

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

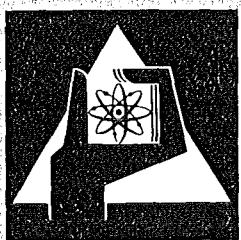
März 1974

KFK 1952

Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

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

P. Weimar, Th. Dippel, D. Freund



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 1952

Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

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

von

P.Weimar, Th.Dippel, D.Freund

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

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

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.

Februar 1974

P. Weimar, Th. Dippel, D. Freund

K U R Z F A S S U N G

Im Rahmen der im Karlsruher Forschungsreaktor FR 2 durchgeföhrten Brennstabbestrahlungsexperimente stellt die Bestrahlung von 35 Prüflingen mit UO_2 - PuO_2 -Brennstoff - zusammengefaßt unter der Bezeichnung "Kapselversuchsgruppe 4b" - eine weitere Erprobung des SNR-Brennstabgrundkonzeptes im thermischen Fluß dar.

Die Bestrahlung wurde in Na/PbBi-Doppelkapseln durchgeföhrte, wobei jeweils 3 bis 4 Kurzprüflinge mit 80 mm Brennstoffsäule übereinander angeordnet waren. Bei einem PuO_2 -Anteil von 20 Gew.-% betragen die Tablettendichten 84 und 90 % th.D., welches Schmierdichten von 80 bzw. 85 % th.D. entspricht. Die Brennstabhüllen aus austenitischem Edelstahl der Werkstoff-Nr. 1.4988 haben bei einem Außendurchmesser von 6,0 mm eine Wandstärke von 0,38 mm. Die Länge der Prüflinge beträgt 172 mm.

Die Bestrahlung der insgesamt 11 Kapselversuchseinsätzen wurde auf normalen FR 2-Brennelement- bzw. Isotopenkanalpositionen durchgeföhrte. Bei Stableistungen bis max. 620 W/cm und Hülloberflächentemperaturen von max. 770 °C wurden Abbrände von 10 bis etwa 120 MWd/kg M erreicht. Die Bestrahlungszeiten lagen zwischen 46,2 und 517,5 Tagen Vollastäquivalent. Alle Prüflinge blieben intakt.

In der vorliegenden Dokumentation wird nach der 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 und vergleichend analysiert.

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. 4b

The irradiation of 35 fuel pin samples with UO_2 - PuO_2 fuel of the experiment called "Capsule Group No. 4b", irradiated in the thermal flux of the Karlsruhe research reactor FR 2, represents a further testing of the SNR basic fuel pin concept.

The irradiation has been carried out in 11 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 20 w/o. Two different fuel densities of 84 and 90 % T.D., corresponding to smeared densities of 80 resp. 85 % T.D., have been realized. The austenitic stainless steel claddings have an outer diameter of 6,0 mm with a wall thickness of 0,38 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 620 W/cm and clad surface temperatures of max. 770 °C the burnup lies between 10 and 120 MWd/kg Metal. The samples have been irradiated between 46,2 and 517,5 days full power (44 MW) equivalent. All fuel pins are intact.

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.

| <u>I n h a l t</u> | <u>Seite</u> |
|--|--------------|
| 1. Einleitung | 1 |
| 2. Aufgabe und Ziel des Experimentes | 2 |
| 3. Auslegung und Spezifikation | 4 |
| 3.1 Brennstabauslegung | 4 |
| 3.2 Brennstoffspezifikation | 6 |
| 3.3 Hüllrohrspezifikationen | 8 |
| 3.4 Brennstabspezifikationen | 10 |
| 4. Herstellung der Prüflinge | 12 |
| 4.1 Ausgangspulver für die Brennstoffherstellung | 12 |
| 4.2 Tablettenherstellung | 14 |
| 4.3 Herstellung des Vibrierbrennstoffes | 14 |
| 4.4 Brennstoffeigenschaften | 15 |
| 4.5 Hüll- und Strukturmateriale | 15 |
| 4.6 Hüllrohrprüfung | 15 |
| 4.7 Stabherstellung | 18 |
| 4.8 Stabprüfung | 21 |
| 5. Bestrahlungseinrichtung | 23 |
| 5.1 Versuchseinsatz | 23 |
| 5.2 Bestrahlung im FR 2 | 29 |
| 6. Ablauf der Bestrahlung | 29 |
| 6.1 Reaktorzyklen und Neutronenfluß | 29 |
| 6.2 Temperatur und Stableistung | 36 |
| 6.3 Thermische Abbrandberechnung | 37 |
| 7. Zerstörungsfreie Nachuntersuchung | 75 |
| 7.1 Äußere Vermessung | 75 |
| 7.2 Durchleuchtung | 90 |
| 7.3 γ -Profile und γ -Spektren | 92 |
| 8. Zerstörende Nachuntersuchung | 97 |
| 8.1 Spaltgasbestimmungen | 97 |
| 8.2 Keramografie | 104 |
| 8.3 Radiochemische Abbrandbestimmungen | 110 |
| 8.4 Vergleich der radiochemischen und berechneten Abbrandwerte | 110 |
| 9. Dokumentation der zerstörungsfreien und zerstörenden Nachuntersuchung | 113 |
| 10. Schlußbetrachtung | 116 |
| Literatur | 118 |

Liste der Tabellen

| | | <u>Seite</u> |
|-------|--|--------------|
| I | Brennstabauslegungsvarianten der Versuchsgruppe 4b | 4 |
| II | Kenndaten der Ausgangspulver | 13 |
| III | Brennstoffanalysen | 16 |
| IV | Hüllrohre und Prüfungsergebnisse | 16 |
| V | Materialwerte für die Tabletten-Prüflinge, Nenndichte 90 % th.D. | 19 |
| VI | Materialwerte für die Tabletten-Prüflinge, Nenndichte 84 % th.D. | 20 |
| VII | Materialwerte für die Prüflinge mit Vibrierbrennstoff, Nenndichte 80 % th.D. | 22 |
| VIII | Länge der Tablettensäulen | 27 |
| IX | Länge der Vibrierpulversäulen | 27 |
| X | Stabvermessung vor der Bestrahlung | 28 |
| XI | Bestrahlungsablauf der Kapselversuchseinsätze der Vg 4b | 32 |
| XII | Vertikaler Verlauf des thermischen Flusses in den Isotopen-kanal-Positionen in Höhe der Prüflingsmitte | 34 |
| XIII | Instrumentierungsplan der Versuchsgruppe 4b | 39 |
| XIV | Hülloberflächentemperaturen der Prüflinge | 40 |
| XV | Mittlere Stableistungen der Prüflinge bei Zyklusbeginn und -ende | 41 |
| XVI | Thermische Abbrandwerte der Prüflinge | 74 |
| XVII | Stabdurchbiegung nach der Bestrahlung | 89 |
| XVIII | Längenvermessungen der Prüflinge (vor und nach der Bestrahlung) | 91 |
| XIX | Veränderung der Brennstoffsäulenlänge | 93 |
| XX | Freies Spaltgas - Spaltgasdruck | 98 |
| XXI | Gebundenes Spaltgas | 99 |
| XXII | Spezifische Poren- und Gitterspaltgasausbeute V' (mm^3/g) | 101 |
| XXIII | Spaltgasbilanz | 102 |
| XXIV | Xe/Kr-Verhältnis, partiell und gesamt | 103 |
| XXV | Vergleich der radiochemisch bestimmten und berechneten Abbrände | 114 |

Liste der Abbildungen

| | | <u>Seite</u> |
|----|--|--------------|
| 1 | EE-Prüfling, Versuchsgruppe 4b | 11 |
| 2 | Alpha-Autoradiographien einer Tablette | 17 |
| 3 | Brennstofftabletten mit Stirnflächeneinsenkung | 17 |
| 4 | Röntgen-Aufnahme der Tablettensäulen in den Prüflingen | 24 |
| 5 | Röntgen-Aufnahme der Tablettensäulen in den Prüflingen | 25 |
| 6 | Röntgen-Aufnahme der einvibrierten Prüflinge | 26 |
| 7 | Ausschnitt aus der NaK/PbBi-Doppelkapsel | 30 |
| 8 | Temperaturverlauf innerhalb der Bestrahlungskapsel bei 550 W/cm Stableistung | 31 |
| 9 | Vertikaler Verlauf des thermischen Flusses | 35 |
| 10 | Temperatur-Stableistungscharakteristik Kapseltyp 4a | 38 |
| 11 | Kapselversuchsgruppe 4b, KVE 42 | 42 |
| 12 | Kapselversuchsgruppe 4b, KVE 43 | 43 |
| 13 | " , KVE 44 | 44 |
| 14 | " , KVE 45 | 45 |
| 15 | " , KVE 47, Blatt 1 | 46 |
| 16 | " , KVE 47, Blatt 2 | 47 |
| 17 | " , KVE 47, Blatt 3 | 48 |
| 18 | " , KVE 48, Blatt 1 | 49 |
| 19 | " , KVE 48, Blatt 2 | 50 |
| 20 | " , KVE 49, Blatt 1 | 51 |
| 21 | " , KVE 49, Blatt 2 | 52 |
| 22 | " , KVE 49, Blatt 3 | 53 |
| 23 | " , KVE 49, Blatt 4 | 54 |
| 24 | " , KVE 55, Blatt 1 | 55 |
| 25 | " , KVE 55, Blatt 2 | 56 |
| 26 | " , KVE 56, Blatt 1 | 57 |
| 27 | " , KVE 56, Blatt 2 | 58 |
| 28 | " , KVE 57, Blatt 1 | 59 |
| 29 | " , KVE 57, Blatt 2 | 60 |
| 30 | " , KVE 57, Blatt 3 | 61 |
| 31 | " , KVE 58, Blatt 1 | 62 |
| 32 | " , KVE 58, Blatt 2 | 63 |
| 33 | " , KVE 58, Blatt 3 | 64 |
| 34 | Axiale Temperaturverteilung (Hülloberfläche) | 65 |
| 35 | " " | 66 |
| 36 | " " | 67 |
| 37 | " " | 68 |
| 38 | " " | 69 |
| 39 | " " | 70 |
| 40 | " " | 71 |
| 41 | " " | 72 |
| 42 | " " | 73 |

| | <u>Seite</u> |
|---|--------------|
| 43 Prüfling 4B/32 nach der Bestrahlung | 76 |
| 44 Veränderungen der Stab-Außendurchmesser | 78 |
| 45 " " | 79 |
| 46 " " | 80 |
| 47 " " | 81 |
| 48 " " | 82 |
| 49 " " | 83 |
| 50 " " | 84 |
| 51 " " | 85 |
| 52 " " | 86 |
| 53 " " | 87 |
| 54 " " | 88 |
| 55 γ -Profil von Prüfling 4b/34 | 95 |
| 56 γ -Profil von Prüfling 4b/30 | 96 |
| 57 Brennstoffstruktur | 106 |
| 58 Brennstoffstruktur | 107 |
| 59 Brennstoffstruktur | 108 |
| 60 Brennstoffstruktur | 109 |
| 61 Abbrandverteilung über Brennstofflänge, KVE 49 | 111 |
| 62 Abbrandverteilung über Brennstofflänge, KVE 57 | 112 |
| 63 Abweichung der gerechneten gegenüber den radiochemisch bestimmten Abbrand-Werten | 115 |

1. Einleitung

Die Versuchsgruppe 4b (Vg 4b) besteht aus 35 Kurzstäben. Als Brennstoff dient Mischoxid UO_2 - PuO_2 verschiedener Dichte sowohl in Tabletten- als auch in einvibriert Form. Diese Versuchsgruppe setzt die in Vg 4a begonnenen Abbrandversuche an Pu-haltigem Brennstoff fort.

Der Stabaufbau und die Bestrahlungsvorrichtung ist identisch mit dem in Versuchsgruppe 4a gewählten wie Brennstoffsäule mit Gasplenum am oberen Ende, bestrahlt in NaK/PbBi-Kapseln im stagnierenden Kühlmittel Natrium-Kalium.

Hinsichtlich der Versuchsgruppe 4a wurden folgende Parameter variiert:

- | | | |
|-----------------------------------|--|------------------|
| - Stabdurchmesser | hier kleiner: | 6 mm |
| - Stableistung | hier niedriger: | ~ 500 W/cm |
| - Max. Hülloberflächen-Temperatur | | 680 °C |
| - Pu-Anreicherung | hier höher: | ~ 20 Gew.-% |
| - Tablettenform | hier mit Dishing an den Stirnflächen bzw. vibriertem Brennstoff | |

Weiterhin wurden in dieser Bestrahlungsreihe erstmals solche Hüllohr-abmessungen verwendet, wie sie für die Brennstäbe des Prototyps des Natrium-gekühlten Schnellen Brüters (SNR) vorgesehen sind.

In diesem Bericht werden alle Details über die 35 Prüflinge dieser Versuchsgruppe angegeben, wie Aufgabenstellung, Auslegung, Spezifikation, Herstellung der Prüflinge, Bestrahlungsablauf, zerstörungsfreie und zerstörende Nachuntersuchung der Prüflinge. Diese Zusammenstellung basiert auf einer Vielzahl von internen Niederschriften und persönlichen Mitteilungen. In der folgenden Übersicht ist der Zeitablauf des Experimentes und die für die einzelnen Schritte verantwortlichen Stellen und Personen angegeben.

| Zeitraum | Teilarbeit | Institution/Hauptbeteil. |
|-----------|--|--|
| 1967/68 | Vorüberlegungen und Versuchsauslegung | IAR; Karsten, Gerken |
| 1967/68 | Bestrahlungskapseln | IRE; Häfner, Bojarsky |
| 1967 | Spezifikationen | IAR; Karsten, Gerken |
| 1969 | Herstellung der Prüflinge | IMF; Dippel, Kummerer, Triemer |
| 1967/71 | Organisation der Bestrahlung und Betreuung | IAR; Gerken IRE; Häfner / IMF; Freund |
| 1967/71 | Bestrahlung im FR 2 | Abt. Reaktorbetrieb FR 2 |
| 1971/72 | Organisation der Nachuntersuchung und Betreuung | IMF; Geithoff, Weimar |
| 1969/72 | Zerstörungsfreie Nachuntersuchung | RB/Z; Scheeder, Enderlein |
| 1972/73 | Spaltgasuntersuchungen | RB/CuM; Gräßner |
| 1970 + 72 | Keramografie | RB/Z; Pejsa |
| 1972/73 | Abbrandbestimmung | IRCH; Wertenbach |
| 1973 | Zusammenfassung und Dokumentation der Ergebnisse | IMF; Weimar, Freund, Dippel |

2. Aufgabe und Ziel des Experimentes

Die Bestrahlung von prototypischen Brennstabprüflingen (hinsichtlich der Durchmesser) mit Mischoxidbrennstoff ist die Hauptaufgabe dieser Kapselversuchsgruppe. Die Simulation der Schnellbrüter-Verhältnisse für die Brennstäbe weicht in folgenden Punkten von der Wirklichkeit ab:

- Die Stablängen entsprechen nur einem Bruchteil der Abmessungen echter Brüterbrennstäbe.
- Die Brutstoffpartien in axialer Richtung fehlen.
- Die Bestrahlung erfolgt (wie in Vg 4a) wieder im thermischen Fluß, mit den hieraus resultierenden Unterschieden in der radialen Wärmequelleverteilung, der Spaltprodukterzeugung sowie der Hüll- und Strukturmaterialbelastung.
- Die Kühlung erfolgt durch stagnierendes Natrium.

Unter Berücksichtigung dieser Abweichung von den zu erwartenden Beanspruchungen - im Hinblick auf die Übertragbarkeit auf realistische Bestrahlungen im schnellen Fluß - muß die Aufgabenstellung wie folgt festgelegt werden:

- Es sollen Prüflinge mit Mischoxid-Brennstoff unter schnellbrüterähnlichen Bedingungen bis zu hohen Abbränden bestrahlt werden.
- Die Brennstoffsäulen haben unterschiedliche Dichte, Topographie (vibrierter bzw. gesinterter Brennstoff) und Durchmesser.
- Die Zielabbrände sollen bis zu 80.000 MWd/t variiert werden.

Die Bestrahlung kann unter Berücksichtigung der erwähnten Einschränkungen folgende Aussagen liefern:

- Ist das Stabgrundkonzept mit dem neuen prototypischen Stabdurchmesser 6,0 mm bei einer Wandstärke von 0,38 mm für Bestrahlungen bis zu hohen Abbränden geeignet ? Bleiben die Prüflinge intakt ?
- Ändert sich die äußere Geometrie der Prüflinge ?
- Welche radialen und evtl. axialen Strukturänderungen erfährt der Brennstoff ?
- Wie ändert sich die Spaltstoffverteilung und welche Folgerungen ergeben sich hieraus für das Stabverhalten ?
- Wie ist die Verteilung der Spaltprodukte ?
- Wie groß ist der Anteil des freien und des gebundenen Spaltgases ?

3. Auslegung und Spezifikation

3.1 Brennstabauslegung

Wie einleitend bereits erwähnt, werden mit der Bestrahlung der Prüflinge der Versuchsgruppe 4b die Abbrandversuche an Prüflingen mit UO_2 - PuO_2 -Brennstoff der Versuchsgruppe 4a [1,2,3,4] fortgesetzt, wobei im Hinblick auf die Brennstabauslegung eine weitere Annäherung an den zum Auslegungszeitpunkt diskutierten SNR-Brennstab angestrebt wird: Die Hüllrohrabmessungen ($6^{\phi} \times 0,38$) sowie die Pu-Anreicherung (20 Gew.-%) und die Tablettenform mit beidseitiger Stirnflächeneinsenkung entsprechen dem SNR-Konzept. Als weitere Varianten werden Tabletten mit einseitiger Einsenkung, Dichten von 84 und 96 % th.D. sowie Brennstäbe mit vibriertem Brennstoff mit 80 % th.D. verwendet. Die Aufteilung der Prüflinge auf die einzelnen Auslegungsvarianten ist in Tabelle I zusammengestellt.

Tabelle I: Brennstabauslegungsvarianten der Versuchsgruppe 4b

| Prüfling Nr. | Brennstoff Form | Dichte (% th.D.) | Stirnflächeneinsenkung |
|--------------|-----------------|------------------|---------------------------|
| 4B/1-6 | Tabletten | 90 | beidseitig 2 x 1,5 v/o |
| 4B/7-12 | Tabletten | 90 | einseitig 3 v/o |
| 4B/13-24 | Tabletten | 84 | einseitig 3 v/o |
| 4B/25-35 | vibriert | 80 | - |

Die Bestrahlungsbedingungen orientieren sich an den SNR-Bedingungen und sind durch folgende Festlegung von Hülltemperatur, Stableistung und Abbrand gegeben: [5]

| | |
|---|------------------|
| - Maximale Nominalstableistung | 600 W/cm |
| - Mittlere Nominalstableistung | 500 W/cm |
| - Maximale Nominalhülltemperatur, außen | 450 °C |
| - Mittlerer Abbrand | 80 MWd/kg Metall |

Weiterführende Rechnungen während der Auslegung und Vorbereitung der Versuchsgruppe 4b ergaben, daß im SNR-Betrieb höhere maximale Hülloberflächentemperaturen zu erwarten sind. Dies führte zu einer Auslegungsänderung, welche zu Hülloberflächentemperaturen $T_{Ha,max}$ von ca. 680 °C [6] sowie zu einer Modifikation der benutzten Bestrahlungskapsel führten (vergl. Kap. 5 und 6.2).

Die Bestrahlung der Prüflinge wird auf normalen Brennelement- bzw. Isotopenkanalpositionen des FR 2 (vergl. Kap. 5) durchgeführt. Der ungestörte thermische Fluß des FR 2 beträgt maximal ca. $1 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2 \text{ sec.}$

Der Brennstab besteht aus einer Hülle mit verschweißten Endstopfen, der Brennstoffzone, bestehend aus Tabletten bzw. vibriertem Brennstoff, mit je einer UO_2 -Isoliertablette am oberen und unteren Säulenende (nicht bei den vibrierten Säulen), einem Führungsstücke sowie einer Feder zur Transportsicherung. Zusätzlich ist im unteren Endstopfen sowie im Führungsstück ein Rh-Plättchen zur Absorption des axialen Flußanteils angebracht. Durch die Sinterstahlfilter im Führungsstück und oberen Endstopfen wird schließlich gewährleistet, daß beim Öffnen des Stabes nur gasförmige Spaltprodukte entweichen können. Damit erhält man folgende Stabeinteilung:

| | | |
|-------------------------------------|--------|---|
| Oberer Endstopfen | 22 mm | |
| Spaltgasraum (mit Führungsstück) | 45 mm | 55 mm bei vibr. Brennstoff (keine Isoliertabletten) |
| Isoliertablette oben | 5 mm | |
| Brennstoffsäule | 80 mm | |
| Isoliertablette unten | 5 mm | |
| Unterer Endstopfen | 15 mm | |
| <hr/> | | |
| Gesamtlänge | 172 mm | |

Die Bezeichnung der Stäbe ist an zwei Schlüsselflächen des oberen Endstopfens angebracht.

3.2 Brennstoffspezifikation

3.2.1 Chemische Zusammensetzung

- Brennstoff: UO_2/PuO_2 -Mischoxid
- Anreicherung: $\text{Pu}/(\text{U}+\text{Pu}) = 20 \text{ Gew.-%}$, Rest U_{nat}
- Isoliertabletten: U_{nat}
- Stöchiometrie O/Me: $1,98 \pm 0,02$
- Chemische Reinheit: Verunreinigungen insgesamt maximal 2500 ppm entsprechend 4 ppm Boräquivalent, mit folgenden Einschränkungen:

| Verunreinigung | Grenzwert in ppm |
|----------------------|------------------|
| C | 150 |
| H_2O | 100 |
| N | 100 |
| Cl | 50 |
| F | 50 |

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

3.2.2 Isotopenzusammensetzung

- Gew.-% von Pu: $\text{Pu-239} 90,9 \pm 0,2$
 $\text{Pu-240} 8,15 \pm 0,15$
 $\text{Pu-241} 0,83 \pm 0,05$
 $\text{Pu-242} 0,04 \pm 0,005$
- Gew.-% von U_{nat} : $\text{U-235} 0,7 \pm 0,1$
 $\text{U-238} 99,3 \pm 0,1$

3.2.3 Homogenität im Mischbrennstoff

- Die Komponenten des Mischbrennstoffes sollen zu größtmöglicher Homogenität gesintert werden.
- Die PuO_2 -Partikel sollen $\leq 0,15 \text{ mm}$ sein

3.2.4 Brennstoff-Form

- Es kommen zylindrische, maßgesinterte Tabletten zum Einsatz.
- Die Tabletten weisen an den Stirnflächen Einsenkungen von 1,5 Vol.-% (beidseitig) bzw. 3 Vol.-% (einseitig) entsprechend der Aufteilung in Tabelle I auf.
- Elf Prüflinge enthalten Brennstoffsäulen aus vibriertem Brennstoff (vergl. Tabelle I).

3.2.5 Brennstoffdichte (Zuordnung vergl. Tabelle I)

- Geometrische Dichte: $84 \pm 2,2$; $90 \pm 2,2$ % th.D.
- Materialdichte: $87 \pm 2,2$; $93 \pm 2,2$ % th.D.
- Vibrierdichte: $80 \pm 1,5$ % th.D.
- Isoliertabletten: $95 \pm 2,2$ % th.D.

3.2.6 Tablettengeometrie

- Tablettendurchmesser: $5,10 \pm 0,03$
- Tablettenhöhe: $6,0 \pm 1,0$
- Isoliertablettenhöhe: $5,0 \pm 0,2$

3.2.7 Oberflächenbeschaffenheit der Tabletten

- Kantenabplatzungen $\leq 0,3$ mm
- Risse maximal 0,2 mm lang und 0,1 mm breit
- Flächenabplatzungen maximal 2 mm Durchmesser

3.2.8 Untersuchungen und Prüfungen am Brennstoff

- BET-Oberfläche (m^2/g)
- Stöchiometrie
- Primärpartikelgröße (max.)
- Sekundäragglomerate (max.)
- Chemische Analyse (aliquote Mischung aller Chargen) mit Angabe für die Elemente Ag, B, C, Ca, Cd, Cl, Co, Cr, Cu, F, Fe, Mg, Mn, Mo, N, Ni, Pb, V, H_2O und Seltene Erden (Gesamtgehalt in ppm Boräquivalent)
- Pu-Analyse mit Mischungsverhältnis Pu-239 + Pu-241 / U+Pu
- Bestimmung von Durchmesser, Dichte und Höhe jeder Tablette einer Brennstoffsäule

- Keramographische Untersuchungen an den Tabletten mit Radialschliffen (Vergrößerung 10-fach), α -Autoradiografie sowie Schliffbildern (x 200) von Tablettenrand und -mantelfläche (10 Tabletten je Charge).
- Dichteverteilung des vibrierten Brennstoffes mit Duschstrahlmethode.
- Keramografische Untersuchung an vibrierfähigen Kornfraktionen (Schliffaufnahmen (x 400) und α -Autoradiografie).

3.3 Hüllrohrspezifikationen

3.3.1 Werkstoff

Die Hüllrohre werden aus dem Werkstoff
X8CrNiMoNb13 (Werkstoff-Nr. 1.4988)
hergestellt.

Chemische Zusammensetzung:

| Element | Gew.-% |
|----------------|-------------|
| C | $\leq 0,1$ |
| 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 | $\leq 1,2$ |
| P | $\leq 0,02$ |
| S | $\leq 0,02$ |
| Fe | Rest |

3.3.2 Abmessungen

- Außendurchmesser: $6,0 \pm 0,04$ mm
- Innendurchmesser: $5,24 \pm 0,025$ mm
- Wanddicke: $0,38 \pm 0,03$ mm
- Geradheit: 1:1500, bezogen auf jeweils 10 cm Länge
- Ovalität: Innerhalb der Außendurchmessertoleranz

3.3.3 Oberflächenbeschaffenheit

- Rauhigkeit: $\leq 2 \mu\text{m}$
- Oberflächenriefen und -fehler: $\leq 20 \mu\text{m}$
- Oberflächenrisse: Nicht zulässig
- Oberflächenbeschaffenheit: Innere und äußere Oberfläche muß frei von Anlauffarben, Öl, Schmutz, Metallspänen und sonstigen Fremdkörpern sein.

3.3.4 Materialbedingungen

- Vorbehandlung: 10 - 20 % kaltverformt und Wärmebehandlung (40 h - 750 °C)
- Korngröße: kleiner 2,5 Körner/cm² bei 100-facher Vergrößerung (ASTM Nr. 5)
- Mechanische Eigenschaften: Zugfestigkeit, Streckgrenze, Bruchdehnung: maximal und minimal. Werte bei RT und 650 °C.
- Innere Fehler: kleiner 10 % der Wandstärke
- Einschlüsse: kleiner 0,05 mm oder 10⁻³ mm²
- Abdruckversuch nach DIN 50104 mit 200 at Druck
- Querfaltversuch nach DIN 50136
- Aufweitversuch nach DIN 50135

3.3.5 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 Innen-durchmesser sowie Wandstärke mit geeigneten Verfahren, entsprechend für Geradheit und Ovalität.
- Oberflächenbeschaffenheit: Durchführung einer Riß-, Rauhigkeits und Meßprüfung

- Materialbedingungen: Nachweis von Vorbehandlung, Korngröße, mechanischen Eigenschaften, Untersuchung auf innere Fehler und Einschlüsse, Durchführung von Abdruk-, Querfalt- und Aufweitversuchen.

3.4 Brennstabspezifikationen

3.4.1 Innere Geometrie

- Länge der Brennstoffsäule (mm) 80 ± 2 mm
- Länge einer Isoliertablette $5 \pm 0,2$ mm
(Die Brennstäbe mit vibriertem Brennstoff enthalten keine Isoliertabletten)
- Im unteren Endstopfen ist ein Rh-Plättchen zur Absorption des axialen Flußanteils befestigt.
- Innerer Aufbau gemäß Zeichnung Nr. TA2K-16-07-3-2861 (Abb. 1) und Tabelle I (s. Seite 4).

3.4.2 Äußere Geometrie

- Die Gesamtlänge des Stabes beträgt $172 \pm 0,5$ mm
- Außendurchmesser $6,0 \pm 0,04$ mm
- Schweißnahtdurchmesser $\leq 6,15$ mm

3.4.3 Füllgas

- Die Stabprüflinge erhalten vor dem Zuschweißen eine Heliumfüllung.

3.4.4 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} Torrliter/sec ist zulässig.

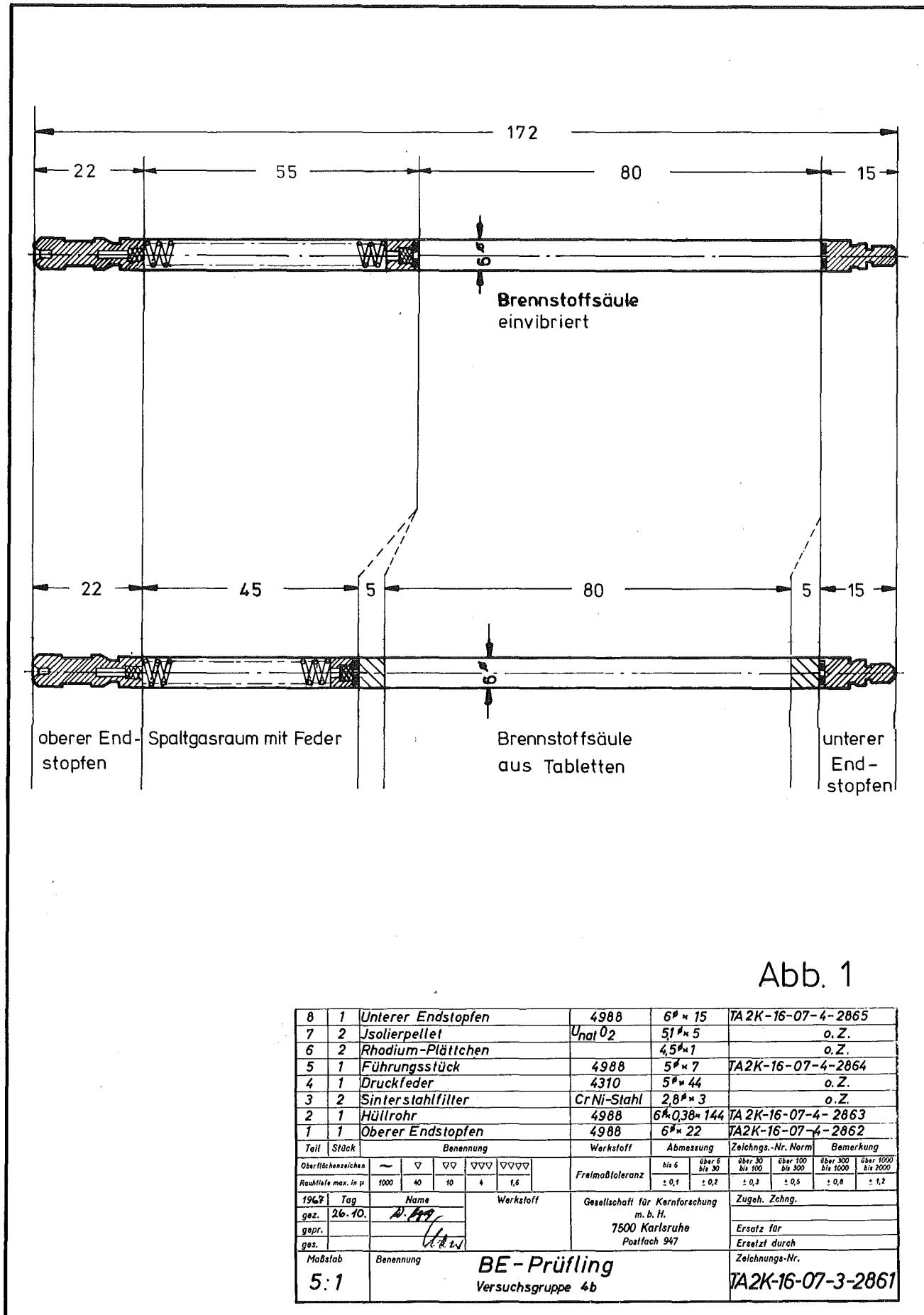


Abb. 1

| | | | | | | |
|--------------------------|------------------|--------------------|-------------|-----------------|---------------------|-----------|
| 8 | 1 | Unterer Endstopfen | 4988 | 6# x 15 | TA 2K-16-07-4-2865 | |
| 7 | 2 | Isolierpellet | Uhal02 | 5# x 5 | | o.Z. |
| 6 | 2 | Rhodium-Plättchen | | 4,5# x 1 | | o.Z. |
| 5 | 1 | Führungsstück | 4988 | 5# x 7 | TA 2K-16-07-4-2864 | |
| 4 | 1 | Druckfeder | 4310 | 5# x 44 | | o.Z. |
| 3 | 2 | Sinterstahlfilter | Cr Ni-Stahl | 2,8# x 3 | | o.Z. |
| 2 | 1 | Hüllrohr | 4988 | 6# x 0,38 x 144 | TA 2K-16-07-4-2863 | |
| 1 | 1 | Oberer Endstopfen | 4988 | 6# x 22 | TA 2K-16-07-4-2862 | |
| Teil | Stück | Benennung | Werkstoff | Abmessung | Zeichnungs-Nr. Norm | Bemerkung |
| Oberflächenzeichen | — | ▽ | ▽▽ | ▽▽▽ | ▽▽▽▽ | |
| Rauhigkeit max. in μ | 1000 | 40 | 10 | 4 | 1,6 | |
| Freimäßtoleranz | bis 6 | über 6 | über 30 | über 100 | über 300 | über 1000 |
| gez. | 26.10. | D. 199 | ± 0,1 | ± 0,2 | ± 0,3 | ± 0,5 |
| gepr. | | | | | ± 0,8 | ± 1,2 |
| ges. | | | | | | |
| Maßstab | Benennung | | | | | |
| 5:1 | BE - Prüfling | | | | | |
| | Versuchsguppe 4b | | | | | |
| | | | | | Zeichnungs-Nr. | |
| | | | | | TA 2K-16-07-3-2861 | |

3.4.5 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
- Durchbiegung 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} Torrliter/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
$$22 \alpha\text{-Zerfälle pro cm}^2 \text{ und Minute}$$
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. NUKEML
 - PuO_2 mit nominell 8,3 % Pu-240, aus verschiedenen Chargen der Lieferung der U.S.A.E.C.

Zur Herstellung des Tablettbrennstoffes wurde das UO_2 unter Argon-5 %-Wasserstoffgemisch bei $1250^{\circ}C$ und das PuO_2 unter Kohlendioxid bei $1100^{\circ}C$ je 2 Stunden lang geglättet, um die Sinteraktivität dieser Pulver zu reduzieren. Zur Herstellung des Vibrierbrennstoffes wurde das Pulver im Anlieferungszustand belassen. In Tabelle II sind die Isotopenzusammensetzungen und die maximale Teilchengröße angegeben.

Tabelle III: Kenndaten der Ausgangspulver

| | | Meßergebnisse (Gew.-%) von Hanford/U.S.A. | | Karlsruhe |
|-------------------------------------|--------|--|--|-----------|
| Charge CO-25-10-3 | Pu-239 | 90,940 | | 90,974 |
| | Pu-240 | 8,154 | | 8,167 |
| | Pu-241 | 0,868 | | 0,819 |
| | Pu-242 | 0,038 | | 0,040 |
| Charge CO-25-10-23 | Pu-239 | 90,844 | | 90,899 |
| | Pu-240 | 8,238 | | 8,209 |
| | Pu-241 | 0,877 | | 0,852 |
| | Pu-242 | 0,041 | | 0,040 |
| Charge CO-26-6-2 | Pu-239 | 90,961 | | 90,997 |
| | Pu-240 | 8,199 | | 8,161 |
| | Pu-241 | 0,802 | | 0,802 |
| | Pu-242 | 0,038 | | 0,040 |
| Charge CO-26-6-8 | Pu-239 | 90,845 | | 90,850 |
| | Pu-240 | 8,301 | | 8,240 |
| | Pu-241 | 0,813 | | 0,867 |
| | Pu-242 | 0,040 | | 0,044 |
| Maximale Teilchen- größe (mm) | | UO ₂ | | < 0,063 |
| | | PuO ₂ | | < 0,032 |

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, Tablettendurchmesser und das Volumen der einseitigen bzw. beidseitigen Stirnflächeneinsenkung durch Maßsintern eingestellt werden mußte, wurde mit Vorversuchen die günstigste Preßdichte und der Schrumpfungsgrad von Höhen und Durchmessern bestimmt. Mit den so gewonnenen Daten wurde das Granulat auf einer mechanischen Presse mit $2 \text{ t}/\text{cm}^2$ Druck verpreßt. Mit Hilfe eines entsprechend geformten Oberstempels bzw. einer Ober- und Unterstempelkombination wurde die einseitige bzw. beidseitige Stirnflächeneinsenkung dabei in die Preßkörper eingepreßt.

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 Tabletten mit 94 % th.D. aus dem 1. Mischansatz wurden unter Stickstoff-8 %-Wasserstoff bei 1450°C , die Tabletten mit 84 % th. D. aus dem 2. Mischansatz bei 1580°C unter Argon-5 %-Wasserstoff gesintert. Die Sinterzeit war jeweils 2 Stunden.

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

4.3 Herstellung des Vibrierbrennstoffes

Das gewählte Herstellungsverfahren geht von Pulvern mit hoher Sinteraktivität aus. Diese wurden granuliert, zu Preßlingen hoher Dichte gepreßt und in grobe Fraktionen gebrochen. Aus dem Brechgut wurden dann die Fraktionen ausgesiebt, die nach einem Rundungsprozeß bzw. dem anschließenden Entwachsen und Sintern bei 1700°C in Argon-5 %-Wasserstoff hauptsächlich in die folgenden vier Teilchengrößenbereiche fielen:

| Fraktion | Teilchengröße |
|----------|----------------|
| I | 1,25 - 1,50 mm |
| II | 0,8 - 1,0 mm |
| III | 0,1 - 0,2 mm |
| IV | < 0,06 mm |

Mit dem zweistündigen Sinterprozeß bei 1700 °C wurde eine möglichst hohe Sinterdichte der Brennstoffpartikel angestrebt.

4.4 Brennstoffeigenschaften

Aus den Tablettengrößen jeder Dichte und aus den Fraktionen des Vibrierbrennstoffes wurden Proben entnommen und mit diesen chemische Analysen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Analysen sind in Tabelle III zusammengefaßt. Die Abb. 2 zeigt Autoradiographien, die die hinreichende Homogenität der Brennstofftabletten und der Vibrierbrennstoffpartikel nachweisen. Die Abb. 3 ist eine Aufnahme von Brennstofftabletten, deren Kantenbeschaffenheit von typischer Qualität ist.

4.5 Hüll- und Strukturmateriale

Zur Herstellung der Stabumhüllung wurde Rohr- und Stabmaterial aus austenitischem Edelstahl X8CrNiMoVb1613, Werkstoff-Nr. 1.4988 bereitgestellt. Die Nennabmessungen dieses Halbzeuges waren:

- bei den Rohren Durchmesser 6,0 mm, Wandstärke 0,38 mm
- beim Stabmaterial Knüppeldurchmesser ca. 10 mm .

4.6 Hüllrohrprüfung

Die Prüfung der Rohre führte die Fa. NUKEM aus. Zur weiteren Verwendung wurden die Rohre Nr. 1, 3 und 4 aufgrund der Angaben im NUKEM-Prüfzeugnis Nr. 944/275/68 vom 26.4.1968 ausgewählt.

Querfehler, Längsfehler und Wandstärke wurden mit Ultraschall ermittelt. Der Innendurchmesser wurde mit einem pneumatischen Verfahren, der Außen-durchmesser kontinuierlich mit einem mechanischen Taster gemessen.

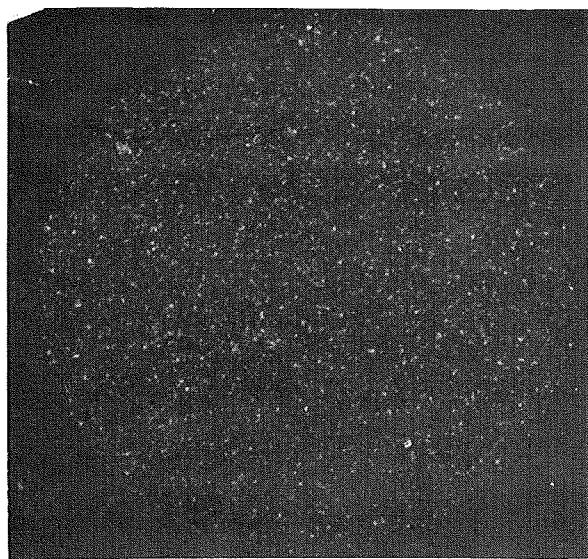
Tabelle III: Brennstoffanalysen

| Materialtyp | Tabletten mit 90 % th.D. | Tabletten mit 84 % th.D. | Vibrier- brennstoff |
|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| Pu U + Pu | 1. Analyse 19,94 2. " 19,85 | 20,22 - | +) +) |
| Chemische Verunreinigungen | (ppm) | (ppm) | (ppm) |
| C | 22 | 109 | 50 |
| Ca | 130 | 55 | 40 |
| Mg | 20 | 10 | 50 |
| Cl | 66 | < 5 | 66 |
| F | 8 | 10 | 10 |
| Ag | 5 | - ++) | < 1 |
| B | 1,2 | < 1 | 4 |
| Cd | 5,0 | < 1 | < 1 |
| Co | - | - | - |
| Cr | 20 | 30 | 40 |
| Cu | 3 | < 5 | < 5 |
| Fe | 60 | 155 | 160 |
| Mn | 10 | 15 | 5 |
| Mo | 40 | 60 | < 10 |
| Ni | 20 | 45 | 40 |
| Pb | < 1 | < 5 | < 10 |
| V | 4 | < 10 | < 10 |
| W | - | - | - |
| Zn | < 5 | < 10 | 30 |
| O/Me-Verhältnis | | 1,98 - 1,99 +++) | |

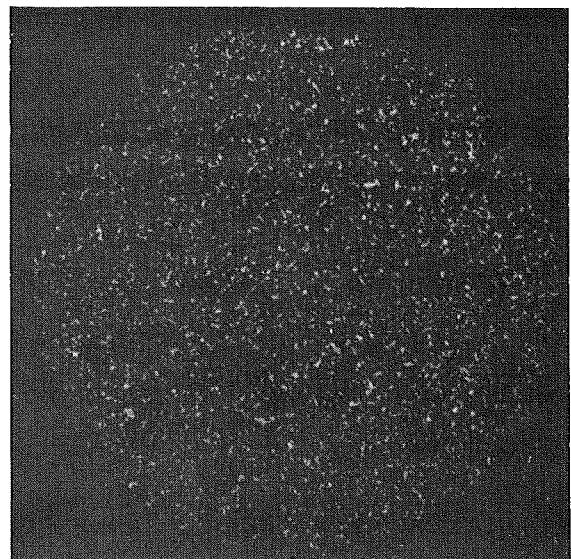
- +) Kein geeignetes Analysenmaterial
++) Nicht analysiert
+++) Angabe auf Grund späterer Messungen

Tabelle IV: Hüllohrre und Prüfungsergebnisse

| Hüllrohr-Nummer nach Prüfzeugnis 944/275/68 | 1 | 3 | 4 |
|--|---------------|---------------|---------------|
| Querfehleranzeige (μ) | o.B. | ca. 25 | o.B. |
| Längsfehleranzeige (μ) | o.B. | ca. 20 | ca. 10 |
| Wandstärke (mm) | 0,350 - 0,380 | 0,350 - 0,390 | 0,350 - 0,370 |
| Innendurchmesser (mm) | 5,225 - 5,235 | 5,220 - 5,260 | 5,230 - 5,235 |
| Außendurchmesser (mm) | 5,975 - 6,000 | 5,975 - 6,025 | 5,975 - 5,990 |

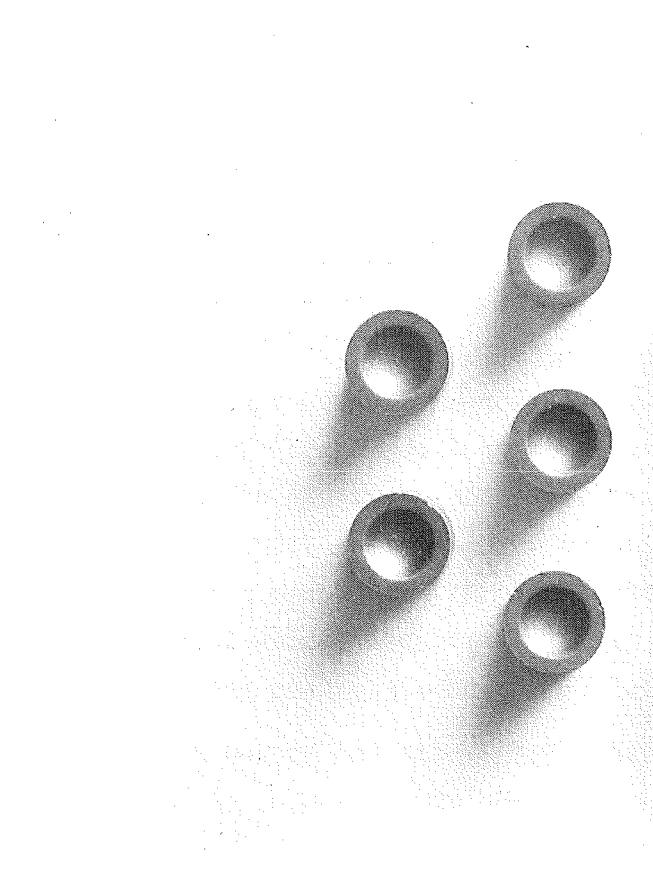


90 % Nenndichte (1. Mischungsansatz)

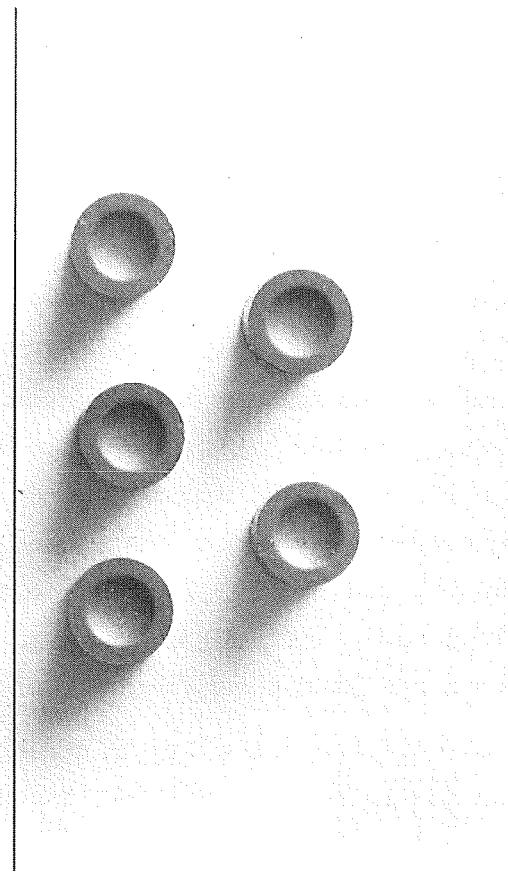


84 % Nenndichte (2. Mischungsansatz)

Abb. 2 Alpha-Autoradiographien einer Tablette



Einseitige Einsenkung
3 Vol.-%



Beidseitige Einsenkung
2 x 1,5 Vol.-%

Abb. 3 Brennstofftabletten mit Stirnflächeneinsenkung

Als Eichfehler für die Quer- und Längsfehlerprüfung dienten Testriefen, auf Rohrstücke außen und innen angebracht. Die Riefentiefe für den Querfehler außen war 28μ , für den Querfehler innen 19μ . Für den Längsfehler außen betrug die Riefentiefe 32μ , für den Längsfehler innen 37μ .

Zur Eichung von Wandstärke und Außendurchmesser dienten genau vermessene Testrohrstücke. Das Normal für die Wandstärke hatte (in 2 Stufen) Abmessungen von 0,35 bzw. 0,41 mm. Das Außendurchmesser-normal hatte die Maße 5,97 bzw. 6,03 mm.

Die wichtigsten Ergebnisse für diese drei Rohre sind in Tabelle IV zusammengefaßt.

4.7 Stabherstellung

4.7.1 Stabprüflinge mit Tablettbrennstoff

Die Prüflinge mit Tablettbrennstoff enthalten 13 Brennstofftabletten sowie an den Enden der Brennstoffsäule je eine UO_2 -Isolier-tablette. Jede Tablette wurde einzeln vermessen hinsichtlich Gewicht und Dimension. Alle diese Ergebnisse sind in Datenlisten zusammengefaßt 77. Die Prüflinge 4b/1 bis 4b/12 enthalten Tabletten mit 90 % th.D., die Prüflinge 4b/13 bis 4b/28 Tabletten mit 84 % th.D. (bei der angegebenen Dichte handelt es sich um die geometrische Dichte, vergl. 3.2). In den ersten sechs Prüflingen jeder Serie sind die Tabletten mit einseitiger Stirnflächeneinsenkung, in die restlichen Prüflinge wurden die Tabletten mit beidseitiger Stirnflächeneinsenkung eingebaut. Die Zusammenfassung der Materialwerte aller Prüflinge bringen die Tabellen V und VI. Diese Angaben werden dort noch durch die Bezifferung der verwendeten Hüllrohrabschnitte ergänzt.

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. Der obere Endstopfen trug jeweils die Bezifferung des Prüflings.

Tabelle V Materialwerte für die Tabletten-Prüflinge, Nenndichte 90 % th.D.

| Prüfling Nr. | Hüllrohr Nr./Abschnitt | 13 Brennstofftabletten | | | | 2 Isoliertabletten | | |
|-----------------|---------------------------|------------------------|----------------------------|--|-------------------------------|--------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| | | Gewicht (g) | Höhe ¹⁾ (mm) | Geom.Dichte ²⁾ (% th.D.) | Pu-Menge ³⁾ (g) | Gewicht (g) | Höhe ¹⁾ (mm) | Dichte ²⁾ (% th.D.) |
| 4B-1 | 1/5 | 15,870 | 79,11 | 90,04 | 2,799 | 2,089 | 9,77 | 96,30 |
| 4B-2 | 1/8 | 15,924 | 79,21 | 90,00 | 2,809 | 2,089 | 9,78 | 96,38 |
| 4B-3 | 1/10 | 15,893 | 79,23 | 89,59 | 2,804 | 2,097 | 9,80 | 95,95 |
| 4B-4 | 1/12 | 15,935 | 79,24 | 89,68 | 2,811 | 2,104 | 9,81 | 96,05 |
| 4B-5 | 1/13 | 15,942 | 79,26 | 89,57 | 2,812 | 2,086 | 9,79 | 95,75 |
| 4B-6 | 1/14 | 15,925 | 79,30 | 89,27 | 2,809 | 2,102 | 9,79 | 96,03 |
| 4B-7 | 1/15 | 16,029 | 79,18 | 89,85 | 2,828 | 2,096 | 9,78 | 95,95 |
| 4B-8 | 1/20 | 16,095 | 79,35 | 89,68 | 2,839 | 2,099 | 9,79 | 96,00 |
| 4B-9 | 1/24 | 16,065 | 79,26 | 89,53 | 2,834 | 2,102 | 9,80 | 95,80 |
| 4B-10 | 3/1 | 16,042 | 79,26 | 89,26 | 2,830 | 2,092 | 9,76 | 95,10 |
| 4B-11 | 3/2 | 16,189 | 79,64 | 89,34 | 2,856 | 2,095 | 9,77 | 95,70 |
| 4B-12 | 3/3 | 16,245 | 79,52 | 89,53 | 2,866 | 2,089 | 9,76 | 95,95 |

Anmerkungen: 1) Die Höhenangaben sind durch Addition der Einzelhöhen der Tabletten ermittelt.

2) Die Dichtewerte sind arithmetische Mittel der Einzeldichten.

3) berechnet für den nominellen PuO_2 -Anteil von 20,0 Gew.%

Prüflinge 4B-7 bis 4B-12 haben einseitige Stirnflächeneinsenkung,
Prüflinge 4B-1 bis 4B-6 haben beidseitige Stirnflächeneinsenkung

Tabelle VI Materialwerte für die Tabletten-Prüflinge, Nenndichte 84 % th.D.

| Prüfling Nr. | Hüllrohr Nr./Abschnitt | Gewicht (g) | 13 Brennstofftabletten | | | 2 Isoliertabletten | | |
|-----------------|---------------------------|----------------|----------------------------|--|-------------------------------|--------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| | | | Höhe ¹⁾ (mm) | Geom.Dichte ²⁾ (% th.D.) | Pu-Menge ³⁾ (g) | Gewicht (g) | Höhe ¹⁾ (mm) | Dichte ²⁾ (% th.D.) |
| 4B-13 | 3/4 | 15,204 | 80,13 | 83,40 | 2,682 | 2,091 | 9,82 | 94,83 |
| 4B-14 | 3/6 | 15,171 | 79,85 | 84,12 | 2,676 | 2,088 | 9,80 | 94,95 |
| 4B-15 | 3/7 | 15,212 | 79,93 | 84,31 | 2,683 | 2,095 | 9,81 | 95,00 |
| 4B-16 | 3/16 | 15,154 | 79,81 | 84,37 | 2,673 | 2,097 | 9,82 | 95,55 |
| 4B-17 | 3/19 | 15,254 | 79,89 | 84,66 | 2,691 | 2,089 | 9,80 | 95,00 |
| 4B-18 | 3/21 | 15,288 | 80,04 | 84,59 | 2,697 | 2,090 | 9,82 | 94,80 |
| 4B-19 | 3/23 | 15,208 | 79,71 | 84,24 | 2,683 | 2,092 | 9,81 | 95,10 |
| 4B-20 | 3/22 | 15,365 | 80,17 | 84,23 | 2,710 | 2,083 | 9,78 | 95,20 |
| 4B-21 | 4/1 | 15,359 | 80,25 | 84,04 | 2,709 | 2,085 | 9,84 | 94,45 |
| 4B-22 | 4/2 | 15,347 | 80,18 | 84,20 | 2,707 | 2,090 | 9,80 | 95,05 |
| 4B-23 | 4/3 | 15,256 | 79,80 | 84,57 | 2,691 | 2,094 | 9,88 | 94,33 |
| 4B-24 | 4/4 | 15,219 | 79,75 | 84,34 | 2,685 | 2,087 | 9,88 | 94,38 |

Anmerkungen:

- 1) Die Höhenangaben sind durch Addition der Einzelhöhen der Tabletten ermittelt.
- 2) Die Dichtewerte sind arithmetische Mittel der Einzeldichten.
- 3) berechnet für den nominellen PuO₂-Anteil von 20,0 Gew.%

Prüflinge 4B-13 bis 4B-18 haben einseitige Stirnflächeneinsenkung,
Prüflinge 4B-19 bis 4B-24 haben beidseitige Stirnflächeneinsenkung

4.7.2 Prüflinge mit Pulverbrennstoff

Um eine 80 mm lange Brennstoffsäule mit 80 % th.D. (geometrische Dichte) zu erhalten, mußte in jedes Hüllrohr ca. 15,3 g Pulverbrennstoff einvibriert werden. Das Einvibrieren selbst geschah mit einem elektrodynamischen Vibrator unter Vakuum (Frequenz 400 bis 2000 Hz; Beschleunigung max. 50 g ; Vibrationszeit 3 min). Nach dem Vibrieren wurden die Prüflinge mit Helium geflutet und die Federn und obere Endstopfen eingesetzt. Das Einschweißen erfolgte mit Hilfe des Elektronenschweißverfahrens im Hochvakuum. Daher war ein abschließender Druckausgleich mit Helium erforderlich. Dazu diente eine kleine seitliche Bohrung im oberen Endstopfen, die dann nach dem Argonarc-Verfahren verschlossen wurde.

Die Einzelangaben zu den Prüflingen mit Vibierbrennstoff finden sich in Tabelle VII.

4.8 Stabprüfungen

4.8.1 Dichtheitsprüfung und Schweißnahtkontrolle

Alle Prüflinge wurden mit Hilfe des Helium-Lecktests auf Dichtheit geprüft und die Schweißnähte der Röntgendiffraktionsstrahlung unterzogen. Die Prüfberichte Nr. 196/68, 231/68 und 70/69 weisen die Dichtheit der verschlossenen Brennstäbe nach. Die Schweißnahtqualität an den unteren und oberen Endstopfen war einwandfrei. Die Prüfprotokolle Rö 63/68, Rö 66/68 und Rö 75/68 enthalten die Angaben zur Prüfung der unteren Endstopfen, die Prüfprotokolle Rö 78/68, Rö 96/68 und Rö 47/69 die Angaben zur Prüfung der oberen Endstopfen [7].

4.8.2 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. Mit Ausnahme der Prüflinge 4b/8, 4b/9 und 4b/10 lag die fixierte Aktivität unter dem Grenzwert von 22 Zerfällen/min · cm². Die Menge des an den genannten Prüflingen punktförmig fixierten radioaktiven Materials war jedoch ohne Bedeutung.

Tabelle VII: Materialwerte für die Prüflinge mit Vibrierbrennstoff, Nenndichte 80 % th.D.

| Prüfling Nr. | Hüllrohr Nr./Abschnitt | Brennstoffgewicht (g) | Brennstoffhöhe (mm) | Schmierdichte (% th.D.) | Pu-Menge [*] (g) | Zusammensetzung des Pulverbrennstoffes nach Teilchengrößen | |
|--------------|------------------------|-----------------------|---------------------|-------------------------|---------------------------|--|--------|
| 4B-25 | 3/10 | 15,258 | 78,5 | 81,46 | 2,692 | Fraktion | Anteil |
| 4B-26 | 3/11 | 15,286 | 78,0 | 82,14 | 2,696 | | |
| 4B-27 | 3/8 | 15,275 | 79,0 | 81,03 | 2,695 | I | 40 % |
| 4B-28 | 3/9 | 15,249 | 79,0 | 80,90 | 2,690 | | |
| 4B-29 | 1/17 | 15,250 | 79,5 | 80,39 | 2,690 | | |
| 4B-30 | 4/6 | 15,259 | 79,5 | 80,44 | 2,692 | | |
| 4B-31 | 4/7 | 15,262 | 78,5 | 81,48 | 2,692 | II | 20 % |
| 4B-32 | 4/8 | 15,263 | 79,0 | 80,97 | 2,692 | | |
| 4B-33 | 4/9 | 15,273 | 80,0 | 80,01 | 2,694 | | |
| 4B-34 | 4/10 | 15,265 | 80,0 | 79,97 | 2,693 | III | 25 % |
| 4B-35 | 4/11 | 15,271 | 79,0 | 81,01 | 2,694 | | |

^{*}) berechnet für den nominellen PuO_2 -Anteil von 20,0 Gew-%

4.8.3 Innere Abmessungen

Im Rahmen der abschließenden Prüfungen wurden die Prüflinge auch in ihrer ganzen Länge geröntgt. Die Abb. 4, 5 und 6 zeigen diese Röntgenaufnahmen. In Tabelle VIII sind die daraus entnommenen Werte für die Länge der Tablettensäule (mit Isoliertabletten) den berechneten Werten gegenübergestellt. Beim Einfüllen der Tabletten ergab sich ein zusätzlicher Längenbedarf von 0,6 bis 1,2 mm. In Tabelle IX sind die Längenwerte für die einvibrierten Brennstoffsäulen zusammengefaßt. Zwischen den gemessenen Längenwerten und den Werten aus den Röntgenaufnahmen ergaben sich nur Differenzen von einigen zehntel Millimetern, die hauptsächlich auf die Meßgenauigkeiten zurückzuführen sind.

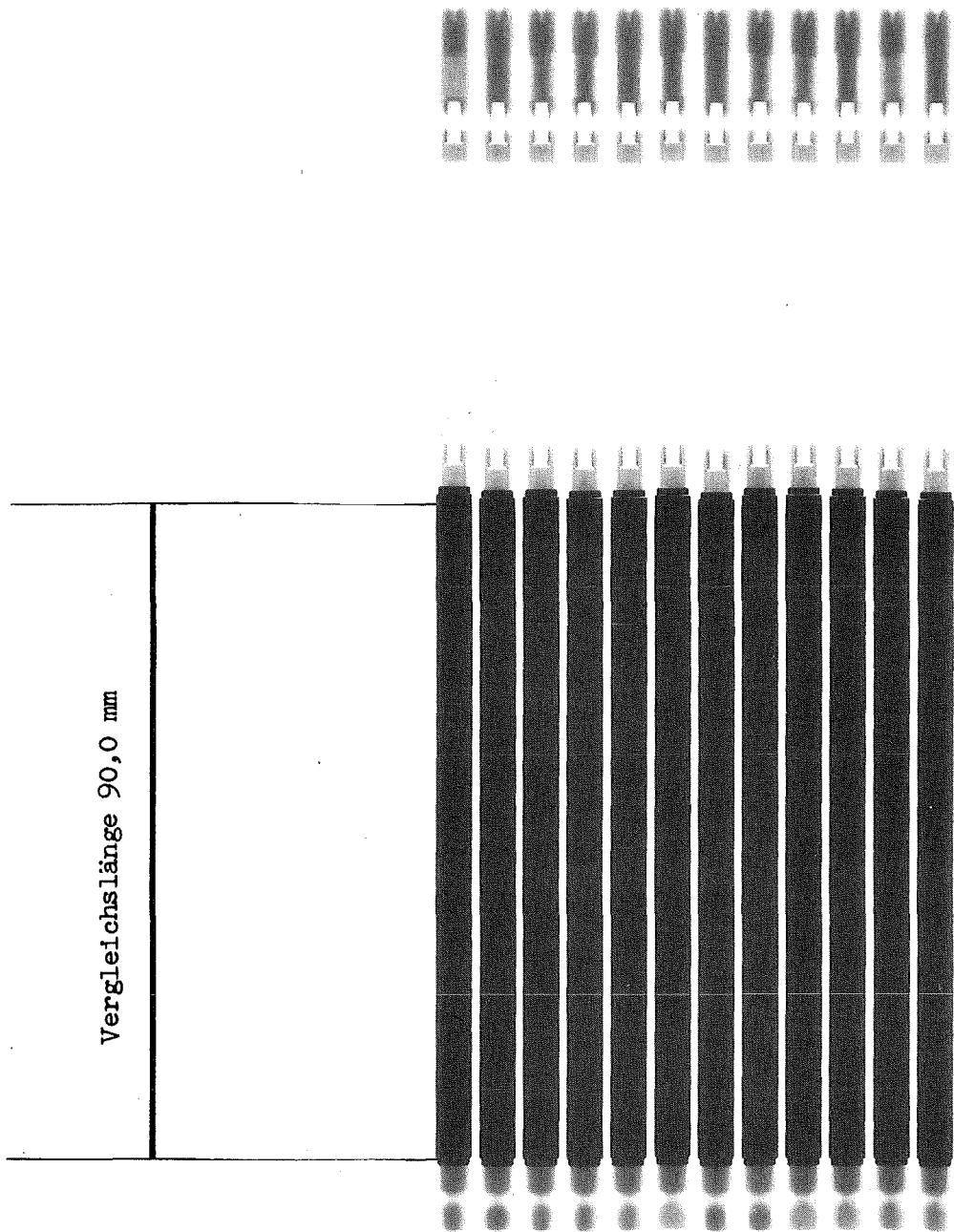
4.8.4 Äußere Abmessungen

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. 188/68, 220/68 und Nr. 75/69 zusammenge stellt 7. 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 X zusammengefaßt. Die schematische Darstellung des Prüflings gibt die Meßposition an.

5. Bestrahlungseinrichtung

5.1 Versuchseinsatz

Die Bestrahlung der Prüflinge wird in den bereits erprobten Doppelkapseln des Typs 4a 8, 9 durchgeführt, wobei infolge der geforderten höheren Hülloberflächentemperaturen das Kühlmittel Natrium durch die eutektische Mischung NaK ersetzt wird ($\lambda_{\text{Na}, 400^\circ\text{C}} = 0,722 \text{ W/cm}^\circ\text{C}$, $\lambda_{\text{NaK}, 400^\circ\text{C}} = 0,262 \text{ W/cm}^\circ\text{C}$). Im Inneren der Kapsel befindet sich der Prüfling in einer dicht verschlossenen Edelstahlkapsel, welche mit dem Kühlmittel gefüllt ist. Der Radialspalt



Prüfling Nr. 4B - | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |

Abb. 4 Röntgen-Aufnahme der Tablettensäulen in den Prüflingen
Nr. 4B-13 bis 4B-24

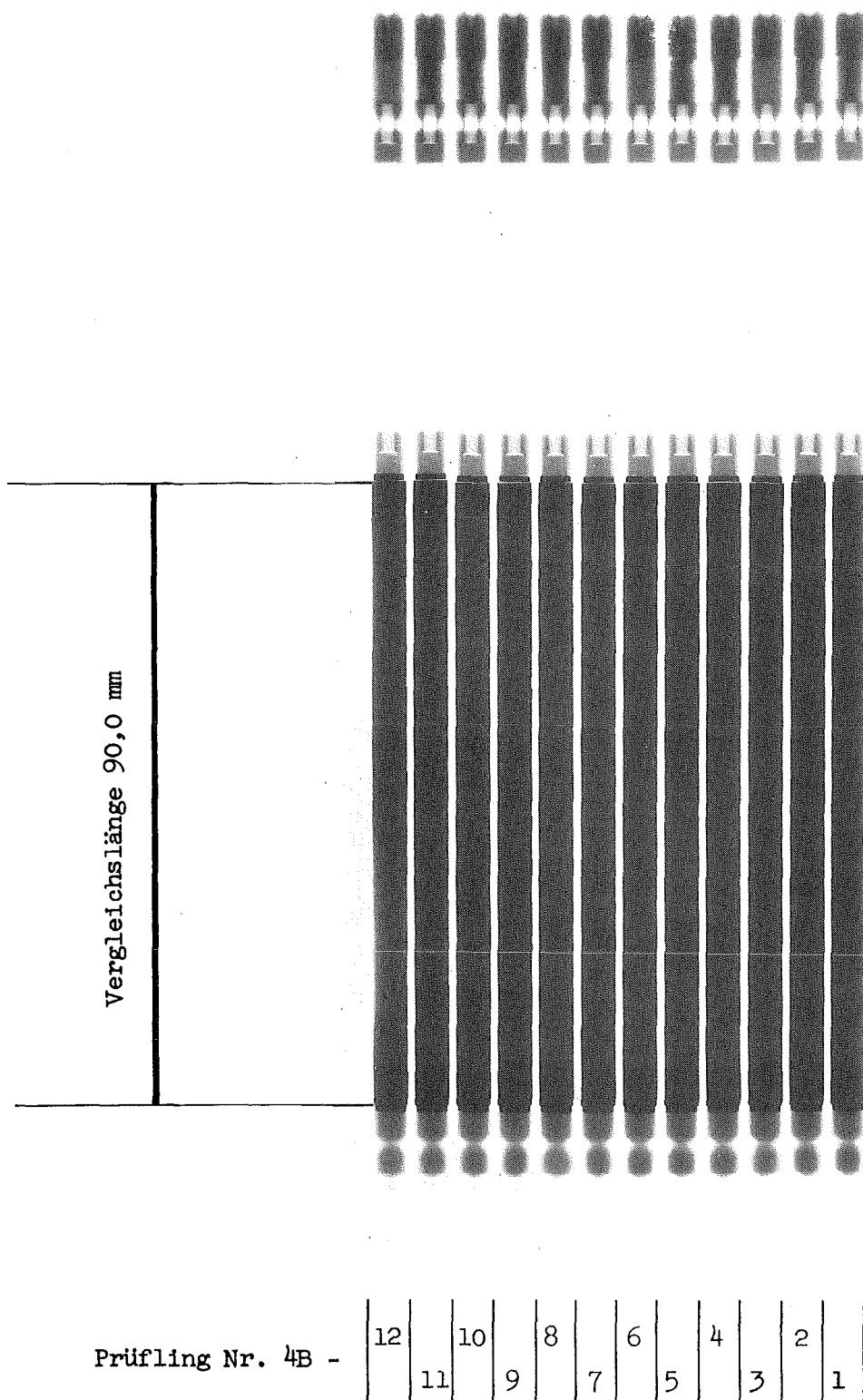


Abb. 5 Röntgen-Aufnahme der Tablettensäulen in den Prüflingen
Nr. 4B-1 bis 4B-12

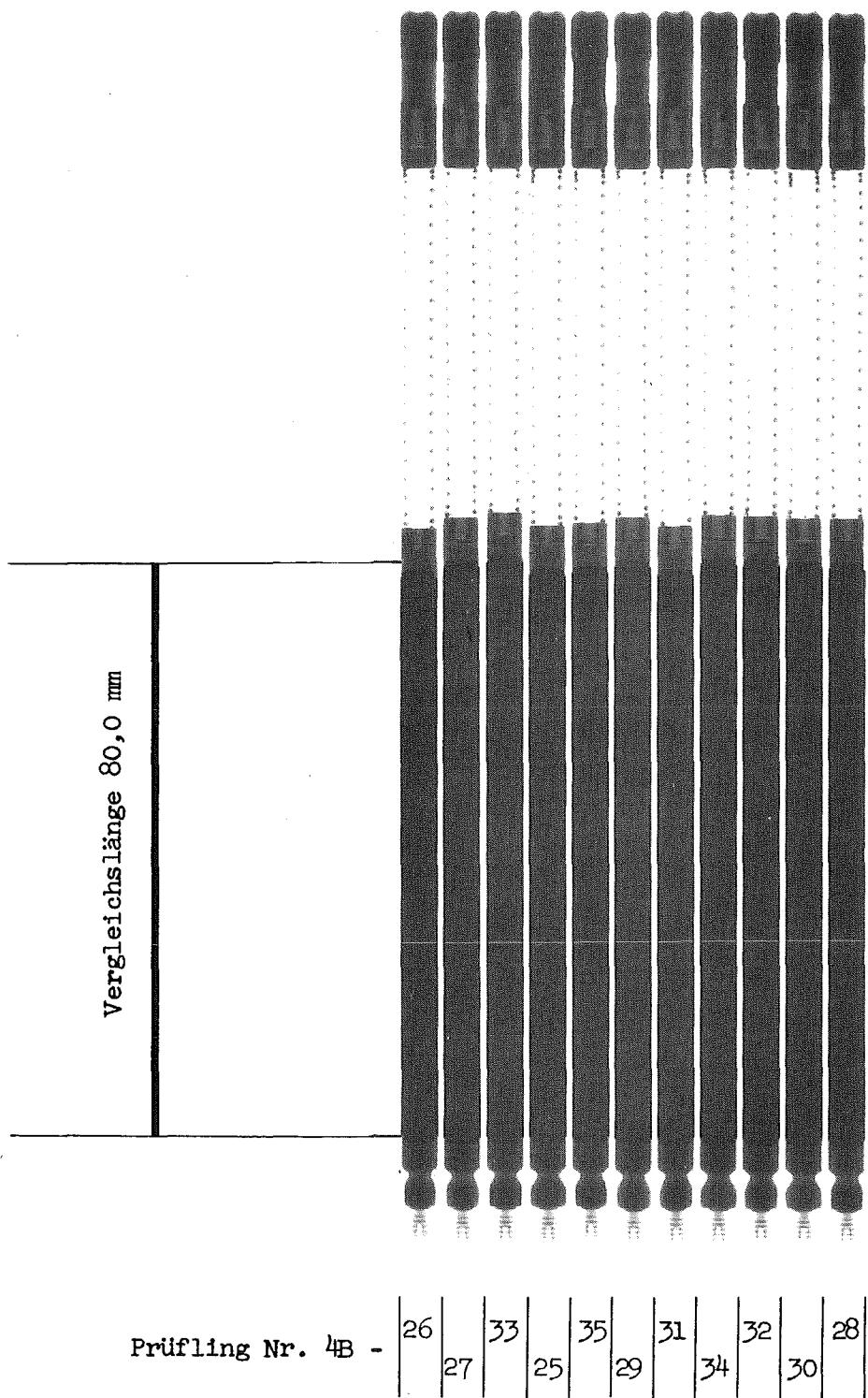


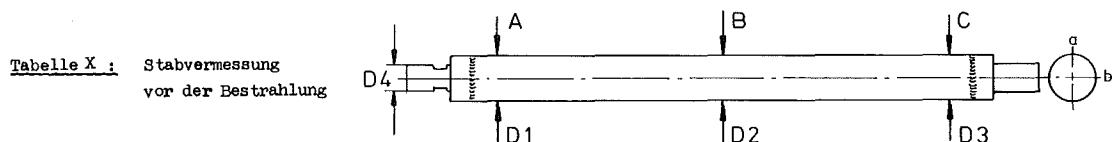
Abb. 6 Röntgen-Aufnahme der einvibrierten Prüflinge

Tabelle VIII: Länge der Tablettensäulen

| Prüfling Nr. | Summe der Tablettenhöhen Brennstoff + Isolierung (mm) | Röntgenaufnahmen Brennstoff + Isolierung (mm) |
|-----------------|---|---|
| 4B-1 | 88,87 | 89,9 |
| 4B-2 | 88,99 | 90,0 |
| 4B-3 | 89,02 | 90,1 |
| 4B-4 | 89,05 | 90,1 |
| 4B-5 | 89,05 | 90,2 |
| 4B-6 | 89,09 | 89,9 |
| 4B-7 | 88,96 | 89,8 |
| 4B-8 | 89,14 | 90,1 |
| 4B-9 | 89,06 | 90,0 |
| 4B-10 | 89,02 | 89,8 |
| 4B-11 | 89,41 | 90,4 |
| 4B-12 | 89,28 | 90,2 |
| 4B-13 | 89,95 | 90,7 |
| 4B-14 | 89,64 | 90,4 |
| 4B-15 | 89,74 | 90,5 |
| 4B-16 | 89,63 | 90,3 |
| 4B-17 | 89,69 | 90,5 |
| 4B-18 | 89,86 | 90,6 |
| 4B-19 | 89,52 | 90,3 |
| 4B-20 | 89,95 | 90,6 |
| 4B-21 | 90,09 | 90,7 |
| 4B-22 | 89,98 | 90,6 |
| 4B-23 | 89,68 | 90,4 |
| 4B-24 | 89,63 | 90,5 |

Tabelle IX: Länge der Vibrierpulversäulen

| Prüfling- Nr. | Gemessene Längen (mm) | Röntgenaufnahmen (mm) |
|------------------|--------------------------|--------------------------|
| 4B-25 | 78,5 | 78,4 |
| 4B-26 | 78,0 | 78,0 |
| 4B-27 | 79,0 | 79,7 |
| 4B-28 | 79,0 | 79,7 |
| 4B-29 | 79,5 | 79,8 |
| 4B-30 | 79,5 | 79,6 |
| 4B-31 | 78,5 | 78,4 |
| 4B-32 | 79,0 | 79,8 |
| 4B-33 | 80,0 | 80,3 |
| 4B-34 | 80,0 | 79,9 |
| 4B-35 | 79,0 | 78,9 |



| Prüflings- bezeichnung | Meß- position | Durchmesser (mm) | | | | Rundlauf (mm) | | |
|---------------------------|------------------|------------------|-------|-------|-------|---------------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | A | B | C |
| 4 B 27 | a | 6,014 | 6,018 | 6,012 | 5,995 | 0,05 | 0,12 | 0,06 |
| | b | 6,010 | 6,019 | 6,010 | 5,996 | | | |
| 4 B 26 | a | 6,011 | 6,016 | 6,005 | 5,997 | 0,12 | 0,07 | 0,05 |
| | b | 6,010 | 6,015 | 6,006 | 5,997 | | | |
| 4 B 25 | a | 6,015 | 6,015 | 6,010 | 6,002 | 0,08 | 0,22 | 0,29 |
| | b | 6,018 | 6,015 | 6,012 | 6,004 | | | |
| 4 B 34 | a | 6,013 | 6,018 | 6,009 | 5,972 | 0,13 | 0,10 | 0,08 |
| | b | 6,008 | 6,021 | 6,009 | 5,974 | | | |
| 4 B 32 | a | 6,013 | 6,016 | 6,010 | 5,991 | 0,07 | 0,04 | 0,03 |
| | b | 6,015 | 6,014 | 6,013 | 5,992 | | | |
| 4 B 30 | a | 6,012 | 6,014 | 6,008 | 6,000 | 0,07 | 0,01 | 0,06 |
| | b | 6,016 | 6,016 | 6,008 | 5,994 | | | |
| 4 B 35 | a | 6,010 | 6,017 | 6,012 | 6,007 | 0,14 | 0,09 | 0,03 |
| | b | 6,010 | 6,016 | 6,010 | 6,004 | | | |
| 4 B 33 | a | 6,012 | 6,017 | 6,006 | 5,995 | 0,10 | 0,09 | 0,04 |
| | b | 6,012 | 6,016 | 6,016 | 6,002 | | | |
| 4 B 31 | a | 6,017 | 6,014 | 6,012 | 5,997 | 0,14 | 0,09 | 0,09 |
| | b | 6,016 | 6,012 | 6,000 | 5,999 | | | |
| 4 B 29 | a | 6,008 | 6,016 | 6,013 | 6,000 | 0,18 | 0,23 | 0,00 |
| | b | 6,017 | 6,014 | 6,010 | 6,000 | | | |
| 4 B 28 | a | 6,010 | 6,016 | 6,010 | 6,000 | 0,16 | 0,11 | 0,08 |
| | b | 6,010 | 6,014 | 6,010 | 5,994 | | | |
| 4 B 4 | a | 5,936 | 5,978 | 5,992 | 6,014 | 0,07 | 0,27 | 0,01 |
| | b | 5,992 | 5,981 | 5,995 | 6,014 | | | |
| 4 B 3 | a | 5,995 | 5,987 | 5,990 | 6,036 | 0,07 | 0,02 | 0,07 |
| | b | 5,998 | 5,985 | 5,993 | 6,039 | | | |
| 4 B 2 | a | 5,994 | 5,983 | 5,990 | 6,019 | 0,09 | 0,02 | 0,07 |
| | b | 5,995 | 5,983 | 5,993 | 6,017 | | | |
| 4 B 1 | a | 5,990 | 5,983 | 5,991 | 6,030 | 0,10 | 0,02 | 0,02 |
| | b | 5,989 | 5,980 | 5,984 | 6,030 | | | |
| 4 B 9 | a | 5,994 | 5,975 | 5,992 | 6,022 | 0,07 | 0,14 | 0,04 |
| | b | 5,998 | 5,979 | 5,992 | 6,024 | | | |
| 4 B 8 | a | 5,986 | 5,978 | 5,982 | 6,012 | 0,02 | 0,09 | 0,11 |
| | b | 5,985 | 5,979 | 5,986 | 6,014 | | | |
| 4 B 7 | a | 5,984 | 5,980 | 5,990 | 6,008 | 0,14 | 0,26 | 0,02 |
| | b | 5,984 | 5,979 | 5,988 | 6,011 | | | |
| 4 B 5 | a | 5,995 | 5,982 | 5,994 | 6,012 | 0,10 | 0,03 | 0,01 |
| | b | 5,995 | 5,982 | 6,002 | 6,016 | | | |
| 4 B 11 | a | 5,999 | 5,978 | 5,994 | 6,005 | 0,08 | 0,09 | 0,03 |
| | b | 5,996 | 5,978 | 5,996 | 6,009 | | | |
| 4 B 12 | a | 5,989 | 5,973 | 5,987 | 6,029 | 0,13 | 0,13 | 0,01 |
| | b | 5,984 | 5,974 | 5,981 | 6,029 | | | |
| 4 B 10 | a | 5,988 | 5,980 | 5,993 | 6,013 | 0,11 | 0,04 | 0,05 |
| | b | 5,996 | 5,979 | 5,993 | 6,015 | | | |
| 4 B 6 | a | 5,994 | 5,984 | 5,997 | 6,004 | 0,06 | 0,03 | 0,02 |
| | b | 5,995 | 5,984 | 5,990 | 6,010 | | | |
| 4 B 15 | | 5,98 | | 5,99 | 6,01 | 0,08 | 0,06 | 0,06 |
| 4 B 14 | | 5,98 | | 5,99 | 6,01 | 0,06 | 0,02 | 0,06 |
| 4 B 13 | | 5,98 | | 5,99 | 6,02 | 0,03 | 0,02 | 0,00 |
| 4 B 18 | | 5,98 | | 5,99 | 6,01 | 0,12 | 0,13 | 0,06 |
| 4 B 17 | | 5,98 | | 5,99 | 6,015 | 0,06 | 0,09 | 0,10 |
| 4 B 16 | | 5,98 | | 5,99 | 6,01 | 0,04 | 0,04 | 0,08 |
| 4 B 21 | | 5,99 | | 6,01 | 6,01 | 0,09 | 0,07 | 0,04 |
| 4 B 20 | | 5,98 | | 5,99 | 6,015 | 0,08 | 0,12 | 0,03 |
| 4 B 19 | | 5,98 | | 5,99 | 6,01 | 0,05 | 0,03 | 0,05 |
| 4 B 24 | | 5,995 | | 6,005 | 6,015 | 0,10 | 0,06 | 0,05 |
| 4 B 23 | | 5,99 | | 6,01 | 6,02 | 0,12 | 0,14 | 0,06 |
| 4 B 22 | | 6,00 | | 6,01 | 6,03 | 0,03 | 0,05 | 0,09 |

zwischen Hülloberfläche und dem Edelstahlrohr beträgt 6 mm. In diesen Spalt werden sogenannte Antikonvektionsrohre eingeführt, welche eine Erhöhung des Temperatursprungs in diesem Spalt und damit der Hülloberflächentemperatur bewirken. In der ersten Kapselserie der Versuchsgruppe wurde ein Rohr, in der zweiten Serie zwei dieser Antikonvektionsrohre eingesetzt, welches einer Temperaturerhöhung um ca. 50 ° entspricht (vgl. Kap. 6.2).

Der weitere Aufbau der Kapsel sowie der Temperaturverlauf ist aus den Abb. 7 und 8 ersichtlich.

5.2 Bestrahlung im FR 2

Die Kapselversuchseinsätze (KVE), welche bis zu vier Prüflingen aufnehmen können, wurden im FR 2 auf normalen Brennelement- sowie Isotopenkanal-Positionen bestrahlt. (Tabelle XI).

Die Bestrahlungszeiten lagen je nach Zielabbrand zwischen 46 und 637 Tagen (Vollastäquivalent).

Aus der in Tabelle XI enthaltenen Positionskarte des FR 2-Cores sind die Bestrahlungspositionen der einzelnen Kapselversuchseinsätze je Reaktorzyklus ersichtlich.

6. Ablauf der Bestrahlung

6.1 Reaktorzyklen und Neutronenfluß

Die Bestrahlung der insgesamt 35 Brennstabprüflinge in 11 Kapselversuchseinsätzen (KVE) begann mit KVE 42 am 16.9.1968 in Zyklus I/68 und endete mit dem Ausbau der KVE's 49 und 58 am 14.6.1971 nach Zyklus D/71. Die Bestrahlung mußte bei den KVE's 42 bis 45 frühzeitig abgebrochen werden, da infolge überhöhter Temperaturen Stabdefekte vermutet wurden. Bei der Kapseldemontage stellte es sich heraus, daß lediglich zwei Prüflinge in KVE 43 defekt waren (vergl. Kap. 7): Infolge eines starken Hochwachsens der vibrierten Brennstoffsäule unter die Wärmedämmung (Abb. 7, Kapselausschnitt) kam es zu starker Überhitzung und einem Durchschmelzen der Prüflinge. Bei den

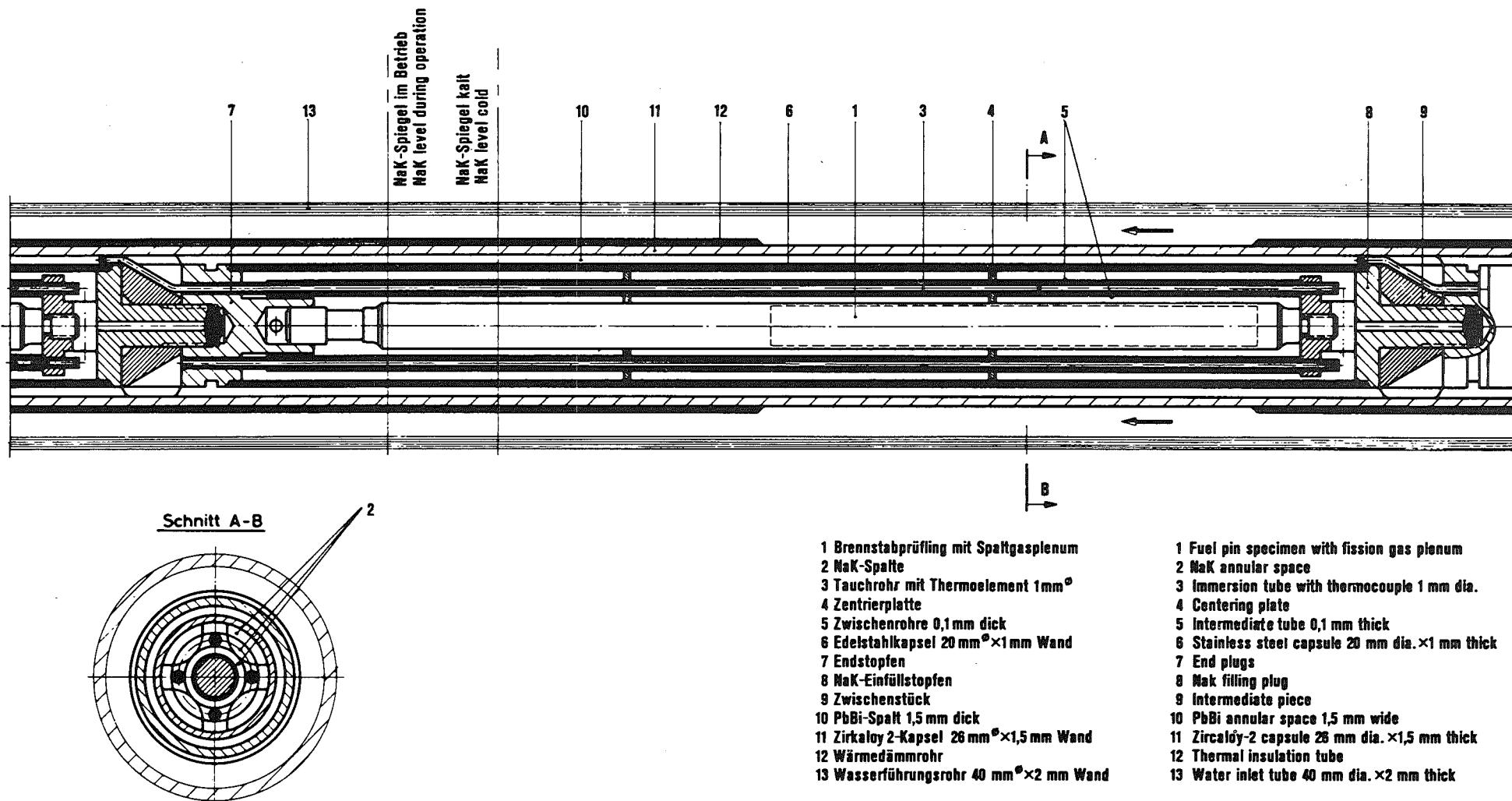


Abb. 7 Ausschnitt aus der NaK/PbBi-Doppelkapsel

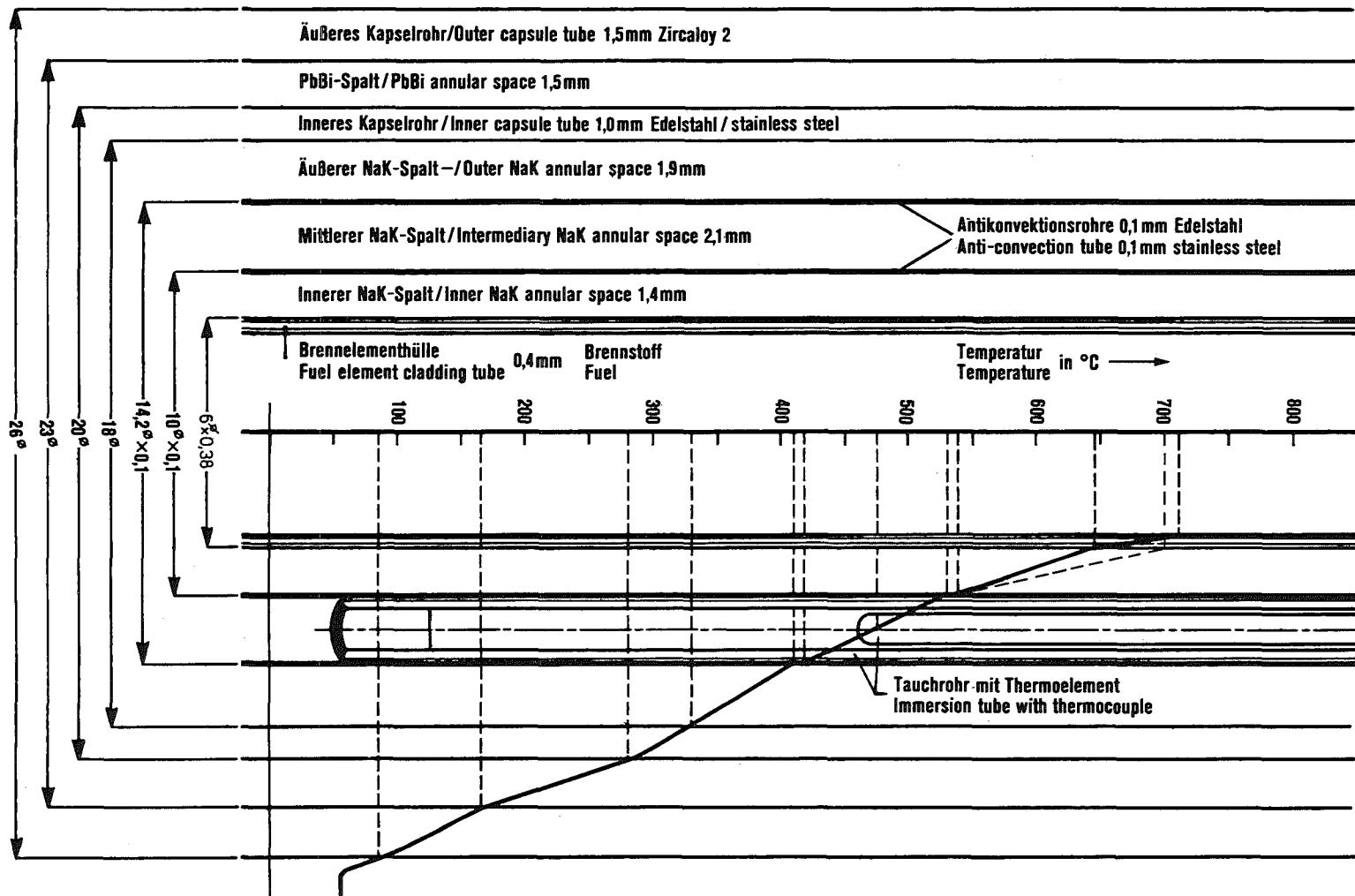
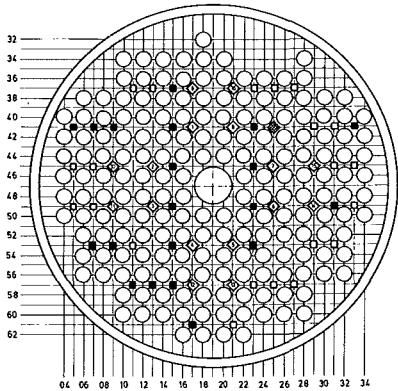


Abb. 8 Temperaturverlauf innerhalb der Bestrahlungskapsel bei 550 W/cm Stableistung

Tabelle XI : Bestrahlungsablauf der Kapselversuchseinsätze der Versuchsgruppe 4b
(Bestrahlungspositionen im FR 2-Core)

| 1968 | | | | 1969 | | | | | | | | | | | | 1970 | | | | | | | | | | | | 1971 | | | |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|--|--|
| Zyklus | I | K | L | A | B | C | D | E | G | H | I | K | L | A | B | C | D | E | F | G | H | I | K | A | B | C | D | | | | |
| Vollast- tage | 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 | 29,4 | 29,7 | 29,5 | 27,7 | 15,0 | 29,8 | 25,1 | 29,7 | 27,5 | | | | |
| KVE- SS Nr. A | 1-1 | 0-3 | -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 | 2-1 | 0-1 | 1-0 | 3-0 | 0-2 | 4-0 | 1-1 | 0-2 | 0-0 | | | | |
| 4 2 | 49 | 45 | 37 | 40 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 33 | 31 | 13 | 22 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 3 | - | 61 | 40 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | - | 21 | 22 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 4 | - | 49 | 49 | 49 | 36 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | - | 33 | 33 | 33 | 20 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 5 | - | - | 45 | 44 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | - | - | 31 | 26 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 7 | - | - | - | 45 | 45 | 49 | 49 | 49 | 49 | 49 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 50 | | | | | | | | |
| | - | - | - | 31 | 31 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 22 | | | | | | | | |
| 4 8 | - | - | - | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 37 | 37 | 37 | 37 | 37 | 37 | 37 | 37 | 37 | 37 | 37 | 37 | 37 | 37 | | | | | | | | | |
| | - | - | - | 5 | 5 | 5 | 5 | 15 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | | | | | | | | | |
| 4 9 | - | - | - | - | 49 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 37 | 37 | 37 | | | |
| | - | - | - | - | 33 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | | | |
| 5 5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 45 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | | | | | | | | | |
| | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 5 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | | | | | | | | | |
| 5 6 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 | | | | | | | | |
| | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | | | | | | | | |
| 5 7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 53 | 53 | 53 | 53 | 53 | 53 | 53 | 53 | 53 | 53 | 53 | 53 | 53 | 57 | 57 | 52 | 52 | 52 | | | |
| | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 23 | 23 | 23 | 10 | 10 | | | |
| 5 8 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 45 | 54 | 54 | 54 | 54 | 54 | 54 | 54 | 54 | 54 | 54 | 54 | 54 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | | | |
| | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 33 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | | | |

- Brennelementposition
- ◊ Trennm-Abschaltstab
- ◆ Feinregelstab
- Isotopenkanal-Position
- zu Flußmessungen benutzte Isotopenkanal-Positionen



Positions-karte
FR 2 - Core

+)
SS = Schnellschluß
A = Abschaltung normal

anderen Kapseln (42, 44 und 45) sind die Temperaturerhöhungen auf Verformungen der NaK-Kapsel und der Antikonvektionsrohre, auf Beschädigungen der Thermoelement-Tauchrohre, der Thermoelemente selbst sowie auf Lunkerbildung im PbBi und im NaK zurückzuführen. Bei den Kapselstrukturteilen (Kapselrohr, Antikonvektionsrohre) wurden z.T. starke Korrosionsangriffe festgestellt [10, 11].

In Tabelle XI ist der zeitliche Bestrahlungsablauf der einzelnen Kapselversuchseinsätzen, charakterisiert durch Bestrahlungsposition, Bestrahlungsdauer je Zyklus (in Tagen Vollastäquivalent, bezogen aus 44 MW (s.u.)) sowie durch Abschaltungen und Schnellschlüsse, die ein qualitatives Maß für die thermisch-zyklische Belastungen darstellen, zusammengestellt. Bei den Abschaltungen sind neben den echten Abschaltungen auch Leistungsreduktionen auf Leistungen mit $N < 10^{-3} N_{\text{nom}}$, wobei $N_{\text{nom}} = 44 \text{ MW}$ Nominalleistung darstellt, berücksichtigt worden.

Im Bestrahlungszeitraum der Versuchsgruppe 4b sind verschiedene Messungen des thermischen Flusses in den Isotopenkanal-Positionen des FR 2 (vergl. Positionskarte in Tabelle XI) durchgeführt worden [12]. Es handelt sich um Messungen des vertikalen Flußverlaufes, bei denen Co-Sonden als Flußdetektoren eingesetzt wurden. In Tabelle XIII und Abb. 9 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 XIII).

Wie Rechnungen mit den Zellprogramm WIMS [13] zeigten, 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.

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

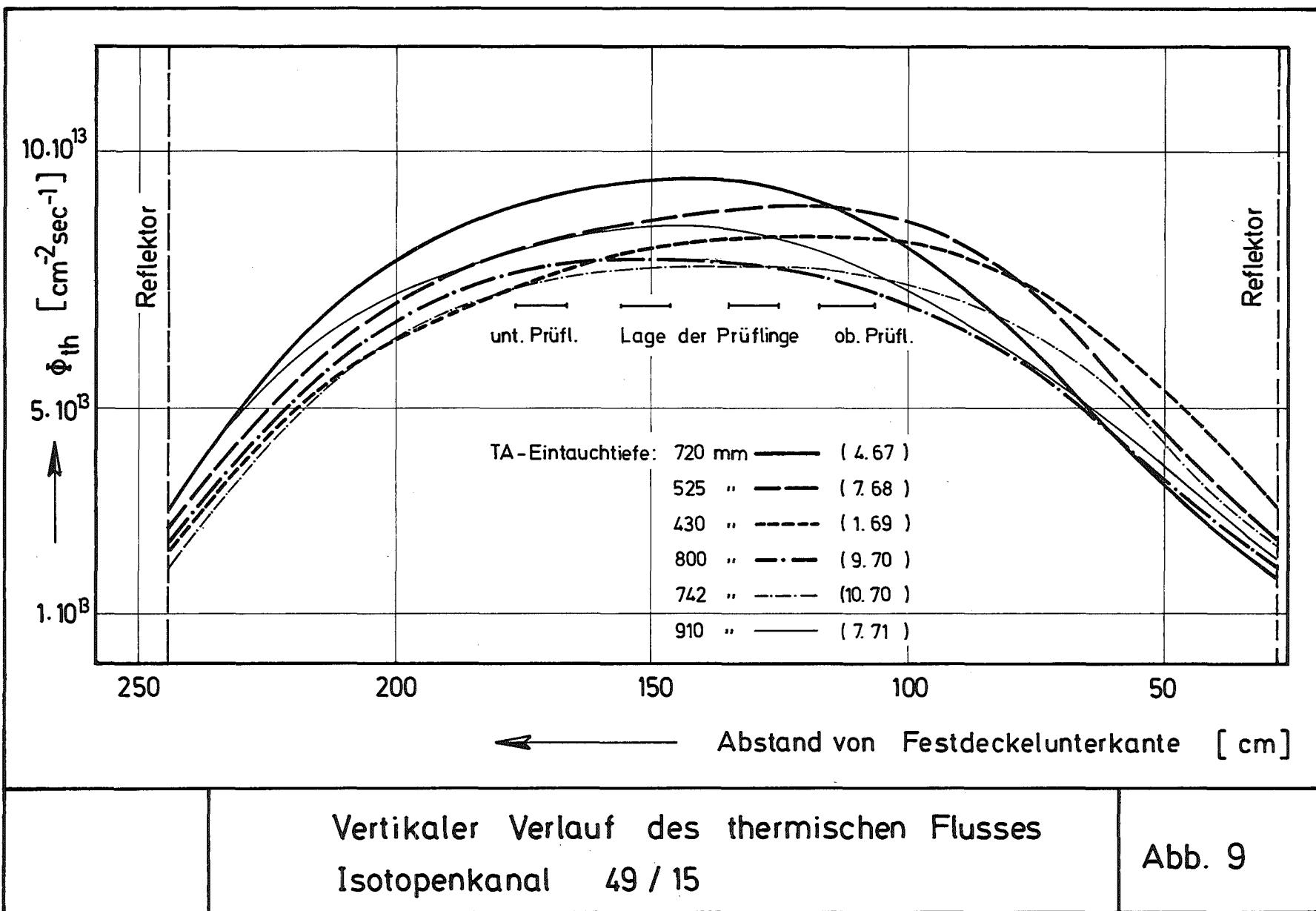
| Iso. ϕ_{th} | 37/15 | 41/05 | 41/07 | 41/09 | 41/15 | 41/23 | 41/33 | 45/15 | 45/23 | 49/15 | 49/23 | 49/31 | 53/07 | 53/09 | 51/15 | 53/23 | 57/13 | 57/15 | 61/17 |
|---------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------|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

Erläuterung:

Spalte 1: $\phi_{th} = 7,9 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{sec}$ bei TA-Stellung 525 mm, gemessen Juli 1968 in Iso.-Kanal 37/15 in Höhe der oberen Prüflingsmitte

$\phi_{th} = 7,5 \times 10^{13} \text{ " " " " 430 mm, " Jan. 1969 " " " "$

(entsprechend für die folgenden Prüflinge und Iso.-Kanäle)



6.2 Temperatur und Stableistung

Die bei den Bestrahlungen der Versuchsgruppe 4b verwendeten NaK-PbBi-Doppelkapseln sind mit Thermoelementen ausgestattet, welche die Messung der Na-Temperatur in Höhe der Bestrahlungsprüflinge gestatten. Aus diesem Meßwert kann die Hülloberflächentemperatur sowie die Stableistung des Prüflings ermittelt werden. Wie Eichversuche zeigen, besteht gute Übereinstimmung zwischen experimentell und rechnerisch ermittelten Werten. Abweichungen von Maximal 20°C röhren 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. 10 dargestellten Zusammenhänge zwischen Meßstellentemperatur T_m , Hülloberflächentemperatur T_{Ha} und Stableistung X .

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

In den Tabellen XIV und XV sind die Hülloberflächentemperaturen der Prüflinge bei Zyklusbeginn und Maximalwerte sowie die mittleren Stableistungen bei Zyklusbeginn und -ende zusammengestellt. Die Abb. 11 bis 33 zeigen schließlich den zeitlichen Temperaturverlauf.

Wie die Abbildungen 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-Stellung) zu suchen sind. In den Abb. 34 - 42 ist schließlich der axiale Verlauf der Hülloberflächentemperatur einiger Prüflinge mit 2 bis 3 Thermoelementen dargestellt, wobei der Anfangs-, End- und Maximalzustand ausgewählt wurde.

Aus diesen Abbildungen sowie aus den Überprüfungen der Thermoelemente geht hervor, daß bei KVE-47 die Thermoelemente 1 und 2, bei KVE-49 die Thermoelemente 1, 2 und 6 sowie bei KVE-55 das Thermoelement 2 nach einer bestimmten Zeit deutlich abgefallen und als defekt zu bezeichnen sind. In diesen Abbildungen ist daher ein (gestrichelt gezeichneter) Verlauf angegeben, welcher den wahrscheinlichen Temperaturverlauf darstellt, wobei als Orientierung der Verlauf der Temperaturen der anderen Prüflinge des KVE zugrundegelegt wurde. Diese korrigierten Werte werden zur Korrektur der Abbrände herangezogen (s. Abschn. 6.3).

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

$$A = \frac{\ell}{m} \cdot \sum \chi_i \cdot t_i \text{ MWd/kg M}$$

mit ℓ = Brennstofflänge (cm)

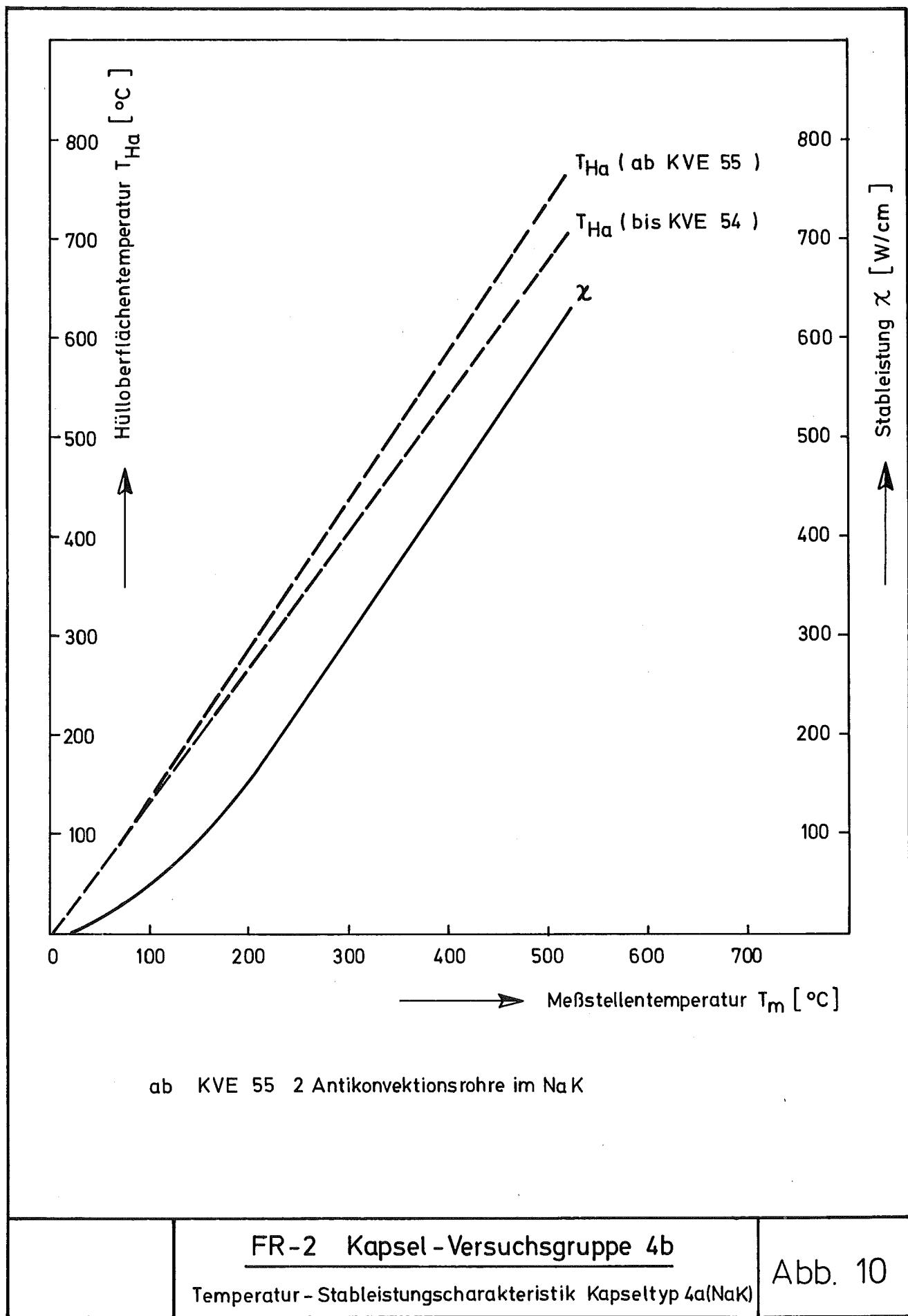
m = Brennstoffgewicht (g)

χ_i = Stableistung (W/cm) (arithmetisches Mittel/Zyklus)

t_i = Bestrahlungszeit (Vollastäquivalent) (d) je Zyklus

In Tabelle XVI sind die aus den Meßwerten aller Thermoelemente berechneten Abbrände sowie die hieraus - bei Prüflingen mit mehreren Thermoelementen - resultierenden Mittelwerte zusammengestellt. Bei Prüflingen mit defekten Thermoelementen sind die korrigierten Abbrandwerte aus den über die geschätzten Hülltemperaturen nach der Umrechnungsvorschrift ermittelten (mittleren) Stableistungen in Klammern hinzugefügt.

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).



FR-2 Kapsel - Versuchsgruppe 4b

Temperatur - Stableistungscharakteristik Kapseltyp 4a(NaK)

Abb. 10

Tabelle XIII

Instrumentierungsplan der Versuchsgruppe 4b

K V E

| 42 | 43 | 44 | 45 | 47 | 48 | 49 | 55 | 56 | 57 | 58 |
|------------------------------|------------------------------|------------------------------|--|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Prüfling TE | - | - | - | <u>4B/4</u> 7/40 | <u>4B/9</u> 7/40 | <u>4B/11</u> 7/40 | <u>4B/15</u> 7/60 6/22 | <u>4B/18</u> 7/60 6/22 | <u>4B/21</u> 7/60 6/22 | <u>4B/24</u> 7/60 6/22 |
| <u>4B/27</u> 6/42 | <u>4B/34</u> 6/42 | <u>4B/35</u> 6/42 | <u>4B/29</u> 6/42 | <u>4B/3</u> 6/55 | <u>4B/8</u> 6/55 | <u>4B/12</u> 6/55 | <u>4B/14</u> 5/60 | <u>4B/17</u> 5/60 | <u>4B/20</u> 5/60 | <u>4B/23</u> 5/60 |
| <u>4B/26</u> 5/67 | <u>4B/32</u> 5/67 | <u>4B/33</u> 5/67 | <u>4B/28</u> 5/67 | <u>4B/2</u> 4/55 | <u>4B/7</u> 4/55 | <u>4B/10</u> 4/55 | <u>4B/13</u> 3/65 | <u>4B/16</u> 3/65 | <u>4B/19</u> 3/65 | <u>4B/22</u> 3/65 |
| 4/42 | 4/42 | 4/42 | 4/42 | 3/25 | 3/25 | 3/25 | 3/25 | 2/40 | 2/40 | 2/40 |
| 3/17 | 3/17 | 3/17 | 3/17 | | | | 1/15 | 1/15 | 1/15 | 1/15 |
| <u>4B/25</u> 2/60 1/22 | <u>4B/30</u> 2/60 1/22 | <u>4B/31</u> 2/60 1/22 | <u>4B/24</u> (Vg. 4a) 2/60 1/22 | <u>4B/1</u> 2/55 1/25 | <u>4B/5</u> 2/55 1/25 | <u>4B/6</u> 2/55 1/25 | - | - | - | - |

Erläuterung:

Die Verteilung der Thermoelemente auf die einzelnen Prüflinge der Kapselversuchseinsätze ist folgendermaßen zu verstehen:

Beispiel: KVE 42, unterster Prüfling 4B/25, Thermoelement 1 in 22 mm Abstand vom unteren Brennstoffsäulenende, Thermoelement 2 in 60 mm Abstand. Die Genauigkeit der Höhenangabe beträgt ± 1 mm.

Tabelle XIV: Hülloberflächentemperaturen der Prüflinge (Anfangswert bei Zyklusbeginn, Maximalwert)

| 1 9 6 8 | | | | 1 9 6 9 | | | | | | | | 1 9 7 0 | | | | | | | | 1 9 7 1 | | | | | | | |
|-----------|------|-----|-----|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|
| | I | K | L | A | B | C | D | E | G | H | I | K | L | A | B | C | D | E | F | G | H | I | K | A | B | C | D |
| KVE TE °C | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Prüfling | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 42/6 | Beg. | 426 | 502 | 514 | 480 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4B/27 | max. | 434 | 507 | 534 | 473 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 42/3,4,5 | Beg. | 481 | 573 | 579 | 460 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4B/26 | max. | 490 | 588 | 614 | 481 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 42/1,2 | Beg. | 481 | 577 | 563 | 414 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4B/25 | max. | 493 | 602 | 599 | 441 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 43/6 | Beg. | - | 384 | 578 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4B/34 | max. | - | 396 | 582 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 43/3,4,5 | Beg. | - | 460 | 584 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4B/32 | max. | - | 462 | 861 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 43/1,2 | Beg. | - | 484 | 631 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4B/30 | max. | - | 489 | 704 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 44/6 | Beg. | - | 419 | 429 | 412 | 414 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4B/35 | max. | - | 425 | 445 | 423 | 428 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 44/3,4,5 | Beg. | - | 463 | 474 | 429 | 460 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4B/33 | max. | - | 479 | 500 | 432 | 520 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 44/1,2 | Beg. | - | 454 | 461 | 436 | 432 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4B/31 | max. | - | 470 | 486 | 445 | 500 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 45/6 | Beg. | - | - | 491 | 544 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4B/29 | max. | - | - | 538 | 624 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 45/3,4,5 | Beg. | - | - | 570 | 641 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4B/28 | max. | - | - | 616 | 653 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 47/7 | Beg. | - | - | - | 438 | 459 | 333 | 337 | 357 | 378 | 351 | 432 | 381 | 394 | 401 | 368 | 390 | 335 | 338 | 343 | 379 | | | | | | |
| 4B/4 | max. | - | - | - | 473 | 493 | 357 | 398 | 392 | 391 | 370 | 470 | 520 | 415 | 425 | 377 | 414 | 372 | 354 | 362 | 395 | | | | | | |
| 47/5,6 | Beg. | - | - | - | 490 | 513 | 372 | 367 | 390 | 387 | 364 | 445 | 398 | 391 | 403 | 359 | 383 | 334 | 339 | 345 | 367 | | | | | | |
| 4B/3 | max. | - | - | - | 507 | 520 | 380 | 373 | 411 | 398 | 365 | 466 | 432 | 398 | 418 | 363 | 391 | 363 | 353 | 353 | 428 | | | | | | |
| 47/3,4 | Beg. | - | - | - | 512 | 559 | 402 | 394 | 414 | 405 | 383 | 472 | 429 | 398 | 411 | 372 | 391 | 348 | 351 | 360 | 368 | | | | | | |
| 4B/2 | max. | - | - | - | 527 | 575 | 413 | 411 | 449 | 421 | 391 | 478 | 448 | 418 | 432 | 391 | 411 | 380 | 370 | 374 | 378 | | | | | | |
| 47/1,2 | Beg. | - | - | - | 538 | 609 | 191 | 191 | 192 | 199 | 184 | 230 | 217 | 199 | 203 | 187 | 195 | 181 | 185 | 193 | 182 | | | | | | |
| 4B/1 | max. | - | - | - | 557 | 609 | 252 | 199 | 203 | 207 | 220 | 234 | 241 | 207 | 214 | 200 | 207 | 193 | 196 | 200 | 186 | | | | | | |
| 48/7 | Beg. | - | - | - | 374 | 457 | 477 | 469 | 382 | 369 | 399 | 373 | 376 | 402 | 384 | 373 | 369 | 355 | 402 | | | | | | | | |
| 4B/9 | max. | - | - | - | 410 | 482 | 497 | 500 | 479 | 391 | 466 | 407 | 408 | 407 | 398 | 388 | 377 | 441 | 421 | | | | | | | | |
| 48/5,6 | Beg. | - | - | - | 408 | 340 | 352 | 350 | 405 | 395 | 423 | 394 | 378 | 410 | 388 | 382 | 376 | 380 | 419 | | | | | | | | |
| 4B/8 | max. | - | - | - | 442 | 355 | 363 | 370 | 500 | 404 | 500 | 407 | 408 | 422 | 398 | 387 | 384 | 438 | 438 | | | | | | | | |
| 48/3,4 | Beg. | - | - | - | 465 | 412 | 425 | 433 | 428 | 421 | 446 | 417 | 403 | 417 | 412 | 408 | 397 | 451 | 452 | | | | | | | | |
| 4B/7 | max. | - | - | - | 486 | 438 | 470 | 459 | 527 | 433 | 520 | 432 | 432 | 425 | 428 | 411 | 477 | 473 | | | | | | | | | |
| 48/1,2 | Beg. | - | - | - | 450 | 357 | 371 | 373 | 436 | 412 | 430 | 421 | 399 | 413 | 404 | 385 | 373 | 426 | 425 | | | | | | | | |
| 4B/5 | max. | - | - | - | 468 | 388 | 391 | 384 | 520 | 432 | 543 | 432 | 445 | 445 | 425 | 418 | 398 | 466 | 445 | | | | | | | | |
| 49/7 | Beg. | - | - | - | 361 | 428 | 429 | 433 | 436 | 397 | 408 | 368 | 378 | 387 | 338 | 382 | 308 | 310 | 289 | 313 | 292 | 318 | 315 | 296 | 291 | 284 | |
| 4B/11 | max. | - | - | - | 388 | 466 | 500 | 616 | 448 | 423 | 421 | 425 | 391 | 411 | 393 | 513 | 350 | 324 | 336 | 325 | 312 | 340 | 315 | 302 | 298 | 293 | |
| 49/5,6 | Beg. | - | - | - | 428 | 529 | 489 | 523 | 495 | 484 | 493 | 453 | 443 | 452 | 388 | 429 | 312 | 338 | 324 | 334 | 315 | 334 | 316 | 302 | 296 | 295 | |
| 4B/12 | max. | - | - | - | 432 | 539 | 507 | 554 | 507 | 493 | 500 | 492 | 445 | 466 | 414 | 445 | 373 | 346 | 388 | 336 | 333 | 350 | 316 | 312 | 302 | 298 | |
| 49/3,4 | Beg. | - | - | - | 456 | 550 | 555 | 560 | 518 | 516 | 525 | 492 | 451 | 471 | 430 | 516 | 425 | 415 | 399 | 410 | 390 | 398 | 370 | 450 | 343 | 345 | |
| 4B/10 | max. | - | - | - | 473 | 568 | 625 | 603 | 534 | 520 | 541 | 507 | 466 | 473 | 486 | 523 | 477 | 429 | 421 | 432 | 415 | 411 | 391 | 370 | 361 | 350 | |
| 49/1,2 | Beg. | - | - | - | 468 | 580 | 243 | 241 | 233 | 223 | 217 | 216 | 200 | 211 | 194 | 197 | 146 | 157 | 162 | 159 | 143 | 137 | 140 | 138 | 133 | 126 | |
| 4B/6 | max. | - | - | - | 486 | 606 | 254 | 260 | 248 | 230 | 234 | 220 | 207 | 214 | 197 | 200 | 156 | 162 | 169 | 170 | 145 | 145 | 140 | 152 | 139 | 136 | |
| 55/6,7 | Beg. | - | - | - | - | - | - | - | - | 394 | 604 | 588 | 532 | 567 | 507 | 549 | 502 | 409 | | | | | | | | | |
| 4B/15 | max. | - | - | - | - | - | - | - | - | 425 | 638 | 653 | 612 | 603 | 550 | 569 | 534 | 493 | | | | | | | | | |
| 55/4,5 | Beg. | - | - | - | - | - | - | - | - | 420 | 663 | 669 | 616 | 631 | 575 | 612 | 549 | 481 | | | | | | | | | |
| 4B/14 | max. | - | - | - | - | - | - | - | - | 429 | 672 | 678 | 658 | 638 | 585 | 612 | 562 | 509 | | | | | | | | | |
| 55/1,2,3 | Beg. | - | - | - | - | - | - | - | - | 485 | 714 | 771 | 365 | 370 | 345 | 360 | 252 | 219 | | | | | | | | | |
| 4B/13 | max. | - | - | - | - | - | - | - | - | 498 | 774 | 729 | 399 | 390 | 486 | 362 | 262 | 230 | | | | | | | | | |
| 56/6,7 | Beg. | - | - | - | - | - | - | - | - | 543 | 462 | 498 | 429 | 443 | 414 | 447 | 413 | 370 | 356 | 376 | | | | | | | |
| 4B/18 | max. | - | - | - | - | - | - | - | - | 560 | 472 | 524 | 478 | 463 | 440 | 457 | 432 | 396 | 379 | 388 | | | | | | | |
| 56/4,5 | Beg. | - | - | - | - | - | - | - | - | 570 | 486 | 550 | 488 | 473 | 440 | 467 | 430 | 401 | 376 | 396 | | | | | | | |
| 4B/17 | max. | - | - | - | - | - | - | - | - | 585 | 509 | 557 | 527 | 478 | 455 | 472 | 451 | 417 | 396 | 410 | | | | | | | |
| 56/1,2,3 | Beg. | - | - | - | - | - | - | - | - | 574 | 495 | 561 | 516 | 483 | 454 | 476 | 436 | 428 | 400 | 425 | | | | | | | |
| 4B/16 | max. | - | - | - | - | - | - | - | - | 589 | 539 | 577 | 569 | 510 | 470 | 502 | 470 | 448 | 419 | 442 | | | | | | | |
| 57/6,7 | Beg. | - | - | - | - | - | - | - | - | 456 | 408 | 421 | 389 | 402 | 430 | 370 | 406 | 336 | 332 | 338 | 376 | 341 | 448 | 400 | 425 | 413 | |
| 4B/21 | max. | - | - | - | - | - | - | - | - | 470 | 435 | 448 | 448 | 425 | 509 | 410 | 429 | 382 | 349 | 356 | | | | | | | |

Tabelle XV: Mittlere Stableistungen der Prüflinge bei Zyklusbeginn und -ende

| 1968 | | | | 1969 | | | | | | | | 1970 | | | | | | | | 1971 | | | | | | | |
|------------------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|
| Zyklus | I | K | L | A | B | C | D | E | G | H | I | K | L | A | B | C | D | E | F | G | H | I | K | A | B | C | D |
| KVE TE °C X Beg. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Prüfling X Ende | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 42/6 X Beg. | 352 | 426 | 437 | 404 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4B/27 X Ende | 350 | 395 | 414 | 341 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 42/3,4,5 X Beg. | 406 | 495 | 501 | 386 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4B/26 X Ende | 387 | 439 | 443 | 402 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 42/1,2 X Beg. | 406 | 498 | 485 | 341 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4B/25 X Ende | 376 | 424 | 419 | 364 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 43/6 X Beg. | - | 312 | 499 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4B/34 X Ende | - | 318 | 463 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 43/3,4,5 X Beg. | - | 385 | 505 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4B/32 X Ende | - | 354 | 530 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 43/1,2 X Beg. | - | 408 | 551 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4B/30 X Ende | - | 354 | 524 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 44/6 X Beg. | - | 346 | 355 | 339 | 341 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4B/35 X Ende | - | 326 | 343 | 321 | 311 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 44/3,4,5 X Beg. | - | 388 | 399 | 355 | 385 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4B/33 X Ende | - | 356 | 343 | 342 | 439 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 44/1,2 X Beg. | - | 379 | 387 | 363 | 358 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4B/31 X Ende | - | 325 | 331 | 313 | 424 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 45/6 X Beg. | - | - | 415 | 466 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4B/29 X Ende | - | - | 396 | 457 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 45/3,4,5 X Beg. | - | - | 492 | 560 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4B/28 X Ende | - | - | 432 | 512 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 47/7 X Beg. | - | - | - | 365 | 384 | 263 | 267 | 286 | 306 | 280 | 358 | 309 | 321 | 329 | 296 | 317 | 265 | 268 | 272 | 308 | | | | | | | |
| 4B/4 X Ende | - | - | - | 387 | 400 | 288 | 280 | 307 | 310 | 280 | 385 | 378 | 335 | 338 | 297 | 339 | 288 | 269 | 284 | 313 | | | | | | | |
| 47/5,6 X Beg. | - | - | - | 414 | 437 | 300 | 295 | 318 | 315 | 293 | 371 | 325 | 318 | 330 | 288 | 311 | 264 | 268 | 274 | 295 | | | | | | | |
| 4B/3 X Ende | - | - | - | 400 | 415 | 299 | 290 | 306 | 298 | 263 | 372 | 357 | 307 | 308 | 274 | 298 | 260 | 248 | 260 | 281 | | | | | | | |
| 47/3,4 X Beg. | - | - | - | 436 | 481 | 330 | 322 | 341 | 333 | 311 | 397 | 356 | 326 | 338 | 301 | 319 | 277 | 281 | 289 | 297 | | | | | | | |
| 4B/2 X Ende | - | - | - | 403 | 426 | 302 | 294 | 310 | 295 | 257 | 366 | 344 | 304 | 302 | 272 | 284 | 255 | 246 | 256 | 263 | | | | | | | |
| 47/1,2 X Beg. | - | - | - | 461 | 570 | 126 | 125 | 126 | 134 | 119 | 163 | 151 | 133 | 138 | 122 | 129 | 116 | 120 | 128 | 117 | | | | | | | |
| 4B/1 X Ende | - | - | - | 436 | 263 | 108 | 110 | 116 | 110 | 96 | 147 | 136 | 117 | 118 | 106 | 115 | 102 | 104 | 108 | 110 | | | | | | | |
| 48/7 X Beg. | - | - | - | 302 | 383 | 402 | 394 | 310 | 298 | 327 | 301 | 304 | 330 | 312 | 301 | 298 | 284 | 330 | | | | | | | | | |
| 4B/9 X Ende | - | - | - | 329 | 350 | 347 | 335 | 306 | 320 | 380 | 335 | 314 | 328 | 312 | 311 | 293 | 365 | 338 | | | | | | | | | |
| 48/5,6 X Beg. | - | - | - | 335 | 269 | 281 | 279 | 332 | 323 | 349 | 321 | 307 | 337 | 316 | 310 | 304 | 308 | 346 | | | | | | | | | |
| 4B/8 X Ende | - | - | - | 293 | 239 | 240 | 234 | 405 | 312 | 414 | 319 | 303 | 307 | 292 | 305 | 283 | 360 | 349 | | | | | | | | | |
| 48/3,4 X Beg. | - | - | - | 390 | 339 | 351 | 359 | 354 | 348 | 372 | 344 | 330 | 344 | 339 | 336 | 325 | 377 | 378 | | | | | | | | | |
| 4B/7 X Ende | - | - | - | 359 | 349 | 385 | 378 | 398 | 314 | 436 | 315 | 303 | 315 | 319 | 314 | 288 | 382 | 332 | | | | | | | | | |
| 48/1,2 X Beg. | - | - | - | 376 | 286 | 300 | 302 | 362 | 339 | 357 | 348 | 326 | 340 | 332 | 313 | 301 | 362 | 351 | | | | | | | | | |
| 4B/5 X Ende | - | - | - | 341 | 312 | 313 | 304 | 381 | 294 | 450 | 305 | 292 | 295 | 280 | 282 | 253 | 347 | 293 | | | | | | | | | |
| 49/7 X Beg. | - | - | - | 290 | 354 | 355 | 360 | 362 | 325 | 335 | 296 | 306 | 315 | 267 | 310 | 238 | 241 | 221 | 244 | 223 | 248 | 245 | 227 | 222 | 216 | | |
| 4B/11 X Ende | - | - | - | 311 | 388 | 369 | 392 | 345 | 326 | 343 | 355 | 313 | 327 | 325 | 316 | 270 | 234 | 246 | 243 | 234 | 265 | 245 | 224 | 204 | 219 | 164 | |
| 49/5,6 X Beg. | - | - | - | 354 | 452 | 413 | 447 | 420 | 408 | 418 | 379 | 369 | 378 | 316 | 355 | 271 | 268 | 254 | 264 | 245 | 264 | 245 | 233 | 227 | 226 | 157 | |
| 4B/12 X Ende | - | - | - | 351 | 437 | 409 | 440 | 389 | 368 | 391 | 398 | 340 | 349 | 336 | 324 | 274 | 239 | 249 | 245 | 233 | 263 | 245 | 211 | 195 | 210 | 152 | |
| 49/3,4 X Beg. | - | - | - | 381 | 472 | 477 | 482 | 442 | 440 | 448 | 416 | 377 | 396 | 357 | 440 | 352 | 342 | 326 | 337 | 317 | 326 | 300 | 279 | 272 | 275 | 185 | |
| 4B/10 X Ende | - | - | - | 338 | 425 | 425 | 458 | 583 | 366 | 393 | 391 | 333 | 341 | 388 | 388 | 331 | 295 | 289 | 275 | 307 | 180 | 239 | 222 | 243 | 168 | | |
| 49/1,2 X Beg. | - | - | - | 393 | 502 | 176 | 174 | 166 | 156 | 161 | 150 | 135 | 145 | 129 | 132 | 82 | 93 | 97 | 95 | 79 | 73 | 75 | 75 | 70 | 69 | 63 | |
| 4B/6 X Ende | - | - | - | 332 | 426 | 151 | 153 | 133 | 122 | 139 | 135 | 115 | 124 | 110 | 104 | 89 | 82 | 84 | 81 | 73 | 74 | 75 | 63 | 54 | 69 | 52 | |
| 55/6,7 X Beg. | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | |
| 4B/15 X Ende | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | |
| 55/4,5 X Beg. | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | |
| 4B/14 X Ende | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | |
| 55/1,2,2 X Beg. | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | |
| 4B/13 X Ende | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | |
| 56/6,7 X Beg. | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | |
| 4B/18 X Ende | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | |
| 56/4,5 X Beg. | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | |
| 4B/17 X Ende | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | |
| 56/1,2,2 X Beg. | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | |
| 4B/16 X Ende | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | |
| 57/6,7 X Beg. | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | |
| 4B/21 X Ende | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | |
| 57/4,5 X Beg. | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | |
| 4B/20 X Ende | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | |
| 57/1,2,2 X Beg. | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | |
| 4B/19 X Ende | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | |
| 58/6,7 X Beg. | - | - | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

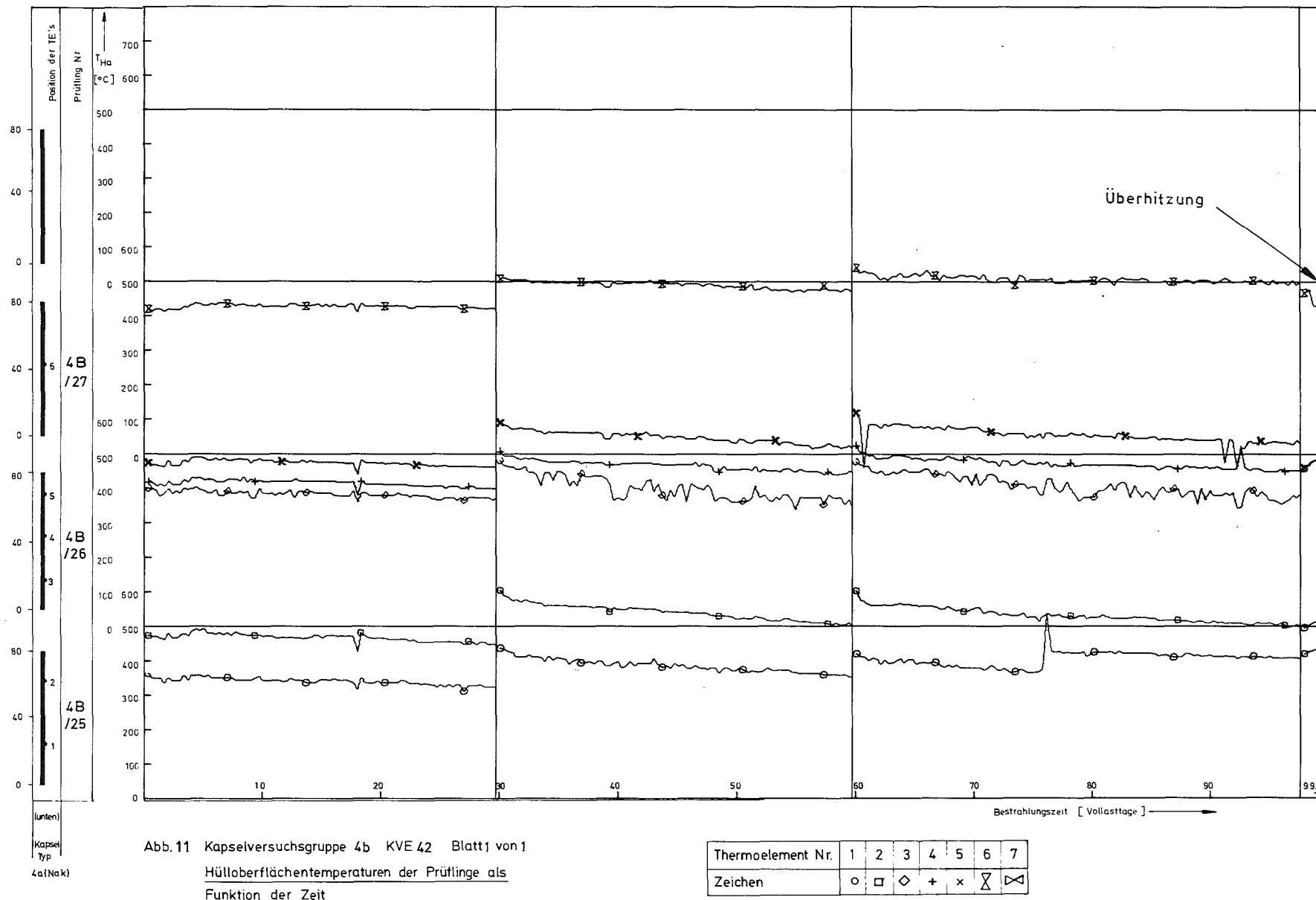


Abb. 11 Kapselversuchsgruppe 4b KVE 42 Blatt 1 von 1
Hülloberflacentemperaturen der Pruflinge als
Funktion der Zeit

