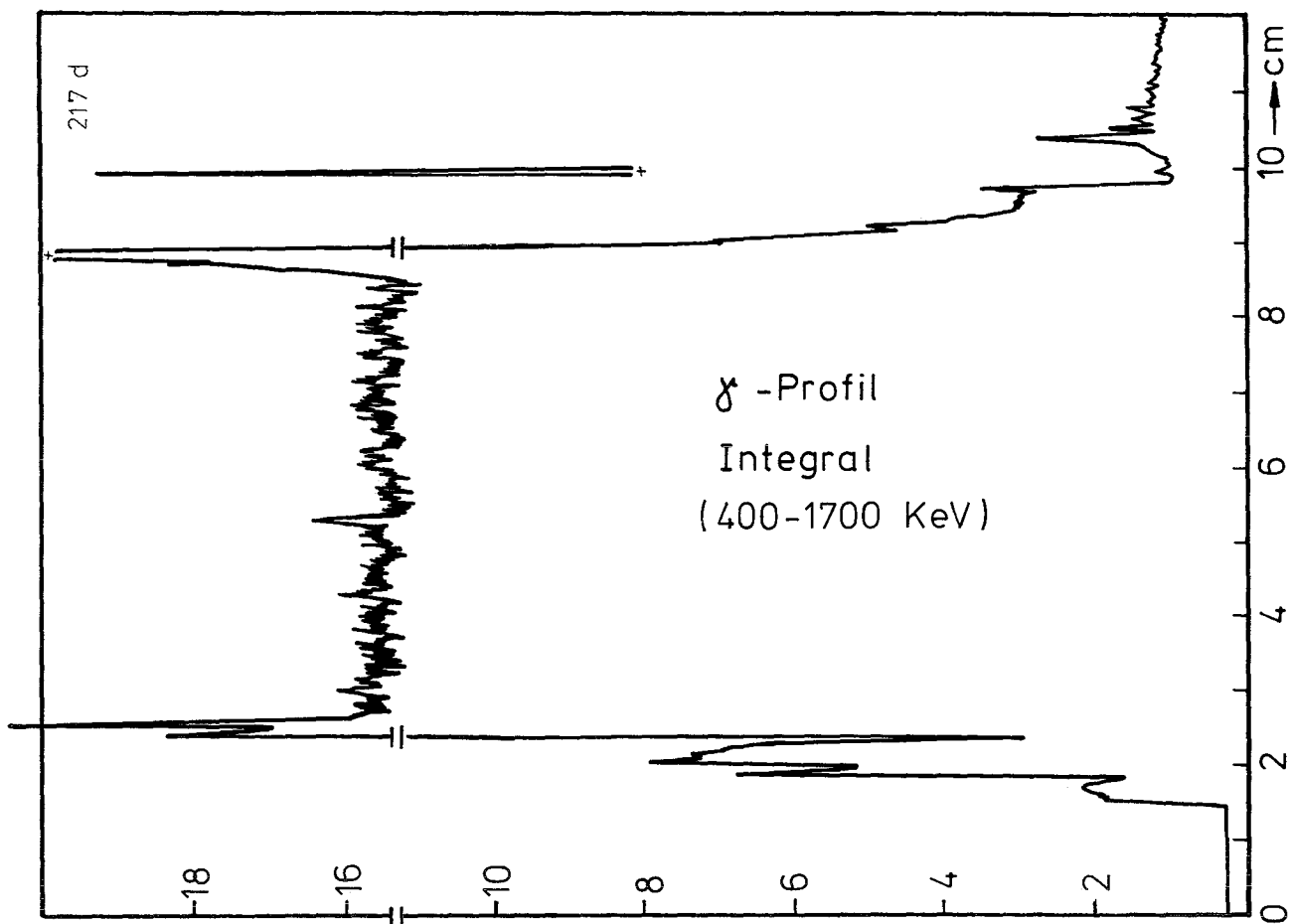
relative Einheiten

A



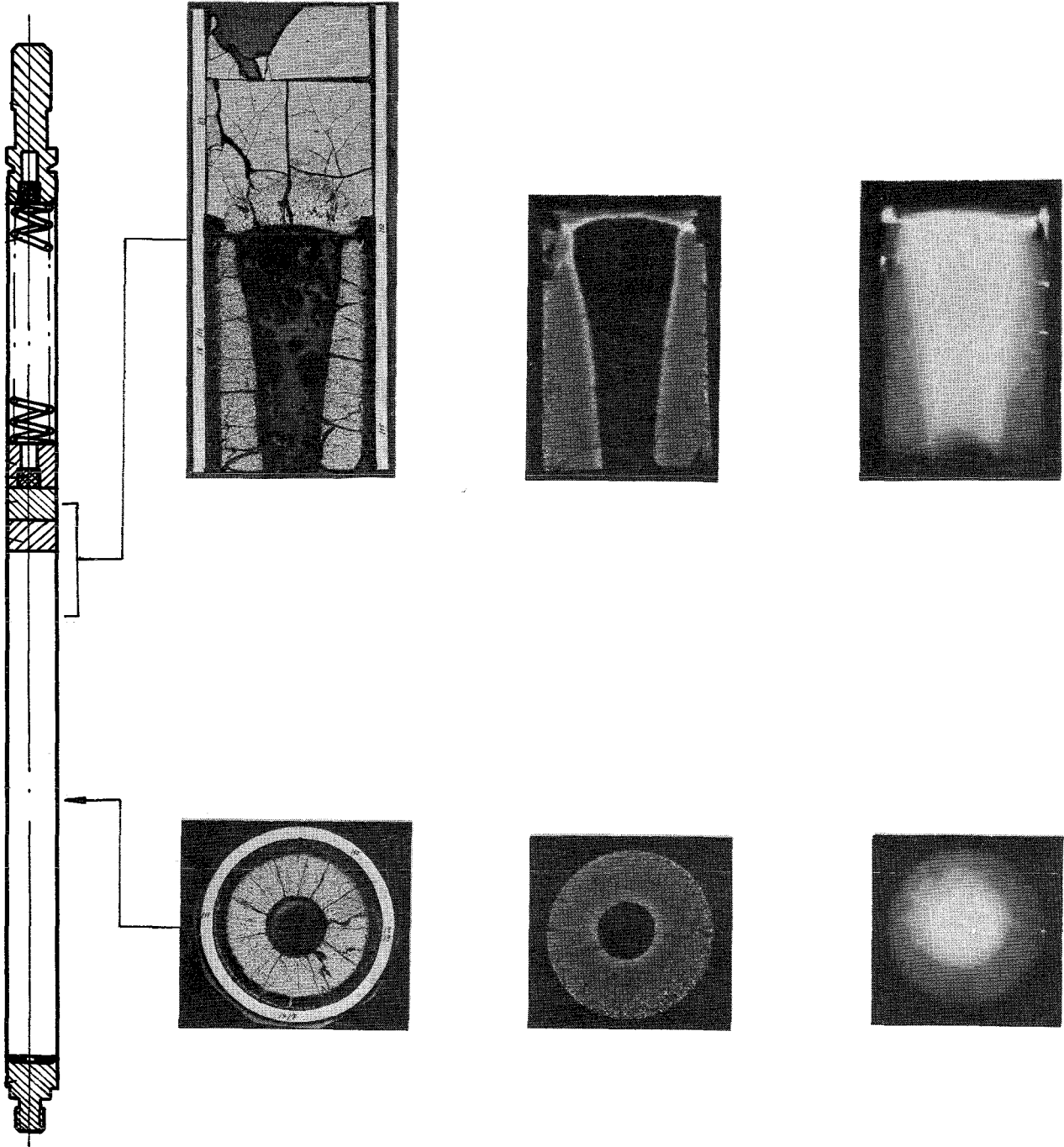
1

2



relative Einheiten

A



1

2



Prüfling 4A28

Brennstoff :

Form : Tabletten
Zusammensetzung : UO_2/PuO_2
Tablettendichte : 84,35% th.D.

Hülle :

Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

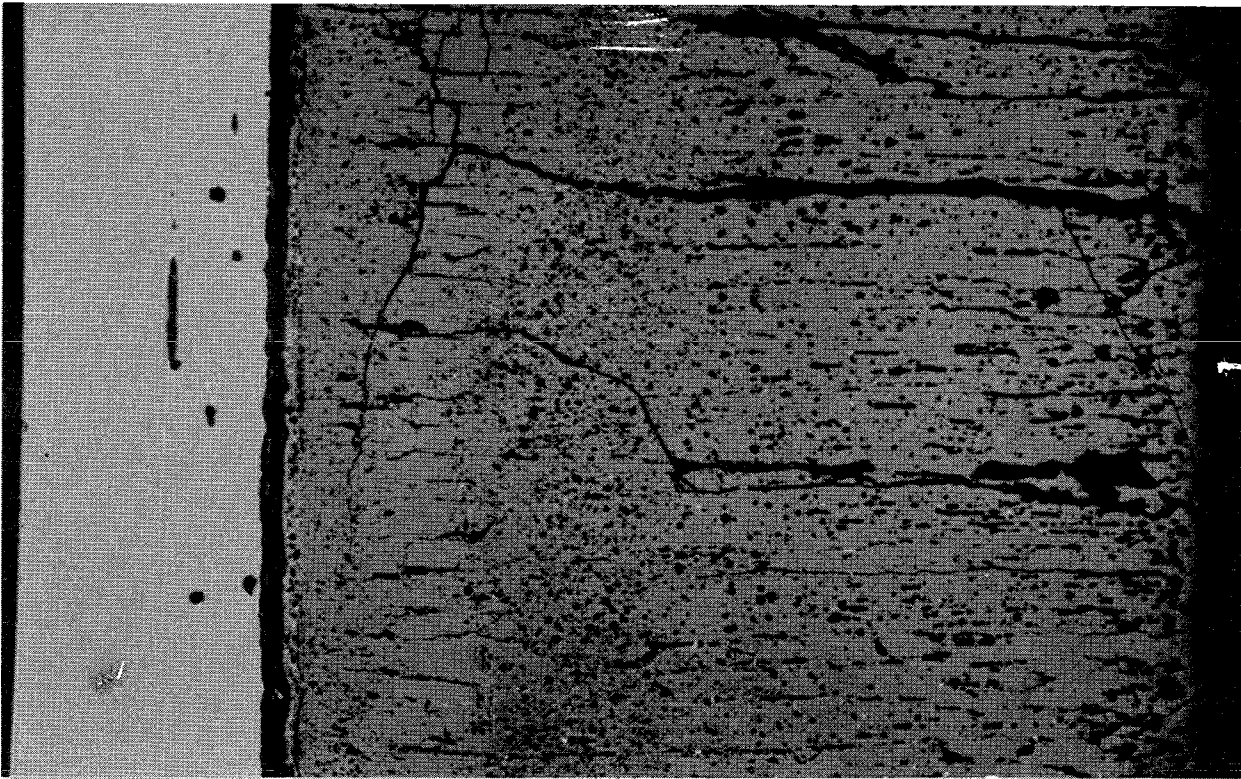
Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,07 mm
Schmierdichte : 80,4% th.D.

Bestrahlung :

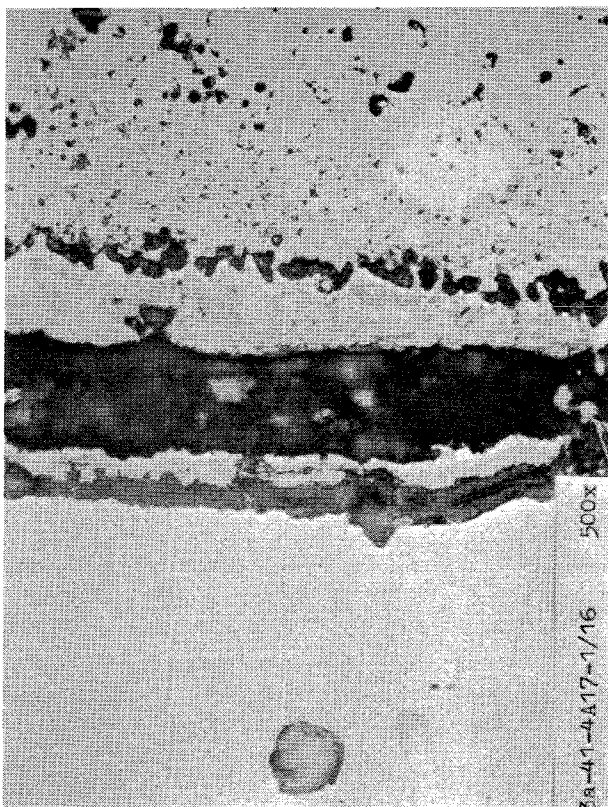
Einrichtung : Na/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4
Dauer : 522,9 Vollasttage
Ende : 13. 7. 70
Rechn. Abbrand mittl. : 81,3 MWd/kg
Stableistung max./mittl. : 568/390 W/cm

