

KERNFORSCHUNGSZENTRUM

KARLSRUHE

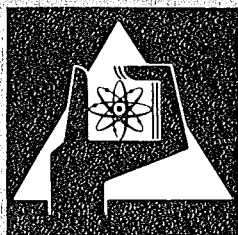
Mai 1975

KFK 1886

Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

**Brennstab-Bestrahlungsversuch mit
integrierter Variation der Brennstoffdichte
– FR 2-Kapsel-Versuchsgruppe 5a –**

K. Kummerer, P. Weimar



**GESELLSCHAFT
FÜR
KERNFORSCHUNG M.B.H.**

KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 1886

Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

Brennstab-Bestrahlungsversuch mit integrierter Variation der Brennstoffdichte
- FR 2-Kapsel-Versuchsgruppe 5a -

von

K. Kummerer, P. Weimar

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

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

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

April 1975

K. Kummerer, P. Weimar

K U R Z F A S S U N G

Im Rahmen der im Karlsruher Forschungsreaktor FR 2 durchgeführten Brennstabbestrahlungsexperimente nimmt die Kapselversuchsgruppe 5a eine gewisse Sonderstellung ein. Bei den 9 mit UO_2 - PuO_2 -Brennstoff bestückten Prüflingen dieser Versuchsgruppe wurden die beiden Parameter Brennstoffdichte und Abbrand in gezielter Weise variiert. Um störende Einflüsse des Bestrahlungskanals und des zeitlichen experimentellen Ablaufes möglichst zurückzudrängen, fand der Dichtevergleich innerhalb jedes einzelnen Stabprüflings statt. Bei diesem sog. "integrierten Dichteversuch" waren 4 unterschiedliche Brennstoffdichten in jedem Stab übereinander angeordnet und erlebten so - unabhängig von evtl. Betriebsschwankungen des FR 2 - eine identische Bestrahlungsgeschichte.

Die Bestrahlung erfolgte in 3 Na/PbBi-Doppelkapseln, in die jeweils 3 Stabprüflinge eingesetzt waren, bis zu Abbränden von 6000, 17000 und 47000 MWd/t M bei Stabileistungen um 500 W/cm und Hülloberflächentemperaturen um 600 °C. Jeder Prüfling hatte eine Brennstoffsäule von 80 mm Länge, die sich aus 4 Dichtestufen mit 84, 87, 90 und 93 % th.D. zusammensetzte. Die Brennstabhüllen waren aus austenitischem Edelstahl der Werkstoff-Nr. 1.4988, Stabdurchmesser 7 mm, Wandstärke 0,4 mm.

Von den 9 eingesetzten Stäben blieben 7 intakt. Die Schadensursache für die beiden anderen Stäbe ist nicht bekannt.

In der vorliegenden Dokumentation wird nach der Darstellung von Aufgabe und Ziel des Experimentes eine detaillierte Beschreibung der Prüflingauslegung, der Spezifikationen und der Herstellung, des Bestrahlungsablaufes und der zerstörungsfreien und zerstörenden Nachuntersuchung gegeben. Wie die Auswertung zeigt, sind die keramografisch sichtbaren Strukturänderungen im Brennstoff bereits bei der ersten Abbrandstufe praktisch abgeschlossen. Sie sind in ausgeprägter und systematischer Weise von der Ausgangsdichte des Brennstoffes abhängig.

A B S T R A C T

Fuel Pin Irradiation Test with Integrated Variation of the Fuel Density

- FR 2 Capsule Group 5 a -

Within the fuel pin irradiation experiments in the Karlsruhe research reactor FR 2 the Capsule Test Group 5a has a certain special attitude. In the 9 pin specimens of this test group containing UO_2 - PuO_2 fuel the two parameters fuel density and burnup are varied in a specific manner. In order to minimize the disturbing influences of changing irradiation conditions, the density variation was included in every single specimen. In this so-called "Integrated Density Test" every specimen contained 4 different fuel densities adjacently positioned. Thus, the 4 density stages in one pin were exposed to an identical irradiation history, independent of operational changes in the FR 2.

The irradiation was performed in 3 Na/PbBi-capsules - each loaded with 3 pin specimens - at linear rod powers of about 500 W/cm, clad surface temperatures of about 600 C up to the 3 burnup stages 6, 17 and 47 MWd/kg M. The 80 mm long fuel column in every pin was composed by 84, 87, 90 and 93 % th.D. fuel portions. The SS cladded pins had an outer diameter of 7 mm. 2 out of the 9 irradiated pins were ruptured, the reason being not definitely known.

The documentation in this report presents the objectives of the experiment, the detailed description of design, specification and fabrication of the pin specimens, the irradiation history and the post irradiation examination. The final evaluation demonstrates that structural changes in the fuel are in systematic interconnection to the original fuel density.

Inhalt :	Seite
1. Einführung	1
2. Aufgabenstellung und Versuchsziel	3
3. Auslegung der Prüflinge	4
3.1 Versuchskonzept	4
3.2 Arbeitspunkt beim maximalen Wärmeleitintegral	5
3.3 Stableistung und Wärmeleitintegral	9
3.4 Auswahl des Bestrahlungskanals	14
3.5 Dichtestufen und Prüflingstypen	14
3.6 Konstruktion der Prüflinge	17
4. Herstellungsspezifikationen	18
4.1 Brennstofftabletten und Tablettensäulen	19
4.2 Hüllmaterial	20
4.3 Brennstäbe	21
5. Herstellung der Prüflinge	23
5.1 Ausgangspulver	23
5.2 Tablettenherstellung	23
5.3 Brennstoffeigenschaften	24
5.4 Hüllrohre und Endstopfen	24
5.5 Stabherstellung	29
5.6 Stabprüfung	31
6. Bestrahlungseinrichtung	34
6.1 Kapselversuchseinsätze	34
6.2 Bestrahlungspositionen im FR 2	34
7. Ablauf der Bestrahlung	38
7.1 Reaktorzyklen und Neutronenfluß	38
7.2 Bestrahlungstemperatur	41
7.3 Stableistung	50
7.4 Bestrahlungszeit und Abbrand	52

8.	Zerstörungsfreie Nachuntersuchung	55
8.1	Äußere Vermessung	55
8.2	Dichtemessung	55
8.3	Durchleuchtung	57
8.4	Gamma-Profile und Gamma-Spektren	59
9.	Zerstörende Nachuntersuchung	62
9.1	Spaltgasbestimmung	62
9.2	Keramografie	63
10.	Dokumentation der zerstörungsfreien und zerstörenden Nachuntersuchung	67
11.	Brennstoffstruktur in Abhängigkeit von der Ausgangsdichte	68
12.	Schlußbetrachtung	74
	Literatur	75
	Liste der Tabellen	76
	Liste der Abbildungen	77
Anhang I	Dokumentation der Nachuntersuchung	79
Anhang II	Konstruktionszeichnungen der Prüflinge	
Anhang III	Zusammenstellung der Tablettensäulen	

1. Einführung

Im Entwicklungsprogramm des Kernforschungszentrums Karlsruhe für Brennelemente schneller Brutreaktoren finden zwei Serien von Bestrahlungsversuchen im thermischen Reaktor FR 2 statt. Die eine Serie benützt als Bestrahlungsposition den zentralen He-gekühlten Bestrahlungskanal des FR 2 (Loop-Experimente), während die andere Serie in Na-gekühlten Bestrahlungskapseln auf Brennelement- oder Isotopenkanalpositionen (Kapsel-Experimente) bestrahlt wird.

Die bislang durchgeführten und größtenteils bereits dokumentierten Kapsel-Experimente in den Versuchsgruppen 1, 2, 3, 4a, 4b und 4c sollten den Nachweis erbringen, daß Oxidstabproben unter simulierten Schnellbrüterbedingungen bis zu hohen Abbränden standhalten. Auch sollte das grundsätzliche Verhalten des thermisch hochbeanspruchten Brennstoffes bei verschiedenen Parameterkonstellationen studiert werden. Diese Versuchsziele wurden - trotz mancher entwicklungsbedingter Irrwege - erreicht / 1,2,3,4 /.

In der Kapselversuchsgruppe 5a wird die Fragestellung im Hinblick auf das Brennstoffverhalten verfeinert. Der "integrierte Dichteversuch" hat den Sinn, die Abhängigkeit des Bestrahlungsverhaltens von der Brennstoffdichte in eindeutigerer Weise als bisher zu ermitteln. Während bei bisherigen Versuchsreihen, in denen Prüflinge mit verschieden dichten Brennstoff zeitlich nacheinander und/oder örtlich nebeneinander im Reaktor bestrahlt wurden, immer eine ziemliche Unsicherheit hinsichtlich der Konstanz aller anderen Parameter verblieb, wird im integrierten Dichteversuch die "Einheit des Ortes und der Zeit" fast ideal verwirklicht. Zu diesem Zweck werden in einem einzigen Prüfling alle zu vergleichenden Brennstoffdichten in entsprechenden Abstufungen übereinander eingesetzt. Eine wesentliche Voraussetzung für einen derartigen gezielten Versuch ist weiterhin, daß auch die Prüflingsherstellung mit weit schärferen Toleranzen erfolgt, als dies in auf industrielle Fertigung ausgerichteten Spezifikationen verlangt ist.

Dieser Bericht faßt alle Einzelheiten der Auslegung, Spezifikation und Prüflingsherstellung zusammen und beschreibt den tatsächlichen Bestrahlungsablauf sowie die zerstörungsfreie und keramografische Nachuntersuchung in zusammenfassender Dokumentation. Die Zusammenstellung benützt neben den ausdrücklich zitierten Referenzen eine Vielzahl von internen Niederschriften

und persönlichen Mitteilungen. Die Arbeit an dem Versuch in all seinen Phasen verteilte sich auf die Jahre 1969 bis 1973. In der nachfolgenden Übersicht ist der Zeitablauf grob dargestellt. Außerdem sind die für jeden Teilaspekt hauptverantwortlichen Stellen bzw. Personen angegeben.

Zeitraum	T e i l a r b e i t	Institution/Hauptbeteiligte
1969	Versuchsauslegung	IMF; Kummerer
1969	Bestrahlungskapseln	IRE; Bojarsky, Häfner
1969	Spezifikationen	IMF; Kummerer
1969/70	Herstellung der Prüflinge	IMF; Dippel, Kummerer
1970/71	Organisation der Bestrahlung und Betreuung	IMF; Freund
1970/71	Bestrahlung im FR 2	Abt. Reaktorbetrieb FR 2
1972/73	Organisation der Nachuntersuchung und Betreuung	IMF; Weimar
1972	Zerstörungsfreie Nachuntersuchung	RB/Z; Scheeder, Enderlein
1973	Spaltgasuntersuchungen	RB/CuM; Gräbner
1973	Keramografie	RB/Z; Pejsa
1974	Abbrandbestimmung	IRCH; Wertenbach
1974	Zusammenfassung und Dokumentation der Ergebnisse	IMF; Kummerer, Weimar

2. Aufgabenstellung und Versuchsziel

Die Kapselversuchsgruppe 5a bringt stabförmige Prüflinge mit $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$ -Brennstoff zur Bestrahlung, wobei hinsichtlich des Brennstabdurchmessers, des Brennstoffes in Tablettenform und des Brennstoffdichtebereiches das SNR-Grundkonzept realisiert wird. Auch bei den Betriebsbedingungen wie Hülltemperatur, Stableistung und Abbrand sollen Brüter-spezifische Belastungswerte erreicht werden. Darüber hinaus sollen insbesondere vorge-
sehen werden:

- sehr enge Dichtetoleranzen bei der Prüflingsfertigung,
- ein Prüflingsaufbau, in dessen Brennstoff mehrere Dichtestufen nebeneinander vorkommen,
- eine gleichmäßige Stableistung trotz unterschiedlicher Brennstoffdichte.

Wesentliche Unzulänglichkeiten des Versuches bestehen in folgendem:

- Die Bestrahlung erfolgt im thermischen Neutronenfluß.
- Die lokale Verteilung des Neutronenflusses im FR 2 ist nicht genau bekannt, so daß auch in nahe beieinander liegenden Dichtebereichen des Brennstoffes Unterschiede nicht auszuschließen sind.
- Die lokalen Absorptionseinflüsse durch die Kapselkonstruktion sind ebenfalls nicht bekannt.

Die Untersuchungsziele sind durch folgende Fragestellungen gegeben:

- Welche äußeren Veränderungen erleiden die Prüflinge bis zu ihrem Zielabbrand ?
- Ist ein systematischer Einfluß der Dichteabstufung anhand der zerstörungsfreien Prüfung und der keramografischen Untersuchung erkennbar ?
- Ist bei der Struktur des Brennstoffes ein Abbrandeinfluß erkennbar ?
- Wie groß ist der Anteil des freigesetzten Spaltgases ?
- Wie ist die Verteilung des Spaltstoffes und der Spaltprodukte nach der Bestrahlung ?

3. Auslegung der Prüflinge

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

3.1 Versuchskonzept

Im Rahmen der Versuchsgruppe 5a werden drei Kapselversuchseinsätze mit je 3 Prüflingen bestrahlt. Jeder dieser Brennstoffprüflinge enthält UO_2 - PuO_2 -Tabletten in den 4 Stufen der Brennstoffdichte 84, 87, 90 und 93 % der theoretischen Dichte. Alle anderen Material- und Herstellungsspezifikationen sind bei allen Prüflingen identisch. Auch die Bestrahlungsbedingungen sollen möglichst einheitlich sein. Hierbei ist aber eine gesonderte Abstimmung zwischen Spaltstoffanreicherung, Stableistung und Temperaturprofil im thermischen Reaktor nötig. Stableistung und Wärmeleitintegral sind im thermischen Fluß verschieden. Da das Wärmeleitintegral im wesentlichen das radiale Temperaturprofil bestimmt, wird festgelegt, daß es bei den verschiedenen dichten Tabletten eines Prüflings gleich sein soll.

Für die Stableistung wird ein Wert über 500 W/cm angestrebt. Die Hüllwandaußentemperatur soll über 600°C betragen. Die Bestrahlung des ersten Versuchseinsatzes wird bis zu einem Abbrand geführt, in dem die "Brennstoffjugend" gerade eben überwunden ist, also bis zu etwa 5000 MWd/t. Der zweite Versuchseinsatz soll bis zu etwa 15 000 MWd/t und der dritte bis zu 50 000 MWd/t laufen. Weitere Versuchseinsätze wären sowohl für eine kurze Bestrahlung (z.B. 1000 MWd/t) als auch für sehr hohe Abbrände sinnvoll, um das Gesamtbild abzurunden.

Der Außendurchmesser des Brennstabes beträgt maximal 7,0 mm. Es kommen ausgesuchte Edelstahl-Hüllrohre der Nennmaße 7 x 0,4 zur Verwendung, Werkstoff-Nr. 1.4988. Für ihren Innendurchmesser gilt das Maß $6,215 \pm 0,010$ mm. Mit diesem realen Ausgangswert setzen wir den Brennstoffdurchmesser fest zu $6,120 \pm 0,010$ mm. Der diametrale Spalt erhält damit den Wert 95 ± 20 μ .

Mit den FR 2-Bestrahlungskapseln (Typ 4a) sind verschiedene Hüllwandtemperaturen bzw. verschiedene Stableistungen möglich, je nachdem

ob als Wärmeübertragungsmedium reines Na oder NaK genommen wird. In dem Diagramm von Abb. 1 ist der Zusammenhang zwischen Hülltemperatur und Stableistung dargestellt, bezogen auf den hier vorliegenden Stabdurchmesser von 7 mm.

Zur Wahl steht demnach z.B. eine maximale Stableistung von 600 W/cm bei einer Hüllaußentemperatur von 490 °C (Na-Kapsel) oder die etwas reduzierte Stableistung von 550 W/cm bei einer Hüllaußentemperatur von 645 °C mit der NaK-Kapsel. In Anlehnung an die realistischen Auslegungsdaten für einen Schnellbrüter-Prototyp wurde der zweiten Version den Vorzug gegeben und die NaK-Kapsel verwendet. Somit liegen als Richtwerte fest:

- Stableistung	550 W/cm
- Hüllaußentemperatur	645 °C
- Hüllinnentemperatur	710 °C

Für den Abbrand werden folgende Richtwerte festgesetzt:

Erste Kapsel	- 1 Zyklus im FR 2	(ca. 5000 MWd/t Me)
Zweite Kapsel	- 3 Zyklen im FR 2	(ca. 15000 MWd/t Me)
Dritte Kapsel	- 10 Zyklen im FR 2	(ca. 50000 MWd/t Me)

3.2 Arbeitspunkt beim maximalen Wärmeleitintegral

Zur Auswahl des richtigen Arbeitspunktes ist zu beachten, daß bei Bestrahlung im thermischen Reaktor Stableistung χ und Wärmeleitintegral ω verschieden sind. Während χ kontinuierlich mit der Anreicherung des Brennstoffes ansteigt, weist ω für jeden Brennstoffradius ein Maximum auf. Es ist sinnvoll, einen Arbeitspunkt für die Bestrahlung im Bereich dieser ω -Maxima auszusuchen, weil dann das radiale Temperaturprofil trotz unterschiedlicher Dichte im Brennstoff etwa gleich hoch bleibt. Oder - anders ausgedrückt - die durch die Dichteabstufung hervorgerufene scheinbare Änderung der Anreicherung bleibt ohne Einfluß auf das Temperaturprofil.

Die Zusammenhänge zwischen Brennstoffradius, Spaltstoffanreicherung, Wärmeleitintegral und Stableistung wurden für UO₂-Brennstoff von 90 % th.D. berechnet /5/.

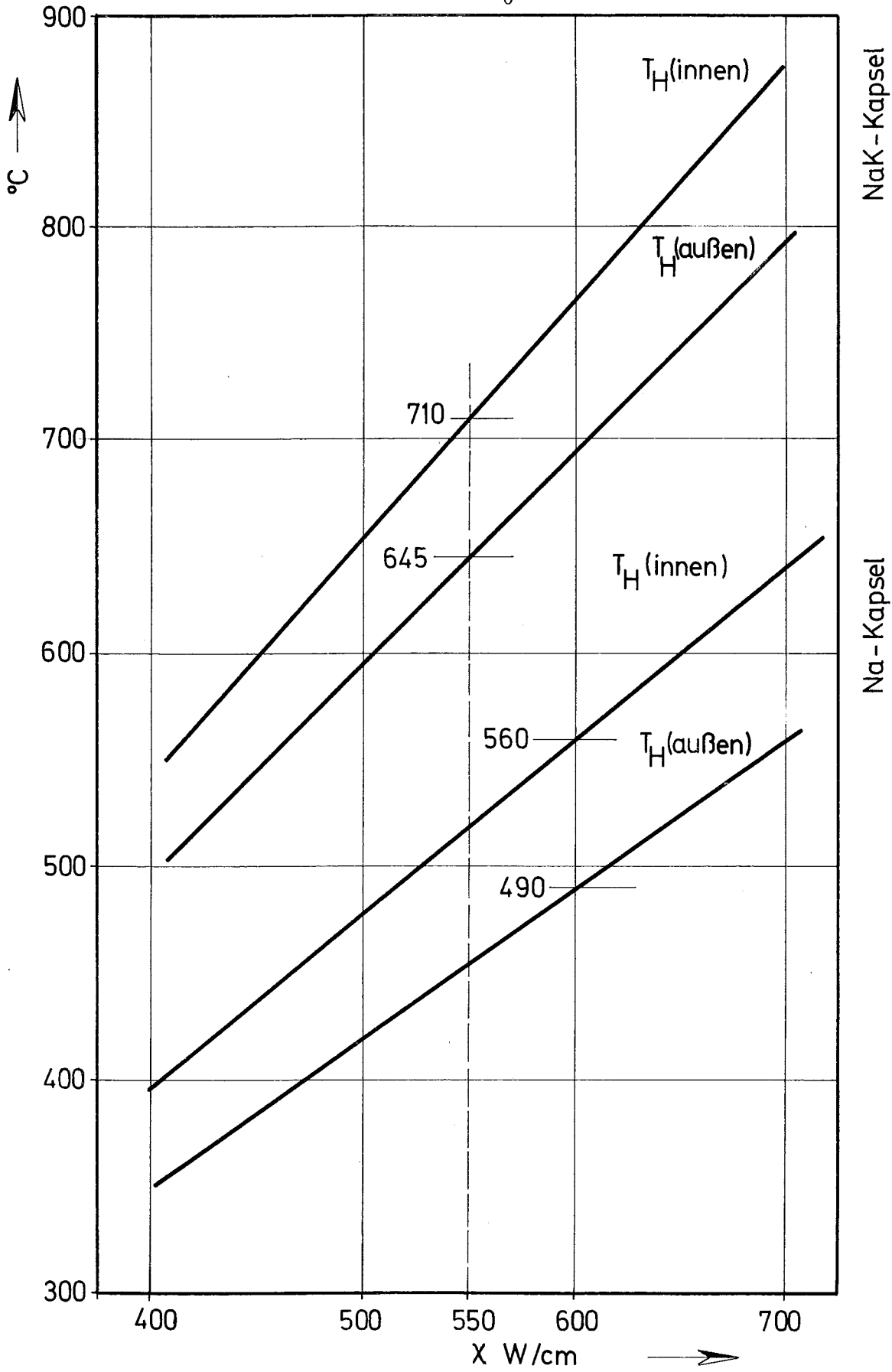


Abb.1 Hüllwandtemperaturen T_H für BE-Prüflinge mit 7mm Außendurchmesser und 0,4mm Wandstärke.

Wir entnehmen daraus zuerst einmal die Lage des ω -Maximums für verschiedene Brennstoffdurchmesser $2R$. Die hierfür in Abb. 2 angegebene Kurve ist vom Flußniveau und damit von der Gesamtleistung des FR 2 unabhängig. Sie gilt also auch für den 44 MW-Betrieb des FR 2.

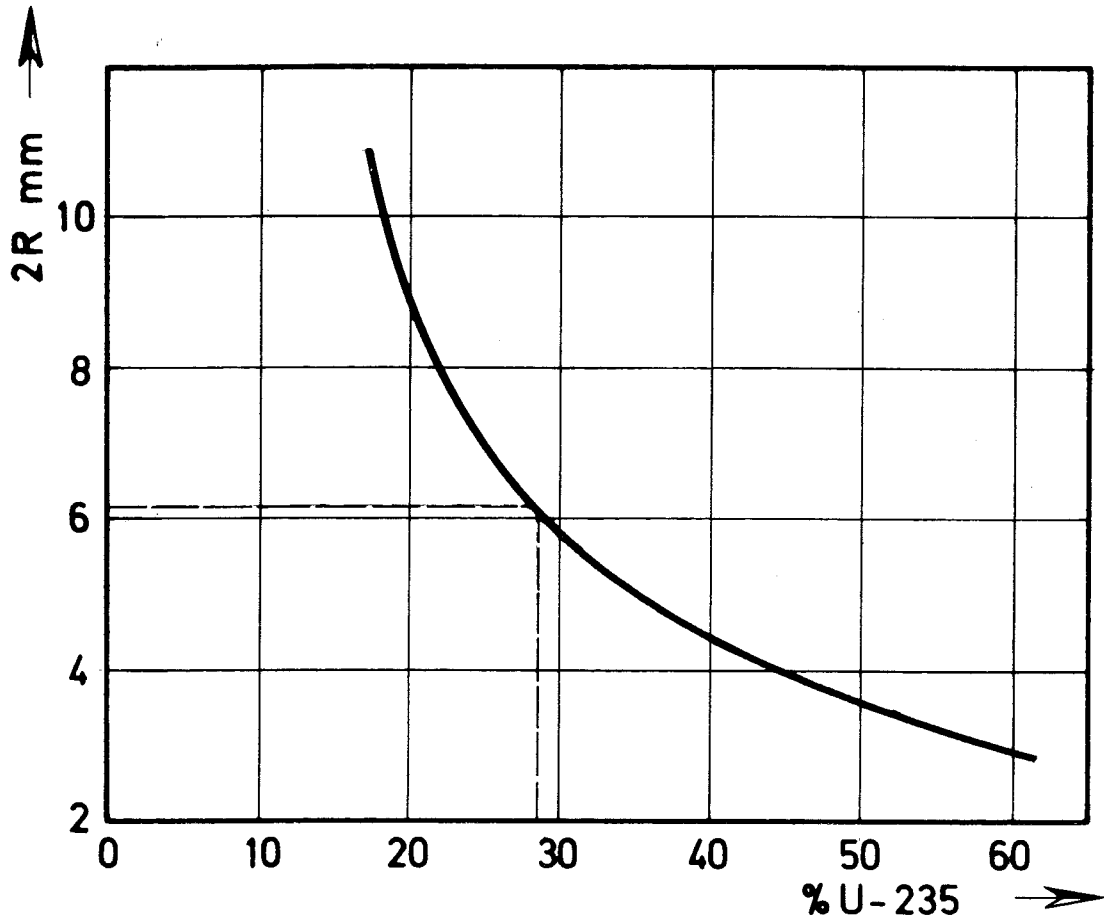


Abb.2 Brennstoffdurchmesser bei maximalem Wärmeleitintegral.

Aus der Kurve in Abb. 2 kann man für

$$R = 3,06 \text{ mm}$$

eine zugehörige Uran-Anreicherung

$$n_{235} = 28,5 \text{ At-\% U-235 in U}$$

festlegen. Dieser Arbeitspunkt bezieht sich vorerst nur auf UO_2 -Brennstoff von 90 % th.D., der mit U-235 angereichert ist. Im folgenden wird die Uran-Anreicherung so auf eine äquivalente Pu-Anreicherung umgerechnet, daß die Flußabsenkung die gleiche bleibt.

Die Flußabsenkung wird durch die Gesamtabsorption von Neutronen im Brennstoff bestimmt. Bei gleichem Brennstoffdurchmesser wird das ω -Maximum im Mischoxid bei einem Pu-Gehalt liegen, der eine Gesamtabsorption ergibt, welche der Gesamtabsorption im UO_2 -Brennstoff mit 28,5 At-% U-235 entspricht. Die Gesamtabsorption in einem beliebigen Mischbrennstoff ist

$$\sigma = (n_{235}\sigma_{235} + n_{238}\sigma_{238}) N_U + (n_{239}\sigma_{239} + n_{240}\sigma_{240} + n_{241}\sigma_{241}) N_{Pu}$$

Darin bedeuten:

$$\left. \begin{array}{l} N_U = 1 - N_{Pu} \\ N_{Pu} \end{array} \right\} \text{Die Atomanteile U bzw. Pu in der Mischung}$$

$$\left. \begin{array}{l} n_{235}, n_{238} \\ n_{239}, n_{240}, n_{241} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Die Atomanteile der Uran-Isotopen im Uran bzw.} \\ \text{der Pu-Isotopen im Pu} \end{array}$$

$$\sigma_{235} \dots \sigma_{241} \quad \text{Die Absorptionsquerschnitte der einzelnen Isotope für thermische Neutronen (unter Einschluß der Spaltquerschnitte).}$$

Im vorliegenden Fall ist

$$\begin{array}{lll} UO_2 \text{ mit} & \begin{array}{l} n_{235} = 0,285 \\ n_{238} = 0,715 \end{array} & \left. \vphantom{\begin{array}{l} n_{235} \\ n_{238} \end{array}} \right\} N_U = 1 \end{array}$$

zu vergleichen mit

$$\begin{array}{lll} UO_2 - PuO_2 \text{ mit} & \begin{array}{l} n_{235} = 0,007 \\ n_{238} = 0,993 \\ n_{239} = 0,909 \\ n_{240} = 0,082 \\ n_{241} = 0,009 \end{array} & \left. \vphantom{\begin{array}{l} n_{235} \\ n_{238} \\ n_{239} \\ n_{240} \\ n_{241} \end{array}} \right\} \begin{array}{l} N_U = 1 - N_{Pu} \\ \\ \\ N_{Pu} \end{array} \end{array}$$

Für die Rechnungen werden folgende Werte der Wirkungsquerschnitte (barn) genommen:

	σ_γ	σ_f	$\sigma_a = \sigma_\gamma + \sigma_f$
U-235	100	580	680
U-238	2,73	0	2,73
Pu-239	286	742	1028
Pu-240	281	0	281
Pu-241	382	1009	1391

^{+) Der sehr geringe Gehalt an Pu-242 kann hier vernachlässigt werden.}

Für den UO_2 -Brennstoff ergibt sich als Gesamtabsorption

$$\sigma_U = 195,75 \text{ barn.}$$

Der Wert für den Mischbrennstoff wird

$$\sigma_{U,\text{Pu}} = 7,47 (1-N_{\text{Pu}}) + 970,01 \cdot N_{\text{Pu}}.$$

Nun wird $\sigma_U = \sigma_{U,\text{Pu}}$ eingeführt, womit sich dann der äquivalente Pu-Gehalt im Brennstoff ausrechnen läßt:

$$N_{\text{Pu}} = 0,1956 = 19,56 \text{ At-\% Pu .}$$

Bei diesem Pu-Anteil im Mischoxid mit Natururan ist die Flußabsenkung also die gleiche wie beim UO_2 mit 28,5 % U-235. Damit ist die Brennstoffzusammensetzung für das ω -Maximum zu (abgerundet)

19,5 Gew.-% PuO_2 im Mischoxid
festgelegt.

3.3 Stableistung und Wärmeleitintegral

Frühere Angaben der Stableistung in FR 2-Kapselversuchen /5/ bringen durch Umrechnung für $R = 3,06 \text{ mm}$ und für eine U-235-Anreicherung von 28,5 % bei einem ungestörten Fluß von $4,95 \cdot 10^{13} \text{ n/cm}^2\text{sec}$ und einer Kapselschwächung von 0,85 im Prüfling eine Stableistung von

$$\chi_B = 454 \text{ W/cm .}$$

Wegen der Startvergiftung des Brennstoffes durch Spaltprodukte geht die Stableistung kurz nach dem Anfahren des Reaktors um ca. 5 % zurück, also mit dem Faktor

$$k_1 = 0,95 .$$

Nach neueren Erfahrungen bei Kapselbestrahlungen im FR 2 ist schließlich noch ein empirischer Faktor

$$k_2 = 1,15$$

anzubringen, der unter anderem auch einen neuen Wert für den Spaltquerschnitt des U-235 berücksichtigt. Bei der Bestrahlung eines angereicherten UO_2 -Brennstoffes im FR 2 wäre also die Stableistung

$$\chi_U = k_1 \cdot k_2 \cdot \chi_B = 1,093 \cdot \chi_B$$

Für unseren Fall ist nun aber zu berücksichtigen, daß wir UO_2 - PuO_2 -Mischbrennstoff haben. Obwohl der Spaltquerschnitt bei Pu-239 größer als bei U-235 ist, sinkt wegen des noch höheren Neutroneneinfangs im Pu die Stabileistung im Vergleich zum äquivalenten UO_2 -Brennstoff. Es gilt die Umrechnung

$$\chi_{\text{Pu}} = \frac{\sigma_{239}(\text{f})}{\sigma_{235}(\text{f})} \cdot \frac{\sigma_{235}(\text{a})}{\sigma_{239}(\text{a})} \cdot \chi_{\text{U}}$$

(f) und (a) deuten Spaltung bzw. Absorption an, wobei hier nur die beiden wichtigsten Spaltisotope U-235 und Pu-239 berücksichtigt sind. Durch Einsetzen der schon angegebenen Zahlenwerte ergibt sich:

$$\chi_{\text{Pu}} = 0,846 \cdot \chi_{\text{U}} \quad .$$

Eine Kombination der beiden Umrechnungen führt zu

$$\chi_{\text{Pu}} = 0,924 \cdot \chi_{\text{B}} \quad .$$

Damit wäre die wirkliche Stabileistung im vorliegenden Fall beim Neutronenfluß $4,95 \cdot 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ beispielsweise

$$\chi_{\text{Pu}} = 420 \text{ W/cm} \quad .$$

Für andere Neutronenflüsse Φ folgt daraus die lineare Beziehung

$$\chi_{\text{Pu}} = 84,75 \cdot 10^{-13} \cdot \Phi \quad .$$

Sie ist im Diagramm von Abb. 3 graphisch ausgewertet.

Für das zugehörige Wärmeleitintegral gilt bei diesem Brennstoffradius im Bereich der Maximalwerte von ω :

$$\omega_{\text{Pu}} = 0,79 \cdot \chi_{\text{Pu}} \quad .$$

Auch die hier zugehörige Auswertung findet sich in Abb. 3. Weiterhin ist dort noch die für die NaK-Kapsel etwa auftretende Hüllwandaußentemperatur (entnommen aus Abb. 1) eingezeichnet.

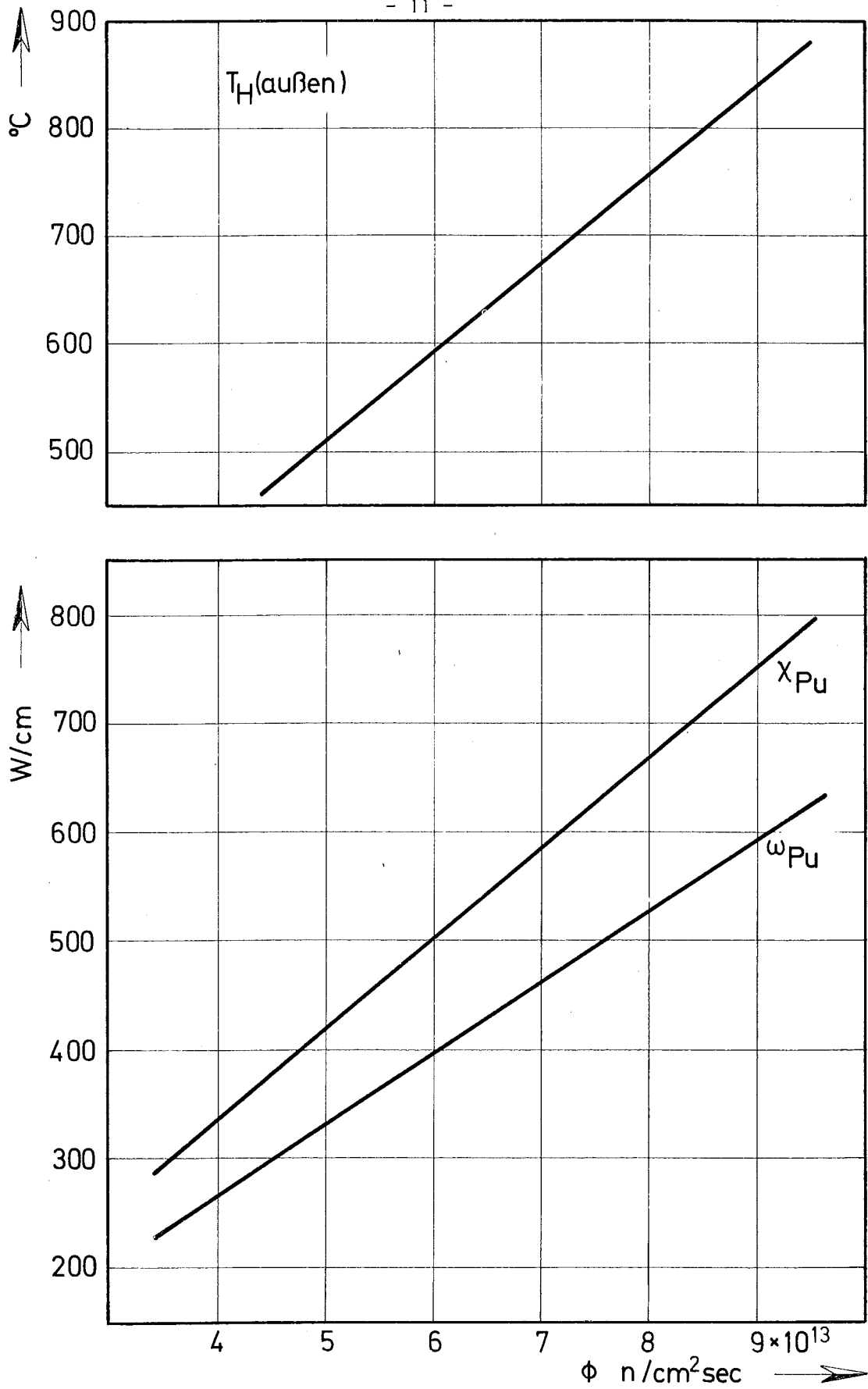


Abb.3 Stabileistung, Wärmeleitintegral und Hüllwand =
außentemperatur in Abhängigkeit vom FR 2 - Neutronen-
fluß.

Brennstoffdaten: $2R = 6,12$ mm
 $19,5$ w/o $PuO_2 + 80,5$ w/o UO_2 (Natururan), 90% th.D.

Die 4 verschiedenen Dichtestufen des Brennstoffes verursachen eine scheinbare Variation der Anreicherung wie folgt:

Dichtestufe (% th.D.)	Scheinbares N_{Pu} (%)
84	18,20
87	18,85
90	19,50
93	20,15

Zur Ermittlung der dadurch bedingten Bandbreite in ω und χ ist in Abb. 4 die Abhängigkeit von der Anreicherung gegeben. Die Kurven beziehen sich auf 6,12 mm Brennstoffdurchmesser und auf eine Bestrahlung im Neutronenfluß $6,5 \cdot 10^{13}$ n/cm²sec. Für die 4 verschiedenen Dichtestufen kann man daraus folgende Werte entnehmen:

Dichtestufe (% th.D.)	ω (W/cm)	χ (W/cm)
84	433	535
87	434	543
90	435	550
93	434	556

Auslegungsgemäß variiert ω praktisch nicht, während bei der Stableistung die Bandbreite ca. 20 W/cm beträgt.

Die wirkliche relative Bandbreite in ω und χ bei der Bestrahlung erhält man aber erst durch Betrachtung des zeitlichen und lokalen Flußverlaufes im Bestrahlungskanal. Obwohl die zeitlichen Schwankungen des Neutronenflusses im FR 2 spürbar sind, wird der eigentliche Versuchszweck dadurch nicht beeinträchtigt. Die zu vergleichenden Brennstoffdichten sind im "integrierten Prüfling" ja absolut gleichzeitig unter Bestrahlung. Eine zeitliche Veränderung des Flusses trifft alle Einzelproben in gleicher Weise. Die lokalen Flußunterschiede bringen Abweichungen, die auch im Wärmeleitintegral bis zu 3 % gehen können. Wie die Kurven für den vertikalen Flußverlauf im FR 2 zeigen /6/, müßte aber eine axiale Positionierung möglich sein, bei der die Flußunterschiede über eine z.B. 80 mm lange Brennstoffsäule nicht mehr als 1 % sind.

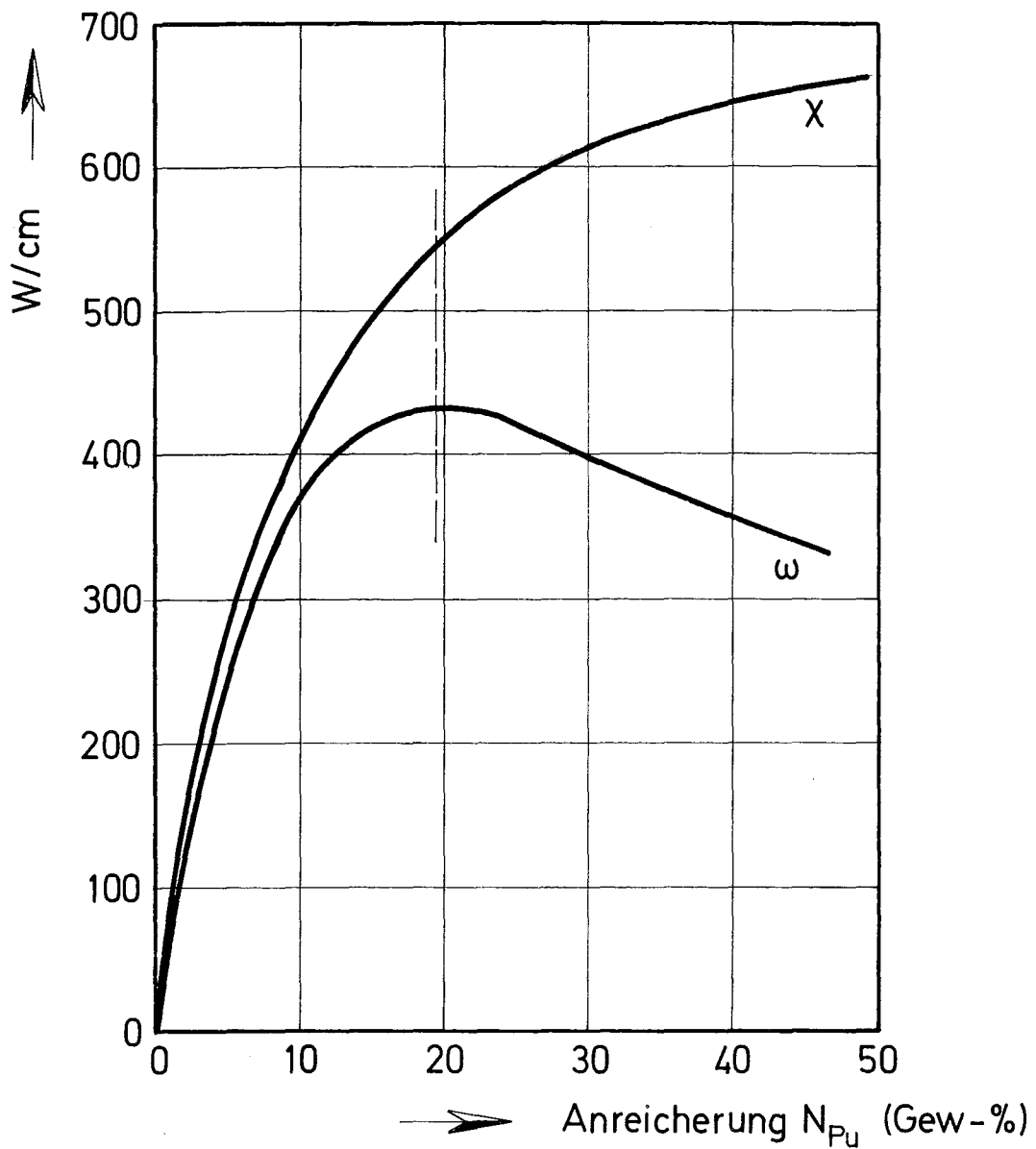


Abb. 4 Stableistung und Wärmeleitintegral als Funktion des Pu-Gehaltes bei $R = 3,06 \text{ mm}$, $\phi = 6,5 \cdot 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$

3.4 Auswahl des Bestrahlungskanals

Um den festgelegten Richtwert von 550 W/cm für die Stableistung zu erhalten, ist nach Abb. 3 ein Neutronenfluß von ca. $6,5 \cdot 10^{13}$ n/cm².sec nötig. Es wird vorgeschlagen, zur Bestrahlung der 3 Kapselinsätze im FR 2 Isotopenkanäle mit den Maximalflüssen

$$6,0 \text{ bis } 7,0 \cdot 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$$

zu nehmen. Damit ergeben sich dann folgende Schwankungsbreiten

ϕ (n/cm ² .sec)	χ_{Pu} (W/cm)	ω_{Pu} (W/cm)	T_{H} (außen) (°C)
$6,0 \cdot 10^{13}$	507	402	602
$6,5 \cdot 10^{13}$	550	435	645
$7,0 \cdot 10^{13}$	593	468	686

Wie bereits gezeigt wurde, ist die durch die Variation der Brennstoffdichte erzeugte Bandbreite bei ω_{Pu} praktisch gleich 0, während sie für χ_{Pu} ca. 20 W/cm beträgt.

Im Sinne des Versuches ist es wünschenswert, wenn die länger in Bestrahlung stehenden Kapseln zwischen den Zyklen des Reaktorbetriebes so umgesetzt werden, daß sie möglichst immer im gleichen Fluß stehen. Auch wäre bei der Auswahl der Bestrahlungskanäle zu berücksichtigen, daß die axialen Flußgradienten möglichst gering sein.

3.5 Dichtestufen und Prüflingstypen

Der Aufbau der stabförmigen Prüflinge entspricht im Prinzip den Brennstäben für die Versuchsgruppen 4a bzw. 4b der FR 2-Kapselbestrahlungen /3,4/. Abb. 5 zeigt den schematischen Aufbau des Prüflings mit einer Brennstoffsäule von 80 mm Höhe. Die Brennstoffsäule besteht aus 12 Tabletten in den 4 Dichtestufen. Die 4 Sorten an Brennstofftabletten sind wie folgt bezeichnet und spezifiziert:

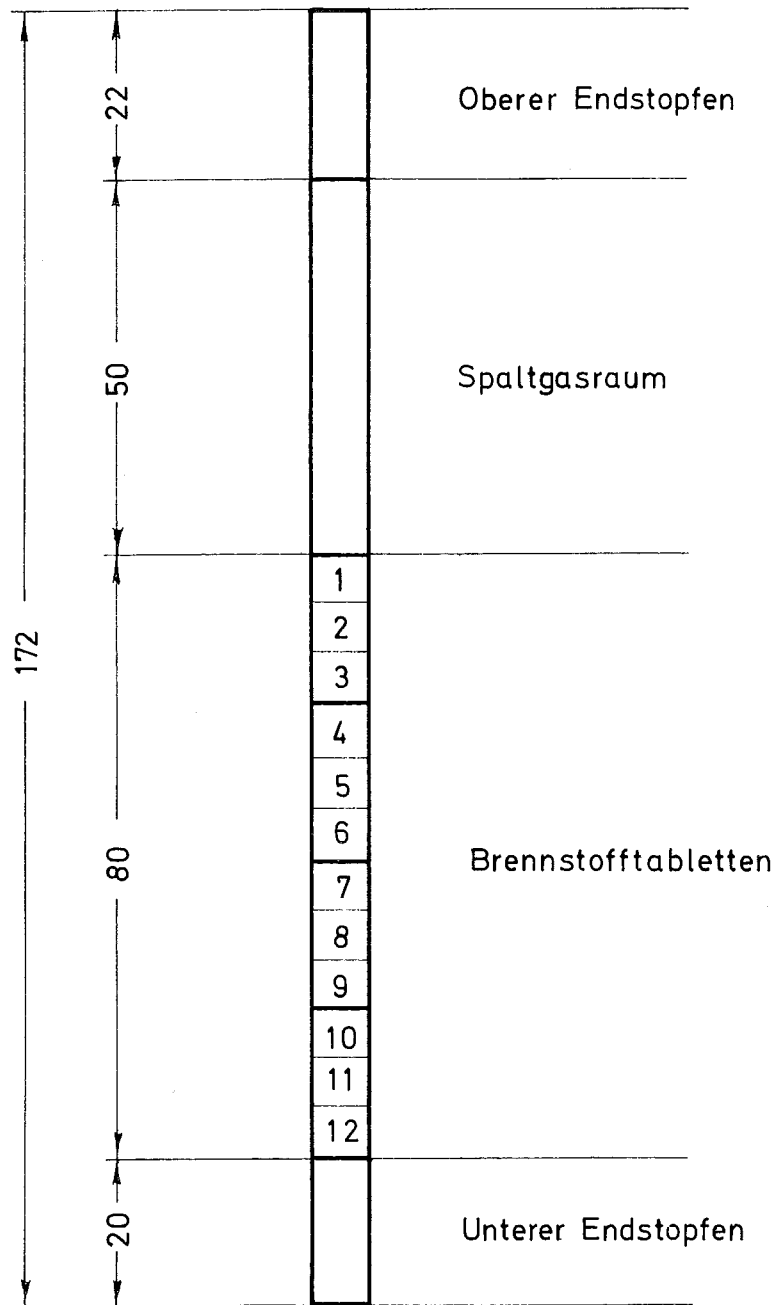


Abb. 5 Schematischer Aufbau der Prüflinge

Tablettensorte	Dichte-Nennwert (% th.D.)
T 84	83,7 - 84,3
T 87	86,7 - 87,3
T 90	89,7 - 90,3
T 93	92,7 - 93,3

Jede Säule enthält zusammen 12 Tabletten und zwar 3 Stück jeder Dichtestufe unmittelbar übereinander. Selbst bei evtl. Beeinflussung der Dichtestufen an ihrer Grenze, müßte dann in der jeweils mittleren Tablette das spezifische Phänomen störungsfrei ausgebildet sein.

Für die Tablettenanordnung in den Brennstäben werden folgende Möglichkeiten als sinnvoll ins Auge gefaßt:

Tabletten-Nr. (von oben nach unten)	Brennstoff-Nenndichte (% th. D.)		
	Prüflingstyp Q	Prüflingstyp R	Prüflingstyp S
1	93	84	90
2	93	84	90
3	93	84	90
4	90	87	84
5	90	87	84
6	90	87	84
7	87	90	93
8	87	90	93
9	87	90	93
10	84	93	87
11	84	93	87
12	84	93	87

Die Prüflingstypen Q und R enthalten die Tabletten in kontinuierlich ansteigenden Dichtestufen von unten nach oben bzw. von oben nach unten. Beim Typ R liegen wohl die Oberflächentemperaturen bei den verschiedenen Dichtestufen näher beisammen als beim Typ Q, weil die größere Stabileistung unten ist und damit die Konvektion im NaK-Spalt ausgleichend wirken kann. In Prüflingstyp S sind möglichst große Dichtesprünge verifiziert, um eine evtl. gegenseitige Beeinflussung der Dichtestufen deutlicher zu machen.

Die insgesamt nötigen 9 Prüflinge bekommen die Bezeichnung 5A-1, 5A-2 usw. Zur Ausführung kommen nur die Prüflingstypen R und S, um die Vielfalt einzuschränken.

Die 3 Bestrahlungseinsätze sollen je 3 Prüflinge in der Anordnung S, S, R (von oben nach unten gezählt) aufnehmen. Damit kommt der Prüflingstyp R immer an das untere Ende des Bestrahlungseinsatzes. Hinsichtlich der Stableistung wird der Flußabfall am unteren Ende durch den Dichteanstieg von oben nach unten zumindest zum Teil kompensiert. Die anderen beiden Prüflinge S in jedem Einsatz verifizieren möglichst große Dichtesprünge.

Somit werden zusammen 9 Prüflinge benötigt und zwar

3 Stück vom Prüflingstyp R,
6 Stück vom Prüflingstyp S .

3.6 Konstruktion der Prüflinge

Die genaue Konstruktion der Prüflinge geht aus den Konstruktionszeichnungen in Anhang II hervor. Der Zeichnungssatz umfaßt die 9 einzelnen Zeichnungen nach folgender Aufstellung:

Zeichnungs-Nr.	LB-Z 6.00	BE-Prüfling (Zusammenstellung)
"	LB-Z 6.01	Oberer Endstopfen (Teil 1)
"	LB-Z 6.02	Hüllrohr (Teil 2)
"	LB-Z 6.03	Unterer Endstopfen (Teil 3)
"	LB-Z 6.04	Führungsstück (Teil 4)
"	LB-Z 6.05	Druckfeder (Teil 5)
"	LB-Z 6.06	Rhodium-Plättchen (Teil 6)
"	LB-Z 6.07	Sinterstahlfilter (Teil 7)
"	LB-Z 6.08	Rhodium-Scheibe (Teil 8)

4. Herstellungsspezifikationen

Die nachfolgenden Unterabschnitte bringen die Herstellungsspezifikationen im einzelnen für die Brennstofftabletten, die Tablettensäulen, das Hüllmaterial und die fertigen Stabprüflinge. Sie sind vorab in Tabelle 1 zusammengefaßt.

Tabelle 1: Auslegung und Spezifikationen

Außenmaße	Gesamtlänge (mm)	172,0 ± 0,2	
	Außendurchmesser (mm)	7,045 ± 0,015	
Einteilung der Stablänge	Oberer Stopfen (mm)	22	
	Spaltgasraum (mm)	43	
	Führungsstück (mm)	7	
	Brennstoffsäule (mm)	80 ± 1	
	Unterer Stopfen (mm)	20	
Hülle	Material	Edelstahl W.-Nr. 1.4988	
	Innendurchmesser (mm)	6,215 ± 0,010	
	Wandstärke (mm)	0,415 ± 0,005	
Brennstoff	Material	UO ₂ - PuO ₂	
	PuO ₂ -Anteil (Gew.-%)	19,5 ± 0,5	
	O/Me-Verhältnis	2,00 ± 0,03	
	Tablettendurchmesser (mm)	6,120 ± 0,010	
	Tablettenhöhe (mm)	6,67 ± 1,00	
Geometrische Tabletten- dichte, Bereich der Nennwerte	Prüflingstyp	R	S
	Abschnitt A (% th.D.)	84,0 ± 0,3	90,0 ± 0,3
	Abschnitt B (% th.D.)	87,0 ± 0,3	84,0 ± 0,3
	Abschnitt C (% th.D.)	90,0 ± 0,3	93,0 ± 0,3
	Abschnitt D (% th.D.)	93,0 ± 0,3	87,0 ± 0,3
Höhe der Dichteabschnitte (mm)		20,0 ± 0,5	
Dichteschwankung innerhalb eines Abschnittes (% th.D.)		± 0,1	
Gasfüllung		1 atm Helium	
Oberflächenkontamination	Wischttest oberflächlich fixiert	unter der Nachweisgrenze < 22 α-Zerfälle/min · cm ²	

4.1 Brennstofftabletten und Tablettensäulen

4.1.1 Chemische Zusammensetzung

- Der Nennwert der Brennstoffmischung ist $80,5 \pm 0,5$ Gew.-% UO_2
 $19,5 \pm 0,5$ Gew.-% PuO_2 .
Der in diesem Bereich liegende wirkliche PuO_2 -Gehalt der Mischung ist mit einer Analysengenauigkeit von $\pm 0,1$ % PuO_2 anzugeben.
- Der Sauerstoffgehalt ist in allen Tabletten einheitlich. Es wird ein Stöchiometriewert im Bereich $\text{O/Me} = 2,0 \pm 0,03$ mit einer Nachweisgenauigkeit von $\pm 0,02$ angestrebt.
- Der H_2O -Gehalt muß unter 100 ppm liegen.
- Der gesamte Gasgehalt des Brennstoffes soll nicht höher als $0,1 \text{ Norm-cm}^3$ je Gramm Brennstoff - geprüft bei einer Freisetzungstemperatur von 1600°C - sein.
- Die sonstigen chemischen Verunreinigungen sollen insgesamt 1000 ppm nicht übersteigen.

4.1.2 Isotopenzusammensetzung

- Das UO_2 enthält Natururan (0,7205 % U-235)
- Das PuO_2 enthält Pu mit einer Isotopenzusammensetzung von etwa
 - 91 % Pu-239
 - 8 % Pu-240
 - 1 % höhere Isotope.

Die wirkliche Zusammensetzung ist mit einer genauen Isotopenanalyse zu belegen.

4.1.3 Homogenität

Die Pulvermischung wird gut homogenisiert. Alle PuO_2 -Partikel sollen kleiner als 100 μ sein.

4.1.4 Tablettendichte

Die Nennwerte liegen in den Bereichen $84 \pm 0,3$, $87 \pm 0,3$, $90 \pm 0,3$ und $93 \pm 0,3$ % th.D. Jede Tablettensorte in einem Prüfling muß innerhalb $\pm 0,1$ % th.D. einheitlich sein. Wenn es die Herstellungsökonomie

erlaubt, soll diese Einheitlichkeit möglichst für jede Tabletten-
sorte in den 3 Prüflingen eines Bestrahlungseinsatzes eingehalten
werden.

4.1.5 Tabletten und Brennstoffgeometrie

- Der Tablettendurchmesser ist $6,120 \pm 0,010$ mm.
- Der Nennwert der Tablettenhöhe ist 6,67 mm. Die Einzelwerte können in einem Bereich von etwa 1 mm schwanken. Die Stirnflächen sollen mit einer Genauigkeit von $\pm 10 \mu$ orthogonal zu den Zylinderflächen sein.
- Die Höhe eines Dichteabschnittes, der aus 3 Tabletten besteht, beträgt $20,0 \pm 0,5$ mm.
- Die Länge der Tablettensäule, die sich aus den 4 Dichteabschnitten zusammensetzt, ist 80 ± 1 mm.

4.1.6 Oberfläche der Tabletten

Die Oberfläche darf keine sichtbaren Fehler aufweisen mit Ausnahme der beim Schleifen der Zylindermäntel unvermeidbar auftretenden Kantenabplatzungen. Dabei soll keine der linearen Abmessungen einer Abplatzung größer als 1 mm sein.

4.2 Hüllmaterial

4.2.1 Werkstoff

- Hüllrohre und Stopfen bestehen aus austenitischem Edelstahl X8CrNiMoVNb1613, Werkstoff-Nr. 1.4988.
- Die Nenngröße der Hüllrohre ist $7,0 \times 0,40$ mm.
- Es werden 4 ausgesuchte Halbzeugrohre mit den Bezeichnungen K 117 bis K 120 bereitgestellt (siehe Rohrprüfprotokoll /7/).

4.2.2 Abmessungen der Hüllrohre

- Die ca. 140 mm langen Rohrstücke haben schärferen Toleranzforderungen hinsichtlich der Geometrie zu genügen als dies normalen Lieferungen entspricht. Die Rohrstücke müssen daher einzeln ausgemessen und vermessen werden.

Nach den Prüfergebnissen im Rohrprüfprotokoll /7/ wird festgelegt:

- Der Innendurchmesser beträgt $6,215 \pm 0,010$ mm.
- Die Wandstärke ist $0,415 \pm 0,050$ mm.
- Für den Außendurchmesser gelten die Grenzen $7,045 \pm 0,015$ mm.

4.3 Brennstäbe

4.3.1 Innere Geometrie

- Die fertig gefüllten und verschweißten Brennstäbe weisen folgende Längeneinteilung auf:

Oberer Endstopfen	22 mm
Spaltgasraum	43 mm
Führungsstück	7 mm
Brennstoffsäule	80 mm
Unterer Endstopfen	20 mm
	<hr/>
	172 mm

- Die durch Röntgendurchleuchtung prüfbare Länge der Oxidsäule darf nicht mehr als 81 mm betragen.
- Das untere Ende der Oxidsäule muß genau der Position nach der Längeneinteilung entsprechen. Innerhalb der Meßgenauigkeit der Röntgendurchleuchtung darf keine Abweichung erkennbar sein.
- Der diametrale Spalt zwischen Brennstoff und Hülle beträgt 95 ± 20 μ .

4.3.2 Äußere Geometrie

- Die gesamte Länge des Stabes beträgt $172 \pm 0,2$ mm.

- Der äußere Durchmesser entspricht mit $7,045 \pm 0,015$ mm der Festlegung für das Hüllrohr in 4.2.2. An den Schweißnähten kann eine lokale Durchmesserüberschreitung bis 7,15 mm auftreten.
- Die mit Rundlaufmessung ermittelte Durchbiegung oder sonstige Gestaltsabweichung soll an keiner Stelle des Stabes mehr als 0,1 mm vom Idealwert betragen.

4.3.3 Oberfläche des Prüflings

Die Oberfläche darf bei optischer Prüfung mit ausgeleuchteter Großlupe bzw. Lichtschnittmikroskop keine Oberflächenfehler oder -schäden aufweisen.

4.3.4 Schweißnähte

Von jedem Stabende werden 2 Röntgen-Aufnahmen (um 90° verdreht) senkrecht zur Stabachse angefertigt. An den Schweißnähten dürfen keinerlei Fehler erkennbar sein.

4.3.5 Dichtheit

Bei einem Helium-Dichtheitstest unter äußerem Vakuum soll die Leckrate kleiner als 10^{-9} Torr-liter/sec sein.

4.3.6 Oberflächenkontamination

- Es dürfen keine nichthaftenden radioaktiven Verunreinigungen an der Oberfläche nachweisbar sein.
- Für haftende Verunreinigungen beträgt die Grenze 22 Alpha-Zerfälle pro cm^2 und Minute. Eine lokale Überschreitung dieses Grenzwertes (etwa an den Schweißnähten) ist zulässig, wenn die über die ganze Staboberfläche gemittelte Kontamination den Grenzwert nicht übersteigt.

5. Herstellung der Prüflinge

5.1 Ausgangspulver

Als oxidische Ausgangspulver standen zur Herstellung der Brennstofftablettten zur Verfügung:

- a) UO_2 aus Natururan, ADU-gefällt (Fa. NUKEM)
- b) PuO_2 mit nominell 7,7 % Pu-240, oxalatgefällt (USAEC)

Die genaue Isotopenzusammensetzung des Pu geht aus Tabelle 2 hervor.

Tabelle 2: Isotopenzusammensetzung des Pu

		Meßergebnisse (Gew.-%) von	
		Hanford/USA	Karlsruhe
Charge CO-26-6-8	Pu-239	90,845	90,850
	Pu-240	8,301	8,240
	Pu-241	0,813	0,867
	Pu-242	0,040	0,044

Da Brennstofftablettten mit stark verschiedener Dichte herzustellen waren, mußten Pulver mit verschiedener spezifischer Oberfläche vorbereitet werden. Für die Grundmischung, aus der sich die weiteren Mischansätze herleiten, wurde eine größere Menge UO_2/PuO_2 gemischt. Etwa die Hälfte der Grundmischung (spezifische Oberfläche = $6,03 \text{ m}^2/\text{g}$) wurde zur Herstellung der Tablettten mit 93 % th.D. bzw. 90 % th.D. verwendet. Die andere Hälfte der Grundmischung wurde 2 Stunden lang bei $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ unter Argon-5 %- H_2 kalziniert. Hieraus ergab sich ein 2. Ansatz, dessen spezifische Oberfläche auf $1,04 \text{ m}^2/\text{g}$ reduziert war. Zwei weitere Ansätze von 3,5 bzw. $4,0 \text{ m}^2/\text{g}$ wurden nun durch Mischen der beiden erstgenannten Ansätze hergestellt.

5.2 Tabletttenherstellung

Es wurden je Dichtestufe 27 Tablettten (insg. 108) hergestellt. Die Pulver wurden mechanisch 1 h lang gemischt. Anschließend wurde unter Zusatz von 1,2 Gew.-% Polyvenylalkohol in wässriger Lösung und 1 Gew.-% Stearinsäure in alkoholischer Lösung granuliert. Nach dem Trocknen wurde das Granulat durch ein Sieb mit $250 \text{ }\mu\text{m}$ Maschenweite

gestrichen. Gepreßt wurde in einer Matrize mit 7,4 mm Durchmesser. Das Pulver wurde volumendosiert unter 2 t/mm^2 verpreßt. Die Grünlinge wurden nun zwischen $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ und $1600 \text{ }^\circ\text{C}$ unter Argon-5 % H_2 2 Stunden gesintert. Die Enddurchmesser wurden mittels Spitzenlos-schleifen erzielt. Die Tabletten wurden anschließend in einem Ultraschallbad gereinigt. Hieran schloß sich eine Vakuumtrocknung bei $120 \text{ }^\circ\text{C}$ (16 h) an. Die Daten der Tabletten gehen aus den Tabellen im Anhang III hervor.

5.3 Brennstoffeigenschaften

Zur Charakterisierung der Brennstoffstruktur wurden keramische Schlif-fe angefertigt und ausgewertet, siehe Abb. 6 bis 9. An einigen Brennstofftabletten wurden schließlich chemische Analysen ausgeführt. Tabelle 3 bringt den Pu-Gehalt der Brennstofftabletten, Tabelle 4 die chemischen Verunreinigungen.

5.4 Hüllrohre und Endstopfen

Für die Herstellung der Stabumhüllungen wurde Rohr- und Stabmaterial aus austenitischem Edelstahl X8CrNiMoVNb1613, Werkstoff-Nr. 1.4988 bereitgestellt. Die Nennabmessungen dieses Halbzeuges waren

- bei den Rohren: Durchmesser 7,0 mm; Wandstärke 0,4 mm
- beim Stabmaterial: Knüppeldurchmesser ca. 10 mm.

Aus den ausgewählten Rohren Nr. K 117 bis K 120 wurden 16 Rohrstücke gefertigt, die einer genauen Rohrprüfung unterzogen wurden. Die Einzelheiten dieser Inspektion sind (für die Hüllrohrabschnitte der 9 Prüflinge) aus Tabelle 5 zu ersehen. Eine Zuordnung der Rohrstücknummern zu den verwendeten Ausgangsrohren wurde nicht vorgenommen.

Aus diesem Halbzeug wurden nach den Einzelteilzeichnungen der Spezifikation die Rohrstücke nachgearbeitet und die Endstopfen gedreht. Ferner wurde die Haltefeder und das Führungsstück vorbereitet.

Die unteren Endstopfen wurden nach sorgfältiger Reinigung aller Teile unter Helium-Schutzgas in die Hüllrohr eingeschweißt. Die Fertigungskontrolle prüfte hierauf die Dichtheit sowie die Schweißnahtqualität. Die Prüfungen ergaben keine Beanstandungen.

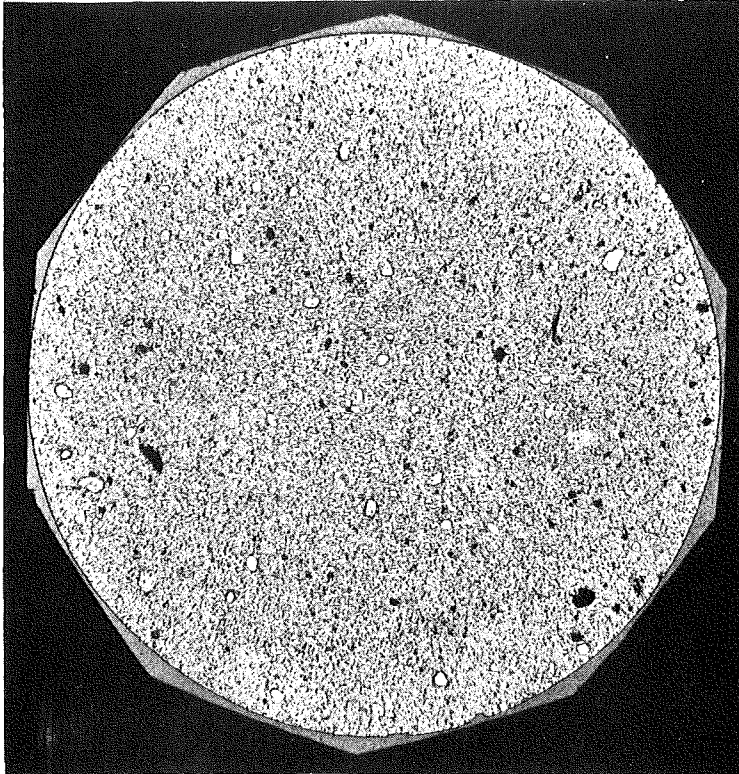


Abb. 6
84 % th.D.

1mm

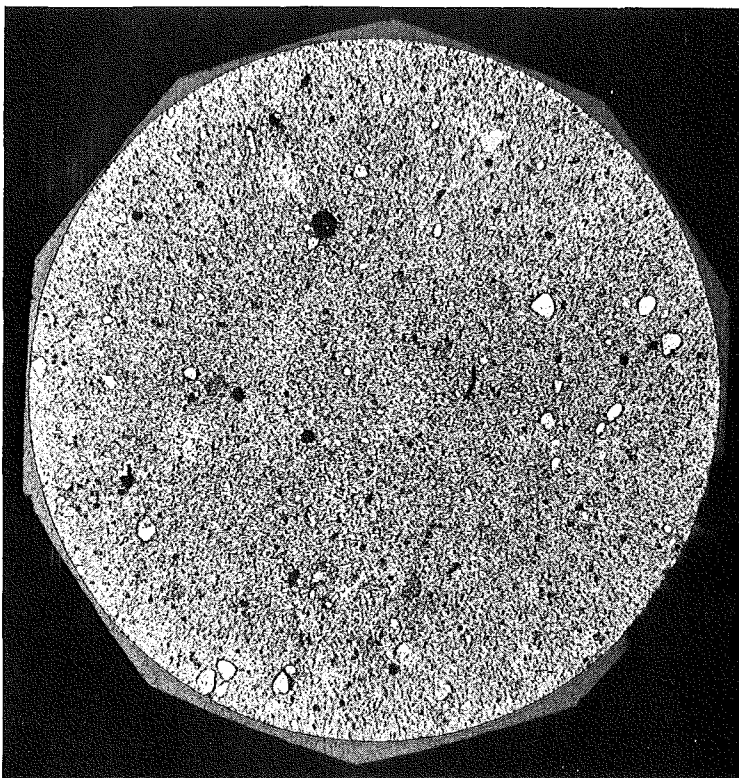


Abb. 7
87 % th.D.

1mm

Keramische Aufnahmen von Pellets der 4
verschiedenen Ausgangsdichten

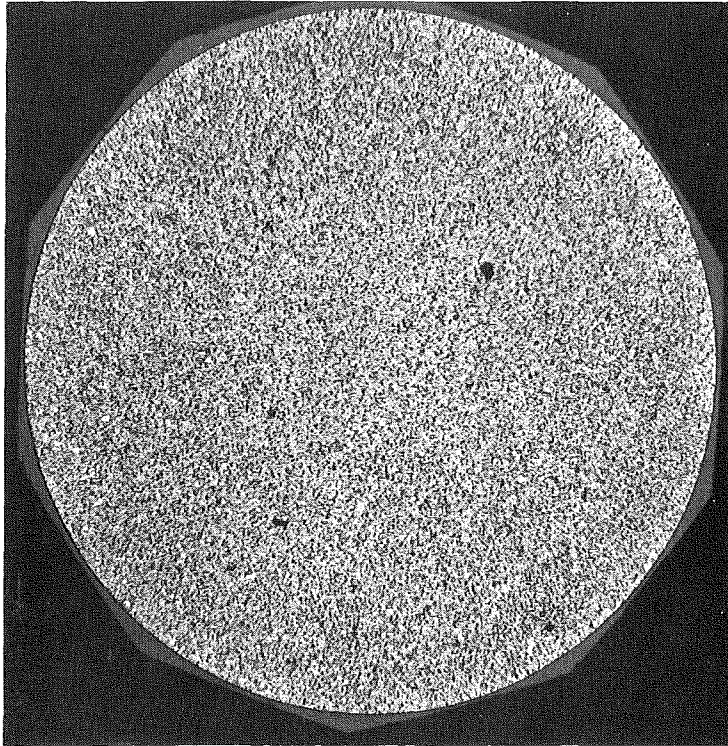


Abb. 8
90 % th.D.

1 mm

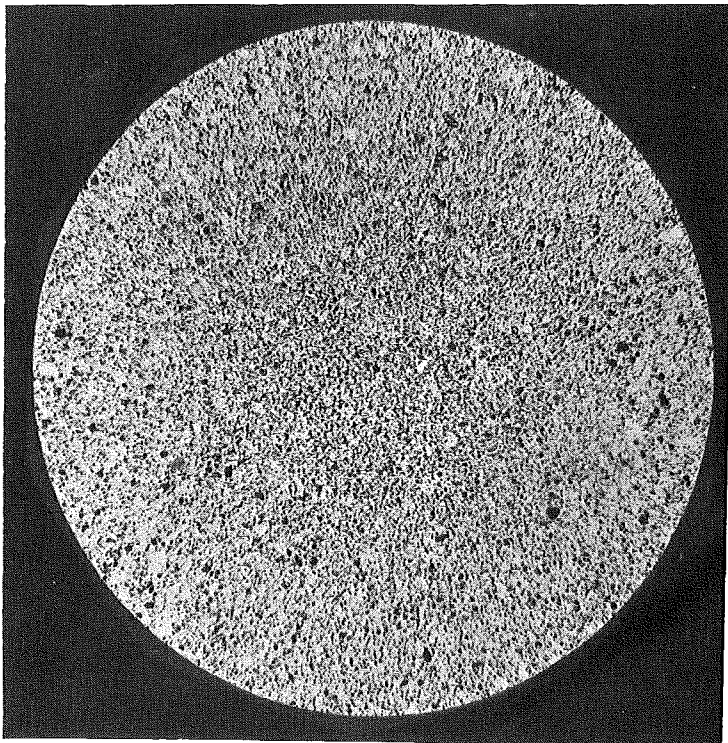


Abb. 9
93 % th.D.

1 mm

Keramische Aufnahmen von Pellets der 4
verschiedenen Ausgangsdichten

Tabelle 3: Pu-Gehalt der Brennstofftabletten

	Tabletten aus Mischansatz		
	1	2	3
$\frac{\text{Pu}}{\text{U} + \text{Pu}}$ (Gew.-%)	19,60	19,60	19,53

Tabelle 4: Chemische Verunreinigungen (ppm)

	Tabletten aus Mischansatz		
	1	2	3
C	150	70/300	340
Ca	100	50	35
Mg	40	5	< 5
Cl	< 1	< 1	51
F	4	< 1	< 1
Ag	< 5	< 5	< 5
B	0,1	0,1	0,1
Cd	< 1	< 1	< 1
Co	-	< 5	< 5
Cr	< 10	10	25
Cu	< 5	< 1	< 1
Fe	150	110	450
Mn	< 5	< 5	< 5
Mo	< 10	< 10	< 10
Ni	10	10	10
Pb	< 5	< 10	< 10
V	< 5	< 10	< 10
W	-	-	-
Zn	< 25	< 5	< 5
Sn	< 10	< 5	< 5
Al	40	350	200
Si	160	-	-

Tabelle 5: Hüllrohre und Hüllrohrprüfung

Prüfling Nr.	Hüllrohr- abschnitt Nr.	Innendurchmesser (mm)	Außendurchmesser (mm)	Wandstärke (mm)
5A-1	1	6,225 ... 6,230	7,045 ± 0,015	0,415 ± 0,005
5A-2	2	6,209 ... 6,215		
5A-3	3	6,210 ... 6,215		
5A-4	4	6,218 ... 6,228		
5A-5	5	6,203 ... 6,207		
5A-6	10	6,224 ... 6,230		
5A-7	7	6,225 ... 6,227		
5A-8	6	6,220 ... 6,230		
5A-9	9	6,211 ... 6,215		
Die Paßflächen in den Hüllrohrabschnitten zur Aufnahme der Endstopfen sind einwandfrei				
Die visuelle Untersuchung der Innenflächen brachte keinen Befund.				
Bei der visuellen Untersuchung der Außenflächen wurde bei den Hüllrohrabschnitten Nr. 3 und 7 je eine 20 µ-Pore gefunden, die anderen Rohre blieben ohne Befund.				
Die Ultraschall-Prüfung auf Längs- und Querfehler brachte bei allen Rohren keine Fehleranzeige.				

5.5 Stabherstellung

Jeder Prüfling enthält 12 Tabletten in vier verschiedenen Dichtestufen. Die Folge dieser Stufen geht aus Tabelle 6 hervor. Die Prüflinge enthalten ferner an den Enden der Brennstoffsäulen ein Rhodiumplättchen. Alle Tabletten wurden zur Charakterisierung ausgewogen und vermessen. Die Tabellen in Anhang III bringen die Zusammenstellung der Tablettensäulen. Die Orientierung der Tabletten im Prüfling stimmt mit der Aufstellung in den Tabellen überein. Die Zählung der Tabletten beginnt am oberen, dem ungekennzeichneten Stopfen zugewandten Ende der Tablettensäule. Als theoretische Dichte für das Brennstoffgemisch wurde 11.058 g/cm^3 genommen.

Tabelle 6: Dichtefolge in den einzelnen Prüflingen

Typ Prüflings-Nr.	R	S
	5A-1 bis 5A-3	5A-4 bis 5A-9
Dichtefolge von oben nach unten	84 % th.D.	90 % th.D.
	87 % th.D.	84 % th.D.
	90 % th.D.	93 % th.D.
	93 % th.D.	87 % th.D.
Zahl der Tabletten je Dichtezone	3	3
Anzahl der Prüflinge	3	6

Eine Zusammenfassung der Materialwerte für die Prüflinge bringt Tabelle 7. Dort ist auch der Pu-Gehalt angegeben. Als Faktor für die Umrechnung von PuO_2 auf Pu wurde der Wert 0,882 verwendet.

In die Hüllrohre war bereits der untere Stopfen mit der Kennzeichnung eingeschweißt worden. Die Tabletten wurden durch eine am unteren Ende aufgesetzte Schutzkappe in die Hüllrohre eingeschoben.

Tabelle 7: Materialwerte für die Prüflinge

Prüfling Nr.	Hüllrohrabschnitt Nr.	Gewicht (g)	Brennstoffdaten		Pu-Menge ²⁾ (g)
			mittlerer Durchmesser (mm)	Höhe ¹⁾ (mm)	
5A-1	1	22,871	6,120	80,05	3,934
5A-2	2	23,187	6,120	81,02	3,988
5A-3	3	22,983	6,121	80,11	3,953
5A-4	4	23,016	6,120	80,12	3,959
5A-5	5	23,018	6,119	80,00	3,959
5A-6	10	23,104	6,120	80,21	3,974
5A-7	7	23,062	6,119	79,94	3,966
5A-8	6	23,184	6,119	80,22	3,987
5A-9	9	23,212	6,118	80,14	3,992

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

2) Berechnet für den nominellen PuO₂-Anteil von 19,5 Gew.-%, Umrechnungsfaktor
Pu/PuO₂ = 0,882.

Nach Abnahme dieser Kappe wurde der Metalleinsatz mit dem Sinterstahlfilter nebst Haltefeder eingeführt. Die unverschlossenen Prüflinge wurden nun auf ca. 0,1 Torr evakuiert. Nach Erreichen dieses Druckes wurde das Prüflingsinnere mit Reinst-Helium geflutet. Anschließend wurden die Endstopfen aufgedrückt und unter Helium mit dem Rohr verschweißt.

5.6 Stabprüfung

Neben dem Stabgewicht wurden die Gesamtlänge sowie der Durchmesser an mehreren längs verteilten Stellen und an der Schweißnähten gemessen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 erhalten. Die Prüflinge zeigten in einigen Fällen an der oberen Schweißnaht Durchmessererhöhungen. Die Prüflinge wurden außerdem in ihrer ganzen Länge geröntgt. Abb. 10 zeigt diese Aufnahmen, wobei der Sollwert 80 mm miteingezeichnet wurde. Die Auswertung dieser Aufnahmen konnte nur mit einer Genauigkeit von 0,1 mm erfolgen. In Tabelle 9 sind die so ermittelten Werte aufgeführt und den Rechenwerten aus den einzelnen Tablettenhöhen gegenübergestellt.

Der Heliumlecktest an den fertigen Stäben wies die Dichtheit der verschlossenen Prüflinge nach. Die Qualität der oberen Schweißnaht ist gemäß Röntgenprüfung bei 7 Prüflingen einwandfrei, bei den Prüflingen Nr. 5A-6 und 5A-7 wurde sie als brauchbar eingestuft.

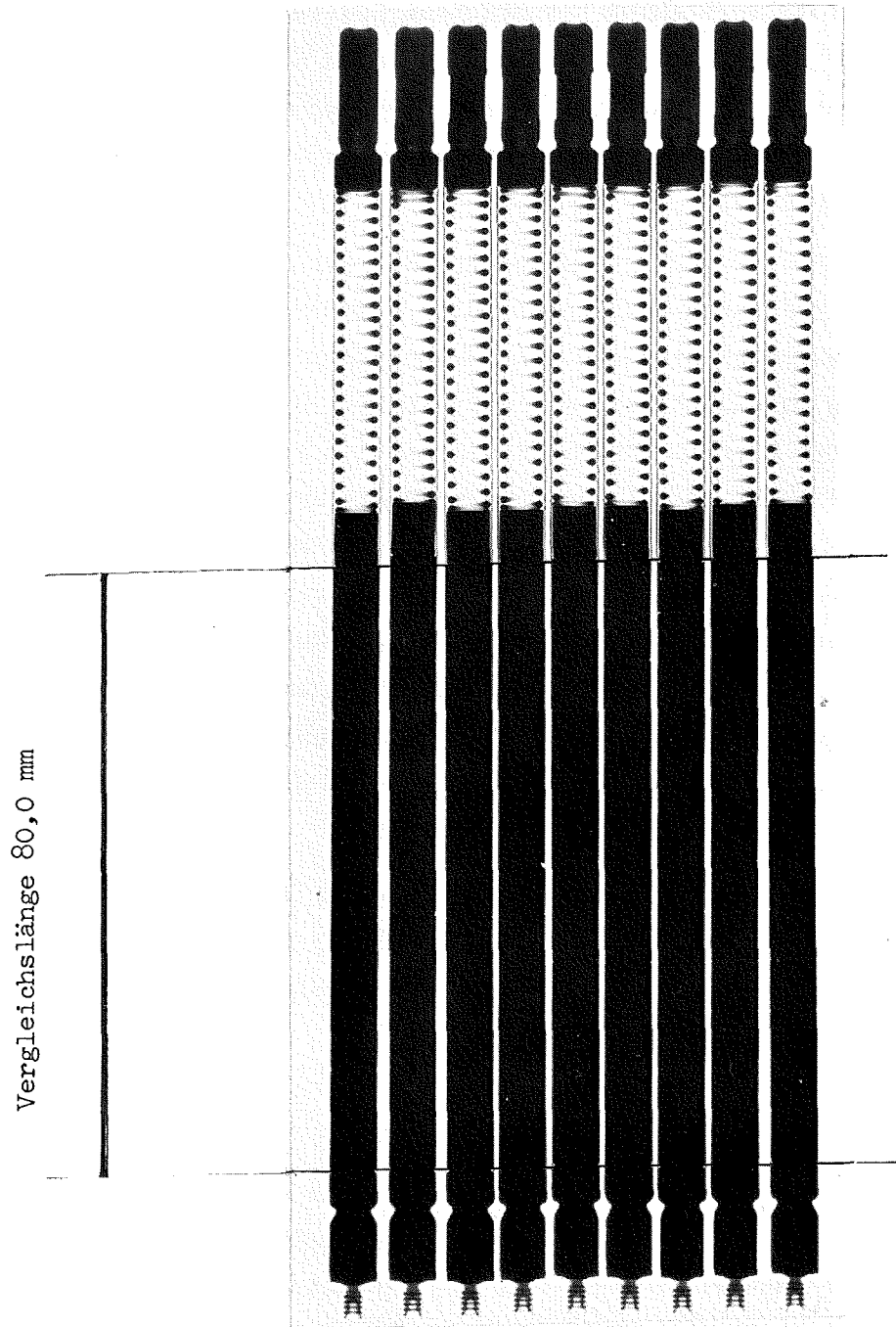
Hinsichtlich einer oberflächlichen Pu-Kontamination ist zwischen einer wischbaren und einer oberflächlich fixierten Aktivität zu unterscheiden. Die wischbare Alpha-Kontamination wird durch Wischteste ermittelt. Die fixierte Kontamination läßt sich durch direkte Ausmessung, speziell der oberen Schweißnaht, mit einem empfindlichen Meßgerät bestimmen. Alle Wischteste blieben ohne Befund. Die Werte für die fixierte Kontamination lagen unterhalb der zulässigen Grenze, sie bewegten sich im Bereich der Nachweisgrenze.

Tabelle 8:
Stabprüfung

Prüfling Nr.	Stabgewicht (g)	Länge (mm)	Durchmesser (mm)	
			längs des Stabes	obere Schweißnaht
5A-1	45,20	171,5	7,050 - 7,052	< 7,20
5A-2	45,50	171,5	7,037 - 7,042	7,21
5A-3	45,30	171,5	7,039 - 7,044	< 7,20
5A-4	45,30	171,5	7,037 - 7,047	< 7,20
5A-5	45,30	171,5	7,038 - 7,050	7,21
5A-6	45,45	171,5	7,048 - 7,060	< 7,20
5A-7	45,45	172,0	7,047 - 7,052	7,22
5A-8	45,50	172,0	7,046 - 7,051	< 7,20
5A-9	45,45	172,0	7,038 - 7,041	7,21

Tabelle 9:
Länge der Tabletten-
säulen

Prüfling Nr.	Summe der Tablettenhöhen (mm)	Länge aus der Röntgenaufnahme (mm)	Längenmehrbedarf in der Tablettensäule (mm)
5A-1	80,1	80,3	+ 0,2
5A-2	81,0	81,4	+ 0,4
5A-3	80,1	80,4	+ 0,3
5A-4	80,1	80,4	+ 0,3
5A-5	80,0	80,4	+ 0,4
5A-6	80,2	80,4	+ 0,2
5A-7	79,9	80,1	+ 0,2
5A-8	80,2	80,6	+ 0,4
5A-9	80,1	80,5	+ 0,4



Prüfling Nr. 5A-

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Abb. 10 Röntgen-Aufnahmen der Tablettensäulen

6. Bestrahlungseinrichtung

6.1 Kapselversuchseinsätze

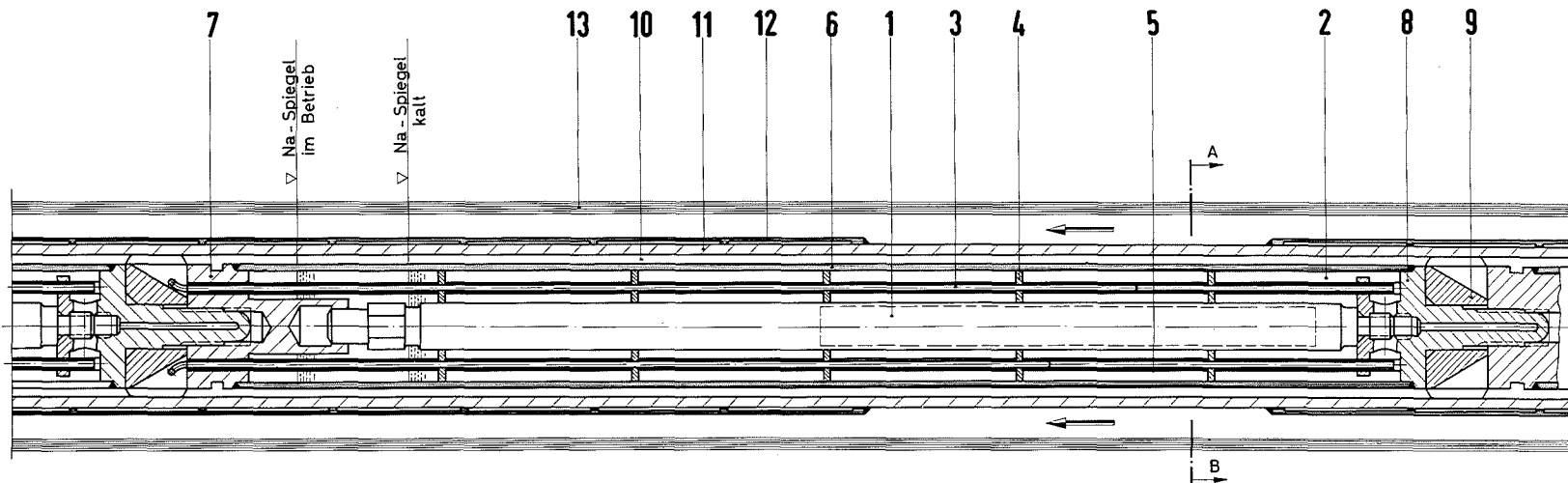
Für das vorstehend beschriebene Bestrahlungsexperiment wurden Einsätze des seit Anfang 1967 laufenden NaK-Blei-Wismut-Doppelkapseltypes eingesetzt /8/. Nach Bewährung in Versuchsgruppe 3, 4a und 4b wurde dieser Kapseltyp für die Versuchsgruppe 5a voll übernommen.

Der Aufbau der Bestrahlungskapsel ist der folgende (Abb. 11): Der Brennstab befindet sich in einer Edelstahlkapsel von 20 mm Außendurchmesser und 1 mm Wandstärke. Der Ringspalt zwischen Prüfling und Kapsel ist mit NaK gefüllt. Drei solche NaK-Kapseln sitzen übereinander in einem ca. 3 m langen äußeren Zircaloy-2-Kapselrohr. Der 1,5 mm starke Spalt zwischen Innen- und Außenkapsel ist mit der eutektischen Blei-Wismut-Legierung ausgefüllt. Um eine starke Konvektion im NaK zu vermeiden, wurde dieses durch Einbau von 2 dünnwandigen Edelstahl-Zwischenrohren in 3 radiale Zonen unterteilt. Die Zwischenrohre haben Durchmesser von 10 bzw. 14 mm, sie sind innerhalb bzw. außerhalb der Thermoelement-Tauchrohre angeordnet. In Abb. 12 ist der gesamte Kapselaufbau in schematischer Darstellung gezeigt.

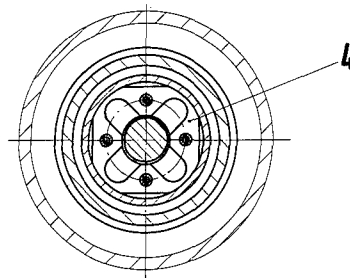
Es kamen 3 Kapselversuchseinsätze zur Verwendung, nämlich KVE-72, -73 und -74. Sie enthielten jeweils 3 Prüflinge (von oben nach unten Type S-S-R) und unten eine Blindprobe.

6.2 Bestrahlungspositionen im FR 2

Die 3 Kapselversuchseinsätze wurden im FR 2 auf verschiedenen Isotopen- und Brennelement-Positionen bestrahlt. Abb. 13 zeigt eine Positionskarte des FR 2-Kernes. In Tabelle 10 sind die Bestrahlungspositionen während der einzelnen Reaktorzyklen sowie die Bestrahlungsdauer und die Zwischenabschaltungen näher bezeichnet. Die Versuchseinsätze wurden in den Abschaltphasen des Reaktors je nach den gewünschten Bestrahlungsdaten auf diesen Positionen umgesetzt.



