

KERNFORSCHUNGSZENTRUM

KARLSRUHE

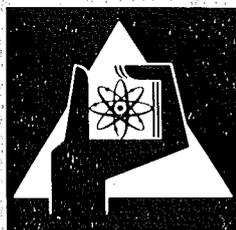
Januar 1975

KFK 2106

Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung des UO_2/PuO_2 -
Brennstab-Bestrahlungsexperimentes Mol 8-B

P. Weimar, H. Sebening



**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 2106

Institut für Material- und Festkörperforschung

Projekt Schneller Brüter

Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung des UO_2/PuO_2 -
Brennstab-Bestrahlungsexperimentes Mol 8-B

P. Weimar

H. Sebening

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

K U R Z F A S S U N G

Im belgischen Forschungsreaktor BR2 werden eine Anzahl von Bestrahlungsexperimente für das Projekt Schneller Brüter in Karlsruhe durchgeführt. Hierzu gehört die Serie der Mol 8 - Experimente. Das Experiment Mol 8-B stellt einen pilot-Versuch für die Serie Mol 8-C mit kontinuierlicher Innendruckmessung dar.

Die Bestrahlung der 2 Stäbe fand in sog. FAFNIR-NaK-Kapseln statt. Mittels eines Cadmium-Schirms wird das weichere Flußspektrum herausgefiltert.

Der Brennstoff besteht aus Mischoxid mit 20 % PuO_2 . Das UO_2 seinerseits ist auf ca. 93 % angereichert. Die Dichte betrug ca. 85 % th.D. Die Hüllrohre aus dem austenitischen Werkstoff Nr. 1.4988 haben einen Außendurchmesser von 6,0 mm und eine Wandstärke von 0,38 mm. Die Länge der Prüflinge beträgt 851 mm.

Die Bestrahlung erfolgte auf Brennelementpositionen des BR2. Bei Stableistungen von 354 bzw. 387 W/cm am Hot Spot und Temperaturen von 549 bzw. 597 °C betrug der mittlere Abbrand 89,5 bzw. 74 MWd/kgMe. Die Bestrahlungszeiten lagen bei 881 bzw. 728 Tagen. Prüfling 8 B-1 brannte an 2 Stellen jeweils unterhalb eines Abstandshalters durch.

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

A B S T R A C T

Design, Irradiation and Post Irradiation Examination of the UO_2/PuO_2 - Fuel Pin Irradiation Experiments of the BR2 Capsule Group Mol 8-B

For the Fast Breeder Project at Karlsruhe some irradiation experiments are conducted in the BR2 at Mol/Belgium. One series are the so-called Mol 8 - experiments.

The described experiment Mol 8-B is the pilot irradiation for the series Mol 8-C with continuous measurement of the fission gas pressure of the pin.

The irradiation was performed in the so-called FAFNIR-NaK-capsule. With a cadmium screen the softer neutron spectrum is filtered. The fuel consists of mixed oxide with 20 wt % PuO_2 . The UO_2 is enriched to some 93 wt %. The density of the pellets is some 85 % th.D. The cladding material consists of the austenitic steel (No. 1.4988). The outer diameter of the tubes is 6,0 mm, with a cladding thickness of 0,38 mm. The length of the pin is 851 mm.

The irradiation was performed in fuel-element positions of the BR2. The pin power was 354 and 387 W/cm respectively, the mean temperatures were 549 and 597°C respectively at the hot spot. The mean burnup was 89,5 and 74 MWd/Kg Me respectively. The irradiation time was 881 and 728 days. The pin Mol 8B-1 melted at two parts of the cladding, each some millimetre below the distance grid.

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

<u>Inhalt</u>	Seite
1. Einleitung	1
2. Aufgabenstellung und Versuchsziel	3
3. Auslegung der Versuchsgruppe	4
4. Konstruktion der Prüflinge und Spezifikationen	5
4.1 Aufbau der Brennstäbe	5
4.2 Brennstoffspezifikationen	5
4.3 Spezifikation für die Hülle	9
4.4 Brennstabspezifikationen	10
5. Herstellung der Brennstäbe	11
5.1 Ausgangspulver	12
5.2 Tablettenherstellung	13
5.3 Nachweis der Brennstoffeigenschaften	14
5.4 Hüll- und Strukturmaterial	15
5.5 Hüllrohrprüfung	15
5.6 Herstellung der Stäbe	16
5.7 Prüfungen an den fertigen Stäben	20
6. Bestrahlungseinrichtung	22
7. Ablauf der Bestrahlung	26
8. Berechnung der Stableistung, des Abbrandes und der Spaltgasfreisetzungsrates	33
8.1 Rechenmethode	33
8.2 Maximale und mittlere Temperaturen, Stableistungen u. Abbrände sowie schnelle Dosis	36
8.3 Spaltgasdruckaufbau und -Freisetzungsrates	38
8.3.1 Nachrechnung der Spaltgasdrucke	45
9. Zerstörungsfreie Nachuntersuchung	45
9.1 Visuelle Kontrolle der Prüflinge	45
9.2 Äußere Vermessung	51
9.3 Innere Vermessung	51
9.4 γ -Profile und γ -Spektren	55

<u>Inhalt</u>	Seite
10. Zerstörende Nachuntersuchung	55
10.1 Keramografie	55
10.2 Radiochemische Abbrandbestimmung	60
10.3 Bestimmung der Poren- und Gitterspaltgase	66
11. Dokumentation der zerstörungsfreien und zerstörenden Nachuntersuchung	67
12. Schlußfolgerungen	68
13. Literatur	69

1. Einleitung

Im Rahmen der Karlsruher Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der Brennelemente für schnelle und natriumgekühlte Brutreaktoren wurde eine Serie von Bestrahlungsversuchen konzipiert, die im "gehärteten" Fluß des belgischen Forschungsreaktors BR2 durchgeführt werden. Der schnelle Neutronenfluß wird durch Absorption der thermischen Neutronen in einem Cadmiumschirm erzeugt. Die hierfür von CEN/Mol speziell entwickelte Kapsel wird als FAFNIR⁺-Bestrahlungseinrichtung bezeichnet. Die Prüflinge werden in dieser Kapsel mit stagnierendem Natrium-Kalium gekühlt.

Die nachfolgende Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die geplanten bzw. bereits erfolgten Mischoxidbestrahlungen im BR 2.

Tabelle 1 Mol 8 - Bestrahlungsexperimente

Bestrahlungs-experiment	Versuchseinrichtung	Art des Experiments	Anz. der Brennstabproben	Brennstoff
Mol 8A	Kapselversuchseinsatz	Leistungsfähigkeitstest	2	(U, Pu)O ₂
Mol 8B		Spaltgasdruckmessung	2	
Mol 8C		Parametertest	10	
Mol 8D		Zentraltemperatur-Messung	12	

In diesem Bericht werden die Details des Bestrahlungsexperimentes Mol 8B wie Aufgabenstellung, Auslegung, Spezifikation, Prüflingsherstellung, Bestrahlungsablauf, zerstörungsfreie und zerstörende Nachuntersuchung wiedergegeben. Dieser Zusammenstellung liegt eine Vielzahl von Notizen und Berichten zugrunde, die sich auf mehrere Jahre verteilen.

⁺) Fuel Array Fast Neutron Irradiation Rig

Tabelle 2 soll einen Überblick über den zeitlichen Verlauf des Experimentes und die zuständigen Stellen bzw. hauptverantwortlichen Personen für die Teilarbeiten geben:

Zeitraum	Teilarbeit	Institutionen und Hauptbeteiligte
1967	Vorüberlegungen und Versuchsauslegung	IAR, Gerken, Karsten
1968	Bestrahlungskapseln	Technologie d.CEN, von der Hardt
1968	Spezifikation	IAR, Gerken, Karsten
1968	Herstellung der Prüflinge	IMF, Dippel
1969 u. 1970/72	Organisation der Bestrahlung und Betreuung	AG-Mol - GfK Technologie d.CEN, von der Hardt
1970/72	Bestrahlung im BR2	Technologie d.CEN, von der Hardt Abteilung Reaktorbetrieb BR2
1973	Organisation der Nachuntersuchung u. Betreuung	IMF, Weimar
1973	Zerstörungsfreie Nachuntersuchung	RB/Z, Scheeder, Enderlein
1973	Spaltgasuntersuchungen	RB/CuM, Gräbner
1973	Keramografie in den Heißen Zellen	RB/CuM, Pejisa, Hellriegel
1973	Abbrandbestimmungen	IRCh, Wertebach
1973	Auswertung der γ -Spektren	IMF, Weimar
1973/74	Zusammenfassung und Dokumentation der Ergebnisse	IMF, Weimar, Sebening (AG Mol)

2. Aufgabenstellung und Versuchsziel

Unter dem Namen "Bestrahlungsexperiment Mol 8B" wurden zwei Stäbe mit $(U,Pu)O_2$ -Brennstoff in Tablettenform im BR 2 bestrahlt. Bei den Stäben B1 und B2 handelt es sich um die ursprünglich für Serie 8A als A2 bzw. A3 hergestellten Prüflinge, die in Mol mit Druckmeßkapillaren versehen wurden und dann als Mol 8B zum Einsatz kamen. Sowohl für die Auslegung der Prüflinge (siehe Kap.3) als auch für die Bestrahlungsbedingungen wurde eine Simulation echter Schnell-Brüter-Verhältnisse angestrebt:

Ein Cd-Schirm um den Prüfling herum sollte die thermischen Neutronen absorbieren und dadurch ein schnelles Neutronenspektrum hervorrufen. Die wesentlichen Unterschiede zu den Schnellbrüter-Brennstäben sind folgende:

- Die Länge des Prüflings beträgt nur ca. 1/3 der Länge des SNR-300-Stabes.
- Dem Brennstabprüfling fehlt die untere Brutstoffzone.
- Die Wärmeübertragung nach außen geschieht durch stagnierendes NaK.
- Das Gasplenum befindet sich im oberen Teil des Prüflings.

Bei der Auslegung und Spezifikation dieses Bestrahlungsexperimentes wurden folgende Aufgaben umrissen:

- Es sollen Mischoxid-Proben unter simulierten Schnellbrüterbedingungen bis zu einem mittleren Abbrand von ca. 100.000 MWd/t Schwere Atome bestrahlt werden.
- Die Bestrahlung wird erstmals in einem schnellen Fluß durchgeführt.
- Es wird ein Kapseltyp mit stagnierendem NaK erprobt.

Das Bestrahlungsexperiment muß folgende Fragen klären:

1. Bleiben die Stabprüflinge bis zum Zielabbrand von 100.000 MWd/t Schwere Atome intakt?
2. Kann der Spaltgasdruck während der Bestrahlung gemessen werden?

Über die Nachbestrahlungsuntersuchungen sollten folgende Detailfragen geklärt und extrapoliert werden:

- Korrosiver Angriff der Hülle
- Spaltproduktbildung und Spaltgasfreisetzung
- Umstrukturierung des Brennstoffes
- Integrales Schwellen des Brennstoffes und der Hülle
- Kriechaufweitung der Hülle

3. Auslegung der Versuchsgruppe

Das Bestrahlungsexperiment Mol 8B beinhaltet die Bestrahlung zweier Teststäbe mit kontinuierlicher Spaltgasdruckmessung im "schnellen Fluß" des BR2. Die Bestrahlungspositionen der Kapseln vom Typ "FAFNIR" waren normale Brennelement-Positionen des BR 2; eine Cd-Hülle in der FAFNIR-Kapsel absorbierte die thermischen Neutronen, so daß am Ort des Brennstabes ein schnelles Neutronenspektrum herrschte. Die Auslegungsdaten für die Brennstoffzusammensetzung, -form und -dichte, das Hüllmaterial, die Brennstabmessungen, die Stableistung, die Hüllaußentemperatur und den Abbrand sind repräsentativ für den Na-gekühlten Schnellen Brutreaktor /1/:

- Brennstoffzusammensetzung: (U,Pu)O₂
Pu/U+Pu = 20 Gew.-%
U-235/U = 93,183 Gew.-%
- Brennstoff-Form: Tabletten, Zylindermantel geschliffen
- Brennstoff-Dichte: 84 \pm 2,2 % th.D.
- Brutstoff-Dichte: 95 \pm 2,2 % th.D.
- Hüllmaterial: X8CrNiMoVNb 1613 (Werkstoff-Nr. 1.4988)
- Brennstababmessungen: 6,0 \pm 0,04 mm Hüllaußendurchmesser
5,24 \pm 0,025 mm Hüllinnendurchmesser
5,1 \pm 0,05 mm Tablettendurchmesser
- Stableistung: 510 W/cm (maximal)
400 W/cm (axial gemittelt)
- Hüllaußentemperatur: 700°C (maximal)
- angestrebter mittlerer Abbrand: ca. 100.000 MWd/t

4. Konstruktion der Prüflinge und Spezifikationen

Die Gesamtkonzeption der Brennstäbe sowie die Spezifikation für Brennstoff, Hülle und kompletten Stab werden in diesem Kapitel dargelegt.

Als Unterlage diene/1/.

4.1 Aufbau der Brennstäbe

Aus Abb. 1 ist der prinzipielle Aufbau eines Brennstabes ersichtlich. Die Gesamtlänge beträgt 851 mm, der Außendurchmesser des Hüllrohres 6,0 mm. Die innere und äußere Geometrie ergibt sich wie folgt:

Oberer Endstopfen	31 mm
Spaltgasraum	170 mm
Brutstoffsäule	120 mm
Spaltstoffsäule	500 mm
2 Isoliertabletten	10 mm
Unterer Endstopfen	20 mm
Gesamtlänge	<u>851 mm</u>

Der Sinterstahlfilter im Stopfen soll verhindern, daß Brennstoffstaub in den Spaltgasraum eindringt und die Spaltgase kontaminiert. Die Feder im Plenum dient der Transportsicherung vor der Bestrahlung.

Der obere Endstopfen ist an zwei gegenüberliegenden Stellen abgeflacht; mittels Schlagtempel werden hier spezifische Markierungen, die die Art der Versuchsgruppe und die Nummer des Brennstabes beinhalten, eingeschlagen.

4.2 Brennstoffspezifikationen

Chemische Zusammensetzung:

Der Brennstoff soll aus einem Gemisch von UO_2 und PuO_2 bestehen. Der Pu-Anteil wird mit 20 ± 1 Gewichtsprozent, die Urananreicherung mit $93,2 \pm 0,2$ Gewichtsprozent im U-Anteil und das O/M-Verhältnis mit $1,98 \pm 0,02$ spezifiziert.

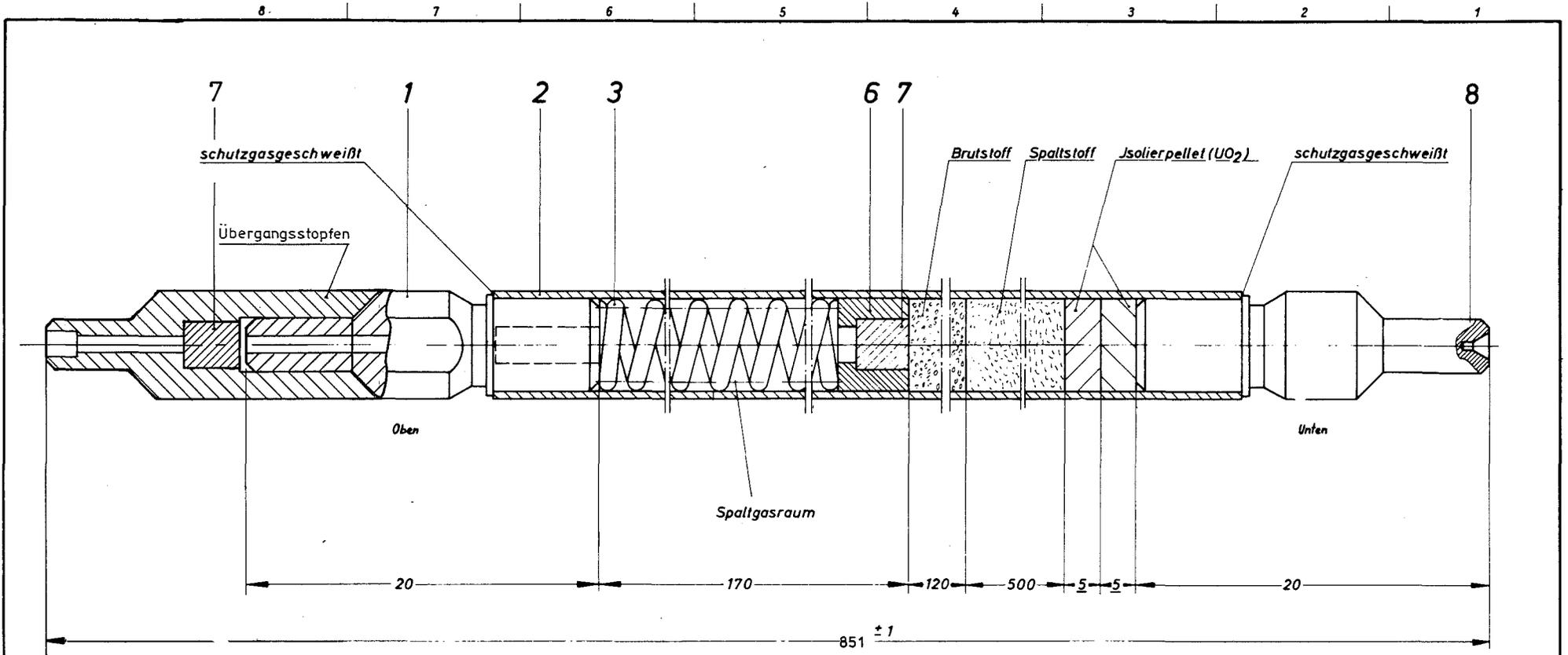


Abb. 1

Buch- stabe	Kommt vor	Änderung	Tag	Name

8	1	Unterer Endstopfen	4988	6 [#] × 20	TA2K-16-07-4-2806		
7	1	Sinterstahlfilter	CrNi-Stahl	28 [#] × 3	Zulieferteil		
6	1	Stopfen	4988	5 [#] × 4	TA2K-16-07-4-2805		
3	1	Druckfeder	4310	5 [#] × 46.5	TA2K-16-07-4-2802		
2	1	Hüllrohr	4988	6 [#] × 0.38 × 812	TA2K-16-07-4-2801		
1	1	Oberer Endstopfen	4988	6 [#] × 20	TA2K-16-07-4-2800		
Teil		Stück	Benennung	Werkstoff	Abmessung	Zeichng.-Nr. Norm	Bemerkung
Oberflächenzeichen		~	▽	▽▽	▽▽▽	▽▽▽▽	
Rauheits max. in μ		1000	40	10	+	1.6	
Freimaßtoleranz		bis 6	über 6 bis 30	über 30 bis 100	über 100 bis 300	über 300 bis 1000	über 1000 bis 2000
		± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5	± 0.8	± 1.2
1963	Tag	Name	Werkstoff		Gesellschaft für Kernforschung m. b. H.		Zugsh. Zeichng.
gez.	12.10.	<i>[Signature]</i>			7500 Karlsruhe		Ersatz für
gepr.		<i>[Signature]</i>			Postfach 947		Ersetzt durch
gez.							Zeichnungs-Nr.
Maßstab		Benennung		Brennstab Mol 8 B		TA2K-16-07-3-2799 a	

4.3.68

Ka.

Verunreinigungen sind bis max. 2500 ppm zulässig; für einige Elemente gelten folgende Höchstwerte:

<u>Verunreinigung</u>	<u>Grenzwert in ppm</u>
C	150
N	100
F	50
H ₂ O	100
Cl	50

Isotopenzusammensetzung:

Die Isotopenzusammensetzung des Pu ist wie folgt in Gew.-% spezifiziert:

Pu-239	90,90 \pm 0,2
Pu-240	8,15 \pm 0,15
Pu-241	0,83 \pm 0,05
Pu-242	0,04 \pm 0,005

Homogenität im Mischbrennstoff:

Eine möglichst einheitliche Homogenität sollte bei der Mischung der Komponenten erreicht werden. Die PuO₂-Partikelgröße wird mit \leq 0,15 mm gefordert.

Brennstoff-Form:

Gemäß spezifizierter Zusammensetzung wird der Brennstoff durch mechanisches Mischen und anschließenden Preß- und Sintervorgang in Tablettenform hergestellt. Die Mantelflächen werden spitzenlos auf das geforderte Maß geschliffen.

Tablettengeometrie:

Die Tablettengeometrie wird wie folgt festgelegt:

Tablettendurchmesser	5,1 \pm 0,05 mm
Tablettenhöhe	5,0 - 8,0 mm

Tablettendichte:

Die Tablettendichte soll wie folgt sein:

für den Spaltstoff	84 \pm 2,2 % th.D.
für den Brutstoff	95 \pm 2,2 % th.D.

Oberflächenbeschaffenheit:

Beim Schleifen der Mantelflächen sind

Kantenabplatzungen	\leq 0,3 mm
Flächenabplatzungen	bis zu einem max. Durchmesser von 2 mm
Haarrisse	bis 2 mm Länge und 0,1 mm Breite zulässig.

Untersuchungen und Prüfungen am Brennstoff:

Um vergleichbare Aussagen über das Bestrahlungsverhalten von Kernbrennstoffen im Rahmen einer Testreihe machen zu können, sind eine ganze Anzahl von Untersuchungen am Brennstoff notwendig. Hierzu gehören sowohl die Untersuchungen an den fertigen Tabletten wie auch am Ausgangsmaterial. Es soll untersucht werden auf:

- | | | |
|---|---|---------------------------|
| <ul style="list-style-type: none">- Chemische Zusammensetzung- BET-Oberfläche- Isotopenzusammensetzung- Stöchiometrie- Mischungsverhältnis | } | am Ausgangsmaterial |
| <ul style="list-style-type: none">- Chemische Zusammensetzung- Stöchiometrie- Dichte- Geometrie- Gewicht- Säulenlänge- Keramografie- Autoradiografie | } | an den fertigen Tabletten |

4.3 Spezifikation für die Hülle

Werkstoff und chemische Zusammensetzung:

Für die Hüllrohre und die beiden Enstopfen ist der austenitische Edelstahl X8CrNiMoVNb 1613 (Werkstoff-Nr. 1.4988) vorgesehen. Er soll 10 - 20 % kaltverformt sein und eine Wärmebehandlung (40 h; 750°C) erfahren haben. Die Richtanalyse des Stahles ist:

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

Die Hüllrohrmaße sind:

Durchmesser, außen:	6,00 ± 0,04 mm
Durchmesser, innen:	5,240 ± 0,025 mm
Wandstärke:	0,38 ± 0,03 mm
Geradheit:	1 : 1500, bezogen auf jeweils 10 cm Länge
Ovalität:	innerhalb der Durchmessertoleranzen

Materialbeschaffenheit:

Die Materialfehler lassen sich in oberflächliche und innere Fehler trennen:

Rauhigkeit:	$\leq 2 \mu\text{m}$
Oberflächenfehler:	$\leq 20 \mu\text{m}$
Innere Fehler:	$\leq 10 \%$ der Wandstärke
Einschlüsse:	$\leq 0,05 \text{ mm}$ oder 10^{-3} mm^2

Hüllrohrprüfungen:

Materialspezifische Eignungstests müssen beim Rohrhersteller durchgeführt und durch Zeugnisse belegt werden.

Die Prüfungen beinhalten u.a. folgende Sachgebiete:

Materialzusammensetzung
Abmessungen und Ovalitäten
Oberflächenbeschaffenheit und Materialfehler
Mechanische Eigenschaften

4.4 Brennstabspezifikation

Fertigung:

Die metallischen Einzelteile sind gemäß Abb. 1 (Zeichnung Nr. TA2K-16-07-3-2799a) zu fertigen. Es gelten die angegebenen Maße und Toleranzen.

Innere Geometrie:

- Die Länge der Spaltstoffsäule beträgt $500 \pm 5 \text{ mm}$
- Die Länge der Tablettensäule (Spaltstoff- und Brutstoffsäule) beträgt $620 \pm 5 \text{ mm}$
- Die Tablettensäulen sollen durch Tabletten einheitlicher Dichte aufgebaut werden.
- Auf die Tablettensäule ist eine Feder zur Transportsicherung zu setzen.

Äußere Geometrie:

- Die gesamte Länge des Stabes beträgt 851 ± 1 mm
- Der Außendurchmesser beträgt $6,00 \pm 0,04$ mm.

Füllung und Verschluß:

Zunächst wird der untere Endstopfen mit der Hülle verschweißt und danach die Füllung der Stäbe mit geeigneter Vorrichtung unter Helium-Atmosphäre vorgenommen. Abschließend wird der obere Endstopfen unter Schutzgas verschweißt. Die Schweißnahtgüte muß vor der endgültigen Verschweißung durch Probeschweißen am Originalmaterial nachgewiesen werden.

Prüfungen am fertigen Brennstab:

Es sind folgende Prüfungen vorgeschrieben:

Maßkontrolle (Länge, Durchmesser, Ovalität, Durchbiegung)

Gewichtskontrolle

He-Lecktest

Röntgenprüfung des Gesamtstabes einschließlich der Schweißnähte

Test auf Oberflächenkontamination (maximal 22α -Zerfälle/min. \cdot cm²).

5. Herstellung der Brennstäbe

An der Fertigung und Prüfung von Zubehörteilen, Tabletten sowie des gesamten Brennstabes waren verschiedene Arbeitsgruppen aus mehreren Instituten und Industriefirmen beteiligt. So wurden beispielsweise die Hüllrohre als Halbzeug von der Firma Mannesmann geliefert, von der Firma Nukem zerstörungsfrei geprüft und in den Werkstätten der GfK auf das spezifizierte Maß geschnitten. Bei der GfK wurden auch die Kleinteile hergestellt und geprüft und die Endmontage vorgenommen. Das von der Firma Nukem bezogene oxidische Ausgangspulver wurde in den Laboratorien des IMF/LB zu Tablettenbrennstoff weiterverarbeitet. Es wurden 4 Brennstäbe gefertigt, von denen hier nur zwei mit den Bezeichnungen Mol 8A-2 $\hat{=}$ Mol 8B-1 und Mol 8A-3 $\hat{=}$ Mol 8B-2 zur Bestrahlung gelangten.

Es wird nachfolgend ein ausführlicher Auszug aus dem Fertigungsbericht /2/ gegeben und die Prüfungen an den Einzelkomponenten und Endprodukten beschrieben.

5.1 Ausgangspulver:

Als oxidische Ausgangspulver standen zur Verfügung:

- a) UO_2 mit 93 % angereichertem Uran, konvertiert von der Firma Nukem aus UF_6 , welches von der USAEC stammt,
- b) PuO_2 mit nominell 7,7 % Pu-240, oxalatgefällt, aus der Charge CO-26-6-8 der Lieferung der USAEC vom Juni 1966.

Die genaue Isotopenzusammensetzung war:

- a) für UO_2 : Der U-235-Gehalt laut Angabe des Lieferanten (USAEC/Nukem) betrug 93,183 Gew.-%.
- b) für PuO_2 :

Isotop	Messung in Hanford (USA)	Messung in Karlsruhe
Pu-239	90,845	90,850
Pu-240	8,301	8,240
Pu-241	0,831	0,867
Pu-242	0,040	0,044

Die chemischen Verunreinigungen (in ppm) waren im einzelnen:

	UO_2	PuO_2
Ag	0,70	nicht analysiert
B	0,18	10
C	40,00	-
Ca	20,00	170
Cd	0,07	-
Cl	3,00	-
Cr	210,00	35
Cu	3,00	5
F	8,00	-
Fe	145,00	85

Mg	0,50	15
Mn	-	25
Mo	1,00	5
N	3,00	-
Ni	330,00	30
Pb	1,00	30

Zur Verringerung der spezifischen Oberfläche wurden die Ausgangspulver kalziniert: Das UO_2 -Pulver wurde 2 h lang bei $1250^\circ C$ unter Ar-Atmosphäre (mit 5 % H_2) und das PuO_2 -Pulver 2 h lang bei $1100^\circ C$ unter CO_2 -Atmosphäre geglüht. Die sinterfähigen Pulver wiesen folgende Eigenschaften auf:

Pulver	BET-Oberfläche (m^2/g)	O/Me-Verhältnis	max. Teilchengröße (mm)
UO_2 -Brennstoff	1,93	2,00	0,063
PuO_2 -Brennstoff	1,05	1,98	0,032
UO_2 -Brutstoff	5,16	2,04	0,063

5.2 Tablettenherstellung

Die kalzinierten Ausgangspulver, d.h. 448 g UO_2 -Pulver und 112 g PuO_2 -Pulver, wurden in einem Lödige-Mischer in einer Charge 2 h lang mechanisch gemischt und dann unter Zusatz von 1,2 Gew.-% Polyvinylalkohol in wässriger Lösung und 1,0 Gew.-% Stearinsäure in alkoholischer Lösung im Lödige-Mischer granuliert. Nach dem Trocknen bei ca. $50^\circ C$ wurde das Granulat durch ein Sieb mit 0,25 mm Maschenweite gestrichen. Das Pulver wurde nun mit 0,25 - 0,35 t/cm^2 Preßdruck zu Grünlingen verpreßt und diese anschließend in einem N_2 - H_2 -Gemisch (8 % H_2) bei $1570^\circ C$ 2 h lang maßgesintert.

Zur Charakterisierung der Brennstoffstruktur wurde von einer Tablette ein keramografischer Schliff und eine α -Autoradiografie angefertigt. Die PuO_2 -Partikel waren gleichmäßig über den gesamten Querschnitt verteilt und lassen somit ausreichende Homogenität erkennen.

Herstellung der Brutstoff-Tabletten:

Der Herstellungsgang ist analog dem Verfahren bei den Brennstoff-tabletten. Als Ausgangspulver wurde natürliches, unkalziniertes UO_2 verwendet; dieses wurde auf einem Sieb der Maschenweite 0,063 mm abgeseibt. Das Granulieren, Trocknen Pressen und Sintern erfolgte im Prinzip wie bei den Brennstofftabletten. Allerdings war die Sinter-temperatur $1600^{\circ}C$.

5.3 Nachweis der Brennstoffeigenschaften

Pu-Anreicherung:

Die chemischen Analysen an den Brennstofftabletten ergaben für den Pu-Anteil ($\frac{Pu}{U + Pu}$) einen Mittelwert von 19,28 Gew.-%.

Chemische Reinheit:

Die chemischen Verunreinigungen wurden ebenfalls an einigen Tabletten ermittelt; sie blieben in der Summe unter dem geforderten Wert von 2500 ppm.

<u>Verunreinigung</u>	<u>Wert in ppm</u>
Ag	5,0
Al	400,0
B	1,2
C	72,1
Ca	130,0
Cd	7,0
Cr	130,0
Cu	3,0
Fe	300,0
Mg	40,0
Mn	150,0
Mo	80,0
Na	50,0
Ni	75,0
Pb	2,0
Si	240,0
Sn	5,0
V	2,0
Zn	< 5,0

5.4 Hüll- und Strukturmaterial

Von der Firma Mannesmann wurden nahtlos gezogene Rohre und Vollstabmaterial als Halbzeug, bestehend aus dem austenitischen Edelstahl X8CrNiMoVNb (Werkstoff-Nr. 1.4988) bezogen.

Die Abmessungen waren:

Rohre: 6,00 mm Außendurchmesser
 0,38 mm Wandstärke
Vollmaterial: 8,00 mm Durchmesser

Von diesem Material wurden nach Abb. 1 in den Werkstätten der GfK die Fertigteile und aus einer anderen Lieferung des gleichen Materials die Druckfedern gefertigt. Die Sinterstahlfilter (ein Zulieferteil aus CrNi-Stahl) wurde in den Stopfen eingebaut.

5.5 Hüllrohrprüfung

Die Hüllrohre wurden bei der Firma Nukem mit Ultraschall auf Quer- und Längsfehler und Wandstärke geprüft.

Der Außendurchmesser wurde mit einem mechanischen Taster und der Innendurchmesser kontinuierlich mit einer pneumatischen Prüfanlage gemessen.

In Tabelle 3 sind die ermittelten geometrischen Abmessungen sowie die Hüllrohrfehler angegeben.

Tabelle 3 Geometrische Abmessungen und Fehler der Hüllrohre

Hüllrohr-Nr.	16	24
Querfehleranzeige (µm)	0	0
Längsfehleranzeige (µm)	ca.5	0
Wandstärke (mm)	0,37 - 0,39	0,37 - 0,40
Innendurchmesser (mm)	5,23 - 5,24	5,20 - 5,22
Außendurchmesser (mm)	6,00 - 6,04	5,99 - 6,02
Brennstab-Nr.	8 B-1	8 B-2

Aus dieser Tabelle ist ersichtlich, daß die spezifizierten Werte durchweg eingehalten werden konnten. Schwankungen im Durchmesser und in der Wandstärke sind herstellungsbedingt und liegen noch im Bereich der Toleranzen. Außerdem ist die Zuordnung der Hüllrohrnummern zu den Brennstabnummern gegeben.

5.6 Herstellung der Stäbe

Auswahl der Tabletten:

Die Vermessung und Dichtebestimmung erfolgte nur an jeder 5. Brennstofftablette. Für die theoretische Dichte des Brennstoffgemisches wurden $10,985 \text{ g/cm}^3$, für den Brutstoff $10,96 \text{ g/cm}^3$ zugrundegelegt. Sowohl die Brennstoffdichte als auch der Tablettendurchmesser entsprachen nicht bei allen Tabletten der Spezifikation. Wegen Materialmangels kamen aber alle Tabletten zum Einsatz.

Tablettensäulen:

Jede Tablettensäule enthält 20 Brutstoff-, 2 Isolierstoff- u. 85 Brennstofftablettensäulen (siehe Tab. 4 und 5). Die Nummern der Tabletten laufen von oben nach unten, d.h. über der obersten Brutstoff-Tablette mit der Nr. 1 ist der Stopfen mit der Druckfeder.

Die Gesamthöhen der Tablettensäulen wurden außerhalb der Hüllrohre in einer besonderen Vorrichtung durch Aneinanderreihen der Tabletten bestimmt. Diese Werte und die Materialdaten der Säulen sind in den Tabellen 6 und 7 zusammengestellt.

Einfüllen und Verschweißen der Prüflinge:

Nach dem Einschweißen der unteren Endstopfen wurden die Tabletten einzeln durch eine am offenen Rohrende angebrachte Vorrichtung in die Hüllrohre geschoben. Danach wurde der Metalleinsatz mit Sinterstahlfilter und Druckfeder eingeführt und die beiden Brennstäbe evakuiert und mit He geflutet. Das Verschweißen des oberen Endstopfens bildete den abschließenden Arbeitsgang.

Tabelle 4 Tablettensäule für Stab 8 B-1

	Lage der geprüften Tabletten	T a b l e t t e n d a t e n			
		Gewicht (g)	Durchmesser (mm)	Höhe (mm)	Materialdichte (% th.D.)
Brutstoff	7	1,3210	5,075	6,145	96,9
2 Tabl. / 5,00 mm	12	1,3360	5,085	6,185	97,0
17 Tabl. / 6,25 mm	17	1,3180	5,020	6,260	97,0
Brennstoff 89 Tabletten	5	1,0585	5,065	5,620	85,1
	10	1,0650	5,080	5,690	84,1
	15	1,0530	5,095	5,690	82,9
	20	1,0557	5,075	5,560	85,4
	25	1,0750	5,085	5,790	83,3
	30	1,0583	5,040	5,650	85,3
	35	1,0472	5,080	5,650	83,3
	40	1,0413	5,030	5,560	85,8
	45	1,0498	5,050	5,555	85,8
	50	1,0490	5,080	5,640	83,6
	55	1,0332	5,085	5,580	83,0
	60	1,0465	5,080	5,625	83,6
	65	1,0520	5,050	5,560	85,9
	70	1,0450	5,060	5,575	84,9
	75	1,0740	5,075	5,750	84,1
	80	1,0410	5,030	5,620	84,9
85	1,0405	5,030	5,550	85,9	
Isolierung	1	1,0455	5,062	4,910	96,2
2 Tabletten	2	1,0300	5,062	4,900	92,2

Tabelle 5 Tablettensäule für Stab 8 B-2

	Lage der geprüften Tabletten	T a b l e t t e n d a t e n			
		Gewicht (g)	Durchmesser (mm)	Höhe (mm)	Materialdichte (% th.D.)
Brutstoff	5	1,3283	5,060	6,280	96,1
2 Tabletten / 5,00 mm	10	1,3370	5,070	6,255	96,6
18 Tabletten / 6,25 mm	15	1,3153	5,050	6,225	96,3
	5	1,0370	5,050	5,550	85,0
	10	1,0503	5,035	5,615	85,5
	15	1,0510	5,080	5,650	83,6
	20	1,0303	5,080	5,575	83,0
	25	1,0432	5,030	5,615	85,1
	30	1,0484	5,045	5,635	84,8
	35	1,0360	5,035	5,550	85,3
	40	1,0258	5,075	5,565	83,0
	45	1,0445	5,030	5,580	85,8
	50	1,0474	5,035	5,610	85,4
	55	1,0470	5,090	5,655	82,9
	60	1,0369	5,080	5,605	83,1
	65	1,0339	5,035	5,550	85,0
	70	1,0446	5,040	5,605	85,0
	75	1,0548	5,035	5,630	85,7
	80	1,0410	5,080	5,615	83,3
	85	1,0472	5,04c	5,570	85,8
Isolierung	1	1,0417	5,062	4,870	96,8
2 Tabletten	2	1,0430	5,062	4,880	96,8

Tabelle 6 Gesamtwerte für die Brennstoffsäulen

Brennstab Nr.	Gewicht UO_2-PuO_2 (g)	Höhe der Säule (mm)	Mittlerer Durchmesser (mm)	Mittlere Dichte (%th.D.)	Gehalt an Pu (g)	Gehalt an U-235 (g)
8 B-1	94,35	499,9	5,064	85,4	16,64	65,92
8 B-2	93,70	499,8	5,052	85,2	16,53	65,47

Tabelle 7 Gesamtwerte für Brutstoff und Isolierung

Brennstab Nr.	B r u t s t o f f				I s o l i e r t a b l e t t e n			
	Gewicht (g)	Höhe (mm)	Mittl. Durchm. (mm)	Mittl. Dichte (%th.D.)	Gewicht (g)	Höhe (mm)	Mittl. Durchm. (mm)	Mittl. Dichte (%th.D.)
8 B-1	23,31	115,3	5,060	92,0	2,08	9,8	5,062	96,2
8 B-2	25,40	120,4	5,060	95,8	2,08	9,8	5,062	96,7

5.7 Prüfungen an den fertigen Stäben

Die Prüfung sowohl der abwischbaren wie auch der punktförmig fixierten Kontamination führte zu einem befriedigenden Ergebnis:

Die Wischtests waren ohne Befund, lediglich die Schweißnähte der oberen Endstopfen zeigten geringe punktförmig fixierte Aktivitäten ($< 10 \alpha$ -Zerfälle/min \cdot cm²).

Die Röntgenprüfung der Schweißnähte ergab eine einwandfreie Qualität; auch wurde die Dichtheit der verschlossenen Stäbe nachgewiesen.

Das Gewicht, die Gesamtlänge (Tabelle 8) und der Durchmesser an verschiedenen Stellen des Prüflings wurden bestimmt. Das Prüfprotokoll ist in Tabelle 9 wiedergegeben. Gleichzeitig wurden in den heißen Zellen mit einer Rundlaufmeßbank Wendelschriebe zur Bestimmung der Außendurchmesser und Ovalitäten (Tabelle 10) angefertigt (s.a. Kap. 9.2).

Tabelle 8 Länge der Tablettensäulen (Angaben in mm)

Brennstab-Nr.	8 B-1		8 B-2
Sollwert für Brennstoffsäule	500 \pm 5		
Sollwert für gesamte Tablettensäule ¹⁾	630 \pm 5		
Brennstoffsäule, Summe der Tablettenhöhen ²⁾	499,9		499,8
Gesamtsäule, Summe der Tablettenhöhen ²⁾	625,0		630,0

Anmerkungen

- 1) mit Einschluß der Isoliertabletten
- 2) Werte aus den Tabellen 6 und 7

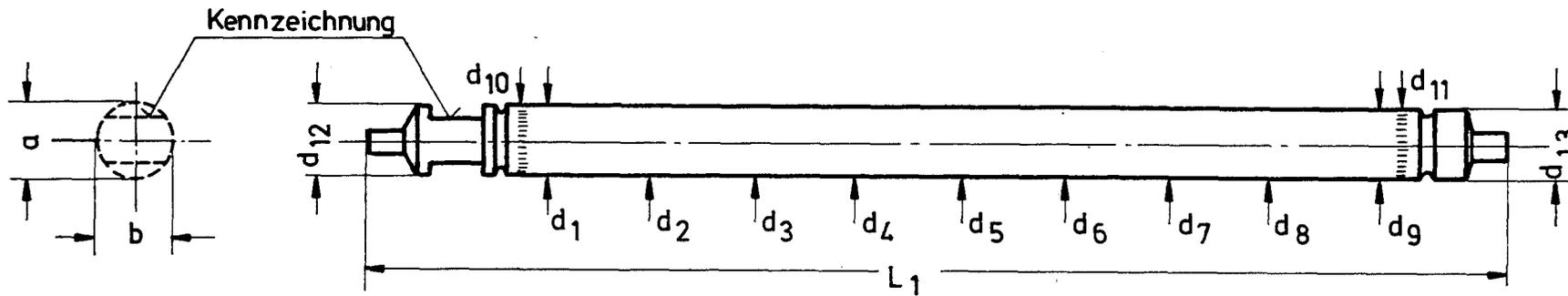


Tabelle 9 Prüfprotokoll der fertigen Brennstabprüflinge

Stab-Nr.	Gewicht (g)	Länge L_1 (mm)	Meßebene	Durchmesser mit Mikrometerschraube gemessen (mm)										
				d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9	d_{12}	d_{13}
Mol 8B-1	173,24	840,0	a	6,021	6,018	6,018	6,017	6,078	6,018	6,018	6,019	6,030	-	6,007
			b	6,014	6,020	6,020	6,017	6,018	6,018	6,017	6,018	6,028	6,013	6,008
Mol 8B-2	173,98	839,9	a	6,000	5,996	6,000	5,496	5,997	5,994	5,994	5,994	6,000	-	6,003
			b	5,998	5,499	6,000	5,994	5,995	5,996	5,998	5,997	5,995	6,017	6,003

Tabelle 10 Außendurchmesser der Brennstäbe (Angaben in mm)

Brennstab-Nr.	8 B-1	8 B-2
Messungen am leeren Hüllrohr	6,000 - 6,040	5,990 - 6,020
Messungen am Brennstab mit dem Mikrometer ¹⁾	6,014 - 6,021	5,993 - 6,000
Messungen am Brennstab auf der Rundlauf-Meßbank ²⁾	6,010 - 6,030	5,980 - 6,020

Anmerkungen:

- 1) durchgeführt an insgesamt 16 der Länge nach verteilten Meßstellen. Bezüglich der Messungen an den Schweißnähten und Endstopfen siehe Tabelle 9.
- 2) ohne Berücksichtigung der Werte an den Schweißnähten und Endstopfen.

6. Bestrahlungseinrichtung

Die Brennstabprüflinge der MOL 8B-Reihe wurden in einem aus der A-Reihe weiterentwickelten FAFNIR-Reaktoreinsatz bestrahlt. Der Stab 8A2 war im Einsatz MOL 8B1 und der Stab 8A3 im Einsatz 8B2 eingebaut.