-A/187-
zu Prüfling 4A/17

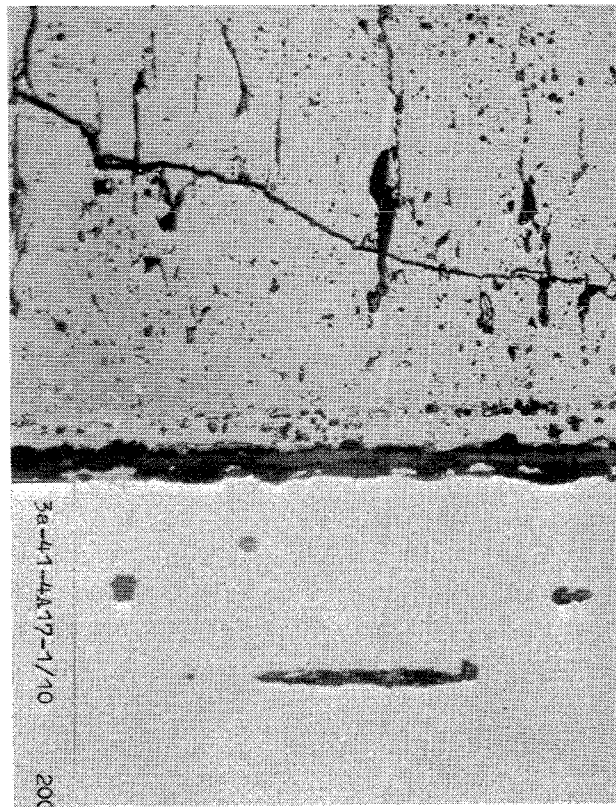
A1



0,1mm

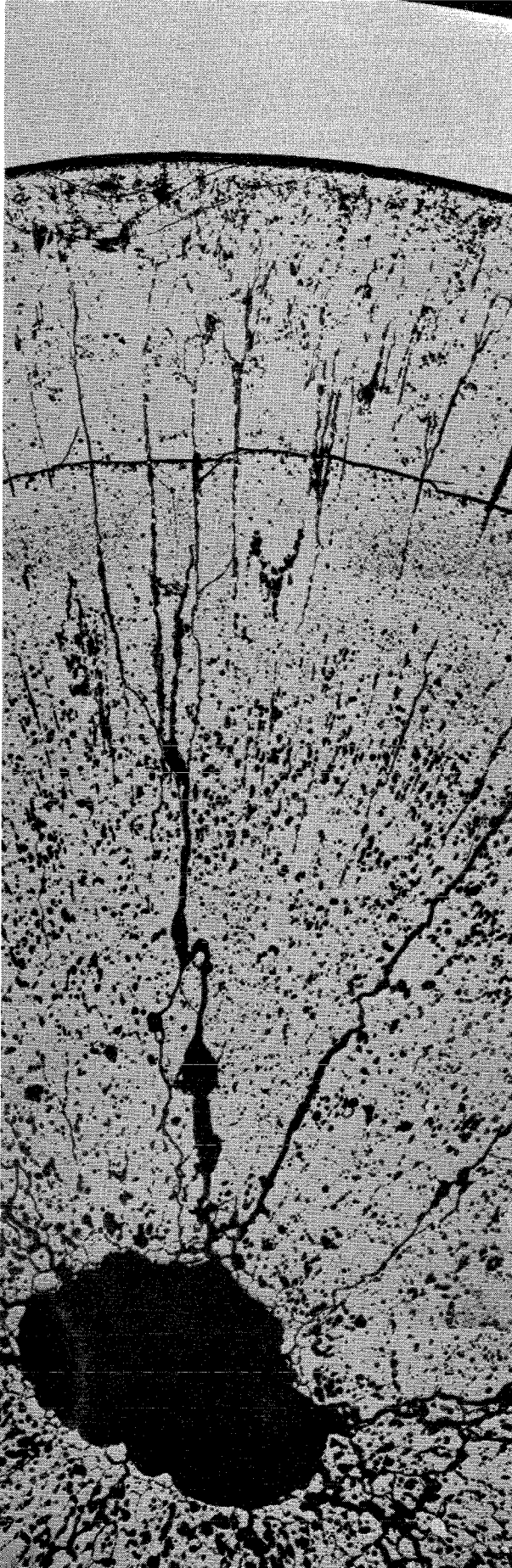


0,1mm



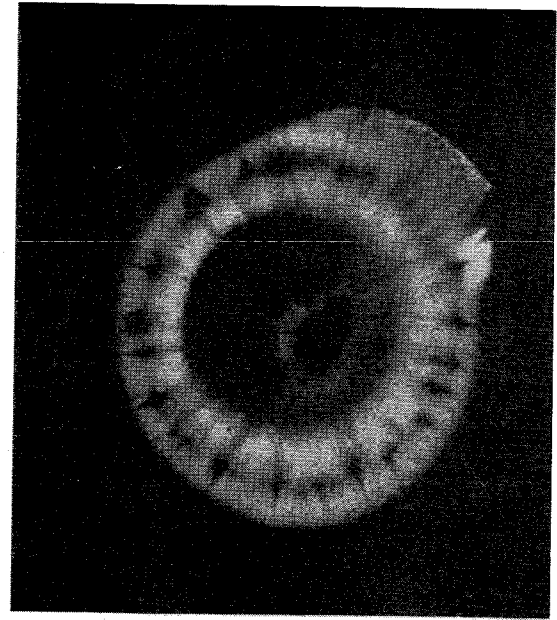
0,1mm

-A/188-
zu Prüfling 4A/17
A2

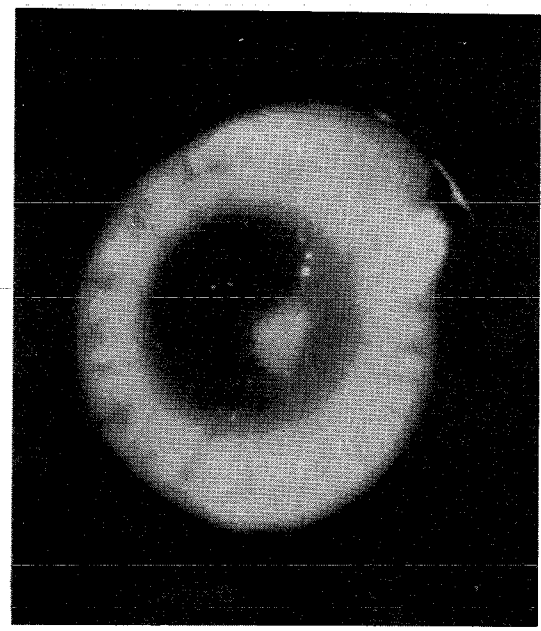


0,1mm

B2

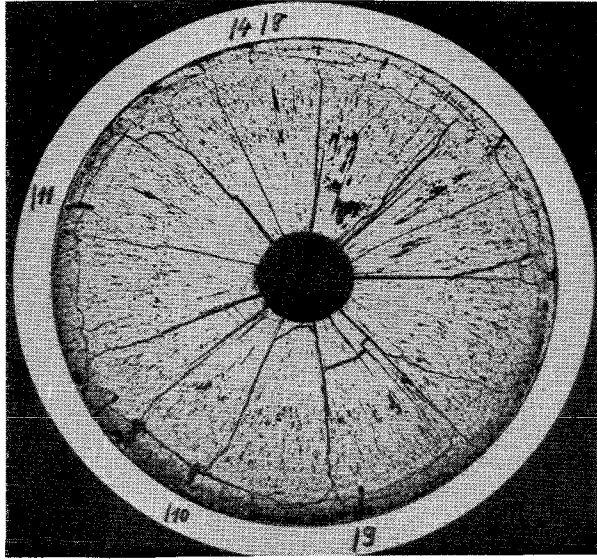


C2

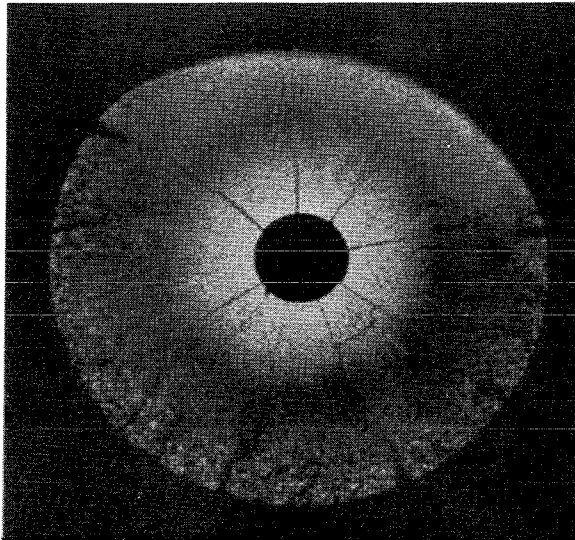


1mm

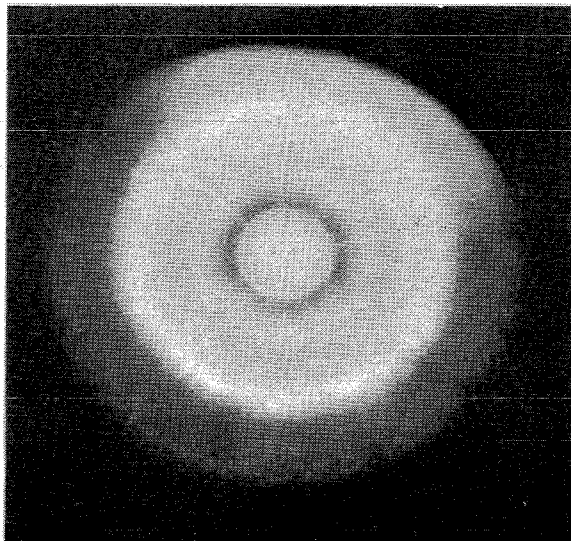
-A/189-
zu Prüfling 4A/17



A3



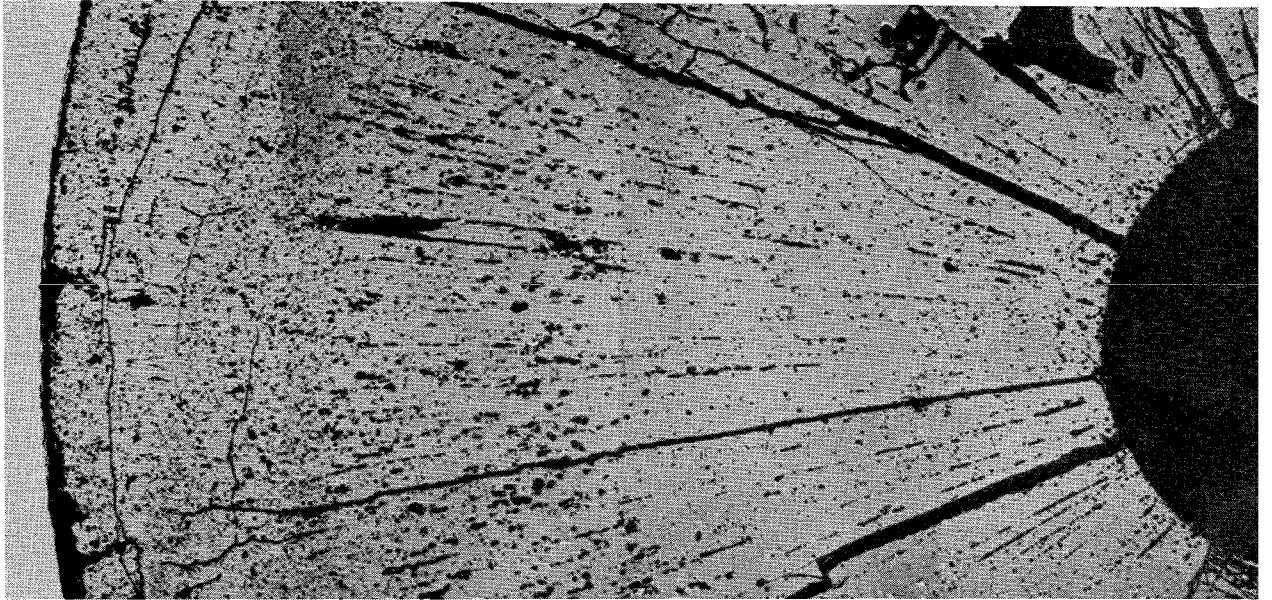
B3



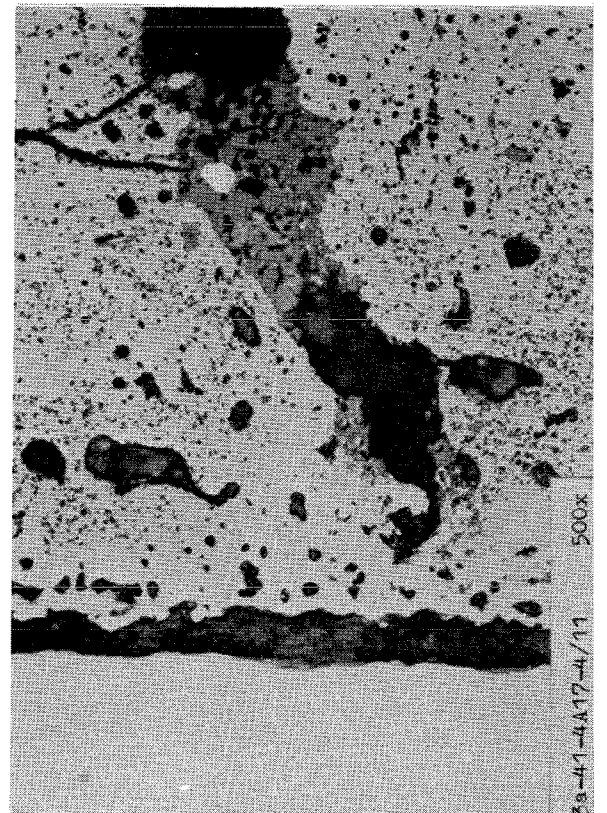
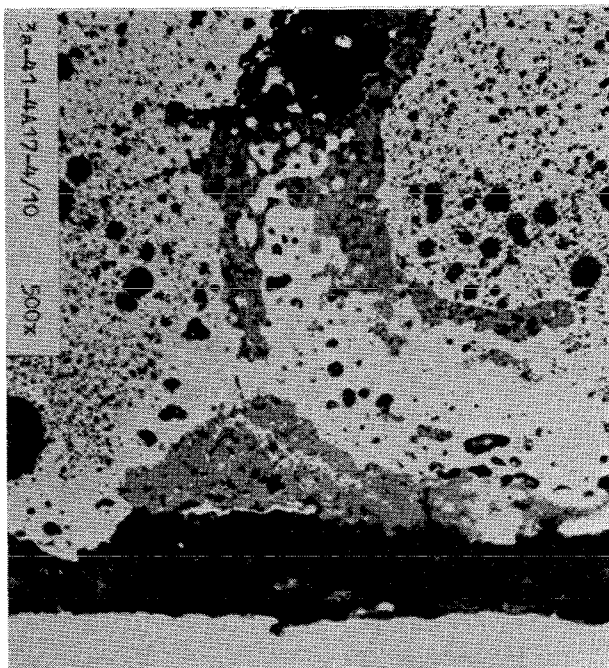
C3

1mm

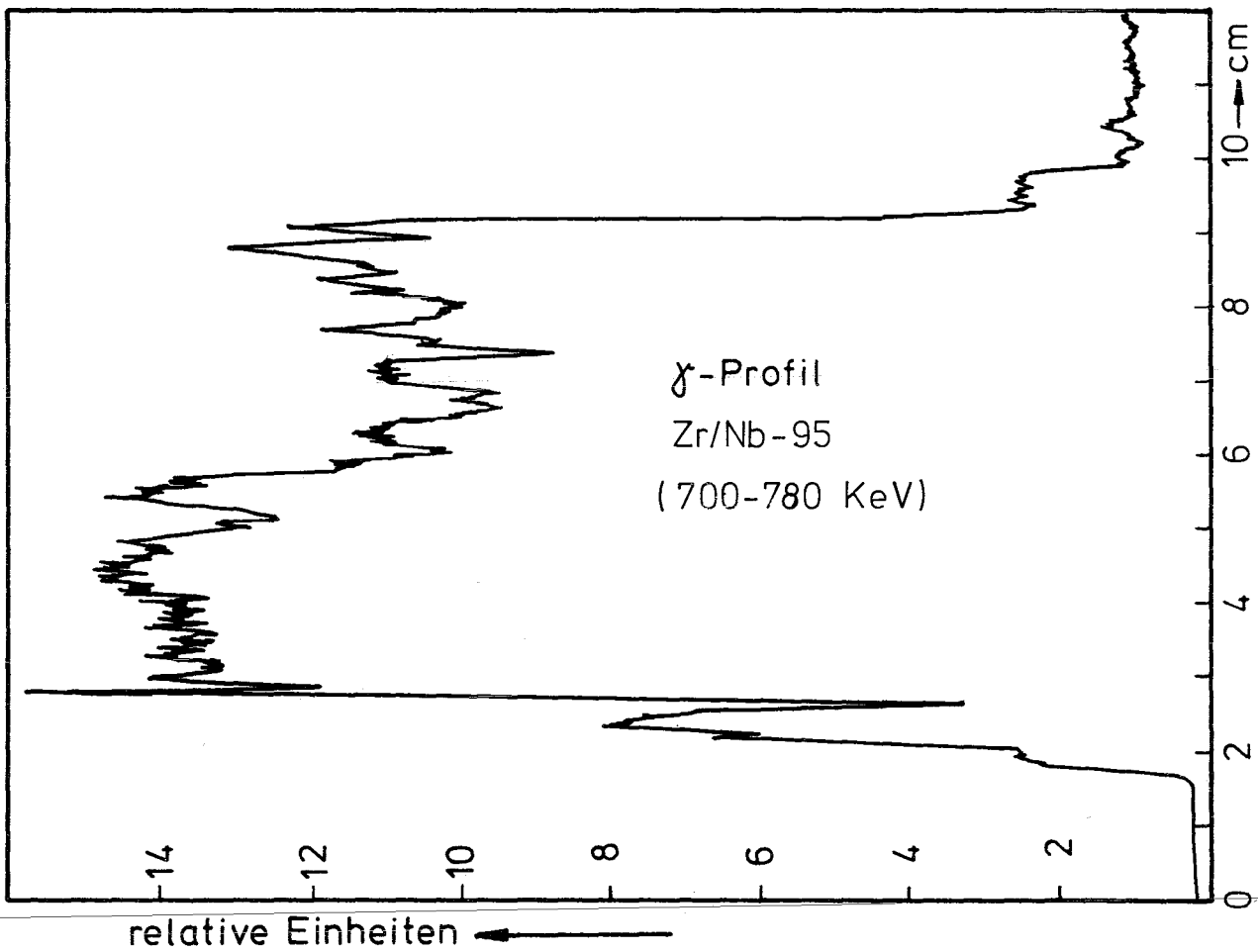
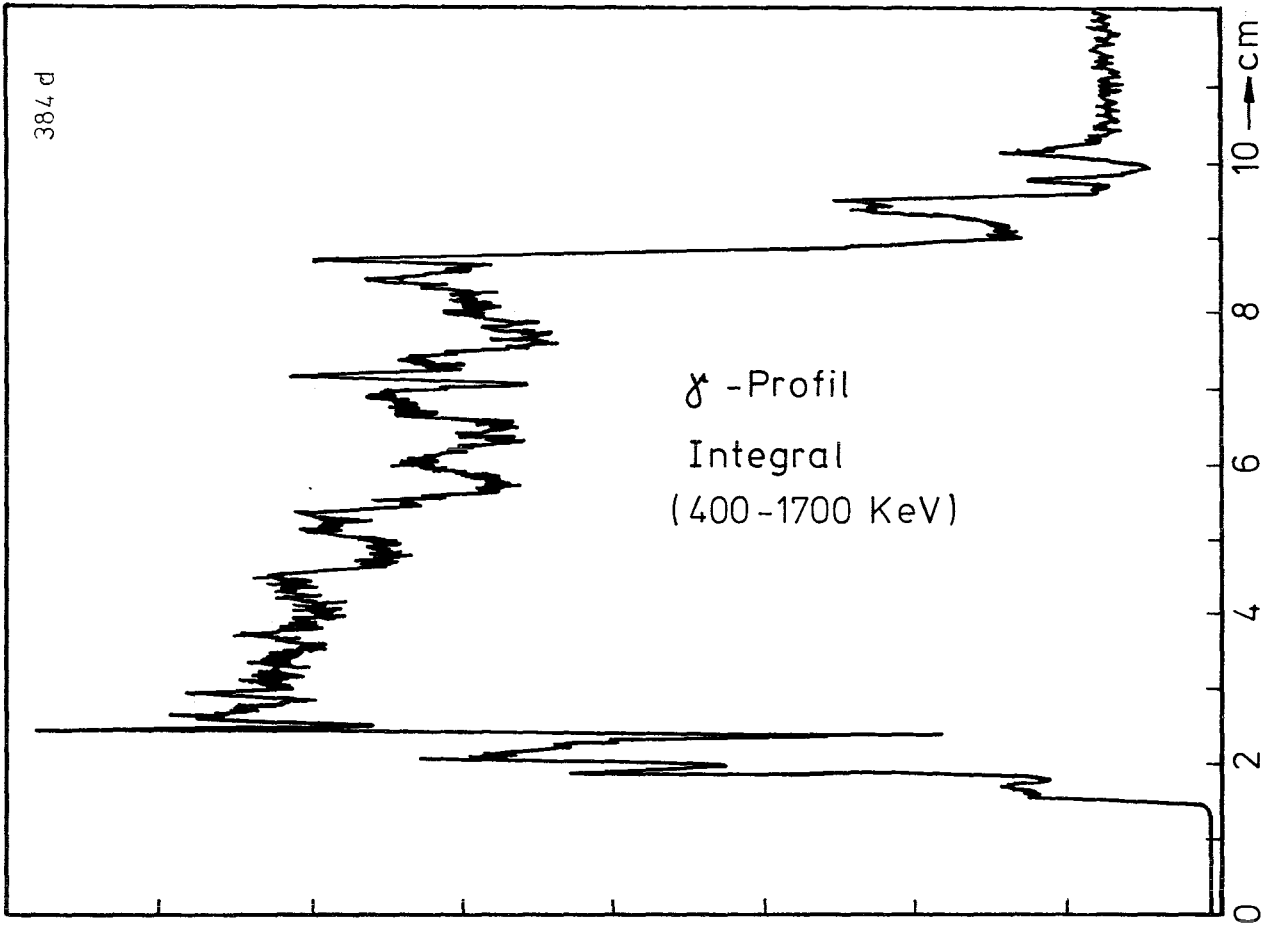
-A/190-
zu Prüfling 4A/17
A3



