

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

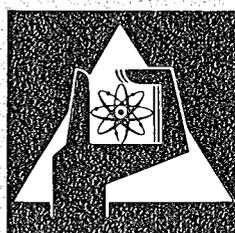
Juli 1974

KFK 1919

Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung
des Mischkarbid-Kurzzeit-Bestrahlungsexperimentes
Loop-Versuchsgruppe 4a

P. Weimar, H. Fiedler



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

KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 1919

Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung des Mischkarbid-
Kurzzeit-Bestrahlungsexperimentes Loop-Versuchsgruppe 4a

P. Weimar
H. Fiedler⁺⁾

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

⁺⁾ delegiert von KWU

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

Der in dem vorliegenden Bericht dargestellte Bestrahlungsversuch basiert auf der Zusammenarbeit mehrerer Arbeitsgruppen im Kernforschungszentrum Karlsruhe und der Industrie. Die Spezifikation wurde vom IMF erstellt, an der Herstellung des Brennstoffes, der Tabletten und der Prüflinge waren die Firmen ALKEM, AEG und das Transurane-Institut beteiligt. Die vielfältige Mühe und Sorgfalt aller Beteiligten sei ausdrücklich anerkannt. Die Autoren danken an dieser Stelle weiterhin allen, die unmittelbar zur Abfassung der Dokumentation beitrugen, insbesondere Herrn F. Bauer für die Ausarbeitung der Diagramme und Abbildungen und Frau B. Hauth für die Reinschrift des Manuskriptes sowie die redaktionelle Hilfe.

Juni 1974

P. Weimar, H. Fiedler

K U R Z F A S S U N G

Im Rahmen der Mischkarbidbestrahlungen des Projektes Schneller Brüter stellt die Versuchsgruppe Loop-4a den ersten in der BRD durchgeführten Test dar. Durch vorliegendes Experiment sollte mittels einer Kurzzeitbestrahlungseinrichtung im Reaktor FR 2 in Karlsruhe das Anfahrverhalten des Brennstoffes in Abhängigkeit von der Breite des Gasspaltes und vom Füllgas getestet werden.

Die Bestrahlung wurde im sogenannten Helium-Loop im Zentralkanal des FR 2 durchgeführt. Es wurde jeweils ein Prüfling mit einer aktiven Brennstofflänge von 150 mm über 3 bzw. 15 Tage bestrahlt. Die gesamte Serie umfaßte acht Prüflinge.

Bei einem Pu-Gehalt von 15 Gew.-% (Rest Natur-Uran) betrug die Tabletendichte 86 % th.D. Das Hüllmaterial aus austenitischem Edelstahl (Nr. 1.4988) hatte bei einem Außendurchmesser von 10,0 mm eine Wandstärke von 0,55 mm. Die Prüflinge waren neben den üblichen an der Hülle angebrachten Meßstellen mit einem Zentral-Thermoelement versehen. Bei Stableistungen von ca. 1100 W/cm und Hüllaußentemperaturen von ca. 500 °C wurden Abbrände von ca. 0,2 % erreicht. Drei Prüflinge schmolzen im Bereich des zentralen Thermoelementes infolge einer peritektischen Reaktion zwischen Thermoelementhülle und Brennstoff zentral auf.

In der vorliegenden Dokumentation wird nach Darstellung von Aufgabe und Ziel des Experimentes, Auslegung, Spezifikation und Herstellung der Prüflinge eine detaillierte Schilderung des Bestrahlungsablaufes gegeben. Hieran anschließend werden sämtliche Ergebnisse der zerstörungsfreien und der zerstörenden Nachuntersuchung dargestellt und einer thermischen Analyse mit dem Brennstab-Rechenprogramm SATURN unterzogen.

Die α -Werte ändern sich während des Betriebes (0,5 - 1,5 W/cm² °C), wobei für industriell gefertigtes Mischkarbid kein Unterschied zwischen He- und Ar-Bindung zu erkennen ist.

A B S T R A C T

Layout, Irradiation and Post-Irradiation-Examination of the Short-Time, Mixed-Carbide-Irradiation-Experiment Loop - 4a

In the frame of irradiation experiments of mixed carbide the Loop Experiment 4a is the first test of a whole series. This experiment was conducted in a short-time-irradiation-facility in FR 2 at Karlsruhe. The starting behaviour of mixed carbide as function of gas gap width and species of bonding gas should be tested.

The irradiation was carried out in the so called Helium-Loop in the central channel of FR 2. One pin each with an active length of 150 mm was irradiated for 3 or 15 days, respectively. The whole series consisted of 8 specimen. The plutonium content was some 15 w/o (rest natural uranium) and the density of pellets was some 86 % T.D. The cladding was an austenitic steel (No. 1.4988). The O.D. of cladding was 10.0 mm with a wall thickness of 0,55 mm. Besides the thermocouples on the cladding the specimen possessed a central thermocouple . The rod power was some 1100 W/cm, the outer cladding temperature 500 °C and the burnup only some 0.2 %. 3 pins melted near the central thermocouple by an peritectic reaction between thermocouples, cladding and fuel.

In this documentation the following details are given:

- tasks and objectives
- layout
- specification and fabrication
- course of irradiation
- post irradiation examination
- thermal analysis of irradiation-data bei SATURN-code

These upon results of non-destructive and destructive post irradiation examination are represented.

The α -values are changing during irradiation (0.5 - 1.5 W/cm² °C). No difference could be found between He- or Ar-Bonding for mixed carbide prepared by an industrial process.

| Inhalt : | Seite |
|---|-------|
| 1. Einleitung | 1 |
| 2. Aufgabe und Ziel des Experimentes | 2 |
| 3. Auslegung und Spezifikation | 3 |
| 3.1 Auslegung des Versuches | 3 |
| 3.2 Auslegungsrechnungen | 6 |
| 3.3 Aufbau der Brennstäbe | 14 |
| 3.4 Brennstoffspezifikation | 14 |
| 3.5 Hüllrohrspezifikation | 18 |
| 3.6 Brennstabspezifikation | 20 |
| 4. Herstellung der Prüflinge | 23 |
| 4.1 Ausgangspulver für die Brennstoffherstellung | 23 |
| 4.2 Tablettenherstellung | 25 |
| 4.3 Brennstoffeigenschaften | 25 |
| 4.4 Prüfung des Hüllmaterials | 29 |
| 4.5 Stabherstellung | 29 |
| 4.6 Stabprüfung | 30 |
| 5. Bestrahlungseinrichtung | 30 |
| 5.1 Versuchseinrichtung für Kurzzeitbestrahlungen | 30 |
| 5.2 Bestrahlung im FR 2 | 33 |
| 6. Ablauf der Bestrahlung | 33 |
| 6.1 Reaktorzyklen und Neutronenfluß | 33 |
| 6.2 Temperatur und Stabileistung | 34 |
| 7. Zerstörungsfreie Nachuntersuchung | 42 |
| 7.1 Äußere Vermessung | 42 |
| 7.2 Durchleuchtung | 46 |
| 7.3 Gamma-Profile und Gamma-Spektren | 47 |

| | Seite |
|--|---|
| 8. Zerstörende Nachuntersuchung | 48 |
| 8.1 Spaltgasbestimmung | 48 |
| 8.2 Keramografie | 49 |
| 8.3 Untersuchungen mit der Mikrosonde | 50 |
| 9. Dokumentation der zerstörungsfreien und zerstörenden Nachuntersuchung | 53 |
| 10. Thermische Analyse mit SATURN | 57 |
| 10.1 Rechenausgangsdaten | 57 |
| 10.2 Durchführung der Rechnungen | 57 |
| 10.3 Allgemeines Verhalten der Prüflinge | 70 |
| 10.4 Quantitative Auswertung | 71 |
| 11. Schlußfolgerungen | 72 |
| Literatur | 74 |
| Anhang I | Dokumentation der zerstörungsfreien und zerstörenden Nachuntersuchung |
| Anhang II | Prüfzeugnisse und Stabbegleitkarten |

1. Einleitung

Im Mittelpunkt des PSB-Entwicklungsprogrammes für einen Hochleistungsbrennstoff für den Schnellen Brüter steht Urkarbid als möglicher Spaltstoff. Angestrebtes Ziel ist ein hoher Abbrand bei hoher Stableistung. Es wurden daher Bestrahlungsversuche in mehreren Reaktoren (FR 2, DFR, BR 2) konzipiert /1,2/.

Die Versuche sollten sowohl das Langzeit- als auch das Anfahrverhalten des Urkarbides aufzeigen. Im vorliegenden Fall sollte im FR 2-Zentral-Loop mittels einer Vorrichtung /3/, die es erlaubt, den Prüfling bei laufendem Reaktor ein, aus und auf neue Höhenposition zu fahren, das Anfahrverhalten getestet werden. Die Versuchsgruppe umfaßt 8 Prüflinge mit zentralen Thermoelementen, mit verschiedenen großen Radialspalten zwischen Hüllrohr und Karbidpellet. Füllgas zwischen Hülle und Pellet war Argon bzw. Helium. Der Karbidbrennstoff ist identisch mit dem in Versuchsgruppe 6 verwendeten Material: U/Pu-Monokarbid mit max. 25 Gew.-% M_2C_3 , Anreicherung 15 Gew.-% Pu /13/.

In diesem Bericht werden alle Details über die 8 Prüflinge dieser Versuchsgruppe angegeben, wie Aufgabenstellung, Auslegung, Spezifikation, Herstellung der Prüflinge, Bestrahlungsablauf, zerstörungsfreie und zerstörende Nachuntersuchung sowie die Nachrechnung mit dem Brennstab-Rechenprogramm SATURN. Die Zusammenstellung basiert auf einer Vielzahl von internen Niederschriften und persönlichen Mitteilungen. In der folgenden Übersicht ist der Zeitablauf des Experimentes und die für die einzelnen Schritte verantwortlichen Stellen und Personen angegeben.

| Zeitraum | T e i l a r b e i t | Institution/Hauptbeteil. |
|-------------------|---|---|
| 1969/70 | Vorüberlegungen und Versuchsauslegung | TU-I; Richter AEG; v. Jahn, Meisner IMF/PSB; Kummerer, Gerken |
| | Bestrahlungskapseln | IRE; Deckers, Piel, Reiser |
| 1970 | Spezifikationen | AEG; v. Jahn IMF; Kummerer |
| 1970 | Herstellung der Prüflinge | TU-I; Richter Fa. ALKEM |
| 1970/71 und 73 | Organisation der Bestrahlung und Betreuung | IMF; Freund PSB; Gerken |
| 1970/71 und 73 | Bestrahlung im FR 2 | Abt. Reaktorbetrieb FR 2 |
| 1973 | Organisation der Nachuntersuchung und Betreuung | IMF; Weimar |
| 1971/72 und 73 | Zerstörungsfreie Nachuntersuchung | RB/Z; Scheeder, Enderlein |
| 1973 | Keramografie | RB/Z; Pejsa |
| 1973 | Zusammenfassung und Dokumentation der Ergebnisse | KWU; Fiedler IMF; Weimar |

2. Aufgabe und Ziel des Experimentes

In der Loop-Versuchsgruppe 4a kamen acht Kurzbronnstäbe mit (U,Pu)C-Brennstoff und Edeldahlhülle zum Einsatz. Die Prüflinge besaßen zentrale Thermoelmente und sollten Aufschluß über das Betriebsverhalten von Karbidstäben beim Anfahren und während der ersten Abbrandphase liefern. Die detaillierte Aufgabenstellung umfaßte im wesentlichen folgende Ziele /1/:

- Quantitative Werte der Zentraltemperatur in einem Karbidbrennstab beim Anfahren und während der ersten Einsatzphase.

- Temperatursprung im Spalt zwischen Brennstoff und Hülle. Hierbei soll insbesondere die Abhängigkeit der Wärmeübergangszahl von der Art des Füllgases (Helium oder Argon) und der Spaltbreite ermittelt werden.
- Strukturveränderungen im Brennstoff beim Anfahren. Hierbei soll die Änderung der Spaltbreite vom Anfangszustand bis zum Einlaufen in einen stationären Zustand (konstante Zentraltemperatur) ermittelt werden. Daneben interessieren die Rißbildung in den Tabletten sowie etwaige Porositätsänderungen.
- Zuordnung von Struktur und Temperatur im Brennstoff.
- Brennstoffverhalten beim zyklischen Lastwechsel. Hierbei interessieren insbesondere das Auftreten von Mehrfachsprüngen im Brennstoff, das Rißverhalten, der Verlauf der Zentraltemperatur sowie das radiale Schwellen des Brennstoffes.

3. Auslegung und Spezifikation

3.1 Auslegung des Versuches

Im folgenden sind die Festlegungen und Auslegungsrechnungen bei der Versuchsvorbereitung zusammengefaßt. Sie bildeten die Basis für die Konstruktion der Brennstäbe und die Spezifikationen. Die angegebenen Daten sind /2/ entnommen, die wiederum auf die Auslegung und Spezifikationen der FR 2-Kapselversuchsgruppe 6 /1/ zurückgehen.

3.1.1 Material für Brennstoff und Hülle

Aus Gründen der zeitgerechten Verfügbarkeit wurden die gleichen Brennstofftabletten wie in der FR 2-Kapselversuchsgruppe 6 verwendet, womit die Pu-Anreicherung vorgegeben ist zu $\text{Pu}/\text{U}+\text{Pu} = 15 \text{ Gew.-%}$. Der Urananteil besteht aus Natururan. Die Verunreinigungen im Mischkarbid mußten relativ hoch toleriert werden. Das zur Verwendung kommende Material ("Produkt I des TU-Institutes") wurde unter N_2 -Atmosphäre

hergestellt, weswegen auch der Sauerstoff- und Stickstoffgehalt zusammen mit ca. 1200 ppm angesetzt wurde. Die Hüllrohre bestehen aus Edelstahl, Werkstoff-Nr. 1.4988. Die Rohre sind von Standard-Qualität der Abmessungen 10,0 x 0,55 mm.

3.1.2 Radialer Spalt und Gasbindung

Der radiale Spalt zwischen Brennstoff und Hülle beträgt 25, 40, 125 oder 300 μ m. Bei den vorgesehenen 8 Prüflingen führt das zu den in Tabelle 1 angegebenen geometrischen Auslegungsdaten.

Tabelle 1: Auslegungsdaten

| Prüfling | Hüllinnen- durchmesser (mm) | Radialspalt (μ m) | Tabletten- durchmesser (mm) | Gasbindung |
|----------|-----------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|------------|
| L4-1 | 8,9 | 25 | 8,85 | He |
| L4-2 | 8,9 | 125 | 8,65 | He |
| L4-3 | 8,9 | 40 | 8,82 | Ar |
| L4-4 | 8,9 | 300 | 8,30 | He |
| L4-5 | 8,9 | 125 | 8,65 | He |
| L4-6 | 8,9 | 125 | 8,65 | Ar |
| L4-7 | 8,9 | 125 | 8,65 | He |
| L4-8 | 8,9 | 300 | 8,30 | He |

Als Füllgas für den Spalt ist wechselweise Helium und Argon vorgesehen, entsprechend der in Tabelle 1 angegebenen Zuordnung. Ursprünglich wurden auch die beiden Prüflinge L4-4 und L4-8 mit einer radialen Spaltweite von 125 μ m und Ar-Bindung gefertigt. Wegen Schweißnahtfehler am oberen Endstopfen wurden die Stäbe jedoch nicht fertiggestellt. Nachdem die ersten Ergebnisse aus den Bestrahlungen der Prüflinge L4-1 bis L4-3 und L4-5 bis L4-7 vorlagen, entschloß man sich, in den beiden Stäben L4-4 und L4-8 die Spaltweite zu vergrößern und die Argon-Bindung durch Helium zu ersetzen.

3.1.3 Stableistung, Hüllwandtemperatur, Bestrahlungsdauer, Zentraltemperatur

Die maximal mögliche Stableistung ist durch den Brennstoffdurchmesser, die Brennstoffdichte, die Pu-Anreicherung und den Neutronenfluß im FR 2-Loop bestimmt. Für die hier vorliegenden Verhältnisse (8,30 - 8,85 mm Brennstoffdurchmesser, 86 % th.D. Brennstoffdichte, 15 w/o Pu-Gehalt) ergibt sich bei einem ungestörten Neutronenfluß im FR 2-Loop von 9×10^{13} n/cm²sec ein maximal möglicher Wert von ca. 1150 W/cm (siehe 3.2.2). Um hinsichtlich der Flußschwankungen während der Betriebszyklen des FR 2 und sonstiger Unsicherheiten flexibel zu bleiben, wurde der Sollwert der Stableistung auf 1100 W/cm festgelegt.

Für die Hüllrohräußentemperatur wurde ein Nennwert von 580 °C festgelegt. Dieser Nennwert bezieht sich auf die Thermoelement-Meßstelle an der Hüllwandoberfläche in der Mitte der Brennstoffsäule. Die Aufheizspanne im Kühlgas beträgt etwa 50 °C, so daß die Temperaturen am Kühlgaseingang (Prüfling oben) nur ca. 25 °C niedriger und am Kühlgasausgang (Prüfling unten) entsprechend höher sind. Dieser Temperaturwert von 580°C gilt für den stationären Betrieb bei der Nennstableistung, während beim Ein- und Ausfahren der Prüflinge der Temperaturverlauf etwa dem Verlauf der Stableistung folgen soll.

Bei der Auslegung wurden für die einzelnen Prüflinge die in Tabelle 2 angegebenen Bestrahlungszeiten vorgesehen.

Tabelle 2: Bestrahlungsdauer

| Prüfling | Bestrahlungsdauer (Tage) | Zyklen |
|----------|--------------------------|--------|
| L4-1 | 3 | nein |
| L4-2 | 3 | nein |
| L4-3 | 3 | nein |
| L4-4 | 3 | nein |
| L4-5 | 15 | nein |
| L4-6 | 15 | nein |
| L4-7 | 15 | 10 |
| L4-8 | 15 | 10 |

Für die zyklischen Bestrahlungen waren nach dem ersten Einfahrvorgang 10 periodische Lastzyklen im Abstand von jeweils 24 Stunden vorgesehen. Anschließend sollte ein kontinuierlicher Dauerlastbetrieb von 5 Tagen folgen.

Für die Zentraltemperatur wurde aus Sicherheitsgründen als Nebenbedingung festgelegt, daß die von den zentralen Thermoelementen angezeigte Temperatur den Wert von 2100 °C nicht überschreiten soll. Sollte - z.B. in der Anfangsphase eines Versuches - diese Temperaturgrenze unterhalb der Nennstableistung von 1100 W/cm erreicht sein, dann ist der Prüfling zunächst konstant bei der entsprechend niedrigeren Stableistung zu bestrahlen. Ein kontinuierliches Nachfahren auf die Nennleistung sollte nur dann erfolgen, wenn die Temperatur sehr rasch wieder abfällt und ein Erreichen der Nennleistung ohne Überschreiten der Grenztemperatur innerhalb einiger Stunden möglich erscheint.

3.2 Auslegungsrechnungen

3.2.1 Stoffdaten

Die meisten der für die Auslegungsrechnungen verwendeten Stoffdaten werden aus /1/ übernommen, um die Rechnungen auf dieselbe Basis zu stellen wie bei der FR 2-Kapselversuchsgruppe 6.

Für die Wärmeleitfähigkeit des Karbidbrennstoffes wird nach /1/ folgende empirische Beziehung verwendet:

$$K_B = (1 - p^{2/3}) C_{UC} (0,19 + 5 \cdot 10^{-5} T)$$

Darin bedeutet

- p die Porosität des Brennstoffes
- C_{UC} den Anteil an UC im Mischkarbid
- T die Temperatur in °C.

Diese Beziehung gilt für den Bereich

$$800 \text{ °C} < T < 2000 \text{ °C}$$

$$60 < C_{UC} < 100 \text{ w/o}$$

$$4,8 < C_C < 5,2 \text{ w/o}$$

wobei C_C den Gewichtsanteil an Kohlenstoff im Karbid bezeichnet.

Für die zu erwartenden Werte der Wärmeübergangszahl im Spalt werden - gestützt auf experimentelle Ergebnisse an Oxidbrennstoff /1,19/ sowie theoretische Überlegungen /20/ - die in Tabelle 3 angegebenen Werte verwendet:

Tabelle 3: Wärmeübergangszahl α_{BH} in $W/cm^2 \text{ } ^\circ C$

| Bindung \ rad. Spalt | 25 μm | 40 μm | 125 μm |
|----------------------|------------|------------|-------------|
| He | 1,0 - 2,0 | | 0,5 - 0,6 |
| Ar | | 0,3 - 0,6 | 0,2 - 0,3 |

Die Auslegungsrechnungen werden jeweils für die beiden Extremwerte durchgeführt.

Der Schmelzpunkt des (U,Pu)C-Brennstoffes wird zu $2290 \text{ } ^\circ C$ angenommen.

Thermische Ausdehnung des Brennstoffes

$$\gamma_B = 12,3 \cdot 10^{-6} / \text{ } ^\circ C$$

Wärmeleitfähigkeit der Hülle: $K_H = 0,22 \text{ W/cm } ^\circ C$ (bei $600 \text{ } ^\circ C$)

Thermische Ausdehnung der Hülle: $\gamma_H = 17,8 \cdot 10^{-6} / \text{ } ^\circ C$ (bei $600 \text{ } ^\circ C$)

E-Modul der Hülle: $E = 15,8 \cdot 10^{+3} \text{ kp/mm}^2$ (bei $600 \text{ } ^\circ C$)

3.2.2 Temperaturprofil

In den Abb. 1 bis 4 sind die errechneten Temperaturprofile für die verschiedenen Brennstofftypen als Funktion der Stableistung zusammengestellt. Dabei bedeutet:

- T_Z die Zentraltemperatur im Brennstoff (Volltabletten)
- T_{BO} die Temperatur an der Brennstoffoberfläche
- T_{Hi} die Hüllinnentemperatur
- T_{Ha} die Hüllaußentemperatur

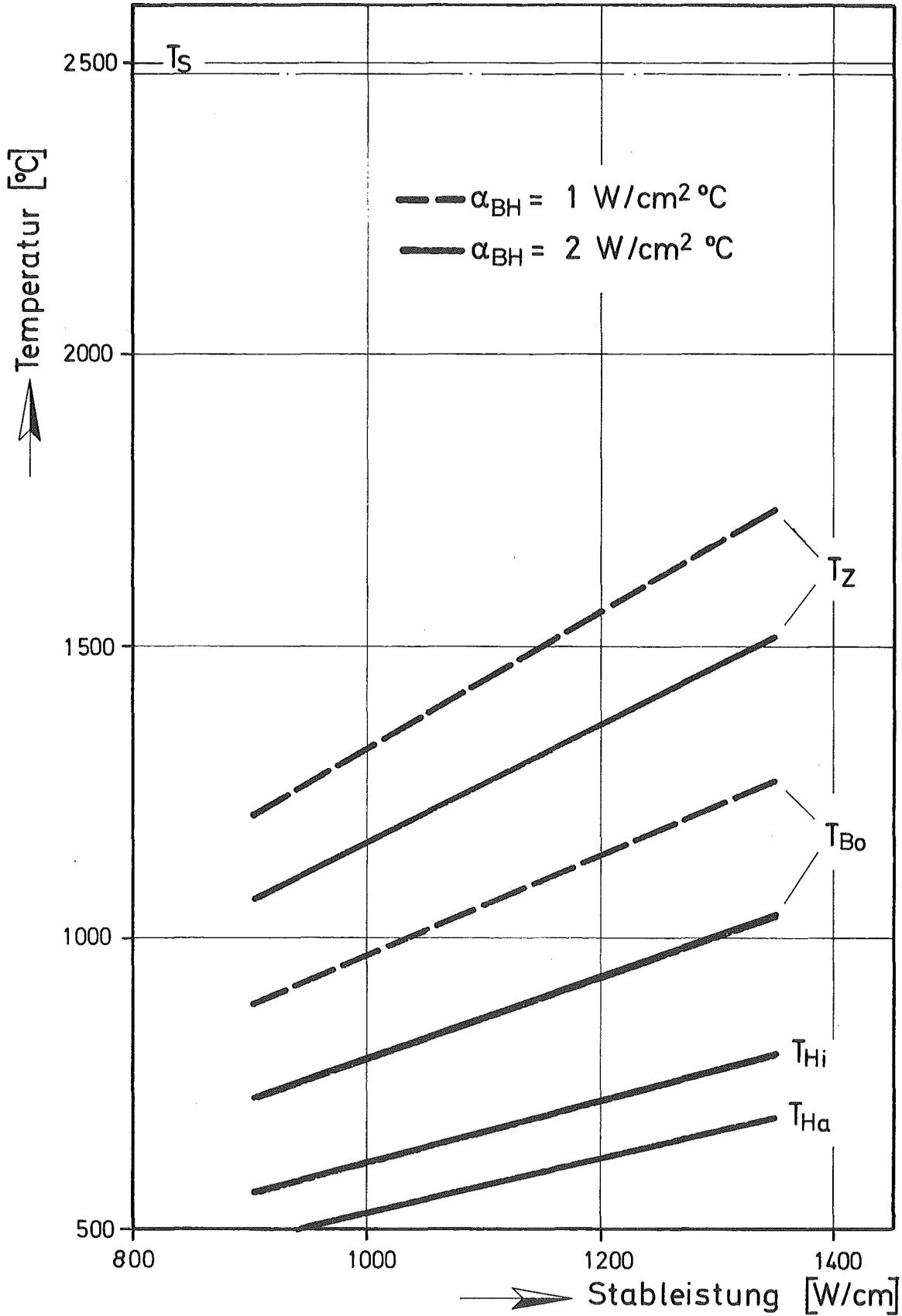


Abb.1 Temperaturprofil als Funktion der Stableistung für He - Bindung und 25 μ Radialspalt

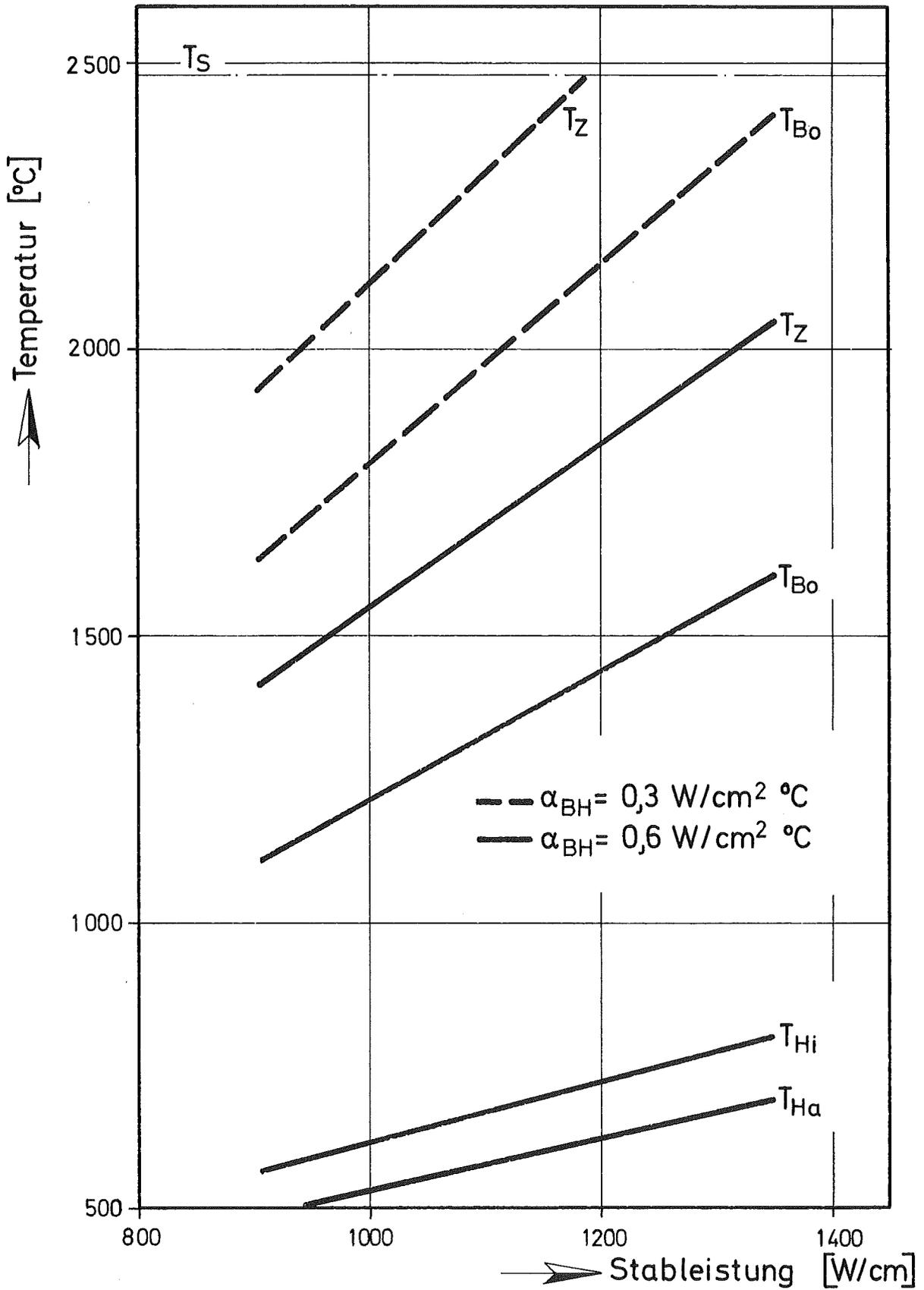


Abb.2 Temperaturprofil als Funktion der Stableistung für Ar - Bindung und 40µ Radialspalt

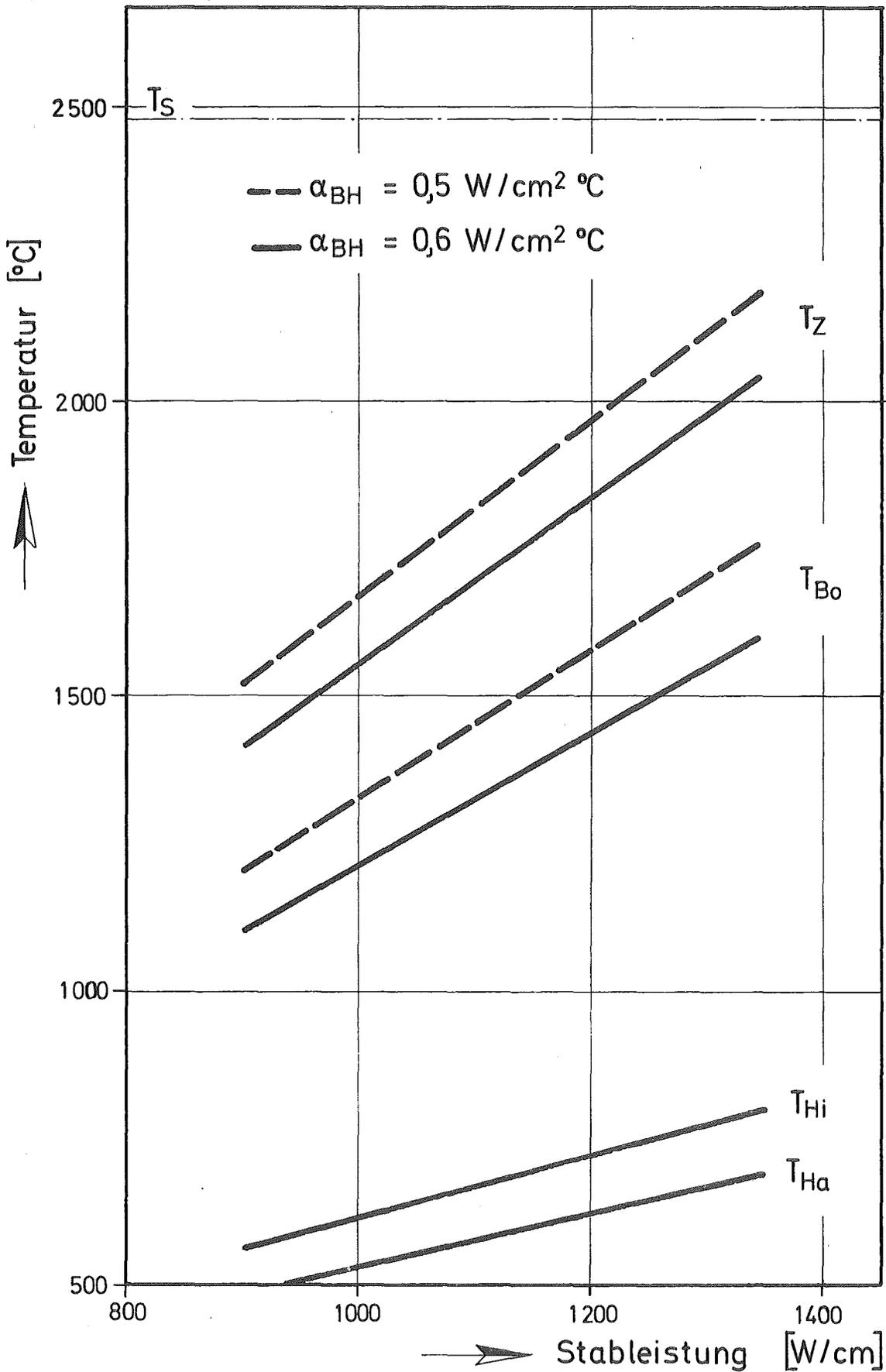


Abb. 3 Temperaturprofil als Funktion der Stableistung für He - Bindung und 125 μ Radialspalt

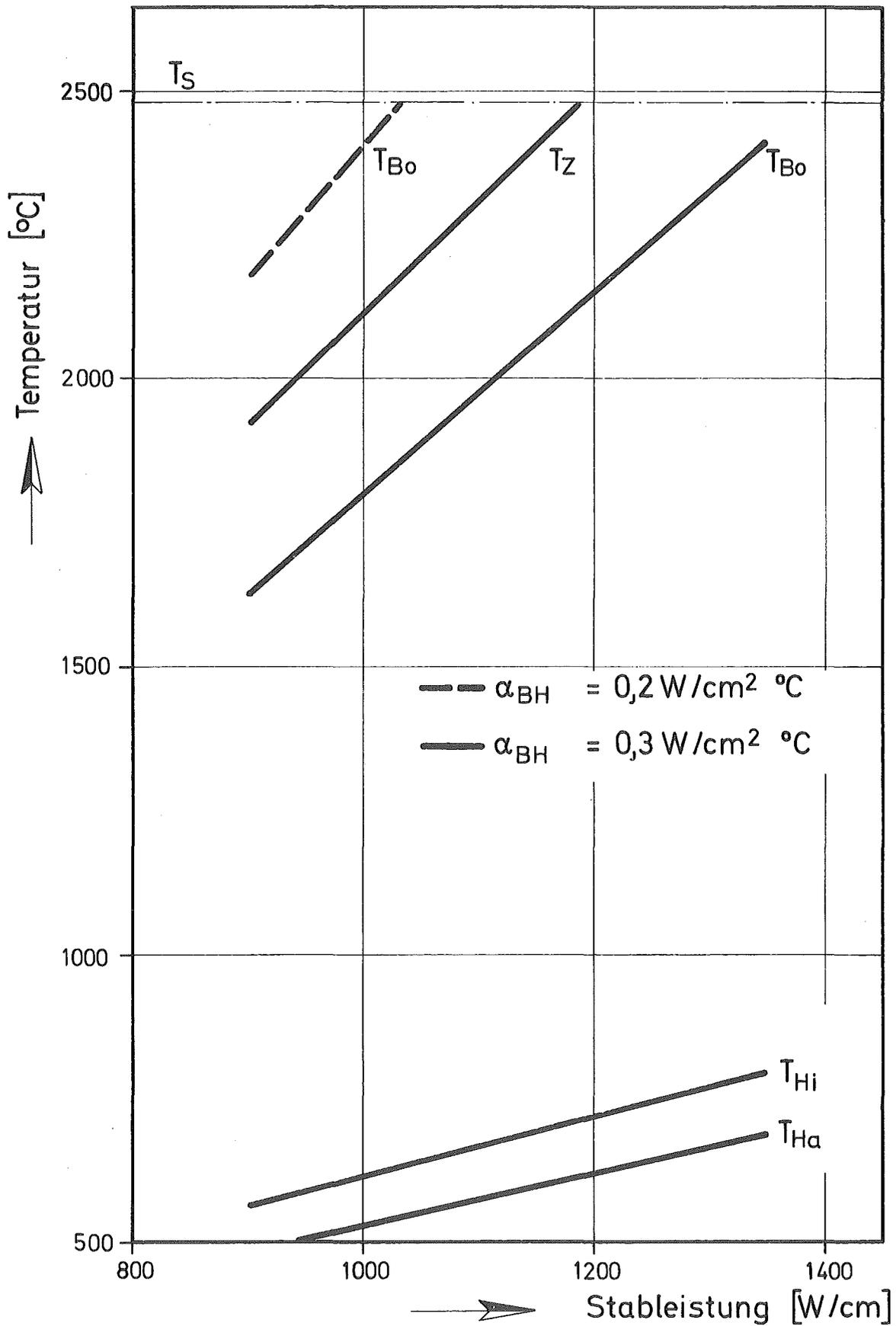


Abb. 4 Temperaturprofil als Funktion der Stableistung für Ar - Bindung und 125 μ Radialspalt

- T_S die Schmelztemperatur des Brennstoffes
- α_{BH} die Wärmeübergangszahl zwischen Brennstoff und Hülle

Die Abhängigkeit der Stableistung im FR 2 von Pu-Anreicherung und Brennstoffdurchmesser ist in Abb. 5 angegeben. Für einen maximalen thermischen Fluß von $9 \cdot 10^{13}$ n/cm² sec und die hier vorliegenden Auslegungsparameter erhält man als maximale Stableistung 1150 W/cm und eine mittlere Flußabsenkung

$$f = \frac{1}{\chi} 4\pi \int KdT = 0,685$$

Das Wärmeleitintegral beträgt somit maximal 790 W/cm. Das Verhältnis der Leistungsdichten am Rand und im Zentrum beträgt dabei 3,5. Die axiale Variation der Stableistung und der Einfluß der Zentralbohrung auf die Leistung können vernachlässigt werden. Die Anzeige des Thermoelementes liegt jedoch um 50 °C niedriger als die Zentraltemperatur im Vollkörper. Die maximalen Zentraltemperaturen bei 1100 W/cm sind in der folgenden Tabelle 4 angegeben.