Schnitt A-B



- 1 Brennstabsprüfling mit Spaltgasplenum 7,4 mm Can^ϕ
- 2 Na- bzw. NaK-Spalt 5,3mm dick
- 3 Thermoelement 1mm^ϕ in Fingerhutröhrchen
- 4 Zentrierplatten
- 5 Distanzhalter
- 6 Edelstahlkapsel 20mm^ϕ x1 mm Wand
- 7 Endstopfen
- 8 Na - Einfüllstopfen
- 9 Zwischenstück
- 10 Pb-Bi- Spalt 1,5mm dick
- 11 Äußere Kapsel 26mm^ϕ x 1,5mm Wand
- 12 Wärmedämmung
- 13 Wasserführungsrohr 40mm^ϕ x 2mm Wand

Abb. 11

Teil	Stück	Benennung				Werkstoff	Abmessung	Zeichnungs-Nr. Norm				Bemerkung	
		~	▽	▽▽	▽▽▽			Skizze	Skizze	Skizze	Skizze		
Fluchtlinie	mm	1000	40	10	4	1,6	Freimaßtoleranz	± 0,1	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,0
1966	Tag	Name		Werkstoff		Gesellschaft für Kernforschung m. b. H. 7500 Karlsruhe Postfach 947		Zugeh. Zeichn.					
gepr.	23.9.	Name		Werkstoff		7500 Karlsruhe Postfach 947		Ersatz für					
gepr.		Name		Werkstoff		7500 Karlsruhe Postfach 947		Ersatz durch					
Modell	Benennung	Ausschnitt aus der komb. Na-Pb/Bi-Kapsel				Zeichnungs-Nr. IREZ- PSB 41.06-2-2003							
2:1													

Für eine Zeichnung haben wir uns nicht bemüht, weil wir nur für die
 Ausführung der Zeichnung verantwortlich sind. Die Zeichnung ist
 weder in der Form der Fertigung, noch in der Ausführung der
 Zeichnung, noch in der Ausführung der Zeichnung, noch in der
 Ausführung der Zeichnung, noch in der Ausführung der Zeichnung.
 Diese Zeichnung ist eine Kopie der Originalzeichnung.

Prüfung	Abmaß

Druck	Zeichner	Änderung	Tag	Name

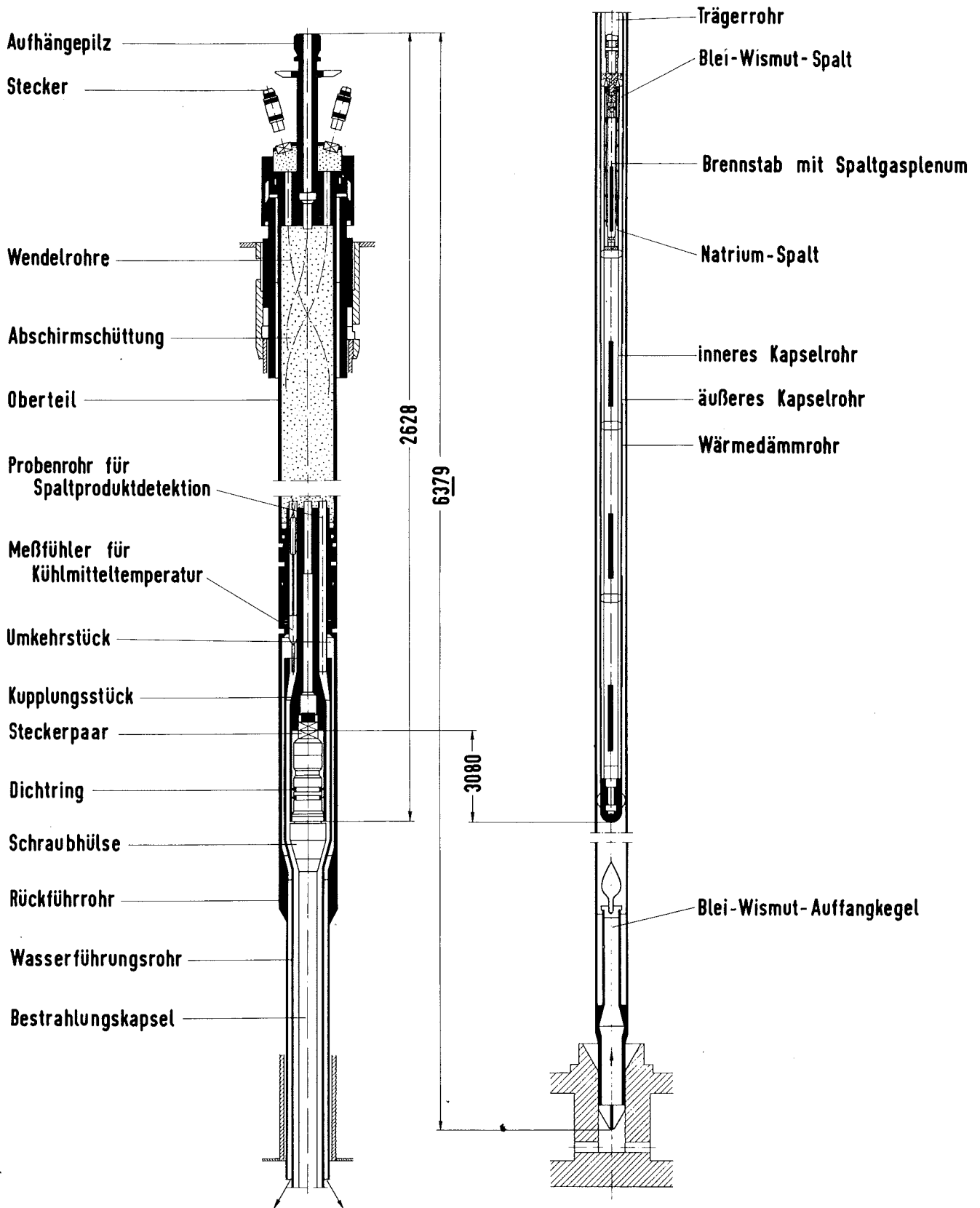


Abb. 12 Schematische Darstellung des FR 2-Kapselversuchseinsatzes

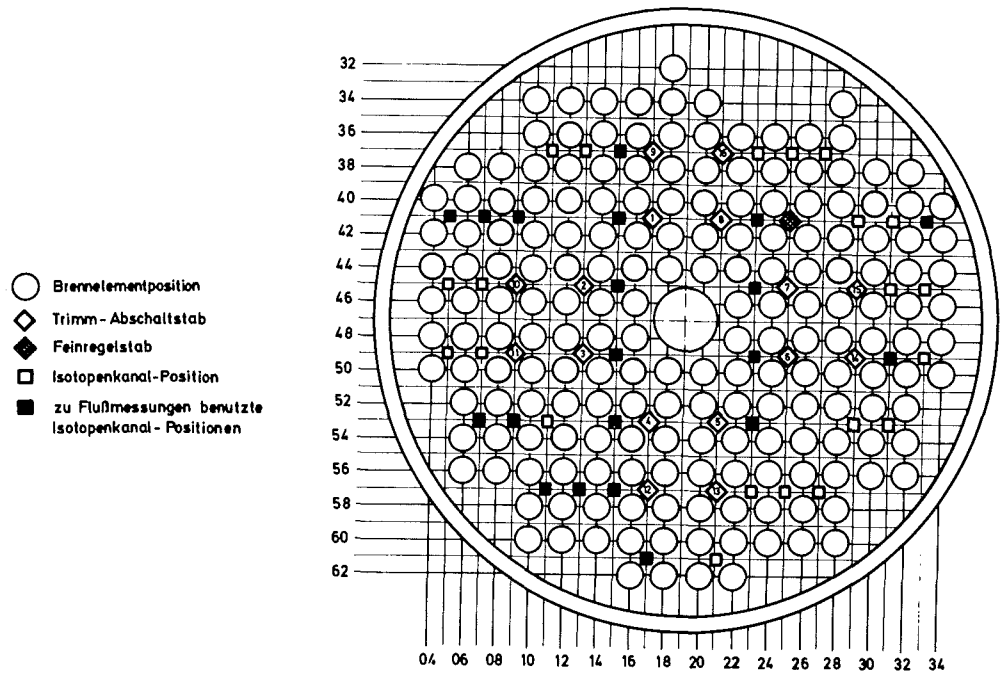


Abb. 13 Positionskarte FR 2 - Core

Tabelle 10: Bestrahlungspositionen der Kapselversuchseinsätze

	Jahr	1 9 7 0							1 9 7 1		
		D	E	F	G	H	I	K	A	B	C
FR 2- Betrieb	Zyklus										
	Volllast- tage	32,9	29,2	29,4	29,7	29,5	27,7	15,0	29,8	23,1	29,7
	SS	2	2	2	0	1	3	0	4	1	0
	A	3	0	1	1	0	0	2	0	1	2
Bestrahlungs- position	KVE 72	37 23									
	KVE 73	45 33	37 23	37 23							
	KVE 74	37 27	37 27	37 27	37 25	37 25	37 25	37 25	37 25	50 22	50 22

SS = Schnellschluß

A = Abschaltung anomal

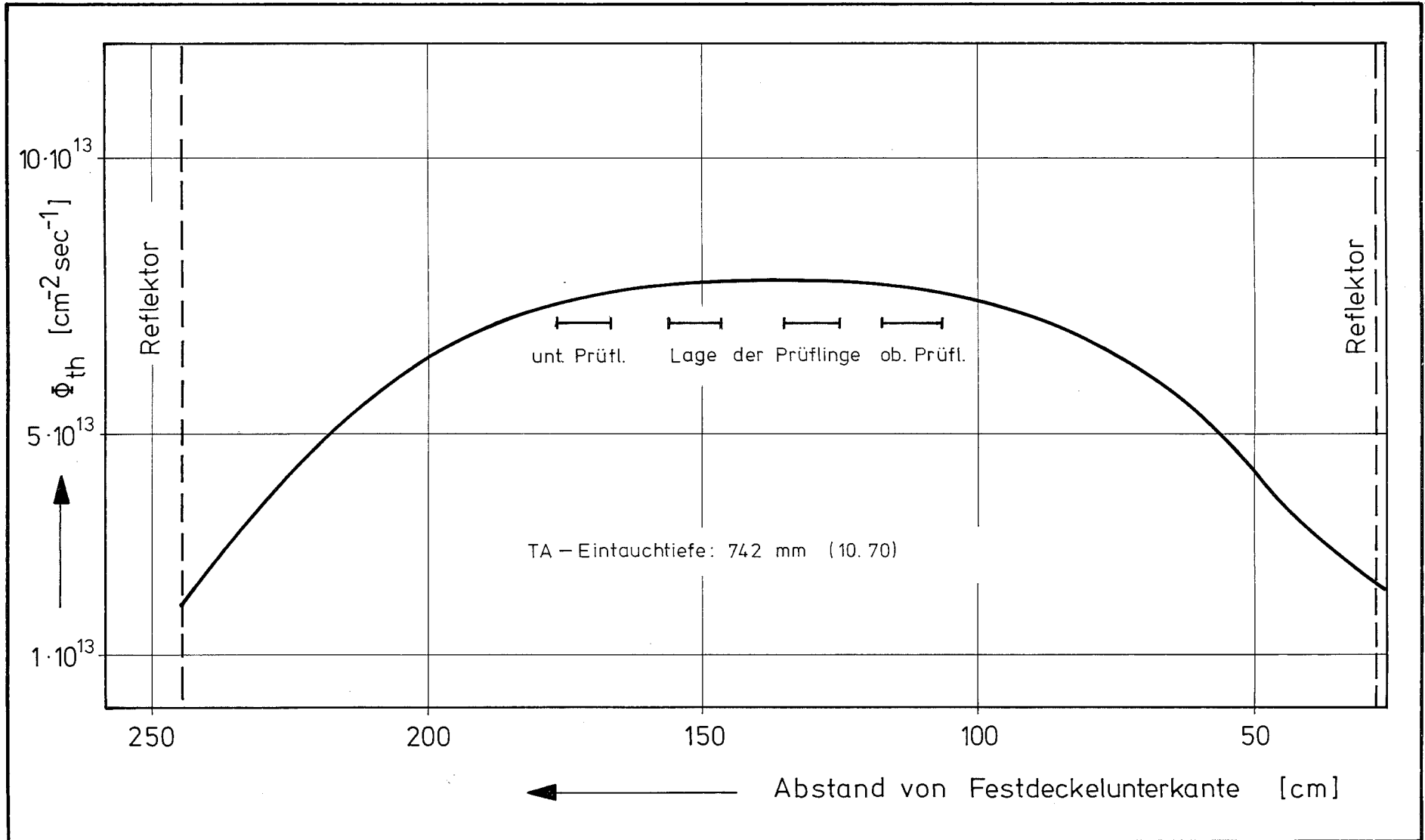
7. Ablauf der Bestrahlung

7.1 Reaktorzyklen und Neutronenfluß

Die Bestrahlung der Prüflinge begann mit dem Einsatz der KVE 72, 73 und 74 am 20.4.1970 im FR 2-Zyklus D/1970 und endete mit dem Ausbau von KVE 74 am 3.5.1971 nach Zyklus C/1971. Wie aus Tabelle 10 hervorgeht wurde KVE 72 in 1 Reaktorzyklus, KVE 73 in 3 Zyklen und KVE 74 in 10 Zyklen bestrahlt. Während jedes einzelnen Zyklus fanden 1 bis 5 nicht geplante Reaktorabschaltungen statt.

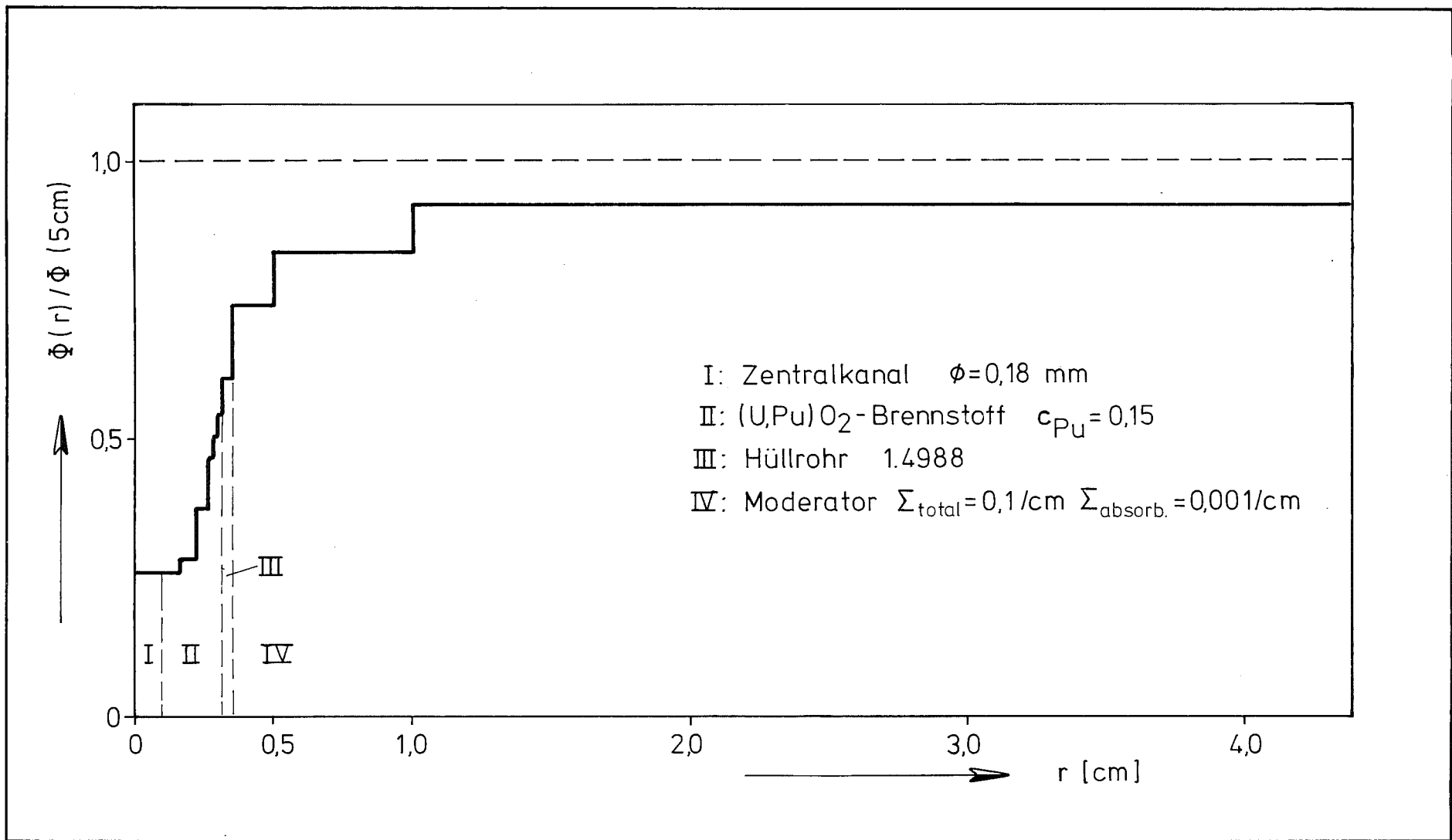
Der Neutronenfluß in den Bestrahlungspositionen der Prüflinge ist nicht sehr genau bekannt. Die thermischen Neutronenflüsse im FR 2 wurden von Zeit zu Zeit in einzelnen Isotopenkanalpositionen mit Co-Sonden gemessen /6/. Für die Jahre 1967 bis 1971 sind diese Messungen in /4/ in Bezug auf die Prüflinge in Kapselversuchseinsätzen näher ausgewertet. Im Oktober 1970 wurde z.B. eine Flußmessung im Isotopenkanal 49/15 durchgeführt. Der axiale Flußverlauf ist in Abb. 14 wiedergegeben. Es ist hierbei zu beachten, daß der untere Prüfling in der Kapsel-Versuchsgruppe 5a durch eine Blindprobe ersetzt ist. Die 3 Prüflinge eines KVE standen offensichtlich in einem weitgehend identischem thermischen Neutronenfluß. Die absolute Höhe des ungestörten Flusses schwankte (je nach Bestrahlungsposition und Zyklus) etwa zwischen $5 \cdot 10^{13}$ und $8 \cdot 10^{13}$ n/cm² sec.

Der Neutronenfluß in den Prüflingen selbst ist infolge der Flußabschwächung durch die Bestrahlungskapsel deutlich niedriger. Entgegen den Annahmen bei der Auslegung des Versuches (siehe Kapitel 3) beträgt diese Flußabsenkung nach neuesten Rechnungen mit dem Programm MERKUR /9/ etwa 50 %. In Abb. 15 ist der radiale Flußverlauf um einen Brennstab unter Berücksichtigung des Kapseleinflusses angegeben.



Vertikaler Verlauf des thermischen Flusses
Isotopenkanal 49/15

Abb. 14



Radialer Flußverlauf um einen Brennstab
im Isotopenkanal des FR 2

Abb. 15

7.2 Bestrahlungstemperatur

Die hier verwendeten NaK/PbBi-Doppelkapseln sind mit 7 Ni/CrNi-Thermoelementen ausgestattet, welche zur Messung der NaK-Temperatur bei verschiedenen Höhen der Prüflinge dienen. Tabelle 11 gibt die Position der Thermoelemente in einem KVE an. Die Meßergebnisse für KVE 72, 73 und 74 sind in den Abb. 16, 17 und 18 für die ganze Bestrahlungszeit wiedergegeben.

Aus diesen Meßwerten werden normalerweise die Hülloberflächentemperatur sowie die Stabileistung der Prüflinge ermittelt.

Es zeigte sich jedoch schon nach einer Einsatzzeit von wenigen Tagen (KVE 72, Prüflinge 5A/5 und 5A/2), daß die hier eingesetzten Thermoelemente stark in der EMK abfielen. Ähnliches wurde auch für KVE 73 beobachtet, während die Thermoelemente für KVE 74 durchwegs vernünftige Werte lieferten. Die Nachuntersuchung der defekten Thermoelemente erbrachte das Ergebnis /10/, daß der Isolationswiderstand auf Null abgefallen war. Eine metallografische Nachuntersuchung des Thermoelement-Adernmaterials zeigte eine starke Grobkornbildung infolge Rekristallisation.





Wegen der teilweise sehr großen Unsicherheit in den Temperaturmeßwerten ist es hier notwendig, einige plausible Annahmen zu machen:

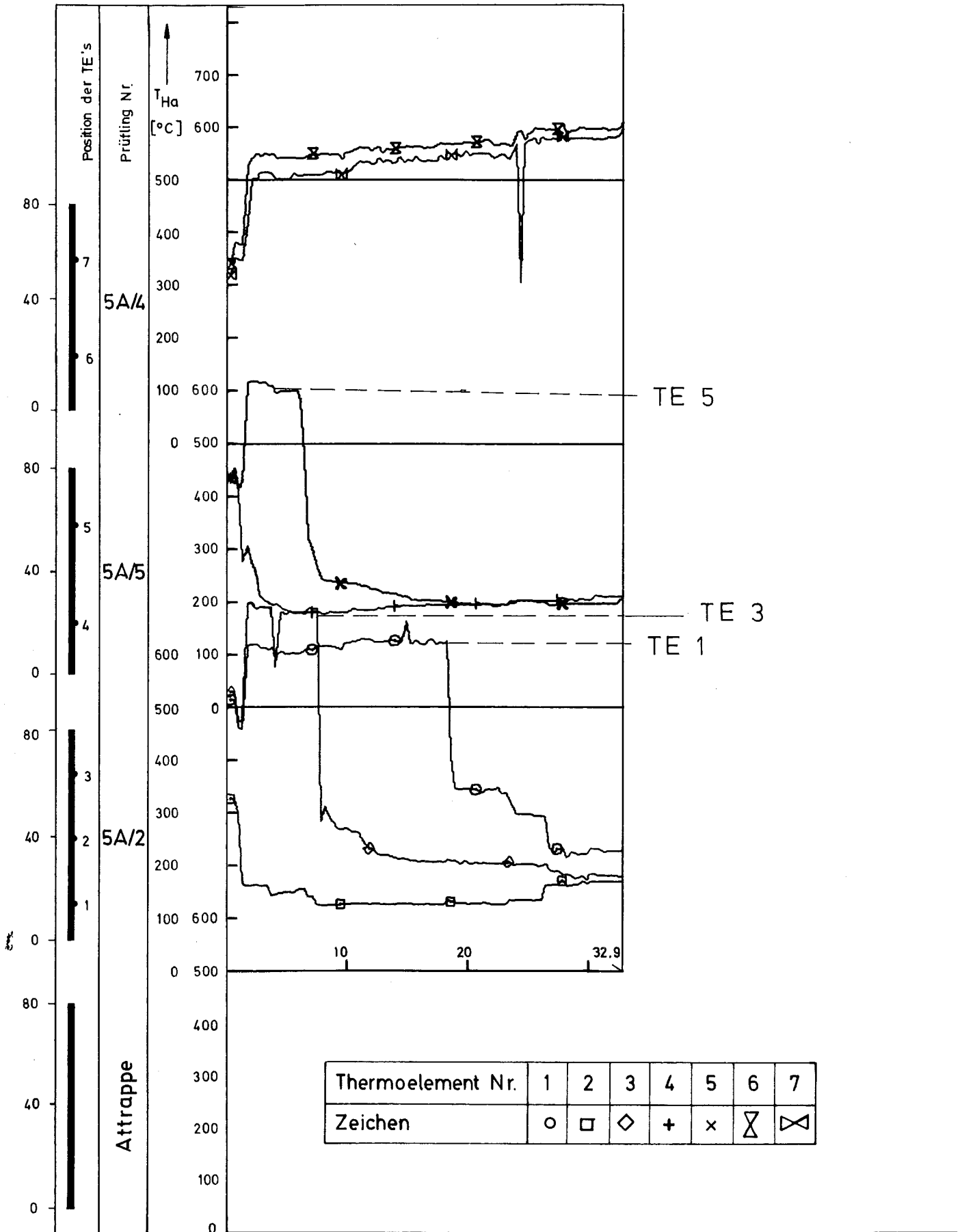
- Bei der weiteren Auswertung werden diejenigen Thermoelementmeßwerte nicht berücksichtigt, die unverständlich niedrige Temperaturen liefern.
- Bei mehreren Meßwertkurven für einen Prüfling im erwarteten Temperaturbereich werden jeweils die höheren Temperaturen als die zutreffenden angenommen. Wir gehen dabei davon aus, daß Abweichungen nach unten durch Positionsverschiebungen der Thermoelementspitze verursacht wurden.
- Bei denjenigen Prüflingen, die überhaupt keine verlässliche Temperaturmessung aufweisen, wurden Werte von Nachbarprüflingen in der gleichen Kapsel extrapoliert.

Mit diesen Annahmen und Voraussetzungen wurde in Tabelle 12 eine Liste der Hülloberflächentemperaturen aufgestellt, gegliedert nach Prüflingen und Reaktorzyklen. Diese Temperaturen werden auch der Berechnung der Stabileistung zugrundegelegt.

Tabelle 11:

Instrumentierungsplan in einem KVE

Prüflings- position		Position der Thermoelemente	
		TE-Nr.	Abstand vom unteren Ende der Brennstoffsäule
	oben	7	60 mm
		6	22 mm
	mitte	5	60 mm
		4	22 mm
	unten	3	65 mm
		2	40 mm
		1	15 mm
	Attrappe		



(unten)
Kapsel
Typ
4a(Nak)

Bestrahlungszeit [Vollasttage] →

Abb.16 Kapselversuchsgruppe 5a KVE 72 Blatt1 von 1
Hüloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

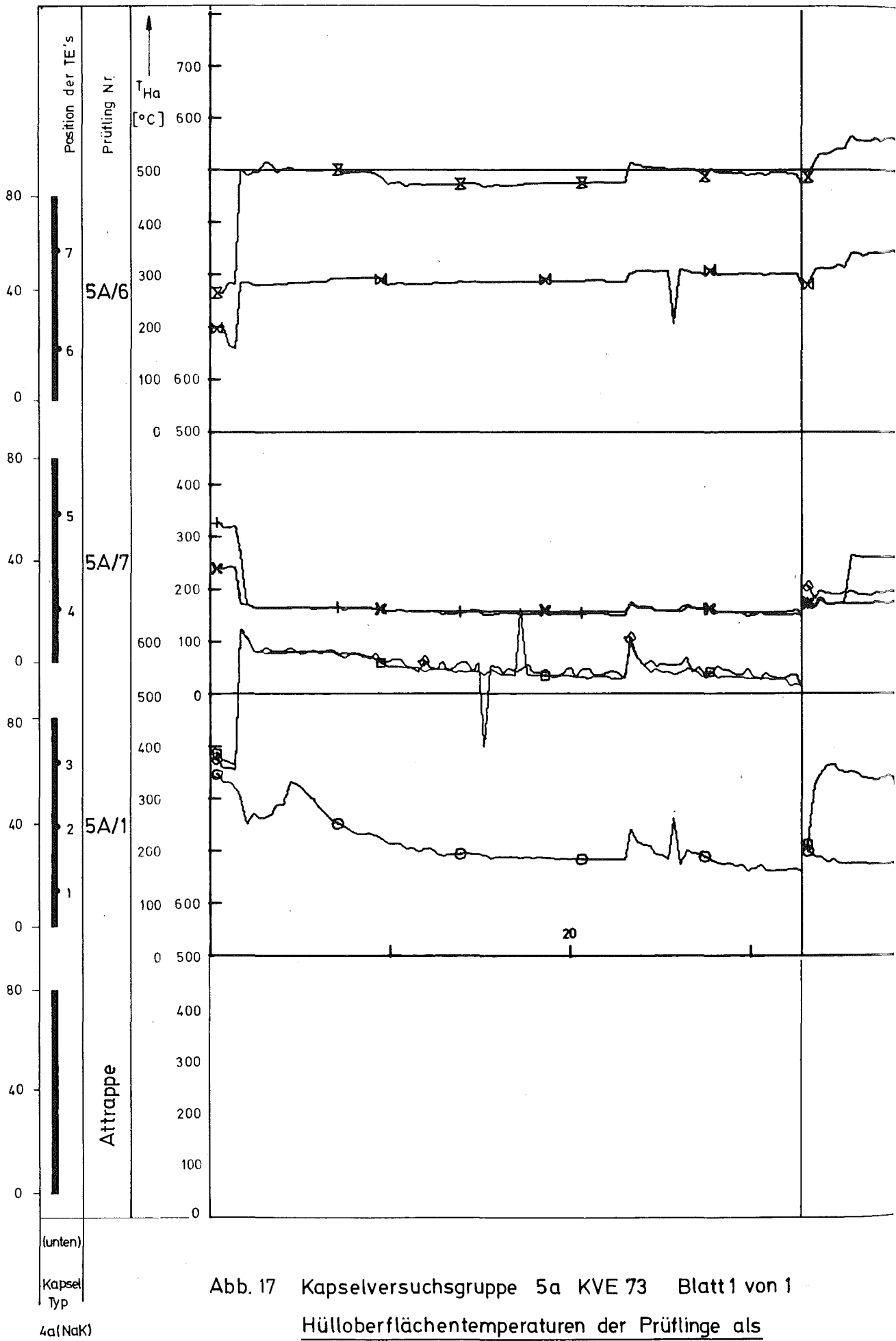
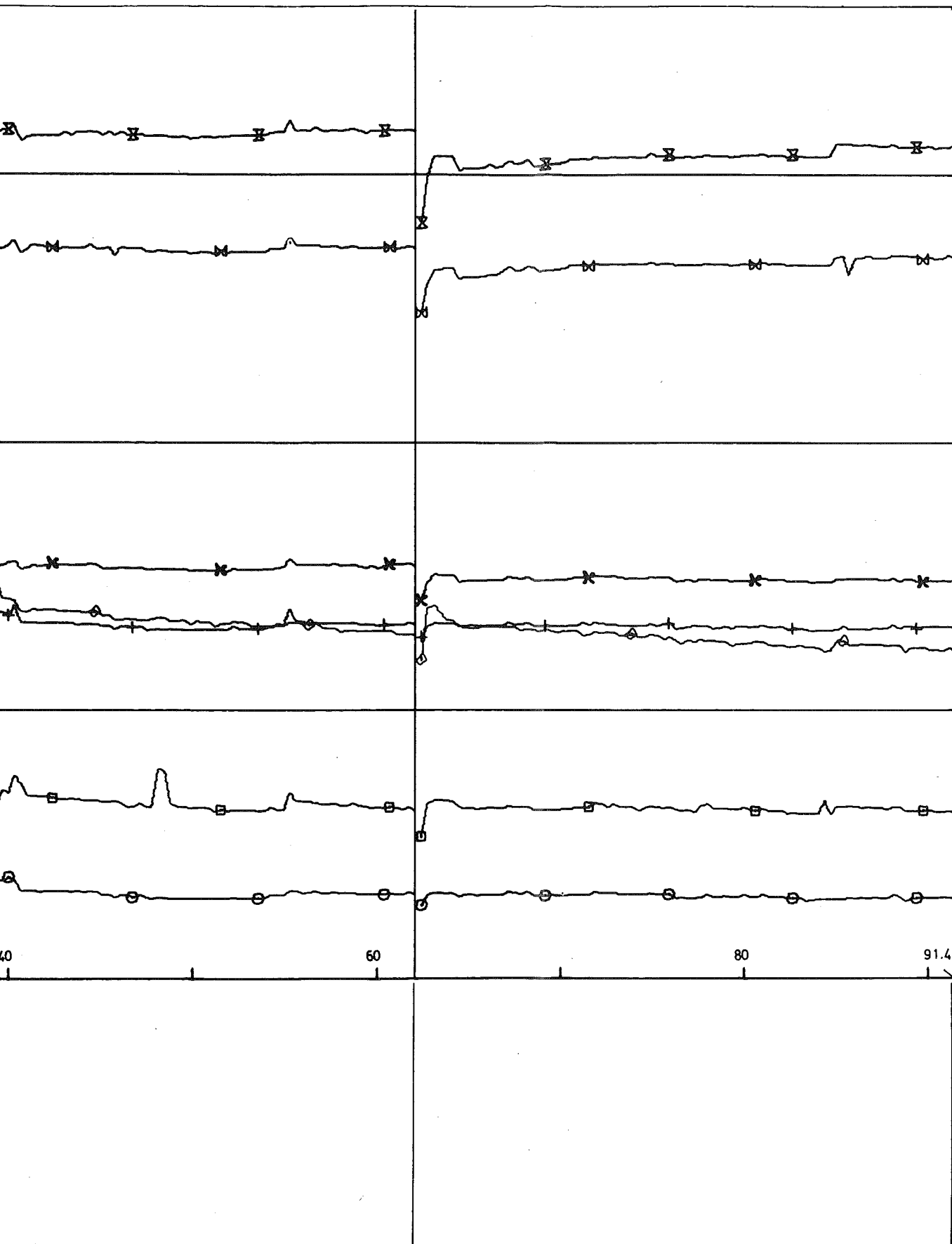


Abb. 17 Kapselversuchsgruppe 5a KVE 73 Blatt 1 von 1
Hülloberflächentemperaturen der Prüflinge als Funktion der Zeit



Bestrahlungszeit [Vollsttage] →

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

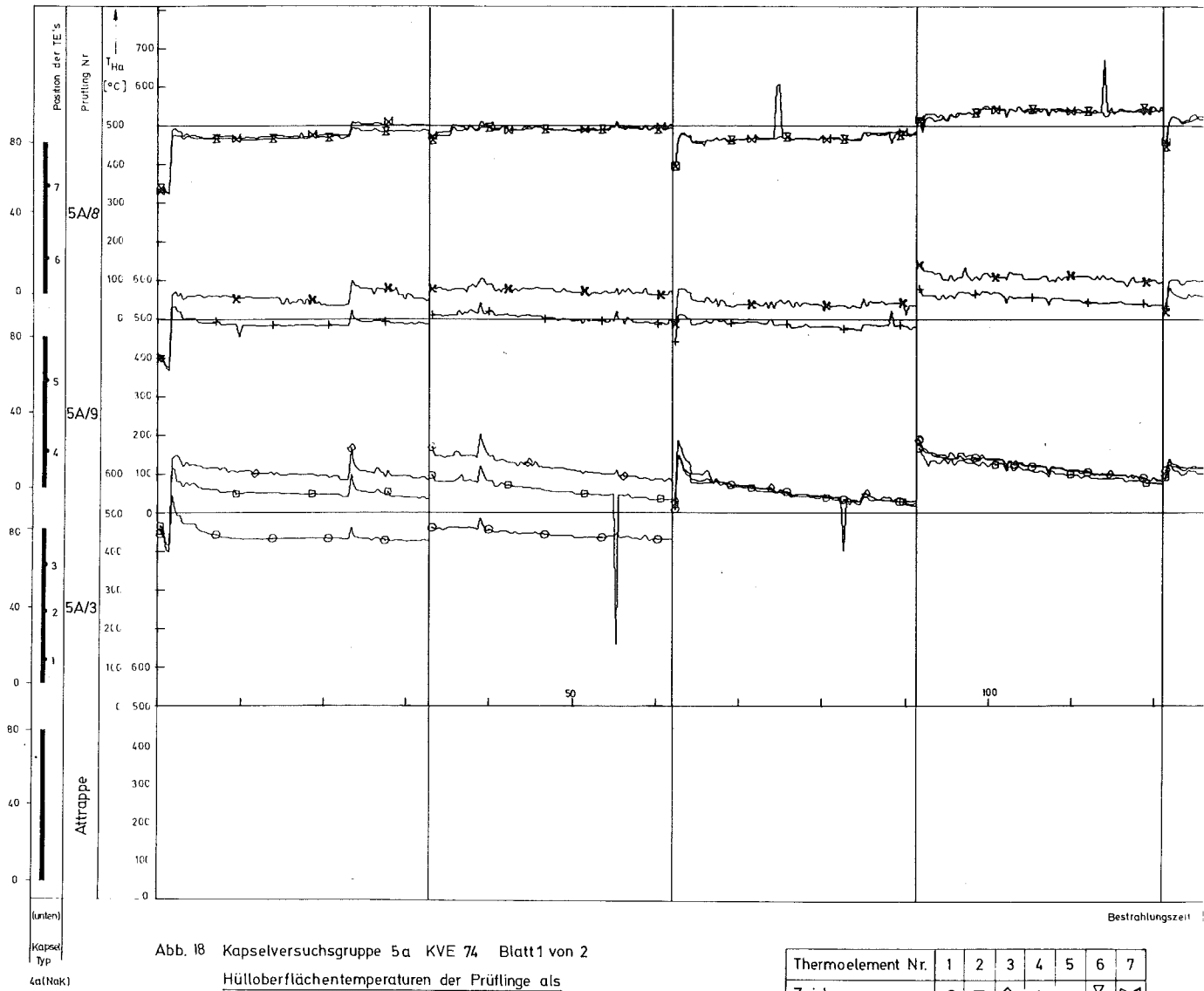
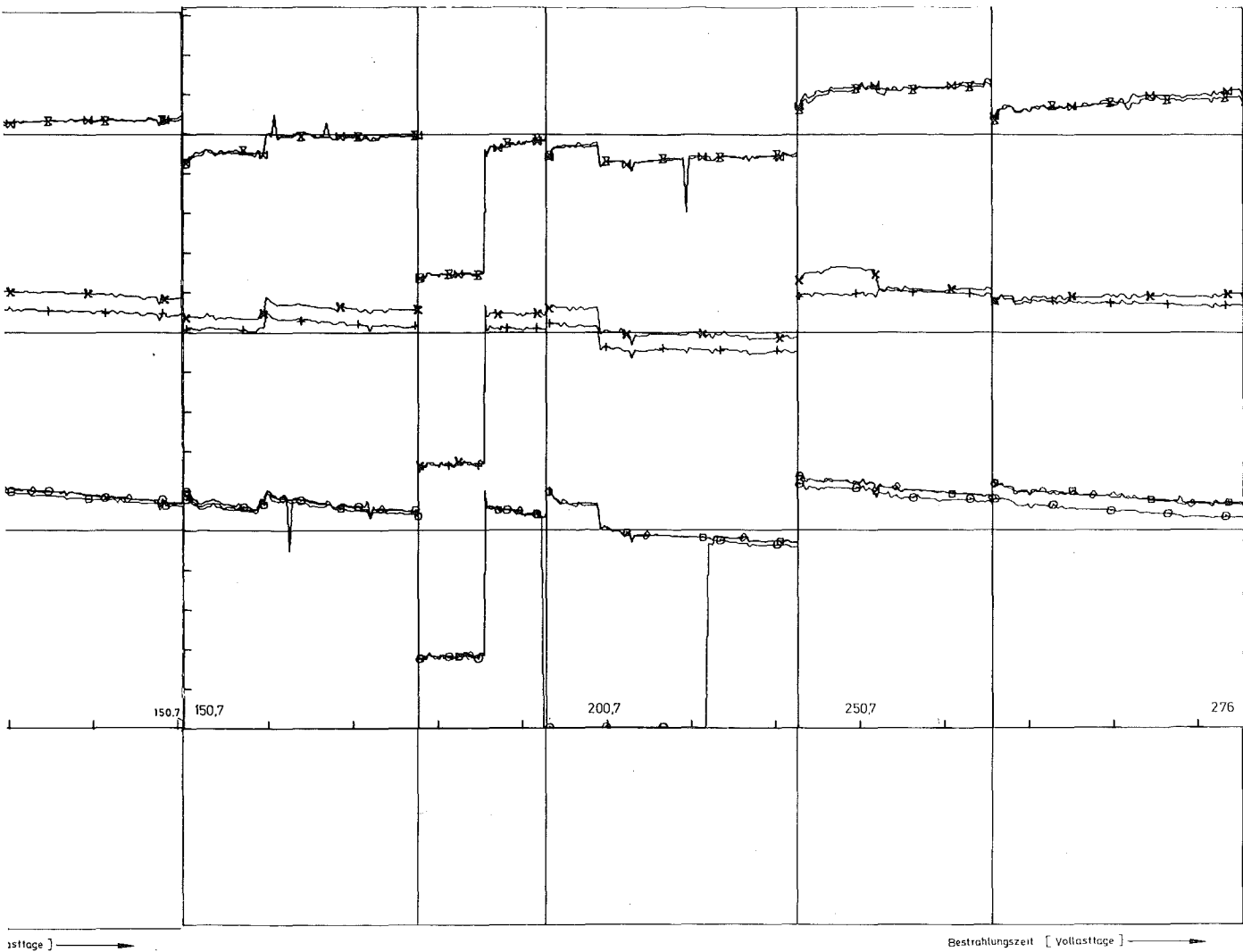


Abb. 18 Kapselversuchsgruppe 5a KVE 74 Blatt 1 von 2
Hüloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

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



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

Tabelle 12: Anfangs- und Endtemperatur der Prüflinge an der Hüll-
außenwand

		Jahr	1 9 7 0						1 9 7 1			
		Zyklus	D	E	F	G	H	I	K	A	B	C
KVE	Prüfling Nr.	Temperatur (°C)										
72	5A/4	T _{Anfang} T _{Ende}	510 610									
	5A/5	T _A T _E	600 ¹⁾									
	5A/2	T _A T _E	600 ¹⁾									
73	5A/6	T _A T _E	500 ¹⁾	550 590	510 560							
	5A/7	T _A T _E	560 ¹⁾	670 ¹⁾	650 ¹⁾							
	5A/1	T _A T _E	530 590	700 650	680 630							
74	5A/8	T _A T _E	480 490	490 500	470 480	520 530	530 550	460 500	140 ⁺ 490	460	590 640	540 600
	5A/9	T _A T _E	570 550	580 570	550 530	620 600	600 590	550 570	160 ⁺ 550	550 490	640 600	580 590
	5A/3	T _A T _E	620 590	650 610	610 540	660 590	620 580	590 530	180 ⁺ 550	610 480	620 600	610 580

+ Reaktor nur auf 12 MW Leistung in der ersten Hälfte von Zyklus K

1) Diese Werte sind extrapoliert aus den Temperaturwerten der Nachbarprüflinge, Genauigkeit etwa $\pm 50^{\circ}\text{C}$

7.3 Stableistung

Zur Ermittlung der Stableistung verwenden wir ein für die Bestrahlungskapsel aufgestelltes Nomogramm. Abb. 19 liefert den Zusammenhang zwischen Hülloberflächentemperatur und Stableistung. Ausgehend von der Temperaturliste in Tabelle 12 werden damit die Stableistungen für die einzelnen Prüflinge in den jeweiligen Reaktorzyklen ermittelt, siehe Zusammenstellung in Tabelle 13. Die Genauigkeit dieser Angaben orientiert sich an den Unsicherheiten der Temperaturbestimmung. Eine Temperaturschwankung von ± 25 °C entspricht einer Schwankung in der Stableistung um ebenfalls etwa ± 25 W/cm.

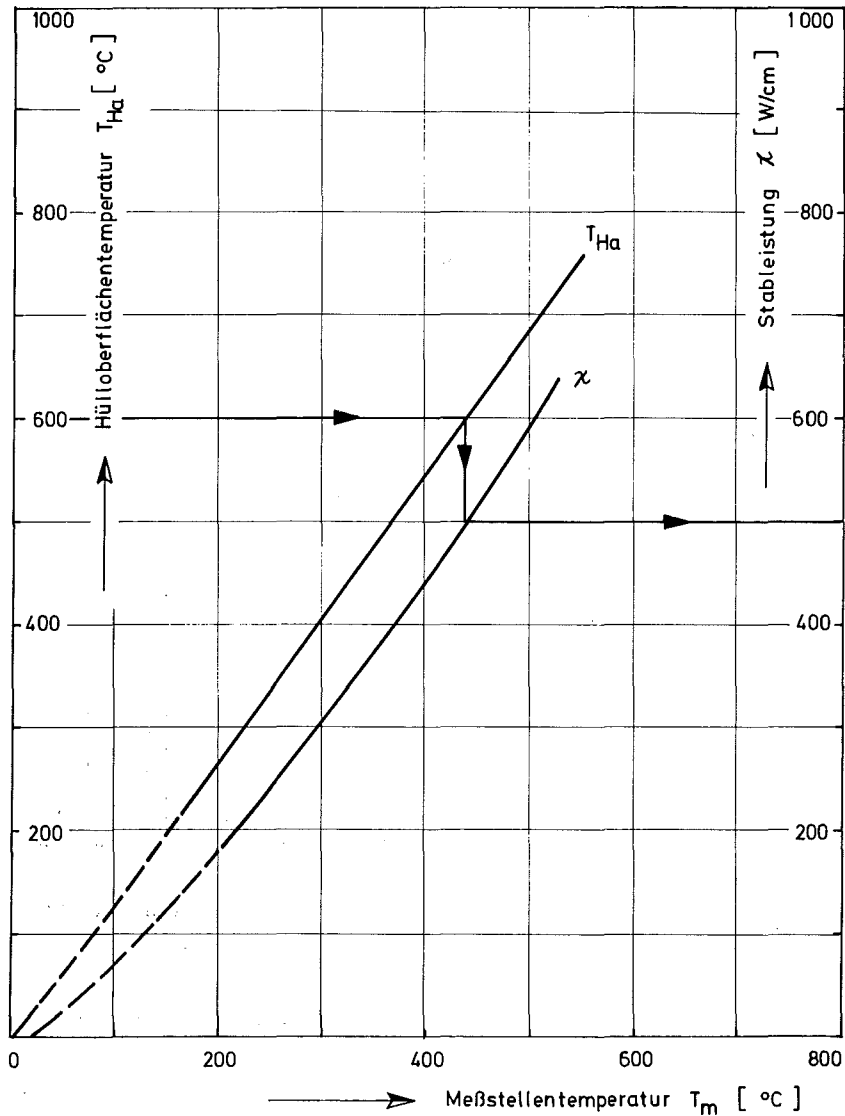


Abb. 19 Temperatur-Stableistungscharakteristik
Kapseltyp 4a (NaK)

Tabelle 13: Stableistung der Prüflinge am Anfang und Ende des Zyklus

KVE	Prüfling Nr.	Stablei- stung (W/cm)	Jahr		1 9 7 0						1 9 7 1		
			Zyklus	D	E	F	G	H	I	K	A	B	C
72	5A/4	χ_{Anfang}	405										
		χ_{Ende}	505										
	5A/5	χ_{A} χ_{E}	500										
73	5A/6	χ_{A}	395	440	405								
		χ_{E}		485	455								
	5A/7	χ_{A} χ_{E}	455	575	550								
74	5A/8	χ_{A}	378	388	368	420	425	360	80 ⁺	360	485	430	
		χ_{E}	388	395	378	425	440	395	388		540	500	
	5A/9	χ_{A} χ_{E}	465 440	480 465	440 425	510 500	500 485	440 465	95 ⁺ 440	440 388	540 500	480 485	
74	5A/3	χ_{A}	523	555	505	567	523	485	115 ⁺	505	523	505	
		χ_{E}	485	505	435	485	480	425	440	378	500	480	

+ Reaktor nur auf 12 MW Leistung

7.4 Bestrahlungszeit und Abbrand

Die Bestrahlungszeiten in den einzelnen Reaktorzyklen gehen aus den Protokollen des FR 2-Betriebes hervor. Sie sind hier in Tabelle 14 angegeben. Der Abbrand A wird auf zweierlei Weise bestimmt, nämlich mit einer kalorimetrischen und mit einer radiochemischen Methode.

Der kalorimetrischen Bestimmung liegt die Beziehung zugrunde:

$$A = \frac{\bar{\chi} \cdot t}{\bar{g} \cdot \pi R^2}$$

Als mittlere Stableistung $\bar{\chi}$ für einen Reaktorzyklus wird hier nach Tabelle 13 der Mittelwert aus Anfang und Ende eines Zyklus gebildet. Die Bestrahlungszeit t geht aus Tabelle 14 hervor. Die mittlere Brennstoffdichte \bar{g} eines Prüflings wird aus der jeweiligen Liste der Tablettensäule in Anhang III errechnet. Der Brennstoffradius ist bei allen Tablettensäulen praktisch konstant, nämlich $R = 0,306$ cm. Die Ergebnisse sind in Tabelle 15 zusammengefaßt.

Die radiochemische Abbrandbestimmung erfolgte an einem Prüfling je Bestrahlungseinsatz. Die hierfür vorgenommene Bestimmung des Spaltproduktes Ce-144 führte durchwegs zu höheren Abbrandbeträgen.

In Tabelle 16 sind die kalorimetrisch und radiochemisch bestimmten Abbrandwerte zusammengestellt. Die kalorimetrischen Abbrände der Prüflinge 5A/6 und 5A/8 sind wahrscheinlich zu niedrig. Sie können eigentlich nur um etwa 5 % niedriger sein als ihre Nachbarprüflinge im gleichen Versuchseinsatz. Der radiochemische Wert für Prüfling 5A/4 ist sicher viel zu hoch. Aufgrund der Bestrahlungszeit müßte dieser Prüfling (z.B. im Vergleich zu den Prüflingen in KVE 73) durchwegs mit einer Stableistung von ca. 700 W/cm betrieben worden sein, was sicher auszuschließen ist. Aus diesen Überlegungen leiten wir für die übersichtsweise Beurteilung wahrscheinliche Abbrandwerte her, die in der letzten Spalte von Tabelle 16 angeführt sind.

Tabelle 14: Bestrahlungszeit

Nr.	FR 2-Zyklus		Bestrahlungszeit t (Vollasttage)		
	Bez.	Beginn	KVE 72	KVE 73	KVE 74
33	D/1970	20.04.70	32,9	32,9	32,9
34	E	01.06.70		29,2	29,2
35	F	13.07.70		29,4	29,4
36	G	17.08.70			29,7
37	H	21.09.70			29,5
38	I	26.10.70			27,7
39	K	14.12.70			15,0
40	A/1971	18.01.71			29,8
41	B	22.02.71			23,1
42	C	29.03.71			29,7
S u m m e KVE			32,9	91,5	276,0

Tabelle 15: Kalorimetrische Abbrandwerte in MWd/kg M

KVE	Prüfl. Nr.	Mittlere Dichte $\bar{\rho}$ (%th.D.)	Jahr		1 9 7 0						1 9 7 1			
			Zyklus		D	E	F	G	H	I	K	A	B	C
					32,9	29,2	29,4	29,7	29,5	27,7	15,0	29,8	23,1	29,7
72	5A/4	88,34	5,21											
	5A/5	88,46	5,72											
	5A/2	87,99	5,75											
73	5A/6	88,56	4,51	4,69	4,39									
	5A/7	88,73	5,19	5,82	5,60									
	5A/1	87,85	5,24	5,93	5,68									
74	5A/8	88,89	4,36	3,95	3,79	4,34	4,42	3,61	1,61	3,71	4,09	4,78		
	5A/9	89,09	5,13	4,76	4,38	5,18	5,02	4,33	1,83	4,26	4,15	4,95		
	5A/3	88,20	5,78	5,40	4,82	5,45	5,15	4,40	1,89	4,58	4,12	5,10		

Tabelle 16: Abbrand der Prüflinge

K V E	Prüfling	A b b r a n d i n M W d / k g M		wahrscheinlicher Wert
		kalorimetrisch ⁺⁾	radiochemisch	
72	5A/4	5,21	8,72	6
	5A/5	5,78		
	5A/2	5,75		
73	5A/6	13,59	16,95	17
	5A/7	16,61		
	5A/1	16,85		
74	5A/8	38,66	49,08	47
	5A/9	44,00		
	5A/3	46,69		

⁺⁾ Dies sind mittlere Abbrände, die aus einer über die einzelnen Zyklen gemittelten Stableistung bestimmt wurden.

8. Zerstörungsfreie Nachuntersuchung

Nach dem Ausbau der Prüflinge aus dem Versuchseinsatz wurden diese in den Heißen Zellen routinemäßig einer visuellen Inspektion unterzogen. Es zeigte sich, daß jeweils die mittleren Prüflinge der KVE 72 und 74 etwa in der Mitte der aktiven Brennstofflänge durchgeschmolzen waren (Abb. 20 und 21).

8.1 Äußere Vermessung

Die Prüflingslänge wurde vor und nach der Bestrahlung gemessen, Meßwerte siehe Tabelle 17. Die Prüflinge sind im Laufe der Bestrahlung geringfügig kürzer geworden. Der Stabdurchmesser wurde vor und nach der Bestrahlung über Wendelschriebe bestimmt. Es ergab sich durchwegs eine leichte Zunahme in den über die Stablänge gemittelten Werten von 0,06 bis 0,42 %.

Tabelle 17: Stabvermessung

KVE	Prüfl.	Stablänge l ohne Gewindezapfen		Differenz Δl (mm)	Mittlere Zunahme des Durchmessers (%)
		vor Bestrahlung (mm)	nach Bestrahlung (mm)		
72	5A/4	166,78	166,74	- 0,04	0,16
	5A/5	166,56	(durchgeschmolzen)		
	5A/2	166,60	166,47	- 0,13	0,09
73	5A/6	166,70	166,70	0	0,06
	5A/7	166,57	166,54	- 0,03	0,07
	5A/1	166,70	166,67	- 0,03	0,13
74	5A/8	166,83	166,78	- 0,05	0,14
	5A/9	166,78	(durchgeschmolzen)		
	5A/3	166,87	166,85	- 0,02	0,42

8.2 Dichtemessung

Von den Prüflingen wurde vor und nach der Bestrahlung die integrale Dichte durch Wägung an Luft bzw. in Flüssigkeit bestimmt. In Tabelle 18 werden die so gewonnenen Volumenveränderungen angegeben.

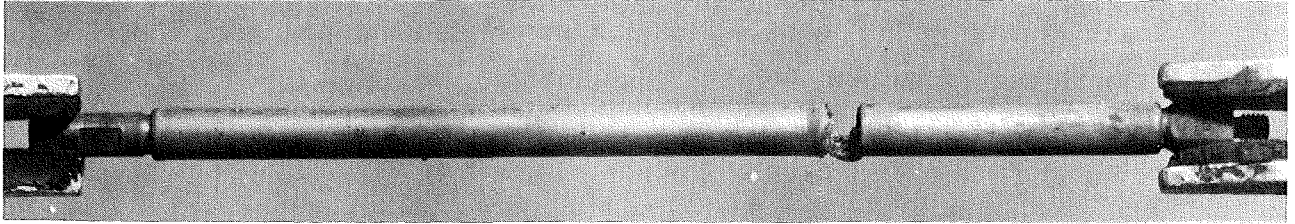


Abb. 20 Durchgeschmolzener mittlerer Prüfling 5A 5
in KVE 72

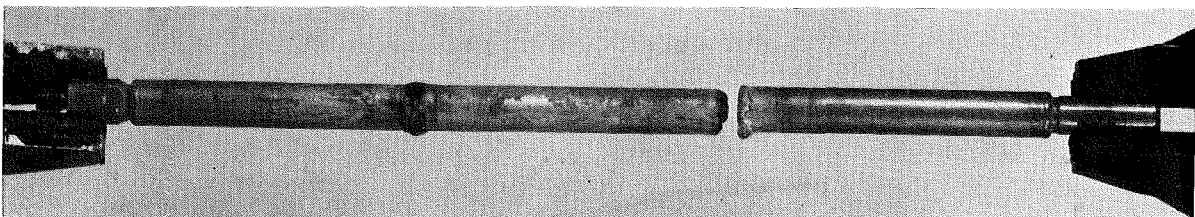


Abb. 21 Durchgeschmolzener mittlerer Prüfling 5A 9
in KVE 74

Tabelle 18: Dichte- und Volumenänderungen bei der Bestrahlung

KVE	Prüfling	D i c h t e ρ		V o l u m e n V	
		$\Delta\rho$ (g/cm ³)	$\Delta\rho$ (%)	ΔV (cm ³)	ΔV (%)
72	5A/4	- 0,044	- 0,61	+ 0,038	+ 0,61
	5A/2	- 0,044	- 0,61	+ 0,039	+ 0,62
73	5A/6	- 0,043	- 0,60	+ 0,037	+ 0,59
	5A/7	- 0,050	- 0,69	+ 0,043	+ 0,69
	5A/1	- 0,062	- 0,87	+ 0,054	+ 0,86
74	5A/8	- 0,015	- 0,21	+ 0,016	+ 0,26
	5A/3	- 0,039	- 0,54	+ 0,035	+ 0,56

8.3 Durchleuchtung

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

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

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

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

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 weisen in den Originalfilmen einen hohen Schwärzungsgrad auf. Sie sind damit nur unter Verlust einiger Details in der Zeichnung auf Fotopapier zu kopieren. Die in der Dokumentation dargestellten Aufnahmen sind daher in ihrer Bildqualität deutlich schlechter als die Original-Filme, die auch zur Beurteilung und Auswertung allein herangezogen wurden. Es wurde mittels dieser Filme die Länge der Brennstoffsäule ermittelt und mit der Original-Brennstoffsäulen-Länge verglichen (Tabelle 19). Man kann sowohl Säulenverlängerungen als auch -verkürzungen (-2,22 bis + 2,37 %) feststellen.

Tabelle 19: Längenänderung der Brennstoffsäulen

KVE	Prüf- ling Nr.	Summe der Tablettenhöhen (mm)	Länge aus der Betatron- Durchleuchtung nach der Bestrahlung (mm)	Längenänderung ΔL	
				(mm)	(%)
72	5A/4	80,1	78,9	- 1,2	- 1,49
	5A/5	durchgeschmolzen			
	5A/2	81,0	79,2	- 1,8	- 2,22
73	5A/6	80,2	79,7	- 0,5	- 0,62
	5A/7	79,9	80,2	+ 0,7	+ 0,87
	5A/1	80,1	81,0	+ 0,9	+ 1,12
74	5A/8	80,2	80,9	+ 0,7	+ 0,87
	5A/9	durchgeschmolzen			
	5A/3	80,1	82,0	+ 1,9	+ 2,37

8.4 Gamma-Profile und Gamma-Spektren

Zur Charakterisierung der Brennstoffsäulen hinsichtlich der Ribstruktur, des axialen Leistungsverlaufes, der Brennstoffverlagerung und der Spaltproduktwanderung wurden die Prüflinge gammaspektrometrisch 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.

Die Standard-Untersuchung wurde mit den Aufnahmen eines typischen Gamma-Spektrums begonnen. Dazu wurde ein Brennstoffsäulenbereich ausgewählt, der eine möglichst geringe Konzentrationsänderung an Spaltprodukten erwarten ließ. Gewöhnlich war dies etwa die Mitte der Brennstoffsäule. An Hand des Gamma-Spektrums wurden dann die besonderen Energiebereiche für bestimmte Gamma-Profile ausgewählt. Unabhängig von Gamma-Spektren wurde von jedem Prüfling ein integrales Profil aufgenommen, das die Gamma-Linien im weiten Bereich zwischen 400 keV und 1700 keV umfaßte.

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

Je nach Abklingdauer wurden weitere Nuklid-Profile zur Bestimmung der Spaltproduktwanderung vermessen. Es waren dies insbesondere Profile für Cs/Ba-137 und Ru-106.

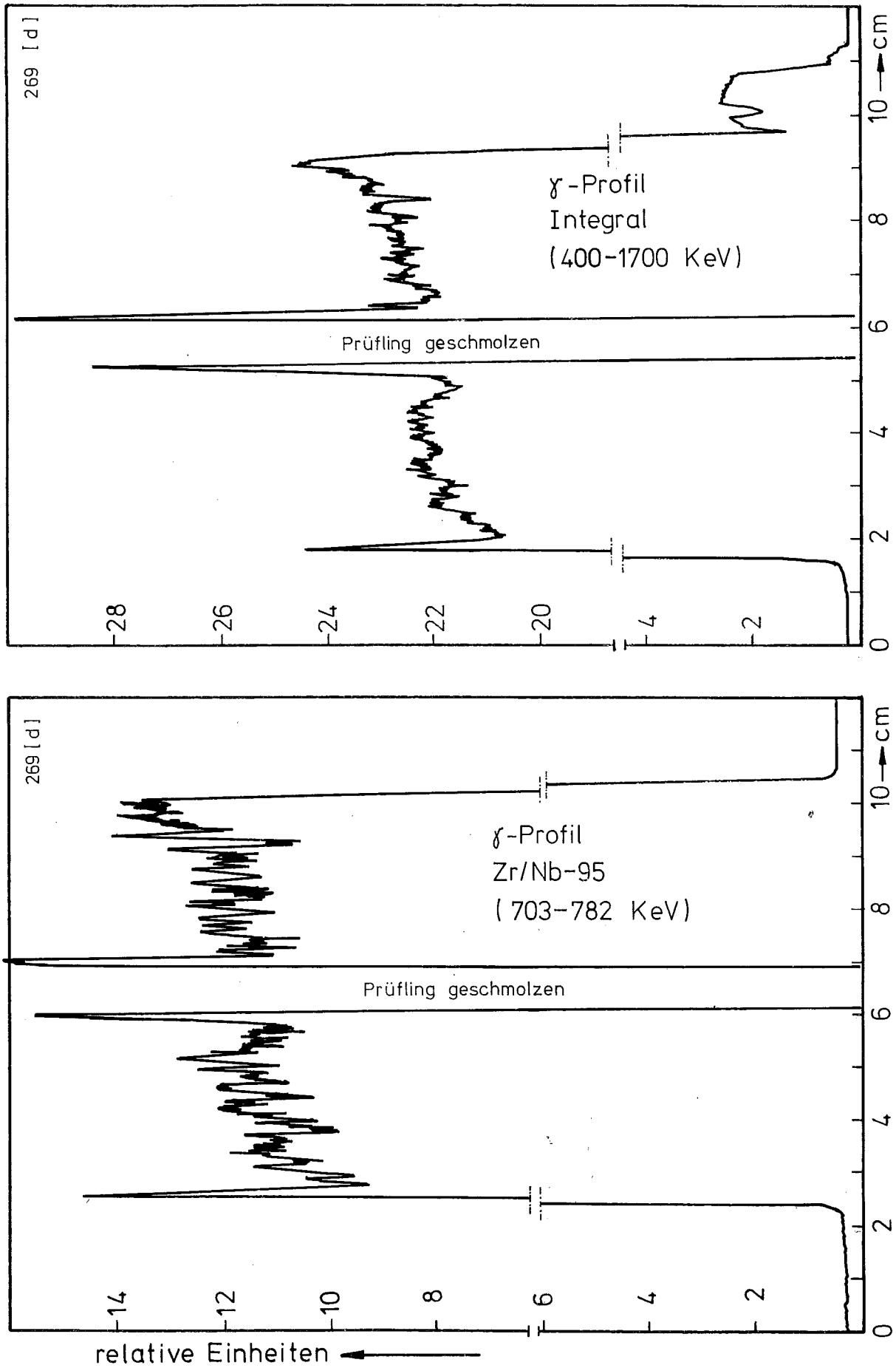


Abb. 22 Prüfling 5A/5, Gamma-Profile

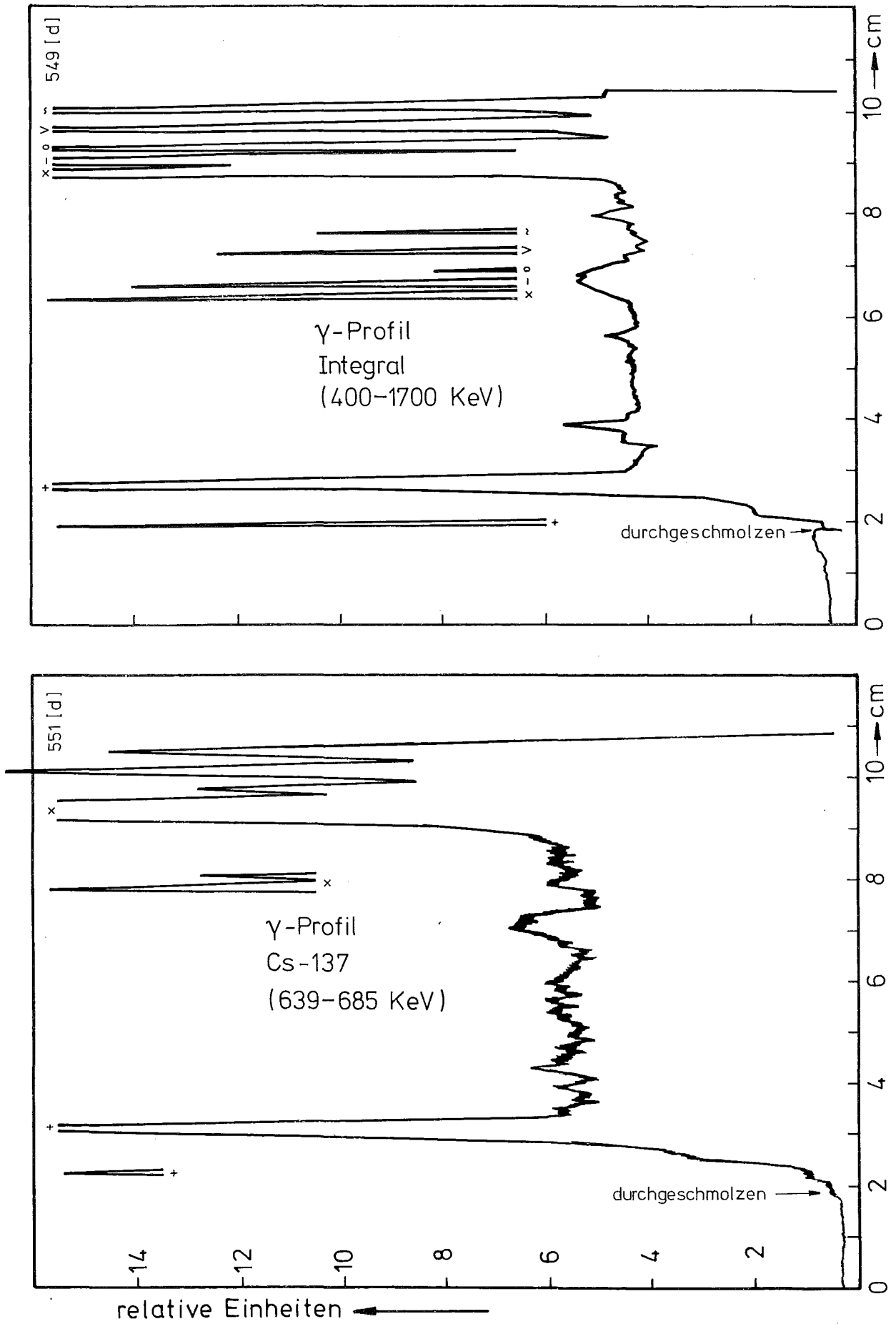


Abb. 23 Prüfling 5A/9, Gamma - Profile

Zur Vervollständigung der Nuklidprofile in Bezug auf die Spaltproduktwanderung wurden, verteilt über die gesamte Prüflingslänge, zusätzliche Spektren aufgenommen, wo immer die Profile einen Hinweis auf anomale Spaltproduktverteilungen brachten. Im Mittel waren etwa 6 Spektren für die Charakterisierung der Spaltsproduktwanderung ausreichend. In Einzelfällen wurde die Zahl noch erhöht. In Anhang I sind für jeden Prüfling zwei der wichtigsten Gamma-Profile wiedergegeben.

Für die zwei durchgeschmolzenen Prüflinge 5A/5 bzw. 5A/9 wird das integrale und das Cs-137- bzw. Zr/Nb-95-Profil in Abb. 22 und 23 wiedergegeben.

9. Zerstörende Nachuntersuchung

9.1 Spaltgasbestimmung

Bei den experimentellen Spaltgasuntersuchungen an den bestrahlten Prüflingen werden Messungen durchgeführt /11/ zur Bestimmung

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

Zu diesem Zweck wird der Prüfling zuerst an der Stirnseite des oberen Stopfens angebohrt und das freie Spaltgas abgezogen mit anschließender Helium-Spülung. Die Zusammensetzung der Spaltgase wird gaschromatografisch ermittelt, wobei die Menge an Ce, Kr quantitativ bestimmt wird. Hierauf folgt eine manometrische Messung des freien Volumens (Hohlräume, offene Poren) innerhalb der Brennstabhülle.

Die normalerweise üblichen weiteren Spaltgasbestimmungen (Anteile in geschlossener Porosität bzw. im Brennstoffgitter gelöst) wurden hier nicht durchgeführt, da die unterschiedlichen Dichtestufen keine eindeutige Zuordnung in einer Gesamtbilanz erlauben.

Die für eine weitere Auswertung wichtigen Ergebnisse sind zusammenfassend dargestellt. Tabelle 20 bringt für alle Prüflinge die gemessenen Mengen an freiem Spaltgas sowie den Spaltgasdruck bei einer (angenommenen) mittleren Betriebstemperatur von 500 °C. Die Gasmengenangaben in mm³ beziehen sich auf 20 °C und 760 Torr. Die gemessenen Freisetzungsmengen bei den beiden Prüflingen des KVE 74 würden Freisetzungsraten um 100 % ergeben. Wahrscheinlich liegt aber ein Meßfehler vor.

9.2 Keramografie

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

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

Das Ziel der Keramografie war es, das Bestrahlungsverhalten der Tabletten in Abhängigkeit von 4 verschiedenen Ausgangsdichten näher zu untersuchen. Es wurden daher je Prüfling 4 Quer- und einige Längsschliffe (siehe Schnittplan, Anhang I) angefertigt.

Tabelle 20: Spaltgasfreisetzung und Spaltgasdruck

KVE	Prüfl.	Freigesetztes Spaltgas				Abbrand (MWd/kg M)	Spaltgas- menge im Prüfling ⁺ (mm ³)	Spaltgas- freiset- zung (%)	Freies Volumen im Prüfl. 500 °C (mm ³)	Spaltgas- druck bei 500 °C (atm)
		Krypton (mm ³)	Xenon (mm ³)	Gesamt (mm ³)	Xe/Kr- Verhältnis					
72	5A/4	97	1890	1987	19,5	6	4320	46,0	1284	4,09
	5A/2	130	2400	2530	18,5		4360	58,0	1311	5,09
73	5A/6	275	4620	4895	16,8	17	12290	39,8	1312	9,85
	5A/7	342	6370	6712	18,6		12230	54,9	1276	13,88
	5A/1	435	5700	6135	13,0		12180	50,4	1356	11,94
74	5A/8	(1780)	(30130)	(32130)	17,0	47	34150		1409	(60,20)
	5A/3	(2150)	(36800)	(38950)	17,1		33790		1474	(69,76)

+) Gesamtmenge, aus dem Abbrand berechnet

() Meßwerte in Klammern wahrscheinlich fehlerhaft

Für die Dokumentation einer Schlifffebene wurde bei den meisten Prüf-
lingen folgendes Schema angewandt:

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

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

- 1. Radius des Zentralkanals
- 2. Radius der Säulenkristallzone (kleine Kristalle) = Kornwachstum
- 3. Radius der Säulenkristallzone (große Kristalle)
- 4. Spalt zwischen Brennstoff und Hülle

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

In Abb. 24 sind die wichtigsten Daten dieser Auswertung
numerisch und graphisch wiedergegeben. Die aufgeführten Radien be-
ziehen sich auf die äußere Abgrenzung der Strukturzonen. Beim radialen
Spalt ist der Mittelwert aus vier Einzelmessungen angegeben, die bei
Querschliffen um 90° versetzt, bei Längsschliffen jeweils in Zweier-
gruppen einander gegenüber bestimmt wurden. Vergleicht man die ver-
bliebenen Radialspalte (Kaltspalt) mit den Säulenverlängerungen (Tab.19),
so kann man feststellen, daß der Brennstoff der Prüflinge vom Typ R (von
oben nach unten ansteigende Dichte) die größere Schwellneigung zeigt.

KVE	Prüfl.	Brennstoff- dichte [% th.D.]	Schliff Nr.	Zentralka- nalradius r [mm]	Säulenkrist.- zone r [mm]	Kornwachs- tumszone r [mm]	rad. Spalt [μm]	Z.K. ■ Kornwachst. □ Säulenkrist. ▨ Brennstoff unverän. □ ← Brennstoffradius →
72	5A4	90	1Q	0,5	1,8	2,2	19	
		84	3Q	1,0	2,5	—	18	
		93	5Q	0,16	1,7	—	17	
		87	7Q	0,65	1,0	3,0	30	
	5A2	84	1Q	1,07	2,4	2,65	0	
		87	2Q	0,75	2,3	2,6	0	
		90	3Q	0,67	2,2	2,5	0	
		93	4Q	0,71	2,25	2,5	10	
73	5A6	90	1Q	0,40	1,7	2,2	0	
		84	3Q	0,7	1,75	2,2	20	
		93	5Q	0,17	1,6	2,1	0	
		87	7Q	0,5	1,7	2,15	20	
	5A7	90	1Q	0,55	1,8	2,1	0	
		84	2Q	0,78	2,05	2,3	0	
		93	3Q	0,55	1,9	2,2	0	
		87	4Q	0,71	2,0	2,3	0	
	5A1	84	1Q	1,1	2,5	2,8	0	
		87	2Q	0,85	2,45	2,8	0	
		90	3Q	0,77	2,24	2,85	0	
		93	4Q	0,7	2,15	2,7	0	
74	5A8	90	1Q	1,0	2,25	2,55	18	
		84	3Q	0,75	2,2	2,7	12	
		93	5Q	0,6	1,9	2,6	0	
		87	7Q	0,65	1,8	2,5	5	
	5A3	84	1Q	1,3	2,55	2,8	0	
		87	2Q	0,95	2,4	2,9	0	
		90	3Q	0,85	2,4	2,9	0	
		93	4Q	0,57	2,3	2,8	0	

Abb. 24 Die Strukturzonen im Brennstoff nach Bestrahlung

10. Dokumentation der zerstörungsfreien und zerstörenden Nachuntersuchung

Im Anhang I wird eine umfassende Dokumentation der zerstörungsfreien und zerstörenden Nachuntersuchung gegeben, welche eine Auswahl der wichtigsten Ergebnisse für jeden der 7 intakten Prüflinge enthält. Die Ergebnisse sind auf einem mehrseitigen Faltblatt zusammengestellt, welches (zusammen mit dem evt. links angesetzten Einzelblatt) 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 (isotopspezifisch, z.B. für Zr/Nb-95, für Cs-134 und Cs-137 und für Ru-106).

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

- Titelblatt:

Kurze Zusammenfassung der Material- und Bestrahlungsdaten des Brennstabprüflings.

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

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

11. Brennstoffstruktur in Abhängigkeit von der Ausgangsdichte

Als quantitative Orientierungsgrößen für die Brennstoffstruktur nach der Bestrahlung werden herangezogen

- der Radius des Zentralkanals (Z)
- der Radius der Säulenkristallzone (S)
- der Radius der Kornwachstumszone (K)

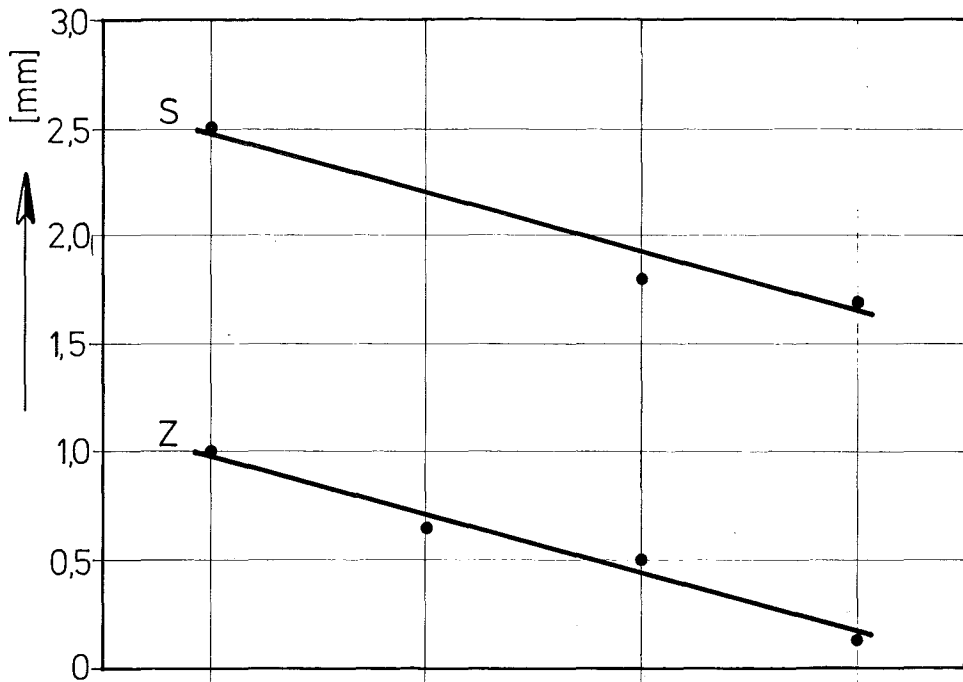
Diese Größen werden aus den keramografischen Querschliffen bestimmt, siehe Kapitel 9.2. Die für eine übersichtliche Darstellung nötigen Einzelwerte sind in Tabelle 21 noch einmal zusammengestellt. Es werden hier nur die 7 intakt gebliebenen Prüflinge berücksichtigt. Es zeigt sich, daß im Rahmen der Schwankungsbreite der Ergebnisse kein Abbrandeinfluß feststellbar ist. Deshalb ist es auch sinnvoll, für die jeweiligen Dichtestufen Gesamtmittelwerte der Strukturzonen zu bilden. Dagegen gibt es (erwartungsgemäß) einen deutlichen Einfluß der Ausgangsdichte. Beim Zentralkanal ist diese Abhängigkeit am stärksten ausgeprägt und nimmt dann nach außen ab.

Die Diagramme in den Abbildungen 25 bis 27 bringen die graphische Darstellung für die einzelnen Prüflinge. Die Meßpunkte lassen sich ziemlich gut durch Gerade interpolieren wofür die Methode der kleinsten Quadrate angewandt wurde. In Abb. 28 sind die Gesamtmittelwerte für die 3 Struktur-
grenzen gegen die Dichtestufen aufgetragen und die maximalen Schwankungsbreiten eingezeichnet. Die lineare Abhängigkeit von der Ausgangsdichte ist gut bestätigt.

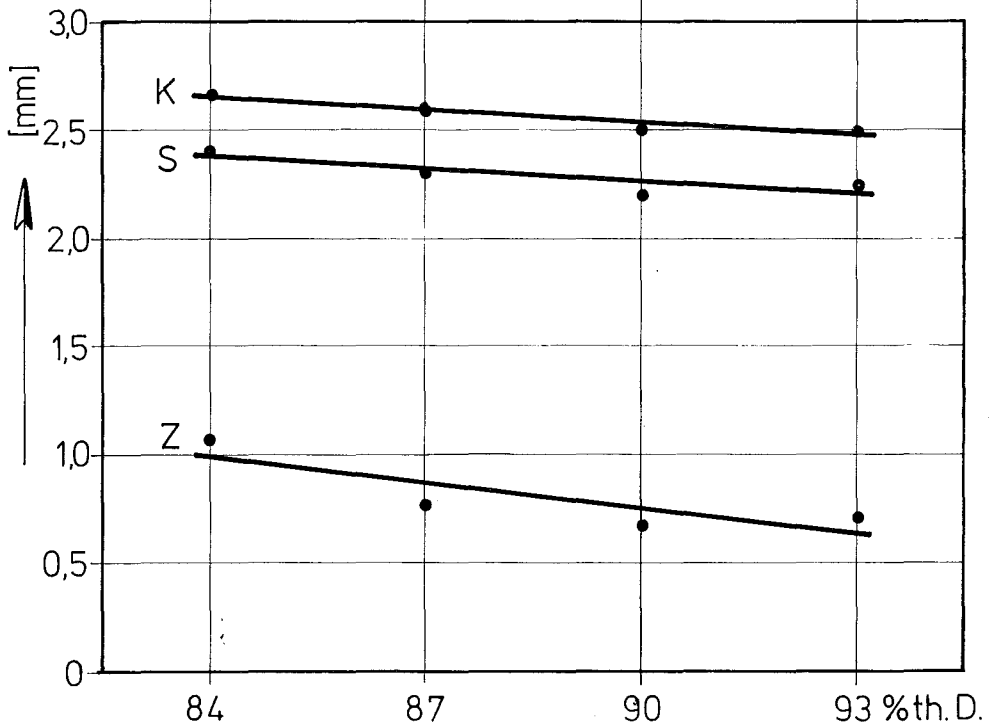
Tabelle 21 Brennstoffstruktur nach der Bestrahlung

Abbrand- stufe (Mwd/t M)	Ausgangsdichte (% th.D.) des Brennstoffes	Zentralkanal Z Radius (mm)				Säulenkristalle S Radius (mm)				Kornwachstum K Radius (mm)			
	Prüfling	84	87	90	93	84	87	90	93	84	87	90	93
ca. 5000	5A/4	1,00	0,65	0,50	0,16	2,50	(1,00)	1,80	1,70	-	(3,00)	2,20	-
	5A/2	1,07	0,75	0,67	0,71	2,40	2,30	2,20	2,25	2,65	2,60	2,50	2,50
	Mittelwert	1,04	0,70	0,59	0,44	2,40	2,30	2,00	1,98	2,65	2,60	2,35	2,50
ca. 15000	5A/6	0,70	0,50	0,40	0,17	1,75	1,70	1,70	1,60	2,20	2,15	2,20	2,10
	5A/7	0,78	0,71	0,55	0,55	2,05	2,00	1,80	1,90	2,30	2,30	2,10	2,20
	5A/1	1,10	0,85	0,77	0,70	2,50	2,45	2,24	2,15	2,80	2,80	2,85	2,70
	Mittelwert	0,86	0,69	0,57	0,47	2,10	2,05	1,91	1,88	2,43	2,42	2,38	2,33
ca. 50000	5A/8	0,75	0,65	1,00	0,60	2,20	1,80	2,25	1,90	2,70	2,50	2,55	2,60
	5A/3	1,30	0,95	0,85	0,57	2,55	2,40	2,40	2,30	2,80	2,90	2,90	2,80
	Mittelwert	1,03	0,80	0,93	0,59	2,38	2,10	2,33	2,10	2,75	2,70	2,73	2,70
Mittelwert über die 3 Abbrandstufen		0,98	0,73	0,70	0,50	2,31	2,15	2,08	1,99	2,61	2,57	2,49	2,51

Prüfling 5A/4
Typ S
(90/84/93/87
% th.D.)



Prüfling 5A/2
Typ R
(84/87/90/93
% th.D.)

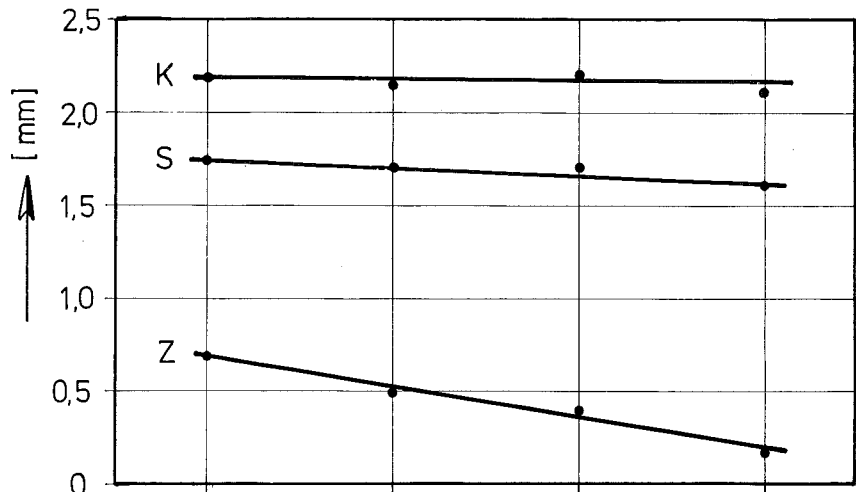


K ≙ Kornwachstum
S ≙ Säulenkristall
Z ≙ Zentralkanal

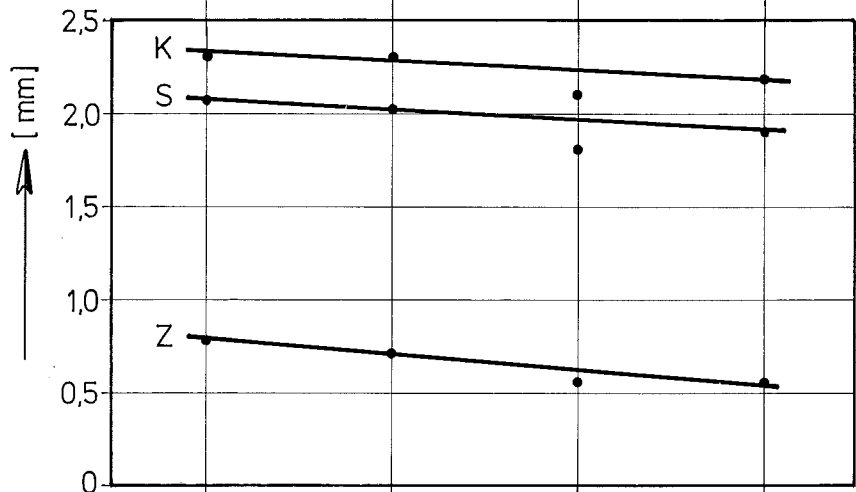
Grensradien der Strukturzonen bei
ca. 6 MWd/kgM Abbrand

Abb. 25

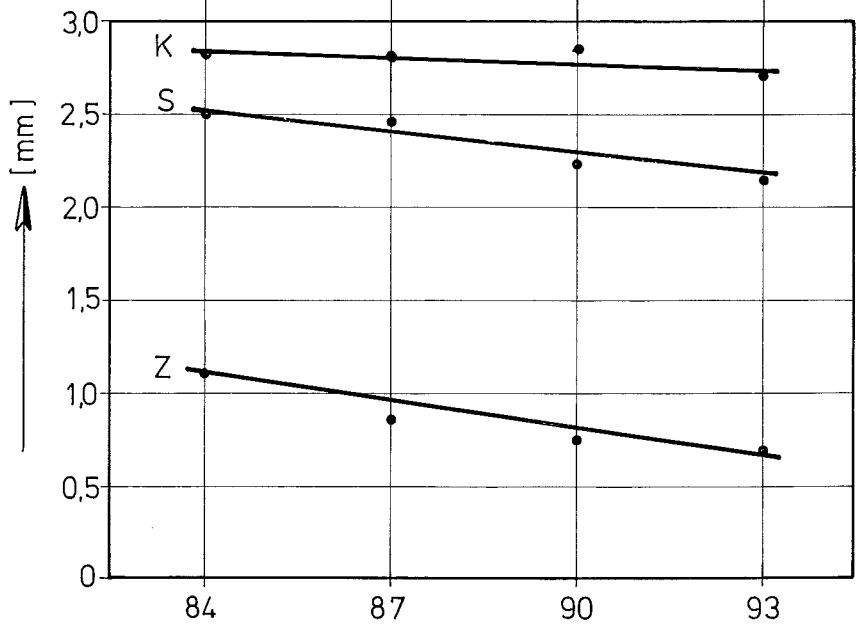
Prüfling 5A/6
Typ S
(90/84/93/87 %th.D.)



Prüfling 5A/7
Typ S
(90/84/93/87 %th.D.)



Prüfling 5A/1
Typ R
(84/87/90/93 %th.D.)



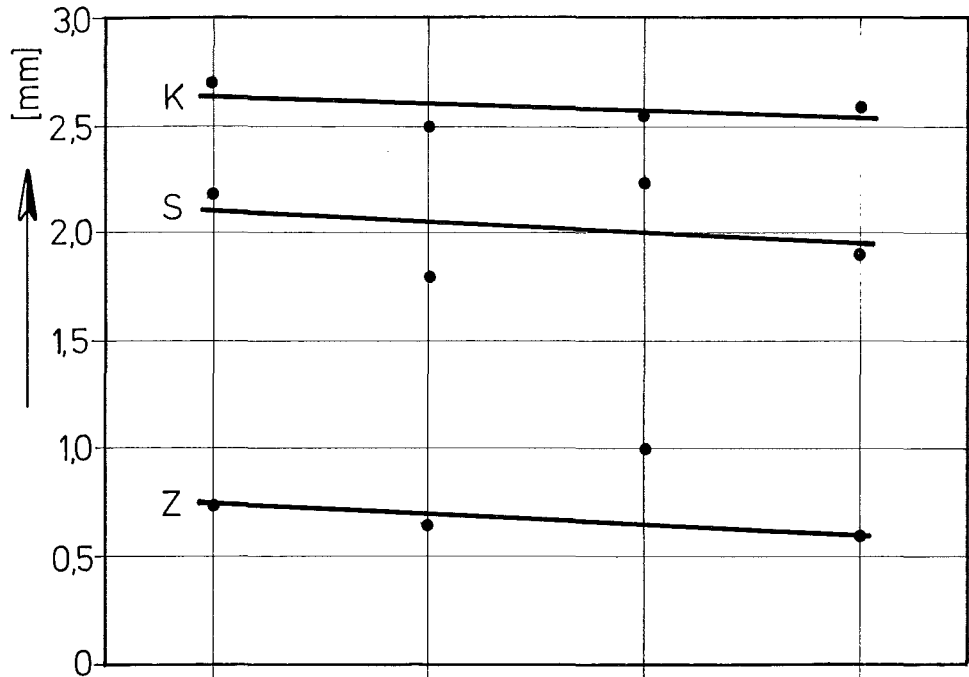
K ≙ Kornwachstum
S ≙ Säulenkristall
Z ≙ Zentralkanal

➔ Ausgangsdichte [% th.D.]

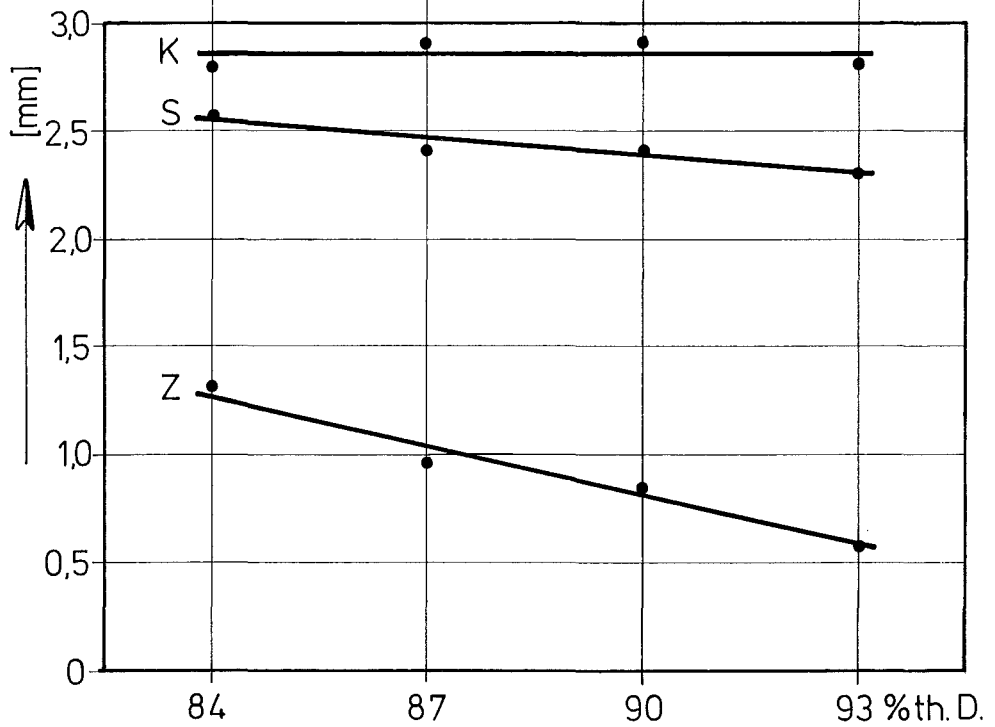
Prüfling mit ca. 17 MWd/kg M Abbrand

Abb. 26

Prüfling 5A/8
Typ S
(90/84/93/87
% th.D.)



