

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

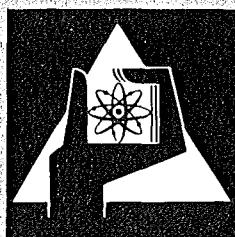
Januar 1974

KFK 1814

Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

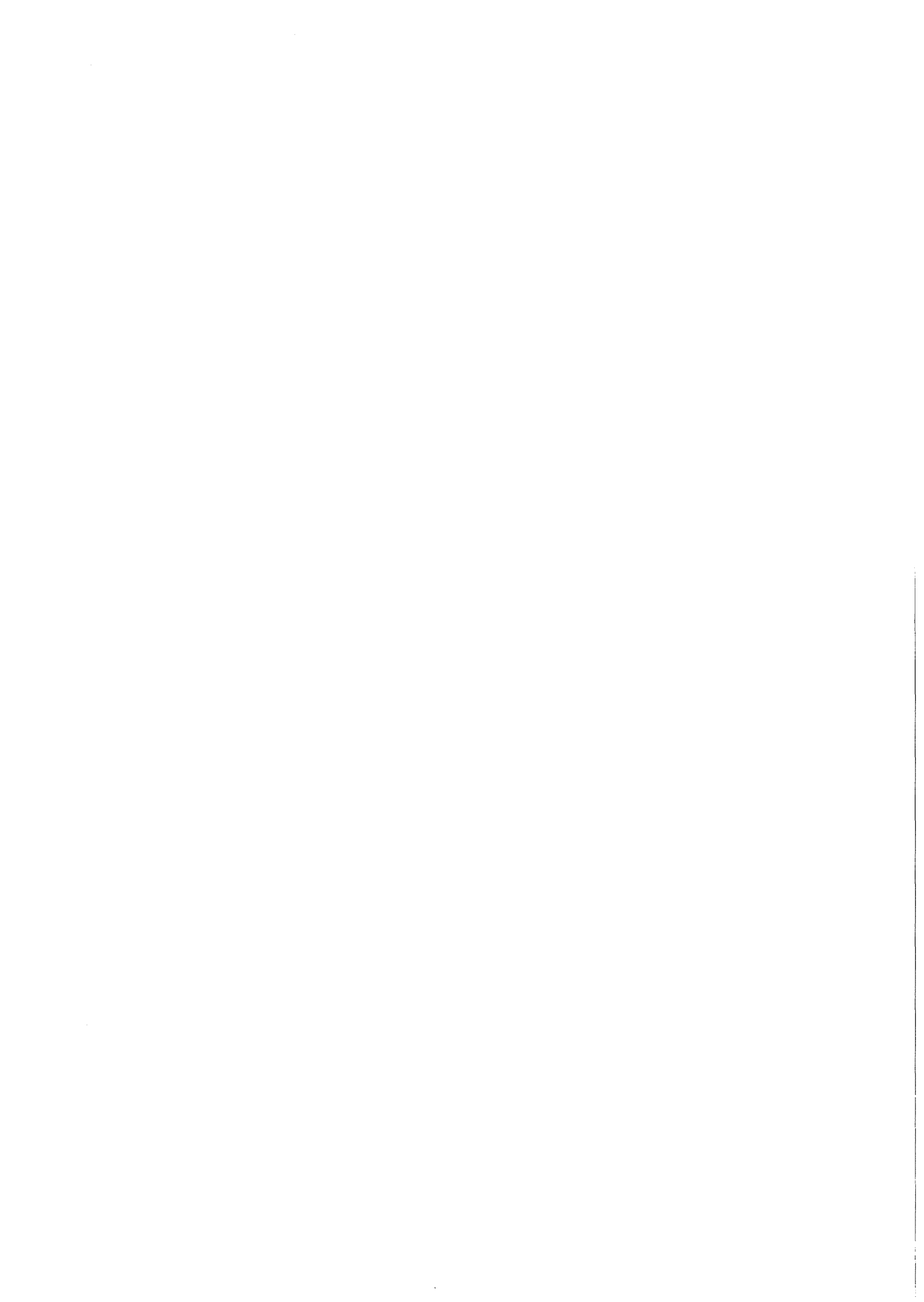
Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung der
 UO_2 - PuO_2 -Brennstab-Prüflinge im Versuch DFR-304

K. Kummerer, D. Geithoff



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

KARLSRUHE



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

K F K 1 8 1 4

Institut für Material- und Festkörperforschung

Projekt Schneller Brüter

Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung der
UO₂-PuO₂-Brennstab-Prüflinge im Versuch DFR-304

von

K. Kummerer, D. Geithoff

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

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

Der in diesem Bericht beschriebene Bestrahlungsversuch basiert auf der Zusammenarbeit mehrerer Arbeitsgruppen im Kernforschungszentrum Karlsruhe sowie auf den vertragsgemäßen Dienstleistungen der U.K.A.E.A. Die vielfältige Mühe und Sorgfalt aller Beteiligten sei ausdrücklich anerkannt. Auch danken wir allen, die unmittelbar zur Abfassung dieser Dokumentation beitrugen, insbesondere Herrn W. Ernst für die Ausarbeitung der Faltblätter, Diagramme und Abbildungen sowie Frau B. Hauth für die Reinschrift des Manuskriptes und für die redaktionelle Hilfe.

Dezember 1973

K. Kummerer, D. Geithoff

KURZFASSUNG

Der im Rahmen der Brennstabentwicklung für schnelle Brutreaktoren durchgeführte Bestrahlungsversuch DFR-304 umfaßt die Bestrahlung von 3 Brennstäben mit UO_2 - PuO_2 -Brennstoff und einer Hülle aus Edelstahl unter NaK-Kühlung im schnellen Fluß des Dounreay Fast Reactors. Die Auslegung der Stäbe hinsichtlich Materialzusammensetzung sowie die betriebliche Beanspruchung stellt in gewissen Grenzen eine Simulation der Verhältnisse in einem prototypischen schnellen Brutreaktor wie dem SNR-300 dar. Der Stabdurchmesser war 6,35 mm. Die Hülle aus hochwarmfestem Edelstahl hatte eine Wandstärke von 0,40 mm. Der aus Tabletten aufgebaute Brennstoff hatte eine Schmierdichte von ca. 83 % der theoretischen Dichte. Die Stablänge war aber nur ein Bruchteil echter Brüterbrennstäbe. Jedoch war das Verhältnis zwischen Brennstoffvolumen und Spaltgasraum wieder typisch.

Dieser Bestrahlungsversuch ist in erster Linie als Vorläufer des Bündelversuches DFR-350, der anschließend im zentralen Hexagon des DFR stattfand, zu verstehen. Die 3 Stäbe wurden in einem sogenannten "Trefoil" zusammen auf einer Brennelement-Position des DFR eingesetzt. Die maximale Stableistung am Anfang der Bestrahlung war etwas über 500 W/cm. Die (berechnete) maximale Temperatur an der Hüllinnenwand betrug etwa 670 °C. Der Zielabbrand wurde mit einem lokalen Maximalwert von 56.000 MWd/t Metall etwas überschritten, ohne daß ein Stabschaden auftrat.

Der vorliegende Bericht stellt eine Dokumentation dieses Bestrahlungsversuches dar. Es sind darin alle Einzelheiten über die Aufgabenstellung, die Auslegung und Konstruktion der Stäbe, über die Staberstellung, die Prüfungen vor der Bestrahlung, über den Bestrahlungsablauf sowie schließlich über die zerstörungsfreie und die zerstörende Nachuntersuchung der bestrahlten Stäbe zusammengestellt.

Das wichtigste Ergebnis bei diesem Versuch war, daß dieser Stabtypus unter Schnellbrüterbedingungen einwandfrei funktionierte. Damit war die Bahn grundsätzlich frei für weitere Bestrahlungen größeren Umfangs im Dounreay Fast Reactor.

11.12.1973

A B S T R A C T

Design, Irradiation and Examination of the UO_2 - PuO_2 Fuel Pins in the Test DFR - 304

Within the fuel pin development for fast breeder reactors the irradiation experiment DFR-304 comprises the irradiation of 3 fuel pins with UO_2 - PuO_2 fuel and a stainless steel cladding in the fast flux of the NaK cooled Dounreay Fast Reactor. The design of the pins with respect of composition and geometry as well as of operational conditions was to some extent representative for a prototype fast reactor like SNR-300. The pin diameter was 6.35 mm. The cladding had a wall thickness of 0.40 mm. The pellet fuel had a smeared density of 80 % of the theoretical value. The pin length, however, was only a fraction of real breeder pins. But the ratio of fuel volume to fission gas plenum was again typical.

This irradiation experiment primarily is to be considered as a precursor of the bundle irradiation DFR-350, which afterwards took place in the central hexagon of the DFR. The 3 pins were assembled in a so-called "trefoil" which was inserted into a fuel position of the DFR. The maximum linear rod power at begin of irradiation was a little above 500 watts/cm. The (calculated) maximum temperature at the clad inner surface was about 670 °C. The really achieved local maximum burnup of 56,000 MWd/t M surpassed the target burnup slightly without any pin irregularity.

This report is a documentation of the whole irradiation experiment and includes all data and facts concerning the experimental objectives, the pin design and specifications, the fabrication of the pins and the pre-irradiational tests, the irradiation history and, finally, the nondestructive and destructive post irradiation examination.

The most important result of the experiment was the operational prove under fast breeder conditions for this pin type. Consequently, the way was open for further irradiations with larger numbers of pins in the Dounreay Fast Reactor.

<u>Inhalt:</u>	Seite
1. Einführung	1
2. Aufgabenstellung und Versuchsziel	3
3. Auslegung des Versuches	4
3.1 Bestrahlungsposition und Bestrahlungseinsatz	6
3.2 Stabgeometrie	6
3.3 Brennstoff	8
3.4 Hülle	8
3.5 Stableistung, Temperatur, Abbrand	8
4. Konstruktion der Prüflinge und Spezifikationen	9
5. Herstellung der Prüflinge	11
5.1 Ausgangspulver für Brennstoff und Brutstoff	11
5.2 Brennstoff-Tabletten	13
5.3 Brutstoff-Tabletten	13
5.4 Hüll- und Strukturmaterial	13
5.5 Fertigung und Prüfung der Stäbe	16
6. Bestrahlungseinrichtung und Reaktorposition	21
7. Ablauf der Bestrahlung	21
7.1 Bestrahlungszeit und Reaktorzyklen	21
7.2 Neutronenfluß	22
7.3 Spezifische Leistung und Stableistung	31
7.4 Kühlmittel-Bedingungen	31
7.5 Abbrand	34
8. Untersuchung und Demontage des Bestrahlungseinsatzes	38
9. Zerstörungsfreie Untersuchung der Prüflinge	38
9.1 Visuelle Inspektion	39
9.2 Durchleuchtung	41
9.3 Äußere Vermessung	48
9.4 Gamma-Spektrometrie	59

	Seite
10. Spaltgasbestimmungen	69
11. Keramografie und Metallografie	69
12. Radiochemische Abbrandbestimmungen	73
13. Dokumentation von Keramografie und Metallografie	79
14. Schlußfolgerungen	79
Literatur	81
Liste der Tabellen	82
Liste der Abbildungen	83
Anhang 1 : Konstruktionszeichnungen	85
Anhang 2 : Stabbegleitkarten	95
Anhang 3 : Übersichten und Keramografie	99
Anhang 4 : Metallografie	131

1. Einführung

Bei der Entwicklung von Brennelementen für schnelle Brutreaktoren ist ein umfassendes Programm von Bestrahlungsexperimenten abzuwickeln. Bei der Bestrahlung ganzer Brennstäbe kann man dabei etwa folgende Stufen unterscheiden:

- Bestrahlung von Stabprüflingen im thermischen Reaktor
- Bestrahlung von Einzelstäben im schnellen Neutronenfluß
- Bestrahlung von Stabbündeln im schnellen Fluß

Wir haben es beim Bestrahlungsversuch DFR-304 mit der Bestrahlung von 3 einzelnen Brennstäben im schnellen Fluß des Dounreay Fast Reactors (D F R) in Schottland/Großbritannien zu tun. Die ersten Überlegungen hierzu gehen auf das Jahr 1965 zurück. Neben der eigenständigen Bedeutung von Stabbestrahlungen bekam dieser Versuch auch den Charakter einer Monitor-Bestrahlung für spätere Versuche an ganzen Brennstabbündeln im gleichen Reaktor und unter ähnlichen Bedingungen. Bekanntlich baute die 1 1/2 Jahre später beginnende Bündelbestrahlung DFR-350 [1] auf den ersten zufriedenstellenden Betriebserfahrungen mit dem Trefoil DFR-304 auf. "Trefoil" ist die Bezeichnung des von der UKAEA⁺) konstruierten und bereitgestellten Dreistabeinsatzes für den DFR, in dem die Bestrahlung stattfand.

Mit den 3 Stäben des Versuches DFR-304 kamen in unserem Programm erstmals "prototypisch" ausgelegte Schnellbrüter-Brennstabprüflinge zur Bestrahlung. Die Initiative zu diesem Bestrahlungsversuch kam von GFK, der auch die Federführung während des ganzen Versuchsablaufes einschließlich der Nachuntersuchung oblag. Als Partner auf der Industrieseite des Schnellbrüterprogrammes kamen seit etwa 1967 die Firmen SIEMENS und INTERATOM in das Blickfeld. Besonders von seiten der Firma INTERATOM gingen speziell bei der Nachuntersuchung wesentliche Impulse aus, was dankbar vermerkt sei.

Dieser Bericht faßt alle Einzelheiten der Auslegung, Spezifikation und Prüflingsherstellung zusammen und beschreibt den tatsächlichen Bestrahlungsablauf sowie die zerstörungsfreie und keramografische Nachuntersuchung in zusammenfassender Dokumentation. Die Zusammenstellung benützt

⁺) United Kingdom Atomic Energy Authority, London

neben den zitierten Referenzen eine Vielzahl von internen Niederschriften und persönlichen Mitteilungen. Erwähnt sei auch ein kürzlich erschienener Technischer Bericht der Fa. INTERATOM [2] zu diesem Thema. Die Hauptarbeiten an dem Versuch in all seinen Phasen verteilte sich auf die Jahre 1966 bis 1971. Seither wurden in gesonderten Studien einzelne Phänomene ausgewertet, die demnächst in einem gesonderten Bericht vorgelegt werden [3]. In der nachfolgenden Übersicht ist der Zeitablauf des Versuches grob dargestellt, außerdem sind die für jeden Abschnitt hauptverantwortlichen Stellen bzw. Personen angegeben:

Zeitraum	T e i l a r b e i t	Institution und Hauptbeteiligte
1965/66	Vorüberlegungen, Verhandlungen mit UKAEA	IAR; Kummerer, Karsten
1966	Spezifikationen	IAR; Karsten
1966/67	Herstellung der Stäbe	EURATOM-Institut für Transurane, Karlsruhe
27.6.1967 bis 26.11.1969	Bestrahlung im D F R	D E R E ⁺)
1967 bis 1969	Organisation und Betreuung der Bestrahlung	IAR; Karsten
1969 bis 1972	Organisation und Betreuung der Nachuntersuchung	IMF; Geithoff
4.-6.1971	Zerstörungsfreie Nachuntersuchung	RB/HZ; Scheeder, Enderlein
4.-8.1971	Spaltgasuntersuchungen	RB/CuM; Gräbner
11.1971 - - 2.1972	Keramografie in den Heißen Zellen	RB/CuM; Pejsa
10.-11.71	Abbrandbestimmungen	IRCH; Wertebach
4.-5.1971	Auswertung der γ -Spektren	IMF; Geithoff
1973	Zusammenfassung und Dokumentation der Ergebnisse	IMF; Kummerer, Geithoff

+) Dounreay Experimental Reactor Establishment

2. Aufgabenstellung und Versuchsziel

In der Trefoil-Bestrahlung DFR-304 kamen 3 Brennstäbe mit UO_2 - PuO_2 -Mischoxid und Edelstahlhülle zum Einsatz. Im Aufbau der Prüflinge sowie in den Bestrahlungsbedingungen wurde eine Simulation der Verhältnisse bei Brennstäben in schnellen Na-gekühlten Reaktoren angestrebt. Insbesondere sollte realisiert werden

- eine Bestrahlung im Neutronenfluß eines schnellen Reaktors
- ein integraler Stabaufbau mit Brennstoffzone, Brutstoff und Spaltgasplenum
- ein den Schnellbrüter-Bedingungen ähnlicher Stabdurchmesser um 6 mm
- ein hochlegierter austenitischer Edelstahl als Hüllwerkstoff
- ein Brennstoffgemisch mit repräsentativer UO_2 - PuO_2 -Zusammensetzung
- eine maximale (nominale) Stableistung von ca. 500 W/cm
- eine maximale (nominale) Hüllwandtemperatur von ca. 670 °C
- Kühlung durch fließendes Natrium
- ein maximaler Abbrand von über 50.000 MWd/t M
- genügender zeitlicher Vorlauf, um als Monitor für den Bündelbestrahlungsversuch DFR-350 dienen zu können

Die wesentlichen Unterschiede im Vergleich zu echten Schnellbrüter-Brennstäben liegen in folgenden Beschränkungen:

- Die Stablänge ist viel geringer. Das Gasplenum ist am oberen Stabende, während bei den meisten Schnellbrüter-Prototypen das Gasplenum am unteren Brennstabende ist.
- Wegen des kleineren Neutronenflusses im DFR muß die gewünschte Stableistung durch hohe U-235-Anreicherung erreicht werden.
- Die Schädigung der Metallhülle durch Neutronen ist etwas anders, weil einerseits der Neutronenfluß niedriger, andererseits das Spektrum härter ist.

- Die Kühlung der Stäbe erfolgt mit NaK und zwar in der Strömungsrichtung von oben nach unten.

Im Vergleich zu den Brennstäben der Bündelbestrahlung DFR-350 sind die Unterschiede geringer. Die DFR-350-Stäbe sind kürzer, entsprechend den geometrischen Bedingungen für diesen Bündelversuch. In Abb. 1 ist ein schematischer Vergleich hinsichtlich der Geometrie eines SNR-300-Stabes, eines DFR-350-Stabes und eines DFR-304-Stabes angestellt.

Die Untersuchungsziele während der Bestrahlung und bei den Nachuntersuchungen sind durch folgende Fragestellungen gegeben:

- Bleiben die Brennstäbe bis zum Zielabbrand intakt ?
- Ändert sich die äußere Geometrie der Stäbe, erfolgt insbesondere eine Hüllaufweitung ?
- Verändert sich die Länge der Brennstoff- und Brutstoffsäule ?
- Wie bildet sich der Zentralkanal im Brennstoff aus ?
- Wie ist die radiale und axiale Strukturverteilung im Brennstoff nach der Bestrahlung ?
- Wie groß ist die Spaltgasfreisetzung, welcher Anteil bleibt im Brennstoff in geschlossenen Poren oder im Gitter zurück ?
- Verteilung der Spaltprodukte ?
- Korrosion des Hüllwerkstoffes von innen und außen ?
- Tritt Porenbildung im Hüllwerkstoff auf ?

3. Auslegung des Versuches

In diesem Kapitel sind die Festlegungen und Auslegungsrechnungen bei der Versuchsvorbereitung zusammengefaßt [4]. Diese bildeten die Basis für die Konstruktion der Brennstäbe und die Spezifikationen.

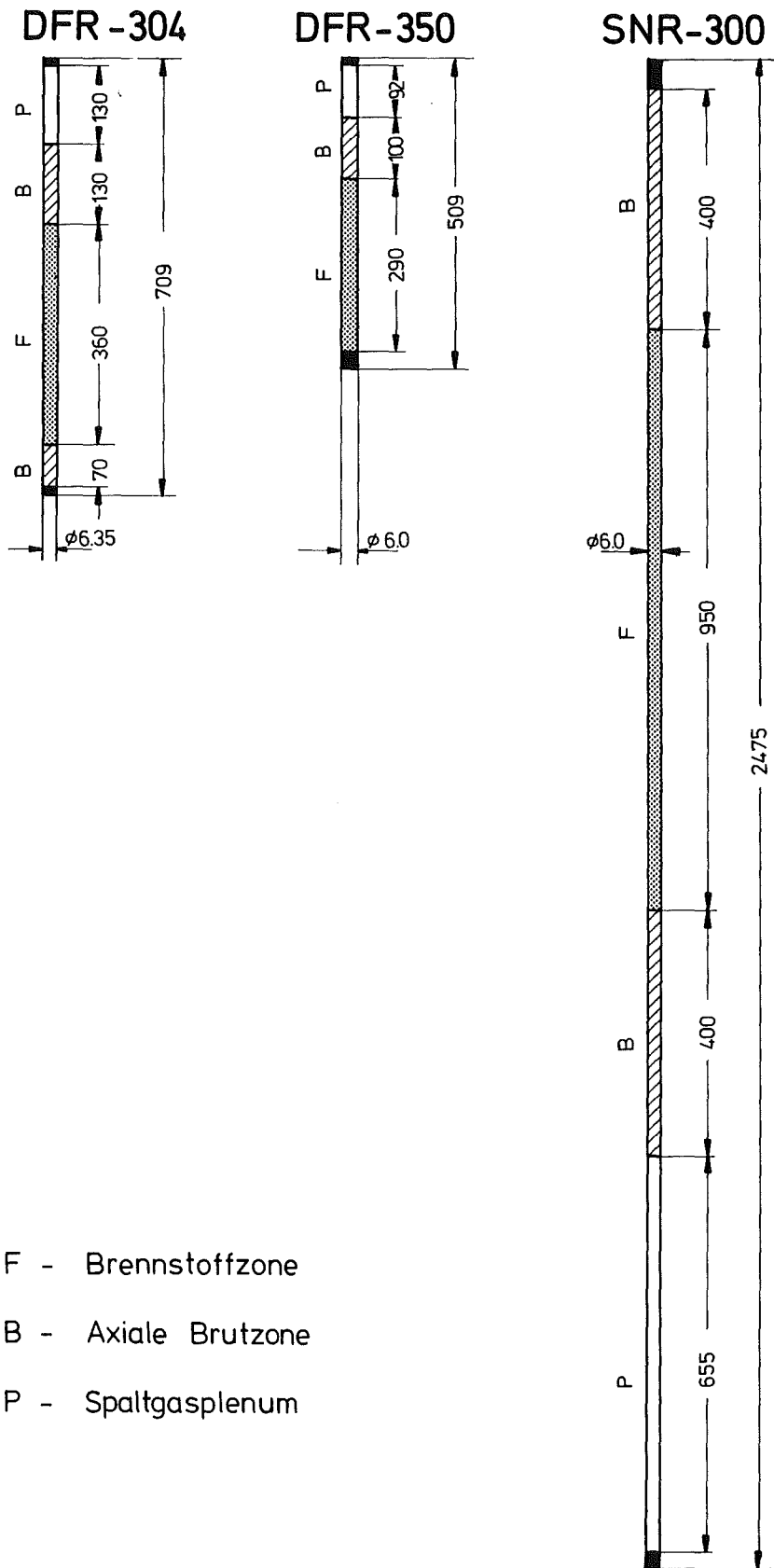


Abb. 1 Vergleich der Stabgeometrie

3.1 Bestrahlungsposition und Bestrahlungseinsatz

Die Bestrahlung soll im Core des DFR erfolgen und zwar in einer sog. R.F.E.-Position⁺⁾. Für die genauere Platzierung im Querschnitt des DFR - siehe Abb. 2 - war Pitch Nr. 8 bis 10 vorgesehen. Diese Angabe bezeichnet einen Abstand vom Zentrum von etwa 10 bis 12 cm. Als Bestrahlungseinsatz für die 3 Stäbe wird das von der UKAEA konstruierte Trefoil genommen. Nähere Angaben hierüber finden sich in Kapitel 6.

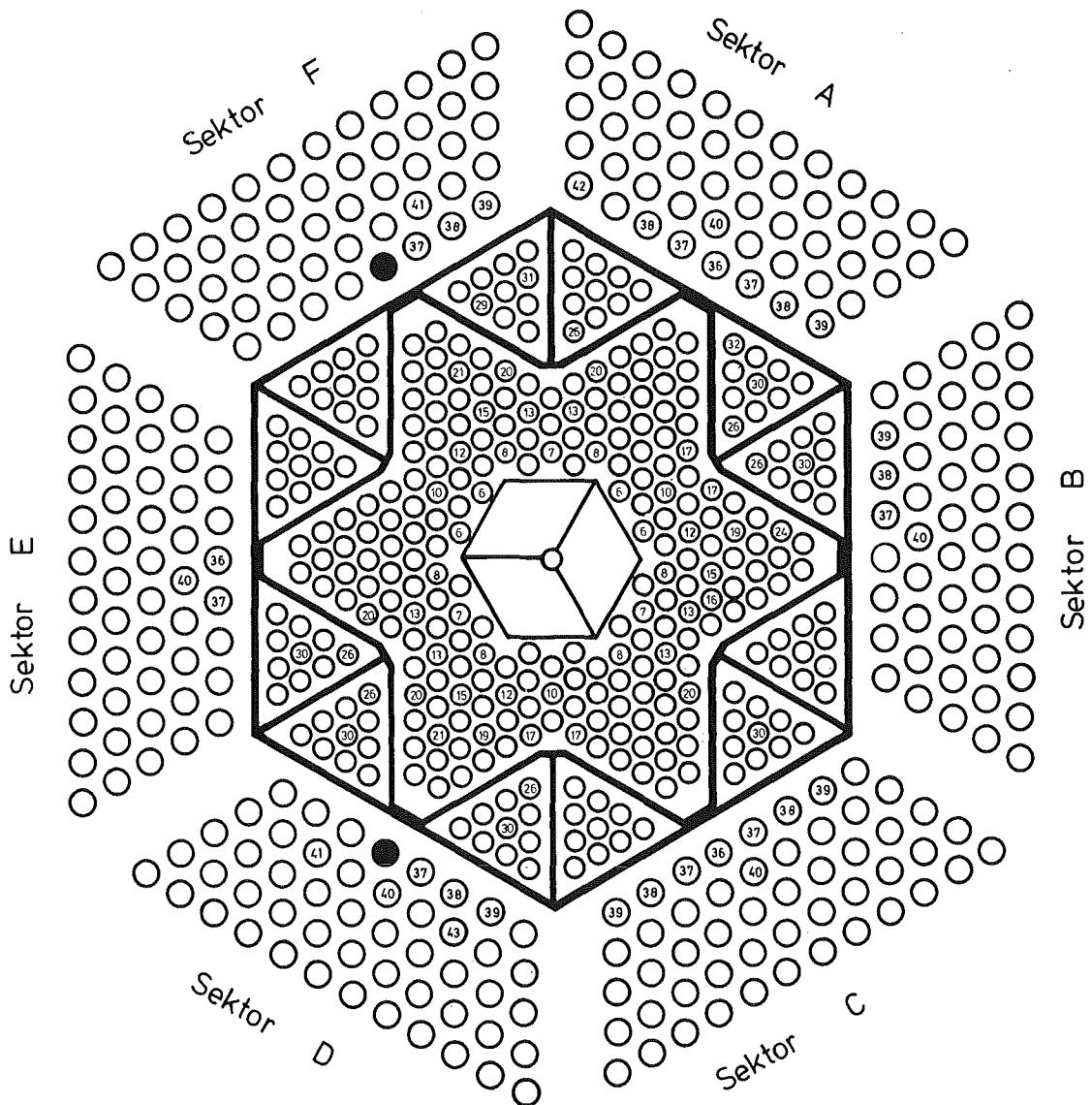
3.2 Stabgeometrie

Die äußere und innere Geometrie der Stäbe wird an die Bedingungen in 3.1 angepaßt. Als Brennstabdurchmesser wird der im Trefoil maximal mögliche gewählt, nämlich 6,35 mm. Diese Durchmesserwahl folgte der Tendenz in der auf 1000 MWe-Kraftwerke hinzielenden Na-1-Studie [5], während die spätere Auslegung für den DFR-350-Versuch sich an der 300 MWd-Prototyp-Studie Na 2 [6] orientierte.

Die Gesamtlänge des Stabes ist durch den Trefoil-Einsatz auf etwa 70 cm festgelegt. 50 cm davon überdecken die Brennstoffzone im DFR. Die Längseinteilung kommt durch folgende Überlegungen zustande:

- Das untere Stabende liegt bereits unterhalb des DFR-Core-Bereiches. Es wird daher ein kurzer unterer Blanket-Abschnitt von 7 cm Länge vorgesehen.
- Der Spaltgasraum wird am oberen, kalten Ende des Brennstabes angebracht. Seine Länge wird auf ca. $1/3$ der Brennstofflänge festgelegt. Eine Abschätzung des maximal möglichen Spaltgasdruckes kommt auf 100 atm.
- Ein oberer Blanket-Bereich von ca. 13 cm soll Spaltgasraum und Brennstoff trennen und somit realistische Verhältnisse annähern.

^{+) R.F.E. = Replaced Fuel Element}



- Brennelemente
 - Positionen für Brutelemente, Nickelreflektoren, Bor-Regelstäbe
 - ○ ○ Positionen für Versuchseinsätze mit Pitch-Nr.
- Hexagon

Abb. 2 Querschnitt durch den Dounreay Fast Reactor

- Damit bleibt für den Brennstoffbereich ein Stababschnitt von ca. 35 cm Länge übrig.

Im Gasplenum befindet sich neben der Spiralfeder 2 starre Einsätze, welche die Längsausdehnung der Tablettensäule auf höchstens 15 mm begrenzen.

3.3 Brennstoff

Als Brennstoff werden gesinterte UO_2 - PuO_2 -Tabletten genommen. Der PuO_2 -Gehalt ist 20 Gew.-% und entspricht damit etwa der Zusammensetzung in einem Schnellbrüter-Brennstoff. Die Anreicherung im Uran-Anteil des Brennstoffes soll möglichst hoch sein, aus Gründen der Verfügbarkeit wird ein U-235-Gehalt von 93 % vorgesehen.

Die Schmierdichte des Brennstoffes wird auf 83 % th.D. festgelegt. Die Tabletten sollen keine Einsenkung erhalten. Außerdem soll ein diametraler Spalt als Schwellraum zur Verfügung stehen.

Die Brutzonen werden mit UO_2 -Tabletten aus Natururan beschickt.

3.4 Hülle

Für die Hüllrohre ist ein stabilisierter austenitischer Edelstahl mit 16 % Cr und 13 % Ni vorgesehen. Die Hüllwandstärke soll 0,4 mm betragen.

3.5 Stableistung, Temperatur, Abbrand

Als Nominalwert der maximalen Stableistung wird 500 W/cm festgelegt. Die maximale nominale Hüllwandtemperatur soll 670 °C betragen. Geplant ist eine Bestrahlung über 6 DFR-Zyklen, die zu einem Maximalabbrand von 80 000 MWd/t führen soll. Nach Ablauf von 3 Zyklen wird eine Zwischenuntersuchung angestrebt.

4. Konstruktion der Prüflinge und Spezifikationen

Der Brennstabaufbau geht aus Abb. 3 und den Konstruktionszeichnungen in Anhang 1 hervor. Die Konstruktion erfüllt die in Kapitel 3 aufgestellten Forderungen der Versuchsauslegung. Die Spezifikationen sind zusammenfassend in Tabelle I dargestellt. Für nicht näher spezifizierte Angaben der Materialzusammensetzung und der Stabfertigung werden Toleranzen entsprechend dem Stand der Technik vorausgesetzt. Bei der Schweißnaht des oberen Endstopfens wird lokal eine Durchmesserüberschreitung bis zu 0,075 mm toleriert.

Tabelle I Spezifikationen für die Brennstäbe DFR-304

Längen- verteilung im Stab	Oberer Endstopfen	9,6 mm
	Spaltgasplenum	130,0 mm
	Obere Brutzone	130,0 ± 0,25 mm
	Brennstoffsäule	360,0 ± 0,50 mm
	Untere Brutzone	70,0 ± 0,25 mm
	Unterer Endstopfen	9,4 mm
Äußere und innere Geometrie	Gesamtlänge	709,0 ± 1,0 mm
	Stabdurchmesser	6,35 ± 0,045 mm
	Hüllwandstärke	0,40 ± 0,04 mm
	Hüllinnendurchmesser	5,550 ± 0,025 mm
	Diam. Spalt Brennstoff/Hülle	0,150 ± 0,050 mm
	Tablettendurchmesser	5,400 ± 0,030 mm
Brennstoff	PuO ₂ -Anteil	20 Gew.-%
	U-235 im Uran	93 Gew.-%
	Tablettendichte	88 % th.D.
	Schmierdichte	ca. 83 % th.D.
Brutstoff, UO ₂ -Tabletten aus Natururan, Dichte		90 % th.D.
Hüllmaterial		W.-Nr. 1.4988
Gasfüllung		1 atm Helium

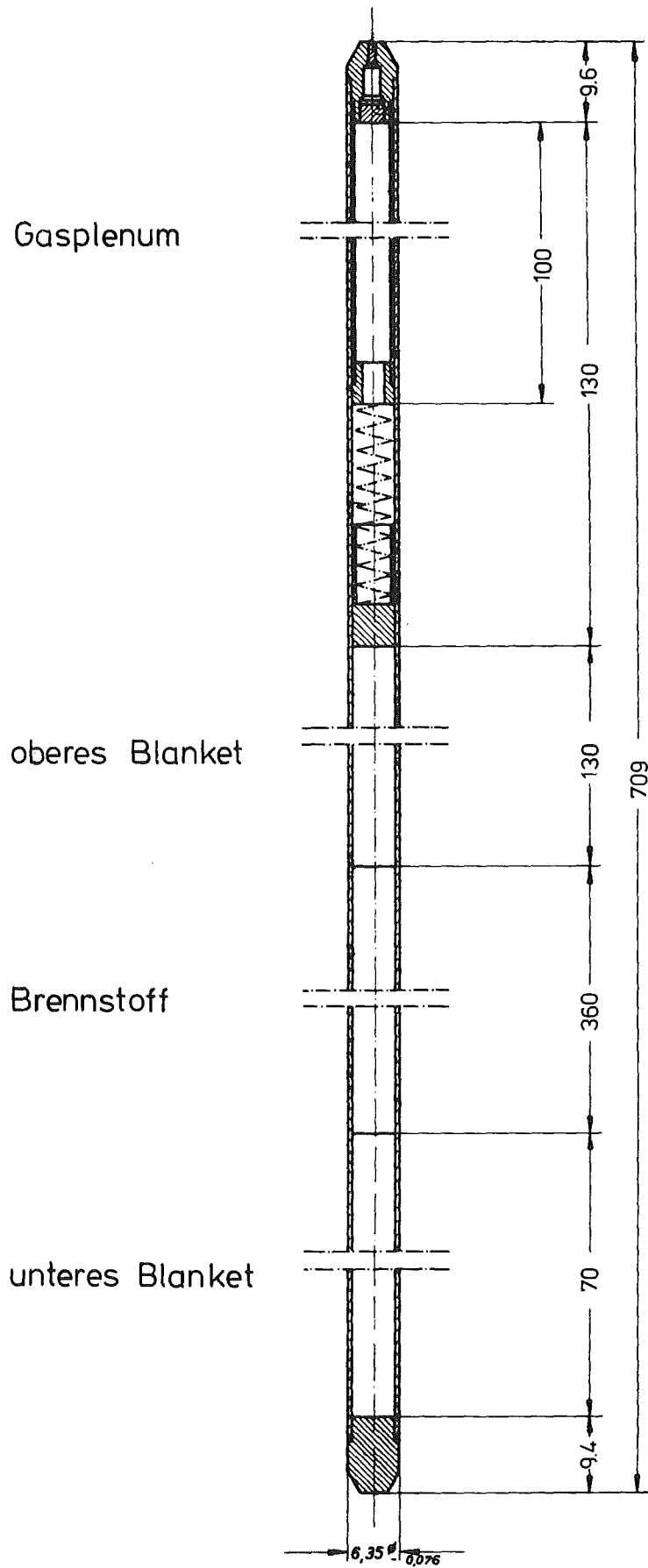


Abb. 3 Brennstabaufbau DFR-304

5. Herstellung der Prüflinge

Die 3 Stäbe haben gleichen Aufbau und gleiche äußere Abmessungen. Sie tragen die Bezeichnung G 1, G 2 und G 3. Die Herstellung der Stäbe erfolgte im Europäischen Institut für Transurane, Karlsruhe. Die Hüllrohre wurden von der Firma Mannesmann geliefert und von der Firma NUKEM geprüft. Die folgenden Abschnitte dieses Kapitels geben nach dem Herstellungsbericht [7] die näheren Einzelheiten der Brennstoffherstellung und der Stabfertigung wieder, einschließlich der Zwischen- und Endprüfungen.

Es sei darauf hingewiesen, daß die Spezifikationen eingehalten wurden mit Ausnahme vom Hüllinnendurchmesser und dem dann entsprechend angepaßten Tablettendurchmesser. Der Hüllinnendurchmesser war um 5 bis 10 μ geringer als die untere Toleranzgrenze. Der Tablettendurchmesser wurde hierauf zu $5,395 \pm 0,010$ mm neu festgelegt.

5.1 Ausgangspulver für Brennstoff und Brutstoff

Als oxidische Ausgangspulver standen zur Verfügung:

- a) UO_2 mit Natururan:
Dieses ADU-gefällte, sinterfähige Pulver stammte von der Fa. NUKEM.
- b) UO_2 mit 93 % angereichertem Uran:
Das angereicherte Material wurde in Form von UF_6 von der USAEC bezogen und bei der Fa. NUKEM zu UO_2 konvertiert.
- c) PuO_2 mit nominell 7,7 % Pu-240:
Dieses Material stammte aus einer Pu-Metall-Lieferung der USAEC. Das Metall wurde im Transurane-Institut Karlsruhe als Oxalat gefällt und bei 900°C unter Luft kalziniert. Es ergab sich dabei ein gut sinterfähiges PuO_2 -Pulver mit der spezifischen Oberfläche $3 \text{ m}^2/\text{g}$.

Die genaue Isotopenzusammensetzung des angereicherten UO_2 und des PuO_2 ist in Tabelle II angegeben. Tabelle III enthält die chemischen Verunreinigungen (soweit bestimmt) im Ausgangsmaterial.

Tabelle II Isotopenzusammensetzung der Ausgangsmaterialien für den Brennstoff

Uran mit nominell 93 % Anreicherung		
U-235-Gehalt laut Angabe des Lieferanten (USAEC/NUKEM): 93,183 Gew.-%		
Plutonium mit nominell 7,7 % Pu-240		
Die Isotopenzusammensetzung des Pu-Metalls wurde in Hanford/USA und in Karlsruhe bestimmt (Angaben in Gew.-%):		
	Hanford/USA 1965	Karlsruhe 1965
Pu-239	90,903	90,948
Pu-240	8,212	8,204
Pu-241	0,847	0,809
Pu-242	0,038	0,038
S u m m e :	100,000	99,999

Tabelle III Chemische Verunreinigungen der Ausgangspulver (Angaben in ppm)

Element	UO ₂ mit Natururan ⁺)	UO ₂ mit 93 % U-235	Pu mit 7,7 % Pu-240
Ag	< 0,05	0,7	-
Al	35	37	-
B	< 0,08	0,18	-
C	50	40	-
Ca	10	< 20	-
Cd	< 0,07	< 0,07	-
Cl	12	< 3	-
Cr	1	210	10
Cu	1	3	-
F	-	8	-
Fe	30	145	45
Mg	3	0,5	5
Mo	2	< 1	-
N	6	< 3	-
Na	-	-	10
Ni	5	330	20
Pb	< 1	< 1	-
Si	30	81	-
Zn	< 20	< 20	-

⁺) Typische Analyse dieser Produktion

5.2 Brennstoff-Tabletten

Die Brennstofftabletten wurden in einer größeren Charge, aus der auch Brennstäbe des TU-Bestrahlungsversuches DFR-305 beschickt wurden, hergestellt. Zuerst wurden die Ausgangspulver UO_2 und PuO_2 mechanisch gemischt, mit 0,4 % Zn-Stearat versetzt, gepreßt und in einem Stickstoff-Wasserstoff-Gasgemisch mit 8 % H_2 bei $1640^\circ C$ gesintert. Die Sinterzeit war 4 Stunden. Der Großteil der so erzeugten hochdichten Tabletten wurde für den obengenannten Versuch DFR-305 verwendet.

Da das restliche Tablettenmaterial nicht die Dichte-Spezifikationen für unseren Versuch DFR-304 erfüllte, wurde es in einem zweimaligen Oxydations-Reduktionszyklus bei 550 bis $600^\circ C$ wieder in Pulver verwandelt und in einer Kreuzschlagmühle gemahlen. Dieses so vorbehandelte Pulver mit einer spezifischen Oberfläche von $1,7 \text{ m}^2/\text{g}$ war dann für niedrigdichte Tabletten geeignet. Es wurde erneut mit 0,4 % Zn-Stearat versetzt, gepreßt und unter N_2 -8 % H_2 -Gasgemisch 4 Stunden lang bei $1600^\circ C$ gesintert. Die Tabletten wurden anschließend auf einer spitzenlosen Rundschleifmaschine geschliffen, gewaschen und unter Vakuum bei $150^\circ C$ getrocknet. An den Tabletten wurden verschiedene abschließende Messungen durchgeführt, deren Ergebnisse in Tabelle IV zusammengefaßt sind. Außerdem wurde festgestellt, daß der fertige Brennstoff in HNO_3 vollständig löslich ist. Das deutet darauf hin, daß kein freies PuO_2 vorliegt, sondern eine feste Lösung $(U,Pu)O_2$. Die autoradiografische Untersuchung von Tablettenoberflächen ergab eine sehr homogene Pu-Verteilung, ähnlich wie in einem kopräzipitierten Produkt.

5.3 Brutstoff-Tabletten

Die Brutstoff-Tabletten stammten aus einer Probeproduktion der Firma NUKEM [8]. Das ADU-gefällte UO_2 -Ausgangspulver (mit Natururan) wurde plastifiziert und granuliert, kalt gepreßt, entwachst und unter reinem Wasserstoff bei Temperaturen zwischen 1400 und $1600^\circ C$ gesintert. Die Dichte der Tabletten lag bei $90 \pm 2 \%$ th.D. Die Sinterlinge hatten eine Höhe von ca. 10 mm und einen Durchmesser von 5,6 bis 5,7 mm. Sie wurden durch spitzenloses Rundschleifen

Tabelle IV Prüfungen an Brennstoff-Tabletten

	Uran	Gew.-%	Plutonium	Gew.-%
Isotopen- Gehalt	U-234	0,727	Pu-239	90,736
	U-235	92,683	Pu-240	8,318
	U-238	6,375	Pu-241	0,905
		99,785		99,959
Pu-Gehalt	$\frac{\text{Pu}}{\text{U+Pu}} =$		0,201	
			0,203	
			0,202	
			0,199	
Stöchiometrie	O/Me =		1,997	
			1,993	
H ₂ O-Gehalt	nicht gemessen			
Chemische Verunreinigungen in ppm (u.N. bedeutet unterhalb der Nachweisgrenze)	Al	50	Mn	20
	As	(u.N.)	Mo	(u.N.)
	B	(u.N.)	Nb	20
	Bi	(u.N.)	Ni	200
	C	48 - 52	Pb	(u.N.)
	Cd	(u.N.)	Si	100
	Cr	150	Sn	(u.N.)
	Fe	600	V	(u.N.)
	Mg	30	Zn	(u.N.)
Tablettendurchmesser	5,395 ± 0,010 mm			
Tablettendichte	89,2 ± 0,2 % th.D. ⁺⁾			

⁺⁾ Die theoretische Dichte dieses Brennstoffgemisches ist 10,96 g/cm³

auf einen Durchmesser von $5,40 \pm 0,01$ mm gebracht und anschließend gewaschen und getrocknet. Tabelle V bringt eine Zusammenstellung der Tablettendaten.

Tabelle V Materialdaten der Brutstoff-Tabletten

Material	UO ₂ mit Natururan								
Stöchiometrie	O/U = 2,005 bis 2,015								
H ₂ O-Gehalt	ca. 50 ppm								
Chemische Verunreinigungen in ppm (Leitanalyse)	B	C	Cd	Cr	Fe	Mn	N	Ni	Si
	<0,08	55	<0,07	17	85	1,7	30	8	41
Tabletten- geometrie	Durchmesser				5,40 ± 0,01 mm				
	Höhe				10,2 mm				
	Dichte				90 ± 2 % th.D.				

5.4 Hüll- und Strukturmaterial

Als Material für die Hüllrohre kam der austenitische Edelstahl

- X8 Cr Ni Mo V Nb 1613, Werkstoff-Nr. 1.4988

zur Verwendung. Die Hüllrohre stammen aus einer größeren Lieferung der Fa. Mannesmann vom Jahre 1966. Von der Lieferfirma waren laut Werksabnahmezeugnis alle üblichen Prüfungen auf Geometrie, Festigkeit, chemische Zusammensetzung und Rohrfehler durchgeführt worden. Für die 3 Prüflinge des Versuches DFR-304 wurden die Hüllrohre mit den Bezeichnungen M 69, M 70 und M 114 verwendet. Diese Rohre wurden vor ihrer weiteren Verarbeitung einer detaillierten Prüfung durch die Fa. NUKEM unterzogen und für spezifikationsgerecht befunden. In Tabelle VI sind neben der Zuordnung der Hüllrohre zu den 3 Prüflingen die bei der Rohrprüfung tatsächlich gefundenen Innendurchmesser angegeben.

Tabelle VI Hüllrohre

Stab-Nr.	Hüllrohr-Nr.	Innendurchmesser (mm)
G 1	M 70	5,520
G 2	M 114	5,518
G 3	M 69	5,515

Der Werkstoff für die Endstopfen sowie für das Führungsstück und den oberen Einsatz ist ebenfalls ein austenitischer Edelstahl Nr. 1.4988. Die Federn in einer Ausführung entsprechend DIN 2099 sind aus dem Werkstoff X12 Cr Ni 179 mit einem Außendurchmesser von 4,7 mm gefertigt worden. Die Sinterstahlfilter sind aus Chrom-Nickel-Stahl.

5.5 Fertigung und Prüfung der Stäbe

An die Hüllrohre wurden zuerst die unteren Endstopfen angeschweißt und hierauf die Schweißnähte mit einem He-Lecksuchgerät geprüft. Dann wurden die vorher auf Länge kontrollierten Brennstoff- und Brutstoffsäulen eingefüllt, die Einbauteile in den Spaltgasraum eingeführt und schließlich der obere Endstopfen nach dem Elektronenstrahlverfahren aufgeschweißt. Über ein kleines Loch im Endstopfen wurde nun im Wechsel 10mal evakuiert und jeweils wieder mit Helium gefüllt. Zum Schluß wurde das Loch im Endstopfen mit einem Stift verschlossen und durch eine Argon-Arc-Schweißungen abgedichtet.

Die einzelnen Fertigungs- und Prüfdaten sind in Stabbegleitkarten niedergelegt [7], eine Neufassung dieser Begleitkarten findet sich in Anhang 2. Eine Zusammenfassung der wichtigsten Stabdaten bringt Tabelle VII. Die fertigen Stäbe wurden auf Kontamination und auf Dichtheit geprüft. Die Leckrate war in allen Fällen besser als 10^{-9} Torr-liter/sec. Die Schweißnähte wurden für gut befunden. Der innere Aufbau der fertigen Stäbe geht aus den Röntgenaufnahmen in Abb. 4 hervor.

Tabelle VII Brennstabdaten

Prüflings-Nr.		G 1	G 2	G 3
Hüllrohr-Nr.		M 70	M 114	M 69
Stab- querschnitt	Hüllaußen- durchmesser (mm)	6,305	6,305	6,310
	Hüllinnen- durchmesser (mm)	5,520	5,518	5,515 - 5,520
	Diametraler Spalt (µm)	125 ± 10	123 ± 10	120 - 125 ± 10
	Tabletten- durchmesser (mm)	5,395	5,395	5,395
Brennstoff- Füllung	Brennstoff- gewicht (g)	80,70	80,74	80,95
	Tabletten- dichte (% th.D. [†])	89,14	89,4	89,4
	Schmier- dichte (% th.D.)	85,34	85,46	85,6
	Pu-Inhalt (g)	14,232	14,239	14,276
	U-235-Inhalt (g)	52,844	52,870	52,008
Gemessene Längen- Verteilung (mm)	Brennstoffzone	360,3	360,1	360,3
	Brennstoff und Brutstoff	560,2	560,8	560,4
	Gesamte Stablänge	709,25	709,25	709,25
Stabgewicht (g)	80,70	80,74	80,95	

+) Die theoretische Dichte des Brennstoffgemisches ist 10,96 g/cm³

G 1

G 2

G 3

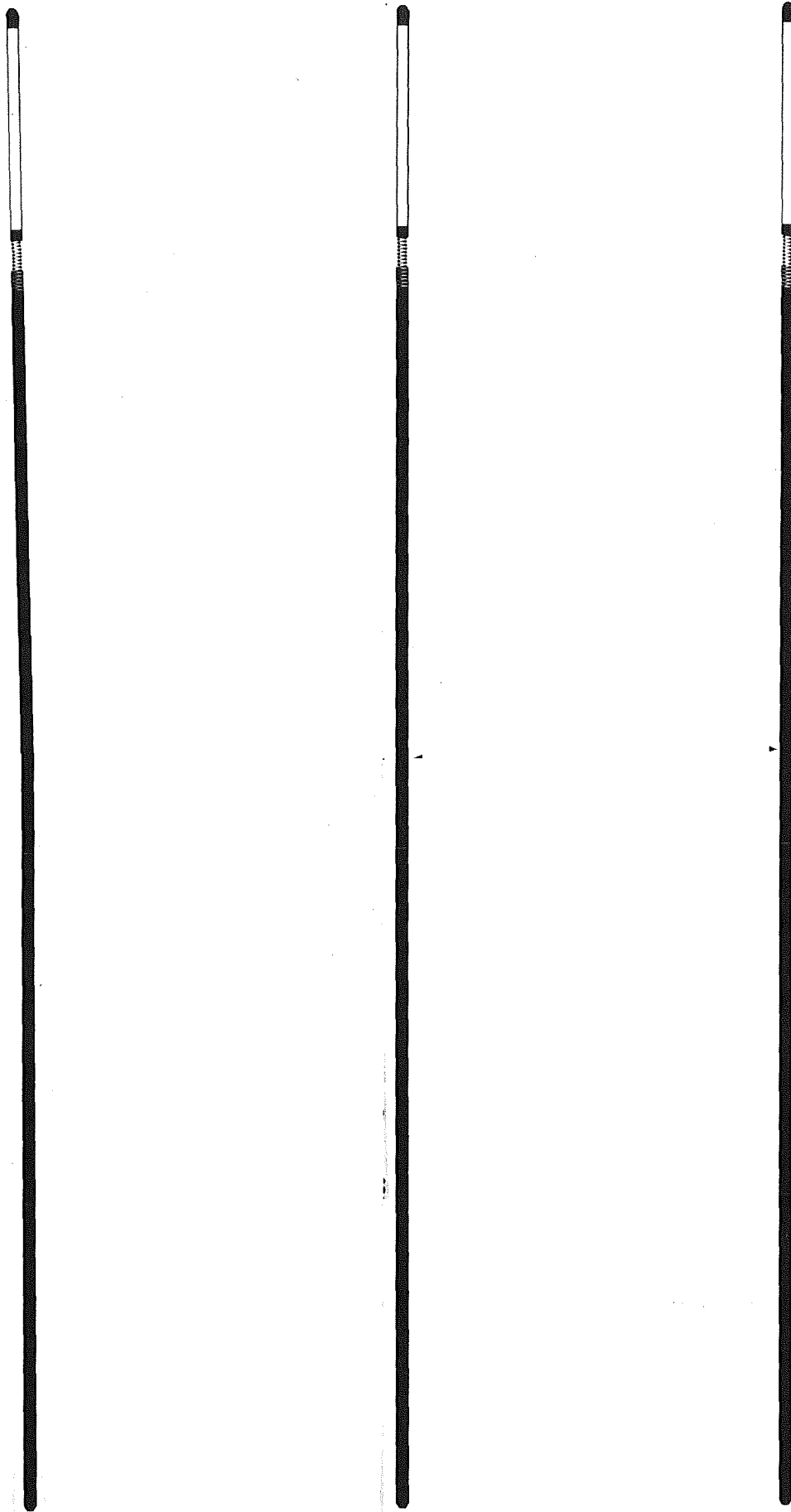
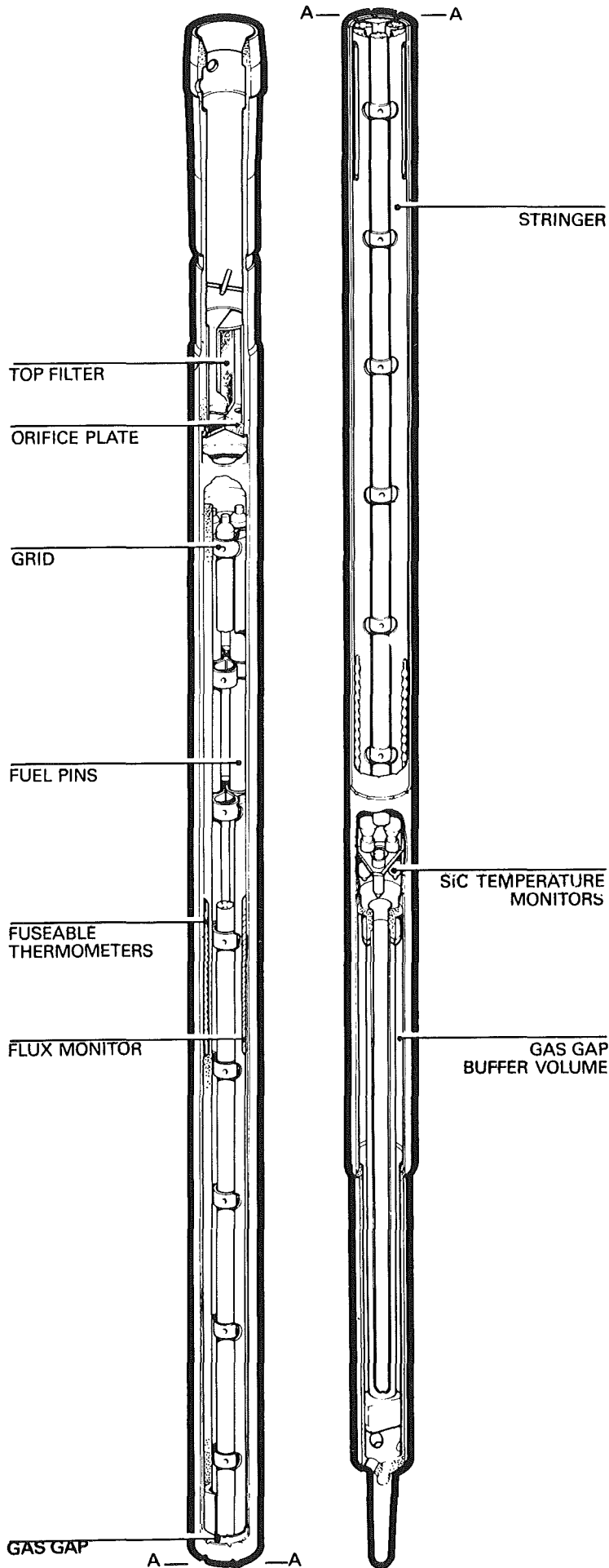


Abb. 4 Röntgen-Durchleuchtung der fertigen Stäbe



Trefoil Fuel Pin Rig

The Trefoil Fuel Pin Rig having the external appearance of a core fuel element has been developed to irradiate three fuel pins. Axial temperature gradients are obtained by restricting the coolant flow through the rig using a calibrated orifice. An argon gas gap is used to attain coolant outlet temperature of up to 650°C.

The radial gas gap is sealed at the upper end but is open at the lower end to the reactor coolant thus forming a buffer volume. When the rig is loaded and the reactor blanket gas is pressurised the coolant level in the buffer volume rises but does not enter the experimental zone. A filter and catchpot can be fitted as in the single pin fail-safe rig.