Tabelle 4:

| Radialspalt (μ) | Bindung | Zentraltemperatur (°C) |
|-----------------------|---------|--------------------------|
| 25 | He | 1260 - 1450 |
| 40 | Ar | 1700 - 2310 |
| 125 | He | 1700 - 1820 |
| 125 | Ar | > 2310 |

Man sieht, daß insbesondere beim letzten Brennstabtyp die Schmelztemperatur des Brennstoffes überschritten werden könnte, wenn die Zentraltemperatur während des Einfahrens in die Bestrahlungsposition nicht beschränkt wäre.

3.2.3 Thermische Ausdehnung

Die thermische Ausdehnung ist nur für die Stäbe mit engen Spaltweiten von Interesse, da man hier ein sofortiges Schließen des Spaltes in der Anfahrphase erreichen möchte. Mit ziemlicher Sicherheit wird dies bei Ar-Bindung eintreten (L4-3), bei He-Bindung wohl erst nach einiger Betriebszeit (L4-1).

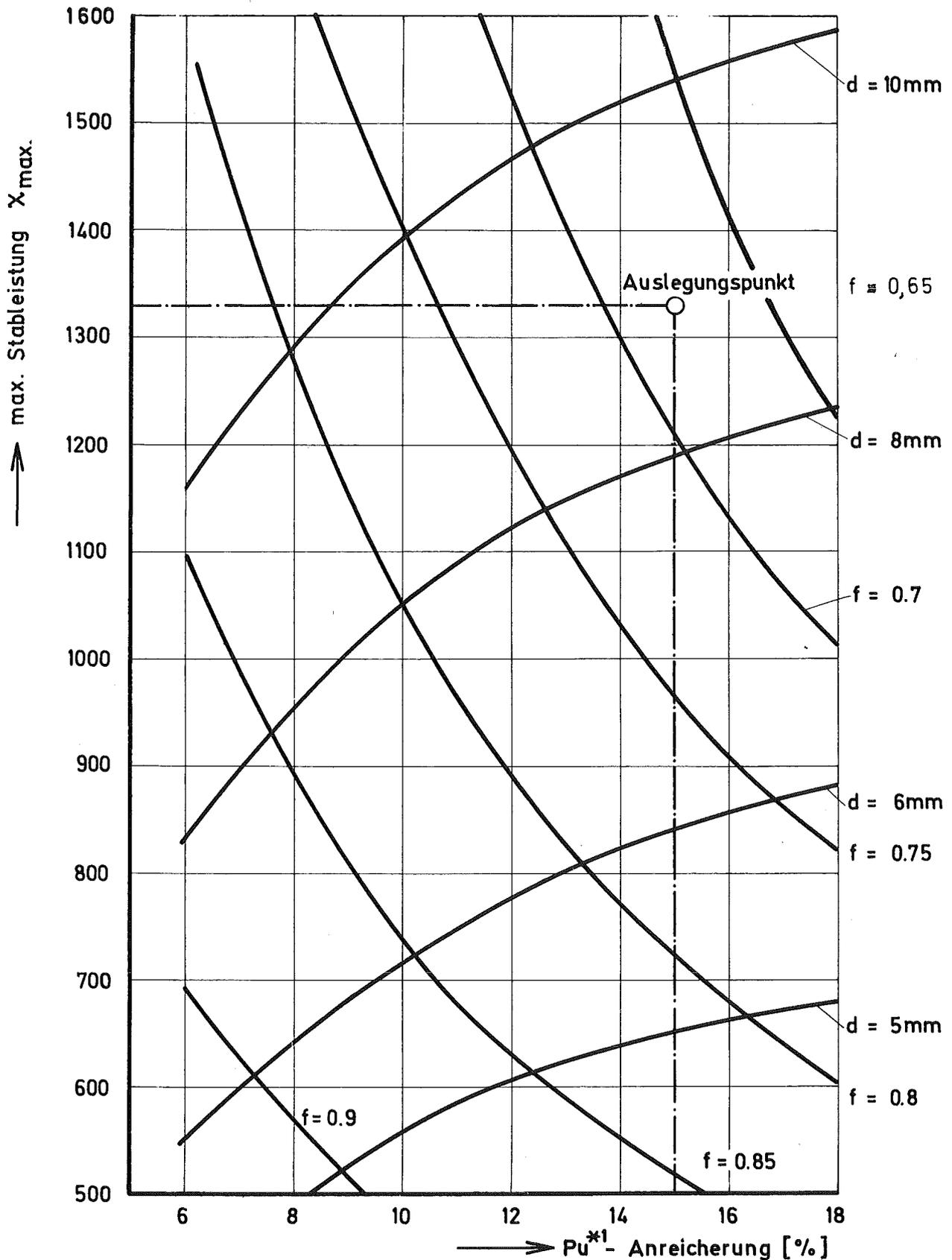


Abb. 5 Max. Stableistung im FR2-KVE, Typ 7 ($\Phi_{th} = 1 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$) in Abhängigkeit von der Pu-Anreicherung im MC-Brennstoff, für versch. Brennstoffdurchmesser, mit dem Selbstabschirmungsfaktor f als Parameter. (BD = 90% th.D., 0% Abbrand) *1) Isotopen zusammensetzung: 91% Pu-239, 8% Pu-240, 1% Pu-241 [1]

3.2.4 Beanspruchung der Hülle

Die mechanische Beanspruchung der Hülle bei den Kurzzeitversuchen der Loop-Versuchsgruppe 4a ist ungefährlich. Für die FR 2-Kapselversuchsgruppe 6 wurde der Festigkeitsnachweis unter wesentlich verschärften Bedingungen erbracht, nämlich bei höherer Hülltemperatur, höherem Spaltgasdruck und vielfacher Einsatzzeit. Eine Rechnung erübrigt sich daher für den vorliegenden Fall, zumal der Aufbau eines nennenswerten Brennstoffdruckes bei kurzen Bestrahlungszeiten sehr unwahrscheinlich ist.

3.3 Aufbau der Brennstäbe

Der Aufbau des Brennstabes geht aus der Konstruktionszeichnung in Abbildung 6 hervor. Die Brennstabumhüllung besteht aus austenitischem Edelstahl und wurde von GfK bereitgestellt. Die Rohre wurden dann bei AEG einseitig verschweißt, geprüft und an die Fa. ALKEM zur Fertigstellung der Stäbe geschickt.

Die Längenverteilung im Brennstab ist insgesamt folgende:

| | |
|------------------------|--------|
| Oberer Endstopfen | 26 mm |
| Spaltgasraum mit Feder | 12 mm |
| Brennstoff | 150 mm |
| Unterer Endstopfen | 22 mm |
| | <hr/> |
| | 210 mm |

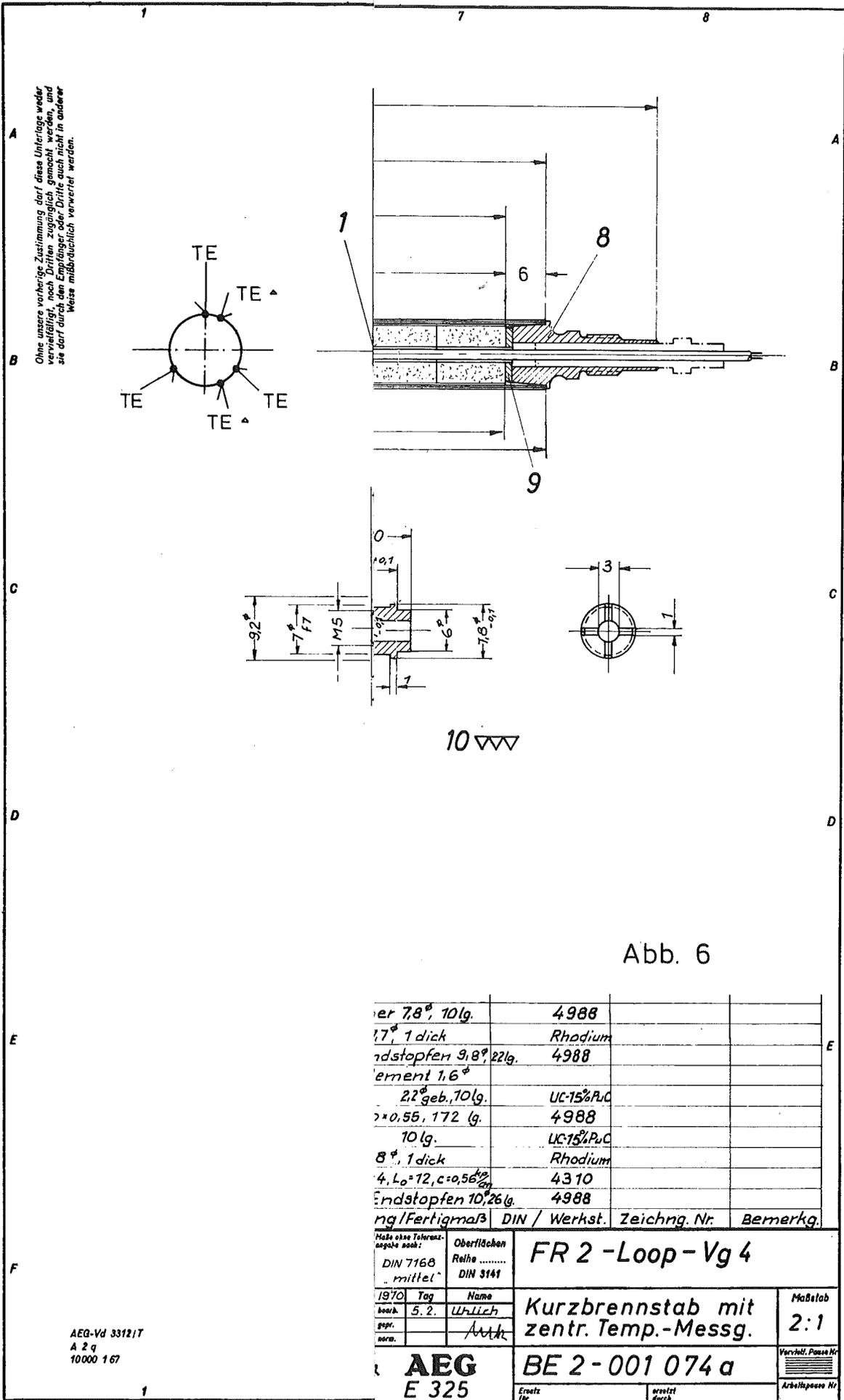
Der untere Endstopfen und der untere Teil der Tablettensäule sind zentral durchbohrt. Durch diese Bohrung wird in alle Prüflinge ein Thermoelement eingeführt zur Messung der Zentraltemperatur in der Mitte der Brennstoffsäule.

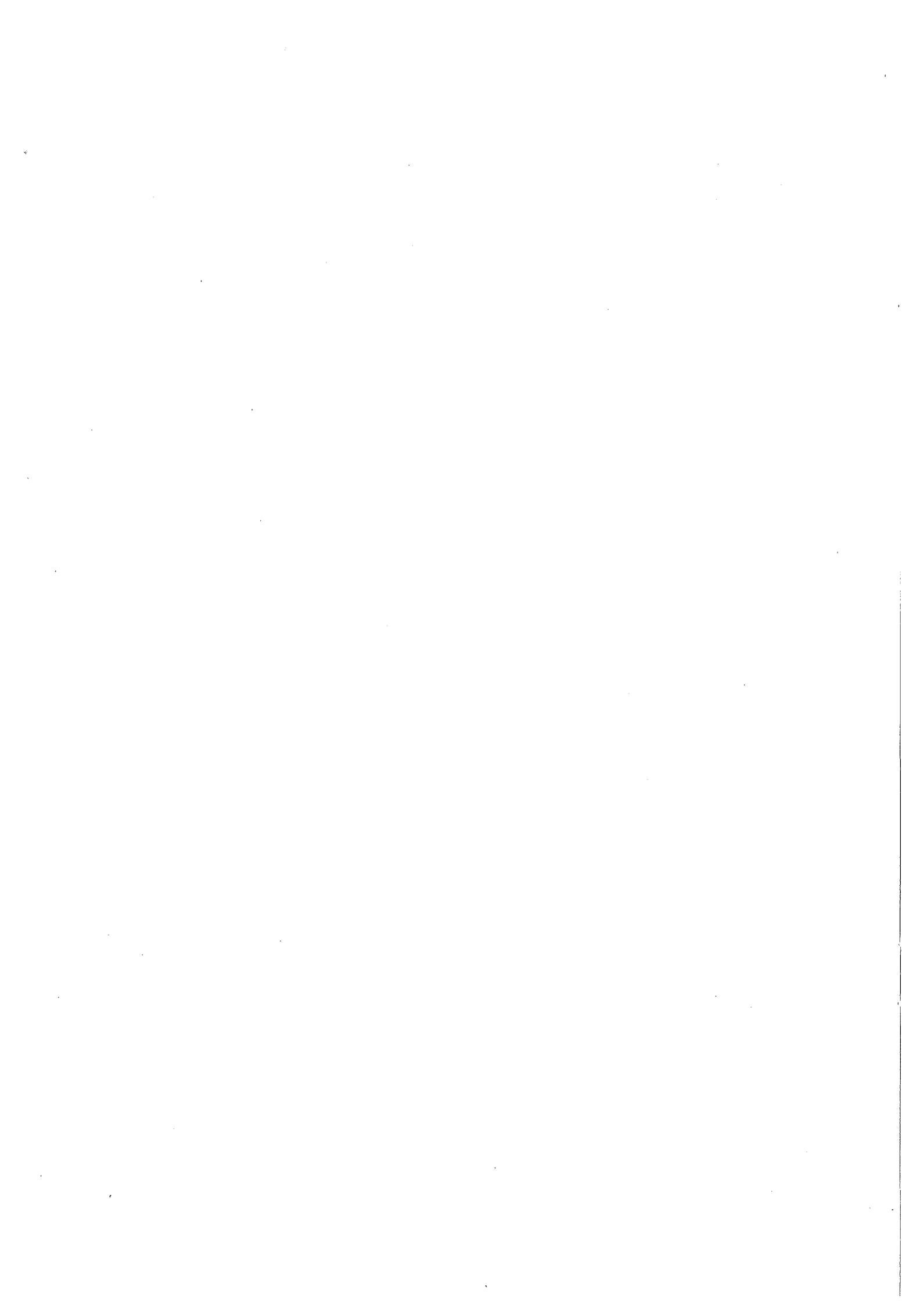
3.4 Brennstoffspezifikation

3.4.1 Chemische Zusammensetzung

Der Brennstoff besteht aus U,Pu-Monokarbid mit maximal 25 % M_2C_3 -Anteil. Die chemische Zusammensetzung des Schwermetallanteils ist gegeben durch

$$U/U+Pu = 0,150 \pm 0,005 \text{ Gewichtsanteile}$$





- Es dürfen weder freier Kohlenstoff noch U-Pu-Metall noch MC_2 -Phase nachweisbar sein.
- Der Stickstoffgehalt muß < 5000 ppm, der Sauerstoffgehalt < 8000 ppm sein. Der Nachweis erfolgt mittels Gaschromatographie.
- Der Äquivalentkohlenstoff $(C + \frac{12}{16} O + \frac{12}{14} N)$ muß im Bereich 4,75 bis 5,25 Gew.-% liegen.
- Für die metallischen Verunreinigungen insgesamt gilt ein Maximalbetrag von 2000 ppm, wobei jedes Element nur maximal 500 ppm erreichen darf.
Ausnahmen: Fe < 2000 ppm
 B < 2 ppm
- Das Boräquivalent muß unter 5 ppm liegen.
- Für den Chlor- und Fluorgehalt ist die Grenze je 20 ppm.

3.4.2 U-Pu-Homogenität

Die größten, mittels Alpha-Autoradiographie nachzuweisenden Pu-Partikel sollen kleiner als $300 \mu m$ sein.

3.4.3 Isotopenzusammensetzung

- Das Uran hat die Isotopenzusammensetzung des Natururans.
- Für die Pu-Zusammensetzung gilt:

| | | |
|--------|-----------------|-----|
| Pu-239 | $90,0 \pm 0,2$ | w/o |
| Pu-240 | $8,15 \pm 0,15$ | w/o |
| Pu-241 | $0,83 \pm 0,05$ | w/o |
| Pu-242 | $0,04 \pm 0,01$ | w/o |

3.4.4 Tablettendichte

Die Tablettendichte beträgt 86 ± 2 % th.D.

3.4.5 Tablettengeometrie

- Der Tablettendurchmesser beträgt in den 3 Varianten
 - 8,85 \pm 0,01 mm für den Stab L4-1
 - 8,82 \pm 0,01 mm für den Stab L4-3
 - 8,65 \pm 0,01 mm für die restlichen 6 Stäbe.
- Die Tablettenhöhe ist 10,0 \pm 1,0 mm
- 60 % aller Tabletten enthalten eine zentrale Bohrung der Größe 2,2 \pm 0,1 mm.
- Die Stirnflächen sollen eben und orthogonal zu den Zylinderflächen sein.

3.4.6 Oberfläche der Tabletten

Die Oberfläche darf keine sichtbaren Fehler aufweisen mit Ausnahme von Kantenabplatzungen. Dabei soll keine der linearen Abmessungen einer Abplatzung größer als 1 mm sein.

3.4.7 Tablettensäulen

- Die Länge der Tablettensäule beträgt 150 \pm 1,0 mm.
- Jede Tablettensäule besteht aus 15 Tabletten, wobei jeweils die unteren 9 die spezifizierte zentrale Bohrung aufweisen.
- Der Brennstoff aus (U,Pu)-Mischkarbid-Sinterkörpern wird vom Transurane-Institut, Karlsruhe, in Form von fertiggelegten und vermessenen Brennstoffsäulen geliefert. Für jede Säule sind vom Hersteller Lage, Gewicht, Durchmesser und Höhe aller Tabletten sowie Länge und Gewicht der Säule zu messen und zu protokollieren.

3.5 Hüllrohrspezifikation

3.5.1 Werkstoff

- Edelstahl X8CrNiMoVNb 1613, Werkstoff-Nr. 1.4988.
- Das Material soll im Vakuum erschmolzen und umgeschmolzen werden.

- Chemische Zusammensetzung in Gew.-%:

| | |
|-------------|-----------------------------|
| Kohlenstoff | max. 0,1 |
| Nickel | 12,5 - 14,5 |
| Chrom | 15,5 - 17,5 |
| Eisen | Rest |
| Molybdän | 1,1 - 1,5 |
| Niob | max. $10 \times C + 0,4 \%$ |
| Vanadin | 0,60 - 0,85 |
| Mangan | 1,0 - 1,5 |
| Schwefel | max. 0,02 |
| Silizium | 0,3 - 0,6 |
| Bor | max. 20 ppm |
| Stickstoff | 0,1 |

3.5.2 Abmessungen

- Außendurchmesser: $10,00 \pm 0,03$ mm

- Innendurchmesser: $8,90 \pm 0,03$ mm

Bei dem einzelnen, für den Prüfling abgelängten Rohrstück soll jedoch der Innendurchmesser um nicht mehr als $\pm 0,01$ mm schwanken.

- Wandstärke: $0,55 \pm 0,03$ mm

3.5.3 Vorbehandlung des Material

Das Material wird 10 bis 20 % kaltverformt mit anschließender Wärmebehandlung.

3.5.4 Ultraschall-Testfehler:

Die Testfehlertiefe (Längs- und Querfehler) soll 5 % der Wandstärke betragen.

3.6 Brennstabspezifikation

3.6.1 Brennstoffsäule

Die durch Röntgendurchleuchtung prüfbare Länge der Karbidsäule darf nicht mehr betragen als 151 mm.

3.6.2 Äußere Geometrie

Die Gesamtlänge des Stabes (ohne Thermoelement) beträgt 210 mm. Sie ist auf 0,1 mm genau zu bestimmen. Der äußere Durchmesser beträgt $10,00 \pm 0,03$ mm. Die Durchbiegung der Stäbe muß unter 0,2 mm liegen.

3.6.3 Gasfüllung der Stäbe

Die mit Brennstoff gefüllten Stäbe sind unter leichtem Überdruck (800 - 850 Torr) mit trockenem, 99,995 %-igem Helium bzw. Argon zu fluten. Der Edelgasgehalt soll im fertigen Brennstab 95 % betragen.

3.6.4 Kennzeichnung der Stäbe

Die fertigen Brennstäbe müssen den Angaben und Toleranzen der Zeichnungen in der Abb. 6 entsprechen. Die Bezeichnung der Stäbe erfolgt am oberen Endstopfen mit den Ziffern L4-1 bis L4-8. Fertigungsbegleitkarten sind anzulegen. Die Nummern von Brennstoffsäule und Hülle sind für jeden Stab zu registrieren.

3.6.5 Kontamination

Nach dem Verschweißen darf die Oberflächenkontamination, gemittelt über die gesamte Oberfläche eines Stabes, folgende Angaben nicht überschreiten:

| | |
|-----|--------------------------------------|
| 22 | α -Zerfälle/min cm^2 |
| 220 | β -Zerfälle/min cm^2 |

Der Wischtest darf nicht höher als der doppelte Nulleffekt sein.

3.6.6 Schweißnähte

Die Schweißnähte dürfen im Durchmesser um maximal 0,2 mm erhöht sein und dürfen keine Poren oder Einschlüsse größer als 100 μ aufweisen.

3.6.7 Zentrales Thermoelement

Der Einbau des Thermoelementes erfolgt gemäß Abb. 6. Die Meßstelle des Thermoelementes soll sich genau in der axialen Mitte der Brennstoffsäule befinden. Es kommt ein Wolfram-Rhenium-Mantelthermoelement folgender Spezifikation zur Verwendung:

Hochtemperaturteil:

- Länge 75 mm
- Adernmaterial W5Re/W26Re
- Isolation Thoriumoxid
- Mantelmaterial W26Re
- Maße des Mantelrohres 1,6 mm x 0,3 mm
- Meßstelle allseitig isoliert

Ausgleichsleitung:

- Länge 35 mm + 2200 mm
- Verbindungsstufe 35 mm lang, 3,5 mm ϕ , Edelstahl
- Adernmaterial passend zum Thermoelement, Temperatur an der Verbindungsstelle maximal 600 °C
- Isolation MgO oder Al₂O₃
- Mantel Edelstahl, 1,5 mm ϕ

Die Verbindungsmuffe zwischen Thermoelement und Ausgleichsleitung wird in den unteren Endstopfen des Brennstabes eingeschweißt (Abb. 7).

3.6.8 Prüfung an den fertigen Stäben

Folgende Prüfungen müssen durch Protokolle belegt werden:

- Gesamtlänge
- Durchmesser (am Hüllrohr, an den Endstopfen, an den Schweißnähten)

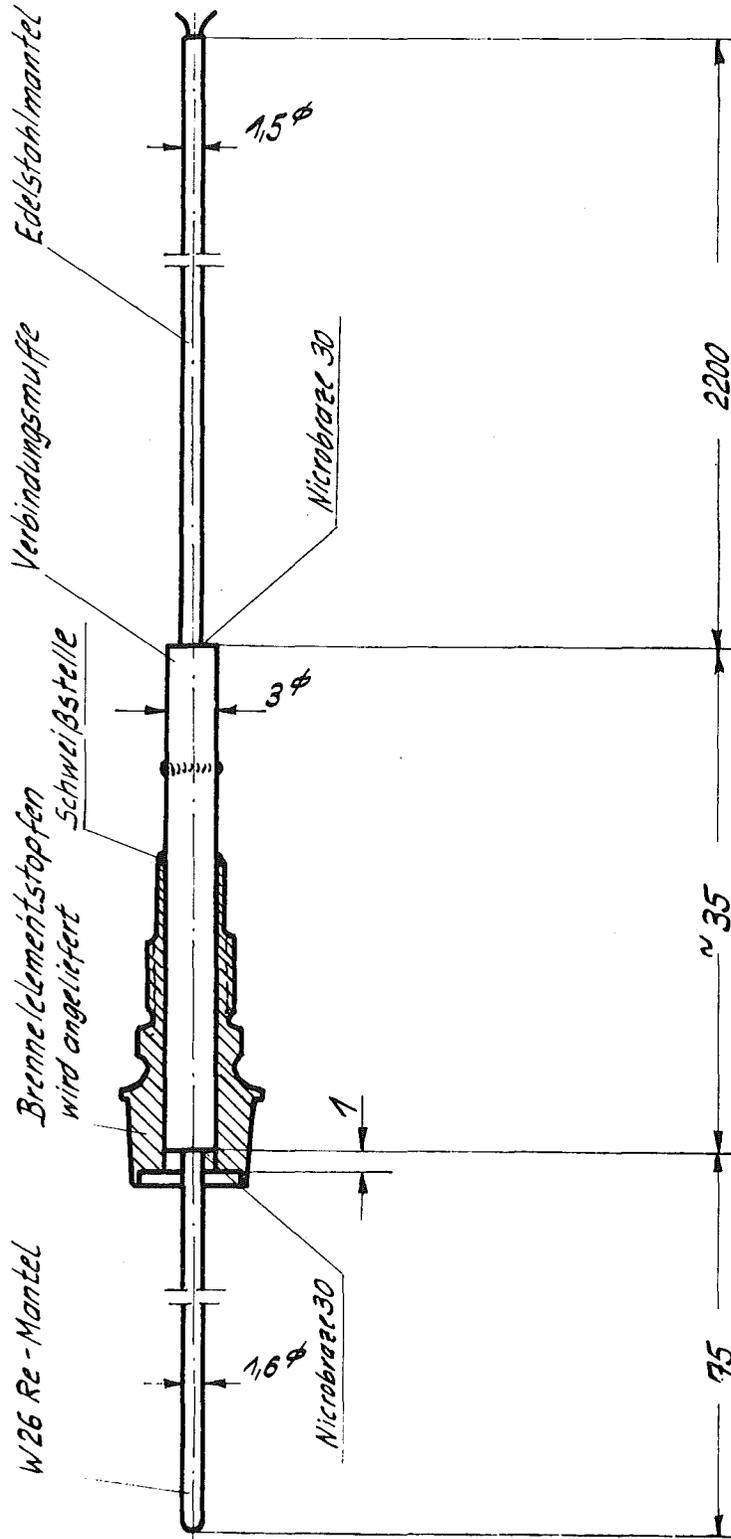


Abb. 7

| Teil | Stück | Benennung | | | | | Werkstoff | Abmessung | | Zeichngs.Nr. Norm | | Bemerkung | |
|---------------------|-------|---|----|----|-----|-----------|--|-----------|----------------------------------|-------------------|------------------|-----------|-------------------|
| | | ~ | ▽ | ▽▽ | ▽▽▽ | ▽▽▽▽ | | bis 6 | über 6 bis 30 | über 30 bis 100 | über 100 bis 300 | | über 300 bis 1000 |
| Oberflächenzeichen | | ~ | ▽ | ▽▽ | ▽▽▽ | ▽▽▽▽ | Freimaßtoleranz | ± 0,1 | ± 0,2 | ± 0,3 | ± 0,5 | ± 0,8 | ± 1,2 |
| Rauhtiefe max. in μ | | 1000 | 40 | 10 | 4 | 1,6 | | | | | | | |
| 1970 | Tag | Name | | | | Werkstoff | Gesellschaft für Kernforschung m. b. H. 7500 Karlsruhe Postfach 947 | | Zugeh. Zchnng. | | | | |
| gez. | 6.3. | Redauy | | | | | | | Ersatz für | | | | |
| gepr. | | | | | | | | | Ersetzt durch | | | | |
| ges. | | | | | | | | | Zeichnungs Nr. JRE2-02-4-3669 | | | | |
| Maßstab | | Benennung | | | | | | | | | | | |
| 2:1 | | Brennelement - Endstopfen mit Thermoelement W5 Re/W26 Re | | | | | | | | | | | |

- Durchbiegung
- Gewicht
- Dichteit
- Röntgenaufnahme von den Schweißnähten und vom gesamten Stab
- Kontamination der Oberfläche

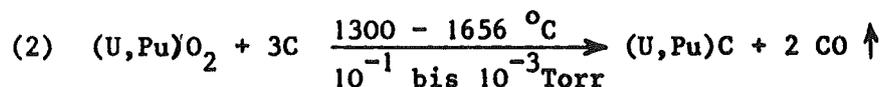
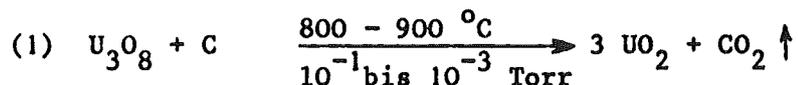
4. Herstellung der Prüflinge /13/

4.1 Ausgangspulver für die Brennstoffherstellung

- a) U_3O_8 : U_{nat} , spezifische Oberfläche = $3 \text{ m}^2/\text{g}$
- b) PuO_2 (EU/S/49), spezifische Oberfläche = $4 \text{ m}^2/\text{g}$
Pu-Isotope: Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-242
Gew.-%: 0,02 ; 91,24 ; 8,07 ; 0,62 ; 0,04
- c) C : Ringsdorf Graphit RW-A, Korngröße = $60 \text{ }\mu\text{m}$
spezifische Oberfläche = $2,6 \text{ m}^2/\text{g}$

Die Oxide wurden durch Sieben in zwei Korngrößenbereiche aufgeteilt und zwar das U_3O_8 in Partikel von einer Größe $< 125 \text{ }\mu\text{m}$ und das PuO_2 in eine von $< 60 \text{ }\mu\text{m}$. Von diesem klassifizierten Ausgangsmaterial wurde ein Mischansatz entsprechend $Pu/U+Pu = 0,155$ eingestellt und derselbe mit 12,2 Gew.-% Graphit gemischt und zu Pellets mit einem Durchmesser von 14 mm (12 mm Höhe) verpreßt (2 t/cm^2). In einem Induktionsofen wurde unter Vakuum (10^{-1} bis 10^{-3} Torr) die karbothermische Reduktion durchgeführt (Zeitablauf siehe Abb. 8).

Die Reaktion läuft nach folgenden vereinfachten Gleichungen ab:



Der durchschnittliche Sauerstoffgehalt des reagierten Produktes (2) betrug 9000 ppm, der Stickstoffgehalt < 500 ppm.