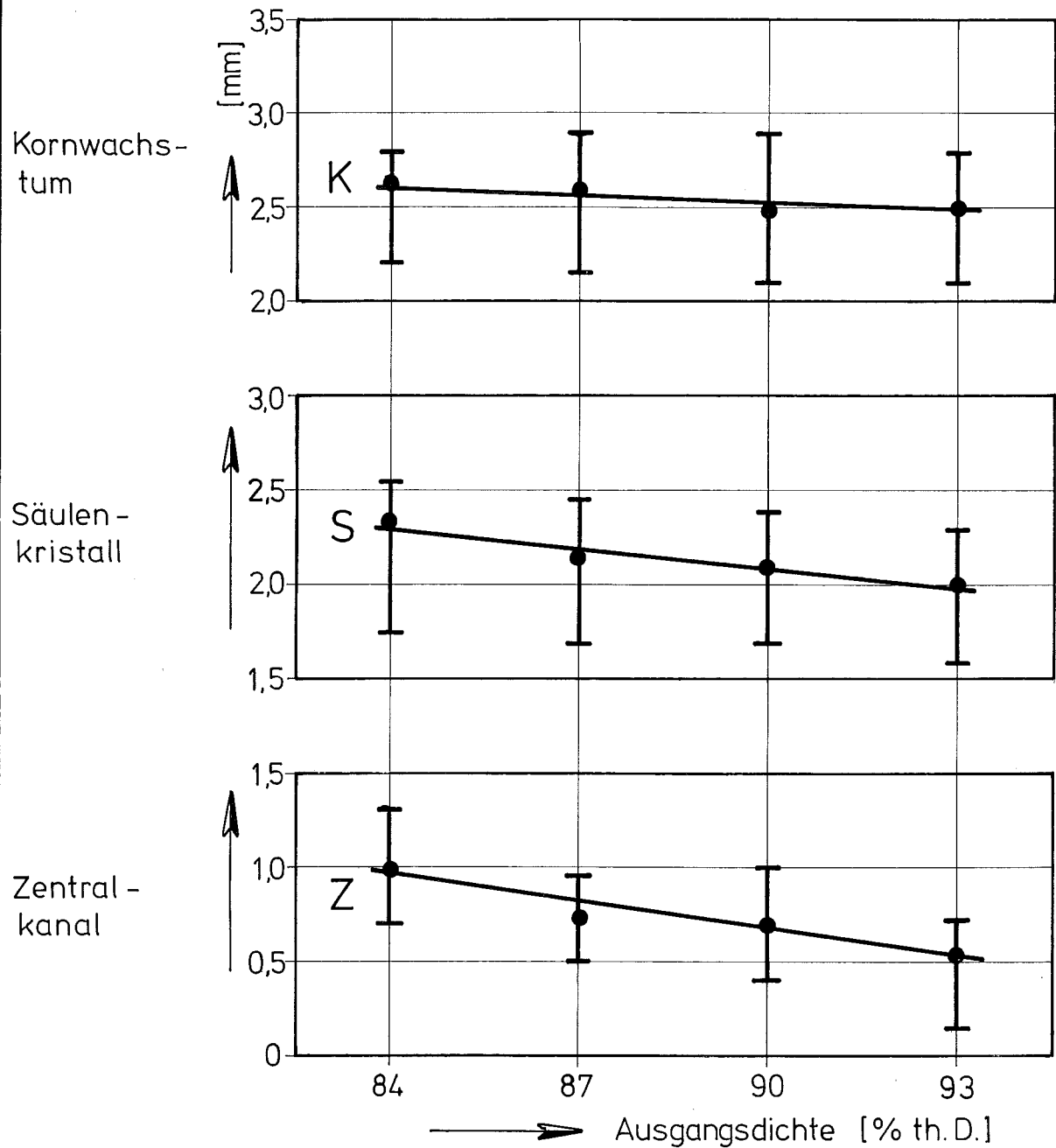
Prüfling 5A/3
Typ R
(84/87/90/93
% th.D.)



K ≙ Kornwachstum
S ≙ Säulenkristall
Z ≙ Zentralkanal

Grenzzadien der Strukturzonen bei
ca. 47 MWd/kg M Abbrand

Abb. 27



Grenzzadien der Strukturzonen
-Mittelwerte der 7 intakten Prüflinge
mit den Abbrandstufen 6, 17
und 47 MWd/kg M

Abb. 28

12. Schlußbetrachtung

Nach Abschluß der Bestrahlung und Nachuntersuchung der 9 Prüflinge in dieser Versuchsgruppe soll hier eine Bilanz im Hinblick auf die in Kapitel 2 formulierten Aufgaben und Ziele gezogen werden:

- 1.) Beim Prüflingsaufbau konnten die spezifizierten engen Toleranzen in den Dichtestufen eingehalten werden.
- 2.) Die Auslegungswerte der Stableistung (550 W/cm) und der Hülloberflächentemperatur (645 °C) wurden bei der Bestrahlung im FR 2 in den meisten Betriebszyklen nicht voll erreicht. Die ziemlich große Unsicherheit bei der Temperaturmessung an den Prüflingen sowie die doch recht starken Neutronenflußänderungen im Laufe der Bestrahlung führen zu maximal möglichen Schwankungsbreiten in der Stableistung um etwa ± 50 W/cm. Die detaillierten Auslegungsrechnungen in Kapitel 3 sind dadurch nur mehr von begrenztem Wert für die Ergebnisse des Experimentes.
- 3.) Die gewünschten Zielabbrände in 3 Stufen wurden experimentell realisiert. Von den 9 Prüflingen sind 2 durchgeschmolzen, ein Prüfling davon im Versuchseinsatz der niedrigen Abbrandstufe, der andere im Einsatz der höchsten Abbrandstufe. Die Ursachen für diese beiden Stabschäden sind unbekannt. Sie sind sicher nicht abbrandbedingt. Eine mögliche Erklärung besteht darin, daß in den Kapselversuchseinsätzen der radiale Wärmeübergang nach außen (etwa durch Gasblasen im Flüssigmetall) lokal unterbrochen war.
- 4.) Bei den 7 intakten Prüflingen traten keine starken Dimensionsänderungen auf.
- 5.) Der Einfluß der Ausgangsdichte des Brennstoffes auf die Ausbildung der radialen Strukturzonen ist in systematisch erfaßbarer Weise ausgebildet. Die Abhängigkeit ist am ausgeprägtesten beim Zentralkanal, während die Strukturgrenze zwischen Kornwachstumszone und unverändertem Brennstoff kaum beeinflusst wird.
- 6.) Die Strukturzonengrenzen im Brennstoff sind bei allen 3 hier untersuchten Abbrandstufen praktisch gleich. Der wesentliche Abbrandeinfluß erfolgt sicher bereits unterhalb 17 MWd/kg M Abbrand.
- 7.) Bei allen Prüflingen ist eine deutliche Pu-Anreicherung um den Zentralkanal zu erkennen.

- 8.) Bedingt durch die hohen Brennstofftemperaturen hat in einigen Prüflingen eine stark axiale Umverteilung einiger Spaltprodukte stattgefunden. So wandert Cs-137 zum oberen Ende des Prüflings (Nähe Gasplenum). Ru-106 ist an beiden Enden des Prüflings stärker vorhanden. Die Effekte sind jedoch alles in allem etwas schwächer im Vergleich etwa zur Kapsel-Versuchsgruppe 4b, bei der die Stäbe höher thermisch belastet wurden.
- 9.) Die Spaltgasfreisetzung wurde bei 5 Prüflingen der beiden niedrigeren Abbrandstufen verlässlich gemessen. Sie liegt zwischen 40 und 60 %.

Literatur:

- /1/ D. Freund:
Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung der Oxidbrennstabproben im FR 2, KFK 1376 (1972)
- /2/ D. Geithoff, D. Freund, K. Kummerer:
Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung der UO₂-Brennstab-Prüflinge der FR 2-Kapsel-Versuchsgruppe 3, KFK 1239 (1971)
- /3/ D. Freund, Th. Dippel, D. Geithoff, P. Weimar:
Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung der UO₂-PuO₂-Brennstab-Bestrahlungsexperimente der FR 2-Kapsel-Versuchsgruppe 4a, KFK 1523 (1973)
- /4/ P. Weimar, Th. Dippel, D. Freund:
Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung der UO₂-PuO₂-Brennstab-Bestrahlungsexperimente der FR 2-Kapselversuchsgruppe 4b, KFK 1952 (1974)
- /5/ H. Reißwenger:
Die Auslegung und Durchführung von Brennelement-Bestrahlungsexperimenten, Beitrag XI in KFK 700 (1967)
- /6/ S. Hagen, H. Malauschek:
Messungen des thermischen Flusses in den Isotopenkanälen des FR 2 (unveröffentlicht)
- /7/ IMF-Prüfprotokoll Nr. 8a vom 22.4.1969 (unveröffentlicht)
- /8/ H. E. Häfner:
Bestrahlung von Brennstäben in instrumentierten Natrium-Blei-Wismut-Doppelkapseln, Kerntechnik 12, Heft 5/6 (1970)
- /9/ L. Steinbock:
Das Brennstabauslegungs- und Überwachungssystem MERKUR, KFK 2163 (1975)
- /10/ Untersuchungsberichte Heiße Zellen, KVE Nr. 72/73/74 (unveröffentlicht)
- /11/ H. Gräbner:
Spaltgasmessungen, Jahresbericht der Heißen Zellen 1970 (unveröffentlicht)

<u>Liste der Tabellen:</u>	Seite
Tabelle 1: Auslegung und Spezifikationen	18
Tabelle 2: Isotopenzusammensetzung des Pu	23
Tabelle 3: Pu-Gehalt der Brennstofftabletten	27
Tabelle 4: Chemische Verunreinigungen	27
Tabelle 5: Hüllrohre und Hüllrohrprüfung	28
Tabelle 6: Dichtefolge in den einzelnen Prüflingen	29
Tabelle 7: Materialwerte für die Prüflinge	30
Tabelle 8: Stabprüfung	32
Tabelle 9: Länge der Tablettensäulen	32
Tabelle 10: Bestrahlungspositionen der Kapselversuchseinsätze	37
Tabelle 11: Instrumentierungsplan in einem KVE	42
Tabelle 12: Anfangs- und Endtemperatur der Prüflinge an der Hüllaußenwand	49
Tabelle 13: Stabileistung der Prüflinge am Anfang und Ende des Zyklus	51
Tabelle 14: Bestrahlungszeit	53
Tabelle 15: Kalorimetrische Abbrandwerte	53
Tabelle 16: Abbrand der Prüflinge	54
Tabelle 17: Stabvermessung	55
Tabelle 18: Dichte- und Volumenänderungen bei der Bestrahlung	57
Tabelle 19: Längenänderung der Brennstoffsäulen	58
Tabelle 20: Spaltgasfreisetzung und Spaltgasdruck	64
Tabelle 21: Brennstoffstruktur nach der Bestrahlung	69

<u>Liste der Abbildungen:</u>	Seite
Abb. 1: Hüllwandtemperaturen	6
Abb. 2: Brennstoffdurchmesser bei maximalem Wärmeleitintegral	7
Abb. 3: Stableistung, Wärmeleitintegral und Hüllwandaußentemperatur in Abhängigkeit vom FR 2-Neutronenfluß	11
Abb. 4: Stableistung und Wärmeleitintegral als Funktion des Pu-Gehaltes	13
Abb. 5: Schematischer Aufbau der Prüflinge	15
Abb. 6: Keramische Aufnahmen der Pellets der 4 verschiedenen Ausgangsdichten 84 % th.D.	25
Abb. 7: " " " " " 87 % th.D.	25
Abb. 8: " " " " " 90 % th.D.	26
Abb. 9: " " " " " 93 % th.D.	26
Abb. 10: Röntgen-Aufnahmen der Tablettensäulen	33
Abb. 11: Ausschnitt aus der komb. Na-Pb/Bi-Kapsel	35
Abb. 12: Schematische Darstellung des FR 2-Kapselversuchseins.	36
Abb. 13: Positionskarte FR 2-Core	37
Abb. 14: Vertikaler Verlauf des thermischen Flusses	39
Abb. 15: Radialer Flußverlauf um einen Brennstab im Isotopenkanal des FR 2	40
Abb. 16: Kapselversuchsgruppe 5a, KVE 72 Hülloberflächentemperaturen der Prüflinge als Funktion der Zeit	43
Abb. 17: " " " " Kapselversuchsgruppe 5a, KVE 73	45
Abb. 18: " " " " Kapselversuchsgruppe 5a, KVE 74	47
Abb. 19: Temperatur-Stableistungscharakteristik, Kapseltyp 4a	50
Abb. 20: Durchgeschmolzener mittlerer Prüfling 5A/5 in KVE 72	56
Abb. 21: Durchgeschmolzener mittlerer Prüfling 5A/9 in KVE 74	56
Abb. 22: Prüfling 5A/5, Gamma-Profile	60
Abb. 23: Prüfling 5A/9, Gamma-Profile	61
Abb. 24: Die Strukturzonen im Brennstoff nach Bestrahlung	66

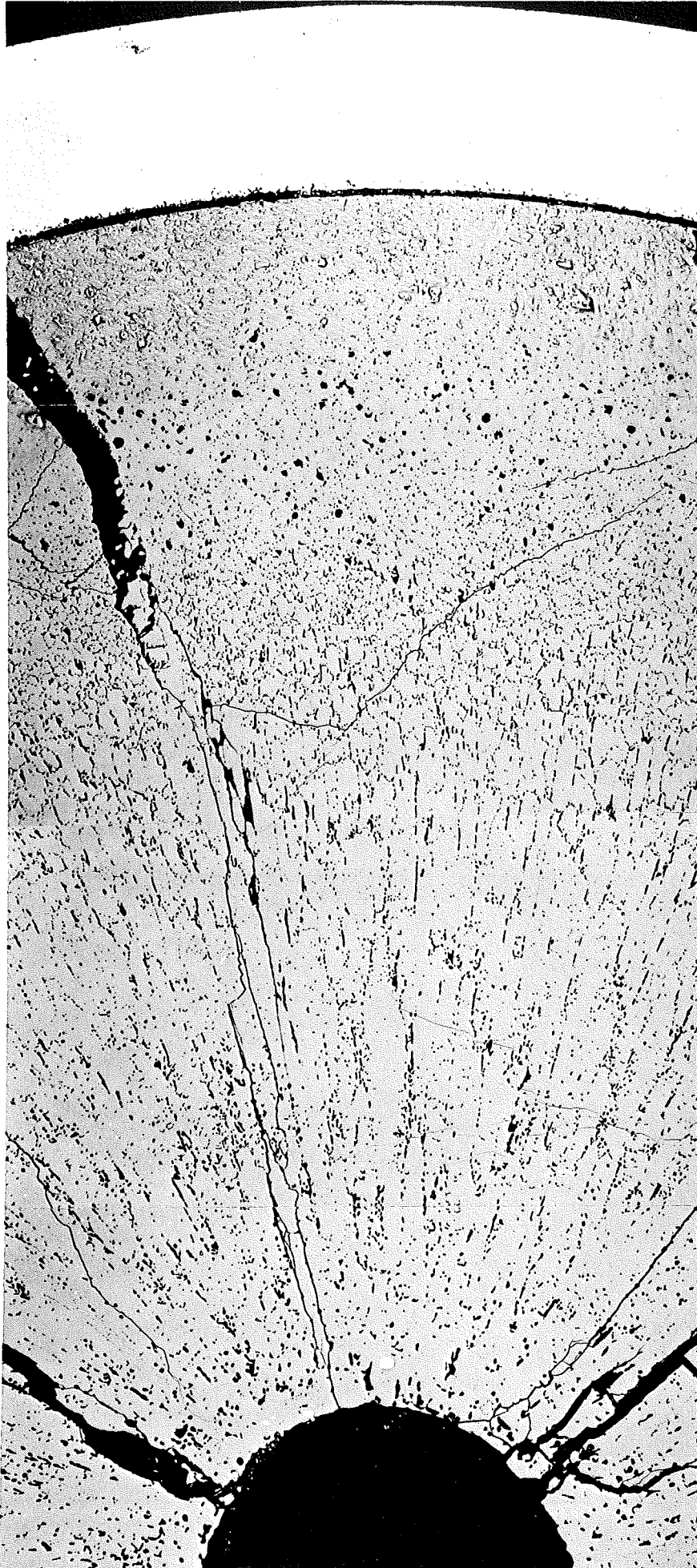
Abb. 25:	Grenzradien der Strukturzonen bei ca. 6 MWd/kg M	70
Abb. 26:	Prüflinge mit 17 MWd/kg M Abbrand	71
Abb. 27:	Grenzradien der Strukturzonen bei ca. 47 MWd/kg M Abbrand	72
Abb. 28:	Grenzradien der Strukturzonen - Mittelwerte der 7 intakten Prüflinge mit den Abbrandstufen 6, 17 und 47 MWd/kg M	73

A n h a n g I

Dokumentation der Nachuntersuchung

- I/3 -
zu Prüfling 5A/4

1A

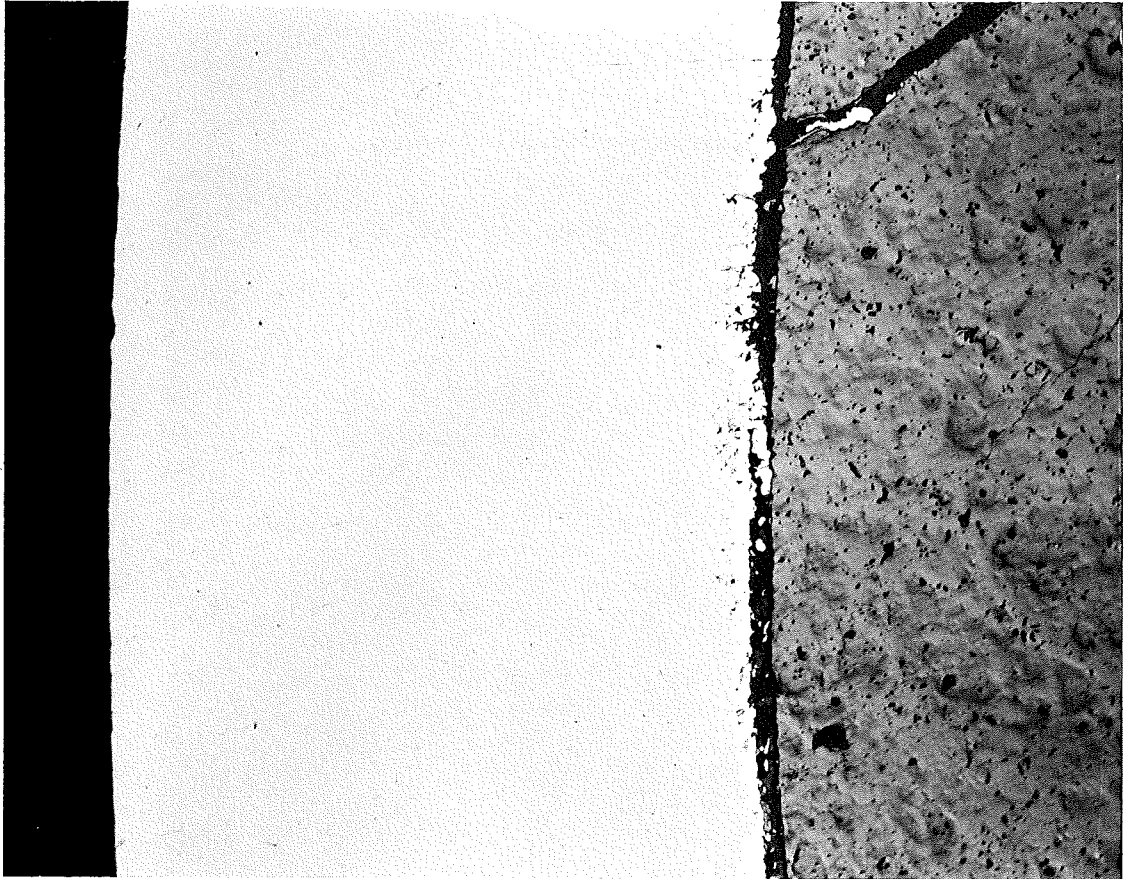


5

0,1 mm

- 1/4 -
zu Prüfling 5A/4

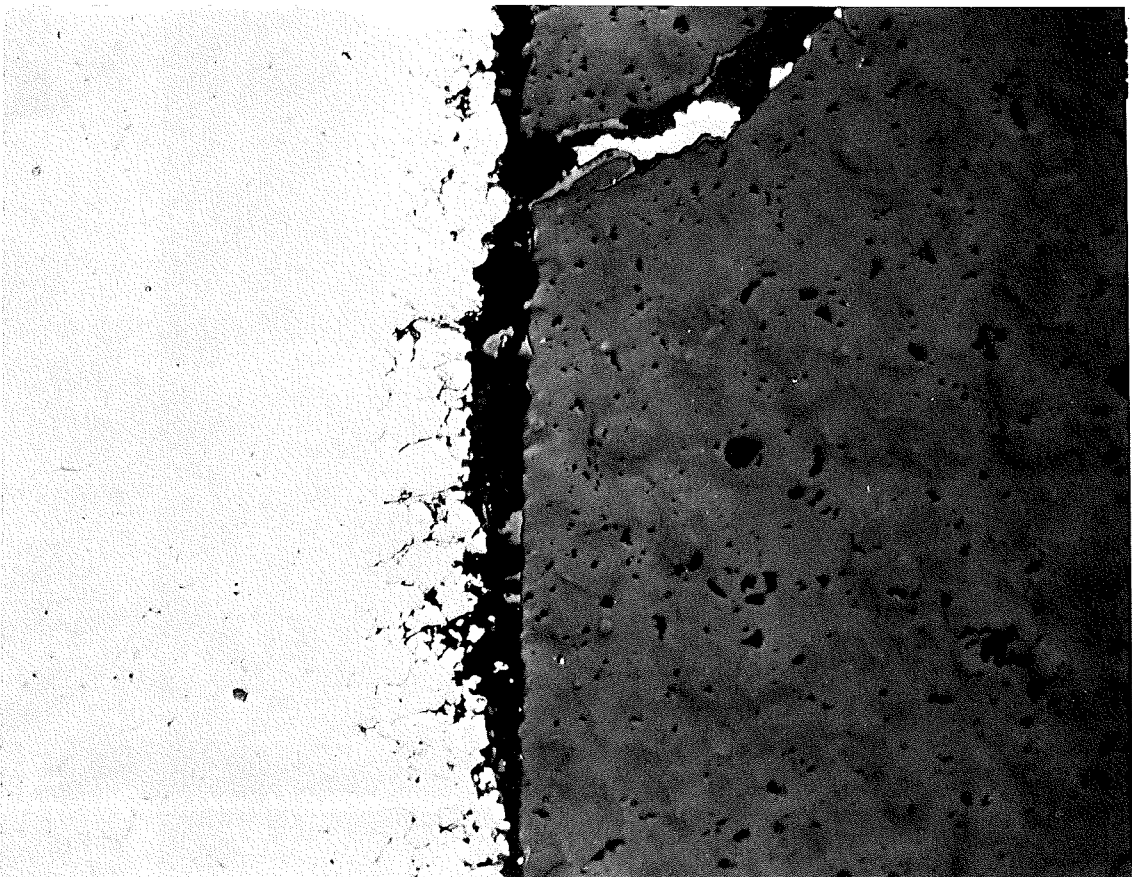
1A



100 μm

200x

3c-72-5A/4-1/6



40 μm

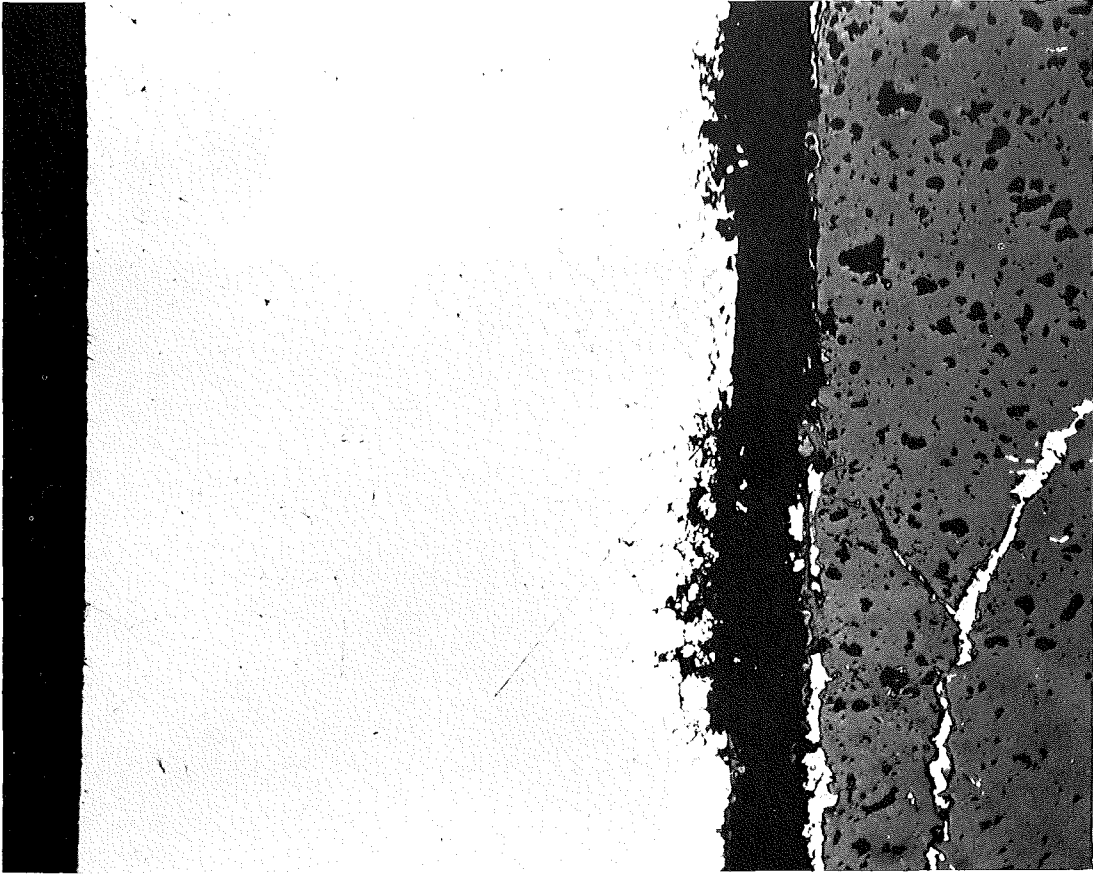
500x

3c-72-5A/4-1/7



- I/6 -
zu Prüfling 5A/4

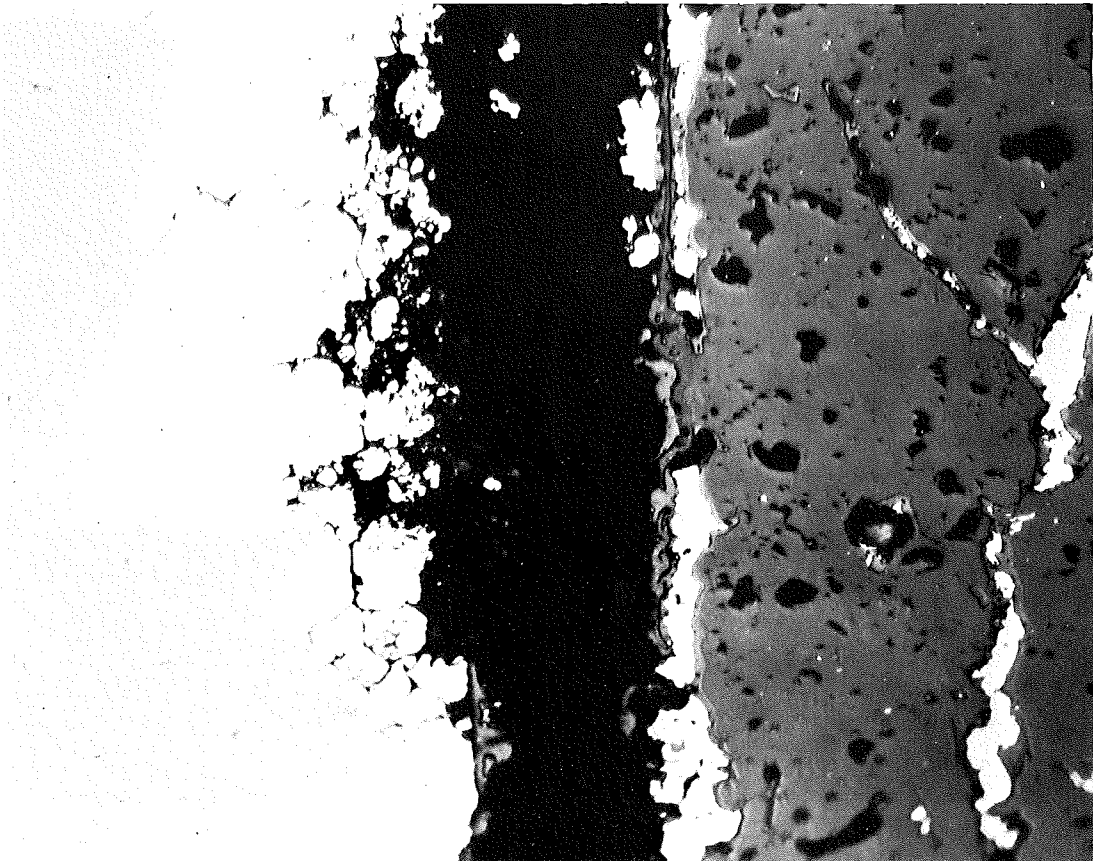
2A



100 μm

200x

3c-72-5A/4-2/7



40 μm

500x

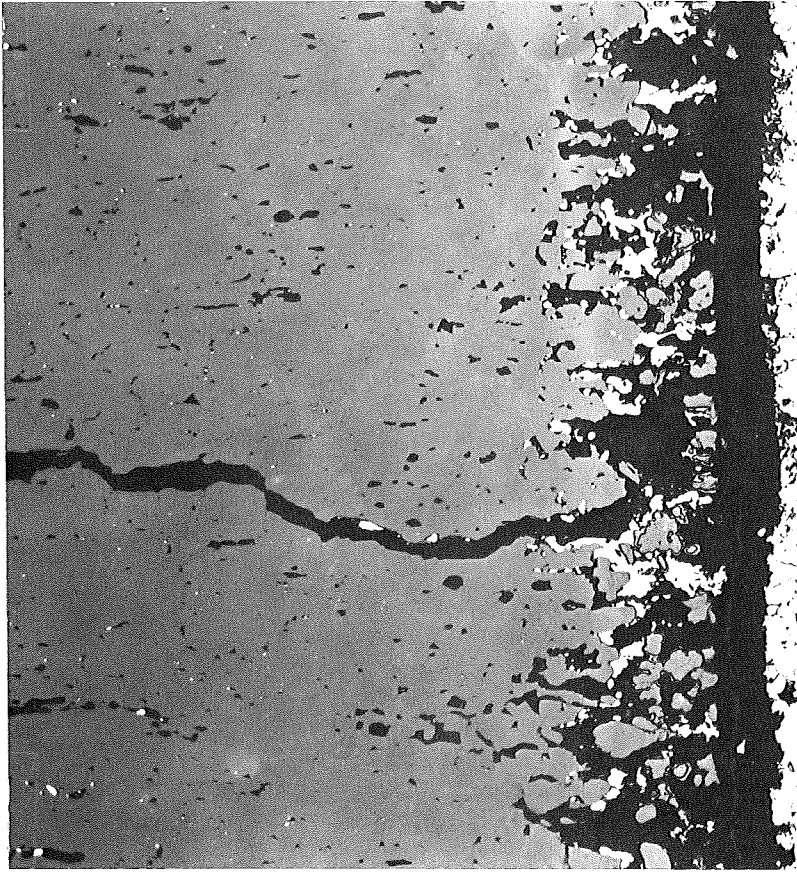
3c-72-5A/4-2/8

- 1/7 -
zu Prüfling 5A/4

2A

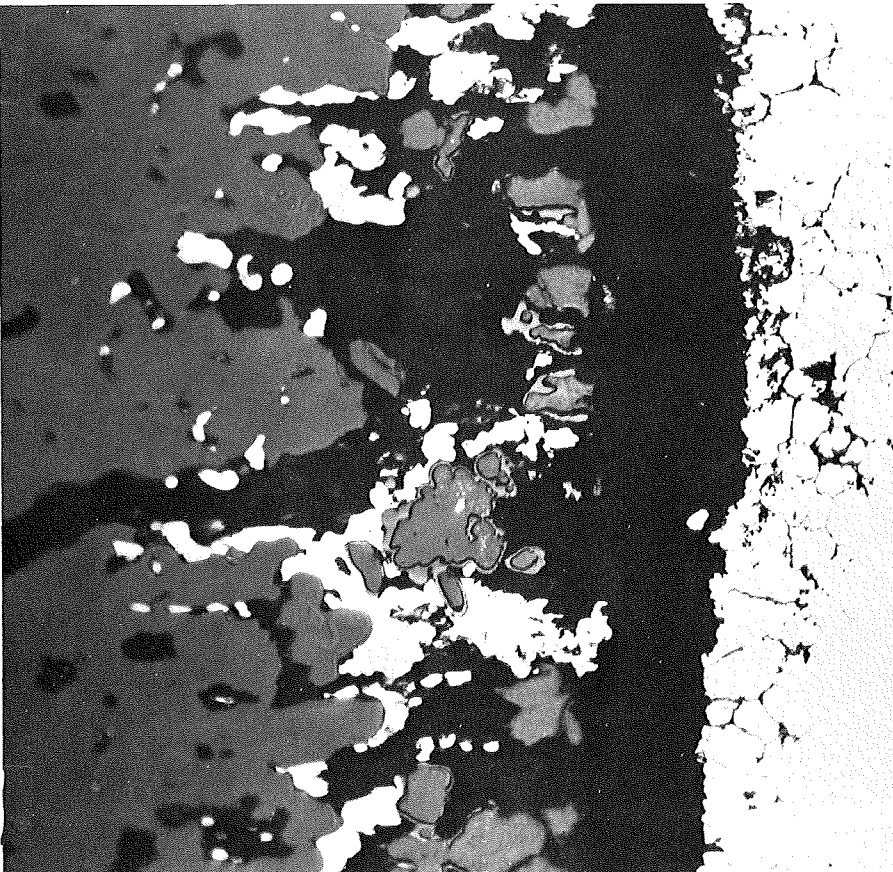
3c-72-5A/4-2/10 200x

100 μm

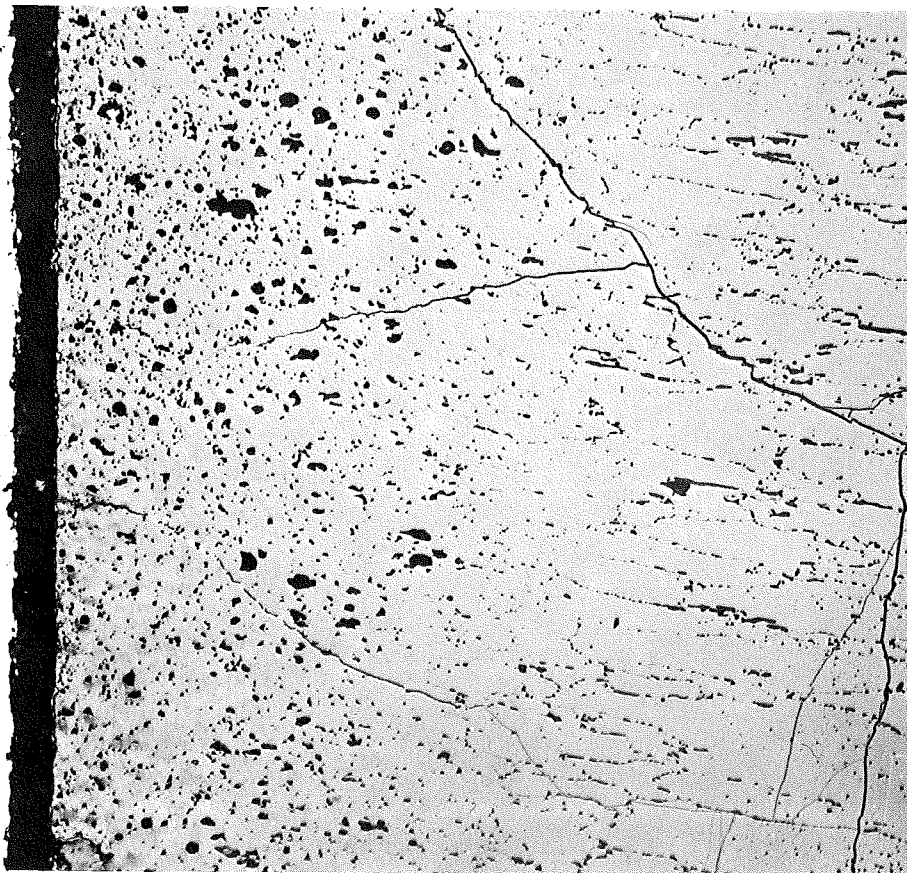
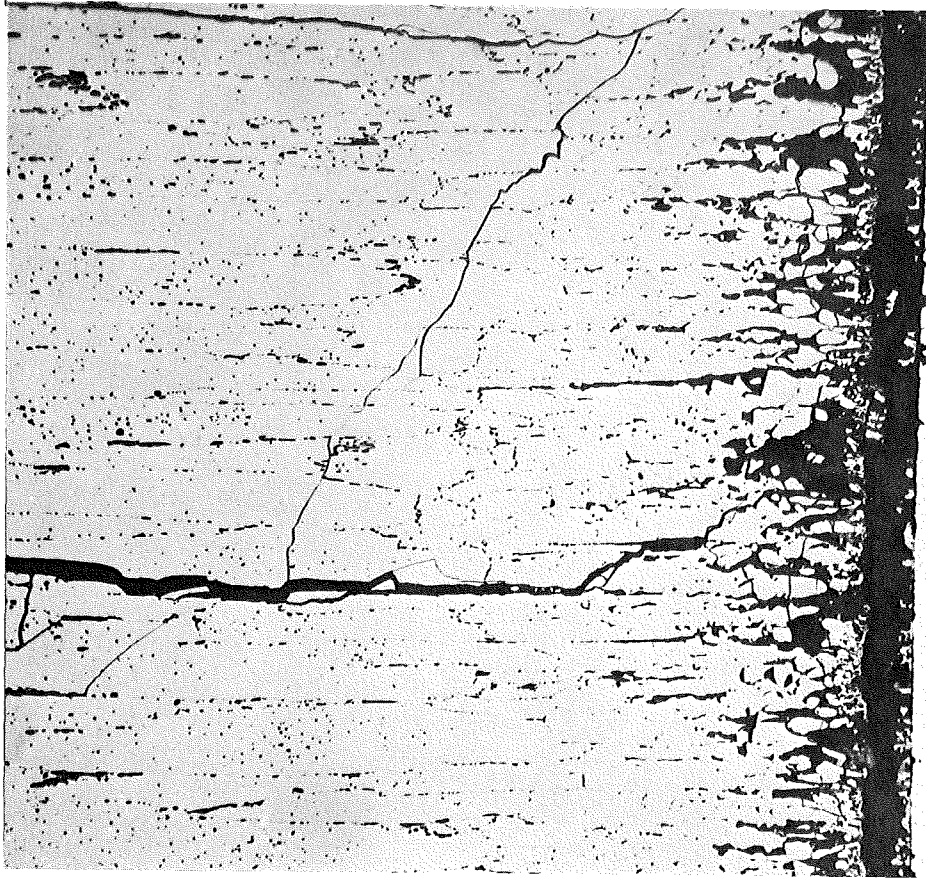