Abb. 5 Trefoil

(Abbildung entnommen
aus der Druckschrift:

D.F.R. Irradiation Testing,
UKAEA, Juni 1971)

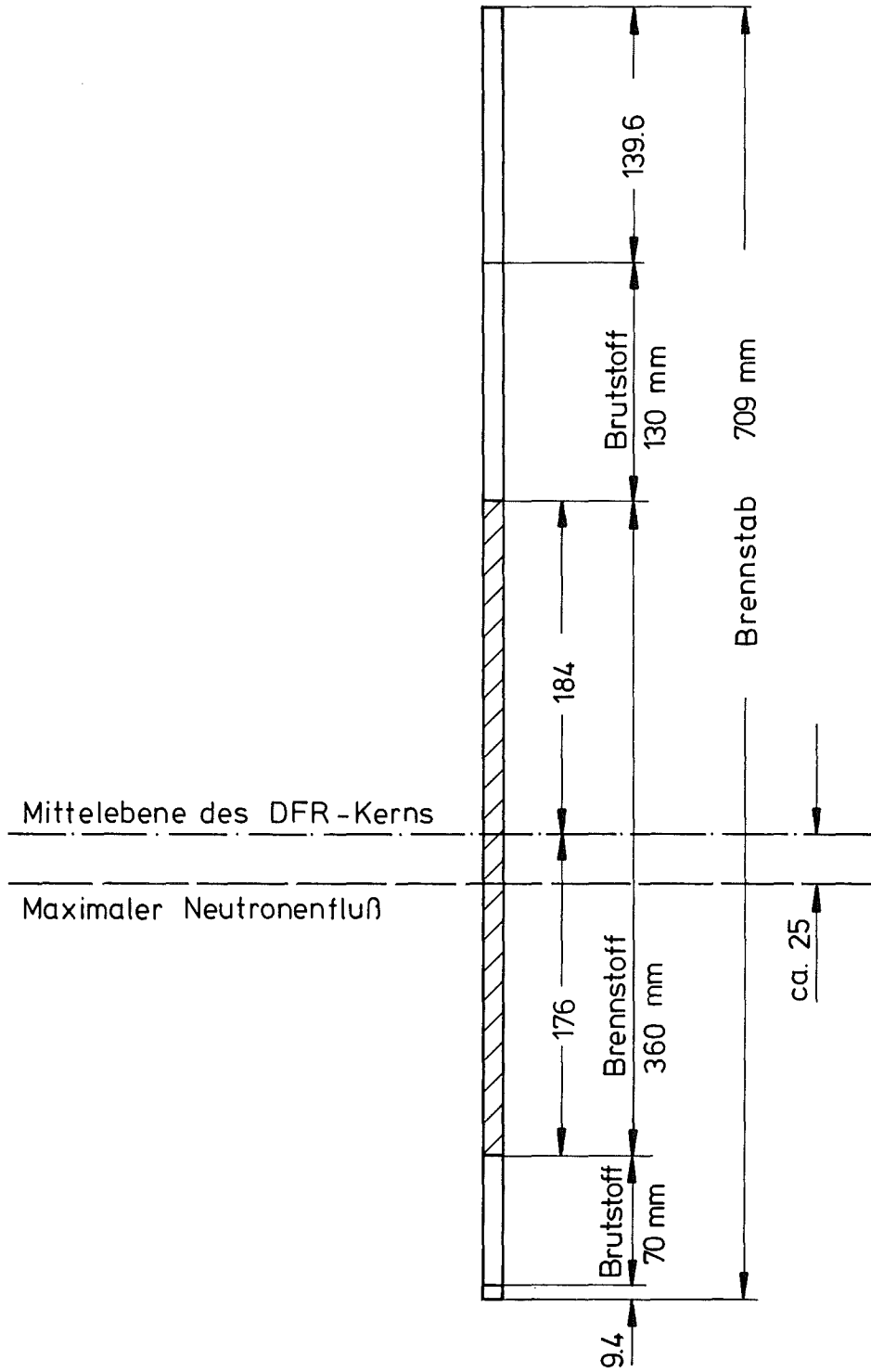


Abb. 6 Axiale Positionierung der Brennstäbe im DFR-Kern

6. Bestrahlungseinrichtung und Reaktorposition

Als Bestrahlungsträger für die 3 Stäbe wurde ein Trefoil-Einsatz in der Originalausführung der UKAEA verwendet. In Abb. 5 ist eine Originalskizze dieser Konstruktion wiedergegeben. Sie hat äußerlich die Form eines Brennelements im DFR-Kern. Die 3 Stäbe sind darin in Dreieckanordnung durch Gitterabstandshalter positioniert. 14 dieser Halterungen verteilen sich über die Stablänge in einem Abstand von etwa 5 cm. Ein radialer Argon-Gasspalt erlaubt es, die Temperatur unabhängig vom Reaktor-Kühlmedium einzustellen. Dazu wird mit einem Drosselstück am oberen Einlaß der NaK-Fluß reguliert.

Für die radiale Positionierung des Trefoil im DFR-Kern wurde die Pitch 12-Position Nr. G 9 gewählt, diese ist ca. 12,4 cm vom Core-Zentrum entfernt. Die axiale Lage des Trefoils ist so, daß vom 360 mm langen Brennstoffteil der Stäbe 176 mm unterhalb und 184 mm oberhalb der Kern-Mittelebene stehen. Die schematische Zeichnung in Abb. 6 macht die Lage anschaulich. Dort ist auch die Ebene des maximalen DFR-Flusses eingetragen. Sie liegt um etwa 25 mm unterhalb der Kern-Mittelebene.

Der Einbau der Stäbe erfolgte durch die UKAEA selbst. GFK lieferte die fertigen Stäbe. Das Trefoil wurde von der UKAEA beige stellt.

7. Ablauf der Bestrahlung

7.1 Bestrahlungszeit und Reaktorzyklen

Die Bestrahlung des Trefoils begann am 27.6.1967 und dauerte bis zum 26.11.1969. In dieser Zeit absolvierte der DFR insgesamt 5 Betriebszyklen, nämlich Run 60, 61, 62, 63 und 64. Jeder Zyklus dauert normalerweise ca. 55 Tage und darauf folgt eine Abschaltperiode von 25 bis 30 Tagen. Schon im ersten Zyklus dieser Bestrahlung trat im DFR eine erhebliche Betriebsstörung - verursacht durch ein Na-Leck - auf. Dies führte zum Abbruch des Run 60 nach nur ca. 18 Volllasttagen. Daran schloß sich von August 1967 bis August 1968 eine längere Reparatur- und Testperiode an, während der der Bestrahlungseinsatz nicht im Reaktor war. Vor dem erneuten Einsatz wurden die Stäbe einer Dampf-

reinigung unterzogen. Auch nach Wiederaufnahme der Bestrahlung kam es im Run 61 noch zu vergleichsweise häufigen Zwischenabschaltungen. Erst die letzten 3 Zyklen 62, 63 und 64 verliefen wieder entsprechend den langjährigen DFR-Betriebserfahrungen.

Eine zusammenfassende Übersicht über den ganzen zeitlichen Bestrahlungsablauf wird zuerst in der grafischen Darstellung von Abb. 7 gegeben. Die Abb. 8 bis 12 bringen dann den Leistungsverlauf des DFR für die 5 Reaktorzyklen mit allen Zwischenabschaltungen und Leistungsreduktionen. Schließlich sind in Tabelle VIII die Zeit- und Leistungsdaten genau zusammengestellt. Bei der Zahl der Abschaltungen wurden Leistungsverminderungen bis unter 10 % der Vollast sowie die betriebsmäßige Abschaltung am Schluß des jeweiligen Zyklus mitgezählt.

7.2 Neutronenfluß

Der örtlich maximale Neutronenfluß des DFR tritt in der Zylinderachse des Kerns (Radius $r = 0$) einige Zentimeter unterhalb der Mittelebene $z = 0$ auf. Er beträgt - alle Energiegruppen eingeschlossen - nach den Standard-Betriebsbedingungen

$$- 2,5 \cdot 10^{15} \text{ n/cm}^2 \text{ sec.}$$

Nach den Angaben der UKAEA [9] beträgt der Maximalfluß für die Bestrahlungsposition Pitch 12 G 9 ca. 93 % des obigen Wertes, das sind dann

$$- 2,3 \cdot 10^{15} \text{ n/cm}^2 \text{ sec.}$$

Der axiale Flußverlauf ist aus dem Diagramm in Abb. 13 herzuleiten. Dort ist die axiale Flußverteilung nach [9] relativ zum Maximalwert (ca. 2,5 cm unterhalb der Core-Mittelebene) angegeben.

Dem axialen Flußverlauf entsprechend ist die Neutronendosis längs dem Stabeinsatz verschieden. In Tabelle IX ist für die Position G 9 die Neutronenfluenz am Ende der Bestrahlung in den hier wichtigen axialen Positionen von $z = -15,2$ bis $z = +16,2$ cm angegeben. Neben der totalen Fluenz findet sich dort auch eine Aufteilung in einige Energiegruppen. Die maximale Dosis beträgt

$$- 4,44 \cdot 10^{22} \text{ n/cm}^2.$$

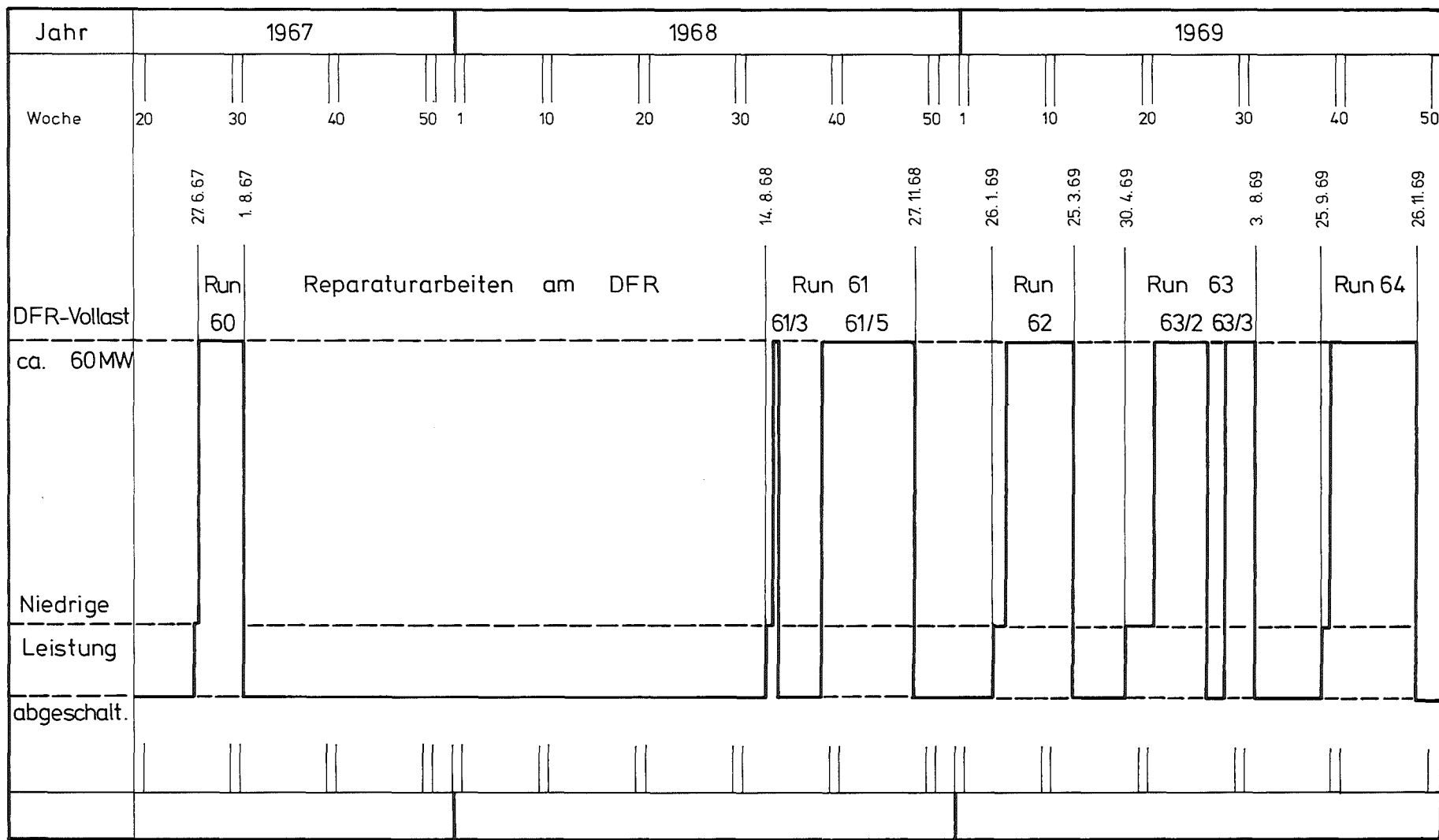


Abb. 7 Bestrahlungszeiten und DFR-Zyklen

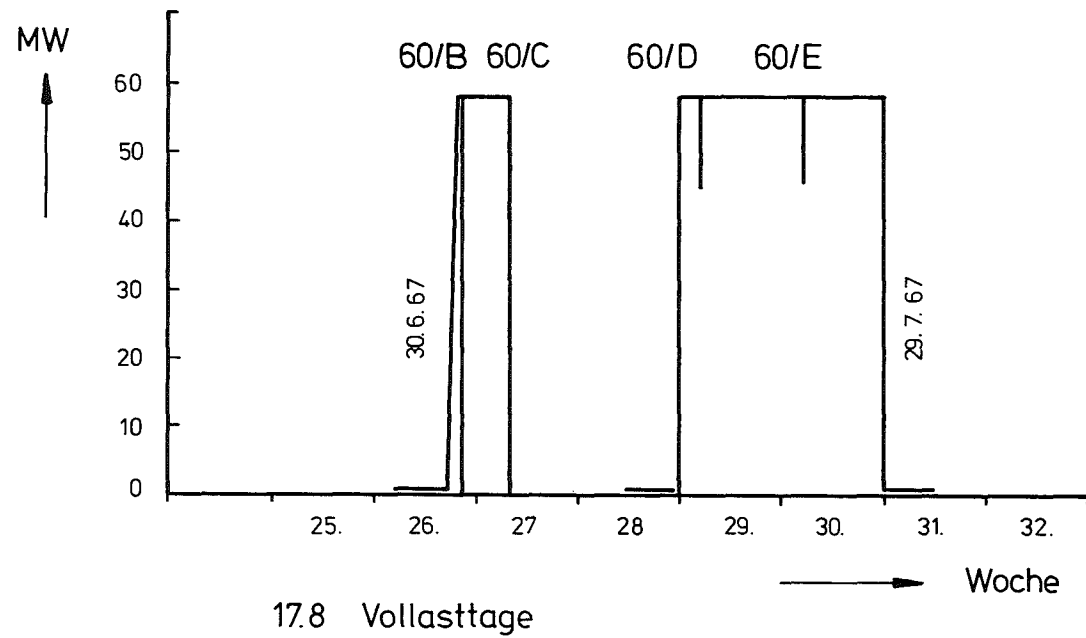
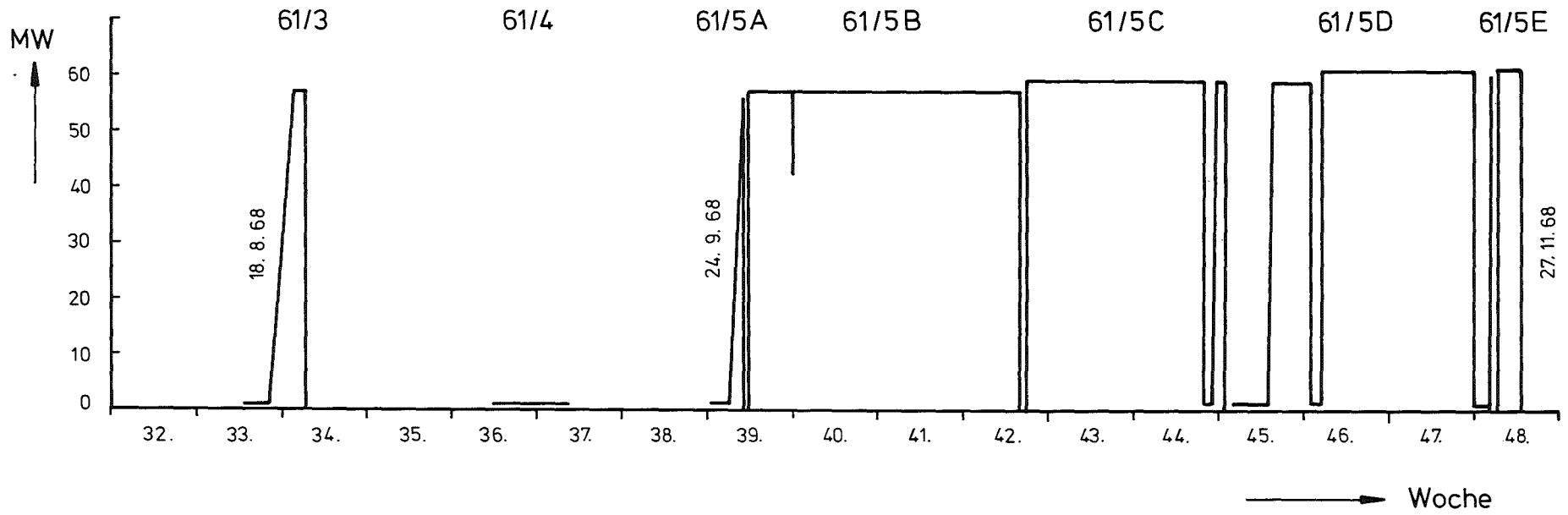
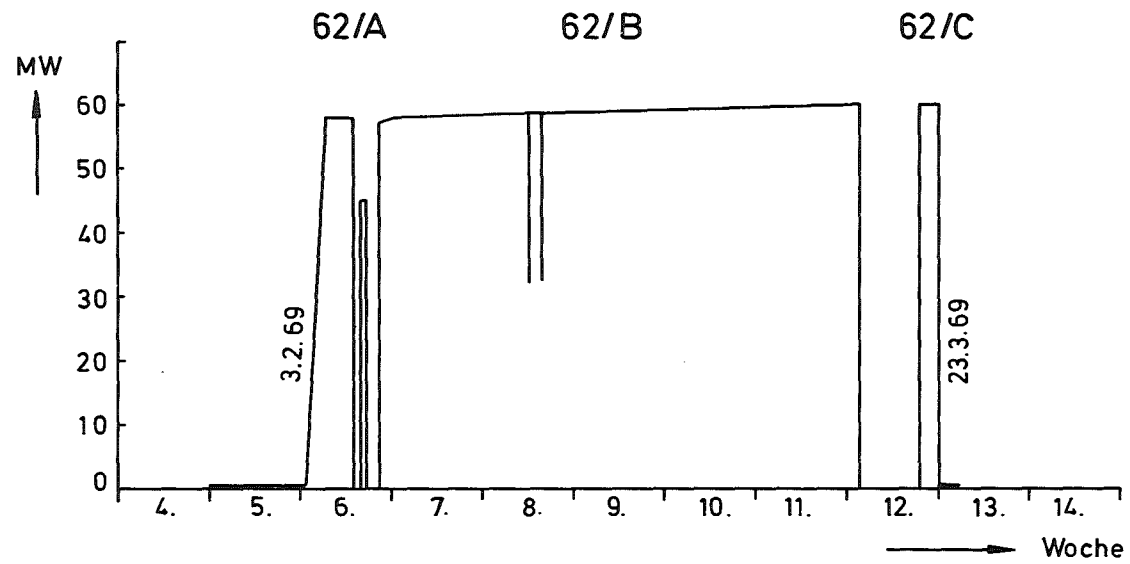


Abb. 8 Leistungsverlauf des DFR in Run 60
(27.6.67 - 1.8.67)



54.8 Vollasttage

Abb. 9 Leistungsverlauf des DFR in Run 61
(14.8.68 - 27.11.68)

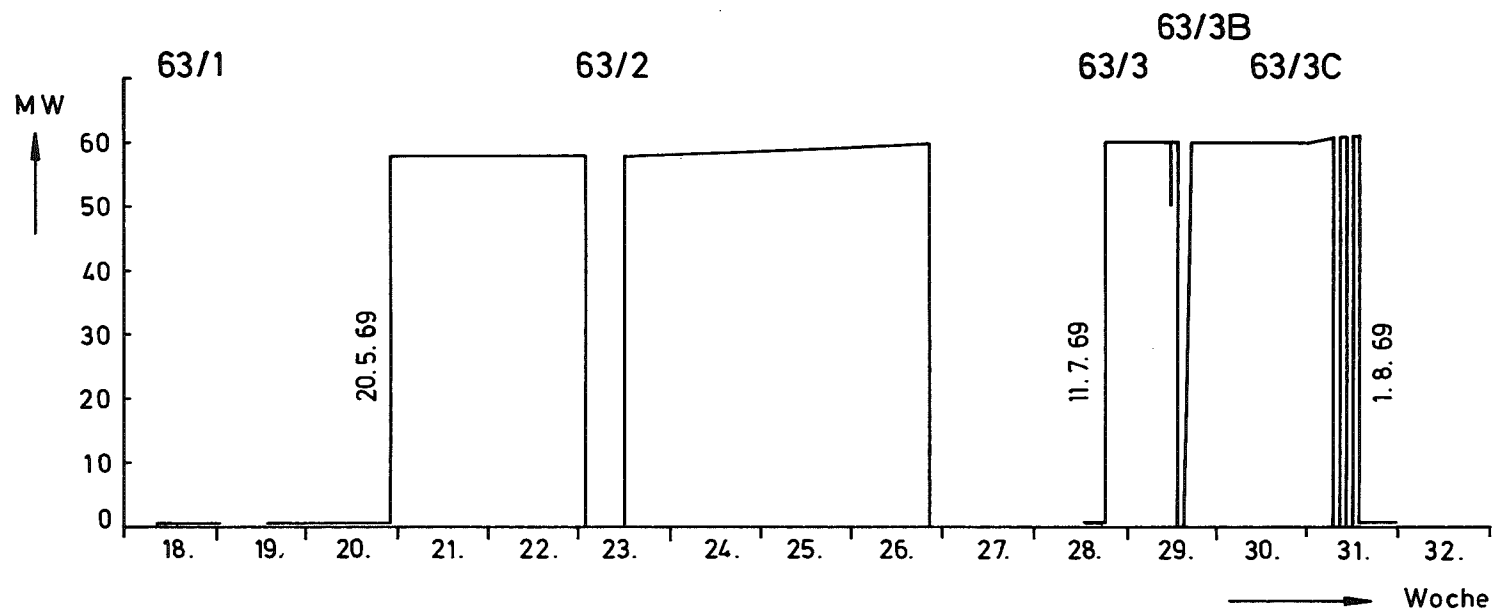


41.8 Vollasttage

Abb. 10

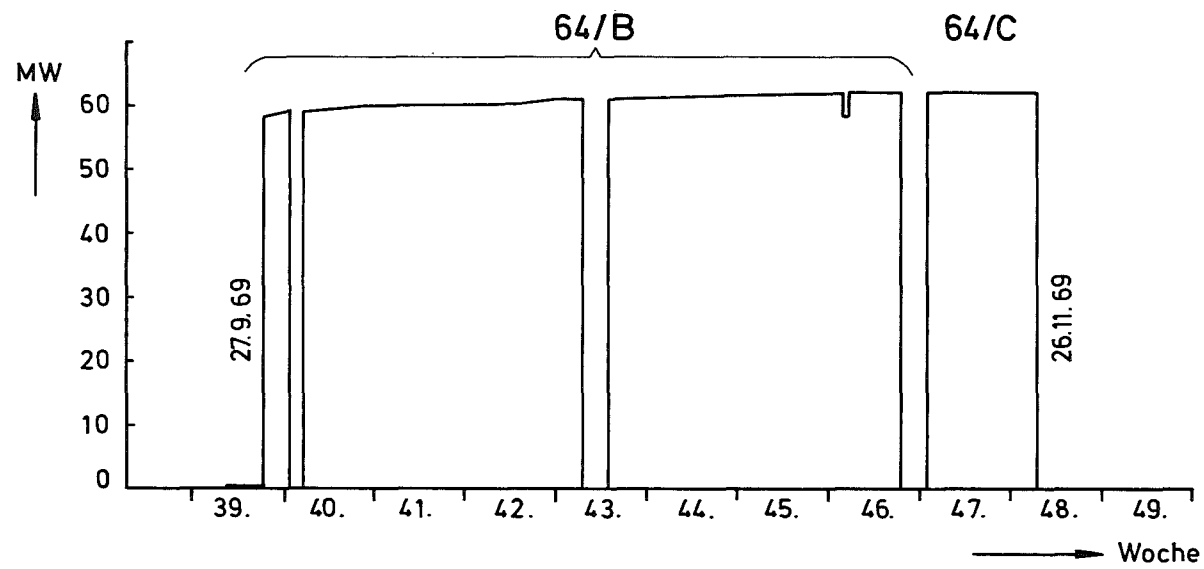
Leistungsverlauf des DFR in Run 62

(26.1.69 - 25.3.69)



54.4 Vollasttage

Abb. 11 Leistungsverlauf des DFR in Run 63
(30.4.69 - 3.8.69)



53.5 Vollasttage

Abb. 12 Leistungsverlauf des DFR in Run 64
(25.9.69 - 26.11.69)

Tabelle VIII Zeit- und Leistungsdaten der DFR-Zyklen

D F R - Zyklus	Beginn Ende	Zyklus- Tage	Vollast- Tage	Zahl der Abschaltungen	Max. D F R- Leistung	MW-Tage des D F R	
						im Zyklus	kumuliert
Run 60	27.06.67 01.08.67	ca. 35	17,8	3	59 MW	1032	1032
Run 61	14.08.68 27.11.68	ca. 105	54,8	9	61 MW	3262	4294
Run 62	26.01.69 25.03.69	ca. 58	41,8	4	60 MW	2449	6743
Run 63	30.04.69 03.08.69	ca. 95	54,4	6	61,1 MW	3274	10017
Run 64	25.09.69 26.11.69	ca. 62	53,5	4	62,7 MW	3266	13283
S u m m e n		ca. 355	222,3	26			

1
2
1

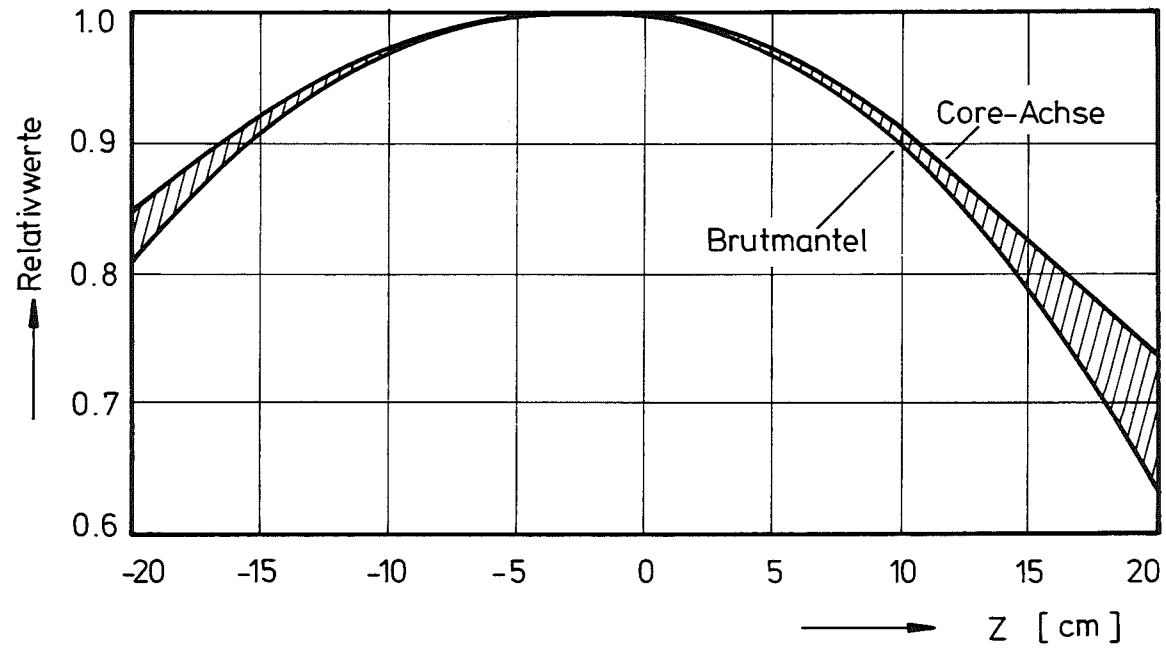


Abb. 13 Axialer Flußverlauf im DFR

Tabelle IX Neutronendosis am Ende der Bestrahlung

Axiale Position z (cm)	Neutronendosis (10^{22} n/cm ²) für Neutronen der Energie		Totale Dosis (10^{22} n/cm ²)
	> 111 keV	> 3,68 keV	
+ 16,2	2,90	0,10	3,33
+ 11,7	3,36	0,11	3,84
+ 7,2	3,64	0,12	4,18
+ 2,7	3,81	0,13	4,37
- 1,7	3,87	0,13	4,44
- 6,2	3,84	0,13	4,40
- 10,7	3,73	0,13	4,28
- 15,2	3,52	0,12	4,04

7.3 Spezifische Leistung und Stabileistung

Die spezifische Leistung b_{ox} , bezogen auf die Oxidmenge, wurde vom DERE für jede Betriebsperiode angegeben. Die Werte beziehen sich auf Standard-Betriebsbedingungen. Durch Multiplikation mit der linearen Brennstoffdichte $g = 2,24$ g/cm erhält man daraus die Stabileistung λ . In Tabelle X sind die Zahlenwerte für die in Betracht kommenden Axialpositionen zusammengefaßt. Abb. 14 bringt den axialen Verlauf der Stabileistung am Anfang und am Ende der Bestrahlung, Abb. 15 zeigt die Stabileistungsabnahme im Laufe der Bestrahlung für die Ebene $z = - 1,7$ cm.

7.4 Kühlmittel-Bedingungen

Das NaK-Flüssigmetall der Zusammensetzung 70 % Na und 30 % K hat einen Schmelzpunkt von 40°C . Im DFR ist der Kühlstrom von oben nach unten gerichtet. Der Druck im Kühlkreislauf oberhalb des Cores beträgt ca. 5 kg/cm², die Druckdifferenz zwischen Eintritt und Austritt ist $0,712$ kg/cm². Die laufende Reinheitsanalyse des NaK mit einem "Plugging"-Meter ergab in allen 5 Betriebszyklen Verunreinigungswerte unter 30 ppm.

Tabelle X Spezifische Leistung und Stableistung

Axiale Position z (cm)	Beginn		Run 60		Ende		Run 61		Ende		Run 62		Ende		Run 63		Ende		Run 64	
	b _{ox} (W/g)	χ (W/cm)	b _{ox} (W/g)	χ (W/cm)	b _{ox} (W/g)	χ (W/cm)	b _{ox} (W/g)	χ (W/cm)	b _{ox} (W/g)	χ (W/cm)	b _{ox} (W/g)	χ (W/cm)	b _{ox} (W/g)	χ (W/cm)	b _{ox} (W/g)	χ (W/cm)	b _{ox} (W/g)	χ (W/cm)	b _{ox} (W/g)	χ (W/cm)
+ 29,3	6,0	14	6,1	14	7,3	17	7,6	17	8,0	18	8,4	19								
+ 25,0	9,1	21	9,2	21	9,5	21	9,6	22	9,9	22	10,0	23								
+ 20,7	11,7	26	11,7	26	11,9	27	12,1	27	12,3	28	12,5	28								
+ 16,2	189,4	425	188,5	422	185,6	416	183,5	411	180,7	405	178,0	399								
+ 11,7	206,9	464	205,8	462	202,4	454	199,8	448	196,6	441	193,4	434								
+ 7,2	220,0	493	218,8	491	214,9	482	212,1	475	208,4	467	204,8	459								
+ 2,7	228,0	511	226,7	508	222,6	499	219,5	492	216,5	484	211,8	475								
- 1,7	230,3	516	228,9	513	224,7	504	221,6	497	217,6	488	213,7	479								
- 6,2	226,1	507	224,8	504	220,7	495	217,7	488	213,8	480	210,1	471								
- 10,7	215,3	482	214,1	480	210,4	472	207,7	465	204,1	458	200,7	450								
- 15,2	198,1	444	197,1	442	194,0	435	191,7	430	188,7	423	185,8	416								
- 19,2	12,8	29	12,9	29	13,2	30	13,4	30	13,6	31	13,9	32								
- 22,7	10,7	24	10,8	25	11,1	25	11,3	26	11,5	26	11,7	27								

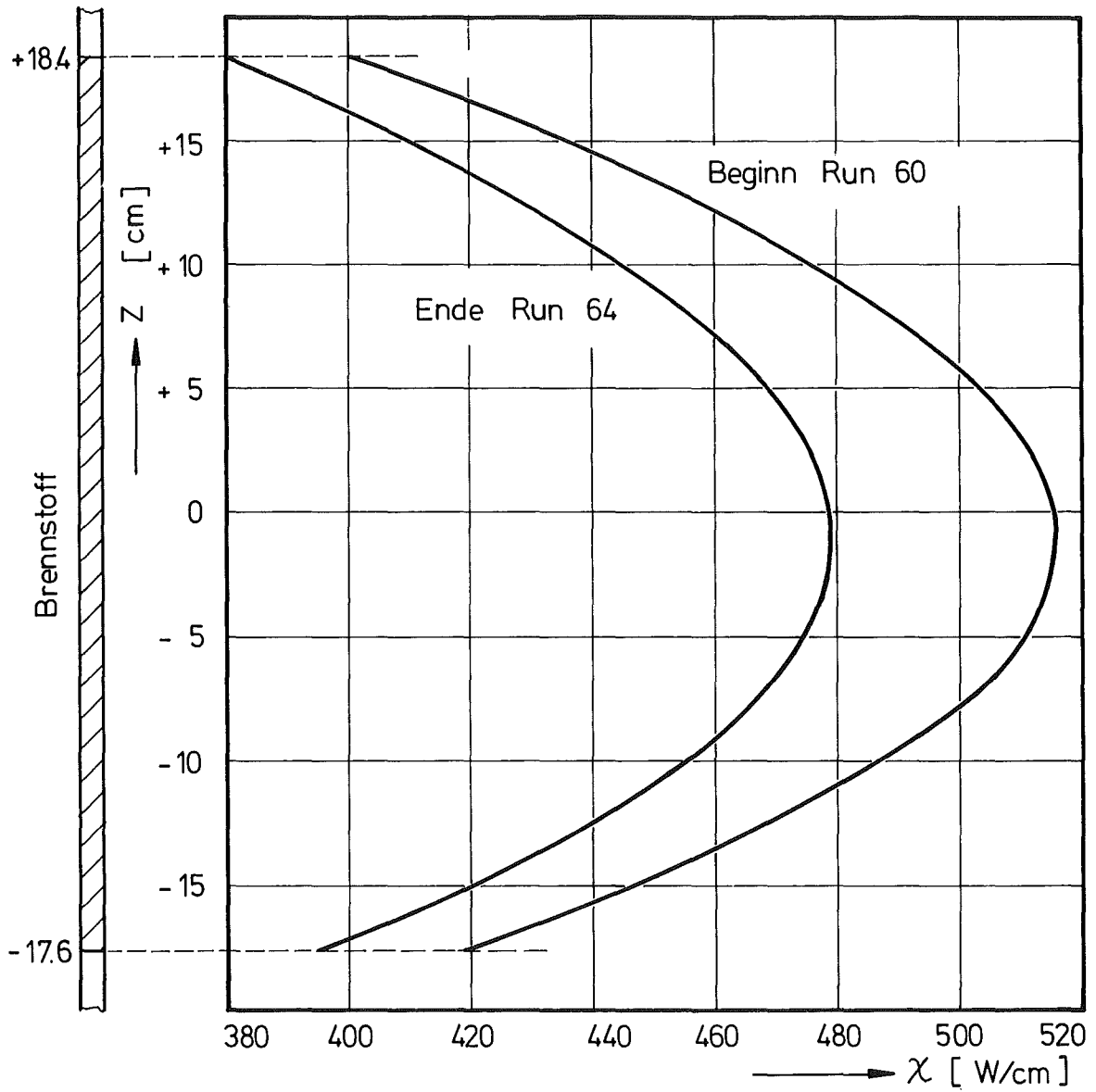


Abb. 14 Axialer Verlauf der Stableistung

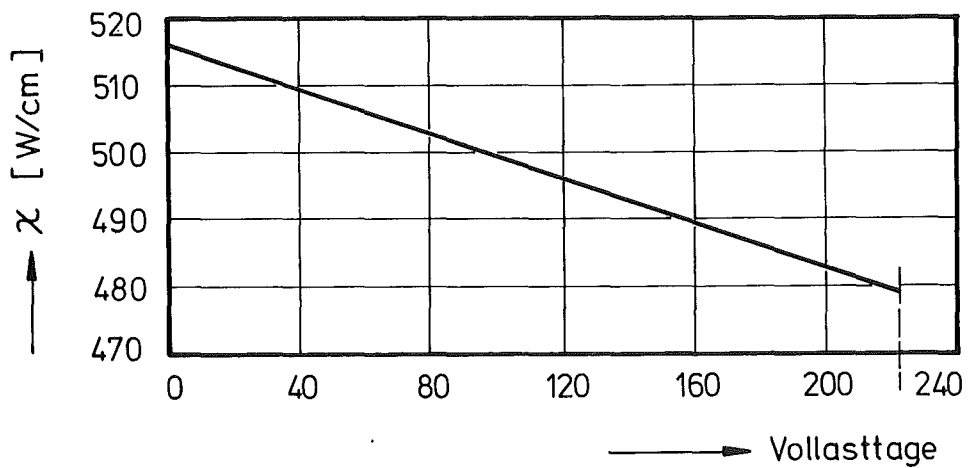


Abb. 15 Abnahme der Stableistung im Laufe der Bestrahlung (Position $z = -1,7$ cm)

Die Temperatur des Kühlkreislaufes während der Abschaltperioden wird auf ca. 150 °C gehalten. Beim Vollastbetrieb beträgt die Eintrittstemperatur des Kühlmittels in den Reaktorkern 230 ± 5 °C, die Austrittstemperatur wird auf 500 °C eingeregelt. Bei Zwischenabschaltungen im Laufe der Betriebsperioden sank die Kühlmitteltemperatur nach den vorliegenden Betriebsprotokollen auf Werte zwischen 150 und 170 °C ab.

Für den Temperaturverlauf längs der Brennstäbe liegen Berechnungen der UKAEA vor. Die Temperaturen der Hüllinnenwand sind für alle Betriebszyklen in Tabelle XI zusammengestellt. Abb. 16 schließlich bringt Hüll- und Kühlmitteltemperaturen in grafischer Darstellung.

Nach dem Abschalten des Reaktors fällt die Temperatur im NaK-Kreislauf auf 150 °C. Beim Entladen des Versuchseinsatzes steigen die Temperaturen in den abgebrannten Stäben wieder kurzzeitig an, überschreiten aber nicht - nach Angaben von DERE - die maximalen Betriebstemperaturen. Im Lagerbecken schließlich variiert die NaK-Temperatur mit der Reaktoreintrittstemperatur, d.h. zwischen 150 und 230 °C.

7.5 Abbrand

Im ersten Betriebszyklus des Versuches wurde an der maximal belasteten Stelle der Stäbe ein Abbrand von ca. 0,5 % der schweren Atome erreicht, in den weiteren Zyklen jeweils 1,1 bis 1,5 %. Die (rechnerisch ermittelten) genauen Abbrandwerte nach den DFR-Betriebsprotokollen sind in Tabelle XII wiedergegeben.

Der lokale maximale Abbrand beträgt 56000 MWd/t Me. Die Unterschiede zwischen den 3 Stäben sind zu vernachlässigen. Der axiale Verlauf des Abbrandes längs eines Stabes ist dagegen sehr ausgeprägt. Das geht aus den Einzeldaten der Tabelle XII für die verschiedenen axialen Positionen hervor. In Abb. 16 ist dieser Abbrandverlauf über die Stablänge mit eingezeichnet.

Tabelle XI Temperaturen der Hüllinnenwand

Axiale Position z (cm)	Beginn Run 60 (°C)	Ende Run 60 (°C)	Ende Run 61 (°C)	Ende Run 62 (°C)	Ende Run 63 (°C)	Ende Run 64 (°C)
+ 29,3	234	234	234	234	235	235
+ 25,0	237	237	238	238	238	238
+ 20,7	242	242	242	242	242	243
+ 16,2	340	339	338	337	336	335
+ 11,7	388	388	386	384	382	380
+ 7,2	438	437	435	432	430	427
+ 2,7	489	488	484	481	478	474
- 1,7	539	538	533	530	525	521
- 6,2	588	586	580	576	571	566
- 10,7	632	630	624	619	613	608
- 15,2	672	670	663	658	652	645
- 19,2	631	629	624	619	613	608
- 22,7	633	631	626	621	615	610

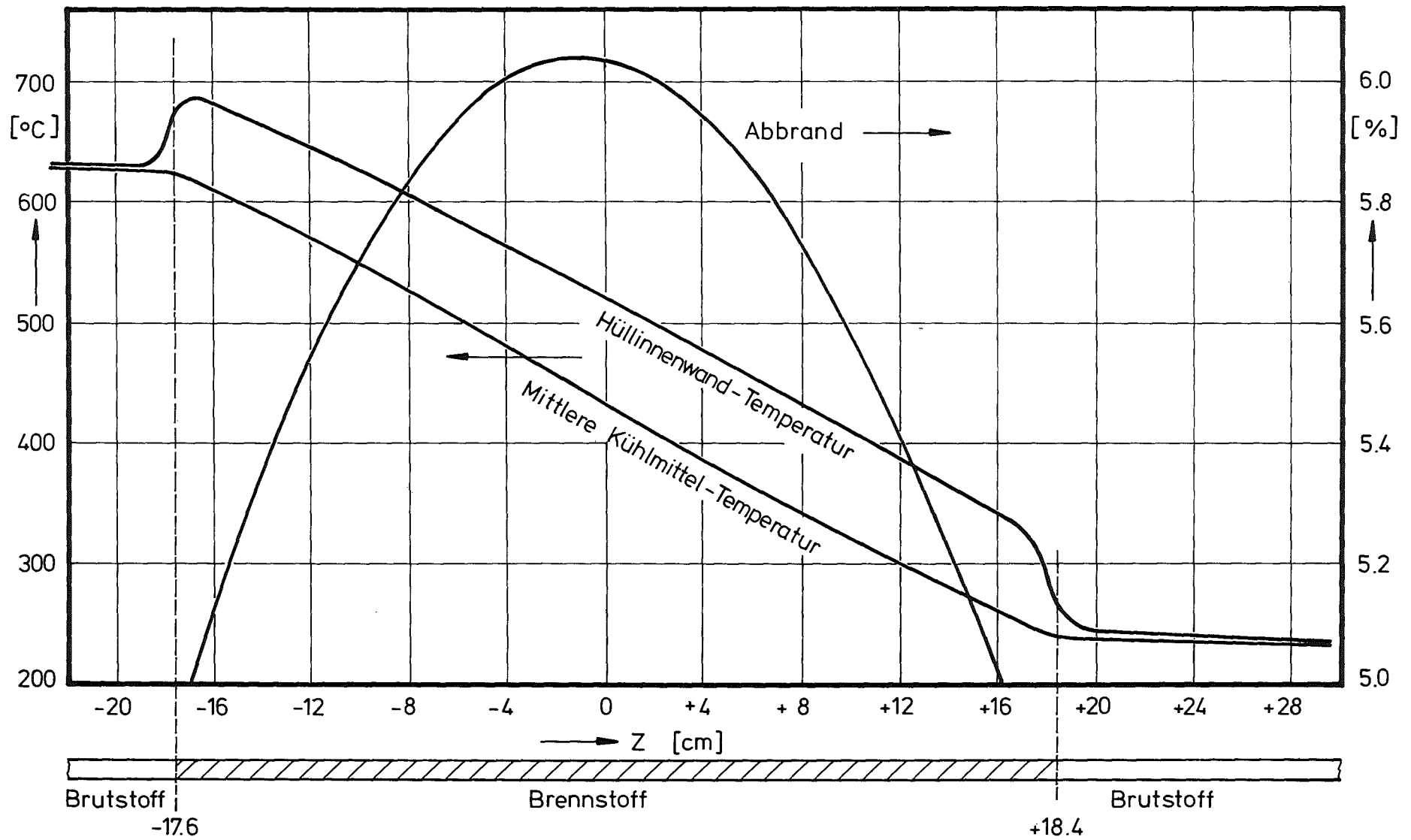


Abb. 16 Hüll- und Kühlmitteltemperatur, Abbrand

Tabelle XII Abbrandwerte in den Betriebszyklen der Bestrahlung

Axiale Position z (cm)	Abbrand am Ende von Run 60			Abbrand am Ende von Run 61			Abbrand am Ende von Run 62			Abbrand am Ende von Run 63			Abbrand am Ende von Run 64		
	%	MWd/t Ox	MWd/t Me	%	MWd/t Ox	MWd/t Me	%	MWd/t Ox	MWd/t Me	%	MWd/t Ox	MWd/t Me	%	MWd/t Ox	MWd/t Me
+ 29,3	0,01	108	123	0,05	510	579	0,09	823	935	0,14	1254	1423	0,18	1695	1925
+ 25,0	0,02	163	185	0,08	679	771	0,13	1079	1223	0,19	1616	1833	0,25	2149	2440
+ 20,7	0,02	208	236	0,10	855	971	0,16	1357	1538	0,24	2030	2305	0,32	2695	3060
+ 16,2	0,41	3363	3820	1,66	13612	15470	2,60	21326	24200	3,83	31359	35600	5,00	40955	46500
+ 11,7	0,45	3673	4170	1,81	14855	16860	2,84	23262	26400	4,17	34183	38800	5,44	44614	50600
+ 7,2	0,48	3905	4440	1,93	15787	17910	3,02	24712	28000	4,43	36295	41200	5,78	47348	53800
+ 2,7	0,49	4047	4590	2,00	16356	18570	3,12	25595	29000	4,59	37581	42600	5,98	49011	55700
- 1,7	0,50	4087	4640	2,02	16516	18770	3,15	25844	29400	4,63	37943	43100	6,04	49479	56100
- 6,2	0,49	4013	4550	1,98	16219	18420	3,10	25382	28800	4,55	37271	42300	5,93	48610	55200
- 10,7	0,47	3821	4340	1,89	15450	17530	2,95	24187	27400	4,34	35531	40300	5,66	46360	52600
- 15,2	0,43	3518	3990	1,74	14234	16180	2,72	22295	25300	4,00	32774	37200	5,22	42789	48600
- 19,2	0,03	229	260	0,11	943	1070	0,18	1497	1700	0,27	2240	2542	0,36	2975	3380
- 22,7	0,02	192	218	0,09	795	902	0,15	1263	1434	0,23	1891	2146	0,30	2513	2850

Anmerkung: Die Zahlenwerte in % und in MWd/t Oxid stammen aus den Protokollen des D.E.R.E. Die Umrechnung auf MWd/t Metall erfolgte unter Verwendung eines Schwermetallgehaltes von 88,09 Gewichts-%.

8. Untersuchung und Demontage des Bestrahlungseinsatzes

Nach einer thermischen Abkühlzeit von 42 Tagen wurde der Bestrahlungseinsatz (Trefoil) aus dem Lagerbehälter innerhalb des DFR in die Heißen Zellen überführt. Eine erste visuelle Inspektion zeigte keine außergewöhnlichen Kennzeichen. Daraufhin wurde das Trefoil mit der Röntgenanlage durchleuchtet und zwar in drei Winkelorientierungen, die jeweils um 120° gegeneinander verschoben waren. Auf diese Weise konnte jeder Einzelstab ohne Überdeckung durch seine Nachbarn begutachtet werden. Die Röntgenbilder zeigten intakte unverbogene Stäbe, bei denen lediglich am Übergang zwischen Brennstoff und Brutstoffsäule sowie im Bereich der oberen Brutstoffsäule einige Querspalte zu sehen waren. Die Spalte zwischen den Stäben und das Fußende des Trefoils waren frei von blockierenden Materialstücken. Aus den Befunden ergaben sich keine Einschränkungen für die übliche Demontage.

Die Routine-Demontage sieht ein Durchtrennen des Trefoils unterhalb der Brennstäbe vor. Durch einen Fehler beim Lesen der Konstruktionszeichnung wurde das Trefoil jedoch in Höhe der unteren Brutstoffsäule ca. 25 mm vom Stabende angeschnitten. Dabei wurden zwei Stäbe (G 1 und G 2) so tief angesägt, daß die Hülle durchbrochen wurde und das Spaltgas entweichen konnte. Im weiteren Verlauf der Arbeiten wurden dann zusätzlich alle drei Stäbe an der Anschnittstelle noch um ca. 10° verbogen. Die Hülle des anfangs unverletzten Stabes G 3 blieb dabei allerdings intakt. Später wurden die Stäbe ohne Schwierigkeiten aus dem Mantelrohr herausgezogen. In der üblichen Weise wurden sie danach mit einem feuchten Zellstofftuch abgewischt, um anhaftendes Alkalioxid bzw. Hydroxid von der Oberfläche zu entfernen.

9. Zerstörungsfreie Untersuchung der Prüflinge

Im Anschluß an die Demontage des Trefoils wurden die Prüflinge in den Heißen Zellen in Dounreay einer zerstörungsfreien Untersuchung unterzogen [10, 11], die folgende Punkte umfaßte:

- Visuelle Inspektion
- Durchleuchtung mit 300 kV-Röntgenstrahlen
- Vermessung der Stablänge

- Vermessung des Stabdurchmessers in Abständen von 0,5 Zoll (25,4 mm)
- Wägung

Später wurden die Stäbe nach Karlsruhe transportiert, wo die zerstörungsfreie Untersuchung ergänzt und zur Kontrolle in einigen Punkten wiederholt wurde. In den nachfolgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der Untersuchungen gemeinsam unter den Sachüberschriften dargestellt. Ein Hinweis auf den Ort der Untersuchung erfolgt nur falls notwendig.

9.1 Visuelle Inspektion

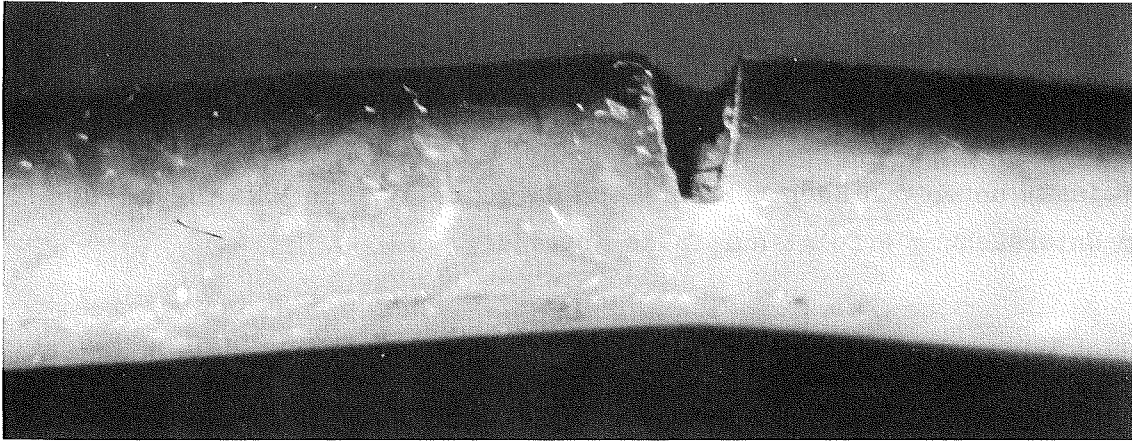
Abgesehen von den durch die fehlerhafte Demontage hervorgerufenen Defektstellen zeigten alle drei Stäbe keine Besonderheiten. Die Oberfläche war am oberen Ende auf eine Länge von ca. 38 cm blank und ging dann über dunkle Anlauffarben in ein mattes Schwarz über. Der Beginn der Verfärbung entspricht einer Kühlmittel-Temperatur von etwa 400 °C. An den Berührungsstellen der Abstandshalter waren blanke Reibmarken zu sehen, die jedoch nicht von einer Verformung oder einem bemerkbaren Abtrag des Hüllrohres begleitet waren. Andere äußere Kennzeichen wie Kratzer und Markierungen über den Umfang stammten von der Handhabung in der Heißen Zelle bzw. von der vorangegangenen Stabvermessung.

Die Defektstellen hatten folgendes Aussehen:

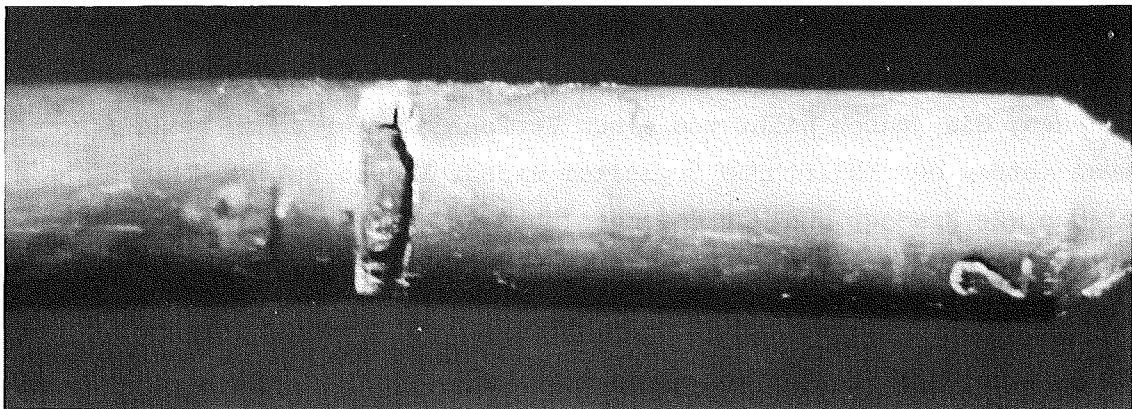
Stab G 1: Etwa 23 mm vom unteren Ende war der Stab über einen Winkel von ungefähr 90 ° eingeschnitten. Die Hülle war durchtrennt und der Schnitt lief ca. 1 mm in den Brutstoff hinein. Von der Defektstelle an war das untere Stabende um etwa 10 ° aus seiner ursprünglichen Richtung abgeknickt.

Stab G 2: Der Schaden war dem an G 1 beobachteten sehr ähnlich. Lediglich die Schnitt-Tiefe war geringer.

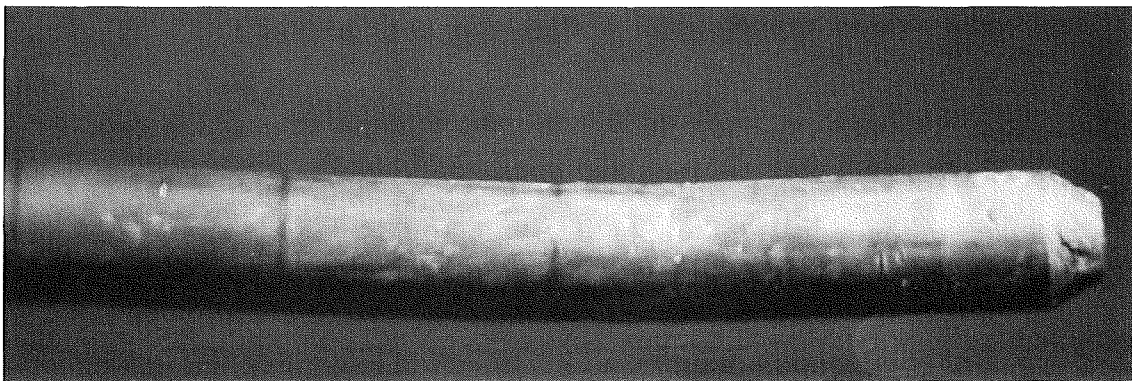
Stab G 3: Dieser Stab war als einziger nicht angeschnitten jedoch wie seine Nachbarn ca. 23 mm vom Ende um 10 ° verbogen. Im Bereich der Biegestelle zeigten sich jedoch keine Risse und auch spätere Untersuchungen bestätigten die Unversehrtheit der Hülle. Abb. 17 zeigt die drei Stäbe im Bereich der Schadensstellen.



G 1



G 2



G 3

Schadensstellen an den un-
teren Stabenden

Abb. 17

9.2 Durchleuchtung

Die Stäbe wurden mehrmals durchleuchtet und zwar mit unterschiedlichen Röntgenanlagen und verschiedenen Zielsetzungen. Bei der ersten Durchleuchtung mit einer 300 kV-Röhre in Dounreay war es nur möglich, die Brennstoff- und Brutstoffsäulen als Schattenrisse abzubilden. Dementsprechend wurde hier nur die äußere Geometrie beurteilt. In Abb. 18 sind die für die Auswertung wichtigen oberen und unteren Stabenden dargestellt. Gleichzeitig mit den Stäben wurden auf jeder Aufnahme auch eine Kalibrierstange abgebildet, die im Abstand von zwei Zoll (50,8 mm) mit Markierungen versehen war. Mit Hilfe dieses internen Standards wurden die Längen der Brennstoff- und Brutstoffsäulen ermittelt [12]. Tabelle XIII gibt die Ergebnisse dieser Vermessung wieder. Danach sind die Brennstoffsäulen um durchschnittlich 0,2 % in der Länge gewachsen, während die Brutstoffsäulen geschrumpft sind. Am unteren, heißen Stabende betrug diese Schrumpfung im Mittel 2,1 % wohingegen an der kalten, oberen Brutstoffzone von Stab G 3 nur 1,5 % Längenabnahme gemessen wurden. Die scheinbare Verlängerung der oberen Brutstoffsäulen an den Stäben G 1 und G 2 ist darauf zurückzuführen, daß diese Säulen von größeren Rissen durchzogen und die Tabletten auseinandergerückt sind.

Nach dem Transport nach Karlsruhe wurden die Stäbe in der HZ-Anlage des Europäischen Instituts für Transurane nochmals geröntgt und zwar einmal als Umstrahlung und einmal als Durchstrahlung der Brennstoffsäule. Die entsprechenden Aufnahmen sind in den Abb. 19, 20 und 21 gezeigt [13]. Eine kurze Beurteilung dieser Aufnahmen führt zu folgenden Aussagen:

Stab G 1

Obere Brutstoffsäule:

Tabletten einzeln erkennbar. Mehrere dünne Längsrisse, zwei große Schrägrisse

Brennstoffsäule:

Zentralkanal im wesentlichen gleichmäßig, am unteren Ende ca. 1 mm lang ausgesackt, darüber auf etwa 8 mm Länge verstopft. Tabletten im mittleren Stabbereich nicht mehr einzeln erkennbar, darüber und darunter häufig jeder zweite Tablettenstoß zu sehen. Keine großen Längs- oder Querrisse.