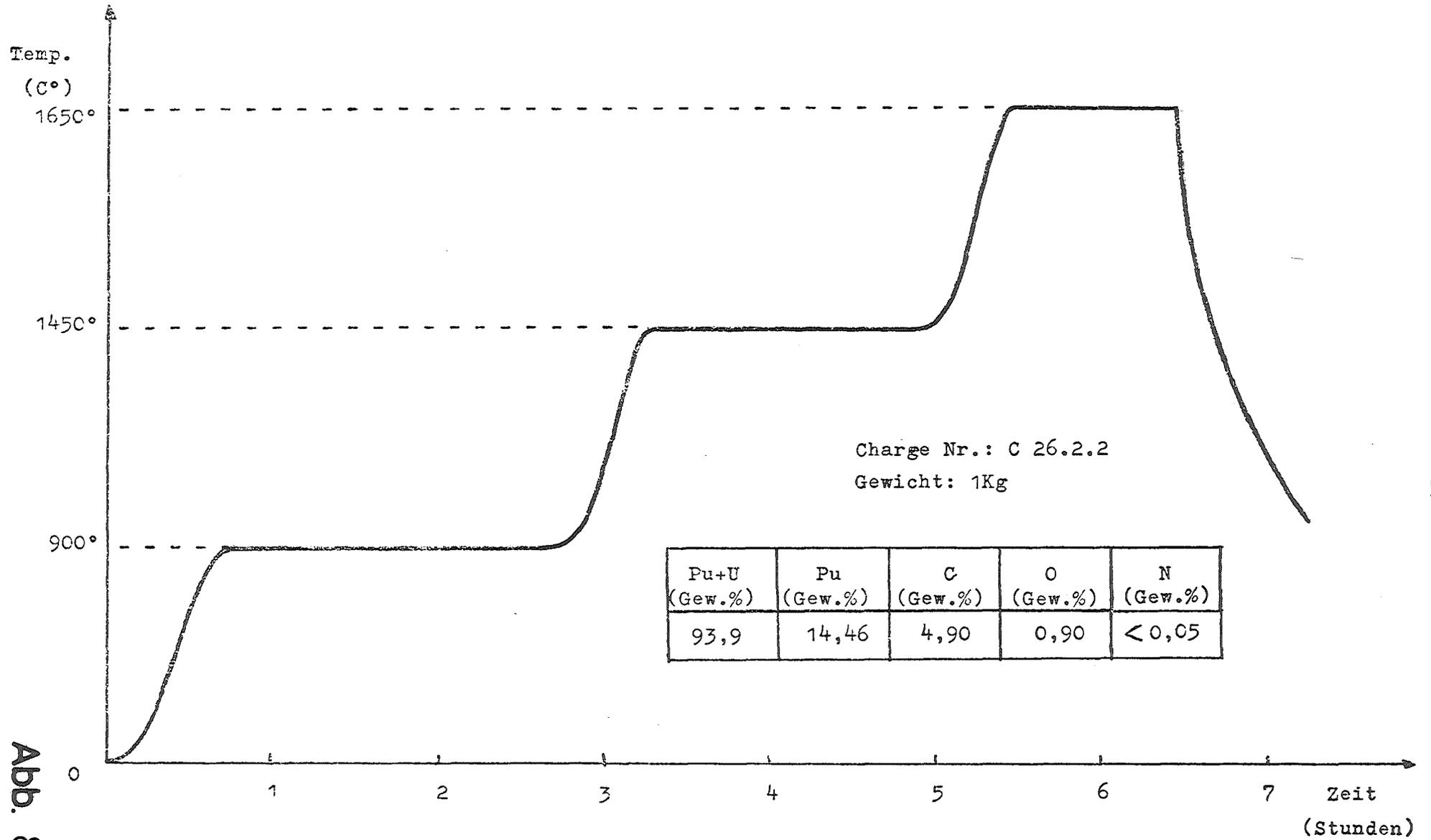


Abb. 8

Karbothermische Reduktion:
Temperatur-Zeit diagramm Nr1

4.2 Tablettenherstellung

Mit dem unter 4.1 beschriebenen Ausgangsprodukt wurden nun Pellets hergestellt. Das Reaktionsprodukt (Pellets mit einer theoretischen Dichte von 40 - 50 %) wurde zerkleinert und in einer Kugelmühle mit Wolframkarbidkugeln unter Zugabe von 1 % Stearin-Säure gemahlen. Die gepreßten Pellets ($5 - 6 \text{ t/cm}^2$) wurden unter Vakuum (10^{-2} Torr) bei $1650^\circ\text{C}/4$ bis 5 h gesintert. Der Temperaturanstieg betrug $300 - 400^\circ\text{C/h}$ mit einer Haltezeit von 2 h bei 1450°C . Ein Teil der Pellets wurde im gepreßten Zustand mit einer zentralen Bohrung von 2,3 mm Durchmesser versehen. Die gesinterten Pellets wurden auf einer spitzenlosen Rundschleifmaschine mit einer Genauigkeit von $\pm 10/\mu$ auf die entsprechenden Durchmesser geschliffen, in Tetrachlorkohlenstoff gewaschen und unter Vakuum getrocknet. Der Sauerstoffrestgehalt der gesinterten Pellets lag bei ca. 3000 ppm, der Stickstoffgehalt war < 500 ppm.

Bemerkung:

Der relativ geringe Sauerstoffgehalt der gesinterten Pellets im Vergleich zum Ausgangsprodukt ist auf eine Fortsetzung der Karbonreduktion (Gleichung 2) des gemahlene und homogenisierten Produktes während des Sinterns zurückzuführen. Zu diesem Zweck wurde bei einer Temperatur von 1450°C eine Haltezeit von 2 h in das Sinterprogramm eingeplant.

In Tabelle 5 wird das Einfüllprotokoll des TU-Institutes /13/ wiedergegeben.

In Abb. 9 sind in 3 Bildern bei 1000-facher Vergrößerung die Sintergefüge der Pellets der 3 Chargen mit unterschiedlichen M_2C_3 -Gehalten wiedergegeben.

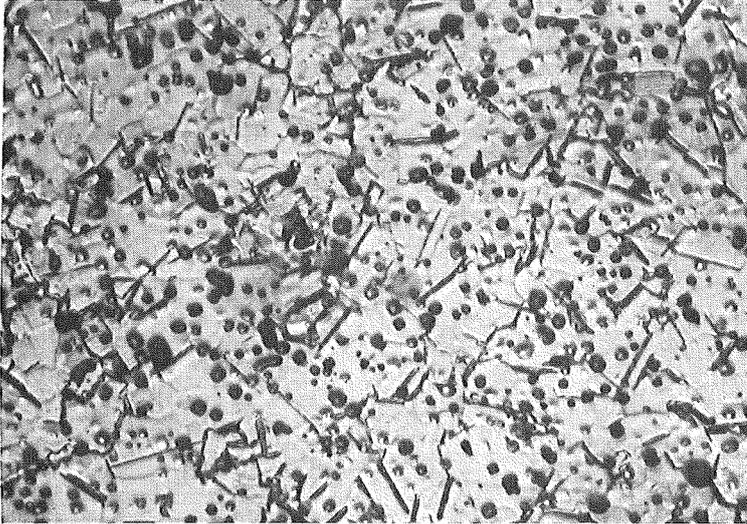
4.3 Brennstoffeigenschaften

Der Brennstoff wurde in 3 Chargen hergestellt. Hierdurch hatten die Pellets als Endprodukt einen unterschiedlichen Gehalt an C, O, N und damit auch an M_2C_3 . Die Werte hierfür werden in der folgenden Tabelle 6 wiedergegeben. - Beim Einfüllprotokoll (s. 4.2) sind die Chargennummern immer mitaufgeführt. -

Tabelle 5: (U,Pu)C-Versuchsgruppe 4, Einfüllprotokoll

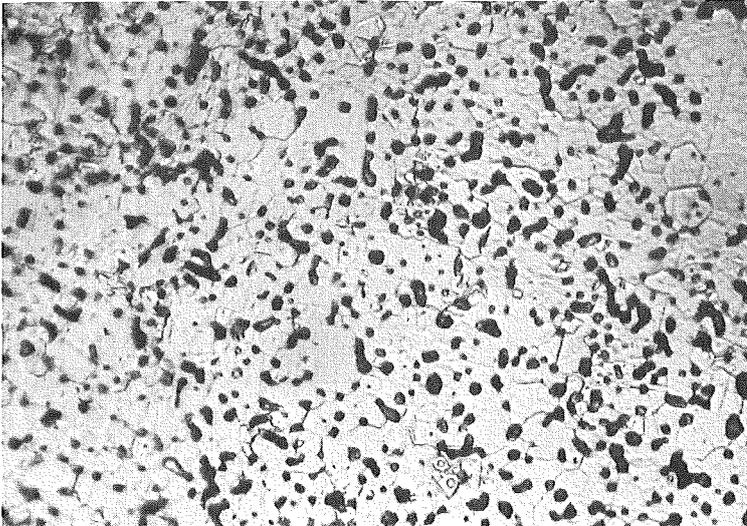
| Stab-Nr. | Behälter-Nr. AEG | Charge-Nr. | Gesamtlänge (mm) | Länge der Hohl- pelletsäule (mm) | Gesamtgewicht (g) | Durchmesser (mm) | Dichte (% th.D.) |
|----------|---------------------|--------------------------------------|---------------------|-------------------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| L4-1 | A1 - B1 | C 28.3.1. | 149,8 | 91,8 | 105,11 | 8,85 | 86,7 |
| L4-3 | C1 - D1 | mit Löcher C 28.3.1. C 28.3.2. | 150,5 | 92,3 | 105,08 | 8,82 | 86,7 87,6 |
| L4-2 | E1 - F1 | C 26.3.3. | 150,2 | 90,7 | 100,92 | 8,65 | 87,0 |
| L4-4 | G1 - H1 | mit Löcher C 28.3.2. C 26.3.3. | 150,2 | 89,5 | 100,80 | 8,65 ^{x)} | 87,6 87,0 |
| L4-5 | A2 - B2 | mit Löcher C 28.3.2. C 26.3.3. | 150,2 | 89,2 | 100,64 | 8,65 | 87,6 87,0 |
| L4-6 | C2 - D2 | mit Löcher C 28.3.2. C 26.3.3. | 150,0 | 89,0 | 100,41 | 8,65 | 87,6 87,0 |
| L4-7 | E2 - F2 | mit Löcher C 28.3.2. C 26.3.3. | 149,2 | 88,2 | 100,10 | 8,65 | 87,6 87,0 |
| L4-8 | G2 - H2 | mit Löcher C 28.3.2. C 26.3.3. | 149,2 | 88,0 | 100,25 | 8,65 ^{x)} | 87,6 87,0 |
| | | | | | Σ = 813,31 | | |

x) nachträglich auf 8,30 mm geschliffen



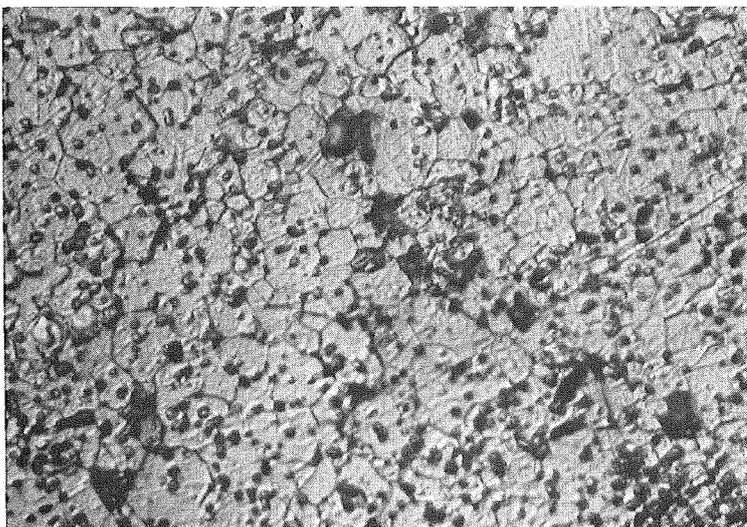
X 1000

Charge Nr.:
C26.3.3
MC



X 1000

Charge Nr.:
C 28.3.1
 $\approx 10\% \text{ M}_2\text{C}_3$



X 1000

Charge Nr.:
C 28.3.2
 $\approx 4\% \text{ M}_2\text{C}_3$

Abb. 9

Mikrographie geätzt

Tabelle 6: Chemische und Röntgenanalysen des Brennstoffes

| Analyse \ Charge-Nr. | C 26.3.3. | C 28.3.1. | C 28.3.2. |
|------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------|
| Pu/U+Pu | 0,154 | 0,151 | 0,151 |
| C (Gew.-%) | 4,65 - 4,75 | 4,65 - 4,73 | 4,65 - 4,72 |
| O (Gew.-%) | 0,27 - 0,45 | 0,36 - 0,55 | 0,23 - 0,30 |
| N (Gew.-%) | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Röntgenanalyse ^{x)} | ≈ 4 % M ₂ C ₃ | ≈ 10 % M ₂ C ₃ | MC |

^{x)} Hauptphase: MC; Gitterparameter: 4,9630 Å

In nachfolgender Tabelle werden die metallischen Verunreinigungen des Brennstoffes wiedergegeben.

Tabelle 7: Metallische Verunreinigungen des Brennstoffes (ppm)

| Element \ Charge-Nr. | C 26.3.3. | C 28.3.1. | C 28.3.2. |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| B | 0,5 | < 0,5 | < 0,5 |
| P | < 15 | < 40 | < 40 |
| Al | 15 | 15 | < 15 |
| Fe | 1000 | 1000 | 1000 |
| Mg | < 5 | 2 | 2 |
| Mn | < 1 | < 2 | < 2 |
| Pb | < 1 | < 1 | < 1 |
| Cr | 150 | < 5 | < 5 |
| Sn | < 1 | < 1 | < 1 |
| Ni | < 4 | 4 | 4 |
| Bi | < 1 | < 1 | < 1 |
| Mo | 10 | 50 | 50 |
| Ca | < 100 | < 100 | < 100 |
| V | < 40 | <15 | <15 |
| Na | < 40 | <40 | <40 |
| Zn | < 50 | <50 | <50 |
| W | 100 | 300 | 25 |
| Si | | <30 | <30 |

4.4 Prüfung des Hüllmaterials

Die Hüllrohre für die 8 Prüflinge wurden von GfK bereitgestellt. Folgende Prüfungen wurden durchgeführt (Prüfprotokoll O. Jacobi, IMF, Nr. 30a vom 28.11.1969):

- 1.) Messung der Rauhtiefe an einer beliebigen Stelle eines Rohres.
- 2.) Kontinuierliche Messung des Außendurchmessers über die gesamte Rohrlänge.
- 3.) Prüfung der Rohre mit Ultraschall auf Rißfehler und Wandstärkenabweichungen.

Die untersuchten Rohre lagen bei allen oben genannten Untersuchungen innerhalb der Toleranzen.

Die geprüften Hüllrohre wurden danach bei der Fa. AEG in Großwelzheim einseitig mit unterem Endstopfen und Thermoelement verschweißt und nochmals geprüft (Abnahmezeugnis E325 vom 2.9.1970). Daraufhin wurden die einseitig verschweißten Hüllrohre zur Fa. ALKEM transportiert, wo der Brennstoff eingefüllt und der obere Endstopfen eingeschweißt wurde.

4.5 Stabherstellung

Von den insgesamt 8 Prüflingen der Loop-Versuchsgruppe 4a wurden 6 Prüflinge bei der Firma ALKEM gefertigt (L4-1, 2, 3, 5, 6, 7). Die Stäbe L4-4 und L4-8 konnten dagegen aufgrund von Schweißnahtfehlern am oberen Endstopfen nicht fertiggestellt werden. In der Zwischenzeit wurden die oben genannten 6 Prüflinge bestrahlt und die Meßergebnisse teilausgewertet. Aufgrund der gemessenen Zentral- und Hülltemperaturen bei den gefahrenen Stableistungen lag die Vermutung nahe, daß die radiale Spaltweite nach einer gewissen Einlaufphase während der Bestrahlung praktisch keinen Einfluß auf den Wärmedurchgang im Spalt hat. Um diese Vermutung auch für sehr große Spaltweiten bestätigen zu können, wurde vorgeschlagen, die Spaltweite für die restlichen Stäbe L4-4 und L4-8 auf 300,µm radial zu vergrößern. Als Bindung wurde Helium statt Argon vorgeschlagen. Die Vergrößerung der radialen Spaltweite von 125,µm auf 300,µm machte einen Schleif-

vorgang nötig, der sich nur im TU-Institut in Karlsruhe durchführen ließ. Daraufhin wurde vorgeschlagen, neben dem Schleifen auch das Füllen und Verschweißen der Stäbe im TU-I durchzuführen.

4.6 Stabprüfung

An den bei der Fa. ALKEM gefertigten 6 Stäben wurden die in der Spezifikation Nr. 9019 geforderten Prüfungen durchgeführt und Stabbegleitkarten angefertigt. Weiter wurden die Durchmesser der jeweiligen letzten 3 Hohlpellets vermessen und Prüfzeugnisse erstellt. An den im TU-I gefertigten Stäben L4-4 und L4-8 wurden ebenfalls die geforderten Kontrollen durchgeführt und sog. "fuel element control sheets" angefertigt. Alle genannten Prüfzeugnisse sowie Stabbegleitkarten befinden sich im Anhang II.

5. Bestrahlungseinrichtung

5.1 Versuchseinrichtung für Kurzzeitbestrahlungen

In der Gruppe Bestrahlungstechnik wurde aufbauend auf dem bereits früher konzipierten und erstellten Heliumversuchskreislauf im Institut für Reaktorentwicklung des KFZ eine Kurzzeitbestrahlungseinrichtung /3,18/ entwickelt. Diese Einrichtung wurde im Jahre 1967 in Betrieb genommen. Sie erlaubt das Ein- und Ausfahren von Bestrahlungsprüflingen in den Zentralkanal des FR 2 bei vollem Leistungsbetrieb des Reaktors. Der Prüfling wird hierbei durch vorbeiströmendes Helium gekühlt. Der Betriebsdruck auf den Prüfling beträgt hierbei ca. 30 at. In Abb. 10 wird die vertikal aufgebaute Bestrahlungseinrichtung gezeigt. Sie ist wesentlich gekennzeichnet durch: Gasführung von oben nach unten, Prüflingshalterung, auswechselbarer Versuchseinsatz, Halogenfilter, Abschirmung und Schleusenkammer. Im Normalfall wird der Prüfling über die Schleusenkammer in die Transportflasche gewechselt, nur bei Störungen muß der gesamte Versuchseinsatz gewechselt werden. In Abb. 11 wird schematisch die Position des Prüflings in Relation zur Core-Mitte und das Hubwerk gezeigt.

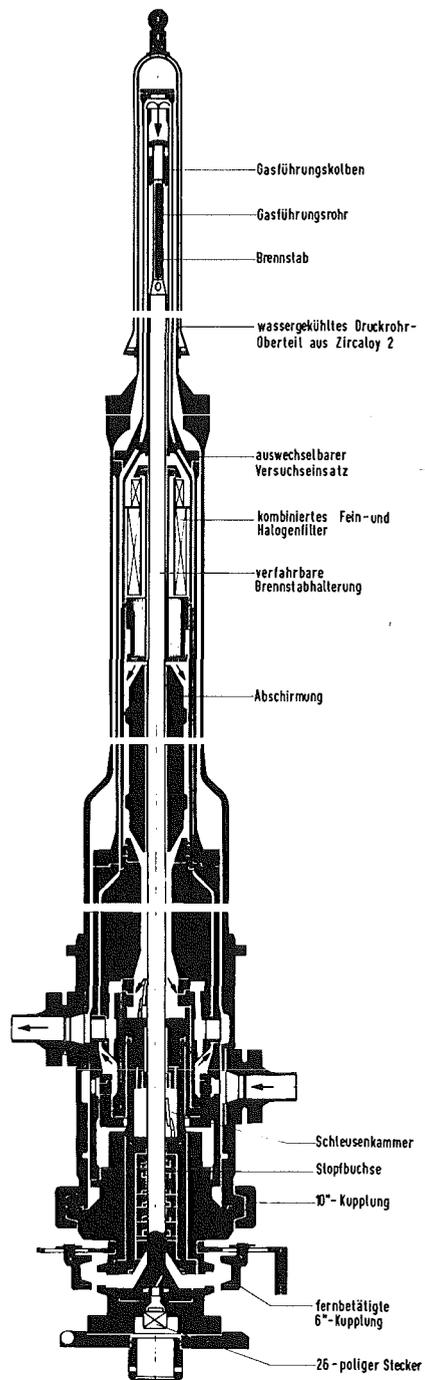
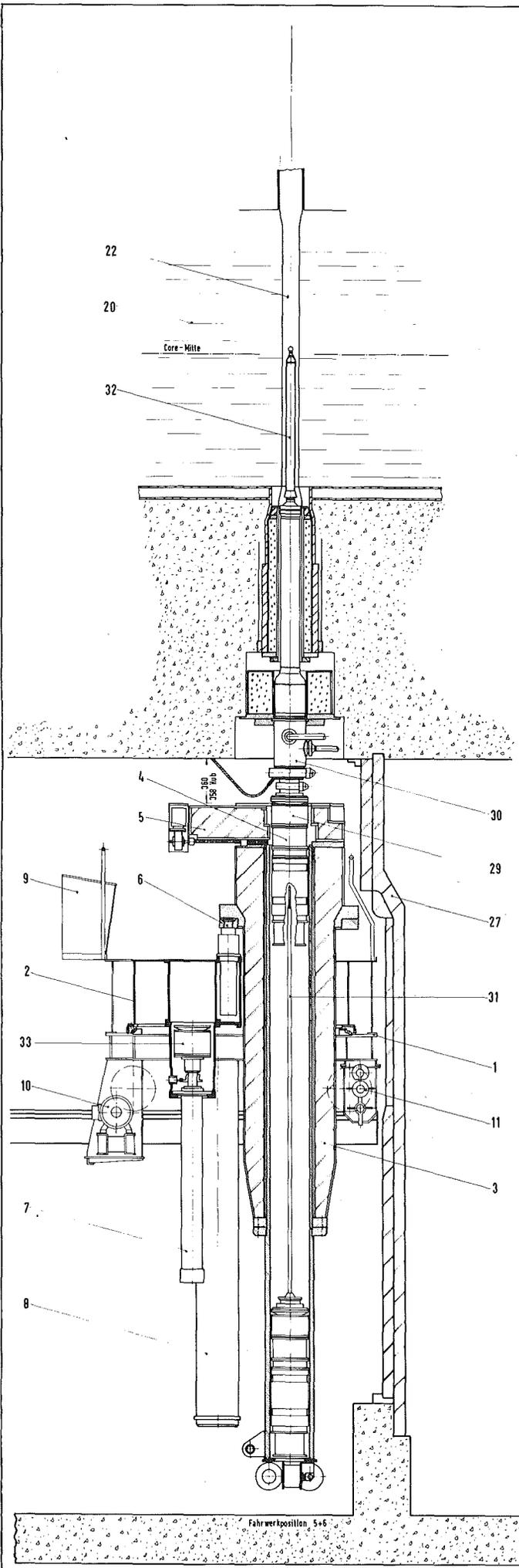


Abb. 10 FR 2 Kurzzeit - Bestrahlungs-
einrichtung



- 1 Fahrwerk
- 2 Drehwerk (Drehplattform)
- 3 Bleiflasche
- 4 Hubgetriebe (Hubwerk III)
- 5 Bleischieber
- 6 Gleichlaufing mit Hubzylinder (Hubwerk II)
- 7 Gleichlaufzylinder (Hubwerk I)
- 8 Lagerposition für Schutzhemd
- 9 Steuerpult
- 10 Pumpenmotor
- 11 Fahrwerkgetriebe
- 12 Looprohrabschirmbehälter
- 13 Elektrom. Greifer
- 14 Greiferantrieb
- 15 Endabschalter
- 16 Looprohrstopfen
- 17 Pneumat. - Riegel
- 18 Versuchseinsatz
- 19 Schutzhemd (verkürzte Ausführung)
- 20 Reaktor - Core
- 21 Biolog. Schirm
- 22 Zentralloop
- 23 Stopfenlager
- 24 Lukendeckel
- 25 Runde Lucke
- 26 Stützring für Looprohrabschirmbehälter
- 27 Bleiabschirmwand
- 28 Fahrbahnschiene
- 29 Greiferzange (Hubwerk III)
- 30 Loopeinsatz für Kurzzeitbestrahlung (Druckrohr mit Versuchseinsatz)
- 31 Prüflingshalterung $36 \times 2,5 \times 3525$
- 32 Wassergekühltes Druckrohr - Oberteil
- 33 Greiferzange (Hubwerk I)
- 34 Prüflingseinsatz $30 \times 1,5 \times 2000$
- 35 Vorrichtung zum Prüflingseinbau
- 36 Transportbehälter mit γ - Scanning
- 37 5 t Kran
- 38 Abschirmstange

Abb. 11

| PROJ. | Obj. | Werk | Werkstoff | Bezeichnung für Herstellung | Legende |
|----------|---|------|-----------|-----------------------------|--------------------|
| PPK | 11.2 | Q235 | | 1100 Bestände | Erstellt durch |
| PPK | | | | Partick 07 | Erstellt durch |
| Nachtrag | | | | | Erstellt durch |
| 1:15 | Auswechselmaschine | | | Aufbau III | 1A2-PSB-4802-U-495 |
| | Versuchsrichtung I. Kurzzeitbestrahlungen | | | | |

5.2 Bestrahlung im FR 2

Mit der in 5.1 beschriebenen Kurzzeitbestrahlungseinrichtung wurden im FR 2 nacheinander die 8 Prüflinge der Loop-Versuchsgruppe 4a bestrahlt. Die Bestrahlungszeiten und evtl. Leistungszyklen können nachfolgender Tabelle entnommen werden.

Tabelle 8: Bestrahlungszeiten und Leistungszyklen der 8 Prüflinge der Loop-Versuchsgruppe 4a

| Prüfling | Bestrahlungszeit (d) | Anzahl der Zyklen |
|----------|----------------------|-------------------|
| L4-1 | 3 | 0 |
| L4-2 | | |
| L4-3 | | |
| L4-4 | | |
| L4-5 | 15 | 2 SS |
| L4-6 | | 1 SS |
| L4-7 | | 10 |
| L4-8 | | 6 |

SS = Schnellschluß

6. Ablauf der Bestrahlung

6.1 Reaktorzyklen und Neutronenfluß

Die Bestrahlung der Prüflinge der Loop-Versuchsgruppe 4a begann mit Prüfling 1 am 26.11.1970 (Zyklus 38/70) und endete mit Prüfling 8 am 16.4.1972 (Zyklus 2/72). Als besondere Vorkommnisse müssen erwähnt werden für:

Prüfling L4-4: stark schwankende Anzeige der Zentraltemperatur mit einer Spitze von 2000 °C.
Beim Ausfahren Spaltgasausbruch gegen Vakuum (Undichtheit an TE-Einschweißstelle).

Prüfling L4-5: Schnellschluß durch plötzlichen Druckabfall im Helium-Kreislauf verursacht.

Prüfling L4-8: Die Zentraltemperatur betrug anfangs über 2100 °C.

Der axiale Verlauf des Neutronenflusses in Core-Mitte und die Stableistung als Funktion von der Eintauchtiefe des Prüflings im Zentral-Loop wird in Abb. 12 dargestellt.

6.2 Temperatur und Stableistung

Der Verlauf der Zentraltemperatur und der 3 Hülltemperaturen in Höhe der Zentral-TE-Spitze und der Stableistung über der Bestrahlungszeit wird in den Abb. 13 bis 18 dargestellt. Hervorzuheben sind die Unterschiede in der TE-Anzeige der 3 Hüllrohraußenthermolemente. Letzteres kann sowohl durch kleine lokale Unterschiede in der Lage der TE-Spitze am Hüllrohr als auch durch exzentrische Lage der Tablettensäule bzw. unterschiedliche diametrale Ausdehnung derselben hervorgerufen sein.

Projekt FR 2/26

Versuchsgruppe 4

Leistungsverhältnisse am Prüfling L4-6

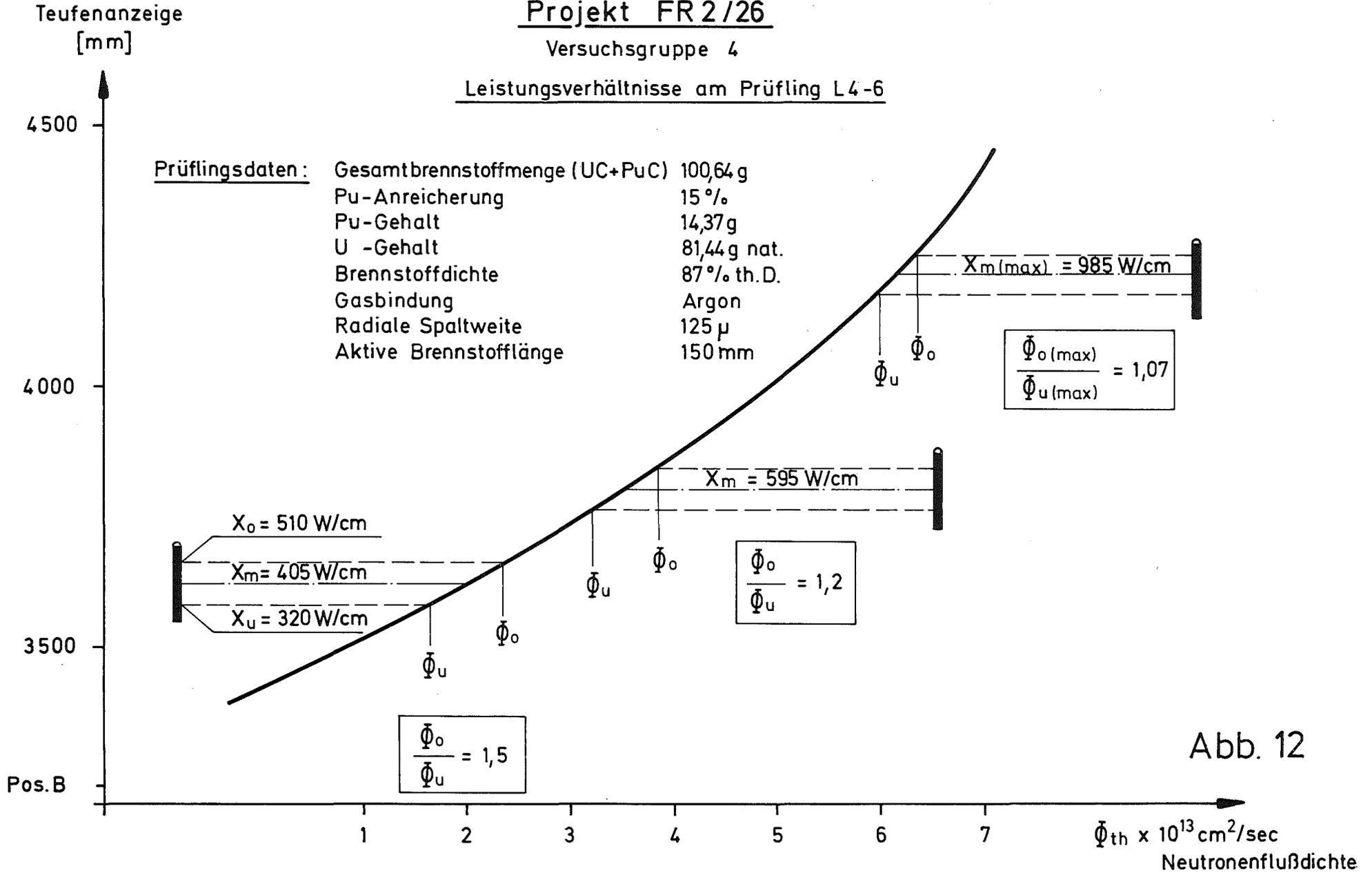
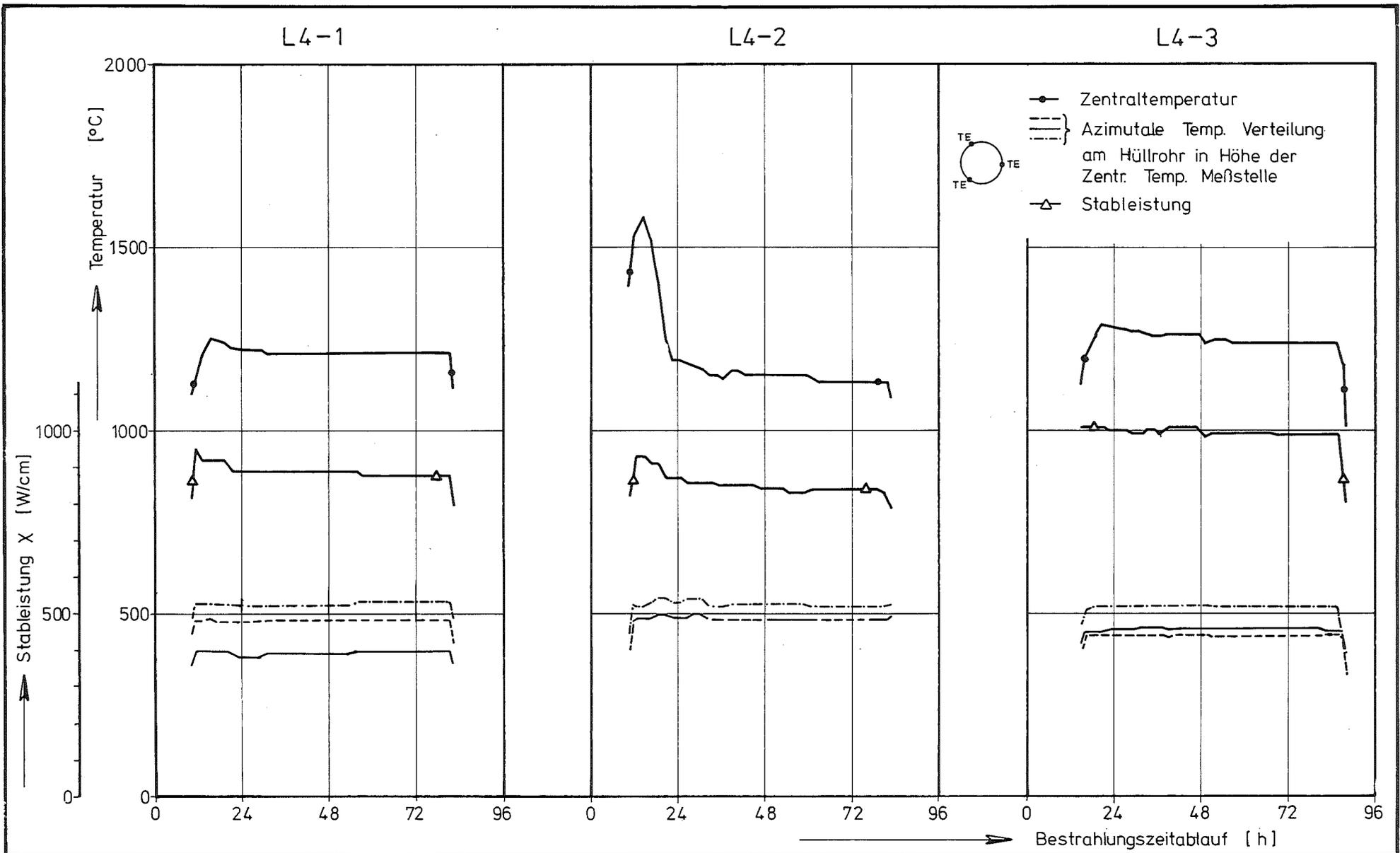