0,1 mm



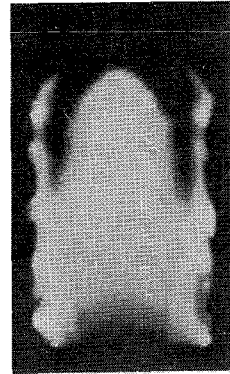
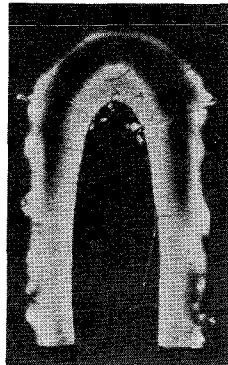
0,1 mm



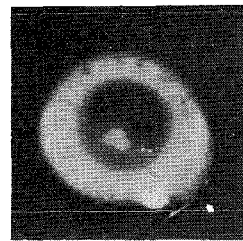
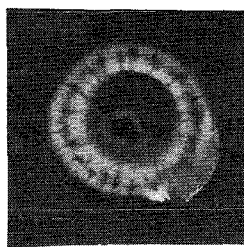
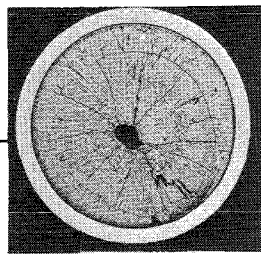
A

B

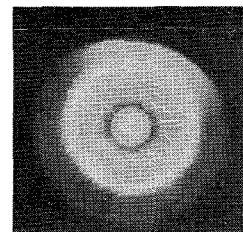
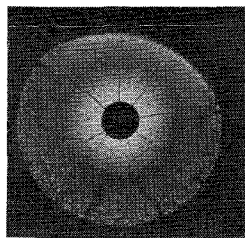
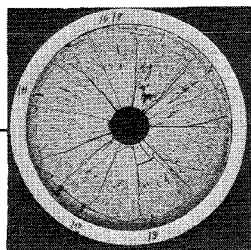
C



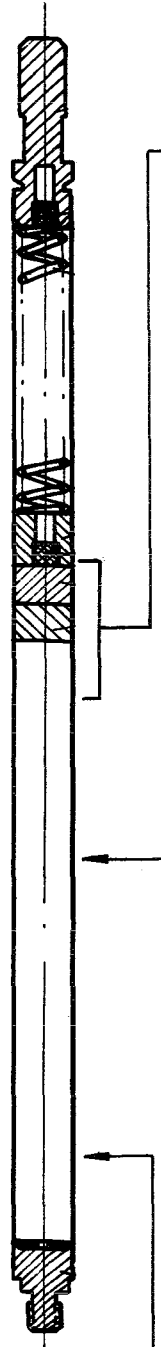
1



2



3





Prüfling 4A17

Brennstoff :

Form : Tabletten
Zusammensetzung : UO_2/PuO_2
Tablettendichte : 84,25% th.D.

Hülle :

Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,5 mm

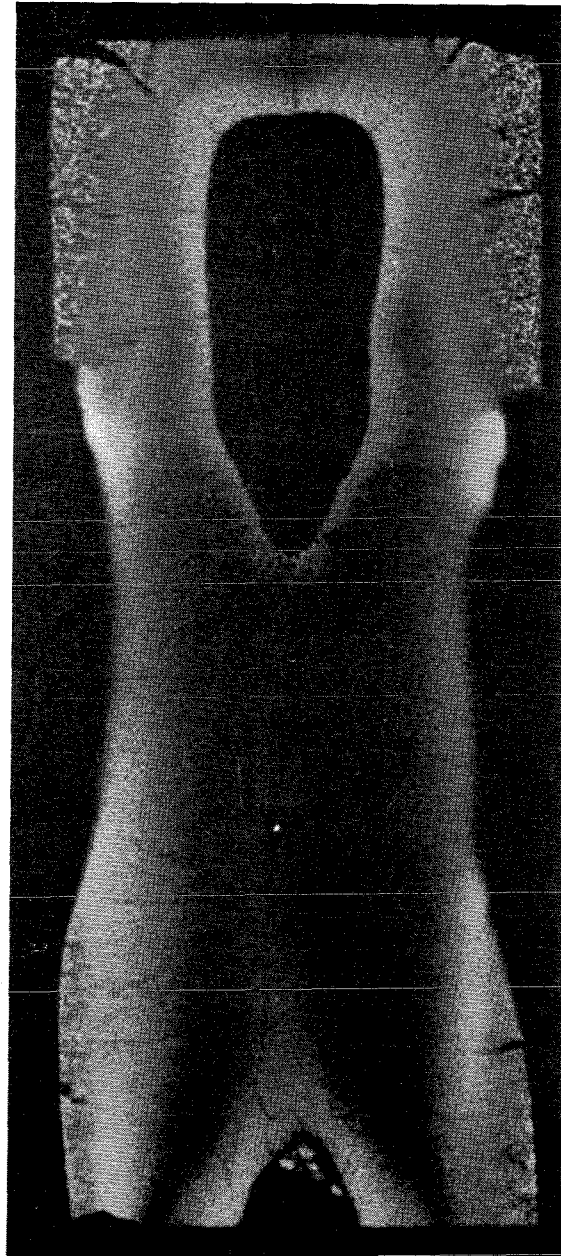
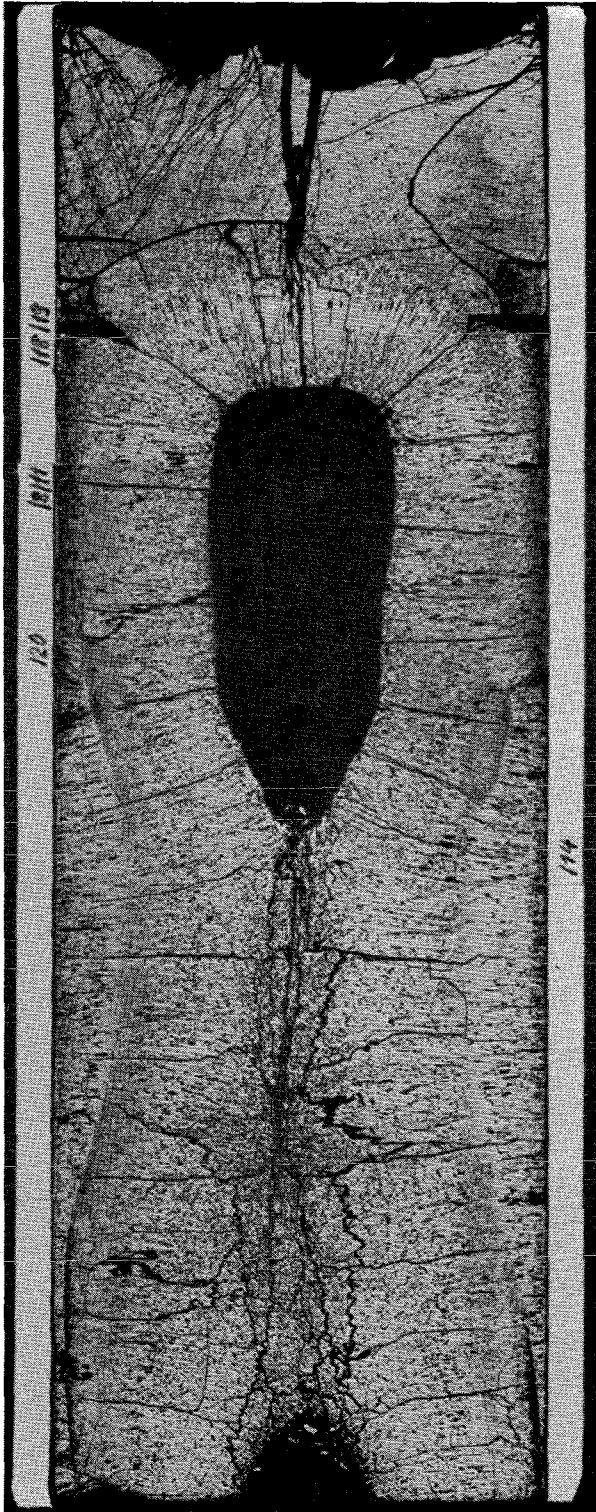
Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,07 mm
Schmierdichte : 80,4% th.D.

Bestrahlung :

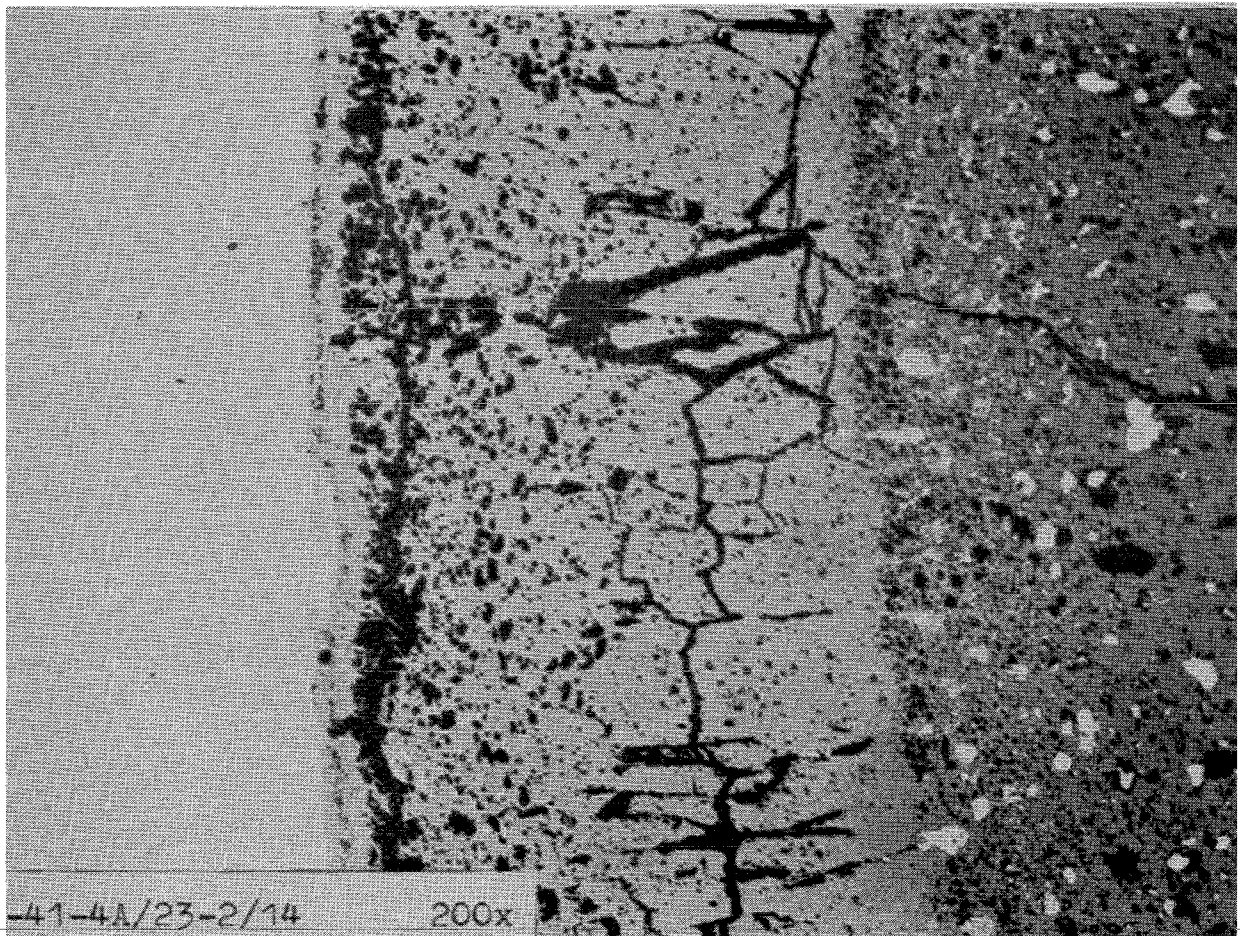
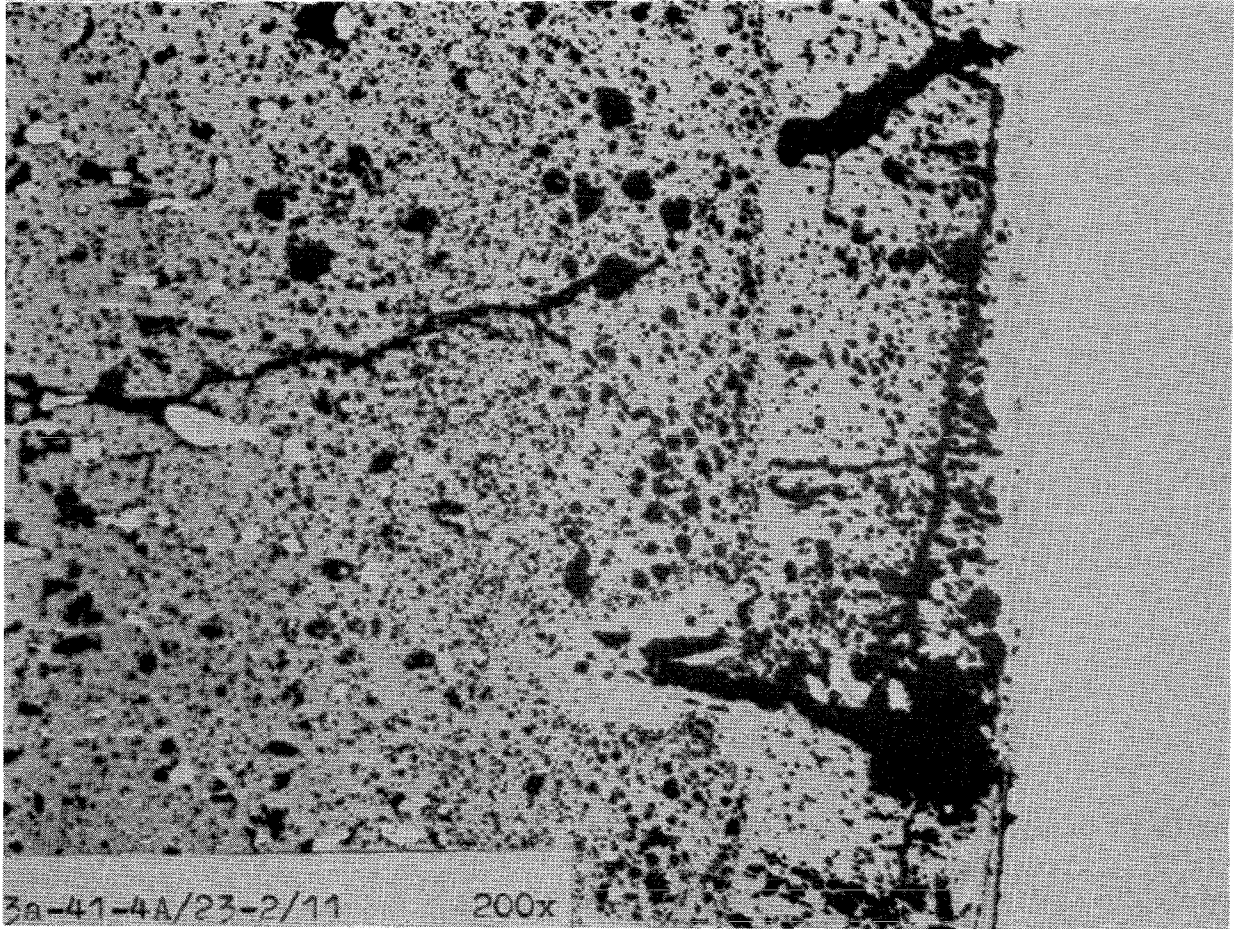
Einrichtung : Na/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4
Dauer : 359,7 Vollasttage
Ende : 15. 12. 69
Rechn. Abbrand mittl. : 51,2 MWd/kg
Stableistung max./mittl. : 593/357 W/cm