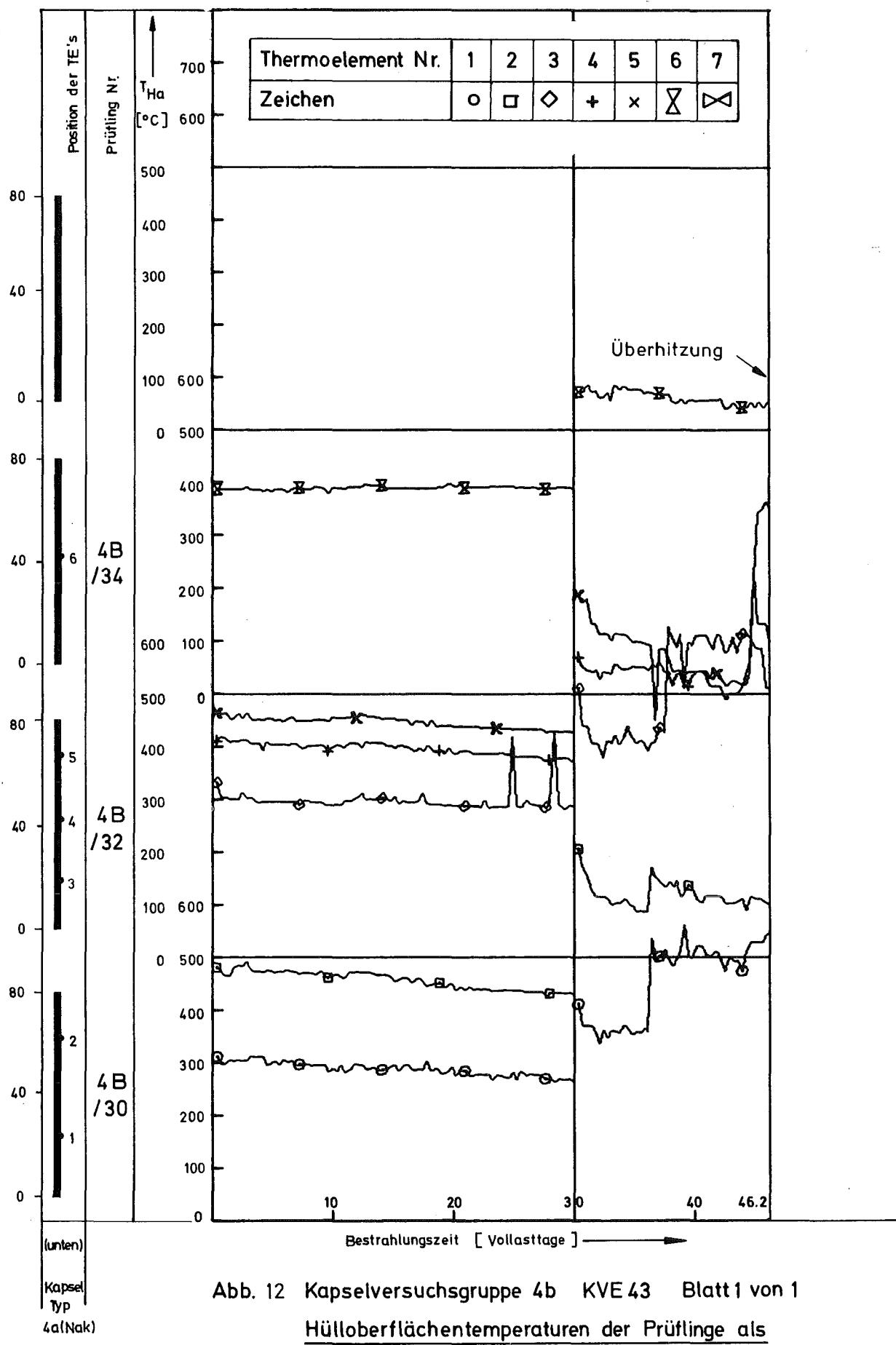


Abb. 12 Kapselversuchsgruppe 4b KVE 43 Blatt 1 von 1
Hülloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

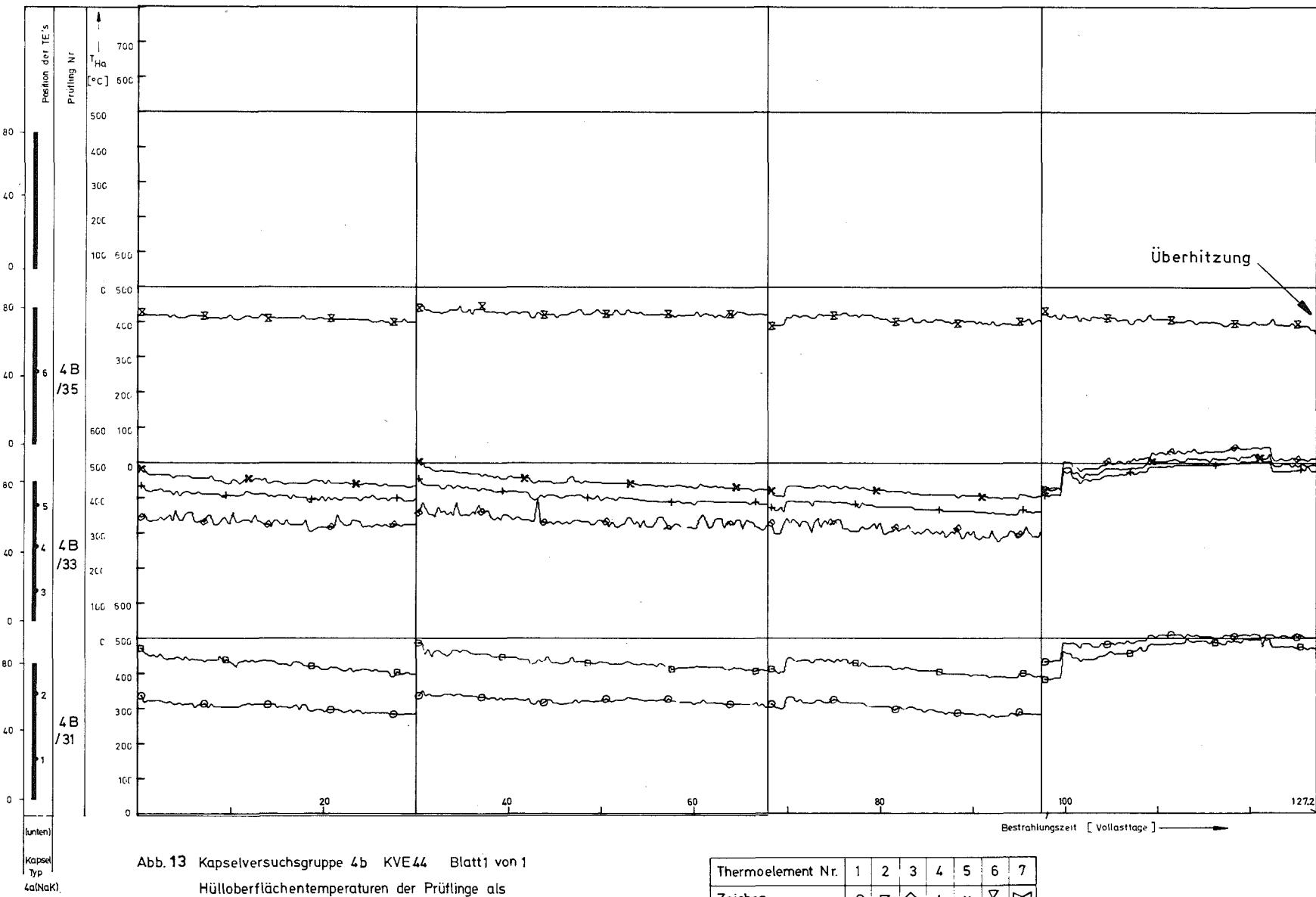
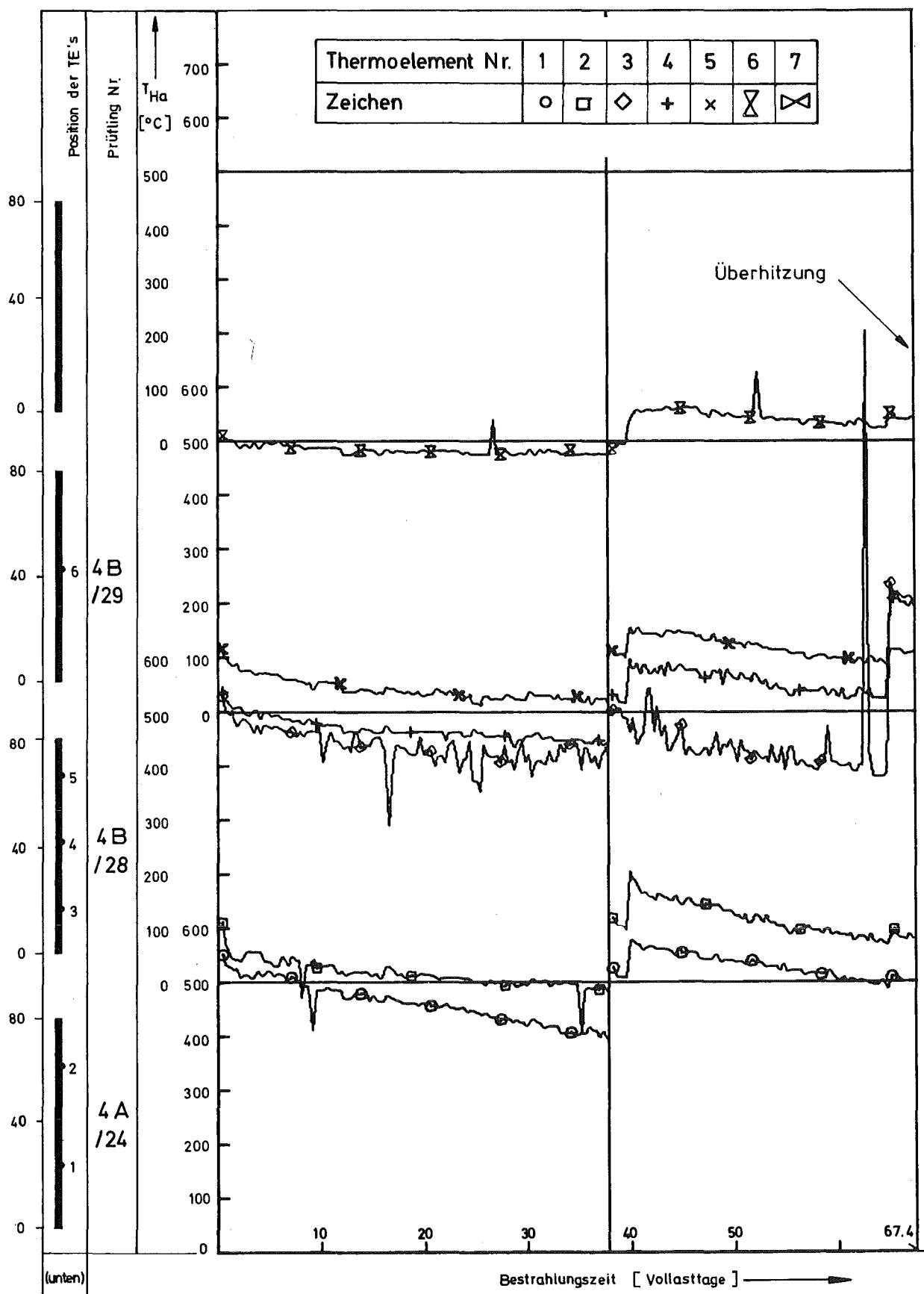


Abb. 13 Kapselversuchsgruppe 4b KVE 44 Blatt 1 von 1
Hülloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

| Thermoelement Nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------------------|---|---|---|---|---|---|---|
| Zeichen | ○ | □ | ◇ | + | × | X | △ |



Kapsel
Typ
4a(NaK)

Abb. 14 Kapselversuchsgruppe 4b KVE 45 Blatt 1 von 1
Hüolloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

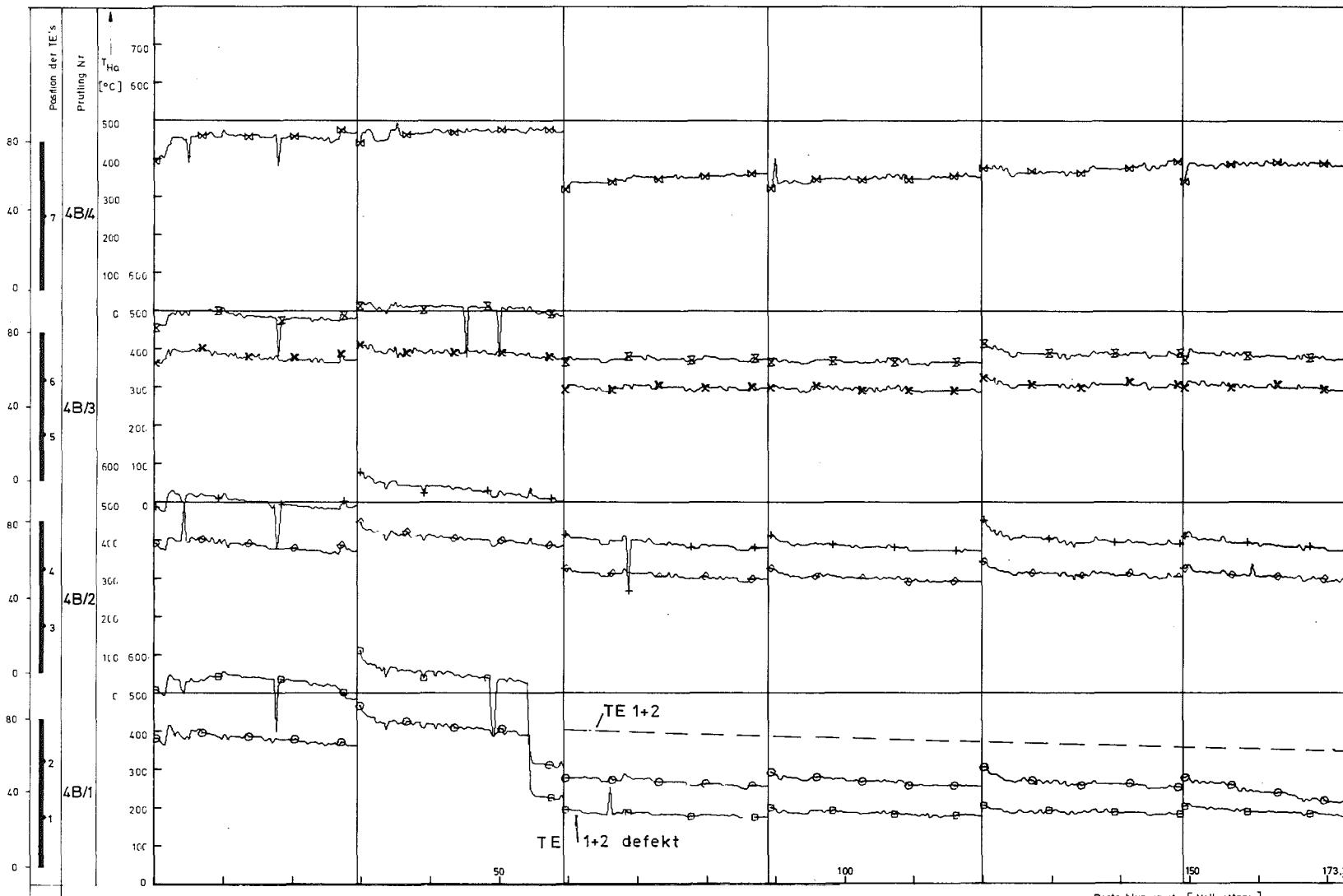


Abb. 15 Kapselversuchsgruppe 4b KVE 47 Blatt 1 von 3
Hülloberflächentemperaturen der Prüflinge als Funktion der Zeit

| Thermoelement Nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------------------|---|---|---|---|---|---|---|
| Zeichen | ○ | □ | ◊ | + | × | ✗ | ▷ |

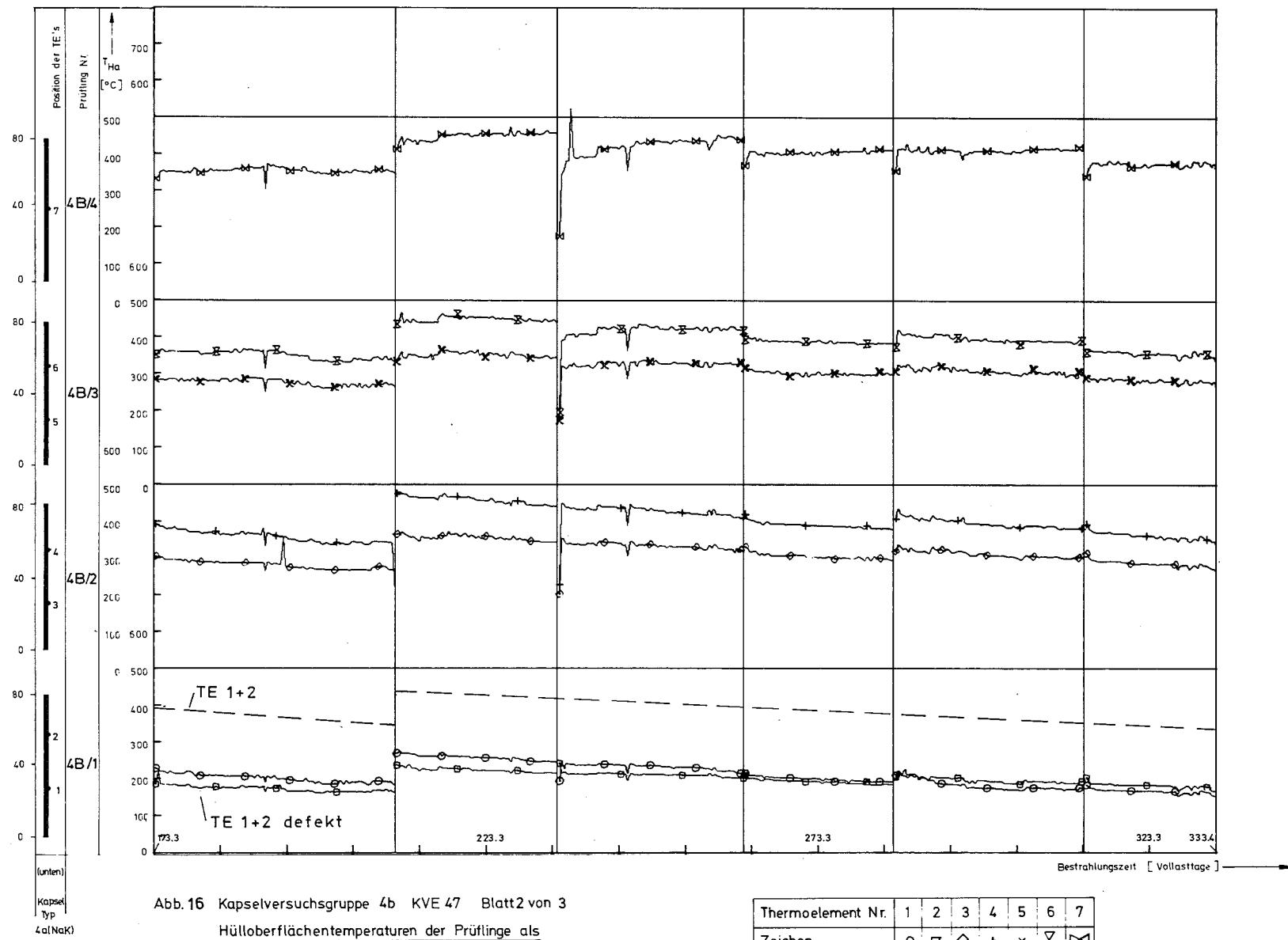


Abb. 16 Kapselversuchsgruppe 4b KVE 47 Blatt2 von 3
Hülloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

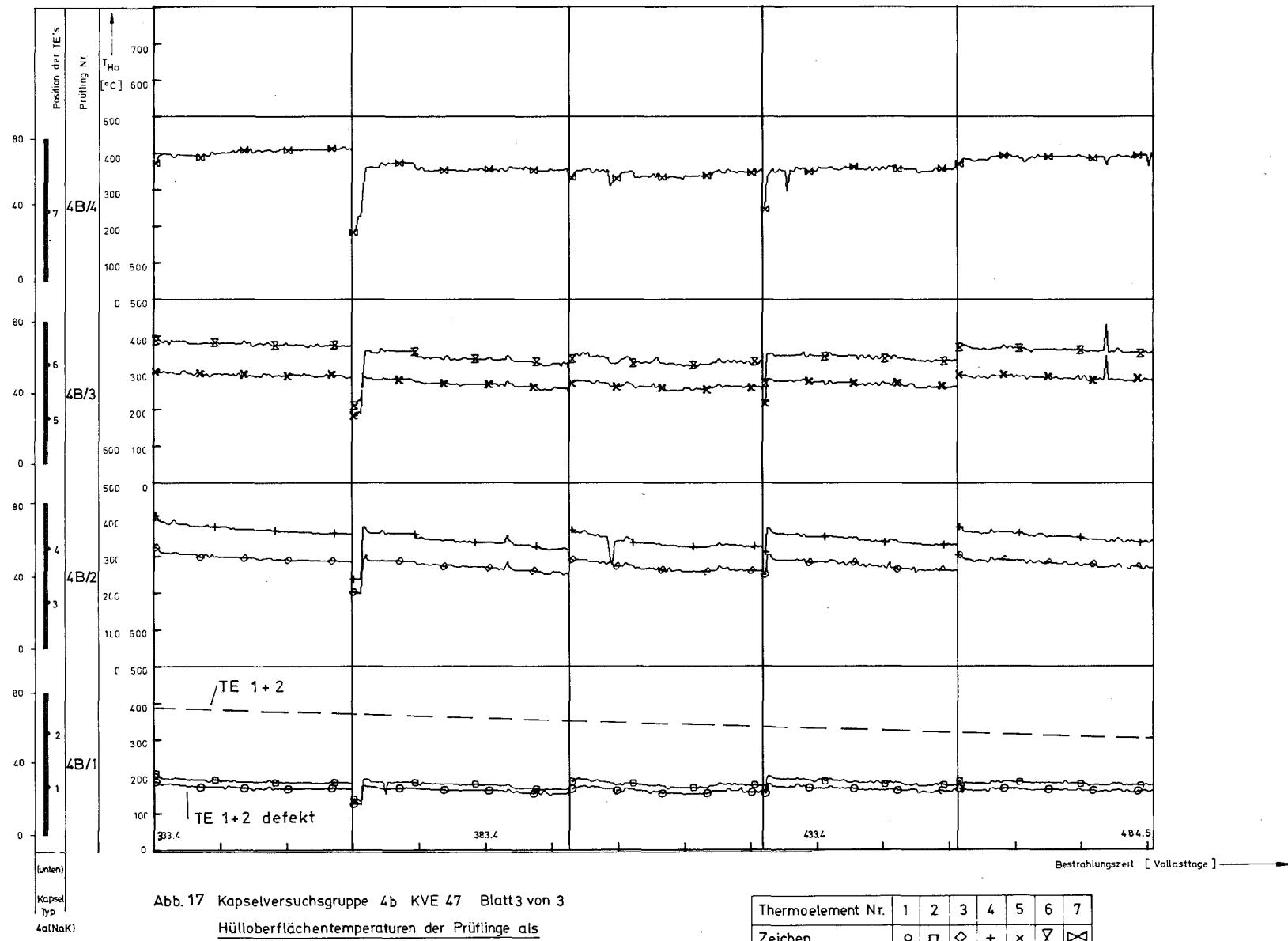


Abb. 17 Kapselversuchsgruppe 4b KVE 47 Blatt3 von 3
Hülloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

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

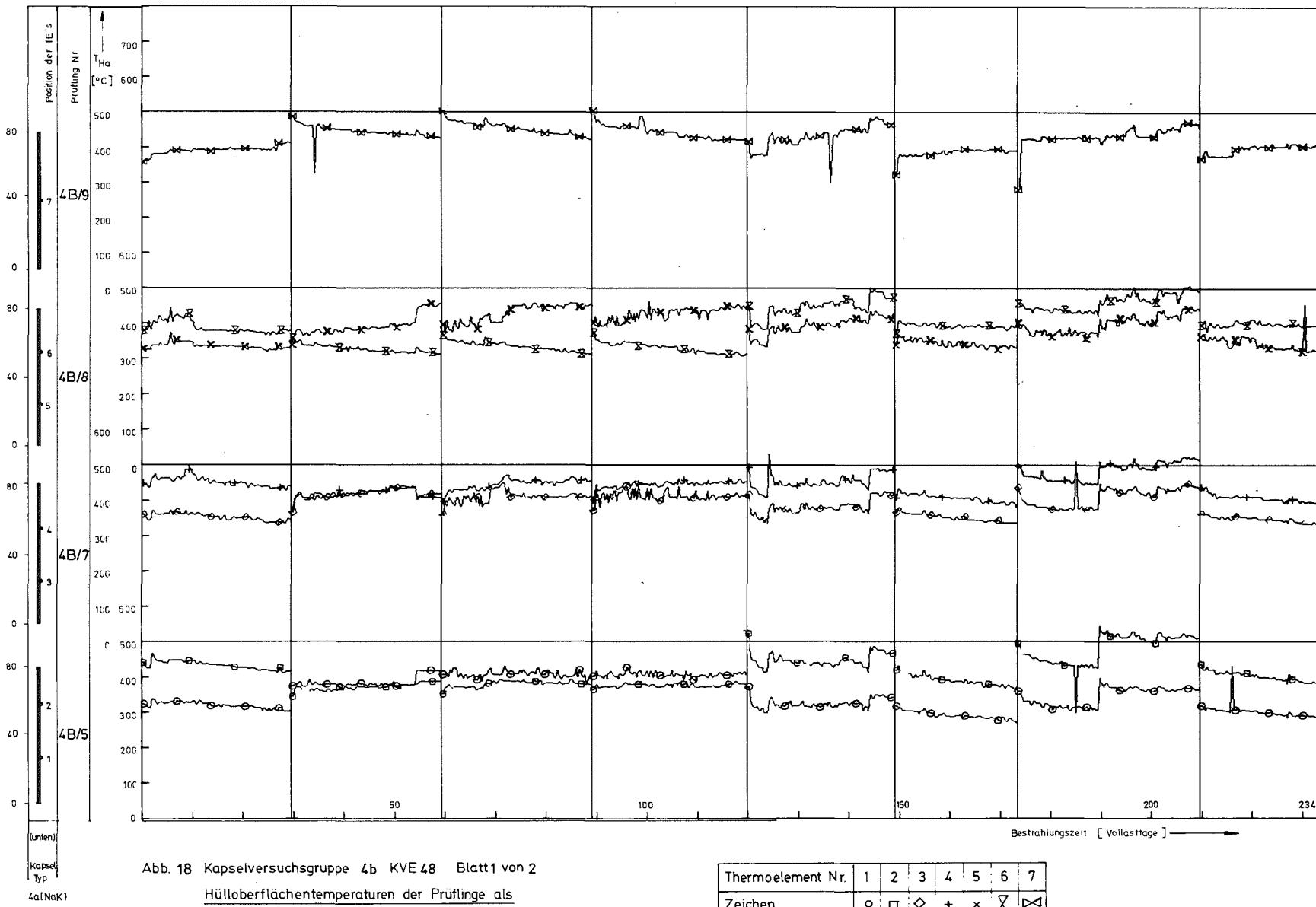


Abb. 18 Kapselversuchsgruppe 4b KVE 48 Blatt 1 von 2

Hülloberflächentemperaturen der Prüflinge als

Funktion der Zeit

| Thermoelement Nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------------------|---|---|---|---|---|---|---|
| Zeichen | ○ | □ | ◊ | + | × | ✗ | △ |

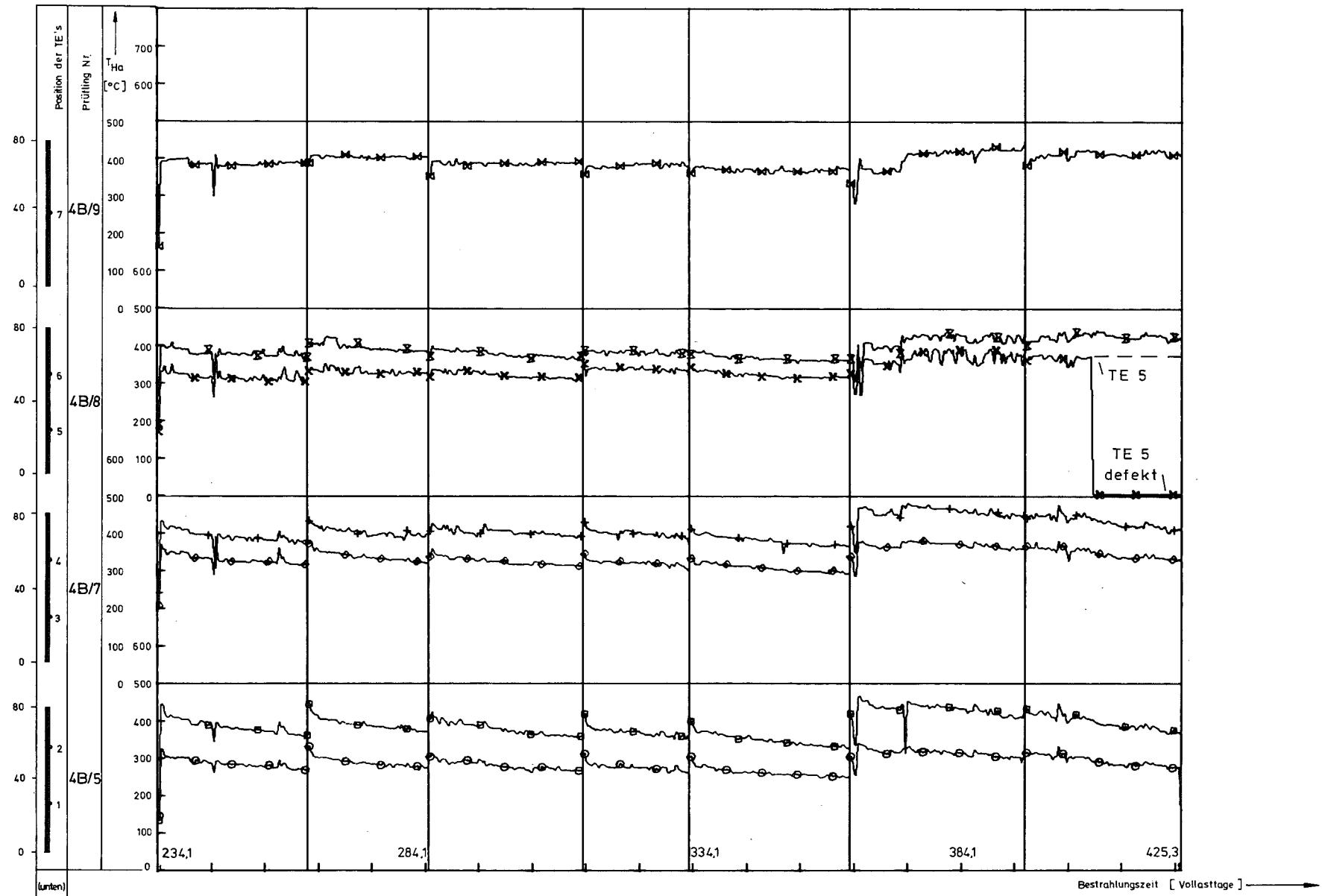


Abb. 19 Kapselversuchsgruppe 4b KVE 48 Blatt 2 von 2
Hülloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

| Thermoelement Nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------------------|---|---|---|---|---|---|---|
| Zeichen | ○ | □ | ◇ | + | × | ✗ | ▷ |

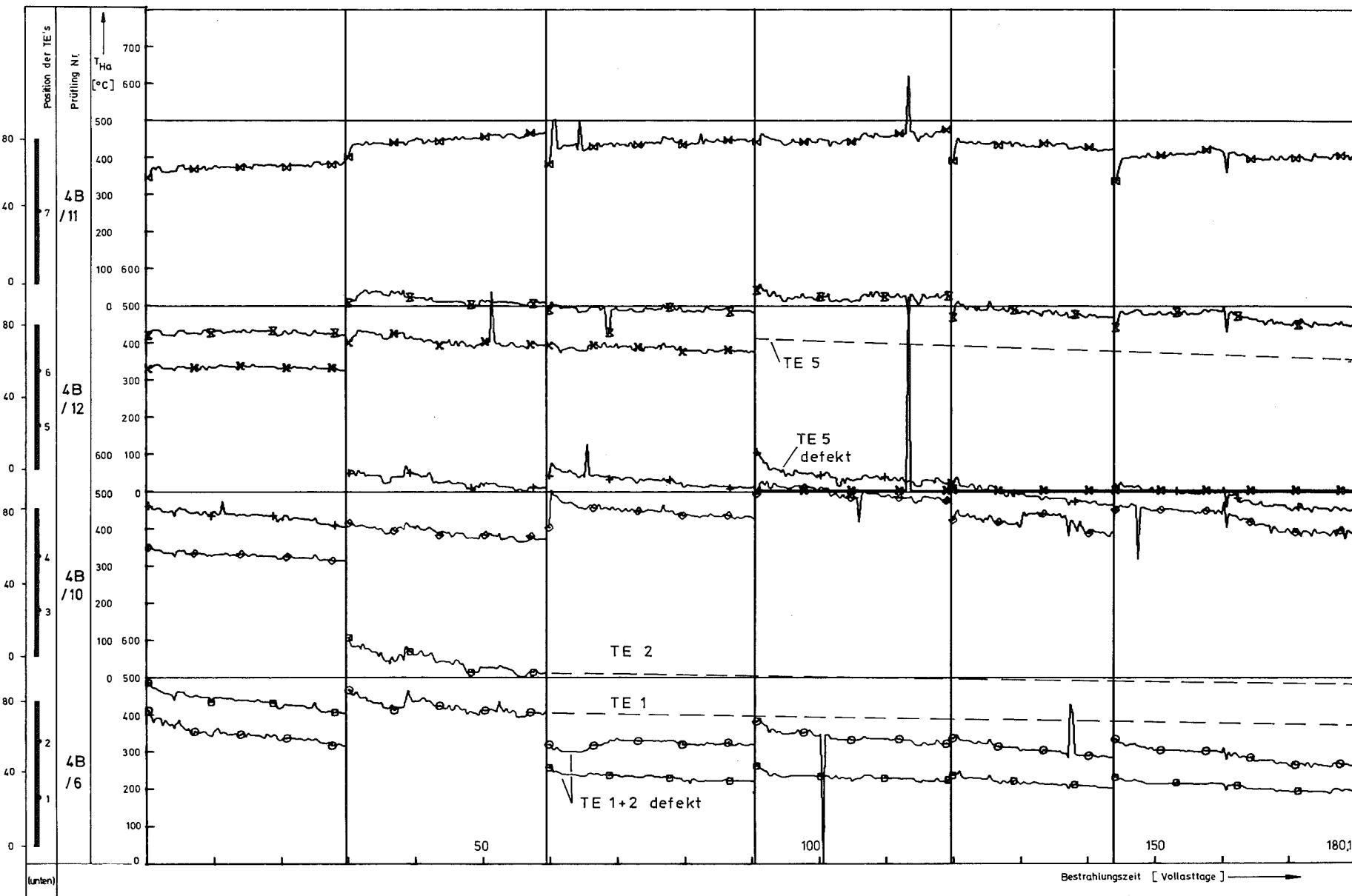


Abb. 20 Kapselversuchsgruppe 4b KVE 49 Blatt 1 von 4
Hüilloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

| Thermoelement Nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------------------|---|---|---|---|---|---|---|
| Zeichen | ○ | □ | ◊ | + | × | X | ▷ |

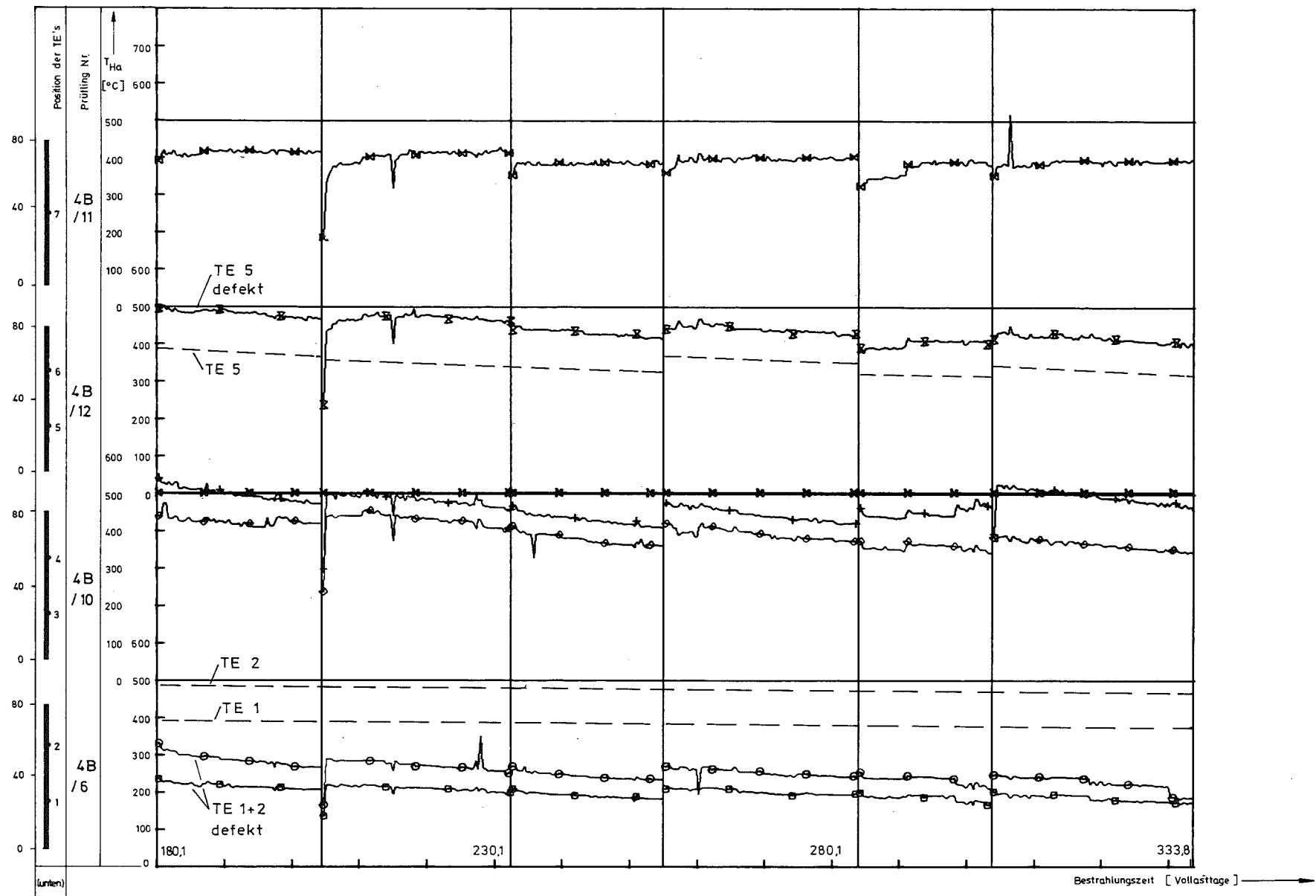


Abb. 21 Kapselversuchsgruppe 4b KVE 49 Blatt 2 von 4

Hülloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

Kapsel
Typ
4a(NaK)

| Thermoelement Nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------------------|---|---|---|---|---|---|---|
| Zeichen | ○ | □ | ◊ | + | × | ✗ | ✗ |

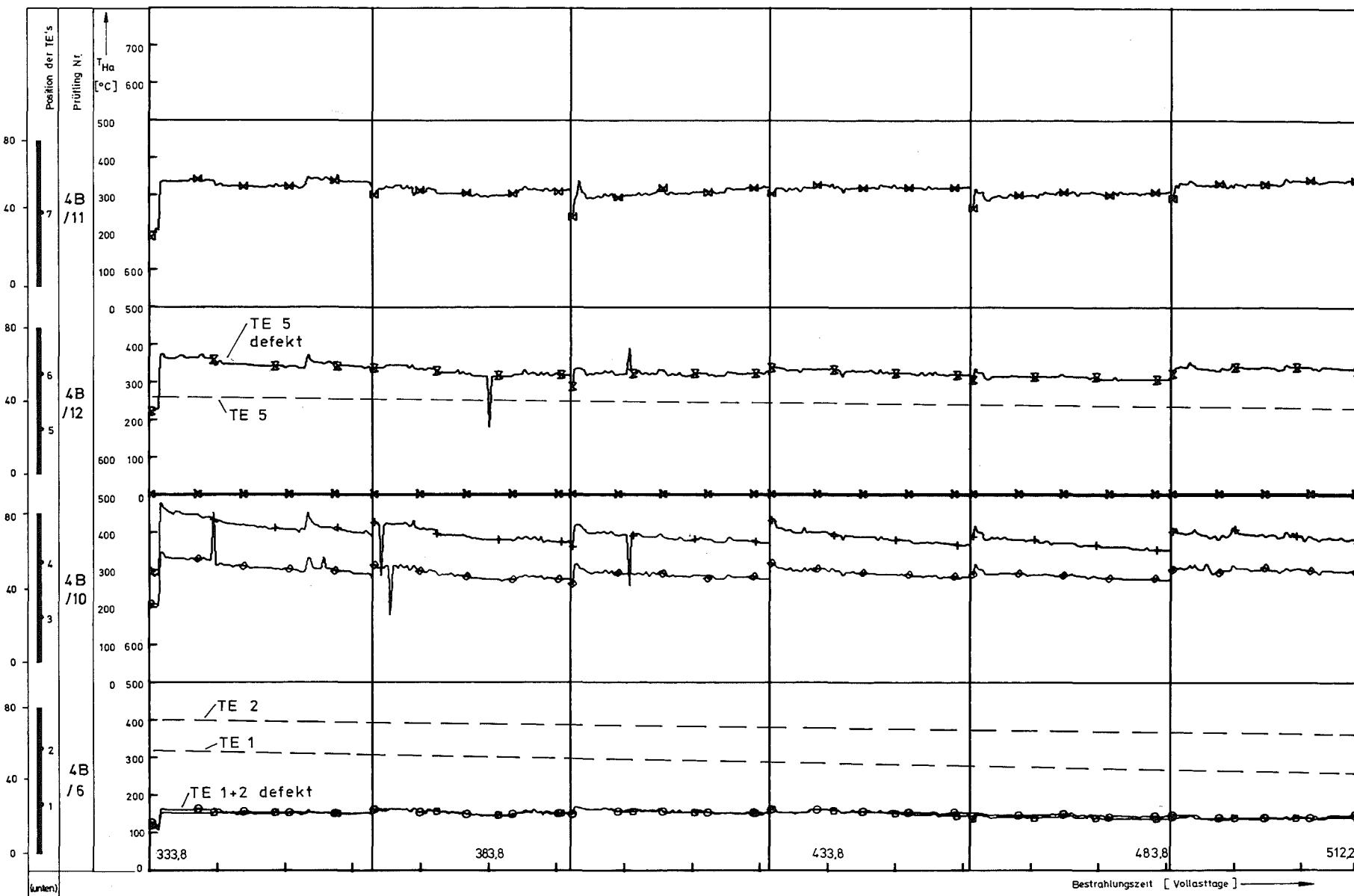
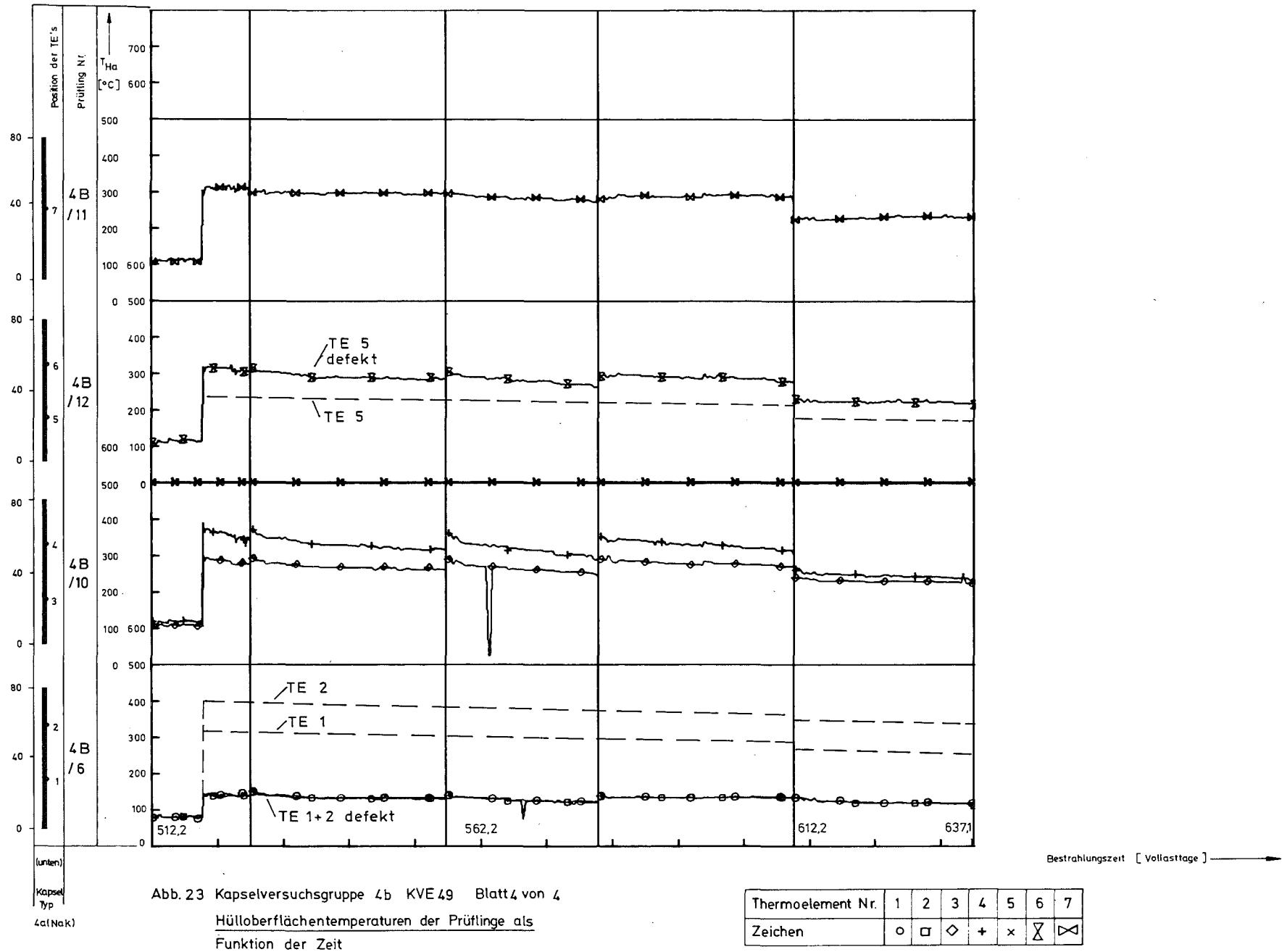
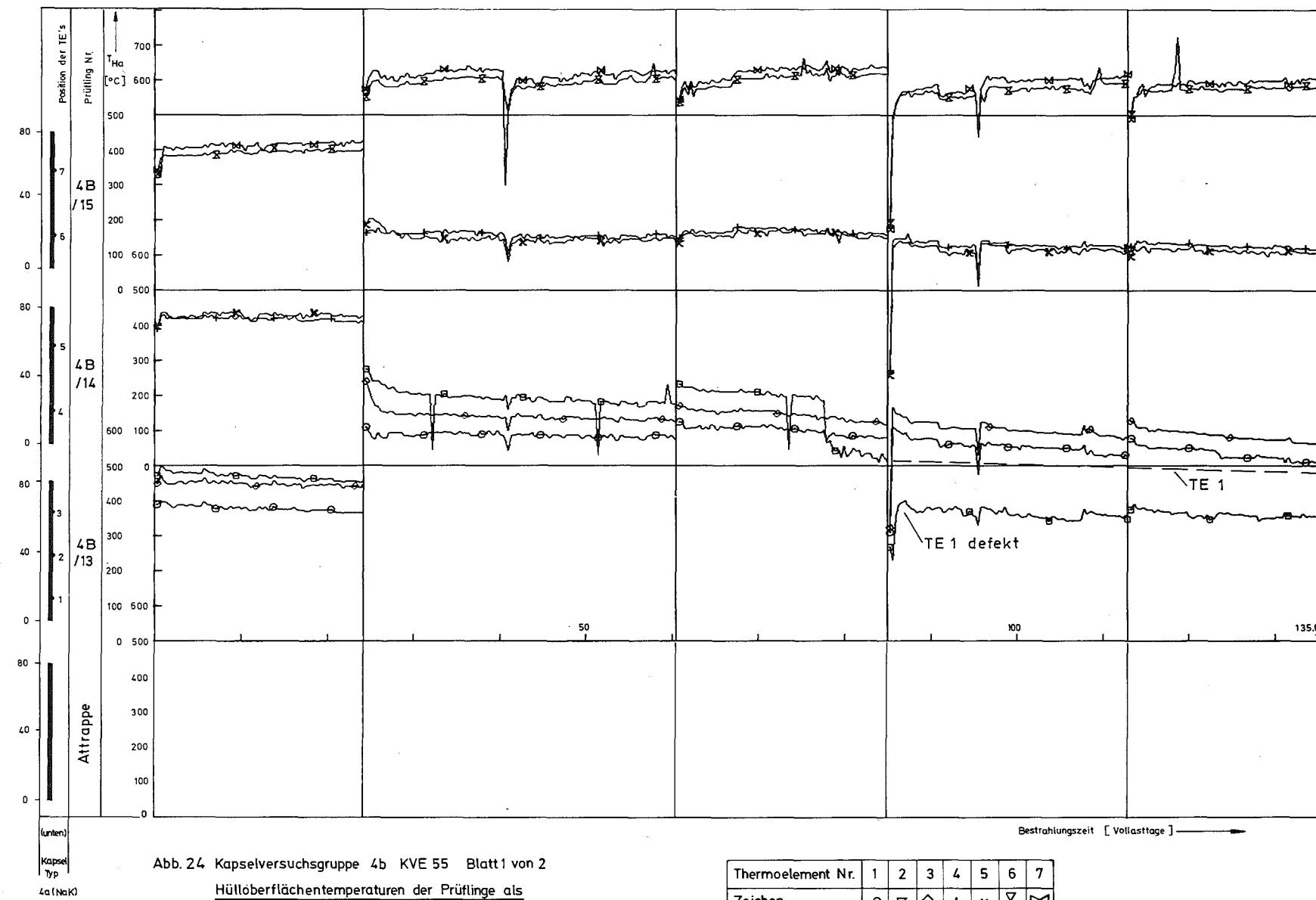


Abb. 22 Kapselversuchsgruppe 4b KVE 49 Blatt3 von 4
Hülloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

| Thermoelement Nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------------------|---|---|---|---|---|---|---|
| Zeichen | ○ | □ | ◇ | + | × | X | ∞ |





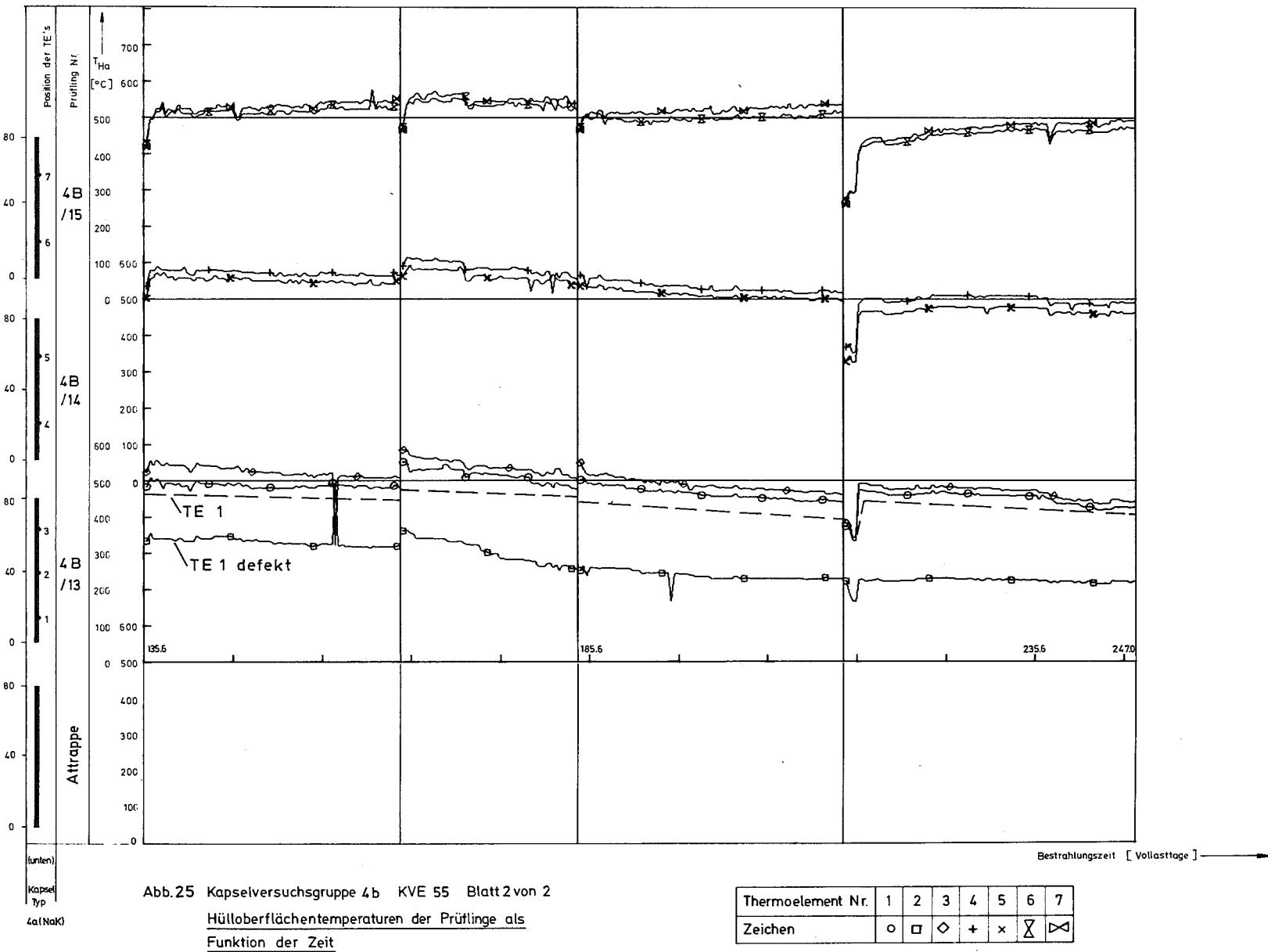


Abb.25 Kapselversuchsgruppe 4b KVE 55 Blatt 2 von 2
Hülloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

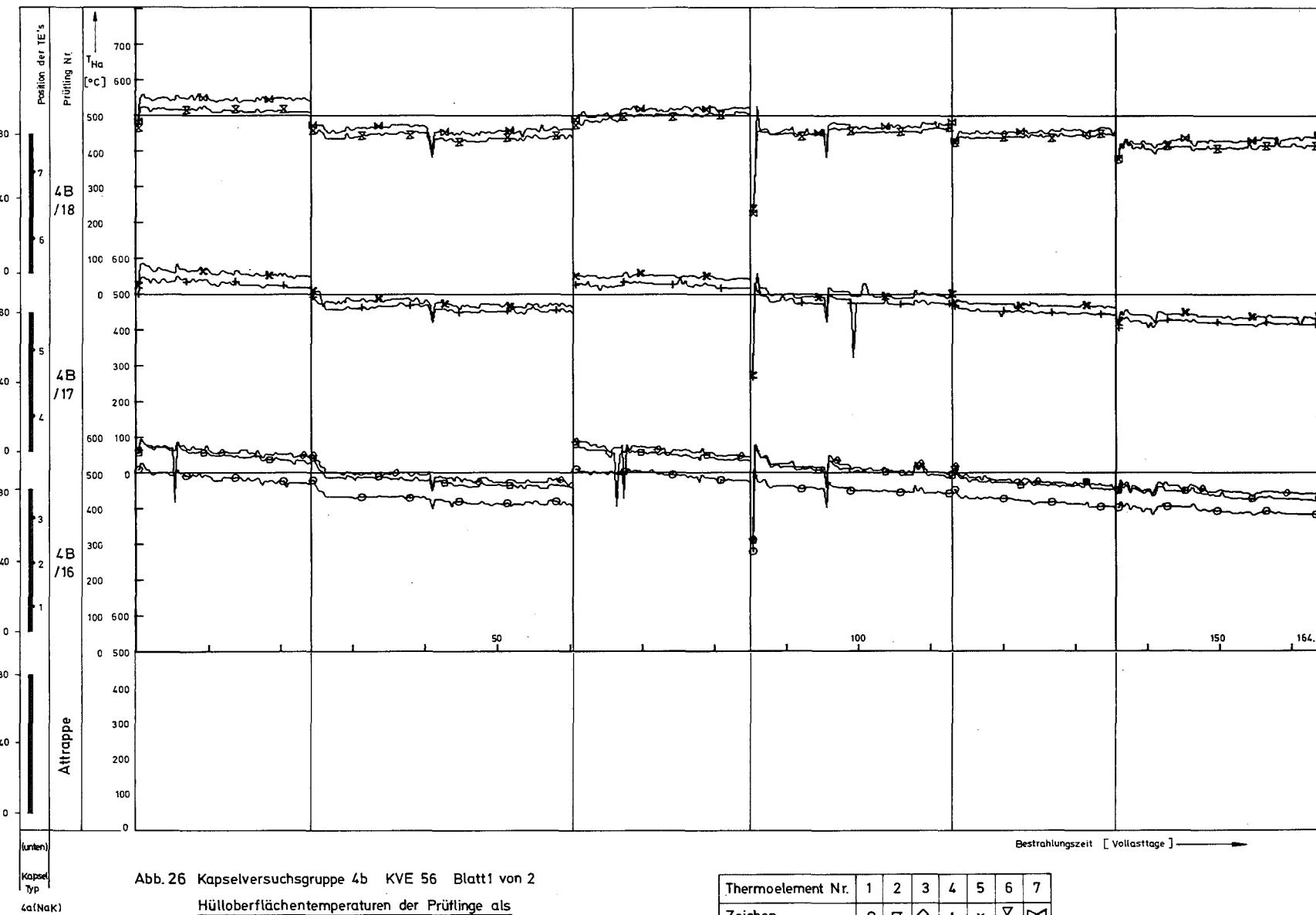


Abb. 26 Kapselversuchsgruppe 4b KVE 56 Blatt 1 von 2
Hülloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

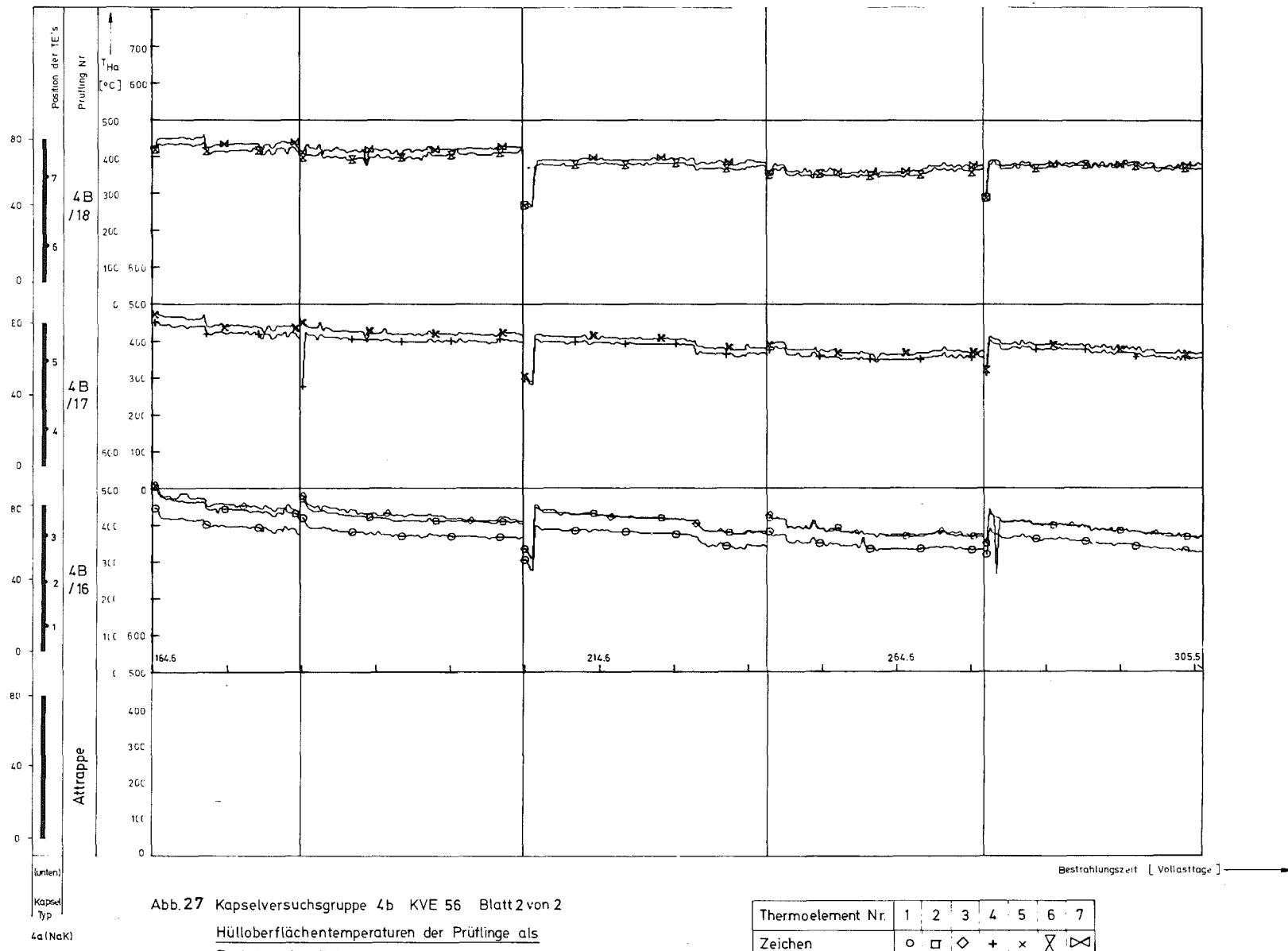


Abb. 27 Kapselversuchsgruppe 4b KVE 56 Blatt 2 von 2
Hülloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

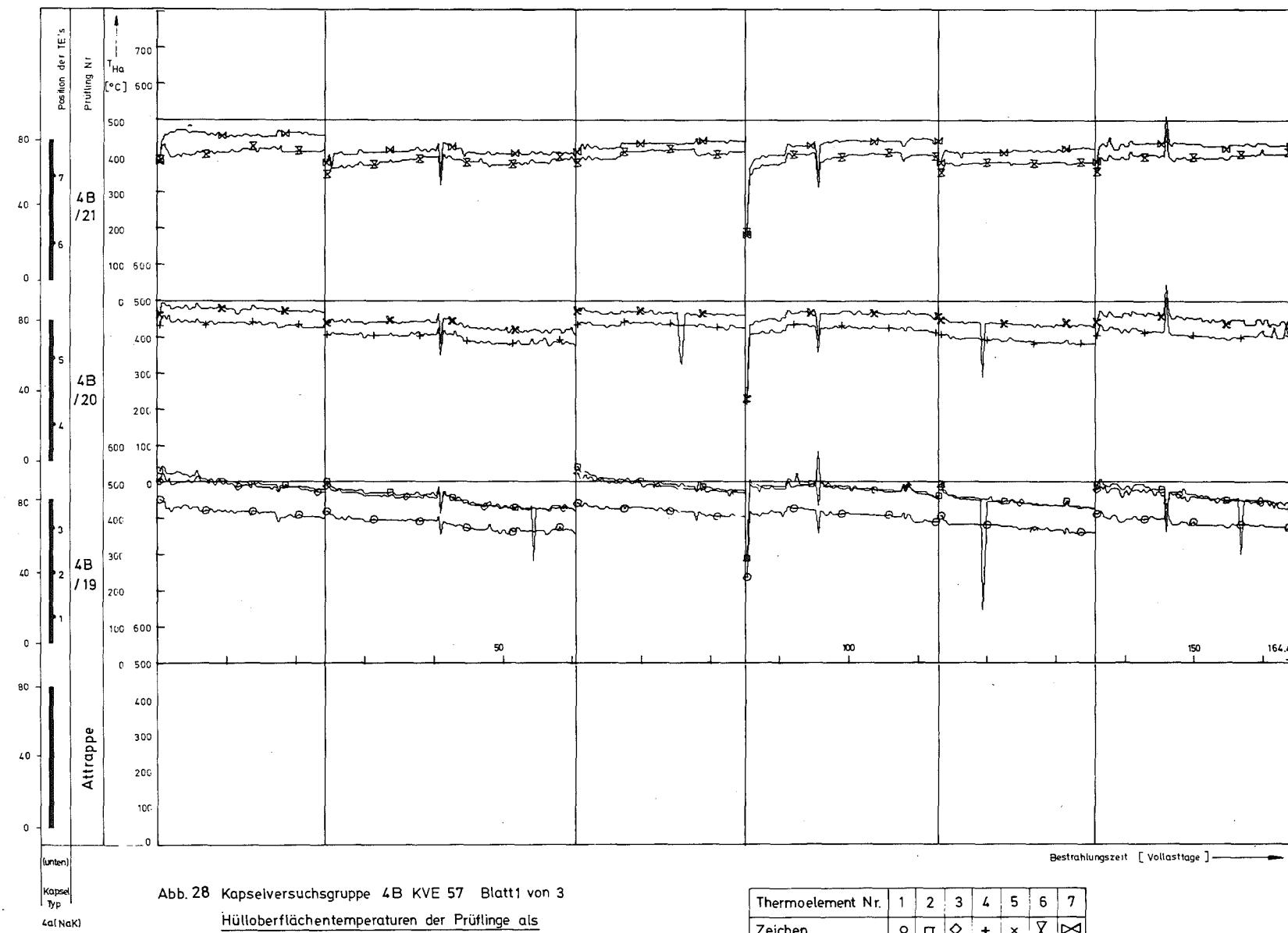
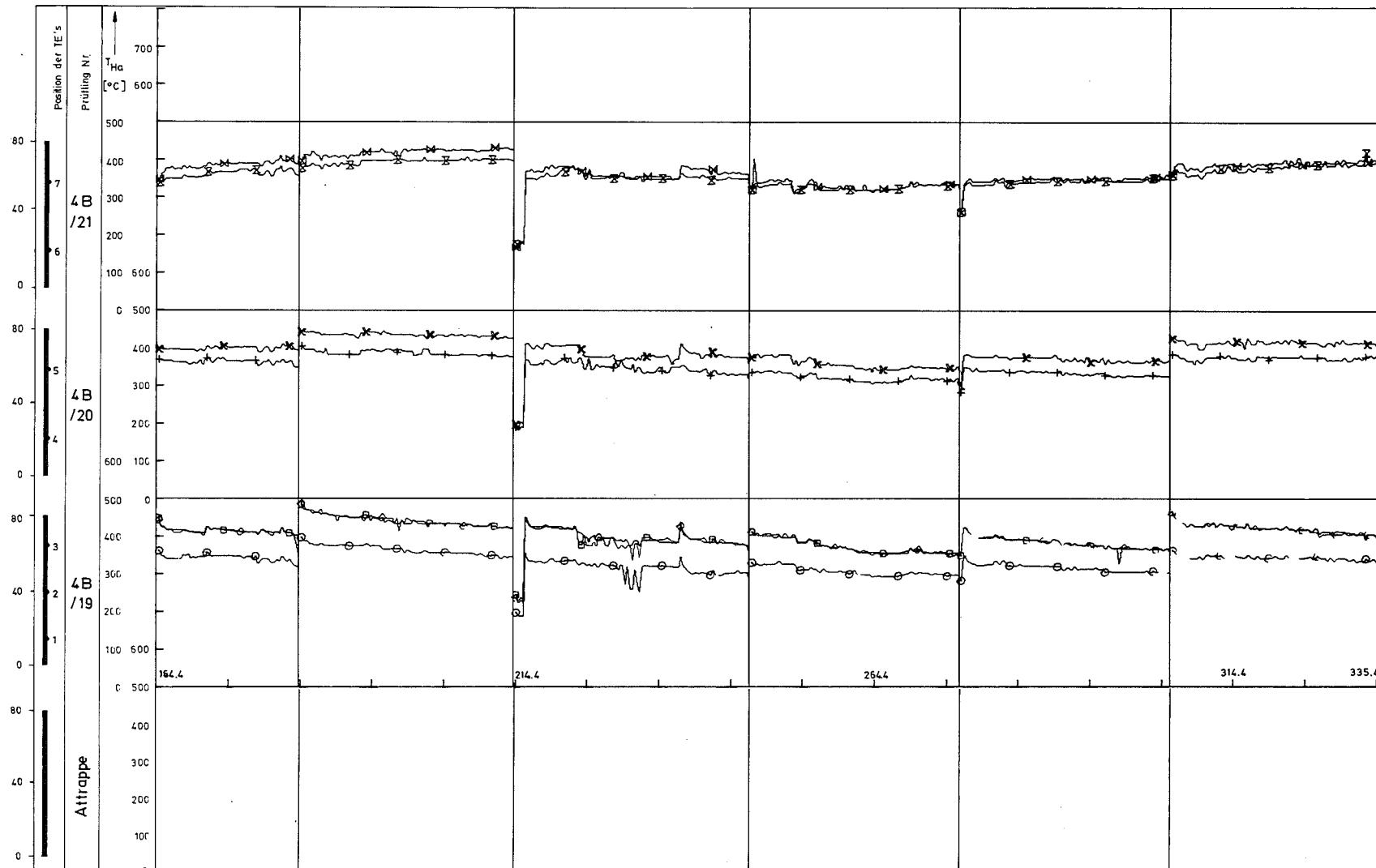


Abb. 28 Kapselversuchsgruppe 4B KVE 57 Blatt1 von 3
Hülloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit



(unten)
Kapsel
typ
4a(NaK)

Abb. 29 Kapselversuchsgruppe KVE 57 Blatt 2 von 3
Hülloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

| Thermoelement Nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------------------|---|---|---|---|---|---|---|
| Zeichen | ○ | □ | ◊ | + | × | X | △ |

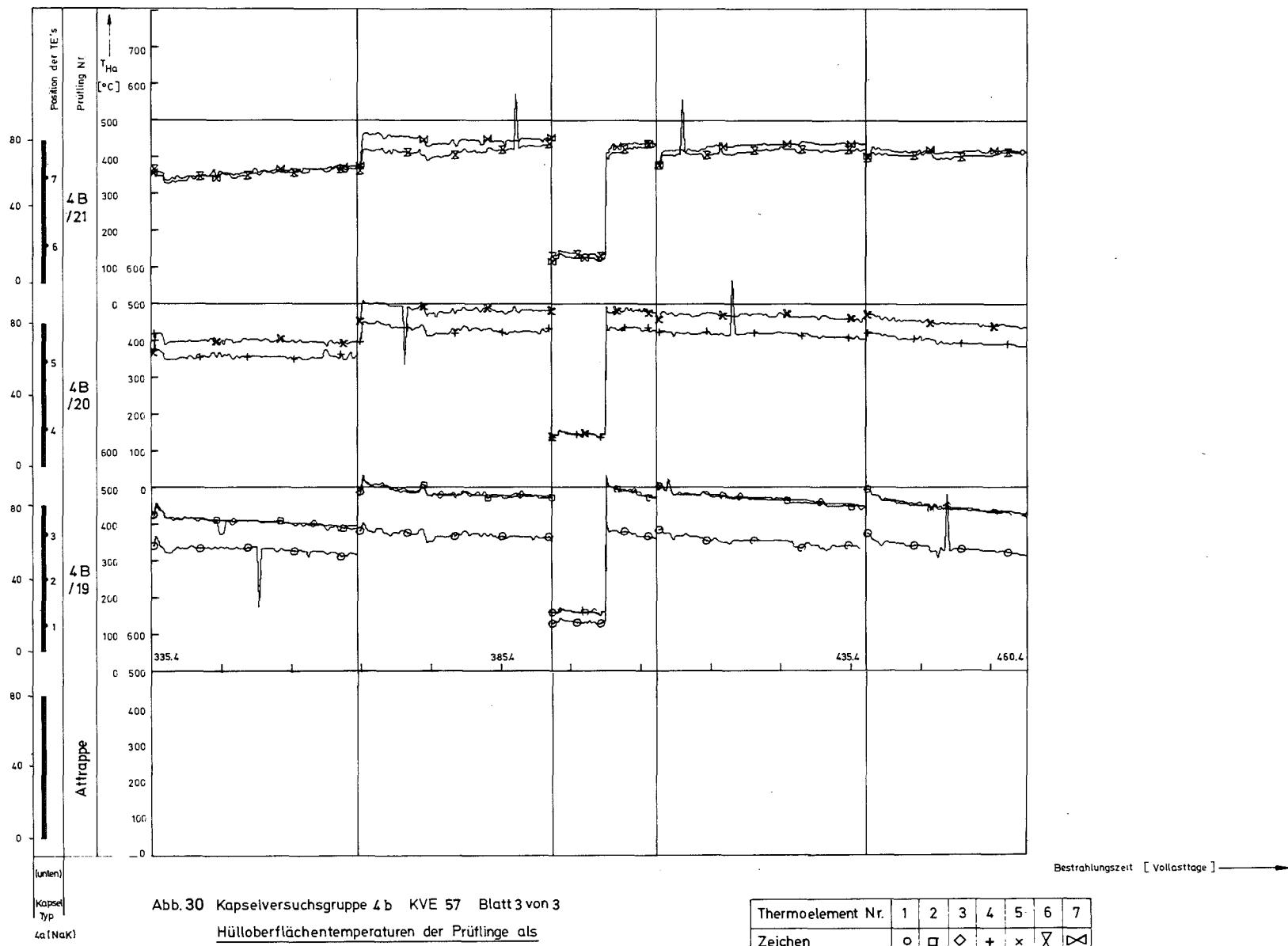


Abb. 30 Kapselversuchsgruppe 4 b KVE 57 Blatt 3 von 3
Hülloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

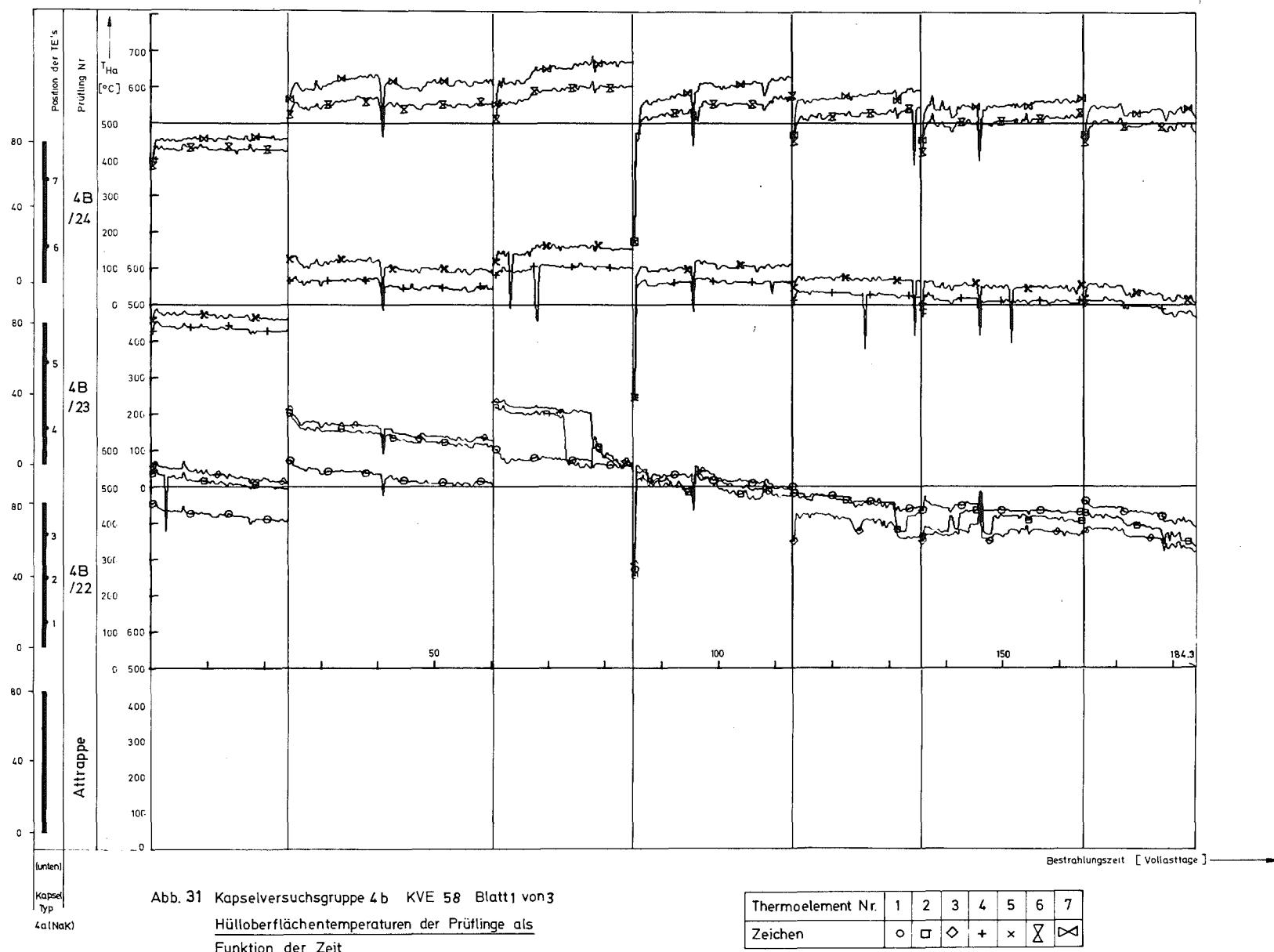


Abb. 31 Kapselversuchsgruppe 4 b KVE 58 Blatt 1 von 3
Hülloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

| Thermoelement Nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------------------|---|---|---|---|---|---|---|
| Zeichen | ○ | □ | ◊ | + | × | ☒ | ☒ |

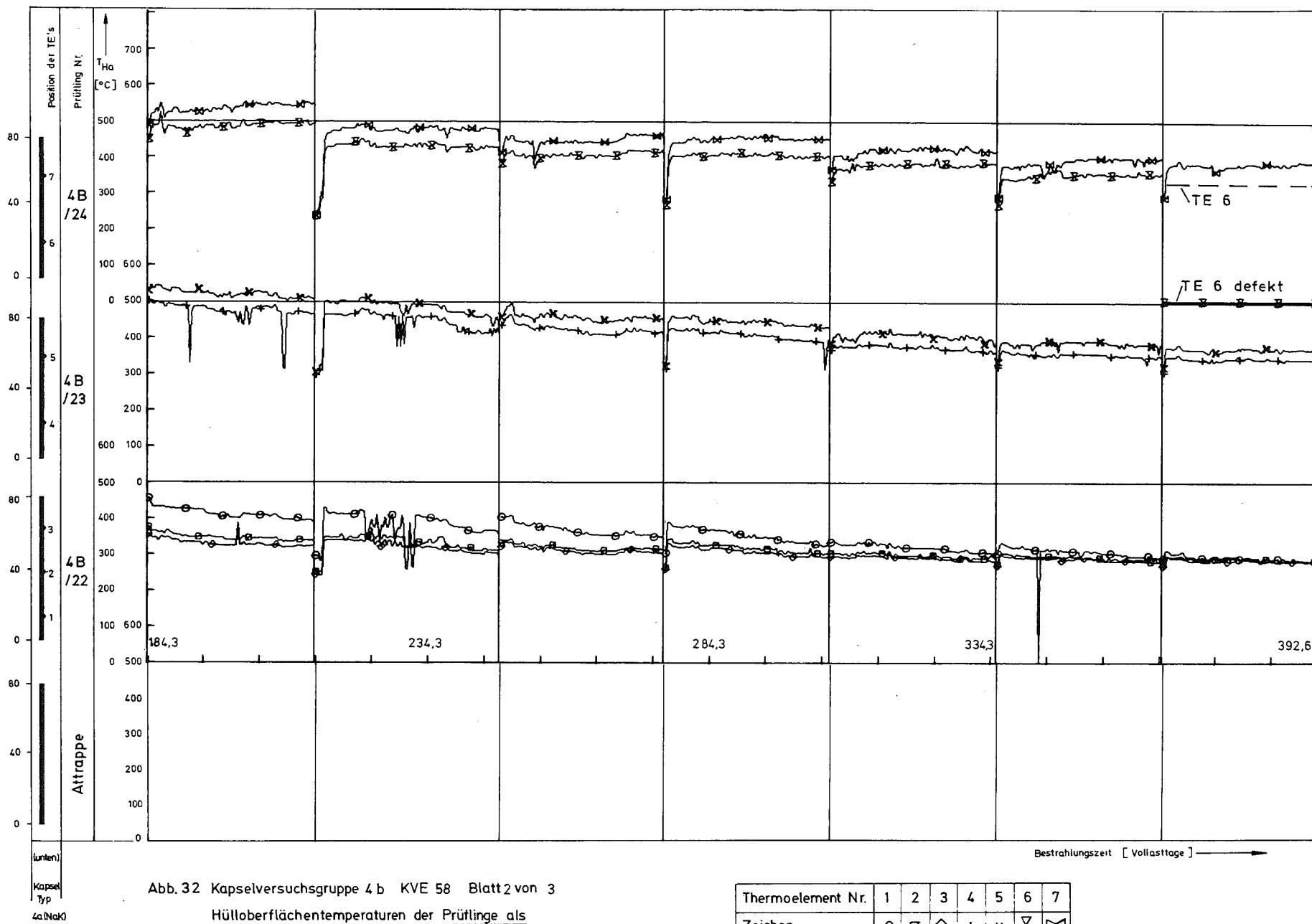


Abb. 32 Kapselversuchsgruppe 4 b KVE 58 Blatt 2 von 3
Hülloberflächentemperaturen der Prüflinge als Funktion der Zeit

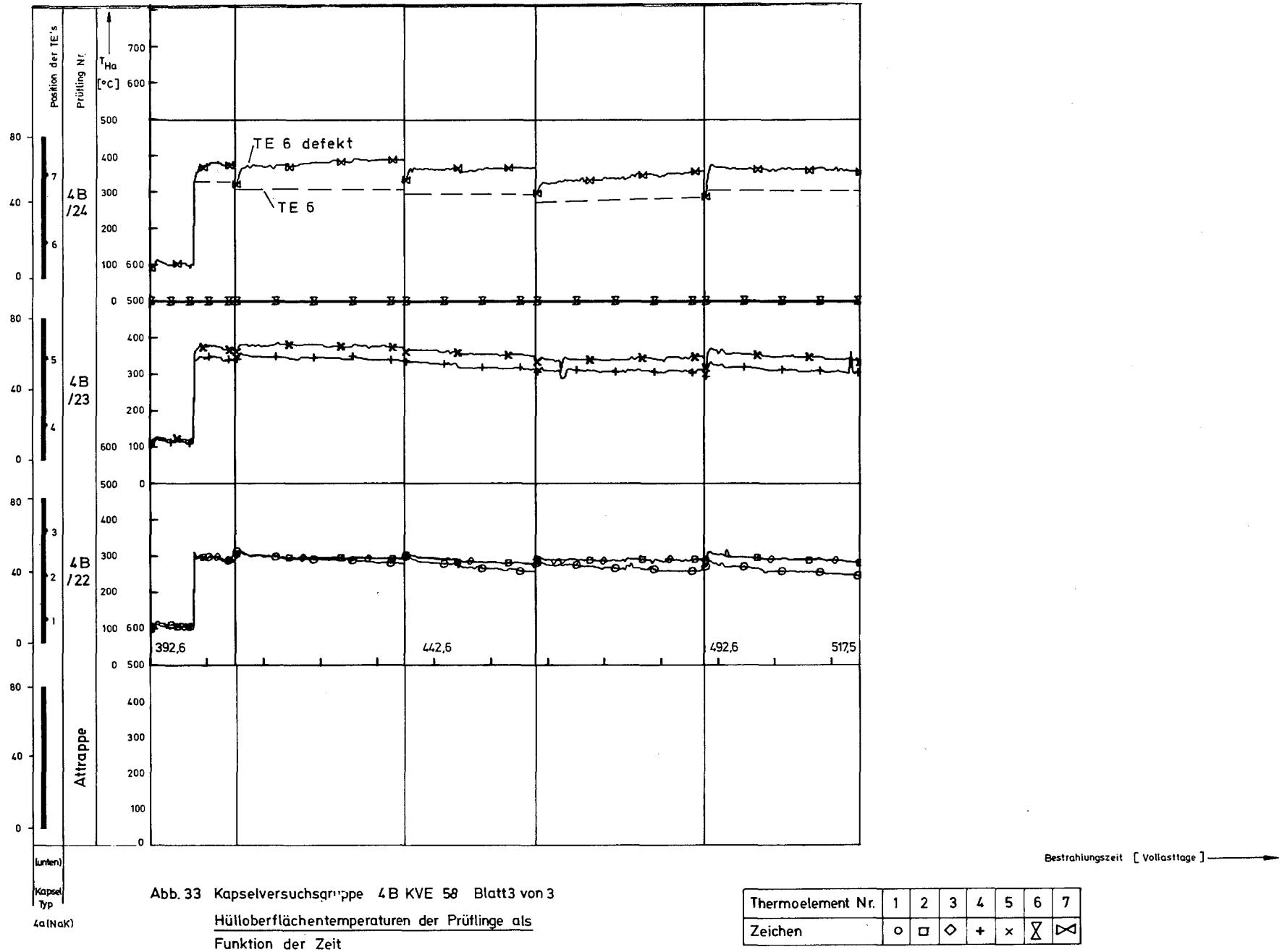
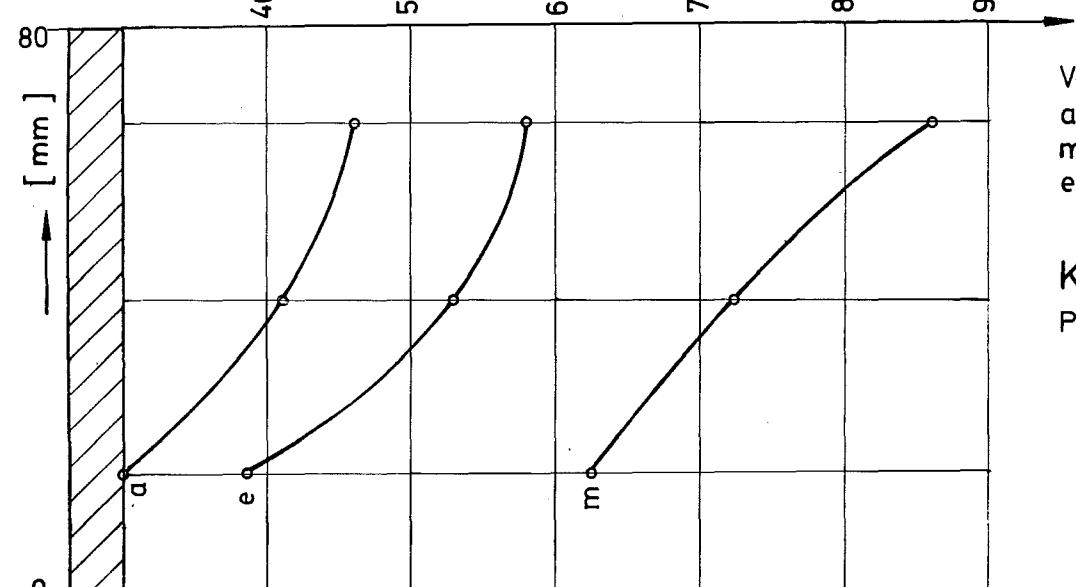
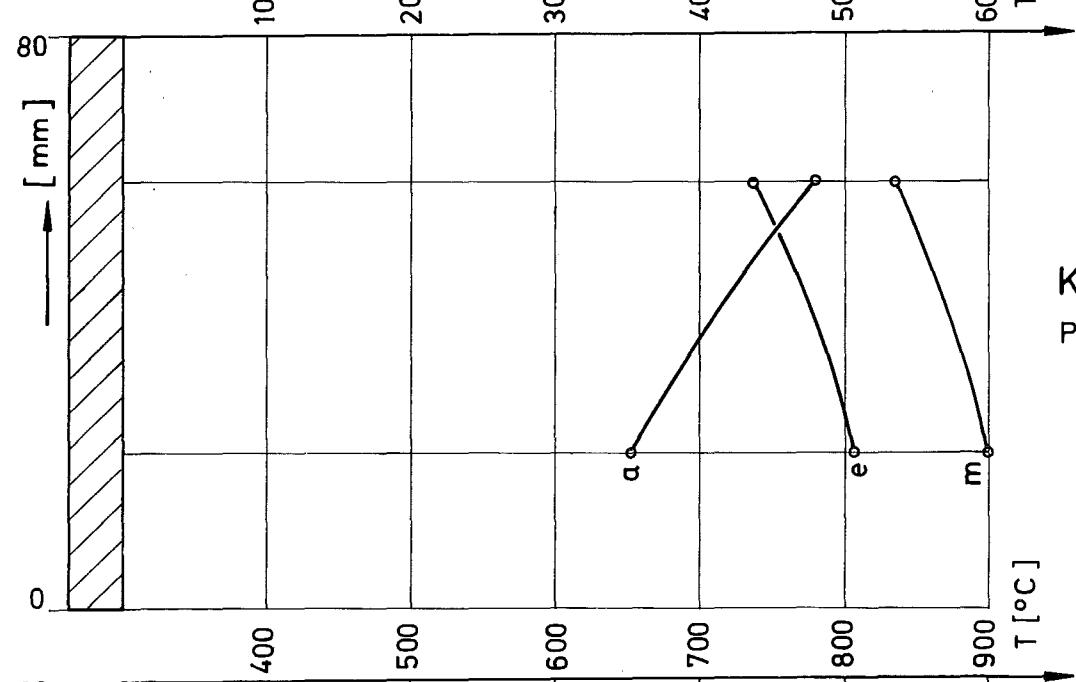
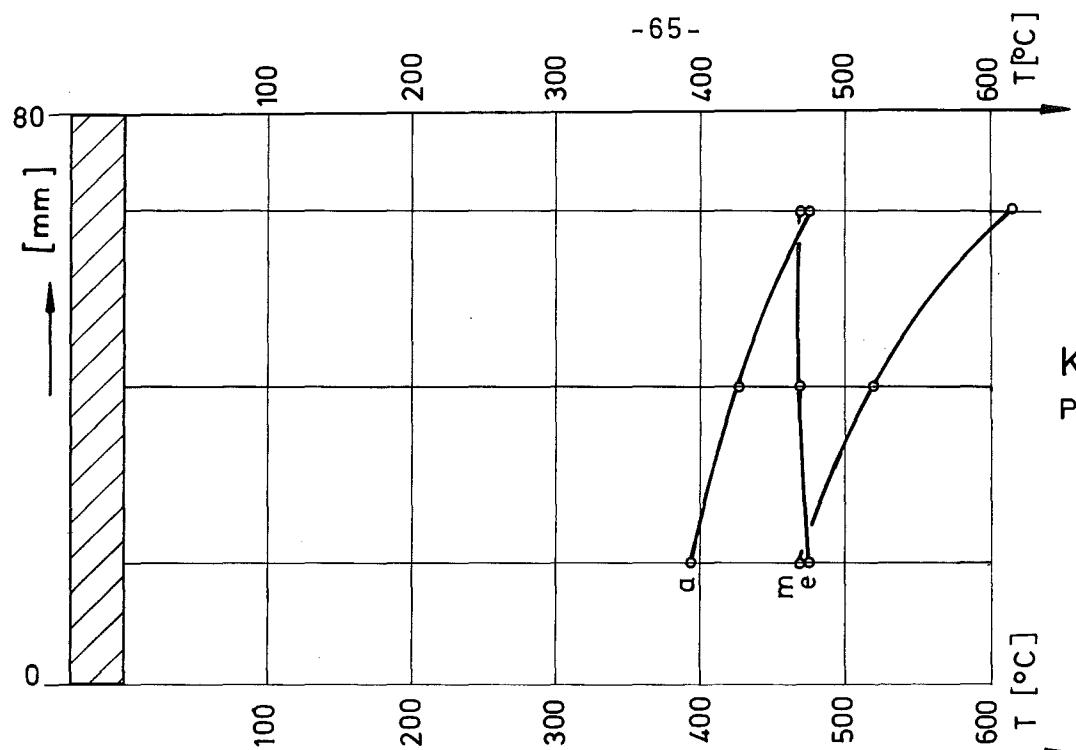


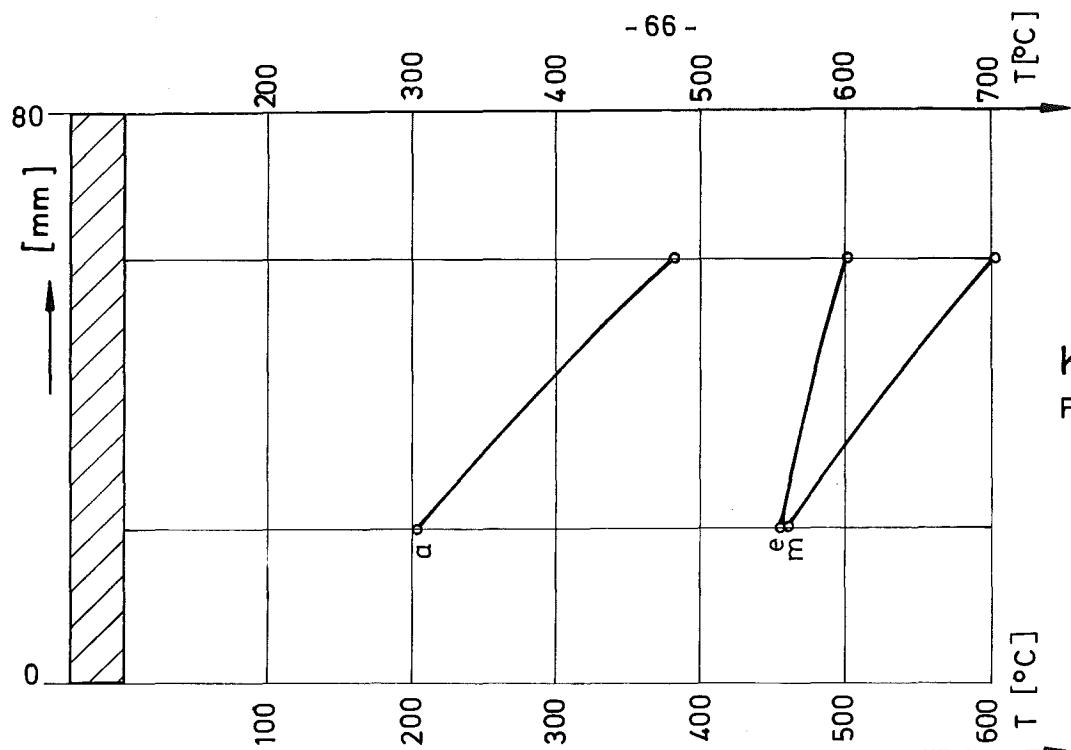
Abb. 33 Kapselversuchsgruppe 4B KVE 58 Blatt3 von 3
Hüolloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit



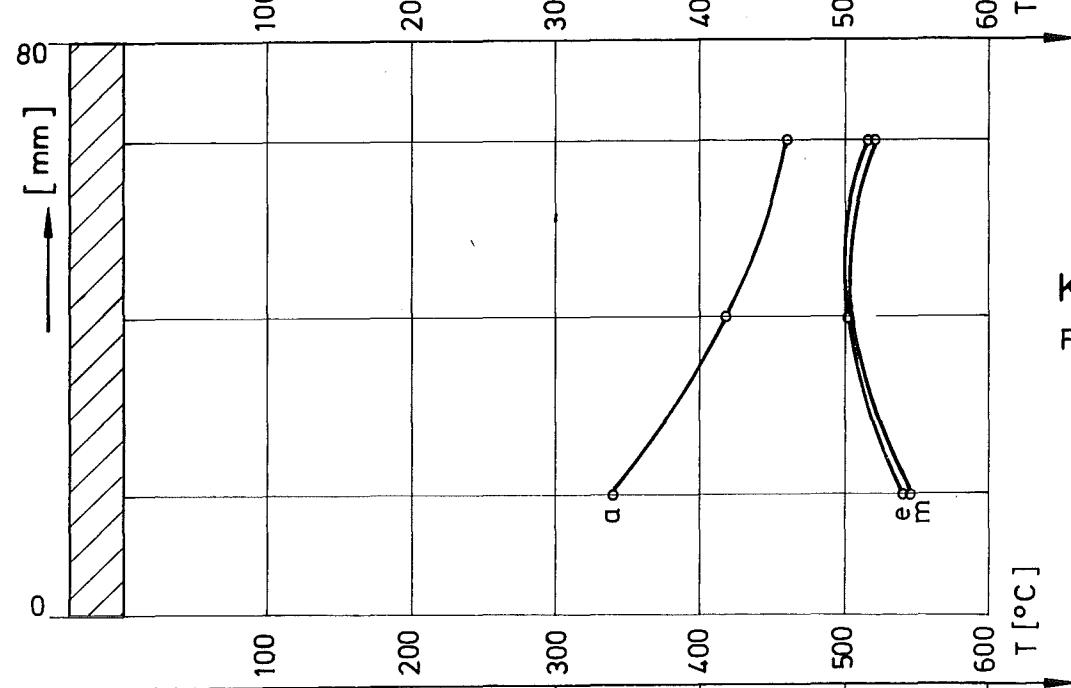
Kapselversuchsgruppe 4b
Axiale Temperaturverteilung (Hülloberfläche)

Abb. 34

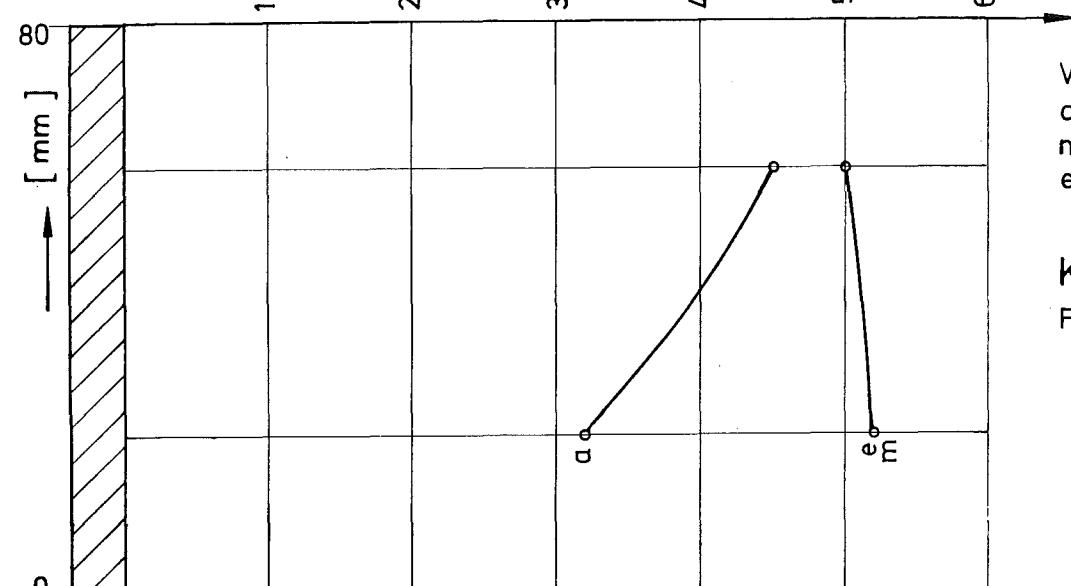
Verteilung :
a - Betriebsbeginn
m - Maximalwert
e - Betriebsende



KVE -Nr. 43
Prüfling 4B 30



KVE -Nr. 44
Prüfling 4B 33

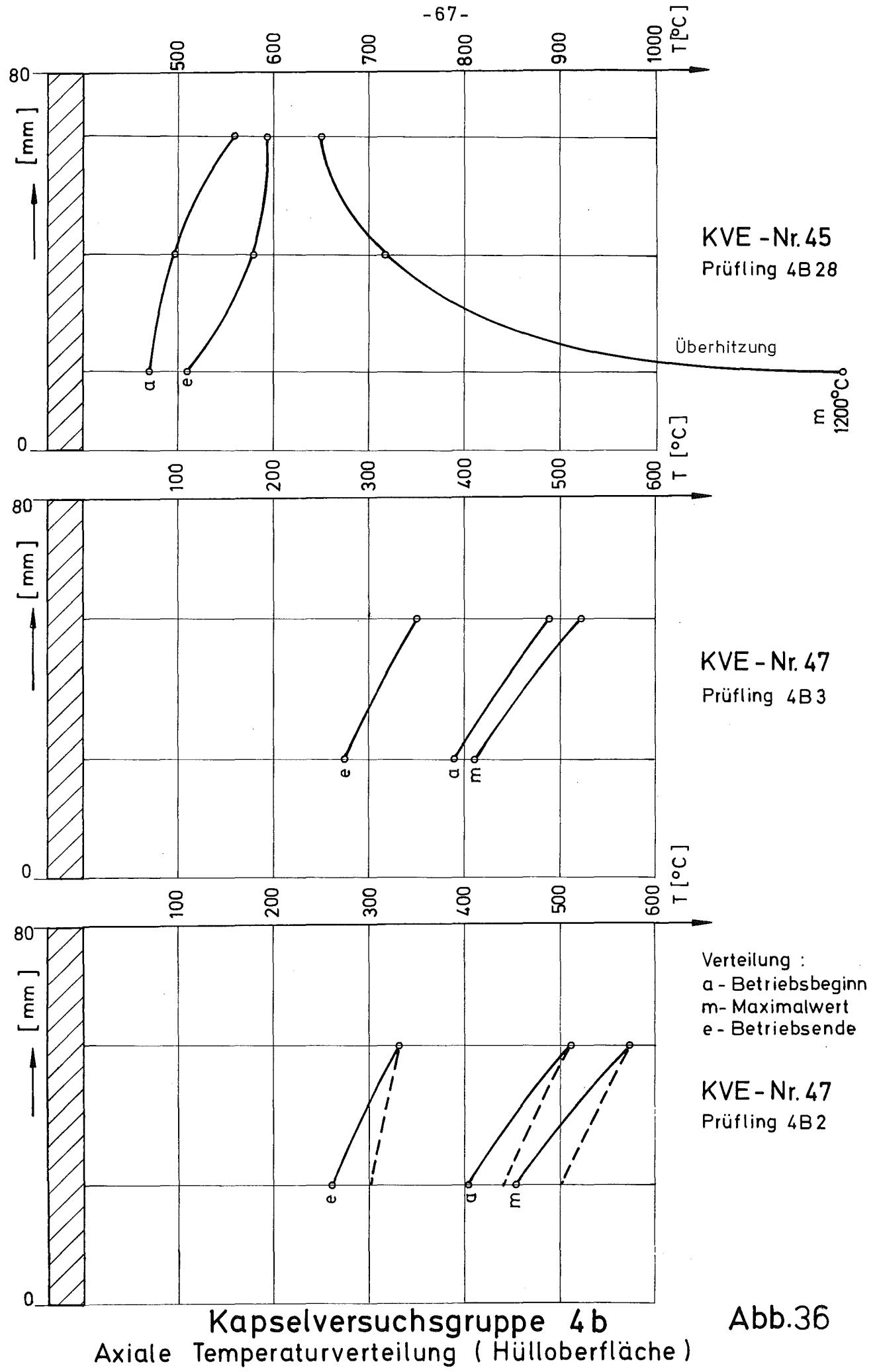


Verteilung :
a - Betriebsbeginn
m - Maximalwert
e - Betriebsende

KVE -Nr. 44
Prüfling 4B 31

Axiale Temperaturverteilung (Hülloberfläche)

Abb. 35



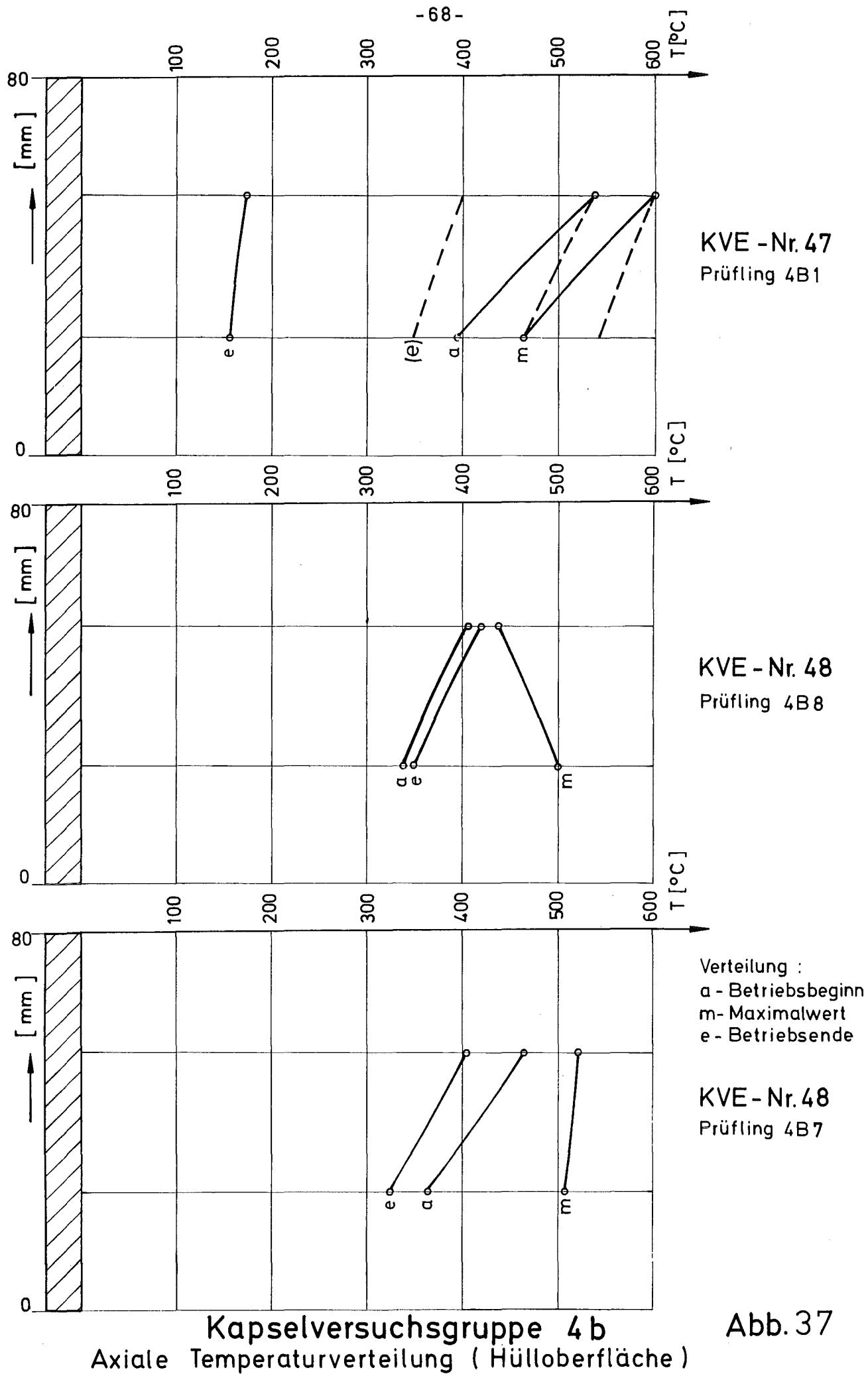
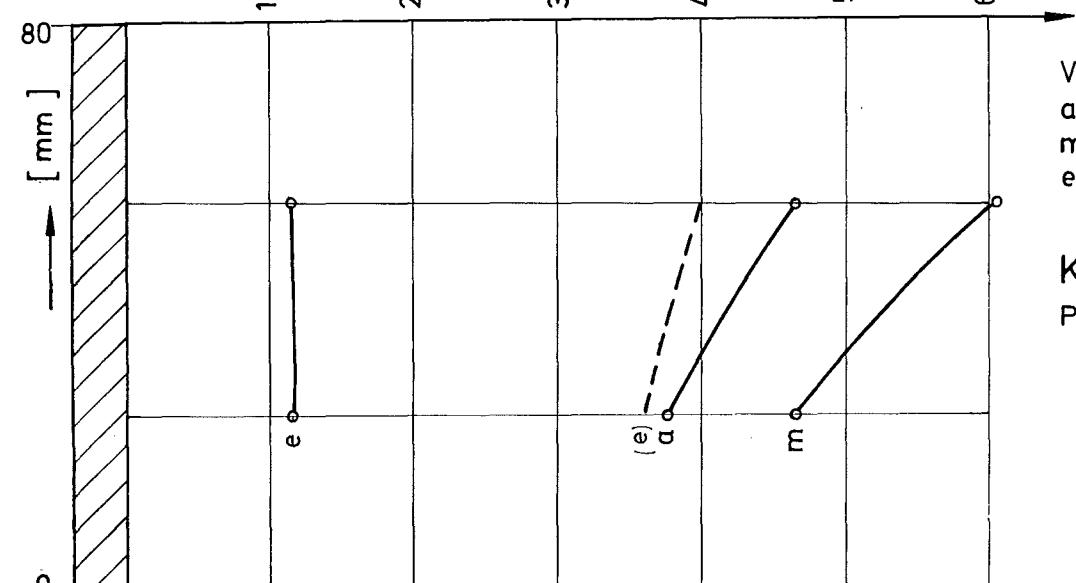
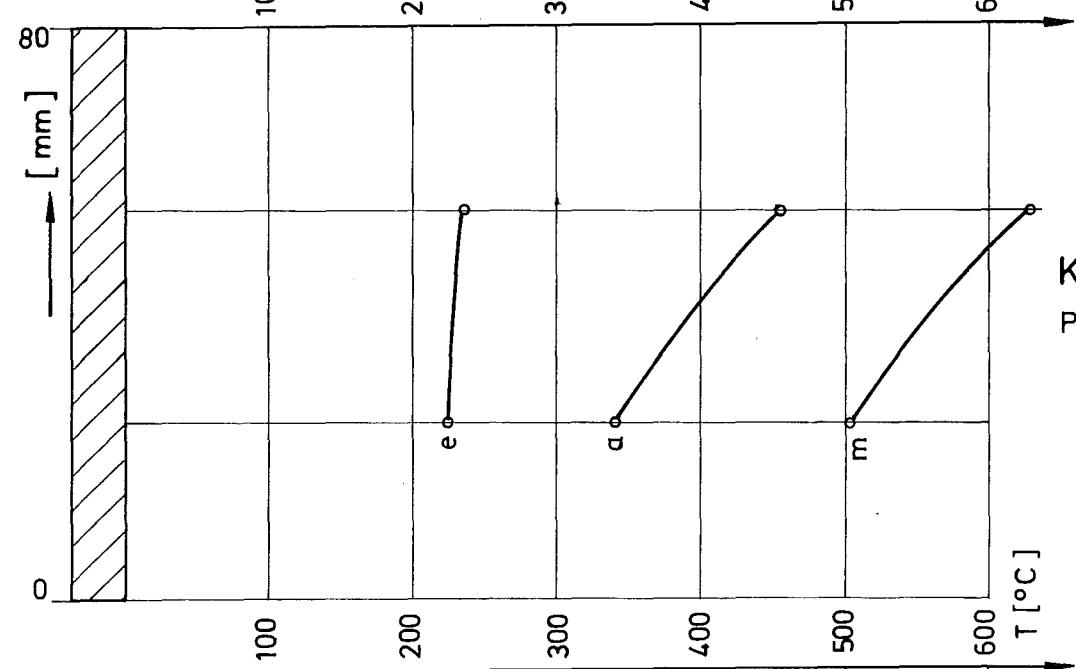
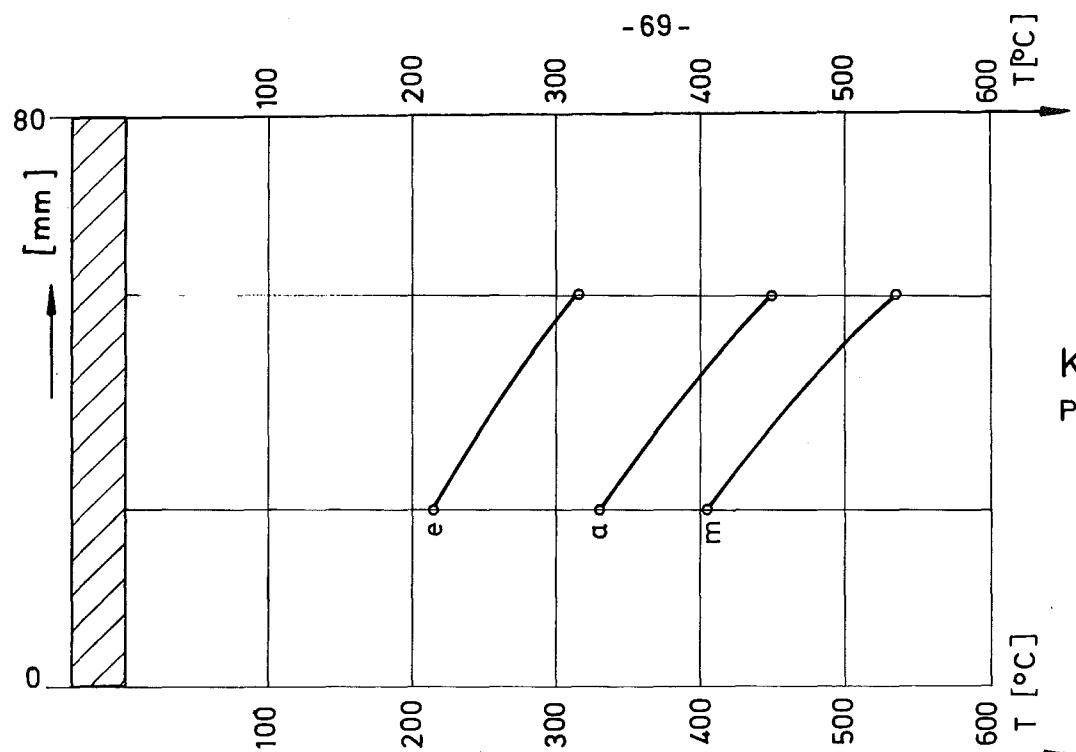
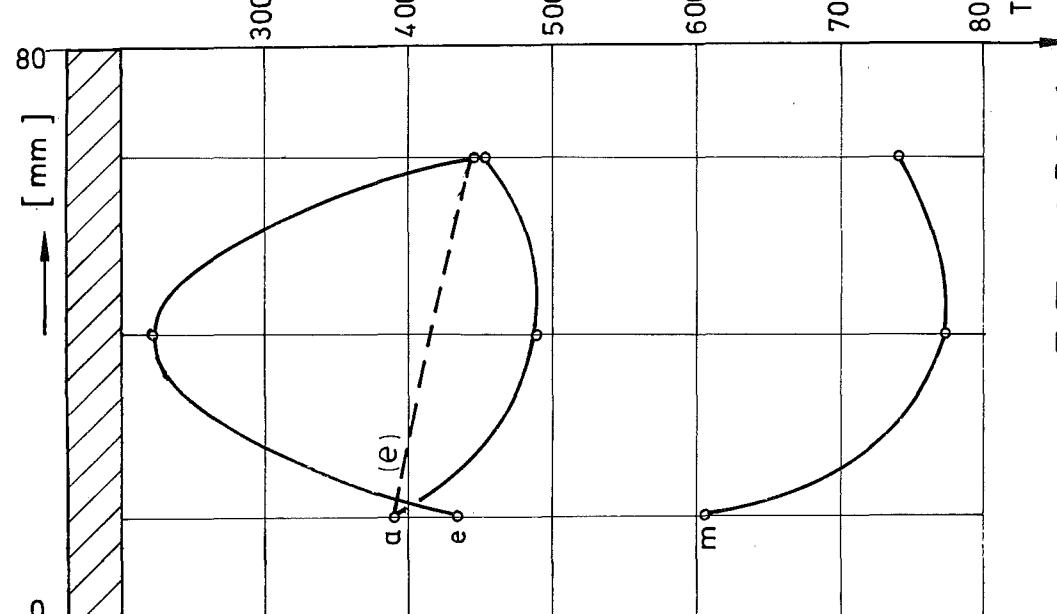
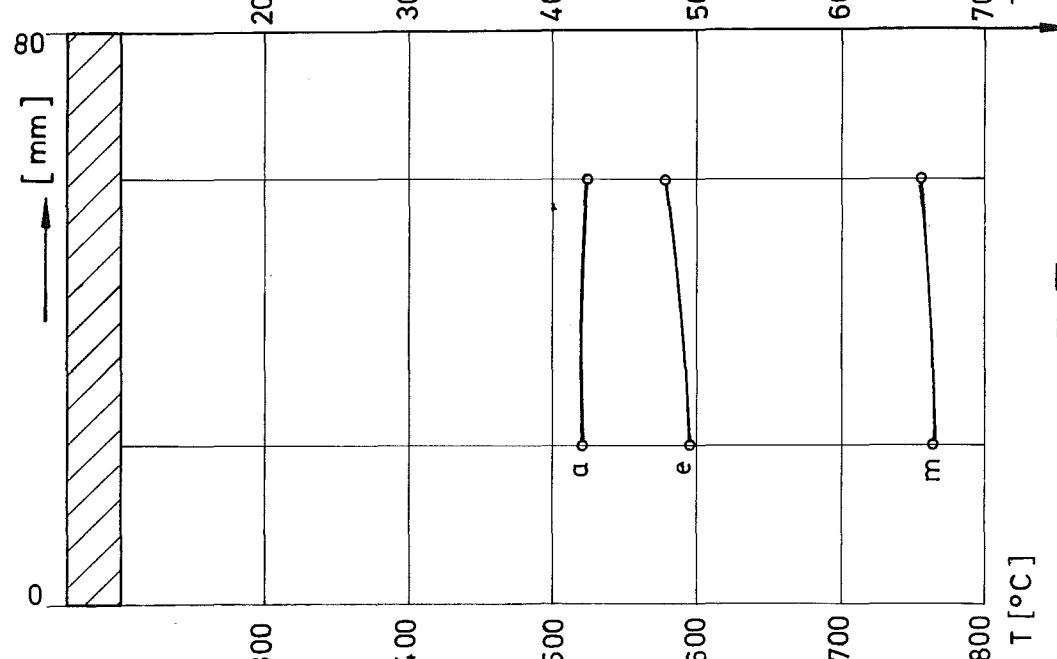
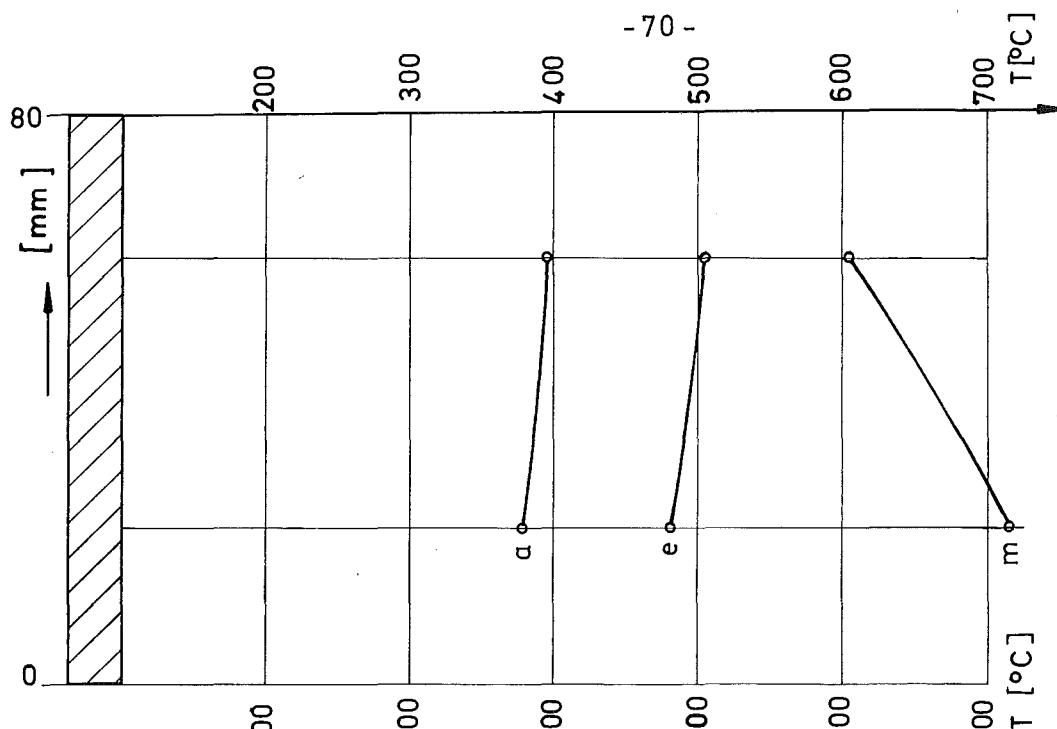


Abb. 37



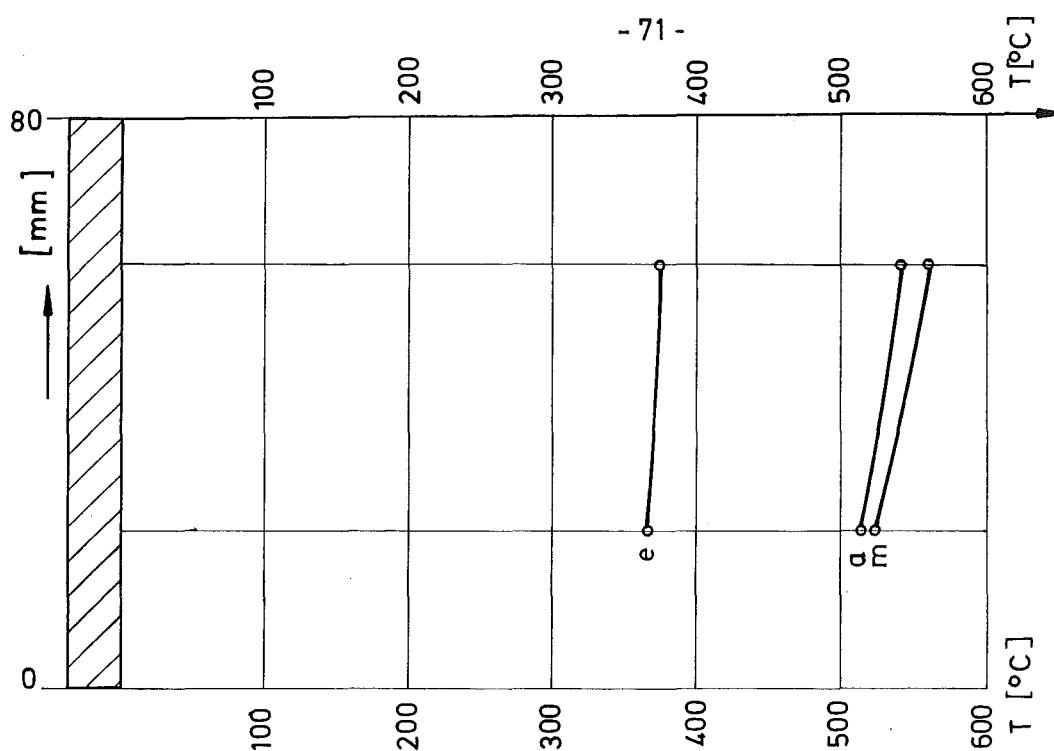
Kapselversuchsgruppe 4 b
Axiale Temperaturverteilung (Hülloberfläche)

Abb. 38

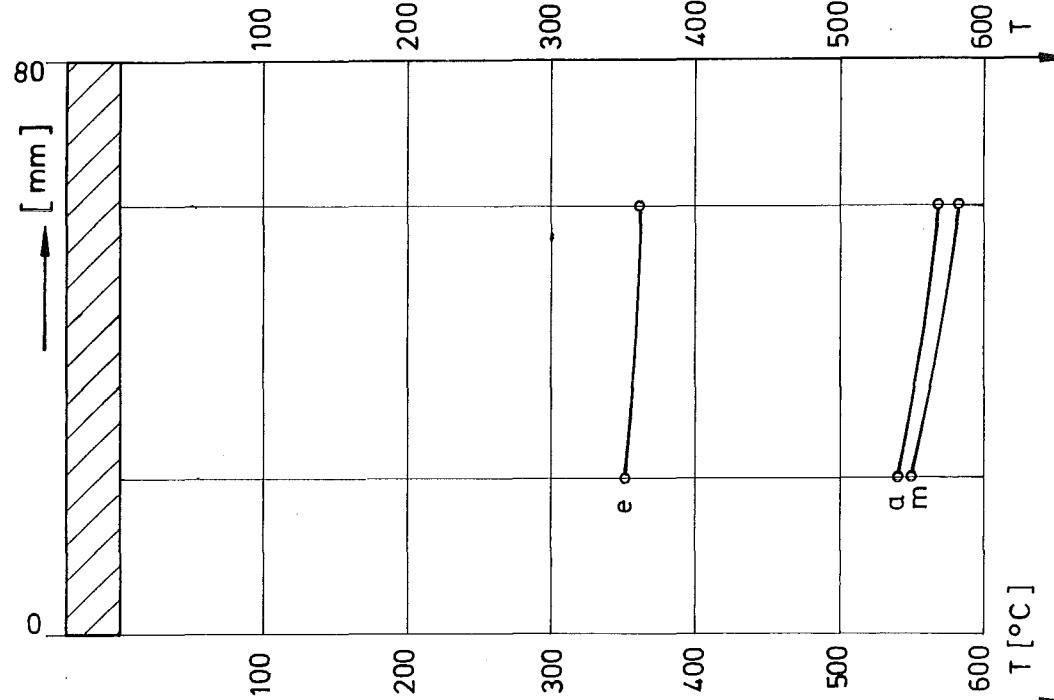


Kapselversuchsguppe 4b
Axiale Temperaturverteilung (Hülloberfläche)

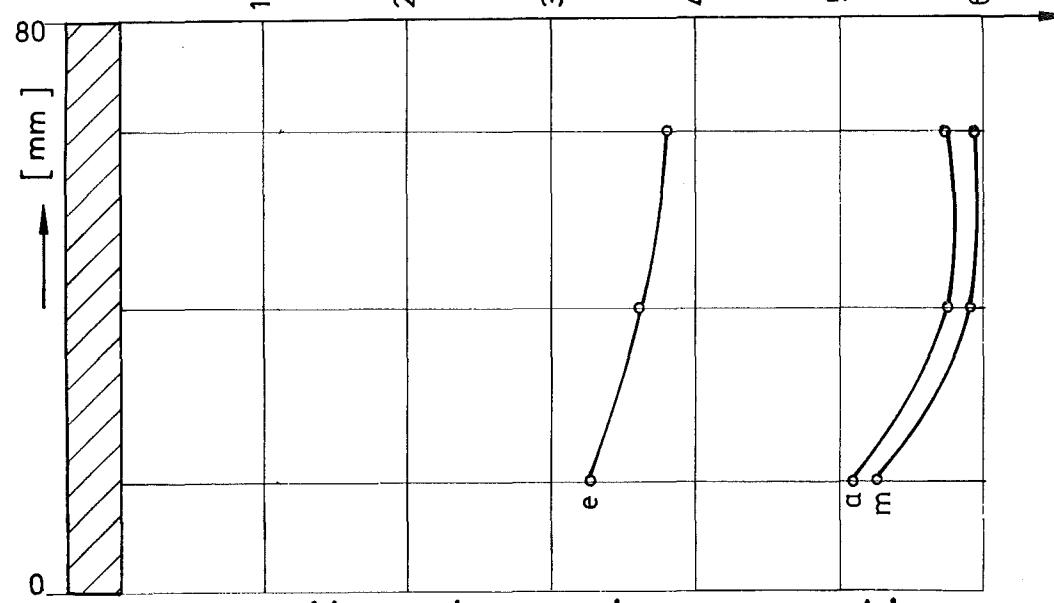
Abb. 39



KVE -Nr. 56
Prüfling 4B18



KVE -Nr. 56
Prüfling 4B17

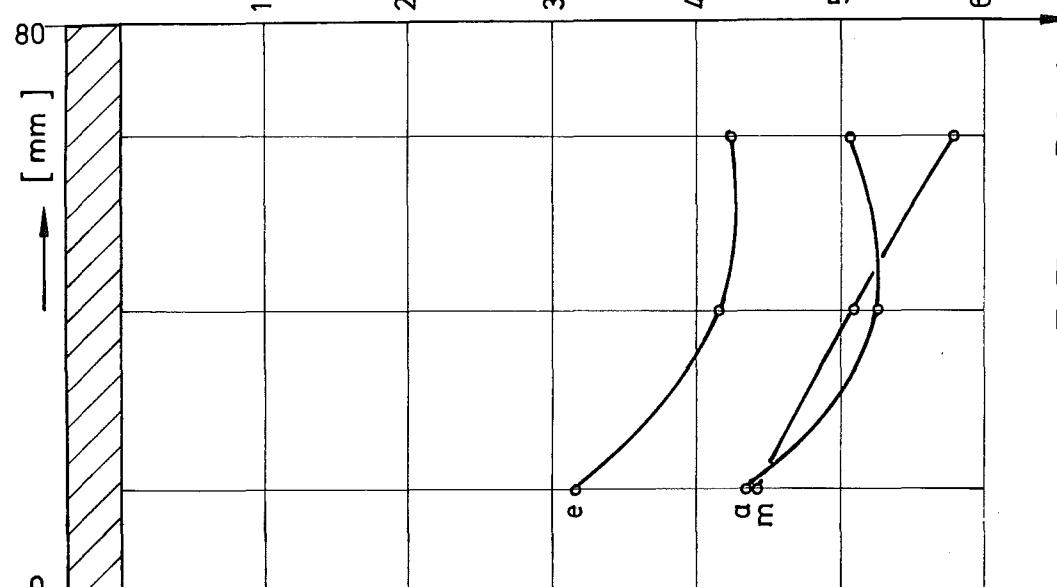
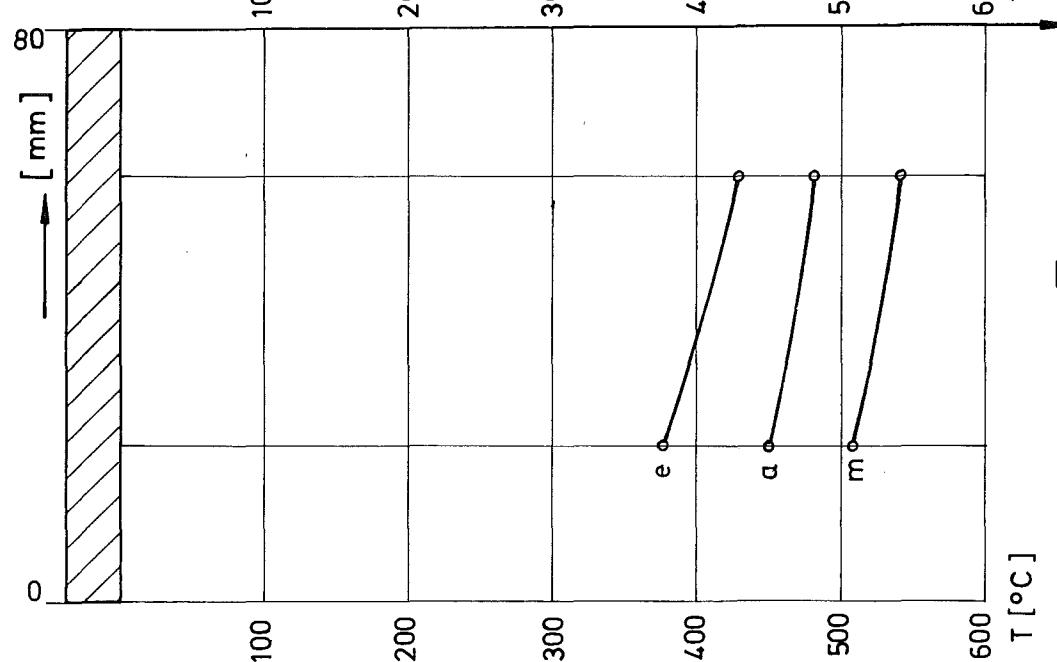
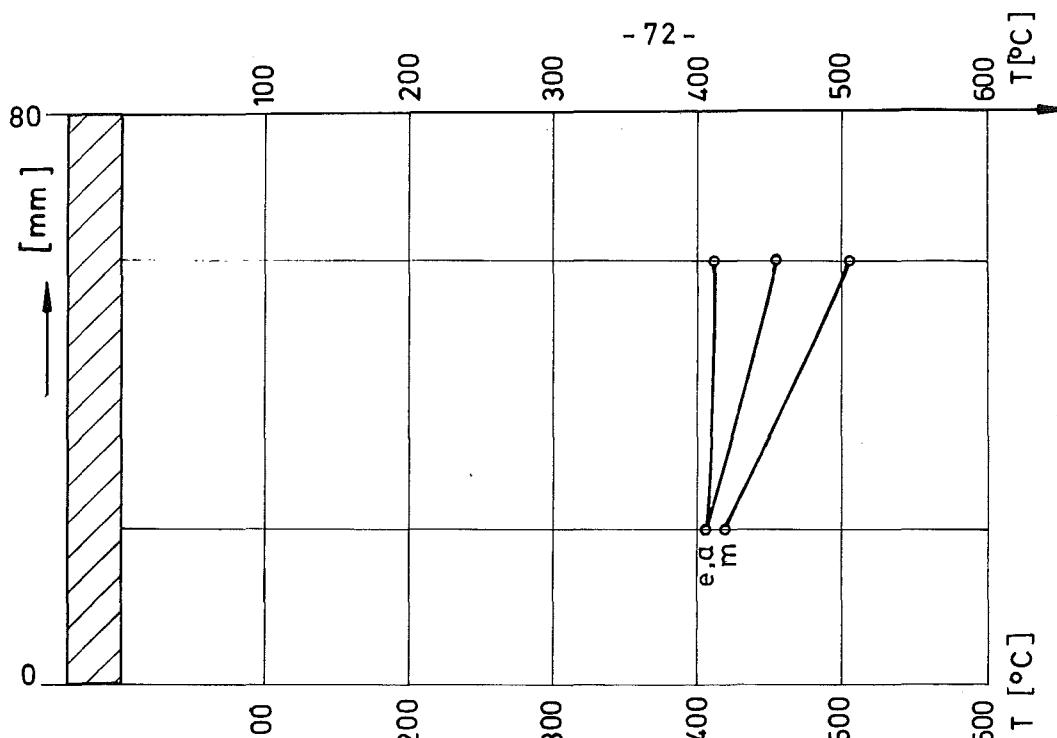


Verteilung :
a - Betriebsbeginn
m - Maximalwert
e - Betriebsende

KVE -Nr. 56
Prüfling 4B16

Kapselversuchsgruppe 4 b
Axiale Temperaturverteilung (Hülloberfläche)

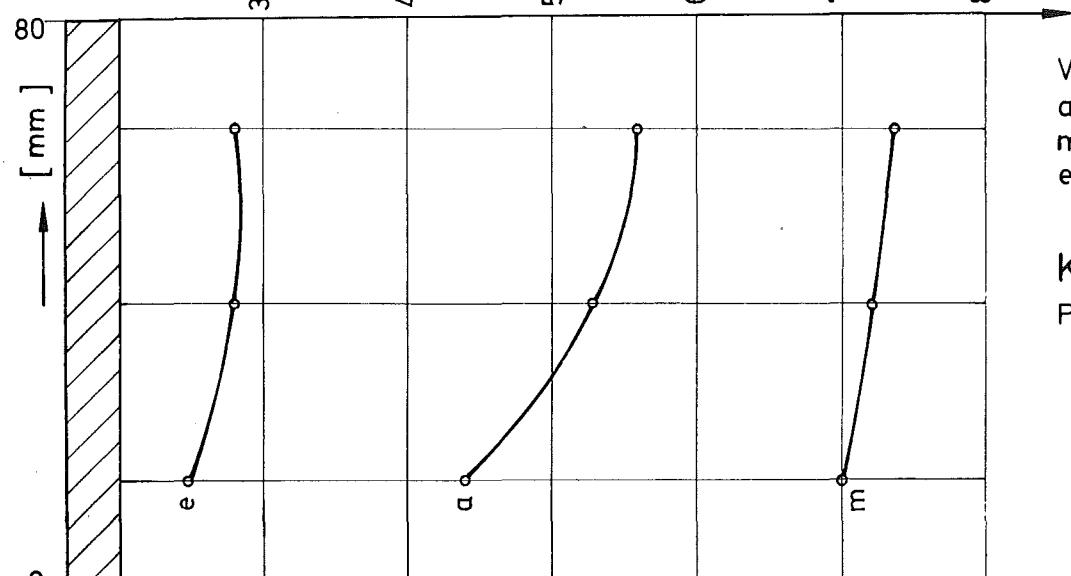
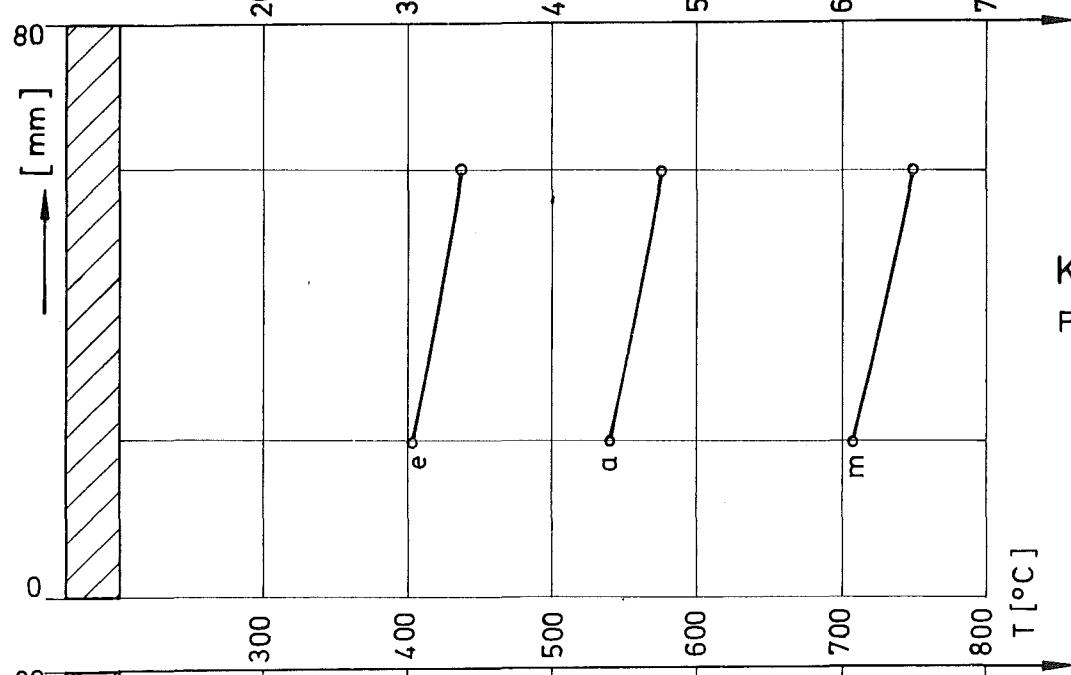
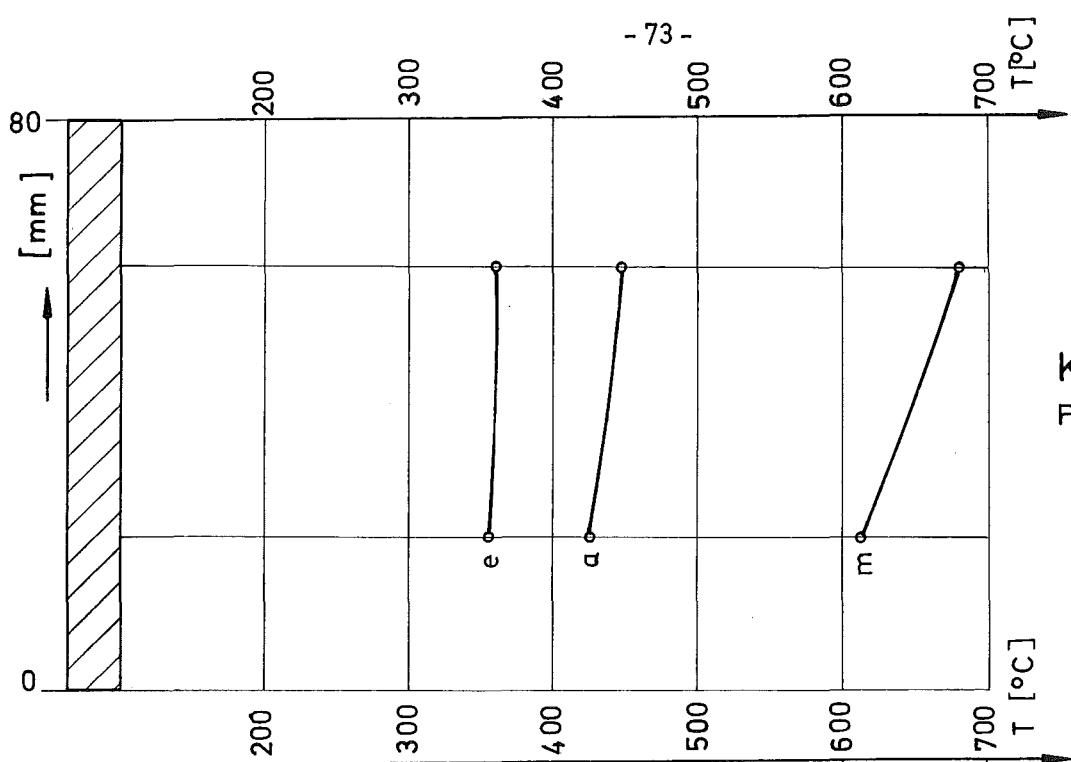
Abb. 40



Verteilung :
a - Betriebsbeginn
m - Maximalwert
e - Betriebsende

Kapselversuchsgruppe 4 b
Axiale Temperaturverteilung (Hülloberfläche)

Abb. 41



Verteilung :
a - Betriebsbeginn
m - Maximalwert
e - Betriebsende

Kapselversuchsgruppe 4b
Axiale Temperaturverteilung (Hülloberfläche)

Abb. 42

Tabelle XVI: Thermische Abbrandwerte der Prüflinge, Kapselversuchsgruppe 4b

| K V E Nr. | Prüfling Nr. | Abbrand gemäß TE-Nr. (MWh/kg M) | | | | | | | Abbrand mittl. Abbrand berechnet |
|--------------|-----------------|---------------------------------|------------------|-------|--------|-----------------|------------------|--------|--|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
| 42 | 4B/27 | | | | | | 23,23 | | 23,23 |
| | 4B/26 | | | 18,62 | 21,66 | 25,71 | | | 22,00 |
| | 4B/25 | 17,91 | 25,24 | | | | | | 21,57 |
| 43 | 4B/34 | | | | | | 10,26 | | 10,26 |
| | 4B/32 | | | 8,08 | 10,10 | 11,43 | | | 9,87 |
| | 4B/30 | 7,48 | 11,90 | | | | | | 9,69 |
| 44 | 4B/35 | | | | | | 25,08 | | 25,08 |
| | 4B/33 | | | 22,33 | 25,55 | 28,21 | | | 25,36 |
| | 4B/31 | 20,81 | 26,69 | | | | | | 23,75 |
| 45 | 4B/24 | 11,08 | 12,85 | | | | | | 11,97 |
| | 4B/29 | | | | | | | | 17,12 |
| | 4B/28 | | | 14,74 | 17,10 | 19,56 | 17,12 | | 17,13 |
| 47 | 4B/4 | | | | | | | | 85,35 |
| | 4B/3 | | | | | | | | 74,62 |
| | 4B/2 | | | | | | | | 76,25 |
| | 4B/1 | 43,92 (79) | 43,53 (84) | 65,07 | 87,44 | 63,69 | 85,54 | | 43,73 (81,5) |
| 48 | 4B/9 | | | | | | | | 79,09 |
| | 4B/8 | | | | | | | | 71,46 |
| | 4B/7 | | | | | | | | 76,41 |
| | 4B/5 | 59,92 | 78,32 | 69,04 | 83,79 | 68,61 | 74,30 | 79,09 | 69,12 |
| 49 | 4B/11 | | | | | | | | 99,98 |
| | 4B/12 | | | | | | | | 62,75 (104,0) |
| | 4B/10 | | | | | | | | 110,29 |
| | 4B/6 | 56,23 (95) | 48,55 (120) | 96,79 | 123,78 | 15,13 (98) | 110,38 | | 52,39 (107,5) |
| 55 | 4B/15 | | | | | | | | 61,17 |
| | 4B/14 | | | | | | | | 65,80 |
| | 4B/13 | 58,39 | 45,64 (68) | 63,59 | 66,76 | 64,84 | 60,11 | 62,23 | 55,87 (63,3) |
| 56 | 4B/18 | | | | | | | | 59,20 |
| | 4B/17 | | | | | | | | 61,25 |
| | 4B/16 | 56,24 | 63,68 | 64,91 | 59,76 | 62,75 | 57,97 | 60,42 | 61,61 |
| 57 | 4B/21 | | | | | | | | 79,39 |
| | 4B/20 | | | | | | | | 83,08 |
| | 4B/19 | 72,18 | 91,24 | 90,85 | 78,36 | 87,81 | 77,0 | 81,78 | 84,76 |
| 58 | 4B/24 | | | | | | | | 93,37 (105) |
| | 4B/23 | | | | | | | | 104,17 |
| | 4B/22 | 86,58 | 86,68 | 85,48 | 99,24 | 109,09 | 77,27 (150) | 109,47 | 86,25 |

7. Zerstörungsfreie Nachuntersuchung

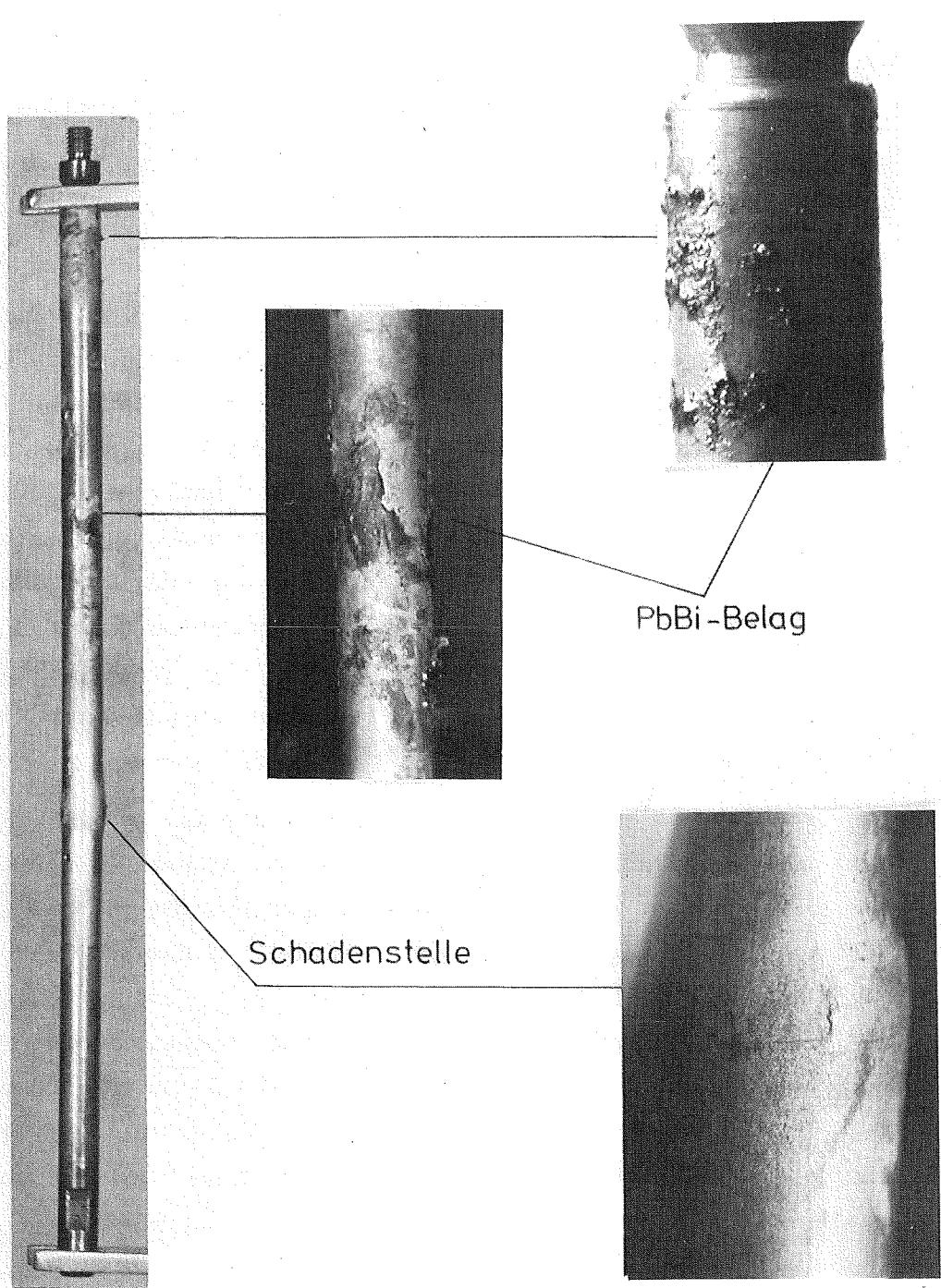
7.1 Äußere Vermessung

An allen Prüflingen wurde vor und 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. Danben 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 vibrierten Prüflinge (KVE 42, 43, 44, 45) wurden nur zerstörungsfrei untersucht. Die Betatronauswertung hinsichtlich Längenveränderung der Brennstoffsäule ergab (s. 7.2) zum Teil beachtliche Zuwachswerte (+ 12,6 %), was im Nachhinein das Stabversagen erklärt (Hineinwachsen in Wärmedämmung - mangelnde Wärmeabfuhr). Abb. 43 zeigt einen solchen Prüfling mit den Schadensstellen.