Abb. 12

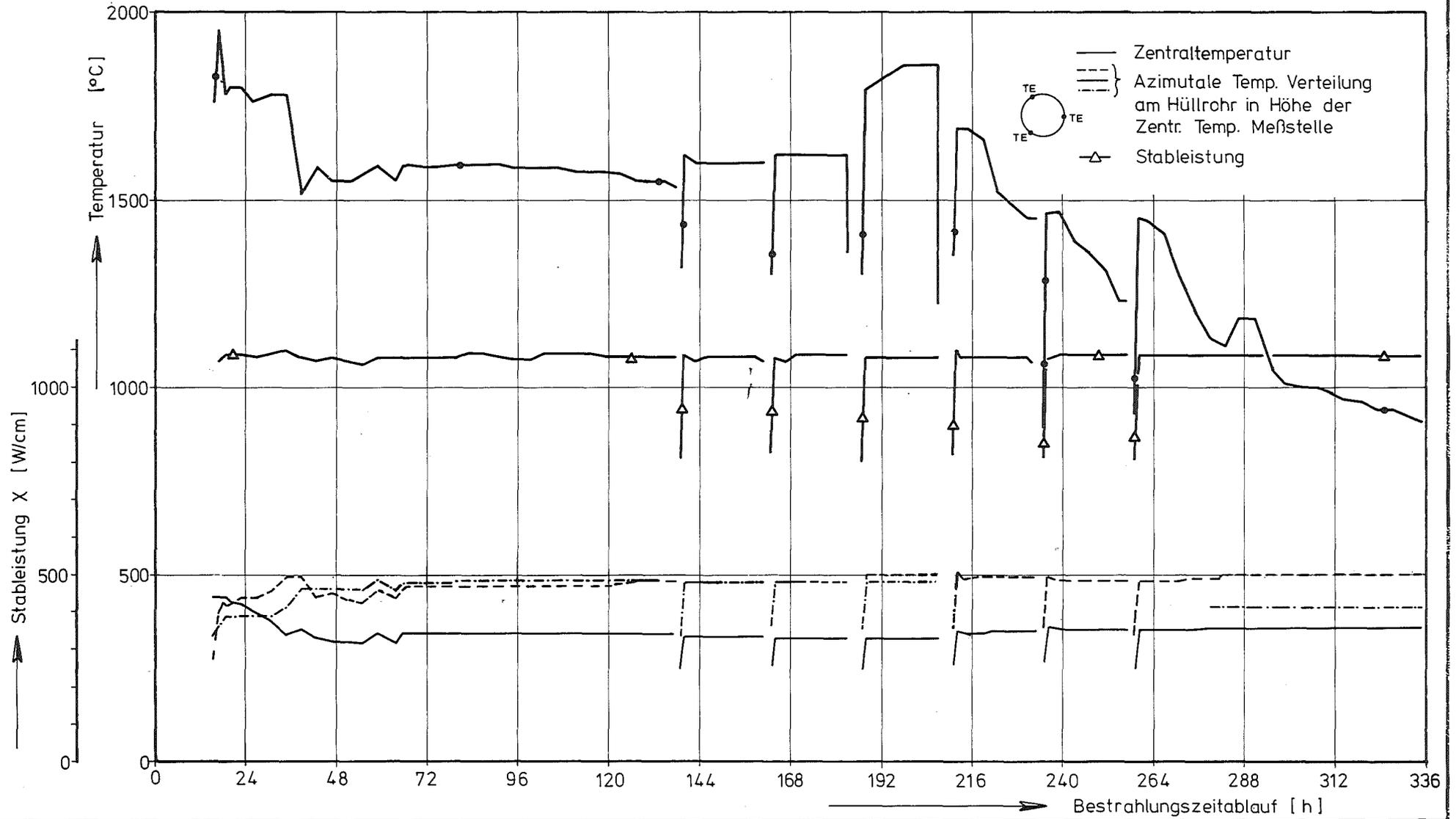


GfK Karlsruhe
IMF/III

Zeitlicher Temperatur-und Stableistungsverlauf

Abb. 13

L 4 - 4

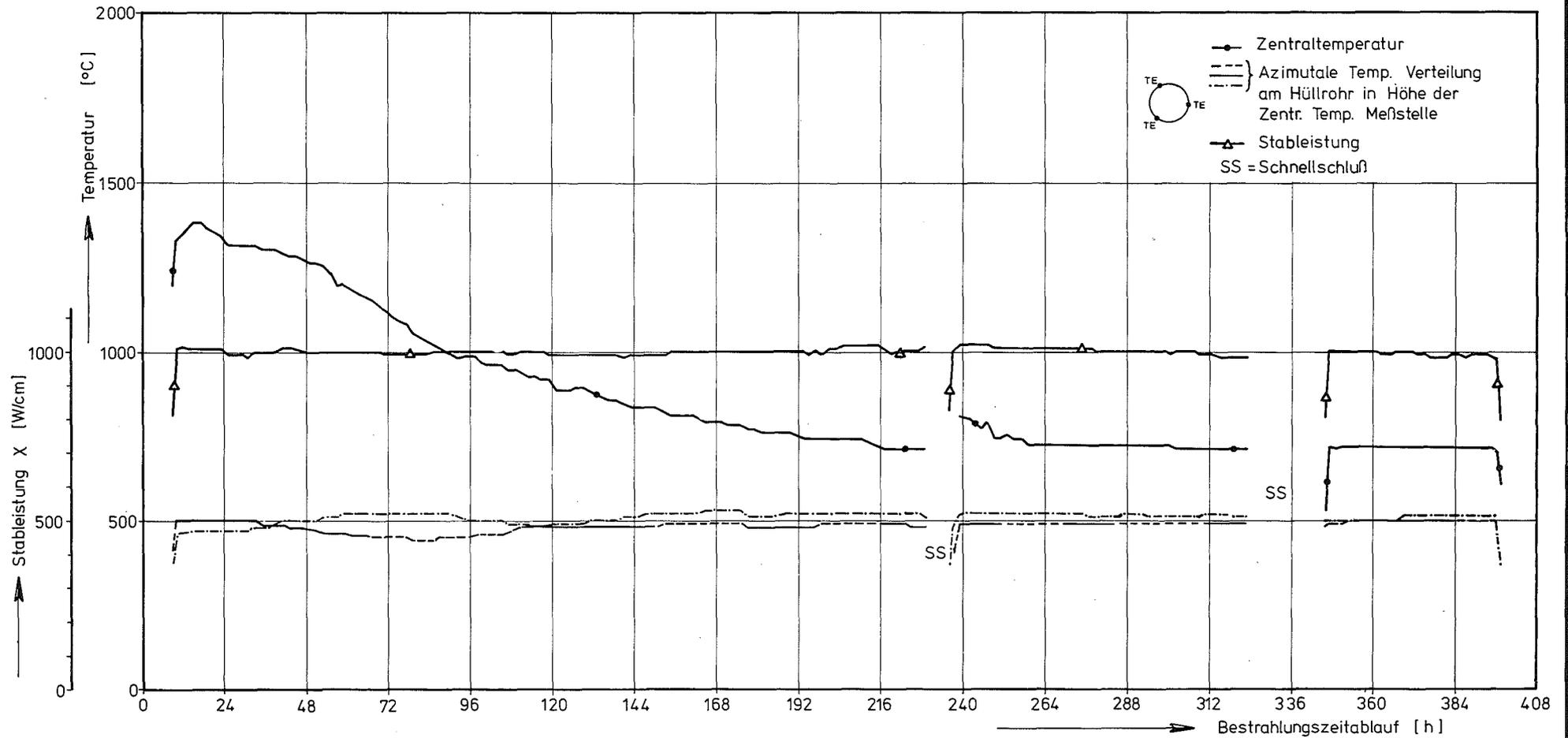


GfK Karlsruhe
IMF/III

Zeitlicher Temperatur- und Stableistungsverlauf

Abb. 14

L 4-5



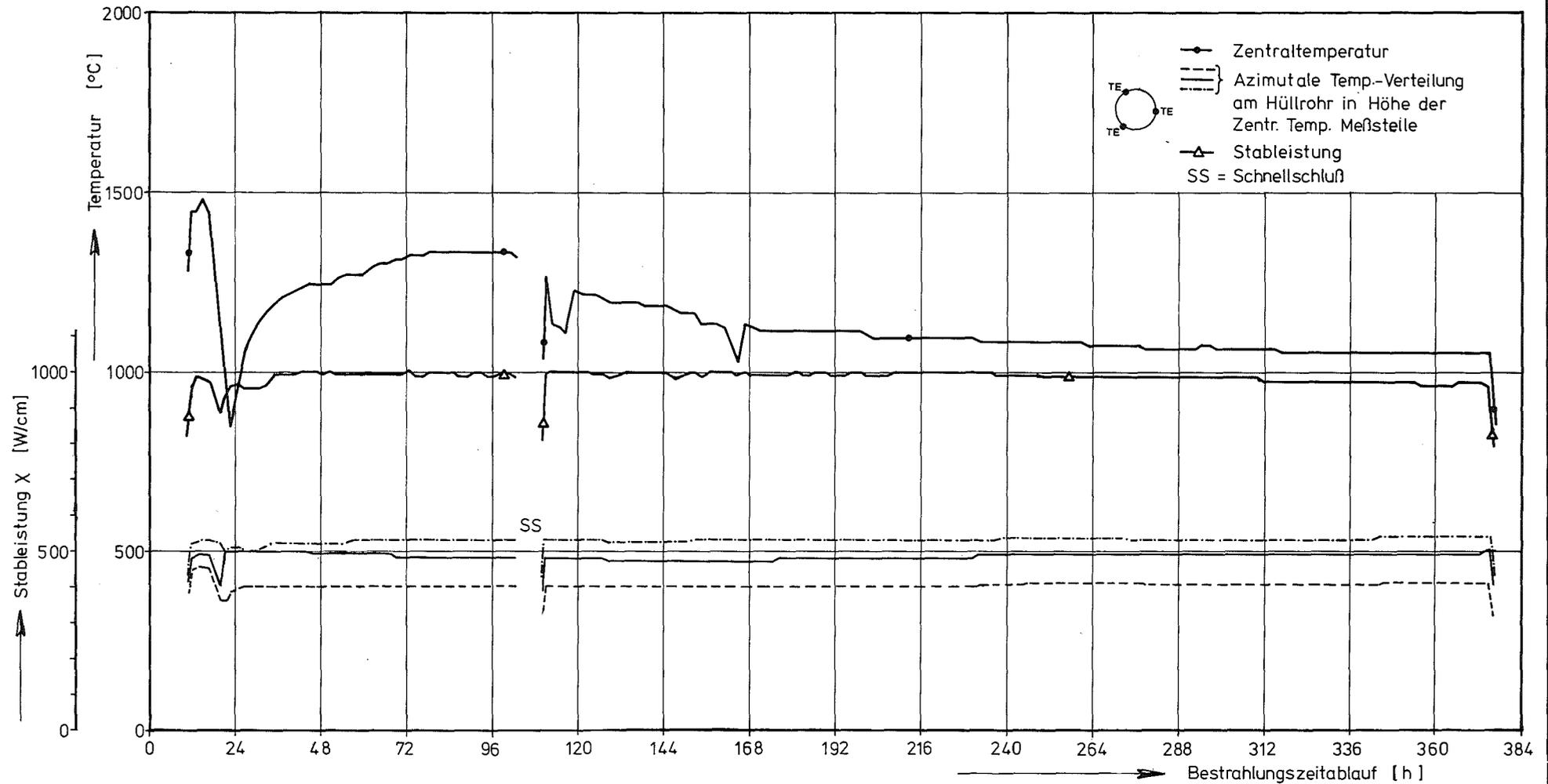
- 38 -

GfK Karlsruhe
IMF/III

Zeitlicher Temperatur- und Stableistungsverlauf

Abb. 15

L4-6



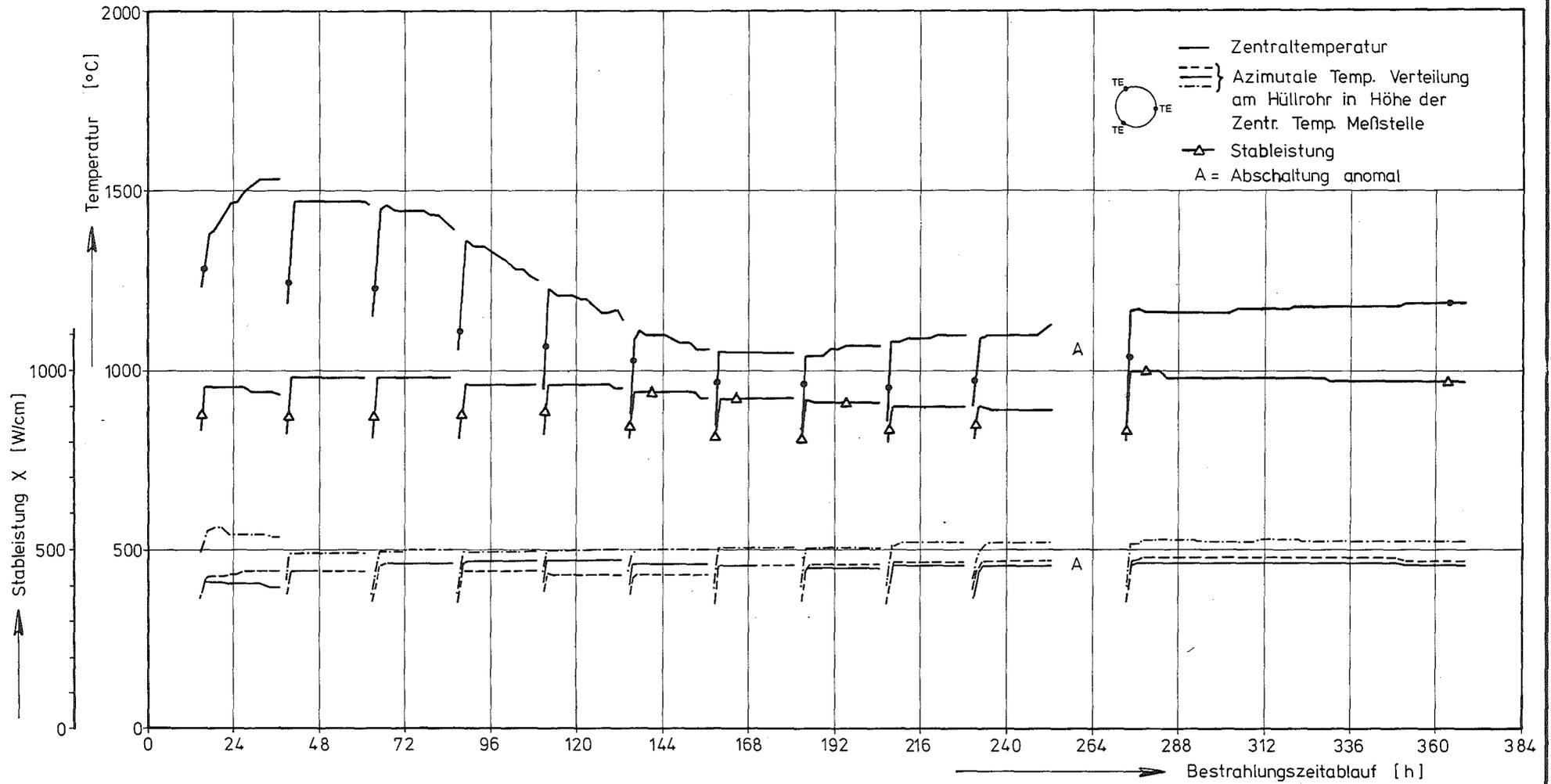
- 39 -

GfK Karlsruhe
IMF/III

Zeitlicher Temperatur- und Stableistungsverlauf

Abb. 16

L4-7



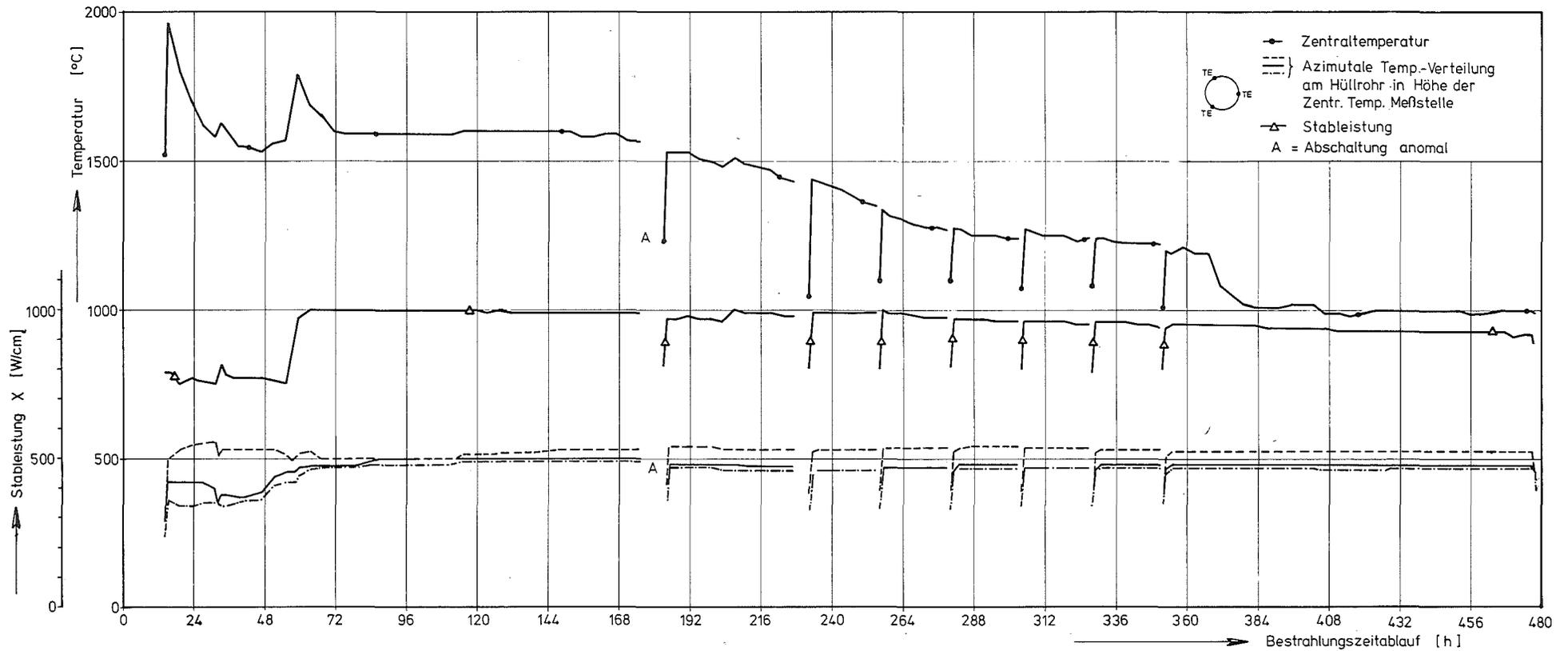
-07-

GfK Karlsruhe
IMF/III

Zeitlicher Temperatur-und Stableistungsverlauf

Abb. 17

L4-8



7. Zerstörungsfreie Nachuntersuchung

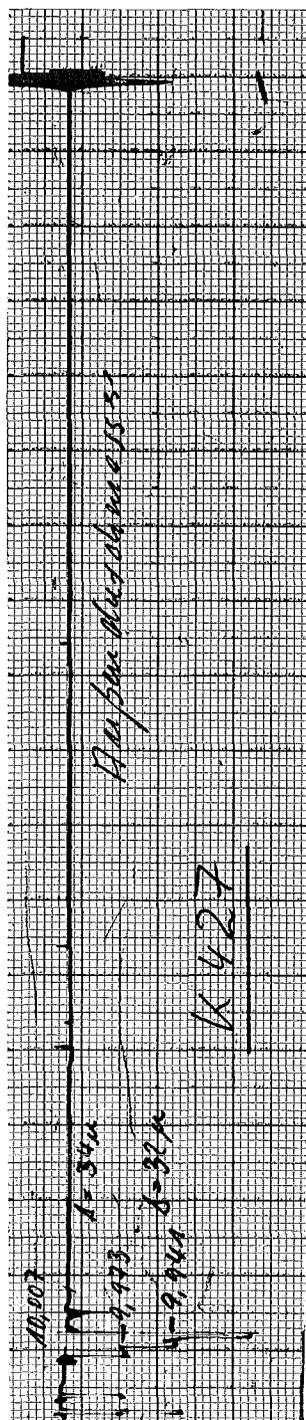
7.1 Äußere Vermessung

Die äußere Vermessung beinhaltet eine Durchmesser- und Längenbestimmung der Prüflinge vor und nach der Bestrahlung.

Die Durchmesserbestimmungen werden auf einer Meßbank mit Hilfe eines induktiven Wegaufnehmers in Form von sogenannten Wendelschrieben aufgezeichnet. Hierbei wird ein Tastkopf mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 5 mm/U an dem rotierenden Prüfling vorbeigeführt. Der Meßkopf hat die Form eines Keiles mit abgerundeten Schneiden ($r = 0,6$ mm). Es wurden von den 8 Prüflingen im bestrahlten Zustand Wendelschriebe angefertigt. Nur von Prüfling L4-4 wurde ein solcher auch im unbestrahlten Zustand aufgenommen. Als Vorvermessung liegt ein Protokoll des IMF (s. Abb. 19) der GfK vor, das die Beschaffenheit des zur Prüflingsherstellung verwendeten Rohrmaterials charakterisiert. Von den fertigen Prüflingen existiert nur eine Stichprobenvermessung der Fa. ALKEM (Anhang I).

Die Schriebe der bestrahlten Prüflinge zeigten eine meßbare Ovalität an. Dieselbe kann auf eine Hüllrohrverformung bei der Demontage der 7 an der Hüllrohroberfläche angepunkteten Thermoelemente zurückgeführt werden (Abb. 20). Bei Prüfling L4-8 wurde die Durchmesserbestimmung mittels Mikrometer ausgeführt, da zu diesem Zeitpunkt die Meßbank defekt war (Abb. 21). Auch aus diesen Meßwerten geht eine Ovalität von max. 25,um hervor.

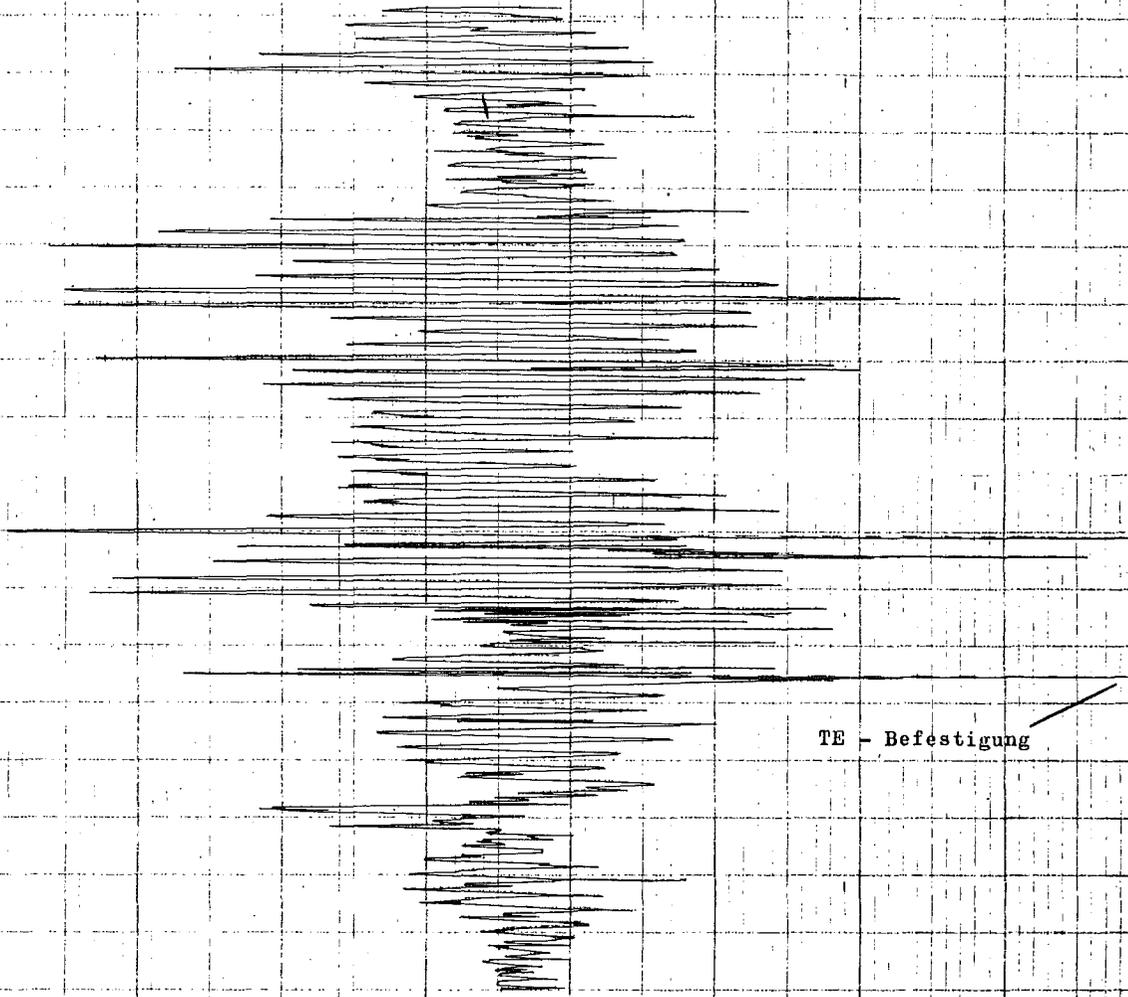
Wegen der nachträglichen Rohrverformung bei der Demontage wurde verzichtet, eine Durchmesseränderung auszuwerten. Eine Längenveränderung der Prüflinge konnte ebenfalls nicht einwandfrei ermittelt werden, da die Bezugsstrecken vor und nach der Bestrahlung nicht dieselben waren. Letztere waren allerdings auch wegen des geringen Abbrandes ($\sim 0,2$ %) nicht zu erwarten. In Tabelle 9 wird die Durchbiegung der Prüflinge dargestellt. Mit einer Ausnahme lag das Maximum der Durchbiegung am oberen Stabende.



1:10

Abb. 19 Außendurchmesser des verwendeten Rohres für alle Prüflinge

ca. 12 mm vom Ende entfernt



TE - Befestigung

WENDELSCHRIEB
DURCHMESSER
STEIGUNG 5 mm/U
MESSSCHEIDE R ± 1 mm

ca. 2 mm vom Ende entfernt

nicht gez. Seite

1 : 1

1000 : 1

103

10,000 φ

Abb.20 Durchmesser Wendelschrieb vom bestrahlten Prüfling L4-7

| | | | | |
|--|----------------------------------|--------------------|-----------------------|------------|
| Gesellschaft für Kernforschung m.b.H. Karlsruhe Abteilung Reaktorbetrieb | HZ 8b Projekt | 4 a Obereinheit | L4. 8 Untereinheit | 0 Probe |
| zugehörige Proj. Nr. | | | | |
| Datum: 3.10.72 | Unterschrift: <i>[Signature]</i> | | Blatt: | von: |

Dimensionskontrolle nach
der Bestrahlung

0°

um 90° gedreht

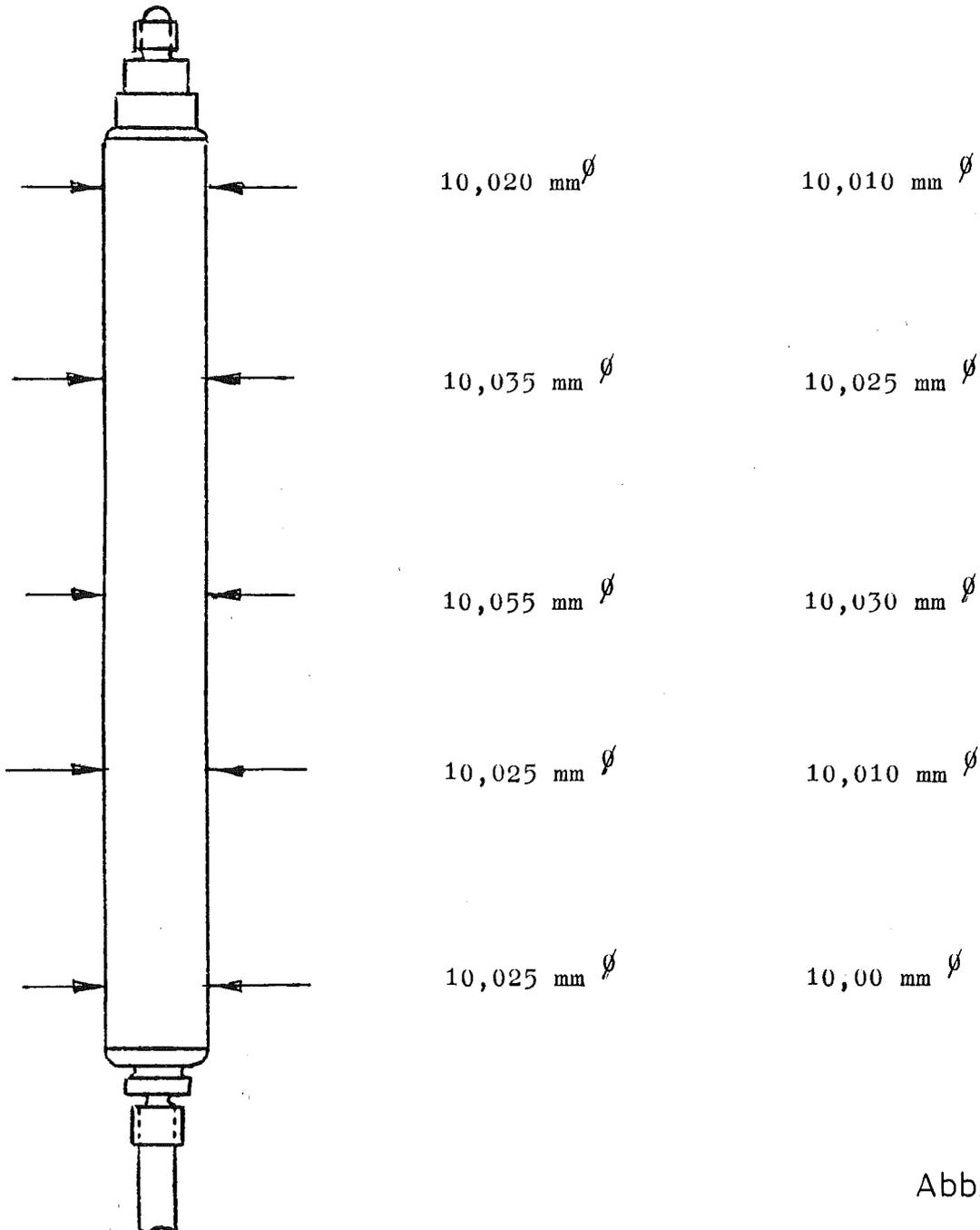


Abb. 21

Tabelle 9: Durchbiegung nach der Bestrahlung

| Prüfling | Durchbiegung in beiden Ebenen (μm) |
|----------|---|
| L4-1 | 300/150 |
| L4-2 | 174/ 84 |
| L4-3 | 144/154 |
| L4-4 | x) |
| L4-5 | 400/150 |
| L4-6 | 134/140 |
| L4-7 | 200/ 50 |
| L4-8 | x) |

x) wurde nicht gemessen, da Meßbank nicht intakt war !

7.2 Durchleuchtung

Die innere Geometrie des Brennstoffs nach der Bestrahlung ist von starkem Interesse. So bildet sich zum Beispiel im thermischen Zentrum der Brennstoffsäule bei Mischoxid ein als Zentralkanal bezeichneter langgestreckter Hohlraum, dessen Ausdehnung und Form Aufschluß über Vorgänge während der Bestrahlung liefert. Bei Mischkarbid konnte diese Zentralkanalbildung wegen des hier geringeren Temperaturgradienten bisher nicht beobachtet werden. Daneben wird die Brennstoffsäule beim Abkühlen durch Rißbildung bzw. Auseinanderbrechen bestimmter Brennstoff-Formationen verändert.

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

Wegen der größeren Stabdurchmesser bei höherer Schwermetalldichte ist jedoch eine Röntgendurchleuchtung üblicher Art nicht durchführbar.

In unserem Falle wurde die Durchleuchtung mit einem Betatron vorgenommen, das eine harte Gamma-Strahlung von maximal 18 MeV aussendet. Für diese hohe Gamma-Energie ist das Element Eisen weitgehend transparent, so daß die Eigenstrahlung der Prüflinge mit Eisen gegen den Aufnahme-film abgeschirmt werden kann, ohne die Intensität der Betatron-Strahlen-

quelle wesentlich zu schwächen. Die Technik dieser Durchleuchtungsmethode sieht noch vor, daß die Außenränder der zylinderförmigen Stäbe durch einen sogenannten Dickenausgleich aus Blei vor einer Überstrahlung geschützt werden. Damit wird eine gleichmäßige Massenbelegung der Bildfläche und eine ausreichende Bildschärfe im Bereich der Randzone erreicht. Daneben wirkt der Dickenausgleich noch als zusätzliche Abschirmung für die Aufnahmefilme.

Auf diese Art wurden bei Durchleuchtungszeiten zwischen 10 und 30 Minuten die in der angefügten Prüflingsdokumentation (Anhang I) wiedergegebenen Durchstrahlungsbilder hergestellt. Die durch die Betatron-Durchleuchtung erzeugten Aufnahmen weisen in den Originalfilmen einen hohen Schwärzungsgrad auf. Sie sind damit nur unter Verlust einiger Details in der Zeichnung auf Fotopapier zu kopieren. Die in der Dokumentation dargestellten Aufnahmen sind daher in ihrer Bildqualität deutlich schlechter als die Original-Filme, die auch zur Beurteilung und Auswertung allein herangezogen wurden.

7.3 Gamma-Profile und Gamma-Spektren

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

Als Detektor diente hierzu ein Halbleiterkristall (GeLi) mit nachgeschaltetem Multikanal-Analysator. Profile und Spektren wurden mit einem schlitzförmigen Kollimator mit den Maßen 0,5 mm x 20 mm x 700 mm durch die Abschirmwand der Heißen Zellen aufgenommen. Während der Messung rotierten die Prüflinge um ihre Längsachse. Hierdurch wurde erreicht, daß Aktivitätsansammlungen im Bereich der Brennstoffaußenzonen nicht durch eine zufällige ungünstige Orientierung des Prüflings zum Detektor unbeachtet blieben.

Die Standard-Untersuchung wurde mit den Aufnahmen eines typischen Gamma-Spektrum begonnen. Dazu wurde ein Brennstoffsäulenbereich ausgewählt, der eine möglichst geringe Konzentrationsänderung an Spalt-

produkten erwarten ließ. Gewöhnlich war dies etwa die Mitte der Brennstoffsäule. An Hand des Gamma-Spektrums wurden dann die besonderen Energiebereiche für bestimmte Gamma-Profile ausgewählt. Unabhängig von Gamma-Spektren wurde von jedem Prüfling ein integrales Profil aufgenommen, das die Gamma-Linien im weiten Bereich zwischen 400 keV und 1700 keV umfaßte.

Zu den Profilen, die an allen Prüflingen gemessen wurden, zählte auch das Zr/Nb-95-Profil. Bei kurzen Bestrahlungszeiten ist dem Profil der axiale Stableistungsverlauf zu entnehmen.

Je nach Abklingdauer wurden weitere Nuklid-Profile zur Bestimmung der Spaltproduktwanderung vermessen. Es waren dies insbesondere Profile für Cs/Ba-137 und Ba/La-140 für die kürzeren Abklingzeiten.

Zur Vervollständigung der Nuklidprofile in Bezug auf die Spaltproduktwanderung wurden, verteilt über die gesamte Prüflingslänge, zusätzliche Spektren aufgenommen, wo immer die Profile einen Hinweis auf anomale Spaltproduktverteilungen brachten (L4-4, 6, 8). In Anhang I sind für jeden Prüfling zwei der wichtigsten Gamma-Profile wiedergegeben.

8. Zerstörende Nachuntersuchung

8.1 Spaltgasbestimmung

Bei den experimentellen Spaltgasuntersuchungen an bestrahlten Prüflingen werden in den Heißen Zellen des KFZ Karlsruhe /18/ folgende Messungen durchgeführt zur Bestimmung

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

Wegen des geringen Abbrandes der Prüflinge ($\sim 0,2\%$) wurde auf die Bestimmung der beiden letztgenannten Größen verzichtet.

Wegen auftretender Lecks an der Durchführung des Zentral-Thermoelementes verloren alle Prüflinge beim Ausbau ihr freies Spaltgas mit Ausnahme des Prüflings 8. Hier ergab die gaschromatographische Bestimmung der gesamten freigesetzten Gase folgende Bilanz:

| | |
|---------------------|------------------------|
| O ₂ /A | ca. 30 mm ³ |
| N ₂ /CO | 2030 mm ³ |
| CH ₄ /Kr | ca. 30 mm ³ |
| Xe | nicht meßbar |
| He | 585 mm ³ |
| H ₂ | 138 mm ³ |
| <hr/> | |
| G e s a m t : | 2813 mm ³ |

Das freie Volumen des Prüflings wurde bestimmt zu : $V' = 3074 \text{ mm}^3$.

