

# KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

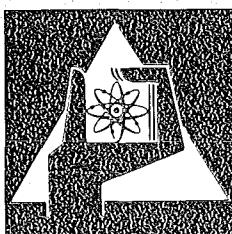
Februar 1976

KFK 2222

Institut für Material- und Festkörperforschung  
Projekt Schneller Brüter

## FR2-Kapselversuchsgruppe 5b Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung der $\text{UO}_2/\text{PuO}_2$ -Brennstabprüflinge

P. Weimar, D. Freund, H. Steiner



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

K E R N F O R S C H U N G S Z E N T R U M   K A R L S R U H E

KFK 2222

Institut für Material- und Festkörperforschung

Projekt Schneller Brüter

FR2-Kapselversuchsgruppe 5b

Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung  
der  $\text{UO}_2/\text{PuO}_2$ -Brennstabprüflinge

---

P. Weimar

D. Freund

H. Steiner

•

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe



## E R R A T A

---

Seite 37: In Tabelle 10 sind die Prüflings-Nummern gemäß nachstehender korrigierter Tabelle zu ergänzen.

KVE Nr.	Prüfling Nr.	Abbrand gemäß TE-Nr. (in (MWd/kgM))							Bestrahlungszeit (d)Vollast	Mittelwert
		1	2	3	4	5	6	7		
77	5B/2	113	119	118						116,8
	5B/3				114	113			322	113,6
	5B/4						108	110		109,2
80	5B/5	108	111							109,9
	5B/6			110	115	116			343	113,6
	5B/7						113	116		114,5
81	5B/1	94	87							90,6
	5B/8			90	91	96			266	92,2
	5B/9						91	91		90,6
82	5B/10	86	85							85,7
	5B/11			93	91	87			266	90,5
	5B/12						94	93		93,5
83	5B/13	11	12							11,6
	5B/14			11	12	12			30	11,7
	5B/15						12	11		11,5
86	5B/16	24	26							24,8
	5B/17			27	26	28	27		73	27,0
	5B/18						27	28		27,8

Seite 38: In Tabelle 11, KVE 82, soll der Prüfling 5B/13 durch Prüfling 5B/10 ersetzt werden.

Seite 85: Ergänzung zu Kapitel 12, erster Abschnitt:

Die Prüflinge der Kapselversuchseinsätze 83 und 86 wurden nur zerstörungsfrei untersucht. Es ergibt sich damit für die keramografisch (zerstörend) untersuchten Prüflinge eine Gesamtzahl von 12 anstelle 35.

## FR2-Capsule-Irradiation Group 5b

### Layout, Irradiation and Post-Irradiation-Examination of Mixed-Oxide Fuel Pins

Within the frame of the GfK irradiation experiments for the development of a fuel pin for Fast Breeder Reactors, the capsule experiment 5b is in a particular position. This group was specified as a fuel pin test for the HFR-reactor planned in 1971 at Karlsruhe - the so called FR3. As shown in a feasibility study the fuel pin diameter has to be minimized for a desired high neutron flux. In this study a pellet diameter of 4,0 mm was chosen. The experiment capsule group FR2-Vg5b comprises 18 short pins which are irradiated in a special irradiation capsule. The fuel was mixed oxide with a Pu content of 35 w%. With a pellet density of 86,2 %, the smear density was 80 % of th. density. As cladding material an austenitic steel No. 1.4988 was chosen. The pin diameter was 4,7 mm, the wall thickness was 0,3 mm. 12 pins were irradiated up to a burnup of 10 at % and 6 up to 1 and 2 at % respectively.

All pins remained intact. The radiographs of the pins showed strong irregularities in the contour of the central channel. The ceramographic investigation showed a U-Pu redistribution and a strong densification at the pellet periphery. These phenomena result from extremal power density and high fuel temperature level.

The documentation in this report presents the objectives of the experiment a detailed description of design, specification and fabrication of the pins, the irradiation history and the post irradiation examination. Thermal and mechanical aspects of the fuel pin behaviour have been analyzed by means of the program system SATURN 1.

## K U R Z F A S S U N G

---

Im Rahmen der Karlsruher Bestrahlungsexperimente zur Entwicklung eines Schnellbrüter-Brennelements nimmt die Kapselversuchsgruppe 5b eine Sonderstellung ein. Sie wurde als Brennstabtest für den 1971 geplanten Hochfluß-Testreaktor FR3 initiiert. Wie eine Durchführbarkeitsstudie /2/ zeigte, muß bei vorgegebener Stableistung ein möglichst kleiner Stabdurchmesser gewählt werden, um den gewünschten hohen Neutronenfluß zu erreichen. Als kleinster technisch realisierbarer Tablettendurchmesser wurde ein Wert von 4 mm festgelegt /2/.

Das Bestrahlungsexperiment FR2-Vg 5b umfaßte insgesamt 18 Kurzprüflinge, die in 6 Na-Kapseln bestrahlt wurden. 12 Prüflinge wurden bis ca. 10 % Abbrand und 6 bis ca. 2 % bestrahlt. Der Brennstoff war  $(U,Pu)O_2$  mit einem Pu-Gehalt von 35 %. Die Tablettendichte betrug 86,2 %, die Schmierdichte 80 % T.D.. Die Brennstabhülle war aus dem austenitischen Edelstahl der Werkstoffnummer 1.4988, Stabdurchmesser 4,7 mm, Wandstärke 0,3 mm.

Alle Stäbe blieben intakt. Im Brennstoffgefüge zeigten sich schon bei der Durchleuchtung starke Unregelmäßigkeiten in der Zentralkanalkontur, die auf starke axiale Brennstoffumverteilungen in der Stabachse hindeuteten. Die keramografische Untersuchung erbrachte die Aussage, daß ebenfalls radial eine starke U-Pu-Umverteilung mit erheblicher Verdichtung an der Tablettenperipherie abgelaufen war. Die starken Umverteilungsphänomene werden auf die extreme Leistungsdichte und hohe Brennstofftemperaturen der Prüflinge zurückgeführt.

In der vorliegenden Dokumentation wird nach Darstellung von Aufgabe und Ziel des Experimentes eine detaillierte Beschreibung der Prüflingsauslegung, der Spezifikation, der Herstellung, des Bestrahlungsablaufes und der zerstörungsfreien und zerstörenden Nachuntersuchung gegeben. Weiterhin wird mittels einer thermischen und mechanischen Analyse (SATURN 1 - Rechenprogramm) sowohl das Brennstoff-, als auch das Brennstabverhalten analysiert und gewichtet.

## 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 W. Ratzel für die Reinschrift des Manuskriptes sowie die redaktionelle Hilfe.

Dezember 1975

P. Weimar, D. Freund, H. Steiner

<u>Inhalt</u>	<u>Seite</u>
1. Einleitung	1
2. Aufgabe und Ziel des Experiments	3
3. Auslegung	4
3.1 Nukleare Auslegung	4
3.2 Thermische Auslegung des Brennstabs	5
3.3 Mechanische Auslegung des Brennstabs	6
4. Spezifikationen	8
4.1 Brennstoff	8
4.2 Hülle	8
4.3 Brennstab	8
5. Herstellung der Prüflinge	9
5.1 Brennstoff	9
5.2 Stabherstellung	12
5.3 Prüfungen	12
6. Bestrahlungseinrichtung	14
6.1 Versuchseinsatz	14
6.2 Bestrahlung im FR2	17
7. Ablauf der Bestrahlung	19
7.1 Reaktorzyklen und Neutronenfluß	19
7.2 Temperatur und Stableistung	22
7.3 Thermische Abbrandberechnung	36

	Seite
<b>8. Zerstörungsfreie Nachuntersuchung</b>	<b>38</b>
<b>8.1 Äußere Vermessung</b>	<b>38</b>
<b>8.2 Durchleuchtung</b>	<b>44</b>
<b>8.3 <math>\gamma</math>-Profile und <math>\gamma</math>-Spektren</b>	<b>45</b>
<b>9. Zerstörende Nachuntersuchung</b>	<b>46</b>
<b>9.1 Spaltgasbestimmungen</b>	<b>46</b>
<b>9.2 Keramografie</b>	<b>51</b>
<b>9.3 Radiochemische Abbrandbestimmung</b>	<b>55</b>
<b>9.4 Vergleich der radiochemischen und berechneten Abbrandwerte</b>	<b>55</b>
<b>10. Modelltheoretische Untersuchungen</b>	<b>56</b>
<b>10.1 Thermische Analyse</b>	<b>56</b>
<b>10.2 Mechanische Analyse</b>	<b>70</b>
<b>11. Schlußbetrachtung</b>	<b>84</b>
<b>12. Dokumentation der zerstörungsfreien und zerstörenden Nachuntersuchung</b>	<b>85</b>
<b>Literatur</b>	<b>87</b>
Anhang I/1 - I/6	
Anhang II/1 - II/103	

## 1. Einleitung

Bei einem Vergleich der im Karlsruher Forschungsreaktor 2 durchgeföhrten Bestrahlungsexperimente an Brennstabprüflingen mit oxidischem Mischbrennstoff fällt ein Experiment, die Kapselversuchsgruppe Vg 5b, aus dem Rahmen /1/. Während die Brennstäbe der übrigen Experimente Stabdurchmesser von 6 und 7,4 mm und Plutoniumanteile im Brennstoff von 15 - 20 Gew.% aufweisen, werden in diesem Experiment Prüflinge mit einem Durchmesser von 4,7 mm und einem Plutoniumgehalt von 35 % bestrahlt.

Wie die neutronenphysikalischen Rechnungen in der Durchführbarkeitsstudie für den Schnellen Hochflußtestreaktor /2/ zeigen, muß der Brennstoffdurchmesser bei vorgegebener Stableistung möglichst klein sein, um einen hohen Neutronenfluß zu erreichen. Je kleiner jedoch der Stabdurchmesser ist, umso größer werden die Unsicherheiten in der Beurteilung des Stabverhaltens sowie die Herstellungsprobleme und -kosten. Als kleinster technisch realisierbarer Tablettendurchmesser wurde daher ein Wert von 4 mm in der Durchführbarkeitsstudie zugrunde gelegt.

Aus diesen Überlegungen heraus wurde das Bestrahlungsexperiment FR2-Vg 5b initiiert, in welchem 18 Brennstabprüflinge in 6 Kapseln bestrahlt werden, um einmal die Verwendbarkeit dieses Konzeptes nachzuweisen, zum anderen die Frage zu beantworten, inwieweit die Ergebnisse der bisherigen Bestrahlungsexperimente auf das 4mm-Konzept übertragbar sind /3/.

Der vorliegende Bericht beinhaltet alle Einzelheiten von Auslegung, Spezifikation und Prüflingsherstellung. Weiterhin werden der Bestrahlungsablauf sowie die zerstörende und zerstörungsfreie Nachuntersuchung beschrieben. Einige der beobachteten Phänomene werden modelltheoretisch mit Hilfe des Programmsystems SATURN 1 untersucht. In der folgenden Übersicht ist der Zeitablauf des Experiments dargestellt, weiterhin sind die für die einzelnen Experimentabschnitte verantwortlichen Stellen und Personen angegeben.

Zeitraum	Teilarbeit	Institution/ Hauptbeteiligte
1969-1971	Durchführbarkeitsstudie für den Schnellen Hochfluß- testreaktor FR3	IRE: Fischer et.al.
1969/70	Auslegung, Spezifikation	IAR: Gerken IMF: Vollath, Depisch <sup>+) </sup>
1969/70	Prüflingsherstellung	IMF: Dippel
1970/71	Organisation der Bestrahlung und Betreuung	IMF: Freund
1970/71	Bestrahlung im FR2	Abt. Reaktorbetrieb FR2
1973	Organisation der Nachunter- suchung und Betreuung	IMF: Weimar
1973	Zerstörungsfreie Nachunter- suchung	RB/Z: Scheeder, Enderlein
1973	Spaltgasuntersuchung	RB/Z: Schweigel
1973	Keramografie	RB/Z: Pejsa
1974	Abbrandbestimmung	IRCh: Wertenbach
1975	Modelltheoretische Analyse	IMF: Steiner
1974/75	Zusammenfassung und Dokumen- tation der Ergebnisse	IMF: Weimar, Freund Steiner

<sup>+)</sup>  delegiert von der Firma AEG

## 2. Aufgabe und Ziel des Experiments

---

In der FR2-Vg 5b werden Brennstabprüflinge mit  $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$ -Mischbrennstoff in Bestrahlungskapseln im FR2 eingesetzt. Diese Brennstäbe unterscheiden sich von den bisher untersuchten Brennstabkonzepten durch ihren wesentlich kleineren Stab- bzw. Tablettendurchmesser von 4,7 mm bzw. 3,95 mm. Gegenüber dem 6 mm-Stabkonzept des SNR 300 führt dies zu

- ca. 60 % größerer Leistungsdichte im Brennstoff
- ca. 30 % größerem radialem Temperaturgradienten sowie zu
- ca. 30 % höherer Oberflächenbelastung der Hülle.

Infolge dieser verschärften Belastung können nachstehende Änderungen im Betriebsverhalten dieser Brennstäbe angenommen werden:

- Der höhere Temperaturgradient führt wahrscheinlich zu einer höheren Spaltgasfreisetzung.
- Durch den höheren Gradienten können stärkere Spaltproduktkonzentrationsunterschiede hervorgerufen werden.
- Die höhere Flächenbelastung der Hülle führt zu Verträglichkeitsproblemen.

Infolge der größeren Leistungsdichte ist jedoch die Abbrandgeschwindigkeit des 4 mm-Konzeptes höher, woraus bei gleichem Abbrand gegenüber dem SNR-Stab eine 40 % kürzere Standzeit resultiert, was zu einer Entschärfung der Verträglichkeitsprobleme führen kann.

Mit den oben genannten Punkten kann nun die Aufgabenstellung formuliert werden:

## Bestrahlung von Brennstäben bis zu hohen Abbränden zur Untersuchung

- der Spaltgasfreisetzung
- der Verträglichkeit sowie
- der Plutonium- und Spaltproduktkonzentrationsprofile.

Weiterhin soll an einigen Stäben das Anfahrverhalten untersucht werden.

In der Versuchsgruppe 5b werden Stäbe mit hoher Leistung zu niedrigen Abbränden sowie Stäbe mit mittlerer Stableistung zu hohen Abbränden hin (120 MWd/kgM) bestrahlt.

Der Versuch soll, unter Berücksichtigung der Abweichungen zwischen Experiment und realistischen Bedingungen (Stablänge, schneller Fluß, strömendes Natrium), Antwort auf folgende Fragen liefern:

- Wie verhält sich das Stabkonzept bis zu hohen Abbränden?
- Welche Spaltgasfreisetzungsrationen treten aufgrund der höheren Temperaturgradienten auf?
- Gibt es auf die höheren Belastungsbedingungen zurückführbare Verträglichkeitsprobleme?
- Welche Spaltstoff- und Spaltproduktverteilungen treten auf, und wie sind eventuelle Abweichungen in das bisherige Bild einzuordnen?

## 3. Auslegung

### 3.1 Nukleare Auslegung

Die nukleare Auslegung wurde mit Hilfe des Rechenprogramms WIMS durchgeführt /4,5/. Bei der SHTR-typischen Plutoniumanreicherung von 35 % sind die in Tabelle 1 angegebenen thermischen Flüsse erforderlich, um die Stableistungen von 400 bzw. 500 W/cm bei den verschiedenen Abbränden zu erreichen.

Tabelle 1 Abhängigkeit des erforderlichen Neutronenflusses  
von Stableistung und Abbrand

Stableistung (W/cm)	Abbrand (MWd/t Me)	Thermischer Flus (n/cm <sup>2</sup> sec)
500	0	$8,8 \cdot 10^{13}$
500	60 000	$9,6 \cdot 10^{13}$
400	0	$7,0 \cdot 10^{13}$
400	60 000	$7,7 \cdot 10^{13}$
400	120 000	$8,7 \cdot 10^{13}$

Wegen der Flusverhaltnisse im FR2 (max. thermischer ungestörter Flus von ca.  $9 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ ) kann ein hoher Abbrand mit einer Stableistung von 500 W/cm nicht erreicht werden. Für hohe Abbrände bei konstanter Stableistung ist daher dieser Wert auf 400 W/cm zu reduzieren.

### 3.2 Thermische Auslegung des Brennstabs

Mit einer ersten Version des Rechenprogramms SATURN 1 /6/ wurde die thermische Auslegung der Brennstäbe durchgeführt. In Tabelle 2 sind die Zentraltemperaturen in Abhängigkeit von Stableistung, Abbrand und Wärmeübergangszahl zusammengestellt. Bei diesen Rechnungen wurde ein Anstieg der Zentraltemperatur mit zunehmendem Abbrand ermittelt. Als ungünstiger Wert der Wärmeübergangszahl wurde  $0,5 \text{ W/cm}^2 \text{ }^\circ\text{C}$  angenommen, bei welchem kein Brennstoffschmelzen zu erwarten war. (In Kapitel 10 wird auf das Problem des Wärmedurchgangs im Spalt näher eingegangen).

Tabelle 2 Zentraltemperaturen der Brennstäbe in Abhängigkeit von  
Stableistung, Abbrand und Wärmeübergangszahl.

Stableistung (W/cm)	Abbrand (MWd/t Me)	Wärmeübergangszahl (W/cm <sup>2</sup> °C)	Zentraltemp. (°C)
500	0	1	2158
500	30 000	1	2205
500	0	0,5	2397
500	30 000	0,5	2435
400	0	1	1846
400	120 000	1	1994
400	0	0,5	2071
400	120 000	0,5	2214

In Tabelle 3 sind die Auslegungs- und Betriebsdaten der Prüflinge zusammengestellt.

### 3.3 Mechanische Auslegung des Brennstabs

Die Brennstabhülle wird durch die thermischen Spannungen sowie durch Gas- und Festkörperdrücke belastet. Für den Spaltgasdruckaufbau wird eine Freisetzungsrage von 100 % angenommen. Der Brennstoffsenschwelldruck wurde in der Rechnung nicht berücksichtigt.

Die Hüllrohrspannungen und Verformungen wurden mit CRASH /7/ nachgerechnet, die Materialdaten für den Hüllwerkstoff 1.4988 wurden /8/ entnommen. Nach einer Standzeit von 10 000 h, entsprechend einem Abbrand von 120 000 MWd/tM bei einer Stableistung von 460 W/cm, stellt sich ein Gasinnendruck von 70 kp/cm<sup>2</sup> ein. Dies führt bei einer Hülloberflächentemperatur von 435°C zu keinen nennenswerten Hüllaufweitungen. Die maximalen Spannungen liegen bei 12 kp/mm<sup>2</sup>. Zum Auslegungszeitpunkt konnten weiterhin Verformungen, hervorgerufen durch zusätzliche Festkörperdrücke bei zyklischem Lastbetrieb(Riß-Rast-Mechanismen), noch nicht berechnet werden.

Tabelle 3 Auslegungs-, Betriebsdaten und Kennzeichnung der Prüflinge der FR2-Versuchsgruppe 5b

Auslegungsdaten	Stab-Bezeichnung	Betriebsdaten				maximaler Abbrand MWd/t Me	
		Stab-Leistung (W/cm)	erforderl. therm. Fluß $\times 10^{14} \text{ 1/cm}^2 \text{ s}$	Hüll-außentemp. (°C)			
Brennstoffdurchmesser 3,95 mm  Brennstoff: $\text{UO}_2/\text{PuO}_2$ -Tabletten  Pu-Anteil 35 w/o Flußabsenkung $f = 0,75$ Brennstofflänge 80 mm	5B-1,2,3	400	0,7 - 0,87	385	120 000	14 000	
	5B-4,5,6						
	5B-7,8,9	400	0,7 - 0,87	385	90 000		
	5B-10,11,12						
Hülle aus 1.4988, 4,7 x 0,3 mm  Spaltgasraumlänge 45 mm  Stablänge 172 mm  Schmierdichte 80 %TD  Tablettendichte 86,2%TD	5B-13,14,15	500	0,9	470	28 000		
	5B-16,17,18						

## 4. Spezifikationen

Die Spezifikationen von Brennstoff, Hülle und Brennstab sind in /5/ aufgeführt. In den folgenden Abschnitten werden die wesentlichen Merkmale der Einzelspezifikationen zusammengestellt.

## 4.1 Brennstoff

- Chemische Zusammensetzung der Tabletten       $65 \pm 0,5$  Gew.-%  $\text{UO}_2$   
      $35 \pm 0,5$  Gew.-%  $\text{PuO}_2$
  - Stöchiometrie                                         $0/\text{Me} = 1,98 \pm 0,02$
  - Isotopenzusammensetzung                             $0,7\%$  U-235  
      $99,3\%$  U-238  
      $91\%$  Pu-239  
      $8\%$  Pu-240  
     1 % höhere Isotope
  - Tablettendichte                                      $86,2 \pm 2\%$  TD
  - Tablettendurchmesser                                 $3,95 \pm 0,015$  mm
  - $\text{H}_2\text{O}$ -Gehalt                                        < 100 ppm
  - Gasgehalt (geprüft bei  $1600^\circ\text{C}$ )                                < 0,1 Norm  $\text{cm}^3/\text{g}$  Brennstoff
  - Sonstige Verunreinigungen                            < 1000 ppm

## 4.2 Hülle

- |                               |                      |
|-------------------------------|----------------------|
| - Werkstoff: X8CrNiMoVNb1613, | Werkstoff-Nr. 1.4988 |
| - Außendurchmesser            | 4,7 $\pm$ 0,030 mm   |
| - Wandstärke                  | 0,3 $\pm$ 0,020 mm   |
| - Innendurchmesser            | 4,1 $\pm$ 0,020 mm   |

### 4.3 Brennstab

- Längseinteilung	oberer Endstopfen	20 mm
	Spaltgasraum	45 mm
	Führungsstück	7 mm
	Brennstoffsäule	80 mm
	Unterer Endstopfen	20 mm
	Gesamtlänge	172 mm

- Brennstoffsäule (bestehend aus 16 Tabletten)  $80 \pm 1$  mm
- Diametralspalt Brennstoff-Hülle  $0,150 \pm 0,035$  mm
- Bezeichnung der Brennstäbe  
(am unt. Endstopfen) 5B-1 bis 5B-18
- Dichtheit (He-Lecktest)  $< 10^{-9}$  Torr l/sec.
- Prüflingskonstruktion Zeichnung LBZ 9/00 (Abb.1)

## 5. Herstellung der Prüflinge

---

Die Herstellung der Prüflinge erfolgte im Plutonium-Labor des Instituts für Material- und Festkörperforschung und ist in /5/ beschrieben. Die Herstellungs- und Prüfergebnisse werden in den folgenden Kapiteln aufgeführt:

### 5.1 Brennstoff

- Chemische Zusammensetzung der Tabletten  $\frac{\text{Pu}}{\text{U+Pu}} = 34,89$  Gew.-%,
- Stöchiometrie (oxidierend gemessen)  $\text{O/Me} = 1,98 - 1,99$
- Isotopenzusammensetzung im  $\text{PuO}_2$ 

Pu-239: 90,782 - 90,887 %
Pu-240: 8,232 - 8,308 %
Pu-241: 0,813 - 0,871 %
Pu-242: 0,035 - 0,044.%

Das verwendete Plutonium stammt aus verschiedenen Lieferchargen, die obigen Werte stellen die minimalen und maximalen Gehalte der einzelnen Isotope dar.

- Tablettendichte

Die Tabletten-Einzelwerte sind in /5/ zusammengestellt. In Tabelle 4 sind die Mittelwerte aufgeführt.

- Tablettendurchmesser

In Tabelle 4 sind die Mittelwerte gemäß /5/ für die einzelnen Prüflinge zusammengestellt.

- $\text{H}_2\text{O}$ -Gehalt nicht gemessen
- Gasgehalt " "
- Sonstige Verunreinigungen < 540 ppm

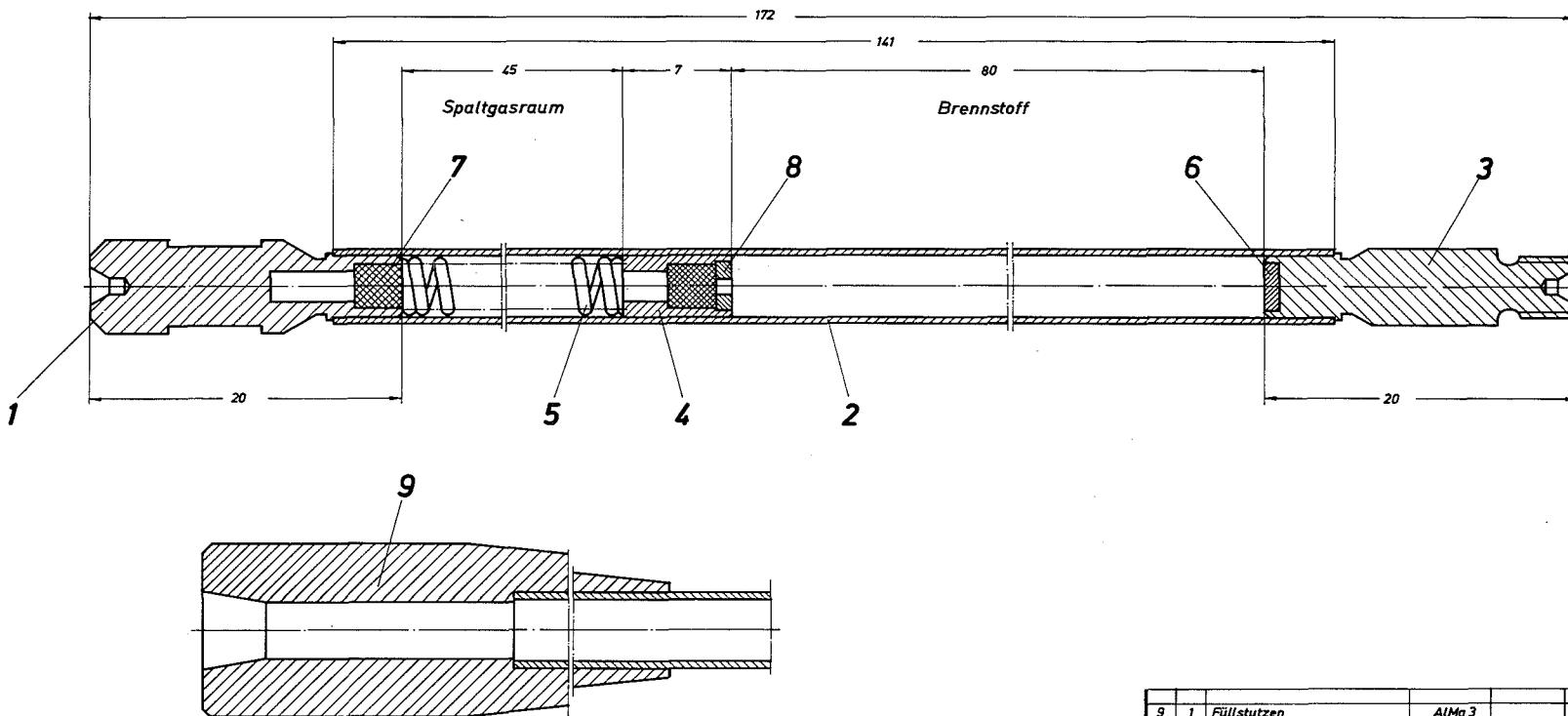


Abb. 1

Teil	Stück	Bezeichnung	Werkstoff	Abmessung		Zulassungs-Nr. Norm	Bemerkung
				mm	mm		
9	1	Füllstutzen	AlMg 3			LBZ 9/09	
8	1	Rhodiumscheibe	Rh			LBZ 9/08	
7	2	Sinterstahlfilter	Cr Ni 2,8% Ni = 3			o.Z.	
6	1	Rhodiumplättchen	Rh 55% Rh = 1			o.Z.	
5	1	Druckfeder	4310 L=67 d=0,8 D <sub>a</sub> =38, h=30				
4	1	Führungsstück	4988			LBZ 9/04	
3	1	Unterer Endstopfen	4988			LBZ 9/03	
2	1	Hüllrohr	4988			LBZ 9/02	
1	1	Oberer Endstopfen	4988			LBZ 9/01	
Tat. Stck							
Gesamtbauabmessungen							
Gesamtbauhöhe in mm							
Produktive Ausz. in St.		1000	W	10	4	1,8	
Fertigstellung							
1963 Tag		Name					
gez. 13.11. E. Schub							
gepr.							
gwe.							
Freimeldedaten							
Maßstab		Bezeichnung					
5:1		Versuchsgruppe 5b					
Zulassungs-Nr.							
LBZ 9/00							

Tabelle 4 Tablettendichte und -durchmesser der  
Prüflinge der Vg 5b

Prüfling	Dichte (% TD)	Durchmesser (mm)
1	87,44	3,945
2	86,58	3,947
3	86,59	3,945
4	86,54	3,945
5	86,88	3,944
6	86,57	3,943
7	86,22	3,947
8	86,20	3,946
9	86,19	3,946
10	86,18	3,945
11	86,26	3,945
12	86,21	3,944
13	86,23	3,946
14	85,82	3,942
15	85,82	3,947
16	85,80	3,950
17	85,72	3,945
18	85,42	3,945

Anmerkung: - Die Dichte- und Durchmesserschwankungen  
entsprechen den Spezifikationen  
- Theoretische Dichte: 11.135 g/cm<sup>3</sup>

## 5.2 Stabherstellung

Die Prüflinge enthalten Tablettensäulen (mit je 16 Brennstofftabletten)/5/, die oben und unten durch Rhodiumplättchen abgeschirmt sind. Nach Einfüllen der Tabletten wurde der unverschlossene Prüfling in einem Rezipienten fixiert, der anschließend auf <0,5 Torr evakuiert und dann mit Reinsthelium geflutet wurde. Dieser Vorgang wurde einmal wiederholt, der Enstopfen eingesetzt und mit dem Hüllrohr verschweißt. Die Qualität der Schweißnähte war einwandfrei, lediglich bei Prüfling 5B-1 mußte aufgrund von Poren in der Schweißnaht nachgeschweißt werden. Durch den Lecktest wurde die Dichtigkeit ( $< 10^{-9}$  Torr 1/sec) in allen Fällen nachgewiesen. Die Stäbe zeigten keinerlei wischbare  $\alpha$ -Aktivität, die in den Schweißnähten fixierte Aktivität lag unterhalb der Nachweisgrenze.

## 5.3 Prüfungen

Zur Kontrolle der äußeren Abmessungen der fertigen Prüflinge wurden die Gesamtlänge, der Außendurchmesser, die Passung der Gewinde und der Durchmesser der beiden Schweißnähte gemessen /5/. Die Ergebnisse der Messungen von Hüllaußendurchmesser und Gesamtlänge sind in Tabelle 5 zusammengefaßt. Die Prüflinge weisen in der Mehrheit Durchmesserüberschreitungen an den Schweißnähten auf. Dies ist wohl auf die sehr geringe Wandstärke der Hüllrohre und das verwendete Schweißverfahren zurückzuführen. Für die Verwendung der Prüflinge ist diese Durchmesserüberschreitung ohne Bewandtnis.

Bei der Abschlußprüfung wurden die Prüflinge auch in ihrer Länge geröntgt. Die Negative dieser Aufnahmen wurden zur Bestimmung der tatsächlichen Säulenhöhe der Brennstofftabletten ausgewertet. Durch die geometrischen Verhältnisse der Röntgeneinrichtung bedingte Verzerrungen in der Abbildung der Brennstäbe auf dem Film konnten durch gleichzeitiges Abbilden eines einfachen "Modellstabes" genau bekannter Abmessungen korrigiert werden. Trotzdem ist die Genauigkeit der Auswertung auf ca.  $\pm 0,1$  mm begrenzt. In Tabelle 5 sind die aus den Einzelhöhen der Tabletten berechneten Säulenlängen den aus den Aufnahmen ermittelten gegenübergestellt. Man erkennt, daß sich ein zusätzlicher Längenbedarf von 1/10 mm ergibt. Dies kann durch die Stirnflächenrauhigkeit der Tabletten und kleine Brennstoffstücke, die beim Einfüllen zwischen die Stirnflächen der Tabletten geraten sind, bedingt sein.

Tabelle 5 FR2-Vg 5b Stabvermessung

Prüfling Nr.	Hüllaußendurchmesser (mm)	Gesamt- stablänge (mm)	Länge der Brennstoffsäule berechnet <sup>+) (mm)</sup>	gemessen <sup>++)</sup>
5B-1	4.698 ... 4.707	171,8	80,294	80,28
5B-2	4.700 ... 4.705	171,7	79,987	80,08
5B-3	4.701 ... 4.708	171,8	79,942	80,08
5B-4	4.698 ... 4.708	171,5	79,951	79,98
5B-5	4.700 ... 4.708	172,0	80,064	80,08
5B-6	4.702 ... 4.706	171,9	79,881	79,98
5B-7	4.700 ... 4.711	172,0	80,240	80,28
5B-8	4.701 ... 4.705	172,0	80,063	80,18
5B-9	4.700 ... 4.710	171,8	80,045	80,28
5B-10	4.698 ... 4.705	172,0	80,240	80,58
5B-11	4.701 ... 4.707	171,9	80,054	80,18
5B-12	4.700 ... 4.718	172,0	80,027	80,28
5B-13	4.700 ... 4.718	171,5	80,195	80,28
5B-14	4.700 ... 4.720	171,7	80,219	80,35
5B-15	4.700 ... 4.705	171,5	80,185	80,26
5B-16	4.701 ... 4.710	171,8	80,286	81,35
5B-17	4.700 ... 4.705	172,0	80,383	80,45
5B-18	4.700 ... 4.707	171,8	80,281	80,45

<sup>+) aus den Einzelhöhen der Tabletten,</sup>

<sup>++) aus den Röntgenaufnahmen ermittelt.</sup>

## 6. Bestrahlungseinrichtung

### 6.1 Versuchseinsatz

Für das vorliegende Bestrahlungsvorhaben werden Einsätze des bereits seit Anfang 1967 laufenden Na/PbBi-Doppelkapseltyps eingesetzt, die sich gut bewährt haben /9/. Dieser Typ war ursprünglich für eine Stableistung von 770 W/cm ausgelegt.

Die Bestrahlungskapsel zeigt folgenden Aufbau /10/: Der Brennstab ist gemeinsam mit dem ihm umgebenden Natrium von einer inneren Edelstahlkapsel von 20 mm Außendurchmesser und 1 mm Wanddicke umgeben. Drei solcher inneren Na-Kapseln sitzen im allgemeinen übereinander im unteren Teil der ca. 3 m langen äußeren Kapsel, die als zweites Containment gegenüber dem Na dient. Der 1,5 mm dicke Spalt zwischen Innenkapsel und Außenkapsel ist mit der eutektischen Blei-Wismut-Legierung ausgefüllt. Das äußere Kapselrohr ist aus Zircaloy 2 und hat bei einem Außendurchmesser von 26 mm eine Wanddicke von 1,5 mm.

Bei gleichbleibender Kapselgeometrie und gegenüber bisher geringerem Brennstoffdurchmesser wird die Na-Spaltbreite größer (6,65 mm). Um eine starke Konvektion im Na zu vermeiden, wird dieses durch Einschieben von zwei dünnwändigen Zwischenrohren in drei radiale Zonen unterteilt. Diese Zwischenrohre haben eine Wanddicke von 0,1 mm und bestehen aus Edelstahl. Mit Durchmessern von 10 bis 14 mm werden sie innerhalb bzw. außerhalb der Thermoelement-Tauchrohre angeordnet.

In Abb. 2 ist eine schematische Übersicht über den gesamten Kapselversuchsaufbau gegeben. In Abb. 3 ist der Temperaturverlauf innerhalb des Versuchseinsatzes für eine Stableistung von 500 W/cm wiedergegeben.

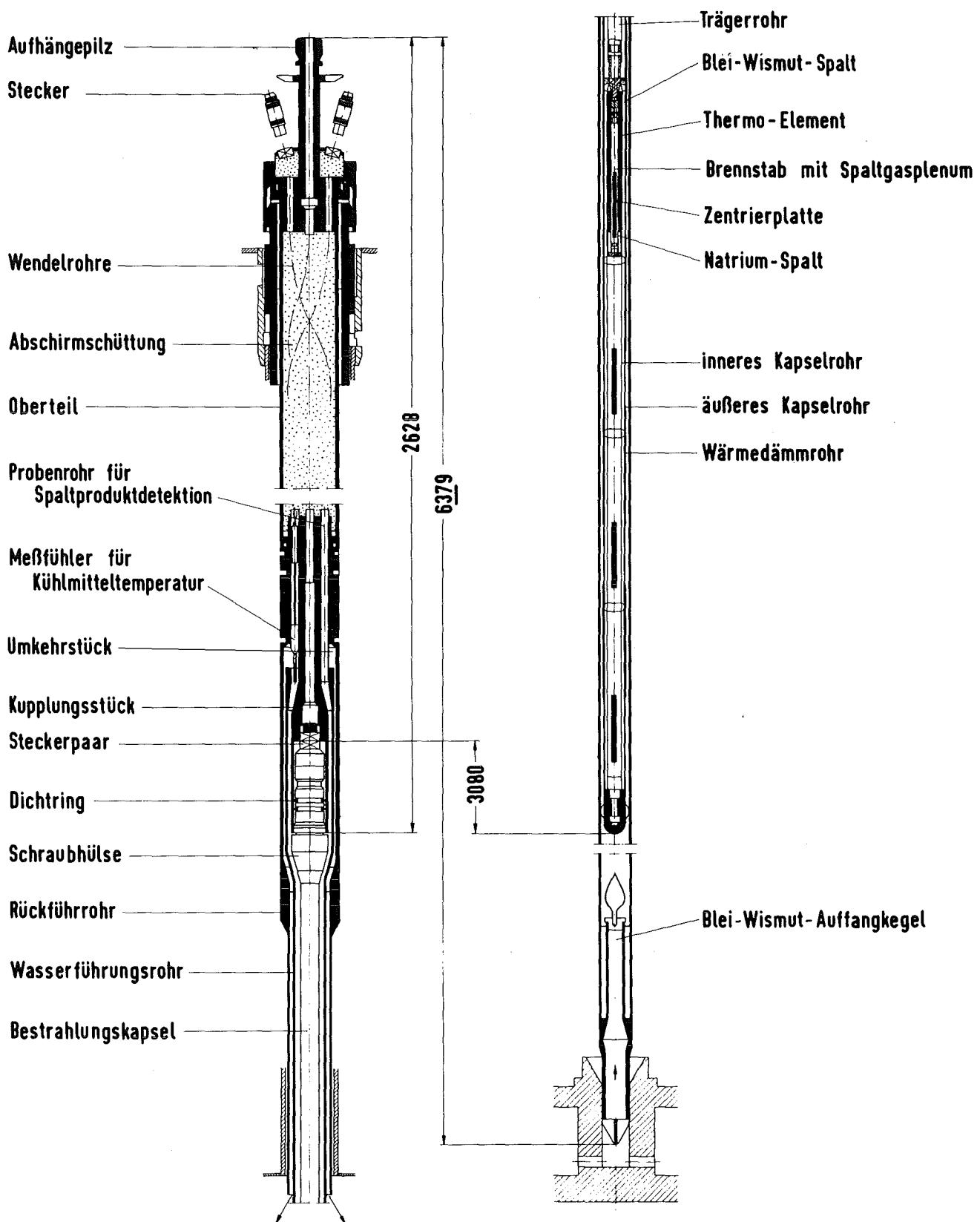


Abb. 2 FR 2-Kapselversuchsgruppe 5 b  
Aufbau des Versuchseinsatzes

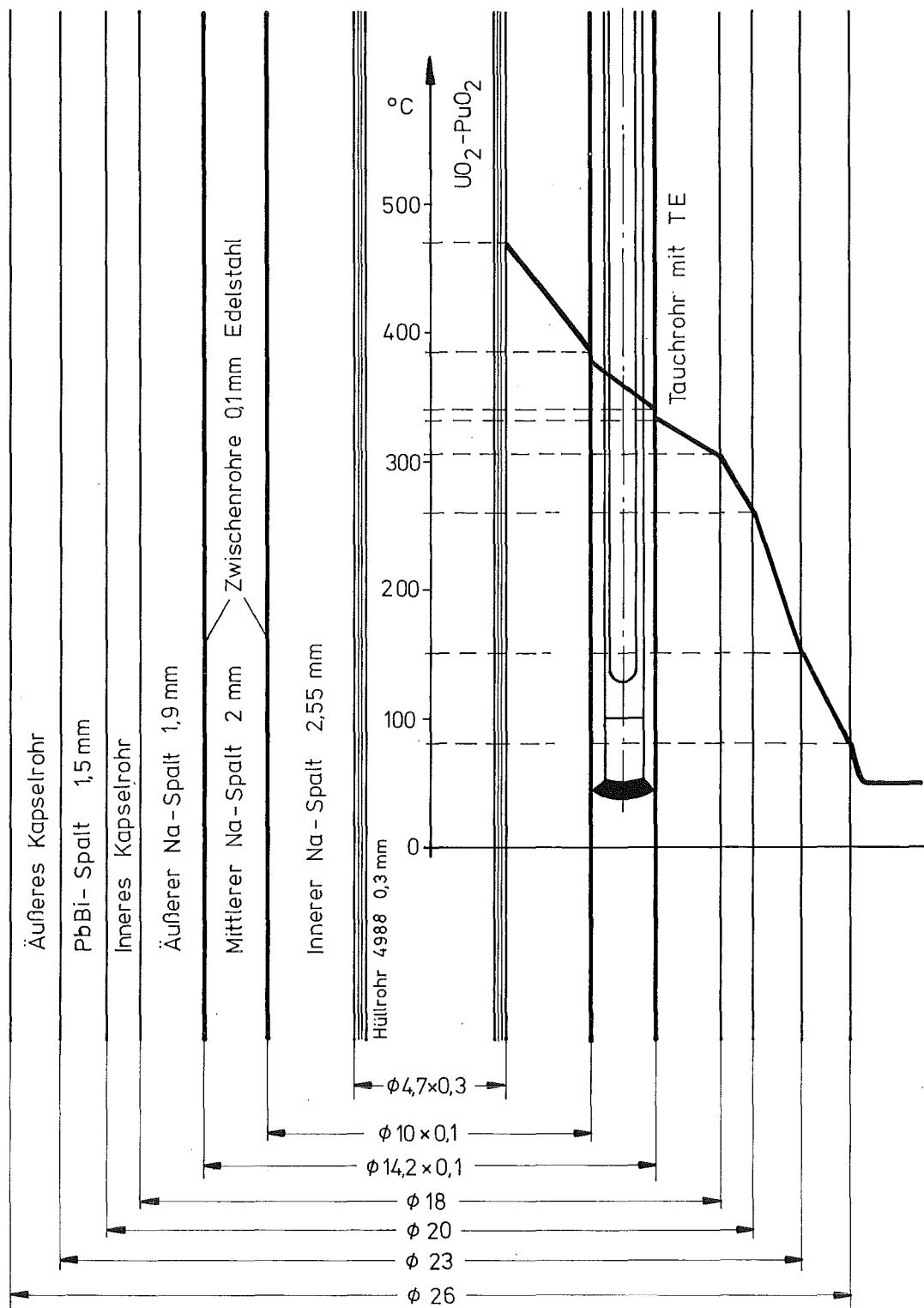


Abb. 3 FR 2-Kapselversuchsgruppe 5b  
Temperaturverlauf in dem  
Versuchseinsatz bei 500 W/cm  
Stableistung

## 6.2 Bestrahlung im FR2

Die 18 Brennstabprüflinge wurden in 6 Bestrahlungseinsätzen auf normalen Brennelement- bzw. Isotopenkanalpositionen im FR2 bestrahlt.

Die Bestrahlungszeiten lagen zwischen 29,5 und 342,7 Tagen (Volllastäquivalent).

Aus Tabelle 6 sind die Bestrahlungspositionen der Kapselversuchseinsätze je Reaktorzyklus ersichtlich. Weiterhin sind die Abschaltungen und Schnellschlüsse während der einzelnen Reaktorzyklen aufgeführt, welche bei der Beurteilung der thermisch-zyklischen Belastung der Brennstäbe im Hinblick auf mechanische Belastungen (Riß-Rastmechanismen) zusätzlich zu den zu erwartenden mechanischen Wechselwirkungen zwischen Brennstoff und Hülle (Brennstoffkontaktdruck) erforderlich sind.

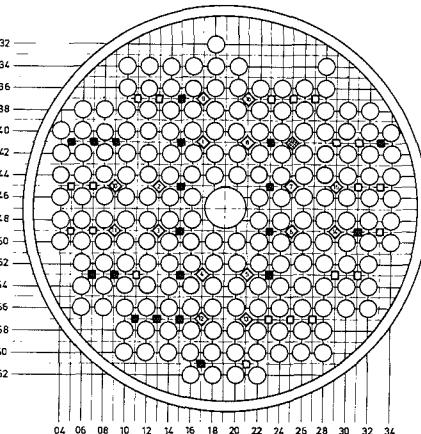
Tabelle 6 Bestrahlungsablauf der Kapselversuchseinsätze der Vg 5b

(Bestrahlungspositionen im FR2-Core)

	1 9 7 0					1 9 7 1								
Zyklus	F	G	H	I	K	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Vollasttage	29,4	29,7	29,5	27,7	15,0	29,8	23,1	29,7	27,5	26,3	27,5	26,4	24,8	25,8
SS	2	0	1	3	0	4	1	0	0	2	2	2	0	0
A	1	1	0	0	2	1	1	2	0	2	2	0	2	2
KVE-Nr. 77	44 22	44 22	44 22	40 28	40 28	40 28	40 28	40 28	45 23	45 23	45 23	50 12	—	—
80	—	53	53	53	53	53	53	50	50	50	50	50	50	50
	—	31	29	29	29	29	29	29	22	22	22	22	22	22
81	—	37	37	37	37	37	49	49	49	49	49	49	49	49
	—	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
82	—	49	49	49	49	49	37	37	50	50	50	50	50	50
	—	7	7	7	7	7	23	23	12	12	12	12	12	12
83	—	—	50	—	—	—								
	—	—	22	—	—	—								
86	—	—	—	50	50	50								
	—	—	—	22	22	22								

Positions-karte  
FR 2 - Core

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



## 7. Ablauf der Bestrahlung

---

### 7.1 Reaktorzyklen und Neutronenfluß

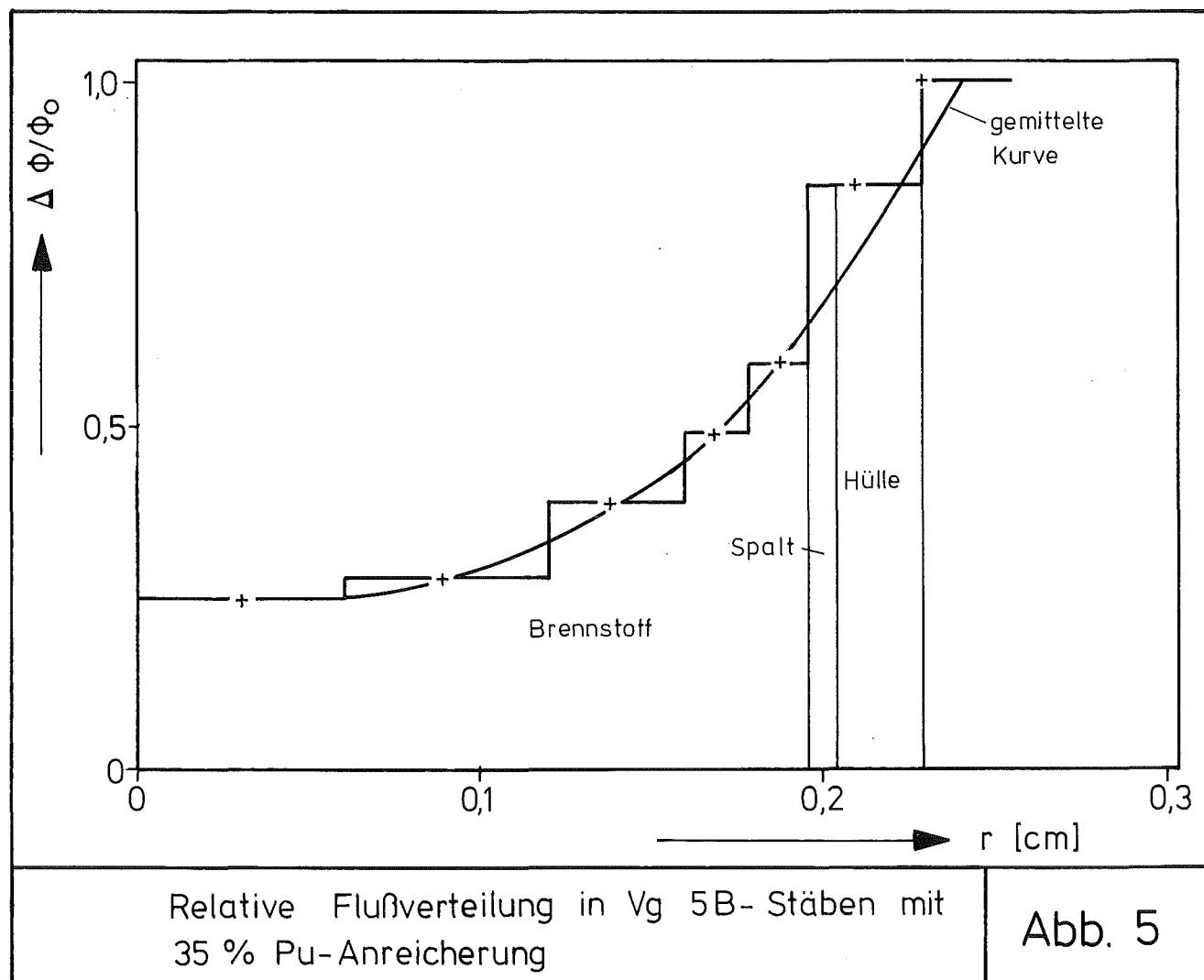
Die Bestrahlung der Prüflinge der Vg 5b begann mit Einbau des KVE 77 am 13.7.1970 in Zyklus F/1970 und endete mit dem Ausbau von KVE 80 nach Zyklus I/1971 am 13.12.1971. Die Anzahl der Reaktorzyklen der einzelnen Versuchseinsätze ist mit der Angabe von Schnellschlüssen und anomalen Abschaltungen in Tabelle 6 zusammengestellt. Der Anfahrvorgang (von Null- auf Vollast) bei Beginn eines Reaktorzyklus dauert etwa 12 h, der kürzeste Anfahrvorgang nach Schnellschlüssen etwa 2 h. Die Dauer der Reaktorzyklen beträgt ca. 27 Vollasttage.

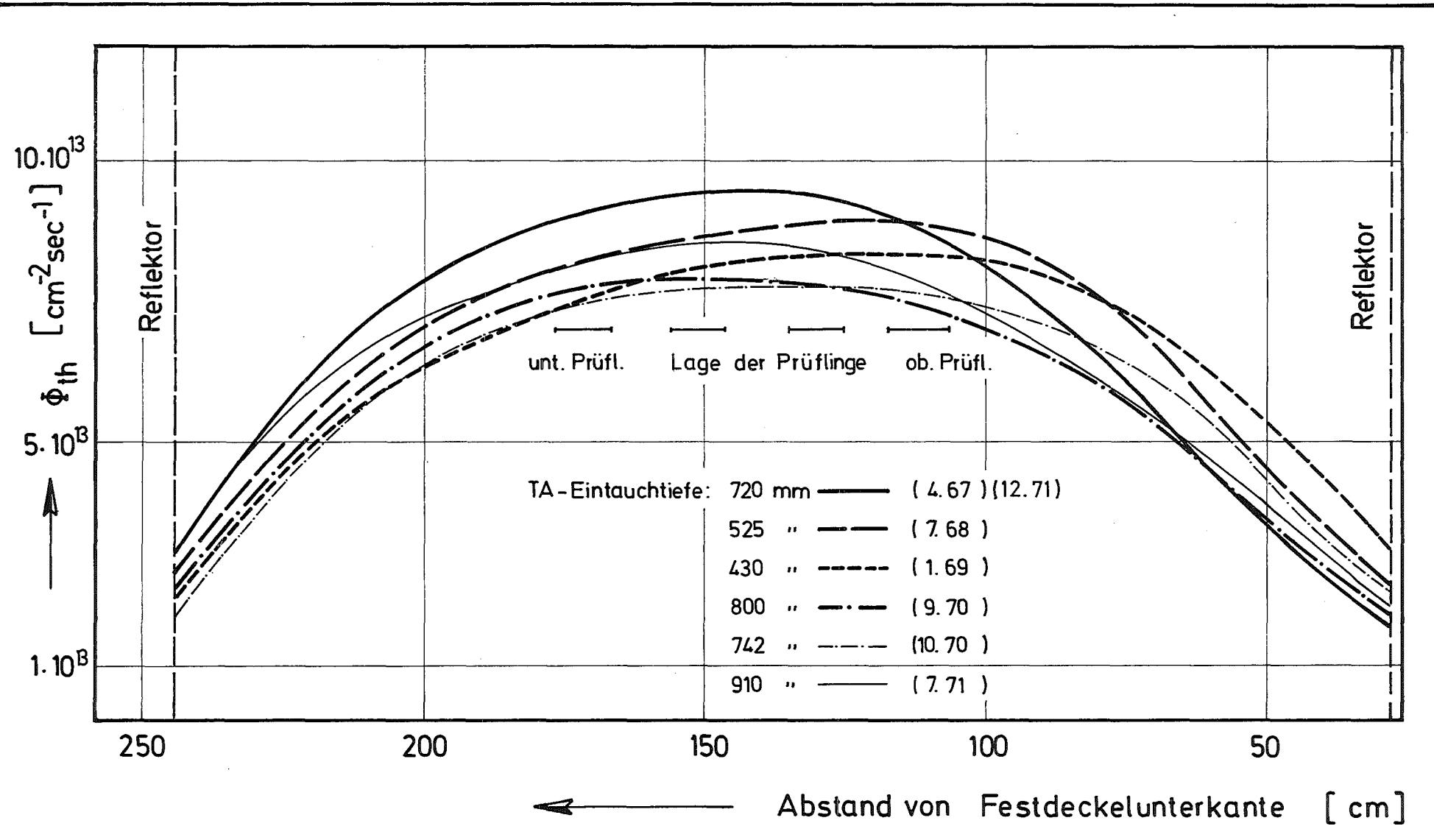
Im Bestrahlungszeitraum der Versuchsgruppe 5b sind verschiedene Messungen des thermischen Flusses in den Isotopenkanal-Positionen des FR2 (vergl. Positionskarte in Tabelle 6) durchgeführt worden /11/. Es handelt sich um Messungen des vertikalen Flußverlaufes, bei denen Co-Sonden als Flußdetektoren eingesetzt wurden. In Tabelle 7 und Abb. 4 sind die Flußwerte der verschiedenen Messungen in den Isotopenkanälen zusammenge stellt. 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.

Von Bedeutung für die Bestimmung des Temperaturprofils im Brennstoff (s. Kap. 10) ist die Kenntnis der WärmequelldichteVerteilung und damit der Flußverteilung. Mit Hilfe des Rechenprogramms Merkur /12/ wurde die Flußverteilung bestimmt. In Abb. 5 /13/ ist eine solche Verteilung dargestellt. Die Flußabsenkung beträgt etwa 75 %.

Tabelle 7: Thermische Neutronenflußdichte in den Isotopenkanälen des FR2 ( $10^{13}/\text{cm}^2 \text{ sec}$ )

Zyklus	Isotopen-kanal	37/15	41/05	41/09	41/15	45/15	49/15	49/31	53/07	53/09	53/15	57/15	61/17
E/71 (7/71)	$\phi_{\text{max}}$	8,20	4,95	7,70	8,40	8,80	8,50	6,75	6,40	7,85	8,70	7,60	5,85
	$\phi_{\text{mittel}}$	5,75	3,55	5,35	6,00	6,70	6,35	4,91	4,98	5,96	6,50	5,74	4,39
G/71 (9/71)	$\phi_{\text{max}}$	8,15	4,40	6,65	7,90	8,20	8,30	5,50	6,50	7,40	8,50	7,30	5,50
	$\phi_{\text{mittel}}$	6,25	3,41	5,12	6,24	6,55	6,61	4,31	4,93	5,75	6,51	5,63	4,21
I/71 (12/71)	$\phi_{\text{max}}$	7,25	4,55	6,45	7,70	8,75	9,05	6,30	7,00	8,55	9,65	8,80	6,20
	$\phi_{\text{mittel}}$	5,28	3,37	4,82	5,62	6,36	6,81	4,69	5,43	6,58	7,34	6,66	4,86





Vertikaler Verlauf des thermischen Flusses  
 Isotopenkanal 49 / 15

Abb. 4

## 7.2 Temperatur und Stableistung

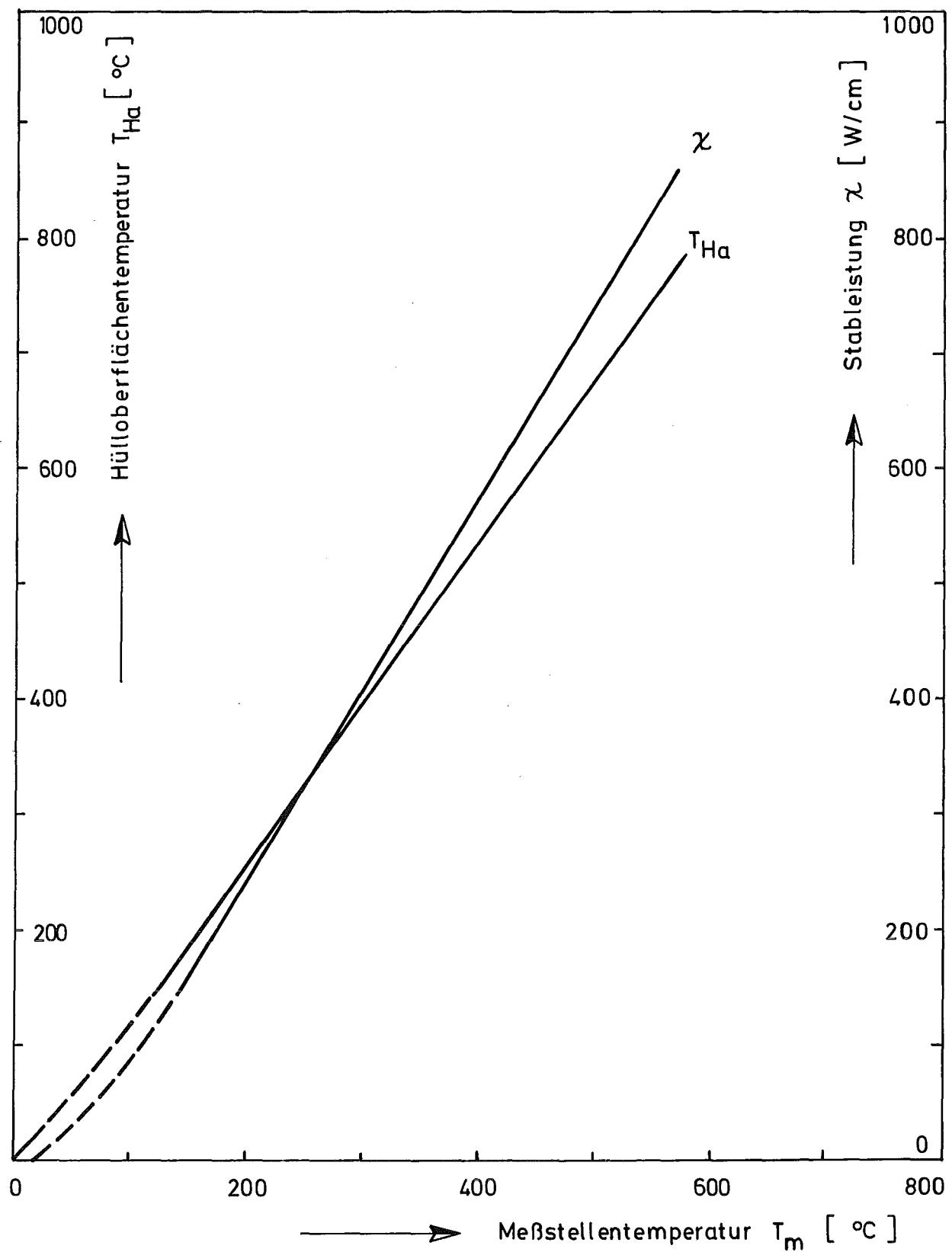
Die bei den Bestrahlungen der Versuchsgruppe 5b verwendeten Na-PbBi-Doppelkapseln sind mit Thermoelementen ausgestattet, welche die Messung der Na-Temperatur in Höhe der Bestrahlungsprüflinge gestatten. Aus diesem Meßwert kann die Hülloberflächentemperatur sowie die Stableistung des Prüflings ermittelt werden. Wie Eichversuche zeigen, besteht gute Übereinstimmung zwischen experimentell und rechnerisch ermittelten Werten. Abweichungen von maximal  $20^{\circ}\text{C}$  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. 6 dargestellten Zusammenhänge zwischen Meßstellentemperatur  $T_m$ , Hülloberflächentemperatur  $T_{Ha}$  und Stableistung  $\chi$ .

Die Auswertung der Meßwerte umfaßt tabellarische und grafische Darstellungen des zeitlichen und axialen Verlaufs der Hüllrohroberflächentemperaturen und der Stableistungen der einzelnen Prüflinge. Die geometrische Zuordnung der Meßwerte zu den Prüflingen ist aus dem Instrumentierungsplan (Tabelle 8) ersichtlich. Die Zahlen neben den TE-Nummern bedeuten die Lage des Thermoelementes in mm vom unteren Prüflingsende entsprechend der Skizze.

In Tabelle 9 sind die mittleren Stableistungen bei Zyklusbeginn und -ende zusammengestellt. Die Abb. 7 bis 12 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-Stabstellung) zu suchen sind.



FR 2-Kapsel-Versuchsgr. 5b

Temperatur-Stableistungscharakteristik Kapseltyp 4 (Na)

Abb. 6

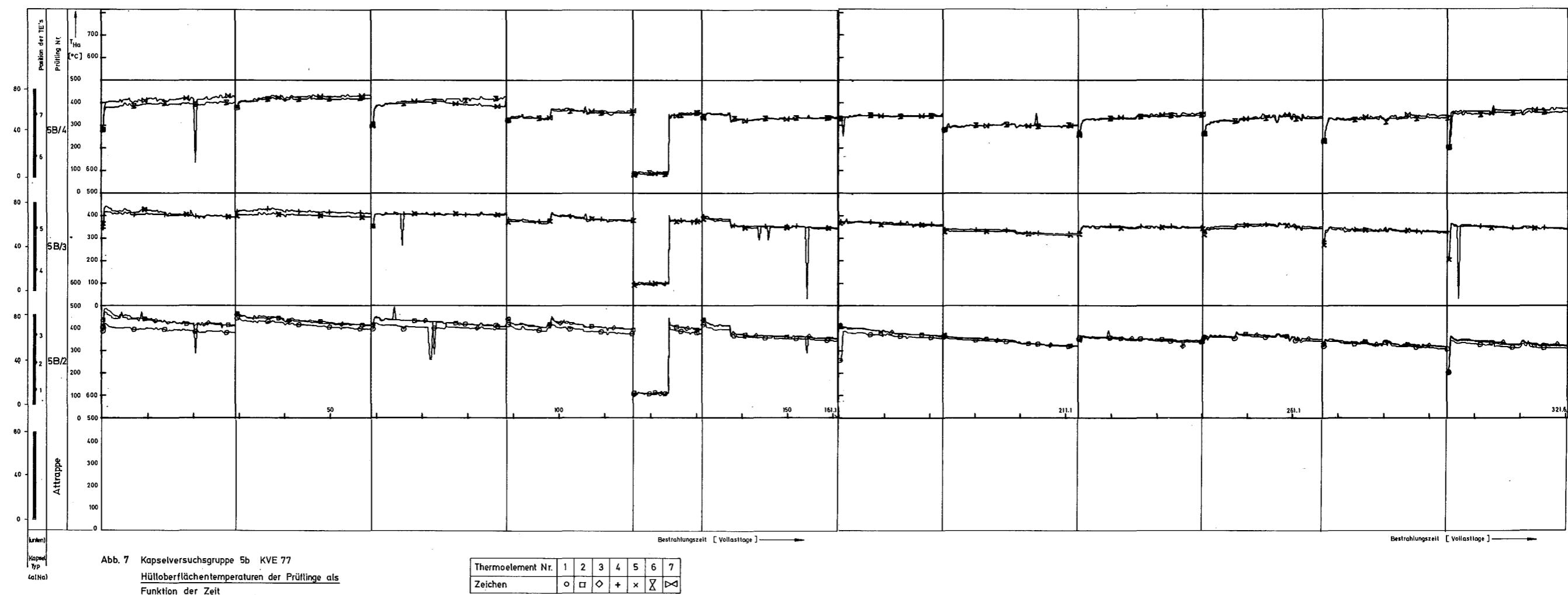
Tabelle 8 Instrumentierungsplan der Versuchsgruppe 5b

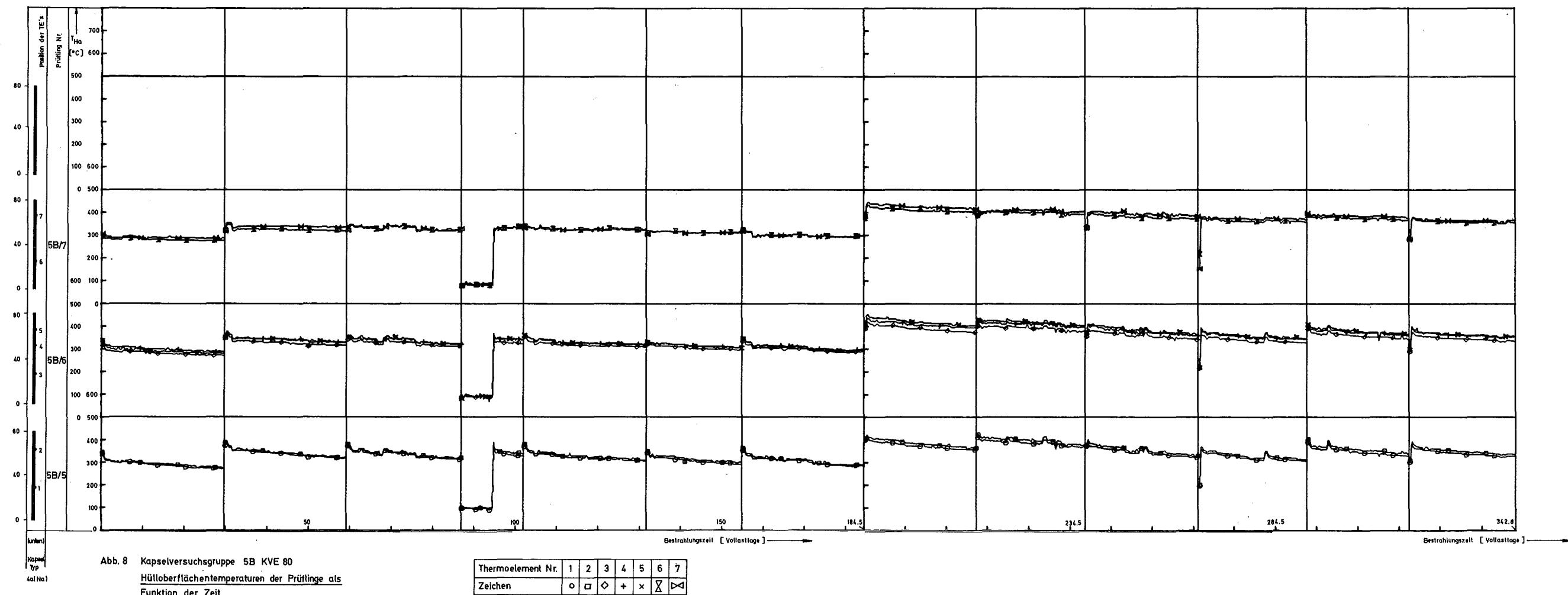
KVE

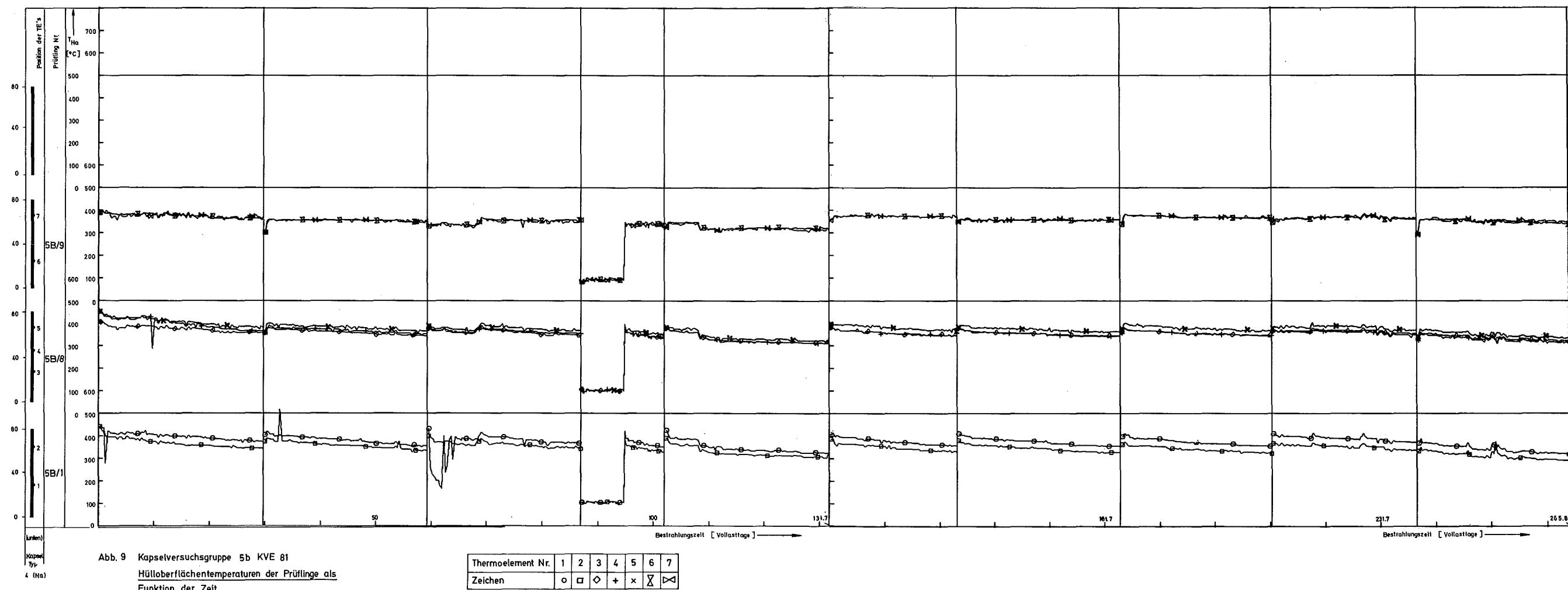
	77	80	81	82	83	86
80	Prüfling <u>5B/4</u>					
0	7/60	-	-	-	-	-
0	6/22					
80	<u>5B/3</u>	<u>5B/7</u>	5B/9	5B/12	5B/15	5B/18
0	5/60	7/68	( wie K V E 80 )			
0	4/22	6/28				
80	<u>5B/2</u>	<u>5B/6</u>	5B/8	5B/11	5B/14	5B/17
0	3/65	5/68	( wie K V E 80 )			
0	2/40	4/48				
0	1/15	3/28				
80	-	<u>5B/5</u>	5B/1	5B/10	5B/13	5B/16
0	(Attrappe)	2/62	( wie K V E 80 )			
0		1/28				

Erläuterung:

Beispiel: KVE 77: 5B/4, 7/60: Thermoelement Nr. 7  
in 60 mm Abstand vom unteren Brennstoffsäulenende.







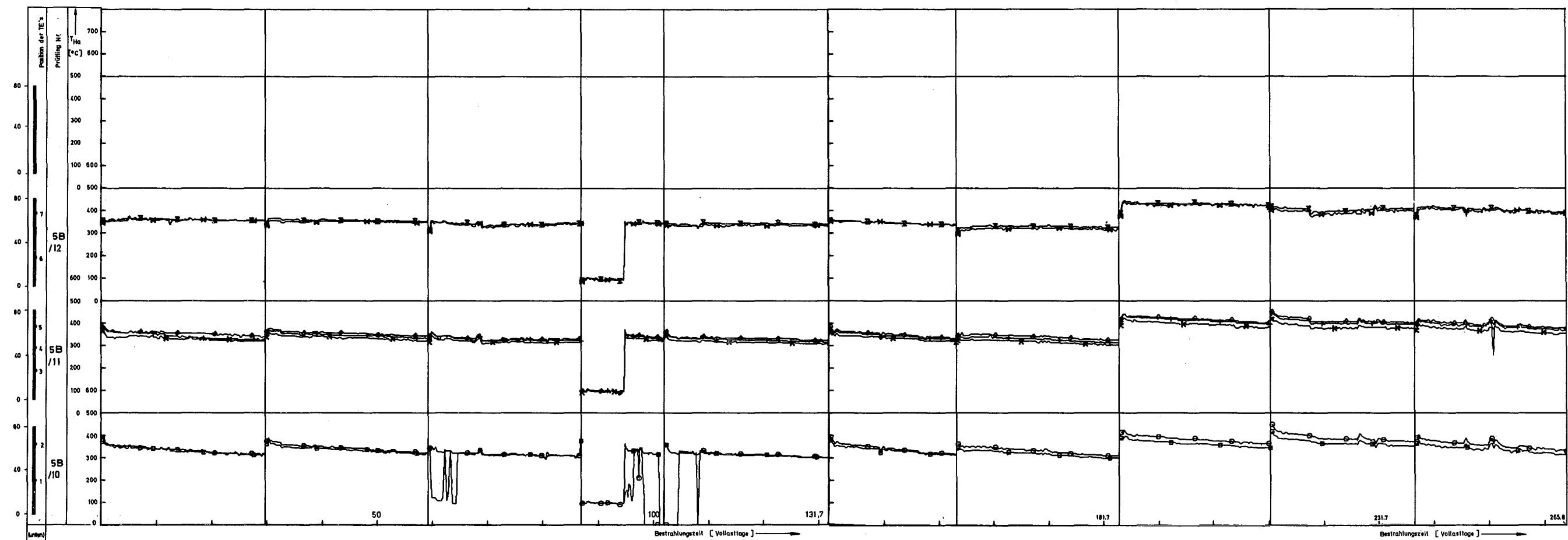
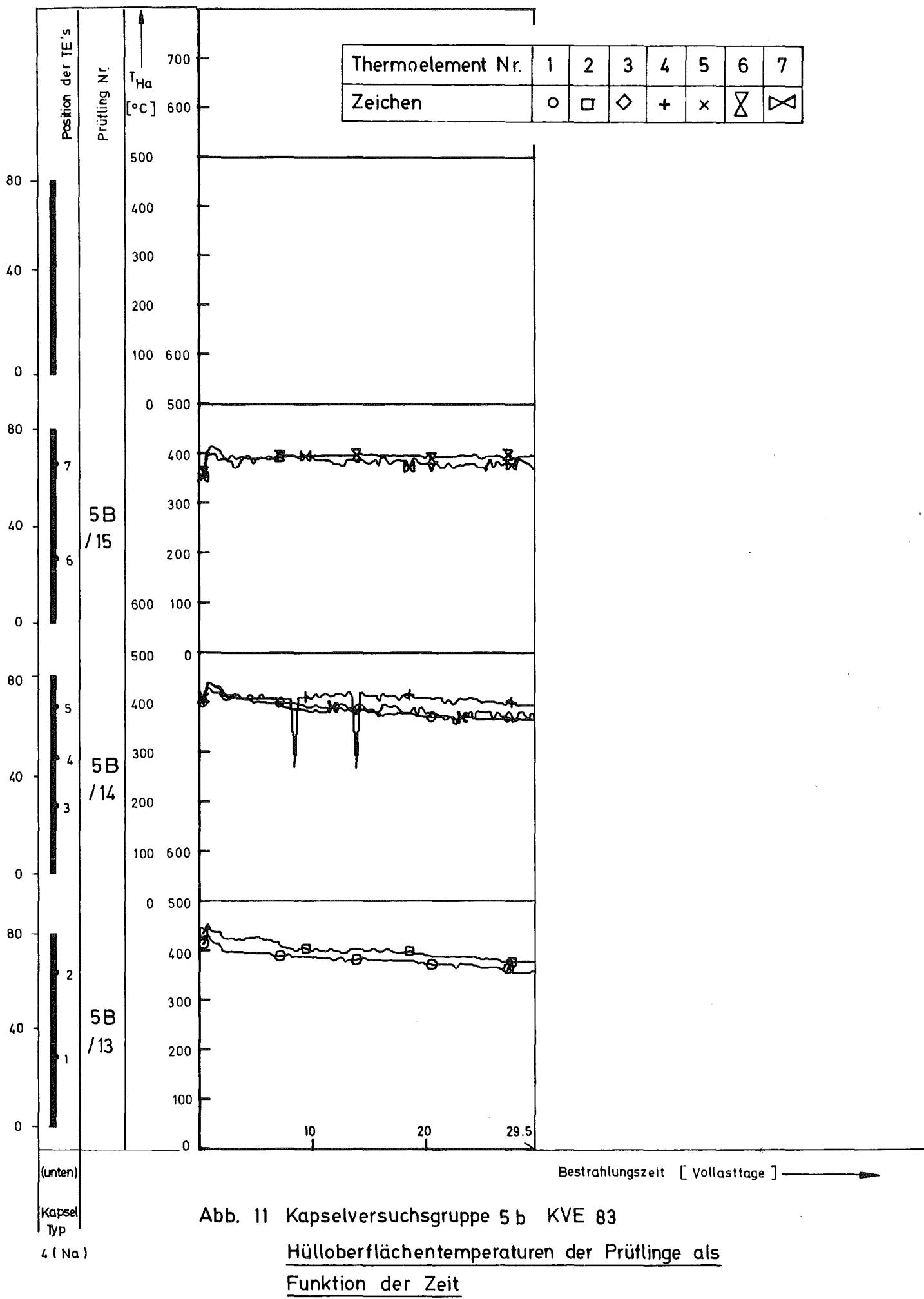


Abb. 10 Kapselversuchsgruppe 5b KVE 82  
Hülloberflächentemperaturen der Prüflinge als  
Funktion der Zeit

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



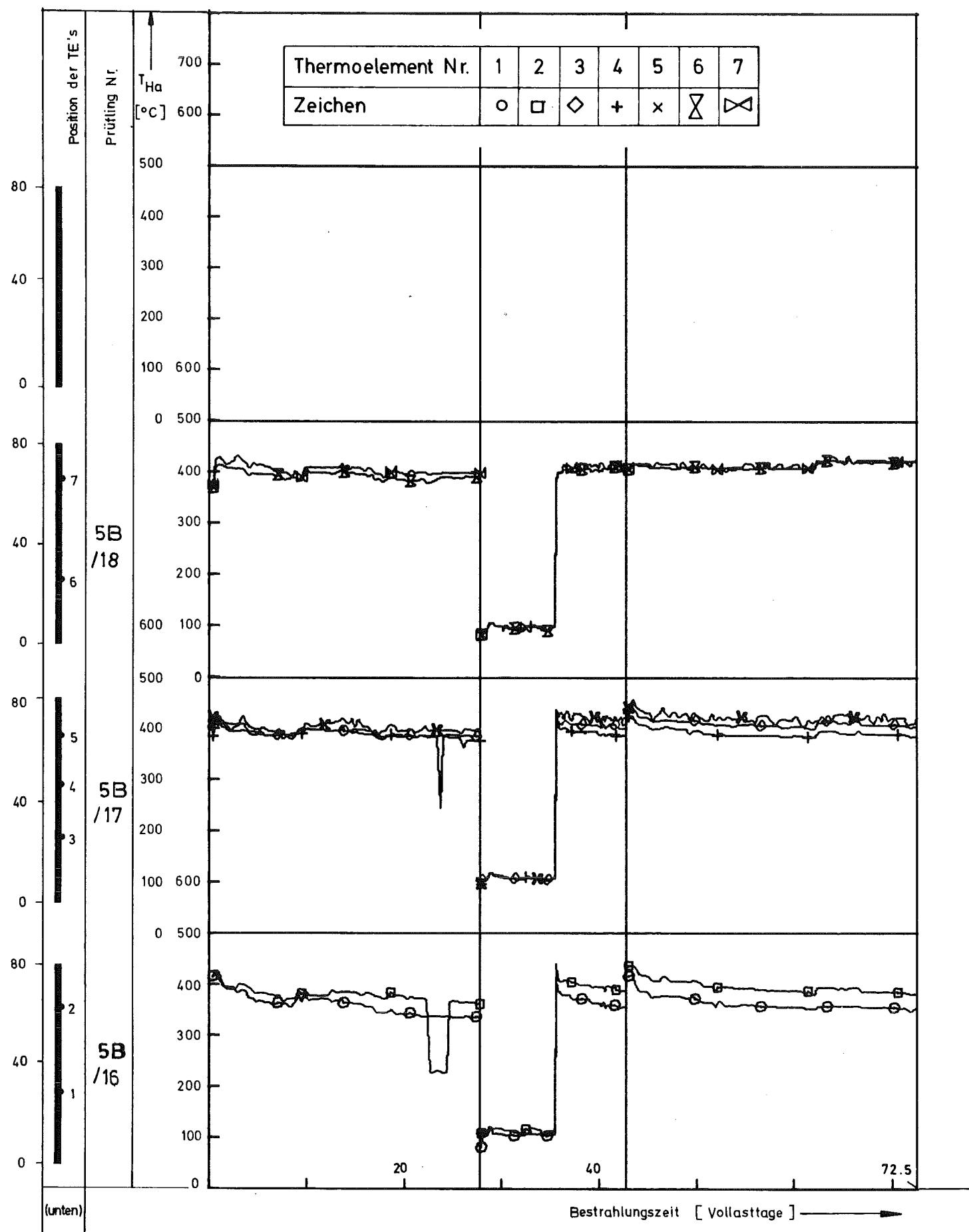


Abb. 12 Kapselversuchsgruppe 5b KVE 86

Hülloberflächentemperaturen der Prüflinge als  
Funktion der Zeit

(unten)  
Kapsel  
Typ

4 (Na)

**Tabelle 9:** Mittlere Stableistungen der Prüflinge der Vg 5 bei Zyklusanfang und -ende ( $x_a$ ,  $x_e$ , (W/cm<sup>2</sup>) )

### 7.3 Thermische Abbrandberechnung

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

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

mit  $\ell$  = Brennstofflänge (cm)

$m$  = Brennstoffgewicht (g)

$\chi_i$  = Stableistung (W/cm) (arithmetisches Mittel/Zyklus)

$t_i$  = Bestrahlungszeit (Vollastäquivalent) (d) je Zyklus

In Tabelle 10 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.9.4).

Tabelle 10 Thermische Abbrandwerte der Prüflinge der Versuchsgruppe 5b

KVE Nr.	Prüfling Nr.	Abbrand gemäß TE-Nr. (in (MWd/kgM) )							Bestrahlungszeit (d)Vollast	Mittelwert
		1	2	3	4	5	6	7		
77	5B/2	113	119	118	114	113	108	110	322	116.8 113.6 109.2
80	5B/5	108	111	110	115	116	113	116	343	109.9 113.6 114.5
81	5B/1	94	87	90	91	96	91	91	266	90.6 92.2 90.6
82	5B/10	86	85	93	91	87	94	93	266	85.7 90.5 93.5
83	5B/13	11	12	11	12	12	12	11	30	11.6 11.7 11.5
86	5B/16	24	26	27	26	28	27	28	73	24.8 27.0 27.8

## 8. Zerstörungsfreie Nachuntersuchung

### 8.1 Äußere Vermessung

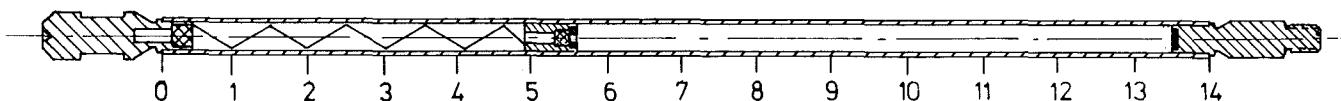
Die äußere Vermessung beinhaltet eine Durchmesser-, Längen- und Durchbiegungsbestimmung der Prüflinge vor und nach der Bestrahlung.

Die Durchmesserbestimmungen wurden auf einer Meßbank mit Hilfe eines induktiven Wegaufnehmers in Form von sogenannten Wendelschrieben aufgezeichnet. Hierbei wurde ein Tastkopf mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 5 mm/U an dem rotierenden Prüfling vorbeigeführt. Der Meßkopf hatte die Form eines Keiles mit abgerundeten Schneiden ( $r = 0,6 \text{ mm}$ ). Es wurden von 15 Prüflingen im bestrahlten und unbestrahlten Zustand Wendelschriebe angefertigt. Durchmesserveränderungen von  $\pm 1 \mu\text{m}$  werden angezeigt. In den Abbildungen 13 bis 17 sind die Durchmesserveränderungen in Prozent vom Nominaldurchmesser 4,7 mm aufgeführt.

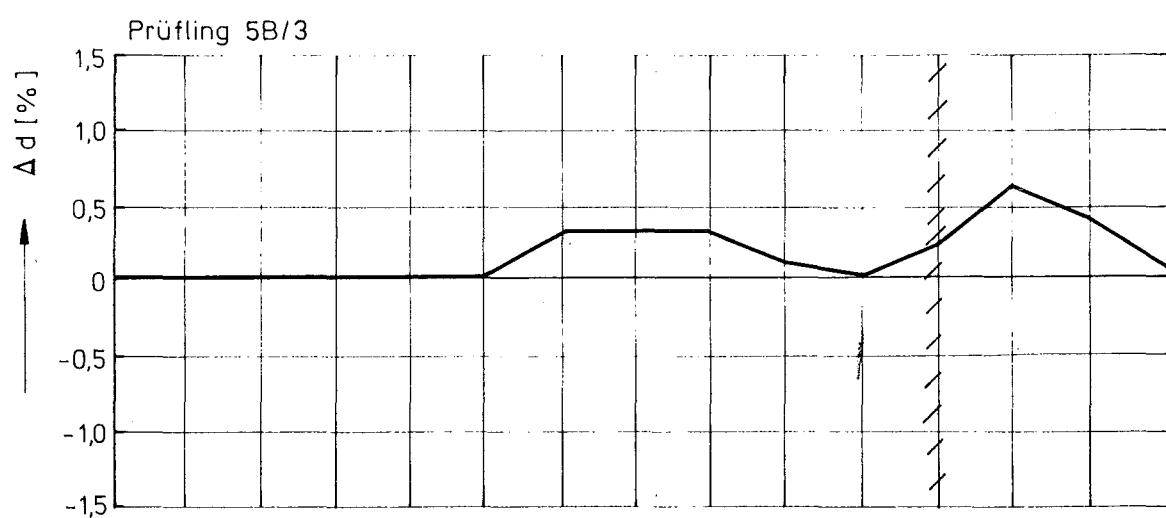
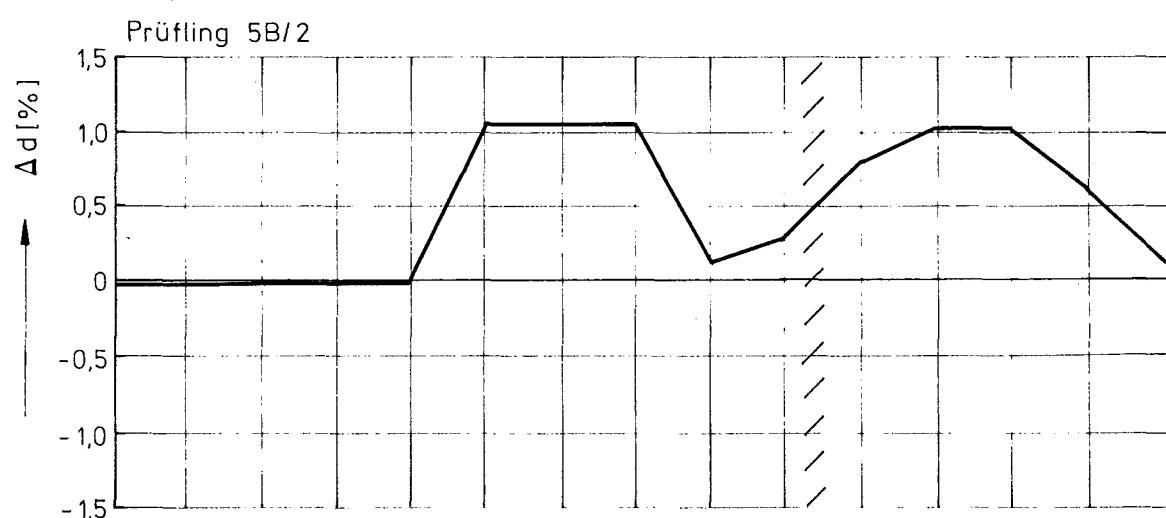
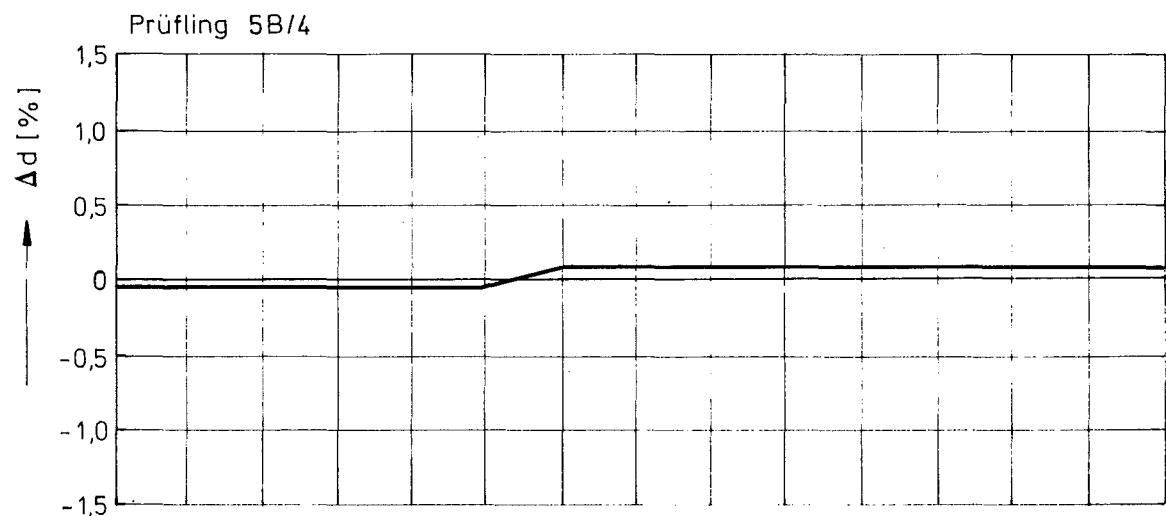
Tabelle 11 gibt die Durchbiegung und die Längenveränderung der Prüflinge wieder.