Trefoil 304 / 1

G 1

G 2

G 3

ob. Ende

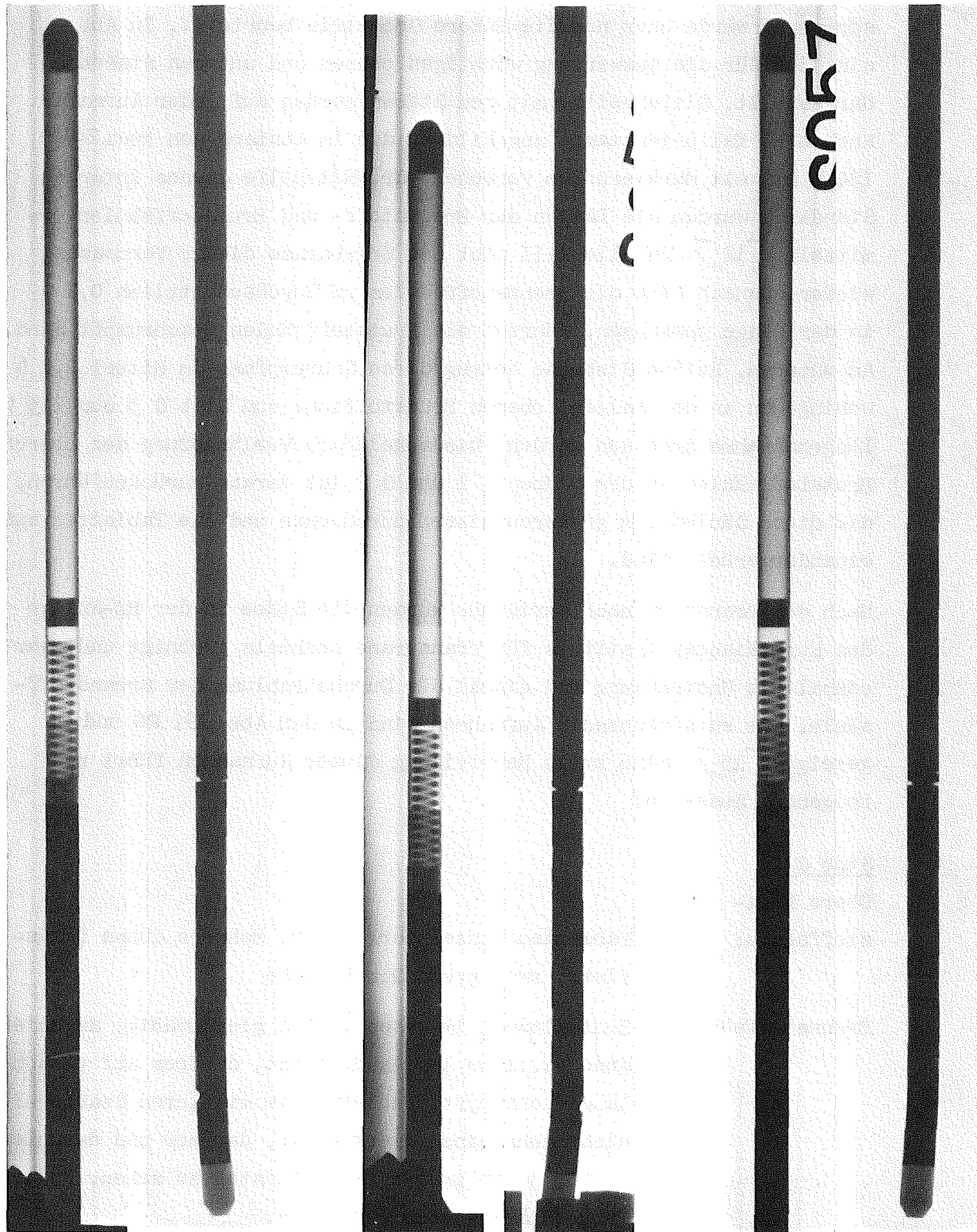
unt. Ende

ob. Ende

unt. Ende

ob. Ende

unt. Ende



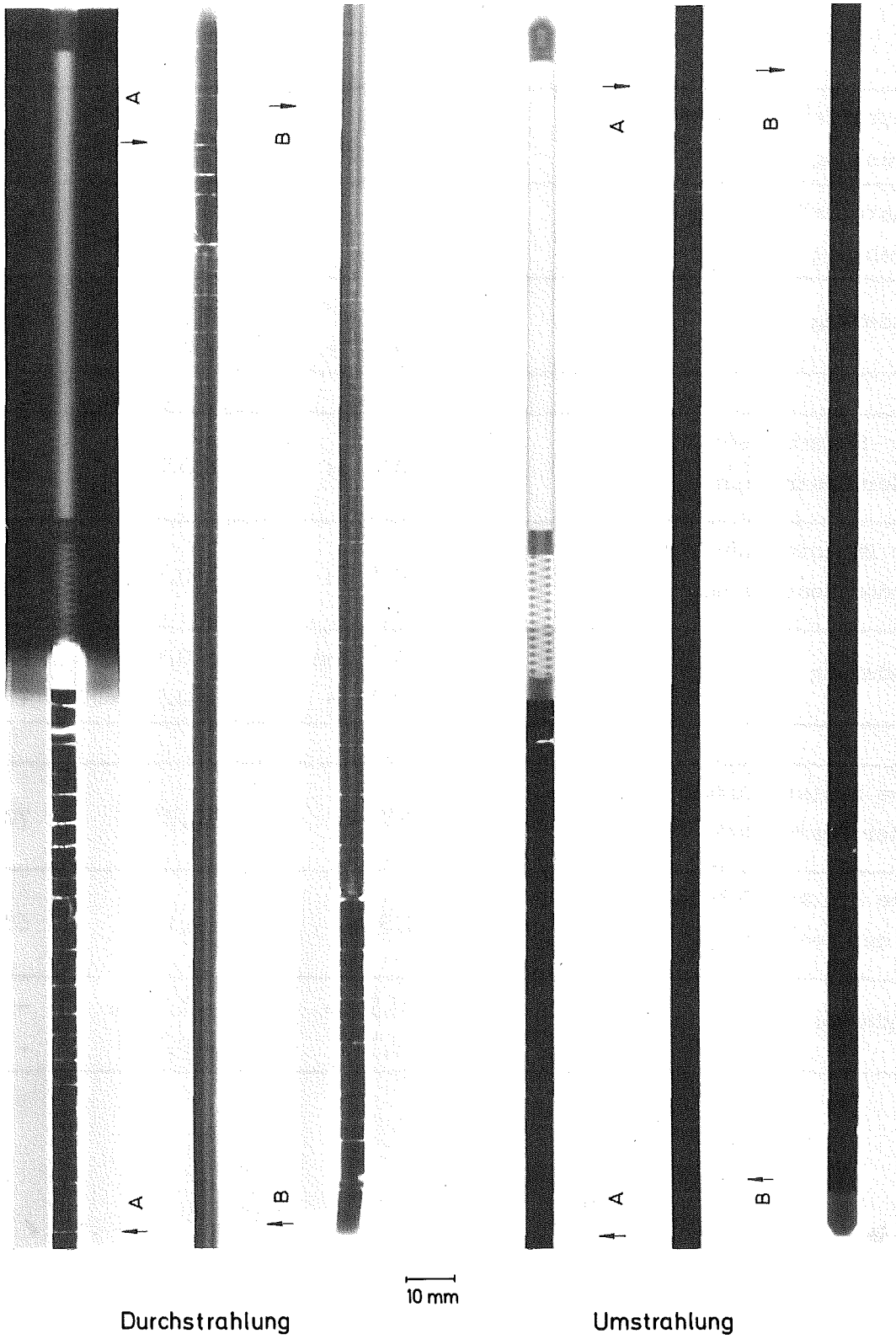
Röntgenbilder der bestrahlten Stäbe

Abb. 18

Tabelle XIII Veränderung der Brennstoff- und Brutstoffsäulen

	G 1	G 2	G 3
Brennstoffsäule vor der Bestrahlung	360,3 mm	360,1 mm	360,3 mm
Brennstoffsäule nach der Bestrahlung	361,5 mm	360,9 mm	361,8 mm
Veränderung	+ 0,4 mm + 0,11 %	+ 0,5 mm + 0,14 %	+ 1,2 mm + 0,33 %
Obere Brutstoffsäule vor der Bestrahlung	130,0 mm	130,0 mm	130,0 mm
Obere Brutstoffsäule nach nach der Bestrahlung	130,4 mm	130,4 mm	128,1 mm
Veränderung	+ 0,4 mm + 0,31 %	+ 0,4 mm + 0,31 %	- 1,9 mm - 1,5 %
Untere Brutstoffsäule vor der Bestrahlung	69,7 mm	70,7 mm	70,4 mm
Untere Brutstoffsäule nach der Bestrahlung	68,8 mm	69,1 mm	68,5 mm
Veränderung	- 0,9 mm - 1,3 %	- 1,6 mm - 2,3 %	- 1,9 mm - 2,7 %

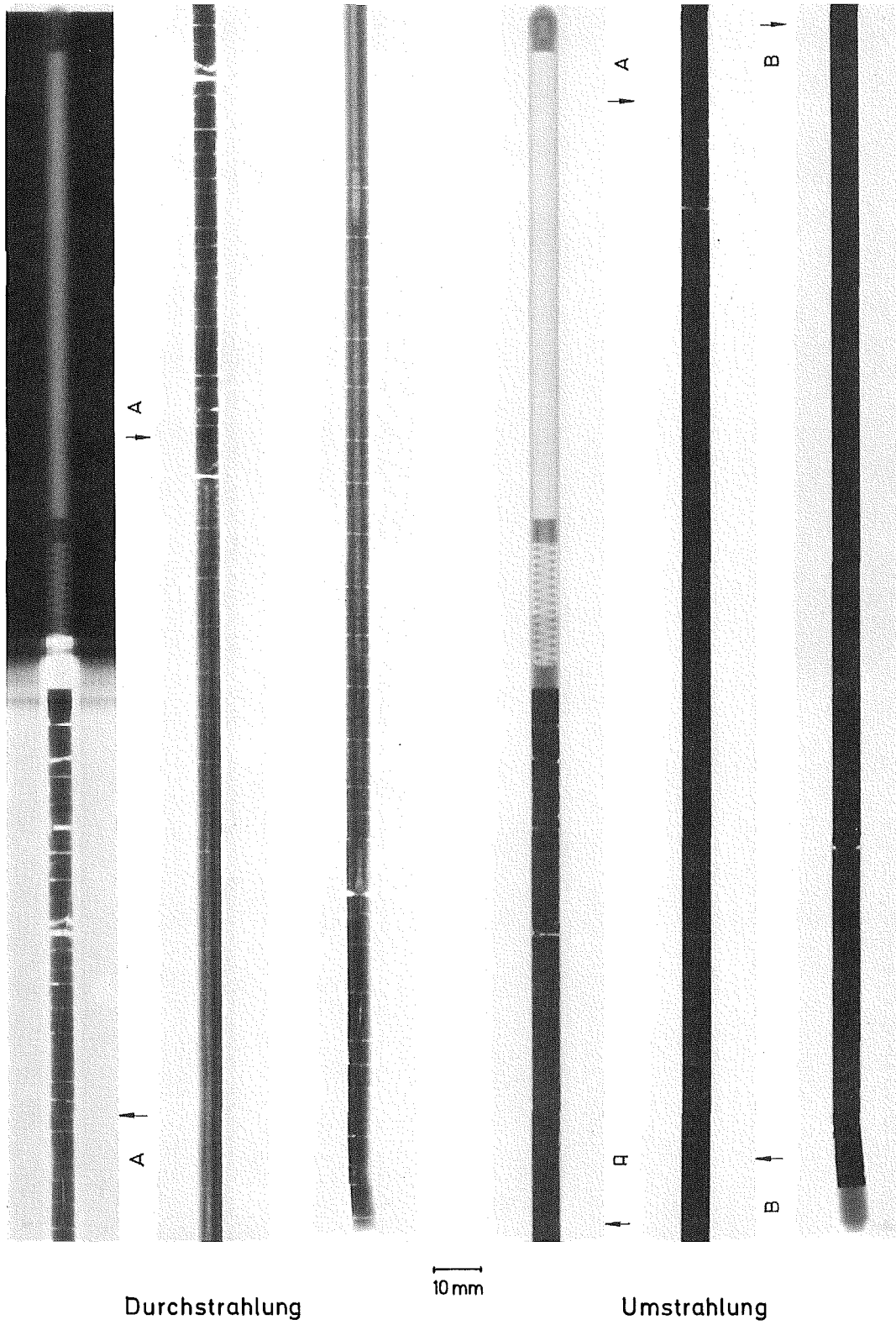
Trefoil - Stab - Nr. - G 1



Röntgendurchleuchtung

Abb. 19

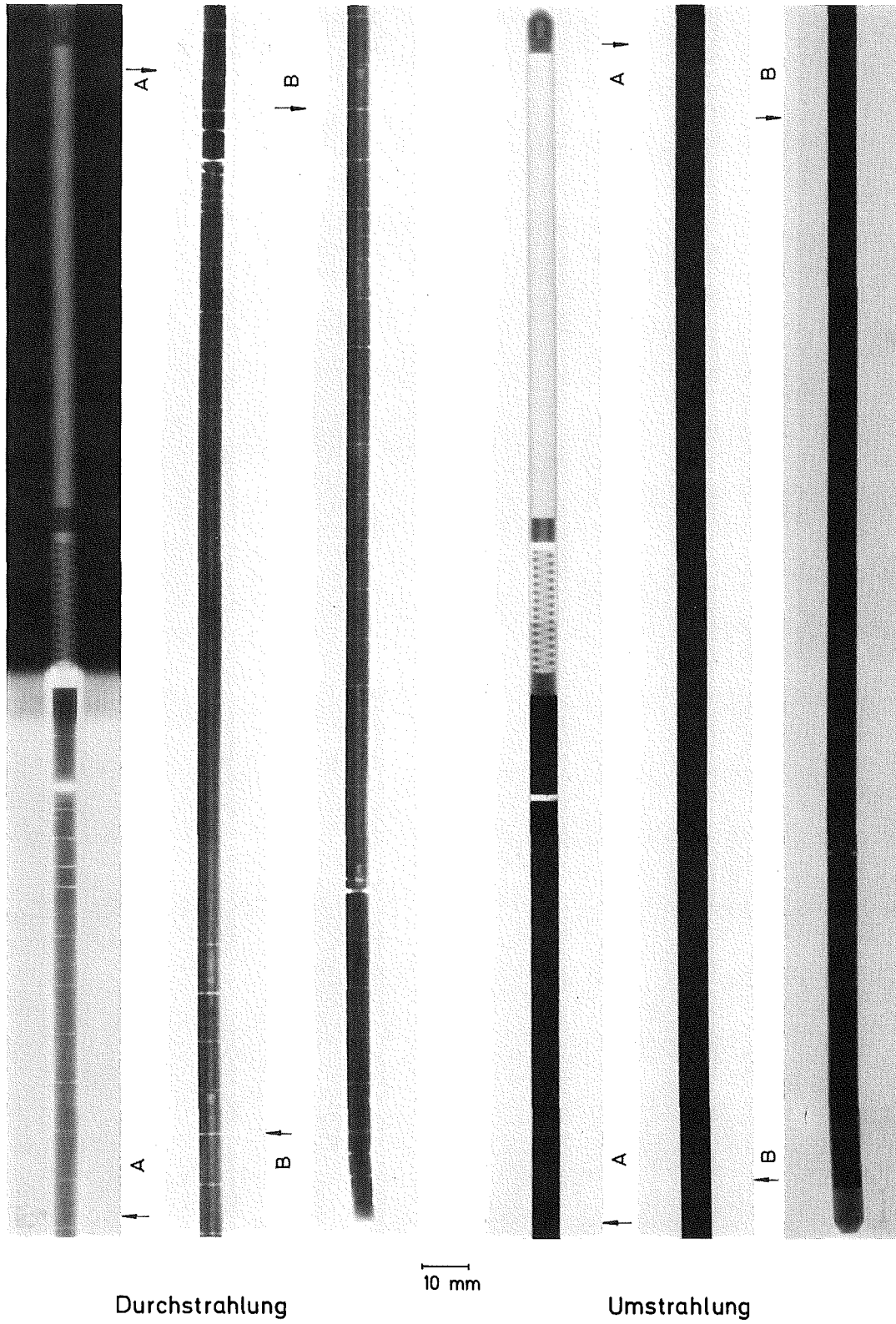
Trefoil - Stab - Nr. - G 2



Röntgendurchleuchtung

Abb. 20

Trefoil - Stab - Nr. - G 3



Röntgendurchleuchtung

Abb. 21

Untere

Brutstoffsäule: Tabletten einzeln erkennbar, ohne größere Risse. An der angesägten Stelle ist die Tablette mehrfach quergestellt.

Stab G 2

Obere

Brutstoffsäule: Tabletten einzeln erkennbar. Zahlreiche breite und schmale Querrisse. Fast alle Tabletten sind zer-rissen.

Brennstoffsäule: Zentralkanal über weite Bereiche gleichmäßig, in Höhe des Stabileistungsmaximums (Säulenmitte) auf-geweitet. Am unteren Säulenende wie bei Stab G 1 eine Aussackung des Zentralkanals, die nach oben zu durch einen Stopfen verschlossen ist. Tabletten im mittleren Stabbereich zusammengewachsen, darüber und darunter ist häufig jeder zweite Tablettenstoß zu sehen.
Keine größeren Längs- oder Querrisse.

Untere

Brutstoffsäule: Tabletten einzeln erkennbar, vielfach mit Längs-rissen versehen. An der angesägten Stelle ist die Tablette schräg geplatzt.

Stab G 3

Obere

Brutstoffsäule: Tabletten einzeln erkennbar, breiter Spalt zwischen 4. und 5. Tablette von oben. Nur wenige und dünne Risse.

Brennstoffsäule: Zentralkanal über weite Bereiche gleichmäßig, jedoch mit einer Brennstoffbrücke in Säulenmitte. Am unteren Säulenende ist der Zentralkanal wie bei den Stäben G 1 und G 2 ausgesackt und nach oben zu verstopft. Die Tabletten sind nur in einem kurzen Bereich in Stabmitte zusammengewachsen, in den übrigen Zonen ist mit großer Regelmäßigkeit jeder zweite Tabletten-stoß zu sehen.

Untere

Brutstoffsäule: Tabletten einzeln erkennbar, ohne größere Risse.
An der abgeknickten Stelle ist die Tablette unbeschädigt.

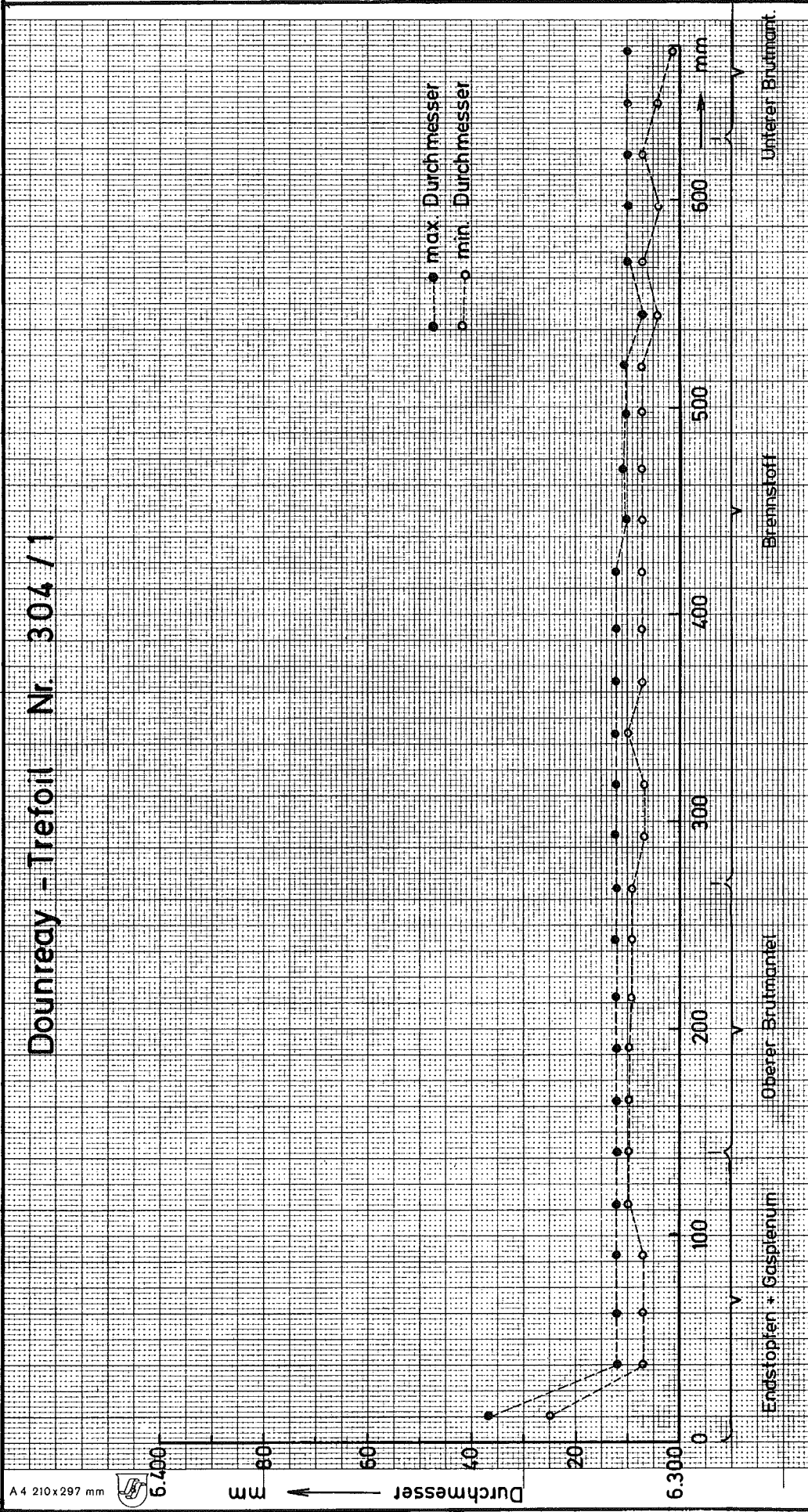
9.3 Äußere Vermessung

Die äußere Vermessung der Stäbe umfaßt eine Bestimmung der Länge sowie des Durchmessers an zahlreichen Punkten entlang der Stabachse. Daneben wurde auch noch die Durchbiegung als maximale Auslenkung der Stabachse festgestellt. Aus terminlichen Gründen konnte eine Vorvermessung sowohl vom Hersteller (TU-I) als auch vom späteren Nachuntersucher (Heiße Zellen der GfK) nicht vorgenommen werden. Daher basieren alle Vergleiche zwischen Vor- und Nachvermessung auf Meßwerten, die von der UKAEA vor dem Einbau in den Bestrahlungseinsatz ermittelt wurden.

9.3.1 Stabdurchmesser

Vor der Bestrahlung wurden Maximum und Minimum der Stabdurchmesser in Abständen von 0,5 bzw. 1 Zoll, insgesamt an 28 Positionen je Stab bestimmt. Die wesentlichsten Daten aus diesen Messungen, die im übrigen keine starken Schwankungen zeigen, sind in den Abb. 22, 23 und 24 dargestellt. Bei der Nachvermessung in den Heißen Zellen in Dounreay wurde an den gleichen Positionen abermals Maximum und Minimum des Durchmessers ermittelt. Darüber hinaus wurden noch weitere Meßpunkte eingeführt, so daß alle 0,5 Zoll gemessen wurde. In den Abb. 25, 26 und 27 sind die Meßdaten und das jeweils daraus gebildete Mittel gegen die Stabachsenlänge aufgetragen. Eine Wiederholung der Vermessung in den Heißen Zellen der GfK in Karlsruhe führte zu Durchmesser-Werten, die in den gleichen Abbildungen zum Vergleich als breit schraffiertes Feld zu sehen sind. Wie aus den Abbildungen ersichtlich, liegen im allgemeinen die Karlsruher Werte um 5 - 10 μm über den Werten, die in Dounreay gemessen wurden. Diese Diskrepanz konnte leider nicht ausgeräumt werden, da eine Vergleichsmessung mit einem Meisterbolzen durch den Ausfall der Meßapparatur in Dounreay nicht zustande kam. Auch der Vergleich mit den Vorbestrahlungsdaten bringt keine Erklärung. Nimmt man an, daß am oberen, kalten Ende der Stab seinen ursprünglichen Durchmesser beibehalten hat - es gibt zur Zeit keinen plausiblen Grund,

Downreay - Trefoil Nr. 304 / 1



Vor - Vermessung Stab G1 (S0 55)

Abb. 22

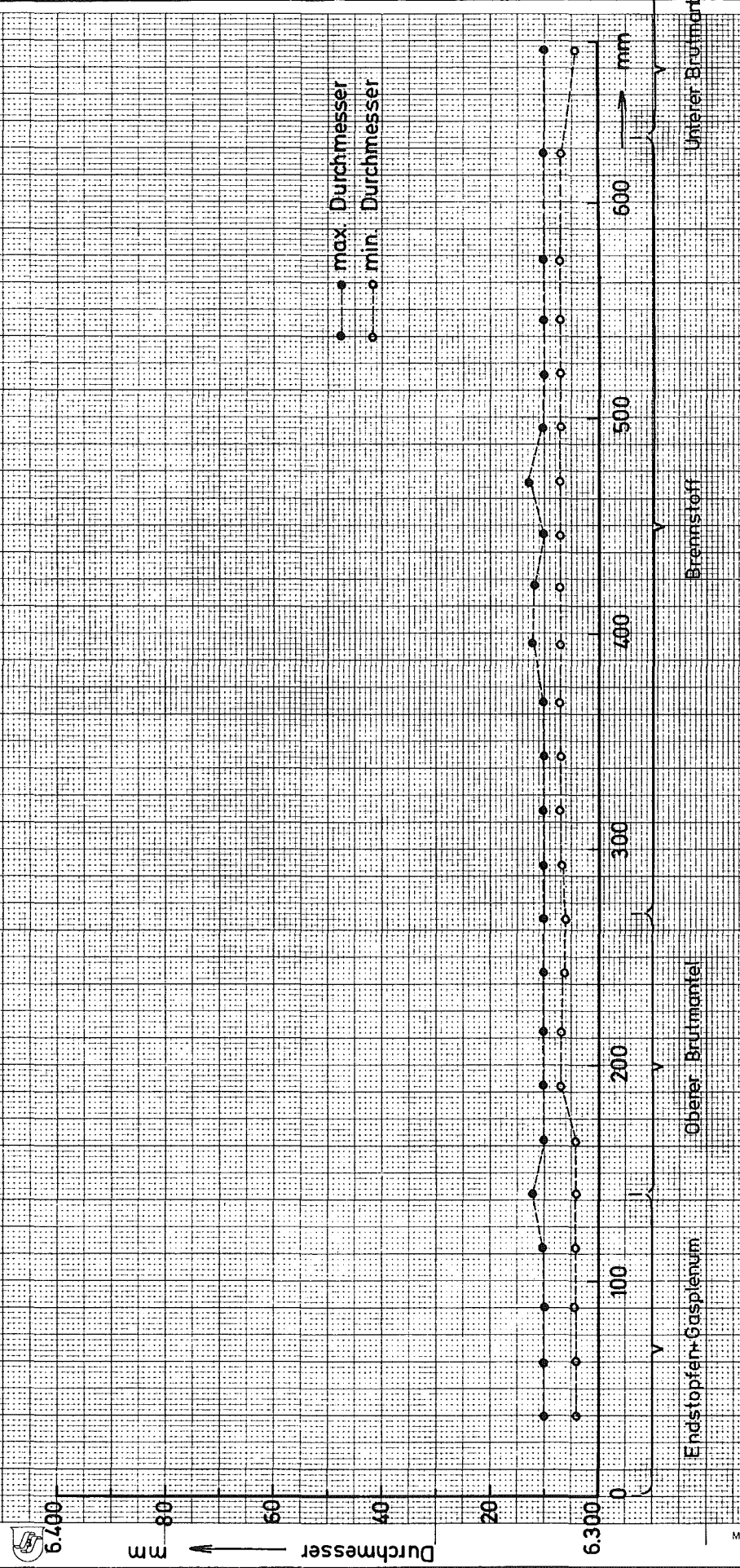


A 4 210 x 297 mm



MADE IN GERMANY

Dounreay - Trefoil Nr. 304/1



Vor - Vermessung Stab G 2 (S0 56)

Abb. 23



A 4 210 x 297 mm



6.400
80
60
40
20
6.300
0



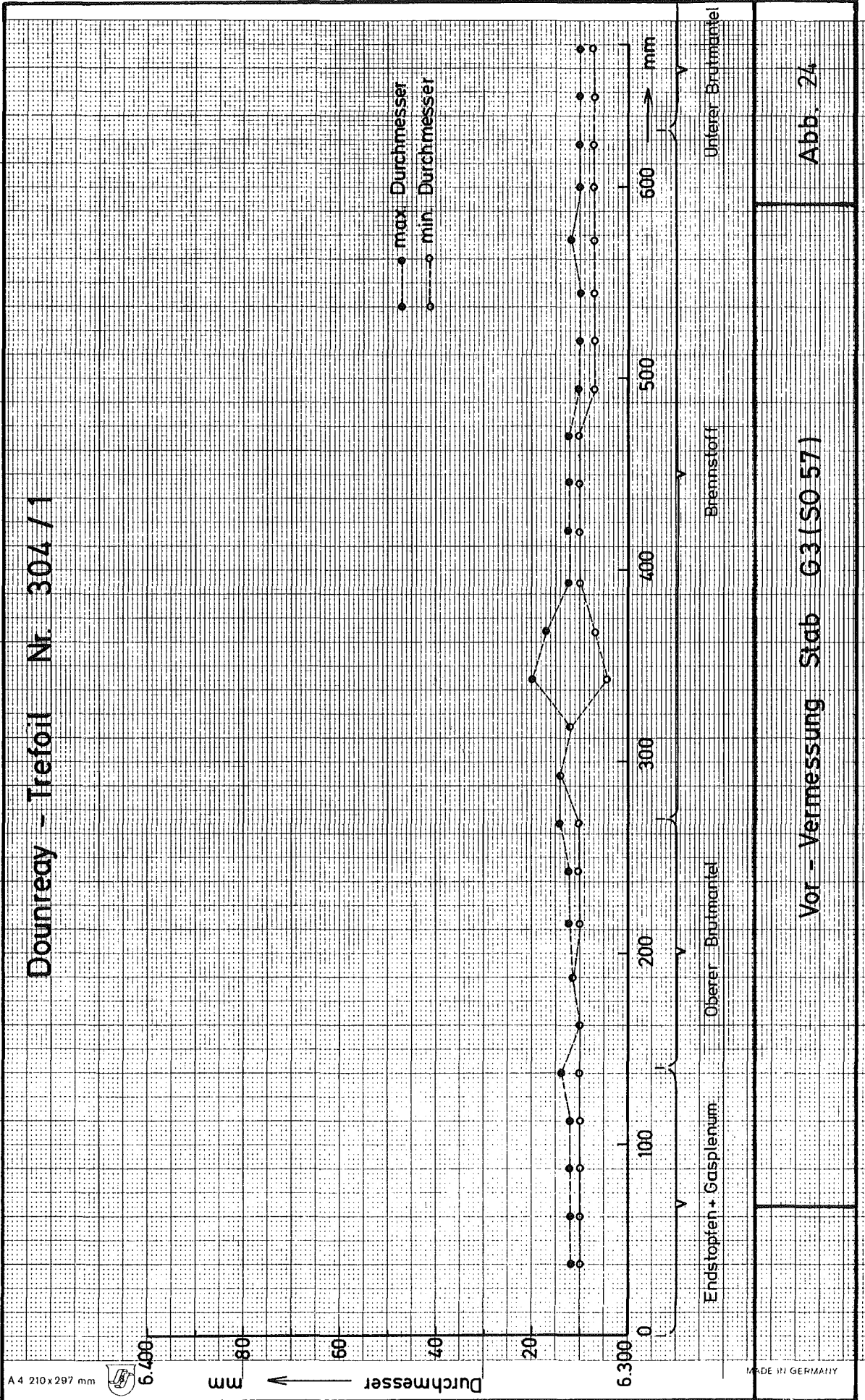
Durchmesser

600
500
400
300
200
100
0

mm

MADE IN GERMANY

Dounreay - Trefoil Nr. 304 / 1



Vor - Vermessung Stab G3(S0 57)

Abb. 24



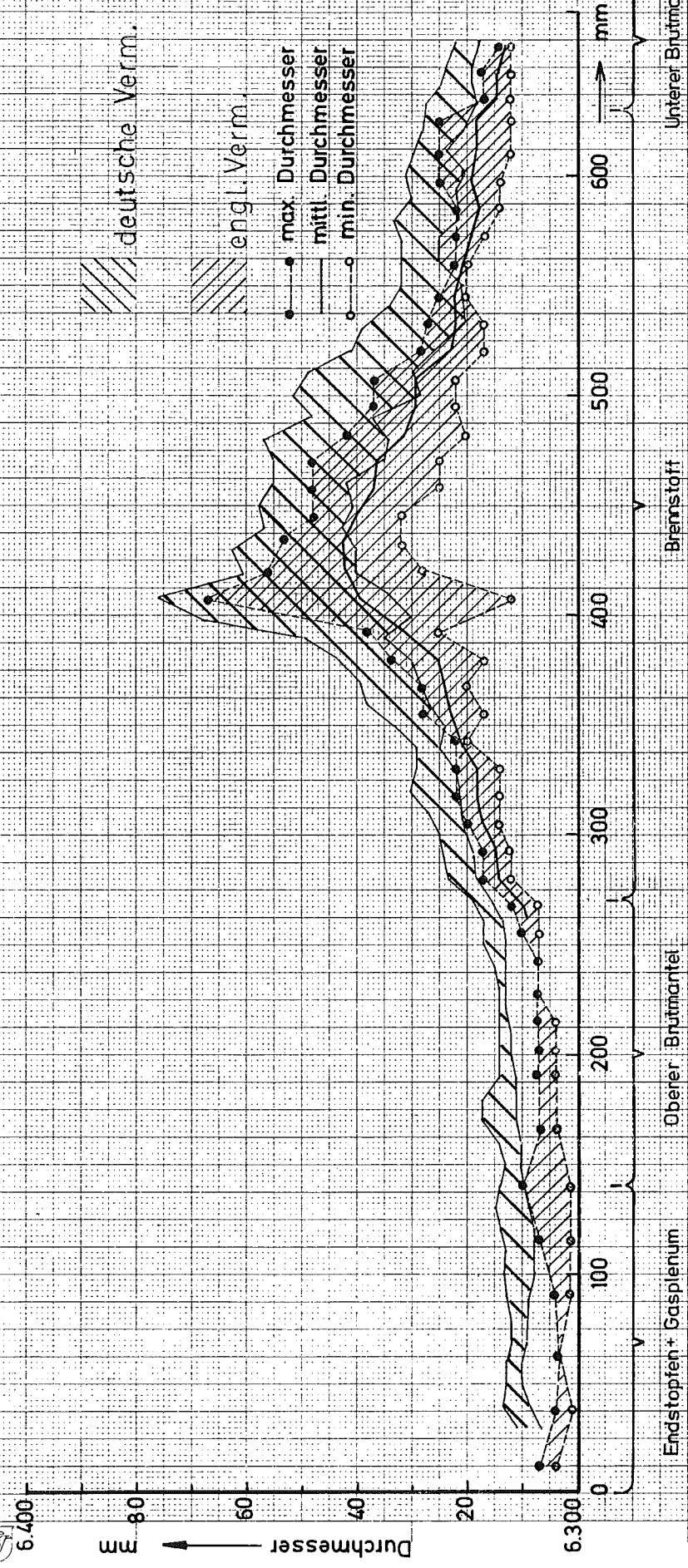
A 4 210 x 297 mm



Durchmesser mm

MADE IN GERMANY

Downrey - Trefoil Nr. 304 / 1



Nach - Vermessung Stab G1 (SO 55)

Abb. 25



A 4 210 x 297 mm



Durchmesser mm

MADE IN GERMANY

Dounreay - Trefoil Nr. 304 / 1



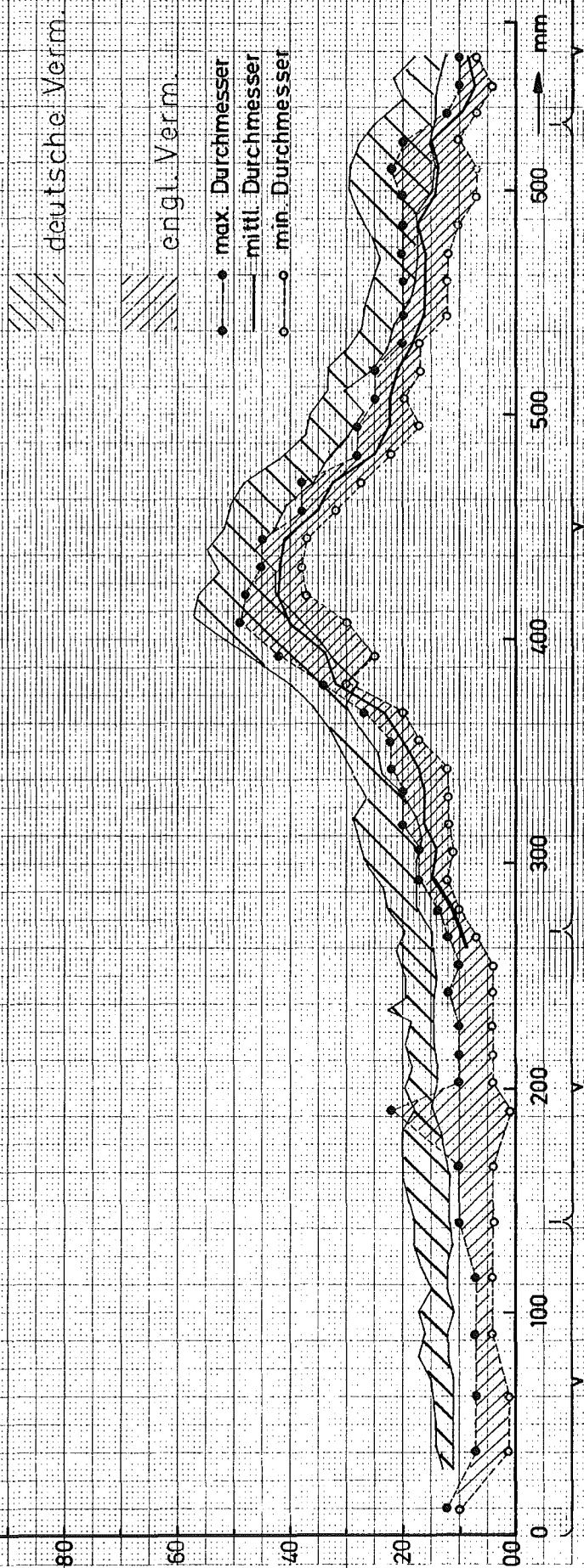
A 4 210x297 mm



6.400

3 m

Durchmesser



Endstopfen + Gasplenum

Oberer Brufmantel

Brennstoff

Unterer Brufmantel

Nach - Vermessung Stab G 2 (S0 56)

Abb. 26

MADE IN GERMANY

Dounreay - Trefoil Nr. 304/1

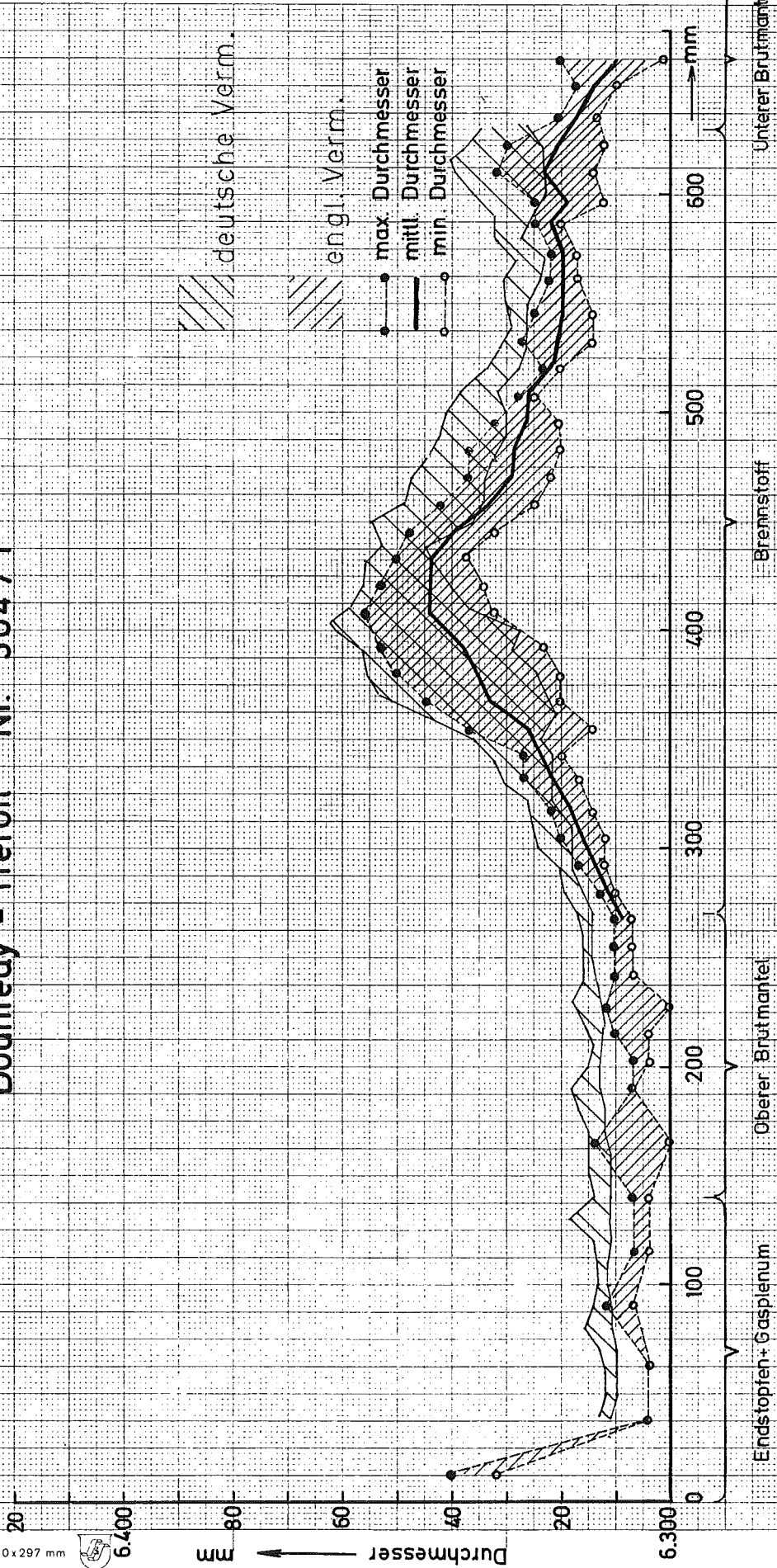


Abb. 27

Nach - Vermessung Stab G3 (S0 57)



A 4 210 x 297 mm



Durchmesser mm

MADE IN GERMANY

warum er das nicht tun sollte. - so liegen die Karlsruher Messungen bei Stab G 1 sehr nahe an diesem internen Standard, während die Dounreay Nachvermessung geringere Werte als bei der Vorvermessung zeigt. Für die Stäbe G 2 und G 3 liegen die Dounreay Nachvermessungen wieder näher an der Vorvermessung. Da die Differenzen 10 μm praktisch nie überschreiten und die Genauigkeit der Einzelmessungen bei etwa $\pm 4 \mu\text{m}$ liegt, wurde nicht weiter versucht, die Diskrepanz aufzulösen. In den Abb. 28, 29 und 30 sind die Werte der Karlsruher Nachvermessung nochmals für sich dargestellt. Sie wurden durch eine andere Meßmethode, nämlich kontinuierlich aus einer wendelförmigen Abtastung erhalten. Die Steigung dieses Wendels betrug 5 mm. Durch diese Meßmethode ist in größerem Maße sichergestellt, daß lokale Durchmesseränderungen auch erfaßt werden. Für die Auswertung der Durchmesseränderungen sollten nur die mittleren Durchmesser herangezogen werden, da die hohen Maximaldurchmesser lediglich eine Folge erhöhter Ovalität sind. Eine zur Ovalität führende Verformung nach der Bestrahlung durch Handhabung in den Heißen Zellen ist aber nicht auszuschließen.

Unter diesen Voraussetzungen betrugen die Durchmesserergrößerungen im Kurvenmaximum zwischen 30 und 40 μm , d.h. 0,5 - 0,6 % des Ausgangswertes.

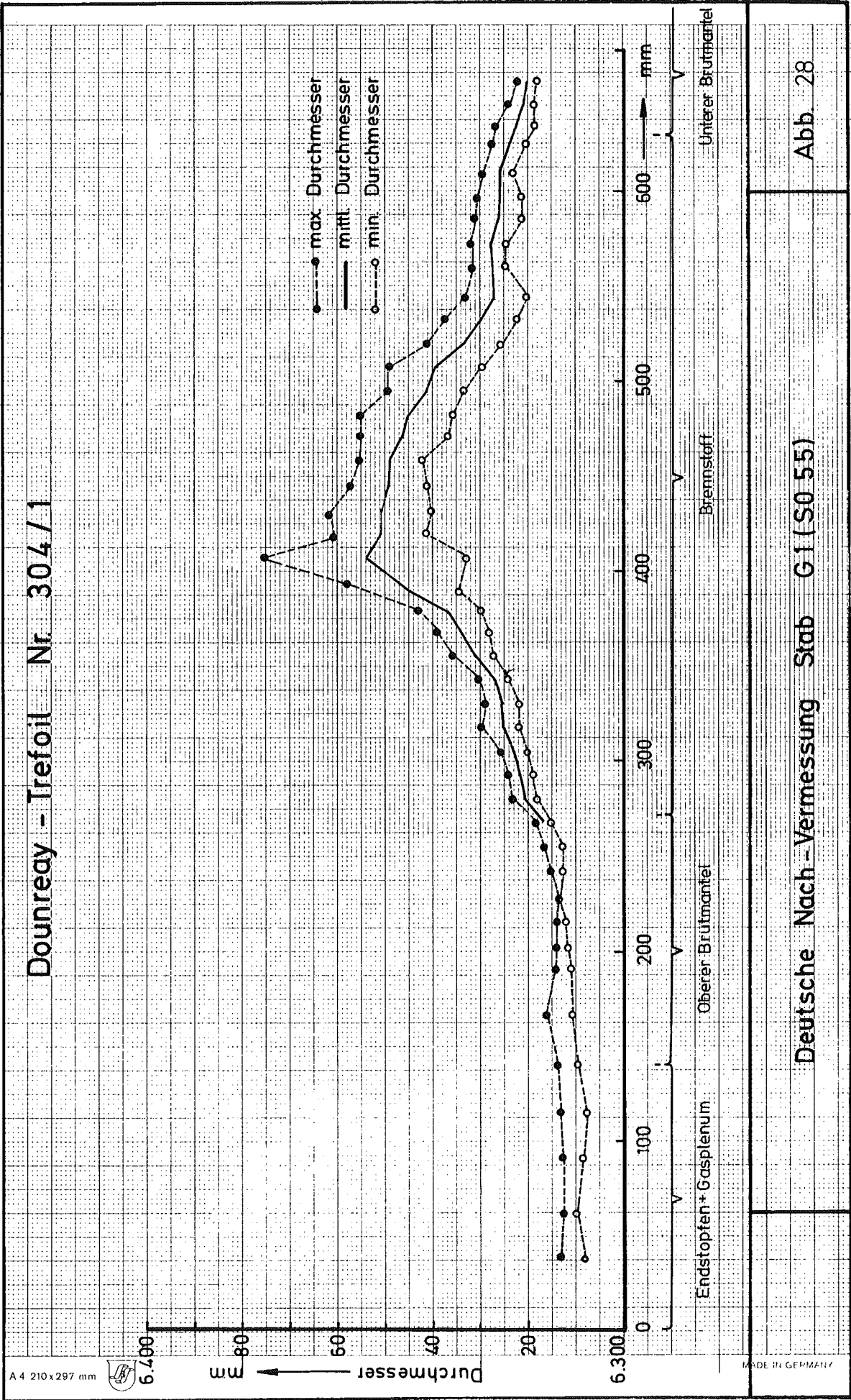
9.3.2 Stablänge

Die Länge der Stäbe wurde vor und nach der Bestrahlung vermessen mit folgenden Ergebnissen:

Stab	Länge vor (mm)	Länge nach (mm)	Veränderung (mm)	Veränderung (%)
G 1	709,14	710,13	0,99	0,14
G 2	709,19	710,05	0,86	0,12
G 3	709,19	709,95	0,76	0,11

Die Meßwerte werden naturgemäß durch die Stabtemperatur beeinflusst. Da die Temperaturerhöhung durch die Nachwärme nicht leicht zu berechnen war und außerdem keine Erfahrungswerte für die Abkühlzeit von 2 bis 3 Monaten vorlagen, wurde an mehreren Positionen der Staboberfläche die Temperatur mit einem Thermoelement gemessen. Bei einer Umgebungstemperatur von 21 °C wurden in Brennstoff-Säulenmitte als

Dounreay - Trefoil Nr. 304/1



A 4 210 x 297 mm



6.400
80
60
40
20
6.300
mm
Durchmesser
0

0 100 200 300 400 500 600 mm

Endstopfen + Gasplenum

Oberer Brutmantel

Brennstoff

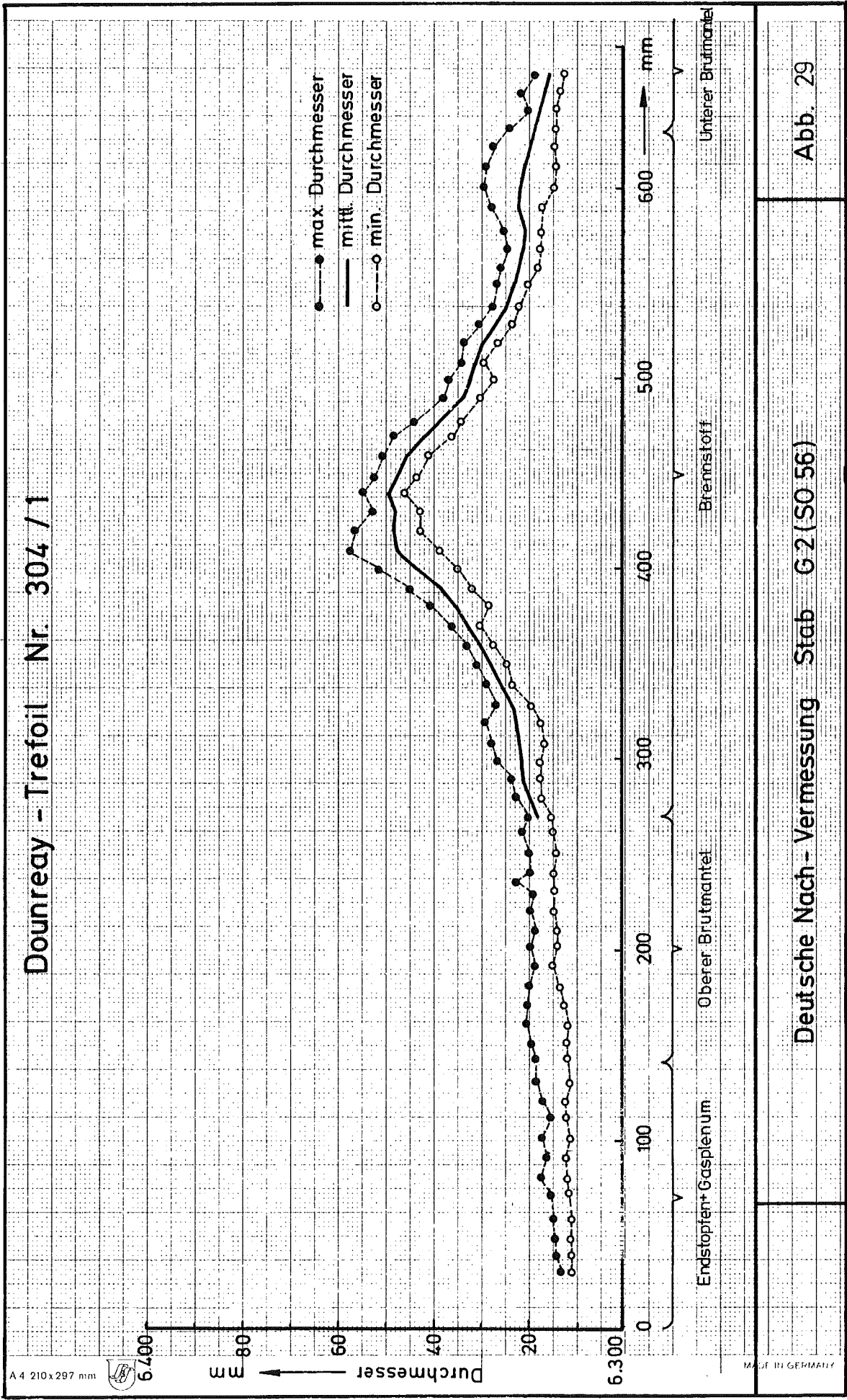
Unterer Brutmantel

MADE IN GERMANY

Deutsche Nach-Vermessung Stab G1(S0.55)

Abb. 28

Downreay - Trefoil Nr. 304 / 1



A 4 210x297 mm



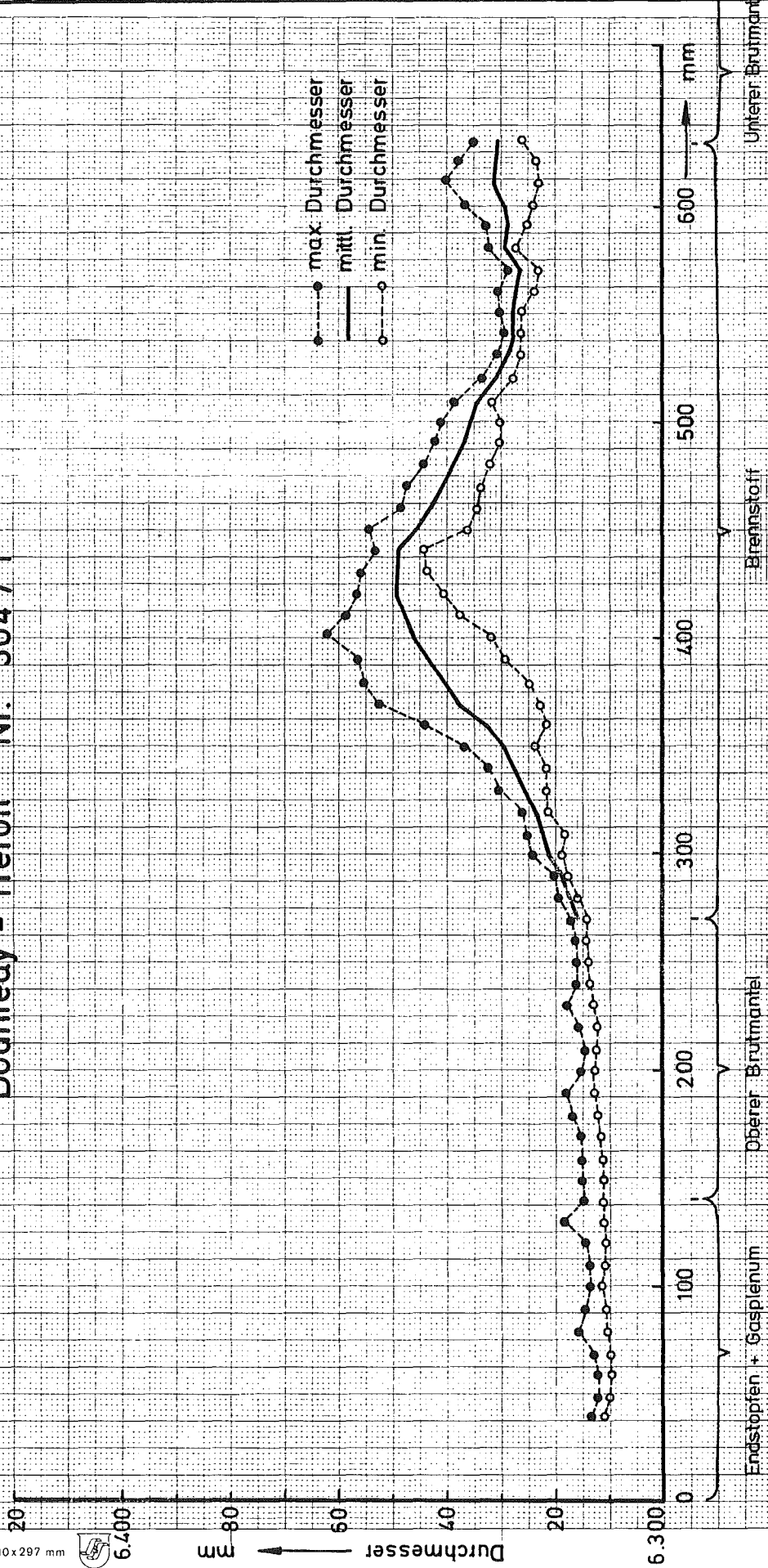
Durchmesser mm

MADE IN GERMANY

Deutsche Nach - Vermessung Stab G 2 (S 0 56)

Abb. 29

Dounrey - Trefoil Nr. 304 / 1



Deutsche Nach-Vermessung Stab G3 (S057)

Abb. 30



A 4 210x297 mm



Durchmesser mm

MADE IN GERMANY

Maximum 32°C festgestellt. Diese geringe Temperaturerhöhung machte eine Korrektur der Meßwerte in Anbetracht der anderen Meßfehler überflüssig.

Auch die Verbiegung der Stäbe durch die Demontage wurde hinsichtlich ihres Einflusses auf die Stablänge betrachtet. Im Idealfall würde ein Biegewinkel von 10° die Stablänge um etwa $0,03\text{ mm}$ vermindern. Durch die Form der Endstopfen ist bei einer Messung mit der Schieblehre diese Veränderung jedoch nicht direkt meßbar. Sie wird sogar weitgehend kompensiert. Daher wurde eine Korrektur der oben angegebenen Tabellenwerte nicht durchgeführt.