8.2 Keramografie

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

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

Das Ziel der Keramografie war einerseits eine typische Verhaltensweise für bestimmte Parameterkombinationen aufzuzeigen, andererseits Besonderheiten im Stabverhalten darzulegen. Für das erstere

Ziel wurden in jedem Stab Schnittebenen ausgesucht, die auf der Höhe des zentralen Thermoelementes lagen. Bei den Prüflingen, die aufgrund der Gamma-Spektrometrie und der Durchleuchtung Hinweise auf strukturelle Inhomogenitäten enthielten, wurden zusätzliche Längsschliffe angefertigt.

8.3 Untersuchungen mit der Mikrosonde /5/ , /12/

Von Prüfling L4-6 wurden 2 Schliffebenen mittels der abgeschirmten Mikrosonde Camera MS 46 untersucht. Bei diesem Prüfling hat - wie für die Prüflinge L4-4 und L4-8 - die keramografische Untersuchung eindeutig gezeigt, daß es im Bereich des Zentralthermoelementes und der Rhodiumplatte vor dem Gasplenum zum Schmelzen gekommen war. Die ausgewählte Probe bestand aus einem Querschliff in Höhe der ursprünglichen Thermoelement-Spitze. Aus der keramografischen Untersuchung folgte, daß das zentrale Thermoelement mit dem Brennstoff reagierte (L4-6-0/1, Abb. 22) und eine starke Uran-Plutonium-Entmischung (s. Alpha-Autoradiografie in Abb. 23) stattgefunden hatte. Die Mikrosondenanalyse erstreckte sich auf die Bestimmung des Uran- und Plutoniumprofils, besonders in Hüllnähe, der Zusammensetzung der im Zentralkanal-nahen Bereich gebildeten Phasen und der Verträglichkeit mit dem Hüllmaterial.

Die Abb. 24 zeigt einen Radialschliff der untersuchten Stelle, Abb. 25 zeigt die Alpha-Autoradiographie desselben Schliffes (s. Pu-Anreicherung im Spalt zwischen Hülle und Brennstoff). In Untersuchungen aus dem Jahre 1969 /6/ wurde eine Grenztemperatur von 2100 °C für WRe-Legierungen im Kontakt mit UC vorgeschlagen. Diese Arbeit wurde auch bei der Auslegung dieses Bestrahlungsversuches mitbetrachtet. Aus neueren Untersuchungen der Systeme U-W-C /7,8/, Pu-W-C /9,10/ und U-Pu-W-C /9,11/ folgt, daß zwischen dem Brennstoff und Wolfram eine peritektische Reaktion auftritt, die im System $U_{0,8}Pu_{0,2}C - W$ gemäß der Gleichung



abläuft /9,11/. Die Untersuchungen können wie folgt interpretiert werden /5/:

Die Schmelze wandelt sich während der Abkühlung in (U,Pu)C, (U,Pu) Metall und W um. Da das ausgeschiedene Komplexkarbid uranhaltiger

Prüfling L4-6

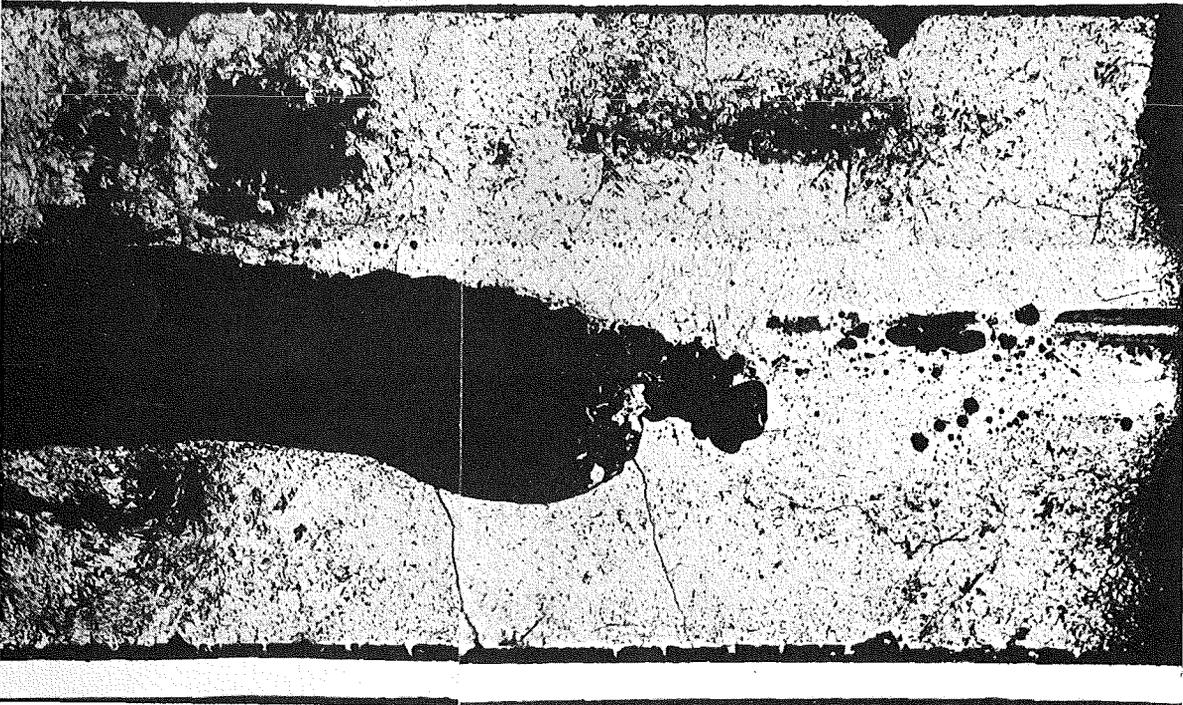
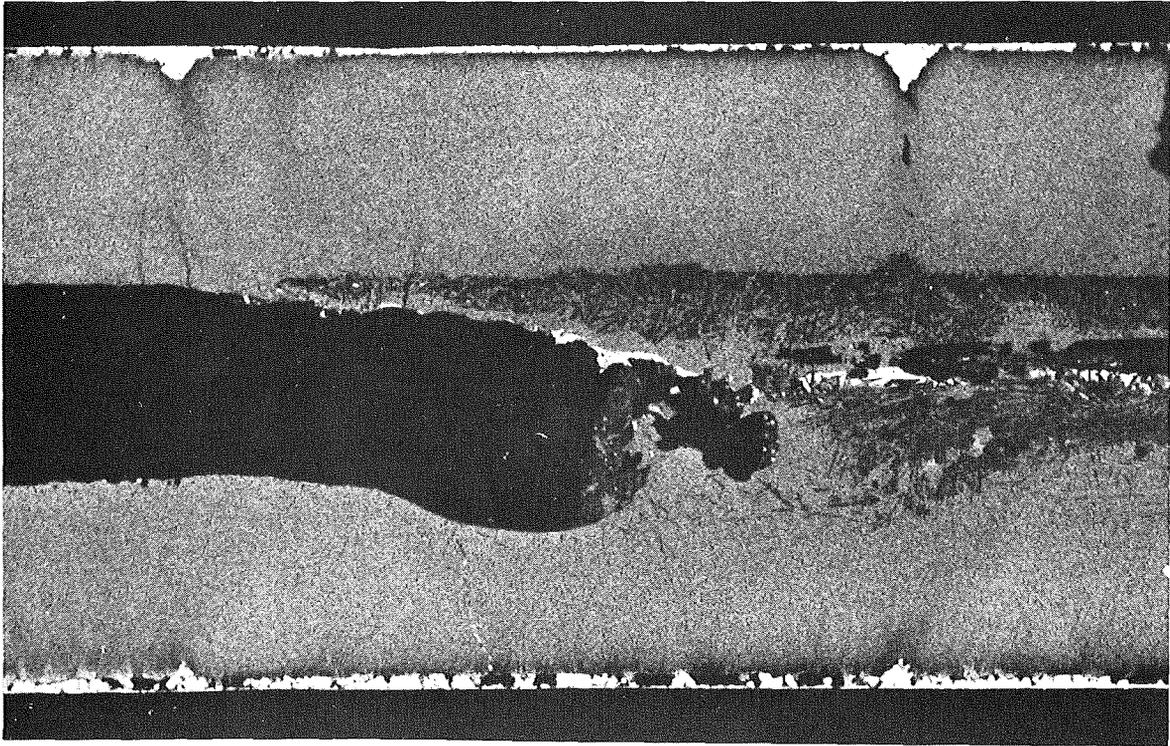
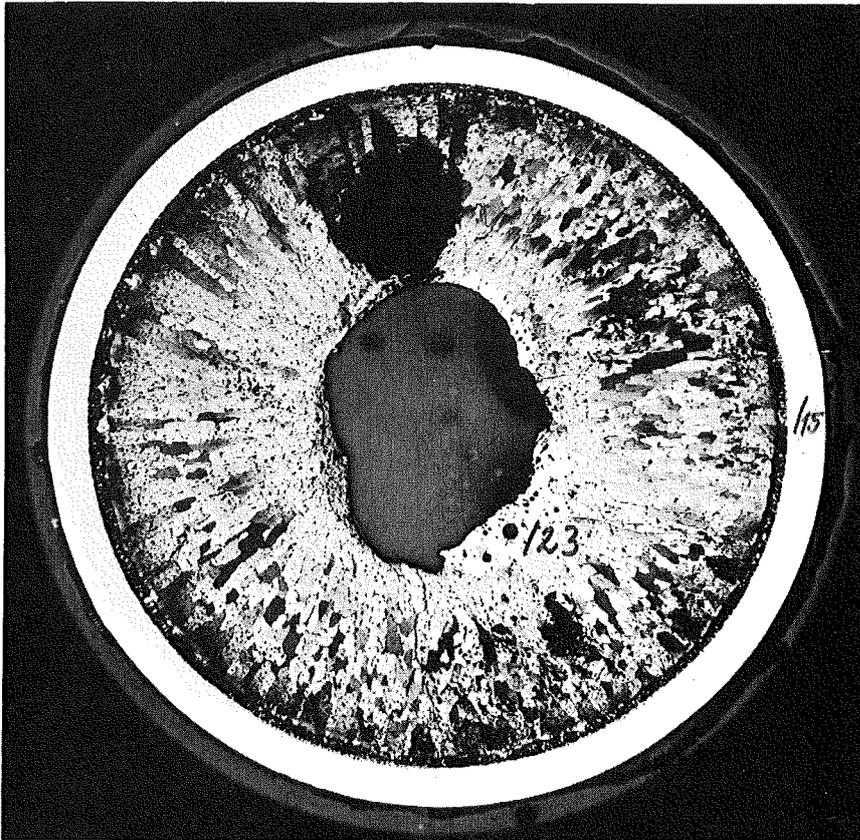


Abb. 22 Keramografie geschmolzenes
Zentral-TE



1 mm

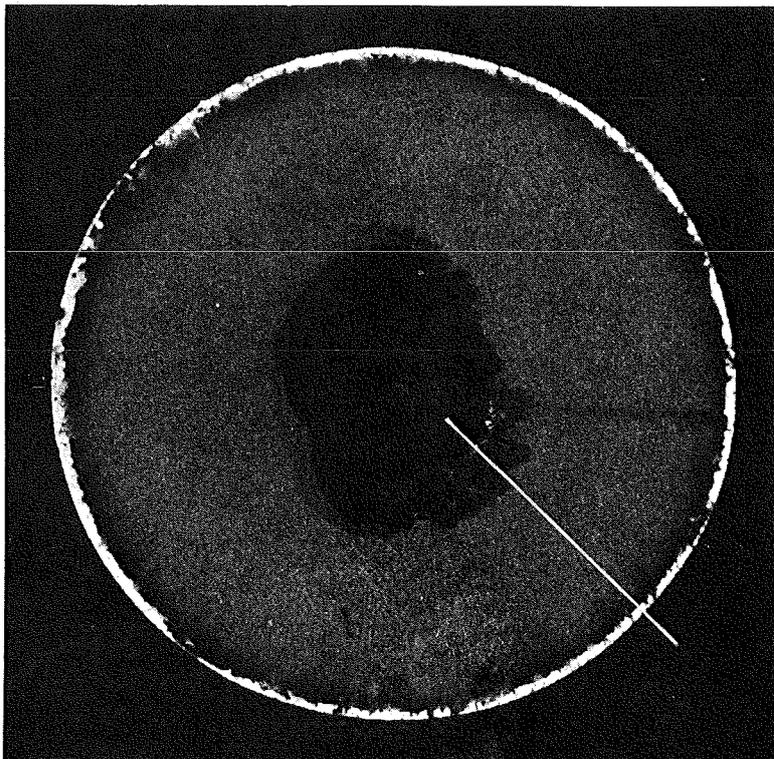
Abb. 23 α -Autoradiografie



Gefüge

1 mm

Abb. 24



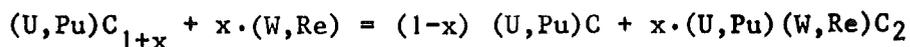
α - Autoradiographie

1 mm

Abb. 25

Loop 4A - L4.6 - 2

ist, reichert sich die Schmelze mit Pu an. Das Pu kondensiert infolge des höheren Dampfdruckes bevorzugt im Spalt zwischen Brennstoff und Hülle (s.a. Alpha-Autoradiografie). Da das hier eingesetzte Mischkarbid stark überstöchiometrisch war, kann sich auch unterhalb der Peritektikalen ein Komplexkarbid durch Reduzierung des Mischkarbides zum Monokarbid gemäß



bilden. Die peritektische Temperatur kann durch den zusätzlichen Einfluß von Rhenium noch erniedrigt werden.

Die hier angeführten Mikrosondenuntersuchungen /5/ zeigten in Übereinstimmung mit der neueren Literatur, daß die zulässige Zentraltemperatur im vorliegenden Fall mit 2100 °C zu hoch angesetzt war.

9. Dokumentation der zerstörungsfreien und zerstörenden Nachuntersuchung

Im folgenden Abschnitt wird eine umfassende Dokumentation der zerstörungsfreien und zerstörenden Nachuntersuchung gegeben, welche eine Auswahl der wichtigsten Ereignisse für jeden der 8 Prüflinge enthält. Die Ergebnisse sind auf einem dreiseitigen Faltblatt zusammengestellt, welches folgende Aufteilung aufweist (von links nach rechts) (Anhang I):

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

- Keramografische Übersicht:
 - a) technische Zeichnung des Prüflings (Maßstab 1:1) mit Markierung der Schnittebenen,
 - b) keramografische Übersichtsaufnahmen entsprechend der Schnittzahl,
 - c) Alpha-Autoradiografie zur Darstellung der Pu-Verteilung nach Ablauf der Bestrahlung,

- d) Gamma-Autoradiografien zur Charakterisierung der Spaltproduktverteilung,
- e) Betatron-Durchleuchtung des Prüflings,
- f) schematische Darstellung des Prüflings mit Hervorhebung des Zentralkanalverlaufes.

- Titelblatt:

Kurze Zusammenfassung der Material- und Bestrahlungsdaten des Brennstabprüflings.

Auf weiteren Einzelblättern werden weiterhin signifikante Details wie beispielsweise axiale und radiale Materialversetzungen oder -entmischungen des Brennstoffes in verschiedenen Vergrößerungen gezeigt.

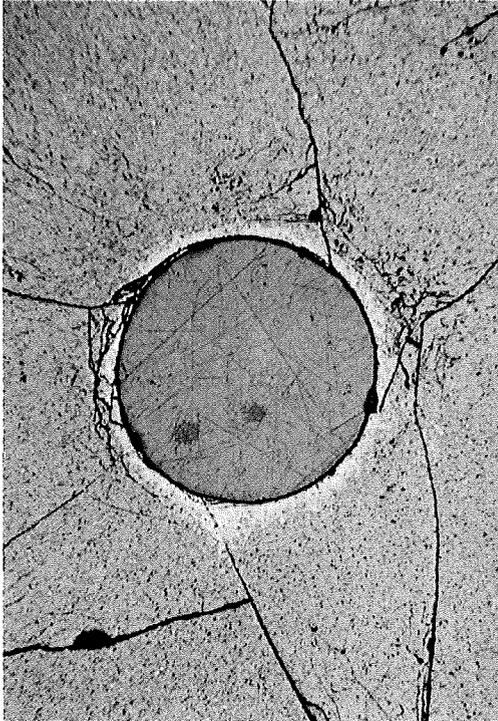
Auf 2 Farbdruckseiten (Abb. 26 und 27) werden auf acht 7x10 cm-formatigen Bildern strukturelle Details der 8 Prüflinge gezeigt, die bei normaler schwarz-weiß Wiedergabe nicht hervorzuheben waren. Speziell war eine Umlagerung der ursprünglich homogen verteilten Oxikarbid-Phase zu verzeichnen. In nachfolgender Tabelle 10 sind die Positionen der Oxikarbid-Phase aufgeführt.

Tabelle 10: Position der Oxikarbid-Phase

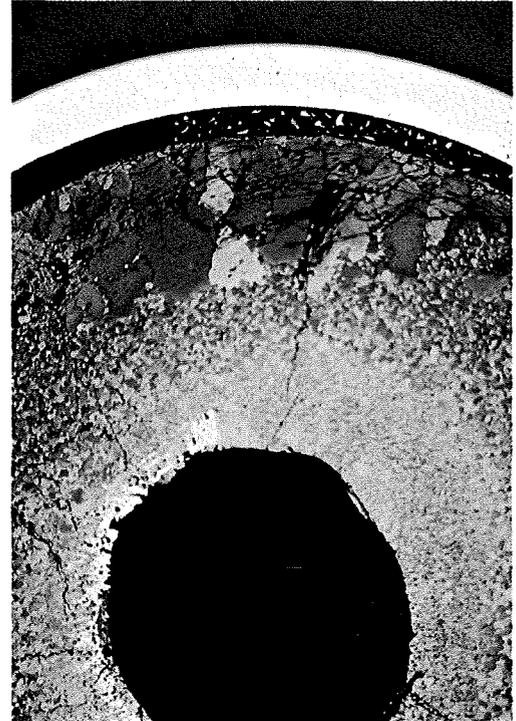
| Prüfling | Radial-Spalt (mm) | Gasbindung | Oxikarbid lokalisiert an: |
|----------------------|-------------------|------------|--|
| L4-1 | 25 | He | Zentralbohrung |
| L4-2 | 125 | He | Rand |
| L4-3 | 40 | Ar | Zentralbohrung |
| L4-4 ^{+))} | 300 | He | nicht feststellbar |
| L4-5 | 125 | He | Rand |
| L4-6 ^{+))} | 125 | Ar | Rand + Oxikarbid in Säulenkristalle |
| L4-7 | 125 | He | Rand |
| L4-8 ^{+))} | 300 | He | MC ₂ Oxikarbid geringe Mengen |

^{+))}Prüflinge mit zentralem Schmelzen

Bei den intakten Prüflingen war bei kleinem Radialspalt (25 - 40 μ m, d.h. gute Wärmeabfuhr nach außen) das Oxikarbid konzentrisch zur Zentralbohrung verlagert, während bei größerem Spalt (125 μ m, schlechte Wärmeabfuhr) diese Phase am Gasspalt wiedergefunden wurde. Letztere Aussage deckt sich mit Aussagen von /4,15/.



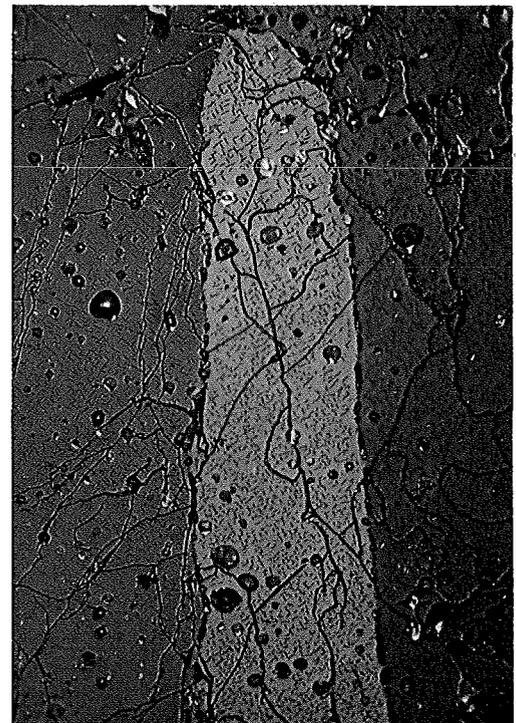
L4-3 Radialschnitt durch
TE-Bohrung



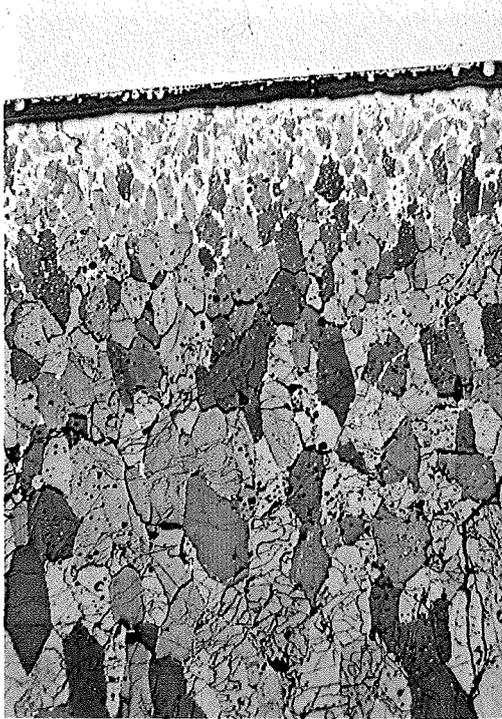
L4-4 Radialschnitt durch
TE-Bohrung



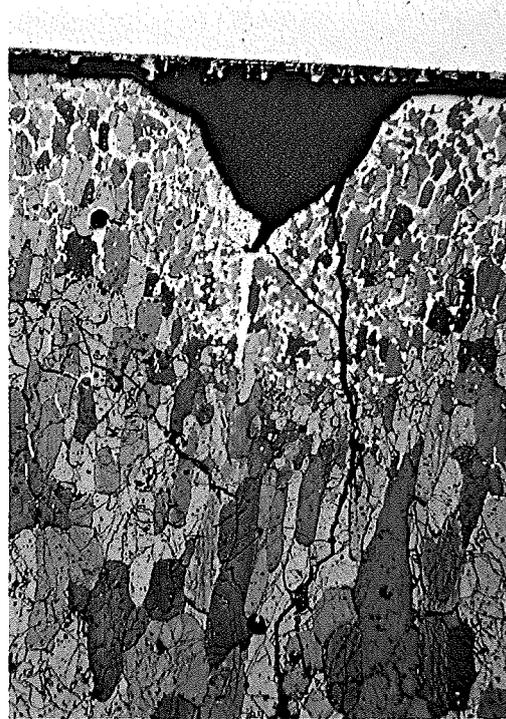
L4-6 Axialschnitt -
Säulenkristalle



L4-6 Axialschnitt- Detail
(MC₂-Nadeln)

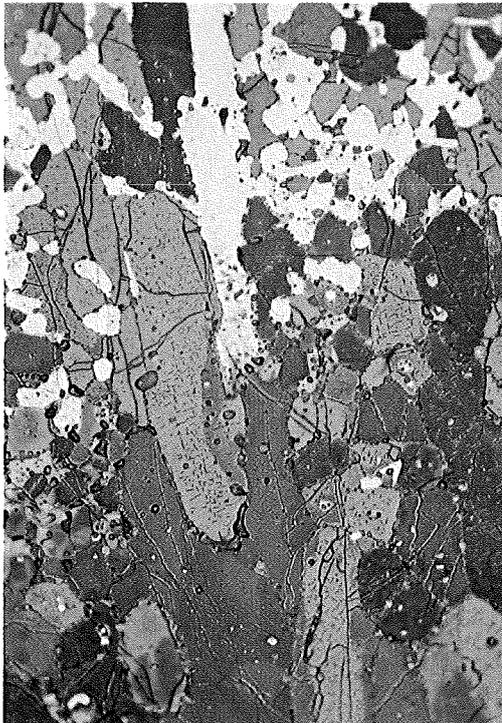


L4-6 Axialschnitt mit Oxikarbid
am Rand



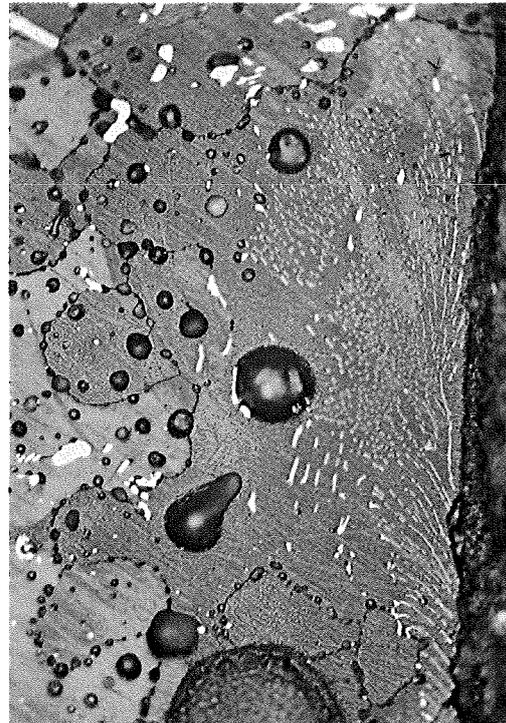
L4-6 Axialschnitt mit Oxikarbid an
Tablettenstoffstelle

0,2mm
┌───┐



L4-6 Axialschnitt Detail

0,1mm
┌───┐



L4-8 Detail mit Komplexkarbid

0,05mm
┌───┐

10. Thermische Analyse mit SATURN

Nach Abschluß der Nachuntersuchung wurde mit der Karbid-Version des Brennstabcodes SATURN-1 /16/ eine thermische Analyse aller 8 Prüflinge durchgeführt. Sie stellt eine Ergänzung bzw. Korrektur einer schon früher durchgeführten Teilauswertung /14/ dar.

10.1 Rechenausgangsdaten

Die bei den SATURN-Rechnungen zugrundegelegten Materialdaten sind in Tabelle 11 zusammengestellt; die für die Rechnungen ebenfalls erforderlichen Auslegungsdaten der einzelnen Prüflinge werden hier nicht mehr angegeben, sie können Kapitel 3 entnommen werden.

10.2 Durchführung der Rechnungen

Die Rechnungen dienen vor allem dazu, aus den gemessenen Werten von Zentraltemperatur, Hüllaußentemperatur und Stableistung die Wärmeübergangszahlen im Spalt in Abhängigkeit von Spaltweite, Füllgas, Einsatzzeit und Zahl der Zyklen zu bestimmen. Leider stellte sich heraus, daß nur bei vier Prüflingen, nämlich L4-1, -2, -3 und -7 ein sinnvoller Vergleich zwischen Rechnung und Experiment möglich ist. Beim Prüfling L4-5 stimmen die Meßwerte der Zentraltemperatur offensichtlich nicht, es liegt wahrscheinlich eine systematische Fehlanzeige von etwa 200°C vor (gemessene Werte zu niedrig). Bei den Prüflingen L4-4, -6 und -8 trat dagegen zentrales Brennstoffschmelzen auf, wobei auch das Thermoelementmaterial mit dem Brennstoff reagierte. Es sind daher alle Meßwerte für die Zentraltemperatur bei diesen drei Prüflingen unbrauchbar.

Die Abb. 28 und 29 zeigen die radiale Temperaturverteilung im Brennstoff in Höhe der Thermoelementspitze jeweils nach Erreichen der Nominalleistung beim Anfahren sowie im stationären Betriebszustand für alle 8 Prüflinge.

Die Abb. 30 bis 38 geben den zeitlichen Verlauf von Stableistung, Zentraltemperatur und Wärmeübergangszahl im Spalt für die Prüflinge L4-1, -2, -3 und -7 wieder.

Tabelle 11: Materialdaten für SATURN-Rechnungen

B r e n n s t o f f :

| | | |
|-----------------------|--|-------------------------------------|
| E-Modul | 19000 kp/mm ² | |
| Poisson-Zahl | 0,34 | |
| thermische Ausdehnung | $\alpha = 8,7 \times 10^{-6} + 0,3 \times 10^{-8} \times T \text{ (1/}^\circ\text{C)}$ | |
| Wärmeleitfähigkeit | T (°C) | WLF (W/cm °C) |
| (für 100 % th.D.) | 20 | 0,30 |
| | 200 | 0,17 |
| | 600 | 0,18 |
| Zwischenwerte linear | 1000 | 0,19 |
| interpoliert | 1400 | 0,21 |
| | 1800 | 0,24 |
| | 2000 | 0,26 |
| | 3000 | 0,30 |
| Schwellrate | T (°C) | $\Delta V/V \text{ (\%/10 MWd/kg)}$ |
| | 20 | 1,0 |
| Zwischenwerte linear | 800 | 1,0 |
| interpretiert | 1200 | 1,5 |
| | 2000 | 2,5 |

Kriechverhalten(nach /1,2,3/)

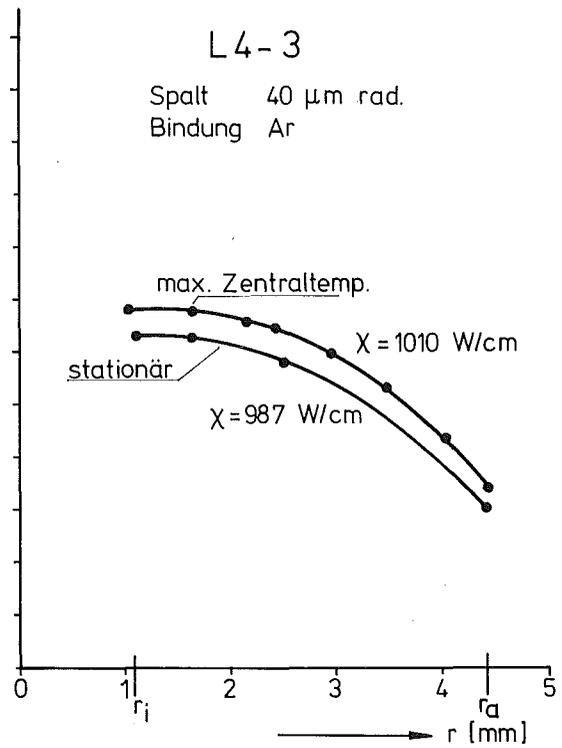
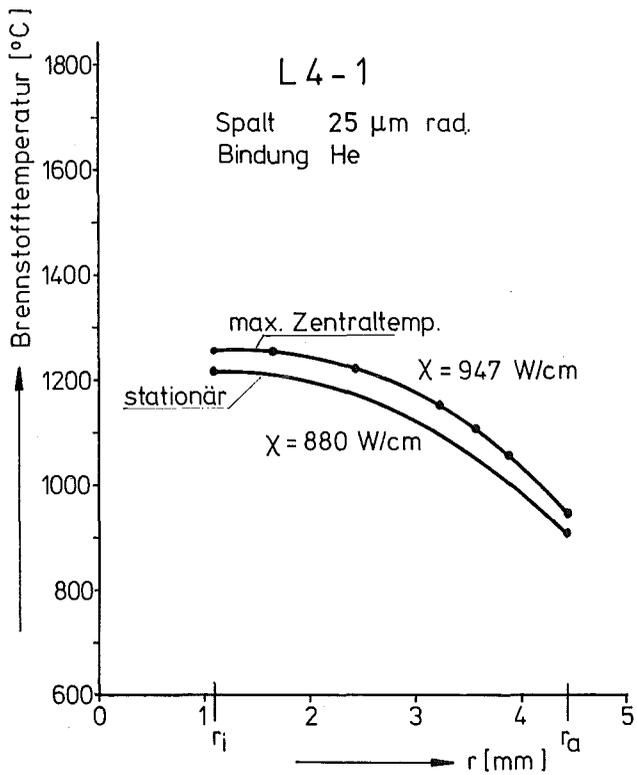
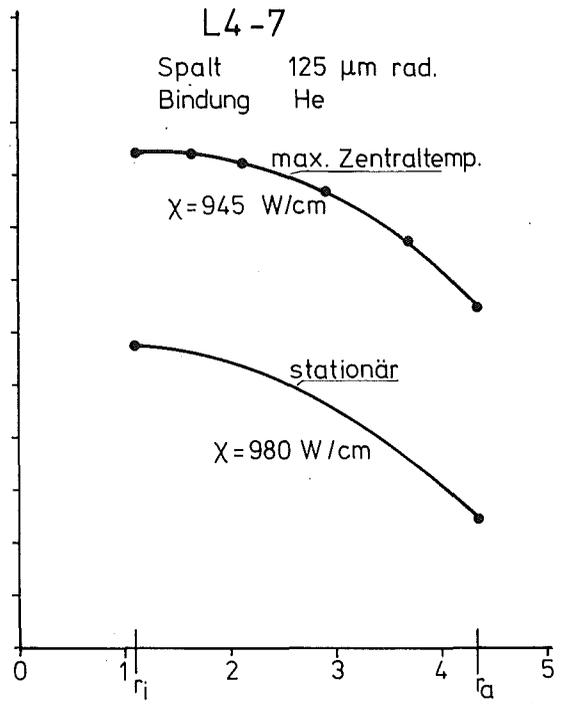
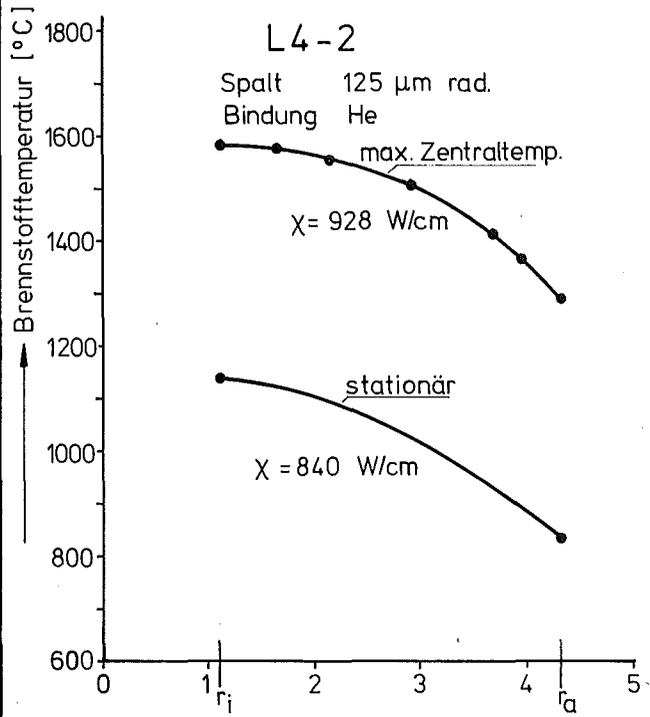
$$\dot{\epsilon} = a, c \cdot \frac{\chi}{r_a^2 - r_i^2} \sigma \text{ (kp/mm}^2\text{)} + 2,3 \cdot 10^{-2} \sigma^{1,8} \text{ (MN/m}^2\text{)} e^{-\frac{69000}{RT}} +$$

$$+ 0,11 \cdot \sigma^{4,2} \text{ (MN/m}^2\text{)} e^{-\frac{142000}{RT}}$$

$a = 1,4 \cdot 10^{-8}$; $c = 0,4$; χ lineare Stableistung

H ü l l e :