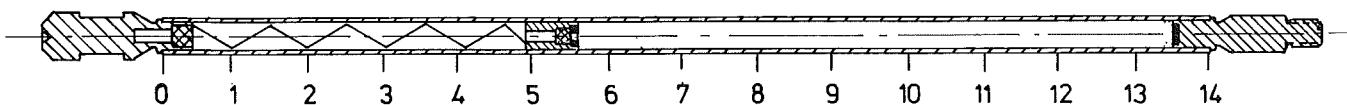
Tabelle 11 Stabdurchbiegung und Verlängerung nach der Bestrahlung

KVE	Prüfling	( $\mu\text{m}$ ) Durchbiegung in beiden Meßebenen	$\Delta L$ ( $\mu\text{m}$ )	M=Mantellinienschrieb L = lineal
77	5B/4	50 - 100	- 5	L
	/3	< 50	-10	L
	/2	< 50	+55	L
80	5B/7	< 50	+60	L
	/6	< 50	+595	
	/5	< 50	+150	L
81	5B/9	< 50	-30	L
	/8	< 50	+40	L
	/1	< 50	+85	L
82	5B/12	150 - 200	+55	L
	/11	< 50	+20	L
	/13	< 50	+80	L
83	5B/15	200 / 50	-10	M
	/14	395 / 210	+10	M
	/13	80 / 60	-30	M
86	5B/18	75 / 75	-10	M
	/17	70 / 50	+30	M
	/16	60 / 100	-10	M

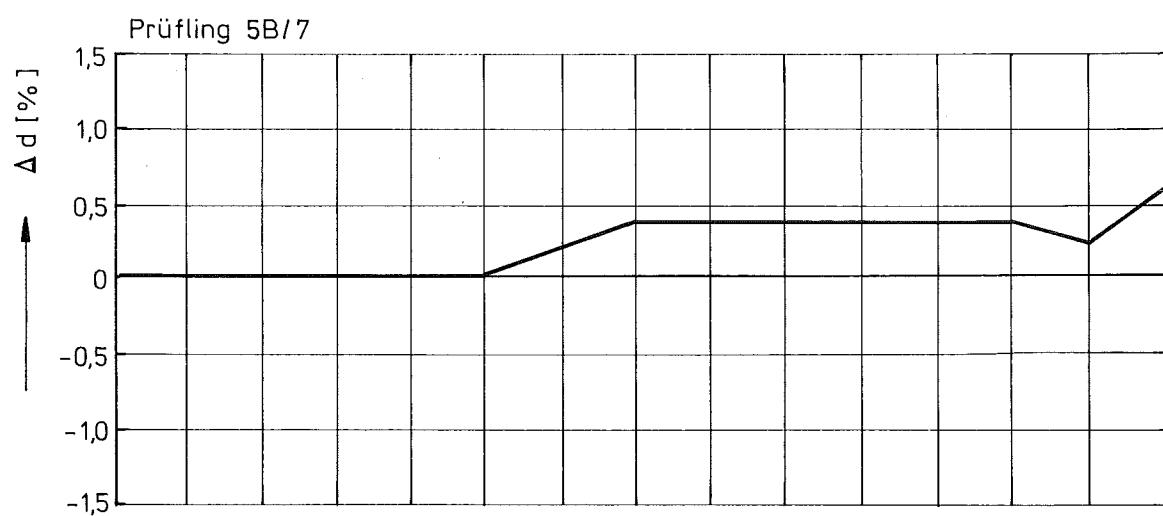
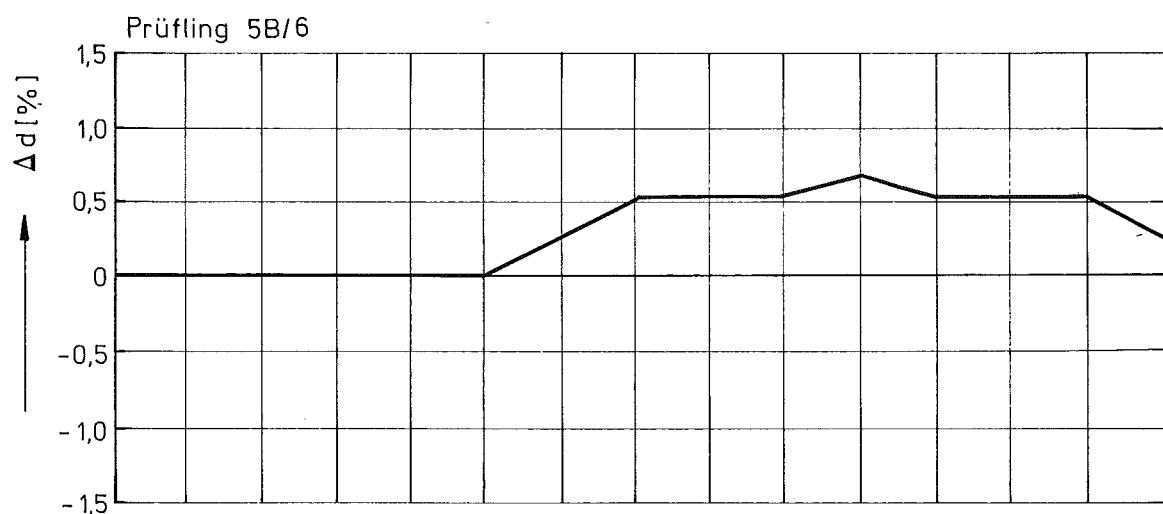
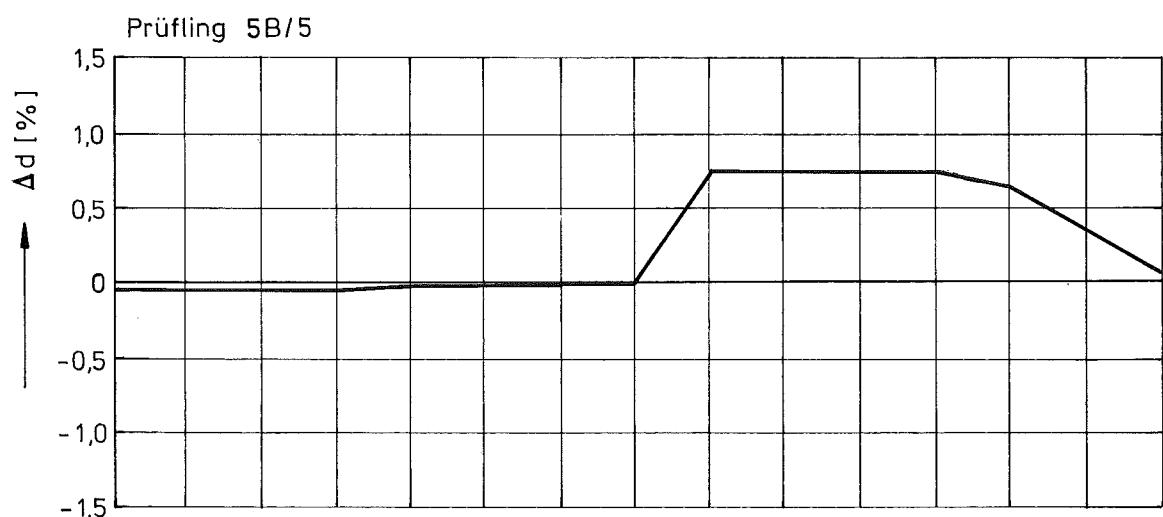


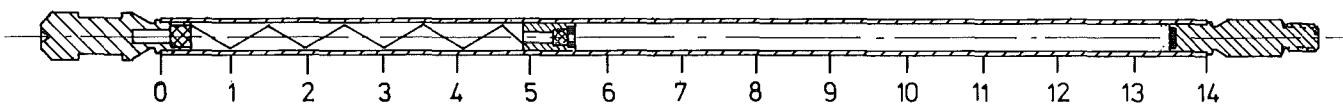
KVE 77



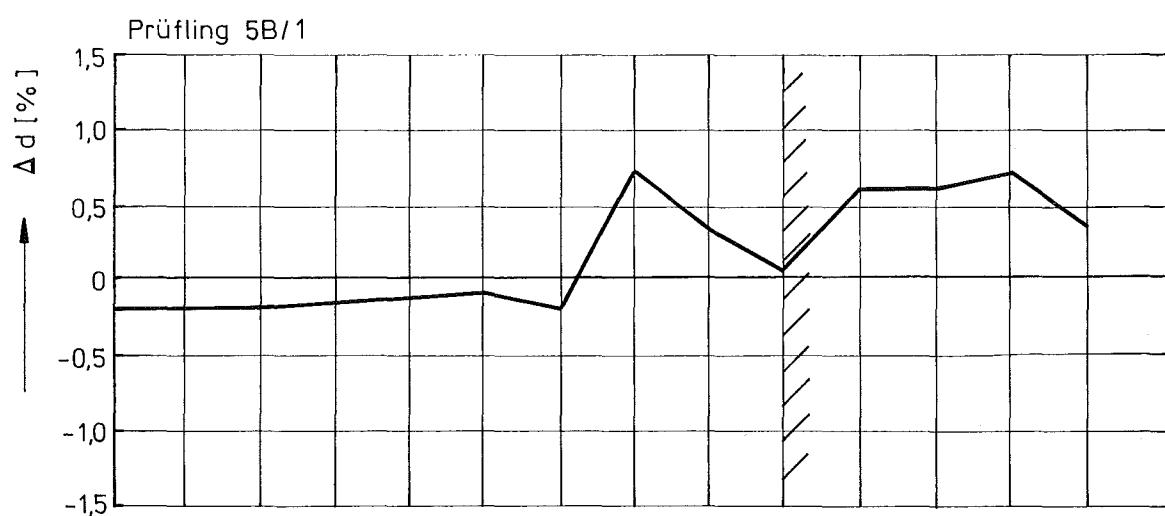
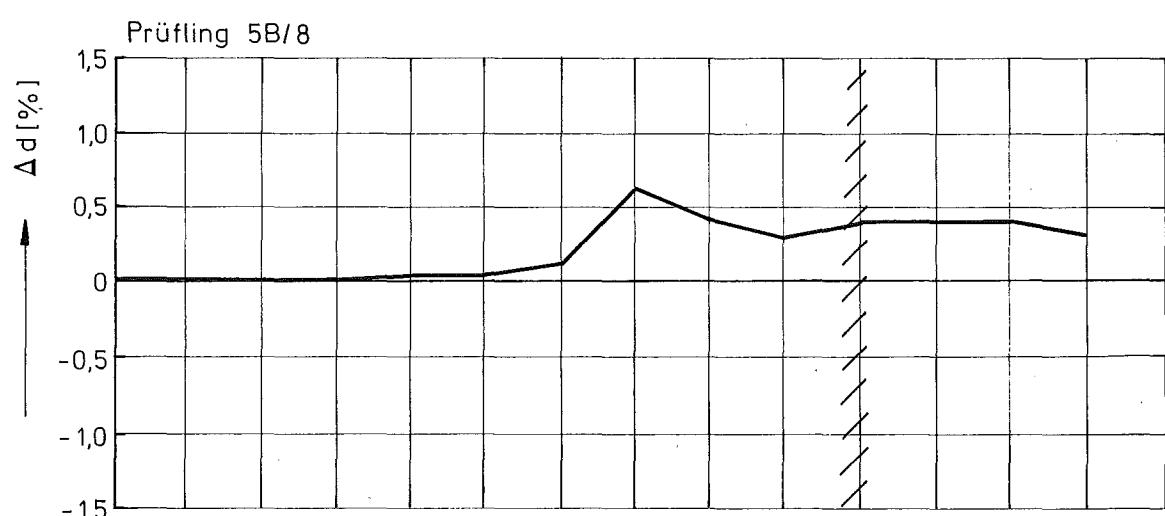
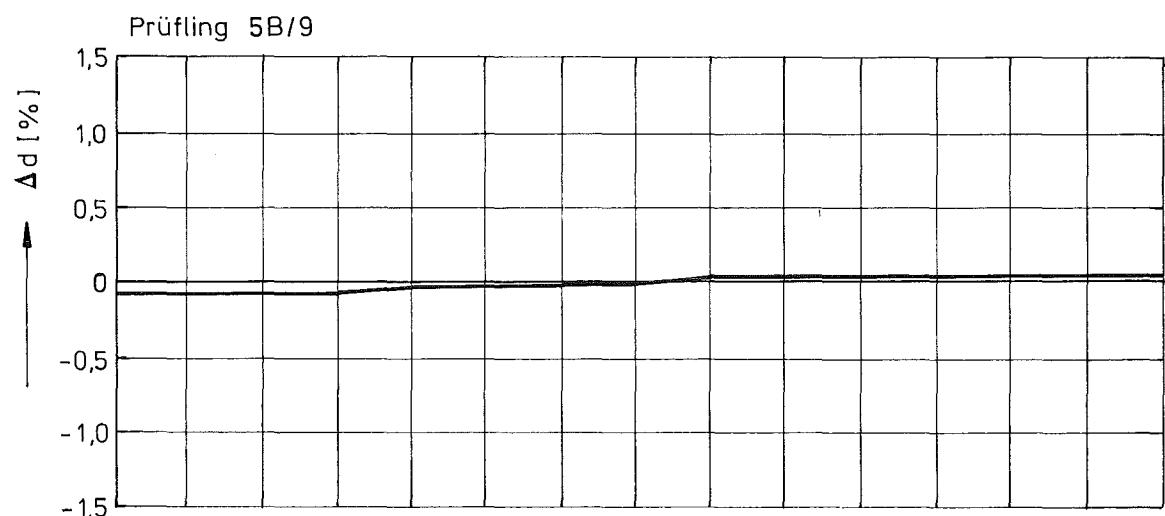


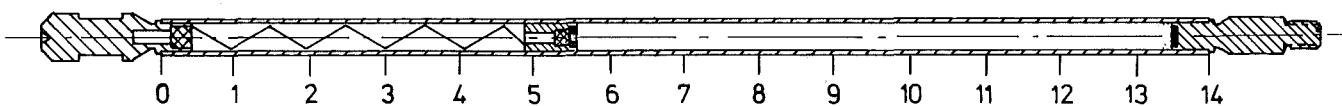
KVE 80



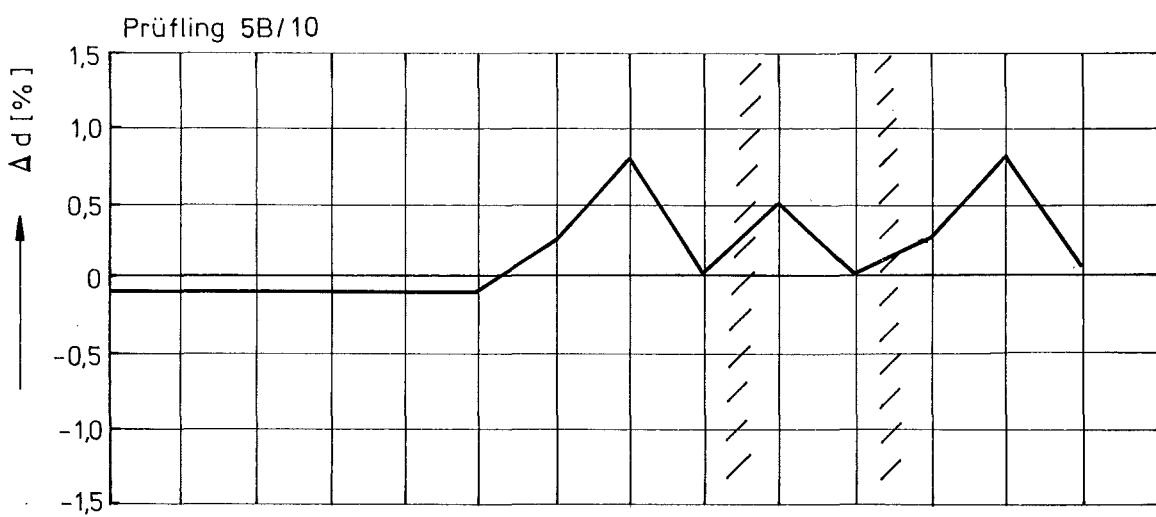
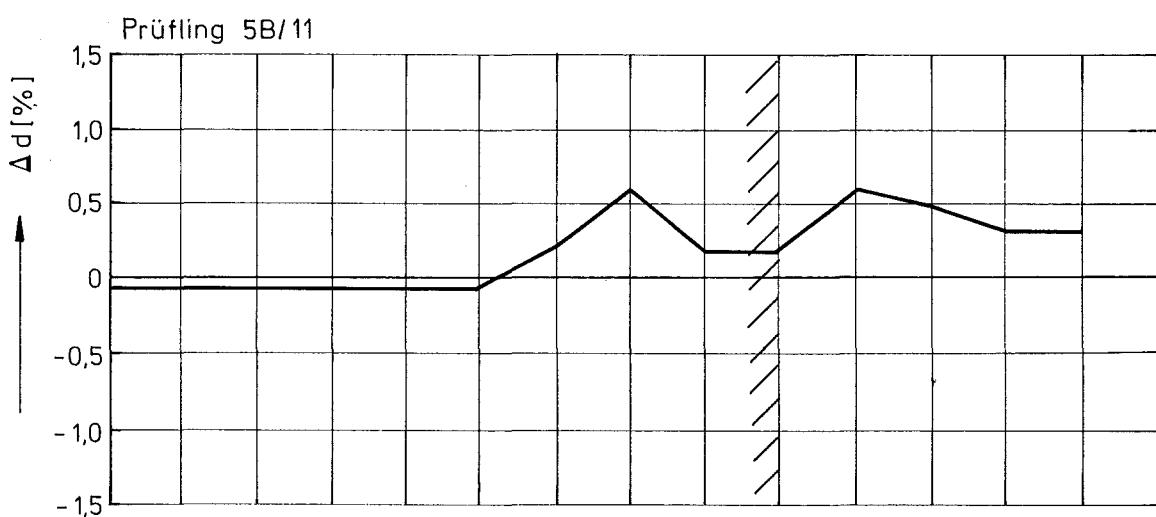
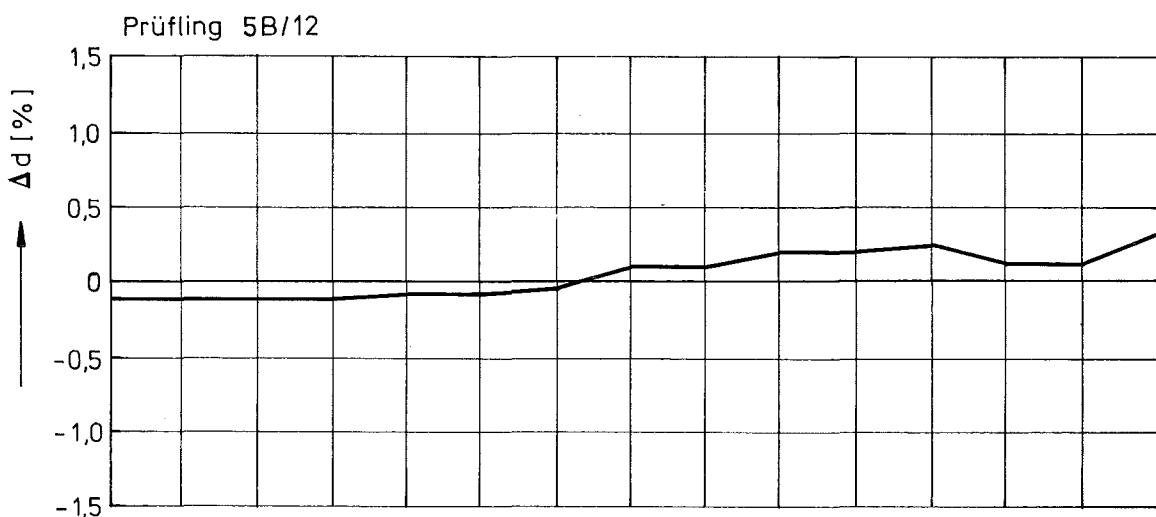


KVE 81



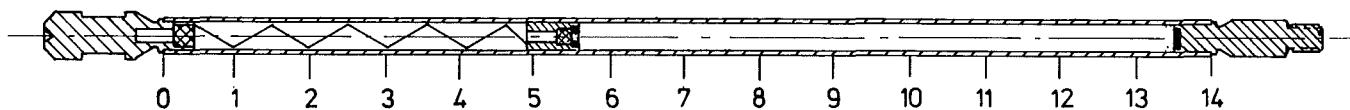


KVE 82

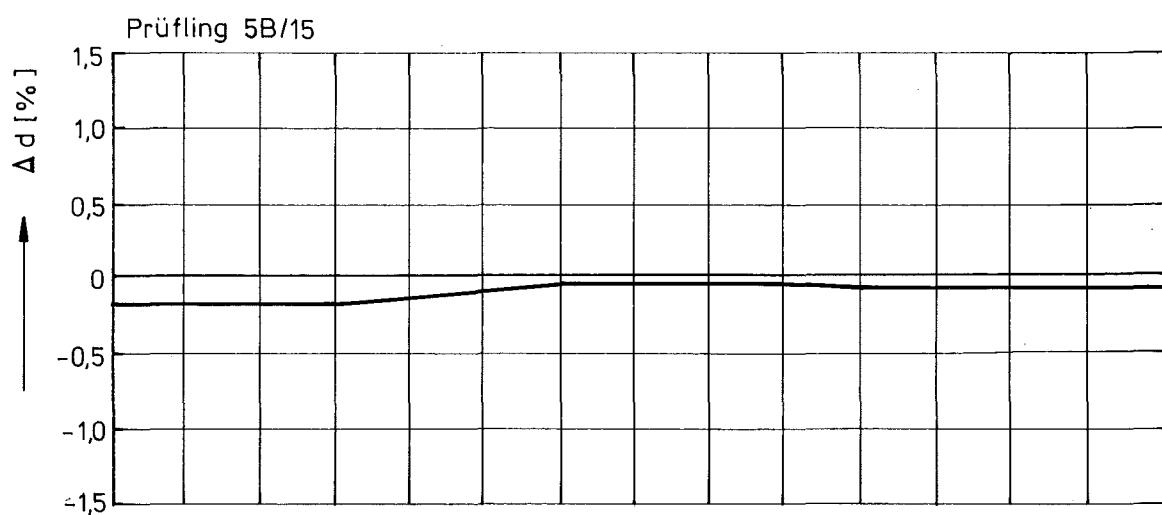
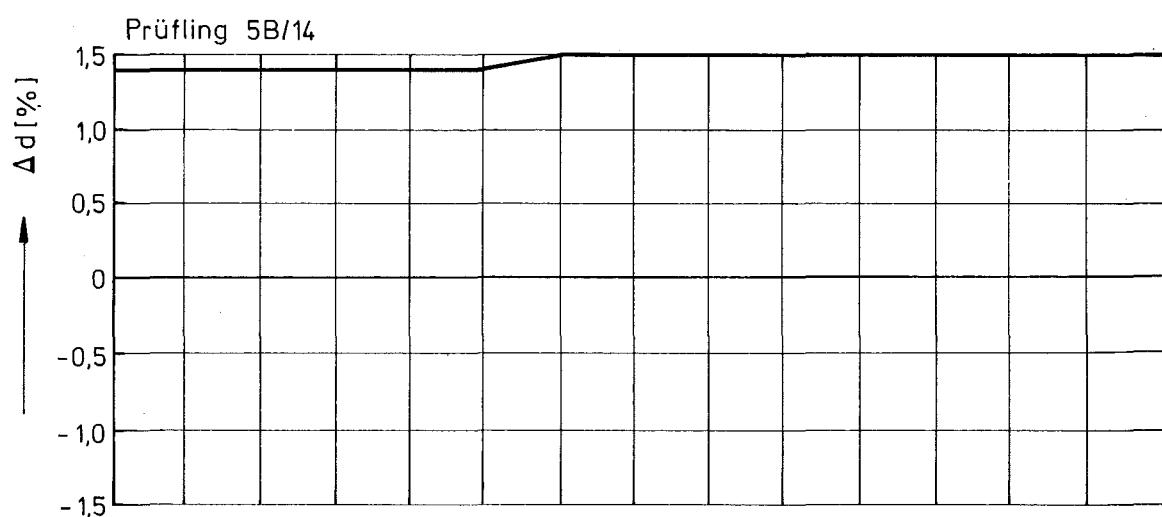
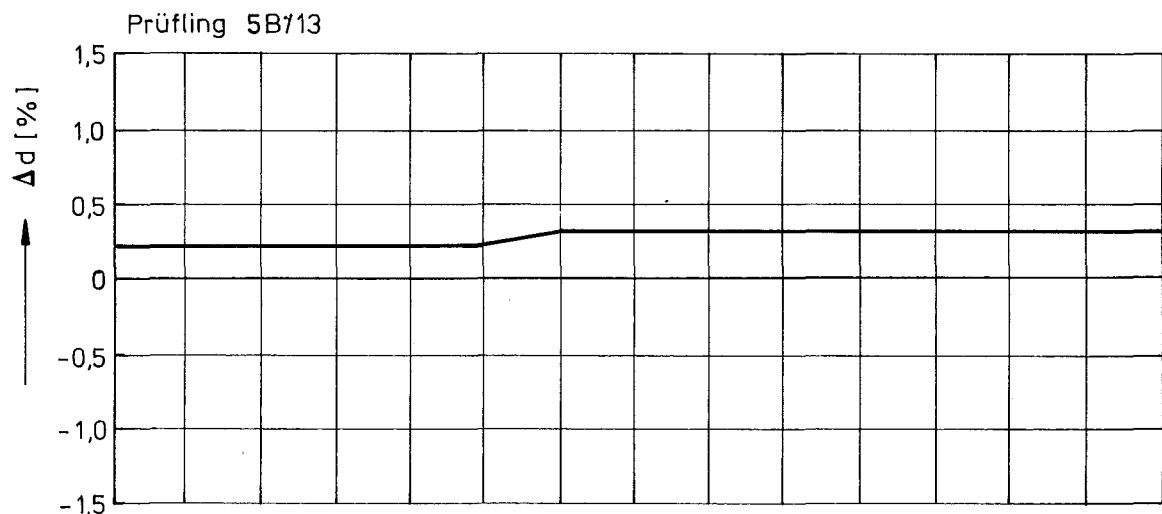


Veränderungen der Stab-Außendurchmesser

Abb. 16



KVE 83



## 8.2 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 Zentralkanal, 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 die zerstörenden Nachuntersuchungen, insbesondere der Keramografie, ist es unumgänglich, die innere Geometrie der Brennstoffsäule zu kennen. Eine Durchleuchtung des Prüflings bietet sich hier an.

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

In unserem Falle wurde die Durchleuchtung mit einem Betatron vorgenommen, das eine harte  $\gamma$ -Strahlung von maximal 18 MeV aussendet. Für diese hohe  $\gamma$ -Energie ist das Element Fe 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 Außenränder der zylinderförmigen Stäbe werden durch einen sogenannten Dickenausgleich aus Blei vor einer Überstrahlung geschützt. Damit wird eine gleichmäßige Massenbelegung der Bildfläche und eine ausreichende Bildschärfe im Bereich der Randzone erreicht. Daneben wirkt der Dickenausgleich noch als zusätzliche Abschirmung für die Aufnahmefilme.

Auf diese Art wurden bei Durchleuchtungszeiten zwischen 10 und 30 Minuten die in der angefügten Prüflingsdokumentation (Anhang I) wiedergegebenen Durchstrahlungsbilder hergestellt. Die durch die Betatron-Durchleuchtung erzeugten Aufnahmen wiesen 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 Originalfilme, die auch zur Beurteilung und Auswertung allein herangezogen wurden.

Eine starke Brennstoffumverteilung in Zentralkanalnähe und an den Prüflingsenden ist praktisch bei allen Prüflingen (Ausnahme KVE 80) erkennbar. Es wurde mittels dieser Filme die Länge der Brennstoffsäule ermittelt und mit der Original-Brennstoffsäulen-Länge verglichen (Tabelle 12). Wie man sieht, sind durchweg Verkürzungen (max. 2,7 %) feststellbar.

Tabelle 12 Länge der Brennstoffsäulen, aus den Röntgenaufnahmen ermittelt

Prüfling Nr.	Länge der Brennstoffsäulen vor Bestr. (mm)		$\Delta \lambda$ (mm)	$\Delta \lambda$ (%)
	nach Bestr. (mm)			
5B/4	79,98	79,4	-0,58	-0,73
5B/3	80,08	78,3	-1,78	-2,22
5B/2	80,08	79,4	-0,68	-0,84
5B/7	80,28	79,5	-0,78	-0,97
5B/6	79,98	79,5	-0,48	-0,60
5B/5	80,08	79,6	-0,48	-0,59
5B/9	80,28	78,0	-2,28	-2,84
5B/8	80,18	78,2	-1,98	-2,46
5B/1	80,28	79,2	-1,08	-1,34
5B/12	80,28	78,1	-2,18	-2,71
5B/11	80,18	78,9	-1,28	-1,59
5B/10	80,58	79,8	-0,78	-0,96

### 8.3 $\gamma$ -Profile und $\gamma$ -Spektren

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

Als Detektor diente hierzu ein Halbleiterkristall (GeLi) mit nachgeschaltetem 400-Kanal-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.

Es wurde von jedem Prüfling ein sogenanntes integrales  $\gamma$ -Profil aufgenommen, das die  $\gamma$ -Aktivität im Bereich von 400 bis 1700 keV umfaßte. Dann wurden an einigen Stellen der Brennstoffsäule  $\gamma$ -Spektren aufgenommen. 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 Brennstoff-Verlagerungen 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 aufgenommen. Es waren dies insbesondere Profile für Cs/Ba-137 und Ru-106.

## 9. Zerstörende Nachuntersuchung

---

### 9.1 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 radial im Bereich des Spaltgasplenums perforiert und das freie Spaltgas abgezogen mit anschließender Heliumspülung. Die Zusammensetzung des Spaltgases wird 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) wird im sogen. Schnittplan des Prüflings eine Brennstoffprobe von ca. 1,5 g Gewicht bereitgestellt. Die Probe wird zuerst in einer gasdichten Kugelmühle aus Edelstahl ca. 2 Stunden gemahlen, wobei eine Partikelgröße von weniger als  $1 \mu\text{m}$  erreicht wird. Das hierbei freigesetzte "Porenspaltgas" umfaßt alles Gas, das sich in geschlossener Porosität mit Porengrößen  $\geq 1 \mu\text{m}$  befand. Nach der gaschromatografischen Bestimmung dieses Anteils wird die gemahlene Brennstoffprobe schließlich in  $\text{HNO}_3$  aufgelöst. Dabei wird sowohl der im Brennstoff gelöste Anteil, das "Gitterspaltgas", und der in den kleinen Poren ( $\leq 1 \mu\text{m}$ ) enthaltene Anteil bestimmt.

Die für eine weitere Auswertung wichtigen Ergebnisse sind in einigen Tabellen zusammengefaßt. Tabelle 13 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  $\text{mm}^3$  beziehen sich auf  $20^\circ\text{C}$  und 760 Torr. Auffallend ist die hohe Freisetzungsraten von ca. 90 %, die sich jedoch gut durch die hohen Brennstofftemperaturen (hohe Leistungsdichte) erklären läßt. In Tabelle 14 sind alle gemessenen Werte für das im Brennstoff gebundene Spaltgas (wieder aufgetrennt nach Krypton und Xenon) enthalten. Die Messungen wurden hierbei an kleinen Brennstoffproben ausgeführt und auf die Gesamtbrennstoffmenge umgerechnet. In Tabelle 15 wird die Spaltgasbilanz wiedergegeben. Wie man sehen kann, ist hier eine relativ gute Übereinstimmung zwischen theoretischer und gemessener Gesamtgasmenge festzustellen (5B/2: + 8 %), d.h. die der theoretischen Gasmenge zugrundeliegende Annahme von 0,30 langlebigen Gasatomen/Spaltung trifft hier den Sachverhalt recht gut.

Tabelle 13: Freies Spaltgas - Spaltgasdruck

KVE	Prüfl.	Abbrand <sup>+) A</sup> (MWd/kg M)	Freies Krypton	Spaltgas (mm <sup>3</sup> )	V <sub>F</sub> Xenon	Gesamt	Xe/Kr-Verhält-nis	Freies Volumen (mm <sup>3</sup> )	Spaltgas-druck bei 500°C(atm)
77	5B/4	108,6	1570	27560	29130	17,5	679	113,26	
	/3	113,2	1640	29200	30840	17,8	901	90,36	
	/2	116,6	1820	31400	33220	17,3	766	114,49	
80	/7	114,0	1600	28200	29800	17,6	574	137,06	
	/6	113,0	1610	27900	29510	17,3	593	131,38	
	/5	110,0	1550	27350	28900	17,6	647	117,92	
81	/9	90,1	1250	21800	23050	17,4	622	97,83	
	/8	92,0	1320	23000	24320	17,4	583	110,13	
	/1	90,5	1360	23600	24960	17,3	532	123,86	
82	/12	93,1	1370	22800	24170	16,7	633	100,80	
	/11	90,3	1400	23700	25100	16,9	661	100,25	
	/10	~ 90,0	1310	22700	24010	17,3	649	97,67	
83	/15	11,5	118	2200	2318	18,6	617	9,92	
	/14	11,7	134	2370	2504	17,8	647	10,22	
	/13	11,5	121	2200	2321	18,2	635	9,65	
86 <sup>++)</sup>	/18	27,1	-	-	-	-	-	-	
	/17	26,7	-	-	-	-	-	-	
	/16	24,7	-	-	-	-	-	-	

<sup>+) rechnerischer Abbrand (Mittelwert)</sup>

<sup>++) KVE 86 wurde nicht gemessen</sup>

Tabelle 14 Gebundenes Spaltgas

KVE		Abbrand *) (MWd/kgM)	Porenspaltgas (mm <sup>3</sup> )			Gitterspaltgas (mm <sup>3</sup> )			Xe/Kr-Verhältnis	
			Krypton	Xenon	Gesamt	Krypton	Xenon	Gesamt	Poren	Gitter
77	5B/4	108,6	142,0	2390,0	2532,0	-	-	-	16,8	-
	/3	113,2	135,3	2132,7	2268,0	11,20	236,7	247,9	15,8	21,1
	/2	116,6	158,0	2630,0	2788,0	14,50	310,0	324,5	16,6	21,4
80	/7	114,0	150,4	2685,0	2835,4	-	-	-	17,8	-
	/6	113,0	175,1	2872,0	3047,1	-	-	-	16,4	-
	/5	110,0	161,0	2815,7	2976,7	-	-	-	17,5	-
81	/9	90,1	118,6	2313,0	2431,6	36,36 <sup>+</sup> )	107,3	144,3	19,5	30,9
	/8	92,0	147,6	2430,6	2577,6	36,08 <sup>+</sup> )	252,6 <sup>+</sup> )	288,7	16,5	7,0
	/1	90,5	178,6	2745,6	2924,2	-	-	-	15,4	-
82	/12	93,1	158,4	2570,9	2729,3	17,94	288,9	306,8	16,2	16,1
	/11	90,3	129,1	1904,9	2034,0	21,69 <sup>+</sup> )	662,8	684,5	14,8	30,6
	/10	~90,0	190,3	2872,4	3062,7	25,30	303,5	328,8	15,1	12,0

Die KVE 83 und 86 wurden nicht untersucht.

- wurde nicht bestimmt, \*) berechneter Abbrand (Mittelwert), +) unsicherer Wert

Tabelle 15 Spaltgasbilanz

KVE	Prüfl.	Abbrand <sup>+) (MWd/kgM)</sup>	Freies Spalt-gas V <sub>F</sub> (mm <sup>3</sup> )	Spalt-gas (%)	Porenspalt-gas V <sub>P</sub> (mm <sup>3</sup> )	(%)	Gitterspalt-gas V <sub>G</sub> (mm <sup>3</sup> )	(%)	Gesamtspalt-gas (mm <sup>3</sup> ) gem.	theor.
77	5B/4	108,6	29 130	-	2 532	-	-	-	-	31 934
	/3	113,2	30 840	92,5	2 268	6,8	248	0,7	33 356	33 288
	/2	116,6	33 220	91,4	2 788	7,7	325	0,9	36 333	34 288
80	/7	114	29 800	-	2 835	-	-	-	-	33 524
	/6	113	29 510	-	3 047	-	-	-	-	33 229
	/5	110	28 900	-	2 977	-	-	-	-	32 247
81	/9	90,1	23 050	89,9	2 432	9,5	144	0,6	25 626	26 495
	/8	92,0	24 320	89,5	2 577	9,5	289	1,0	27 186	27 054
	/1	90,5	24 960	-	2 924	-	-	-	-	29 613
82	/12	93,1	24 170	88,8	2 729	10,0	307	1,2	27 206	27 378
	/11	90,3	25 100	90,2	2 034	7,3	685	2,5	27 819	26 554
	/10	~90,0	24 010	87,6	3 063	11,2	329	1,2	27 402	26 466

Die KVE 83 und 86 wurden nicht untersucht.

+ ) berechneter Abbrand (Mittelwert)

## 9.2 Keramografie

Die Keramografie nimmt unter den Untersuchungsmethoden 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)  
 $\gamma$ -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 in der Nähe der Säulenenden beobachtet und untersucht. Eine vergleichende Auswertung, bei der die Zentralkanalgröße, der Spalt Brennstoff-Hülle 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 Beobachtung spezieller Verhaltensweisen erweisen 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 folgendes Schema angewandt:

A u f n a h m e t y p (im Anhang)	Vergröß- serung	Verarbeitung der Untersuchungsfläche
1. Faltblätter	10,6x	a) poliert
2. Totalaufnahme	20 x	a) poliert b) geätzt
3. Panorama-Aufnahme über den Säulenradius	100x	a) poliert b) geätzt
4. Detailaufnahmen	100x 200x 500x	a) poliert b) geätzt

Darüberhinaus 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.

In den Abb. 18 und 19 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  $90^{\circ}$  versetzt, bei Längsschliffen jeweils in Zweiergruppen einander gegenüber bestimmt wurden.

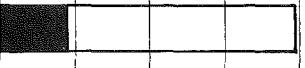
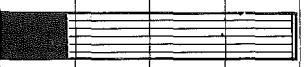
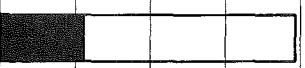
Prüfling	Probe	Zentralka-	Säulenkristall-	Säulenkristall-	rad.	Z.K.	Säulenkristallzonen				
	Quer o.	nalradius	zone groß	zone klein	Spalt		Randzone				
	Längs	r [mm]	r [mm]	r [mm]	[μm]	0	0,5	1,0	1,5	2,0 [mm]	
5B/4	Q	0,60	1,3	1,7	0						
	L	0,48	—	—	0						
5B/3	Q	0,42	1,6	1,95	0						
5B/2	Q	0,62	1,75	—	0						
5B/7	L	0,56	—	—	50						
	Q	0,59	—	—	0						
5B/6	L	0,60	—	—	70						
	Q	0,64	1,7	1,9	0						
5B/5	L	0,65 - 0,78	—	—	0						
	Q	0,66	1,6	1,9	0						

Abb. 18 Brennstoffstruktur

Prüfling	Probe Quer o. Längs	Zentralka- nalradius r [mm]	Säulenkristall- zone groß r [mm]	Säulenkristall- zone klein r [mm]	rad. Spalt [μm]	Z.K.	Säulenkristallzonen					Randzone
							—	—	—	—	—	
5B/9	Q	0,43	1,95	—	0		■	—	—	—	—	—
5B/8	Q	0,32	—	—	0		■	—	—	—	—	—
5B/1	Q	0,65	1,6	1,95	50		■■■	—	—	—	—	—
	Q	0,63	—	—	0		■■■	—	—	—	—	—
5B/12	Q	0,76	1,55	1,85	0		■■■	—	—	—	—	—
	L	0,63	1,5	1,8	0		■■■	—	—	—	—	—
5B/11	Q	0,60	—	—	0		■■■	—	—	—	—	—
5B/10	Q	0,69	—	—	0		■■■	—	—	—	—	—

Abb. 19 Brennstoffstruktur

### 9.3 Radiochemische Abbrandbestimmung

Zur Stützung der thermischen Abbrandbestimmung (s.Kap. 7.3) wurden die Abbrände der Prüflinge (Ausnahme KVE 83 und 86) durch radiochemische Isolierung und quantitative Analyse bestimmter Spaltprodukte ermittelt. Als Abbrandindikator wurden sowohl die Pu-Anreicherung als auch die Spaltprodukte Ce-144 und Nd-148 benutzt. Aus den 3 Einzelwerten wurde über eine Wichtung Pu:Ce:Nd = 1 : 1 : 1 (Ausnahme Proben mit partieller Brennstoffverlagerung - Pu-Wert besonders gewichtet) ein mittlerer Abbrand berechnet. Die Anteile der einzelnen Spaltquellen wurden wie folgt angenommen /15/:

Nur thermische Spaltung:	U-235	1,20 %
	Pu-239	97,60 %
	Pu-241	1,20 %

### 9.4 Vergleich der radiochemischen und berechneten Abbrandwerte

Aus der radiochemischen Abbrandbestimmung ergeben sich die Werte in Prozent der ursprünglich vorhandenen schweren Atome (% Fima). Zum Vergleich wurden die Abbrände in MWd/kgM umgerechnet. Hierzu wurden  $10,0 \text{ MWd/kgM} = 1,02 \% \text{ Fima}$  (nur Pu-239 Spaltung) gleichgesetzt.

Tabelle 16 Radiochemische Abbrandbestimmung

KVE	Prüfl.	Abbrand (MWd/kg M)		geschmolzen <sup>+</sup> + = ja - = nein	(2) - (1) Abweichung $\Delta A(\%)$	Symbol
		(2) gerechnet	(1) gemessen (rad.chem.)			
77	5B/4	108,6	127,0	-	-14,0	x
	/3	113,2	124,8	+	- 9,0	
	/2	116,6	139,0	+	-16,0	
80	/7	114,0	129,0	-	-11,0	
	/6	113,0	131,5	-	-14,0	•
	/5	110,0	129,0	-	-14,0	
81	/9	90,1	95,4	+	- 5,0	o
	/8	92,0	104,0	+	-11,0	
	/1	90,5	106,0	+	-14,0	
82	/12	93,1	103,5	-	-10,0	
	/11	90,3	94,3	+	- 4,0	Δ
	/10	~90,0	110,0	+	(-18,0)	

Pu-239-Spaltung 1 % FIMA  $\hat{=} 9,5 \text{ MWd/kg M}$

+ ) an der Zentralkanal-Peripherie

++ ) s. Abb. 20

In Tabelle 16 sind die Wertepaare der vergleichbaren Prüflinge enthalten. Abb. 20 gibt die Abweichung der gerechneten von den radiochemisch bestimmten Werten wieder. Der Mittelwert der Abweichungen ergibt - 11,7 %, d.h. die berechneten Werte liegen um ca. 11,7 % unter den analytisch bestimmten Werten. Vergleicht man diesen Sachverhalt mit dem Ergebnis der Versuchsgruppe 4b (20 % Pu), so stellt man fest daß dort ein Wert von -14,1 % auftrat.

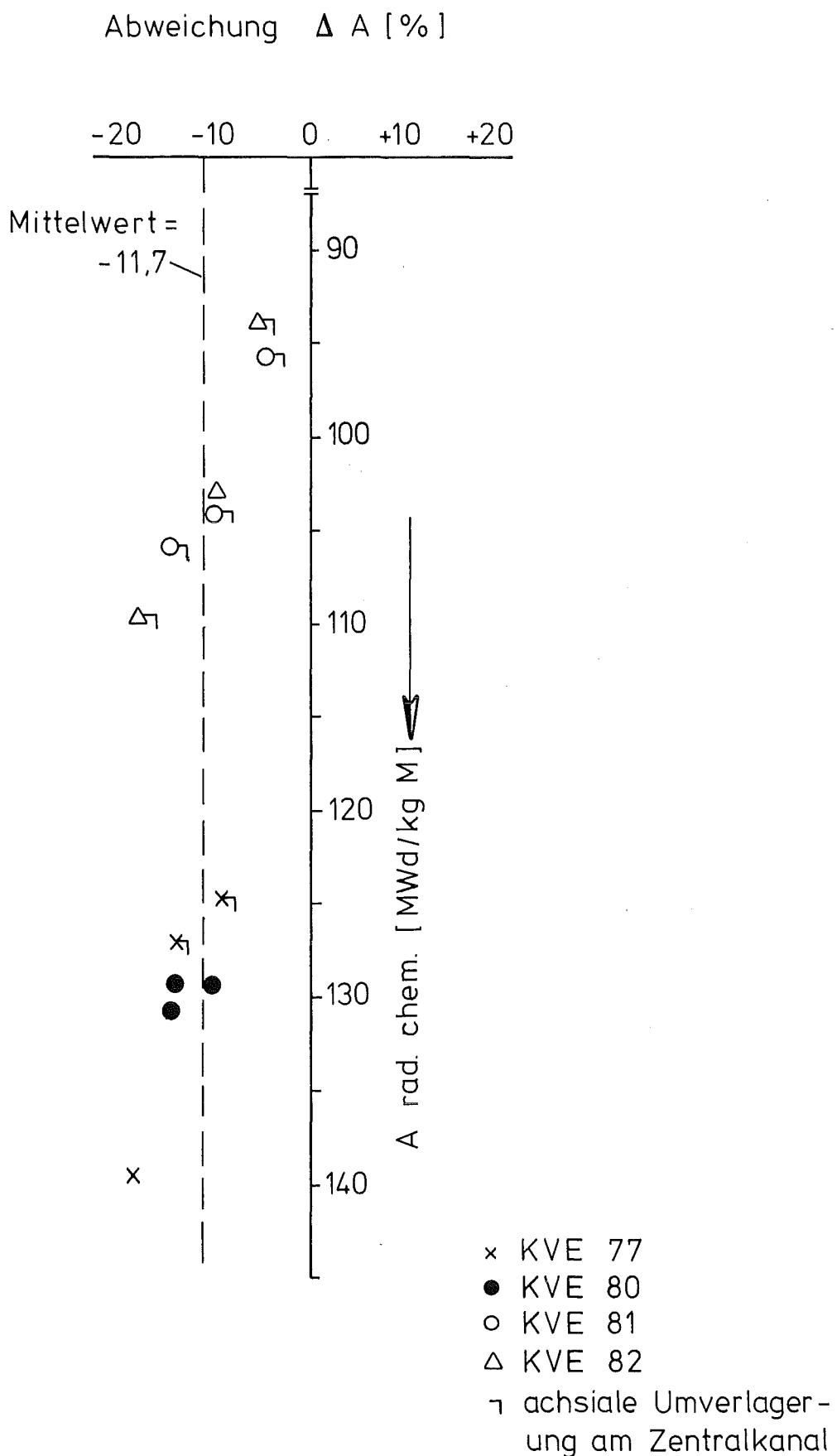
Beim Vergleich ist zu beachten, daß bei der hier abgehandelten Versuchsgruppe 5b ein Pu-Gehalt von 35 % gegeben war. Die Leistungsdichte war mit  $3,82 \text{ W/mm}^3$  um 40 % gegenüber der Versuchsgruppe 4b erhöht! Hieraus resultierte in Verbindung mit einem hohen O/M von ca. 2.0 ein starker Pu-Transport zur Stabachse. Die repräsentative Probennahme der Abbrandproben war hierdurch stark erschwert.

## 10. Modelltheoretische Untersuchungen

### 10.1 Thermische Analyse

Eine thermische Analyse der Prüflinge der Vg 5b wird in erster Linie zu klären haben, warum es bei einigen Prüflingen am Zentralkanal zu massiven Brennstoffverlagerungen kam und warum der Brennstoff bei diesen Prüflingen bis zum Rand hin stark verdichtet ist. Dabei ist diese Umstrukturierung gekoppelt mit starker Pu-Entmischung am Rand, deren Ursache in einem Masse-transport über eine Uran-Oxid-Gasphase liegen dürfte. Darauf wird am Ende des Kapitels näher eingegangen.

Damit nun solche Prozesse überhaupt stattfinden können, muß die Brennstofftemperatur an dieser Stelle im Laufe der Bestrahlung die  $1400 - 1500^\circ\text{C}$ -Grenze eine gewisse Zeit lang überschritten haben. Was das lokale Schmelzen an der Zentralkanalperipherie anbetrifft, ist es interessant zu wissen, ob dies schon zu Beginn der Bestrahlung aufgetreten ist oder aufgrund von Spaltgasfreisetzung und starker Pu-Umverteilung erst zu einem späteren Zeitpunkt im Laufe der Bestrahlung.



Die Tatsache, daß alle Prüflinge mit lokalem Schmelzen auch starke Pu-Umverteilung zeigen, deutet auf eine ursächliche Verknüpfung dieser beiden Phänomene hin.

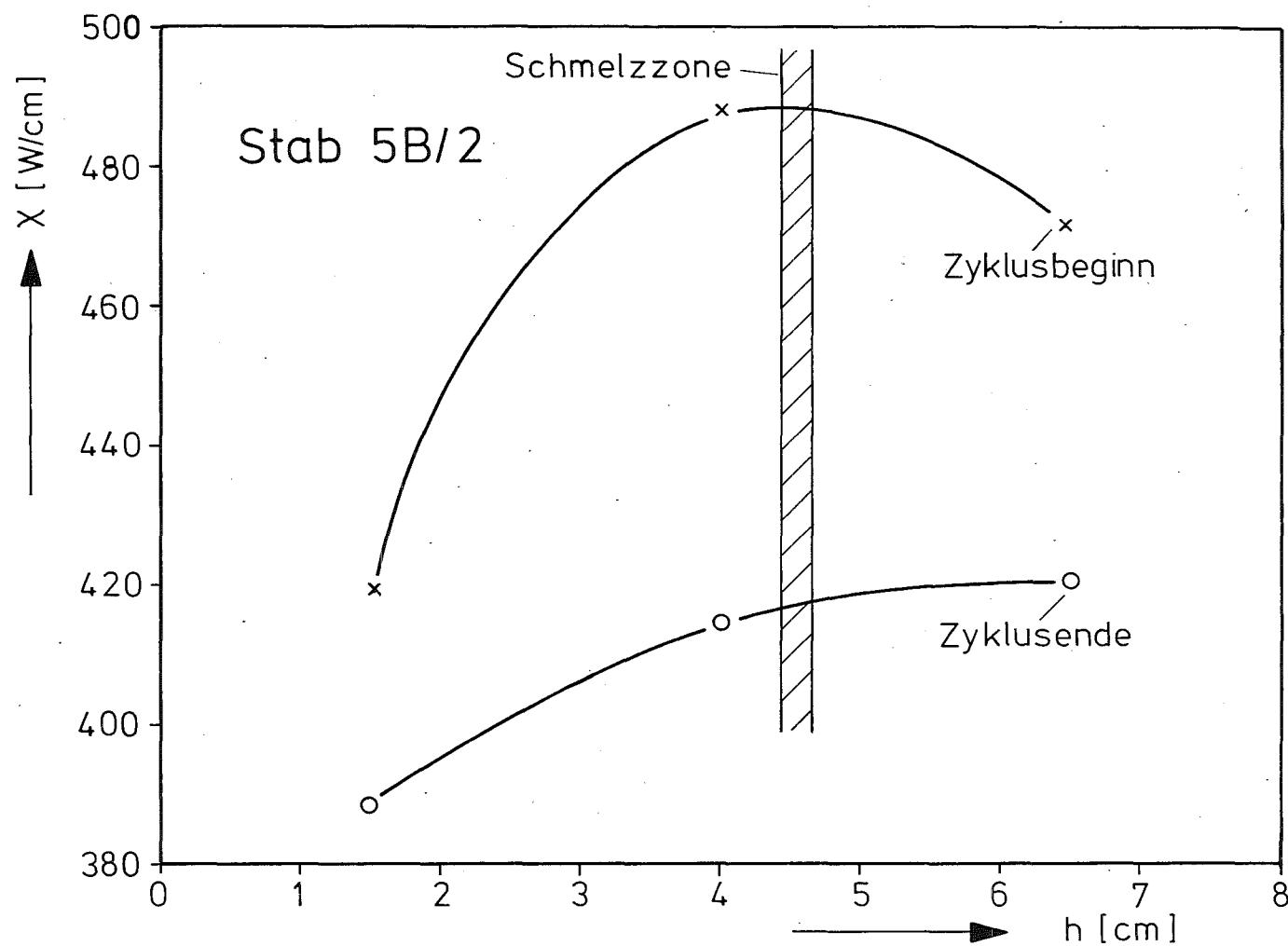
Einigen Aufschluß über diese Umverteilung durch Verdampfung und Kondensation aufgrund partiellen Schmelzens kann man nun aus den Hülldehnungen gewinnen (siehe Abb. 13 bis 17). Bei den Prüflingen, bei denen diese Umlagerungen stark auftraten, findet man durchweg stark ausgeprägte Minima und Maxima in der Verteilung der Hülldehnung. Die Stellen partiellen Schmelzens mit Verdampfung lassen sich diesen Minima zuordnen (in den Abb. 13 bis 17 sind diese Stellen durch Schraffierung angedeutet). Liegt nun das Minimum an der Nulllinie oder nur wenig darüber (falls die Partien der Hülle in der Nachbarschaft sehr stark gedehnt sind), dann kann man annehmen, daß die Umverteilung schon vor der mechanischen Wechselwirkung zwischen Hülle und Brennstoff auftrat. Beispiele sind die beiden Prüflinge 5B2 und 5B3 des KVE 77 (Abb. 13).

Aus Rechnungen mit SATURN 1e<sup>+</sup>) für diese beiden Prüflinge folgt nun, daß der Spalt schon im 2. Zyklus geschlossen war (siehe Abb. 28). Daraus muß man schließen, daß mit großer Wahrscheinlichkeit diese beiden Prüflinge schon während des Anfahrens an den bestimmten Stellen überhitzt wurden, was zu den Spaltstoffverlagerungen führte. (Diese Prüflinge wurden im 1. Zyklus mit abnehmender Leistung gefahren).

In Abb. 21 wurde für den Prüfling 5B2 die axiale Verteilung der Stableistung zu Beginn und am Ende des 1. Zyklus aufgetragen (Kurven (1) und (2)). Gleichzeitig wurde noch der Bereich der partiellen Umverteilung am Zentralkanal durch Schraffierung angedeutet. Man sieht, daß diese Schmelzzone - wie erwartet - mit dem Maximum der Stableistung zu Beginn des 1. Zyklus zusammenfällt.

+) —————

Die verwendeten Materialbeziehungen und -daten sind im Anhang I aufgeführt.

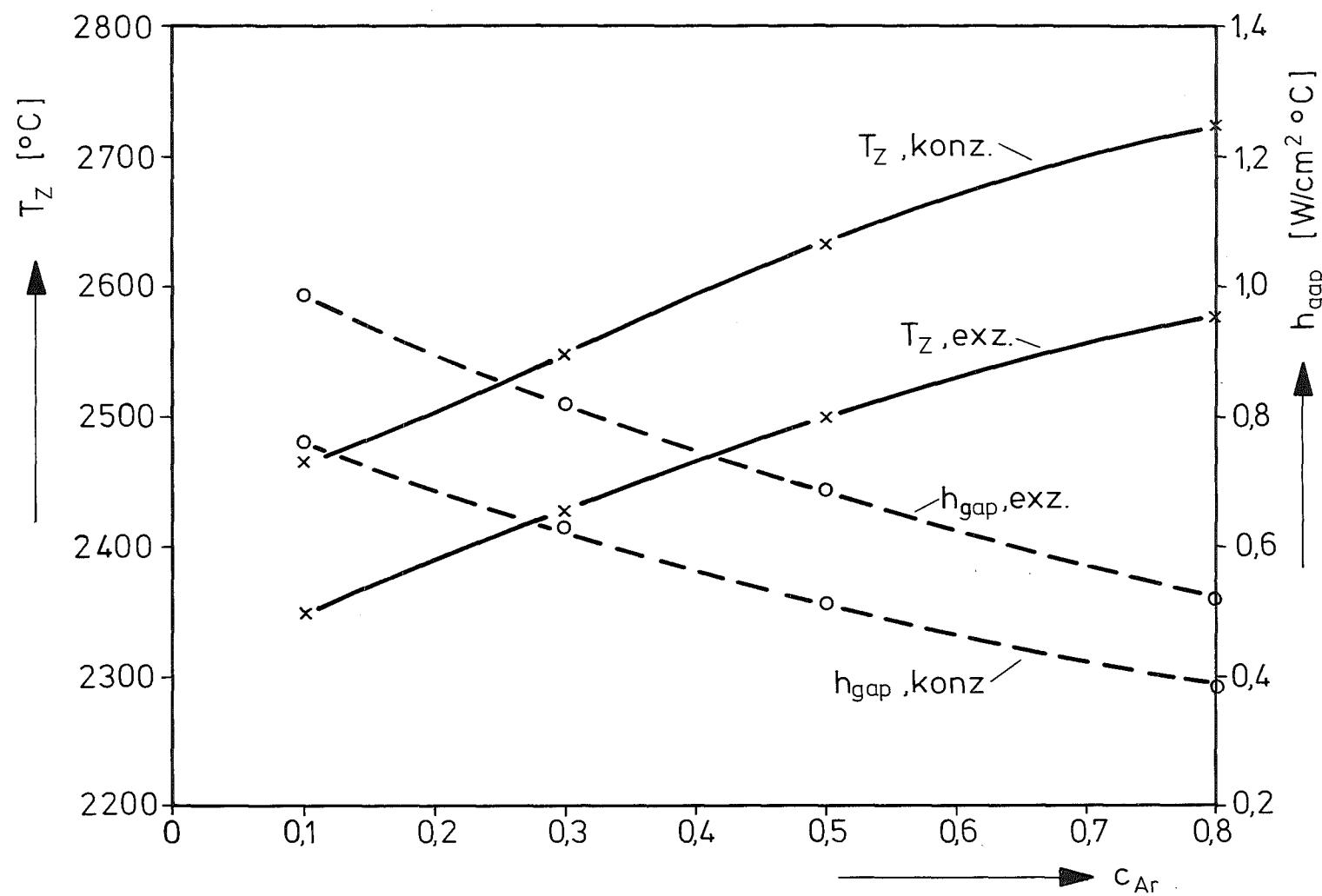


Nach der Spezifikation für die Vg 5b ist der gesamte Gasgehalt der Tabl-  
lettensäule eines Prüflings nicht höher als  $0,95 \text{ Ncm}^3$ . In die Prüflinge  
wurden ca.  $0,7 \text{ Ncm}^3$  Reinst-Helium eingefüllt. Bei den hohen Temperaturen  
die schon beim Anfahren im Brennstoff geherrscht haben, wird ein beträcht-  
licher Teil des im Brennstoff enthaltenen Gases freigesetzt, was zu einer  
starken Verschlechterung des Wärmedurchgangs im Spalt führt. Unter ungün-  
stigen Umständen muß man damit rechnen, daß die Gasbindung nur noch aus  
ca. 50 % He besteht und der Rest aus verunreinigenden Gasen, die modell-  
mäßig durch Argonäquivalente ersetzt werden. Dies gilt umso mehr, als auch  
durch das Verschweißen der Hüllrohre die Gasbindung zusätzlich verunreinigt  
werden kann.

Für verschiedene Anteile an verunreinigenden Gasen in der Bindung wurden  
die Temperaturverteilungen im Stab 5B2 an der Stelle maximaler Stablei-  
stung berechnet und zwar einmal für den Fall, daß die Tablette konzen-  
trisch liegt und zum anderen, daß sie exzentrisch an der Hülle anliegt.  
Damit erhält man eine obere und untere Marke für die Zentraltemperatur.

In Abb. 22 ist diese Temperatur als Funktion der Konzentration an ver-  
unreinigenden Gasen  $C_{\text{Ar}}$  zusammen mit der Wärmedurchgangszahl  $h_{\text{gap}}$  auf-  
getragen. Für  $C_{\text{Ar}} = 0,5$  liegt die Zentraltemperatur in der Nähe der Schmelz-  
temperatur  $T_s$  ( $T_s \approx 2650^\circ\text{C}$  für einen Pu-Anteil von 35 %). Ein weiterer  
Effekt, der zu einer Erhöhung der Zentraltemperatur führt, ist das Nach-  
sintern, das bei diesen hohen Temperaturen zu erwarten ist. Nach Rechnungen  
mit SATURN 1e führt eine Verdichtung des Brennstoffs von 86 % auf 90 % zu  
einem Anstieg der Zentraltemperatur um ca.  $150 - 200^\circ\text{C}$ .

Weiterhin ist zu berücksichtigen, daß die Thermoelemente in den KVE's nur  
auf  $\pm 5\%$  genau anzeigen; d.h. die Stableistung kann tatsächlich um ca.  
 $25 \text{ W/cm}$  höher gelegen haben, was wiederum einen  $\Delta T_z$  von ca.  $75^\circ\text{C}$  ent-  
spricht. Bei Berücksichtigung dieser Unsicherheiten kann im Prüfling 5B2  
partielles Schmelzen während des Anfahrens nachgewiesen werden. Man muß  
also den Schluß ziehen, daß bei Stableistungen höher als ca.  $470 \text{ W/cm}$   
die Spezifikation von  $0,1 \text{ Ncm}^3/\text{g}$  Gasgehalt zu weit gefaßt ist, wenn  
Schmelzen mit Sicherheit ausgeschlossen werden soll.



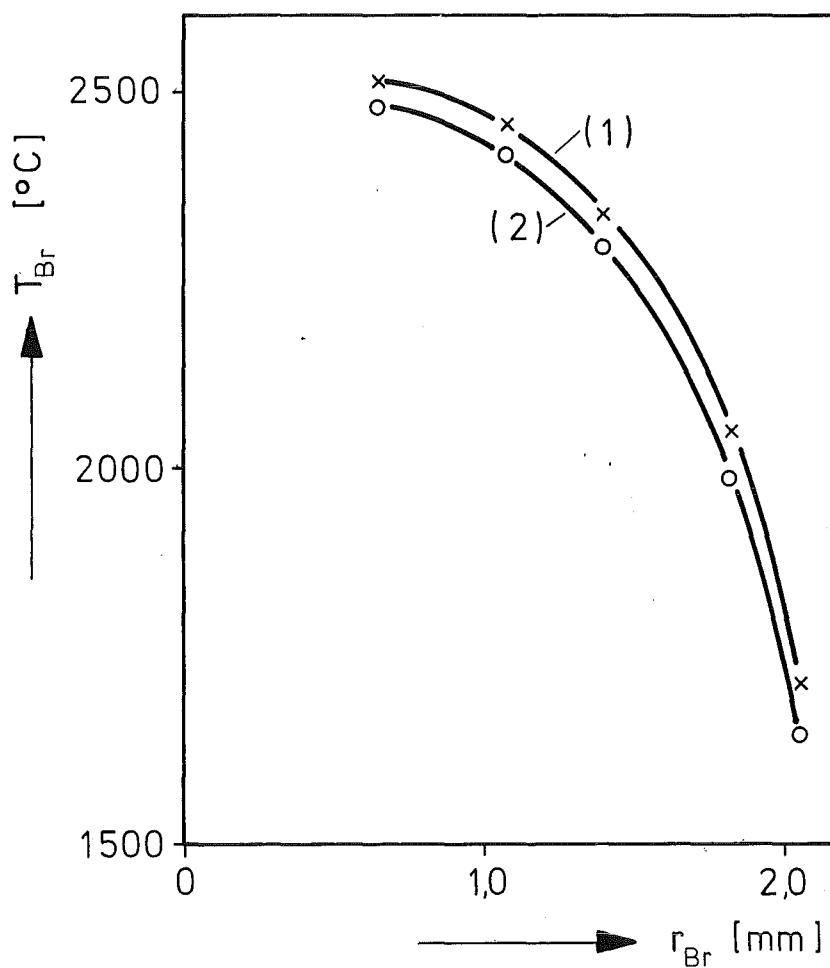
Durch Spaltgasfreisetzung wird der Wärmedurchgang im Spalt im Laufe des 1. Zyklus noch merklich schlechter. Trotz abnehmender Leistung kommt es bei Prüfling 5B2 zu einem Anstieg der Brennstoffrandtemperatur auf ca. 1600 - 1700 °C je nach Anteilen an verunreinigenden Gasen zu Beginn der Bestrahlung in der Bindung. In Abb. 23 ist für 5B2 die Temperaturverteilung im Brennstoff zu Ende des 1. Zyklus aufgetragen ( (1):  $C_{He} = 0,7$  (2):  $C_{He} = 0,9$ ): Die Randtemperatur liegt also hoch genug, um die starke Umstrukturierung des Brennstoffs bis zum Rand hin erklären zu können.

Unklar ist nun, warum es am Zentralkanal des Prüflings 5B3 schon zu Beginn der Bestrahlung partiell zu so starken Umverteilungen kam. Wie aus Abb. 24 zu ersehen ist, liegt die Schmelzzone weder im Gebiet des Stableistungsmaximums beim Anfahren, noch ist an dieser Stelle die Stableistung hoch genug, um die massiven Umverteilungen auch nur annähernd erklären zu können.

Die Prüflinge des KVE 80 zeigen "normales" Verhalten, also weder partielles Schmelzen noch starke Umstrukturierung. Sie wurden während der ersten Zyklen mit sehr niedriger Stableistung gefahren. Für den Prüfling 5B6 wurde die Temperaturverteilung zu Beginn des 1. Zyklus in Abb. 25 aufgetragen und zwar unter der Annahme, daß die Tabletten konzentrisch liegen. Die Rechnung wurde für  $C_{Ar} = 0,3$  durchgeführt, ein Wert, der bei diesen niedrigen Temperaturen wahrscheinlich nicht überschritten wird. Die Zentraltemperatur liegt bei ca. 1700 °C und die Brennstoffrandtemperatur bei ca. 900 °C. Es sind also zu Beginn der Bestrahlung weder partielles Schmelzen noch starke Pu-Umverteilung zu erwarten.

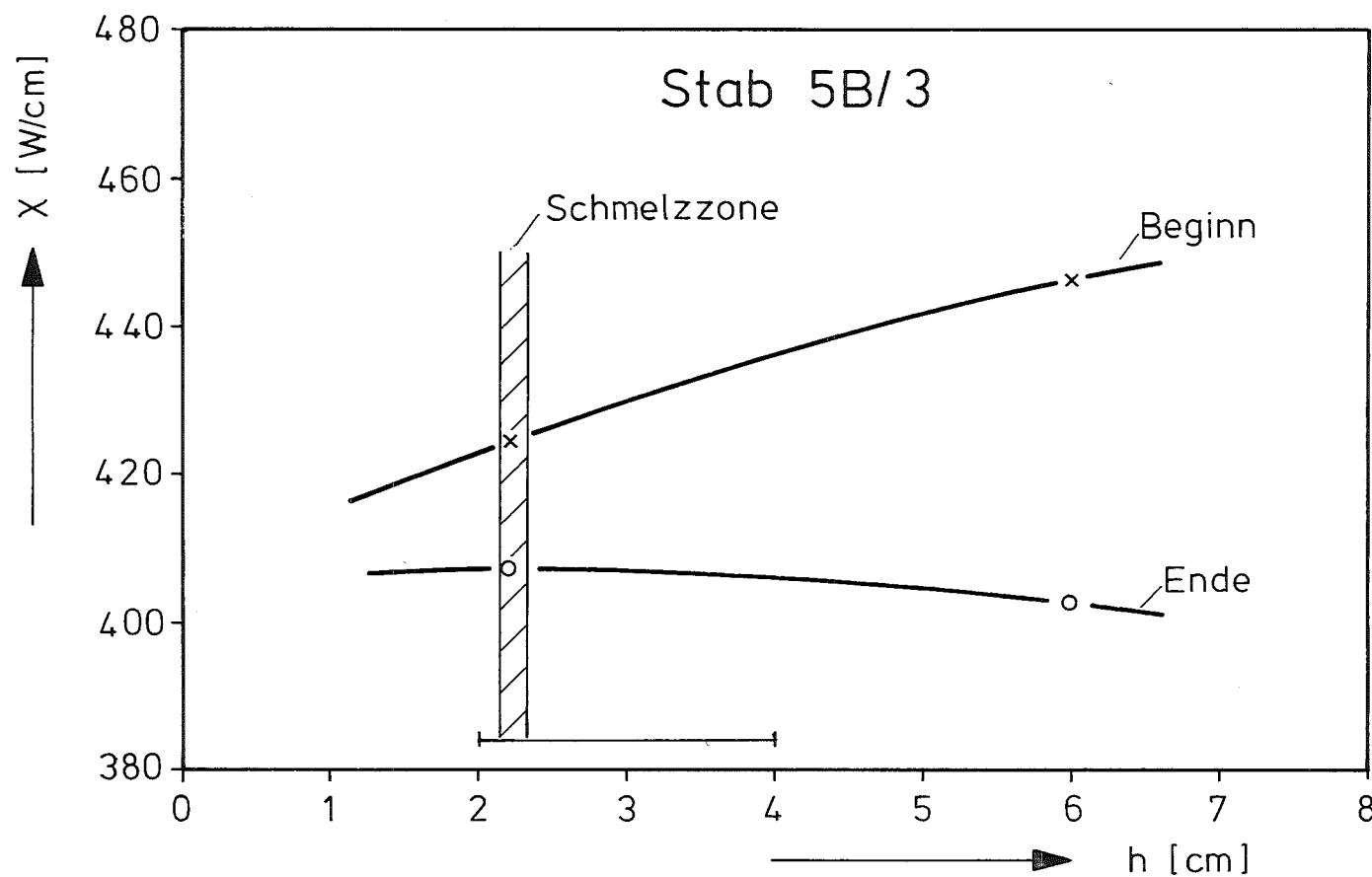
Während des 8. und 9. Zyklus liegen die Stableistungen für den KVE 80 über 400 W/cm. Höchstwahrscheinlich kam es aber hier zu starken Wechselwirkungen zwischen Brennstoff und Hülle; eine Vermutung, die einmal durch die Leistungsgeschichte und zum anderen durch die großen Hüllehnungen nahegelegt wird.

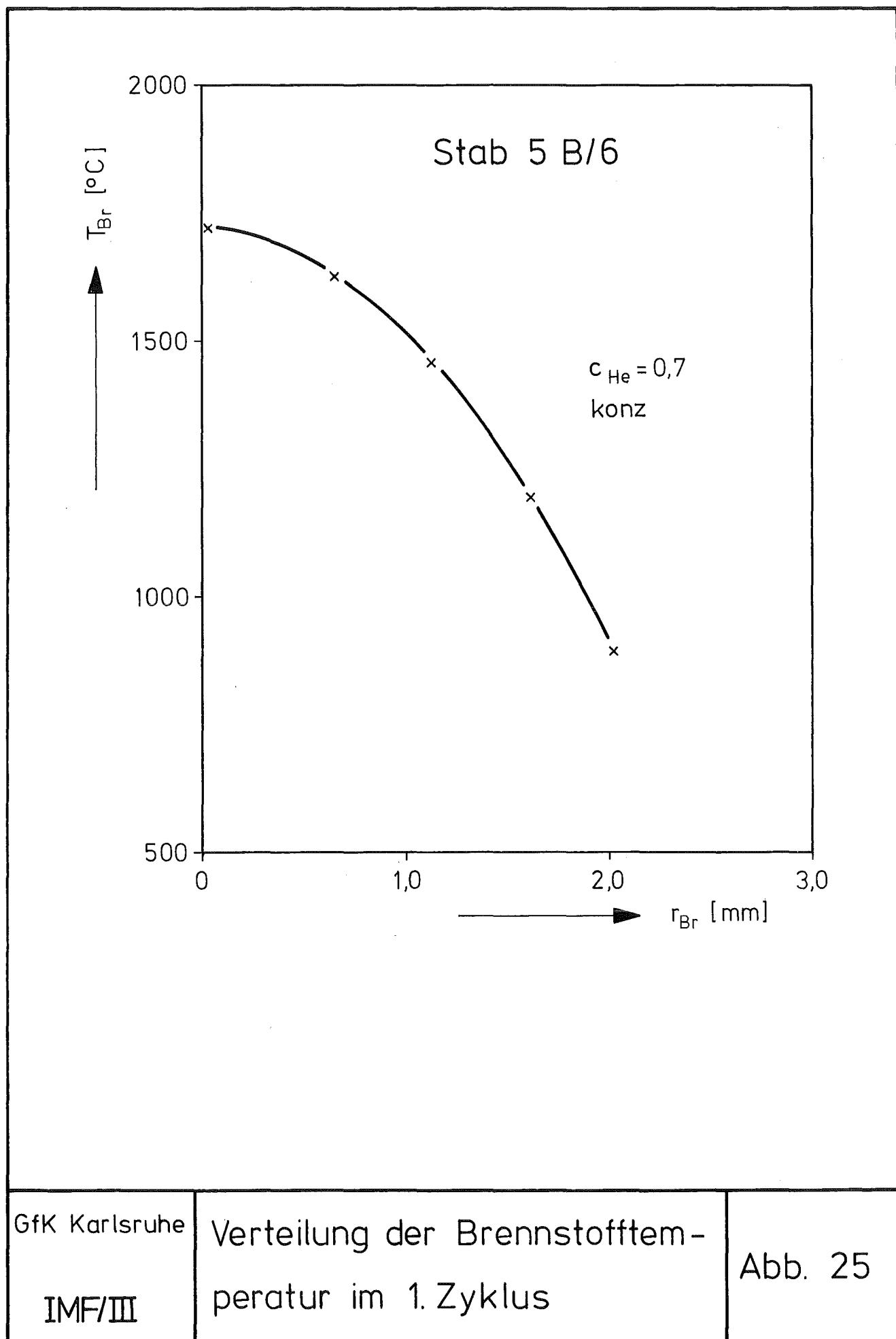
Stab 5B/2



(1)  $\text{con}_{\text{He}} = 0.7$

(2)  $\text{con}_{\text{He}} = 0.9$



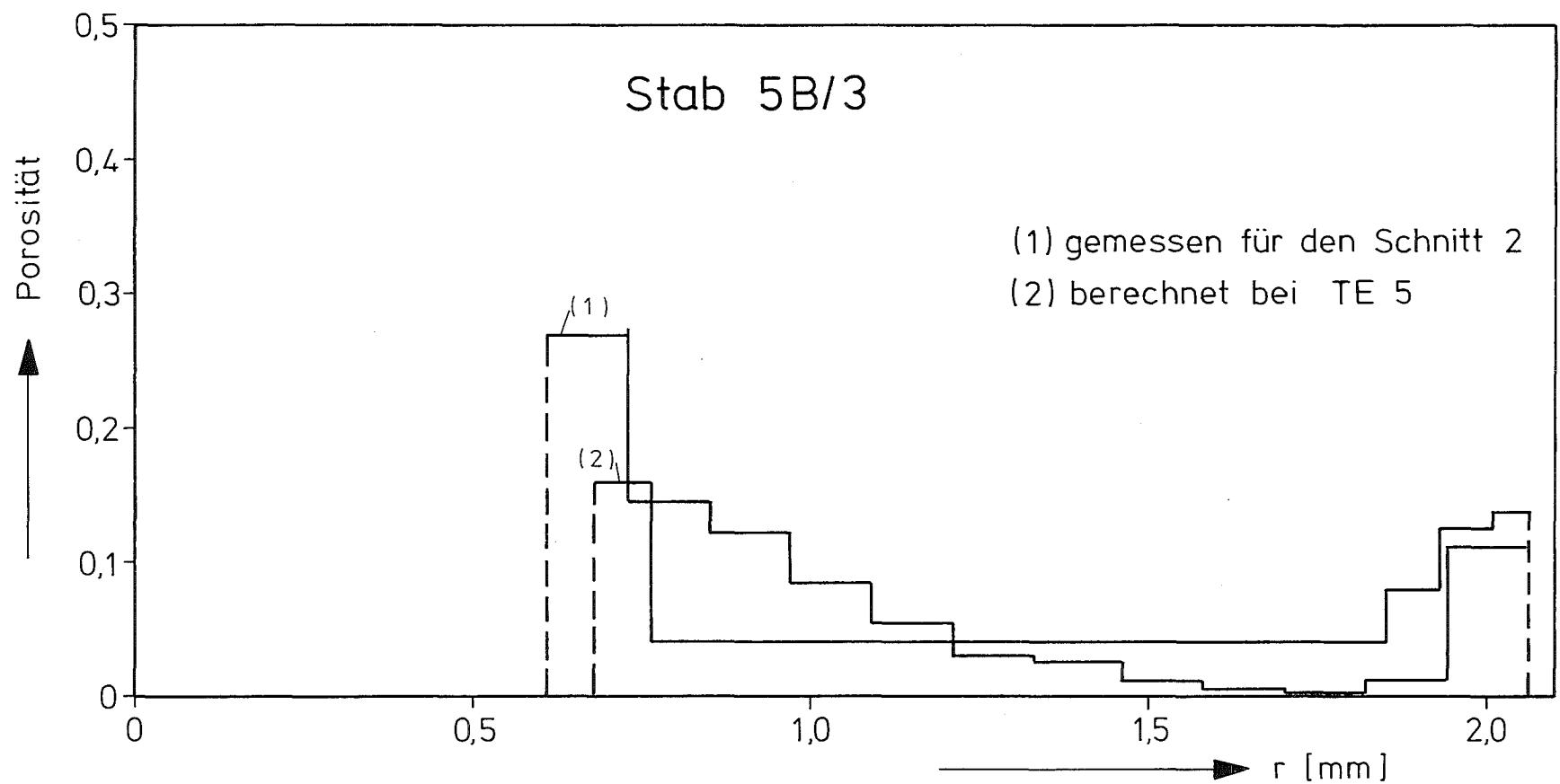


Ein hoher Kontaktdruck führt zu einer starken Verbesserung des Wärmedurchgangs und dies wiederum zu niedrigen Brennstofftemperaturen.

Von den Prüflingen des KVE 81 und KVE 82 hatte nur 5B/8 zu Beginn der Bestrahlung eine hohe Leistung, so daß nur bei diesem Prüfling die Schmelztemperatur beim Anfahren möglicherweise überschritten wurde. Aus dem Verlauf der Hüllehnung (siehe Abb.15) folgt aber, daß auch bei diesem Prüfling die massive Umverteilung erst viel später und zwar nach mechanischer Wechselwirkung eingetreten sein kann. Die Ursache der starken Umlagerungen bei allen diesbezüglichen Prüflingen der KVE 81 und 82 muß also zum einen in der Verschlechterung des Wärmeübergangs durch Spaltgasfreisetzung und in ganz massiver Pu-Umverteilung in axialer und radia-ler Richtung und der damit verbundenen Schmelzpunktserniedrigung des Mischoxids gesucht werden. Eine weitere Schmelzpunktserniedrigung findet durch die Löslichkeit einiger Spaltprodukte wie Cs und Te statt.

Die von SATURN 1e berechneten Porositätsprofile stimmen mit den gemessenen relativ gut überein. In Abb.26 ist das für den Prüfling 5B3 am TE5 berechnete Porositätsprofil (Kurve (2) ) zusammen mit dem gemessenen (Kurve (1) ) eingetragen.(Die Messung wurde an dem Schnitt (2) durchgeführt). Auch am Zentralkanal findet man eine befriedigende Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment. Die äußeren Zonen des Prüflings 5B 3 sind sehr hoch verdichtet, die Porosität liegt zum Teil unter 1 %. Durch die starke Pu-Entmischung in den äußeren Zonen wird hier sehr wenig Spaltgas erzeugt. Zudem ist hier der Temperaturgradient am steilsten. Dies alles mag die hohe Verdichtung erklären.

Das in SATURN 1e verwendete Modell hat eine obere Grenze für die erreichbare Verdichtung, nämlich 96 %. Deshalb sinkt hier die Porosität nicht unter 4 % und somit kann die beobachtete hohe Verdichtung nicht durch das Modell simuliert werden.



- 67 -

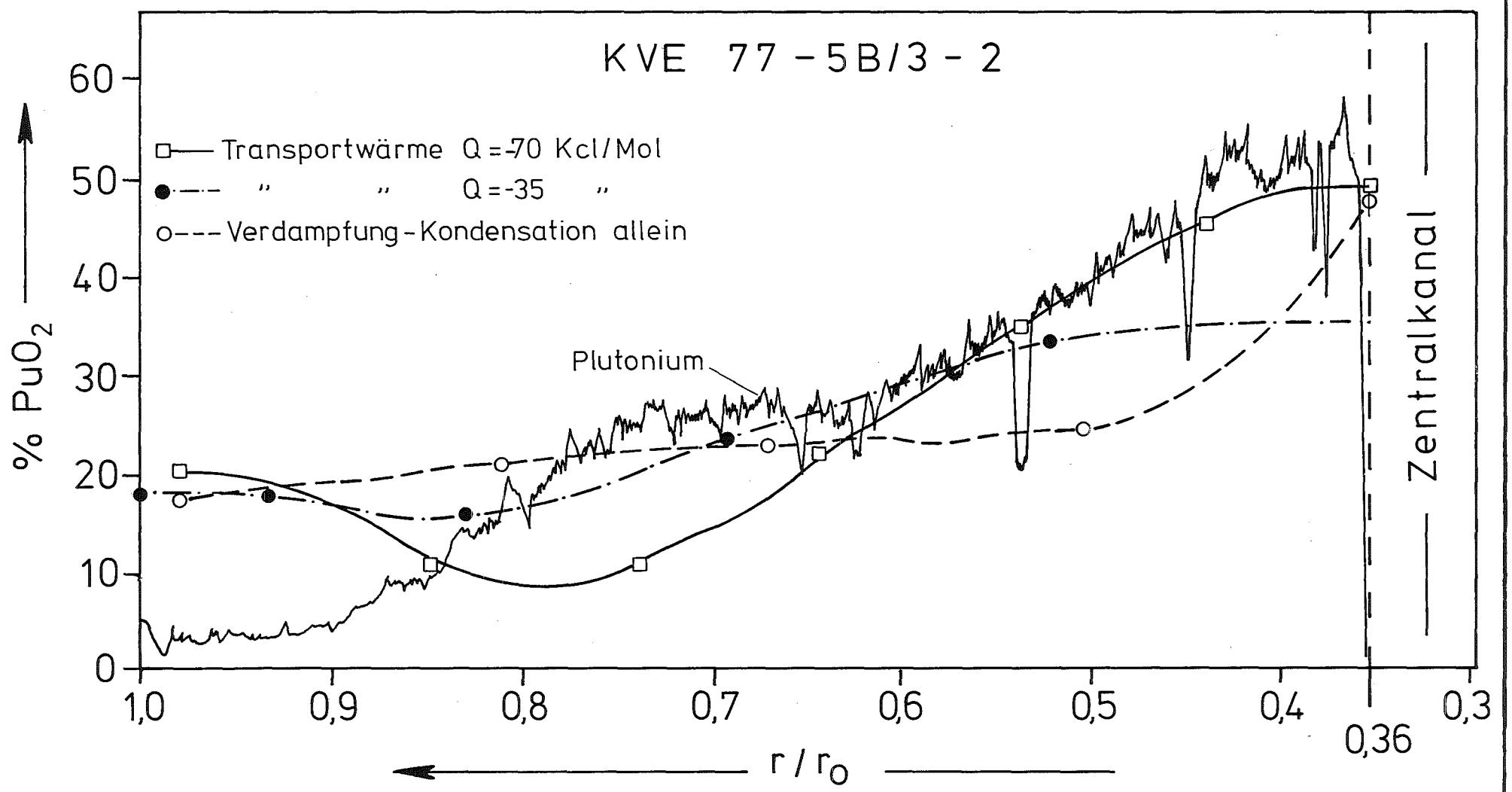
Mit Hilfe des Rechenprogramms POUMEC und PUDIREFF /21 wurde in /22/ die Pu-Umverteilung für den Prüfling 5B3 (Schnitt 2) berechnet. Die Grundlagen der in den Programmen POUMEC und POUDIFF verwendeten Modelle sind aus /17, 18, 19, 20/ übernommen. Es werden dabei die beiden wichtigsten Mechanismen bei der Pu-Umverteilung berücksichtigt, nämlich die Verdampfung-Kondensation und die Thermodiffusion. Die Ergebnisse der Rechnungen sind in Abb. 27 zusammen mit dem experimentellen Befund /23/ eingetragen.

Die gemessene Pu-Verteilung läßt sich grob in drei Zonen einteilen

1. eine äußere Zone mit einem Pu-Gehalt von ca. 5 %,
2. eine mittlere Zone mit einem Pu-Gehalt von  
25 - 30 % und
3. eine innere Zone, im Anschluß an den Zentralkanal,  
mit ca. 55 % Pu-Gehalt.

Die äußere Zone ist gleichzeitig hoch verdichtet (Porosität z.T. < 1 %). Wie die Rechnungen zeigen (siehe Abb. 27) kann eine so starke Verarmung an Pu durch mikroskopische Verdampfungs-Kondensationsprozesse allein nicht erklärt werden. Sämtliche Stäbe mit massiven Brennstoffumlagerungen, d.h. Stäbe, bei denen im Laufe der Bestrahlung die Schmelztemperatur überschritten wurde, zeigen nun dieses Phänomen der starken Verdichtung und Pu-Abreicherung in der äußeren Zone. Daraus muß man schließen, daß der äußere Ring hochdichten Materials höchstwahrscheinlich durch Verdampfen aus der Schmelze (Zentrum) und anschließender Kondensation an der kälteren Zone im Brennstab entstanden ist. Da Uran-Oxid über der Schmelze einen wesentlich höheren Partialdruck hat als Plutonium-Oxid, ist damit die Pu-Abreicherung in der äußeren Zone erkläbar. Im Laufe der Bestrahlung wird dann der scharfe Phasenübergang durch Festkörperdiffusion etwas verwischt. Dies würde dann erklären, warum man bei den Stäben, die nur einen Zyklus lang bestrahlt wurden, einen ganz steilen Abfall in der Pu-Verteilung findet.

KVE 77 - 5B/3 - 2



Damit ist nun die starke Pu-Anreicherung in der inneren Zone im wesentlichen nicht auf Thermodiffusion zurückzuführen, sondern einfach eine Folge der Abreicherung von Uran. Für verschiedene Werte der Transportwärme wurde nun für den Prüfling 5B3 die Pu-Verteilung berechnet. Für einen Wert von  $Q = -70 \text{ kcal/Mol}$  erreicht man in der inneren Zone eine gute Anpassung der berechneten Werte an die gemessenen.

In /18/ wurde für  $Q$  ein Wert von ca.  $-30 \text{ kcal/Mol}$  gefunden. Mit einem Wert dieser Größe kann nun die Pu-Anreicherung der inneren Zone nicht richtig beschrieben werden. Dies ist eine weitere Stütze für den oben angedeuteten Transportmechanismus.

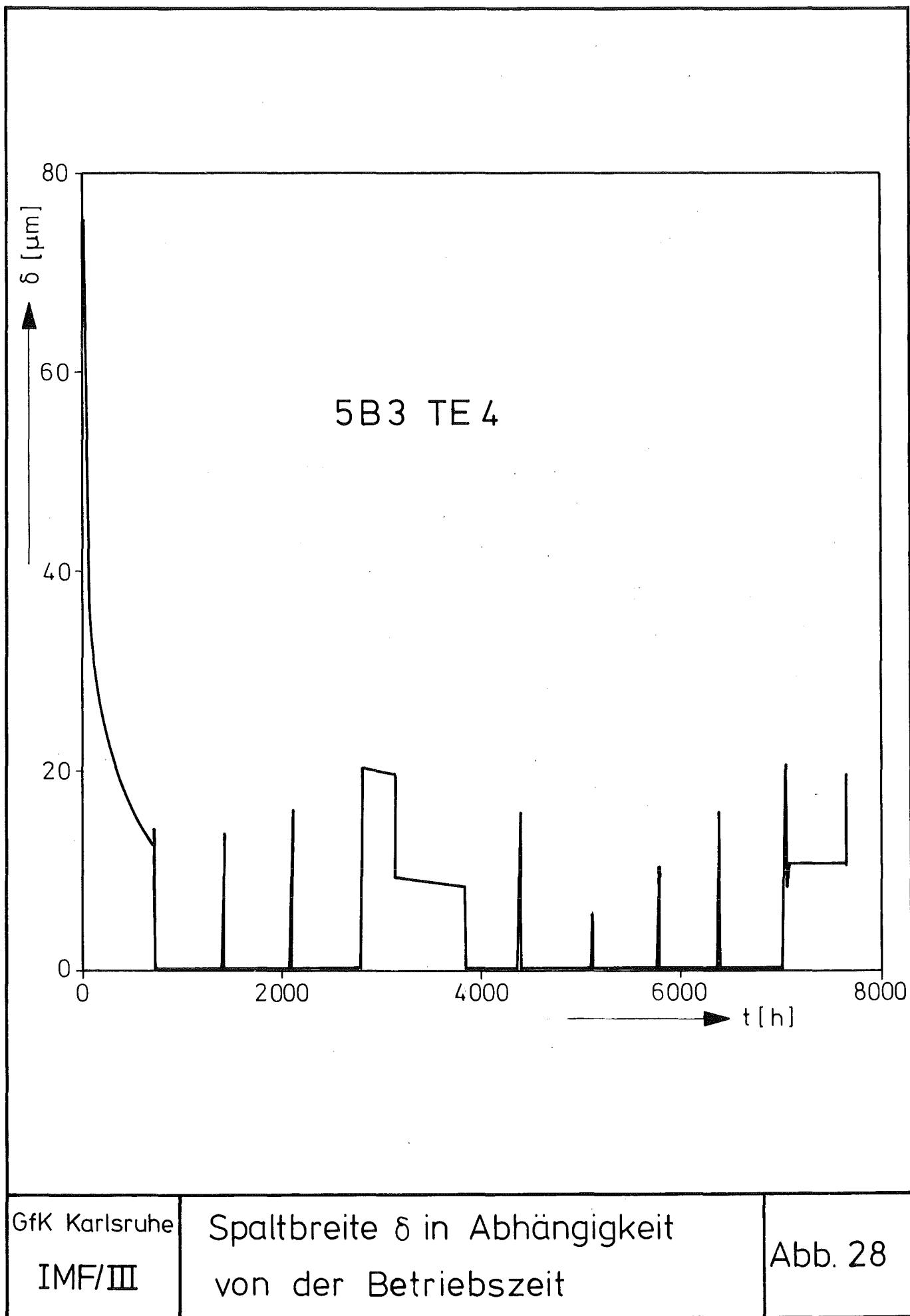
## 10.2 Mechanische Analyse

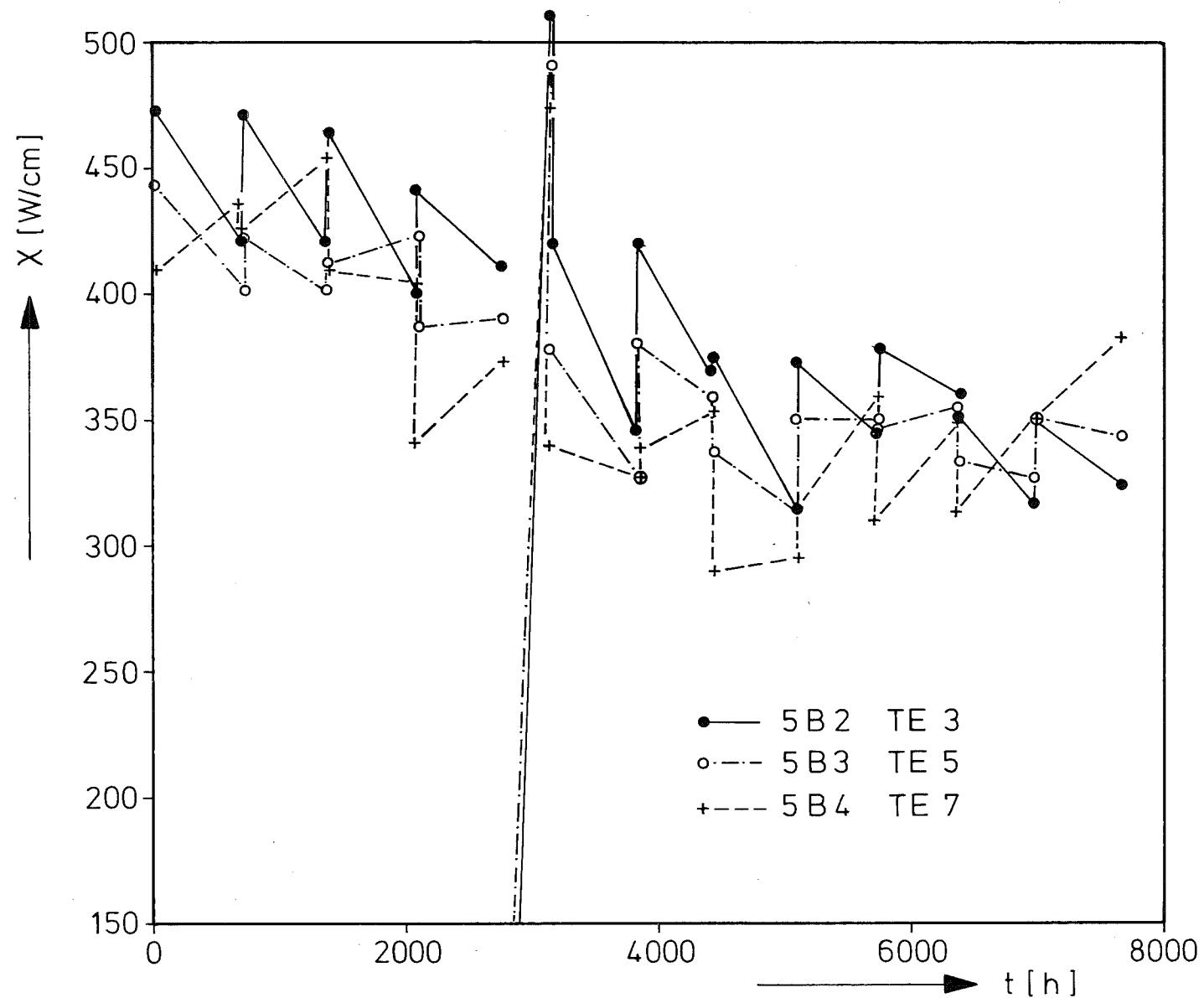
An den Stäben wurden z.T. beträchtliche Hüllverformungen festgestellt und zwar fand man für  $\Delta d/d$  Werte bis zu 1,5 %. Da aufgrund der niedrigen Hülltemperaturen von ca.  $400^\circ\text{C}$  Kriechvorgänge keinen Beitrag in nennenswerter Größe liefern können (dies wird auch durch Rechnungen mit SATURN 1e bestätigt), bleiben zur Erklärung nur die plastischen Verformungen. (Unter plastischen Verformungen sollen im folgenden nur die augenblicklichen Verformungen durch Überschreiten der Streckgrenze verstanden werden). Die Hüllverformungen einiger Stäbe sind stark strukturiert mit ausgeprägten Minima und Maxima. Die Ursache für die Existenz dieser Minima liegt im massiven Brennstoffverlagerungen an den jeweiligen Stellen. Dies wurde explizit für die Stäbe 5B2 und 5B3 nachgeprüft. Die Bereiche der partiellen Umverteilung liegen hier kurz unterhalb den Stellen minimaler Hülldehnung. Die die Brennstoffverlagerung begleitenden Verschiebungen des Brennstoffs führen örtlich zu starken Belastungen der Hülle, was die Existenz einiger Maxima erklärt.

Die Minima der Hülledehnungen von 5B2 und 5B3 liegen direkt über der Nulllinie (Brennstabdurchmesser vor der Bestrahlung). Die Umverteilung hat aller Wahrscheinlichkeit nach vor der Dehnung der Hülle stattgefunden. (Daß das Minimum von 5B2 leicht höher liegt, kann durch die allgemein stärkere Hülledehnung erklärt werden). Nach Abb.28 kommt nun in 5B3 der Brennstoff während des 2. Zyklus in Kontakt mit der Hülle. Die Brennstoffverlagerung an der Zentralkanalperipherie muß also schon im 1. Zyklus aufgetreten sein. Dies ist eine Bestätigung für die Richtigkeit der thermischen Analyse.

In KVE 77 und KVE 81 findet man große Unterschiede in den Hülledehnungen der verschiedenen Prüflinge. Wenn man die über den Zyklus gemittelten Stableistungen der drei Prüflinge 5B2, 5B3 und 5B4 miteinander vergleicht, dann ist nicht einzusehen, warum der Prüfling 5B4 fast keine Hülledehnung erfahren hat, während die Hüllen von 5B2 und 5B3 stark gedehnt wurden: Entscheidend ist der zeitliche Verlauf der Stableistung in den einzelnen Zyklen (siehe Abb.29) / 24,25 /.