3c-72-5A/4-2/11 500x

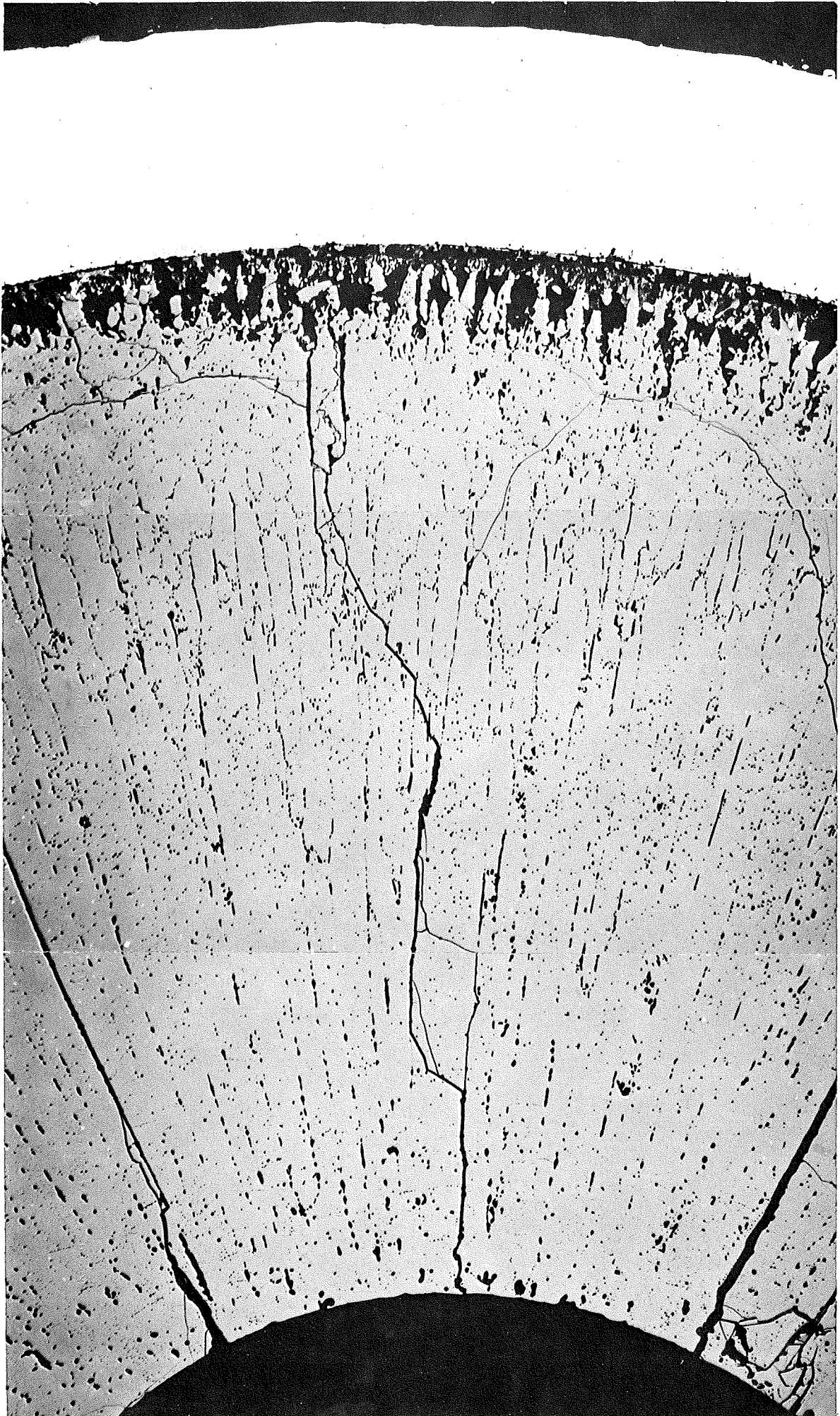
40 μm



- 1/8 -
zu Prüfling 5A/4
2A



- 1/9 -
zu Prüfling 5A/4
3A



- I/10 -
zu Prüfling 5A/4

3A

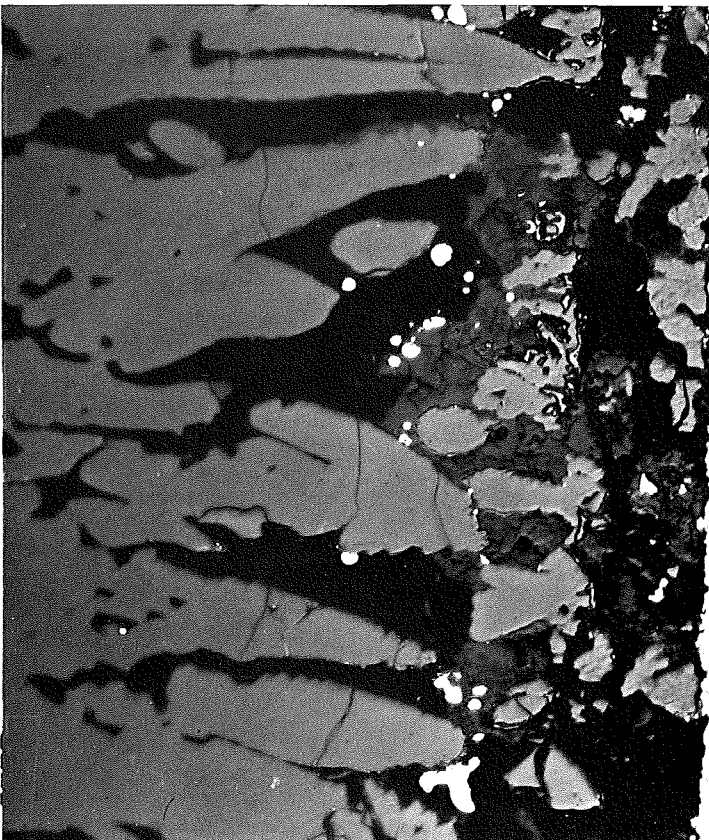
3c-72-5A/4-3/6 200x

100 μm



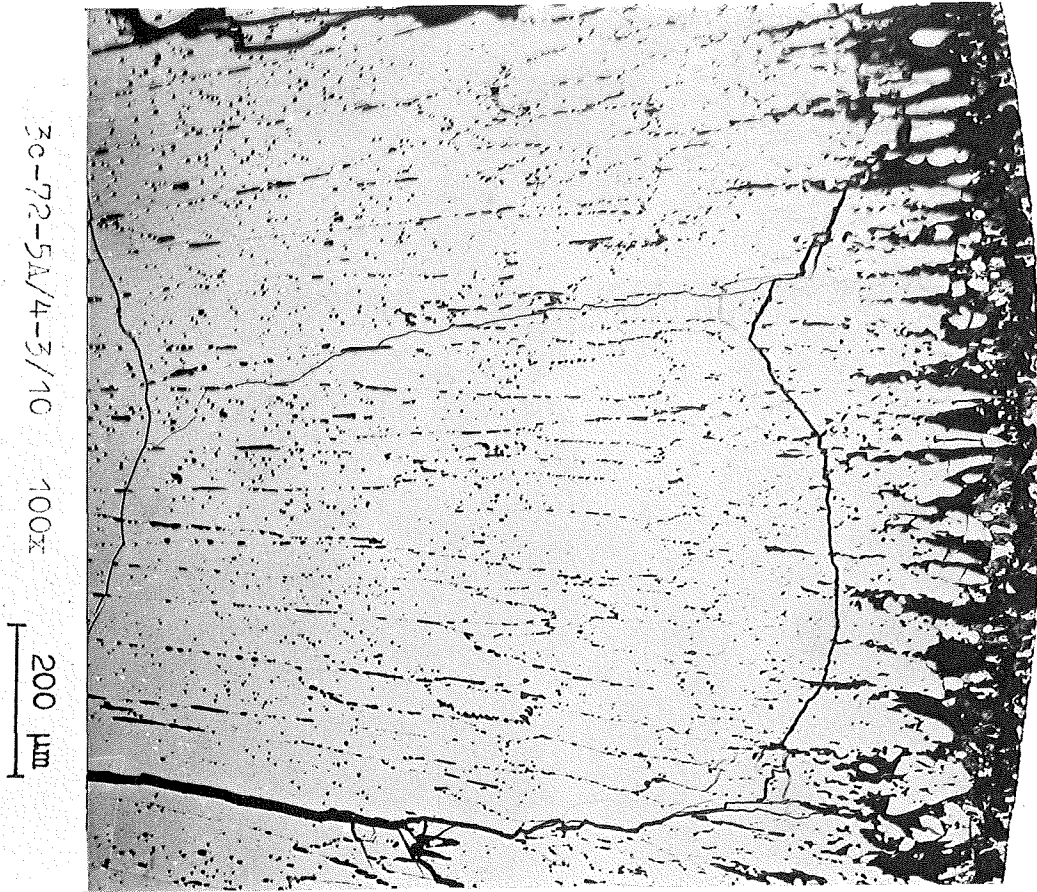
3c-72-5A/4-3/7 500x

40 μm

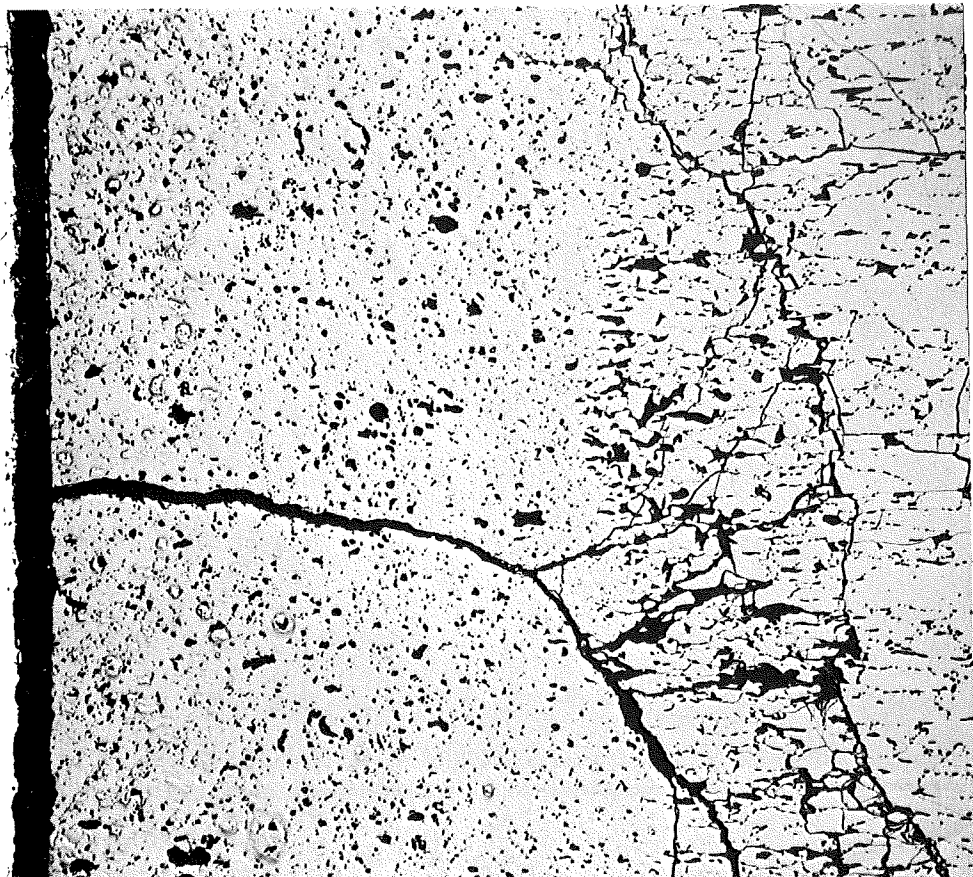


-I/11 -
zu Prüfling 5A/4

3A



4A

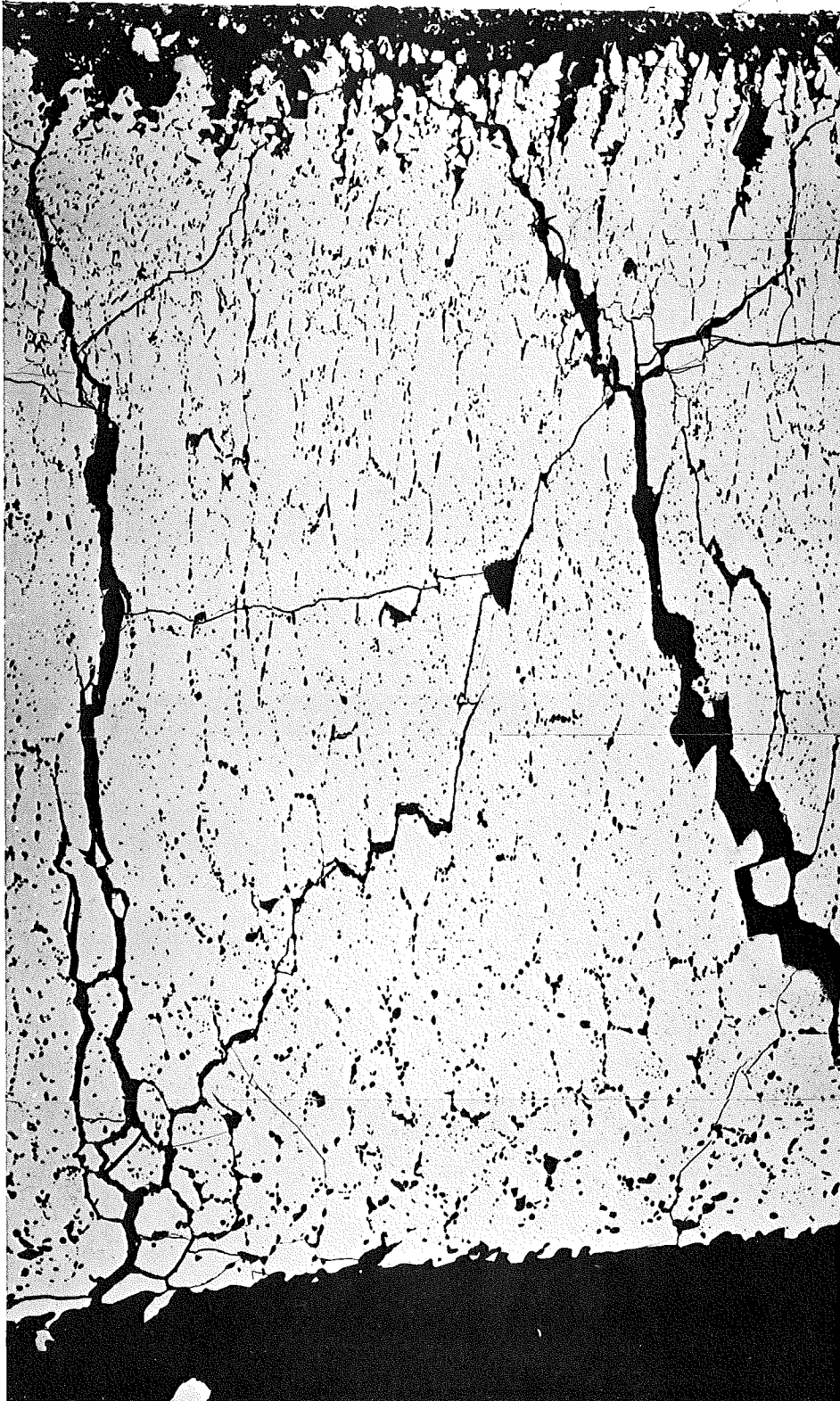


3c-72-5A/4-4/10 100x

200 µm

- I/12 -
zu Prüfling 5A/4

4A



7

—|—
0,1mm

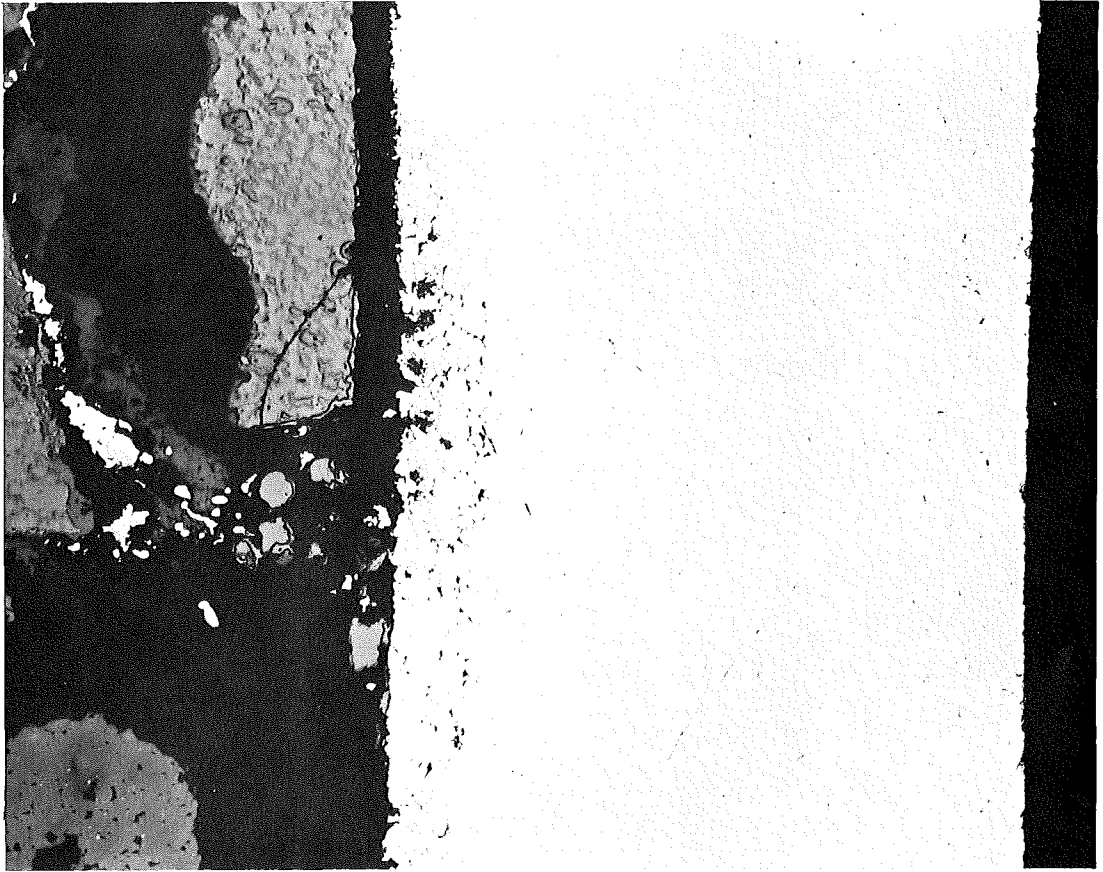
- I/13 -
zu Prüfling 5A/4

4A

3c-72-5A/4-4/8

200x

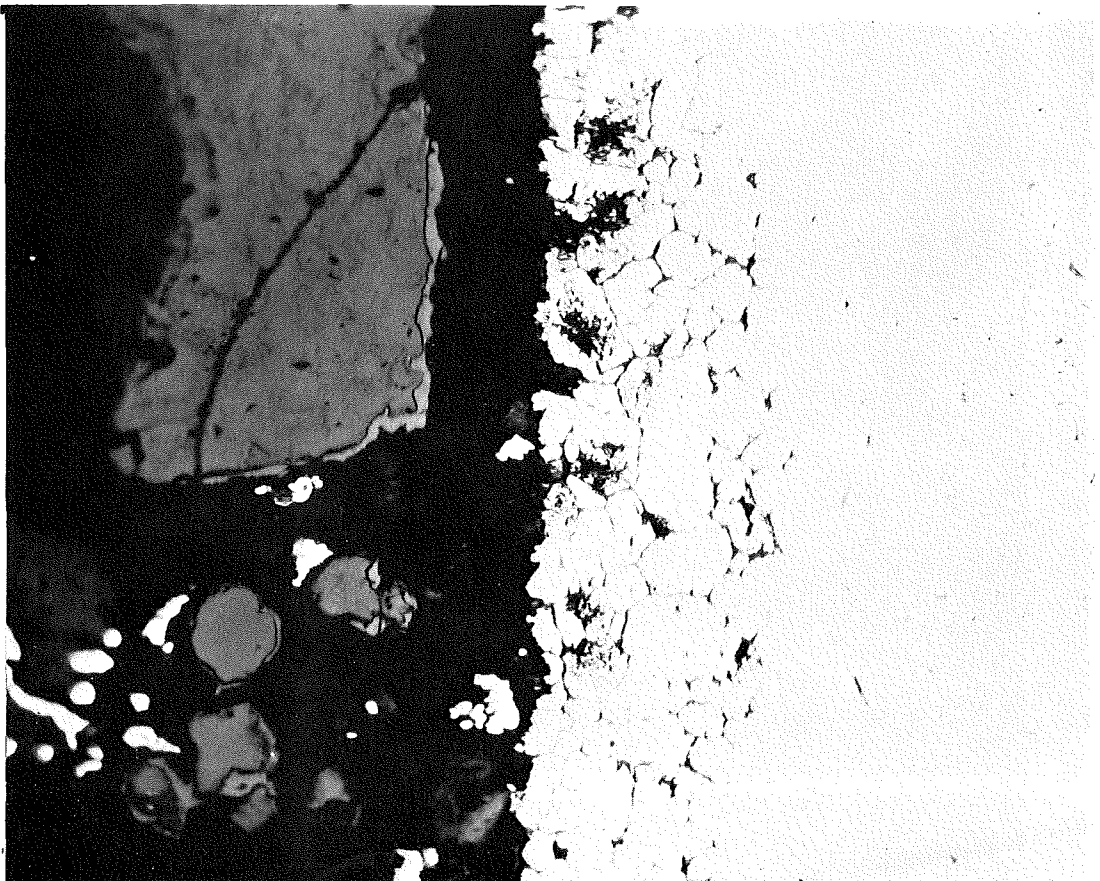
100 μ m



3c-72-5A/4-4/9

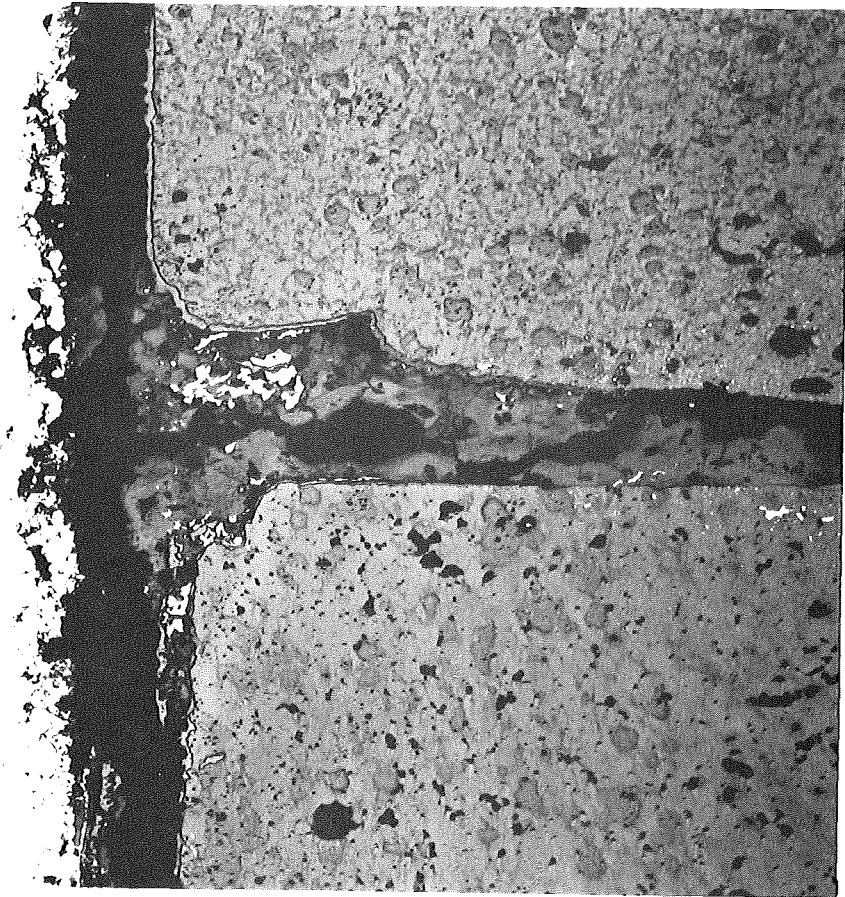
500x

40 μ m



- I/14 -
zu Prüfling 5A/4

4 A

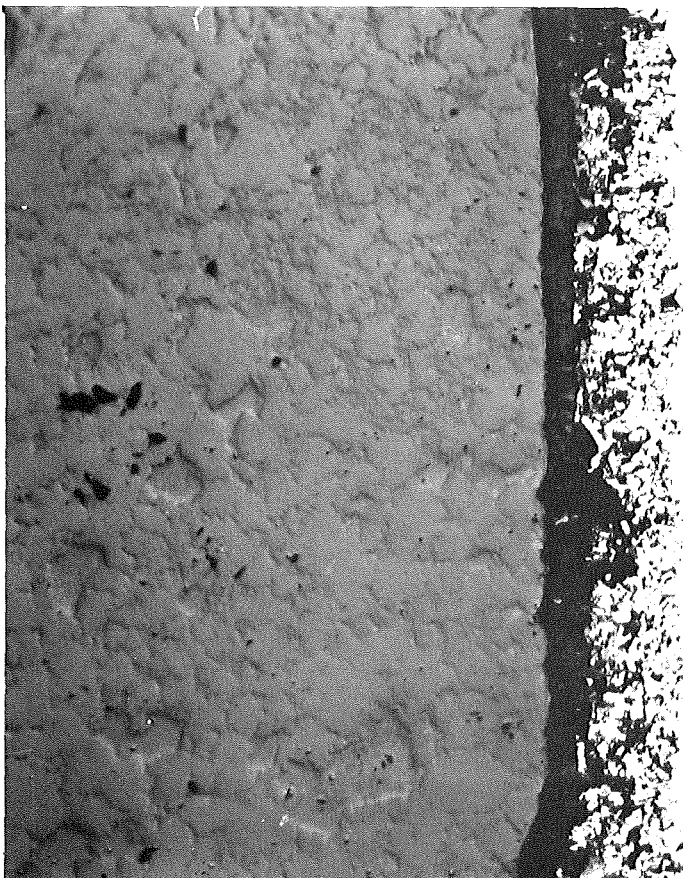


100 μm

200x

3c-72-5A/4-4/12

5 A



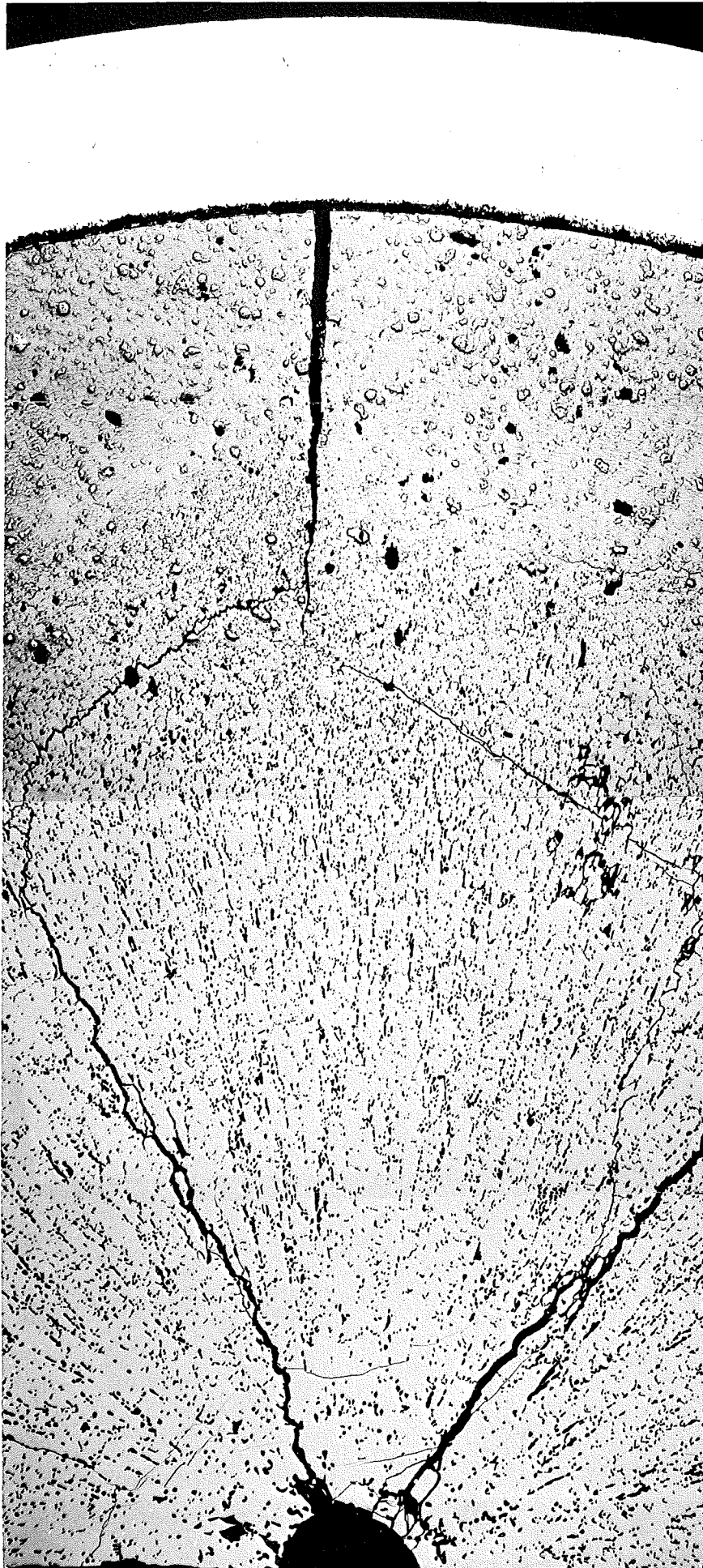
3c-72-5A/4-5/8

500x

40 μm

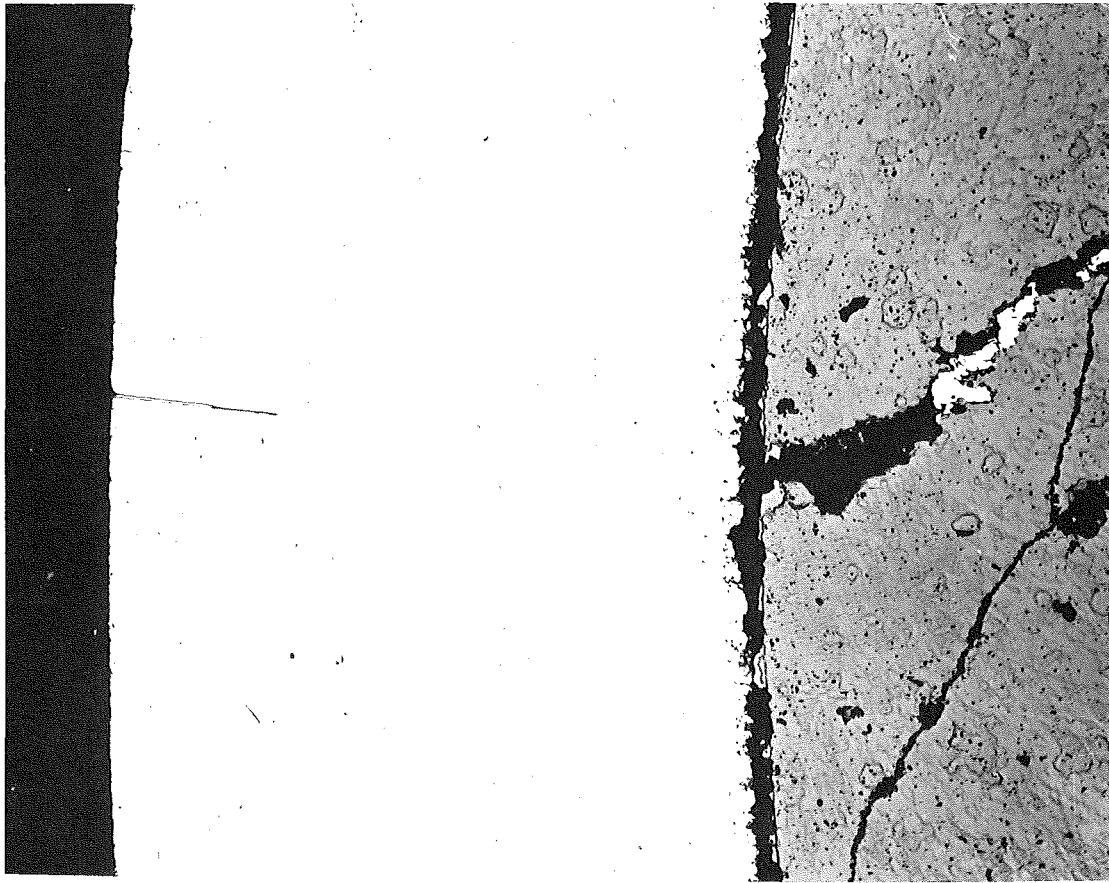
- I/15 -
zu Prüfling 5A/4

5A



- 1/16 -
zu Prüfling 5A/4

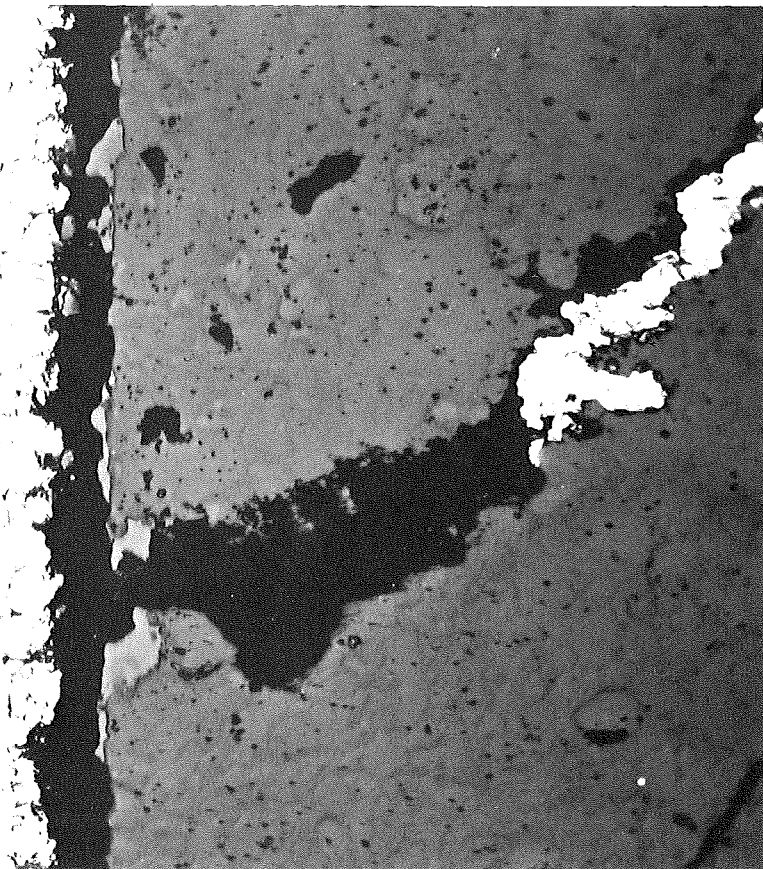
5A



100 μm

200x

3c-72-5A/4-5/6

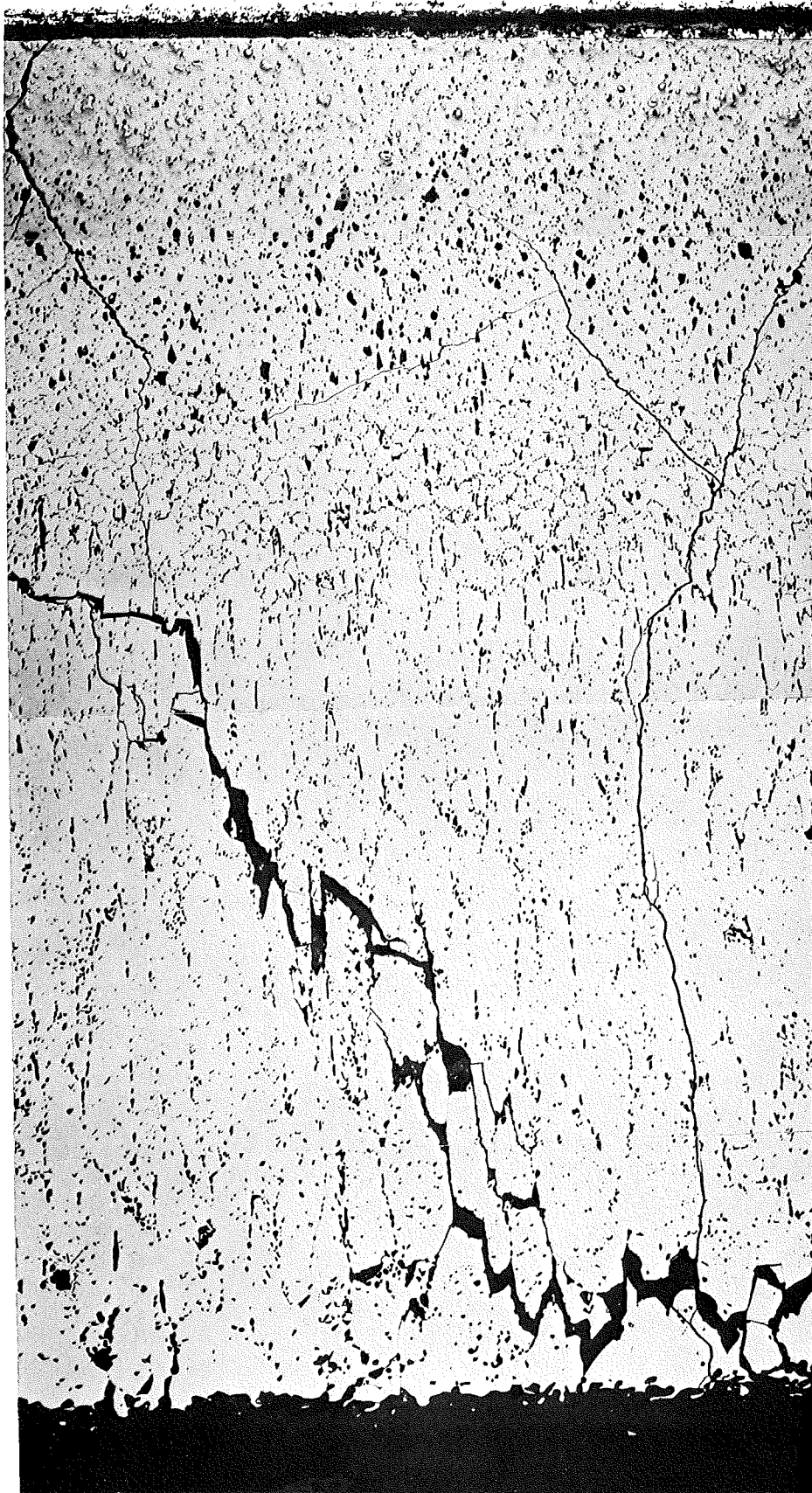


40 μm

500x

3c-72-5A/4-5/7

-1/17-
zu Prüfling 5A/4
6A



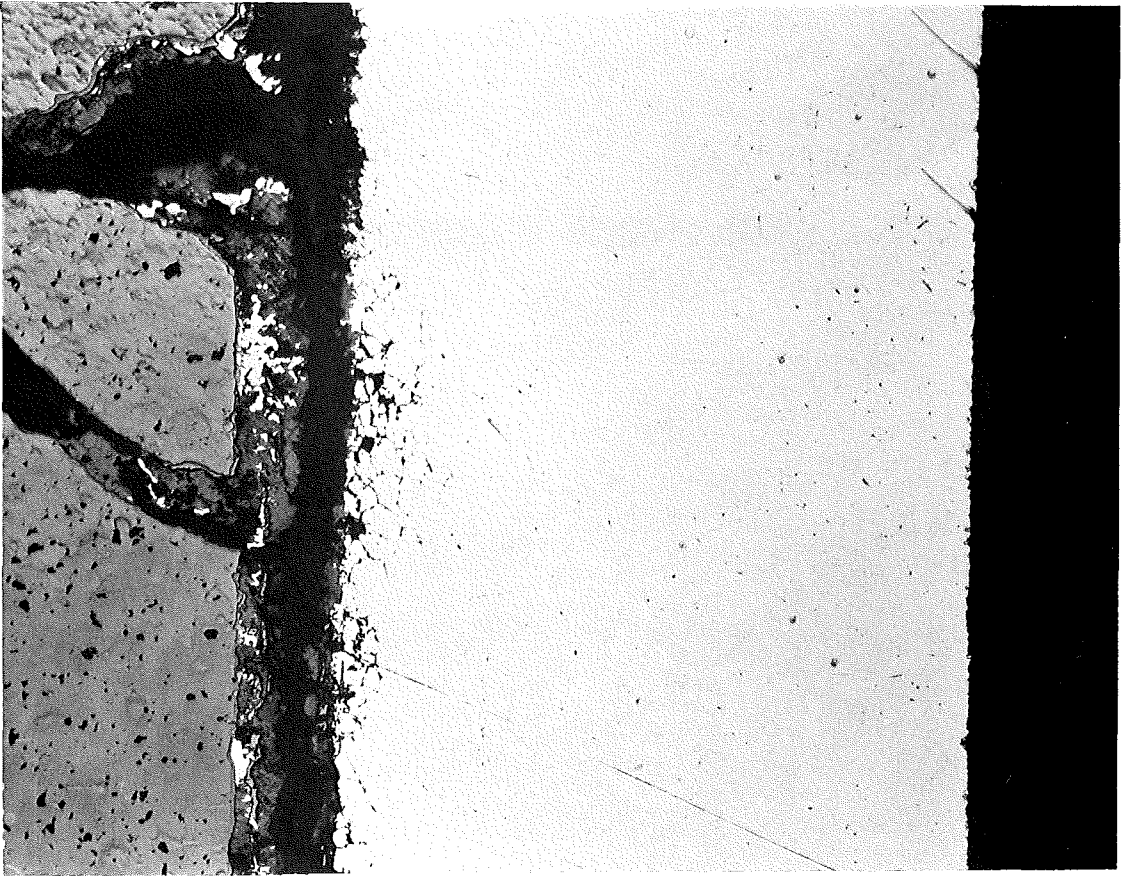
- I/18 -
zu Prüfling 5A/4

6 A

3c-72-5A/4-6/8

200x

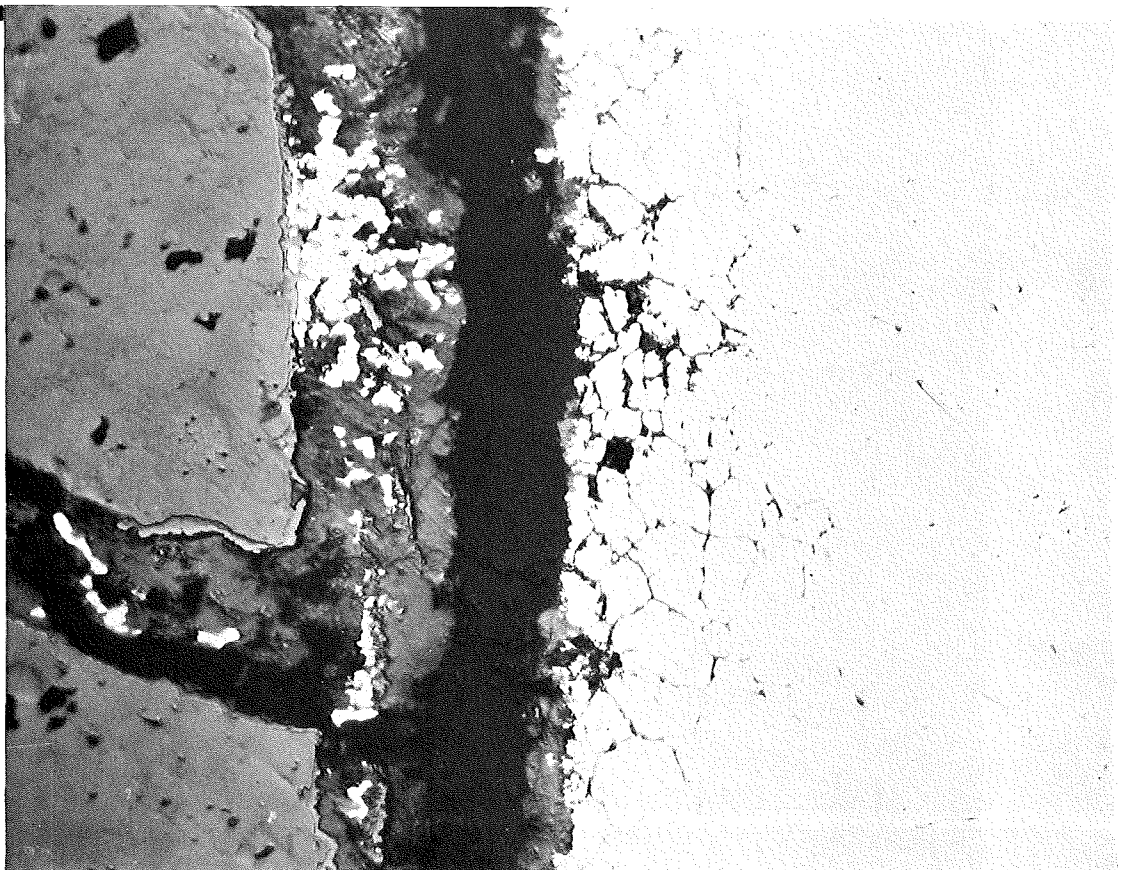
100 μ m



3c-72-5A/4-6/9

500x

40 μ m

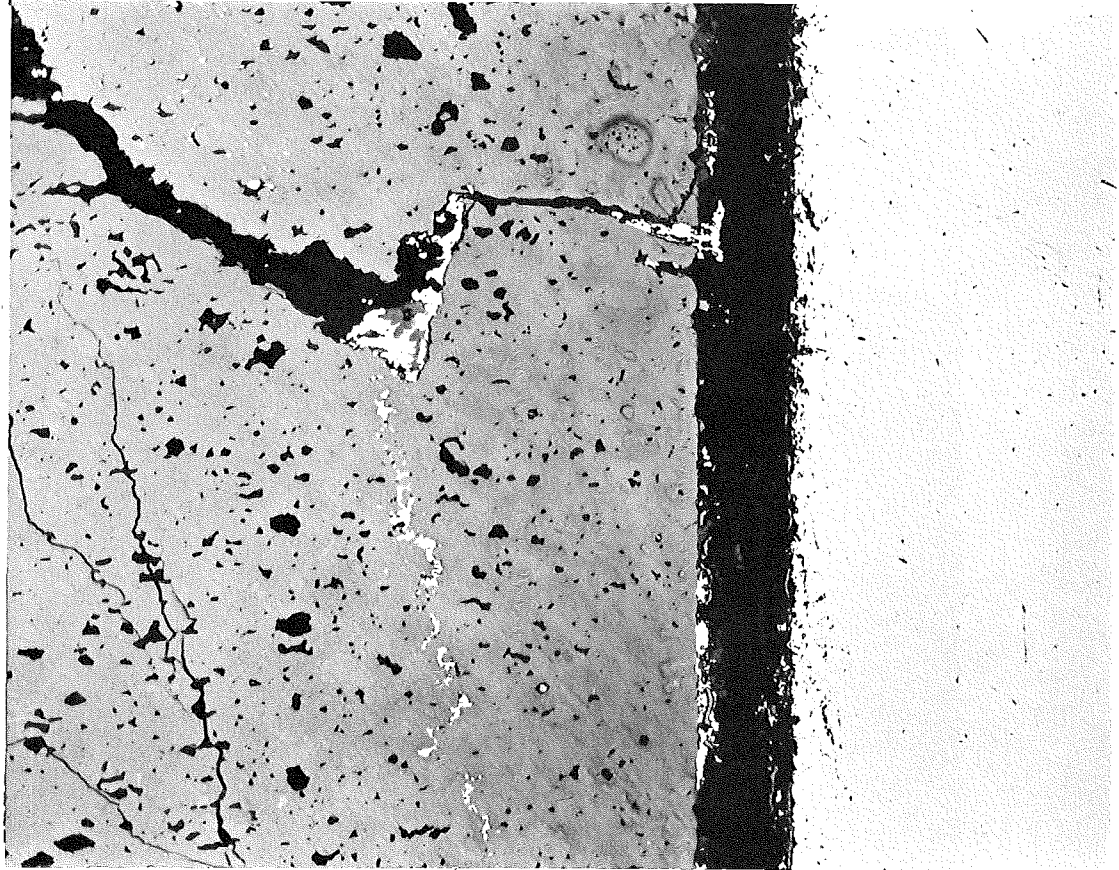


- I/19 -
zu Prüfling 5A/4

6 A

3c-72-5A/4-6-12 200x

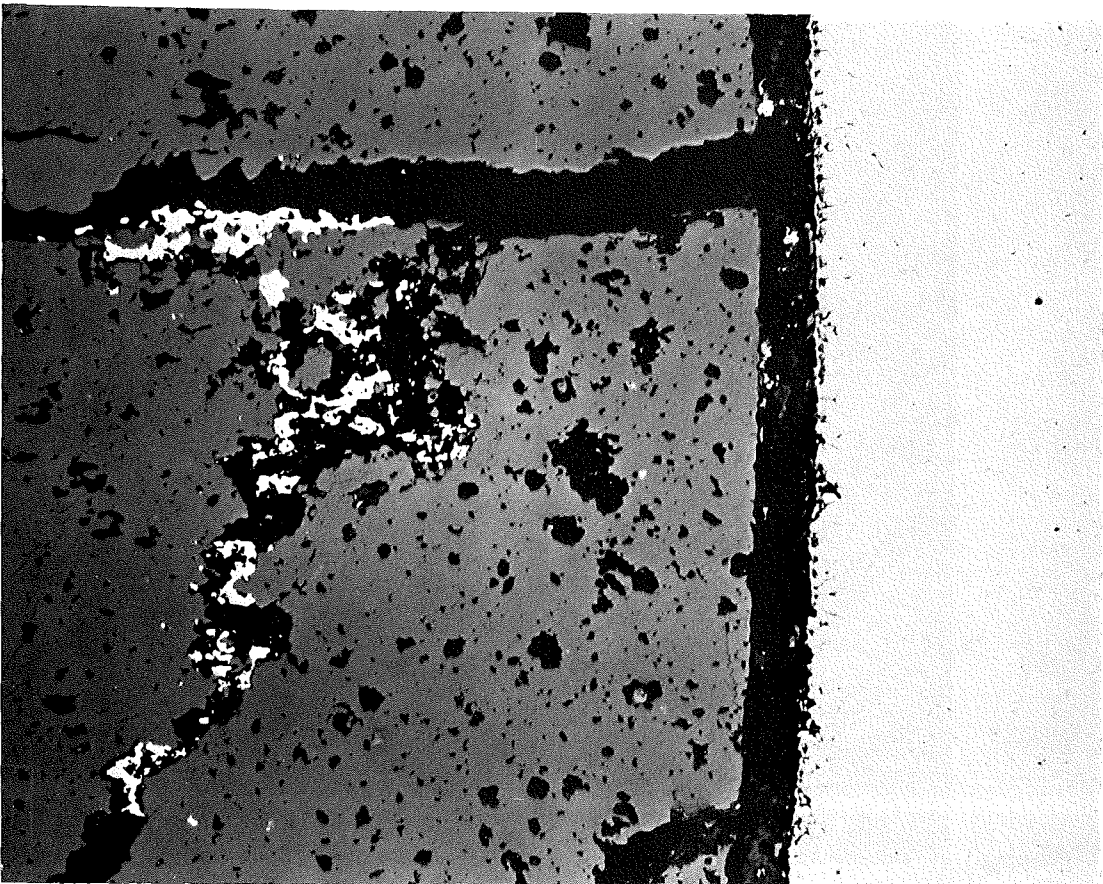
100 μm



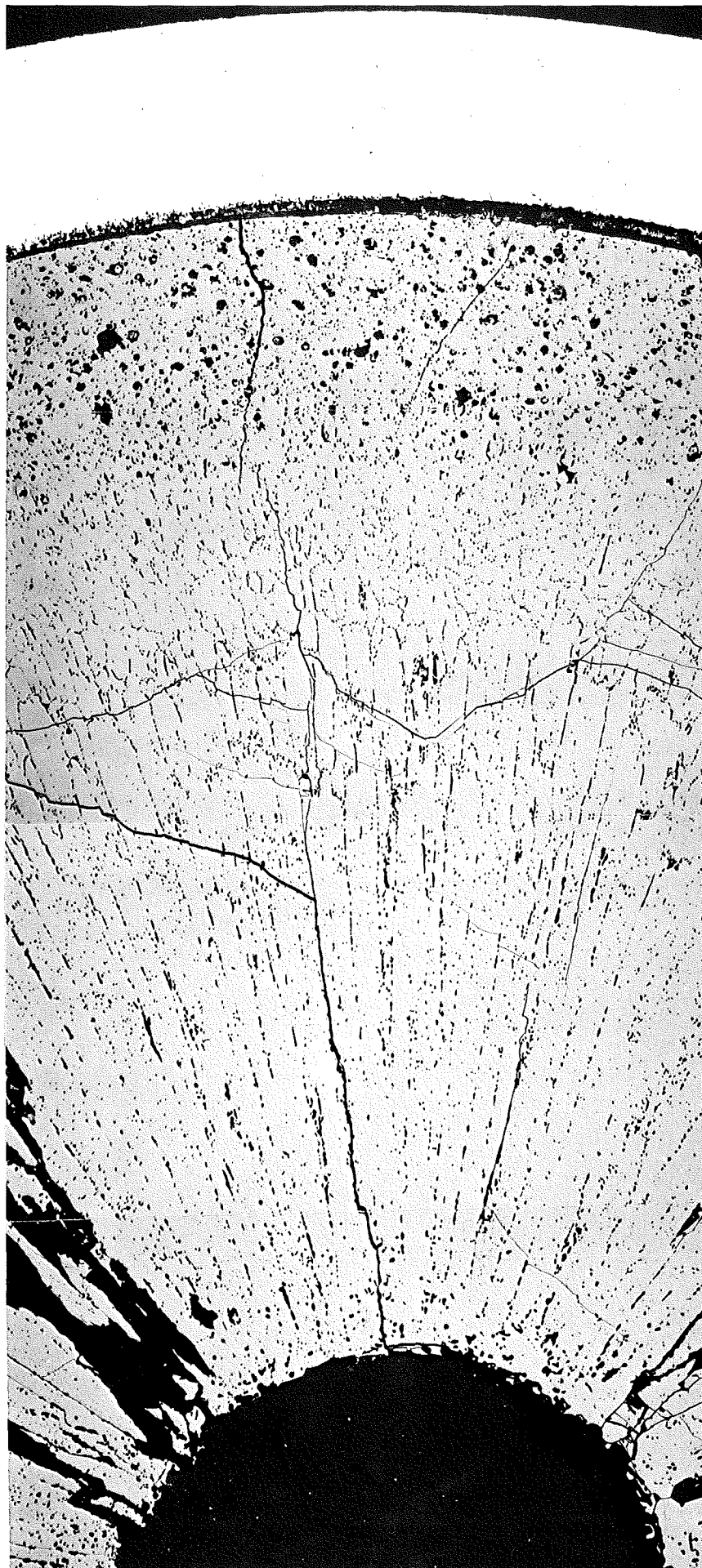
7 A

3c-72-5A/4-7-10 200x

100 μm

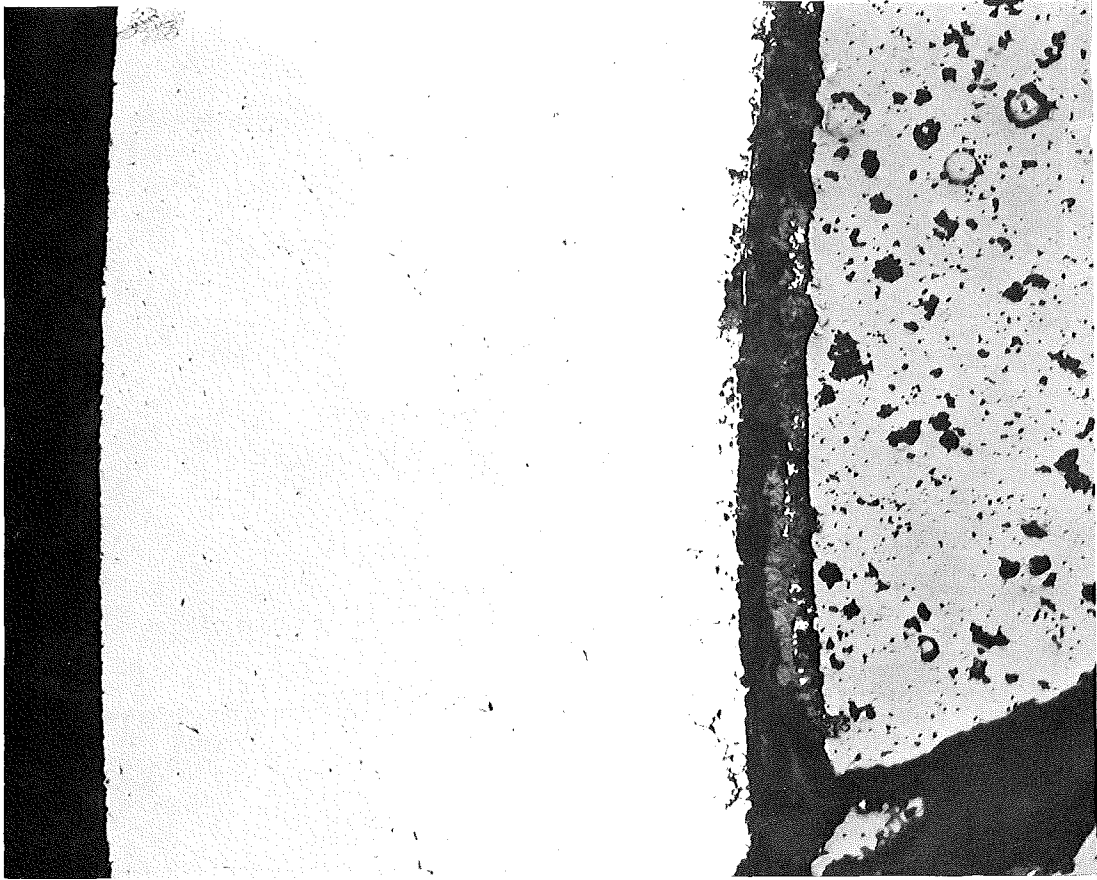


7A



- I/21 -
zu Prüfling 5A/4

7A



100 μm

200x

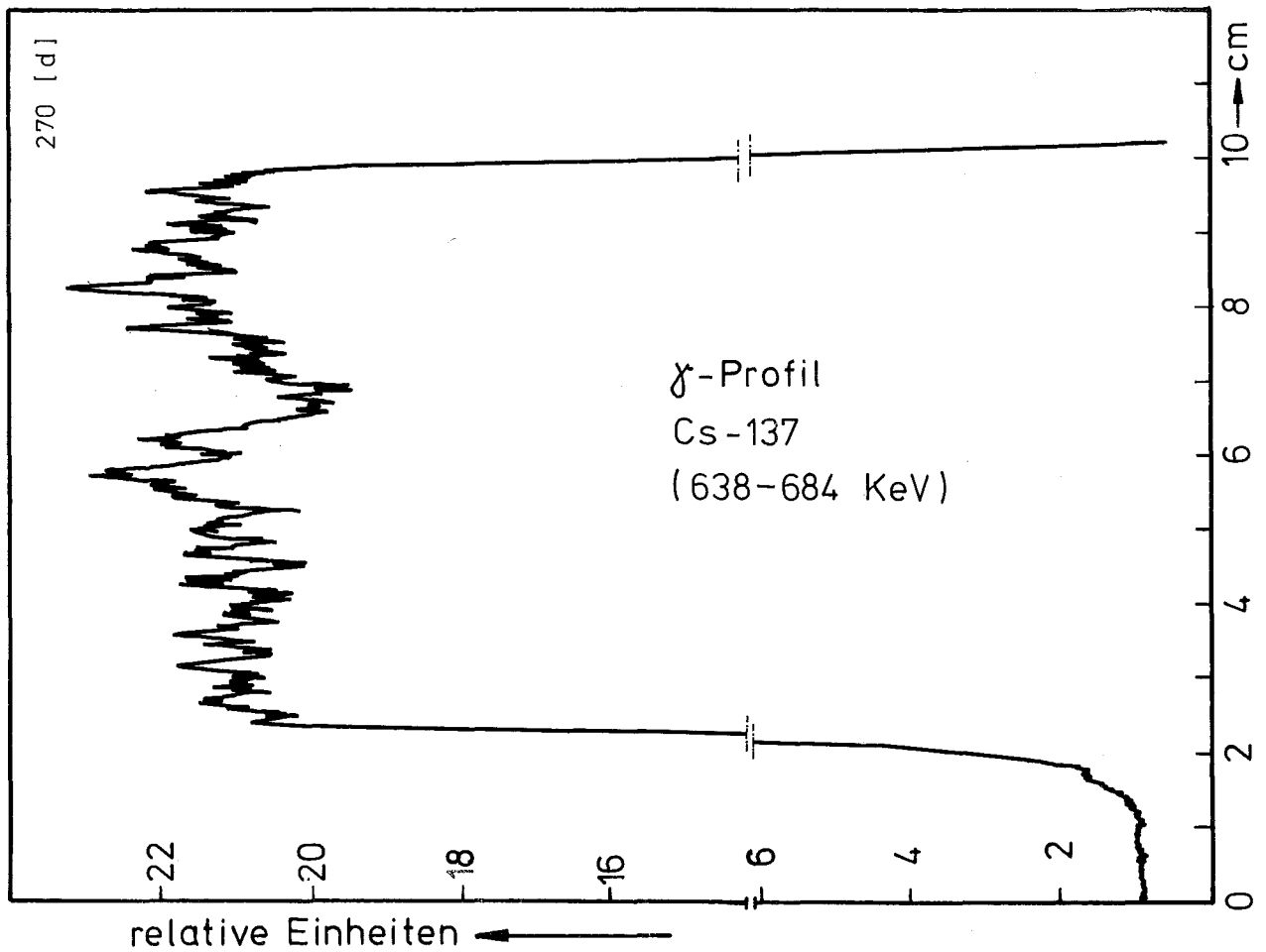
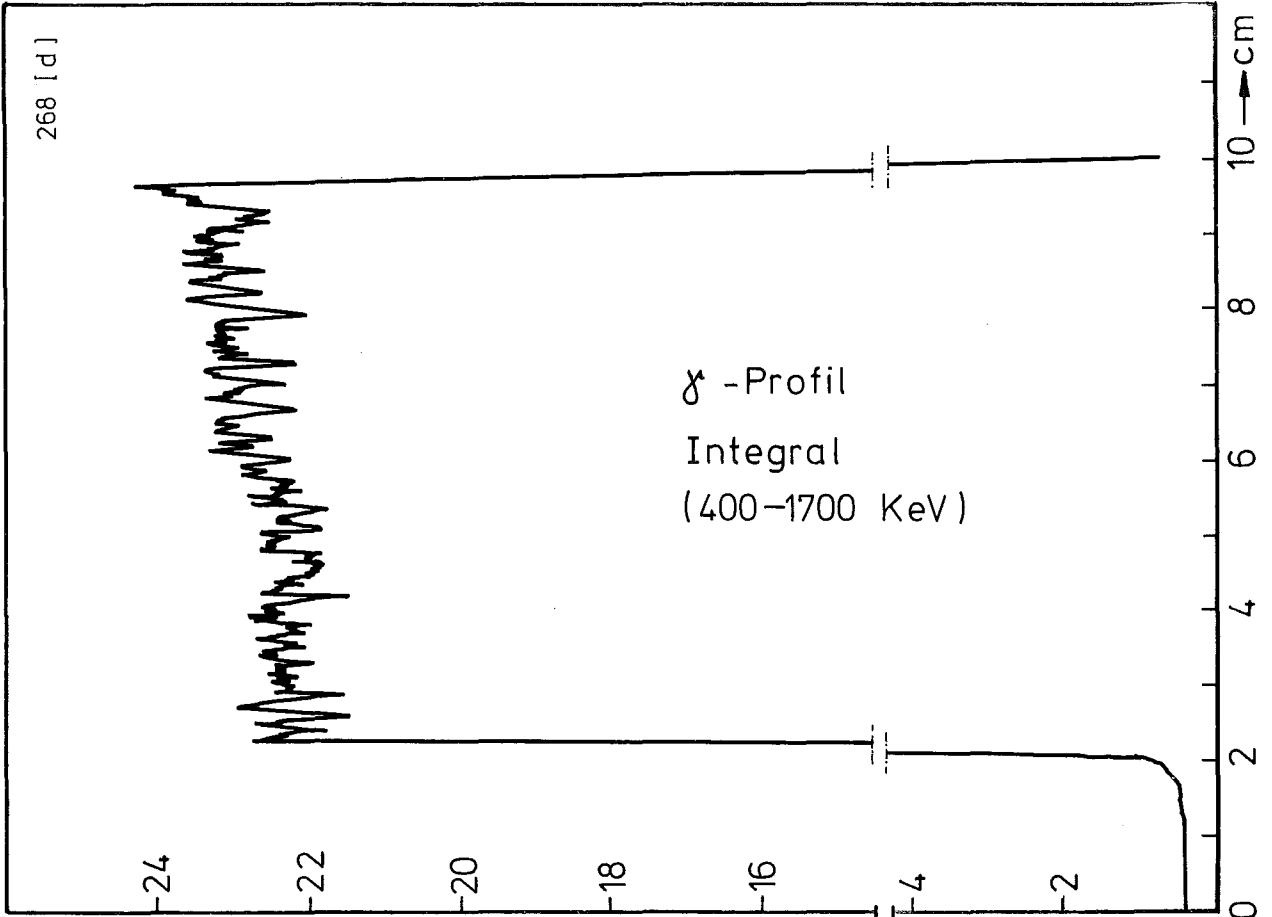
3c-72-5A/4-7/6

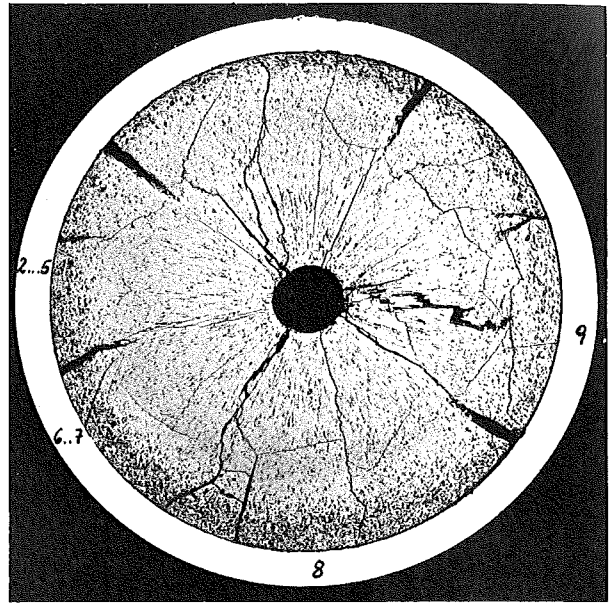
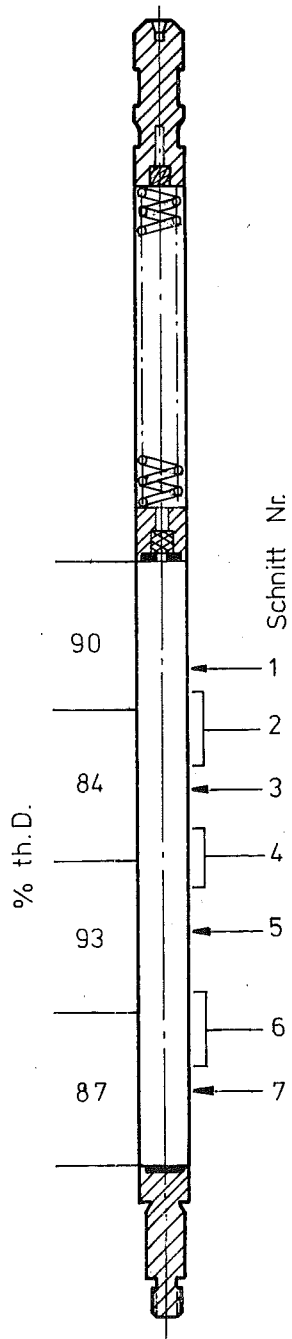


40 μm

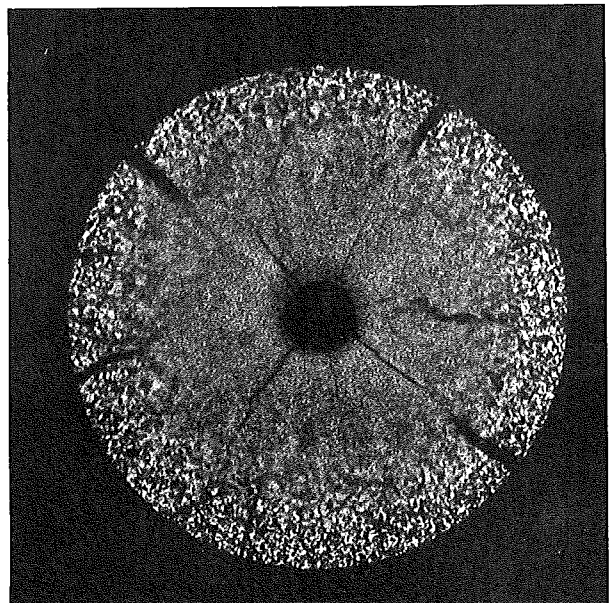
500x

3c-72-5A/4-7/7

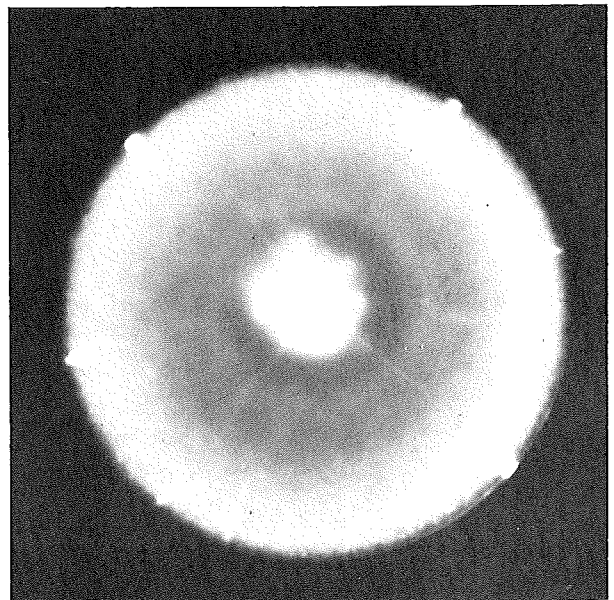




A



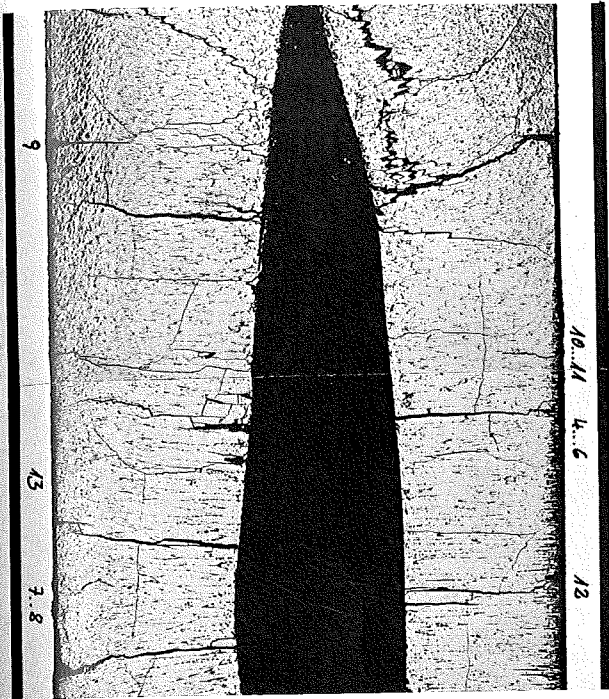
B



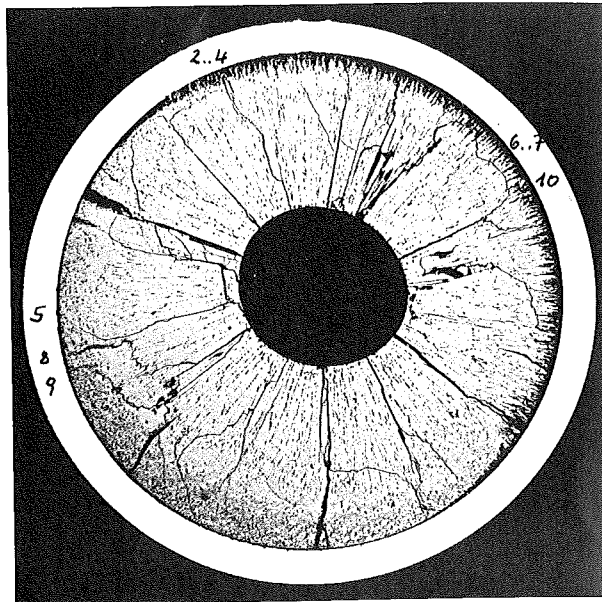
C

1 mm

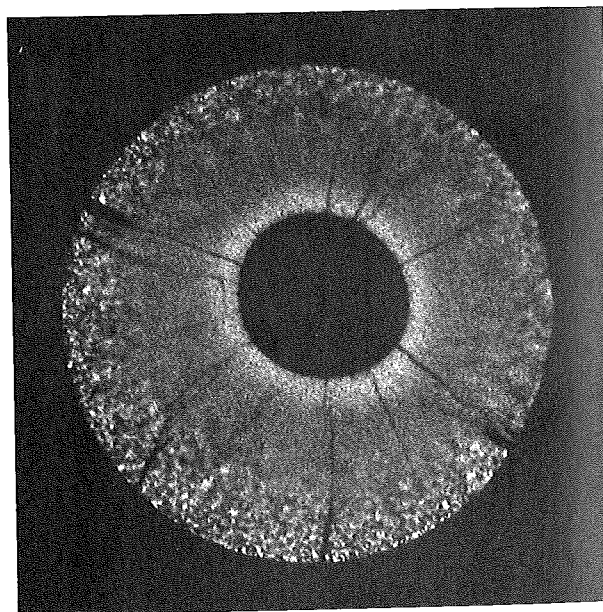
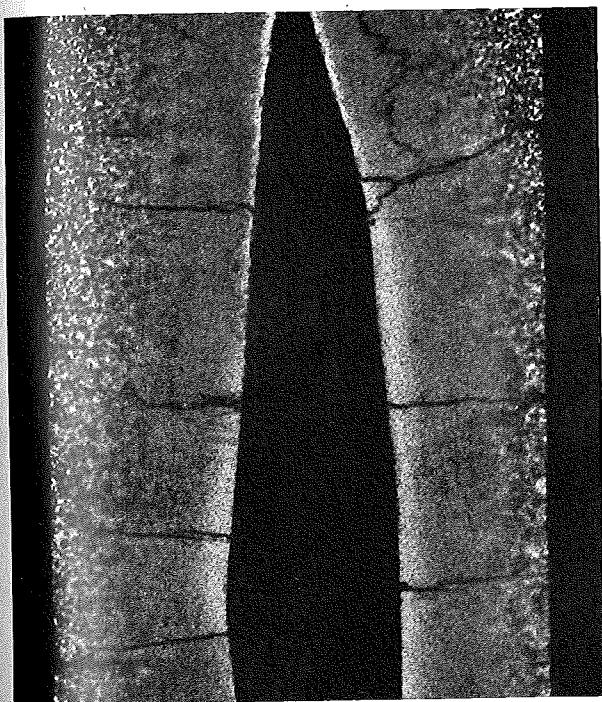
2



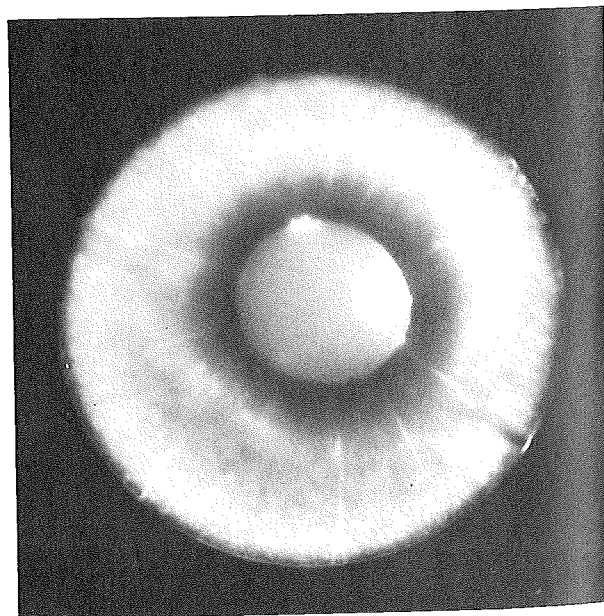
3



A



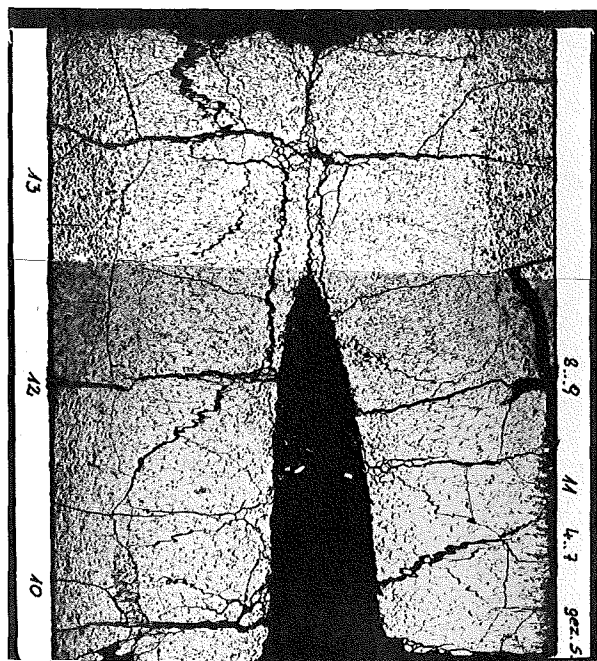
B



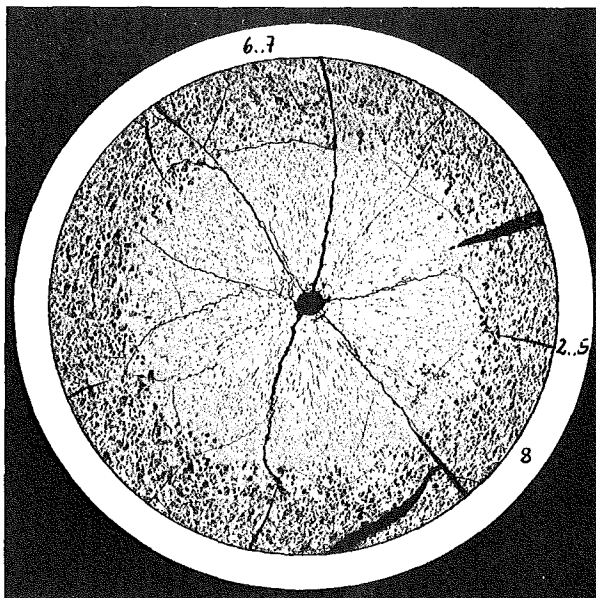
C

1mm

4

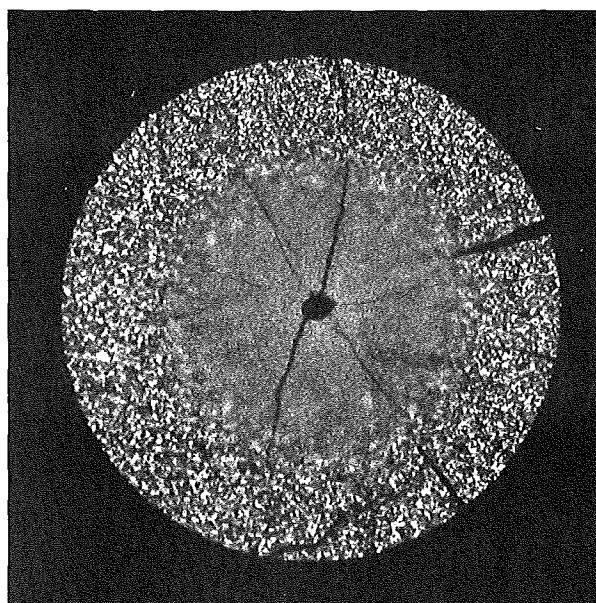
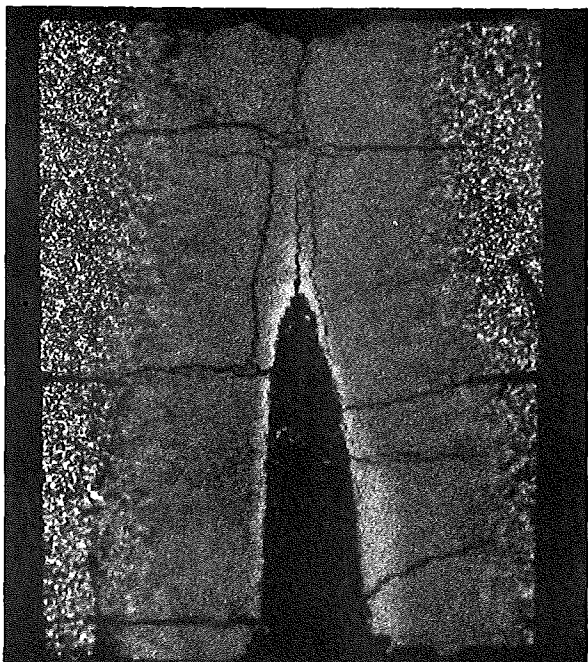


5



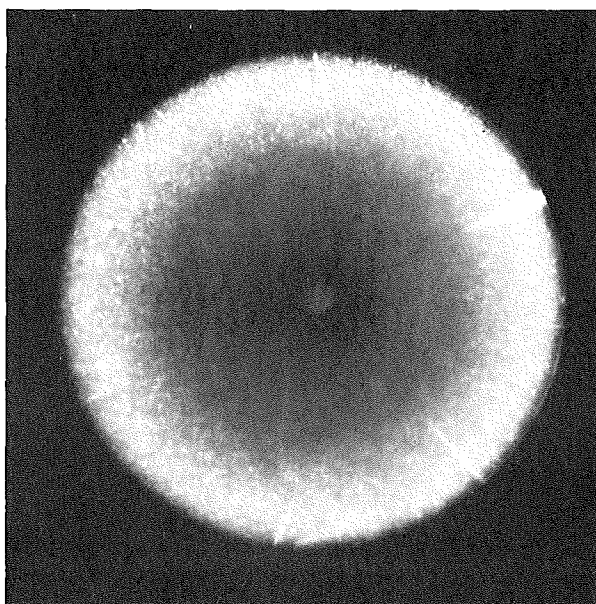
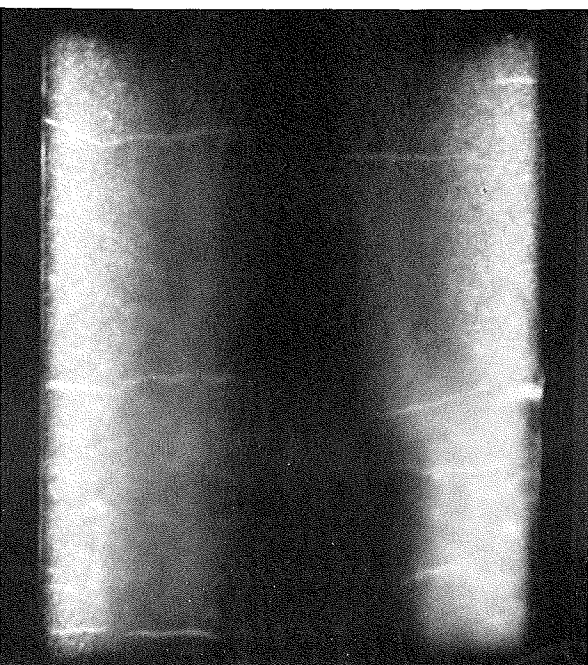
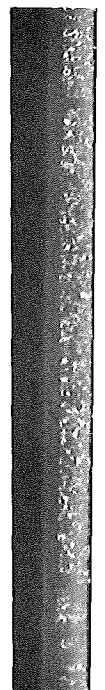
A

A



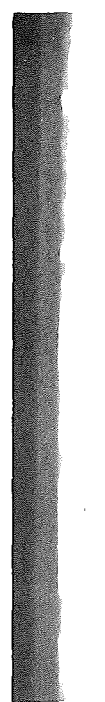
B

B



C

C

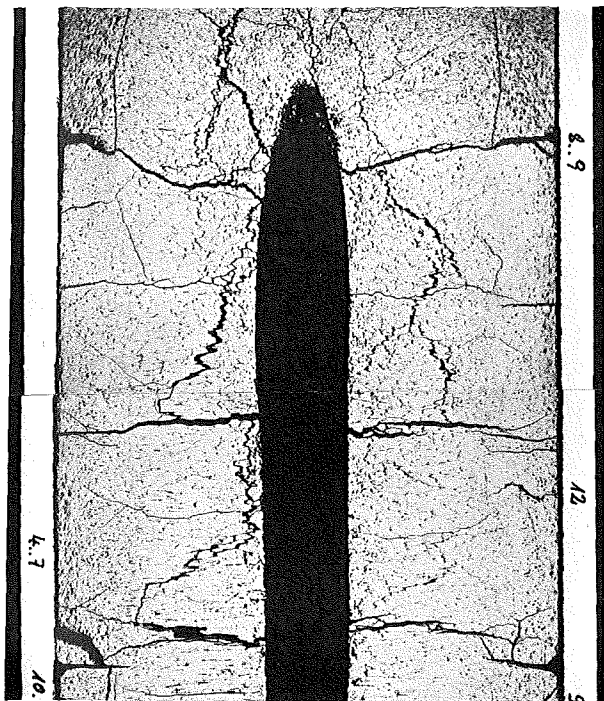


1 mm

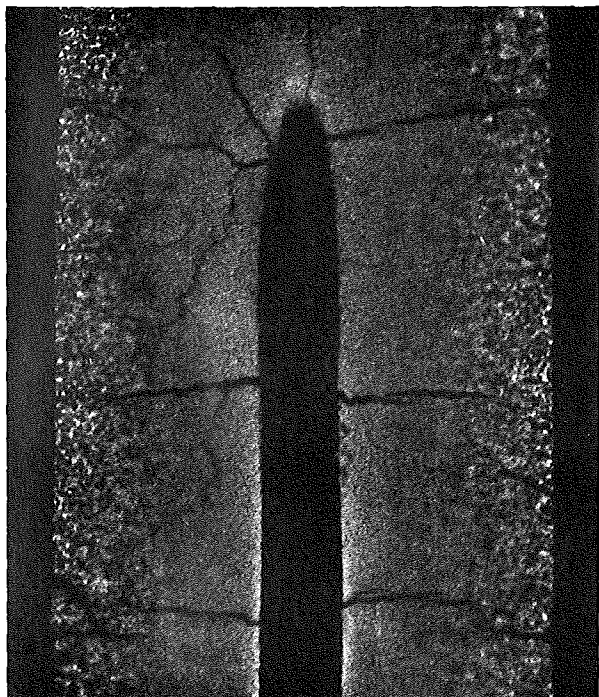
1 mm

6

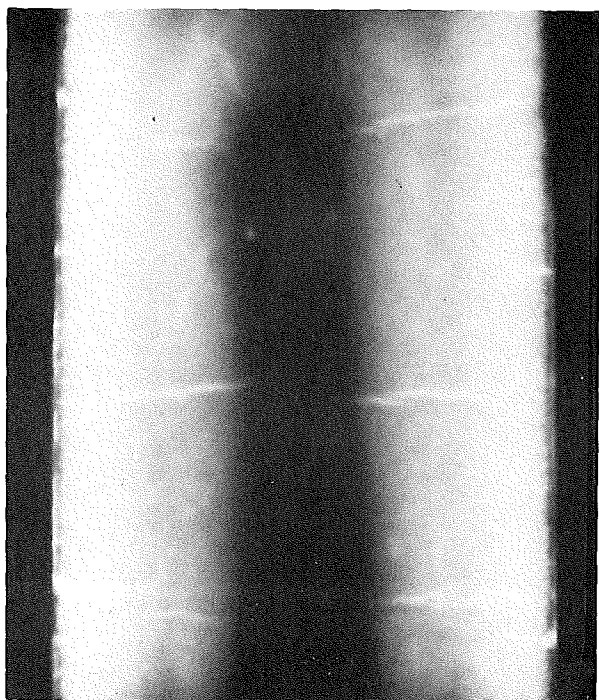
A



B



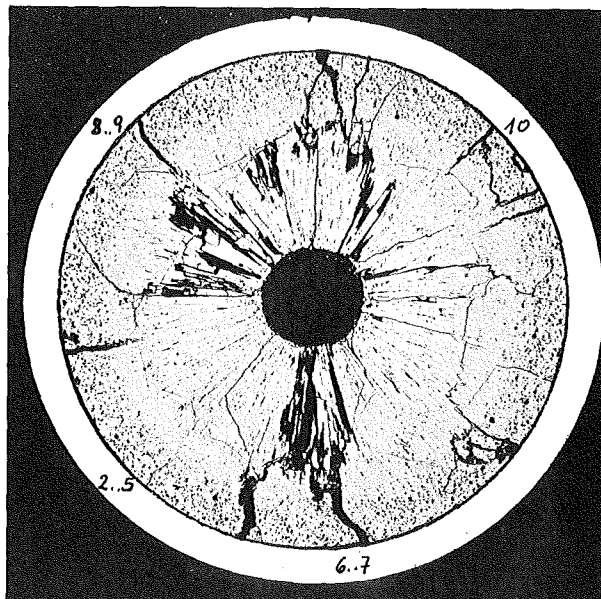
C



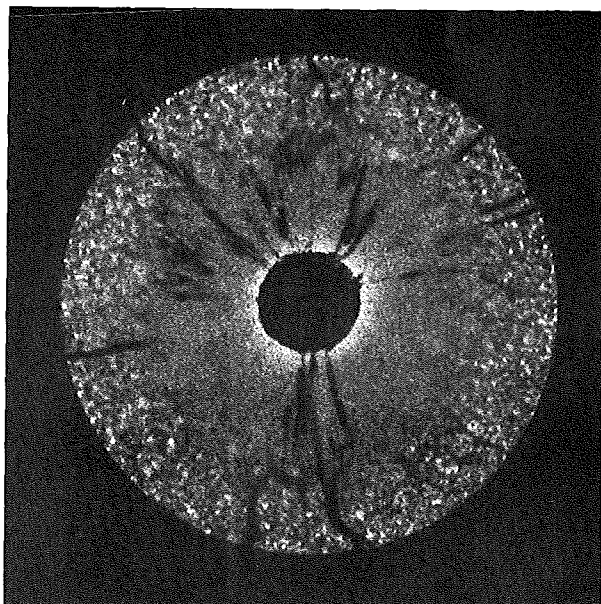
1 mm

7

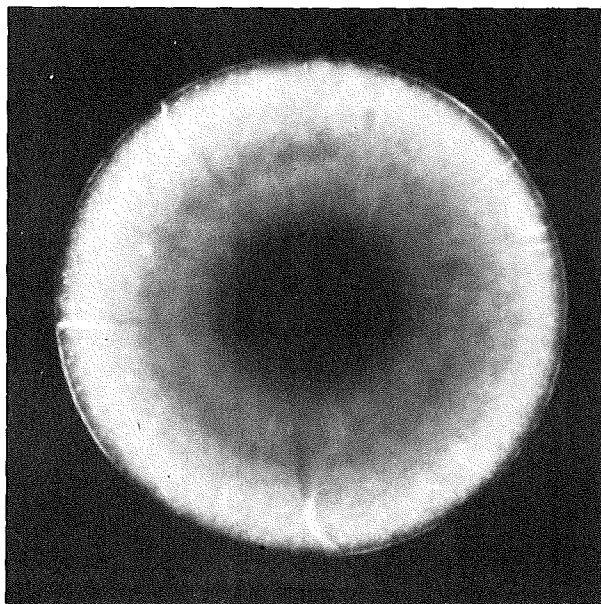
A



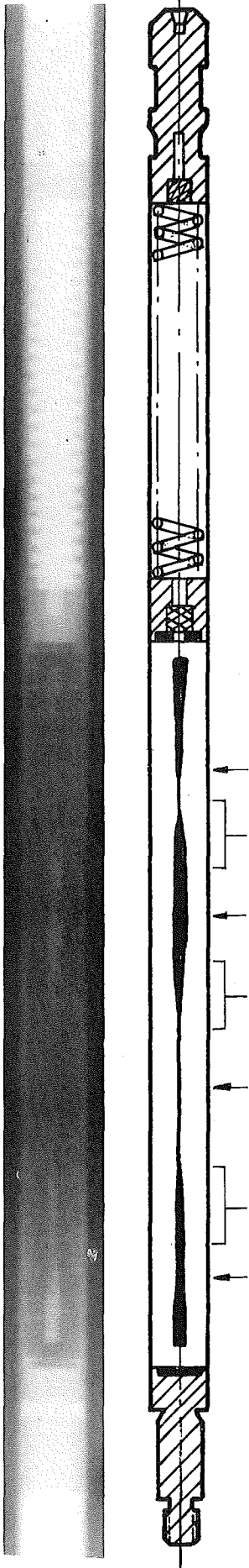
B



C



1 mm



Prüfling 5A-4

Brennstoff :

Form : Tabletten

Zusammensetzung : UO_2/PuO_2

Tablettendichte : 89,7; 83,7; 93,0;
86,8 % th.D.

Hülle :

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 7,0 mm

Wandstärke : 0,4 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : 48 μ m

Schmierdichte : —

Bestrahlung :

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

Dauer : 32,9 Vollasttage

Ende : 1.6.1970

Rechn. Abbrand mittl. : 5,8 MWd/kg

Stableistung max./mittl. : 511/448 W/cm

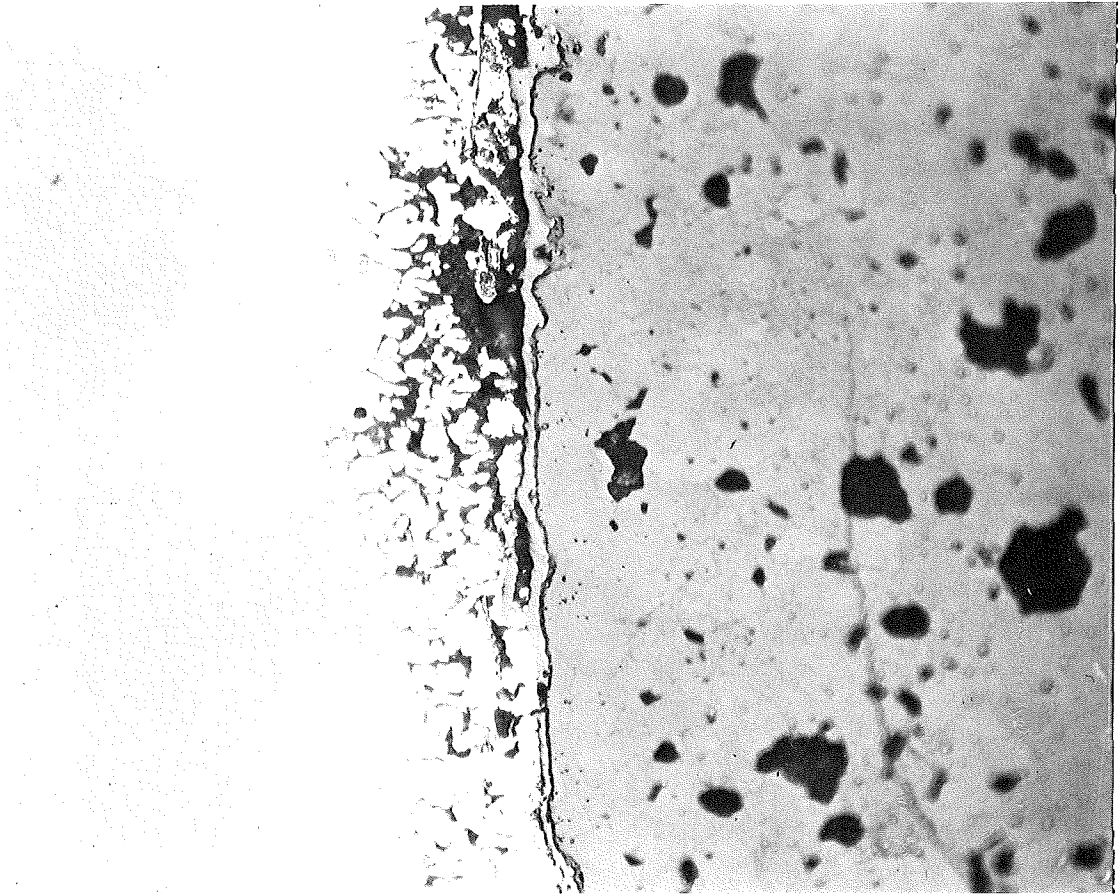
-1/25-
zu Prüfling 5A/2
1A



4

0,1 mm

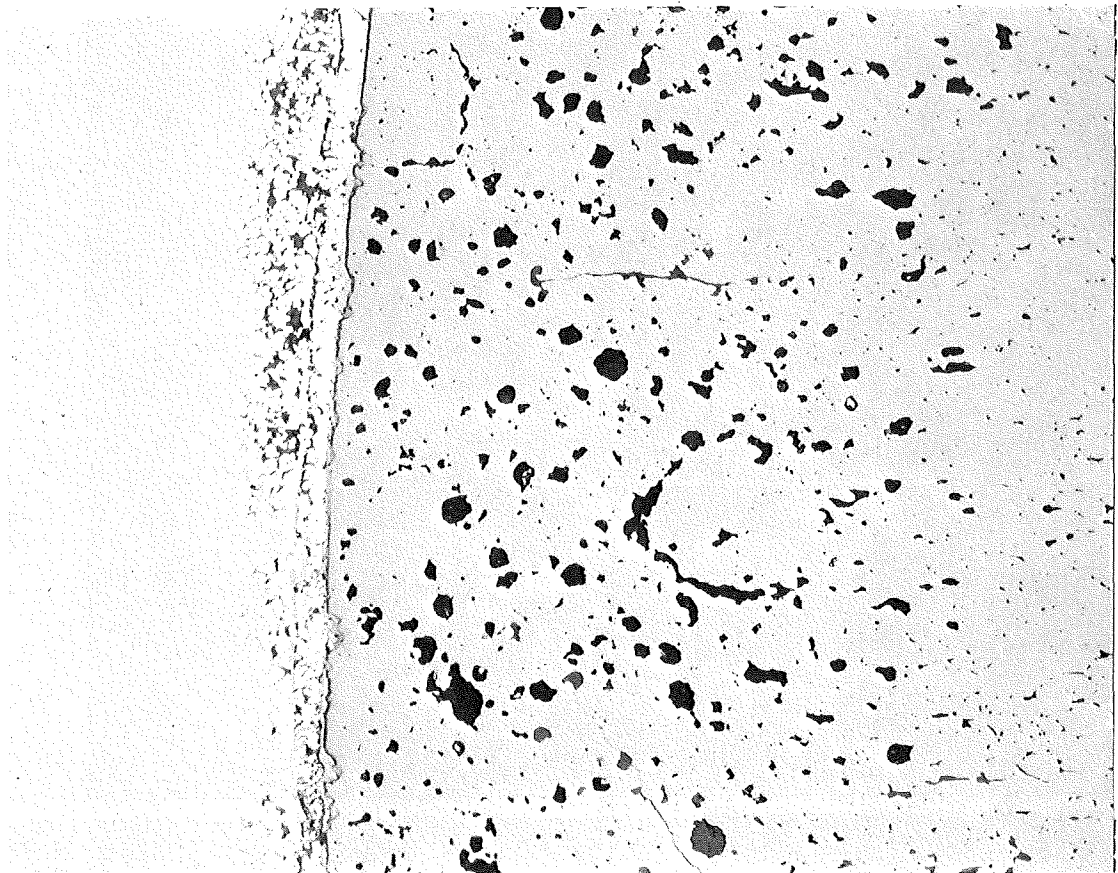
-1/26-
zu Prüfling 5A/2
1A



40 μm

500x

HZ-3c-72-5A2-1/7



100 μm

200x

HZ-3c-72-5A2-1/13

-1/27-
zu Prüfling 5A/2

2 A

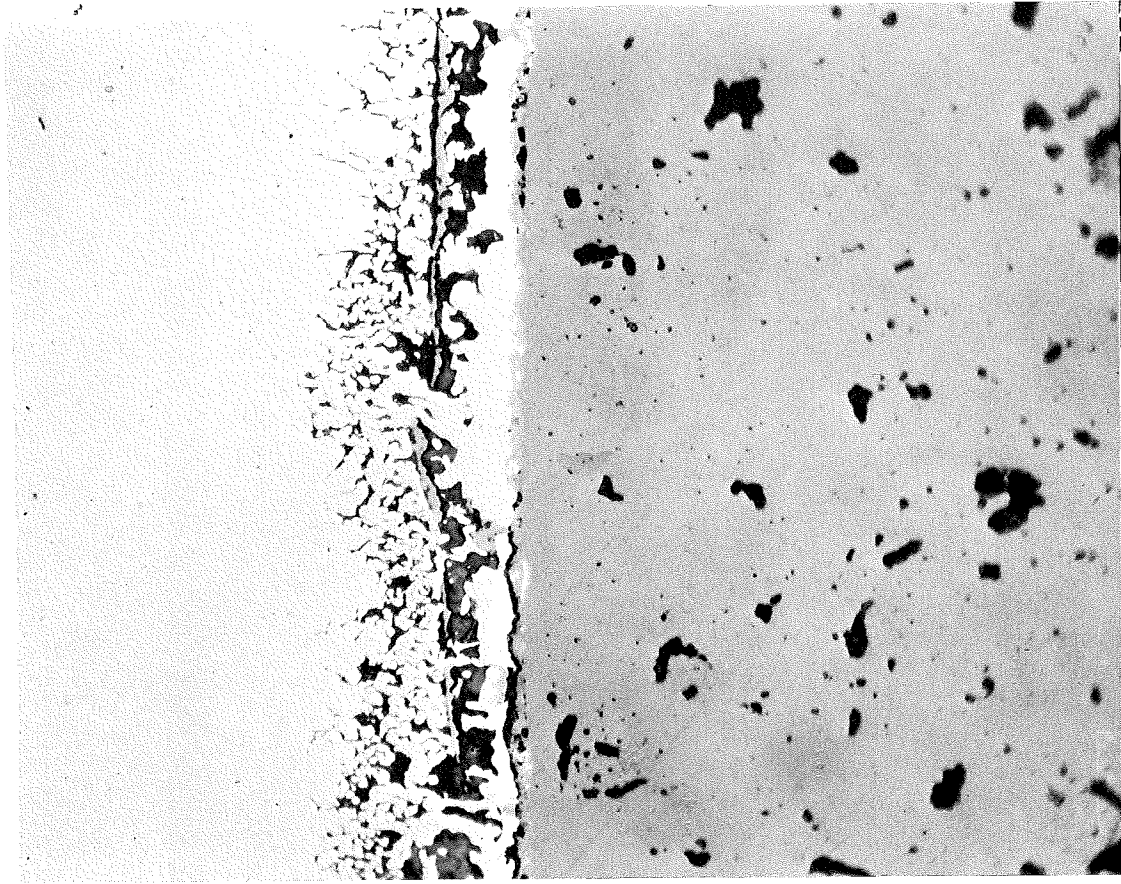


4

0,1mm

-1/28-
zu Prüfling 5A/2

2 A

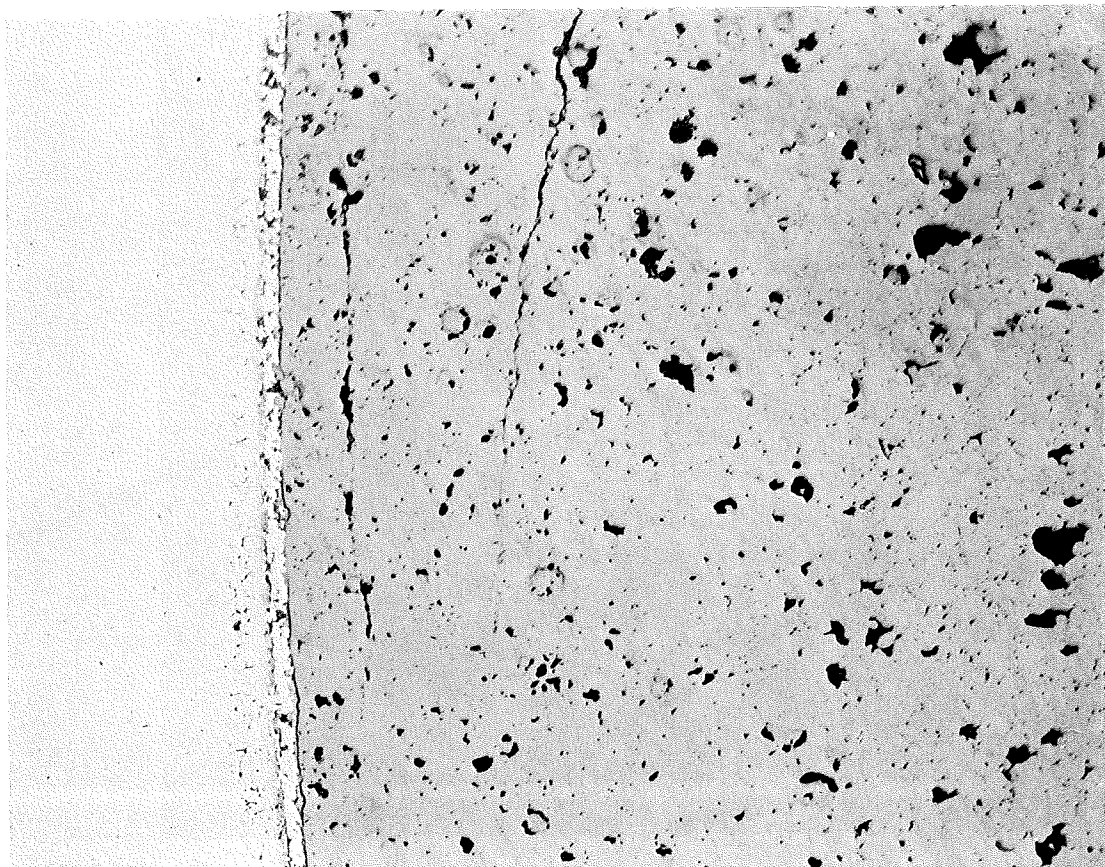


40 μm

500x

HZ-3c-72-5A2-2/8

3 A



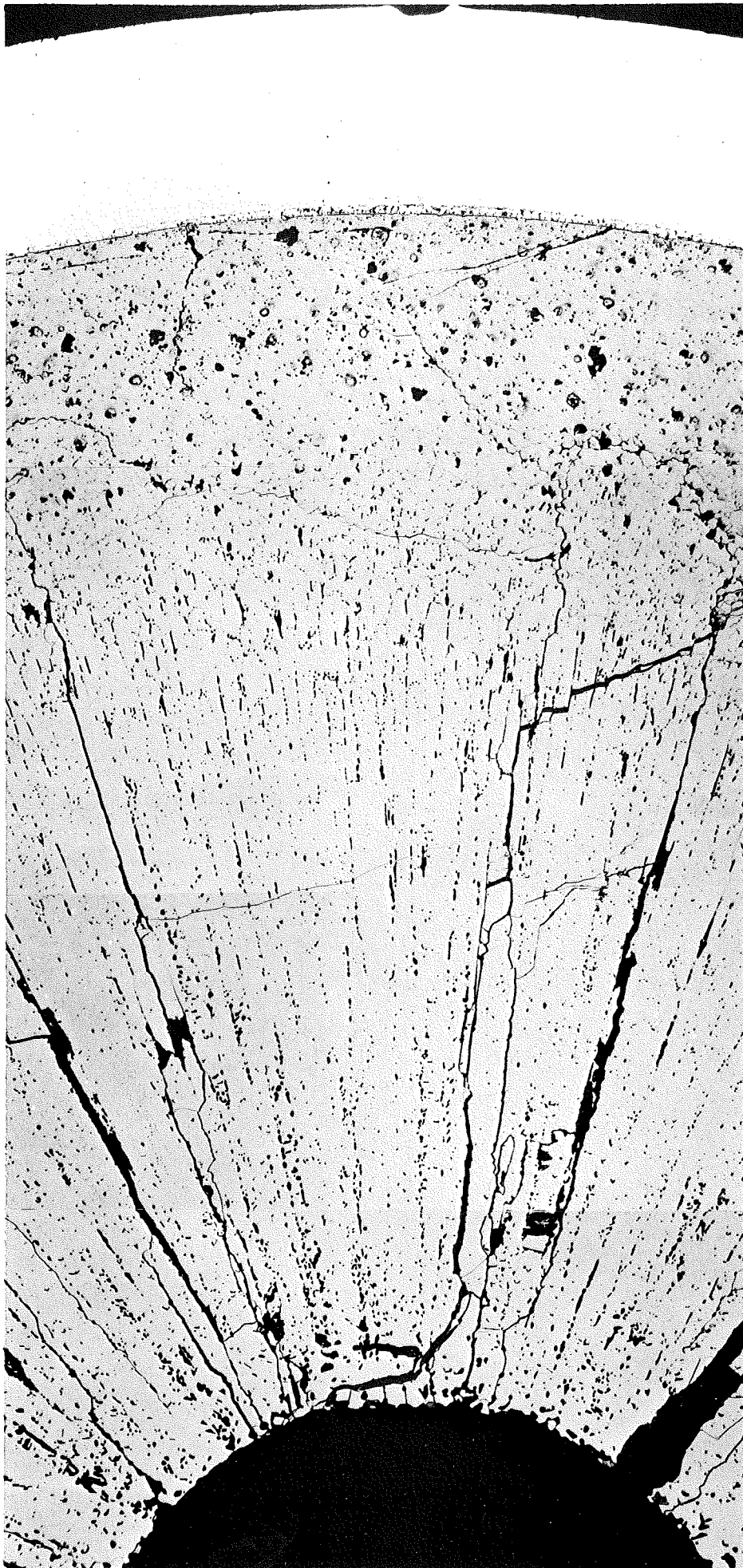
100 μm

200x

HZ-3c-72-5A2-3/14

- I/29 -
zu Prüfling 5A/2

3A



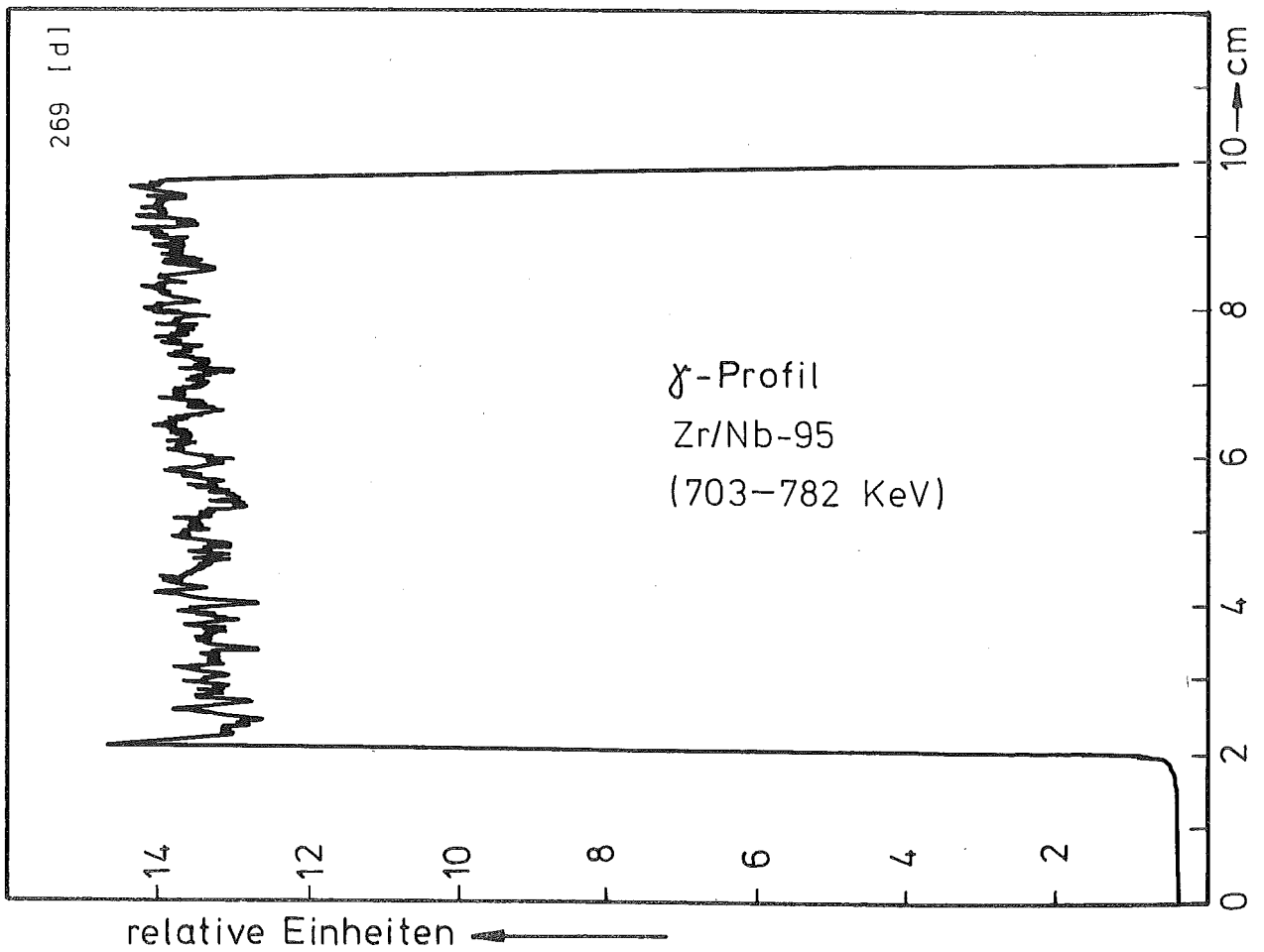
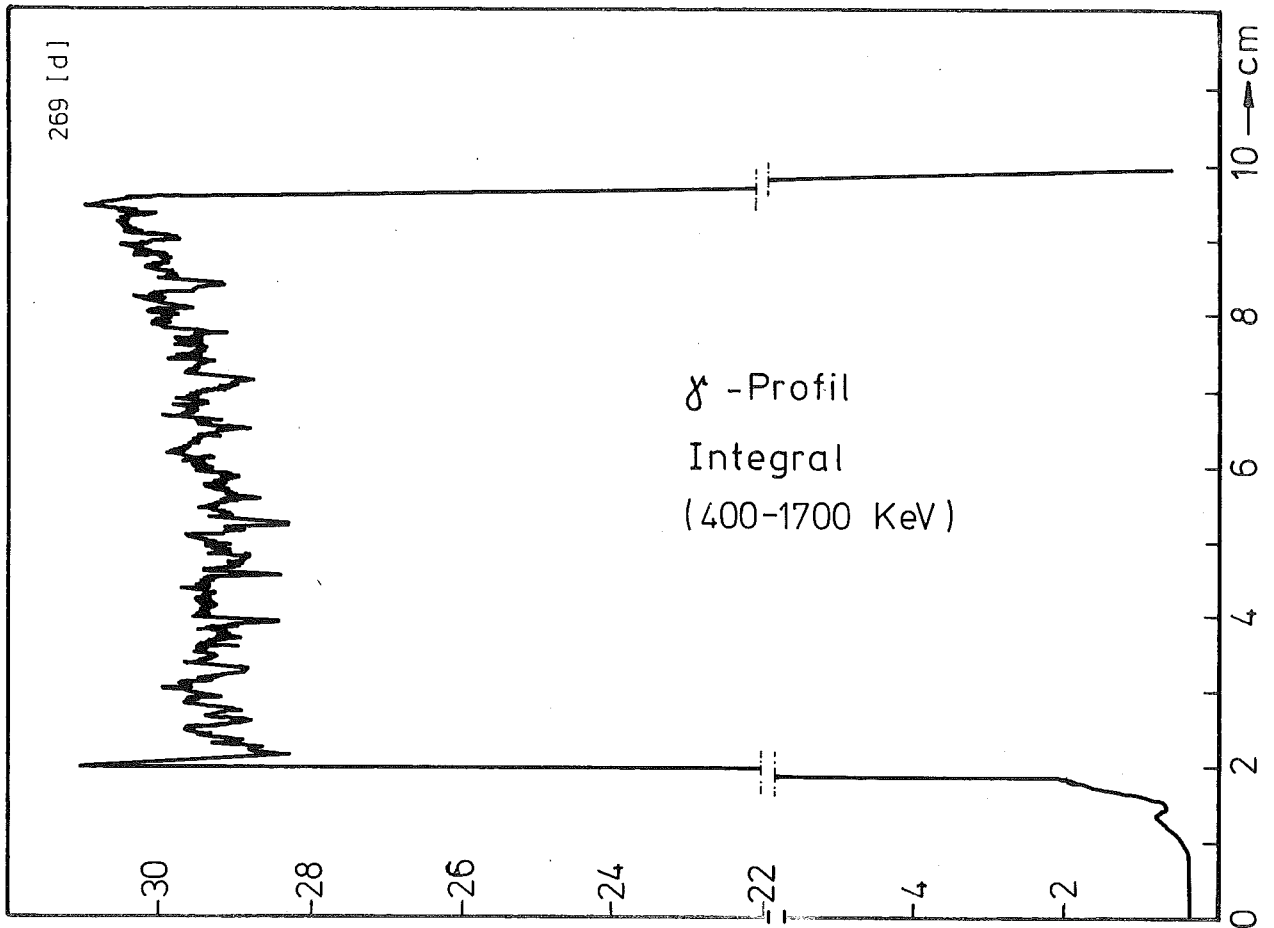
-I/30-
zu Prüfling 5A/2

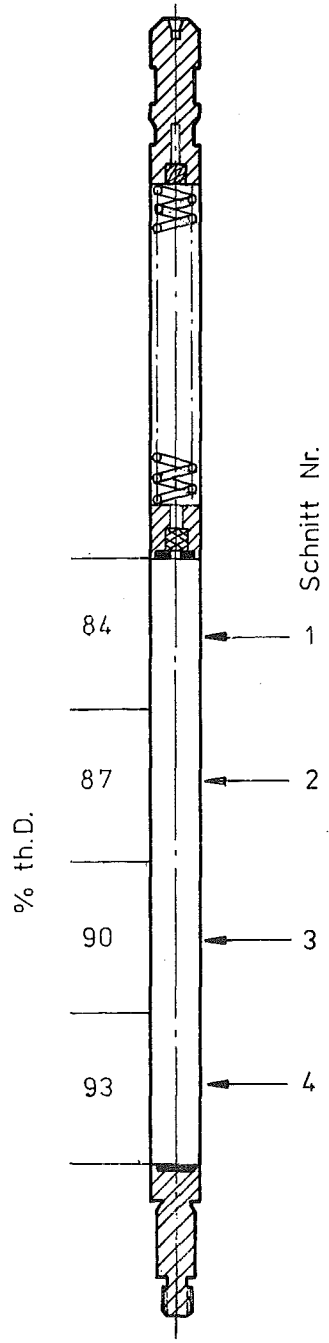
4A



4

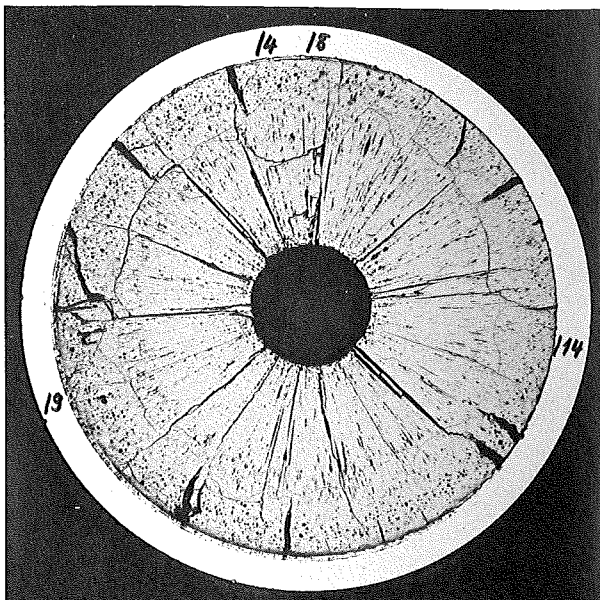
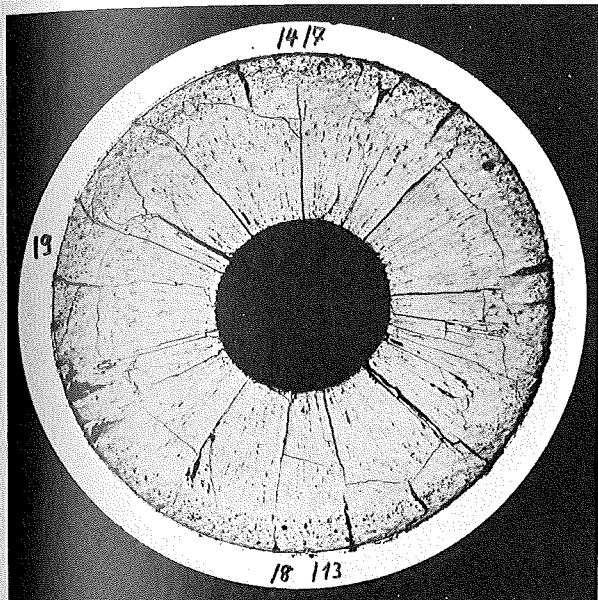
0,1mm



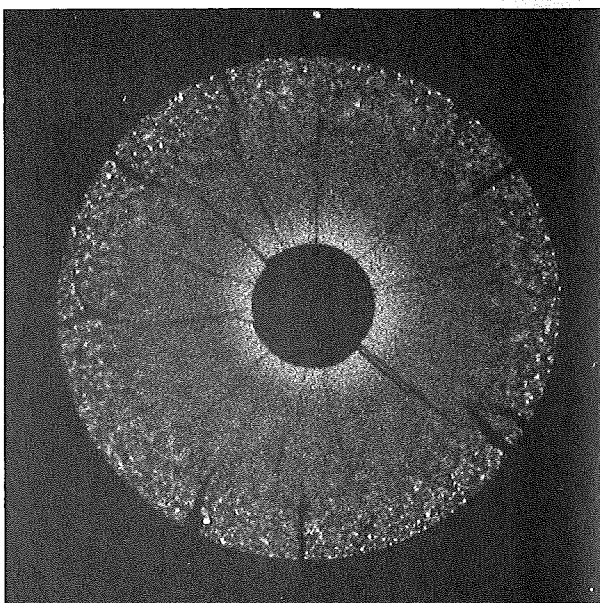
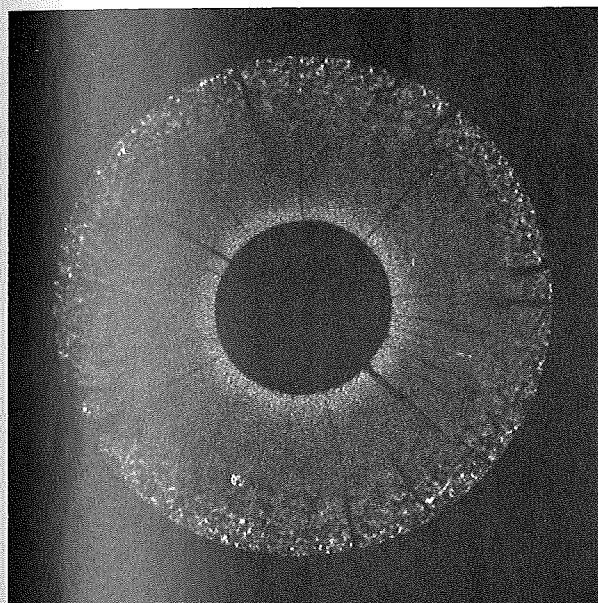


1

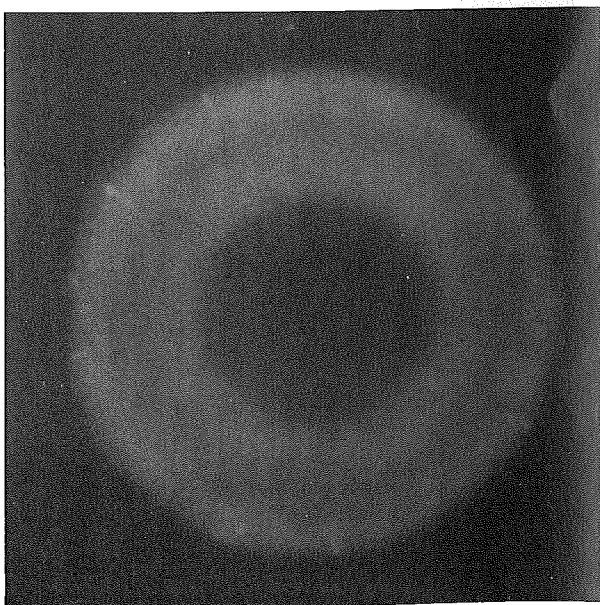
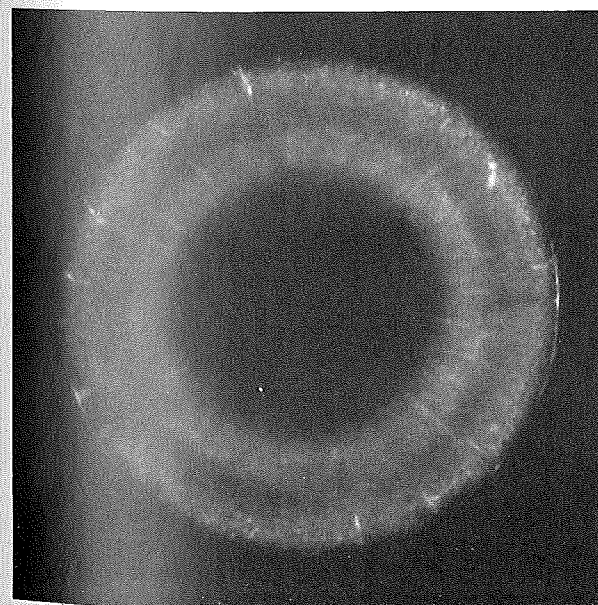
2



A



B



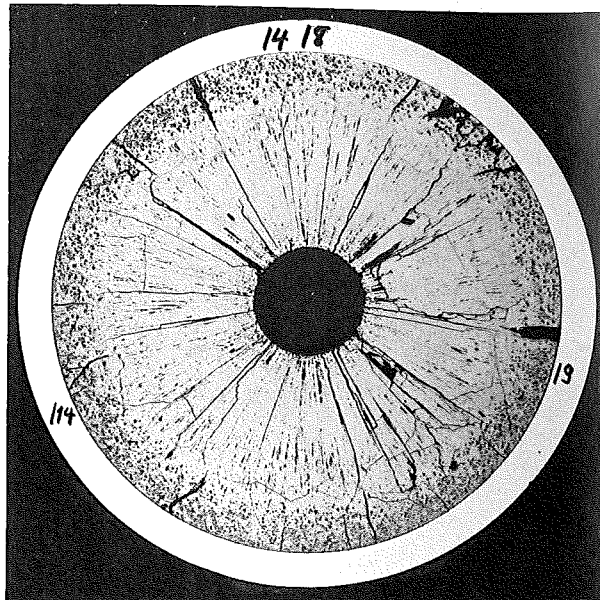
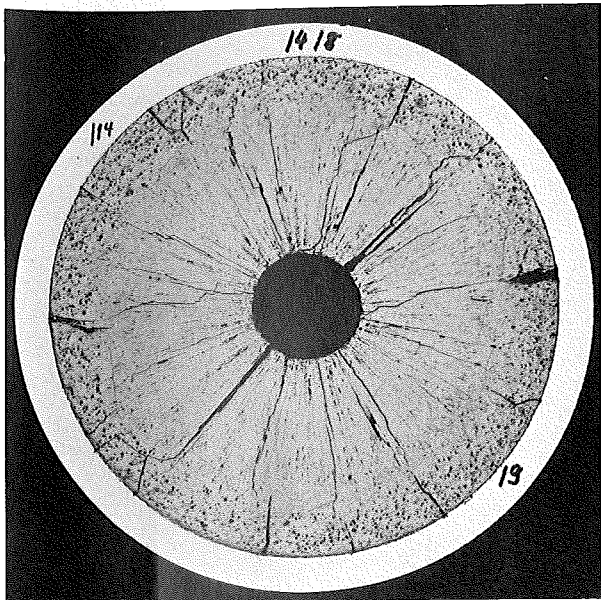
C

1 mm

3

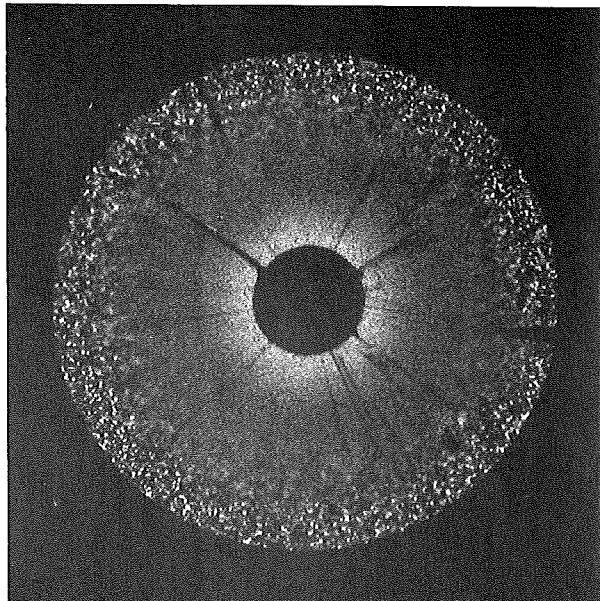
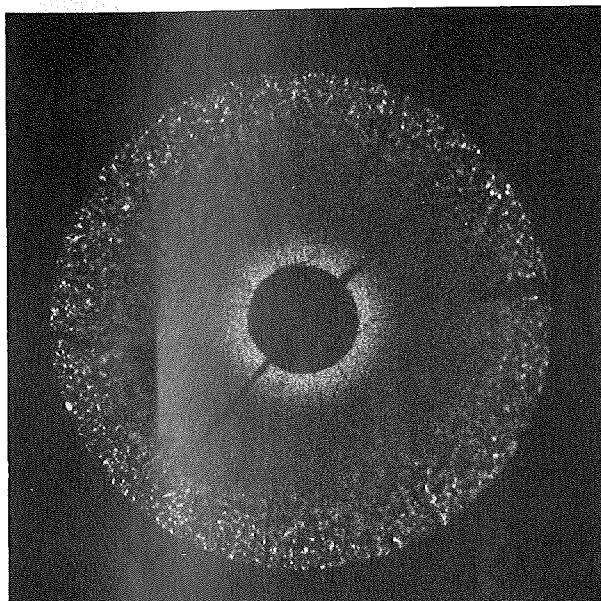
4

A



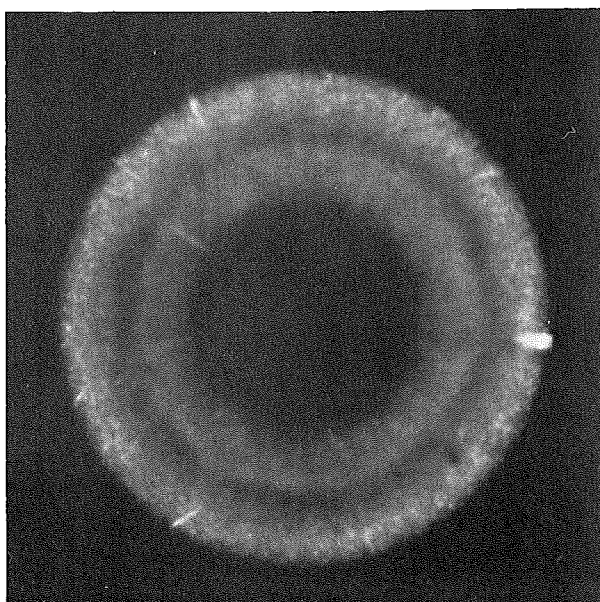
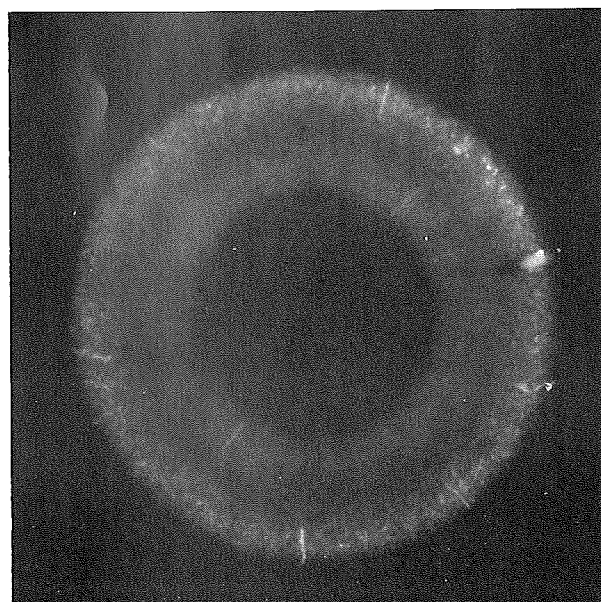
A

B



B

C

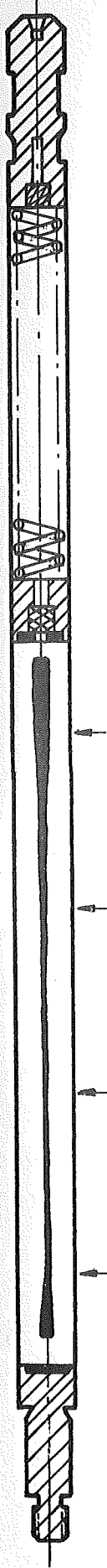


C

1 mm

1 mm





Prüfling 5A-2

Brennstoff :

Form : Tabletten
Zusammensetzung : UO_2/PuO_2
Tablettendicke : 83,5; 86,4; 89,4;
92,6 % th.D.