Der Aufbau der Reaktoreinsätze geht aus der Abbildung 2 hervor. Im Vergleich zu der A-Reihe wurden die 8B-Einsätze mit einer Spaltgasdruckmessung ausgerüstet. Sie besteht aus einem im Reaktoreinsatz montierten Druckaufnehmer und dem zugehörigen kontinuierlichen Druckschreiber in der Out-Pile-Anlage. Das Gasplenum im Brennstab und der Druckaufnehmer werden durch eine Kapillare verbunden, wodurch einerseits eine räumliche Trennung ermöglicht wird und die Strahlenbelastung am Aufnehmer klein gehalten werden kann und andererseits ein Druckaufnehmertyp größeren Durchmessers verwendbar wird. Die Übertragung des Meßwertes vom Druckaufnehmer zum

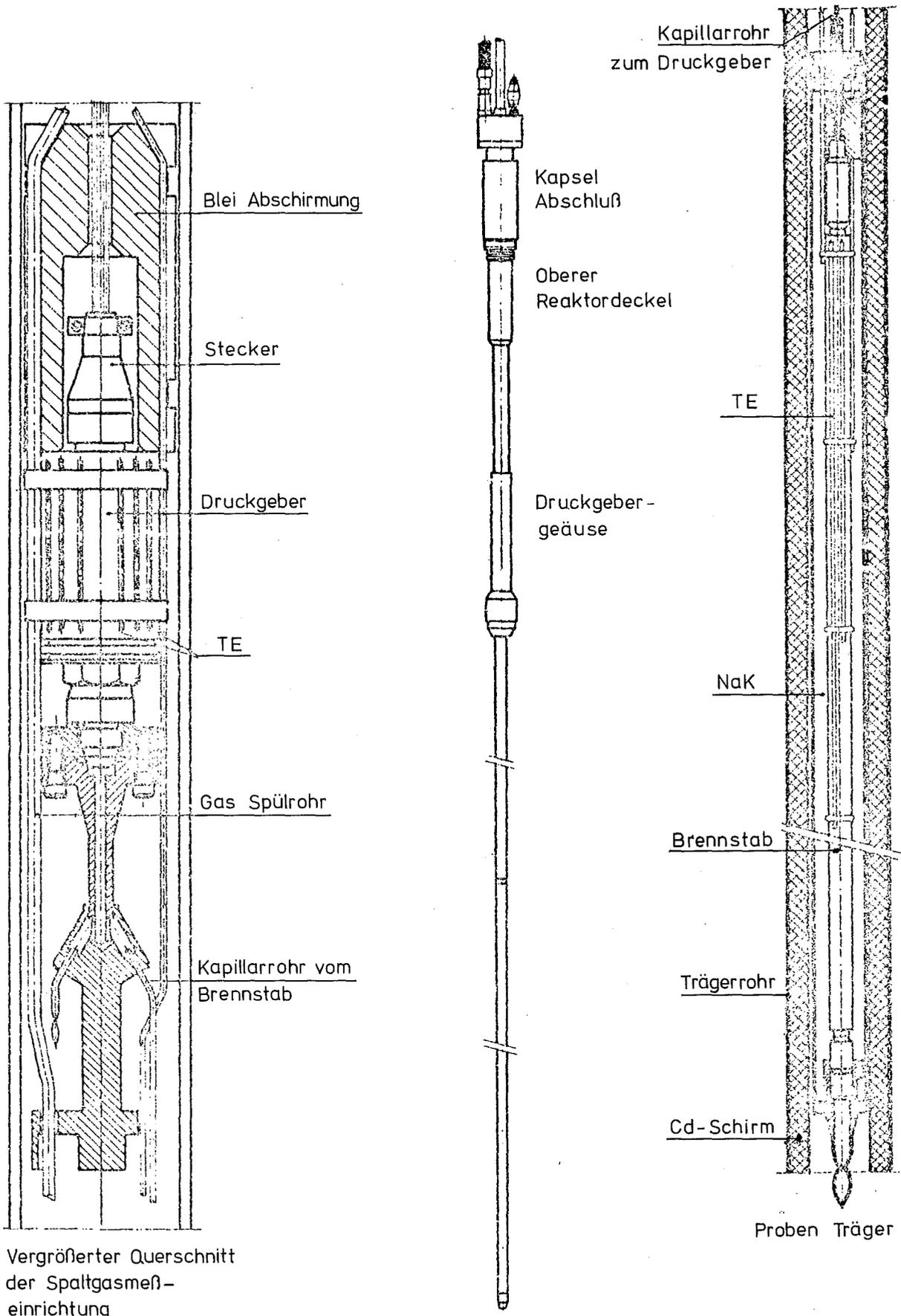


Abb. 2

FUEL ARRAY FAST NEUTRON
IRRADIATION RIG
FAFNIR

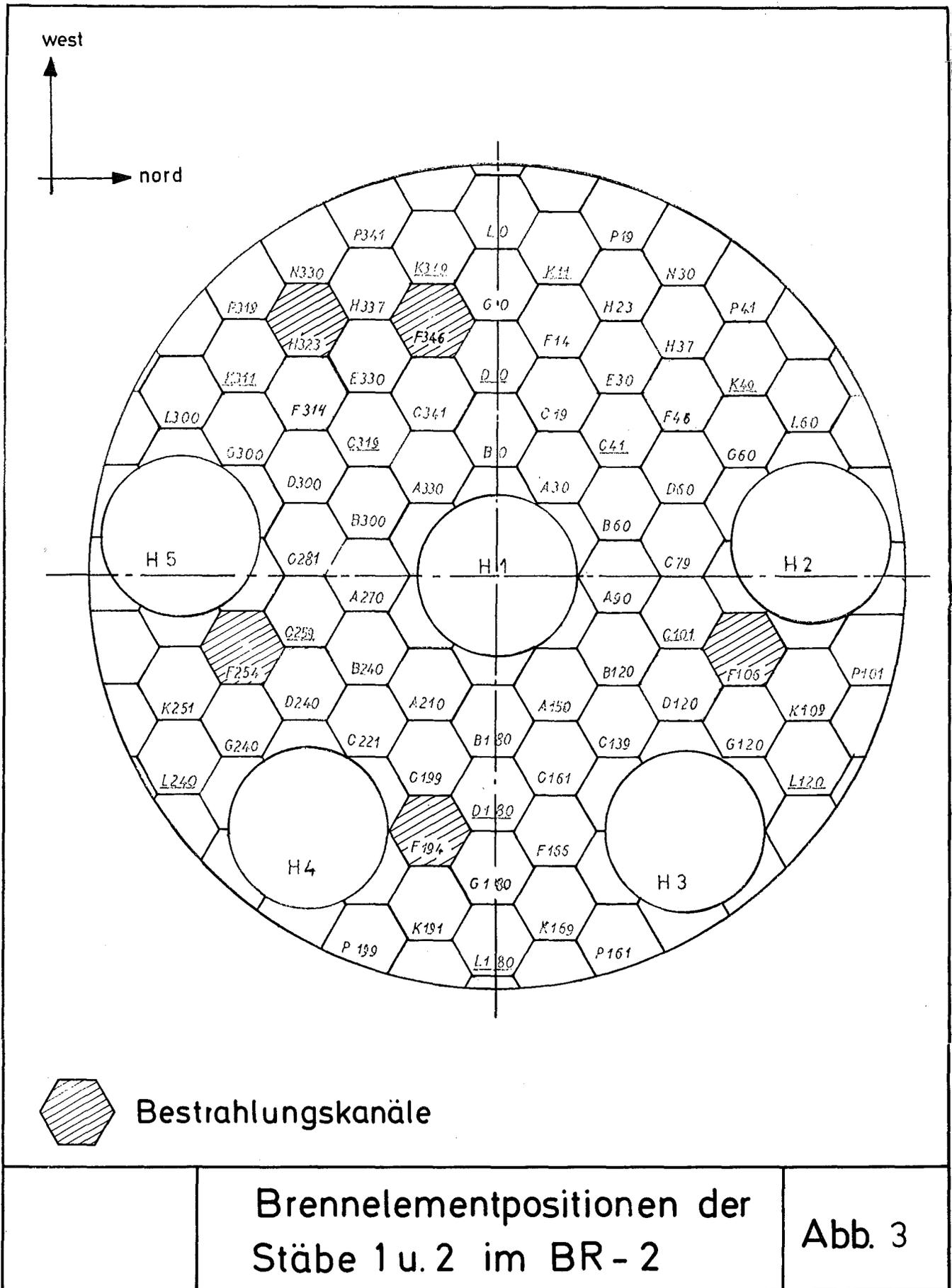
Registriergerät erfolgt elektrisch (siehe Abb. 2).

Anstelle von 10 Thermoelementen wie bei der A-Reihe wurden die Mol 8B-Einsätze mit 12 Thermoelementen ausgerüstet (Durchmesser 0,5 und 1 mm). Zwei davon dienen der Kontrolle des NaK-Standes in der Kapsel. Neun Elemente wurden auf acht verschiedenen Höhenschnitten an der Hülloberfläche aufgebunden, wobei in der heißesten Zone zwei Elemente um 180° versetzt angebracht wurden. Ein Thermoelement wurde zur Messung der Temperaturdifferenz im NaK-Spalt an der Innenseite der NaK-Kapsel befestigt. Durch ringförmige Scheiben auf mehreren Höhenschnitten wurden sowohl der Brennstab in der NaK-Kapsel zentriert, als auch die Thermoelemente geführt. Sie behindern außerdem die natürliche Konvektion des NaK, aber auch wie sich beim Schaden an 8B1 zeigte, das Abwandern von Gasblasen in das Gasplenum bei einem Hüllschaden.

Im übrigen besitzt auch die B-Ausführung die typischen Merkmale der FAFNIR Reaktoreinsätze mit der dichten NaK-gefüllten Kapsel, die den Brennstab aufnimmt, dem Gasspalt zur Wärmedämmung und dem Kadmium-Edelstahl-Sandwich-Rohr zur Absorption der thermischen Neutronen. Die Messung, Registrierung und Grenzwertüberwachung von Drücken und Temperaturen, die Gasversorgung für das Unterteil und den Kopf des Einsatzes und die Gasprobenentnahme sind in einer Out-Pile-Anlage, die aus einem elektrischen und pneumatischen Teil sowie einer Glovebox besteht, zusammengefaßt.

Entwurf /3/, Herstellung, Prüfung und Einbau der Reaktoreinsätze und Out-Pile-Anlagen wurden von verschiedenen Abteilungen des CEN unter Leitung der Abteilung Technologie durchgeführt.

Die Bestrahlung der Einsätze erfolgte in Brennelementkanälen des BR2-Reaktors wobei zur Anpassung an die Bestrahlungsbedingungen mehrfach Umladungen in Positionen mit günstigeren Neutronenflußverhältnissen vorgenommen wurden (siehe Tabelle 11 und 12 Spalte "Kanal" und Abb. 3).



7. Ablauf der Bestrahlung

Die Bestrahlung der beiden Reaktoreinsätze wurde im Reaktorzyklus 4/70 für 8B1 und 3/70 für 8B2 begonnen. Die Betreuung des Versuchsablaufs oblag der Arbeitsgruppe MOL der GfK in Zusammenarbeit mit der Betriebsabteilung des BR2.

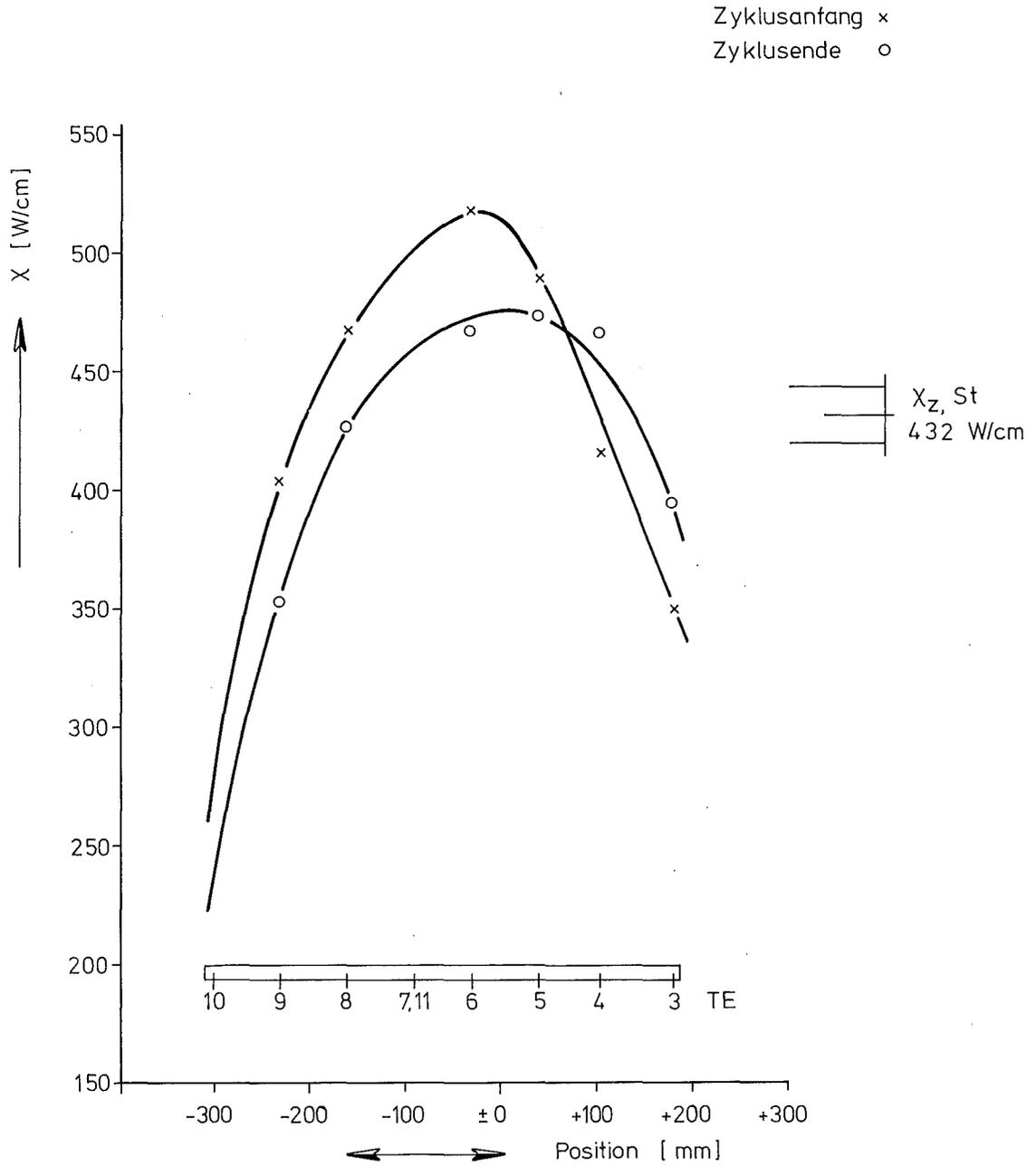
Die Bestrahlungsdaten wie Zeit, Reaktorleistung, Temperaturen und Drücke wurden in vierstündigen Abständen protokolliert und Überprüfungen der Anlagen, Reparaturen und Wartungsarbeiten und besondere Vorkommnisse wie Reaktorleistungsänderungen, Ausfall von Meßfühlern und Registriergeräten, in ein Logbuch eingetragen. Im Rhythmus der Reaktorzyklen wurden zusammenfassende Berichte /4/ ausgearbeitet, die Neutronendosis, Stableistung und Abbrand für verschiedene Höhenschnitte, maximale Temperatur und maximale Leistung, Spaltgasdruck und Freisetzungsratesowohl für den Berichtszeitraum als auch für die Gesamtbestrahlungszeit enthalten. In Diagrammen wurden die Leistung über die Stablänge zu Beginn und Ende des Zyklus sowie der zeitliche Verlauf der Stableistung aufgetragen. Der typische Verlauf dieser Kurven ist in Abb. 4 und 5 dargestellt.

Die Bestrahlung des Experimentes 8B1 wurde durch einen Schaden am Brennstab /5/ im Zyklus 7/72, die des Experimentes 8B2 planmäßig im Zyklus 1/72 beendet.

Nach einer Abklingzeit von mehreren Wochen wurden die Reaktoreinsätze (Abb. 6) in den Heißen Zellen des BR2 zerlegt /6/ und anschließend in der NaK-Kapsel nach Karlsruhe zur Nachuntersuchung der Brennstäbe transportiert.

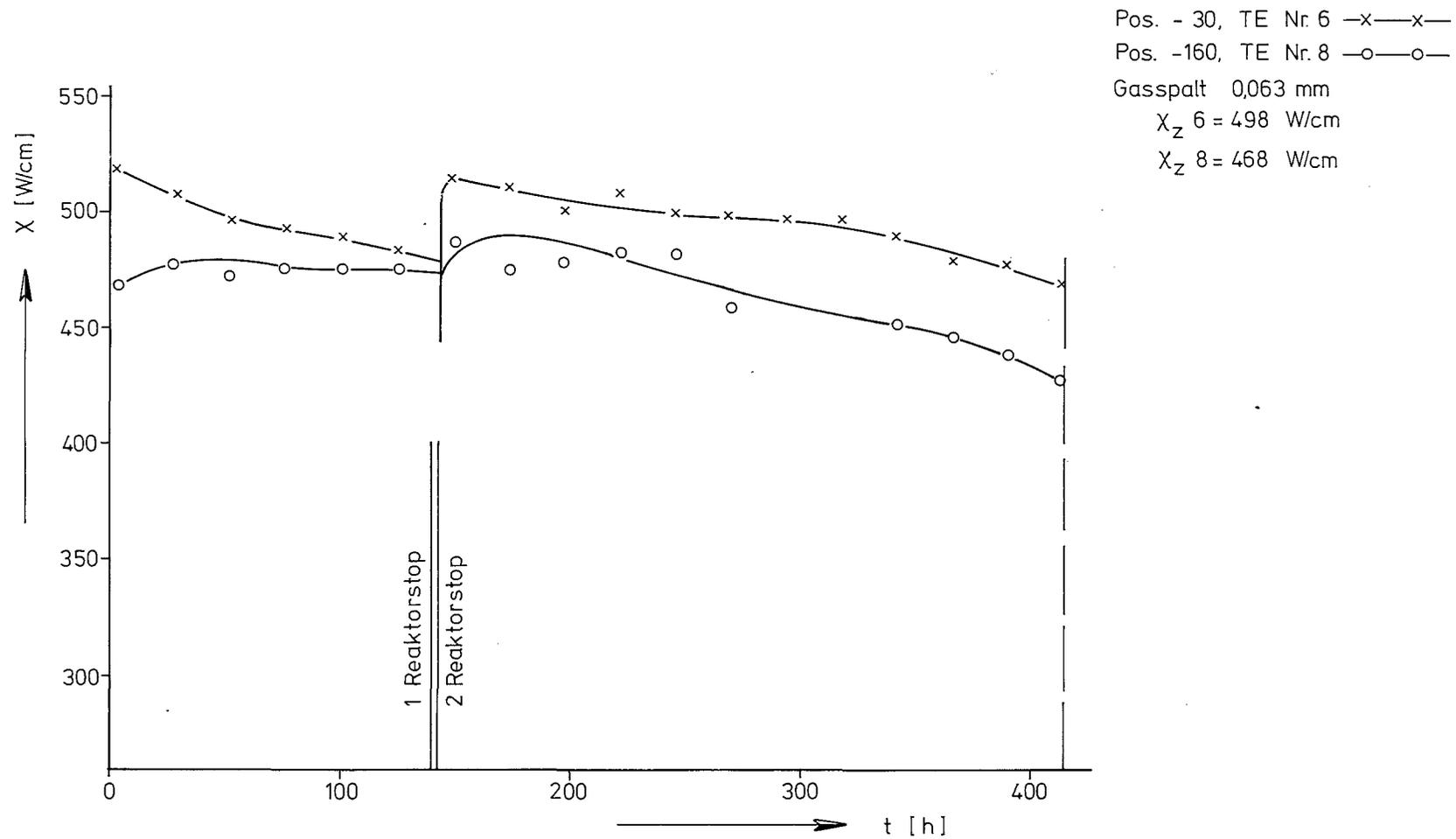
Der Bestrahlungsverlauf ist in tabellarischer Übersicht nach BR2 Reaktorzyklen geordnet wiedergegeben (Tabelle 11 und 12). Neben dem Bestrahlungskanal und der Zyklusdauer sind die maximalen Temperaturen an der Außenhülle während des Zyklus und der Spaltgasdruck am Ende des Zyklus angegeben. Berechnet wurden folgende Stableistungen:

- das absolute Maximum während des Zyklus
- das zeitliche Mittel über den Zyklus an der Heiß-Stelle
- das zeitliche Mittel über den Zyklus und die Stablänge



Mol 8B Stab Nr. 2
Stableistung χ über Stablänge im
Zyklus 3/71

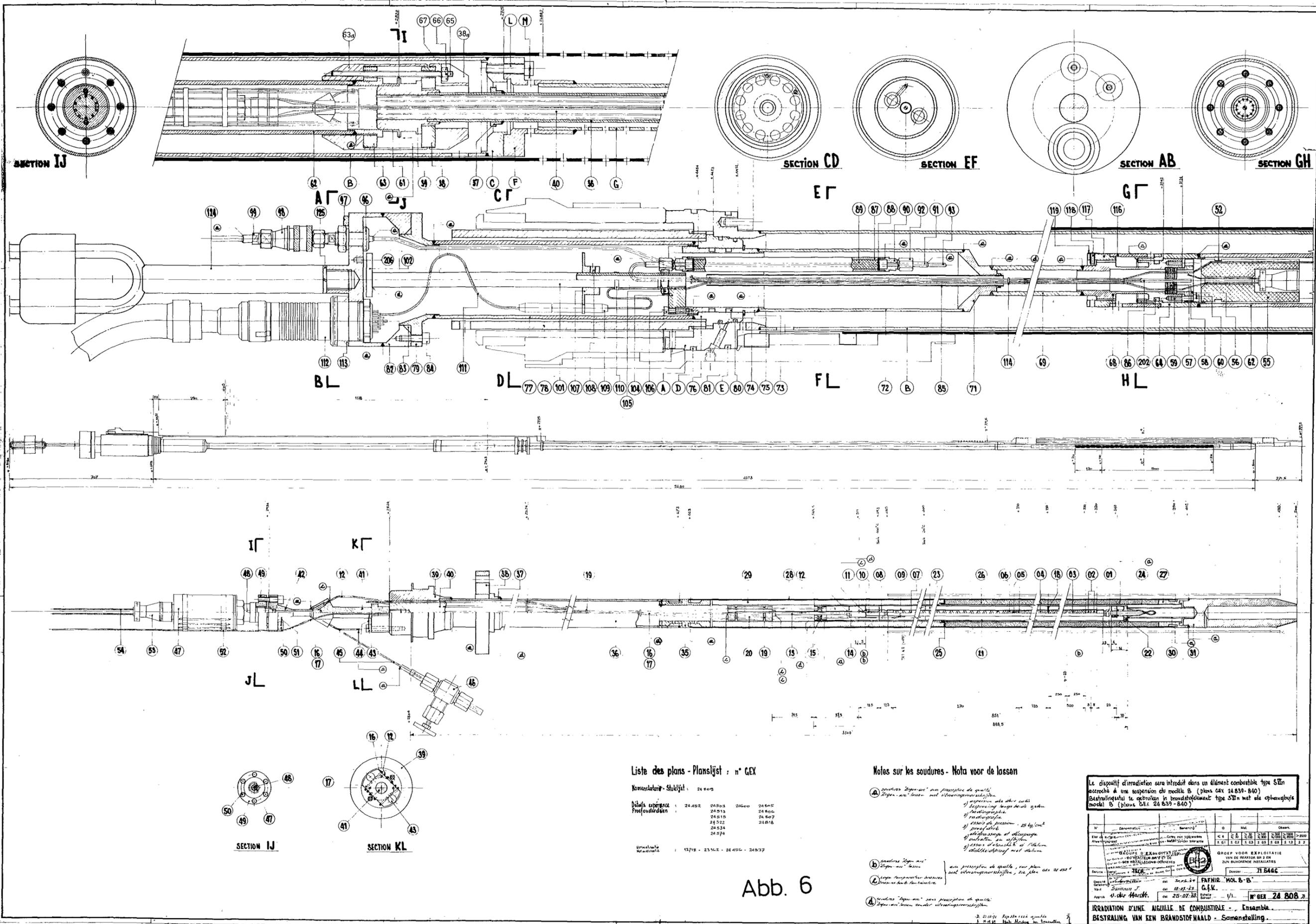
Abb. 4



Mol 8B Stab Nr. 2

Stableistung χ als Funktion der Bestrahlungszeit im Zyklus 3/71

Abb. 5



Liste des plans - Planslijst : n° GEX

Nomenclature - Skidlijst: 24808

Ditelsk erfaringe	24 452	24 503	24 600	24 606
Profondardelen	24 515	24 519	24 522	24 524

Vertrouwdheidsnummer: 13718 - 23162 - 24 456 - 24 637

Notes sur les soudures - Nota voor de lassen

- a) soudures "à la main" sans prescription de qualité
- b) soudures "à la main" avec prescription de qualité, voir plan
- c) soudures "à la main" avec prescription de qualité, voir plan
- d) soudures "à la main" sans prescription de qualité

Le dispositif d'irradiation sera introduit dans un élément combustible type S2In attaché à une suspension de modèle B (plans GEX 24 839 - 840)

GROEP VOOR EXPLOITATIE VAN DE REACTOR NO 2 EN ZIJN BIJHOORDE INSTALLATIE	
Docent: 71 546C	Dossier: 71 546C
Van: 24-07-52	G.F.V.
Van: 25-07-52	G.F.V.
IRRADIATION D'UNE AGUILLE DE COMBUSTIBLE - Ensemble	
BESTRALING VAN EEN BRANDSTOF NAALD - Samenstelling	

Abb. 6

Tabelle 11 Bestrahlungsablauf für den Brennstab Mol 8 B 1

(korrigierte Werte)

Zyklus	Kanal	Zeit d über 80 % Reaktor- Leistung	Temp. °C Maxim. an Außen- hülle	Stableistung W / cm			Abbrand Mwd/kg Me				Spaltgasdruck kp/cm ² Zykl. Ende	Gesamt Freisetz- rate	f Korrekt. für Leist. u. Abbrand
				abs. Max. im Zyklus	Hot Spot zeitl. Mittel im Zyklus	Mittel über Zyklus und Stab- länge	Hot Spot zeitl. Mittel im Zyklus	Hot Spot Gesamt über Zeit	Mittel über Zyklus und Stab- länge	Gesamt über Zeit und Stablänge			
4/70	H323	11,1	528	296	271	223	1,79	1,8	1,51	1,5	2,0	-	0,723
6/70	F194	12,6	502	275	251	211	1,89	3,7	1,58	3,1	1,8	-	0,728
7/70	F346	14,2	605	413	343	278	2,88	6,6	2,34	5,4	1,4	-	0,732
8/70		13,7	590	362	329	271	2,68	9,2	2,21	7,6	3,6	0,397	0,737
9/70		13,9	584	359	335	274	2,74	12,0	2,26	9,9	4,6	0,518	0,742
10/70		15,6	598	377	350	295	3,24	15,4	2,72	12,6	-	-	0,748
11/70		14,4	610	393	357	308	3,14	18,5	2,64	15,3	7,5	0,714	0,754
12/70		10,1	609	394	387	309	2,3	20,8	1,83	17,1	7,6	0,65	0,758
13/70		15,9	584	370	339	267	3,19	24,0	2,51	19,6	9,0	0,704	0,764
14/70		12,5	590	378	352	287	2,6	26,6	2,12	21,7	10,1	0,734	0,768
15/70	F254	14,5	567	357	323	265	2,77	29,4	2,27	24,0	10,1	0,665	0,773
16/70		12,5	599	392	350	300	2,6	32,0	2,23	26,2	11,9	0,744	0,777
17/70		14,4	588	384	347	264	2,96	35,0	2,50	28,7	12,4	0,714	0,783
1/71		18,9	626	430	363	312	4,07	39,0	3,49	32,2	13,5	0,707	0,79
2/71		20,9	562	362	312	287	3,87	42,9	3,56	35,7	13,6	0,644	0,796
3/71		17,3	566	369	333	303	3,41	46,3	3,11	38,9	16,2	0,722	0,802
4/71		22,1	598	407	330	303	4,33	50,6	3,98	42,9	17,4	0,712	0,809
5/71		18,95	616	432	346	302	3,89	54,5	3,39	46,3	21,3	0,828	0,815
6/71		21,0	611	430	346	301	4,24	58,8	3,69	50,0	24,3	0,888	0,823
7/71		12,0	567	382	336	293	2,34	61,1	2,04	52,0	23,7	0,826	0,827
8/71		16,4	592	413	352	307	3,36	64,5	2,93	54,9	25,9	0,860	0,832
9/71		17,0	592	413	348	319	3,44	67,9	3,07	58,0	27,3	0,863	0,837
10/71		16,2	588	411	327	303	3,09	71,0	2,85	60,8	28,0	0,847	0,843
11/71		21,4	608	440	338	288	3,99	75,0	3,60	64,4	29,2	0,863	0,85
1/72		21,5	608	443	350	312	4,38	79,4	3,89	68,3	31,7	0,860	0,856
2/72		16,1	638	484	434	365	4,08	83,5	3,42	71,7	33,3	0,863	0,862
3/72		19,9	622	469	441	324	5,03	88,5	3,76	75,5	34,0	0,838	0,871
4/72	F106	21,8	571	409	342	253	4,35	92,8	3,22	78,7	34,6	0,819	0,878
5/72		23,5	628	484	473	423	6,47	99,3	5,33	84,1	40,5	0,907	0,887
6/72		23,1	607	462	428	360	5,77	105,1	4,84	88,9	38,7	0,817	0,897
7/72		2,7	598	452	449	361	0,71	105,8	0,57	89,5	38,9	0,877	0,897

Tabelle 12 Bestrahlungsablauf für den Brennstab Mol 8 B 2

(korrigierte Werte)

Zyklus	Kanal	Zeit d über 80 % Reaktor- Leistung	Temp. °C Maxim. an Außen- hülle	Stableistung W / cm			Abbrand MWd/kg Me				Spaltgasdruck kp/cm ² Zyklus Ende	Gesamt Freisetz- rate	f Korrekt. für Leist. u. Abbrand
				abs.Max. im Zyklus	Hot Spot zeitl. Mittel im Zyklus	Mittel über Zyklus und Stab- länge	Hot Spot zeitl.Mittel im Zyklus	Hot Spot Gesamt über Zeit	Mittel über Zyklus und Stab- länge	Gesamt über Zeit und Stablänge			
3/70	H323	12,4	545	307	282	262	2,08	2,1	1,70	1,7	3,3	-	0,705
4	F194	11,1	574	333	306	256	2,02	4,1	1,69	3,4	3,8	0,35	0,708
6	F254	12,6	612	373	345	289	2,58	6,7	2,17	5,6	5,1	0,66	0,714
7	F254	14,2	614	379	334	288	2,80	9,5	2,42	8,0	5,7	0,62	0,719
8	F106	15,7	590	356	322	279	2,63	12,1	2,27	10,3	5,8	0,63	0,724
9		13,9	611	381	334	295	2,75	14,8	2,42	12,7	-	-	0,729
10		15,6	598	370	335	279	3,10	17,9	2,59	15,3	-	-	0,735
11		14,4	563	336	319	270	2,73	20,7	2,31	17,6	-	-	0,739
12		10,1	619	397	383	319	2,28	22,8	1,90	19,5	-	-	0,744
13		15,9	605	385	365	302	3,44	26,3	2,84	22,0	9,8	0,61	0,75
14		12,5	586	367	355	296	2,62	28,9	2,19	24,1	10,6	0,63	0,755
15		14,5	598	383	347	282	3,01	31,8	2,42	26,7	11,4	0,61	0,76
16		12,5	602	390	357	296	2,65	34,4	2,20	28,8	12,4	0,63	0,765
17		14,4	590	379	349	285	2,98	37,4	2,44	31,2	13,0	0,62	0,77
1/71		18,9	574	365	336	286	3,76	41,2	3,2	34,4	14,0	0,62	0,775
2		20,9	606	402	363	332	4,5	45,7	4,12	38,5	-	-	0,783
3		17,3	608	409	393	341	4,04	49,7	3,5	42,0	-	-	0,79
4		22,1	567	368	350	302	4,59	54,3	3,96	46,0	-	-	0,798
5		19,0	634	448	390	316	4,40	58,7	3,55	49,5	-	-	0,805
6		21,0	544	349	338	285	4,14	62,8	3,49	53,0	-	-	0,811
7		12,0	606	422	-	333	3,02	65,7	2,32	55,3	-	-	0,817
8		16,4	615	435	431	328	4,12	69,3	3,14	58,5	-	-	0,823
9		17,0	543	354	348	306	3,44	72,7	3,03	61,5	-	-	0,827
10		16,2	608	433	427	373	4,02	76,7	3,52	65,0	-	-	0,835
11		21,4	620	451	429	357	5,33	82,0	4,45	69,5	-	-	0,844
1/72	F106	21,5	618	453	405	357	5,08	87,1	4,46	74,0	-	-	0,851

Ferner sind angegeben:

- der Abbrand an der Heiß-Stelle während des Zyklus
- die Summe der Zyklusabbrände an der Heiß-Stelle
- der mittlere Abbrand über Zyklusdauer und Stablänge
- die Summe der mittleren Abbrände über Zyklusdauer und Stablänge

In der vorletzten Spalte ist die Freisetzungsrates für das Spaltgas am Ende des jeweiligen Zyklus, bezogen auf die Summe der Zyklusabbrände über der Stablänge gemittelt, angegeben.

Die letzte Spalte gibt den Korrekturfaktor wieder, mit dem die in den Zyklusberichten und Diagrammen genannten Werte für Leistung und Abbrand korrigiert werden müssen (siehe hierzu Kapitel 8.1 Rechenmethode).

Abb. 7 gibt die Verteilung der maximalen Temperaturen über der aktiven Länge, über alle Zyklen gemittelt, wieder.

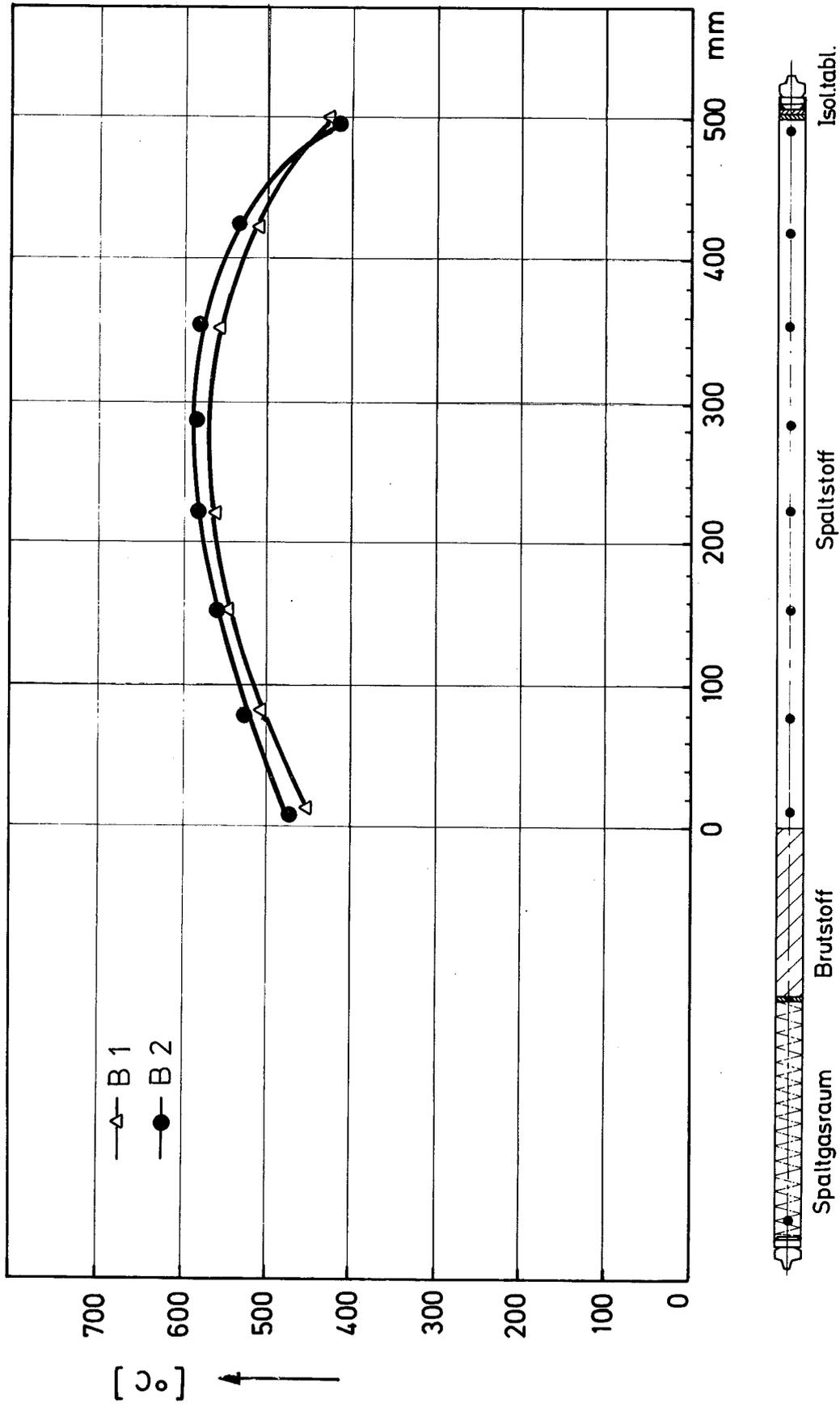
8. Berechnung der Stabileistung, des Abbrandes und der Spaltgasfreisetzungsrates

Bei diesem Bestrahlungsexperiment blieben bis zum Bestrahlungsende genügend Thermoelemente funktionsfähig, so daß eine experimentelle Bestimmung der Stabileistung aus den Hüllwandaußentemperaturen möglich war. Fluß- bzw. Dosismessungen innerhalb des Cd-Schirmes waren nicht vorgesehen.

8.1 Rechenmethode

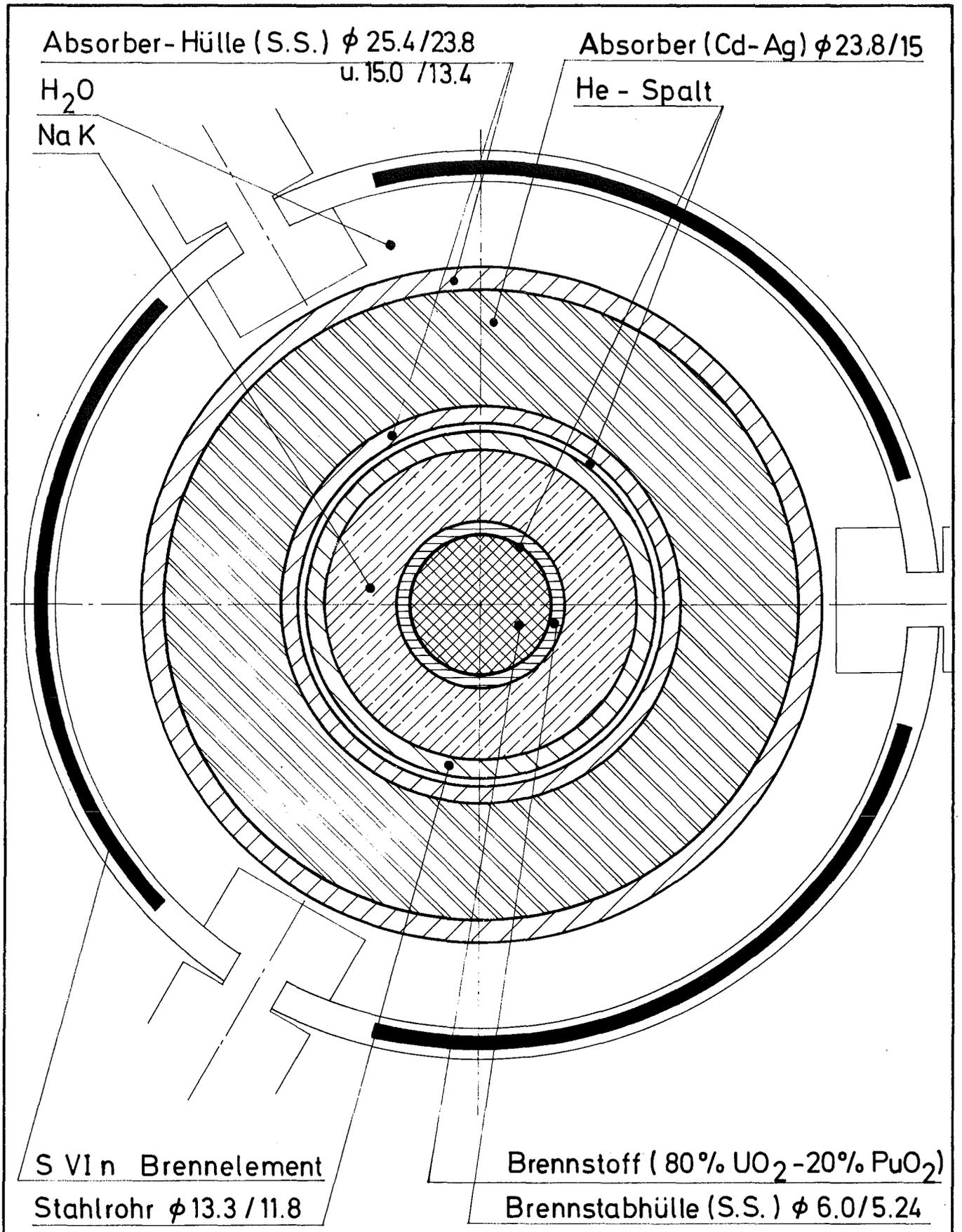
Der grundsätzliche Aufbau der FAFNIR-Kapsel wurde bereits in Kapitel 6 beschrieben. Der Querschnitt durch Brennelement und Bestrahlungskapsel (Abb. 8) zeigt die für den Wärmetransport wesentlichen Schichtungen, Materialien und Dimensionen.

Die aus dem Brennstab zum Kühlwasser des Reaktorprimärkreislaufs strömende Wärme wird mit Hilfe von Temperaturmessung an der Außenhülle des Brennstabes über eine Wärmedurchgangsrechnung /7/ bestimmt. Das Rechenprogramm berücksichtigt unter anderem die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitung der Komponenten, die Änderung der Gasspaltdimensionen durch



Mol-8B Stab.-Nr. 1 + 2
Mittelwerte der max. Hülloberflächentemperaturen

Abb. 7



Querschnitt v. Brennelement
u. Bestrahlungskapsel

Abb. 8

die unterschiedliche Wärmedehnung der begrenzenden Rohre sowie die Wärmestrahlung. Im NaK-Spalt wurde mit natürlicher Konvektion des Flüssigmetalls gerechnet.

Die Wärmeerzeugung in den Strukturmaterialien durch Absorption von Gammastrahlung aus dem Core und dem Cd-Schirm, die durch (n,γ) -Reaktionen entstanden sind, und die Temperatur des Primärkreislaufwassers wurden bei der Auswertung berücksichtigt. Diese Rechnung ergab die Spaltleistung des Brennstabes in Abhängigkeit von den gemessenen Temperaturen für verschiedene Gasspaltbreiten.