9.3.3 Durchbiegung

Die Stäbe zeigten nach der Bestrahlung etwa in Stabmitte eine leichte Durchbiegung, von der angenommen wird, daß sie durch ungleichmäßige Kühlung im Bestrahlungseinsatz herrührt. Im Maximum des Bogens betrug die Abweichung von der Stabachse für den Stab G 2 $3,5\text{ mm}$, für den Stab G 3 $4,0\text{ mm}$. Der Stab G 1 wurde nicht vermessen.

9.3.4 Wägung

Da das Gewicht der Stäbe vor der Bestrahlung nicht ermittelt worden war und die Demontage-Schäden an zwei Stäben außerdem das Gewicht vermindert hatten, wurde eine Wägung nicht für sinnvoll gehalten. Ohne irgendeinen Bezug zu haben wurde nur das Gewicht des Stabes G 3 zu $176,105\text{ g}$ bestimmt.

9.4 Gamma-Spektrometrie

Die erste γ -spektrometrische Analyse der Stäbe wurde in Dounreay vorgenommen. Zu diesem Zeitpunkt waren seit Bestrahlungsende 112 Tage vergangen, weshalb die kurzlebigen Radionuklide wie Ba/La-140 bzw. J-131 bereits weitgehend abgeklungen waren. Dementsprechend zeigten sich in den zunächst aufgenommenen Spektren nur zwei Aktivitätsspitzen, nämlich bei $0,75\text{ MeV}$ (Zr/Nb-95) und bei $0,52\text{ MeV}$ (Ru-103, Ru-106). Da für die Messungen nur ein NaJ-Kristall als Detektor in Verbindung mit einem Einkanal-Impulsanalysator verwendet wurde, konnten diese Aktivitätsspitzen nicht weiter aufgelöst werden. Insbesondere war es

nicht möglich, zwischen Zr-95 (722 keV und 754 keV) und Nb-95 (765 keV) zu unterscheiden. So wurden zwei γ -Profile mit Energiebereichen, die die oben erwähnten Aktivitätsspitzen jeweils umfaßten, aufgenommen und als Zr/Nb-95 bzw. Ru-103-Profile bezeichnet.

Die Stäbe unterschieden sich in ihren γ -Profilen nicht wesentlich voneinander und es zeigte sich folgendes Bild: Im oberen Abschnitt der Brennstoffsäule folgte die γ -Aktivität dem Leistungsverlauf im Reaktor recht gut. Die untere Hälfte der Brennstoffsäule zeigte dagegen Störungen in Form von Aktivitätserhöhungen, die sich bei den Ru-Profilen meist als dünne Spitzen, bei den Zr-Profilen dagegen als breitere Niveaus darstellten. Insbesondere am unteren Säulenende, wo später bei der Keramografie massive Spaltproduktablagerungen im Zentralkanal gefunden wurden, waren regelmäßig Aktivitätserhöhungen im Zr-95-Profil zu sehen. Als ca. 1 Jahr später abermals Zr-95-Profile aufgenommen wurden, waren die Erhöhungen verschwunden. Es liegt nahe anzunehmen, daß sie durch Nb-95 hervorgerufen wurden, von dem bekannt ist, daß es im Brennstoff stark wandert. Erwähnenswert ist noch, daß die Aktivitätsquelle für eine Spitze im Ru-Profil als beweglich erkannt wurde. Bei einer Wiederholung der Messung zeigte sie sich mehrere Zentimeter von ihrer ursprünglichen Position entfernt. Nimmt man an, daß es sich hier um einen Ru-Regulus im Zentralkanal handelt, so ist ein Abreißen und Verschieben während der Handhabung durchaus möglich.

Zusätzlich zu den beschriebenen Untersuchungen wurden an Stab G 3 in Dounreay einige Punkte mit einem hochauflösenden Detektor γ -spektrometrisch analysiert. Hieraus ergaben sich jedoch keine zusätzlichen Aussagen.

Etwa 16 Monate nach Bestrahlungsende wurden die Stäbe in den Heißen Zellen in Karlsruhe nochmals γ -spektrometrisch untersucht und zwar mit einem hochauflösenden GeLi-Halbleiter-Detektor, dem ein 400-Kanal-Impulsanalysator nachgeschaltet war.

Zunächst wurde von jedem Stab ein integrales Profil (Energiebereich 400 - 1700 keV) aufgenommen (siehe Abb. 31). Alle prominenten Punkte auf der Stabachse wurden zusätzlich durch Aufnahmen eines γ -Spektrums analysiert. Die in der Abbildung eingezeichneten Pfeile deuten auf die wichtigsten dieser Meßpunkte hin. Als Hauptkomponenten wurden jeweils die danebenstehenden Radionuklide ermittelt.

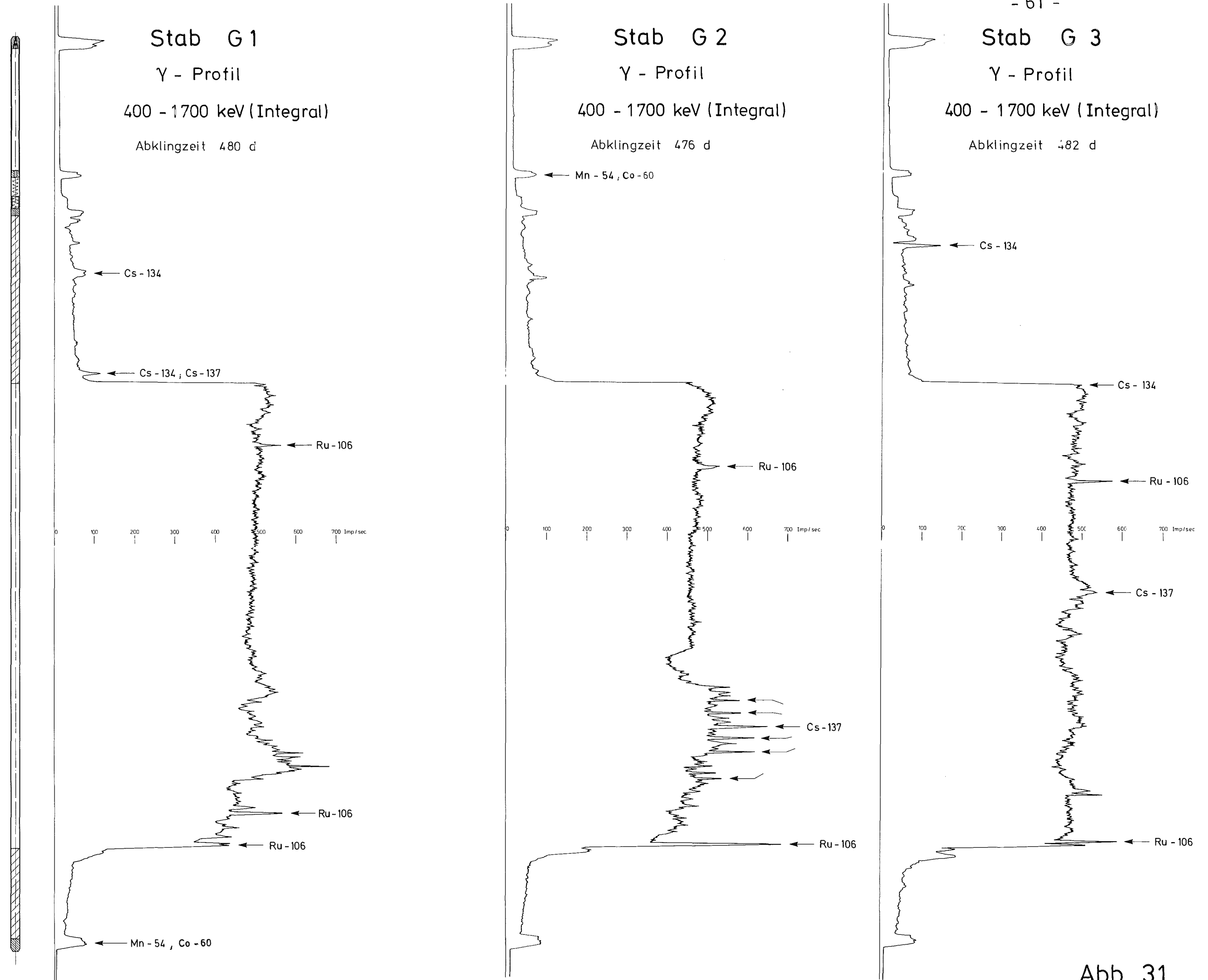


Abb. 31

Die Ruthenium-Verteilung entspricht grob den bereits in Dounreay gemachten Beobachtungen. Dünne Aktivitätsspitzen deuten auf Ru-Reguli, besonders am unteren Ende der Brennstoffsäule hin.

Bedingt durch die lange Abklingzeit treten nun die Spalt-Cäsium-Isotope im Profil hervor. Anreicherungen von Cs-137 im unteren, heißen Teil der Brennstoffsäule sind hier zu sehen. Das Cs-134, ein Folgeprodukt des Spaltgasisotops Xe-133 findet sich auf dem Weg des Spaltgases von der Brennstoffsäule zum Gasplenum, abgelagert in den Zwischenräumen der oberen Brutstofftabletten. Auch die Aktivierungsprodukte des Hüllmaterials sind in Stopfen und massiven Stabeinbauten noch identifizierbar.

Eine umfassendere Analyse der Cs-137-Verteilung wurde durch die Aufnahme von Cs-137-Profilen möglich (siehe Abb. 32). Typisch für alle drei Stäbe ist die Cs-Verarmung in Brennstoffsäulenmitte, d.h. im Bereich höchster Stableistung und Brennstofftemperaturen. Die Verlagerung vollzieht sich hauptsächlich zum unteren, heißen Stabende hin, ohne jedoch das Ende der Brennstoffsäule zu erreichen. Hingegen zeigt sich am oberen Ende eine allgemeine Cs-Ansammlung unmittelbar am Säulenanfang. Bemerkenswert ist noch die Tatsache, daß bei Stab G 2 das Cs-137 in mehreren Aktivitätsspitzen zu finden ist, die hinsichtlich ihres Abstandes voneinander genau der Riß-Struktur der Brennstoffsäule entsprechen. Offenbar hat sich das Cs hier in den während der Bestrahlung offenbleibenden Spalten in der Peripherie angesammelt.

Ein drittes Profil wurde für die Stäbe im γ -Energiebereich zwischen 702 und 780 keV entsprechend dem Spaltproduktpaar Zr/Nb-95 aufgenommen (siehe Abb. 33). Mit Ausnahme von kleineren Störungen der Gleichmäßigkeit entspricht der Verlauf des Profils dem der Stableistung. Die kurz nach der Bestrahlung in diesem Energiebereich beobachteten erhöhten Aktivitätsniveaus sind verschwunden. Wenn sie ursprünglich durch gewardertes Nb-95 hervorgerufen wurden, so sollten sie auch inzwischen nicht mehr sichtbar sein, da das nun vorhandene Nb-95 praktisch nur noch aus dem nach der Bestrahlung durch Zerfall von Zr-95 entstandenen Anteil besteht.

Die in diesem Bericht nicht wiedergegebenen aber ebenfalls aufgenommenen Ru-Profile führten lediglich zu einer Bestätigung der Befunde bei den integralen Profilen.

Stab G 1

γ - Profil

638 - 684 keV (Cs/Ba-137)

Abklingzeit 477 d

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90

Stab G 2

γ - Profil

638 - 684 keV (Cs/Ba-137)

Abklingzeit 483 d

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 Imp/sec

Stab G 3

γ - Profil

638 - 684 keV (Cs/Ba-137)

Abklingzeit 483 d

0 10 20 30 40 50 60 70 80 Imp/sec

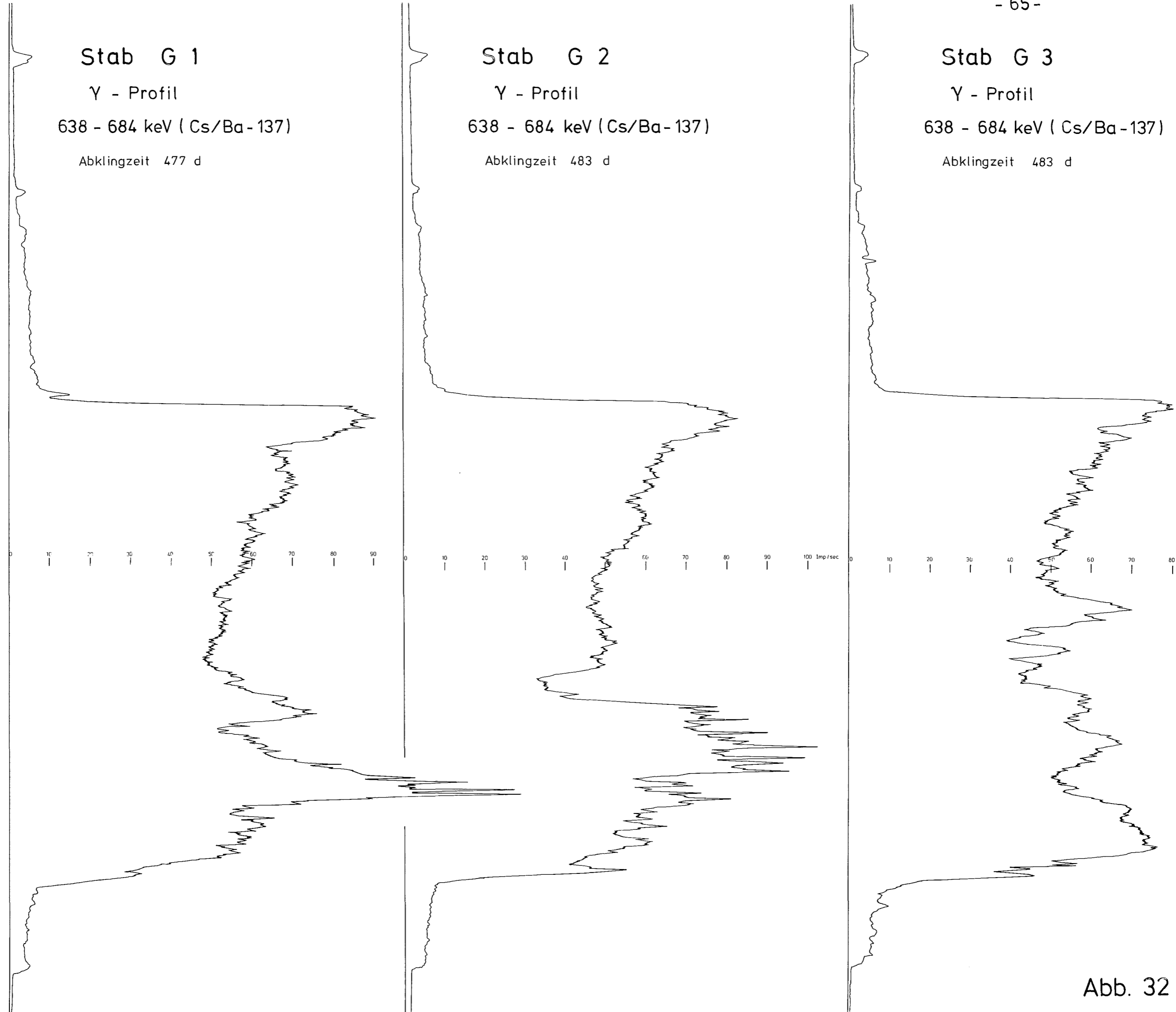


Abb. 32

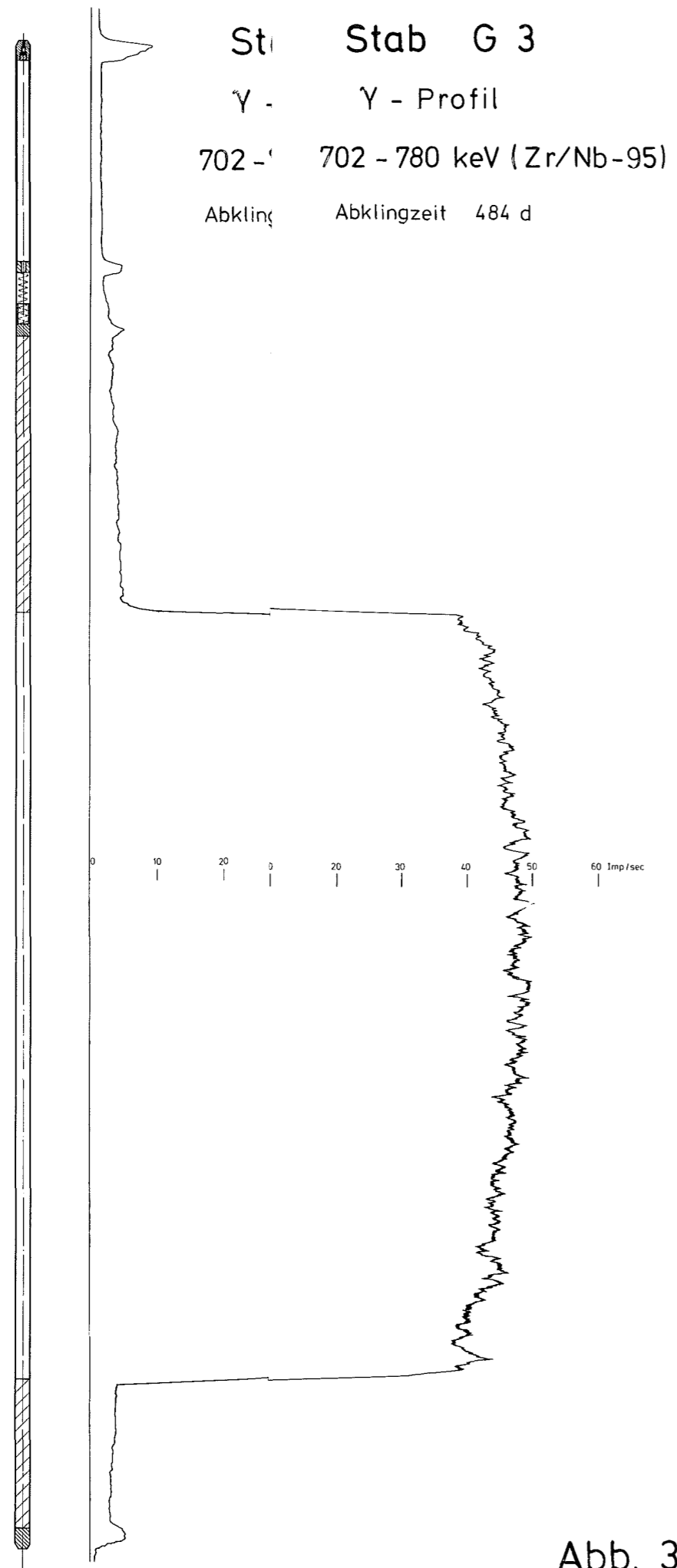


Abb. 33



10. Spaltgasbestimmungen

Da durch Demontageschäden an den Stäben G 1 und G 2 das freigesetzte Spaltgas bereits entwichen war, konnte es nur noch an Stab G 3 bestimmt werden.

Die gaschromatografische Analyse erbrachte:

Krypton	16,0 cm ³
Xenon	101,0 cm ³

Das im Stab einer Messung zugängliche sogenannte freie Volumen wurde zu 4,44 cm³ bestimmt. Von ihm entfallen etwa 2,4 cm³ auf den Spaltgasraum, der Rest auf Hohlvolumina in Brut- und Brennstoffsäule.

Das im Brennstoff zurückgehaltene Gas wurde in zwei Fraktionen als Poren- und Gitterspaltgas analysiert. Hierzu wurde der Brennstoff (~ 2 g) aus ca. 10 mm langen Stababschnitten in einer Vibrationsmühle gemahlen und die so freigesetzte, als Poren-Spaltgas bezeichnete Gasmenge gemessen. Anschließendes Auflösen des Mahlgutes erbrachte den Anteil an Gitterspaltgas. In Tabelle XIV sind die auf ein Gramm Brennstoff normierten Analysenwerte wiedergegeben. Sie zeigen, daß der in den aufgemahlten Poren angesammelte Spaltgasanteil im Mittel etwa doppelt so groß ist, wie der im gemahlten Pulver verbliebene. In welchem Maße die Spaltgasmenge von Abbrand und Hülltemperatur abhängig ist, ist aus Abb. 34 zu ersehen. Eine Auswertung der experimentell gewonnenen Daten ist bereits an anderer Stelle erfolgt [13].

11. Keramografie und Metallografie

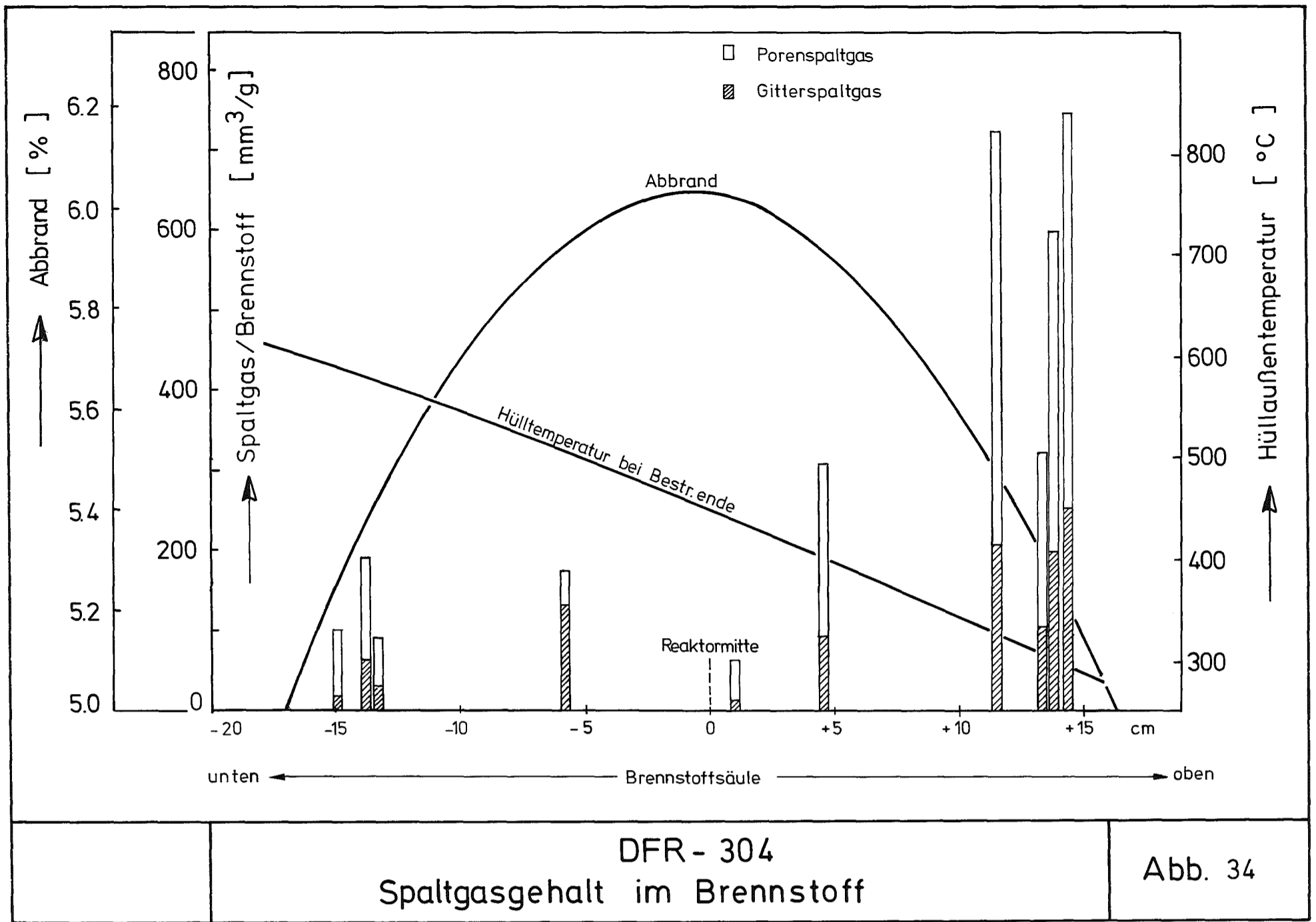
Entsprechend der Bedeutung des Experimentes als erstem Bestrahlungsversuch im schnellen Neutronenfluß wurde die keramografische Untersuchung umfangreich angelegt. Sie begann mit dem Festlegen der zu untersuchenden Bereiche wobei fast ausschließlich Schnitte durch die Brennstoffsäule untersucht wurden. Folgende Gesichtspunkte sind bei der Auswahl berücksichtigt worden:

- 1. Brennstabdaten
(Stabaufbau, Vergleichbarkeit von Schliffen verschiedener Stäbe)
- 2. Bestrahlungsdaten
(Stableistungsverlauf, Hülltemperatur, Abbrandverlauf)

Tabelle XIV

Spaltgasgehalt im Brennstoff DFR-304

Stab	Probe Nr.	Position zur Core-Mitte	Porensplattgas			Gittersplattgas			Gesamt-splattgas (mm ³ /g)
			mm ³ Kr/g	mm ³ Xe/g	Verhältn. Xe/Kr	mm ³ Kr/g	mm ³ Xe/g	Verhältn. Xe/Kr	
G 1	4	- 139	18,0	110,5	6,1	7,0	57,0	8,1	192,5
	7	- 7,5	7,0	39,3	5,6	10,4	120,0		176,7
	14	+ 141	65,0	431,0	6,6	32,4	220,0	6,8	748,4
G 2	4	- 149	12,4	70,0	5,6	3,0	16,2	5,4	101,6
	11	+ 45	31,4	197,0	6,3	9,0	78,2	8,7	315,6
	14	+ 132	28,7	200,0	7,0	12,6	92,3	7,3	333,6
G 3	6	- 134	8,5	51,6	6,1	2,0	25,0		87,1
	12	+ 1	6,5	44,0	6,8				
	12a	+ 12	3,3	22,9	6,9	2,2	12,7	5,8	41,1
	19	+ 137	53,5	340,0	6,4	26,0	171,0	6,6	590,5
	19a	+ 124	60,0	467,0	7,9	21,9	186,0	8,5	734,9



DFR - 304
Spaltgasgehalt im Brennstoff

Abb. 34

3. Ergebnisse der zerstörungsfreien Nachuntersuchung

Durchleuchtung

(Zentralkanal und Rißkonfiguration)

γ -Spektrometrie

(Brennstoff und Spaltproduktverlagerungen)

Das Ziel der Keramografie war einerseits die typische Verhaltensweise der in dem Experiment enthaltenen Parameterkombinationen aufzuzeigen, andererseits Besonderheiten im Stabverhalten darzulegen. Für das erstere Ziel wurden in jedem Stab vergleichbare Standard-Schnitte in Brennstoff-Säulenmitte und an die Säulenenden gelegt. Brennstoffanomalitäten wurden in geeigneten Sonderschliffen untersucht. Eine vergleichende Auswertung verschiedener Schliffe hinsichtlich Zentralkanalgröße, Brennstoff/Hülle-Spalt, Brennstoff-Strukturzonen ist praktisch nur an Querschliffen möglich, weshalb die als typisch angesehenen Brennstoffabschnitte so weit wie möglich als Querschliffe ausgeführt wurden. Für die Beobachtung des Übergangs Brennstoff/Brennstoff sowie für spezielle Brennstoff-Phänomene erwiesen sich Längsschliffe als besonders brauchbar. Sie erlauben den Verlauf der Brennstoffsäule bis zu einer Achslänge von 20 mm zu verfolgen.

Für die Dokumentation einer Schliffebene wurde folgendes Schema angewandt:

Aufnahmetyp	Vergrößerung	Verarbeitung der Untersuchungsfläche
Totalaufnahme (bei Längsschliffen aus Teilen zusammengesetzt)	15 x	poliert wasserfrei
α - und β, γ -Autoradiografie	15 x	poliert wasserfrei
Panorama-Aufnahmen über den Säulenradius	100 x	poliert wasserfrei
Detailaufnahmen	100 x 200 x 500 x	poliert wasserfrei geätzt
Spezielle Hüllrohrtaufnahmen	200 x 250 x 500 x	geätzt

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

- 1. Radius des Zentralkanals
- 2. Radius der großen Stengelkorn-Zone
- 3. Radius der gerichteten Kornwachstumszone (kleine Stengelkörner)
- 4. Radius der ungerichteten Kornwachstumszone (Rekristallisation)
- 5. Spalt zwischen Brennstoff und Hülle

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

In den Abb. 35, 36 u. 37 sind die wichtigsten Daten dieser Auswertung numerisch und grafisch wiedergegeben. Die aufgeführten Radien beziehen sich auf die äußere Abgrenzung der Strukturzonen. Beim radialen Spalt ist der Mittelwert aus vier Einzelmessungen angegeben, die bei Querschliffen um 90° versetzt, bei Längsschliffen jeweils in Zweiergruppen einander gegenüber bestimmt wurden.

An jeweils drei Proben jedes Stabes wurden die ursprünglich keramografisch untersuchten Schnittebenen hinsichtlich des Hüllrohrverhaltens nochmals metallografisch untersucht, d.h. nachgeschliffen, poliert und angeätzt. Die Ergebnisse dieser Arbeiten sind im Anhang 4 wiedergegeben.

Die wesentlichsten Aufnahmen aus der Keramografie und Metallografie der drei Brennstabprüflinge sind im Anhang 3 in den Faltblättern und ihren Zwischenseiten abgebildet.

12. Radiochemische Abbrandbestimmungen

Zur Stützung und Überprüfung der aus Reaktordaten vorausgerechneten Abbrände wurden an allen drei Stäben radiochemische Abbrandbestimmungen vorgenommen. Als Abbrandindikator diente das Spaltnuklid Nd-148. Für die Probenahme wurde der Brennstoff aus einem ca. 10 mm langen Stababschnitt aus der Hülle herausgedrückt, gemahlen, aufgelöst und anschließend ein aliquoter Teil für die Analyse bereitgestellt. Daraus wurden die schweren Elemente U und Pu durch Röntgenfluoreszenzanalyse, das Nd-148 massenspektrometrisch bestimmt. Bei dem hier vorliegenden Mischbrennstoff mit U- und Pu-Isotopen als spaltbarem Material mußte eine gewichtete Mittelung der Spaltausbeute "y" für das Nd-148 vorgenommen werden. Berücksichtigt man ferner die im Neutronenspektrum

Stab	Probe Quer-o. Längs	Zentralkanal [mm]	Stengelkörner groß [mm]	Stengelkörner klein [mm]	Kornwachstum [mm]	rad. Spalt [μ m]	← Brennstoffradius →
G 1	1 L	0,33	-	-	-	50	
	1a Q	0,52	1,50	1,80	2,50	25	
	2 L	0,51	1,60	1,90	2,50	25	
	3 Q	0,70	1,80	2,10	2,60	-	
	4 Q	0,77	1,90	2,20	2,60	-	
	5 Q	0,84	2,00	2,20	2,70	-	
	6 L	0,65	-	1,70	2,70	-	








Zentralkanal Stengelkörner groß Stengelkörner klein Kornwachstum Brennstoff unveränd.

Abb: 35 Keramografische Auswertung, Stab G 1

Stab	Probe Quer-o. Längs	Zentralkanal [mm]	Stengelkörner groß [mm]	Stengelkörner klein [mm]	Kornwachstum [mm]	rad. Spalt [μm]	← Brennstoffradius →
G 2	1 L	0,20	-	1,60	2,30	50	
	2 Q	0,50	1,10	1,70	2,20	30	
	3 Q	0,48	1,25	1,80	2,30	30	
	4 Q	0,78	1,90	2,20	2,55	-	
	5 Q	0,93	1,95	2,35	2,65	50	
	6 Q	0,68	1,70	2,00	2,40	-	
	7 L	0,65	-	1,90	2,25	-	

- 75 -

Abb. 36 Keramografische Auswertung, Stab G 2

Stab	Probe Quer-o. Längs	Zentralkanal [mm]	Stengelkörner groß [mm]	Stengelkörner klein [mm]	Kornwachstum [mm]	rad. Spalt [μm]	← Brennstoffradius →
G 3	1 L	0,43	1,40	1,90	2,40	50	
	2 Q	0,55	1,50	2,00	2,40	20	
	3 Q	0,70	1,80	2,25	2,65	-	
	4 L	-	1,70	2,10	2,50	50	
	5 Q	0,66	1,80	2,15	2,50	50	
	6 Q	0,69	1,70	2,10	2,50	-	
	7 L	-	1,70	2,10	2,50	-	

- 76 -


 ■ Zentralkanal  Stengelkörner groß  Stengelkörner klein  Kornwachstum  Brennstoff unveränd.

Abb. 37 Keramografische Auswertung, Stab G 3

des DFR gültigen Spaltquerschnitte so ergeben sich folgende Werte für Spaltungsanteil und gewichtete Nd-148-Spaltausbeute:

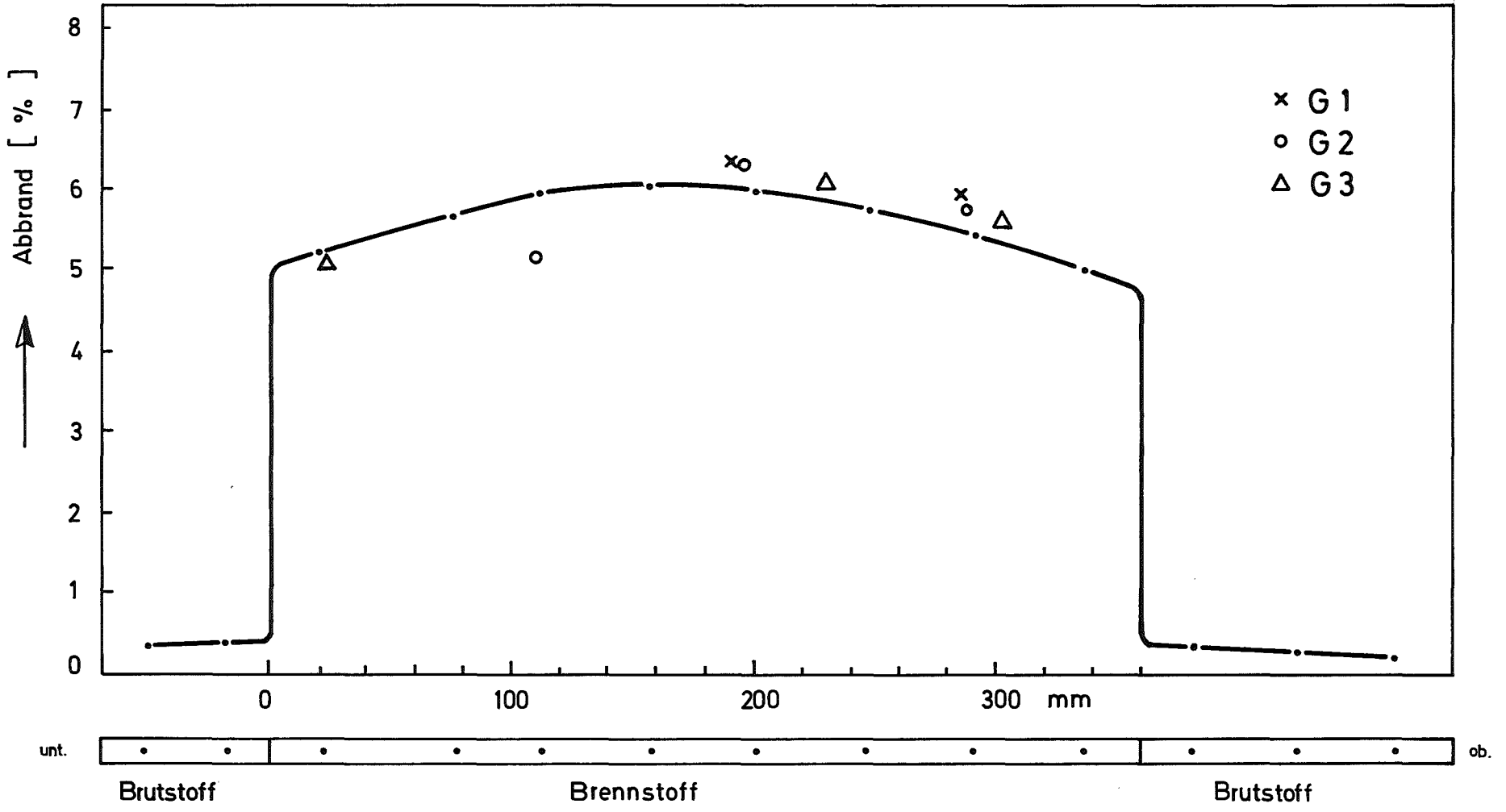
U-235 77 % der Spaltungen y für Nd-148 1,75 %
 Pu-239 23 % der Spaltungen y für Nd-148 1,69 %

\bar{y}	für Nd-148	1,73 %
-----------	------------	--------

Die daraus errechneten Abbrände sind in Tabelle XV wiedergegeben. Trägt man die radiochemischen Analysenergebnisse gegen die Stablänge auf (siehe Abb. 38) und vergleicht sie mit der errechneten Kurve, so ist zu erkennen, daß die radiochemischen Abbrände mit Ausnahme von zwei Punkten höher liegen und zwar um etwa 5 %. Diese Abweichung kann nicht durch unrichtige Annahmen bei der Berechnung der Spaltausbeute erklärt werden. Offenbar ist der echte Abbrand wirklich um etwa 5 % höher als der vorausberechnete. Die Größe der Diskrepanz ist jedoch für derartige Vergleiche durchaus üblich, so daß von einer guten Übereinstimmung zwischen Rechen- und Analysenwerten gesprochen werden kann.

Tabelle XV Radiochemische Abbrandwerte

Stab	Probe	Position von Reaktormittelebene	Abbrand in %
G 1	8	+ 14 mm	6,33
	11	+ 109 mm	5,92
G 2	6	- 68 mm	5,14
	8	+ 20 mm	6,30
	12	+ 112 mm	5,77
G 3	3	- 154 mm	5,11
	15	+ 52 mm	6,01
	17	+ 123 mm	5,64



GfK Karlsruhe
IMF/LB

Trefoil DFR - 304
Abbrandprofil

Abb. 38

13. Dokumentation von Keramografie und Metallografie

Im Anhang werden die wichtigsten Aufnahmen aus der Keramografie und Metallografie in Form einer Dokumentation ohne zusätzliche Erläuterungen wiedergegeben (Keramografie Anhang 3, Metallografie Anhang 4). Das für jeden Prüfling vorhandene Übersichts-Faltblatt enthält neben einer Konstruktionszeichnung, in der die Schnittebenen angegeben sind, eine Röntgenaufnahme. Außerdem ist ein Datenblatt mit den wesentlichsten Herstellungs- und Bestrahlungsdaten angefügt. Alle Quer- und Längsschliffe sind in Übersichtsaufnahmen (ursprüngliche Vergrößerung 15 x) zusammen mit den dazugehörigen α - und β, γ -Autoradiografien abgebildet. Die Proben sind vom oberen Stabende her durchgehend nummeriert. Unter dieser Nummer sind in den beigehefteten Seiten auch die stärker vergrößerten Detailaufnahmen zu finden, wobei im Interesse einer besseren Lesbarkeit die Detailaufnahmen vor die zugehörigen Faltblätter gestellt sind. Die Fotos aus der Metallografie finden sich am Schluß dieser Dokumentation.

In der hier wiedergegebenen Dokumentation sind mehr als 80 % der insgesamt gemachten Fotos abgebildet. Im Sinne einer Straffung des Materials wurden unwesentliche und aussageschwache Bilder weggelassen.

14. Schlußfolgerungen

Eine zusammenfassende Wertung dieses Bestrahlungsversuches hat sich an der Aufgabenstellung und am Versuchsziel, wie sie in Kapitel 2 formuliert sind, zu orientieren. Man kann folgendes feststellen:

1. Die vorgesehenen Werte für die Stableistung wurden mit einem Maximalwert von etwas über 500 W/cm betriebsmäßig erreicht, ebenso die maximale Hüllwandtemperatur von 670 °C an der Hüllinnenwand. Entsprechend der im Laufe des Abbrandes etwas zurückgehenden Stableistung sank diese Maximaltemperatur auf etwa 640 °C bis zum Schluß der Bestrahlung hin ab.
2. Der Zielabbrand wurde mit Maximalwerten von 56.000 MWd/t M etwas überschritten.

3. Alle 3 Brennstäbe blieben bis zum Schluß der Bestrahlung hin intakt. Bei der Entnahme aus dem Bestrahlungseinsatz wurden alle 3 Stäbe durch einen Hantierungsfehler im Gebiet der unteren Brutstoffsäule erheblich beschädigt. Von diesen Schäden abgesehen, konnten keine weiteren wesentlichen Veränderungen festgestellt werden.
4. Das Innere der Brennstäbe hat nach den Ergebnissen der Röntgen-Untersuchungen und der Auswertung der Gamma-Strahlungsprofile die für die Bestrahlungsbedingungen typischen Veränderungen (Zentralkanal, Cs-Wanderung besonders zum kalten Stabende) erfahren. Die Länge der Brennstoffsäule hat nur um ca. 0,2 % zugenommen. Die untere (heiße) Brutstoffsäule dagegen ist um ca. 2 % geschrumpft.
5. Alle 3 Stäbe zeigen eine deutliche Hüllaufweitung. Die Durchmesserzunahme beträgt 0,5 bis 0,6 % und liegt nicht direkt im Bereich maximaler Stableistung, sondern etwas oberhalb bei einer Hüllinnentemperatur von etwa 470 °C.
6. Die Stäbe wurden um ca. 0,1 % länger.
7. Die Spaltgasfreisetzung an dem nicht beschädigten Stab erreichte die außergewöhnliche Höhe von ca. 92 %. Der im Brennstoff gebundene Gasanteil wurde zu zwei Dritteln in den Poren und zu einem Drittel im Brennstoffgitter gefunden.
8. Die Struktur der Brennstoffsäule zeigte im allgemeinen das für diese Stableistungs- und Abbrandverhältnisse übliche Bild. Der Zentralkanal verlief ohne exzentrische Verlagerungen in Säulenmitte, jedoch zeigte sein Durchmesser größere Schwankungen entlang der Stabachse, die nicht allein mit der unterschiedlichen Stableistung erklärt werden können, sondern auf Brennstoffverdampfung schließen lassen.
9. Hinsichtlich der Verteilung der Spaltprodukte zeigten die drei Stäbe eine Eigentümlichkeit, die bisher noch nie beobachtet wurde. In der Nähe des heißen Endes der Brennstoffsäule waren die Zentralkanäle über einige Zentimeter durch jeweils einen Pfropfen aus oxidischen Spaltprodukten und Brennstoff verschlossen. Die dendritische Struktur dieses Stopfens beweist, daß er aus einer Schmelze gebildet wurde.

Weitere Ergebnisse, vor allem hinsichtlich der Spaltgasfreisetzung, der Riß- und Porenverteilung sowie der chemischen Wechselwirkung zwischen Brennstoff, Spaltprodukten und Hüllmaterial wurden in einer detaillierten Auswertung der Bestrahlungsphänomene [3] erarbeitet.

Literatur:

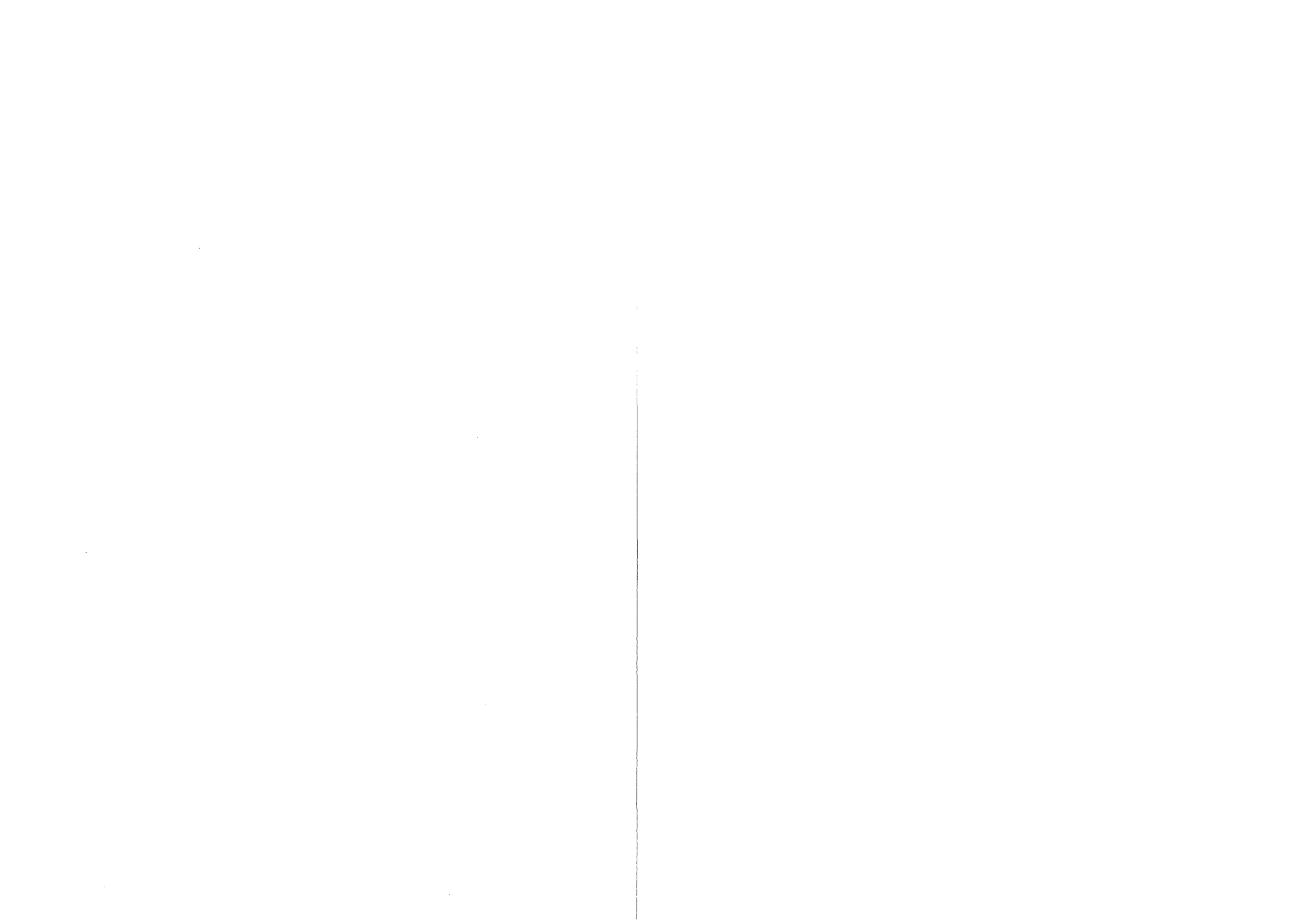
- [1] D. Geithoff, K. Kummerer:
Auslegung, Bestrahlung und zerstörungsfreie Nachuntersuchung des
UO₂-PuO₂-Brennstab-Bündels DFR-350, KFK 1377 (1972)
- [2] Ph. Dünner, Ch. Heyne:
Bestrahlungsexperiment DFR-304, Stabspezifikation, Bestrahlungs-
ablauf und Ergebnisse der Nachuntersuchung (unveröffentlicht)
- [3] W. Dienst et al.:
Auswertung der Untersuchungsergebnisse aus dem Bestrahlungsversuch
DFR-304, KFK-Bericht, erscheint demnächst
- [4] G. Karsten:
Concept for Fuel Pin Irradiations in the Dounreay Fast Reactor
Experiment No. EUR-GFK-304, interne Notiz (unveröffentlicht)
- [5] D. Smidt, A. Müller:
Referenzstudie für den 1000 MWe natriumgekühlten schnellen Brut-
reaktor (Na 1), KFK 299 (1964)
- [6] K. Gast, E. Schlechtendahl et al.:
Schneller Natriumgekühlter Reaktor Na 2, KFK 660 (1967)
- [7] K. Richter:
Technischer Bericht (1972) (unveröffentlicht)
- [8] B. Liebmann, N. Müller:
Herstellung von UO₂-Sinterkörpern, NUKEM-Technischer Bericht (1974)
(unveröffentlicht)²
- [9] I.R. Birss, T.P. Bishop:
The Use of Dounreay Fast Reactor as a Materials Testing Reactor,
TRG Report 1039 (D), UKAEA (1969)
- [10] W.M. Sloss, F. Neyton:
Post Irradiation Examination of DFR-304/1 Euratom/GFK Fuel Pin
Experiment, D. 1217 Information Report No. 234 (23.4.70)
- [11] D. Geithoff:
Bestrahlungsnachuntersuchungen, Beitrag in KFK 1270/1 (1970)
- [12] D. Geithoff:
Vermessung der Brennstoff- und Brutstoff-Säulen in den drei Stäben
des DFR-304/1-Experimentes, interne Notiz (unveröffentlicht)
- [13] H. Zimmermann:
Spaltgasverhalten in den DFR-304-Brennstäben, Beitrag in KFK 1272/1
(1972)
- [14] D. Geithoff:
Bestrahlungsnachuntersuchungen, Beitrag in KFK 1271/4 (1972)

Liste der Tabellen:

<u>Tabelle</u>	<u>Thema</u>	<u>Seite</u>
I	Spezifikationen für die Brennstäbe DFR-304	9
II	Isotopenzusammensetzung der Ausgangsmaterialien für den Brennstoff	12
III	Chemische Verunreinigungen der Ausgangspulver	12
IV	Prüfungen an Brennstoff-Tabletten	14
V	Materialdaten der Brutstoff-Tabletten	15
VI	Hüllrohre	16
VII	Brennstabdaten	17
VIII	Zeit- und Leistungsdaten der DFR-Zyklen	29
IX	Neutronendosis am Ende der Bestrahlung	31
X	Spezifische Leistung und Stableistung	32
XI	Temperaturen der Hüllinnenwand	35
XII	Abbrandwerte in den Betriebszyklen der Bestrahlung	37
XIII	Veränderung der Brennstoff- und Brutstoffsäulen	43
XIV	Spaltgasgehalt im Brennstoff DFR-304	70
XV	Radiochemische Abbrandwerte	77

Liste der Abbildungen:

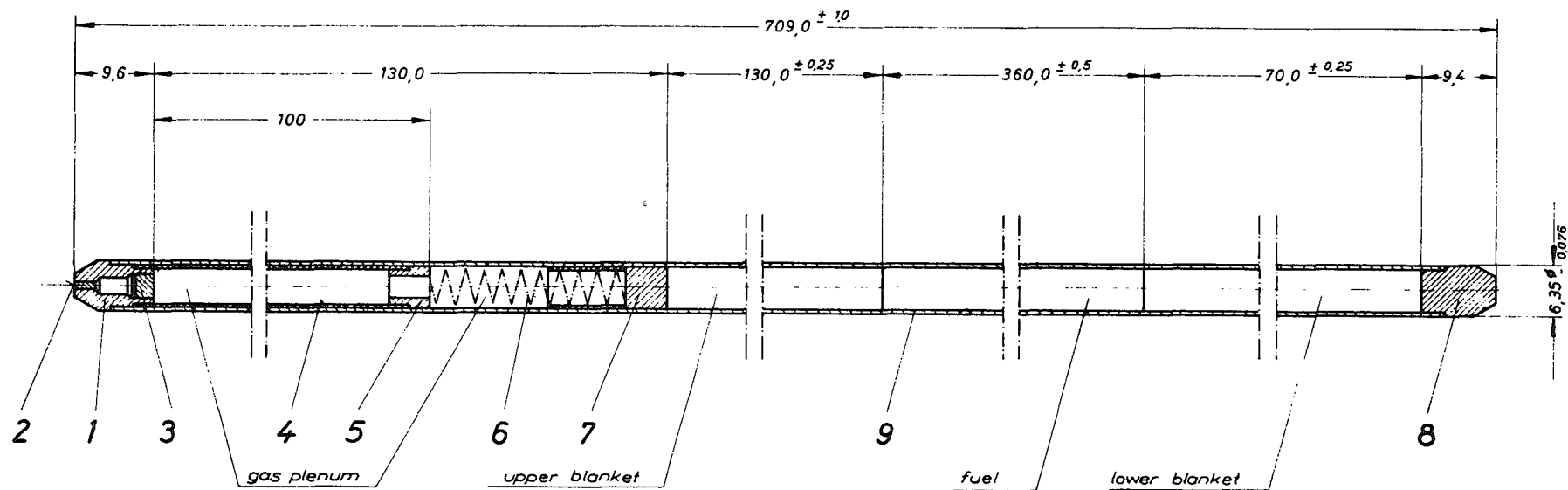
Abbildung	Thema	Seite
1	Vergleich der Stabgeometrie	5
2	Querschnitt durch den Dounreay Fast Reactor	7
3	Bremstabaufbau DFR-304	10
4	Röntgen-Durchleuchtung der fertigen Stäbe	18
5	Trefoil	19
6	Axiale Positionierung der Brennstäbe im DFR-Kern	20
7	Bestrahlungszeiten und DFR-Zyklen	23
8	Leistungsverlauf des DFR in Run 60	24
9	" " " " 61	25
10	" " " " 62	26
11	" " " " 63	27
12	" " " " 64	28
13	Axialer Flußverlauf im DFR	30
14	Axialer Verlauf der Stableistung	33
15	Abnahme der Stableistung im Laufe der Bestrahlung	33
16	Hüll- und Kühlmitteltemperatur, Abbrand	36
17	Schadensstellen an den unteren Stabenden	40
18	Röntgenbilder der bestrahlten Stäbe	42
19	Röntgendurchleuchtung	44
20	"	45
21	"	46
22	Vor-Vermessung Stab G 1	49
23	" " G 2	50
24	" " G 3	51
25	Nach-Vermessung Stab G 1	52
26	" " G 2	53
27	" " G 3	54
28	Deutsche Nach-Vermessung Stab G 1	56
29	" " " G 2	57
30	" " " G 3	58
31	Integrale Gamma-Profile	61
32	Gamma-Profile im Energiebereich 638 - 684 keV	65
33	Gamma-Profile im Energiebereich 702 - 780 keV	67
34	DFR-304, Spaltgasgehalt im Brennstoff	71
35	Keramografische Auswertung, Stab G 1	74
36	" " " G 2	75
37	" " " G 3	76
38	Trefoil DFR-304, Abbrandprofil	78



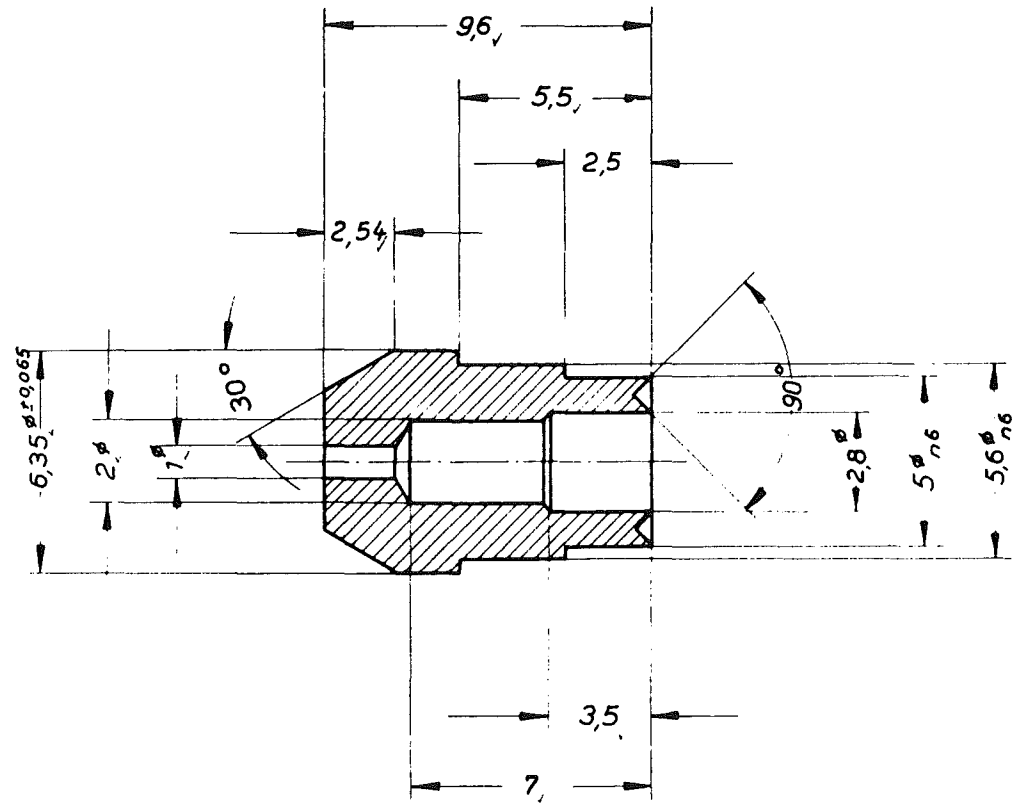
A n h a n g 1

Konstruktionszeichnungen

TA2K-16-07-3-2043	Teststab für die Bestrahlung DFR-304
-4-2044	Oberer Endstopfen
-4-2045	Stift
-4-2046	Sinterstahlfilter
-4-2047	Oberer Einsatz
-4-2048	Stopfen
-4-2050	Führungsstück
-4-2051	Unterer Endstopfen
-4-2052	Hüllrohr