Falls zu Ende eines Zyklus Kontakt zwischen Brennstoff und Hülle vorliegt, kann sich der Brennstoff beim Hochfahren der Leistung im neuen Zyklus bis zum alten Leistungsniveau annähernd frei ausdehnen. Liegt der Startwert der Stableistung im neuen Zyklus höher als der Endwert im alten Zyklus, dann führt der zusätzliche Leistungssprung  $\Delta X = X_{\text{Beginn}}^{\text{neu}} - X_{\text{Ende}}^{\text{alt}}$  zu einer mechanischen Belastung der Hülle, falls deren thermische Ausdehnung geringer ist als die des Brennstoffs. Ein weiterer Leistungsanstieg über die Zyklusdauer hinweg führt zu keiner nennenswerten Hüllebelastung, was durch Rechnungen mit SATURN 1e nachgewiesen wird /24/. In diesem Fall hat der Brennstoff immer genügend Zeit, die Spannungen durch Kriechen abzubauen, falls die Brennstofftemperatur hoch genug ist.

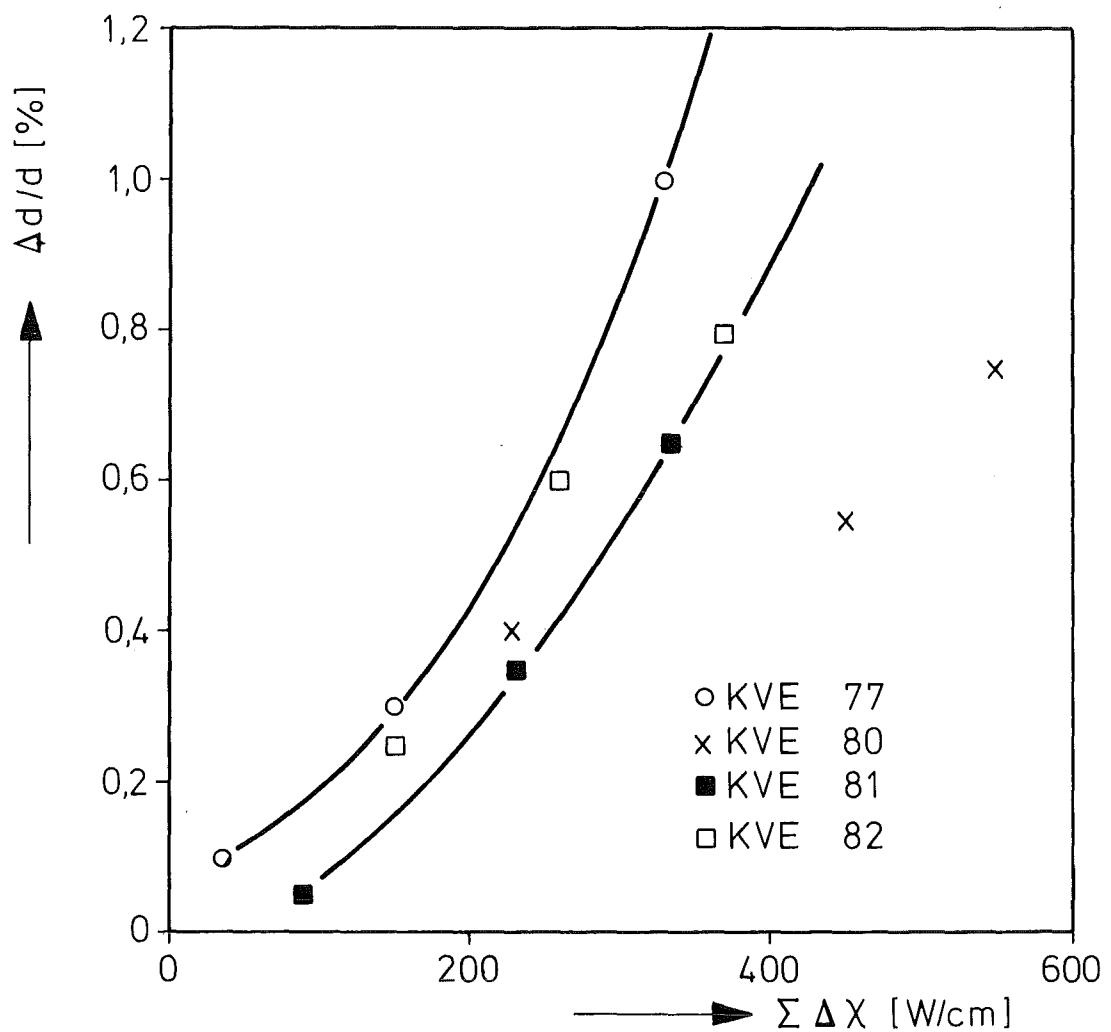


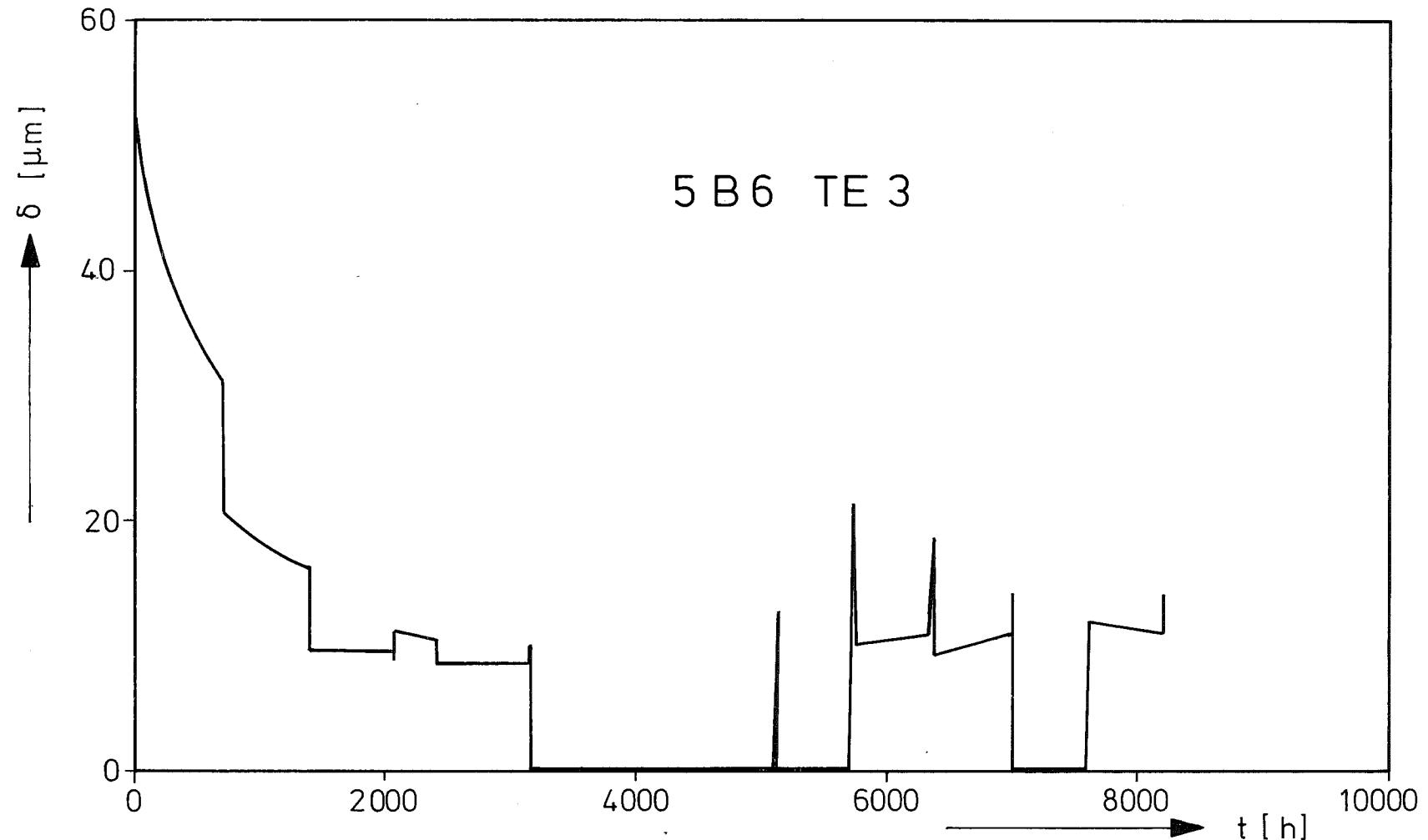


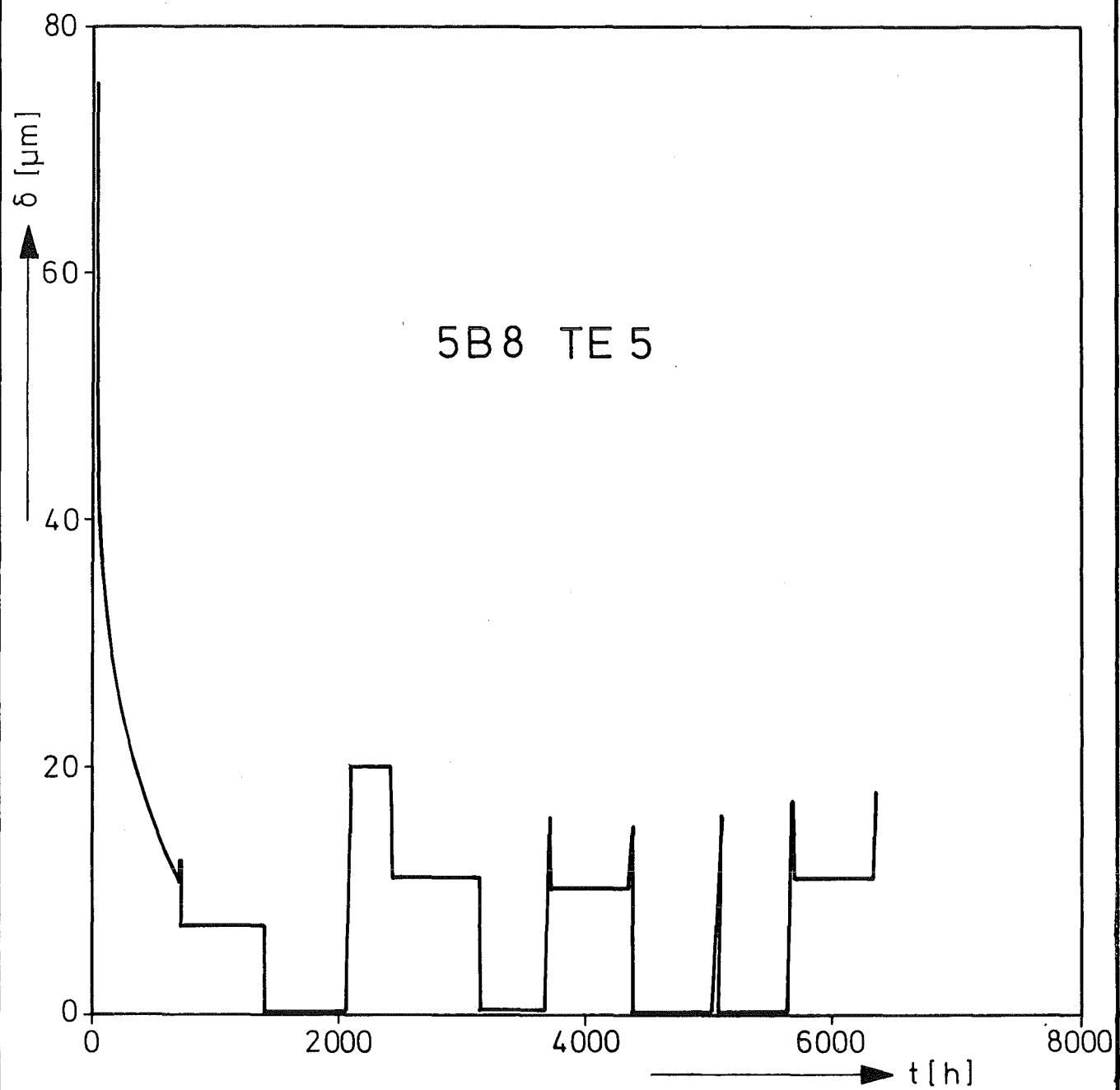
In /24/ wurde festgestellt, daß höchstwahrscheinlich ein eindeutiger Zusammenhang besteht zwischen der absoluten Größe der Hülldehnung und der Summe der Stableistungssprünge (über alle Zyklen betrachtet), bei denen der Spalt geschlossen war. Die großen Unterschiede in den Hülldehnungen der Prüflinge eines bestimmten KVE lassen sich also auf die unterschiedliche zeitliche Struktur des Stableistungsverlaufs zurückführen ( Abb. ). Langzeitvorgänge wie Schwellen spielen also - wenn überhaupt - nur eine sehr geringe Rolle bei der mechanischen Wechselwirkung in den Brennstäben. Der Beitrag des Schwellens ist in erster Linie ein indirekter ; von Bedeutung für die mechanische Wechselwirkung ist er hauptsächlich über die Rißausheilung. Die Tatsache, daß die Hülldehnungen auf die thermische Differenzdehnung zurückgeführt werden können, führt zu einer Abschätzung der Hülldehnungen, die im folgenden entwickelt werden soll.

Für drei Stäbe aus verschiedenen KVE's (5B2, 5B6 und 5B8) wurden mit SATURN 1e die Bestrahlungsgeschichten nachgerechnet, um eine Vorstellung davon zu bekommen, über wieviel Zyklen hinweg Kontakt zwischen Brennstoff und Hülle vorlag. In den Abb. 28, 31 und 32 sind die berechneten Spaltbreiten in Abhängigkeit von der Betriebszeit aufgetragen.

Es zeigt sich nun, daß die mechanische Wechselwirkung zwischen Brennstoff und Hülle nicht durch Rißausheilung aufgrund thermischer Ausdehnung und Schwellen allein beschrieben werden kann, wie es dem Rißmodell in SATURN 1 zugrunde liegt. Die Rechenergebnisse von SATURN 1e ergeben keine Wechselwirkung. Man muß also schließen, daß in den Stäben der Vg 5b noch andere Rißausheilungsmechanismen wirksam sein müssen, wie Diffusion, Verdampfung-Kondensation, Verhaken von Rissen usw. Alle diese Effekte bewirken, daß der Brennstoff sich stärker nach außen schiebt und schließlich in mechanische Wechselwirkung mit der Hülle tritt.







Die maximale Hüllbelastung für einen Zyklus, bei dem Kontakt vorliegt, lässt sich folgendermaßen bestimmen:

Es sei der Spalt schon im kalten Zustand geschlossen, und die Risse seien vollständig ausgeheilt (der Brennstoff hat dann seine maximale mechanische Festigkeit).

Für die drei Prüflinge 5B3, 5B6 und 5B8 wurden nun auf diese Weise für einige Zyklen die Hüllspannungen berechnet. Die Ergebnisse für die Tangential- und Äquivalenzspannung sind in den Abb. 33, 34 und 35 zu sehen.

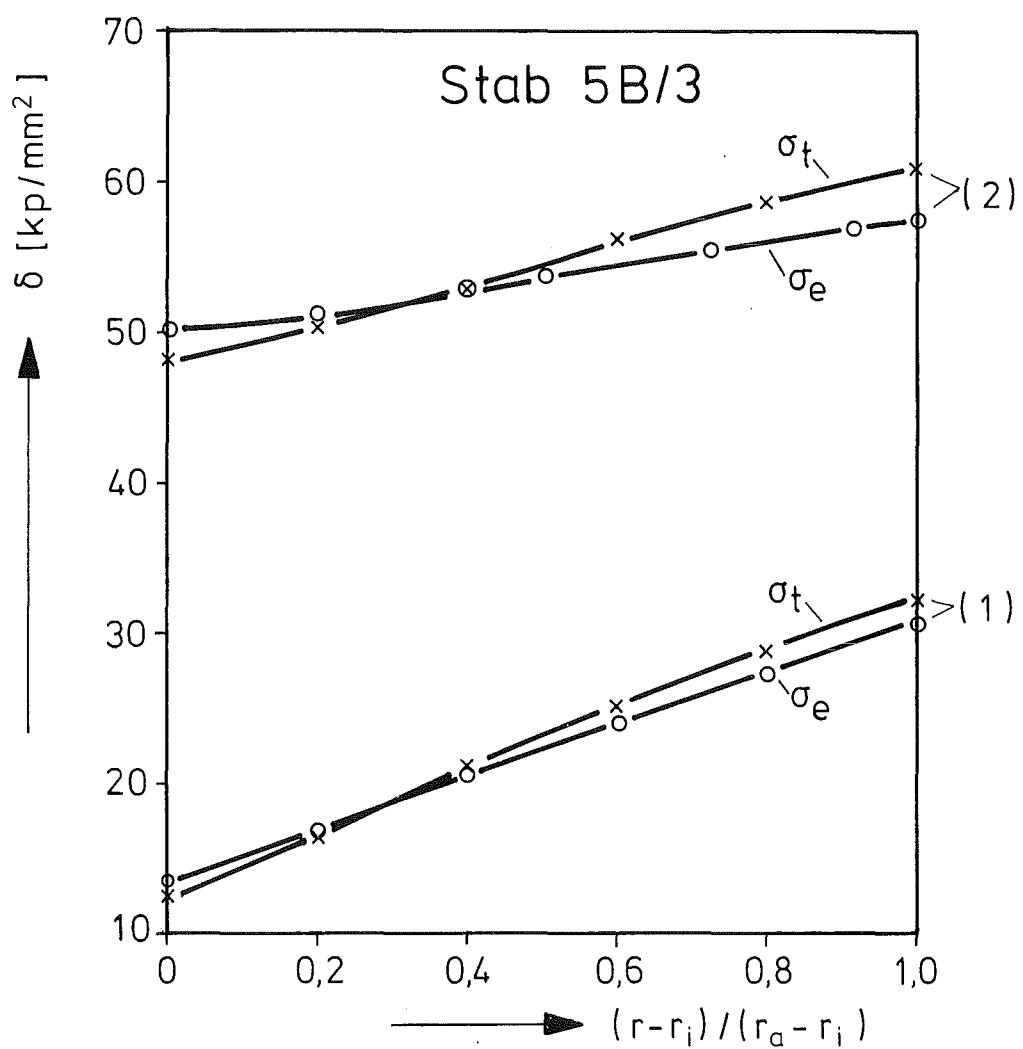
Der sich aufbauende Kontakt ist insbesondere eine Funktion der thermischen Differenzdehnung zwischen Brennstoff und Hülle und der Brennstofftemperatur. Ist die letztere Größe hoch, dann werden im Brennstoff über Kriechvorgänge die Spannungen sehr schnell abgebaut.

Deshalb wurden bei den Prüflingen 5B3 und 5B6 jeweils zwei repräsentative Zyklen gerechnet, je einmal mit niedriger und einmal mit hoher Leistung. Die berechneten Hüllspannungen liegen z.T. weit über der Streckgrenze von  $\sigma_s = 17 \text{ kp/mm}^2$ . Dabei ist jedoch zu bedenken, daß in SATURN 1 nur elastische Verformungen der Hülle berechnet werden. In Wirklichkeit wird nach Überschreiten der Streckgrenze die Hülle plastisch verformt, wodurch ein weiteres Anwachsen der Hüllspannungen begrenzt wird. Das heißt aber, daß die berechneten Werte der Hüllspannungen nicht den tatsächlichen Verhältnissen entsprechen können, doch können sie dazu dienen, die aufgetretenen plastischen Verformungen abzuschätzen.

Unter der Annahme, daß die Hüllspannungen die Streckgrenze nicht, oder zumindest nicht wesentlich überschreiten können, lässt sich aus der Kesselformel die Druckbelastung des Hüllrohrs berechnen,

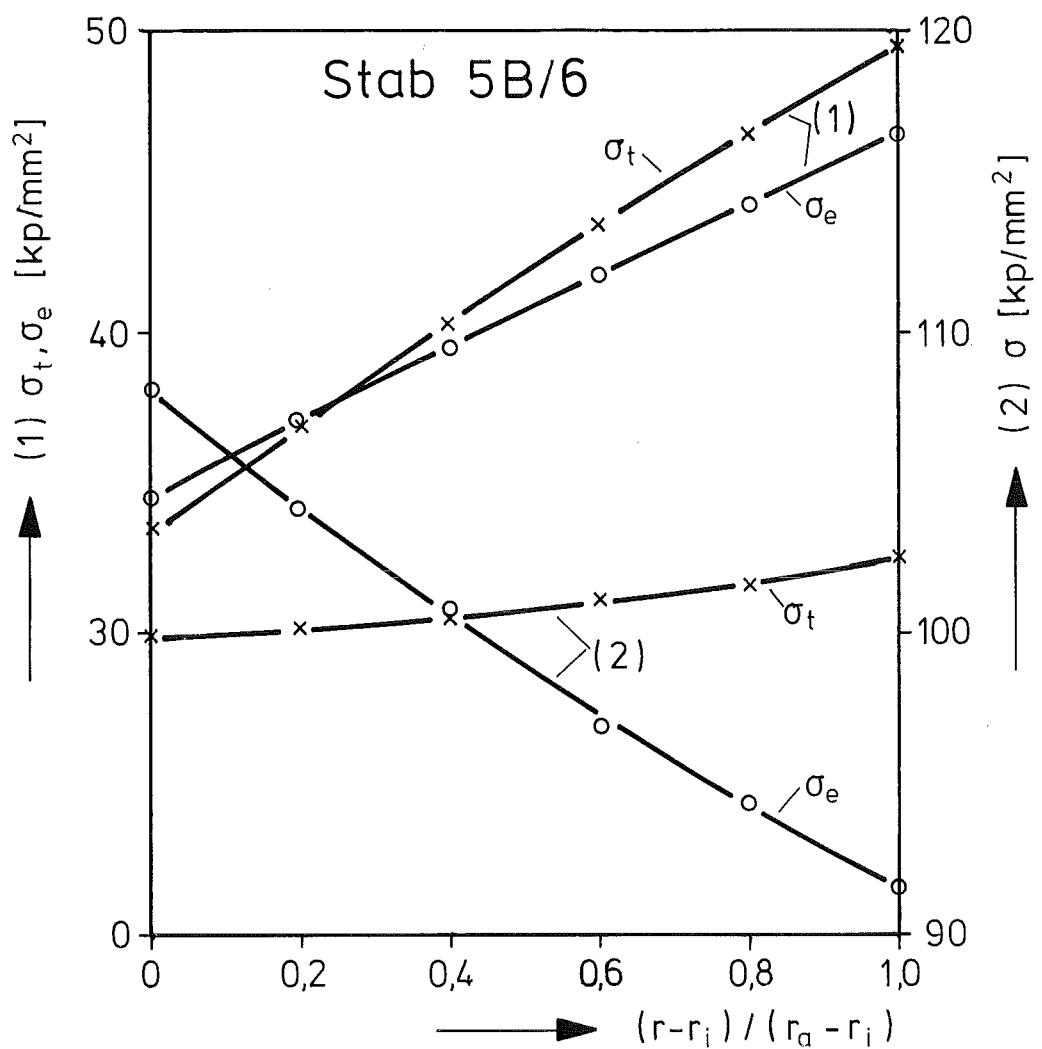
$$p = \frac{\sigma_s \cdot d}{r_a}$$

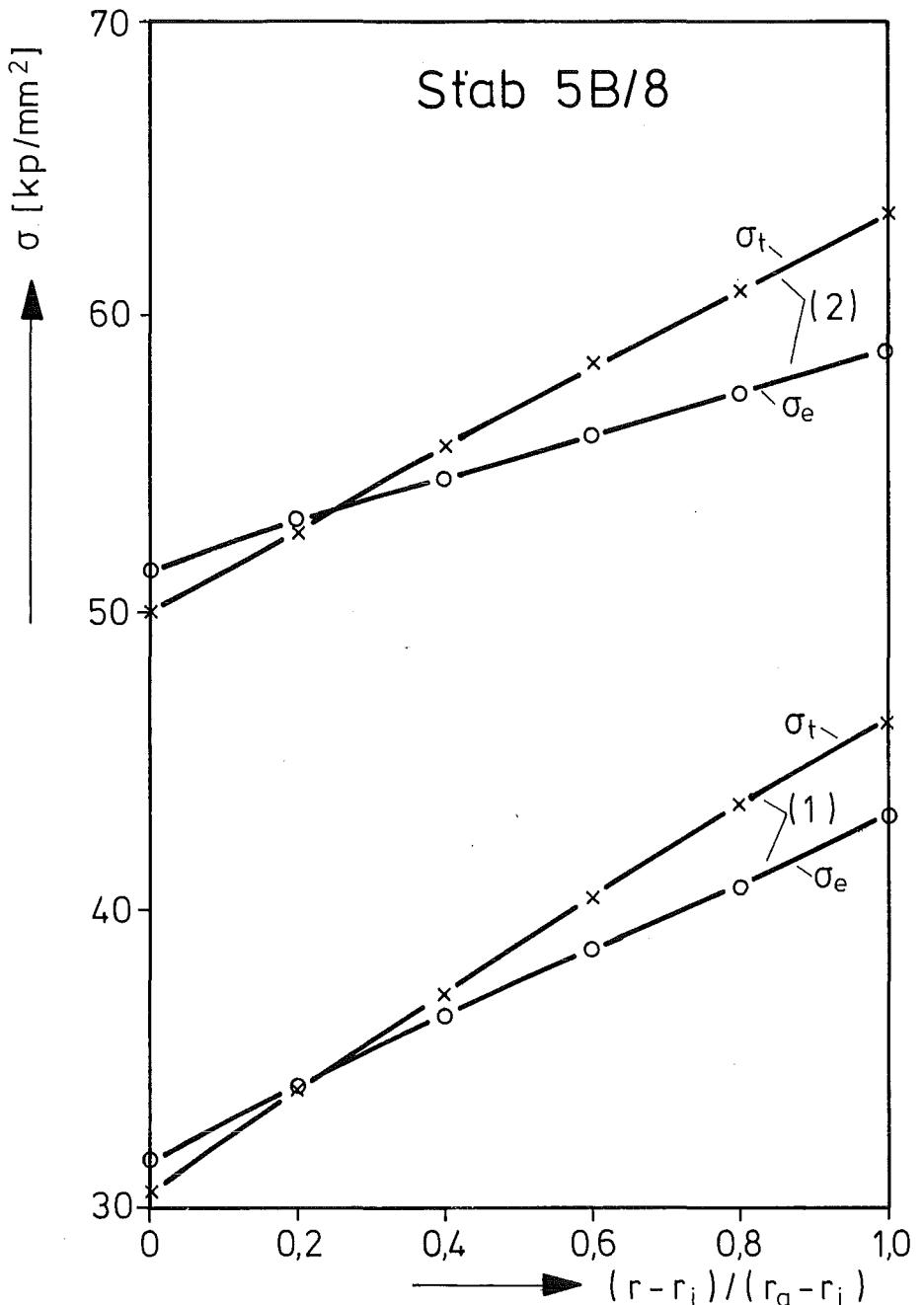
wobei  $d$  die Hülldicke ist und  $r_a$  der Hüllaußenradius. Im Falle der Stäbe von Vg 5b erhält man für  $p$  einen Wert von ca. 230 at.



(1) Beginn 2. Zyklus

(2) Beginn 7. Zyklus





(1) Beginn 3.Zyklus TE 5

(2) Beginn 8.Zyklus TE 5

Die Spannungs-Dehnungskurve des Hüllmaterials habe einen Verlauf wie in Abb. 36. In erster Näherung sind dann die plastischen Verformungen gegeben durch

$$\Delta\epsilon_{p1} = \Delta\sigma / E$$

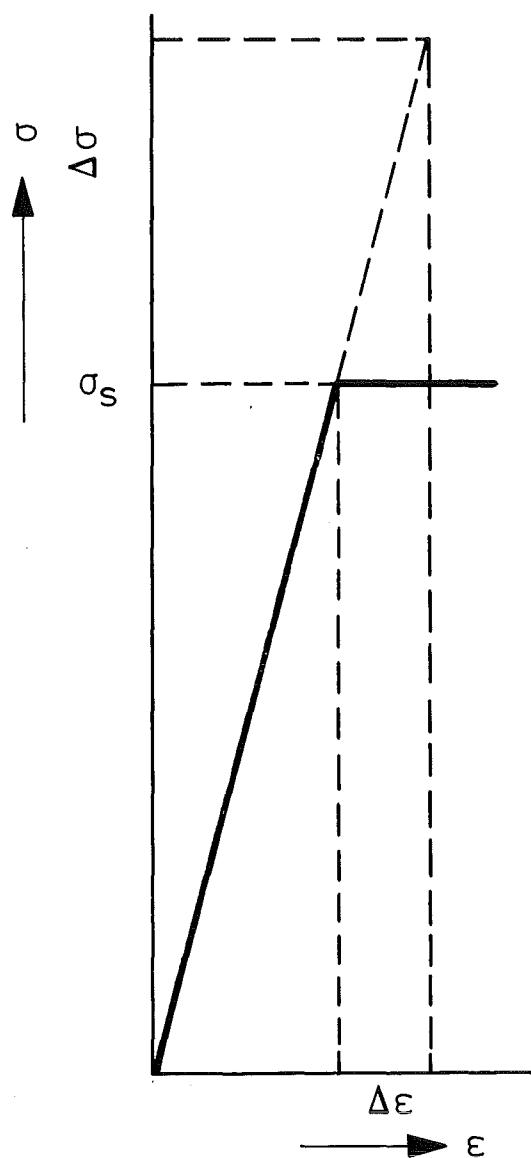
Dabei ist E der Elastizitätsmodul des Hüllmaterials und  $\Delta\sigma = \sigma - \sigma_s$ . Die Dehnungen müssen dabei natürlich klein sein. Den Wert aus obiger Gleichung multiplizieren wir noch mit der Zahl der Zyklen, bei denen Kontakt vorlag und so erhalten wir eine Abschätzung für die gesamte plastische Verformung des Hüllrohrs. Für die Prüflinge 5B3 und 5B6 wurde noch geeignet gemittelt bezüglich Zyklen verschiedener Stableistung.

In der Tabelle 17 sind nun die geschätzten Hülldehnungen mit den gemessenen verglichen. Erwartungsgemäß liegt der Schätzwert über dem gemessenen. Den größten Unsicherheitsfaktor stellt die Zahl der Zyklen dar, bei denen Kontakt herrschte. Zum einen sind in SATURN le die plastischen Hülldehnungen nicht berücksichtigt, und dies führt zur Überschätzung der Kontaktzeit. Andererseits sind aber viele Effekte nicht berücksichtigt (s.o.), die bedingen, daß der Brennstoff stärker nach außen geschoben wird.

Ein weiterer Punkt ist die mechanische Festigkeit des Brennstoffs während der Bestrahlung. Daß die Schätzwerte für die Hülldehnungen zu groß ausgefallen sind (insbesondere für 5B3 und 5B6), liegt daran, daß entweder die Kontaktzeit oder die mechanische Festigkeit des Brennstoffs überschätzt wurde.

Tabelle 17: Vergleich zwischen geschätzten und gemessenen Werten der Hülldehnungen einiger Prüflinge

Prüfling	geschätzter Wert für Hülldehnung (%)	gemess. max. Hülldehnung (%)
5B 3	1,1	0,7
5B 6	1,3	0,7
5B 8	0,8	0,7



## 11. Schlußbetrachtung

Nach Abschluß der Nachuntersuchung der Kapselversuchsgruppe 5b, die die Erprobung von 18 "dünnen" ursprünglich für den sog. FR3, einem schnellen Hochfluß-Testreaktor, vorgesehenen Oxid-Stäben diente, kann folgendes festgestellt werden:

1. Die vorgesehenen maximalen Stableistungen von 400 W/cm bzw. 500 W/cm wurden erreicht.
2. Die angestrebten Abbrände von 10, 30, 90 und 120 MWd/kgMe wurden erreicht.
3. Die Prüflinge blieben äußerlich intakt.
4. Die Hülldehnungen  $\Delta d/d$  der verschiedenen Prüflinge streuen beträchtlich und zwar von ca. 0,1 % bis 1,5 %. Dies ist eine Folge der unterschiedlichen Leistungsgeschichten, speziell der gefahrenen Leistungssprünge.
5. Bedingt durch die extreme Leistungsdichte und des hiermit verbundenen steilen Temperaturgradienten kam es zu starken U/Pu-Entmischungen und zu z.T. massiven Brennstoffumlagerungen an der Zentralkanal-Peripherie.
6. Durch die zeitweise hohen Brennstoffrandtemperaturen von mehr als 1500 °C kam es in Verbindung mit Porenwanderung bei einigen Prüflingen zu einer starken radialen Umverteilung von Spaltprodukten und Pu in Richtung der Stabachse. Dies ist gekoppelt mit einer hohen Verdichtung des Brennstoffs in den äußeren Zonen.

7. Es konnten keine nennenswerten Reaktionen der Hülle mit dem Brennstoff beobachtet werden. Dies lässt sich durch die niedrigen Hülltemperaturen erklären.
8. Was die Spaltgasfreisetzung anbetrifft, so erbrachte diese Versuchsgruppe folgenden Sachverhalt:

Die Freisetzungsraten sind sowohl von der Brennstofftemperatur als auch vom Abbrand abhängig. Die beobachteten Freisetzungsraten von größer 90 % sind eine Folge der hohen Leistungsdichte und damit der hohen Brennstofftemperatur. Derart hohe Freisetzungsraten wurden bei den Karlsruher Kapselbestrahlungen bisher nicht beobachtet.

Abschließend lassen sich folgende Feststellungen treffen:

Ein Stabkonzept mit vergleichsweise kleinem Durchmesser ist realisierbar. Hierbei müssen die Betriebsbedingungen allerdings hinsichtlich des Anfahrens und Zyklierens scharf spezifiziert werden.

## 12. 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  $\gamma$ -Profil (Energiebereich 400 – 1700 keV),
  - b) differentielles  $\gamma$ -Profil für Teilenergiebereiche  
(isotop-spezifisch, z.B. für Zr/Nb-95 700 bis 790 keV,  
Cs/Ba-137 640 bis 680 keV).

- Keramografische Übersicht:

- a) technische Zeichnung des Prüflings (Maßstab 1:1) mit Markierung der Schnittebenen,
- b) keramografische Übersichtsaufnahmen entsprechend der Schnittzahl
- c)  $\alpha$ -Autoradiografie zur Darstellung der Pu-Verteilung nach Ablauf der Bestrahlung,
- d)  $\gamma$ -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 Brennstab-prüflings.

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.

Literatur:

- /1/ D. Freund:  
Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung der Oxidbrennstabproben im FR2, KFK 1376, Mai 1972
- /2/ M. Fischer et.al.:  
Durchführbarkeitsstudie für den Schnellen Hochflußreaktor FR3  
KFK 1356, März 1971
- /3/ A. Gerken, D. Vollath:  
Bestrahlung von  $UO_2$ -PuO<sub>2</sub>-Brennstäben für den SHTR im FR2 (unveröffentl.)
- /4/ Roth et al.:  
The Preparation of Input Data for WIMS, AEEW-R 538, August 1967
- /5/ D. Vollath, F. Depisch, Th. Dippel:  
Spezifikation und Herstellung von  $UO_2$ -PuO<sub>2</sub>-Stabprüflingen mit  
4 mm Brennstoffdurchmesser, FR2-Kapselversuchsgruppe 5b,  
Externer Bericht 6/71-2, November 1971
- /6/ H. Kämpf, H. Elbel, F. Depisch:  
Die Behandlung des mechanischen und thermischen Verhaltens  
von Brennstäben in SATURN 1, KFK 1477, November 1971
- /7/ M. Guyette:  
CRASH, a Computer Program for the Analysis of Creep and Plasticity  
in Fuel Pin Sheets, KFK 1050, 1969
- /8/ K.D. Cloß:  
Physikalische und mechanische Eigenschaften von Hüllmaterialien  
(unveröffentlicht)
- /9/ H.E. Häfner:  
Bestrahlung von Brennstäben in instrumentierten Na-PbBi-Doppelkapseln, Kerntechnik 12, Heft 5/6, 1970

/10/ H.E. Häfner:

Bestrahlung von  $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$ -Brennstäben für den SHTR (FR3) im FR2,  
Versuchsgruppe 5b, Kapseltyp 4, (unveröffentlicht)

/11/ H. Schülken:

Thermische Neutronenflußdichte in den Isotopenkanälen des FR2,  
1970, (unveröffentlicht)

/12/ L. Steinbock:

Das Brennstabauslegungs- und Überwachungssystem MERKUR, KFK 2163, 1970

/13/ L. Steinbock:

Relative Flußverteilung in den Stäben der FR2-Kapselversuchsgruppe 5b  
1975, (unveröffentlicht)

/14/ H. Gräßner:

Spaltgasmessungen, Jahresbericht der Heißen Zellen (unveröffentlicht)

/15/ H. Wertenbach:

Persönliche Mitteilung

/16/ M. Bober, C. Sari, G. Schumacher:

Redistribution of Plutonium and Uranium in Mixed (U,Pu)  
Oxide Fuel Materials in a Thermal Gradient,  
J. Nucl. Mat. 39, 265 (1971)

/17/ M. Bober, C. Sari, G. Schumacher:

Redistribution of Uranium and Plutonium during Evaporation  
Processes in Mixed Oxide Fuel,  
J. Nucl. Mat. 40, 341 (1971)

/18/ M. Bober, H. Kleykamp, G. Schumacher:

Investigations of Radial Plutonium Redistribution in Mixed  
Oxide Fuel Irradiated in a Fast Flux, Nucl. Techn. 26, 172 (1975)

- /19/ M. Bober, G. Schumacher:  
Transport Phenomena in Mixed Oxide Fuel Pins, KFK 1887, Dez. 1973
- /20/ W.J. Lackey et.al.: Porosity and Actinide Redistribution during Irradiation of  $(U,Pu)O_2$ , Nucl.Techn. 26, 120 (1972)
- /21/ H. Elbel, J. Lopez-Jimenez:  
Ein Beitrag zur Analyse des thermischen Verhaltens von Schnellbrüter-Brennstäben mit  $UO_2$ - $PuO_2$  Brennstoff, KFK 2216, Okt. 1975
- /22/ J. Lopez-Jimenez:  
Pers. Mitteilung
- /23/ P. Weimar, H. Kleykamp:  
Brennstoffverhalten in dünnen Mischoxid-Brennstäben mit extremer Leistungsdichte, Reaktortagung Düsseldorf, 30. März - 2. April 1976
- /24/ H. Steiner:  
Analyse der Hüllehnungen der Versuchsgruppe 5b, Okt. 1975 (unveröffentl.)
- /25/ A. Gerken:  
Modelltheoretische Analyse der Brennstabbelastungen durch zyklischen Leistungsbetrieb anhand des experimentellen Datenmaterials der KVE Vg.4a, 4b, 5b und Mol 8B, KFK 1913, Febr. 1974
- /26/ K.D. Cloß:  
Kriechverhalten von Hüllohrmaterialien für schnelle Na-gekühlte Reaktoren, Beitrag KFK 1400, S. 263, Okt. 1971
- /27/ H.E. Schmidt:  
Die Wärmeleitfähigkeit von Uran- und Uran-Plutonium-Dioxid bei hohen Temperaturen, High Temp.-High-Press. 3 (1971) 345
- /28/ G. Ondracek, B. Schulz:  
Zum Ansatz der Porositätsabhängigkeit für die Wärmeleitfähigkeit keramischer Brennstoffe, Beitrag KFK 1273/3, Dez. 1972, S. 112

- /29/ P. Royl et. al.:  
Transient Fuel-Cladding Deformation Analysis of the In-Pile H3-Treat-Test with SAS2A/DEFORM-II-Code, 2. SMIRT, Berlin Sept. 1973
- /30/ J.R. Mathews:  
Mechanical properties and diffusion data for carbide and oxide fuels, AERE-M 2643, Sept. 1974
- /31/ D. Brucklacher:  
Kriechverhalten von keramischen Kernbrennstoffen unter Neutronenbestrahlung bei Temperaturen unterhalb 1200 °C,  
Beitrag zu KFK 1400, Okt. 1971, S. 177
- /32/ D. Brucklacher, I. Alecu:  
In-pile-Kriechversuche an porösem UO<sub>2</sub>-PuO<sub>2</sub>-Brennstoff,  
Beitrag zu KFK 1272/3, Dez. 1972, S. 112
- /33/ D. Brucklacher:  
Einfluß des Abbrandes auf das bestrahlungsinduzierte Kriechen von UO<sub>2</sub>, Beitrag zu KFK 1273/1, Jun. 1973, S. 112
- /34/ D. Brucklacher et al.:  
Die mechanische Belastung der Hülle durch den Brennstoff  
Beitrag zu KFK 1999, Sept. 1974, S. 59
- /35/ W.J. Lackey et.al.:  
Porosity and Actinide Redistribution during Irradiation of (U, Pu)O<sub>2</sub>, Nucl. Techn. 16 (1972) 120

## A N H A N G I

Materialbeziehungen und -daten

## a) Materialeigenschaften der Hülle (1.4988)

1. Wärmeleitfähigkeit / 8/

<u>T/°C</u>	<u>λ/ W/cm°C</u>
20	0.151
100	0.159
200	0.172
300	0.180
400	0.193
500	0.201
600	0.218
700	0.250

2. Thermische Ausdehnung / 8/

<u>T/°C</u>	<u>α/ 10<sup>-4</sup> · 1/°C</u>
20	0.000
100	0.157
200	0.167
300	0.171
400	0.174
500	0.176
600	0.178
700	0.180
800	0.187

Es gilt:  $1(T) = 1(T = 20^\circ\text{C}) \cdot (1 + \alpha \cdot (T - 20^\circ\text{C}))$

### 3. Elastische Eigenschaften / 8 /

Poisson Zahl:  $\nu = 0.3$

Elastizitätsmodul:

<u>T / <math>^\circ\text{C}</math></u>	<u>E / <math>10^4 \text{ km/mm}^2</math></u>
20	2.00
200	1.90
300	1.85
400	1.80
500	1.70
600	1.60
700	1.50
800	1.40

### 4. Kriechverhalten

Das Kriechverhalten des Hüllrohrmaterials wurde durch die Norton'sche Beziehung

$$\dot{\epsilon} = K \sigma^n$$

beschrieben, mit der das sekundäre Kriechen erfaßt wird. Die Temperatur-abhängigkeit der Parameter K und n ist für lösungsgeglühtes und ausgelagertes Material durch folgende Tabelle gegeben / 26/:

<u>T / <math>^\circ\text{C}</math></u>	<u>K</u>	<u>n</u>
20	$1 \cdot 10^{-45}$	15
400	$1 \cdot 10^{-45}$	15
550	$1 \cdot 10^{-45}$	15
600	$3 \cdot 10^{-28}$	15
650	$9 \cdot 10^{-15}$	8
700	$5 \cdot 10^{-13}$	7
750	$3 \cdot 10^{-8}$	4

b) Materialbeziehungen und -daten für den Brennstoff ( (U,Pu) O<sub>2</sub> )

1. Wärmeleitfähigkeit /27/

$$\lambda' = \frac{1 - (a_1 - a_2 \cdot x) \cdot T^2 + (b_1 - b_2 \cdot x) \cdot T^4}{c_1 + c_2 \cdot x + dT^+}$$

$\lambda'$  in W/cm°C

$$a_1 = 0.35 \cdot 10^{-7}$$

$$b_1 = 0.284 \cdot 10^{-13}$$

$$a_2 = 0.3 \cdot 10^{-6}$$

$$b_2 = 0.131 \cdot 10^{-12}$$

$$c_1 = 10.8$$

$$d = 0.0235$$

$$c_2 = 360$$

$$T^+ = \begin{cases} T & \text{für } T < \theta \\ \theta & \text{für } T > \theta \end{cases}$$

$$\theta = (1930 - 5000 \cdot x) \quad T \text{ in } ^\circ\text{C}$$

$$x = 2.00 - (0/\text{Me})$$

$$\lambda' = \lambda (P = 0.05) \quad (P = \text{Porosität})$$

$$\lambda(P) = \frac{(1-P)^{1.5}}{0.95^{1.5}} \cdot \lambda' \quad /28/$$

2. Thermische Ausdehnung / 29/

$$\alpha_I(T, T_0) = (6.5693 + 0.002997 \cdot T / {}^\circ C) \cdot 10^{-6} / {}^\circ C$$

mit

$$l(T) = l(T_0) \cdot (1 + \alpha_I(T, T_0) \cdot (T - T_0))$$

und

$$T_0 = 20 {}^\circ C$$

3. Elastische Eigenschaften / 30/

Poisson-Zahl:  $\nu = 0.325$

Elastizitätsmodul:

$$E = E_0 \left[ 1 - 0.92 \cdot 10^{-4} \cdot (T - 298 {}^\circ C) \right] \cdot (1 - 2.3 P)^{-\alpha x}$$

$$E_0 = 220 \text{ GPa} = 22000 \text{ kp/mm}^3$$

T in  ${}^\circ C$

P (Porosität)  $0 < P < 0.3$

$\alpha = 1,75$

$x = 2.00 - (0/\text{Me})$

4. Sekundäres Kriechen / 31, 32, 33/  
 (für  $P = 0.03$ )

Bestrahlungsinduziertes Kriechen

$$\dot{\varepsilon}_i = 5.6 / kp \text{ mm}^{-2} \exp \left\{ \frac{-2600 \text{ K}}{T} \right\} \sigma \cdot \dot{A}$$

Bestrahlungsverstärktes Kriechen

$$\dot{\varepsilon}_e = 10^{15} / kp \text{ mm}^{-2} \exp \left\{ \frac{-45000 \text{ K}}{T} \right\} \cdot \sigma \dot{A}$$

$\dot{\varepsilon}$  = Kriechrate in 1/h

T = Temperatur in K

$\sigma$  = Äquivalenzspannung in kp/mm<sup>2</sup>

$\dot{A}$  = Spaltrate in Spaltungen pro schwerem Atom und Stunde

Porositätsabhängigkeit der Kriechrate:

$$\dot{\varepsilon}^P = \dot{\varepsilon}^0 (1 + 1250 \cdot P_{eff}^2)$$

mit  $0 < P < 1$

5. Festkörperschwellen / 34/

$$\beta_s = 0.75 \text{ vol \% pro 1 \% Abbrand}$$

6. Porenwanderung / 35/

$$\mathcal{V} = \frac{K p_0 \exp(-H/RT)}{p \cdot T^{3/2}} \frac{dT}{dr}$$

$$K = 0, 1211 \cdot 10^6$$

p = Druck in der Pore in at

T = Temperatur in K

$$\begin{aligned} p_o \exp(-H/RT) &= \{ \exp [-212.275 + 65.842 (0/\text{Me}) \\ &+ 8.9453 \cdot 10^{-2} \cdot T - 2.55399 \cdot 10^{-2} (0/\text{Me}) \cdot T \\ &+ 2.956 (0/\text{Me})^2 - 5.6541 \cdot 10^{-6} T^2] \} \text{ at} \end{aligned}$$

A N H A N G II

Dokumentation der zerstörungsfreien  
und zerstörenden Nachuntersuchung



- II/3 -

zu Prüfling 5B4

A1



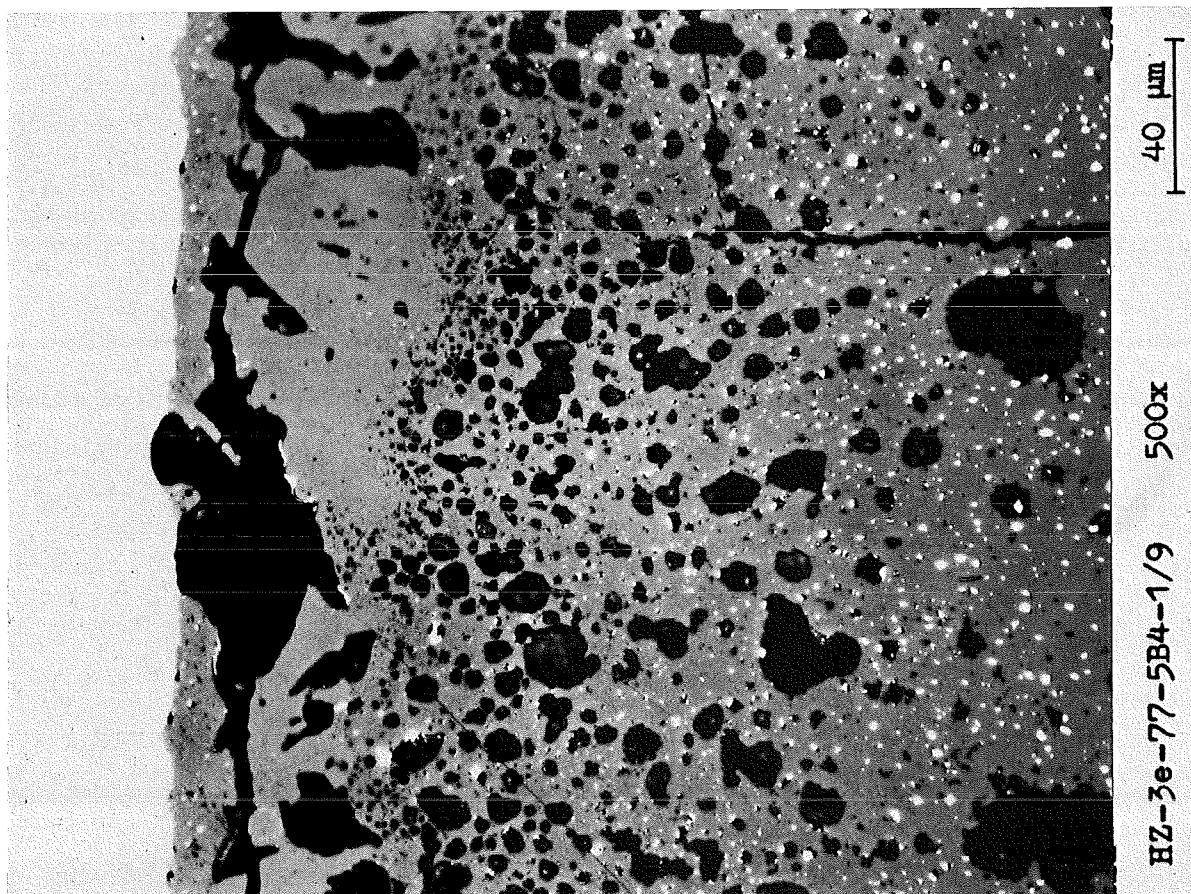
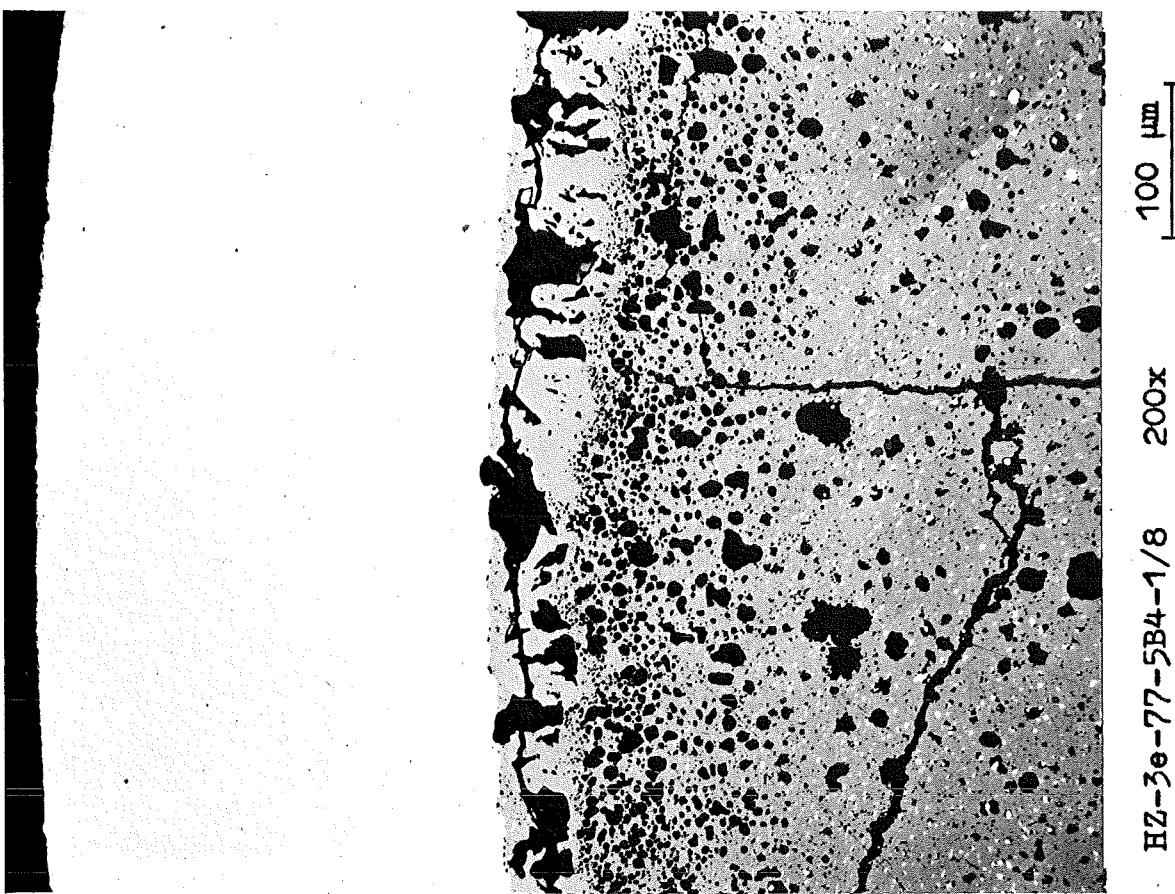
4-6

200  $\mu\text{m}$

- II / 4 -

zu Prüfling 5B4

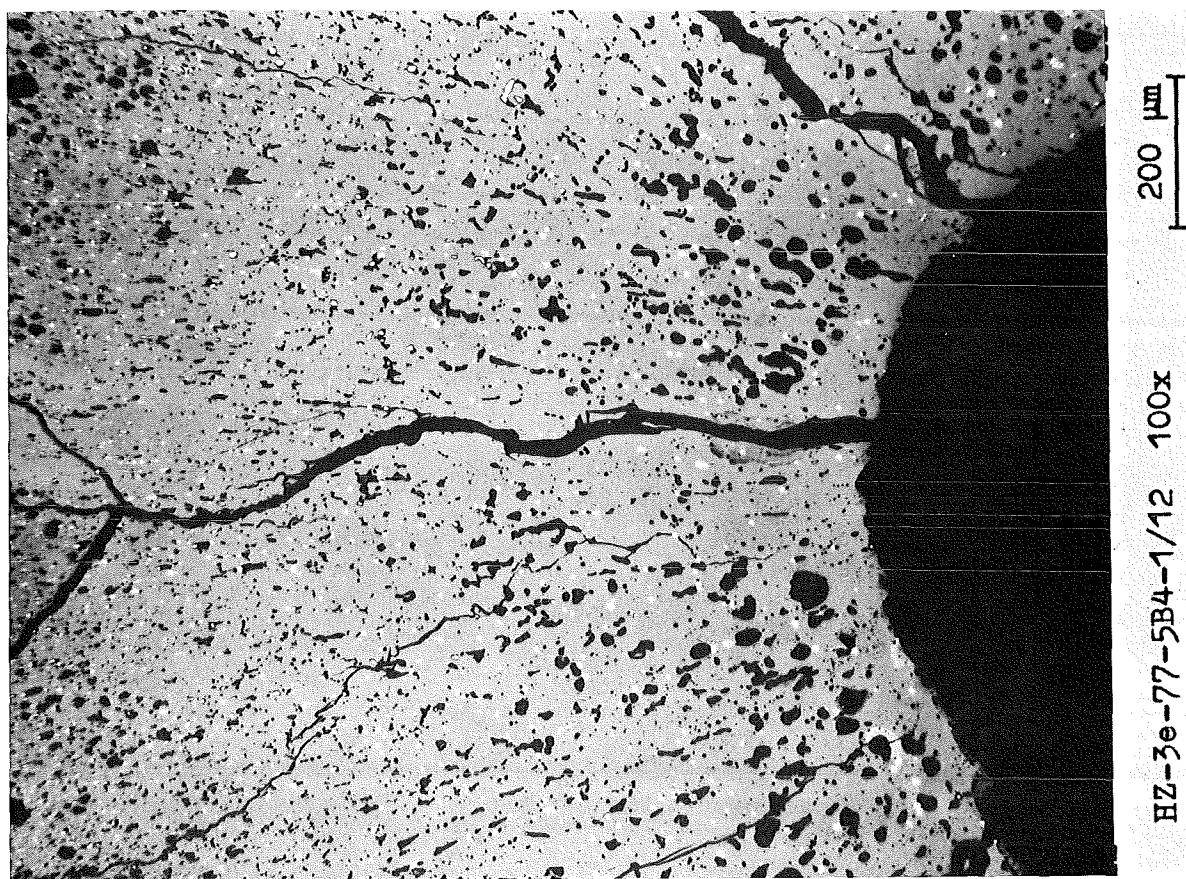
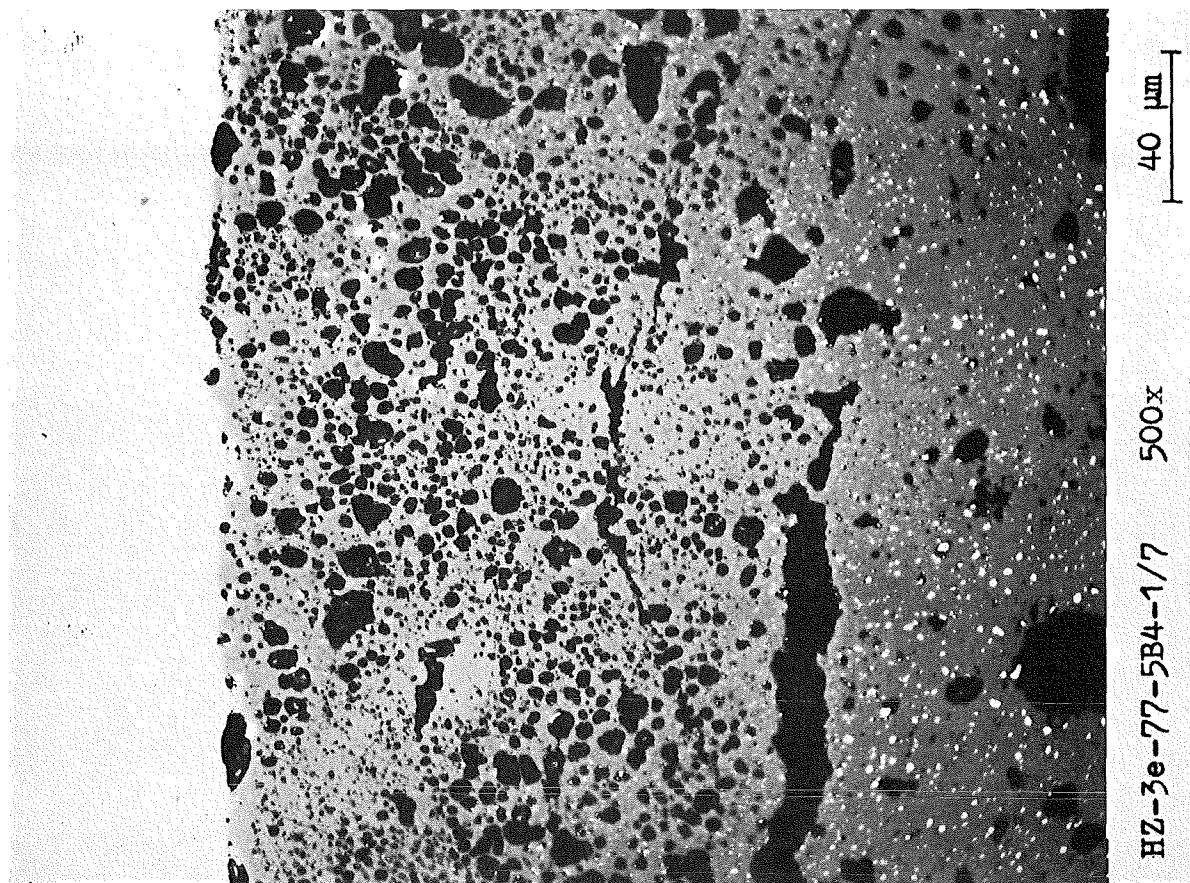
A 1



- II/5 -

zu Prüfling 5B4

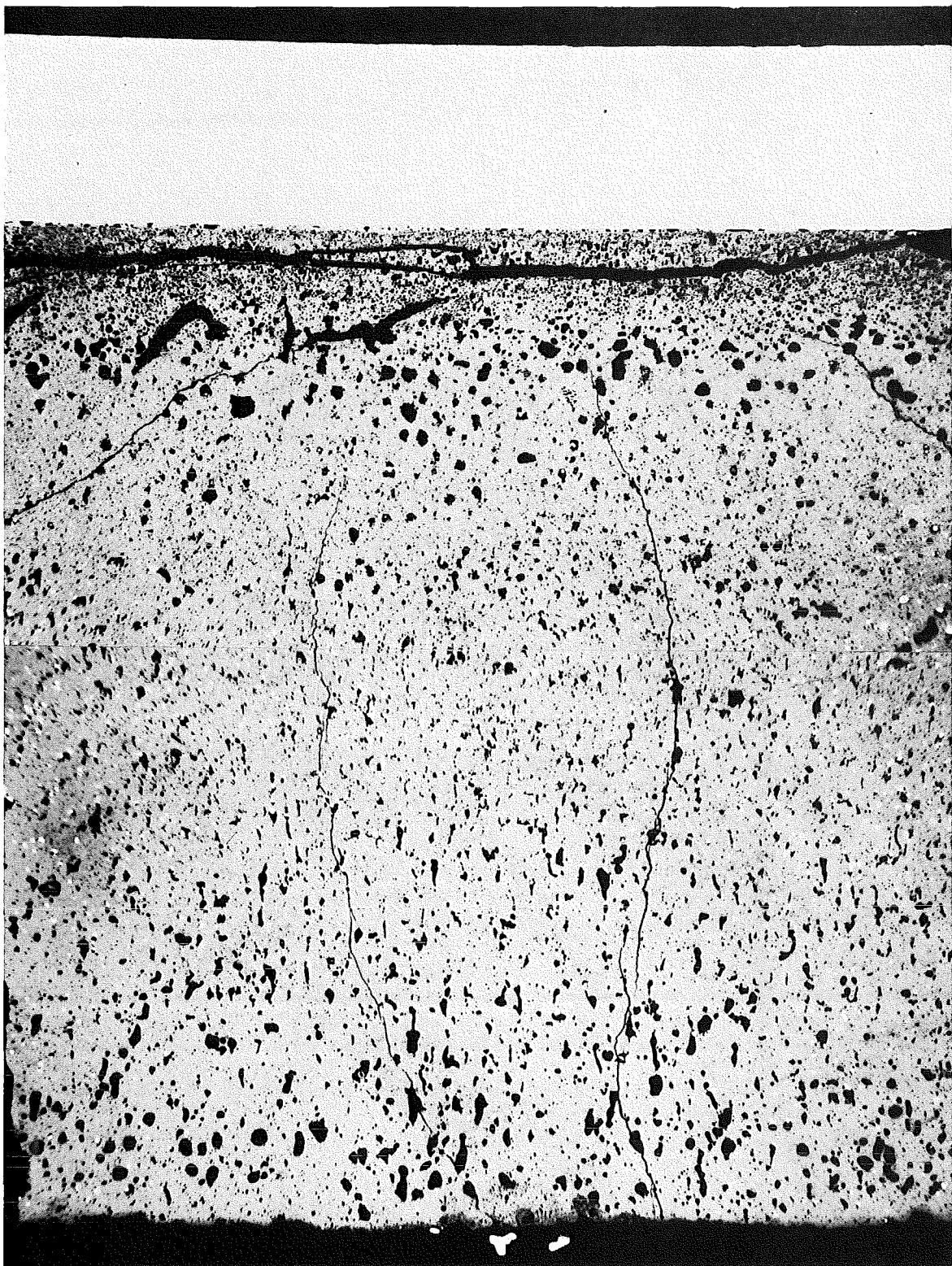
A1



- II/6 -

zu Prüfling 5B4

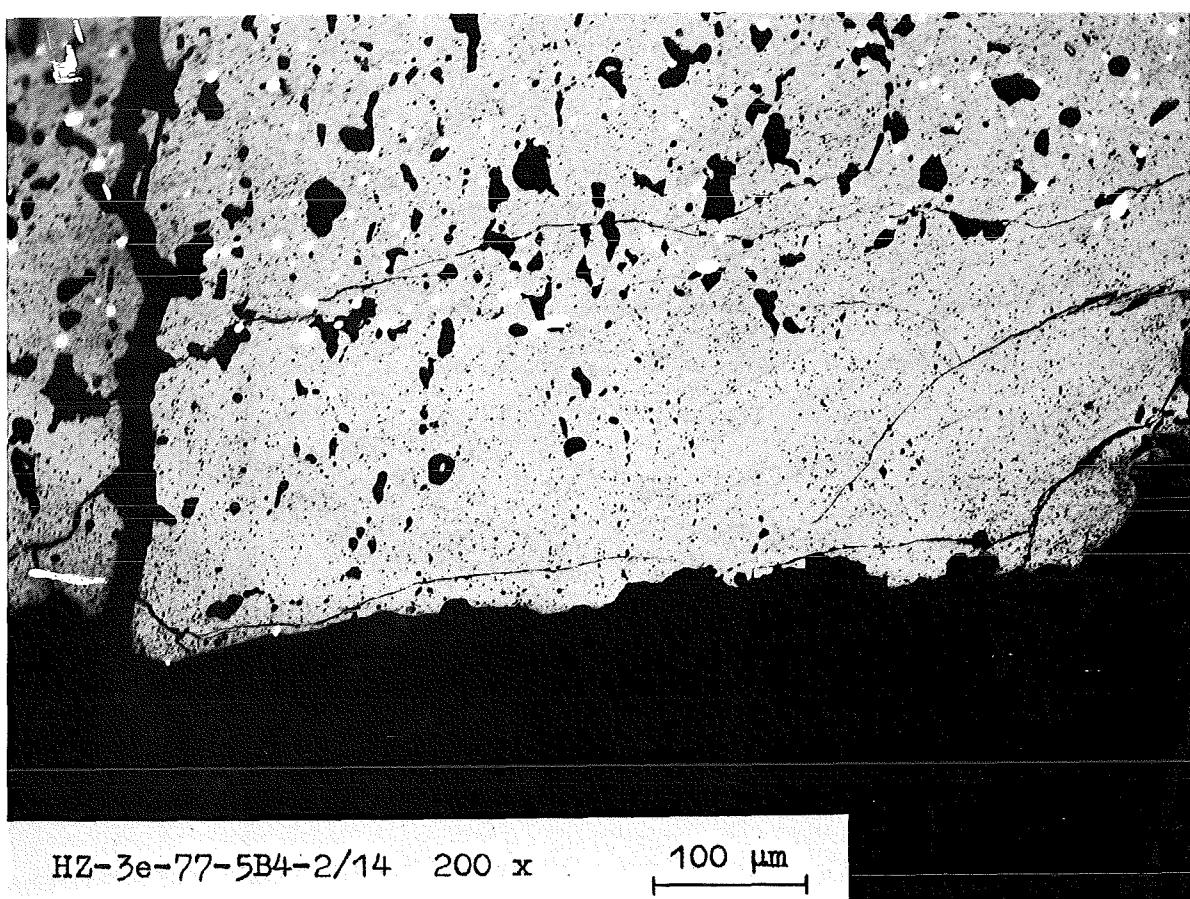
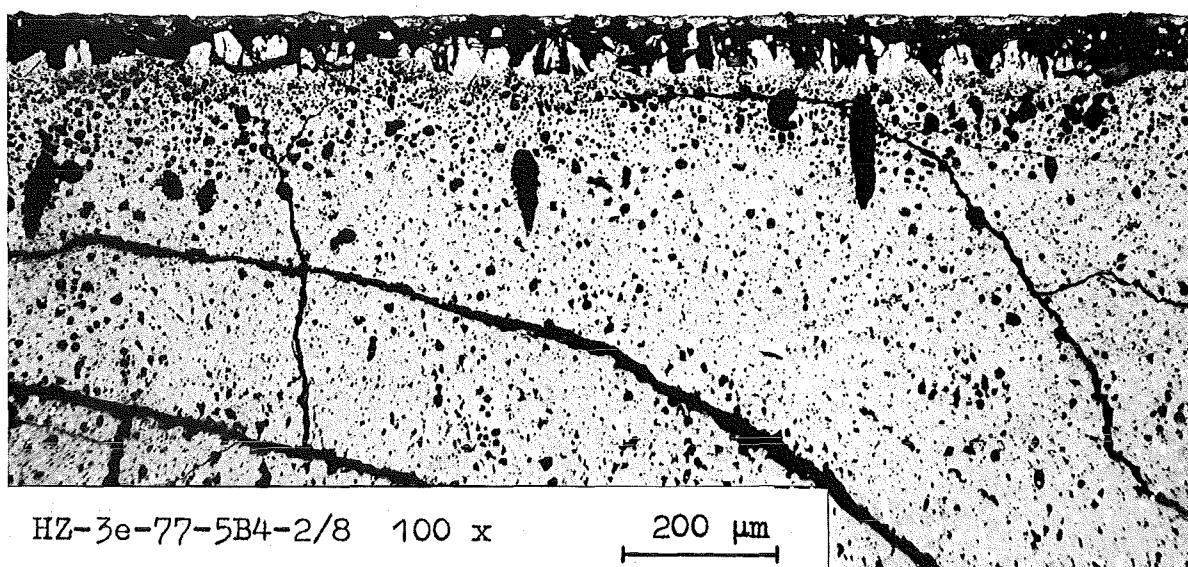
A 2



10...11

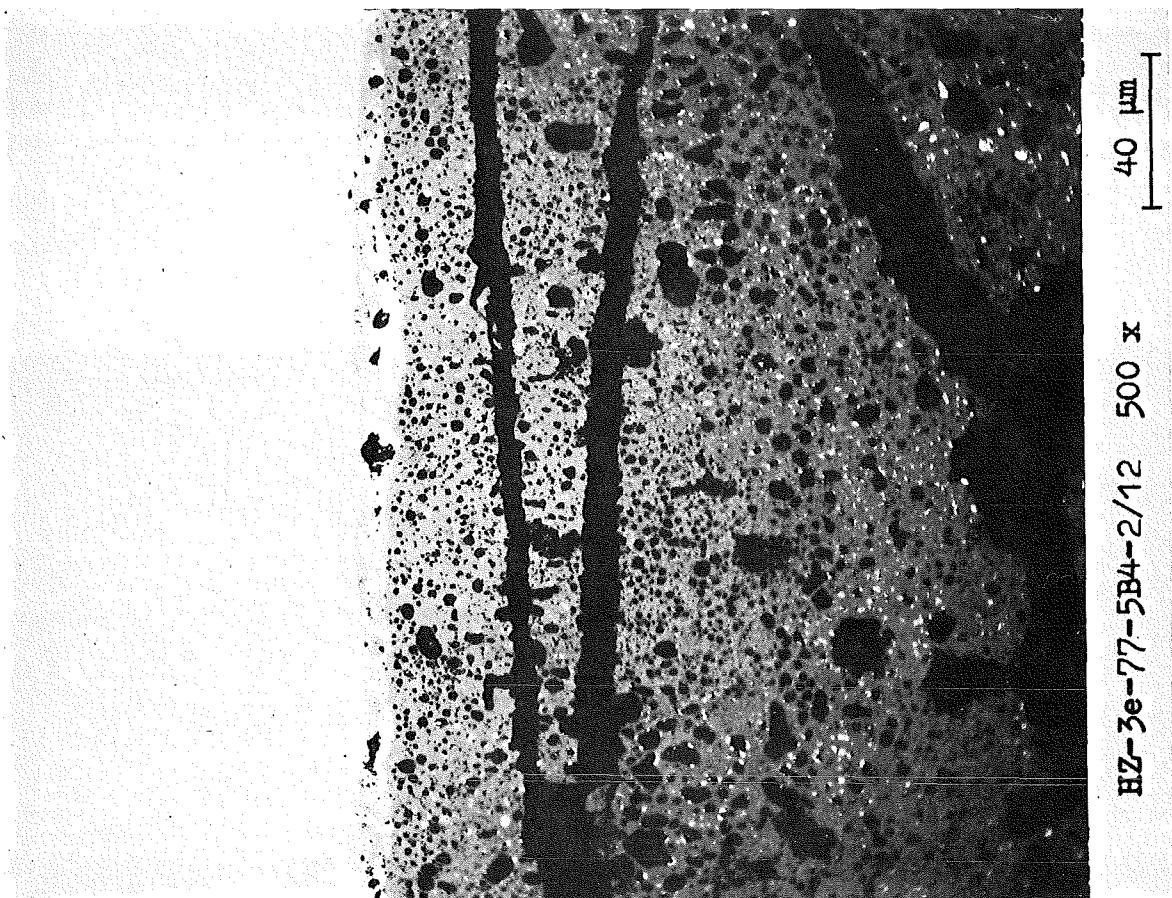
200  $\mu\text{m}$

- II/7-  
zu Prüfling 5B4  
A 2



- II/8 -

zu Prüfling 5B4  
A 2

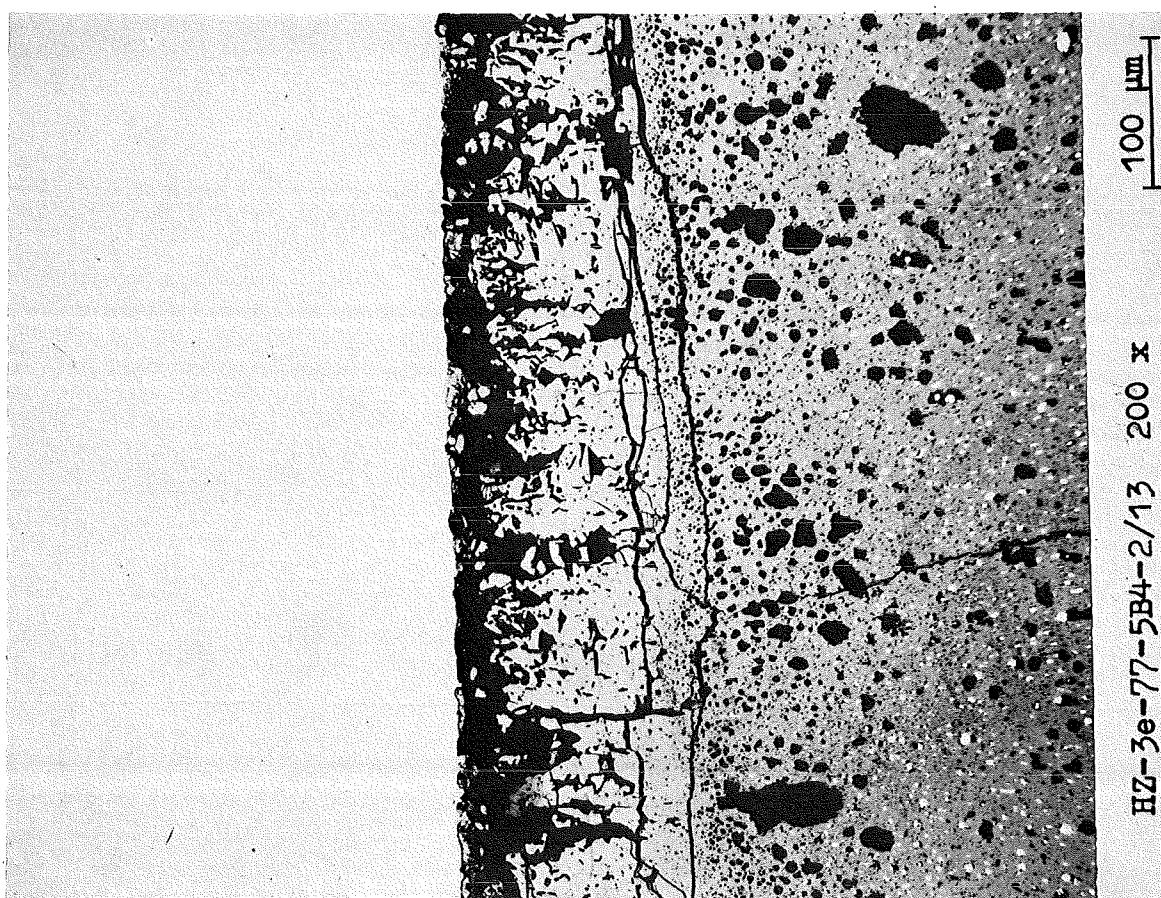


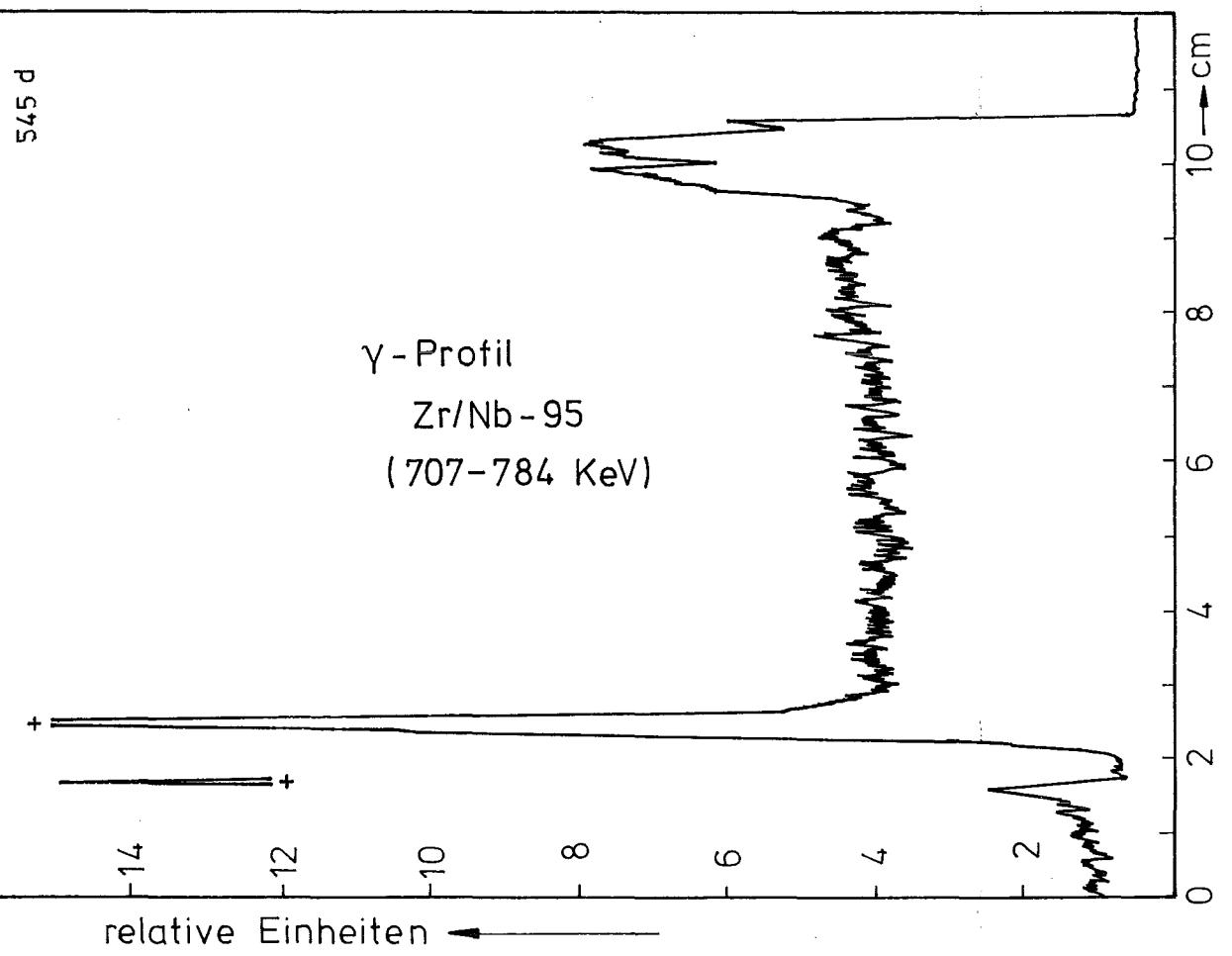
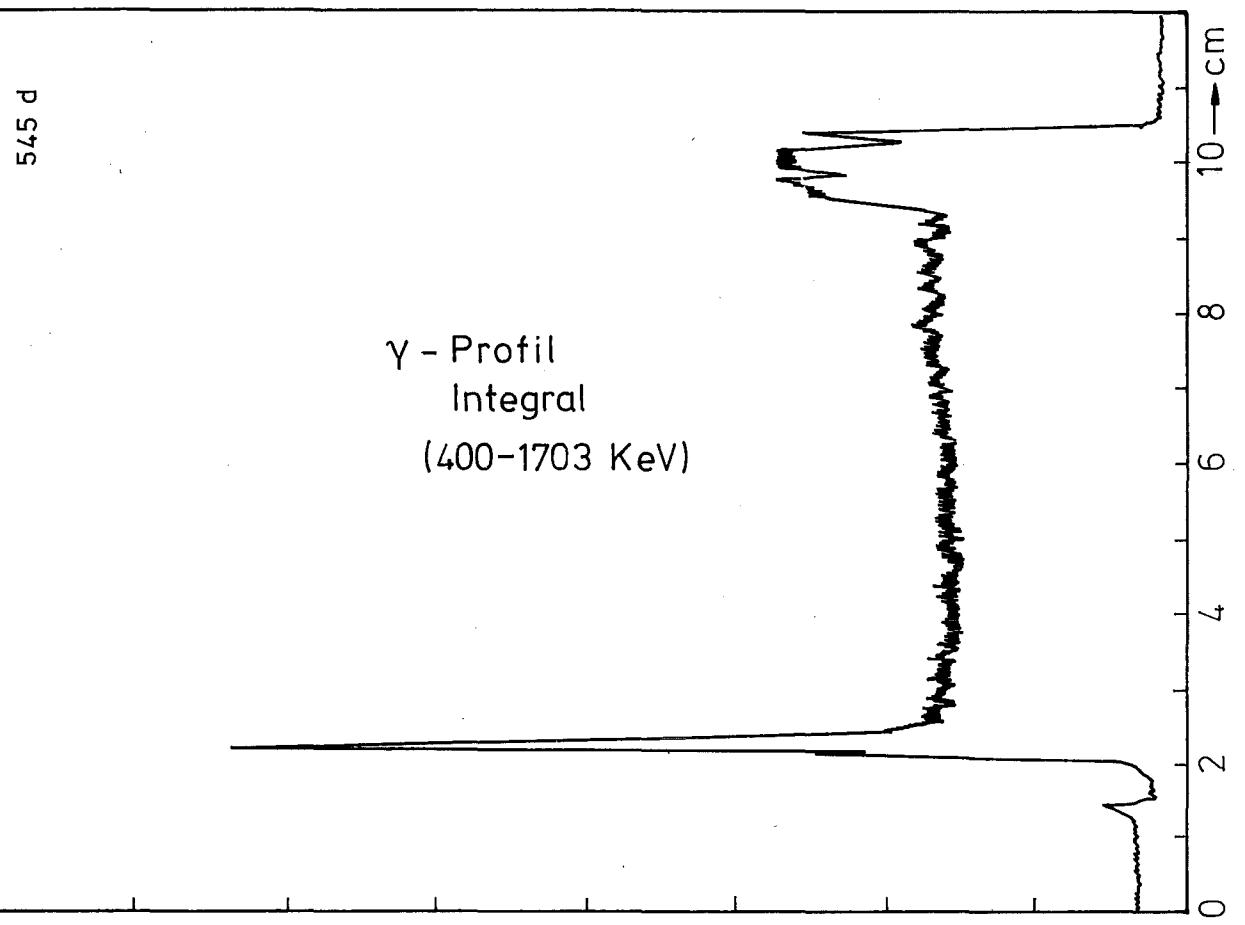
HZ-3e-77-5B4-2/12 500 x

100 μm

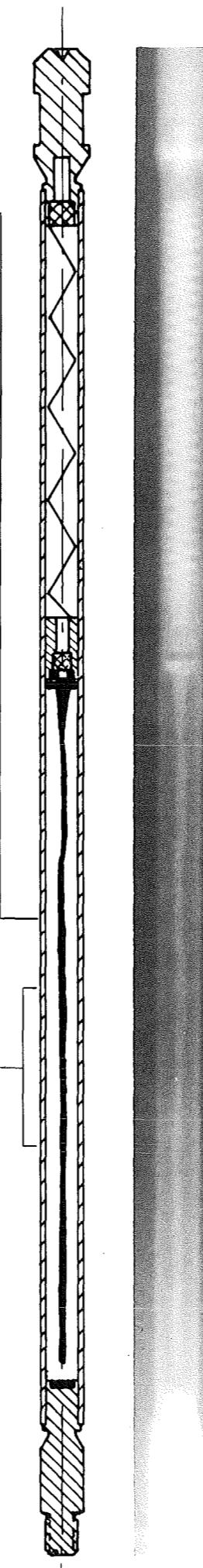
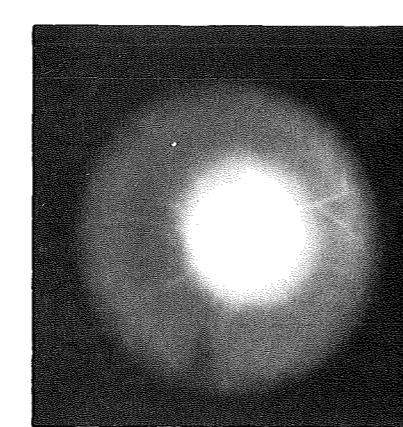
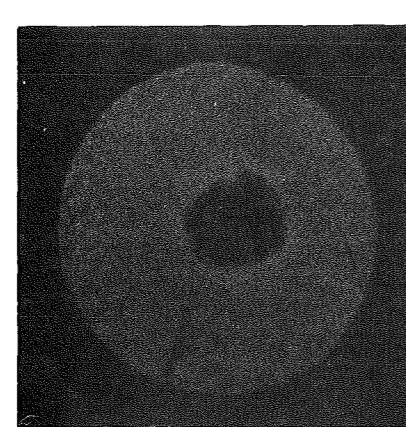
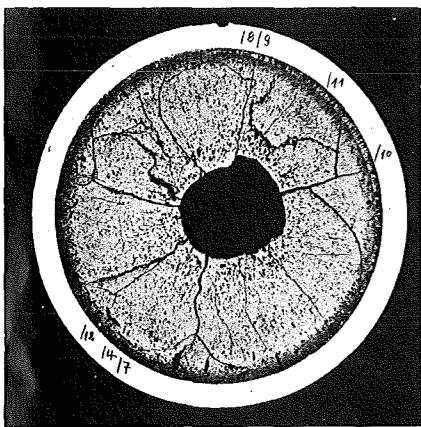
HZ-3e-77-5B4-2/13 200 x

100 μm





Schnitt: 1



- II/9 -

Prüfling 5 B/4

Brennstoff:

Form	:	Tabletten
Zusammensetzung	:	$\text{UO}_2\text{-PuO}_2$
Tablettendichte	:	86,5 % th.D.

Hülle:

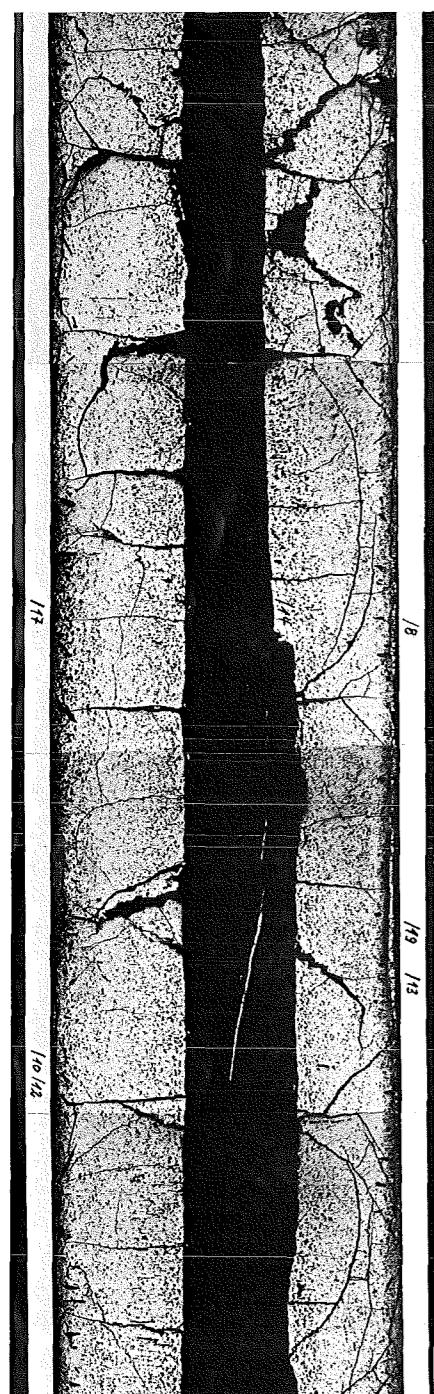
Material	:	1,4988
Aussendurchmesser	:	4,7 mm
Wandstärke	:	0,3 mm

Geometrie:

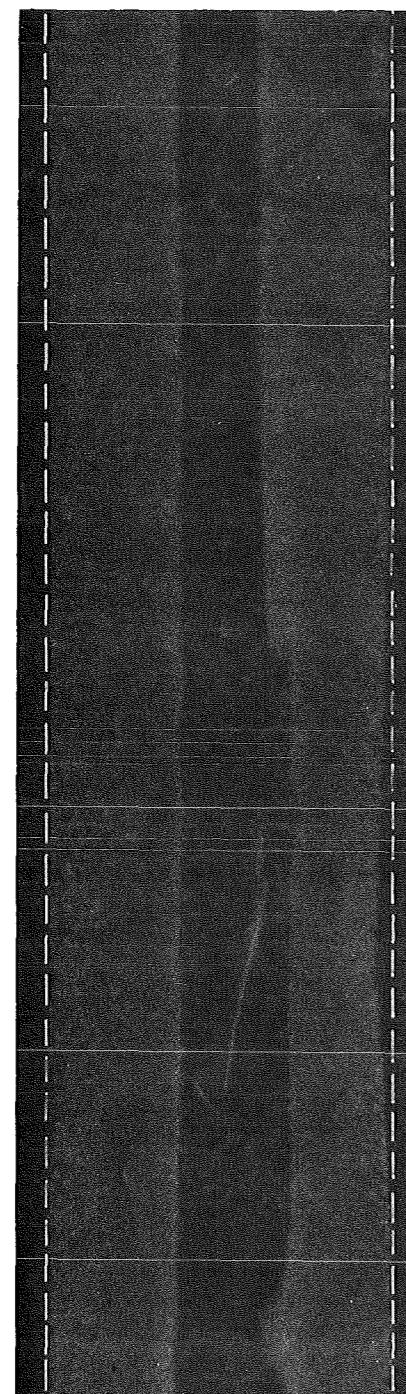
Länge des Prüflings	:	172 mm
Länge der Brennstoffsäule	:	80 mm
Radiale Spaltweite	:	75 $\mu\text{m}$
Schmierdichte	:	80 % th.D.