Für die praktische Auswertung /8, 9/ wurde mit einem kalten Gasspalt von 0,063 mm gerechnet. Mit diesem Wert wurden alle Stableistungen und Abbrandwerte in den Zyklusberichten bestimmt. Eine Korrektur war deshalb am Ende der Bestrahlung notwendig, um die Leistungs- und Abbrandwerte an die Fertigungsspalte anzupassen. Gleichzeitig wurden zwei weitere Korrekturen berücksichtigt, die sich aus der Gesamterfahrung der FAFNIR-Experimente, insbesondere aber aus der Gasspaltkalibrierung bei den MOL 8C-Experimenten ergaben. Dabei war festgestellt worden, daß sich die Gasspalte im Laufe der Bestrahlung zusetzen und damit einen besseren Wärmeübergang schaffen. Weiterhin ergab sich, daß der Einfluß der natürlichen Konvektion im NaK-Spalt überschätzt worden war. Bezogen auf die gleiche Hüllwandaußentemperatur führte der Einfluß der geänderten Spaltgeometrie zu einer um etwa 15 % kleineren Stableistung. Der Einfluß der geringeren Konvektion im NaK-Spalt geht in die gleiche Richtung und ist von gleicher Größe wie die geometrische Korrektur. Die Verringerung des Wärmewiderstandes durch Zusetzen des Gasspaltess hingegen führt zu einer größeren Stableistung. Sie wurde als linear mit dem Abbrand ansteigend angesetzt, wobei beim Endabbrand bei 8B-1 etwa 25 % erreicht werden. Die in Tabelle 11 und 12 aufgeführten Werte sind mit den drei Faktoren korrigierte Werte. Die in diesen Tabellen aufgeführte Freisetzungssrate des Spaltgases wurde aus der Differenz der Spaltgasdrücke am Anfang und Ende eines jeden Zyklus bezogen auf den Gesamtabbrand und die ursprünglich vorhandene Spaltstoffmenge berechnet /8/.

8.2 Maximale und mittlere Temperaturen, Stableistungen und Abbrände sowie die schnelle Dosis

Aus den Bestrahlungsdaten, die in den Zyklusberichten aufgeführt sind, sowie den Tabellen 11 und 12 ergeben sich folgende Werte: (Tab.13)

Tabelle 13 Gesamtwerte für 8B-1 und 8B-2

	8 B-1	8 B-2	
Gesamtversuchszeit	881	728	Tage
Anzahl der Bestrahlungstage über 80 % Reaktorleistung	506	412	Tage
Maximale Temperatur während der Bestrahlungszeit	638	620	°C
Maximale Leistung während der Bestrahlungszeit	484	453	W/cm
Hot Spot, mittlere Temperatur	549	597	°C
Hot Spot, mittl.lineare Leistung	354	387	W/cm
Hot Spot, Abbrand	106	87	MWd/kgMe
Hot Spot, Abbrand (in Atom %)	11	9,1	%
Mittlere Temperatur über Gesamtlänge und Zeit	496	518	°C
Mittlere lineare Leistung über Gesamtlänge und Zeit	299	308	W/cm
Abbrand über Gesamtlänge und Zeit	89,5	74	MWd/kgMe
Abbrand (in Atom-%) über Gesamtlänge und Zeit	9,3	7,8	%
Schnelle Dosis	$1 \cdot 10^{22}$	$0,83 \cdot 10^{22}$	n/cm ²

Die angegebenen Temperaturen beziehen sich auf die Hüllaußenwand

Die Umrechnung der Thermoelementmeßwerte erfolgte mit Hilfe des in /9/ dargestellten Diagramms auf graphischem Weg.

Die Heiß-Stelle für Experiment 8B-1 lag auf Stabhöhe-90 mm und für 8B-2 auf Stabhöhe-30 mm bzw. in der Nähe dieser Schnittebenen. Niedrigflußmessungen in den Nachbarkanälen von F 254 und F 106, in denen hauptsächlich bestrahlt wurde, ergaben Werte von - 50 mm bzw. - 35 mm und bestätigen die Tendenz.

8.3 Spaltgasdruckaufbau und Freisetzungsrates

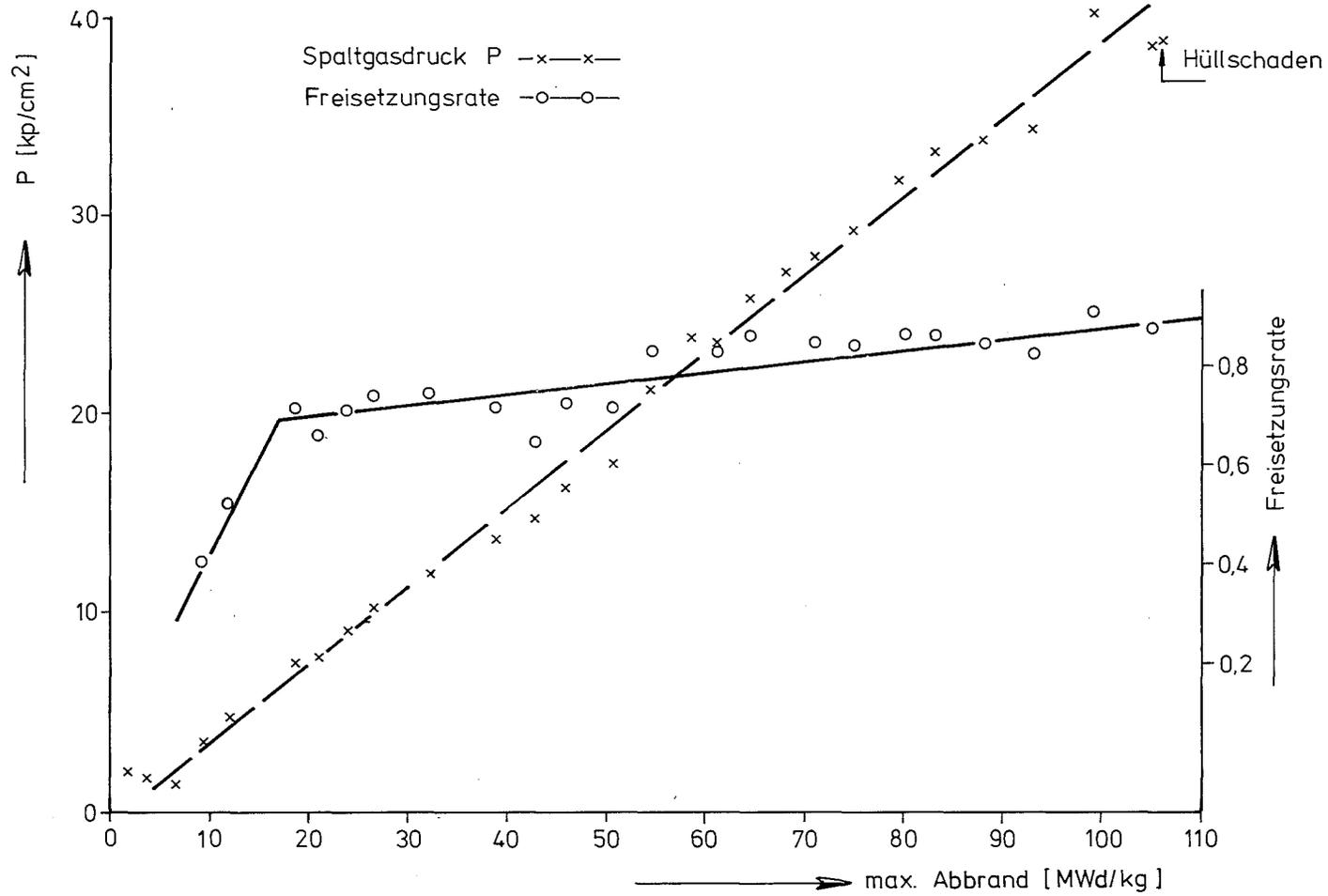
Die beiden Einsätze 8B-1 und 8B-2 zeigen ein unterschiedliches Verhalten bezüglich des Spaltgasdruckaufbaus und der Freisetzungsrates.

Spaltgasdruckaufbau	0,37	0,31	$\frac{\text{kp/cm}^2}{\text{MWd/kgMe}}$
Druckaufbau bei Bestrahlungsende	39	27,2	kg/cm^2
Freisetzungsrates bei Bestrahlungsende	0,85	(0,6)	-
Gesamtdruck im Brennstab (Vordruck + Spaltgasdruck)	43	31,2	kp/cm^2

Die Druckangaben beziehen sich auf die Betriebstemperatur des Stabes, der Kapillare und des Druckaufnehmers. Die Freisetzungsrates wurde gemäß /9/ bestimmt.

Wie aus den Abbildungen 9 und 11 ersichtlich, zeigt 8B-1 zu Beginn der Bestrahlung einen deutlichen Druckabfall und erst nach dem dritten Zyklus einen Anstieg. Der Druck in 8B-2 dagegen steigt von Beginn an, jedoch ist insgesamt die Spaltgasfreisetzung geringer als bei 8B-1 (siehe Abb. 10 und 12)

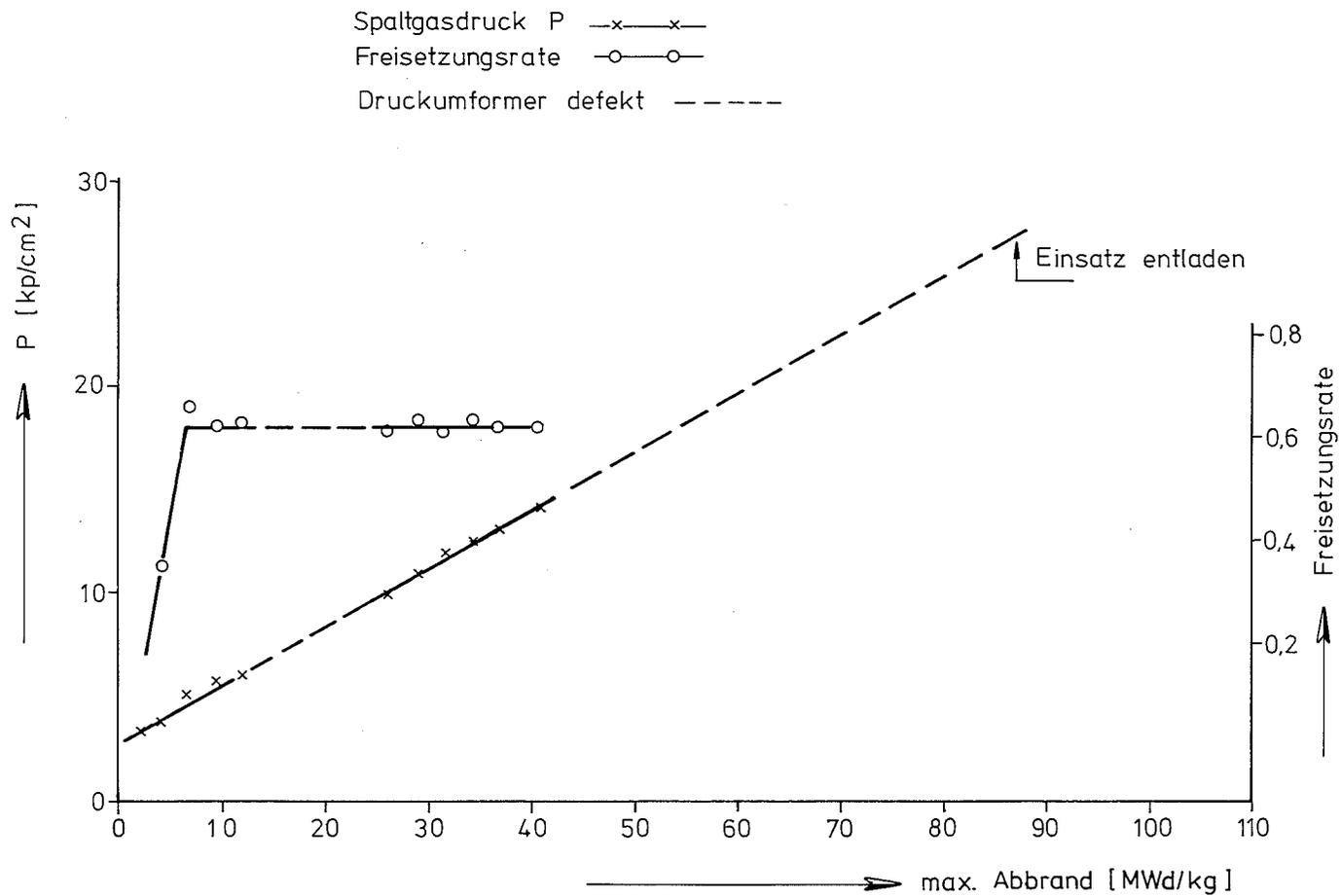
Aus der Stab- bzw. Kapselgeometrie bzw. den Bestrahlungsbedingungen erscheint der Unterschied zwischen den beiden Stäben nicht erklärbar. Ähnliche Unterschiede wurden jedoch auch bei Experimenten der Reihe Mol 8C festgestellt.



Mol 8B Stab Nr. 1

Spaltgasdruckaufbau

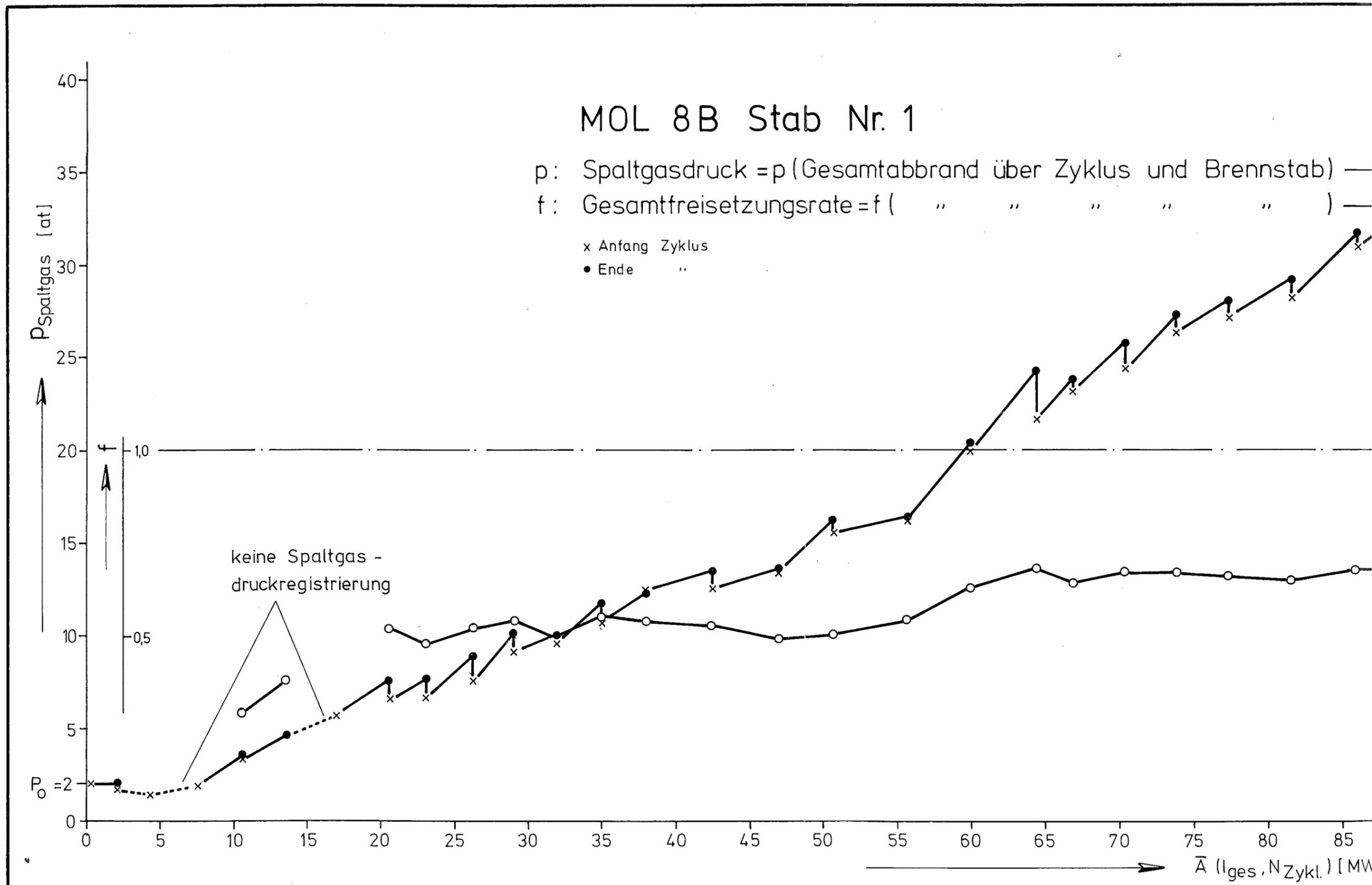
Abb. 9



Mol 8B Stab Nr. 2

Spaltgasdruckaufbau

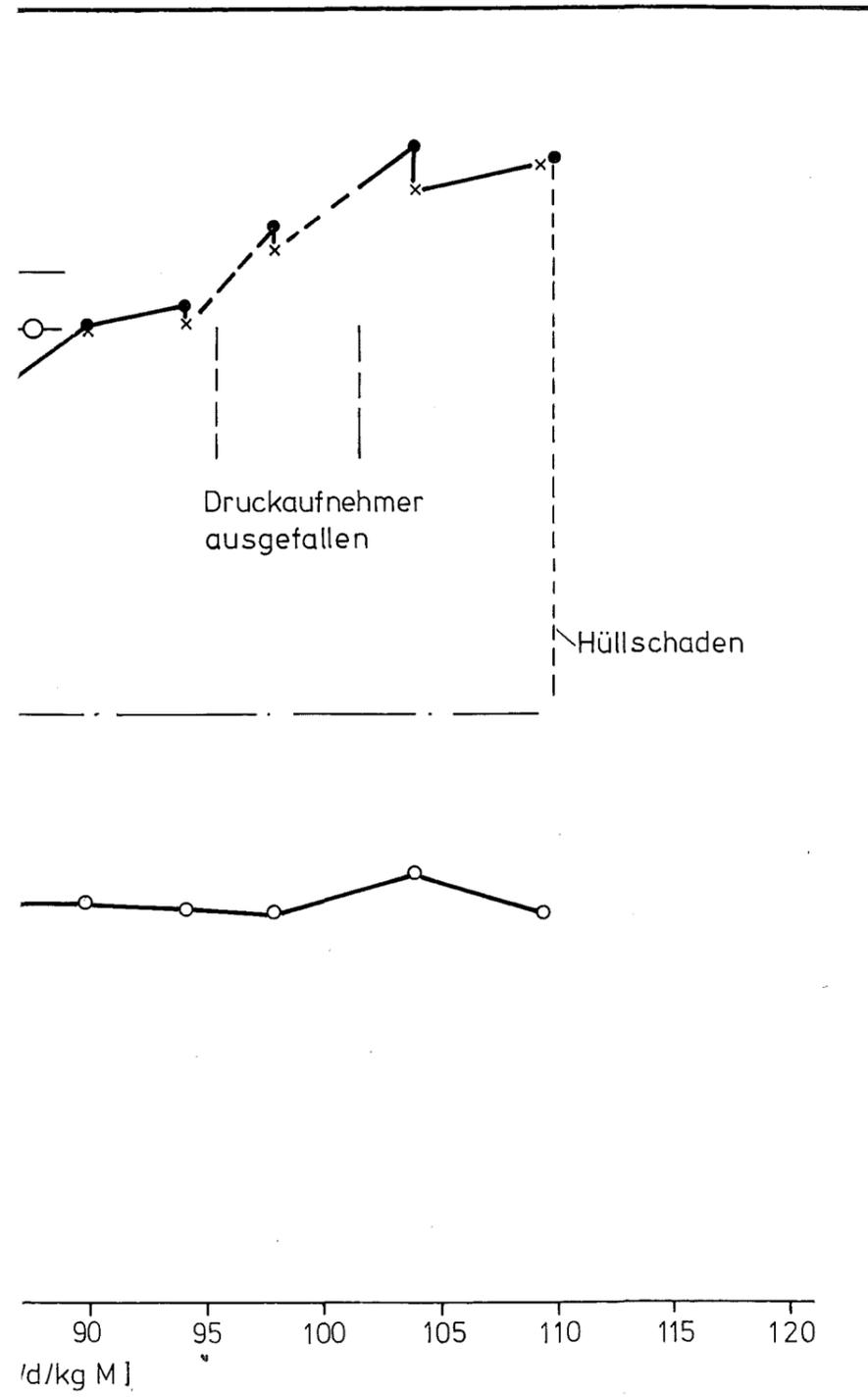
Abb. 10



GfK Karlsruhe

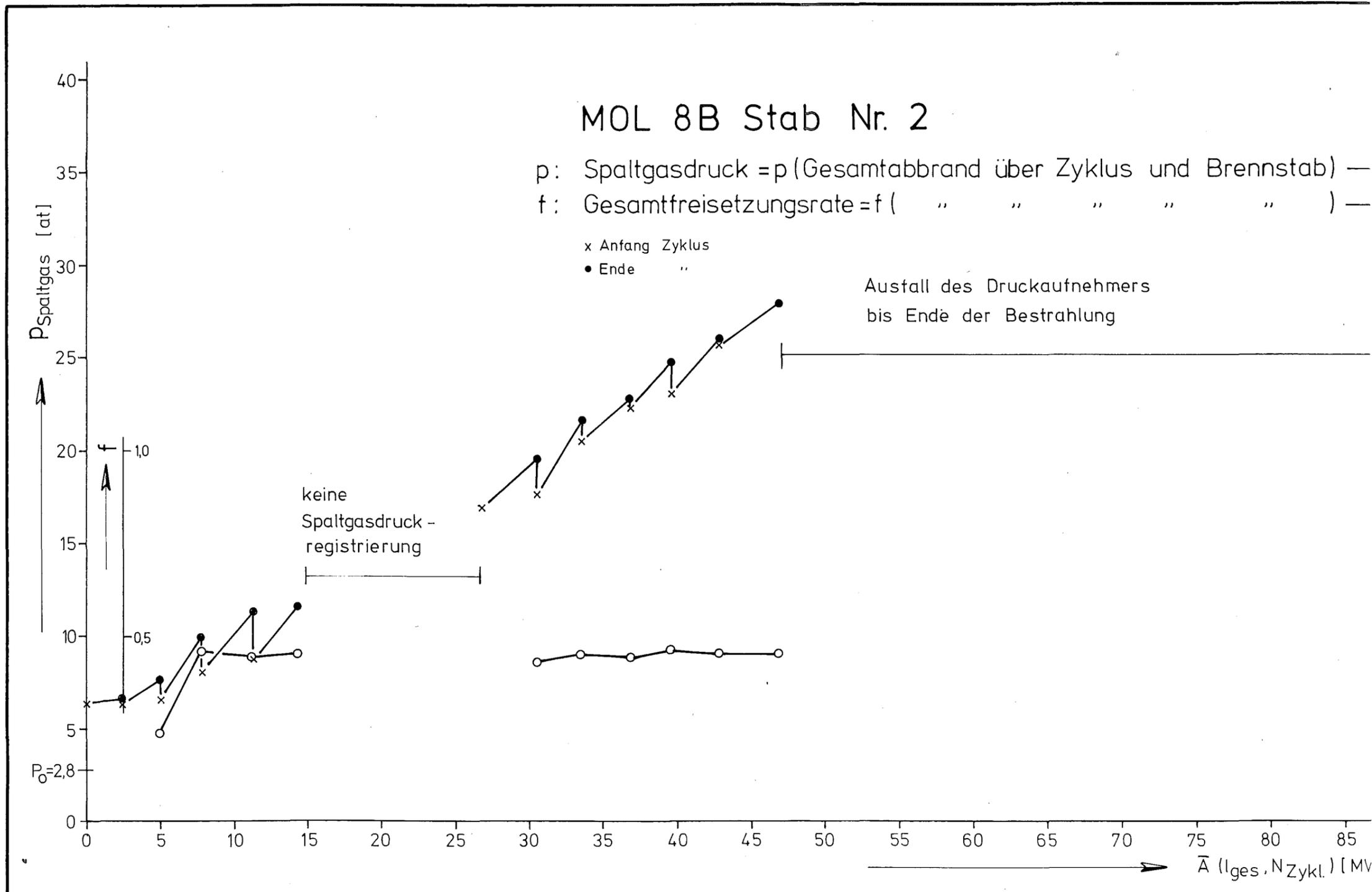
IMF/III

MOL 8B: Spaltgasdruckaufbau und -freisetzungsrate als Funkt



ion des Abbrandes

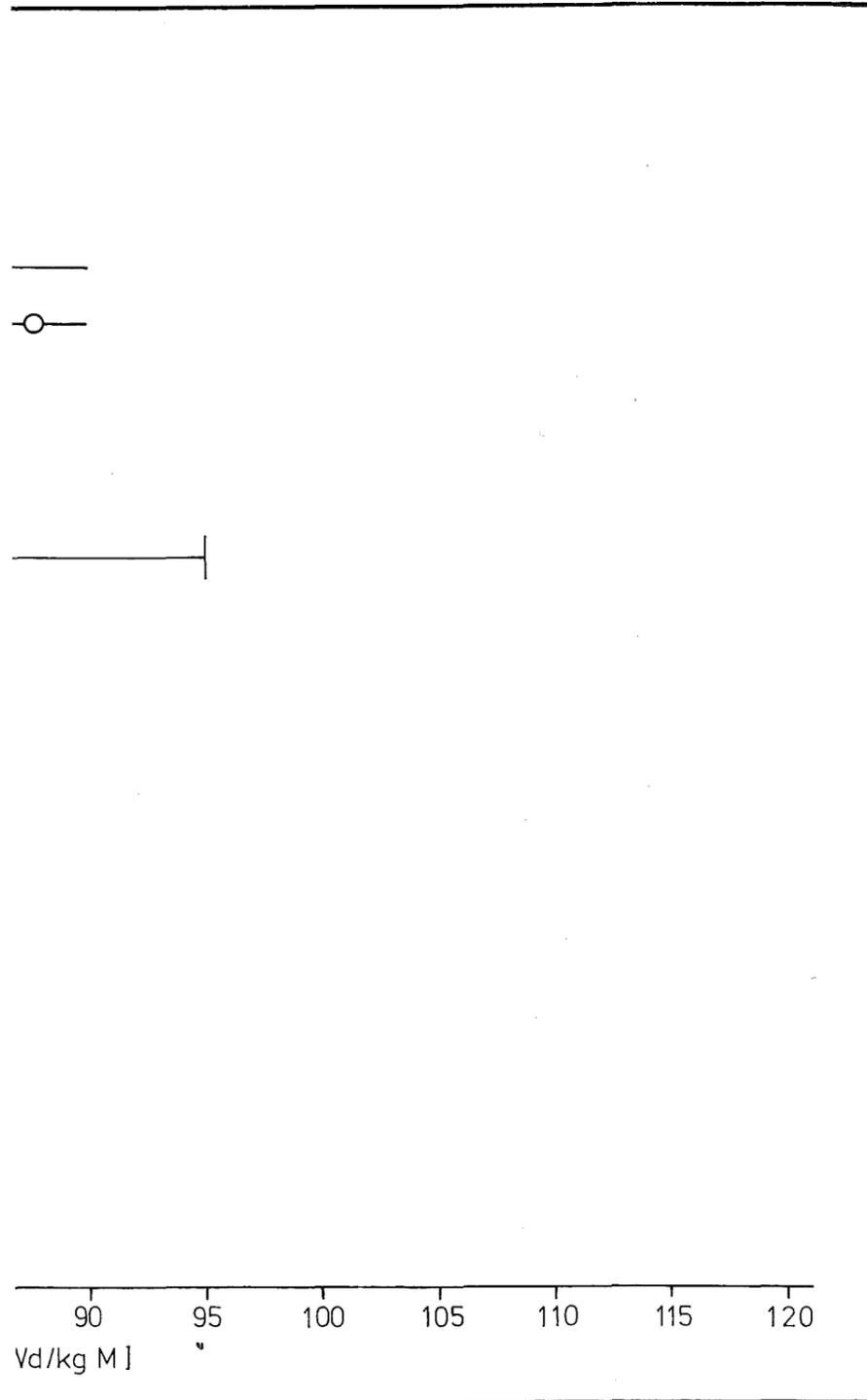
Abb. 11



GfK Karlsruhe

IMF/III

MOL 8B: Spaltgasdruckaufbau und -freisetzungsrate als Funkt



tion des Abbrandes

Abb. 12

8.3.1 Nachrechnung der Spaltgasdrucke

Da die Spaltgasanalyse in Karlsruhe (s. 10.3) nur die gebundenen Spaltgase erfassen konnte, wurde die Gesamtgasmenge errechnet.

Ausgehend von 0,30 langlebigen Gasatomen/Spaltung errechnen sich die Gasmengen wie folgt:

$$8 \text{ B-1 : } V_{\text{Gas ges.}} = 266 \text{ cm}^3$$

$$8 \text{ B-2 : } V_{\text{Gas ges.}} = 218 \text{ cm}^3$$

Das freie Volumen, das für das Spaltgas zur Verfügung steht, setzt sich aus folgenden Anteilen zusammen:

$$V = V_{\text{Plenum}} + V_{\text{Gasspalt}} + V_{\text{Kapillare}} + V_{\text{Druckaufnehmer}}$$

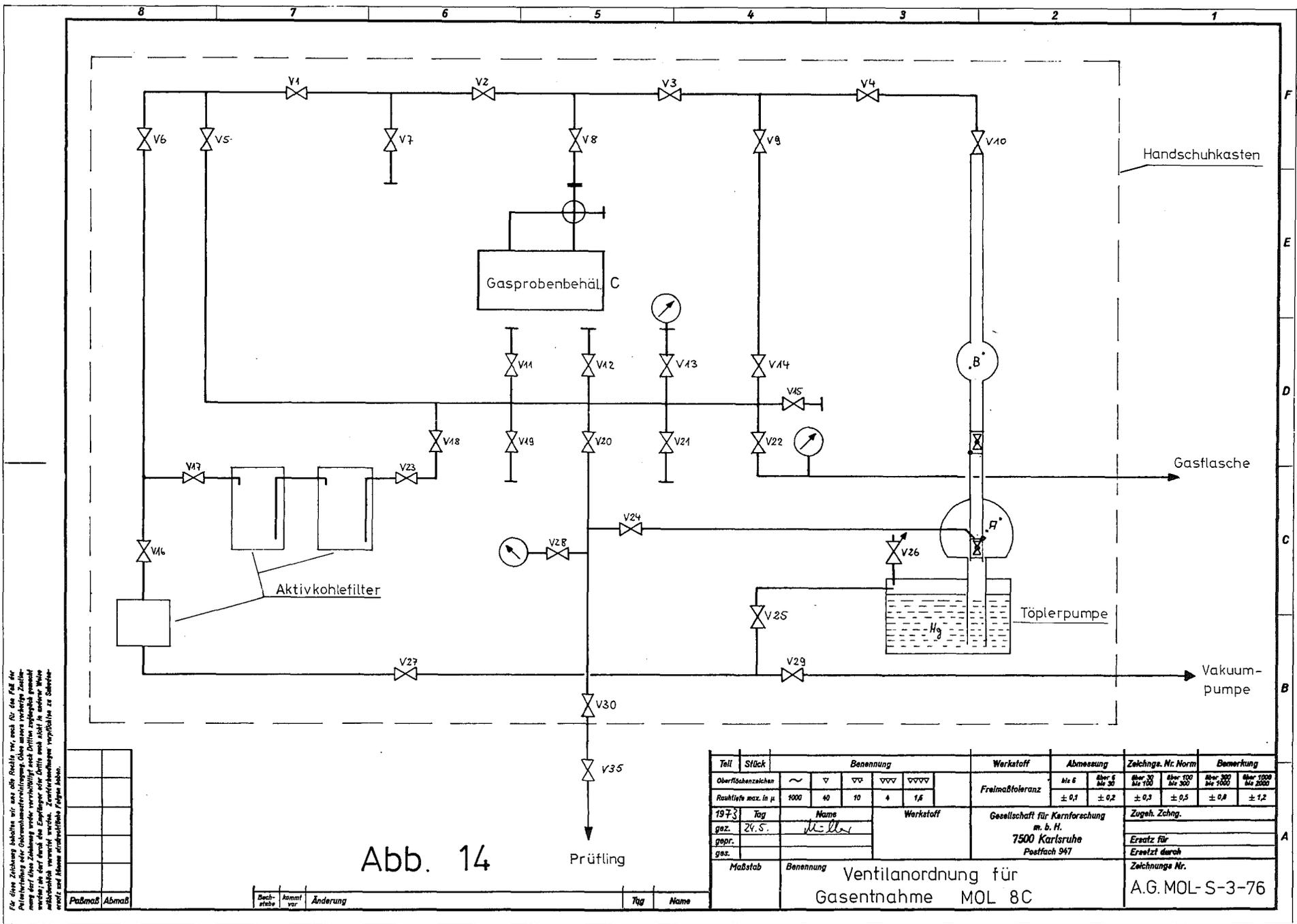
Für die Rechnung wurde eine Angabe aus Mol /11/ ($V = 7 - 9 \text{ cm}^3$) benutzt. Für einen Mittelwert von 8 cm^3 ergibt sich ein Spaltgasdruck für 8 B-1 von 33,5 at und für 8 B-2 von 27,4 at. Diese Werte zeigen gute Übereinstimmung mit den Angaben aus Abb. 9 und 10. Ein Ausgasen des Brennstoffs während der Bestrahlung wurde bei dieser Betrachtung nicht berücksichtigt. Abb. 13 zeigt schematisch die Gasentnahmeverrichtung und Abb. 14 die Ventil-anordnung zur Gasentnahme.

9. Zerstörungsfreie Nachuntersuchung

Nach dem Transport der Prüflinge in der FAFNIR-Kapsel nach Karlsruhe, wurden diese in den dortigen Heißen Zellen ausgebaut.

9.1 Visuelle Kontrolle der Prüflinge

In Abb. 15 werden die beiden Prüflinge nach dem Ausbau und dem Reinigen gezeigt. Bei Prüfling 8 B-1 sind die durchgeschmolzenen Stellen jeweils unterhalb eines Abstandshalters zu erkennen.



Für diese Zeichnung sind die nachfolgenden Angaben zu berücksichtigen:
 1. Die Zeichnung ist eine schematische Darstellung der Anlage.
 2. Die Abmessungen sind in mm angegeben.
 3. Die Ausführung ist nach den Angaben in der Zeichnung zu verstehen.
 4. Die Ausführung ist nach den Angaben in der Zeichnung zu verstehen.
 5. Die Ausführung ist nach den Angaben in der Zeichnung zu verstehen.

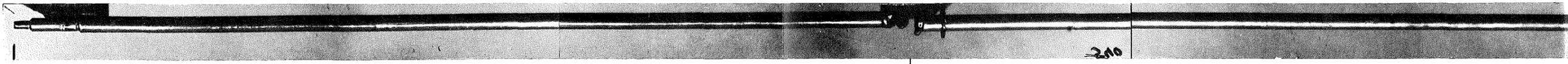
Paßmaß	Abmaß

Beschreibung	Abm. vor	Änderung	Täg	Name

Abb. 14

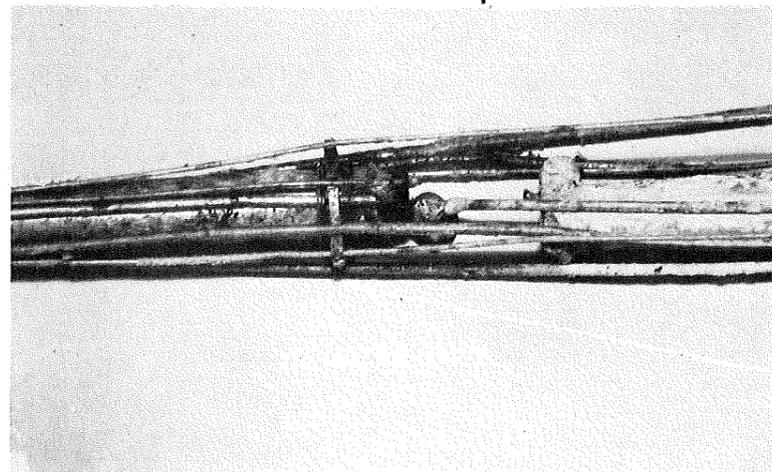
Prüfling

Teil	Stück	Benennung	Werkstoff	Abmessung	Zeichn. Nr. Norm	Bemerkung
Oberflächenzacken	~	▽	▽▽	▽▽▽	▽▽▽▽	
Rauhiefe max. in µ	1000	40	10	4	1,6	
1973	Täg	Name	Werkstoff	Gesellschaft für Kernforschung m. b. H. 7500 Karlsruhe Postfach 947		Zugeh. Zeichn.
gez.	24.5.	<i>M. Müller</i>				Ersatz für
gepr.						Ersatz durch
gs.						Zeichnungs Nr.
Maßstab	Benennung	Ventilanordnung für Gasentnahme MOL 8C			A.G. MOL-S-3-76	



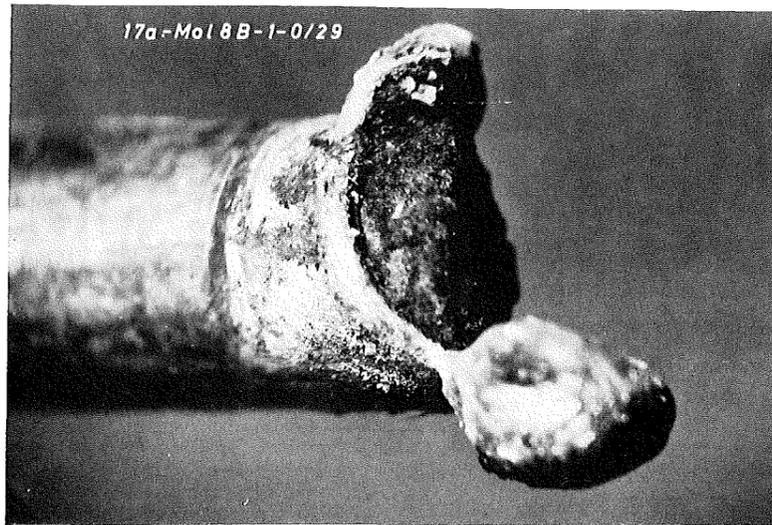
oben

Stab 8B-1



TE

Abstandshalter



17a-Mol 8B-1-0/29



oben

Stab 8B-2

A

A = Abstandshalter

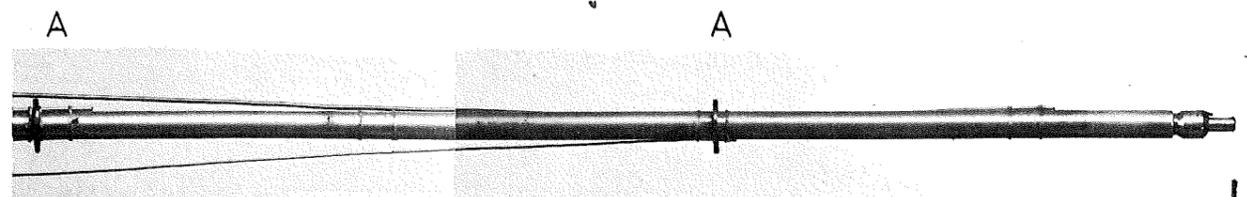
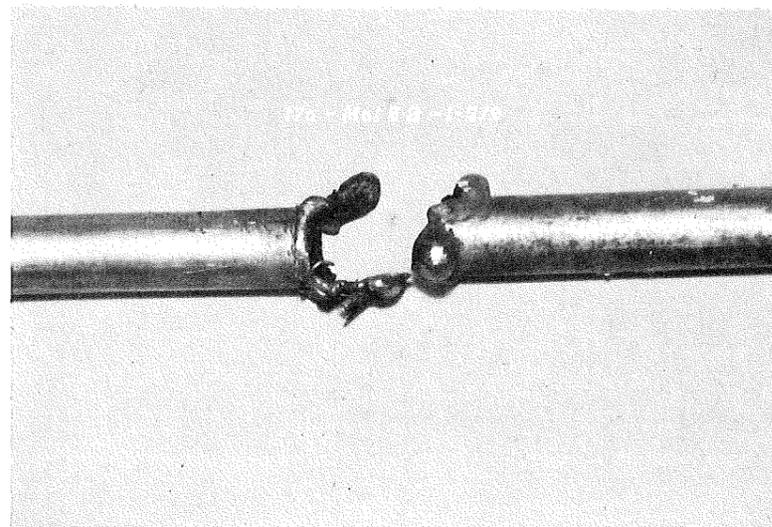
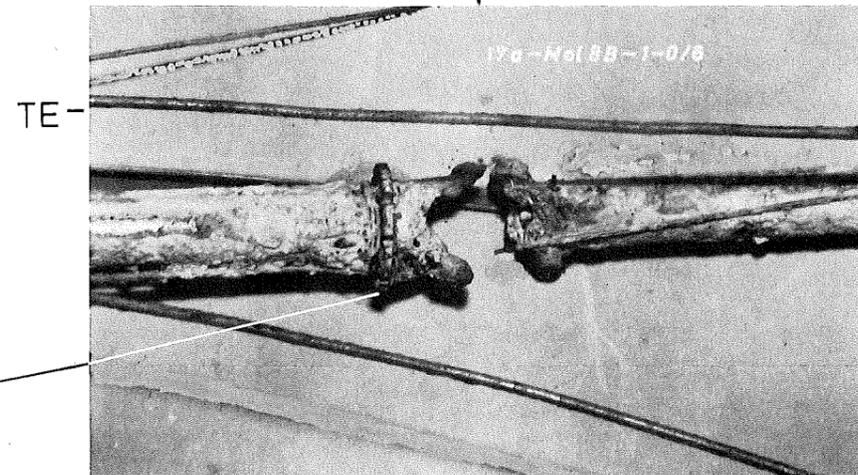
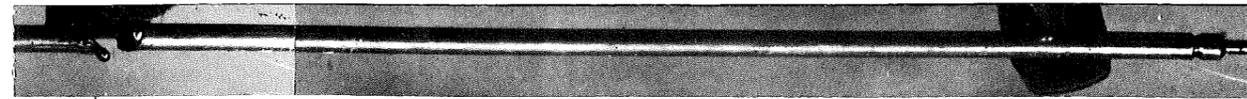


Abb. 15 : Prüflinge nach der Reinigung

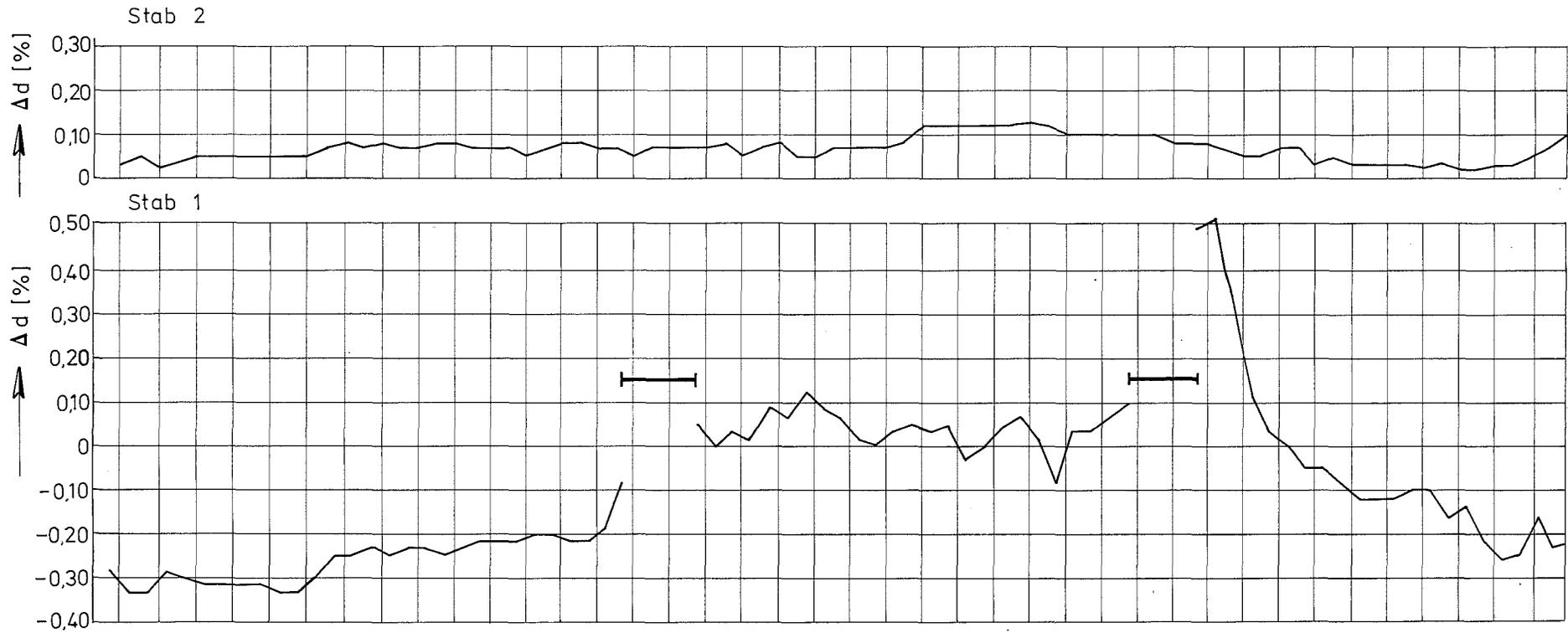
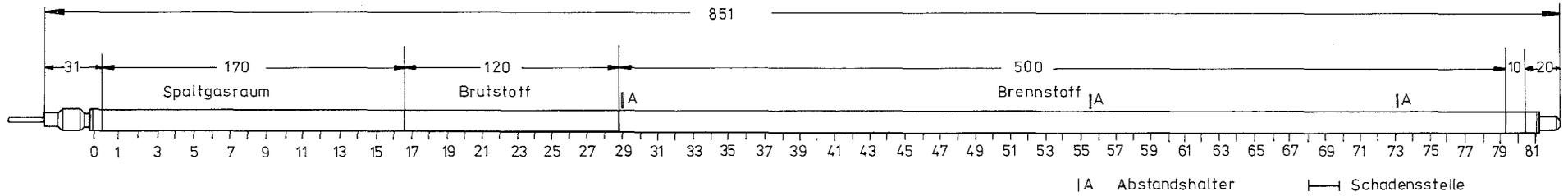
Der intakte Prüfling 8 B-2 ist mit den außen befestigten Thermoelementen dargestellt. Am oberen Ende der Prüflinge ist das nachträglich im CEN Mol angebrachte Anschlußstück für Spaltgasdruckmessung zu sehen. In 4 weiteren Bildern sind Details von Prüfling 8 B-1 zu erkennen. Sie zeigen beide durchgeschmolzenen Stellen und zwar je eine mit TE-Bündel und NaK-Verunreinigung und 2 Aufnahmen dieselbe Stelle ohne TE. Gut zu erkennen ist ein großer Schmelztropfen des Hüllmaterials. Äußerlich waren die Prüflinge nach einer Standzeit von 506 bzw. 412 Bestrahlungstagen metallisch blank, an einigen Stellen mausegrau. Eine Außenkorrosion war nicht zu erkennen.