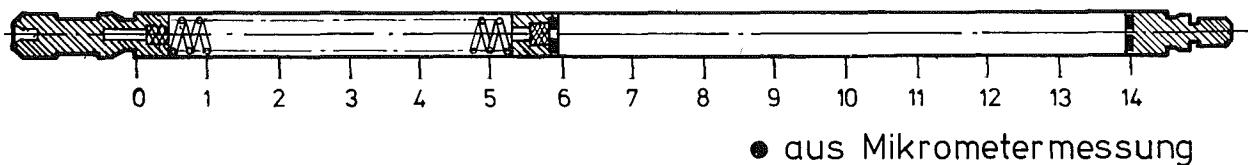
Prüfling 4B/32
nach der Bestrahlung

Abb. 43

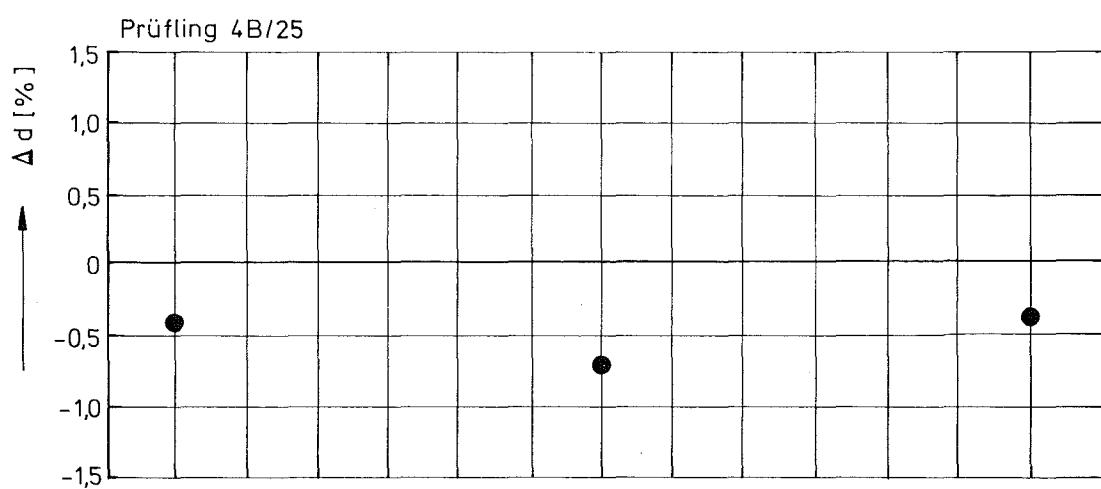
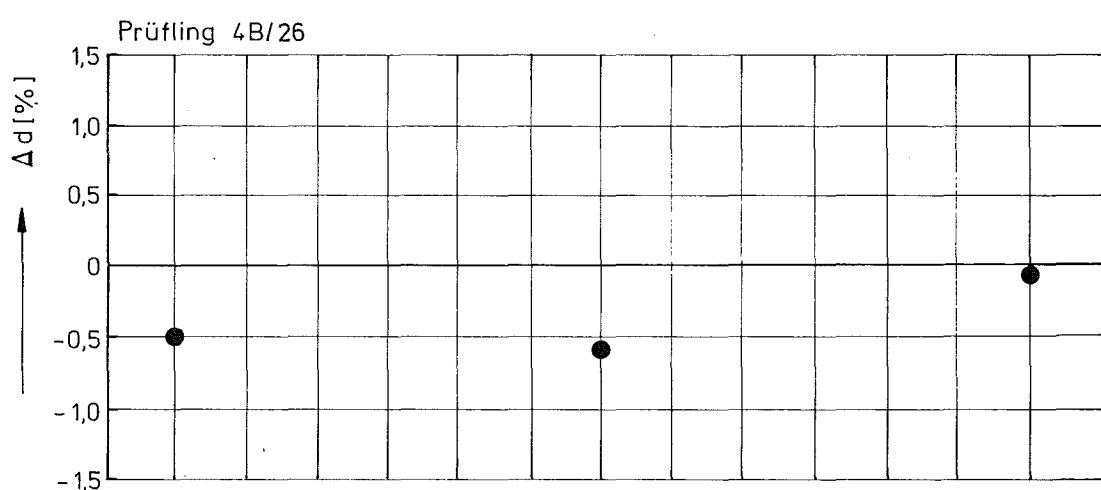
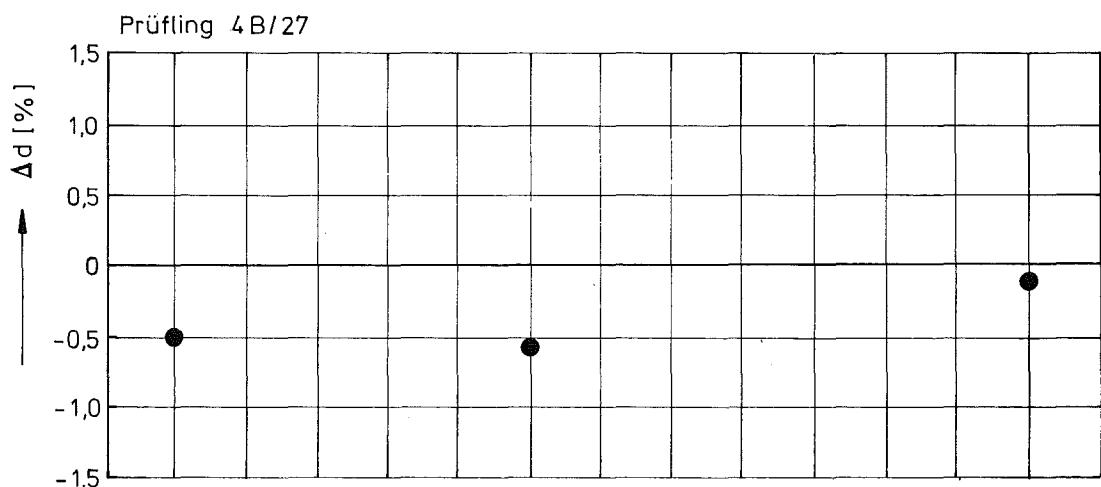
Die neue Apparatur wurde ab KVE 47 benutzt und zwar bei den KVE's 47 und 48 für die Nachvermessung der bestrahlten Stäbe und beim KVE 57 für die Vor- und Nachvermessung der Prüflinge.

Eine besondere Schwierigkeit ergab sich beim Vergleich einiger Meßwerte, die nach der Bestrahlung aufgenommen wurden, mit den Vorbestrahlungsdaten. In der Vorvermessung war hier noch ein Meßtaster benutzt worden, der anstelle 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 Durchmesserveränderungen klein zu halten, wurde daher hier von einer anderen Art der Vorvermessung ausgegangen. Vor der Bestrahlung war der Durchmesser der Stäbe an mehreren (3 bis 4) 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 KVE 42, 44 und 45 wurden so ausgewertet. KVE 43 wurde nicht vermessen, da die beiden untersten Prüflinge defekt waren. Ab KVE 47 wurden auch bei der Vorvermessung Meßschneiden benutzt. Ab KVE 57 hingegen wurden die Vor- und Nachvermessungen mittels Wendelschrieben ausgeführt. In den Abb. 44 bis 54 werden die Durchmesserveränderungen in % über der Prüflingslänge dargestellt. Bei den vibrierten Prüflingen (4B/25 bis 4B/34) zeigt sich eindeutig eine Durchmesserabnahme über die gesamte Prüflingslänge, während die mit Tabletten gefüllten Stäbe (4B/1 bis 4B/24) im Bereich der Brennstoffsäule durchweg Durchmesserzunahmen aufweisen. Die Zunahmen sind für die Prüflinge der KVE 47, 48 und 49 zum Teil recht beachtlich (bis zu 1,75 %), während sie für die KVE 55, 56, 57 und 58 wesentlich geringer ($\sim 0,5 \%$) sind. Eine Abbrandabhängigkeit der Durchmesserveränderung kann nicht festgestellt werden.

Die zusammen mit dem Durchmesser bestimmten Durchbiegungen der Prüflinge nach der Bestrahlung sind in Tabelle XVII 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.

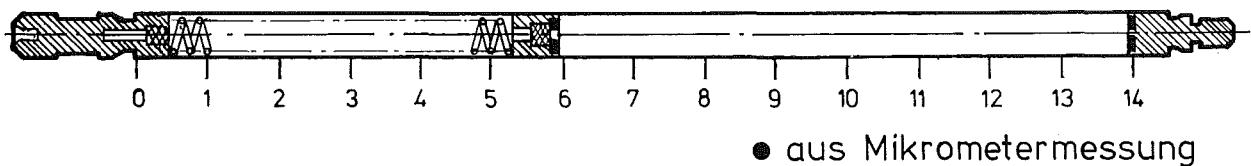


KVE 42

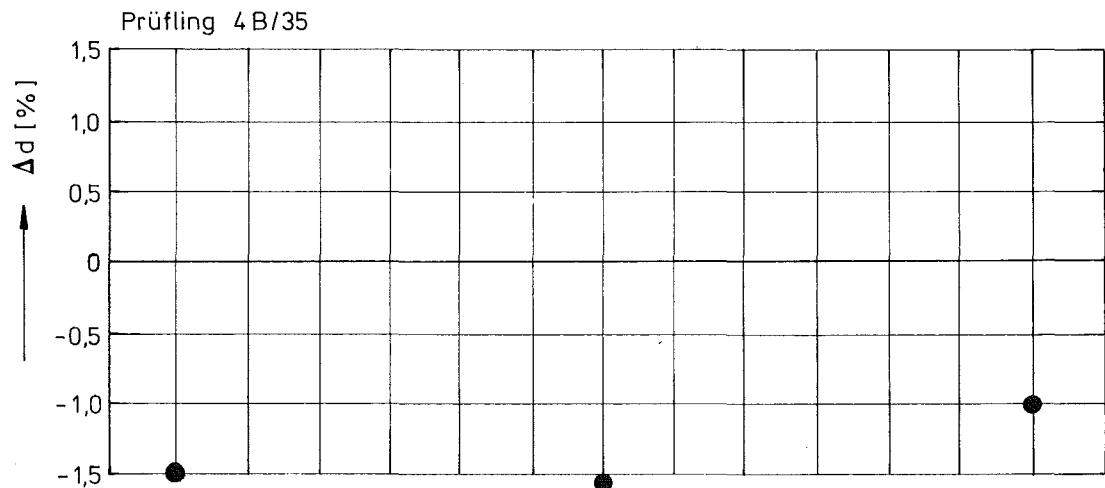


Veränderungen der Stab-Außendurchmesser

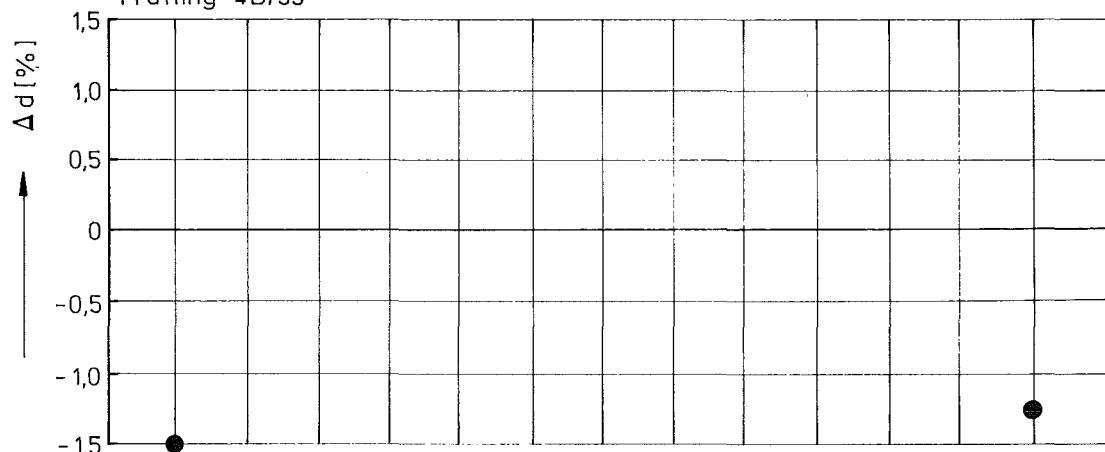
Abb. 44



KVE 44

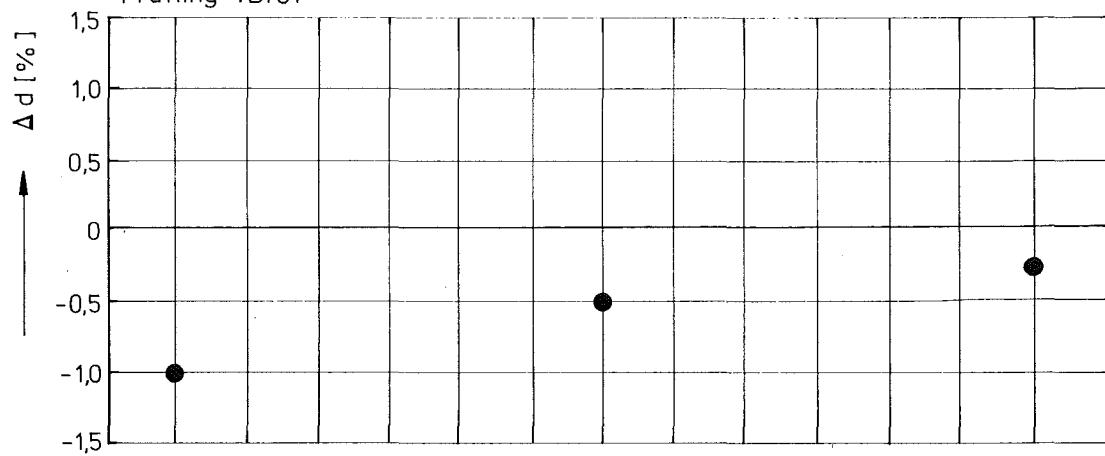


Prüfling 4B/33



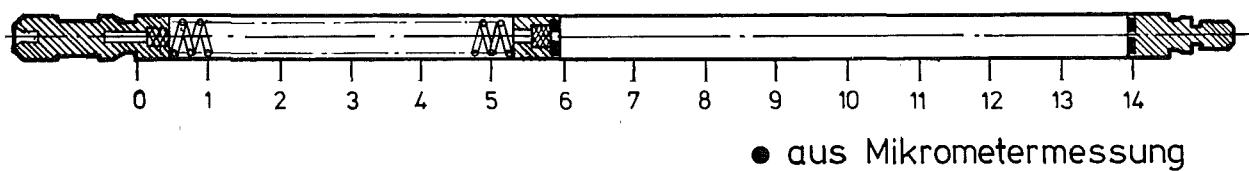
●

Prüfling 4B/31



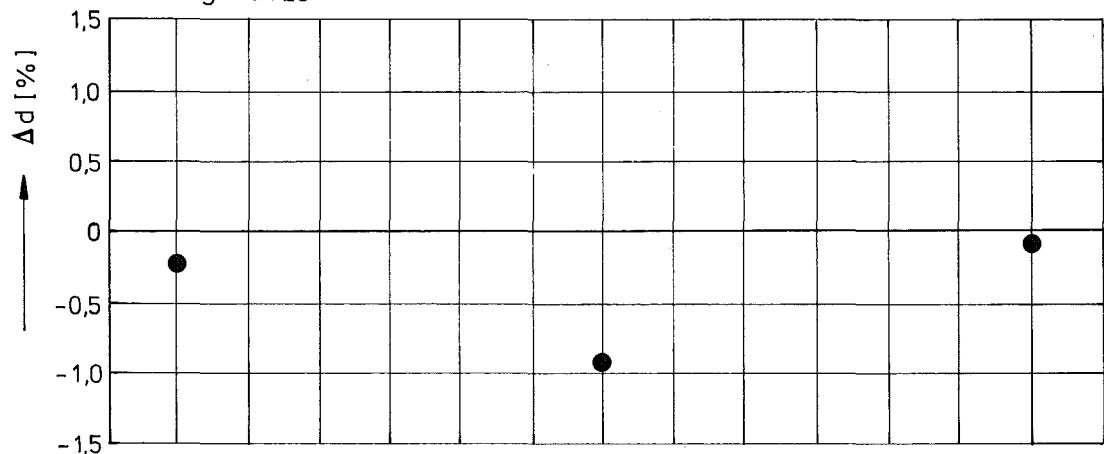
Veränderungen der Stab-Außendurchmesser

Abb. 45

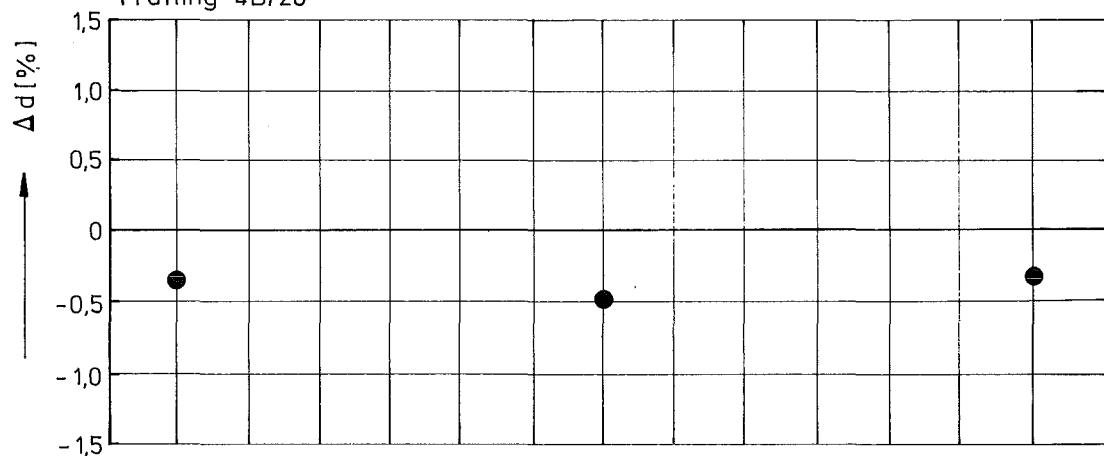


KVE 45

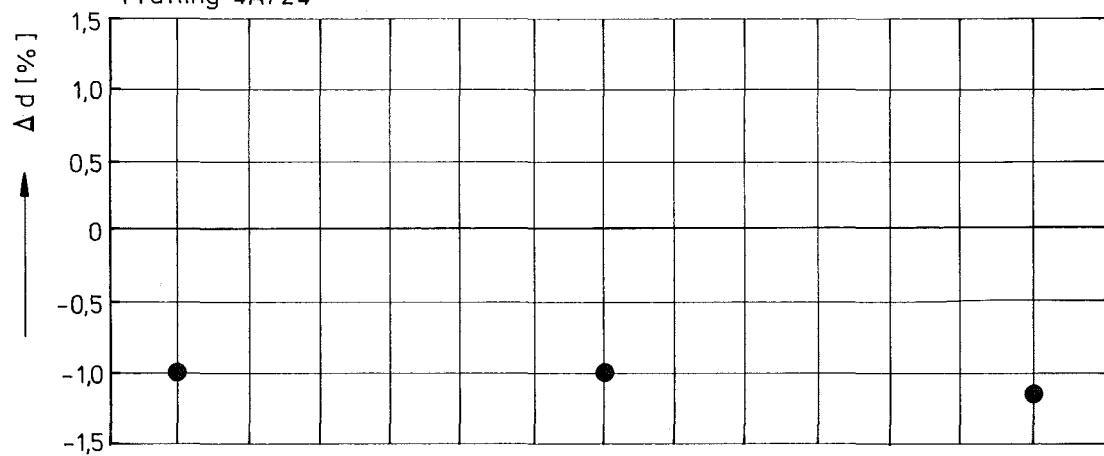
Prüfling 4B/29

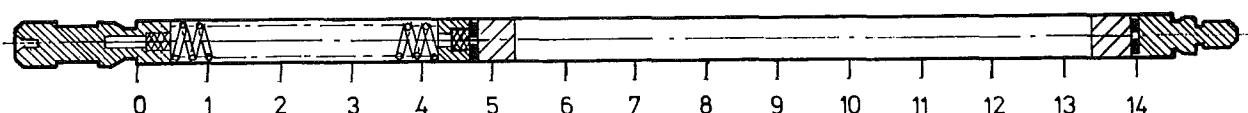


Prüfling 4B/28



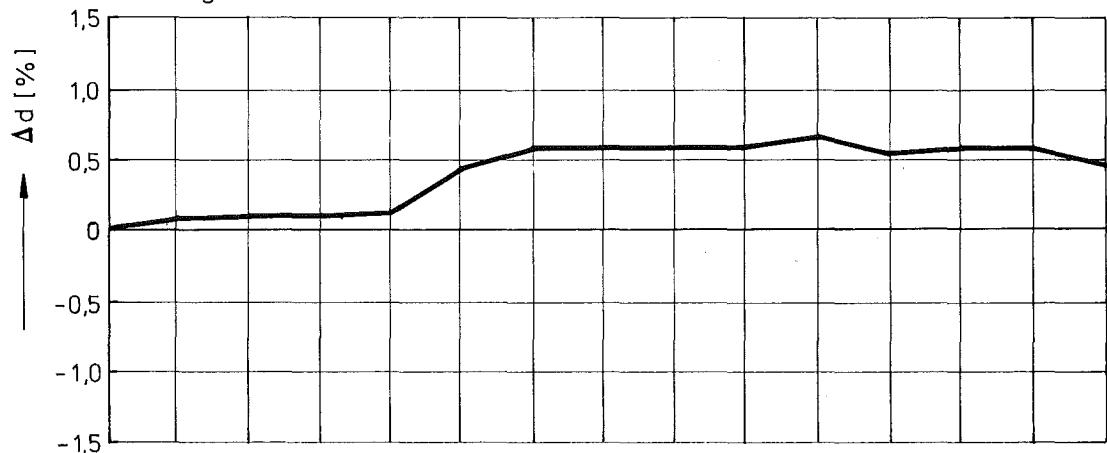
Prüfling 4A/24



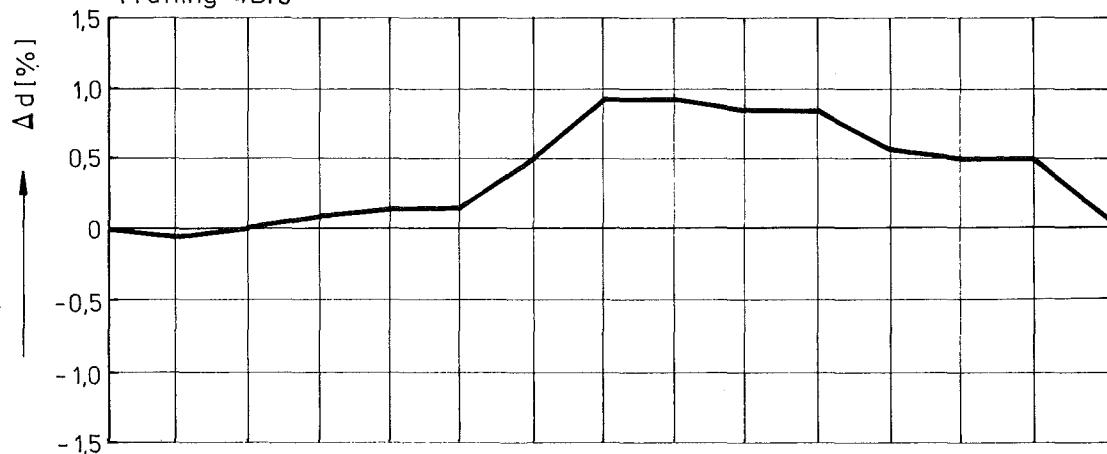


KVE 47

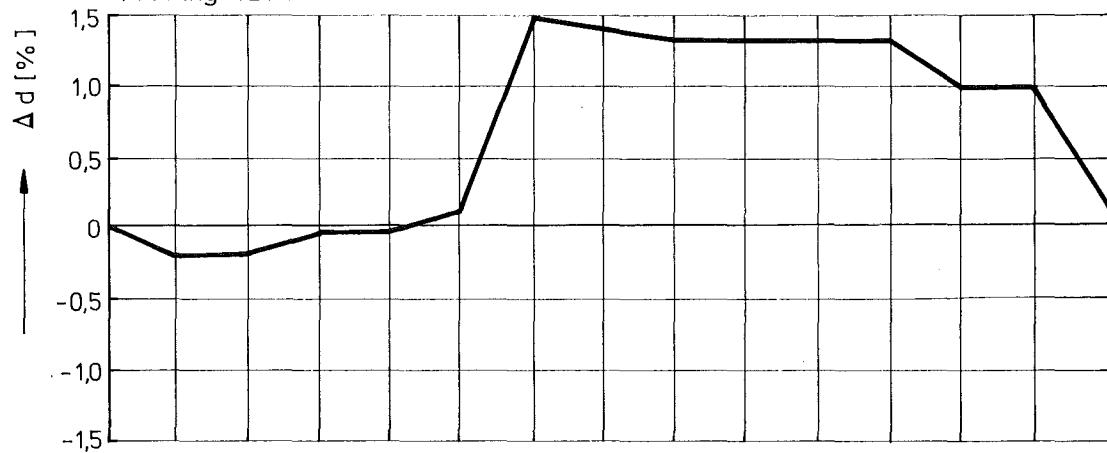
Prüfling 4B/4



Prüfling 4B/3

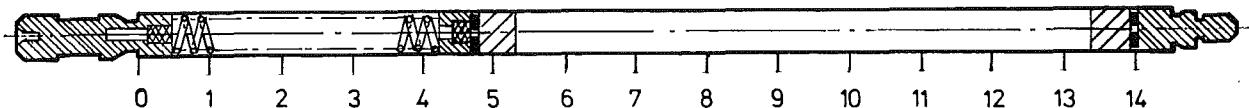


Prüfling 4B/2

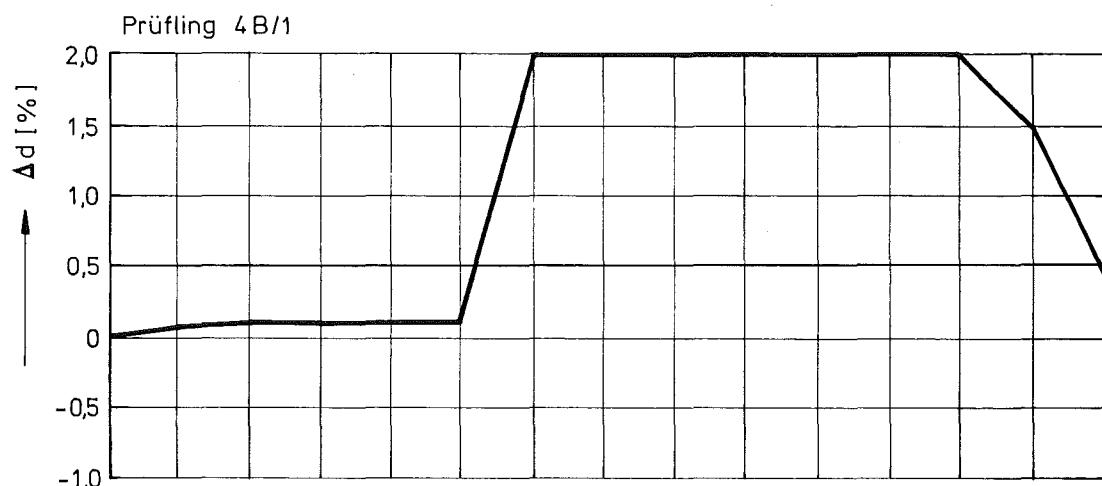


Veränderungen der Stab-Außendurchmesser

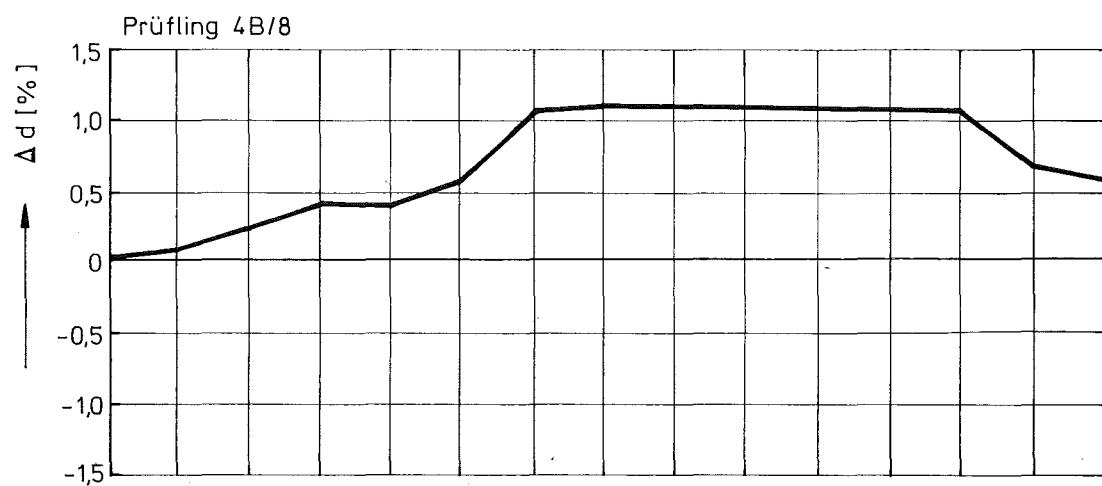
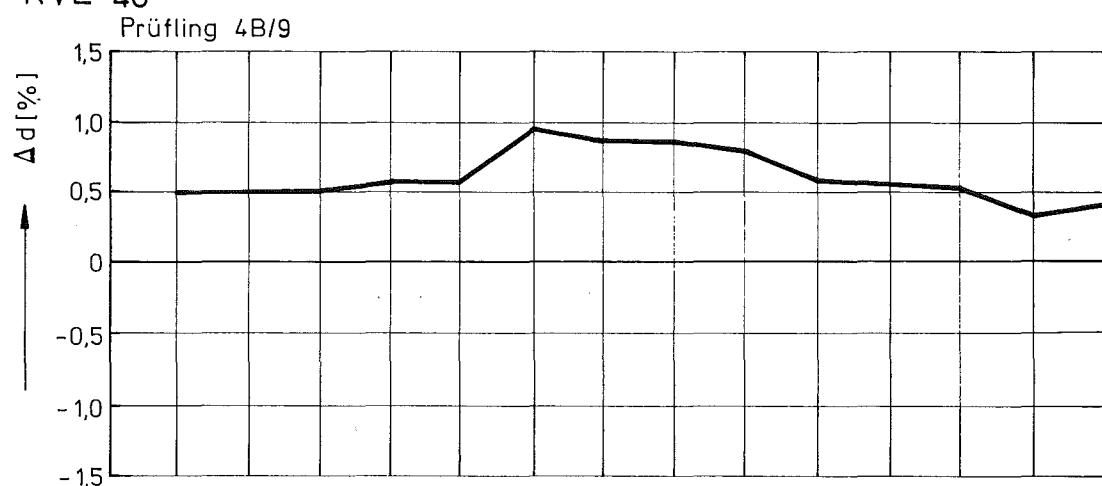
Abb. 47



KVE 47

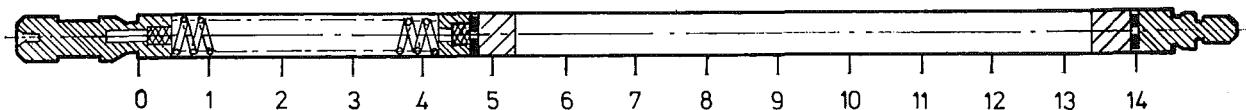


KVE 48

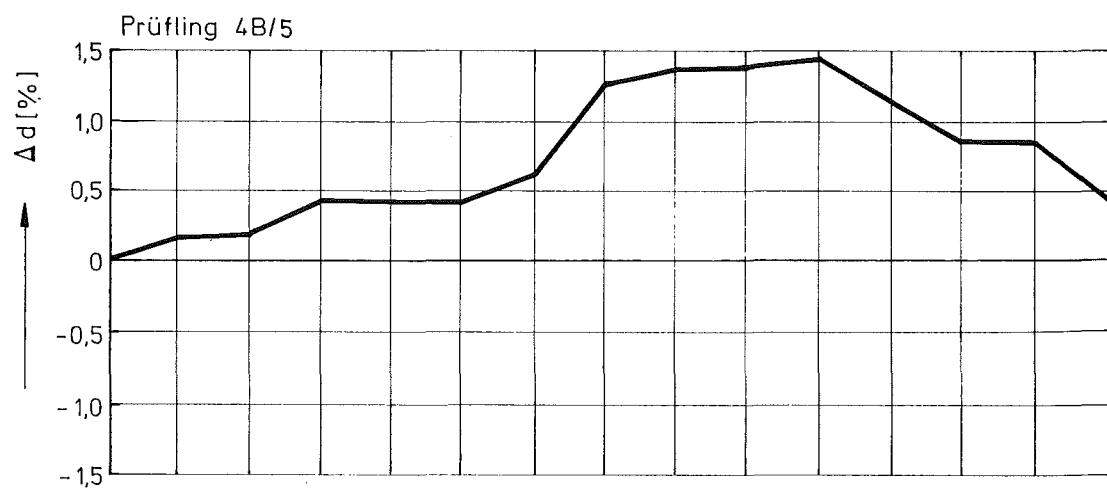
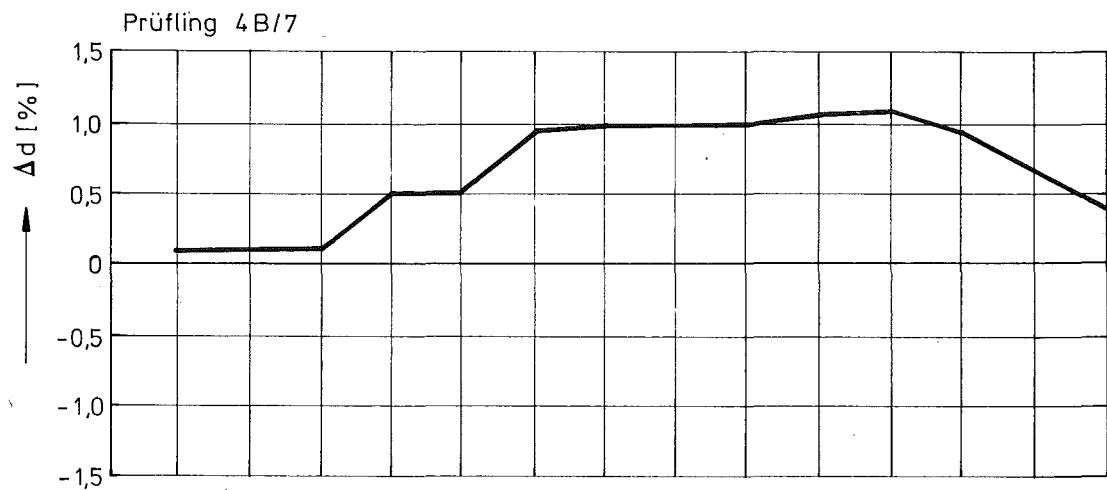


Veränderungen der Stab-Außendurchmesser

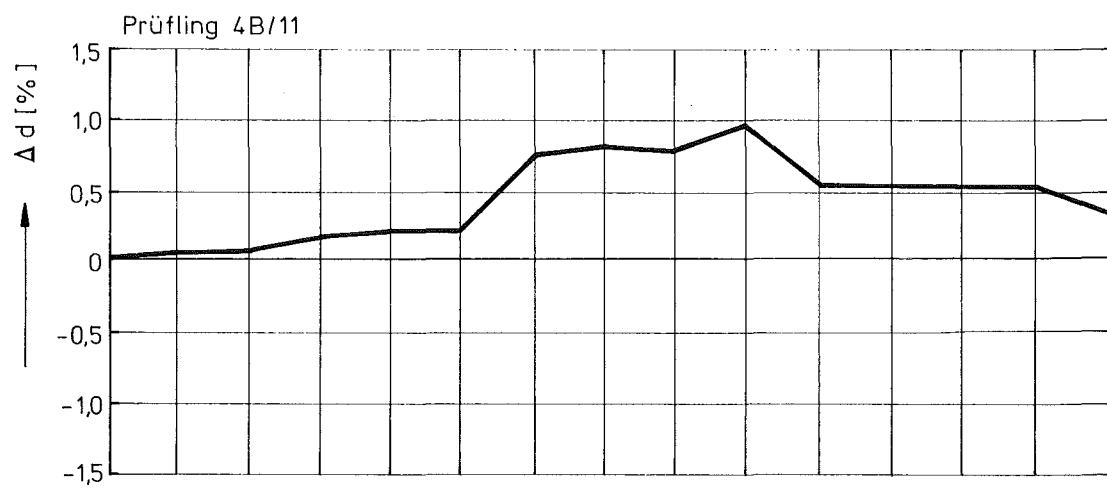
Abb. 48

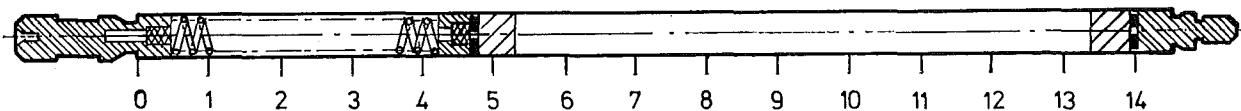


KVE 48



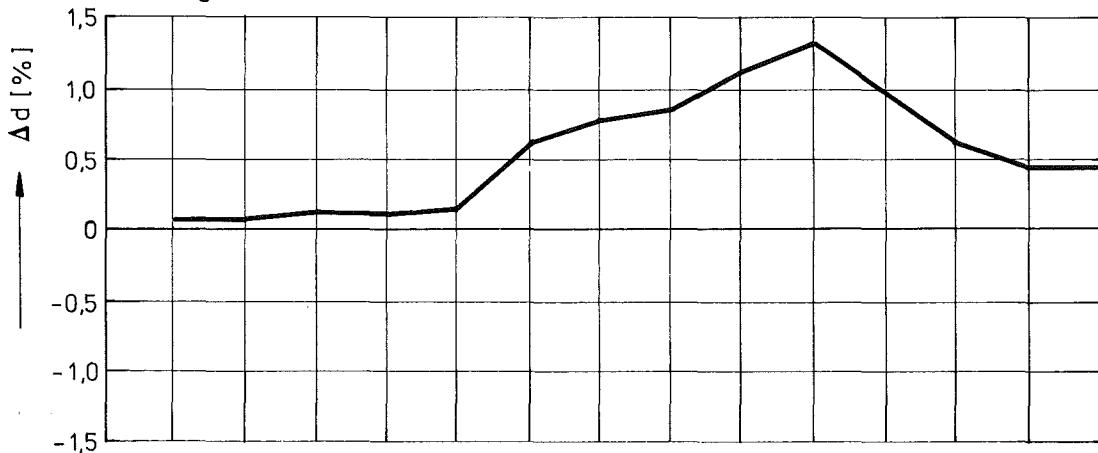
KVE 49



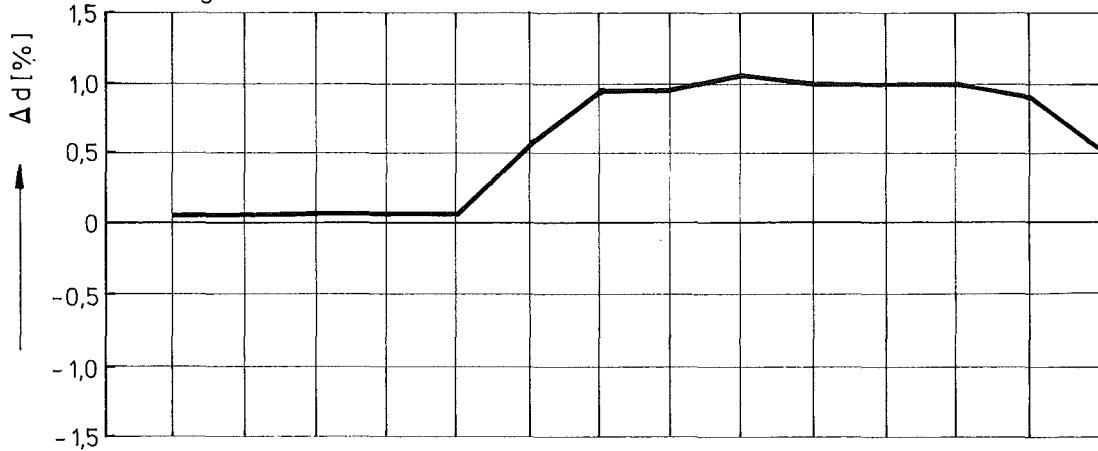


KVE 49

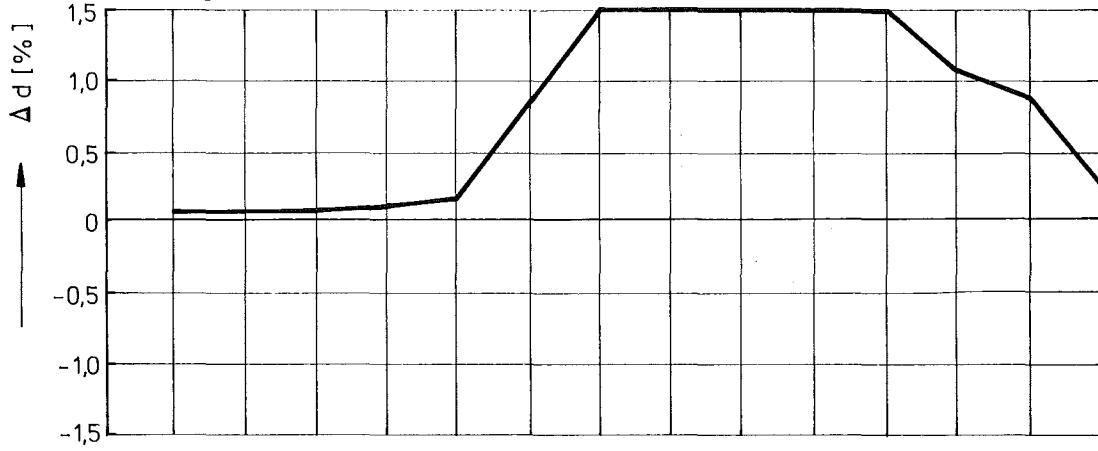
Prüfling 4B/12

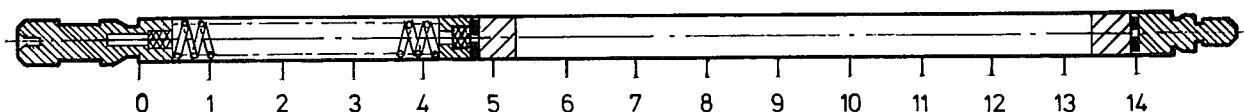


Prüfling 4B/10

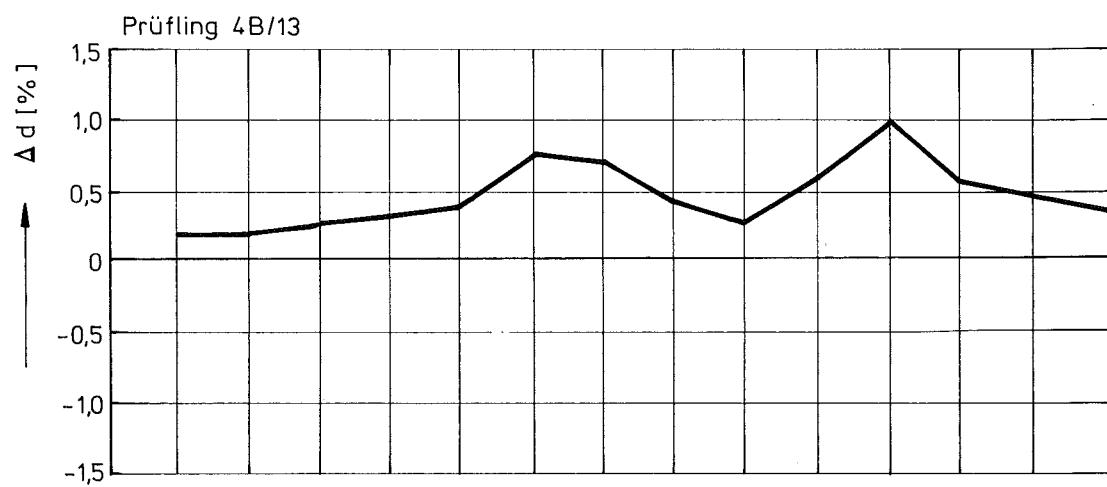
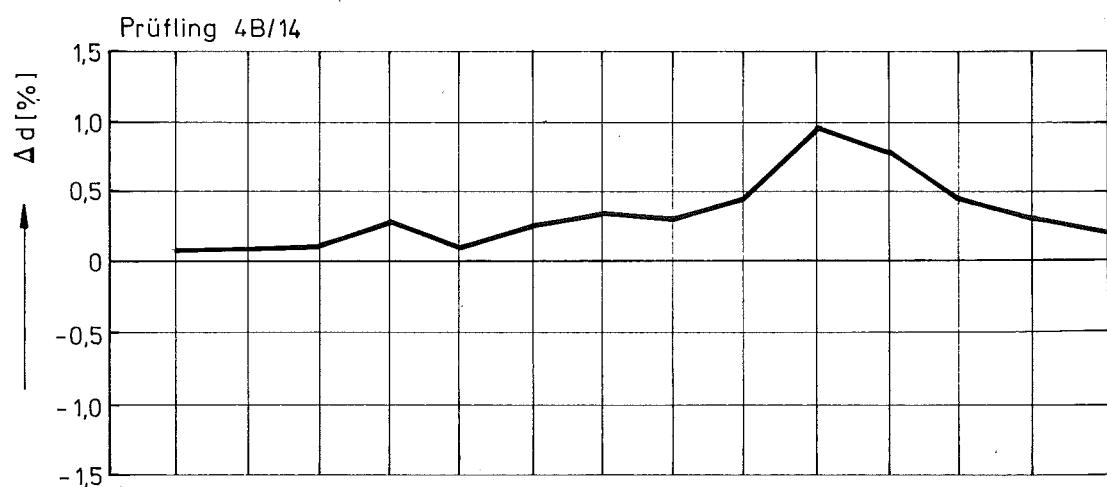
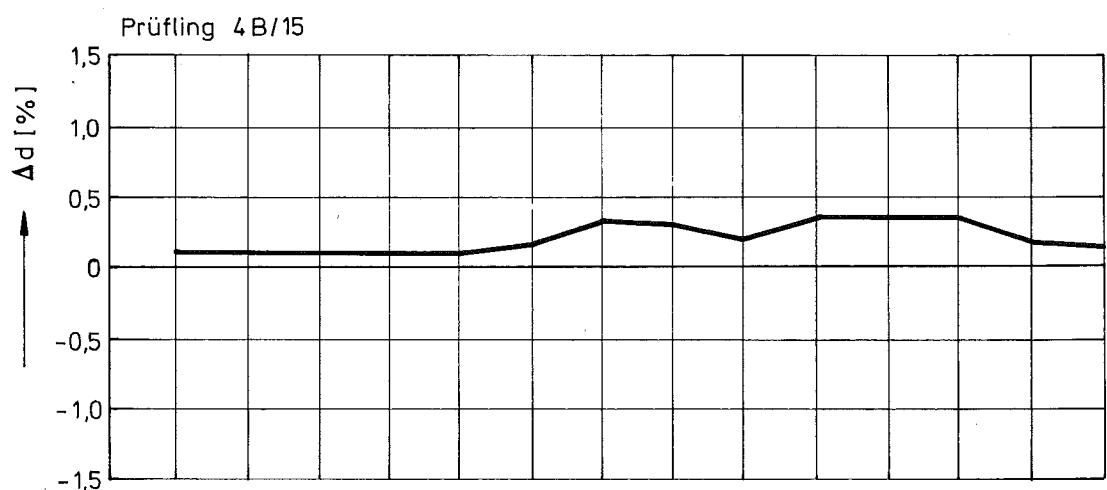


Prüfling 4B/6



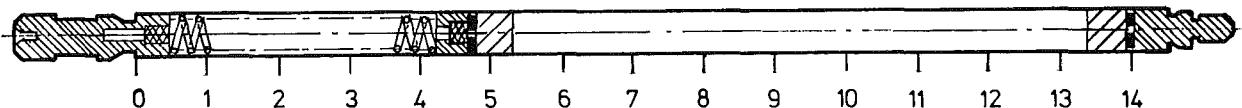


KVE 55



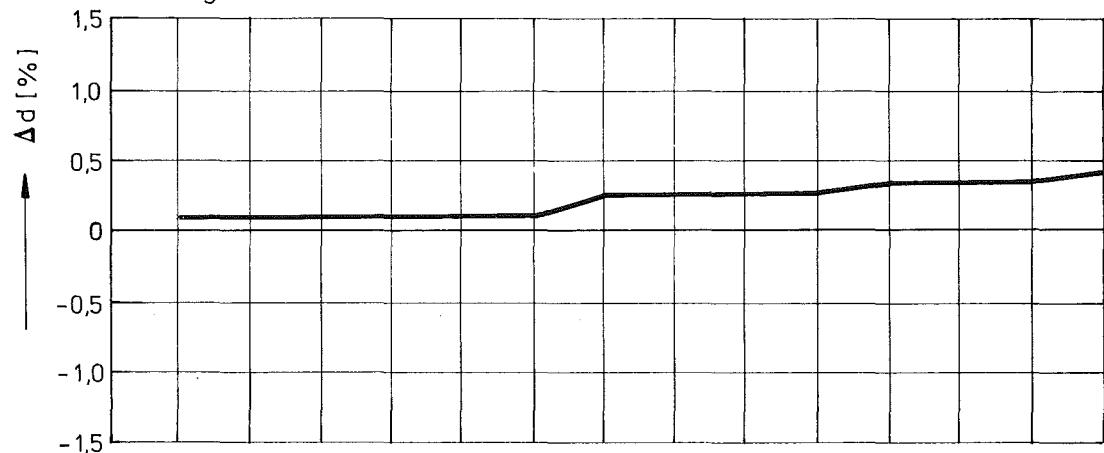
Veränderungen der Stab-Außendurchmesser

Abb. 51

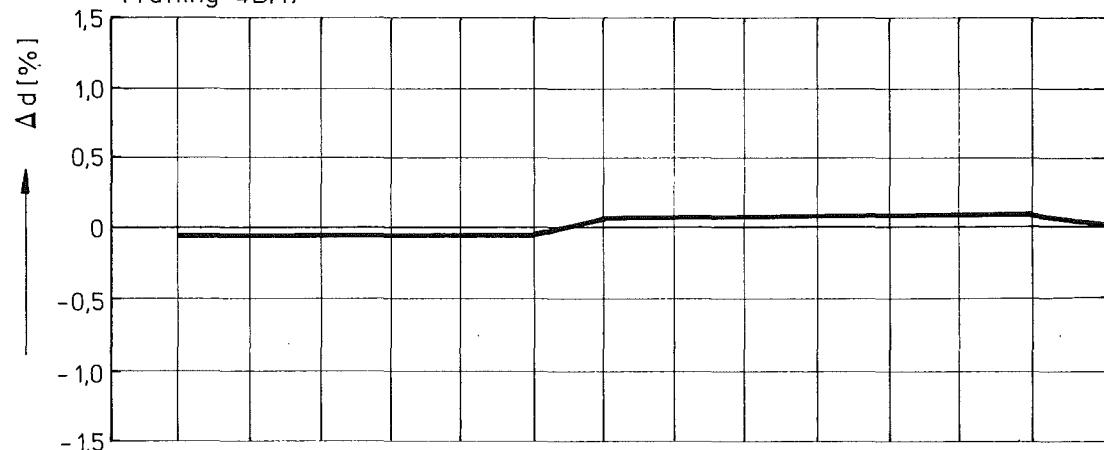


KVE 56

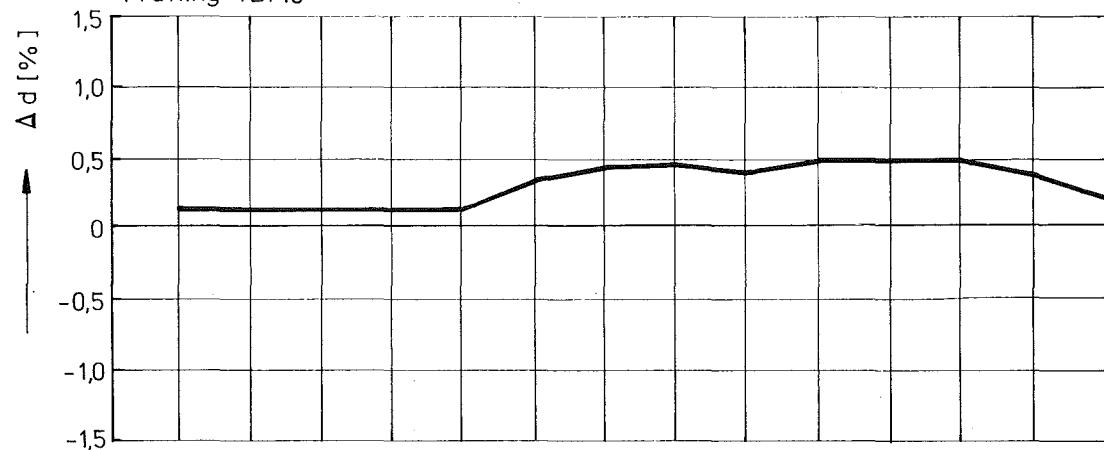
Prüfling 4B/18



Prüfling 4B/17

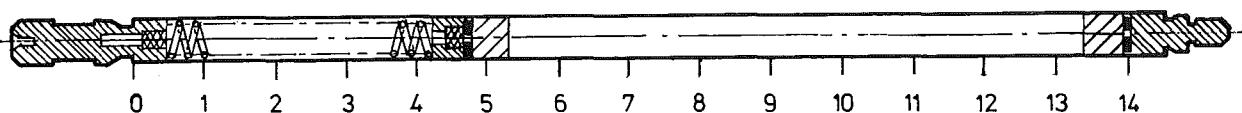


Prüfling 4B/16

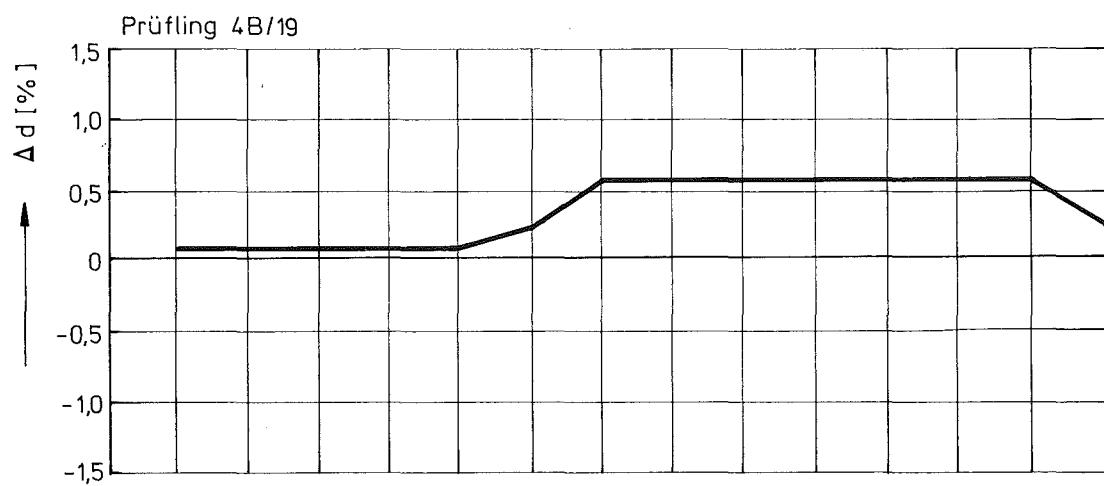
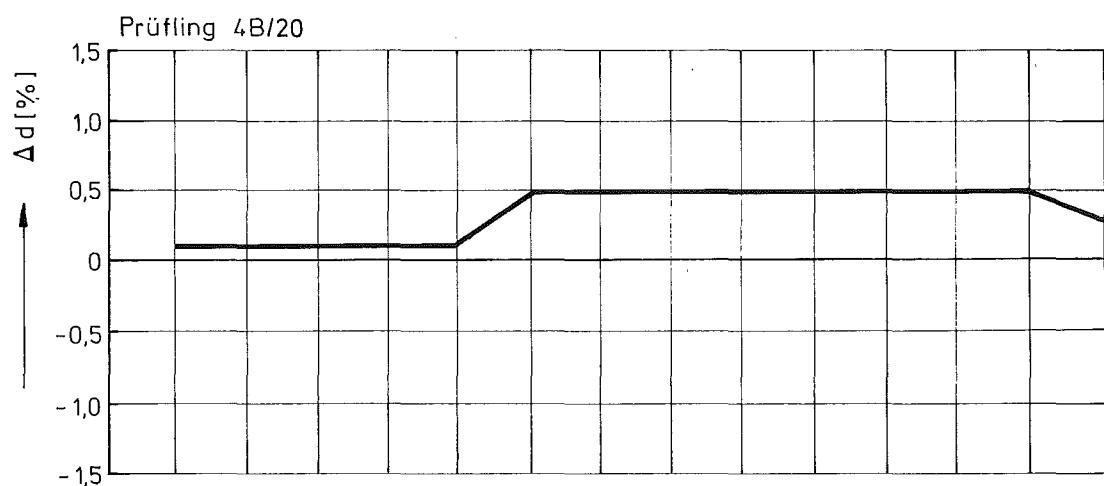
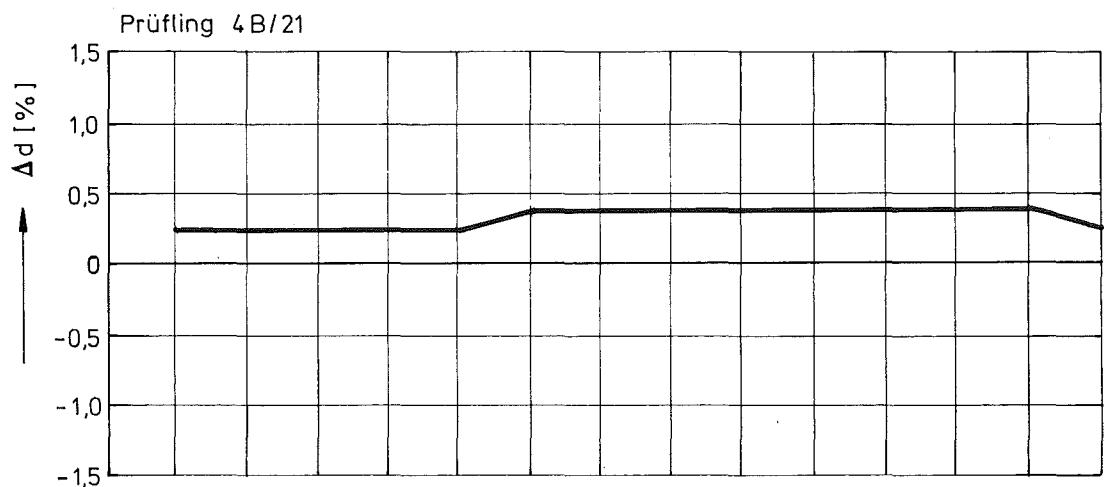


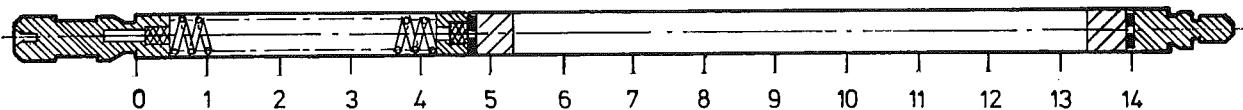
Veränderungen der Stab-Außendurchmesser

Abb. 52

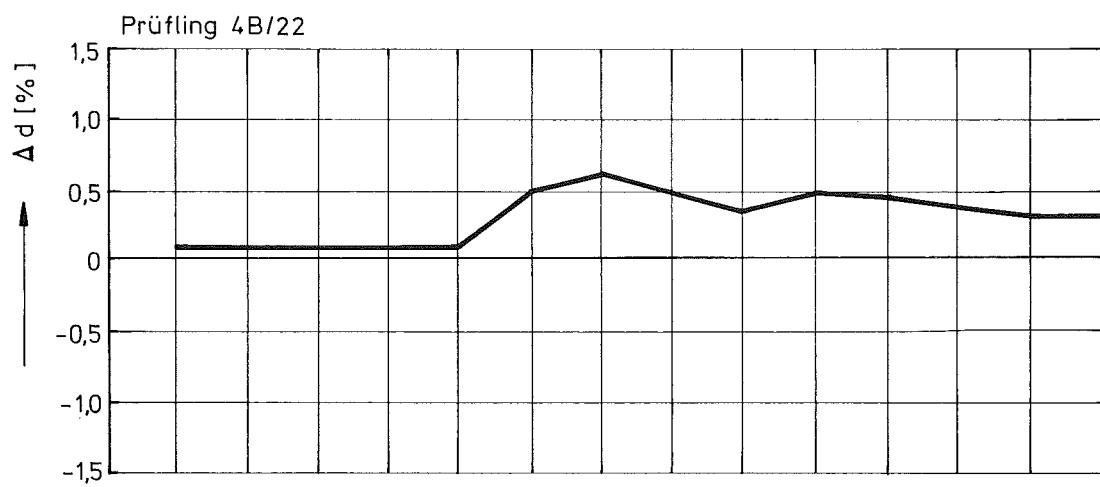
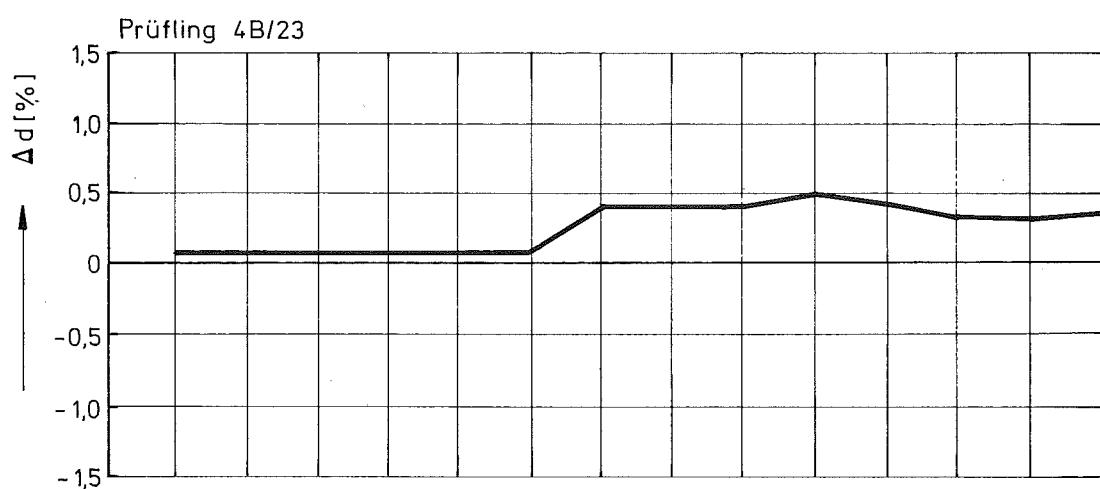
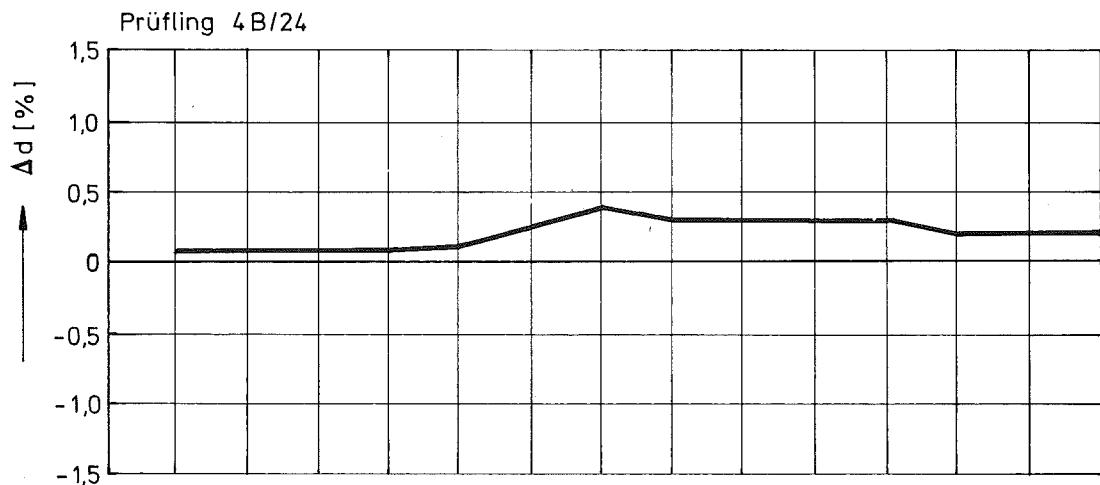


KVE 57





KVE 58



Veränderungen der Stab-Außendurchmesser

Abb. 54

Tabelle XVII: Stabdurchbiegung nach der Bestrahlung

| K V E | Prüfling | Durchbiegung in beiden Meßebenen (μm) | M = Makrograph W = Wendelschrieb |
|-------|---------------------------------|--|-------------------------------------|
| 42 | 4B/27 4B/26 4B/25 | 60 / 30 60 / 60 40 / 30 | M M M |
| 43 | 4B/34 4B/32 4B/30 | 140 / 100 +) +) | M +) +) |
| 44 | 4B/35 4B/33 4B/31 | 140 / 170 100 / 160 20 / 40 | M M M |
| 45 | 4B/29 4B/28 | 270 / 80 70 / 0 | M M |
| 47 | 4B/4 4B/3 4B/2 4B/1 | 100 / 10 330 / 0 150 / 40 30 / 20 | M, W M, W M, W M, W |
| 48 | 4B/9 4B/8 4B/7 4B/5 | 8 / 55 32 / 0 85 / 90 70 / 10 | M, W M, W M, W M, W |
| 49 | 4B/11 4B/12 4B/10 4B/6 | bestraht f e h l t ! | |
| 55 | 4B/15 4B/14 4B/13 | unbestraht f e h l t ! | |
| 56 | 4B/18 4B/17 4B/16 | unbestraht f e h l t ! | |
| 57 | 4B/21 4B/20 4B/19 | 18 / 8 54 / 1 114 / 51 | W W W |
| 58 | 4B/24 4B/23 4B/22 | bestraht f e h l t ! | |

+) defekter Stab

Ein Vergleich der Stablänge vor und nach der Bestrahlung ergab als Mittelwert der gesamten Versuchsgruppe eine unwesentliche Verlängerung von 0,077 mm, entsprechend 0,046 %. Wie in Tabelle XVIII 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.

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 Brennstoff-Formationen 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 Röntgendifurchleuchtung 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 Aufnahmefilm 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.

Tabelle XVIII: Längenmessungen der Prüflinge (vor und nach der Bestrahlung)

| KVE Nr. | Prüfling Nr. | Länge (mm) vor der Bestrahlung | Länge (mm) nach der Bestrahlung | Differenz (mm) |
|-----------------------------|--------------|-----------------------------------|------------------------------------|----------------|
| 42 | 4B/27 | 166,96 | 166,96 | 0 |
| | 4B/26 | 166,79 | 166,83 | + 0,04 |
| | 4B/25 | 166,83 | 166,83 | 0 |
| 43 | 4B/34 | 166,96 | 166,97 | + 0,01 |
| | 4B/32 | 166,95 | 166,83 | - 0,12 |
| | 4B/30 | 166,97 | 166,78 | - 0,19 |
| 44 | 4B/35 | 166,80 | 166,82 | + 0,02 |
| | 4B/33 | 166,90 | 166,90 | 0 |
| | 4B/31 | 166,98 | 166,98 | 0 |
| 45 | 4B/29 | 166,97 | 167,04 | + 0,07 |
| | 4B/28 | 166,98 | 166,99 | + 0,01 |
| 47 | 4B/4 | 166,92 | 167,01 | + 0,09 |
| | 4B/3 | 166,93 | 167,08 | + 0,15 |
| | 4B/2 | 167,00 | 167,10 | + 0,10 |
| | 4B/1 | 166,92 | 167,18 | + 0,26 |
| 48 | 4B/9 | 166,94 | 167,02 | + 0,08 |
| | 4B/8 | 166,93 | 167,01 | + 0,08 |
| | 4B/7 | 166,89 | 167,07 | + 0,18 |
| | 4B/5 | 167,01 | 167,22 | + 0,21 |
| 49 | 4B/12 | 166,95 | 166,98 | + 0,03 |
| | 4B/11 | 166,95 | 167,01 | + 0,06 |
| | 4B/10 | 166,98 | 167,06 | + 0,08 |
| | 4B/6 | 166,98 | 167,17 | + 0,19 |
| 55 | 4B/15 | 166,99 | 167,09 | + 0,10 |
| | 4B/14 | 167,01 | + | - |
| | 4B/13 | 167,02 | 167,21 | + 0,19 |
| 56 | 4B/18 | 167,01 | 167,12 | + 0,11 |
| | 4B/17 | 166,97 | 167,05 | + 0,08 |
| | 4B/16 | 167,03 | 167,14 | + 0,11 |
| 57 | 4B/21 | 167,05 | 167,11 | + 0,06 |
| | 4B/20 | 167,05 | 167,15 | + 0,10 |
| | 4B/19 | 167,03 | 167,17 | + 0,14 |
| 58 | 4B/24 | 167,13 | 167,16 | + 0,03 |
| | 4B/23 | 166,97 | 167,02 | + 0,05 |
| | 4B/22 | 167,01 | 167,07 | + 0,06 |
| +) wurde nicht durchgeführt | | | arithm. Mittel (mm) | + 0,077 |
| | | | ΔL (%) | + 0,046 |

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 Schwärzungsgrad 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. Es wurde mittels dieser Filme die Länge der Brennstoffsäule ermittelt und mit der Original-Brennstoffsäulen-Länge verglichen (Tabelle XIX). Man kann - mit einigen Ausnahmen - eine Säulenverkürzung von ca. 10 % feststellen, wobei die größere axiale Schwindung der niederdichten Pellets zuzuordnen ist. Die starke Verlängerung bei Prüfling 4B/30 ist auf Stabversagen zurückzuführen.

Der Versuch, hierzu ebenfalls die γ -Profile heranzuziehen, wurde aufgegeben, da beim Auftreten von Cs-Anreicherungen zu den Enden eine scheinbare Brennstoff-Säulen-Verlängerung vorgetäuscht wird.

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.

Tabelle XIX: Veränderung der Brennstoffsäulenlänge

| KVE | Prüfling | Brennstoffsäulenlänge (mm) | | $\Delta \ell$ | | Ausgangs- dichte (% th.D.) |
|-----|----------|----------------------------|------------------------------|---------------|--------|----------------------------------|
| | | vor der Bestr. | nach der Bestr. ⁺ | (mm) | (%) | |
| 42 | 4B/27 | 79,0 | 77,9 | + 0,9 | + 1,14 | 80 |
| | 4B/26 | 78,0 | 77,8 | - 0,2 | - 0,26 | |
| | 4B/25 | 78,5 | 77,2 | - 1,3 | - 1,66 | |
| 43 | 4B/34 | 80,0 | 83,0 | + 3,0 | + 3,75 | 90 |
| | 4B/32 | 79,0 | - | - | - | |
| | 4B/30 | 79,5 | 89,5 | +10,0 | +12,58 | |
| 44 | 4B/35 | 79,0 | 77,8 | - 1,2 | - 1,52 | 80 |
| | 4B/33 | 80,0 | 81,0 | + 1,0 | + 1,25 | |
| | 4B/31 | 78,5 | 79,2 | + 0,7 | + 0,89 | |
| 45 | 4B/29 | 79,5 | 81,0 | + 1,5 | + 1,89 | 90 |
| | 4B/28 | 79,0 | 81,6 | + 2,6 | + 3,29 | |
| 47 | 4B/4 | 79,2 | 72,8 | - 6,4 | - 8,08 | 90 |
| | 4B/3 | 79,2 | 72,8 | - 6,4 | - 8,08 | |
| | 4B/2 | 79,2 | 72,8 | - 6,4 | - 8,08 | |
| | 4B/1 | 79,1 | 73,4 | - 5,7 | - 7,21 | |
| 48 | 4B/9 | 79,3 | 73,4 | - 5,9 | - 7,44 | 84 |
| | 4B/8 | 79,4 | 72,1 | - 7,3 | - 9,19 | |
| | 4B/7 | 79,2 | 72,7 | - 6,5 | - 8,21 | |
| | 4B/5 | 79,3 | 74,8 | - 4,5 | - 5,67 | |
| 49 | 4B/11 | 79,6 | 79,9 | + 0,3 | + 0,38 | 84 |
| | 4B/12 | 79,5 | 79,9 | + 0,4 | + 0,50 | |
| | 4B/10 | 79,3 | 81,0 | + 1,7 | + 2,14 | |
| | 4B/6 | 79,3 | 80,4 | + 1,1 | + 1,39 | |
| 55 | 4B/15 | 79,9 | 71,6 | - 8,3 | -10,39 | - |
| | 4B/14 | 79,8 | 71,0 | - 8,8 | -11,03 | |
| | 4B/13 | 80,1 | 73,0 | - 7,1 | - 8,86 | |
| 56 | 4B/18 | 80,0 | 71,4 | - 8,6 | -10,75 | - |
| | 4B/17 | 79,9 | 71,4 | - 8,5 | -10,64 | |
| | 4B/16 | 79,8 | 72,0 | - 7,8 | - 9,77 | |
| 57 | 4B/21 | 80,3 | 71,4 | - 8,9 | -11,08 | - |
| | 4B/20 | 80,2 | 72,0 | - 8,2 | -10,22 | |
| | 4B/19 | 79,7 | 71,4 | - 8,3 | -10,41 | |
| 58 | 4B/24 | 79,7 | 79,5 | - 0,2 | - 0,25 | - |
| | 4B/23 | 79,8 | 79,5 | - 0,3 | - 0,38 | |
| | 4B/22 | 80,2 | 81,5 | + 1,3 | + 1,62 | |

+) aus Betatron-Aufnahmen ermittelt.

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 Spaltnukliden 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 Ru-106.

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 wurde die Zahl noch erhöht. In Anhang A sind für jeden Prüfling zwei der wichtigsten γ -Profile wiedergegeben.

Abb. 55 und 56 zeigen das integrale bzw. Zr/Nb-Profil der nur störungsfrei untersuchten Prüflinge 4B/30 und 4B/34.

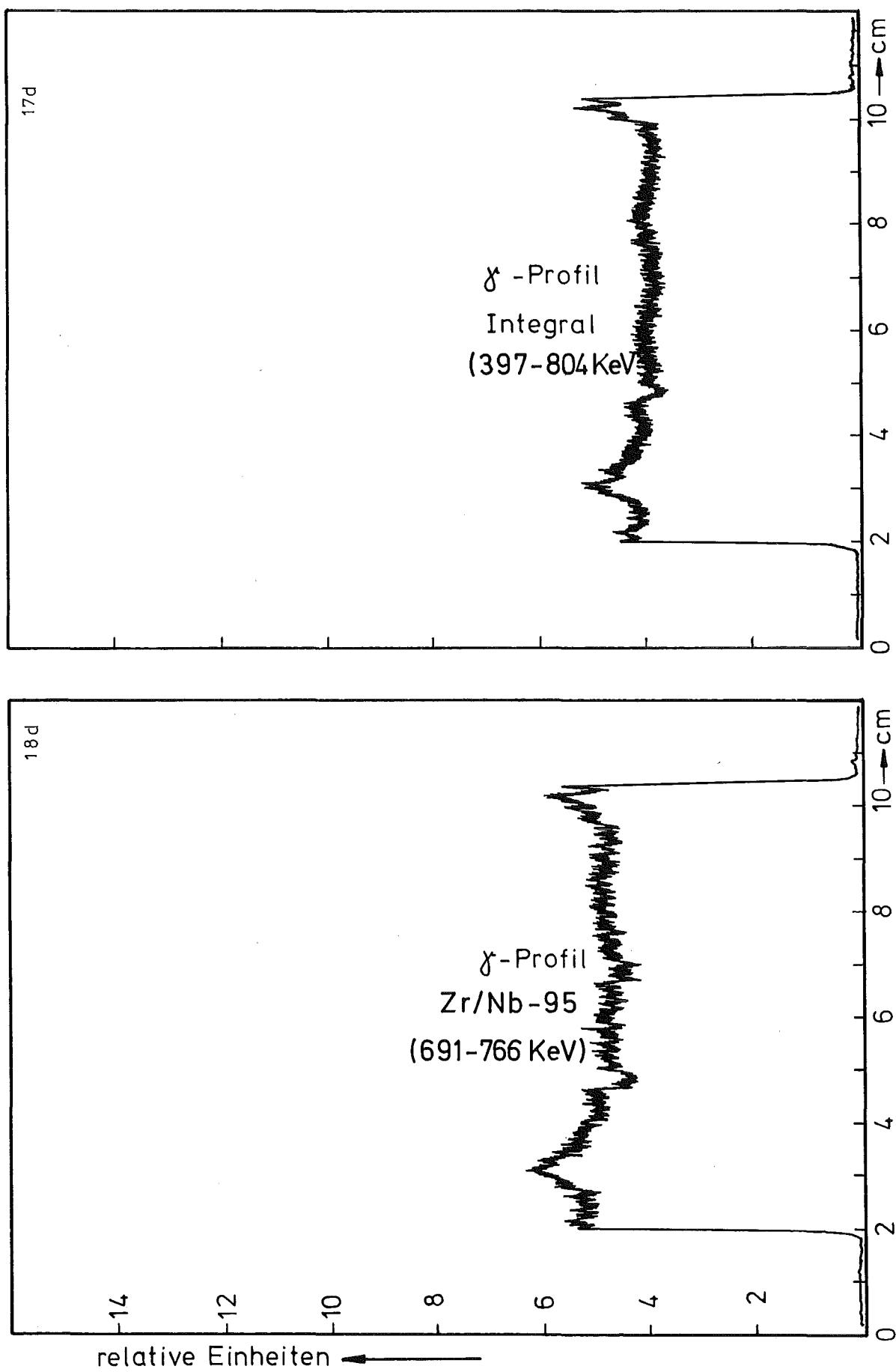


Abb. 55 γ -Profil von Prüfling 4b/34

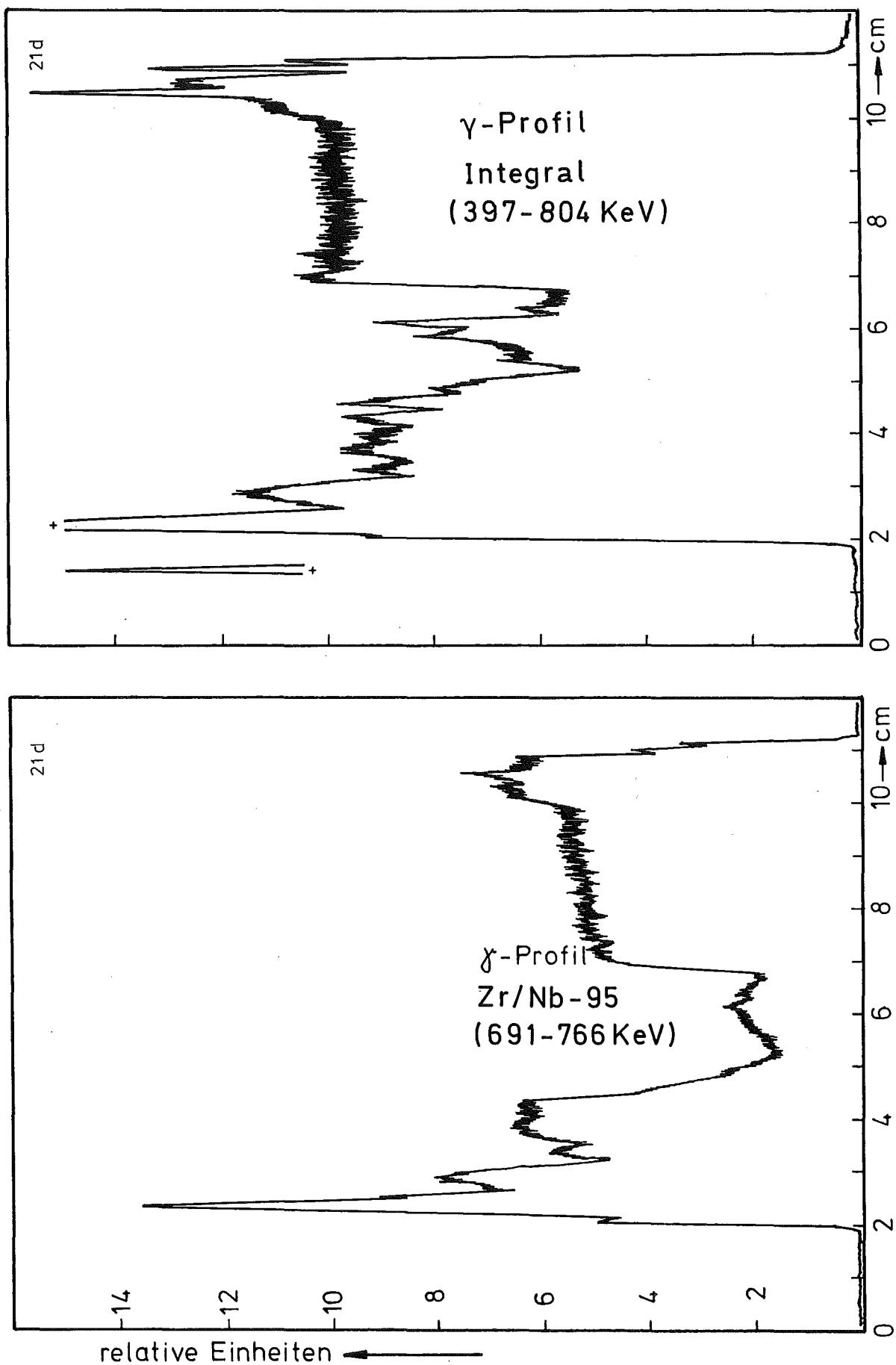


Abb. 56 γ -Profil von Prüfling 4b/30

8. Zerstörende Nachuntersuchung

8.1 Spaltgasbestimmungen

Bei den experimentellen Spaltgasuntersuchungen an den bestrahlten Prüflingen werden Messungen durchgeführt 14 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 insgesamt 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 "Porenspaltgas" 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 "Gitterspaltgas", 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 XX bringt für alle Prüflinge die gemessenen Mengen an freiem Spaltgas sowie den Spaltgasdruck bei einer (angenommenen) mittleren Betriebstemperatur von 500 $^{\circ}\text{C}$. Die Gasmengenangaben in mm^3 beziehen sich auf 20 $^{\circ}\text{C}$ und 760 Torr.

In Tabelle XXI sind alle gemessenen Werte für das im Brennstoff gebundene Spaltgas (wieder aufgetrennt nach Krypton und Xenon) enthalten. Die Messungen wurden hierbei an kleinen Brennstoffproben

Tabelle XX: Freies Spaltgas- Spaltgasdruck

| KVE | Prüf1. | Abbrand ⁺ A (MWd/kg M) | Freies Spaltgas V _F (mm ³) | | | Xe/Kr- Verhältnis | Freies Volumen (mm ³) | Spaltgas- druck bei 500°C (atm) |
|-----|--------|---|--|-------|--------|----------------------|---|---------------------------------------|
| | | | Krypton | Xenon | Gesamt | | | |
| 42 | 4B/27 | 23,2 | 403 | 4570 | 4973 | 11,3 | 982,3 | 13,36 |
| | 4B/26 | 25,7 | 263 | 2930 | 3193 | 11,3 | 1290 | 6,53 |
| | 4B/25 | 25,2 | 1030 | 17800 | 18830 | 17,3 | 1416 | 35,08 |
| 43 | 4B/34 | 10,3 | - | - | - | - | - | - |
| | 4B/32 | 11,4 | - | - | - | - | - | - |
| | 4B/30 | 11,9 | - | - | - | - | - | - |
| 44 | 4B/35 | 25,1 | 770 | 16700 | 17470 | 21,7 | 1003 | 45,95 |
| | 4B/33 | 28,2 | 908 | 16050 | 16958 | 17,7 | 1118 | 40,02 |
| | 4B/31 | 26,7 | 1367 | 19700 | 21067 | 14,4 | 1137 | 48,88 |
| 45 | 4B/29 | 17,1 | - | - | - | - | 812,3 | - |
| | 4B/28 | 19,6 | 340 | 6430 | 6770 | 18,9 | 1164 | 15,34 |
| | 4A/24 | - | siehe Versuchsgruppe 4a | | | - | - | - |
| 47 | 4B/4 | 85,4 | 1490 | 27500 | 28990 | 18,4 | 654 | 116,95 |
| | 4B/3 | 85,5 | 1590 | 29500 | 31090 | 18,0 | 637 | 128,76 |
| | 4B/2 | 87,4 | 1440 | 24100 | 25540 | 16,7 | 592 | 113,82 |
| | 4B/1 | 81,5 | 1570 | 25500 | 26070 | 16,2 | 709 | 97,01 |
| 48 | 4B/9 | 79,1 | 1390 | 24900 | 26290 | 17,9 | 784 | 88,45 |
| | 4B/8 | 74,3 | 1600 | 27700 | 29300 | 17,3 | 586 | 131,91 |
| | 4B/7 | 83,3 | 1710 | 30500 | 32210 | 17,8 | 683 | 124,42 |
| | 4B/5 | 78,3 | 1720 | 30100 | 31820 | 17,5 | 569 | 147,53 |
| 49 | 4B/11 | 100,00 | 2050 | 34000 | 36050 | 16,6 | 856 | 111,0 |
| | 4B/12 | 110,4 | 2480 | 36600 | 39080 | 14,8 | 706 | 146,0 |
| | 4B/10 | 123,8 | 2370 | 36000 | 38370 | 15,2 | 831 | 122,0 |
| | 4B/6 | 120,0 | 2340 | 37300 | 39640 | 15,9 | 942 | 111,0 |
| 55 | 4B/15 | 62,2 | 950 | 17300 | 18250 | 18,2 | 936 | 51,44 |
| | 4B/14 | 66,8 | 1190 | 22000 | 23190 | 18,5 | 746 | 82,01 |
| | 4B/13 | 63,3 ⁺⁺) | 1160 | 21100 | 22260 | 18,2 | 902 | 65,11 |
| 56 | 4B/18 | 60,4 | 585 | 10100 | 15685 | 17,3 | 837 | 49,44 |
| | 4B/17 | 62,8 | 656 | 11850 | 12506 | 18,0 | 826 | 39,94 |
| | 4B/16 | 64,9 | 670 | 11950 | 12620 | 17,8 | 879 | 37,88 |
| 57 | 4B/21 | 81,8 | 1725 | 28800 | 46050 | 17,0 | 775 | 156,76 |
| | 4B/20 | 87,8 | 2020 | 34900 | 55100 | 17,3 | 826 | 175,99 |
| | 4B/19 | 91,2 | 1810 | 32600 | 50700 | 18,0 | 676 | 197,87 |
| 58 | 4B/24 | 109,5 | 1860 | 34900 | 36760 | 18,75 | 781 | 124,18 |
| | 4B/23 | 109,1 | 1910 | 35600 | 37510 | 18,65 | 804 | 123,08 |
| | 4B/22 | 86,7 | 1835 | 34100 | 36935 | 18,60 | 723 | 131,13 |

+) maximale Abbrände aus Tab.XVI; ++) korrigierte Werte

Tabelle XXI: Gebundenes Spaltgas

| KVE | Prüfl. | Abbrand ⁺ (MWd/kg M) | Porenspaltgas (mm ³) | | | Gitterspaltgas (mm ³) | | | Xe/Kr- Verhältnis | |
|-----|--------|------------------------------------|----------------------------------|-------|-------------------------|-----------------------------------|-------|--------|----------------------|--------|
| | | | Krypton | Xenon | Gesamt | Krypton | Xenon | Gesamt | Poren | Gitter |
| 42 | 4B/27 | 23,2 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 4B/26 | 25,7 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 4B/25 | 25,2 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 43 | 4B/34 | 10,3 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 4B/32 | 11,4 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 4B/30 | 11,9 | - | -- | - | - | - | - | - | - |
| 44 | 4B/35 | 25,1 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 4B/33 | 28,2 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 4B/31 | 26,7 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 45 | 4B/29 | 17,1 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 4B/28 | 19,6 | - | - | -- | - | - | - | - | - |
| | 4A/24 | - | - | - | siehe Versuchsgruppe 4a | | | - | - | - |
| 47 | 4B/4 | 85,4 | 591 | 6732 | 7323 | 50 | 1239 | 1289 | 11,39 | 24,78 |
| | 4B/3 | 85,5 | 511 | 8441 | 8952 | 57 | 1453 | 1510 | 16,51 | 25,49 |
| | 4B/2 | 87,4 | 528 | 7324 | 7852 | 103 | 2522 | 2625 | 13,87 | 24,49 |
| | 4B/1 | 81,5 ^o) | 675 | 11204 | 11879 | 137 | 3314 | 3451 | 16,60 | 24,19 |
| 48 | 4B/9 | 79,1 | 478 | 7672 | 8140 | 79 | 1769 | 1848 | 16,05 | 22,39 |
| | 4B/8 | 74,3 | 339 | 5375 | 5714 | 80 | 1809 | 1889 | 15,86 | 22,61 |
| | 4B/7 | 83,8 | 381 | 5642 | 6023 | 66 | 1668 | 1734 | 14,81 | 25,27 |
| | 4B/5 | 78,3 | 404 | 6125 | 6529 | 96 | 1948 | 2044 | 15,16 | 20,29 |
| 49 | 4B/11 | 100,0 | 755 | 13365 | 14120 | 165 | 3162 | 3327 | 17,70 | 19,16 |
| | 4B/12 | 110,4 | 730 | 16102 | 16832 | 181 | 3346 | 3527 | 22,06 | 18,49 |
| | 4B/10 | 123,8 | 897 | 14670 | 15567 | 169 | 3663 | 3832 | 16,35 | 21,67 |
| | 4B/6 | 120,0 ^o) | 577 | 9814 | 10391 | 248 | 4890 | 5138 | 17,00 | 19,72 |
| 55 | 4B/15 | 62,2 | 250 | 2505 | 2755 | 95 | 2881 | 2976 | 10,02 | 30,32 |
| | 4B/14 | 66,8 ^o) | 340 | 5473 | 5813 | 86 | 2228 | 2314 | 16,10 | 25,91 |
| | 4B/13 | 63,3 ^o) | 320 | 4729 | 5049 | 77 | 2454 | 2531 | 14,78 | 31,87 |
| 56 | 4B/18 | 60,4 | 771 | 11942 | 12713 | 119 | 3153 | 3272 | 15,49 | 26,50 |
| | 4B/17 | 62,8 | 735 | 11833 | 12568 | 130 | 2840 | 2970 | 16,10 | 21,85 |
| | 4B/16 | 64,9 | 633 | 10059 | 10692 | 136 | 2924 | 3060 | 15,89 | 21,50 |
| 57 | 4B/21 | 81,8 | 398 | 6041 | 6439 | 69 | 1850 | 1919 | 15,18 | 26,81 |
| | 4B/20 | 87,8 | 335 | 5434 | 5769 | 76 | 1742 | 1818 | 16,22 | 22,92 |
| | 4B/19 | 91,2 | 363 | 5659 | 6022 | 92 | 2200 | 2292 | 15,59 | 23,91 |
| 58 | 4B/24 | 109,5 | 691 | 11471 | 12162 | 153 | 3639 | 3792 | 16,90 | 23,78 |
| | 4B/23 | 109,1 | 690 | 11359 | 12049 | 86 | 2615 | 2701 | 16,46 | 30,41 |
| | 4B/22 | 86,7 | 834 | 13832 | 14660 | 81 | 2071 | 2152 | 16,59 | 25,57 |

+) maximale Abbrände aus Tab.XVI; - wurde nicht gemessen. o) korrigierte Werte

(~1/8 vom Brennstoff) durchgeführt und die Meßergebnisse auf die in einem Prüfling enthaltene Gesamtmenge an Brennstoff umgerechnet. In Tabelle XXII werden die spezifischen Spaltgasausbeuten angegeben.

In Tabelle XXIII schließlich wird für jeden Prüfling die Spaltgasbilanz aufgestellt. Interessant ist hier die Spalte "Gesamtspaltgas", wo das gemessene Spaltgas mit einem berechneten Wert verglichen wird. Wie man sieht, überschreitet die gemessene Spaltgasmengen in einigen Fällen (4 von 24) die theoretische Menge um mehr als 30 %. Nachfolgend soll versucht werden, diese Diskrepanz zu diskutieren: Die theoretische Spaltgasmengen wurde hier berechnet nach der Formel

$$V_g = A \cdot B \cdot C ,$$

wobei A = Abbrand

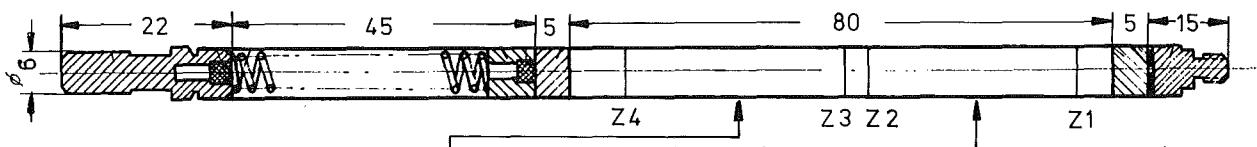
B = Brennstoffgewicht bzw. -Volumen

C = theoretisch erzeugte (Xe + Kr)-Menge (spezifisch je Gewicht bzw. Volumen)

In Tabelle XXIII wurde mit dem kalorimetrisch ermittelten Abbrand gerechnet. Derselbe liegt erfahrungsgemäß (s. Abbrandvergleich S.114) ca. 14 % unter dem radiochemisch bestimmten Wert. Da dieser Wert ebenfalls mit einer Unsicherheit von $\pm 3\%$ behaftet ist, kann man die Unsicherheit in A mit 0,17 ansetzen. Der Wert B ist exakt bestimmbar. Der Wert C besitzt ebenfalls eine Unsicherheit von ca. 13 % (konservative Annahme 0,26 langlebige Gasatome/Spaltung, neuerer Wert 0,30 Gasatome /Spaltung), so daß die Gesamtunsicherheit in der theoretischen Spaltgasmengen ca. 0,30 bzw. 30 % beträgt. Hierdurch sind die Abweichungen von den Meßwerten in den meisten Fällen abgedeckt.

In Tabelle XXIV werden sowohl die partiellen als auch Gesamt-Xe/Kr-Verhältnisse wiedergegeben. Der Mittelwert für das Gesamtspaltgas beträgt 17,3. In der Literatur findet man für die theoretische Spaltung von Pu-239 einen Xe/Kr-Wert von 13,3 [15]. 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 [4] erklären lässt.

Tabelle XXII: Spezifische Poren- und Gitterspaltgasausbeute V' (mm^3/g)



| KVE | Prüfling | Z ₃ -Z ₄ | Poren-Spaltgas | Gitter-Spaltgas | Gesamt | Z ₁ -Z ₂ | Poren-Spaltgas | Gitter-Spaltgas | Gesamt |
|-----|----------|--------------------------------|----------------|-----------------|--------|--------------------------------|----------------|-----------------|--------|
| 42 | 4B/27 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 4B/26 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 4B/25 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 43 | 4B/34 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 4B/32 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 4B/30 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 44 | 4B/35 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 4B/33 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 4B/31 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 45 | 4B/29 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 4B/28 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 4A/24 | - siehe Versuchsgruppe 4a | | | | - | - | - | - |
| 47 | 4B/4 | 68/78 | 364 | 103 | 468 | 4/13 | 555 | 59 | 614 |
| | 4B/3 | 61/71 | 485 | 89 | 574 | 13/23 | 642 | 101 | 743 |
| | 4B/2 | 62/71 | 439 | 189 | 628 | 13/23 | 548 | 141 | 689 |
| | 4B/1 | 62/71 | 733 | 190 | 923 | 13/23 | 765 | 245 | 1010 |
| 48 | 4B/9 | 62/71 | 330 | 81 | 411 | 12/22 | 683 | 149 | 832 |
| | 4B/8 | 61/71 | 245 | 99 | 344 | 12/22 | 465 | 136 | 601 |
| | 4B/7 | 62/71 | 276 | 116 | 392 | 13/23 | 476 | 101 | 577 |
| | 4B/5 | 62/71 | 363 | 131 | 494 | 13/23 | 457 | 125 | 582 |
| 49 | 4B/11 | 40/48 | 1004 | 251 | 1255 | 30/38 | 757 | 153 | 910 |
| | 4B/12 | 46/55 | 1355 | 246 | 1601 | 10/20 | 712 | 188 | 900 |
| | 4B/10 | 40/49 | 109 | 160 | 269 | 30/38 | 1022 | 318 | 1340 |
| | 4B/6 | 56/64 | 649 | 322 | 971 | 30/38 | - | - | - |
| 55 | 4B/13 | 47/57 | 69 | - | 69 | 24/31 | 294 | 195 | 489 |
| | 4B/14 | 50/59 | 427 | 155 | 582 | 20/30 | 339 | 149 | 488 |
| | 4B/13 | 25/33 | 341 | 133 | 474 | 15/23 | 324 | 131 | 455 |
| 56 | 4B/18 | 49/58 | 900 | 188 | 1088 | 19/29 | 763 | 241 | 1004 |
| | 4B/17 | 49/58 | 885 | 167 | 1052 | 19/29 | 763 | 222 | 985 |
| | 4B/16 | 49/58 | 714 | 217 | 931 | 19/29 | 697 | 187 | 884 |
| 57 | 4B/21 | 30/39 | - | - | - | 19/29 | 419 | 124 | 543 |
| | 4B/20 | 49/58 | - | - | - | 19/29 | 376 | 118 | 494 |
| | 4B/19 | 50/59 | - | - | - | 19/29 | 396 | 151 | 547 |
| 58 | 4B/24 | 48/58 | 725 | 322 | 1047 | 19/28 | 873 | 176 | 1049 |
| | 4B/23 | 40/48 | 717 | 167 | 884 | 30/39 | 862 | 187 | 1049 |
| | 4B/22 | 48/55 | 799 | 162 | 961 | 10/19 | 1112 | 118 | 1230 |

Bemerkung: Die Z₁ bedeuten den Abstand (bz. die Länge) der zur Bestimmung des Spaltgases aus der Brennstoffsäule herausgeschnittenen Probe in mm vom unteren Brennstoffsäulenende

Tabelle XXIII: Spaltgasbilanz

| KVE | Prüfl. | Abbrand ^{+) A_{max}} | Freies Spaltgas V _F | Porenspaltgas V _P | Gitterspaltgas V _G | Gesamtspaltgas (mm ³) | | |
|-----|--------|---------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|------|--------|
| | | (MWh/kg M) | (mm ³) | (%) | (mm ³) | (%) | gem. | theor. |
| 42 | 4B/27 | 23,2 | 4973 | - | - | - | - | 9761 |
| | 4B/26 | 25,7 | 3193 | - | - | - | - | 10813 |
| | 4B/25 | 25,2 | 18830 | - | - | - | - | 10603 |
| 43 | 4B/34 | 10,3 | - | - | - | - | - | 4334 |
| | 4B/32 | 11,4 | - | - | - | - | - | 4796 |
| | 4B/30 | 11,9 | - | - | - | - | - | 5007 |
| 44 | 4B/35 | 25,1 | 17470 | - | - | - | - | 10560 |
| | 4B/33 | 28,2 | 16958 | - | - | - | - | 11822 |
| | 4B/31 | 26,7 | 21067 | - | - | - | - | 11234 |
| 45 | 4B/29 | 17,1 | - | - | - | - | - | 7195 |
| | 4B/28 | 19,6 | 6770 | - | - | - | - | 8246 |
| | 4A/24 | - | - | s. Versuchsgruppe 4a | - | - | - | - |
| 47 | 4B/4 | 85,4 | 28990 | 77,1 | 7323 | 19,5 | 1289 | 37602 |
| | 4B/3 | 85,5 | 31090 | 74,8 | 8952 | 21,5 | 1510 | 41552 |
| | 4B/2 | 87,4 | 25540 | 70,9 | 7852 | 21,8 | 2625 | 36017 |
| | 4B/1 | 81,5 ^o) | 26070 | 63,0 | 11879 | 28,7 | 3451 | 41400 |
| 48 | 4B/9 | 79,1 | 26290 | 72,5 | 8140 | 22,4 | 1848 | 36278 |
| | 4B/8 | 74,3 | 29300 | 79,4 | 5714 | 15,5 | 1889 | 36903 |
| | 4B/7 | 83,8 | 32210 | 80,6 | 6023 | 15,1 | 1734 | 39967 |
| | 4B/5 | 78,3 | 31820 | 78,8 | 6529 | 16,2 | 2044 | 40393 |
| 49 | 4B/11 | 100,0 | 36050 | 66,6 | 14120 | 26,1 | 3327 | 54097 |
| | 4B/12 | 110,4 | 39080 | 65,8 | 16832 | 28,3 | 3527 | 59439 |
| | 4B/10 | 123,8 | 38370 | 66,4 | 15567 | 26,9 | 3832 | 57769 |
| | 4B/6 | 120,0 ^o) | 39640 | 72,0 | 10391 | 18,9 | 5138 | 55169 |
| 55 | 4B/15 | 62,2 | 18250 | 76,1 | 2755 | 11,5 | 2976 | 23981 |
| | 4B/14 | 66,8 | 23190 | 74,0 | 5813 | 18,6 | 2314 | 31317 |
| | 4B/13 | 63,3 ^o) | 22260 | 74,6 | 5049 | 16,9 | 2531 | 29840 |
| 56 | 4B/18 | 60,4 | 15685 | 49,5 | 12713 | 40,1 | 3272 | 31670 |
| | 4B/17 | 62,8 | 12506 | 44,6 | 12568 | 44,8 | 2970 | 28044 |
| | 4B/16 | 64,9 | 12620 | 47,8 | 10692 | 40,5 | 3060 | 26372 |
| 57 | 4B/21 | 81,8 | 46050 | 84,6 | 6439 | 11,8 | 1919 | 54408 |
| | 4B/20 | 87,8 | 55100 | 87,9 | 5769 | 9,2 | 1818 | 62687 |
| | 4B/19 | 91,2 | 50700 | 85,9 | 6022 | 10,2 | 2292 | 59014 |
| 58 | 4B/24 | 109,5 | 36760 | 69,7 | 12162 | 23,1 | 3792 | 52714 |
| | 4B/23 | 109,1 | 37510 | 71,8 | 12049 | 23,1 | 2701 | 52260 |
| | 4B/22 | 86,7 | 35935 | 68,1 | 14660 | 27,8 | 2152 | 52747 |

+)
max. Abbrände s. Tab. XVI^o) korrigierter Wert; () unsicherer Wert

Tabelle XXIV: Xe/Kr-Verhältnis, partiell und gesamt

| KVE | Prüfl. | Abbrand ⁺ (MWd/kg M) | Freies Spaltgas | Poren- Spaltgas | Gitter- Spaltgas | Gesamt- Spaltgas |
|-------------|--------|------------------------------------|----------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| 42 | 4B/27 | 23,2 | 11,3 | - | - | - |
| | 4B/26 | 25,7 | 11,3 | - | - | - |
| | 4B/25 | 25,2 | 17,3 | - | - | - |
| 43 | 4B/34 | 10,3 | - | - | - | - |
| | 4B/32 | 11,4 | - | - | - | - |
| | 4B/30 | 11,9 | - | - | - | - |
| 44 | 4B/35 | 25,1 | 21,7 | - | - | - |
| | 4B/33 | 28,2 | 17,7 | - | - | - |
| | 4B/31 | 26,7 | 14,4 | - | - | - |
| 45 | 4B/29 | 17,1 | - | - | - | - |
| | 4B/28 | 19,6 | 18,9 | - | - | - |
| | 4A/24 | - | s. Versuchsgruppe 4a | | | - |
| 47 | 4B/4 | 85,4 | 18,4 | 11,4 | 24,8 | 16,6 |
| | 4B/3 | 85,5 | 18,0 | 16,5 | 25,5 | 18,3 |
| | 4B/2 | 87,4 | 16,7 | 13,9 | 24,5 | 16,4 |
| | 4B/1 | 81,5 ^o) | 16,2 | 16,6 | 24,2 | 16,8 |
| 48 | 4B/9 | 79,1 | 17,9 | 16,1 | 22,4 | 17,6 |
| | 4B/8 | 74,3 | 17,3 | 15,9 | 21,6 | 17,3 |
| | 4B/7 | 83,8 | 17,8 | 14,8 | 25,3 | 17,5 |
| | 4B/5 | 78,3 | 17,5 | 15,2 | 20,3 | 17,2 |
| 49 | 4B/11 | 100,0 | 16,6 | 17,7 | 19,2 | 17,0 |
| | 4B/12 | 110,4 | 14,8 | 22,1 | 18,5 | 16,5 |
| | 4B/10 | 123,8 ^o) | 15,2 | 16,4 | 22,7 | 15,8 |
| | 4B/6 | 120,0 ^o) | 15,9 | 17,0 | 19,7 | 16,4 |
| 55 | 4B/15 | 62,2 | 18,2 | 10,0 | 30,3 | 17,5 |
| | 4B/14 | 66,8 | 18,5 | 16,1 | 25,9 | 18,4 |
| | 4B/13 | 63,3 ^o) | 18,2 | 14,8 | 31,9 | 18,2 |
| 56 | 4B/18 | 60,4 | 17,3 | 15,5 | 26,5 | 17,1 |
| | 4B/17 | 62,8 | 18,0 | 16,1 | 21,9 | 17,4 |
| | 4B/16 | 64,9 | 17,8 | 15,9 | 21,5 | 17,3 |
| 57 | 4B/21 | 81,8 | 17,0 | 15,2 | 26,8 | 16,7 |
| | 4B/20 | 87,8 | 17,3 | 16,2 | 22,9 | 17,3 |
| | 4B/19 | 91,2 | 18,0 | 15,6 | 23,9 | 17,7 |
| 58 | 4B/24 | 109,5 | 18,8 | 16,6 | 23,8 | 18,5 |
| | 4B/23 | 109,1 | 18,7 | 16,5 | 30,4 | 18,5 |
| | 4B/22 | 86,7 | 18,6 | 16,6 | 25,6 | 18,2 |
| Mittelwerte | | | 17,28 | 15,66 | 23,82 | 17,26 |

+) max. Abbrand aus Tab. XVI; o) korrigierte Werte

Zusammenfassend kann gesagt werden: Die Unstimmigkeiten in der Spaltgasbilanz beruhen auf

- Schwierigkeiten bei der meßtechnischen Erfassung der Spaltgasanteile,
- Unsicherheiten in der Bestimmung des wahren Abbrandes (sowohl radiochemisch als auch kalorimetrisch),
- Unsicherheit in der Erzeugungsrate der langlebigen Gasatome.

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 Rißkonfiguration) |
| 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/Hüll-Spalt und die konzentrischen Strukturzonen im Brennstoff vermessen wurden, ist praktisch nur an Querschliffen möglich, weshalb die als typisch angesehenen Brennstoffabschnitte als Querschliffe ausgeführt wurden. Für die Beobach-

tung 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. Mittelvergrößerung | 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 Säulenkristallzone (kleine Kristalle) = Kornwachstum
- 3. Radius der Säulenkristallzone (große Kristalle)
- 4. Spalt zwischen Brennstoff und Hülle

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

In den Abb. 57 bis 60 sind die wichtigsten Daten dieser Auswertung numerisch und graphisch 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 klein r [mm] | Säulenkrist- zone groß r [mm] | rad. Spalt [µm] | ZK | Komwachst |
|-----|--------|----------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|----|-----------|
| 42 | B 25 | 1 L | 1,00 | 2,00 | 2,15 | 12 | | |
| | | 2 Q | 0,70 | 1,80 | 2,00 | 12 | | |
| | B 26 | 1 L | 1,10 | 1,95 | 2,15 | 0 | | |
| | | 2 Q | 0,70 | 1,80 | 1,95 | 0 | | |
| | B 27 | 1 L | 1,30 | 2,05 | 2,20 | 0 | | |
| | | 2 Q | 0,65 | 1,70 | 1,90 | 0 | | |
| 43 | B 32 | 2 Q | 0,50 | 1,80 | 2,05 | 0 | | |
| 44 | B 35 | 1 L | 0,88 | 1,85 | 2,00 | 0 | | |
| | | 2 Q | 0,68 | 1,70 | 1,90 | 0 | | |
| | B 33 | 1 L | 1,25 | 1,95 | 2,20 | 0 | | |
| | | 2 Q | 0,92 | 2,00 | 2,20 | 20 | | |
| | B 31 | 1 L | 1,25 | 2,30 | - | 0 | | |
| | | 2 Q | 0,82 | 1,95 | 2,20 | 0 | | |
| 45 | B 29 | 1 L | 1,10 | 2,00 | 2,20 | 0 | | |
| | | 2 Q | 0,85 | 2,10 | 2,30 | 10 | | |
| | B 28 | 1 L | 1,15 | 2,10 | 2,25 | 0 | | |
| | | 2 Q | 1,00 | 2,20 | 2,35 | 0 | | |

Abb. 57 Brennstoffstruktur

| KVE | Prüfl. | Probe Quer.-o. Längs | Zentralka- nalradius r [mm] | Säulenkrist.- zone klein r [mm] | Säulenkrist.- zone groß r [mm] | rad. Spalt [µm] | ZK | Kornwachst. |
|-----|--------|----------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|----|-------------|
| | | | | | | | ■ | ■ |
| 47 | B 4 | 1 Q | 0,52 | 1,60 | 2,10 | 0 | | |
| | | 2 L | 0,50 | 1,70 | 2,10 | 0 | | |
| | B 3 | 1 Q | 0,75 | 1,90 | 2,40 | 0 | | |
| | | 2 L | 0,75 | 1,80 | 2,50 | 0 | | |
| | B 2 | 1 Q | 0,80 | 2,20 | 2,40 | 0 | | |
| | | 2 L | 0,80 | 2,10 | 2,30 | 0 | | |
| | B 1 | 1 Q | 0,85 | 1,90 | 2,40 | 0 | | |
| | | 2 L | 0,70 | 1,80 | 2,10 | 0 | | |
| 48 | B 9 | 1 Q | 0,68 | 1,70 | 2,00 | 0 | | |
| | | 2 L | 0,64 | - | - | 0 | | |
| | B 8 | 1 Q | 0,70 | - | 2,10 | 0 | | |
| | | 2 L | 0,65 | - | - | 0 | | |
| | B 7 | 1 Q | 0,70 | 1,60 | 1,80 | 0 | | |
| | | 2 L | 0,76 | 1,60 | 1,90 | 0 | | |
| | B 5 | 1 Q | 0,76 | 1,75 | 2,10 | 0 | | |
| | | 2 L | 0,75 | - | 1,70 | 0 | | |

Abb. 58

Brennstoffstruktur

| KVE | Prüfl. | Probe Quer.-o. Längs | Zentralka- ntradius r [mm] | Säulenkrist.- zone klein r [mm] | Säulenkrist.- zone groß r [mm] | rad. Spalt [µm] | ZK | Kornwachstum | |
|-----|--------|----------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|----|--------------|---------------------|
| | | | | | | | | Säulenkrist. | Brennstoff unverän. |
| 49 | B 11 | 1 Q | 0,51 | 1,80 | 2,20 | 0 | | | |
| | | 2 L | 0,35 | - | - | 0 | | | |
| | B 12 | 1 Q | 0,56 | 1,70 | 2,20 | 0 | | | |
| | | 2 L | 0,47 | 1,60 | 2,10 | 0 | | | |
| | B 10 | 1 Q | 0,71 | 1,90 | 2,30 | 0 | | | |
| | | 2 L | 0,65 | 1,80 | 2,20 | 0 | | | |
| 55 | B 6 | 1 Q | 0,79 | 1,90 | 2,40 | 0 | | | |
| | | 3 L | 0,67 | 1,80 | 2,20 | 0 | | | |
| | B 15 | 1 Q | 0,75 | 1,90 | 2,30 | 0 | | | |
| | | 2 L | 0,94 | 1,80 | 2,30 | 0 | | | |
| | B 14 | 1 Q | 1,05 | 2,00 | 2,40 | 0 | | | |
| | | 2 L | 0,75 | 1,90 | 2,30 | 0 | | | |
| | B 13 | 1 Q | 1,35 | 2,50 | - | 0 | | | |
| | | 2 L | 1,05 | - | - | 0 | | | |

Abb. 59 Brennstoffstruktur

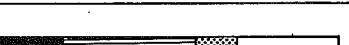
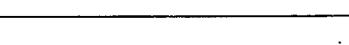
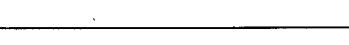
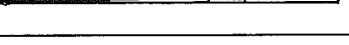
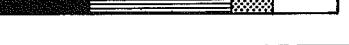
| KVE | Prüfl. | Probe Quer.-o. Längs | Zentralka- ntradius r [mm] | Säulenkrist.- zone klein r [mm] | Säulenkrist.- zone groß r [mm] | rad. Spalt [µm] | ZK | Kornwachst. |
|-----|--------|----------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|---|-------------|
| 56 | B 18 | 1 Q | 0,76 | 1,70 | 1,90 | 0 |  | |
| | | 1 Q | 0,78 | 1,60 | 2,00 | 0 |  | |
| | B 17 | 2 L | 0,80 | - | - | 0 |  | |
| | | 1 Q | 0,85 | 1,80 | 2,10 | 0 |  | |
| | B 16 | 2 L | 0,75 | - | - | 0 |  | |
| | | 1 Q | 0,53 | 1,50 | 1,80 | 0 |  | |
| | B 21 | 2 L | 0,75 | 1,50 | 1,80 | 0 |  | |
| | | 1 Q | 0,70 | 1,35 | 1,60 | 0 |  | |
| | B 20 | 2 L | 0,55 | 1,25 | 1,60 | 0 |  | |
| | | 1 Q | 0,86 | 1,60 | 1,85 | 0 |  | |
| 58 | B 24 | 1 Q | 0,75 | 1,80 | 2,10 | 0 |  | |
| | | 2 L | 0,72 | 1,75 | 2,05 | 0 |  | |
| | B 23 | 1 Q | 0,66 | 1,80 | 2,10 | 0 |  | |
| | | 1 Q | 0,86 | 1,80 | 2,10 | 0 |  | |
| | B 22 | 2 L | 0,77 | 1,75 | 2,05 | 0 |  | |

Abb. 60 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.