Bestrahlung:

Einrichtung	:	Na/PbBi-Doppel Kapsel Typ 4
Dauer	:	321,6 Vollasttage
Ende	:	27.9.1971
Rechn. Abbrand mittl.	:	108,6 MWD/kgM
Stableistung max./mittl.:	:	453/351 W/cm



1mm



B

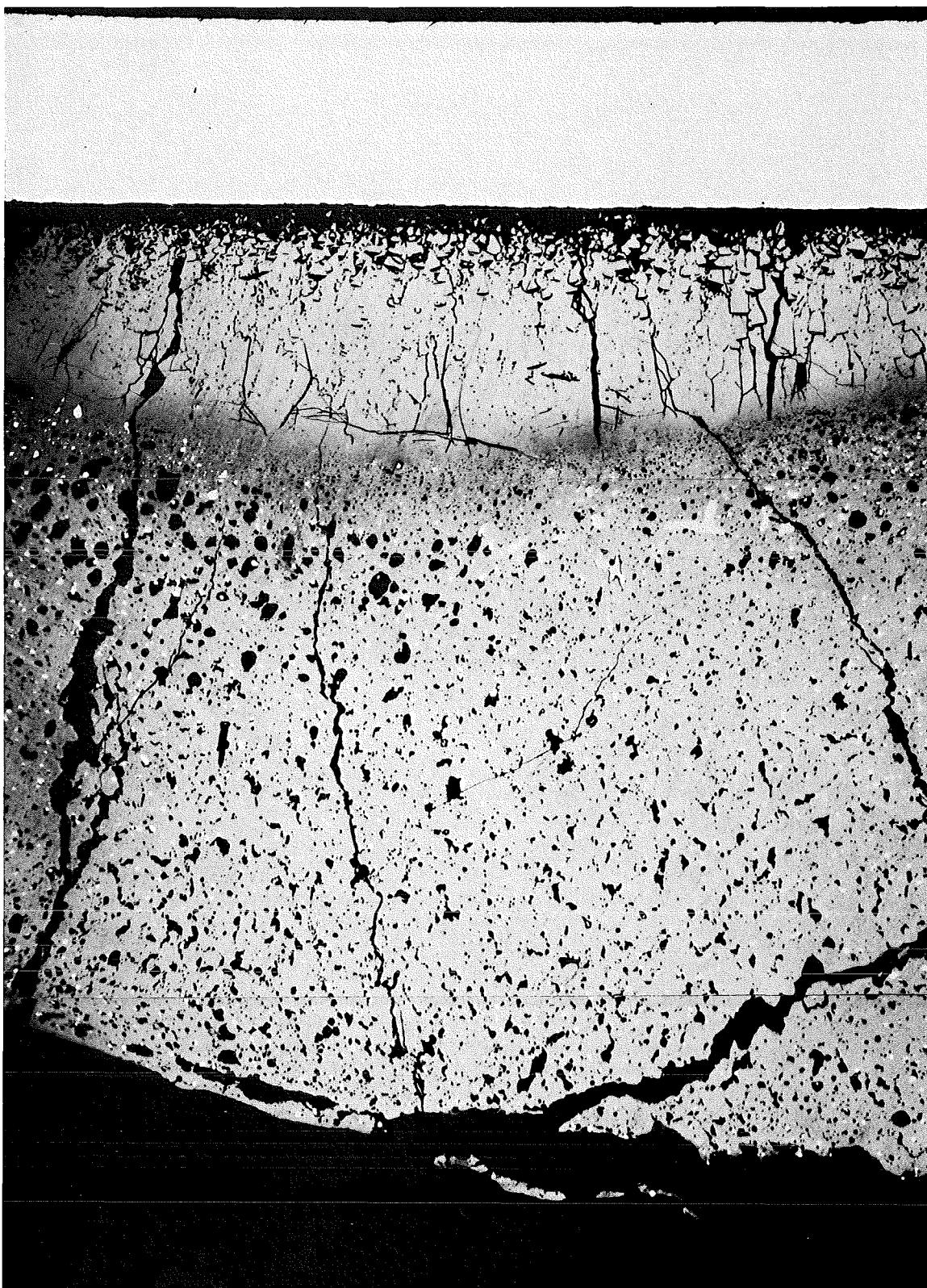


C

- II/11 -

zu Prüfling 5B3

A1



8 ... 10

200  $\mu\text{m}$

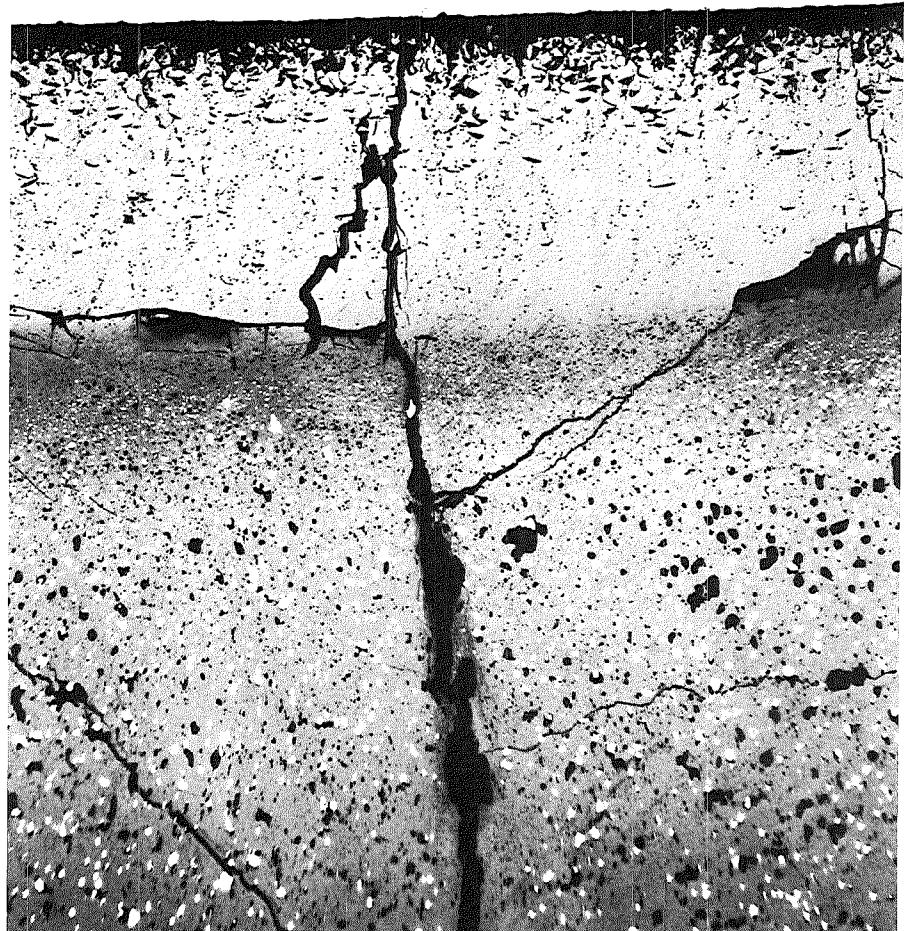
-II/12-

zu Prüfling  
A1 5B3



HZ-3e-77-5B3-1/11 200 x

100  $\mu\text{m}$



HZ-3e-77-5B3-1/12 100 x

200  $\mu\text{m}$

- II/13 -  
zu Prüfling 5B3  
A 2



4...6

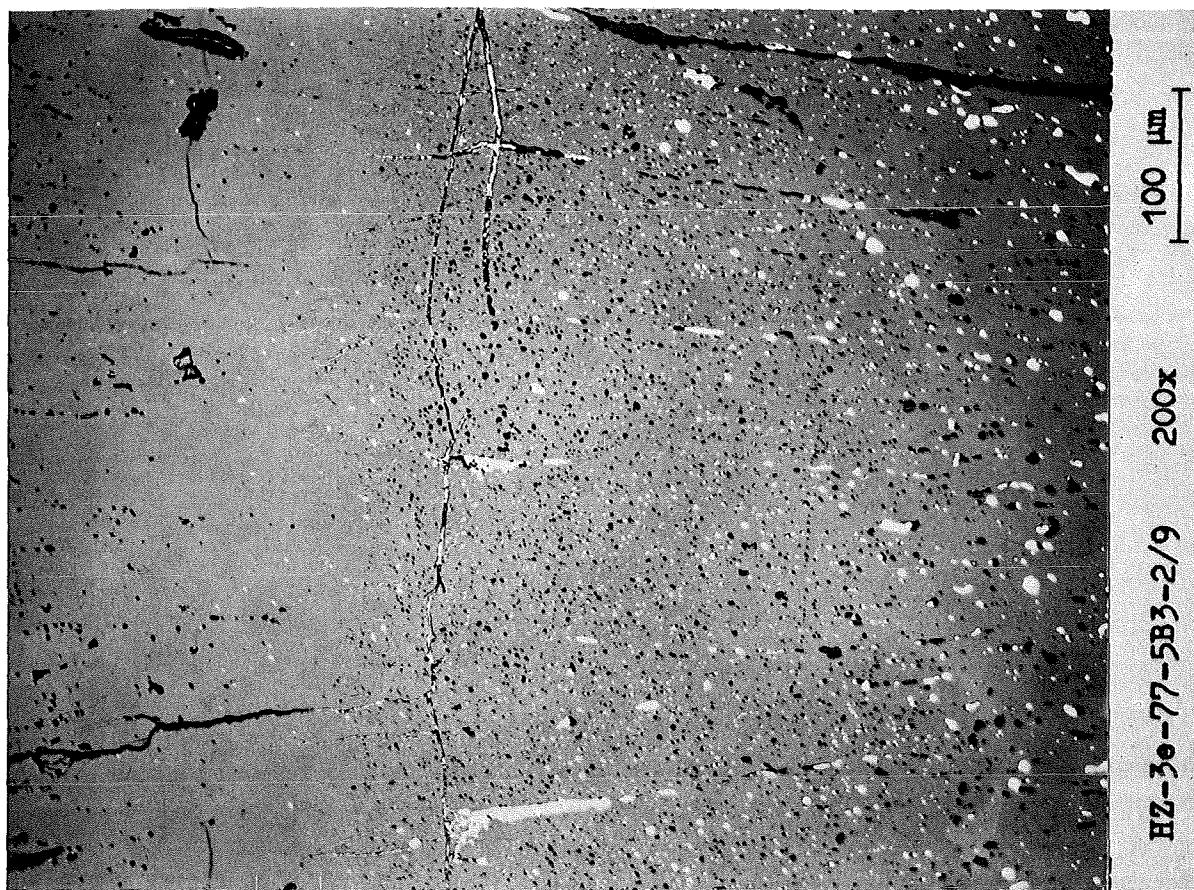
200  $\mu\text{m}$

- II/14 -

zu Prüfling 5B3  
A 2



HZ-3e-77-5B3-2/7      500x      40 μm

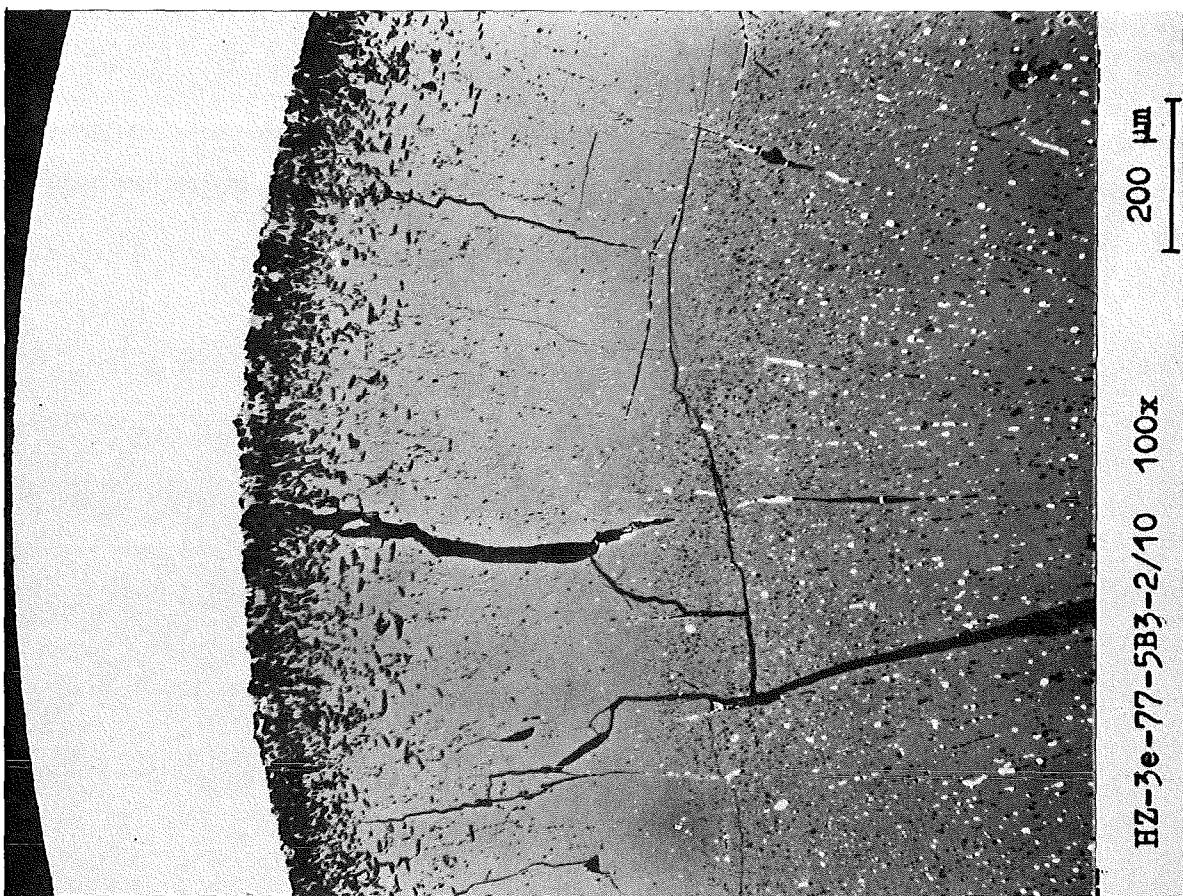


HZ-3e-77-5B3-2/9      200x      100 μm

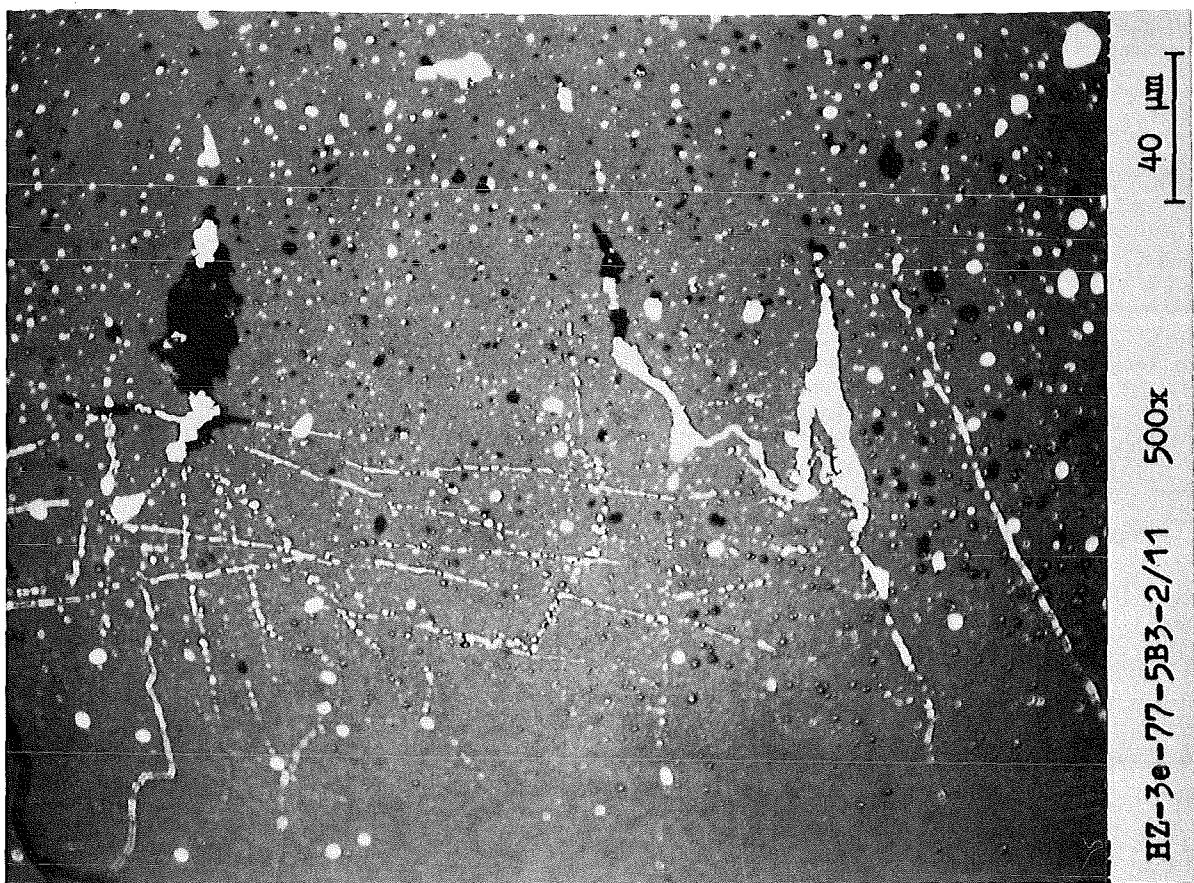
-II/15-

zu Prüfling 5B3

A2



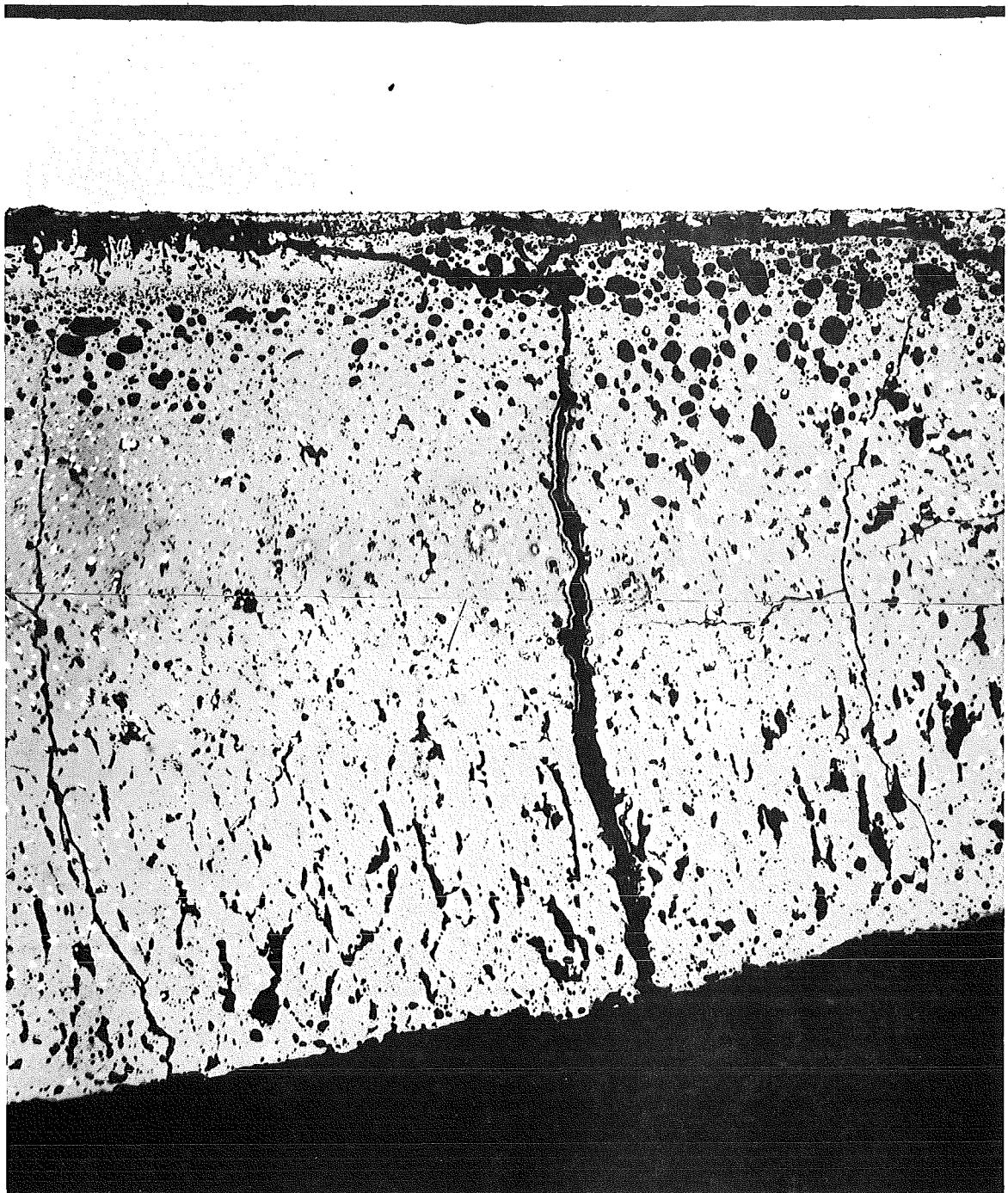
HZ-3e-77-5B3-2/10 100x



HZ-3e-77-5B3-2/11 500x

- II/16 -

zu Prüfling 5B3  
A3



8...9

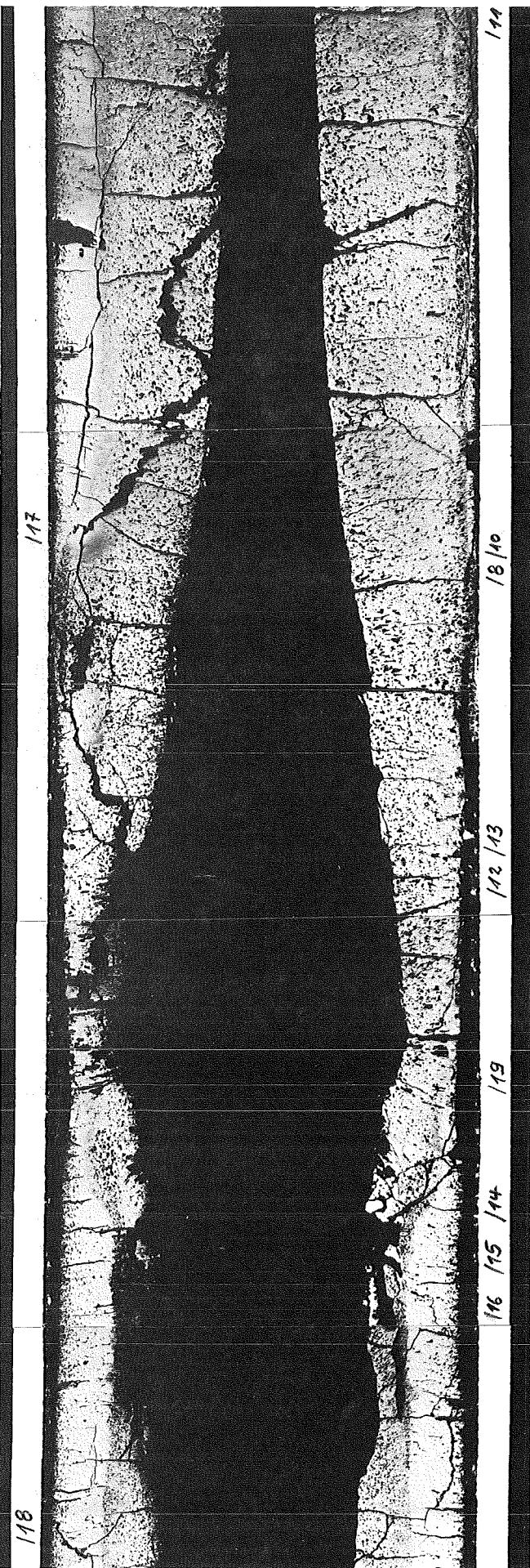
200  $\mu\text{m}$

B3



$\alpha$ -Autoradiografie

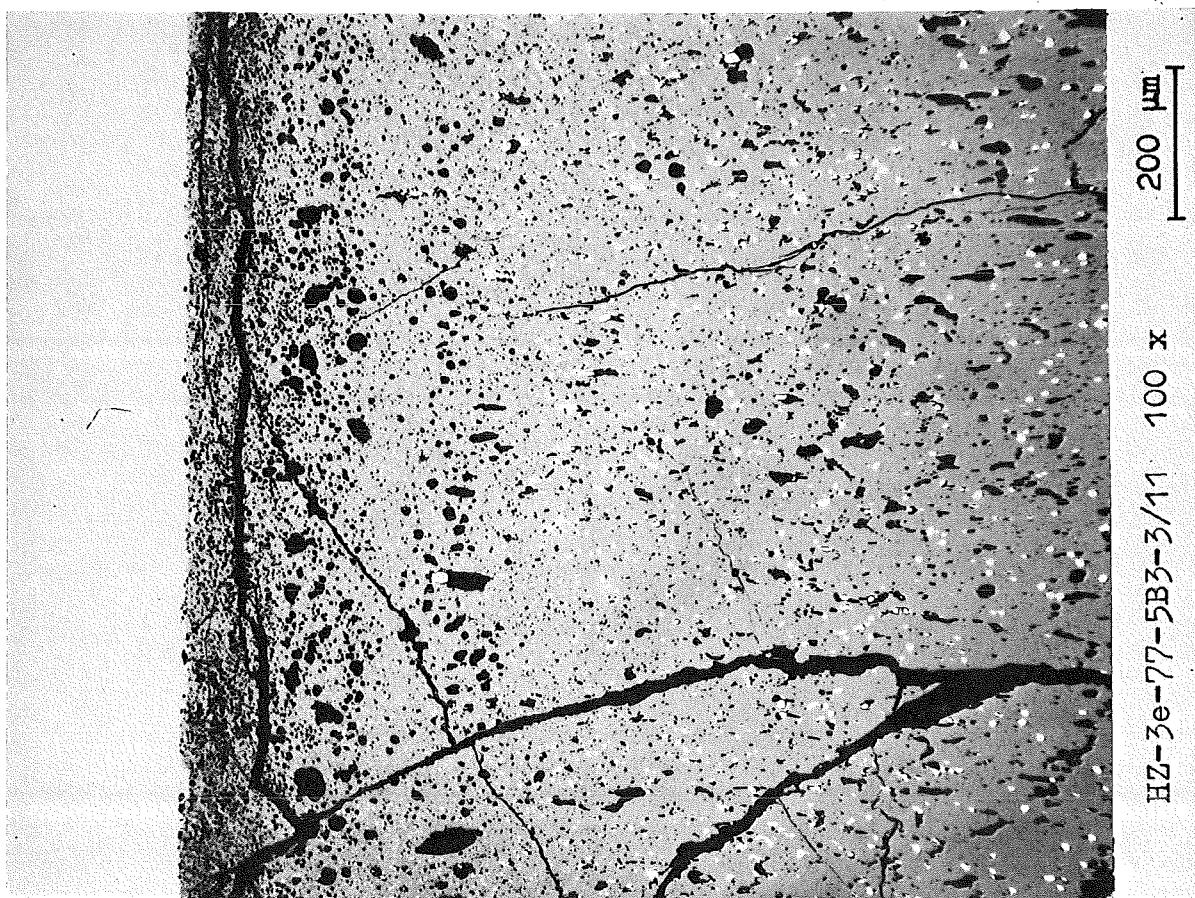
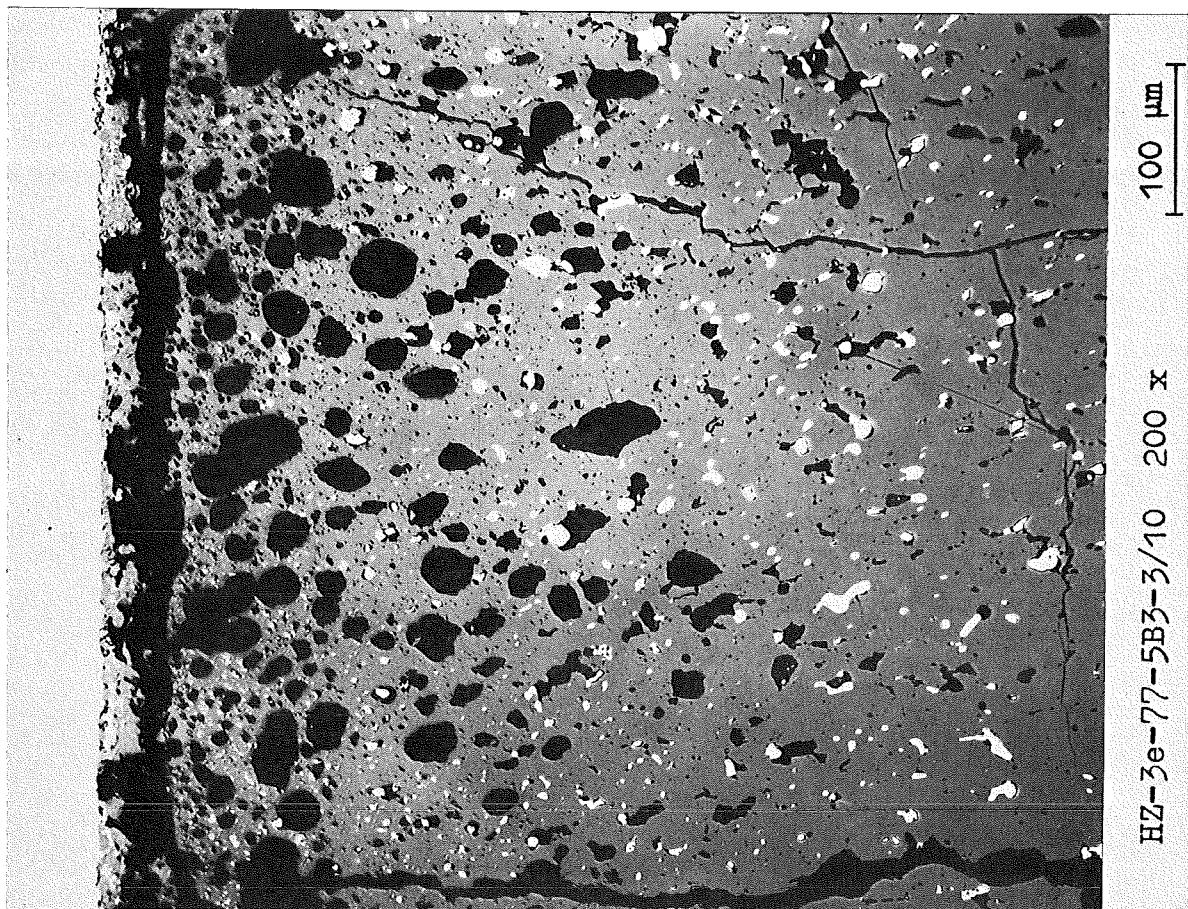
A 3

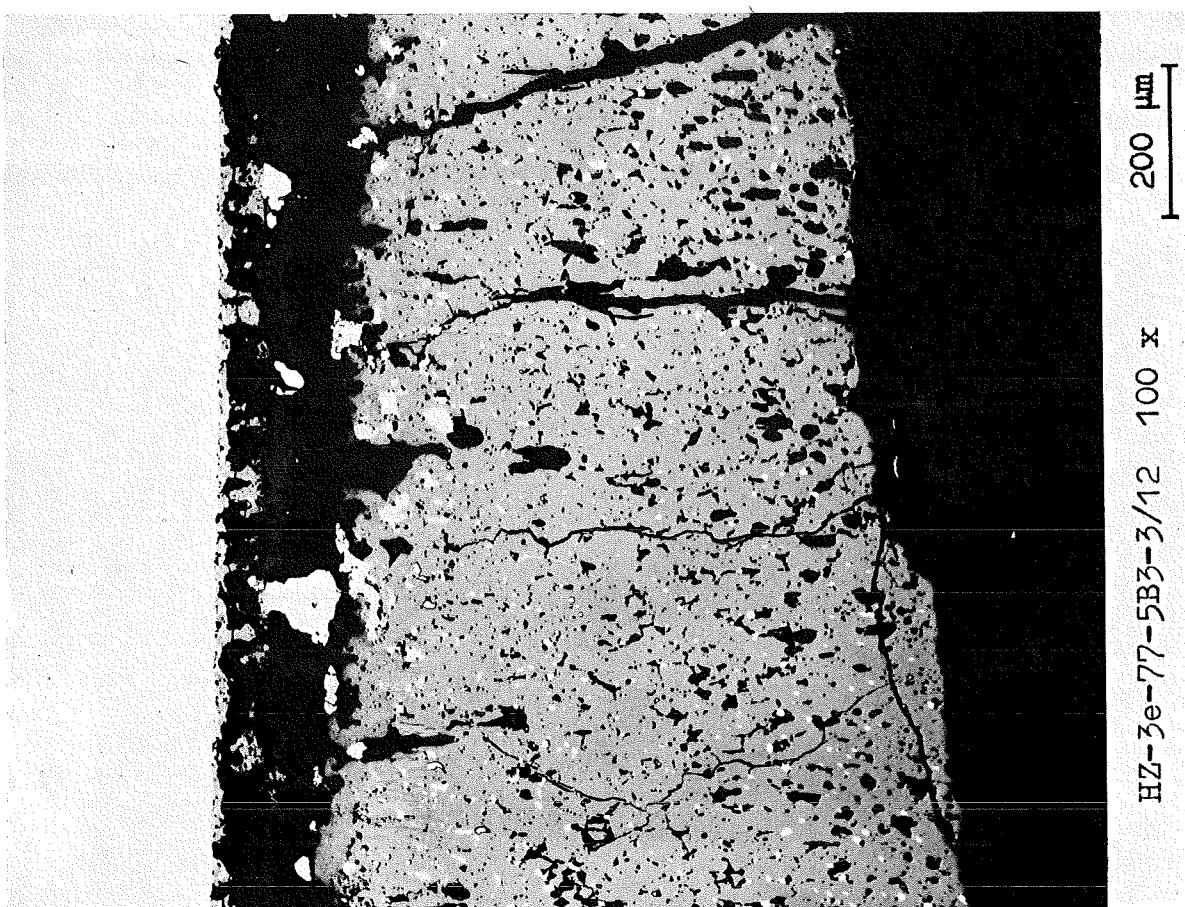


1mm

- II/18 -

zu Prüfling 5B3  
A 3

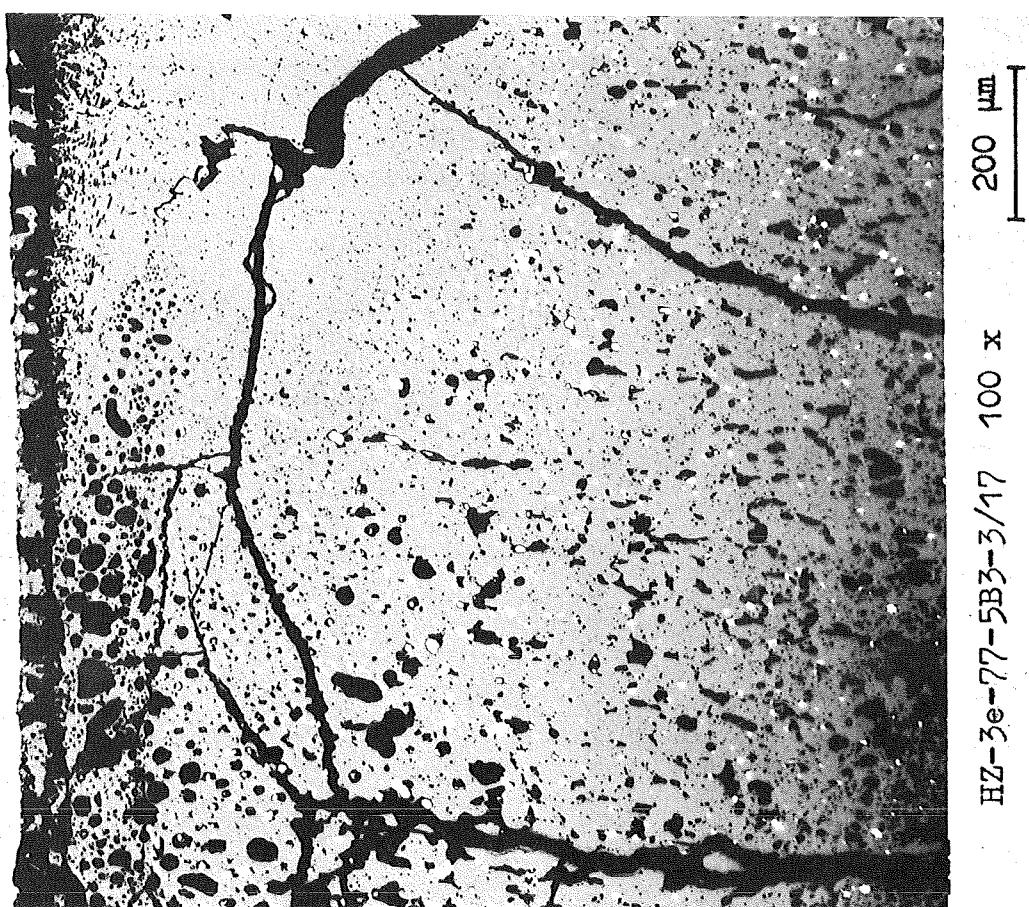




- II/20 -

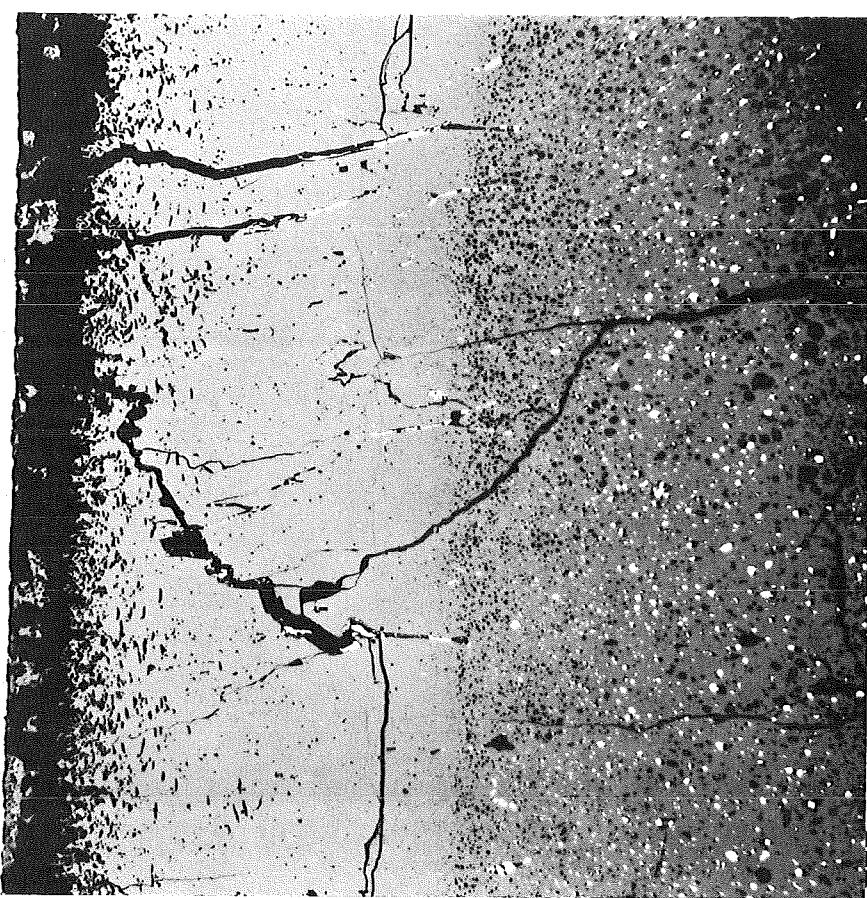
zu Prüfling 5B3

A 3

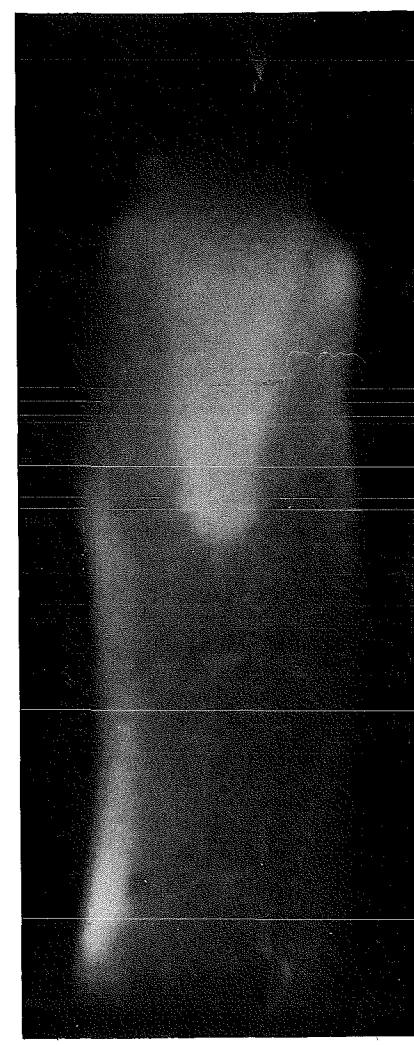
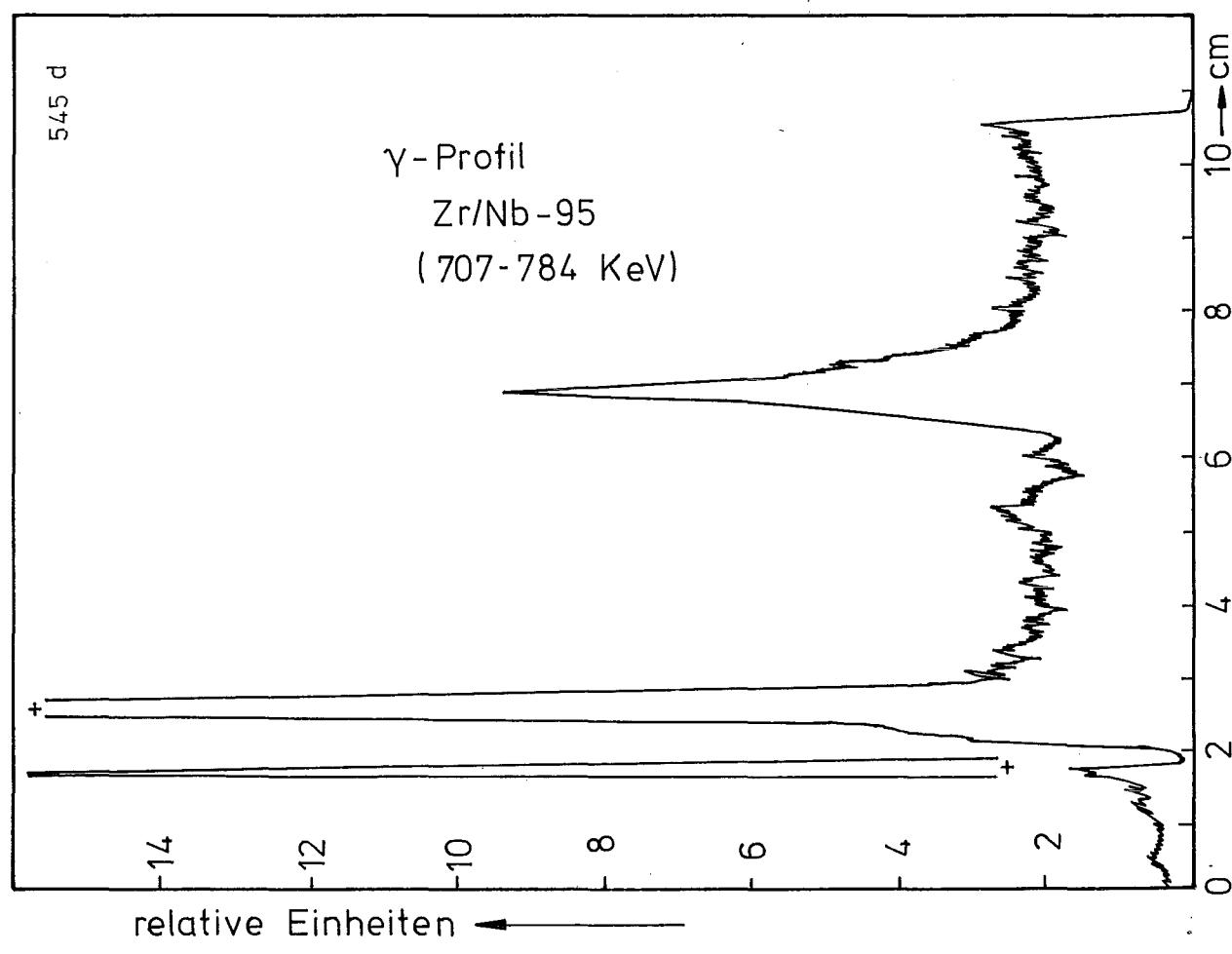
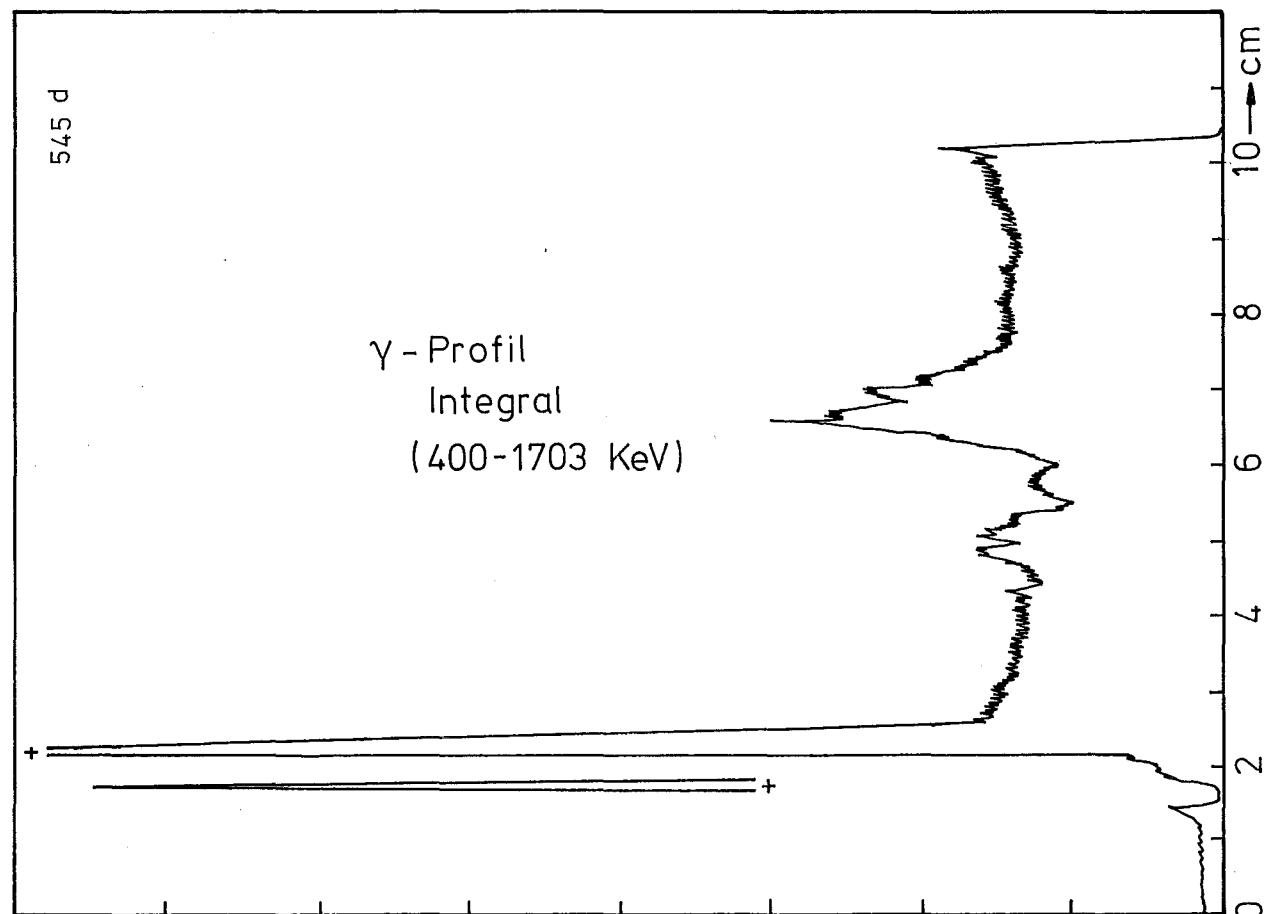


HZ-3e-77-5B3-3/17 100 x

HZ-3e-77-5B3-3/18 100 x



Schnitt: 1



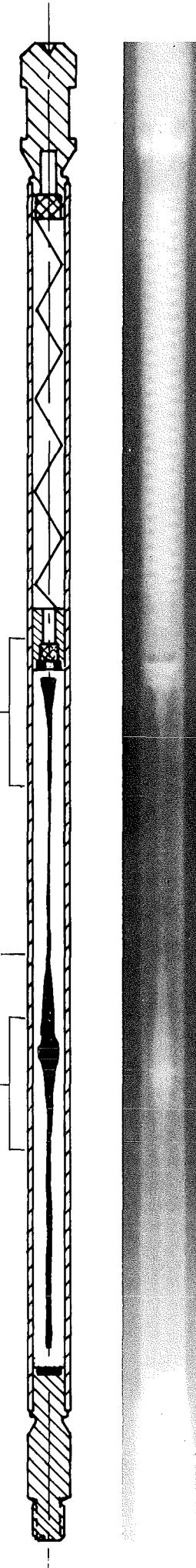
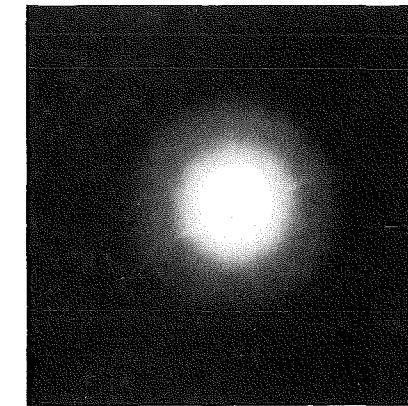
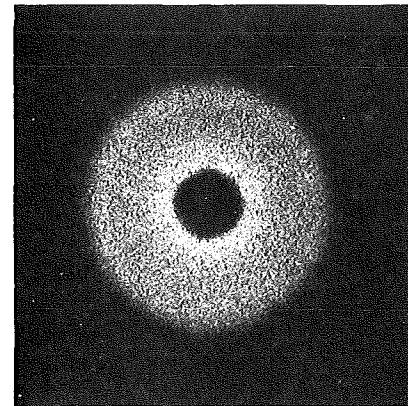
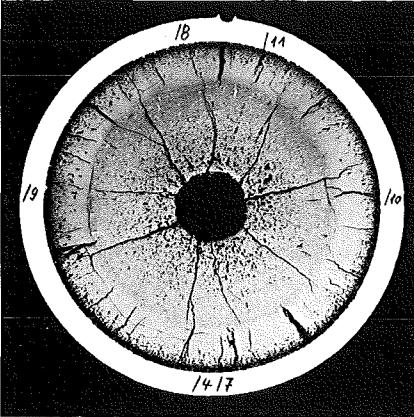
A

1mm

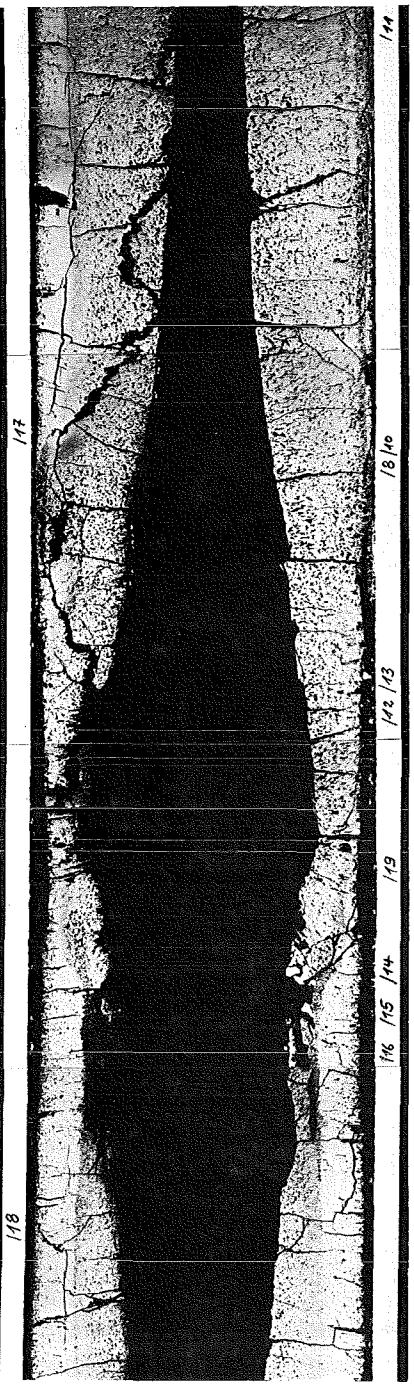
B

C

Schnitt: 2



Schnitt: 3



- II /21 -

Prüfling 5 B/3

## Brennstoff

Form : Tabletten

## Zusammensetzung :

Tablettendichte : 86,6 % th.D.

## Hülle

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 4,7 mm

**Wandstärke** : 0,3 mm

## Geometrie

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : 75 µm

**Schmierdichte** : 80 % th.D.

## Bestrahlung

Einrichtung : Na/PbBi-Doppel-  
kapsel Typ 4

Dauer : 321,6 Vollasttage

Ende : 27.9.1971

Rechn. Abbrand mittl. : 113,2 Mwd/kgM.

Stableistung max./mittl.: 462/366 W/cm

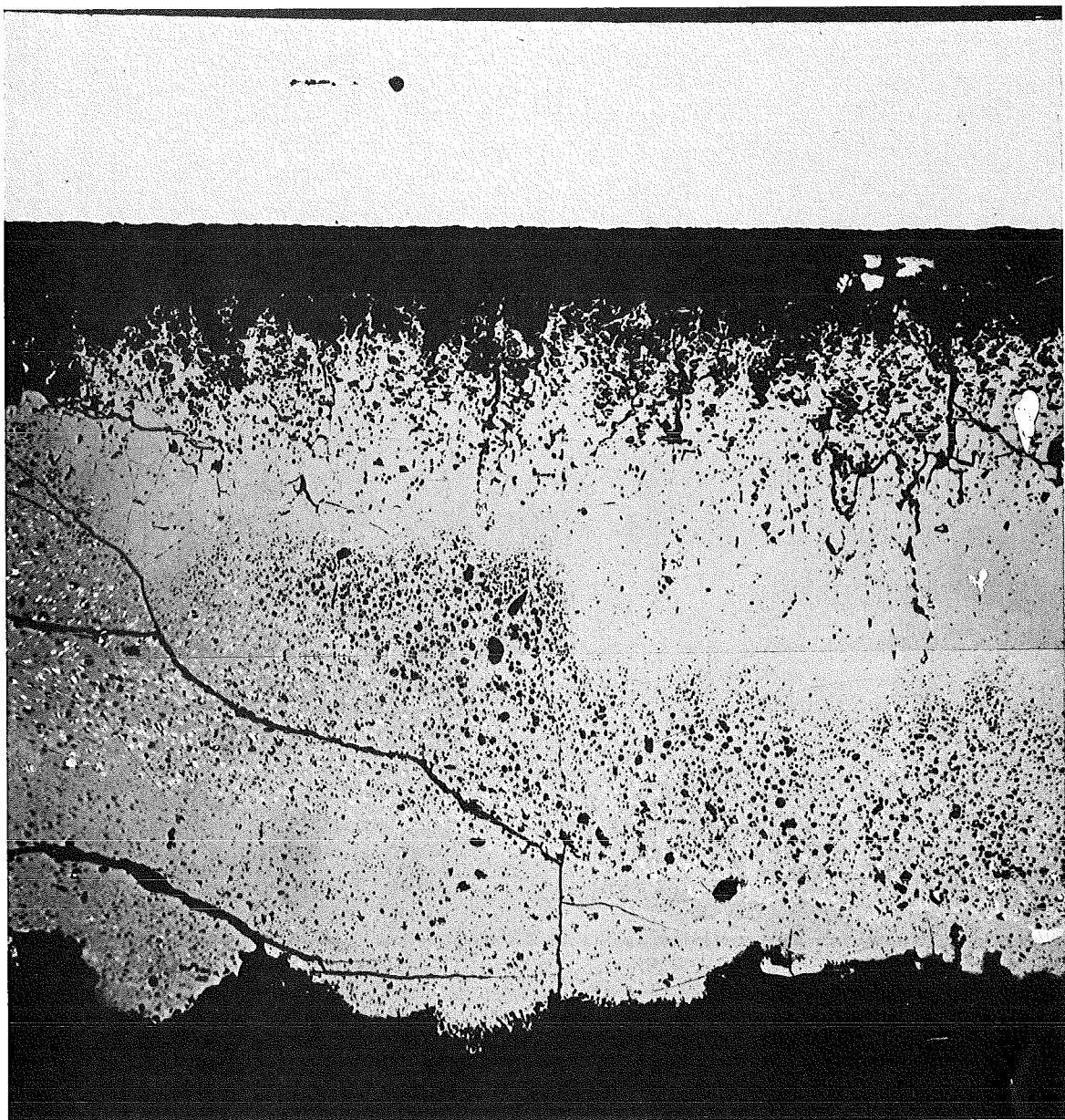
A

1mm

B

C

- II/23 -  
zu Prüfling 5B2  
A1



8...9

200  $\mu\text{m}$

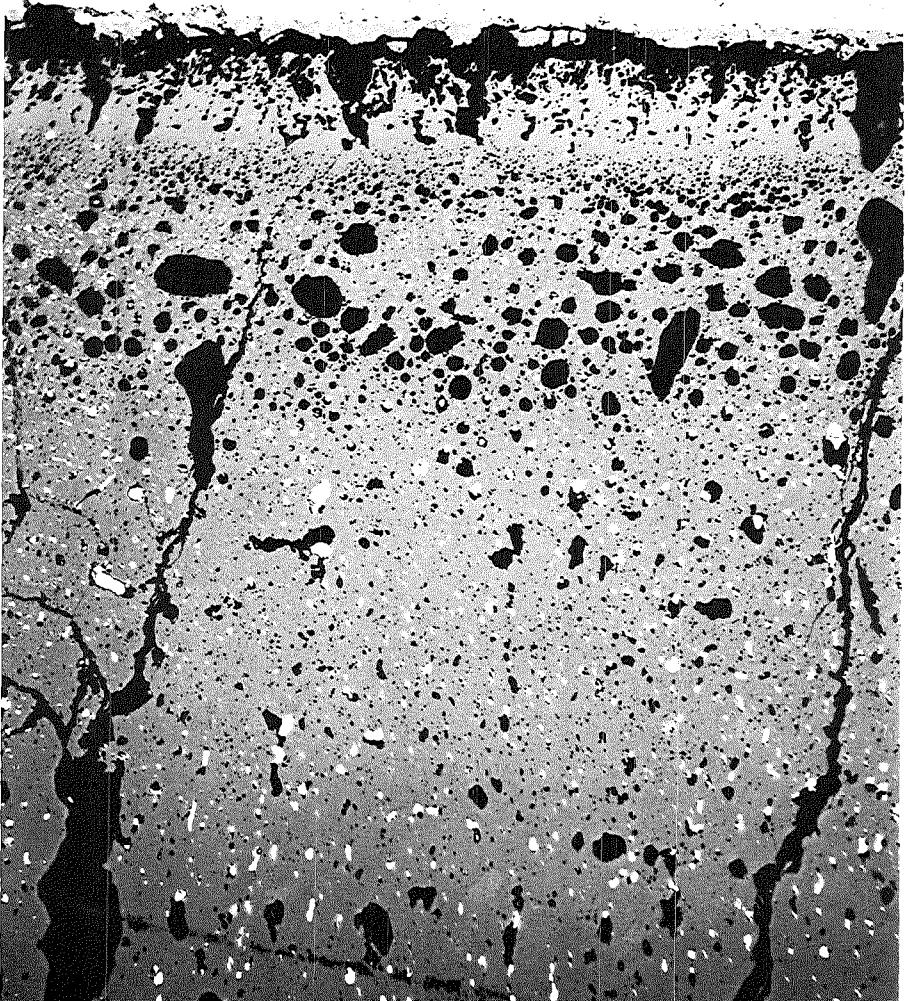
- II/24 -

zu Prüfling 5B2  
A 1



HZ-3e-77-5B2-1/12 200 x

100  $\mu\text{m}$



HZ-3e-77-5B2-1/14 200 x

100  $\mu\text{m}$

-II/25-

zu Prüfling 5B 2

A 1



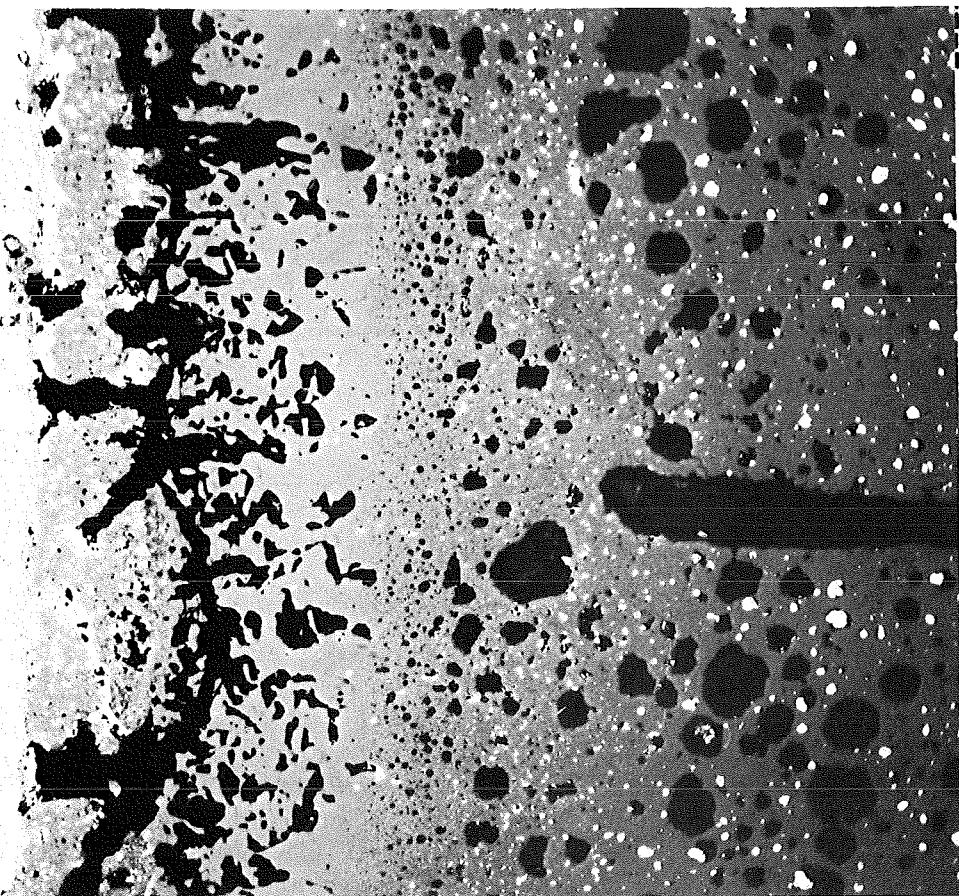
- II/26 -

zu Prüfling 5B2

A 1



HZ-3e-77-5B2-1/16 200 x 100 μm



HZ-3e-77-5B2-1/17 500 x 40 μm

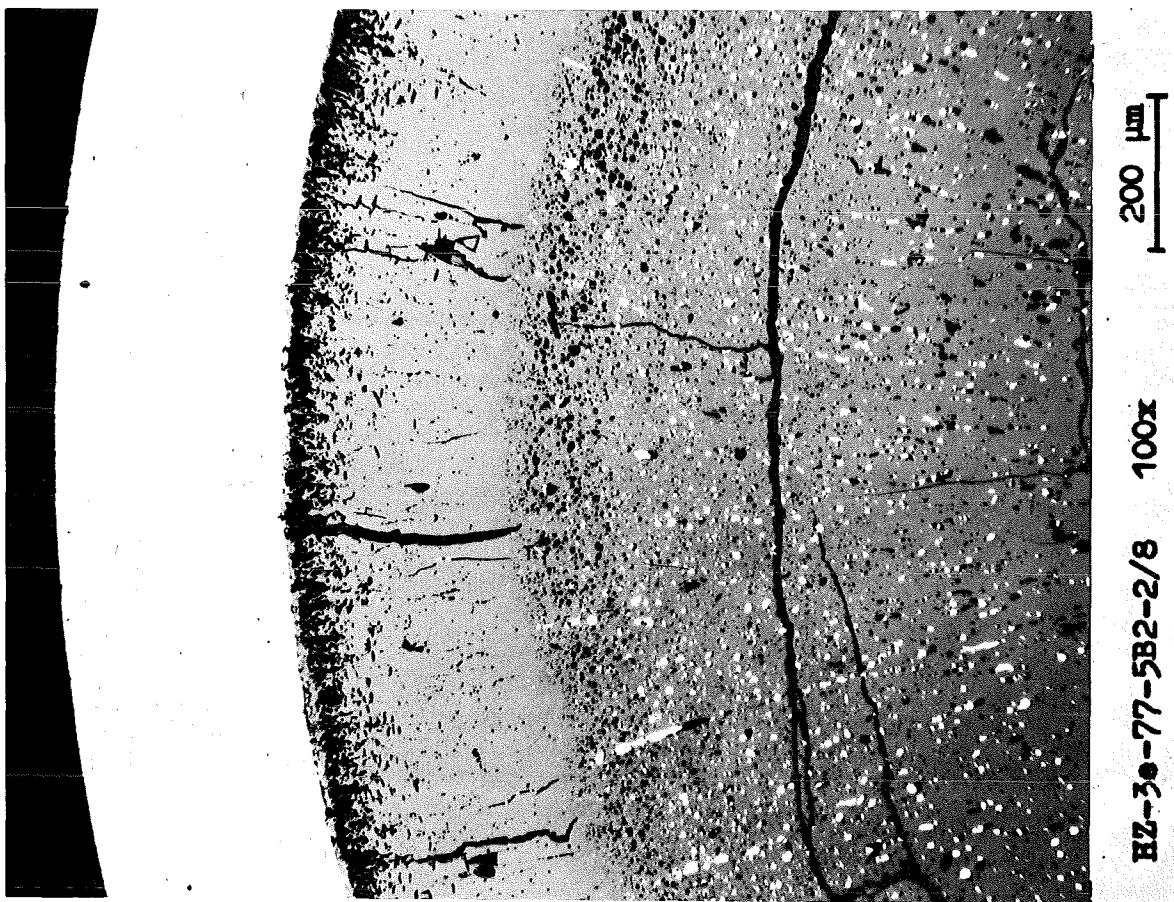
- II/27-  
zu Prüfling 5B2  
A 2



- II/28 -

zu Prüfling 5B2

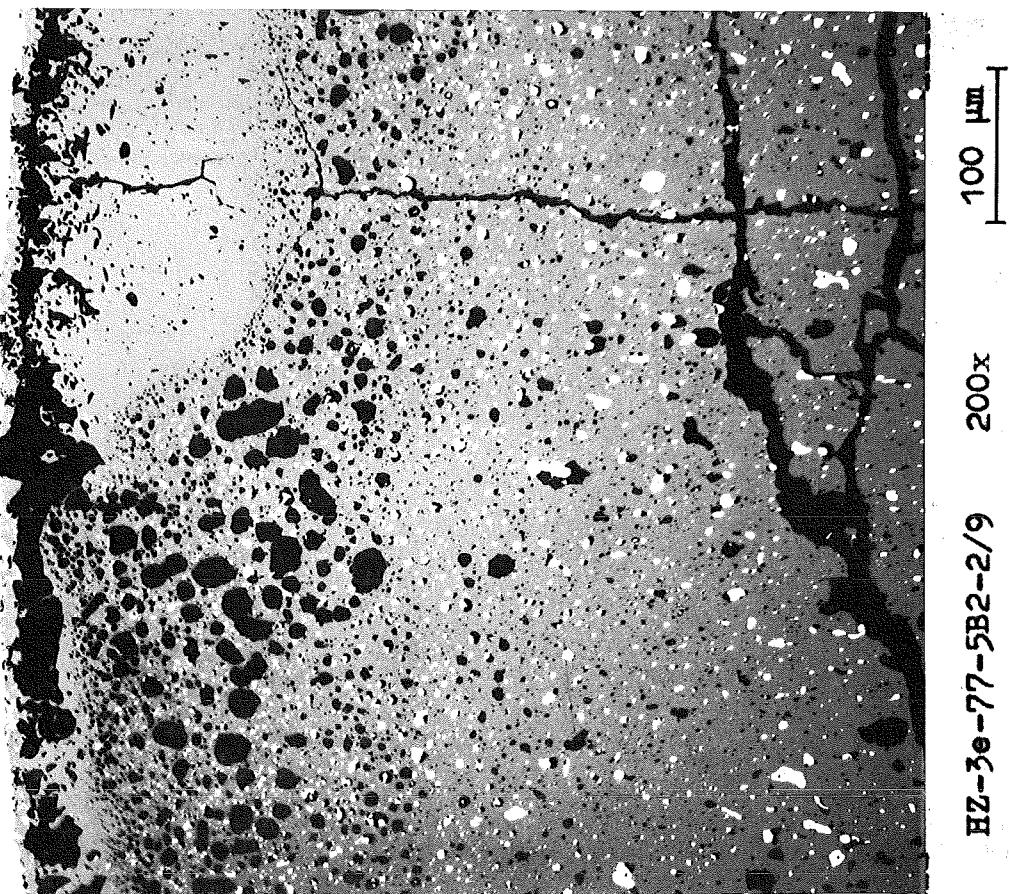
A 2



- II/29 -

zu Prüfling 5B2

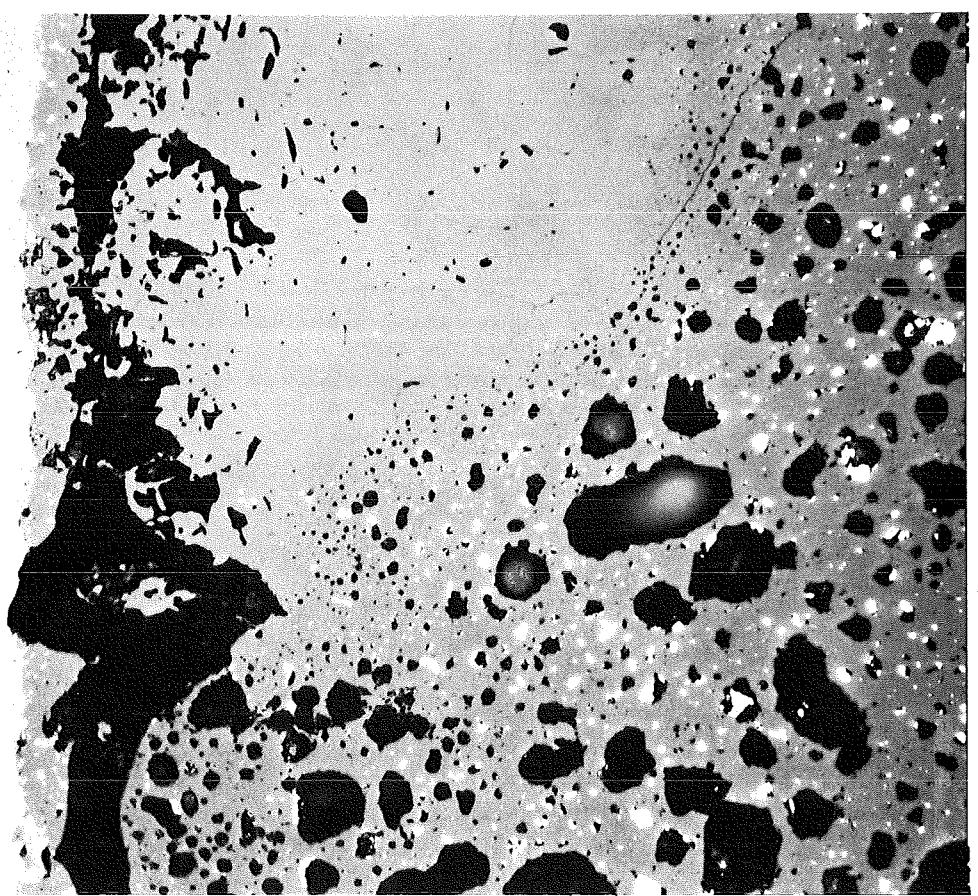
A 2



HZ-30-77-5B2-2/9

200x

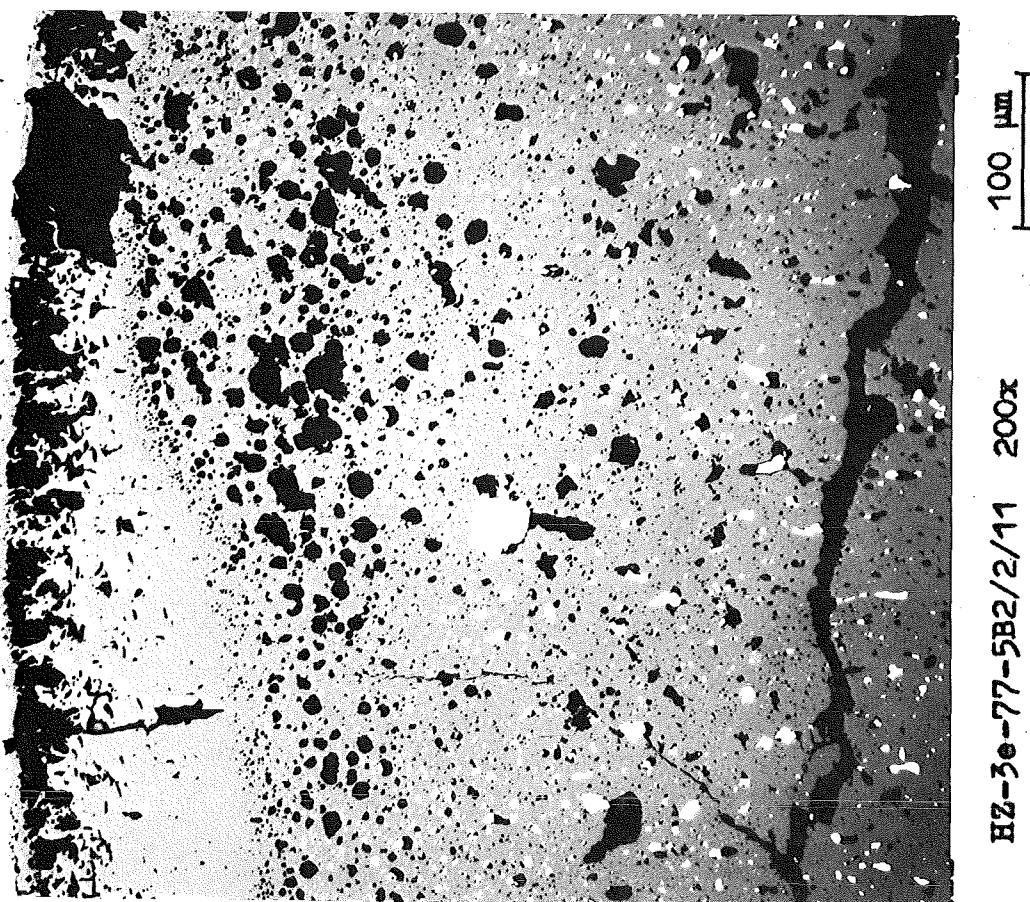
40 μm



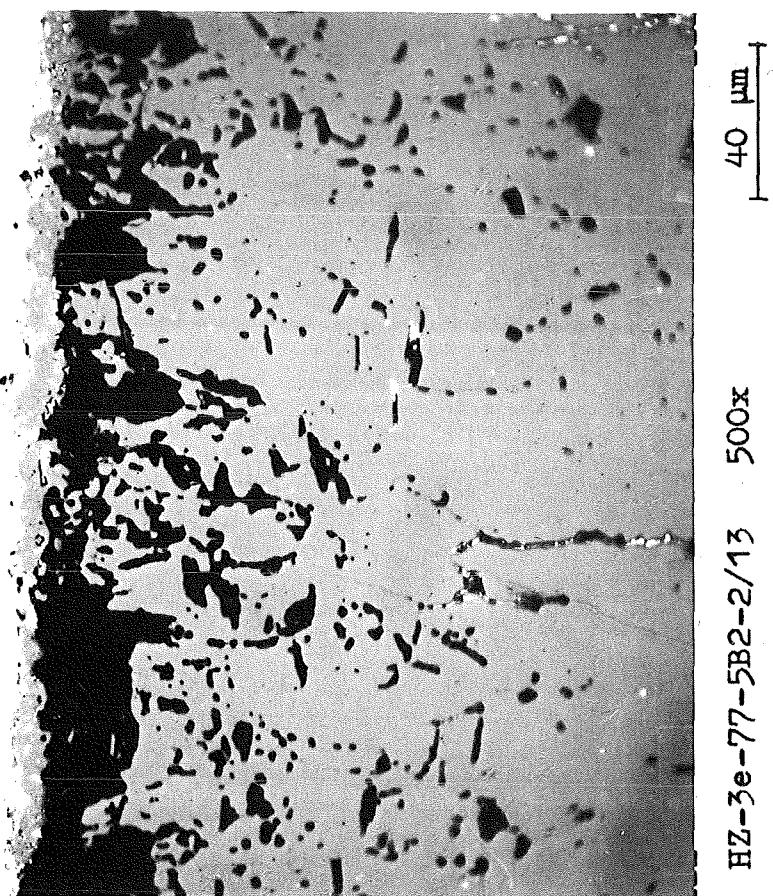
HZ-30-77-5B2-2/10

500x

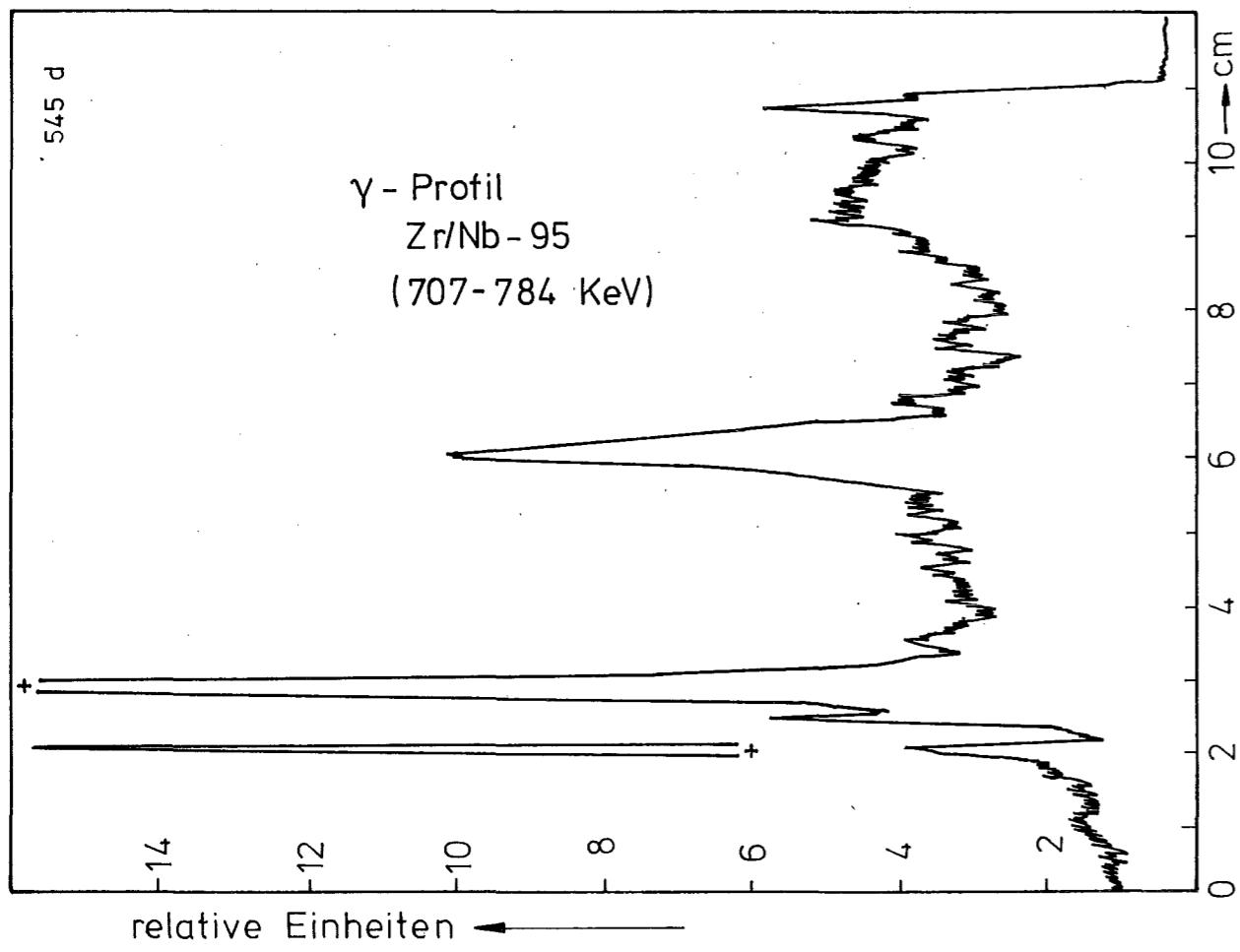
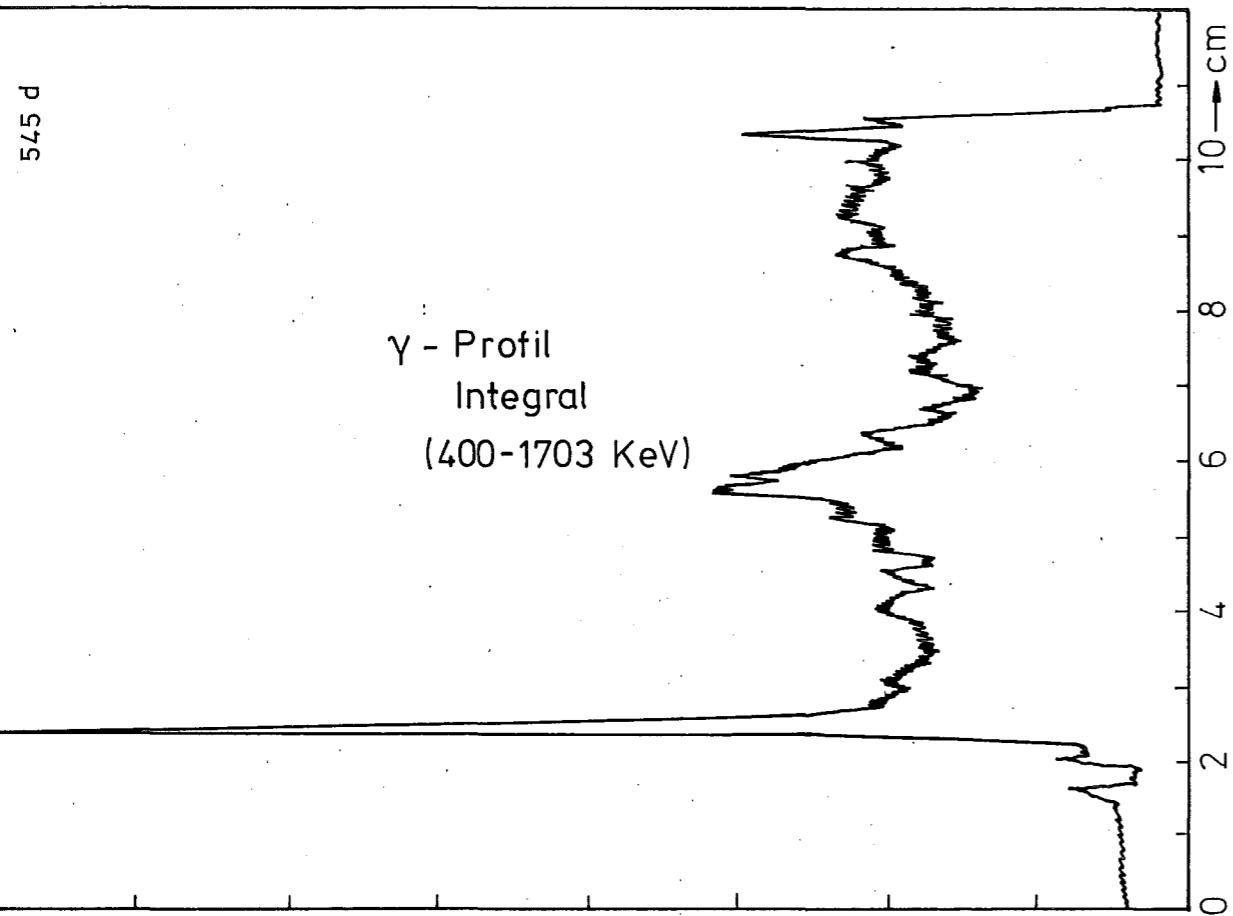
- II/30 -  
zu Prüfling 5B2  
A 2



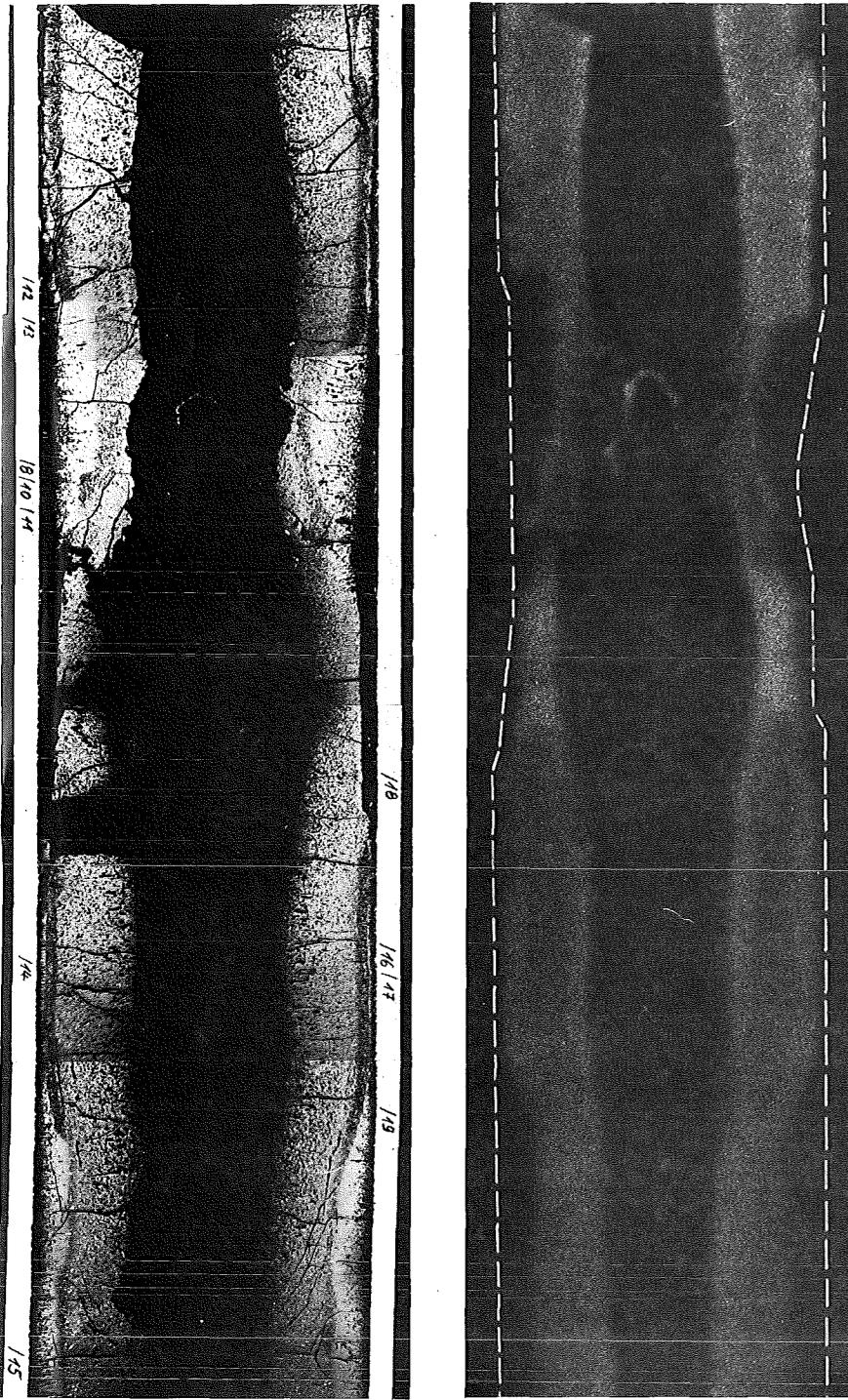
HZ-3e-77-5B2/2/11 200x



HZ-3e-77-5B2-2/13 500x



Schnitt: 1



A

1mm

B

C

- II/31-

Prüfling 5 B/2

Brennstoff:

Form : Tabletten  
Zusammensetzung :  $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$   
Tablettendichte : 86,6 % th.D.

Hülle:

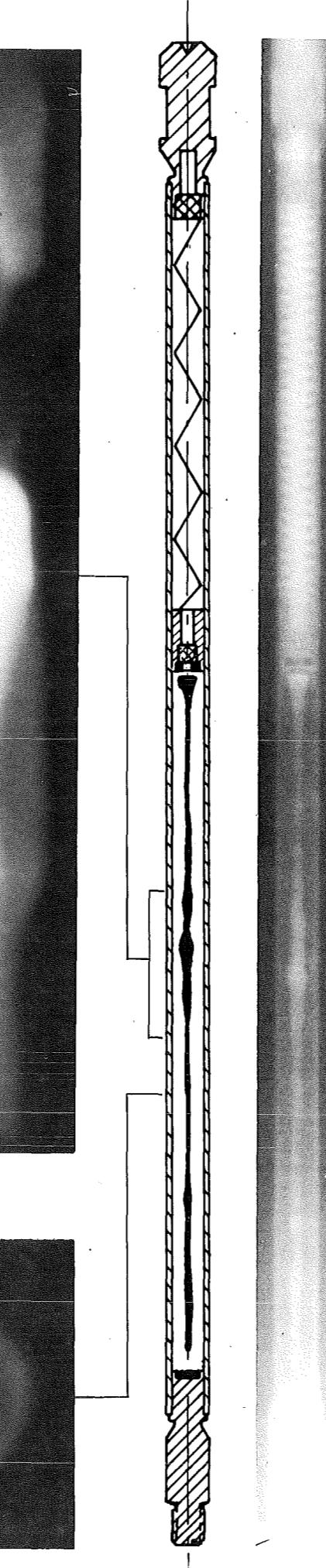
Material : 1.4988  
Aussendurchmesser : 4,7 mm  
Wandstärke : 0,3 mm

Geometrie:

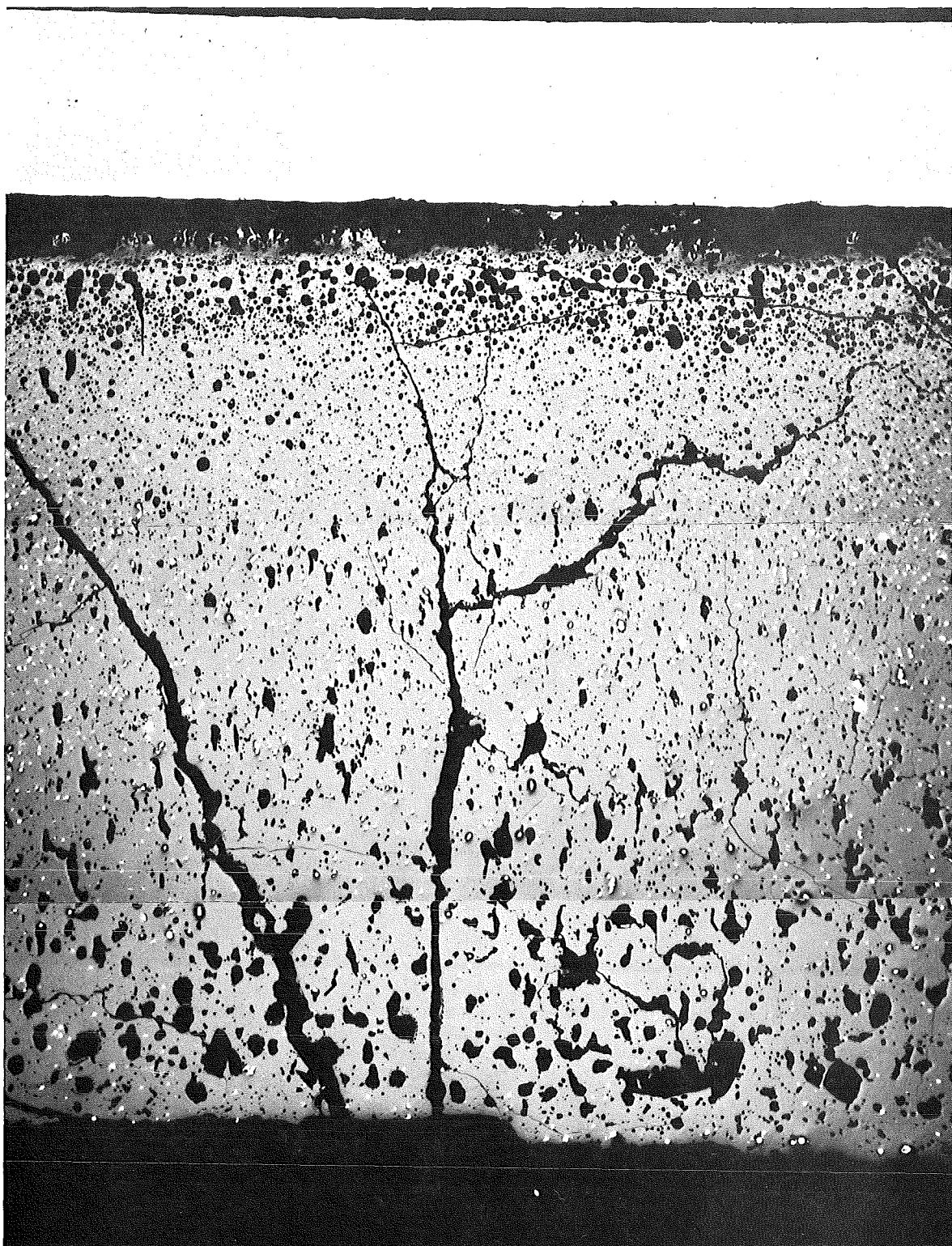
Länge des Prüflings : 172 mm  
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm  
Radiale Spaltweite : 75  $\mu\text{m}$   
Schmierdichte : 80 % th.D.