9.2 Äußere Vermessung

In der Abb. 16 sind die Durchmesseränderungen für beide Stäbe über der Stablänge wiedergegeben. Für Stab B-1 beträgt diese für die Brennstoffsäule $+ 7 \mu\text{m} = +0,10\%$ für das Plenum $-18 \mu\text{m} = -0,3\%$, für Stab 8 B-2 liegen diese Werte bei $+ 9 \mu\text{m} + 0,12\%$ bzw. $+ 5 \mu\text{m} + 0,08\%$. Durchbiegungsmessungen wurden für Stab 8 B-2 nicht ausgeführt.

9.3 Innere Vermessung

Von dem an 2 Stellen angeschmolzenen Stab 8 B-1 wurde jeweils bei 9,0 % Abbrand und nach dem Durchschmelzen eine Neutronografie in Mol angefertigt. Man erkennt den Prüfling in der FAFNIR-Kapsel (Abb.17). Innerhalb der Spaltstoffsäule ist gut der Zentralkanal zu sehen. Die Aufnahme zeigt gleichzeitig die relative Lage der Schadensstellen zu den Abstandshaltern in der Kapsel. Der Stabschaden tritt jeweils unterhalb eines Abstandshalters auf, was zur Vermutung führte, daß durch ausgetretenes Spaltgas sich eine heiße Stelle bildete und es zum Schmelzen der Hülle kam. Der Stab 8 B-2 wurde in den Karlsruher Heißen Zellen mittels eines Betatrons durchstrahlt (s.Anhang). Infolge der Länge des Stabes mußten mehrere Aufnahmen zusammengesetzt werden, die für eine quantitative Auswertung hinsichtlich einer Säulenverlängerung jedoch nicht geeignet waren.

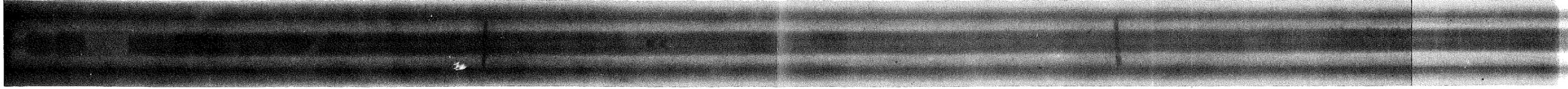


GfK Karlsruhe

IMF/III

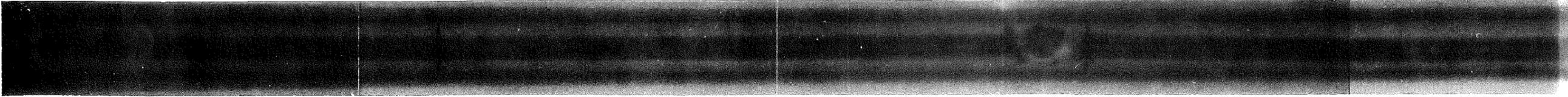
Änderungen der Stab-Außendurchmesser

Abb. 16



A

A

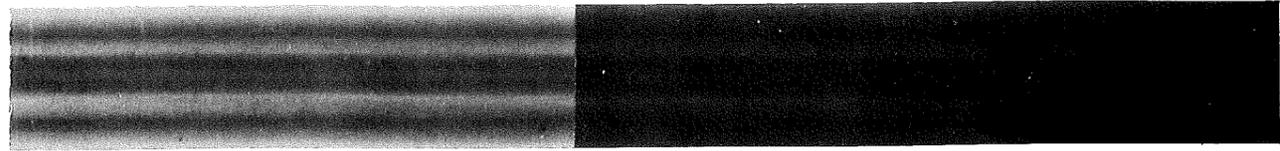


A

Schadensstelle

A

A = Abstandshalter

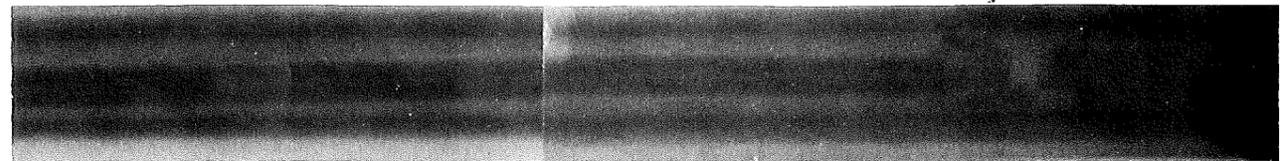


9,0 % Abbrand

A

Schadensstelle

A



10,6 % Abbrand

Abb. 17: Neutrografie von Prüfling 8 B-1

9.4 γ -Profile und γ -Spektren

Zur Ermittlung von Spaltprodukt- und Brennstoffumlagerungen und um eine Abschätzung des axialen Leistungsverlaufes zu ermöglichen, wurden die Stäbe γ -spektrometrisch untersucht. Hierbei wurden jeweils zwei Profile und zwar im Energiebereich 690 - 780 keV (Zr/Nb 95) und 400 - 1700 keV (integral) aufgenommen (Abb. 18 und 19). Als Detektor diente ein Ge-Li-Halbleiter. Die Stäbe wurden während der Messung rotierend an einem Schlitzkollimator von 0,5 mm Spaltweite vorbeigeführt. Zusätzlich wurden an auffallenden Positionen entlang der Stabachse (in den Profilen als Punkte A, B usw. bezeichnet) sowie an einem als "normal" angesehen Punkt γ -Spektren aufgenommen. Eine quantitative Auswertung der Spektren wurde für die drei Nuklide Cs-134, Cs-137 und Ru-106 vorgenommen. In der Abb. 20 sind die ermittelten Aktivitäten für die Einzelnuklide an den Stabpositionen aufgetragen.

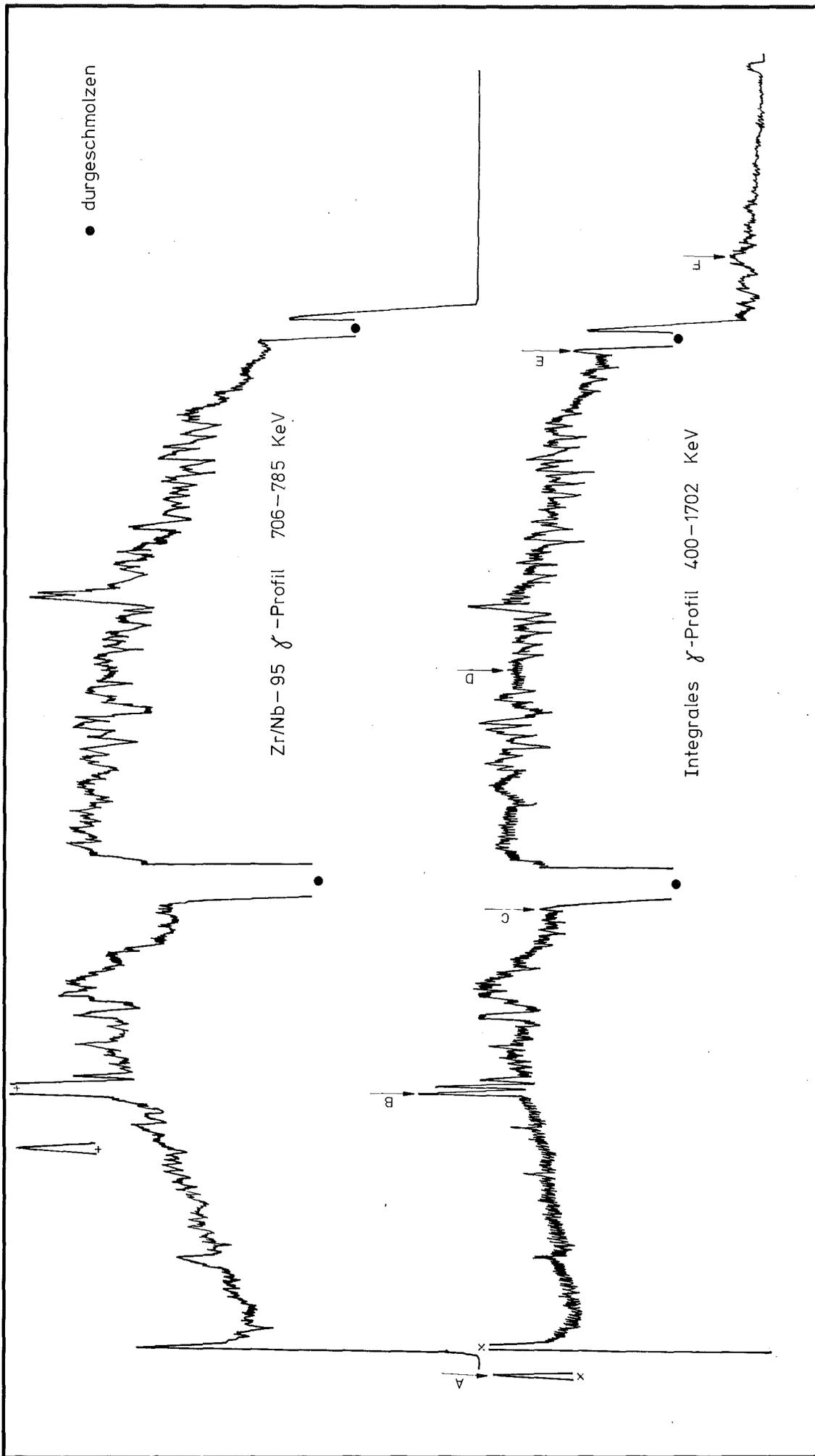
10. Zerstörende Nachuntersuchung

10.1 Keramografie

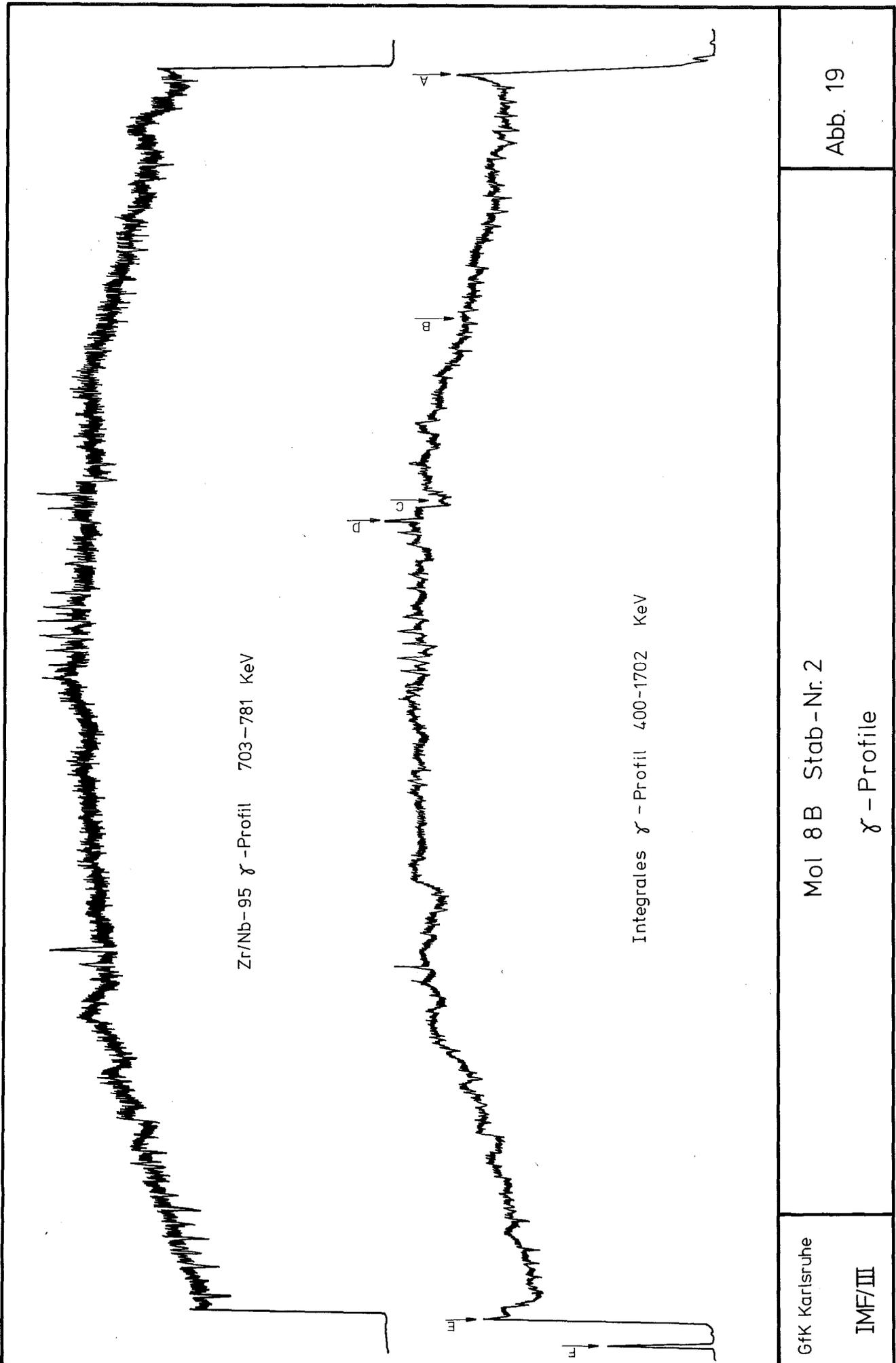
Folgende Gesichtspunkte sind bei der Auswahl der Keramografie-Schnitte berücksichtigt worden:

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

Das Ziel der Keramografie war einerseits, eine typische Verhaltensweise aufzuzeigen, andererseits Besonderheiten im Stabverhalten darzulegen.



GfK Karlsruhe IMF/III	Mol 8B Stab-Nr. 1 γ -Profil	Abb. 18
--------------------------	---------------------------------------	---------

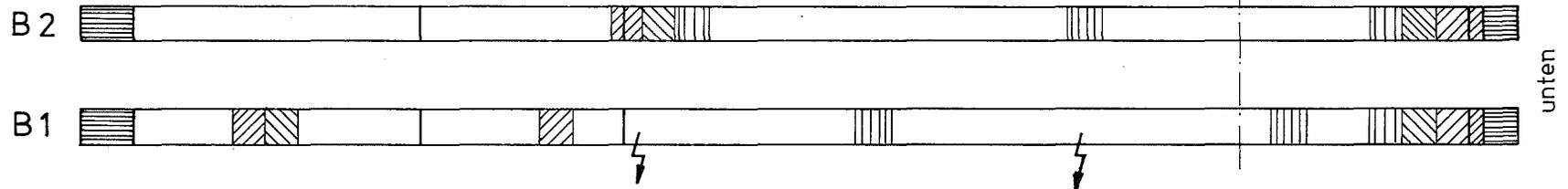
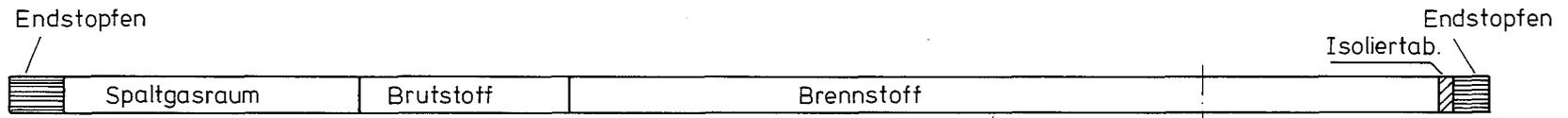


GfK Karlsruhe

Mol 8B Stab - Nr. 2

IMF/III

γ - Profile



Cs - 134 

Cs - 137 

Ru - 106 

GfK Karlsruhe

IMF/III

Mol 8 B Stab Nr. 1+2

Verteilung der Spalt - Nuklide

Abb. 20

Für das erstere Ziel wurden in jedem Stab Schnittebenen ausgesucht, die in möglichst ungestörten, regelmäßigen Bereichen, meist in Stabmitte lagen. Untypische Brennstoffstrukturen wurden besonders häufig an den Säulenenden beobachtet und untersucht.

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

A u f n a h m e t y p	Vergrößerung	Verarbeitung der Untersuchungsfläche
1. Totalaufnahme	15 x	a) poliert b) geätzt
2. α - und $\beta\gamma$ -Autoradiografie	9 x	poliert
3. Panorama-Aufnahme über den Säulenradius	100 x	a) poliert b) geätzt
4. Detailaufnahmen	100 x 200 x 500 x	a) poliert b) geätzt

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

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

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

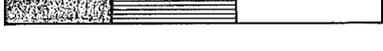
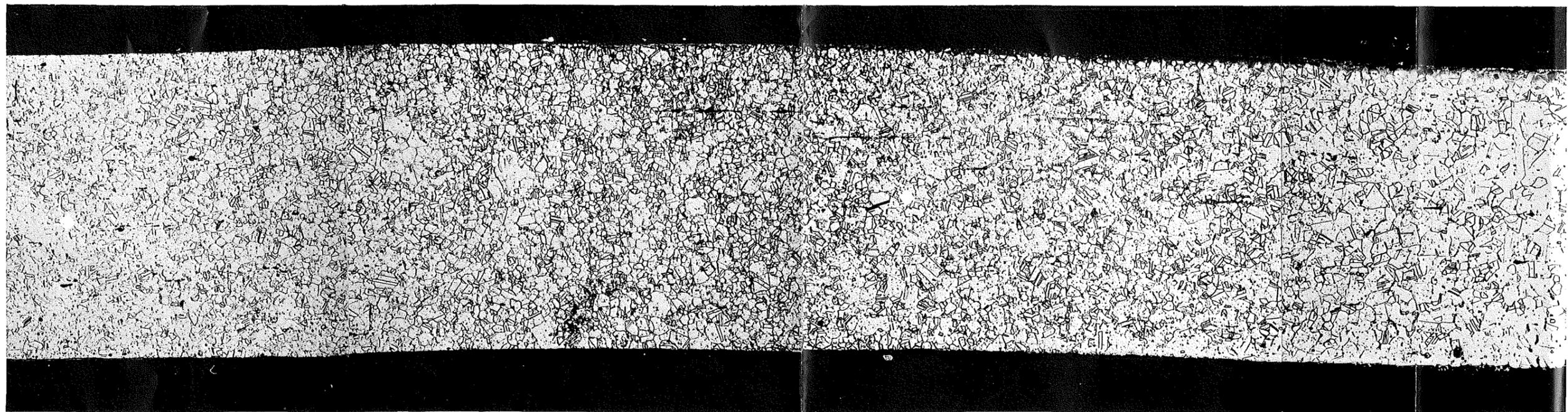
Prüfling	Probe Quer o. Längs	Zentra- karnradius r [mm]	Säulenkristall- zone groß r [mm]	Säulenkristall- zone klein r [mm]	rad. Spalt [μm]	Z.K. ■ Säulenkristallzonen ▨ Randzone □ ← Brennstoffradius →
Mol 8 B-1	L	0,78	1,7	2,45	0	
	Q	0,89	1,7	2,35	0	
	Q	0,55	1,7	2,25	0	
	L	0,80	1,7	2,20	0	
	L	0,75	1,6	—	0	
	Q	0,78	1,6	2,20	0	
Mol 8 B-2	Q	0,82	1,8	2,20	0	
	Q	0,85	1,9	2,30	0	
	Q	0,85	1,8	2,20	0	
	Q	0,76	1,9	2,40	40	

Abb. 21 : Brennstoffstruktur



350 kp/mm²

174 kp/mm²

0,1 mm

Mikrohärteprüfung : HV
Prüflast : 50 p

Prüfling 8 B - 1

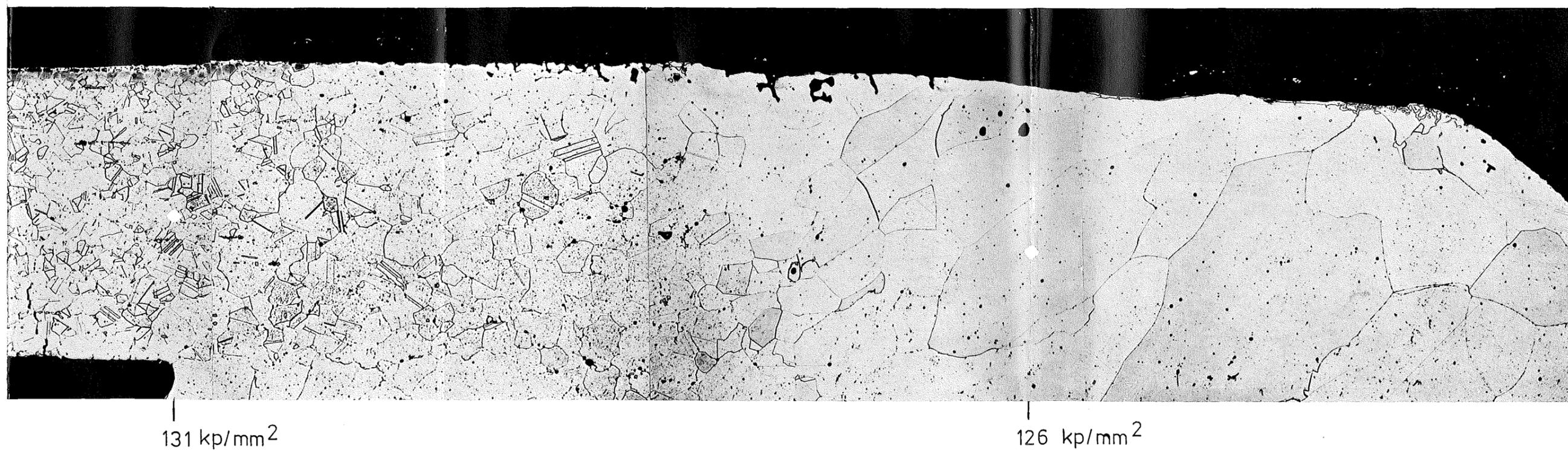


Abb. 22: Mikrogefüge des Hüllrohres an einer Schadensstelle

Der Anteil der Pu-Spaltung an der Gesamtsplaltung errechnet sich somit zu $19,99 = 20\%$. 80% der Spaltungen stammen von U-235 und U-238. Der Anteil des U-238 wurde mit weniger als $0,5\%$ der Spaltungen aus U geschätzt und kann somit vernachlässigt werden. Der Anteil des Pu-240 könnte etwas größer sein, wird aber, da auch hier keine Spaltausbeuten bekannt sind, vernachlässigt /12/.

2. epithermischer/schneller Fluß 3 : 1
3. kumulative Spaltausbeuten für Ce-144 und Nd-148 für epithermischen Fluß sind in der Literatur nicht vorhanden. Aus dem gleichen Grunde wurden für U-235 und für Pu-239-Spaltungen in der epithermischen Zone Energiewerte für Spaltspektrum angesetzt.

In Tabelle 14 wird ein Vergleich der gerechneten und radiochemisch bzw. massenspektrometrisch bestimmten Werte angestellt. Wie aus der Tabelle ersichtlich ist, wurde bei 8A nur die Ce-144 und Nd-148-Methode benutzt. Hier sollte den Nd-148-Werten der Vorzug gegeben werden. Bei 8B wurden 3 Methoden, nämlich Nd-148, Nd-gesamt und Ce-144 herangezogen. Eine Wichtung 1:1:1 wurde vorgenommen; diese Werte erscheinen in der letzten Spalte. Wie man sieht, ergibt sich eine recht gute Übereinstimmung, wenn man für 8A noch eine Unsicherheit von $\pm 3\%$ für die Nd-148-Methode in Betracht zieht.

Es wurde eine rückgewinnbare mittlere Energie pro Spaltung U-235 und Pu-239 von 201 MeV zugrundegelegt. Es ergibt sich hiermit folgende Umrechnung:

$$1 \text{ At \% Abbrand} \hat{=} 9550 \text{ MWd/t schwere Atome}$$

(Alle Atome mit $M > 231$).

Tabelle 14 Abbrandwerte für Mol 8A und Mol 8B

Stab-Nr.	Berechneter Abbrand (MWd/kgM)	Abbrand-Werte Nd-148	Abbrand-Werte Σ Nd	Abbrand-Werte Ce-144	Gewichteter Abbrand
Mol 8A-1	74,8	69,2	-	65,3	-
Mol 8A-2	60,2	54,6	-	54,3	-
Mol 8B-1	106,0	110,0	117,0	111,0	115,8 ⁺⁾
Mol 8B-2	87,0	88,3	89,9	91,6	89,6

⁺⁾ geschmolzener Stab

10.3 Bestimmung der Poren- und Gitterspaltgase

Eine Bestimmung der freien Spaltgase war nicht möglich, da die Gasplena der Stäbe mit dem Druckmeßsystem verbunden waren und die Messung der Gasanteile in Mol nicht vorgenommen werden konnte.

(Eine Spaltgasabföulleinrichtung wurde inzwischen von der GEX-Mol entwickelt und steht für die Stäbe der Serie 8C zur Verfügung).

Für beide Stäbe wurden die gebundenen Spaltgase, d.h. der in den Poren und im Gitter des Brennstoffs gelöste Anteil, in den Heißen Zellen in Karlsruhe bestimmt. Der Porenanteil wird hierbei nach Mahlen des Brennstoffs (Korngröße $< 1 \mu\text{m}$) und der Gitteranteil nach Auflösen des Mahlguts in HNO_3 gaschromatografisch bestimmt. In der nachfolgenden Tabelle sind die Gasmengen als Xenon bzw. Kryptonanteile bzw. als sogn. Poren- und Gittergase aufgeführt. Es wurde in den unteren 2 Zeilen der Tabelle der Versuch eines Vergleichs mit der Bündelbestrahlung Mol 7A unternommen. (Mol 7A hatte dieselbe Brennstoffzusammensetzung und wurde ebenfalls im BR2 bis ca. 50 MWd/kg M bestrahlt). Der Vergleich zeigt, daß sich der Porenanteil bei einer Erhöhung des Abbrandes von ca. 5 auf ca. 10 % auf 1/3 und der des Gittergases auf ca. 1/6 durch Freisetzung erniedrigt.

Tabelle 15 Gebundene Spaltgase für Mol 8B-1 und Mol 8B-2

Stab	Abbrand (%)	P o r e n g a s		$\frac{\text{Xe}}{\text{Kr}}$	G i t t e r g a s		$\frac{\text{Xe}}{\text{Kr}}$	Gesamtwerte (mm^3)	
		Kr (mm^3)	Xe (mm^3)		Kr (mm^3)	Xe (mm^3)		Poren	Gitter
B-1	~ 10,0	723,7	4 963,0	6,2	131,1	914,0	7,0	5 687	1 045
B-2	~ 9,0	789,9	1 175,3	6,6	138,6	-	-	5 965	-
Mol 7A 1-3-5- 6-7-9	~ 5,0							16 177	6 267

11. Dokumentation der zerstörungsfreien und zerstörenden Nachuntersuchung

Im folgenden Abschnitt wird eine umfassende Dokumentation der zerstörungsfreien und zerstörenden Nachuntersuchung gegeben, welche eine Auswahl der wichtigsten Ereignisse für jeden der 2 Prüflinge enthält. Die Ergebnisse sind auf einem 5-seitigen Faltblatt zusammengestellt.

Keramografische Übersicht:

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

Titelblatt:

Kurze Zusammenfassung der Material- und Bestrahlungsdaten des Brennstabprüflings.

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

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

12. Schlußfolgerungen

Die Versuchsgruppe Mol 8 B, die eine Fortsetzung des Bestrahlungsexperimentes 8 A mit Erhöhung des Abbrandes von ca. 5 auf ca. 10 % und kontinuierlicher Spaltgasmessung darstellt, erbrachte folgende Aussagen:

1. Die Stäbe bleiben auch bei einer Erhöhung des Abbrandes auf 10 % intakt. Der Schaden des Stabes 8 B-1 trat - was sich auch bei 8 C bestätigt - infolge Gasblasenagglomeration unter den Abstandshaltern bzw. an den Thermoelementen auf.
2. Der Korrosionsangriff auf die Hülle(1.4988) bleibt auf ca. 70 μm an der heißesten Stelle (638 bzw. 620^oC) beschränkt.
3. Die maximale Durchmesserergrößerung beträgt 0,12 %.
4. Die hier erstmals eingesetzte kontinuierliche Spaltgasdruckmessung arbeitete zufriedenstellend und ermöglichte so die Auslegung des Folge-Experimentes Mol 8 C.
5. Die Brennstoffdichte von 85 % th.D. erwies sich für die angestrebten Abbrände als geeignet.

13. Literatur:

- /1/ A. Gerken, G. Karsten
Spezifikation des Brennstabs für die FAFNIR-Kapsel-
Bestrahlung im BR2 (unveröffentlicht)
A. Gerken: Änderung der Bestrahlung von Mol 8 B
(unveröffentlicht)
- /2/ Th. Dippel, K. Kummerer, K.H. Triemer:
Herstellung Pu-haltiger Brennstäbe für die FAFNIR-Kapsel-
Bestrahlungsversuche im BR2 (unveröffentlicht)
- /3/ von der Hardt:
Auslegung des Reaktoreinsatzes (unveröffentlicht)
- /4/ GfK-Arbeitsgruppe Mol:
AG-Mol Berichte (unveröffentlicht)
- /5/ H. Sebening:
Schaden am Brennstab Mol 8 B-1 (unveröffentlicht)
- /6/ K. Müller:
Zerlegung der Reaktoreinsätze in der Heißen Zelle
des BR2 (unveröffentlicht)
- /7/ J. van Looy:
Thermal Behaviour Calculations (unveröffentlicht)
- /8/ R. Kirchner:
Betrieb und Auswertung des Projektes Mol 8 B
(unveröffentlicht)
- /9/ J. van Looy:
Thermal Measurement Interpretation Practice
(unveröffentlicht)
- /10/ H. Sebening:
Korrektur der Abbrand- und Leistungsberechnung der
Zyklusberichte (unveröffentlicht)
- /11/ R. Kirchner:
persönliche Mitteilung
- /12/ H. Wertenbach:
persönliche Mitteilung

A n h a n g I

Dokumentation der zerstörungsfreien und zerstörenden

Nachuntersuchung

-I/3-
zu Prüfling Mol 8B-1
A1



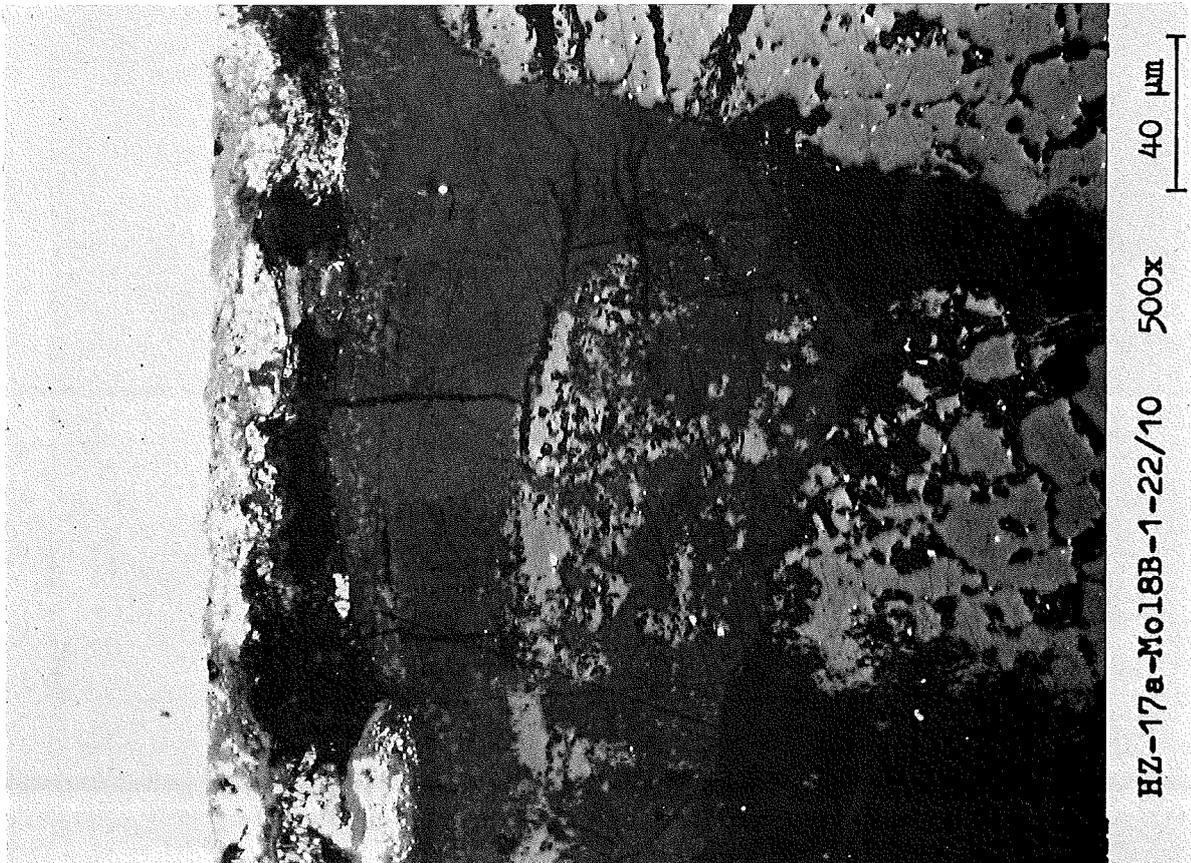
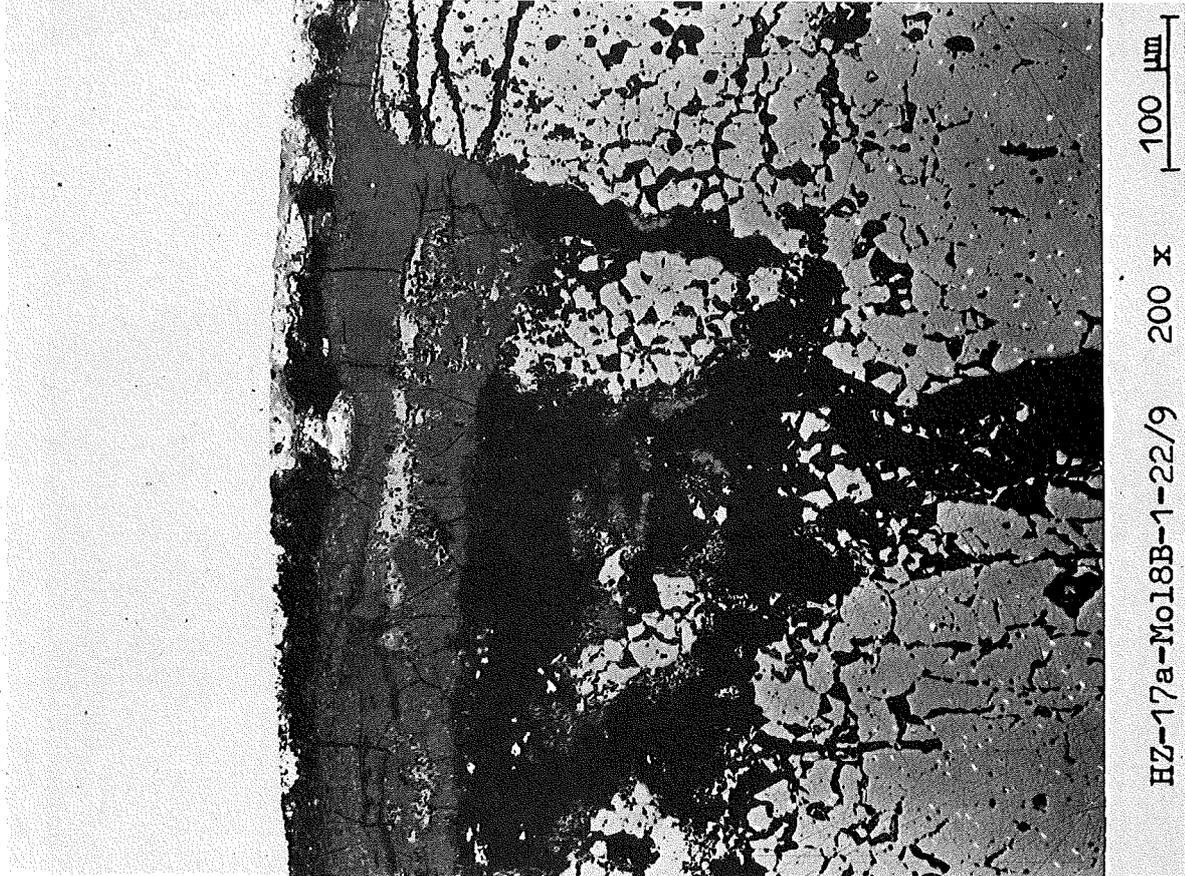
4...5