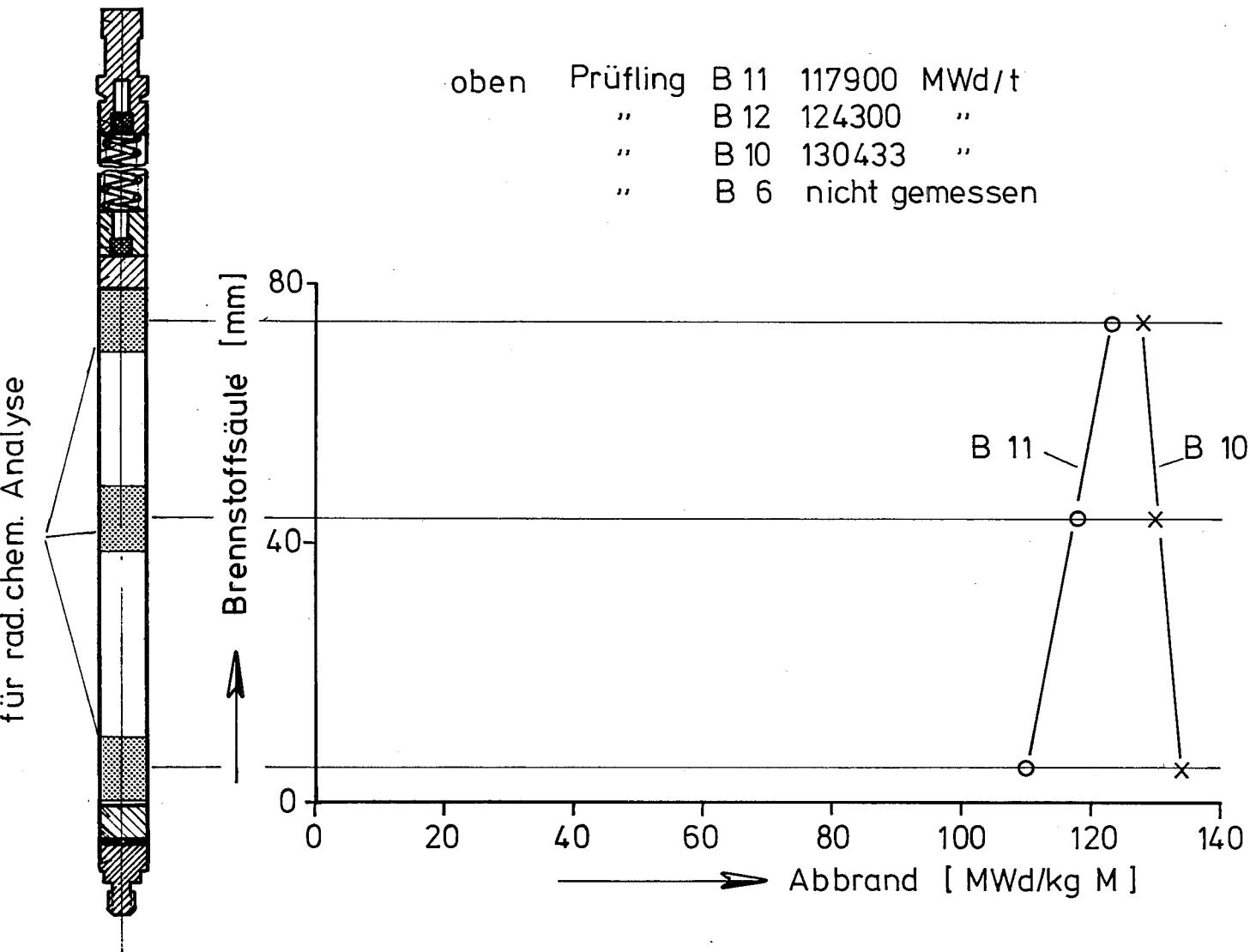
Hierzu wurden aus dem Bereich der Brennstoffsäule 8 bis 10 mm lang Abschnitte herausgetrennt. Sie enthielten gewöhnlich etwa 2 g Brennstoff. Die Proben entstammten aus der Brennstoffsäulenmitte und bei den KVE 55, 56, 57 und 58 15 mm oberhalb der Prüflingsmitte (Erbauzustand). Bei den KVE 49 (Prüfling 4B/10 und 4B/11) und KVE 57 (Prüfling 4B/19 und 4B/21) wurden drei Abbrandproben entnommen (s. Profile in Abb. 61 und 62). Als Abbrandindikator wurden sowohl die Pu-Abreicherung als auch die Spaltprodukte Ce-144 und Nd-148 benutzt. Aus den Einzelwerten wurde über eine Wichtung (Pu:Ce:Nd = 1:2:3) ein mittlerer Abbrandwert errechnet. Bei einem typischen Brennstoffprüfling lagen die Anteile der einzelnen Spaltquellen und Spaltausbeuten (\bar{Y}), gemittelt über die Bestrahlungszeit, etwa wie folgt

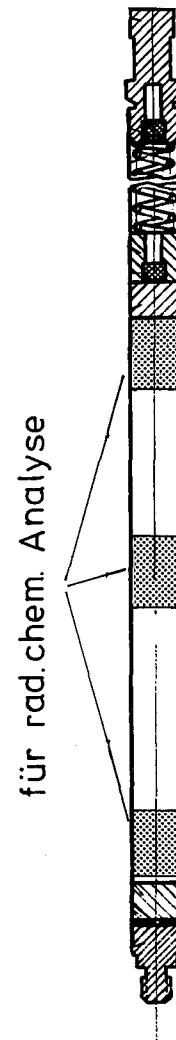
16:

| | Spaltquellen | | \bar{Y} Ce-144 (%) | \bar{Y} Nd-148 (%) |
|--------|-------------------|--------|----------------------|----------------------|
| U-238 | schnelle Spaltung | 0,5 % | 4,30 | 1,90 |
| U-235 | thermische " | 2,5 % | 5,42 | 1,69 |
| Pu-239 | " " | 93,0 % | 3,78 | 1,70 |
| Pu-241 | " " | 4,0 % | 4,13 | 1,89 |

8.4 Vergleich der radiochemischen und berechneten Abbrandwerte

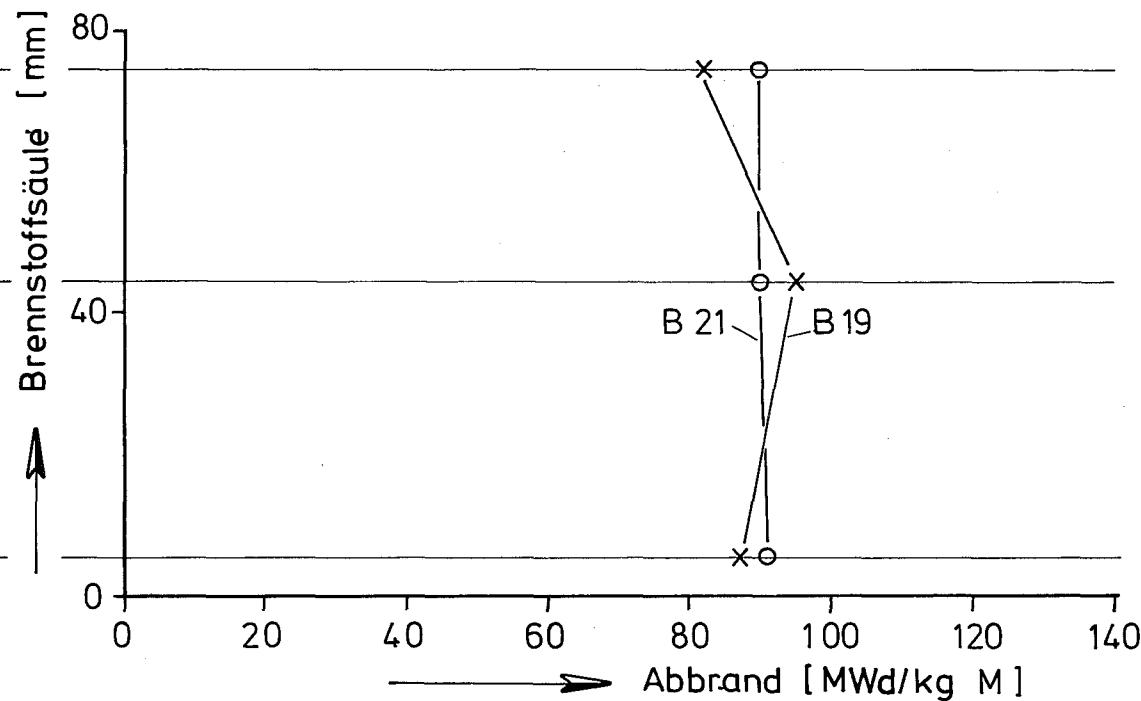
Als Ergebnis der radiochemischen Abbrandbestimmung ergab sich der Abbrand in Prozent der ursprünglich vorhandenen schweren Atome (FIMA). Zum Vergleich mit den berechneten Abbränden wurden dieselben in MWd/t umgerechnet. Hierzu wurden $10\ 000\ \text{MWd/t} = 1,02\ \% \text{ FIMA}$ gleichgesetzt.





oben Prüfling B 21 89 434 MWd/t
 " B 20 93 600 "
 " B 19 88 193 "

Attrappe



In Tabelle XXV sind die Wertepaare für sämtliche Prüflinge enthalten. Abb. 63 gibt die Abweichung der gerechneten von den radiochemisch bestimmten Werten wieder. Es ergibt sich eine Abweichung der gerechneten von - 14,1 % gegenüber den radiochemisch bestimmten Werten, d.h. die berechneten Werte liegen um ca. 14 % unter den analytisch bestimmten. Vergleicht man diesen Sachverhalt mit dem Ergebnis der Versuchsgruppe 4a (15 % Pu), so stellt man fest, daß bei Versuchsgruppe 4a ein Streuband von \pm 9,5 % auftrat, welches beidseitig durch Werte von Prüflingen mit Pu-Entmischung durchbrochen wurde. Das vorliegende Ergebnis ist voll befriedigend, wenn man beachtet, mit welch großen Unsicherheiten die rein kalorimetrische Abbrandbestimmung behaftet ist. Auch stimmt hier die generelle Tendenz der negativen Abweichung, da die Hüll-Thermoelemente im besten Falle exakt die Hüllaußentemperaturen, meist aber etwas niedrigere Werte anzeigen. Letzteres rechtfertigt auch die Vorgehensweise, bei der Berechnung der theoretischen Spaltgasmenge von maximalen Abbränden auszugehen, um die Unsicherheit bei den Anteilen der Spaltgase je Spaltung zu kompensieren.

9. Dokumentation der zerstörungsfreien und zerstörenden Nachuntersuchung

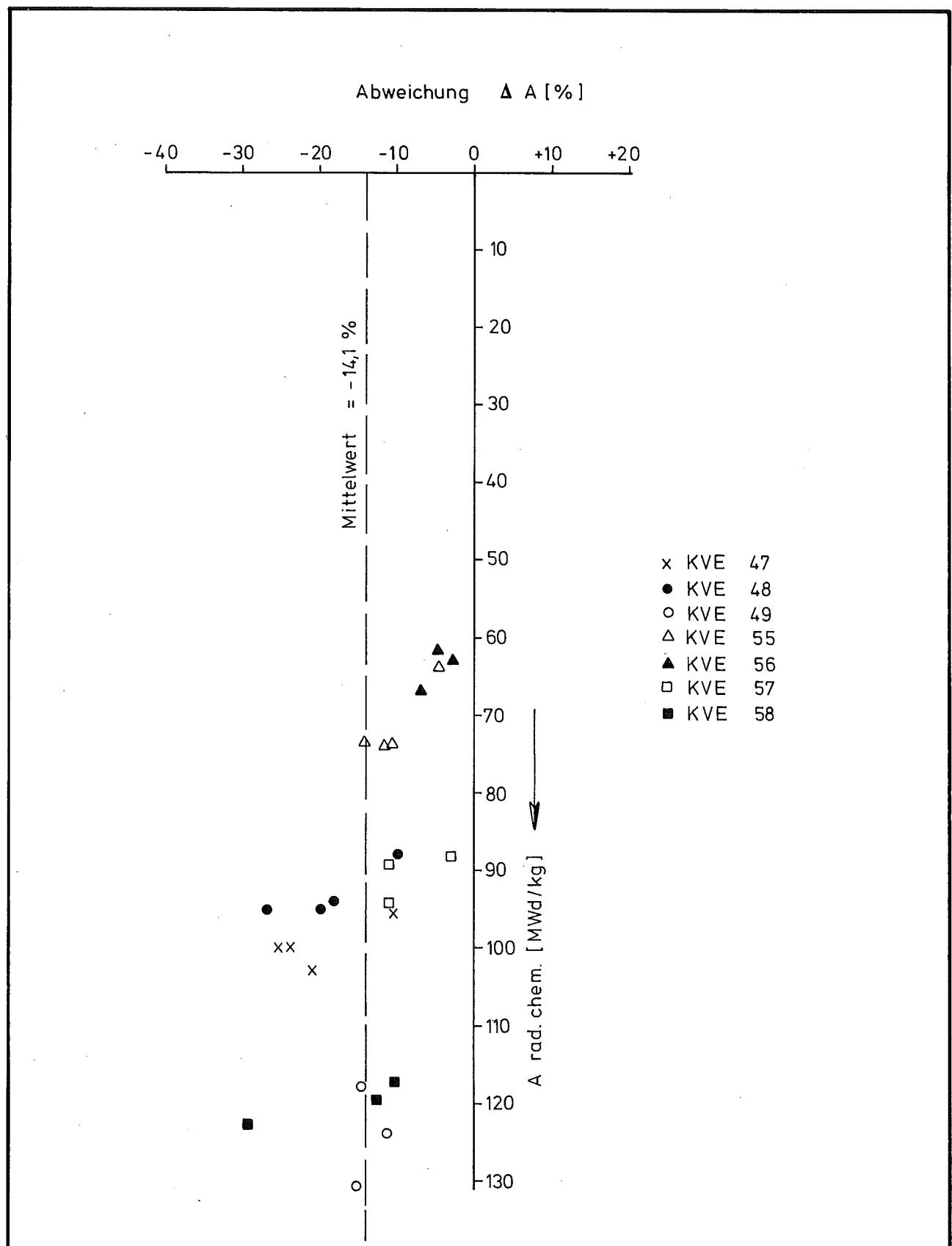
Im folgenden Abschnitt wird eine umfassende Dokumentation der zerstörungsfreien und zerstörenden Nachuntersuchung gegeben, welche eine Auswahl der wichtigsten Ereignisse für jeden der 35 Prüflinge enthält. Die Ergebnisse sind auf einem dreiseitigen Faltblatt zusammengestellt, welches folgende Aufteilung aufweist (von links nach rechts):

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

Tabelle XXV: Vergleich der radiochemisch bestimmten und berechneten Abbrände
(1 % A = 979,6 MWd/t)

| KVE | Prüfl. | (1) A radioch. (MWd/kg) | (2) berechnet (MWd/kg) | (2) - (1) ΔA (MWd/kg) | ΔA (%) (A radioch. = 100) | Symbole in Abb. 63 |
|-----|----------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|
| 47 | 4B/4 | 95,3 | 85,3 | - 10,0 | - 10,4 | X |
| | 4B/3 | 100,0 | 74,6 | - 25,4 | - 25,4 | |
| | 4B/2 | 100,0 | 76,3 | - 23,7 | - 23,7 | |
| | 4B/1 | 103,0 | 81,5 ^{o)} | - 21,5 | - 20,9 +) | |
| 48 | 4B/9 | 88,0 | 79,1 | - 8,9 | - 10,1 | ● |
| | 4B/8 | 95,1 | 71,5 | - 19,5 | - 20,5 | |
| | 4B/7 | 93,8 | 76,4 | - 17,4 | - 18,6 | |
| | 4B/5 | 95,1 | 69,1 | - 26,0 | - 27,3 | |
| 49 | 4B/11 | 117,9 | 99,9 | - 18,0 | - 15,3 | ○ |
| | 4B/12 | 124,3 | 110,0 | - 14,3 | - 11,5 | |
| | 4B/10 | 130,4 | 110,3 | - 20,1 | - 15,4 | |
| | 4B/6 | - | 120,0 ^{o)} | - | - | |
| 55 | 4B/15 | 64,1 | 61,2 | - 2,9 | - 4,5 | △ |
| | 4B/14 | 74,3 | 65,8 | - 8,5 | - 11,5 | |
| | 4B/13 ⁺) | 73,7 | 63,3 ^{o)} | - 10,4 | - 14,1 | |
| 56 | 4B/18 | 62,3 | 59,2 | - 3,1 | - 5,0 | ▲ |
| | 4B/17 | 63,3 | 61,3 | - 2,0 | - 3,1 | |
| | 4B/16 | 66,8 | 61,6 | - 5,2 | - 7,7 | |
| 57 | 4B/21 | 89,43 | 79,4 | - 10,0 | - 11,2 | □ |
| | 4B/20 | 93,8 | 83,1 | - 10,7 | - 11,4 | |
| | 4B/19 | 88,2 | 84,8 | - 3,4 | - 3,8 | |
| 58 | 4B/24 | 117,1 | 105,0 | - 12,1 | - 10,3 | ■ |
| | 4B/23 ⁺) | 119,5 | 104,2 | - 15,3 | - 12,8 | |
| | 4B/22 ⁺) | 122,6 | 86,2 | - 36,4 | - 29,7 | |

+) Probe mit zentralem Brennstoffschatz, ^{o)} korrigierte Werte



- 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 -entmischung des Brennstoffes, 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 Nachuntersuchung der Kapselversuchsgruppe 4b, die der Erprobung von 35 Brennstabprüflingen mit Mischoxid als Brennstoff unter simulierten Schnellbrüterbedingungen im thermischen Fluß diente, kann folgende Bilanz gezogen werden:

1. Die spezifikationsgemäß angestrebte Stableistung von 500 W/cm und eine maximale Hüllwandtemperatur (außen) von max. 680 °C wurden erreicht.
2. Der angestrebte mittlere Abbrand von 80.000 MWd/t M wurde für die mit Tabletten gefüllten Prüflinge erreicht bzw. überschritten.

Bei den mit vibriertem Brennstoff gefüllten Prüflingen traten wegen kapselspezifischer Schwierigkeiten Hüllschäden auf, worauf die Bestrahlung abgebrochen wurde.

3. Alle Prüflinge blieben intakt.
4. Die tablettengefüllten Stäbe zeigten eine Durchmesserzunahme von maximal 2 %, die vibrierten zeigten teilweise eine Durchmesserabnahme im Brennstoffbereich.
5. In den Prüflingen treten die durch Temperatur, Stableistung und Abbrand bewirkten Strukturänderungen wie Zentralkanal und Ausbildung von Strukturzonen (Stengelkorn, gerichtetes Kornwachstum) auf. Bei 2 tablettengefüllten Prüflingen wurde zentrales Brennstoffschmelzen beobachtet.
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.
7. Stärkere Hüllangriffe durch Reaktionen mit dem Brennstoff treten erst ab Hülltemperaturen von 600 °C auf.
8. Für die Spaltgasfreisetzung und -verteilung im Brennstoff ergibt sich der schon in Versuchsgruppe 4a beobachtete Sachverhalt: 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 im Gitter, bei hohem Abbrand ist es dagegen vornehmlich in den Poren zu finden.

Literatur:

[1] D. Freund:

Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung der Oxidbrennstabproben im FR 2, KFK 1376, Mai 1972

[2] D. Freund, Th. Dippel, D. Geithoff, P. Weimar:

Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung der UO_2/PuO_2 -Brennstab-Bestrahlungsexperimente der FR 2-Kapsel-Versuchsgruppe 4a, KFK 1523, April 1973

[3] 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 1324, Februar 1972

[4] W. Dienst, O. Götzmann, H. Kleykamp, G. Ondracek, B. Schulz, H. Zimmermann: Auswertung der Untersuchungsergebnisse an den bestrahlten UO_2-PuO_2 -Brennstäben der Versuchsgruppe FR 2-4a, KFK 1727, Januar 1973

[5] G. Karsten, A. Gerken:

Spezifikation des Brennstabes für die FR 2-Kapselversuchsgruppe 4b, unveröffentlicht

[6] A. Gerken: persönliche Mitteilung

[7] Th. Dippel, K. Kummerer, K.H. Triemer:

Herstellung Pu-haltiger Prüflinge für Versuchsgruppe 4b der FR 2-Kapselbestrahlungen, unveröffentlicht

[8] H.E. Häfner:

Bestrahlung von Brennstäben in instrumentierten Natrium-Blei-Wismut-Doppelkapseln, Kerntechnik 12, Heft 5/6, 1970

[9] H.E. Häfner:

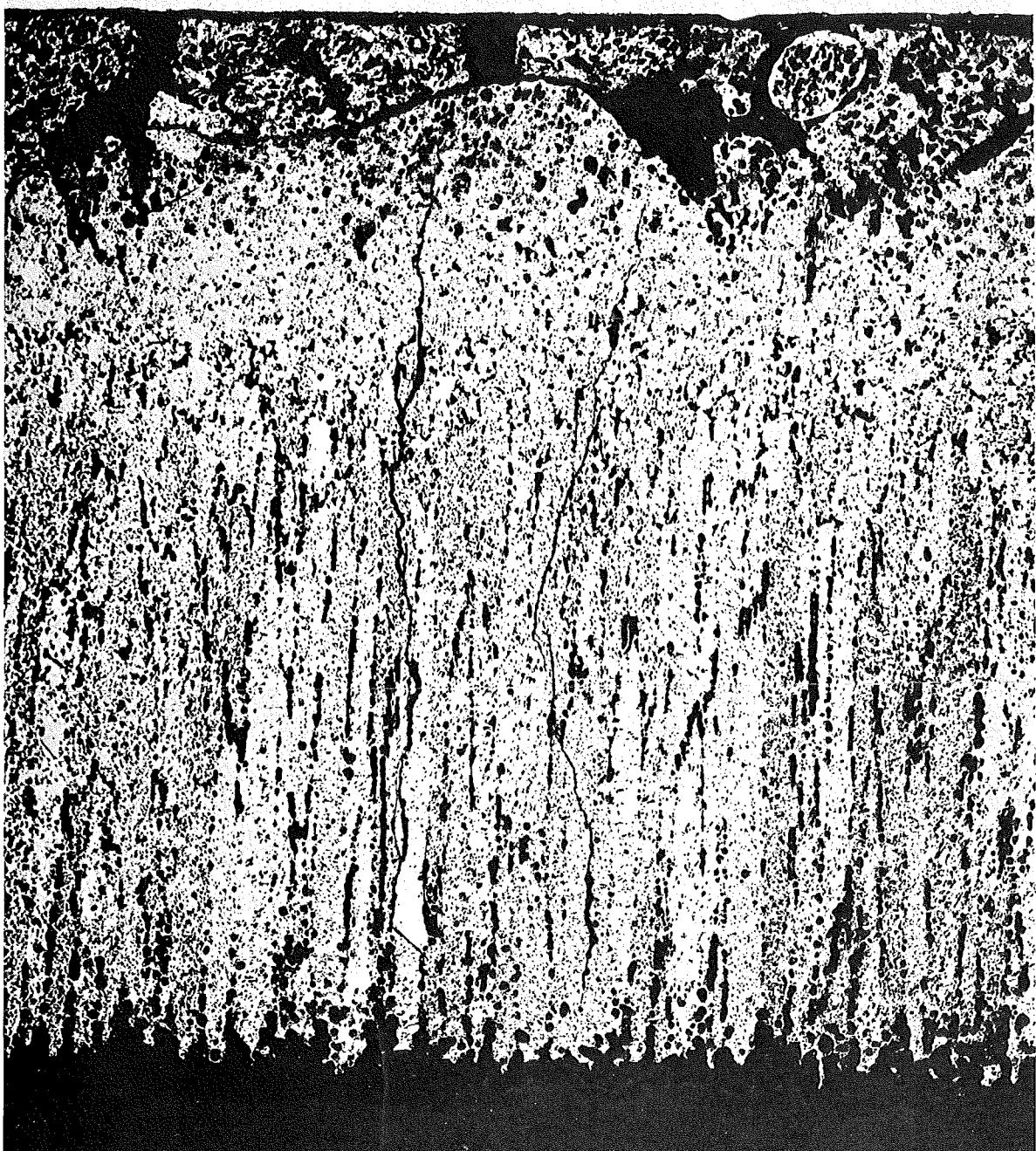
persönliche Mitteilung

- 10 H.E. Häfner:
Übersicht über die im FR 2 bestrahlten Brennstoff-Bestrahlungskapseln, unveröffentlicht
- 11 Untersuchungsberichte Heiße Zellen GfK, unveröffentlicht
- 12 S. Hagen, H. Malaushek:
Messungen des thermischen Flusses in den Isotopenkanälen des FR 2, unveröffentlicht
- 13 M.J. Roth et al.:
The Preparation of Input Data for WIMS, Winfrith, Report AEEW-R 538, August 1967
- 14 H. Gräßner:
Spaltgasmessungen, Jahresbericht der Heißen Zellen, unveröffentlicht
- 15 K. Varteressian, L. Burris:
Fission Product Spectra from Fast and Thermal Fission of U-235 and Pu-239, ANL 7678, 1970
- 16 H. Wertenbach:
persönliche Mitteilung

A n h a n g I
=====

Dokumentation der zerstörungsfreien und zerstörenden
Nachuntersuchung

3-42-4B/27-1/11 100 x geätzt

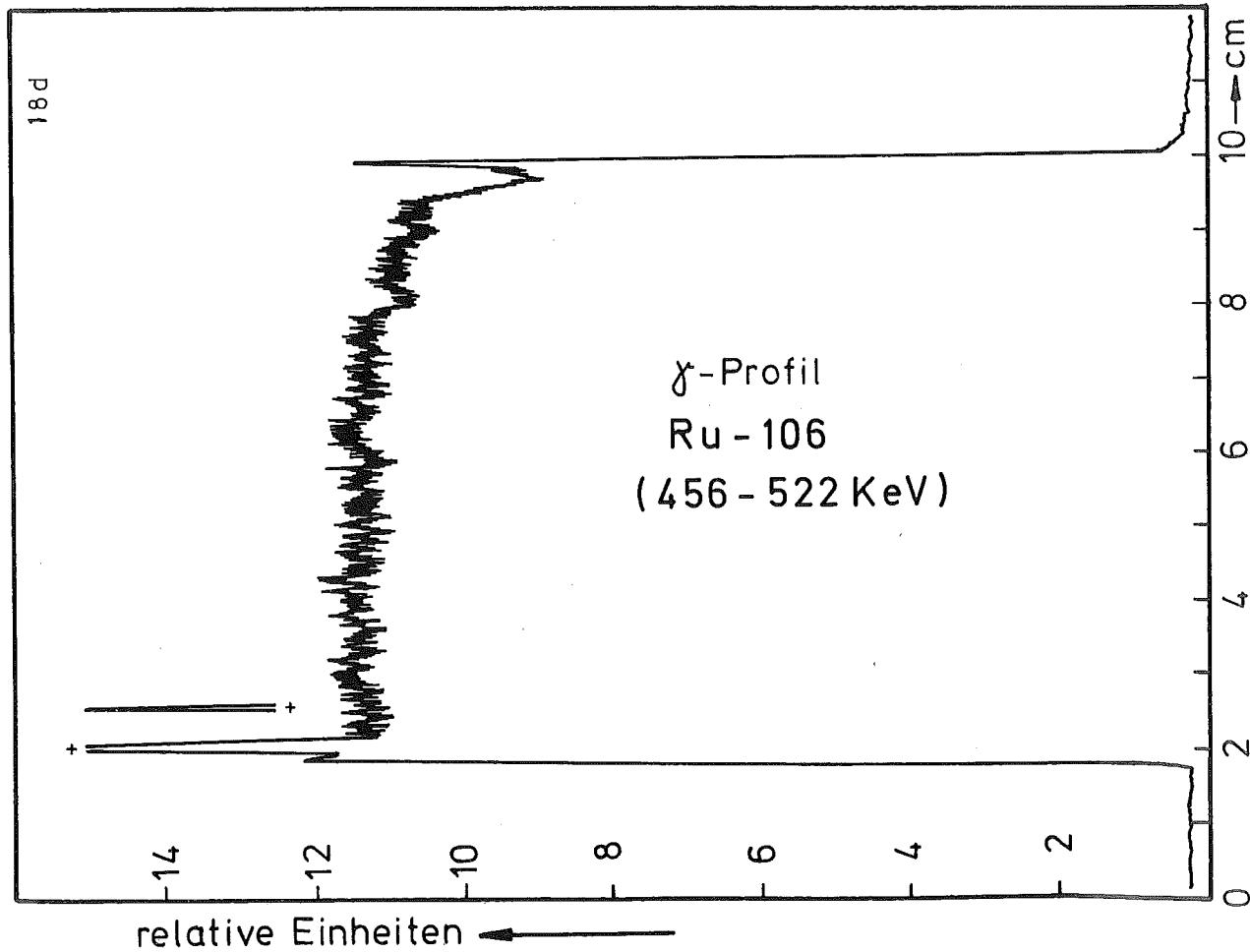
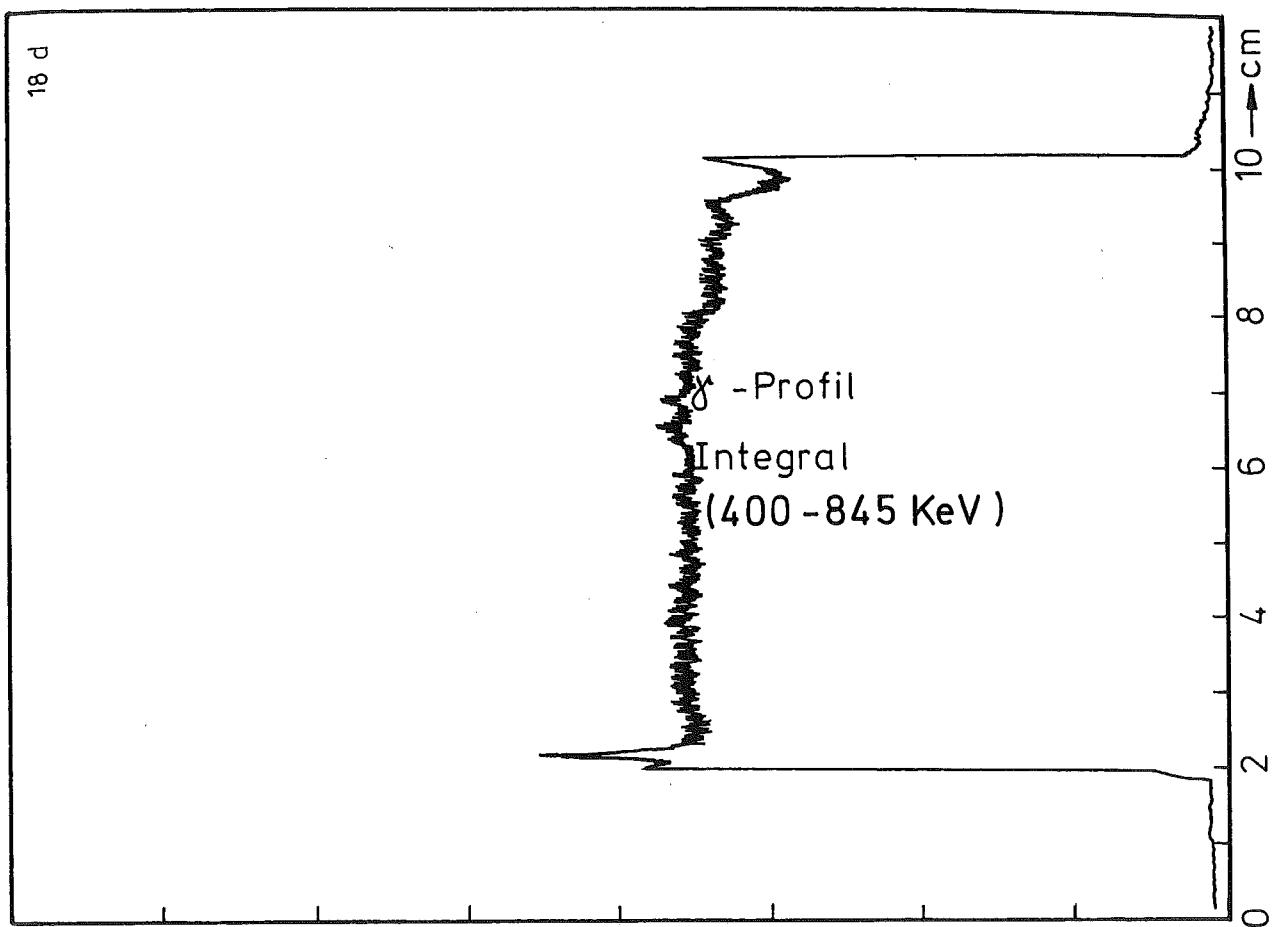


0,1 mm

-114-
zu Prüfling 4B/27
A2



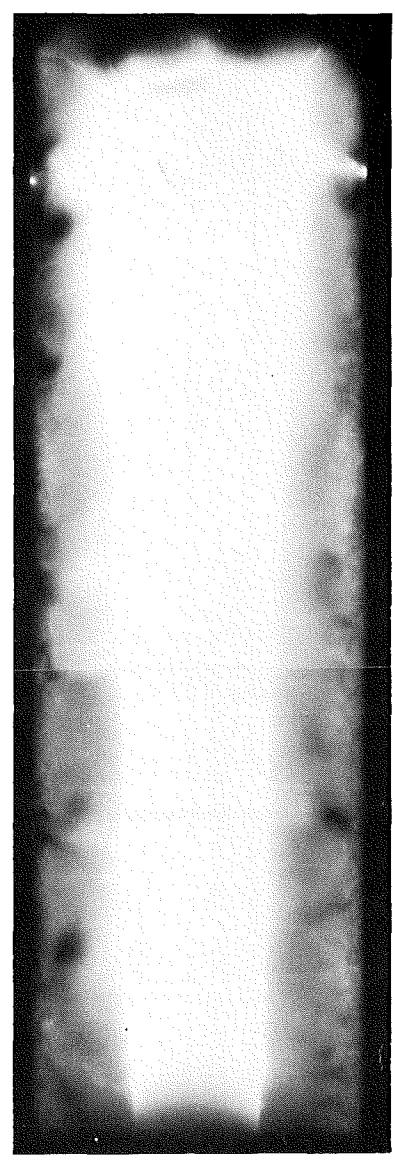
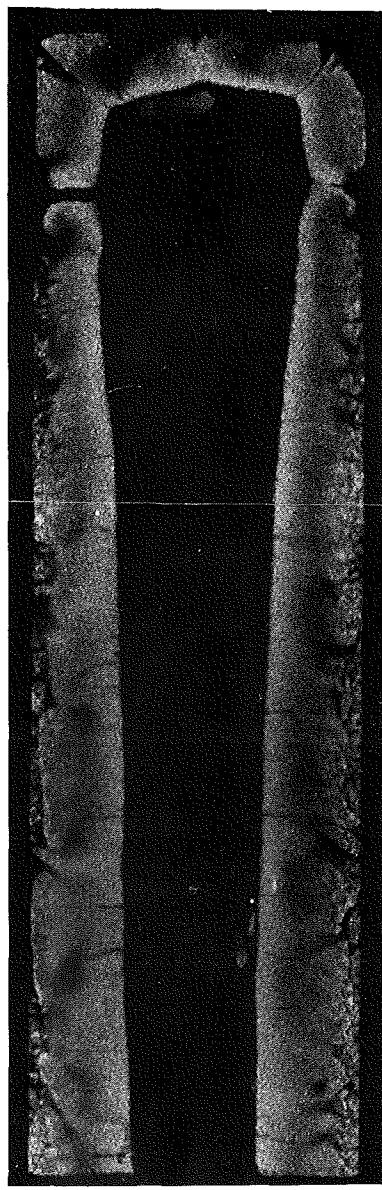
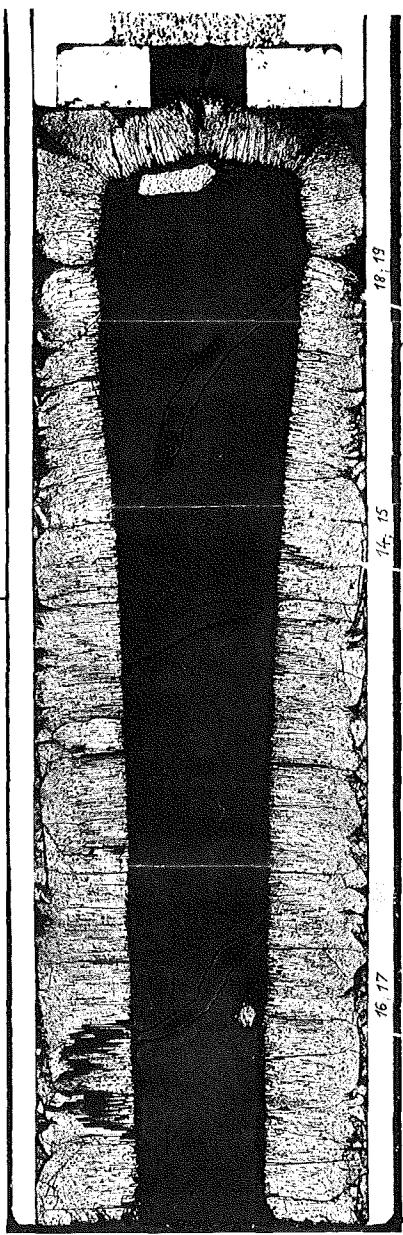
0,1mm



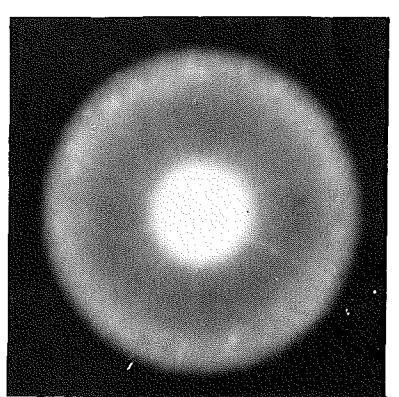
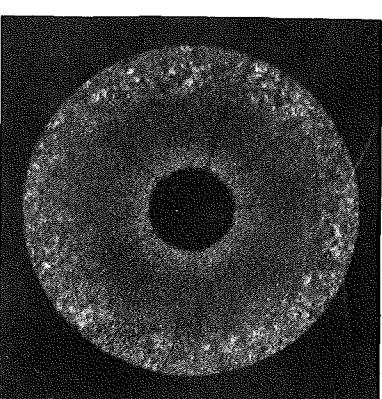
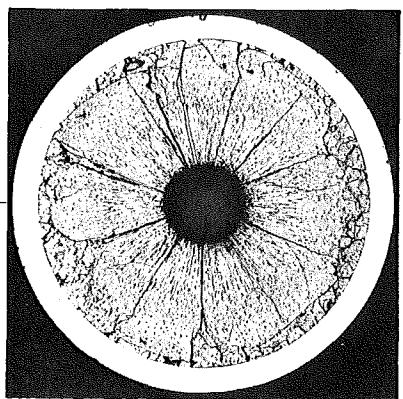
A

B

C



1



2

1mm



Prüfling 4B-27

Brennstoff:

Form : Pulver
Zusammensetzung : UO_2-PuO_2
Tablettendichte : _____

Hülle:

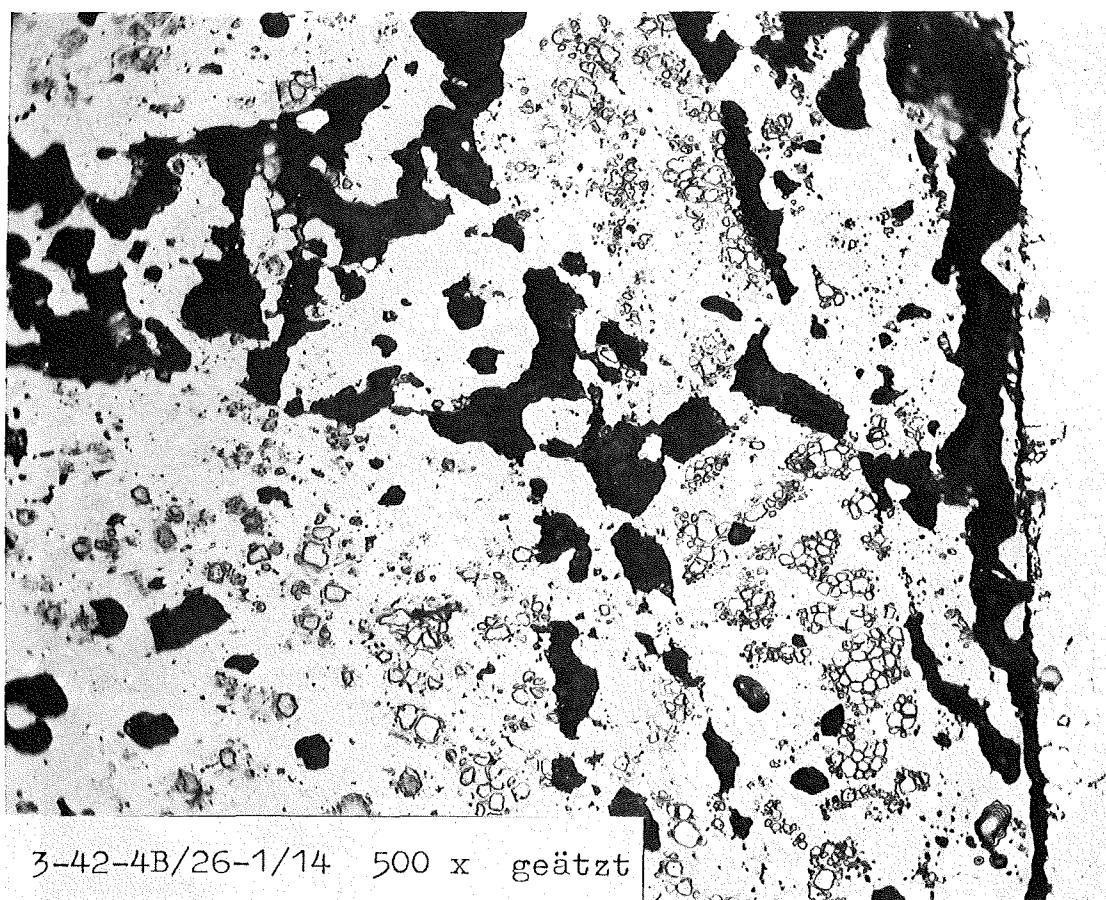
Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,0 mm
Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie:

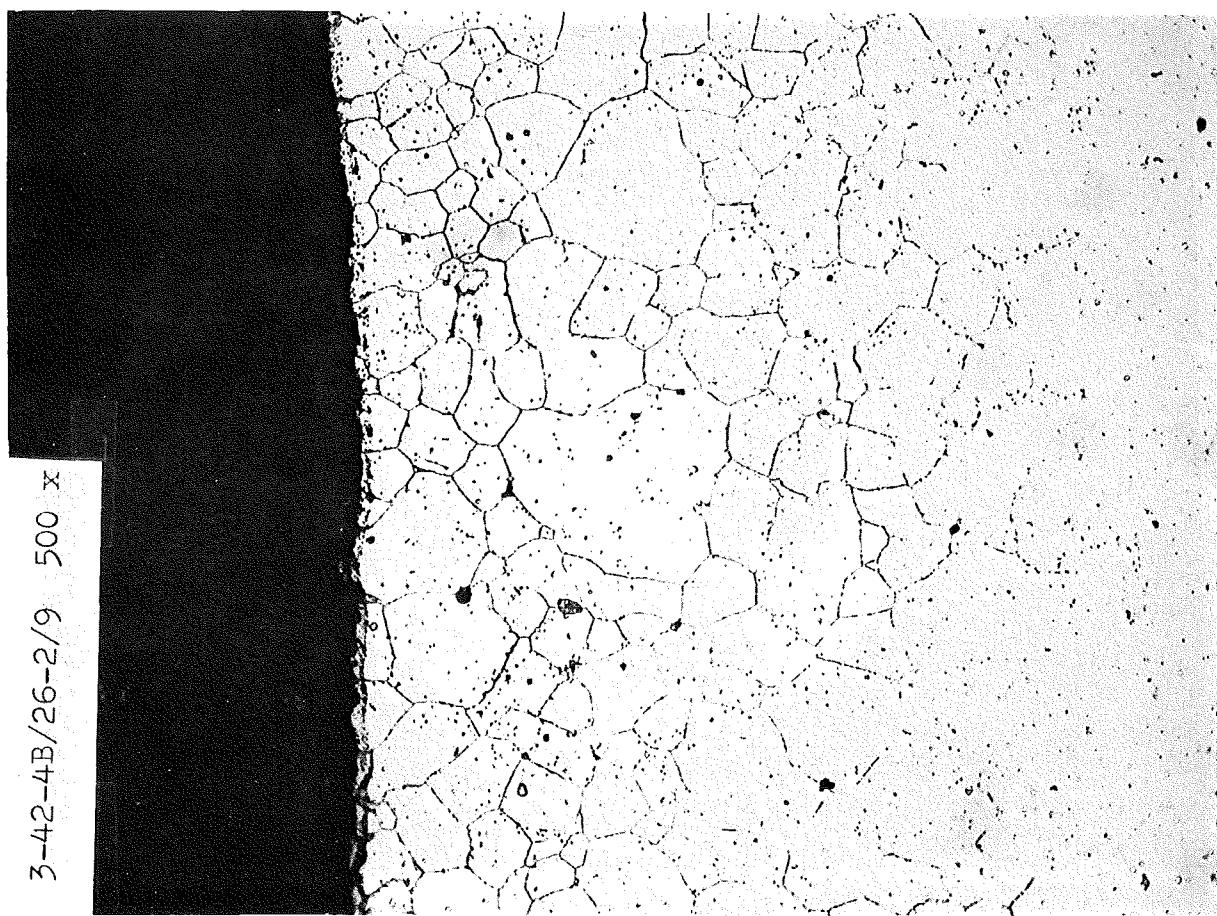
Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : _____
Schmierdichte : 80% th.D.

Bestrahlung:

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppel-
Kapsel Typ 4a
Dauer : 99,6 Vollasttage
Ende : 13. 1. 69
Rechn. Abbrand mittl. : 23,2 MWd/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 457 / 398 W/cm

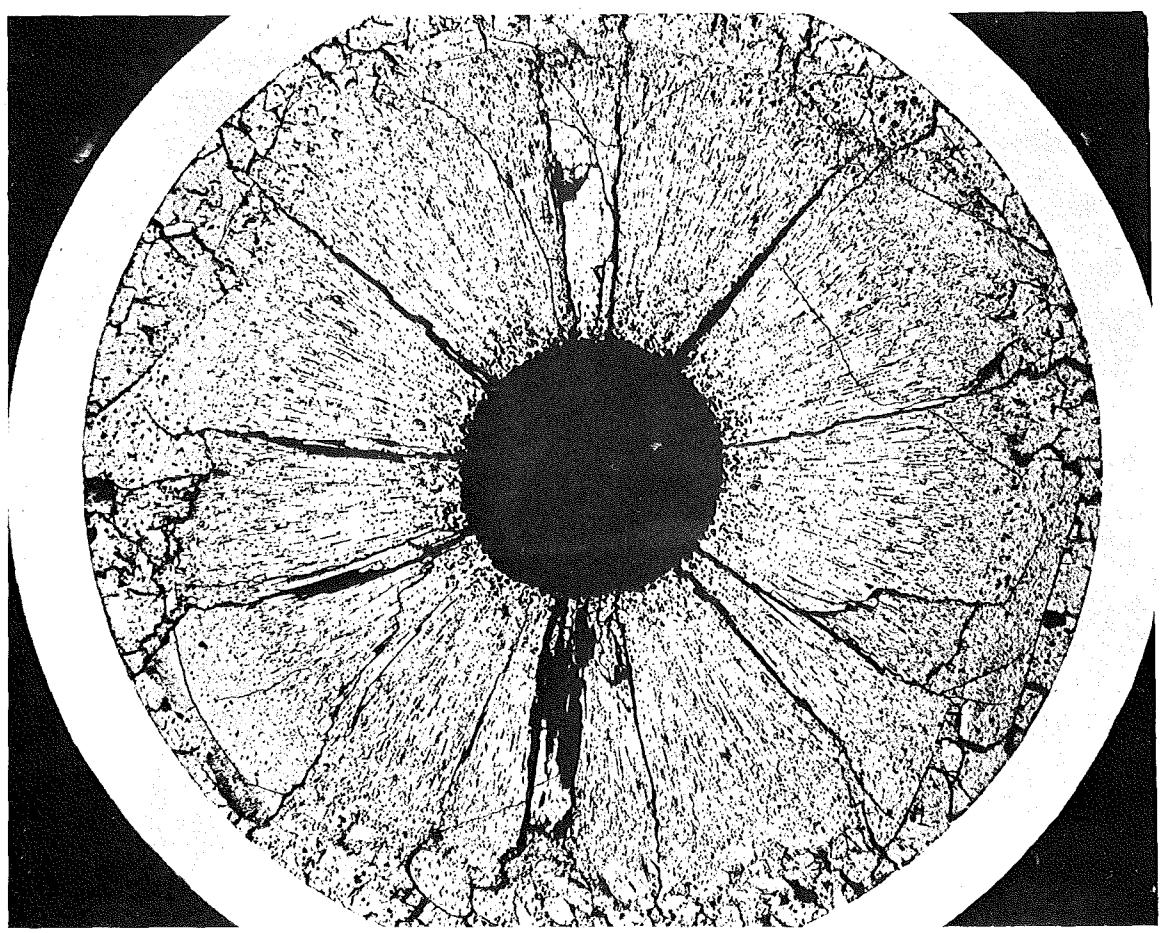


A2



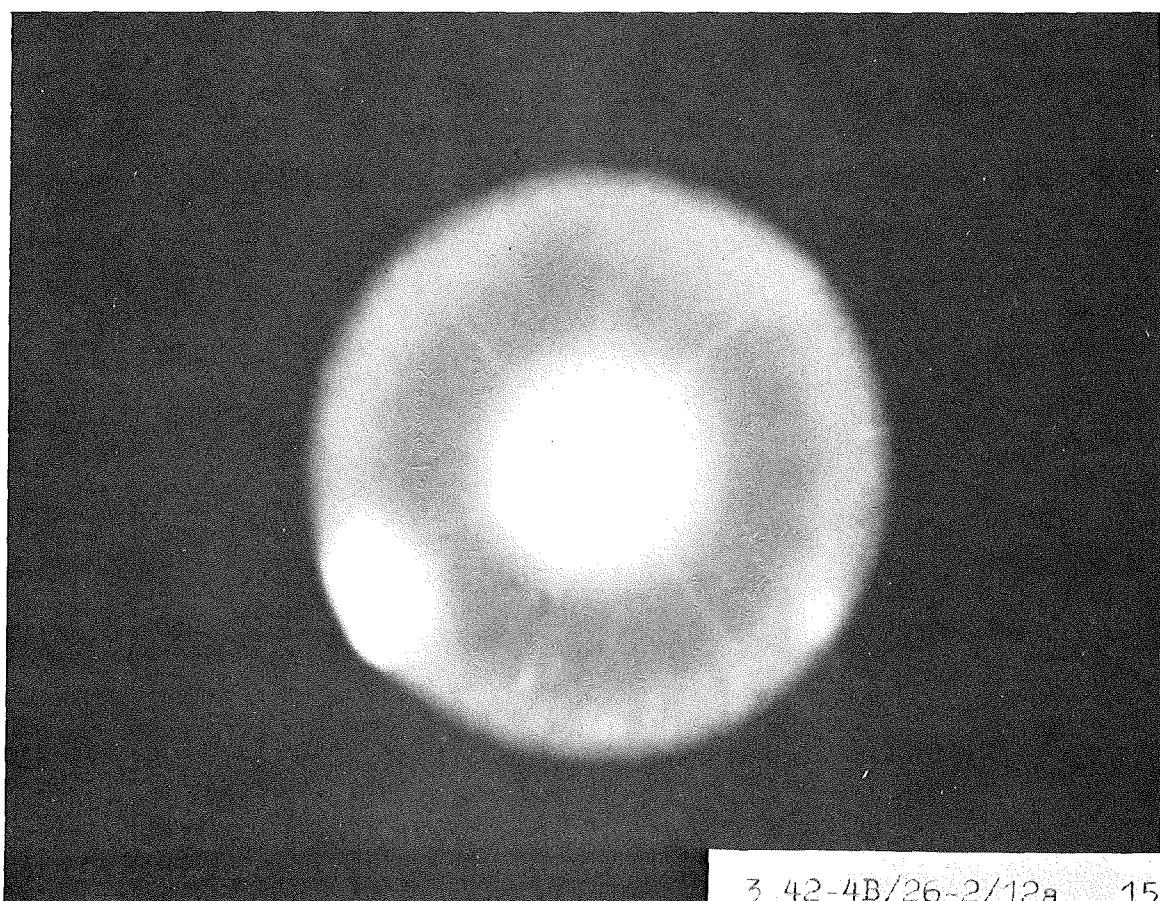
0,04 mm

-I/8-
zu Prüfling 4B/26
A2



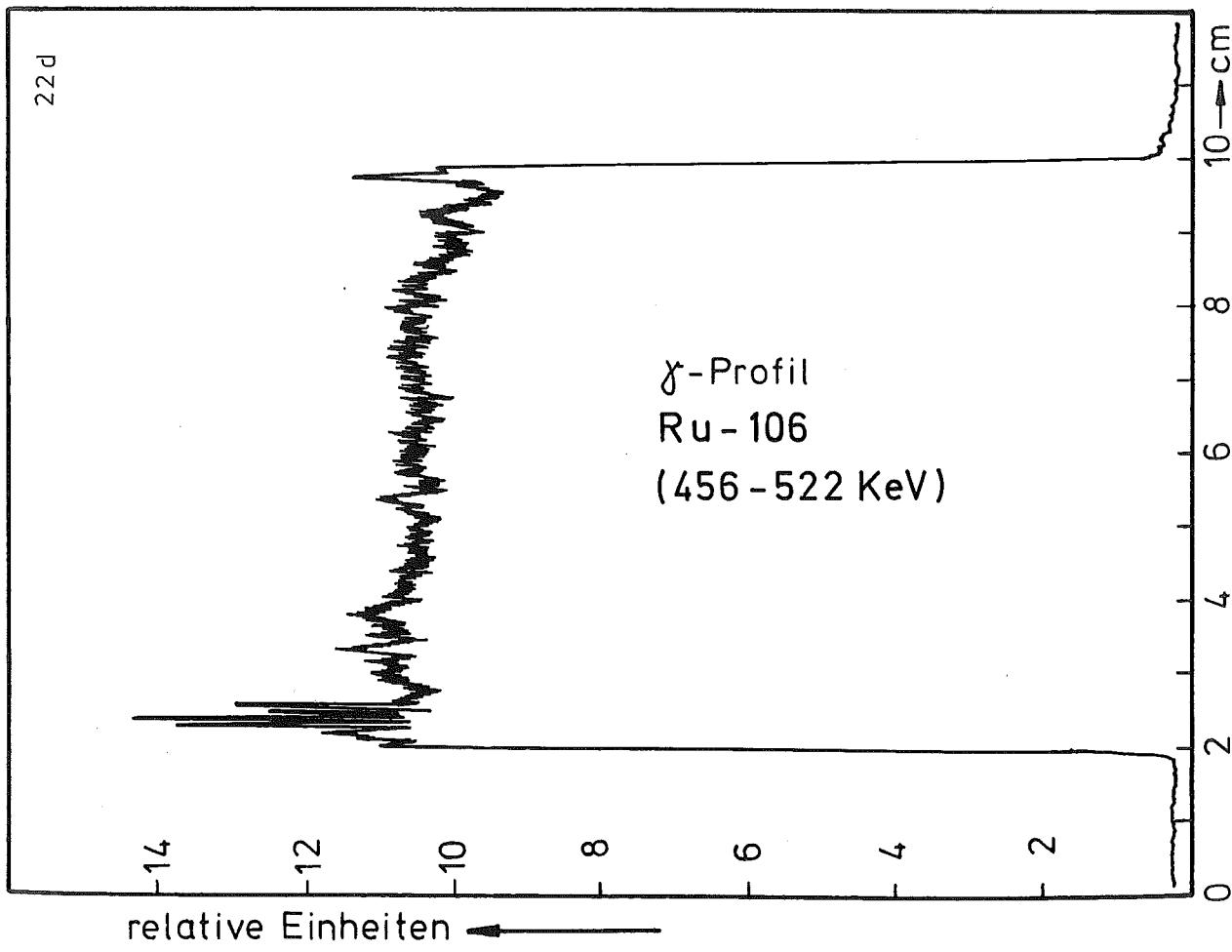
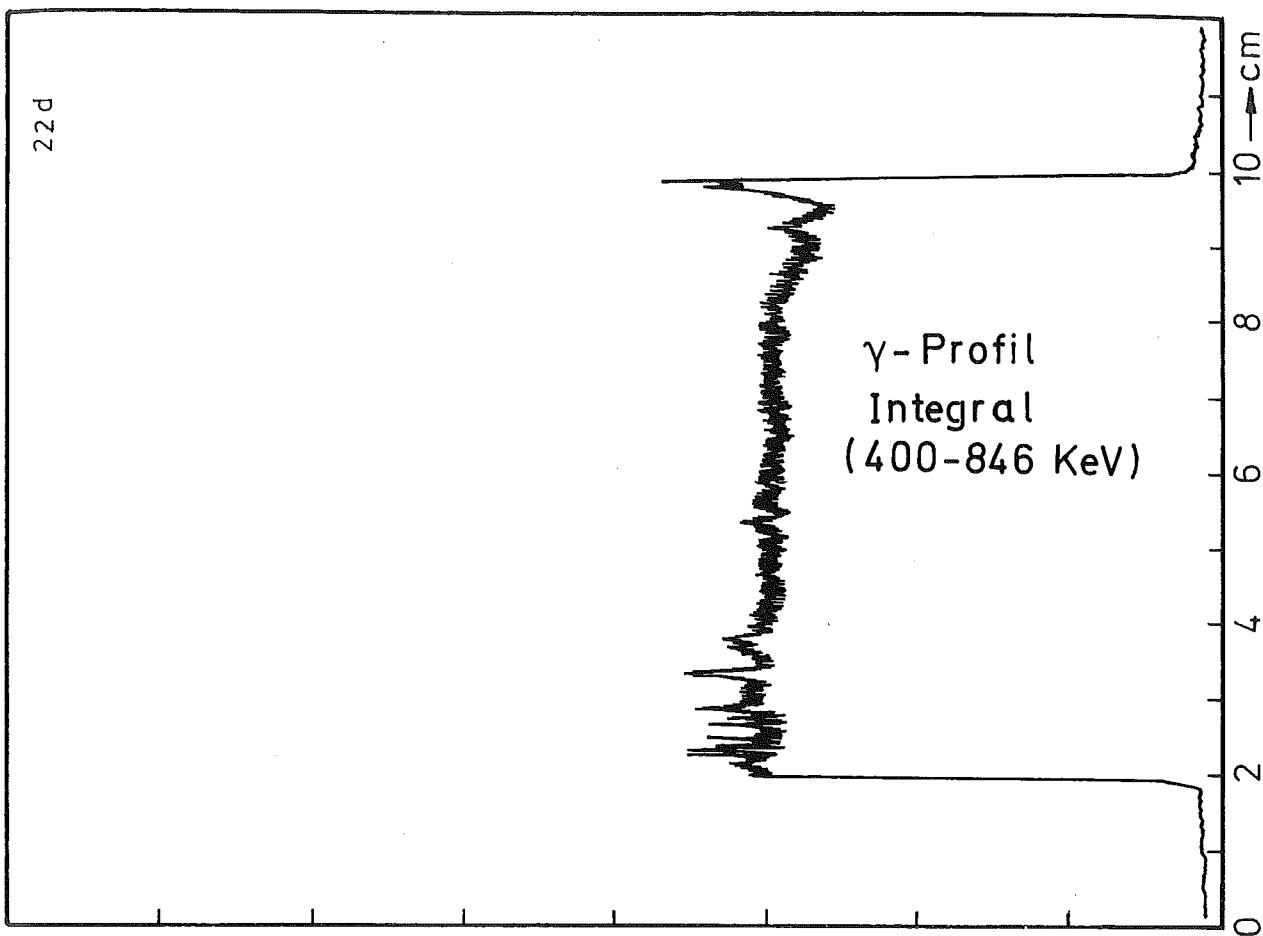
1 mm

C2



3 42-4B/26-2/12a 15

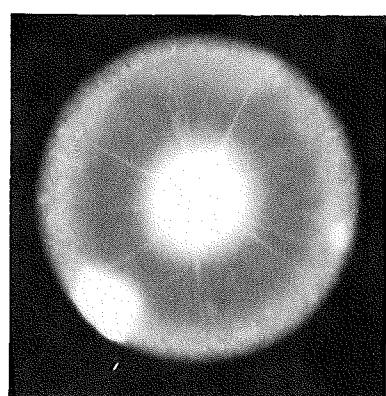
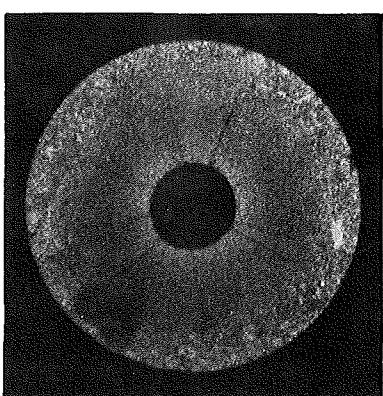
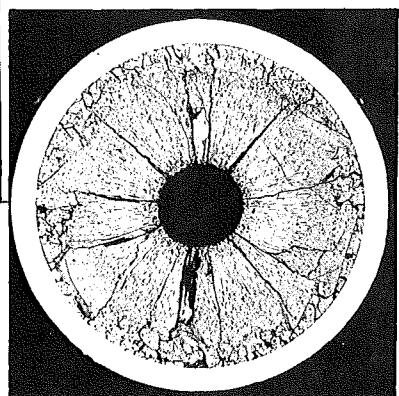
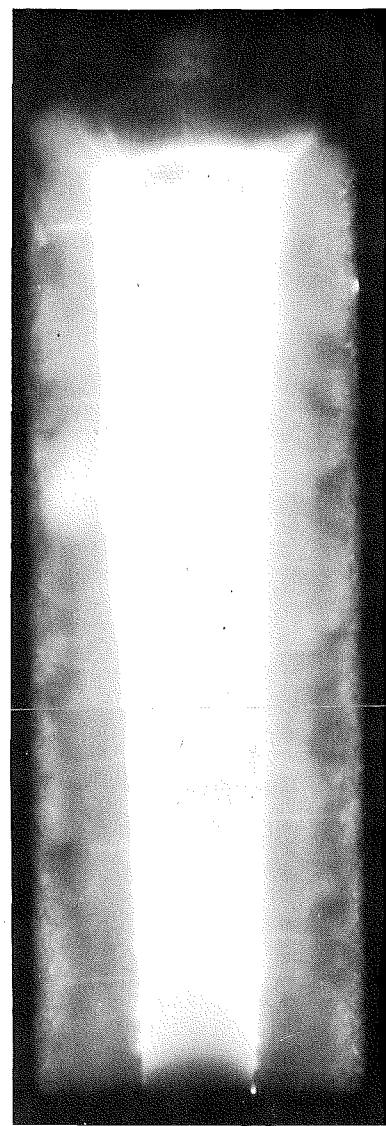
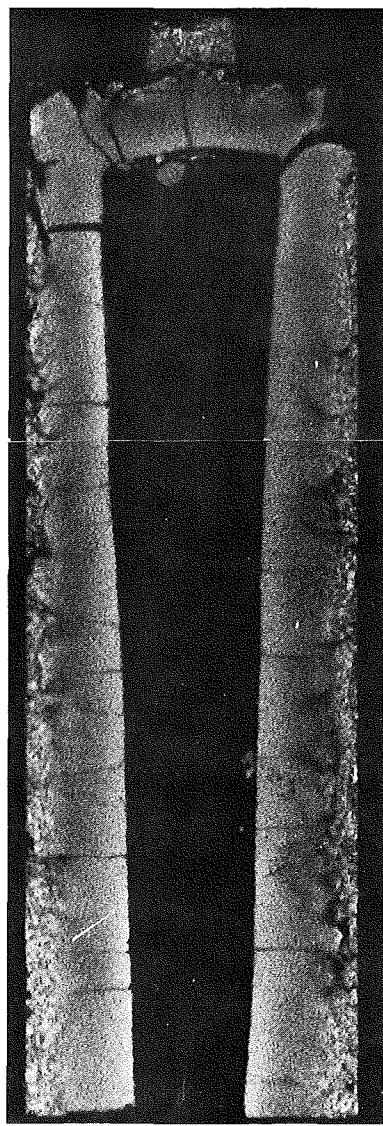
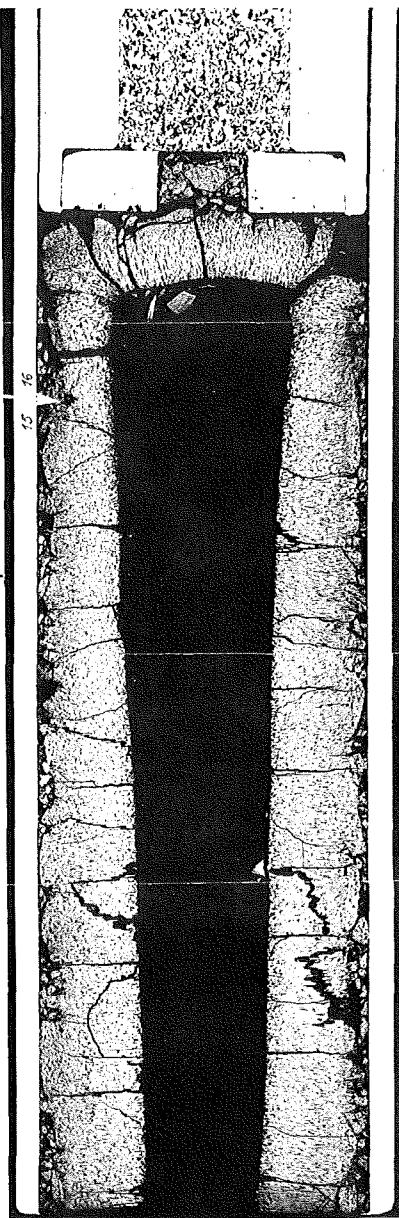
1 mm



A

B

C



1mm



Prüfling 4B-26

Brennstoff:

Form : Pulver
Zusammensetzung : UO_2-PuO_2
Tablettendichte : —

Hülle:

Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,0 mm
Wandstärke : 0,38 mm

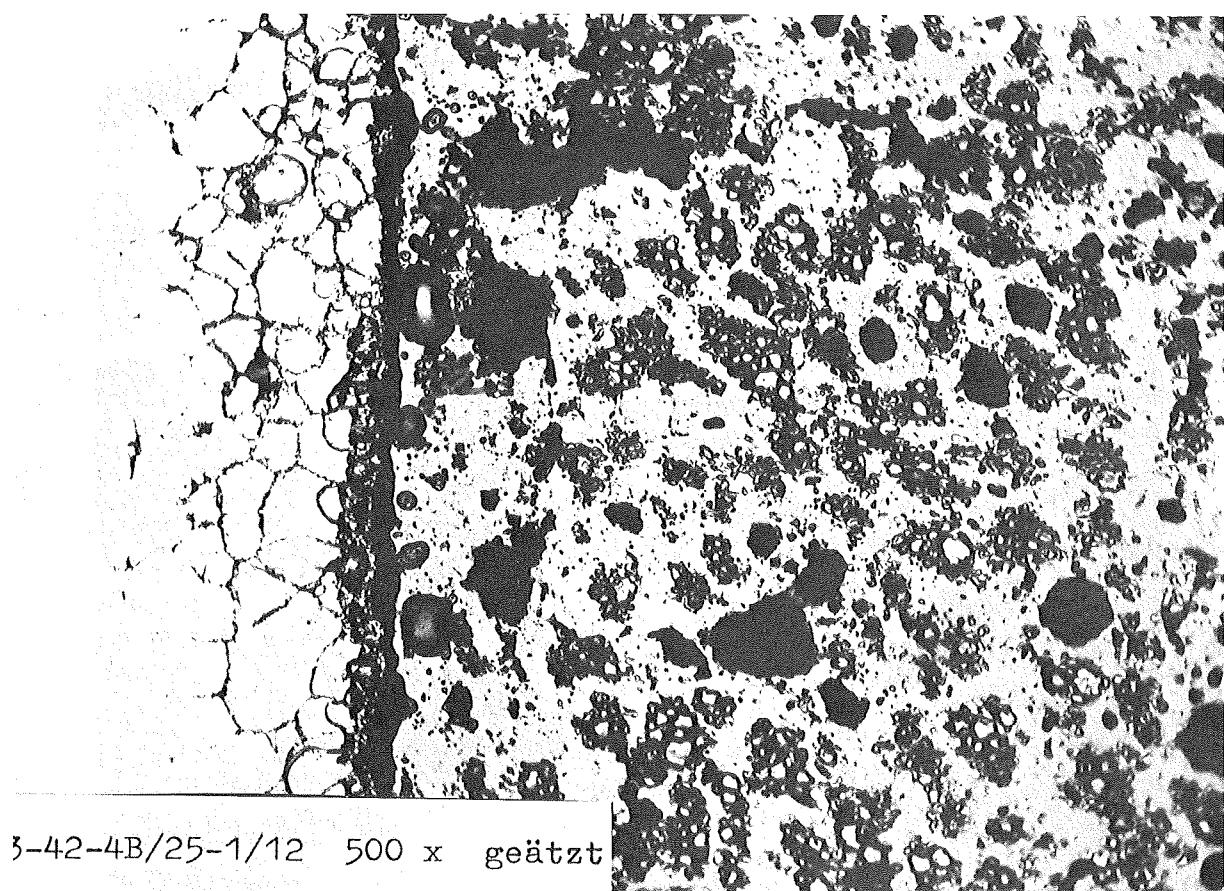
Geometrie:

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : —
Schmierdichte : 80% th.D.

Bestrahlung:

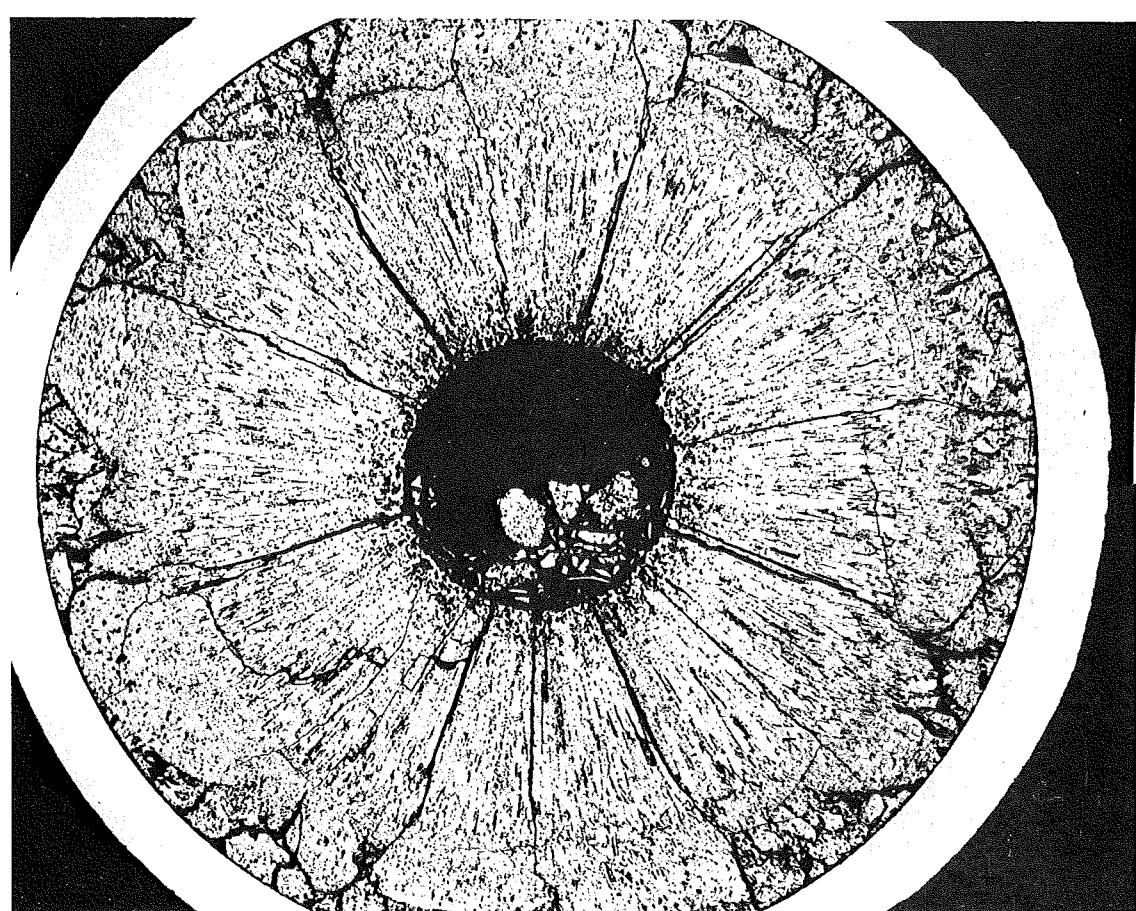
Einrichtung : NaK/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4a
Dauer : 99,6 Vollasttage
Ende : 13. 1. 69
Rechn. Abbrand mittl. : 22,0 MWD/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 534/382 W/cm

- I/11 -
zu Prüfling 4B/25
A1

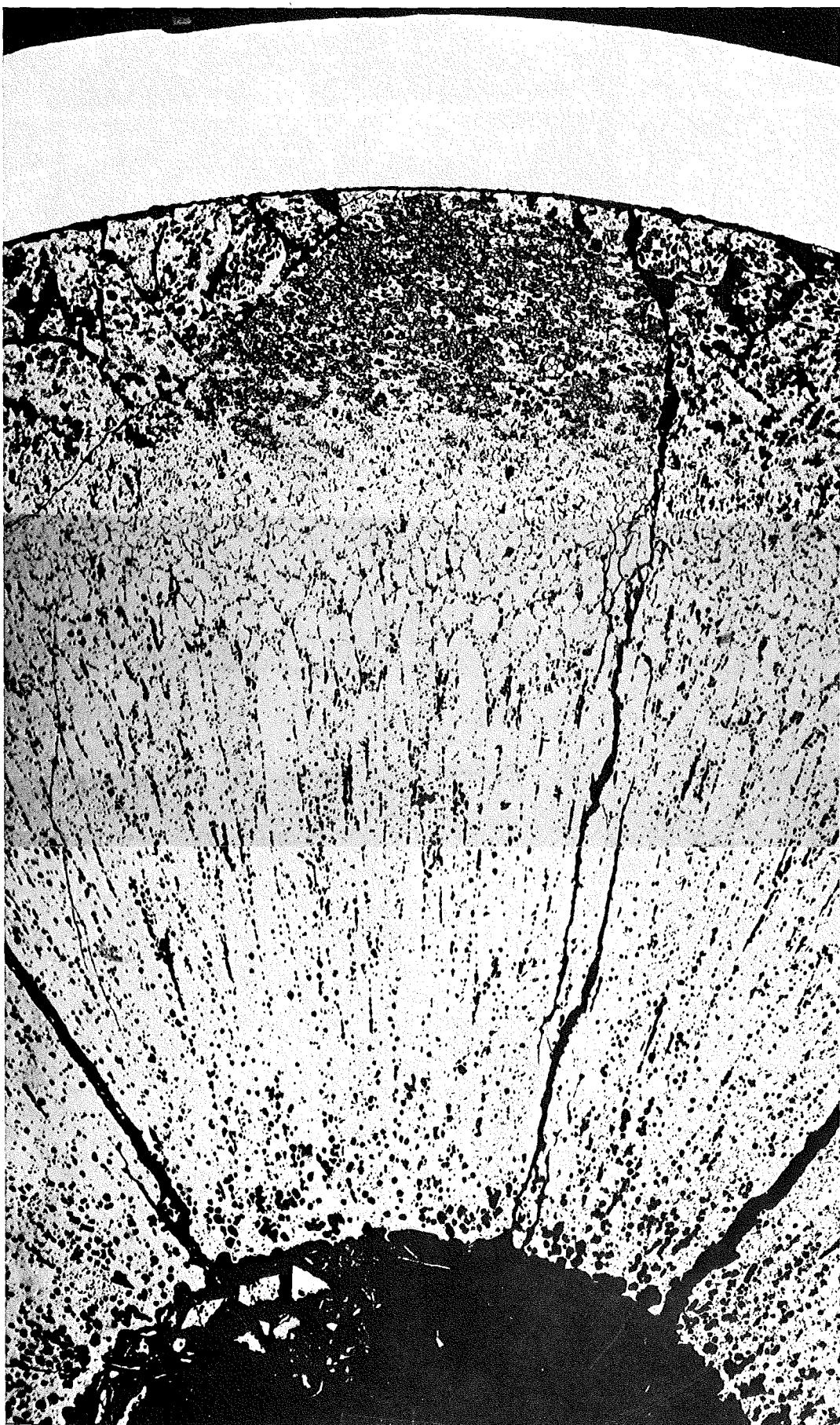


0,04 mm

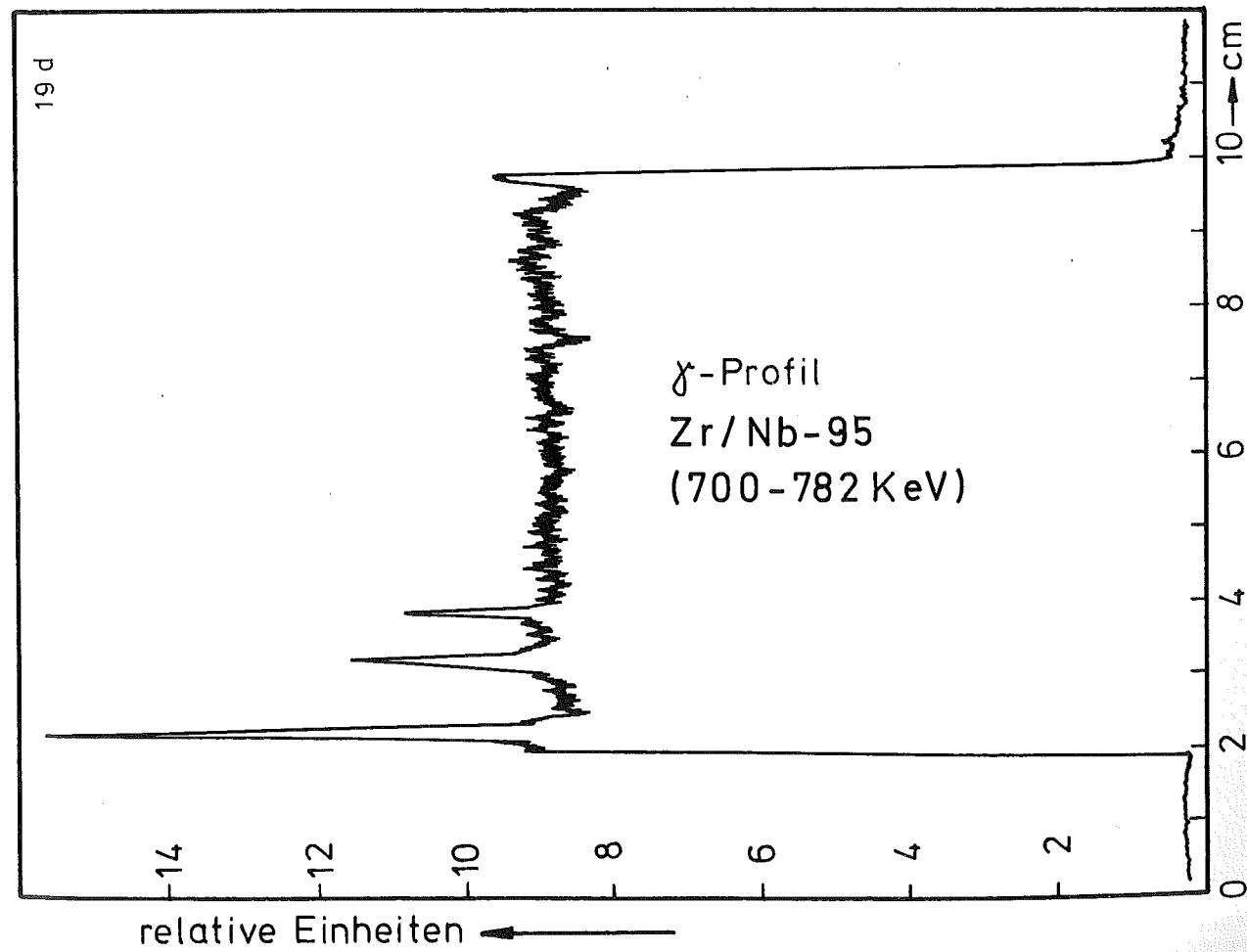
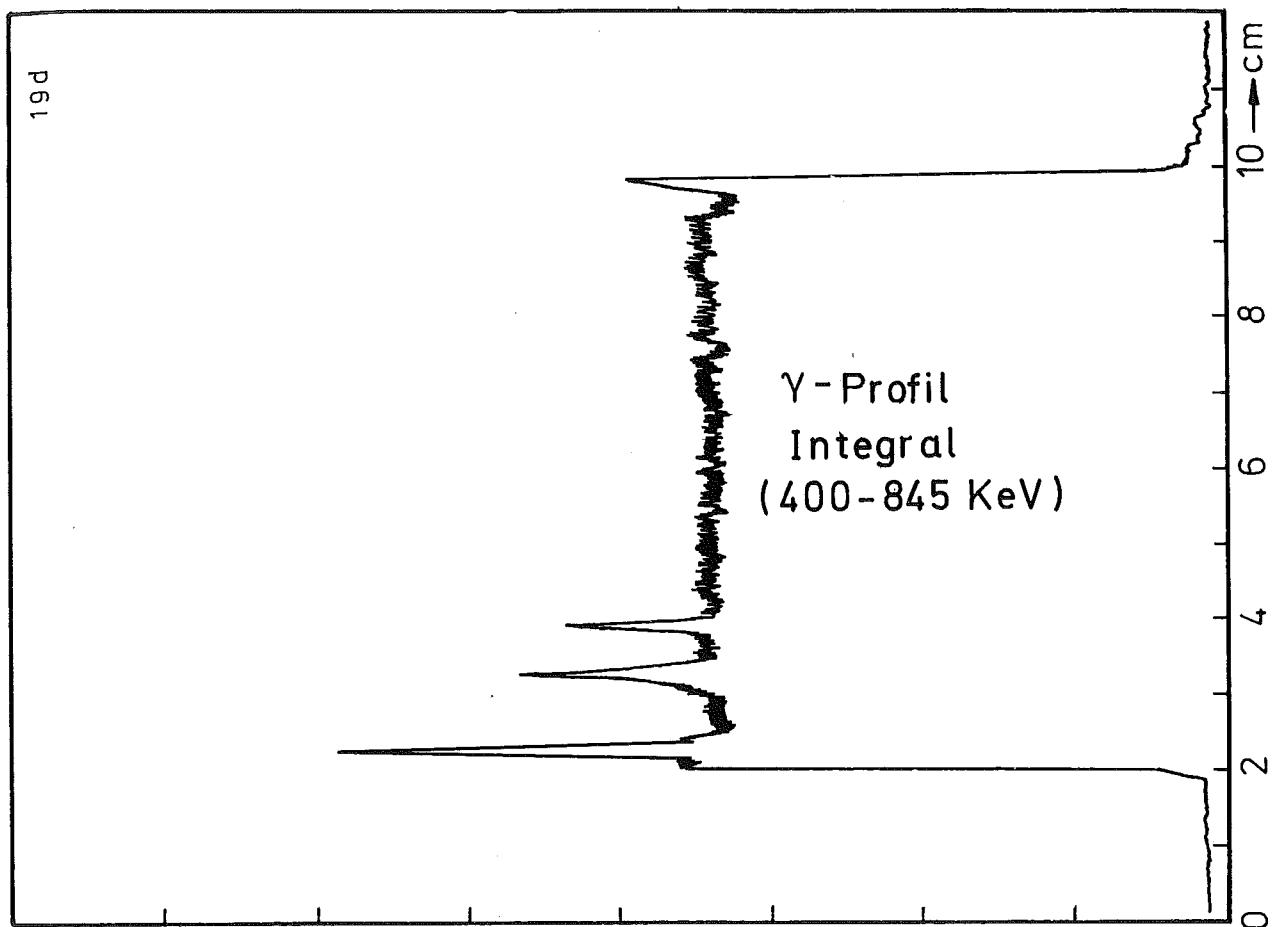
A2



-I/12-
zu Prüfling 4B/25
A2



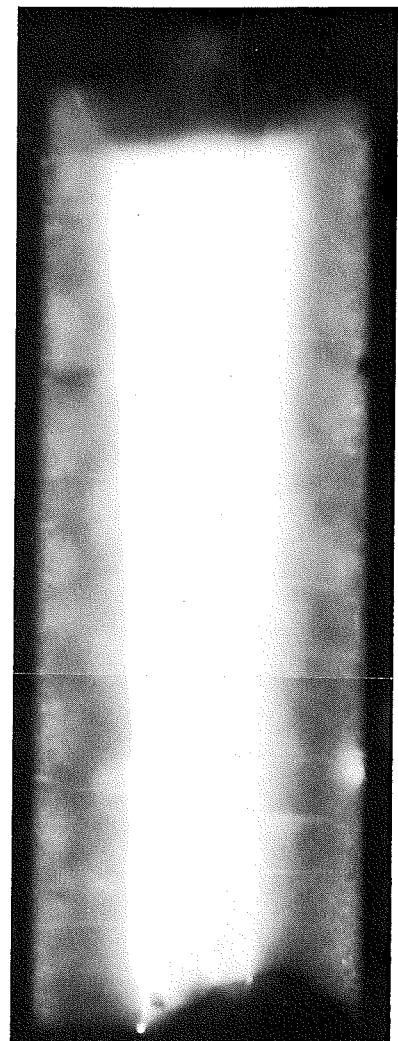
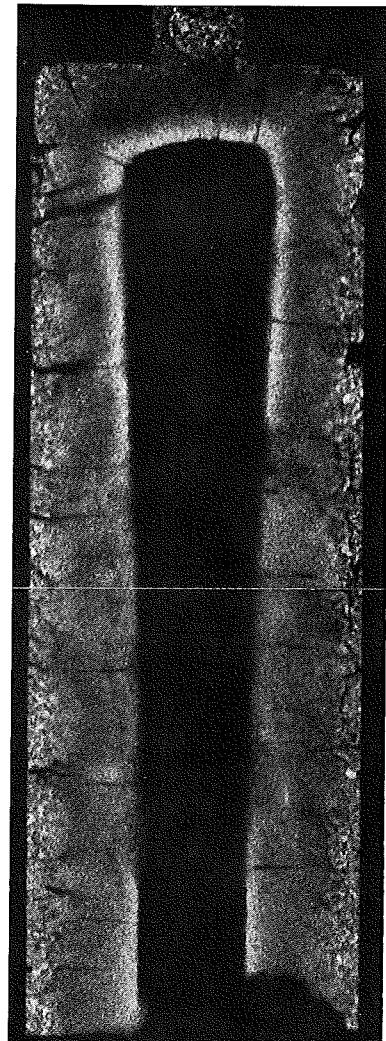
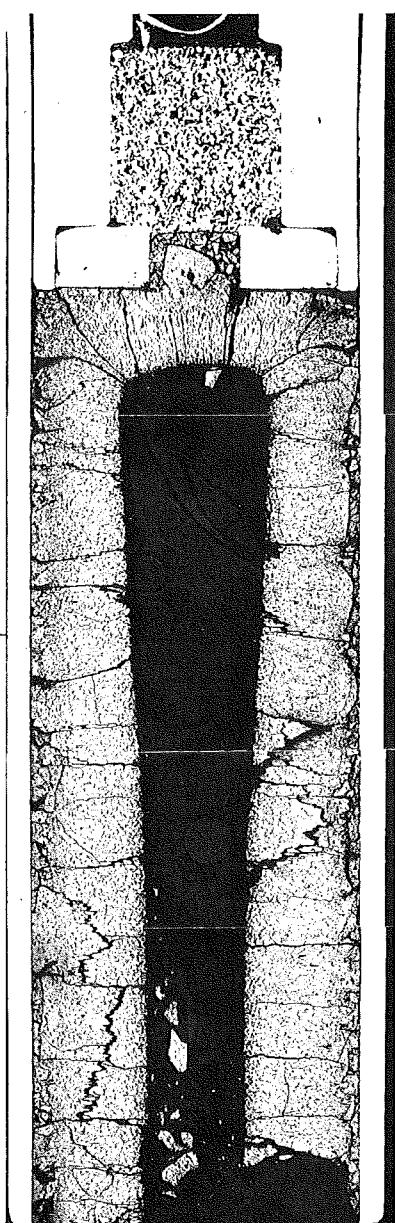
0,1 mm



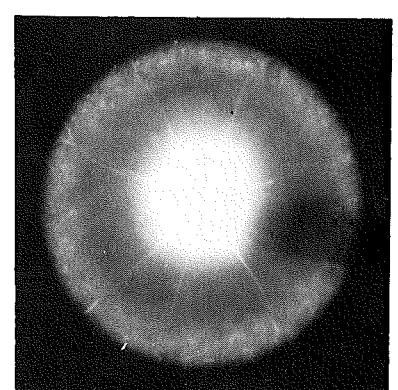
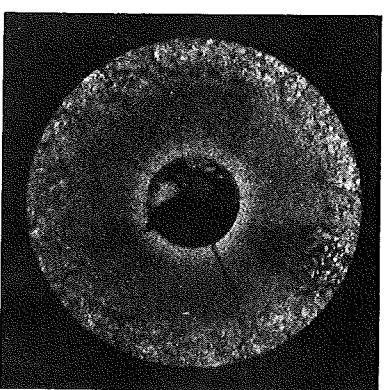
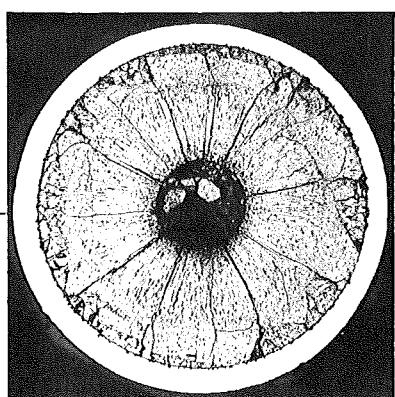
A

B

C



1



2

1mm



Prüfling 4B-25

Brennstoff:

Form : Pulver
Zusammensetzung : UO_2-PuO_2
Tablettendichte : —

Hülle:

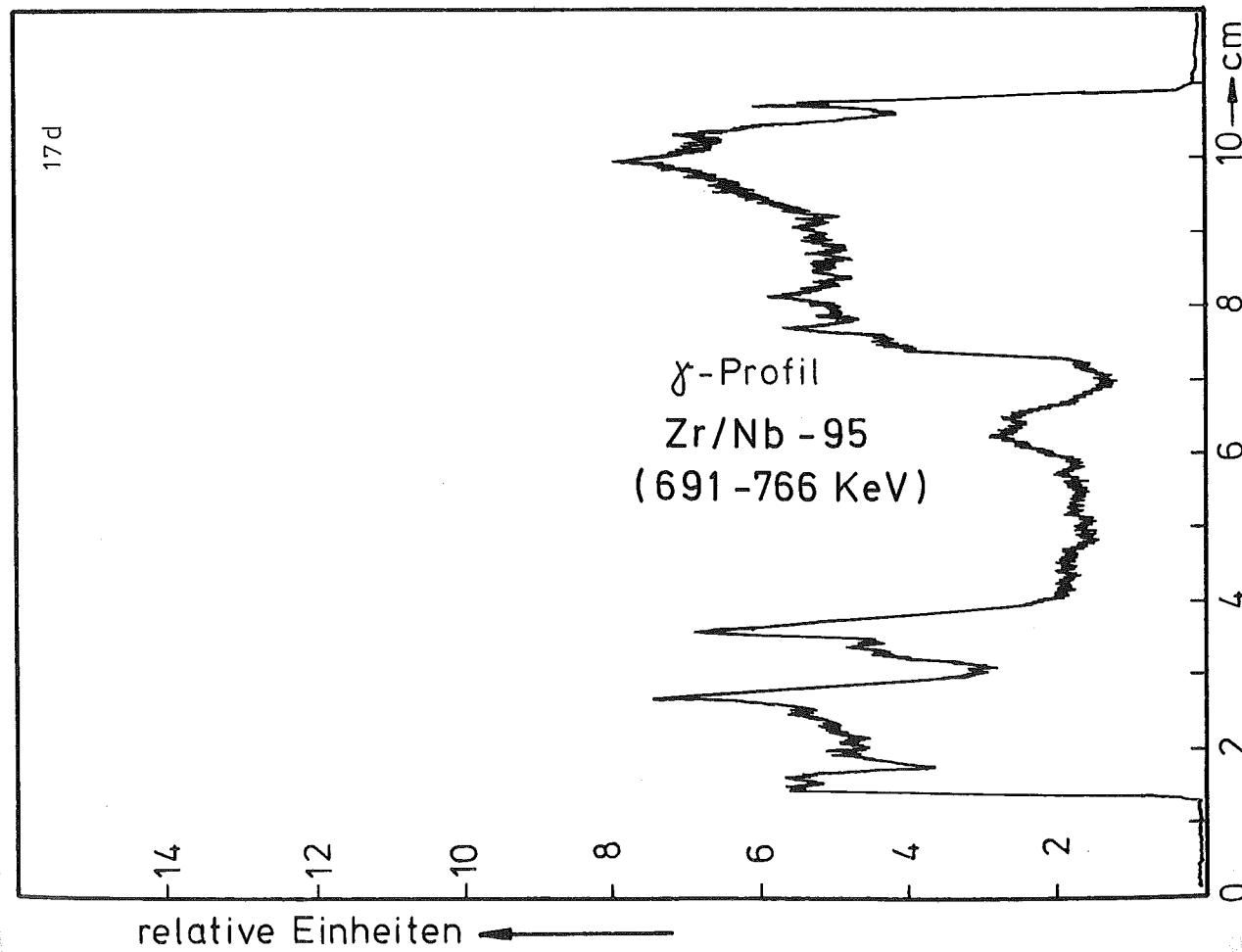
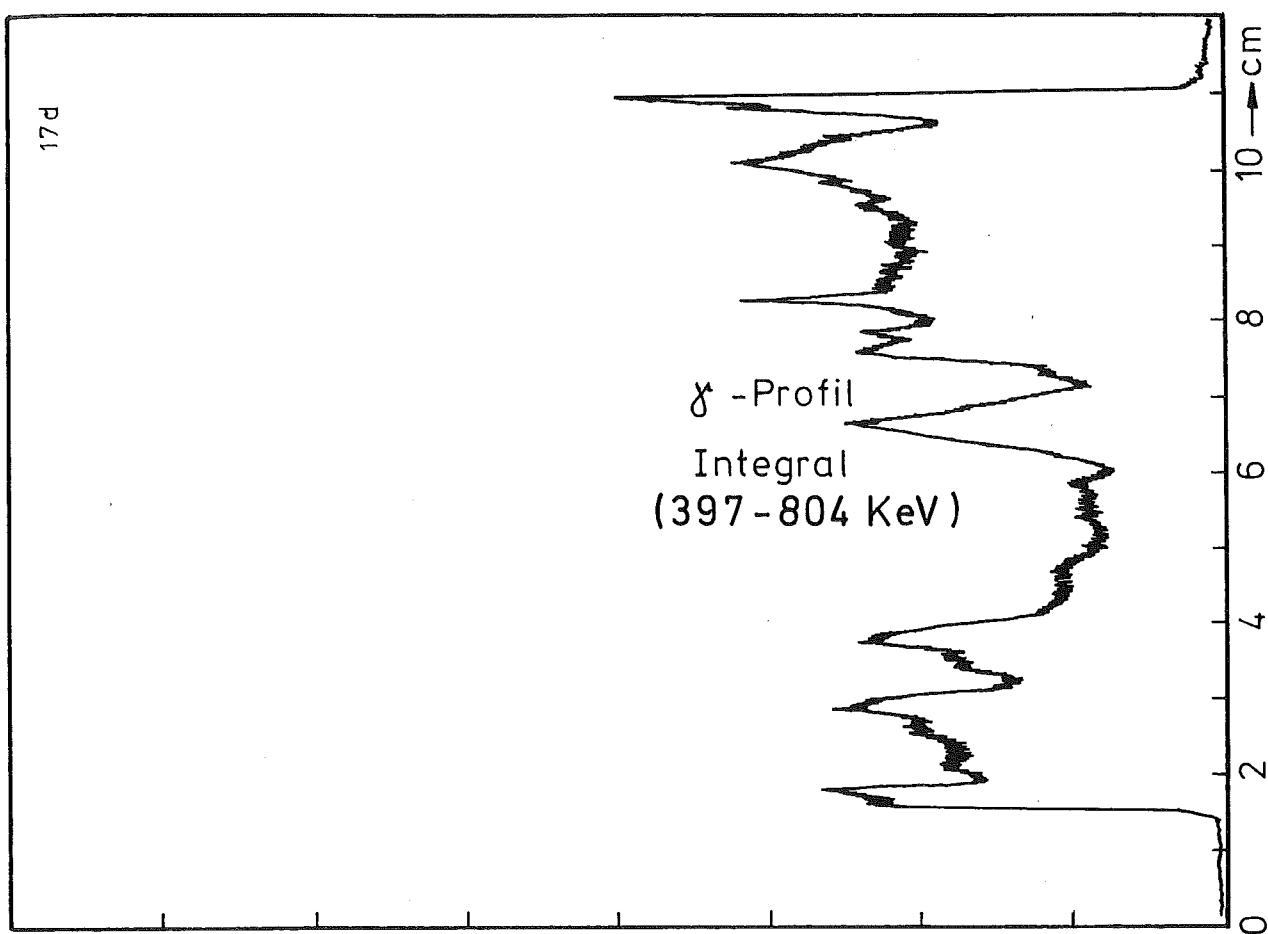
Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,0 mm
Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie:

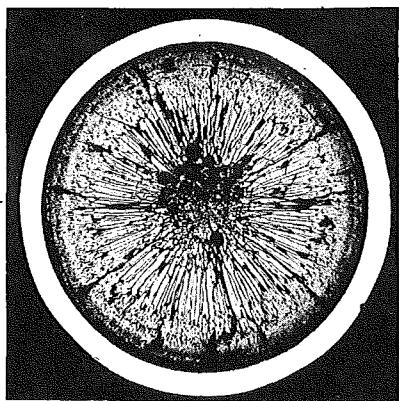
Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : —
Schmierdichte : 80% th.D.

Bestrahlung:

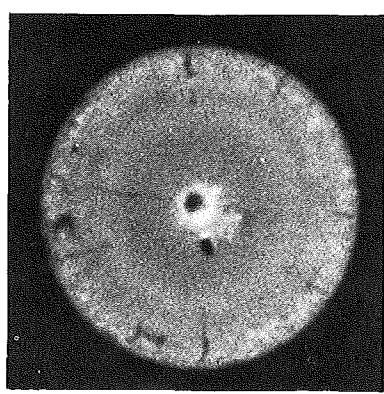
Einrichtung : NaK/PbBi-Doppel-
Kapsel Typ 4a
Dauer : 99,6 Vollasttage
Ende : 13. 1. 69
Rechn. Abbrand mittl. : 21,6 MWd/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 523/371 W/cm



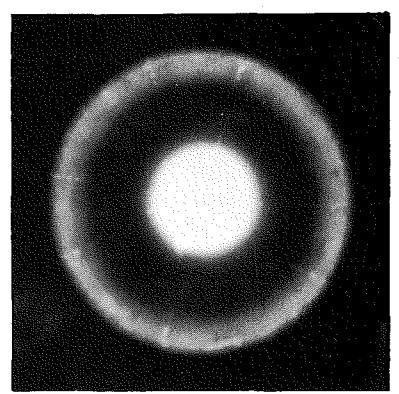
A



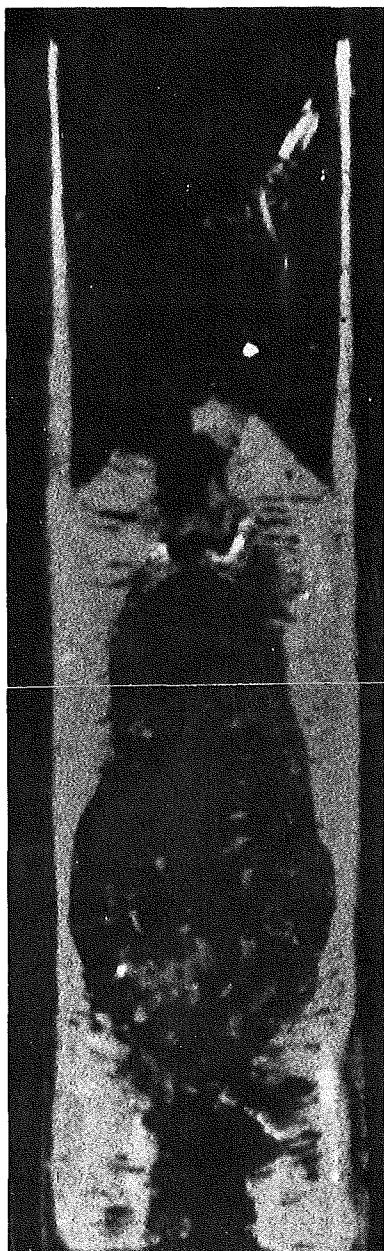
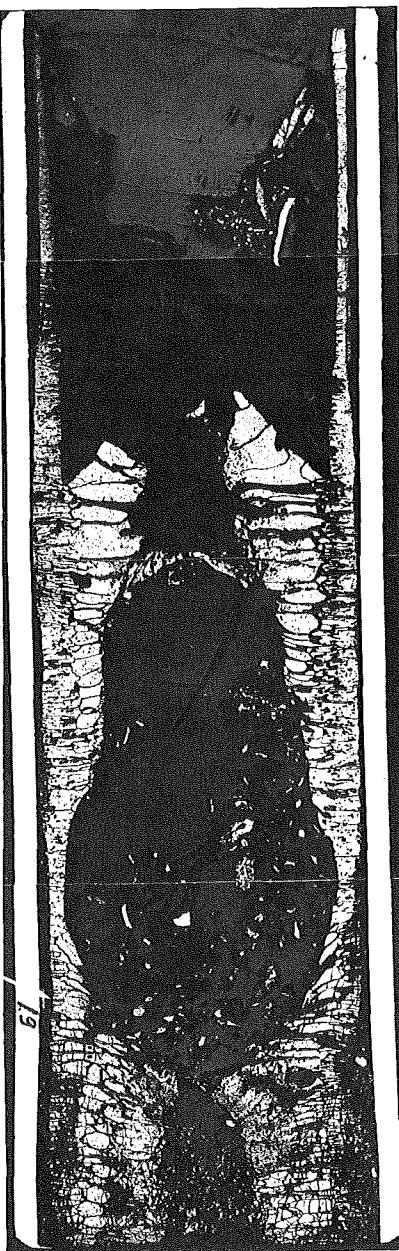
B



C



1



2

1mm



Prüfling 4B-32

Brennstoff:

Form : Pulver
Zusammensetzung : $UO_2 - PuO_2$
Tablettendichte : _____

Hülle:

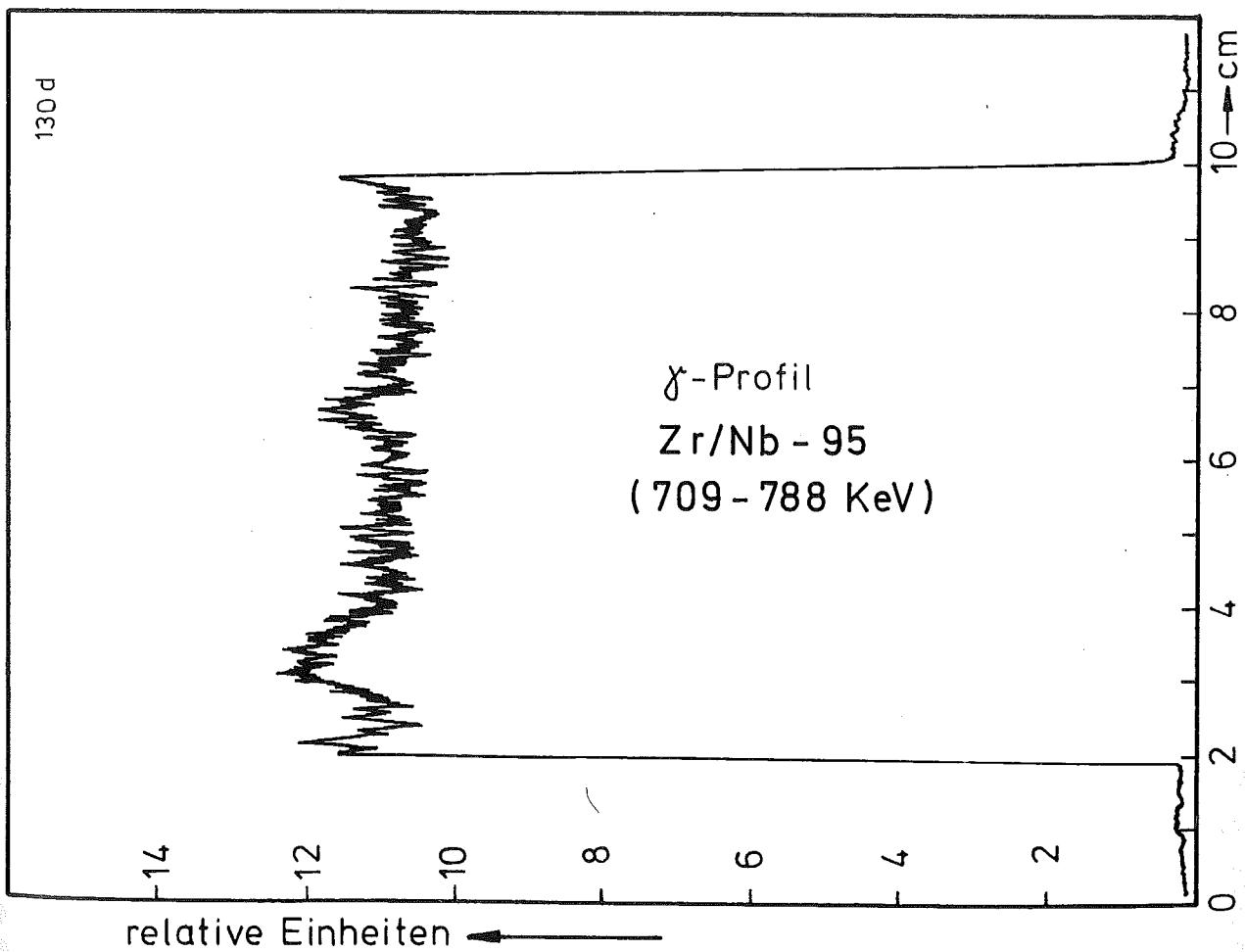
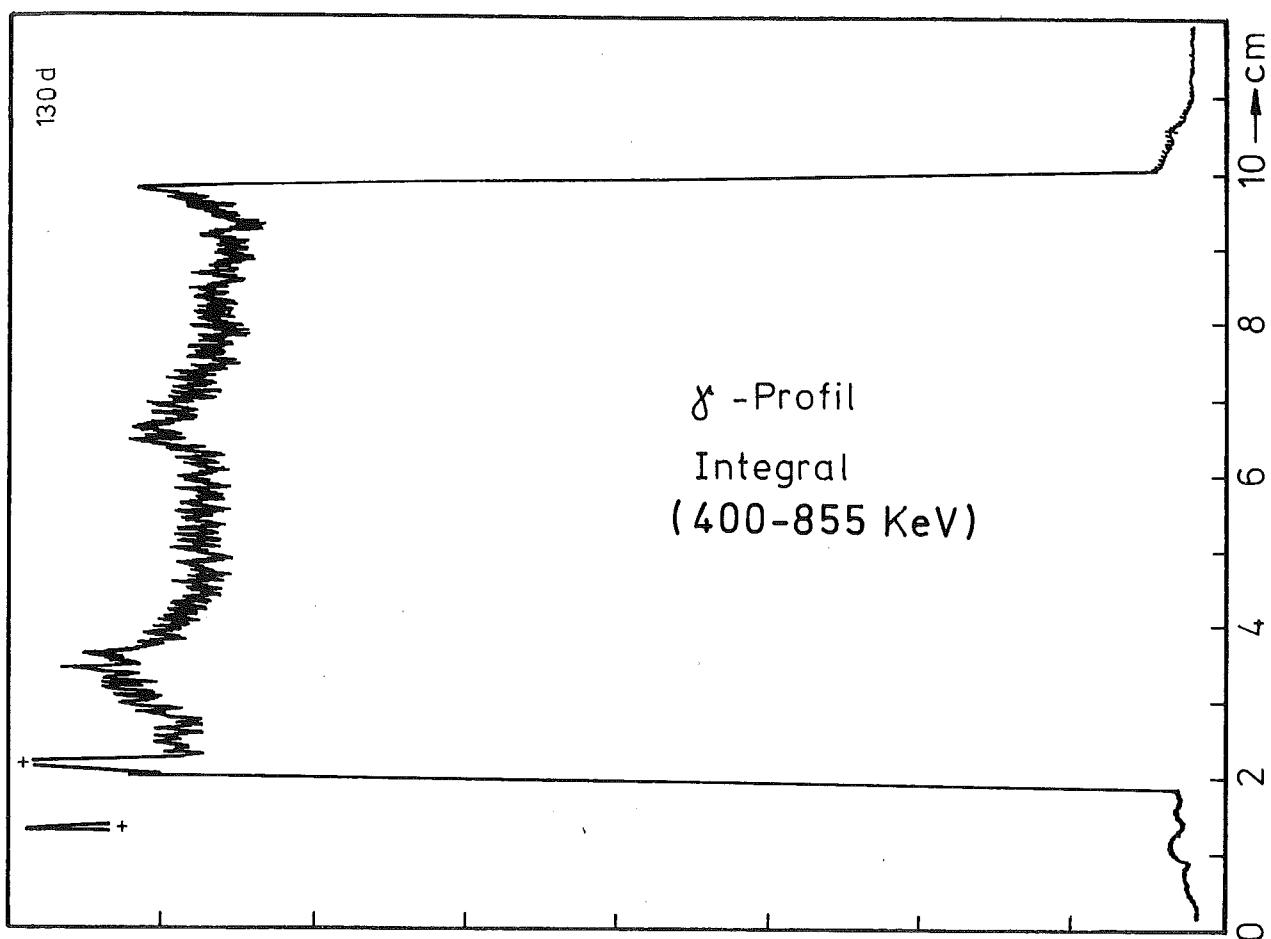
Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,0 mm
Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie:

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : _____
Schmierdichte : 80% th.D.

Bestrahlung:

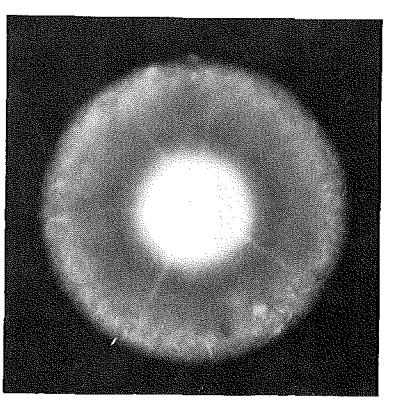
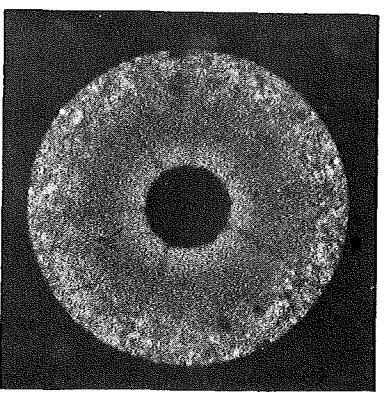
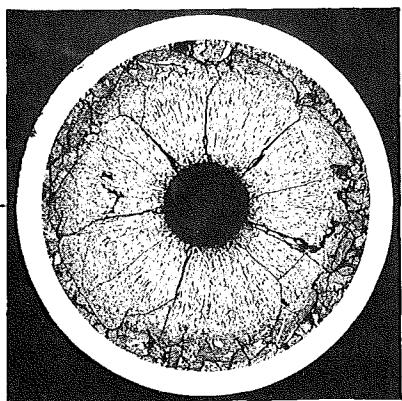
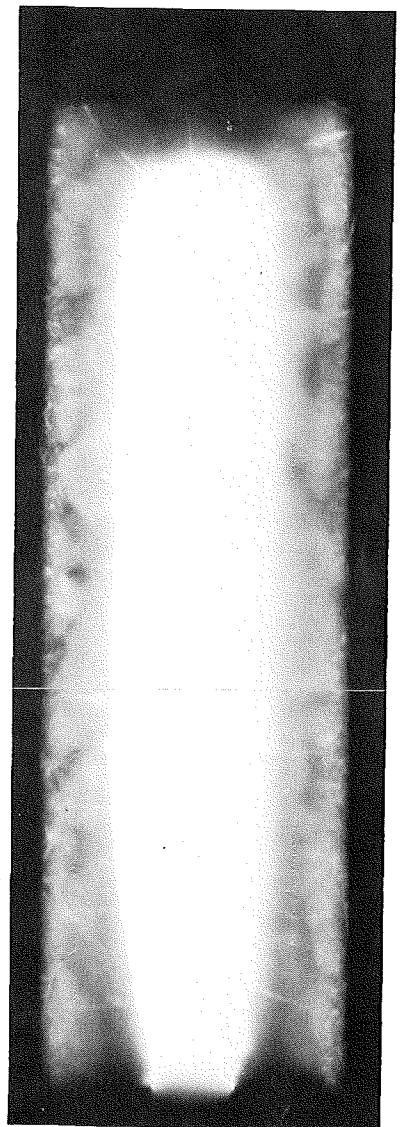
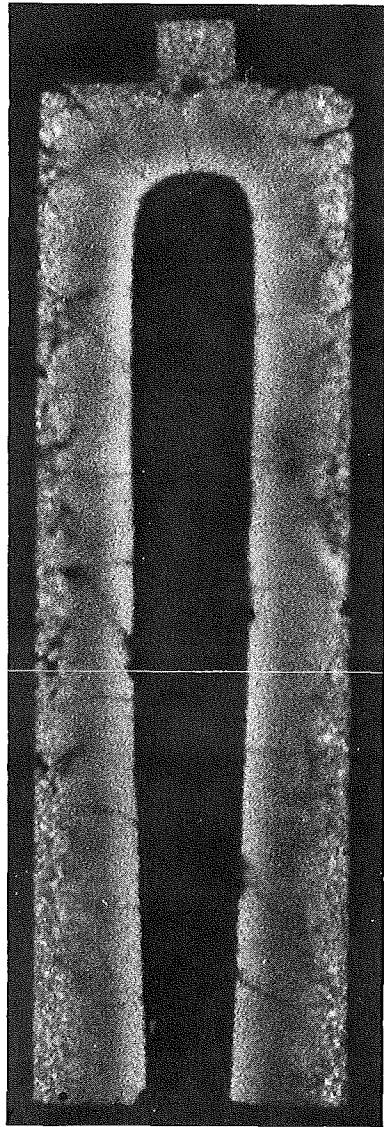
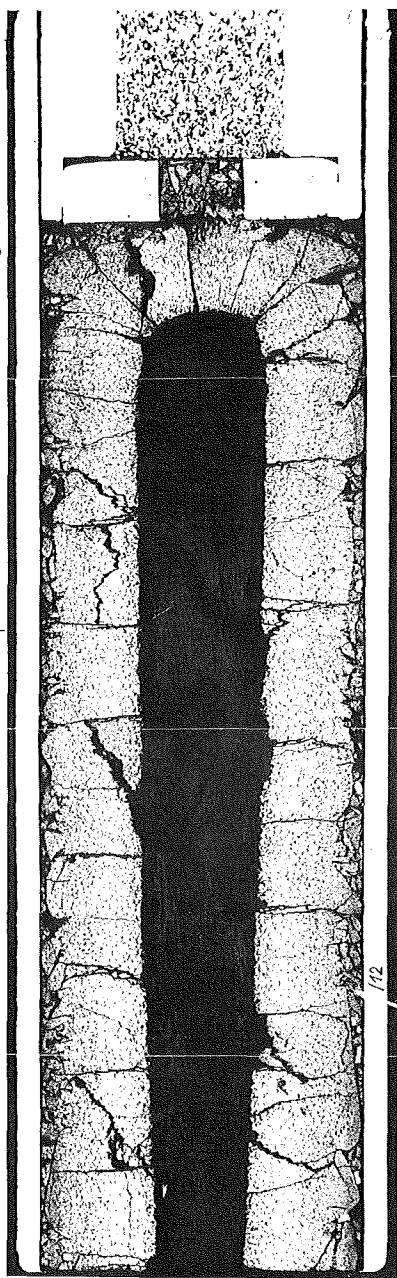
Einrichtung : NaK/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4a
Dauer : 46,2 Vollasttage
Ende : 16. 12. 68
Rechn. Abbrand : 9,8 MWD/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 773 / 364 W/cm



A

B

C



1mm

Prüfling 4B-35



Brennstoff:

Form : Pulver
Zusammensetzung : $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$
Tablettendichte : —

Hülle:

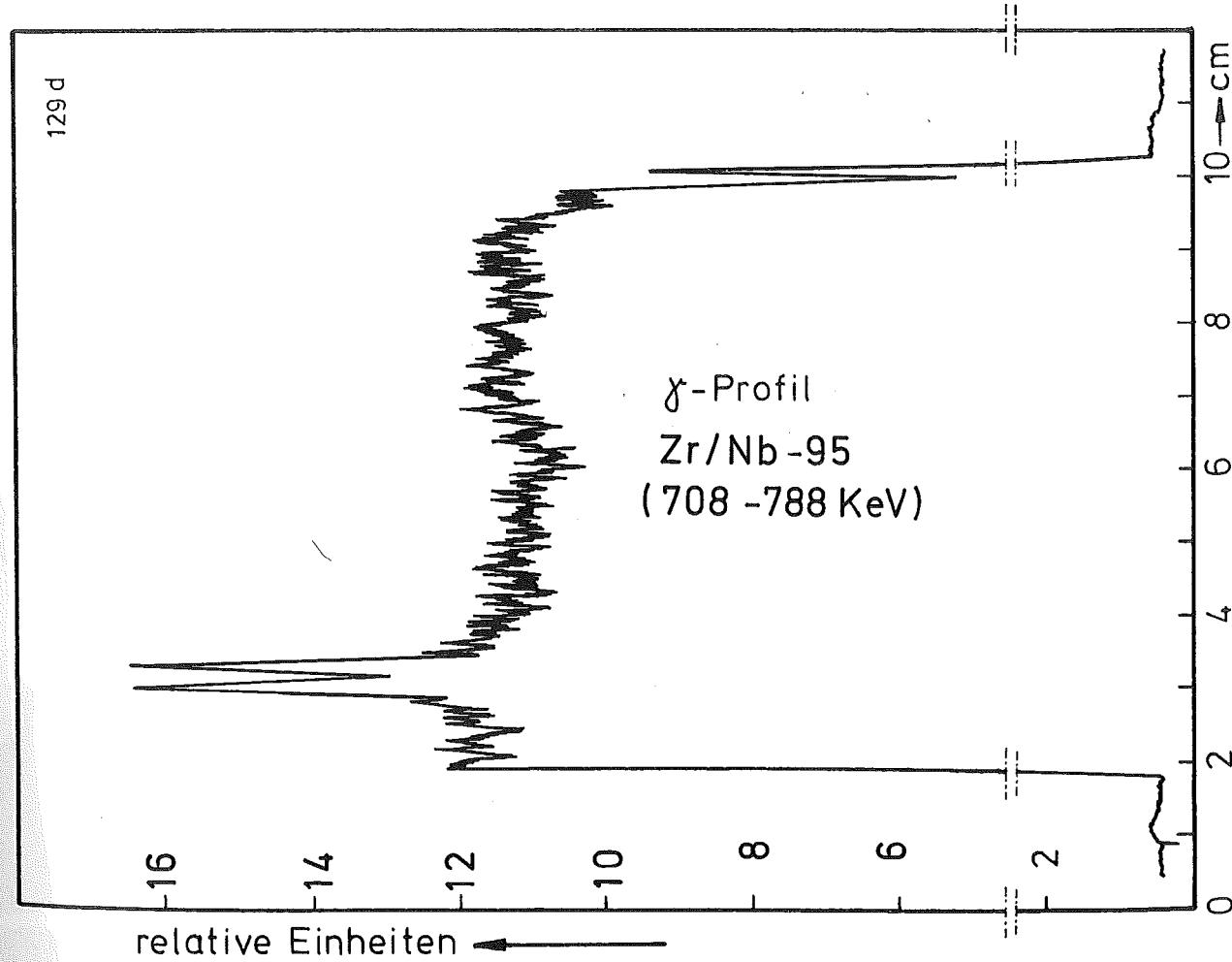
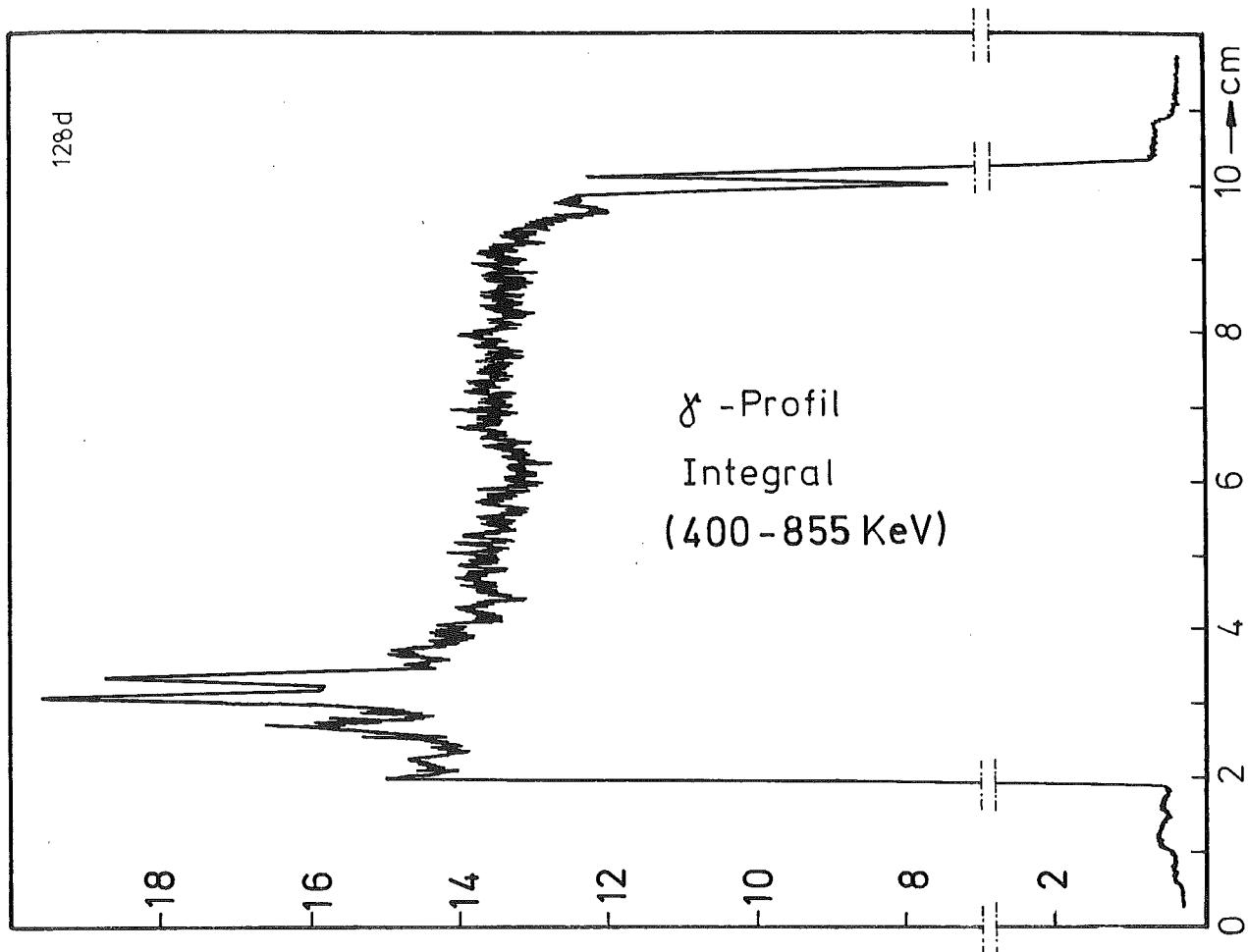
Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,0 mm
Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie:

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : —
Schmierdichte : 80% th.D.

Bestrahlung:

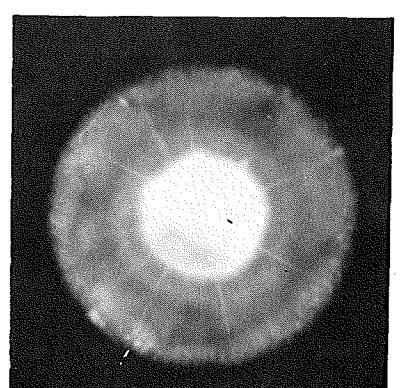
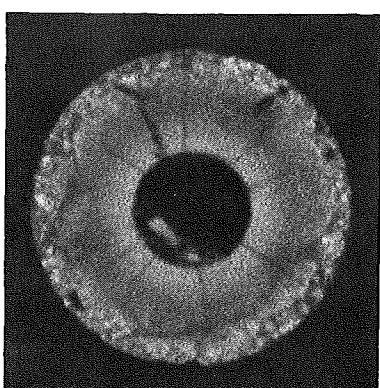
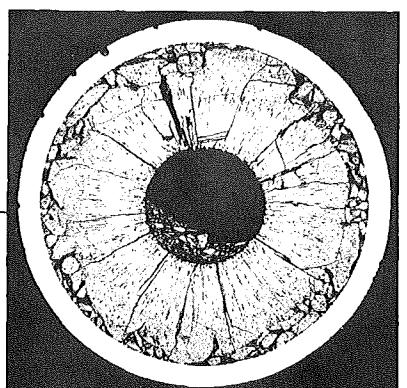
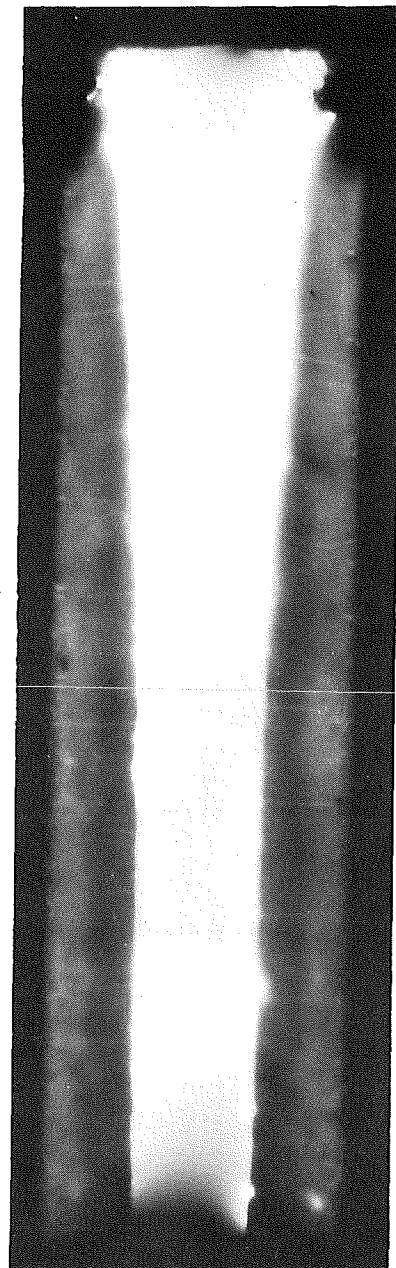
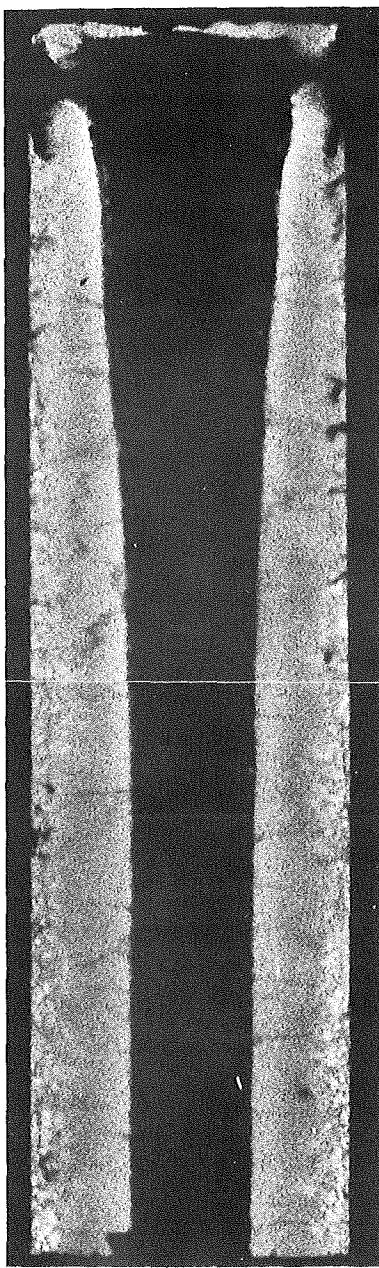
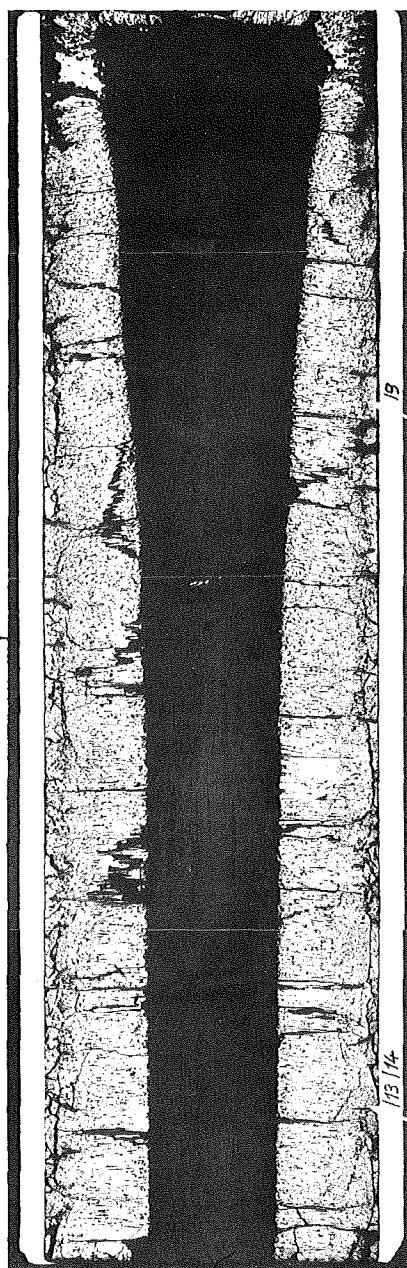
Einrichtung : NaK/PbBi-Doppel-
Kapsel Typ 4a
Dauer : 127,2 Vollasttage
Ende : 17. 3. 69
Rechn. Abbrand mittl. : 25,1 MWd/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 371 / 336 W/cm



A

B

C



1mm

Prüfling 4B-33

Brennstoff:

Form : Pulver

Zusammensetzung : UO_2-PuO_2

Tablettendichte : _____

Hülle:

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 6,0 mm

Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie:

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : _____

Schmierdichte : 80% th.D.