Bestrahlung:

Einrichtung : Na/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4  
Dauer : 321,6 Vollasttage  
Ende : 27.9.1971  
Rechn. Abbrand mittl. : 116,6 MWD/kgM  
Stableistung max./mittl. : 491/377 W/cm



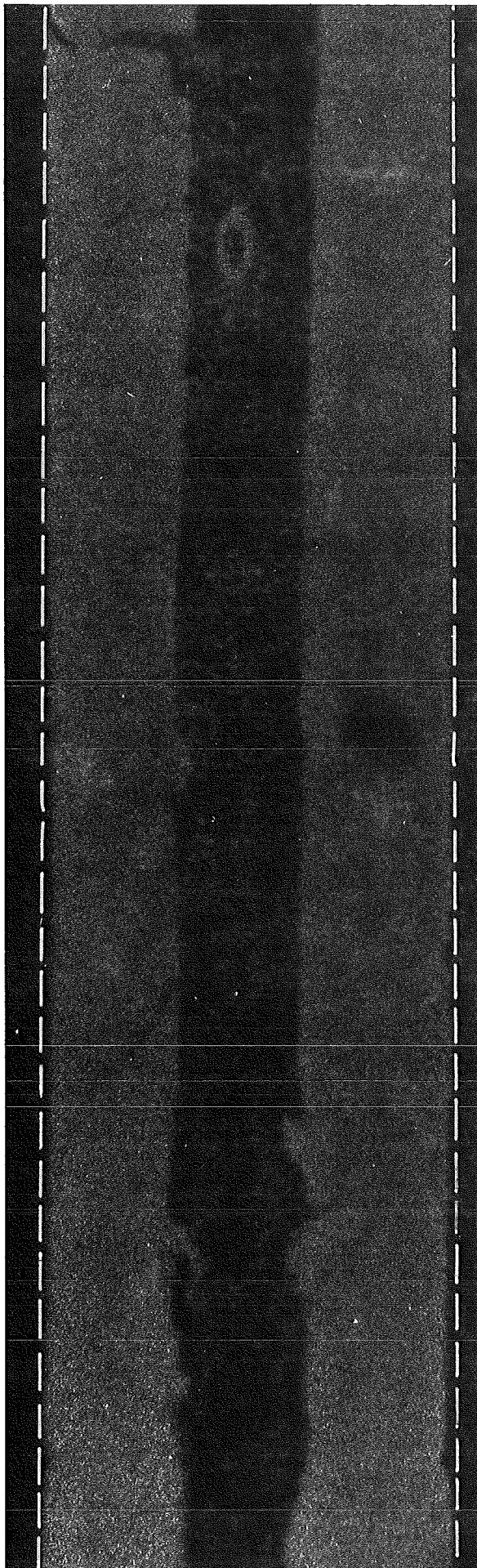
- II/33 -  
zu Prüfling 5B7  
A1



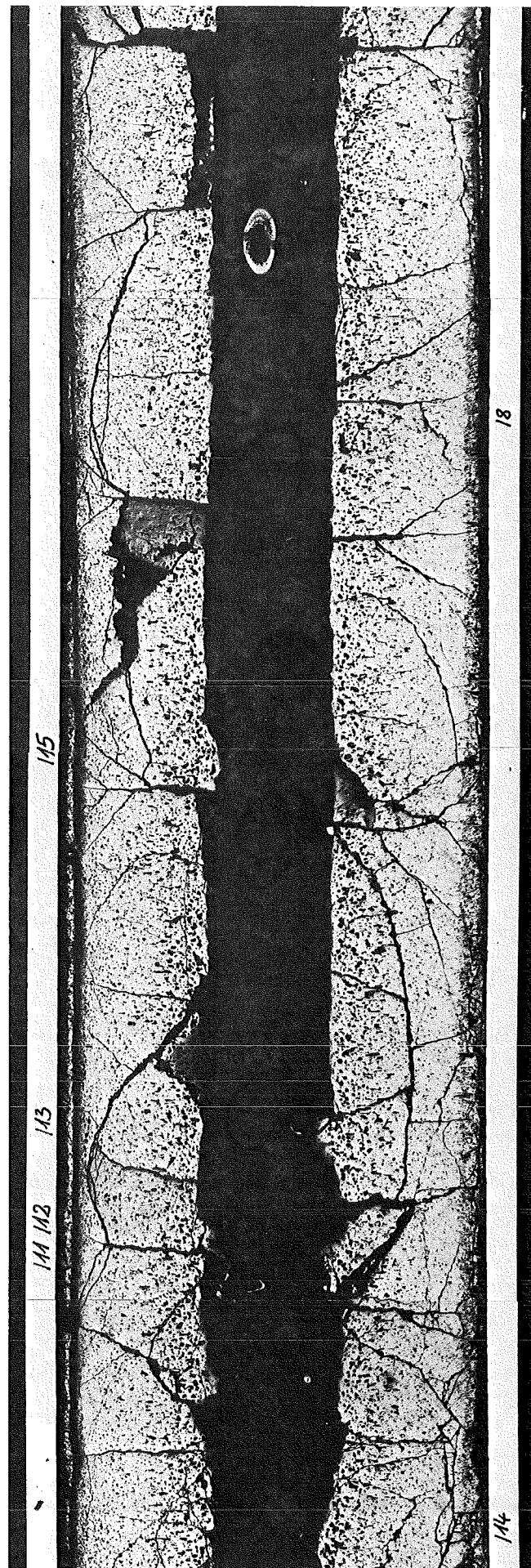
8...10

200  $\mu\text{m}$

B 1



A1

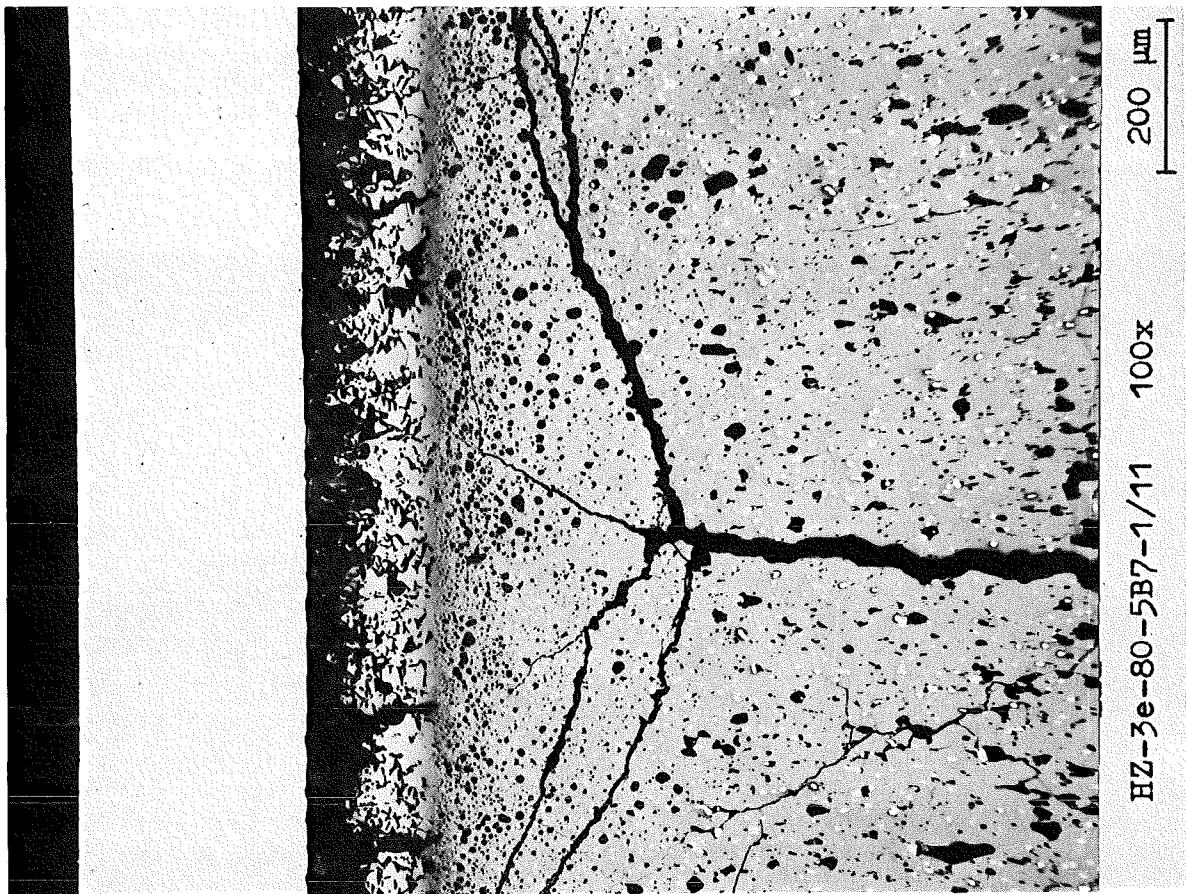


$\alpha$  - Autoradiografie

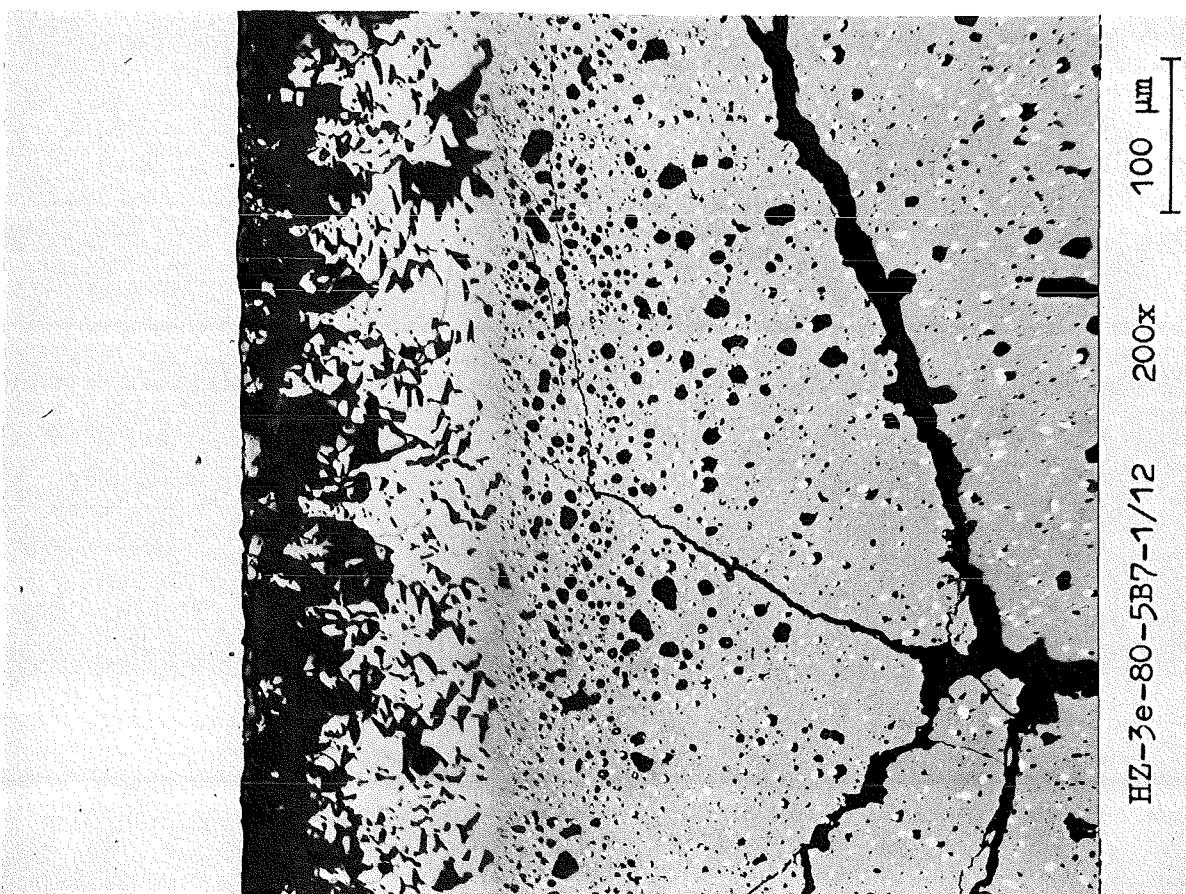
1mm

- II/35 -

zu Prüfling 5B7  
A 1



HZ-3e-80-5B7-1/11 100x

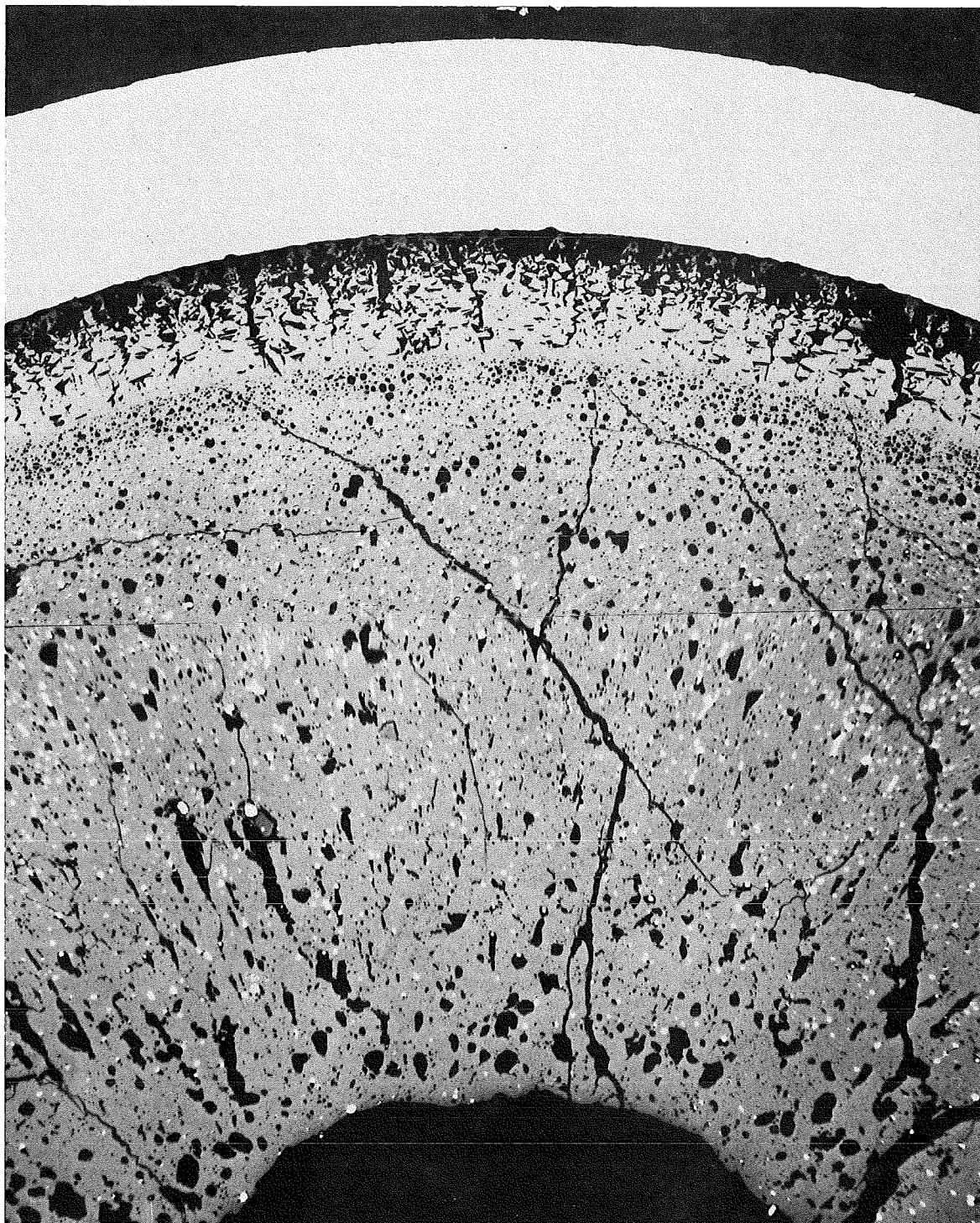


HZ-3e-80-5B7-1/12 200x

- II/36 -

zu Prüfling 5B7

A 2



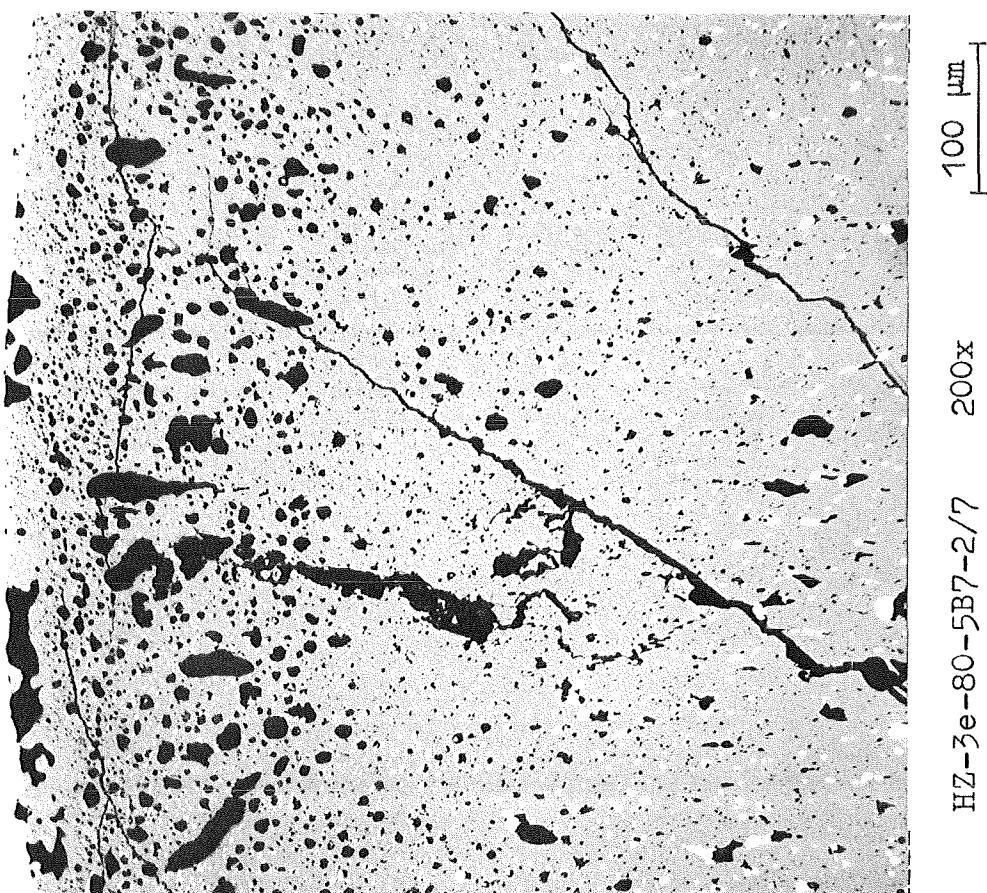
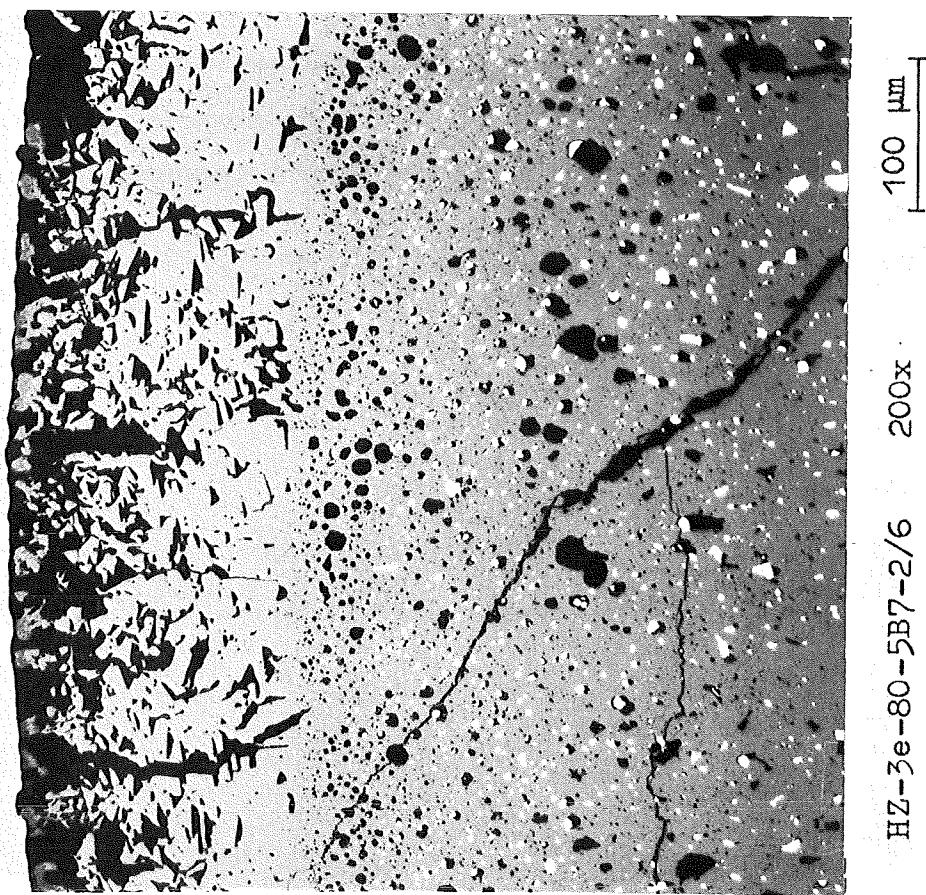
4...5

200  $\mu\text{m}$

- II / 37 -

zu Prüfling 5B7

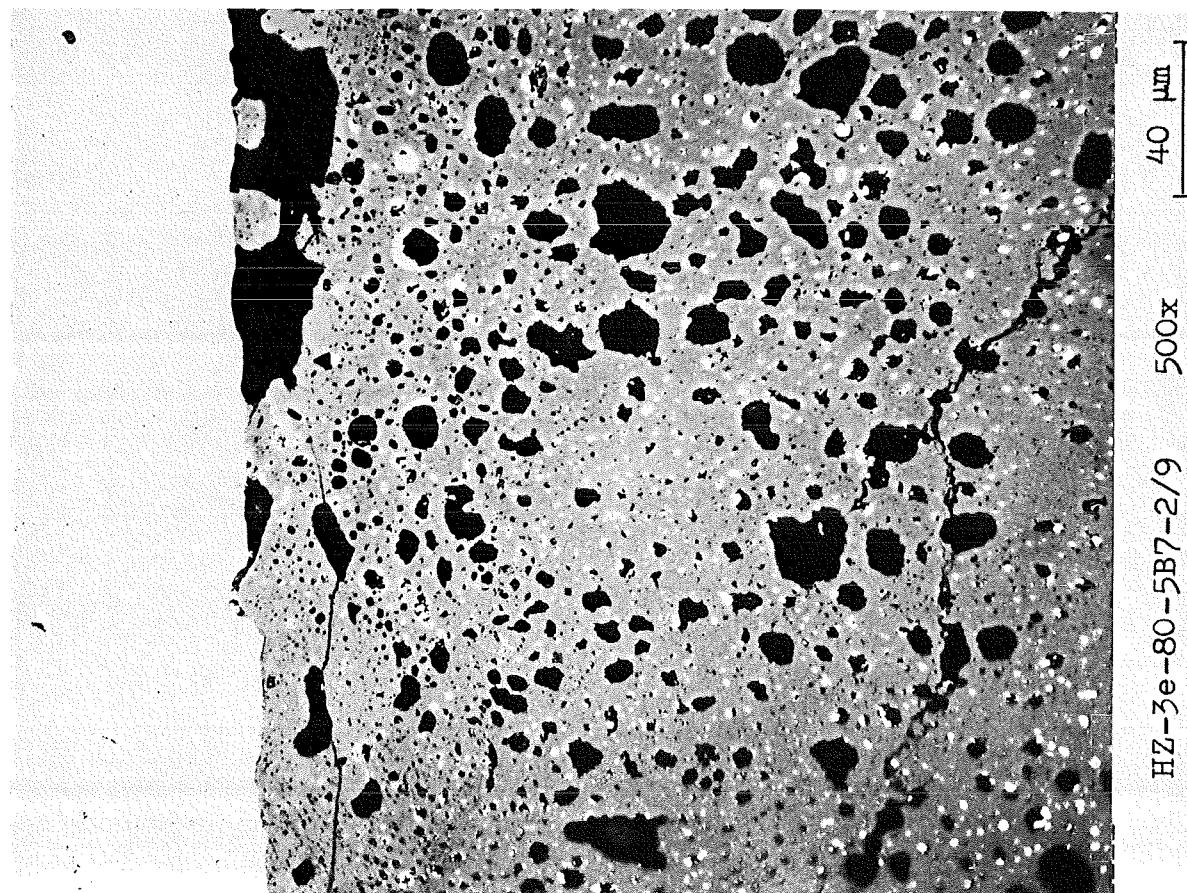
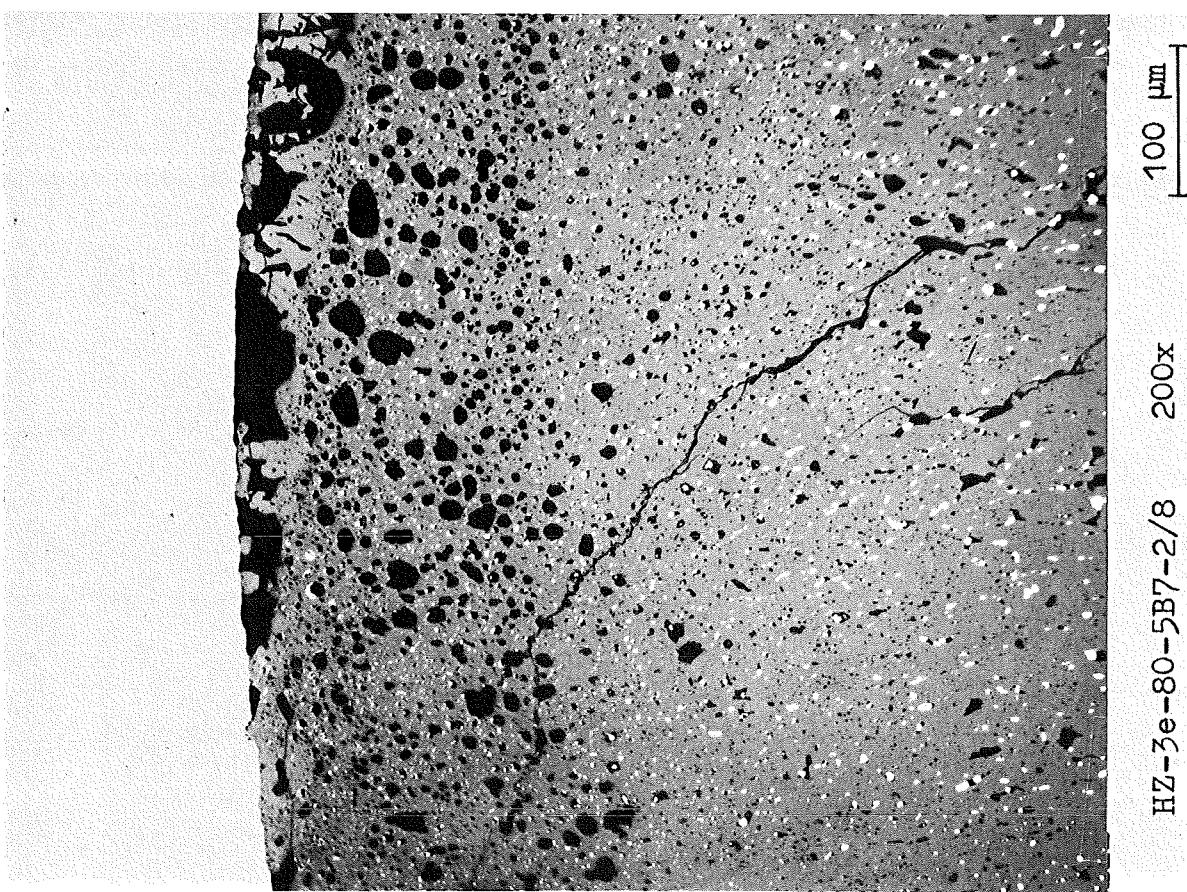
A 2

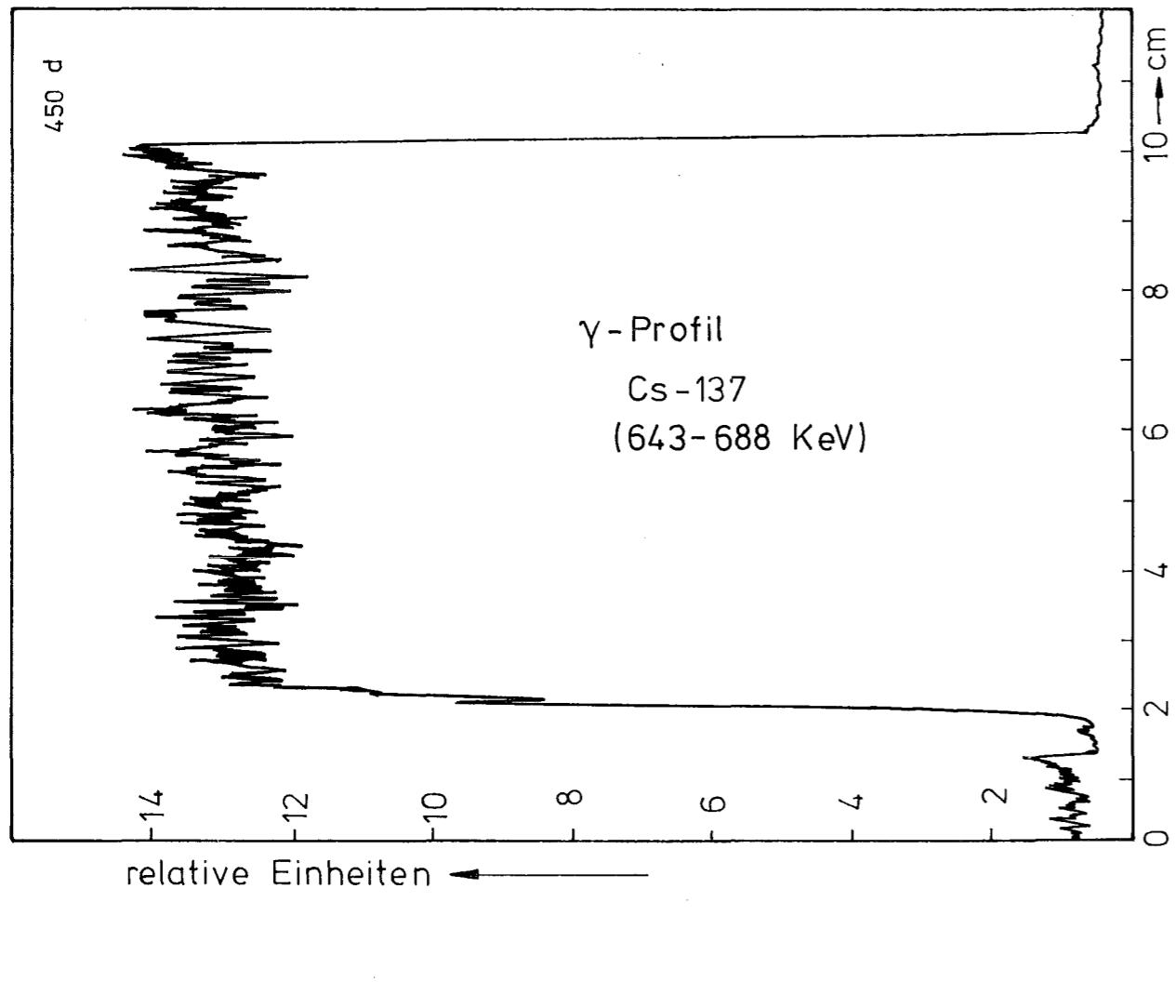
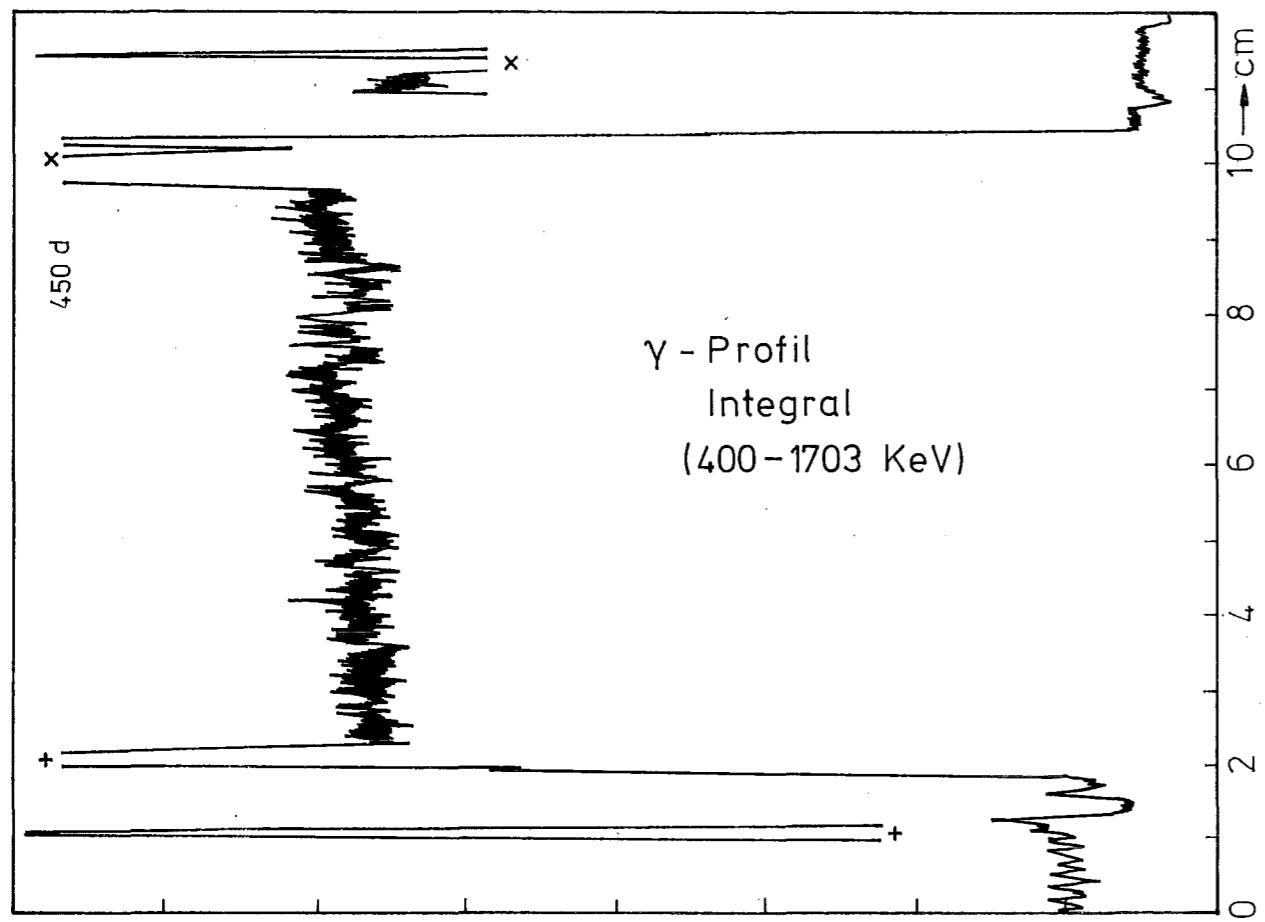


- II/38 -

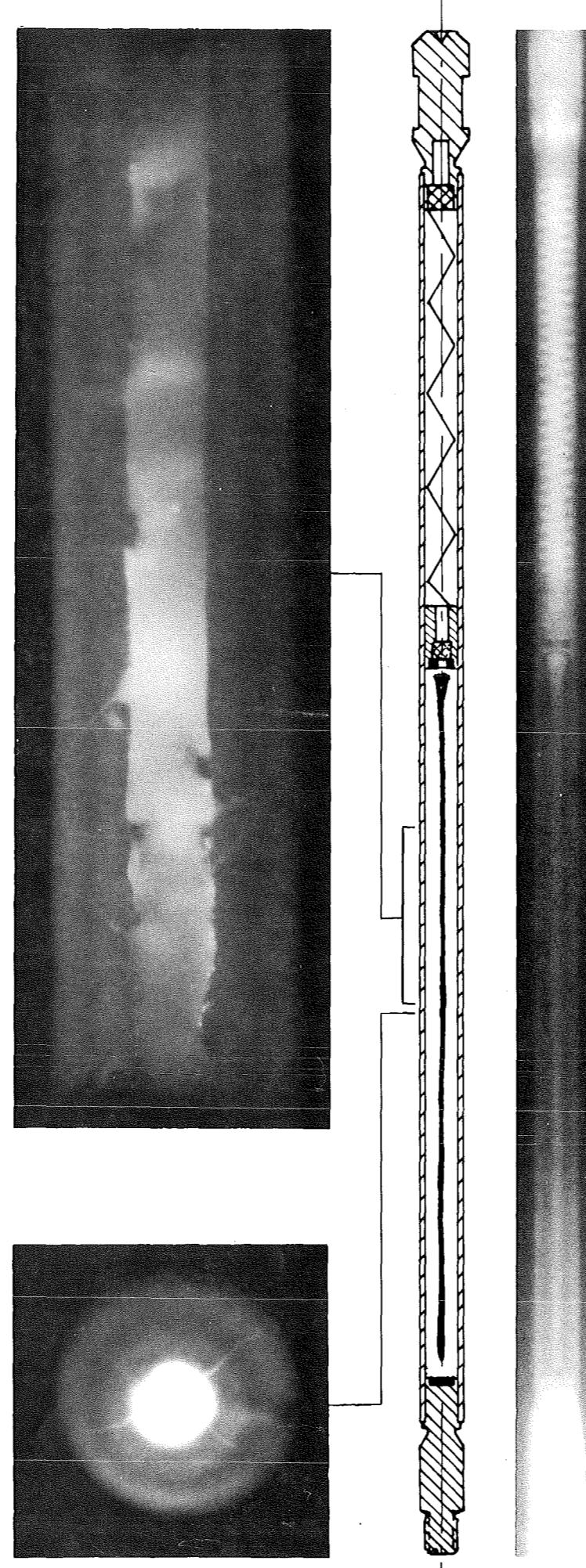
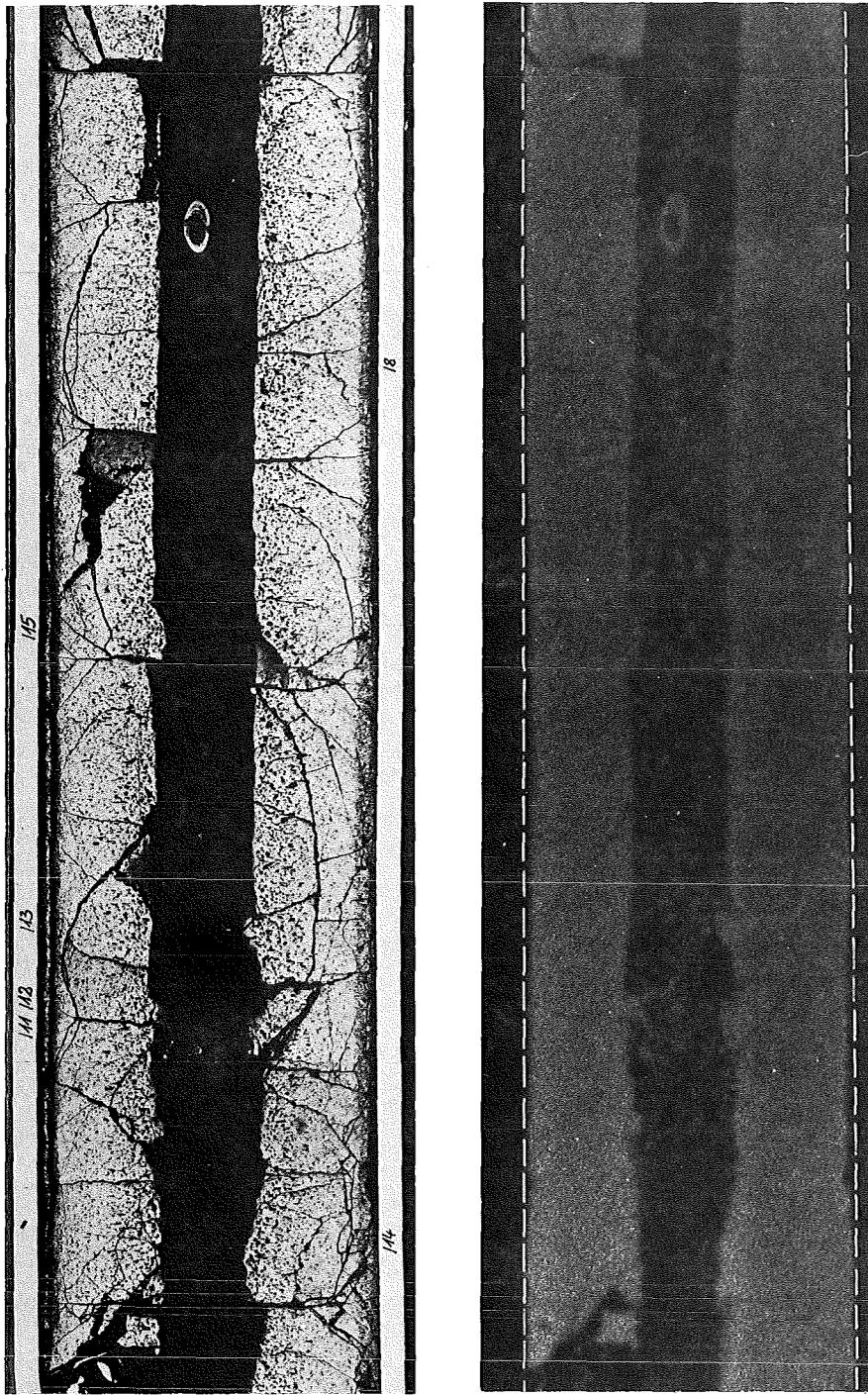
zu Prüfling 5B7

A 2

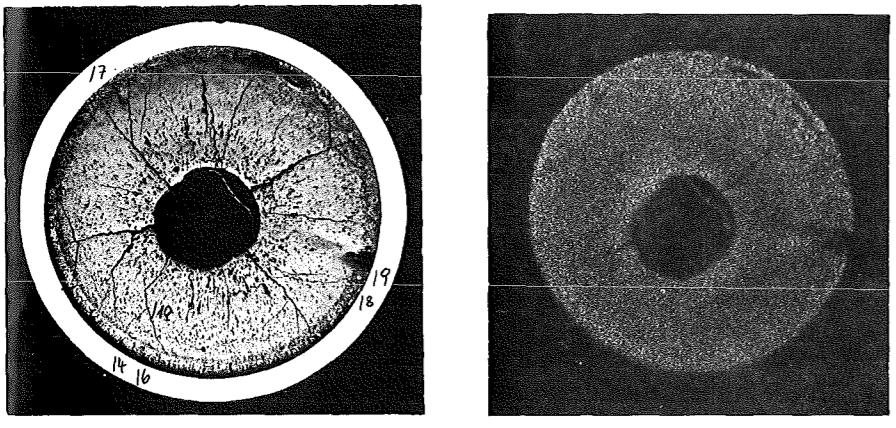




Schnitt: 1



Schnitt: 2



- II/39 -

Prüfling 5 B/7

Brennstoff:

Form : Tablettchen  
Zusammensetzung :  $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$   
Tablettendichte : 86,2 % th.D.

Hülle:

Material : 1.4988  
Aussendurchmesser : 4,7 mm  
Wandstärke : 0,3 mm

Geometrie:

Länge des Prüflings : 172 mm  
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm  
Radiale Spaltweite : 75  $\mu\text{m}$   
Schmierdichte : 80 % th.D.

Bestrahlung:

Einrichtung : Na/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4  
Dauer : 342,7 Vollasttage  
Ende : 13.12.1971  
Rechn. Abbrand mittl. : 114 MWD/kgM  
Stableistung max./mittl. : 469/345 W/cm

A

1mm

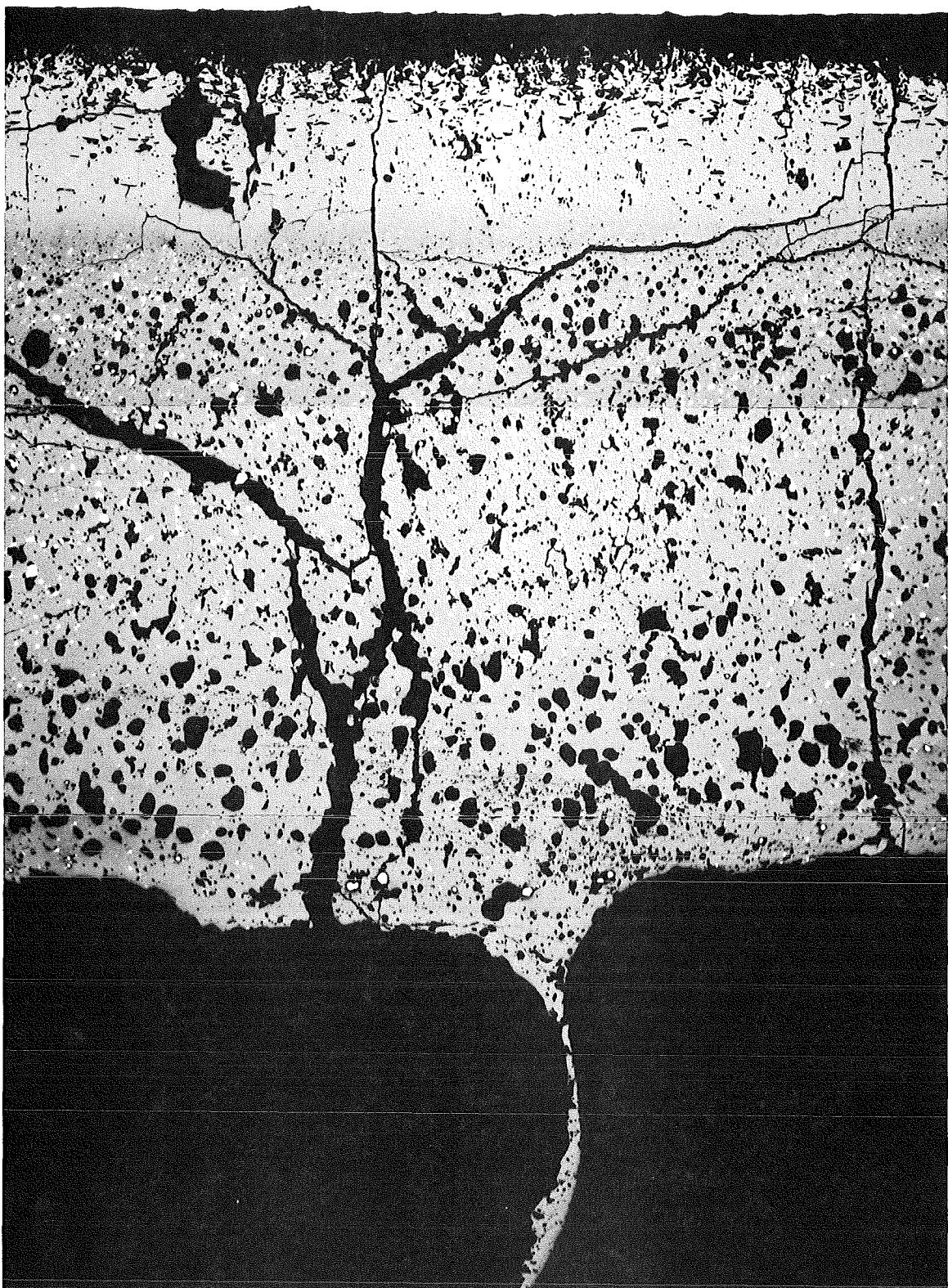
B

C

- II/41 -

zu Prüfling 5 B6

A 1

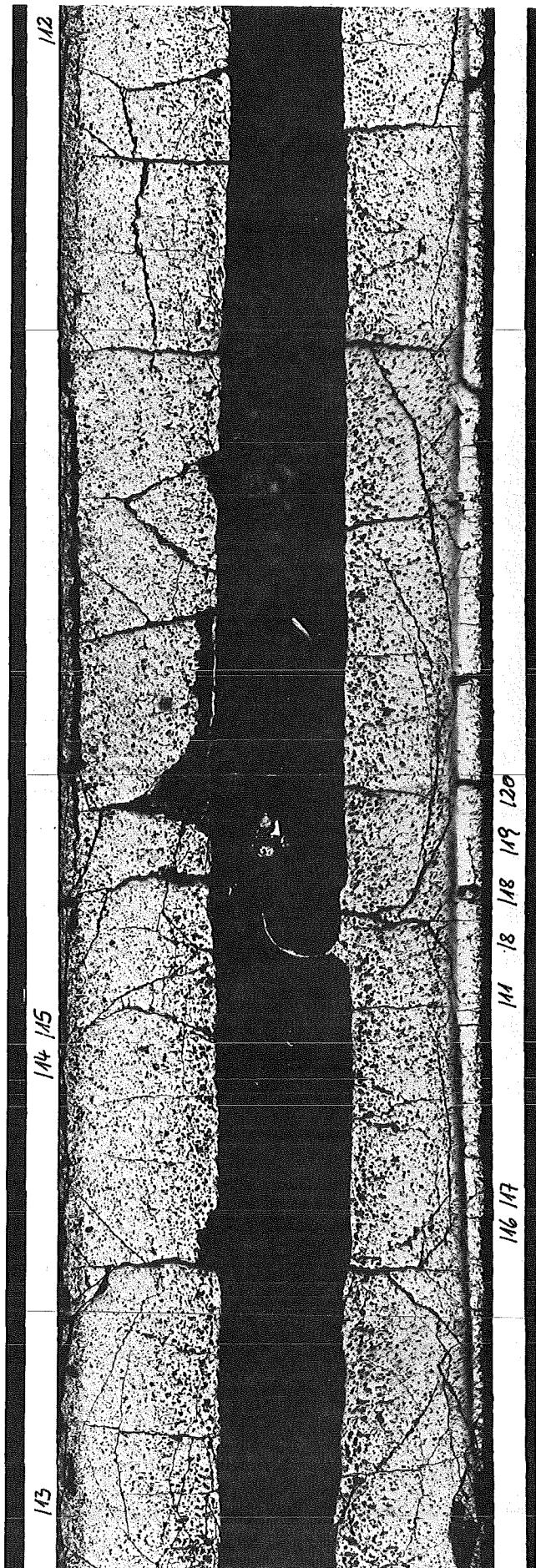


8 · 10

200  $\mu\text{m}$

B1

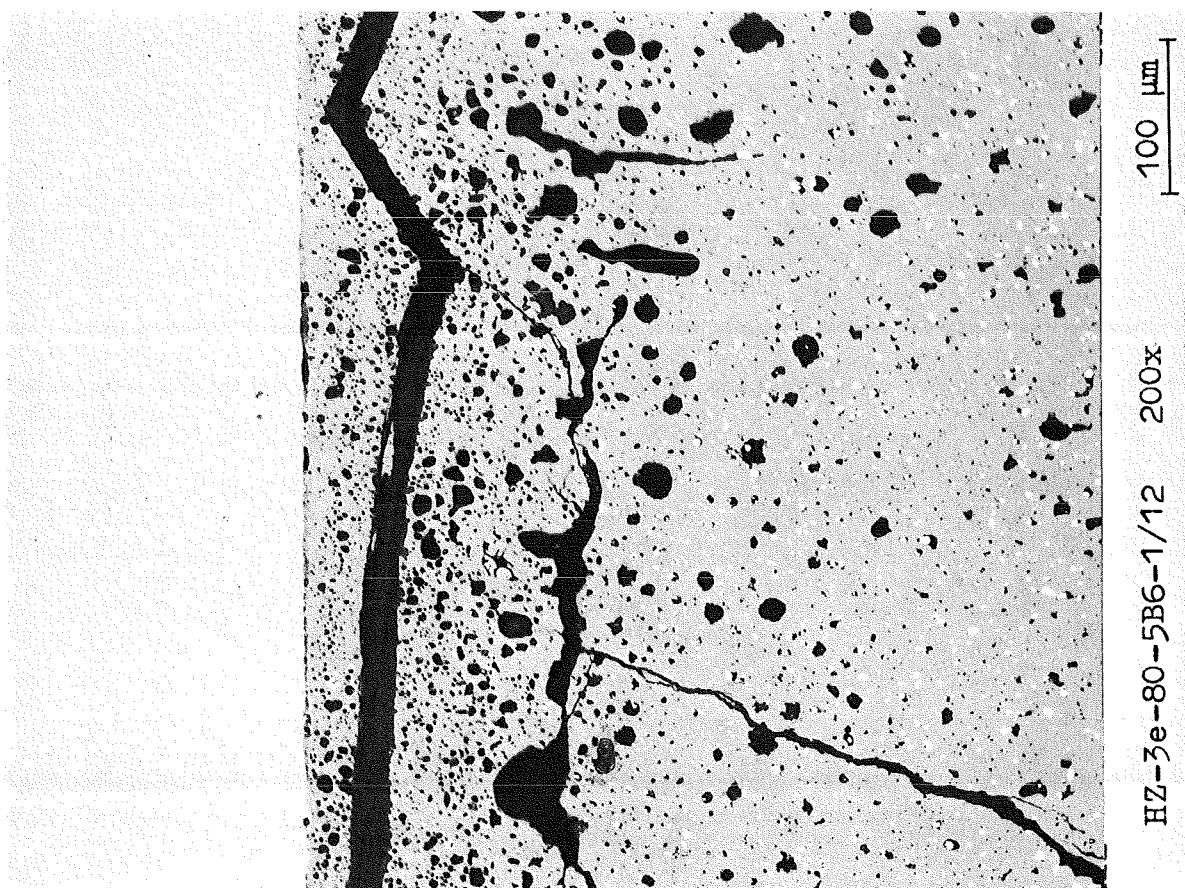
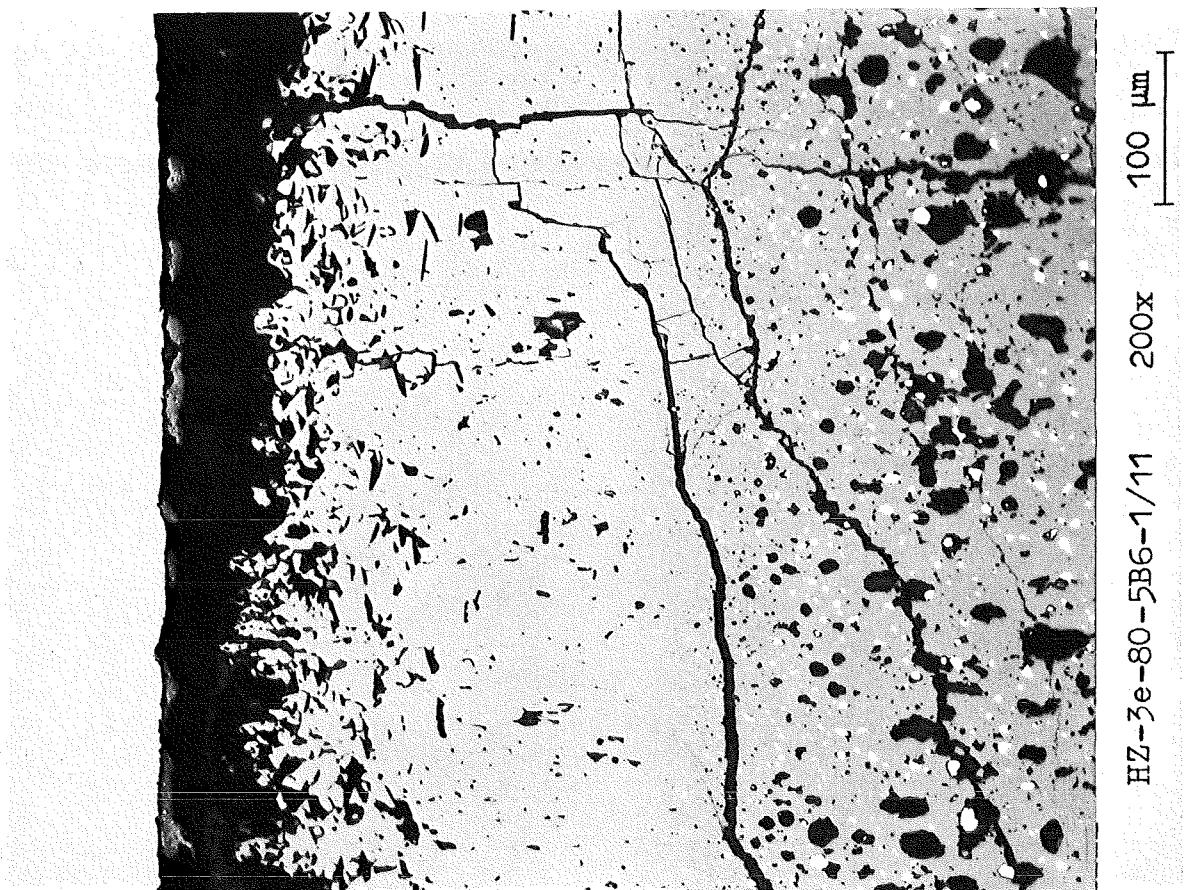
A1



$\alpha$  - Autoradiografie

1 mm

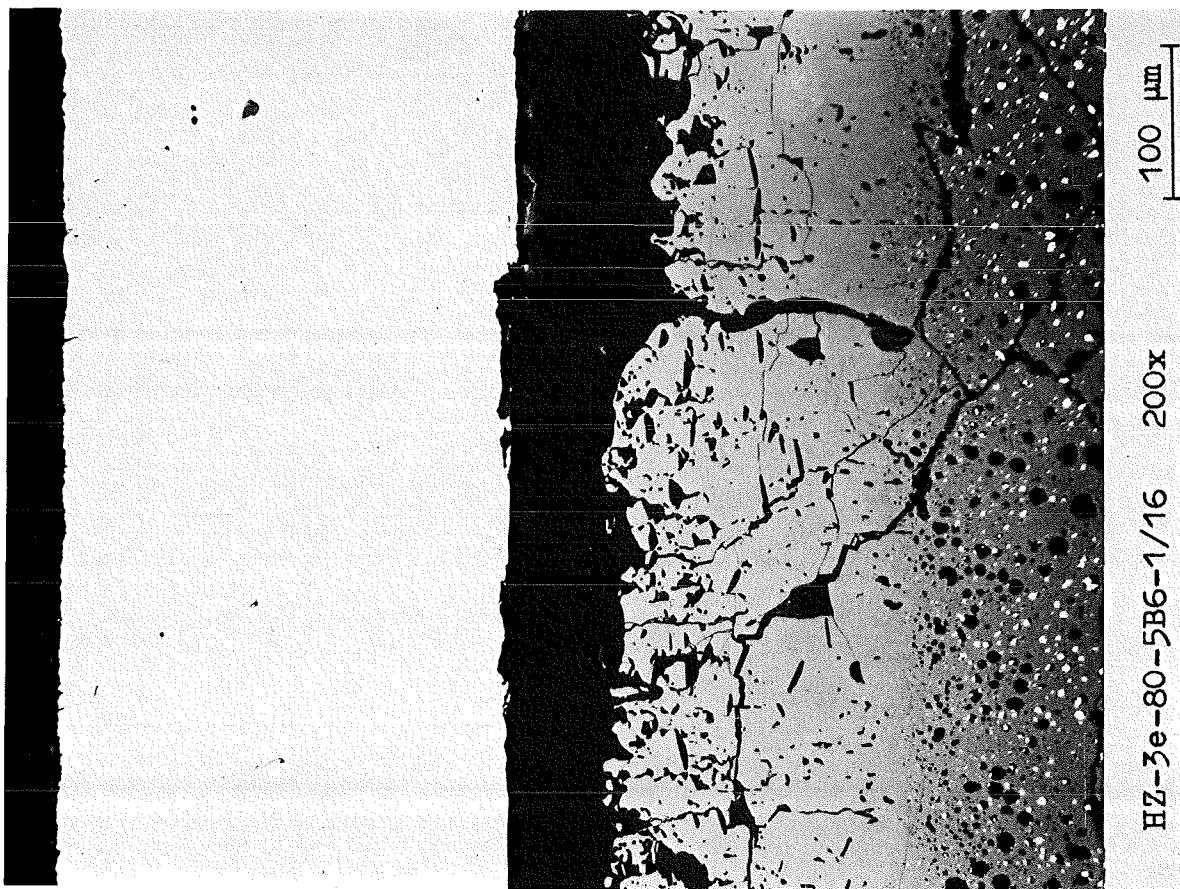
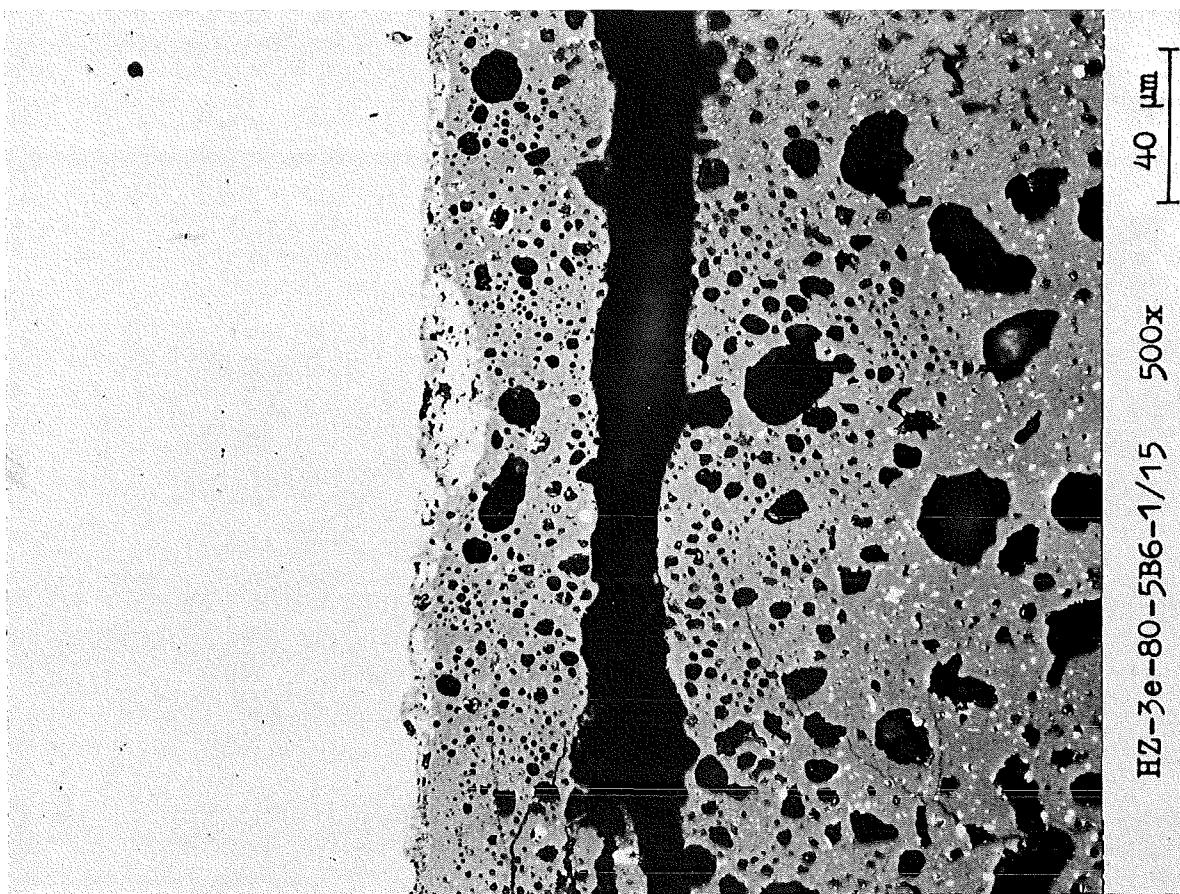
- II/43 -  
zu Prüfling 5B6  
A1



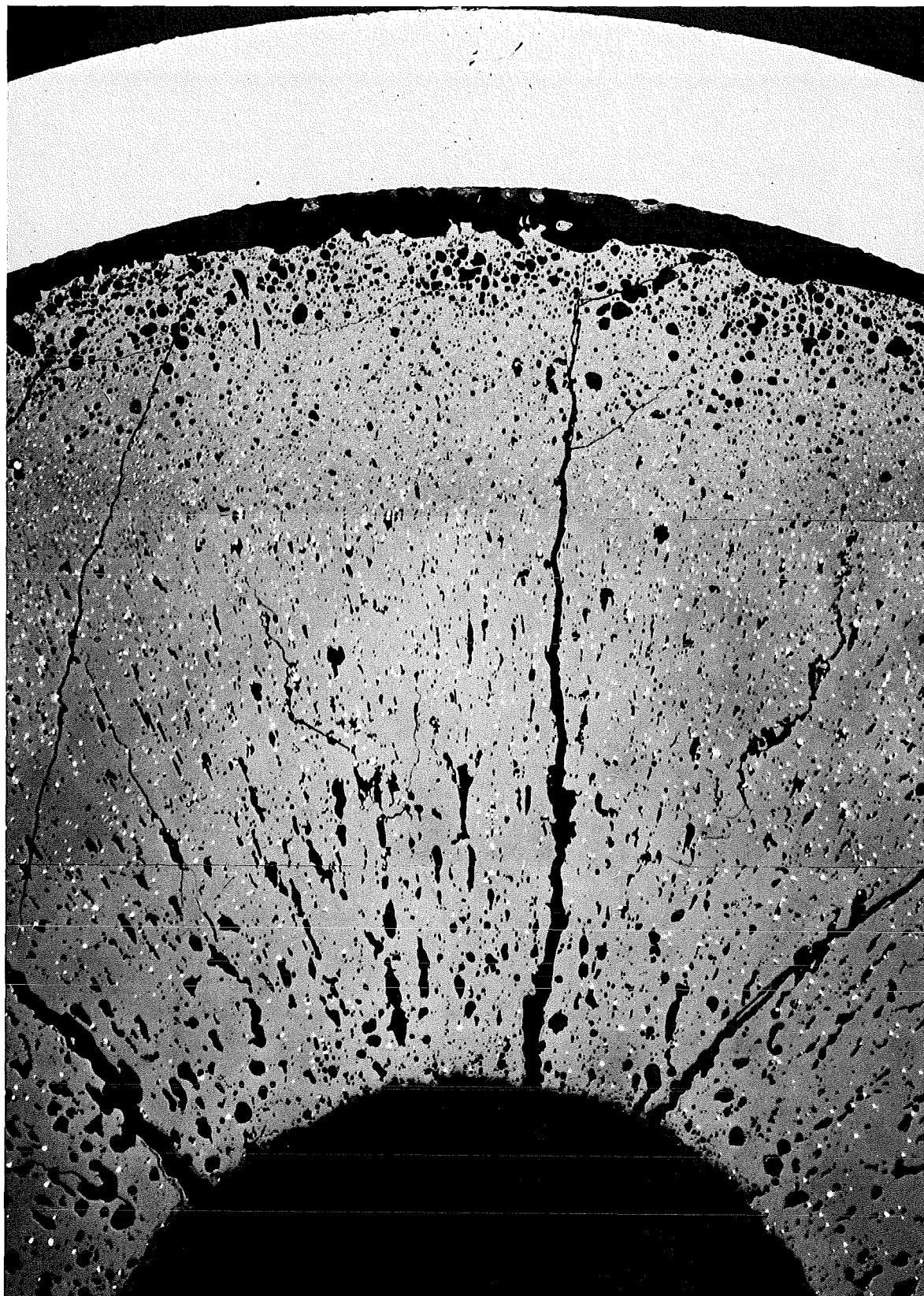
- II/44 -

zu Prüfling 5B6

A 1



- II/45 -  
zu Prüfling 5B6  
A2



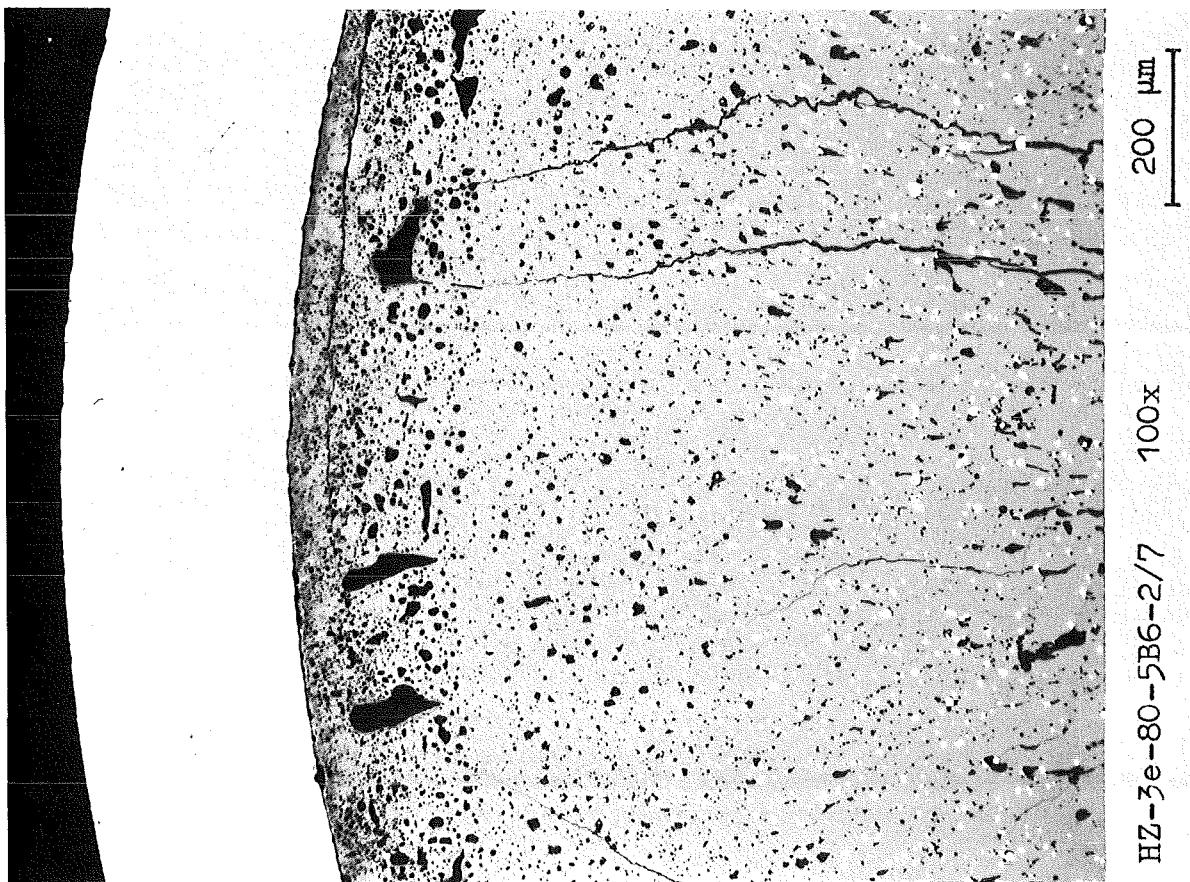
4...6

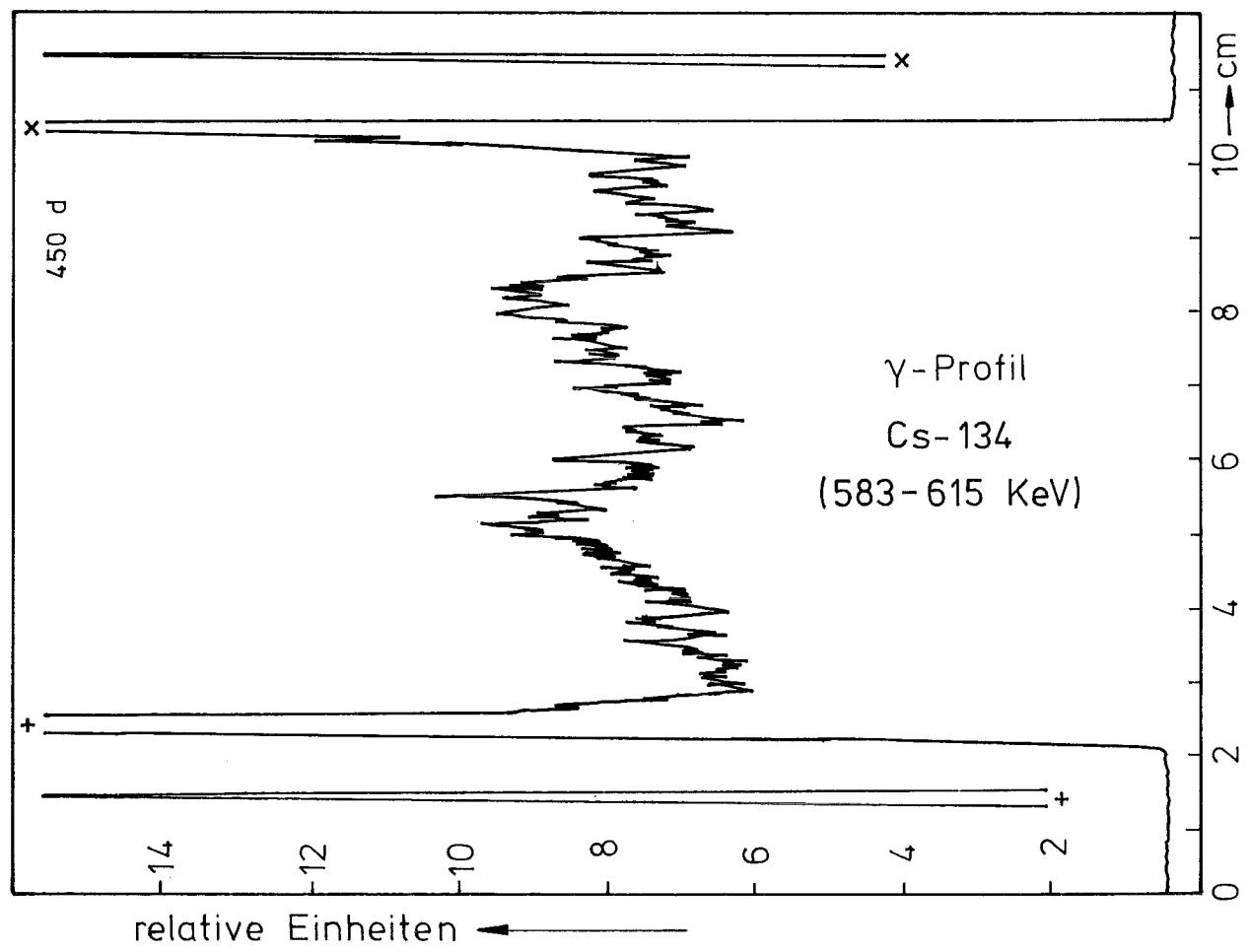
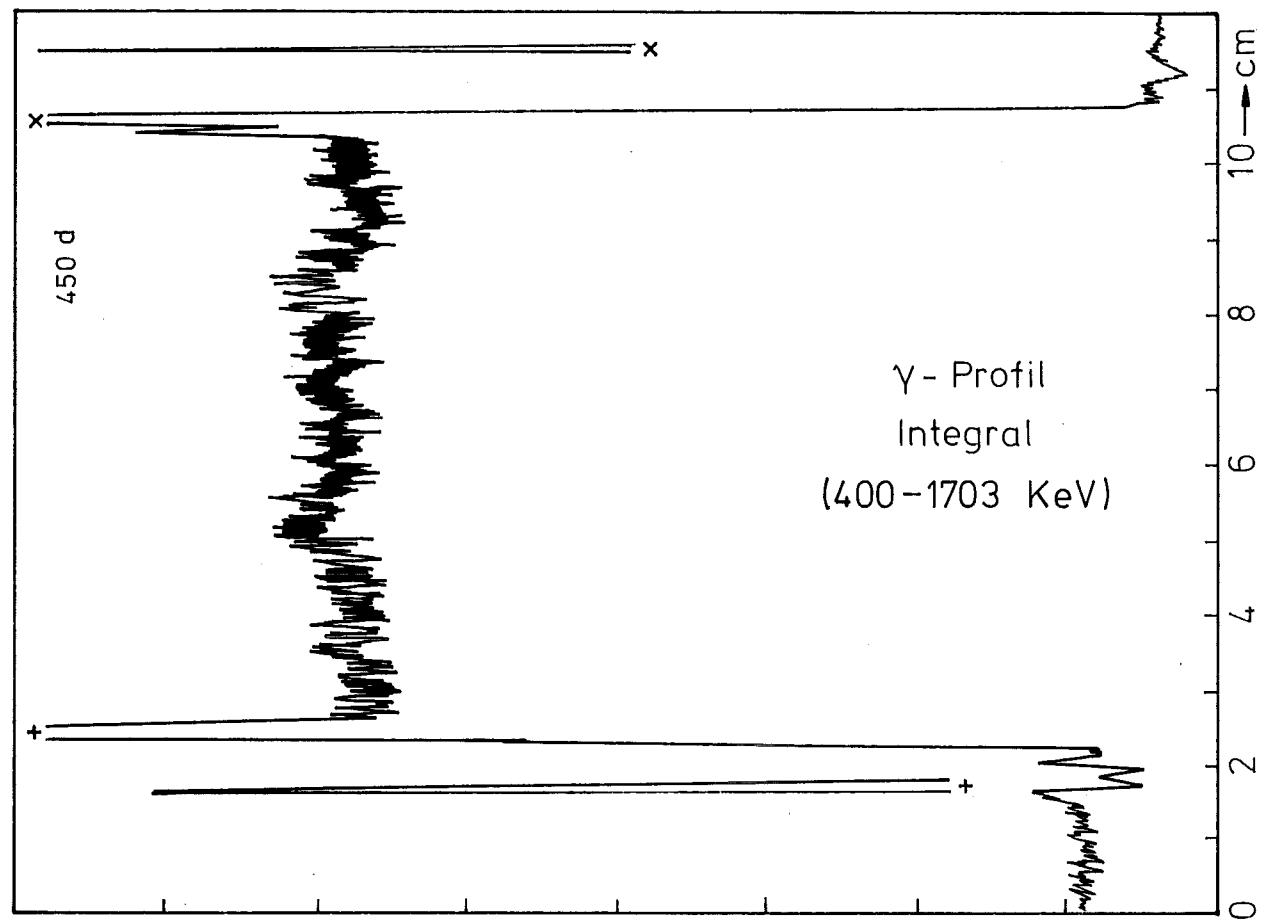
200  $\mu\text{m}$

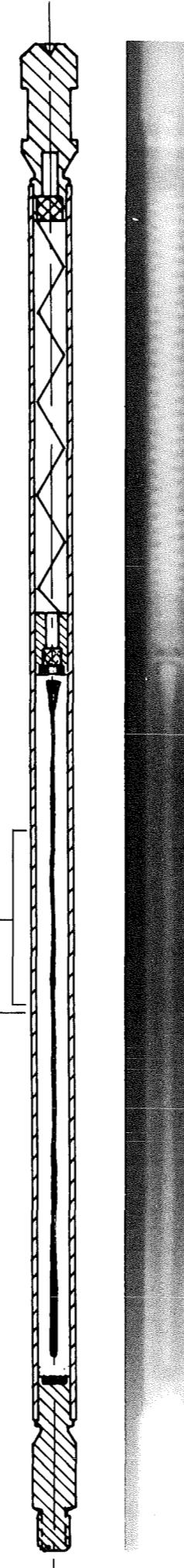
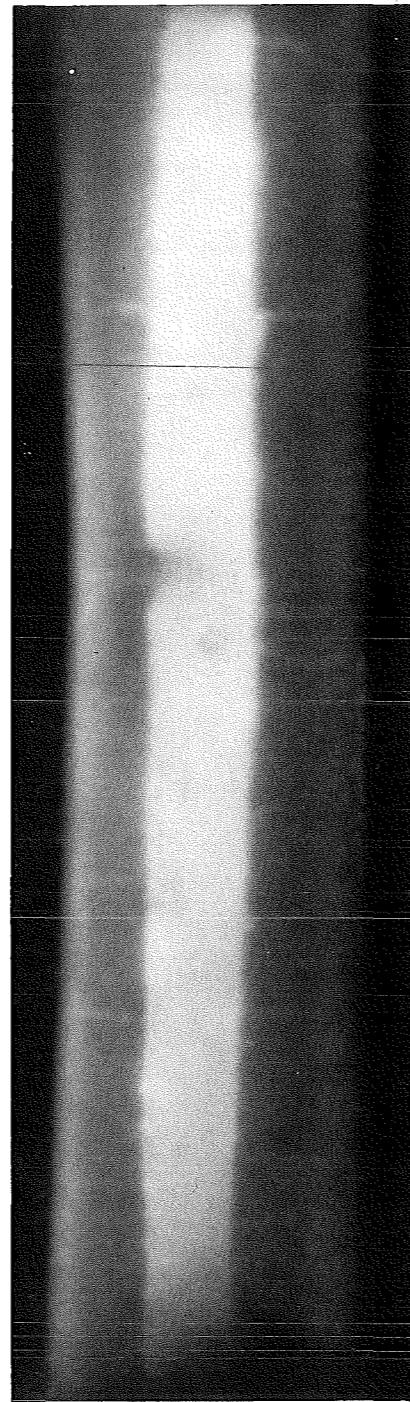
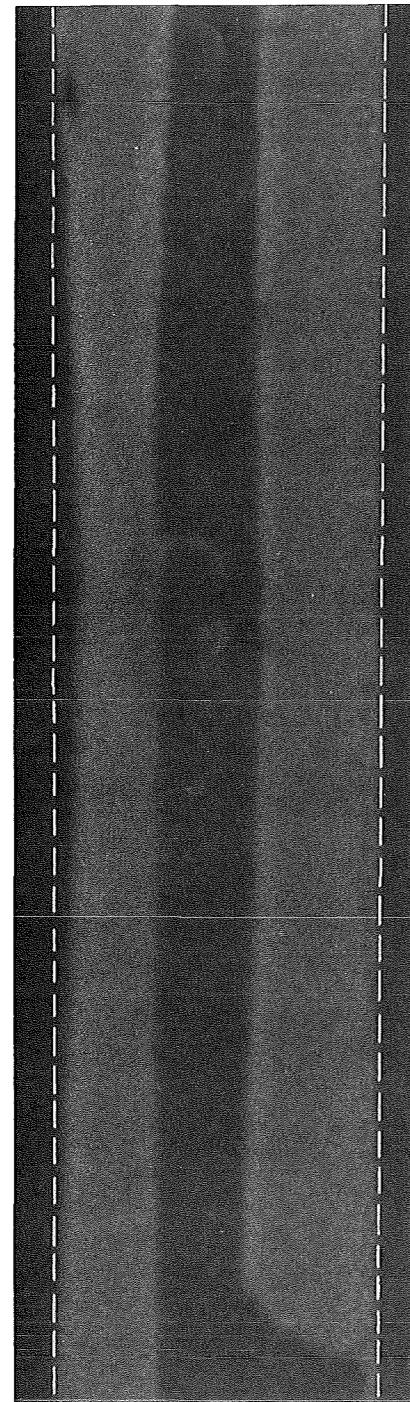
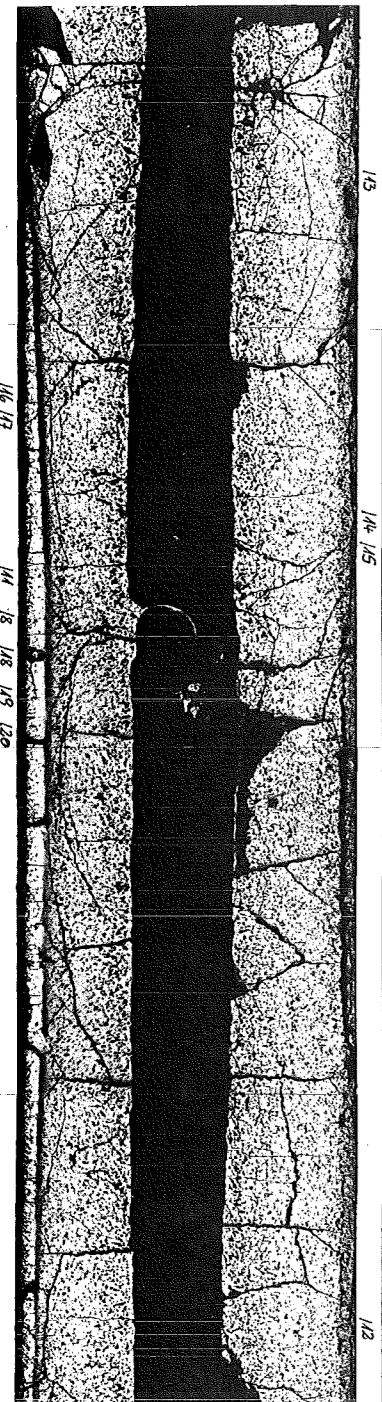
- II / 46 -

zu Prüfling 5B6

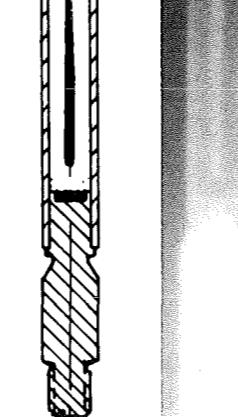
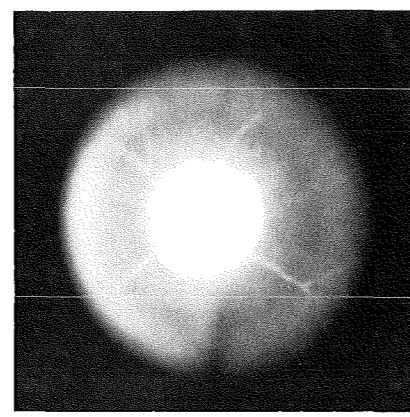
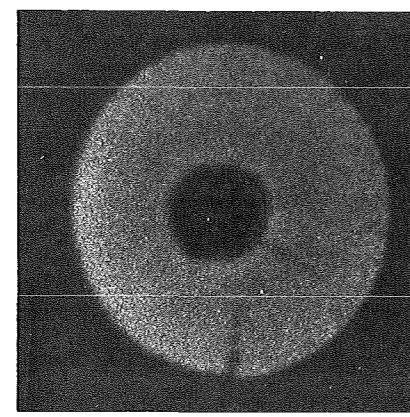
A 2







Schnitt: 2



A

1mm

B

C

### Prüfling 5 B/6

#### Brennstoff:

Form : Tabletten  
 Zusammensetzung :  $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$   
 Tablettendichte : 86,6 % th.D.

#### Hülle:

Material : 1.4988  
 Aussendurchmesser : 4,7 mm  
 Wandstärke : 0,3 mm

#### Geometrie:

Länge des Prüflings : 172 mm  
 Länge der Brennstoffsäule : 80 mm  
 Radiale Spaltweite : 75  $\mu\text{m}$   
 Schmierdichte : 80 % th.D.