0,2 mm

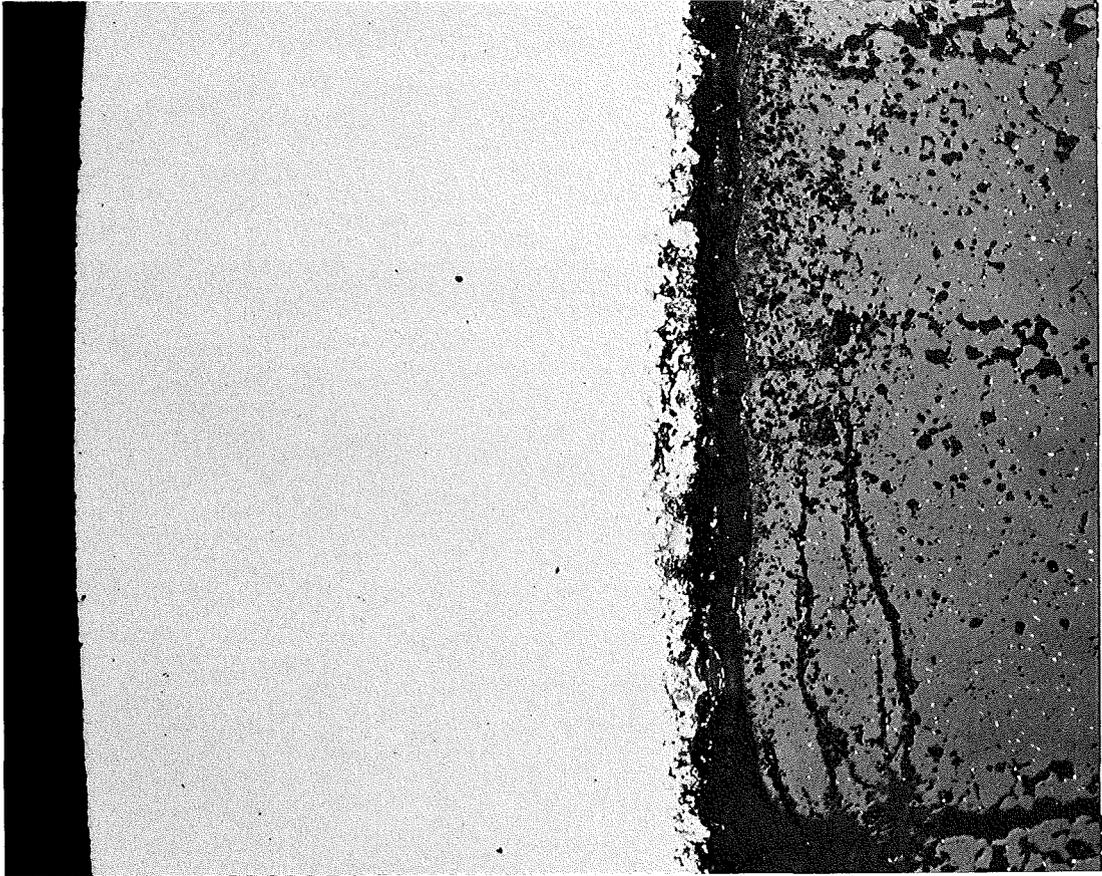
- I/4 -

zu Prüfling Mol 8B-1

A 1



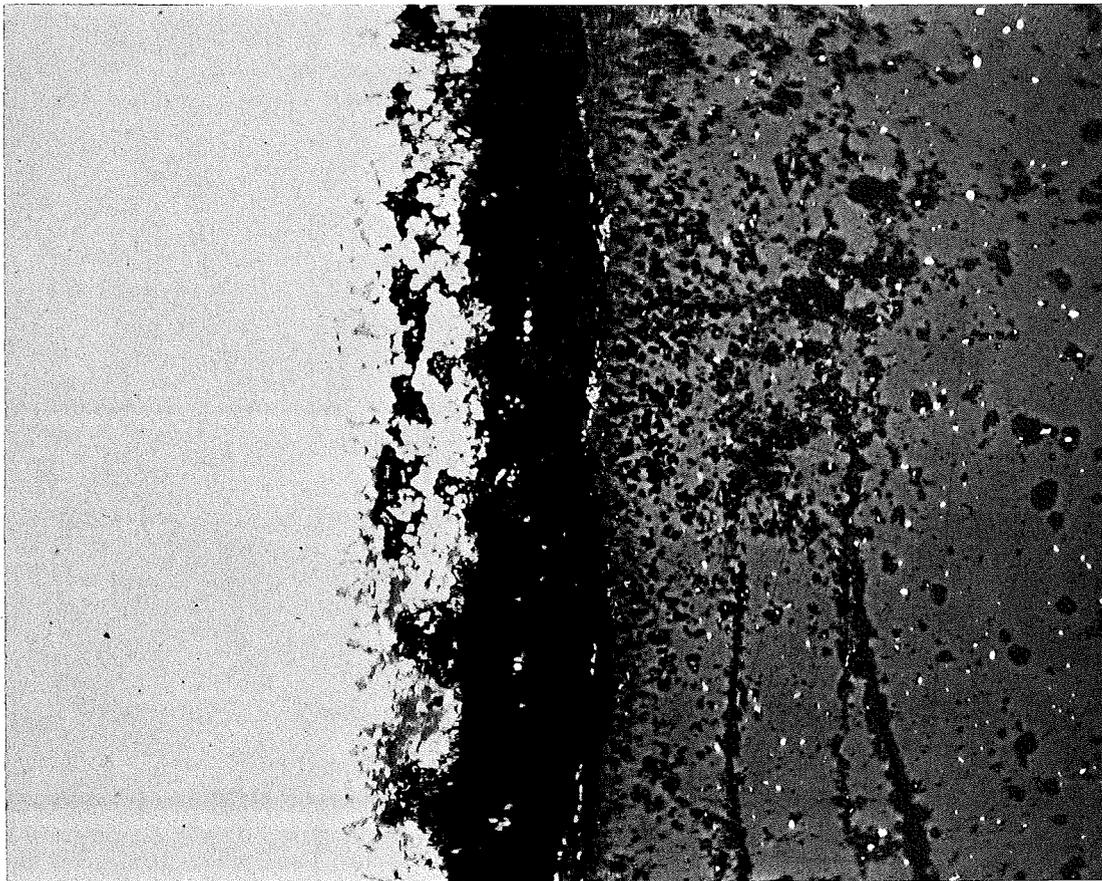
- I/5 -
zu Prüfling Mol 8B-1
A1



100 μm

200 x

HZ-17a-Mol8B-1-22/7

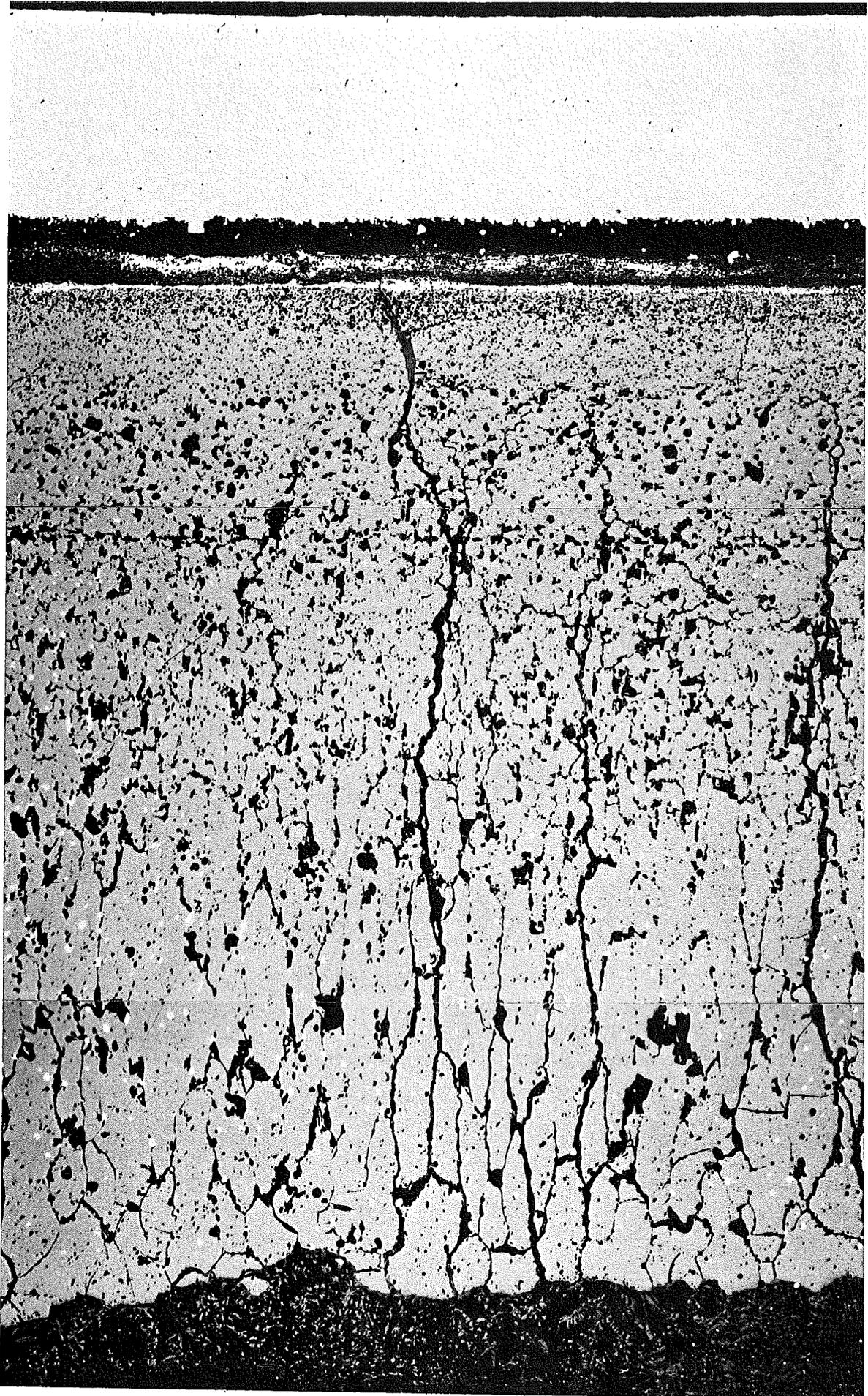


40 μm

500x

HZ-17a-Mol8B-1-22/8

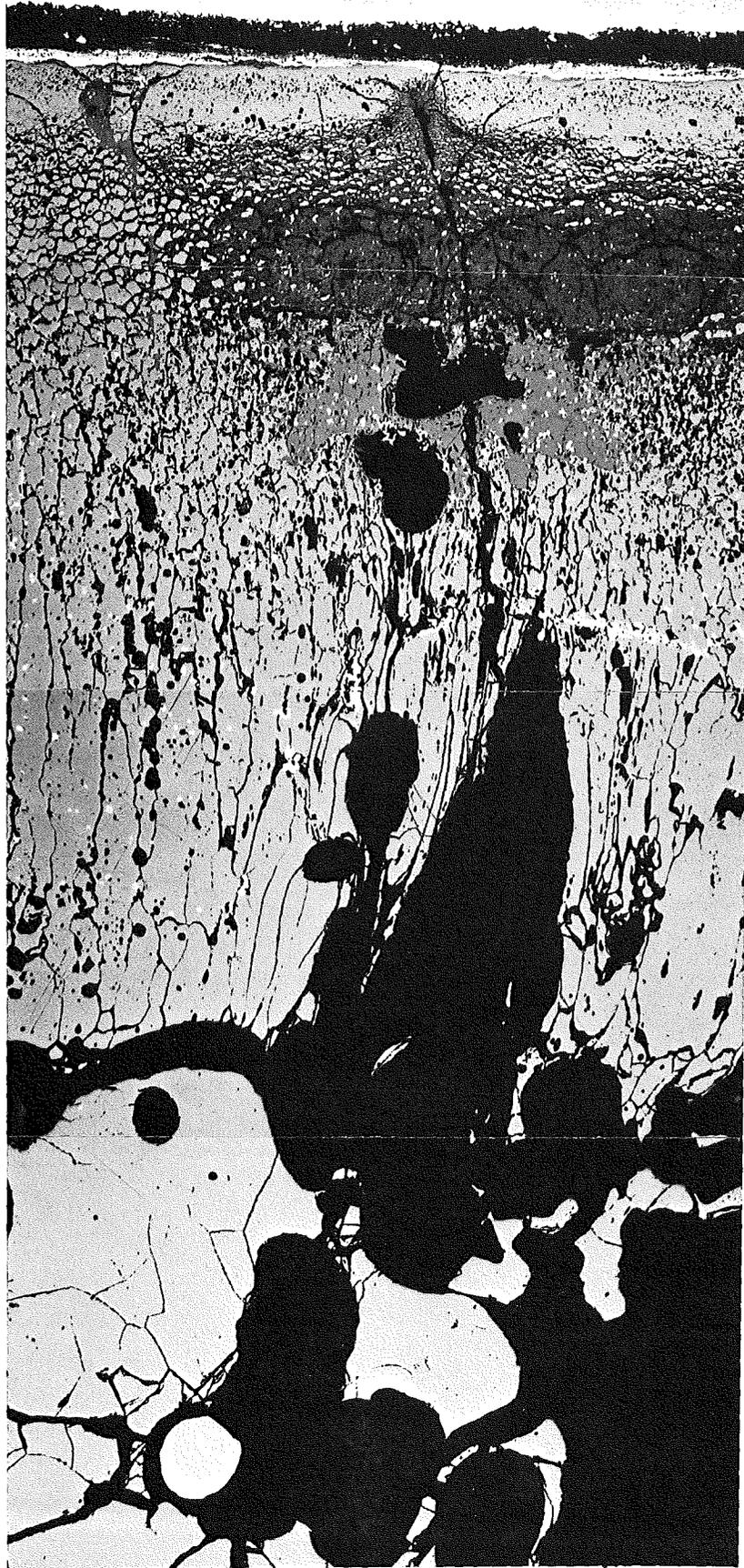
-1/6-
zu Prüfling Mol 8B-1
A 2



13-15

0,2 mm

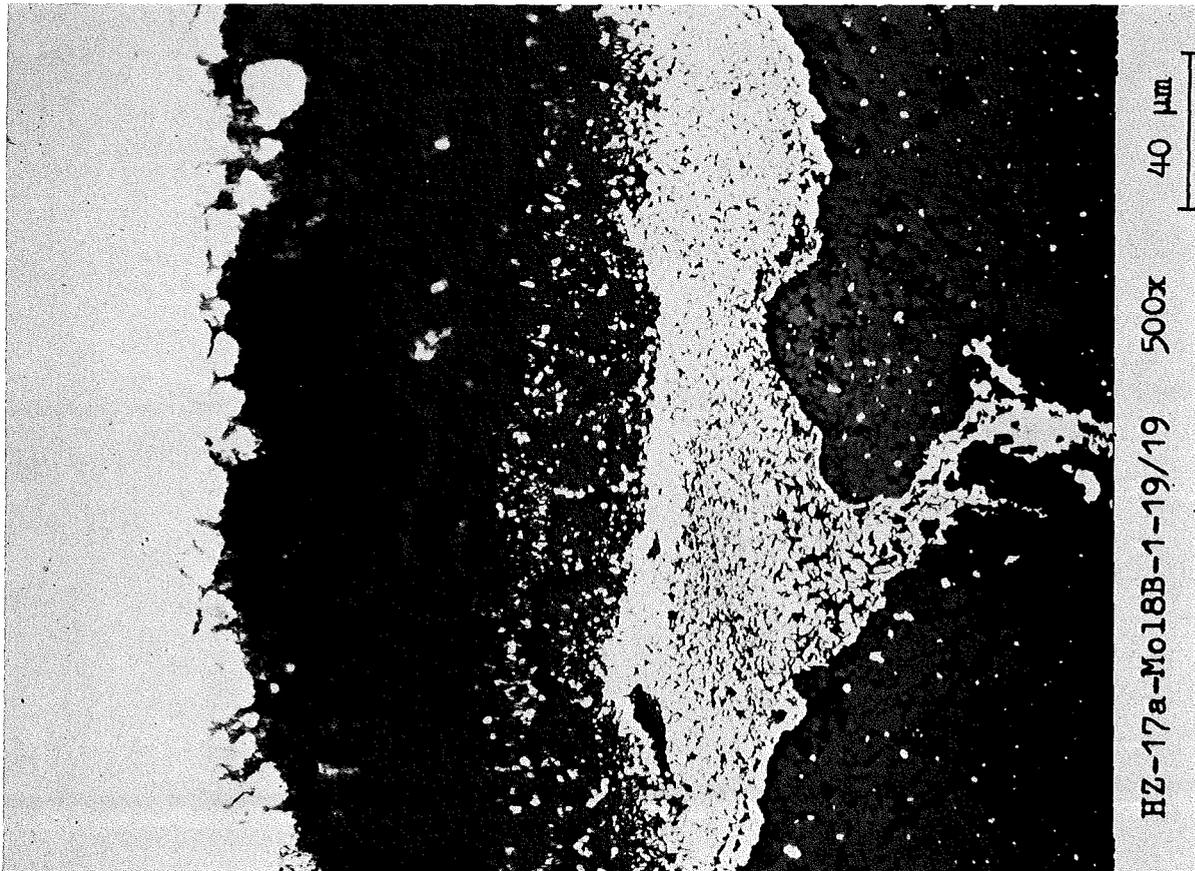
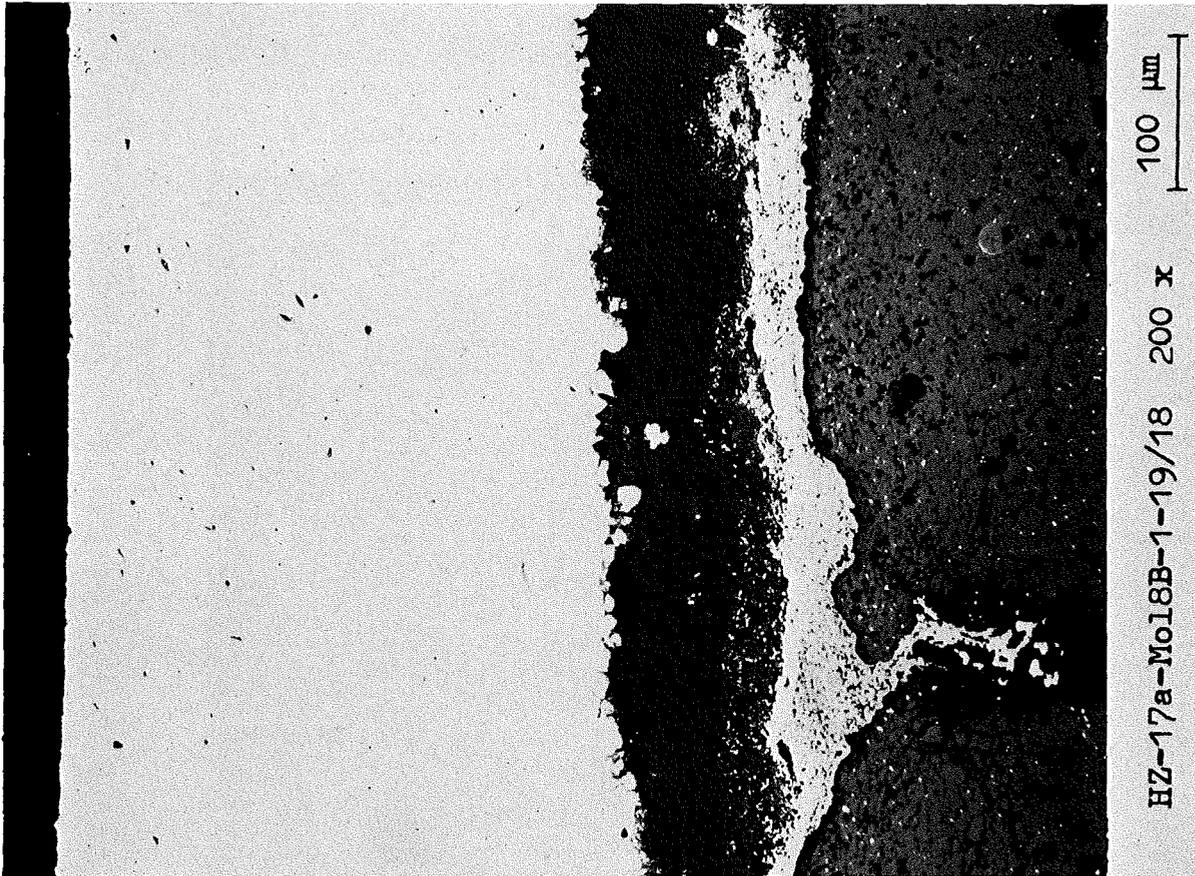
-1/7-
zu Prüfling Mol 8B-1
A2



9...12

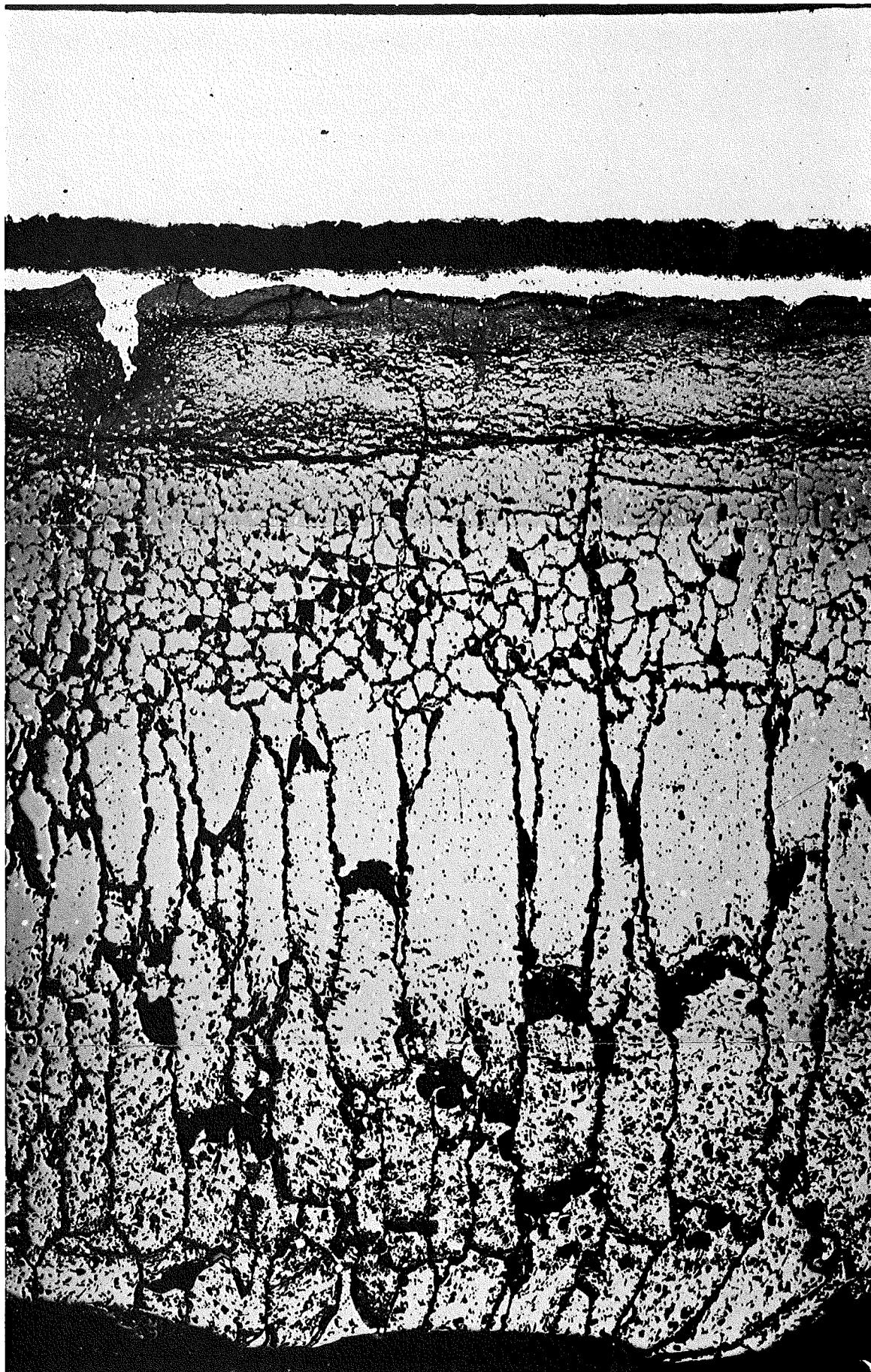
—|
0,2 mm

-I/8-
zu Prüfling Mol 8B-1
A2

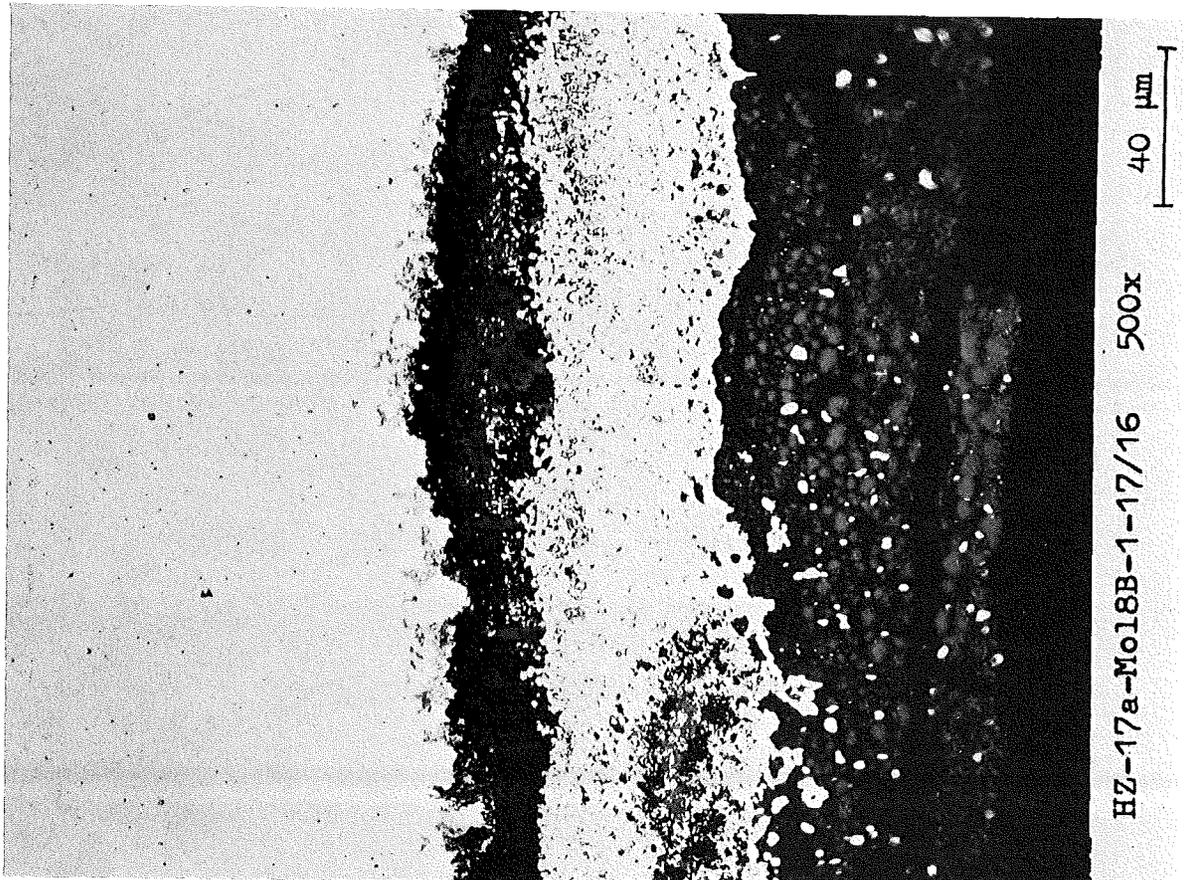
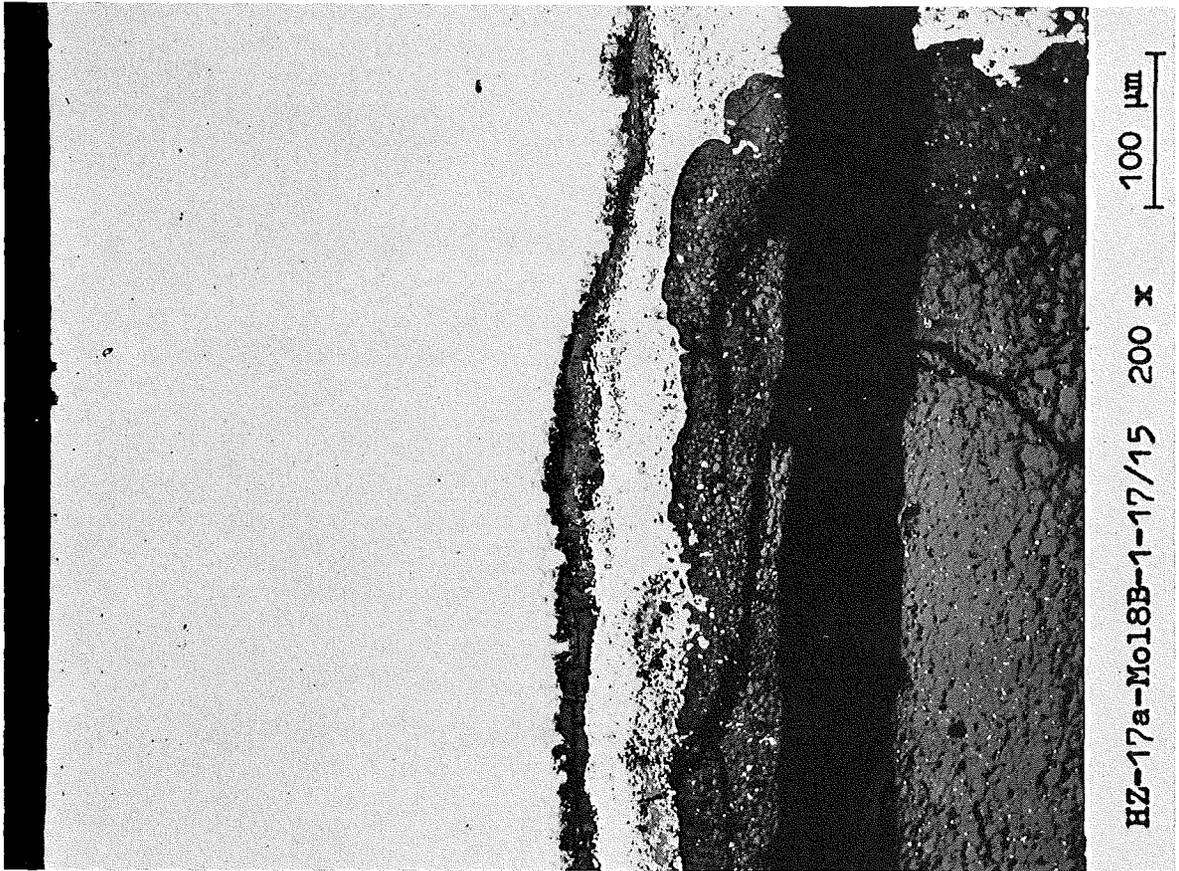


-1/9 -
zu Prüfling Mol 8B-1
A 3





-I/11-
zu Prüfling Mol 8B-1
A 3



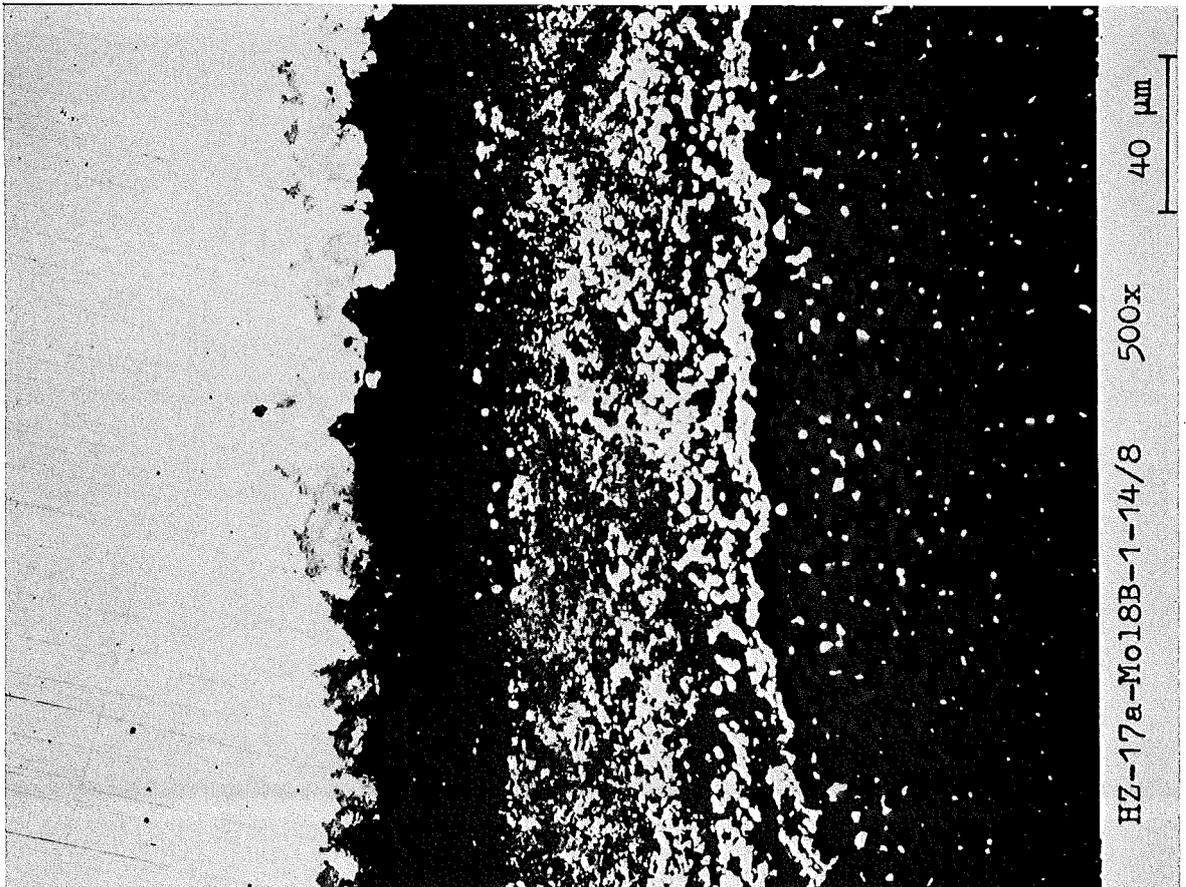
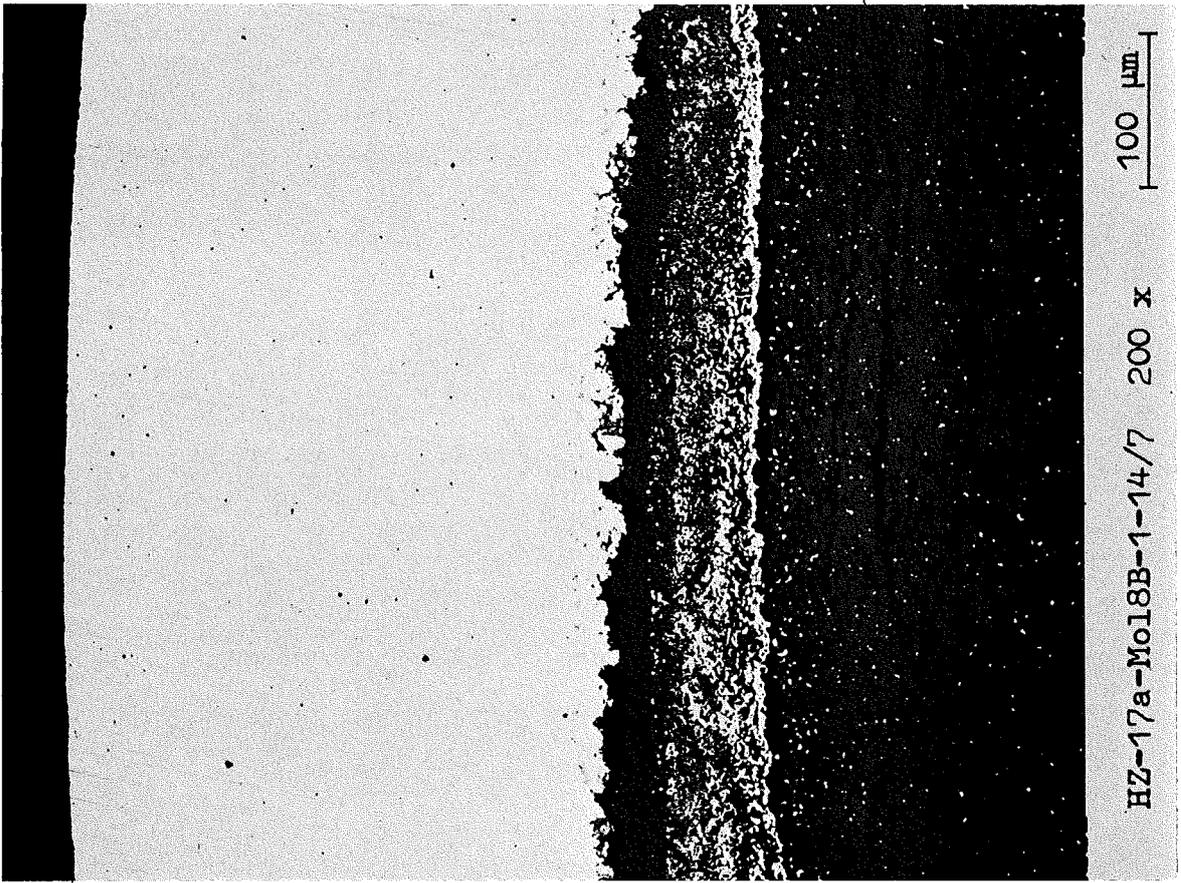
- I/12 -
zu Prüfling Mol 8B-1
A4



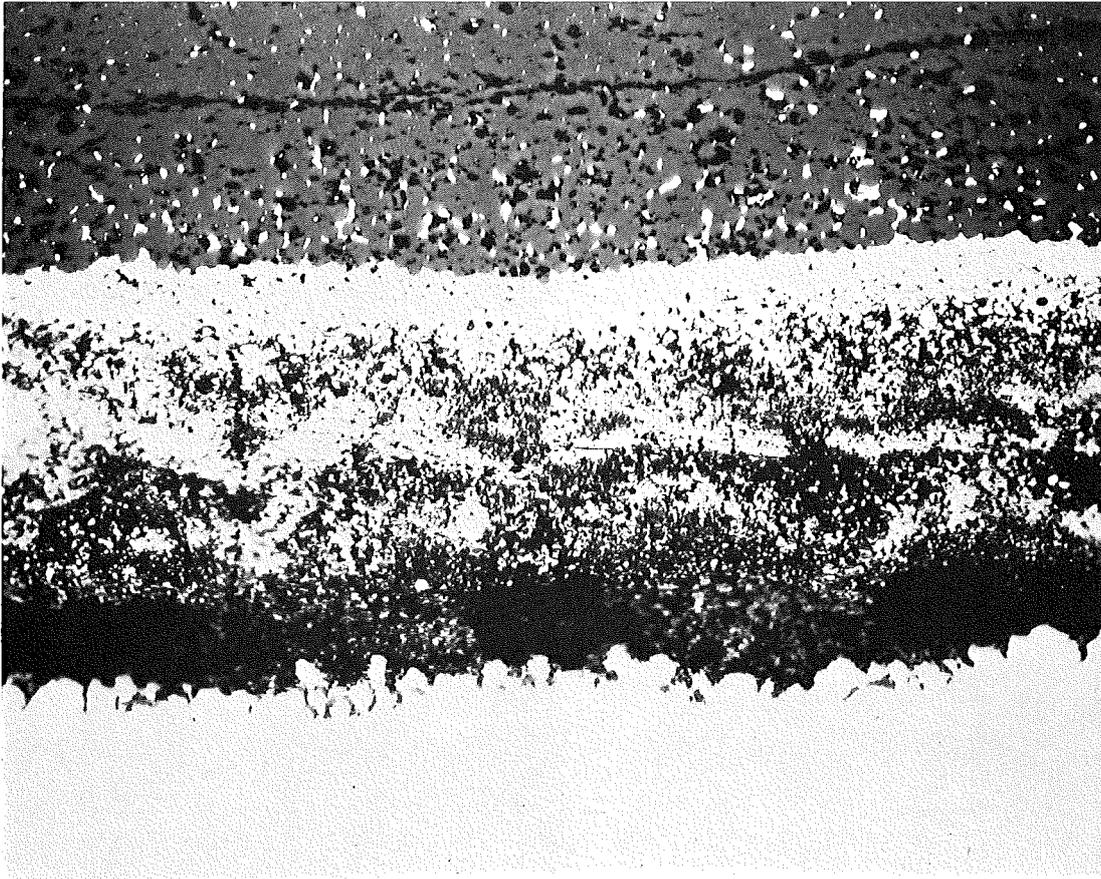
4...6

0,2 mm

-1/13-
zu Prüfling Mol 8B-1
A 4



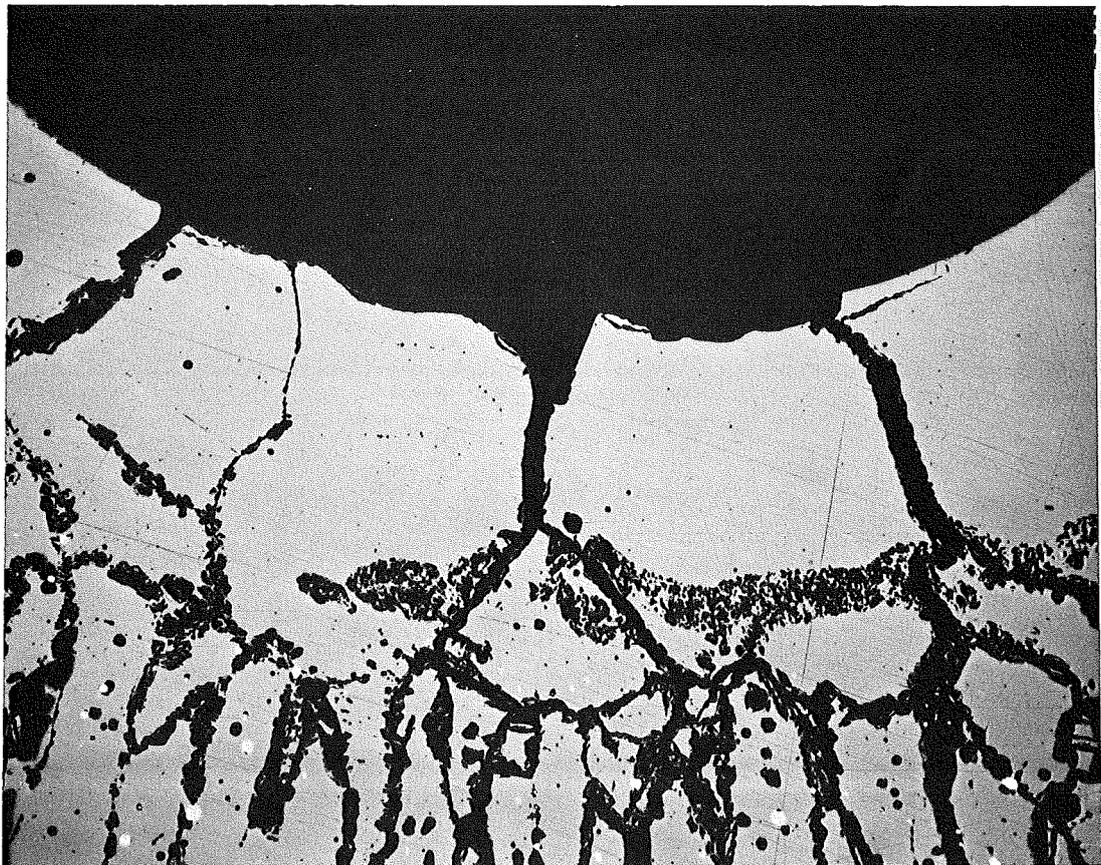
- I/14 -
zu Prüfling Mol 8B-1
A 4



40 μm

500x

HZ-17a-Mol8B-1-14/9



100 μm

200 x

HZ-17a-Mol8B-1-14/13

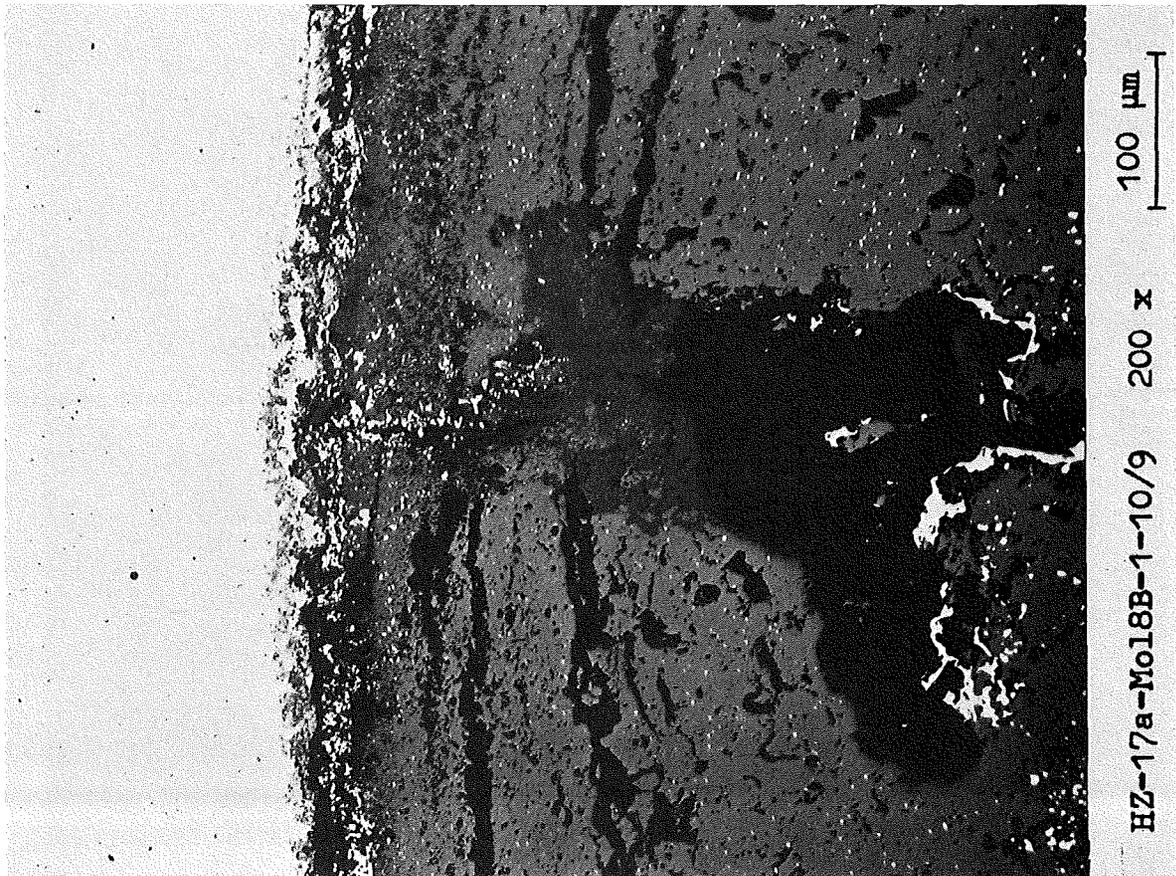
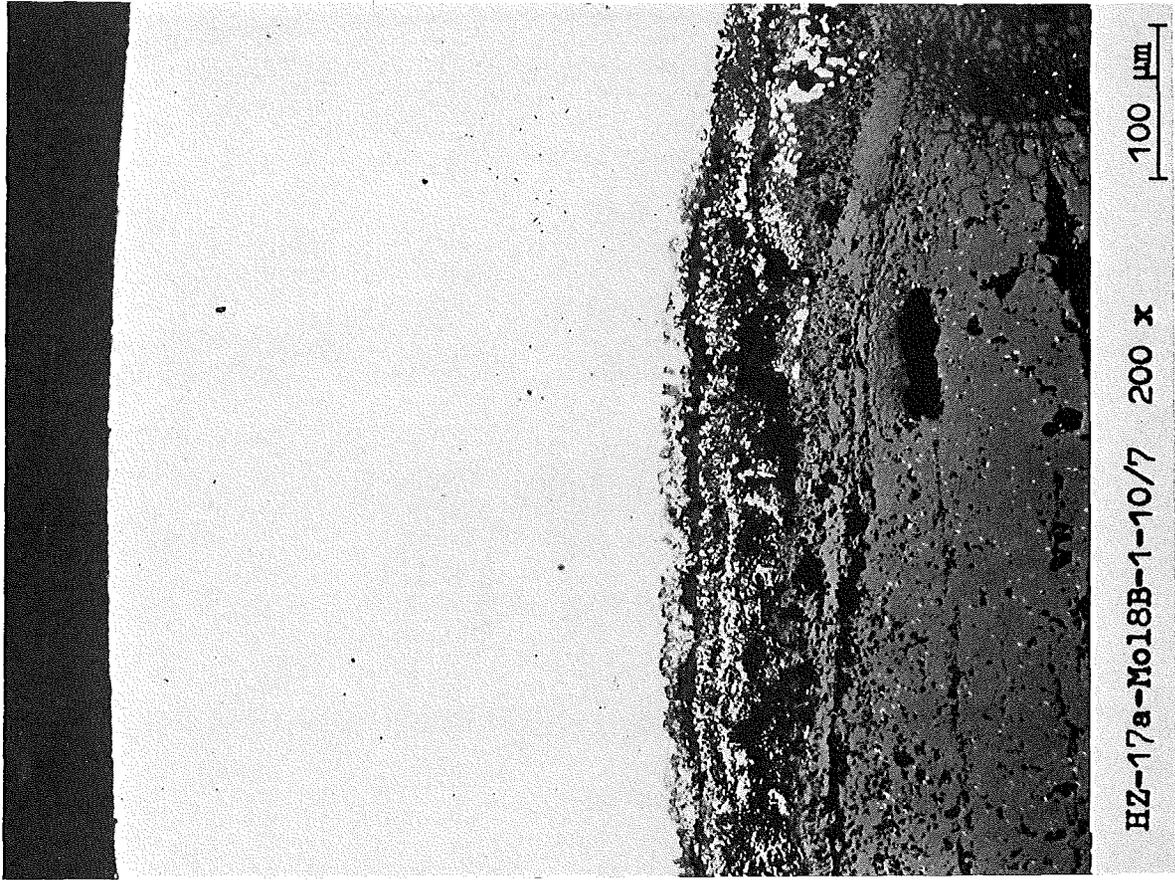
- I/15 -
zu Prüfling Mol 8B-1
A 5