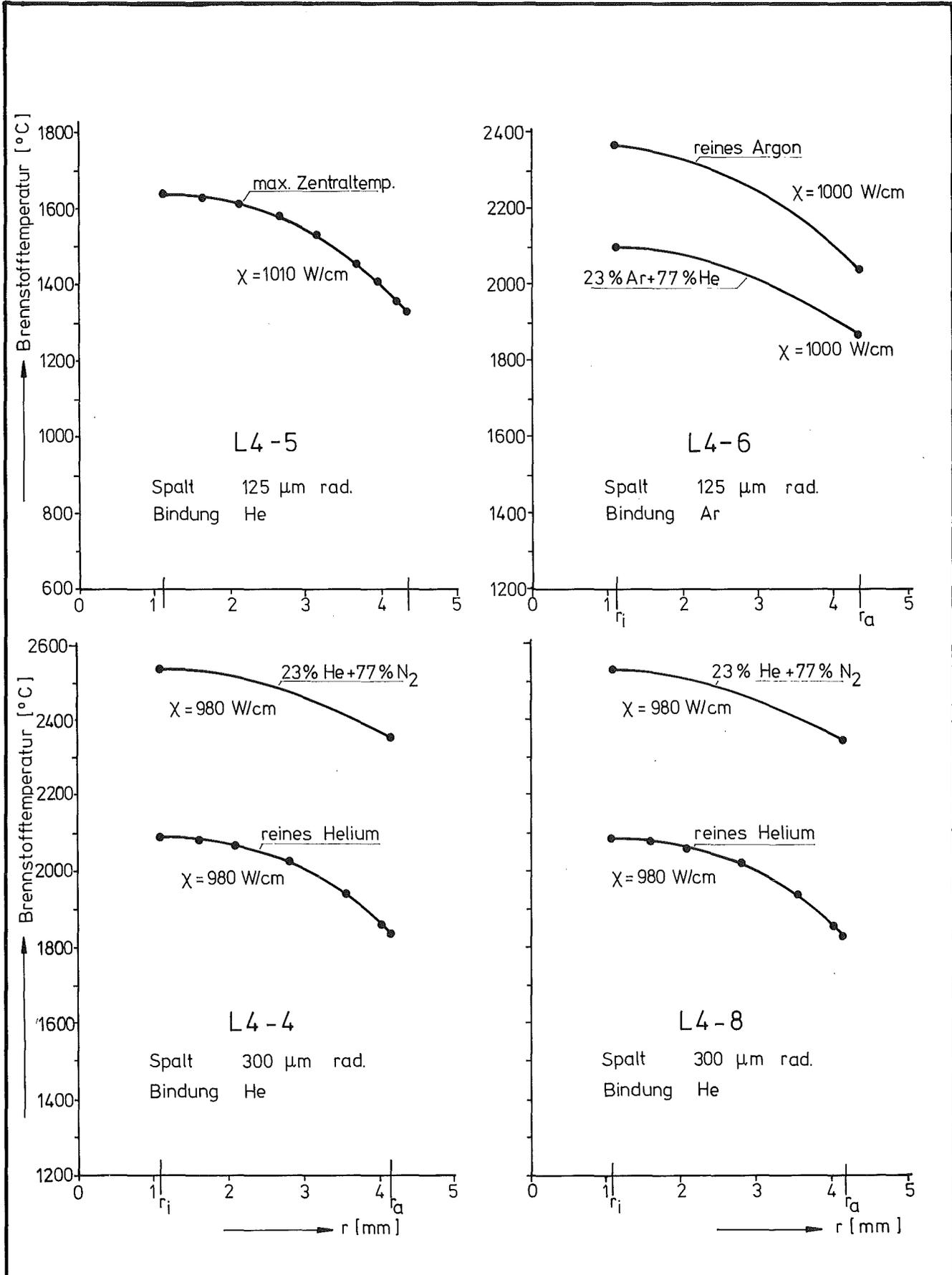
| | | |
|-----------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| E-Modul | 16000 kp/mm ² | |
| Poisson-Zahl | 0,3 | |
| thermische Ausdehnung | T (°C) | $\alpha \text{ (1/}^\circ\text{C)}$ |
| | 20 | 0 |
| | 300 | $0,171 \cdot 10^{-4}$ |
| | 400 | 0,174 |
| | 500 | 0,176 |
| | 600 | 0,178 |
| | 700 | $0,180 \cdot 10^{-4}$ |
| Wärmeleitfähigkeit | T (°C) | WLF (W/cm °C) |
| | 20 | 0,151 |
| | 300 | 0,180 |
| | 400 | 0,193 |
| | 500 | 0,201 |
| | 600 | 0,218 |
| | 700 | 0,250 |



GfK Karlsruhe
 IMF/III

radiale Temperaturprofile in Höhe des
 Zentral-TE

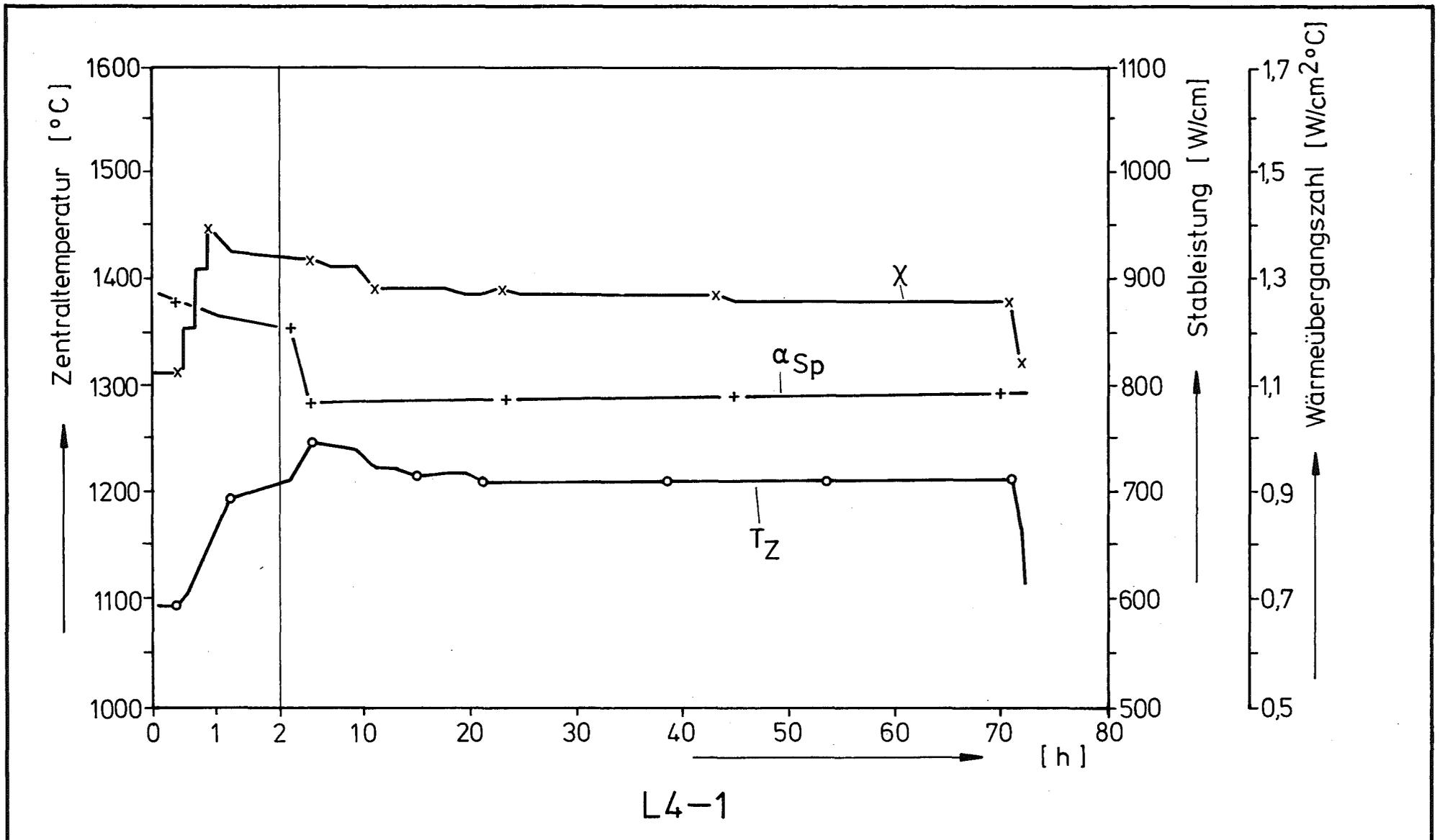
Abb. 28



GfK Karlsruhe
IMF/III

radiale Temperaturprofile in Höhe des
Zentral-TE

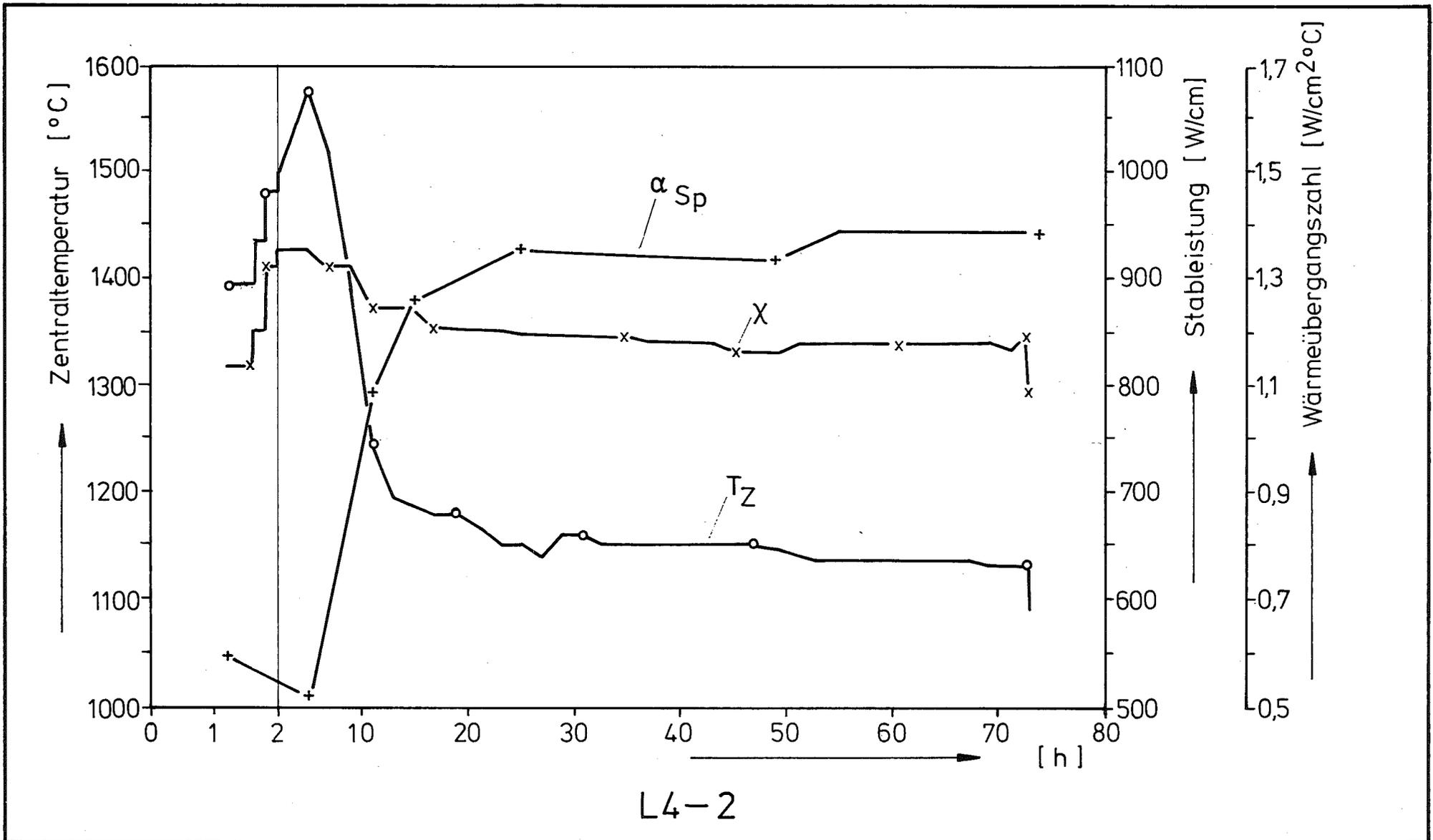
Abb. 29



GfK Karlsruhe
IMF/III

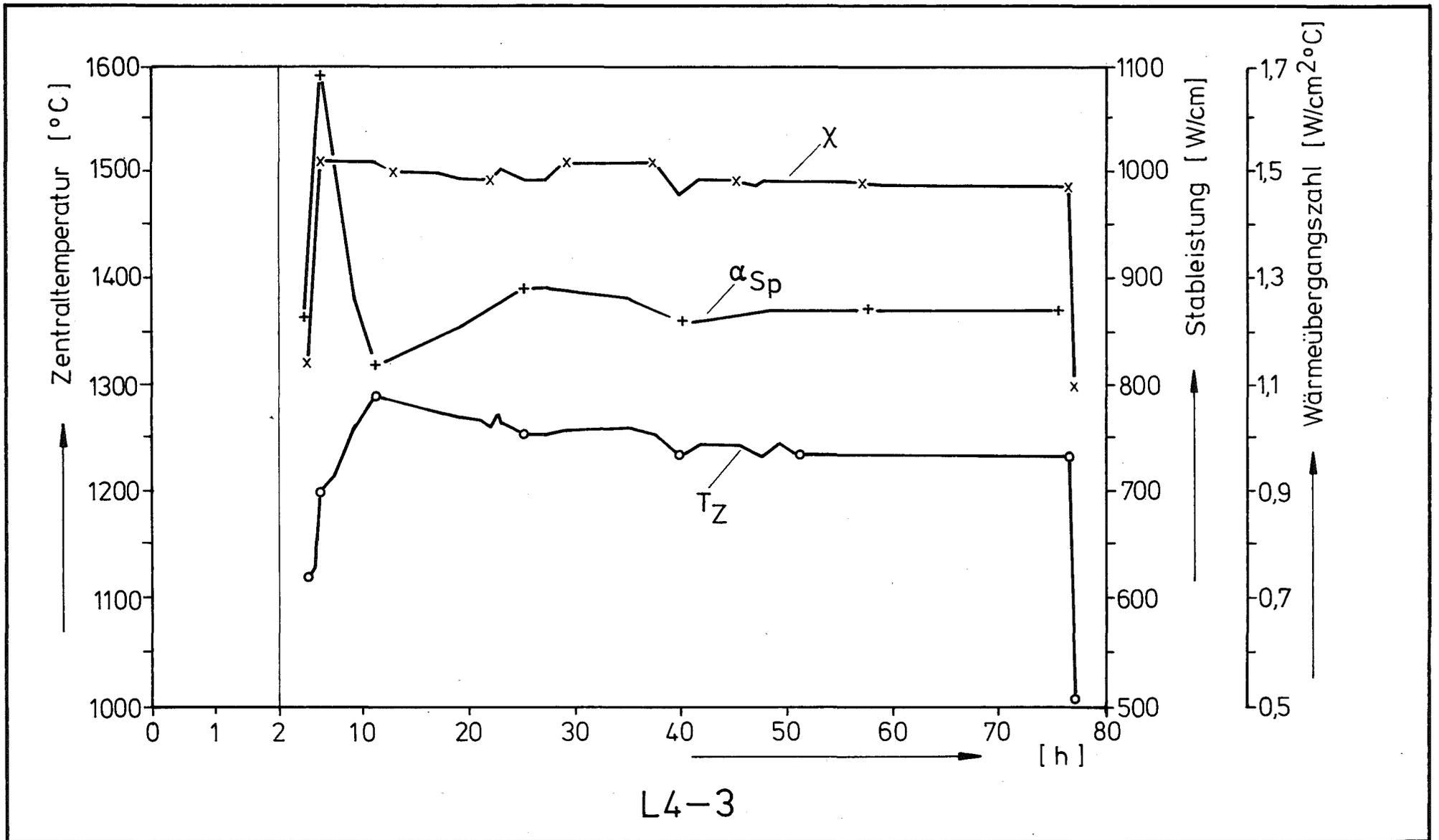
Stableistung, Zentraltemperatur sowie die daraus ermittelte Wärmeübergangszahl im Spalt in Abhängigkeit von der Einsatzzeit

Abb. 30



L4-2

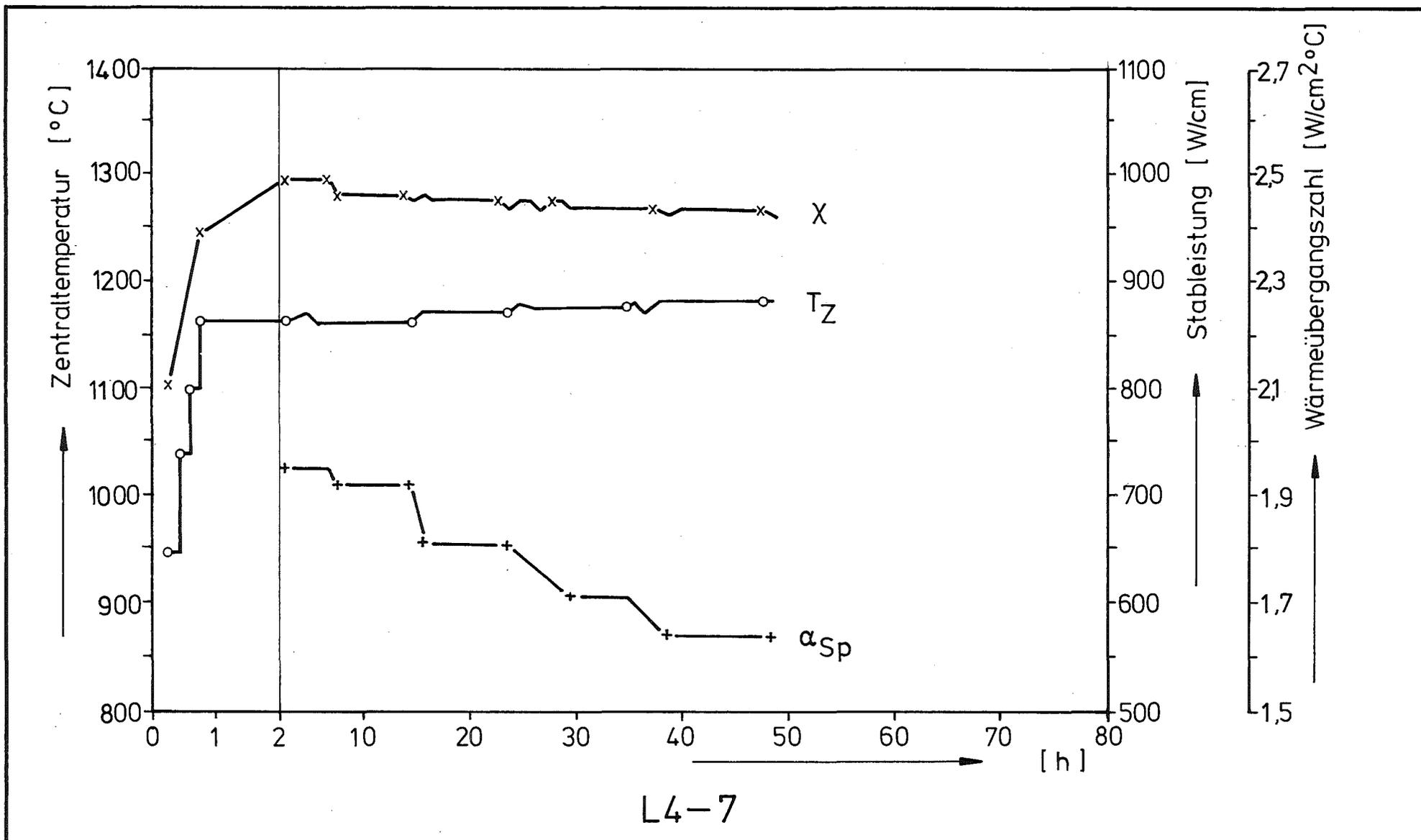
| | | |
|----------------------------------|--|----------------|
| <p>GfK Karlsruhe IMF/III</p> | <p>Stableistung, Zentraltemperatur sowie die daraus ermittelte Wärmeübergangszahl im Spalt in Abhängigkeit von der Einsatzzeit</p> | <p>Abb. 31</p> |
|----------------------------------|--|----------------|



GfK Karlsruhe
IMF/III

Stableistung, Zentraltemperatur sowie die daraus ermittelte Wärmeübergangszahl im Spalt in Abhängigkeit von der Einsatzzeit

Abb. 32

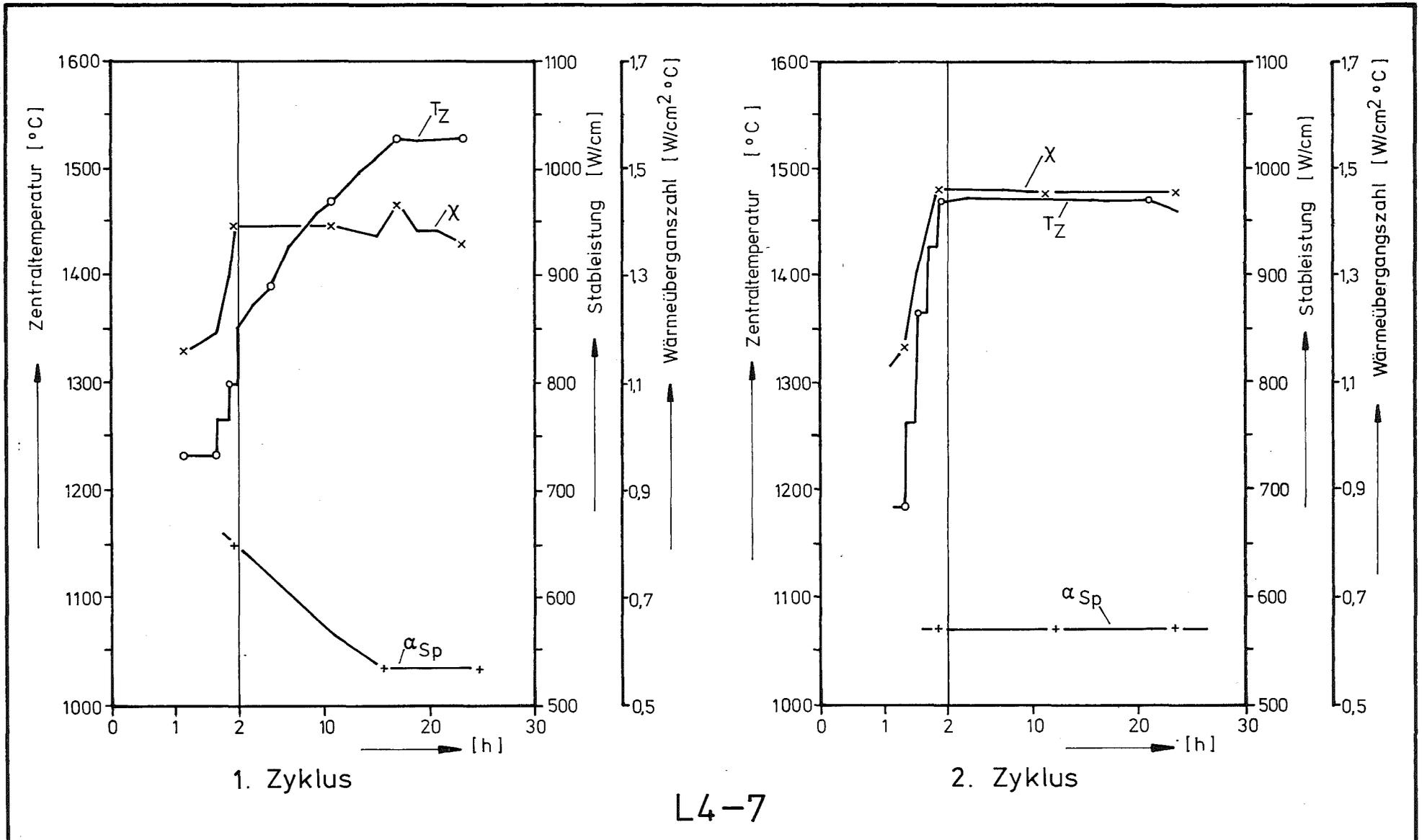


L4-7

GfK Karlsruhe
IMF/III

Stableistung, Zentraltemperatur sowie die daraus ermittelte Wärmeübergangszahl im Spalt in Abhängigkeit von der Einsatzzeit

Abb. 33



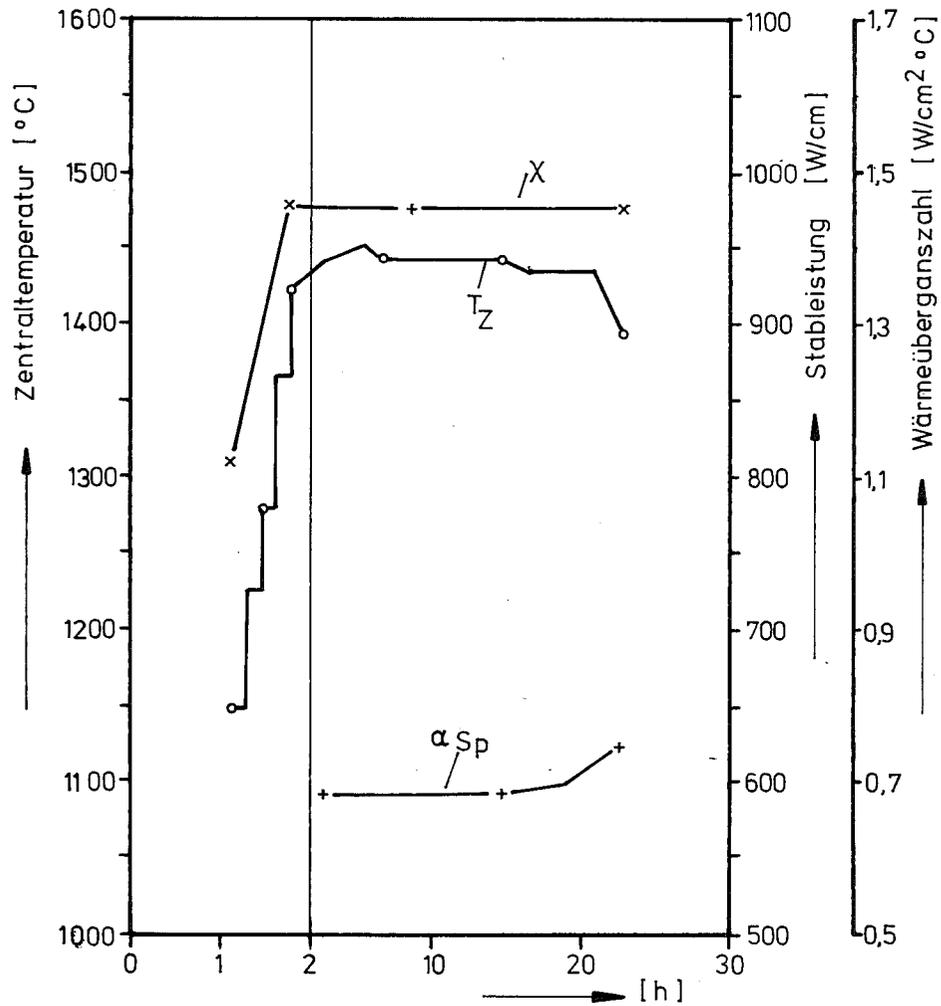
L4-7

GfK Karlsruhe

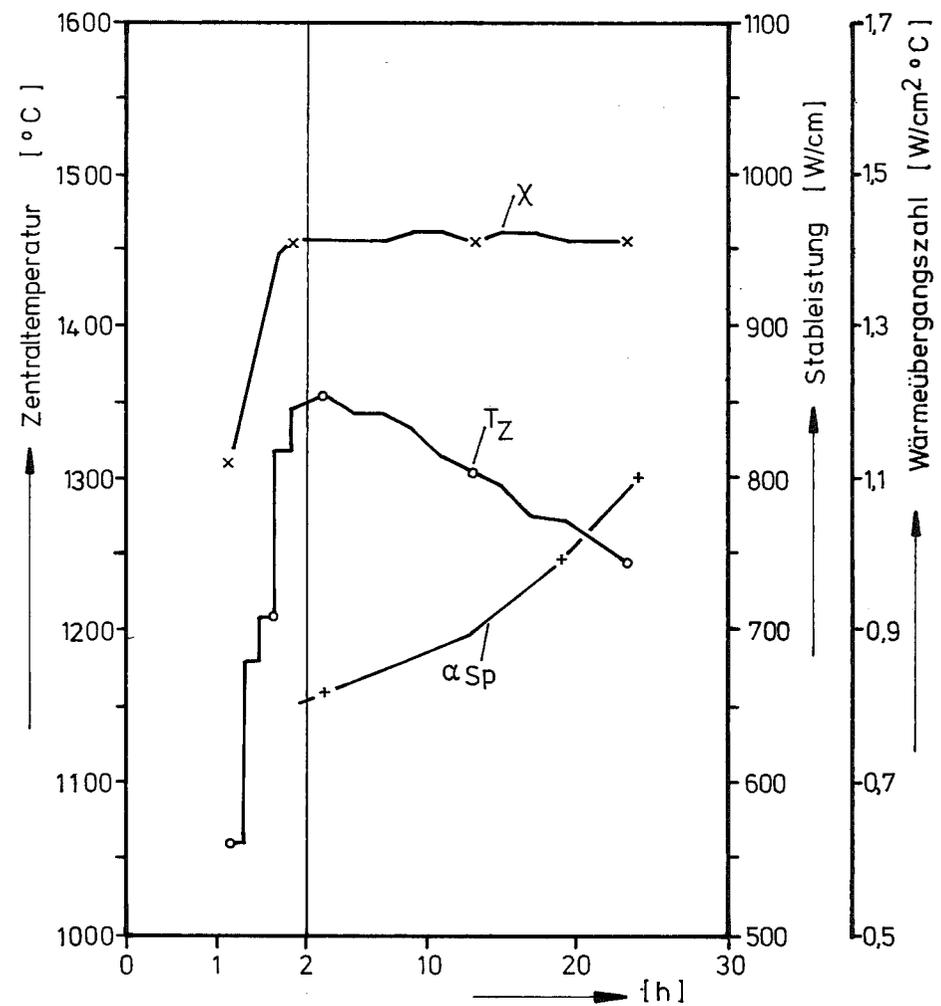
IMF/III

Stableistung, Zentraltemperatur sowie die daraus ermittelte Wärmeübergangszahl im Spalt in Abhängigkeit von der Einsatzzeit

Abb. 34



3. Zyklus



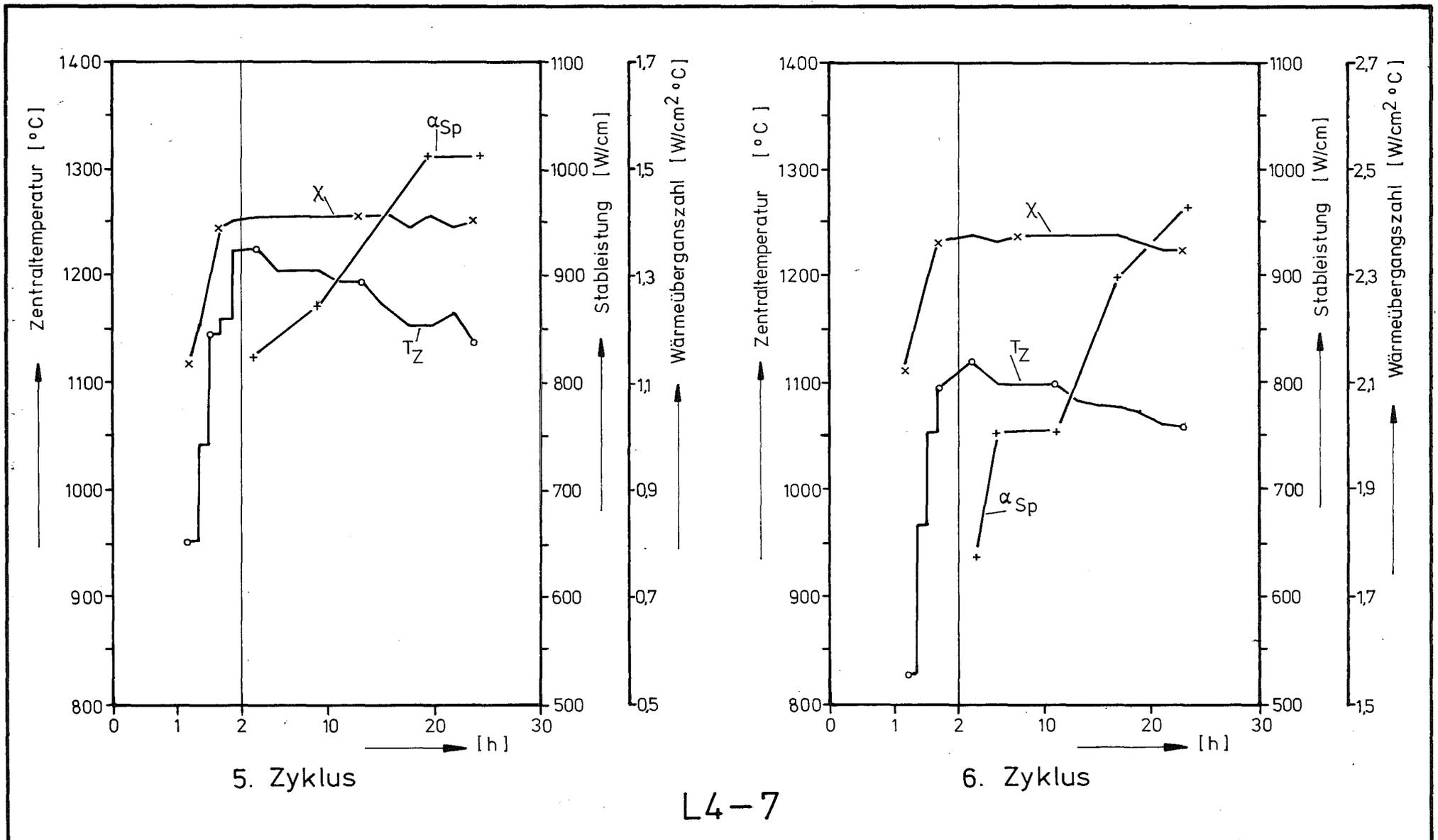
4. Zyklus

L4-7

GfK Karlsruhe
IMF/III

Stableistung, Zentraltemperatur sowie die daraus ermittelte Wärmeübergangszahl im Spalt in Abhängigkeit von der Einsatzzeit