Bestrahlung:

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

Dauer : 127,2 Vollasttage

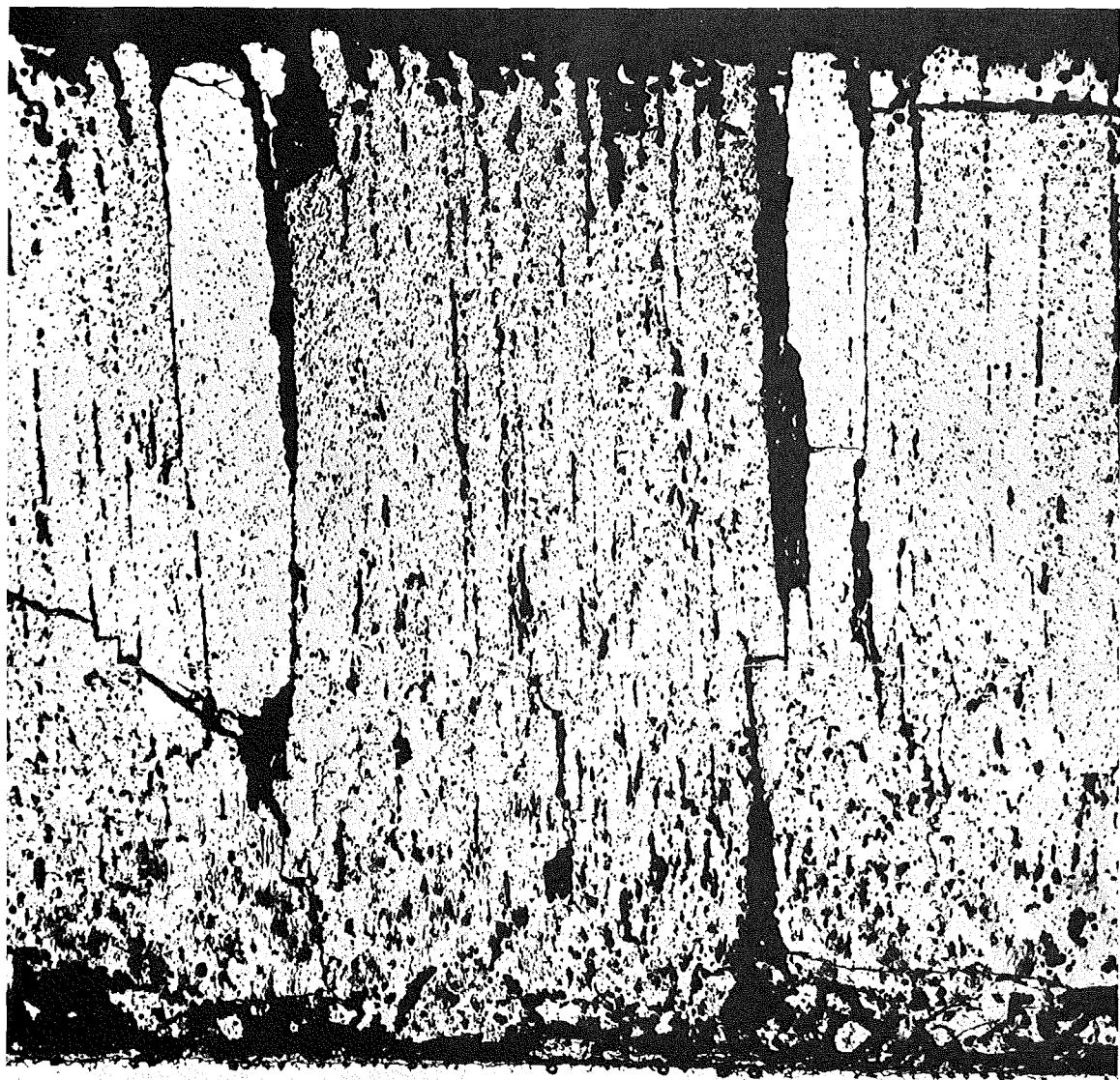
Ende : 17. 3. 69

Rechn. Abbrand mittl. : 25,4 MWD/kg Metall

Stableistung max./mittl. : 466 / 336 W/cm



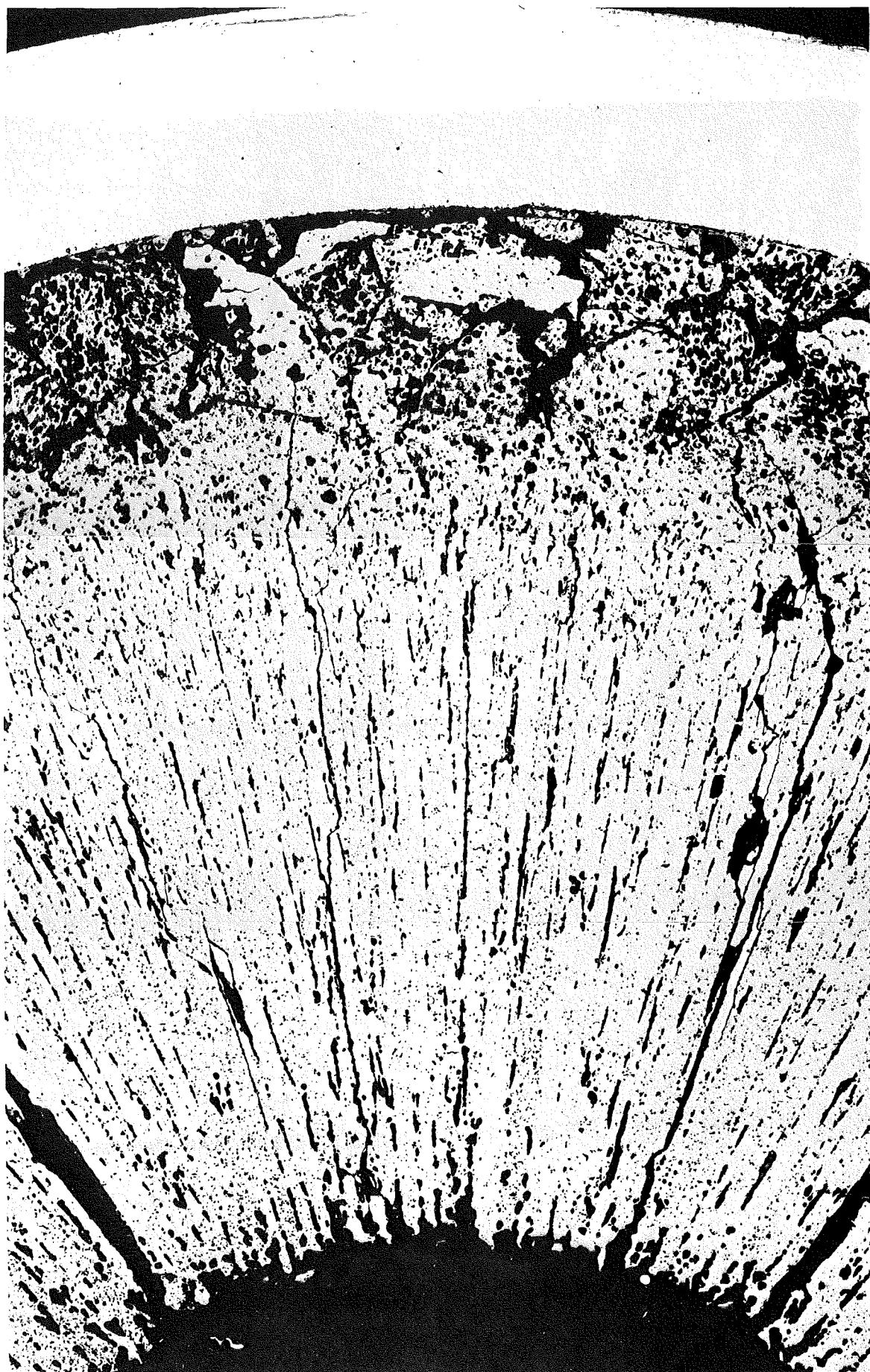
- I/21-
zu Prüfling 4B/31
A1



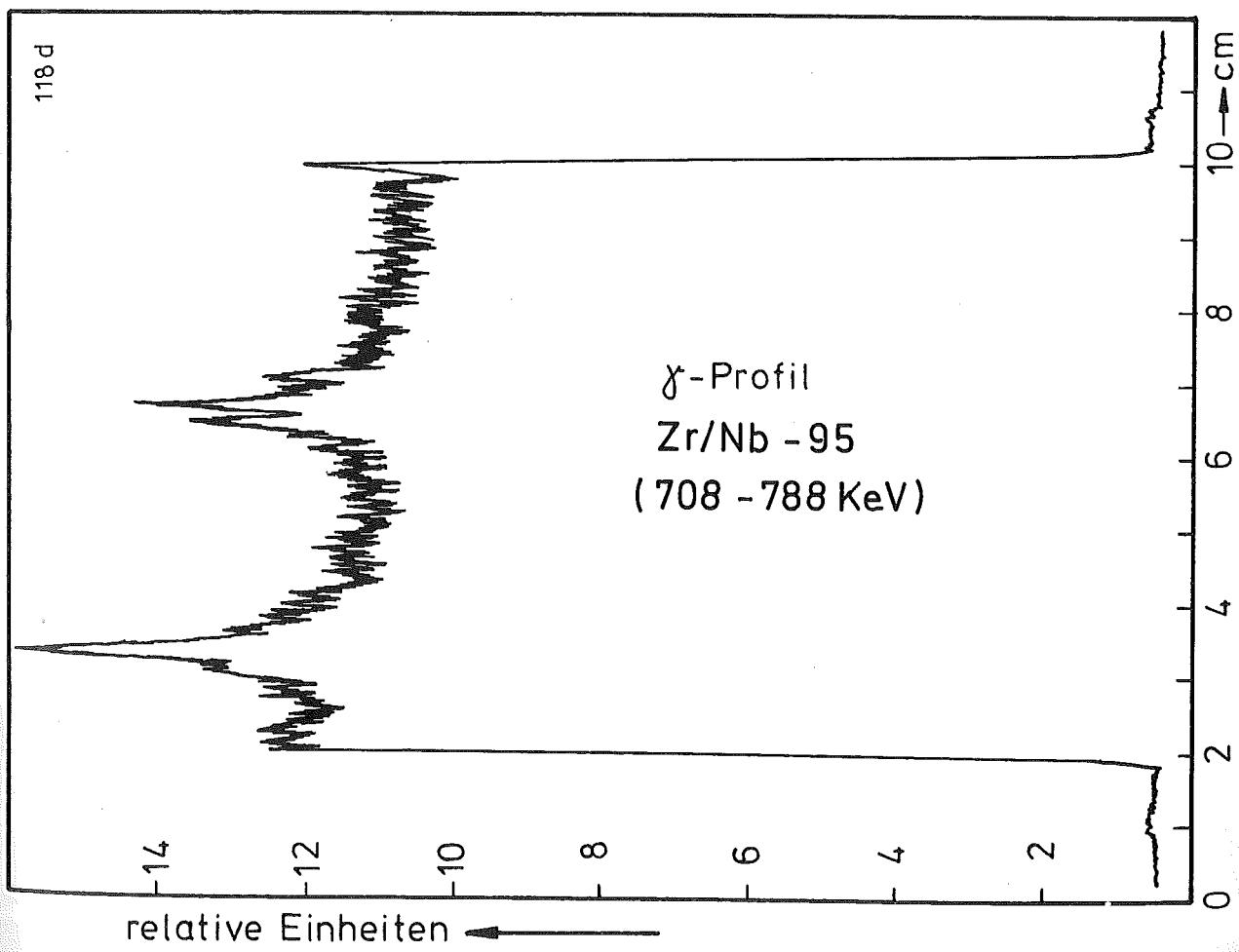
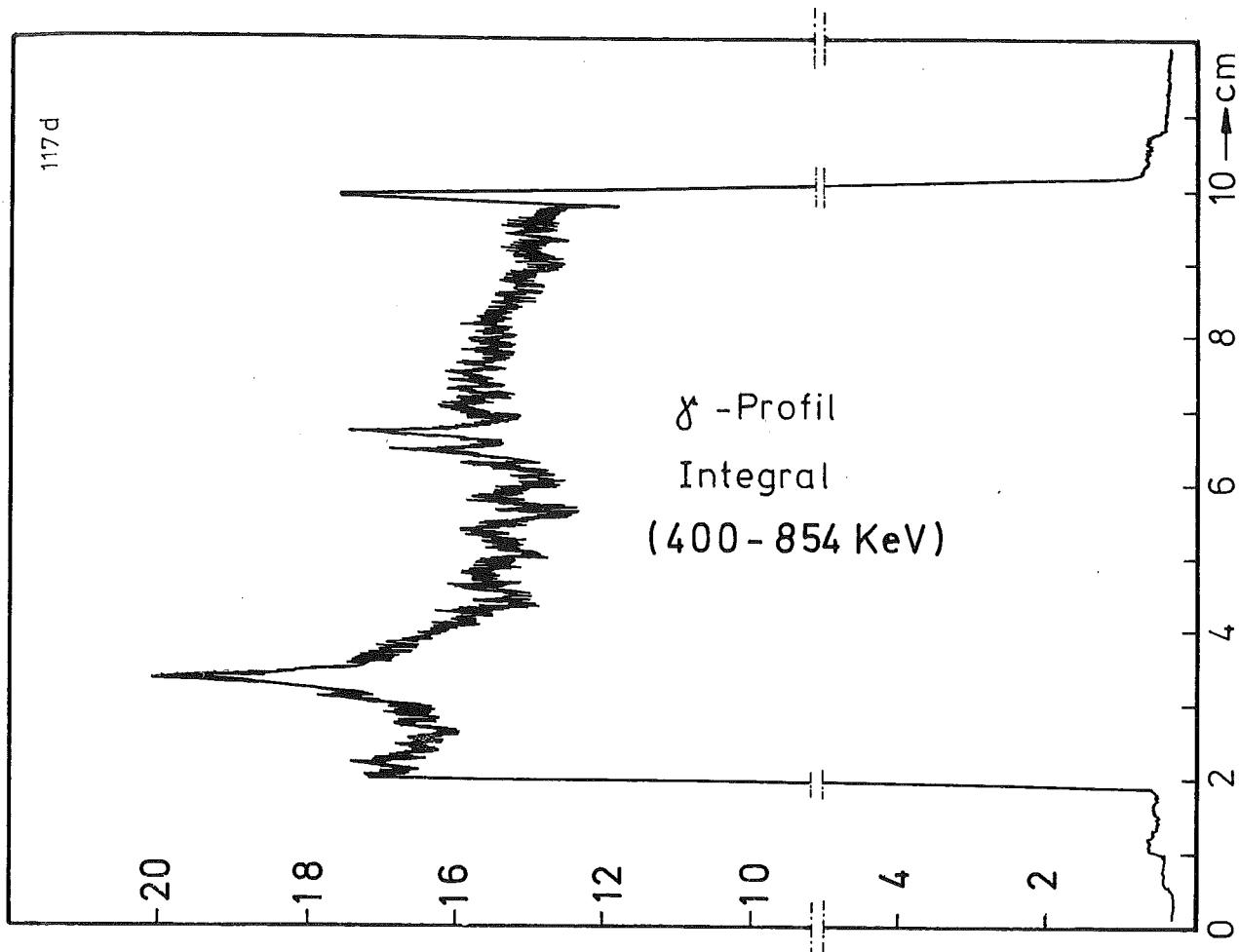
01-44-4B/31-1/10 100 x geätzt

0,1 mm

-I/22-
zu Prüfling 4B/31
A2



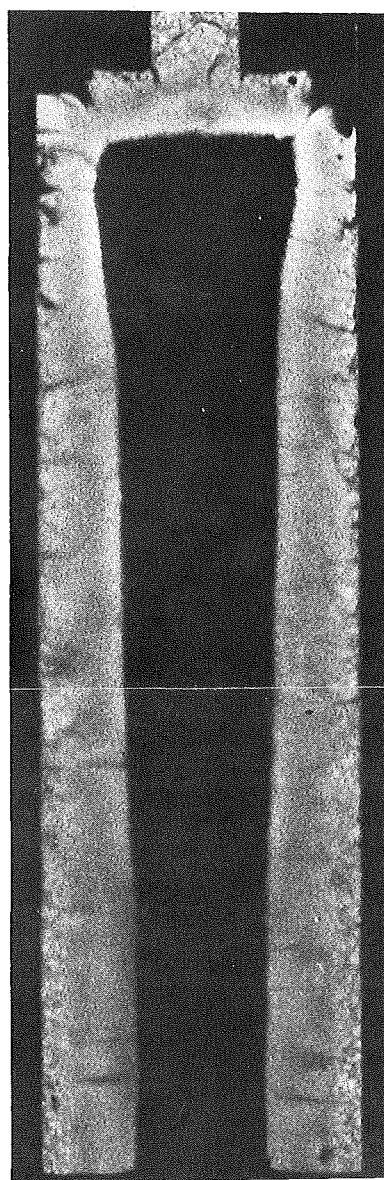
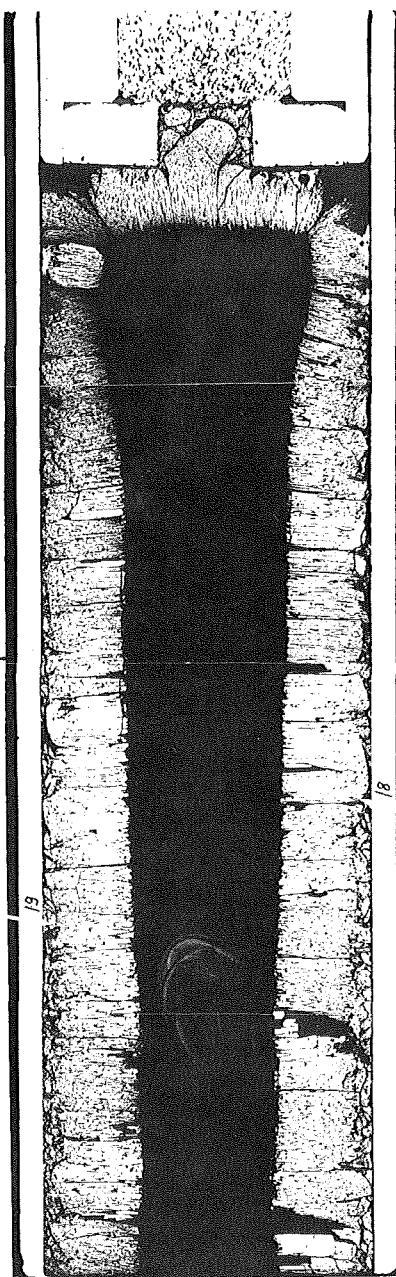
0,1mm



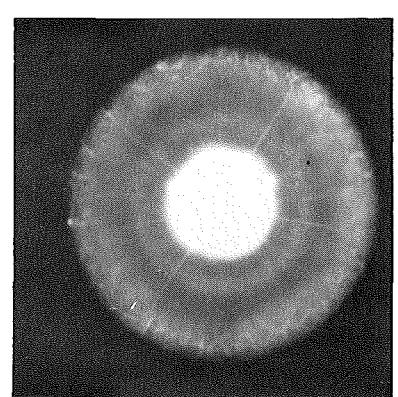
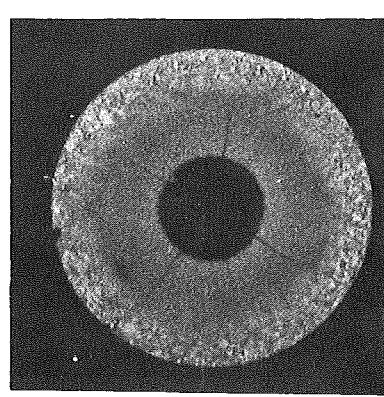
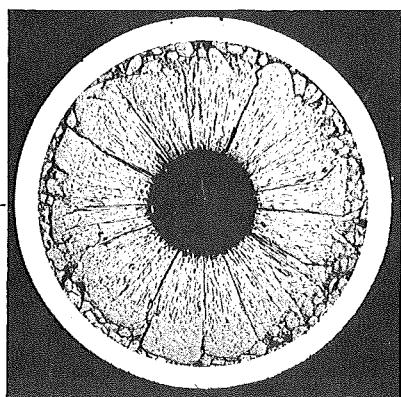
A

B

C



1



2

1 mm

Prüfling 4B-31



Brennstoff:

Form : Pulver
Zusammensetzung : $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$
Tablettendichte : _____

Hülle:

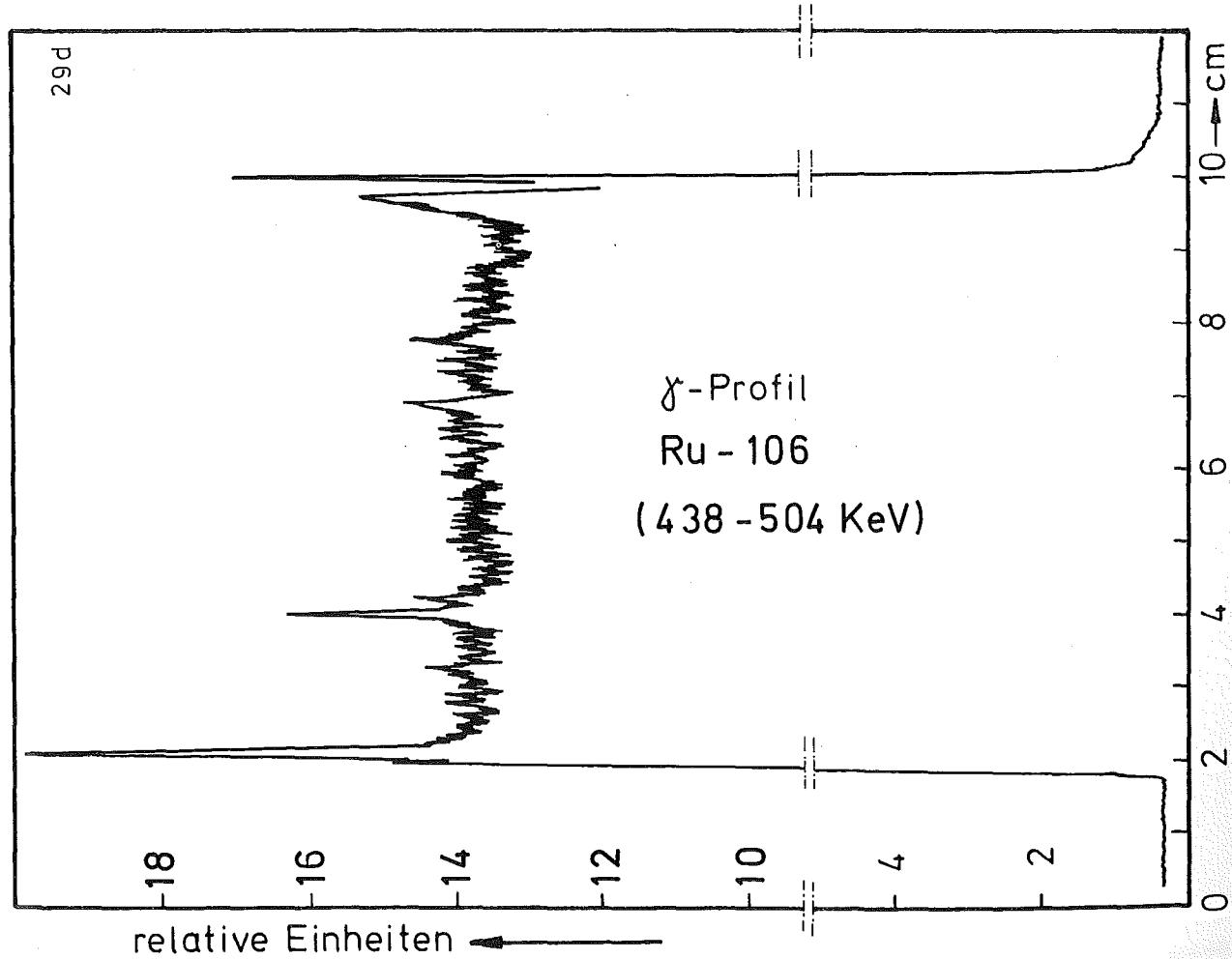
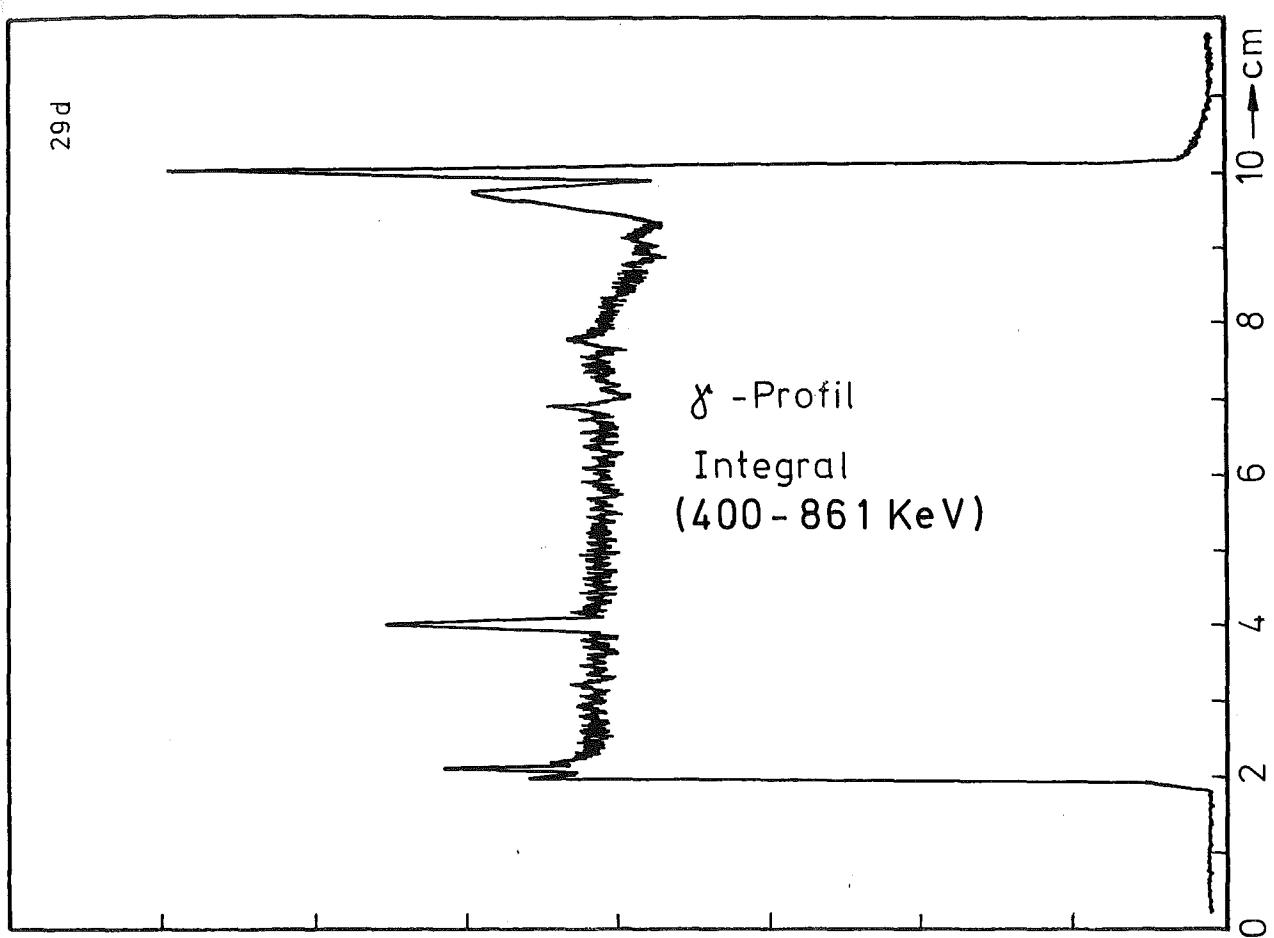
Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,0 mm
Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie:

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : _____
Schmierdichte : 80% th.D.

Bestrahlung:

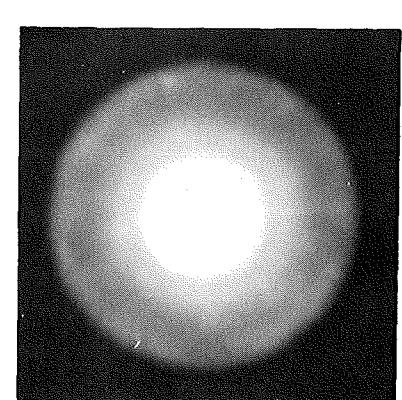
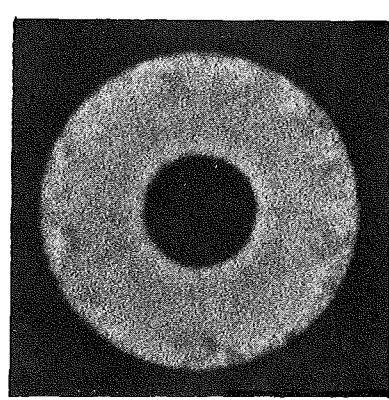
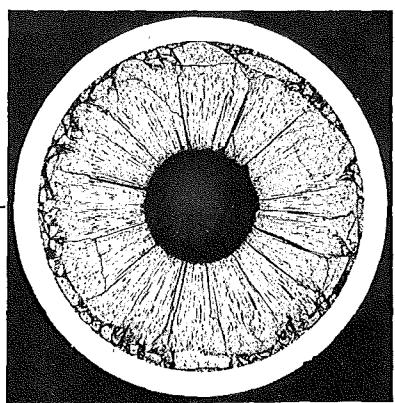
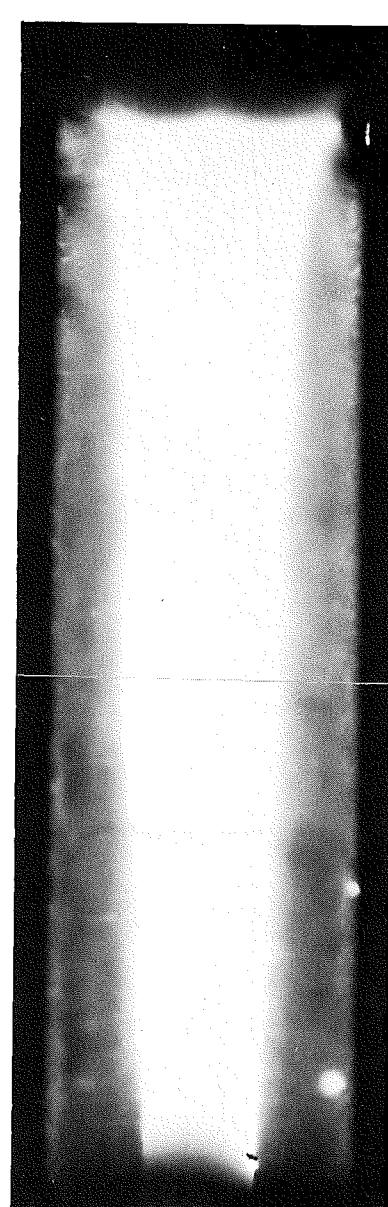
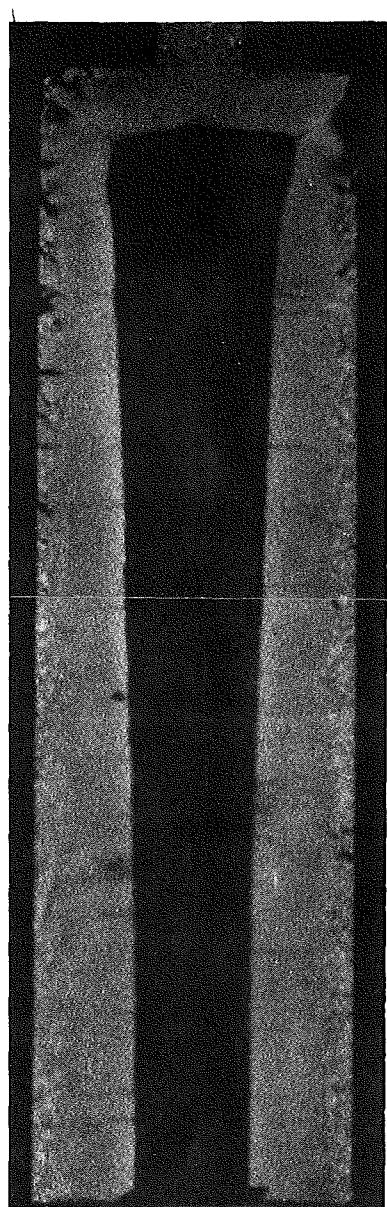
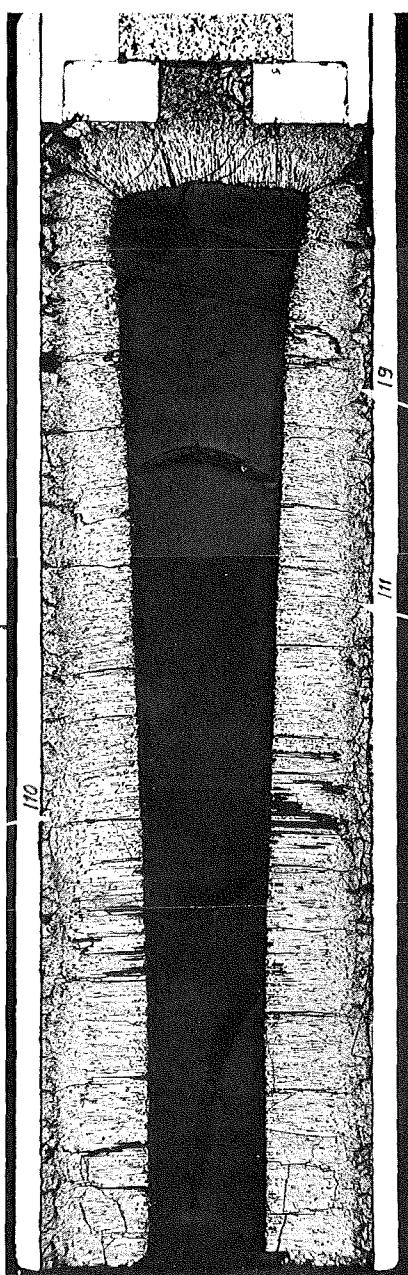
Einrichtung : NaK/PbBi-Doppel-
Kapsel Typ 4a
Dauer : 127,2 Vollasttage
Ende : 17. 3. 69
Rechn. Abbrand mittl. : 23,8 MWd/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 433 / 320 W/cm



A

B

C



1mm



Prüfling 4B-29

Brennstoff:

Form : Pulver
Zusammensetzung : UO_2-PuO_2
Tablettendichte : _____

Hülle:

Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,0 mm
Wandstärke : 0,38 mm

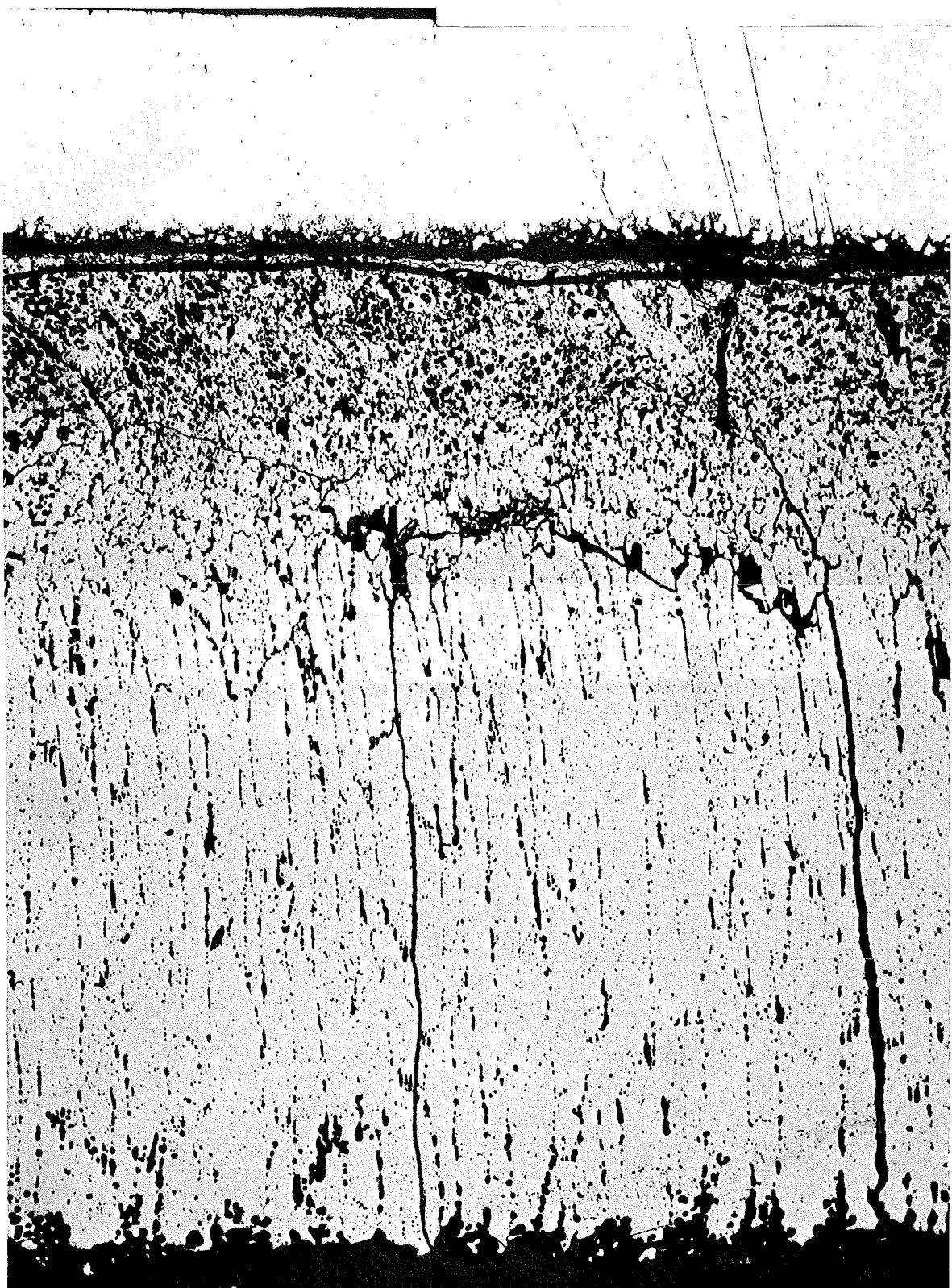
Geometrie:

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : _____
Schmierdichte : 80% th.D.

Bestrahlung:

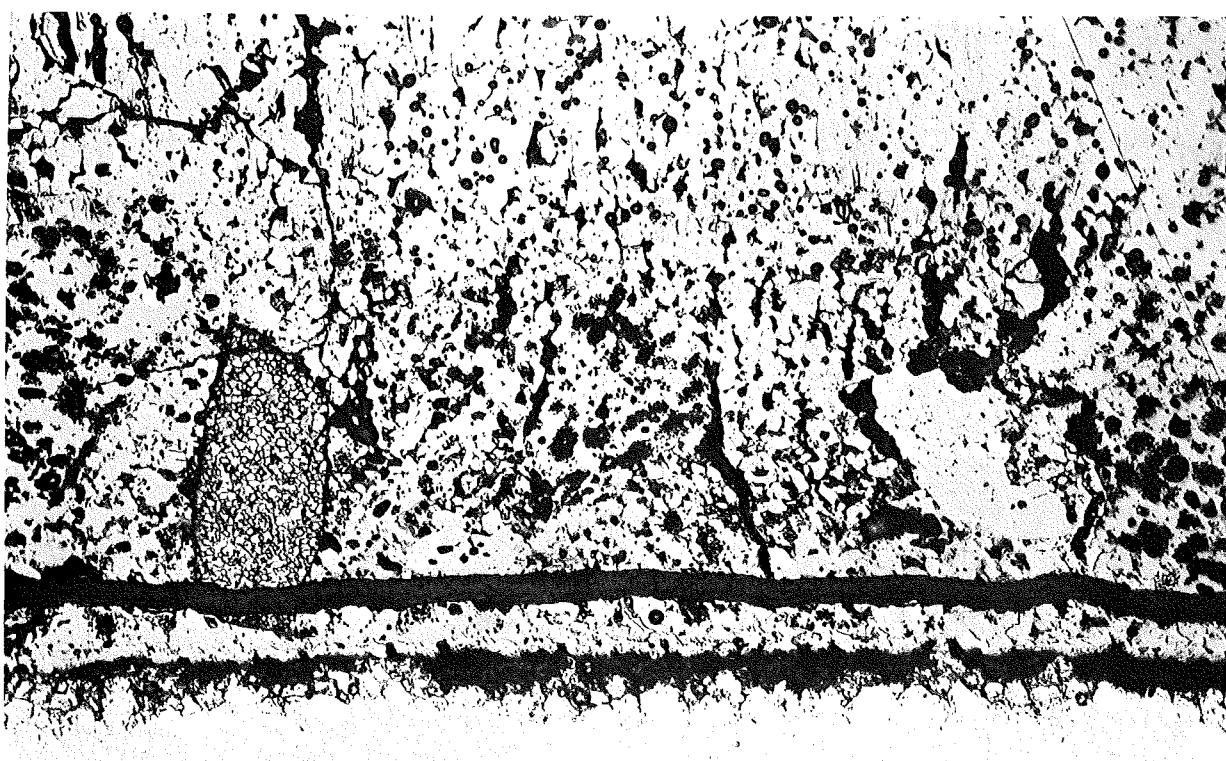
Einrichtung : NaK/PbBi-Doppel-
Kapsel Typ 4a
Dauer : 67,4 Vollasttage
Ende : 12. 2. 69
Rechn. Abbrand mittl. : 17,1 MWD/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 544 / 430 W/cm

- I/27-
zu Prüfling 4B/28
A1

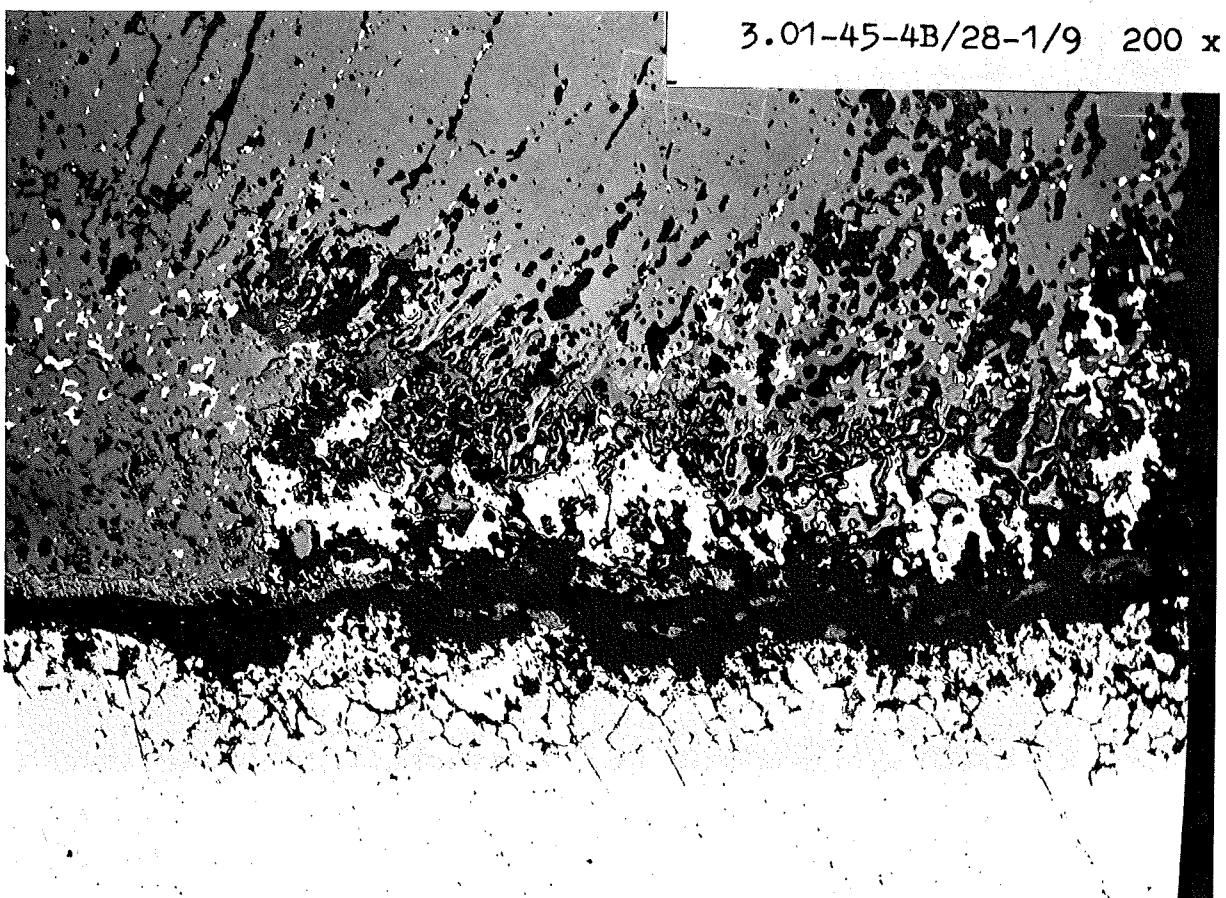


0,1mm

- I/28 -
zu Prüfling 4B/28
A1

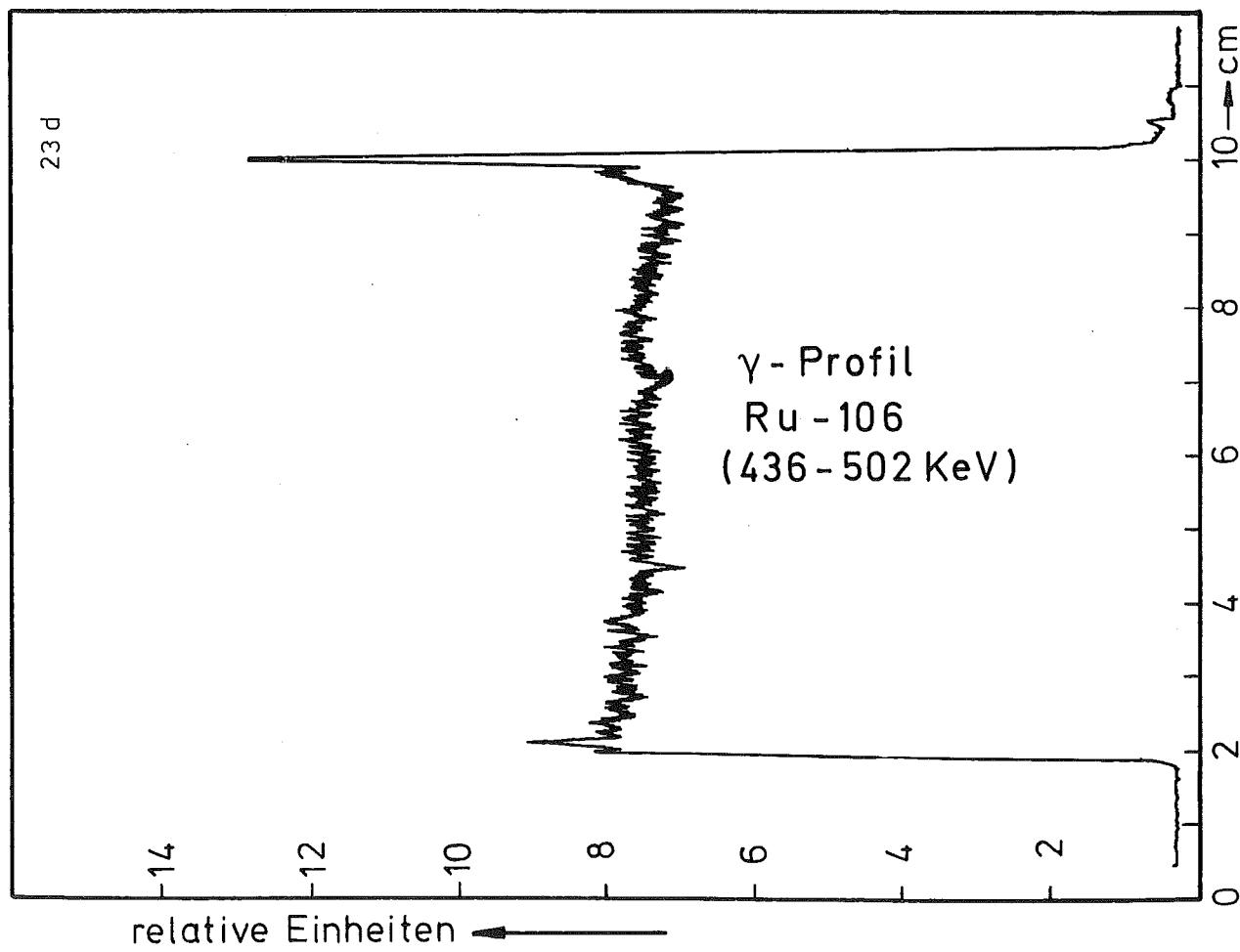
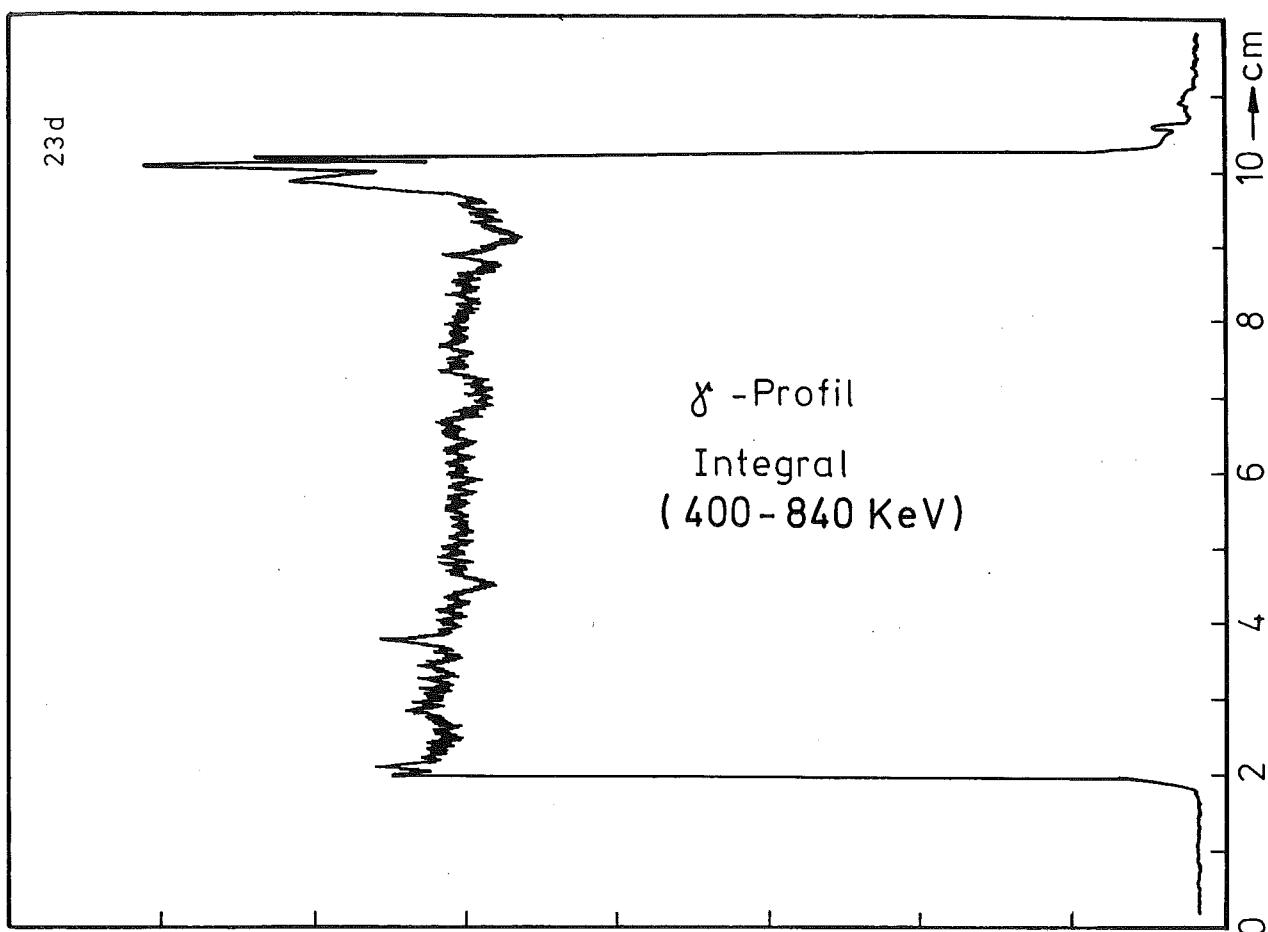


3.01-45-4B/28-1/19 200 x



3.01-45-4B/28-1/9 200 x

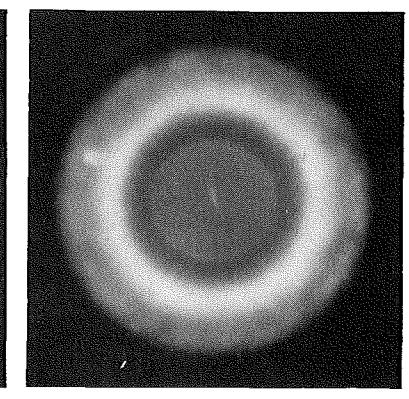
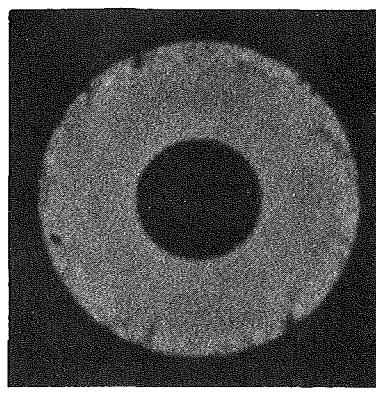
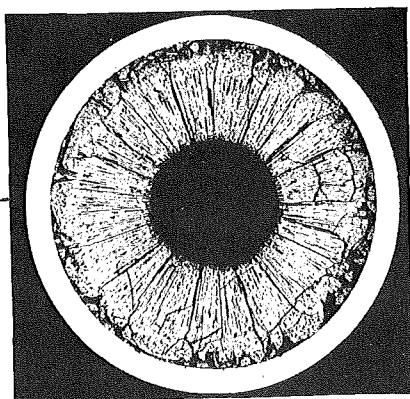
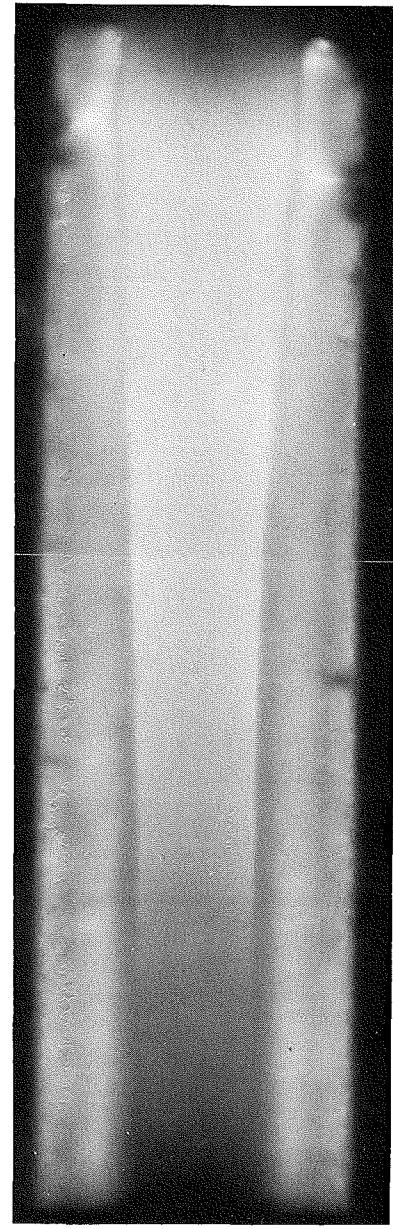
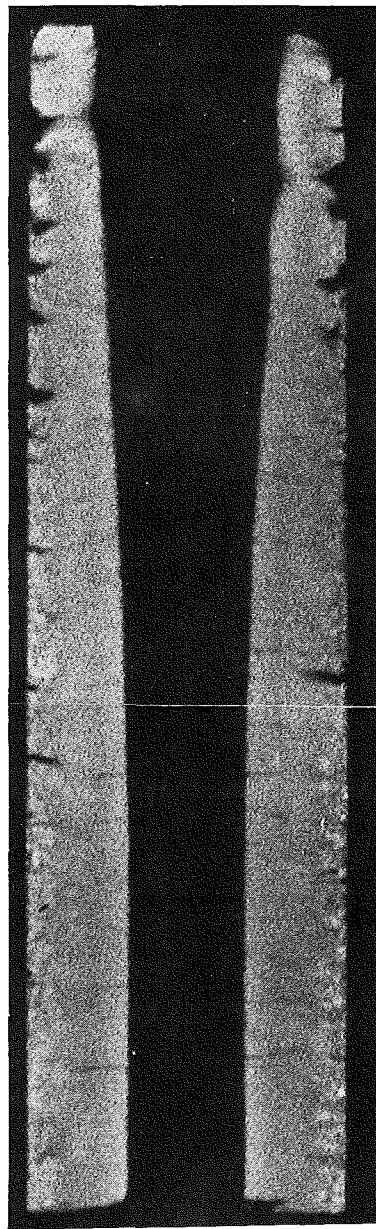
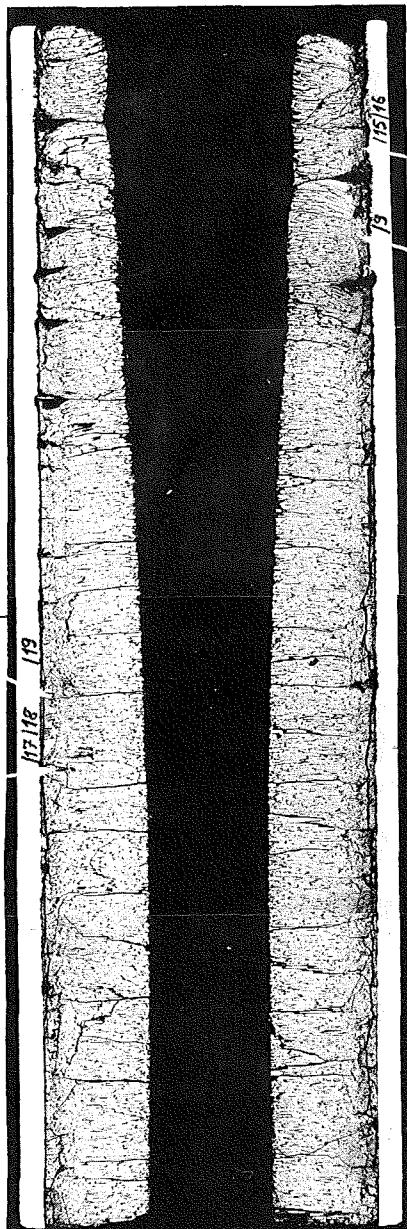
0,1 mm



A

B

C



1mm



Prüfling 4B-28

Brennstoff:

Form : Pulver

Zusammensetzung : UO_2-PuO_2

Tablettendichte : —

Hülle:

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 6,0 mm

Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie:

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : —

Schmierdichte : 80% th.D.

Bestrahlung:

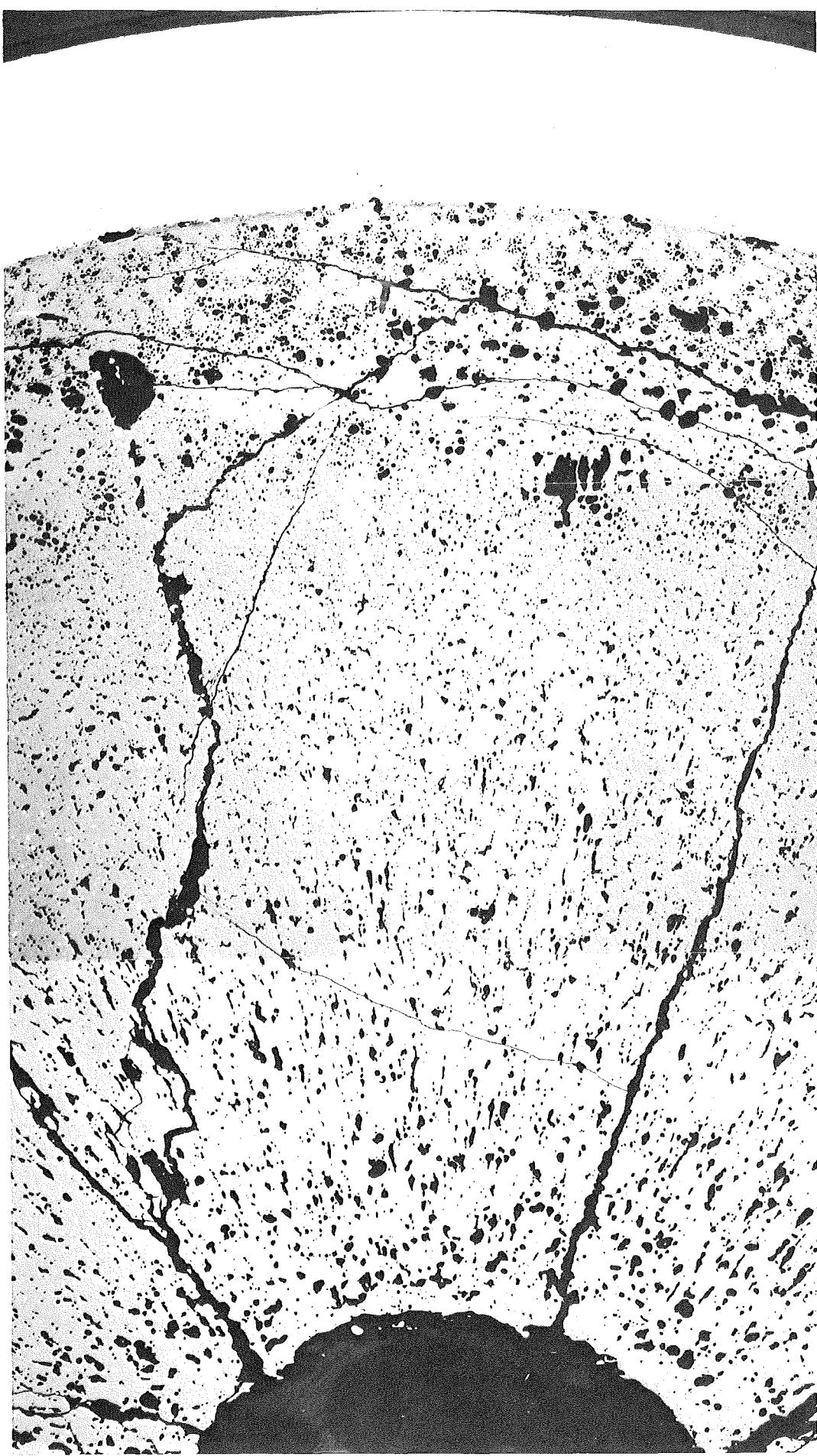
Einrichtung : NaK/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4a

Dauer : 67,4 Vollasttage

Ende : 12. 2. 69

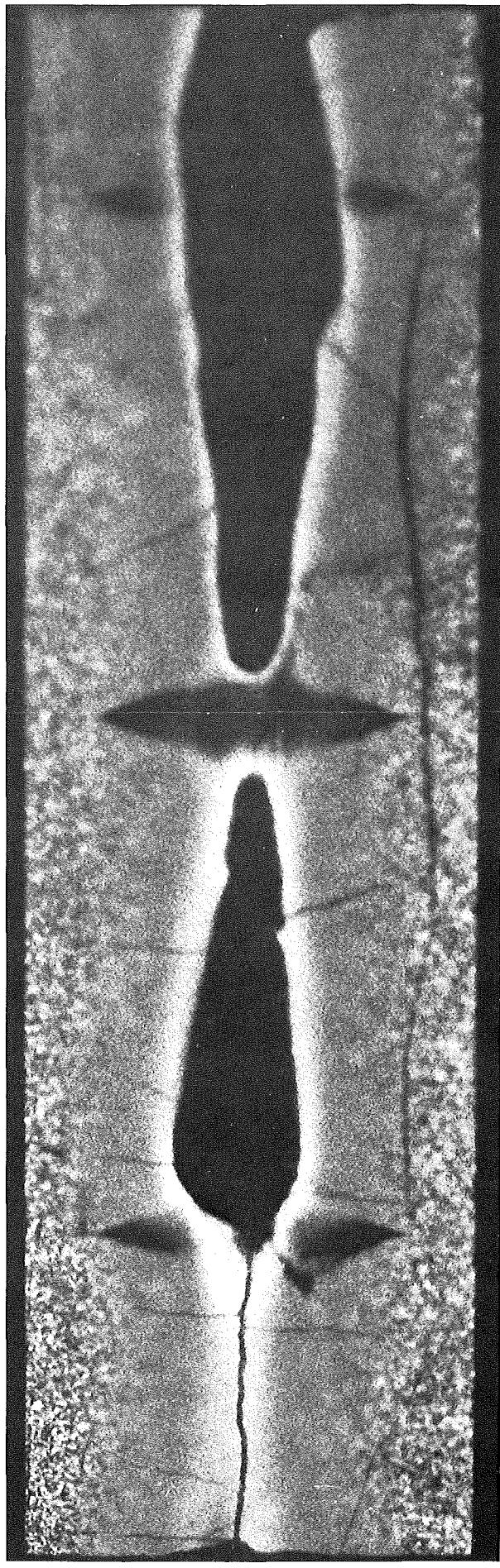
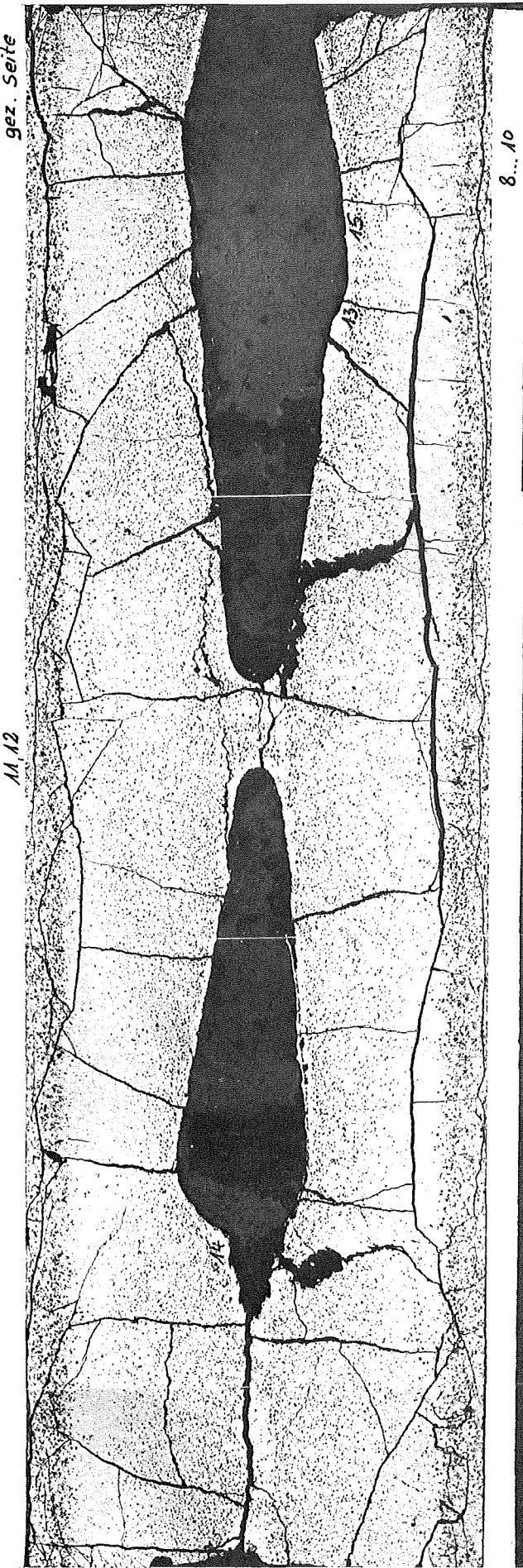
Rechn. Abbrand mittl. : 17,1 MWD/kg Metall

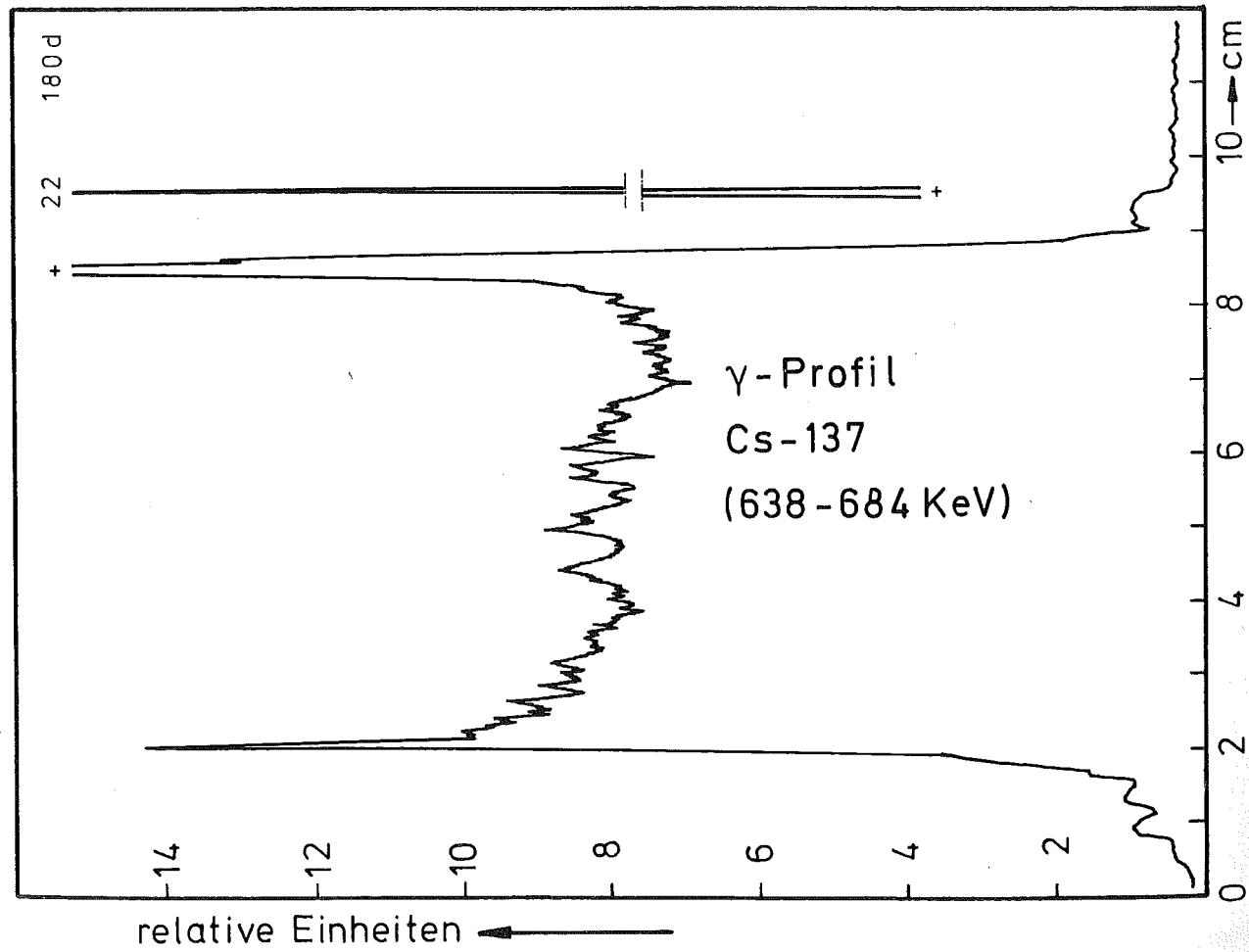
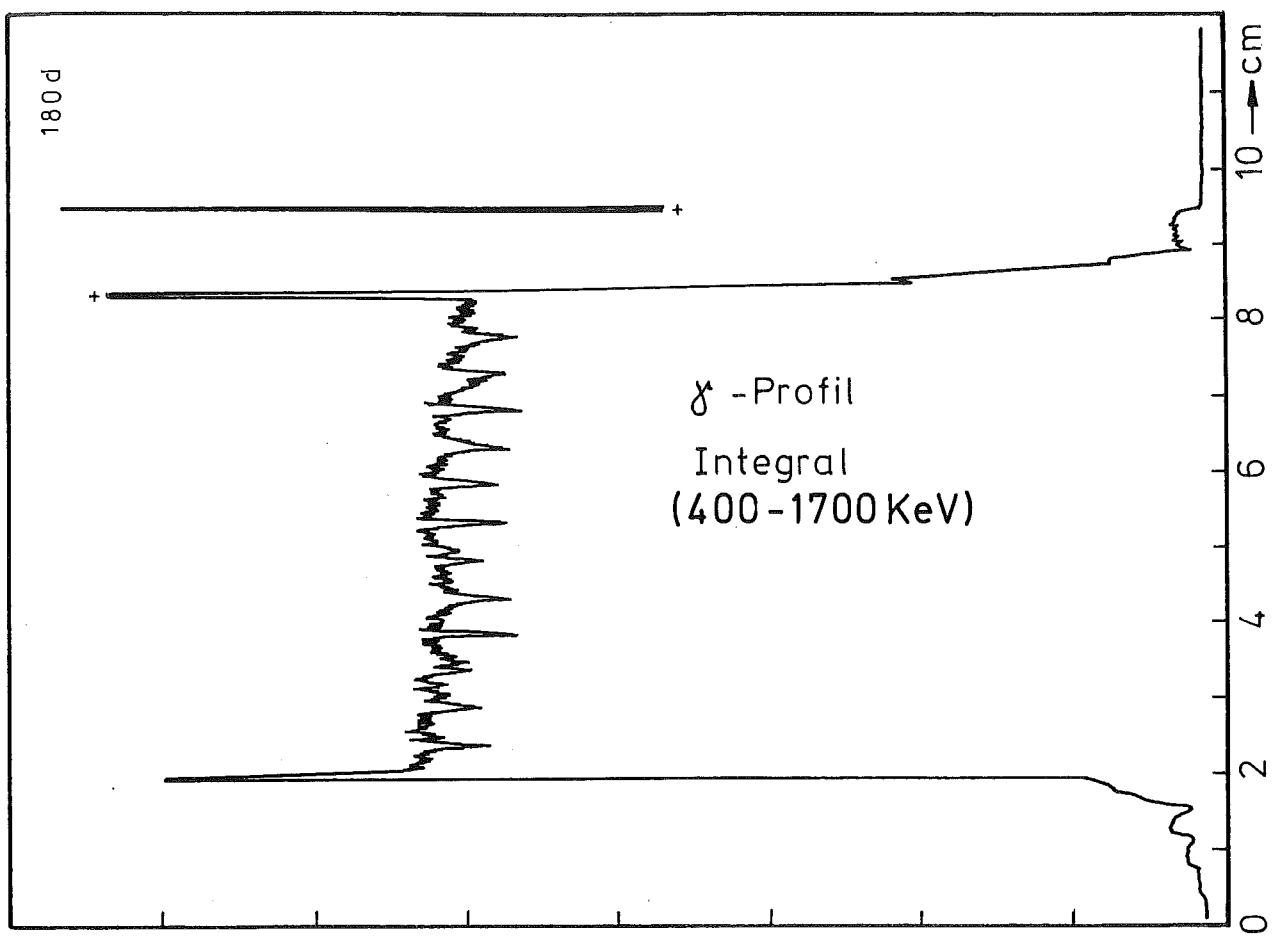
Stableistung max./mittl. : 1102 / 433 W/cm



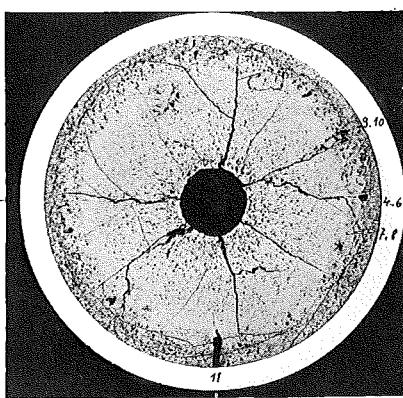
A3

B3





A





Prüfling 4B-4

Brennstoff:

Form : Tabletten beidseitige Einsenkung
Zusammensetzung : UO_2-PuO_2
Tablettendichte : 90% th.D.

Hülle:

Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,00 mm
Wandstärke : 0,38 mm

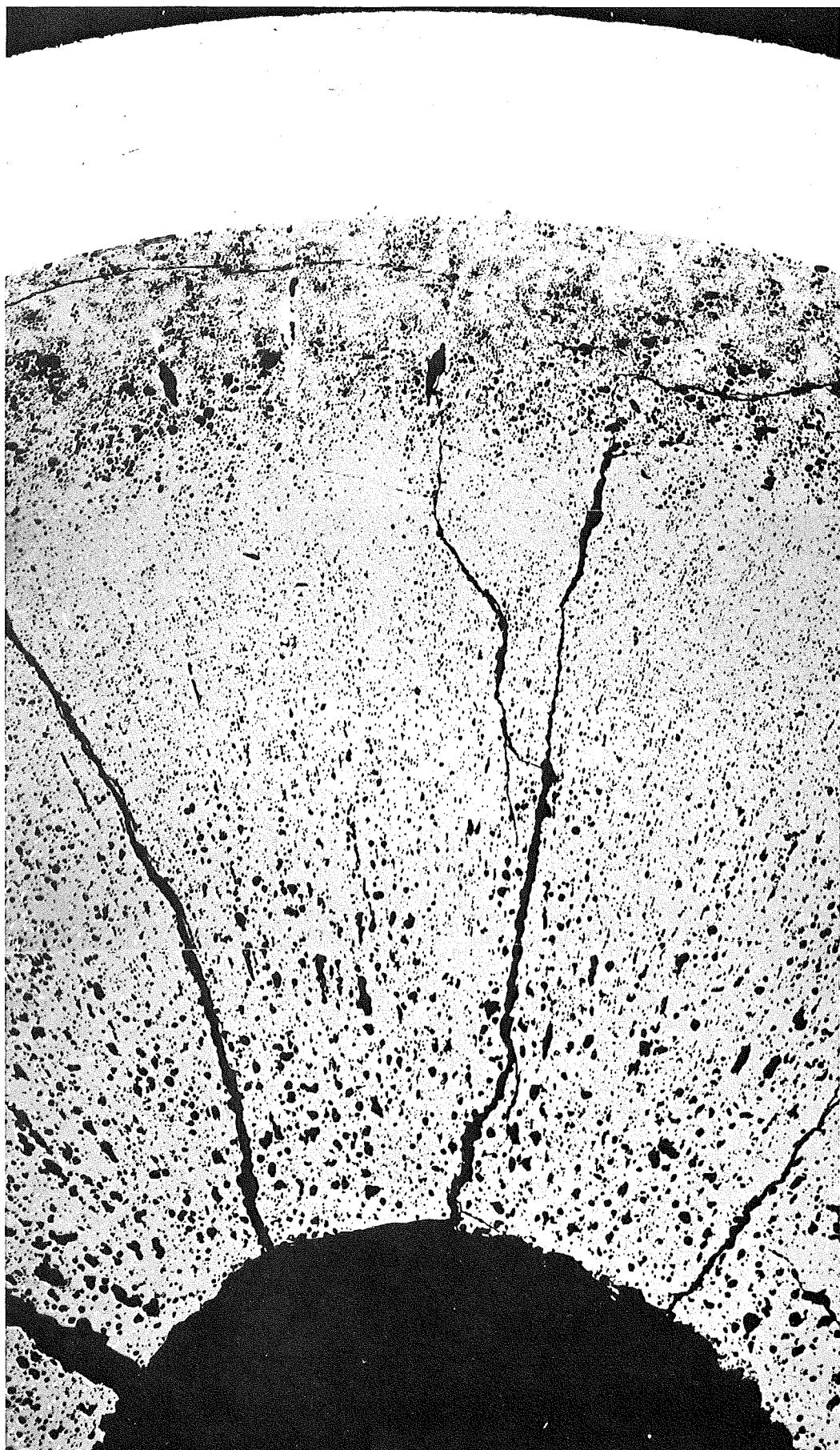
Geometrie:

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,070 mm
Schmierdichte : 85,3% th.D.

Bestrahlung:

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4a
Dauer : 484,3 Vollasttage
Ende : 21. 9. 70
Rechn. Abbrand mittl. : 85,3 MWd/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 444 / 313 W/cm

- I/35 -
zu Prüfling 4B/3
A1



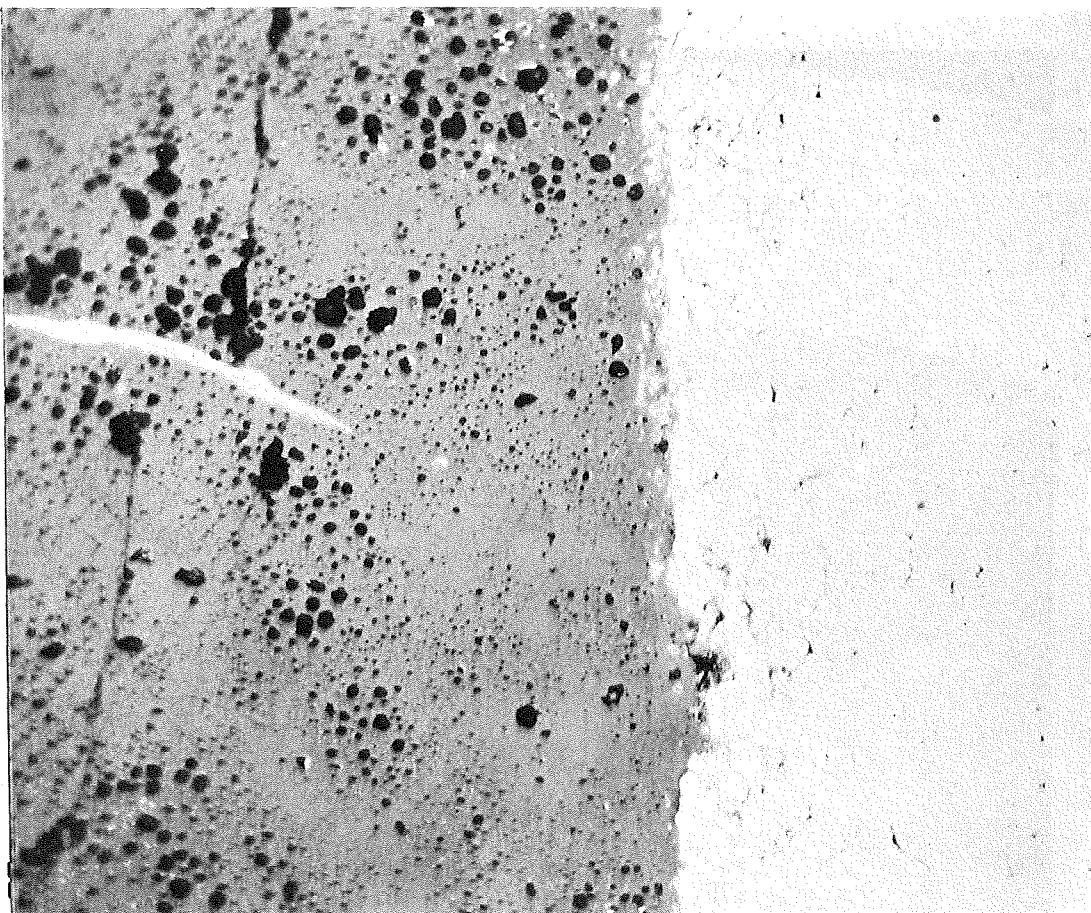
4-6

0,1mm

- I/36 -
zu Prüfling 4B/3

A1

HZ-3a-47-433-1/8 500x

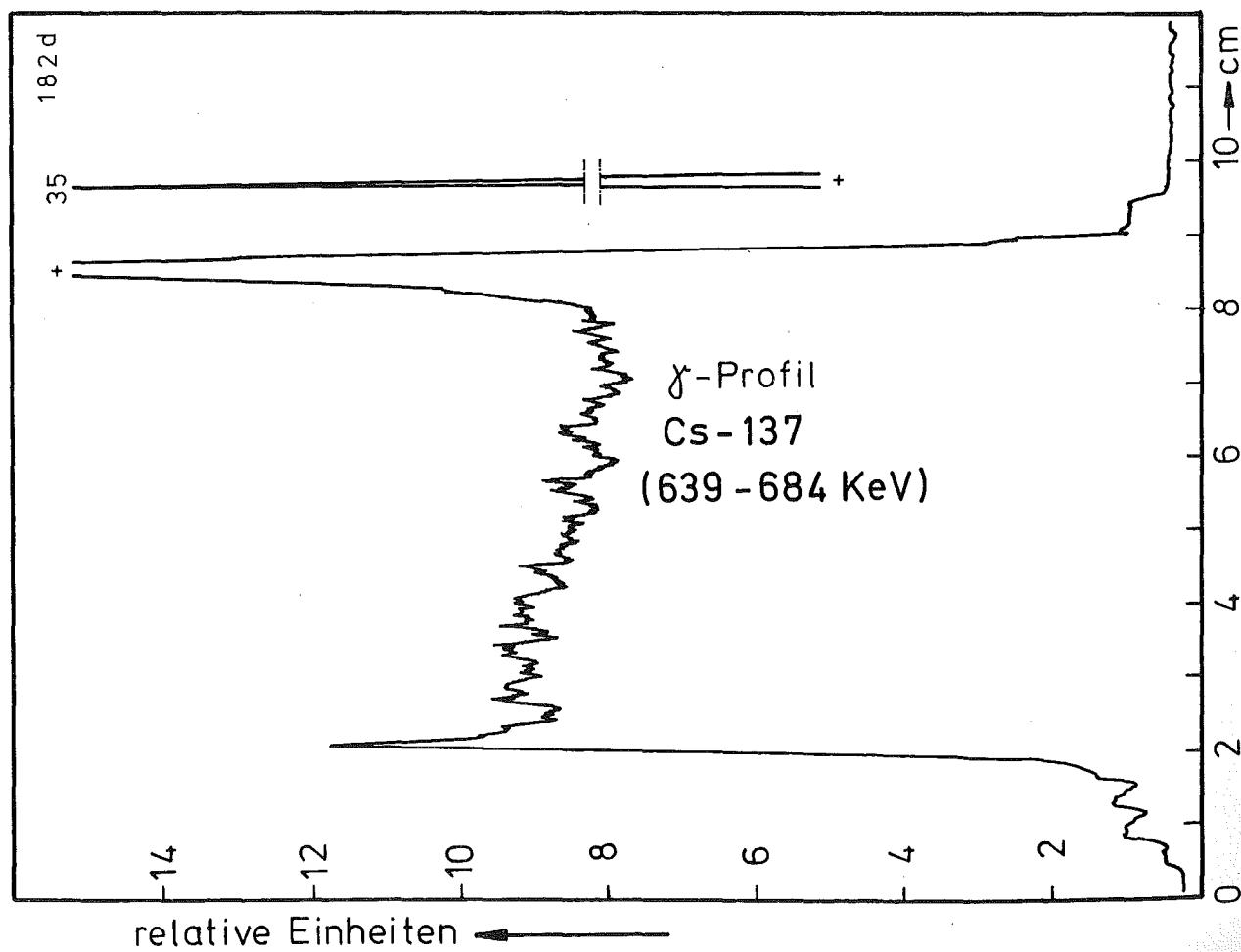
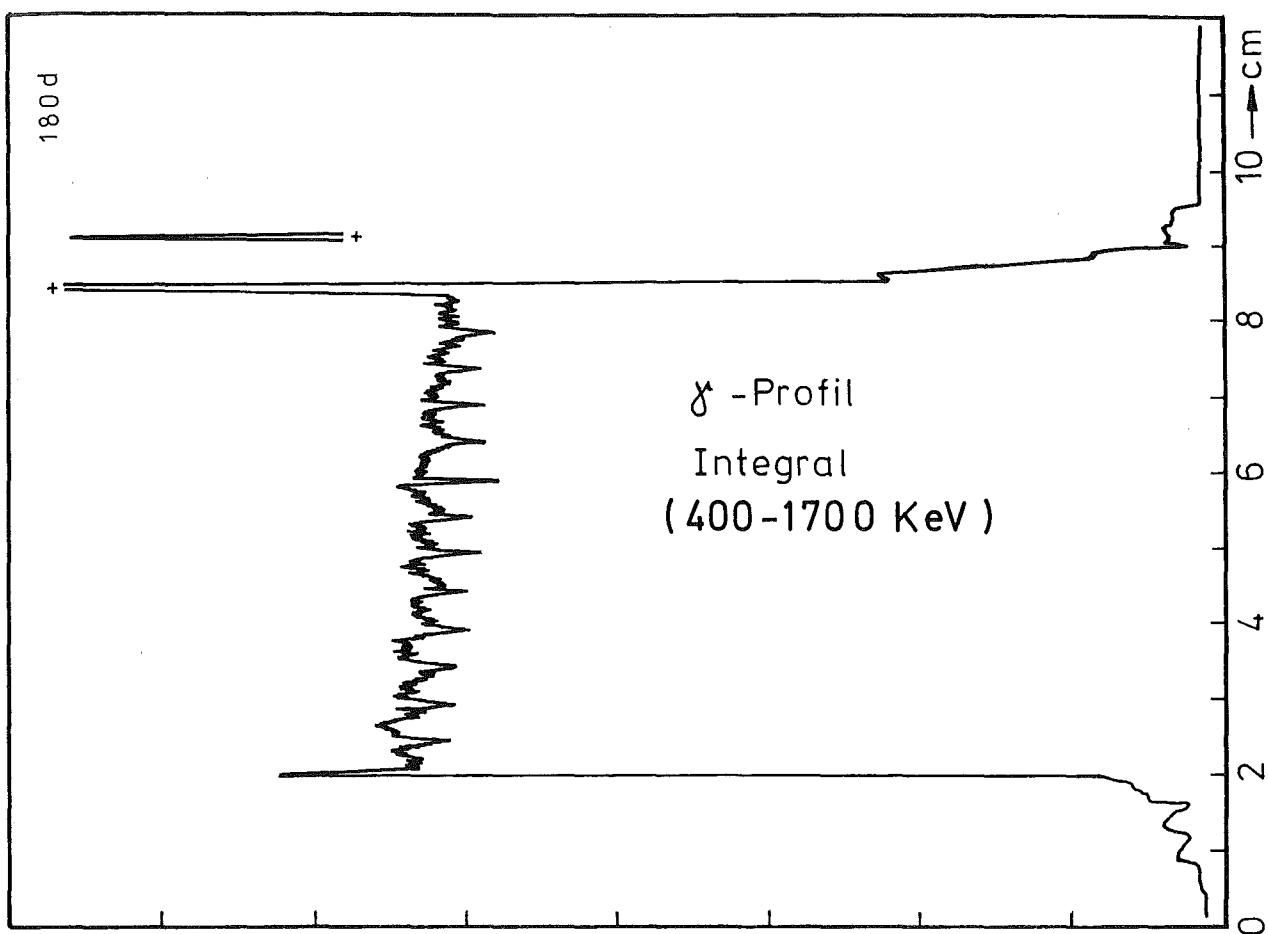


0.04 mm

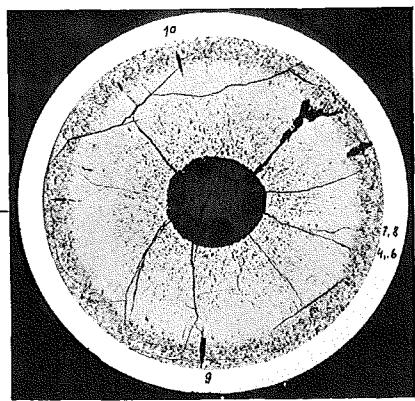
HZ-3a-47-433-1/10 200x



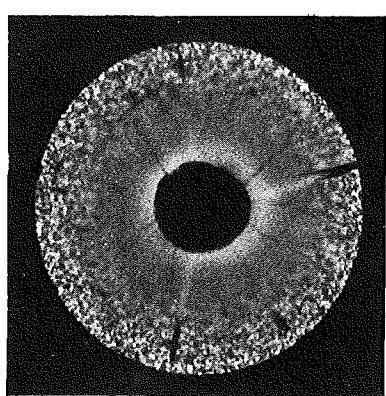
0.1 mm



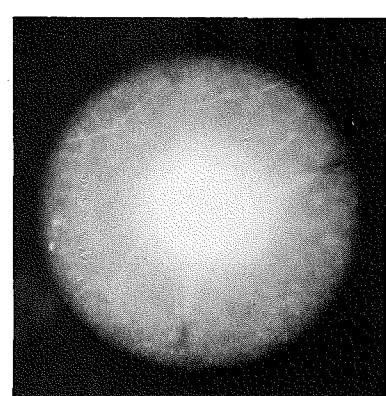
A



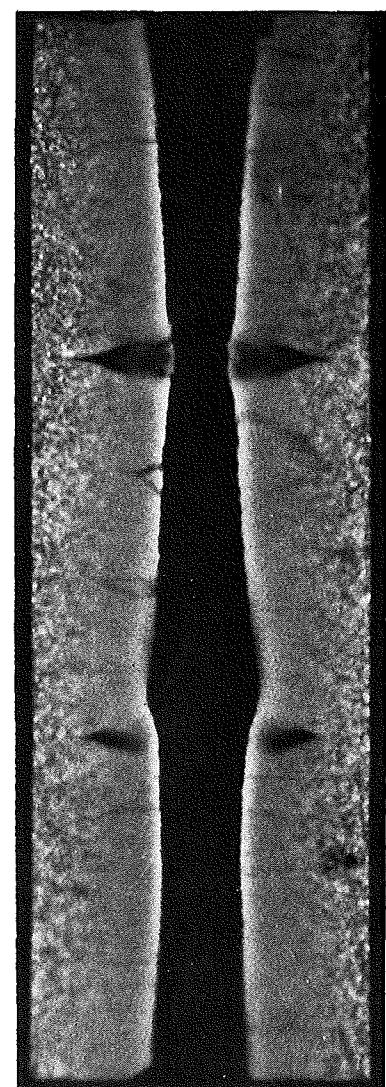
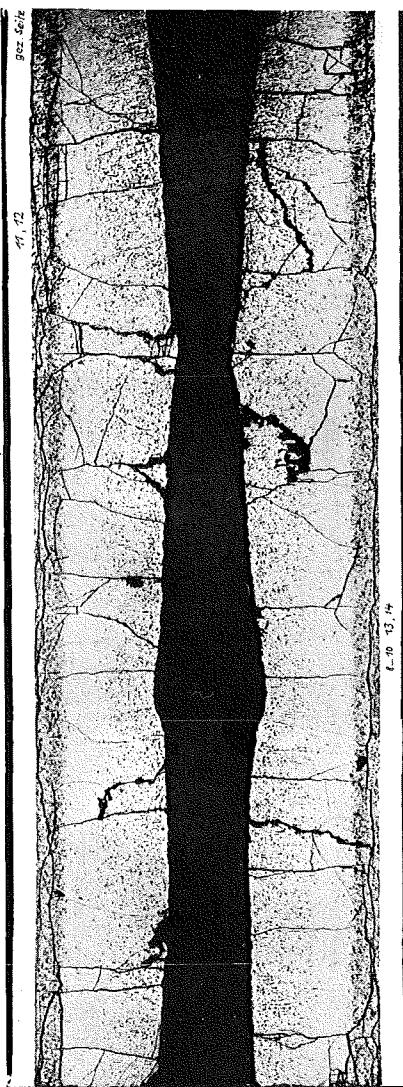
B



C



1



2



1mm

Prüfling 4B-3



Brennstoff:

Form : Tabletten beidseitige Einsenkung
Zusammensetzung : UO_2-PuO_2
Tablettendichte : 90% th.D.

Hülle:

Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,00 mm
Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie:

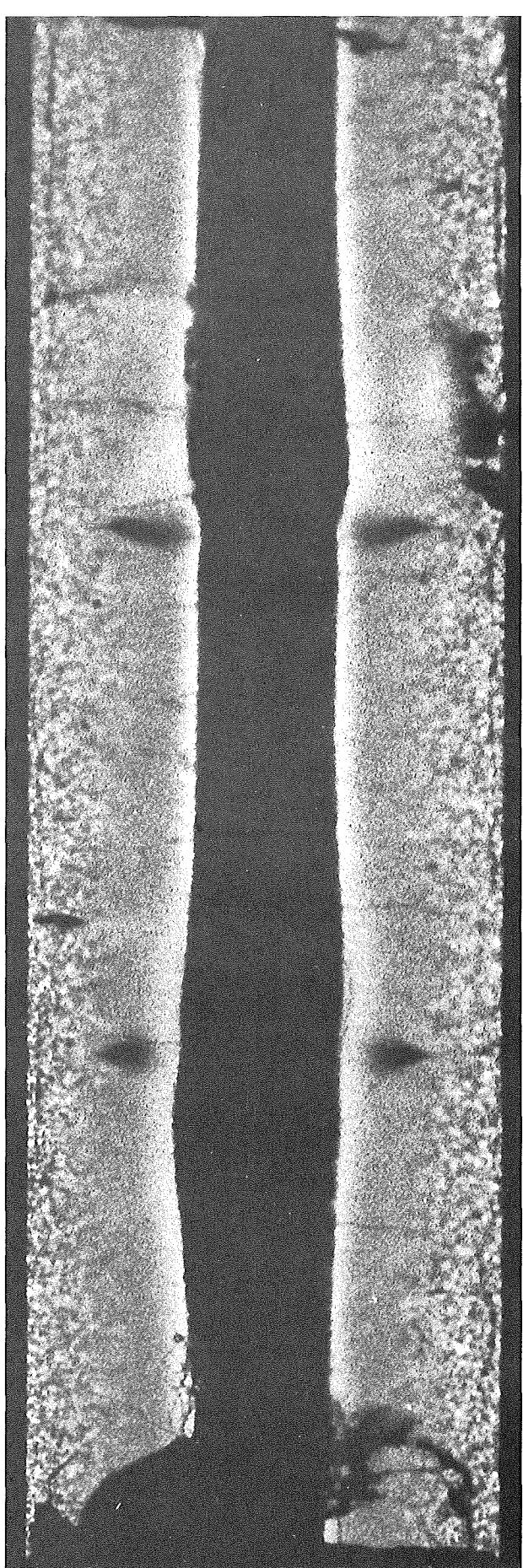
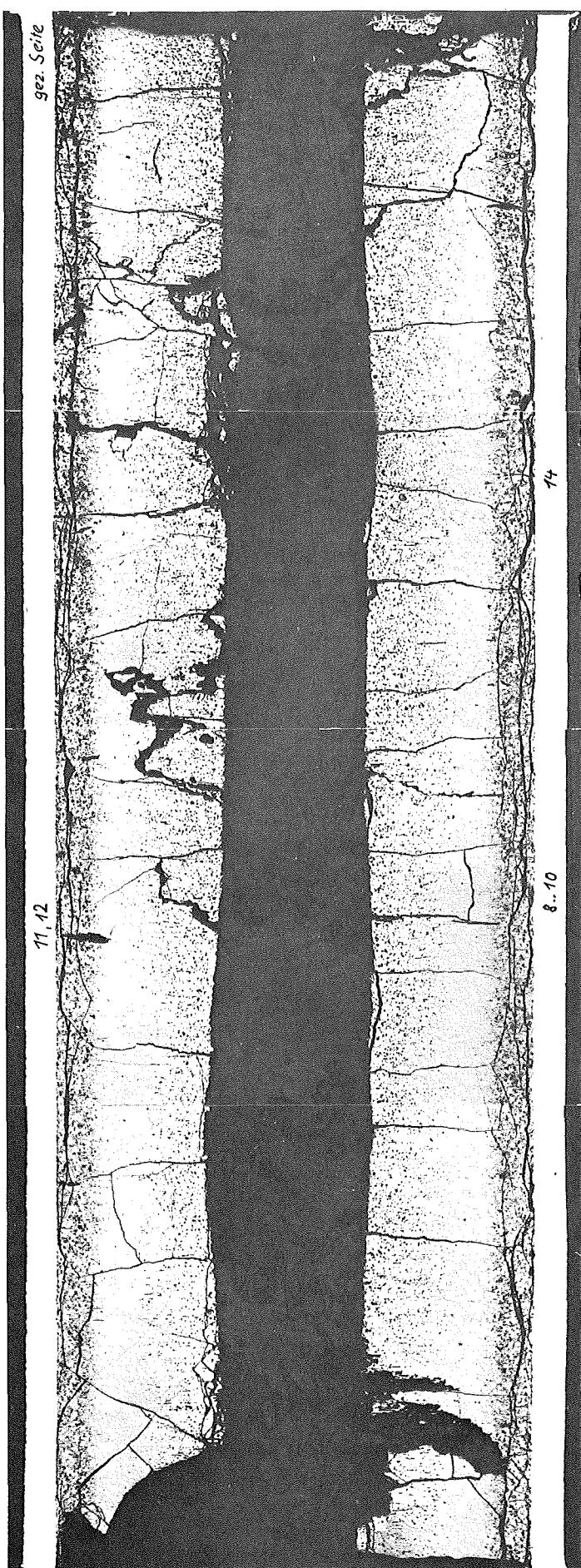
Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,070 mm
Schmierdichte : 85,3% th.D.

Bestrahlung:

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppelkapsel Typ 4a
Dauer : 484,3 Vollasttage
Ende : 21. 9. 70
Rechn. Abbrand mittl. : 74,6 MWd/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 444 / 273 W/cm

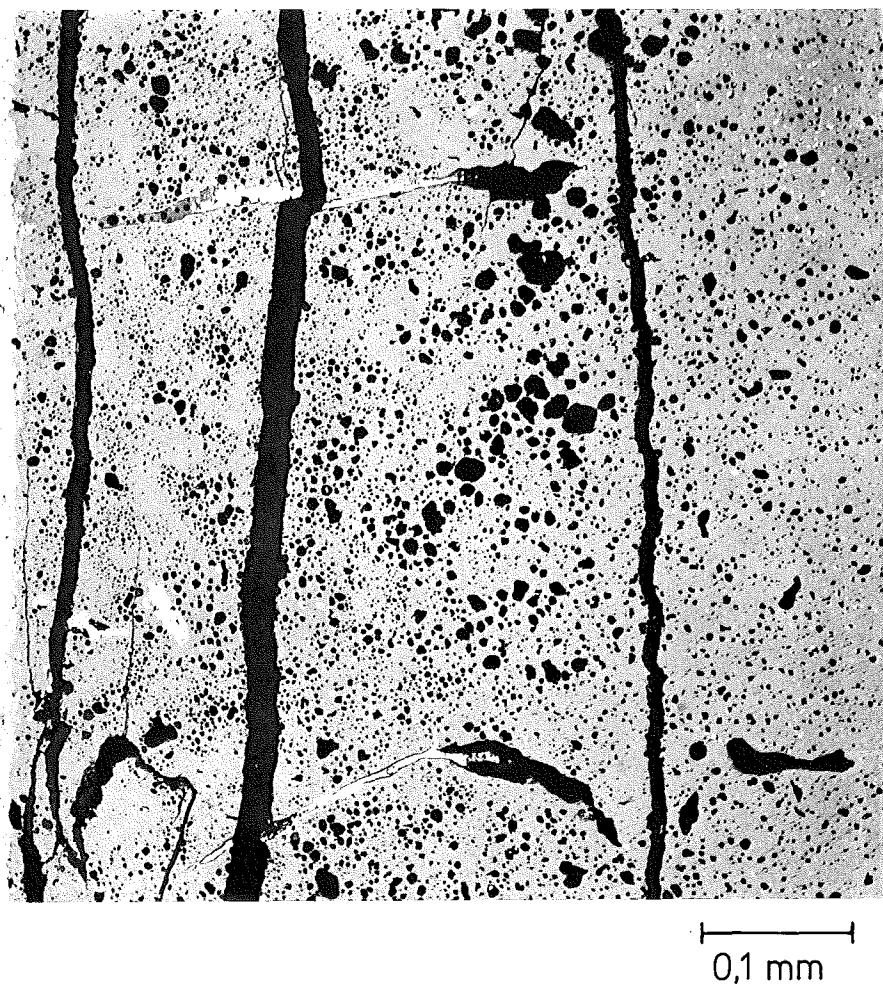
A 2

B 2



1mm

- I/40 -
zu Prüfling 4B/2
A2



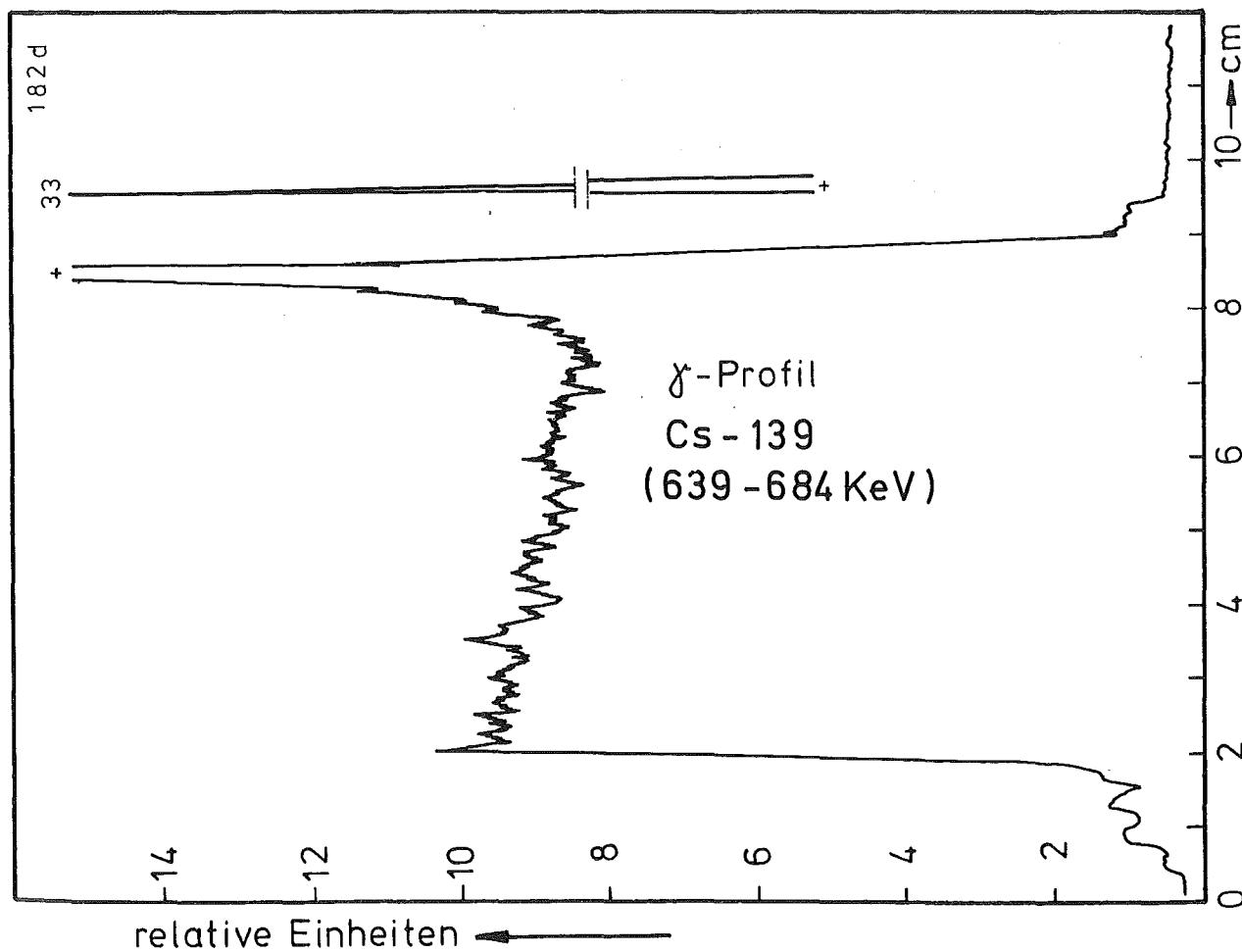
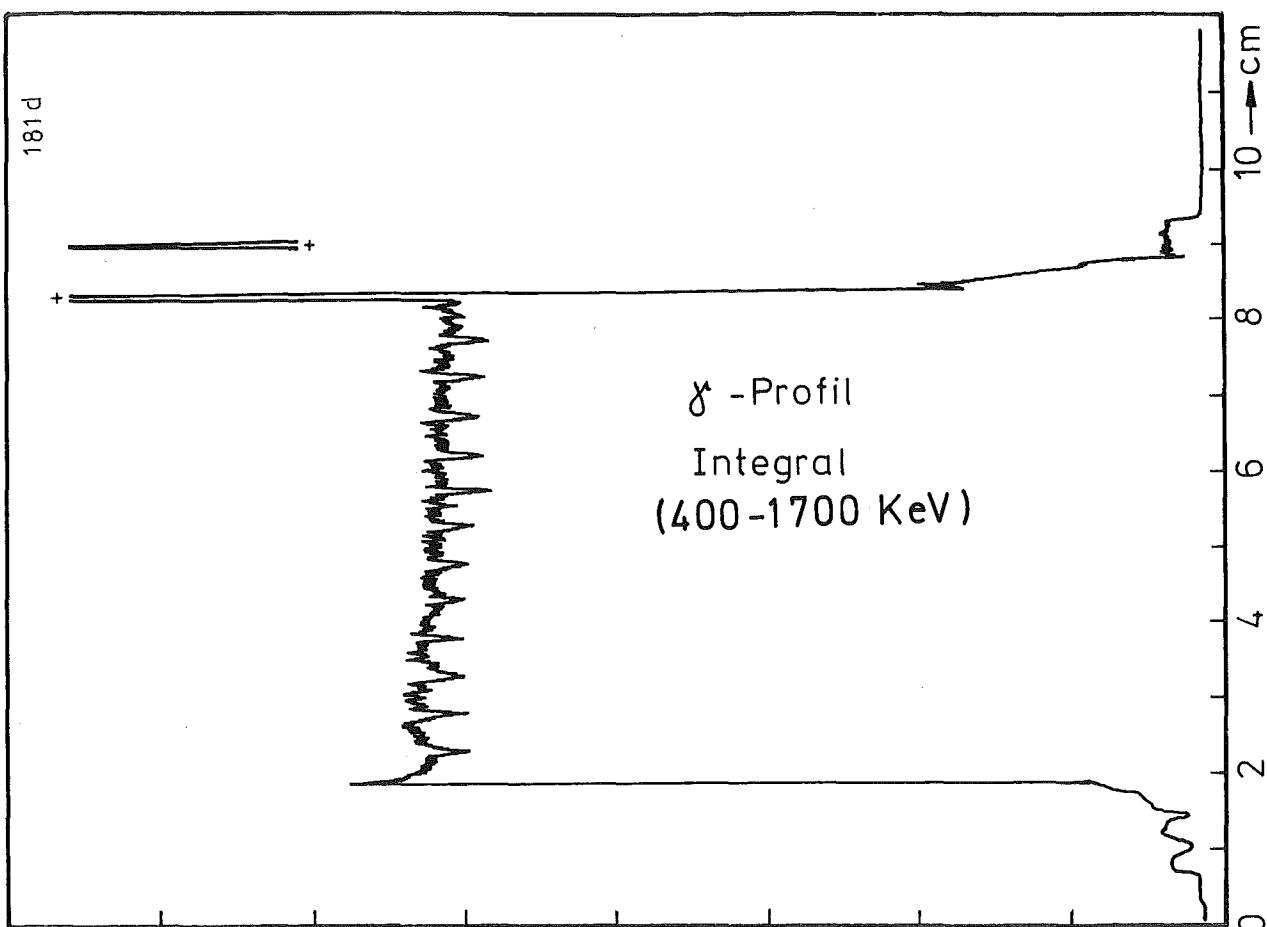
HZ-3a-47-4B2-2/13 200x

0,1 mm



0,04 mm

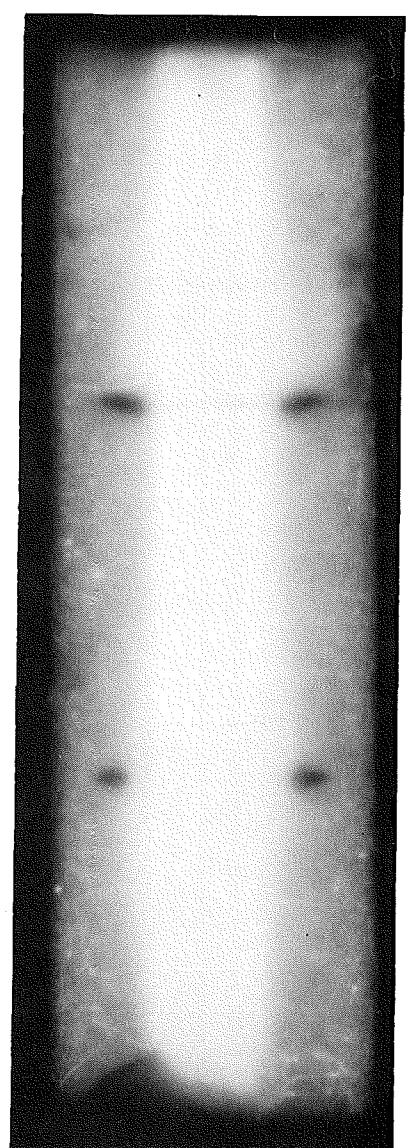
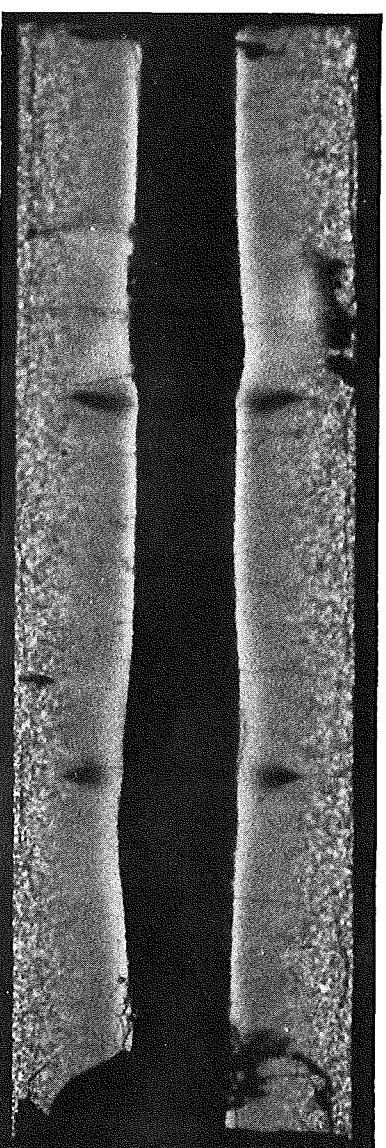
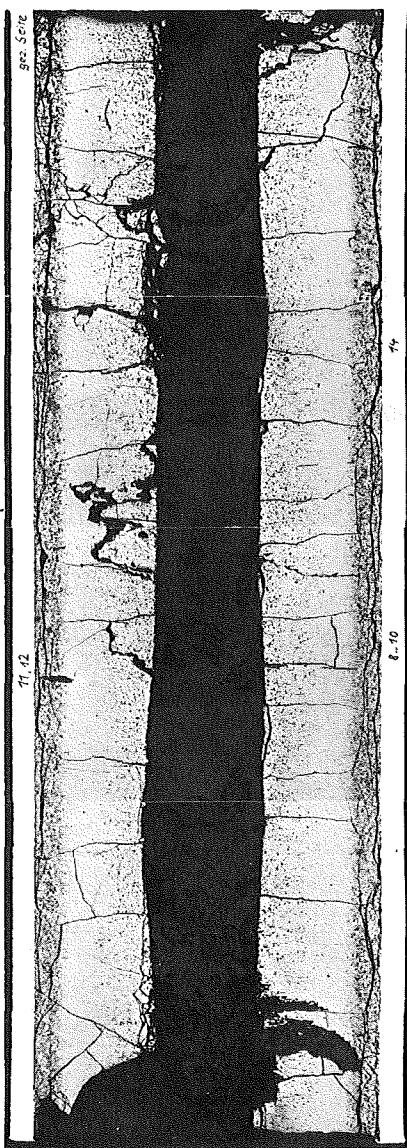
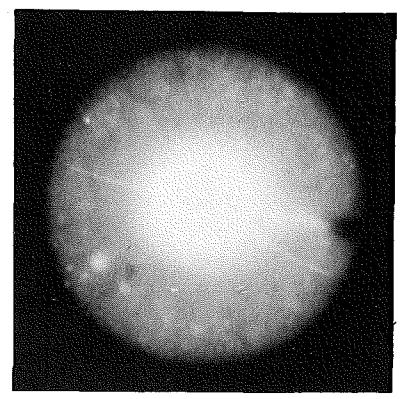
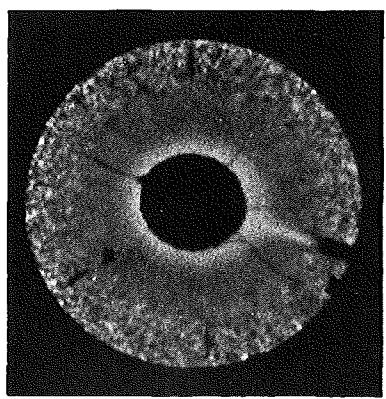
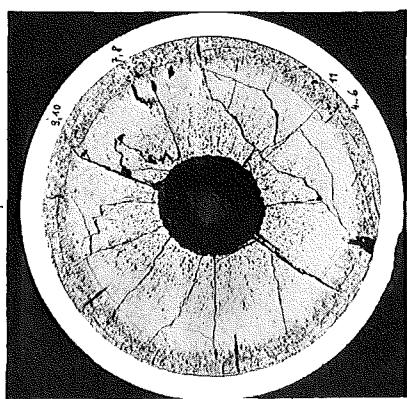
HZ-3a-47-4B2-2/14 500x



A

B

C



1mm

Prüfling 4B-2



Brennstoff:

Form : Tabletten beidseitige Einsenkung
Zusammensetzung : UO_2-PuO_2
Tablettendichte : 90% th.D.

Hülle:

Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,00 mm
Wandstärke : 0,38 mm

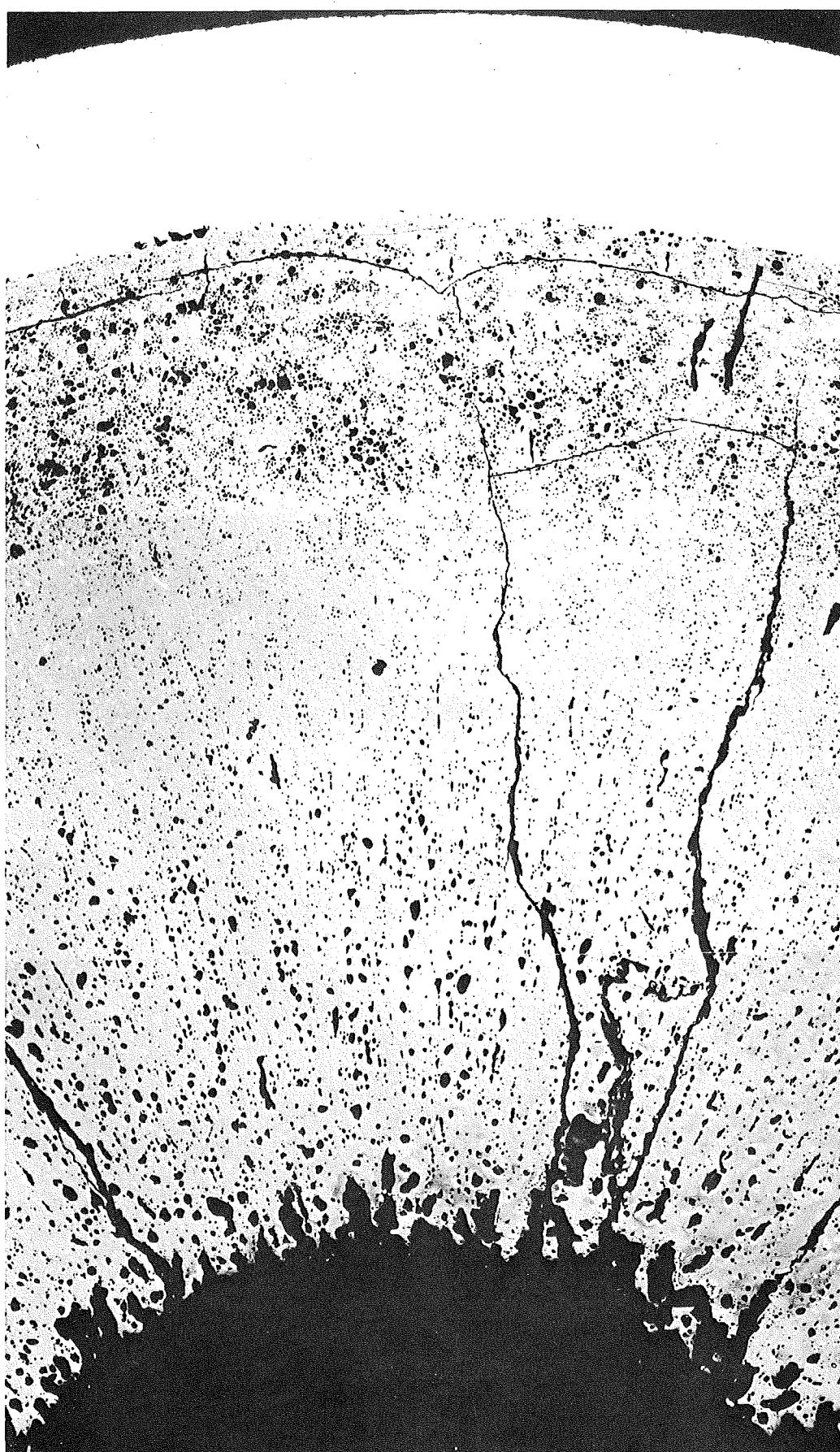
Geometrie:

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,070 mm
Schmierdichte : 85,3% th.D.

Bestrahlung:

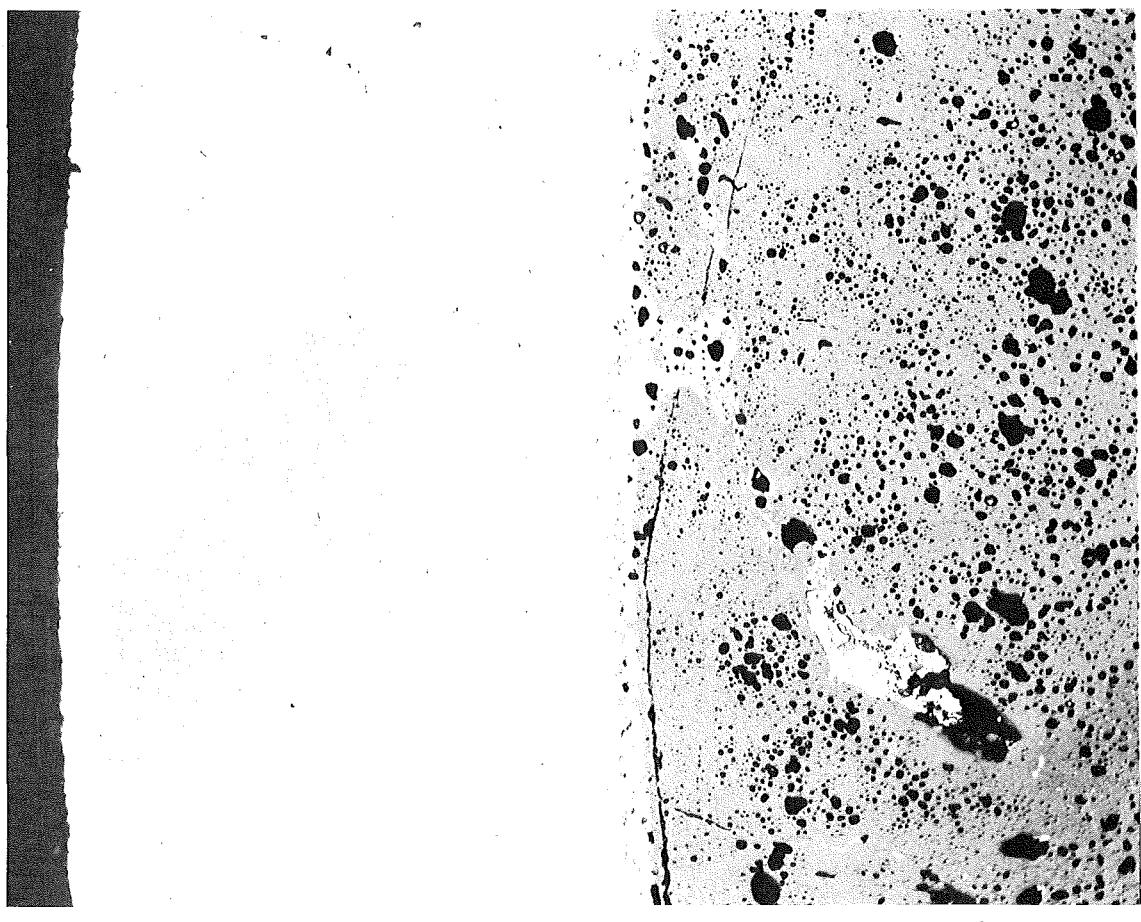
Einrichtung : NaK/PbBi-Doppelkapsel Typ 4a
Dauer : 484,3 Vollasttage
Ende : 21. 9. 70
Rechn. Abbrand mittl. : 76,3 MWD/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 496 / 279 W/cm

- I/43 -
zu Prüfling 4B/1
A1



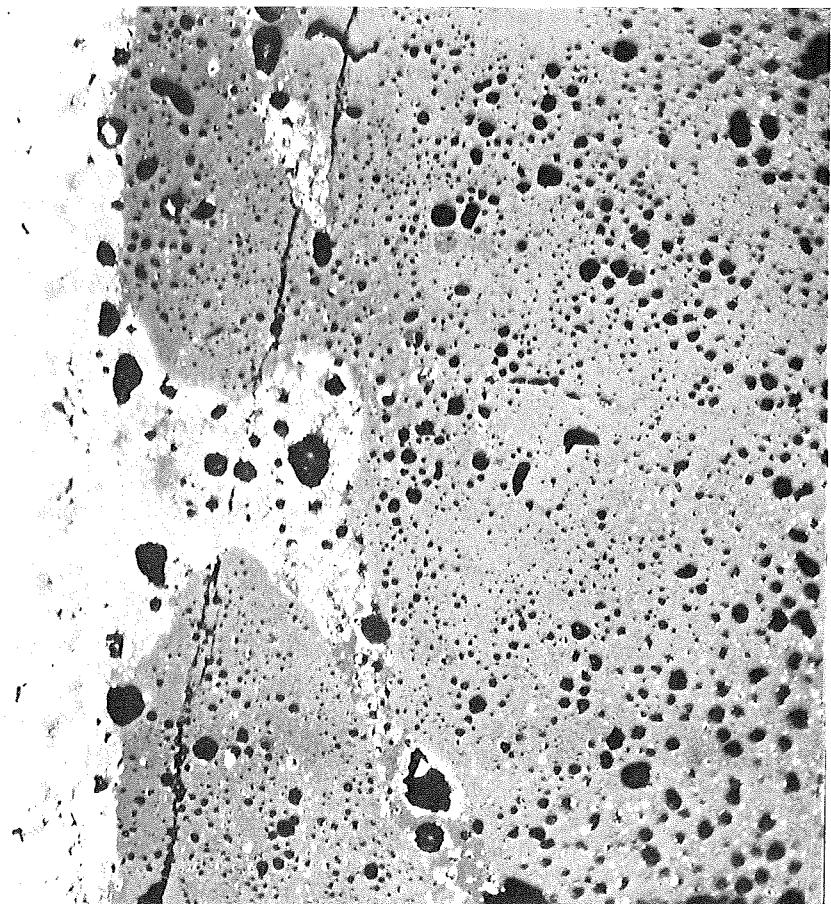
4...6

0,1 mm



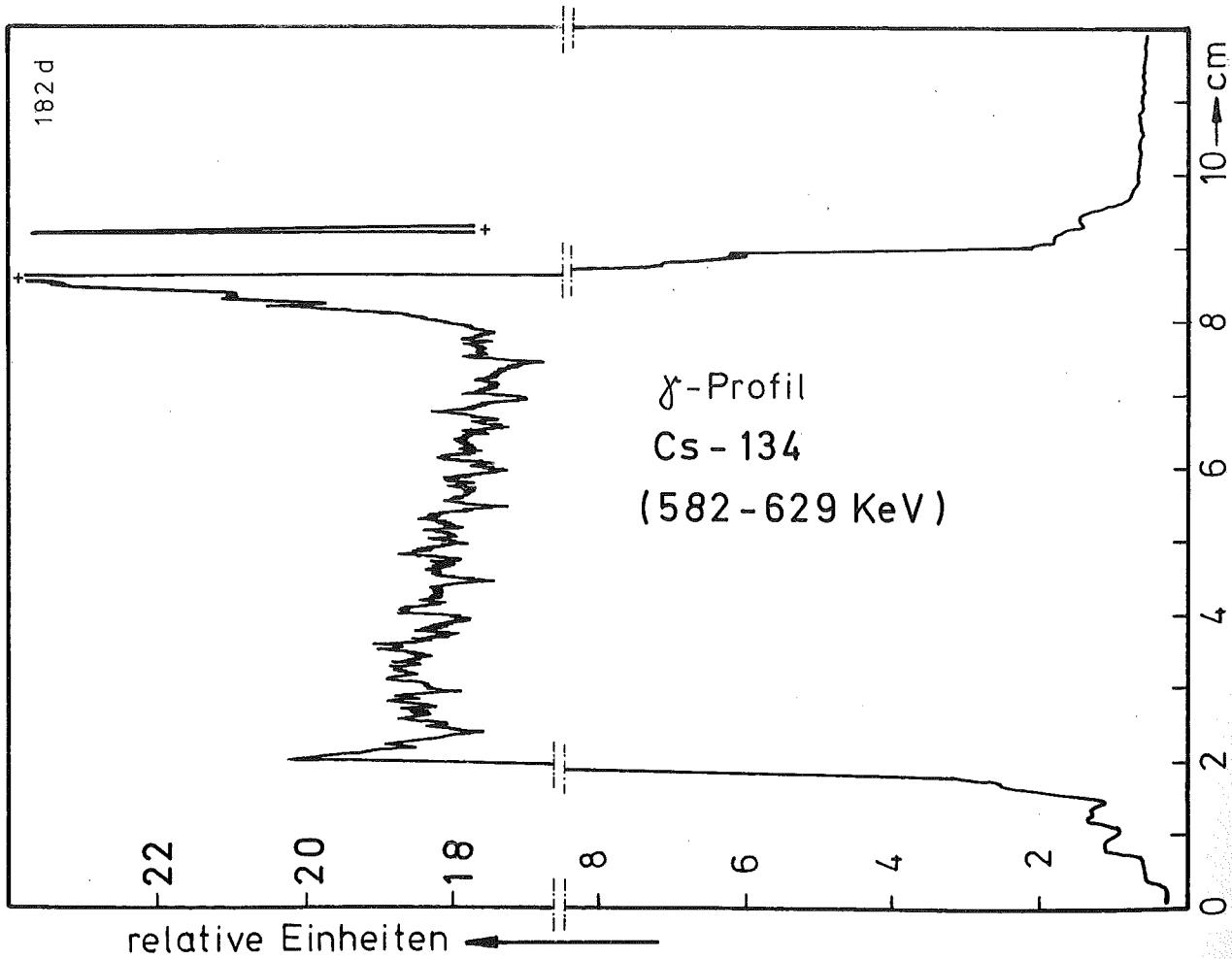
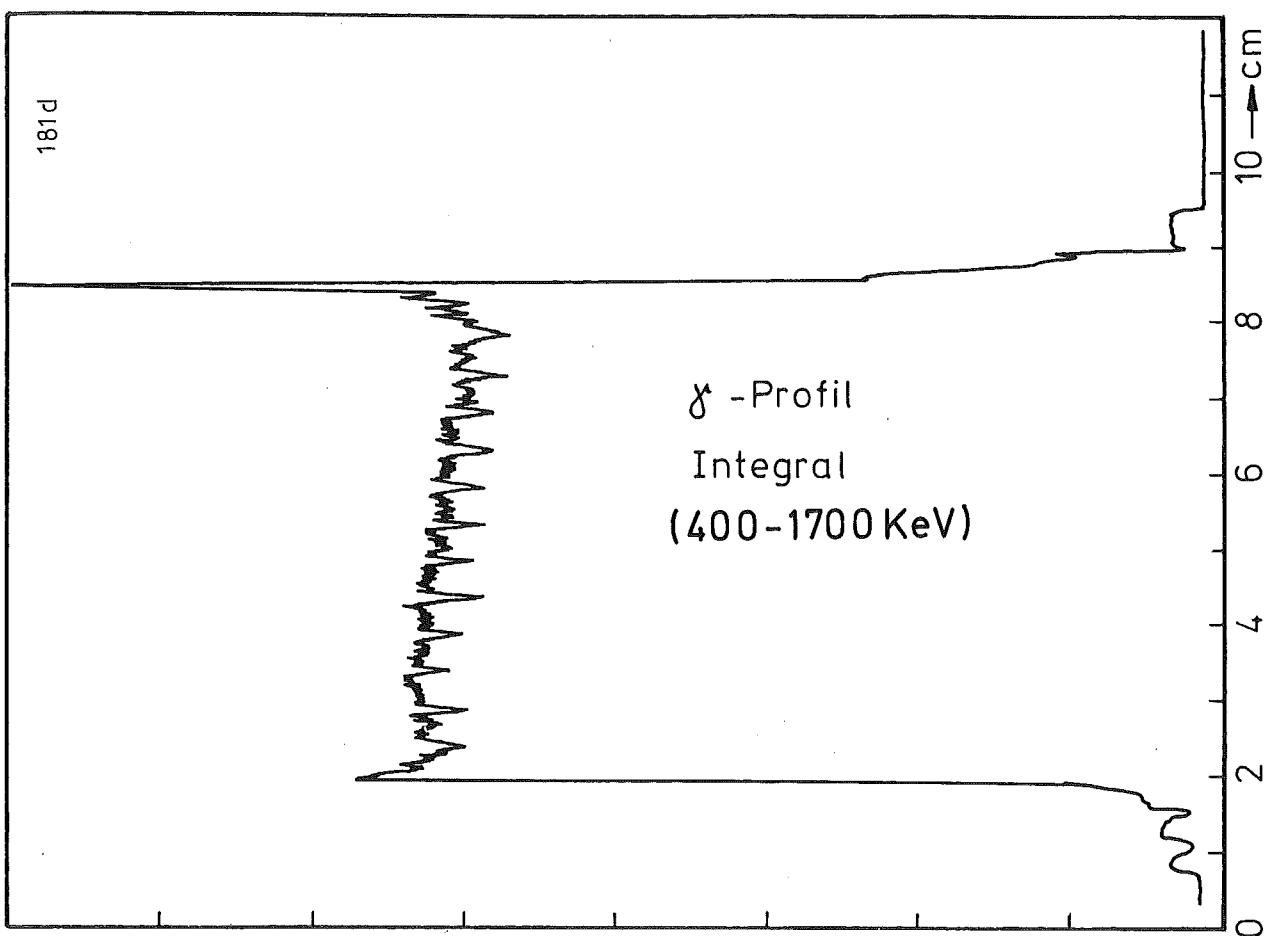
HZ-3a-47-4B1-1/7 200x

0,1 mm

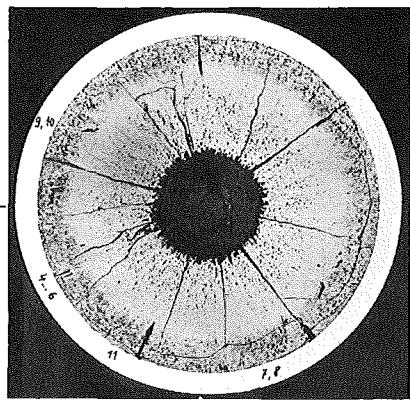


HZ-3a-47-4B1-1/8 500x

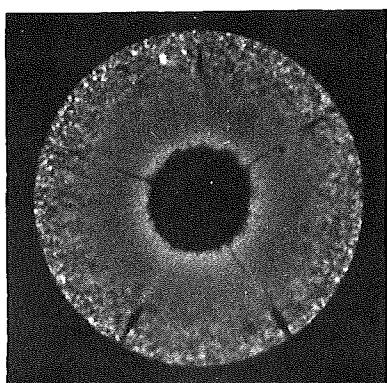
0,04 mm



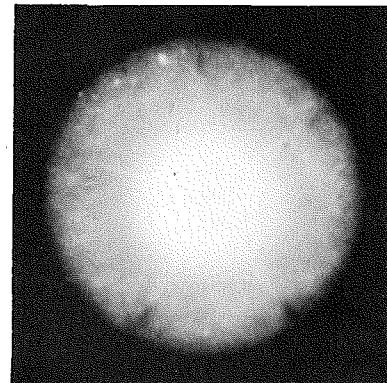
A



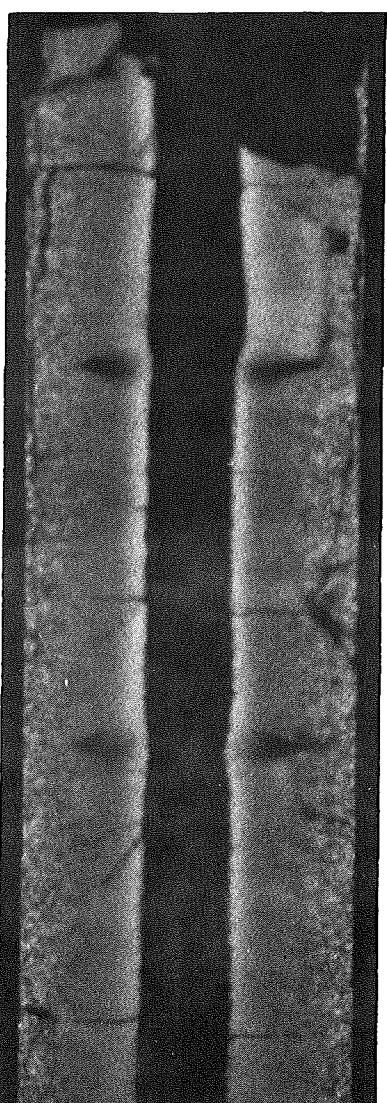
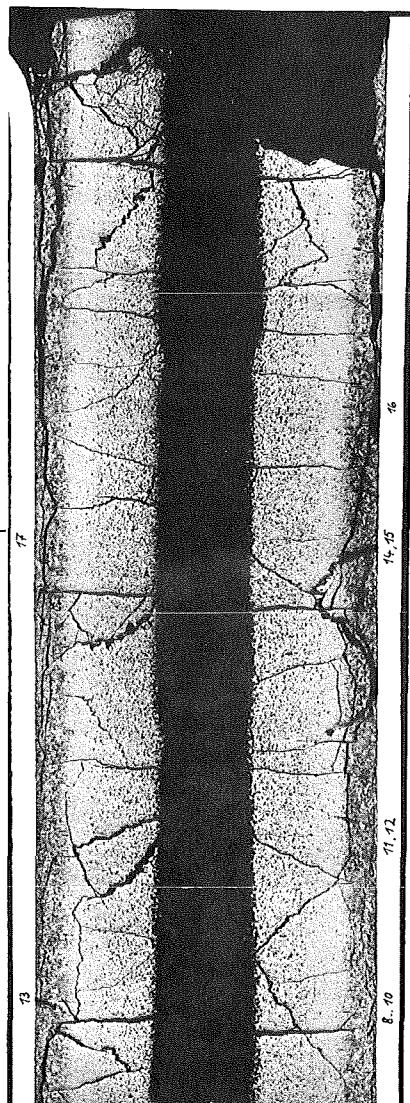
B



C



1



2

1mm



Prüfling 4B-1

Brennstoff:

Form : Tabletten beidseitige Einsenkung
Zusammensetzung : UO_2-PuO_2
Tablettendichte : 90% th.D.