-A/193-
zu Prüfling 4A/23
A1



1mm

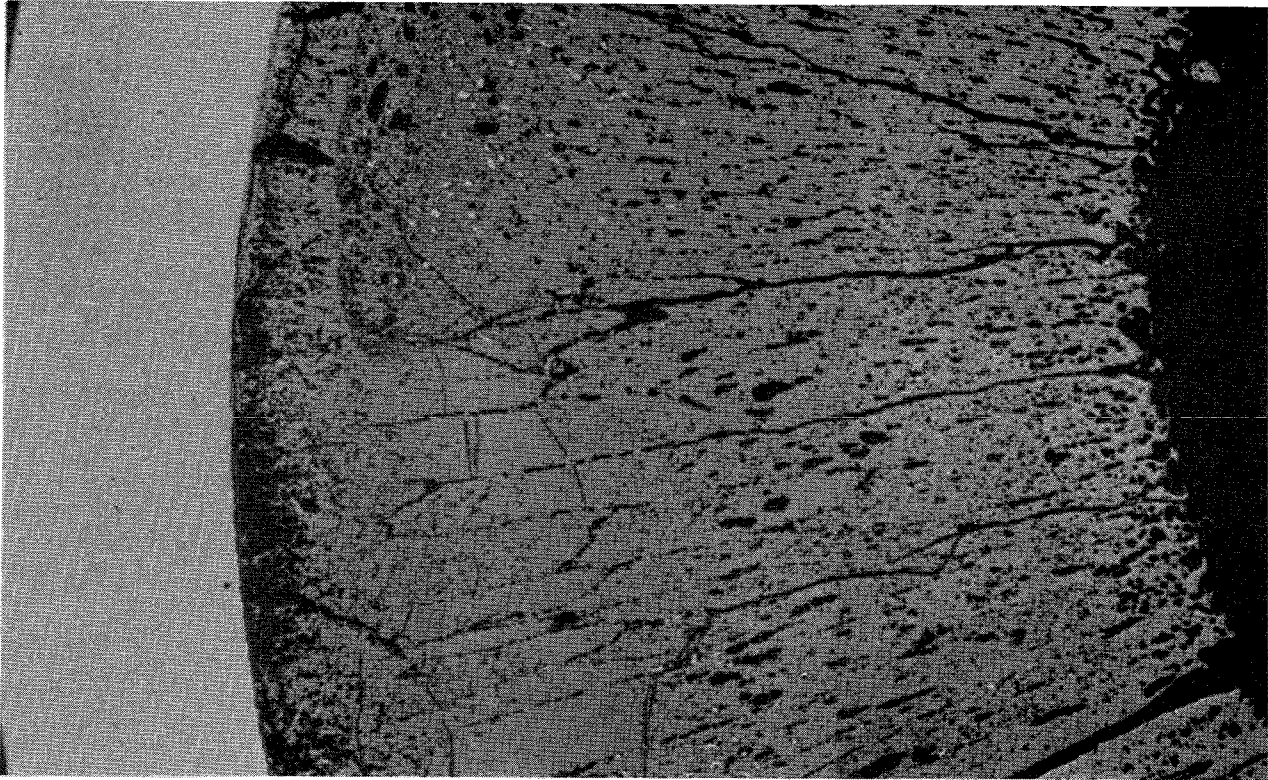
-A/194-
zu Prüfling 4A/23
A2



0,1 mm

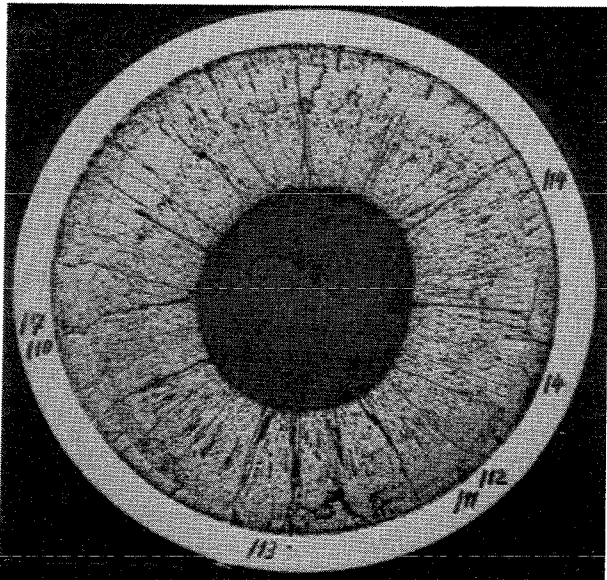
-A/195-
zu Prüfling 4A/23

A2

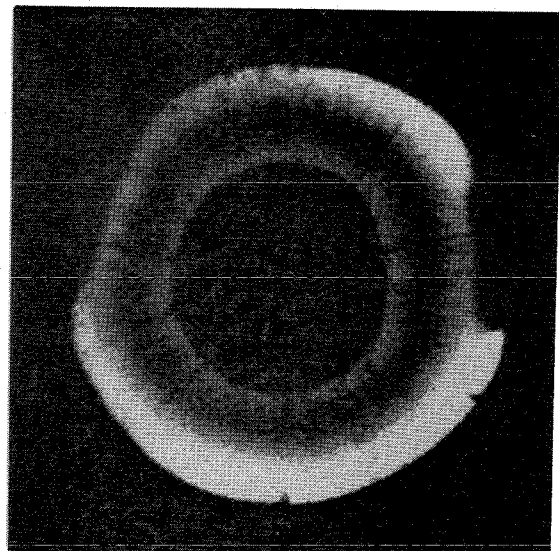


—|—
0,1 mm

A2

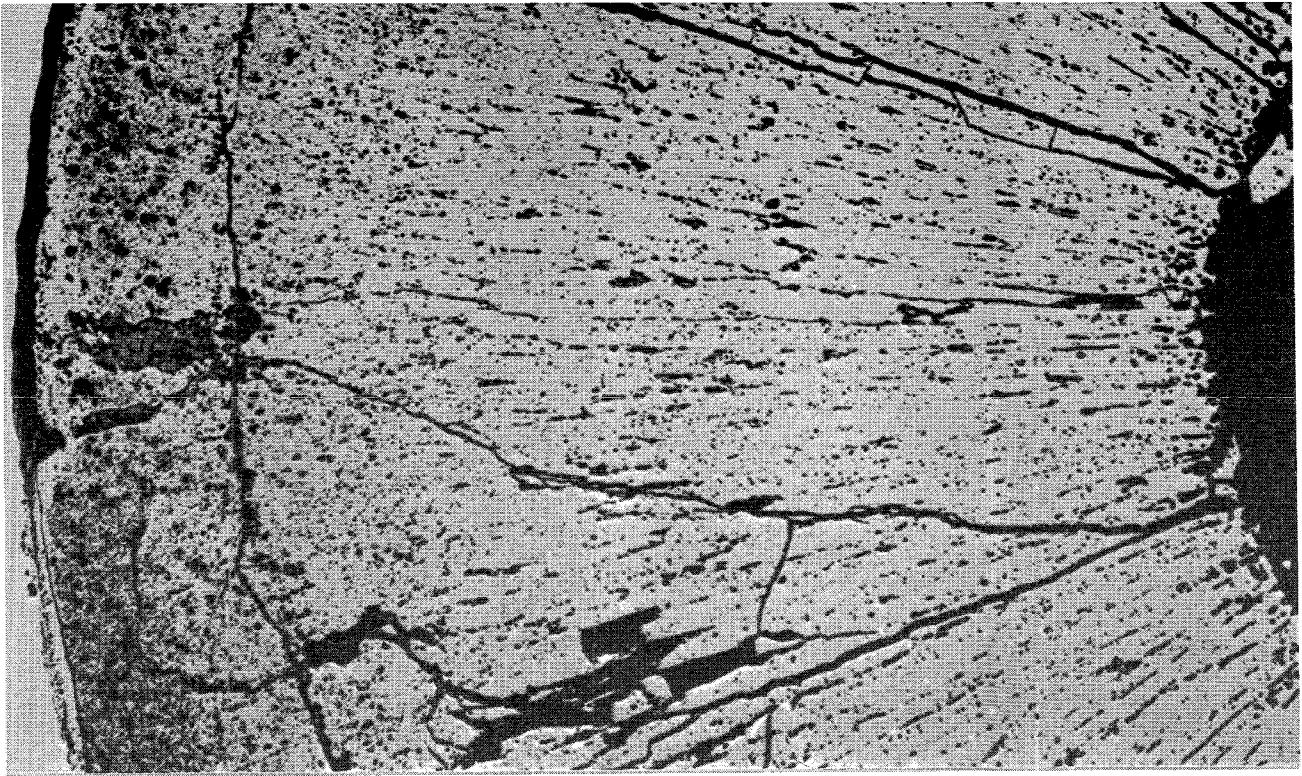


B2

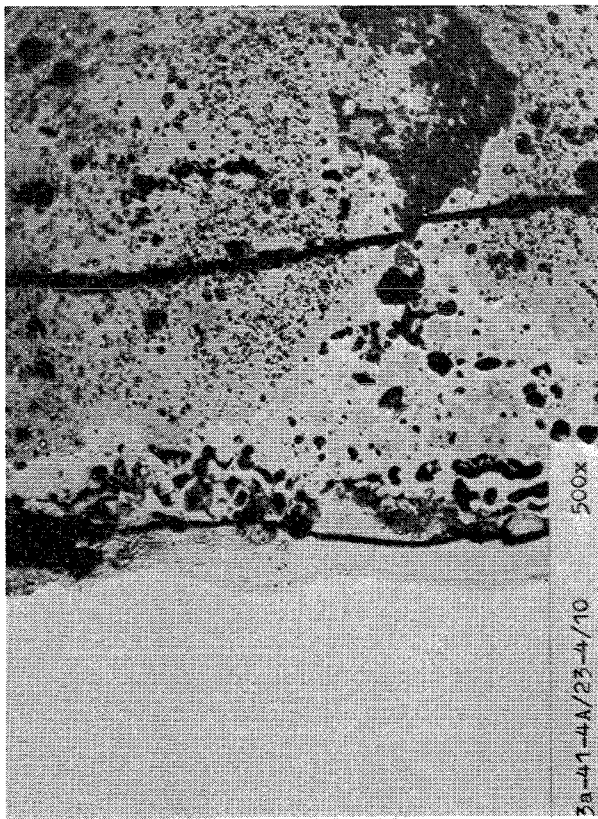


—|—
1 mm

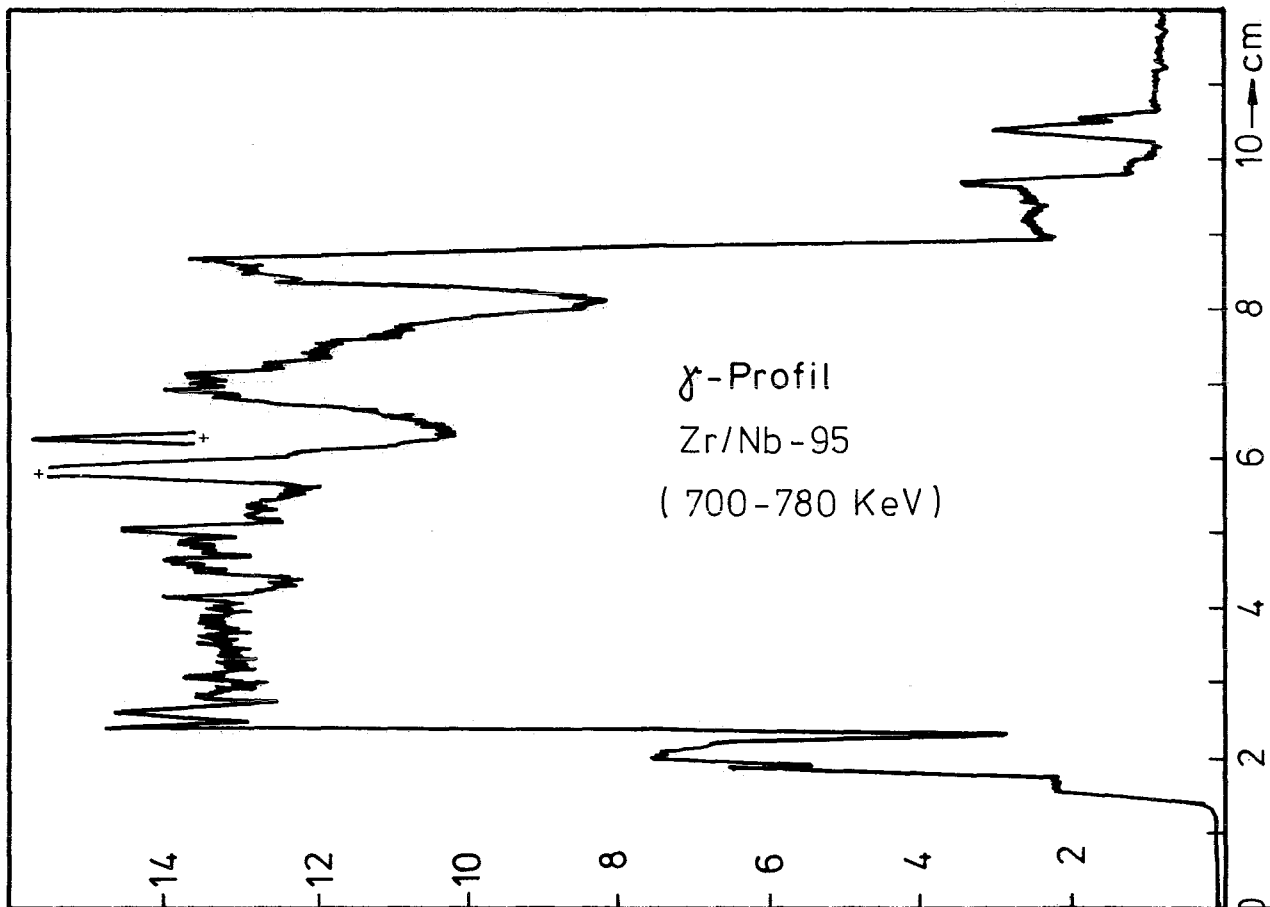
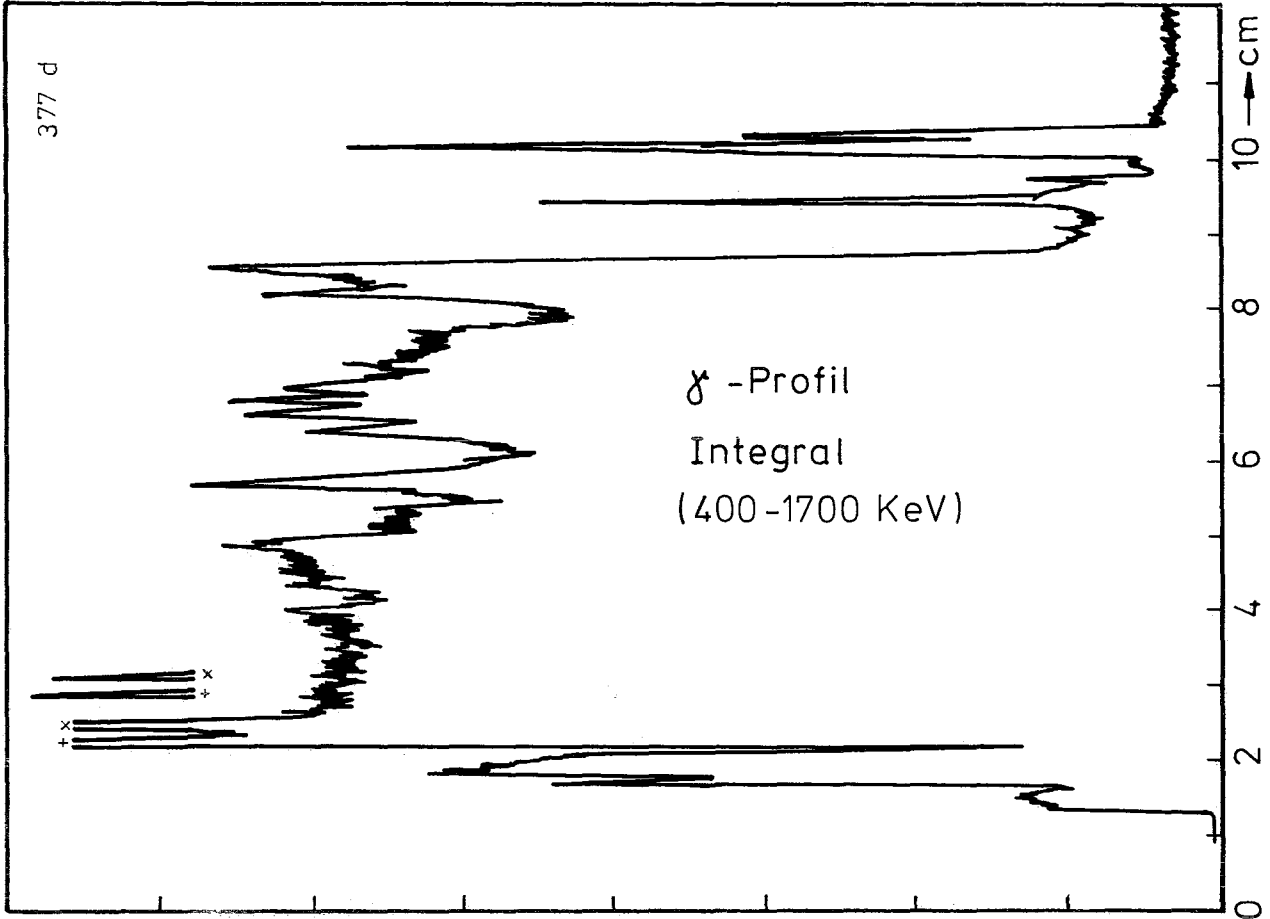
-A/196-
zu Prüfling 4A/23
A3