4...6

0,2 mm

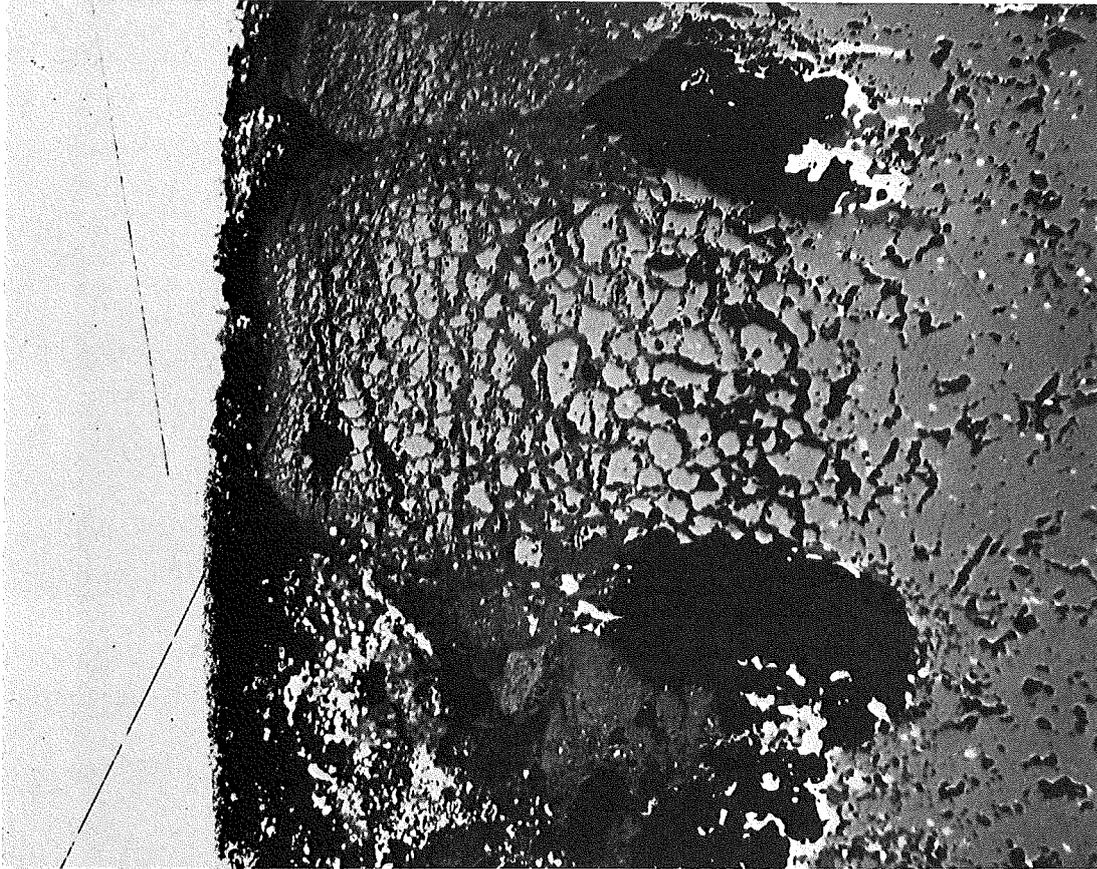
-I/16-
zu Prüfling Mol 8B-1
A 5



-I/17-

zu Prüfling Mol 8B-1

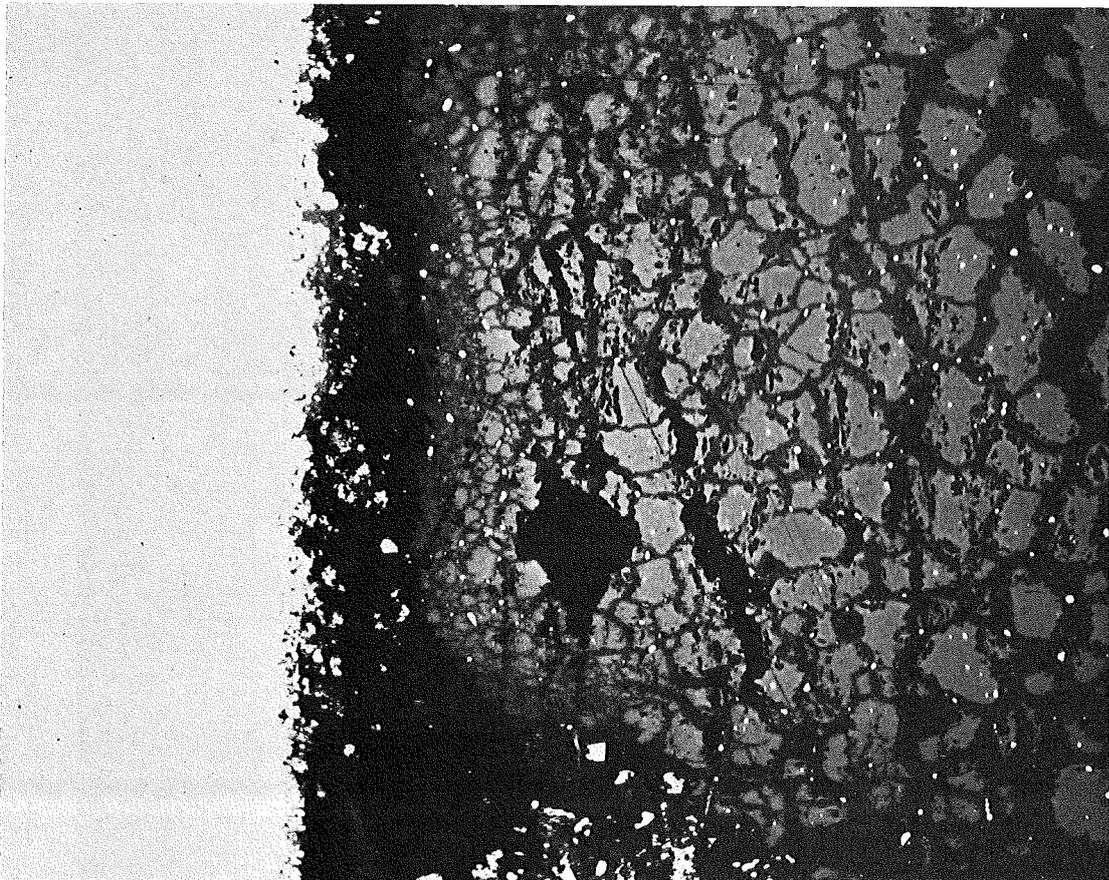
A 5



100 μm

200 x

HZ-17a-Mo18B-1-10/10

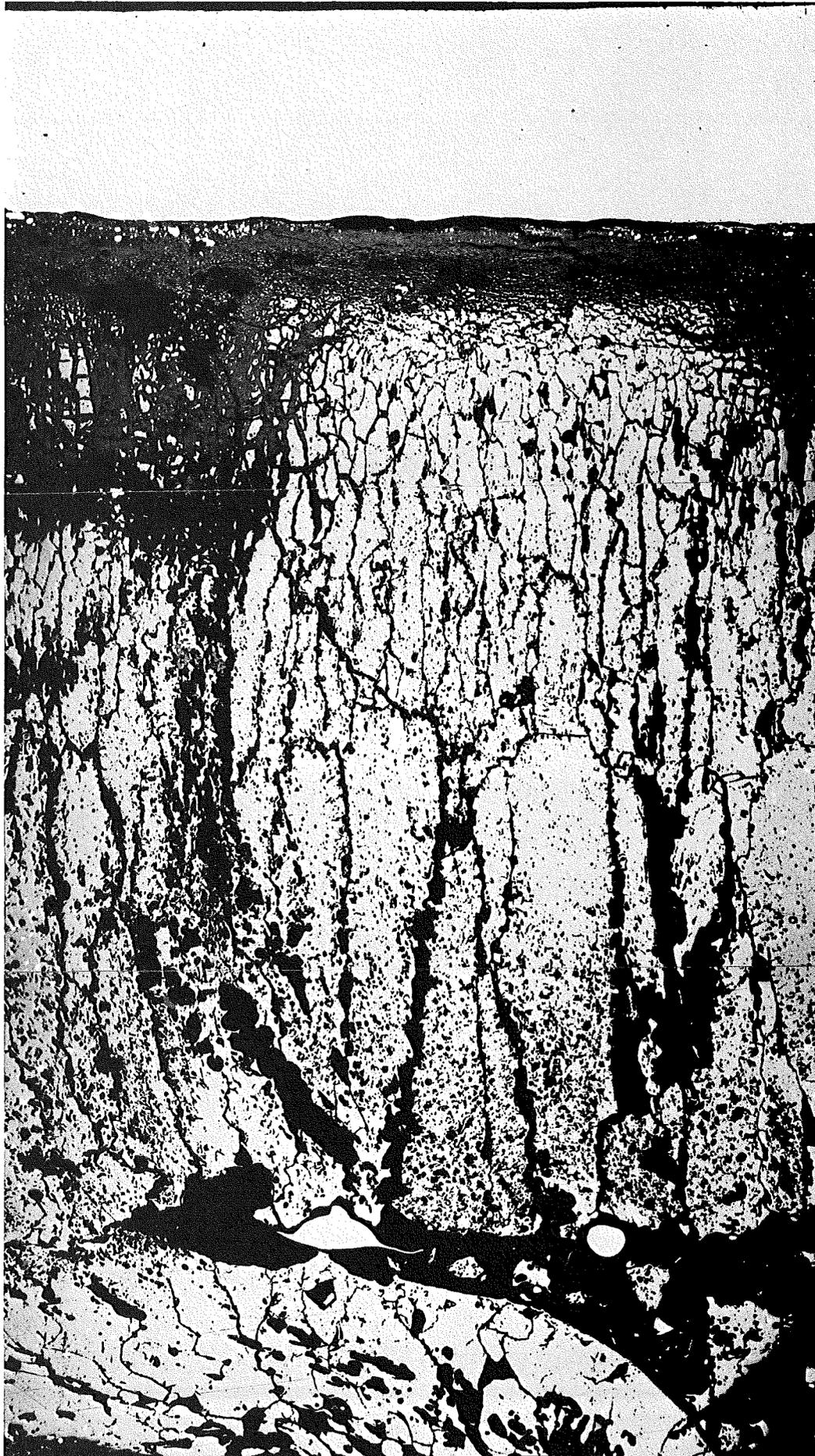


40 μm

500x

HZ-17a-Mo18B-1-10/11

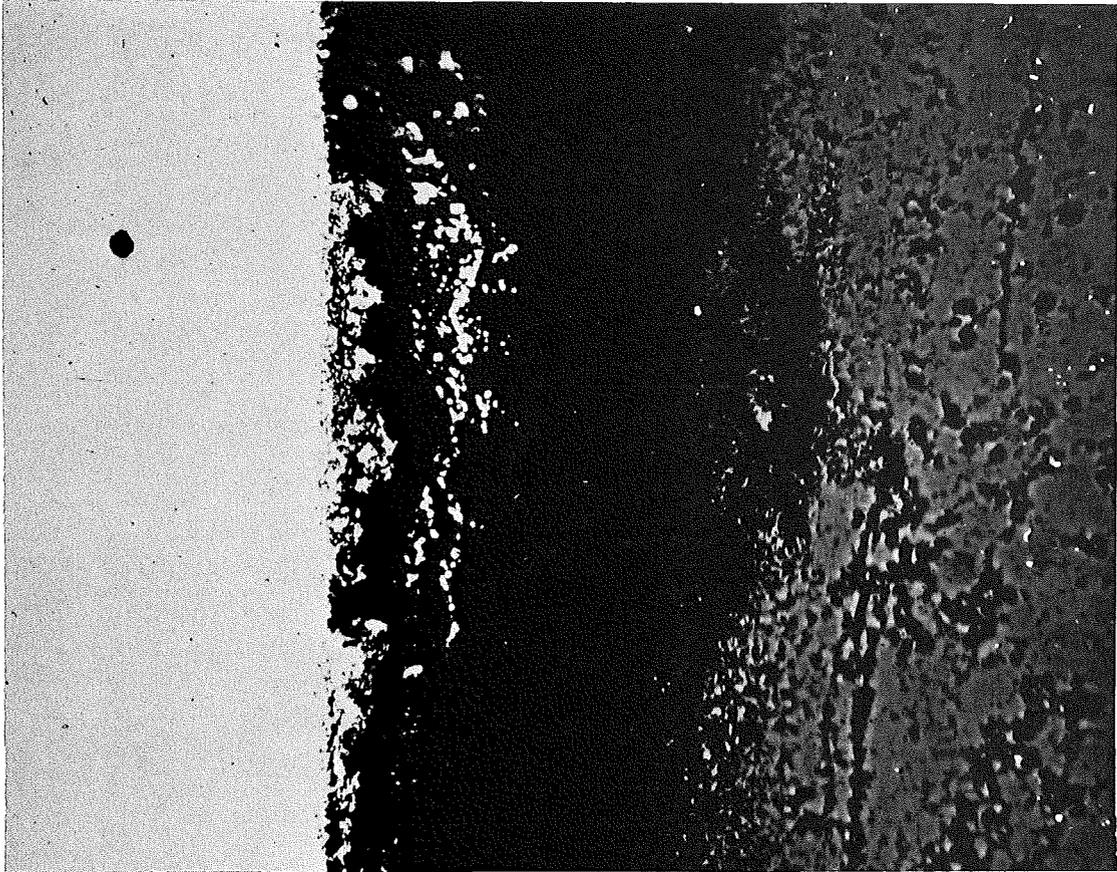
- I/18 -
zu Prüfling Mol 8B-1
A 6



8-10

0,2 mm

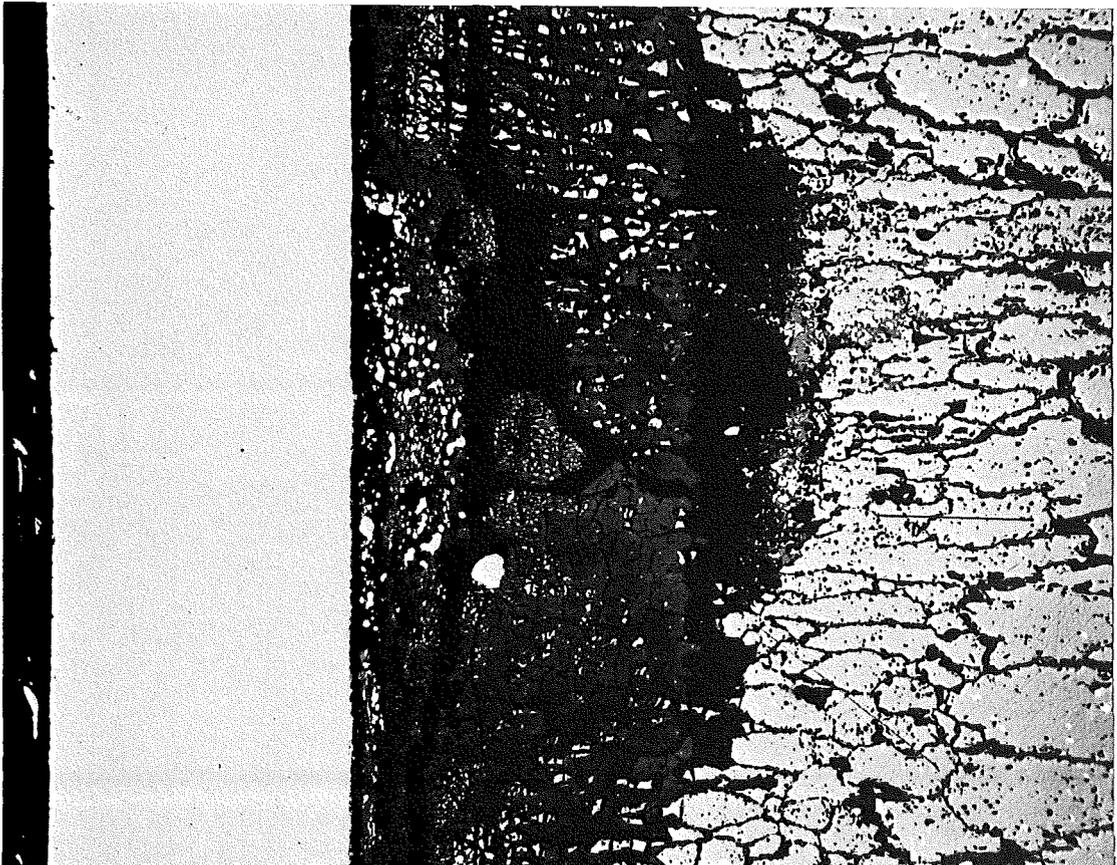
-1/19 -
zu Prüfling Mol 8B-1
A 6



40 µm

500x

HZ-17a-Mo18B-1-8/17

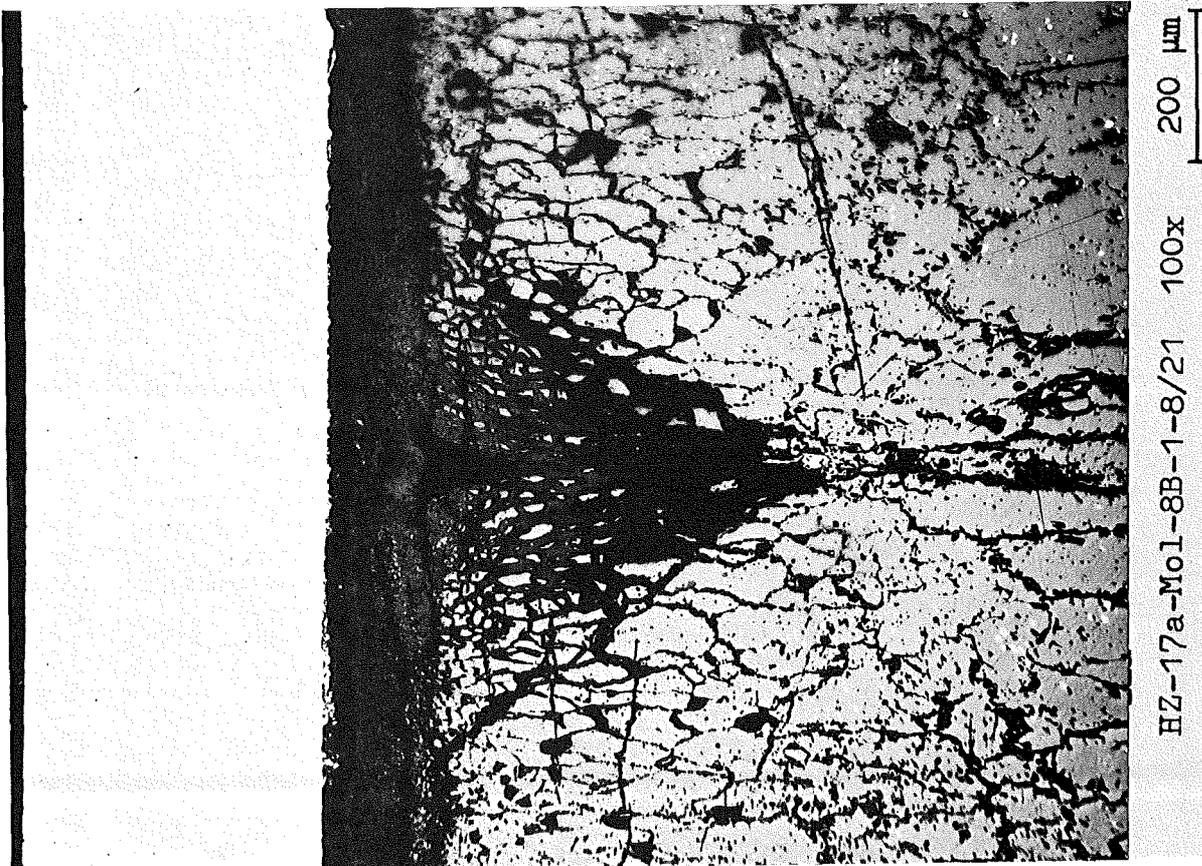
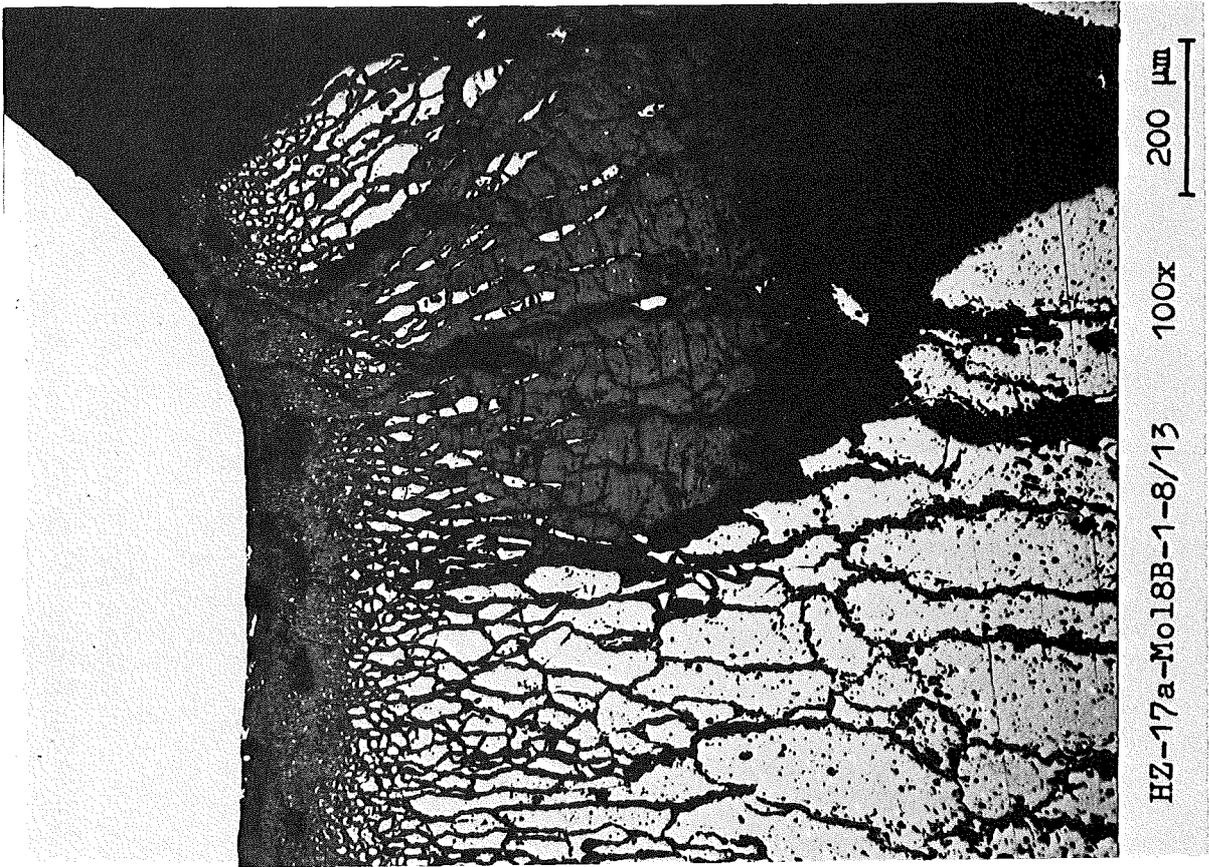


200 µm

100x

HZ-17a-Mo18B-1-8/18

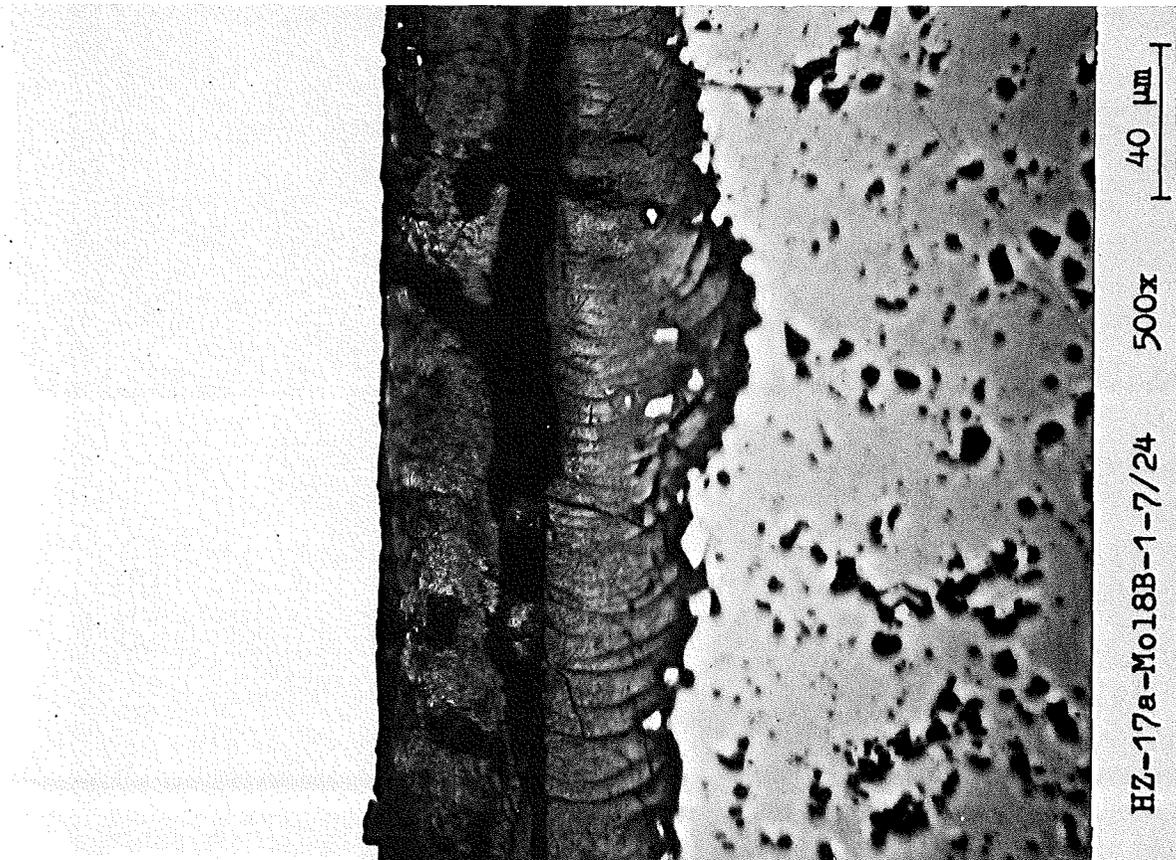
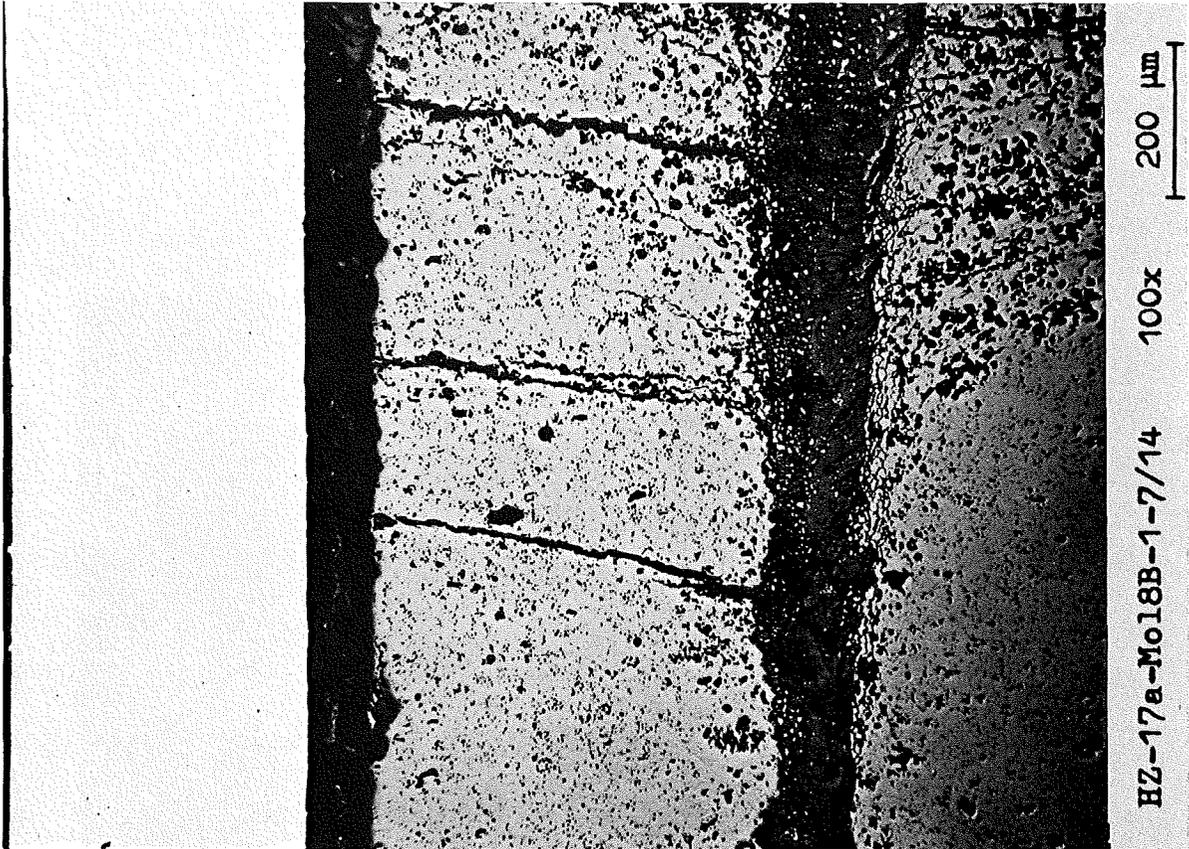
-1/20 -
zu Prüfling Mol 8B-1
A 6

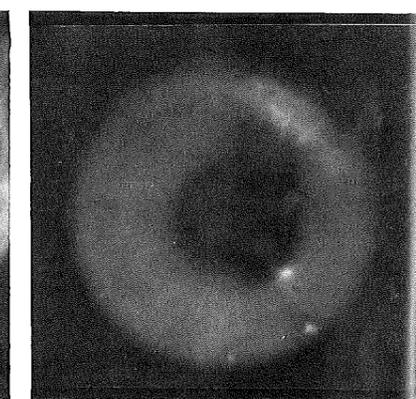
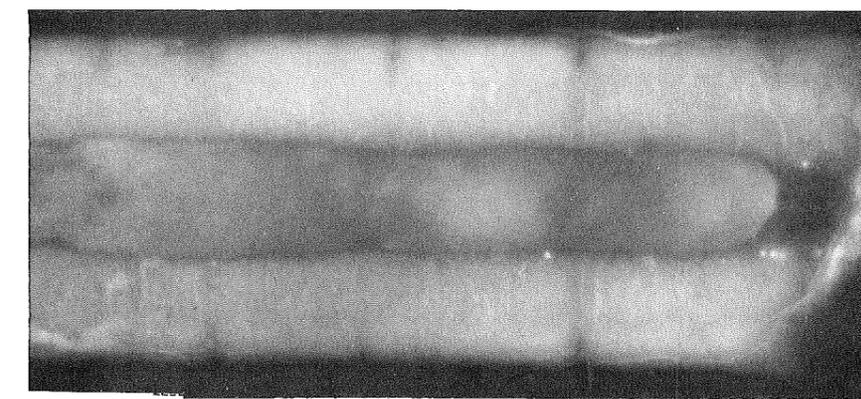
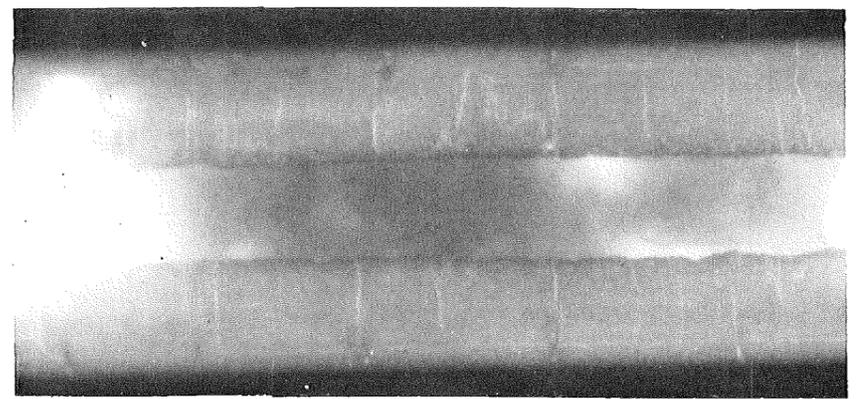
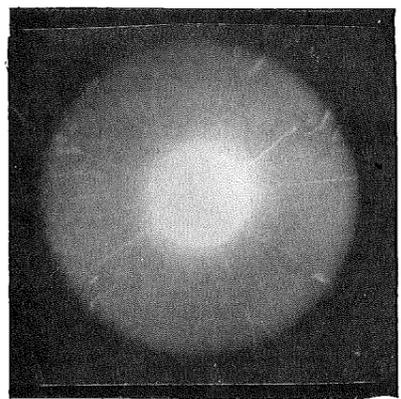
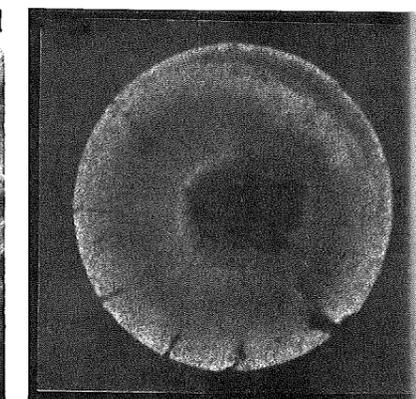
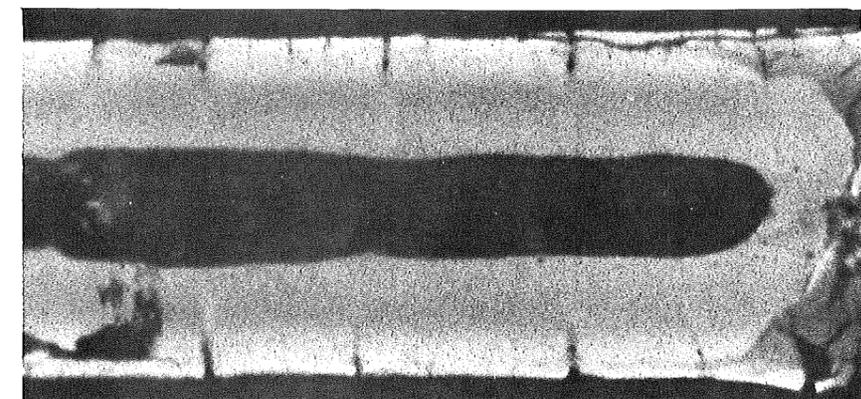
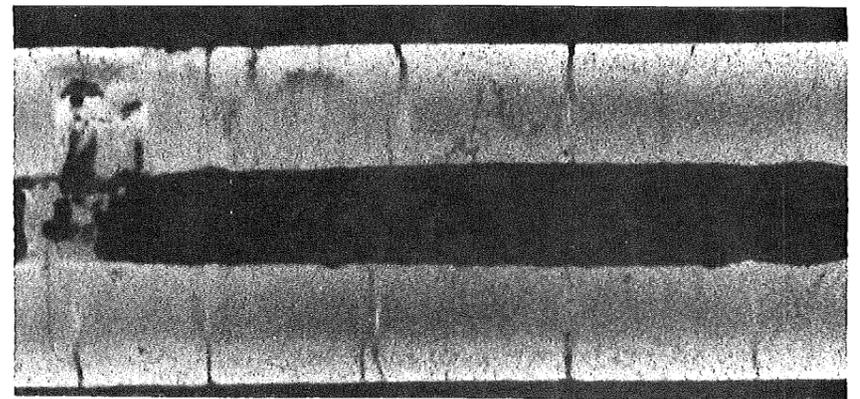
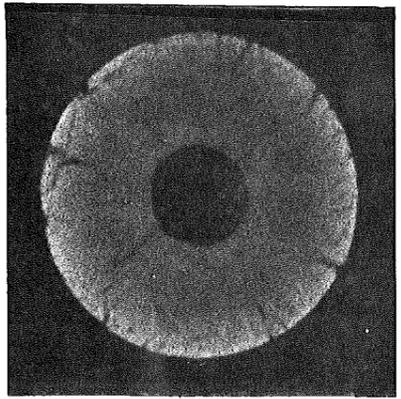
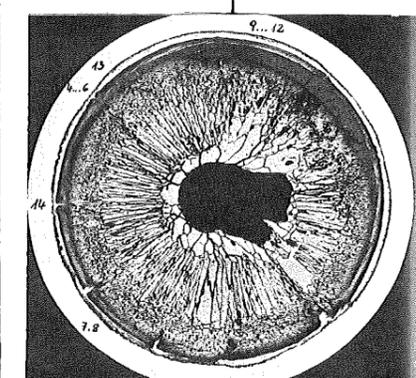
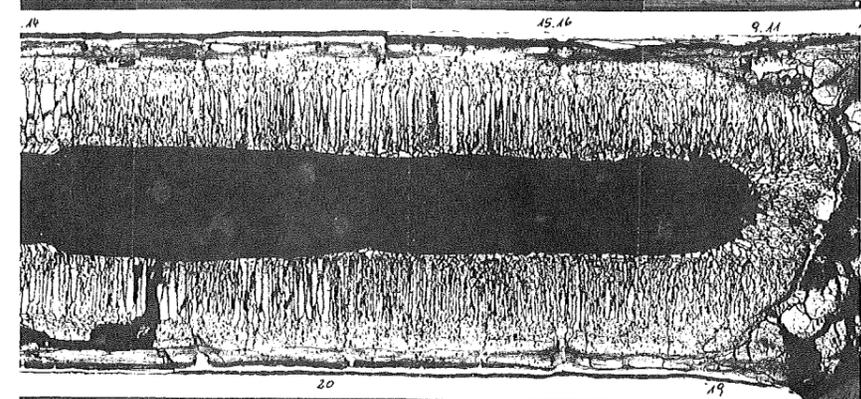
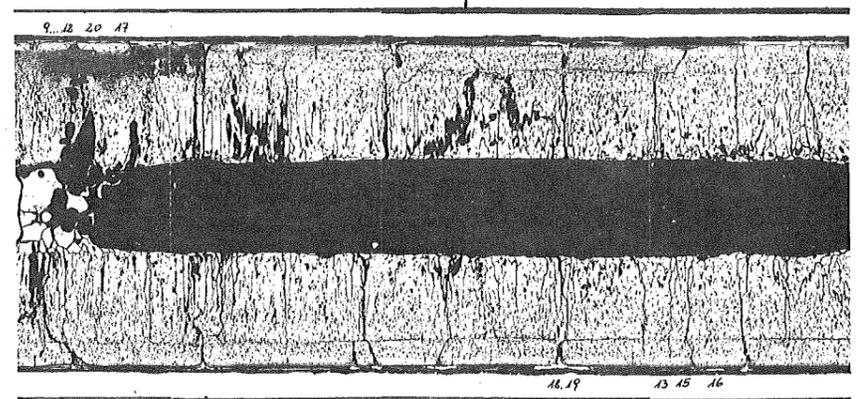
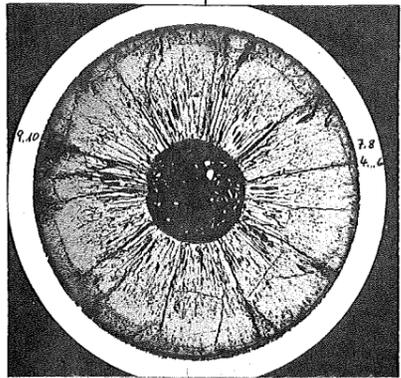
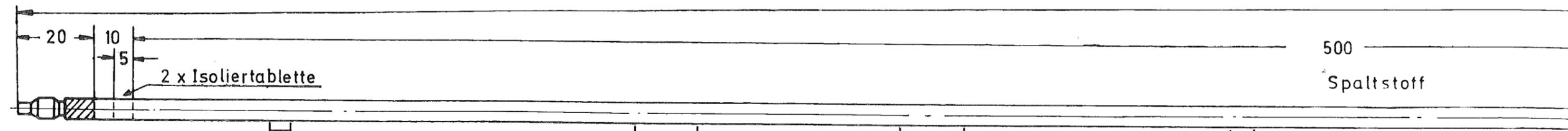
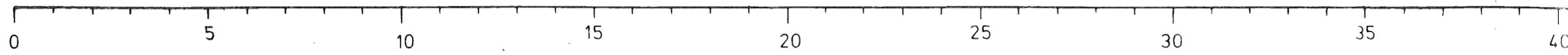