		Dimensions in mm: length x diameter			
		Material Nr. 4988 = X8 Cr Ni Mo Nb V 1613			
9	Hüllrohr	cladding	TA2K-16-07-4-2052	4988	698,5 x 6,35 x 0
8	Unterer Endstopfen	lower end cap	TA2K-16-07-4-2051	4988	9,4 x 6,35
7	Führungsstück	sliding inset	TA2K-16-07-4-2050	4988	15 x 5,4
6	Feder	spring		s.s. Cr-Ni	27 x 5,0 (expand)
5	Stopfen	annular plug	TA2K-16-07-4-2048	4988	5 x 5,55
4	Oberer Einsatz	upper inset	TA2K-16-07-4-2047	4988	102,5 x 5,55
3	Sinterstahlfilter	s.s. filter	TA2K-16-07-4-2046	s.s. Cr-Ni	3 x 2,8
2	Stift	needle	TA2K-16-07-4-2045	4988	2,5 x 1
1	Oberer Endstopfen	upper end cap	TA2K-16-07-4-2044	4988	9,6 x 6,35
Teil	Stück	Benennung	Zeichng. Nr.	Werkst.	Abmessung
Test - Pin			Gesellsch. f. Kernforschung m.b.		
for Dounreay - Irradiation Nr. 304			7500 Karlsruhe Postf. 947		
			TA2K-16-07-3-2043		



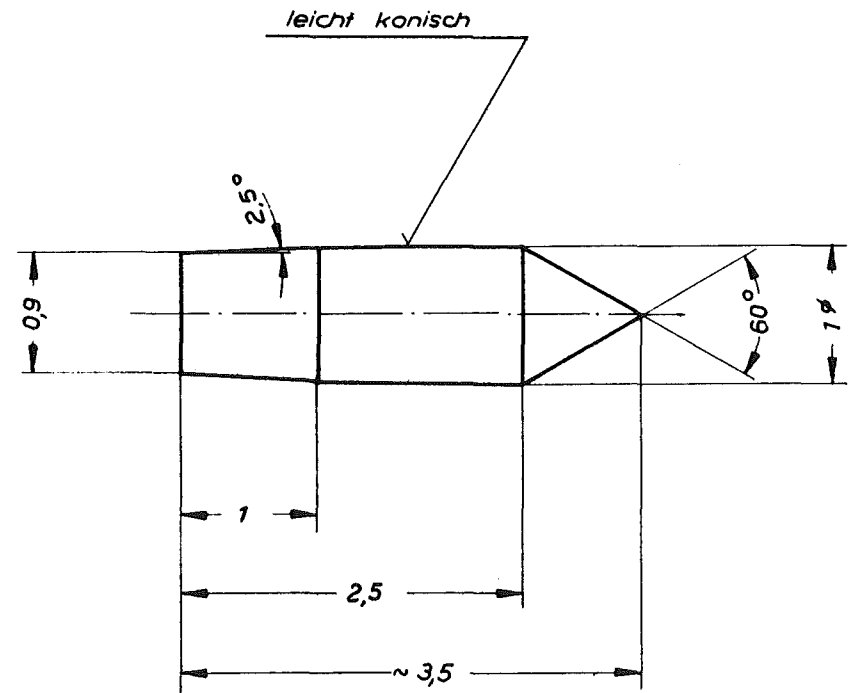
5 ϕ_{n6}^{+16}
+ 8



5,6 ϕ_{n6}^{+16}
+ 8

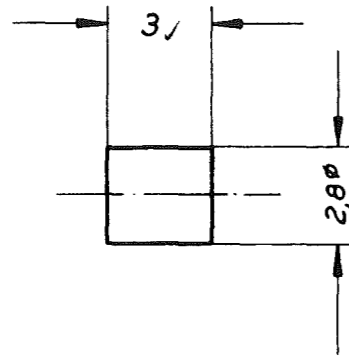
Teil 1

Teil	Stück	Benennung					Werkstoff	Abmessung		Zeichngs.-Nr. Norm		Bemerkung
4988		6,35 ϕ x 9,6										
Oberflächenzeichen		~	▽	▽▽	▽▽▽	▽▽▽▽	Freimaßtoleranz					
Rauhtiefe max. in μ		1000	40	10	4	1,6	± 0,1	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2
1966	Tag	Name		Werkstoff		Gesellschaft für Kernforschung m. b. H.		Zugeh. Zeichng.				
gez.	11. 11.	K. P.				7500 Karlsruhe Postfach 947		Ersatz für				
gepr.								Ersetzt durch				
ges.								Zeichnungs-Nr.				
Maßstab		Benennung										
5:1		<u>Oberer - Endstopfen</u>							TA2K-16-07-4-2044			



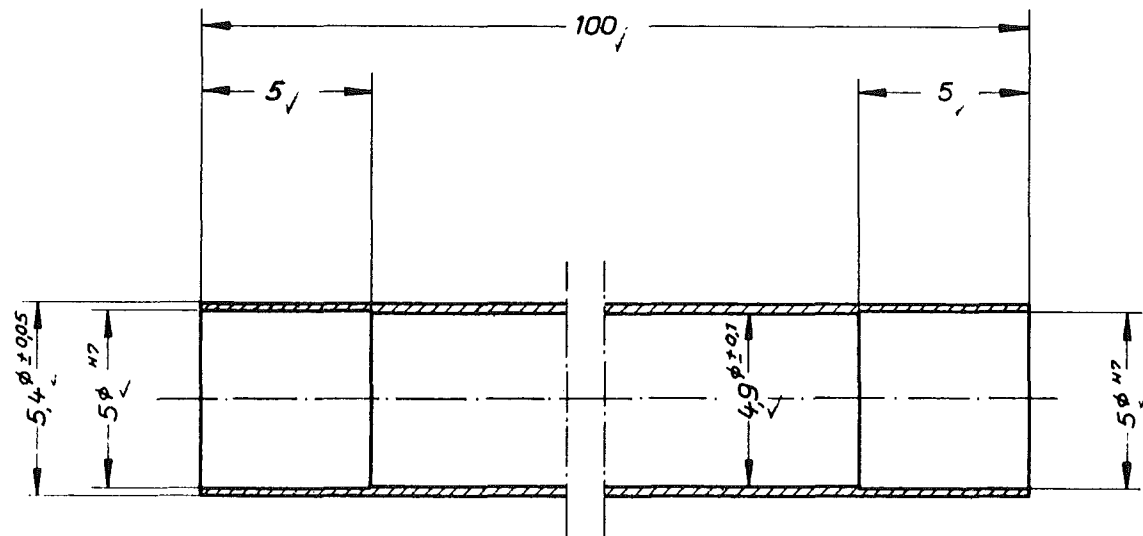
Teil 2

Teil	Stück	Benennung						Werkstoff	Abmessung						Zeichngs.-Nr. Norm	Bemerkung
		~	▽	▽▽	▽▽▽	▽▽▽▽		Freimaßtoleranz	bis 6	über 6 bis 30	über 30 bis 100	über 100 bis 300	über 300 bis 1000	über 1000 bis 2000		
		1000	40	10	4	1,6		± 0,1	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2			
1966	Tag	Name						Werkstoff	Gesellschaft für Kernforschung m. b. H. 7500 Karlsruhe Postfach 947						Zueh. Zeichng.	
gez.	11. 11.	[Signature]													Ersatz für	
gepr.															Ersetzt durch	
ges.															Zeichnungs-Nr.	
Maßstab		Benennung														
5:1		<u>Stift</u>														TA2K-16-07-4-2045



Teil 3

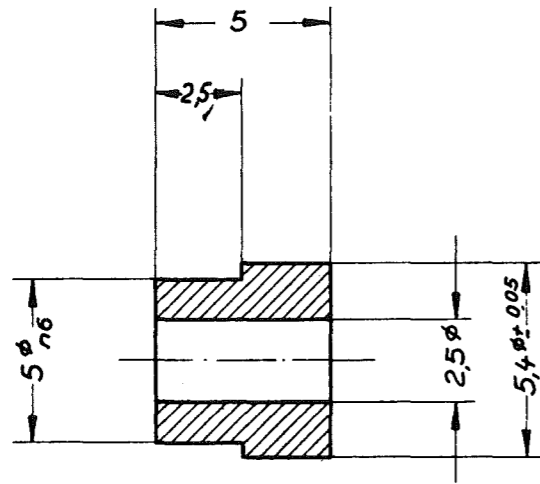
Teil	Stück	Benennung					Werkstoff	Abmessung	Zeichngs.-Nr. Norm				Bemerkung
		s.s. Cr Ni 2,8 φ x 3											
Oberflächenzeichen		~	▽	▽▽	▽▽▽	▽▽▽▽	Freimaßtoleranz	bis 6	über 6 bis 30	über 30 bis 100	über 100 bis 300	über 300 bis 1000	über 1000 bis 2000
Rauhtiefe max. in μ		1000	40	10	4	1,6		± 0,1	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2
19 66	Tag	Name		Werkstoff		Gesellschaft für Kernforschung m. b. H. 7500 Karlsruhe Postfach 947		Zueh. Zeichng.					
gez.	11. 11.	Ka.						Ersatz für					
gepr.		A...						Ersetzt durch					
ges.								Zeichnungs-Nr.					
Maßstab		Benennung											
5:1		<u>Sinterstahlfilter</u>							TA2K-16-07-4-204t				



Teil 4

5 φ N7 +12
- 0

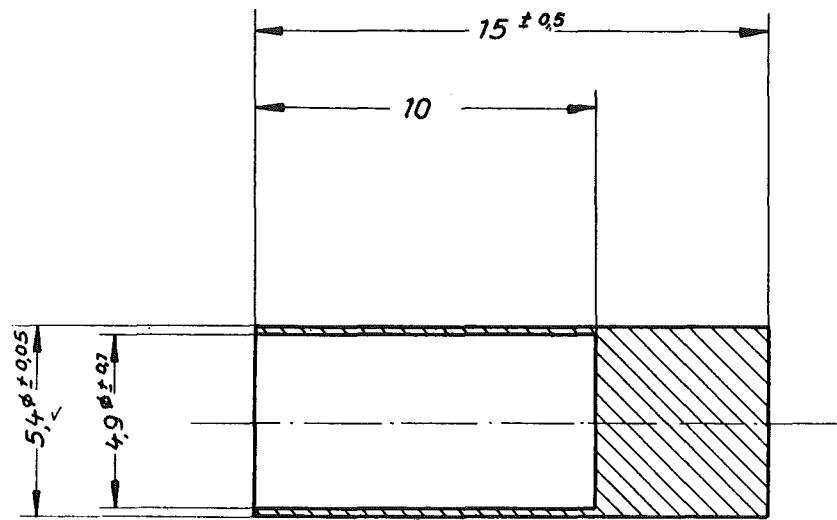
Teil	Stück	Benennung					Werkstoff	Abmessung		Zeichngs.-Nr. Norm		Bemerkung
Oberflächenzeichen	~	▽	▽▽	▽▽▽	▽▽▽▽	Freimaßtoleranz	bis 6	über 6 bis 30	über 30 bis 100	über 100 bis 300	über 300 bis 1000	über 1000 bis 2000
Rauhliefe max. in μ	1000	40	10	6	1,6		± 0,1	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2
1966	Tag	Name		Werkstoff		Gesellschaft für Kernforschung m. b. H. 7500 Karlsruhe Postfach 947		Zugeh. Zeichng.				
gez.	11. 11.	[Signature]						Ersatz für				
gepr.								Ersetzt durch				
ges.								Zeichnungs-Nr.				
Maßstab	Benennung											
5:1	<u>Oberer - Einsatz</u>							TA2K-16-07-4-2047				



5 ϕ +16
n6 + 8

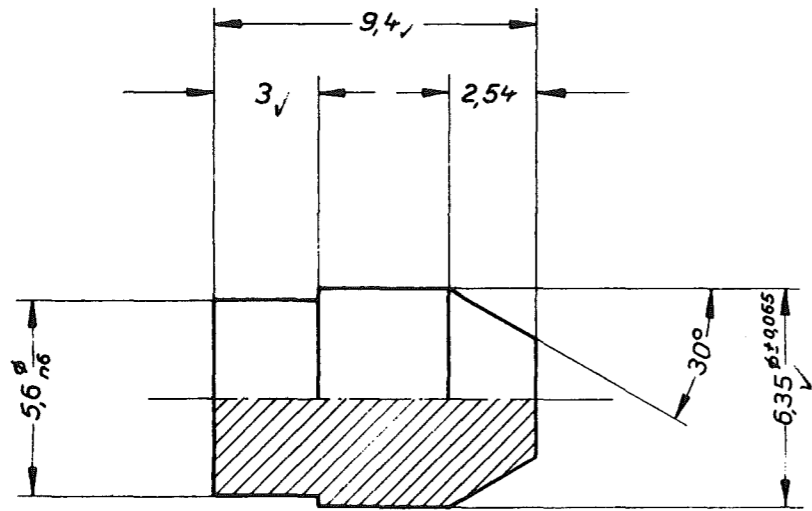
Teil 5

Teil	Stück	Benennung					Werkstoff	Abmessung		Zeichngs.-Nr. Norm		Bemerkung	
		~	▽	▽▽	▽▽▽	▽▽▽▽	Freimaßtoleranz	bis 6	über 6 bis 30	über 30 bis 100	über 100 bis 300	über 300 bis 1000	über 1000 bis 2000
		1000	40	10	4	1,6		± 0,1	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2
1966	Tag	Name		Werkstoff		Gesellschaft für Kernforschung m. b. H. 7500 Karlsruhe Postfach 947		Zugeh. Zchnng.					
gez.	11. 11.	K.R.						Ersatz für					
gepr.		A.K.S.						Ersetzt durch					
ges.								Zeichnungs-Nr.		TA 2K-16-07-4-2048			
Maßstab		Benennung											
5:1		<u>Stopfen</u>											



Teil 7

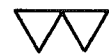
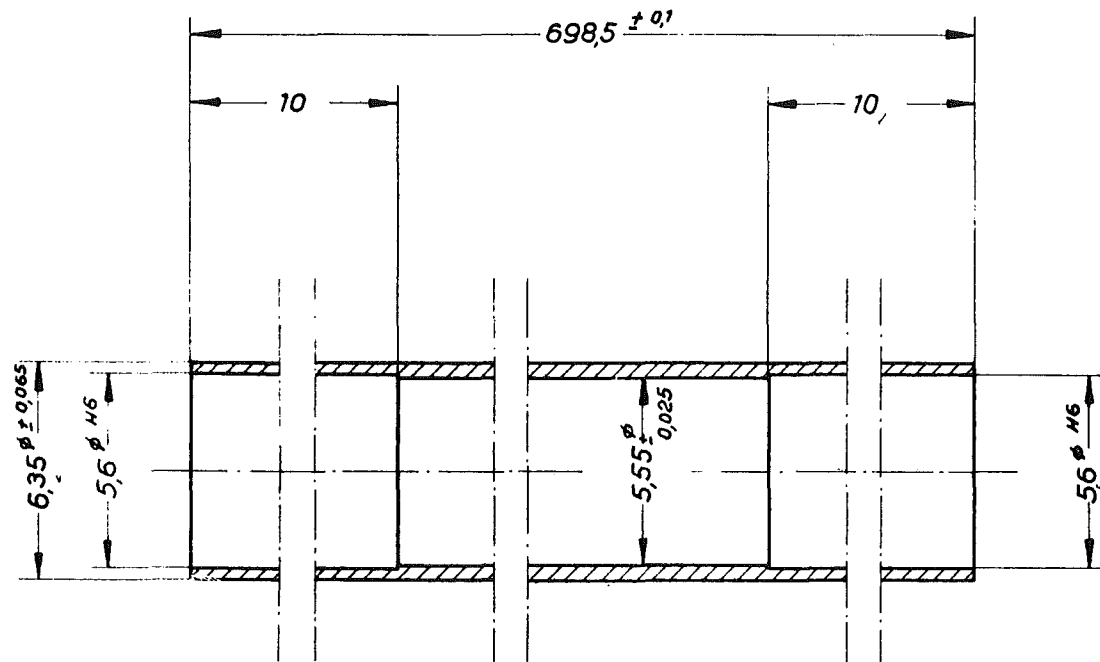
Teil	Stück	Benennung					Werkstoff	Abmessung		Zeichngs.-Nr. Norm		Bemerkung	
		~	▽	▽▽	▽▽▽	▽▽▽▽	Freimaßtoleranz	bis 6	über 6 bis 30	über 30 bis 100	über 100 bis 300	über 300 bis 1000	über 1000 bis 2000
		1000	40	10	4	1,6	± 0,1	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2	
1966	Tag	Name		Werkstoff		Gesellschaft für Kernforschung m. b. H. 7500 Karlsruhe Postfach 947		Zugeh. Zeichng.					
gez.	11. 11.	R.						Ersatz für					
gepr.		A.						Ersetzt durch					
ges.								Zeichnungs-Nr.					
Maßstab	Benennung						TA2K-16-07-4-205						
5:1	<u>Führungsstück</u>												



5.6 ϕ $\begin{matrix} +16 \\ -8 \end{matrix}$

Teil 8

Teil	Stück	Benennung					Werkstoff	Abmessung		Zeichngs.-Nr. Norm				Bemerkung
		4988					4988	6,35 ϕ x 9,4						
Oberflächenzeichen		~	▽	▽▽	▽▽▽	▽▽▽▽	Freimaßtoleranz	bis 6	über 6 bis 30	über 30 bis 100	über 100 bis 300	über 300 bis 1000	über 1000 bis 2000	
Rauhtiefe max. in μ		1000	40	10	4	1,6		± 0,1	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2	
1966	Tag	Name		Werkstoff		Gesellschaft für Kernforschung m. b. H.		Zugeh. Zeichng.						
gez.	11. 77.	Ka				7500 Karlsruhe Postfach 947		Ersatz für						
gepr.		A...						Ersetzt durch						
ges.								Zeichnungs-Nr.						
Maßstab		Benennung												
5:1		<u>Unterer - Endstopfen</u>							7A2K-16-07-4-2051					



Teil 9

$5,6 \text{ H6} \begin{matrix} +0 \\ 0 \end{matrix}$

Teil	Stück	Benennung					Werkstoff	Abmessung	Zeichngs.-Nr. Norm					Bemerkung
4988		6,35 ϕ x 698,5												
Oberflächenzeichen	~	▽	▽▽	▽▽▽	▽▽▽▽	Freimaßtoleranz	bis 6	über 6 bis 30	über 30 bis 100	über 100 bis 300	über 300 bis 1000	über 1000 bis 2000		
Rauhtiefe max. in μ	1000	40	20	10	5		1,6	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$	$\pm 0,8$	$\pm 1,2$	
1956	Tag	Name		Werkstoff		Gesellschaft für Kernforschung m. b. H. 7500 Karlsruhe Postfach 947		Zugeh. Zeichng.						
gez.	17. 77.	Yed						Ersatz für						
gepr.		[Signature]						Ersetzt durch						
ges.								Zeichnungs-Nr.						
Maßstab	Benennung													
5:1	Hüllrohr								TA 2K-16-07-4-205z					

Anhang 2

Stabbegleitkarten

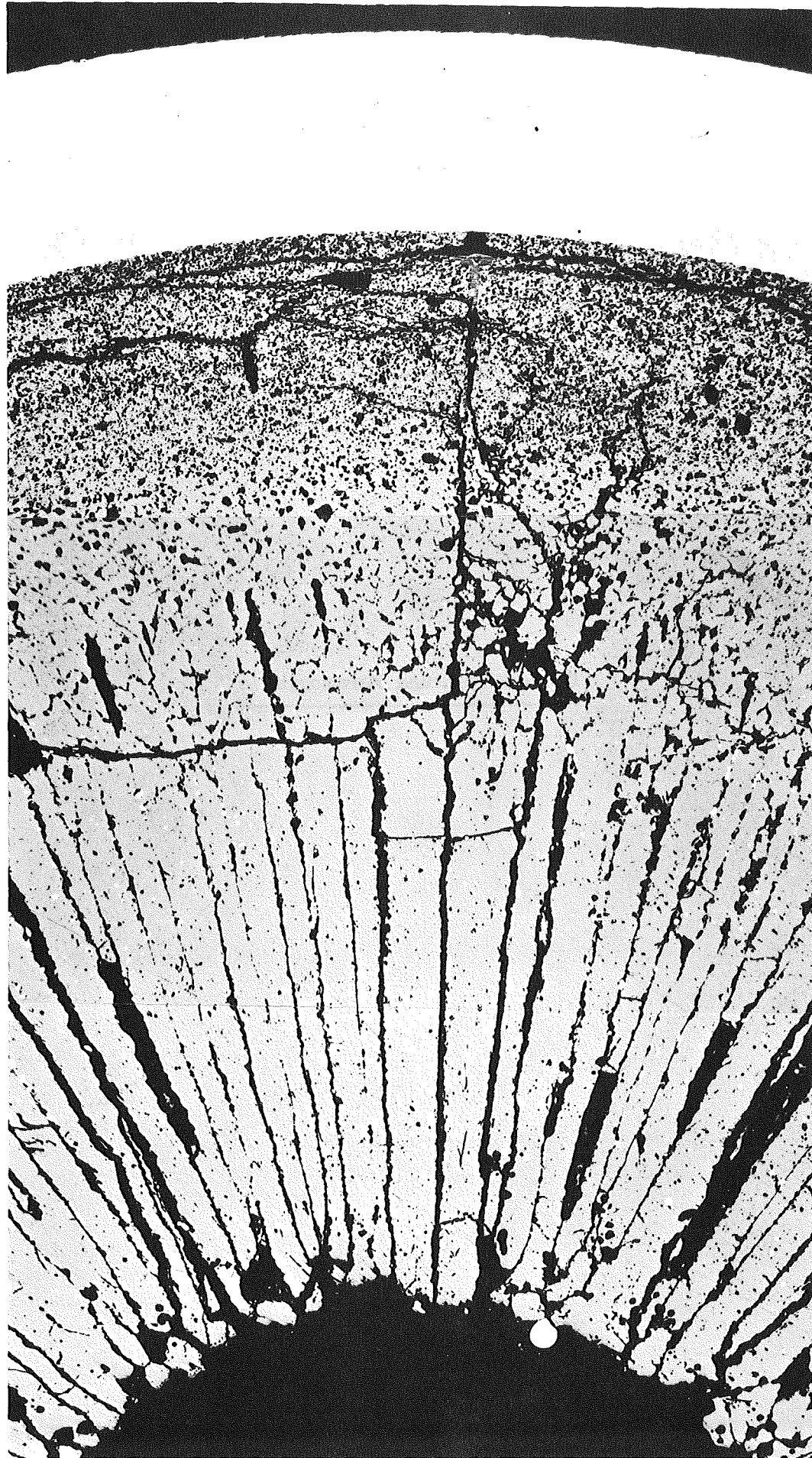
Stab-Nr.: G 1		Hüllrohr-Nr.: M 70	
Spezifikationen	Hüllmaterial	1.4988	
	Brennstofflänge	360,0	± 0,5 mm
	Blanket I	70,0	± 0,25 mm
	Blanket II	130,0	± 0,25 mm
	Tablettendurchmesser	5,40	± 0,03 mm
	Tablettendichte	88 % th.D.	
Tabletten- Herstellung	Charge Nr.	GFK 1	
	Schleifen	5,395	± 0,010 mm
	Waschen	ja	
	Trocknen	150 °C/Vakuum	
Stabfüllung	Brennstofflänge	360,3	mm
	Brennstoffgewicht	80,70	g
	Blanket I, Gewicht	15,95	g
	Blanket II, Gewicht	29,40	g
	Abstand Filter/oberes Ende	595,7	mm
	Blanket I, Länge	69,7	mm
	Brennstoff und Bl. I, Länge	430,2	mm
	Brennstoff und Bl. I + II, Länge	560,2	mm
	Tablettendichte	89,14 % th.D.	
	Schmierdichte	85,34 % th.D.	
Kontamination	vor dem Schweißen	< 10 Zerfälle/Min.	
	nach dem 2. Schweißen	10 Zerfälle/Min.	
Dichtheit	Helitest	< 10 ⁻⁸ Torr-liter/sec	
Schlußprüfung	Stabdurchmesser	6,305	mm
	Stablänge	709,25	mm
	Kontamination	10 Zerfälle/Min.	
	Ergebnis	gut	
	Datum	6.4.1967	
Spaltstoff- Inhalt	Pu	14,232	g
	U-235 im Brennstoff	52,844	g

Stab-Nr.: G 2		Hüllrohr-Nr.: M 114
Spezifikationen	Hüllmaterial	1.4988
	Brennstofflänge	360,0 ± 0,5 mm
	Blanket I	70,0 ± 0,25 mm
	Blanket II	130,0 ± 0,25 mm
	Tablettendurchmesser	5,40 ± 0,03 mm
	Tablettendichte	88 % th.D.
Tabletten- Herstellung	Charge Nr.	GFK 2
	Schleifen	5,395 ± 0,010 mm
	Waschen	ja
	Trocknen	150 °C/Vakuum
Stabfüllung	Brennstofflänge	360,1 mm
	Brennstoffgewicht	80,74 g
	Blanket I, Gewicht	15,90 g
	Blanket II, Gewicht	29,31 g
	Abstand Filter/oberes Ende	595,3 mm
	Blanket I, Länge	70,7 mm
	Brennstoff und Bl. I, Länge	430,5 mm
	Brennstoff und Bl. I + II, Länge	560,8 mm
	Tablettendichte	89,4 % th.D.
	Schmierdichte	85,46 % th.D.
Kontamination	vor dem Schweißen	< 5 Zerfälle/Min.
	nach dem 2. Schweißen	5 Zerfälle/Min.
Dichtheit	Helitest	< 10 ⁻⁸ Torr-liter/sec
Schlußprüfung	Stabdurchmesser	6,305 mm
	Stablänge	709,25 mm
	Kontamination	5 Zerfälle/Min.
	Ergebnis	gut
	Datum	6.4.1967
Spaltstoff- Inhalt	Pu	14,239 g
	U-235 im Brennstoff	52,870 g

Stab-Nr.: G 3		Hüllrohr-Nr.: M 69
Spezifikationen	Hüllmaterial	1.4988
	Brennstofflänge	360,0 ± 0,5 mm
	Blanket I	70,0 ± 0,25 mm
	Blanket II	130,0 ± 0,25 mm
	Tablettendurchmesser	5,40 ± 0,03 mm
	Tablettendichte	88 % th.D.
Tabletten- Herstellung	Charge Nr.	GFK 3
	Schleifen	5,395 ± 0,010 mm
	Waschen	ja
	Trocknen	150 °C/Vakuum
Stabfüllung	Brennstofflänge	360,3 mm
	Brennstoffgewicht	80,95 g
	Blanket I, Gewicht	15,80 g
	Blanket II, Gewicht	29,45 g
	Abstand Filter/oberes Ende	595,5 mm
	Blanket I, Länge	70,4 mm
	Brennstoff und Bl. I, Länge	430,9 mm
	Brennstoff und Bl. I + II, Länge	560,4 mm
	Tablettendichte	89,4 % th.D.
	Schmierdichte	85,6 % th.D.
Kontamination	vor dem Schweißen	< 5 Zerfälle/Min.
	nach dem 2. Schweißen	5 Zerfälle/Min.
Dichtheit	Helitest	< 10 ⁻⁸ Torr-liter/sec
Schlußprüfung	Stabdurchmesser	6,31 mm
	Stablänge	709,25 mm
	Kontamination	5 Zerfälle/Min.
	Ergebnis	gut
	Datum	6.4.1967
Spaltstoff- Inhalt	Pu	14,276 g
	U-235 im Brennstoff	53,008 g

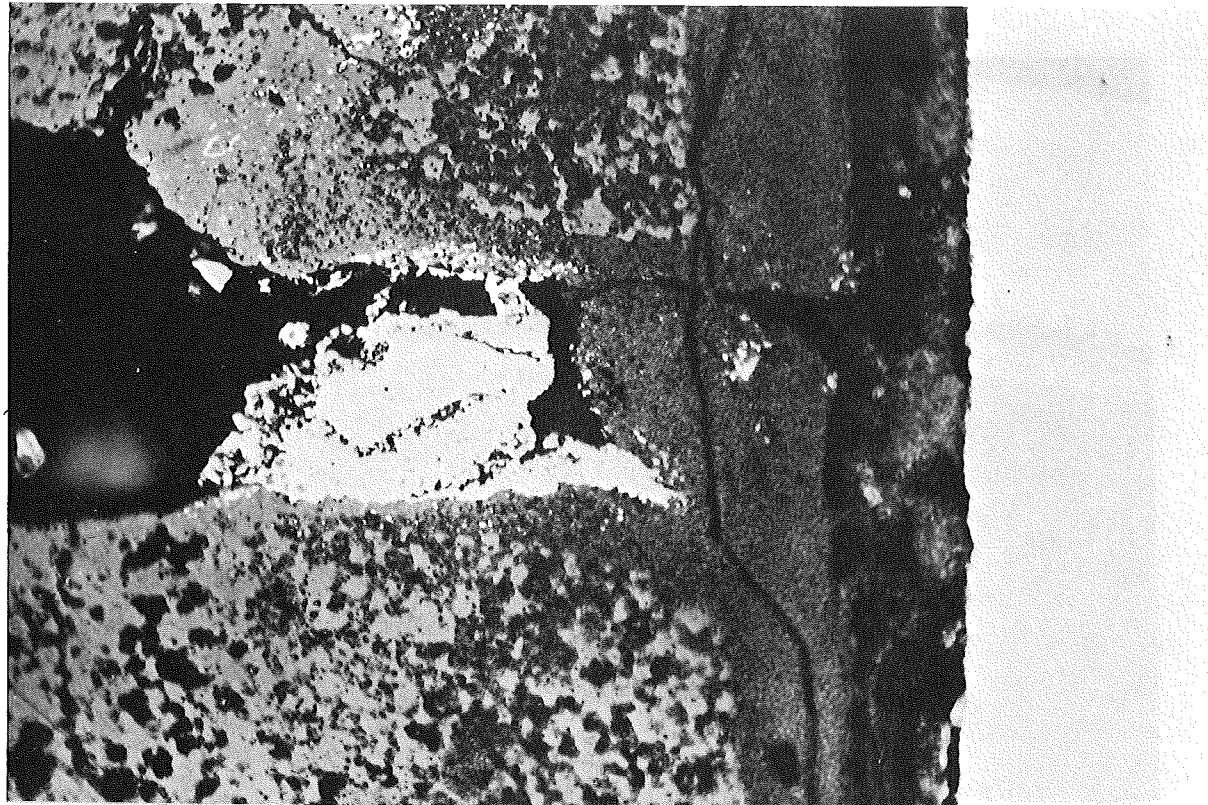
A n h a n g 3

Übersichten und Keramografie



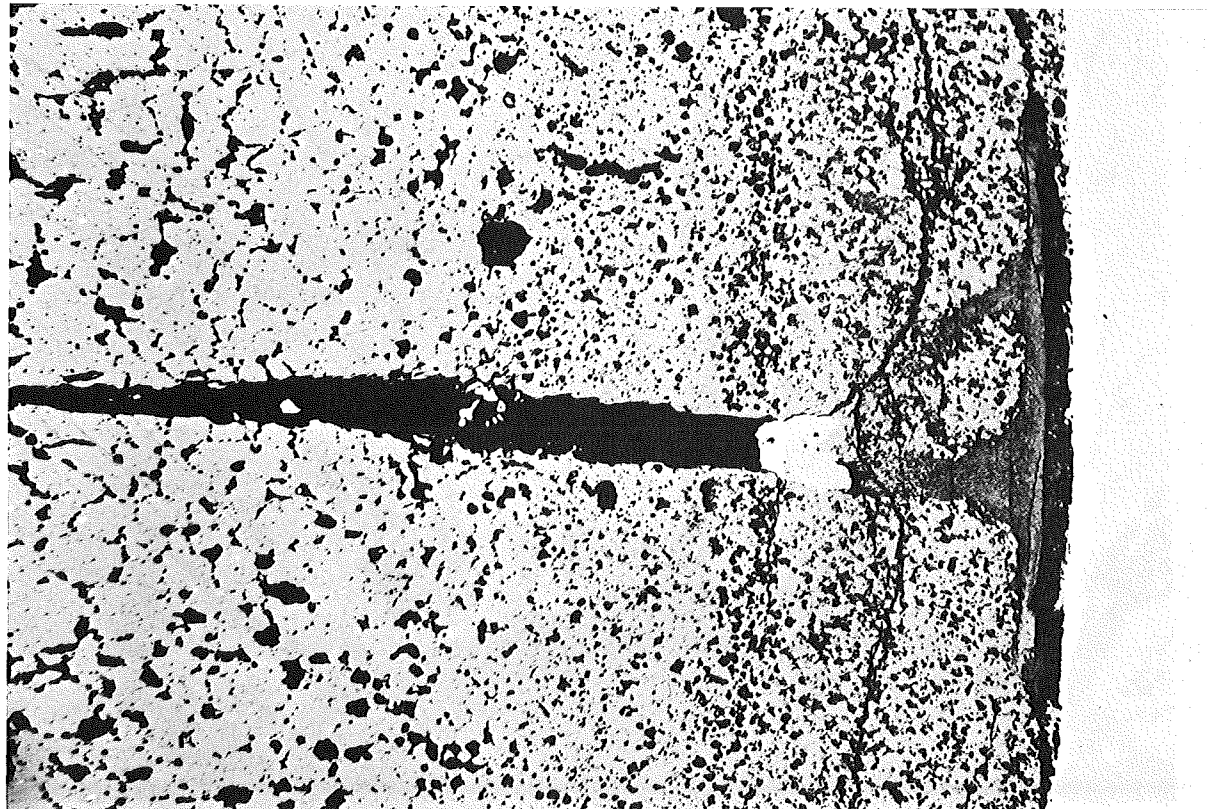
zu Stab G 1

A 4



/ 10

0.1 mm



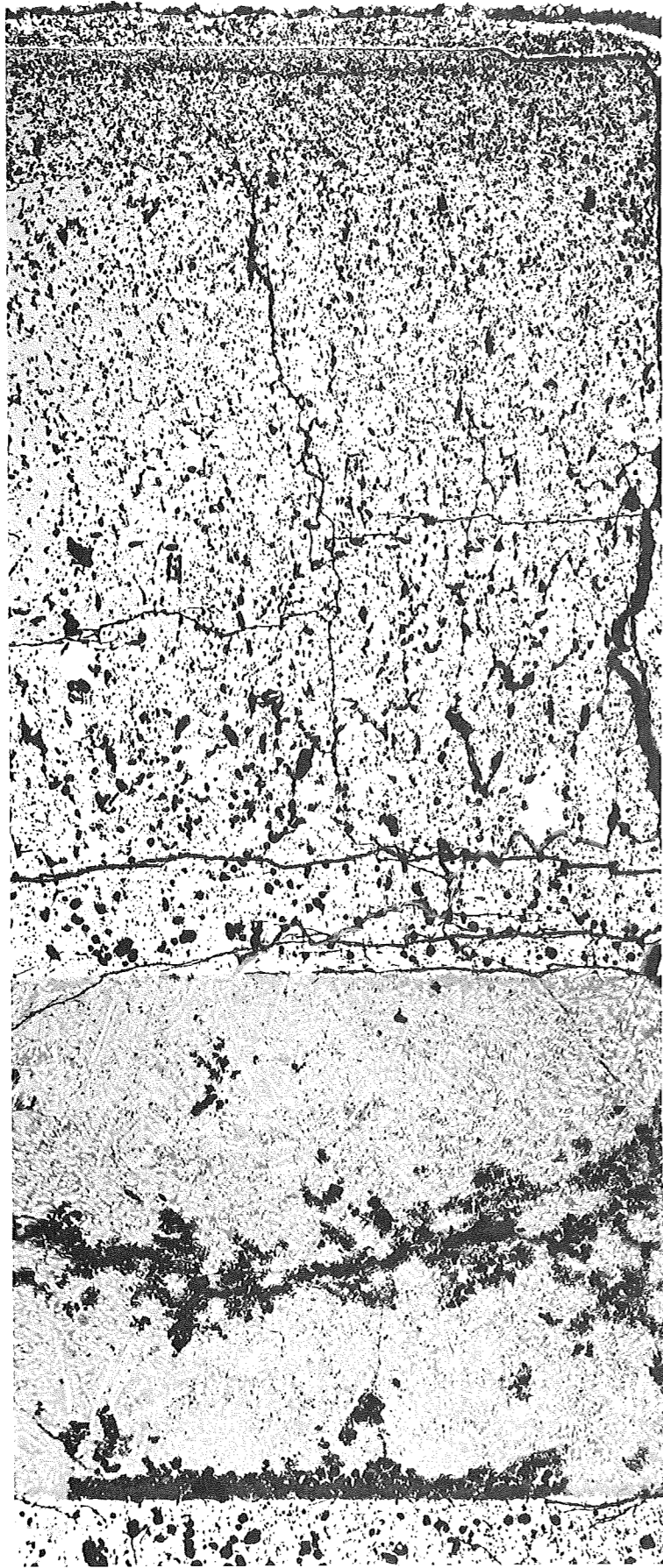
/ 11

0.1 mm

zu Stab G1

A 5





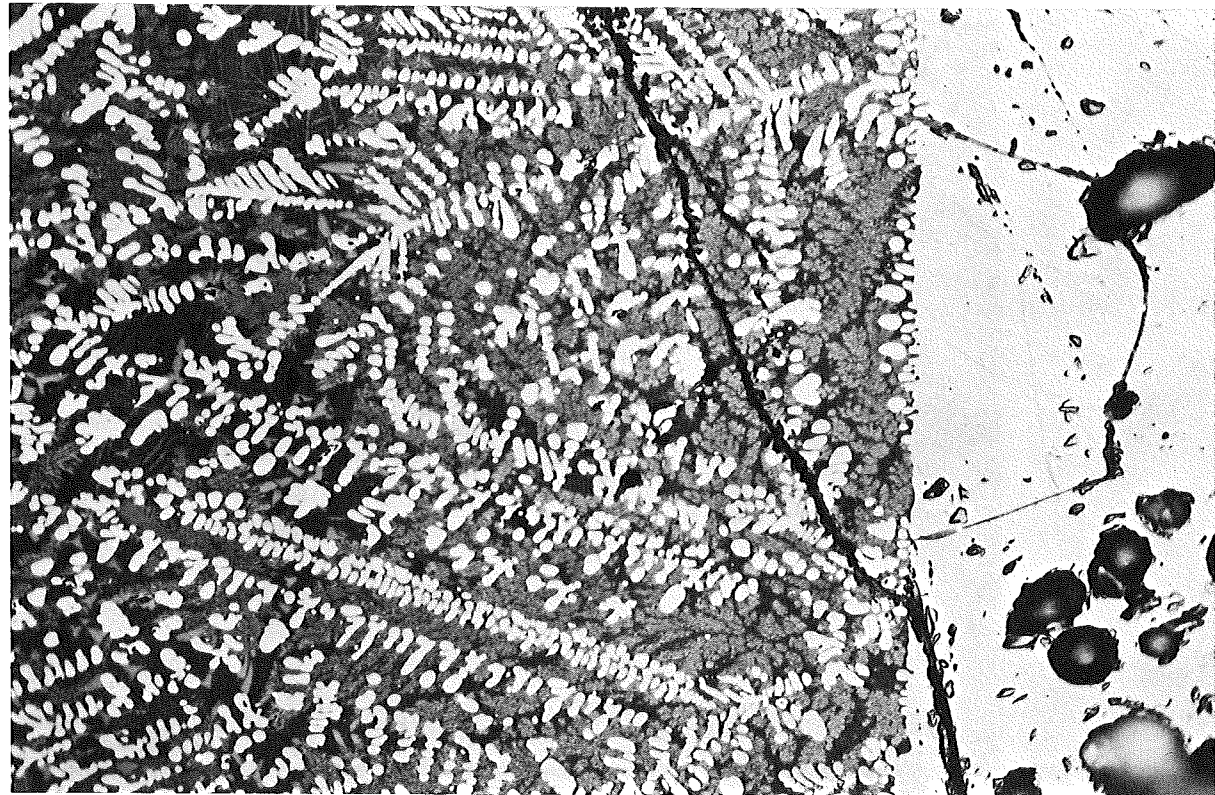
zu Stab G1

A 6



/ 12

0.1 mm

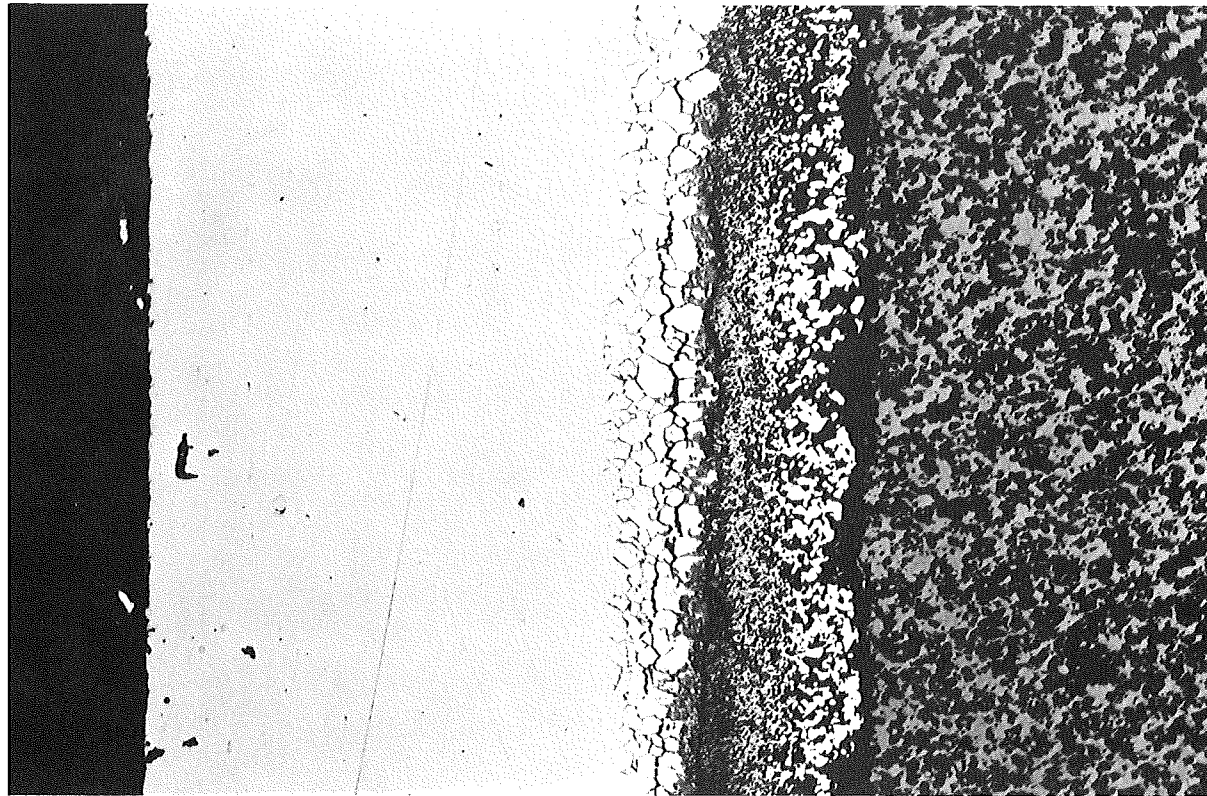


/ 23

50 μ m

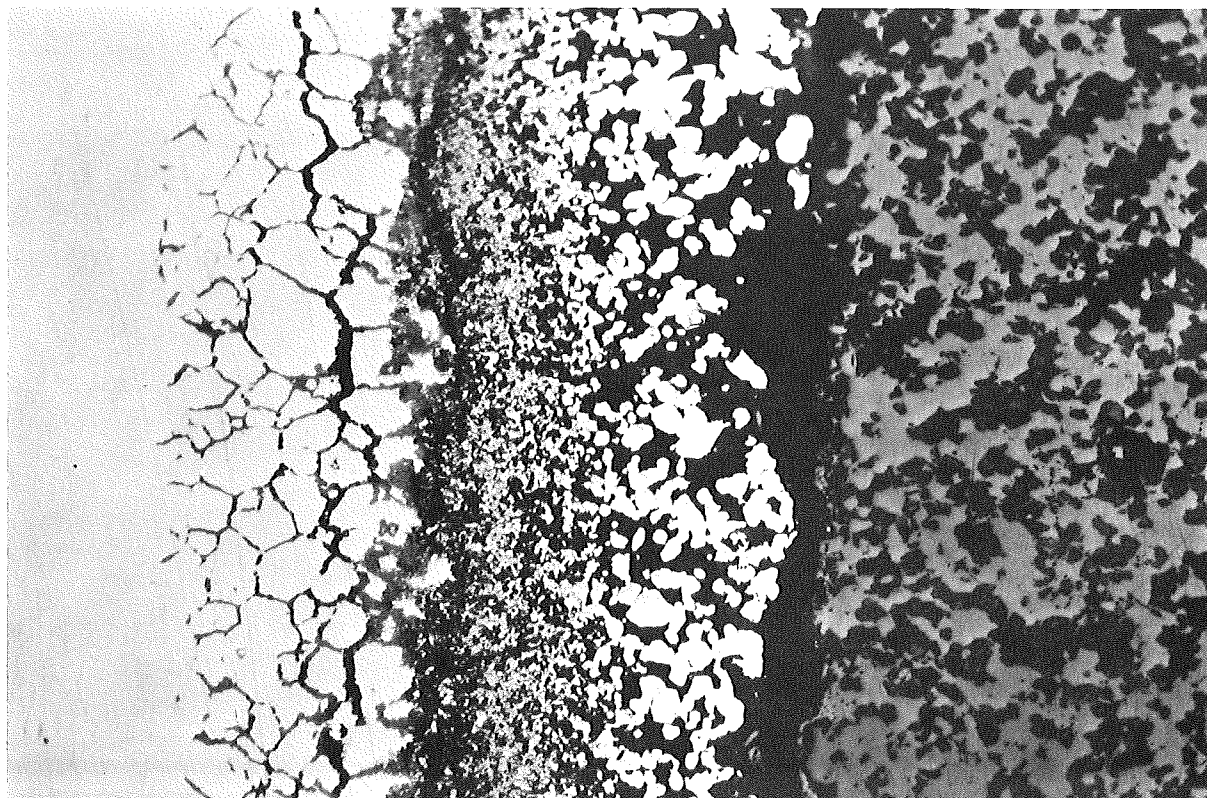
zu Stab G1

A 6



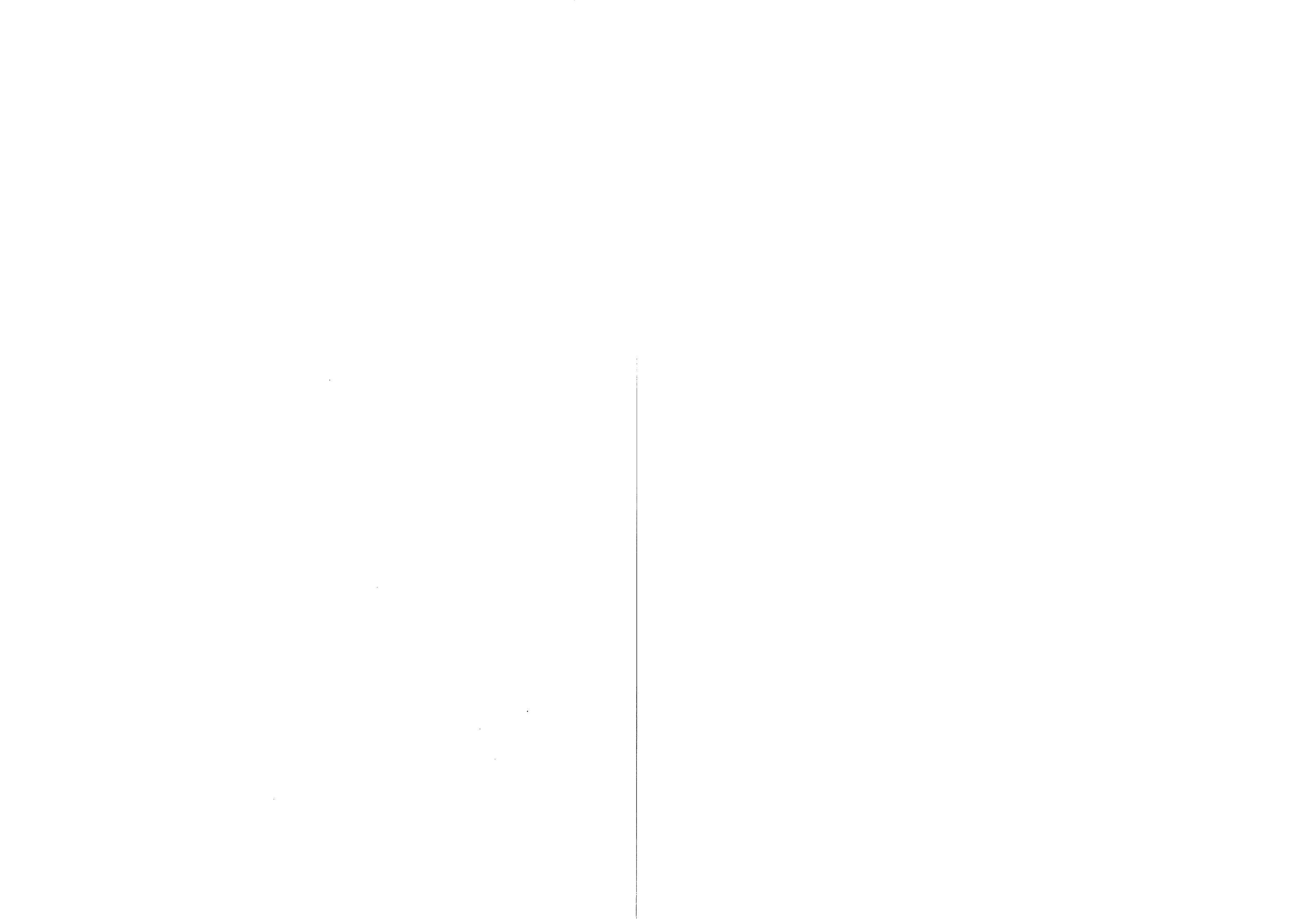
/ 25

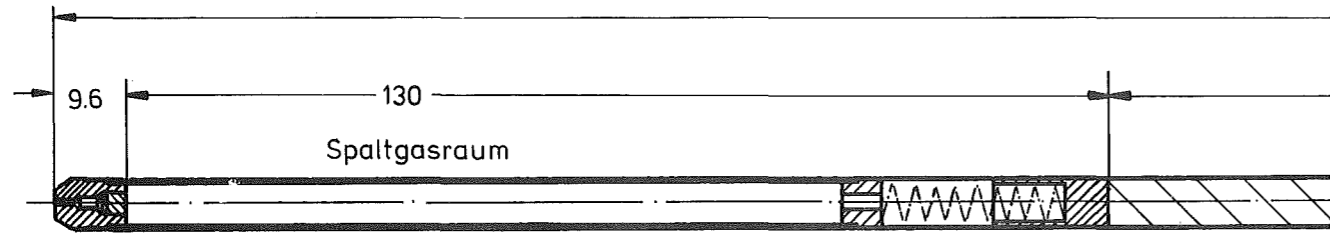
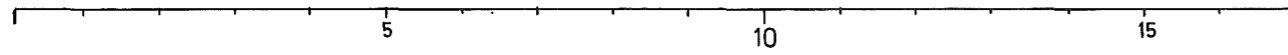
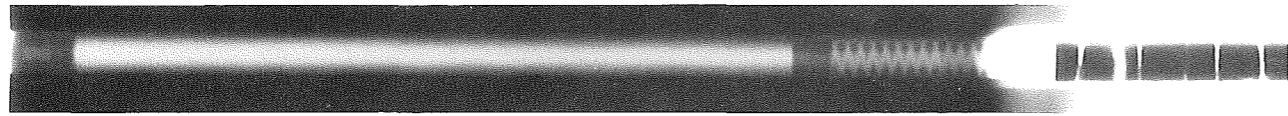
0.1 mm



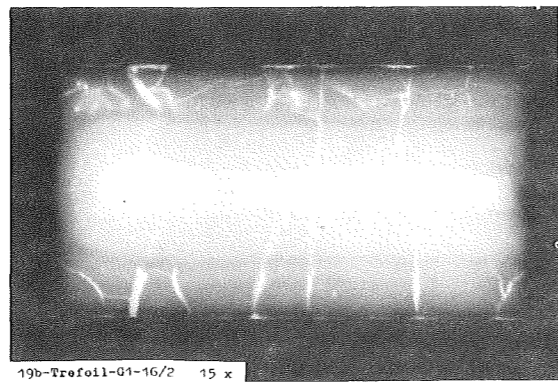
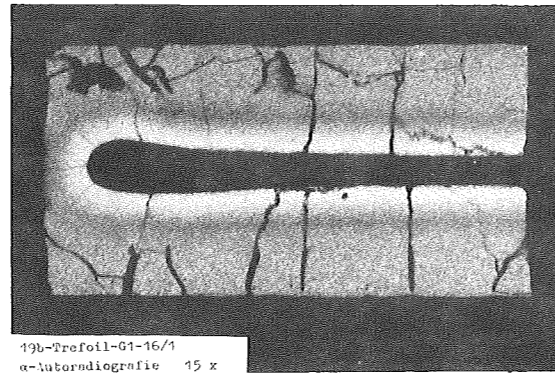
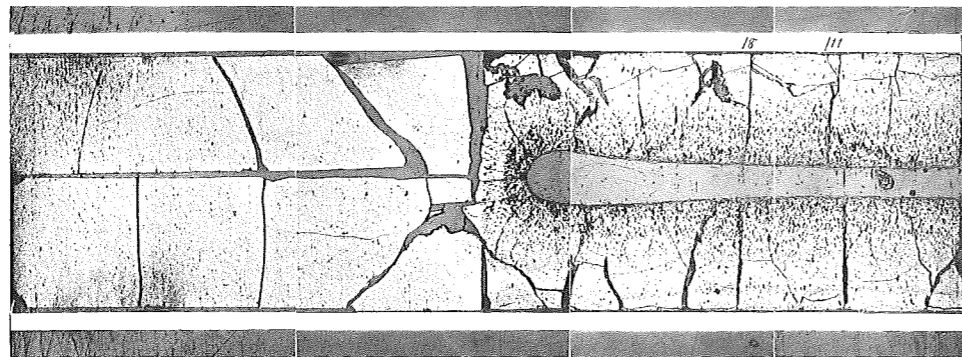
/ 26