0,1mm



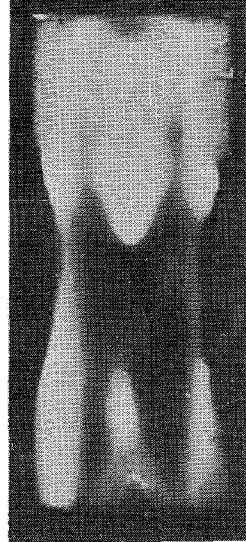
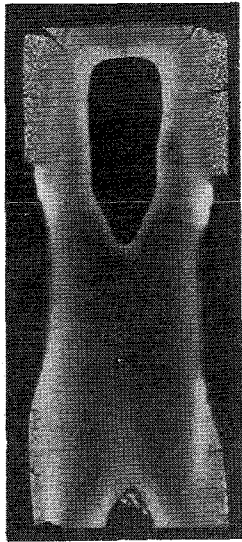
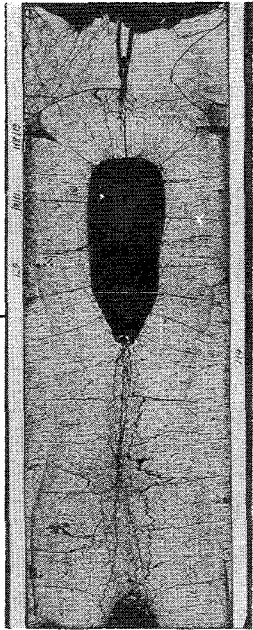
0,1mm



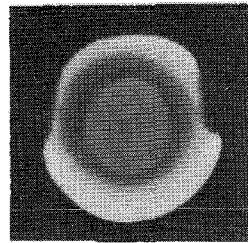
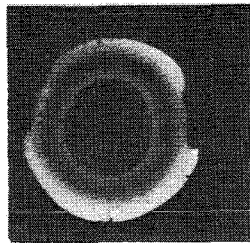
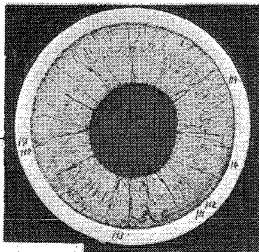
relative Einheiten \leftarrow

A

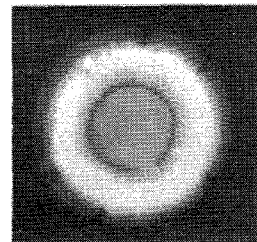
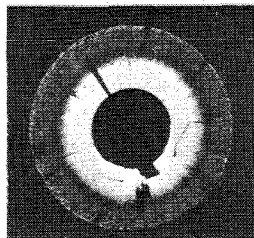
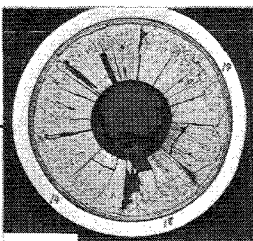
B



1



2



3





Prüfling 4A23

Brennstoff :

Form : Tabletten
Zusammensetzung : UO_2/PuO_2
Tablettendichte : 84,82% th.D.

Hülle :

Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,5 mm

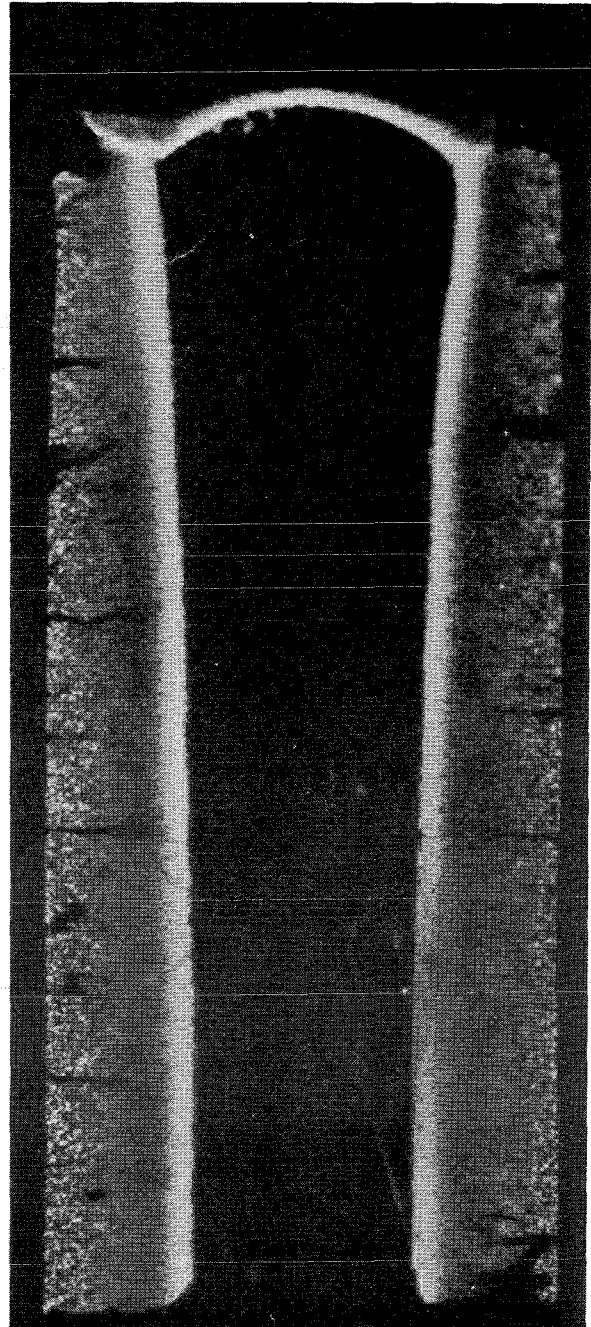
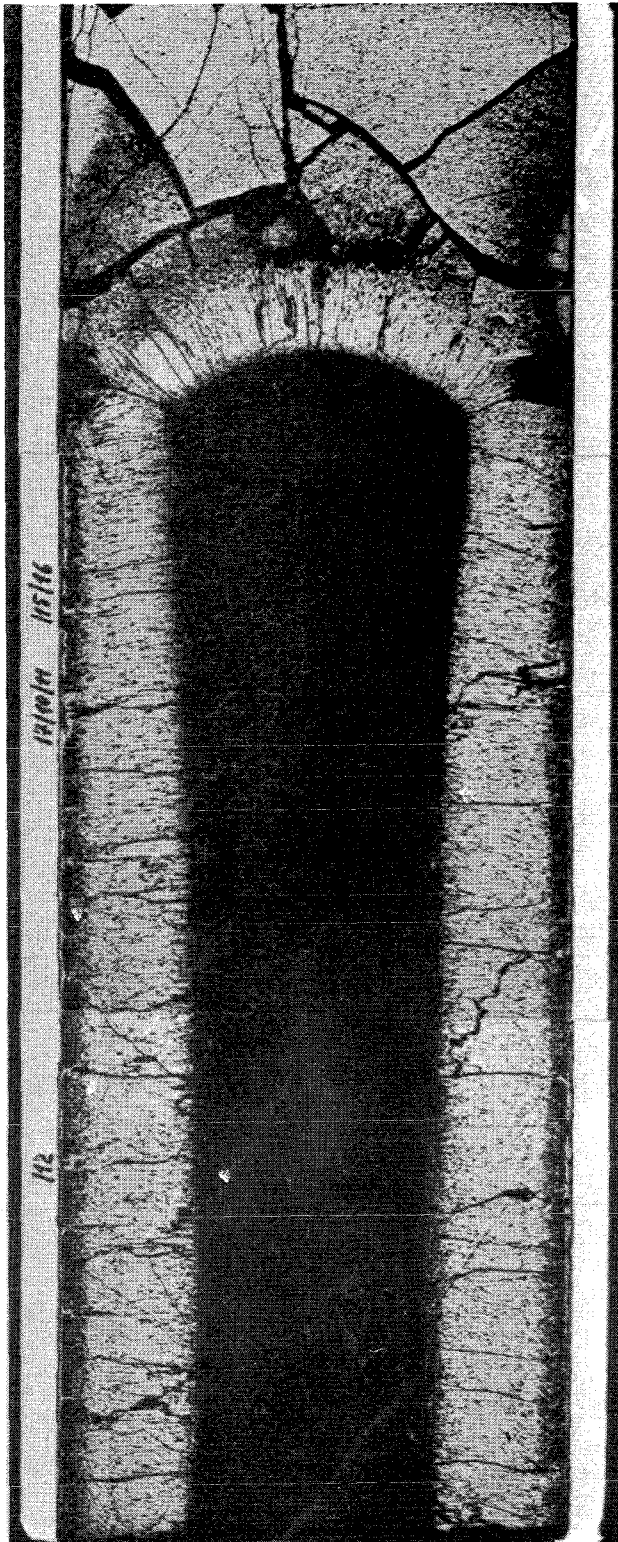
Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,07 mm
Schmierdichte : 80,4% th.D.

Bestrahlung :

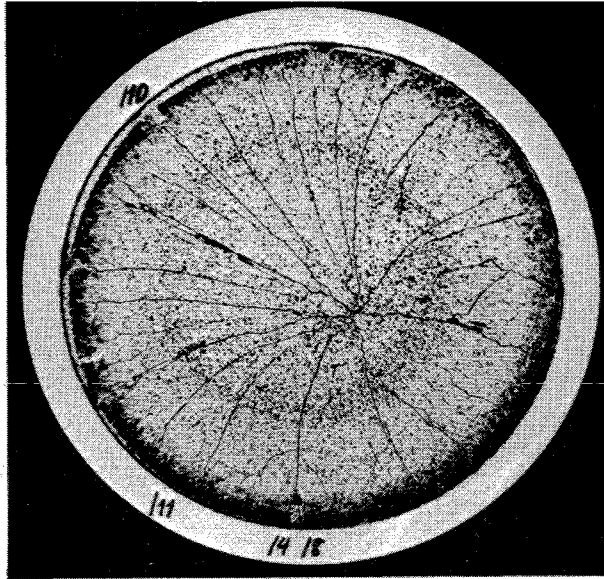
Einrichtung : Na/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4
Dauer : 359,7 Vollasttage
Ende : 15. 12. 69
Rechn. Abbrand mittl. : 57,5 MWd/kg
Stableistung max./mittl. : 616/401 W/cm