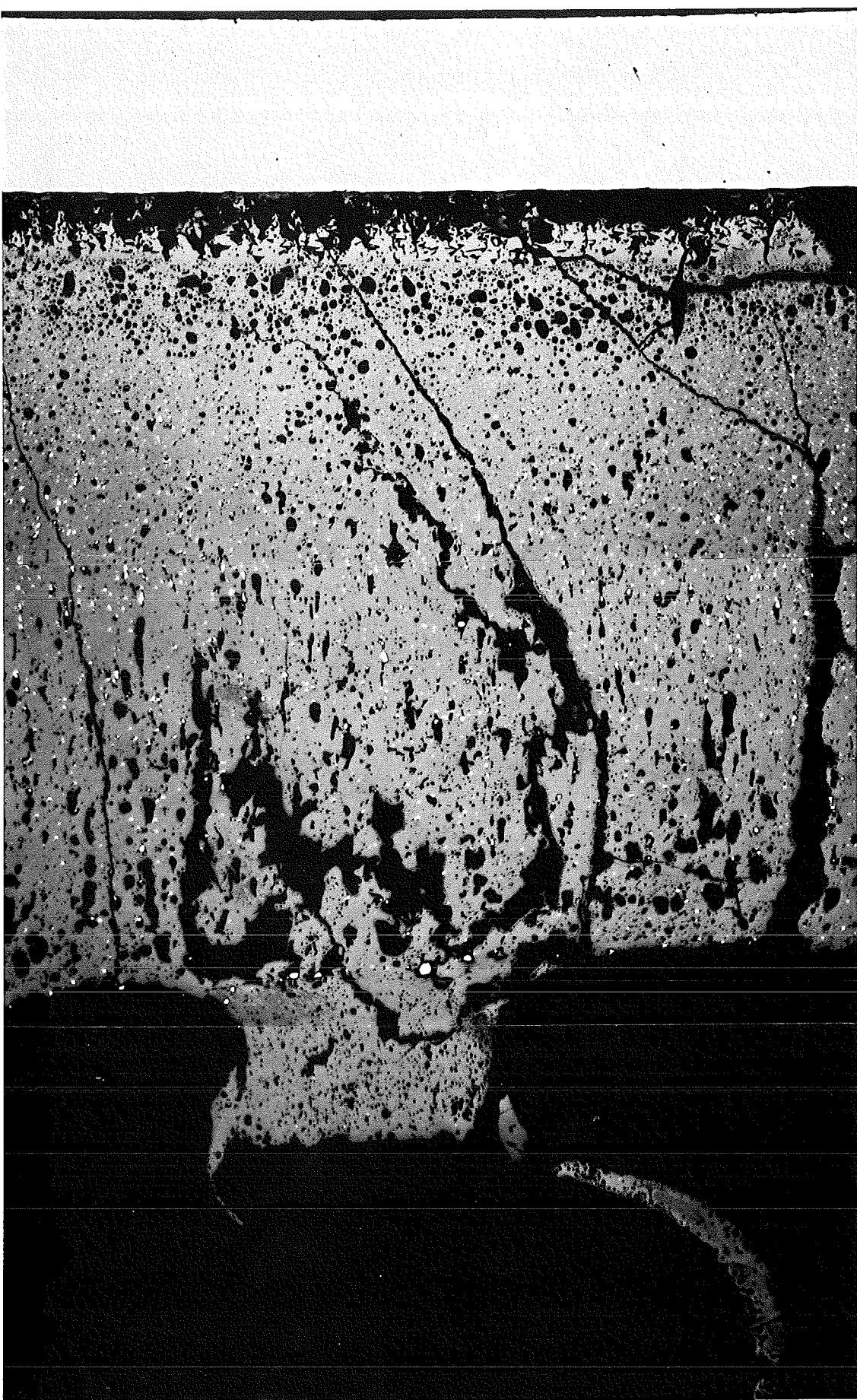
#### Bestrahlung:

Einrichtung : Na/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4  
 Dauer : 342,7 Vollasttage  
 Ende : 13.12.1971  
 Rechn. Abbrand mittl. : 113 MWD/kgM  
 Stableistung max./mittl. : 476/343 W/cm

- II/49 -

zu Prüfling 5B5

A 1



8 · 10

200  $\mu\text{m}$

- II / 50 -

zu Prüfling 5B5  
A 1

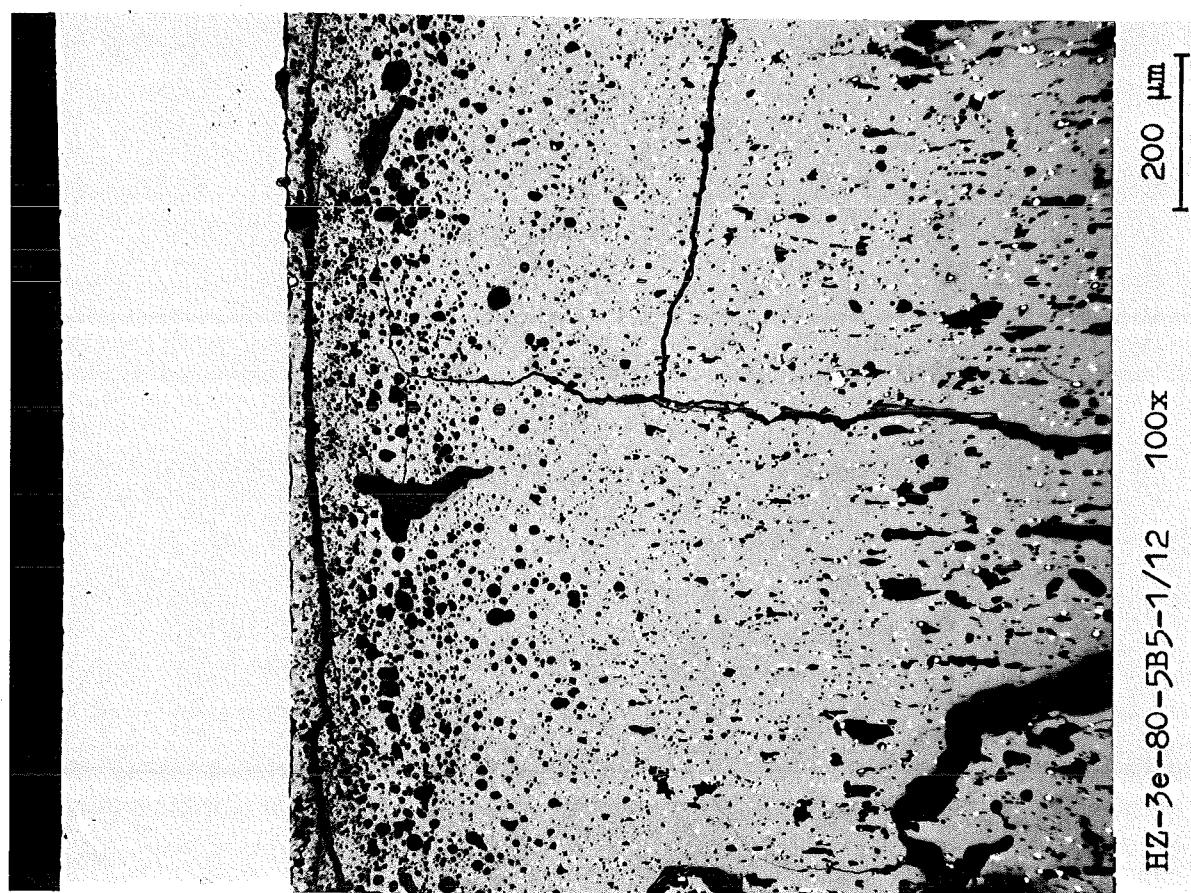


HZ-3e-80-5B5-1/11

200 μm

HZ-3e-80-5B5-1/12

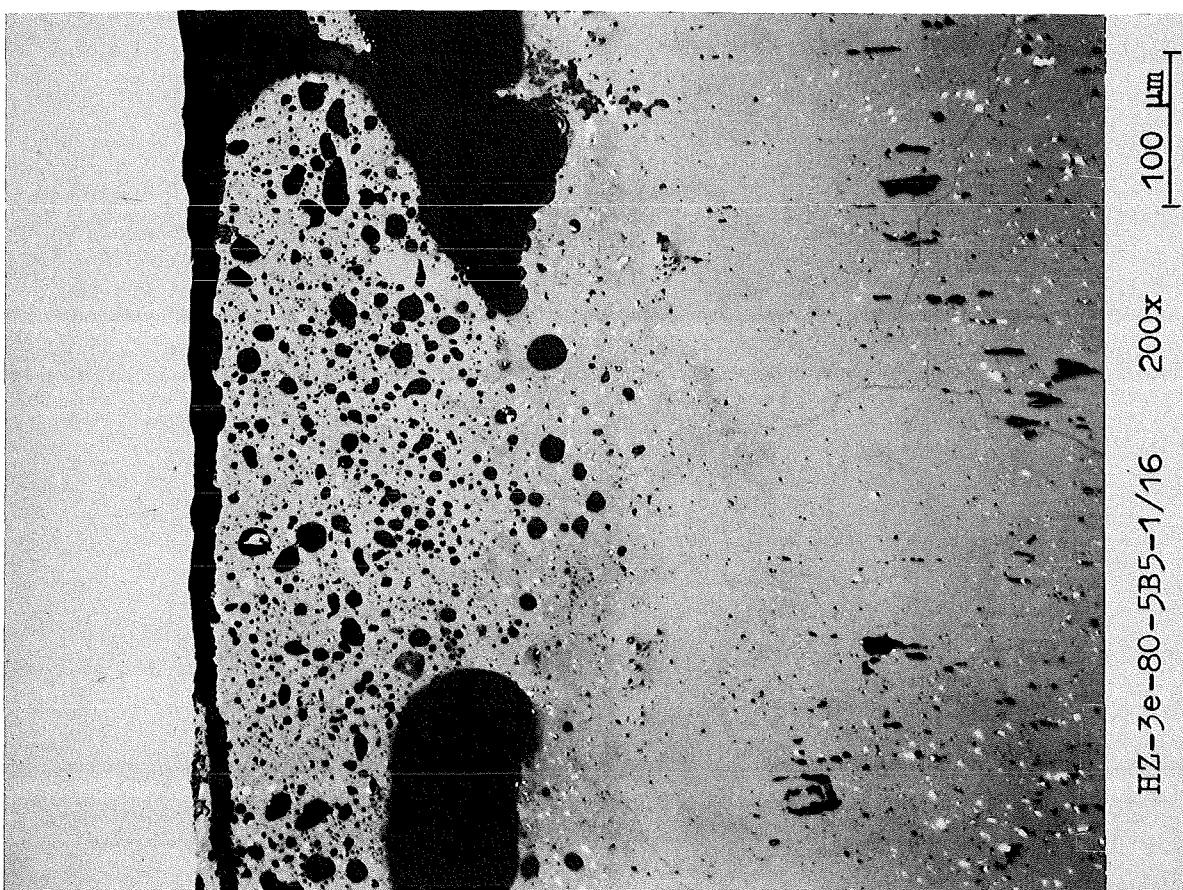
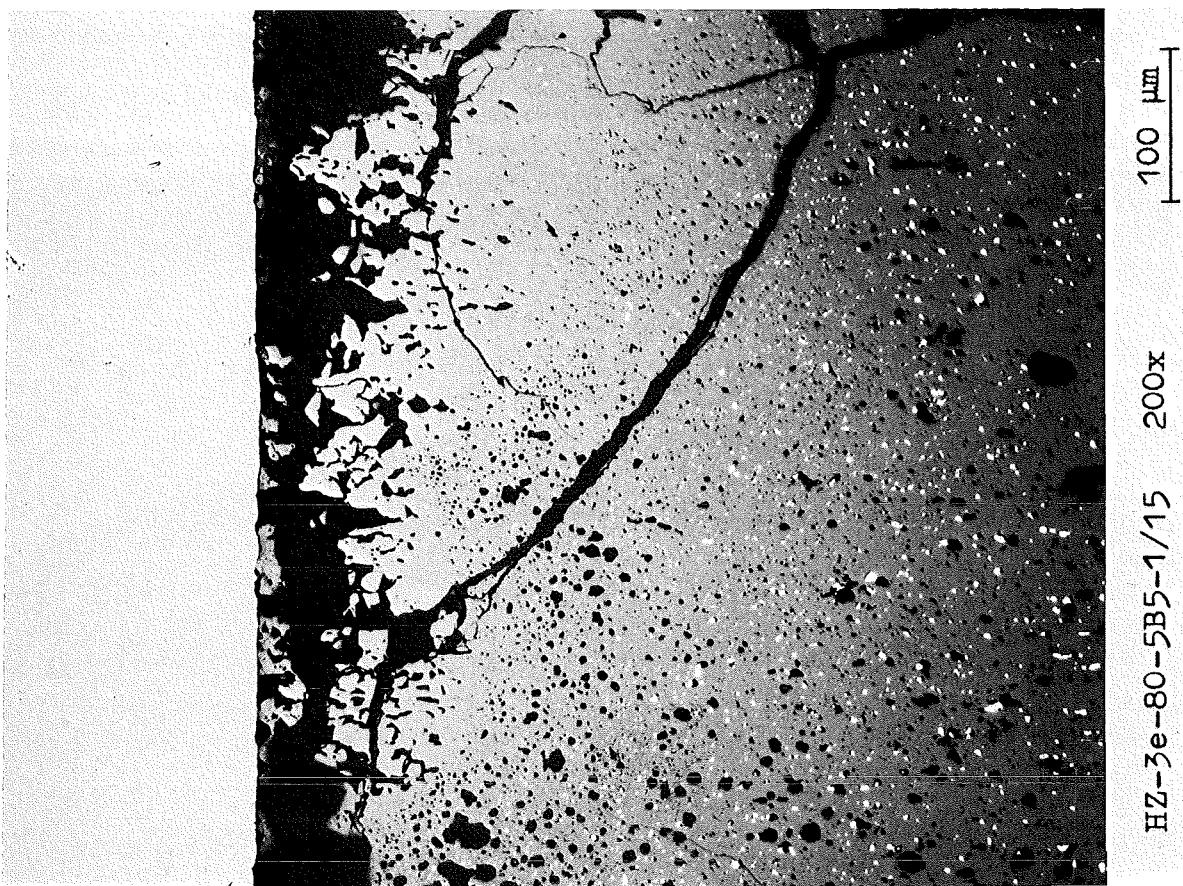
100x



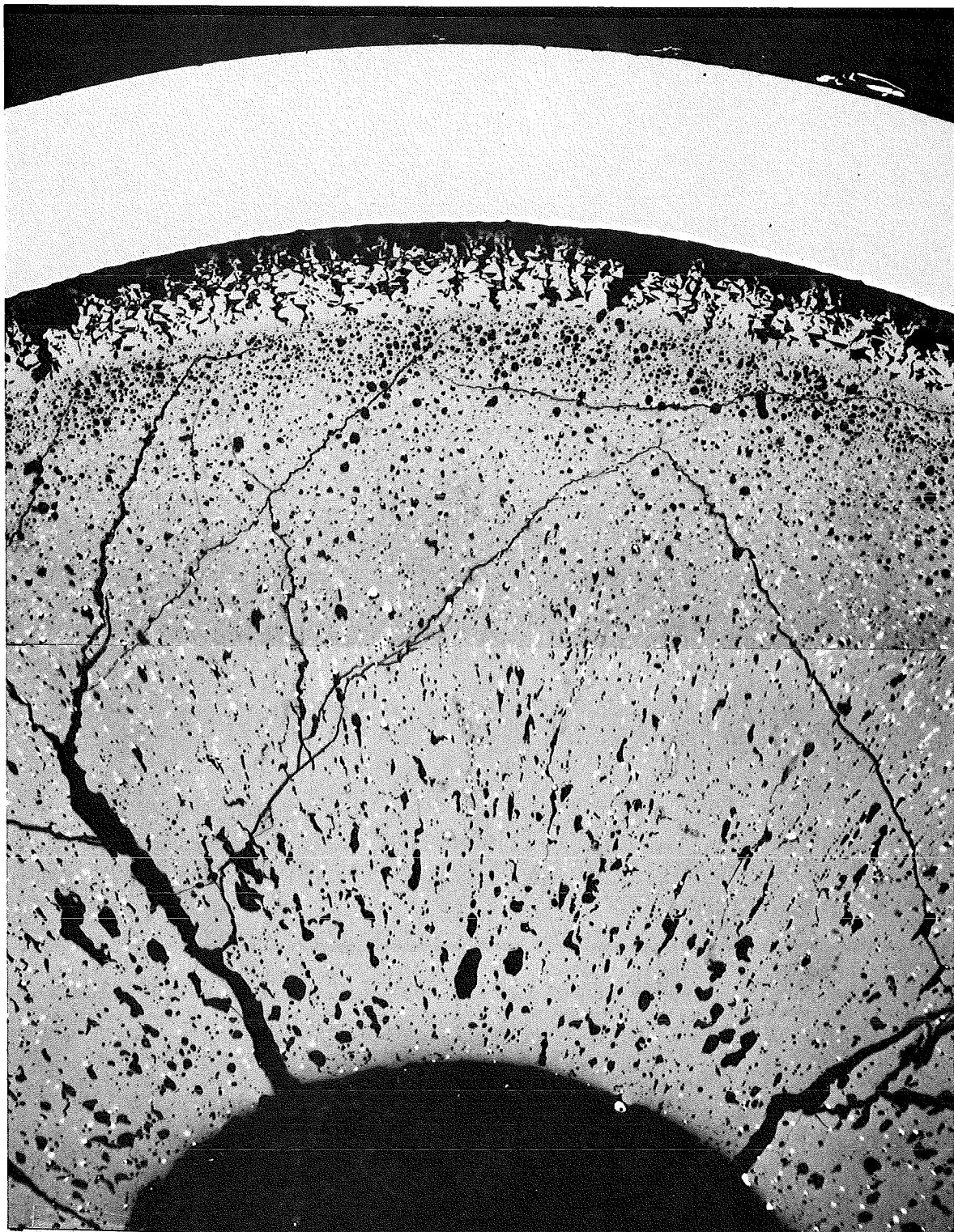
- II/51 -

zu Prüfling 5 B5

A 1



-II/52 -  
zu Prüfling 5B5  
A 2



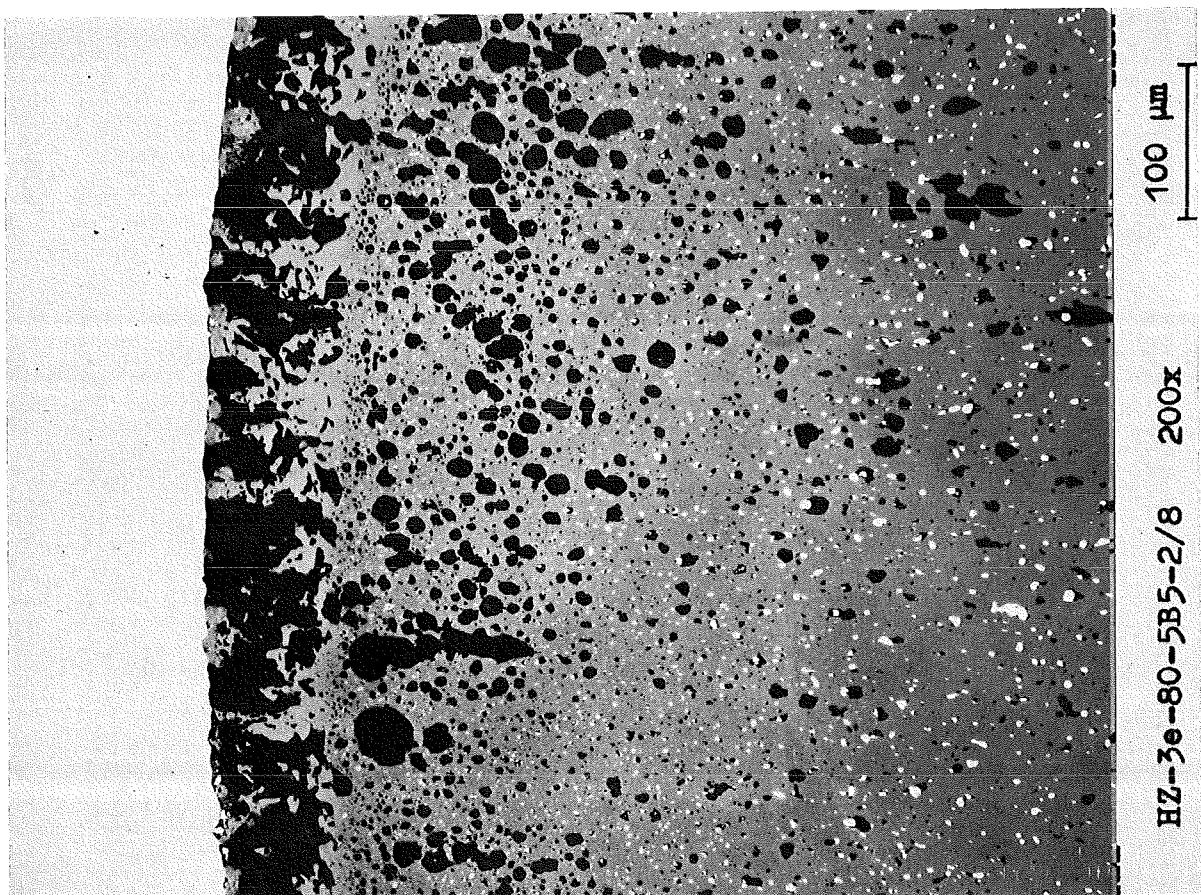
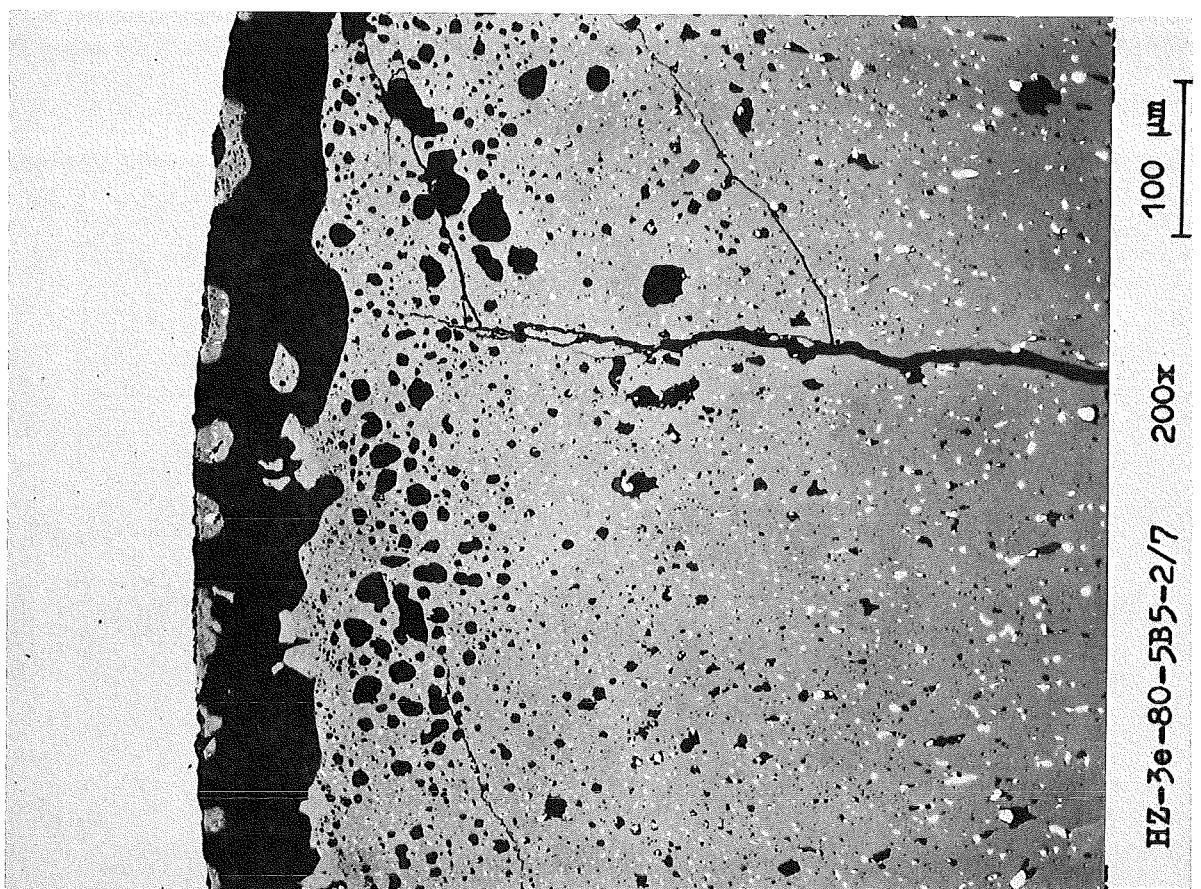
4...5

200  $\mu\text{m}$

- II/53 -

zu Prüfling 5B5

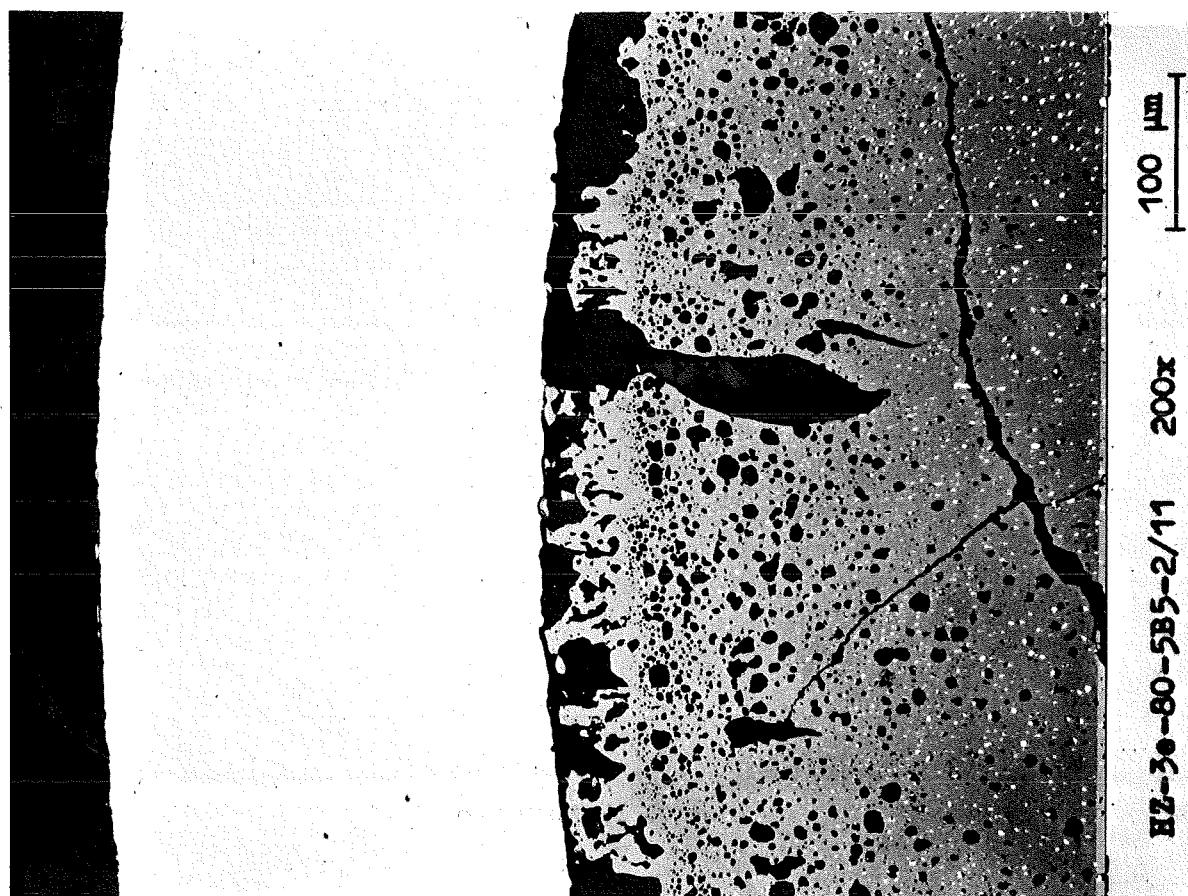
A 2

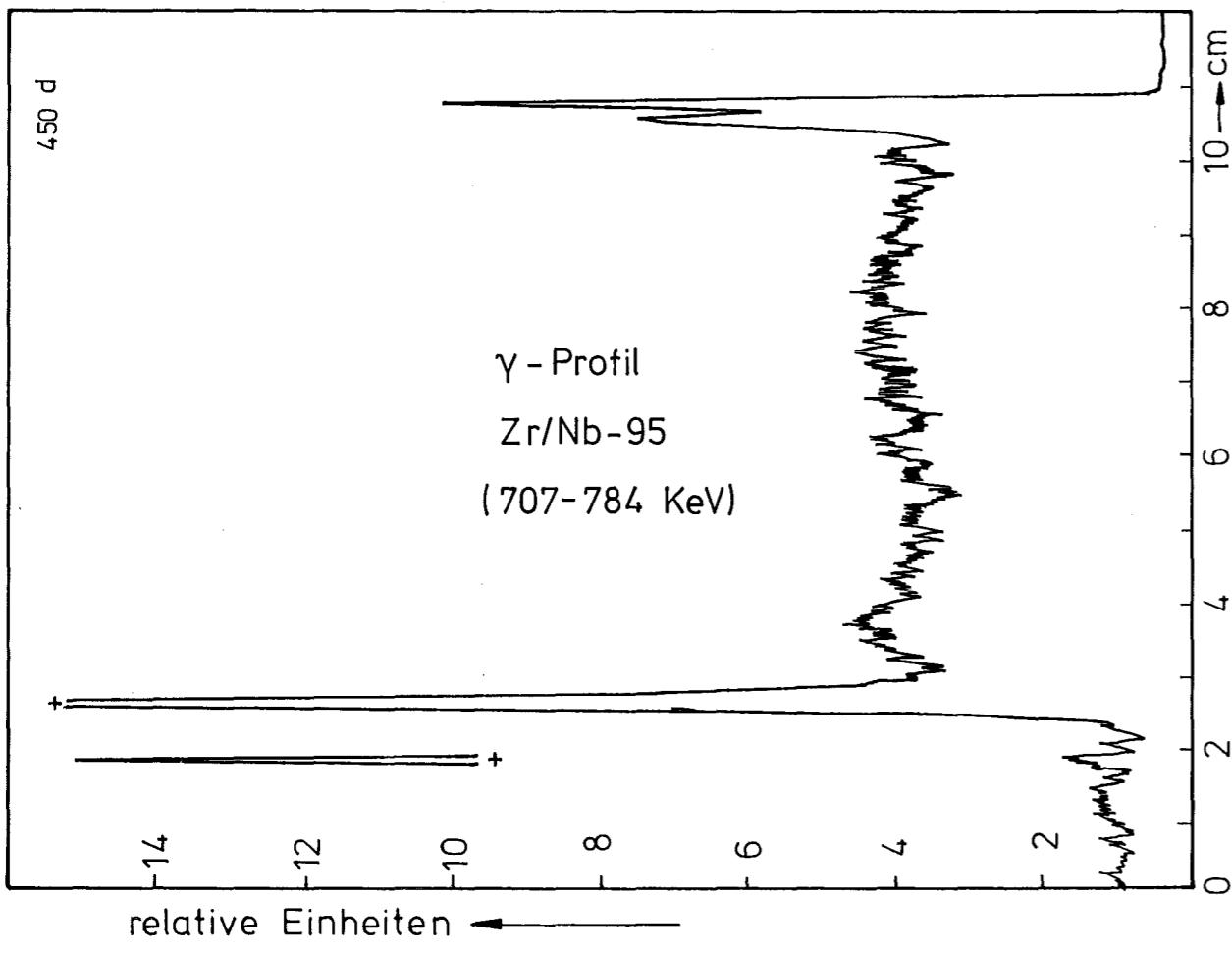
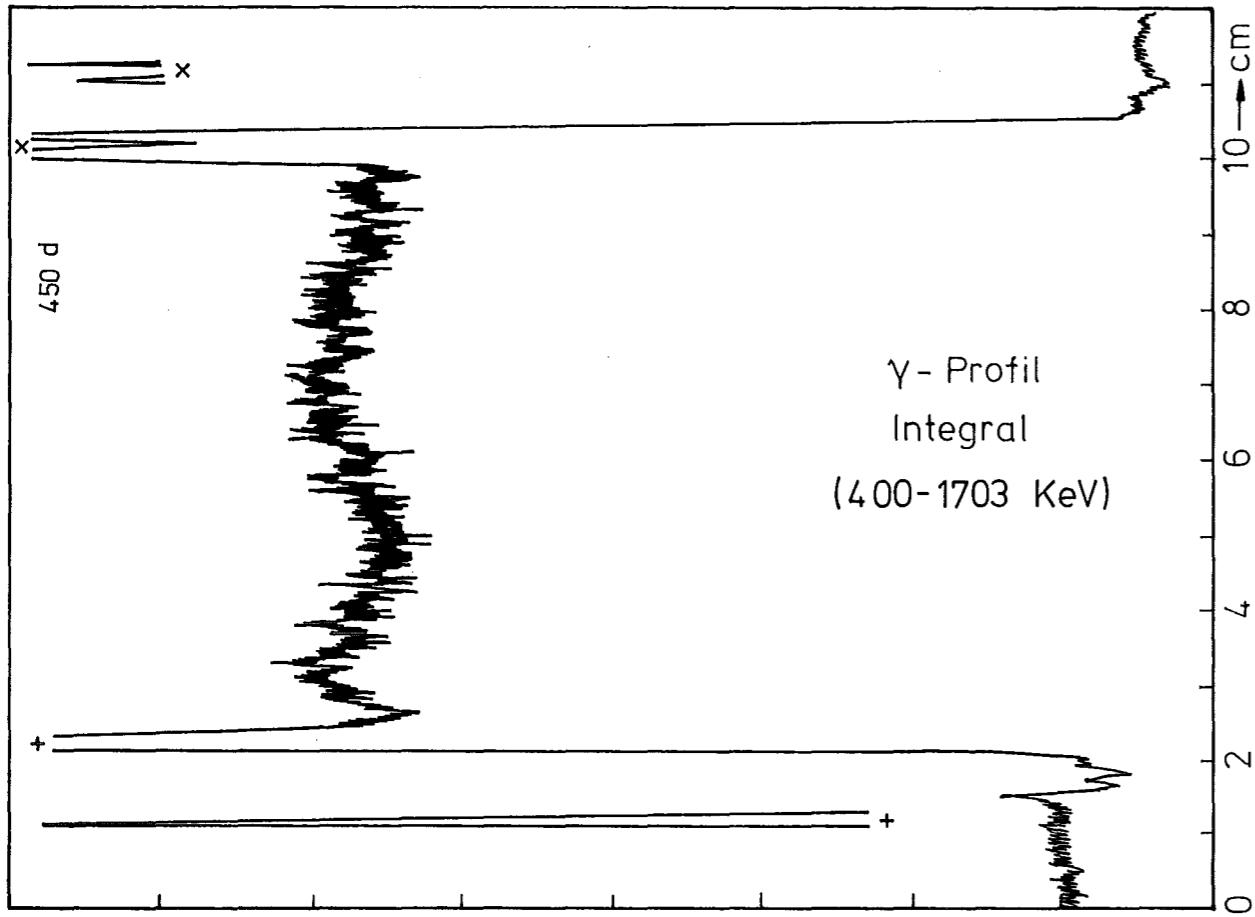


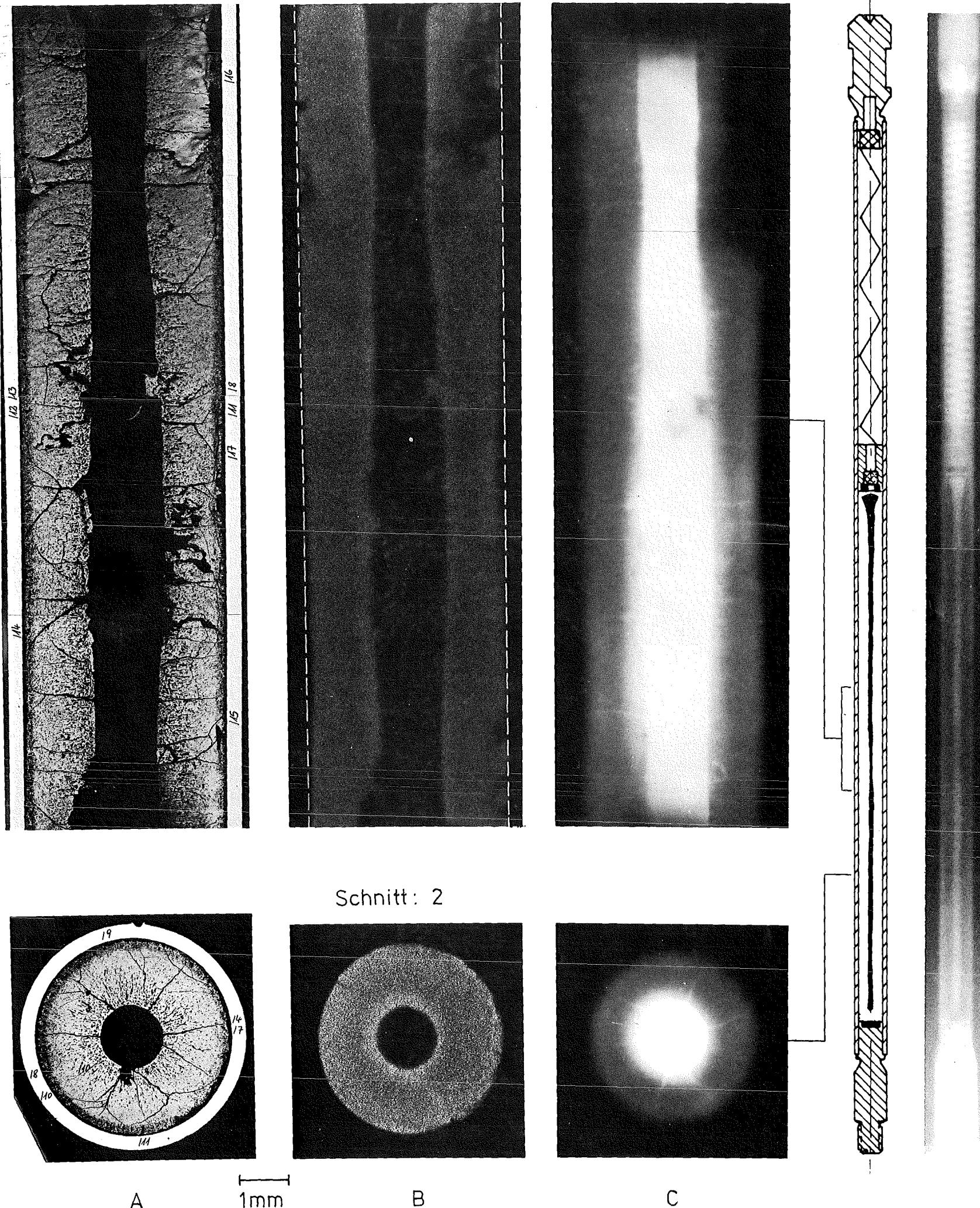
- II/54 -

zu Prüfling 5B5

A 2







Schnitt: 2

**Prüfling 5 B/5****Brennstoff:**

Form : Tabletten

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

Tablettendichte : 86,9 % th.D.

**Hülle:**

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 4,7 mm

Wandstärke : 0,3 mm

**Geometrie:**

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : 75  $\mu\text{m}$ 

Schmierdichte : 80 % th.D.

**Bestrahlung:**

Einrichtung : Na/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4

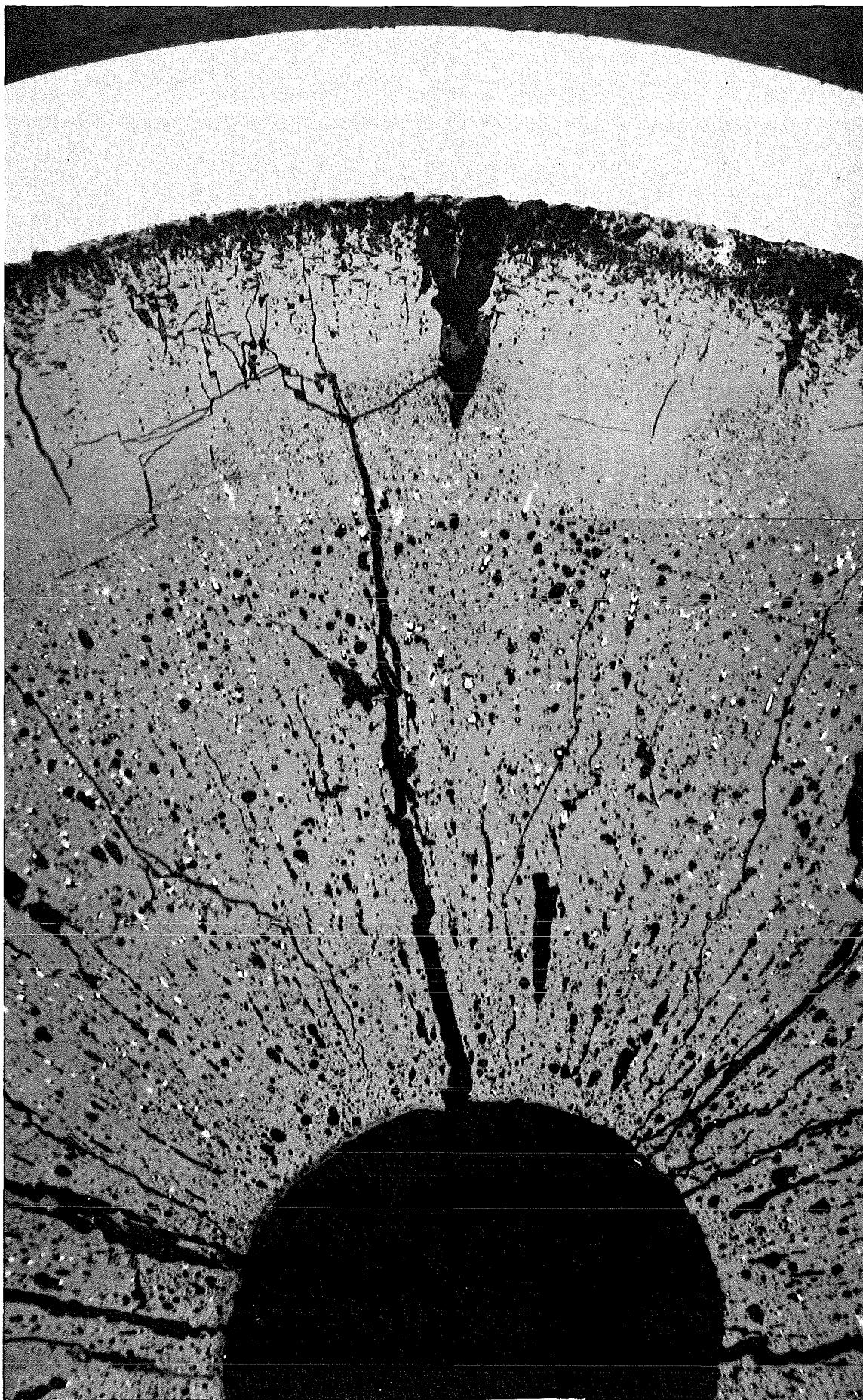
Dauer : 342,7 Vollasttage

Ende : 13.12.1971

Rechn. Abbrand mittl. : 110 MWd/kg M

Stableistung max./mittl. : 443/333 W/cm

-II/57-  
zu Prüfling 5B9  
A1



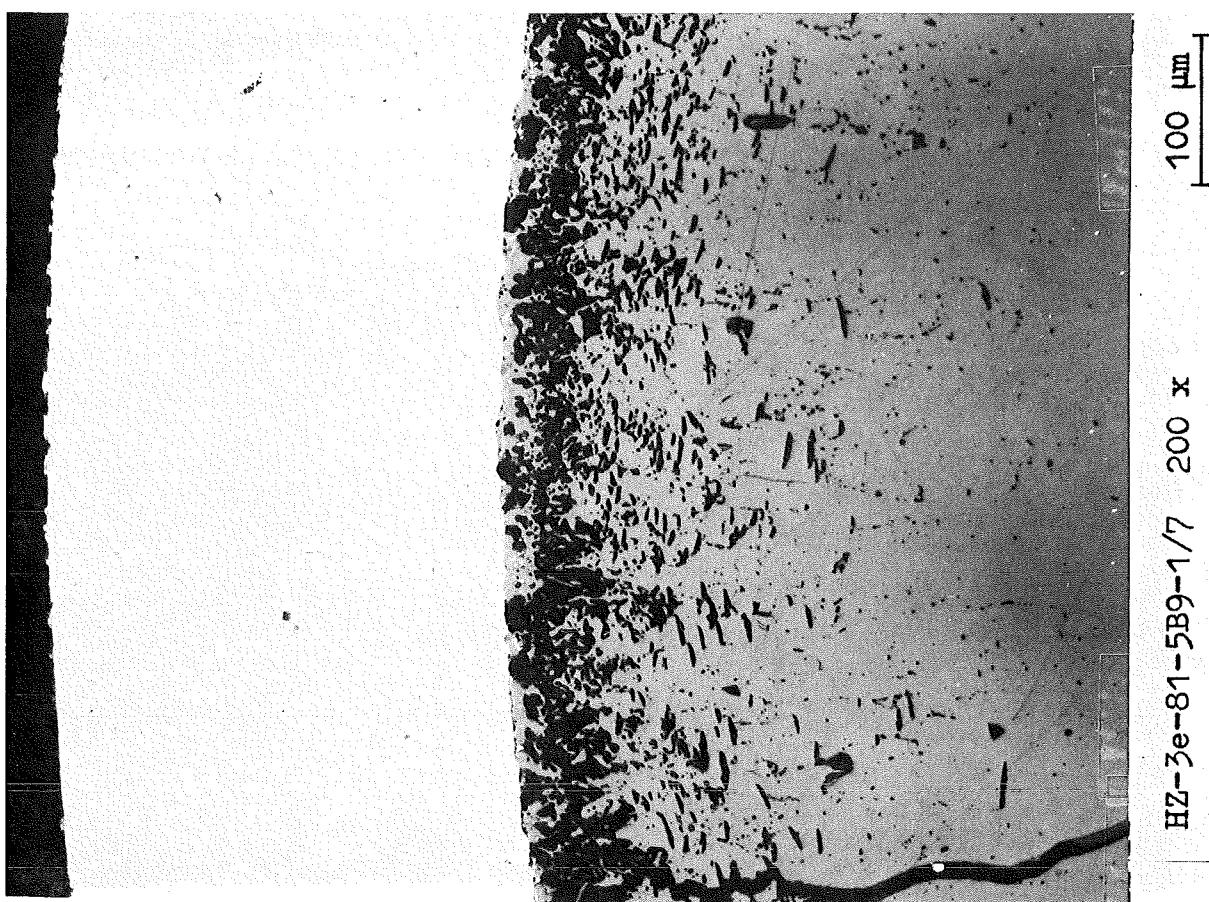
4...6

200  $\mu\text{m}$

- II/58 -

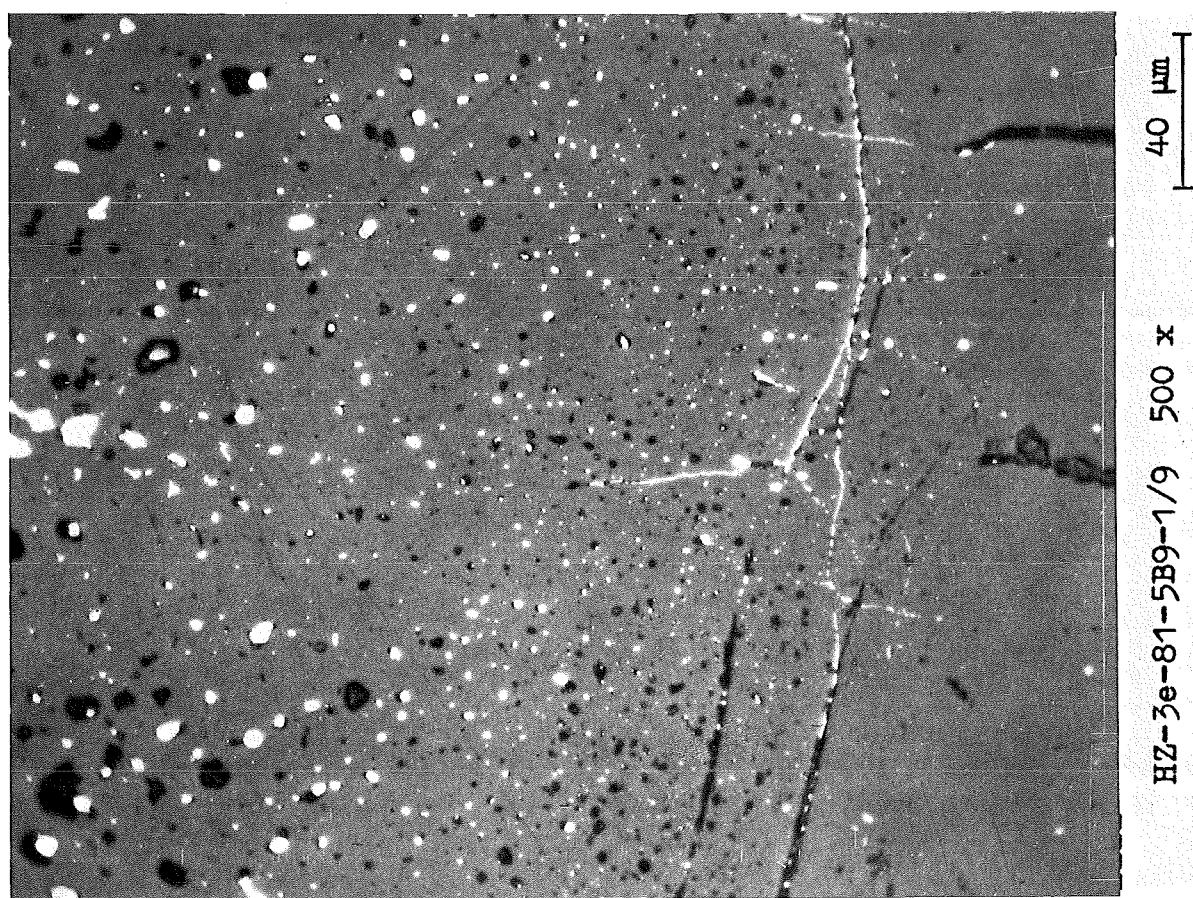
zu Prüfling 5B9

A 1



HZ-3e-81-5B9-1/7 200 x

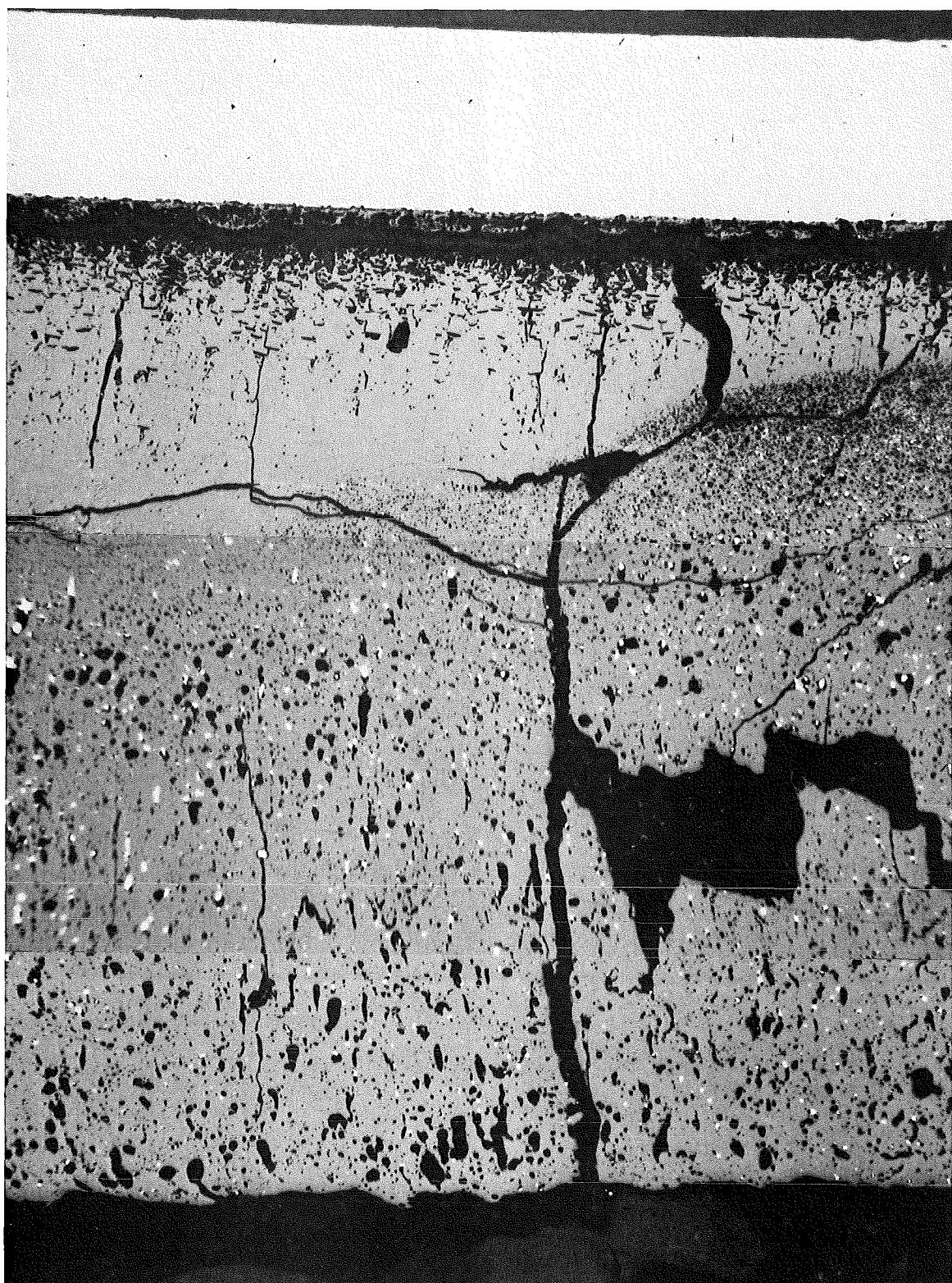
100 μm



HZ-3e-81-5B9-1/9 500 x

40 μm

- II/59 -  
zu Prüfling 5B9  
A 2



8 · 10

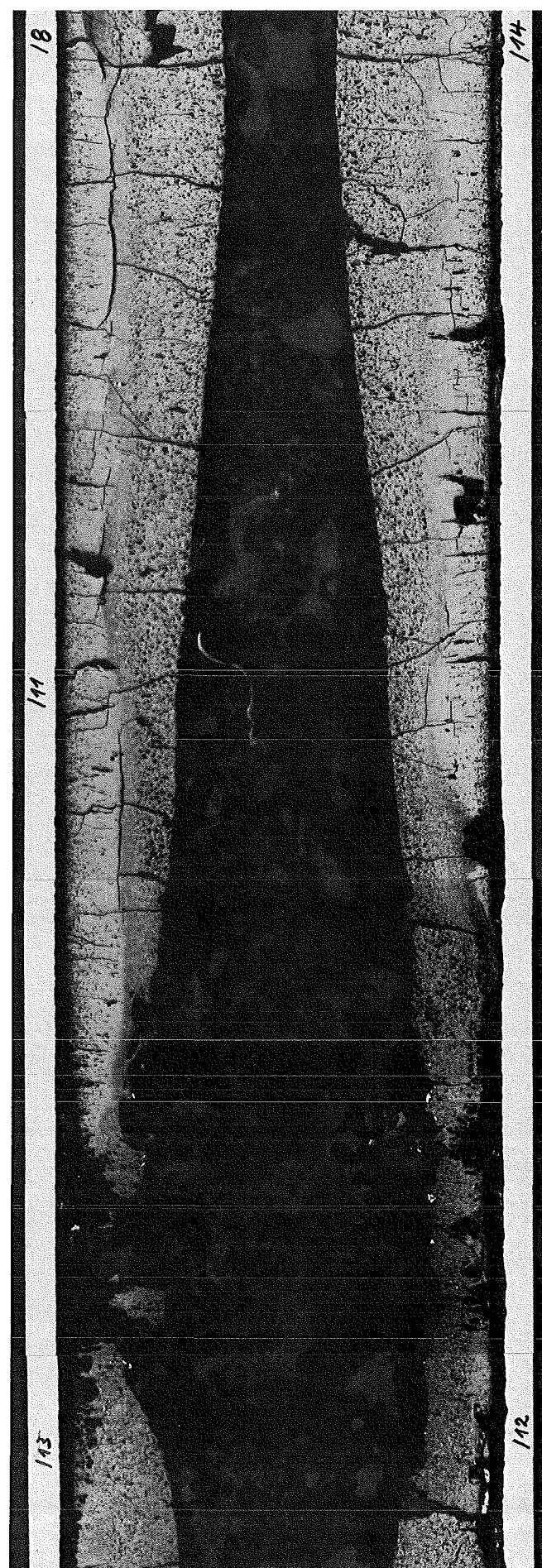
200  $\mu\text{m}$

-II/60-

zu Prüfling 5B9

B 2

A 2

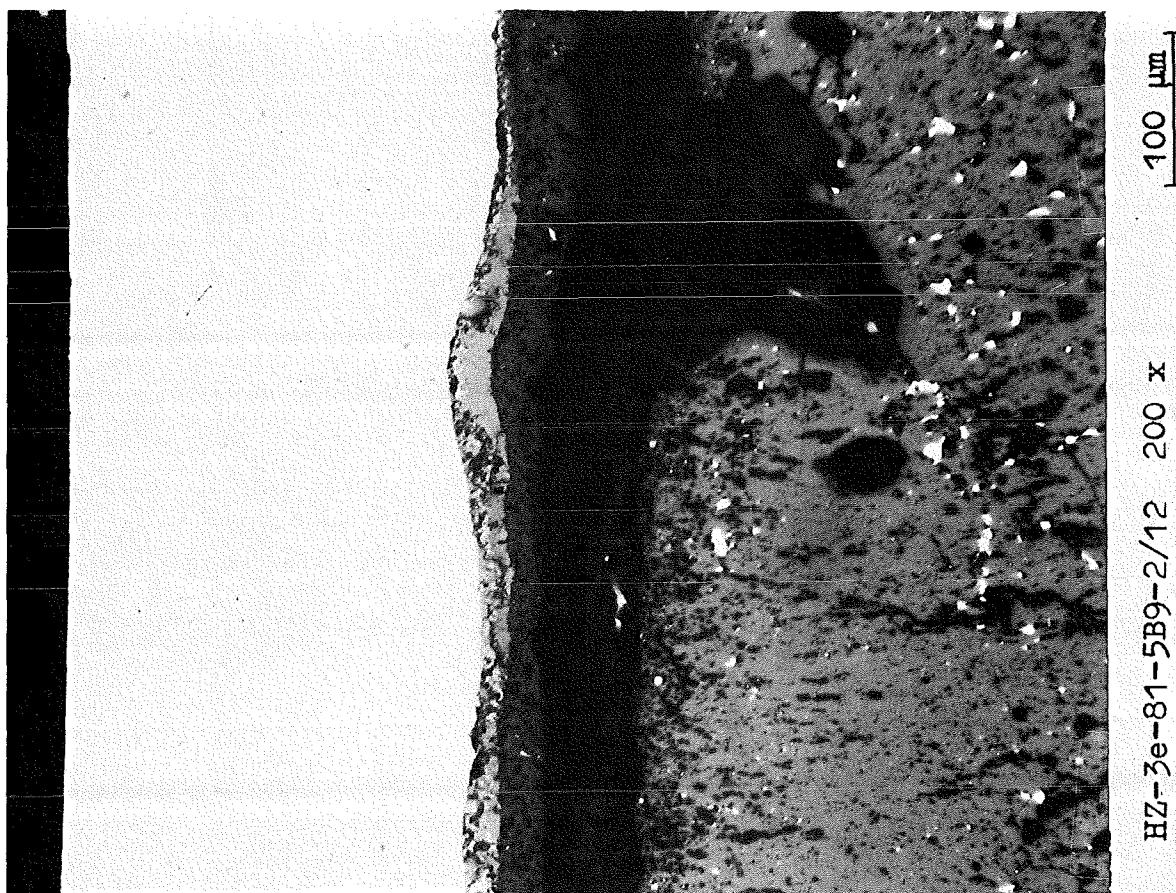
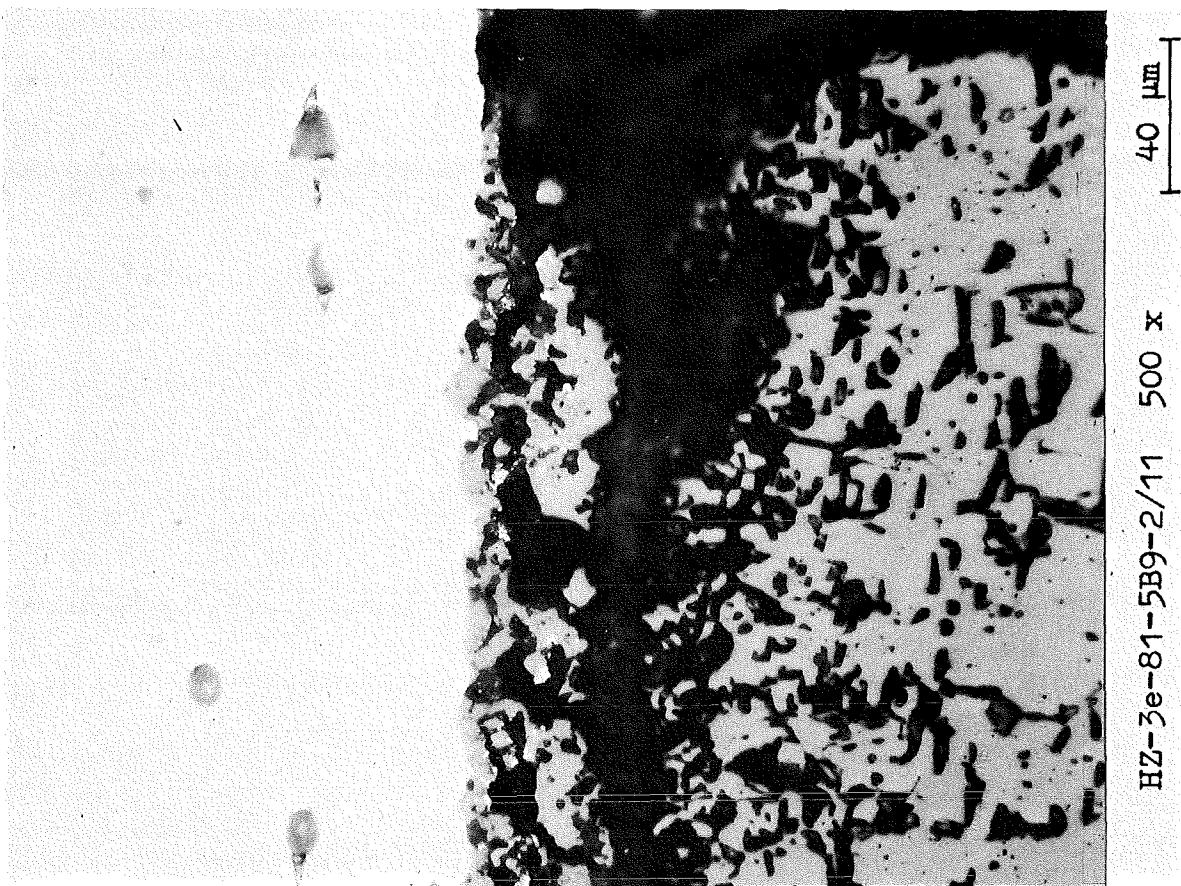


$\alpha$  - Autoradiografie

1mm

-II/61-

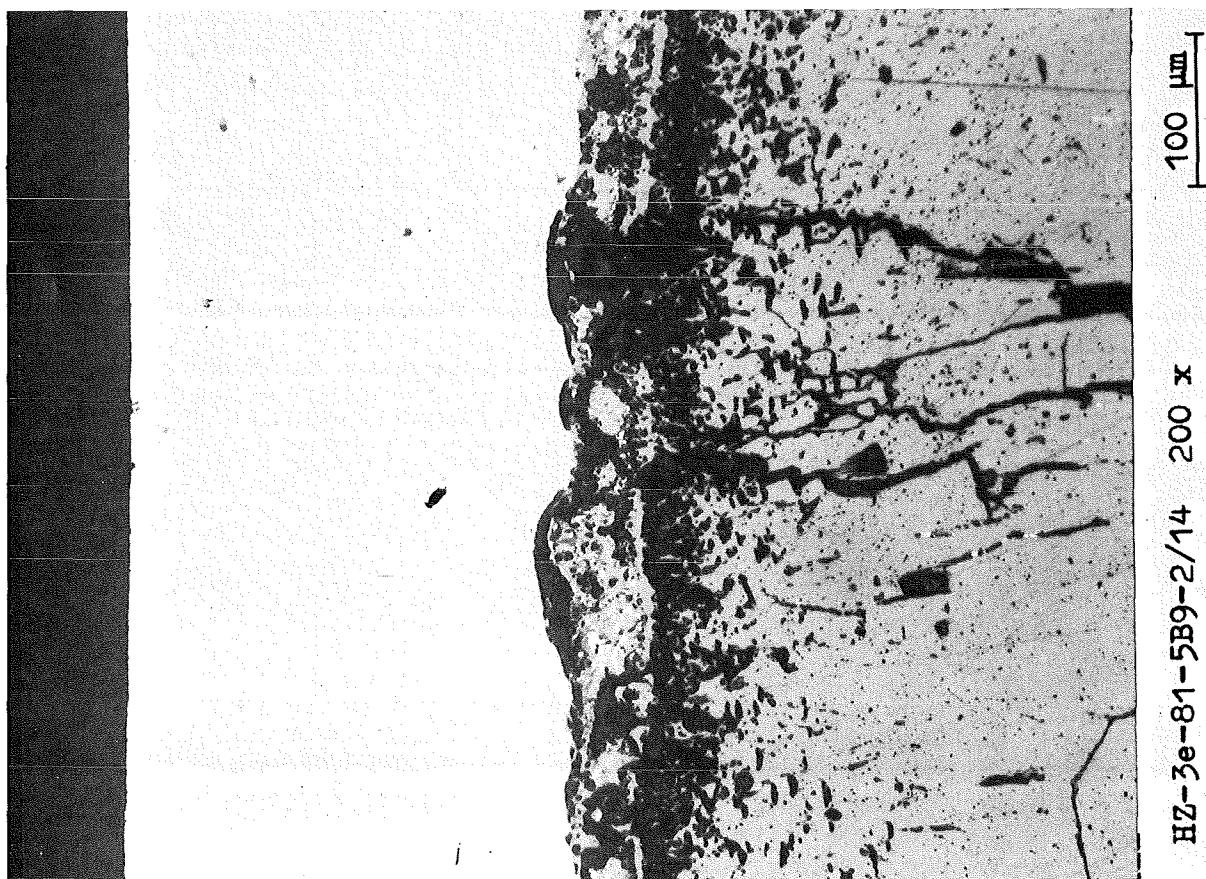
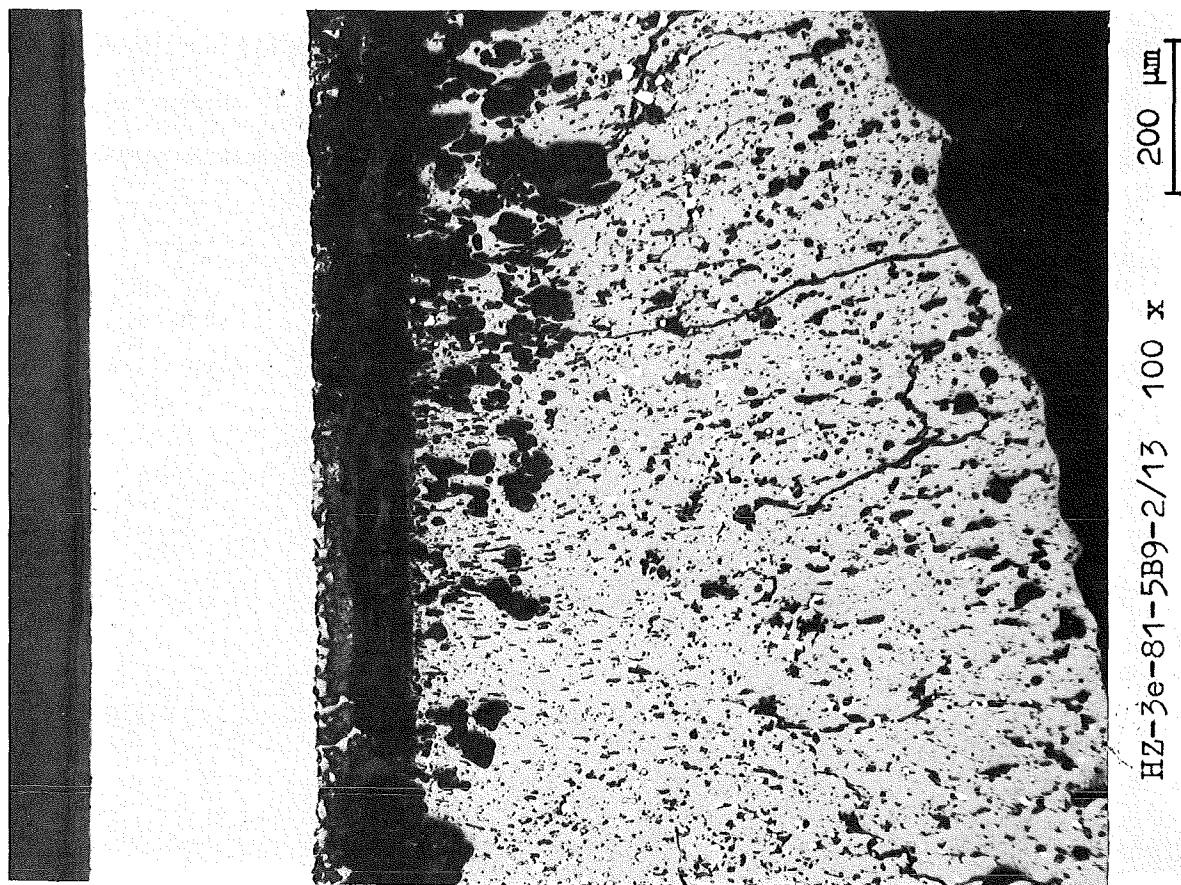
zu Prüfling 5B9  
A 2

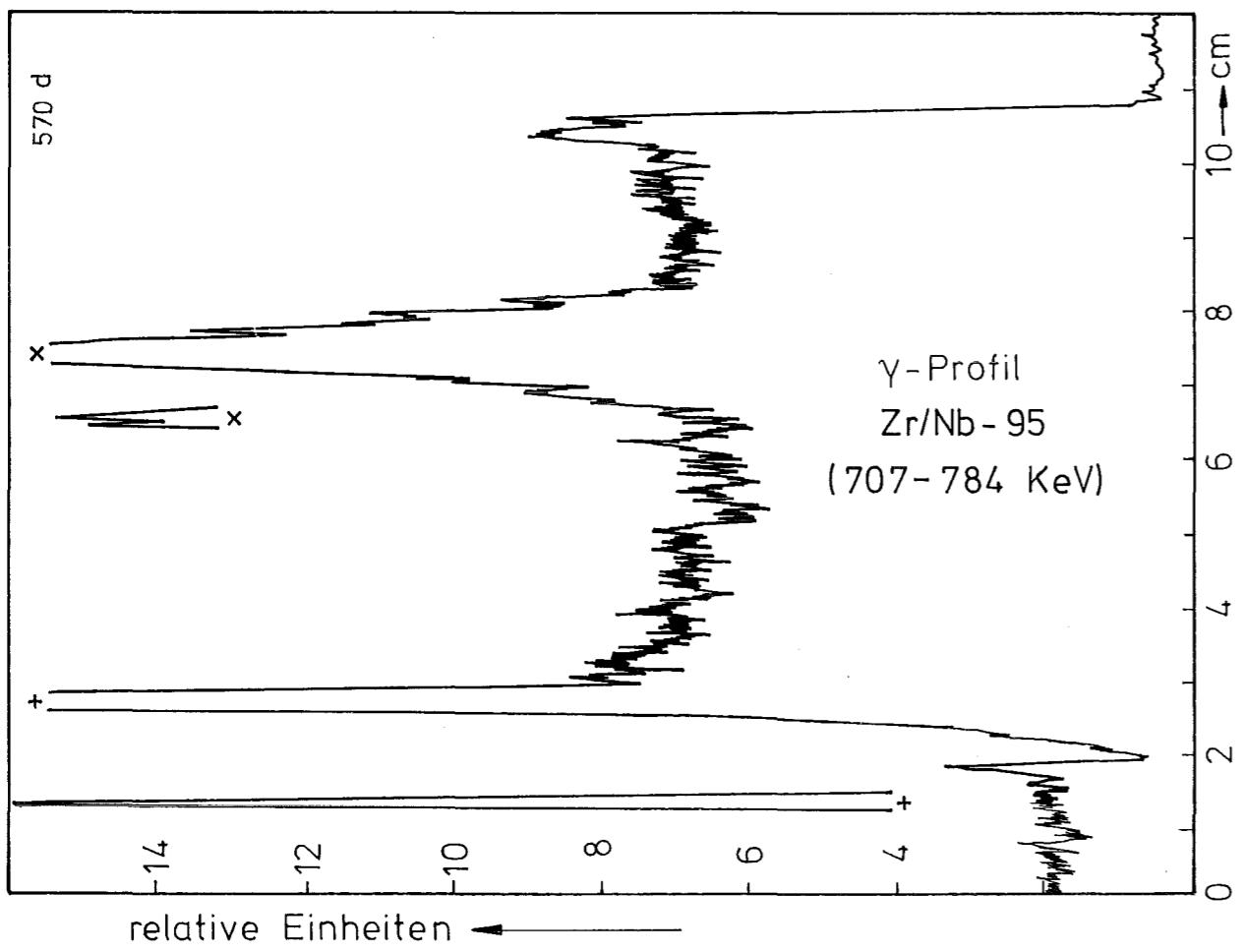
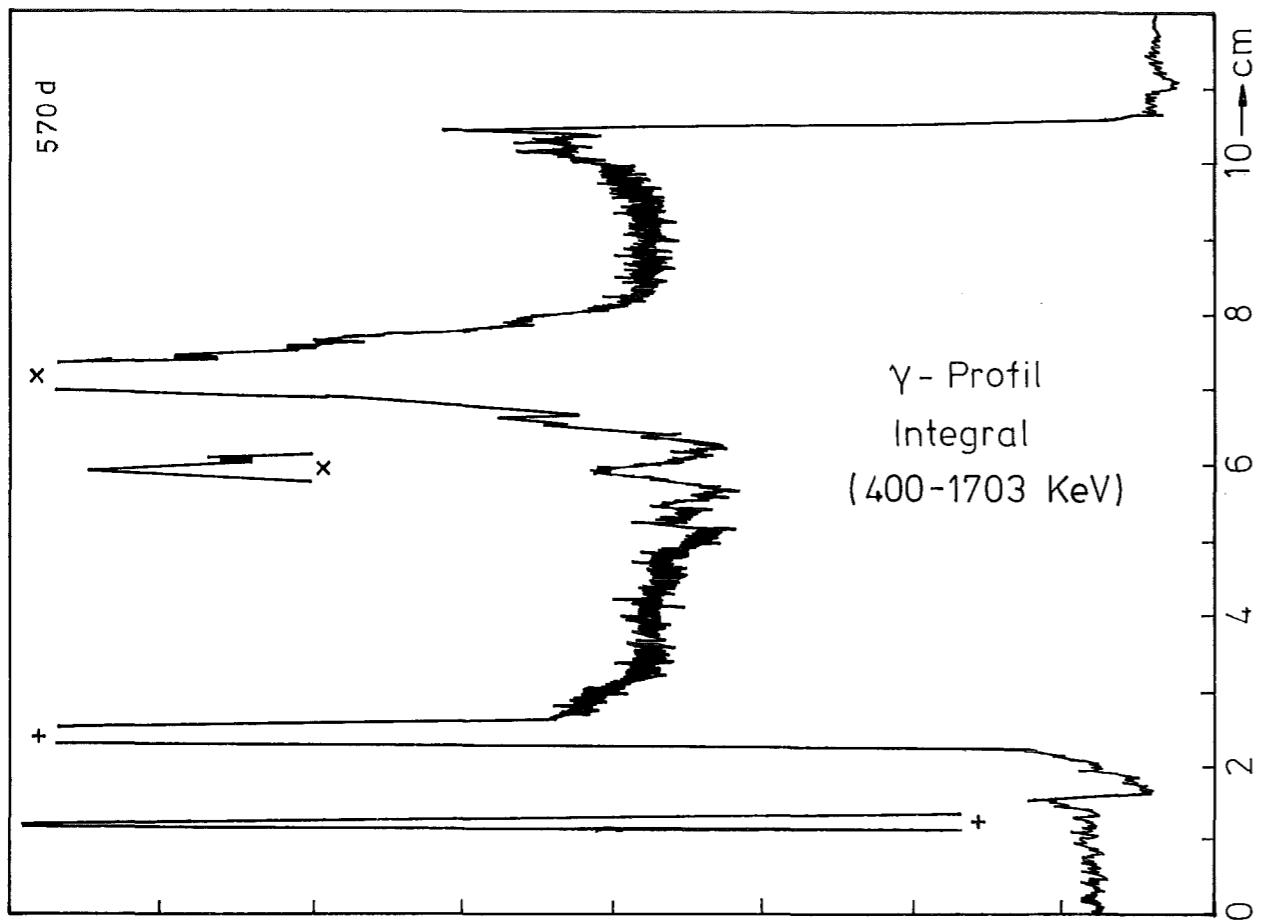


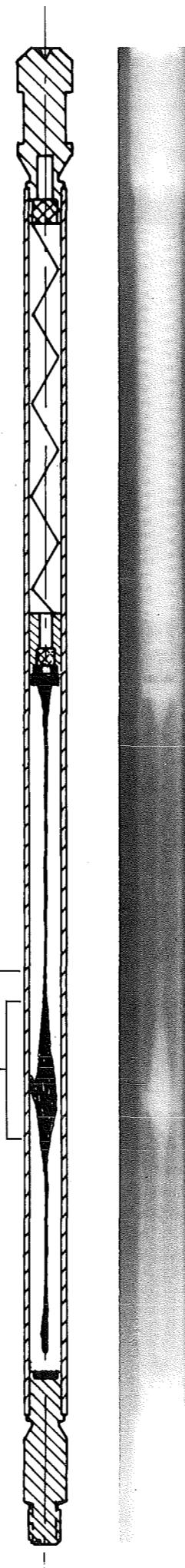
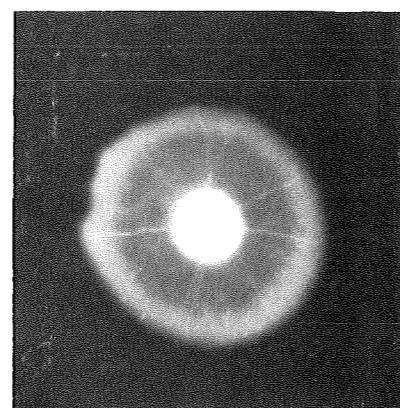
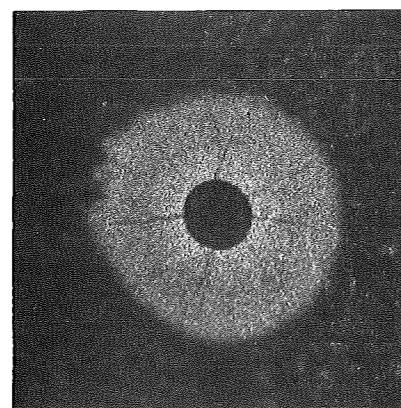
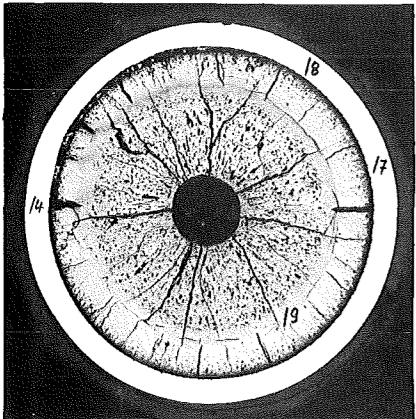
- II/62 -

zu Prüfling 5B9

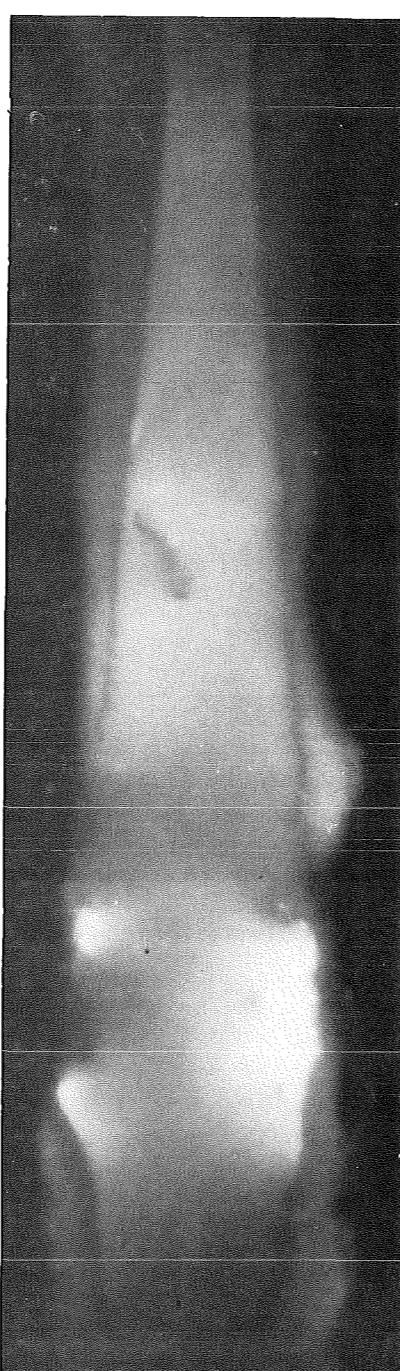
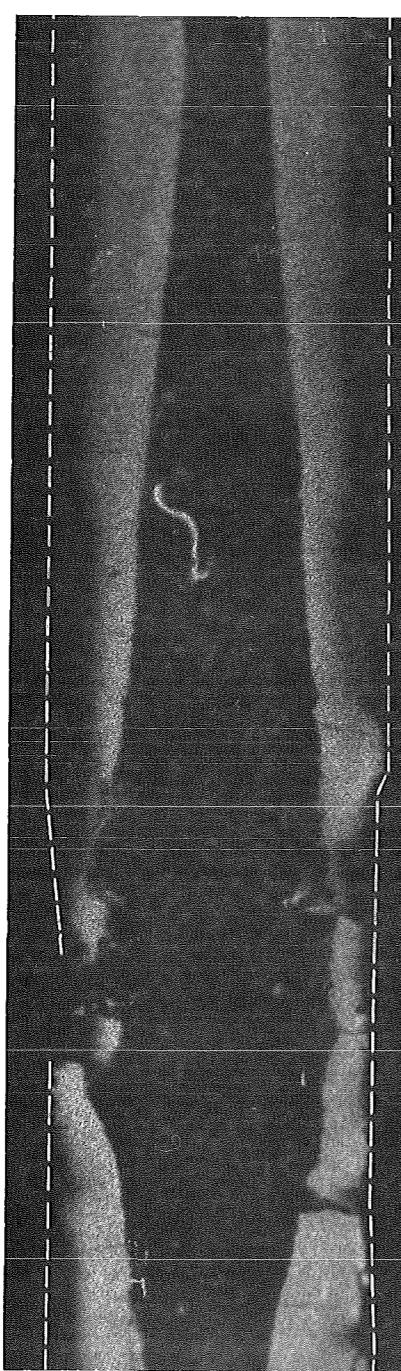
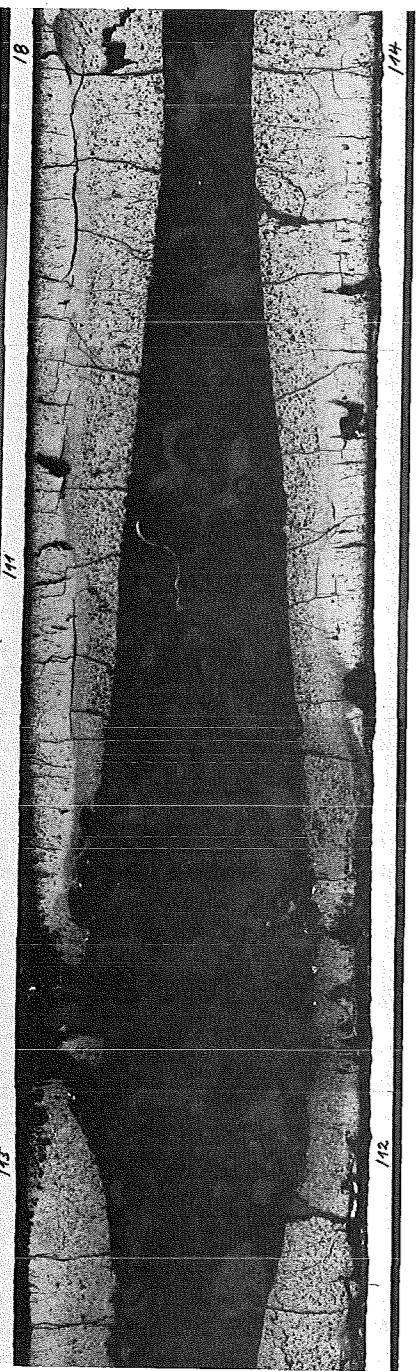
A 2







Schnitt: 2



A

1mm

B

C

### Prüfling 5 B/9

#### Brennstoff:

Form : Tabletten  
 Zusammensetzung :  $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$   
 Tablettendichte : 86,2 % th.D.

#### Hülle:

Material : 1.4988  
 Außendurchmesser : 4,7 mm  
 Wandstärke : 0,3 mm

#### Geometrie:

Länge des Prüflings : 172 mm  
 Länge der Brennstoffsäule : 80 mm  
 Radiale Spaltweite : 75  $\mu\text{m}$   
 Schmierdichte : 80 % th.D.

#### Bestrahlung:

Einrichtung : Na/PbBi-Doppel-  
 Kapsel Typ 4  
 Dauer : 265,8 Vollasttage  
 Ende : 23.8.1971  
 Rechn. Abbrand mittl. : 90,1 MWD/kg  
 Stableistung max./mittl. : 411/411 W/cm

- II/65 -

zu Prüfling 5B 8

A 1



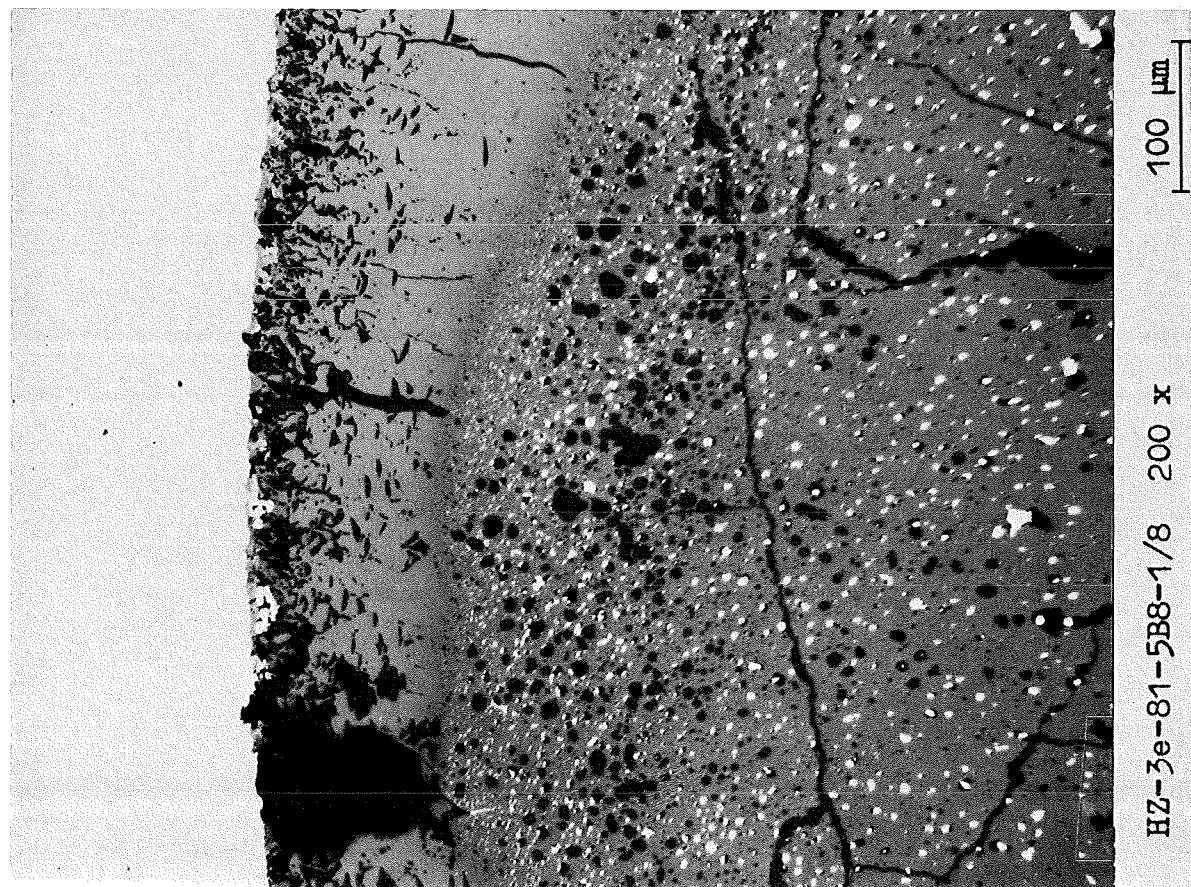
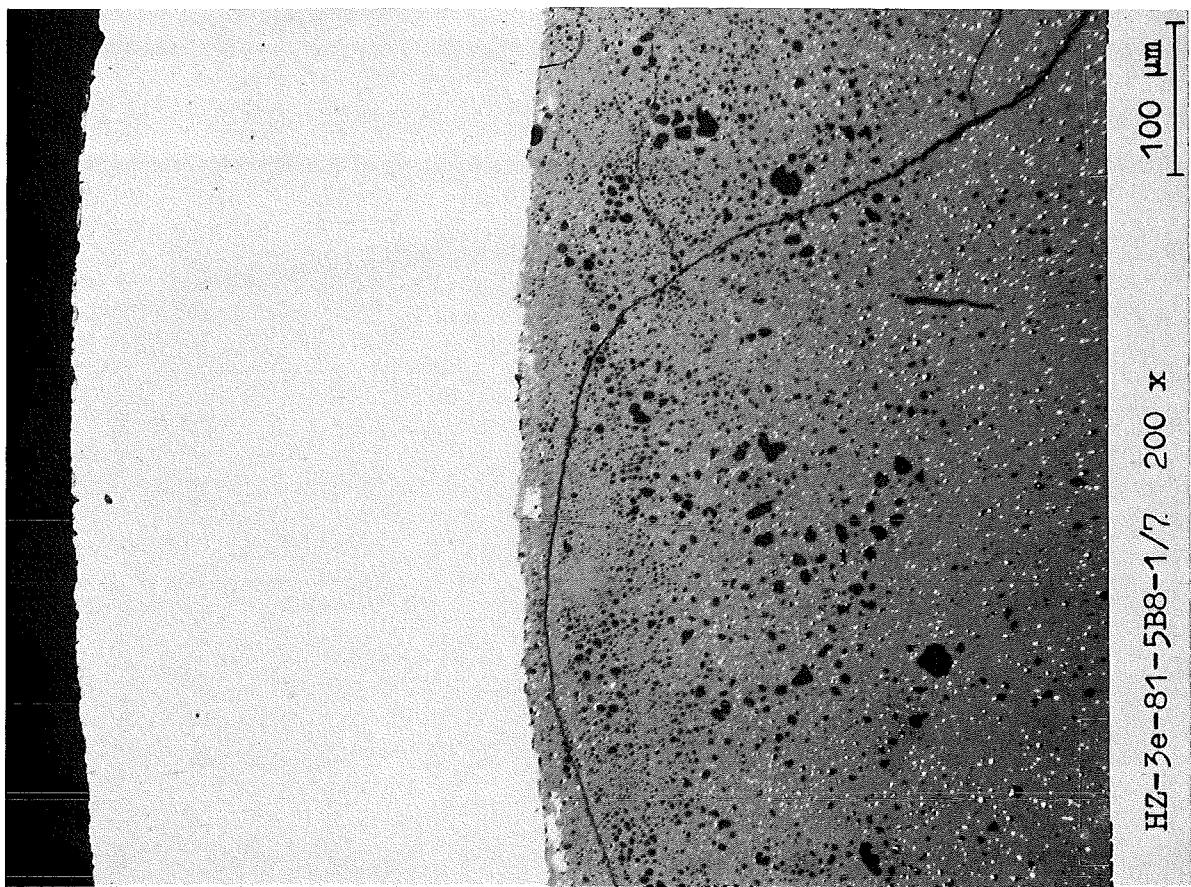
4...6

200  $\mu\text{m}$

-II/66-

zu Prüfling 5B8

A 1



- II/67-  
zu Prüfling 5B8  
A 2

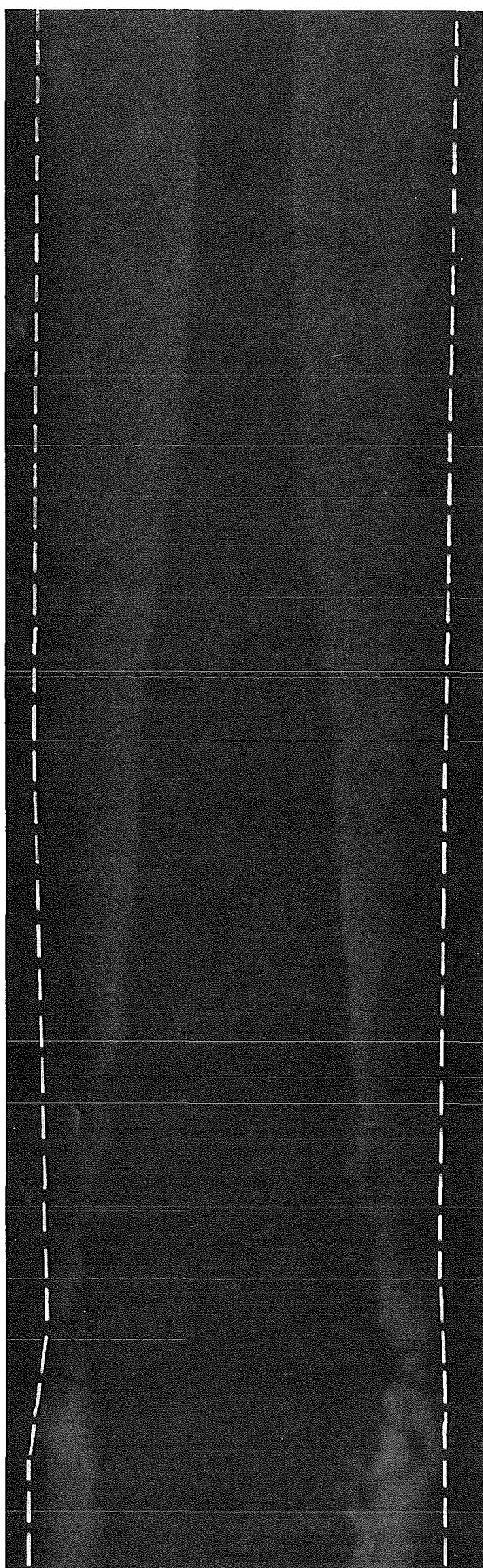


8-9

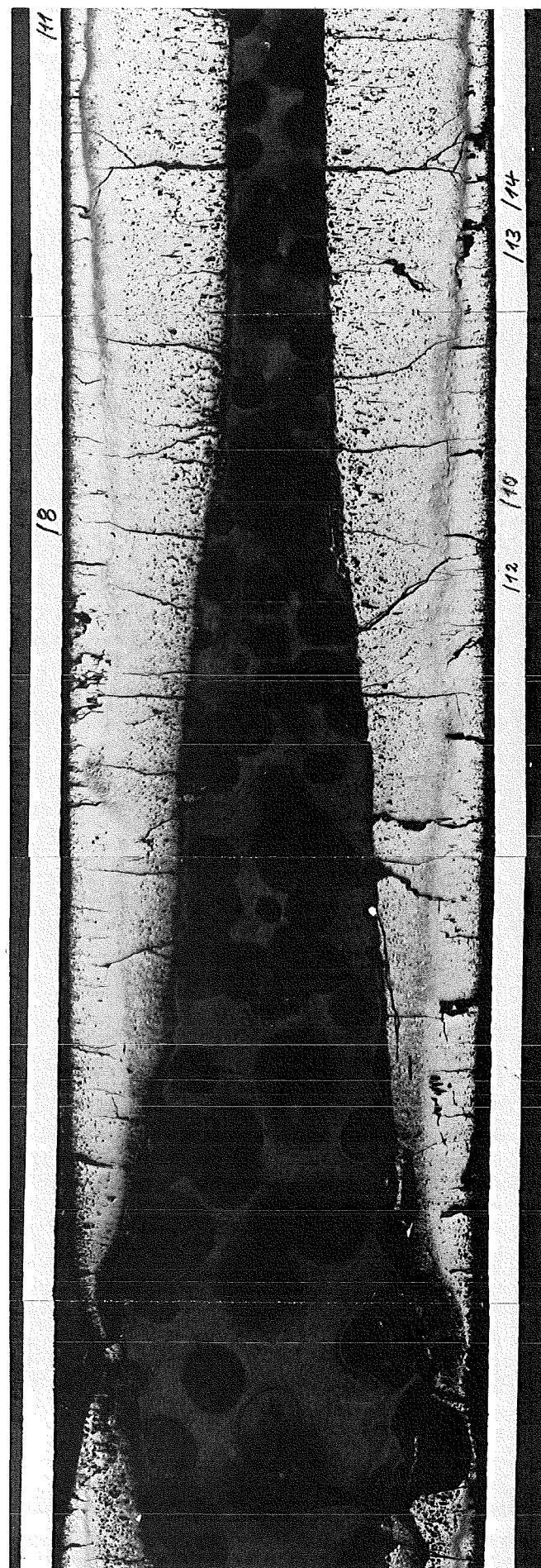
200  $\mu\text{m}$

- II/68 -  
zu Prüfling 5B8

B 2



A 2



α-Autoradiografie

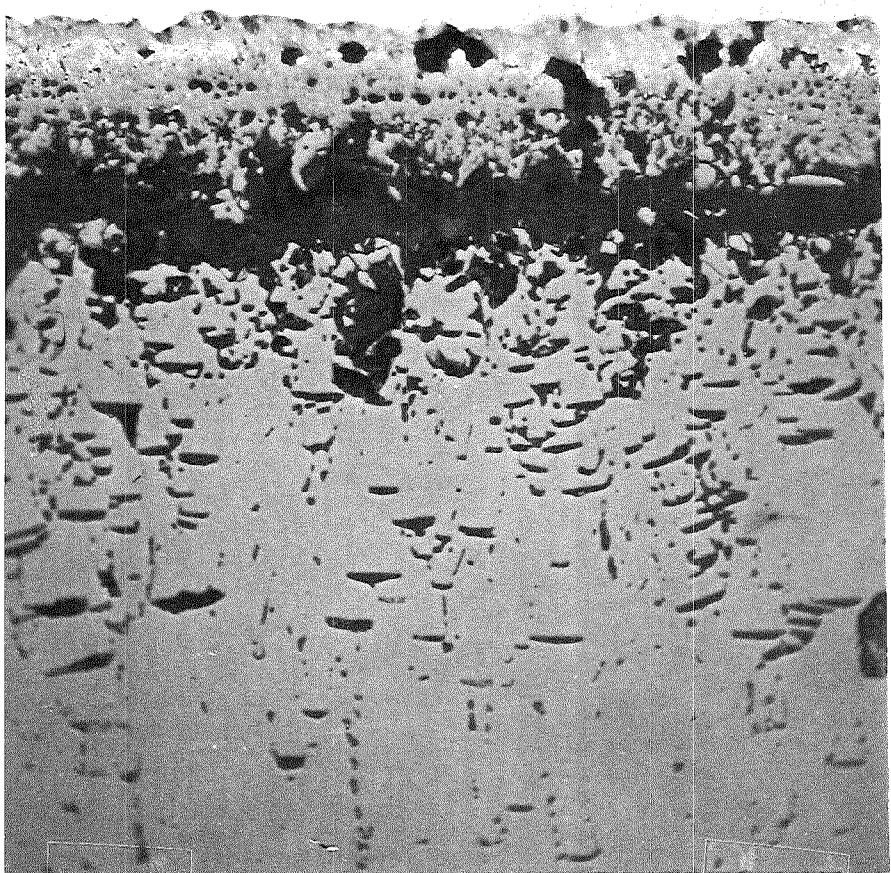
1mm

zu Prüfling 5B8  
A 2



HZ-3e-81-5B8-2/11 200 x

100  $\mu\text{m}$

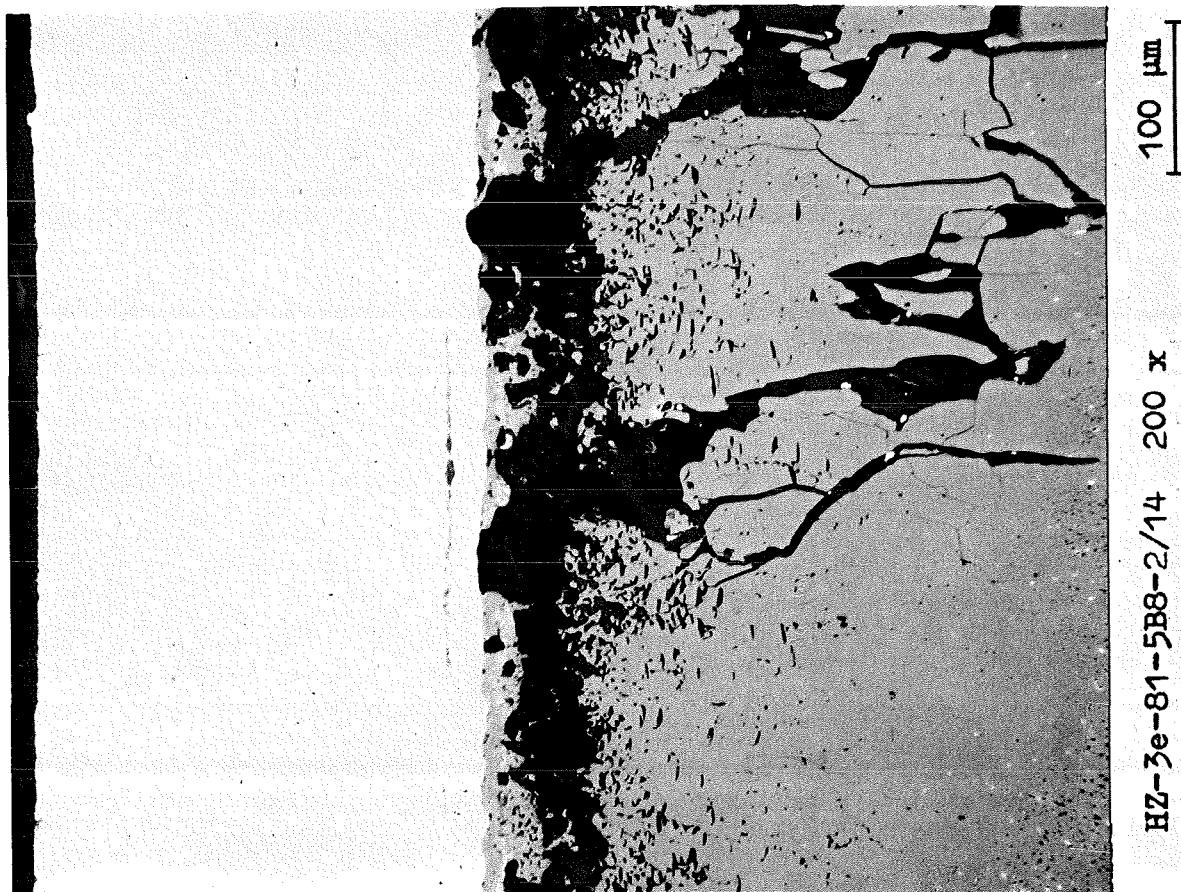


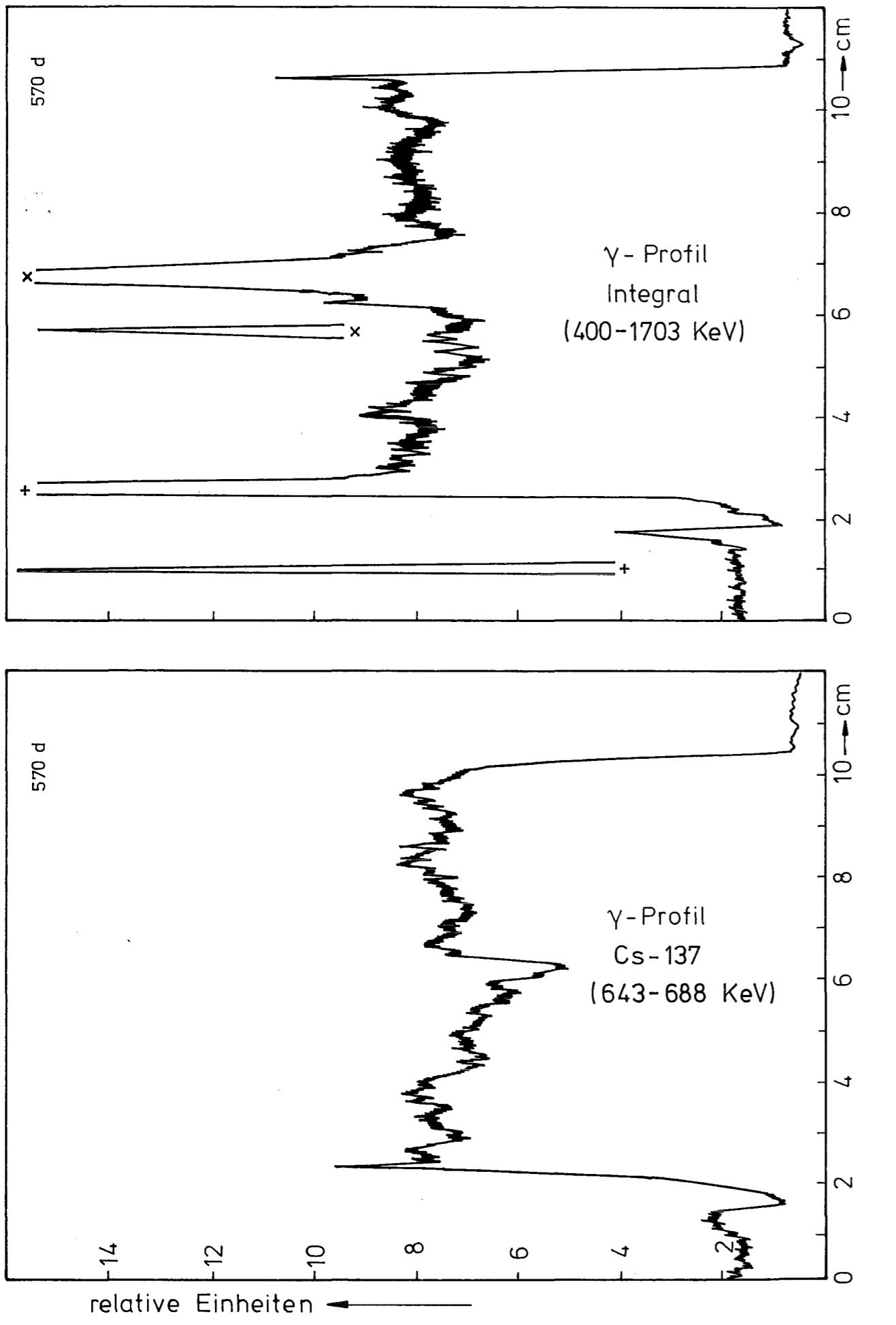
HZ-3e-81-5B8-2/10 500 x

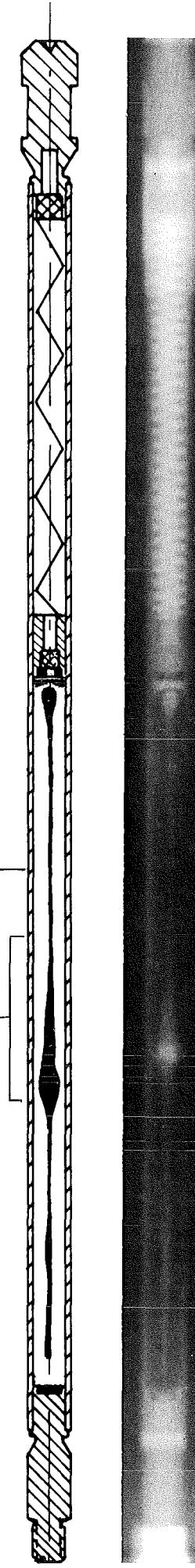
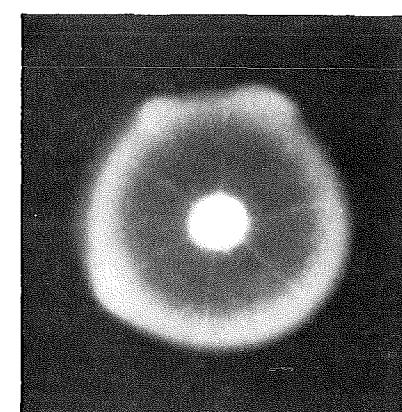
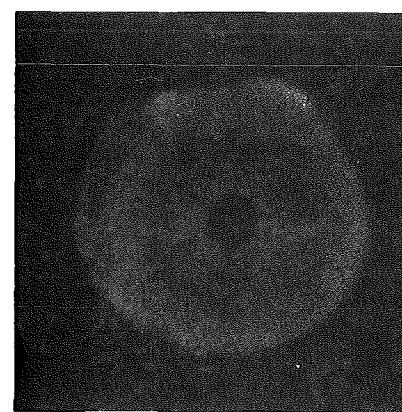
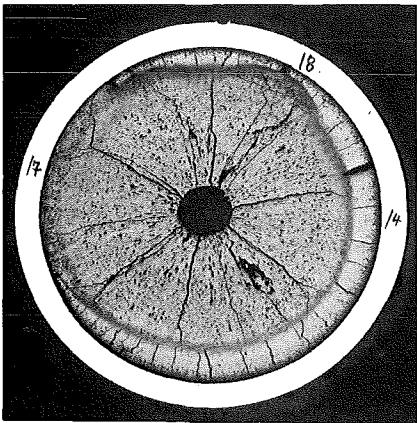
40  $\mu\text{m}$