Hülle :

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

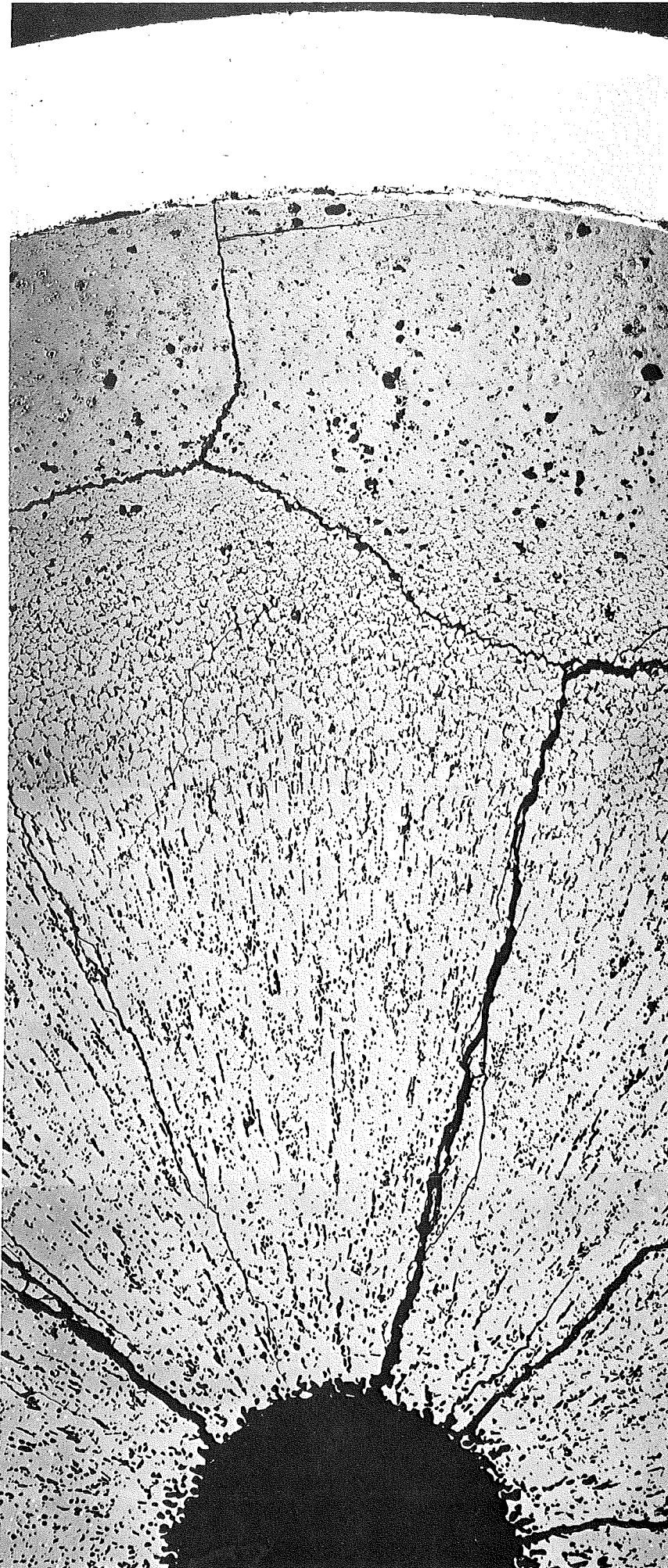
Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 48 μm
Schmierdichte : —

Bestrahlung :

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppel-
Kapsel Typ 4a
Dauer : 32,9 Volllasttage
Ende : 1.6.1970
Rechn. Abbrand mittl. : 6,0 MWd/kg
Stableistung max./mittl. : 600 / 216 W/cm

-I/33-
zu Prüfling 5A/6
1A

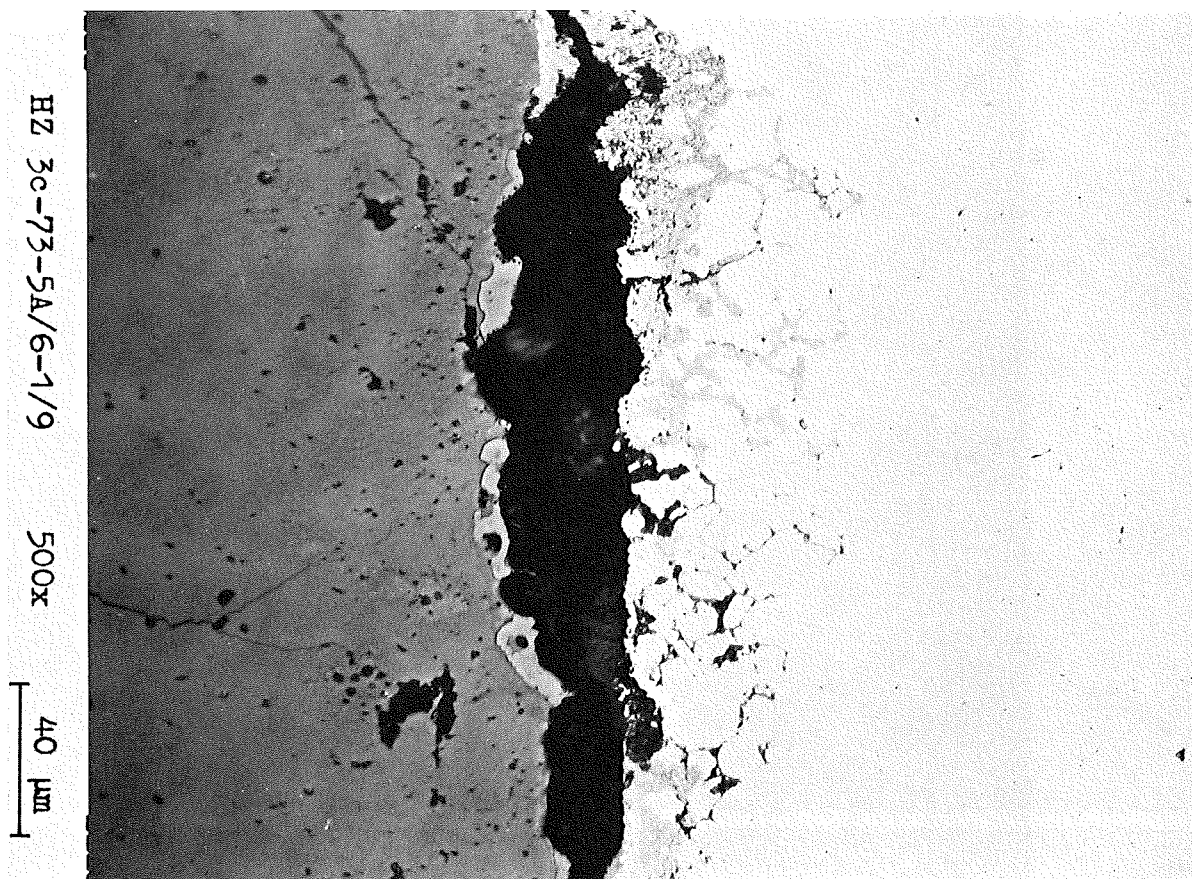
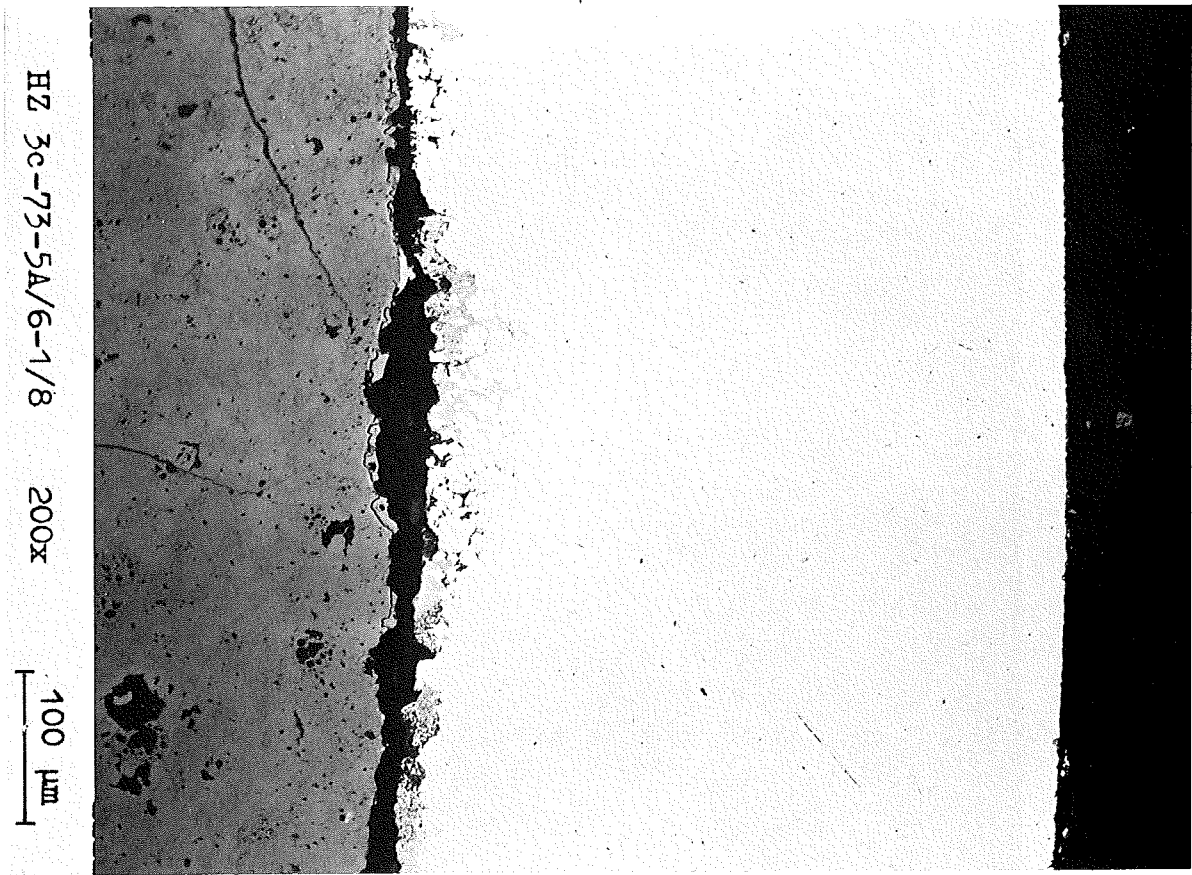


4...7

0,1 mm

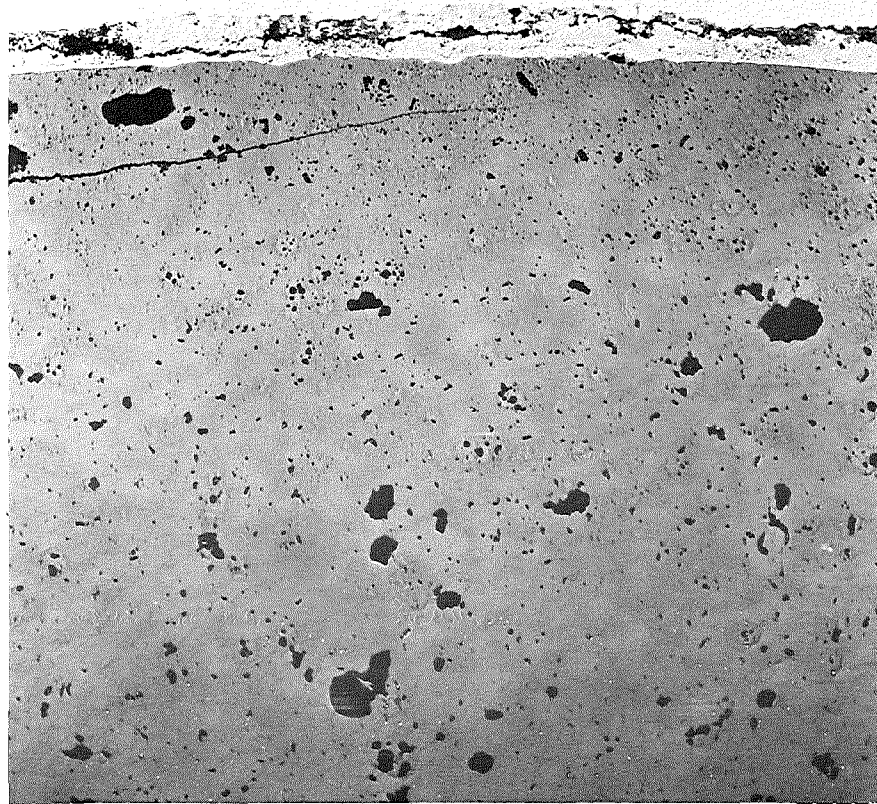
-1/34-
zu Prüfling 5A/6

1A



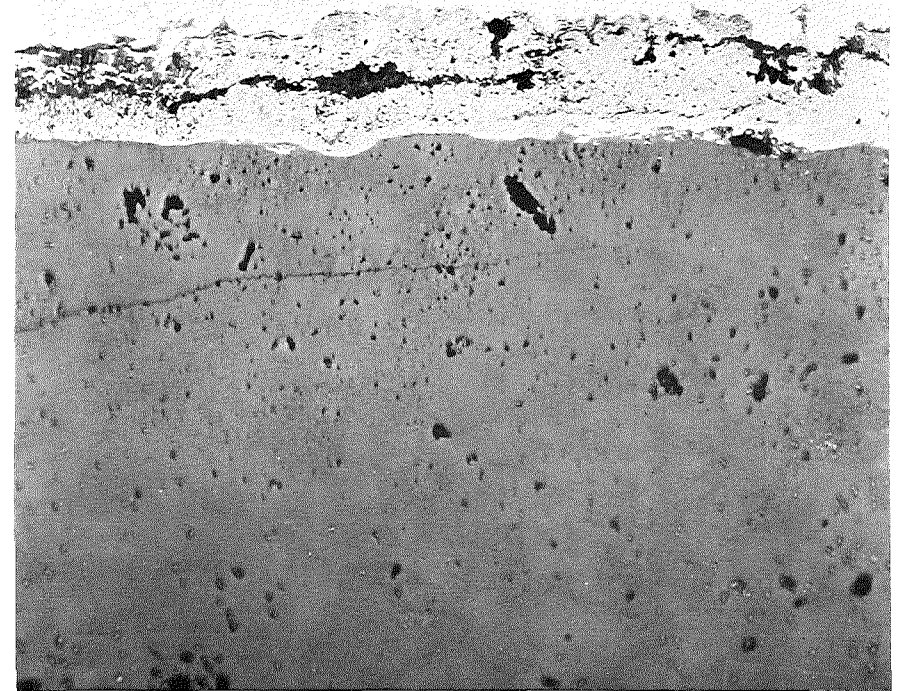
-1/35-
zu Prüfling 5A/6

1A



HZ 3c-73-5A/6-1/10 200x

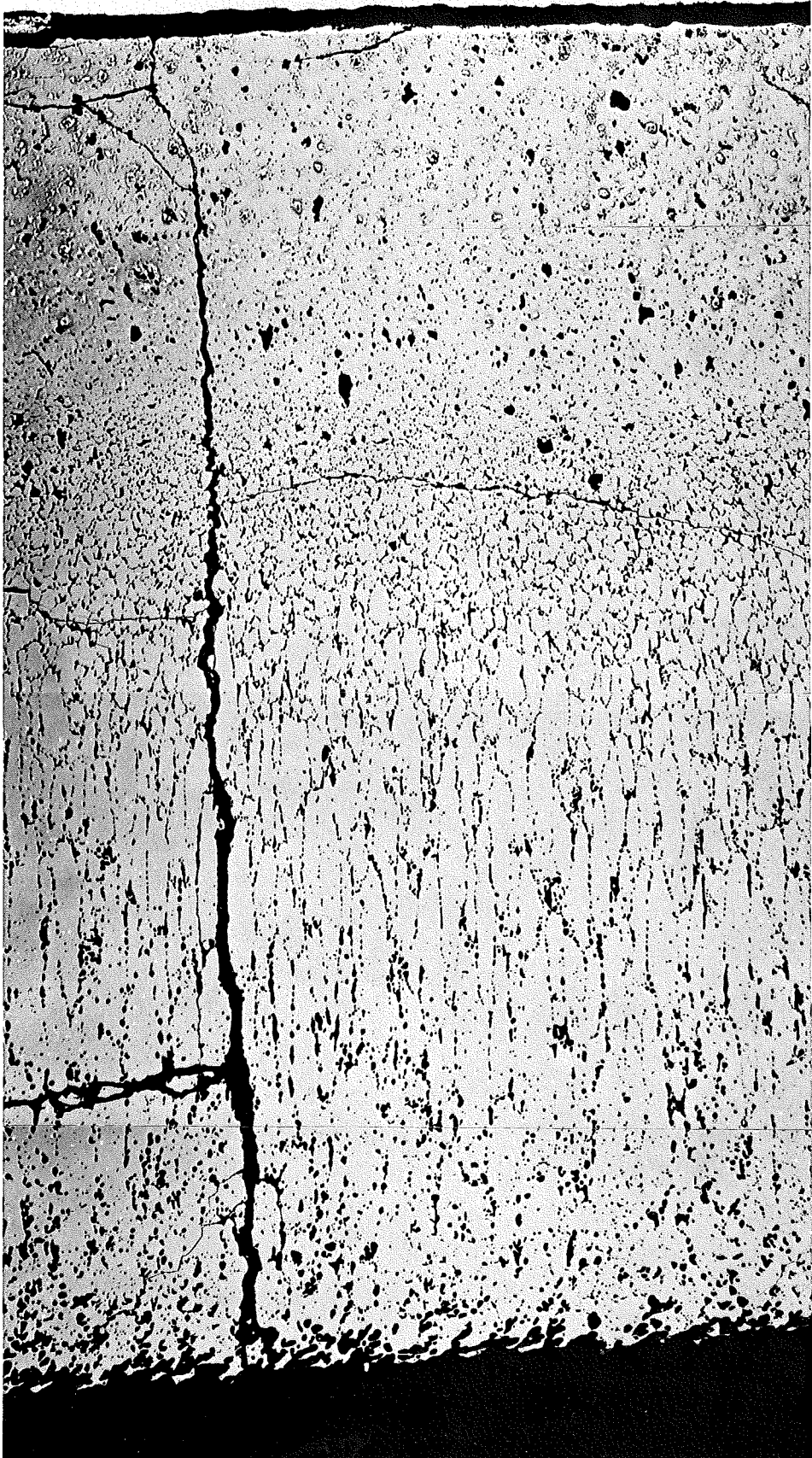
100 μm



HZ 3c-73-5A/6-1/11 500x

40 μm

- I/36 -
zu Prüfling 5A/6
2 A



4...7

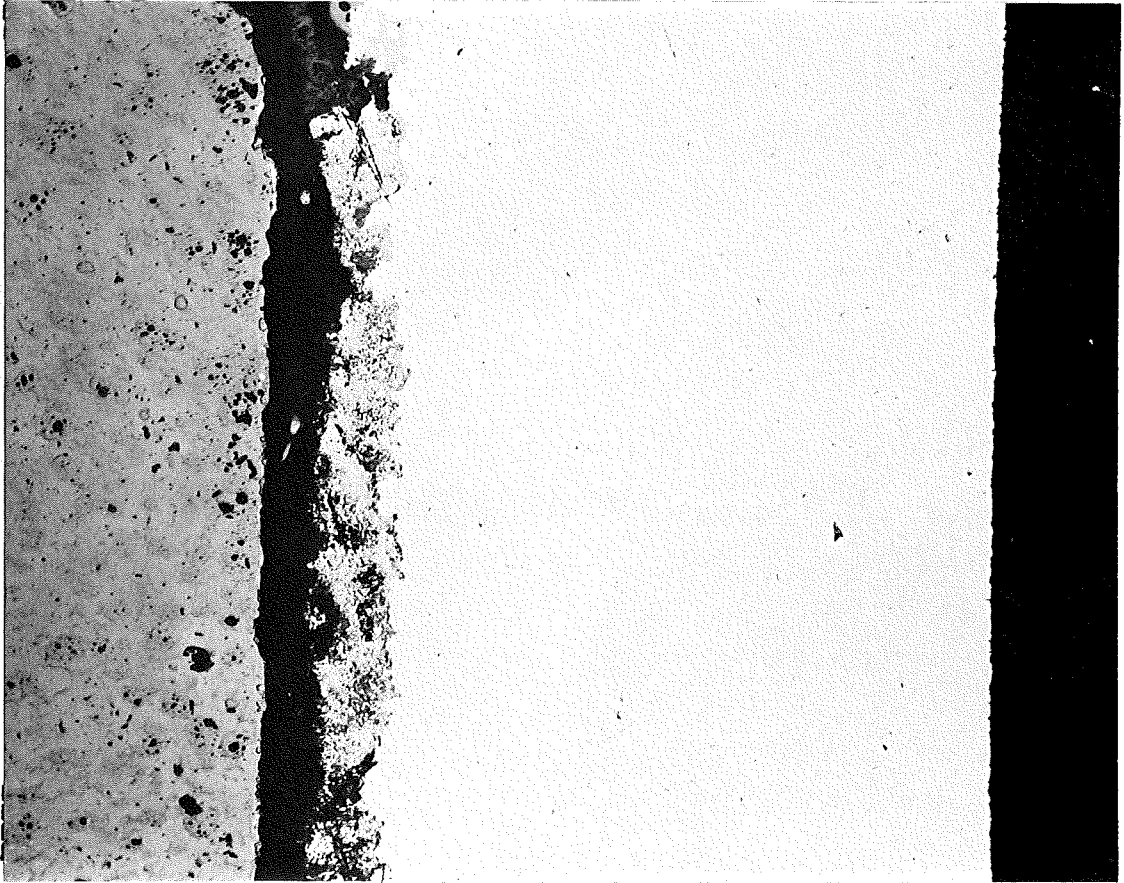
0,1 mm

-I/37-
zu Prüfling 5A/6

2 A

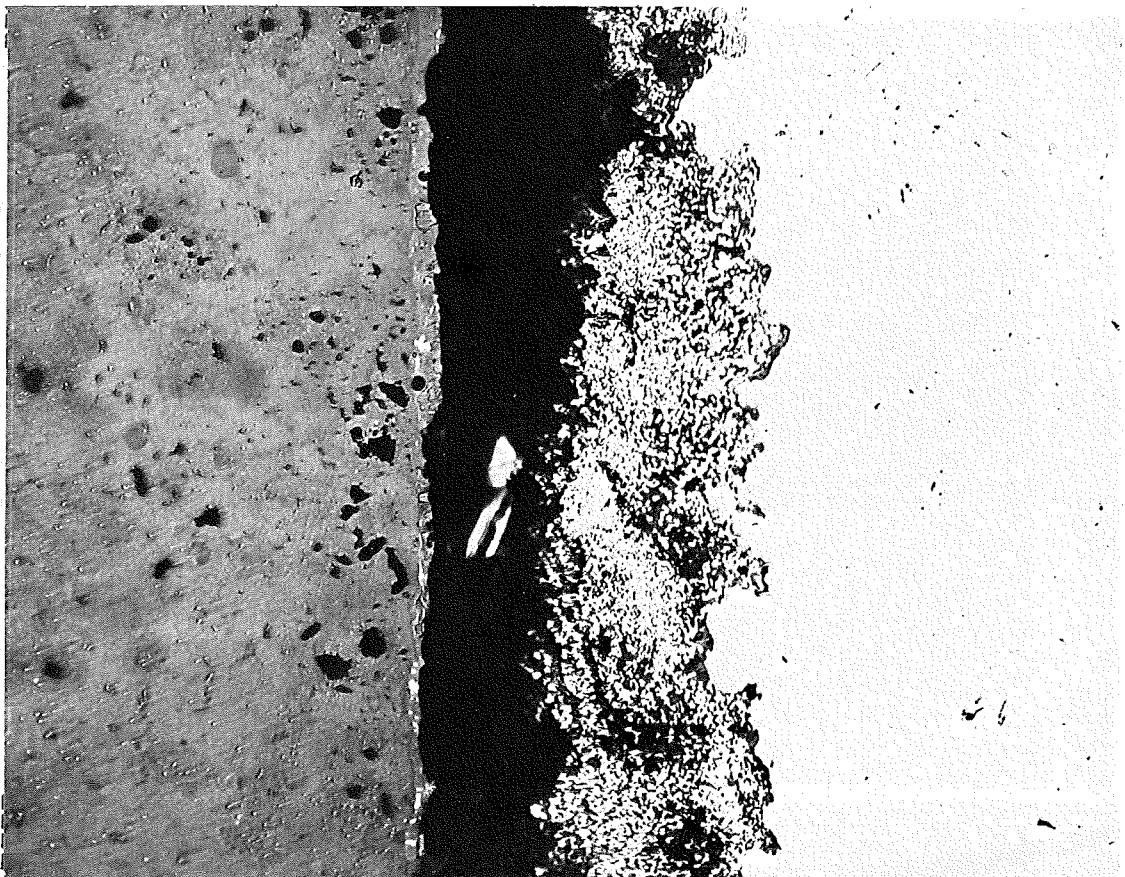
HZ 3c-73-5A/6-2/10 200x

100 μm



HZ 3c-73-5A/6-2/11 500x

40 μm

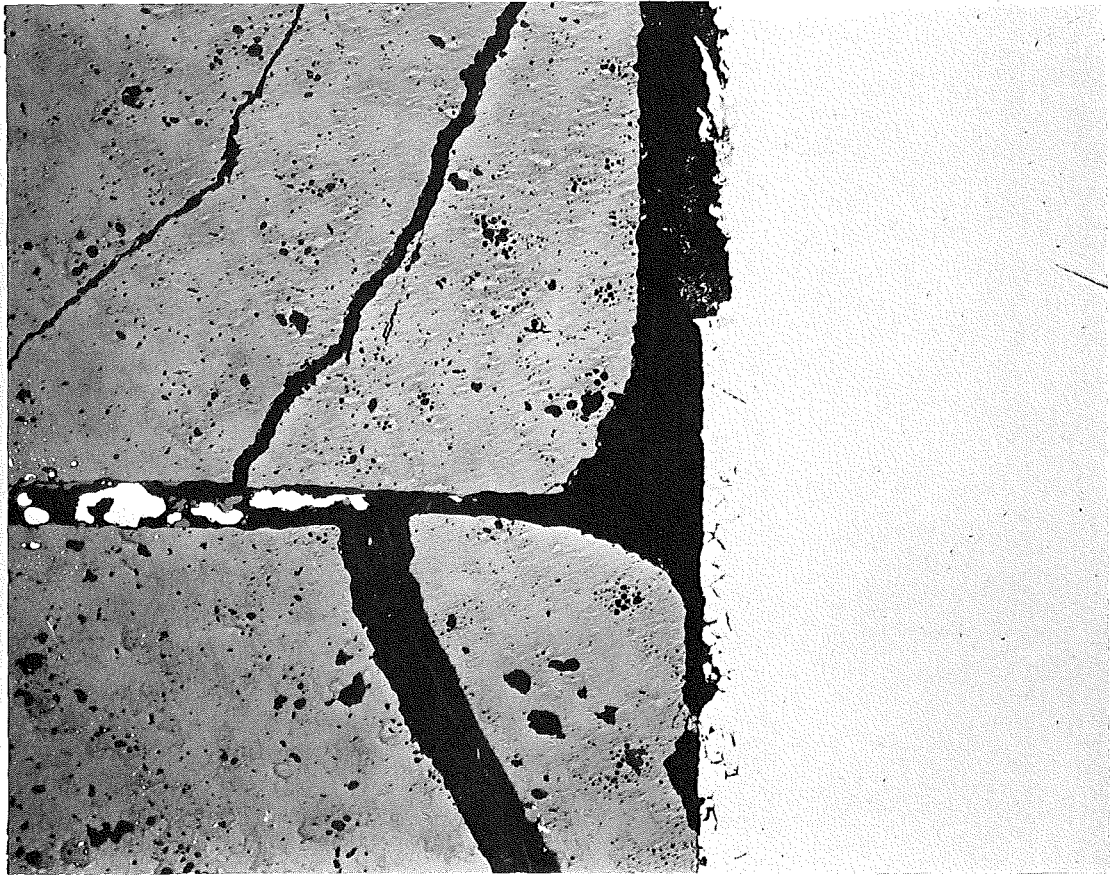


- 1/38 -
zu Prüfling 5A/6

2A

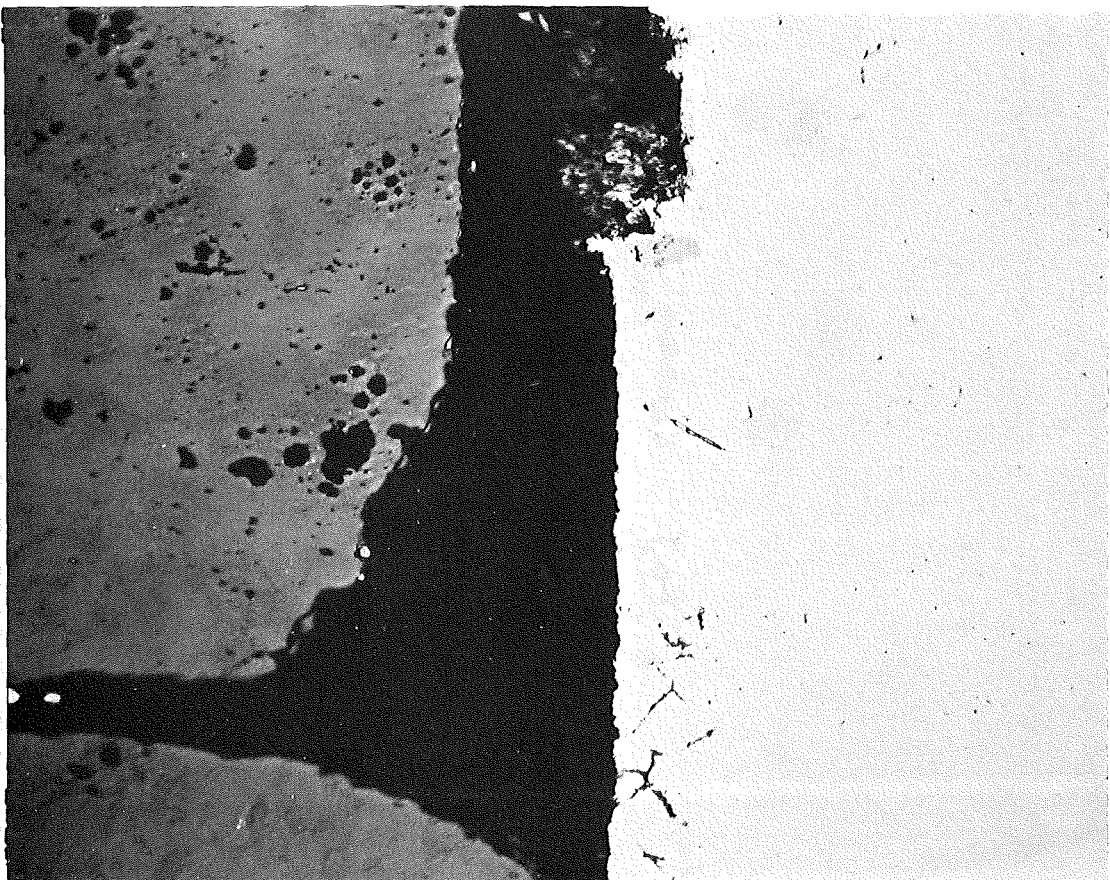
HZ 3c-73-5A/6-2/12 200x

100 μm



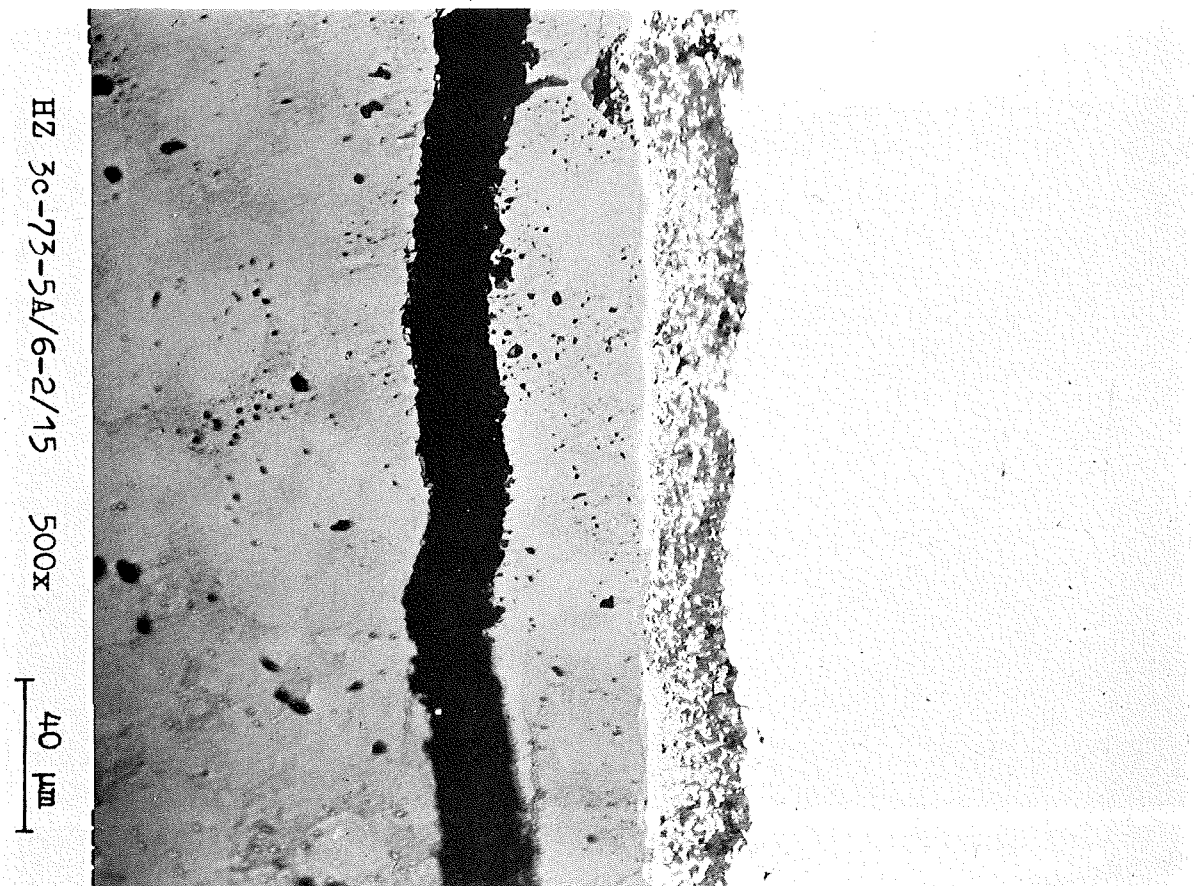
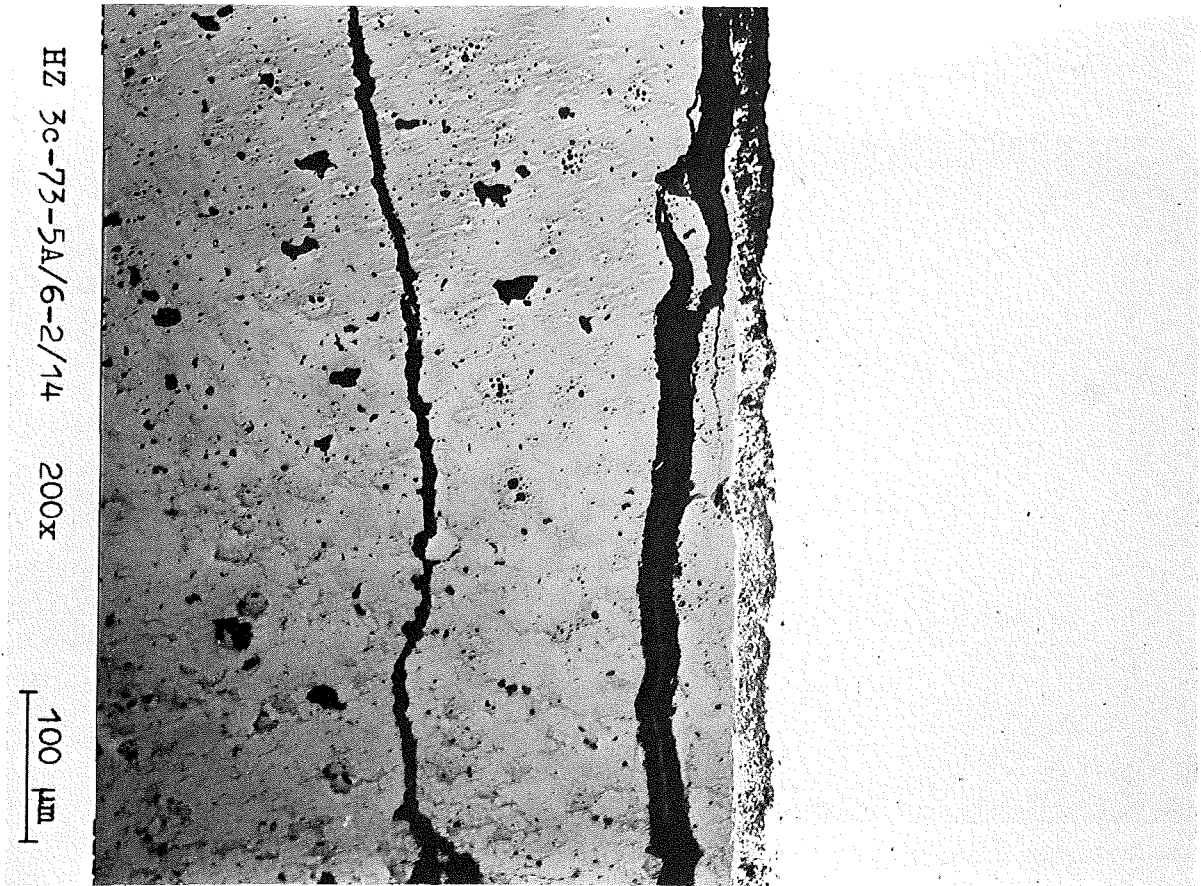
HZ 3c-73-5A/6-2/13 500x

40 μm



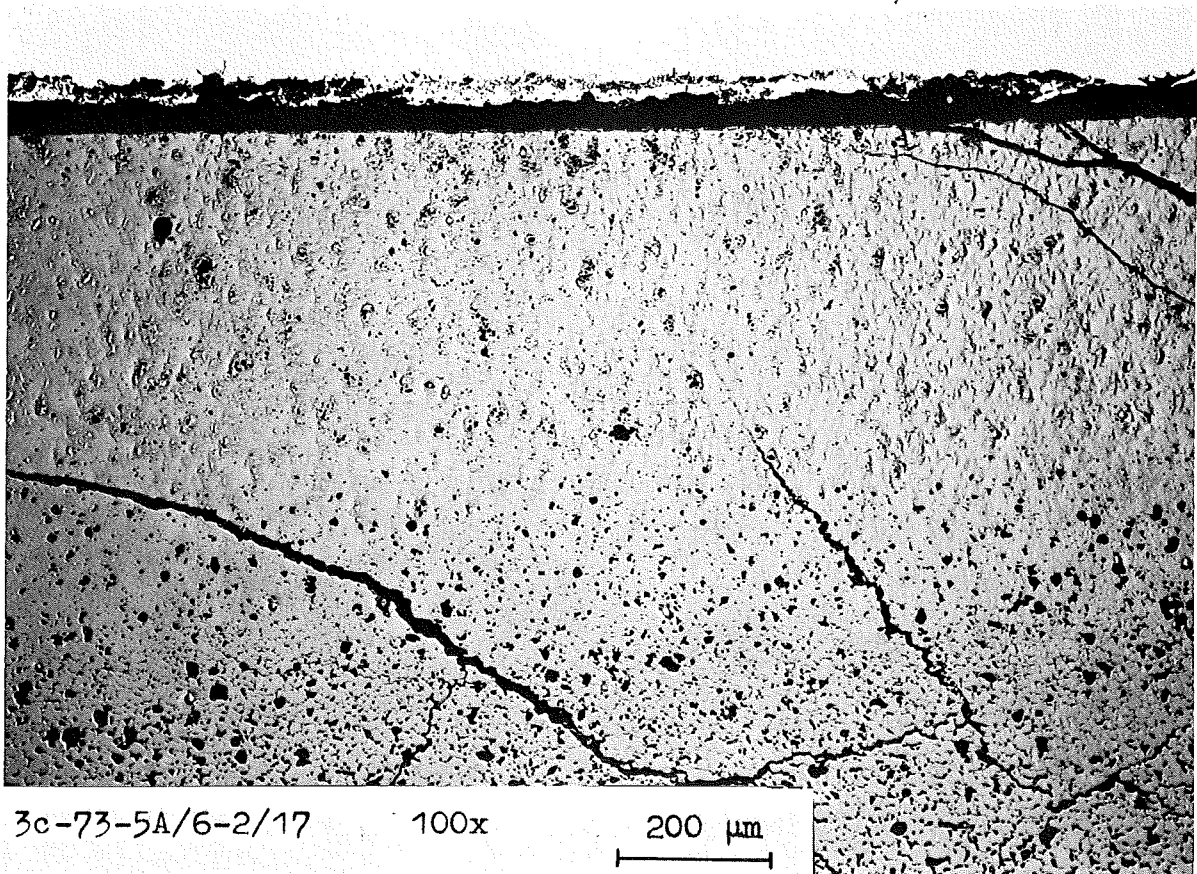
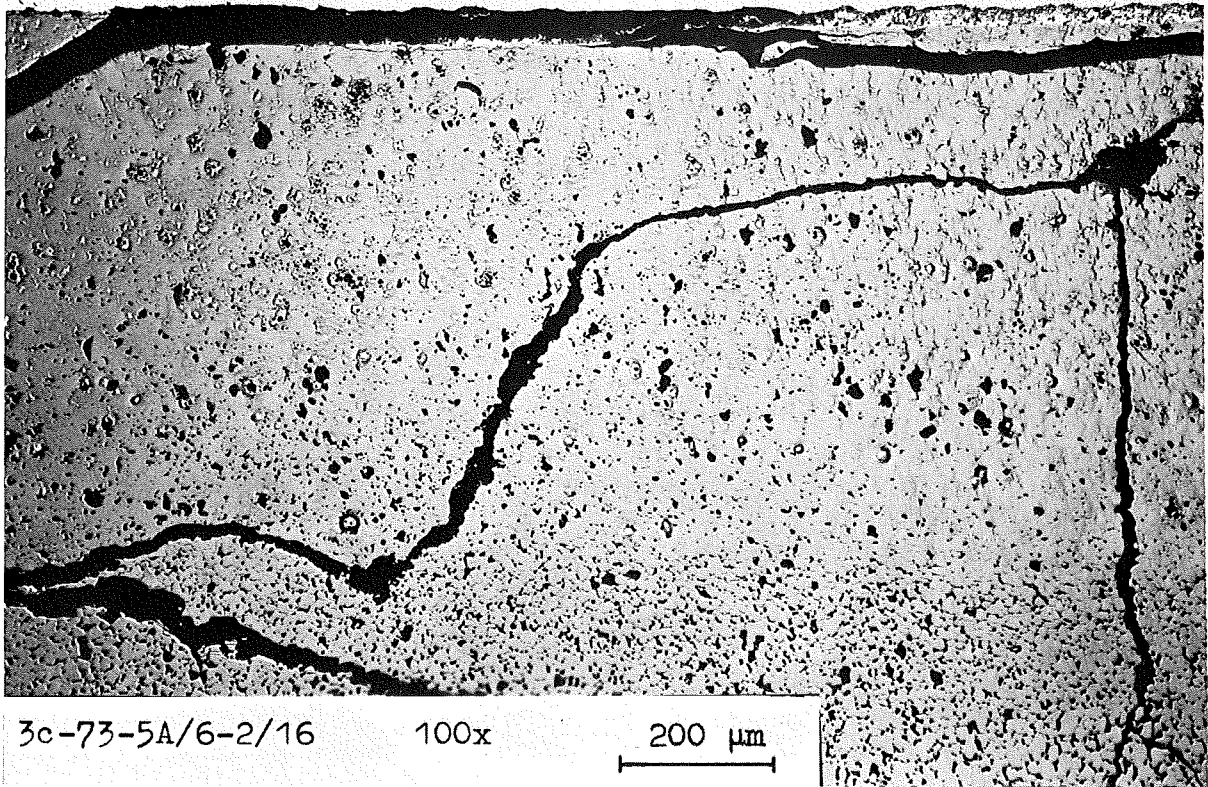
- I/39 -
zu Prüfling 5A/6

2A

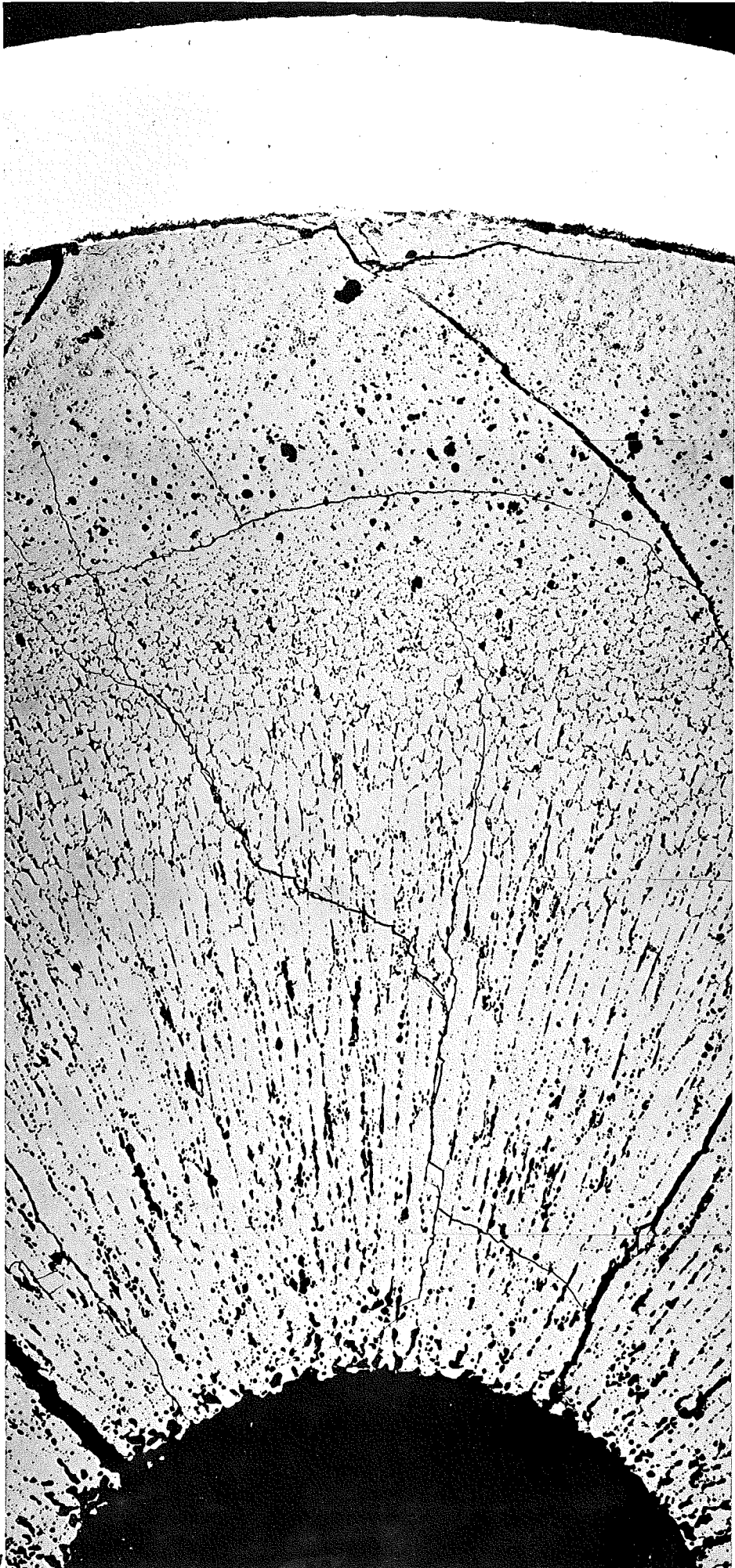


- I/40 -
zu Prüfling 5A/6

2 A



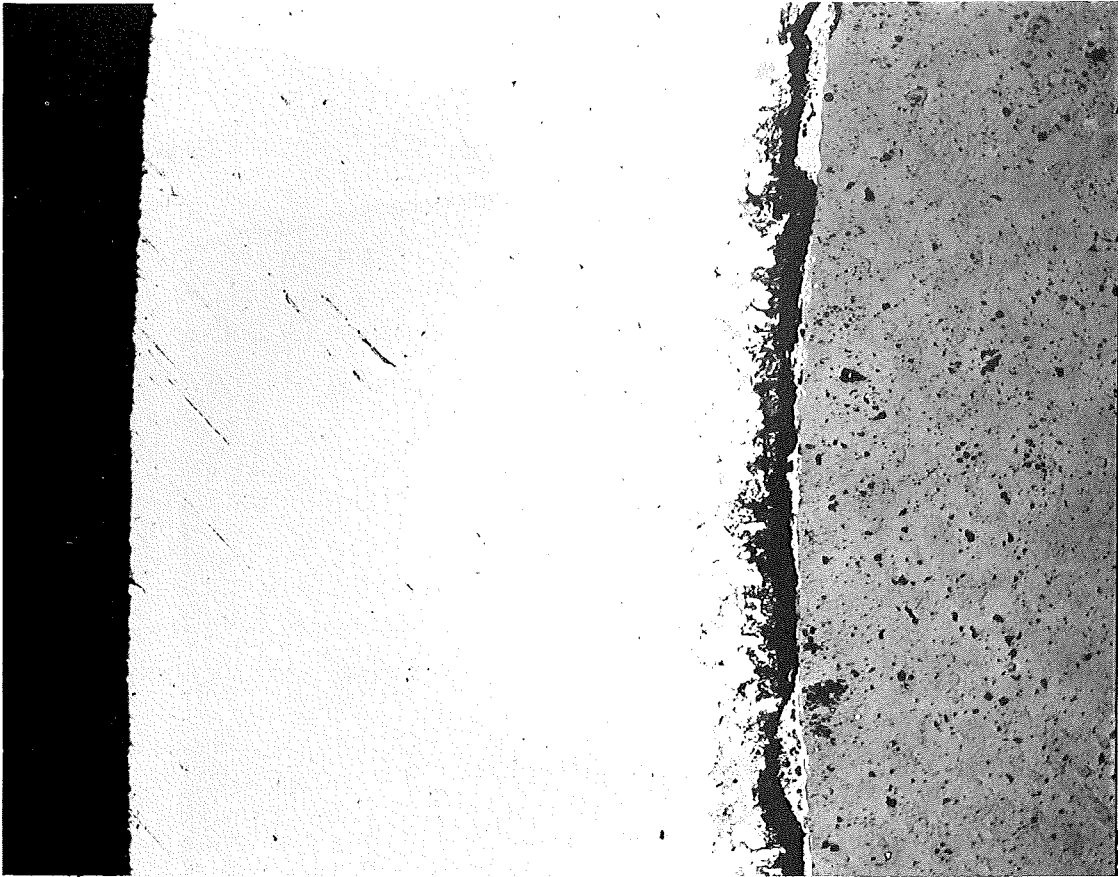
- I/41 -
zu Prüfling 5A/6
3A



4...7

0,1 mm

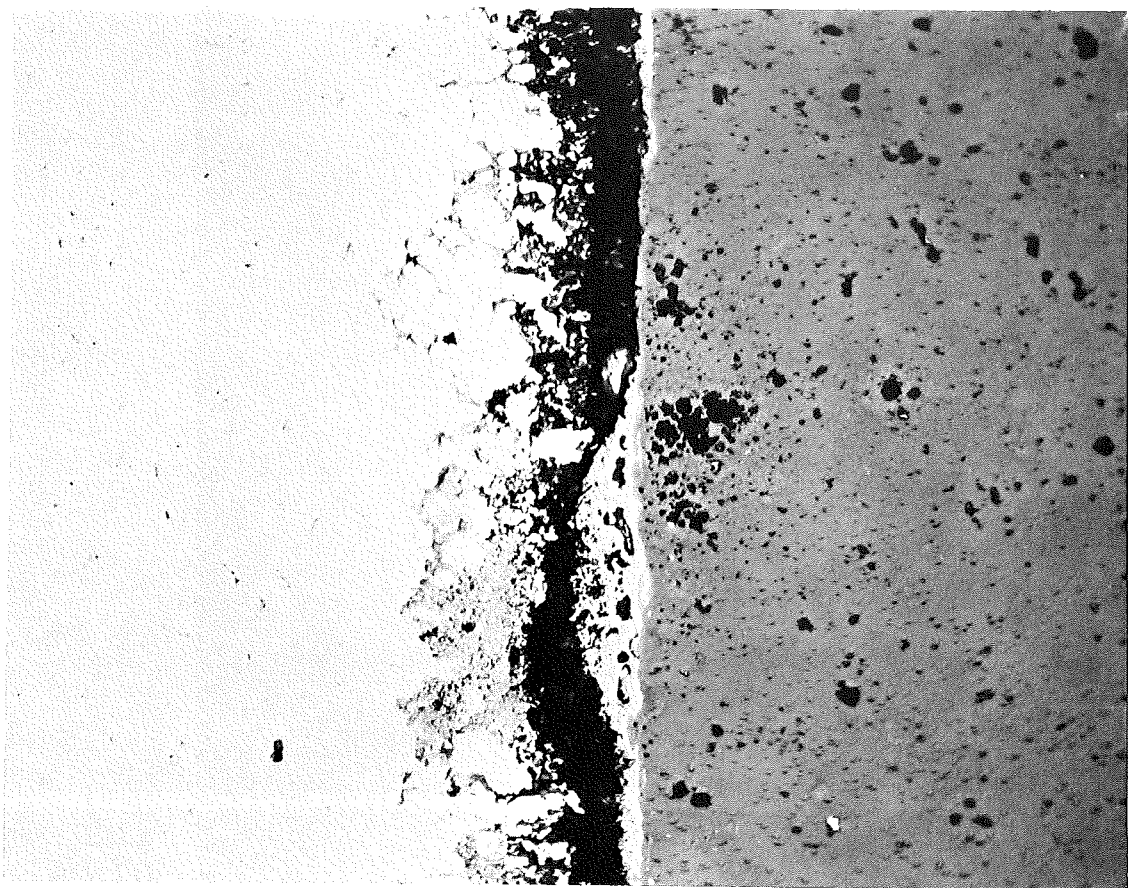
-I/42-
zu Prüfling 5A/6
3A



100 μm

200x

HZ 3c-73-5A/6-3/8



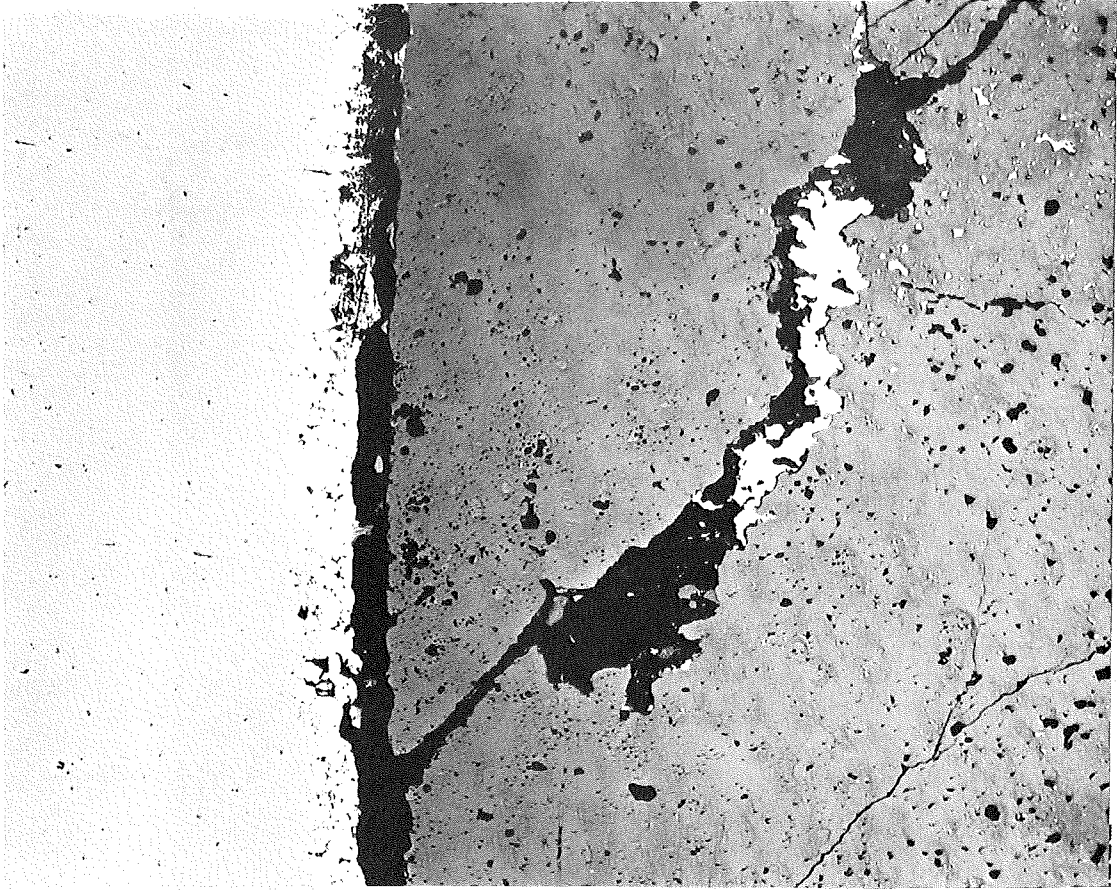
40 μm

500x

HZ 3c-73-5A/6-3/9

-1/43-
zu Prüfling 5A/6

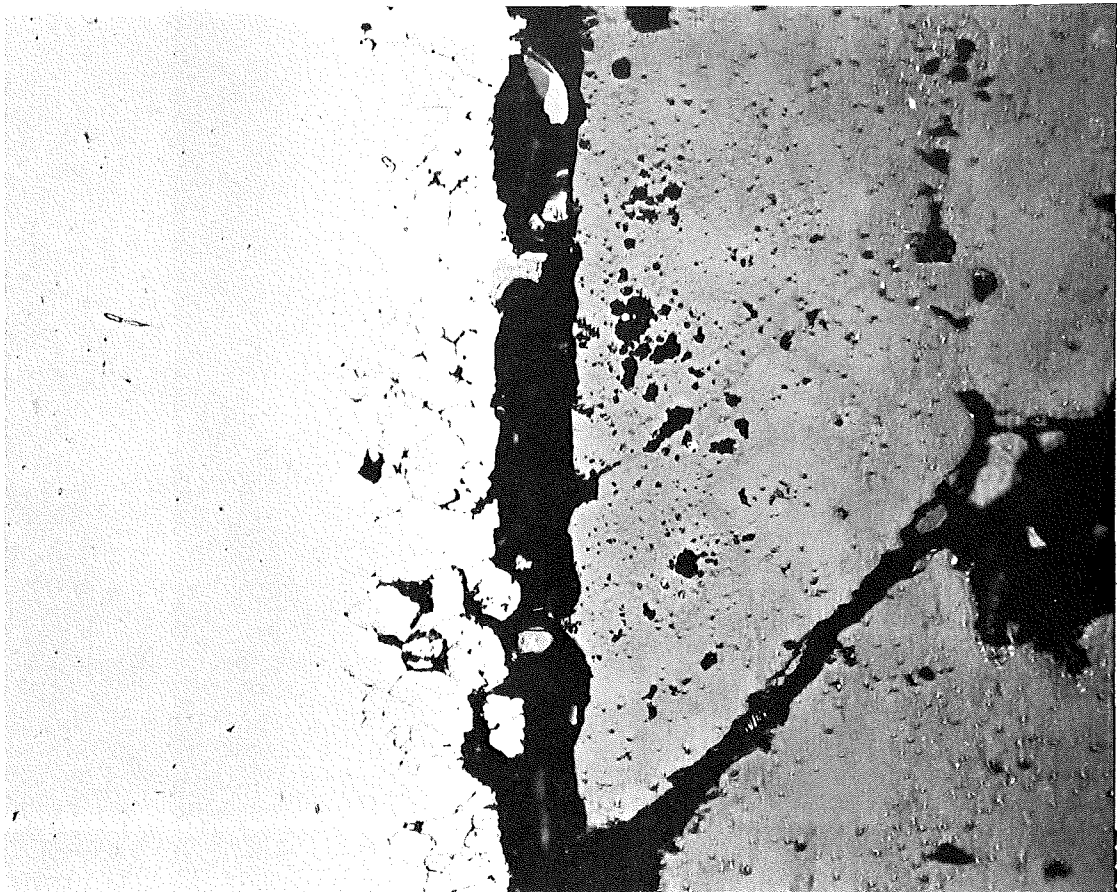
3A



100 μm

200x

HZ 3c-73-5A/6-3/10



40 μm

500x

HZ 3c-73-5A/6-3/11

- 1/44 -
zu Prüfling 5A/6
4 A



4-7

0,1 mm

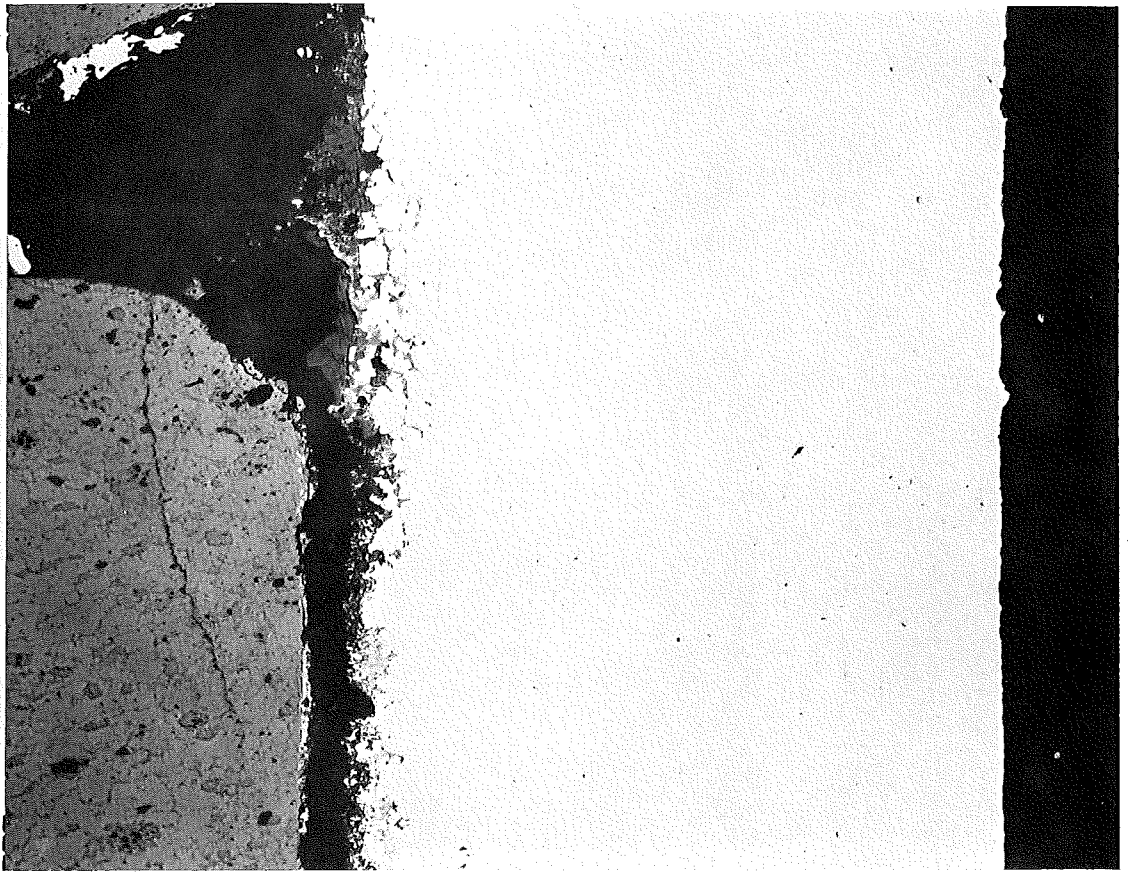
-I/45-
zu Prüfling 5A/6

4 A

HZ 3c-73-5A/6-4/8

200x

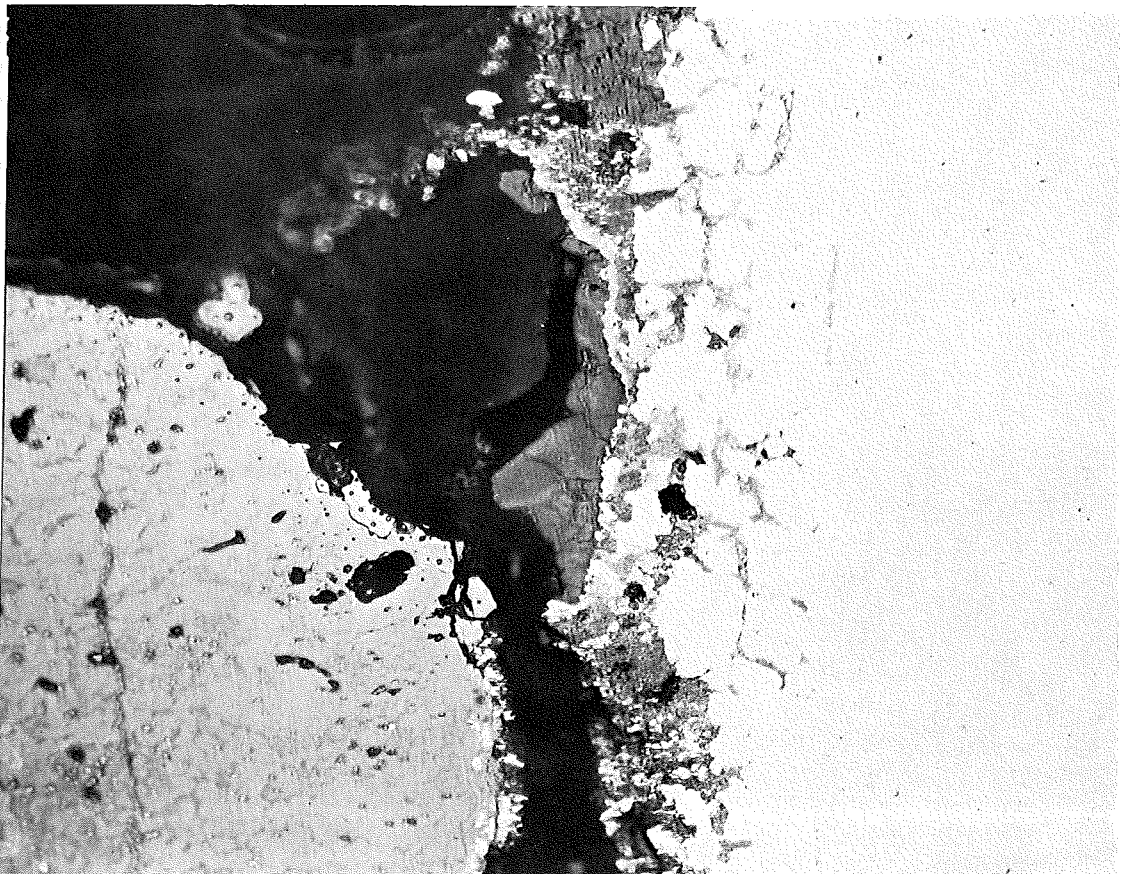
100 μm



HZ 3c-73-5A/6-4/9

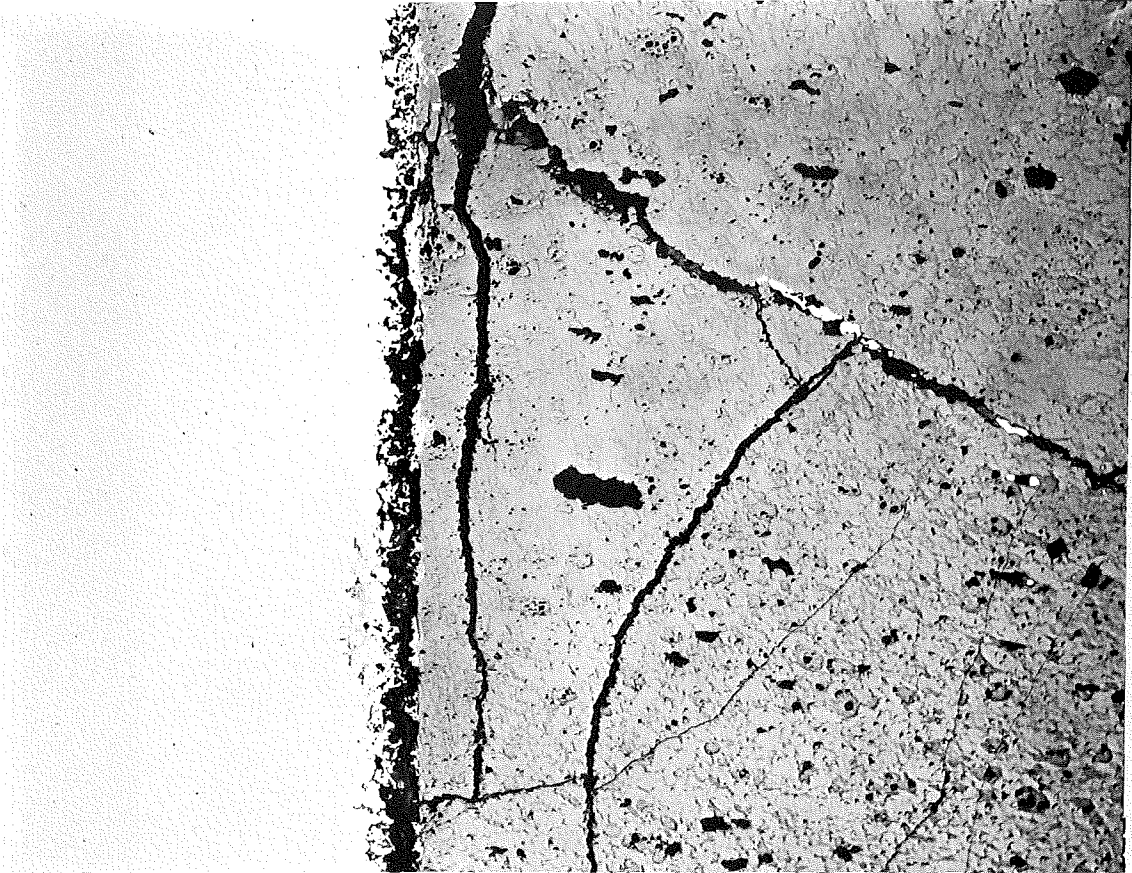
500x

40 μm



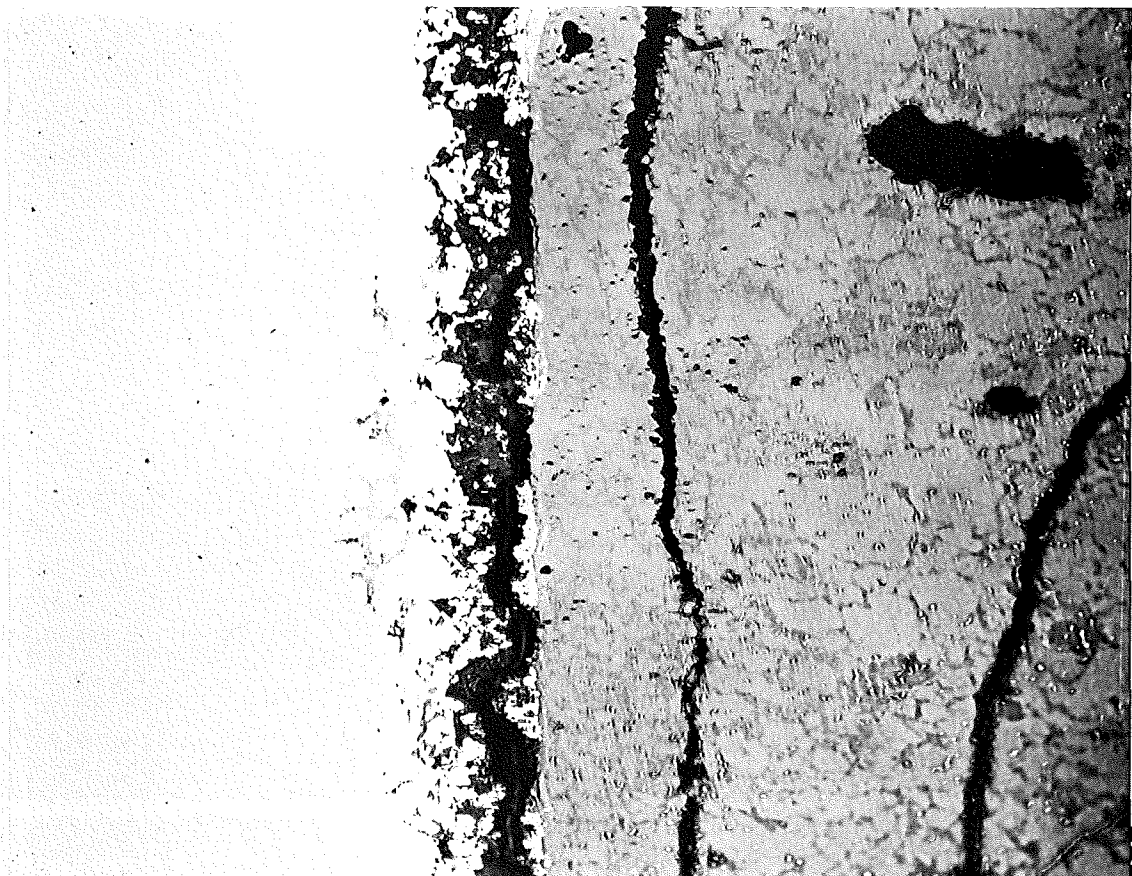
-1/46-
zu Prüfling 5A/6

4A



HZ 3c-73-5A/6-4/10 200x

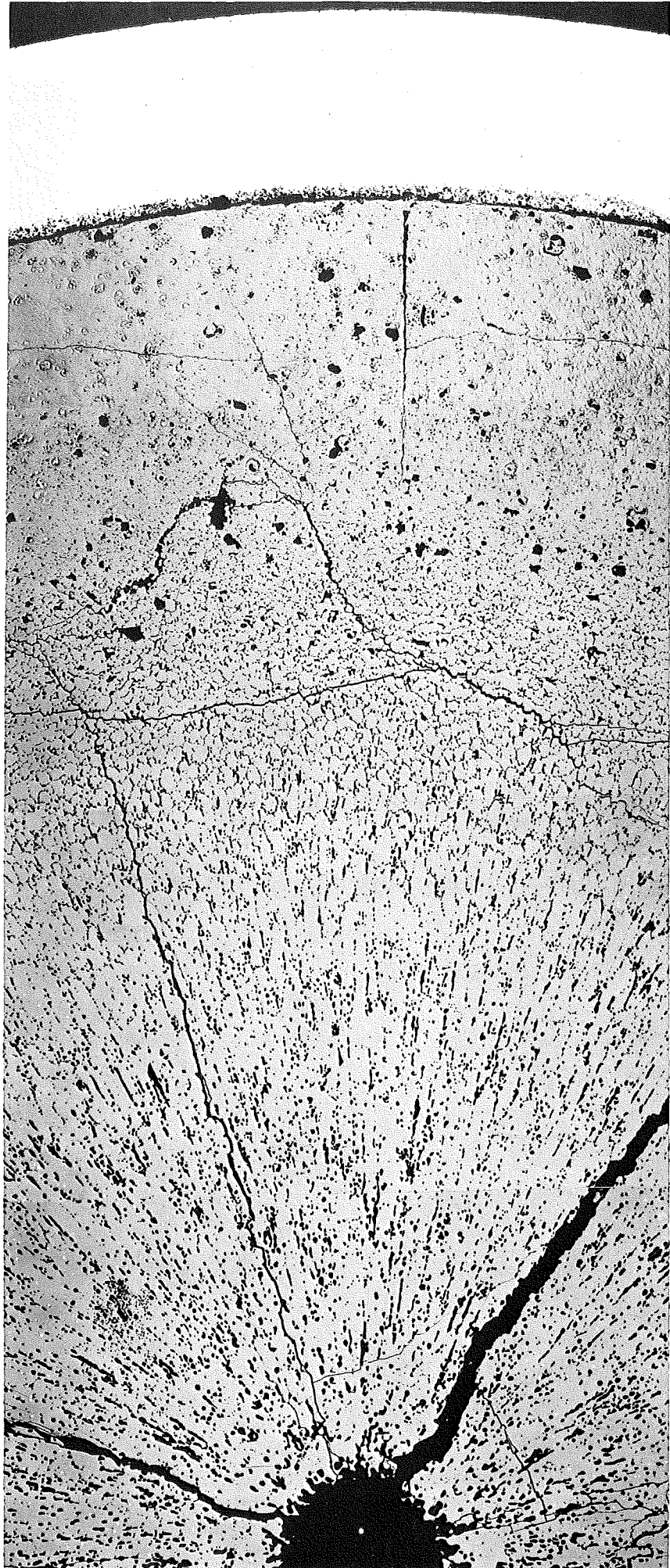
100 μm



HZ 3c-73-5A/6-4/11 500x

40 μm

-1/47-
zu Prüfling 5A/6
5A

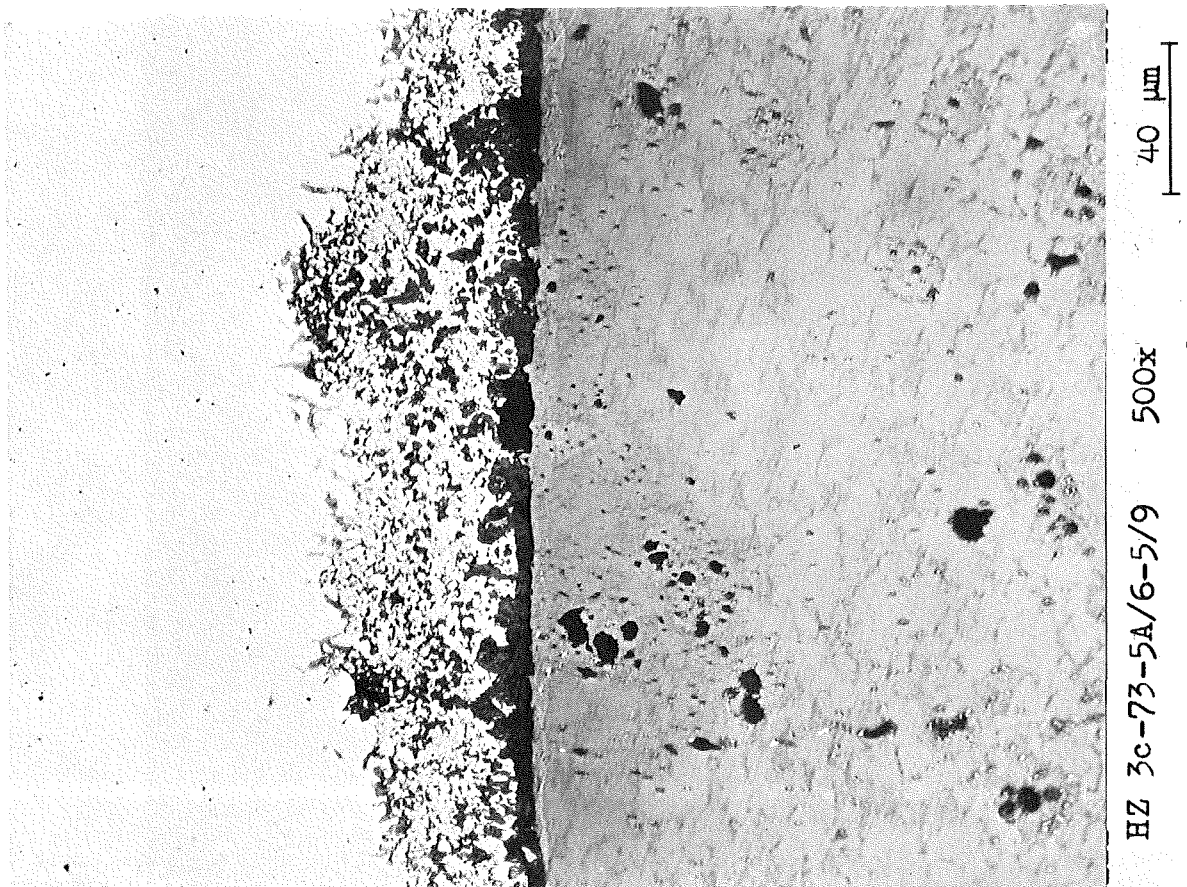
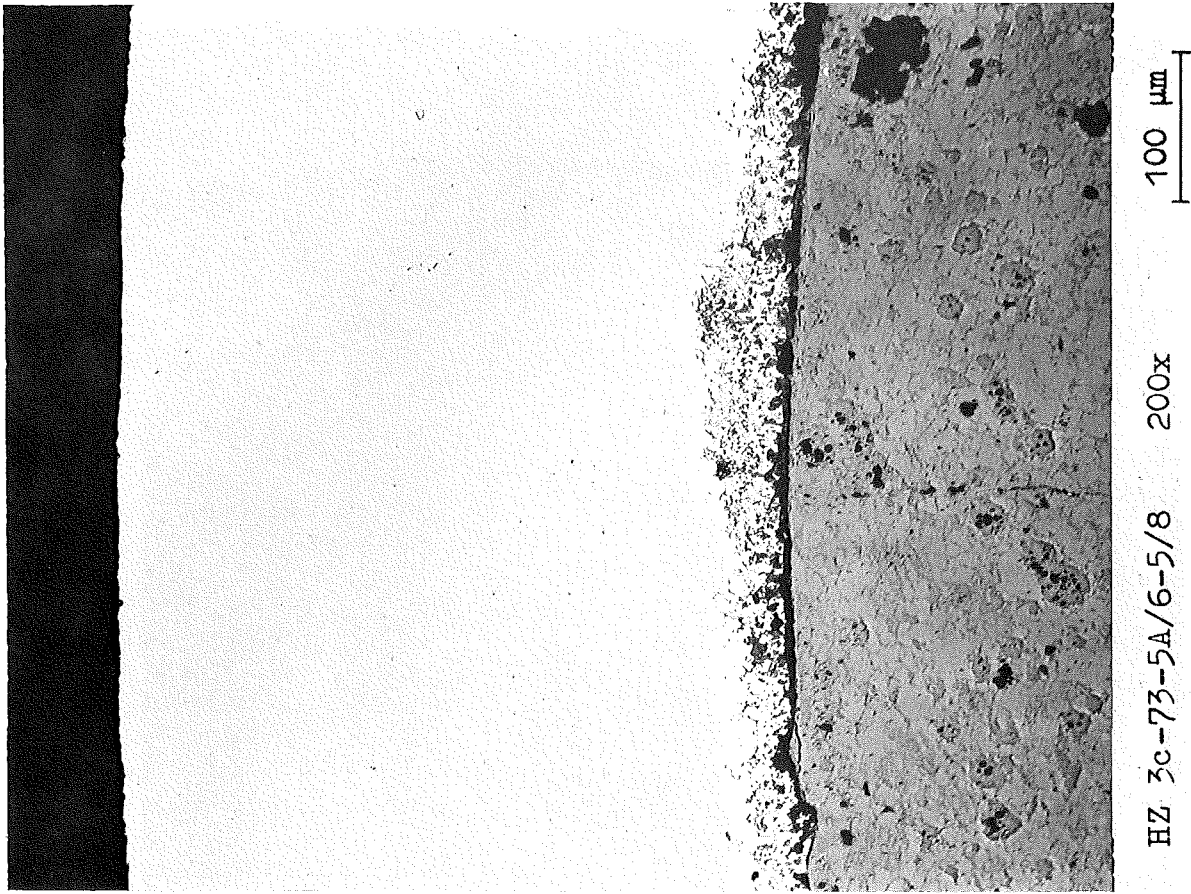


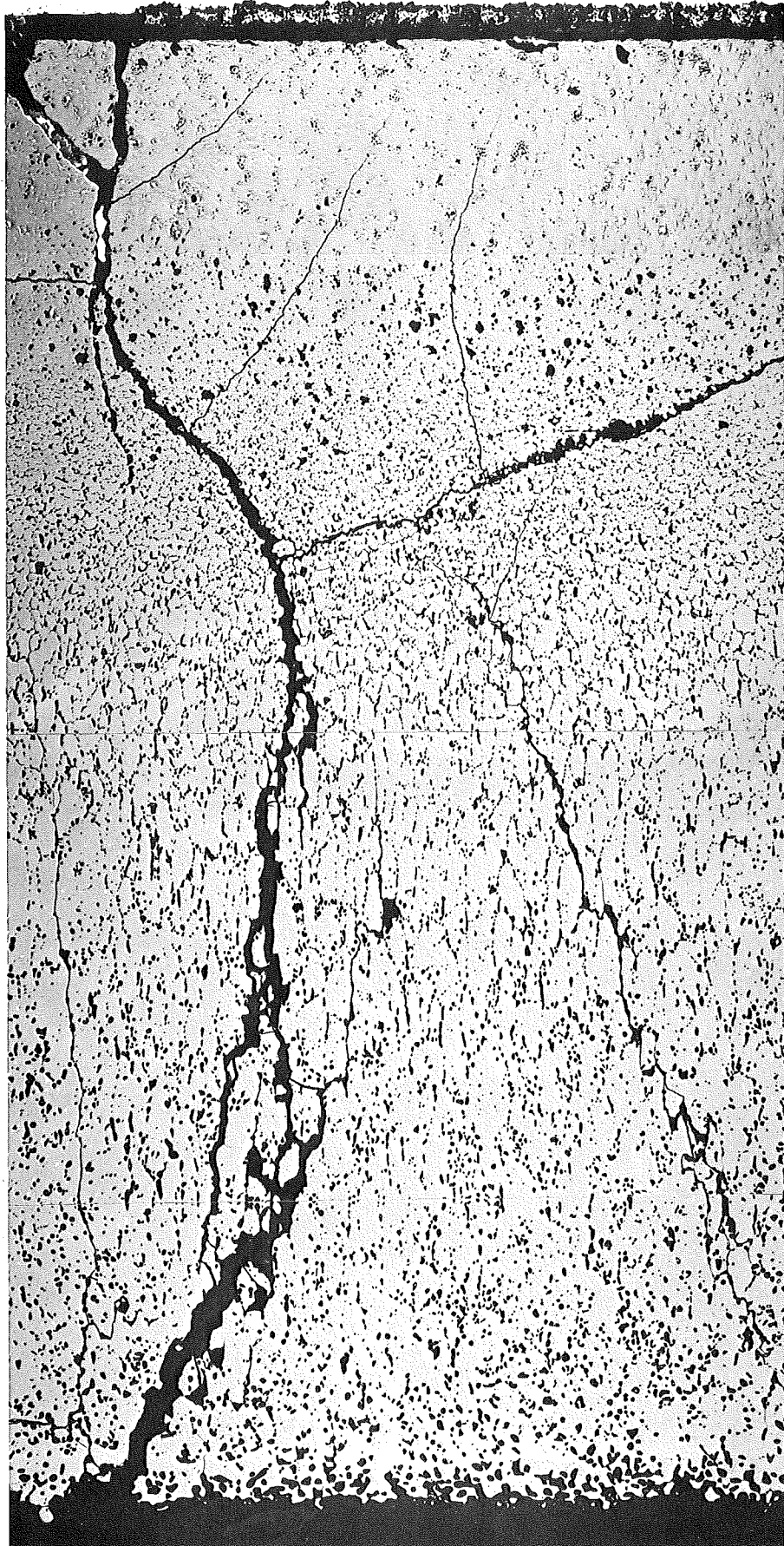
4...7

0,1mm

-1/48-
zu Prüfling 5A/6

5 A



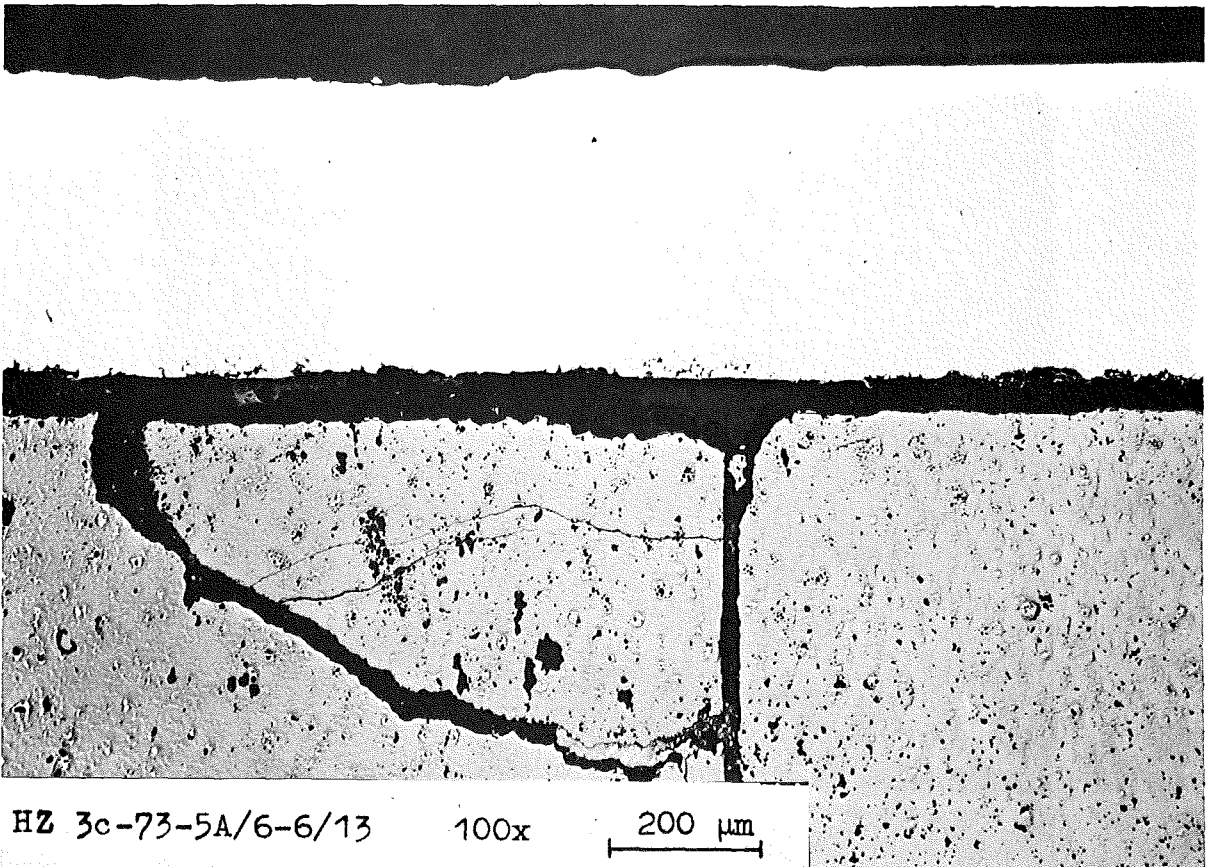
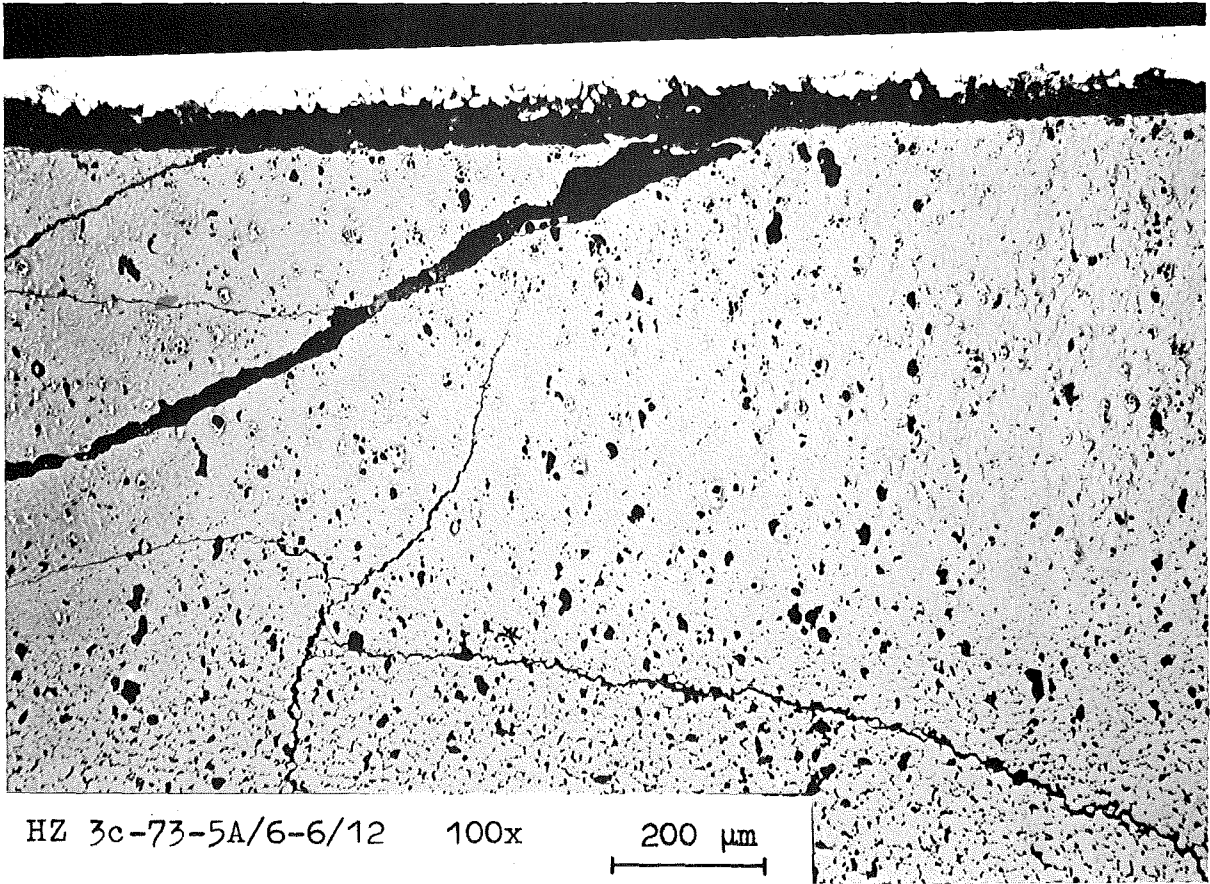