-A/199-
zu Prüfling 4A/18
A1

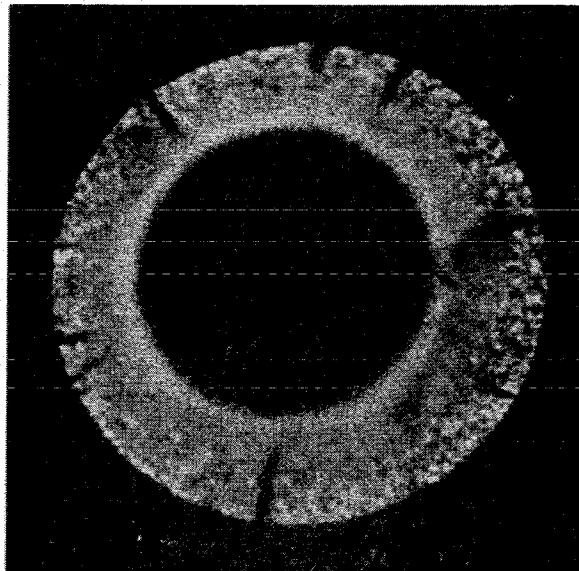


1mm

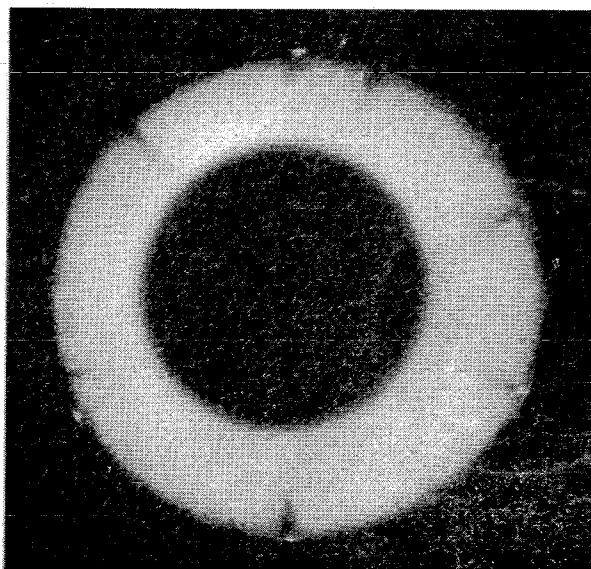
-A/200-
zu Prüfling 4A/18



A2



B2



C2

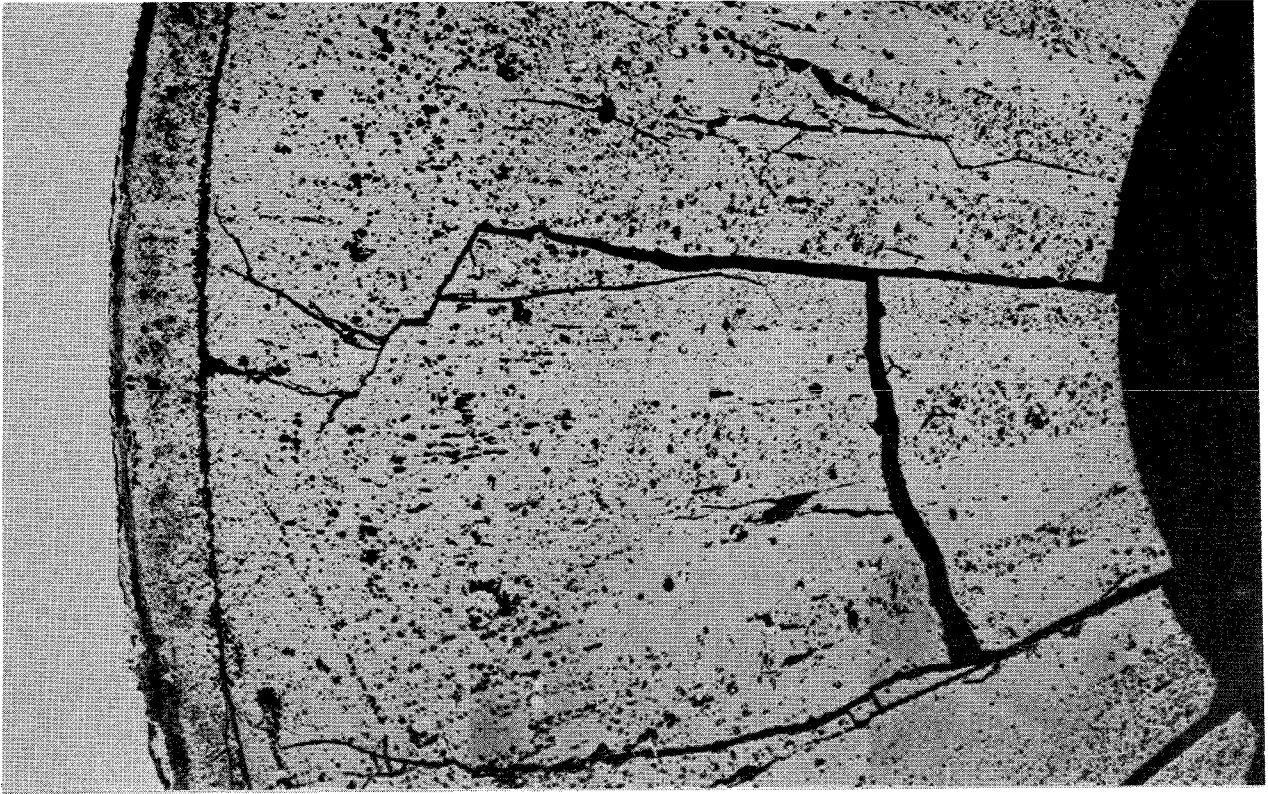
1mm

-A/201-
zu Prüfling 4A/18
A2



—
0,1mm

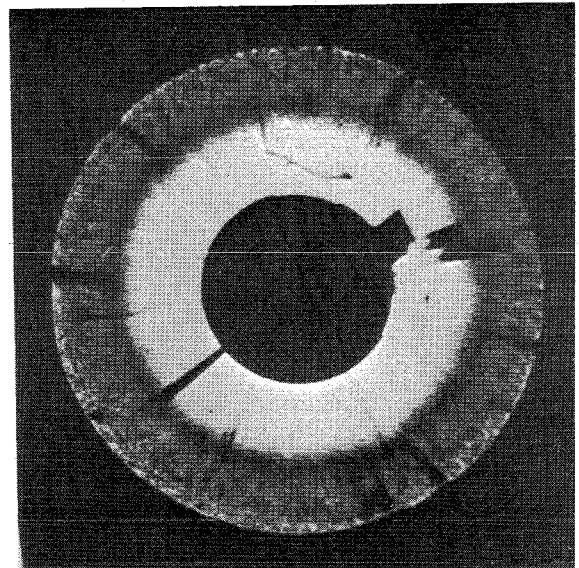
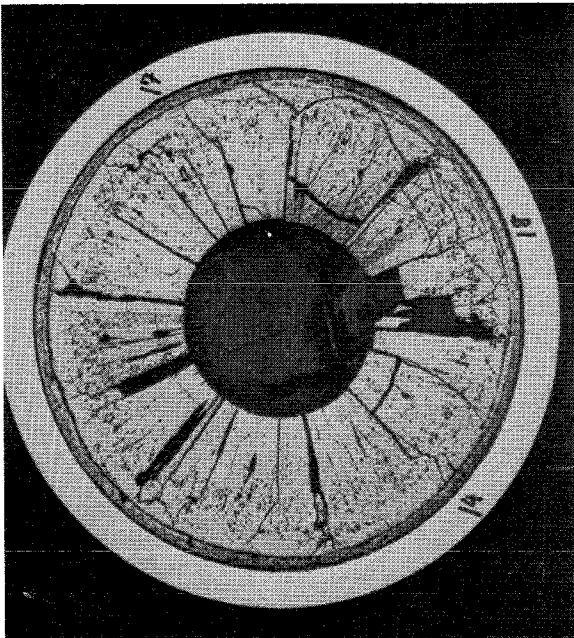
-A/202-
zu Prüfling 4A/18
A3



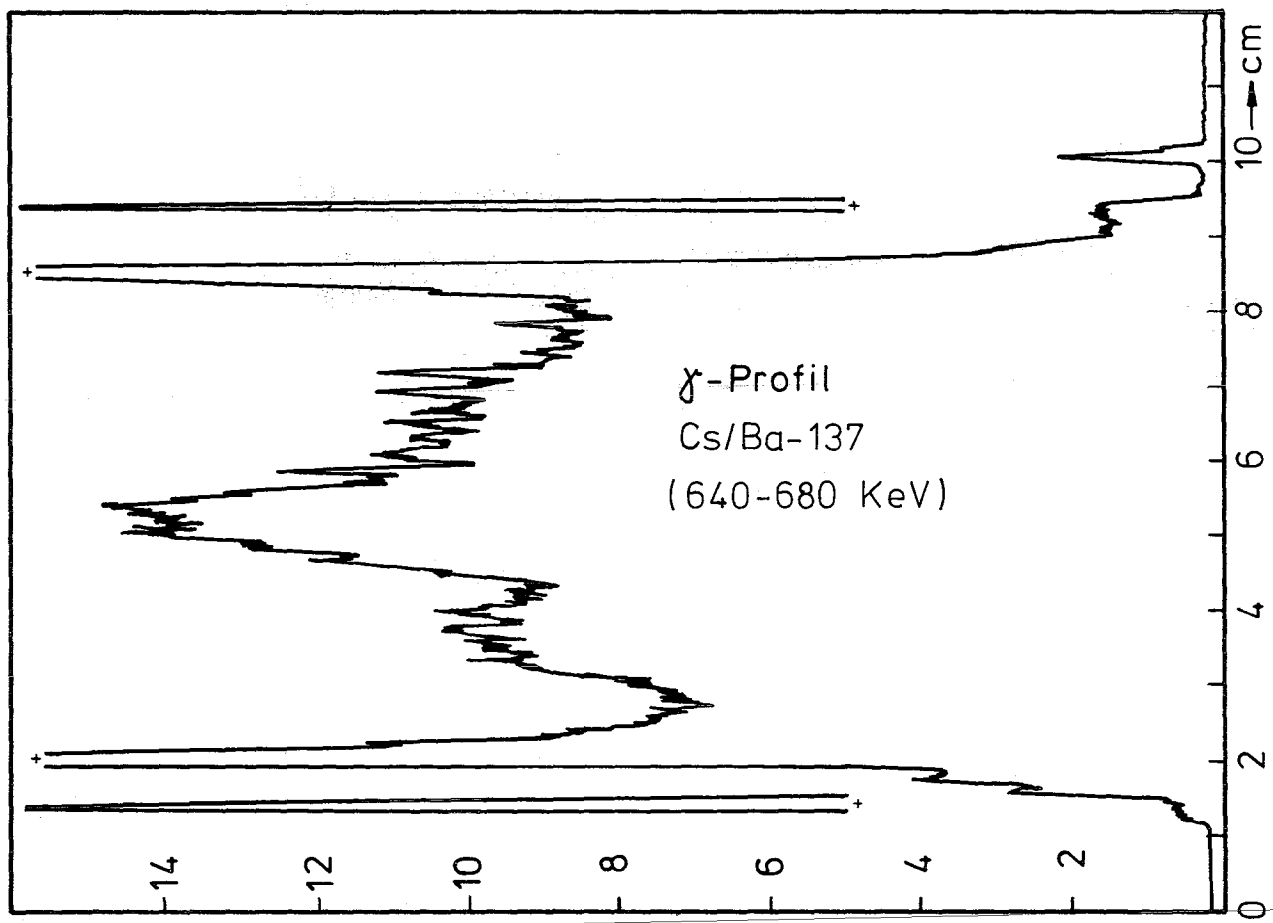
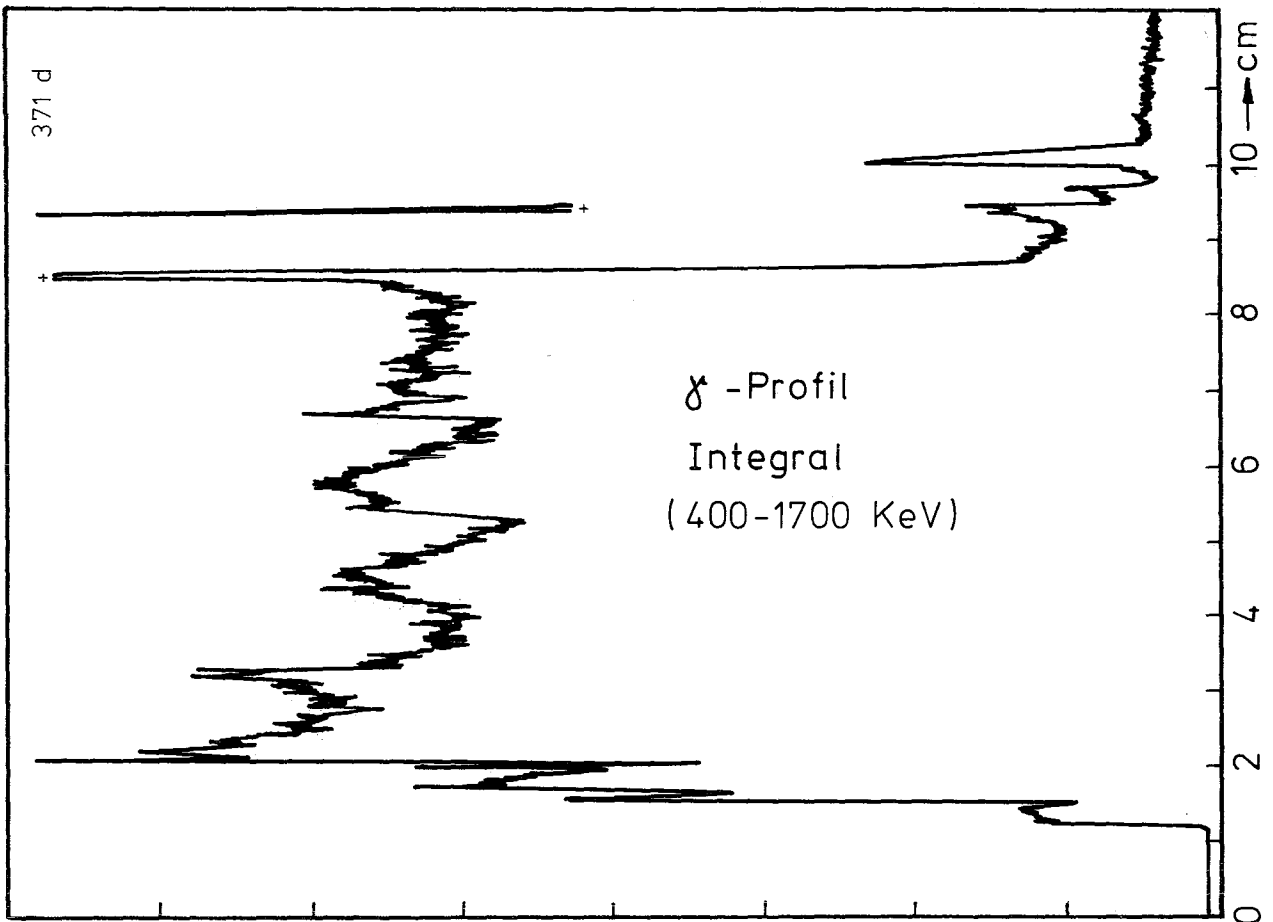
0,1mm

A3

B3



1mm

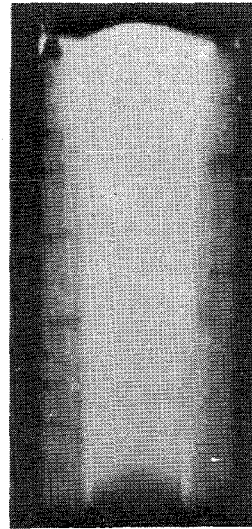
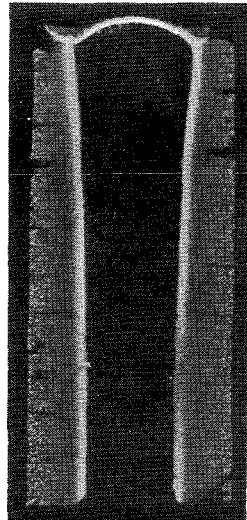


relative Einheiten \leftarrow

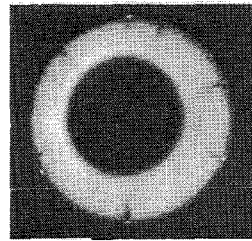
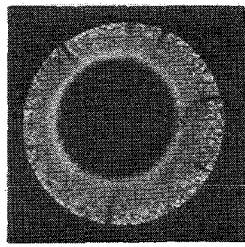
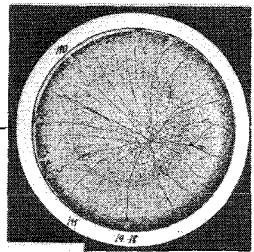
A

B

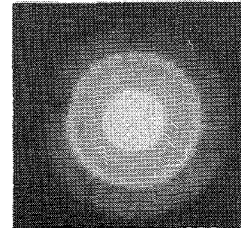
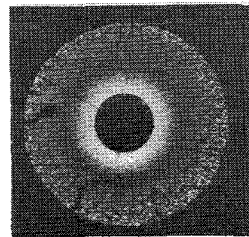
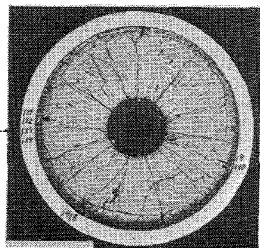
C



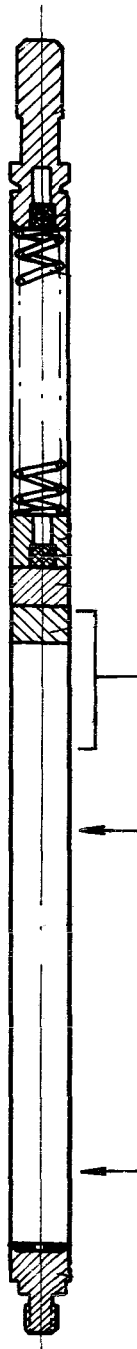
1



2



3





Prüfling 4A18

Brennstoff :

Form	:	Tabletten
Zusammensetzung	:	UO_2/PuO_2
Tablettendichte	:	84,25% th.D.