-I/21-
zu Prüfling Mol 8B-1
A7



-1/22-
zu Prüfling Mol 8B-1
A 7





1

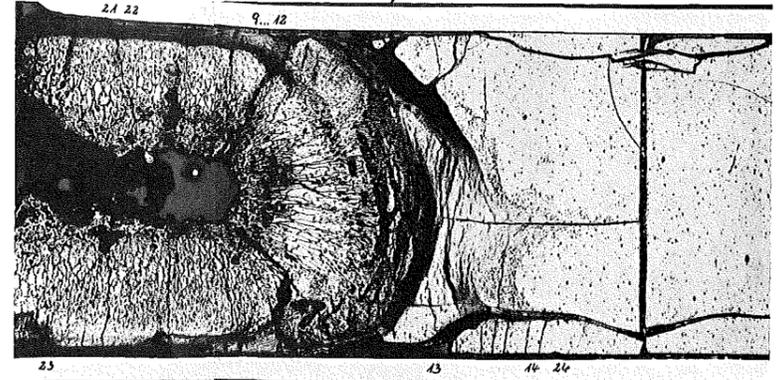
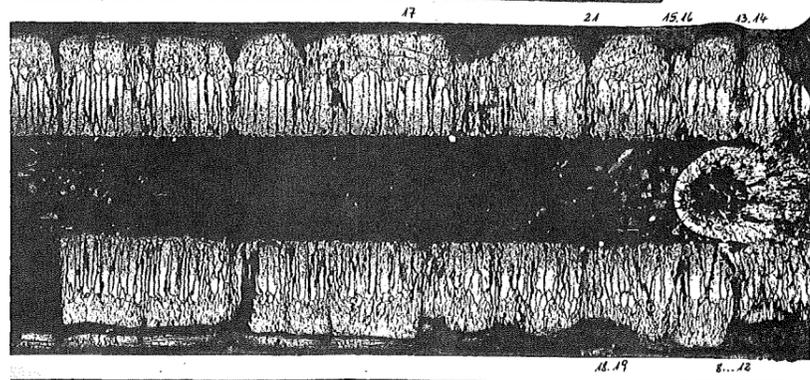
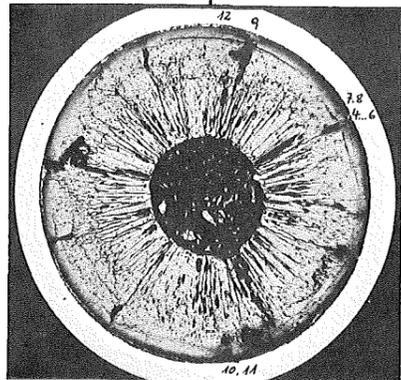
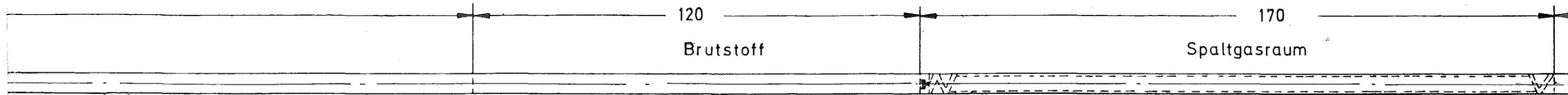
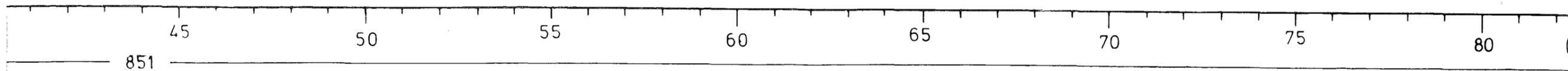
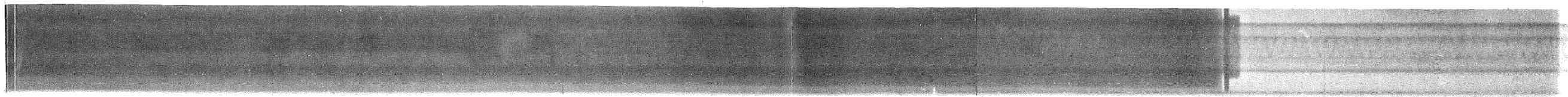
2

1mm

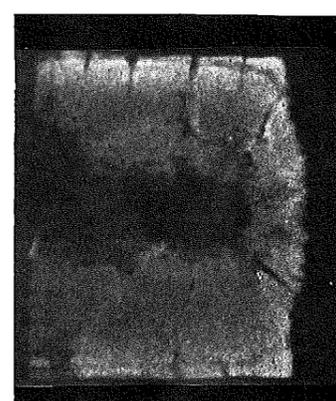
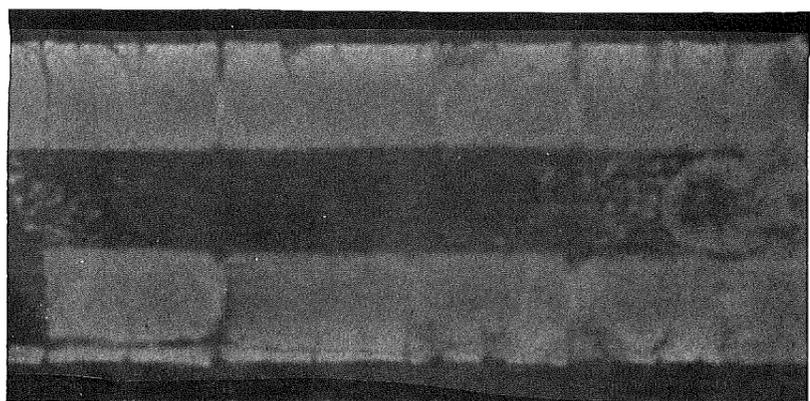
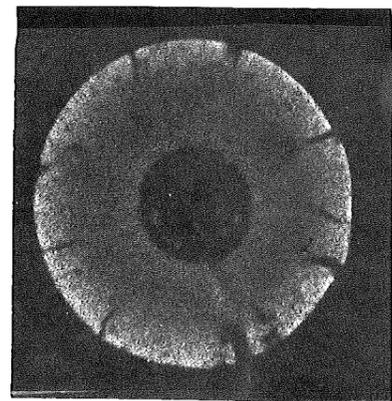
3

1mm

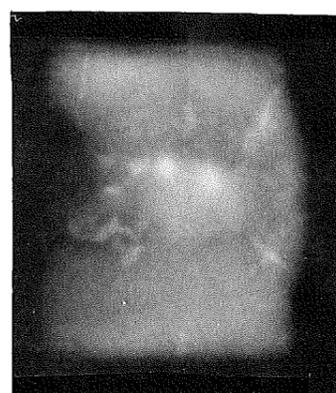
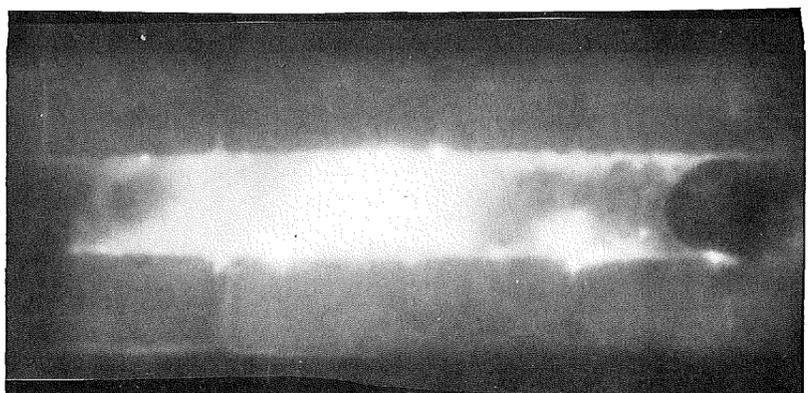
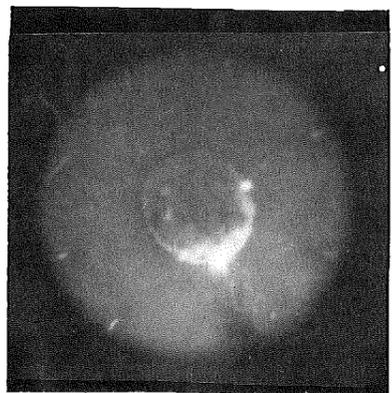
4



A



B



C

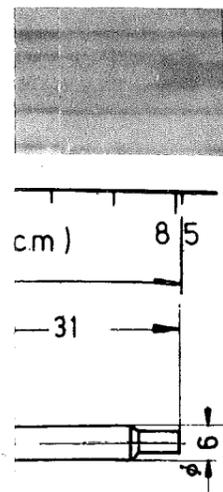
5

6

1mm

7

1mm



Prüfling Mo1-8B/1

Brennstoff:

Form : Tabletten
Zusammensetzung : (U,Pu) C_2
Tablettendichte : 84 % th.D.

Hülle:

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

Geometrie:

Länge des Prüflings : 851 mm
Länge der Brennstoffsäule : 500 mm
Radiale Spaltweite : 70 μ m
Schmierdichte : 79,6 % th.D.

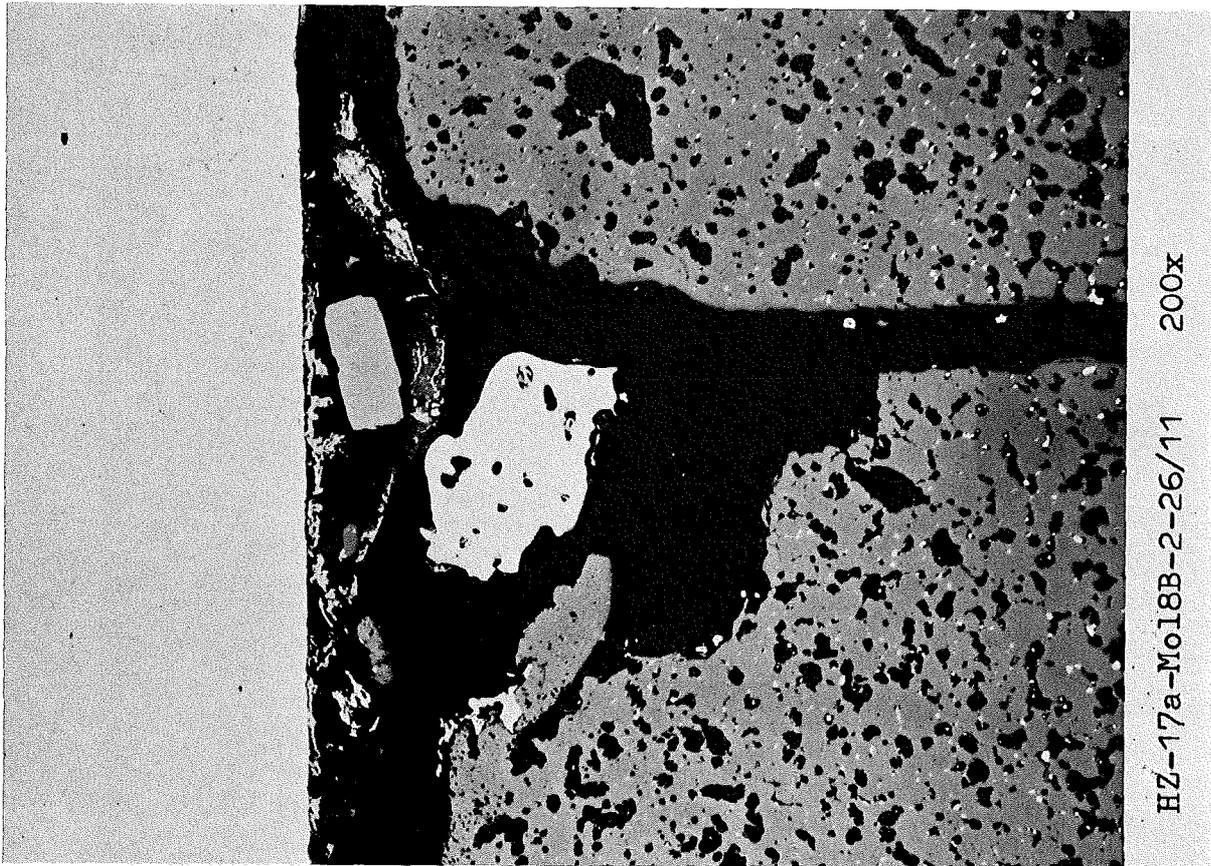
Bestrahlung:

Einrichtung : FAFNIR
NaK-Bestrahlungseinrichtung
Dauer : 505 Vollasttage
Ende : 14.8.1972
Rechn. Abbrand max. : 106 MWd/kg M
Stableistung max./mittl. : 484/299 W/cm