-II/70 -

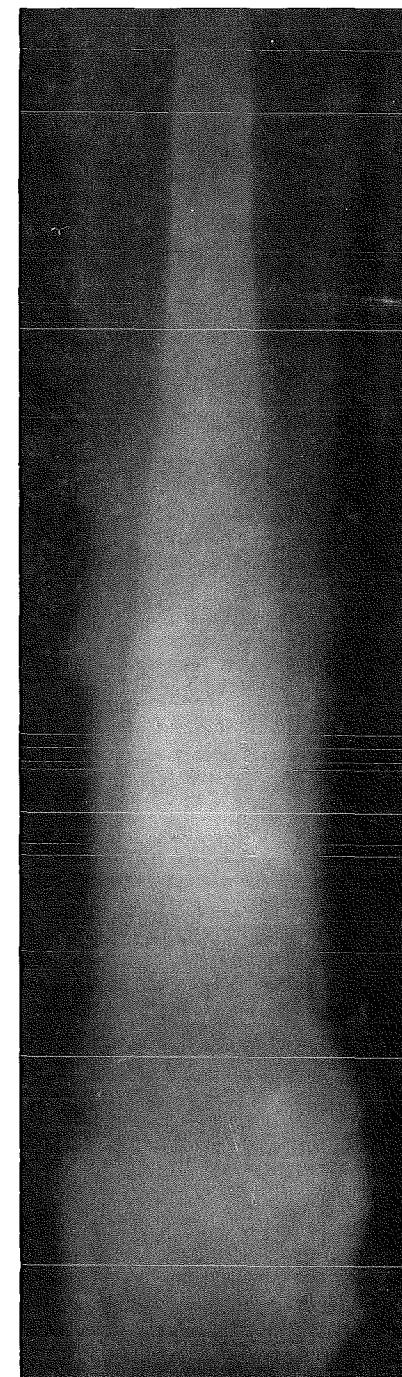
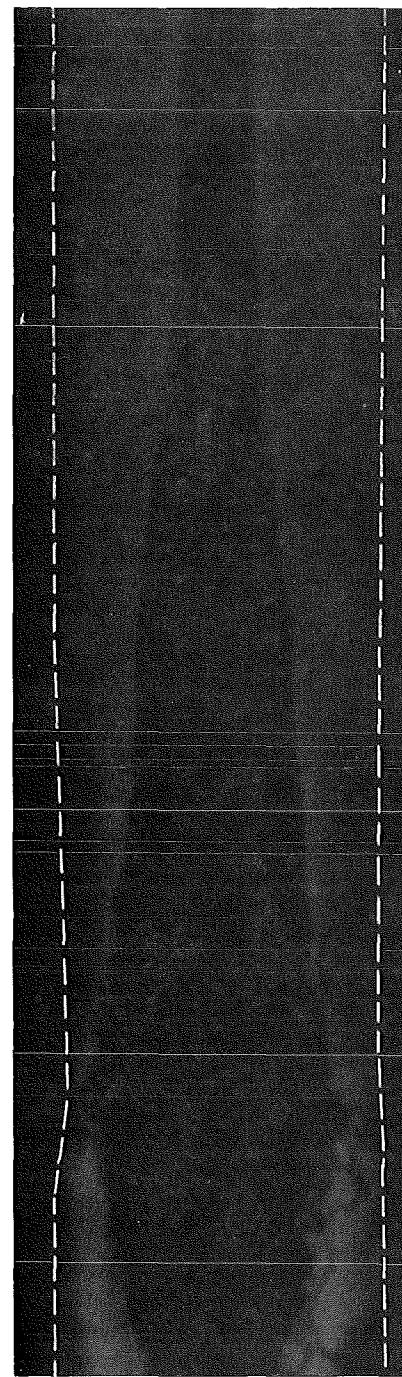
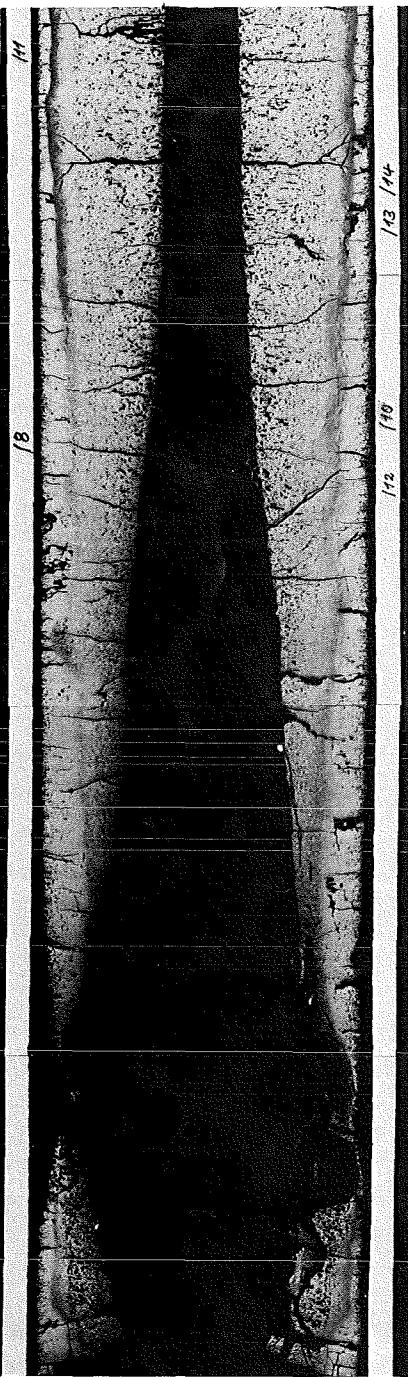
zu Prüfling 5B8  
A 2







Schnitt: 2



A

1mm

B

C

**Prüfling** 5 B/8

**Brennstoff:**

Form : Tabletten

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

Tablettendichte : 86,2 % th.D.

**Hülle:**

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 4,7 mm

Wandstärke : 0,3 mm

**Geometrie:**

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : 75  $\mu\text{m}$

Schmierdichte : 80 % th.D.

**Bestrahlung:**

Einrichtung : Na/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4

Dauer : 265,8 Vollasttage

Ende : 23.8.1971

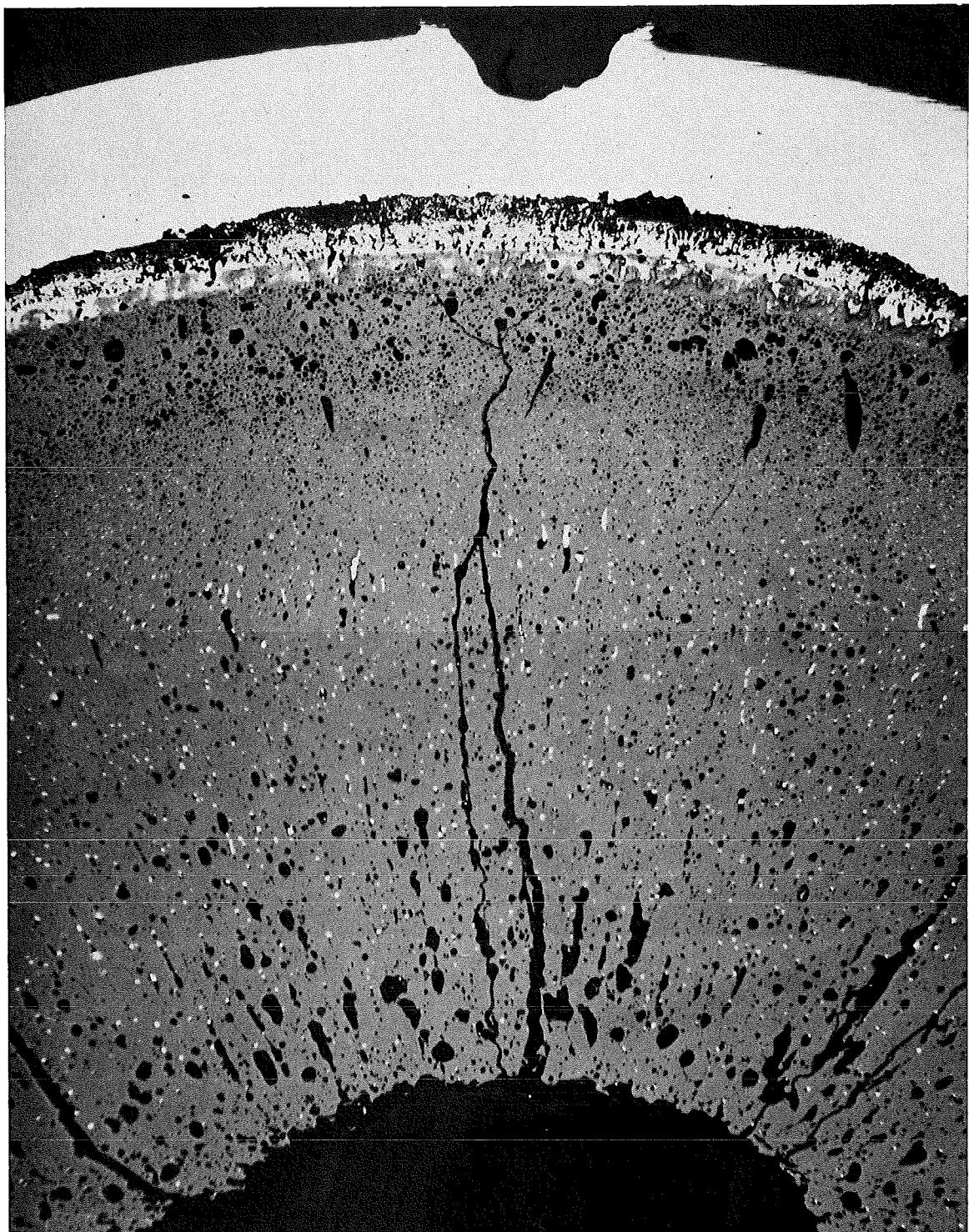
Rechn. Abbrand mittl. : 92 MWD/kg

Stableistung max./mittl. : 478/358 W/cm

- II/73 -

zu Prüfling 5B1

A1

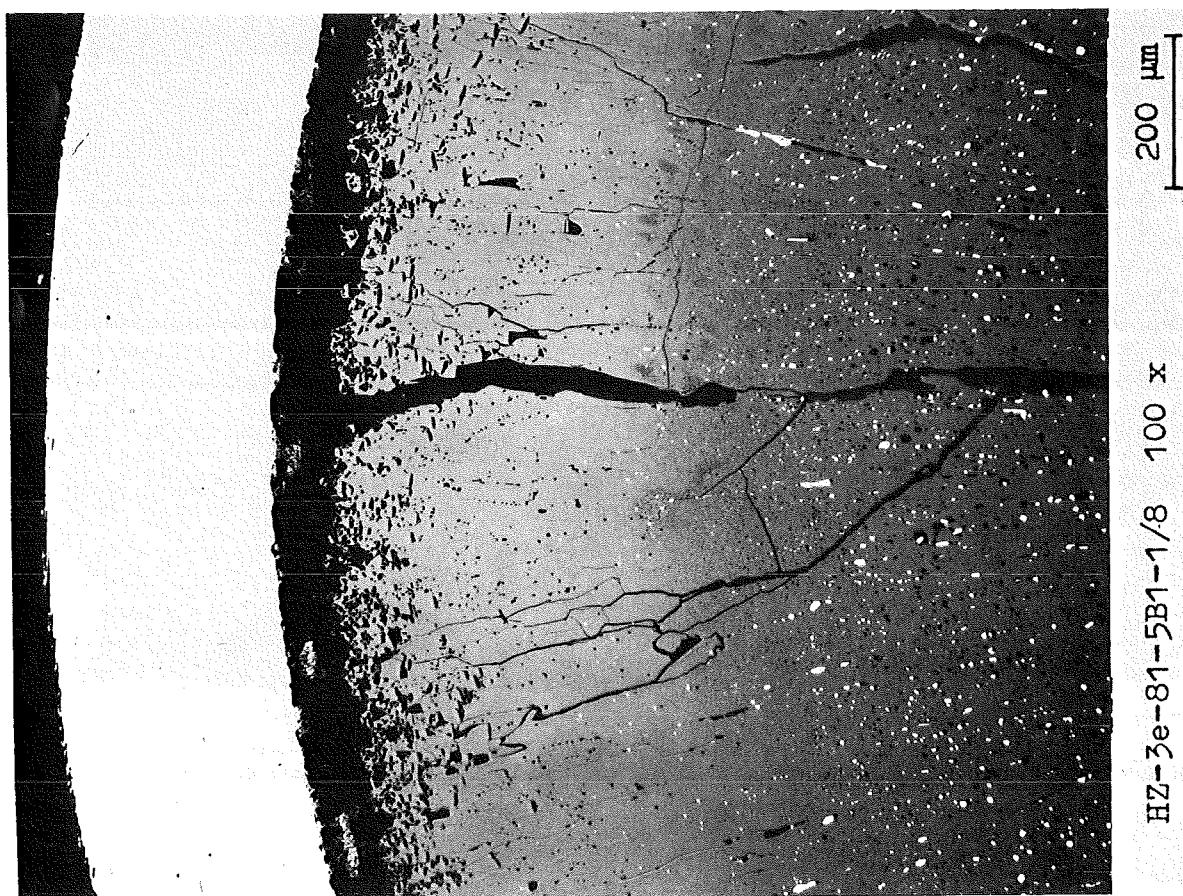
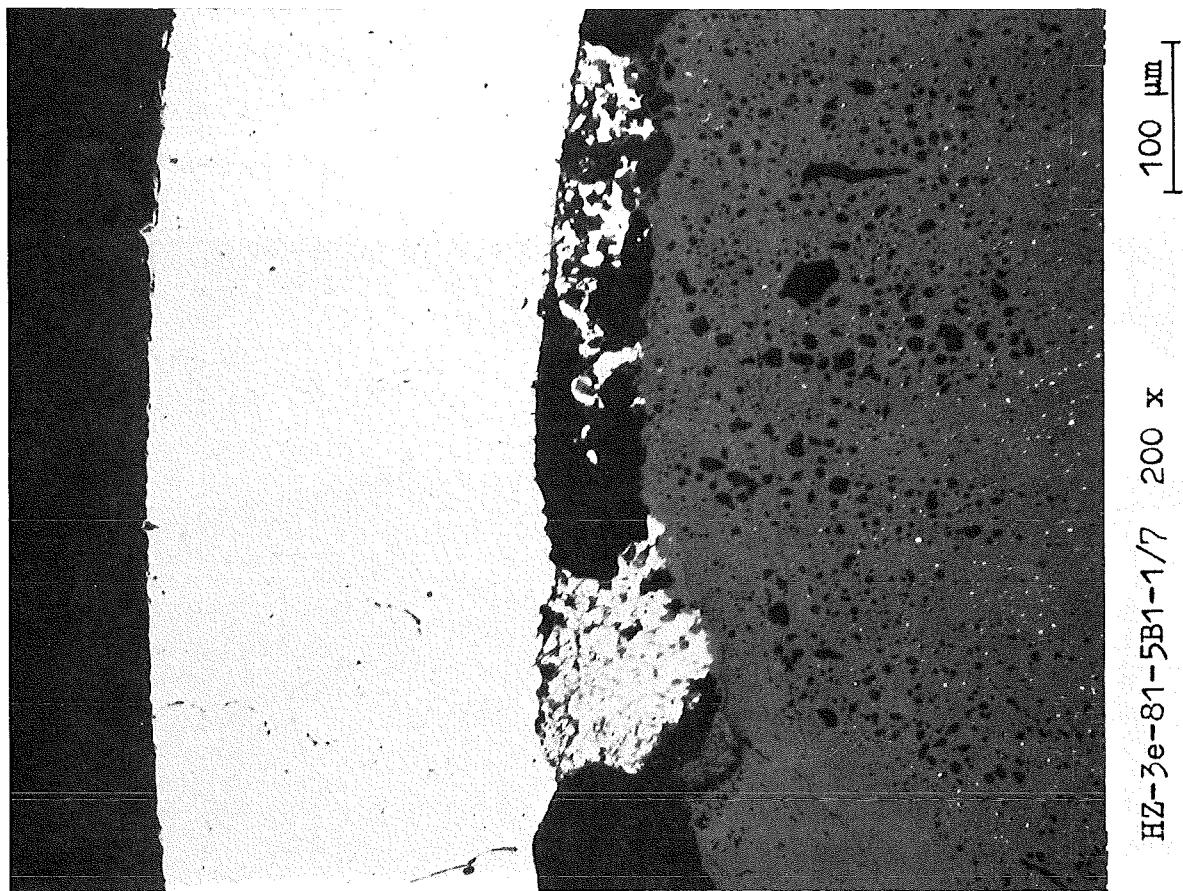


4...5

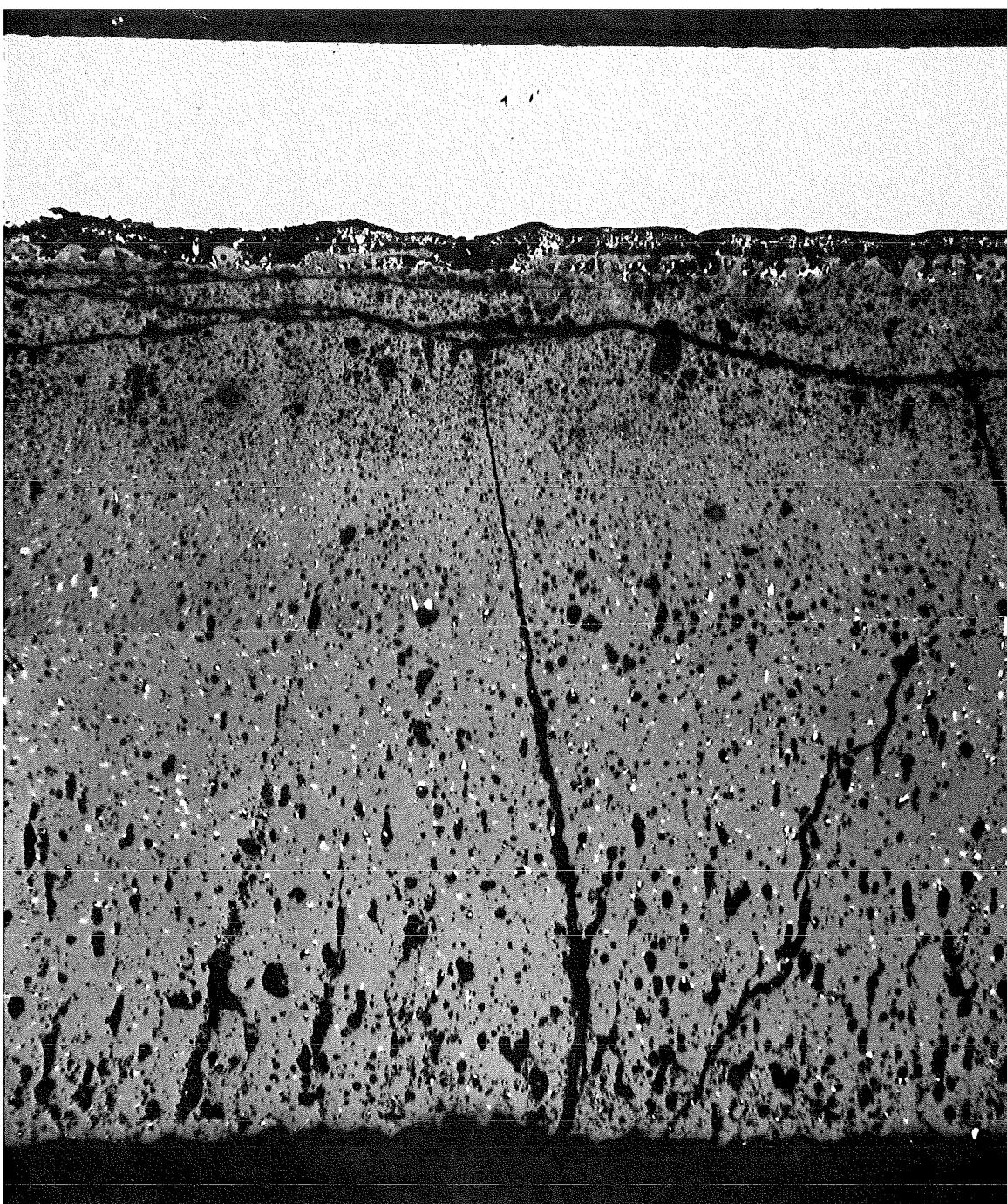
200  $\mu\text{m}$

- II/74 -

zu Prüfling 5B1  
A 1



- II / 75 -  
zu Prüfling 5B1  
A 2

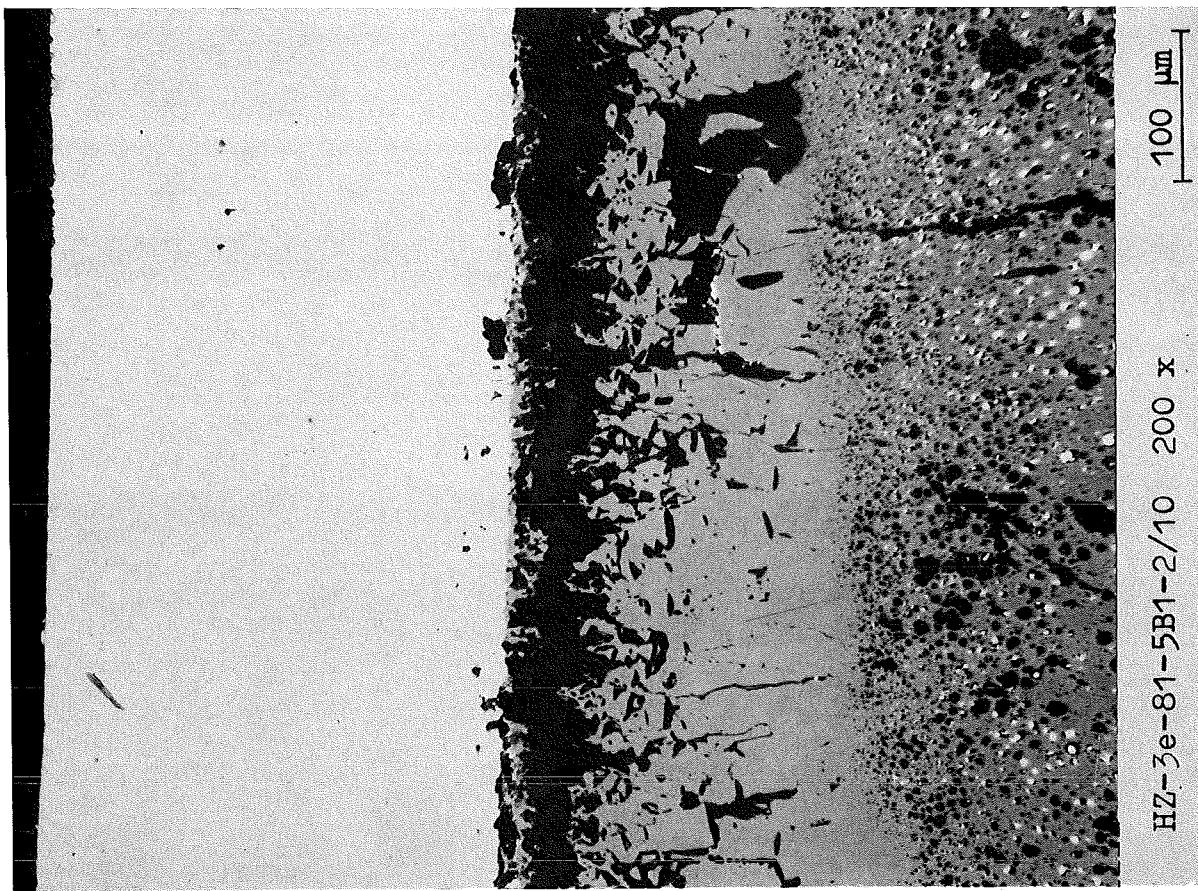


8 · 9

200  $\mu\text{m}$

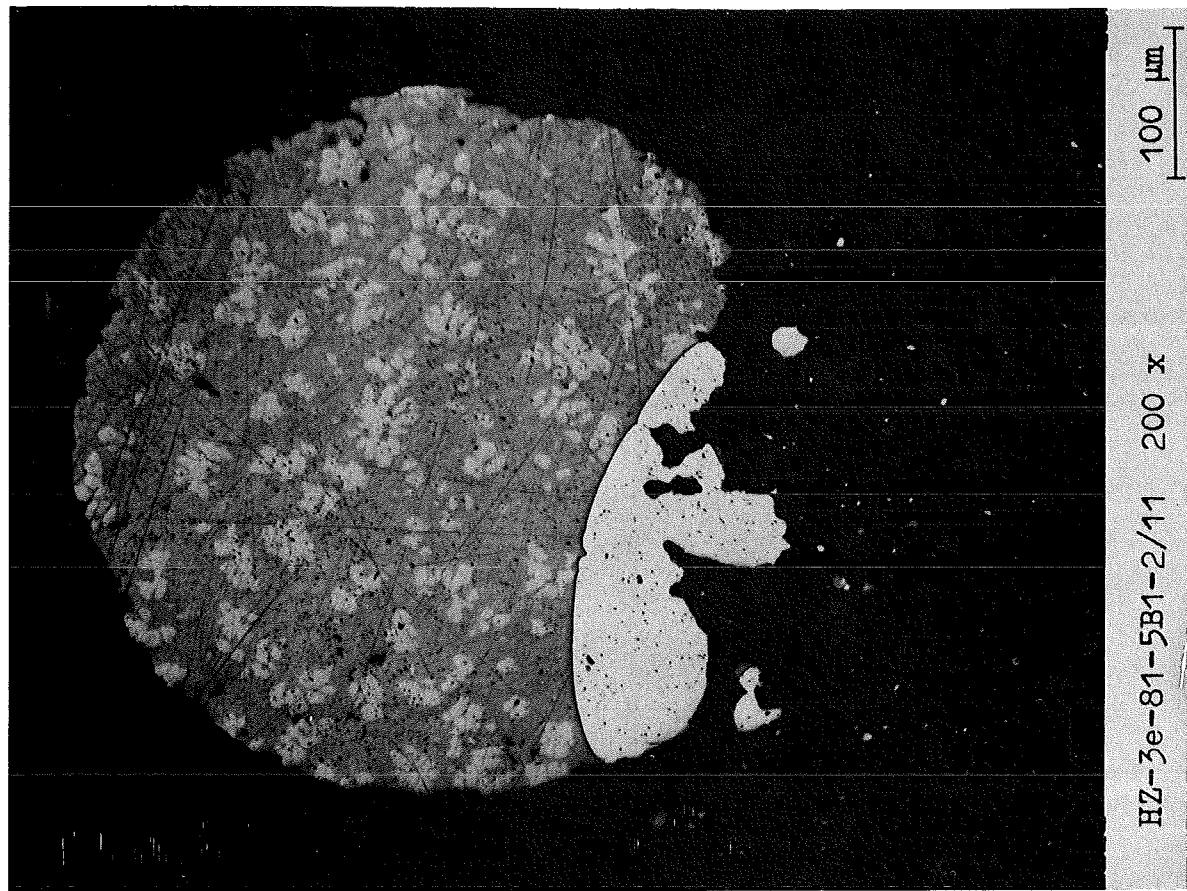
- II/76 -  
zu Prüfling 5B1

A 2



HZ-3e-81-5B1-2/10 200 x

100 μm



HZ-3e-81-5B1-2/11 200 x

100 μm

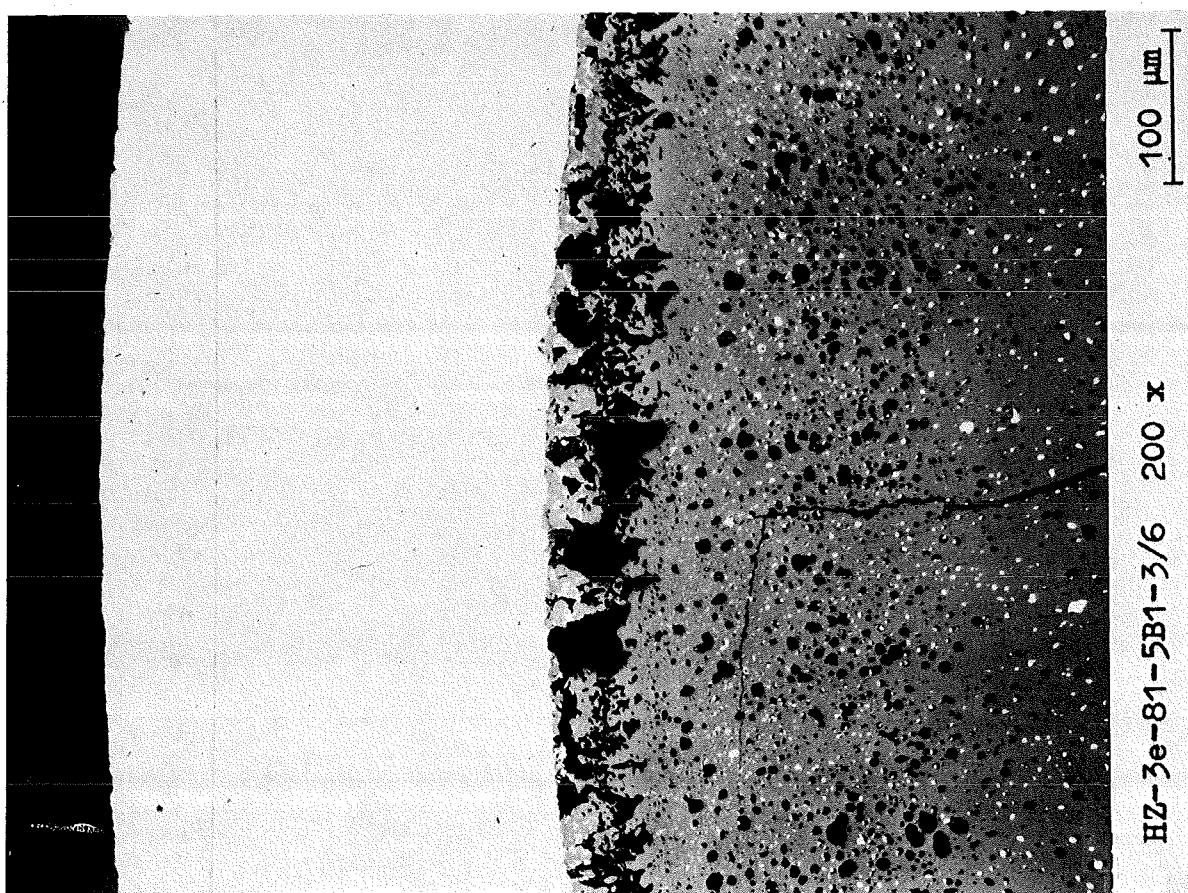
-II/77-

zu Prüfling 5B1

A 2



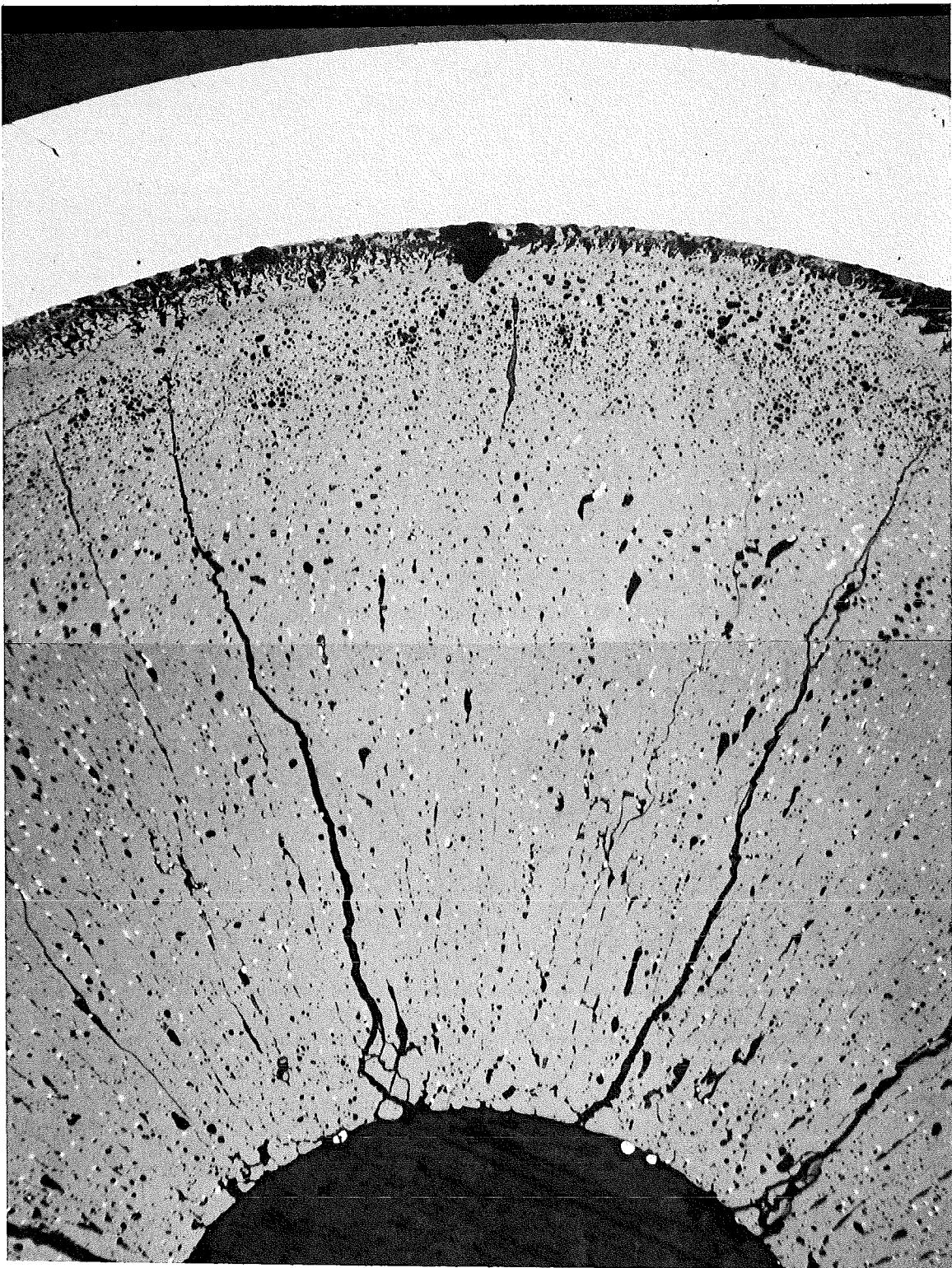
A 3



-II/78-

zu Prüfling 5B1

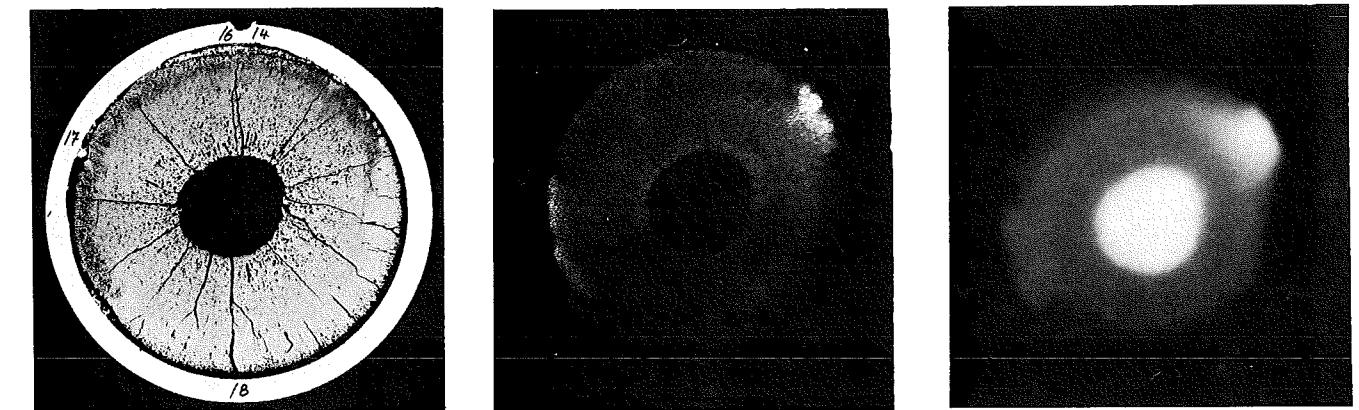
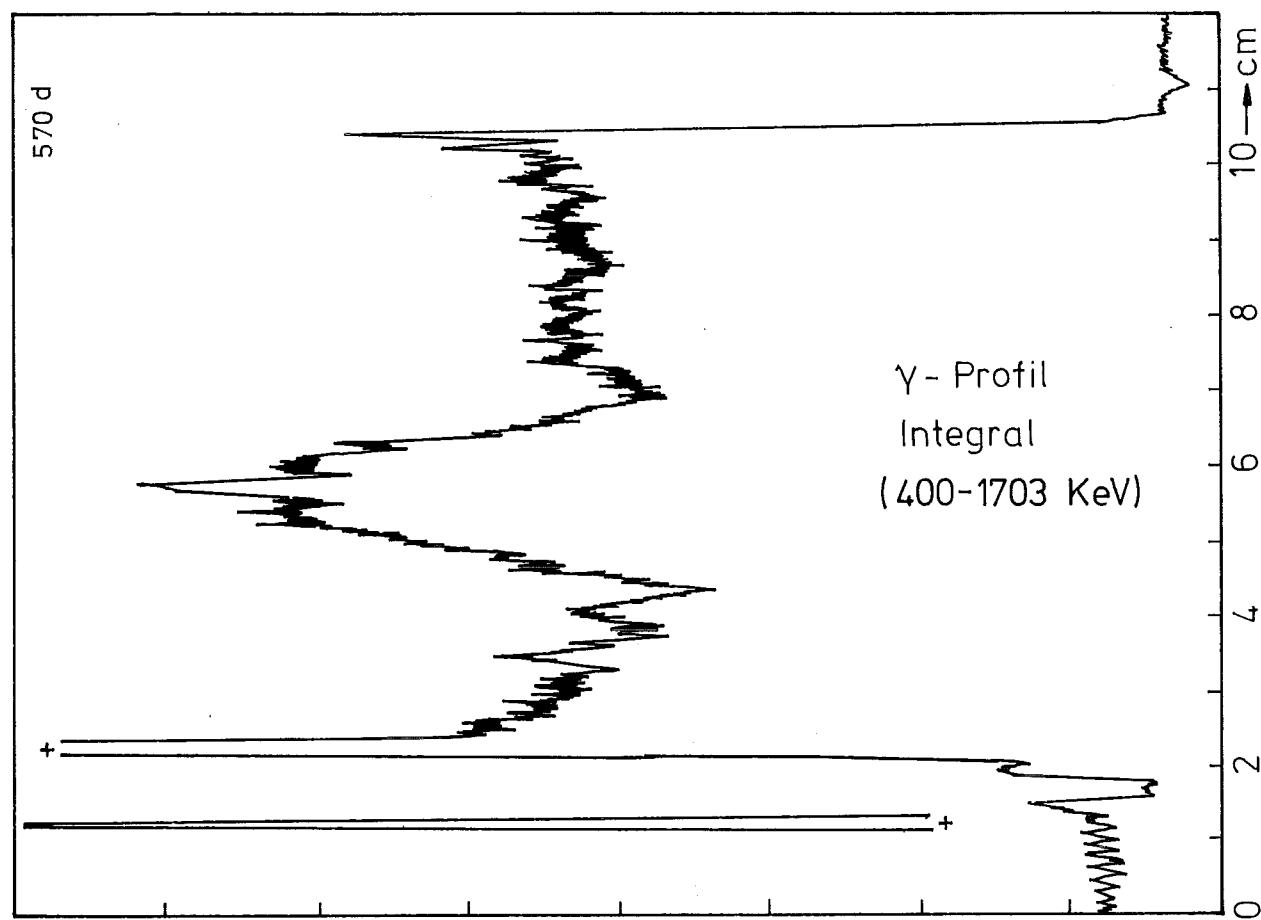
A 3



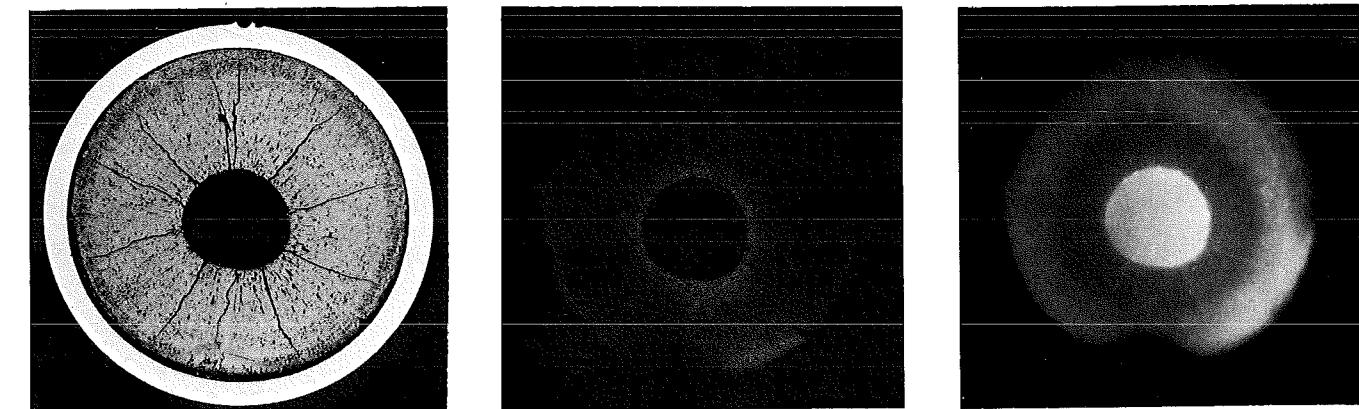
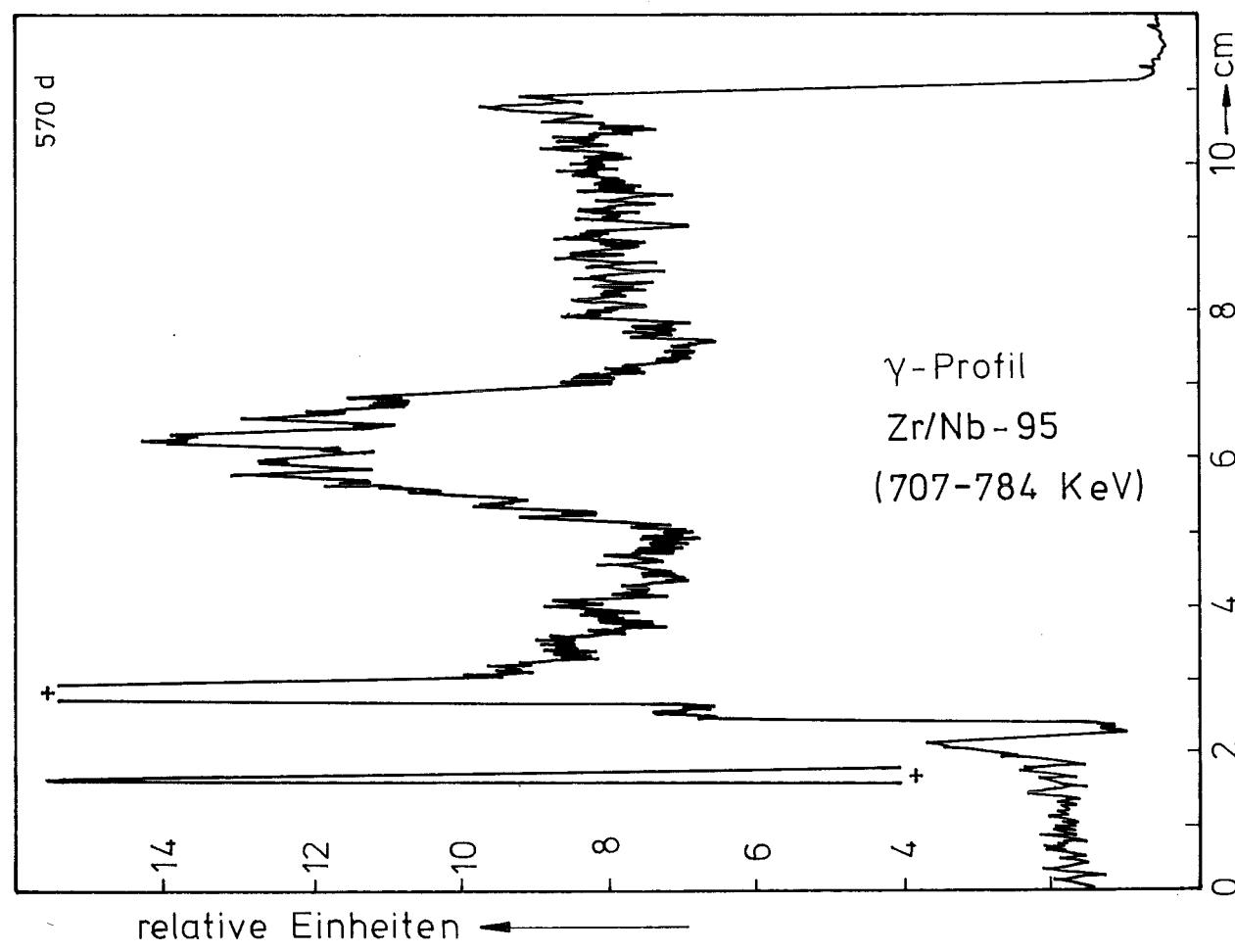
4...5

200  $\mu\text{m}$

Schnitt: 1



Schnitt: 3

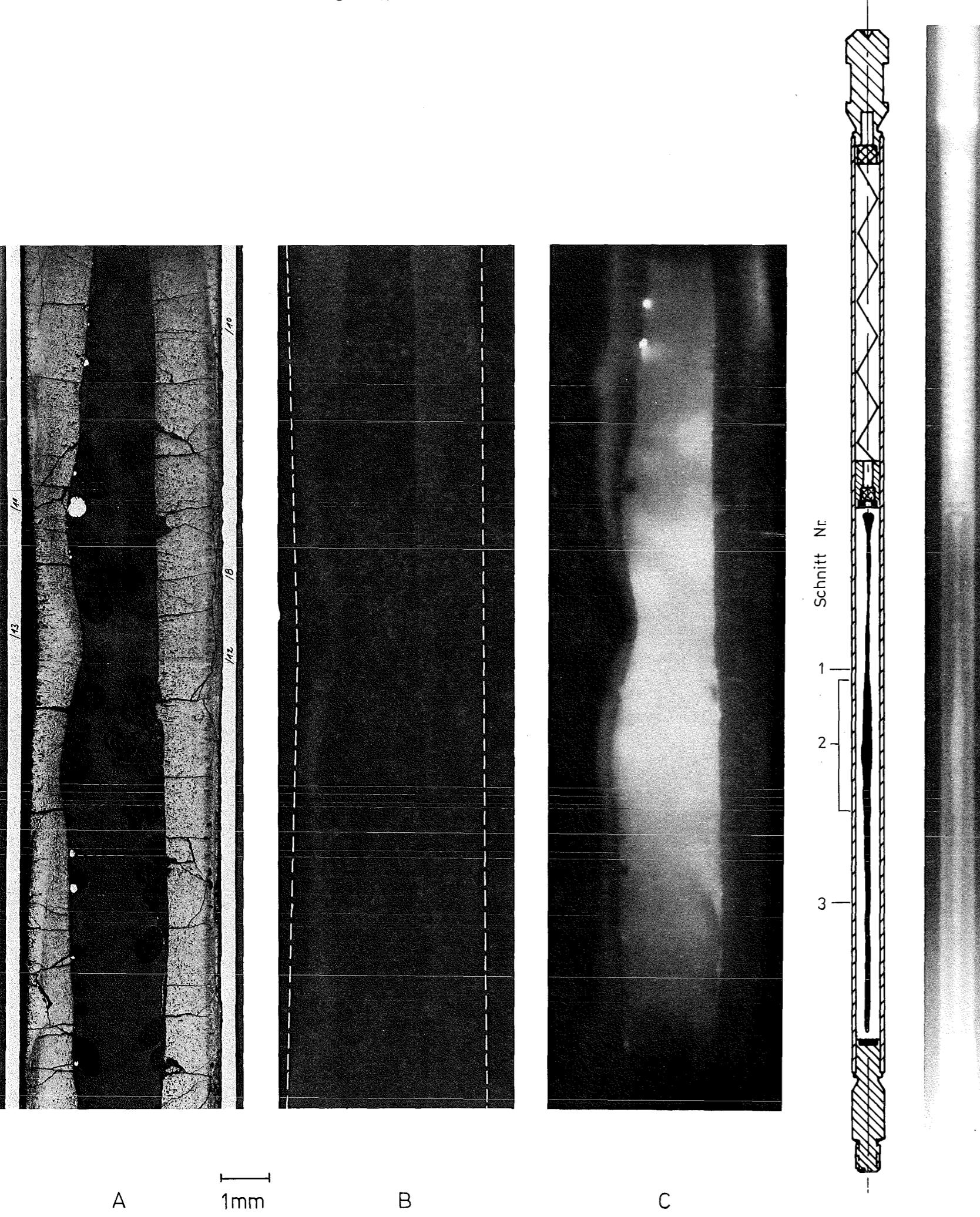


A

1mm

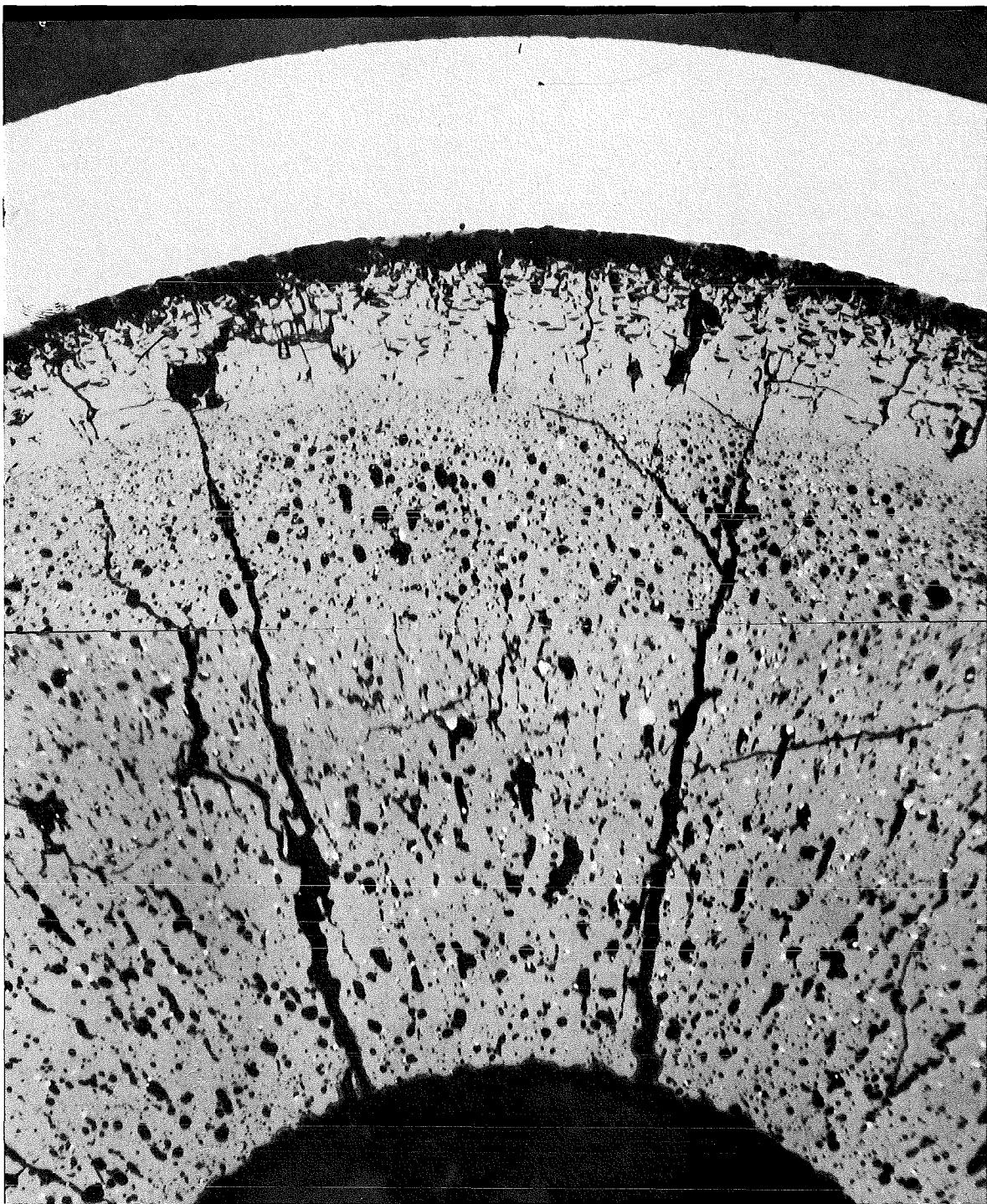
B

C



<b>Prüfling</b>	
5 B/1	
<b>Brennstoff:</b>	
Form	: Tabletten
Zusammensetzung	: $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$
Tablettendichte	: 87,4 % th.D.
<b>Hülle:</b>	
Material	: 1.4988
Aussendurchmesser	: 4,7 mm
Wandstärke	: 0,3 mm
<b>Geometrie:</b>	
Länge des Prüflings	: 172 mm
Länge der Brennstoffsäule	: 80 mm
Radiale Spaltweite	: 75 $\mu\text{m}$
Schmierdichte	: 80 % th.D.
<b>Bestrahlung:</b>	
Einrichtung	: Na/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4
Dauer	: 265,8 Vollasttage
Ende	: 23.8.1971
Rechn. Abbrand mittl.	: 90,5 MWd/kgM
Stableistung max./mittl.:	553/357 W/cm

- II/81 -  
zu Prüfling 5B12  
A 1



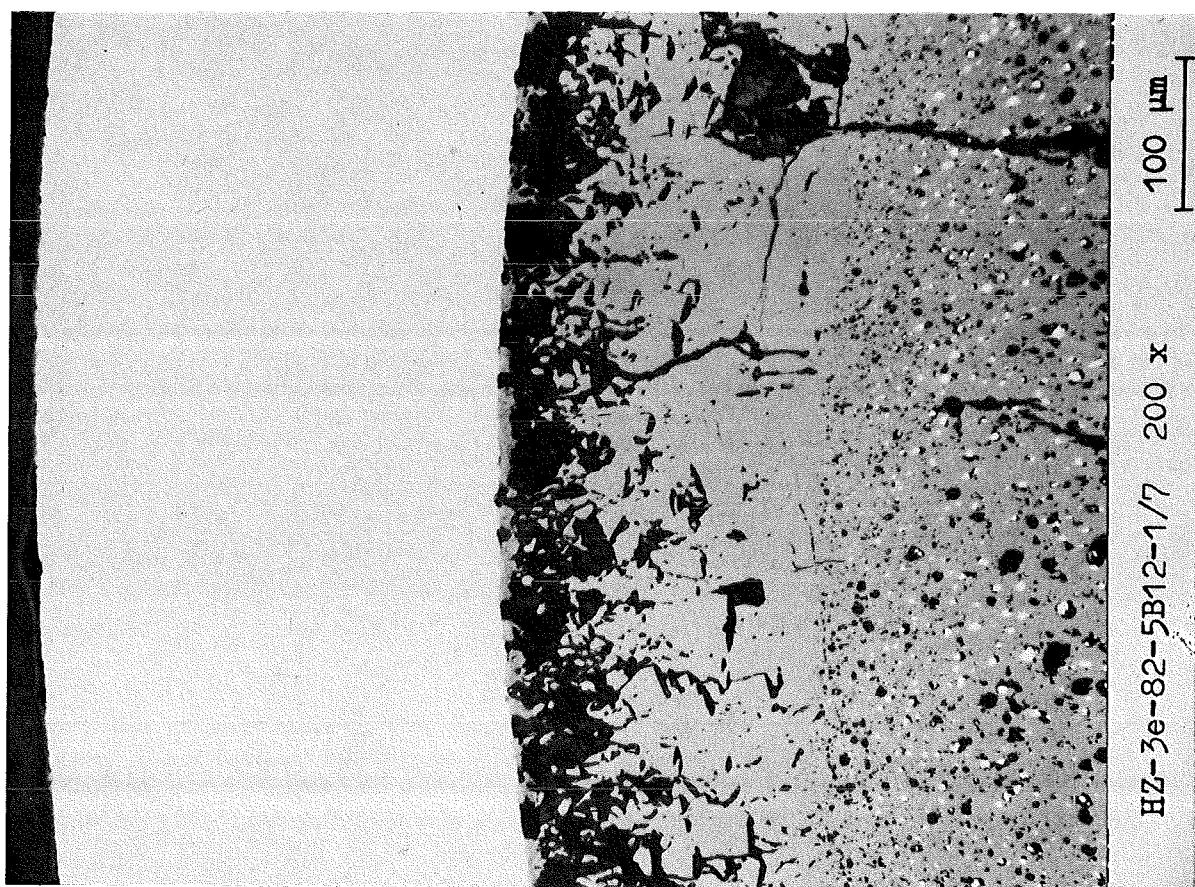
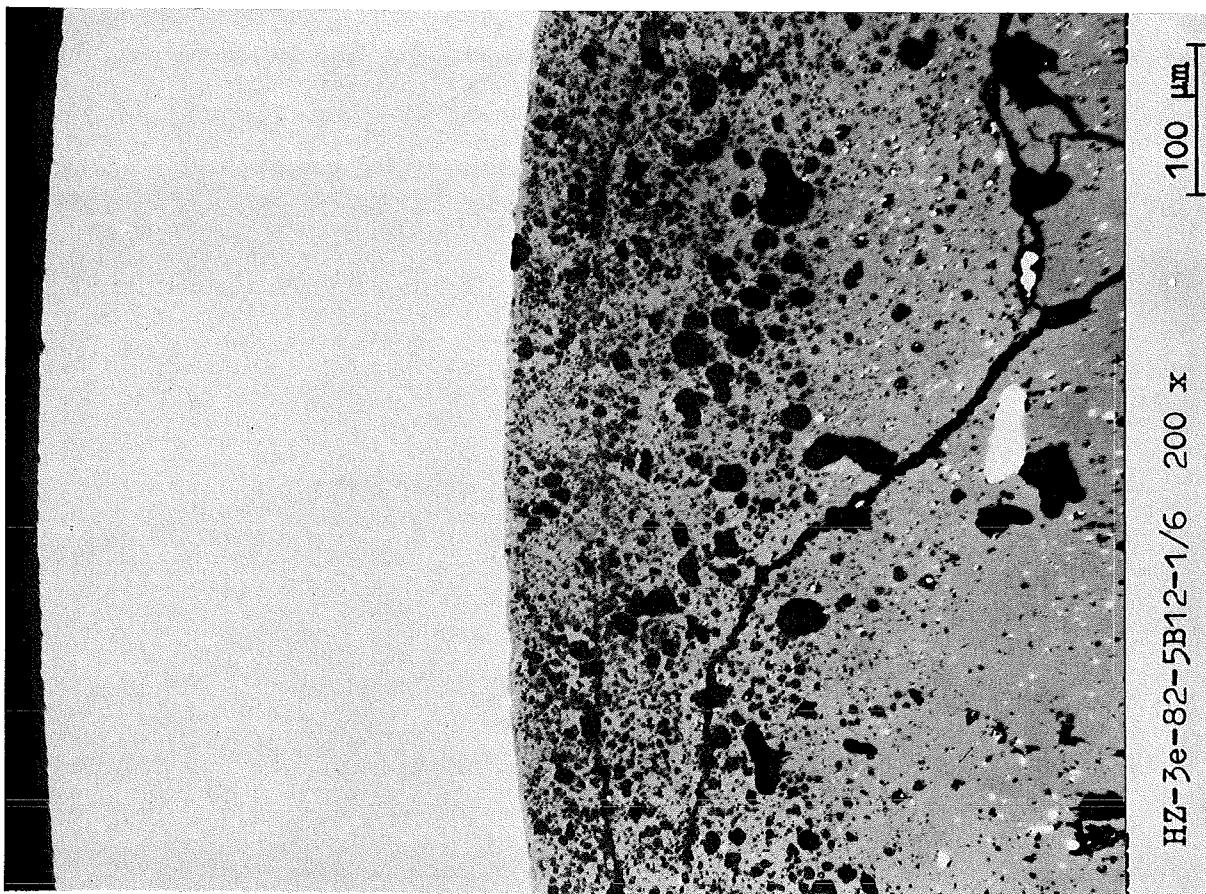
4...5

200  $\mu\text{m}$

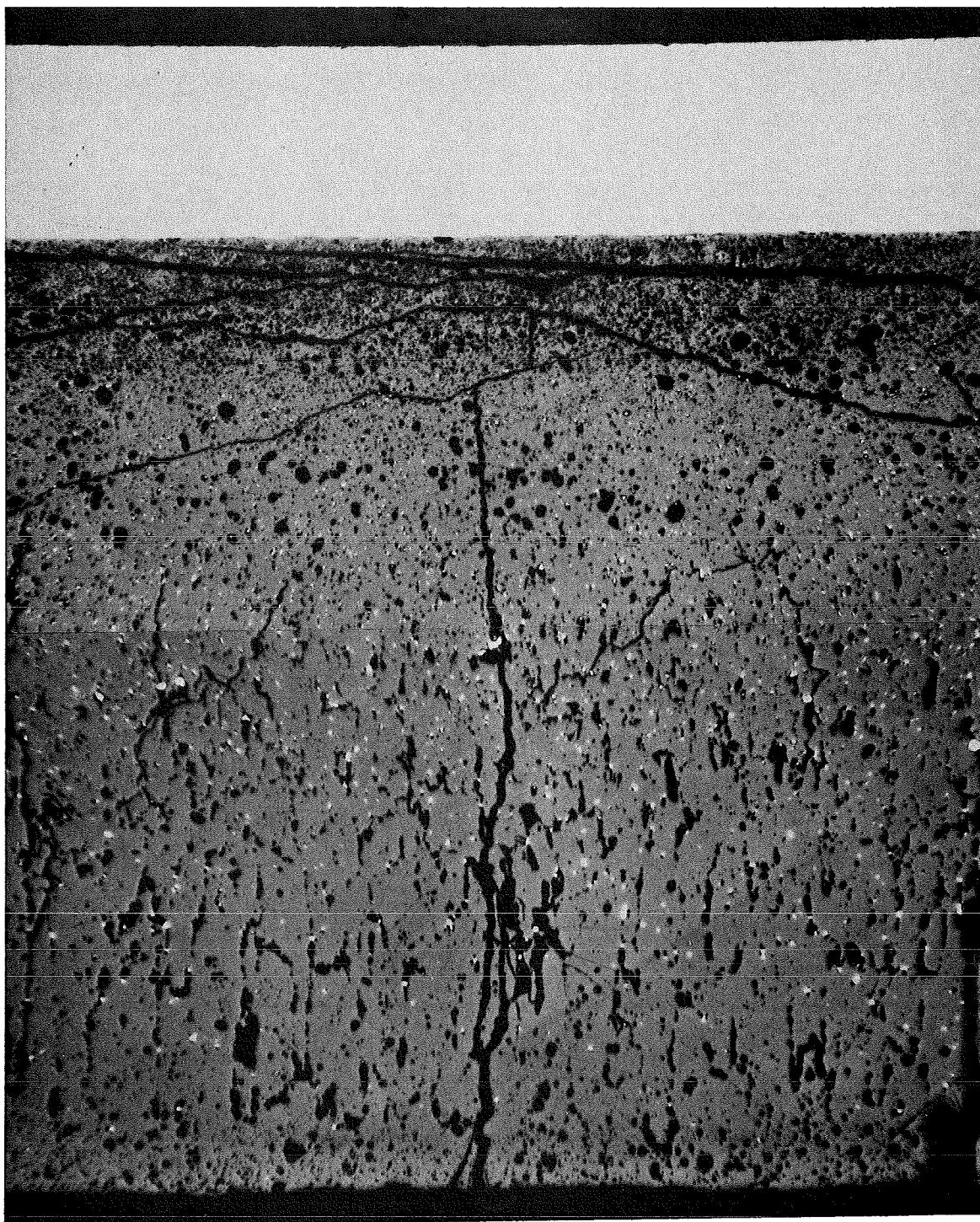
- II/82 -

zu Prüfling 5B12

A1

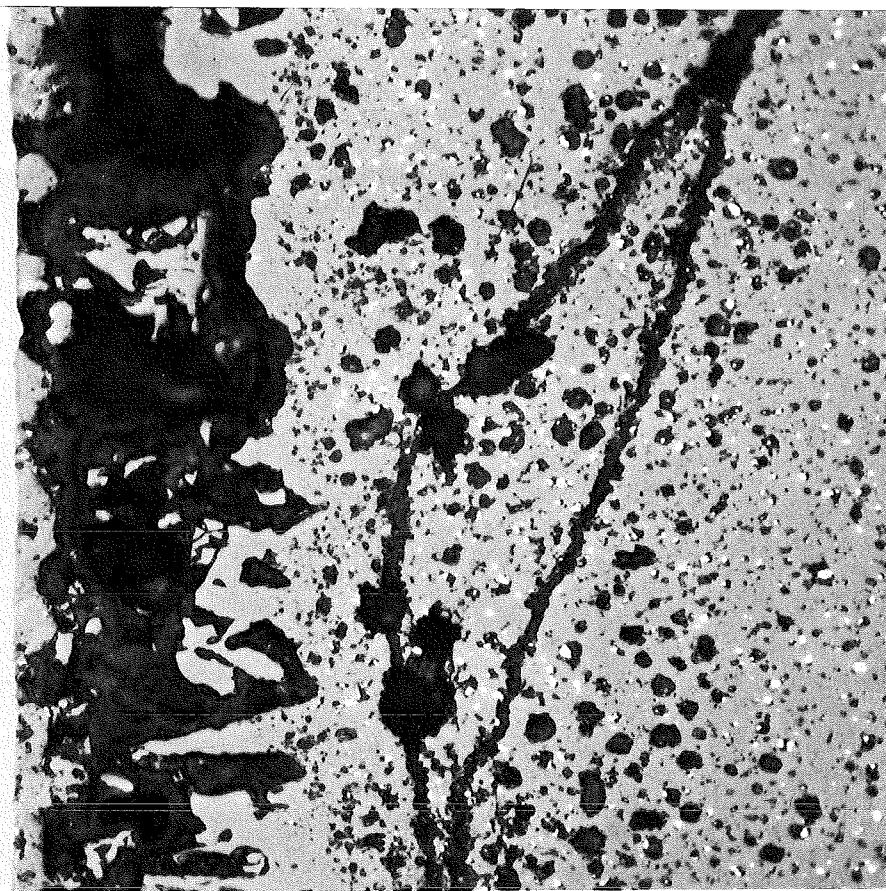


- II/83 -  
zu Prüfling 5 B 12  
A 2

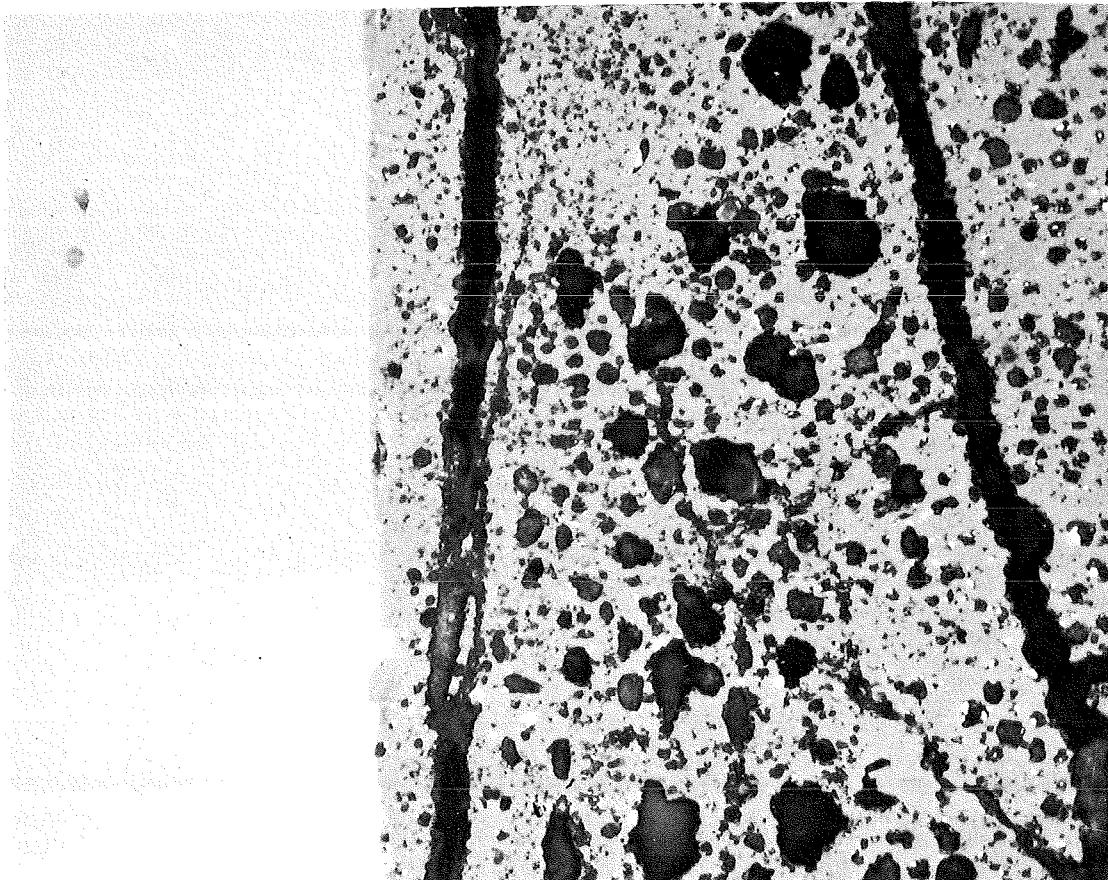


8...9

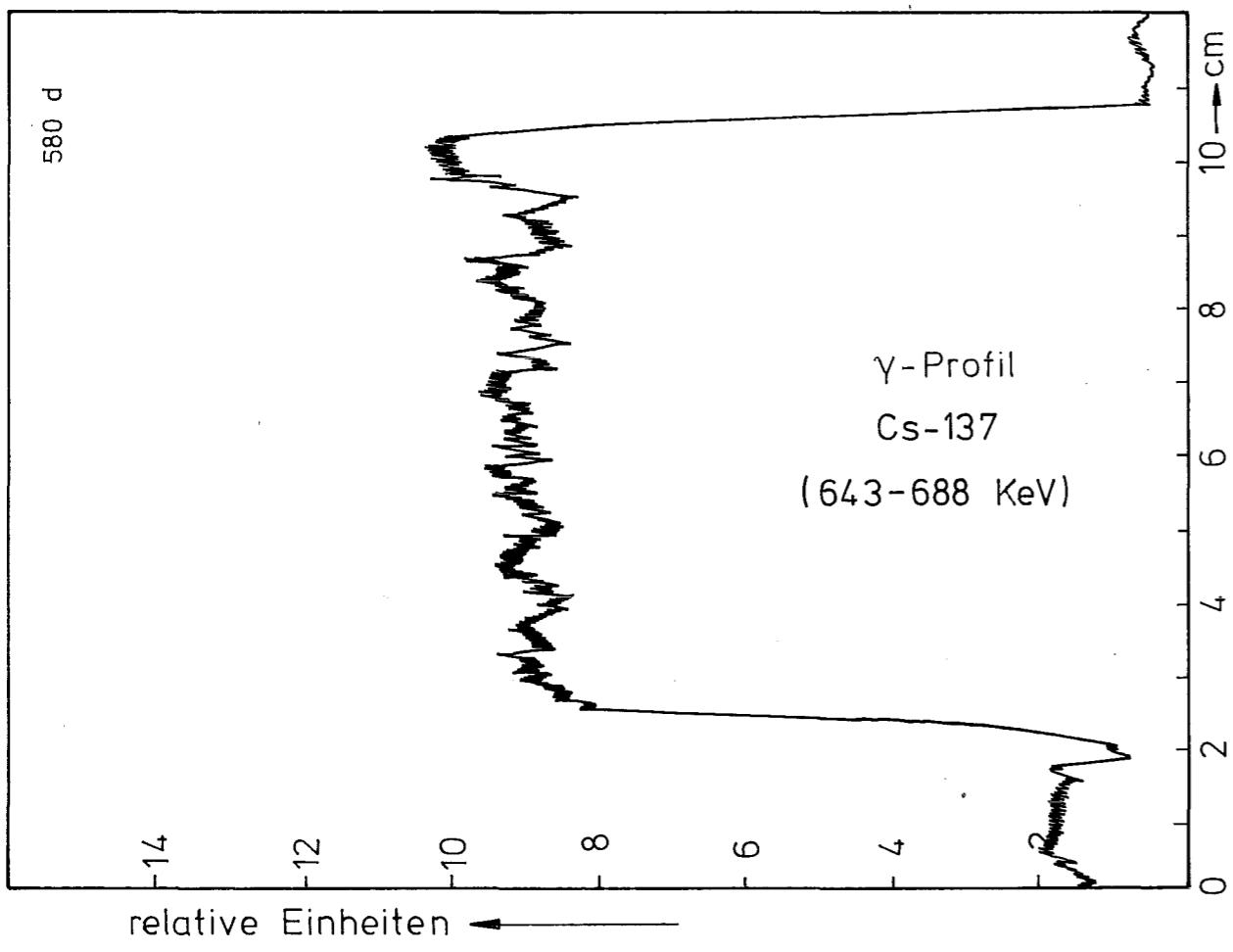
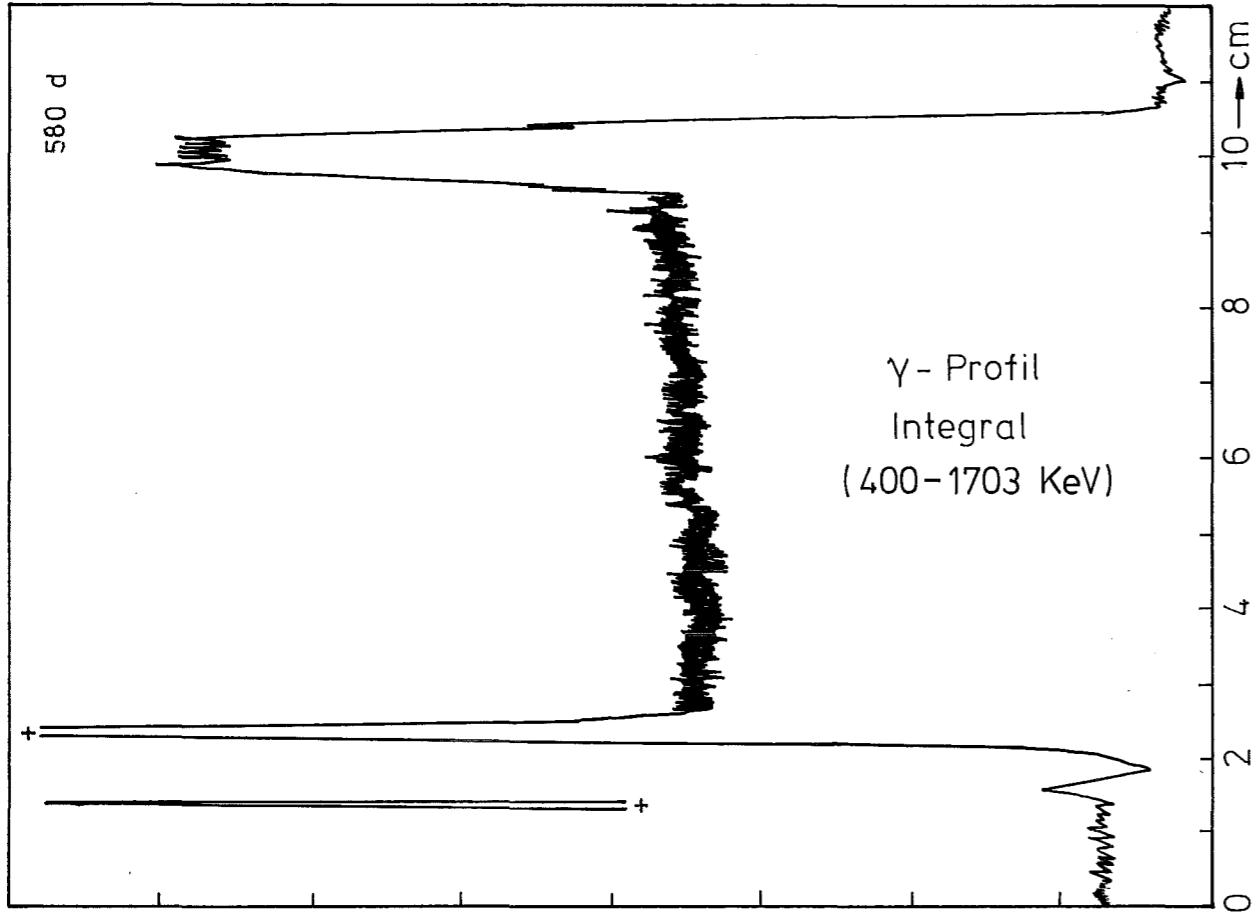
200  $\mu\text{m}$

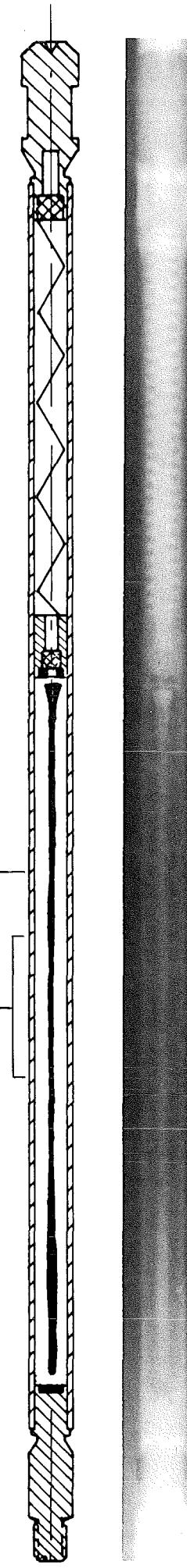
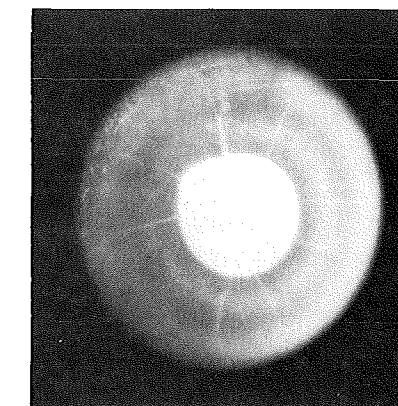
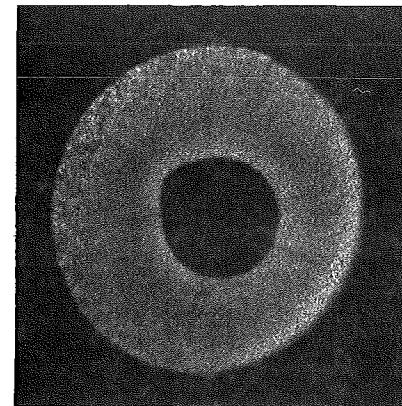
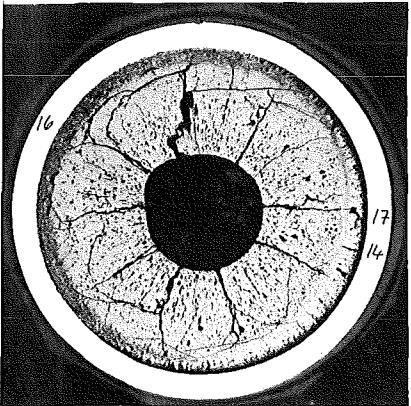


HZ-3e-82-5B12-2/12 500 x 40  $\mu\text{m}$

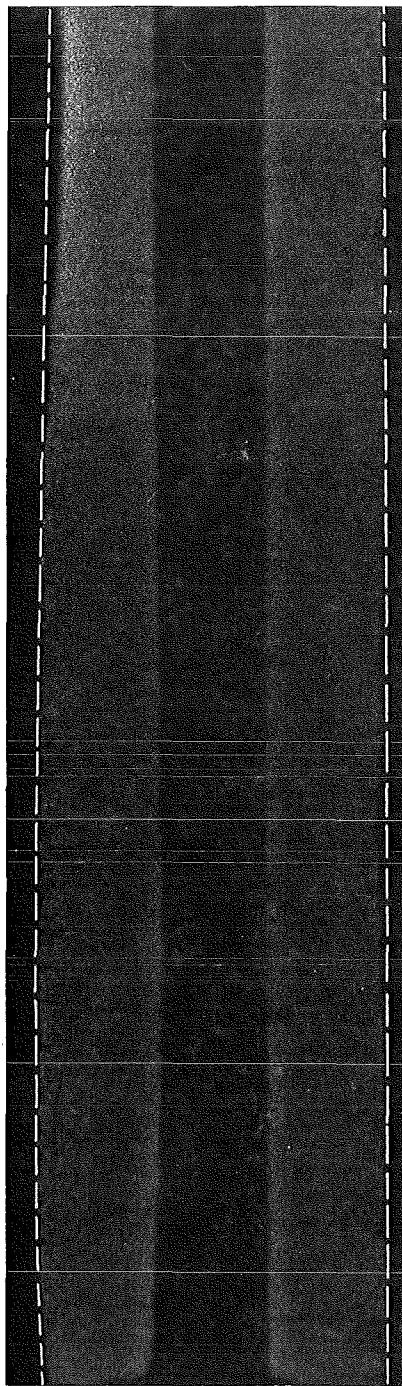
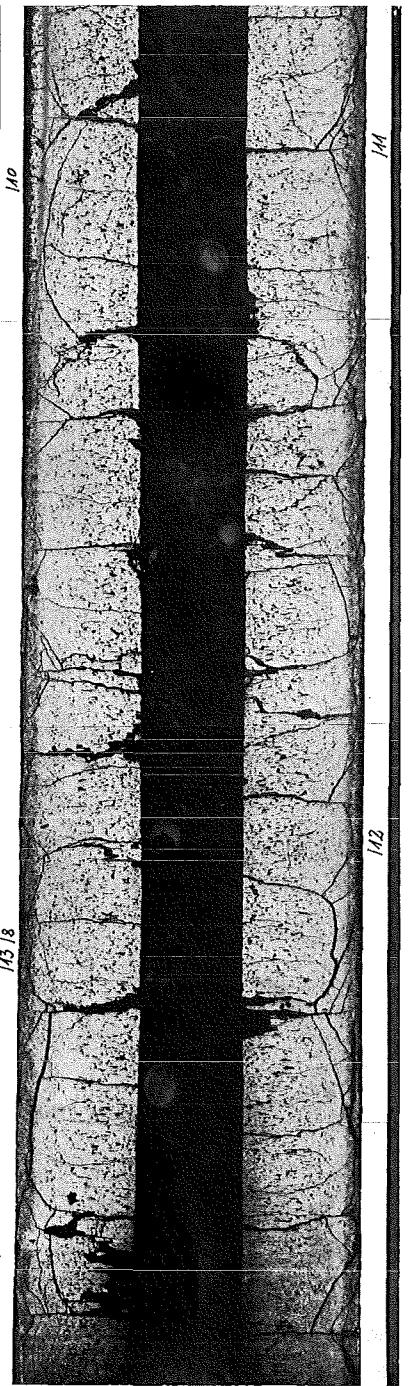


HZ-3e-82-5B12-2/13 500 x 40  $\mu\text{m}$





Schnitt: 2



A

1mm

B

C

### Prüfling 5 B/12

#### Brennstoff:

Form	:	Tabletten
Zusammensetzung	:	$\text{UO}_2\text{-PuO}_2$
Tablettendichte	:	86,2 % th.D.