Abb. 35

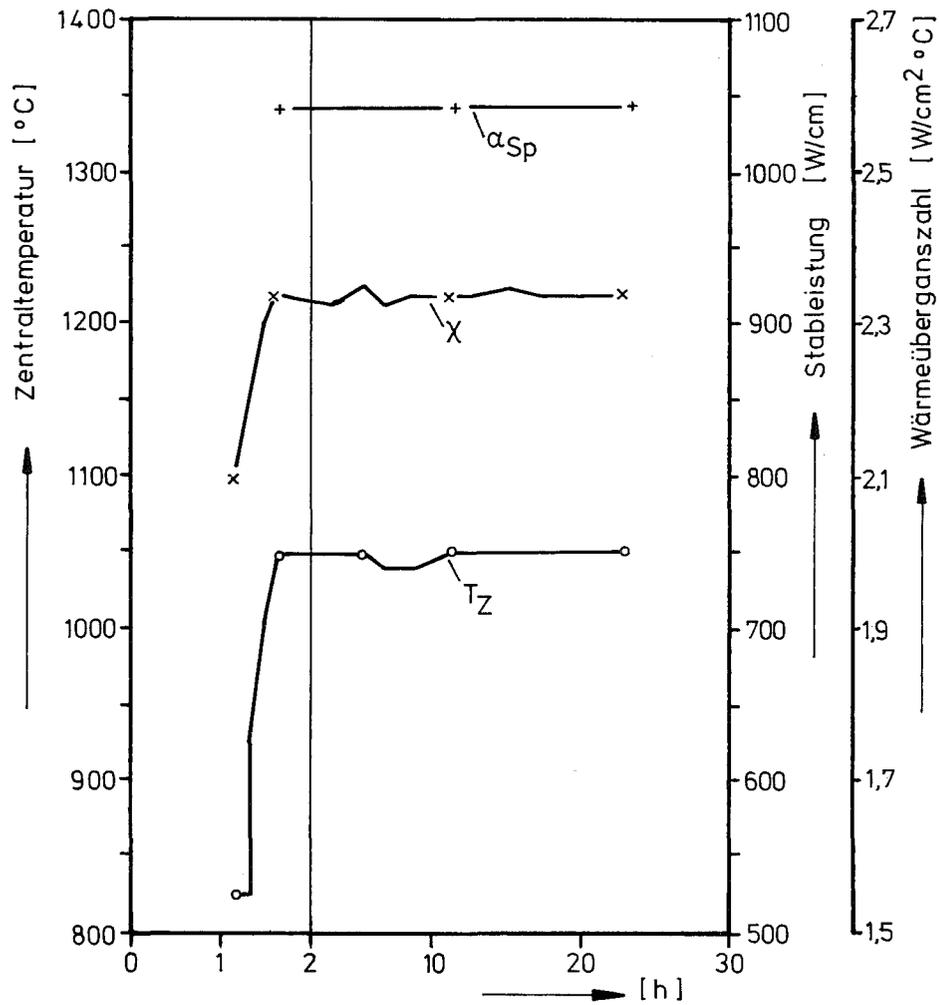


L4-7

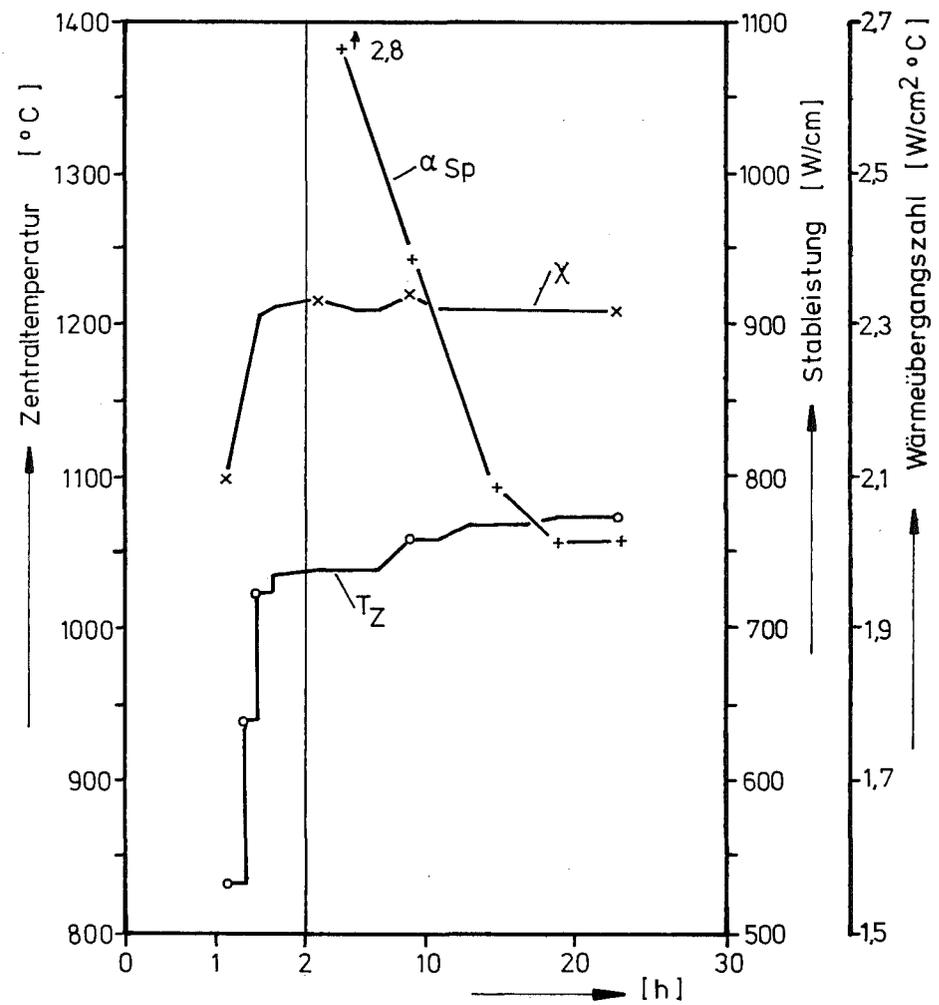
GfK Karlsruhe
IMF/III

Stableistung, Zentraltemperatur sowie die daraus ermittelte Wärmeübergangszahl im Spalt in Abhängigkeit von der Einsatzzeit

Abb. 36



7. Zyklus



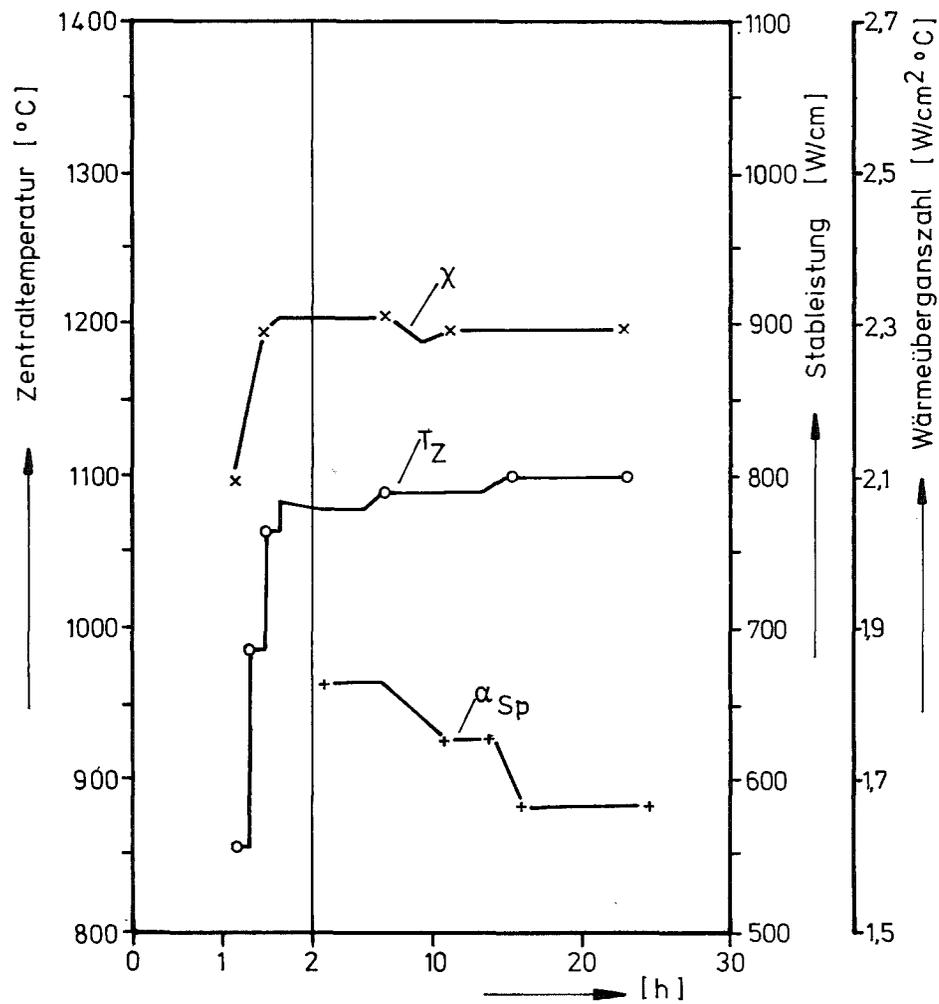
8. Zyklus

L4-7

GfK Karlsruhe
IMF/III

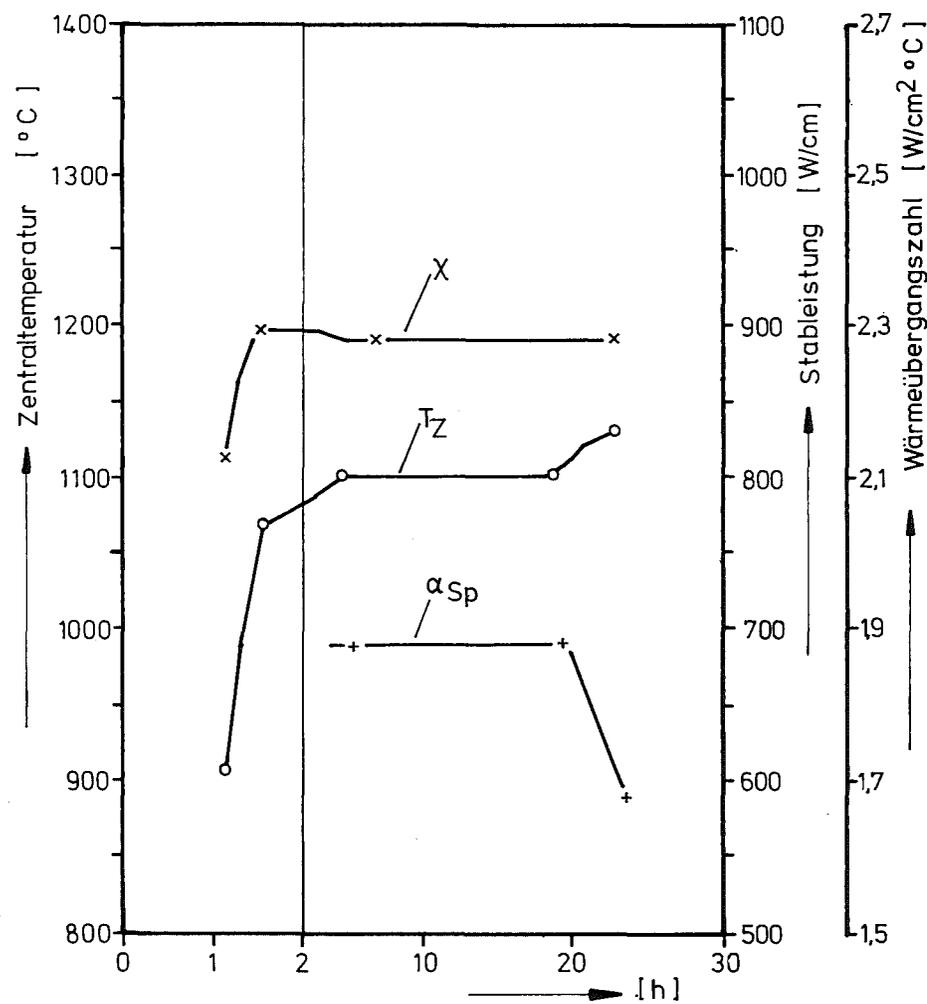
Stableistung, Zentraltemperatur sowie die daraus ermittelte
Wärmeübergangszahl im Spalt in Abhängigkeit von der Einsatzzeit

Abb.37



9. Zyklus

L4-7



10. Zyklus

GfK Karlsruhe

IMF/III

Stableistung, Zentraltemperatur sowie die daraus ermittelte Wärmeübergangszahl im Spalt in Abhängigkeit von der Einsatzzeit

Abb. 38

Der Prüfling L4-5 müßte infolge der gleichen Geometrie und Gasbindung ein ähnliches Verhalten zeigen wie die Prüflinge L4-2 und L4-7. Für die Prüflinge L4-4, -6 und -8 kann dagegen nur die Temperaturverteilung beim Anfahren angegeben werden. Man sieht, daß die Zentraltemperaturen in allen 3 Fällen deutlich oberhalb 2100 °C lag. Bei ca. 1900 °C reagiert nach /5,12/ das Material des Thermoelementes peritektisch mit dem Mischkarbid unter Bildung eines Komplexkarbides. Das bedeutet aber, daß bei der Auslegung eine zu hohe Zentraltemperatur im Brennstoff zugelassen wurde. Durch den Schmelzvorgang im Brennstoff, verbunden mit einer axialen Verlagerung der Schmelze sowie einer Ablagerung des Pu an der Hülle ist es nicht möglich, weitere Aussagen über Temperaturverlauf im Brennstoff und Wärmeübergangszahl im Spalt zu machen.

10.3 Allgemeines Verhalten der Prüflinge

Trotz mancher Unterschiede im Detail zeigen die Prüflinge ein bemerkenswert einheitliches Verhalten, das in drei typische Betriebsphasen zerfällt.

Phase I: Temperaturanstieg

Nach Erreichen der Vollast wird ein kontinuierlicher, über mehrere Stunden anhaltender Anstieg der Zentraltemperatur um ca. 80 - 150 °C für die Helium-gebundenen intakten Stäbe beobachtet.

Eine mögliche Erklärung dafür ist die Änderung der Füllgaszusammensetzung durch Gasfreisetzung aus dem Brennstoff. Leider liegt von allen 8 Prüflingen nur für einen einzigen (L4-8) eine Gasanalyse vor, deren Ergebnisse in Pkt. 8.1 wiedergegeben sind.

Wie man aus Kap. 8.1 ersehen kann, stammen nur etwa 20 % der festgestellten Gasmenge von der He-Bindung, der N₂/CO-Anteil liegt dagegen bei 72 %. Dieser Effekt führt auch dazu, daß der Unterschied in der Wärmeübergangszahl zwischen He und Ar nicht mehr so deutlich hervortritt und erklärt auch die bei einer Vorauswertung /14/ gefundene Tatsache, daß praktisch kein Unterschied zwischen He- und Ar-Bindung besteht. Die Ribildung im Brennstoff ist nicht stark. Die

Tabletten platzen im Mittel nur in 3 bis 4 größere Teile. Trotzdem wirken sich diese Risse wegen der hohen Leitfähigkeit des Karbides stärker auf die Temperaturverteilung aus als bei Oxid.

Phase II: Temperaturabfall

Mit Ausnahme des Brennstabes L4-1, bei dem zu diesem Zeitpunkt der Spalt praktisch geschlossen ist, folgt ein manchmal rascher und starker Rückgang der Zentraltemperatur auf Werte, die Wärmeübergangszahlen $\geq 1 \text{ W/cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ entsprechen.

Phase III: Stationärer Zustand

Alle Proben erreichen schließlich einen stationären Zustand, in dem die Zentraltemperaturen bzw. Wärmeübergangszahlen nur noch geringfügig schwanken.

10.4 Quantitative Auswertung

Die aus SATURN-Rechnungen ermittelten Werte für die Wärmeübergangszahlen sind in Tabelle 12 quantitativ zusammengestellt. Sie weichen nur in einigen Fällen von den in /14/ angegebenen Werten ab.

Tabelle 12: Effektive Wärmeübergangszahlen

| Prüfling | rad.Spalt (μm) | Bin- dung | Wärmeübergangszahlen ($\text{W/cm}^2\text{ } ^\circ\text{C}$) | | |
|---------------------|--------------------------------|--------------|---|-------------------|-----------------|
| | | | Anfahrphase | max. Zentraltemp. | station.Zustand |
| L4-1 | 25 | He | 1,2 - 1,3 | 1,1 | 1,1 |
| L4-3 | 40 | Ar | 1,2 - 1,6 | 1,1 | 1,2 - 1,3 |
| L4-2 | 125 | He | 0,5 - 0,6 | 0,5 | 1,3 - 1,4 |
| L4-5 ^{x)} | 125 | He | (0,6 - 0,7) | (0,6) | |
| L4-7 ^{xx)} | 125 | He | 0,7 - 0,8 | 0,55 | 1,5 - 2,5 |
| L4-6 ^{x)} | 125 | He | 0,2 - 0,3 | | |
| L4-4 ^{x)} | 300 | He | $\sim 0,3$ | $\sim 0,2$ | |
| L4-8 ^{x)} | 300 | He | $\sim 0,3$ | $\sim 0,2$ | |

- x) Beim Prüfling L4-5 wurde die Zentraltemperatur um ca. 250°C höher angenommen, als das zentrale Thermoelement anzeigte. Der stationäre Fall konnte nicht ausgewertet werden, da das Thermoelement nur noch 700°C anzeigte und offensichtlich defekt war. Bei den geschmolzenen Prüflingen können nur Werte bis zum Erreichen der Vollast bzw. für das Gasgemisch angegeben werden.
- xx) Die Alpha-Werte > 2 im stationären Fall scheinen nicht reell zu sein, da im Schliffbild (s. Kap. 8.2) der Spalt nach wie vor vorhanden ist. Dies könnte auf Fehlanzeige des Thermoelementes zurückgeführt werden.
- Beim Prüfling L4-6 wird die maximale Temperatur beim Anfahren erreicht (reines Ar), eine Verunreinigung durch N_2 würde den Wärmeübergang verbessern. Genau umgekehrt ist die Lage bei den Prüflingen L4-4 und -8: Durch Gasfreisetzung verschlechtert sich der Wärmeübergang. Diese Effekte hatten aber insofern wenig Wirkung, als bei allen 3 Prüflingen spätestens nach Erreichen der maximalen Leistung die peritektischen Reaktionen des Thermoelementes mit dem Brennstoff stattfinden.

11. Schlußfolgerungen /12/

Der Bestrahlungsversuch Loop-4a führt zu folgenden Aussagen:

- 1.) Die Zentraltemperatur im Karbidstab erreicht in den ersten Betriebsstunden ihr Maximum.
- 2.) Der Temperatursprung im Spalt ist abhängig von der Spaltweite und dem Füllgas. (Letzteres wurde hier durch CO bzw. N_2 aus dem Brennstoff verunreinigt, wodurch sich bei den He-gebundenen Stäben die Wärmeleitfähigkeit bereits in der Anfahrphase stark verschlechtert.)
- 3.) Bei den geschmolzenen Prüflingen kann die Zuordnung von Temperatur und Struktur mit Hilfe der Korngröße geschehen. Bei den intakten Prüflingen (Sintergefüge) war ein Einfluß von Rekristallisation

nicht zu erkennen. Eine Umlagerung des M_2C_3 -Anteils war hier zu verzeichnen.

- 4.) Das Stabverhalten bei Lastwechseln konnte nicht eindeutig verfolgt werden, da von 3 zyklerten Stäben 2 durch zentrales Schmelzen ausfielen. Der intakte Stab zeigte nach 10 Leistungszyklen axial und radial eine Anzahl breiter Risse. Bei den übrigen Stäben konnte man allerdings auch feine Risse feststellen.
- 5.) Die Radialspalte lagen nach der Bestrahlung in ihren ursprünglichen Abmessungen vor.
- 6.) Die kleinen Spalte waren während der Bestrahlung geschlossen. Die großen Spalte waren während der Bestrahlung längs einiger bevorzugter Mantellinien infolge unterschiedlicher Ausdehnung des Brennstoffes evtl. infolge Schiefelast des Reaktors überbrückt.
- 7.) Bei 3 Prüflingen mit "ungenügender" Wärmeabfuhr wurde die kritische Temperatur überschritten, wodurch es über eine peritektische Reaktion zwischen dem Mischkarbid und dem Thermoelementmantel zum partiellen Schmelzen kam. - Interessanterweise wurde das Stabversagen bei 2 von 3 geschmolzenen Prüflingen durch die zentralen Thermolemente nicht angezeigt, so daß auch diese Prüflinge über die volle Bestrahlungszeit bestrahlt wurden. -

Zusammenfassend muß festgestellt werden, daß bei einem Brennstabkonzept, bestehend aus einem Stab mit Heliumbindung, der Einsatz von einem möglichst reinen Karbid geboten ist, da sonst der ausgasende Brennstoff zu einer starken Verschlechterung der Wärmeleitfähigkeit im Spalt führt. Weiterhin ist bei der Instrumentierung von Karbidprüflingen von einer oberen Verträglichkeitsgrenze von 1900°C - für W-Re-Thermolemente - auszugehen.

Literatur:

- /1/ A. Gerken, R.v. Jan, H. Meisner, K. Richter:
Auslegung und Spezifikation des UC/PuC-Brennstab-Bestrahlungs-
versuches im FR 2 im Rahmen der Versuchsgruppe 6 (unveröffentlicht)
- /2/ R.v. Jan, K. Kummerer:
Auslegung und Spezifikation des UC/PuC-Brennstab-Bestrahlungs-
versuches im Rahmen der FR 2-Loop-Versuchsgruppe 4a (unveröffentlicht)
- /3/ H. Deckers:
Interne Notiz (unveröffentlicht)
- /4/ Post-Irradiation Examination of High Density Uranium-Plutonium Carbide
Fuel Rods in EBR-II to 65,000 MWd/T Burnup, GU-5286 (1972)
- /5/ H. Kleykamp, H.D. Gottschalg:
Nachbestrahlungsuntersuchungen mit der Mikrosonde am Bestrahlungsex-
periment FR 2-Loop-4a, Prüfling 6 (unveröffentlicht)
- /6/ O. Götzmann:
Re, W-26 Re und Mr-50 Re als Mantelmaterialien für Thermoelemente
in UC (unveröffentlicht)
- /7/ M. Ugajin, I. Takahashi:
The Phase Reaction in the UC-W-System, J.Nucl. Mat. 37 (1970), p.303
- /8/ C. Politis:
Beitrag zum System Uranmonokarbid-Wolfram, J.Nucl.Mat. 39 (1971), p.258
- /9/ M. Ugajin, Y. Suzuki, J. Shimokawa:
Contribution to the Study of the System U-Pu-W-C, J.Nucl.Mat. 43 (1972),
p.277
- /10/ M. Ugajin, J. Abe:
The Ternary Compound Pu WC_{1,75}, J.Nucl.Mat. 47 (1973), p.117
- /11/ M. Ugajin:
The U_{0,8}Pu_{0,2}C-W System, J.Nucl.Mat. 47 (1973), p.205
- /12/ P. Weimar, H. Kleykamp, C. Politis:
Über das Bestrahlungsverhalten von Mischkarbid in der Anfahrphase.
Atomwirtschaft-Atomtechnik, Mai 1974, S. 235
- /13/ J.F. Guegnon, G. Kramer, K. Richter, D. Richard:
Herstellung von Mischkarbidbrennstoff (U_{0,8}Pu_{0,15})C für Bestrahlungs-
versuch L-4a im FR 2 und Fertigstellung der Brennstäbe L4-4 und L4-8,
Interner Bericht (unveröffentlicht)
- /14/ R. v. Jan:
Anfahrverhalten von Karbidbrennstäben,
AEG-E3-1923 (1971)
- /15/ H. Kleykamp:
Mikrosondenuntersuchungen an bestrahltem Urancarbid,
Journal Nucl. Mat. 47 (1973), p. 271

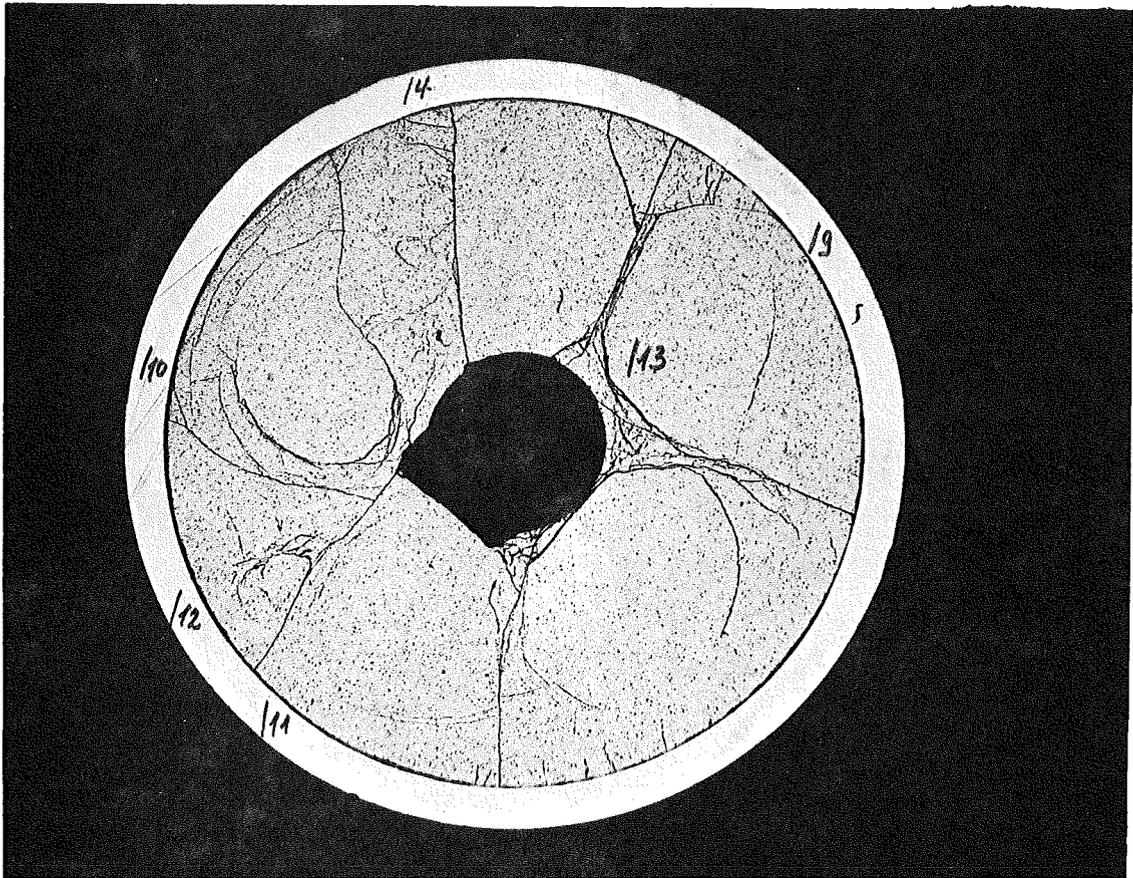
- /16/ H. Kämpf, H. Elbel, K. Kummerer:
Brennstabmodelltheorie - Modelle und Materialdaten,
KFK-Bericht 1400 (Oktober 1971)
- /17/ H. Deckers, H. Reiser:
Versuchseinrichtung für die Kurzzeitbestrahlung von Brutreaktor-
Brennstäben im Reaktor FR 2,
Kerntechnik II (1967), S. 7
- /18/ H. Scheeder et al.:
Berichte aus den Heißen Zellen Karlsruhe (1974)
- /19/ R. Schwarzwälder:
Untersuchungen über den Wärmeübergang Brennstoff/Hülle und über
die Wechselwirkung zwischen Brennstoff und Hülle bei Kurzzeit-
bestrahlung unter Siedewasser-Reaktor-Bedingungen,
Atomkernenergie 9/10 (1967)
- /20/ H. Kämpf:
Die Möglichkeiten der Brennstabauslegung,
Beitrag in KFK-Bericht 1111 (1969), Kap. XI