50 μm



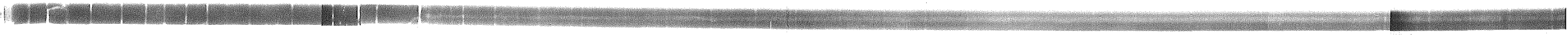


A



1

1mm



20

25

30

35

40

45

50

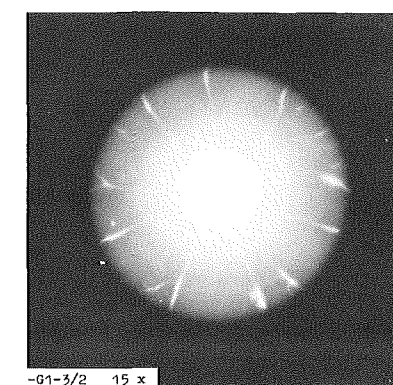
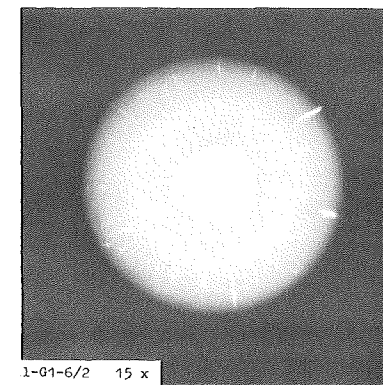
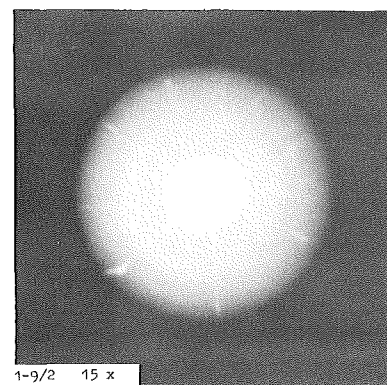
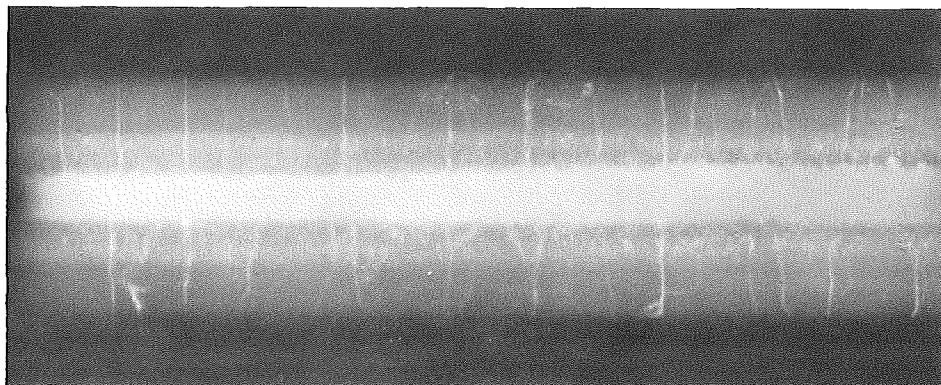
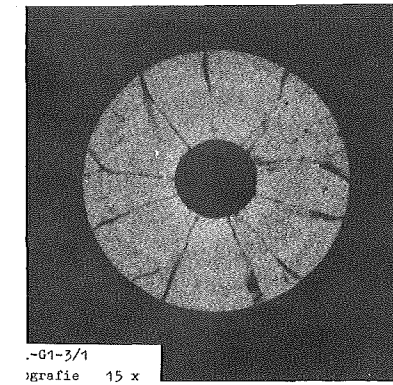
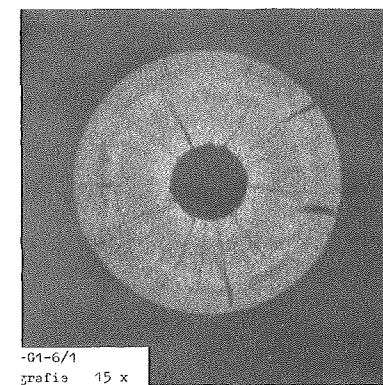
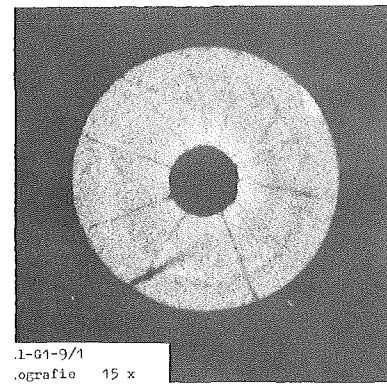
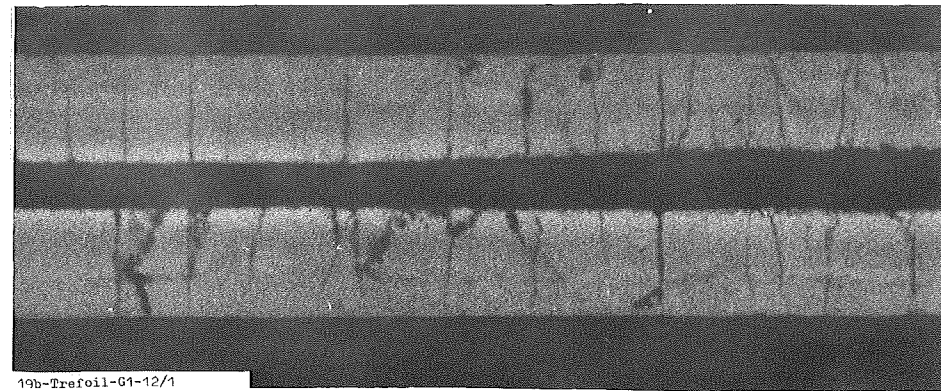
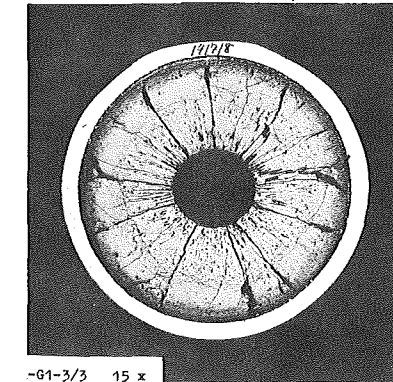
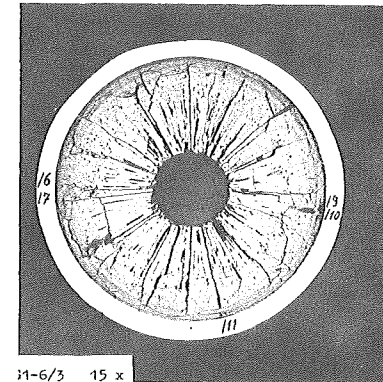
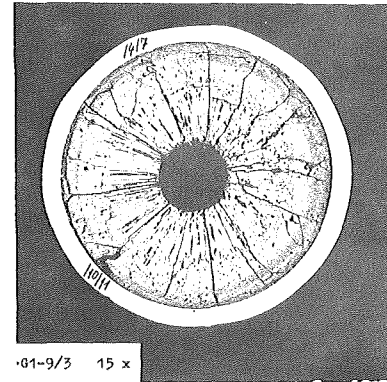
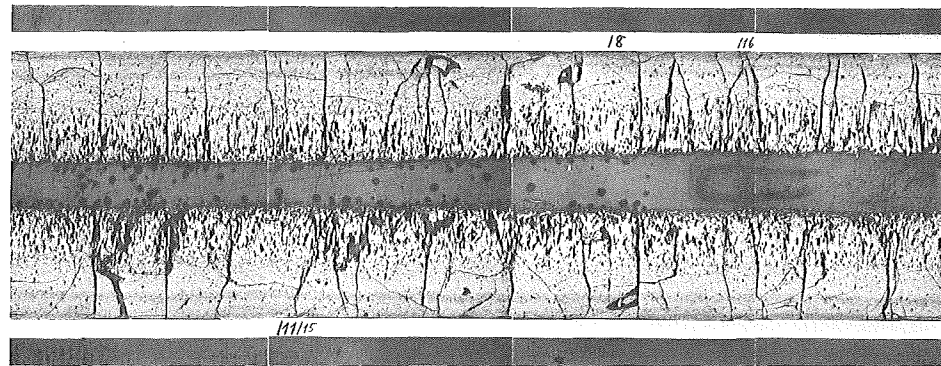
709

130

Brutstoff

360

Brennstoff



2

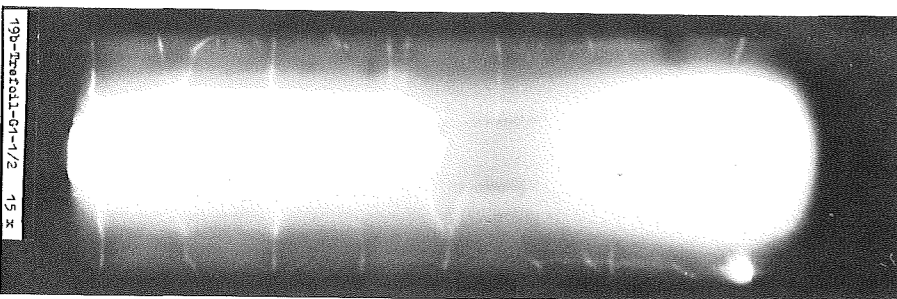
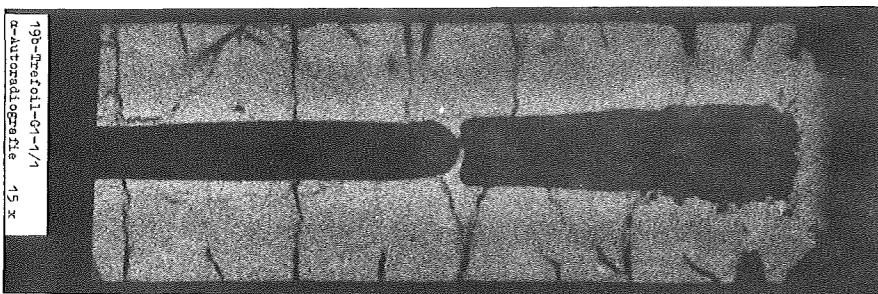
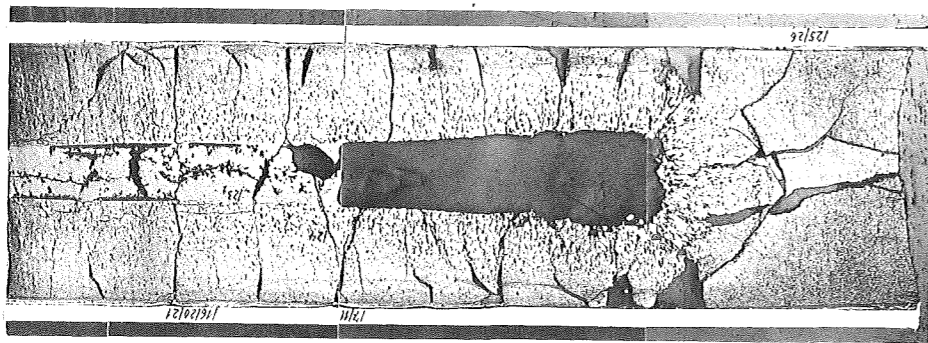
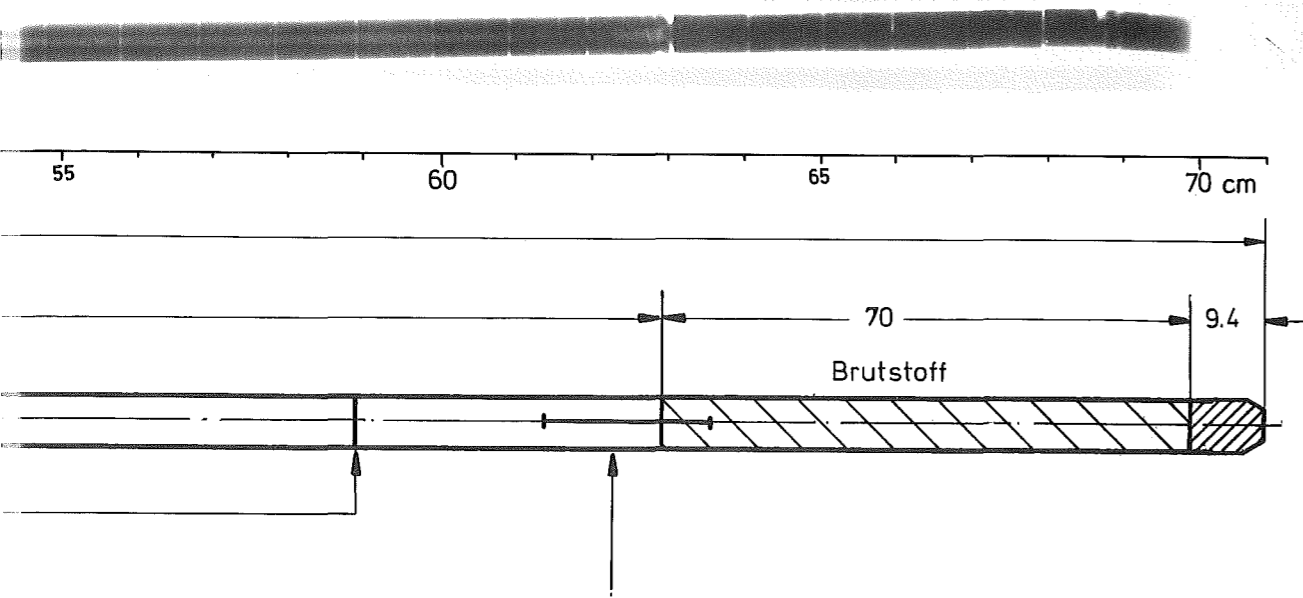
1mm

3

4

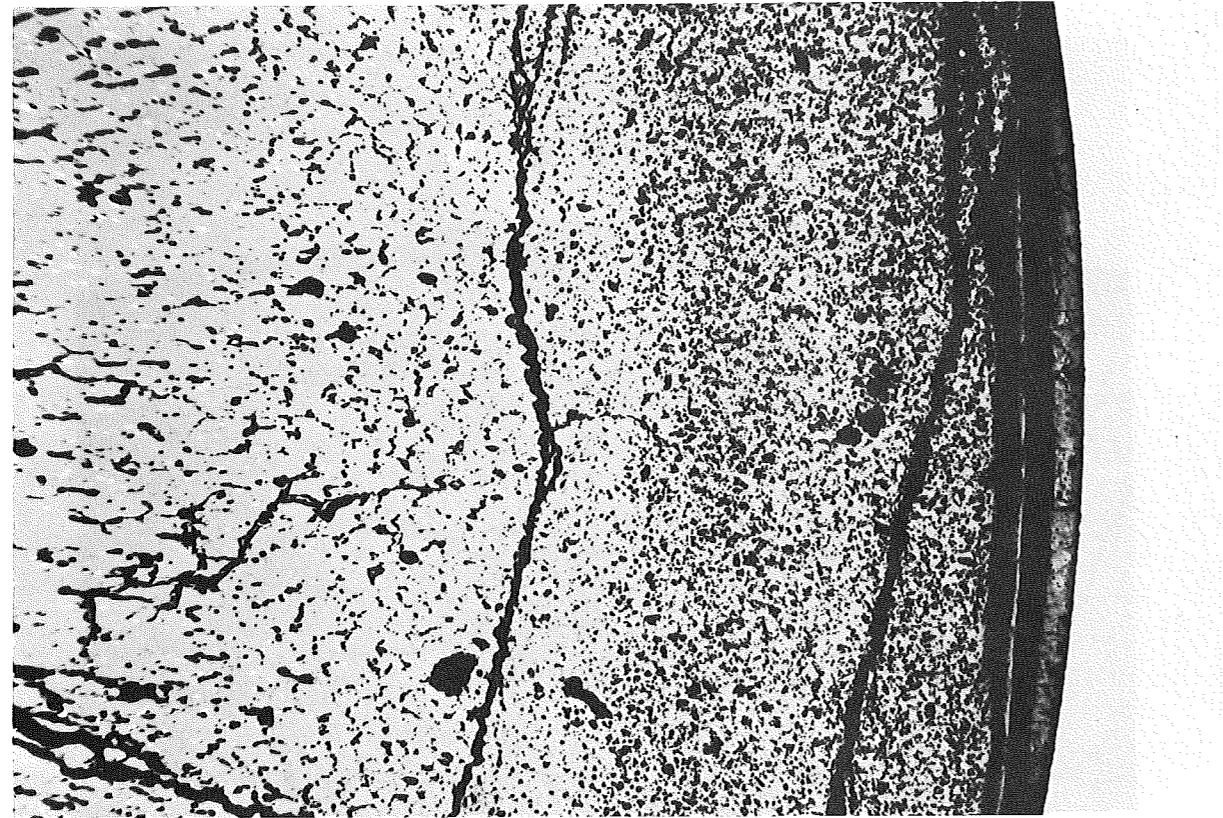
5

1mm



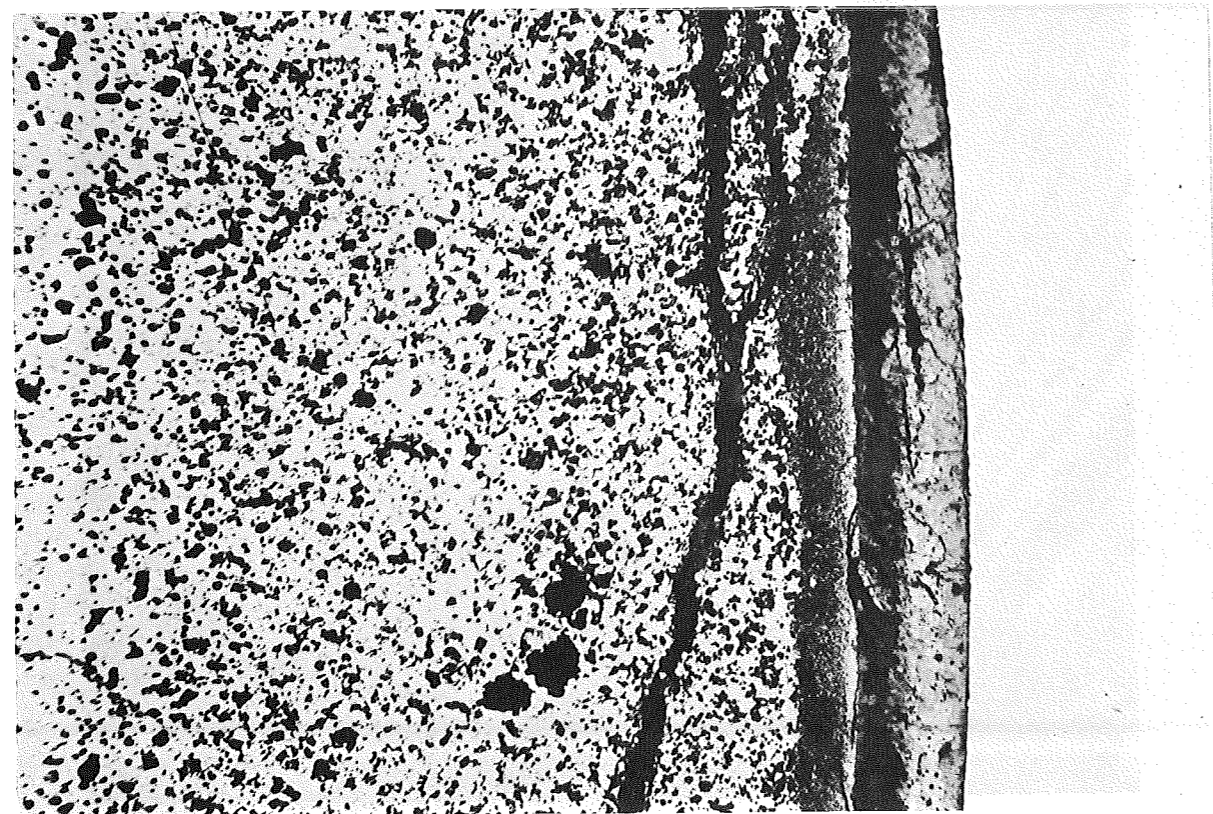
Prüfling G 1	
Brennstoff :	
Form	: Tabletten
Zusammensetzung	: UO ₂ -PuO ₂
Tablettendichte	: 89,2 % th.D.
Hülle :	
Material	: 1.4988
Aussendurchmesser	: 6,305 mm
Wandstärke	: 0,40 mm
Geometrie:	
Länge des Prüflings	: 709,25 mm
Länge der Brennstoffsäule	: 360,3 mm
Radiale Spaltweite	: 75 µm
Schmierdichte	: 85,4 % th.D.
Bestrahlung:	
Einrichtung	: Trefoil DFR-304
Dauer	: 220 Vollasttage
Ende	: 26.11.1969
Rechn. Abbrand (mittl.)	: 52 MWd/kg Metall
Stableistung max./mittl.	: 520/477 W/cm

zu Stab G 2 A 2



0.1 mm

/ 7



0.1 mm

/ 8

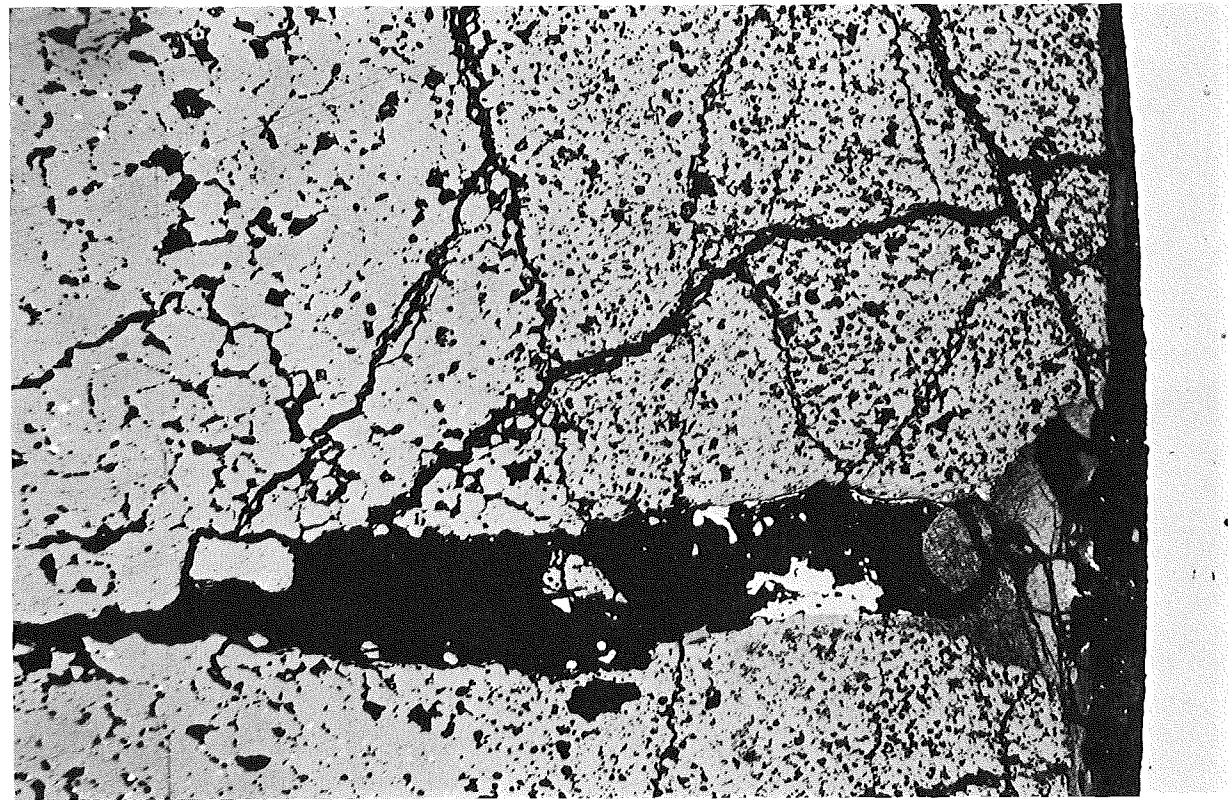
zu Stab G 2

A 4



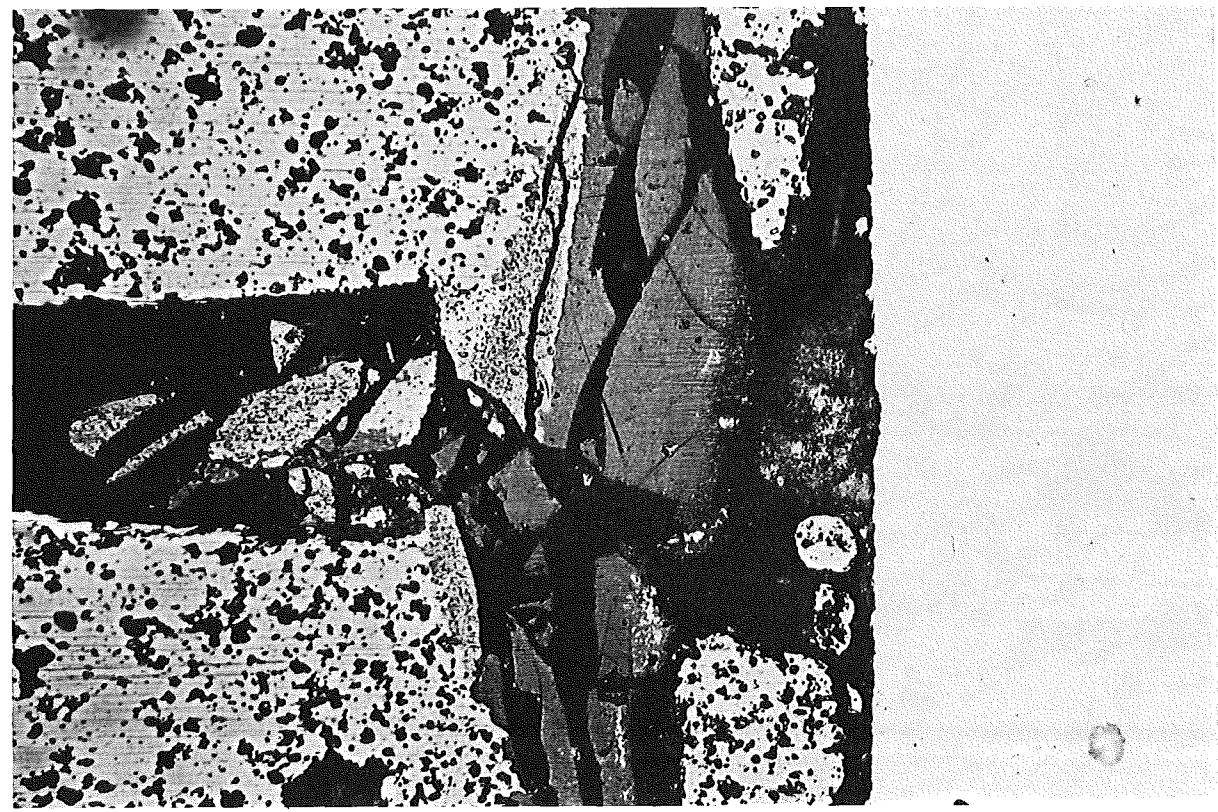
zu Stab G 2

A 4



/ 9

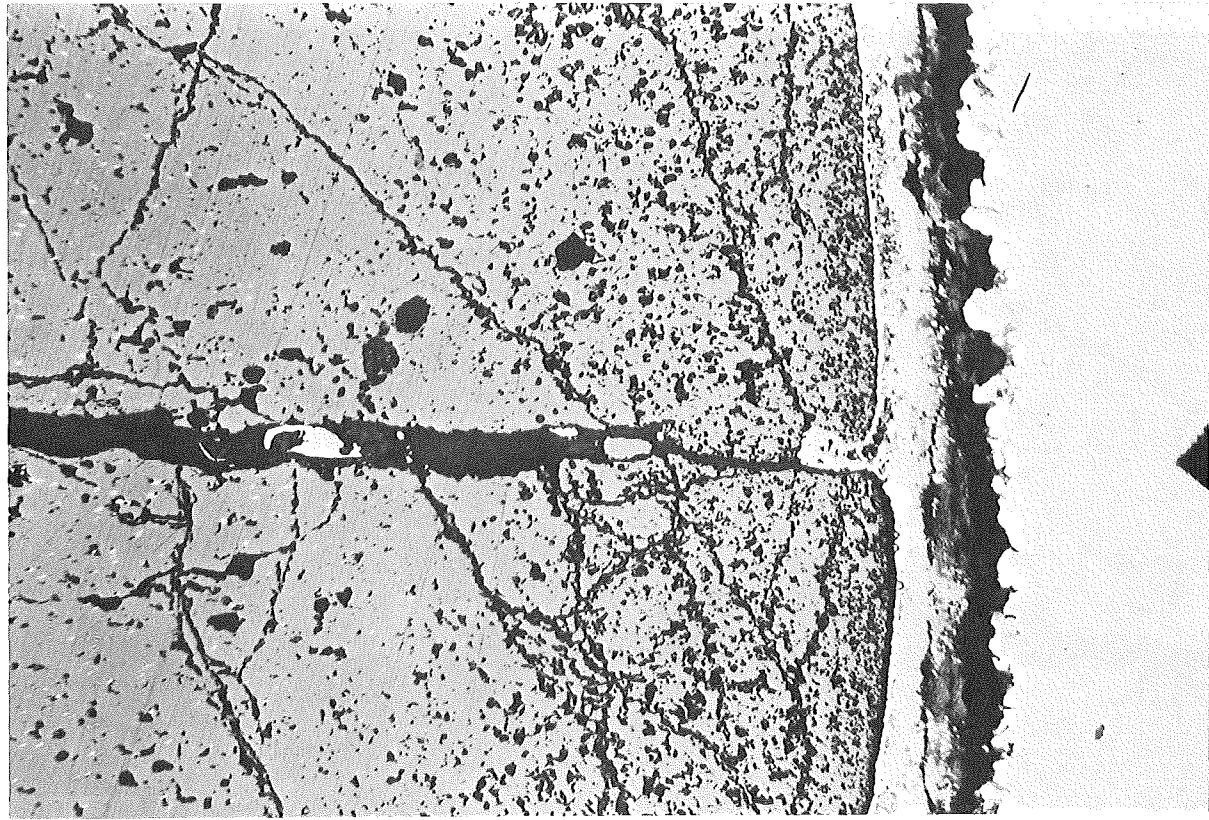
0.1 mm



/ 11

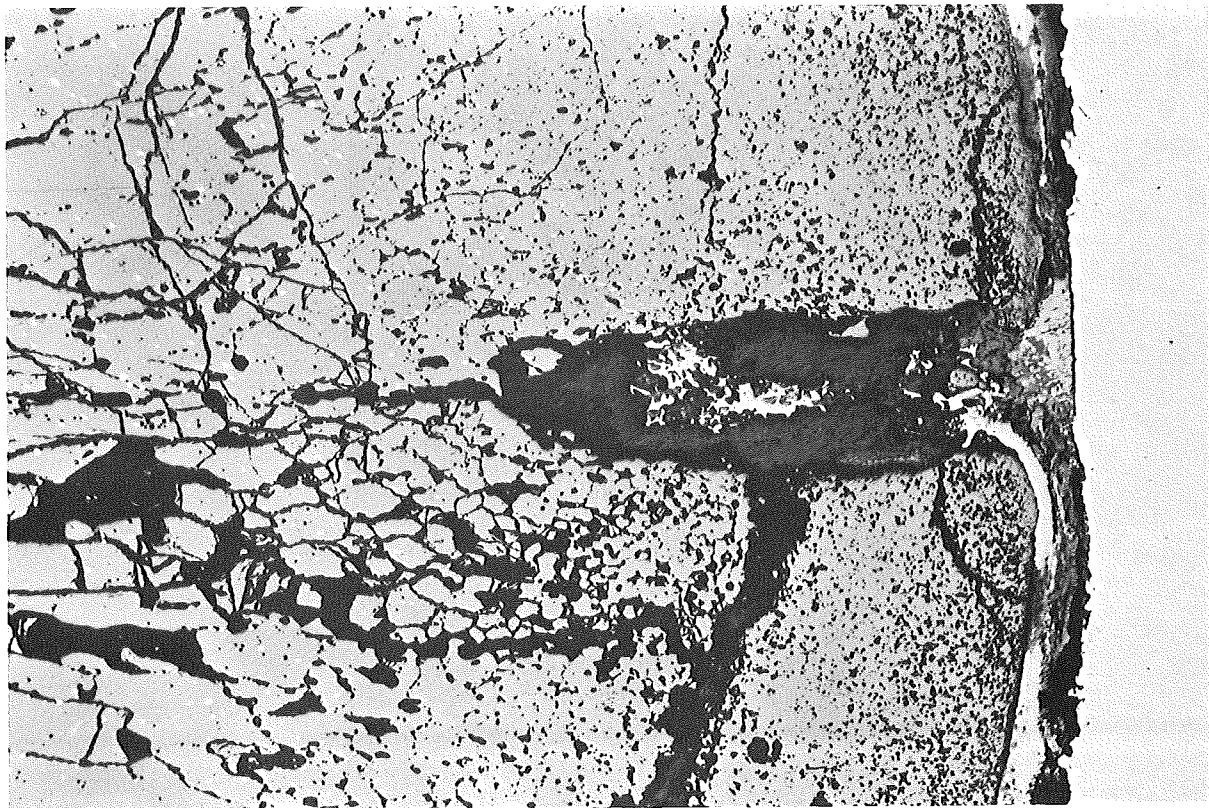
50 μ m

zu Stab G 2 A 6



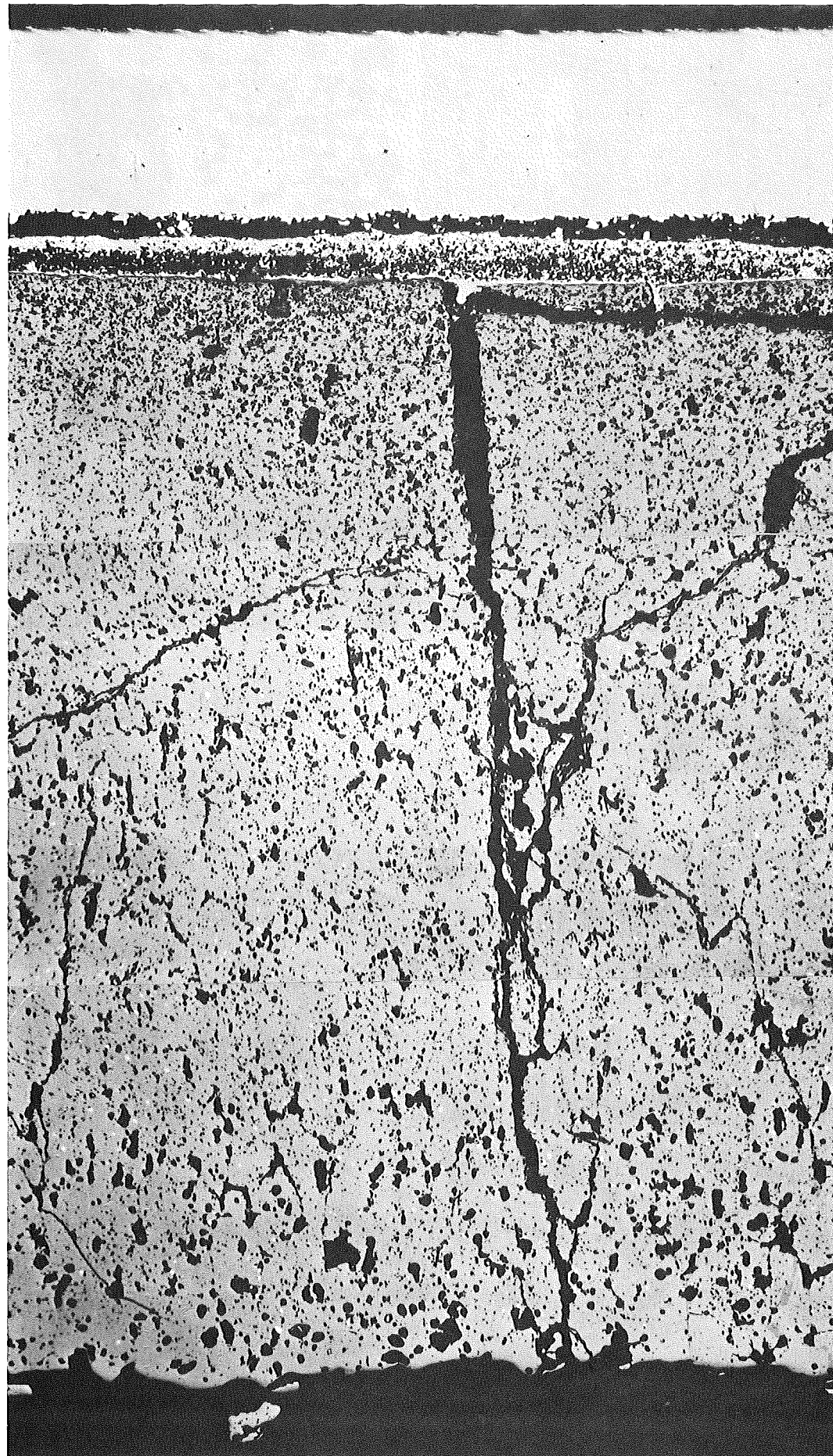
0.1 mm

17

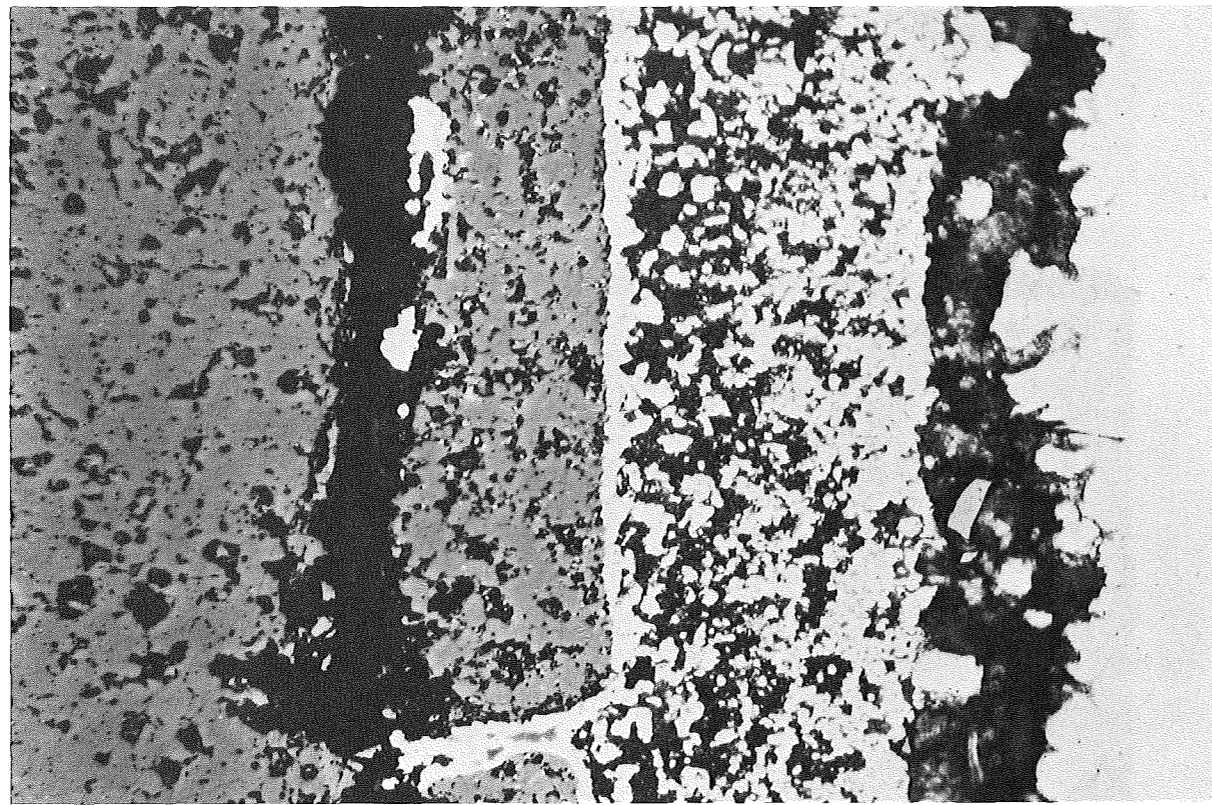


0.1 mm

18

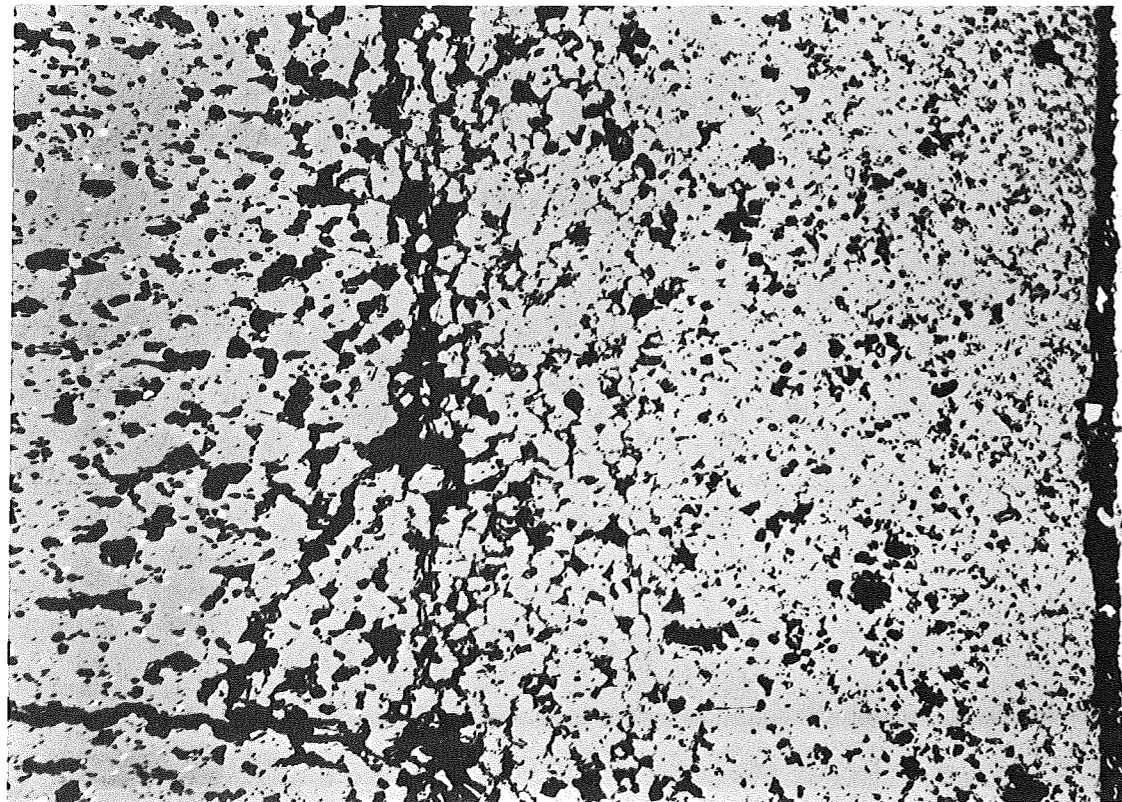


zu Stab G 2 A 7



/ 11

50 μm



/ 16

0.2 mm

Prüfling G 2

Brennstoff :

Form : Tabletten
Zusammensetzung : UO_2 - PuO_2
Tablettendichte : 89,2 % th.D.

Hülle :

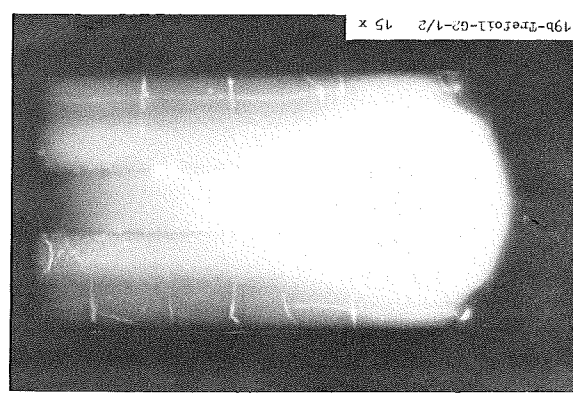
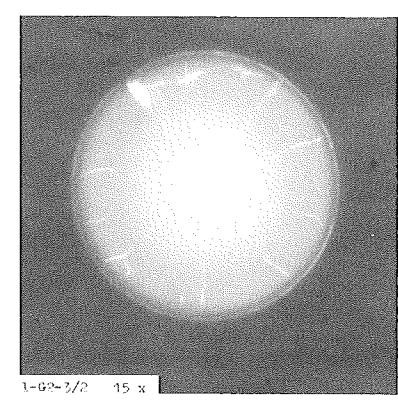
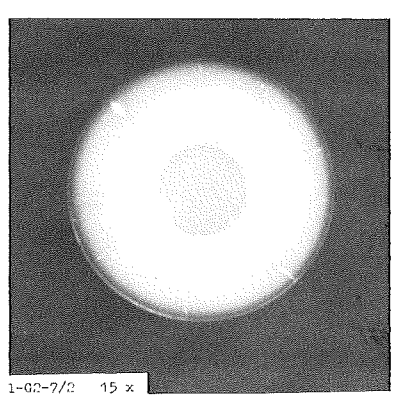
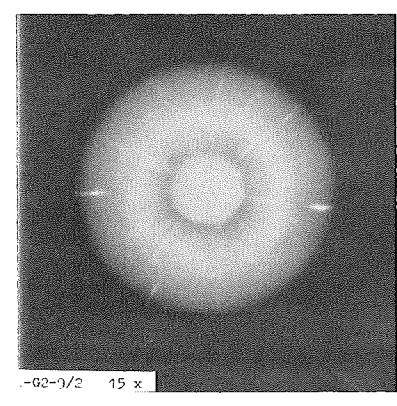
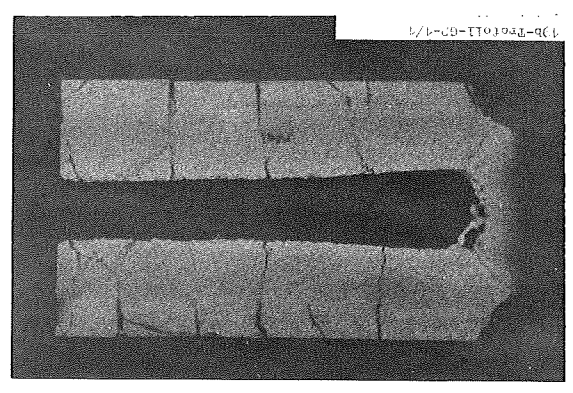
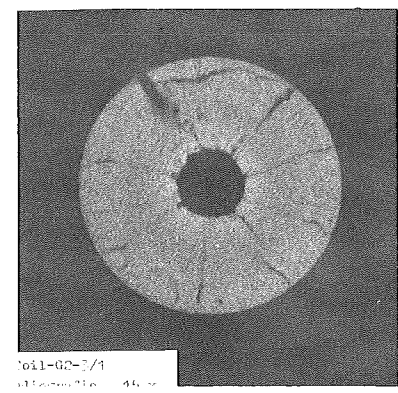
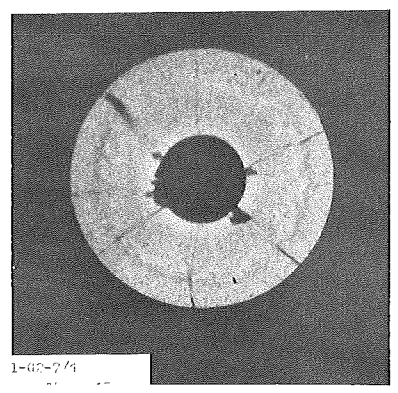
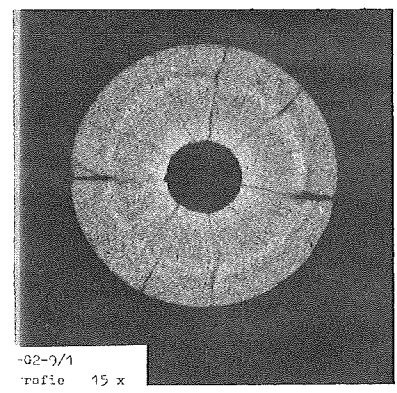
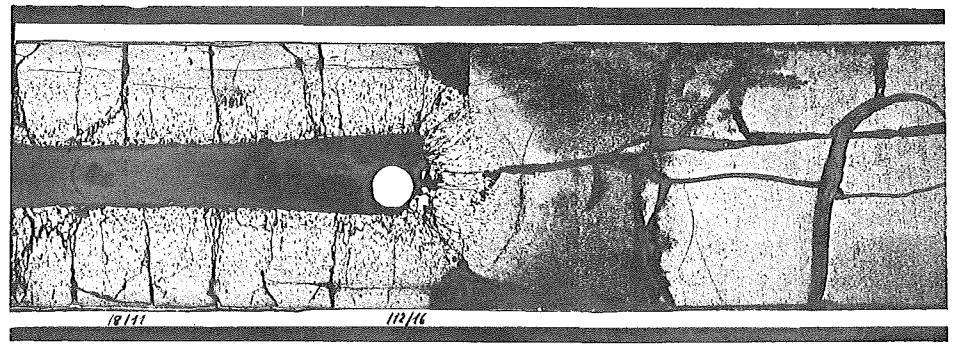
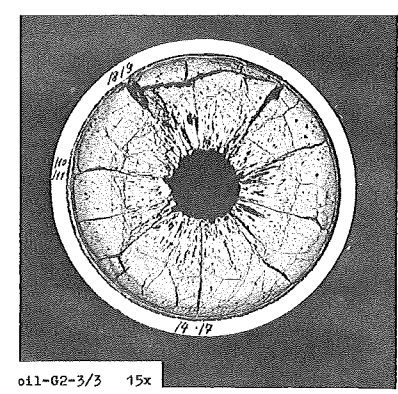
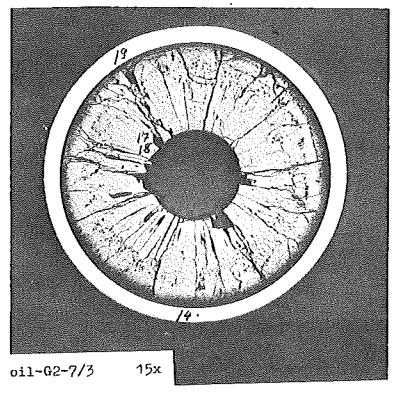
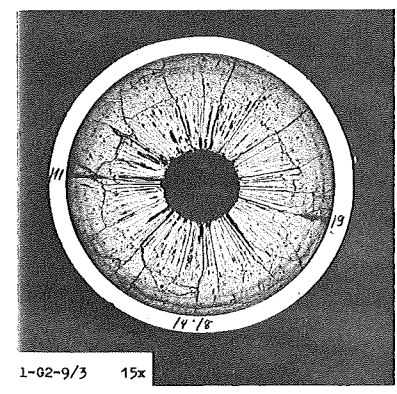
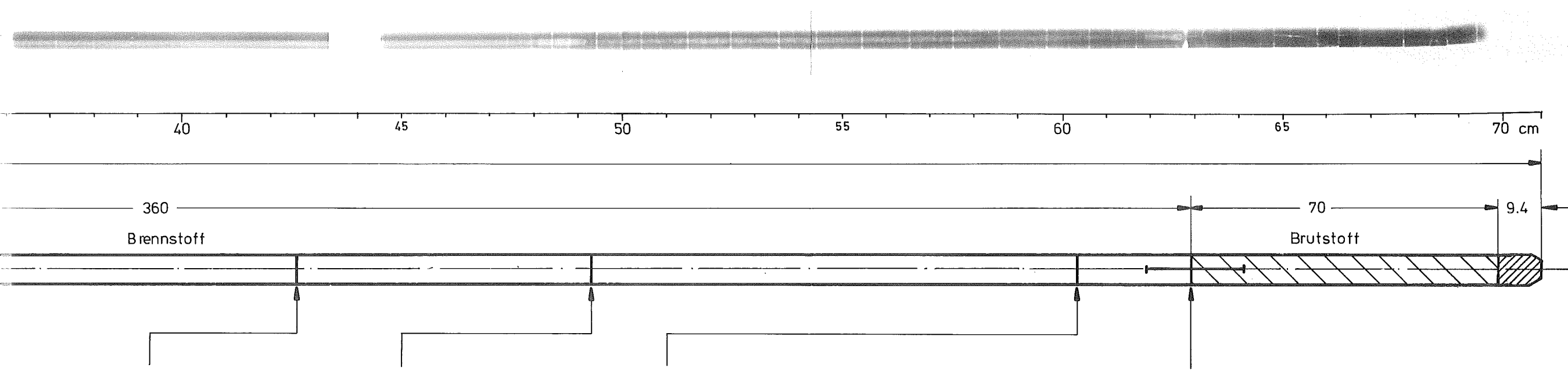
Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,305 mm
Wandstärke : 0,40 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 709,25 mm
Länge der Brennstoffsäule : 360,1 mm
Radiale Spaltweite : 75 μ m
Schmierdichte : 85,4 % th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : Trefoil DFR-304
Dauer : 220 Vollasttage
Ende : 26.11.1969
Rechn. Abbrand mittl. : 52 MWd/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 520/477 W/cm



4

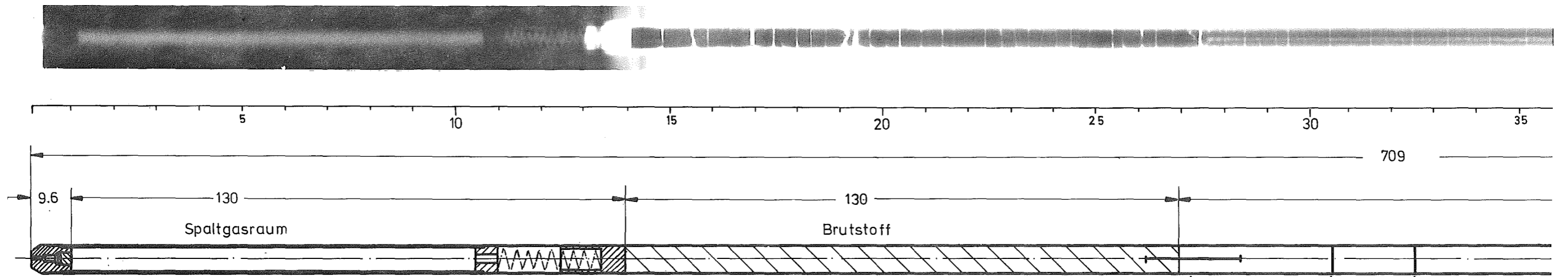
5

6

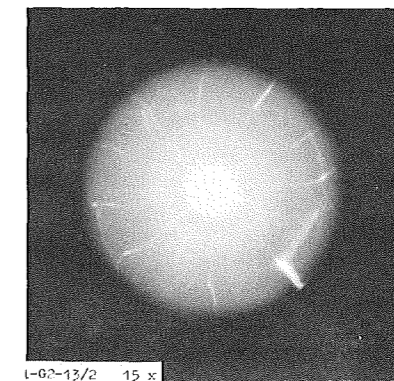
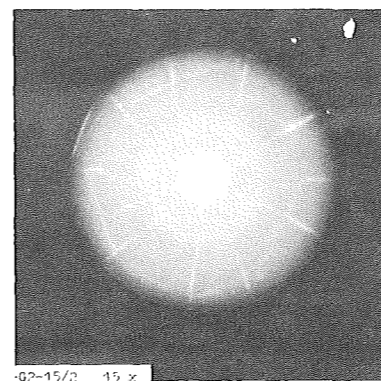
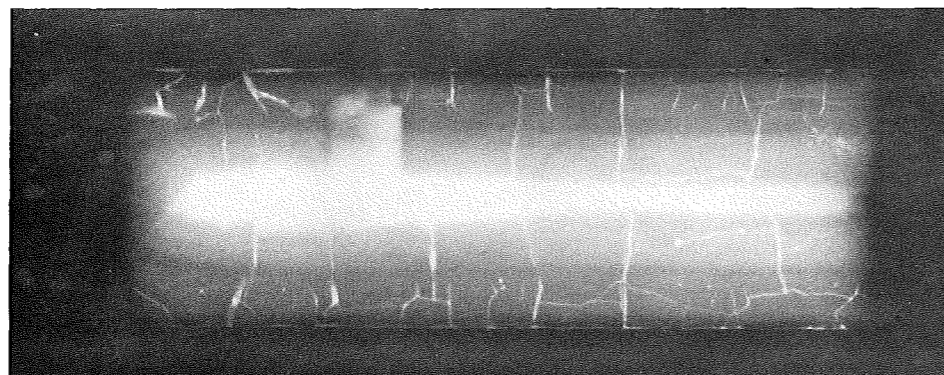
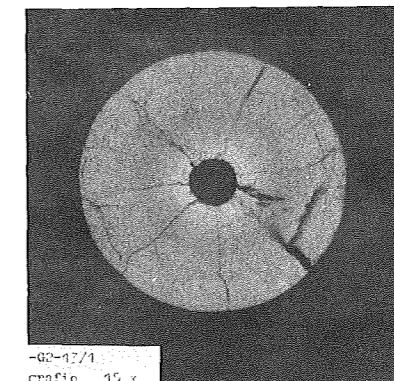
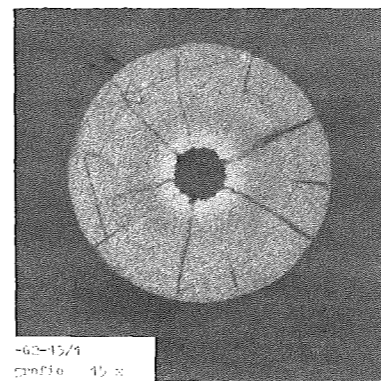
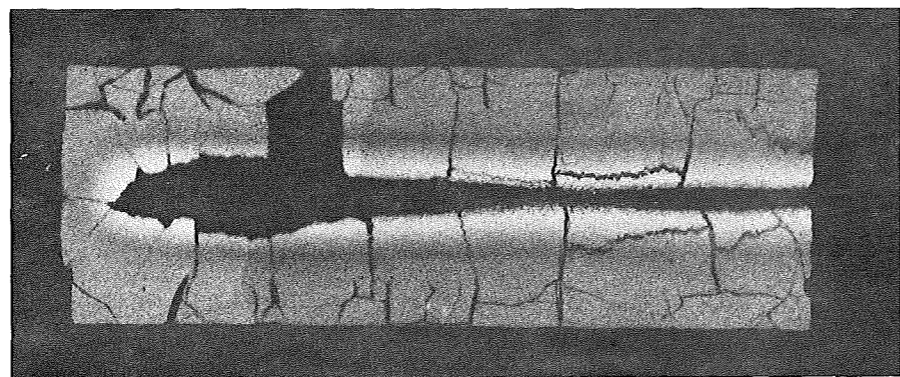
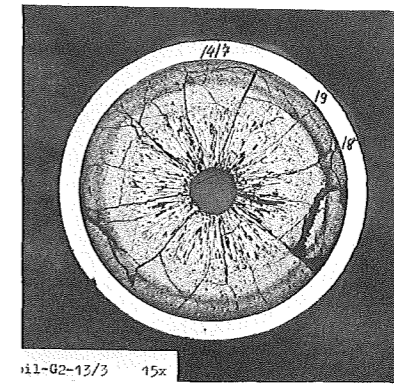
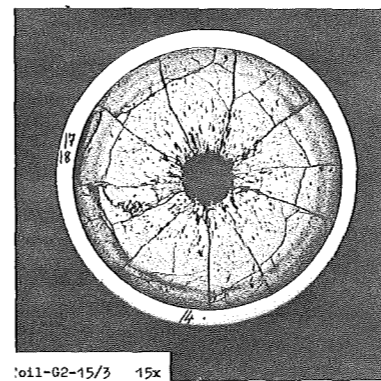
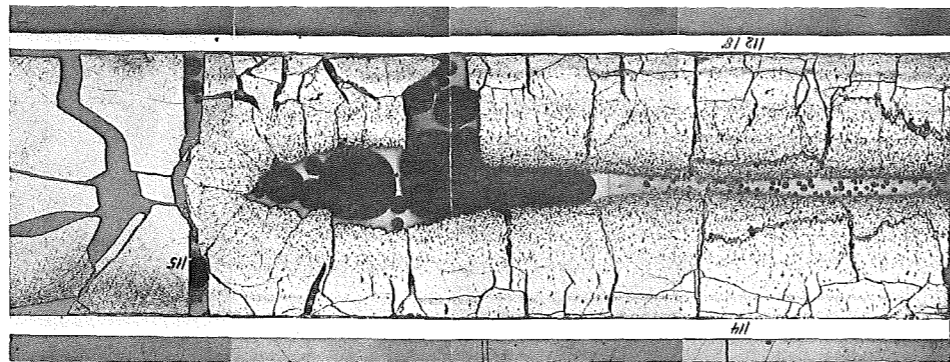
1mm