Hülle:

Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,0 mm
Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie:

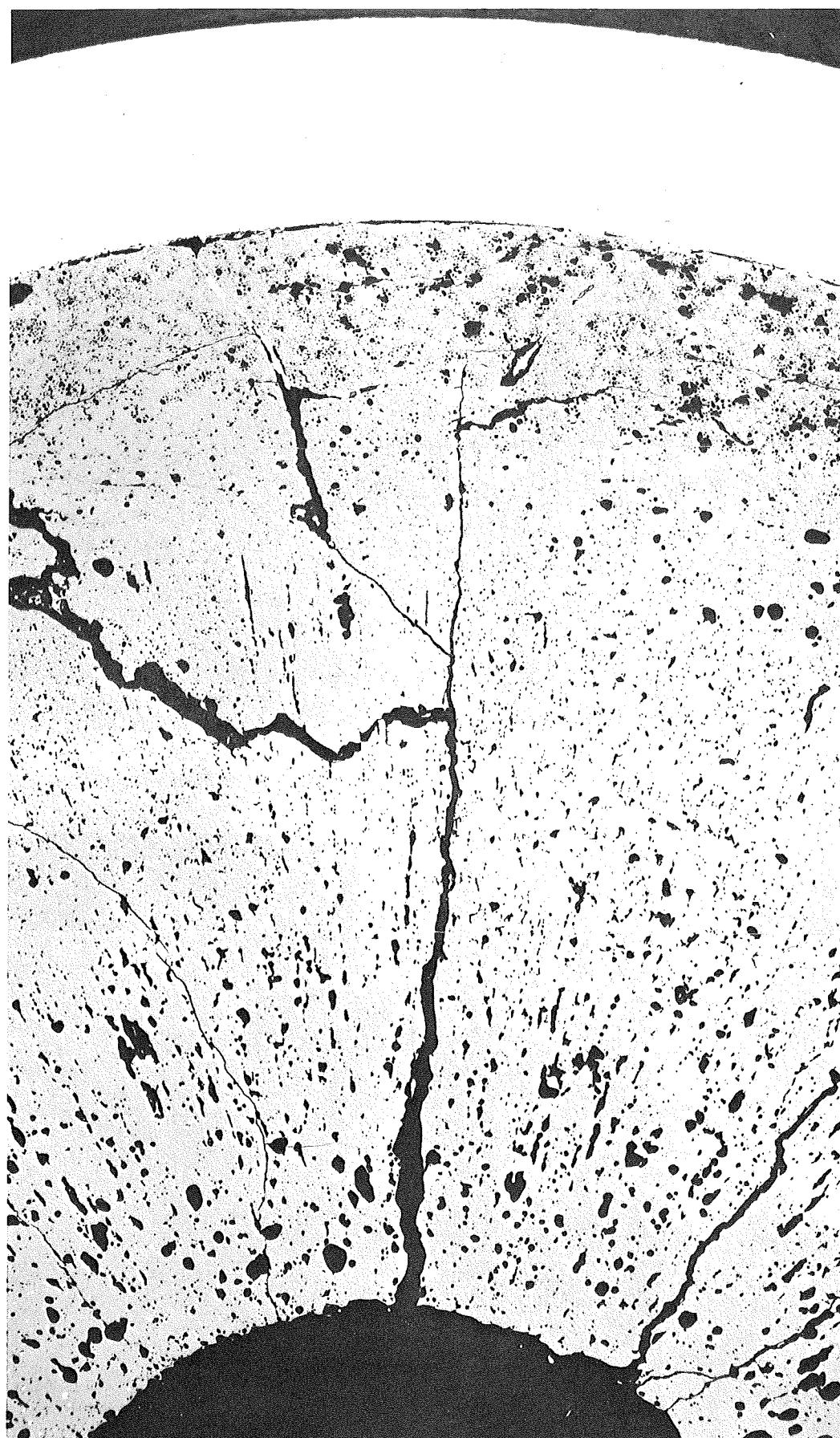
Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,070 mm
Schmierdichte : 85,3% th.D.

Bestrahlung:

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4a
Dauer : 484,3 Vollasttage
Ende : 21. 9. 70
Rechn. Abbrand mittl. : 43,7 MWD/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 529 / 160 W/cm

-I/47 -
zu Prüfling 4B/9

A1



14

0,1 mm

-I/48-
zu Prüfling 4B/9
A2

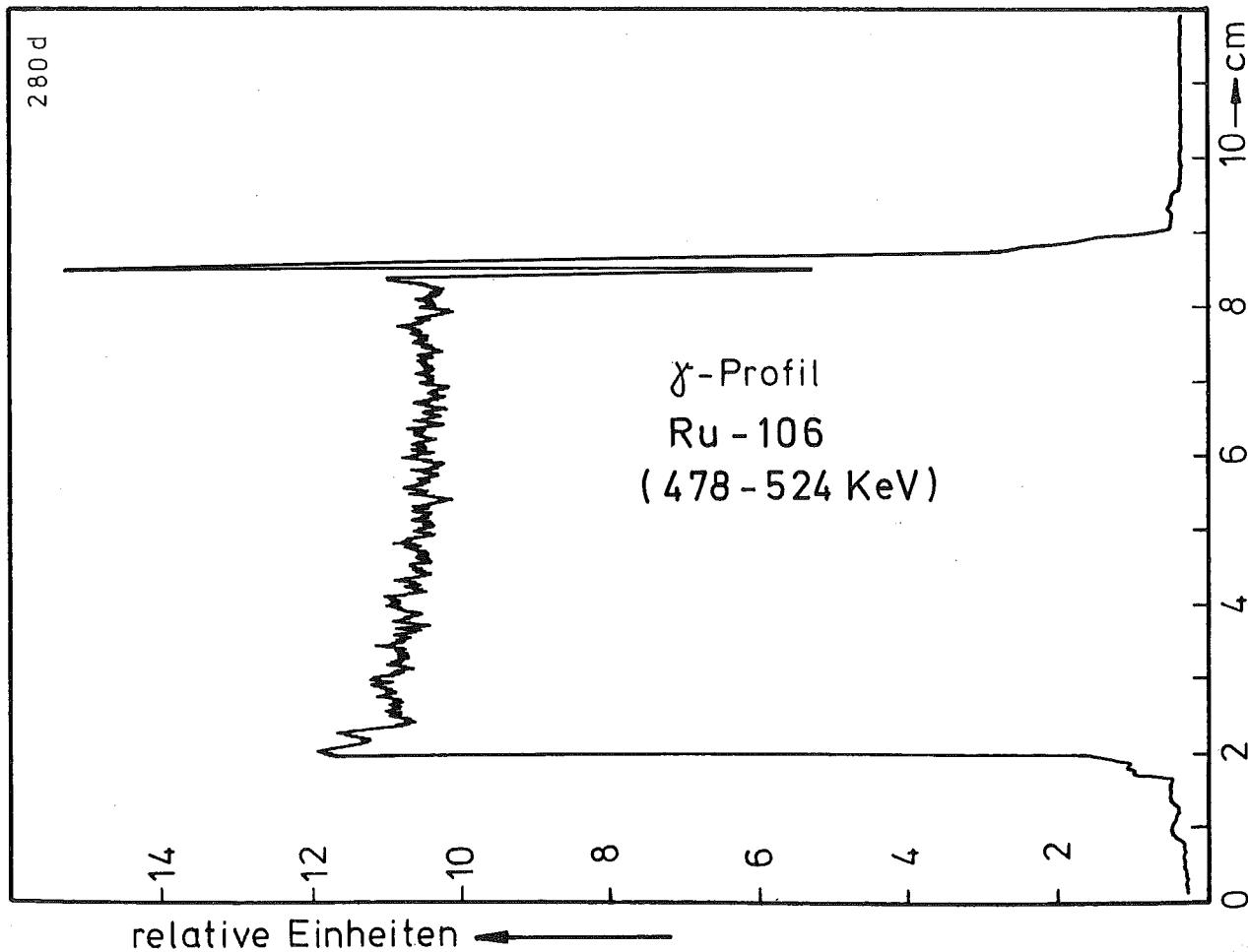
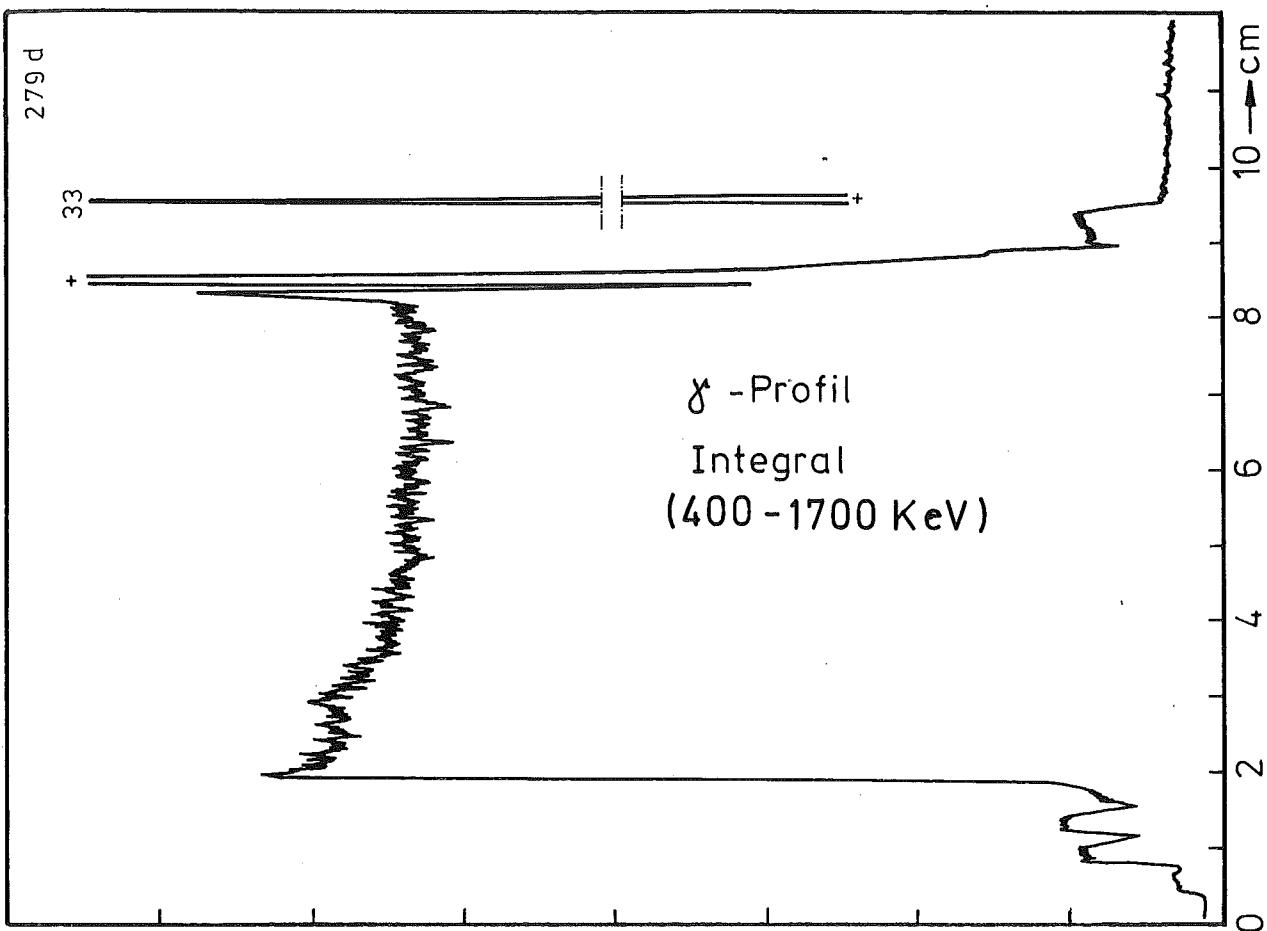


HZ-3a-48-4B/9-2/10
200x



HZ-3a-48-4B/9-2/12
200x

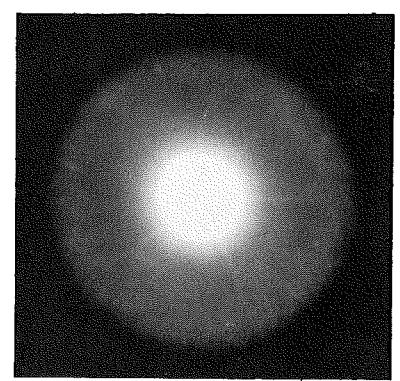
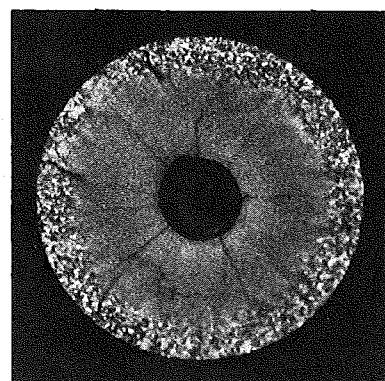
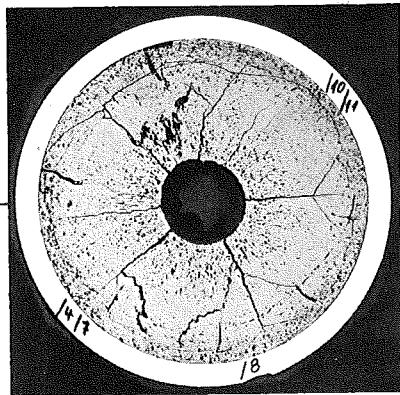
0,1 mm



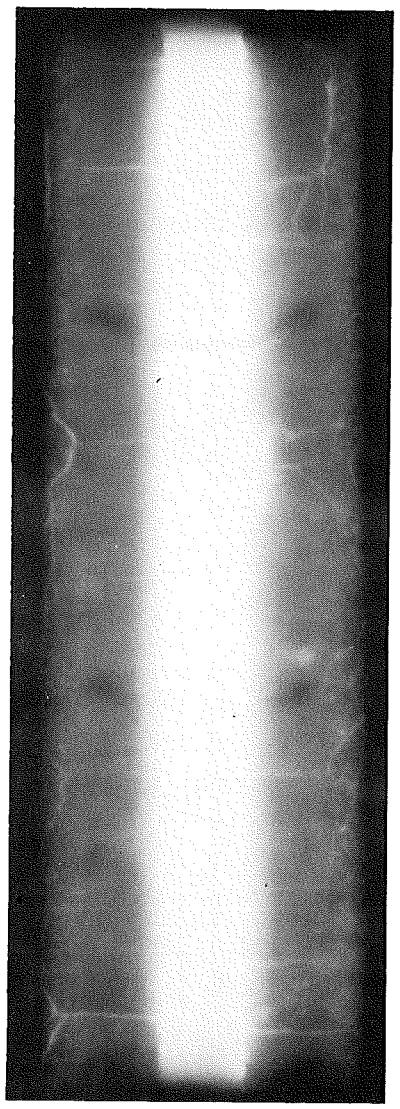
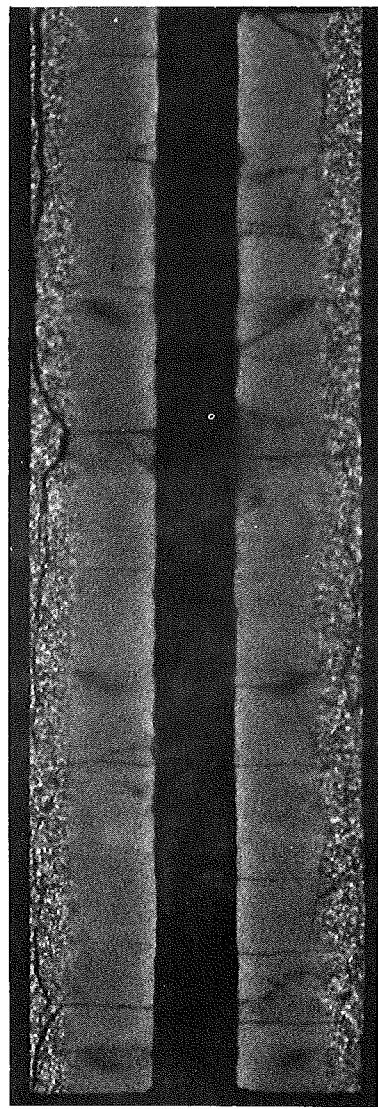
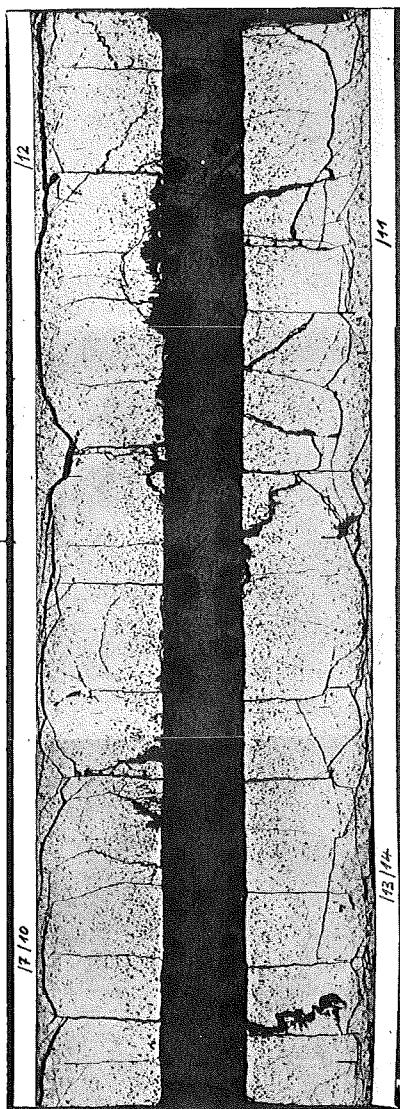
A

B

C



1



2

1mm

Prüfling 4B-9



Brennstoff:

Form : Tabletten beidseitige Einsenkung

Zusammensetzung : $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$

Tablettendichte : 90% th.D.

Hülle:

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 6,00 mm

Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie:

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : 0,070 mm

Schmierdichte : 85,3% th.D.

Bestrahlung:

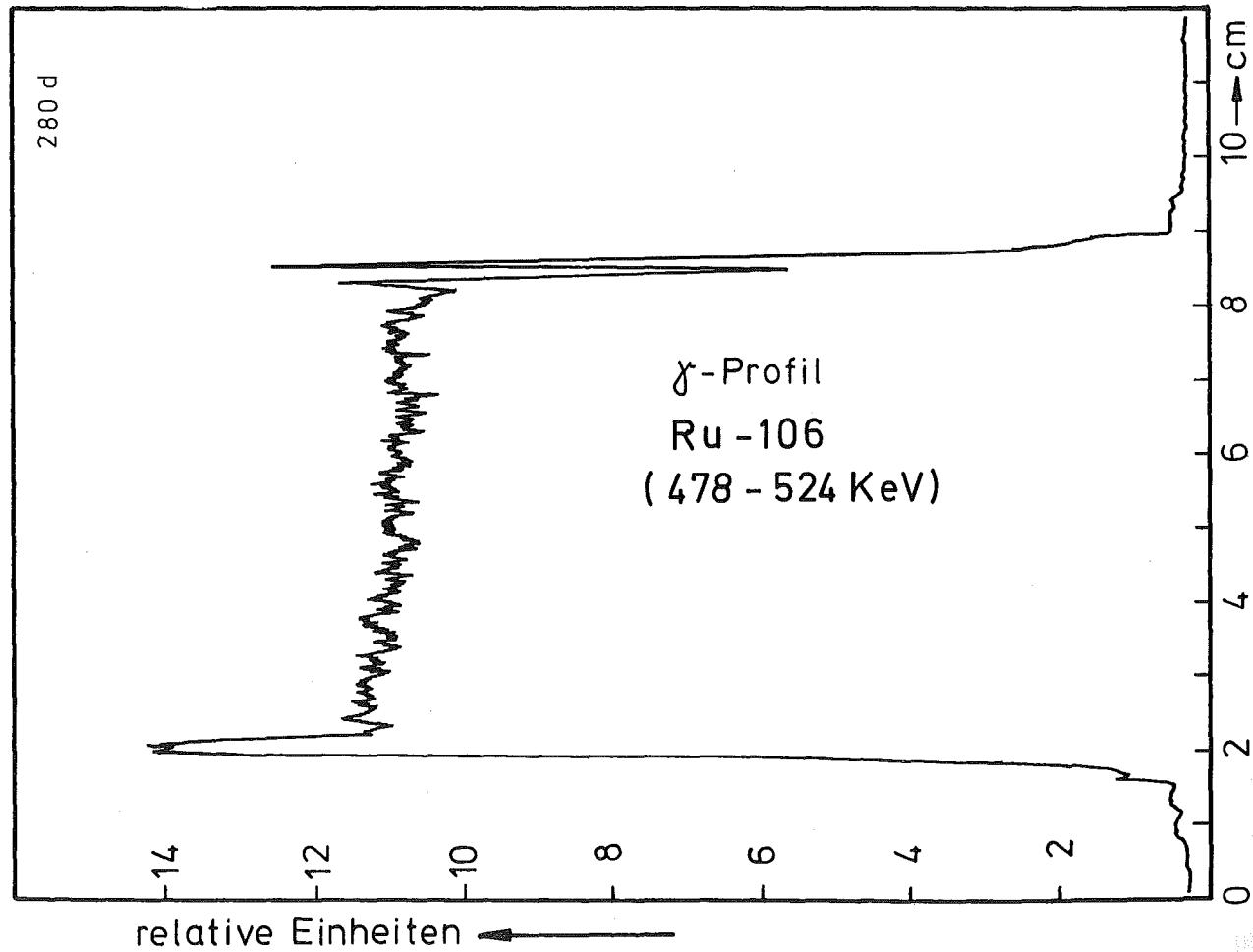
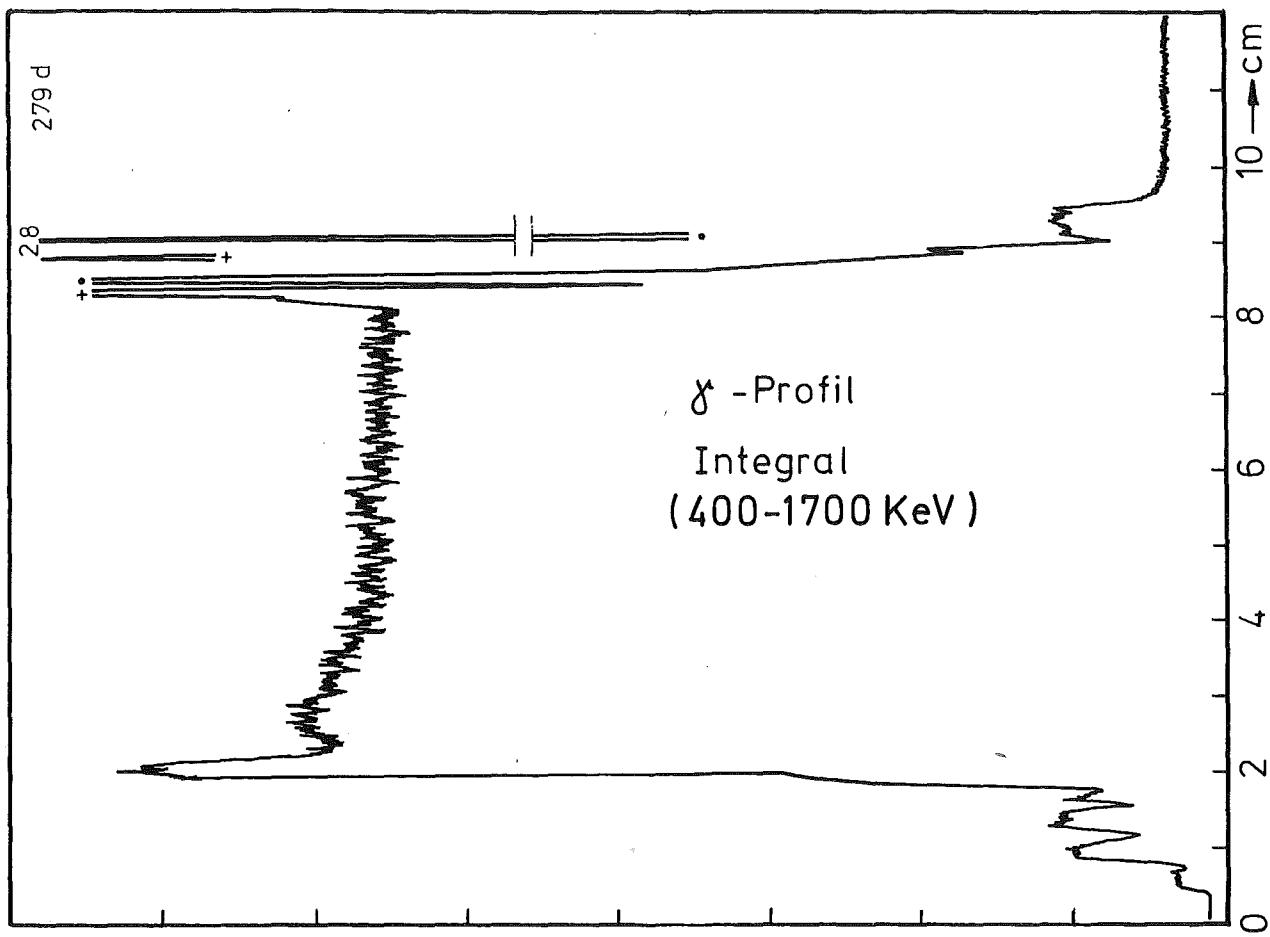
Einrichtung : NaK/PbBi-Doppelkapsel Typ 4a

Dauer : 425,3 Vollasttage

Ende : 13. 7. 70

Rechn. Abbrand mittl. : 79,1 MWD/kg Metall

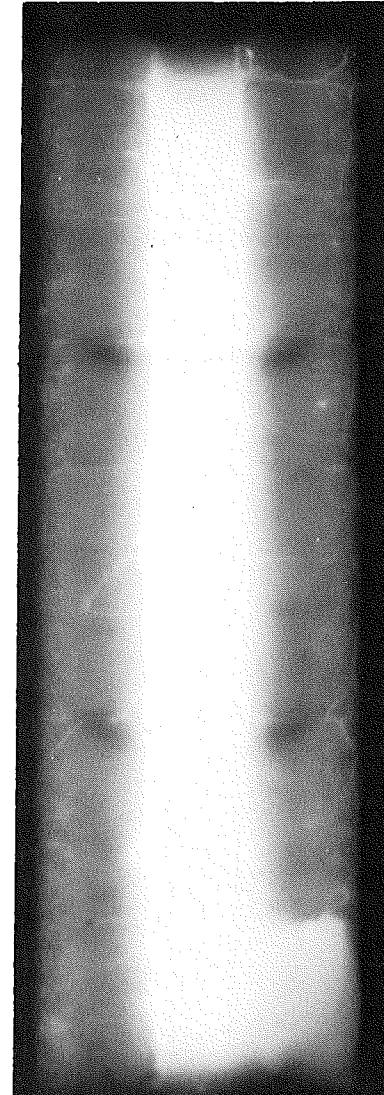
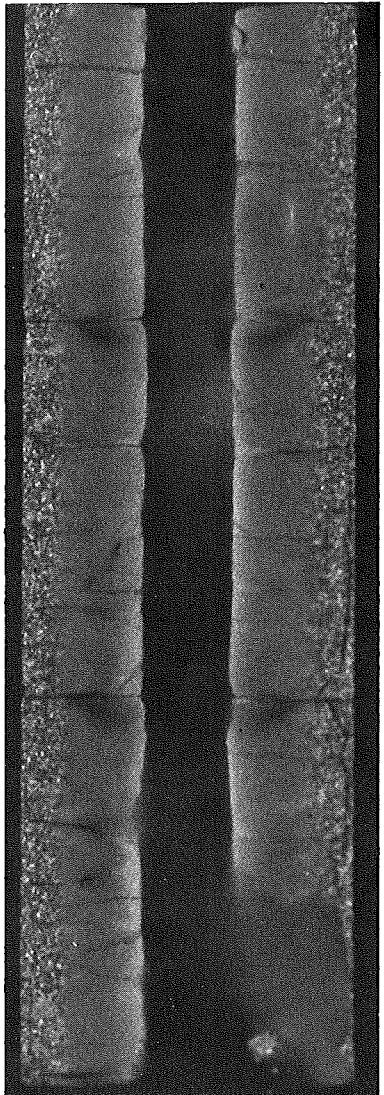
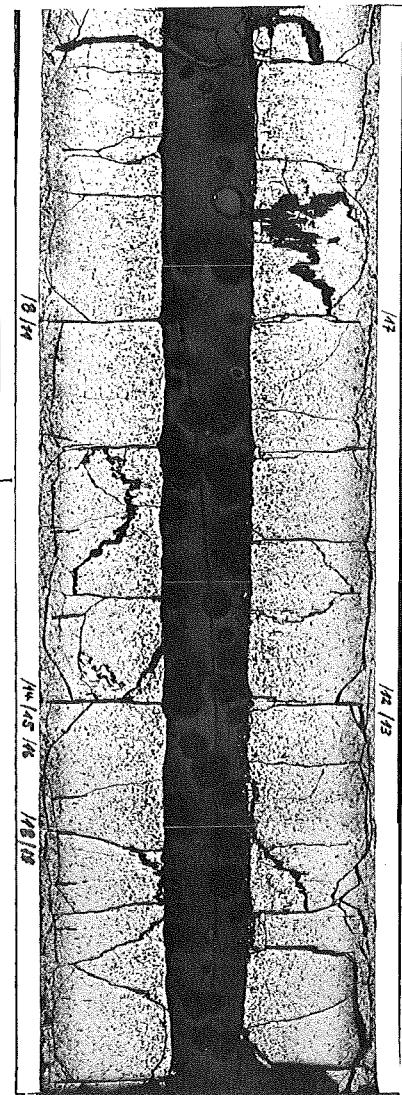
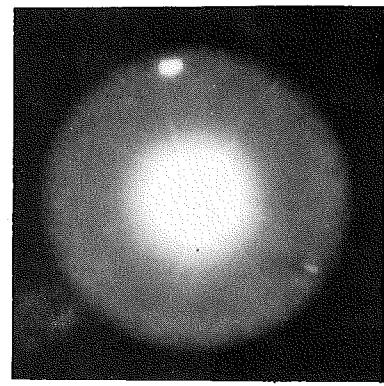
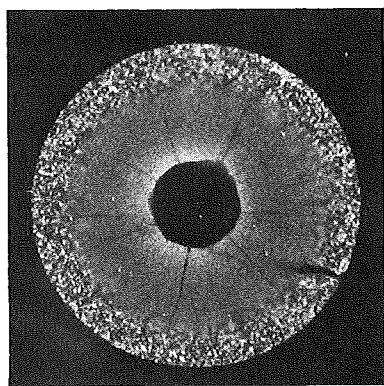
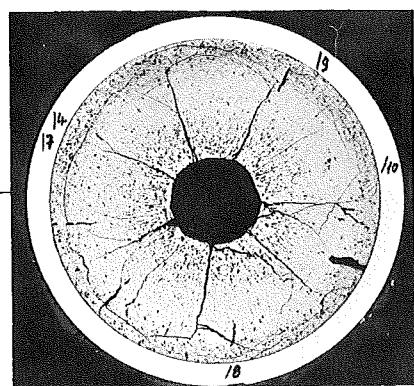
Stableistung max./mittl. : 424 / 333 W/cm



A

B

C



1mm

Prüfling 4B-8



Brennstoff:

Form : Tabletten einseitige Einsenkung
Zusammensetzung : $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$
Tablettendichte : 90% th.D.

Hülle:

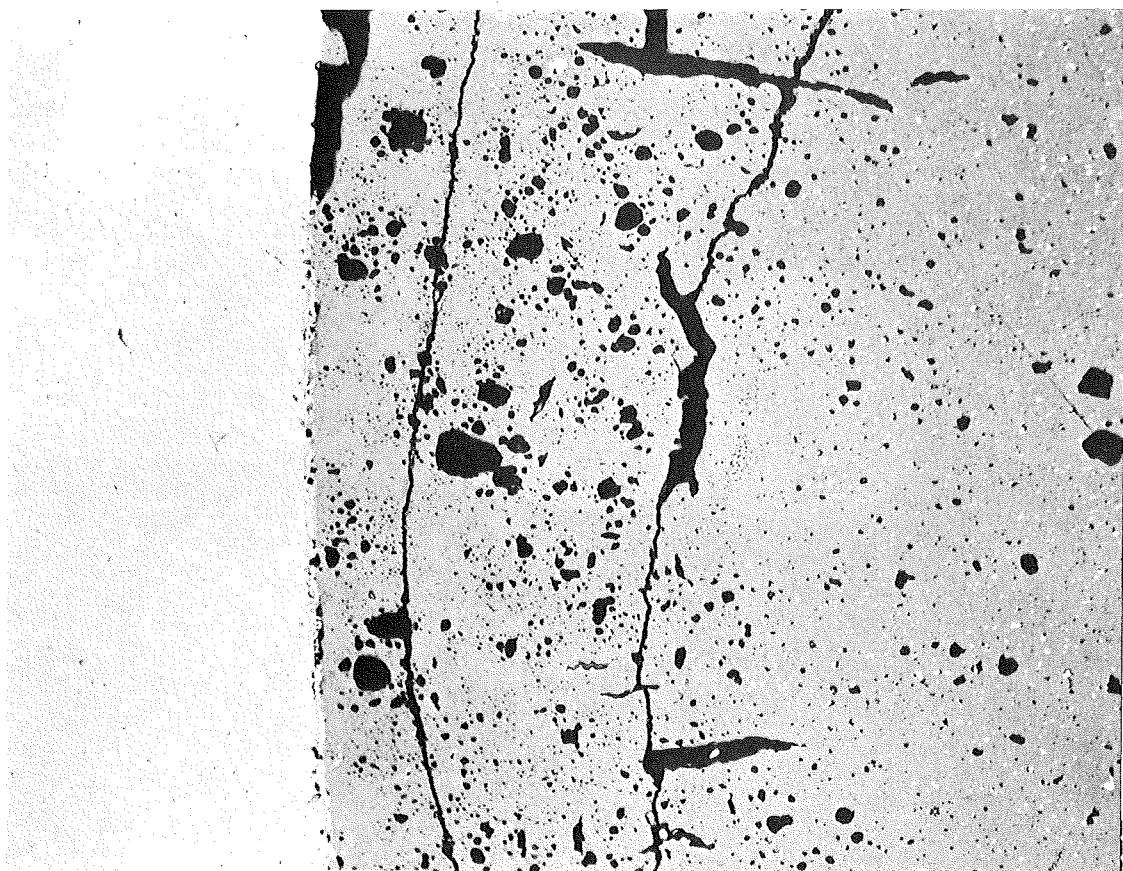
Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,00 mm
Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie:

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,070 mm
Schmierdichte : 85,3% th.D.

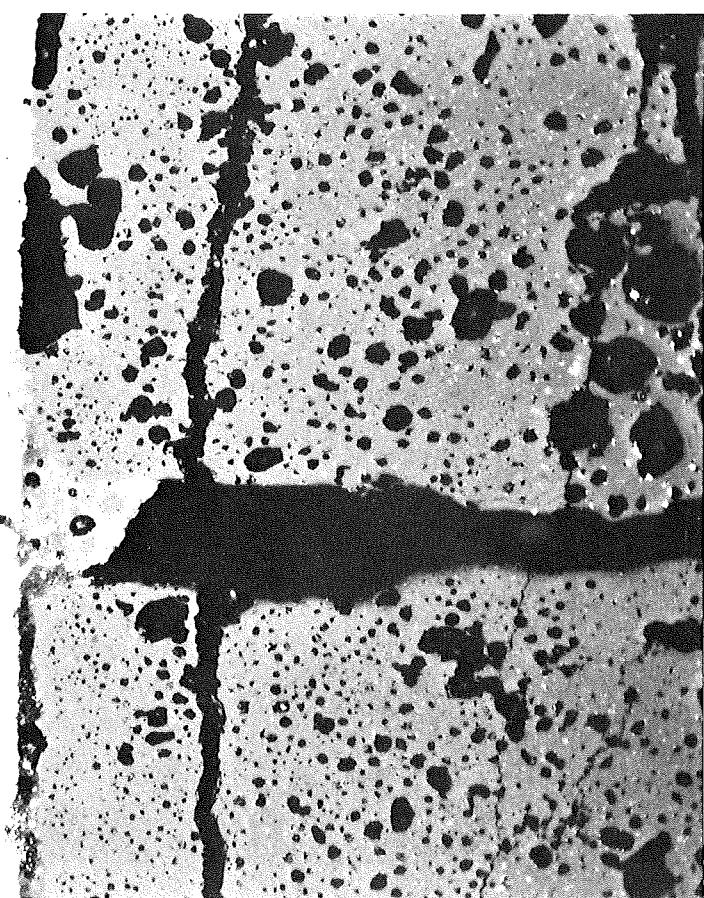
Bestrahlung:

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppelkapsel Typ 4a
Dauer : 425,3 Vollasttage
Ende : 13. 7. 70
Rechn. Abbrand mittl. : 71,5 MWD/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 424 / 301 W/cm



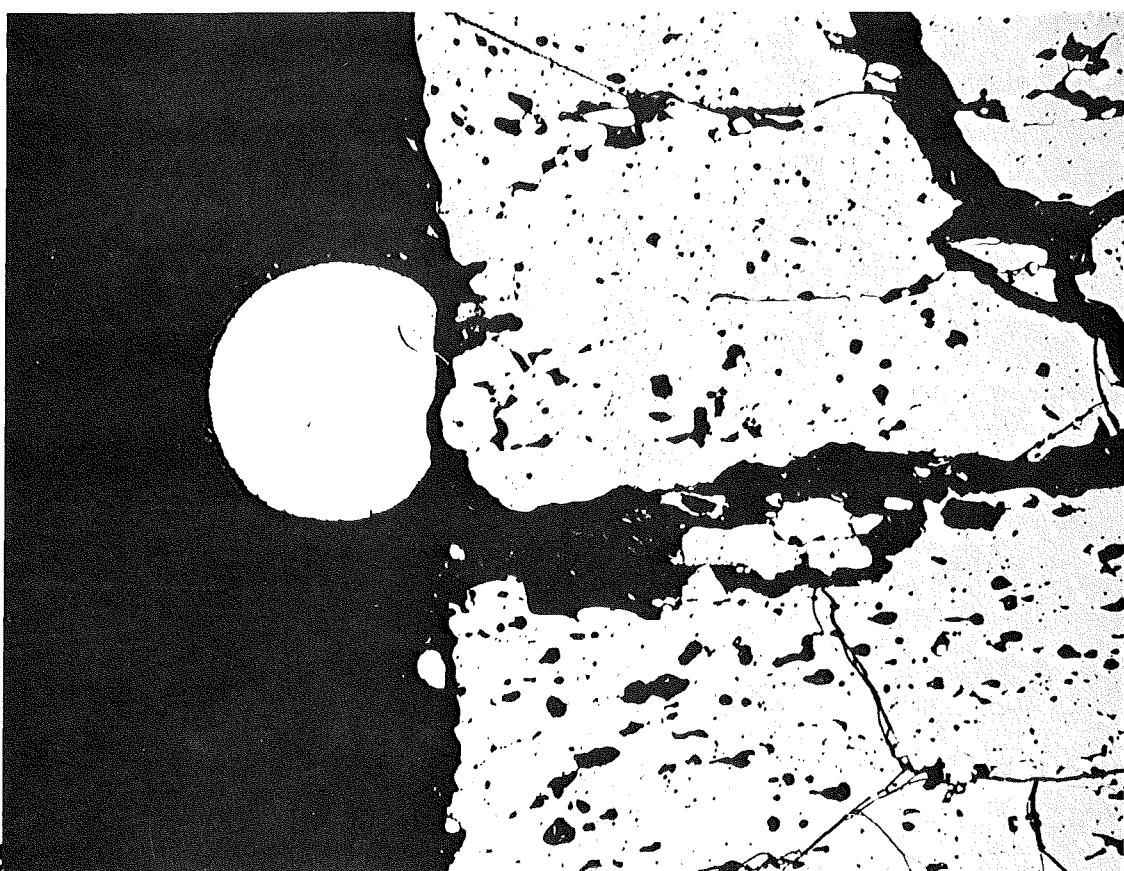
200x

HZ-3a-48-4B/7-1/7



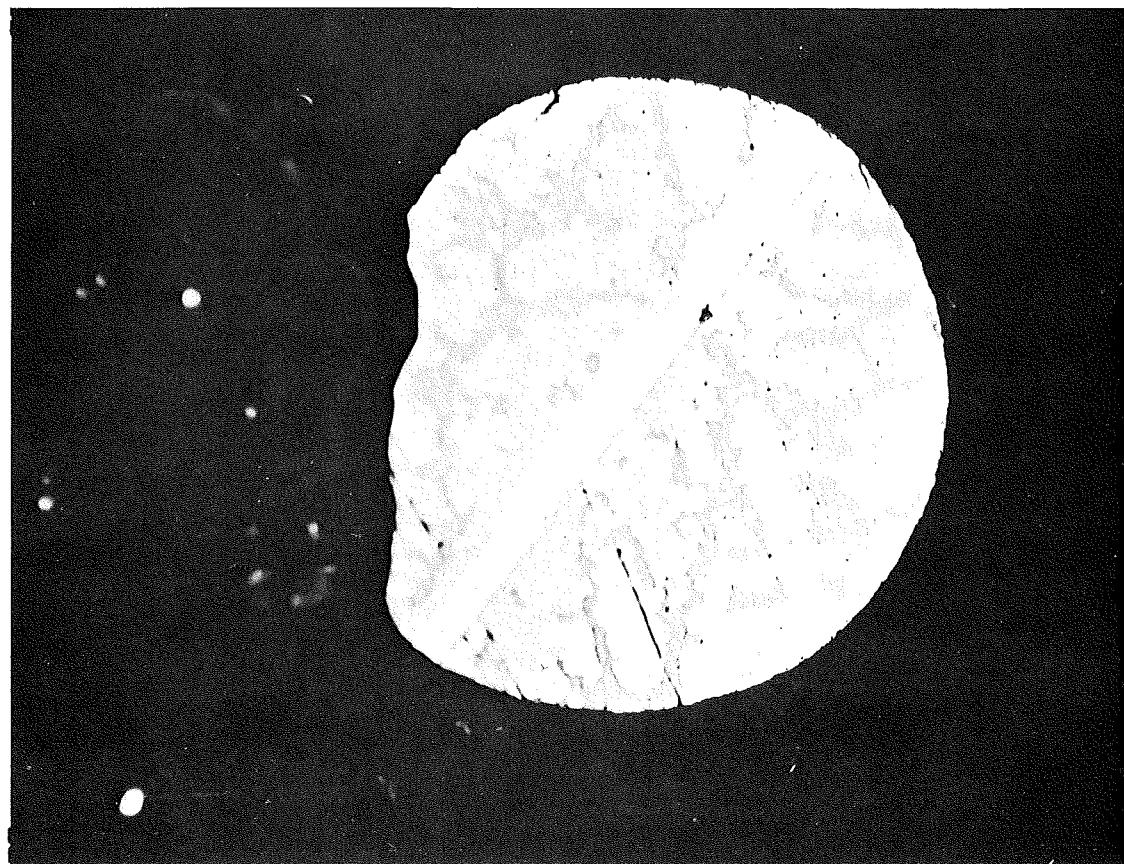
500x

HZ-3a-48-4B/7-1/9



HZ-3a-48-4B/7-2/12

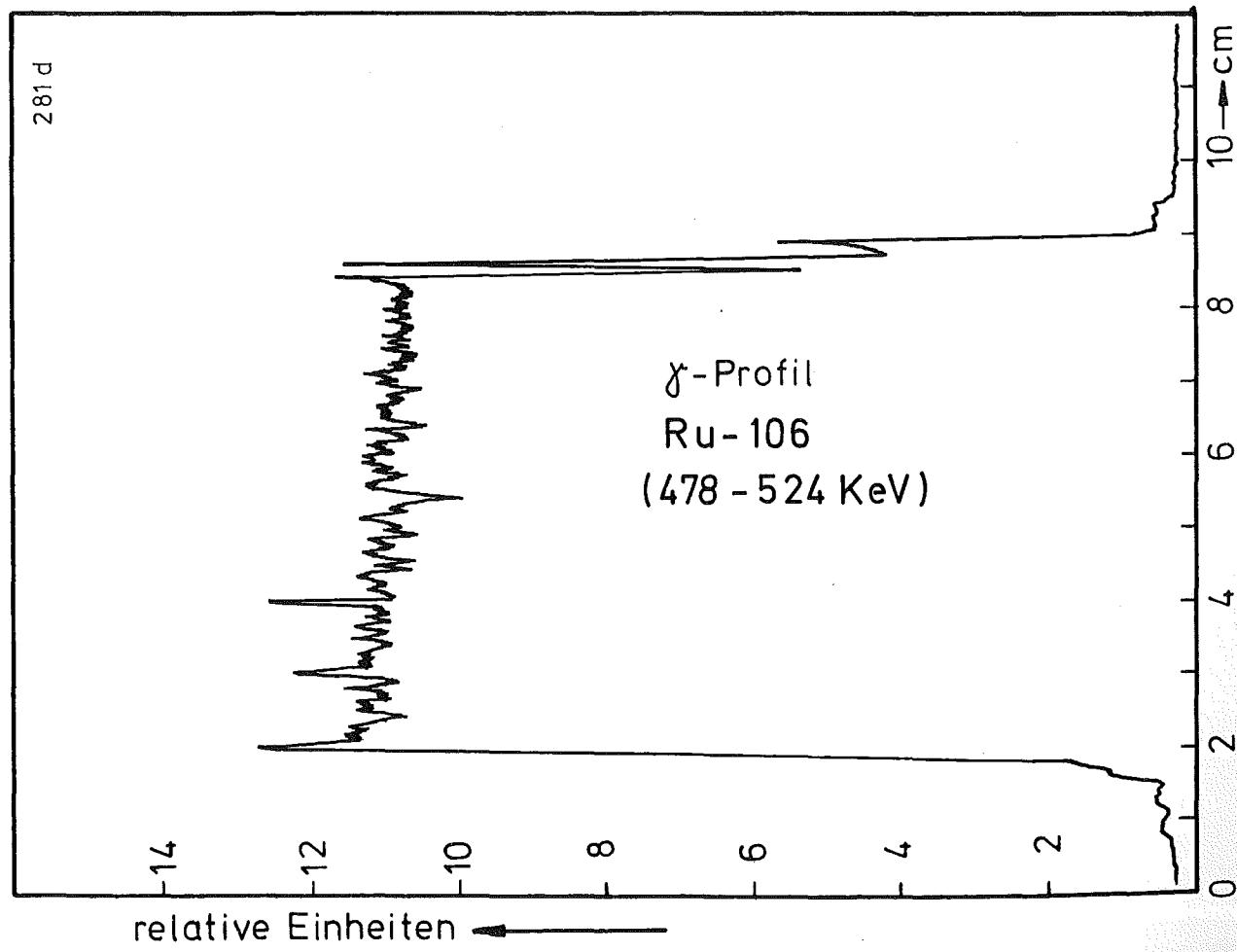
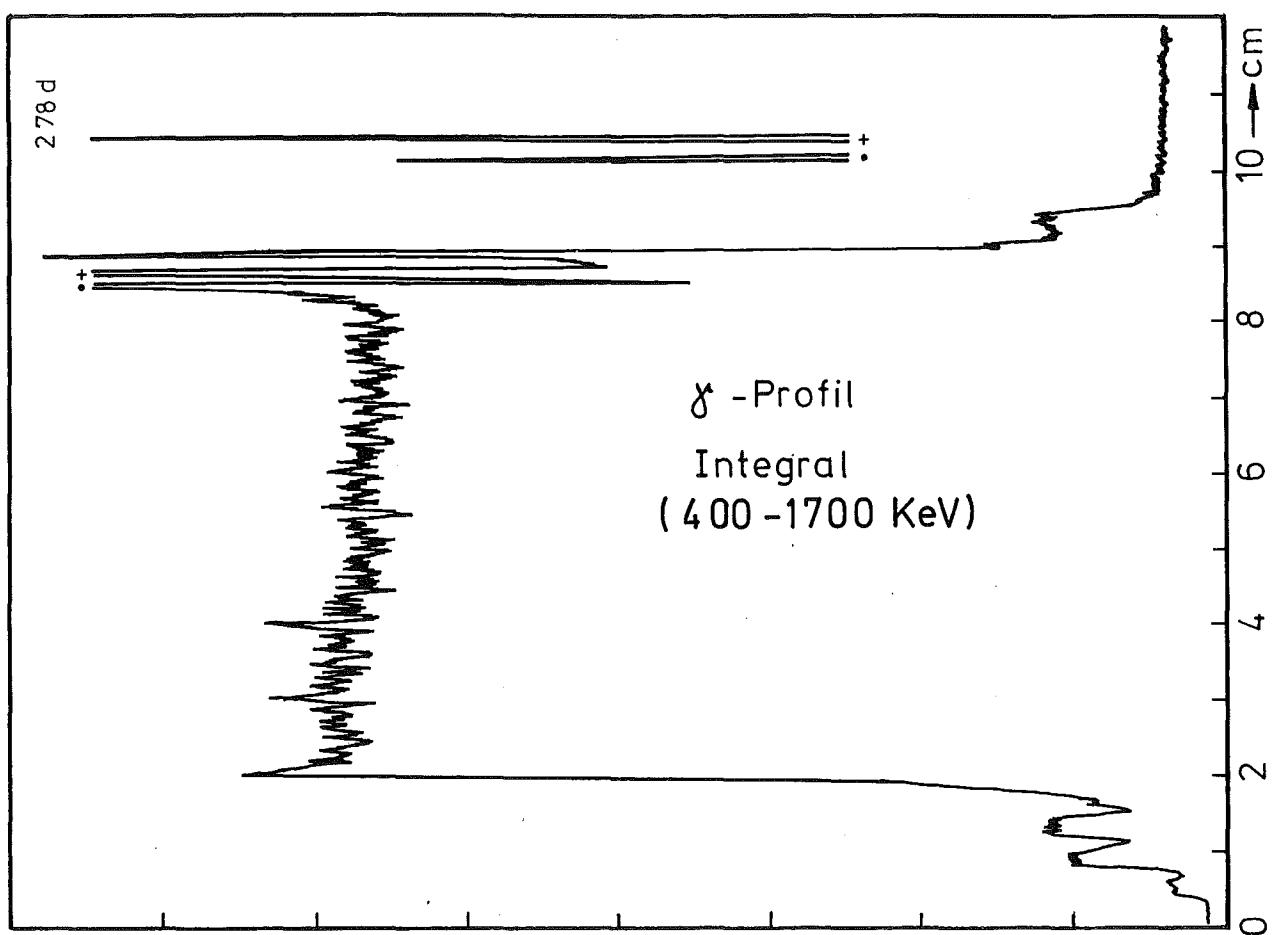
200x



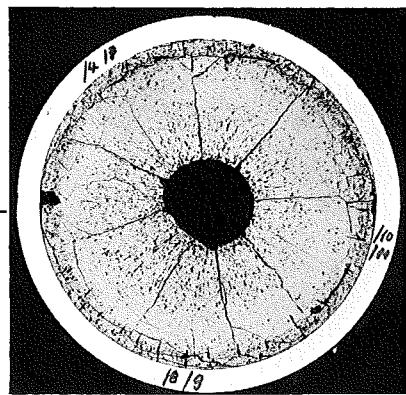
HZ-3a-48-4B/7-2/13

500x

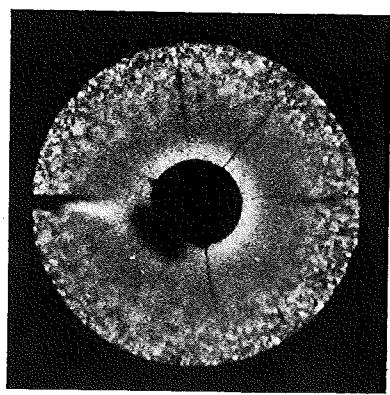
0,04 mm



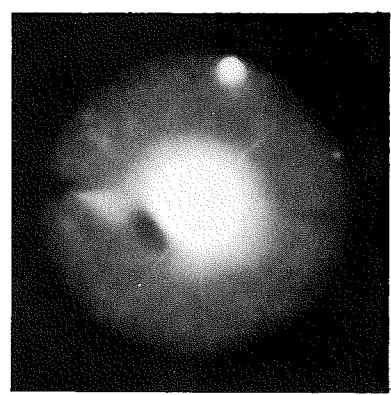
A



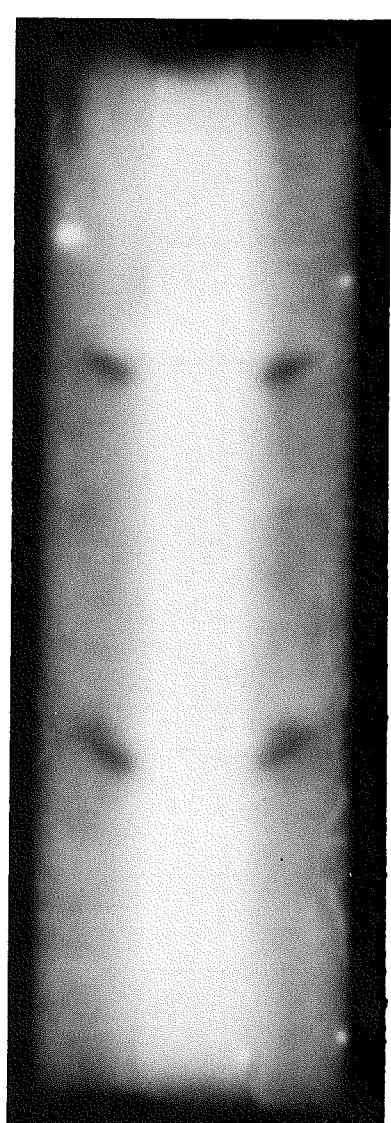
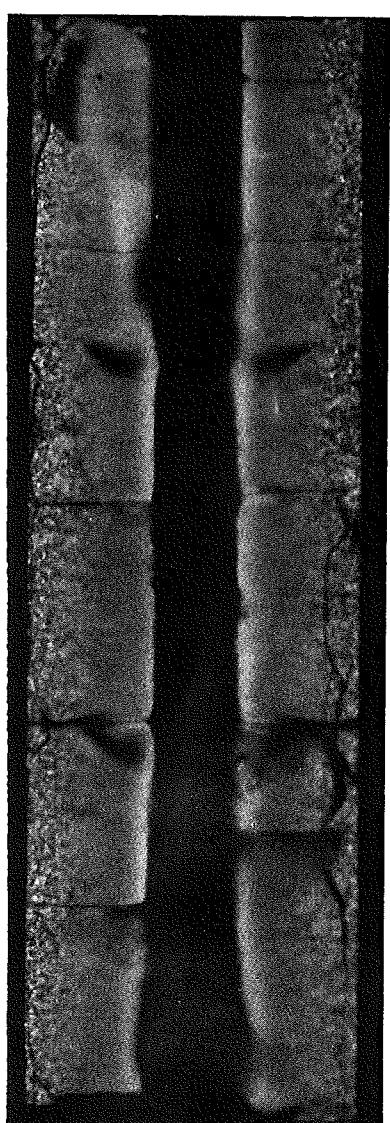
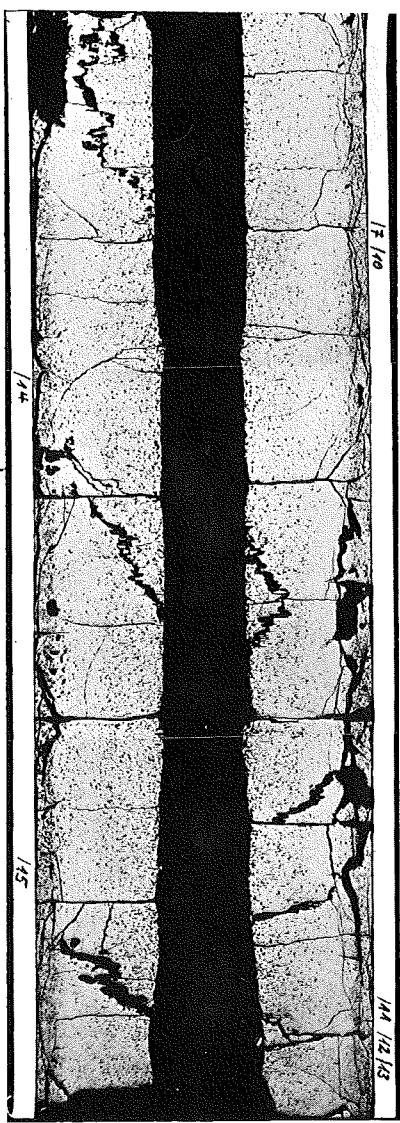
B



C



1



2

1mm

Prüfling 4B-7



Brennstoff:

Form : Tabletten beidseitige Einsenkung
Zusammensetzung : $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$
Tablettendichte : 90% th.D.

Hülle:

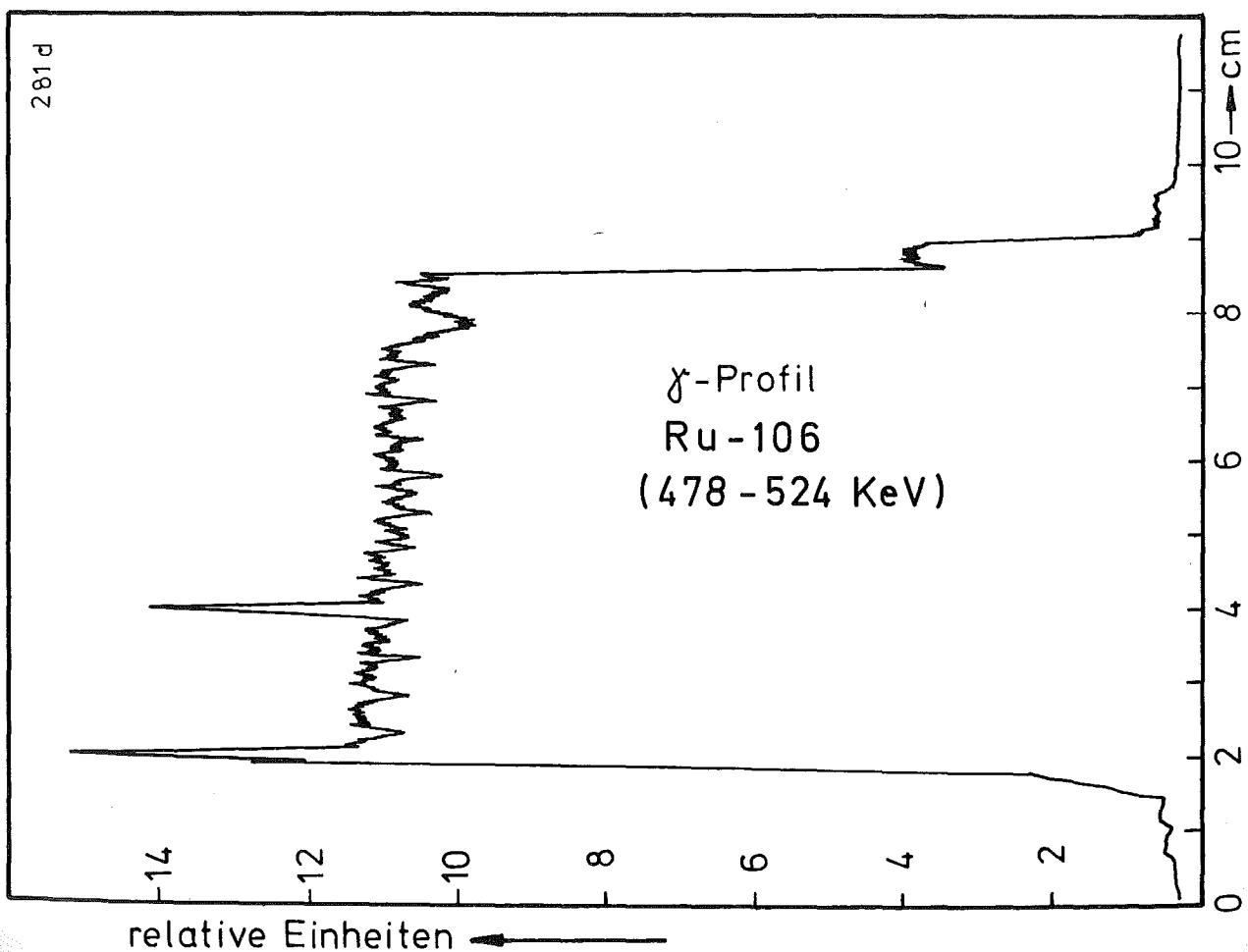
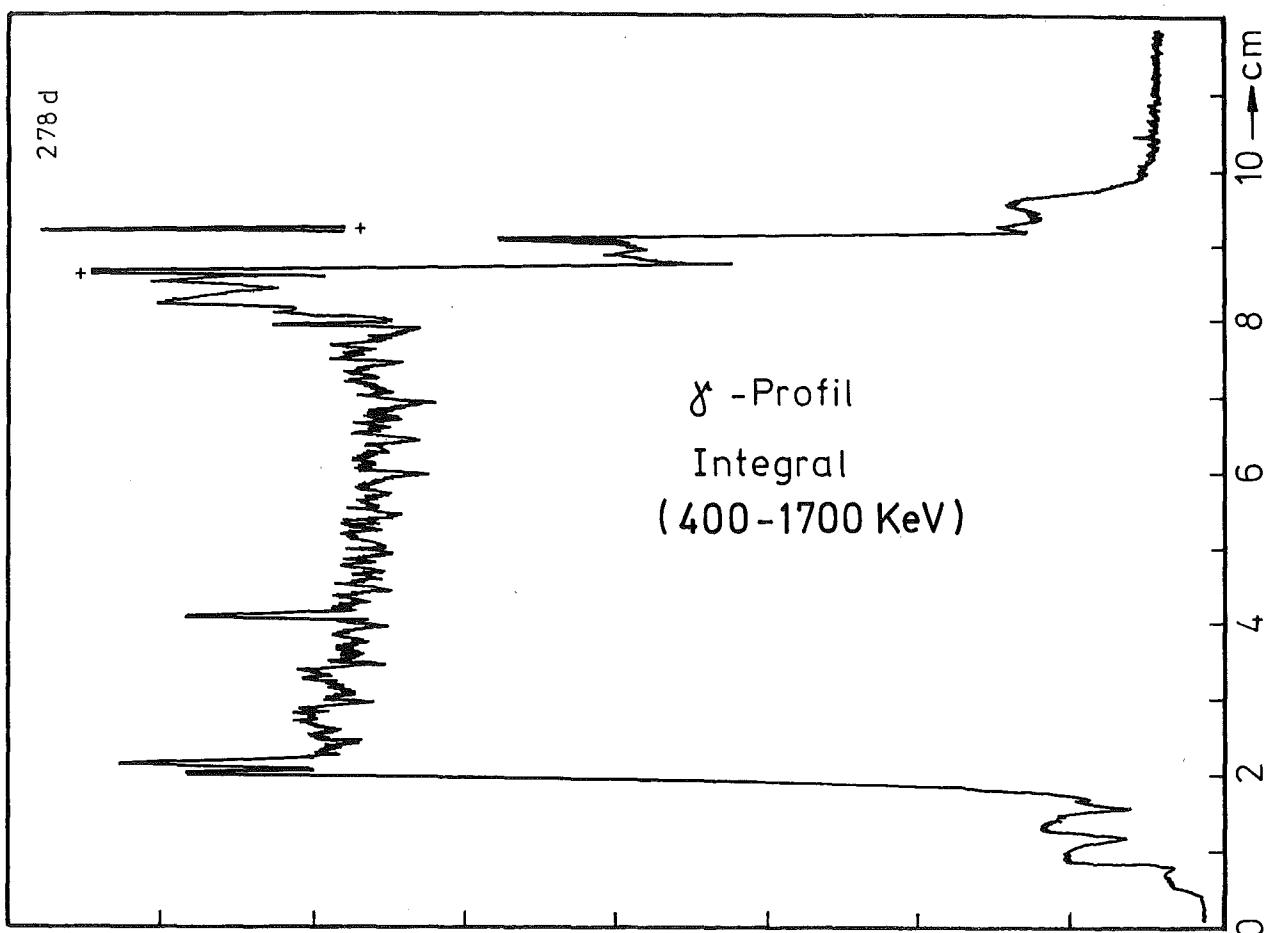
Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,00 mm
Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie:

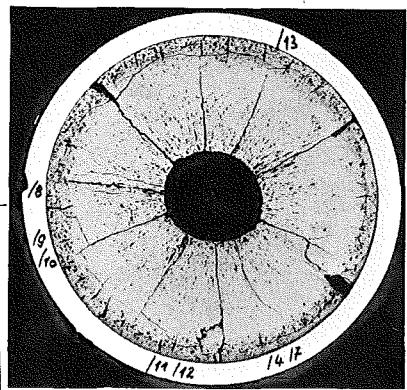
Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,070 mm
Schmierdichte : 85,3% th.D.

Bestrahlung:

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppelkapsel Typ 4a
Dauer : 425,3 Vollasttage
Ende : 13. 7. 70
Rechn. Abbrand mittl. : 76,4 MWD/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 450 / 321 W/cm



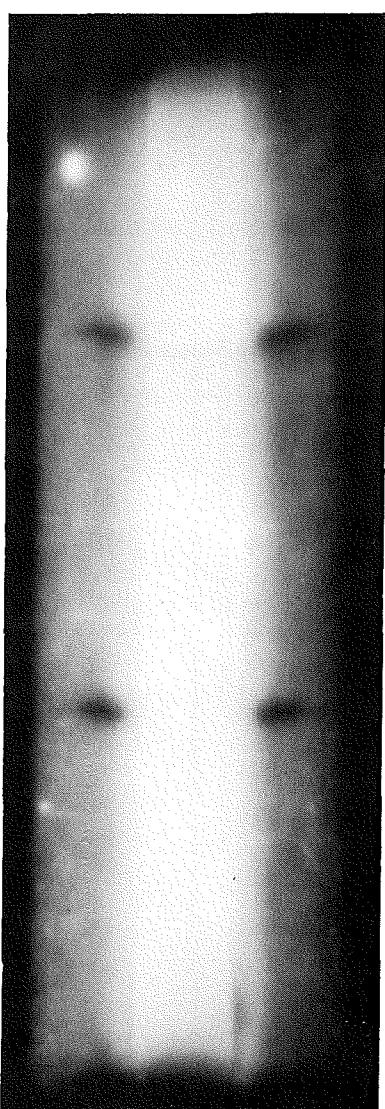
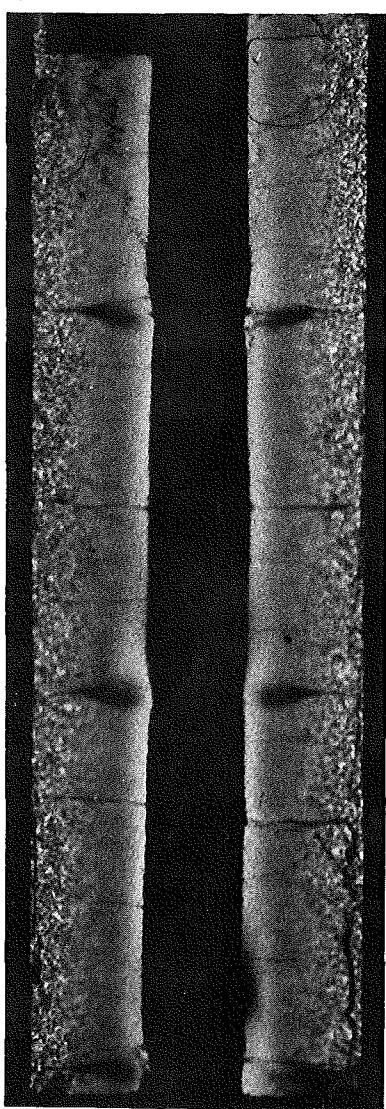
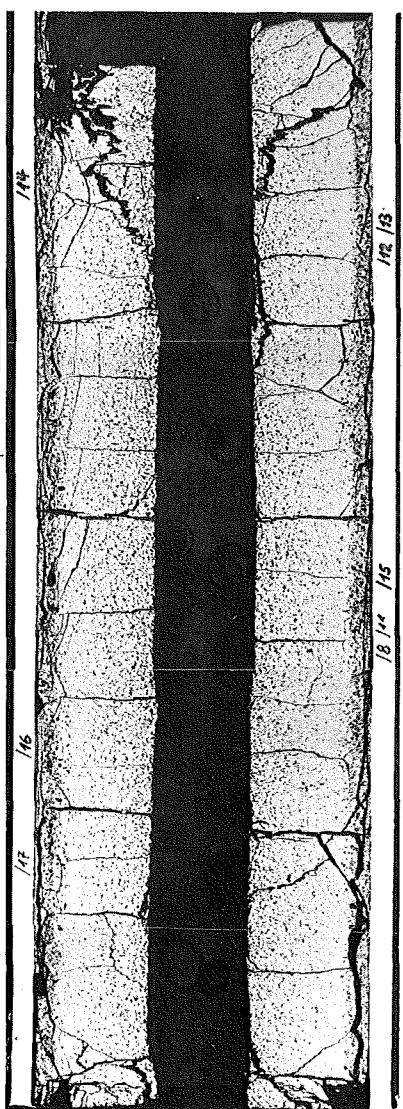
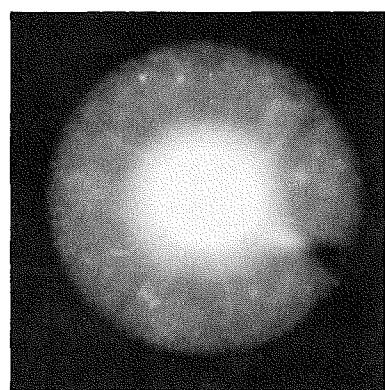
A



B



C



1 mm



Prüfling 4B-5

Brennstoff:

Form : Tabletten beidseitige Einsenkung
Zusammensetzung : $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$
Tablettendichte : 90% th.D.

Hülle:

Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,00 mm
Wandstärke : 0,38 mm

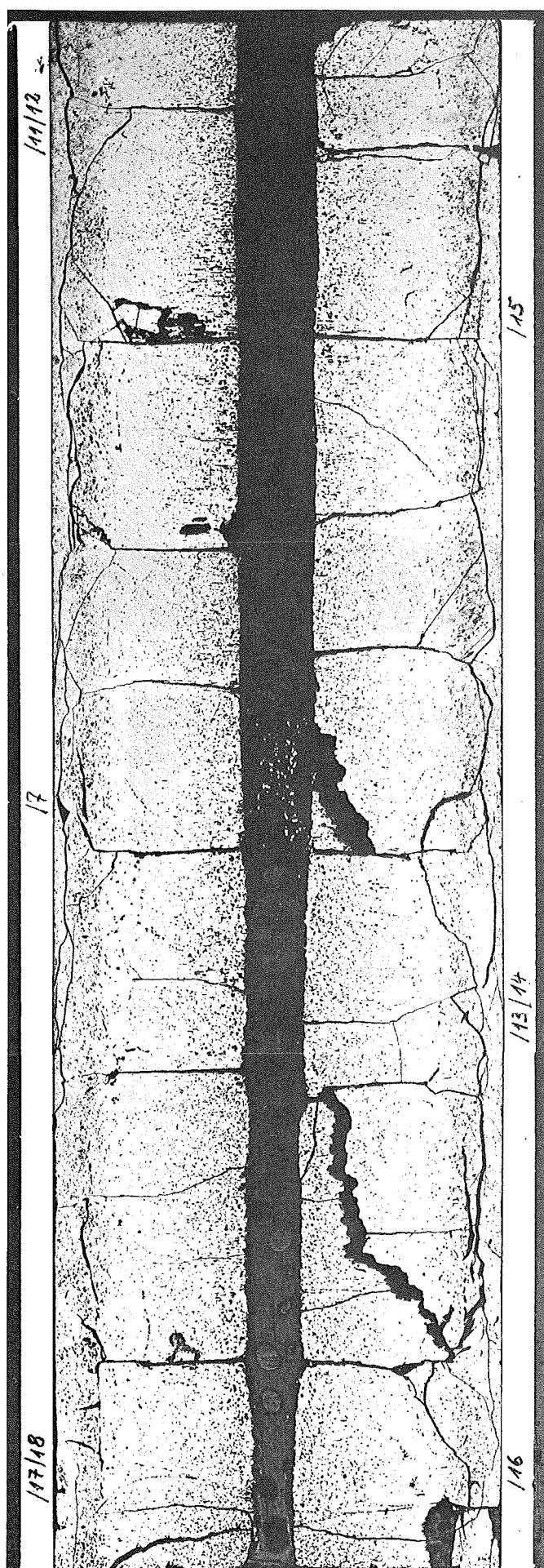
Geometrie:

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,070 mm
Schmierdichte : 85,3% th.D.

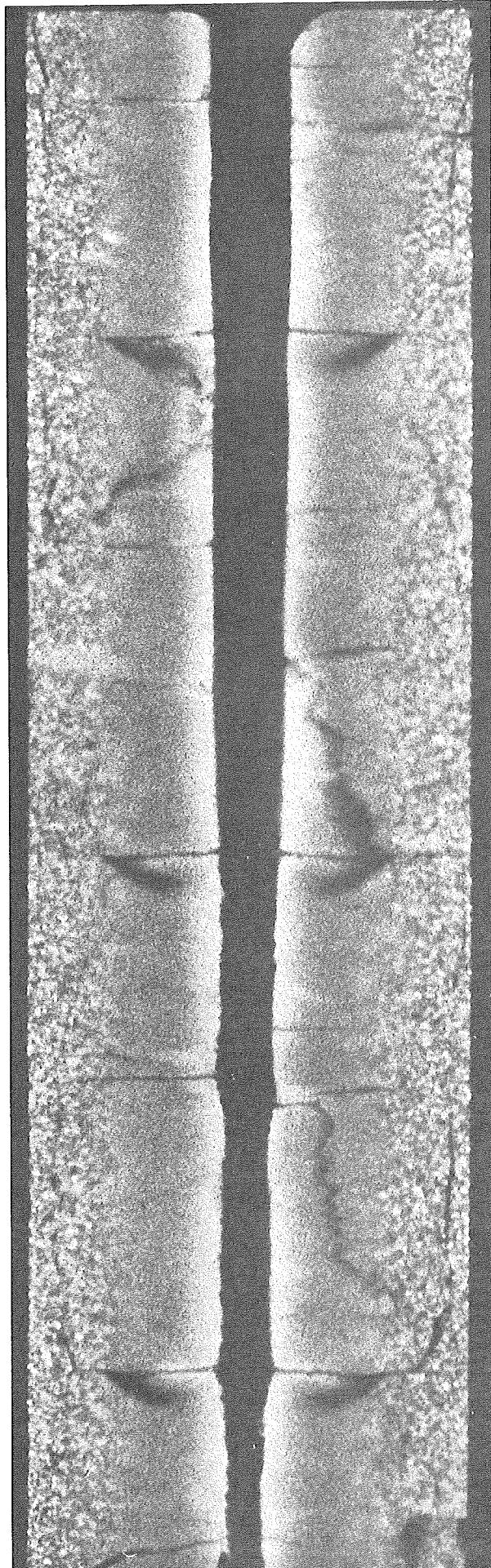
Bestrahlung:

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppelkapsel Typ 4a
Dauer : 425,3 Vollasttage
Ende : 13. 7. 70
Rechn. Abbrand mittl. : 69,1 MWd/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 466 / 288 W/cm

A 2



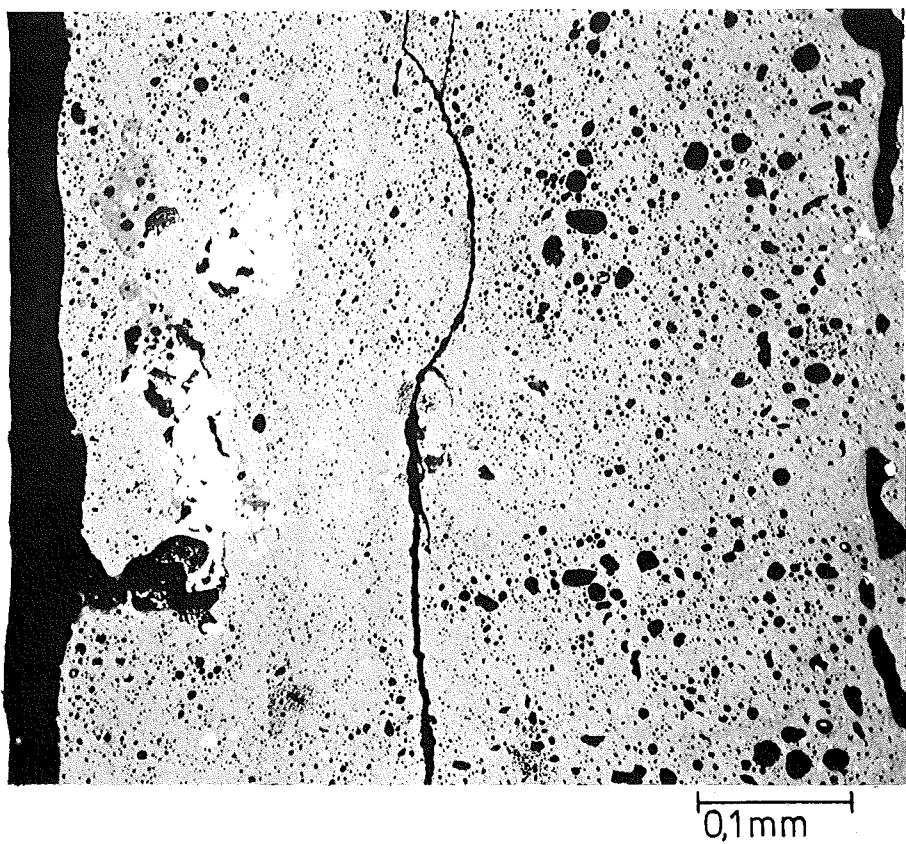
B 2



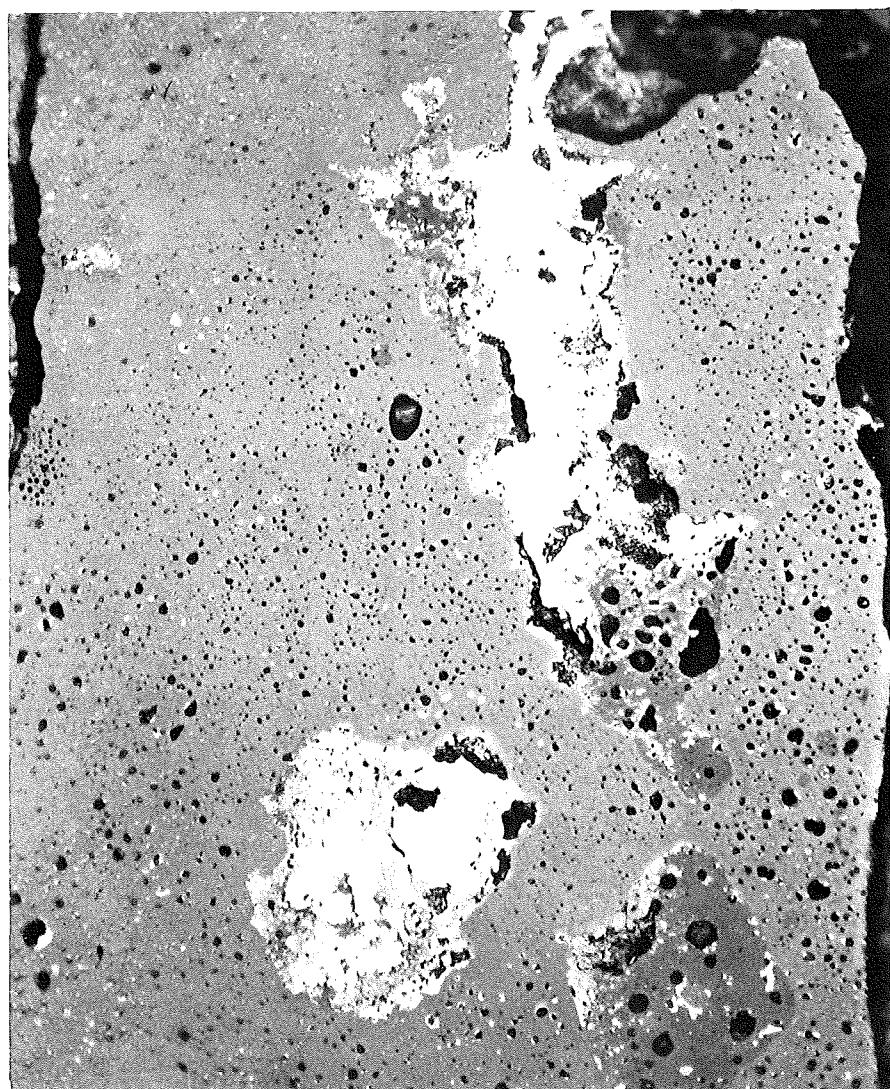
1 mm

-I/60-

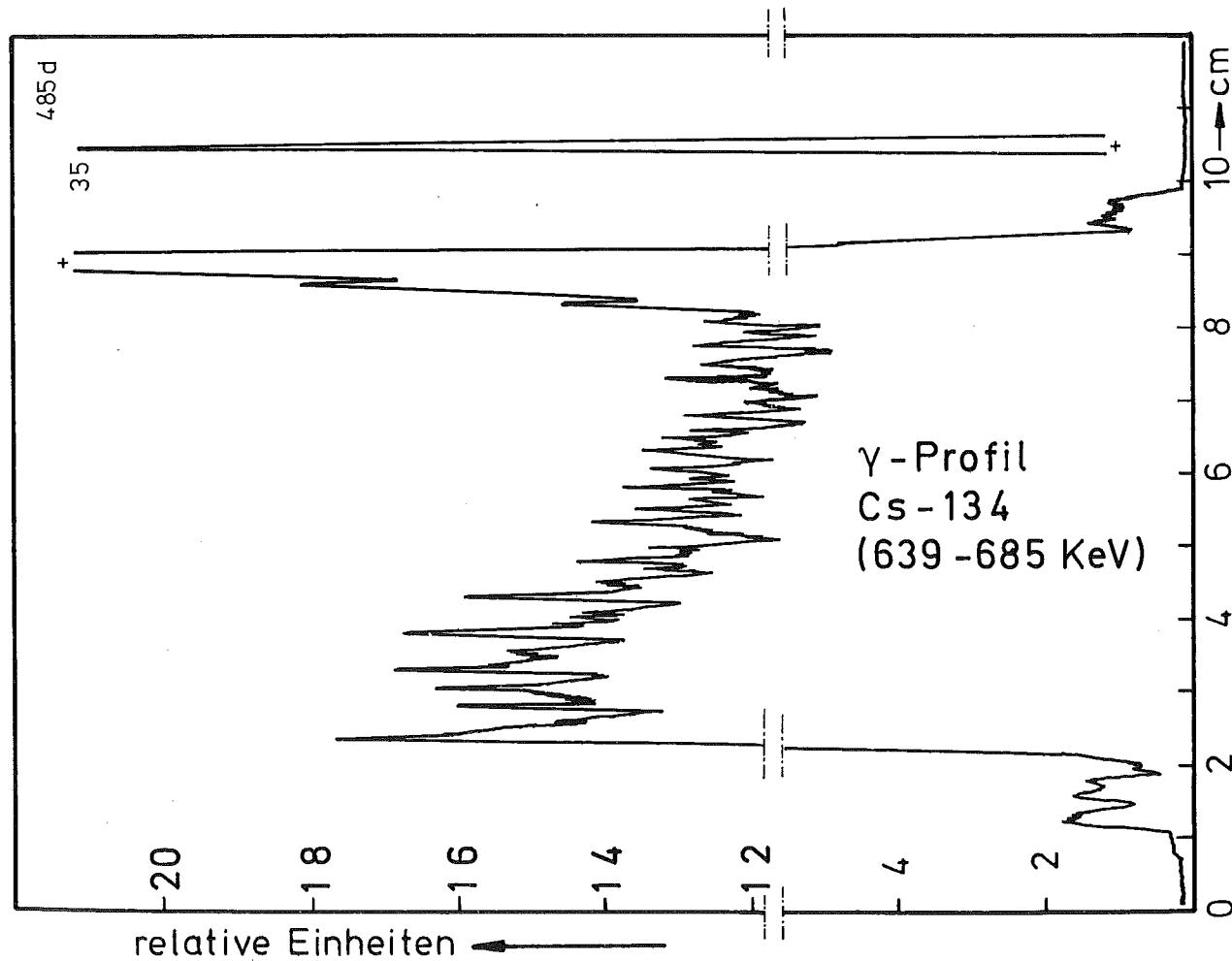
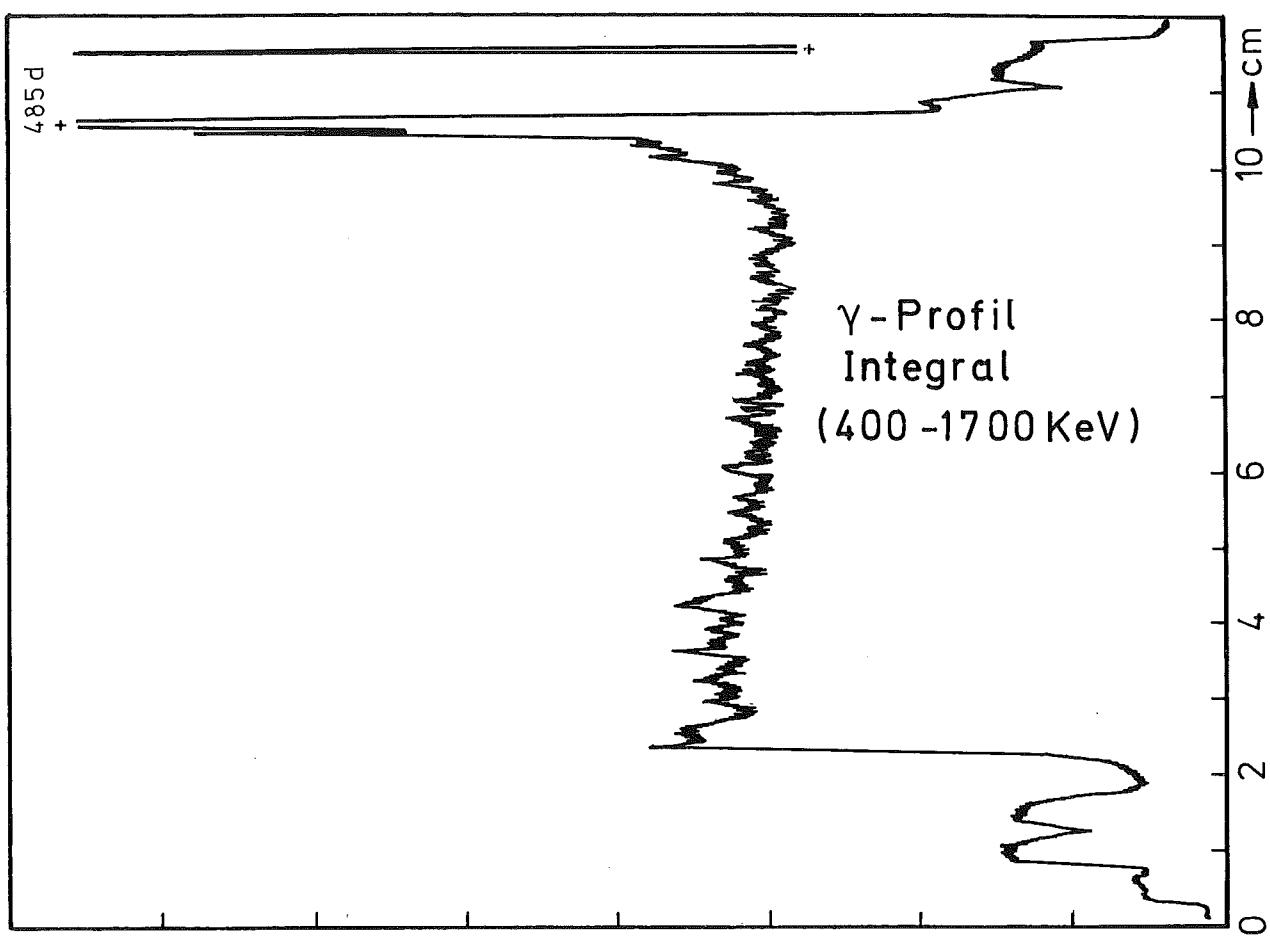
zu Prüfling 4B/11
A2



HZ-3a-49-4B/11-2/17 200x



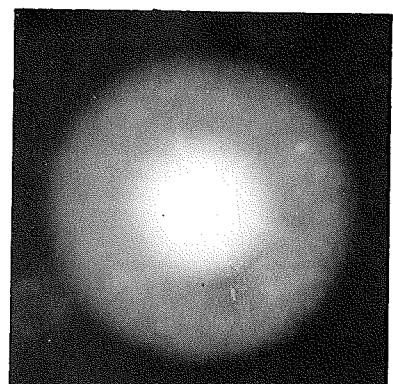
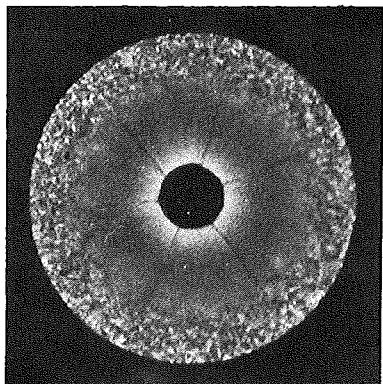
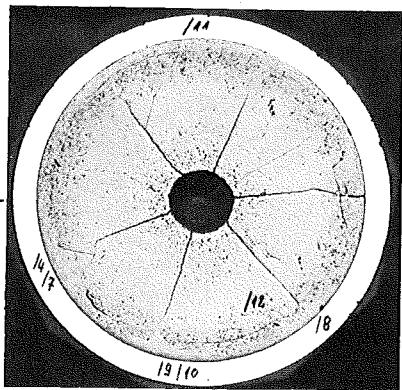
HZ-3a-49-4B/11-2/18 500x



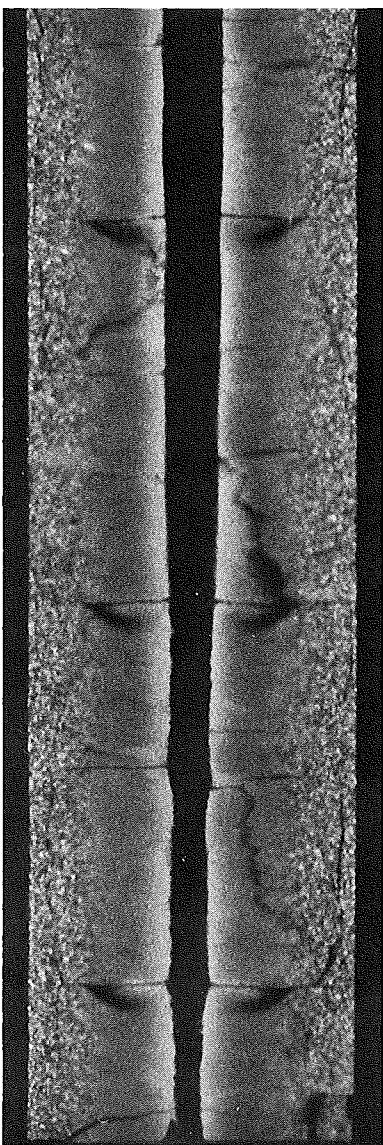
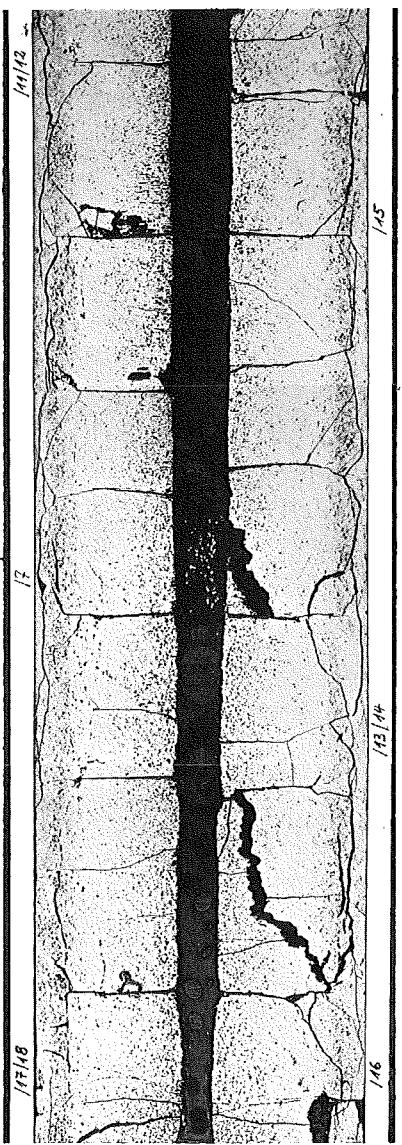
A

B

C



1



2

1 mm

Prüfling 4B-11



Brennstoff:

Form : Tabletten einseitige Einsenkung

Zusammensetzung : $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$

Tablettendichte : 90% th.D.

Hülle:

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 6,00 mm

Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie:

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : 0,070 mm

Schmierdichte : 85,3% th.D.

Bestrahlung:

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppelkapsel Typ 4a

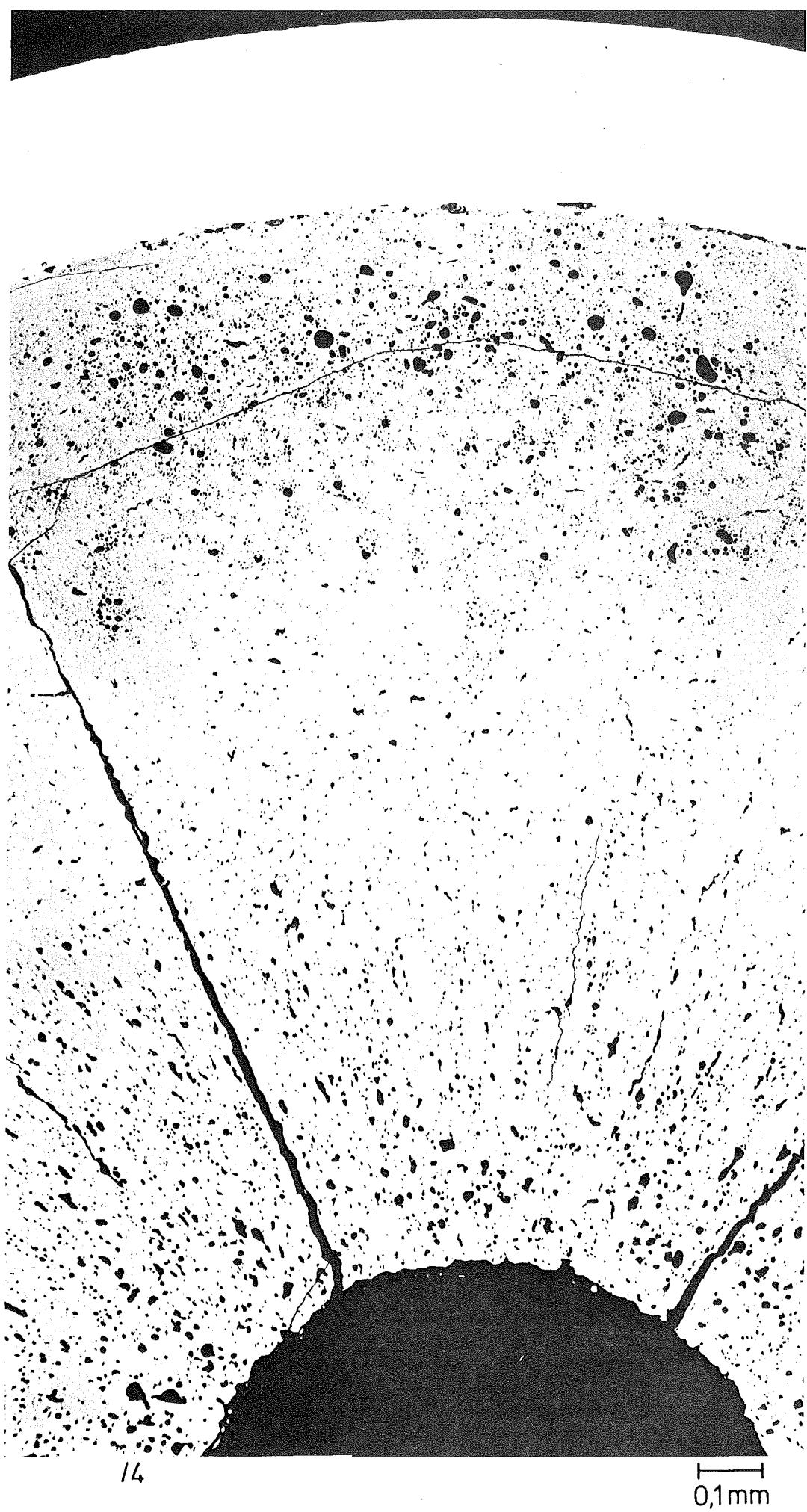
Dauer : 637,1 Vollasttage

Ende : 14. 6. 71

Rechn. Abbrand mittl. : 99,9 MWd/kg Metall

Stableistung max./mittl. : 536 / 281 W/cm

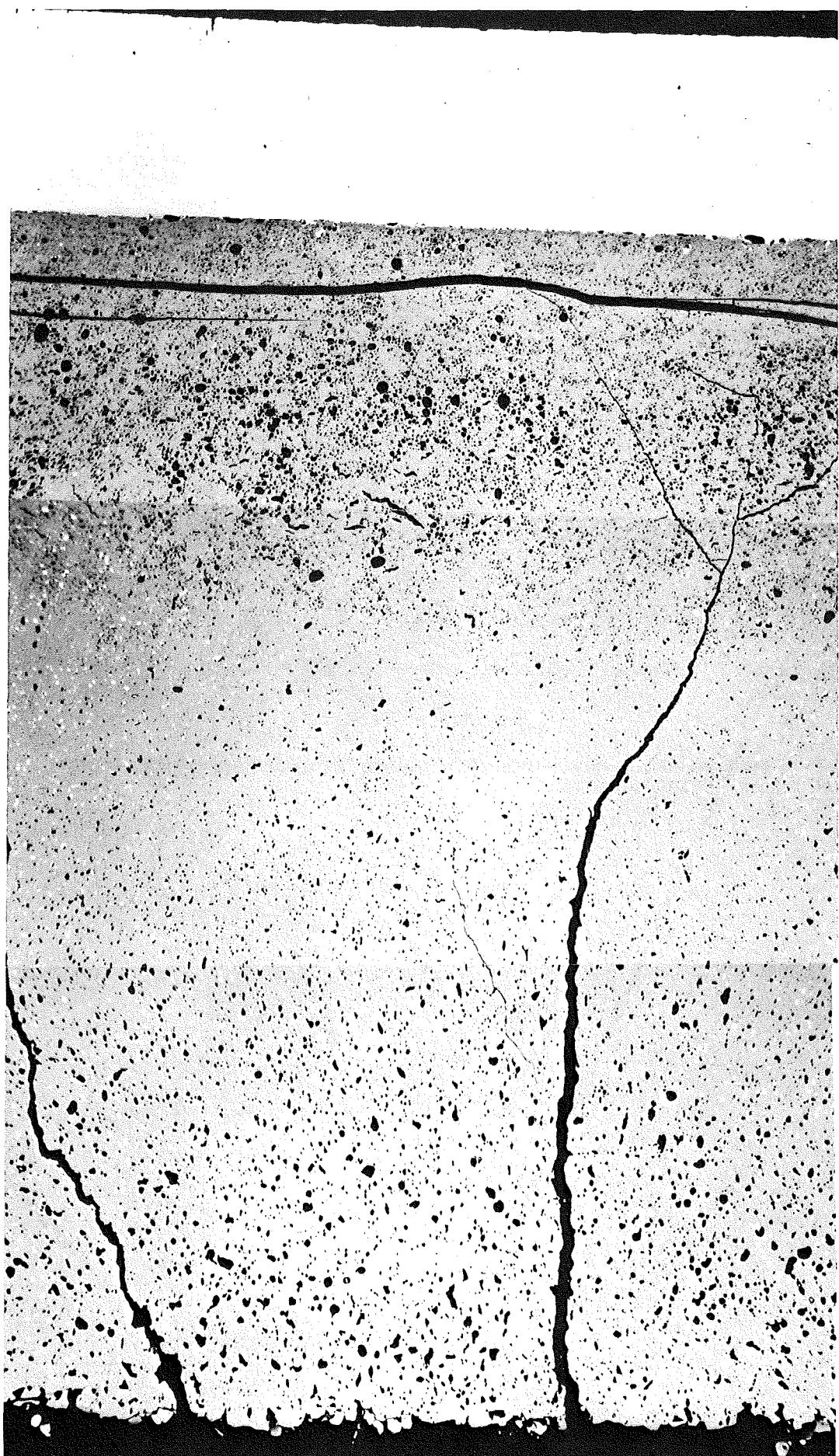
-I/63-
zu Prüfling 4B/12
A1



-I/64-

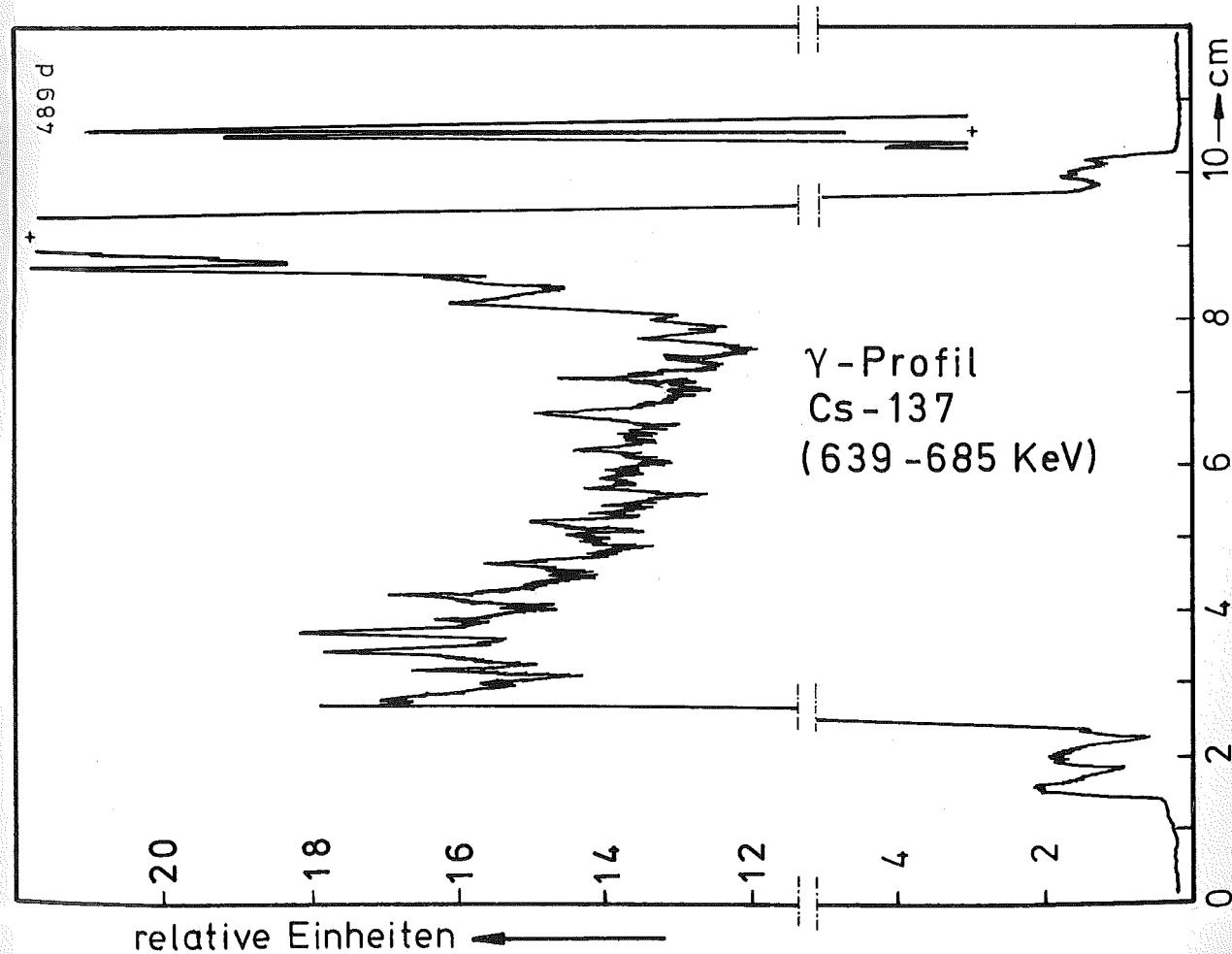
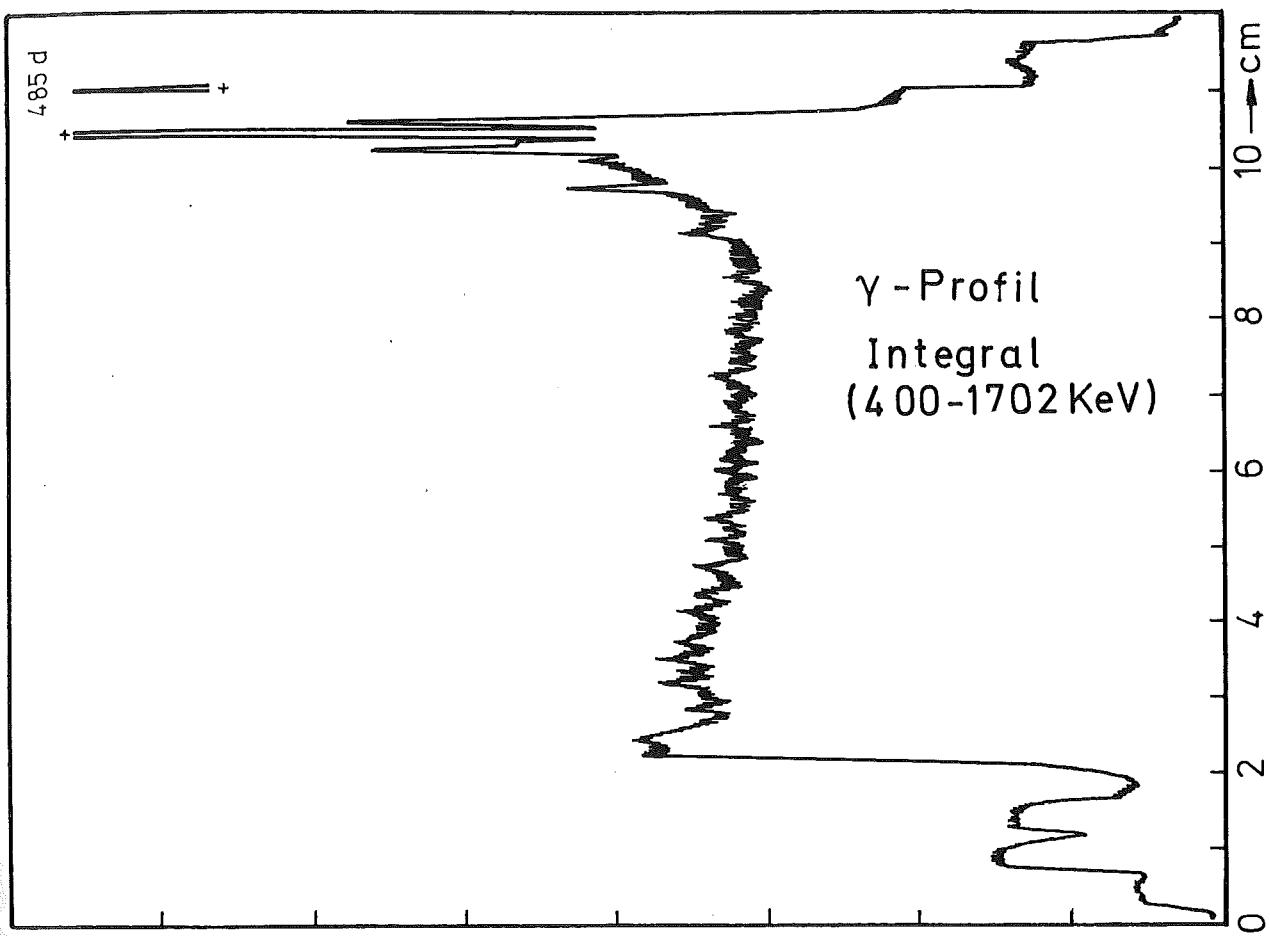
zu Prüfling 4B/12

A2



17

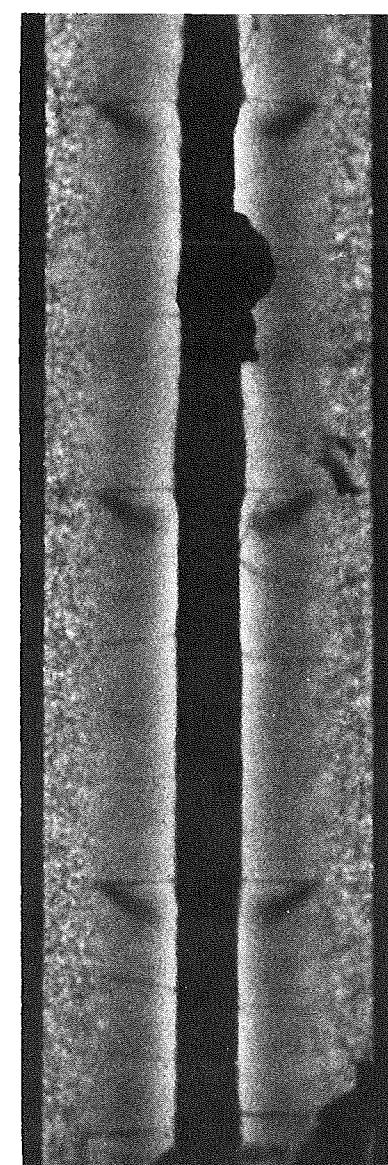
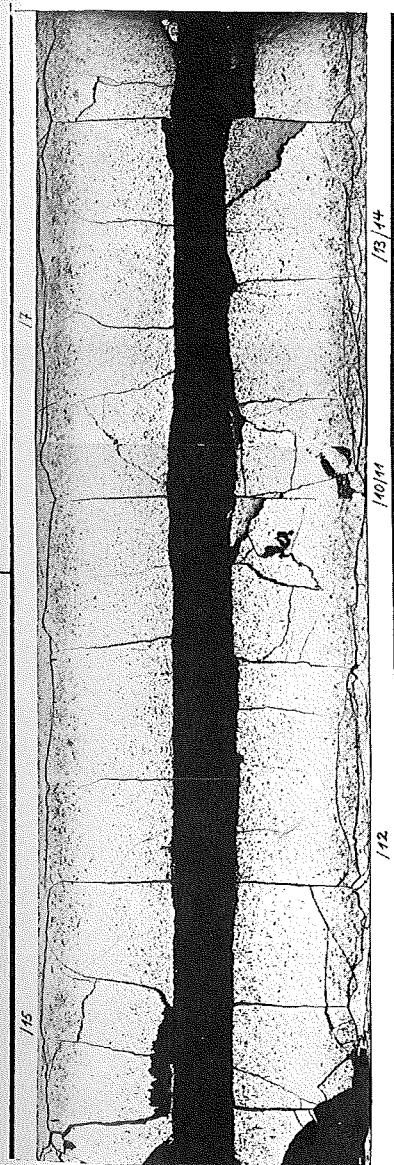
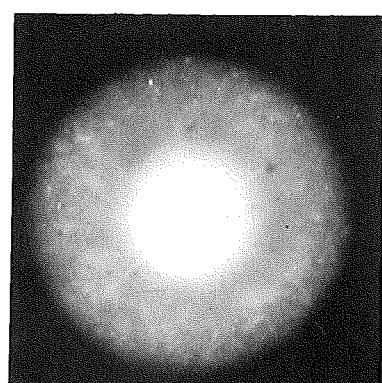
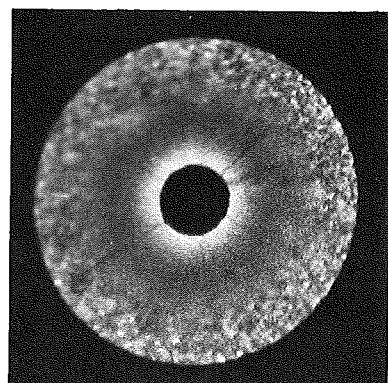
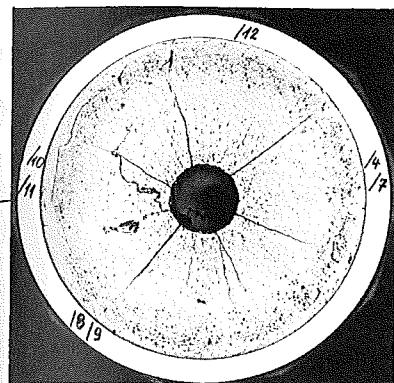
0,1 mm



A

B

C



1mm



Prüfling 4B-12

Brennstoff:

Form : Tabletten einseitige Einsenkung
Zusammensetzung : UO_2-PuO_2
Tablettendichte : 90% th.D.

Hülle:

Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,00 mm
Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie:

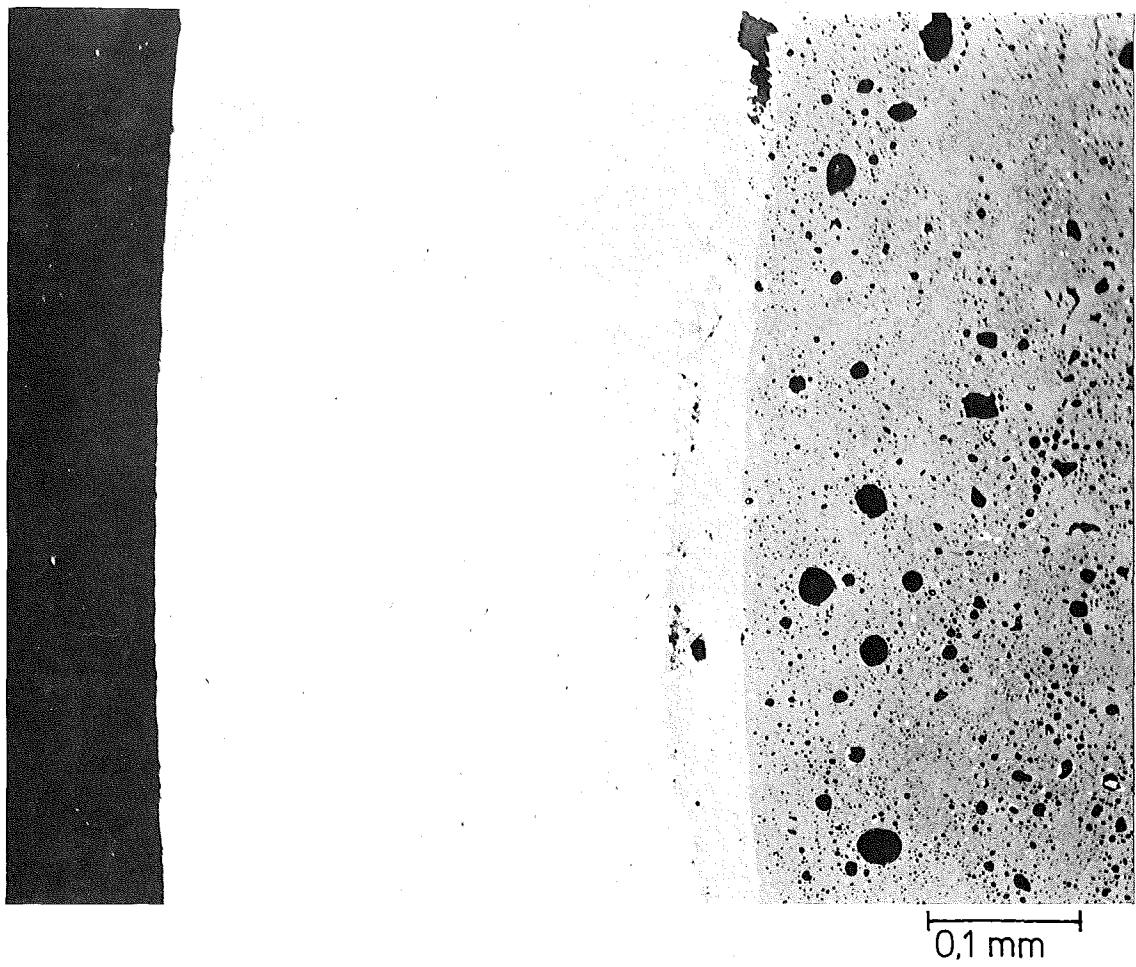
Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,070 mm
Schmierdichte : 85,3% th.D.

Bestrahlung:

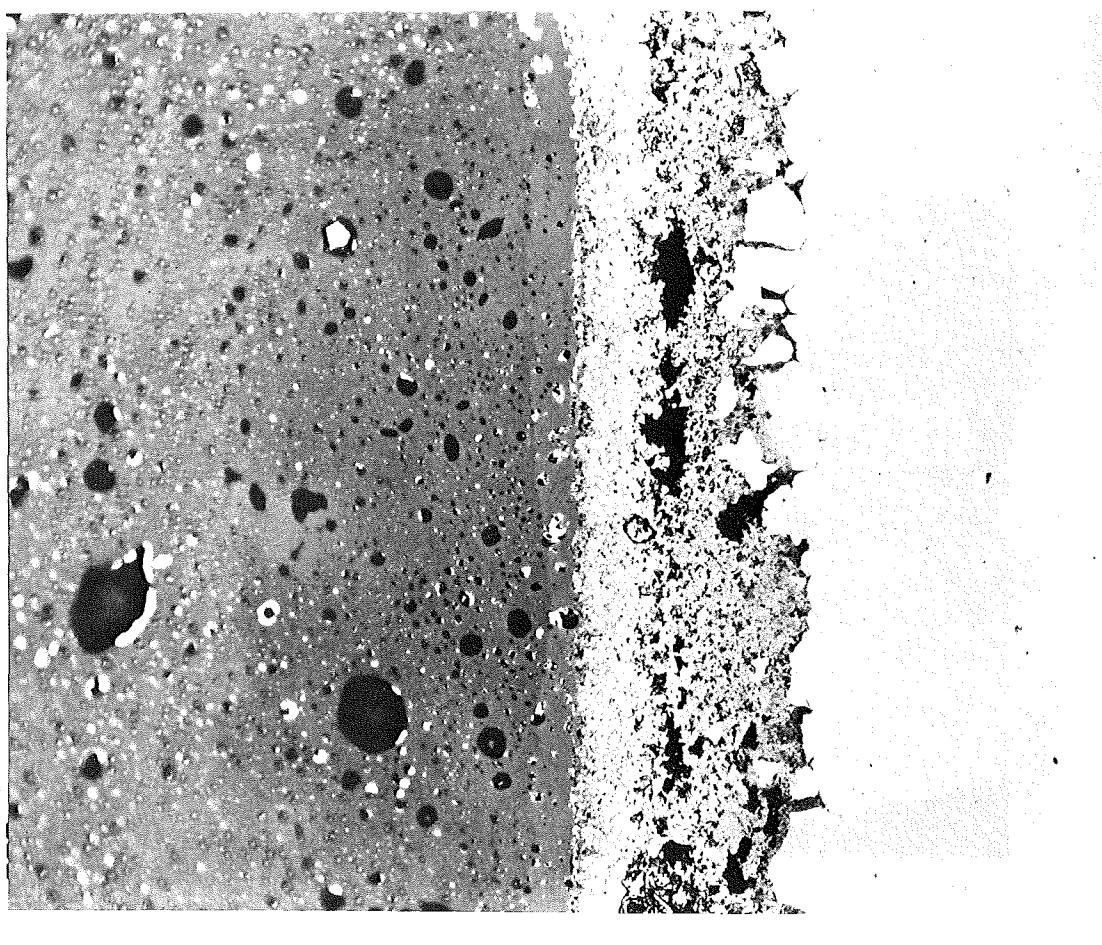
Einrichtung : NaK/PbBi-Doppelkapsel Typ 4a
Dauer : 637,1 Vollasttage
Ende : 14. 6. 71
Rechn. Abbrand mittl. : 62,8 MWd/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 477 / 188 W/cm

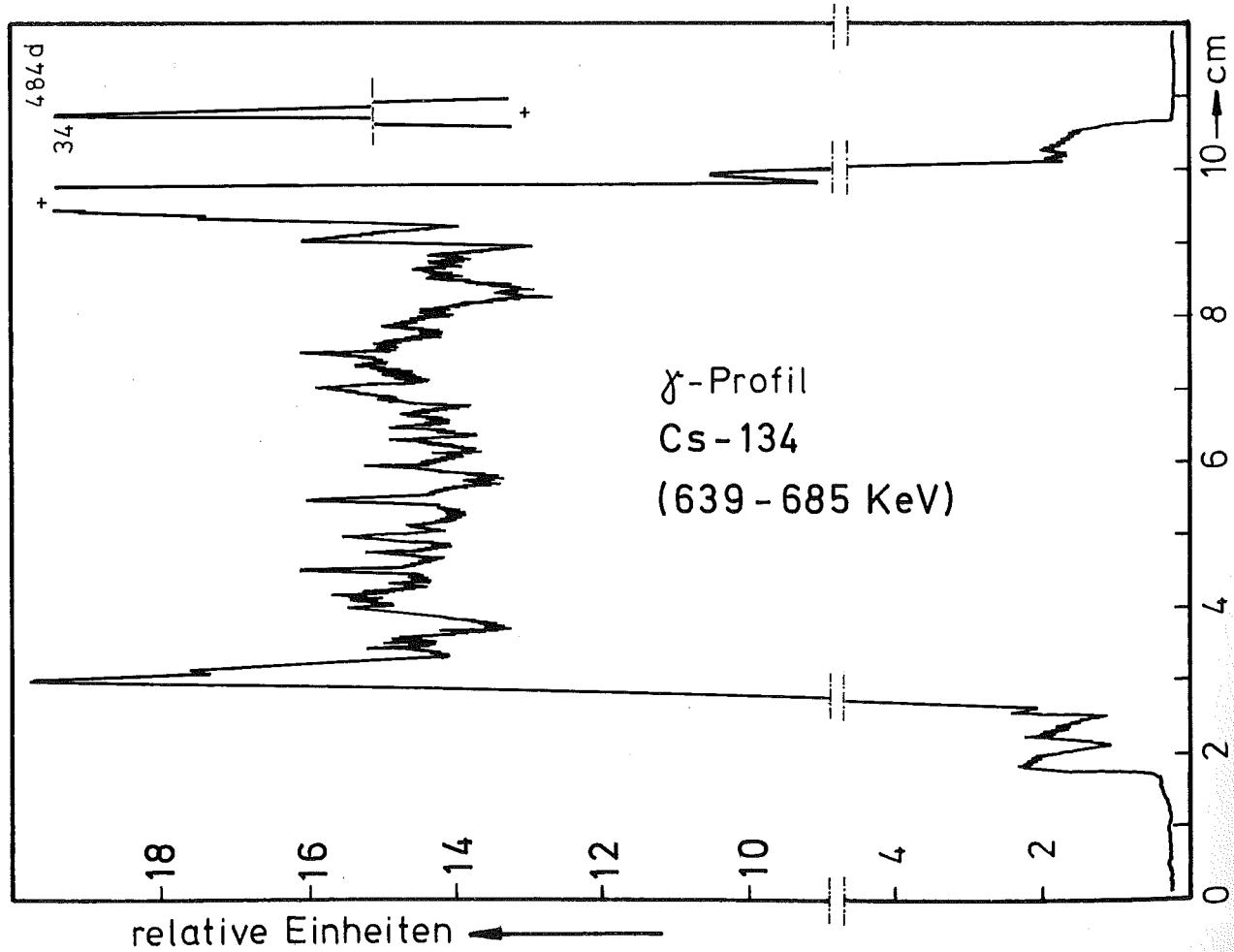
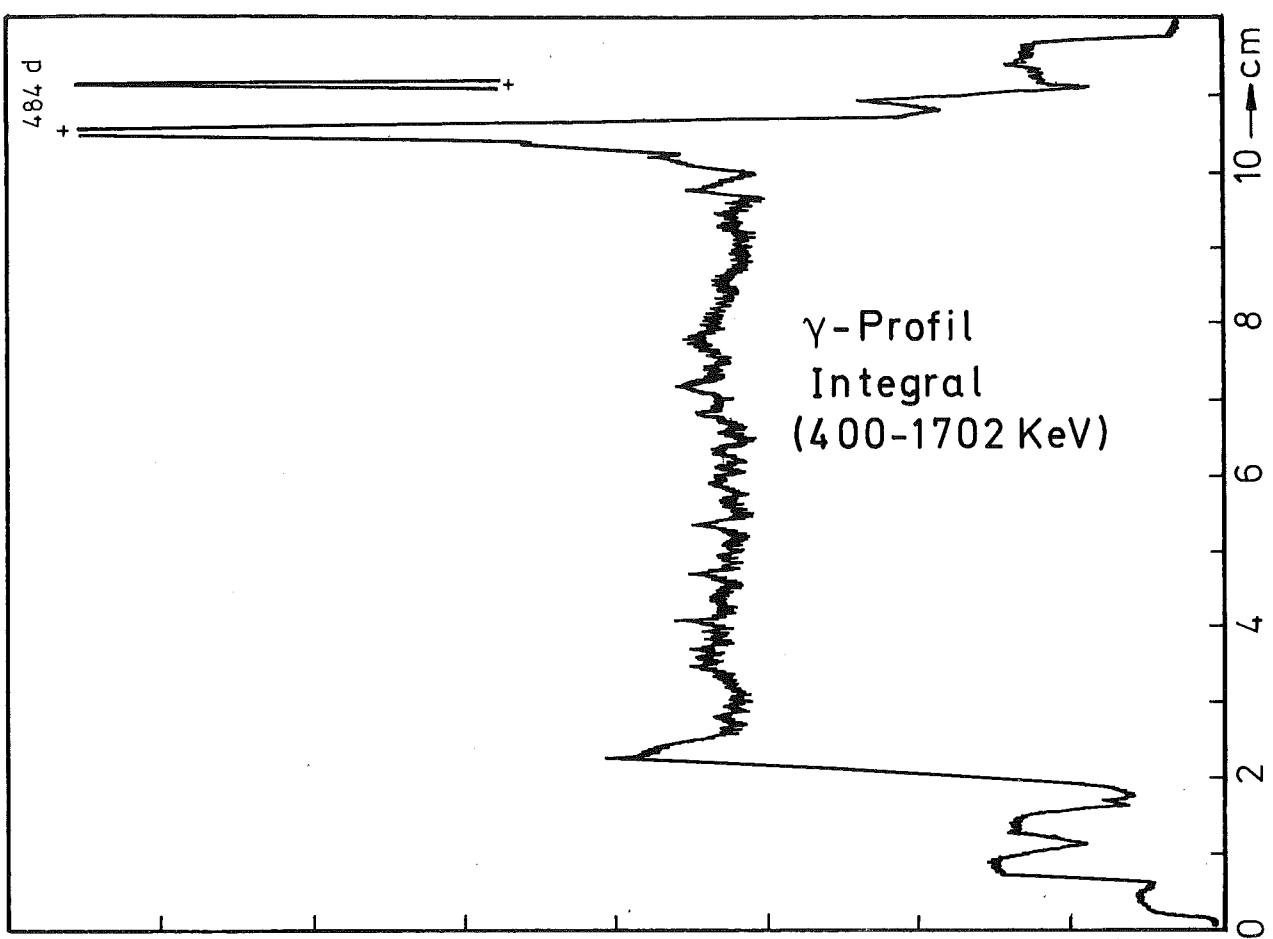


-I/68-
zu Prüfling 4B/10
A1

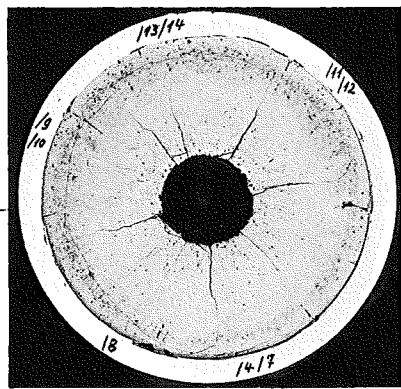


HZ-3a-49-4B/10-1/12 500x

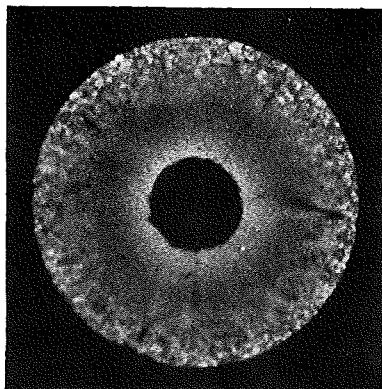




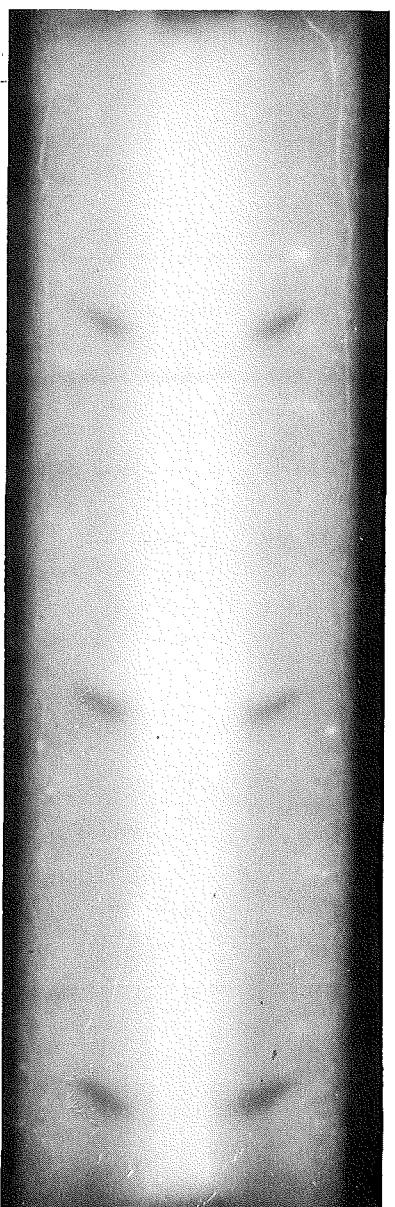
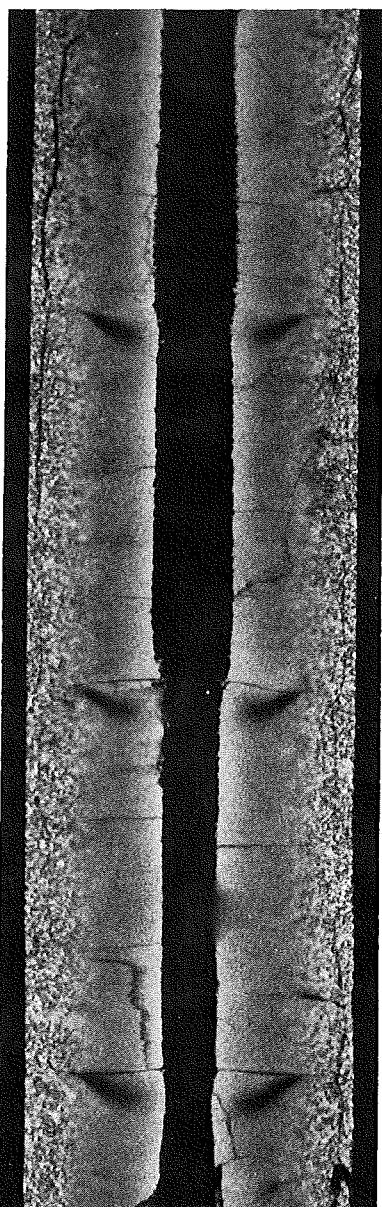
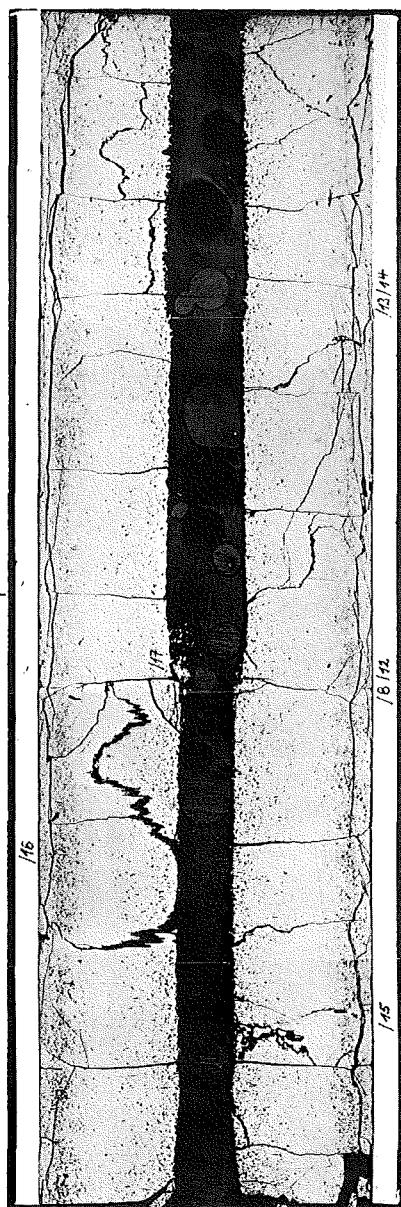
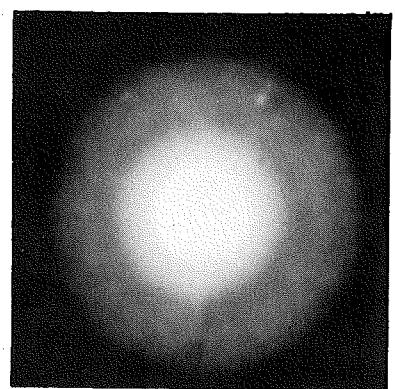
A



B



C



1mm

Prüfling 4B-10



Brennstoff:

Form : Tabletten einseitige Einsenkung
Zusammensetzung : $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$
Tablettendichte : 90% th.D.