#### Hülle:

Material	:	1.4988
Aussendurchmesser	:	4,7 mm
Wandstärke	:	0,3 mm

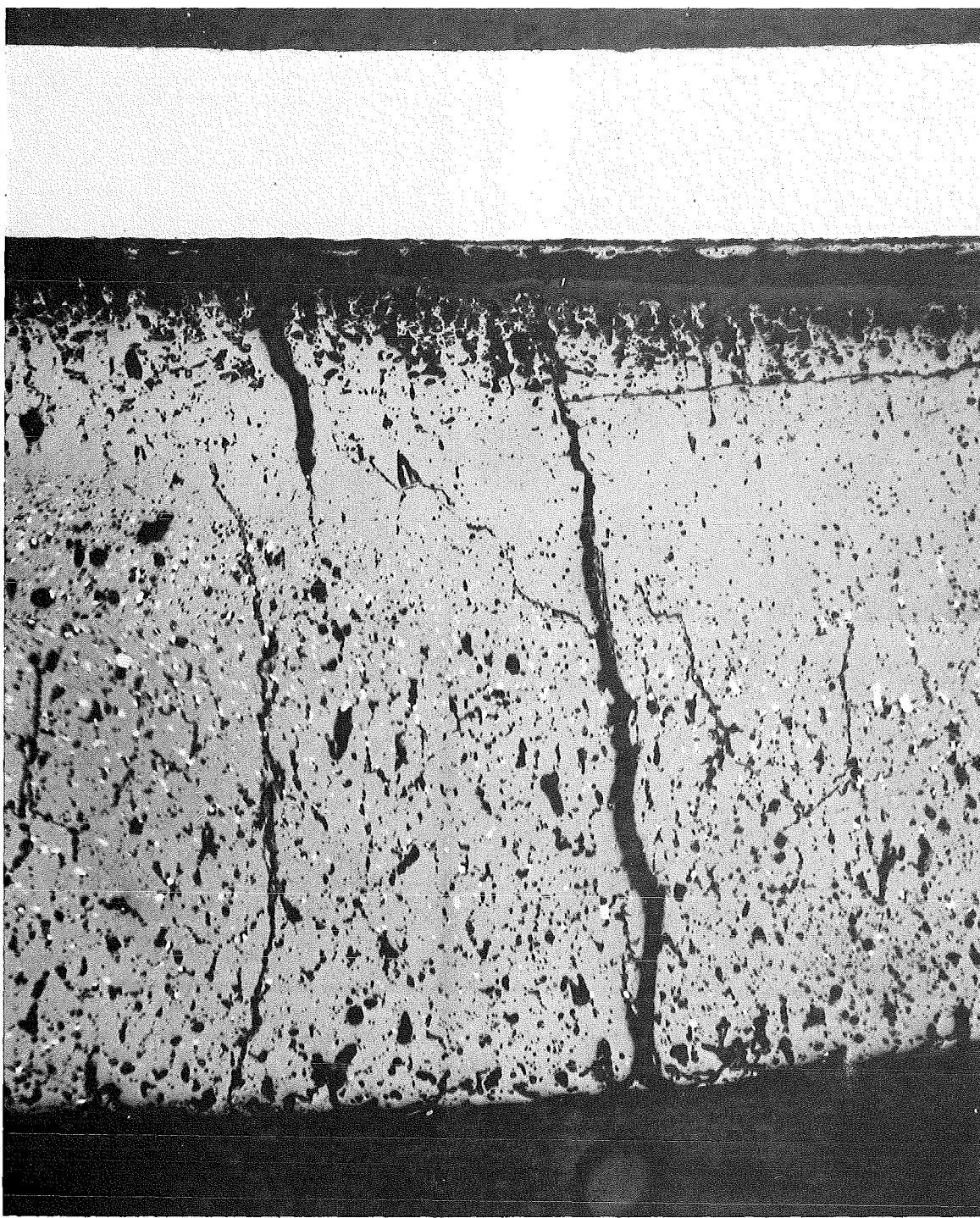
#### Geometrie:

Länge des Prüflings	:	172 mm
Länge der Brennstoffsäule	:	80 mm
Radiale Spaltweite	:	75 $\mu\text{m}$
Schmierdichte	:	80 % th.D.

#### Bestrahlung:

Einrichtung	:	Na/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4
Dauer	:	265,8 Vollasttage
Ende	:	23.8.1971
Rechn. Abbrand mittl.	:	93,1 MWD/kgM
Stableistung max./mittl.:	:	468/362 W/cm

-II/87-  
zu Prüfling 5B11  
A 2



8...9

200  $\mu\text{m}$

- II/88 -

zu Prüfling 5B11

B 2



A 2

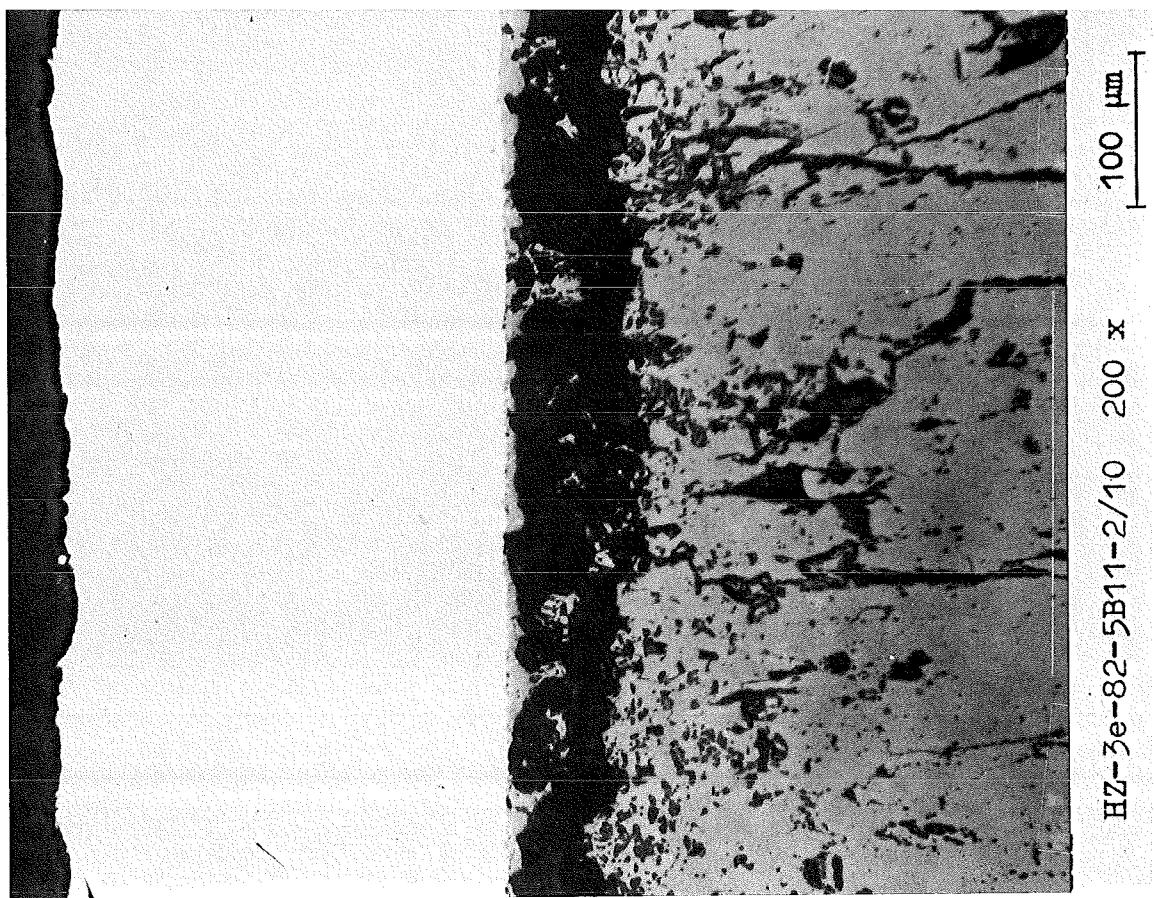
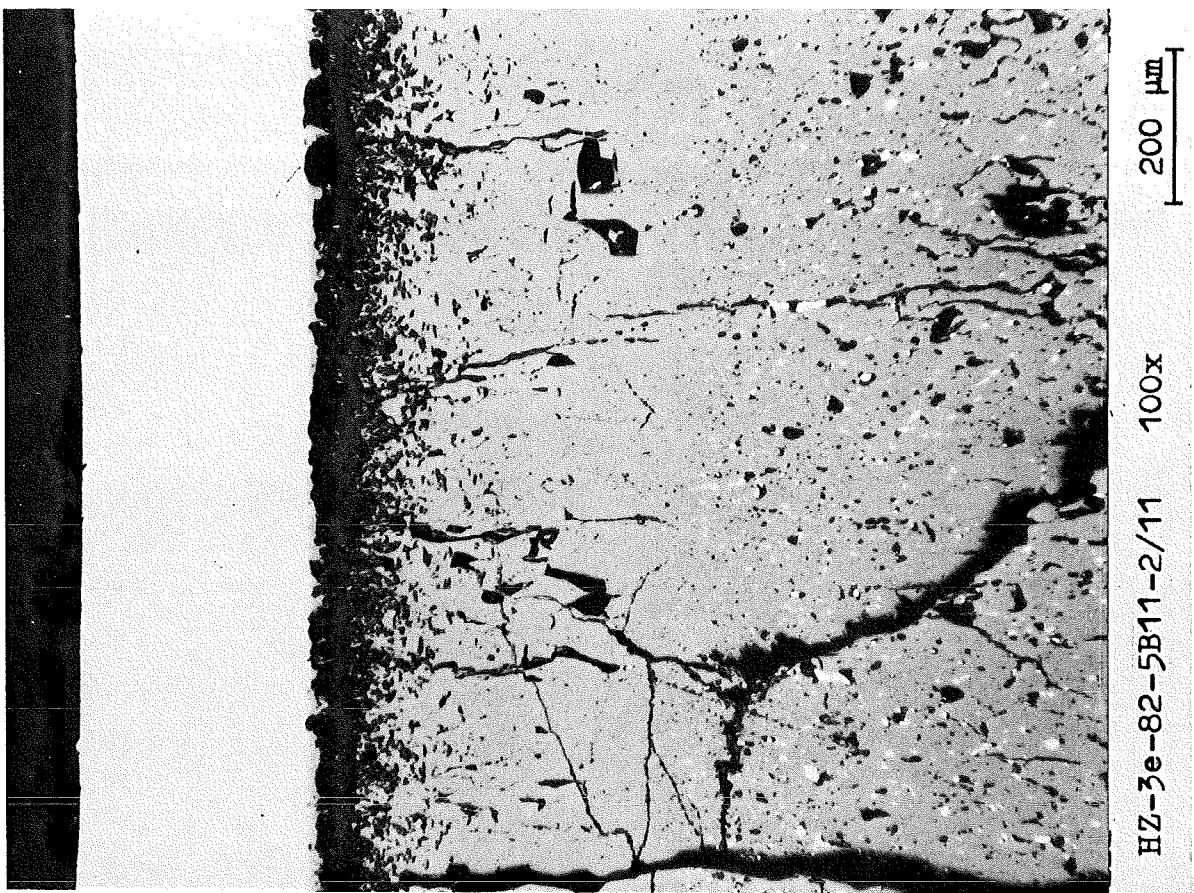


1mm

- II/89 -

zu Prüfling 5B11

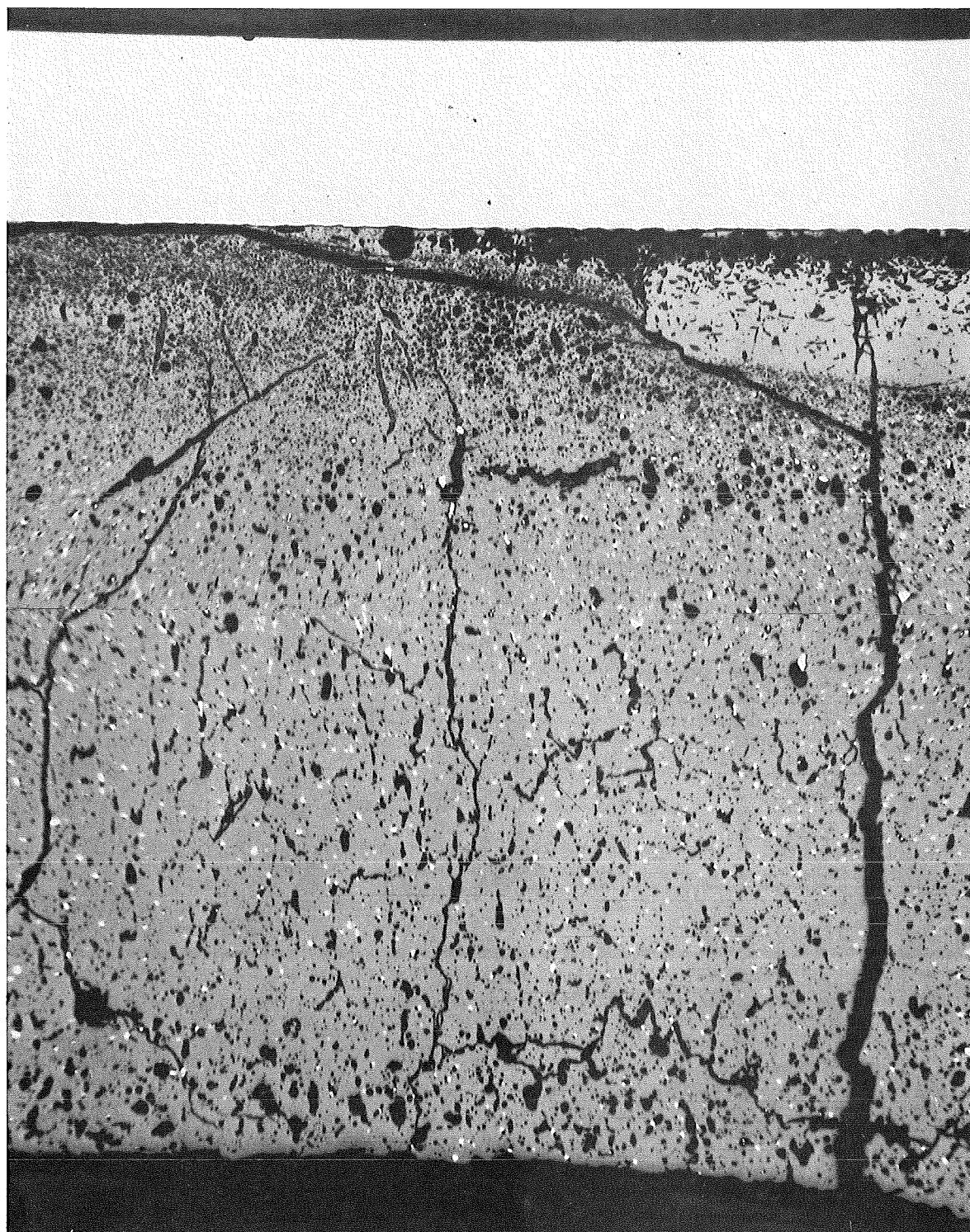
A2



-II/90-

zu Prüfling 5B11

A 3



8..9

200  $\mu\text{m}$

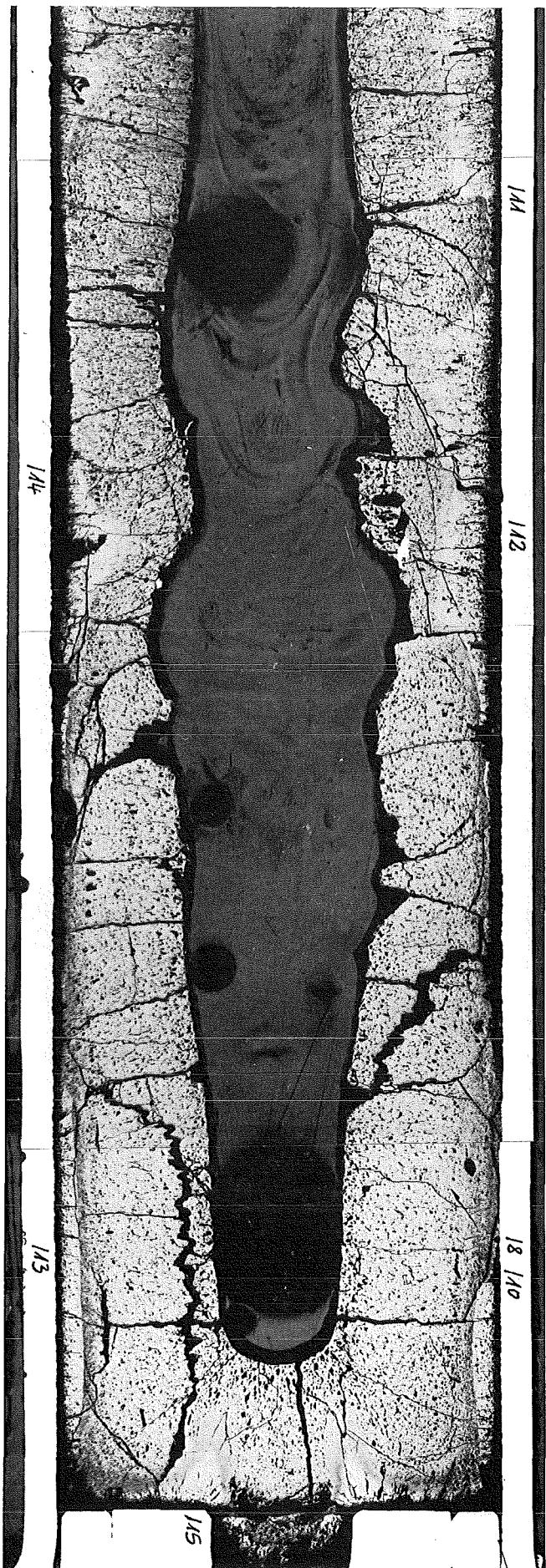
- II/91 -

zu Prüfling 5B11

B 3



A 3



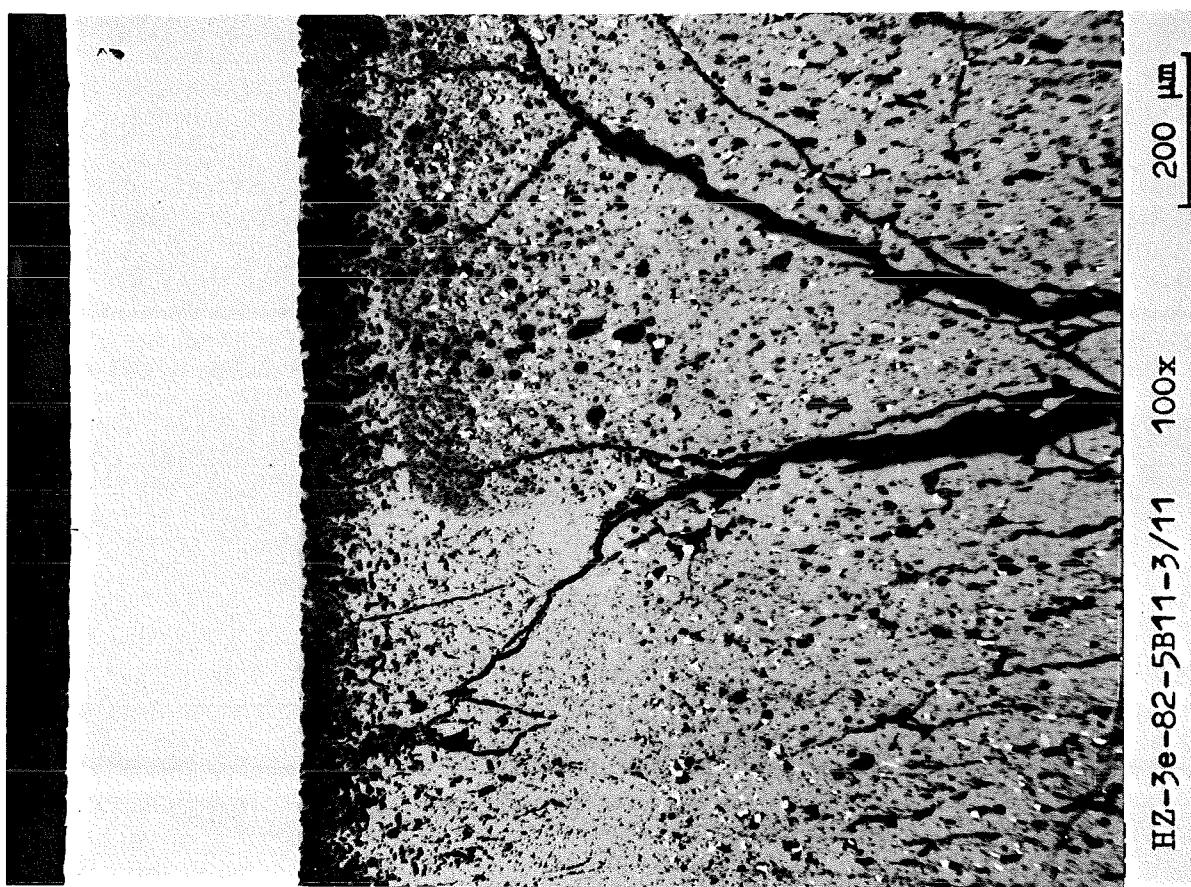
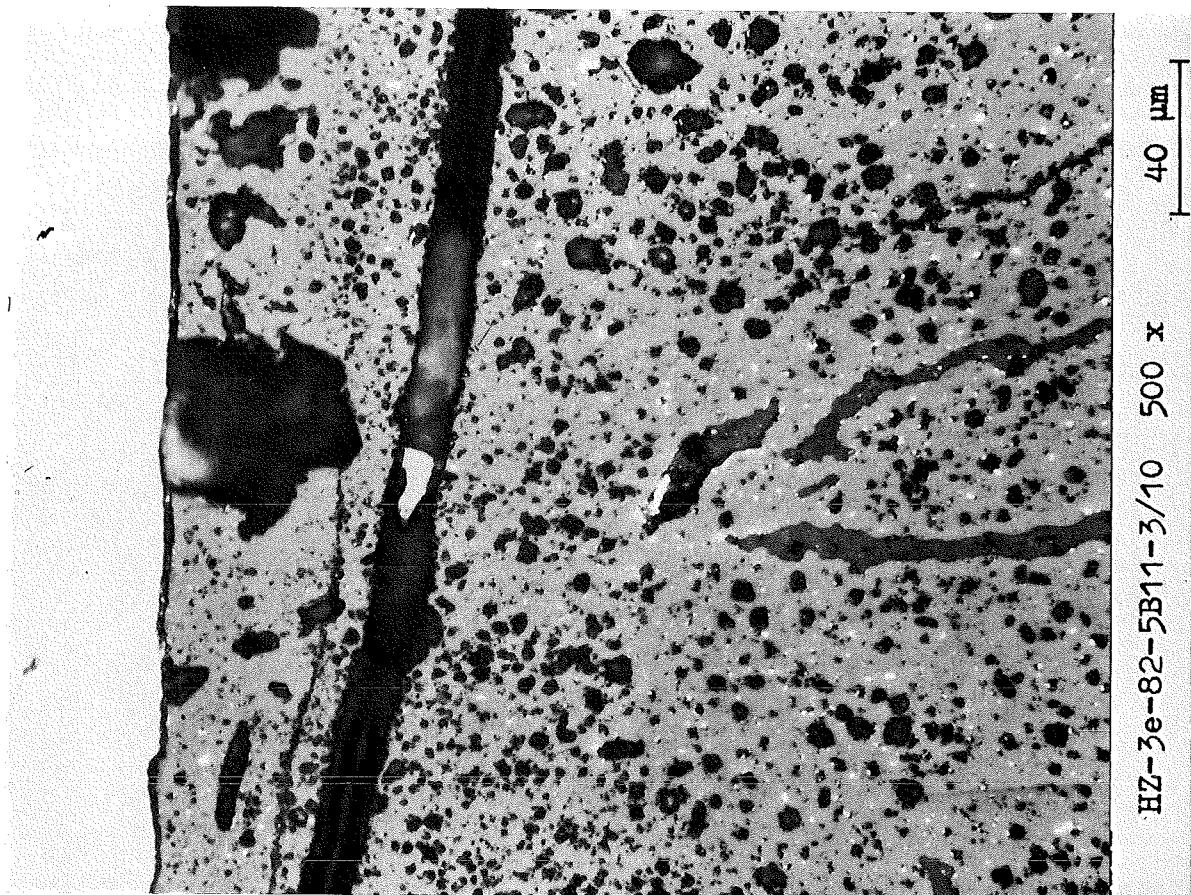
$\alpha$ -Autoradiografie

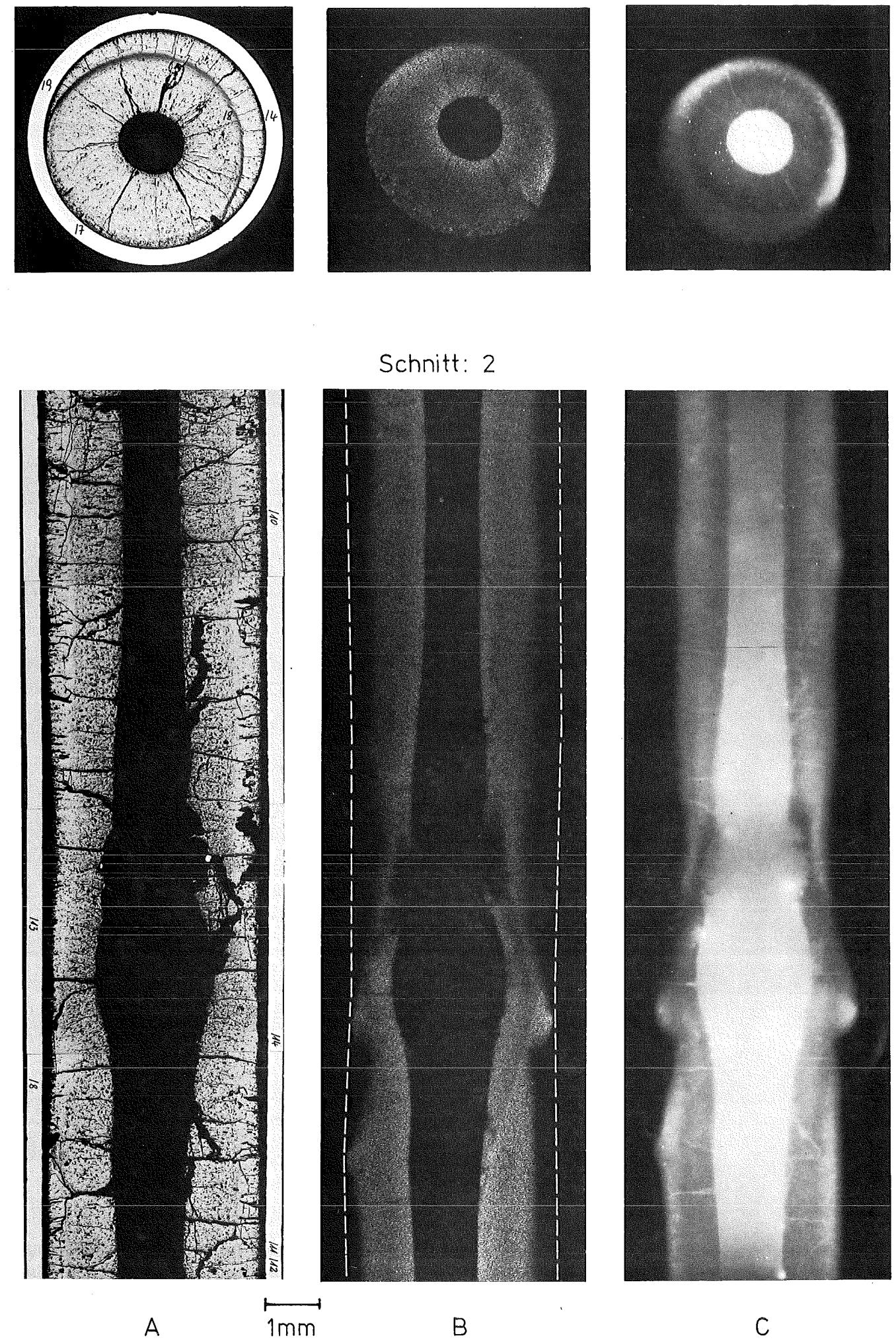
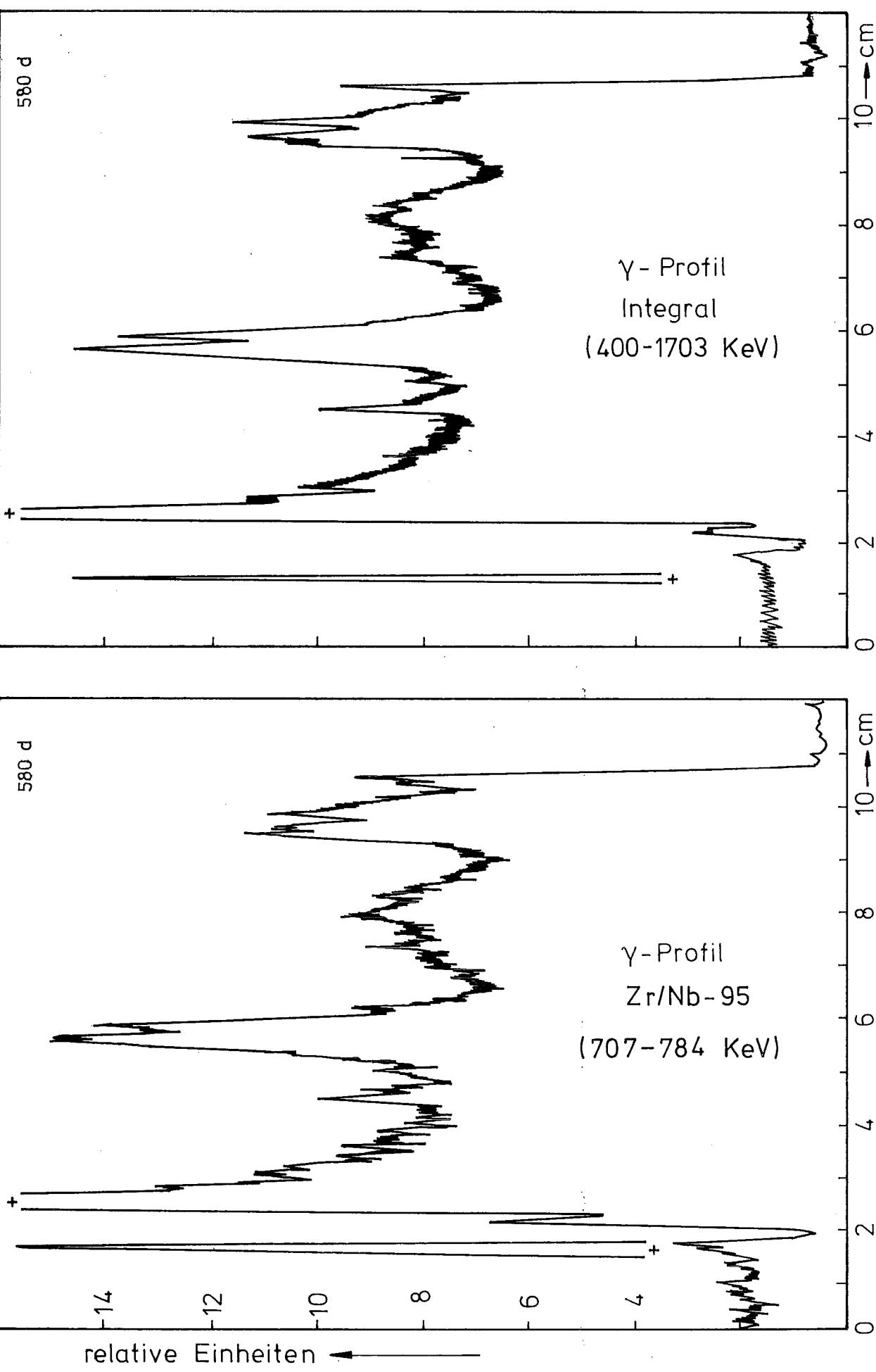
1 mm

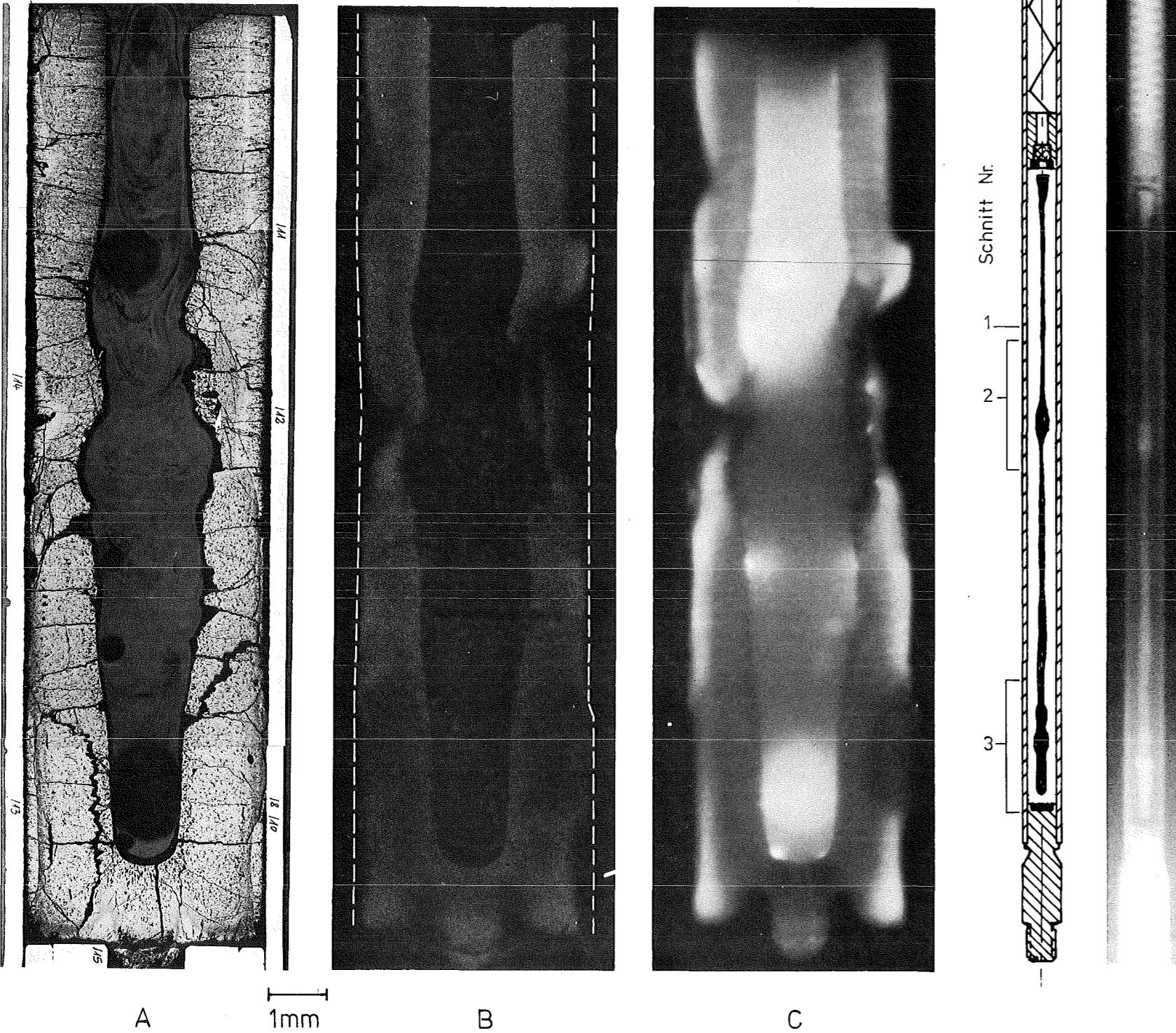
- II/92 -

zu Prüfling 5B11

A 3







### Prüfling 5 B/11

#### Brennstoff:

Form : Tabletten

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

Tablettendichte : 86,3 % th.D.

#### Hülle:

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 4,7 mm

Wandstärke : 0,3 mm

#### Geometrie:

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : 75  $\mu\text{m}$

Schmierdichte : 80 % th.D.

#### Bestrahlung:

Einrichtung : Na/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4

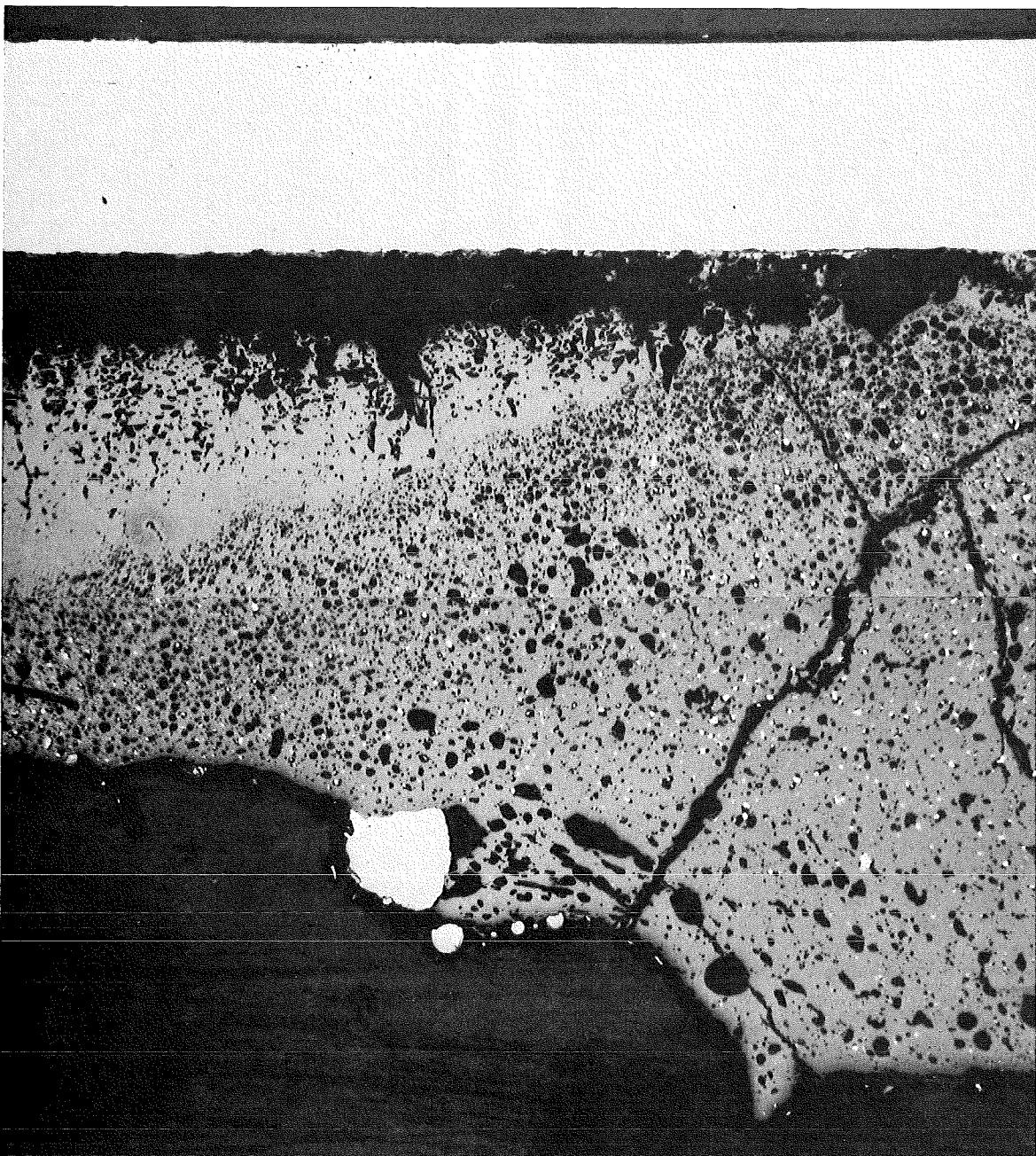
Dauer : 265,8 Vollasttage

Ende : 23.8.1971

Rechn. Abbrand mittl. : 90,3 MWD/kg

Stableistung max./mittl. : 475/352 W/cm

- II / 95 -  
zu Prüfling 5B10  
A1



8...9

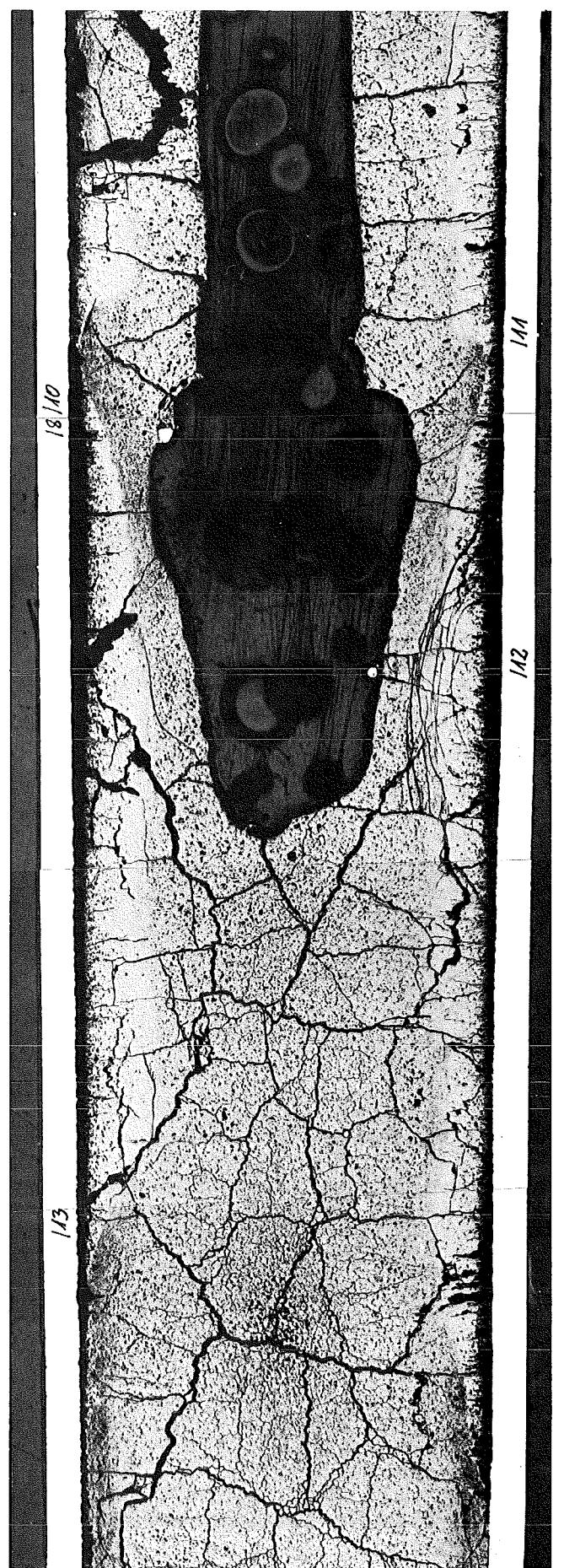
200  $\mu\text{m}$

- II/96 -

zu Prüfling 5B10

B 1

A 1



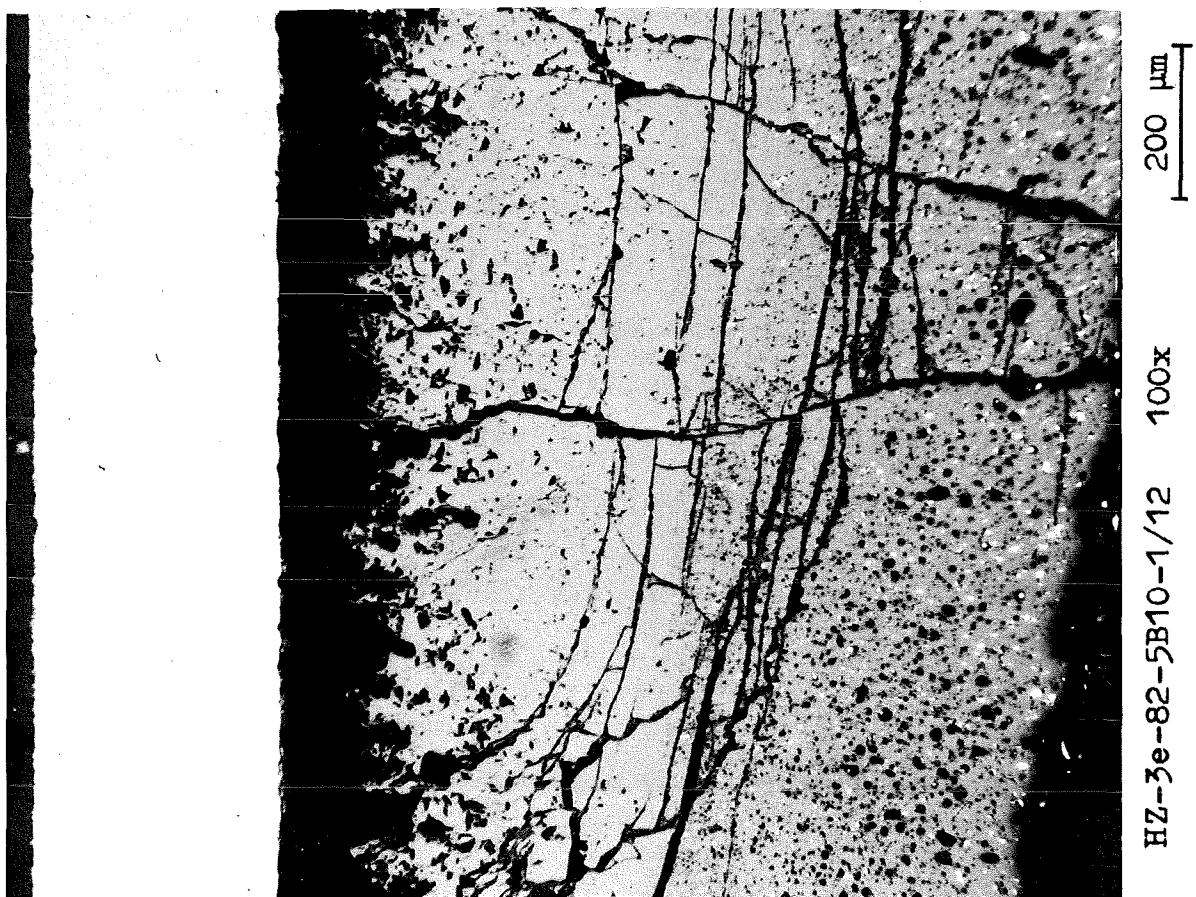
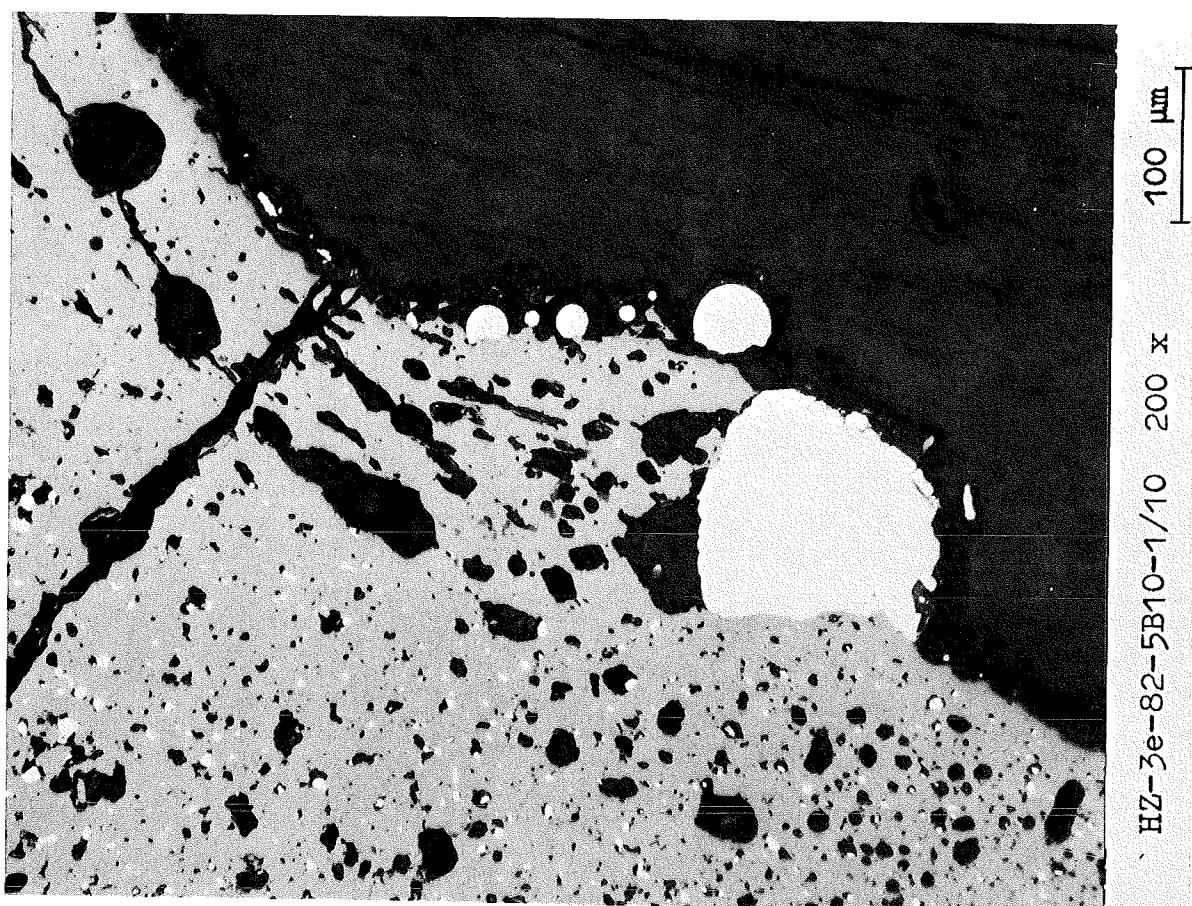
$\alpha$ -Autoradiografie

1mm

-II/97-

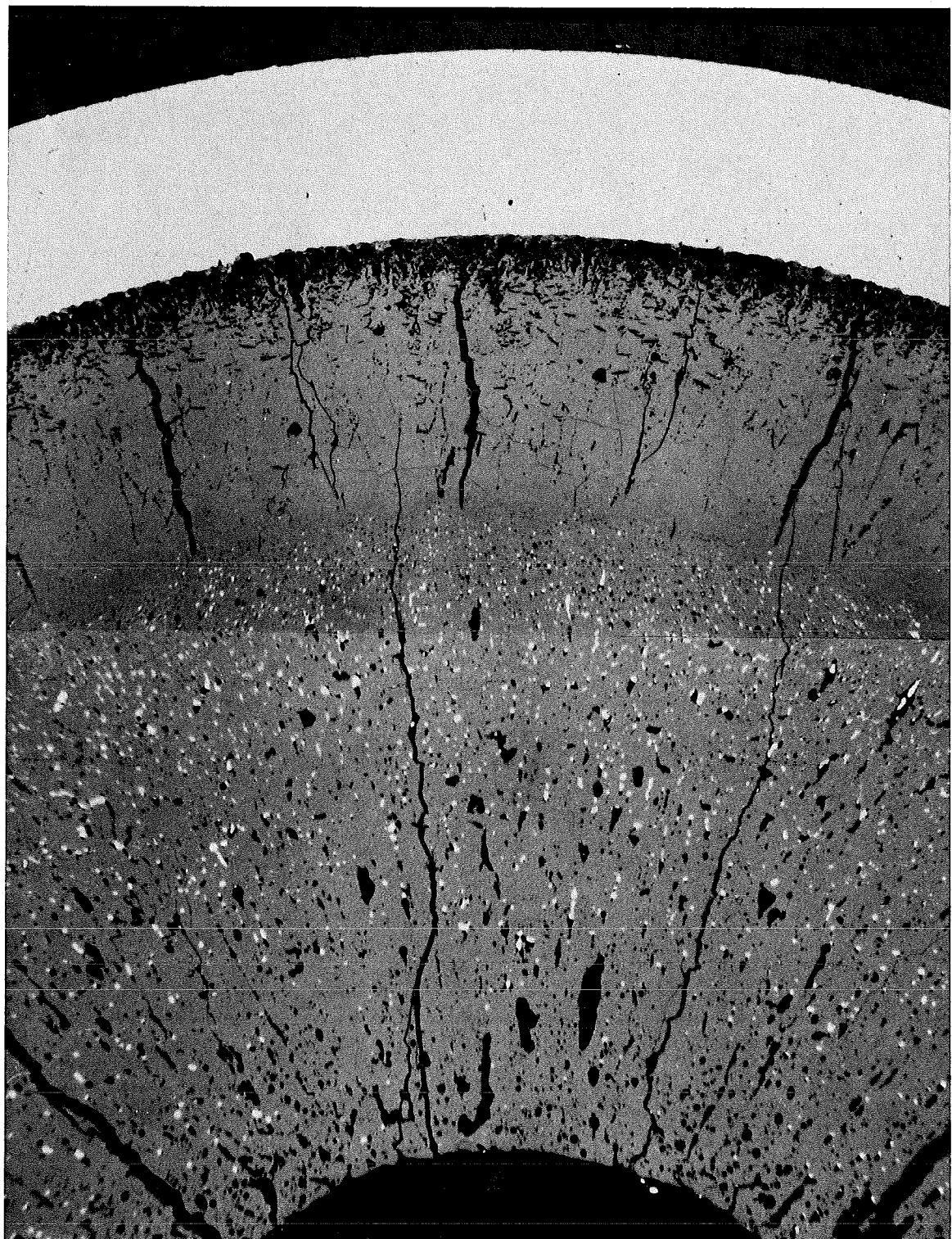
zu Prüfling 5B10

A 1



- II/98 -

zu Prüfling 5B10  
A 2



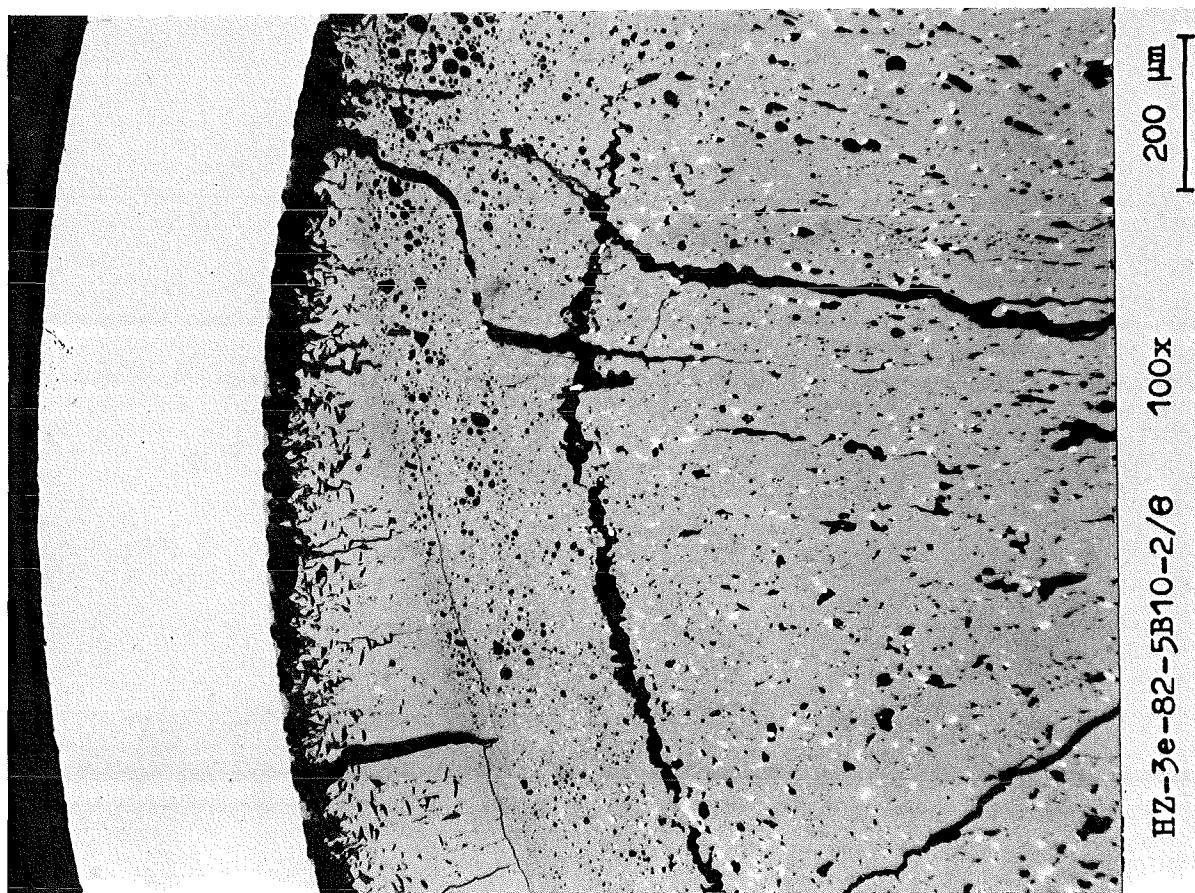
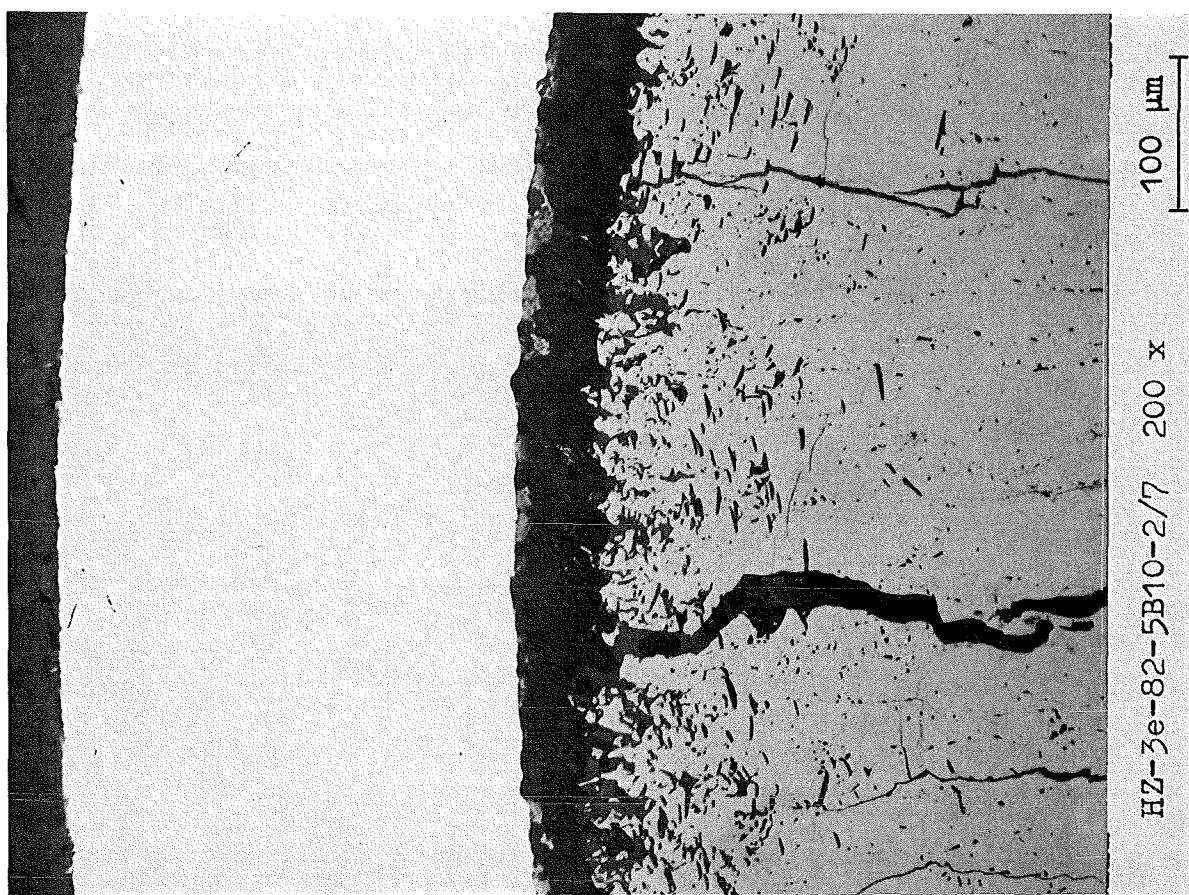
4...5

200  $\mu\text{m}$

-II/99-

zu Prüfling 5B10

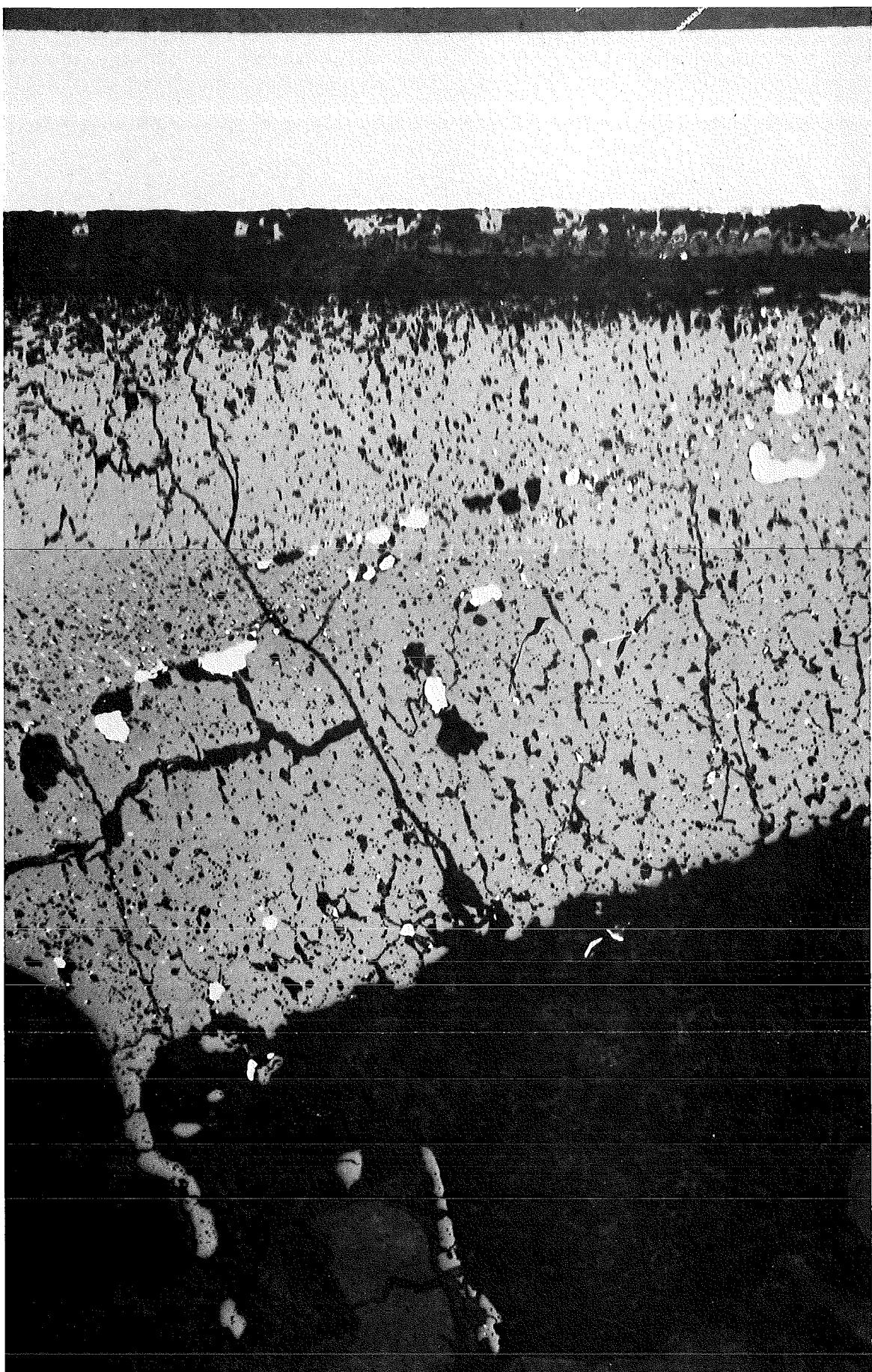
A 2



- II / 100 -

zu Prüfling 5B10

A 3



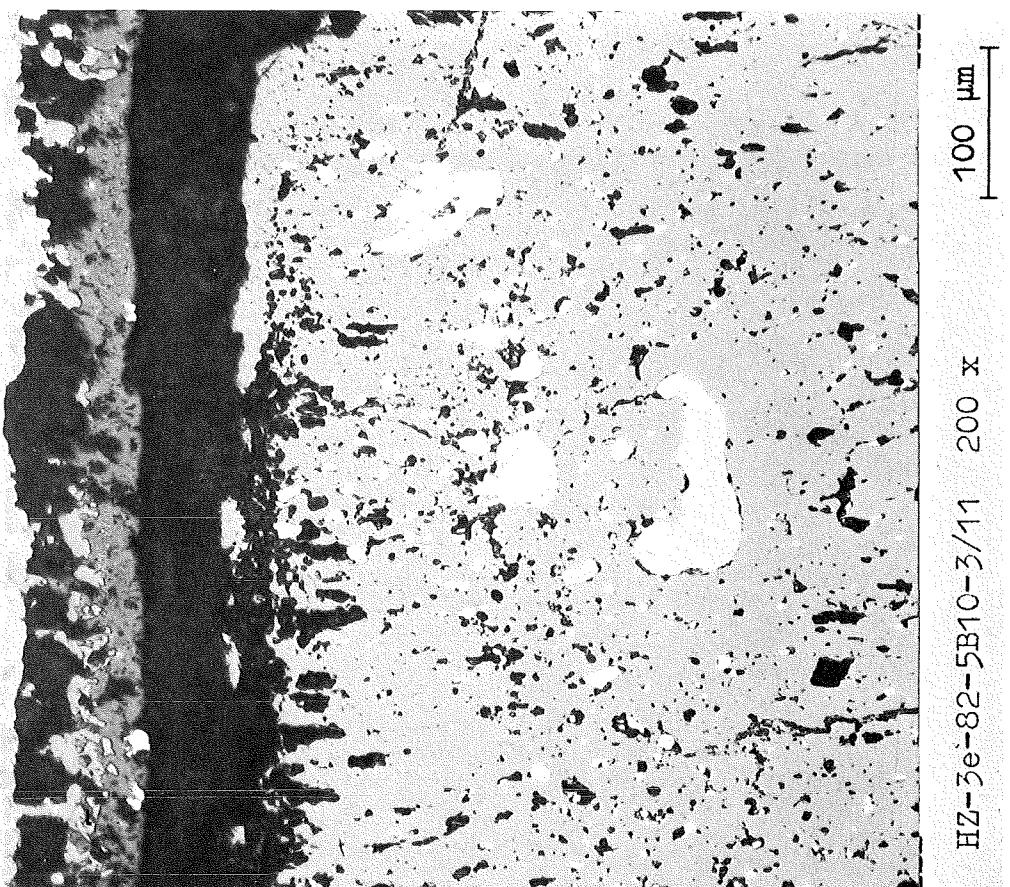
8 · 10

200  $\mu\text{m}$

-II/101-

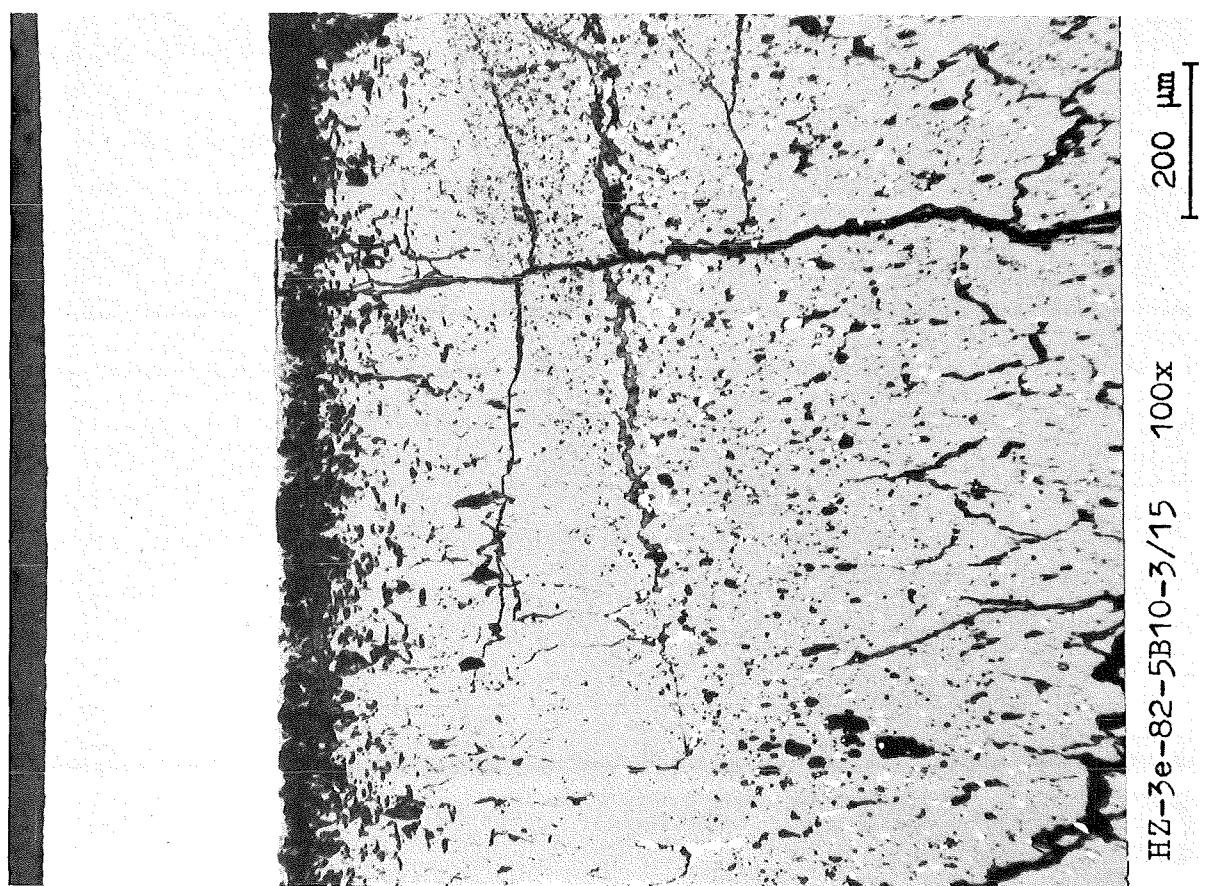
zu Prüfling 5B10

A 3



HZ-3e-82-5B10-3/11 200 X

200 μm

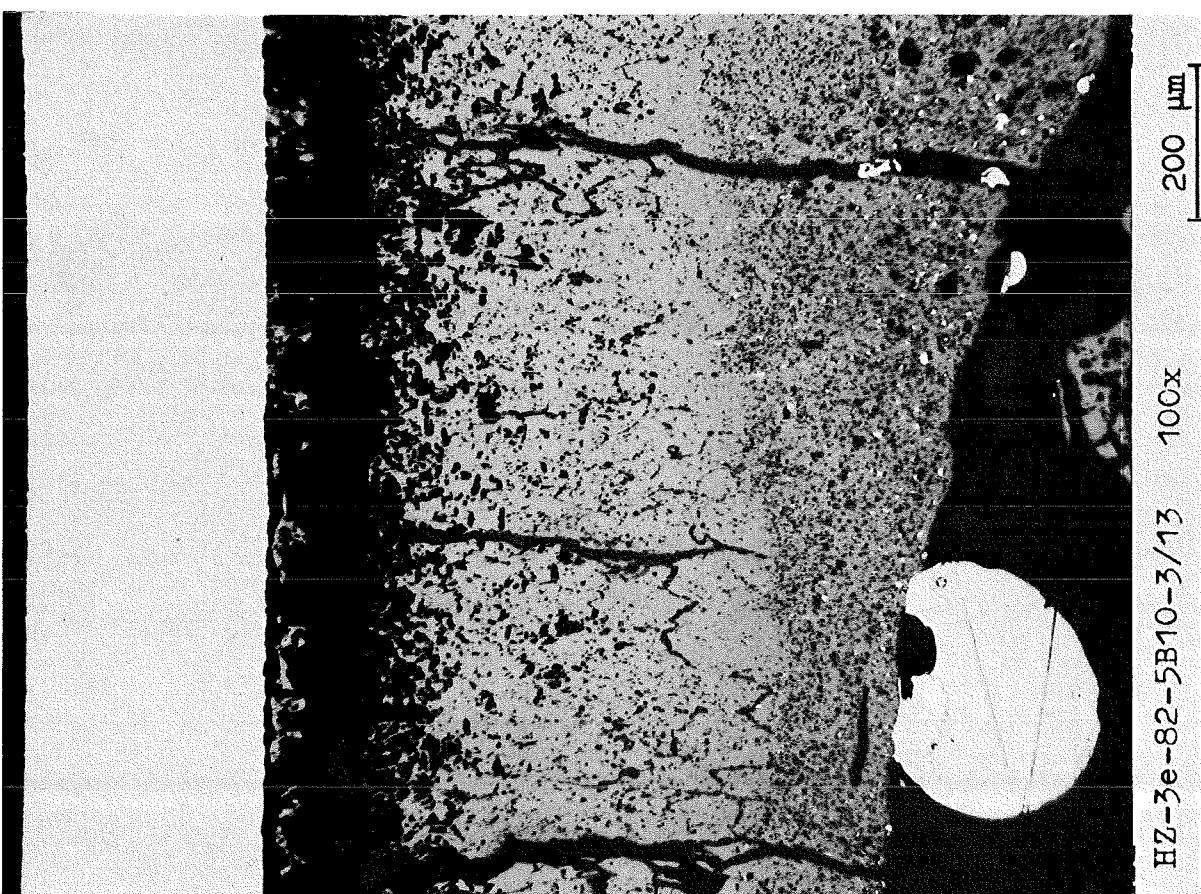
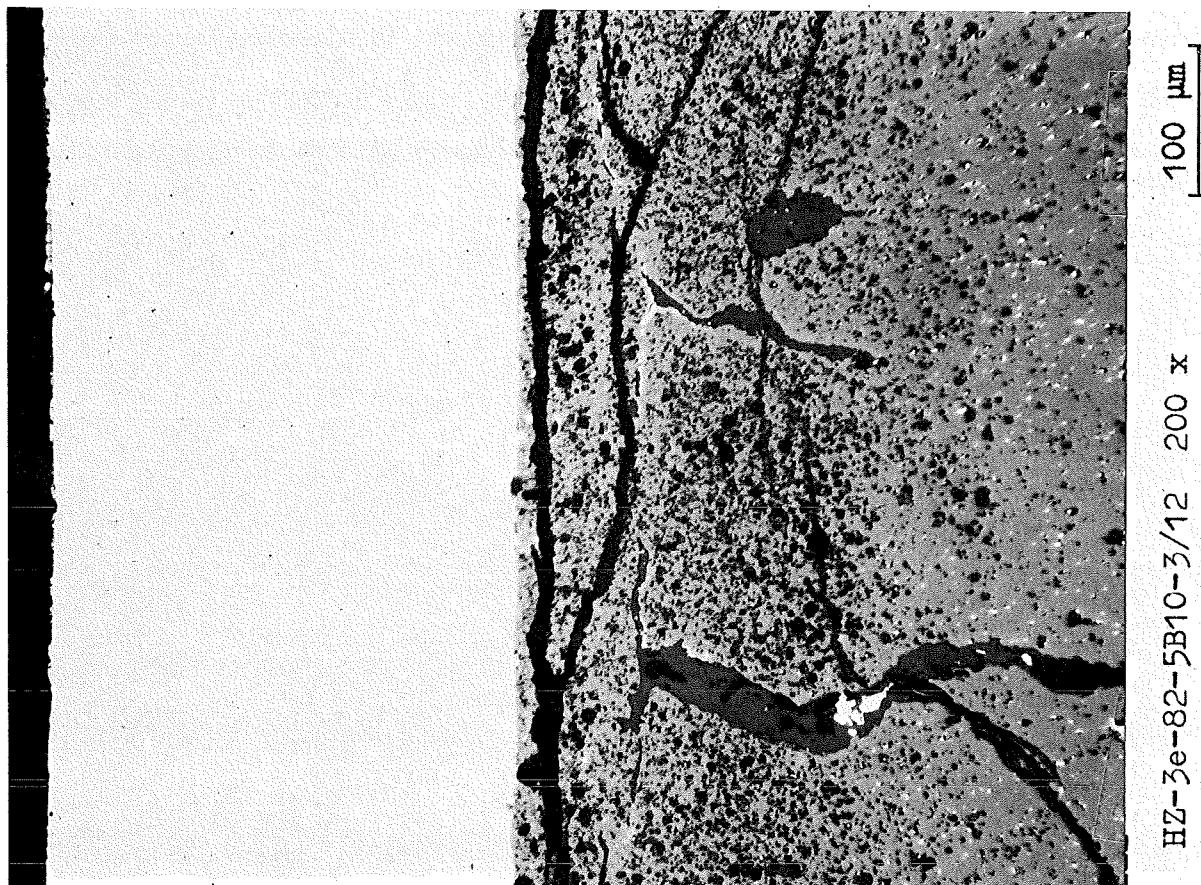


HZ-3e-82-5B10-3/15 100X

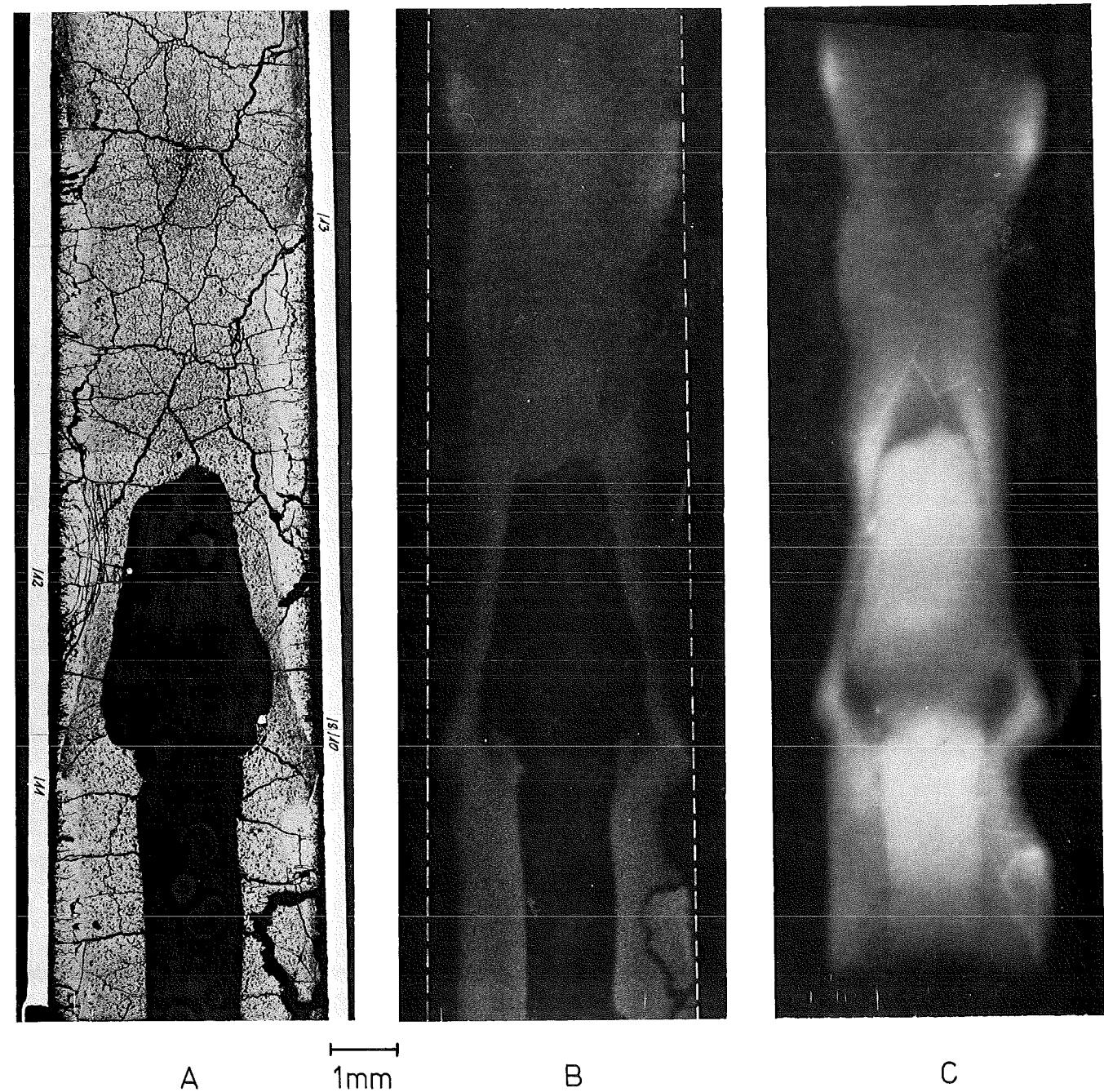
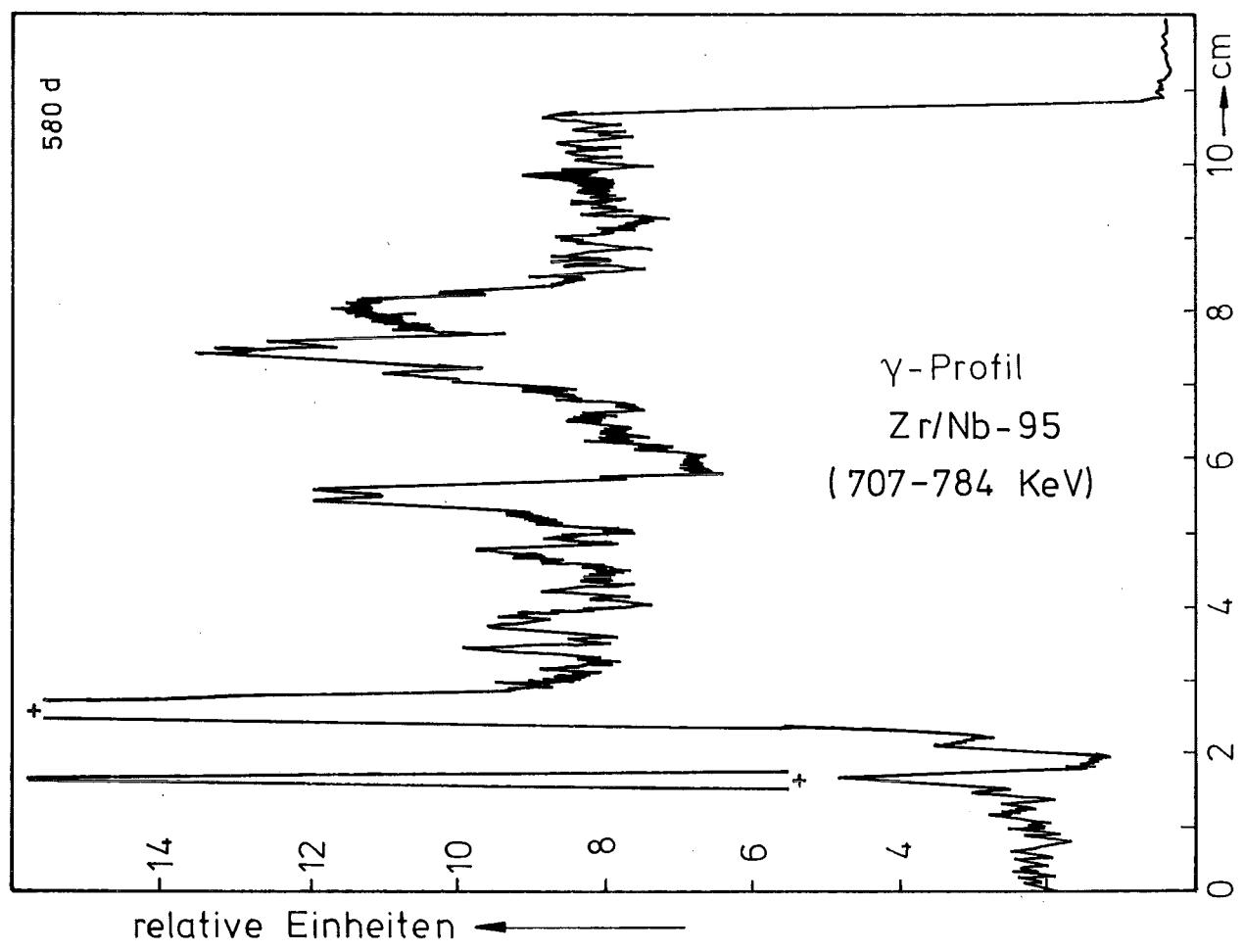
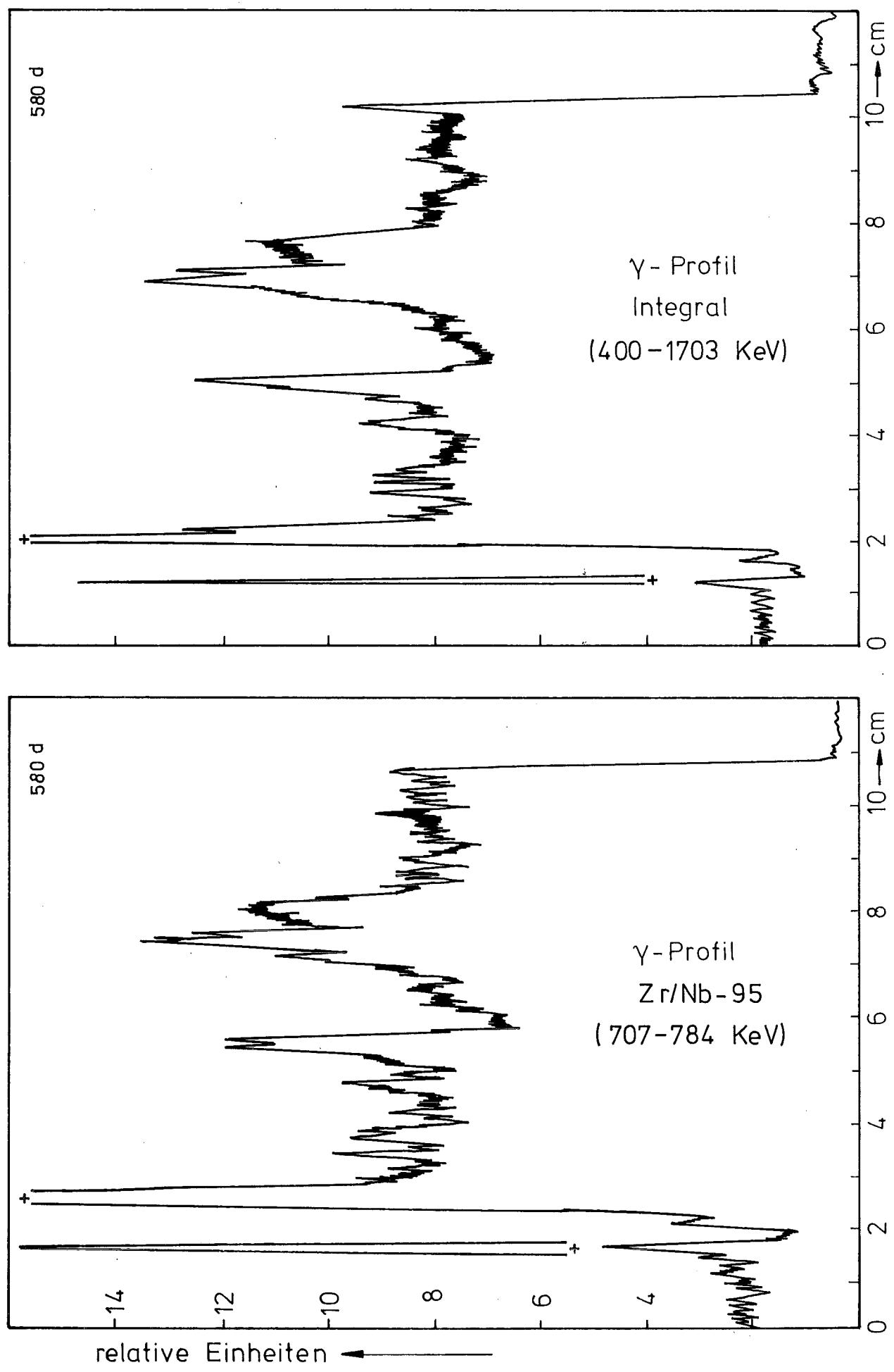
200 μm

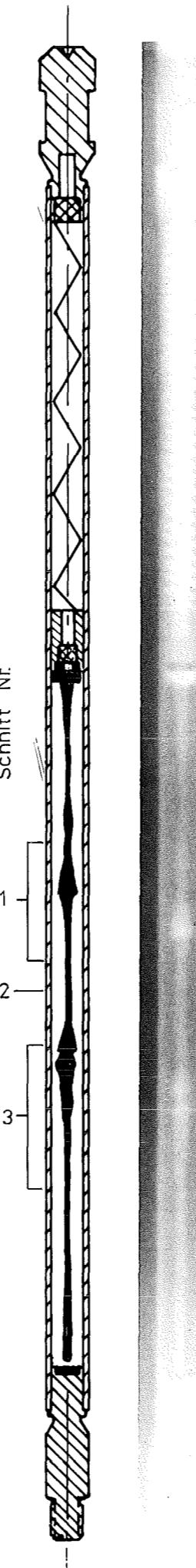
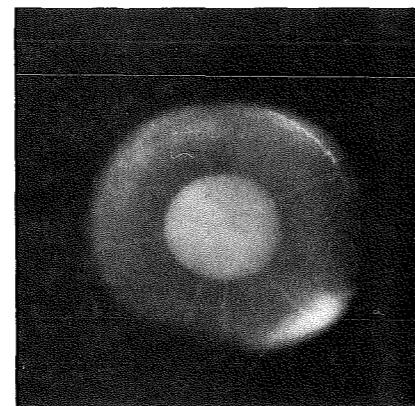
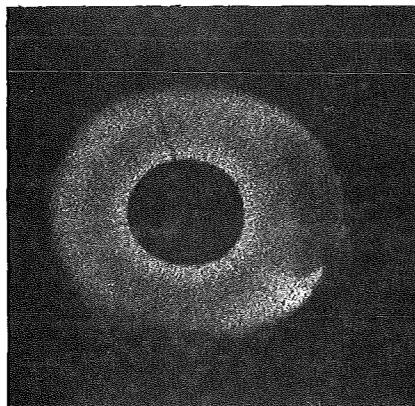
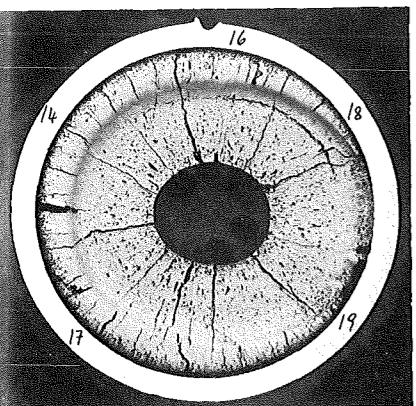
- II/102 -

zu Prüfling 5B10  
A 3

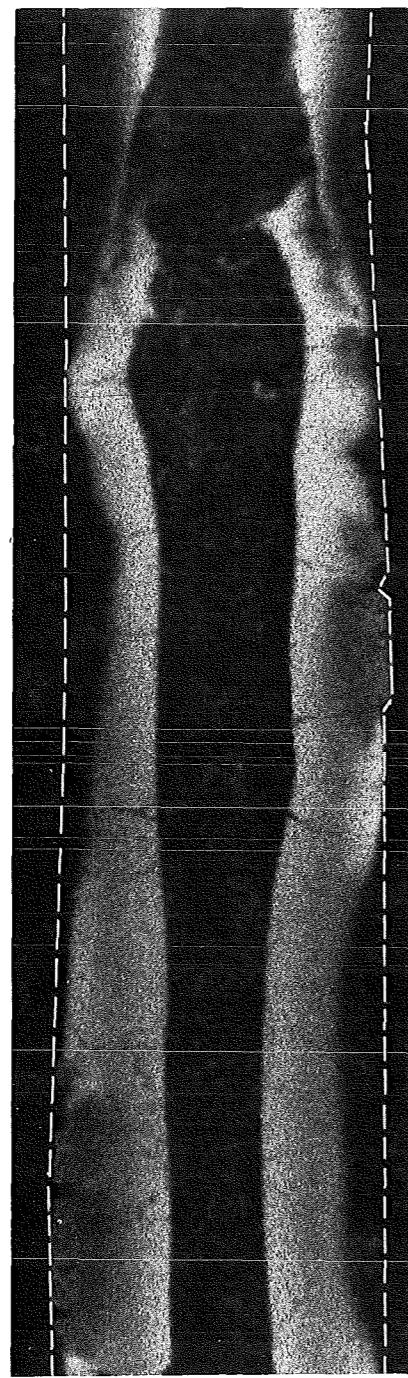
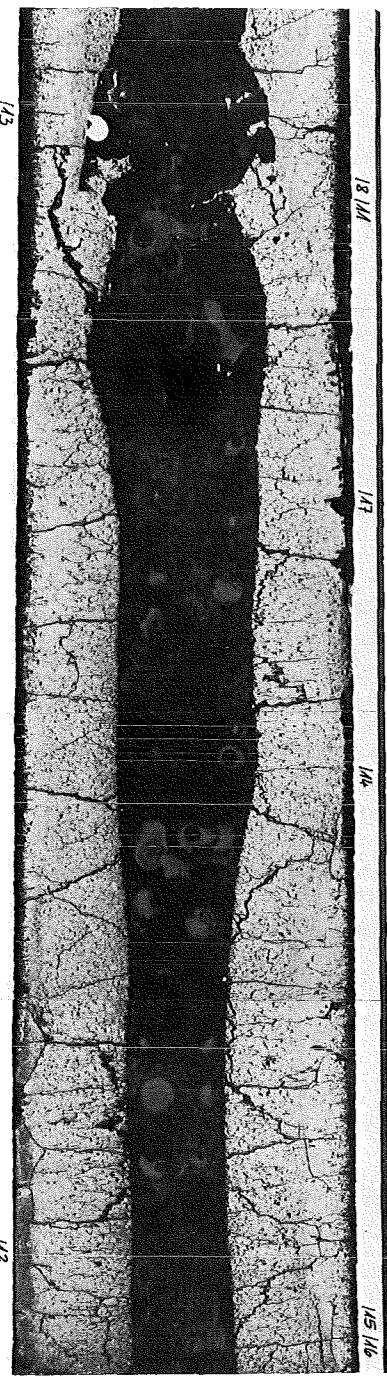


Schnitt: 1





Schnitt: 3



A 1mm

B

C

**Prüfling 5 B/10****Brennstoff:**

Form : Tabletten

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

Tablettendichte : 86,2 % th.D.

**Hülle:**

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 4,7 mm

Wandstärke : 0,3 mm

**Geometrie:**

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : 75  $\mu\text{m}$ 

Schmierdichte : 80 % th.D.

**Bestrahlung:**

Einrichtung : Na/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4

Dauer : 265,8 Vollasttage

Ende : 23.8.1971

Rechn. Abbrand mittl. :  $\approx 90 \text{ MWD/kg M}$ 

Stableistung max./mittl. : 475/331 W/cm