-1/25 -
zu Prüfling Mol 8B-2
A 1

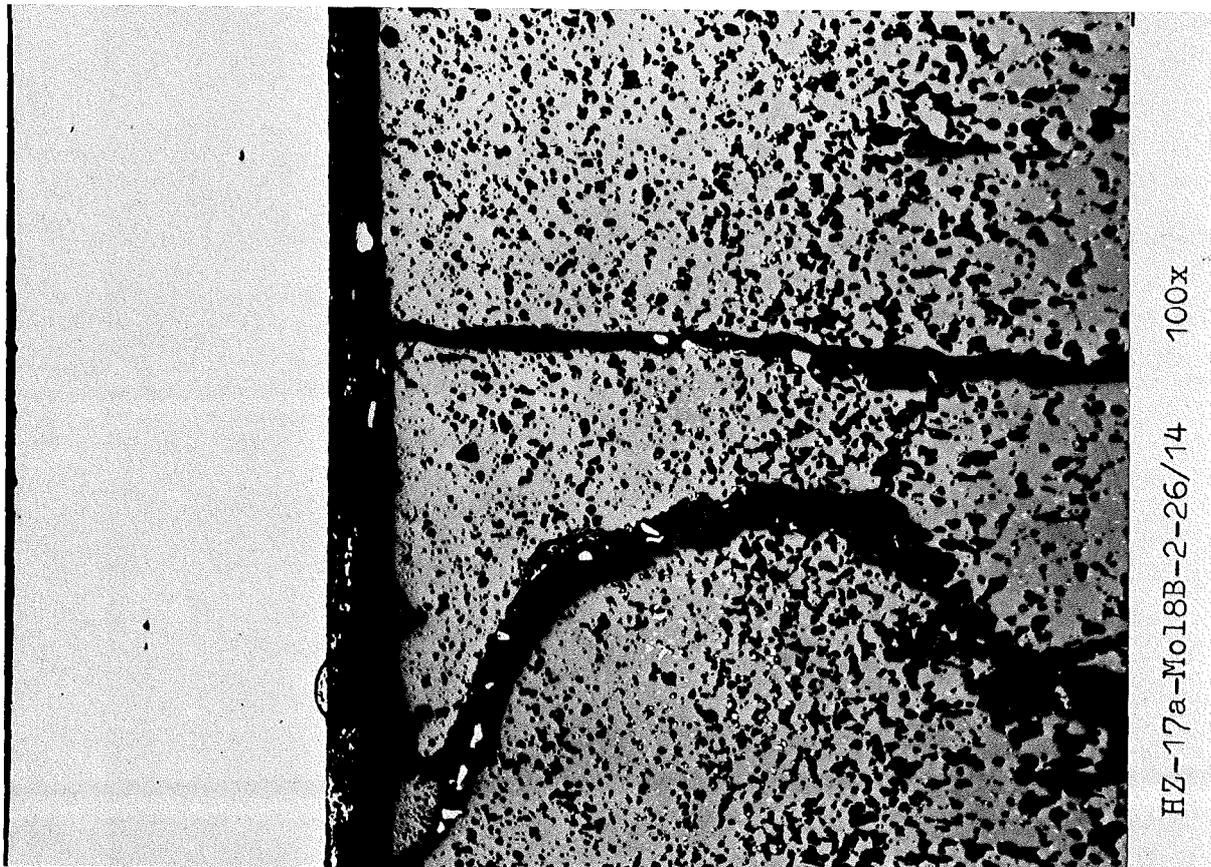


-I/26-
zu Prüfling Mol 8B-2
A 1



0,1 mm

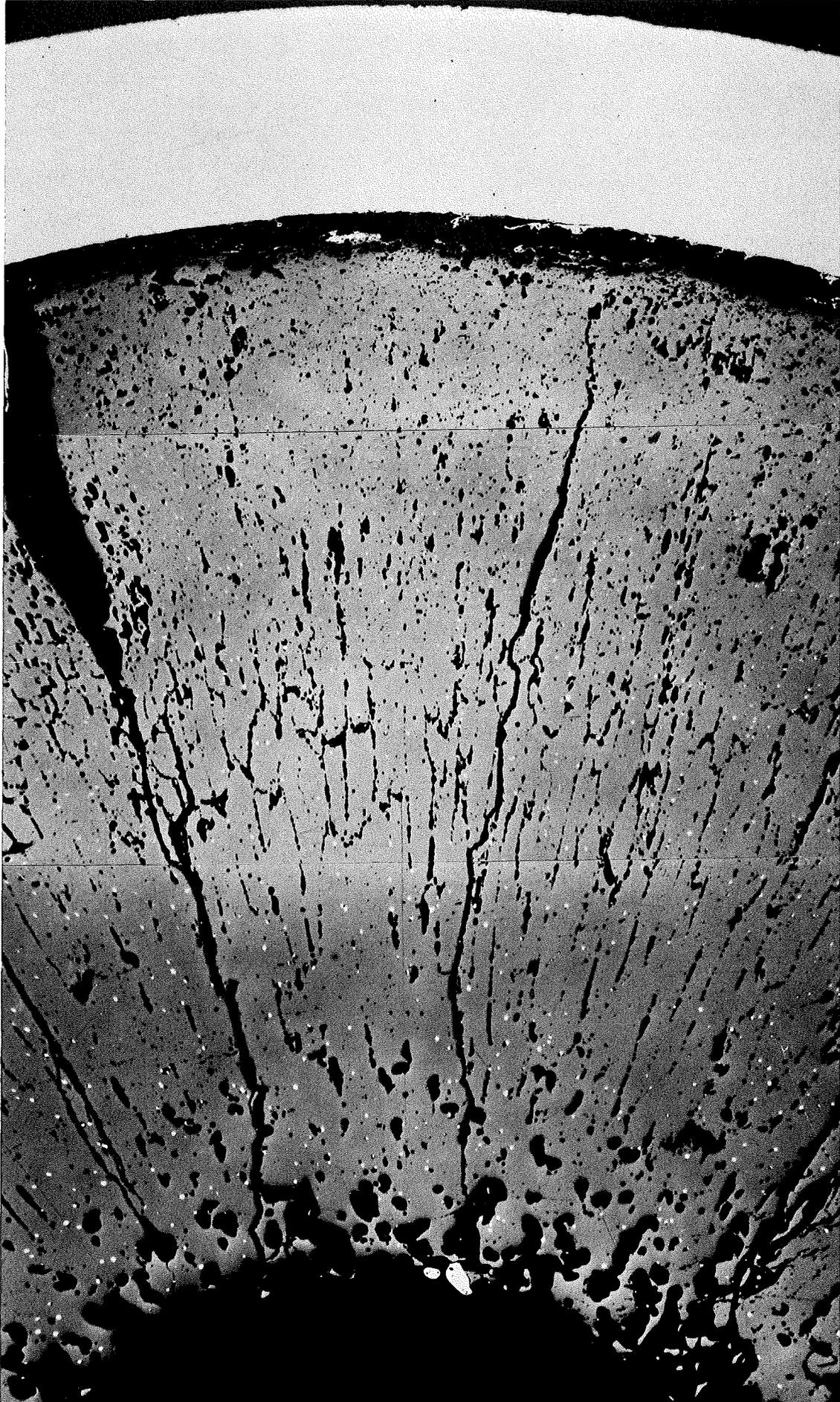
HZ-17a-Mo18B-2-26/11 200x



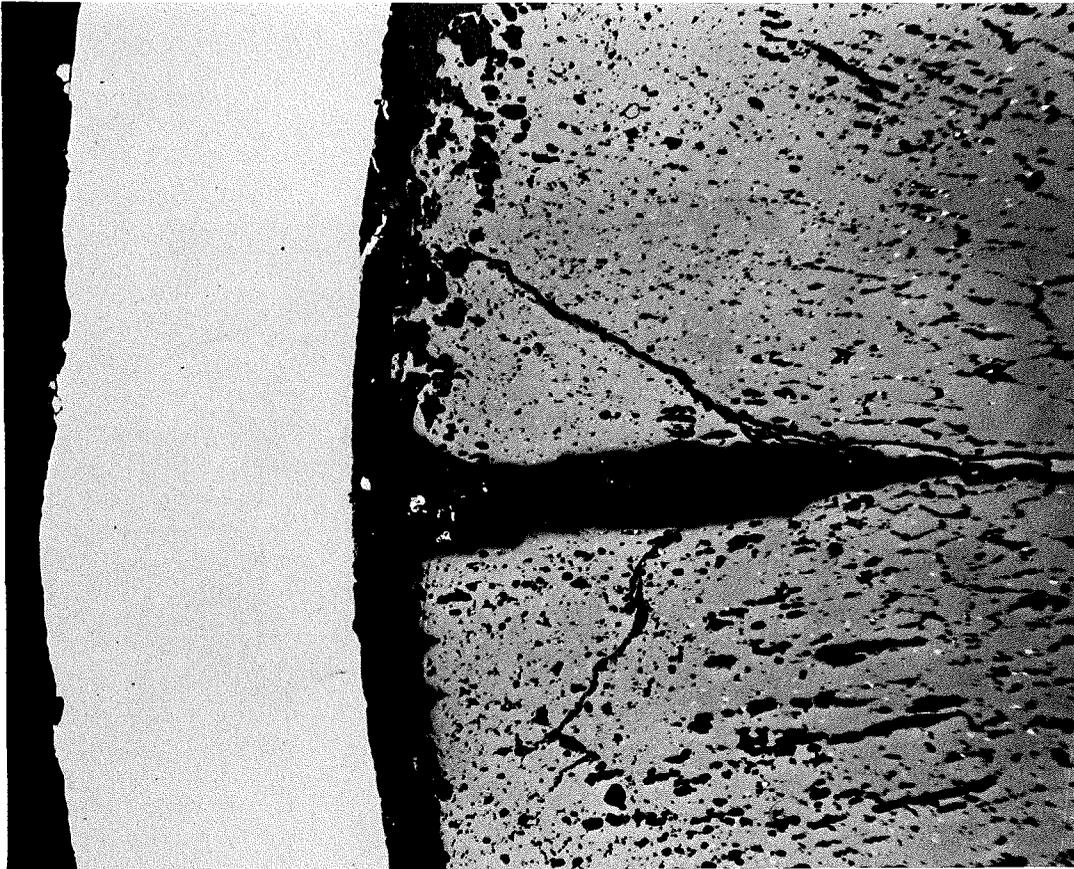
0,2 mm

HZ-17a-Mo18B-2-26/14 100x

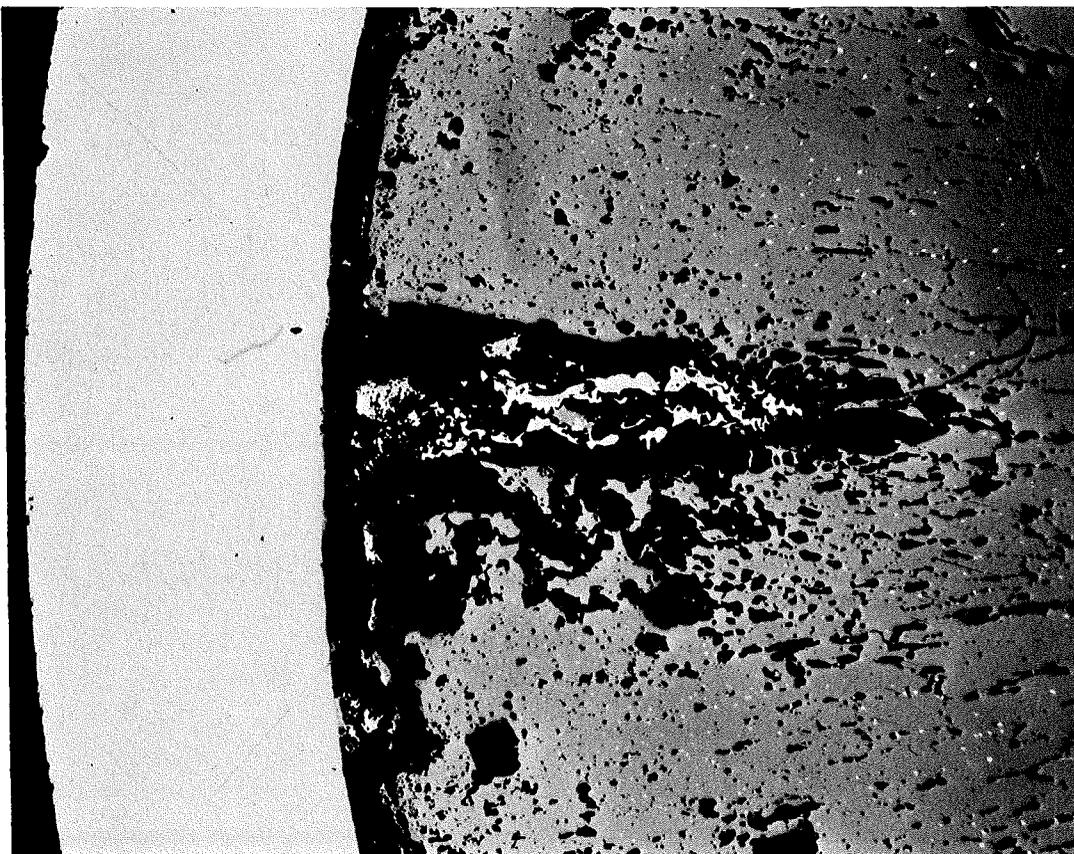
-I/27-
zu Prüfling Mol 8B-2
A2



-I/28-
zu Prüfling Mol 8B-2
A 2



HZ-17a-Mo18B-2-24/8 100x



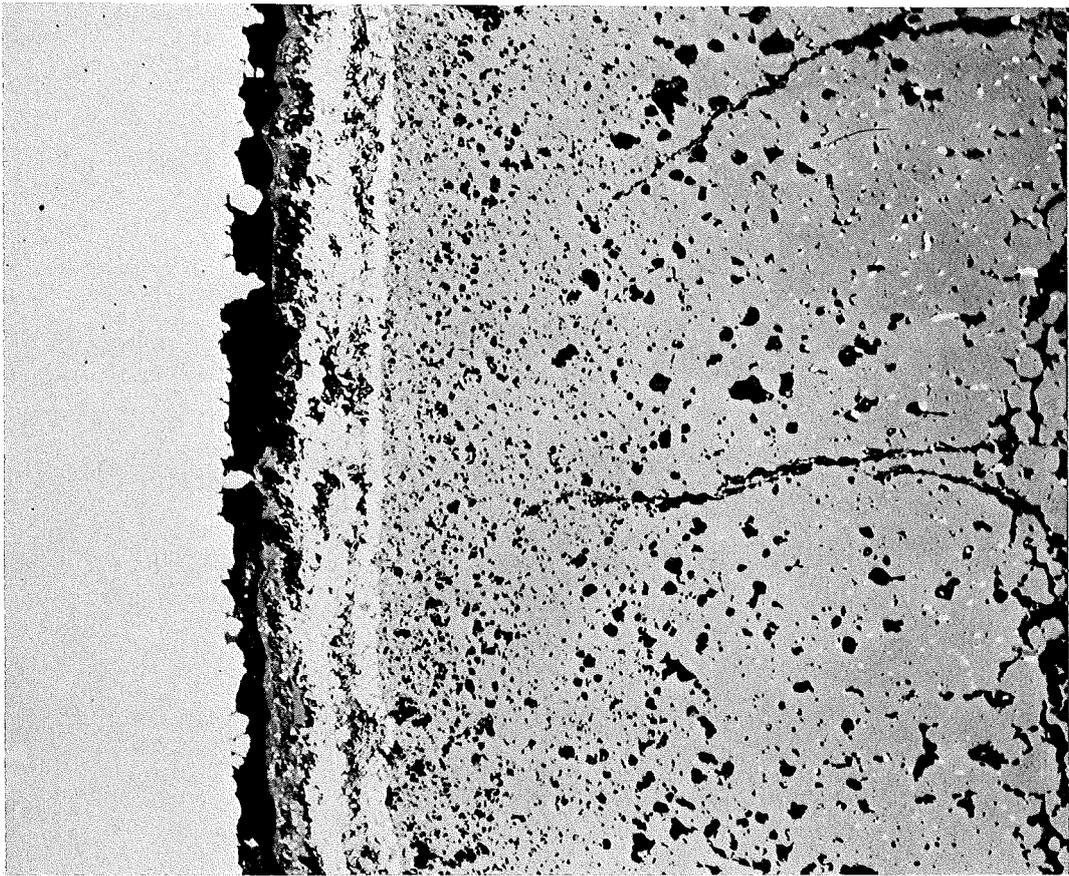
HZ-17a-Mo18B-2-24/10 100x

0,2 mm

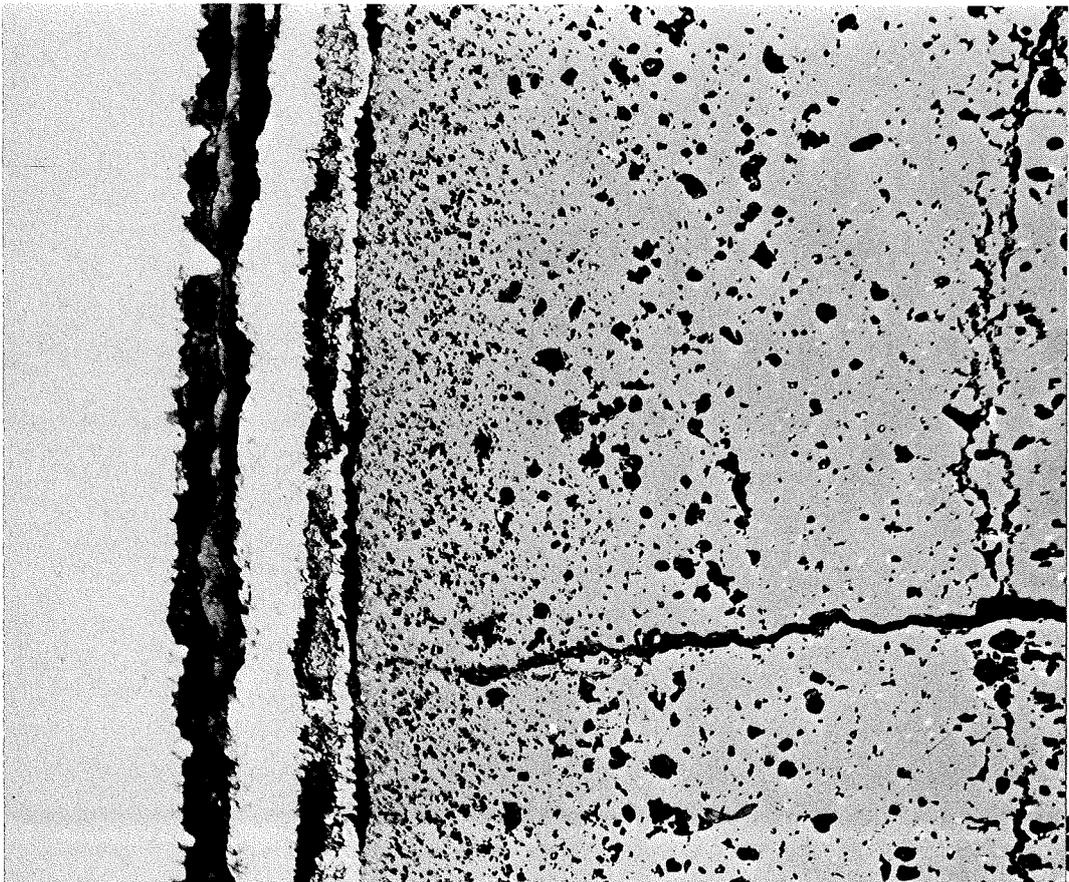
-I/29 -
zu Prüfling Mol 8B-2
A3



- I/30 -
zu Prüfling Mol 8B-2
A 3

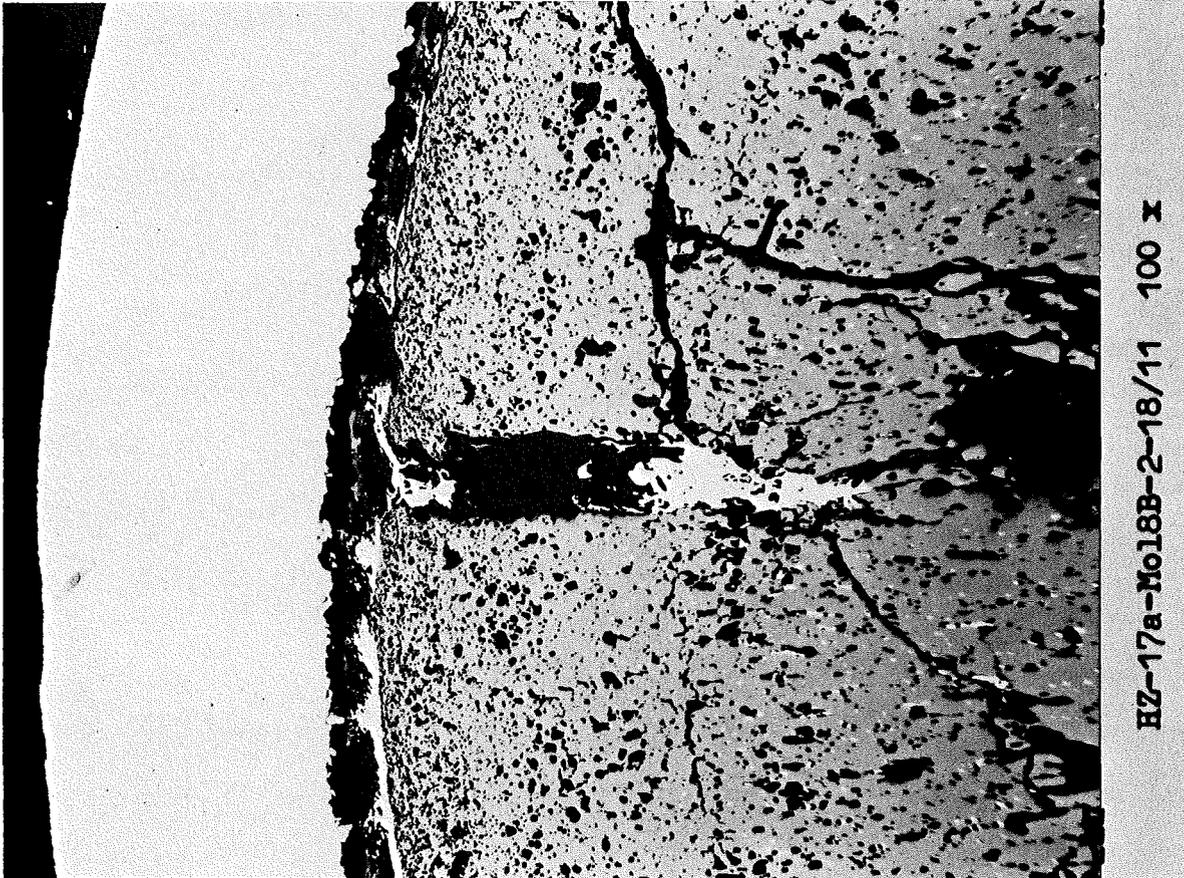


HZ-17a-Mol8B-2-18/9 200 x



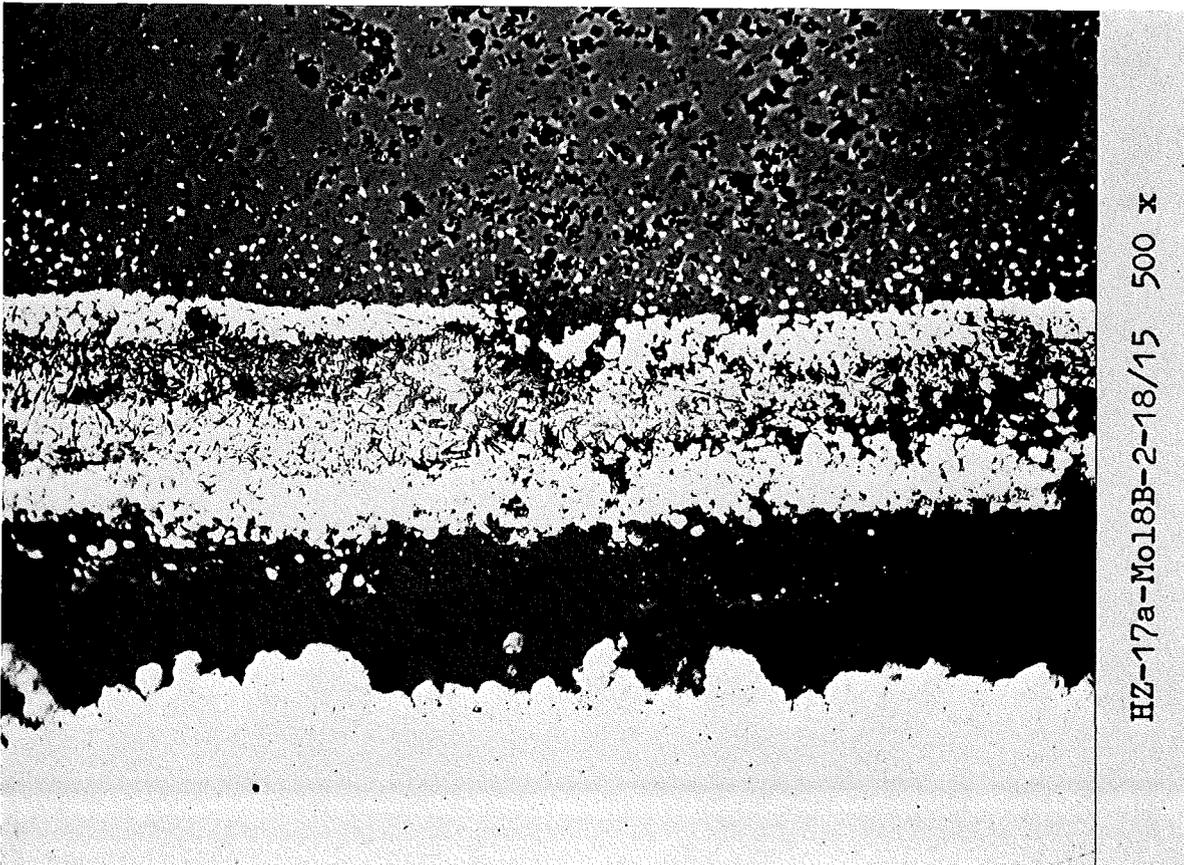
HZ-17a-Mol8B-2-18/14 200 x

0,1mm



HZ-17a-Mol8B-2-18/11 100 x

0,2 mm



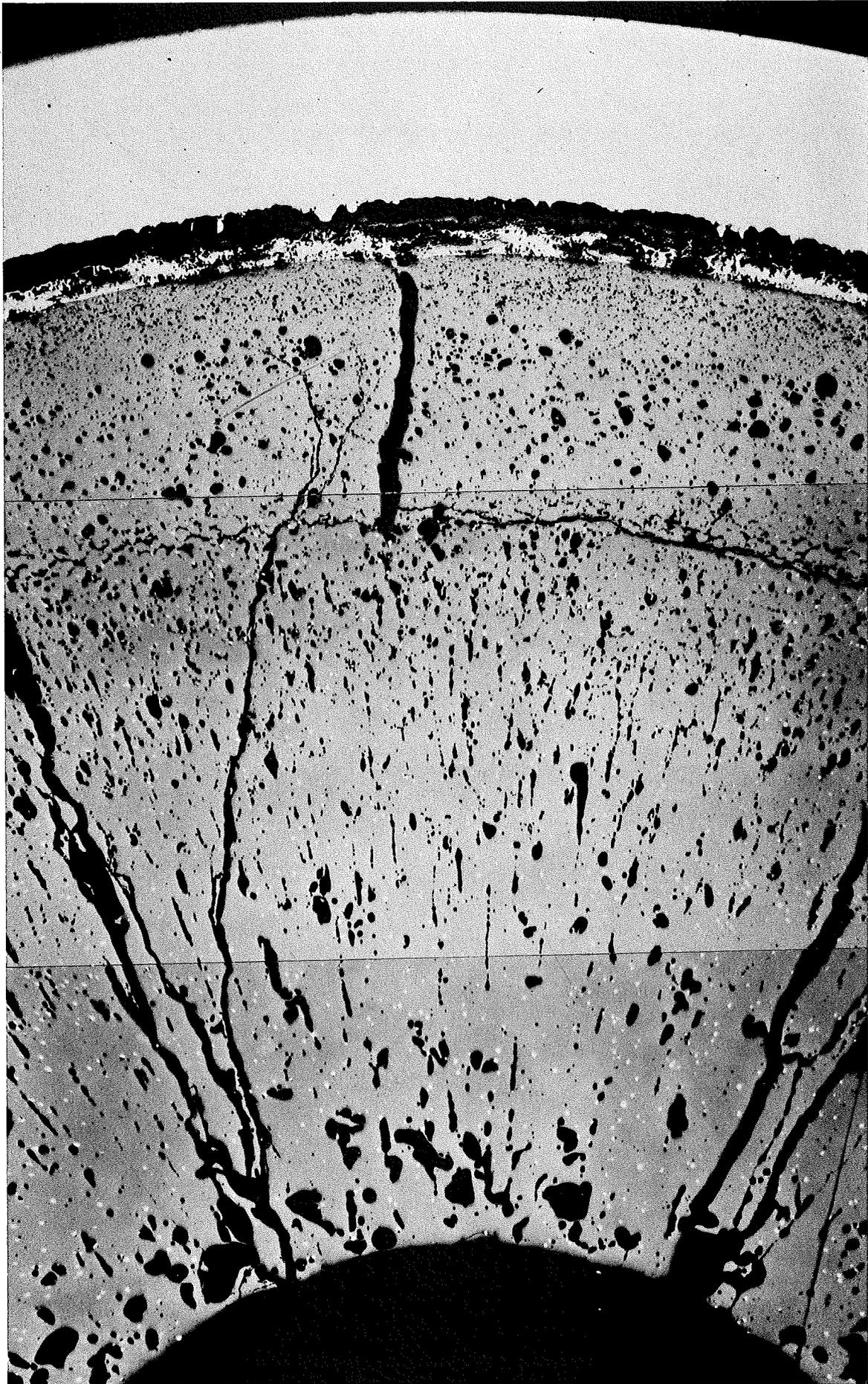
HZ-17a-Mol8B-2-18/15 500 x

0,04 mm

-I/32-

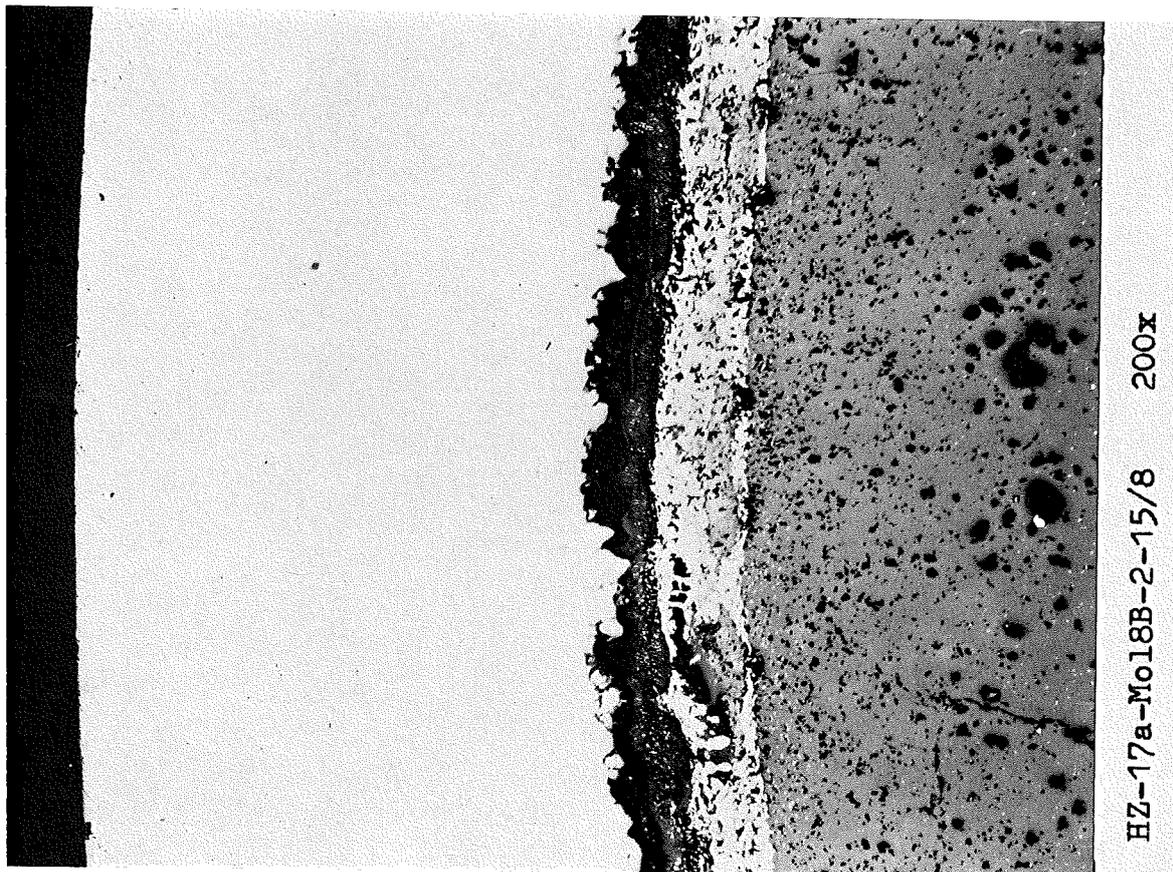
zu Prüfling Mol 8B-2

A4



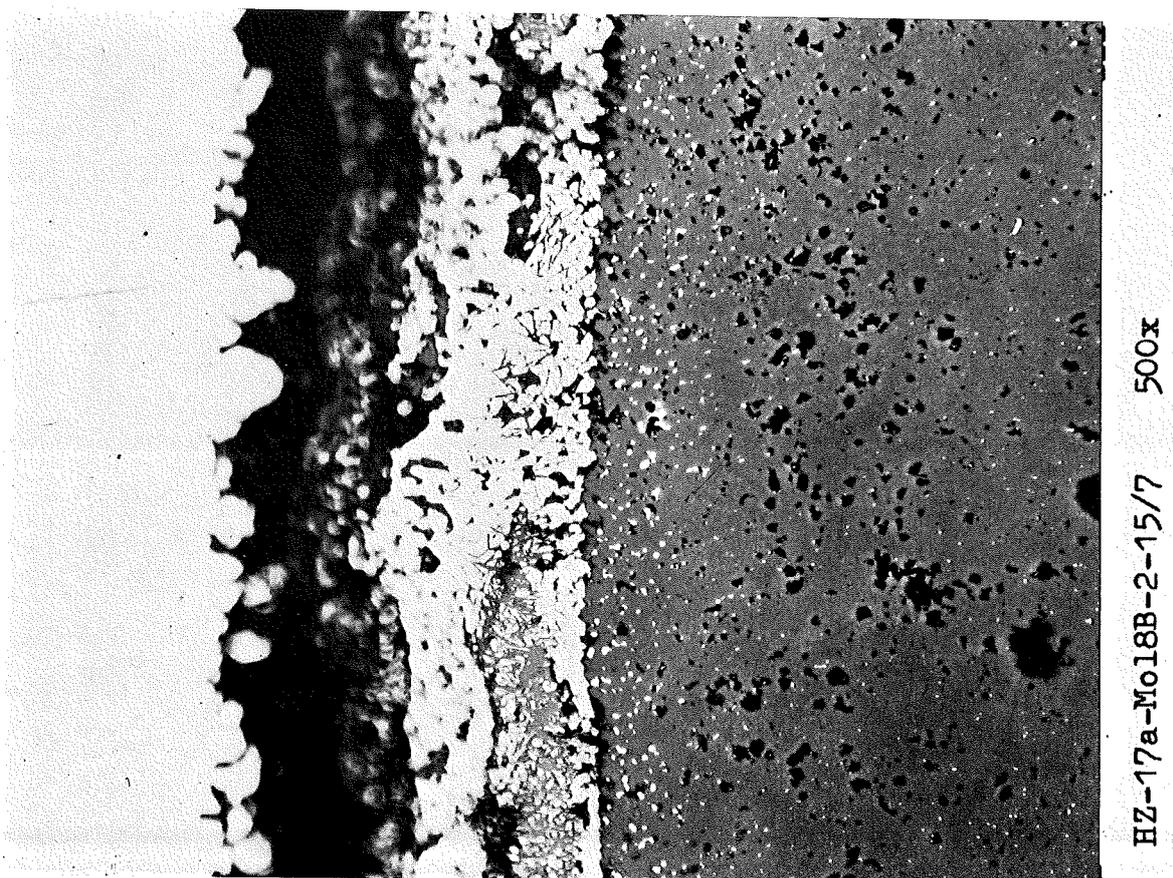
zu Prüfling Mol 8B-2

A 4



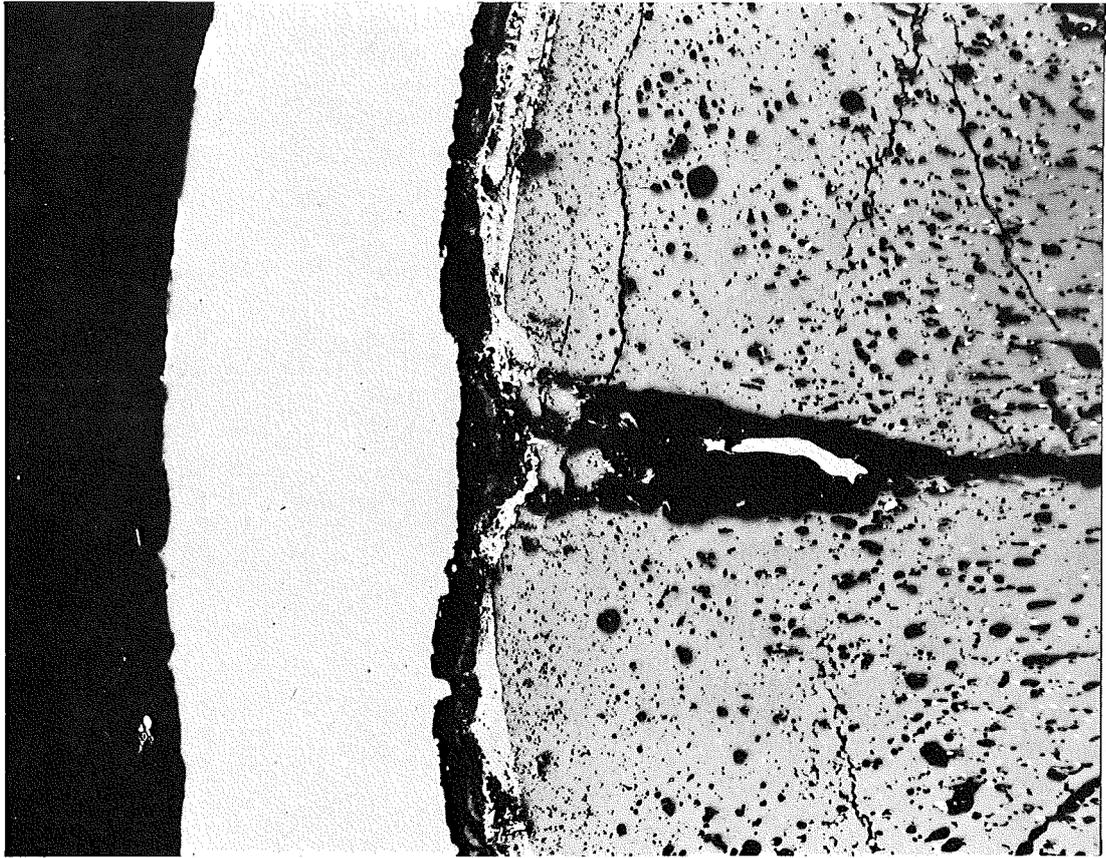
HZ-17a-Mo18B-2-15/8 200x

0,1 mm



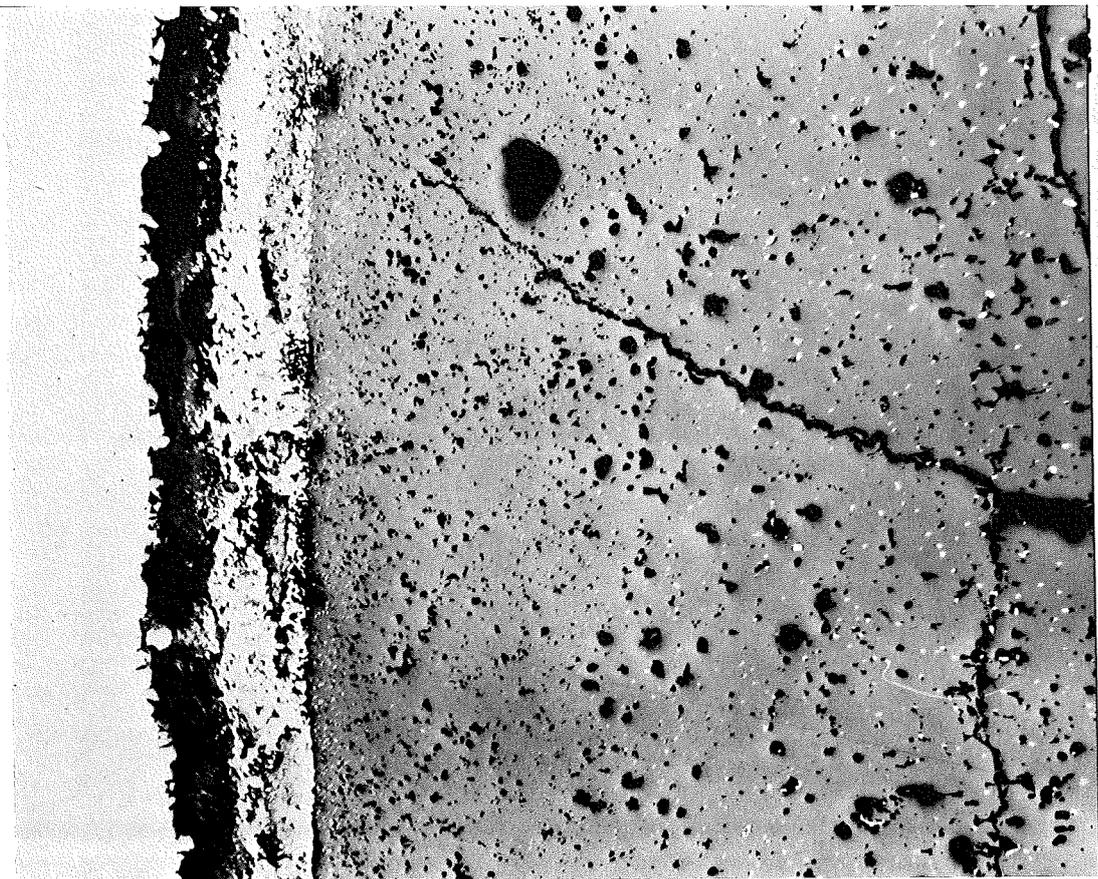
HZ-17a-Mo18B-2-15/7 500x

0,04 mm



HZ-17a-Mo18B-2-15/10 100x

0,2 mm



HZ-17a-Mo18B-2-15/12 200x

0,1 mm

-I/35-
zu Prüfling Mol 8B-2
A 5



4

0,2 mm



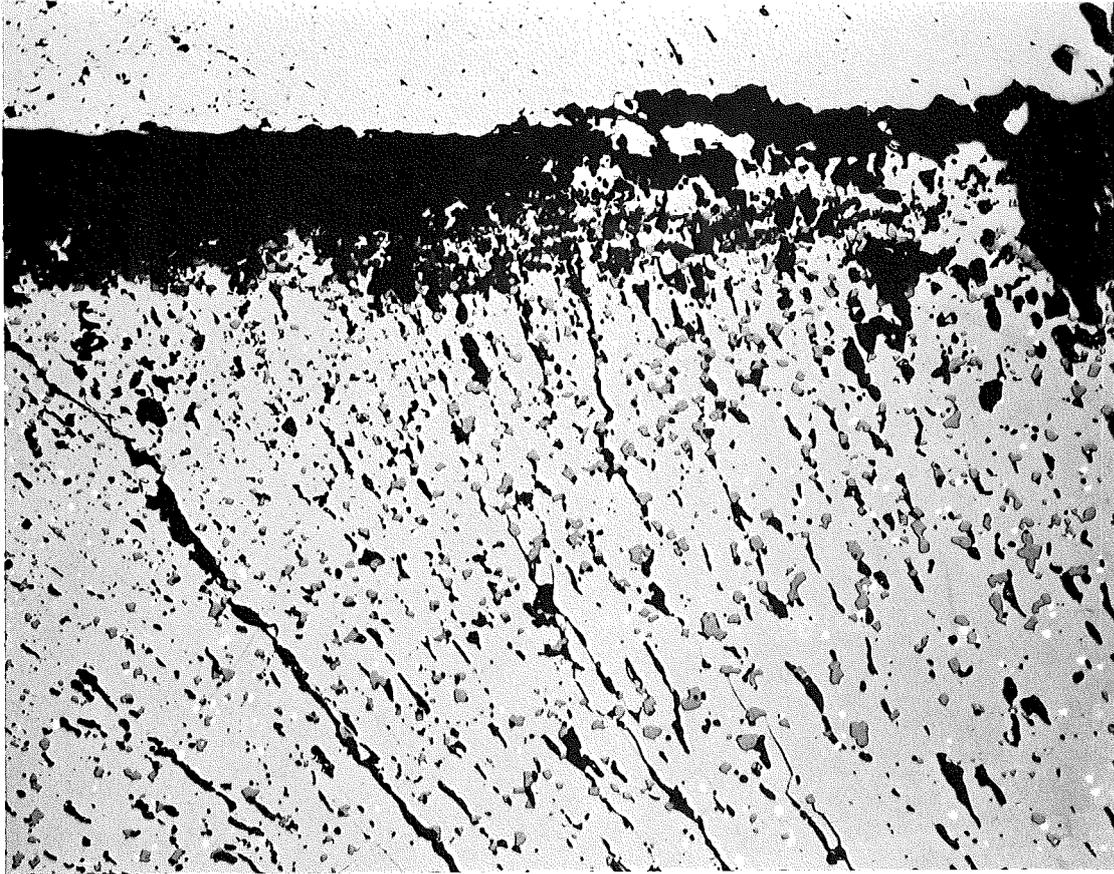
HZ-17a-Mol8B-2-12/8 200 x



HZ-17a-Mol8B-2-12/10 200 x

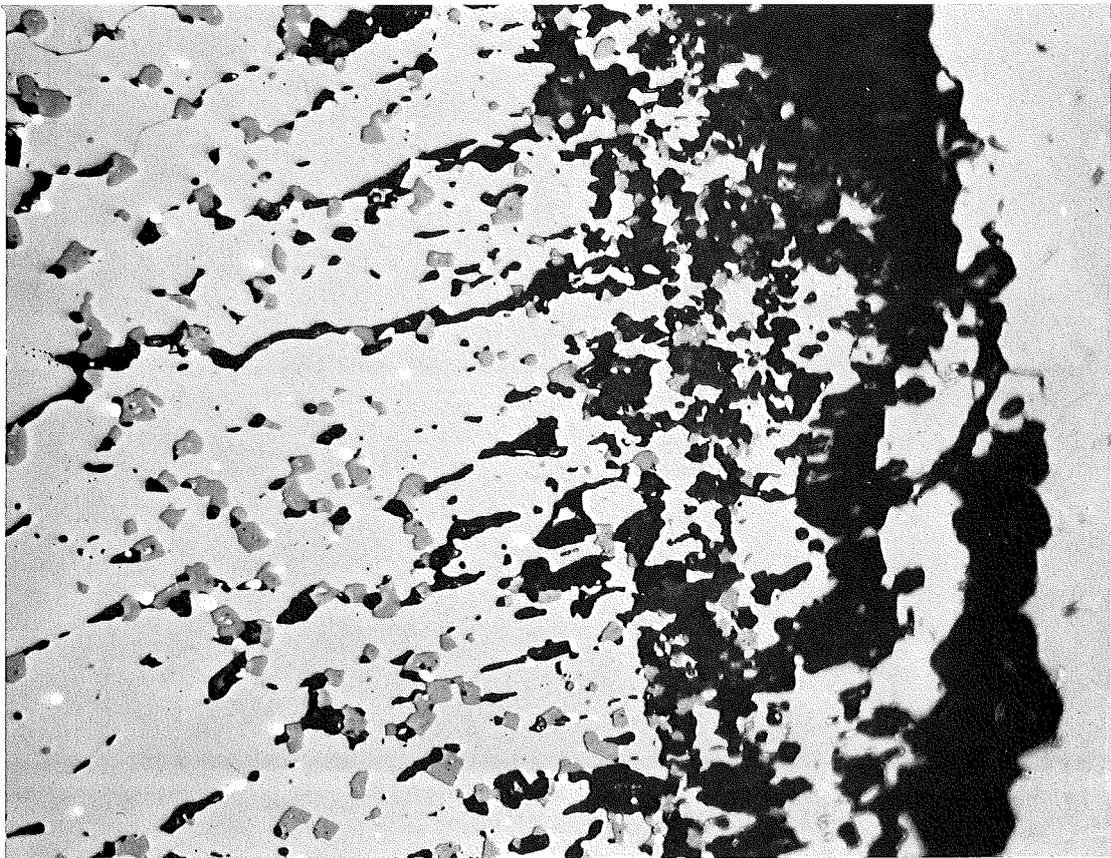
0,1mm

-1/37-
zu Prüfling Mol 8B-2
A 6



HZ-17a-Mo18B-2-7/10 200x

0,1 mm



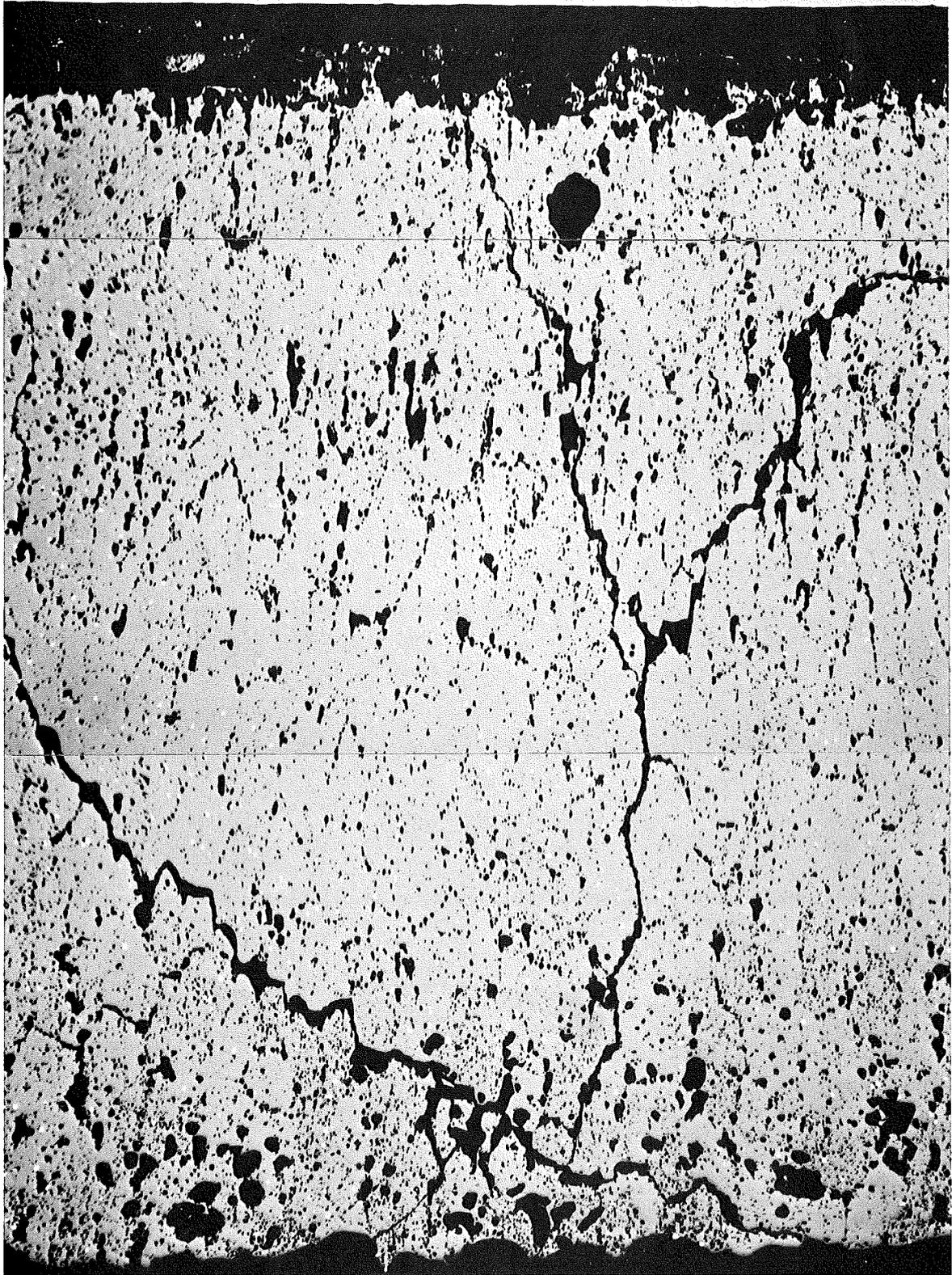
HZ-17a-Mo18B-2-7/11 500x

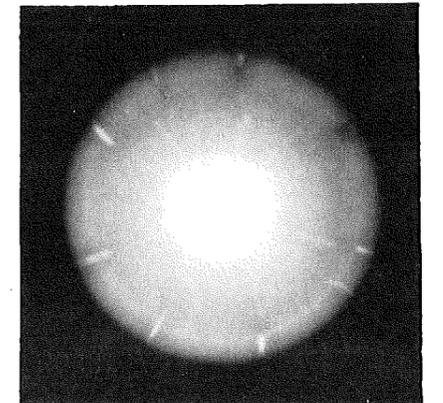
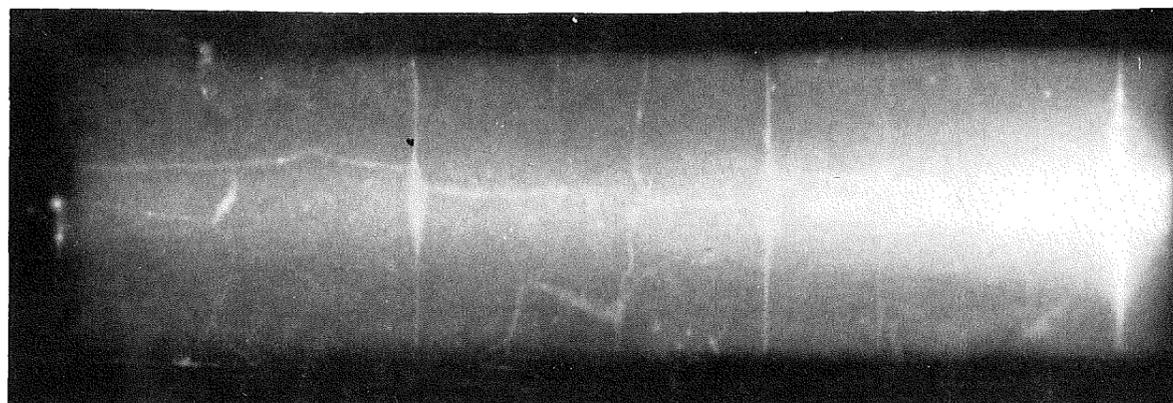
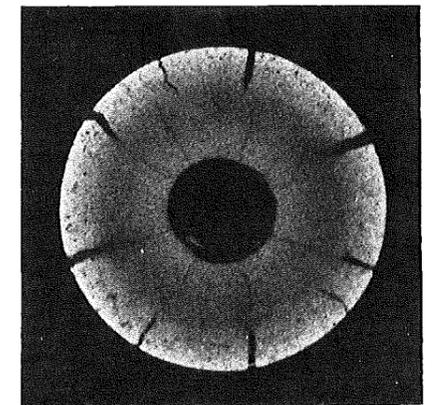
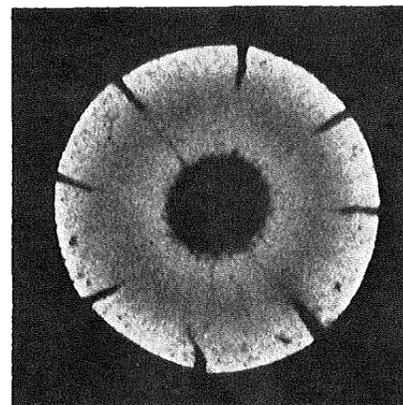
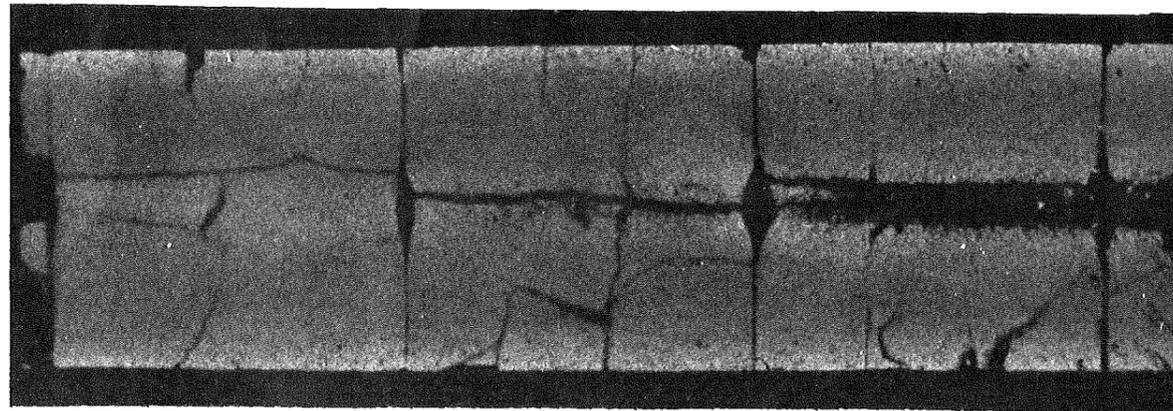
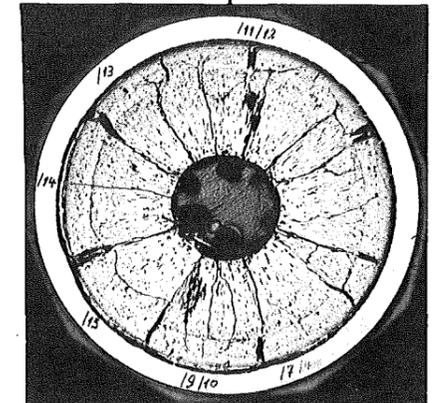
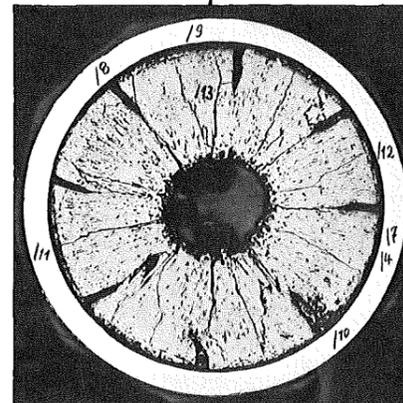
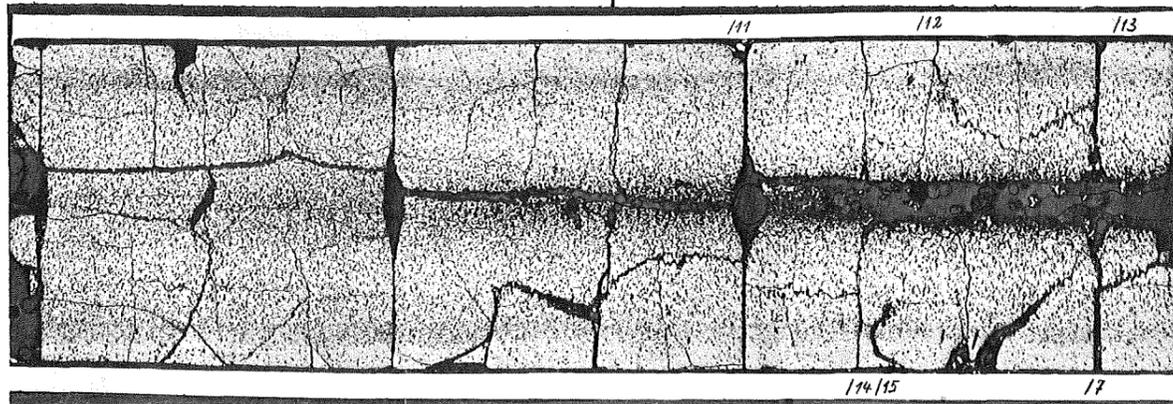
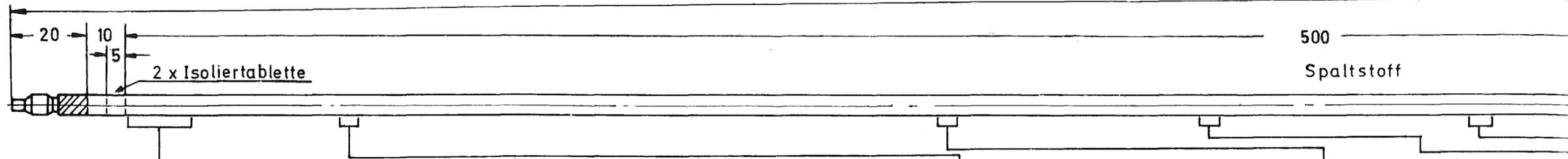
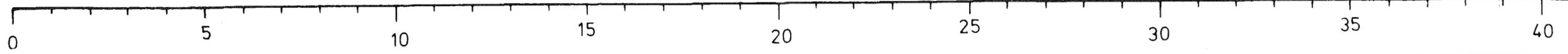
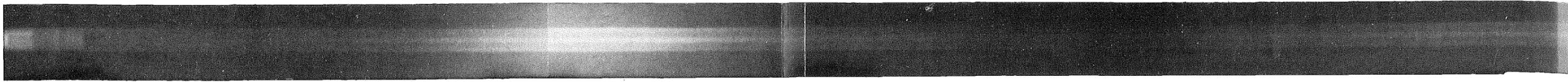
0,04 mm

-1/38-

zu Prüfling Mol 8B-2

A 6





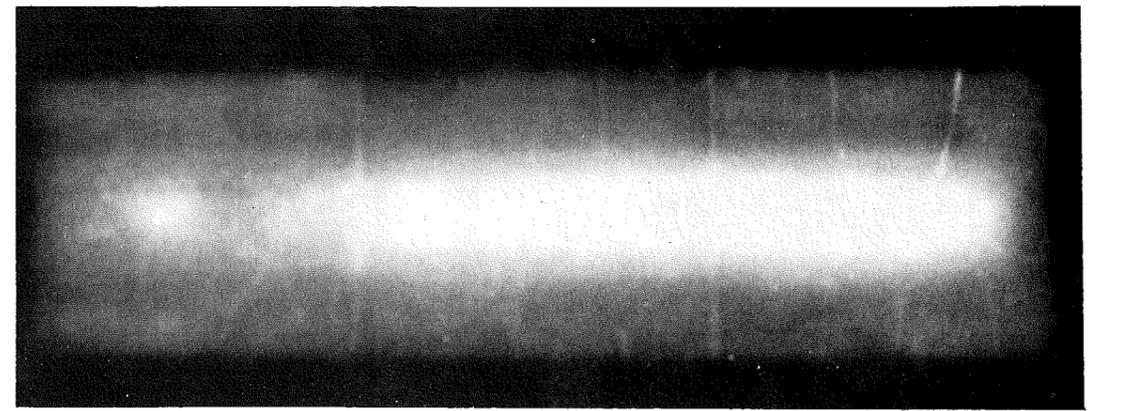
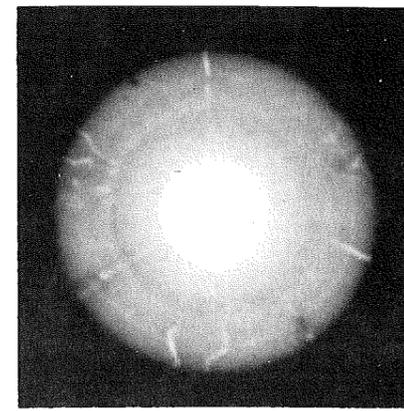
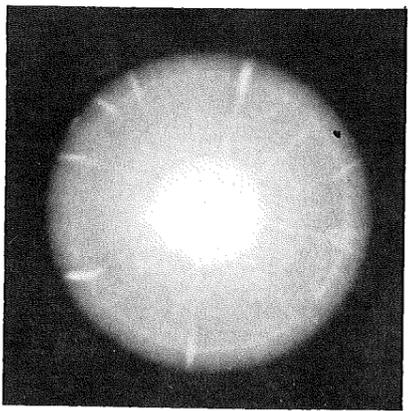
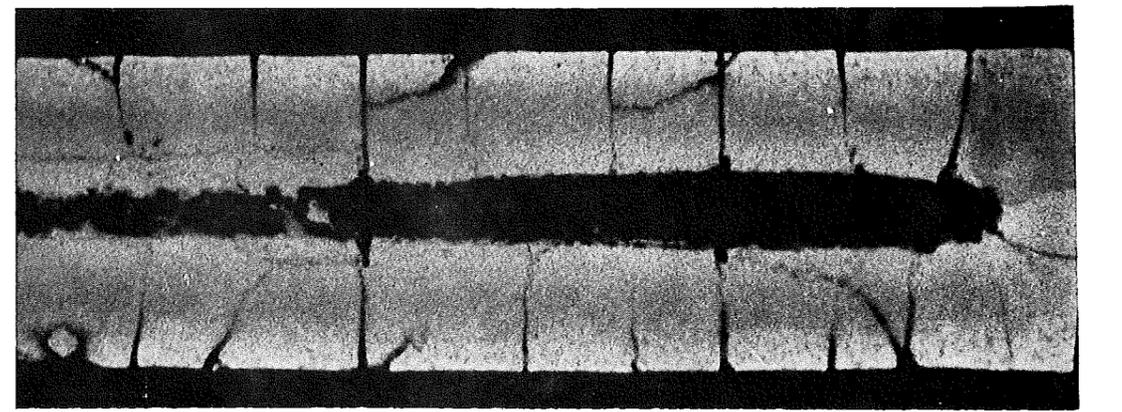
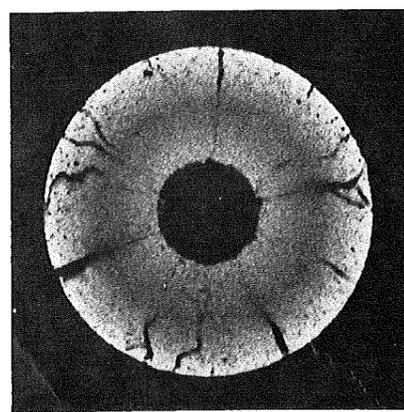
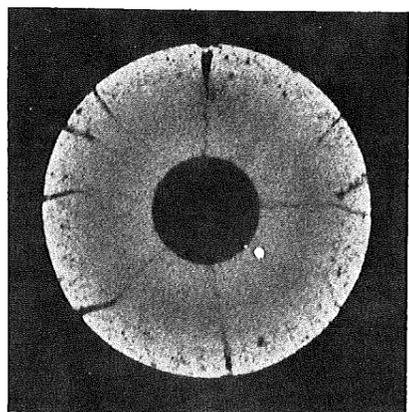
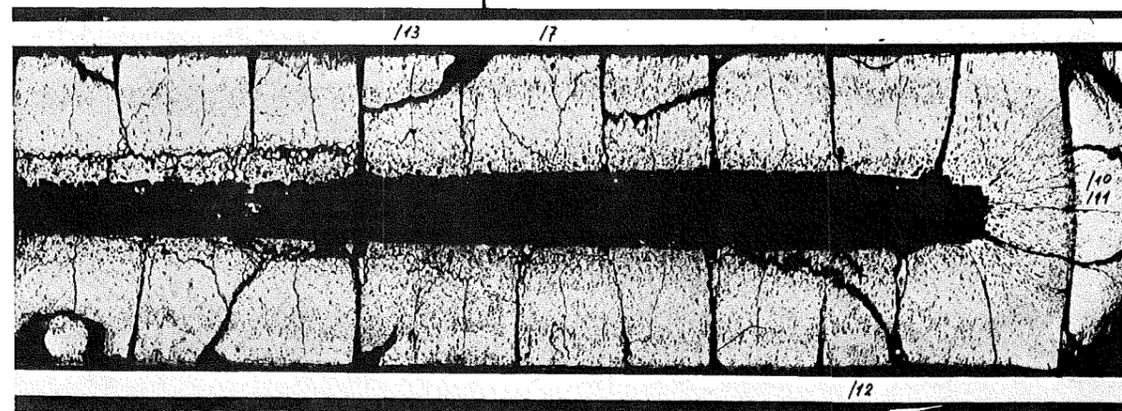
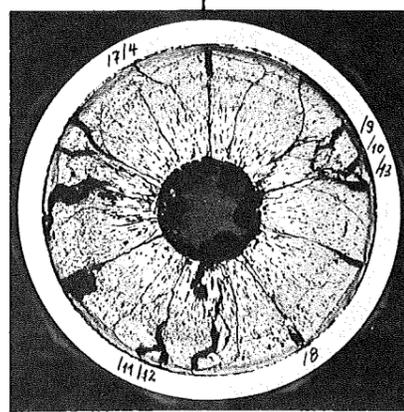
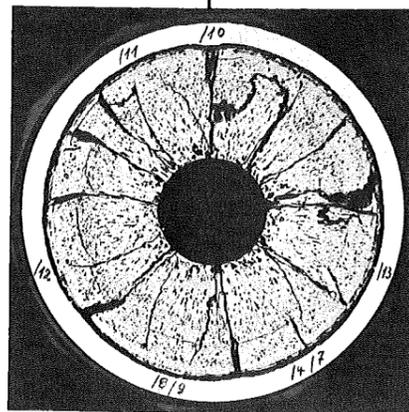
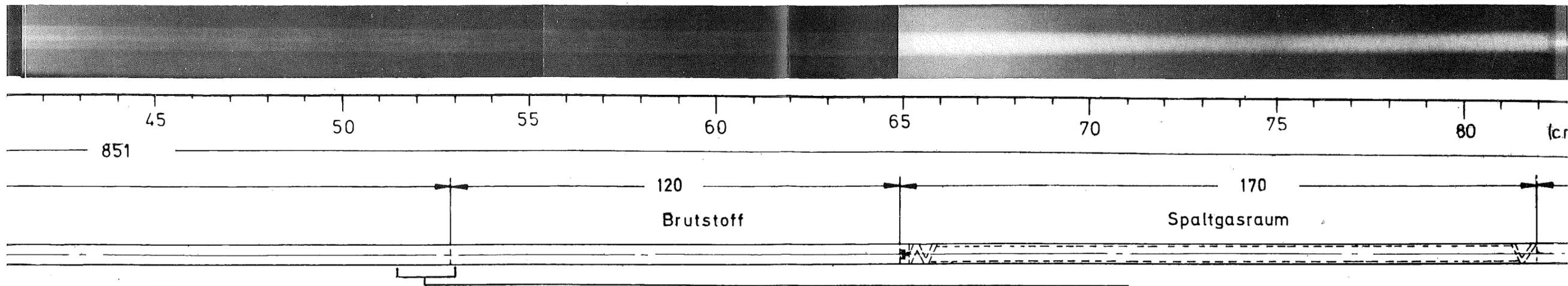
1

1mm

2

3

1mm



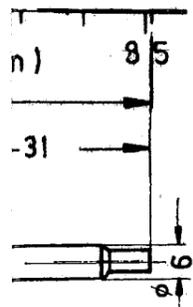
4

5

1mm

6

1mm



A

B

C

Prüfling Mo1-8B/2

Brennstoff:

Form : Tabletten
Zusammensetzung : (U,Pu)O₂
Tablettendichte : 84 % th.D.

Hülle:

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

Geometrie:

Länge des Prüflings : 851 mm
Länge der Brennstoffsäule : 500 mm
Radiale Spaltweite : 70,um
Schmierdichte : 79,6 % th.D.

Bestrahlung:

Einrichtung : FAFNIR
NaK-Bestrahlungseinrichtung
Dauer : 412 Vollasttage
Ende : 2.2.1972
Rechn. Abbrand max. : 87 MWd/kg M
Stableistung max./mittl. : 453/308 W/cm