Hülle:

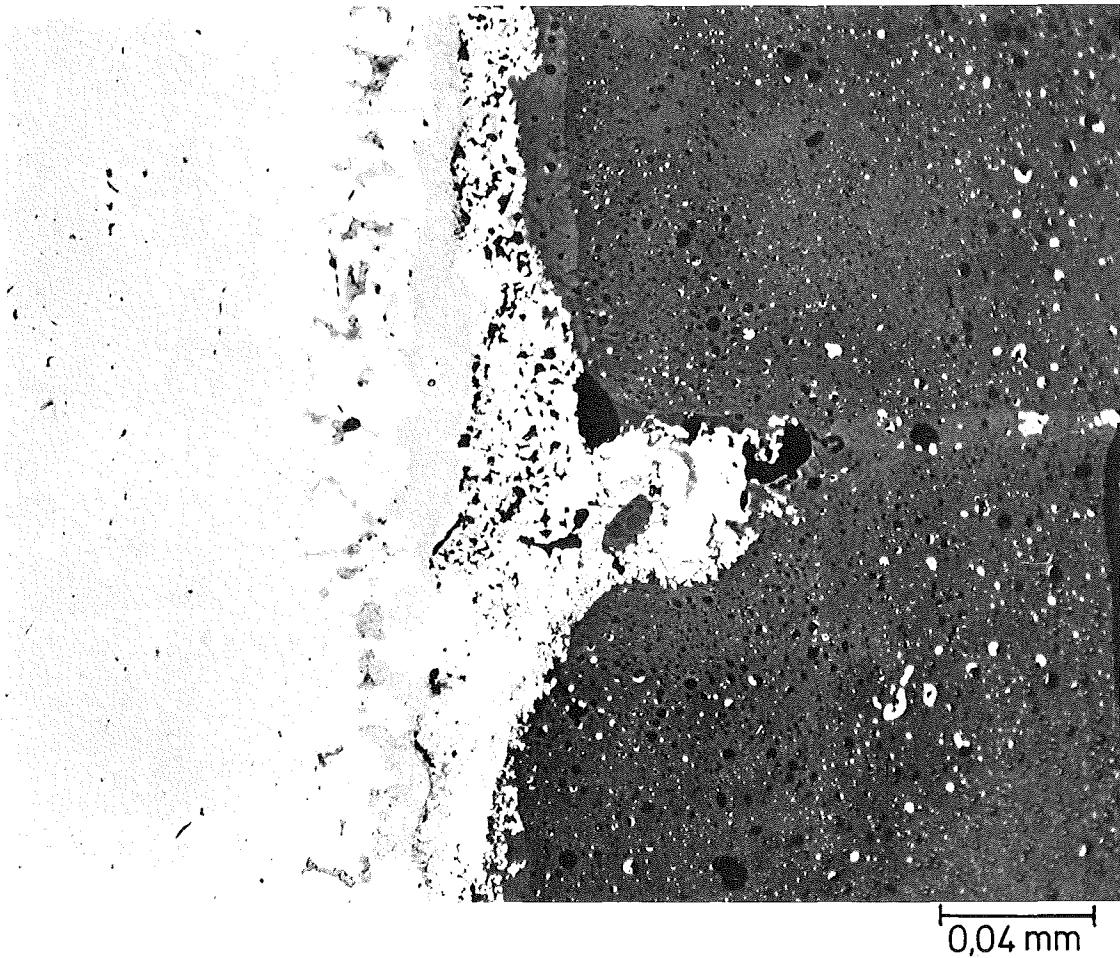
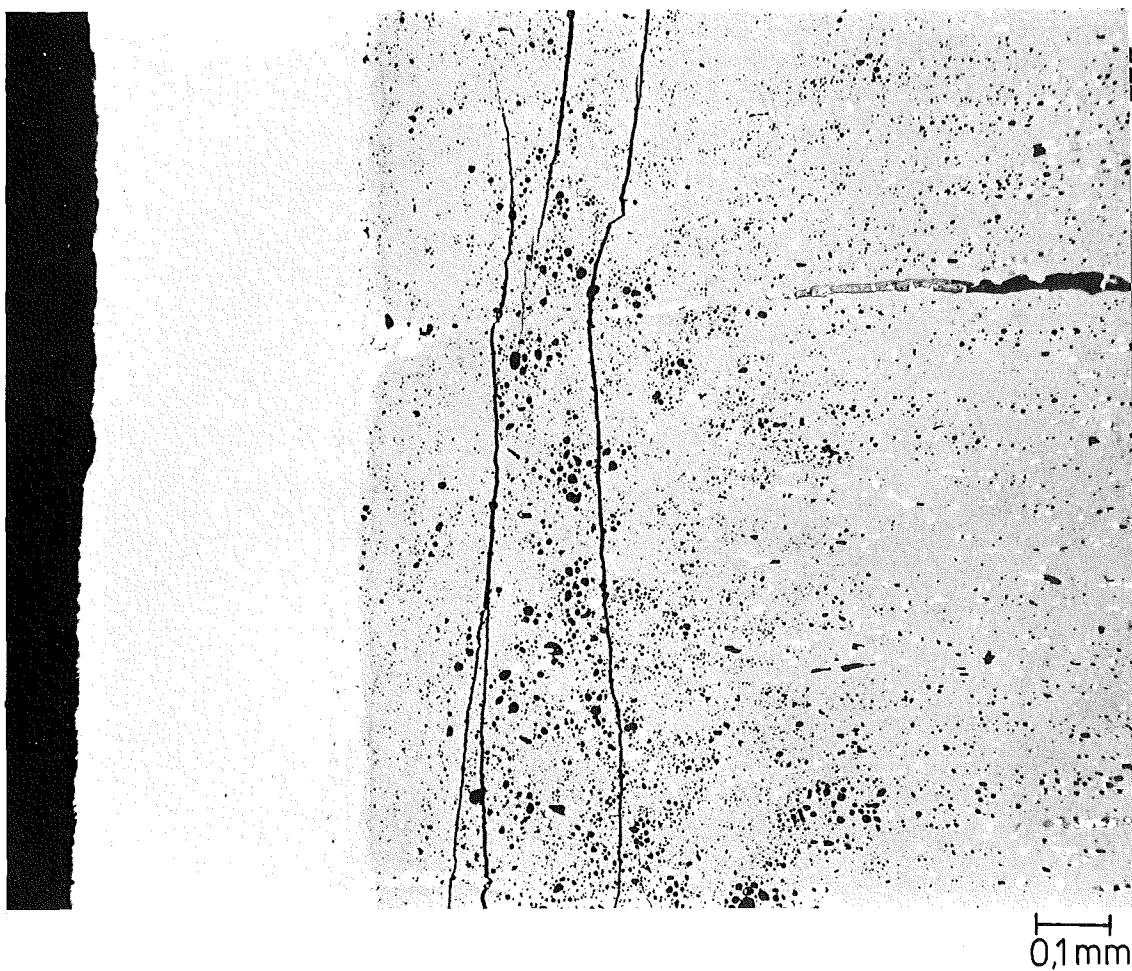
Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,00 mm
Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie:

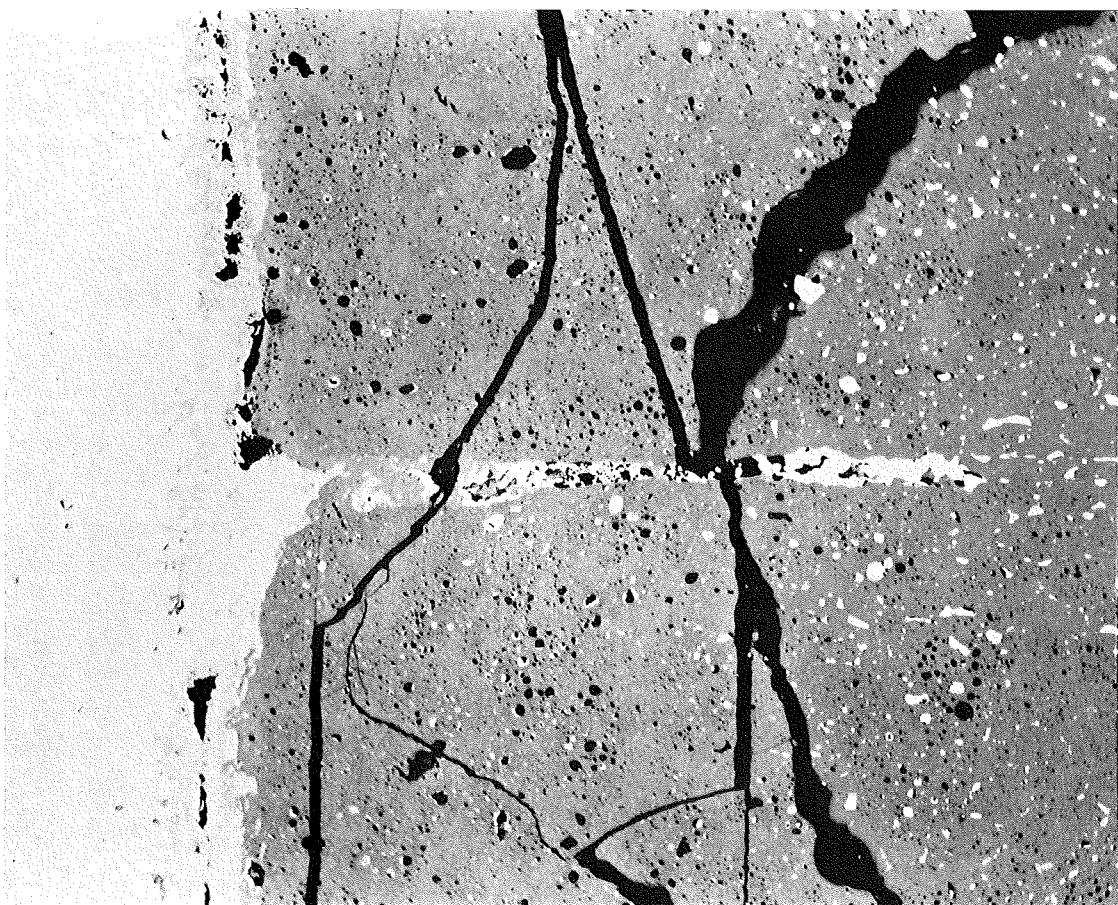
Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,070 mm
Schmierdichte : 85,3% th.D.

Bestrahlung:

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppelkapsel Typ 4a
Dauer : 637,1 Vollasttage
Ende : 14. 6. 71
Rechn. Abbrand mittl. : 110,3 MWd/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 545 / 309 W/cm

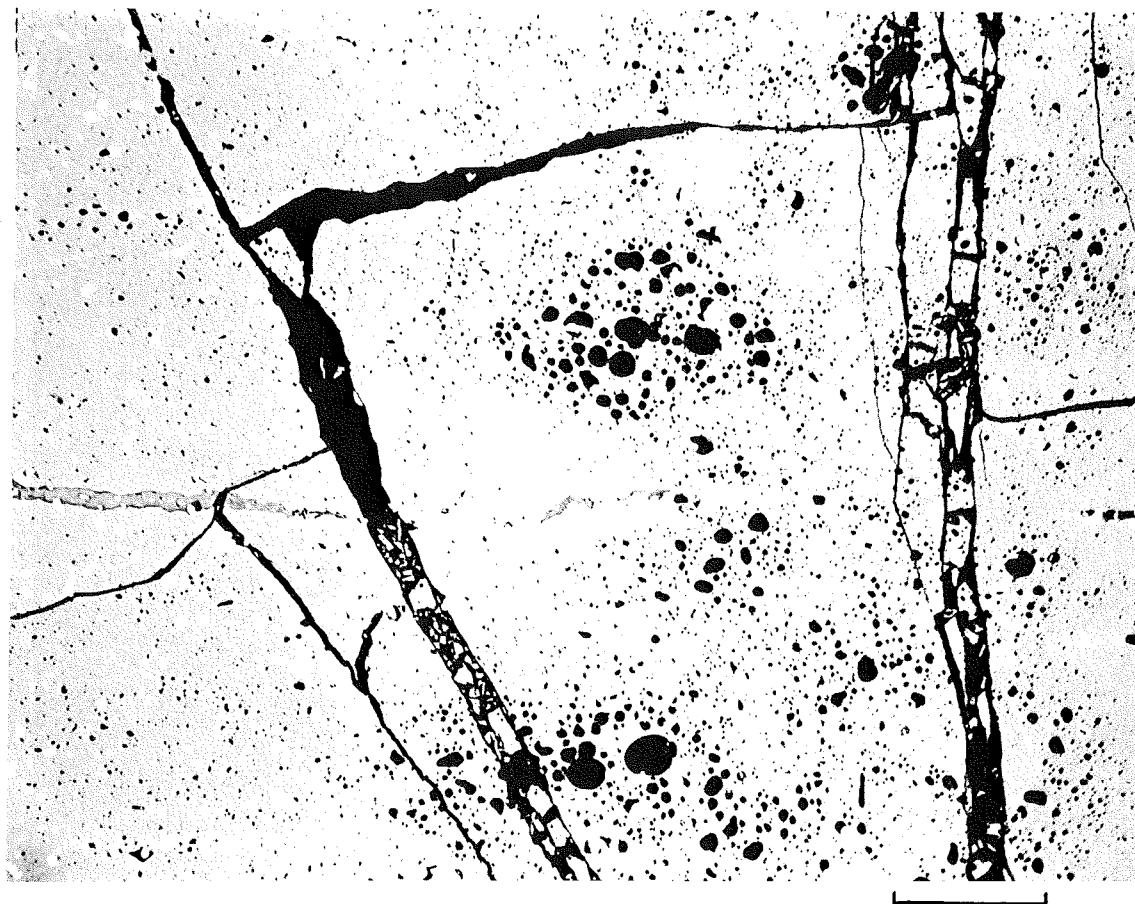


-I/72-
zu Prüfling 4B/6
A1



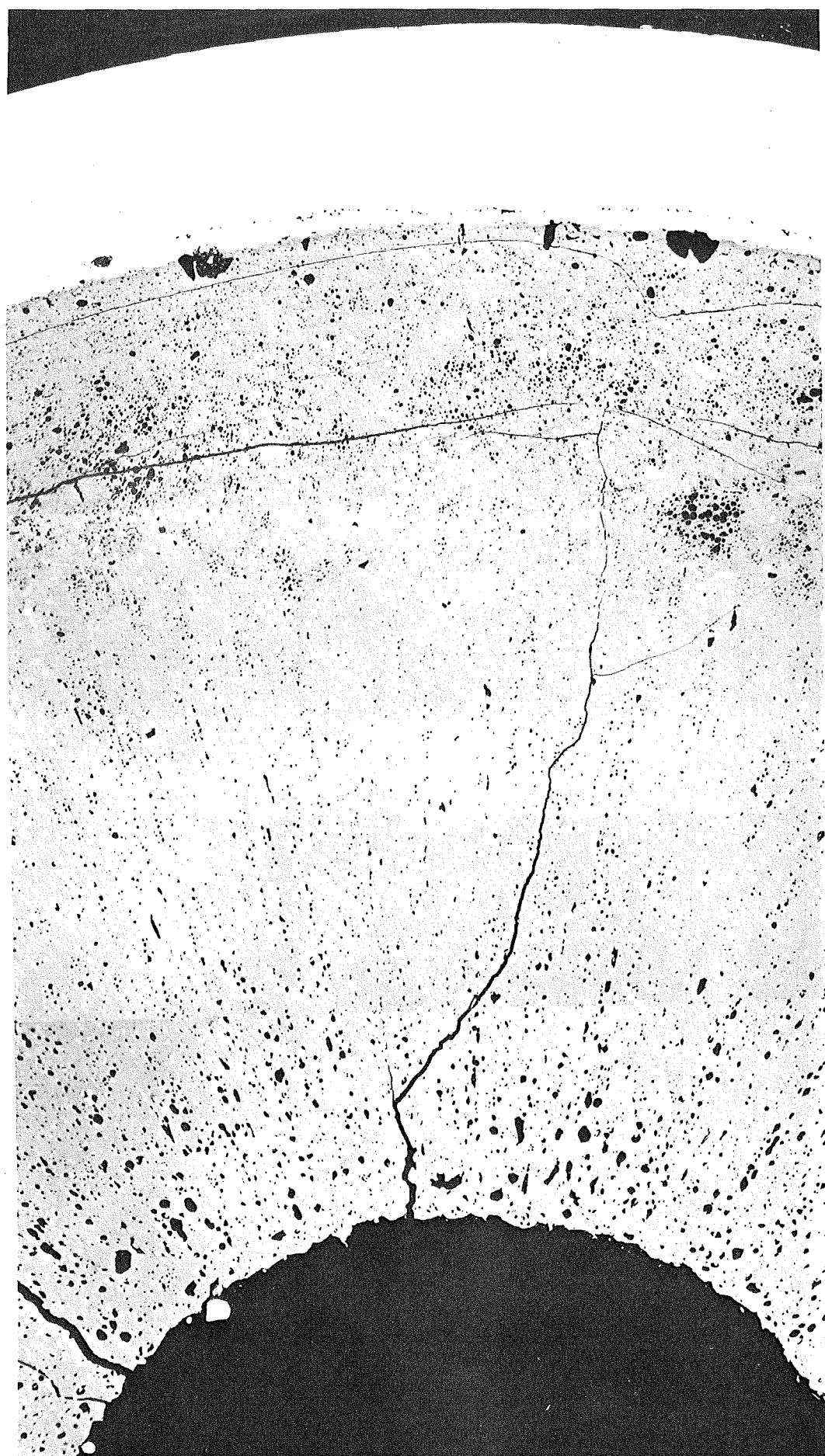
HZ-3a-49-4B/6-2/13 200x

HZ-3a-49-4B/6-2/18 200x



0,1mm

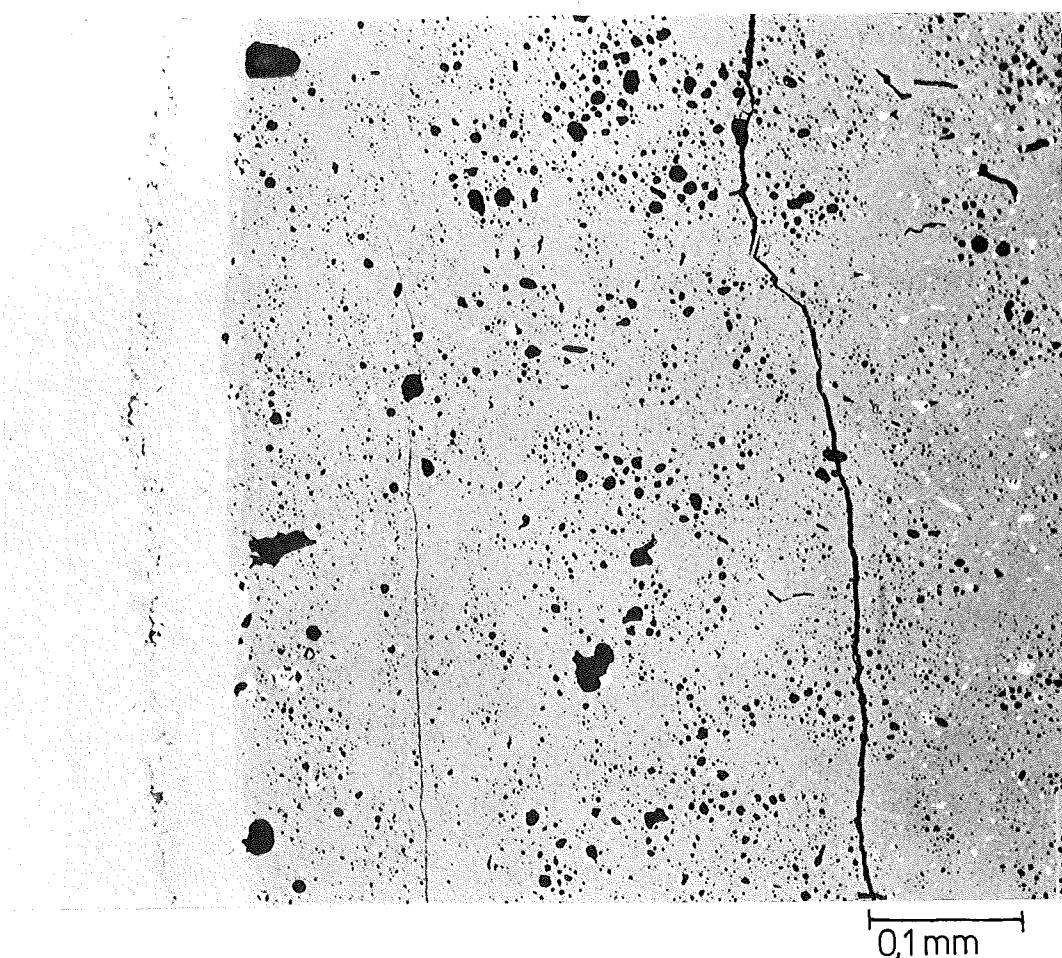
- I/73-
zu Prüfling 4B/6
A2



14

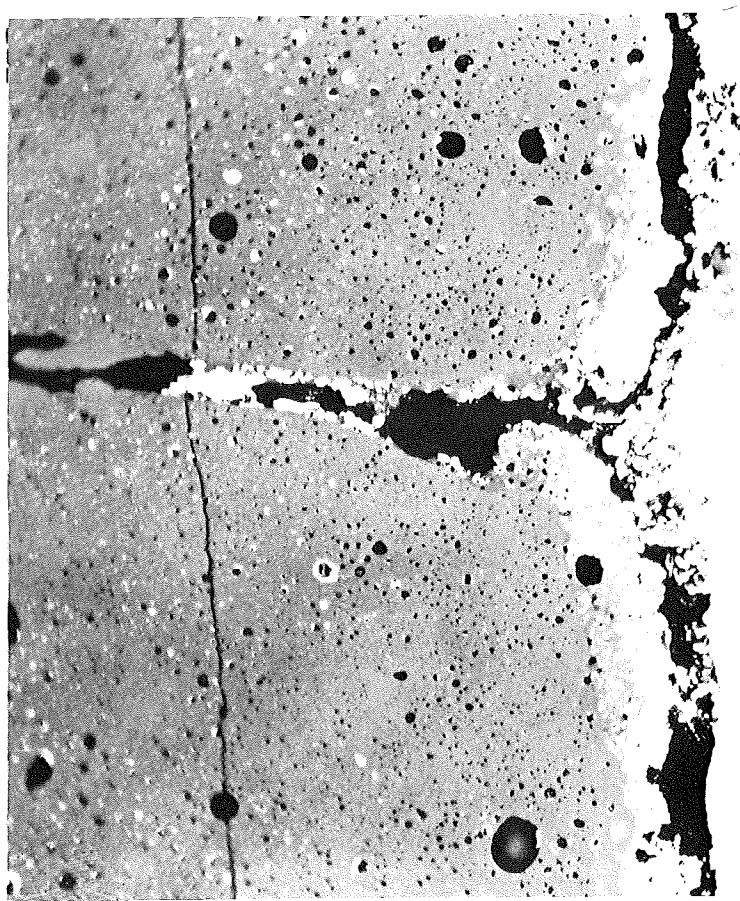
0,1mm

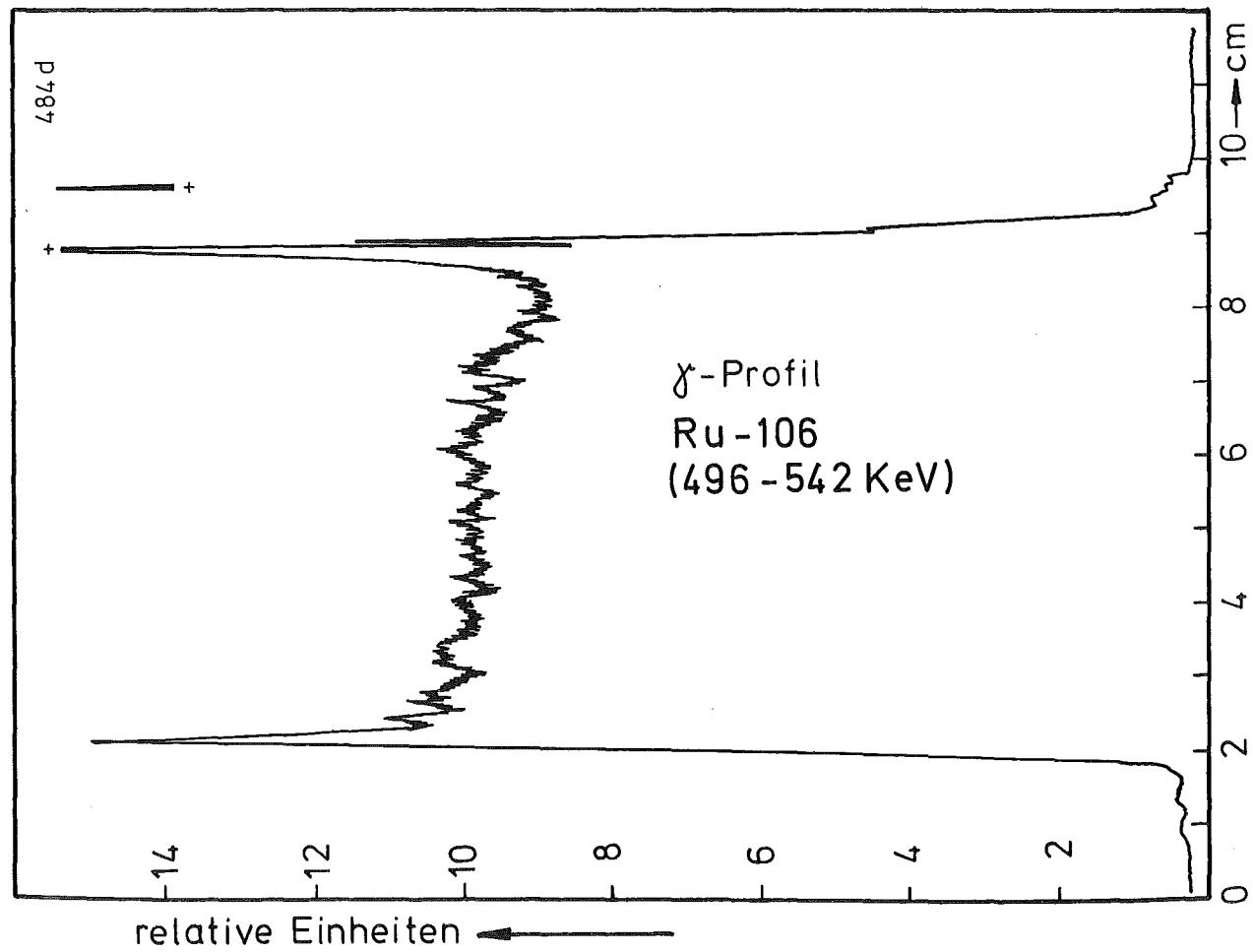
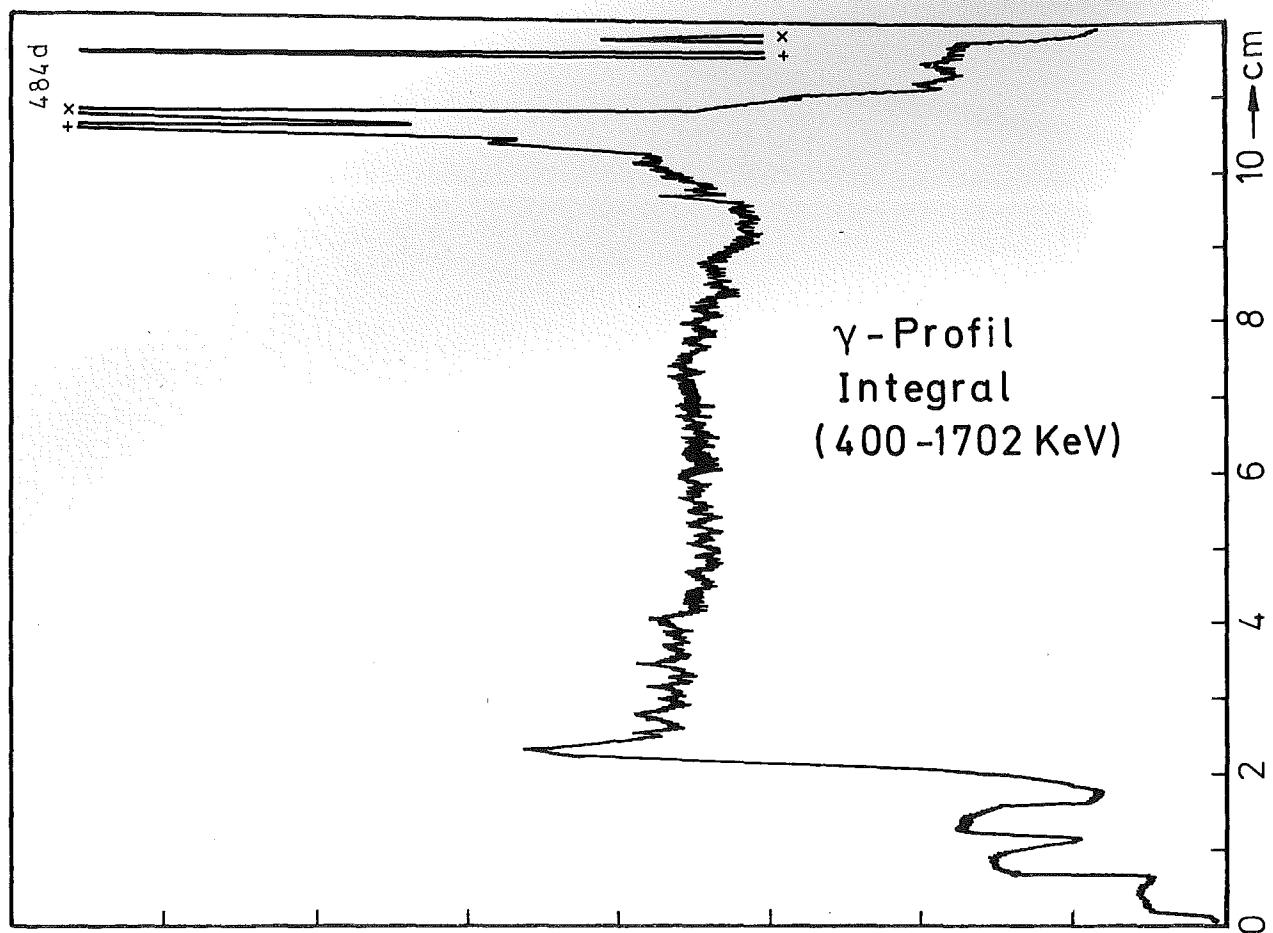
- I/74-
zu Prüfling 4B/6
A2

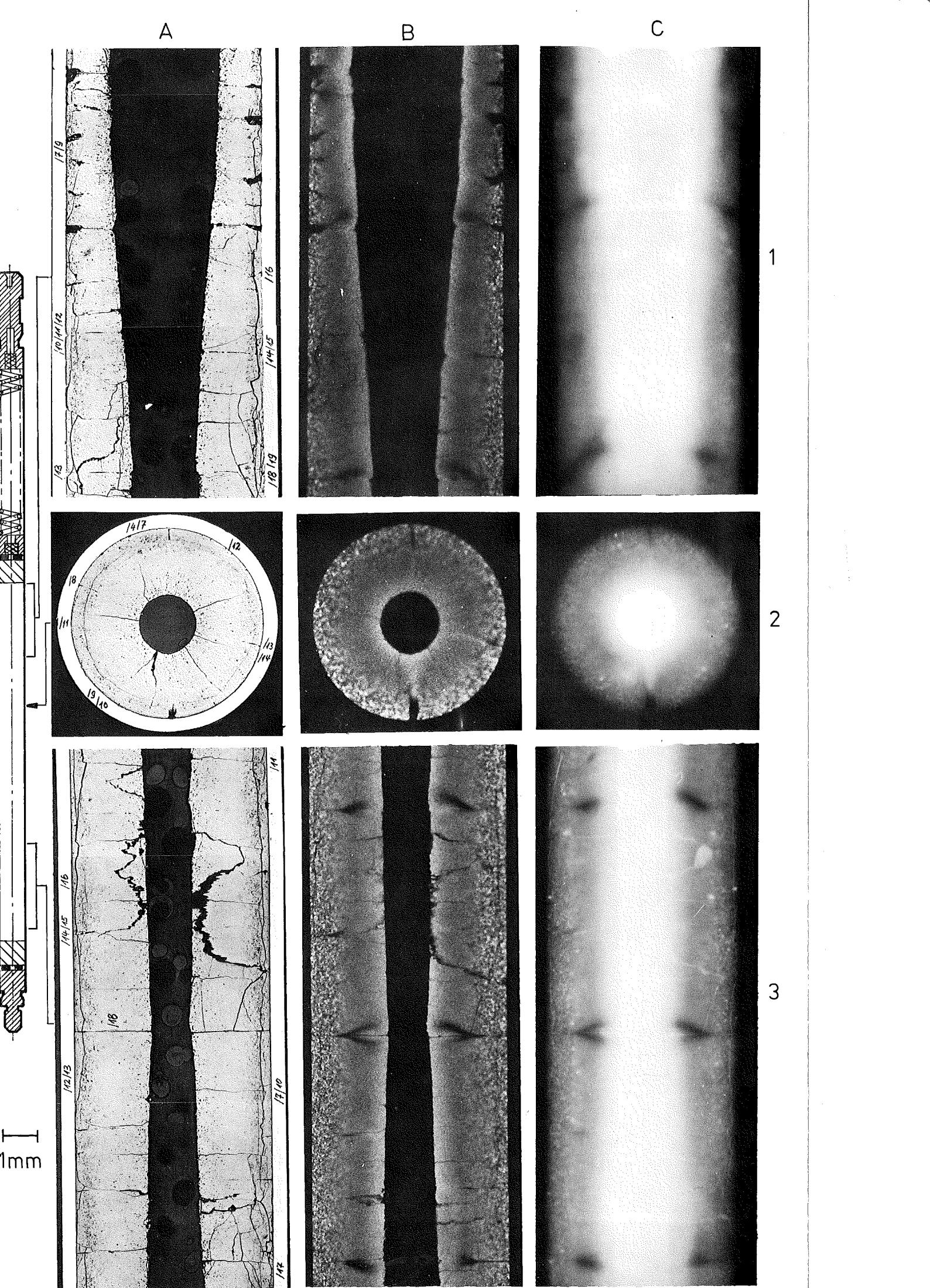


HZ-3a-49-4B/6-1/9 200x

HZ-3a-49-4B/6-1/14 500x









Prüfling 4B-6

Brennstoff:

Form : Tabletten beidseitige Einsenkung

Zusammensetzung : $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$

Tablettendichte : 90% th. D.

Hülle:

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 6,00 mm

Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie:

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : 0,070 mm

Schmierdichte : 85,3% th.D.

Bestrahlung:

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppelkapsel Typ 4a

Dauer : 637,1 Vollasttage

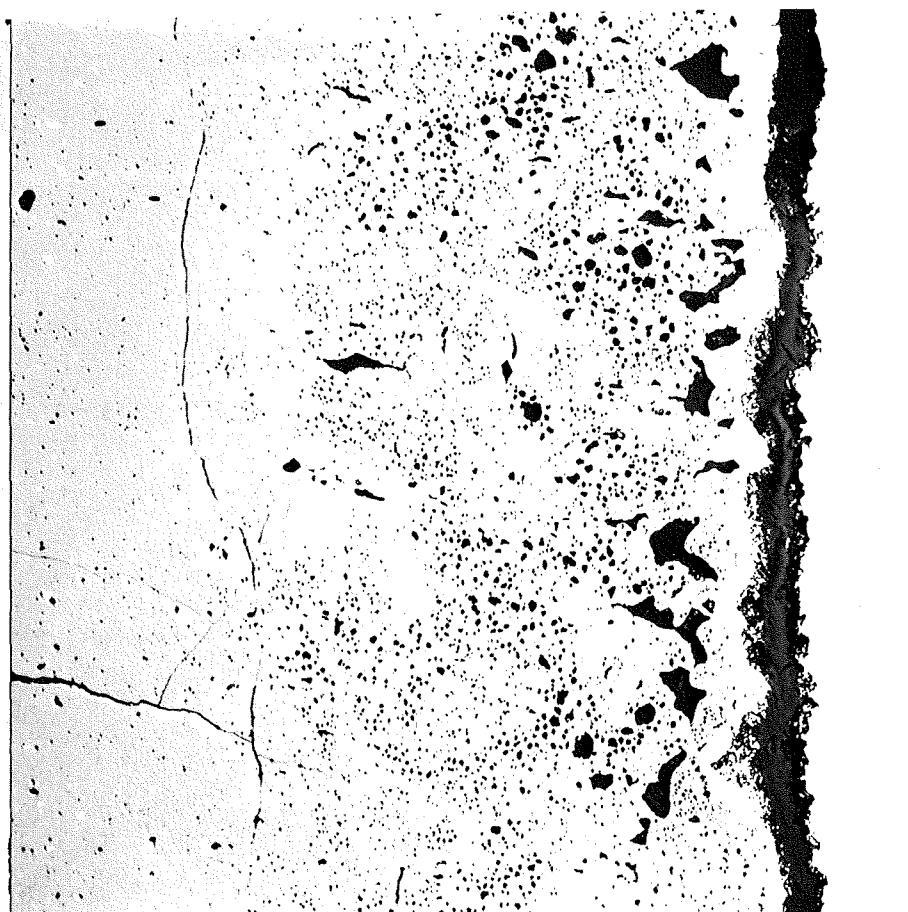
Ende : 14. 6. 71

Rechn. Abbrand mittl. : 52,4 MWd/kg Metall

Stableistung max./mittl. : 527 / 146 W/cm

HZ-3a-55-4B/15-2/14

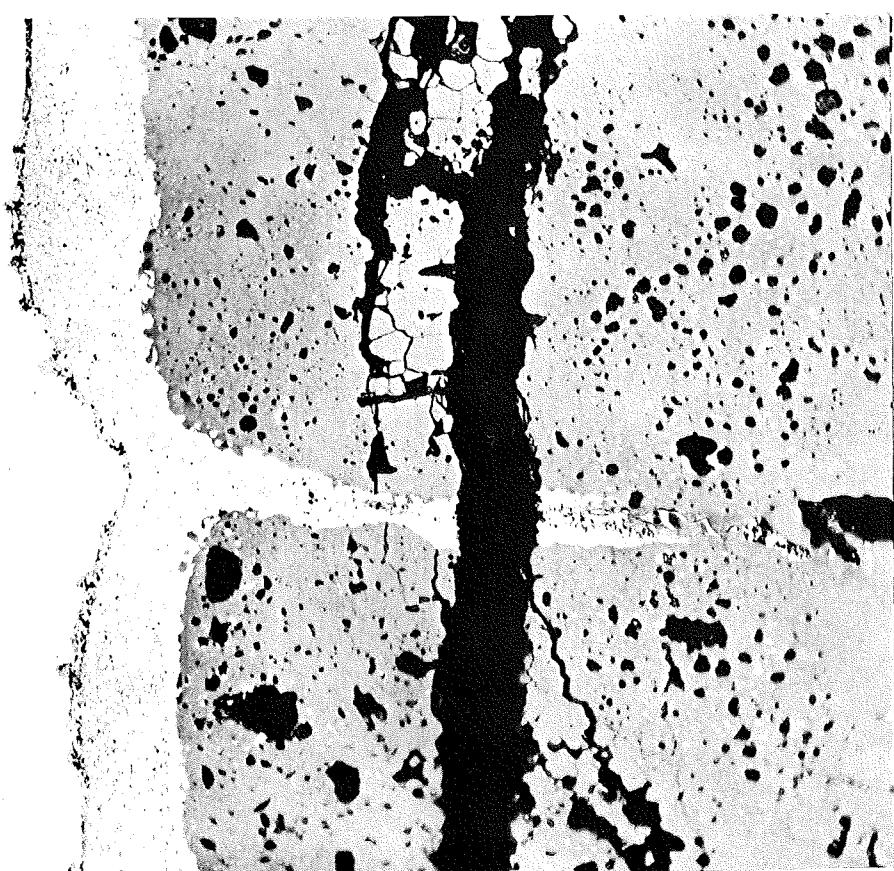
200x



0,1 mm

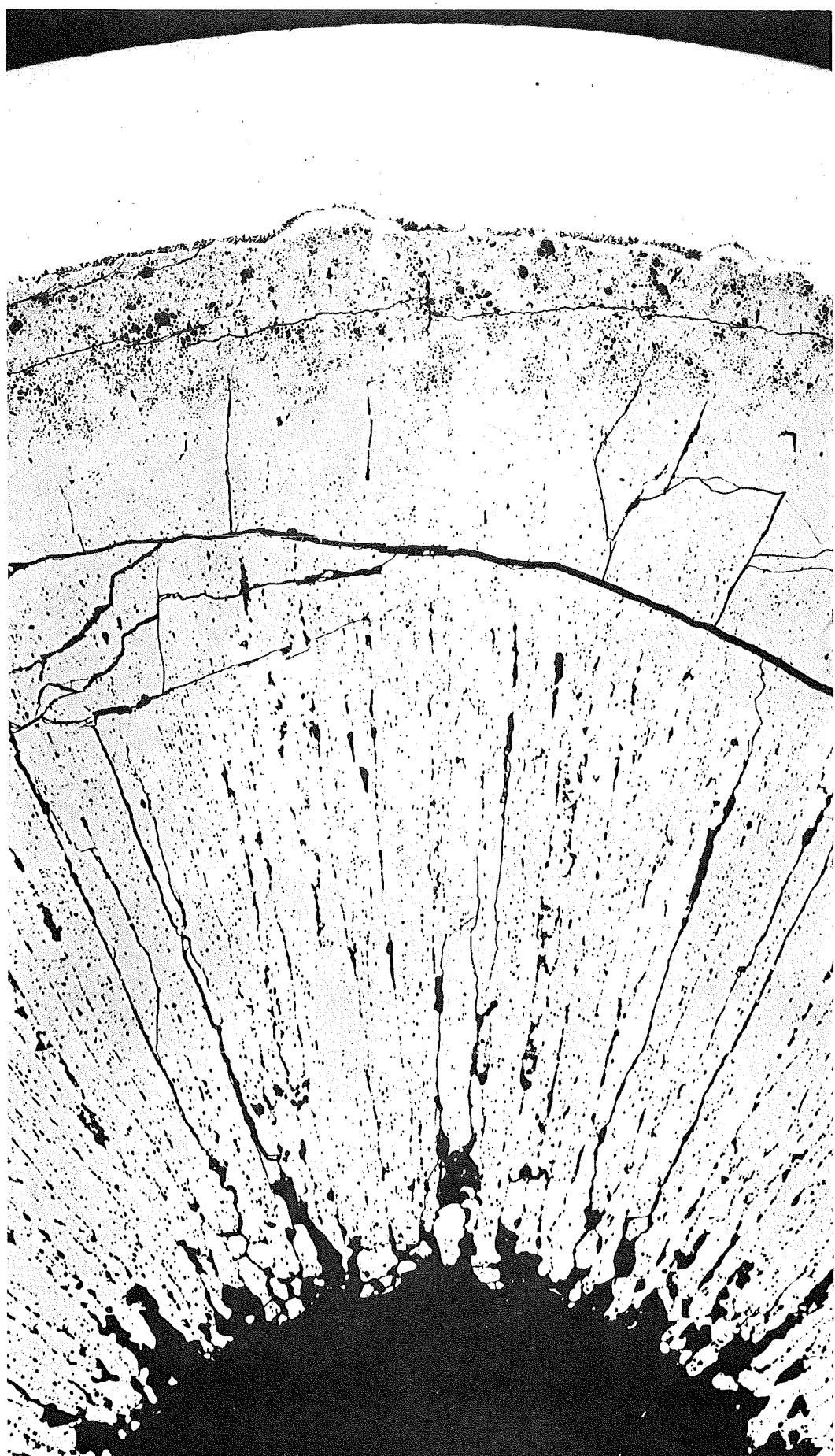
HZ-3a-55-4B/15-2/10

500x



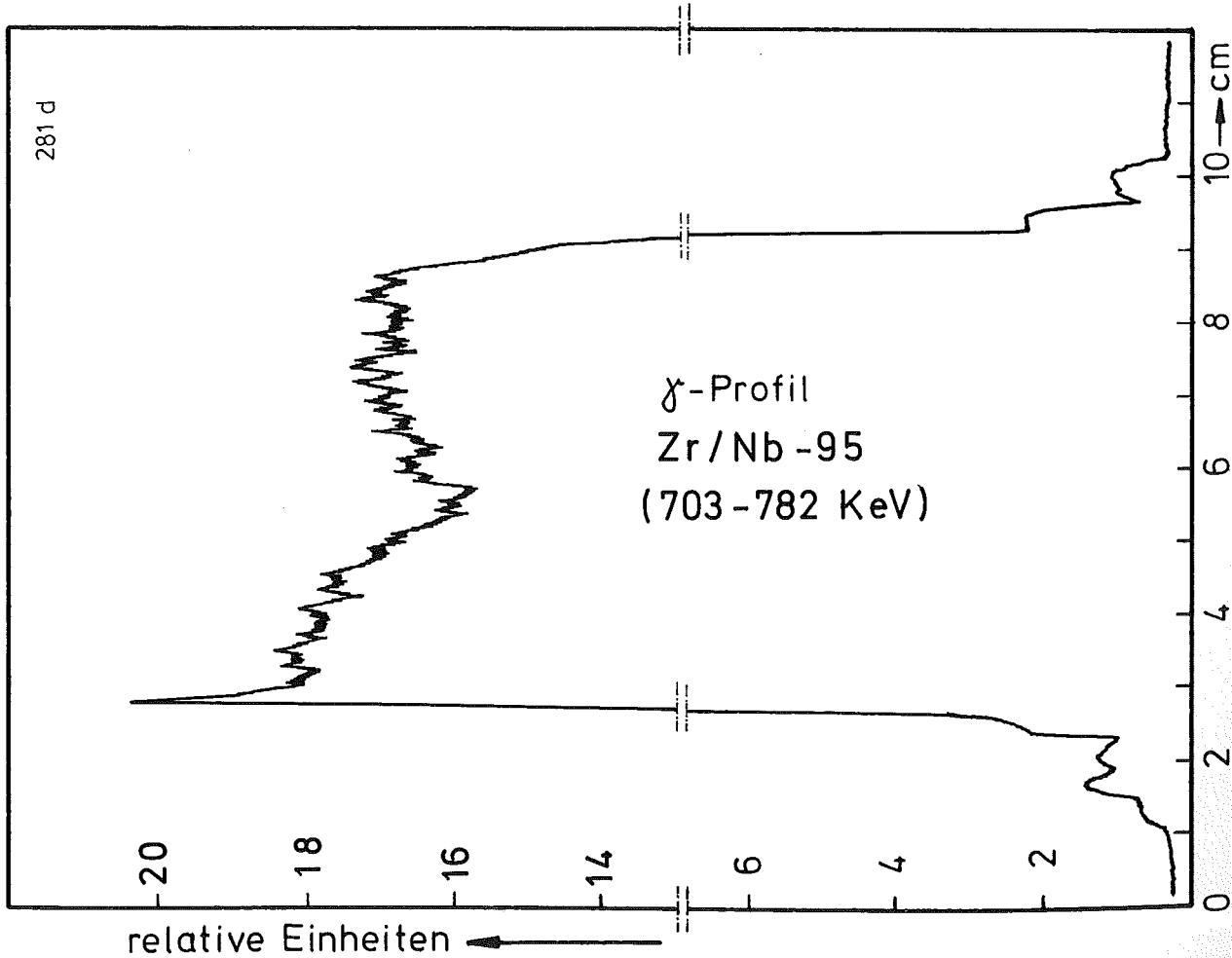
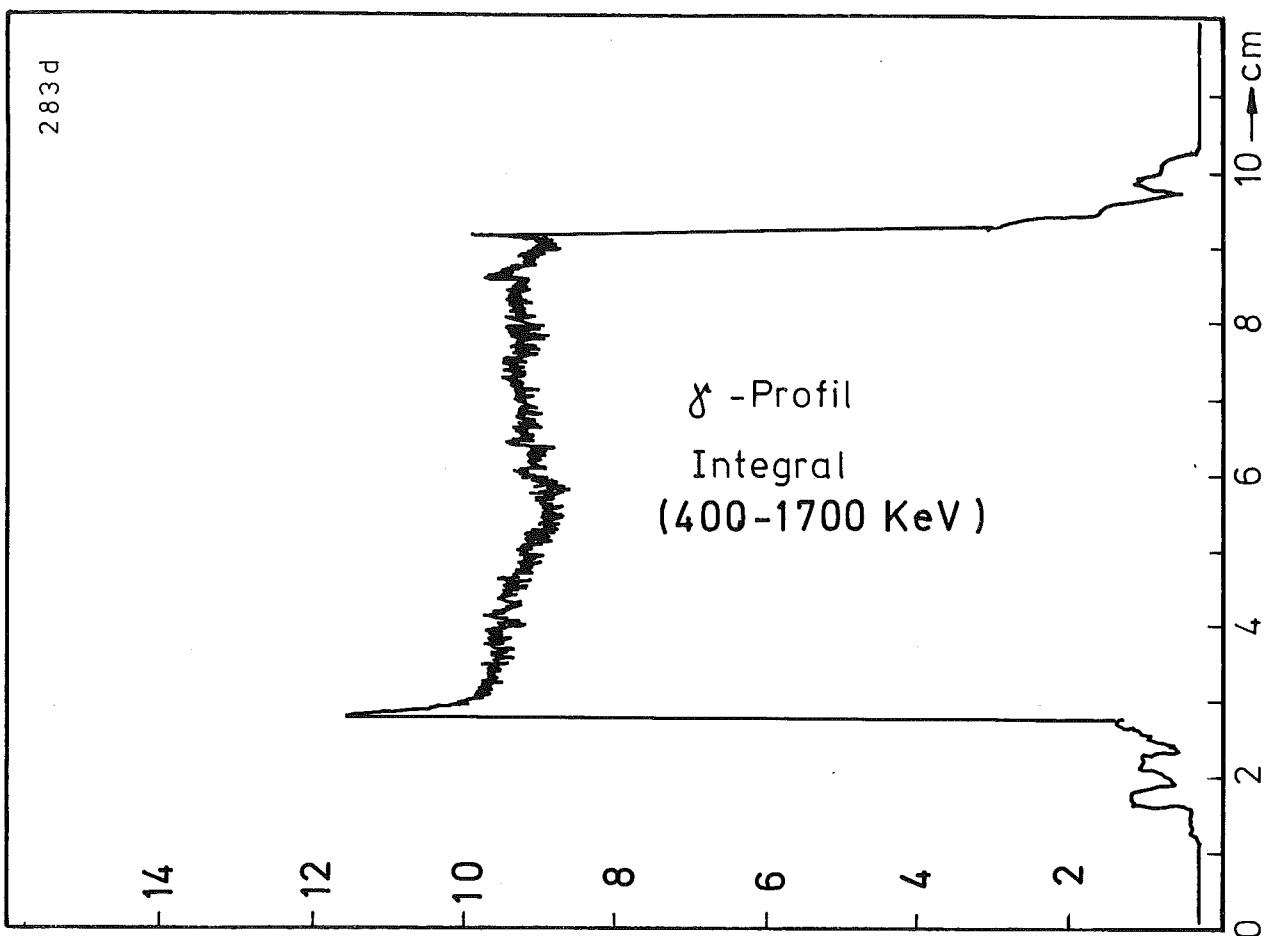
0,04 mm

-I/78-
zu Prüfling 4B/15
A2



14

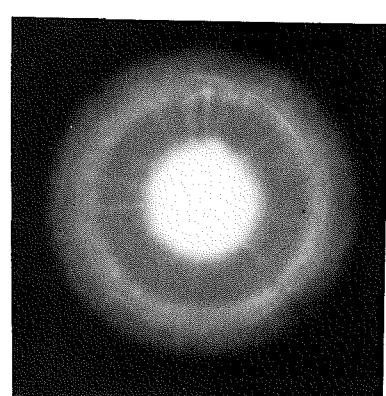
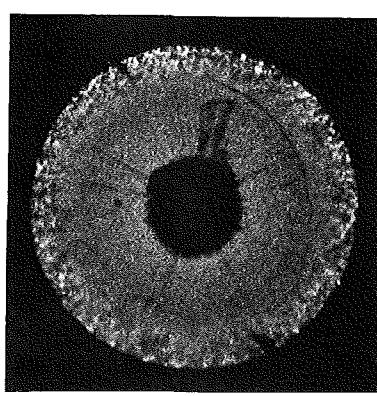
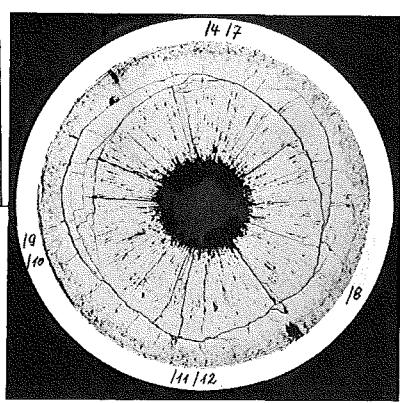
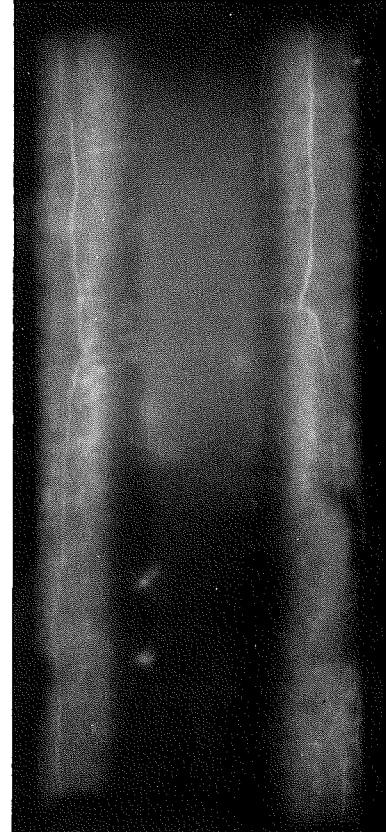
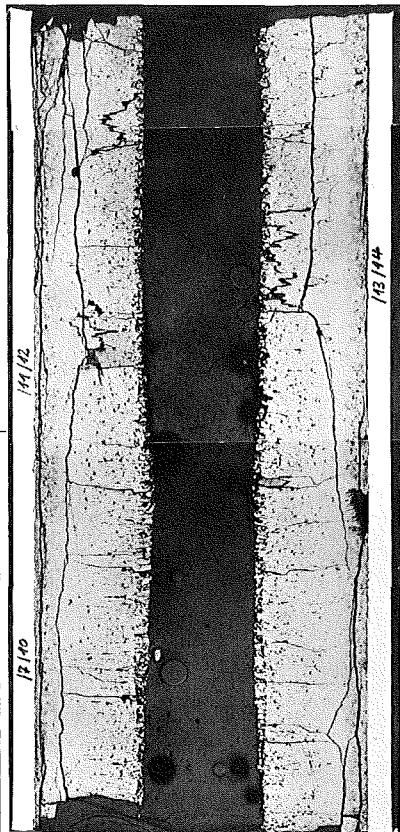
0,1 mm



A

B

C



1
1mm



Prüfling 4B-15

Brennstoff:

Form : Tabletten einseitige Einsenkung

Zusammensetzung : $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$

Tablettendichte : 84% th.D.

Hülle:

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 6,00 mm

Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie:

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : 0,070 mm

Schmierdichte : 79,6% th.D.

Bestrahlung:

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppelkapsel Typ 4a

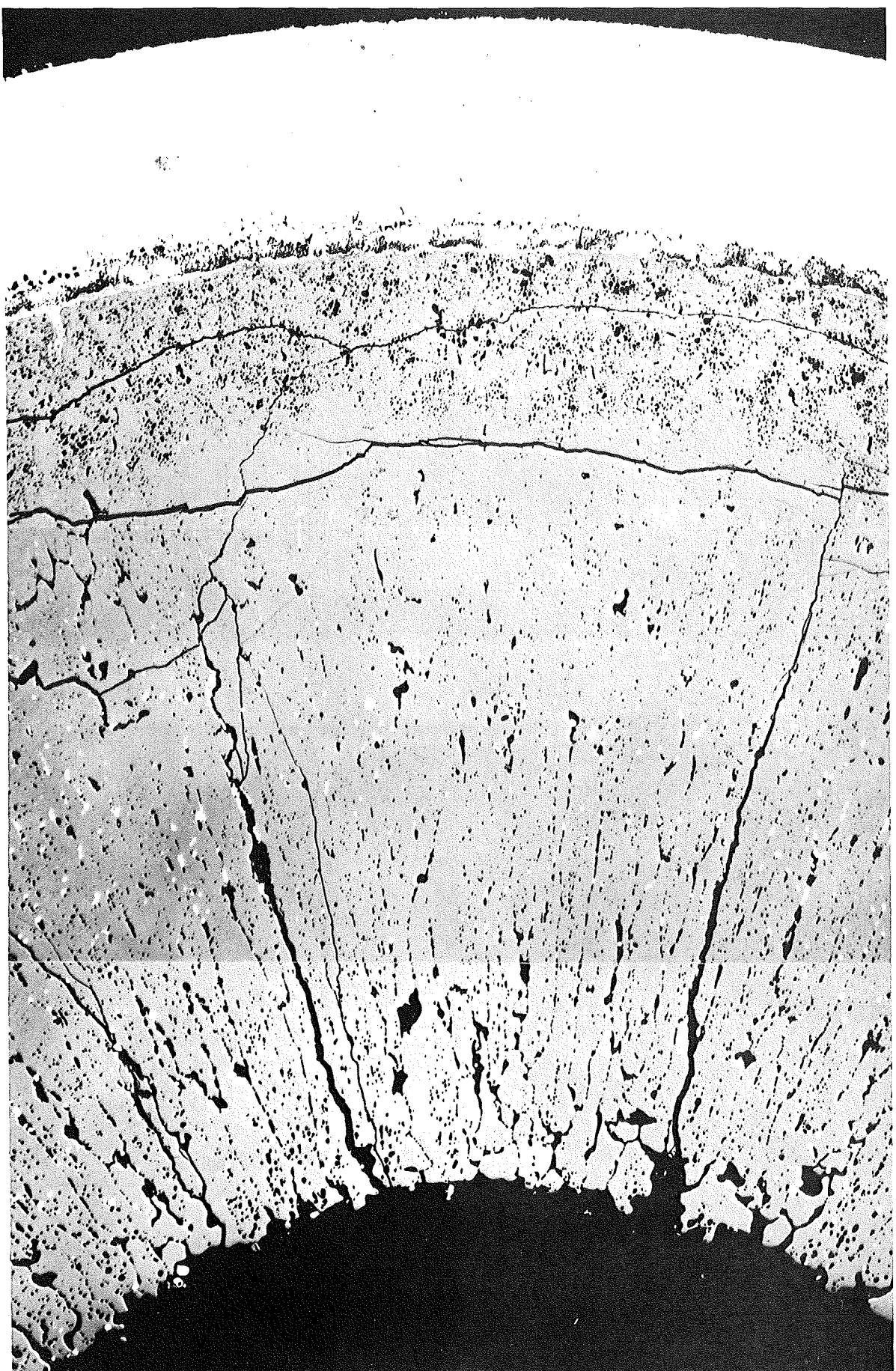
Dauer : 247 Vollasttage

Ende : 1. 6. 70

Rechn. Abbrand mittl. : 61,2 MWd/kg Metall

Stableistung max./mittl. : 579 / 416 W/cm

- I/81-
zu Prüfling 4B/14
A1

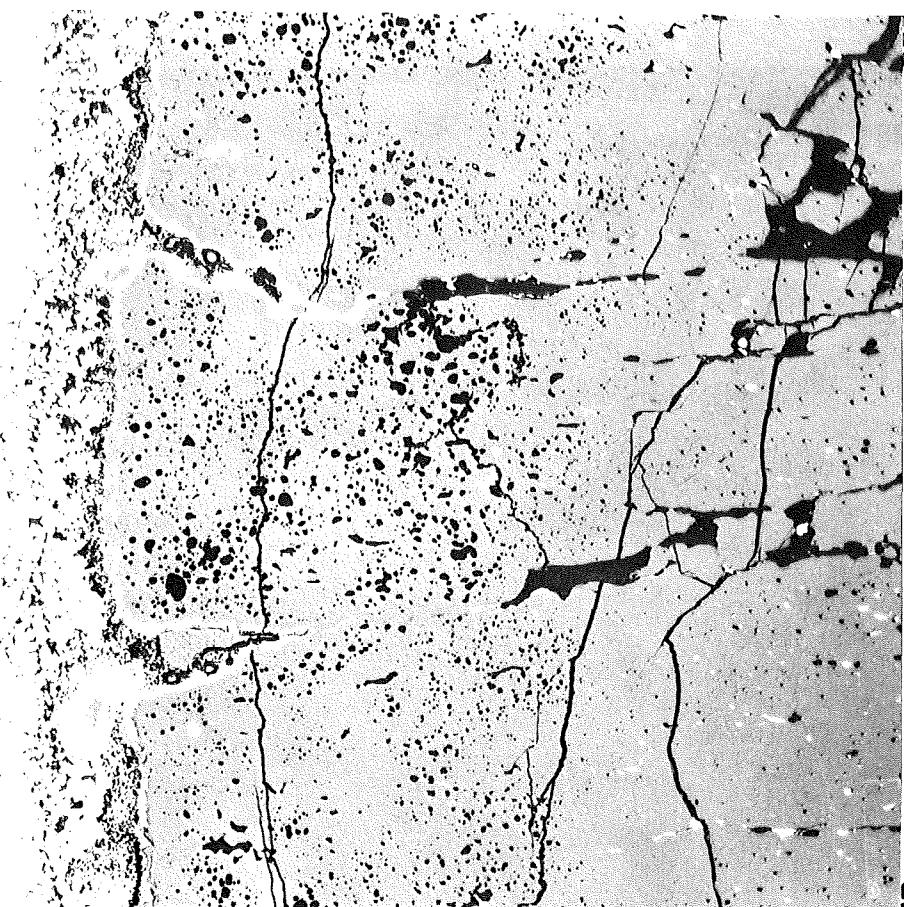


14

0,1mm

-I/82-
zu Prüfling 4B/14

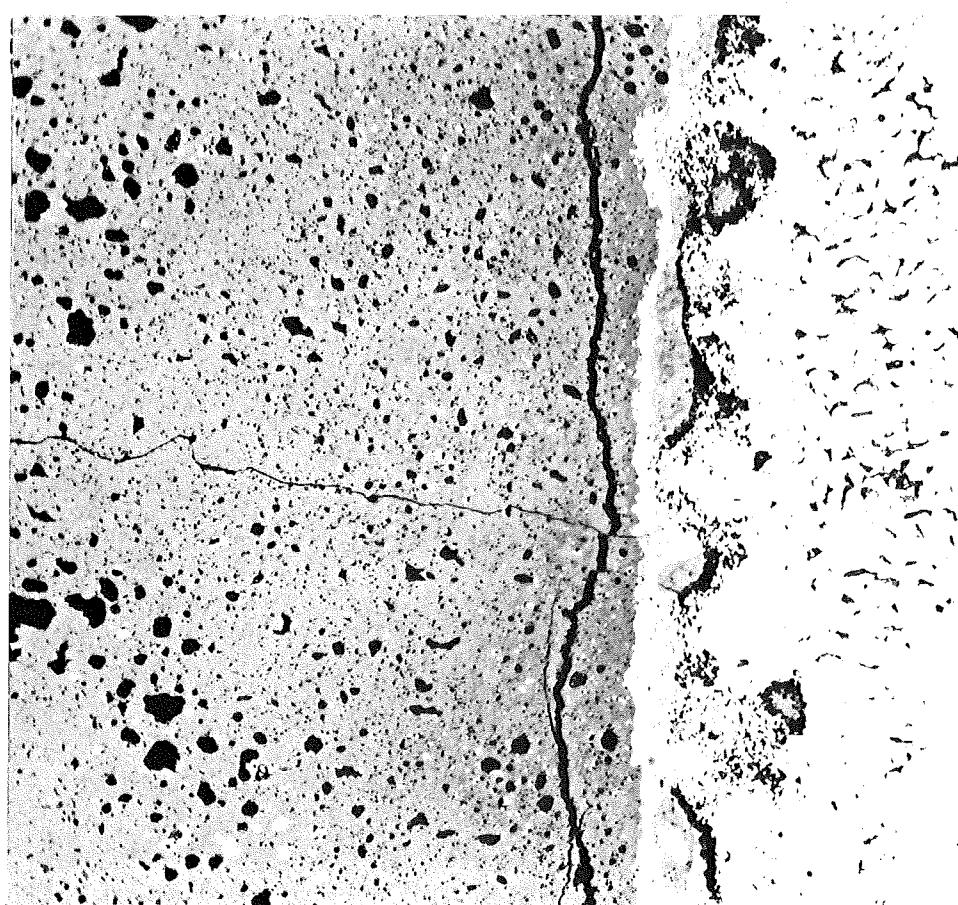
A1



200x

HZ-3a-55-4B/14-1/8

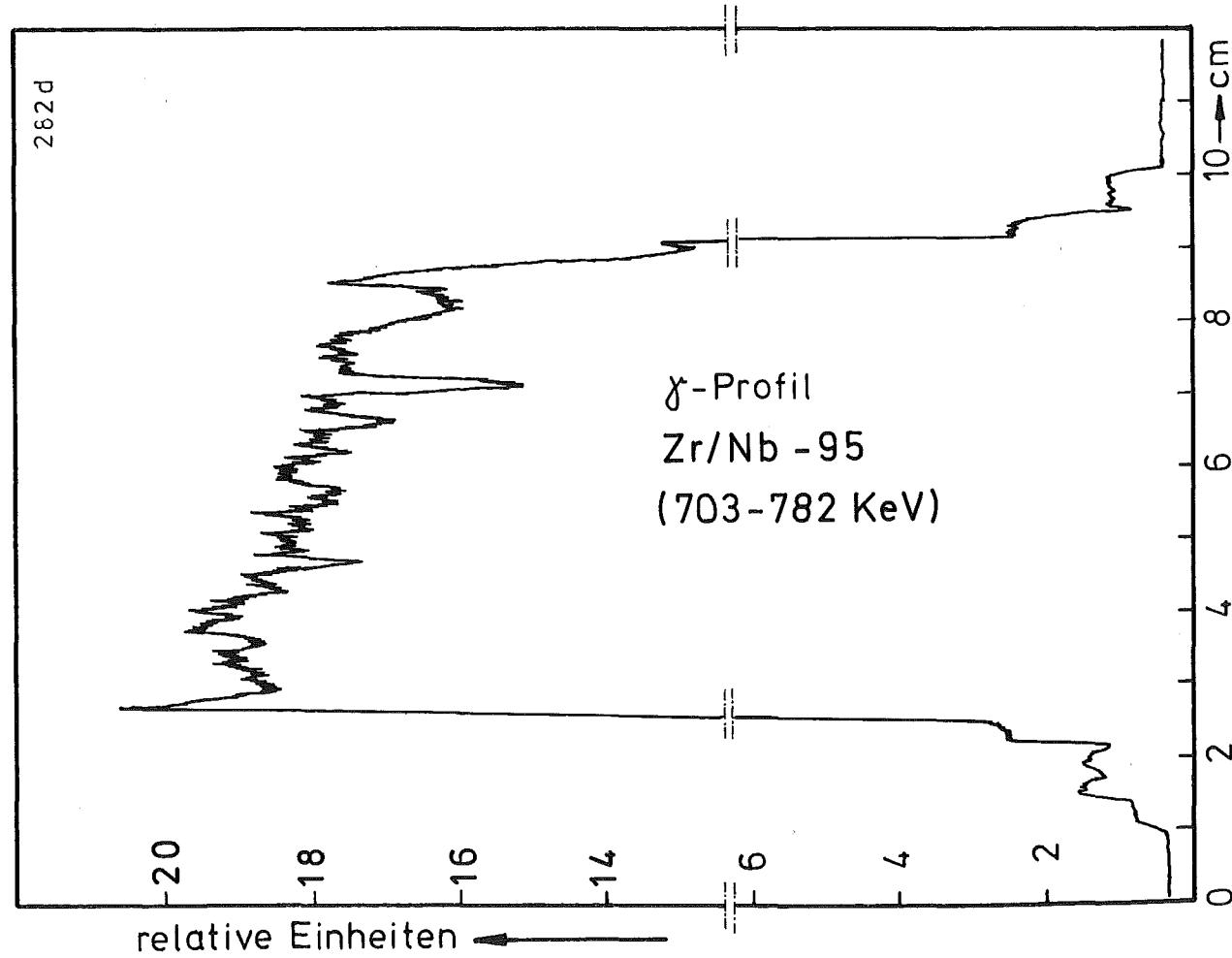
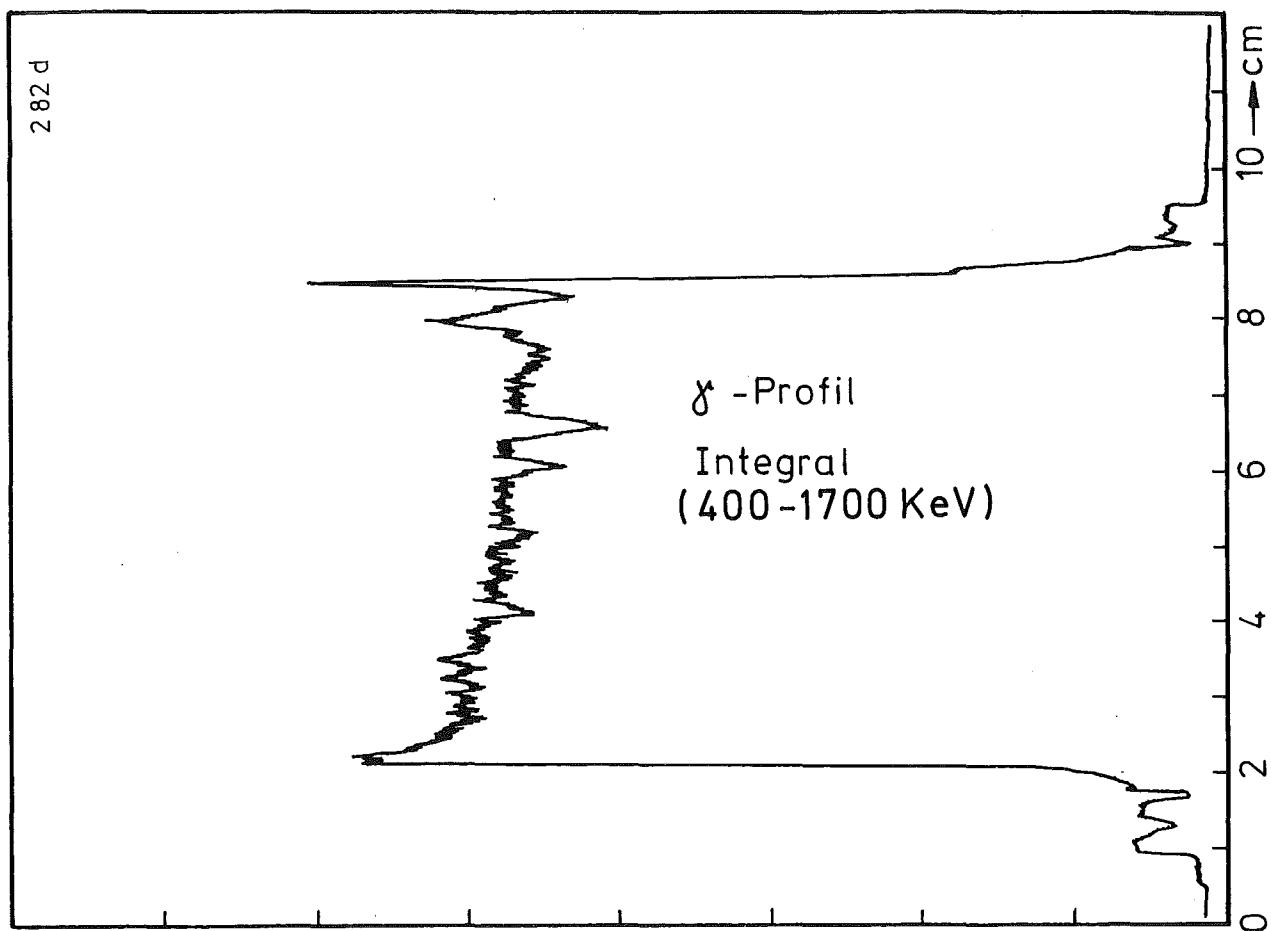
A2



HZ-3a-355-4B/14-2/16

500x

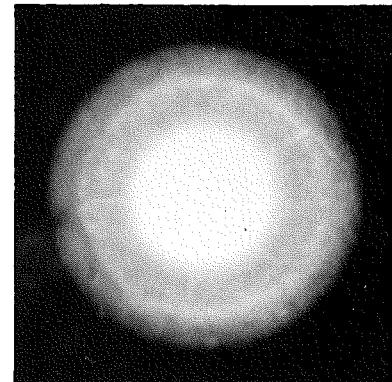
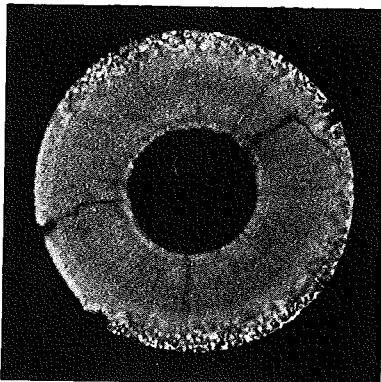
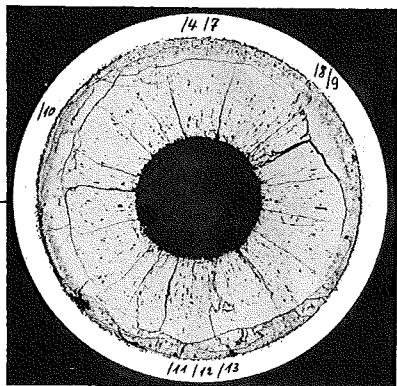
0,04 mm



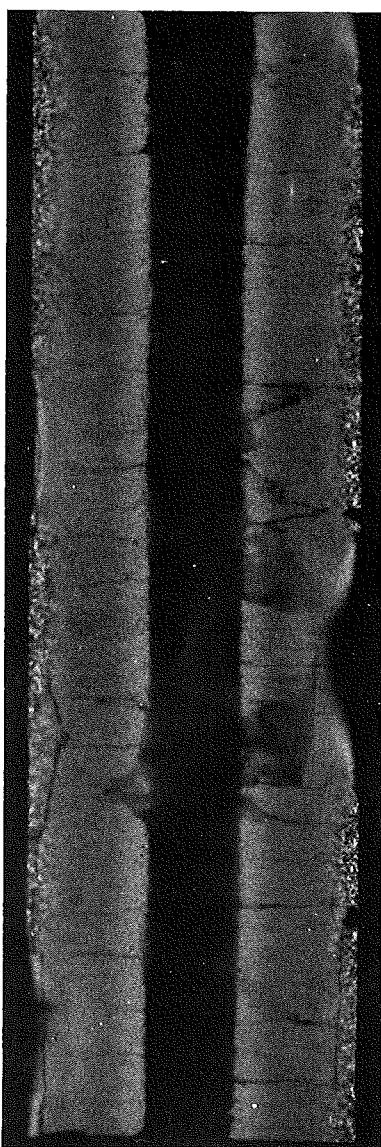
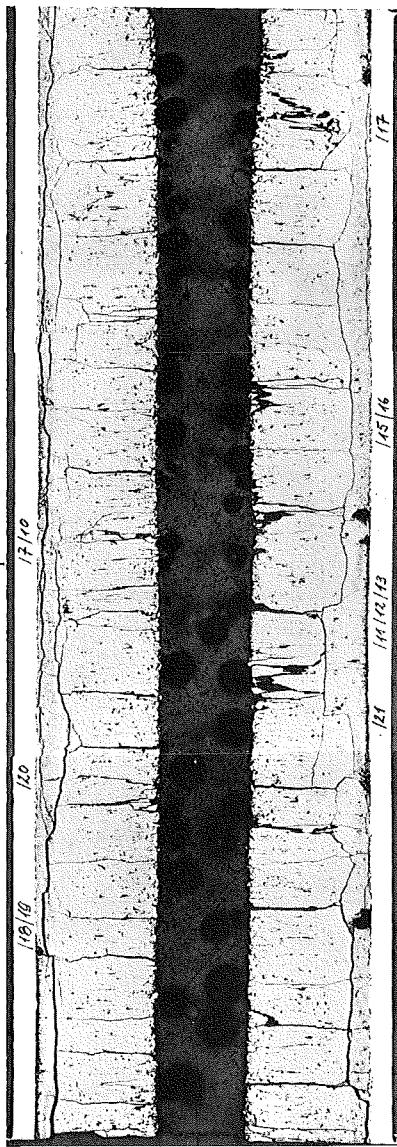
A

B

C



1



2

1mm

Prüfling 4B-14

Brennstoff:

Form : Tablettten einseitige Einsenkung

Zusammensetzung : $^{235}\text{UO}_2\text{-PuO}_2$

Tablettendichte : 84% th.D.

Hülle:

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 6,00 mm

Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie:

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : 0,070 mm

Schmierdichte : 79,6% th.D.

Bestrahlung:

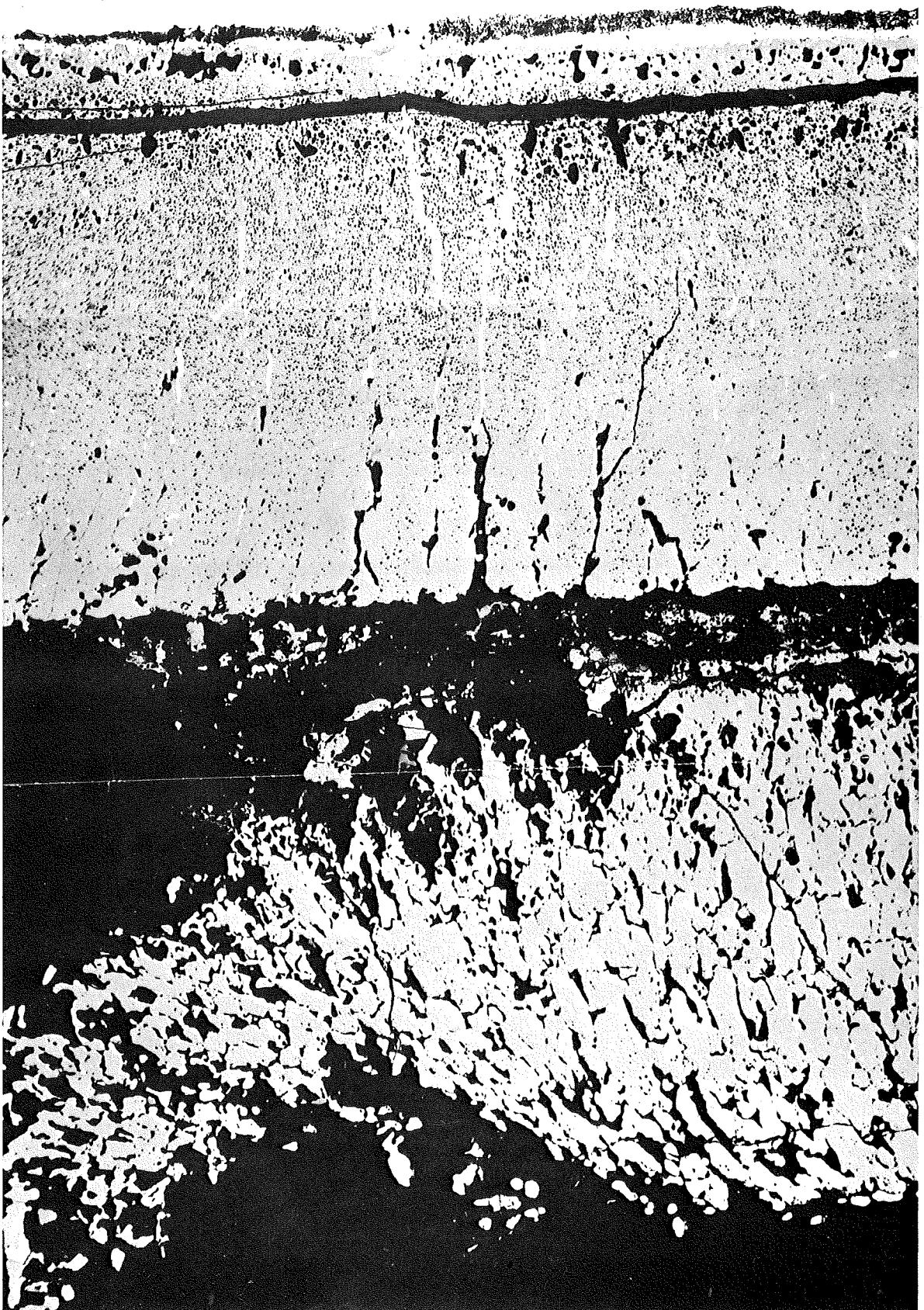
Einrichtung : NaK/PbBi-Doppelkapsel Typ 4a

Dauer : 247 Vollasttage

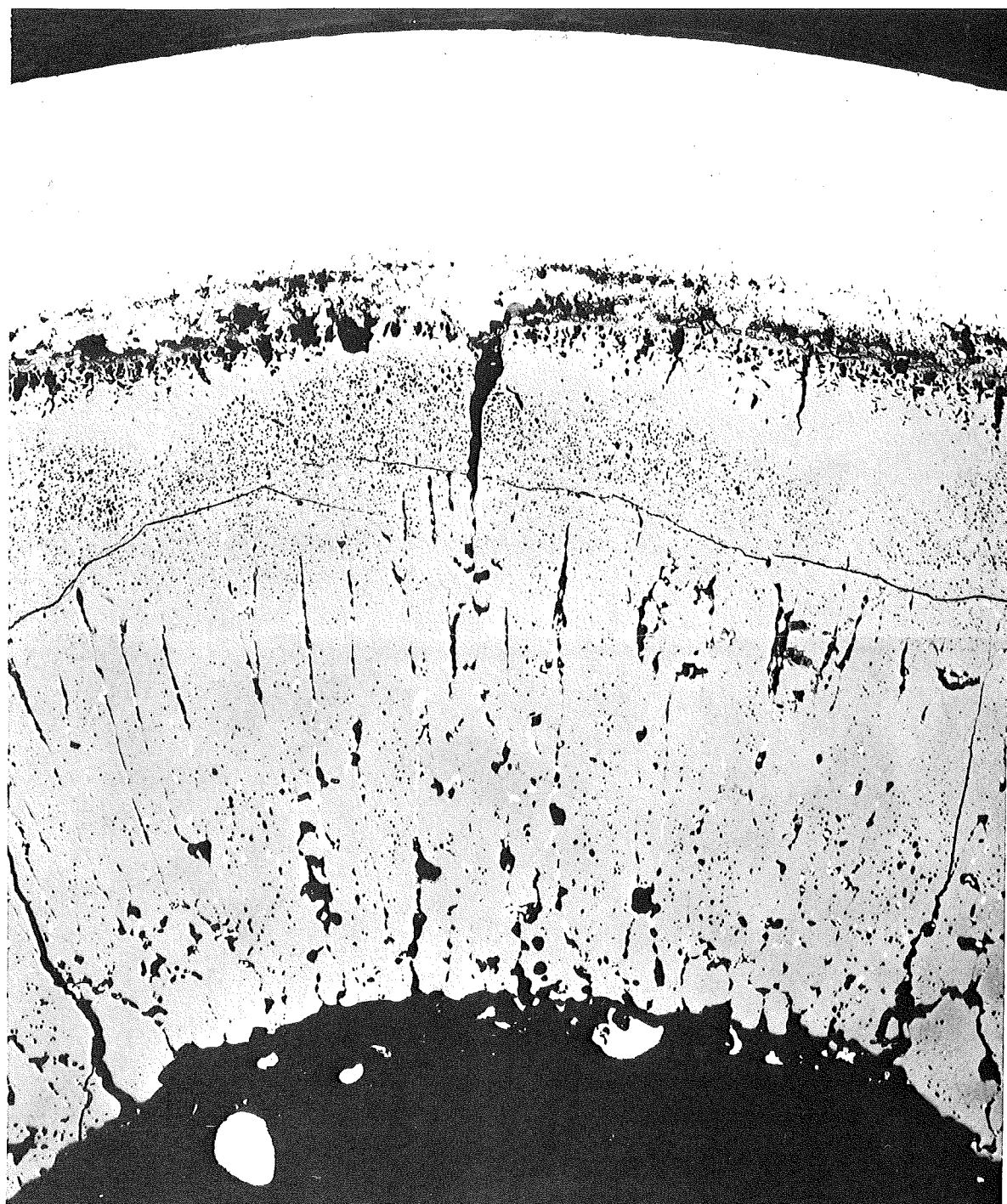
Ende : 1. 6. 70

Rechn. Abbrand mittl. : 65,8 MWd/kg Metall

Stableistung max./mittl. : 563 / 446 W/cm

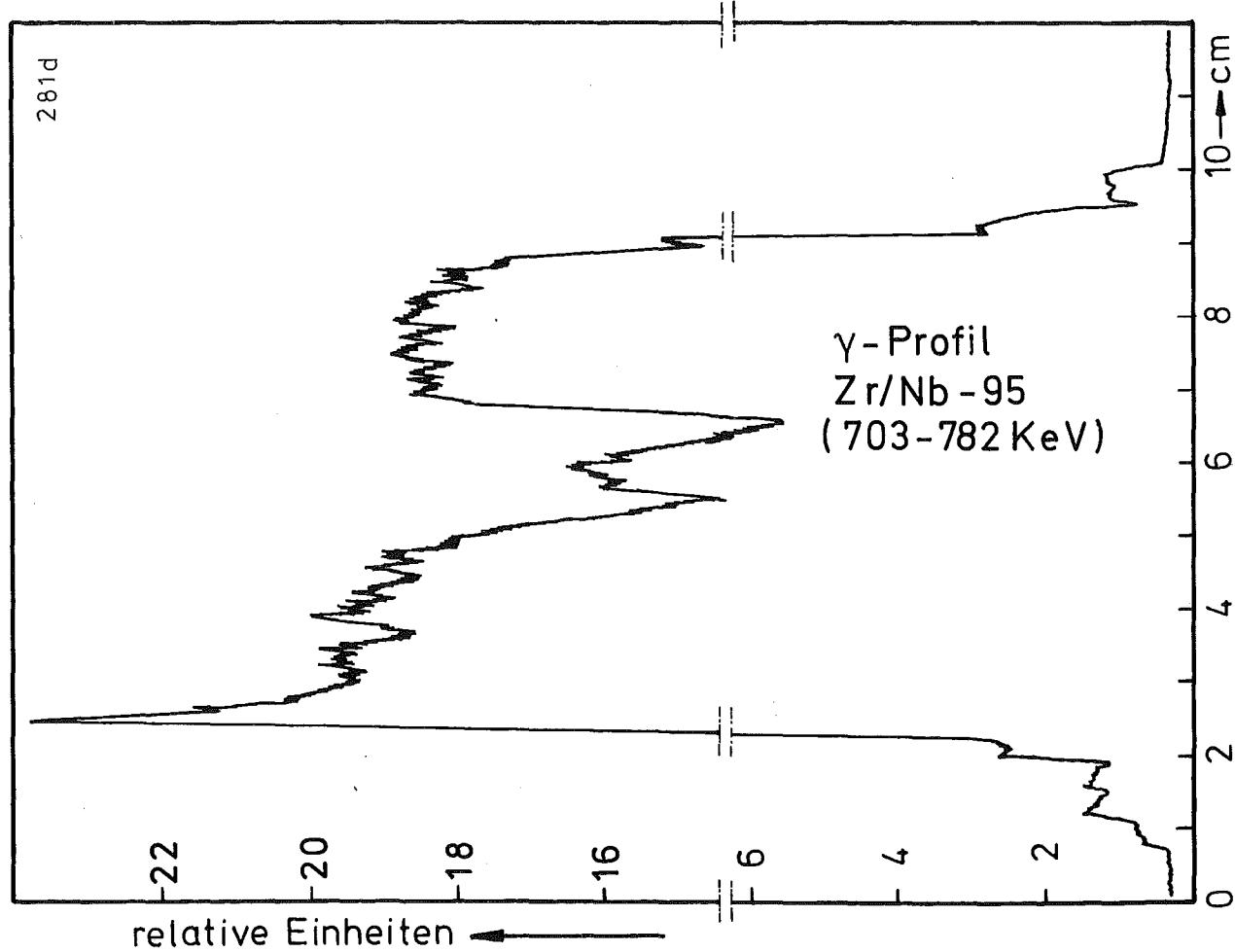
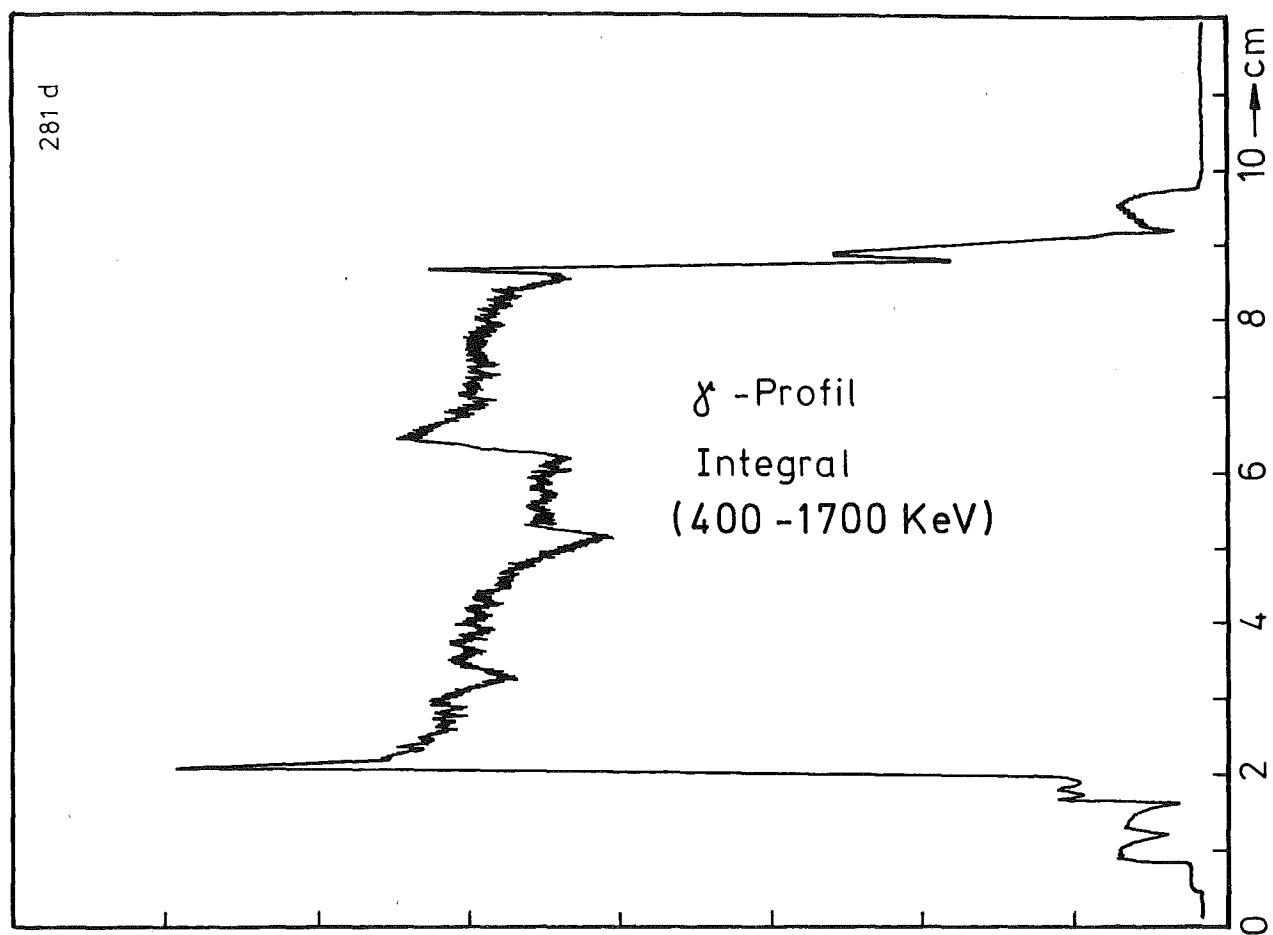


-I/86-
zu Prüfling 4B/13
A2



14

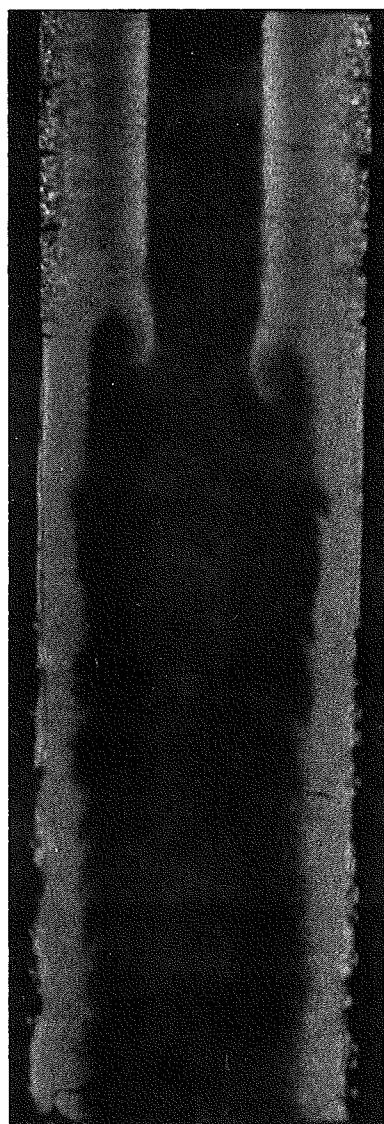
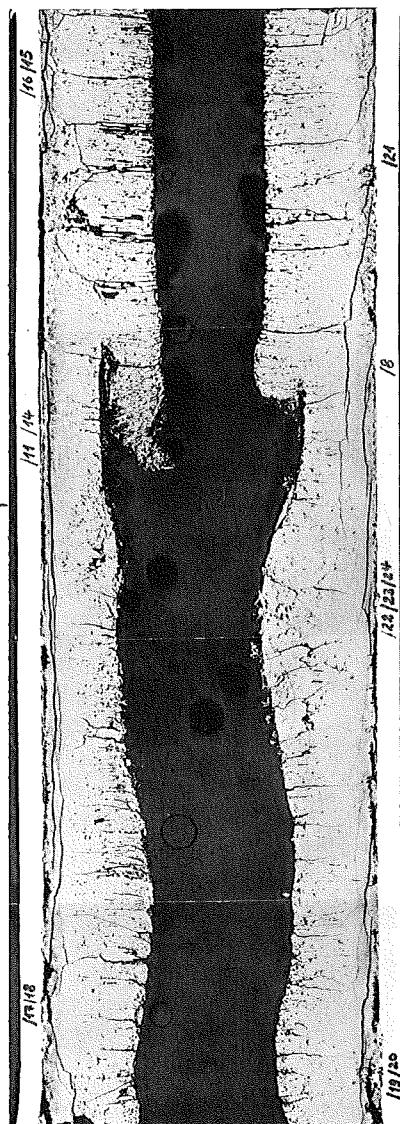
0,1 mm



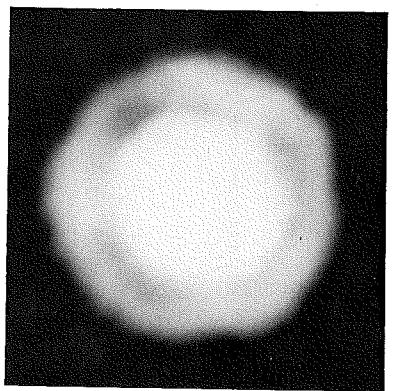
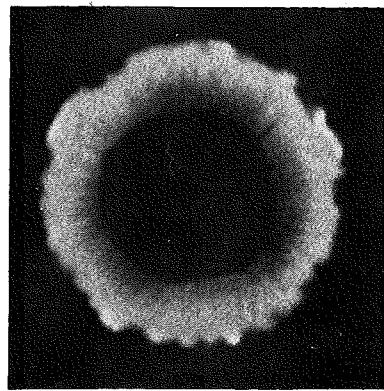
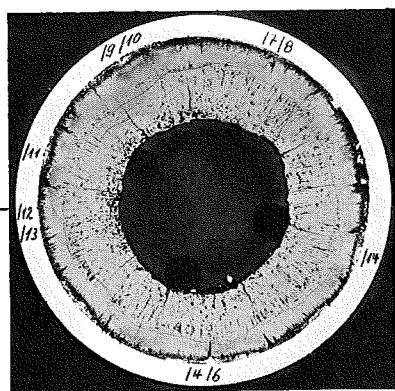
A

B

C



1



2

1mm

Prüfling 4B-13

Brennstoff:

Form : Tablett einseitige Einstellung
Zusammensetzung : UO_2-PuO_2
Tablettendichte : 84% th.D.

Hülle:

Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,00 mm
Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie:

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,070 mm
Schmierdichte : 79,6% th.D.

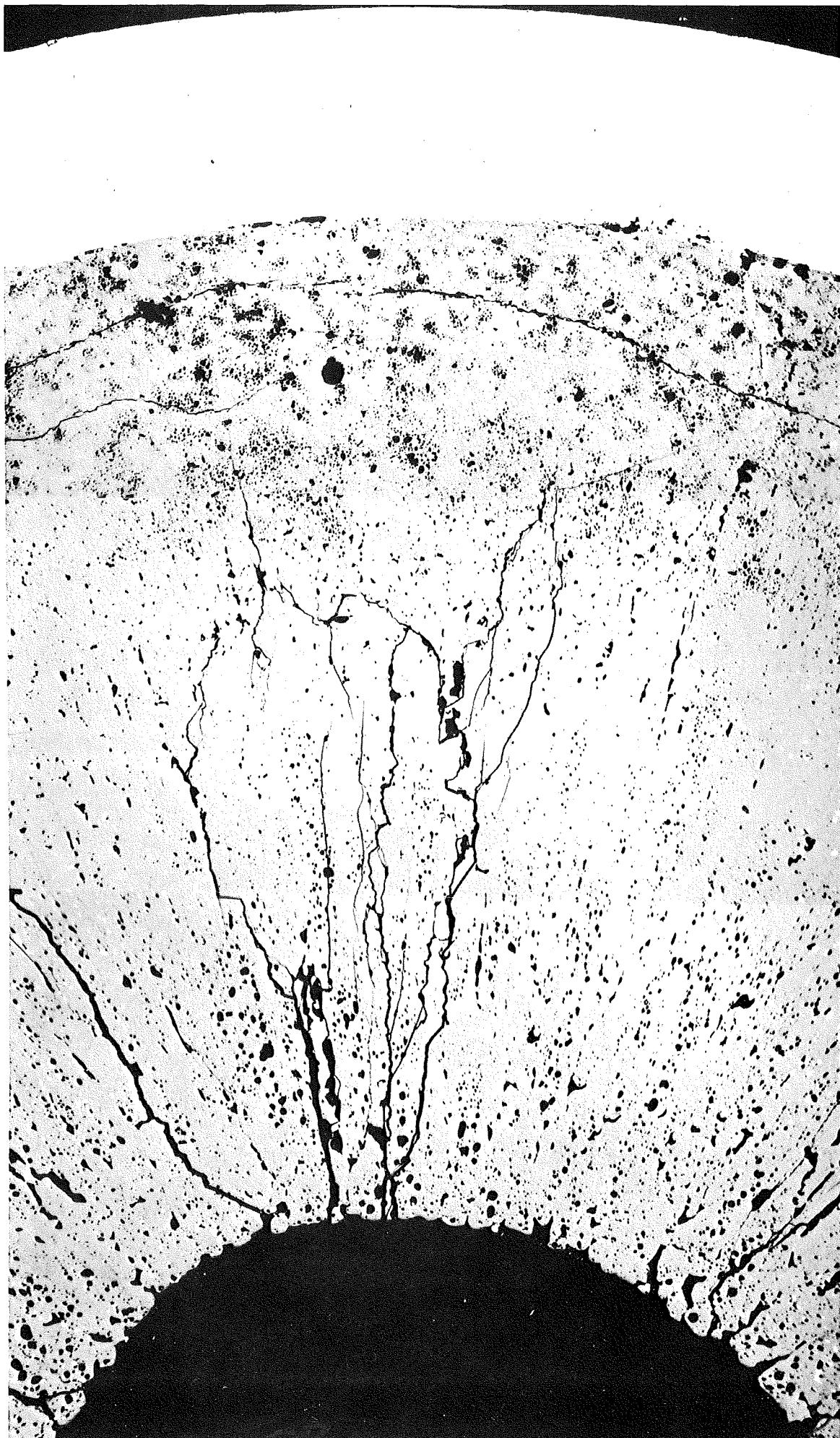
Bestrahlung:

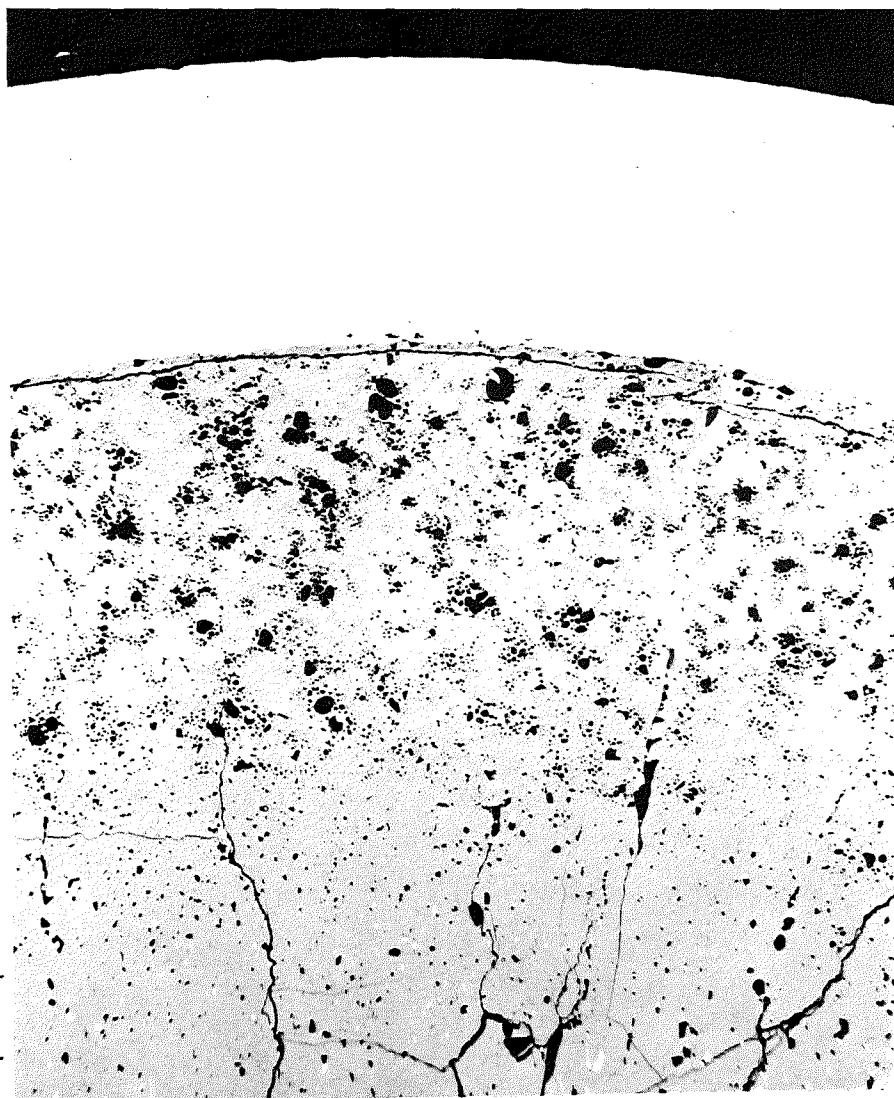
Einrichtung : NaK/PbBi-Doppelkapsel Typ 4a
Dauer : 247 Vollasttage
Ende : 1. 6. 70
Rechn. Abbrand mittl. : 55,9 Mwd/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 627 / 378 W/cm

-I/89-

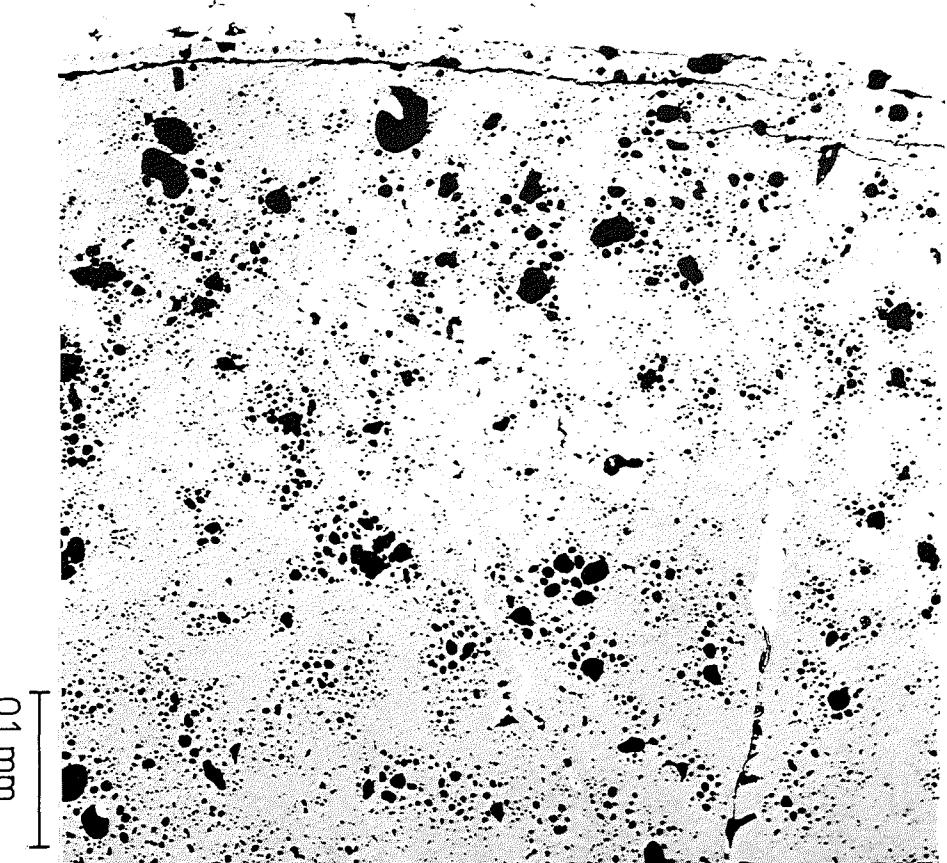
zu Prüfling 4B/18

A1

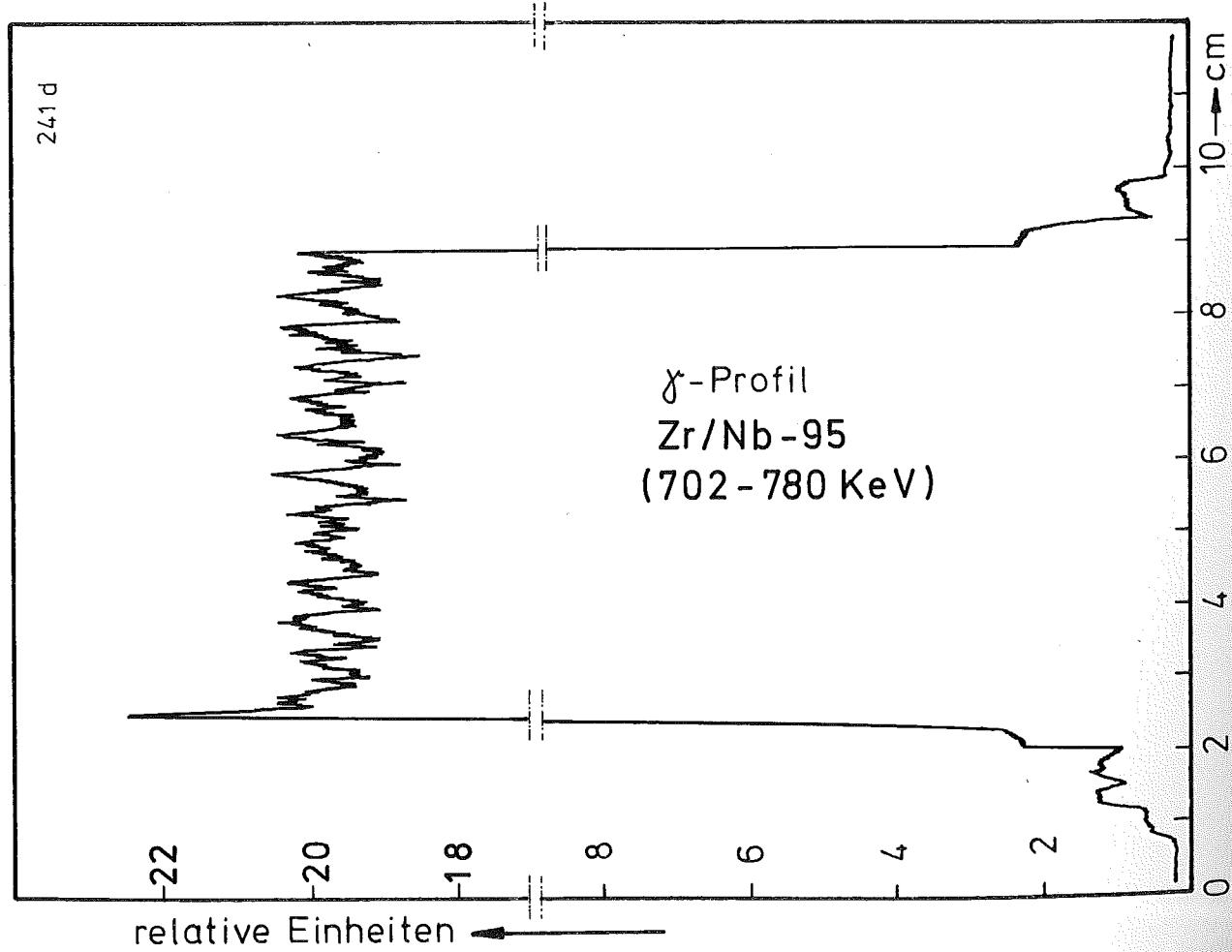
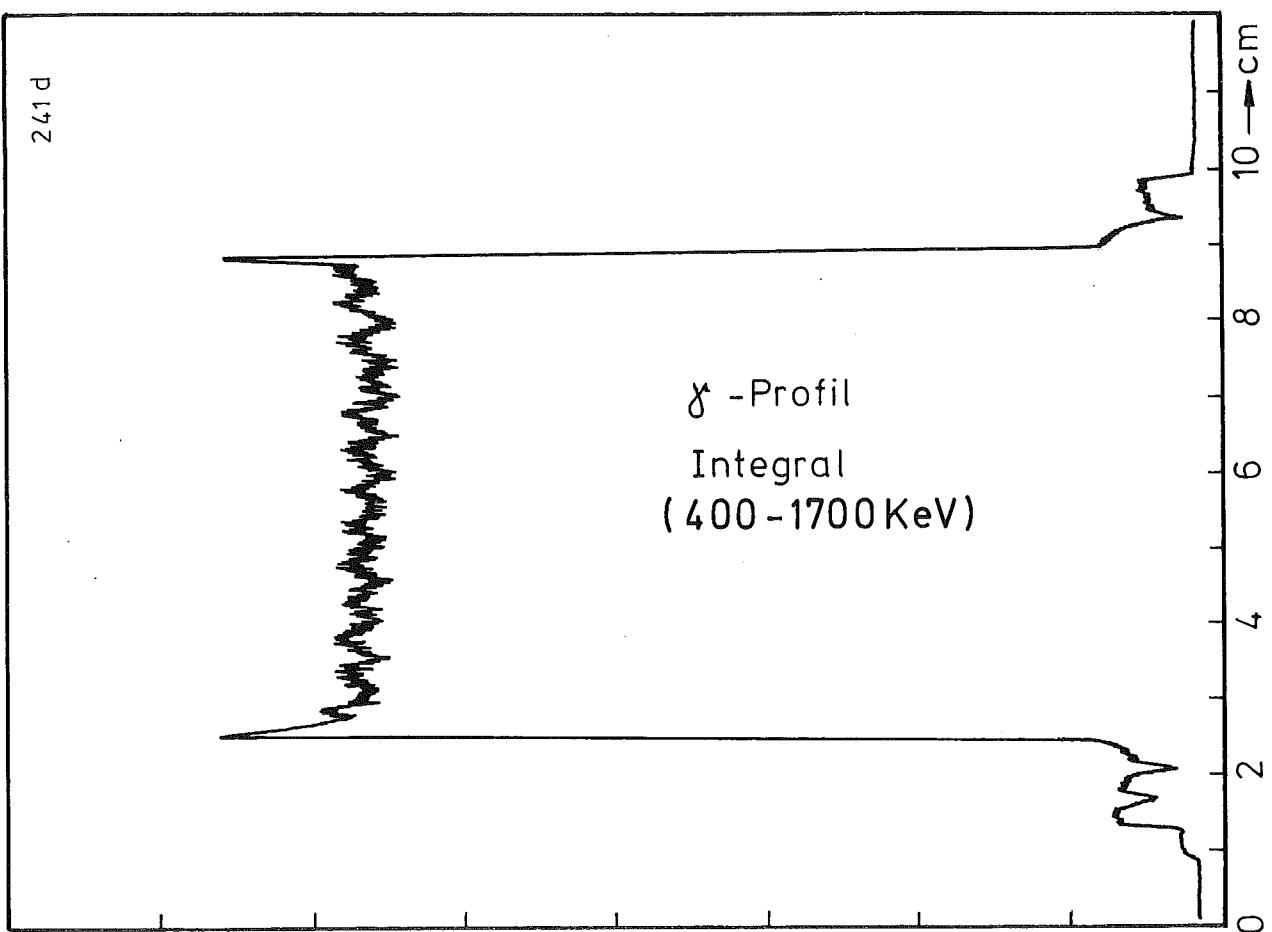




HZ-3a-56-4B/18-1/10 100x



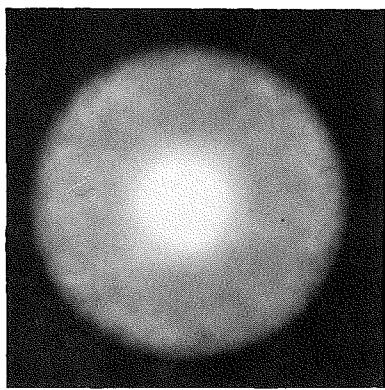
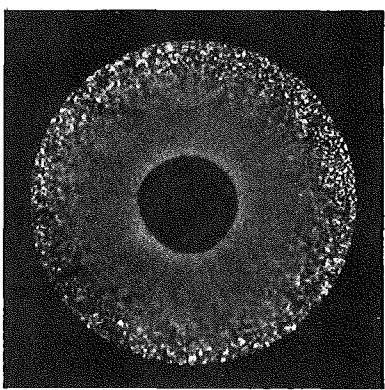
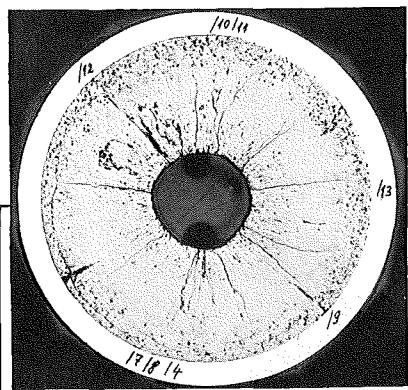
HZ-3a-56-4B/18-1/11 200x



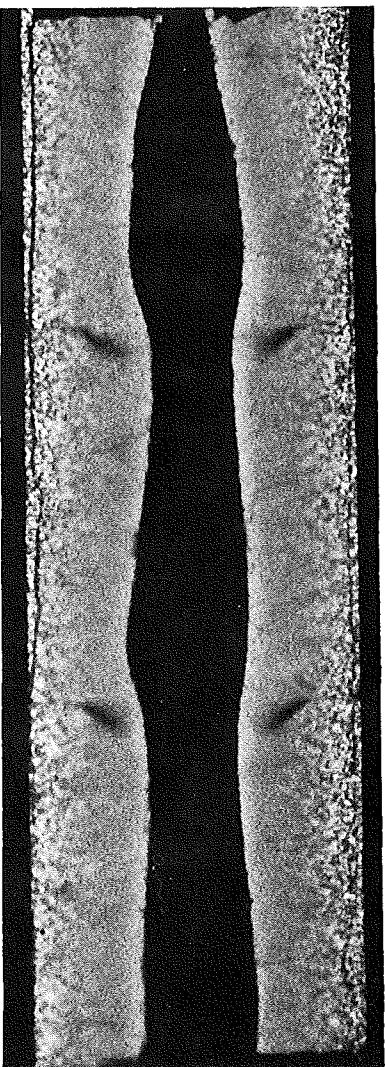
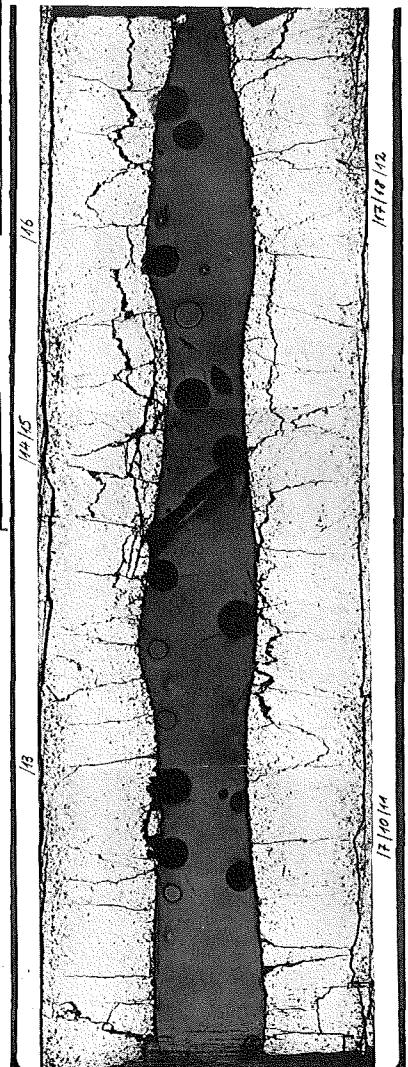
A

B

C



1



2

1mm



Prüfling 4B-18

Brennstoff:

Form : Tablett einseitige Einsenkung
Zusammensetzung : $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$
Tablettendichte : 84% th.D.

Hülle:

Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,00 mm
Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie:

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,070 mm
Schmierdichte : 79,6% th.D.

Bestrahlung:

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4a
Dauer : 305,5 Vollasttage
Ende : 17. 8. 70
Rechn. Abbrand mittl. : 59,2 MWd/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 442 / 326 W/cm

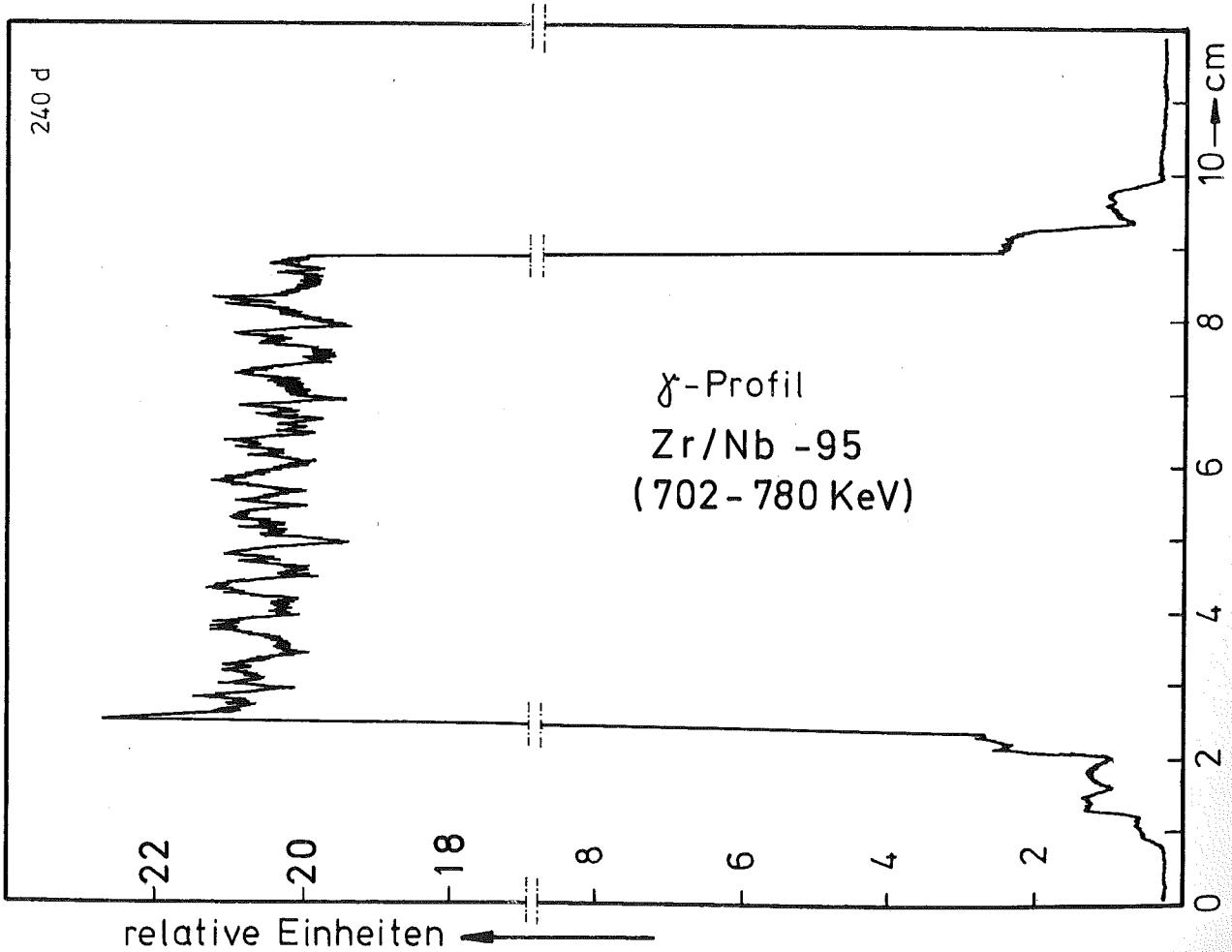
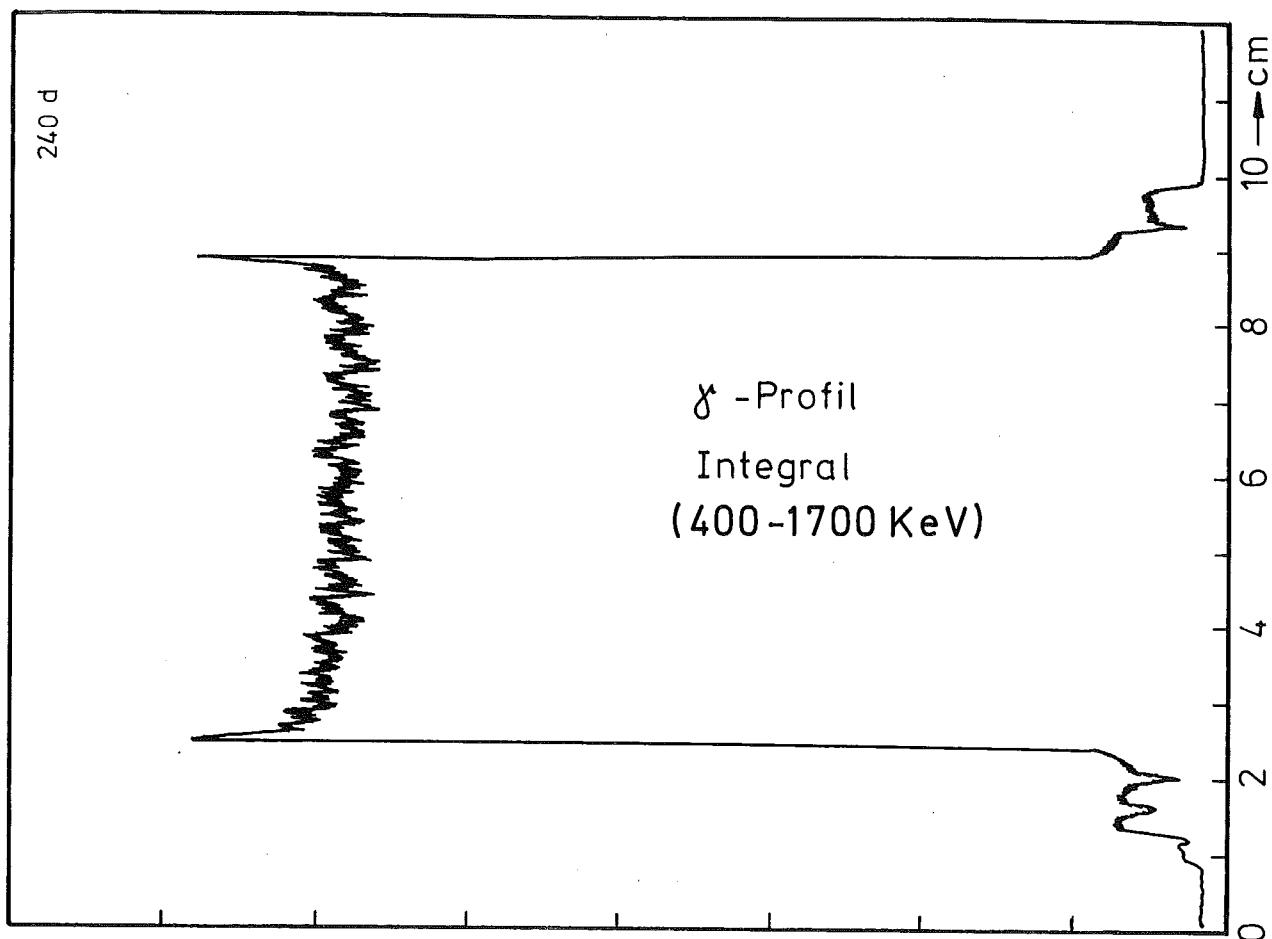
-I/93-

zu Prüfling 4B/16

A1



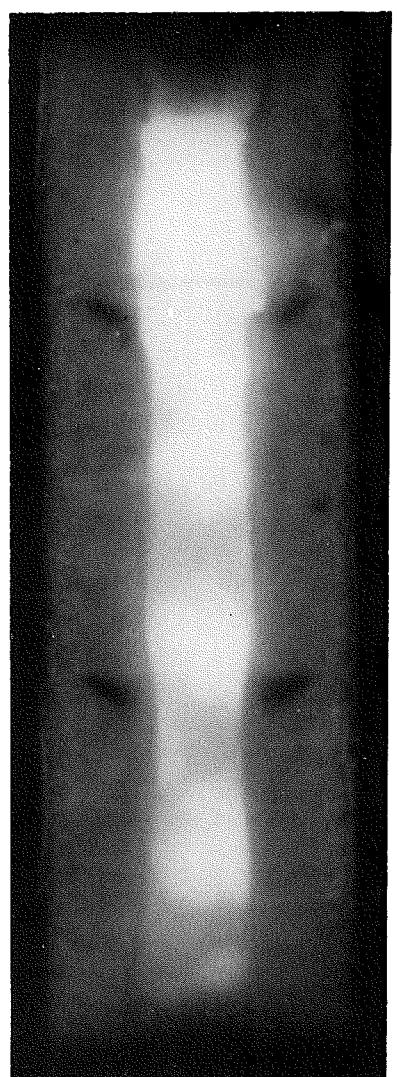
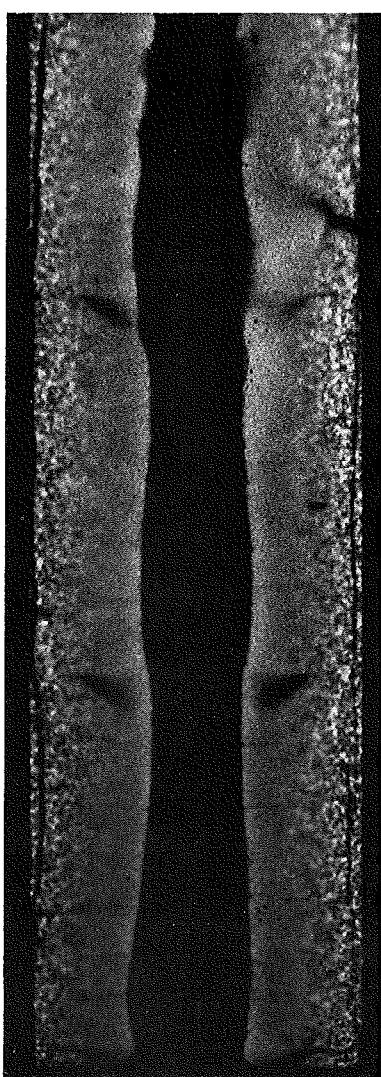
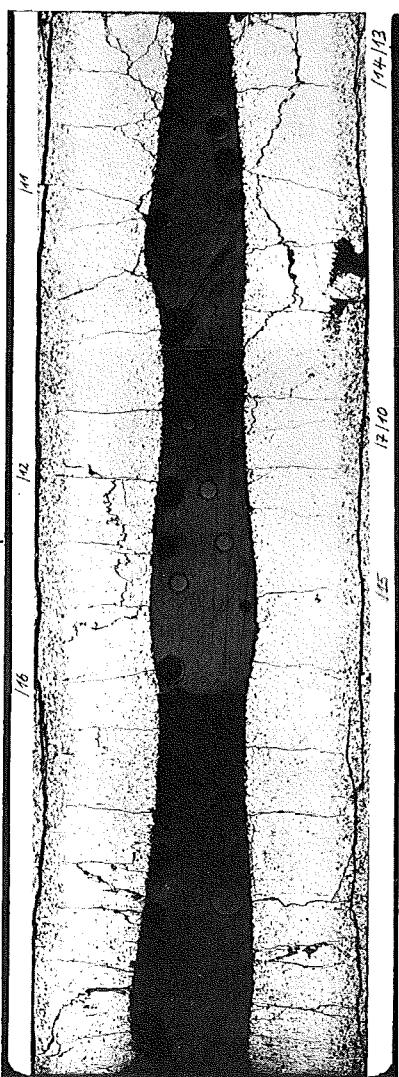
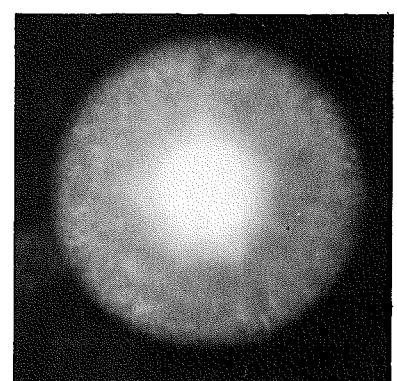
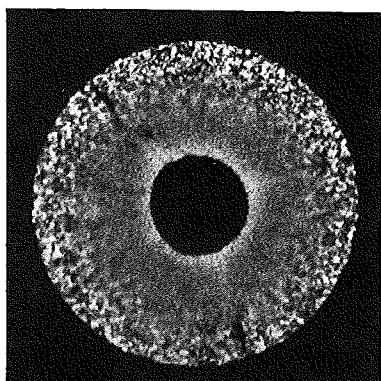
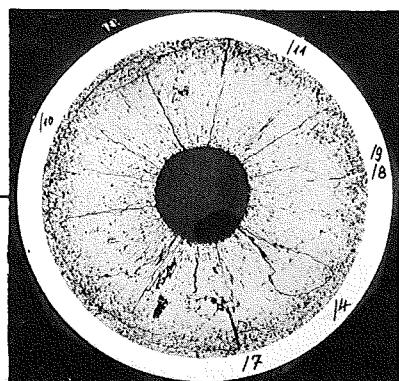




A

B

C



1mm

Prüfling 4B-17



Brennstoff:

Form : Tabletten einseitige Einsenkung
Zusammensetzung : UO_2-PuO_2
Tablettendichte : 84% th.D.