Hülle :

Material	:	1.4988
Aussendurchmesser	:	7,4 mm
Wandstärke	:	0,5 mm

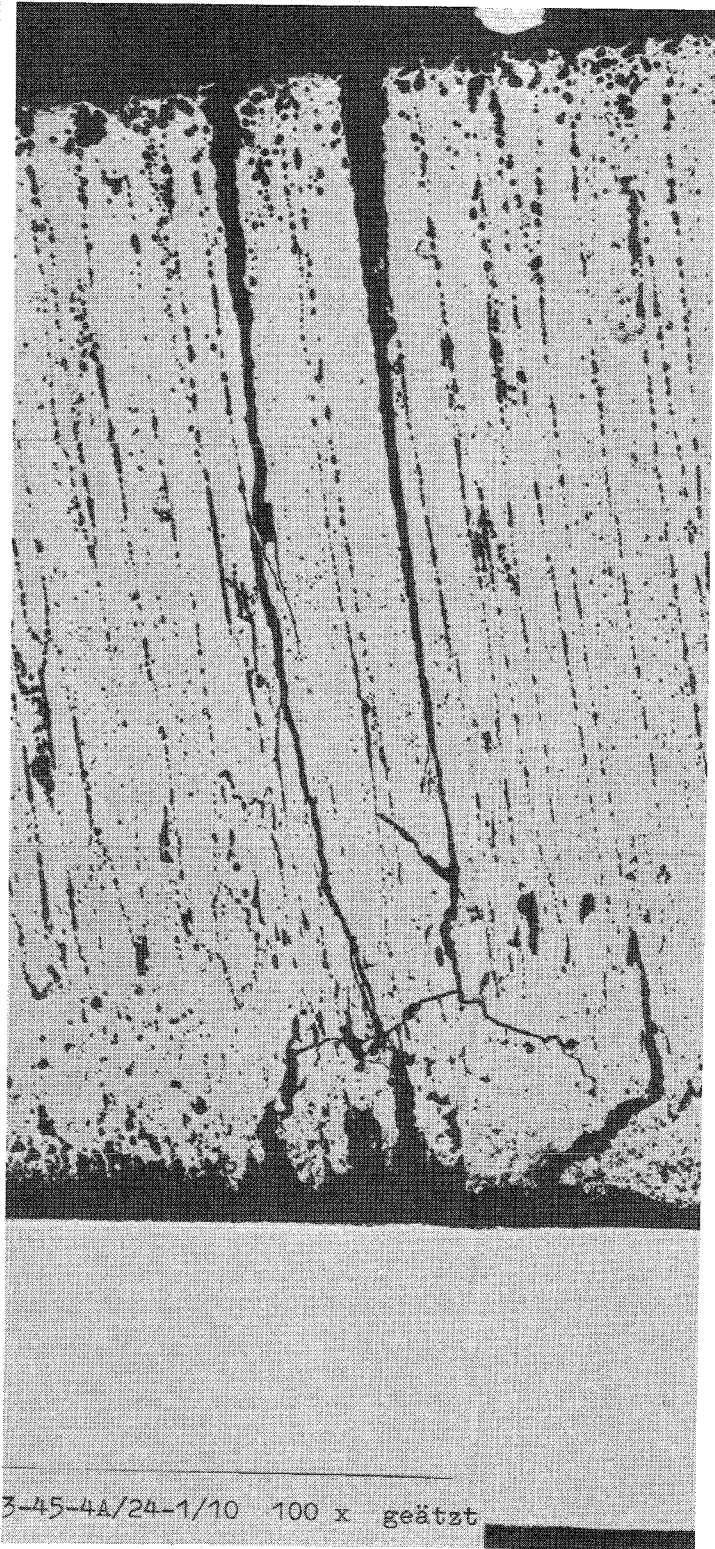
Geometrie :

Länge des Prüflings	:	172 mm
Länge der Brennstoffsäule	:	80 mm
Radiale Spaltweite	:	0,07 mm
Schmierdichte	:	80,4% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung	:	Na/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4
Dauer	:	359,7 Vollasttage
Ende	:	15. 12. 69
Rechn. Abbrand mittl.	:	55,7 MWd/kg
Stableistung max./mittl.	:	587/394 W/cm