4...7

┌───┐
0,1mm

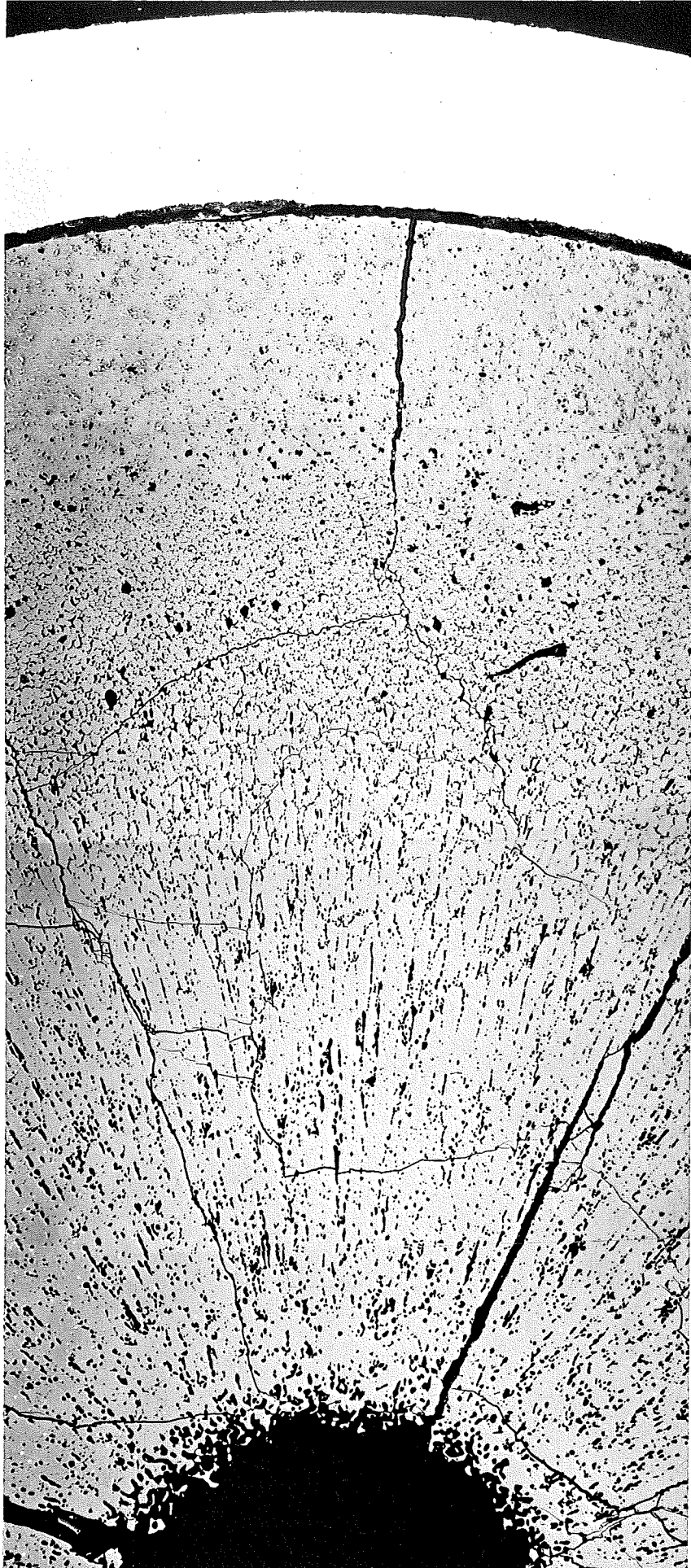
-I/50-
zu Prüfling 5A/6

6 A



- I/51 -
zu Prüfling 5A/6

7 A



4...7

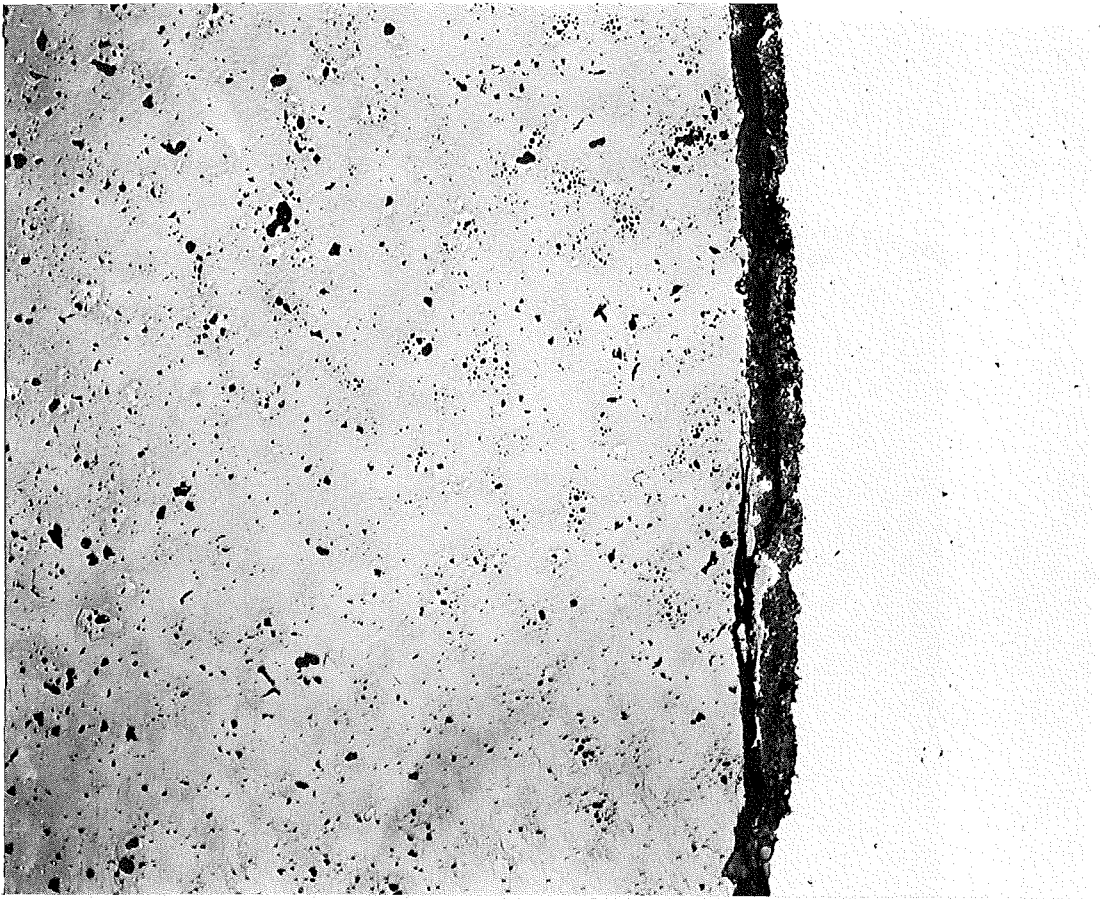
—|—
0,1mm

-I/52-
zu Prüfling 5A/6

7A

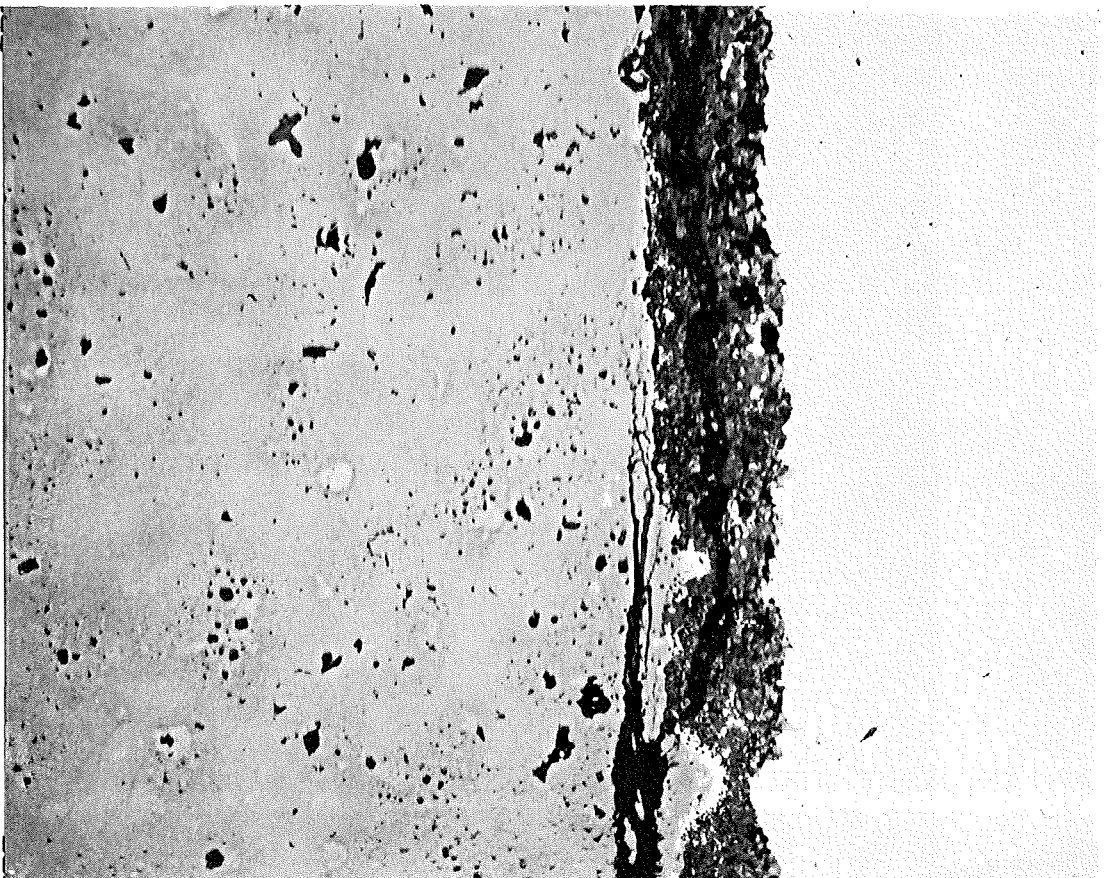
HZ 3c-73-5A/6-7/10 200x

100 μm



HZ 3c-73-5A/6-7/11 500x

40 μm

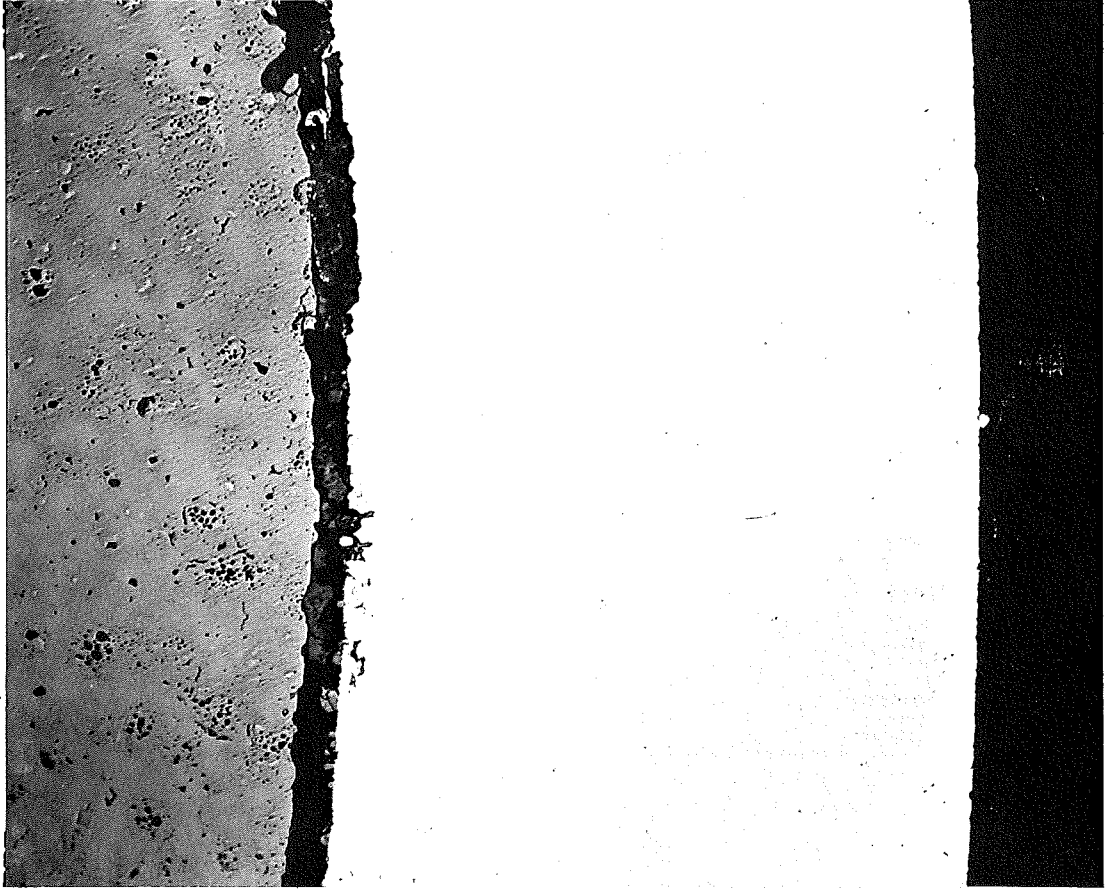


-I/53-
zu Prüfling 5A/6

7A

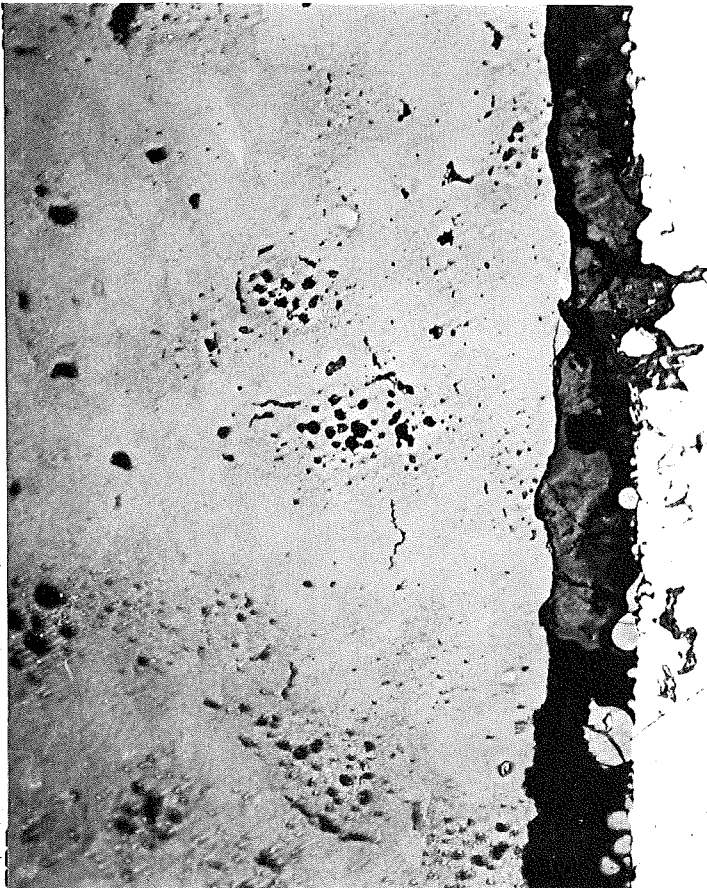
HZ 3c-73-5A/6-7/8 200x

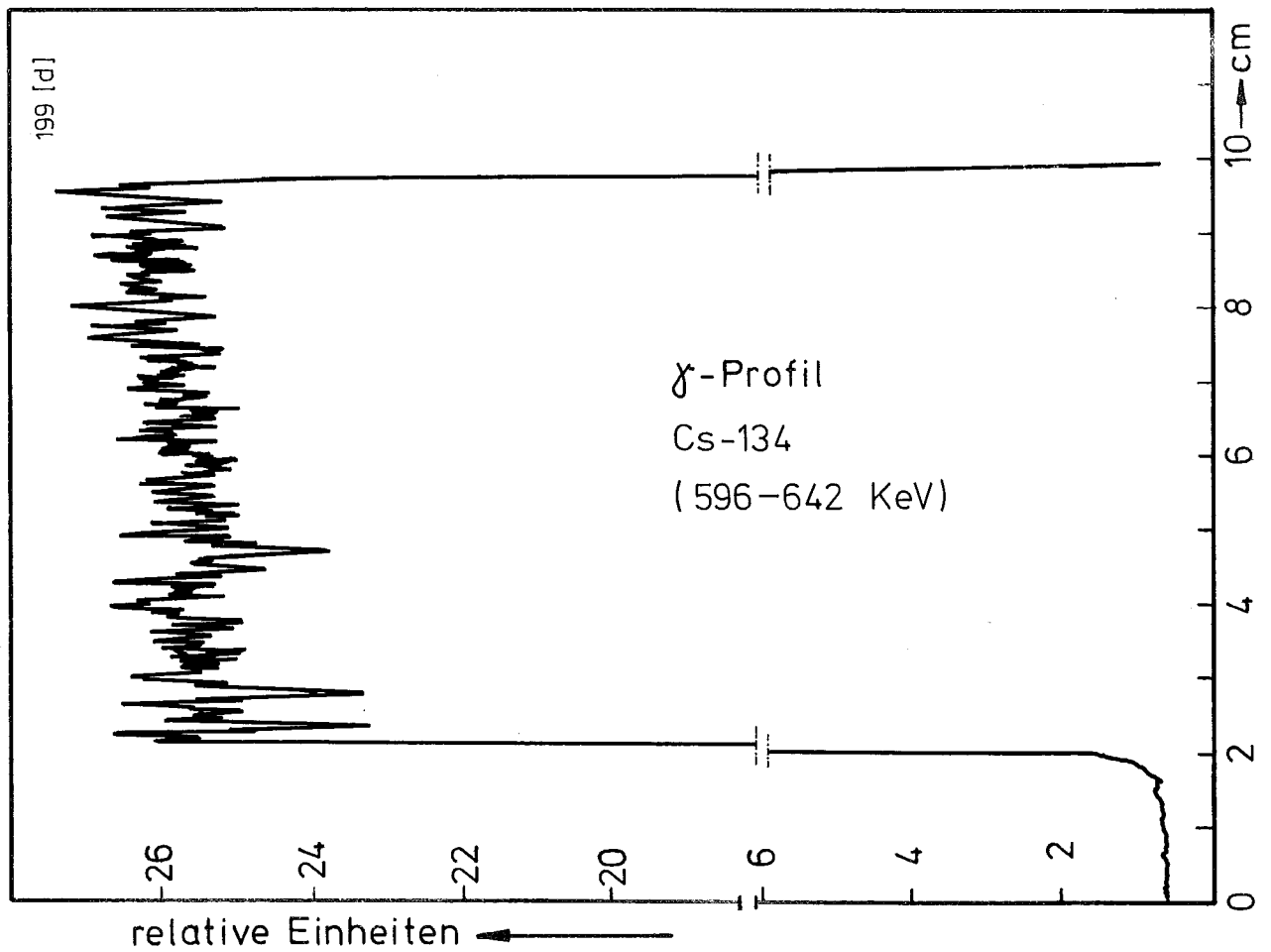
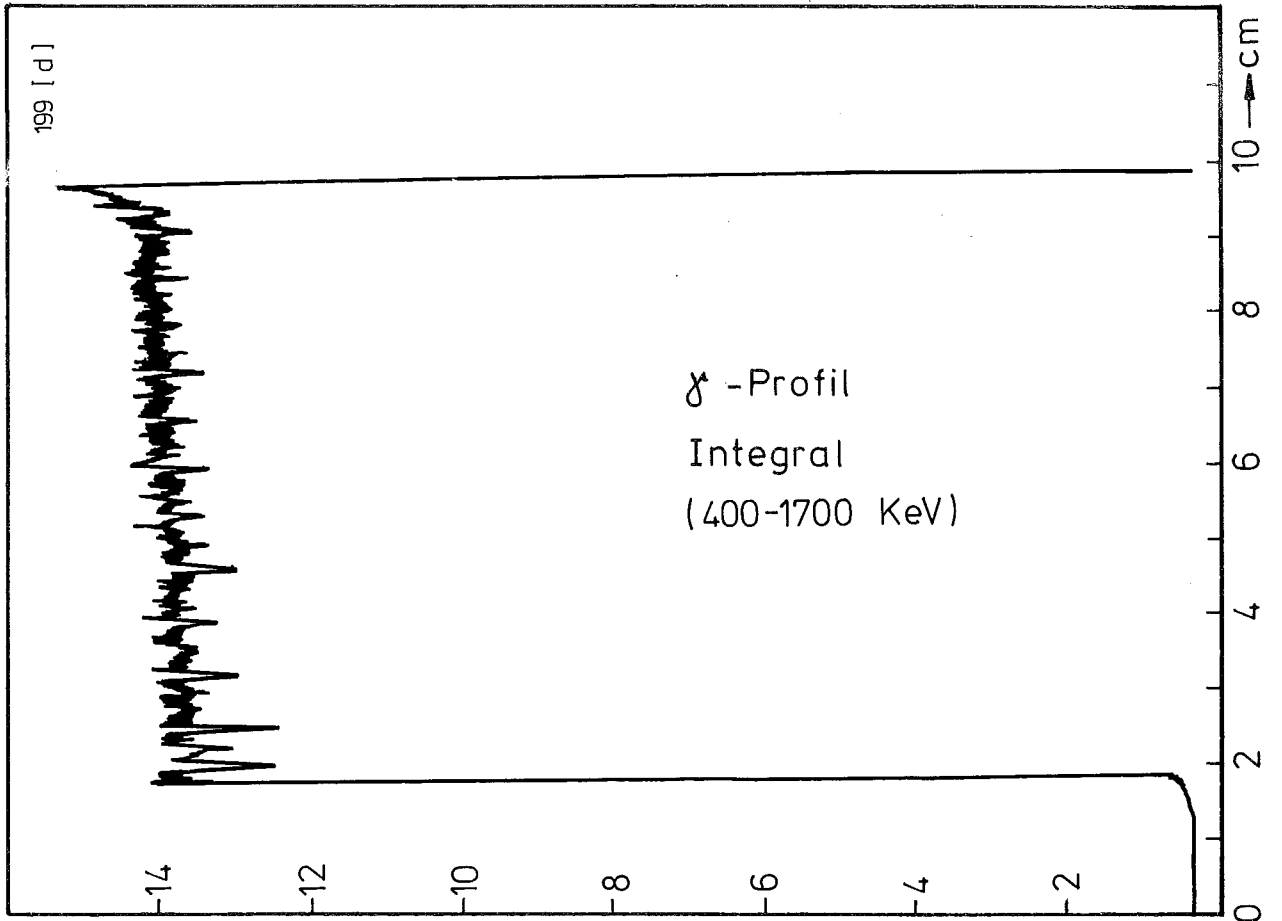
100 μm

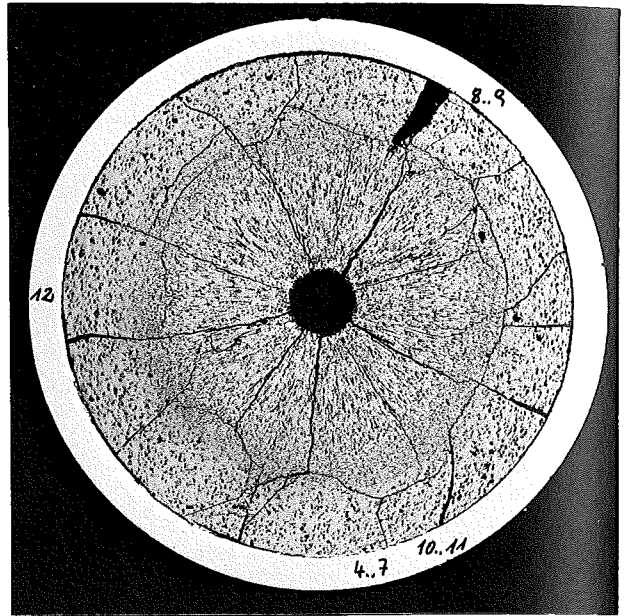
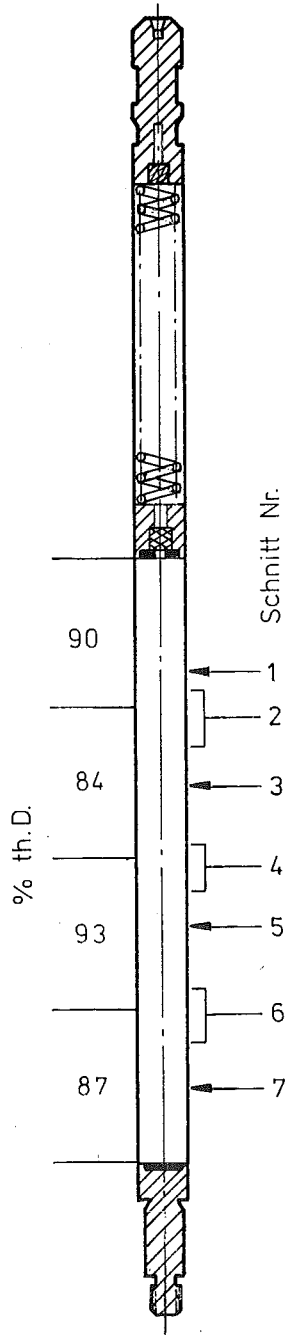


HZ 3c-73-5A/6-7/9 500x

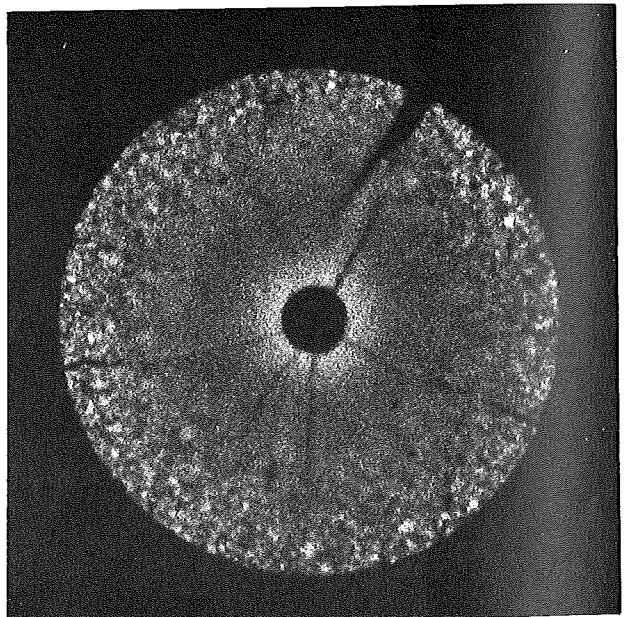
40 μm



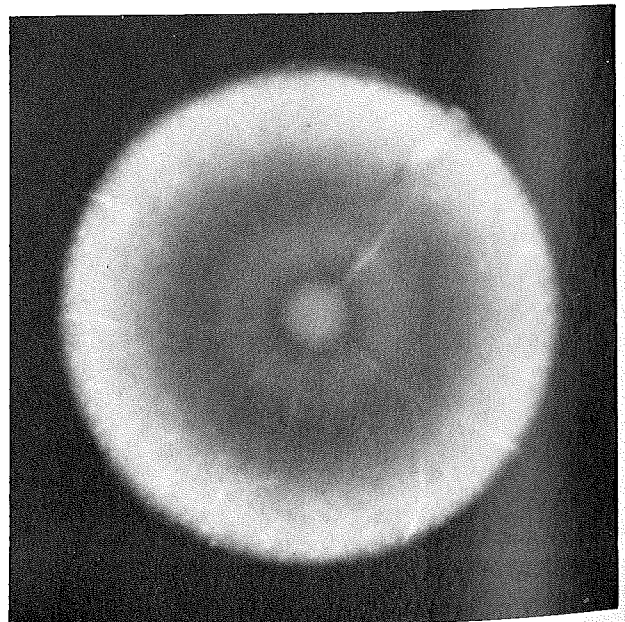




A

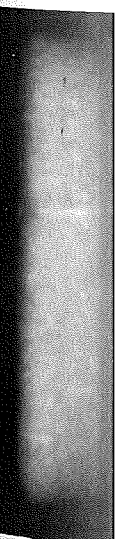
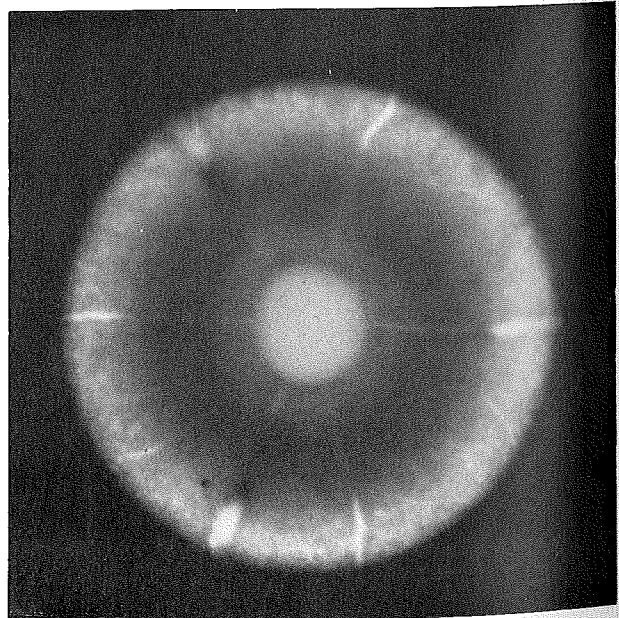
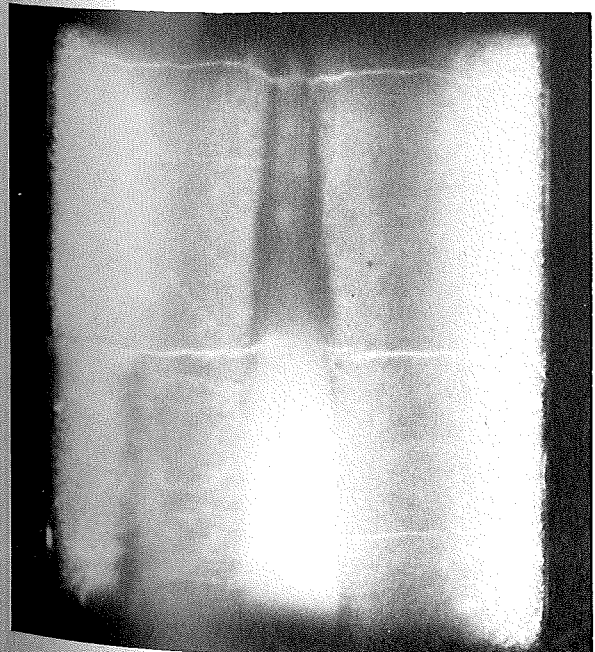
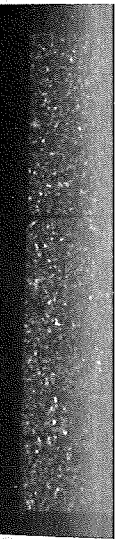
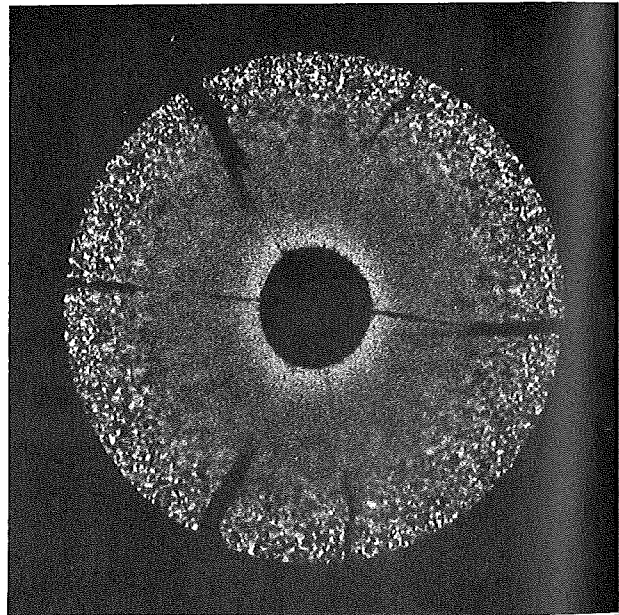
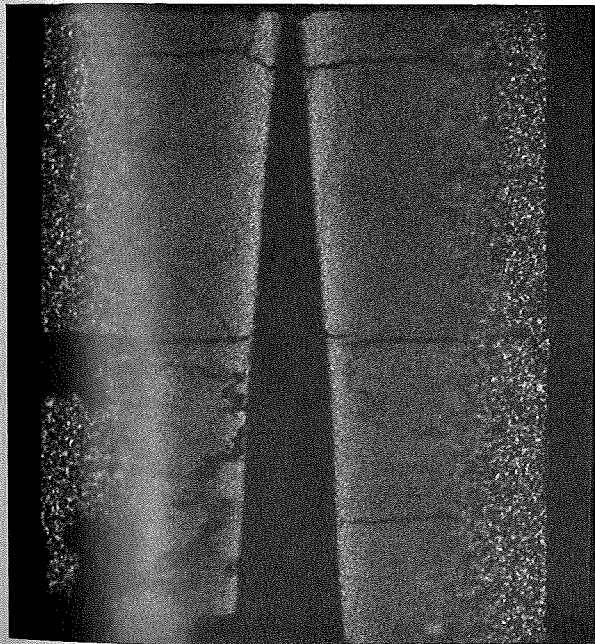
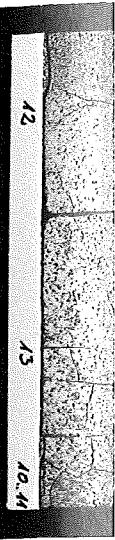
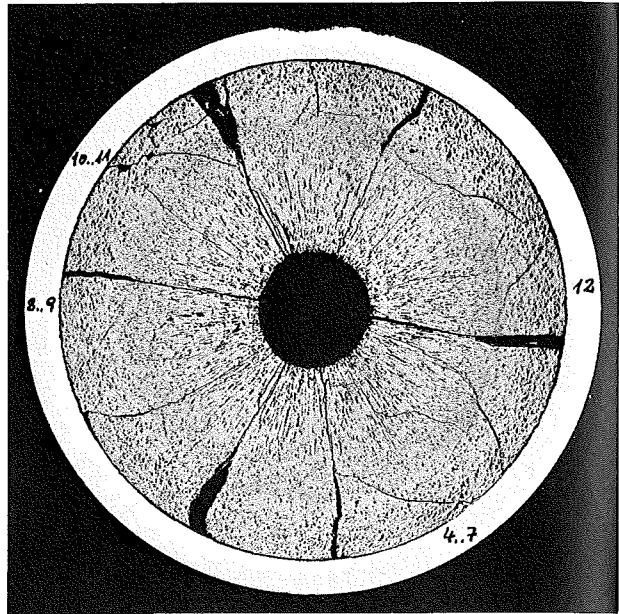
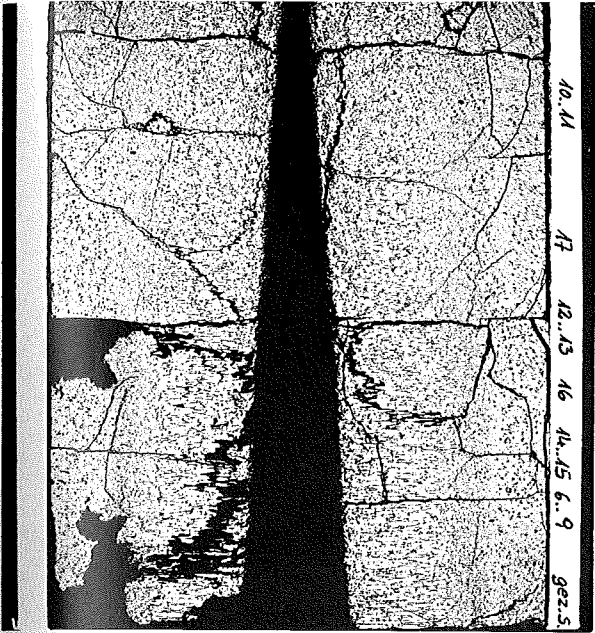


B



C

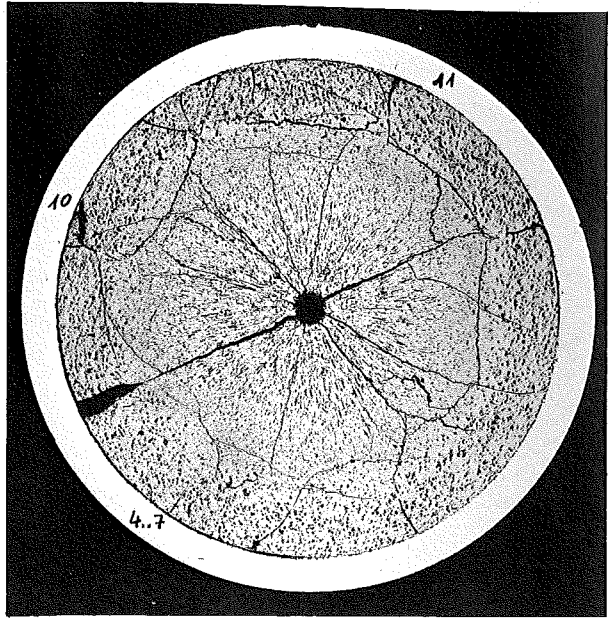
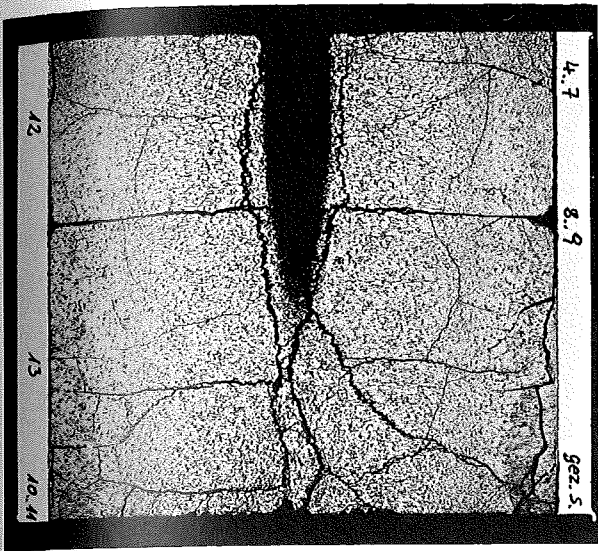
1 mm



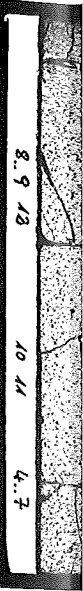
1 mm

1 mm

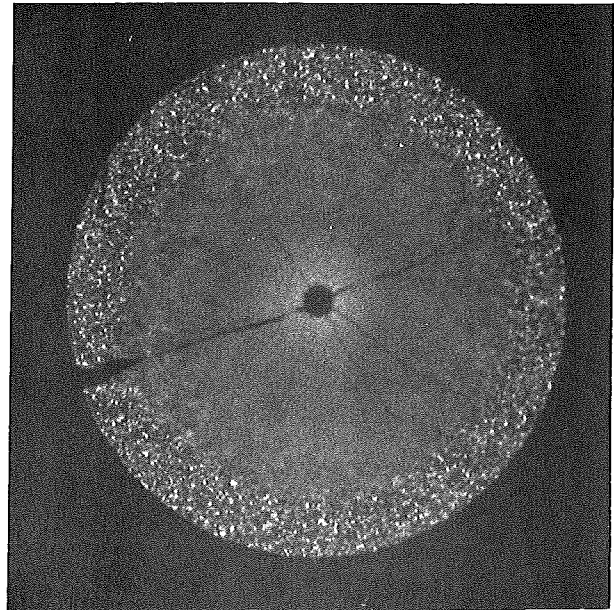
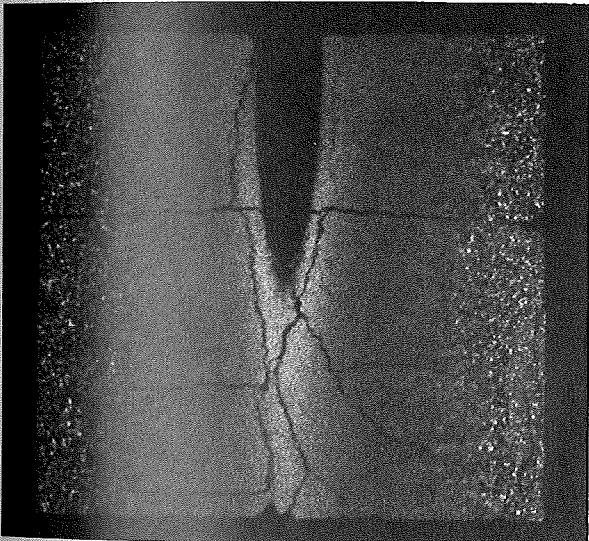
A



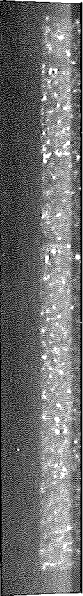
A



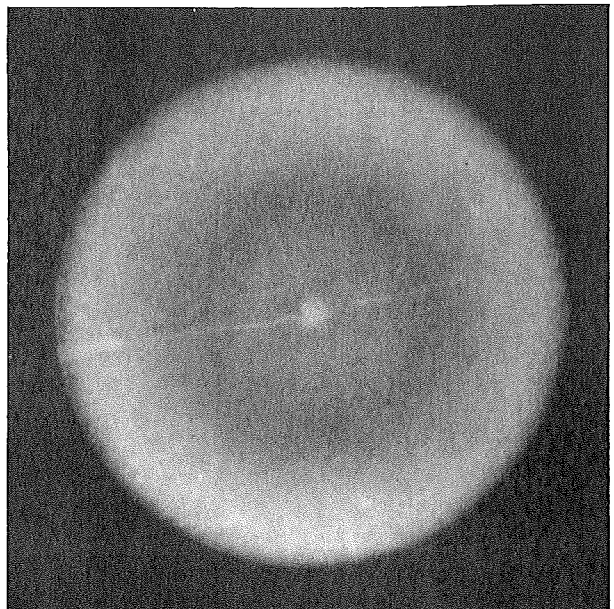
B



B



C



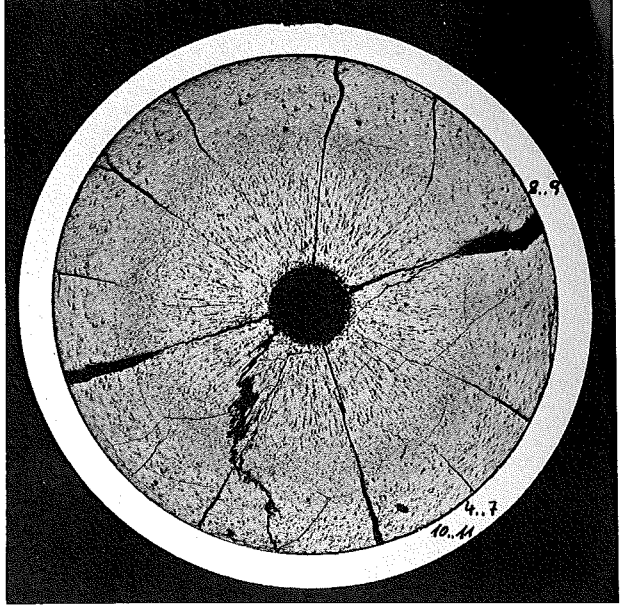
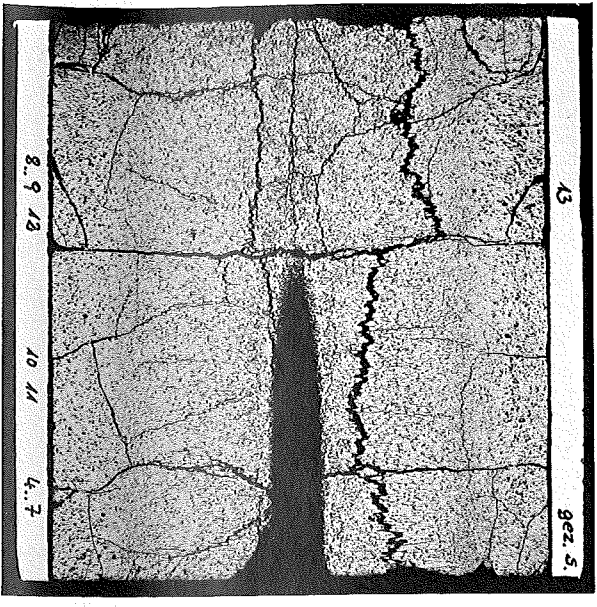
C



1 mm

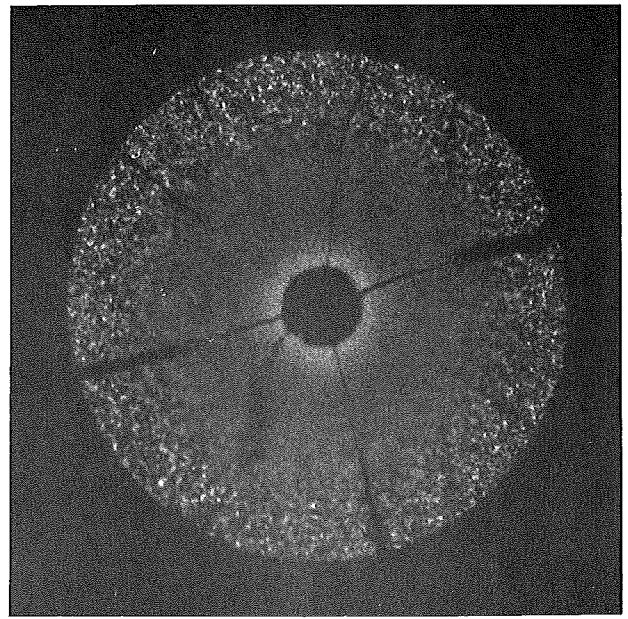
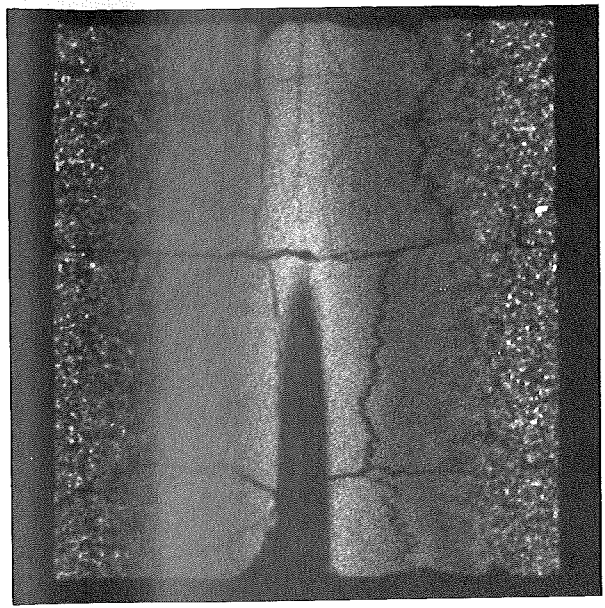
1 mm

A



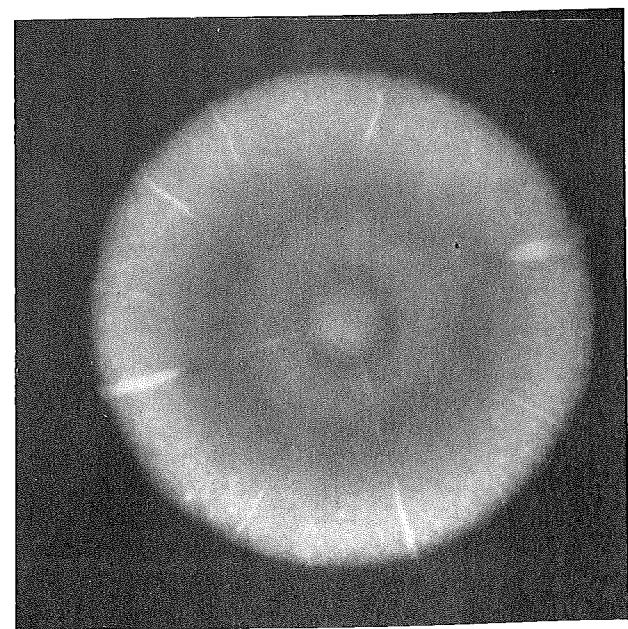
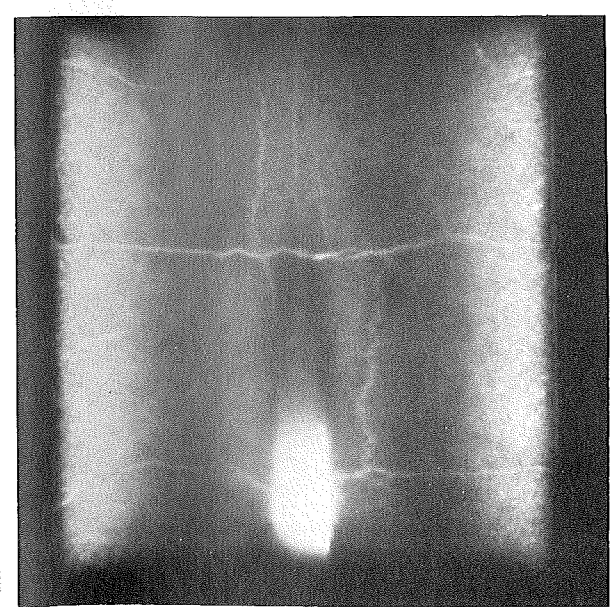
A

B



B

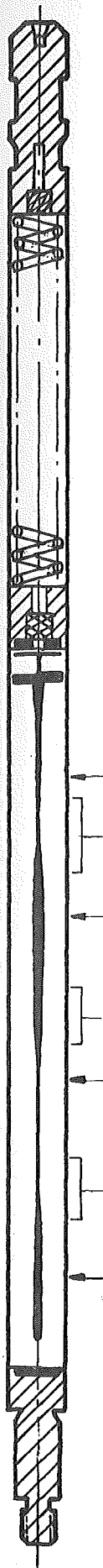
C



C

mm

1 mm



Prüfling 5A-6

Brennstoff :

Form : Tabletten

Zusammensetzung : UO_2/PuO_2

Tablettendichte : 89,9; 84,2; 93,1;
86,9 % th.D.

Hülle :

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 7,0 mm

Wandstärke : 0,4 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : 48 μ m

Schmierdichte : —

Bestrahlung :

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

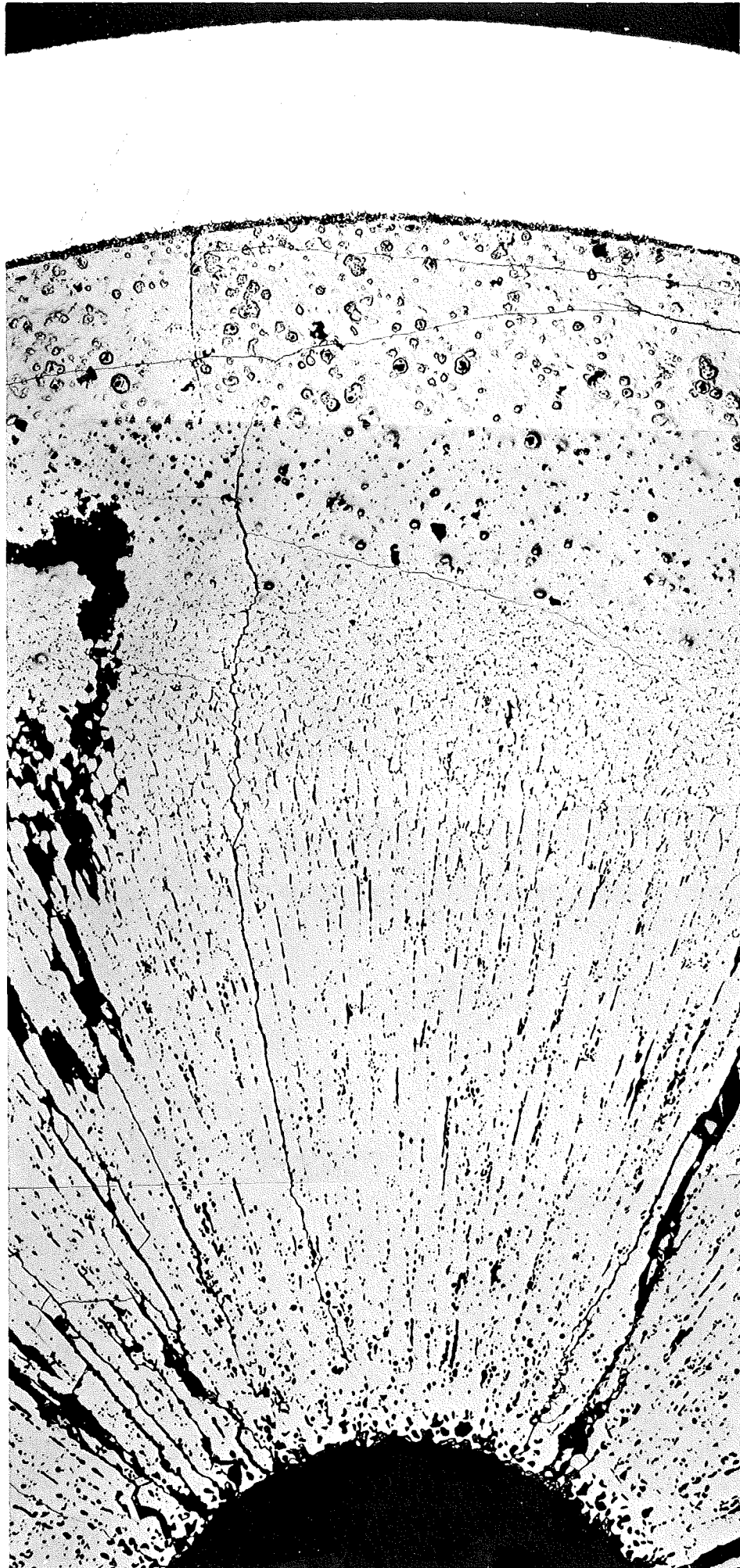
Dauer : 91,4 Vollasttage

Ende : 17.8.1970

Rechn. Abbrand mittl. : \approx 16,0 MWd/kg

Stableistung max./mittl. : 502/327 W/cm

-1/57-
zu Prüfling 5A/7
1A

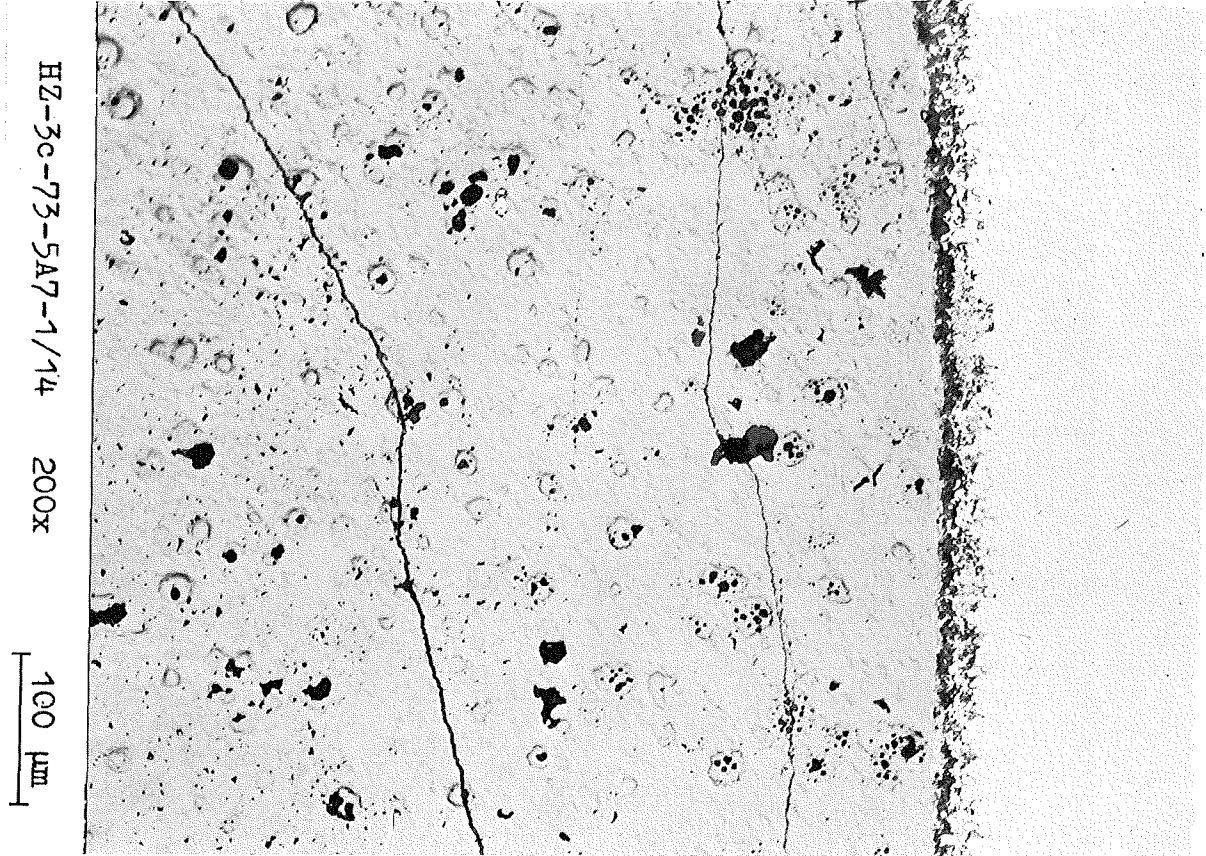


4

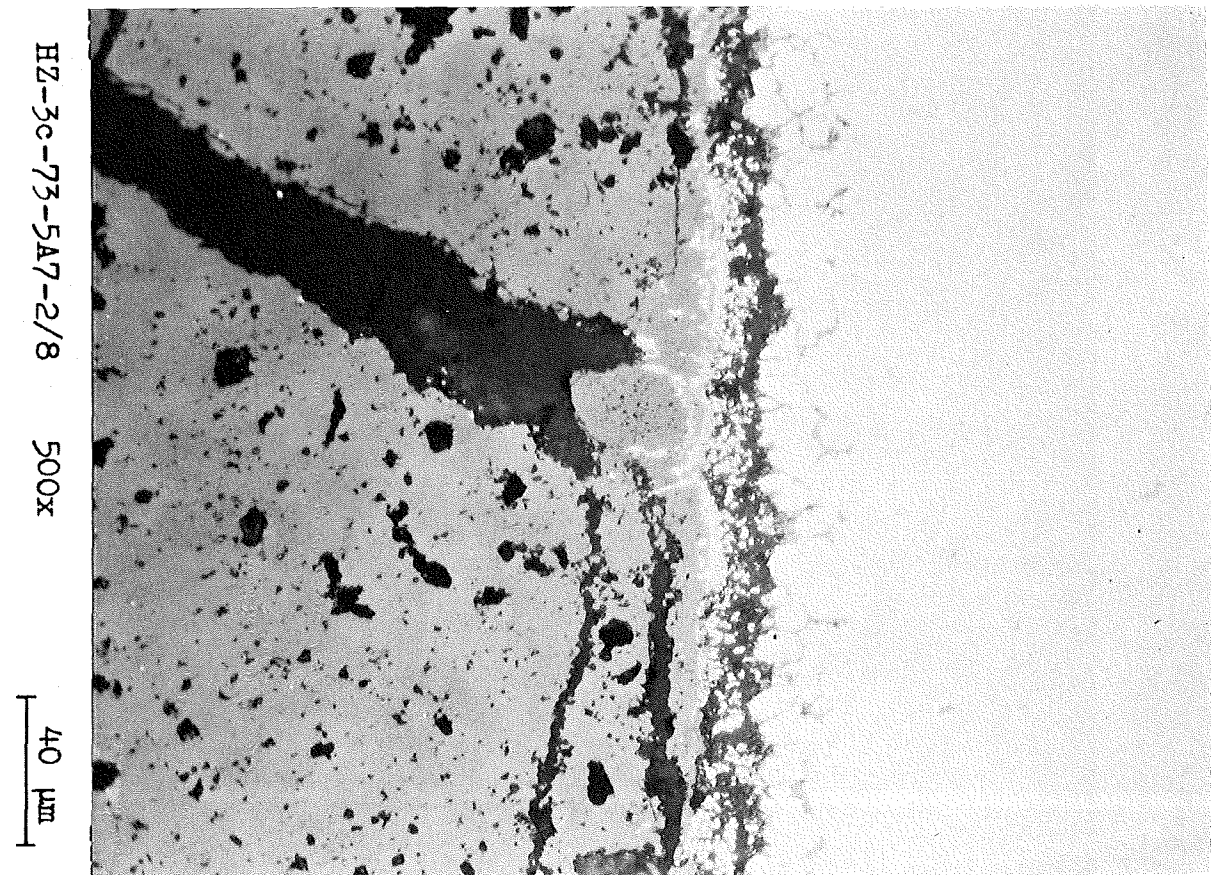
—
0,1mm

-1/58-
zu Prüfling 5A/7

1A



2A

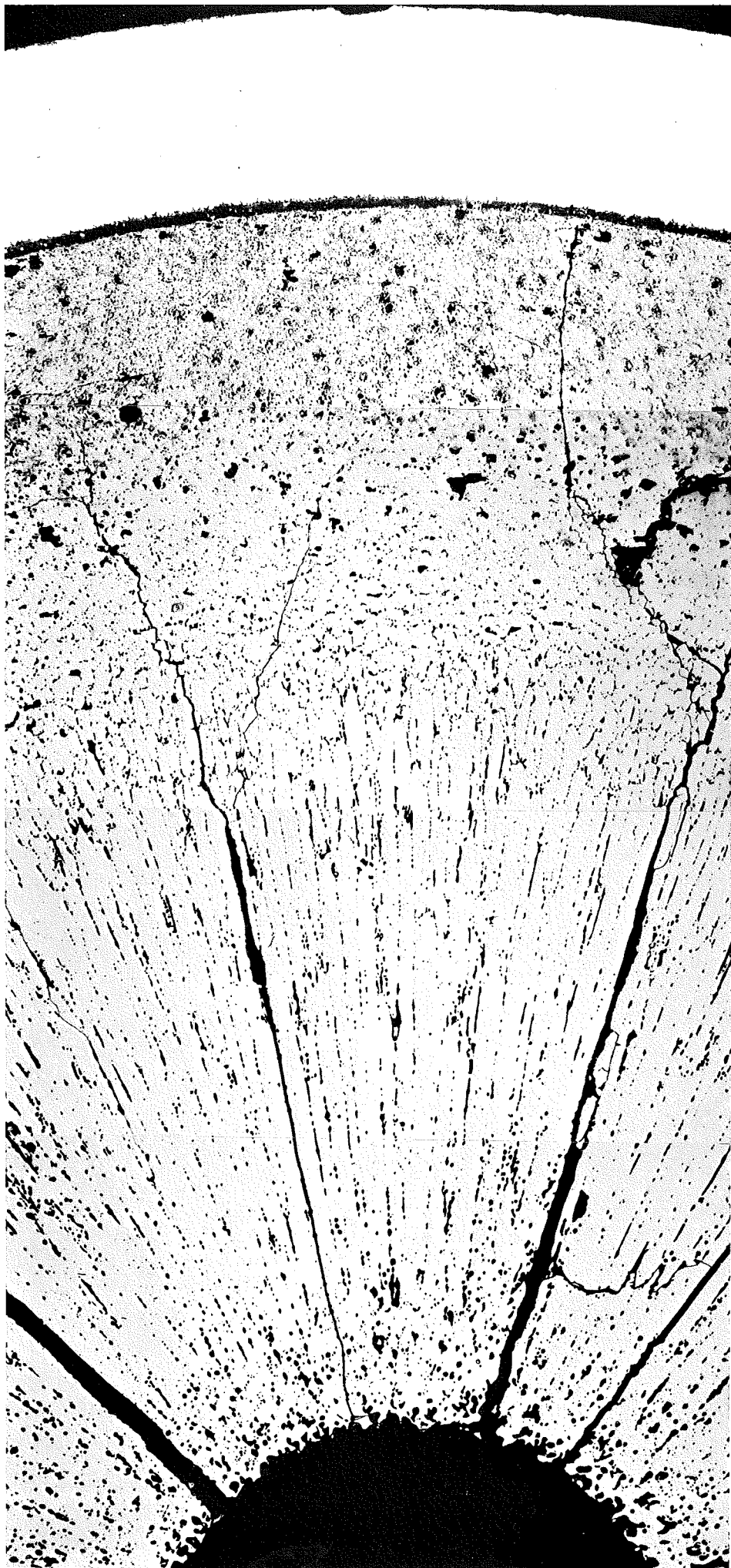


-1/59-
zu Prüfling 5A/7

2 A



-I/60-
zu Prüfling 5A/7
3 A

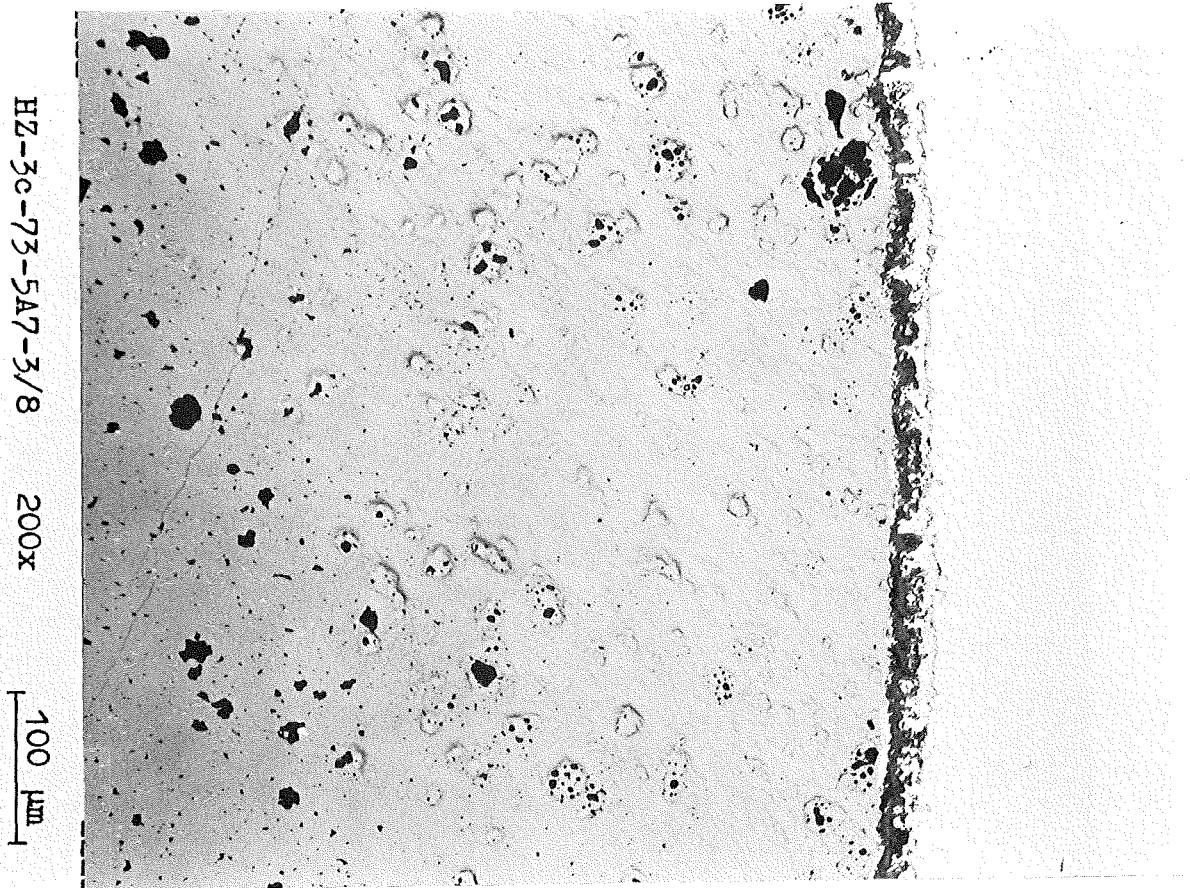


0,1mm

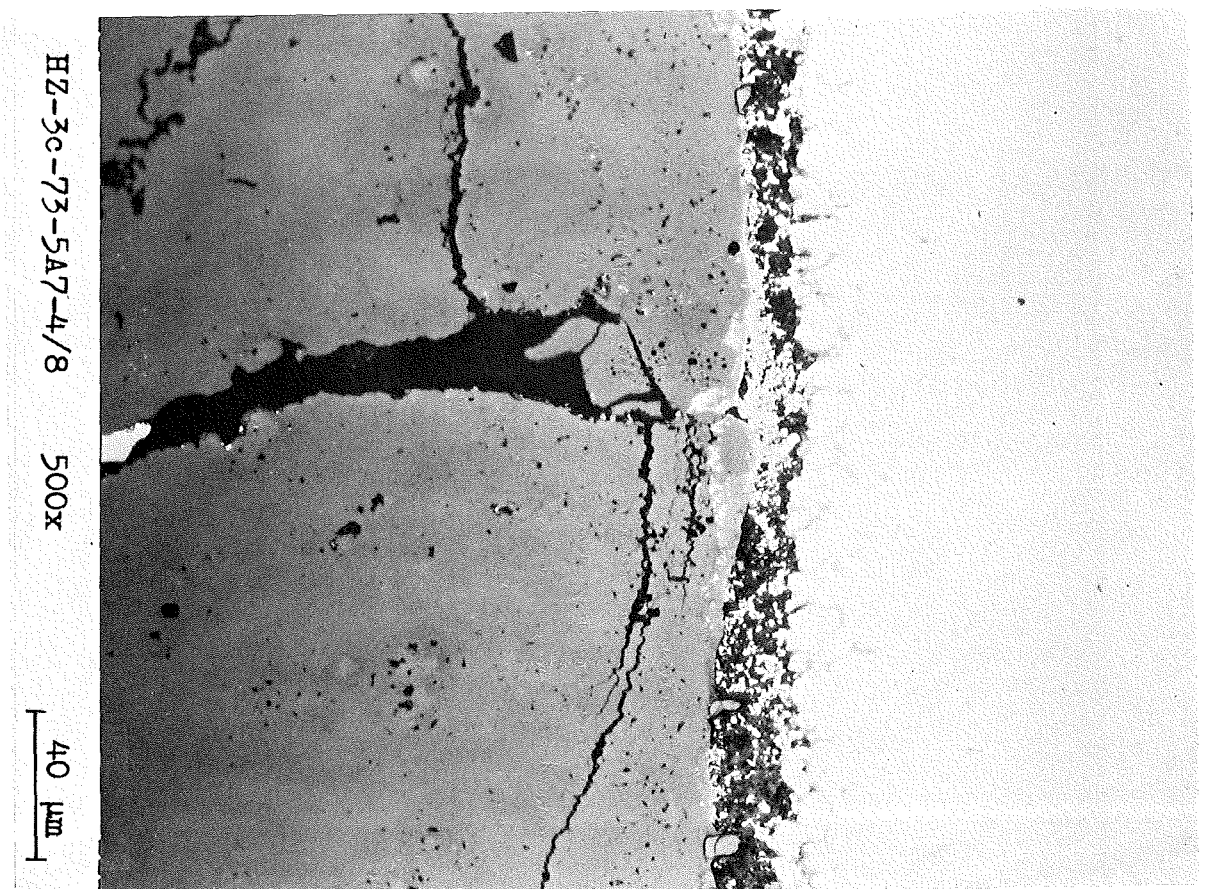
4

- I/61 -
zu Prüfling 5A/7

3A

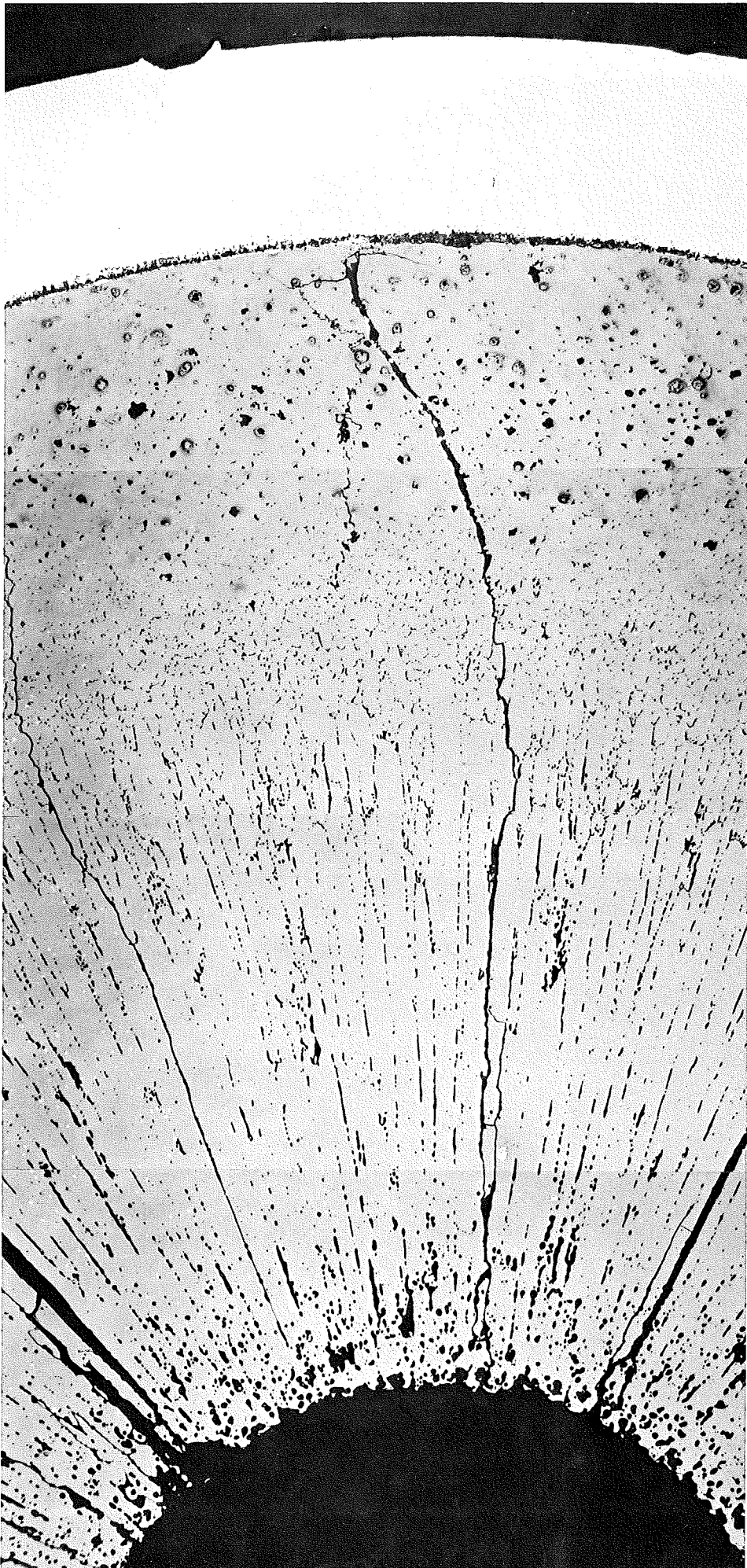


4A



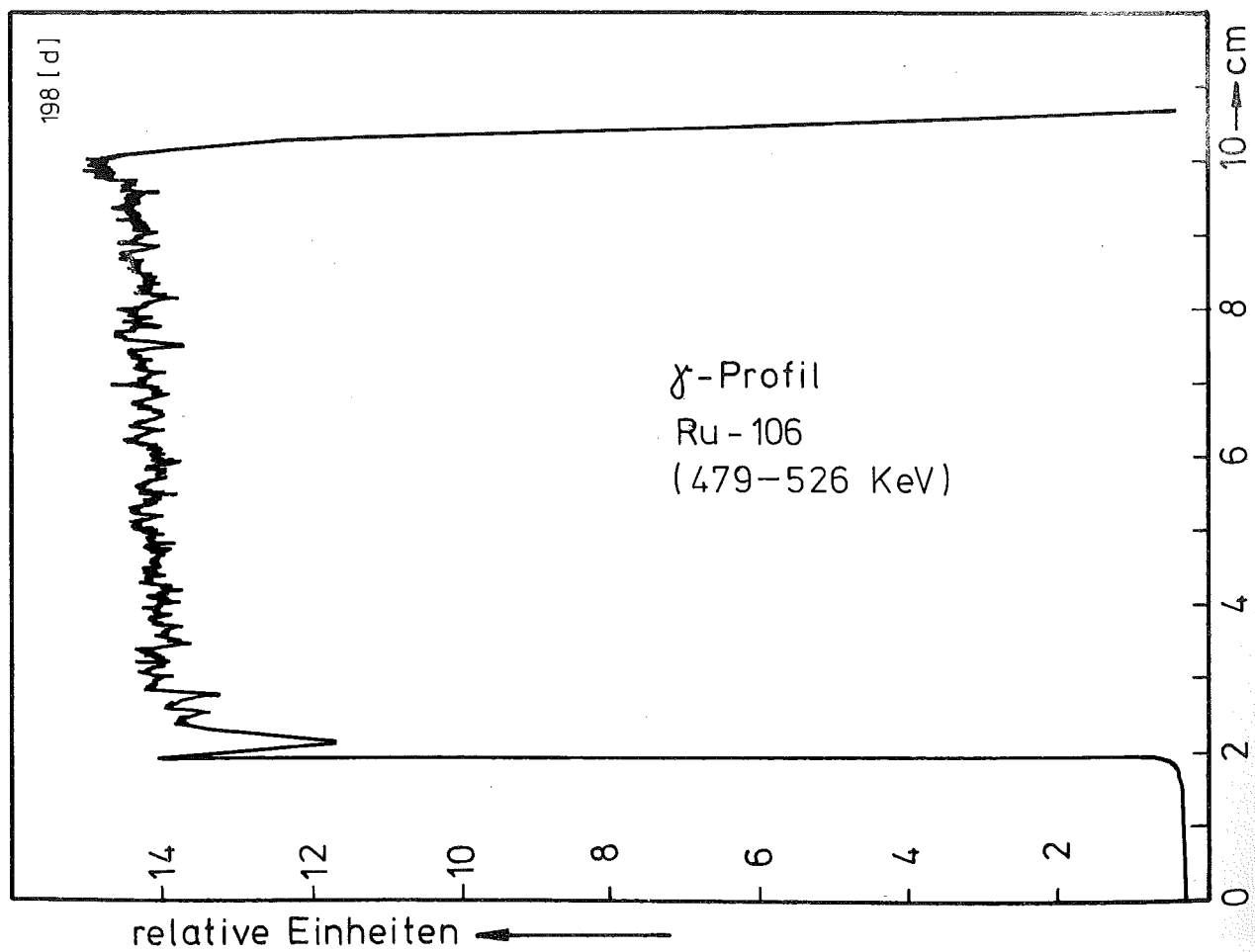
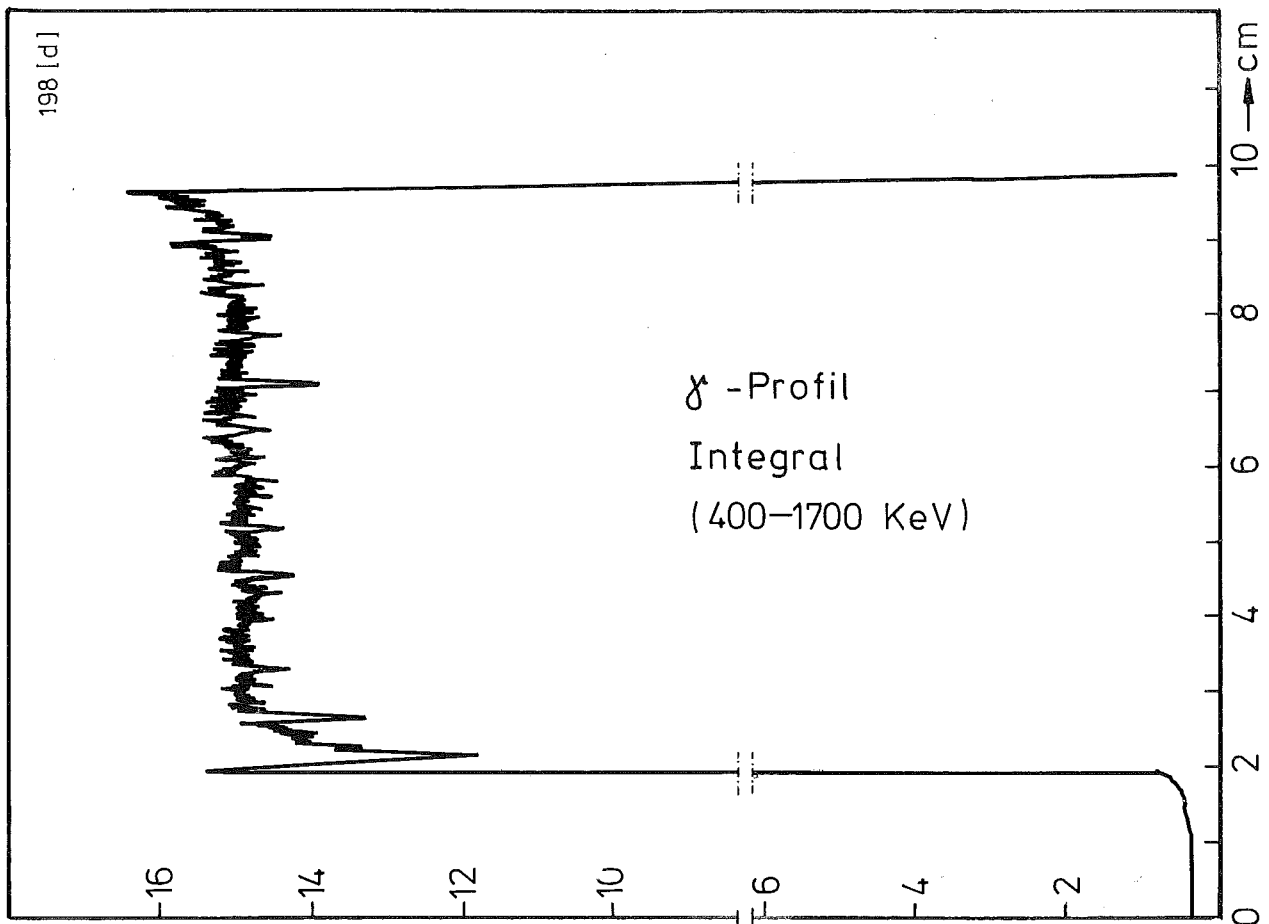
-1/62-
zu Prüfling 5A/7

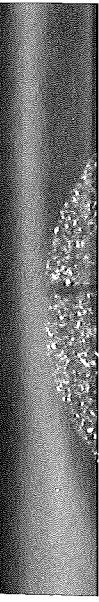
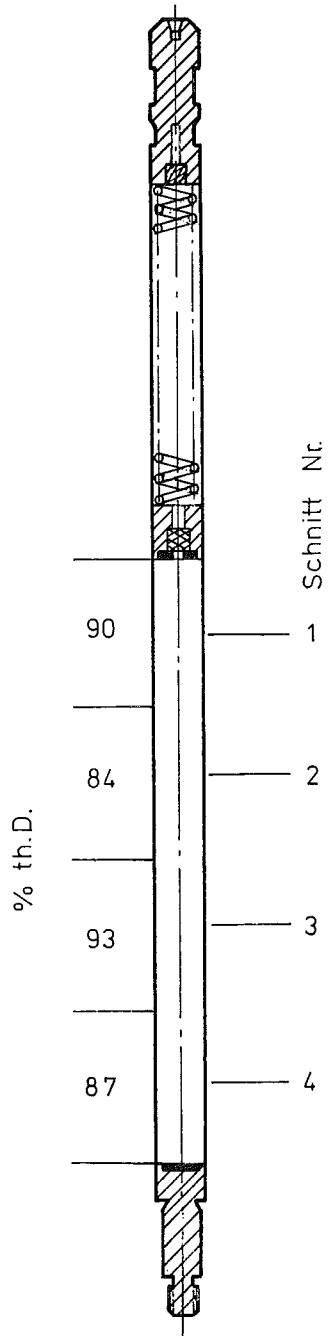
4 A



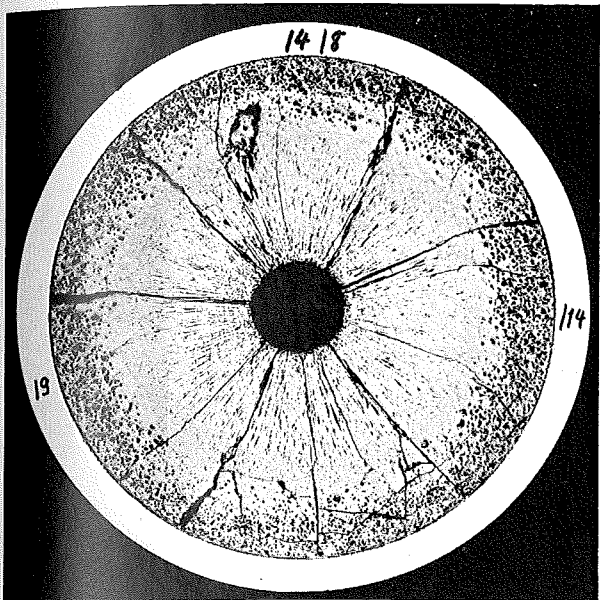
4

0,1mm

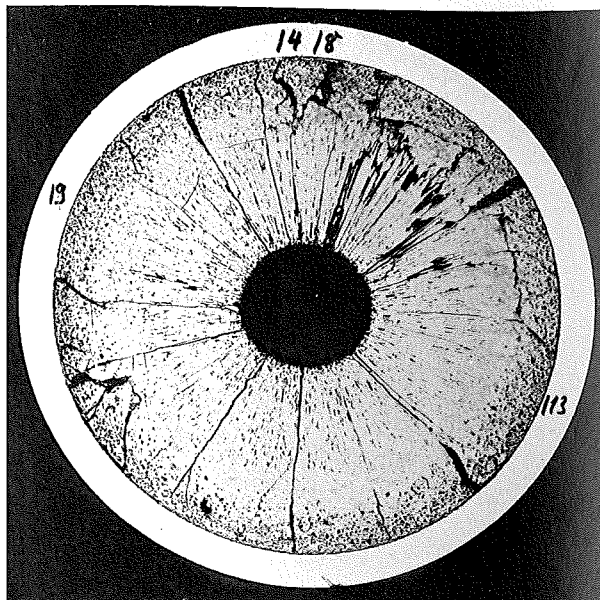




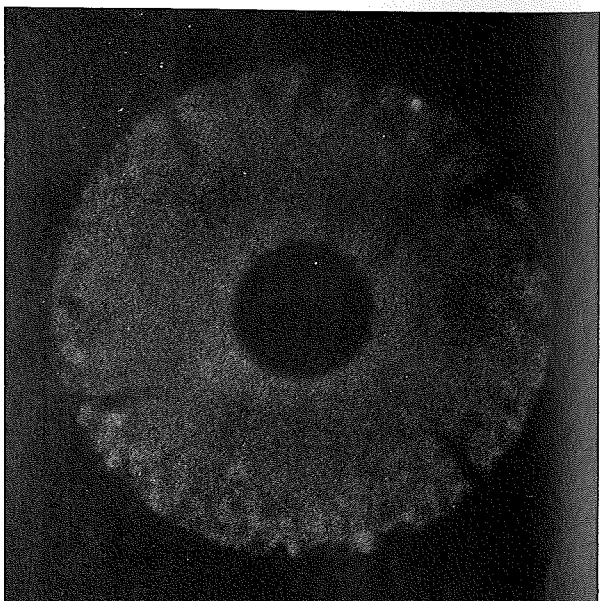
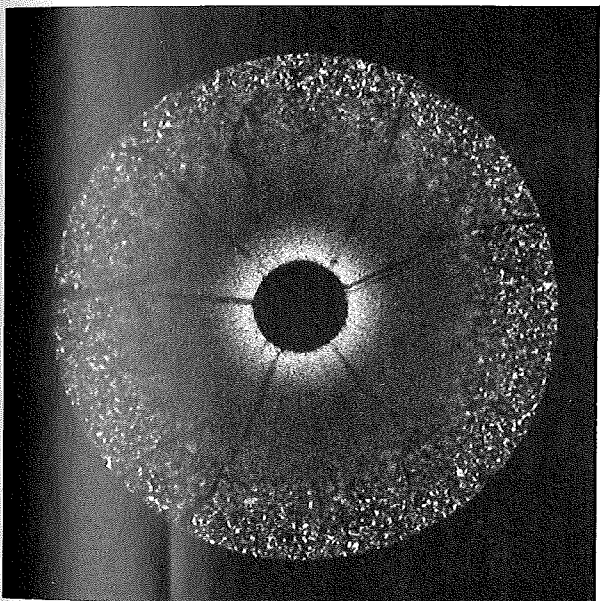
1



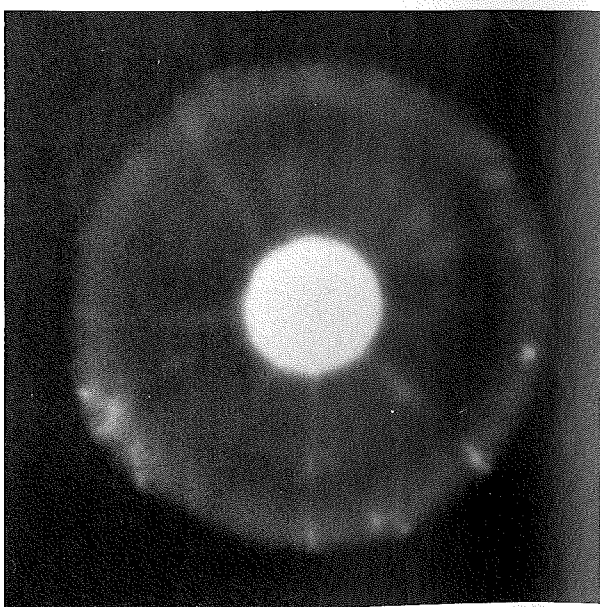
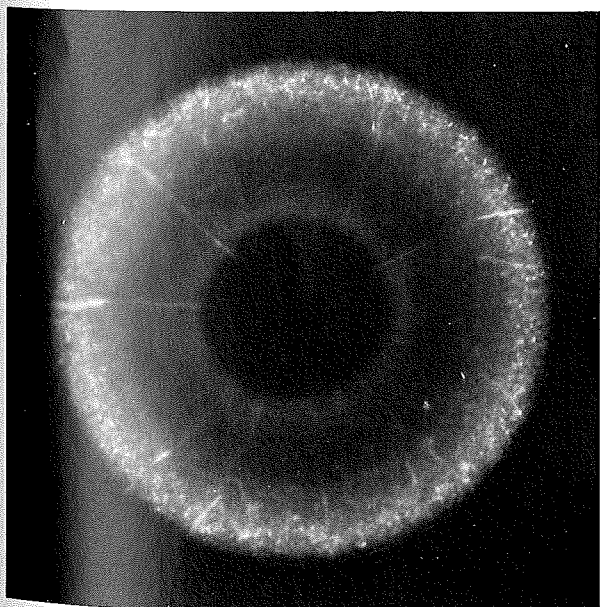
2



A



B



C

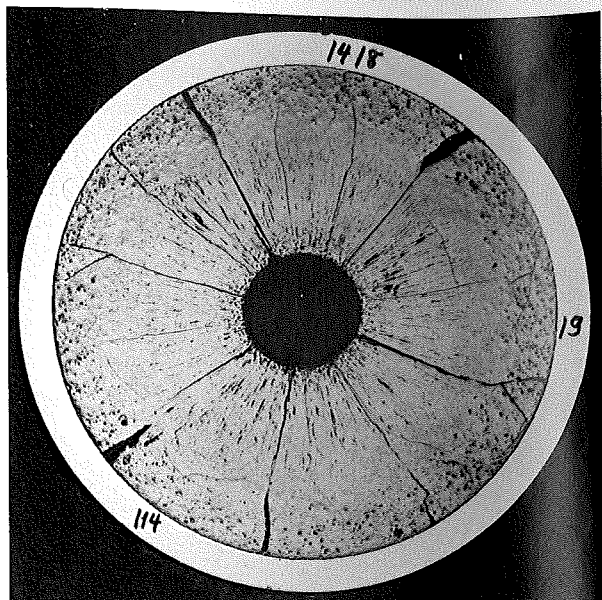
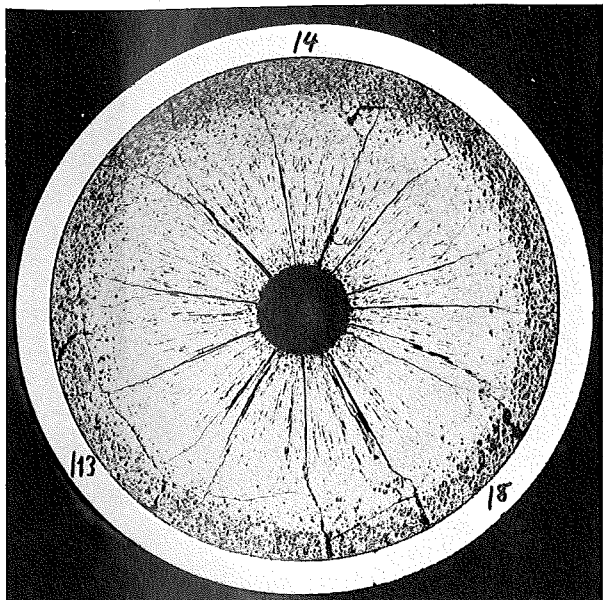
1mm

3

4

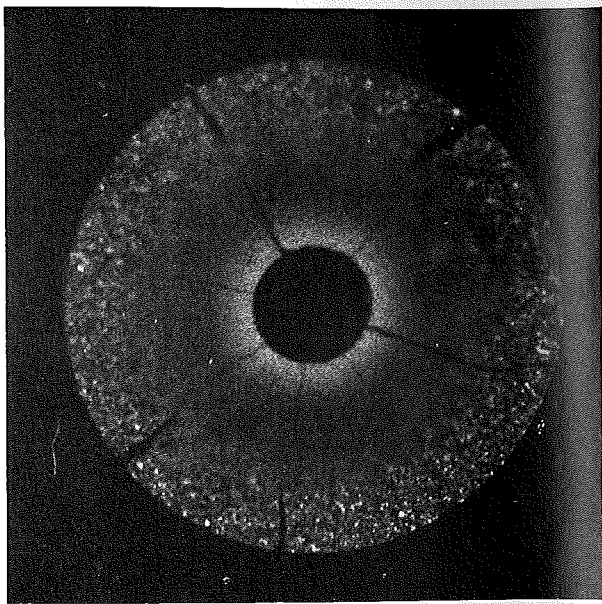
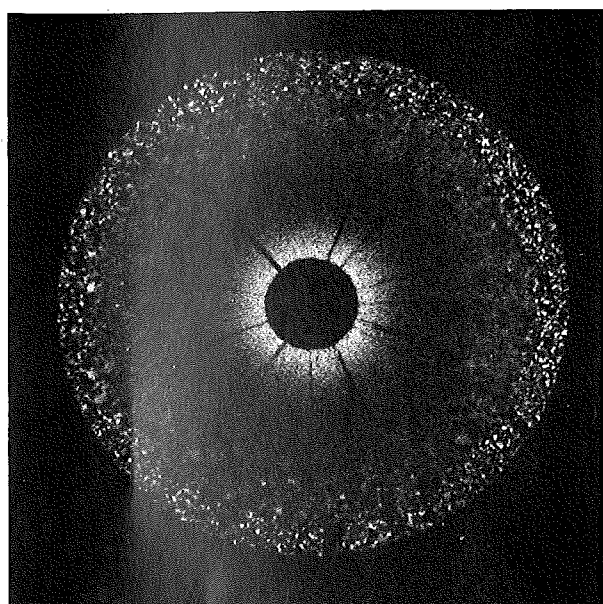
A

A



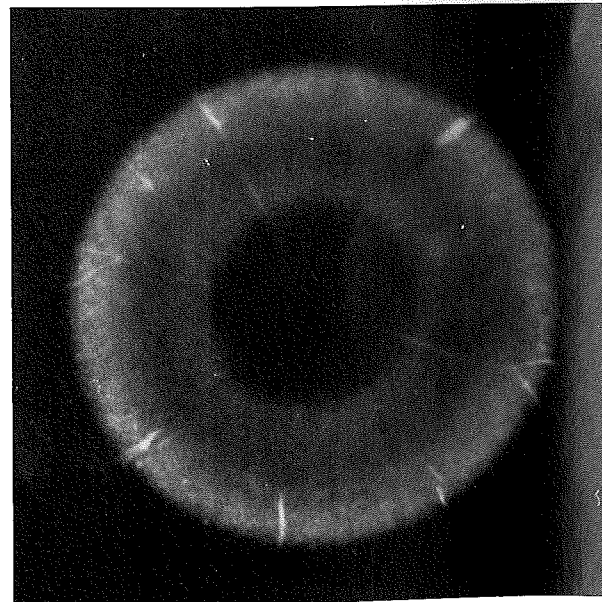
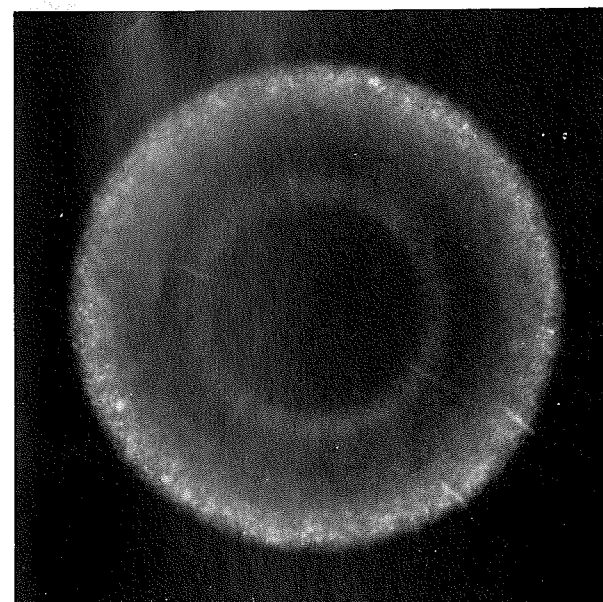
B

B



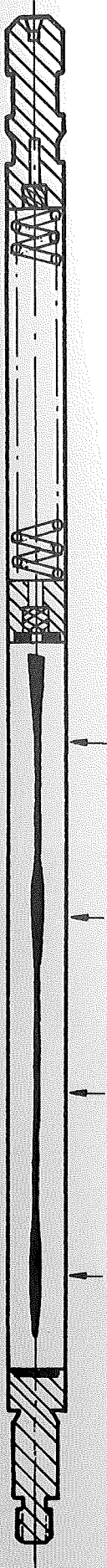
C

C



1 mm

1 mm



Prüfling 5A-7

Brennstoff :

Form : Tabletten
Zusammensetzung : UO_2/PuO_2
Tablettendichte : 90,3; 84,3; 93,3;
87,0 % th.D.