7

1mm



A



1

1mm

2

3

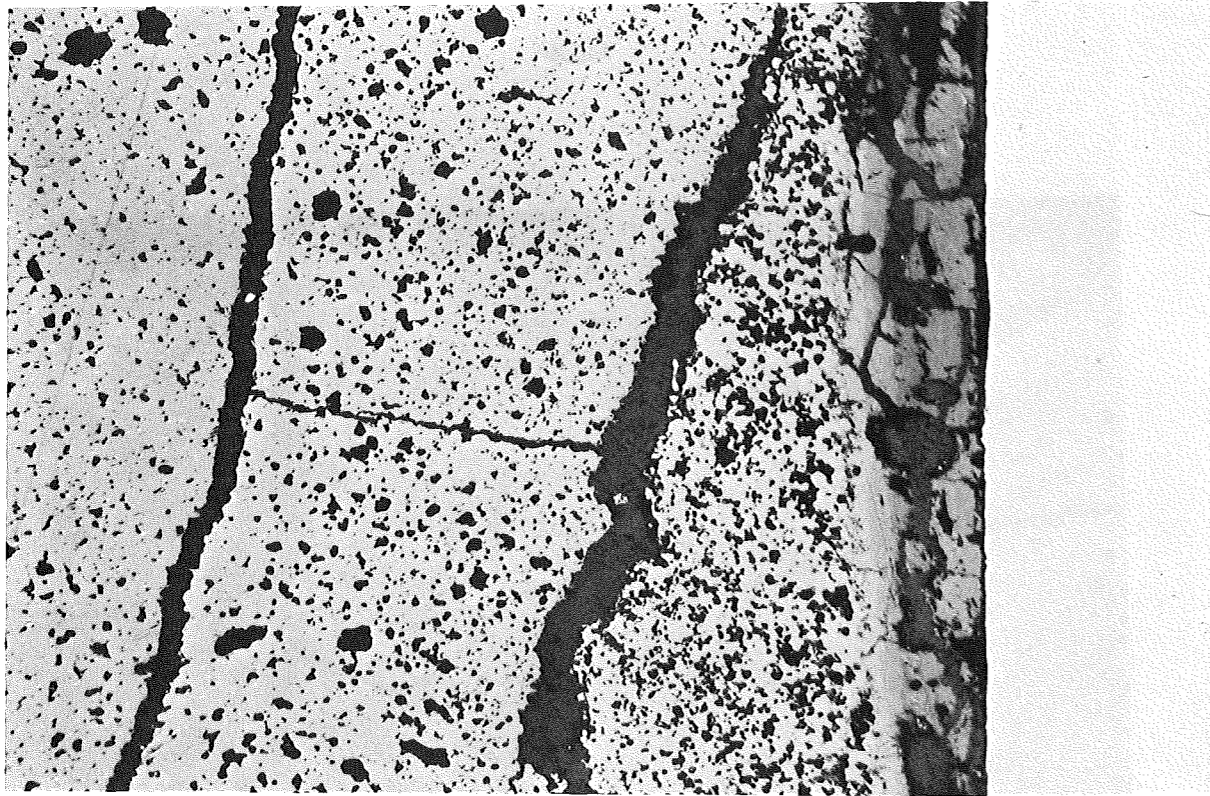
1mm





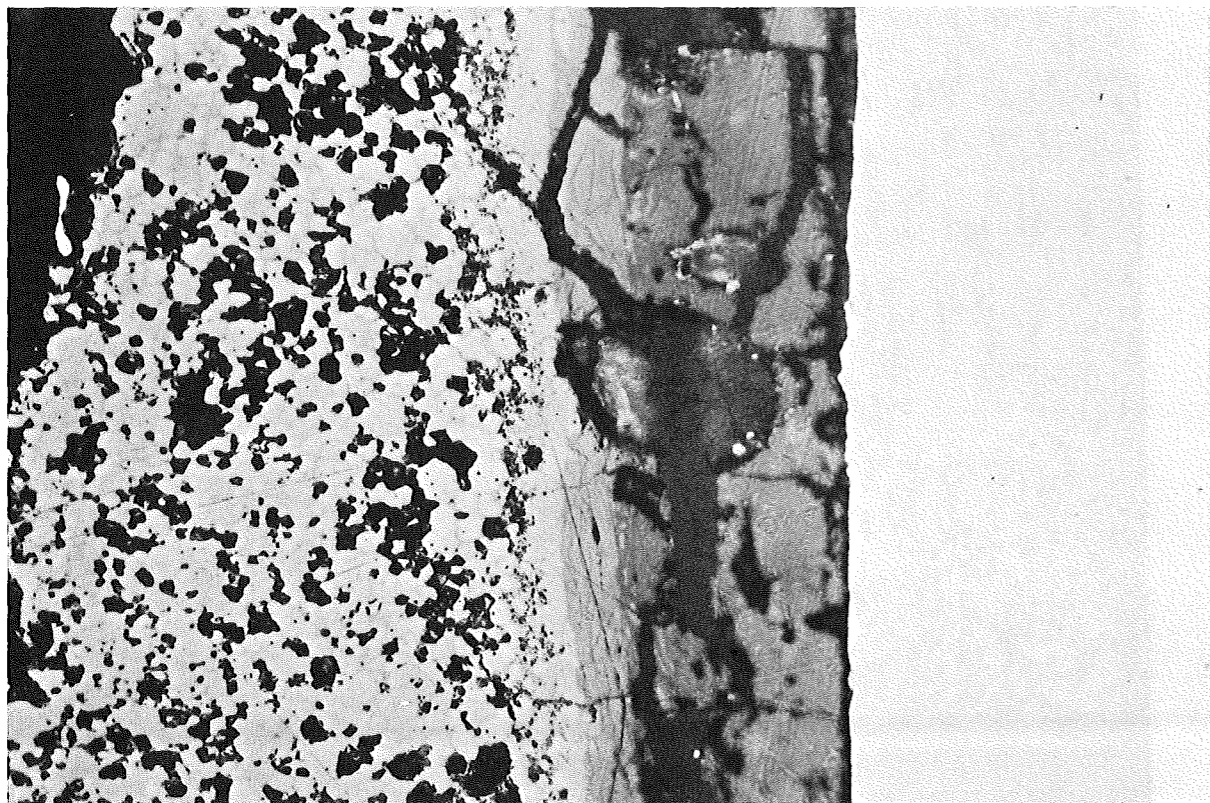
0.2 mm

zu Stab G 3 A 1



/ 14

0.1 mm



/ 15

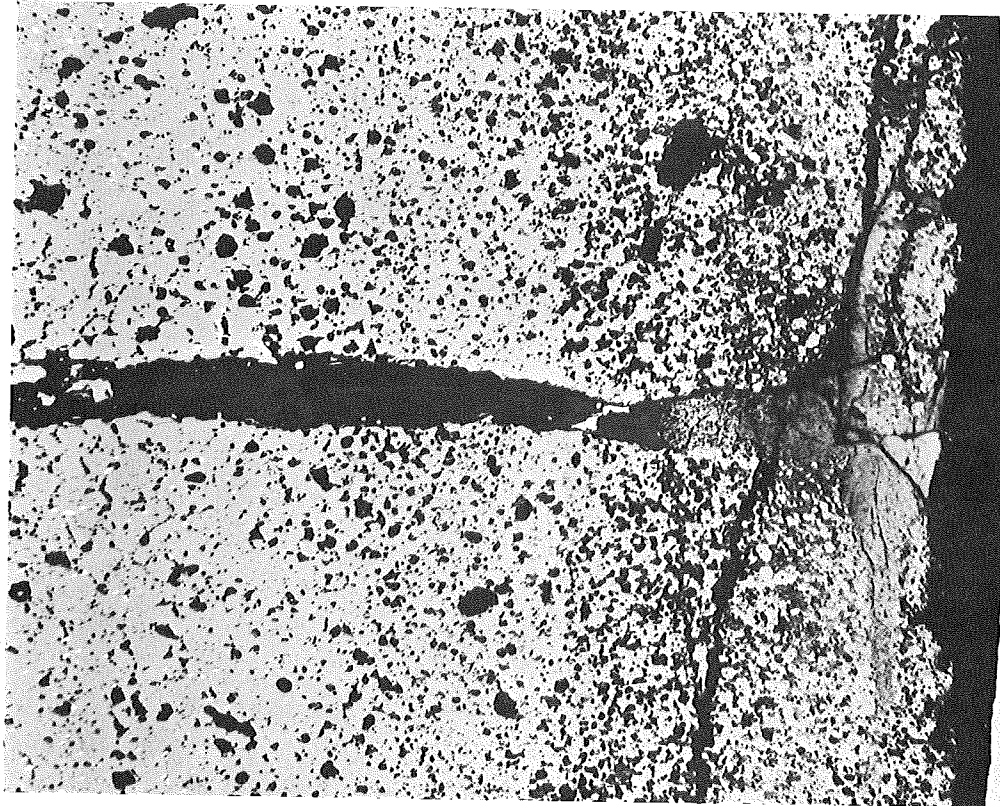
50 μm



0.2 mm

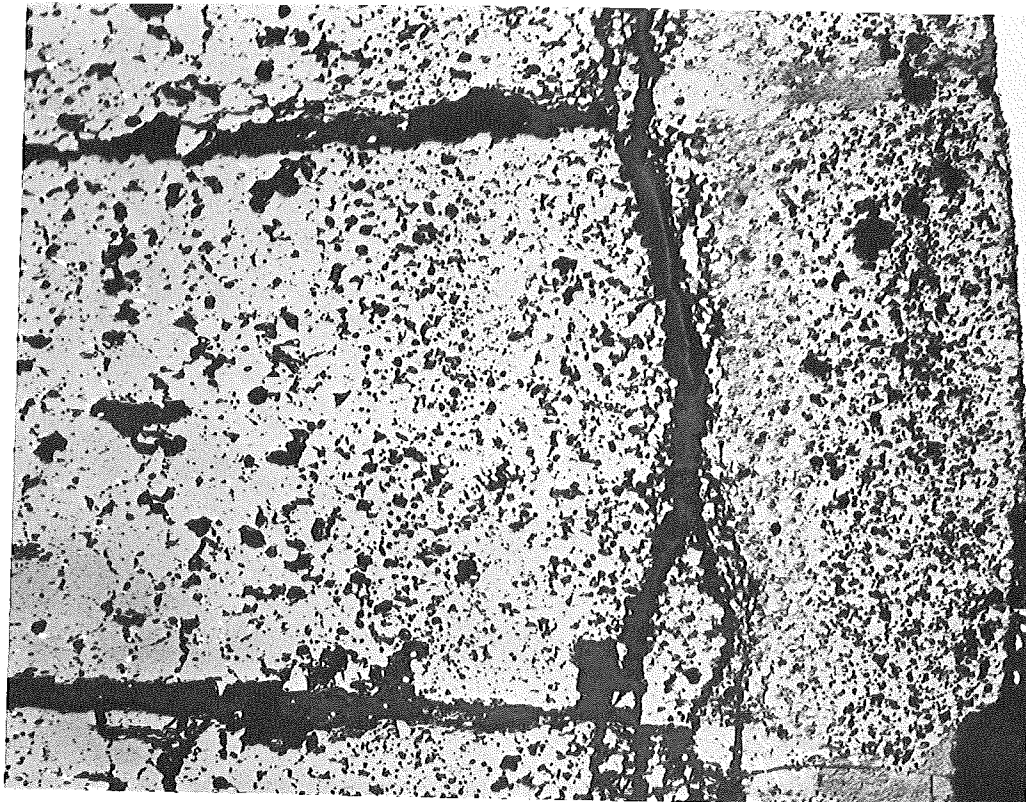
zu Stab G 3

A 3



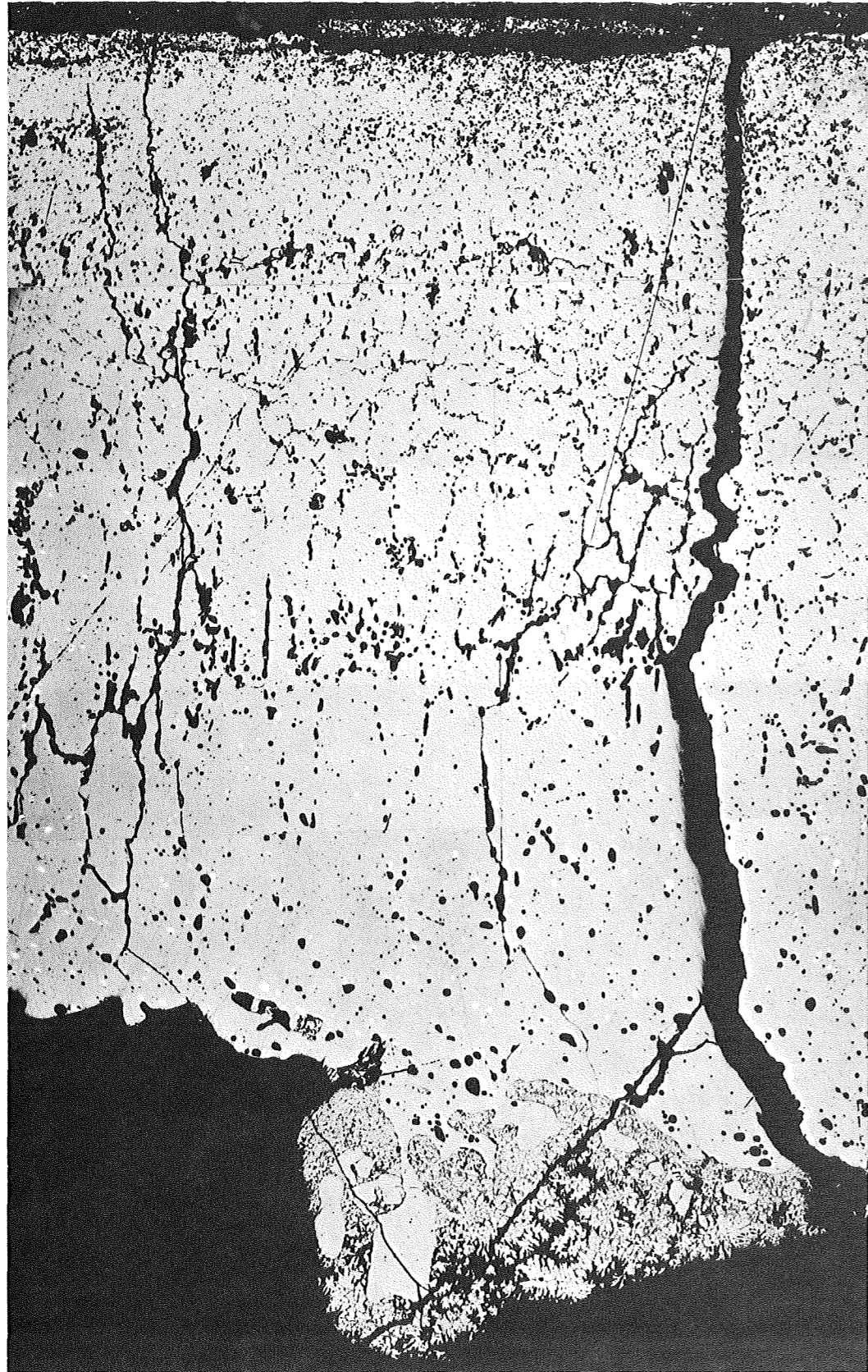
/ 7

0.1 mm



/ 9

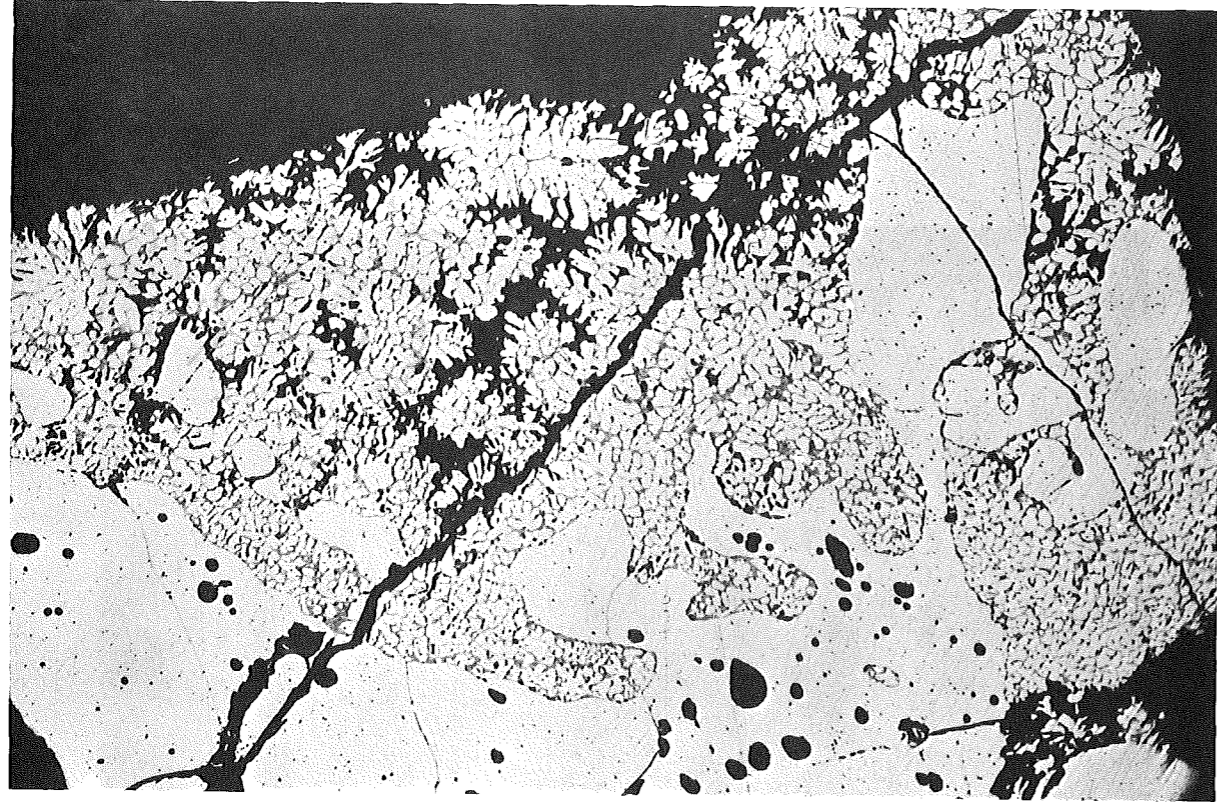
0.1 mm



0.1 mm

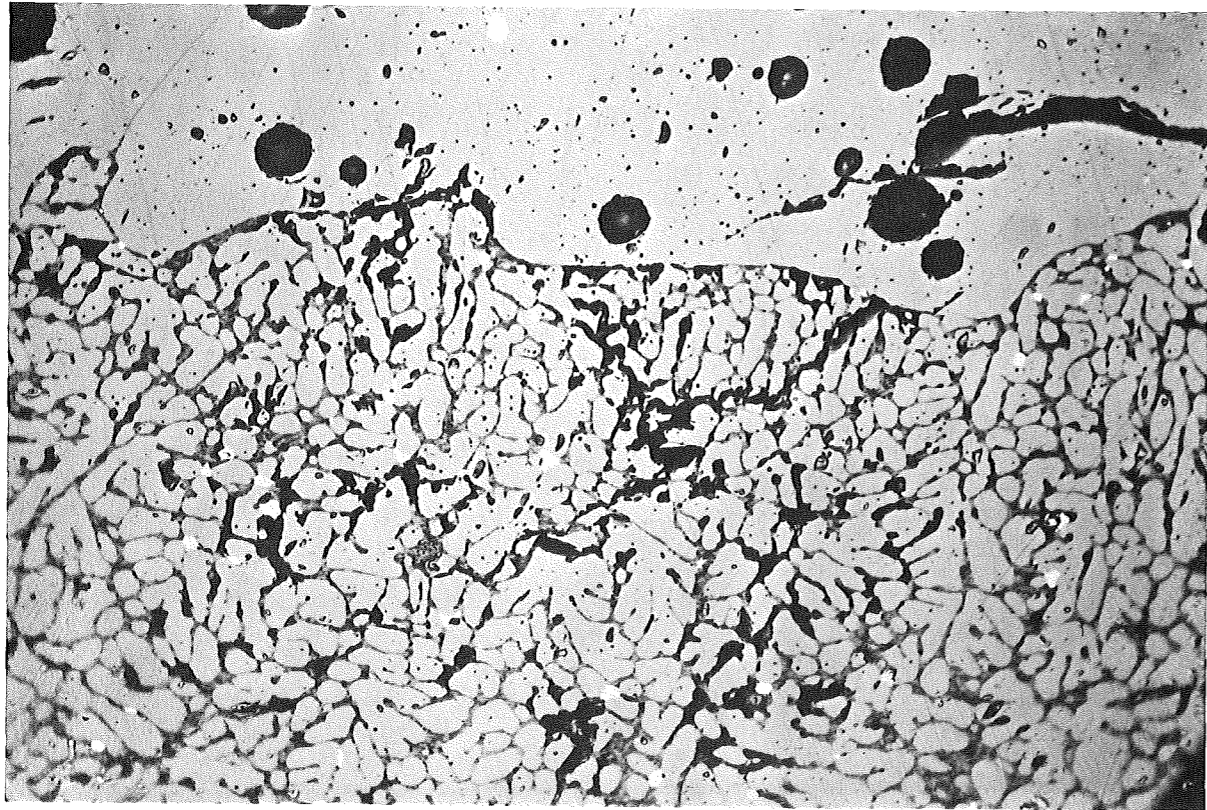
zu Stab G 3

A 4



0.1 mm

/ 15



50 μ m

/ 17



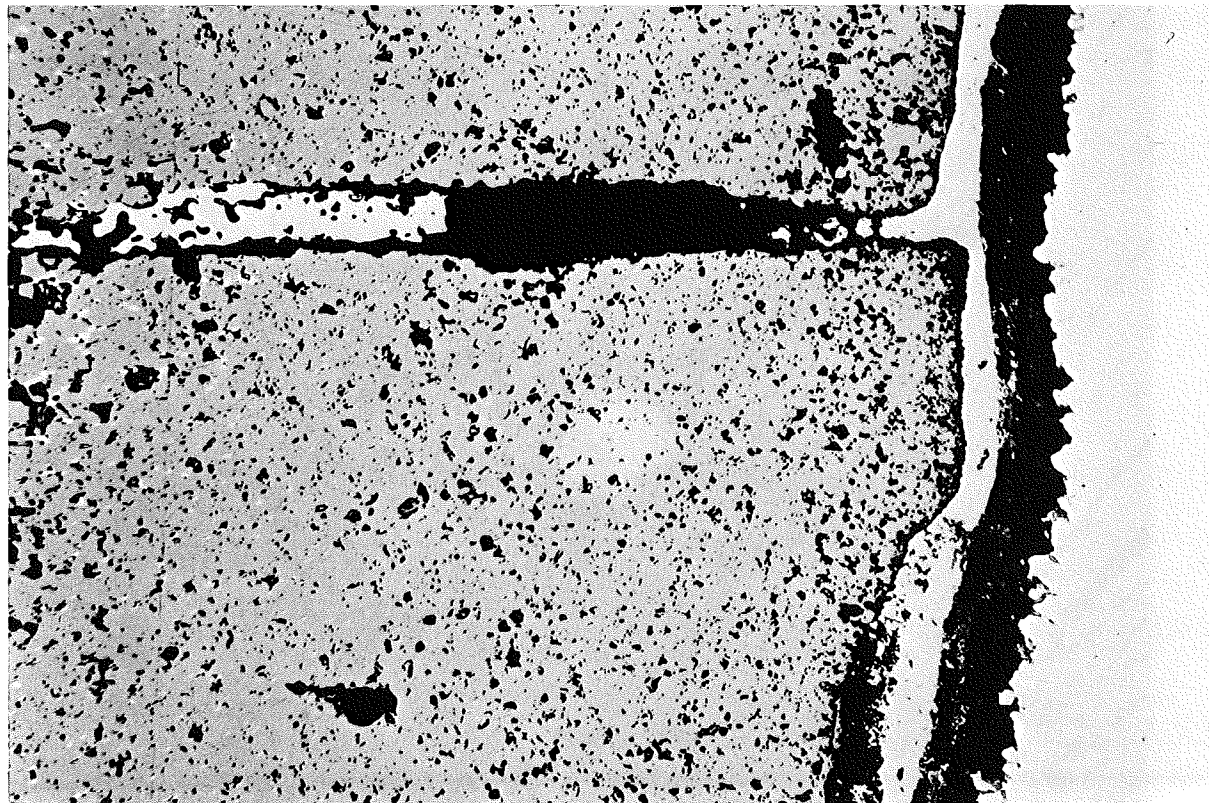
0.1 mm

zu Stab G3 A 6



/ 7

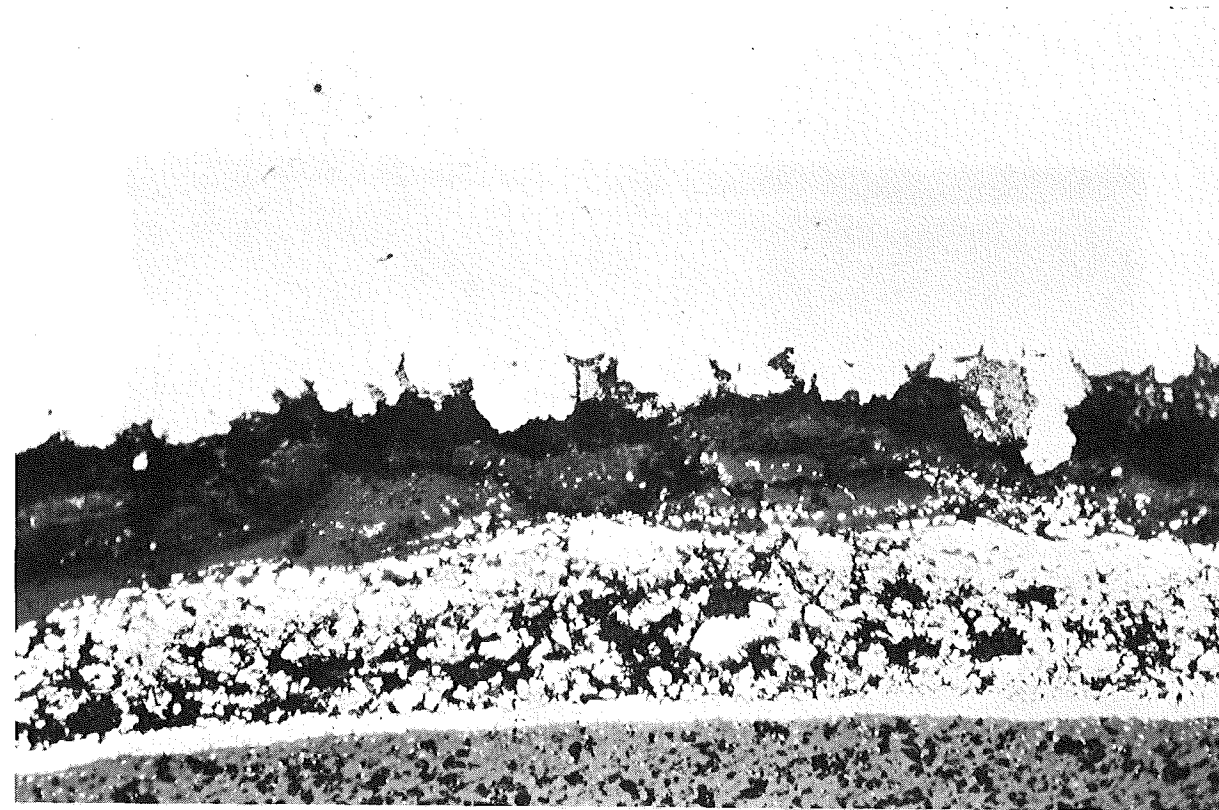
0.1 mm



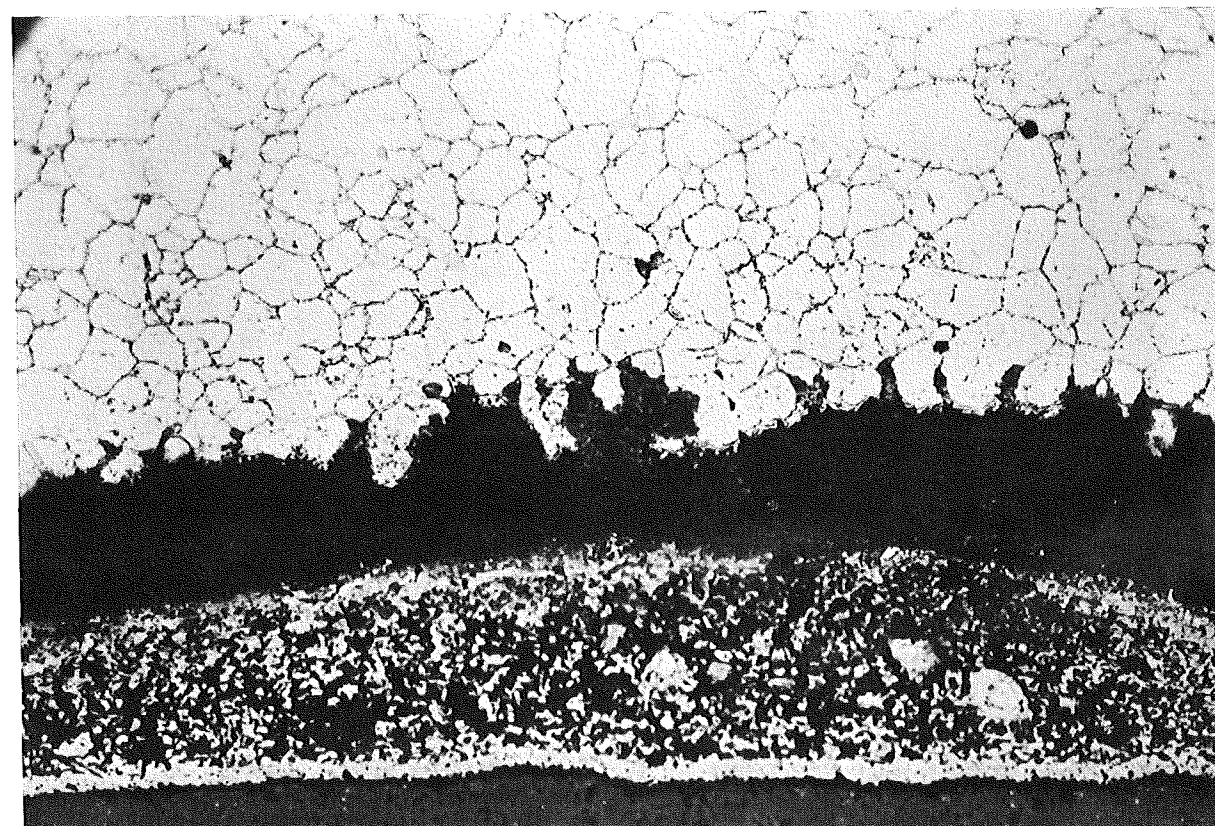
/ 8

0.1 mm

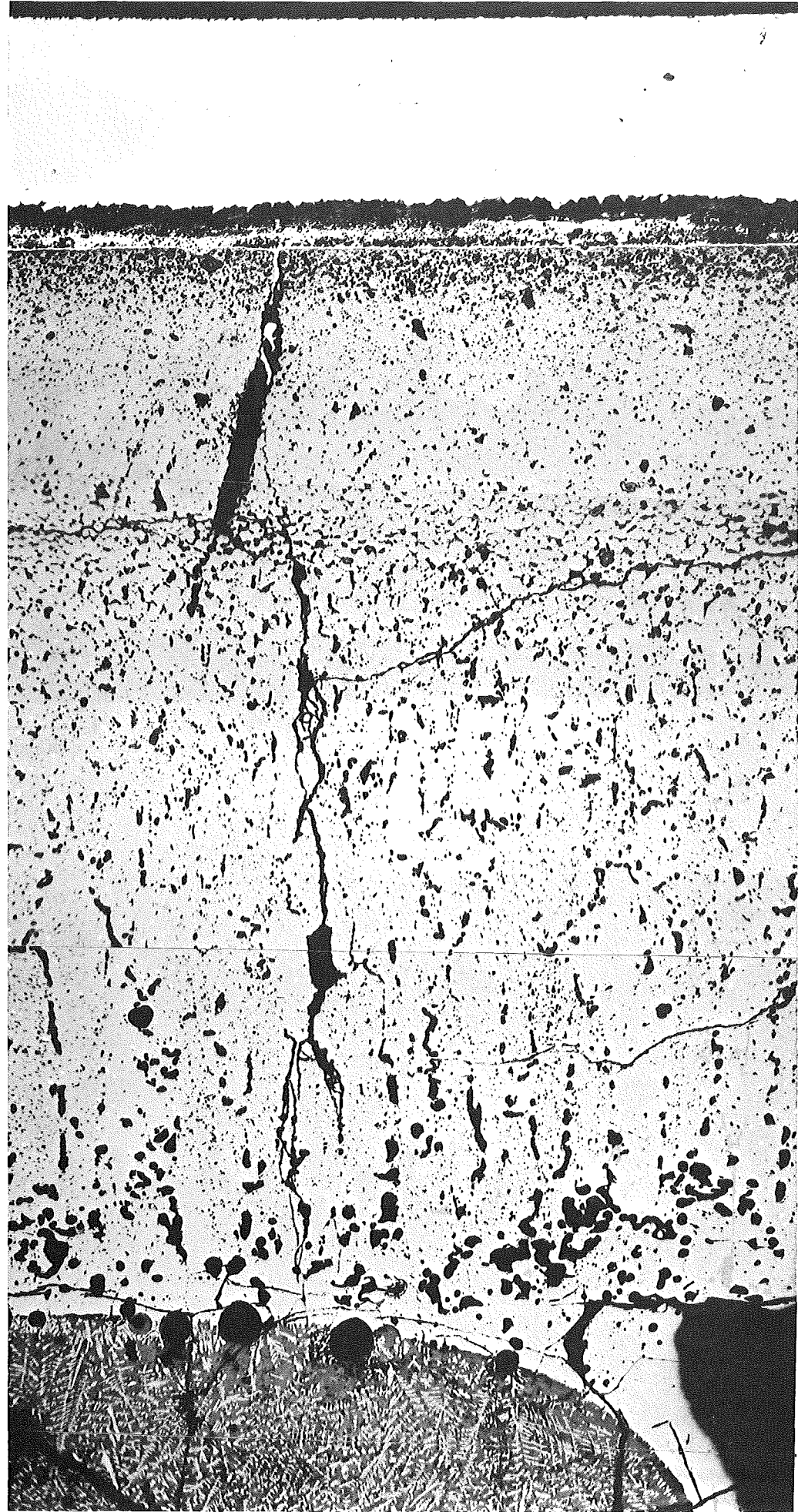
zu Stab G 3 A 6



50 μm



50 μm



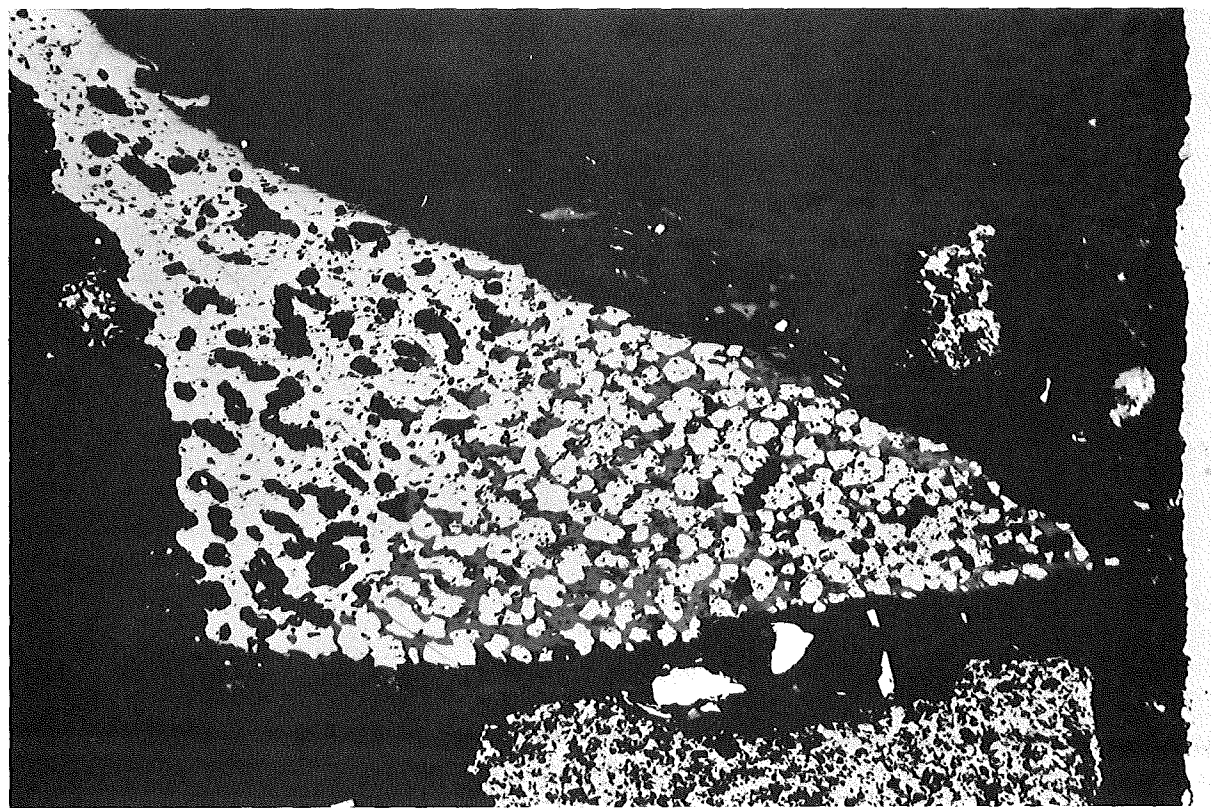
0.1 mm

zu Stab G 3 A 7



/ 12

0.1 mm



/ 18

0.1 mm

Prüfling G 3

Brennstoff :

Form : Tabletten

Zusammensetzung : UO_2 - PuO_2

Tablettendichte : 89,2 %

Hülle :

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 6,31 mm

Wandstärke : 0,40 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 709,25 mm

Länge der Brennstoffsäule : 360,3 mm

Radiale Spaltweite : 75 μ m

Schmierdichte : 85,4 % th.D.

Bestrahlung :

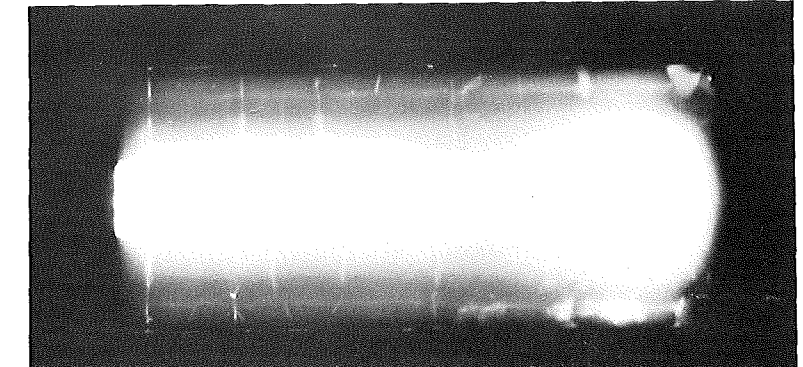
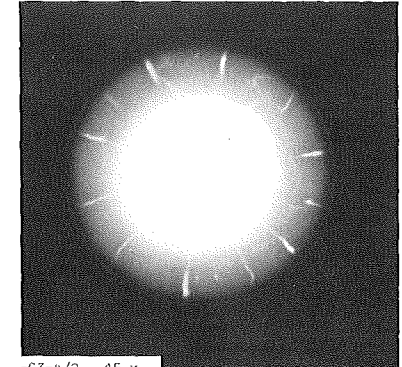
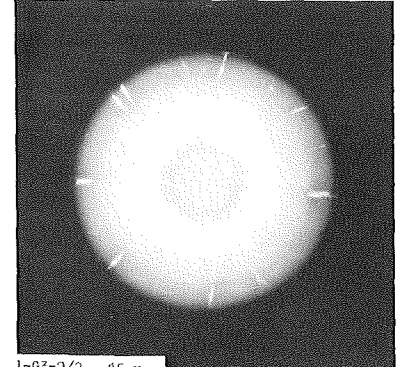
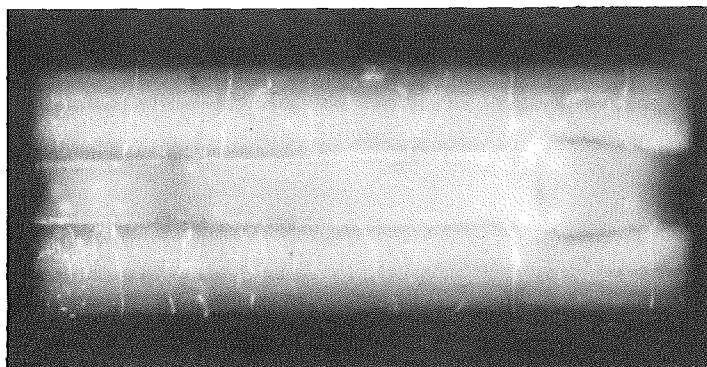
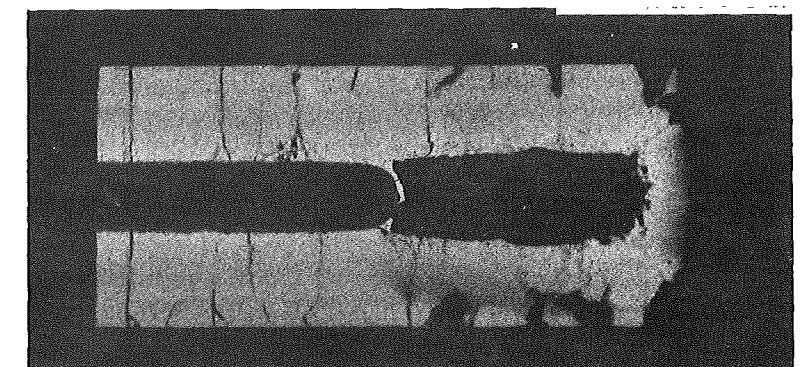
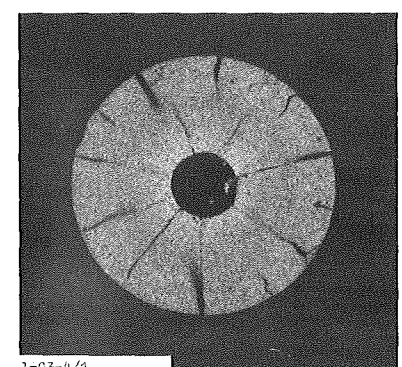
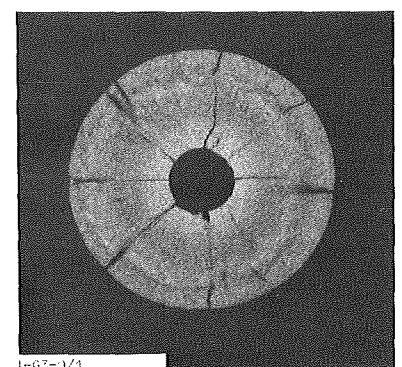
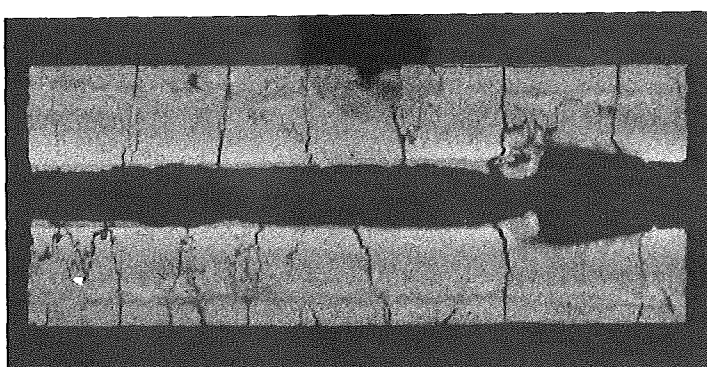
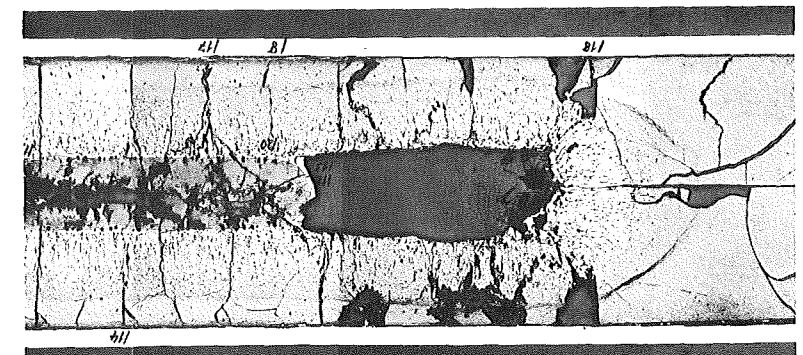
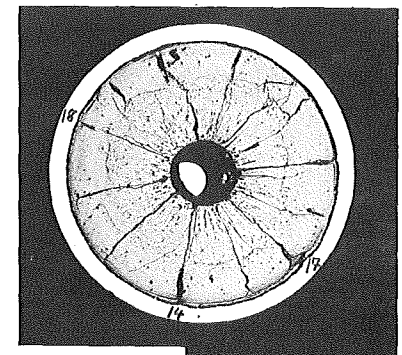
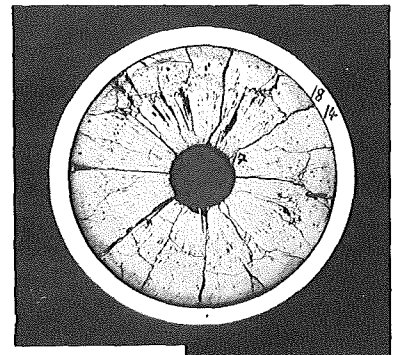
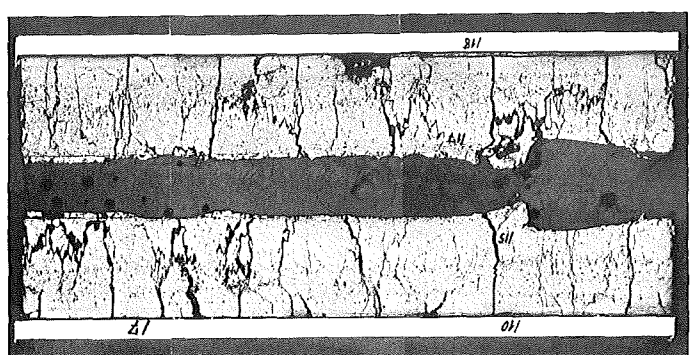
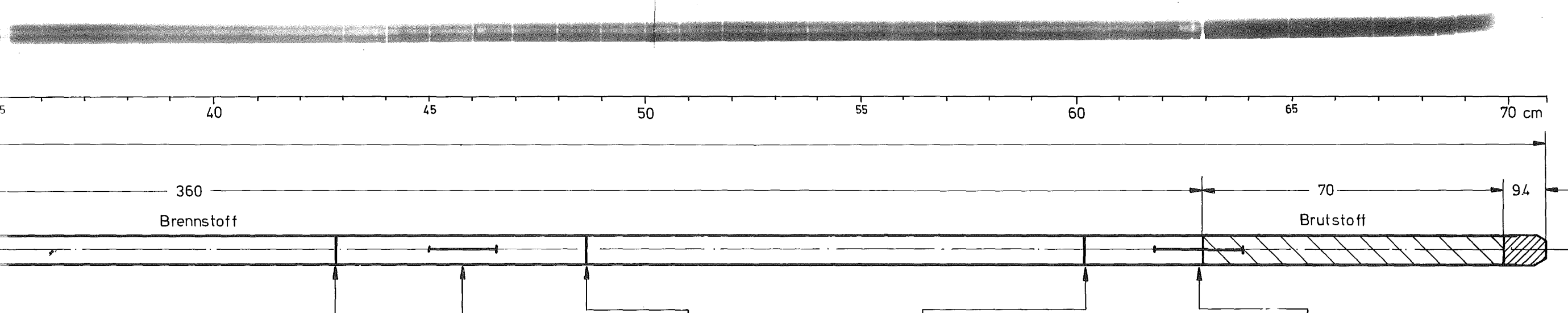
Einrichtung : Trefoil DFR-304

Dauer : 220 Vollasttage

Ende : 26.11.1969

Rechn. Abbrand mittl. : 52 MWd/kg Metall

Stableistung max./mittl. : 520/477 W/cm



4

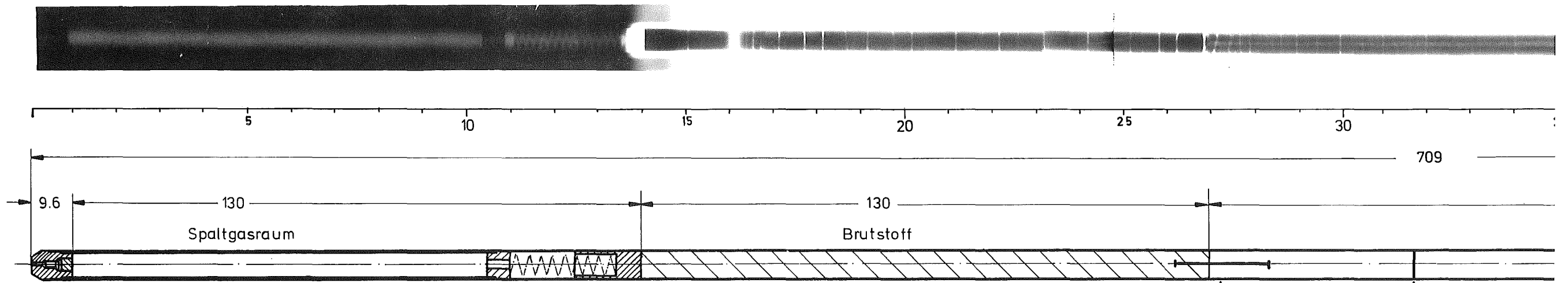
5

1mm

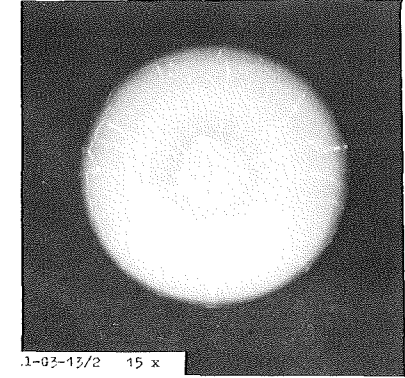
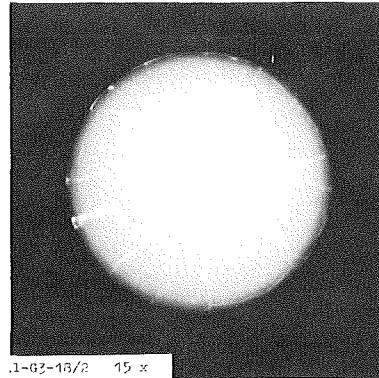
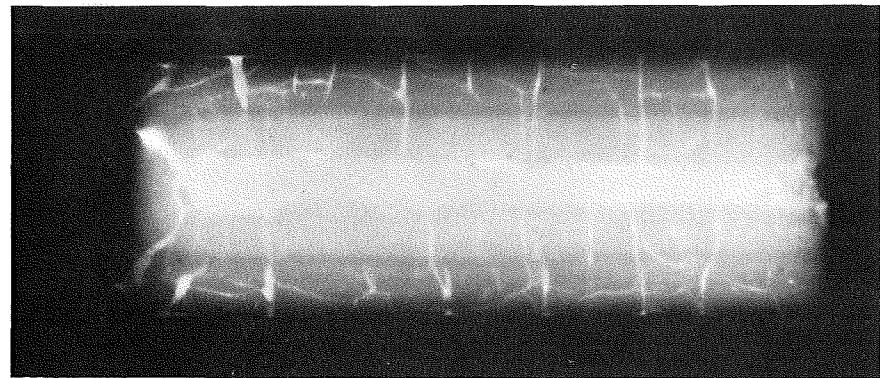
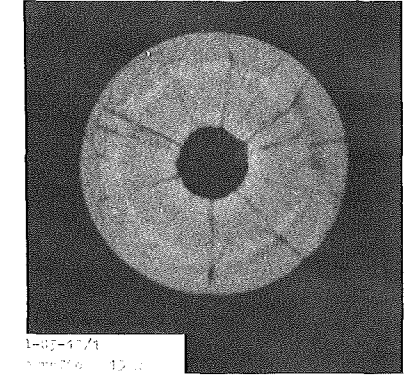
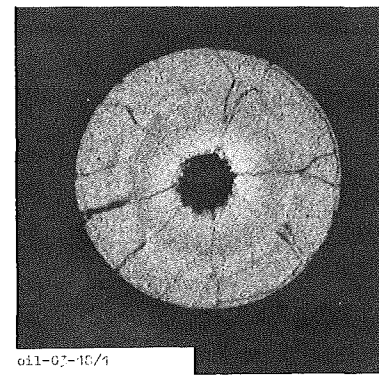
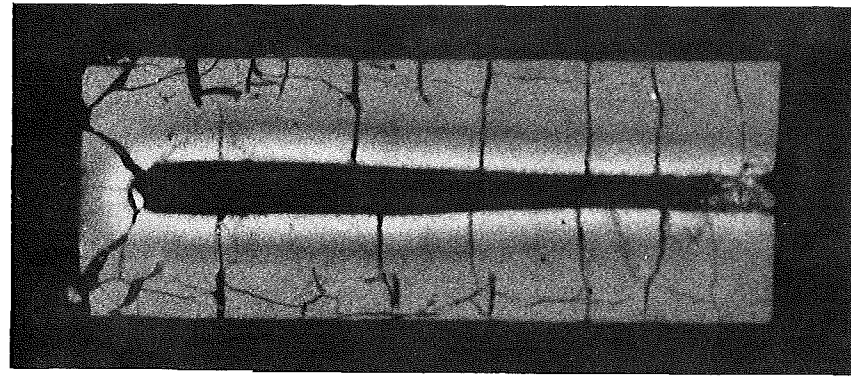
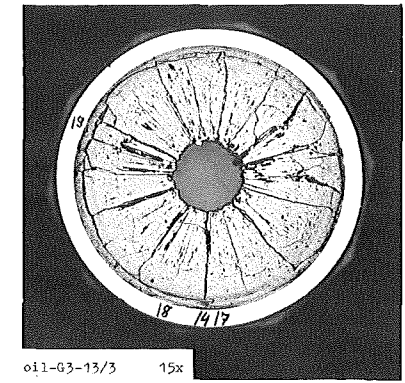
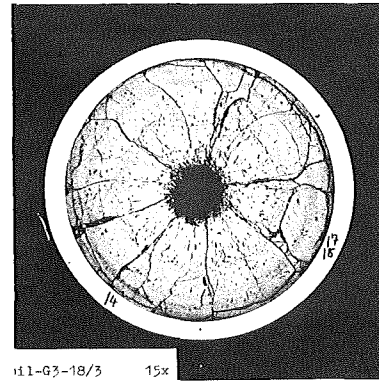
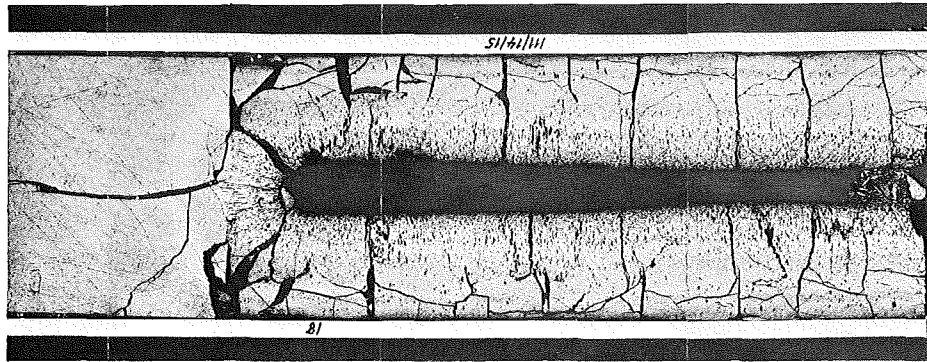
6