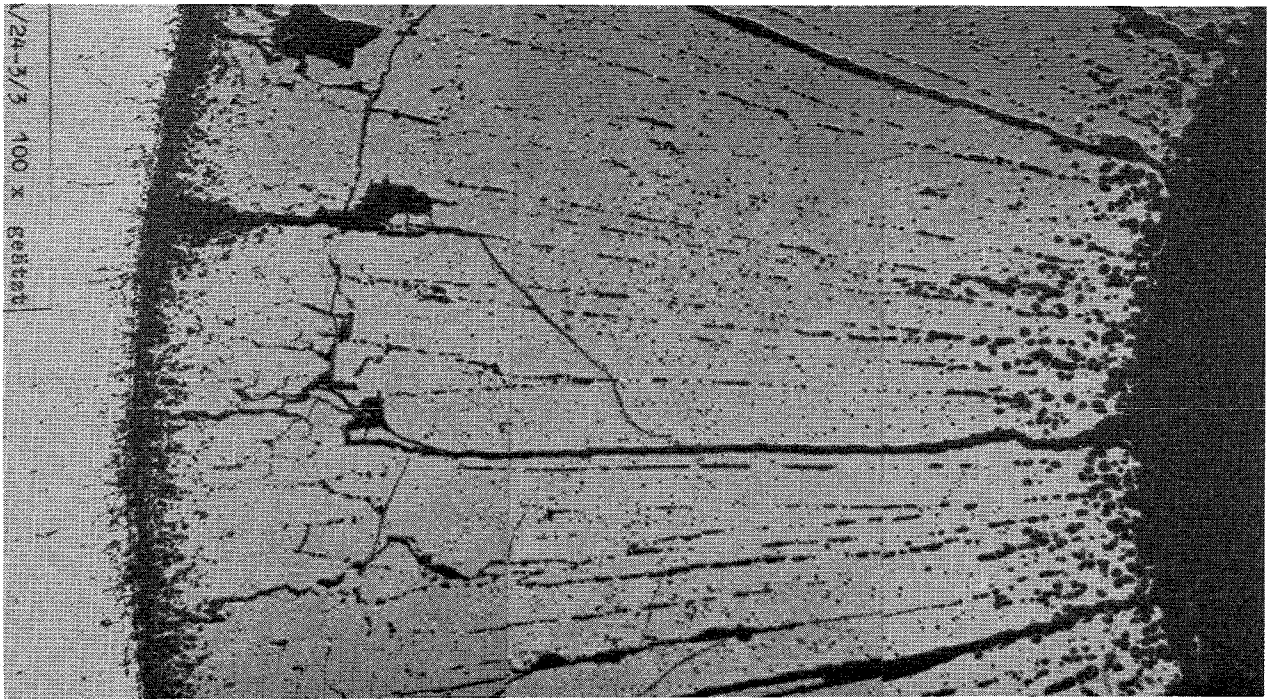
-A/205-
zu Prüfling 4A/24
A1



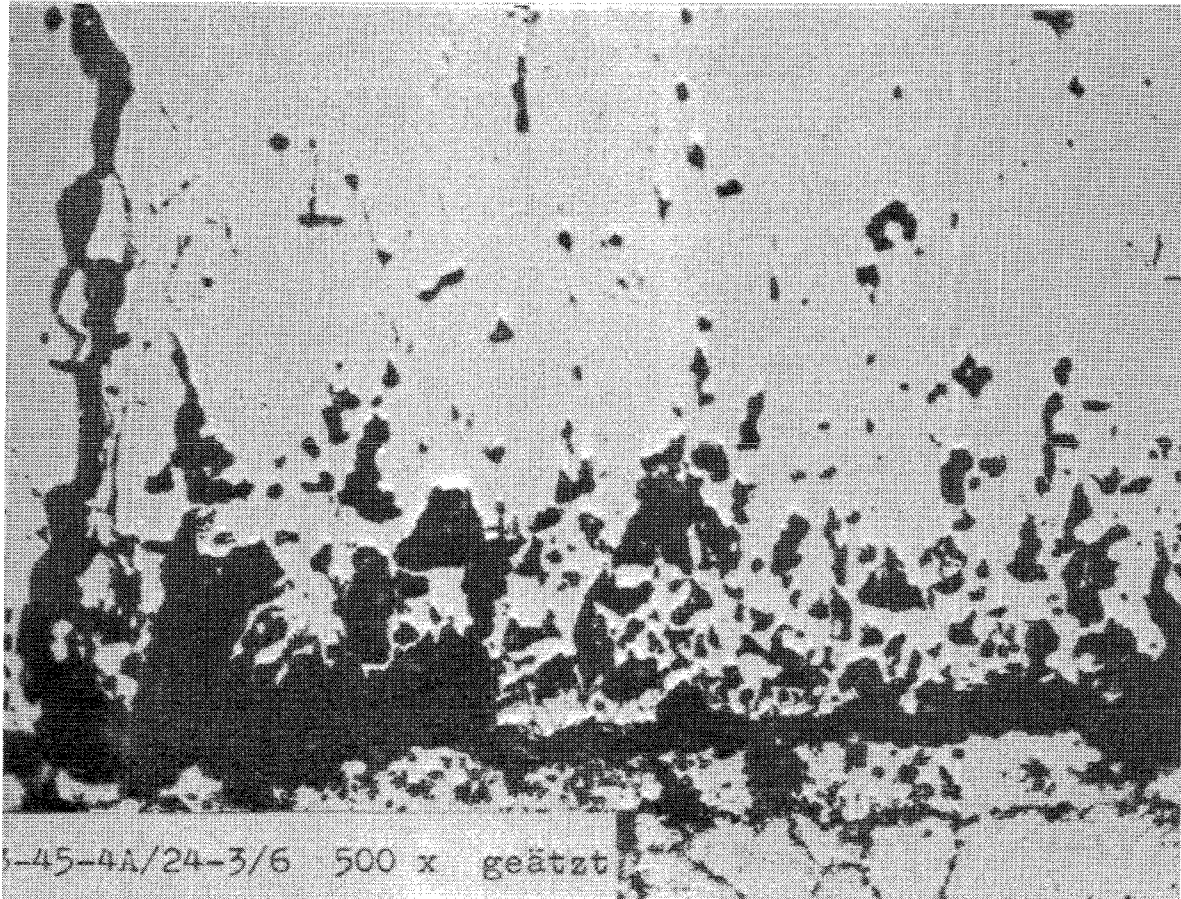
0,1mm

0,1mm

- A/206-
zu Prüfling 4A/24
A2

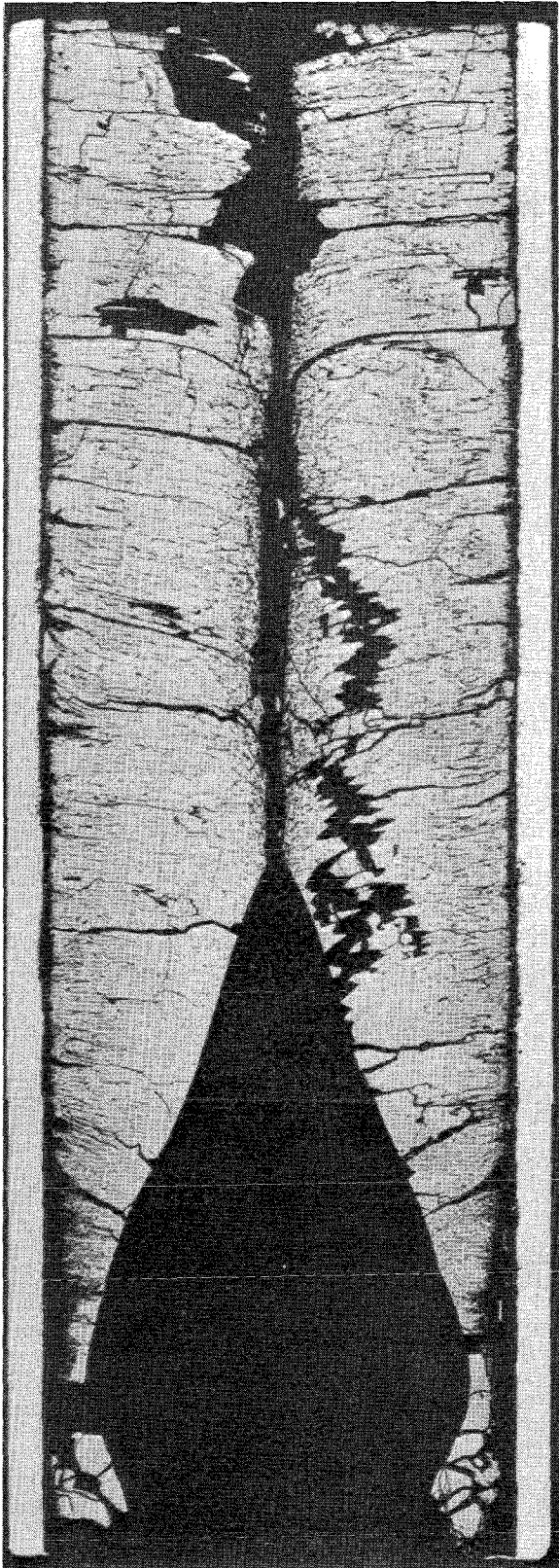


0,1 mm

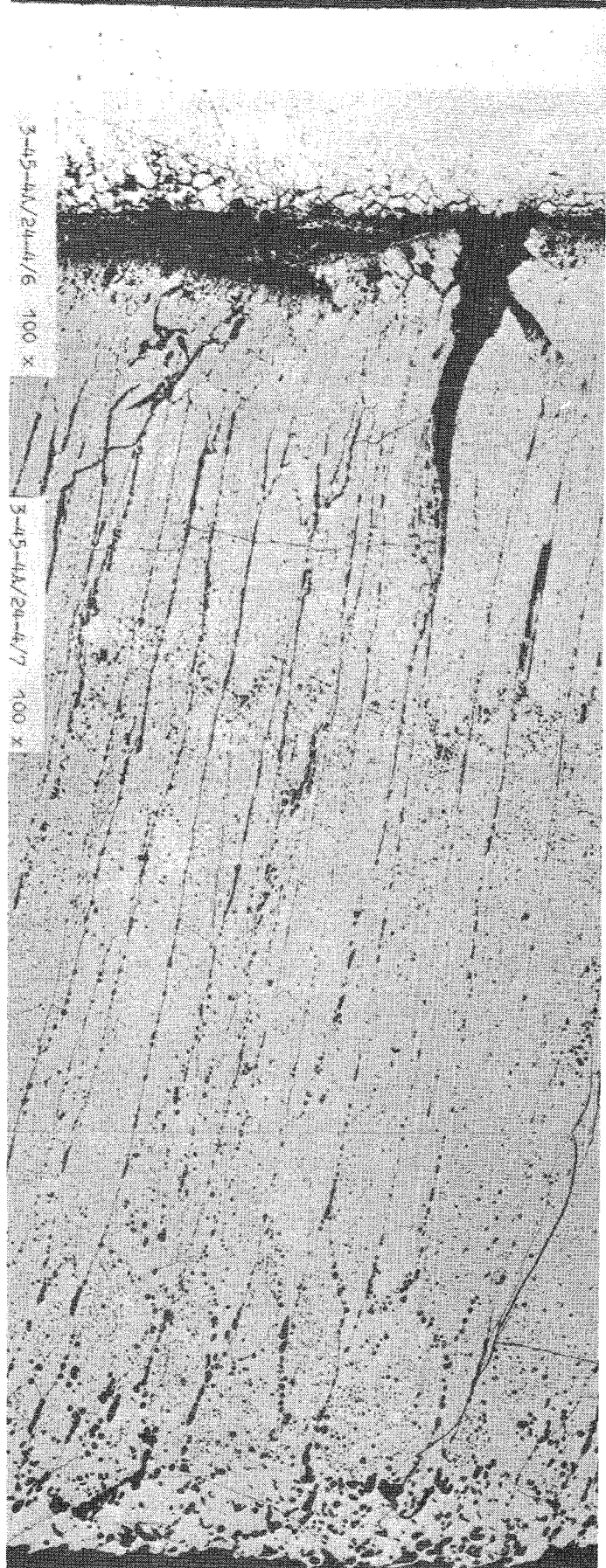


0,1 mm

-A/207-
zu Prüfling 4A/24
A3

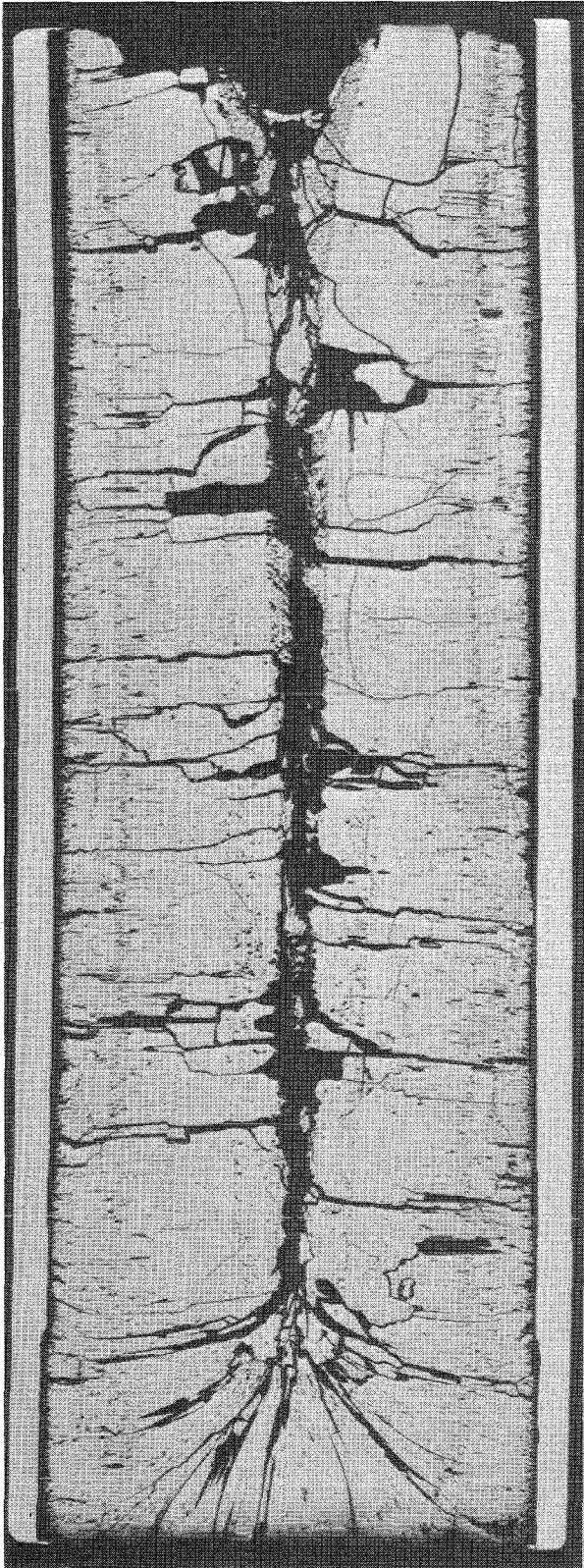


1mm



0,1mm

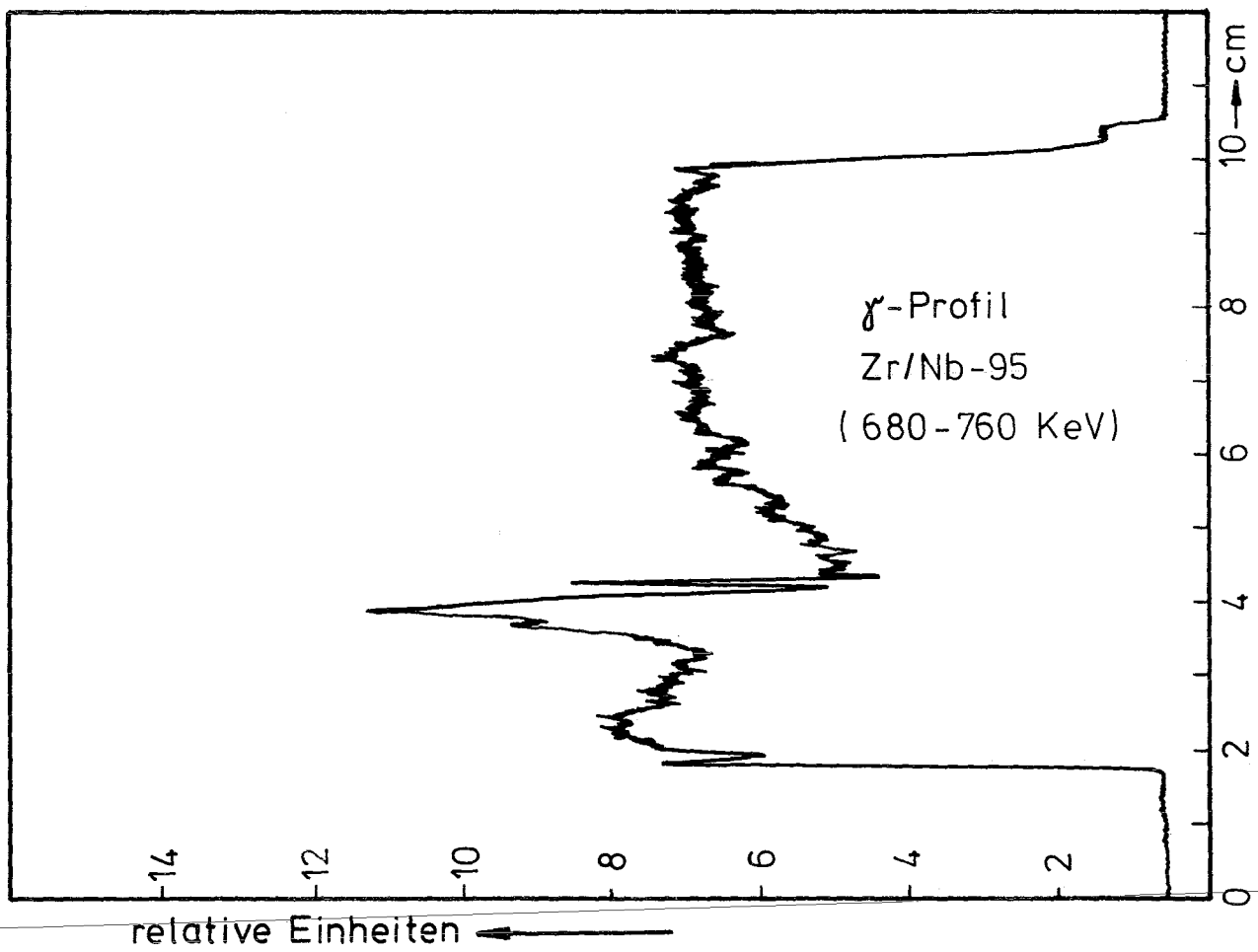
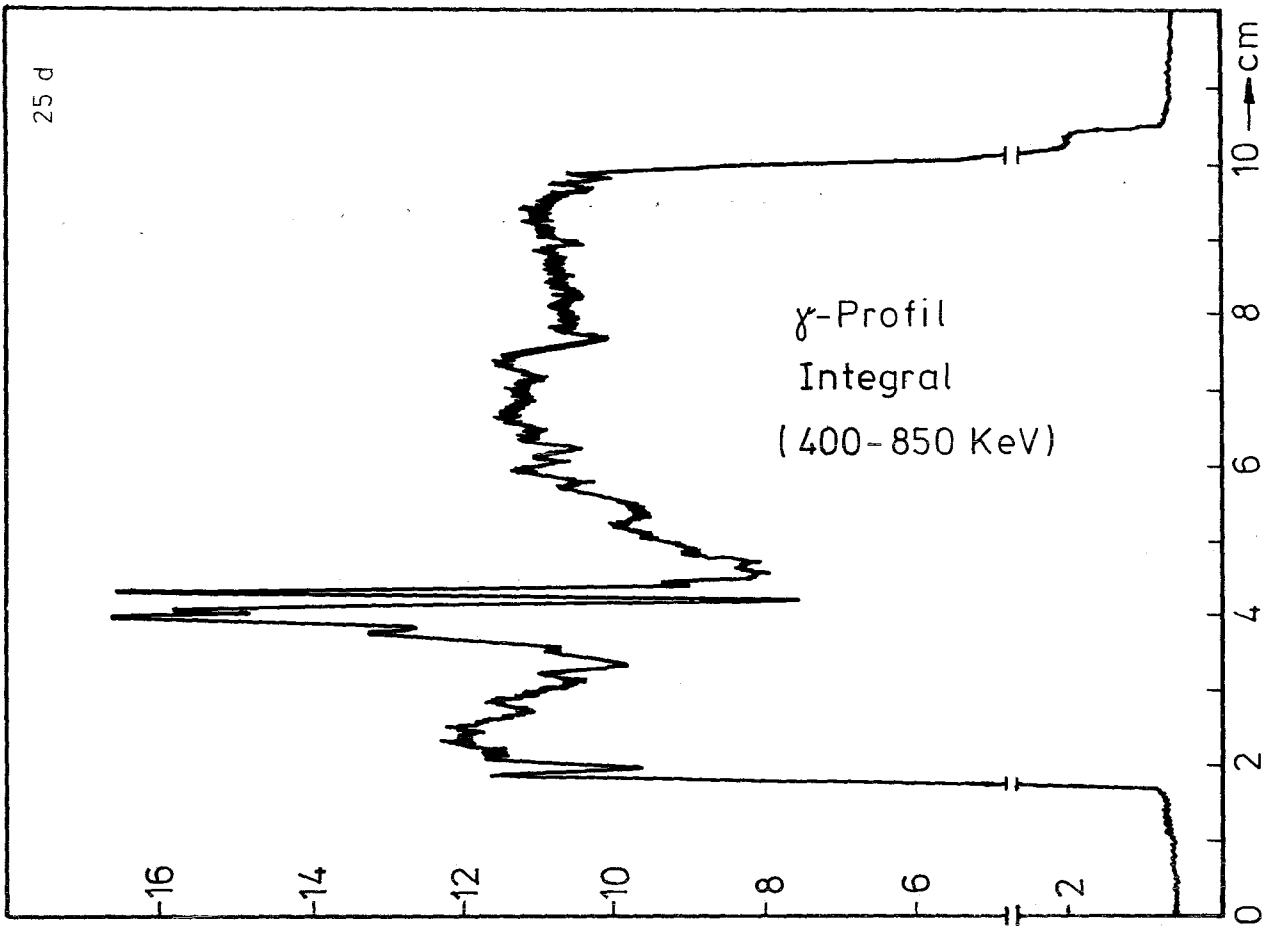
-A/208-
zu Prüfling 4A/24
A4

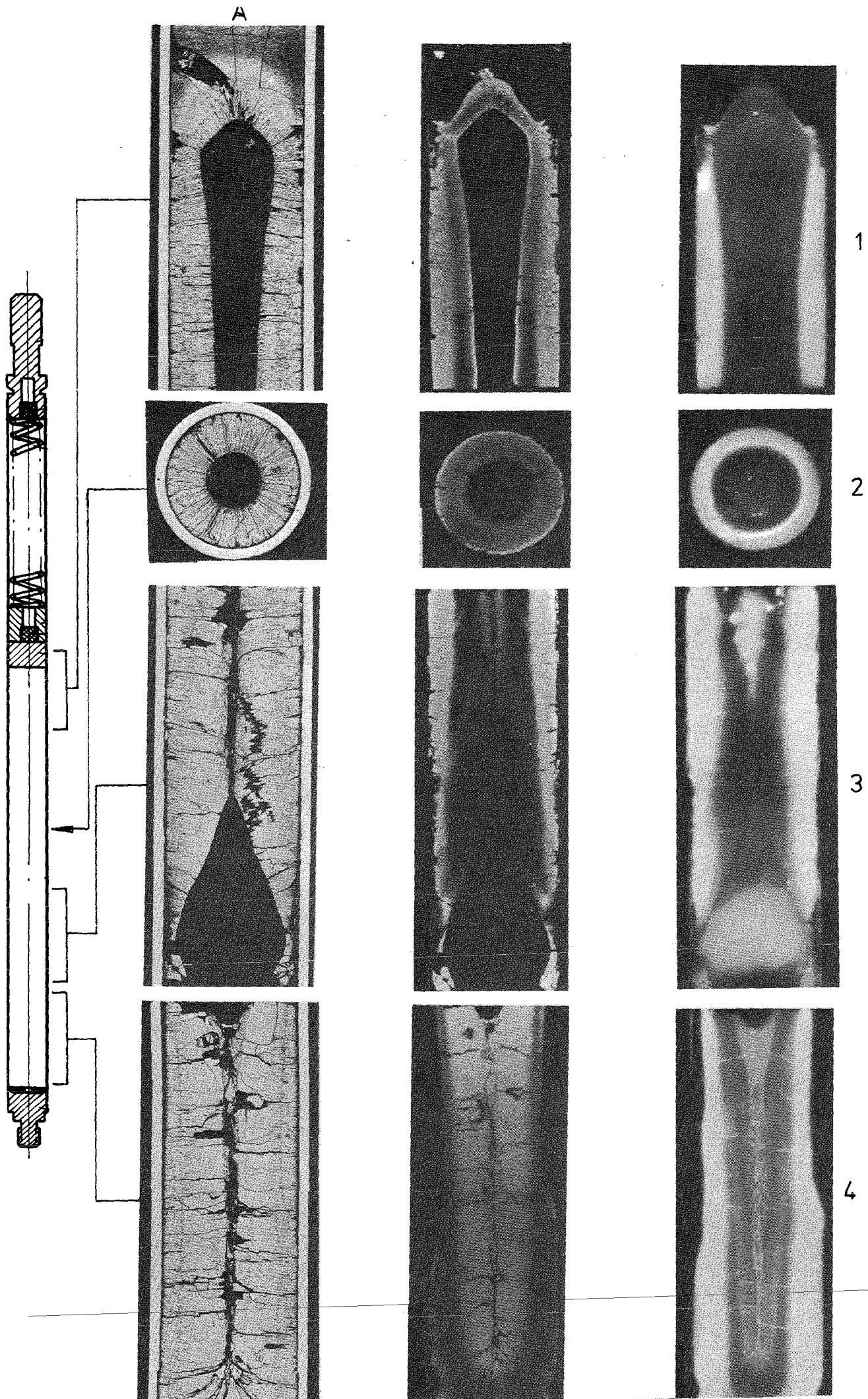


1mm



0,1mm





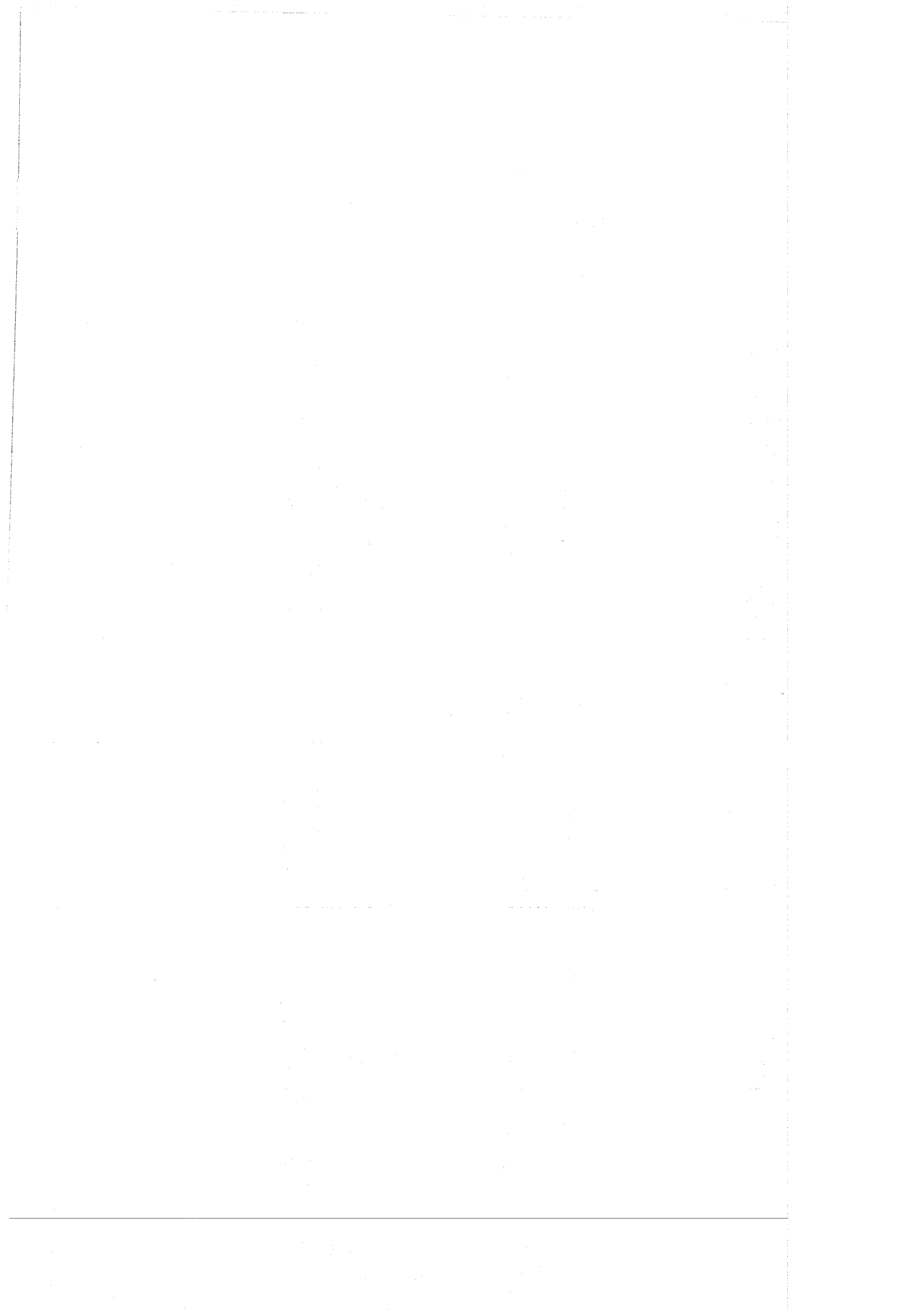
A

1

2

3

4



Prüfling 4A24

Brennstoff :

Form : Tabletten

Zusammensetzung : UO_2/PuO_2

Tablettendichte : 84,4% th.D.

Hülle :

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 7,4 mm

Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : 0,07 mm

Schmierdichte : 80,4% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppel-
Kapsel Typ 4a

Dauer : 67,4 Vollasttage

Ende : 12. 2. 69

Rechn. Abbrand mittl. : 12,0 MWd/kg

Stableistung max./mittl. : 621/447 W/cm