Hülle :

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

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 48 μ m
Schmierdichte : —

Bestrahlung :

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppel-
kapsel Typ 4a
Dauer : 91,4 Volllasttage
Ende : 17.8.1970
Rechn. Abbrand mittl. : $\approx 17,0$ MWd/kg
Stableistung max./mittl. : $\approx 500/300$ W/cm

-I/65-
zu Prüfling 5A/1

1A



4...6

—|
0,1mm

- I/66 -
zu Prüfling 5A/1

2 A

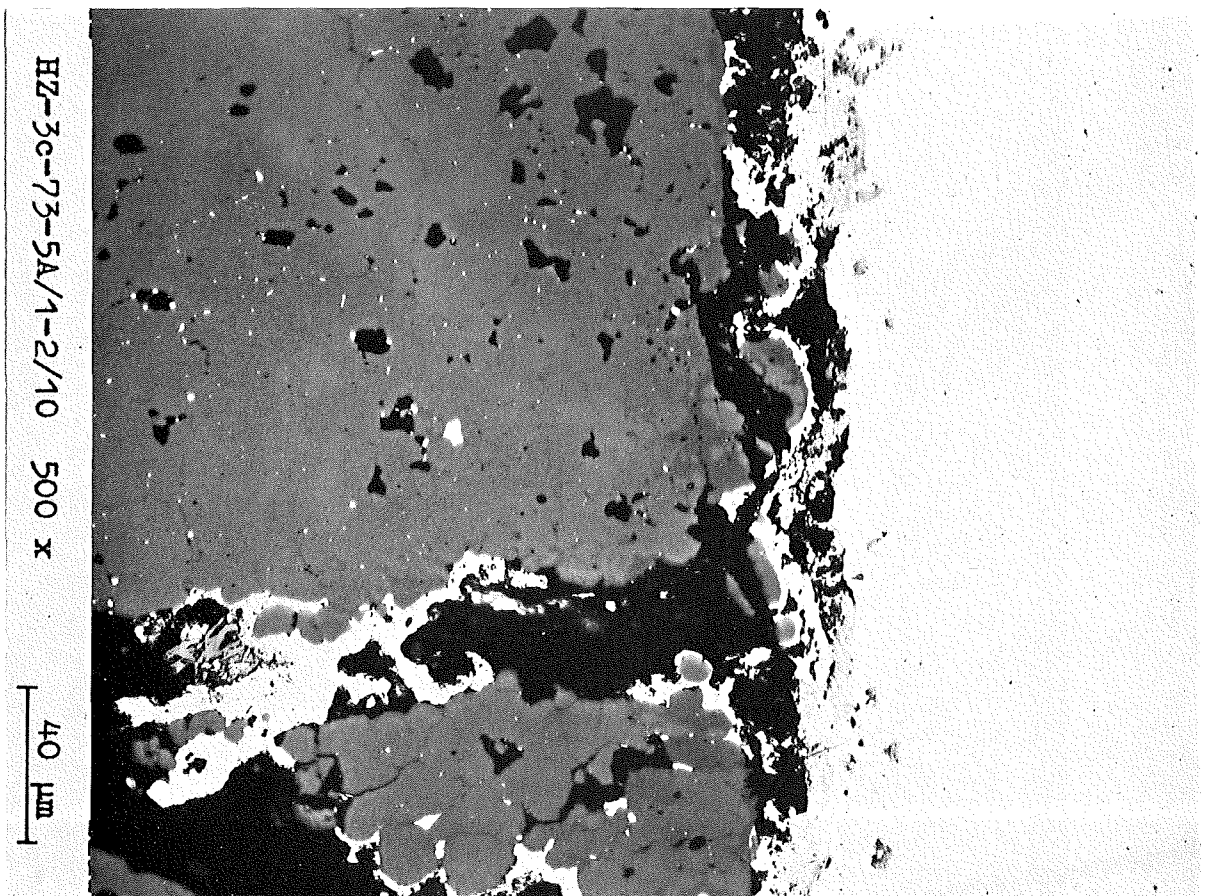
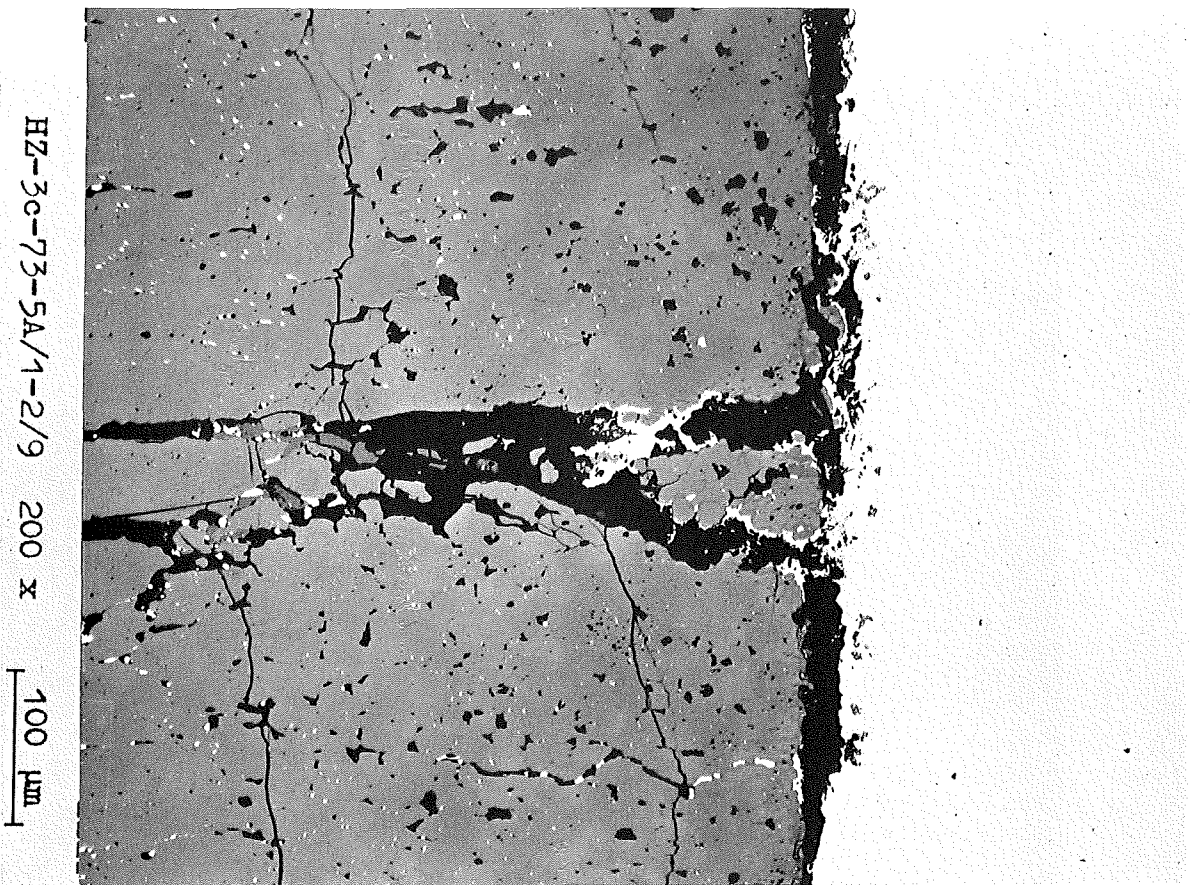


4...6

—|—
0,1mm

-1/67-
zu Prüfling 5A/1

2 A



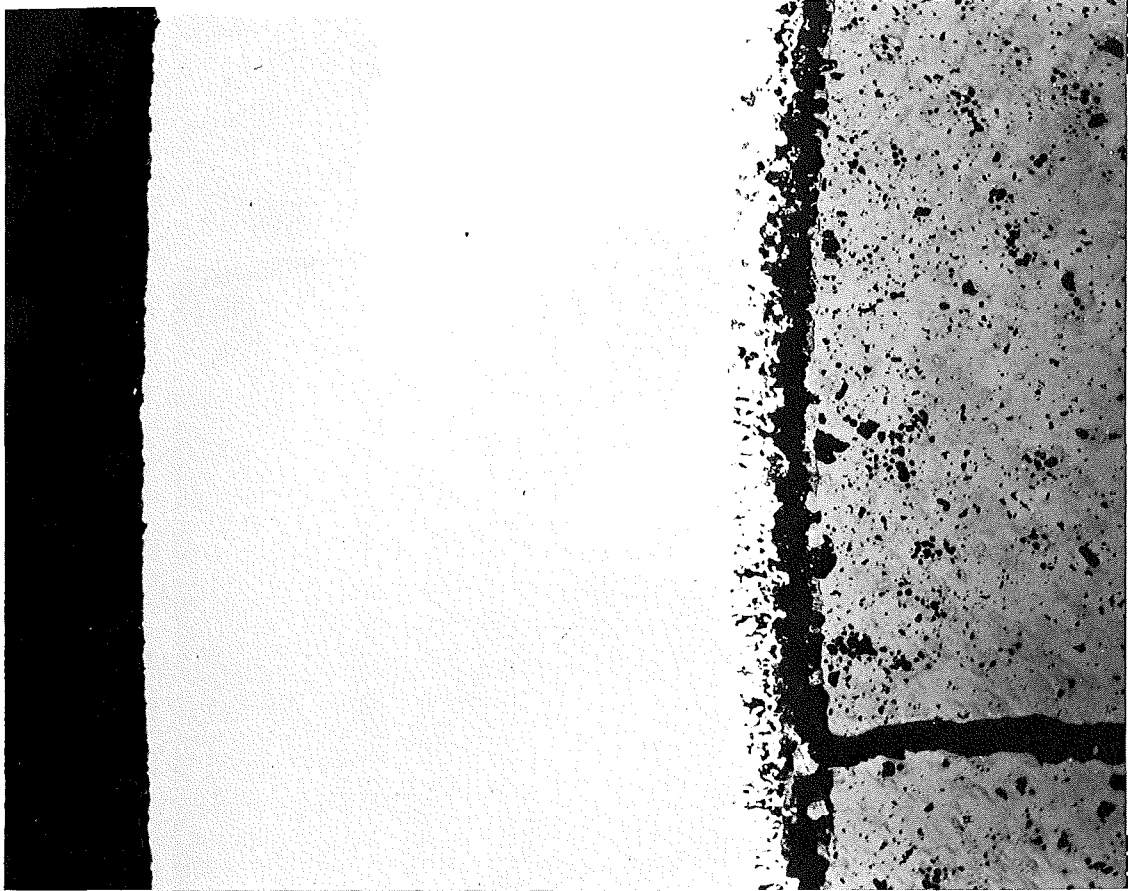
- I/68 -
zu Prüfling 5A/1
3A



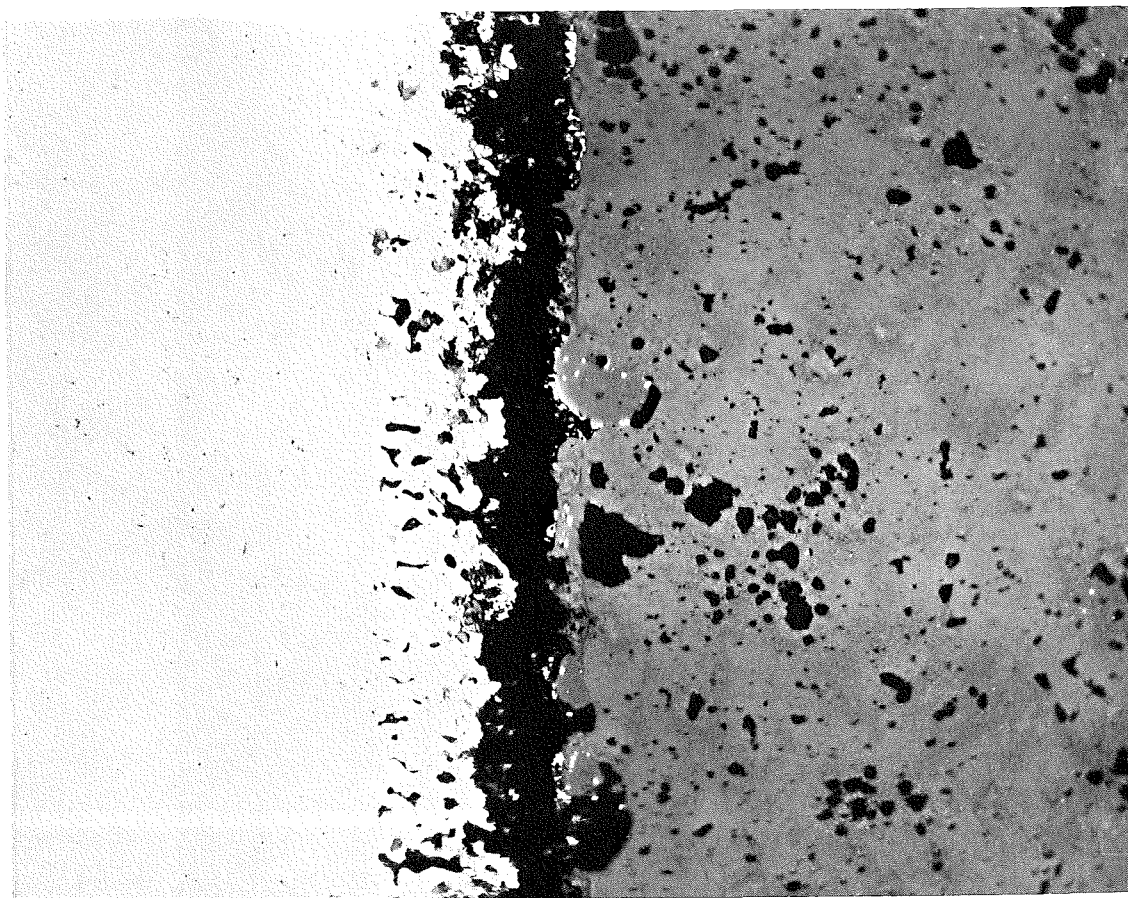
4...7

0,1mm

- I/69 -
zu Prüfling 5A/1
3 A



HZ-3c-73-5A/1-3/8 200 x 100 μm



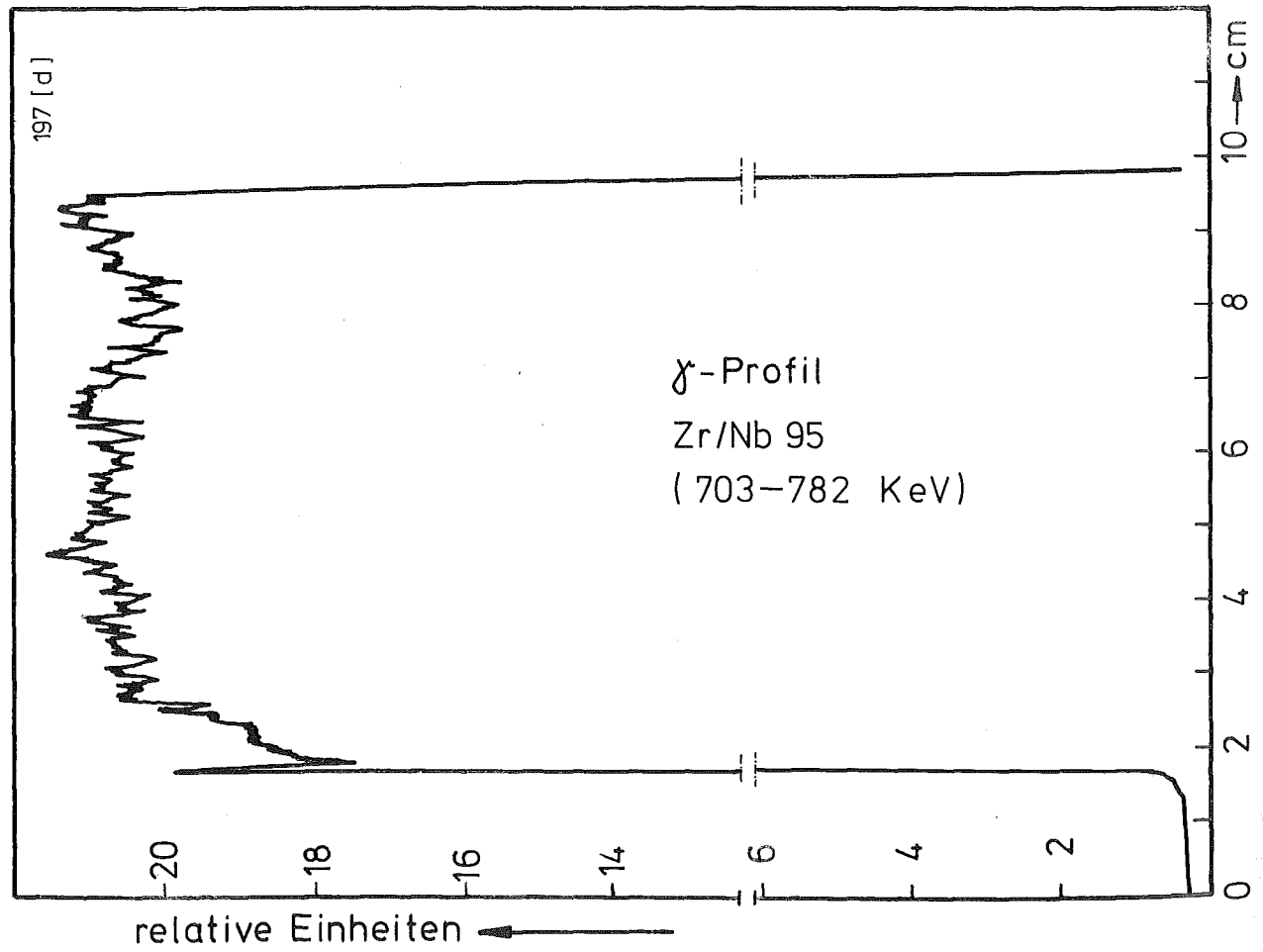
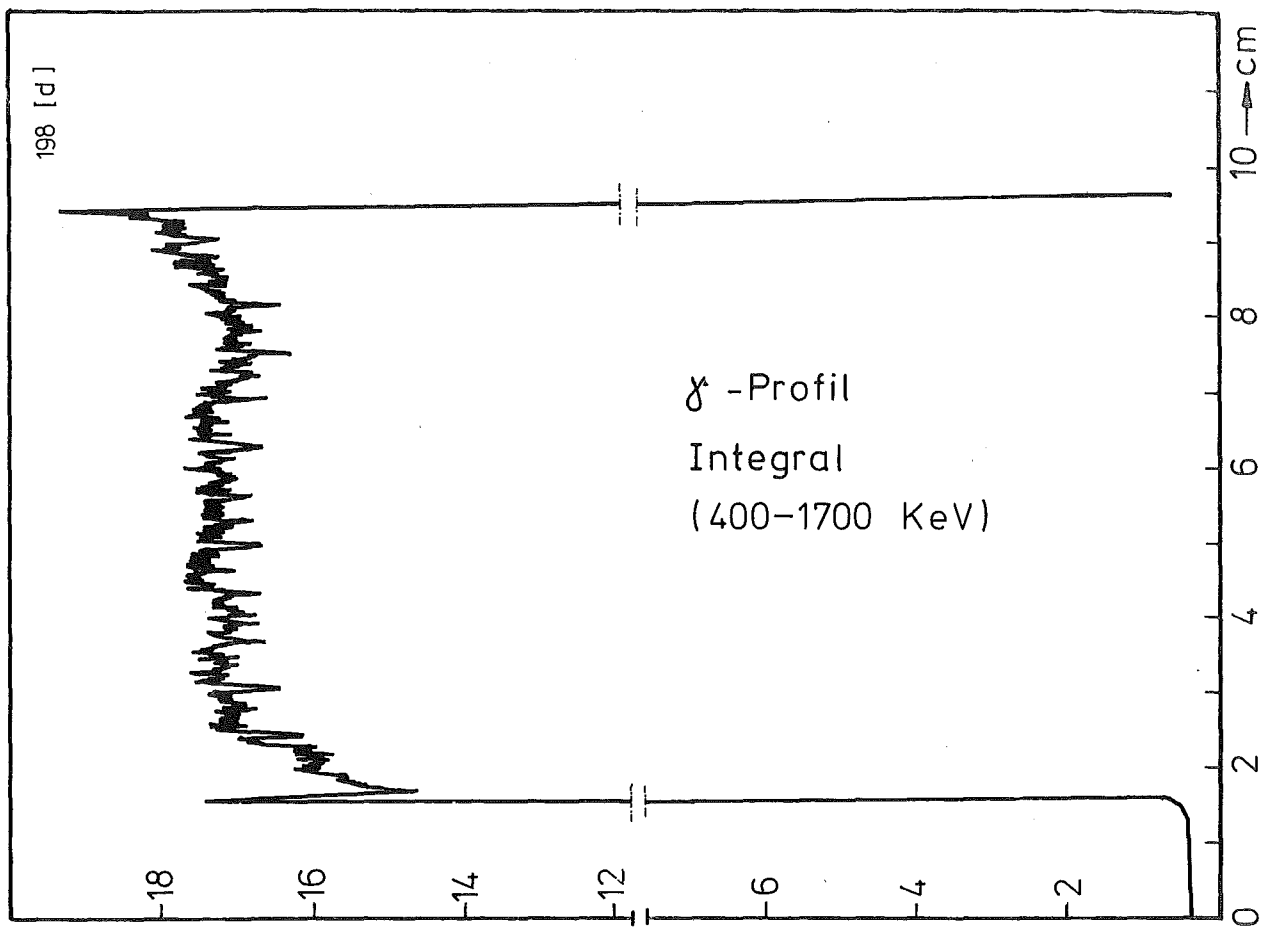
HZ-3c-73-5A/1-3/9 500 x 40 μm

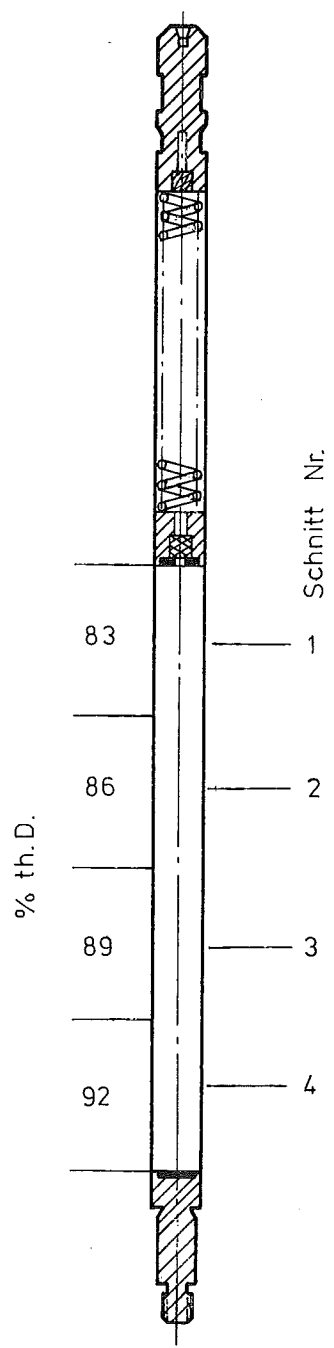
- I/70 -
zu Prüfling 5A/1
4 A



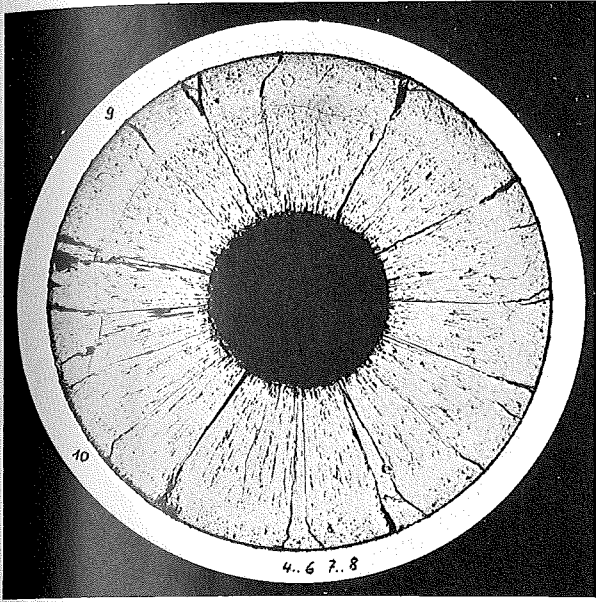
4...7

I
0,1mm

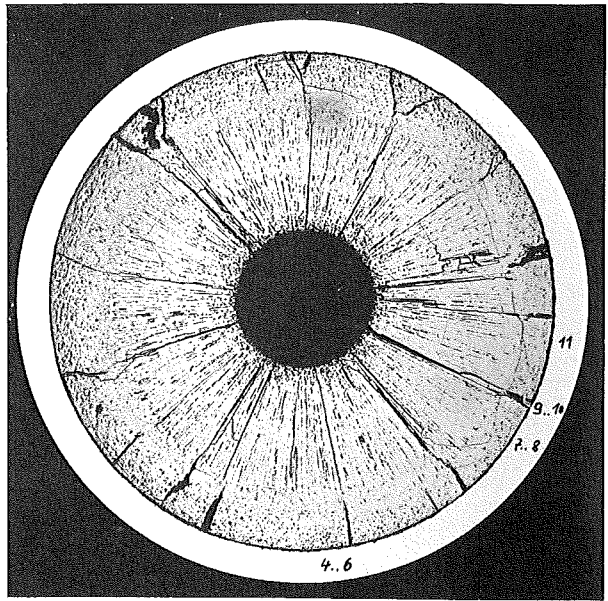




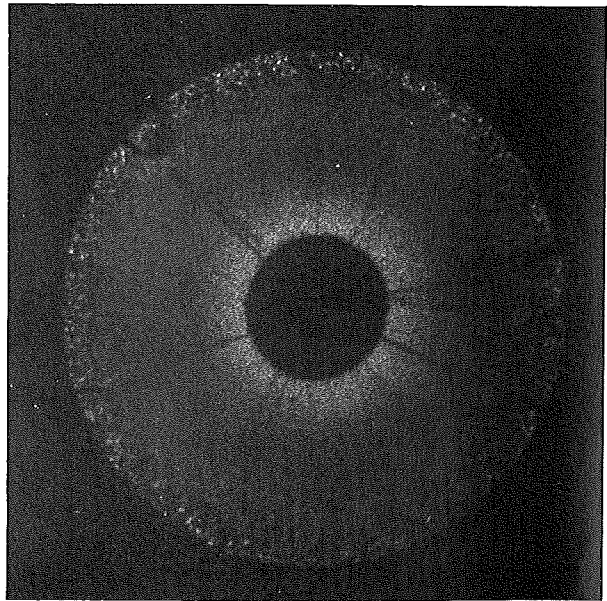
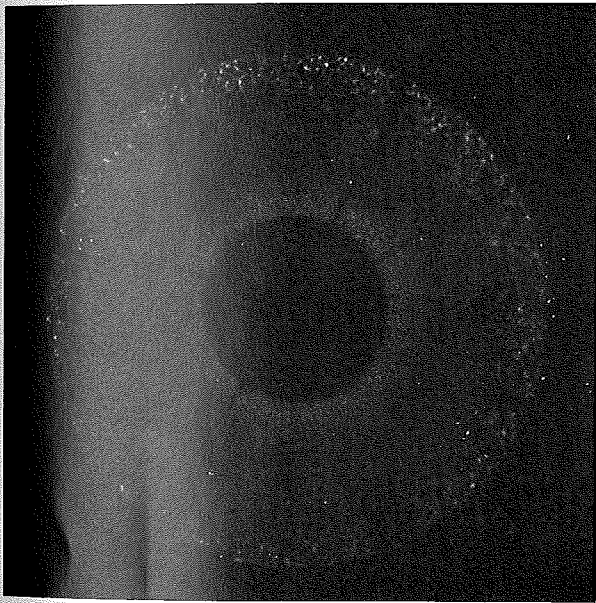
1



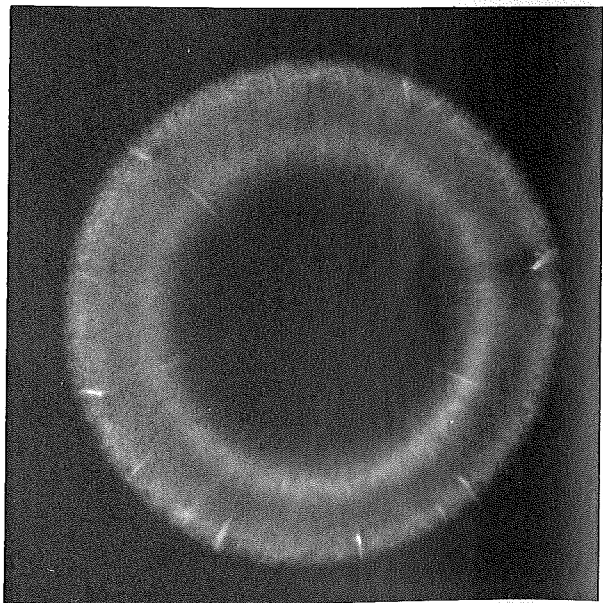
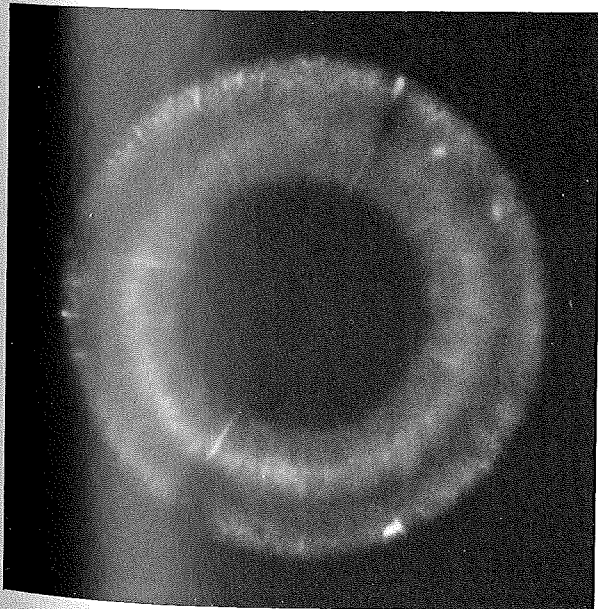
2



A



B



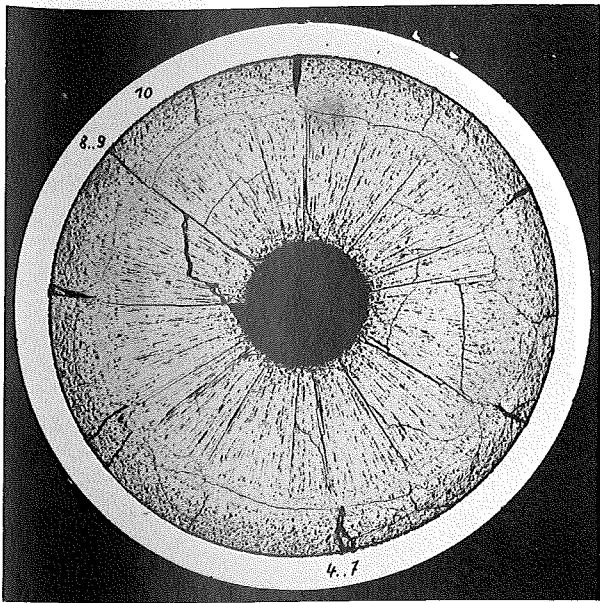
C

1mm

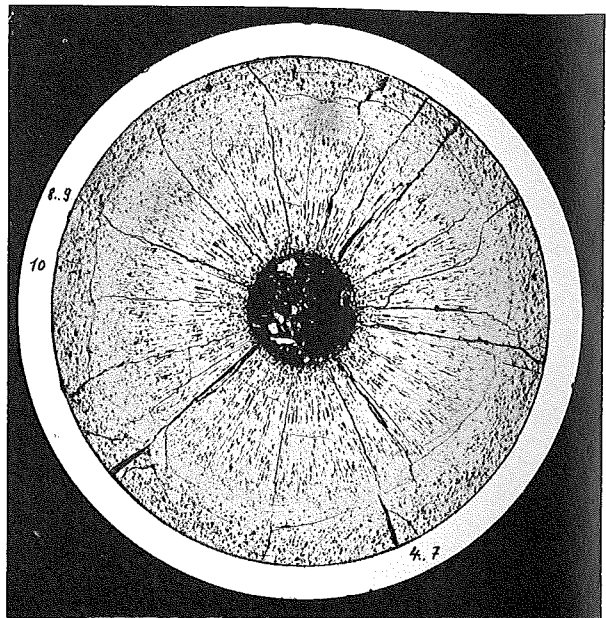
3

4

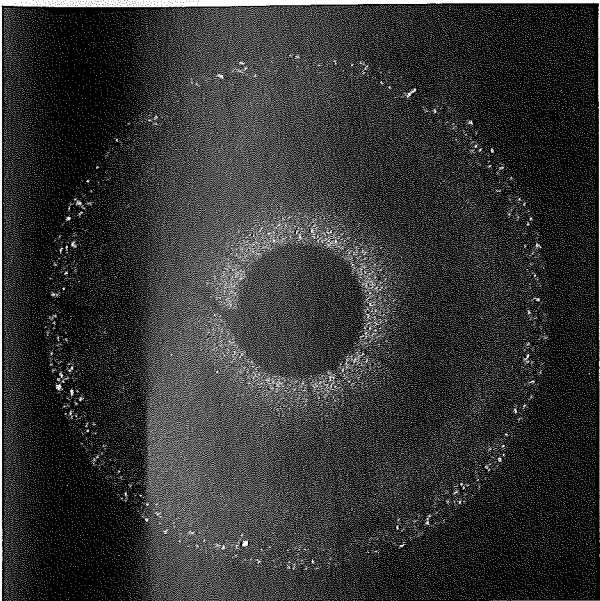
A



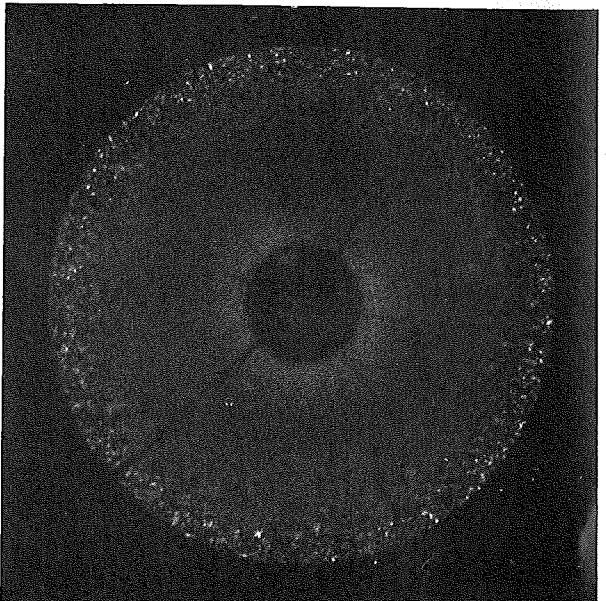
A



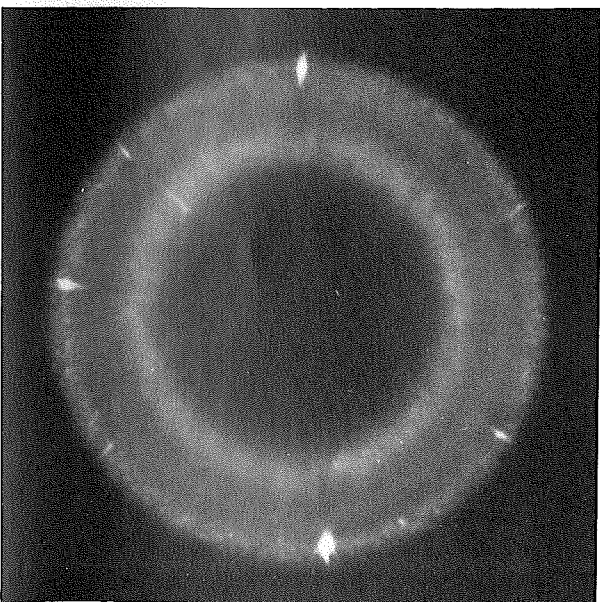
B



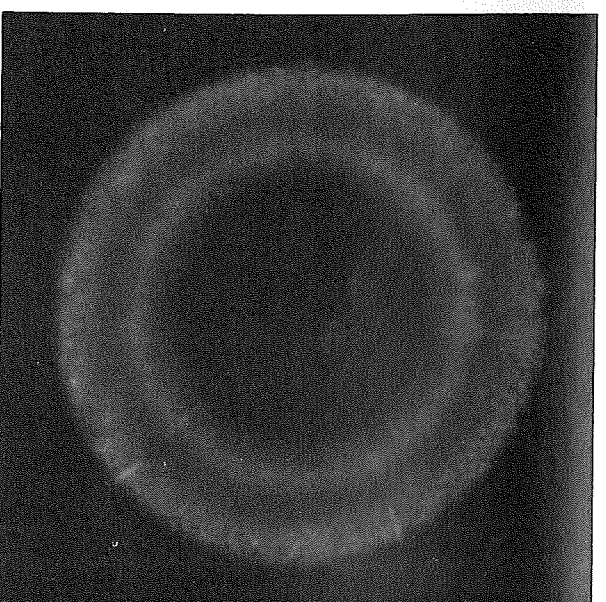
B



C



C



1 mm



Prüfling 5A-1

Brennstoff :

Form : Tabletten
Zusammensetzung : UO_2/PuO_2
Tablettendichte : 83,3; 86,4; 89,0;
92,5 % th.D.

Hülle :

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

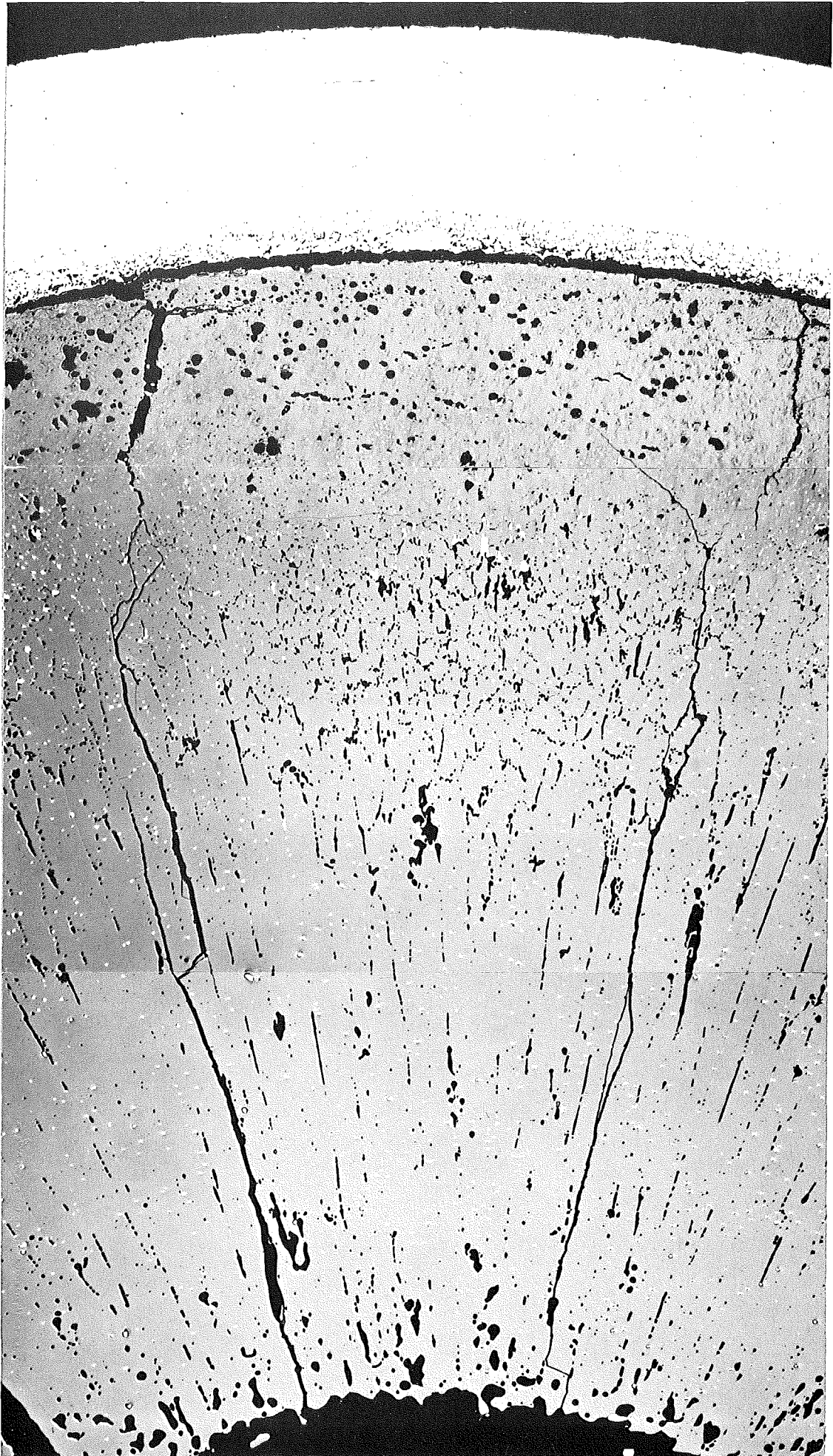
Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 48 μ m
Schmierdichte : —

Bestrahlung :

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppelkapsel Type 4a
Dauer : 91,4 Vollasttage
Ende : 17.8.70
Rechn. Abbrand mittl. : $\approx 19,0$ MWd/kg
Stableistung max./mittl. : 657/304 W/cm

-I/73-
zu Prüfling 5A/8
1 A



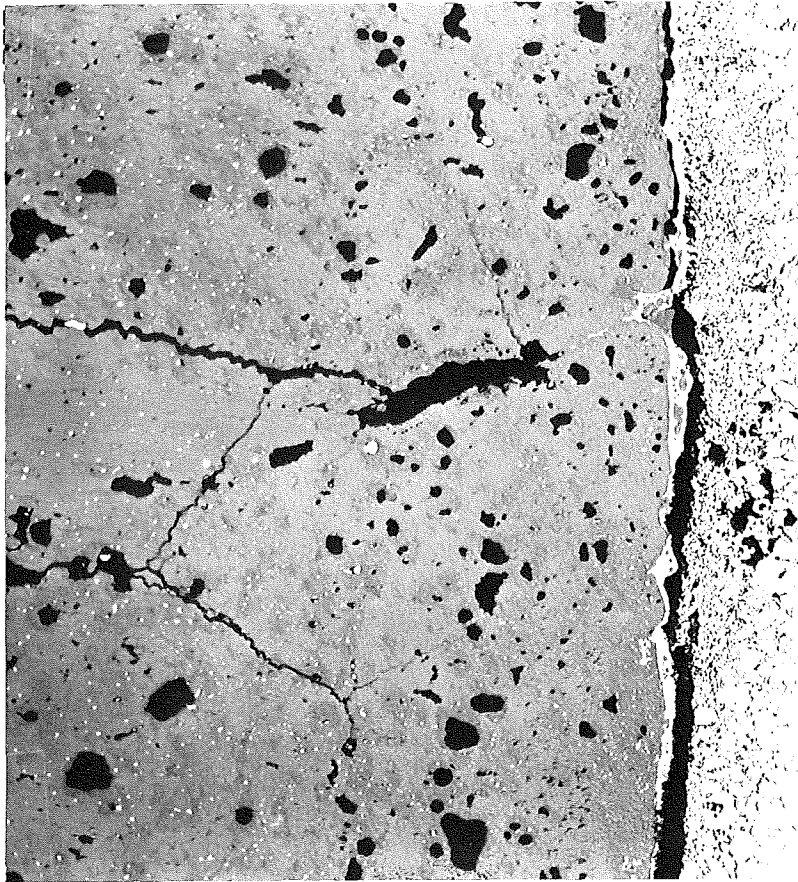
4...6

0,1mm

- 1/74 -
zu Prüfling 5A/8
1 A

HZ-3c-74-5A/8-1/9 200 x

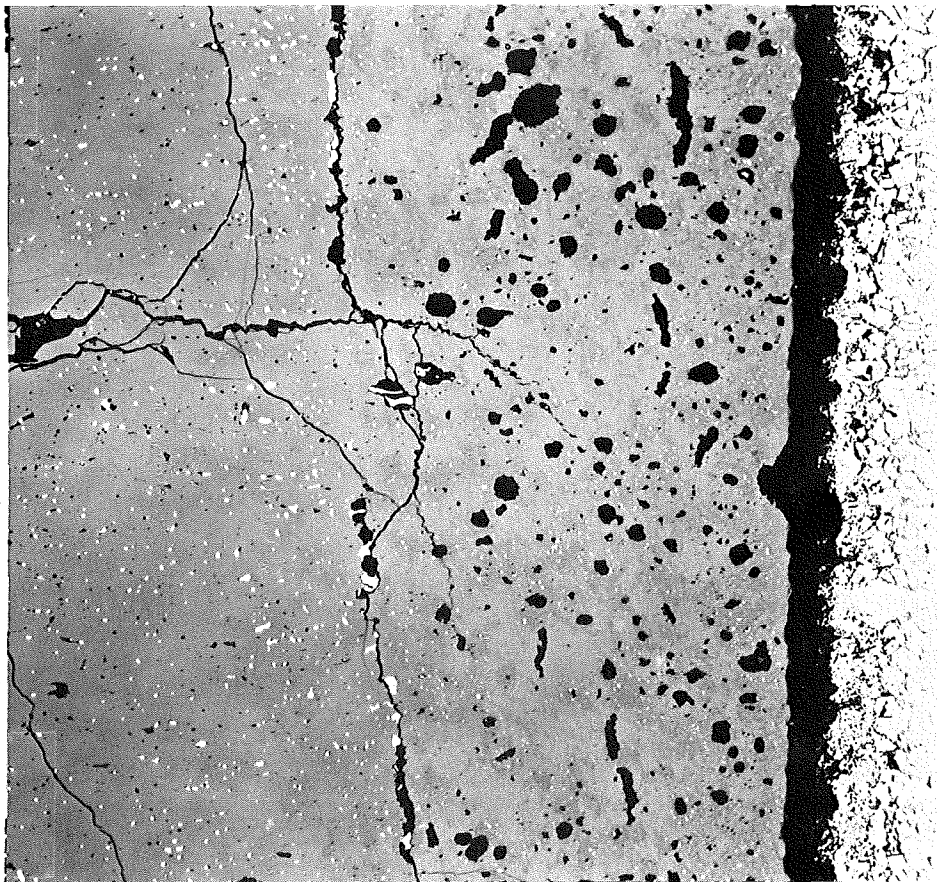
100 μm



2 A

HZ-3c-74-5A/8-2/11 200 x

100 μm



- 1/75 -
zu Prüfling 5A/8

2 A



6-8

—|—
0,1mm

-I/76-
zu Prüfling 5A/8

3A



4...6

0,1mm

- 1/77 -
zu Prüfling 5A/8

4 A

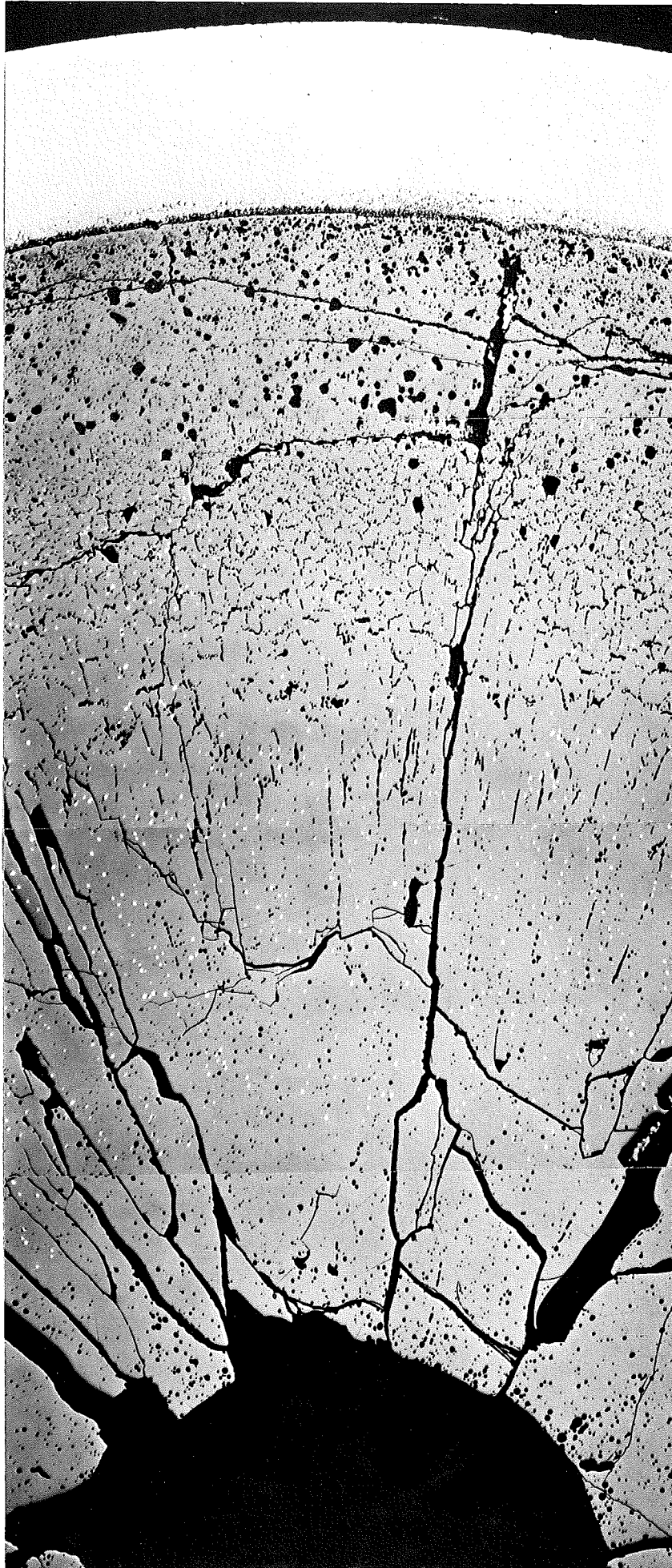


6...9

I
0,1mm

- 1/78 -
zu Prüfling 5A/8

5 A



4-7

0,1mm

- I/79 -
zu Prüfling 5A/8
6 A



6-9

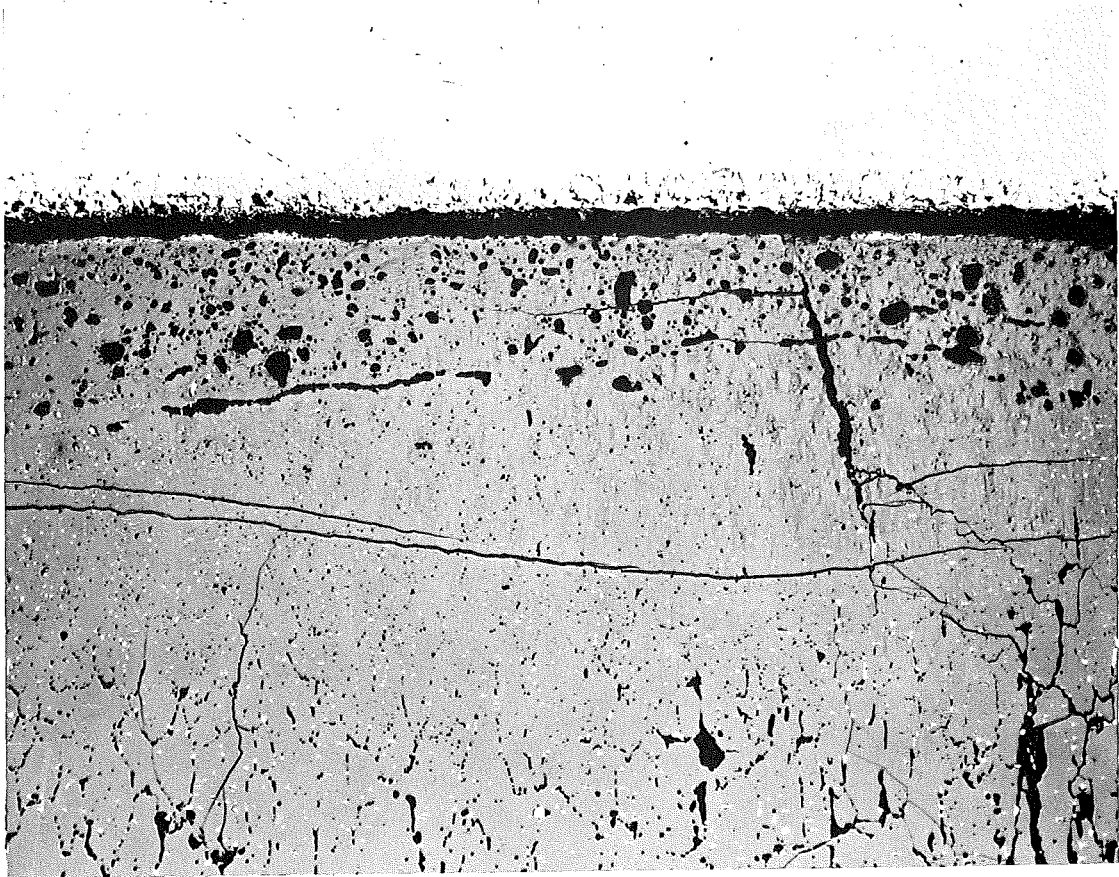
0,1 mm

- I/80 -
zu Prüfling 5A/8

4 A

HZ-3c-74-5A/8-4/17 100 x

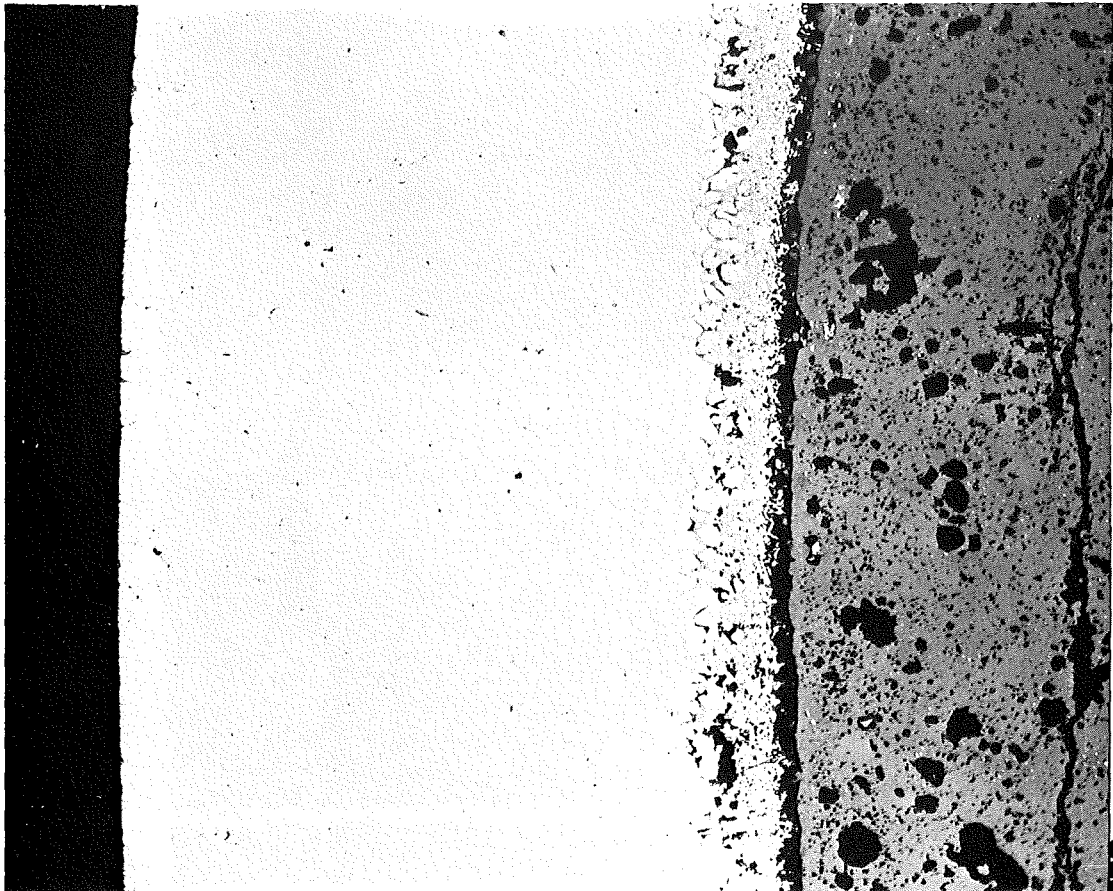
200 μm



7 A

100 μm

HZ-3c-74-5A/8-7/8 200 x

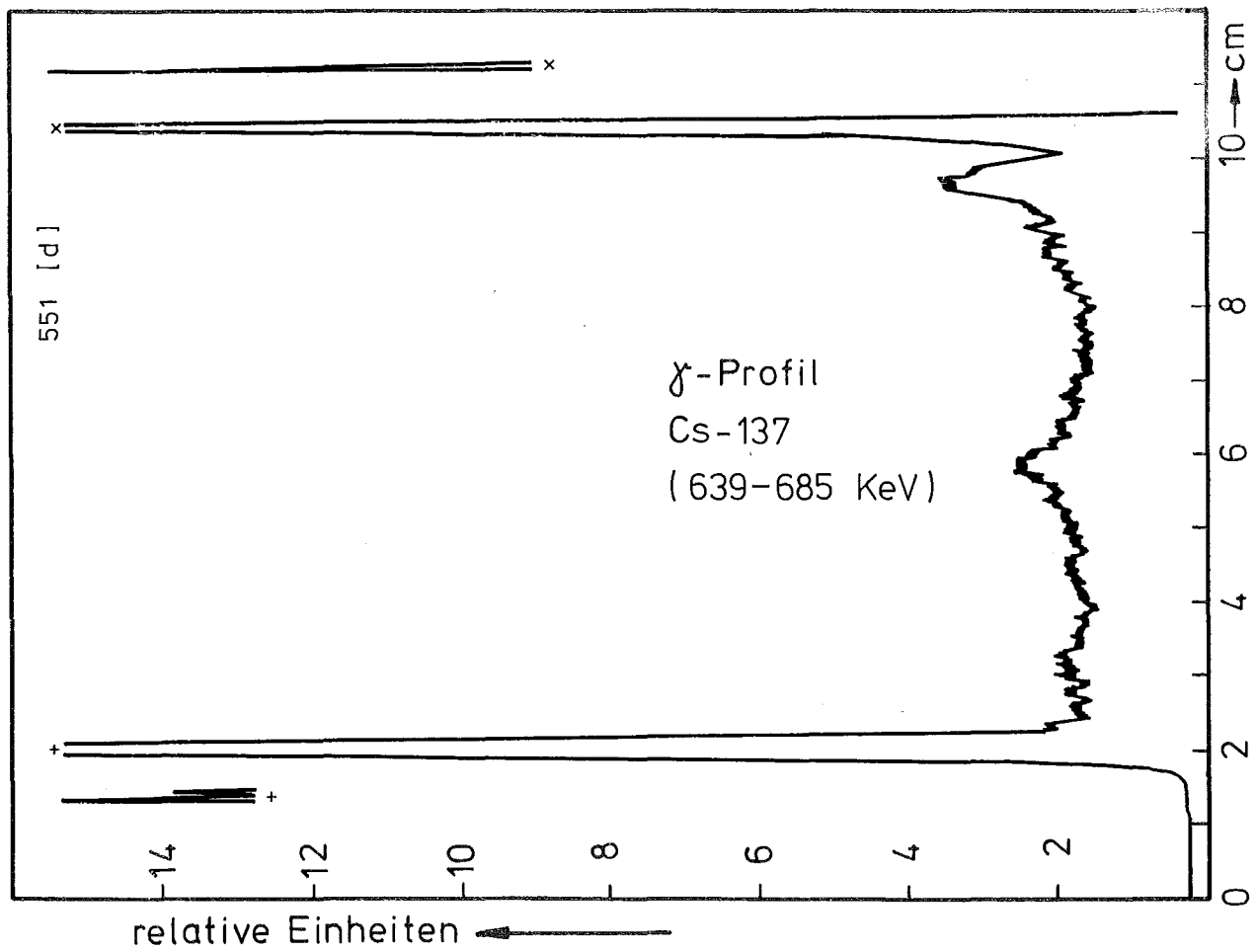
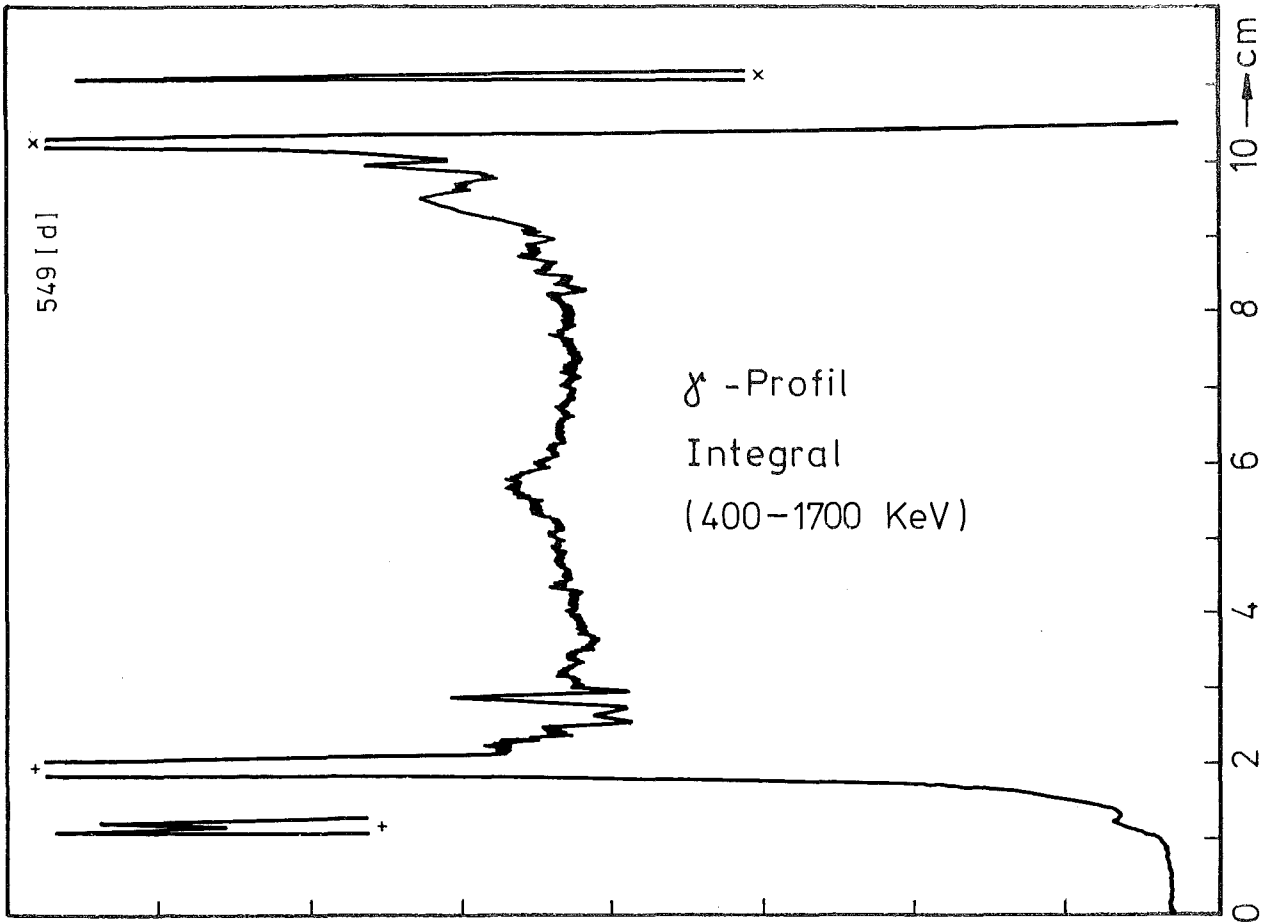


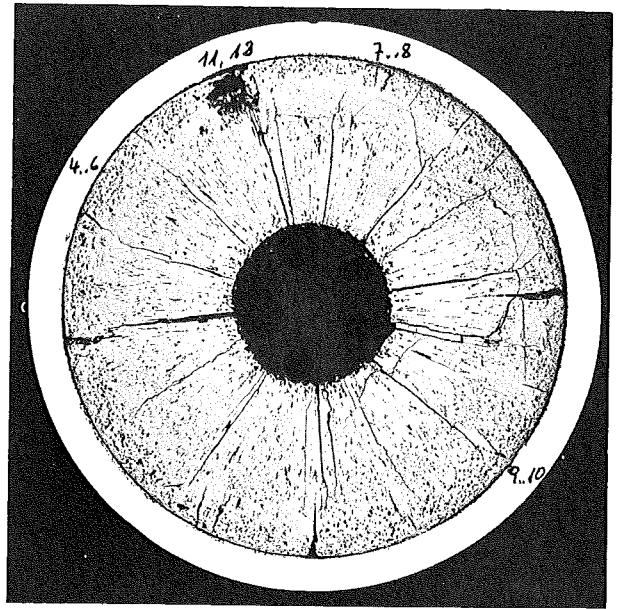
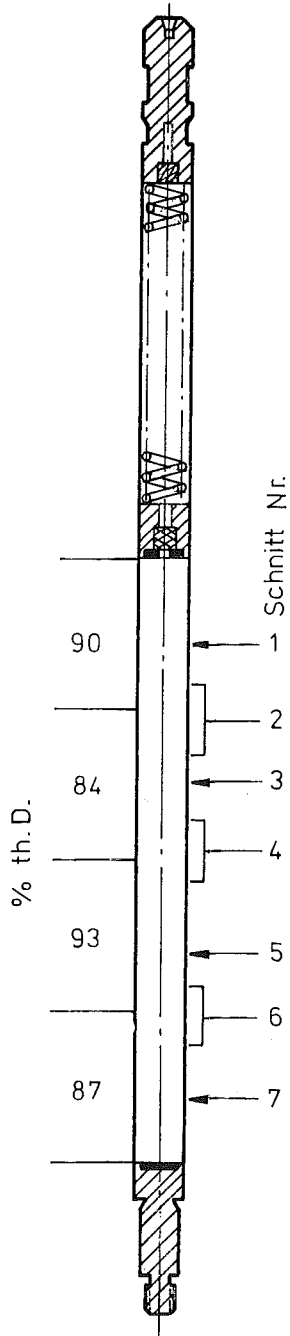
- I/81 -
zu Prüfling 5A/8
7A



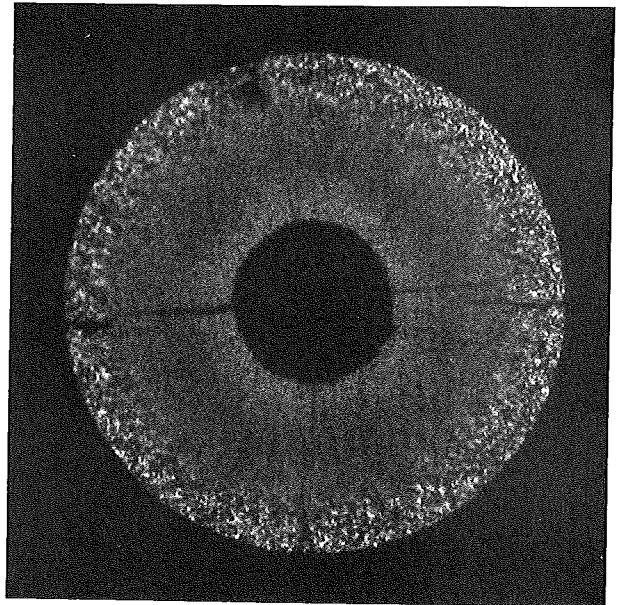
4...7

0,1mm

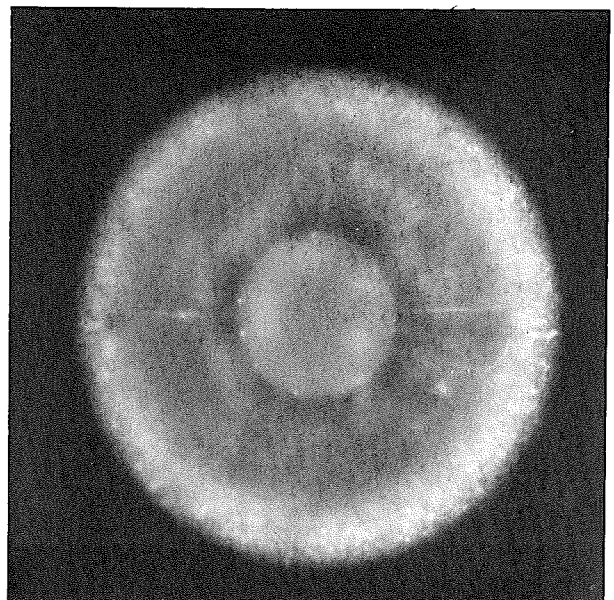




A



B



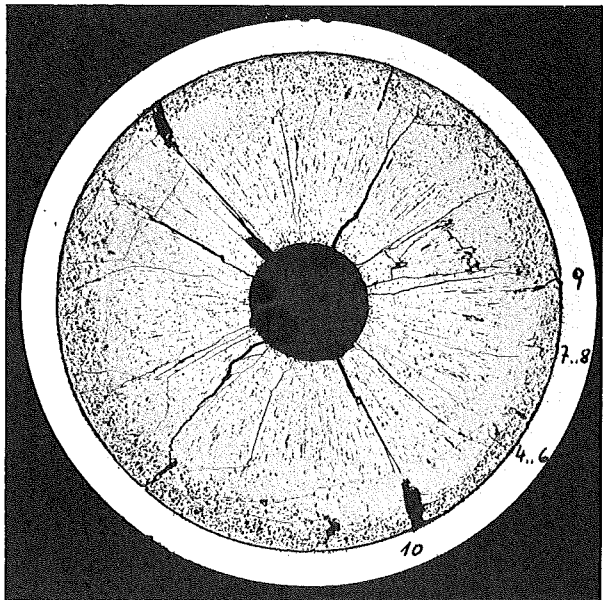
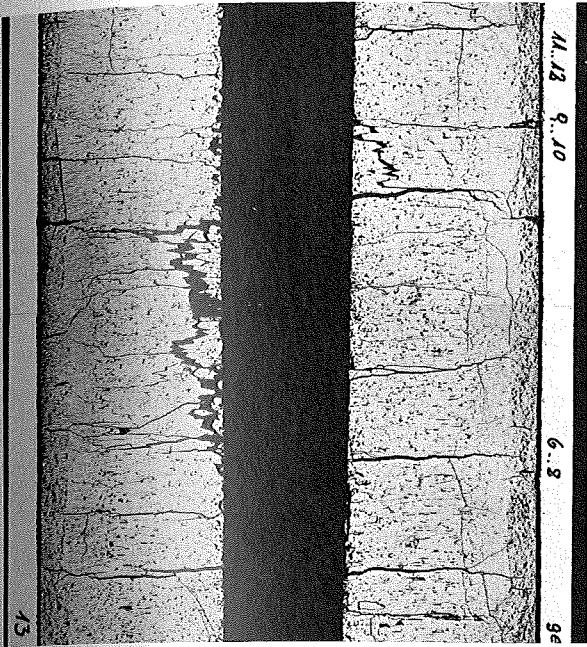
C

1 mm

2

3

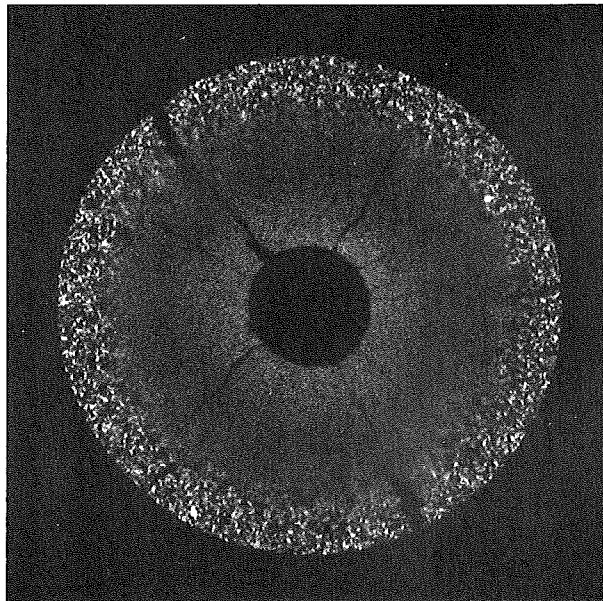
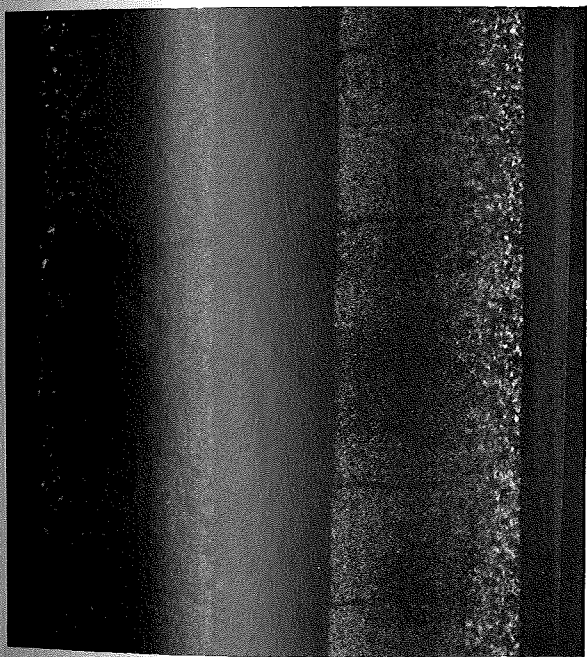
A



A



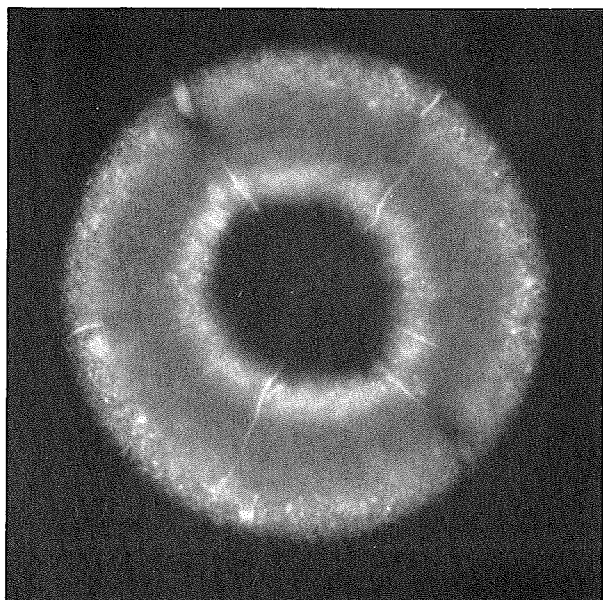
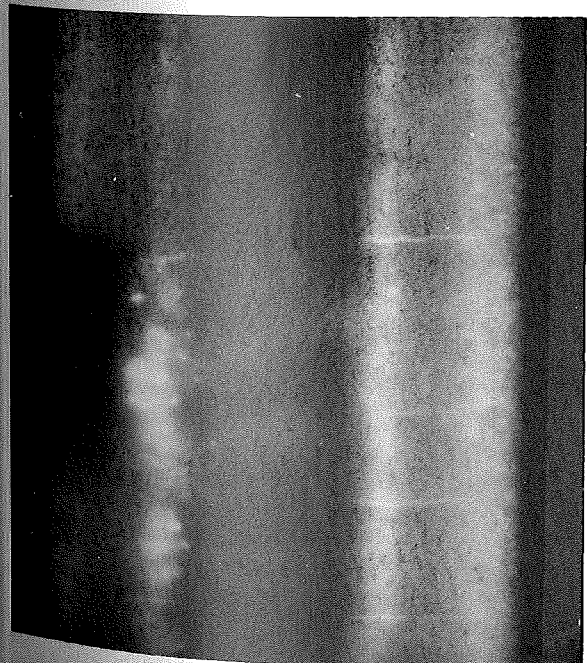
B



B



C



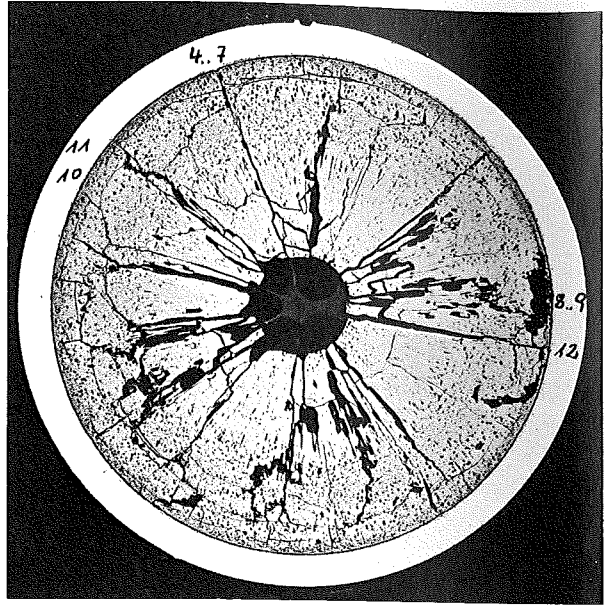
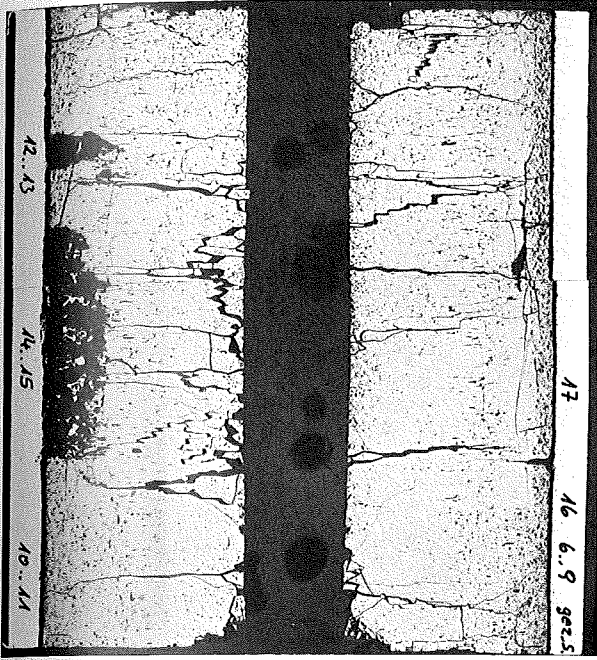
C



mm

1 mm

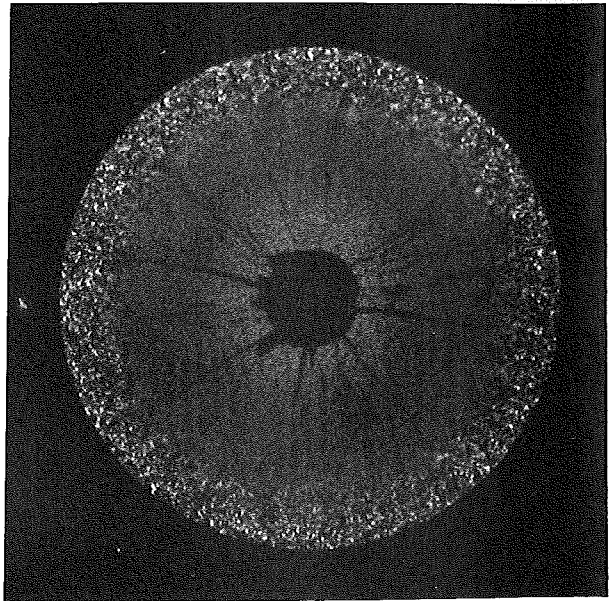
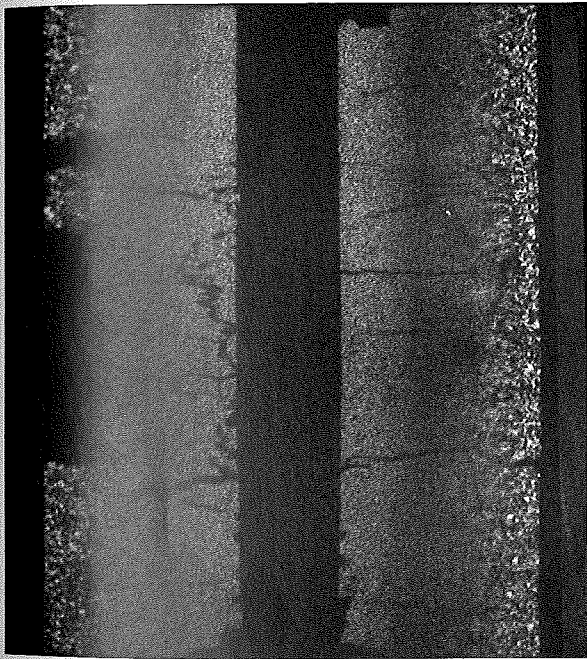
A



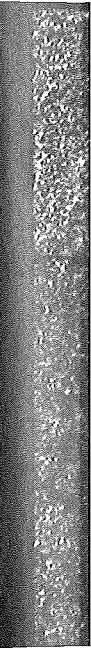
A



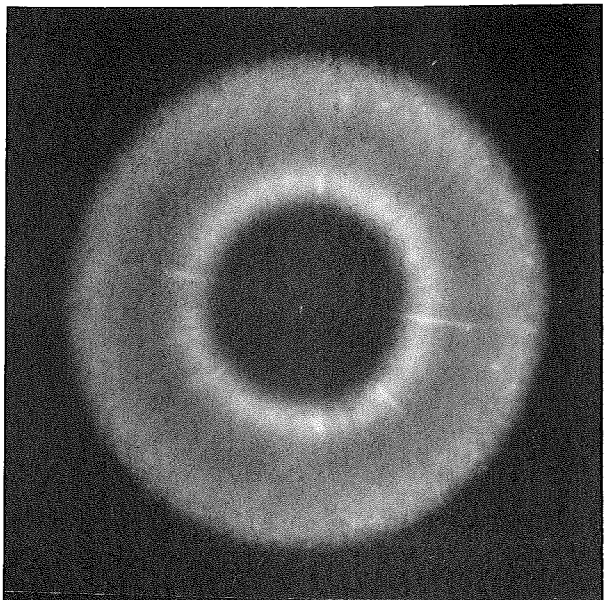
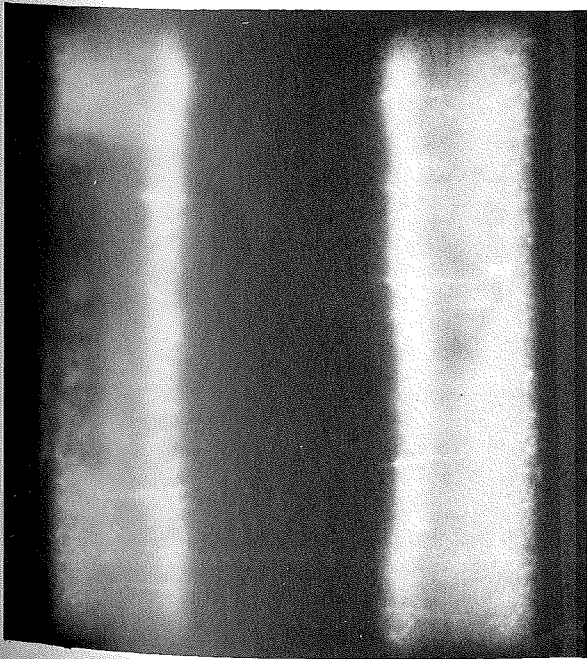
B



B



C



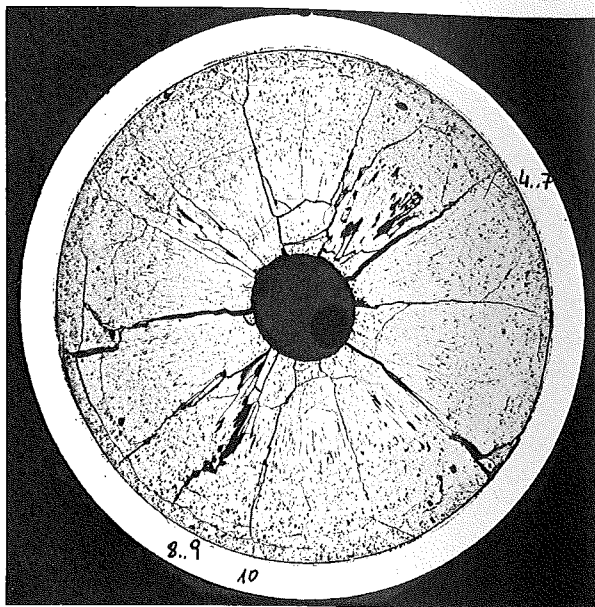
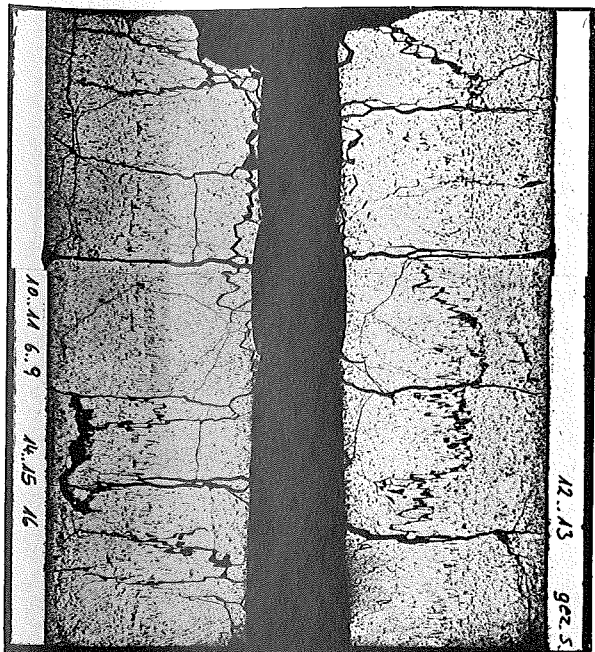
C



6

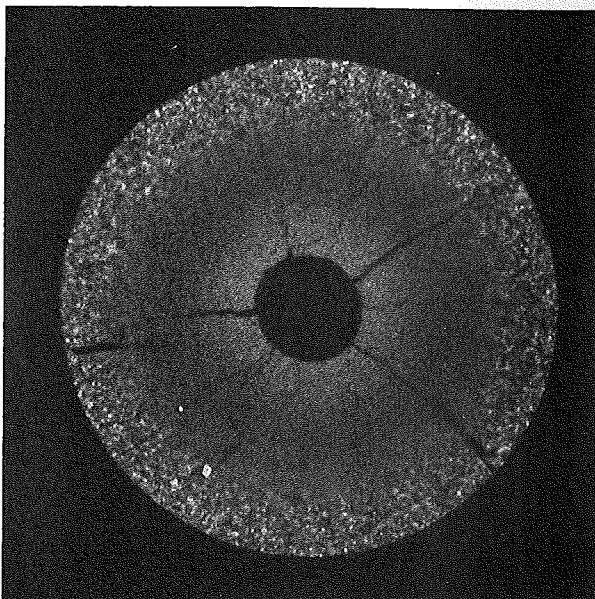
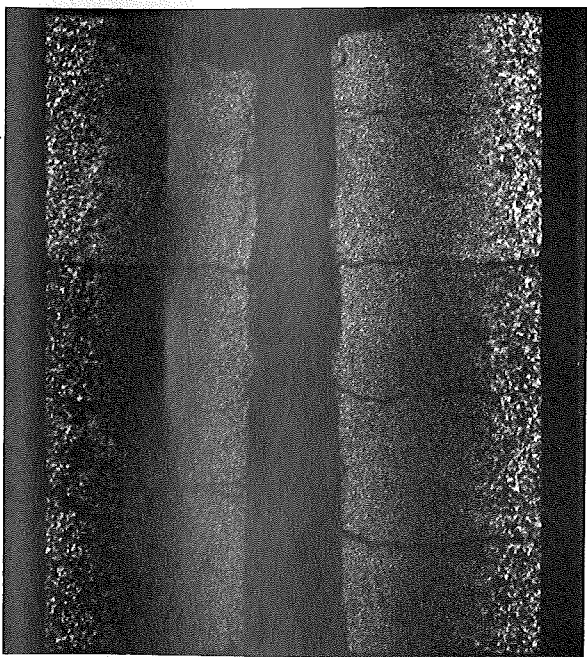
7

A



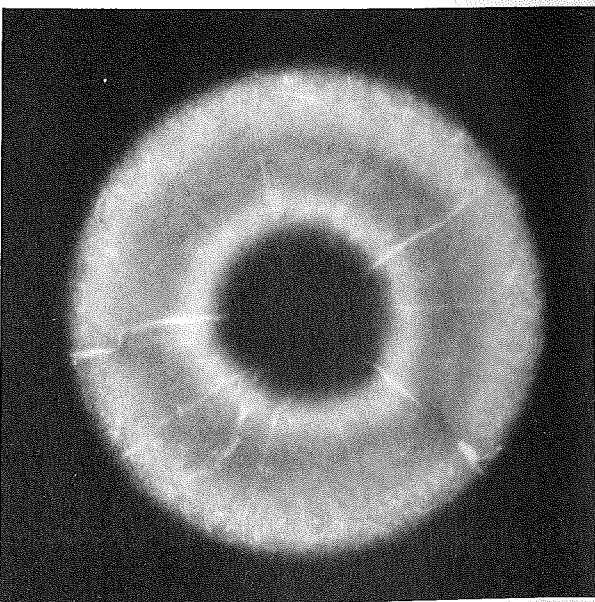
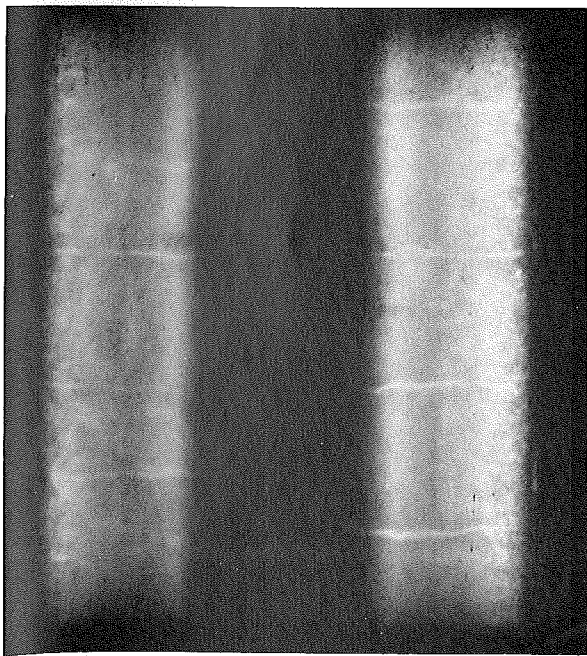
A

B



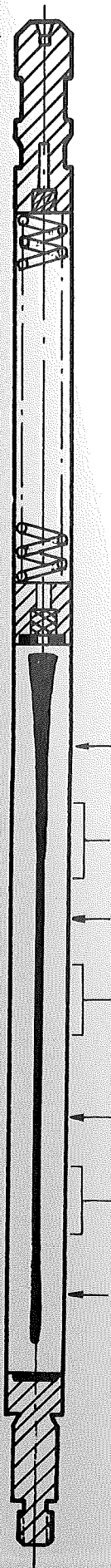
B

C



C

1mm



Prüfling 5A-8

Brennstoff :

Form : Tabletten

Zusammensetzung : UO_2/PuO_2

Tablettendichte : 90,4; 84,4; 93,4;
87,4 % th.D.