7

1mm



A



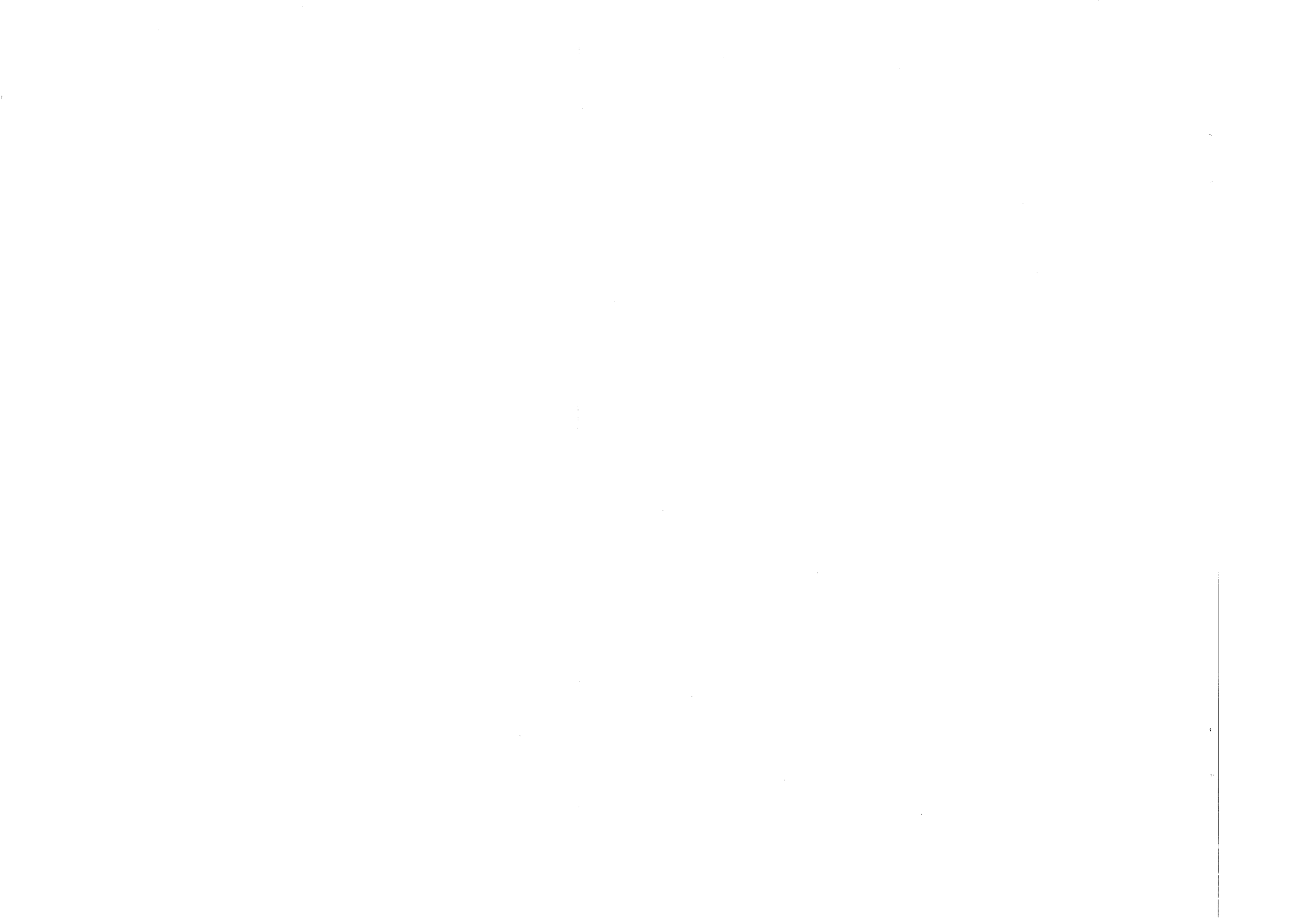
1

1mm

2

3

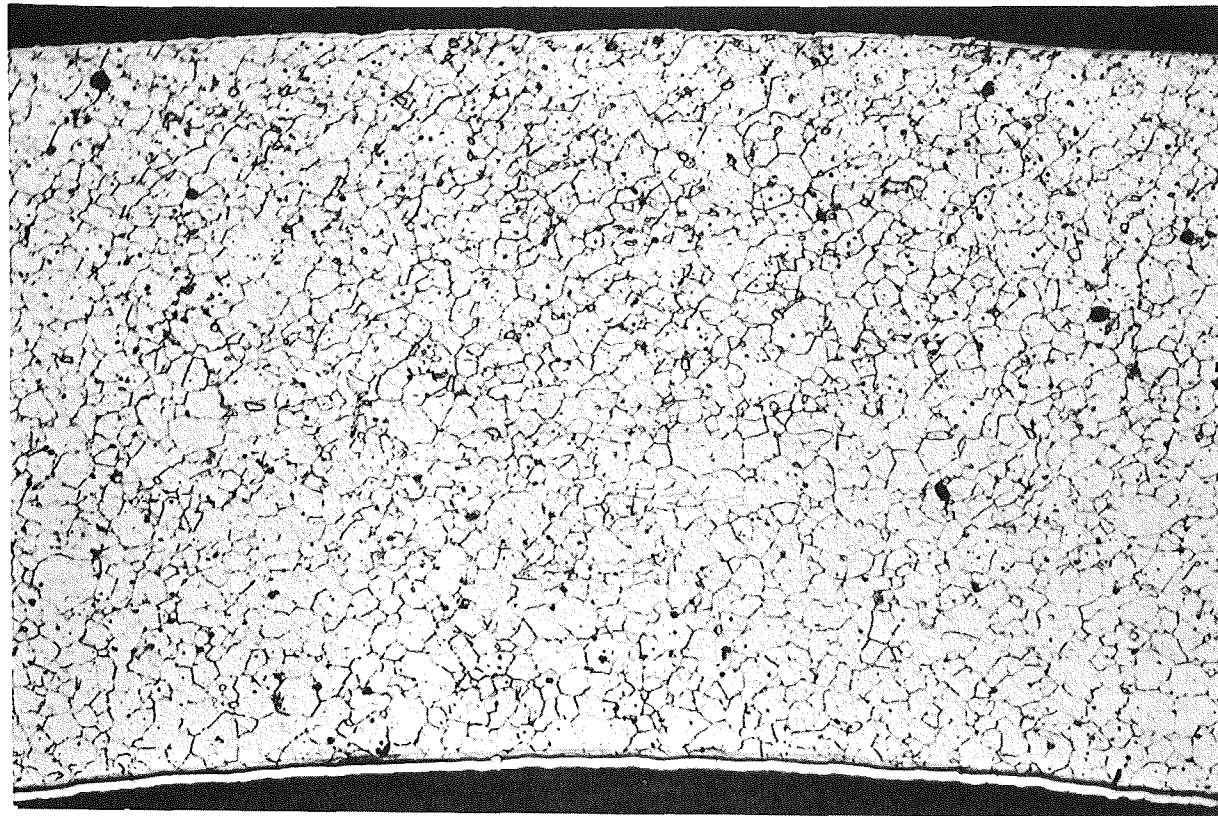
1mm



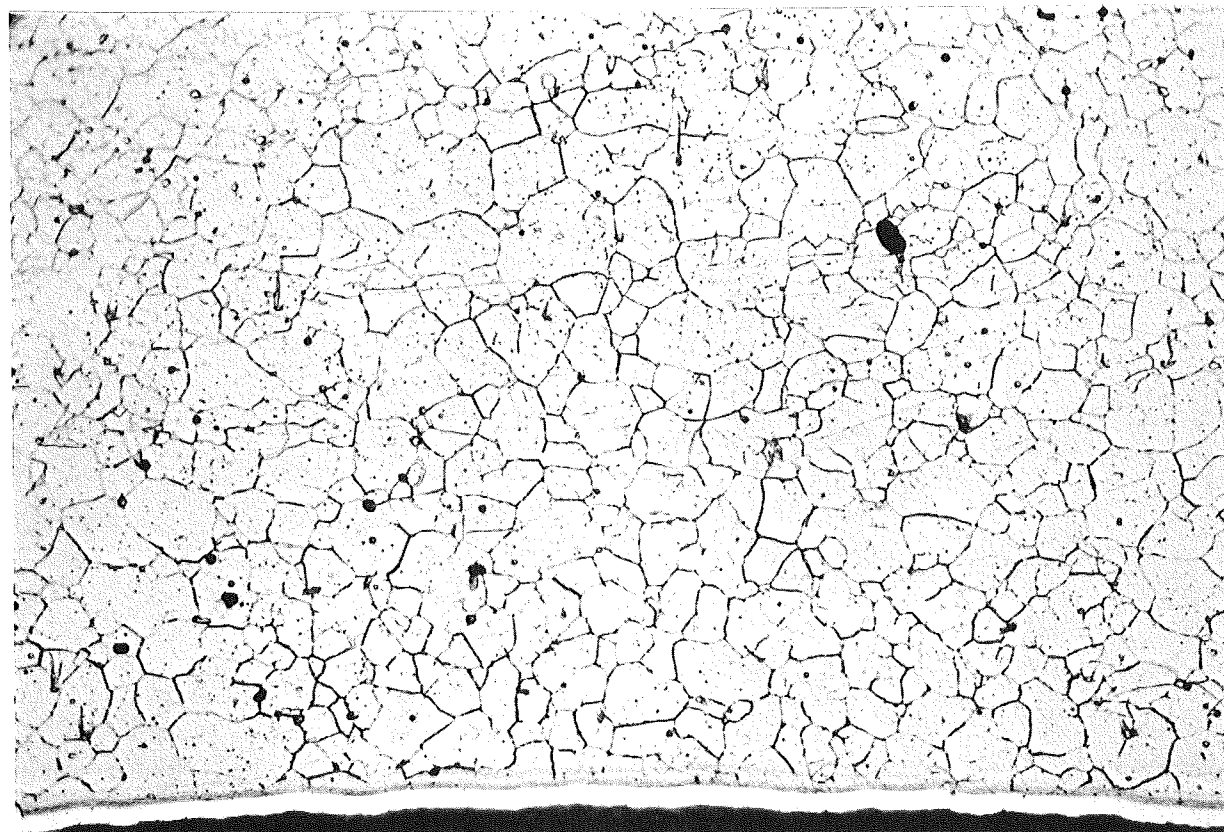
A n h a n g 4

Metallografie

zu Stab G1



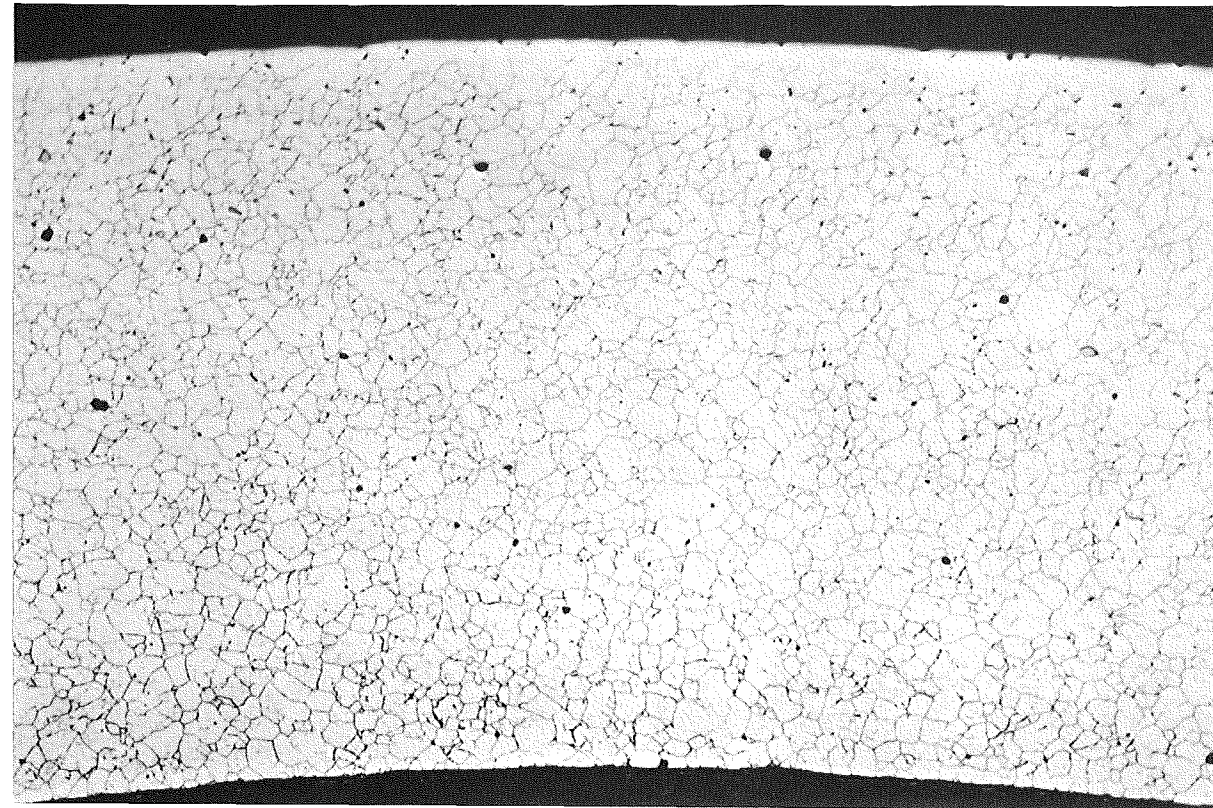
100 μm



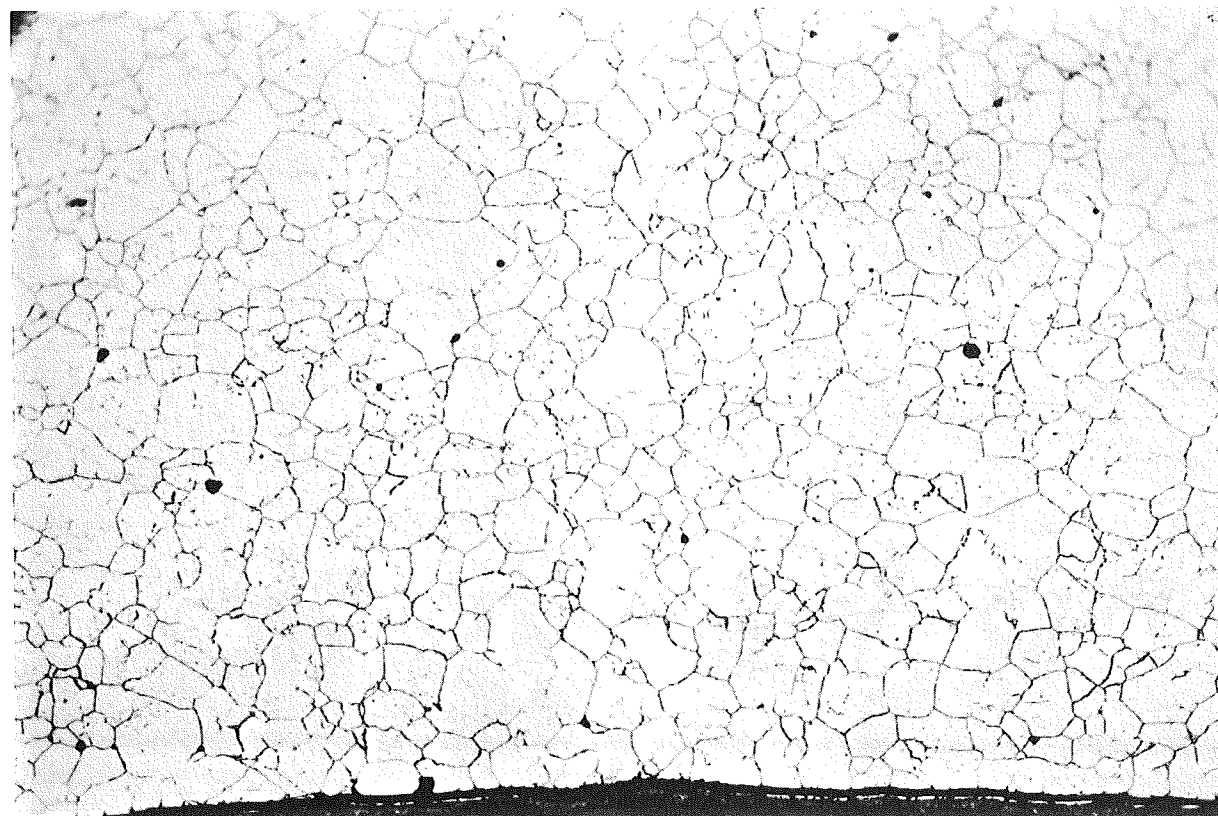
50 μm

zu Stab G 1

A 4



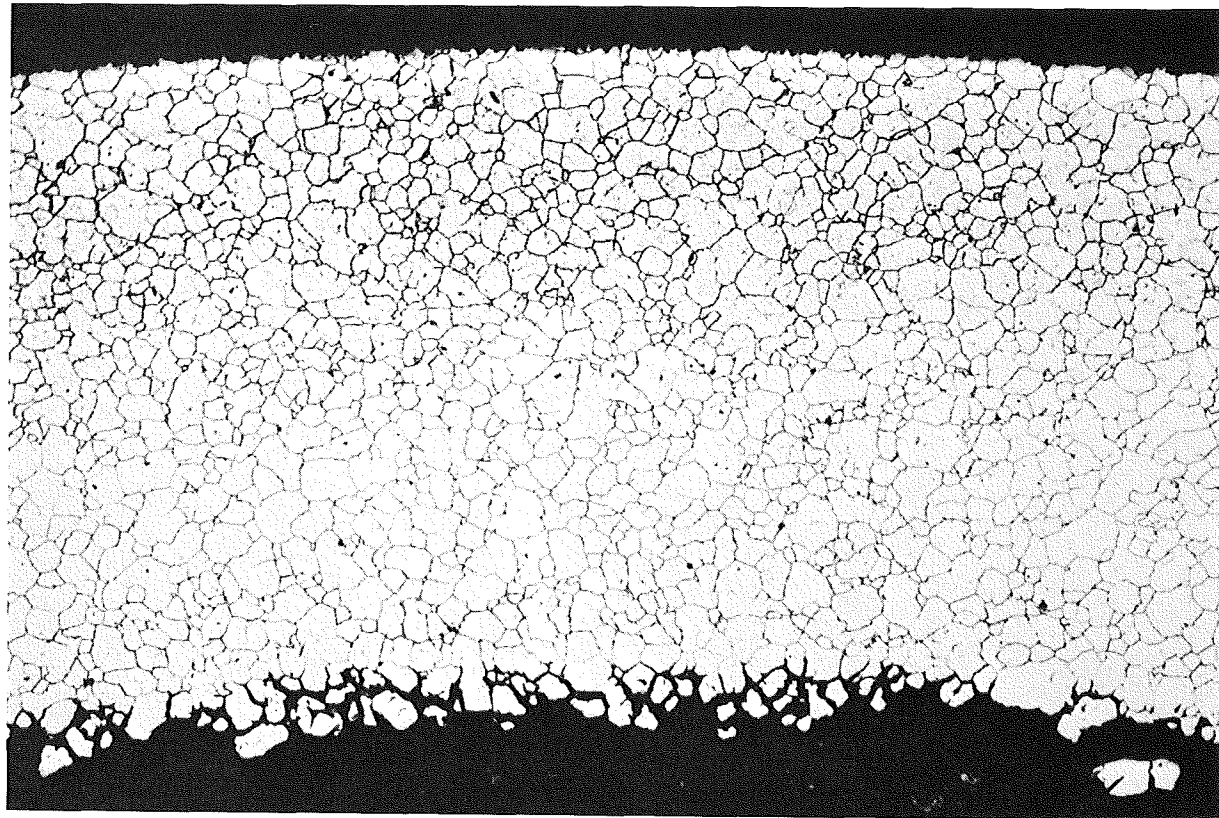
100 μm



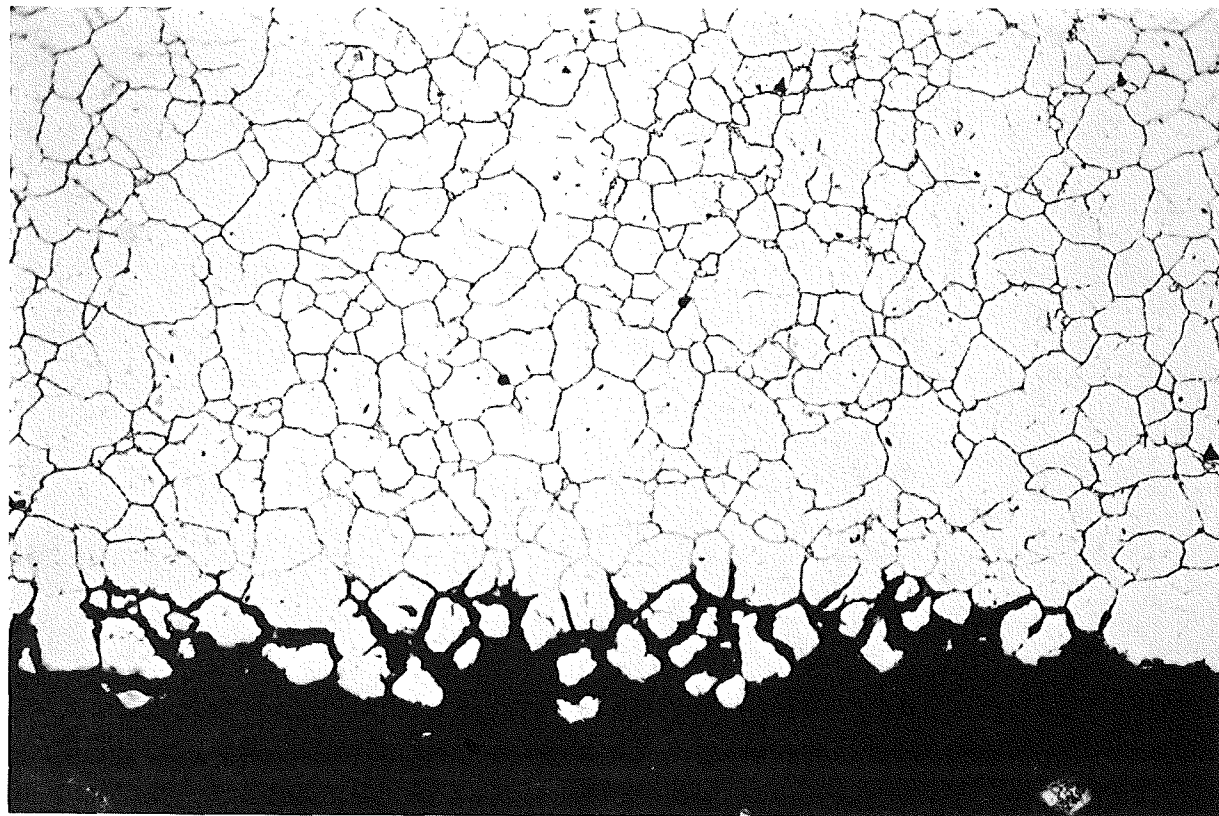
50 μm

zu Stab G1

A 5



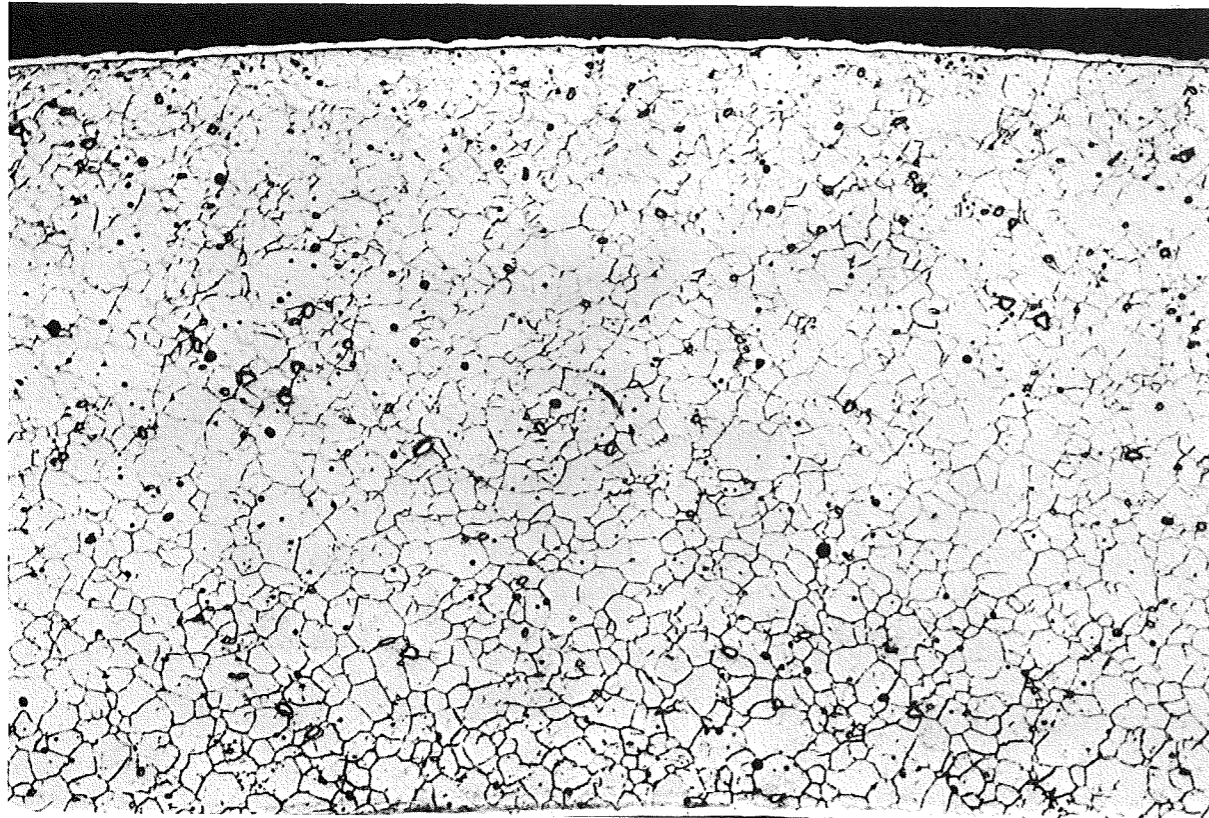
100 μm



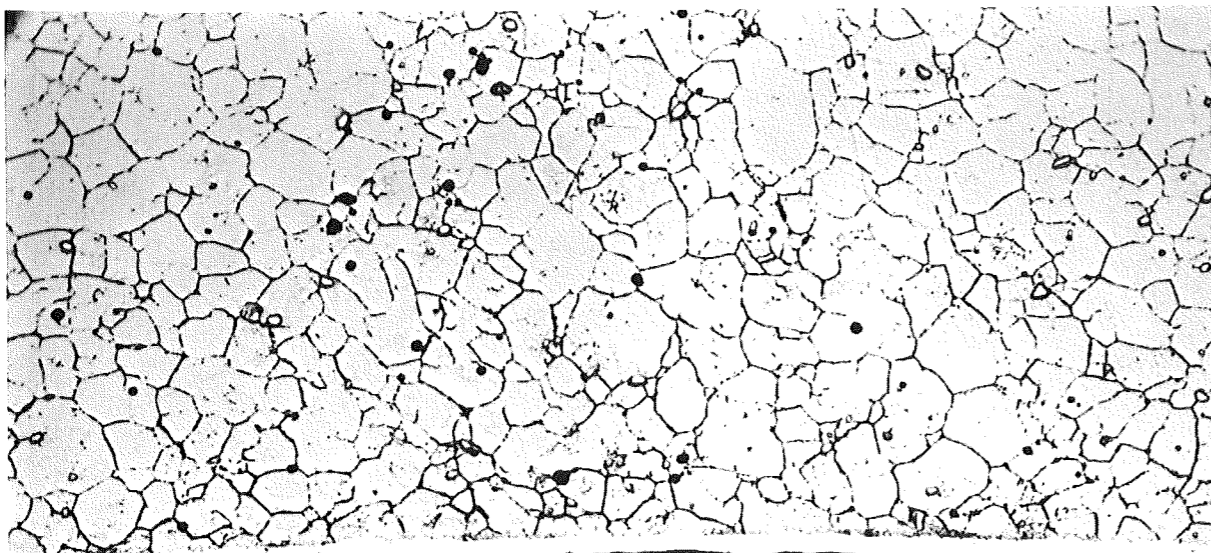
50 μm

zu Stab G 2

A 3



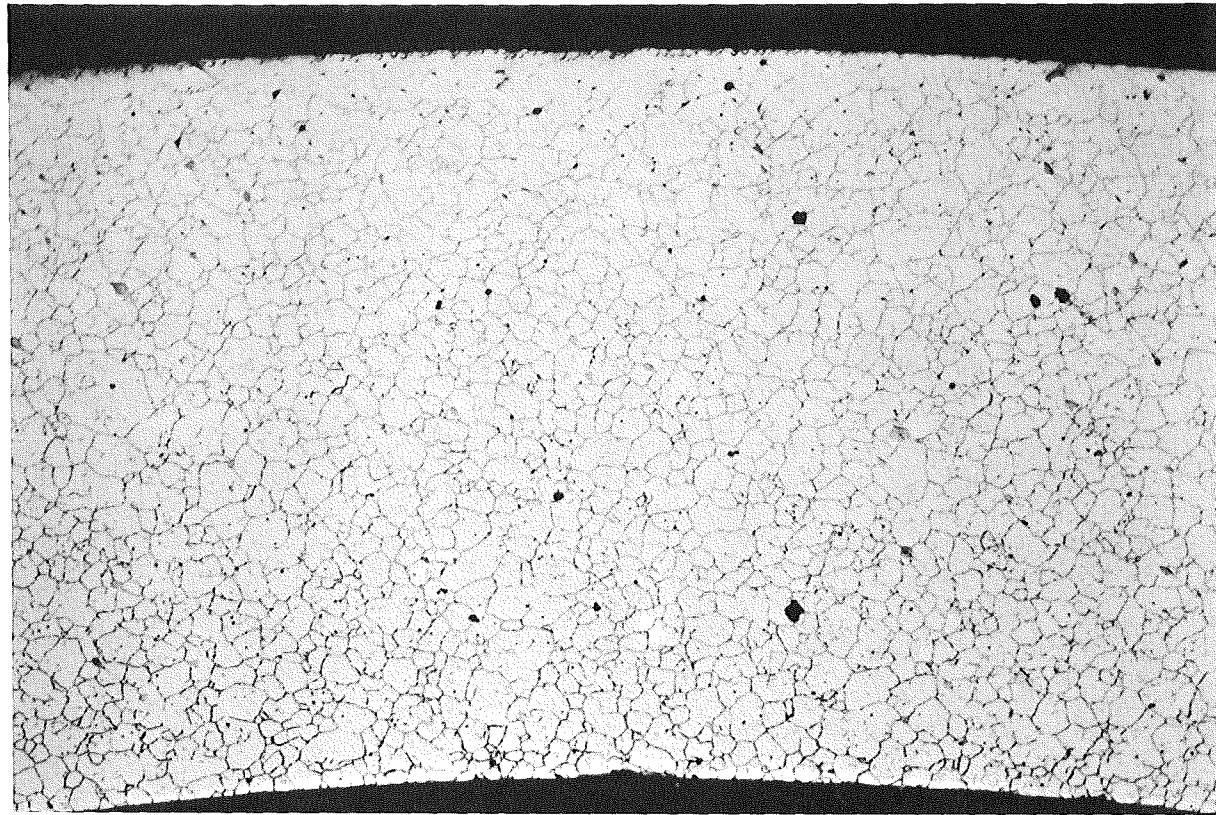
100 μm



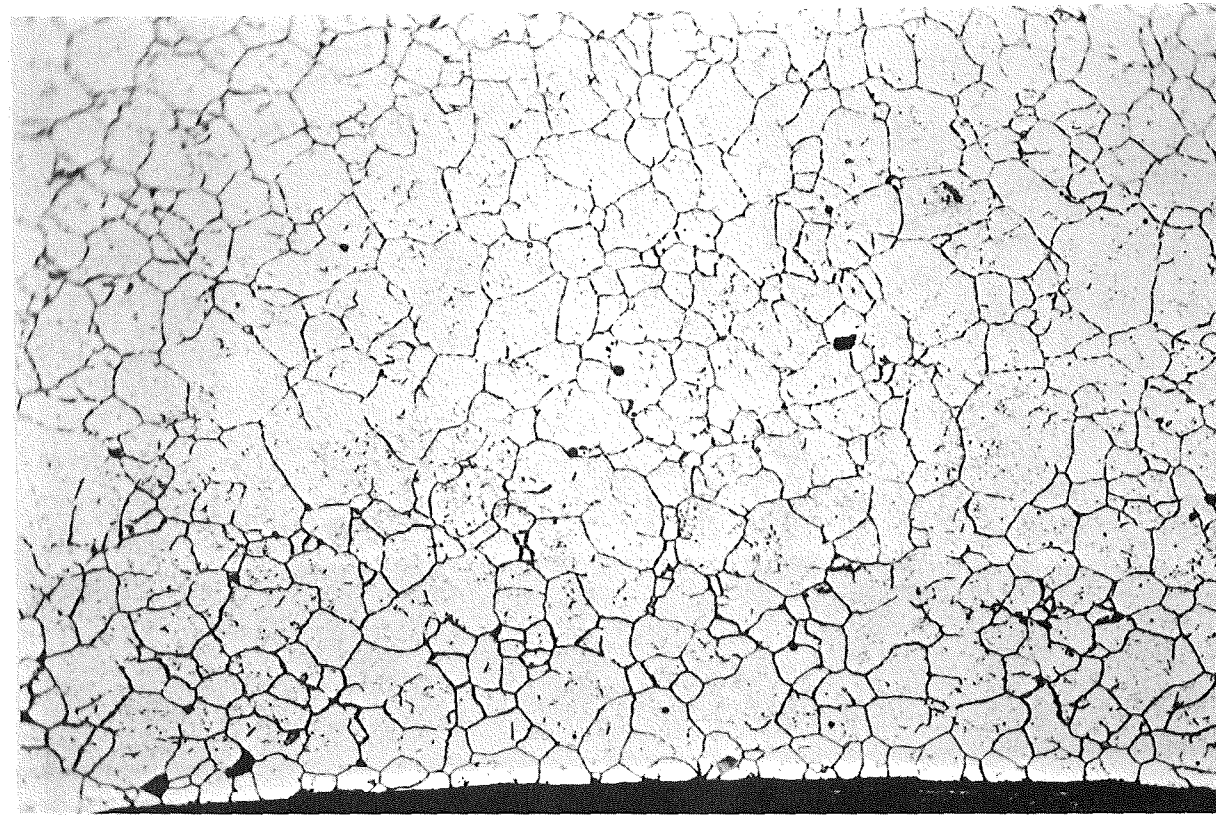
50 μm

zu Stab G 2

A 5

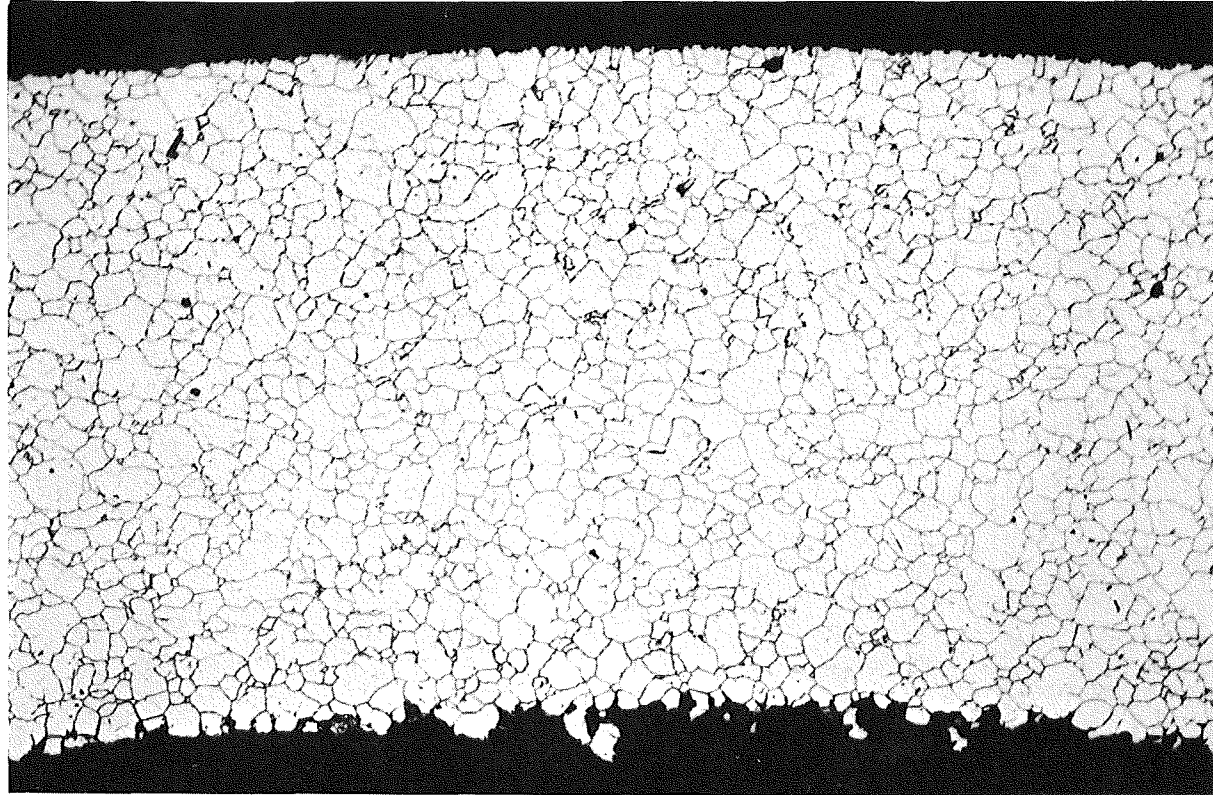


100 μm

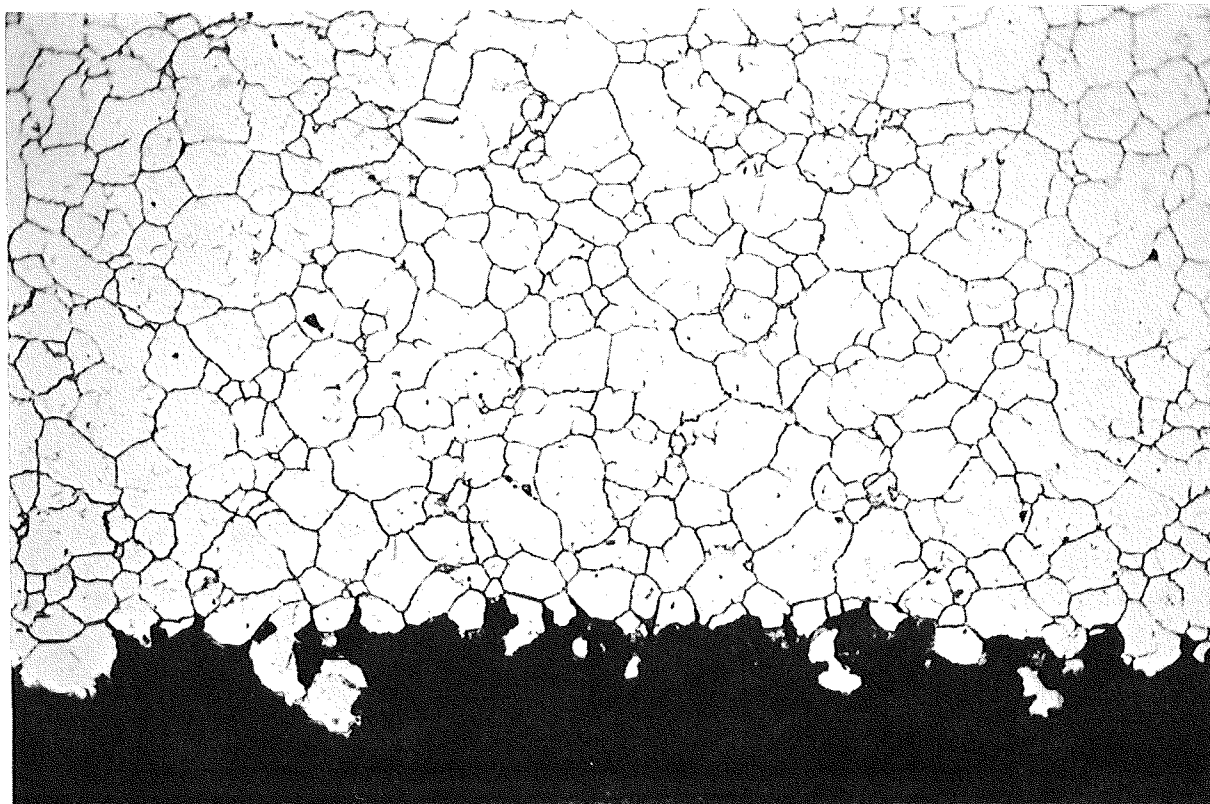


50 μm

zu Stab G 2 A 6

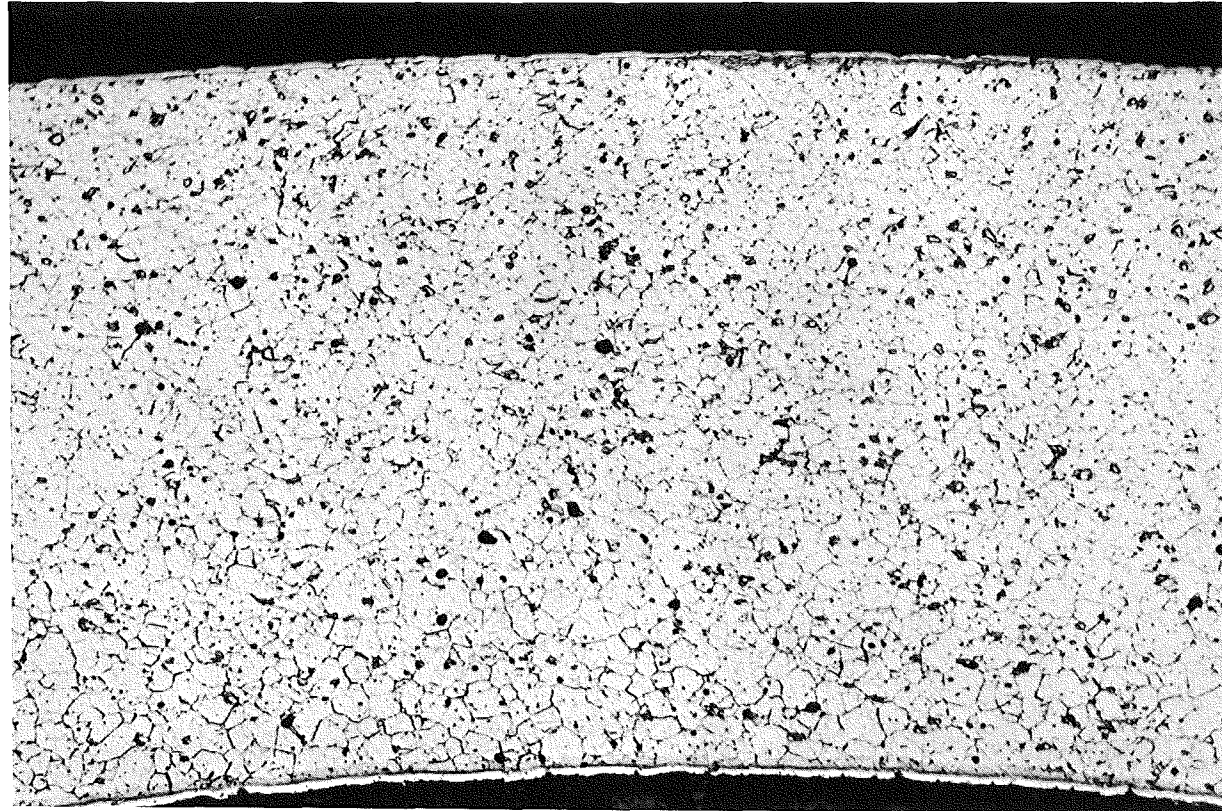


100 μm

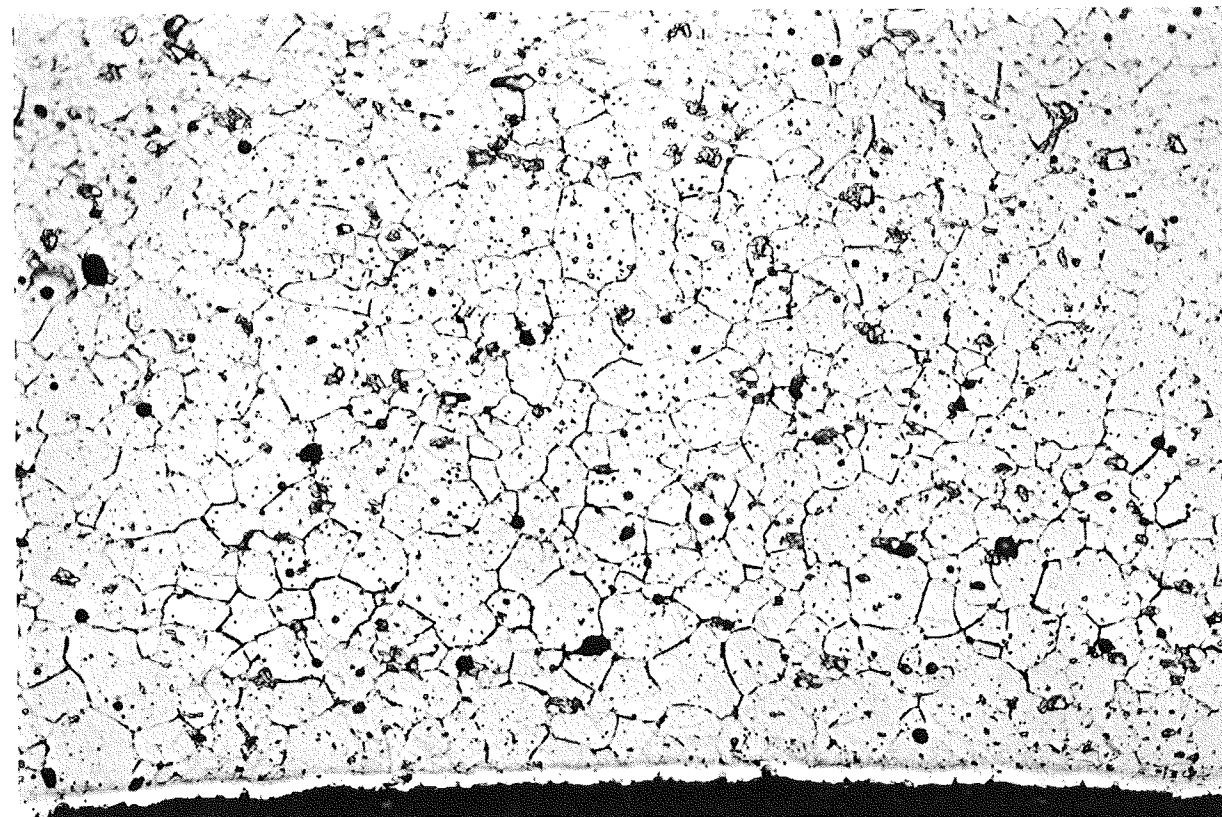


50 μm

zu Stab G 3 A 2



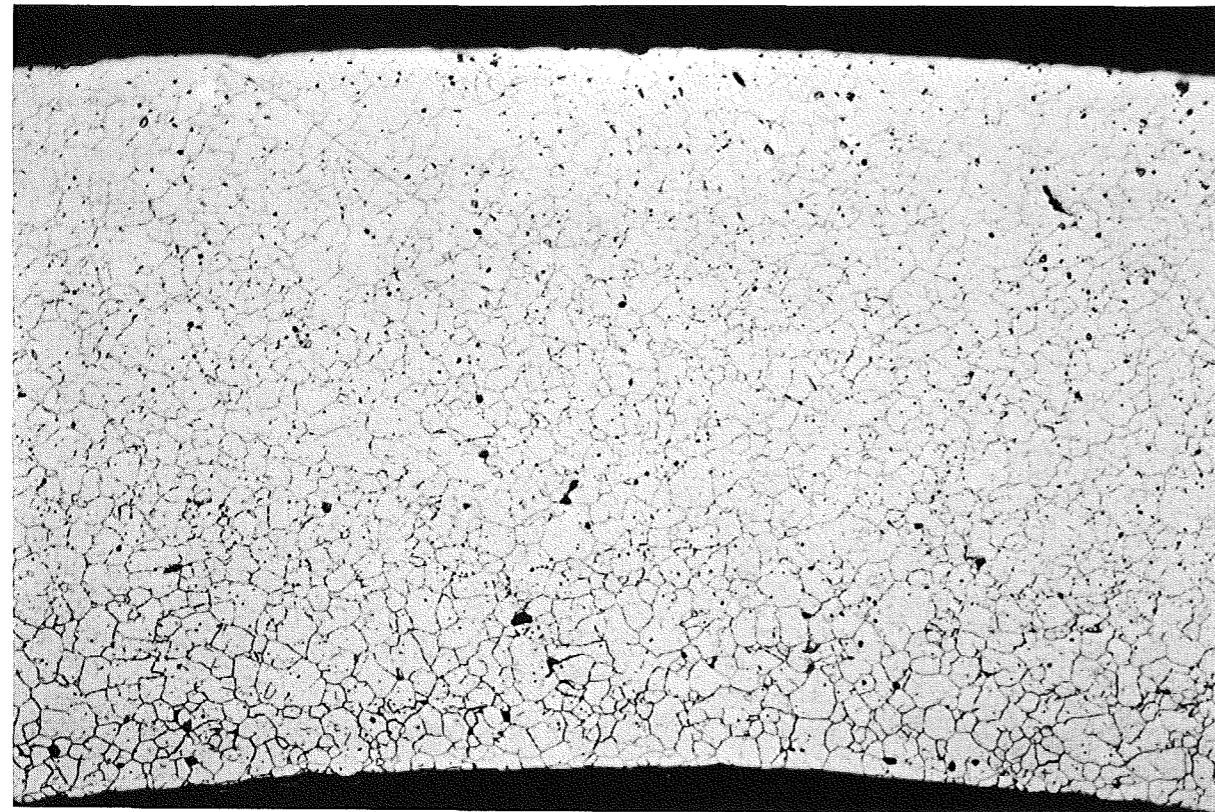
100 μm



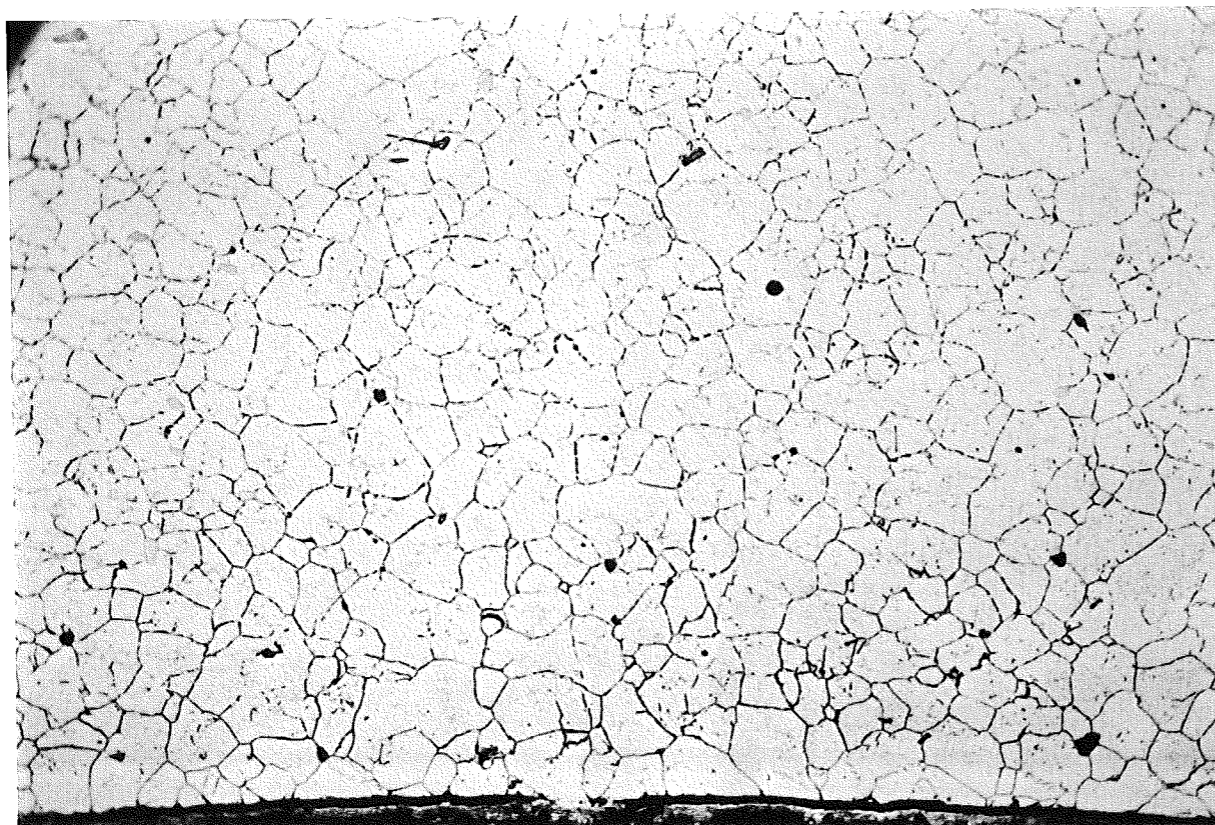
50 μm

zu Stab G 3

A 5

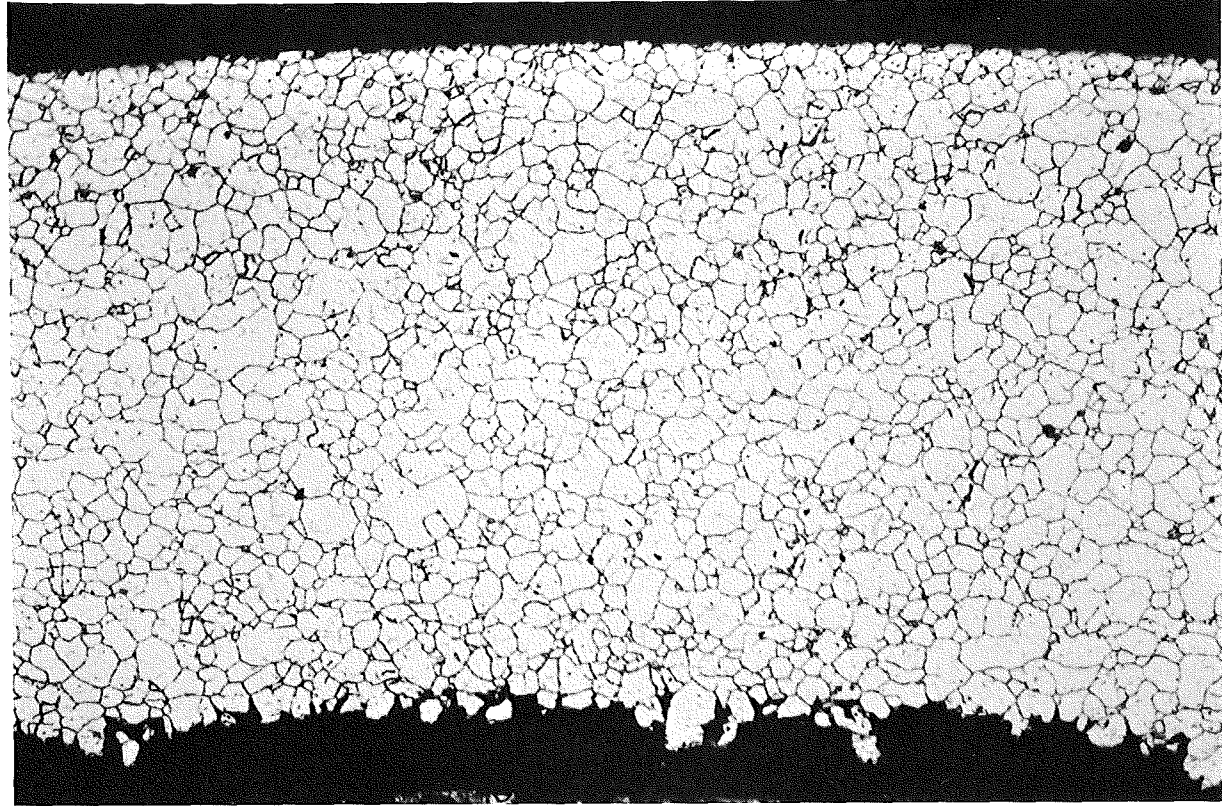


100 μm

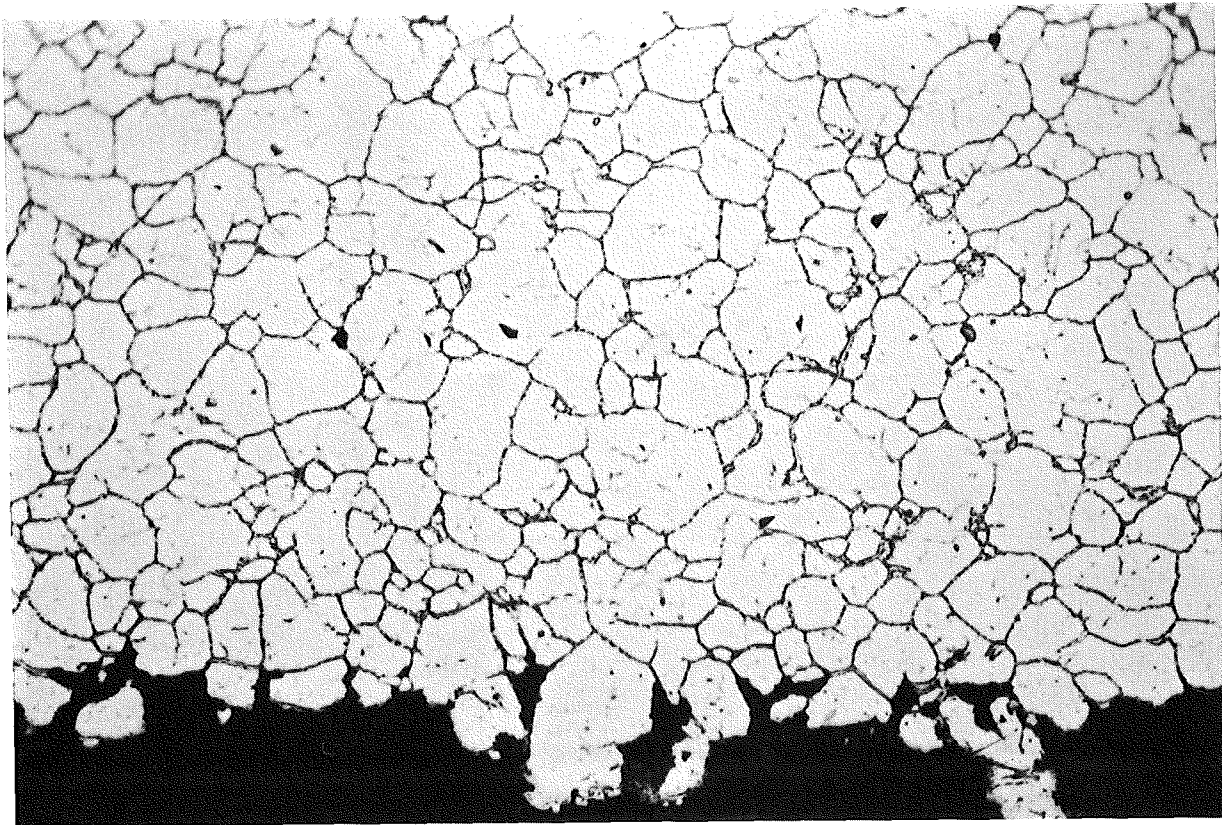


50 μm

zu Stab G 3 A 6



100 μm



50 μm