Hülle:

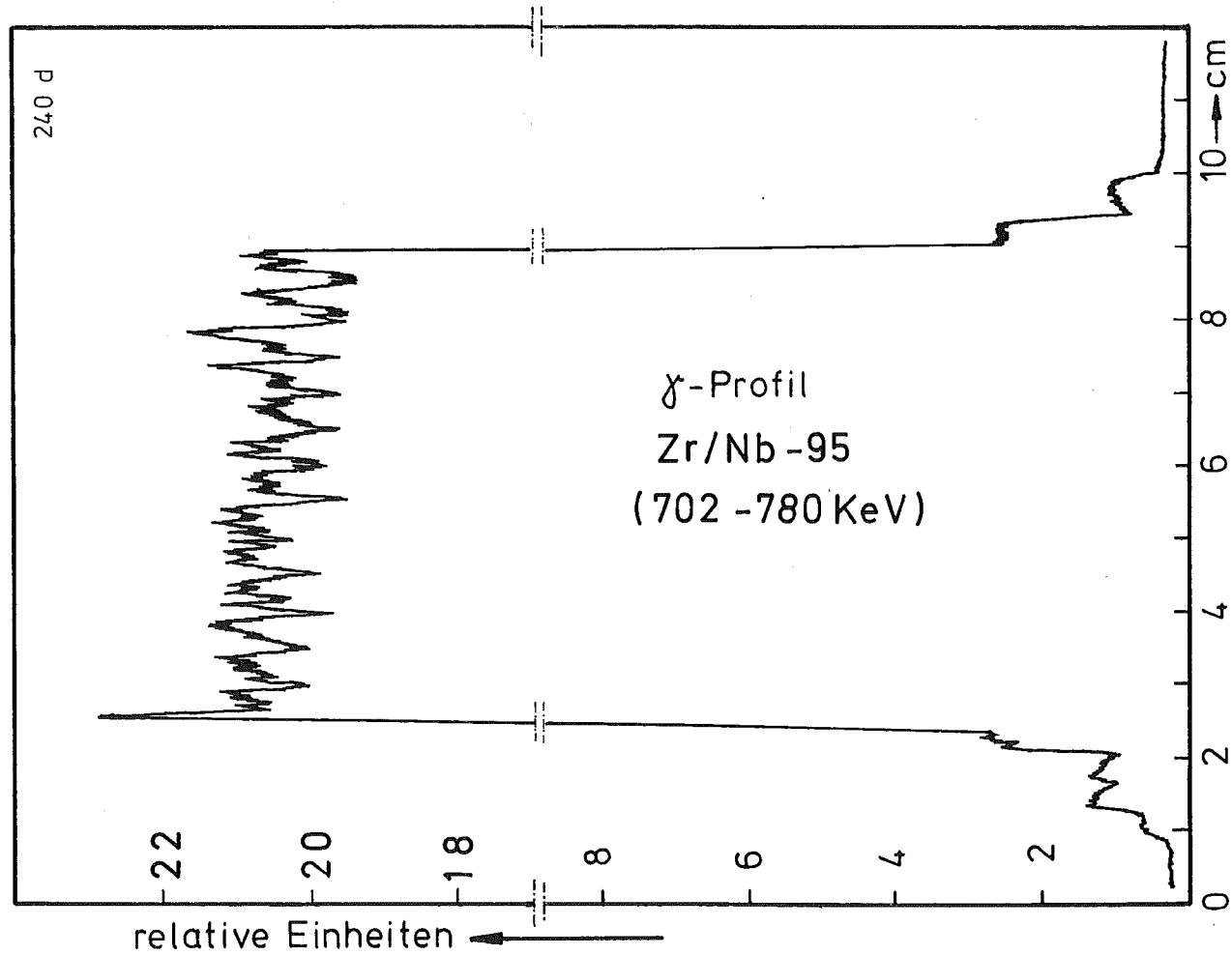
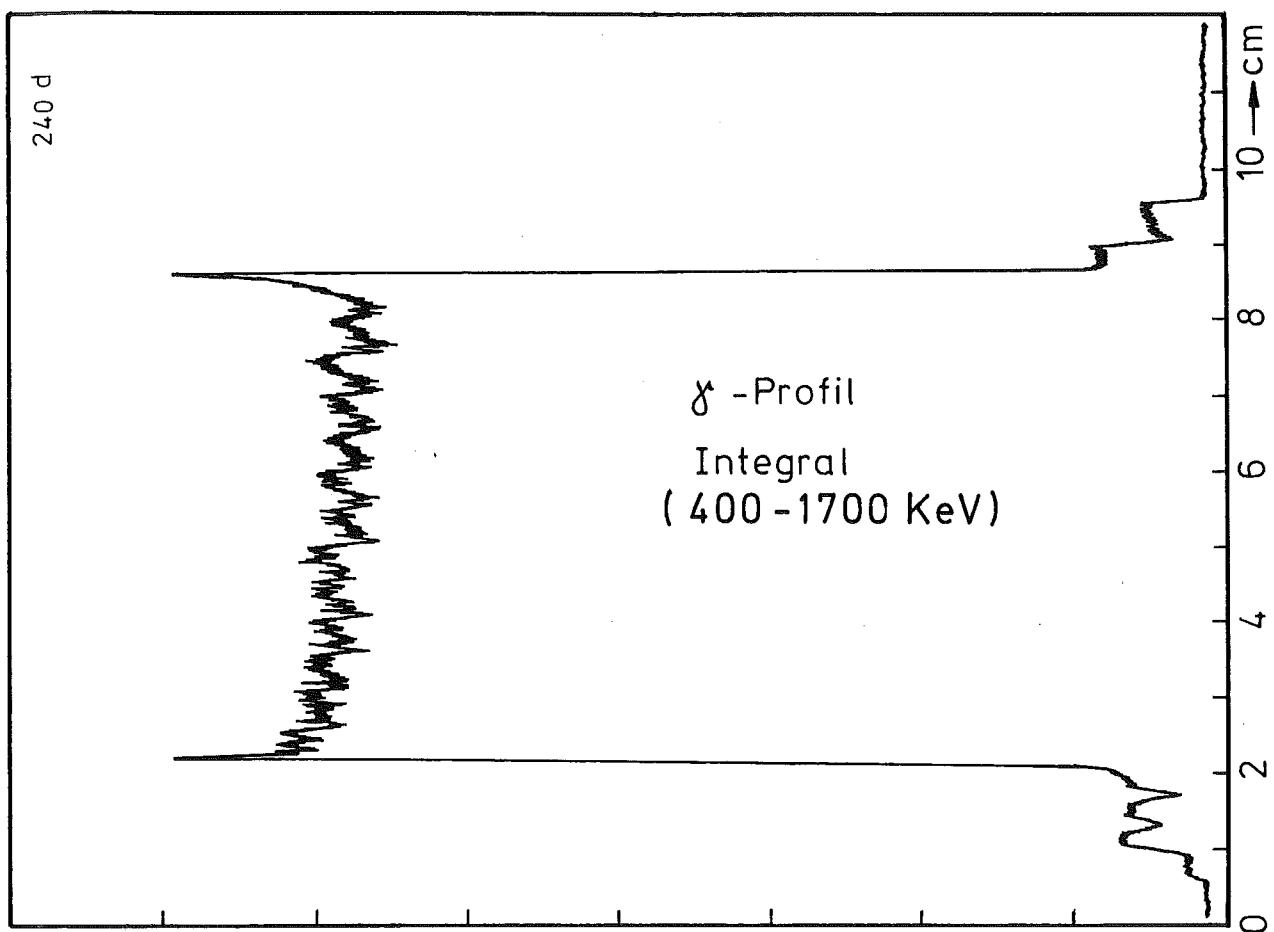
Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,00 mm
Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie:

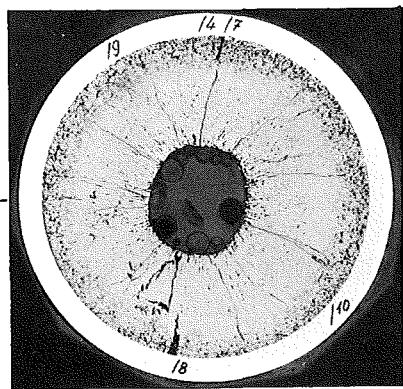
Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,070 mm
Schmierdichte : 79,6% th.D.

Bestrahlung:

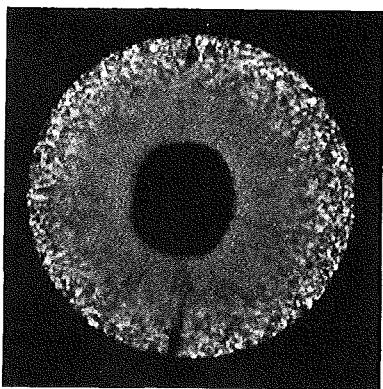
Einrichtung : NaK/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4a
Dauer : 305,5 Vollasttage
Ende : 17. 8. 70
Rechn. Abbrand mittl. : 61,3 MWD/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 463 / 338 W/cm



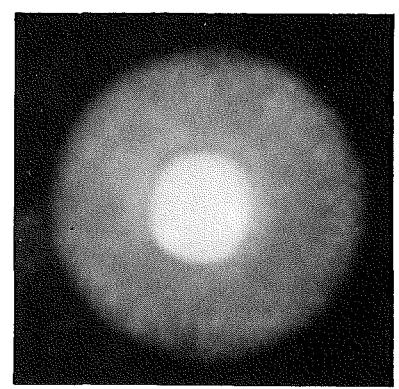
A



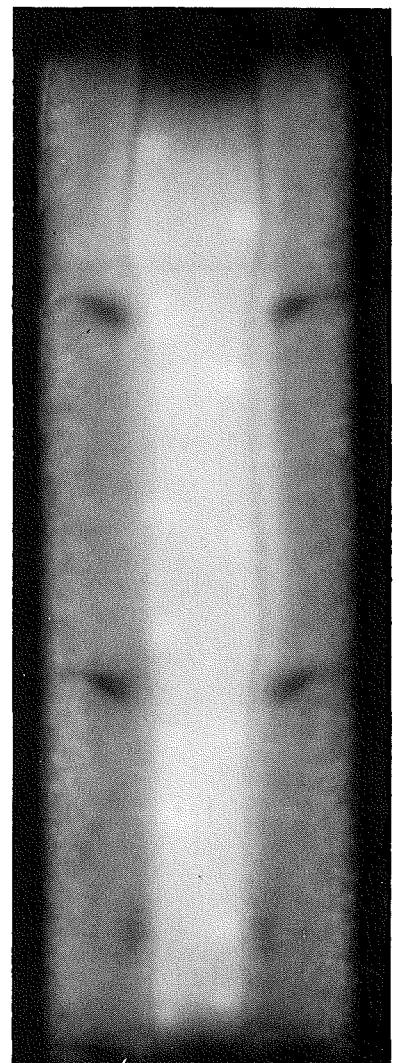
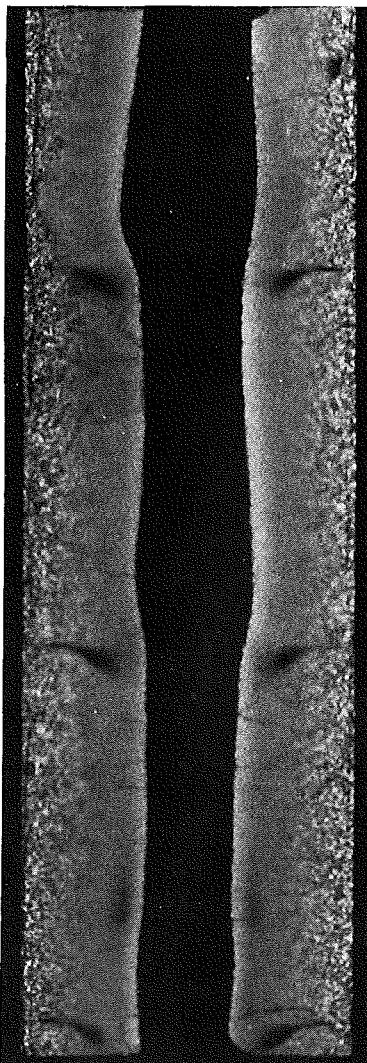
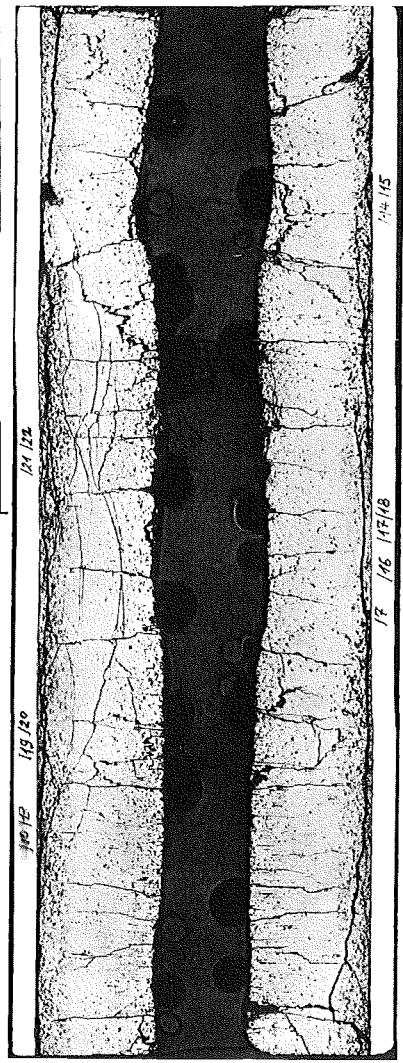
B



C



1



2

1mm

Prüfling 4B-16



Brennstoff:

Form : Tabletten einseitige Einsenkung

Zusammensetzung : $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$

Tablettendichte : 84% th.D.

Hülle:

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 6,00 mm

Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie:

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : 0,070 mm

Schmierdichte : 79,6% th.D.

Bestrahlung:

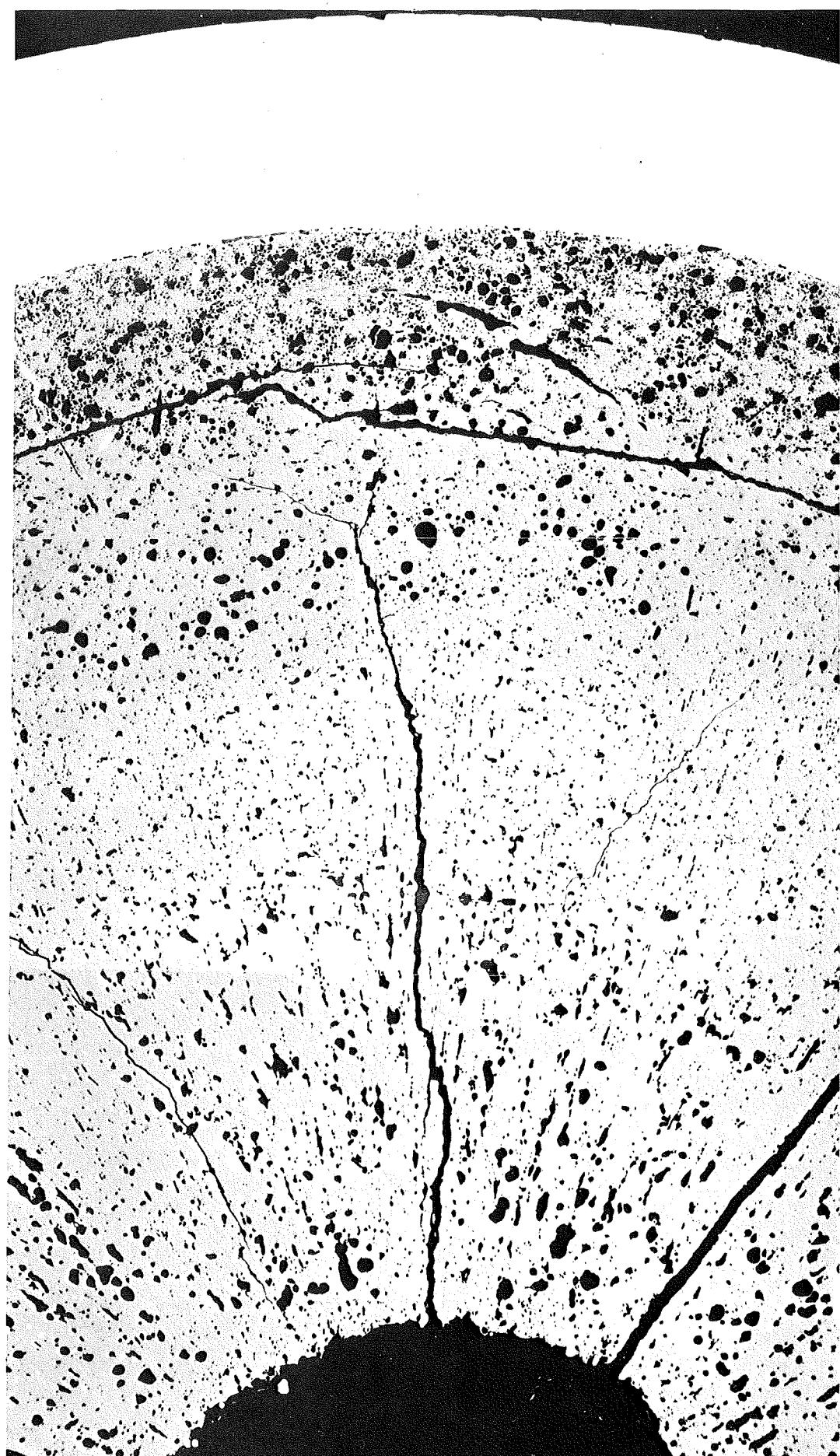
Einrichtung : NaK/PbBi-Doppelkapsel Typ 4a

Dauer : 305,5 Vollasttage

Ende : 17. 8. 70

Rechn. Abbrand mittl. : 61,6 MWd/kg Metall

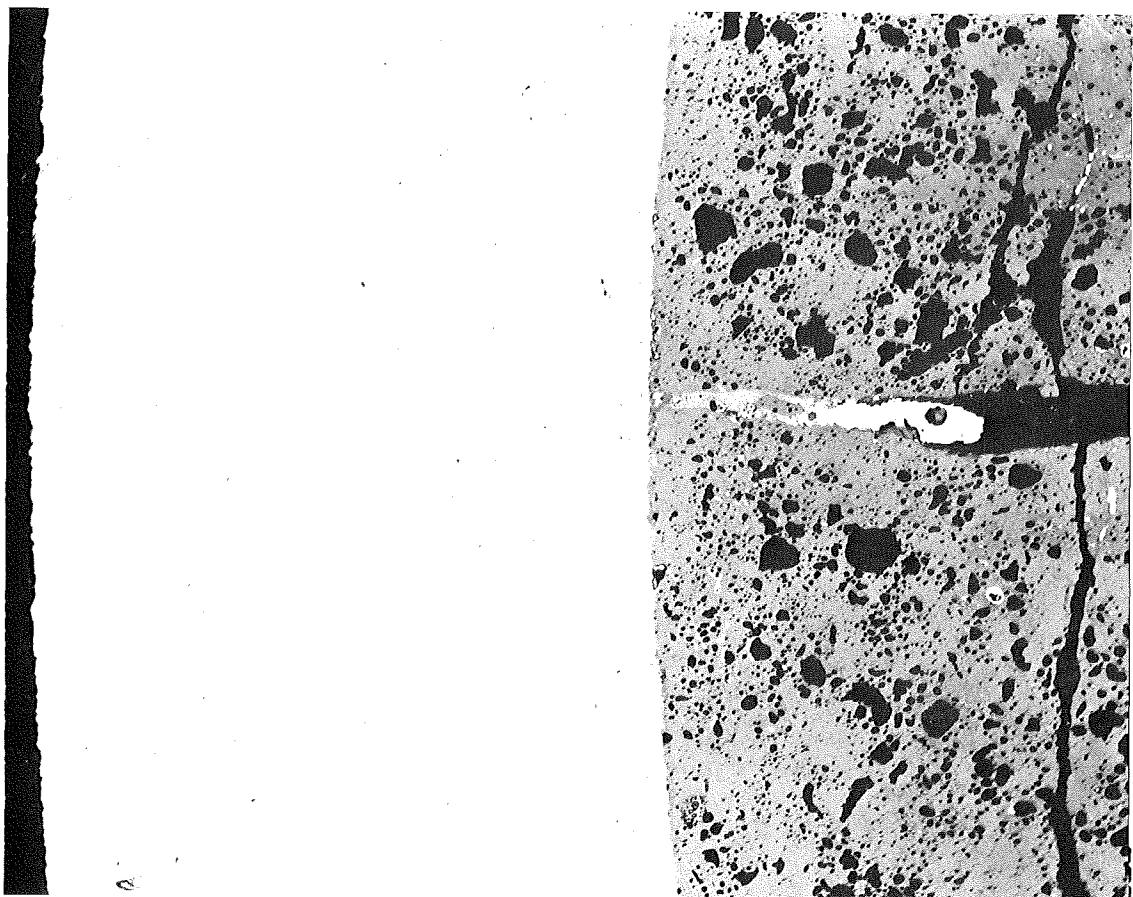
Stableistung max./mittl. : 471 / 338 W/cm



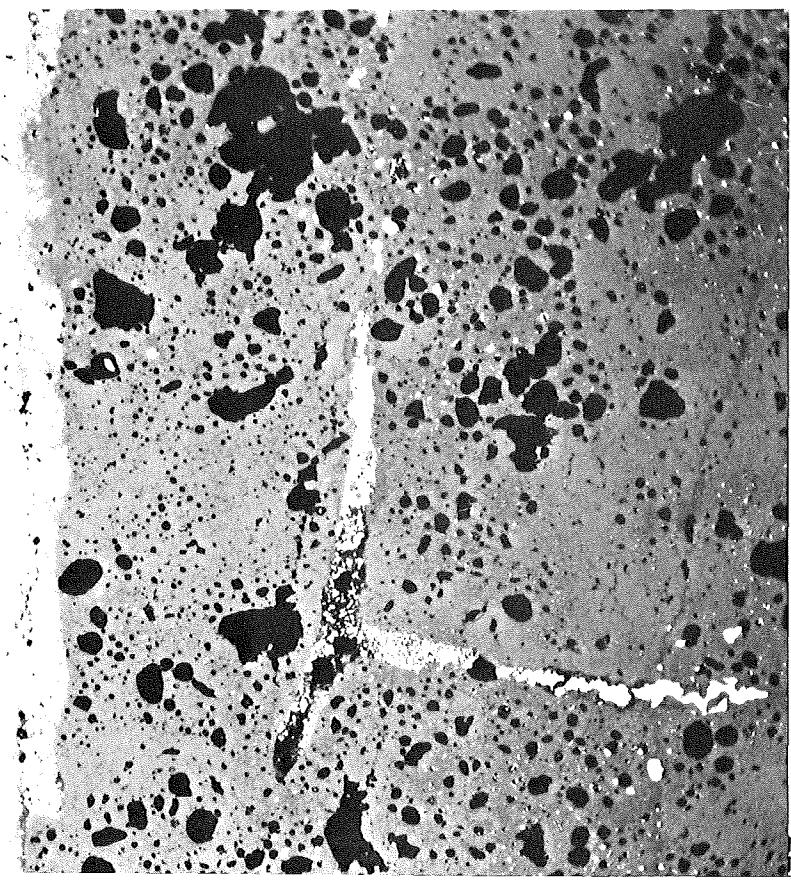
- I/100 -

zu Prüfling 4B/21

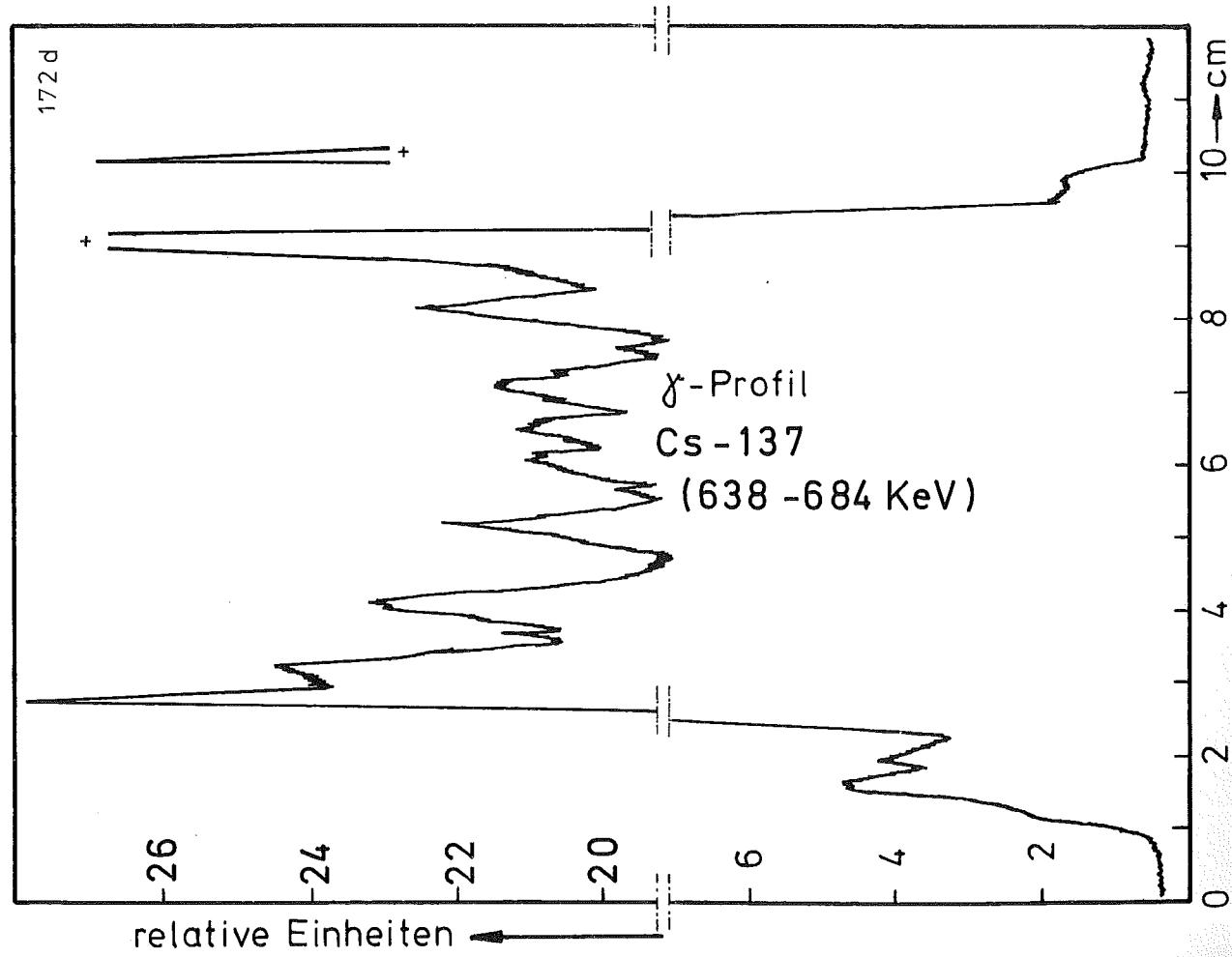
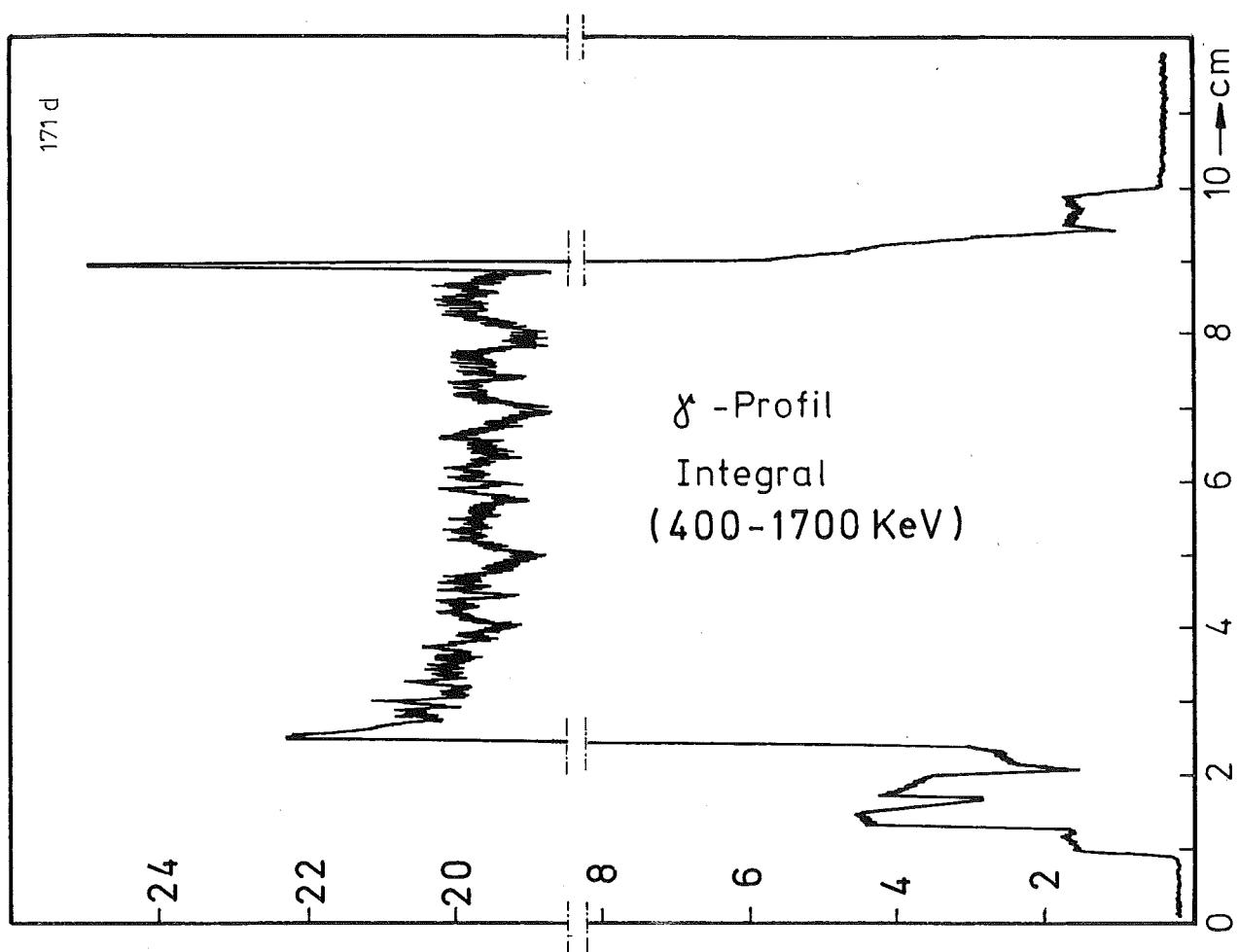
A1



HZ-3a-57-4B/21-1/10 200 x



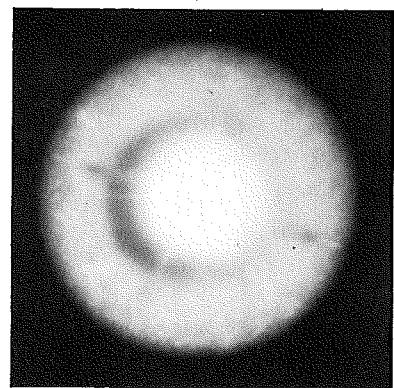
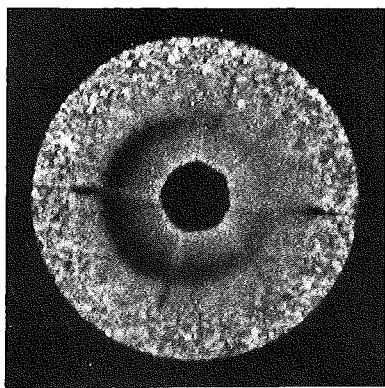
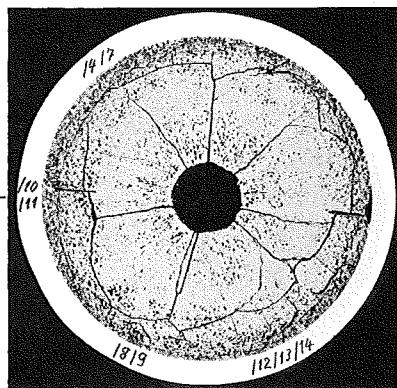
HZ-3a-57-4B/21-1/9 500 x



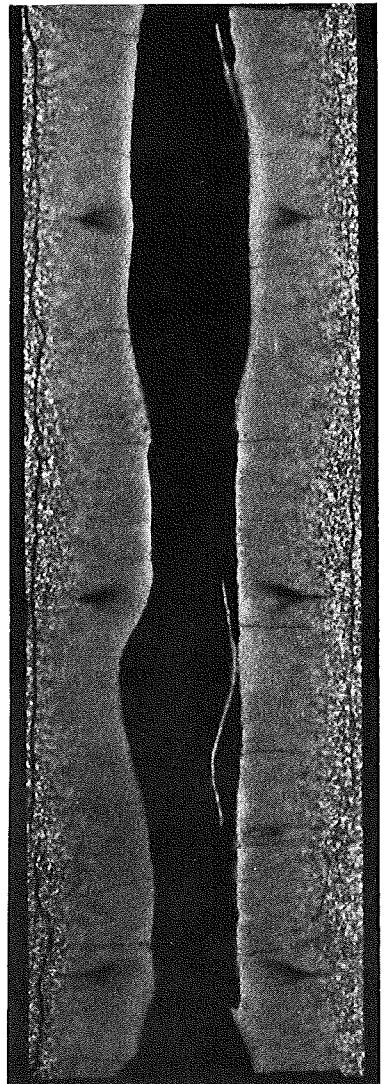
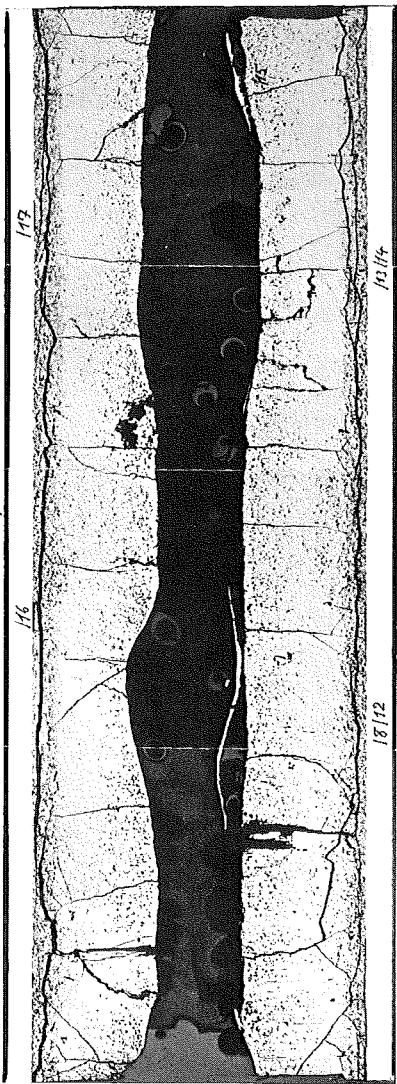
A

B

C



1



2

1mm

Prüfling 4B-21



Brennstoff:

Form : Tabletten beidseitige Einsenkung

Zusammensetzung : $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$

Tablettendichte : 84% th.D.

Hülle:

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 6,00 mm

Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie:

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : 0,070 mm

Schmierdichte : 79,6% th.D.

Bestrahlung:

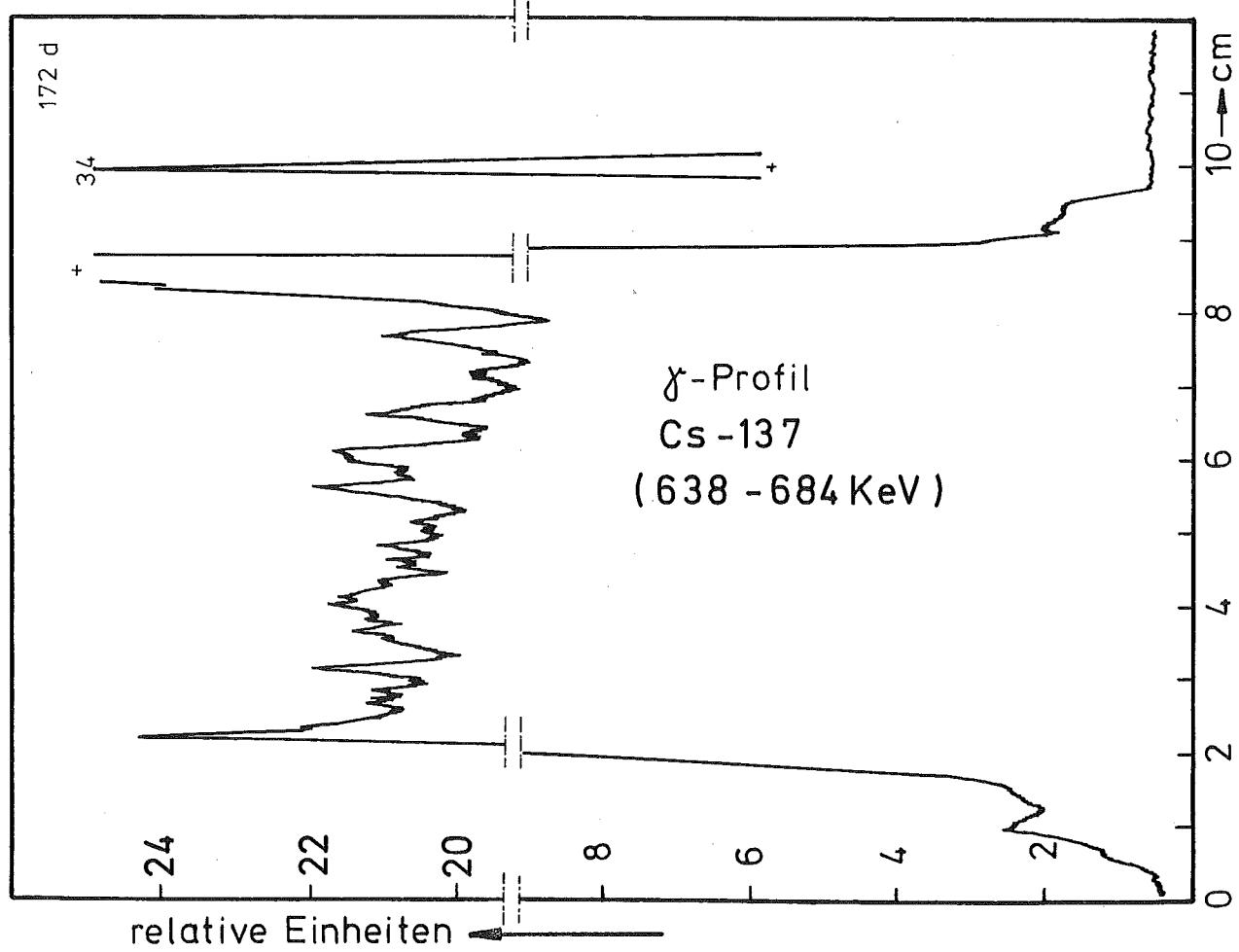
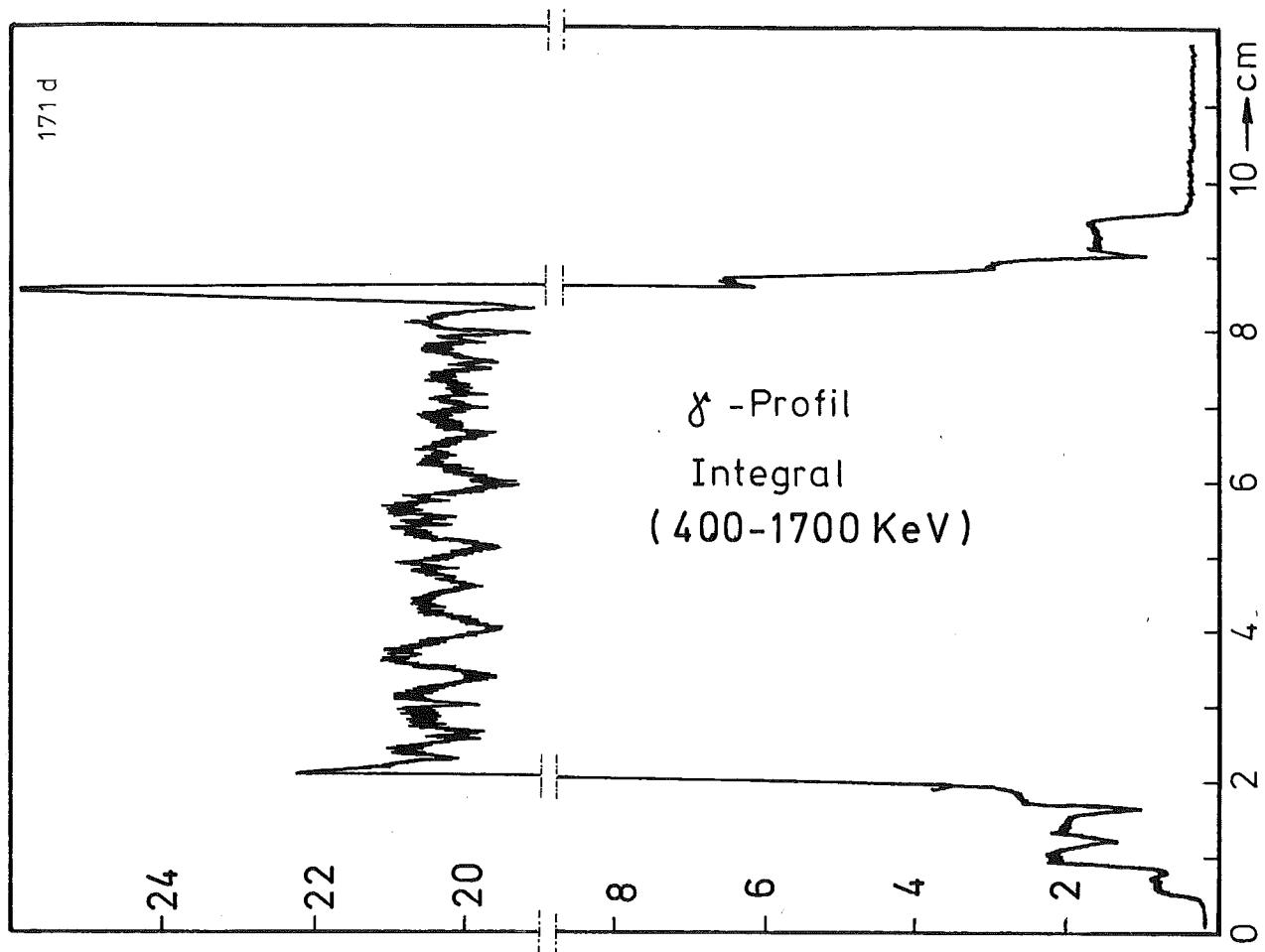
Einrichtung : NaK/PbBi-Doppelkapsel Typ 4a

Dauer : 460,4 Vollasttage

Ende : 29. 3. 71

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

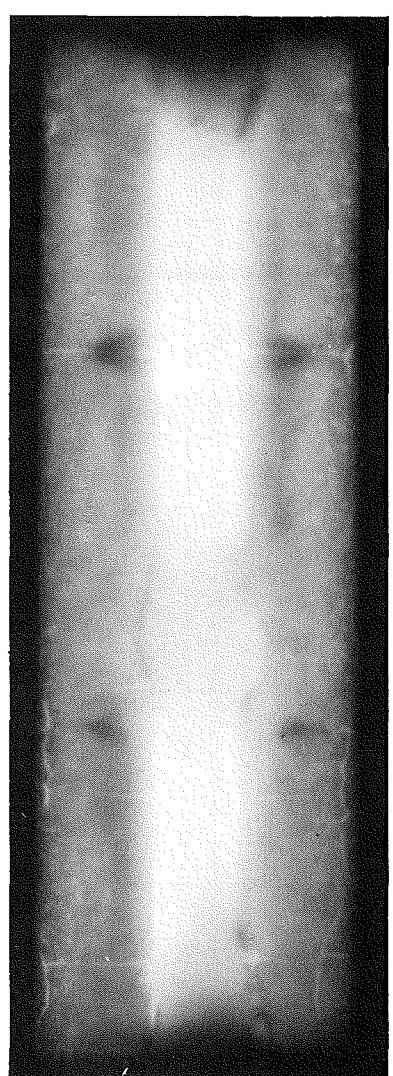
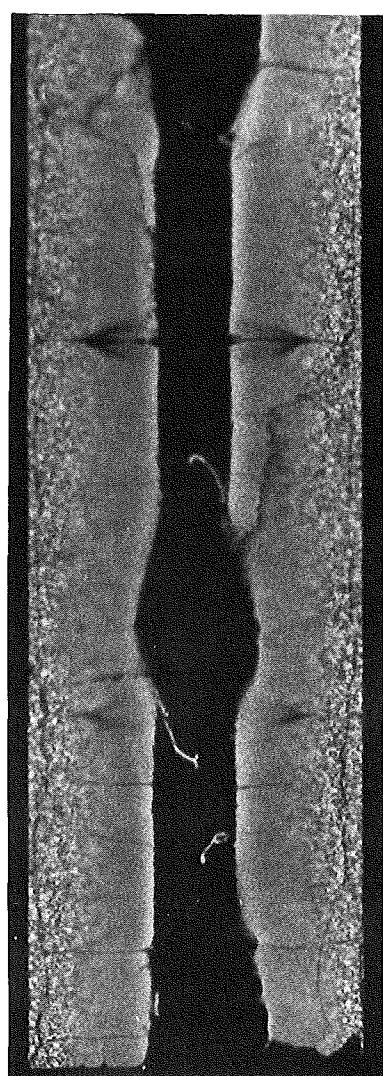
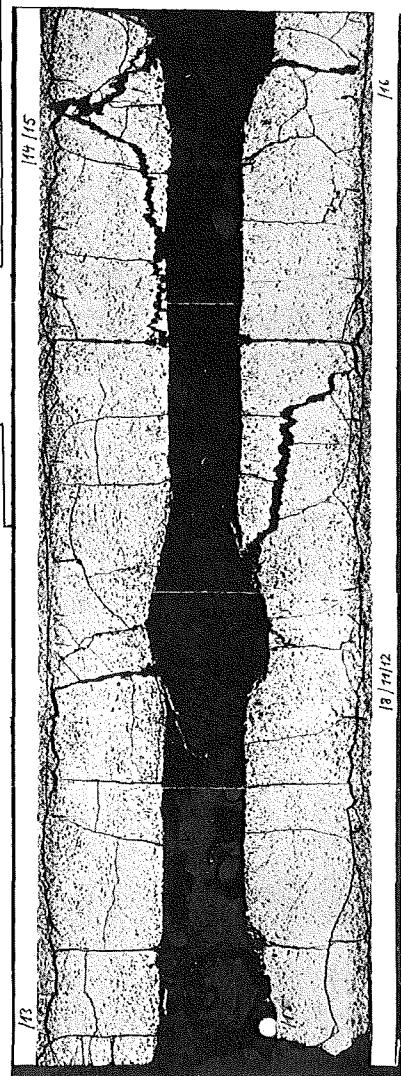
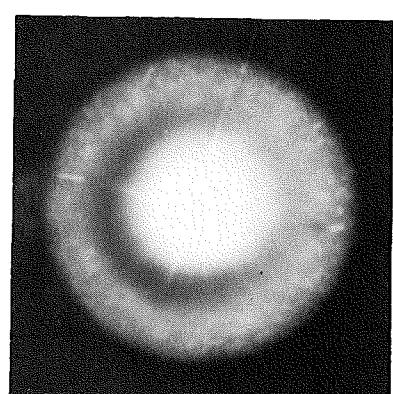
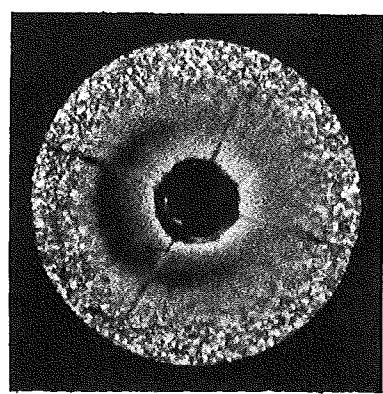
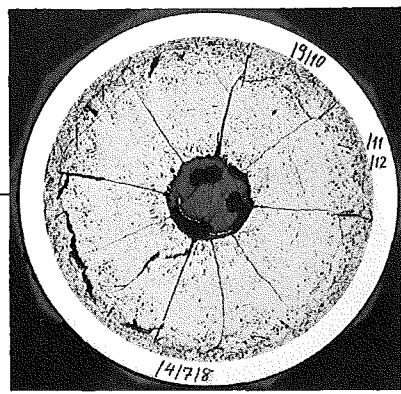
Stableistung max./mittl. : 450 / 291 W/cm



A

B

C



1mm



Prüfling 4B-20

Brennstoff:

Form : Tabletten beidseitige Einsenkung

Zusammensetzung : $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$

Tablettendichte : 84% th.D.

Hülle:

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 6,00 mm

Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie:

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : 0,070 mm

Schmierdichte : 79,6% th.D.

Bestrahlung:

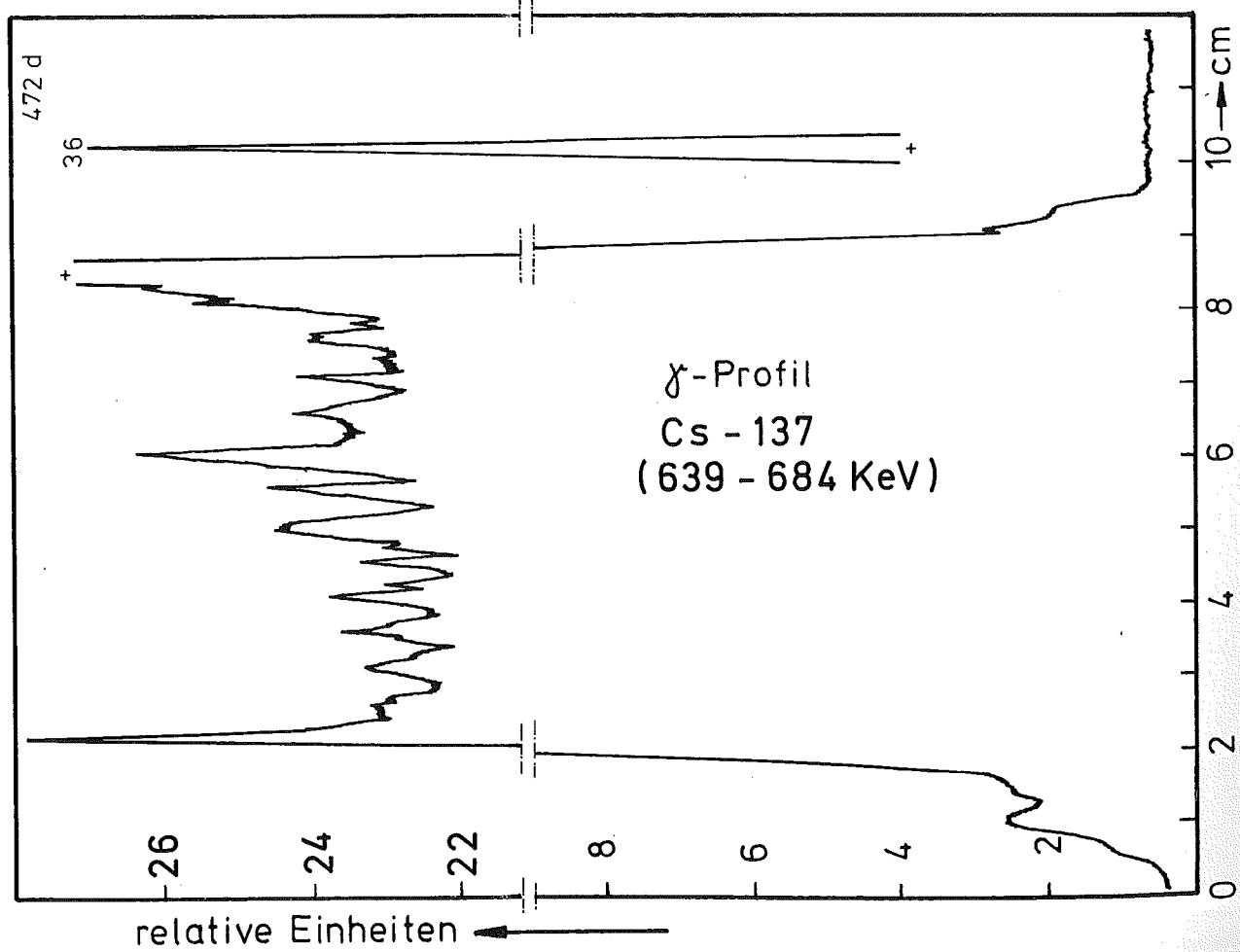
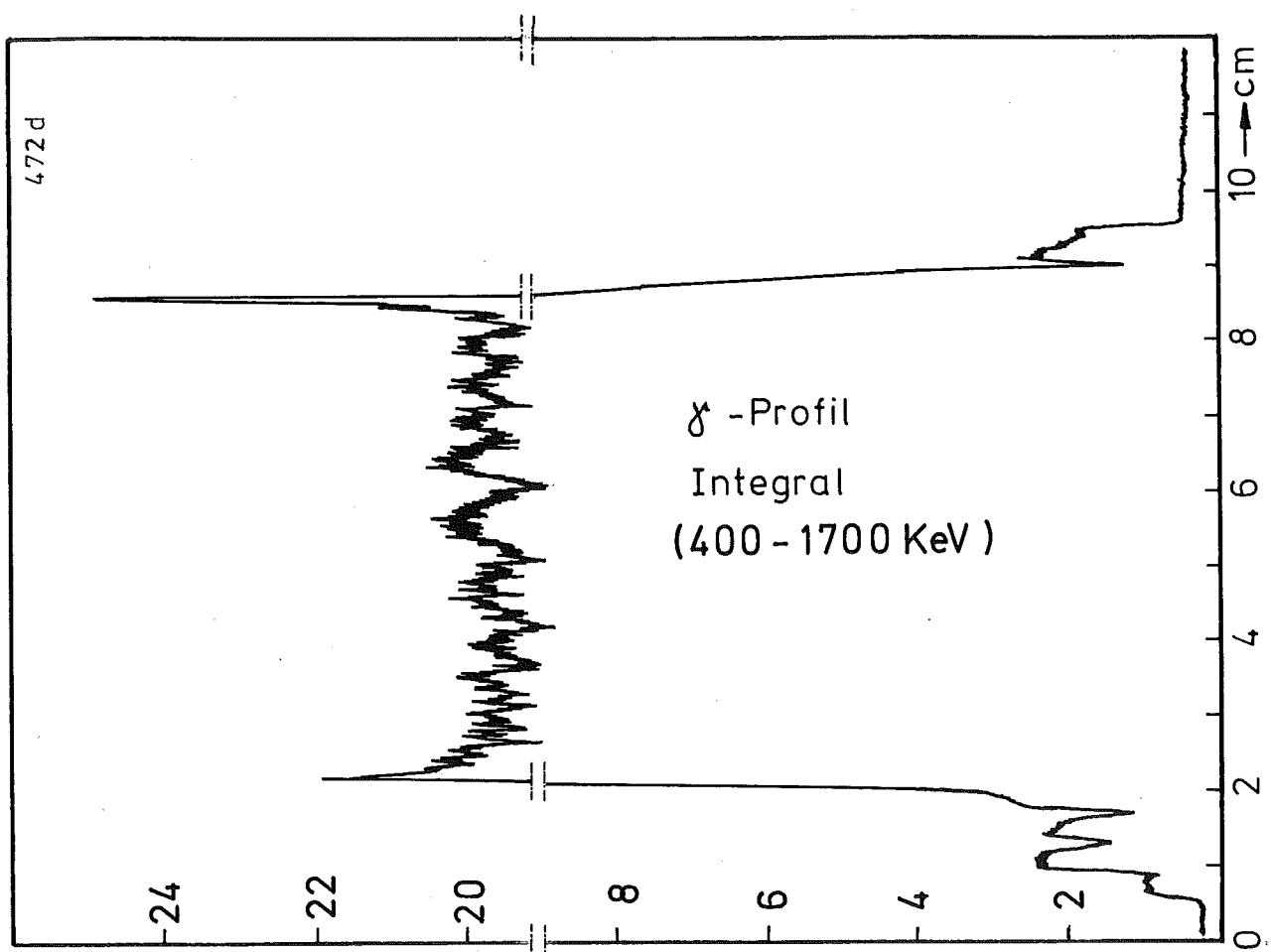
Einrichtung : NaK/PbBi-Doppelkapsel Typ 4a

Dauer : 460,4 Vollasttage

Ende : 29. 3. 71

Rechn. Abbrand mittl. : 83,1 MWd/kg Metall

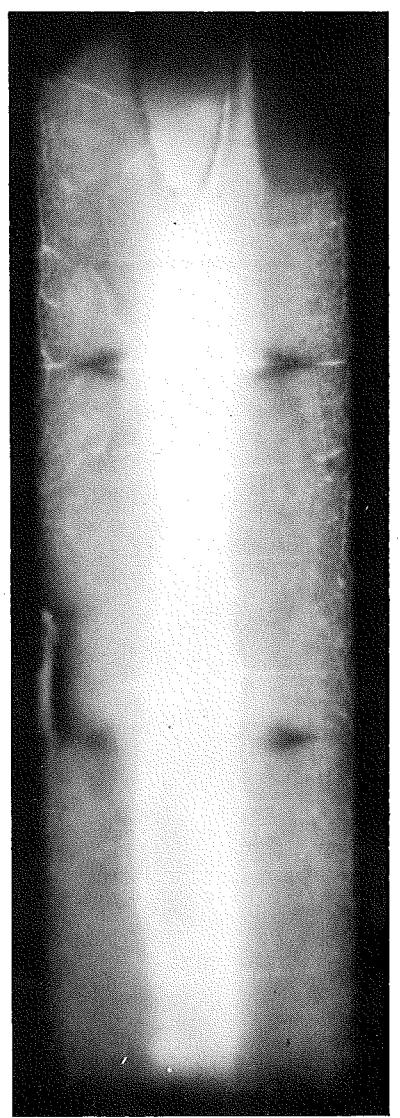
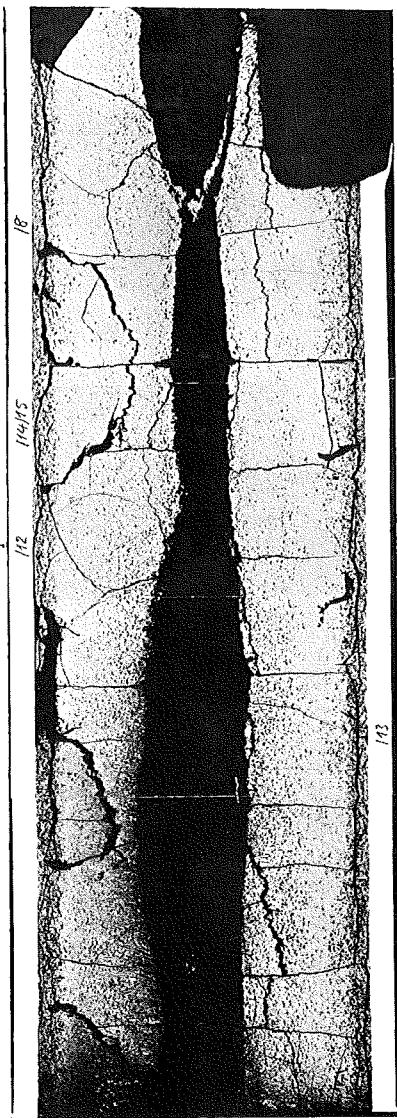
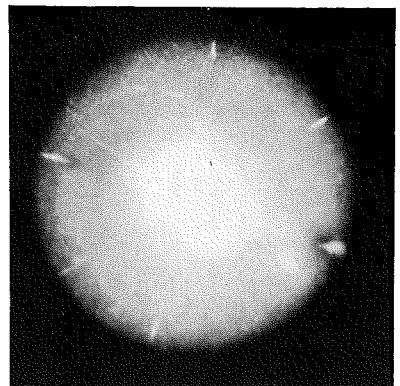
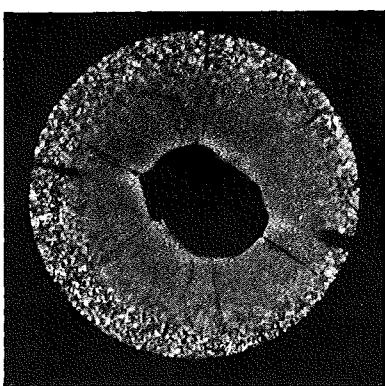
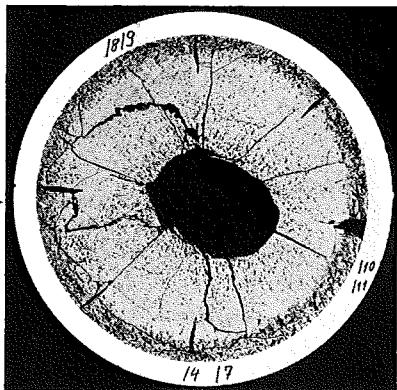
Stableistung max./mittl. : 445 / 305 W/cm



A

B

C



1 mm

Prüfling 4B-19



Brennstoff:

Form : Tablettten beidseitige Einsenkung
Zusammensetzung : UO_2-PuO_2
Tablettendichte : 84% th.D.

Hülle:

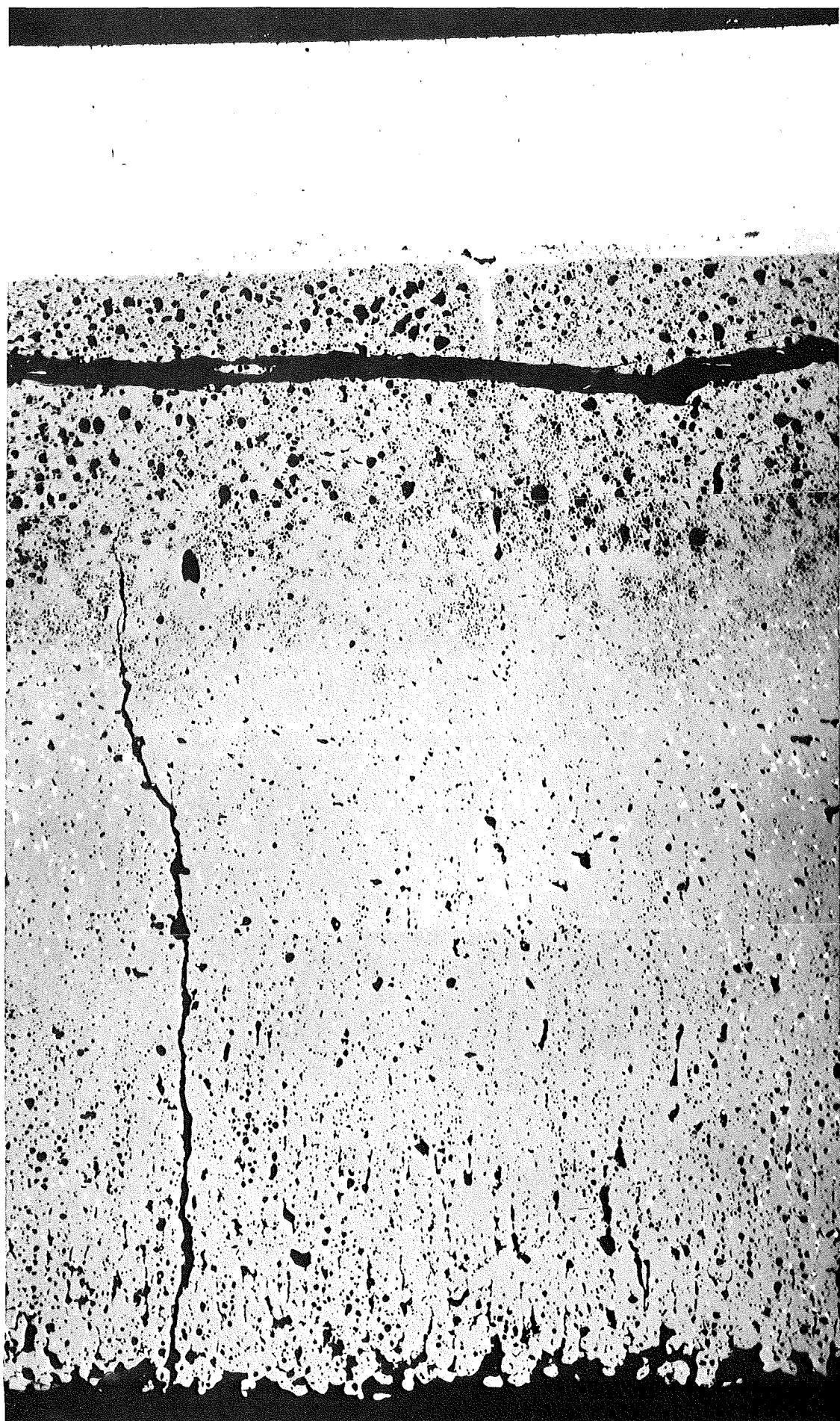
Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,00 mm
Wandstärke : 0,38 mm

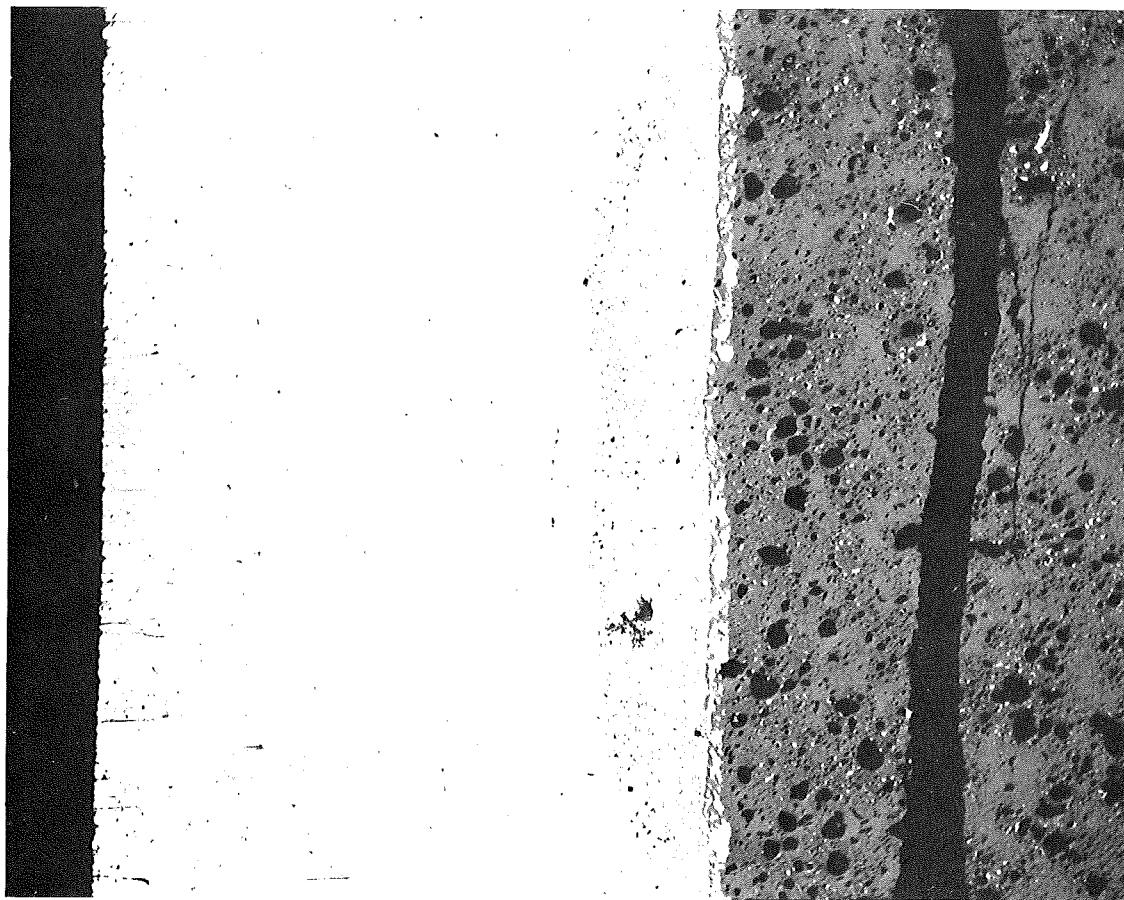
Geometrie:

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,070 mm
Schmierdichte : 79,6% th.D.

Bestrahlung:

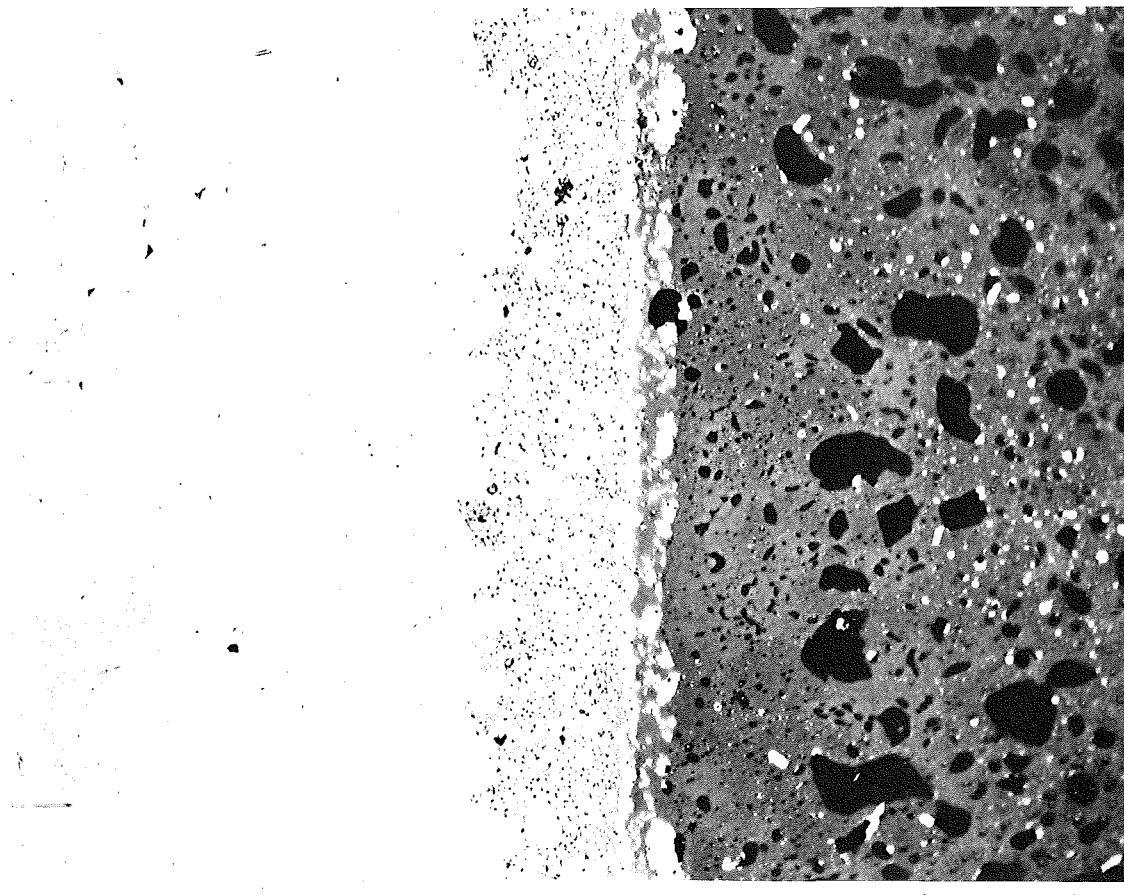
Einrichtung : NaK/PbBi-Doppelkapsel Typ 4a
Dauer : 460,4 Vollasttage
Ende : 29. 3. 71
Rechn. Abbrand mittl. : 84,8 MWd/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 461 / 310 W/cm





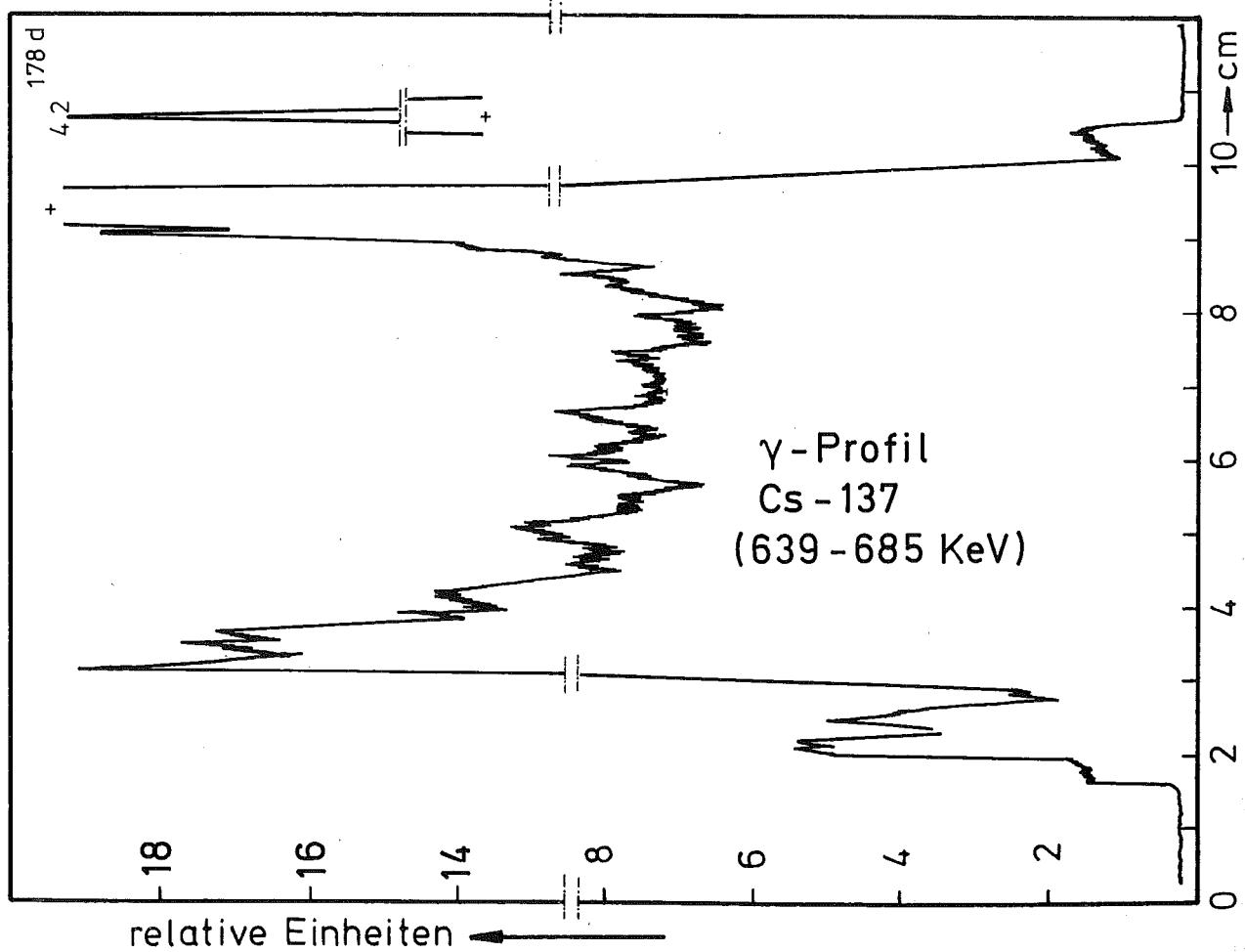
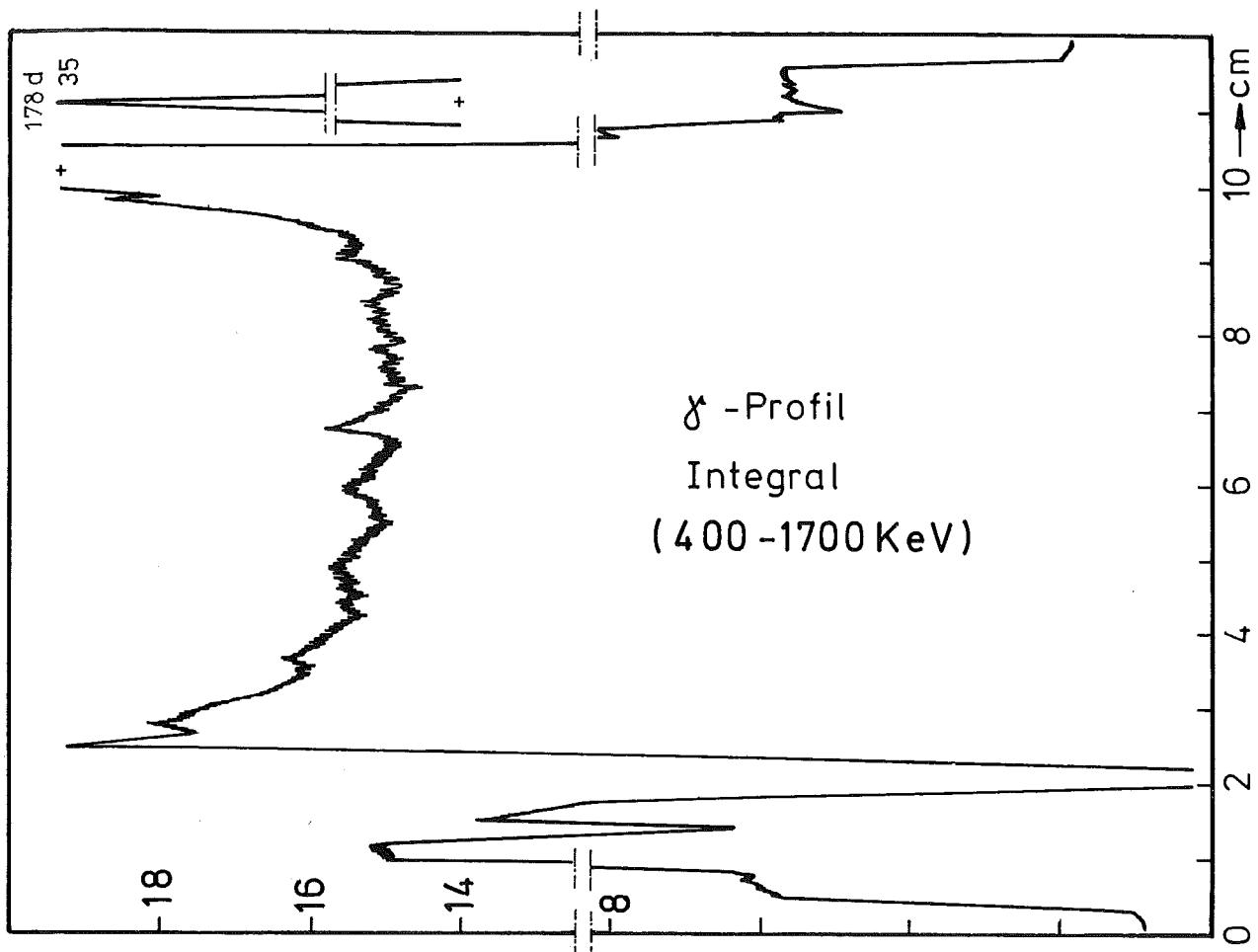
HZ-3a-58-4B/24-2/13 200x

0,1 mm



HZ-3a-58-4B/24-2/12 500x

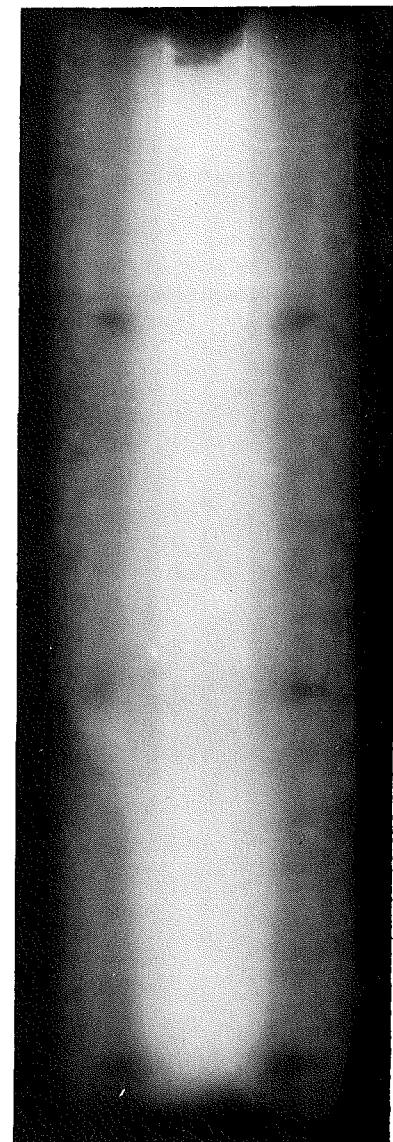
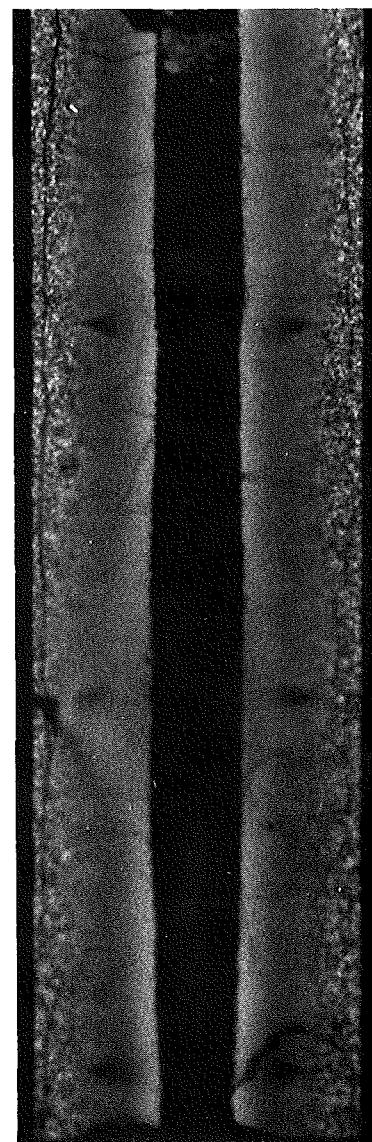
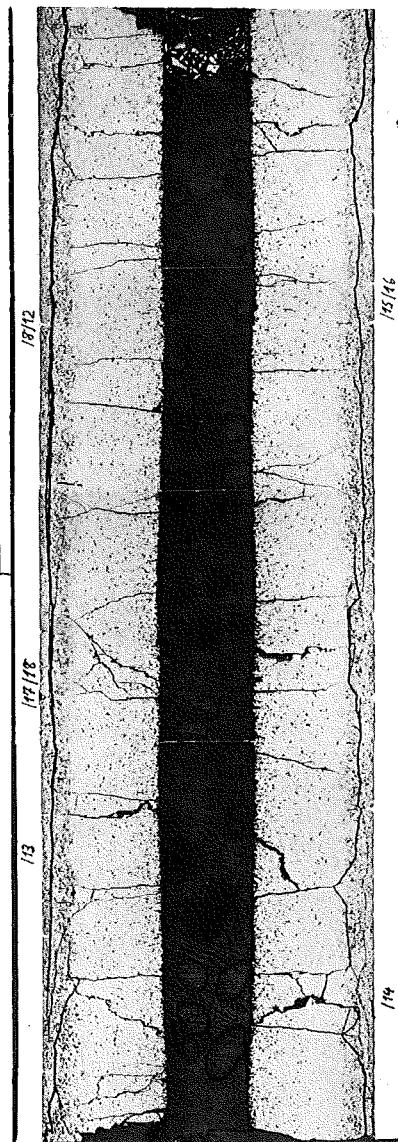
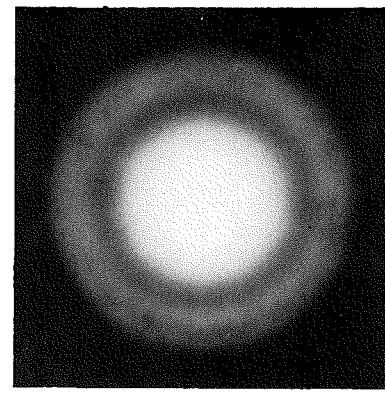
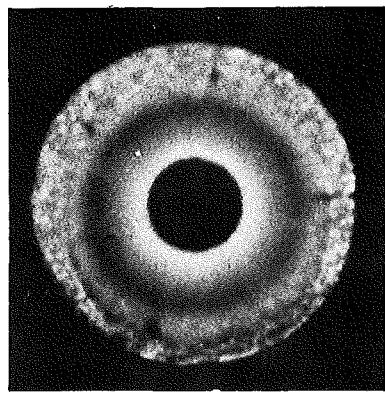
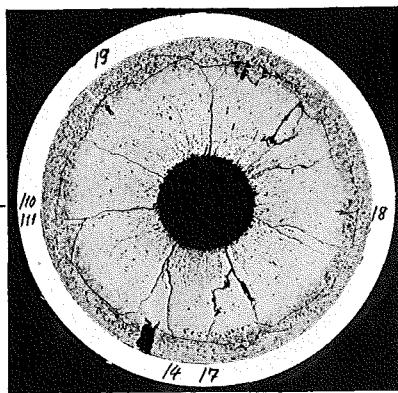
0,04 mm



A

B

C



1mm



Prüfling 4B-24

Brennstoff:

Form : Tabletten beidseitige Einsenkung
Zusammensetzung : $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$
Tablettendichte : 84% th.D.

Hülle:

Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,00 mm
Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie:

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,070 mm
Schmierdichte : 79,6% th.D.

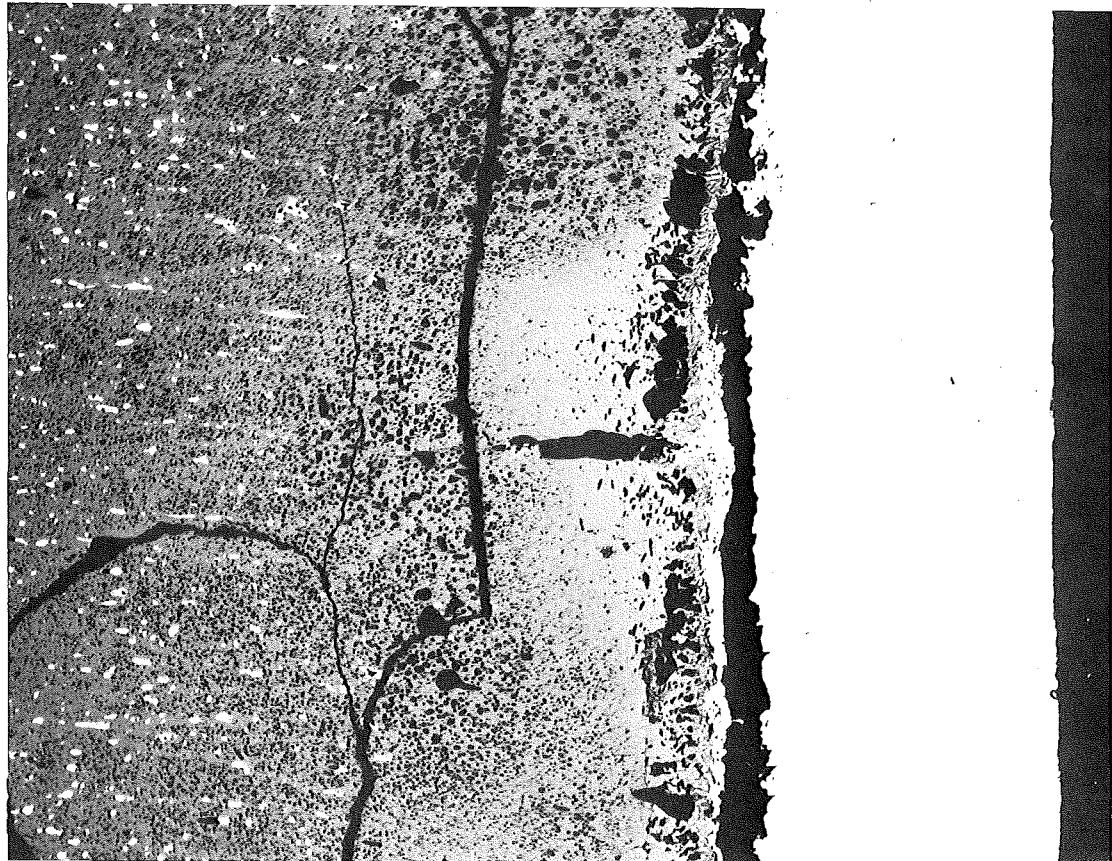
Bestrahlung:

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4a
Dauer : 517,5 Vollasttage
Ende : 14. 6. 71
Rechn. Abbrand mittl. : 93,3 MWD/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 549 / 304 W/cm



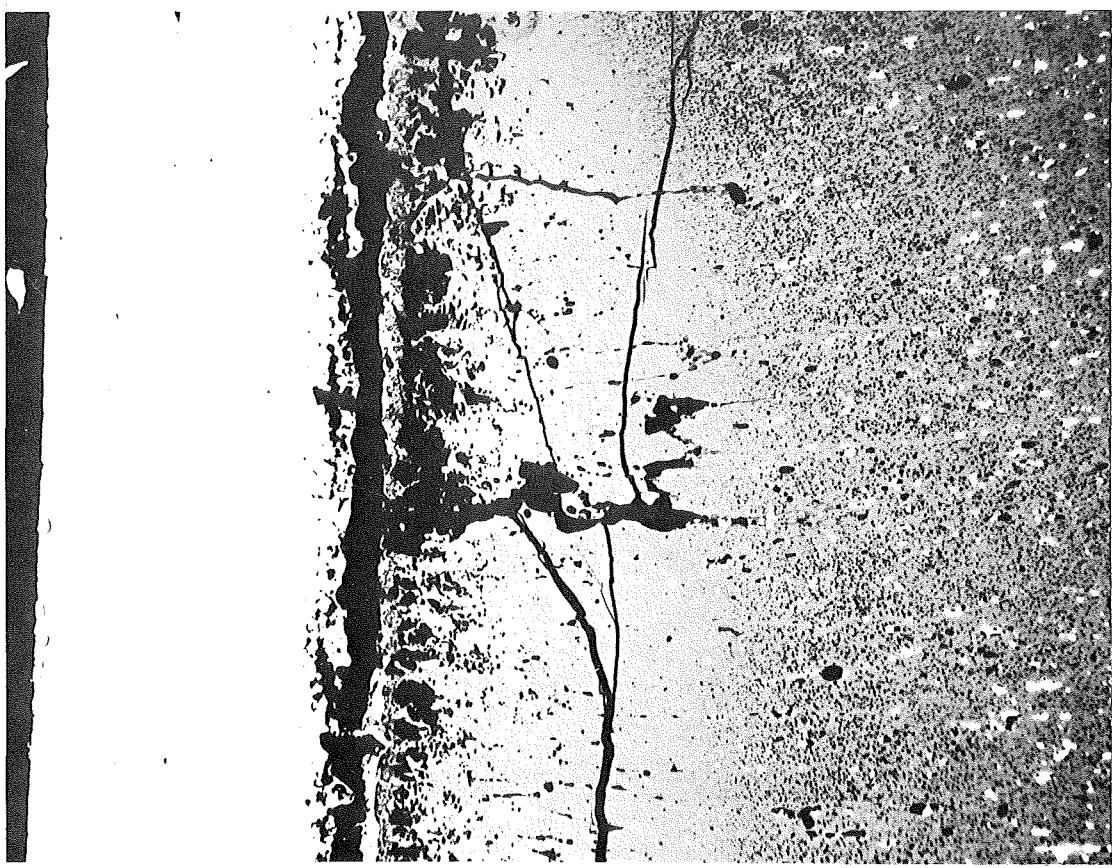
HZ-3a-58-4B/23-2/12

100x



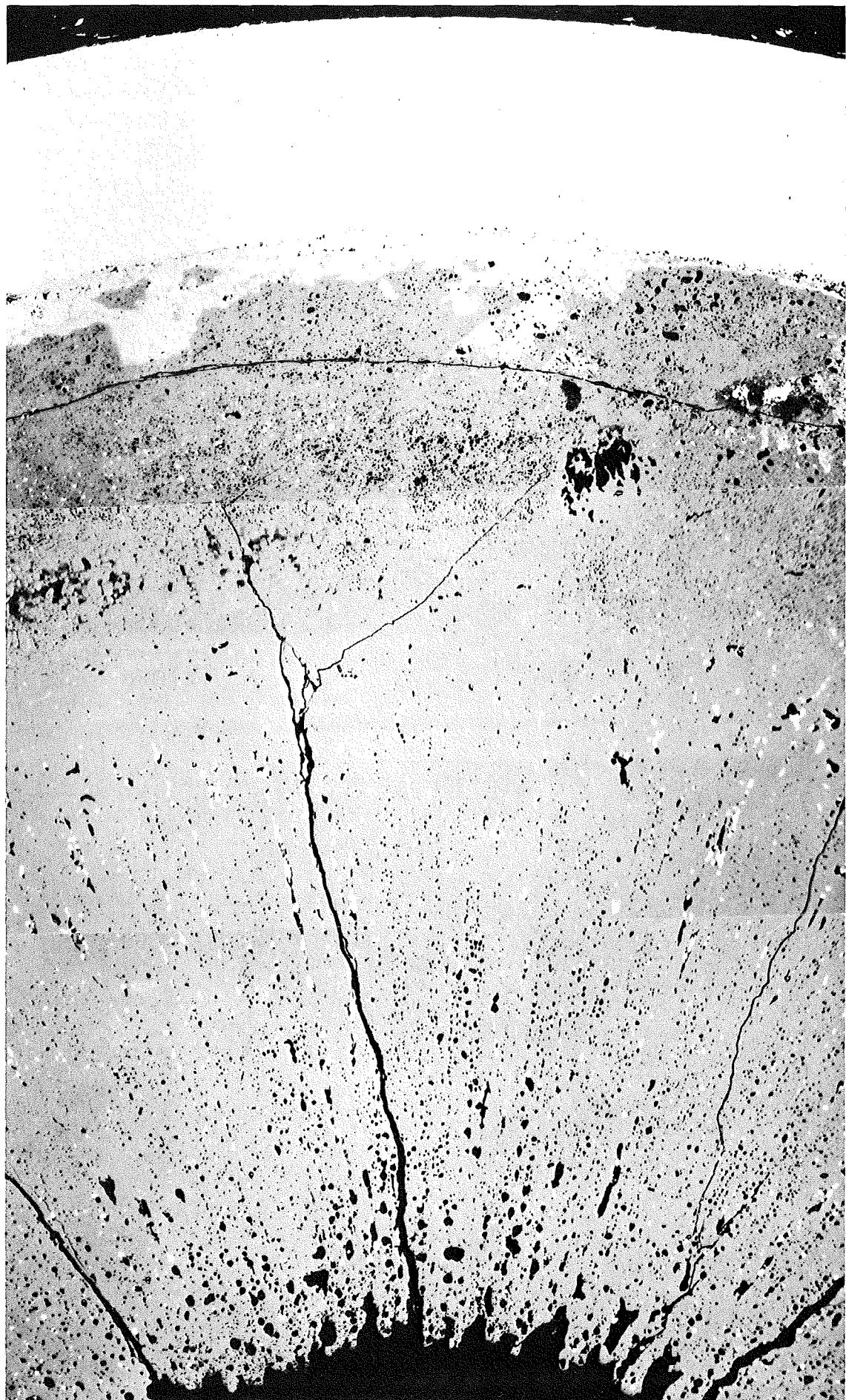
HZ-3a-58-4B/23-2/14

100x

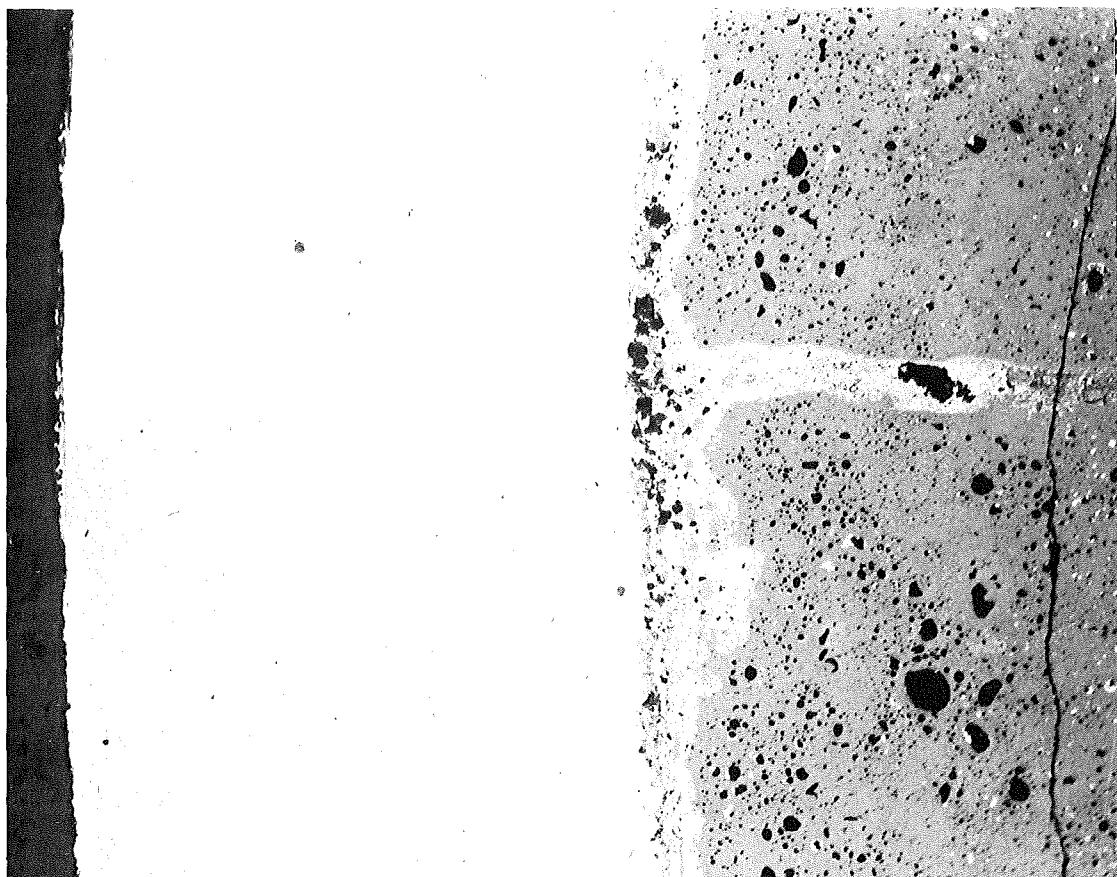


0,1 mm

- I/113 -
zu Prüfling 4B/23
A2



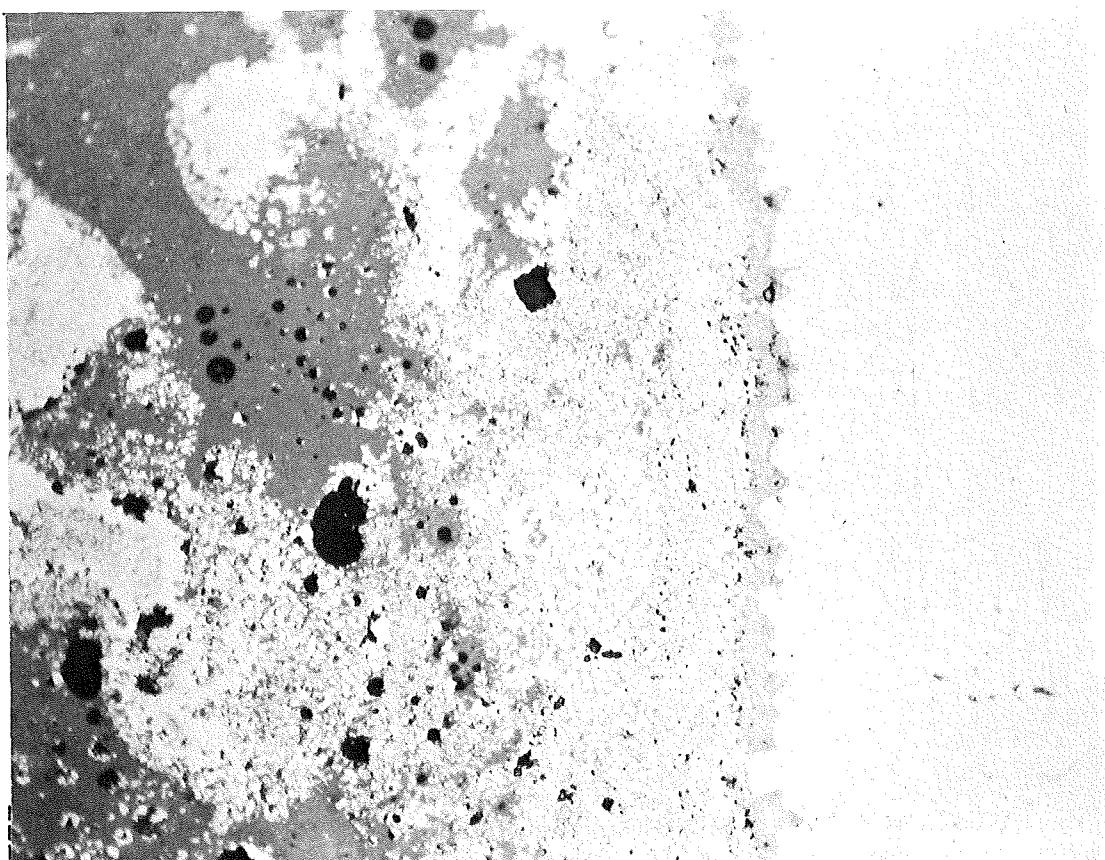
A 2



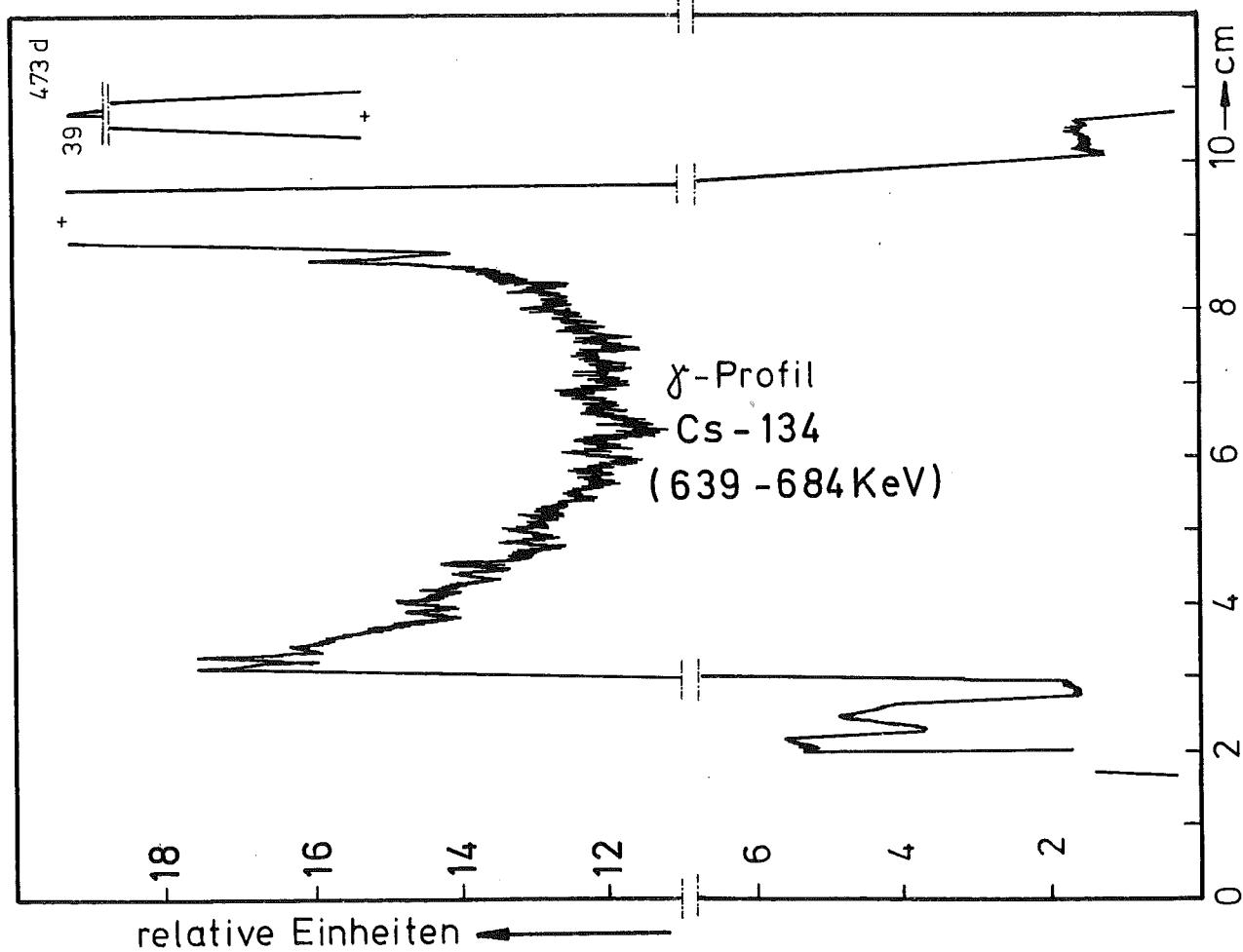
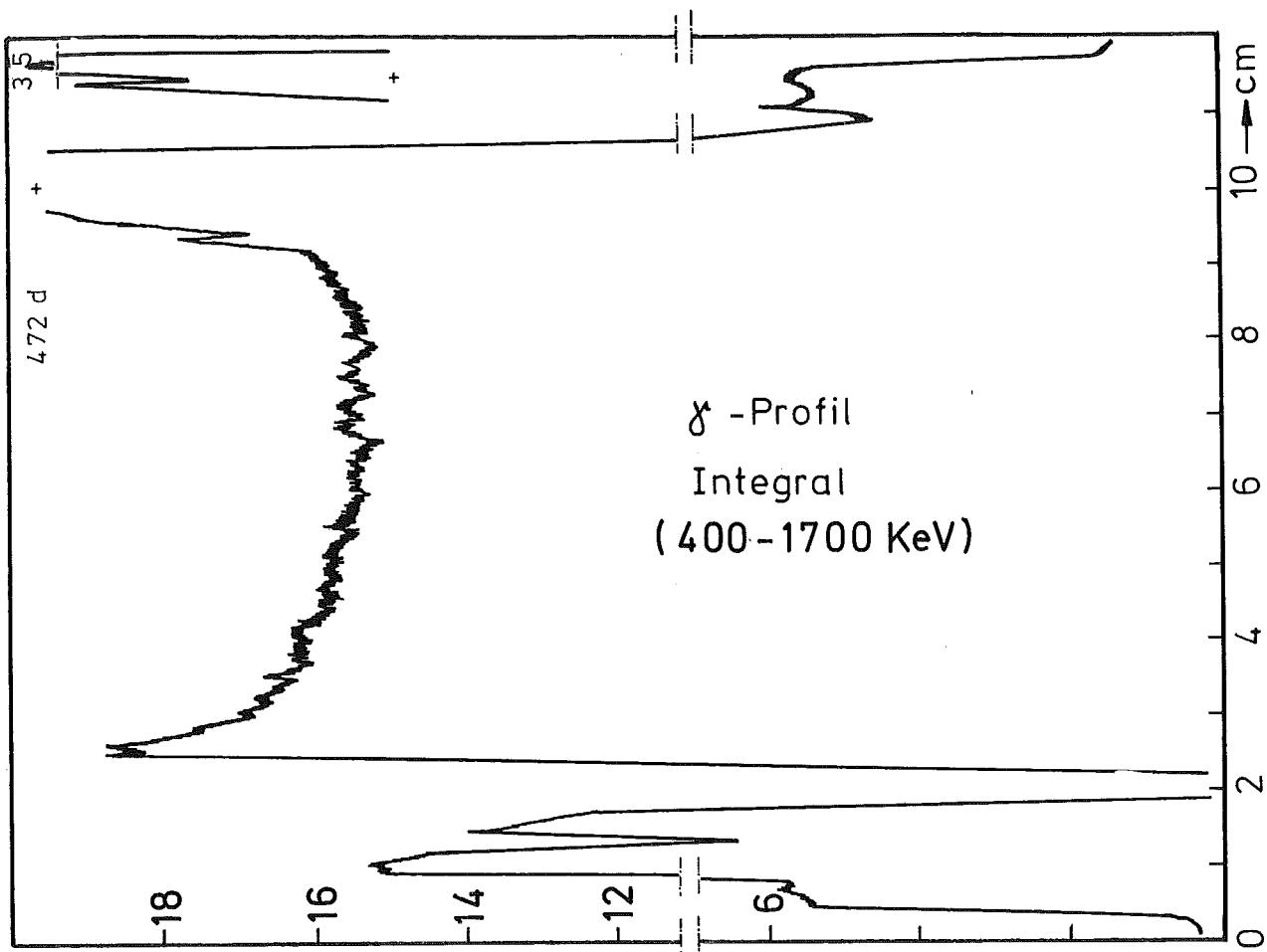
HZ-3a-58-4B/23-1/10

200x

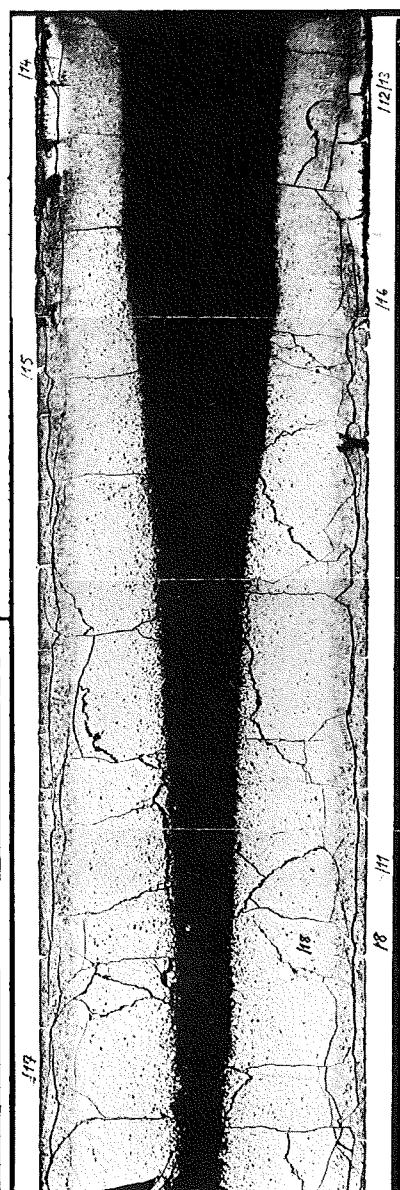
HZ-3a-58-4B/23-1/8
500x



0,04 mm



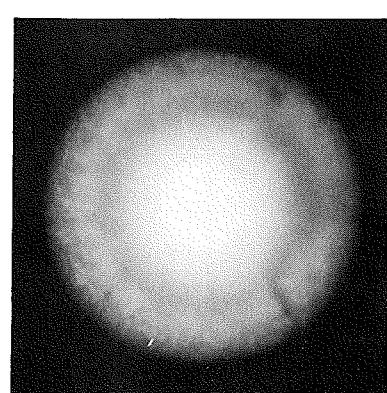
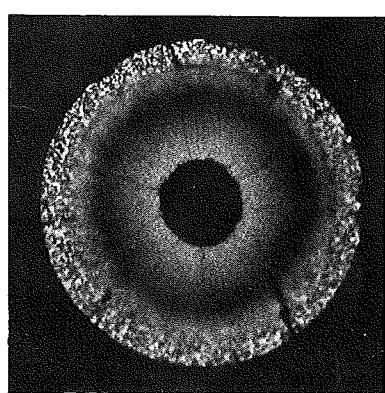
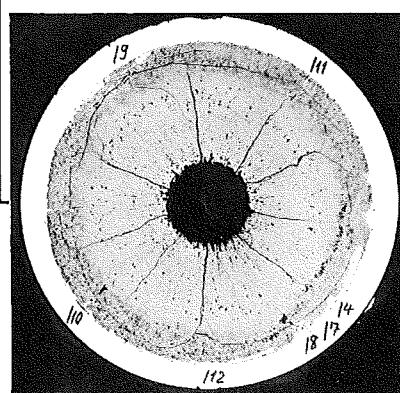
A



B



C



1 mm

Prüfling 4B-23



Brennstoff:

Form : Tabletten beidseitige Einsenkung

Zusammensetzung : $^{235}\text{UO}_2 - \text{PuO}_2$

Tablettendichte : 84% th.D.

Hülle:

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 6,00 mm

Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie:

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : 0,070 mm

Schmierdichte : 79,6% th.D.

Bestrahlung:

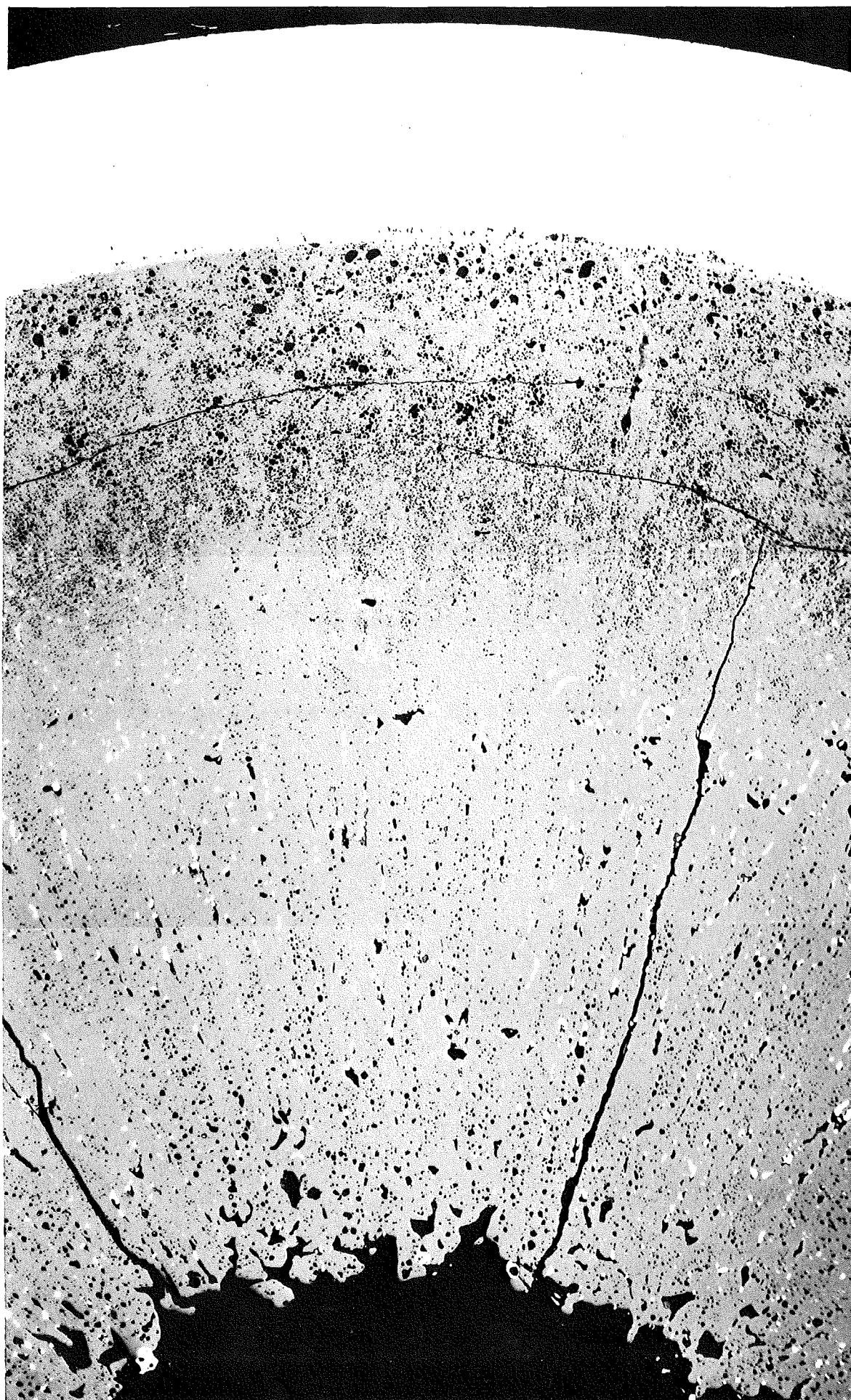
Einrichtung : NaK/PbBi-Doppelkapsel Typ 4a

Dauer : 517,5 Vollasttage

Ende : 14. 6. 71

Rechn. Abbrand mittl. : 104,2 MWd/kg Metall

Stableistung max./mittl. : 549 / 339 W/cm

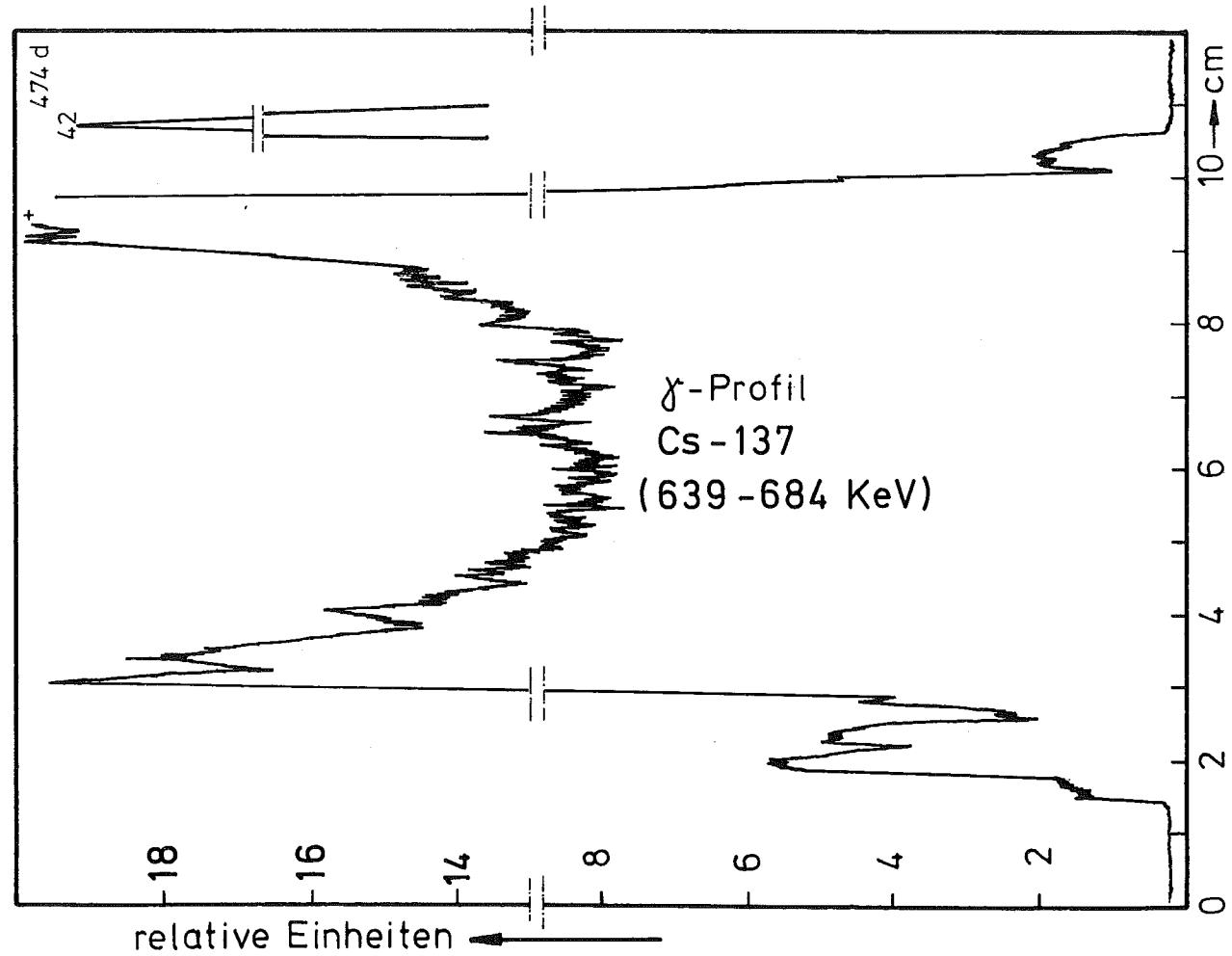
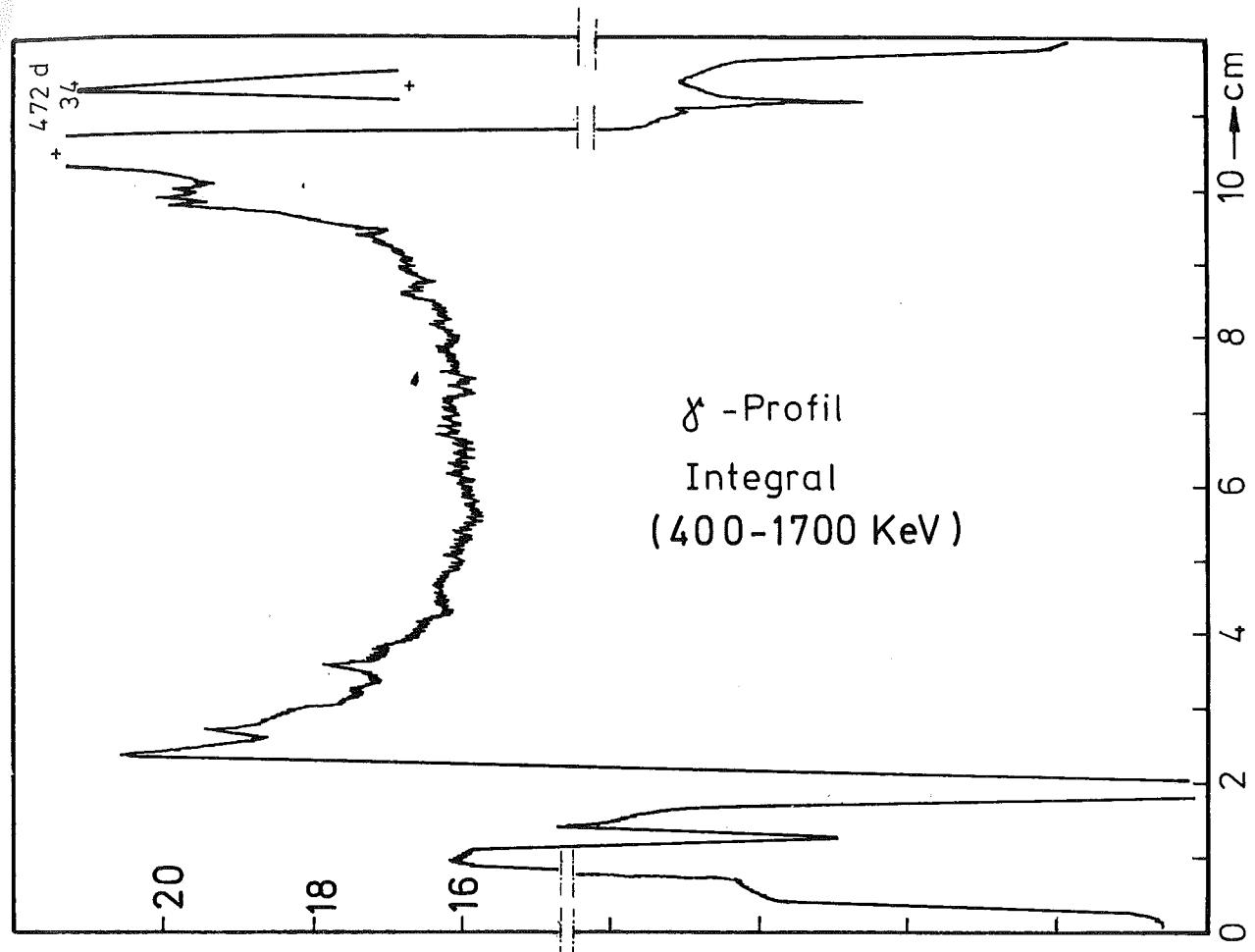


-I/118-
zu Prüfling 4B/22
A2



/11

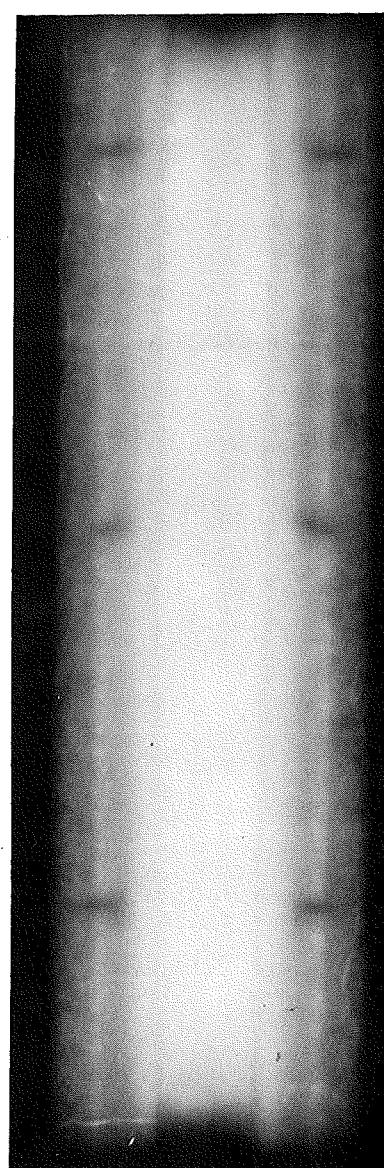
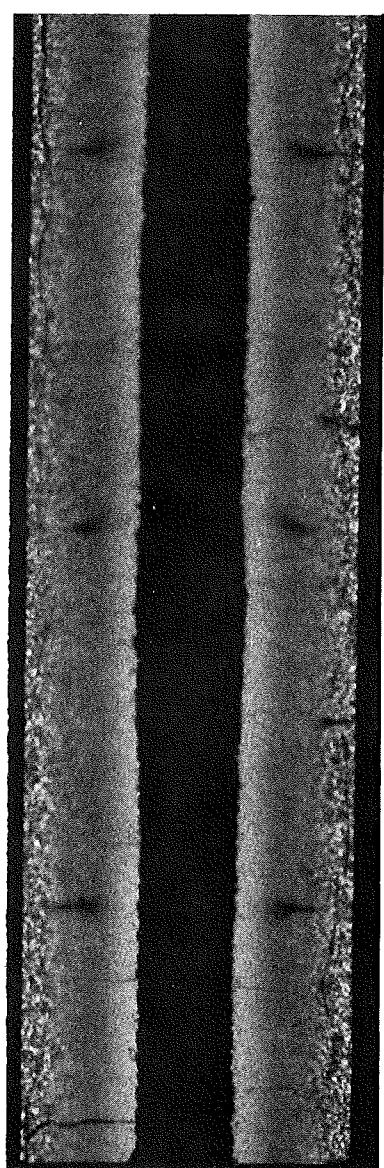
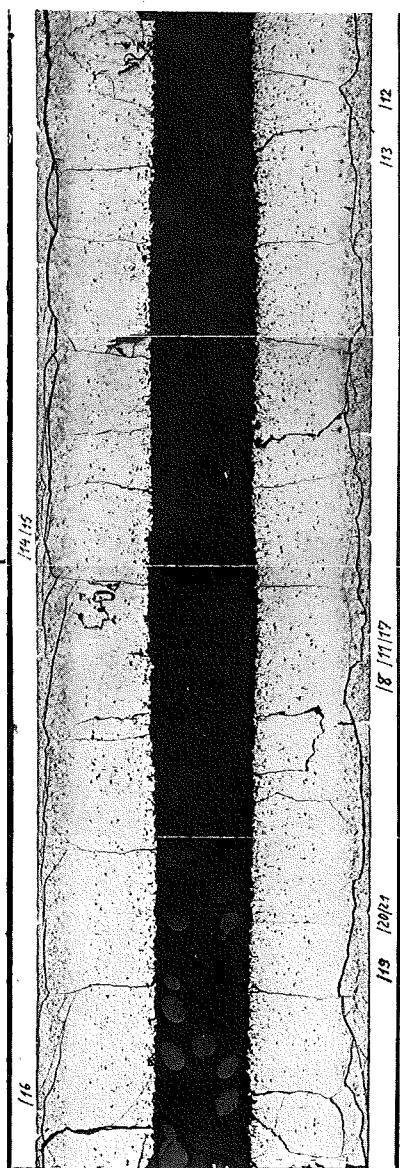
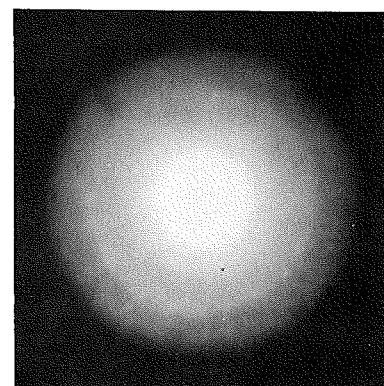
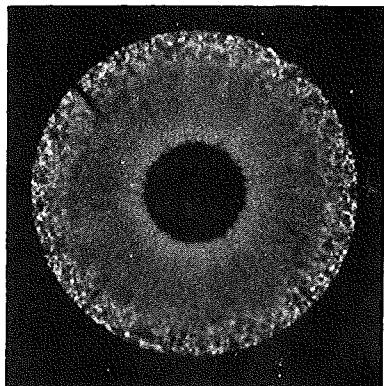
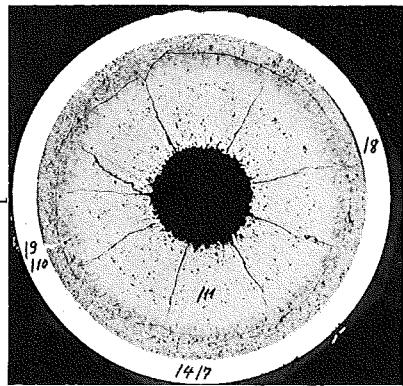
0,1mm



A

B

C



1 mm



Prüfling 4B-22

Brennstoff:

Form : Tabletten beidseitige Einsenkung

Zusammensetzung : $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$

Tablettendichte : 84% th.D.

Hülle:

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 6,00 mm

Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie:

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : 0,070 mm

Schmierdichte : 79,6% th.D.

Bestrahlung:

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppelkapsel Typ 4a

Dauer : 517,5 Vollasttage

Ende : 14. 6. 71

Rechn. Abbrand mittl. : 86,2 MWd/kg Metall

Stableistung max./mittl. : 595 / 281 W/cm