Hülle :

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 7,0 mm

Wandstärke : 0,4 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : 48 μ m

Schmierdichte : —

Bestrahlung :

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppelkapsel Typ 4a

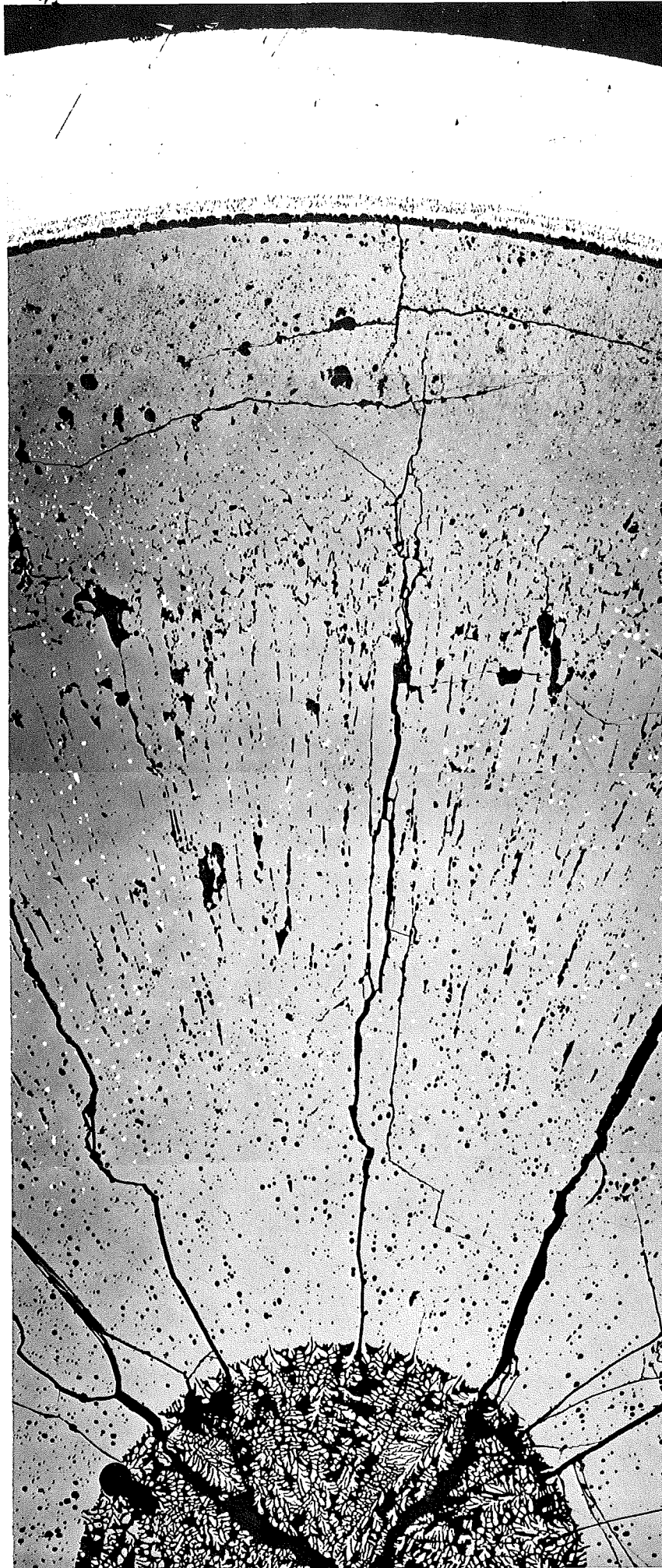
Dauer : 276 Vollasttage

Ende : 3.5.1971

Rechn. Abbrand mittl. : 43,6 MWd/kg

Stableistung max./mittl. : 571/402 W/cm

- I/85 -
zu Prüfling 5A/3
4 A

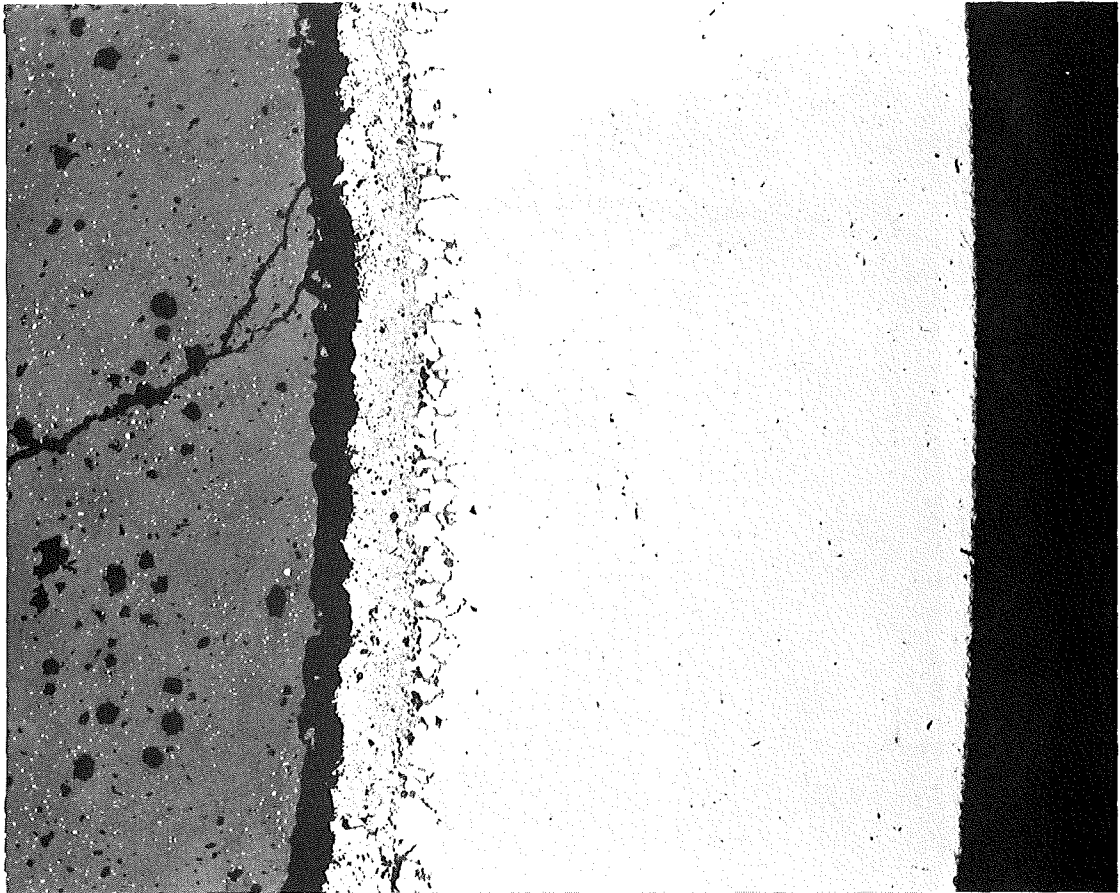


4...7

0,1mm

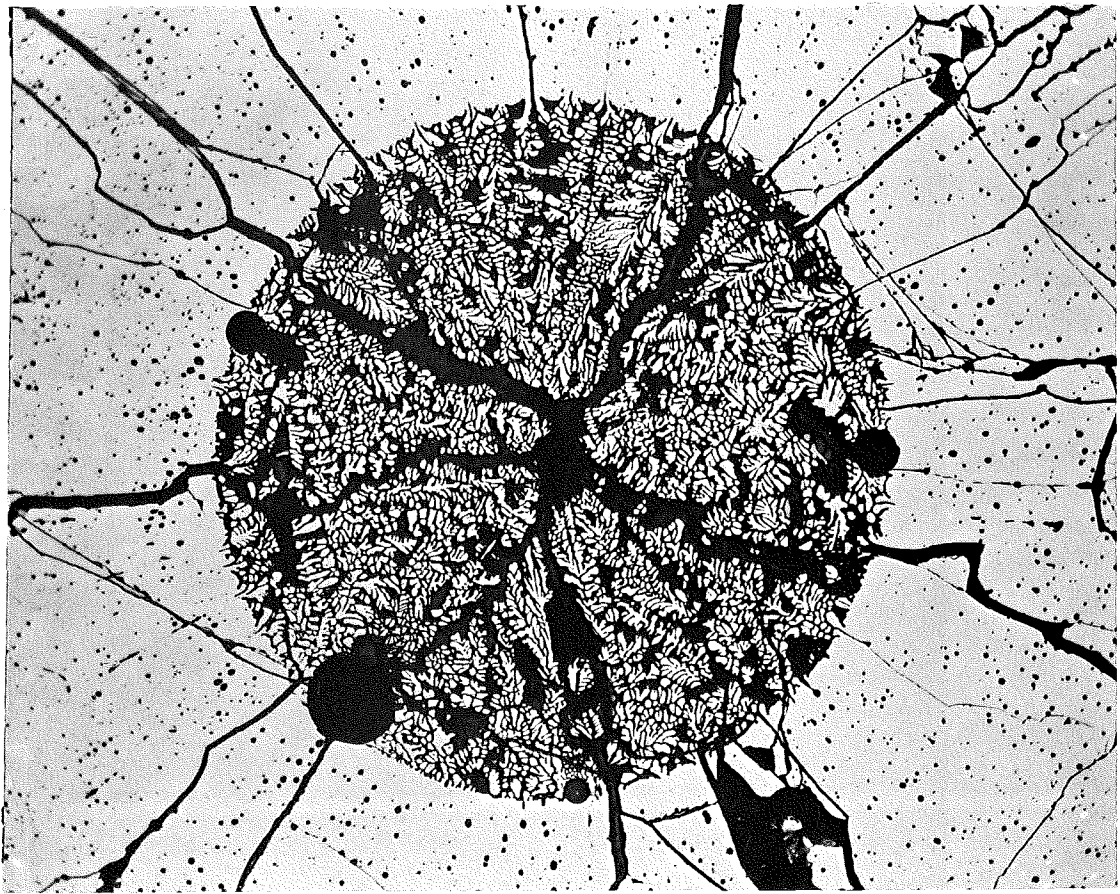
- I/86 -
zu Prüfling 5A/3
3 A

HZ-30-74-5A/3-3/7 200 x
100 µm



4 A

HZ-30-74-5A/3-4/8 75 x



- I/87-
zu Prüfling 5A/3

3A



4...6

0,1mm

- I/88 -
zu Prüfling 5A/3

2 A

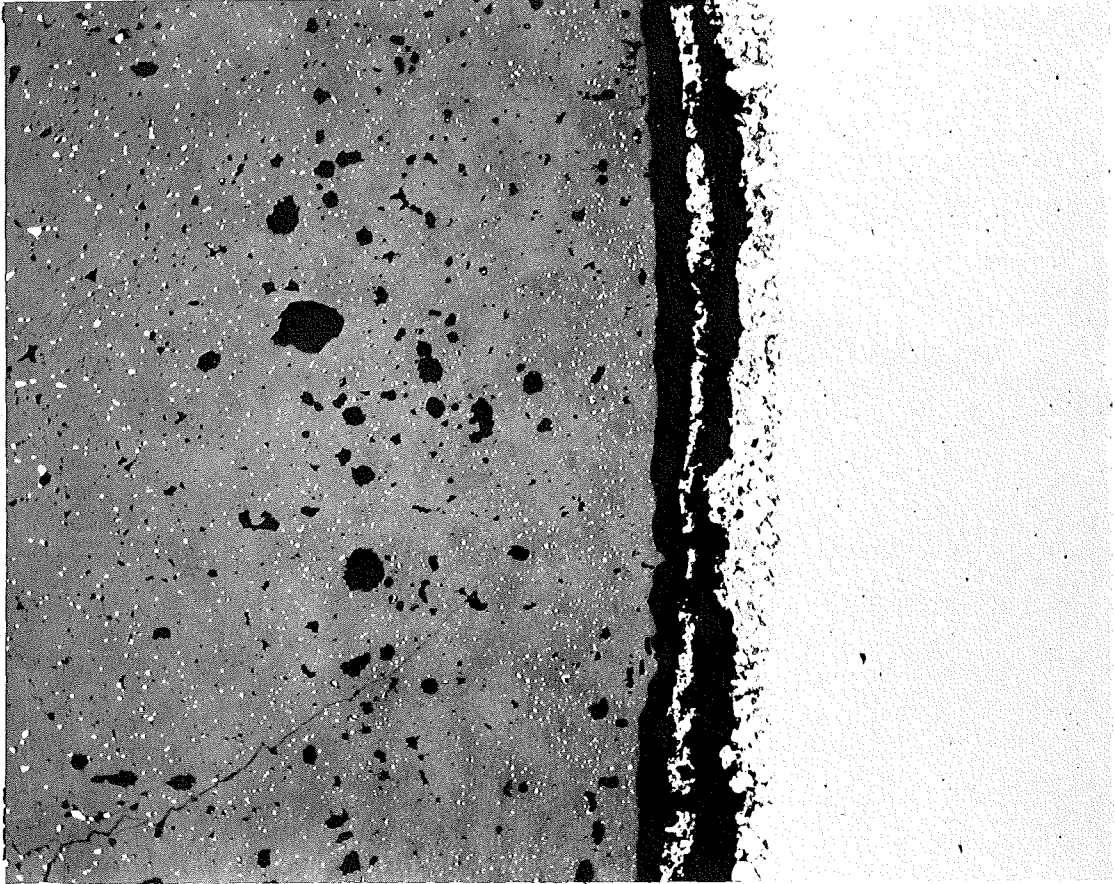


4...6

0,1mm

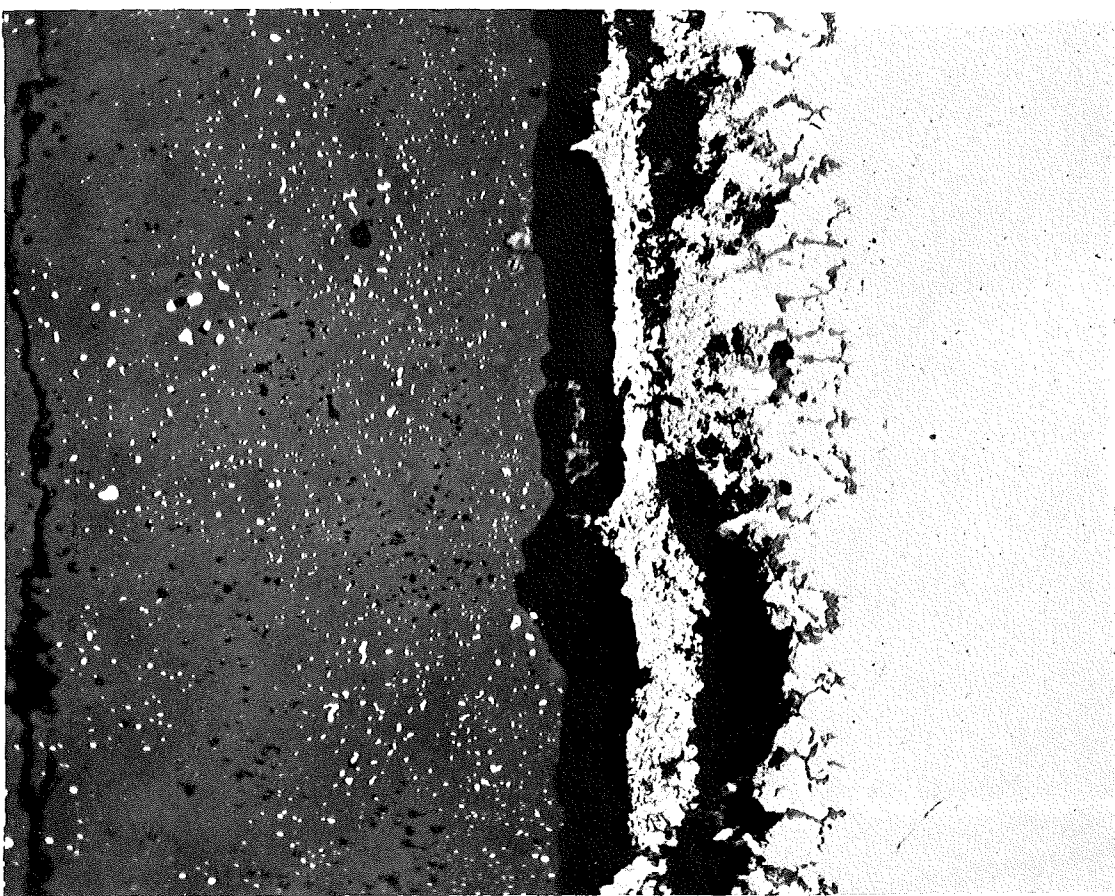
- I/89 -
zu Prüfling 5A/3
1 A

HZ-3c-74-5A/3-1/9 200 x
100 µm

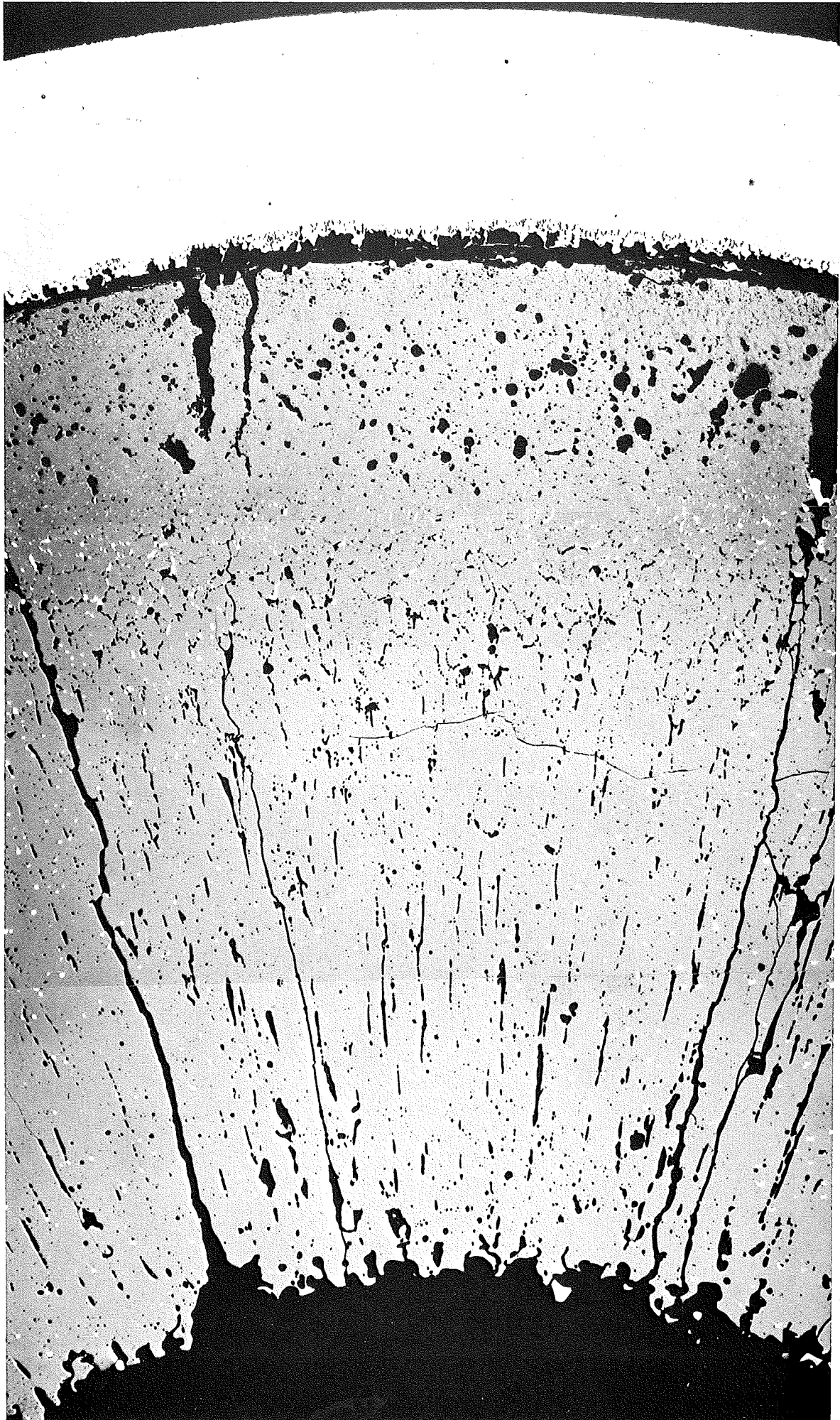


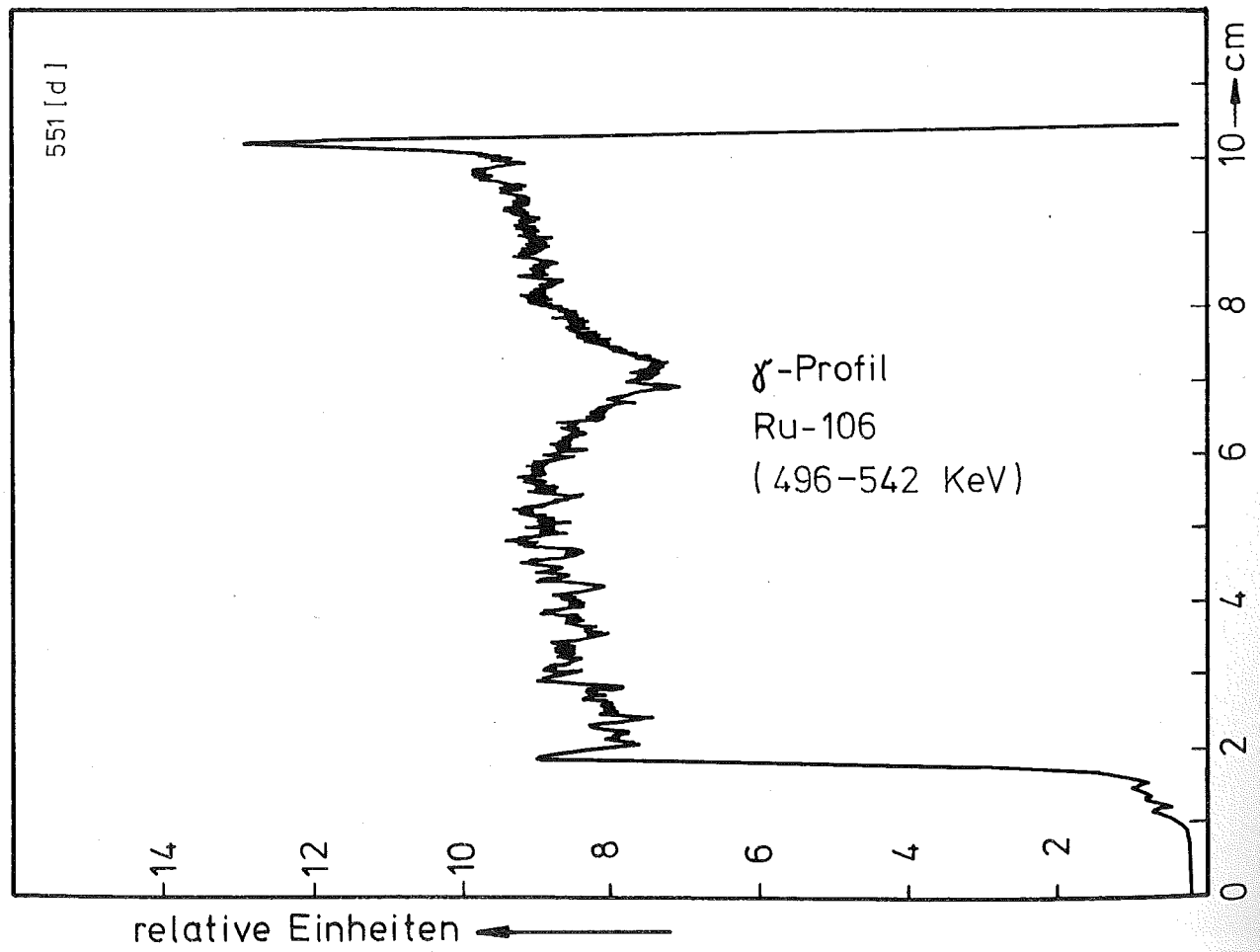
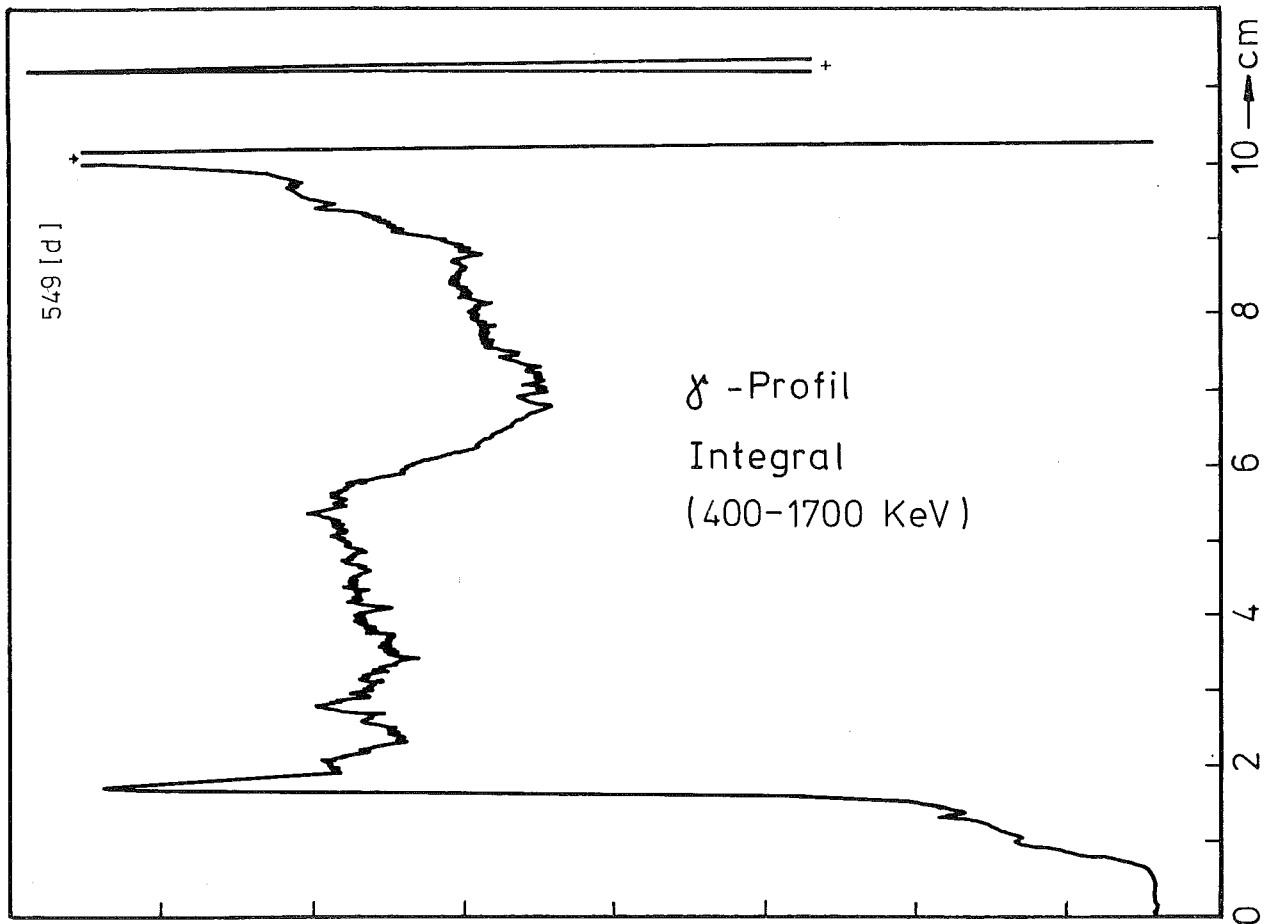
2A

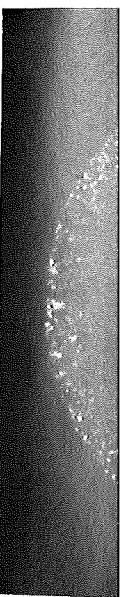
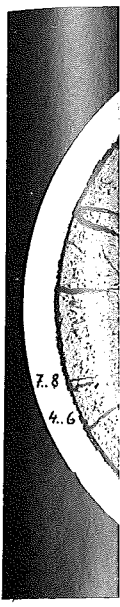
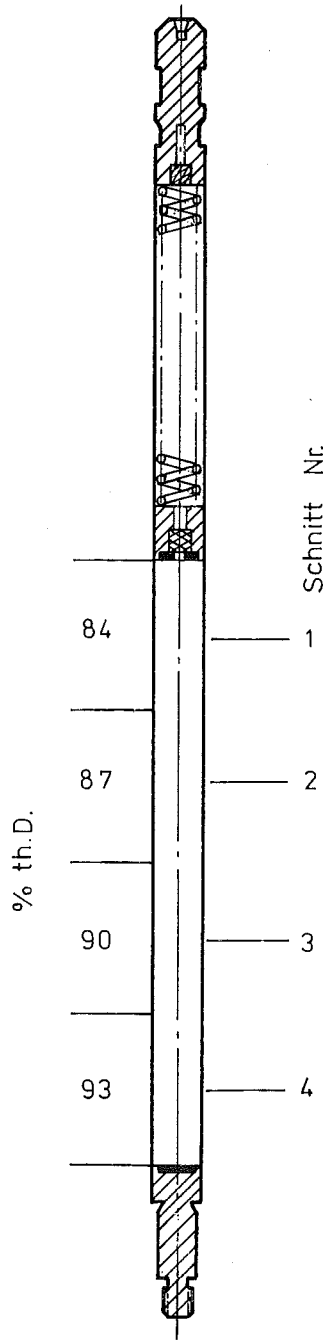
HZ-3c-74-5A/3-2/8 500 x
40 µm



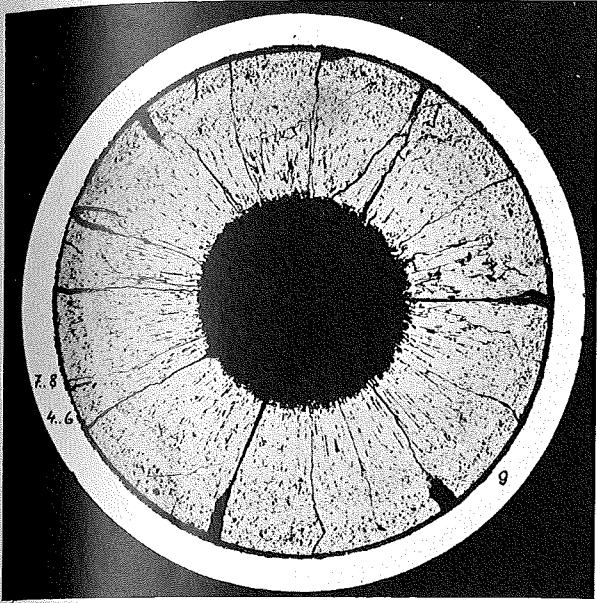
-1/90-
zu Prüfling 5A/3
1 A



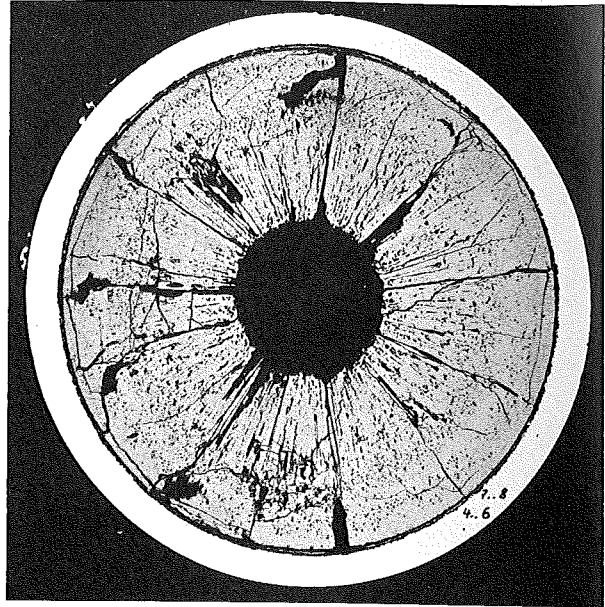




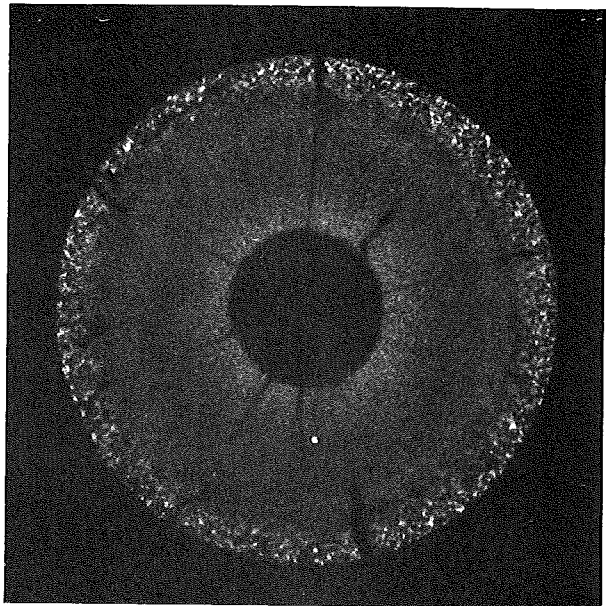
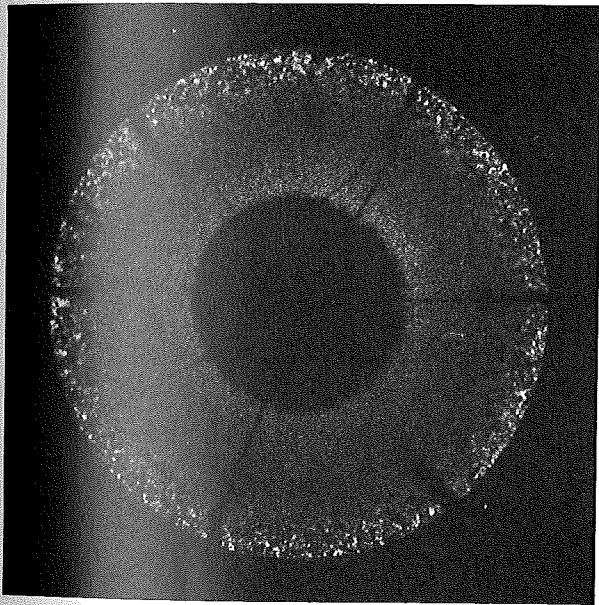
1



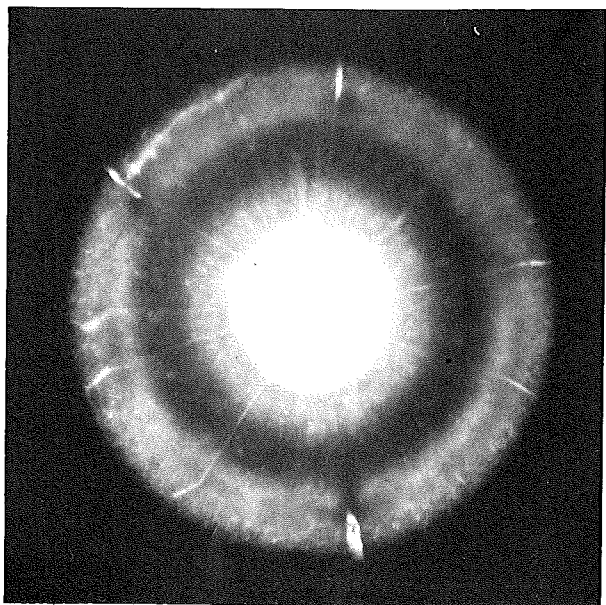
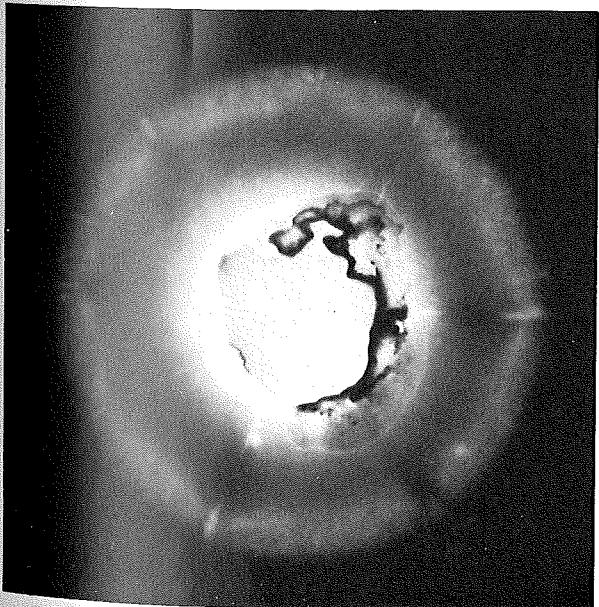
2



A



B



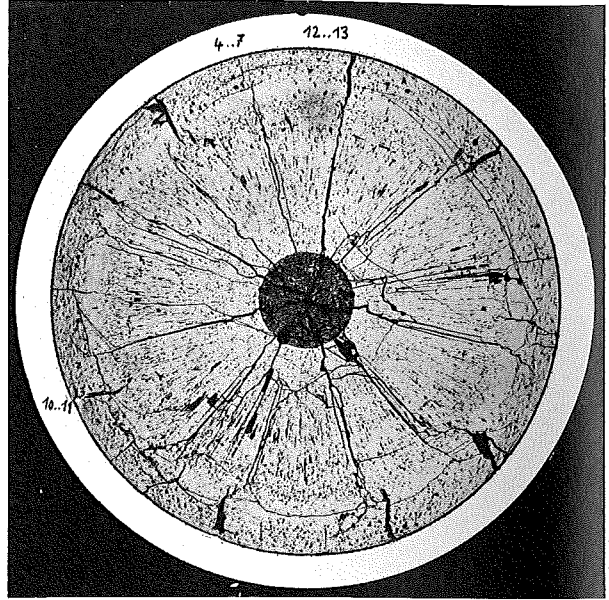
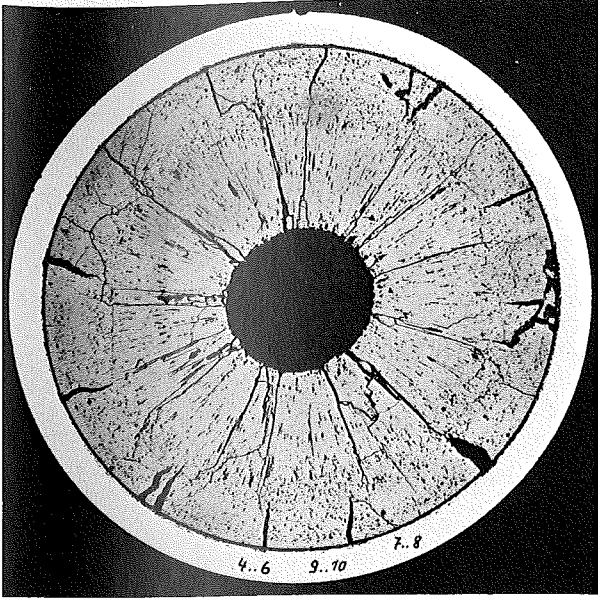
C

1 mm

3

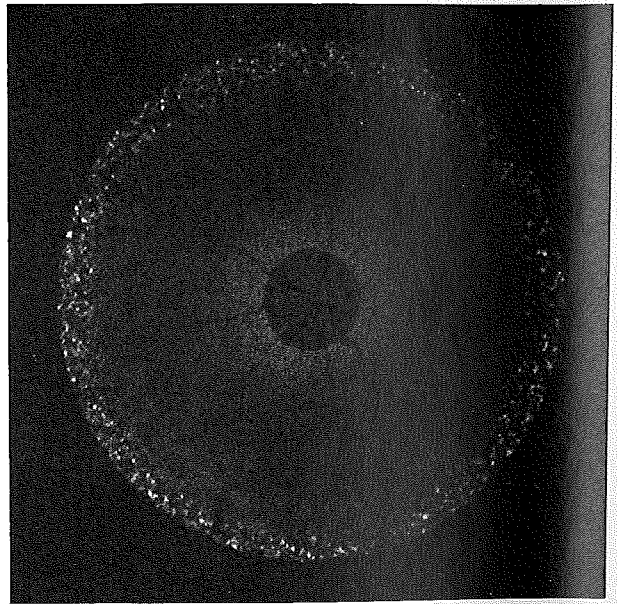
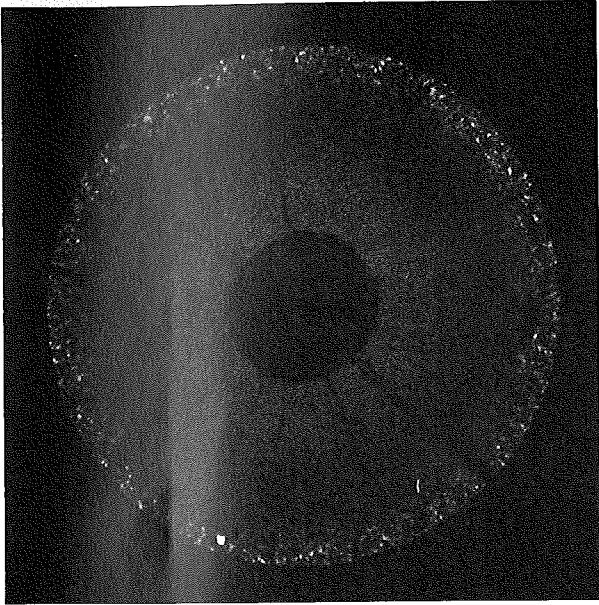
4

A



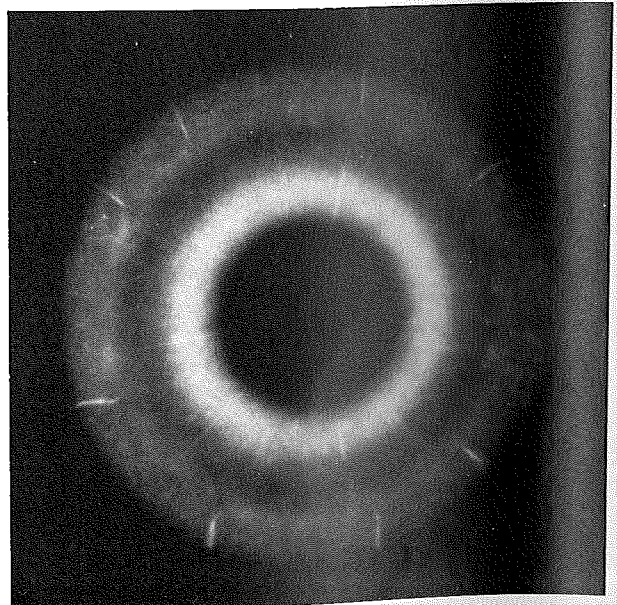
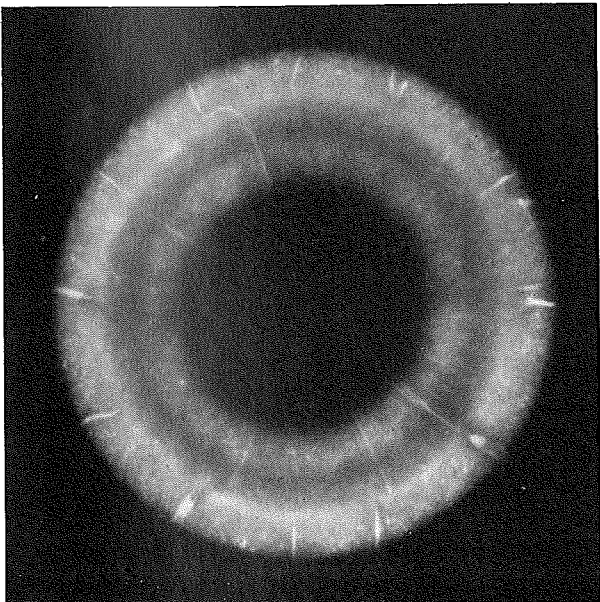
A

B



B

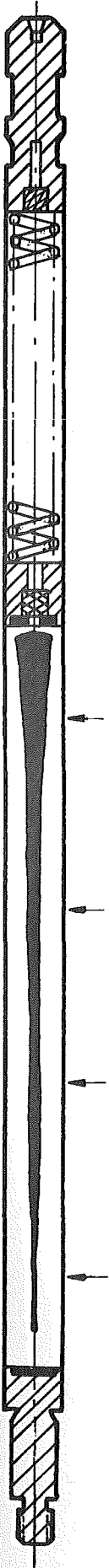
C



C

1 mm

1 mm



Prüfling 5A-3

Brennstoff :

Form : Tabletten
Zusammensetzung : UO_2/PuO_2
Tablettendichte : 83,6; 86,6; 89,6;
92,9 % th.D.

Hülle :

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

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 48 μm
Schmierdichte : —

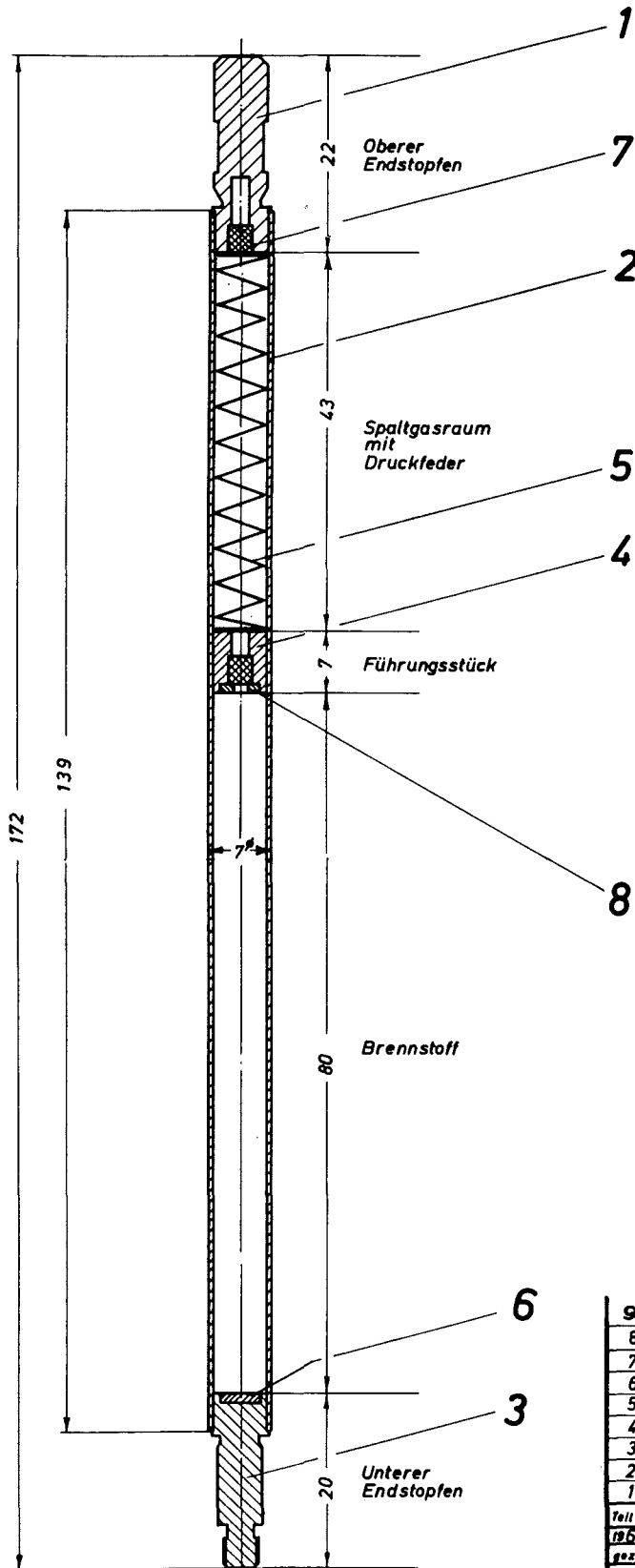
Bestrahlung :

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppel-
kapsel Typ 4a
Dauer : 276 Vollasstage
Ende : 3.5.1971
Rechn. Abbrand mittl. : 49,4 MWd/kg
Stableistung max./mittl. : 604/453 W/cm

A n h a n g I I

Konstruktionszeichnungen der Prüflinge

Zeichnung LB-Z 6.00
 LB-Z 6.01
 LB-Z 6.02
 LB-Z 6.03
 LB-Z 6.04
 LB-Z 6.05
 LB-Z 6.06
 LB-Z 6.07
 LB-Z 6.08



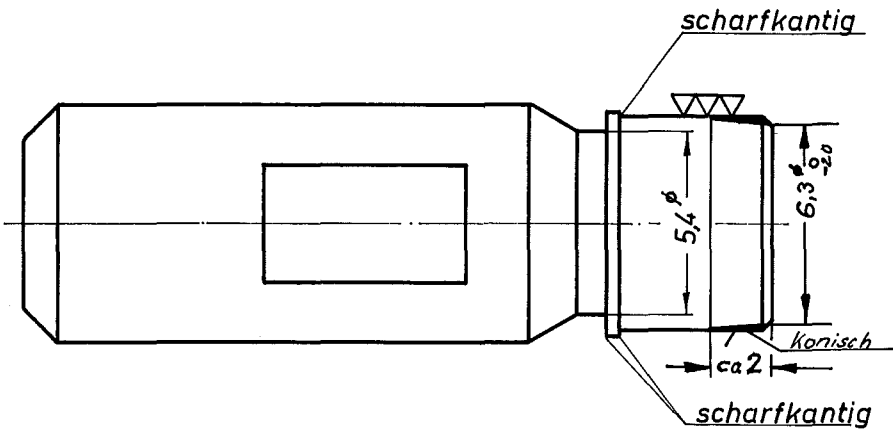
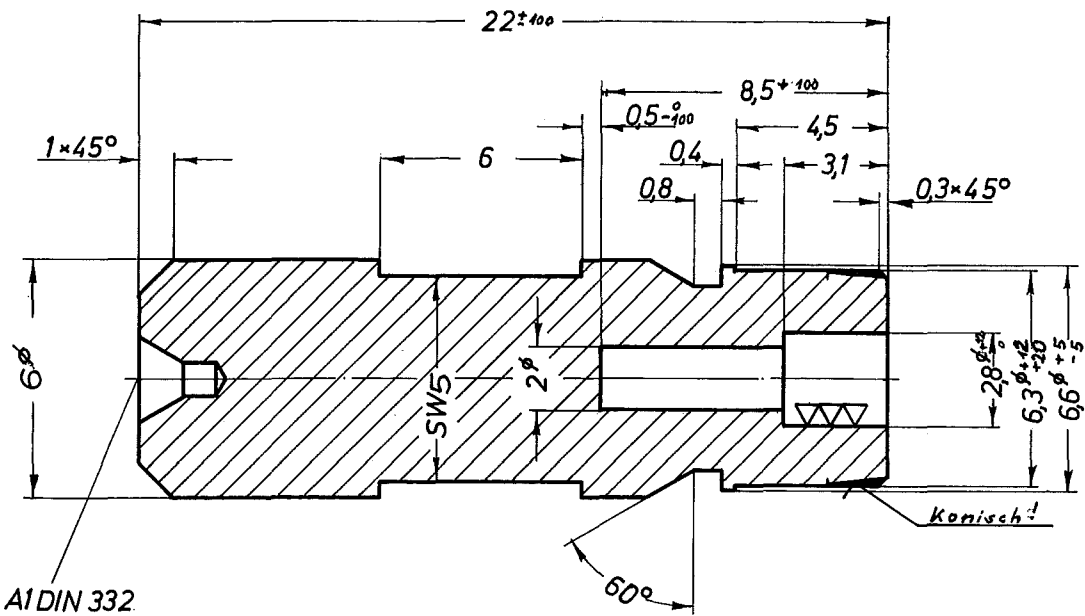
9	12	Schutzkappe	Al
8	15	Rhodium - Scheibe	Rh
7	22	Sinterstahlfilter	CrNi
6	15	Rhodium - Plättchen	Rh
5	10	Druckfeder	4310
4	12	Führungsstück	4988
3	15	Unterer - Endstopfen	4988
2	15	Hüllrohr $\varnothing 7-0,4$	4988
1	15	Oberer - Endstopfen	4988
Teil	Stück	Benennung	Werkstoff
1969	Tag	Name	LB - Z 6.00
gez.	23.04.	<i>Leub</i>	
gepr.			
ges.			

Durchm. v. oberem Endstopfen geändert! Zeichnungssatz erweitert!
 Änderung v. Paßmaßen vorgenommen! 25.7.69 *J. Jaschke*

2 : 1

BE-Prüfling

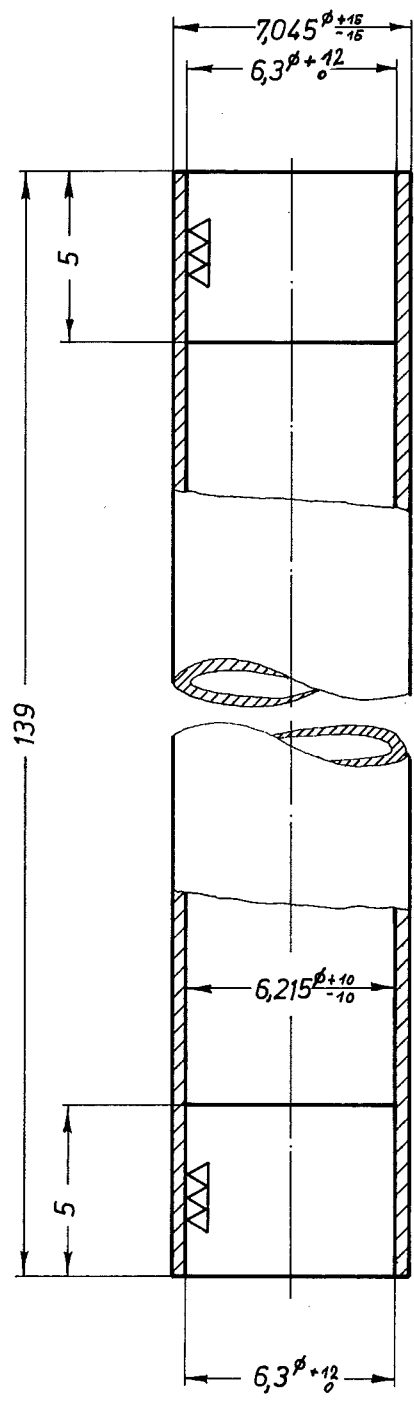
- II/2 -



▽ (▽▽)

1	15	Oberer Endstopfen			4988							
Teil	Stück	Benennung			Werkstoff	Abmessung	Zeichngs. Nr.	Norm	Bemerkung			
Oberflächenzeichen	~	▽	▽▽	▽▽▽	▽▽▽▽	Freimaßtoleranz	bis 6	über 6 bis 30	über 30 bis 100	über 100 bis 300	über 300 bis 1000	über 1000 bis 2000
Rauhliefe max. in μ	1000	40	10	4	1,6		± 0,1	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2
1969	Tag	Name			Werkstoff	Gesellschaft für Kernforschung m. b. H.		Zuegh. Zchnng. LB-Z 6.00				
gez.	07.07.	<i>Leub</i>				7500 Karlsruhe		Ersatz für				
gepr.						Postfach 947.		Ersetzt durch				
ges.								Zeichnungs Nr.				
Maßstab	Benennung							Zeichnungs Nr.				
5 : 1	BE-Prüfling							LB-Z 6.01				

- II/3 -



▽ (▽▽)

Für diese Zeichnung behalten wir uns alle Rechte vor, auch für den Fall der Patenterteilung oder Gebrauchsmustereintragung. Ohne unsere vorherige Zustimmung darf diese Zeichnung weder vervielfältigt noch Dritten zugänglich gemacht werden; sie darf durch den Empfänger oder Dritte auch nicht in anderer Weise mißbräuchlich verwendet werden. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadenersatz und können strafrechtliche Folgen haben.

2	15	Hüllrohr				4988						
Teil	Stück	Benennung				Werkstoff	Abmessung		Zeichngs. Nr. Norm		Bemerkung	
Oberflächenzeichen	~	▽	▽▽	▽▽▽	▽▽▽▽	Freimaßtoleranz	bis 6	über 6 bis 30	über 30 bis 100	über 100 bis 300	über 300 bis 1000	über 1000 bis 2000
Rauhtiefe max. in µ	1000	40	10	4	1,6		± 0,1	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2
1969	Tag	Name		Werkstoff		Gesellschaft für Kernforschung m. b. H.		Zugeh. Zeichng. LB-Z 6,00				
gez.	07.07.	<i>Leut</i>				7500 Karlsruhe Postfach 947		Ersatz für				
gepr.								Ersetzt durch				
ges.								Zeichnungs Nr.				
Maßstab		Benennung						Zeichnungs Nr.				
5 : 1		BE-Prüfling						LB-Z 6.02				

D
C
B
A

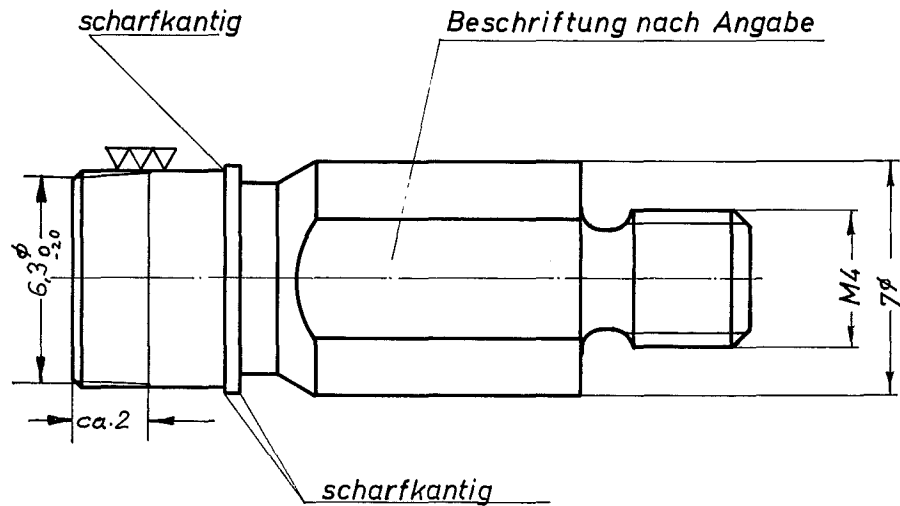
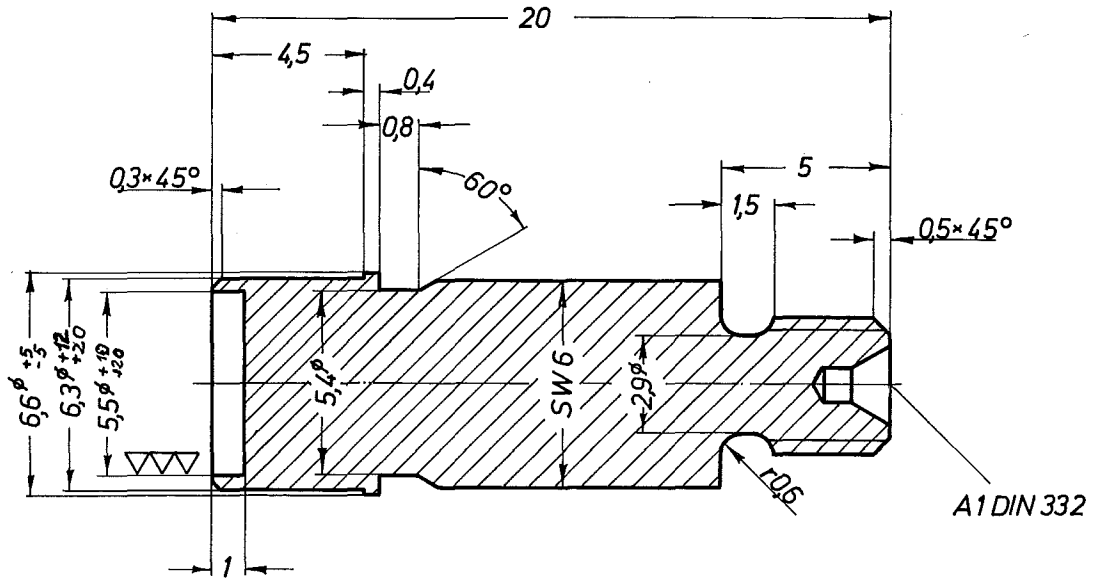
4

3

2

1

- II/4 -



Für diese Zeichnung behalten wir uns alle Rechte vor, auch für den Fall der Patenterteilung oder Gebrauchsmustereintragung. Ohne unsere vorherige Zustimmung darf diese Zeichnung weder vervielfältigt noch Dritten zugänglich gemacht werden; sie darf durch den Empfänger oder Dritte auch nicht in anderer Weise mißbräuchlich verwendet werden. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadenersatz und können strafrechtliche Folgen haben.

Teil	Stück	Benennung					Werkstoff	Abmessung		Zeichngs. Nr. Norm		Bemerkung
3	15	Unterer Endstopfen					4988					
Oberflächenzeichen	~	▽	▽▽	▽▽▽	▽▽▽▽	Freimaßtoleranz	bis 6	über 6 bis 30	über 30 bis 100	über 100 bis 300	über 300 bis 1000	über 1000 bis 2000
Rauhtiefe max. in µ	1000	40	10	4	1,6		± 0,1	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2
1969	Tag	Name		Werkstoff		Gesellschaft für Kernforschung m. b. H. 7500 Karlsruhe Postfach 947		Zueh. Zeichng. LB-Z 6,00				
gez.	07.07	<i>Kaus</i>						Ersatz für				
gepr.								Ersetzt durch				
ges.								Zeichnungs Nr.				
Maßstab	Benennung							Zeichnungs Nr.				
5:1	BE-Prüfling							LB-Z 6.03				

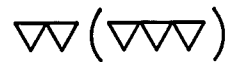
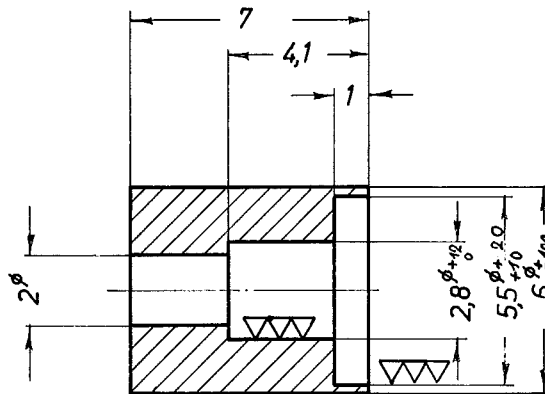
4

3

2

1

- II/5 -



Für diese Zeichnung behalten wir uns alle Rechte vor, auch für den Fall der Patenterteilung oder Gebrauchsmustereintragung. Ohne unsere vorherige Zustimmung darf diese Zeichnung weder vervielfältigt noch Dritten zugänglich gemacht werden; sie darf durch den Empfänger oder Dritte auch nicht in anderer Weise mißbräuchlich verwendet werden. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadenersatz und können strafrechtliche Folgen haben.

4	12	Führungsstück				4988							
Teil	Stück	Benennung				Werkstoff	Abmessung		Zeichngs. Nr. Norm	Bemerkung			
Oberflächenzeichen	~	▽	▽▽	▽▽▽	▽▽▽▽	Freimaßtoleranz		bis 6 über 6 bis 30	bis 30 über 30 bis 100	über 100 bis 300	über 300 bis 1000	über 1000 bis 2000	
Rauhtiefe max. in µ	1000	40	10	4	1,6			± 0,1	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2
1969	Tag	Name		Werkstoff		Gesellschaft für Kernforschung m. b. H. 7500 Karlsruhe Postfach 947		Zugeh. Zeichng. LB-Z 6.00					
gez.	07.07	<i>V. B. B.</i>						Ersatz für					
gepr.								Ersetzt durch					
ges.								Zeichnungs Nr.					
Maßstab		Benennung						Zeichnungs Nr.					
5 : 1		BE-Prüfling						LB-Z 6.04					

D

C

B

A

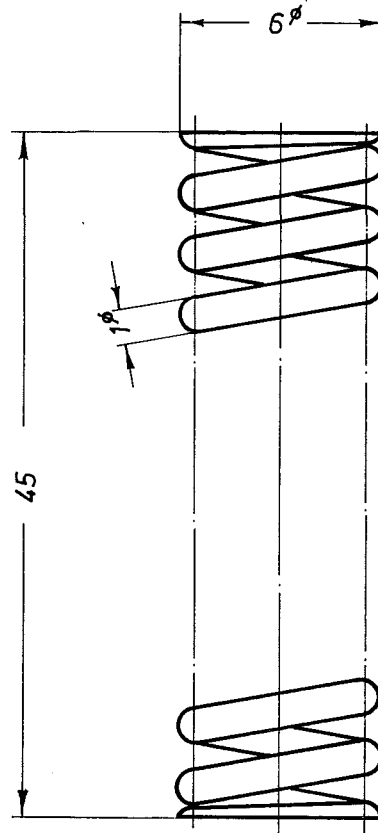
4

3

2

1

- II/6 -

22 Windungen

Für diese Zeichnung behalten wir uns alle Rechte vor, auch für den Fall der Patenterteilung oder Gebrauchsmustereintragung. Ohne unsere vorherige Zustimmung darf diese Zeichnung weder vervielfältigt noch Dritten zugänglich gemacht werden; sie darf durch den Empfänger oder Dritte auch nicht in anderer Weise missbräuchlich verwendet werden. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadenersatz und können strafrechtliche Folgen haben.

5	10	Druckfeder				4310						
Teil	Stück	Benennung				Werkstoff	Abmessung	Zeichngs. Nr. Norm		Bemerkung		
Oberflächenzeichen	~	▽	▽▽	▽▽▽	▽▽▽▽	Freimaßtoleranz	bis 6	über 6 bis 30	über 30 bis 100	über 100 bis 300	über 300 bis 1000	über 1000 bis 2000
Rauhtiefe max. in μ	1000	40	10	4	1,6		$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$	$\pm 0,8$	$\pm 1,2$
1969	Tag	Name		Werkstoff		Gesellschaft für Kernforschung m. b. H. 7500 Karlsruhe Postfach 947		Zueh. Zeichng. LB-Z 6.00				
gez.	07.07.	Kaub						Ersatz für				
gepr.								Ersetzt durch				
ges.								Zeichnungs Nr.				
Maßstab		Benennung						Zeichnungs Nr.				
5 : 1		BE-Prüfling						LB-Z 6.05				

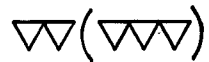
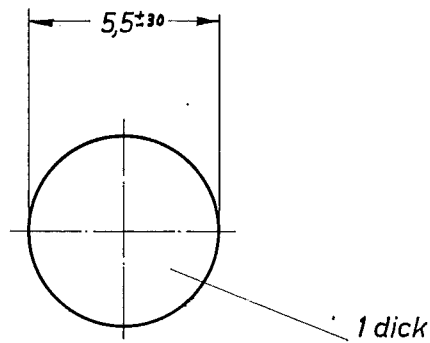
4

3

2

1

- II/7 -



Für diese Zeichnung behalten wir uns alle Rechte vor, auch für den Fall der Patenterteilung oder Gebrauchsmustereintragung. Ohne unsere vorherige Zustimmung darf diese Zeichnung weder vervielfältigt noch Dritten zugänglich gemacht werden; sie darf durch den Empfänger oder Dritte auch nicht in anderer Weise mißbräuchlich verwendet werden. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadenersatz und können strafrechtliche Folgen haben.

6	15	Rhodium-Plättchen				Rh							
Teil	Stück	Benennung					Werkstoff	Abmessung	Zeichngs. Nr. Norm		Bemerkung		
Oberflächenzeichen		~	▽	▽▽	▽▽▽	▽▽▽▽	Freimaßtoleranz	bis 6	über 6 bis 30	über 30 bis 100	über 100 bis 300	über 300 bis 1000	über 1000 bis 2000
Rauhtiefe max. in µ		1000	40	10	4	1,6		± 0,1	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2
1969	Tag	Name				Werkstoff	Gesellschaft für Kernforschung m. b. H. 7500 Karlsruhe Postfach 947	Zugeh. Zeichng. LB-Z 6.00					
gez.	07.07.	<i>Kaut</i>						Ersatz für					
gepr.								Ersetzt durch					
ges.								Zeichnungs Nr. LB-Z 6.06					
Maßstab		Benennung											
5 : 1		BE-Prüfling											

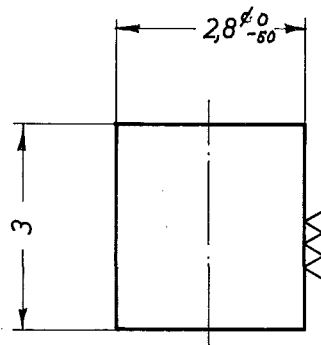
4

3

2

1

- II/8 -



Für diese Zeichnung behalten wir uns alle Rechte vor, auch für den Fall der Patenterteilung oder Gebrauchsmustererteilung. Ohne unsere vorherige Zustimmung darf diese Zeichnung weder vervielfältigt noch Dritten zugänglich gemacht werden; sie darf durch den Empfänger oder Dritte auch nicht in anderer Weise mißbräuchlich verwendet werden. Zweidrehentwürfen verpflichten zu Schadensersatz und können strafrechtliche Folgen haben.

7	22	Sinterstahlfilter				Cr Ni						
Teil	Stück	Benennung				Werkstoff	Abmessung	Zeichngs. Nr. Norm		Bemerkung		
Oberflächenzeichen	~	▽	▽▽	▽▽▽	▽▽▽▽	Freimaßtoleranz	bis 6	über 6 bis 30	über 30 bis 100	über 100 bis 300	über 300 bis 1000	über 1000 bis 2000
Rauhtiefe max. in µ	1000	40	10	4	1,6		± 0,1	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2
1969	Tag	Name			Werkstoff	Gesellschaft für Kernforschung m. b. H. 7500 Karlsruhe Postfach 947	Zugeh. Zeichng. LB-Z 6.00					
gez.	07.07.	Krauß					Ersatz für					
gepr.								Ersetzt durch				
ges.												
Maßstab		Benennung				Zeichnungs Nr.						
10:1		BE-Prüfling				LB-Z 6.07						

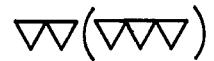
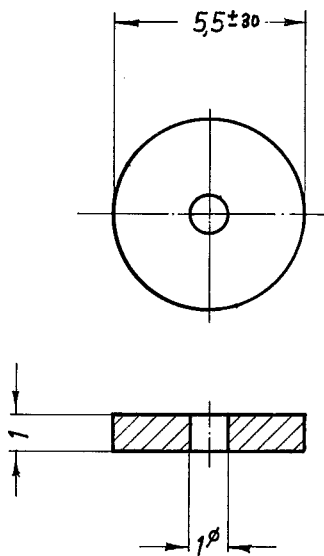
4

3

2

1

- II/9 -



Für diese Zeichnung behalten wir uns alle Rechte vor, auch für den Fall der Patenterteilung oder Gebrauchsmustererteilung. Ohne unsere vorherige Zustimmung darf diese Zeichnung weder vervielfältigt noch Dritten zugänglich gemacht werden; sie darf durch den Empfänger oder Dritte auch nicht in anderer Weise mißbräuchlich verwendet werden. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadenersatz und können strafrechtliche Folgen haben.

Teil	Stück	Benennung					Werkstoff	Abmessung		Zeichngs. Nr. Norm		Bemerkung	
8	15	Rhodium - Scheibe					Rh						
Oberflächenzeichen		~	▽	▽▽	▽▽▽	▽▽▽▽	Freimaßtoleranz	bis 6	über 6 bis 30	über 30 bis 100	über 100 bis 300	über 300 bis 1000	über 1000 bis 2000
Rauhtiefe max. in µ		1000	40	10	4	1,6		± 0,1	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2
1969	Tag	Name				Werkstoff	Gesellschaft für Kernforschung m. b. H. 7500 Karlsruhe Postfach 947	Zugeh. Zchnng. LB-Z 6.00					
gez.	07.07.	<i>Kraus</i>											
gepr.								Ersatz für					
ges.								Ersetzt durch					
Maßstab		Benennung							Zeichnungs Nr.				
5 : 1		BE - Prüfling							LB-Z 6.08				

A n h a n g I I I

Zusammenstellung der Tablettensäulen

Tabellen III/1 bis III/9

Tabelle III/1: Tablettensäule für Prüfling 5A-1
Prüflingstyp R

		Gewicht (g)	Durchmesser (mm)	Höhe (mm)	Geometrische Einzelwerte	Dichte (% th.D.) Mittelwerte
Abschnitt A	1	1,8858	6,124	6,95	83,33	83,26
	2	1,7983	6,119	6,65	83,18	
	3	1,7844	6,115	6,60	83,27	
Abschnitt B	4	1,8591	6,119	6,62	86,38	86,35
	5	1,8693	6,119	6,66	86,34	
	6	1,8987	6,121	6,76	86,34	
Abschnitt C	7	1,9617	6,123	6,75	89,28	89,32
	8	1,9031	6,124	6,54	89,34	
	9	1,9094	6,120	6,57	89,35	
Abschnitt D	10	2,0080	6,121	6,68	92,40	92,46
	11	1,9989	6,123	6,64	92,48	
	12	1,9945	6,120	6,63	92,50	
Gesamtwerte		22,871		80,05		
Mittelwert			6,120			

Tabelle III/2: Tablettensäule für Prüfling 5A-2
 Prüflingstyp R

		Gewicht (g)	Durchmesser (mm)	Höhe (mm)	Geometrische Dichte (% th.D.)	
					Einzelwerte	Mittelwerte
Abschnitt A	1	1,8180	6,118	6,70	83,49	83,47
	2	1,9090	6,115	7,05	83,40	
	3	1,8287	6,121	6,73	83,52	
Abschnitt B	4	1,9070	6,120	6,78	86,49	86,43
	5	1,9168	6,116	6,83	86,41	
	6	1,9175	6,118	6,83	86,39	
Abschnitt C	7	1,9298	6,123	6,63	89,42	89,44
	8	1,9561	6,122	6,72	89,45	
	9	1,9522	6,120	6,71	89,46	
Abschnitt D	10	2,0260	6,125	6,72	92,55	92,60
	11	2,0103	6,124	6,67	92,56	
	12	2,0066	6,123	6,65	92,69	
Gesamtwerte		23,178		81,02		
Mittelwert			6,120			

Tabelle III/3: Tablettensäule für Prüfling 5A-3
 Prüflingstyp R

		Gewicht (g)	Durchmesser (mm)	Höhe (mm)	Geometrische Dichte (%th.D.)	
					Einzelwerte	Mittelwerte
Abschnitt A	1	1,8205	6,120	6,70	83,55	83,64
	2	1,8172	6,118	6,68	83,70	
	3	1,8200	6,119	6,69	83,68	
Abschnitt B	4	1,8537	6,120	6,59	86,50	86,62
	5	1,8898	6,116	6,71	86,72	
	6	1,8946	6,117	6,74	86,66	
Abschnitt C	7	1,9560	6,124	6,70	89,65	89,64
	8	1,9513	6,117	6,70	89,64	
	9	1,9598	6,122	6,72	89,62	
Abschnitt D	10	2,0103	6,128	6,63	92,99	92,91
	11	1,9960	6,126	6,59	92,95	
	12	2,0145	6,127	6,66	92,80	
Gesamtwerte		22,983		80,11		
Mittelwert			6,121			

Tabelle III/4: Tablettensäule für Prüfling 5A-4
 Prüflingstyp S

		Gewicht (g)	Durchmesser (mm)	Höhe (mm)	Geometrische Dichte (% th.D.)	
					Einzelwerte	Mittelwerte
Abschnitt A	1	1,9548	6,112	6,72	89,68	89,74
	2	1,9337	6,118	6,63	89,72	
	3	1,9092	6,122	6,53	89,83	
Abschnitt B	4	1,8200	6,113	6,69	83,78	83,74
	5	1,8131	6,115	6,67	83,72	
	6	1,8272	6,125	6,70	83,72	
Abschnitt C	7	2,0134	6,122	6,65	93,04	93,04
	8	2,0150	6,125	6,65	93,02	
	9	2,0138	6,127	6,64	93,05	
Abschnitt D	10	1,8975	6,120	6,72	86,82	86,83
	11	1,9206	6,124	6,79	86,86	
	12	1,8980	6,117	6,73	86,81	
Gesamtwerte		23,016		80,12		
Mittelwert			6,120			

Tabelle III/5: Tablettensäule für Prüfling 5A-5
Prüflingstyp S

		Gewicht (g)	Durchmesser (mm)	Höhe (mm)	Geometrische Dichte (% th.D.)	
					Einzelwerte	Mittelwerte
Abschnitt A	1	1,9482	6,119	6,67	89,84	89,90
	2	1,9206	6,123	6,56	89,94	
	3	1,9491	6,118	6,67	89,92	
Abschnitt B	4	1,8216	6,118	6,67	84,03	84,03
	5	1,8230	6,121	6,67	84,02	
	6	1,8290	6,120	6,69	84,06	
Abschnitt C	7	2,0153	6,115	6,67	93,06	93,08
	8	2,0113	6,127	6,63	93,07	
	9	2,0440	6,129	6,73	93,12	
Abschnitt D	10	1,8973	6,118	6,72	86,87	86,84
	11	1,8932	6,116	6,71	86,87	
	12	1,8653	6,119	6,61	86,80	
Gesamtwerte		23,018		80,00		
Mittelwert			6,119			

Tabelle III/6: Tablettensäule für Prüfling 5A-6
Prüflingstyp S

		Gewicht (g)	Durchmesser (mm)	Höhe (mm)	Geometrische Dichte (% th.D.)	
					Einzelwerte	Mittelwerte
Abschnitt A	1	1,9768	6,122	6,75	89,99	89,97
	2	1,9659	6,121	6,72	89,93	
	3	1,9300	6,122	6,59	89,98	
Abschnitt B	4	1,8692	6,118	6,83	84,21	84,20
	5	1,8273	6,117	6,68	84,20	
	6	1,8241	6,121	6,66	84,19	
Abschnitt C	7	2,0157	6,122	6,65	93,14	93,15
	8	2,0149	6,125	6,64	93,16	
	9	2,0102	6,123	6,63	93,14	
Abschnitt D	10	1,8946	6,121	6,70	86,93	86,91
	11	1,8605	6,120	6,58	86,95	
	12	1,9151	6,120	6,78	86,86	
Gesamtwerte		23,104		80,21		
Mittelwert			6,120			

Tabelle III/7: Tablettsäule für Prüfling 5A-7
 Prüflingstyp S

		Gewicht (g)	Durchmesser (mm)	Höhe (mm)	Geometrische Dichte (% th.D.)	
					Einzelwerte	Mittelwerte
Abschnitt A	1	1,9418	6,120	6,61	90,33	90,27
	2	1,9603	6,117	6,69	90,19	
	3	1,9406	6,121	6,61	90,23	
Abschnitt B	4	1,7807	6,118	6,50	84,29	84,28
	5	1,8457	6,118	6,74	84,26	
	6	1,8060	6,114	6,60	84,31	
Abschnitt C	7	2,0210	6,128	6,65	93,21	93,32
	8	2,0407	6,128	6,71	93,27	
	9	2,0072	6,126	6,61	93,19	
Abschnitt D	10	1,8970	6,119	6,70	87,09	87,06
	11	1,9280	6,115	6,82	87,07	
	12	1,8934	6,115	6,70	87,04	
Gesamtwerte		23,062		79,94		
Mittelwert			6,119			

Tabelle III/8: Tablettensäule für Prüfling 5A-8
Prüflingstyp S

		Gewicht (g)	Durchmesser (mm)	Höhe (mm)	Geometrische Dichte (% th.D.)	
					Einzelwerte	Mittelwerte
Abschnitt A	1	1,9472	6,114	6,64	90,35	90,44
	2	1,9330	6,120	6,57	90,45	
	3	1,9360	6,118	6,56	90,51	
Abschnitt B	4	1,8220	6,118	6,65	84,30	84,37
	5	1,9132	6,119	6,97	84,43	
	6	1,8310	6,116	6,68	84,40	
Abschnitt C	7	2,0284	6,126	6,67	93,33	93,38
	8	2,0048	6,125	6,59	93,39	
	9	2,0268	6,125	6,66	93,43	
Abschnitt D	10	1,9030	6,119	6,70	87,38	87,36
	11	1,9377	6,122	6,82	87,31	
	12	1,9073	6,120	6,71	87,41	
Gesamtwerte		23,184		80,22		
Mittelwert			6,119			

Tabelle III/9:

Tablettensäule für Prüfling 5A-9
Prüflingstyp S

		Gewicht (g)	Durchmesser (mm)	Höhe (mm)	Geometrische Dichte (%th.D.)	
					Einzelwerte	Mittelwerte
Abschnitt A	1	1,9760	6,119	6,70	90,72	90,75
	2	1,9398	6,118	6,58	90,69	
	3	1,9427	6,118	6,58	90,83	
Abschnitt B	4	1,8257	6,117	6,64	84,63	84,63
	5	1,8600	6,114	6,77	84,65	
	6	1,8236	6,119	6,63	84,61	
Abschnitt C	7	2,0496	6,125	6,73	93,49	93,51
	8	2,0396	6,122	6,70	93,55	
	9	2,0338	6,124	6,68	93,50	
Abschnitt D	10	1,9028	6,120	6,69	87,46	87,47
	11	1,9147	6,116	6,74	87,46	
	12	1,9038	6,116	6,70	87,49	
Gesamtwerte		23,212		80,14		
Mittelwert			6.118			