A n h a n g I

Dokumentation der zerstörungsfreien und
zerstörenden Nachuntersuchung

-I/3-
zu Prüfling L4-1

A1

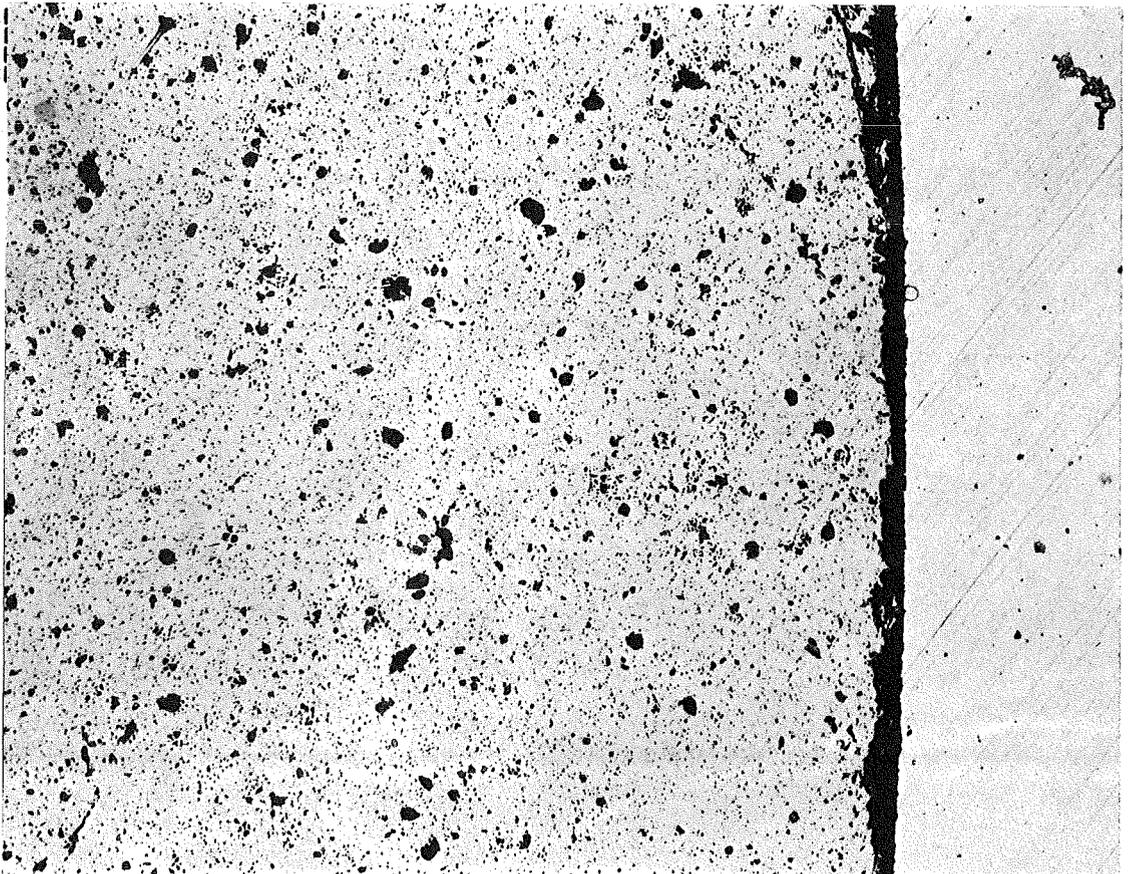


HZ-8b-4a-L4/1-1/3 10x

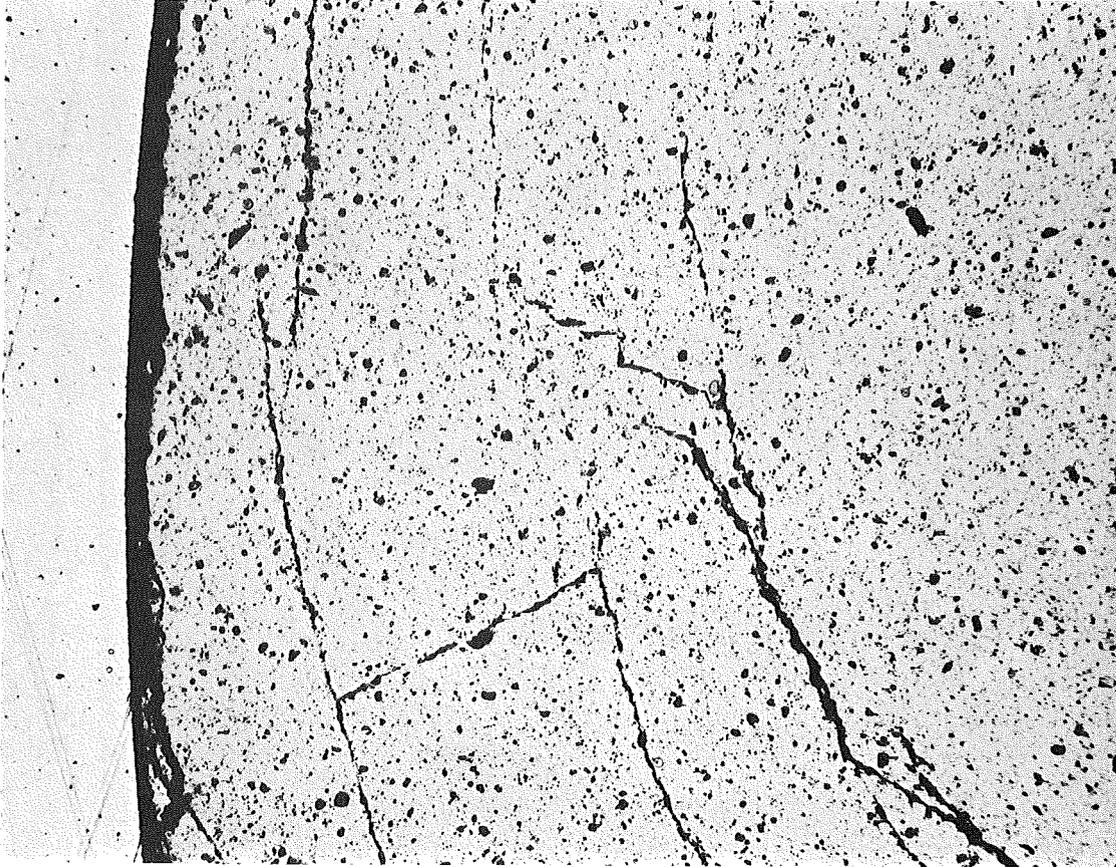
1mm

HZ-8b-4a-L4/1-1/9 200x

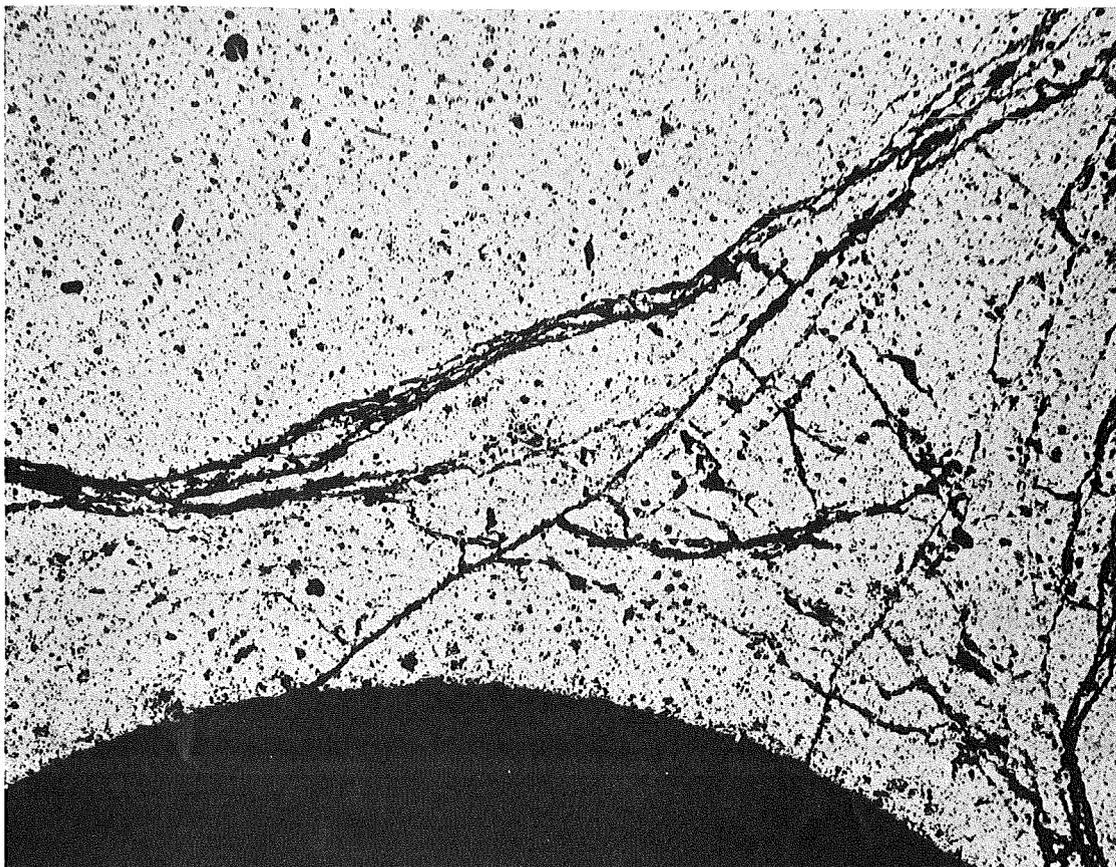
100 µm



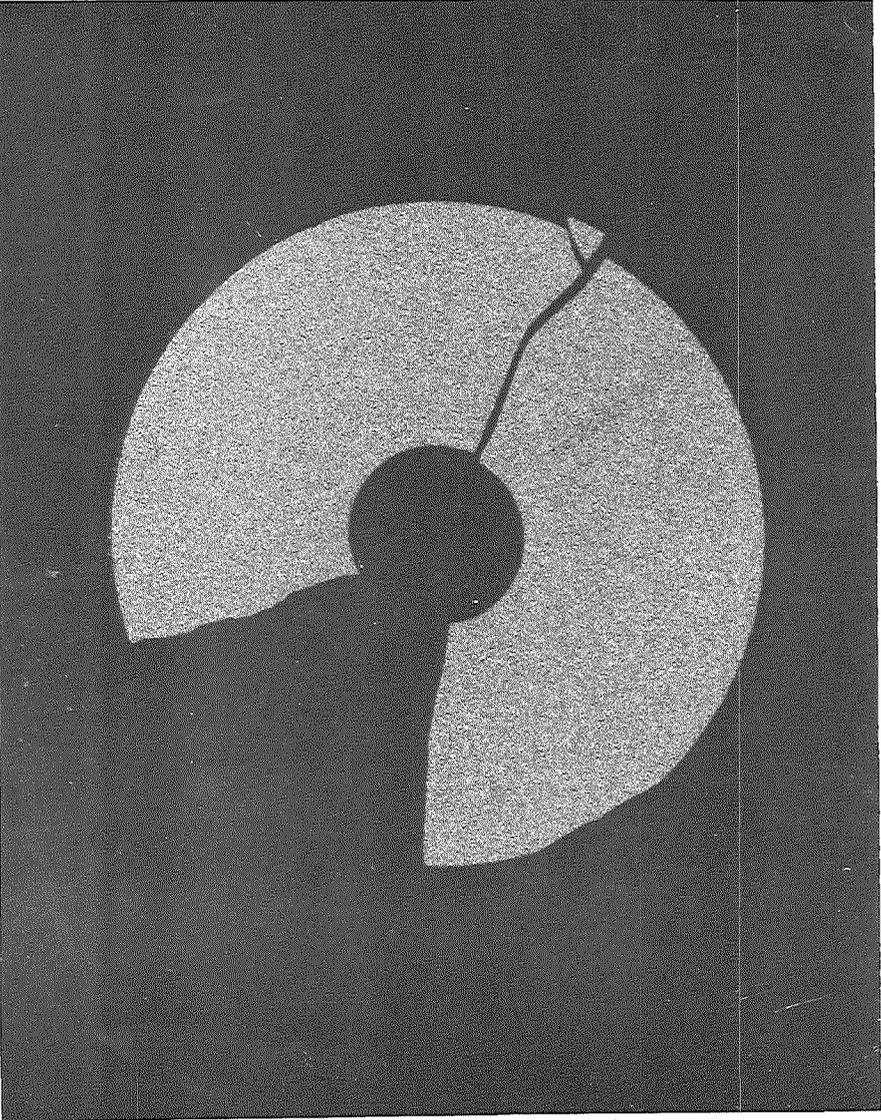
- I/4 -
zu Prüfling L4-1
A1



HZ-8b-4a-I4/1-1/10 100x
200 μm



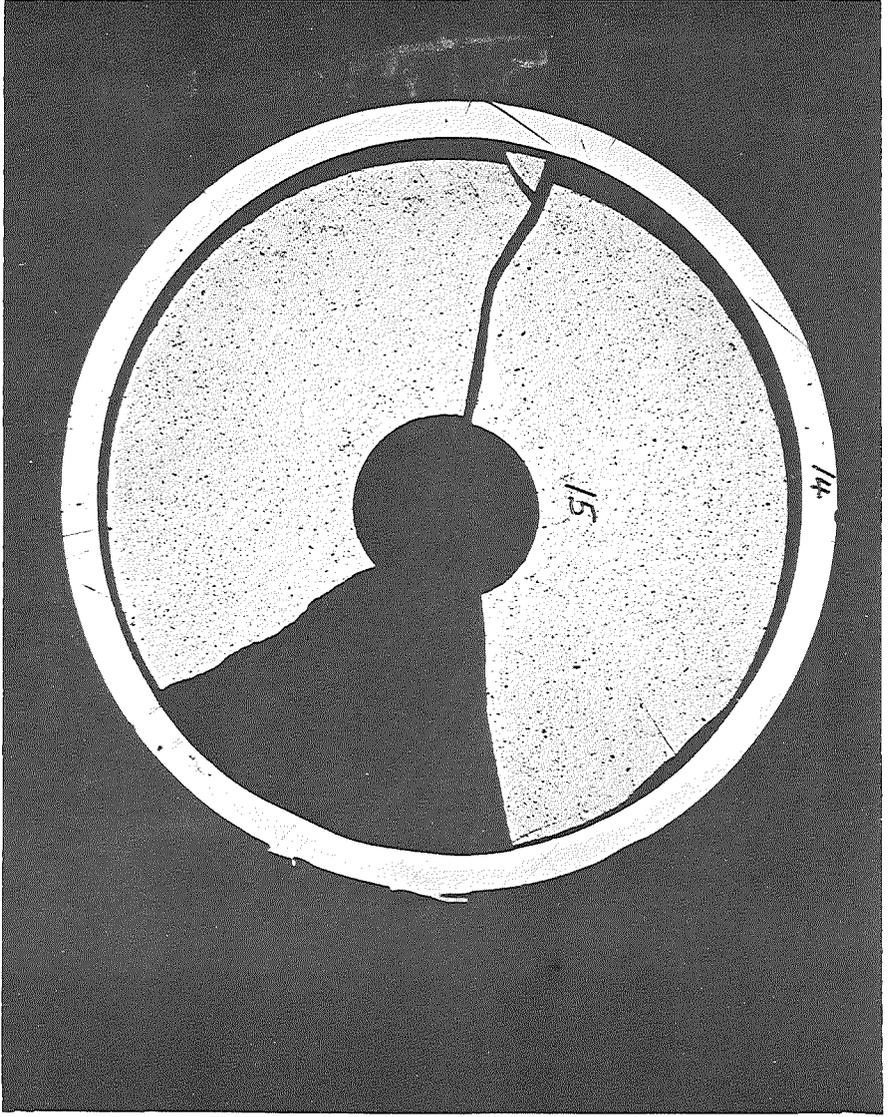
HZ-8b-4a-I4/1-1/13 100x
200 μm



1mm

HZ-8b-4a-L4/2-1/1 10x
 α -Autoradiografie

A 2



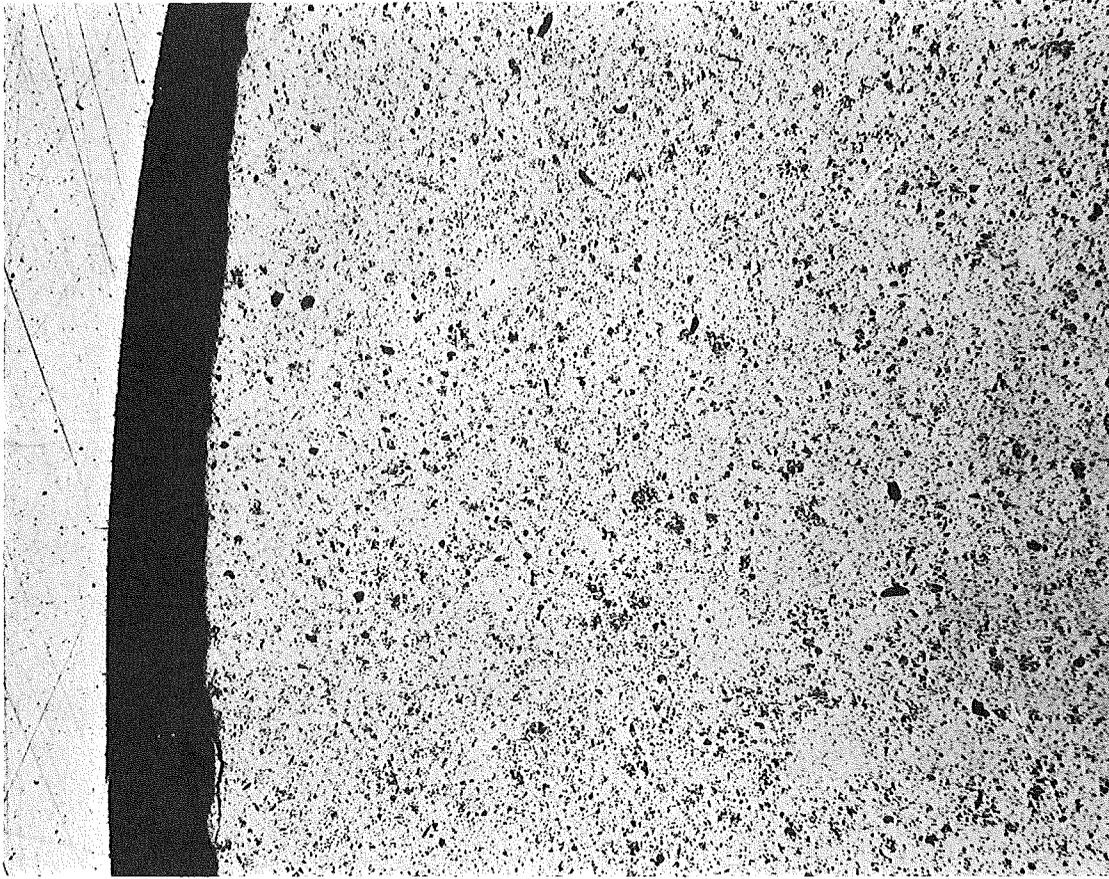
HZ-8b-4a-L4/2-1/3 10 x

A 1

-1/9 -
zu Prüfling L4-2

- 1/10 -
zu Prüfling L4-2

A1



200 μm

100x

HZ-8b-4a-I4/2-1/4



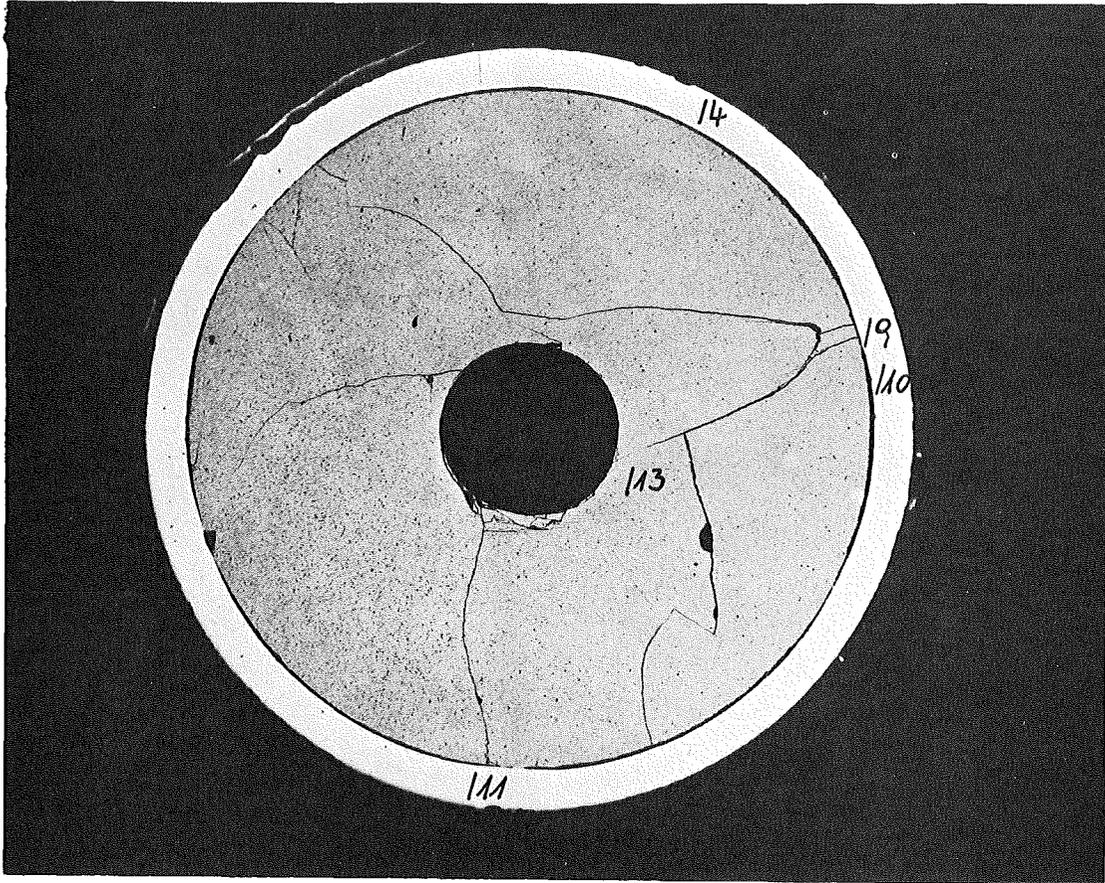
200 μm

100x

HZ-8b-4a-I4/2-1/5

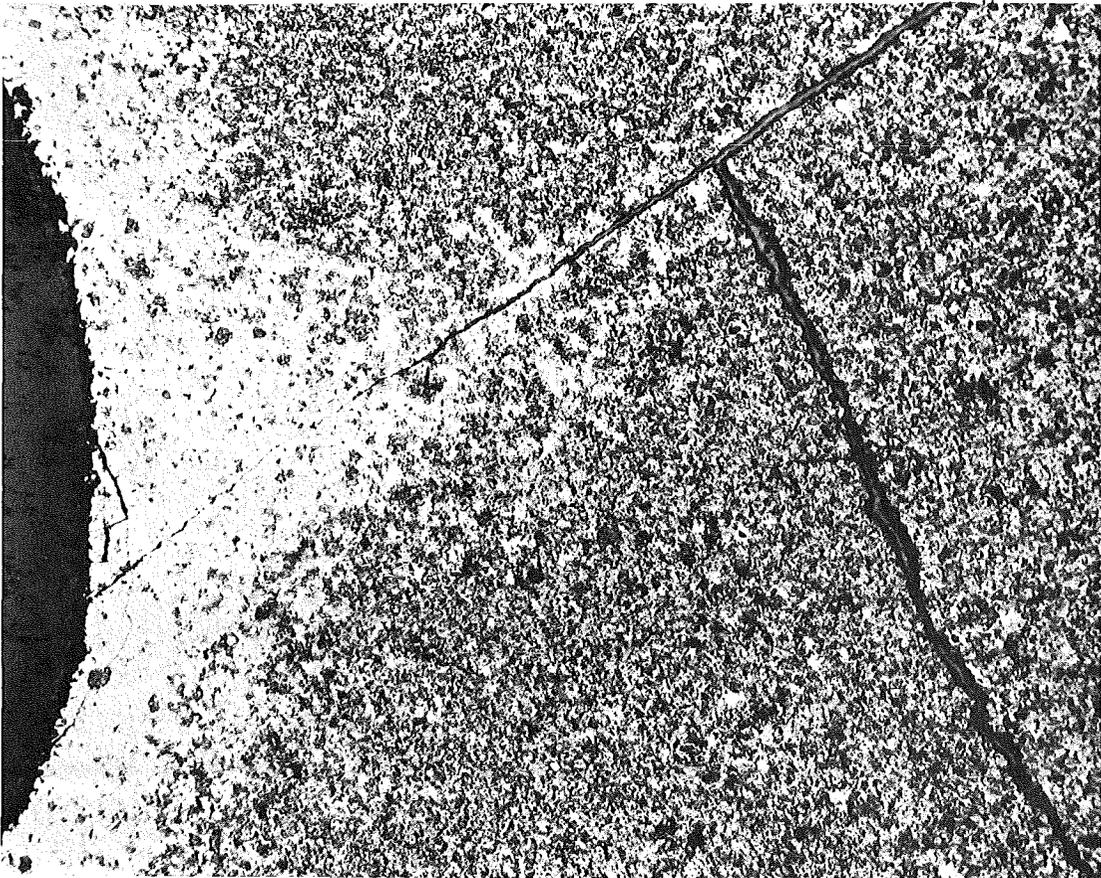
- I/13 -
zu Prüfling L4-3

A1



HZ-8b-4a-I4/3-1/3 10 x

III



HZ-8b-4a-I4/3-1/13 100 x

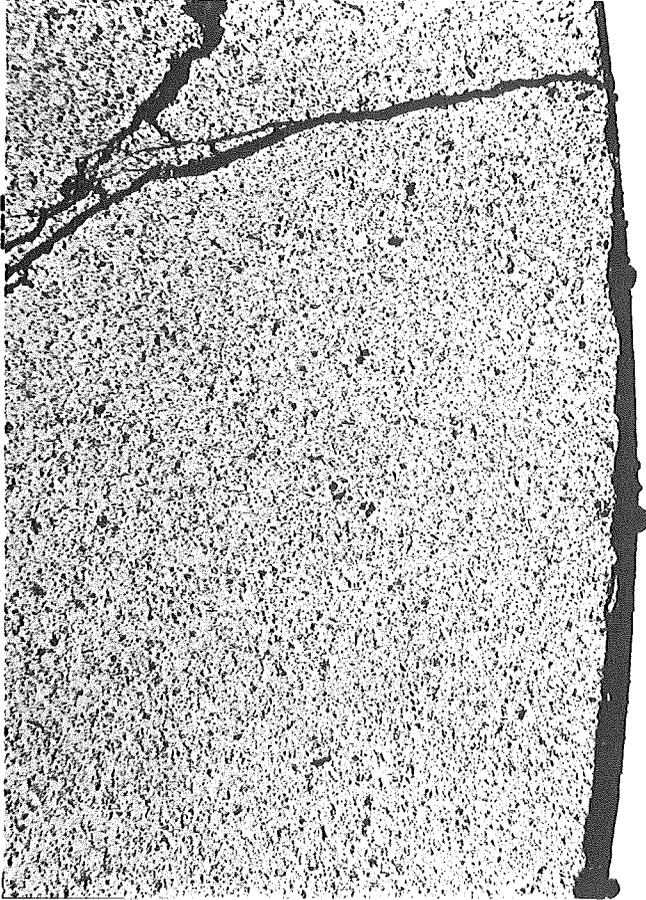
geätzt

200 µm

A1

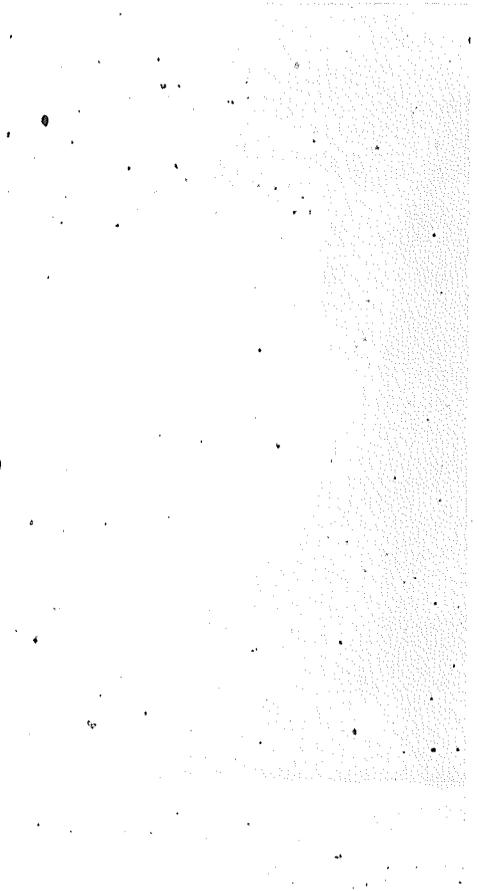
HZ-8b-4a-L4/3-1/9 100 x

200 μm



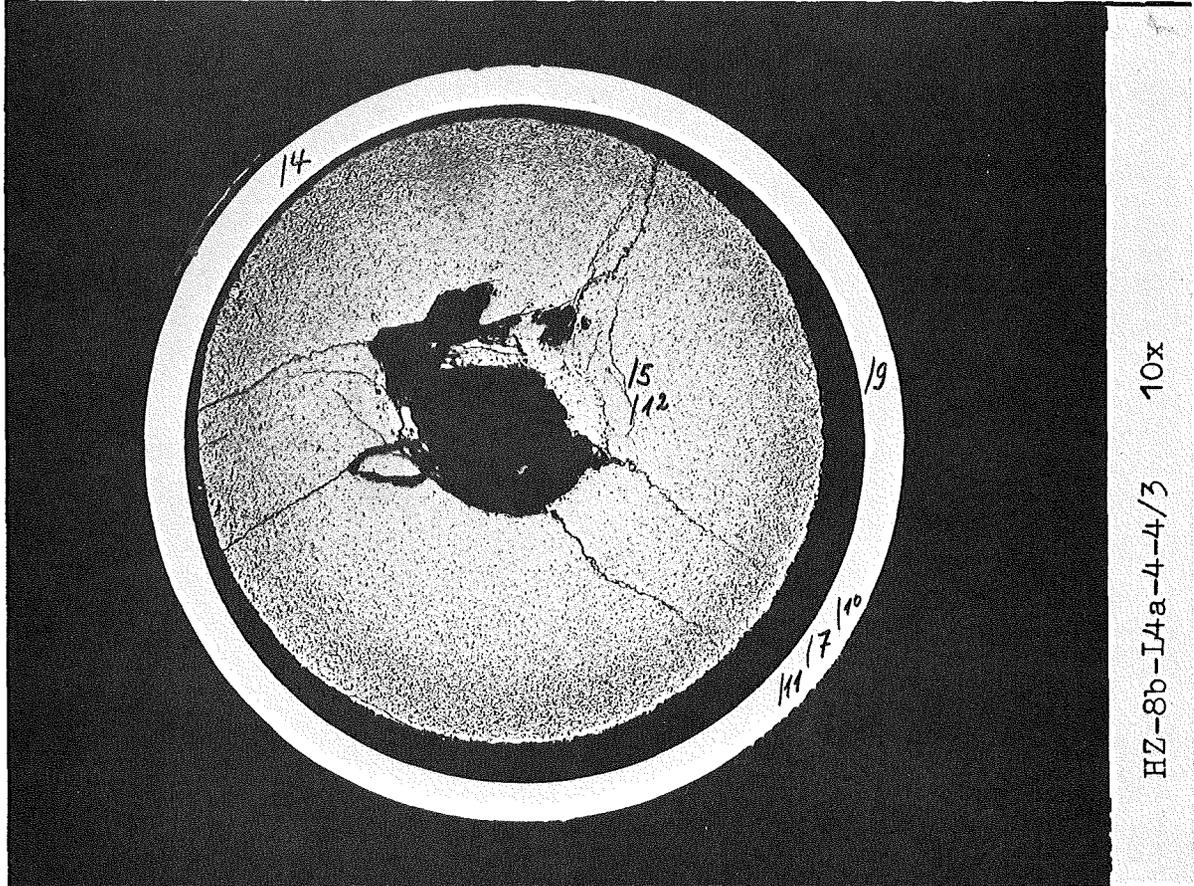
HZ-8b-4a-L4/3-1/10 500 x

40 μm



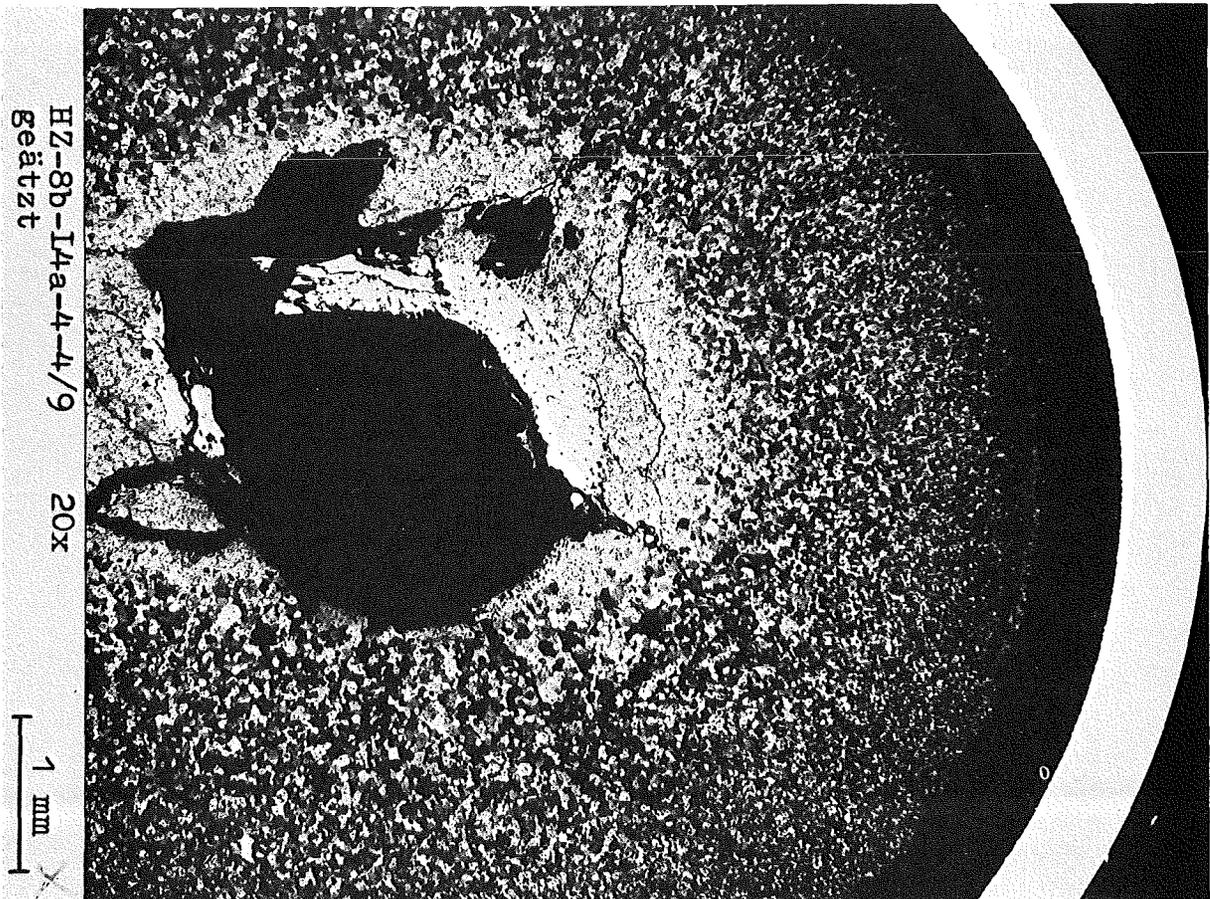
-I/19-
zu Prüfling L4-4

A1



HZ-8b-L4a-4-4/3 10x

1 mm



HZ-8b-L4a-4-4/9 20x
Geätzt

1 mm

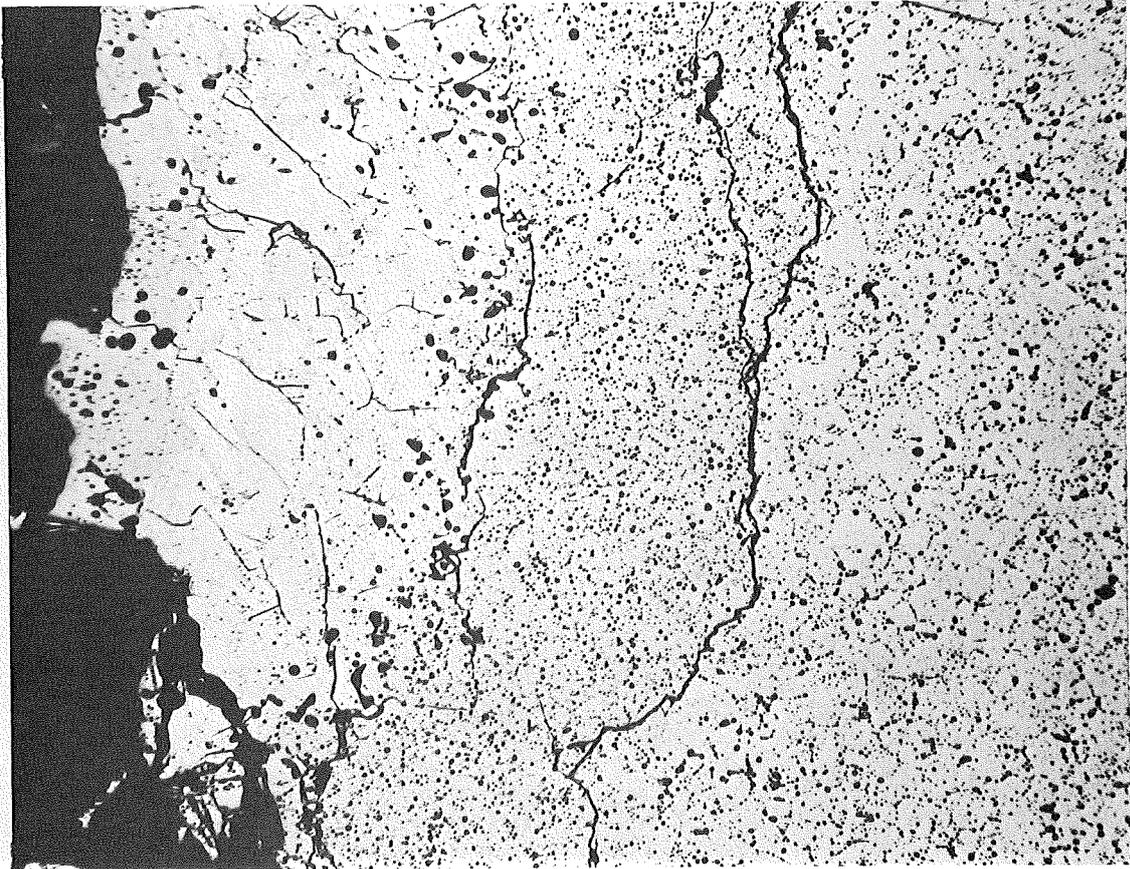
- I/20 -
zu Prüfling L4-4

A1

HZ-8b-I4a-4-4/5

100x

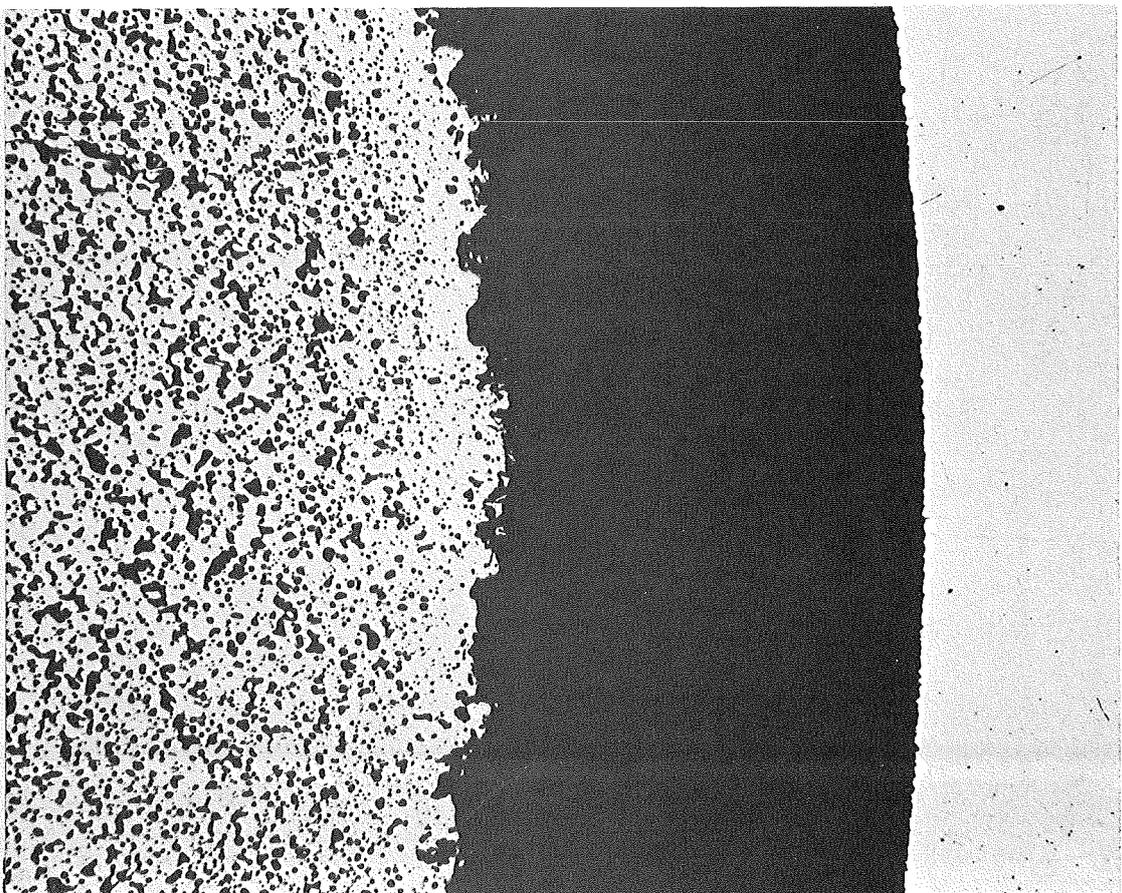
200 μm



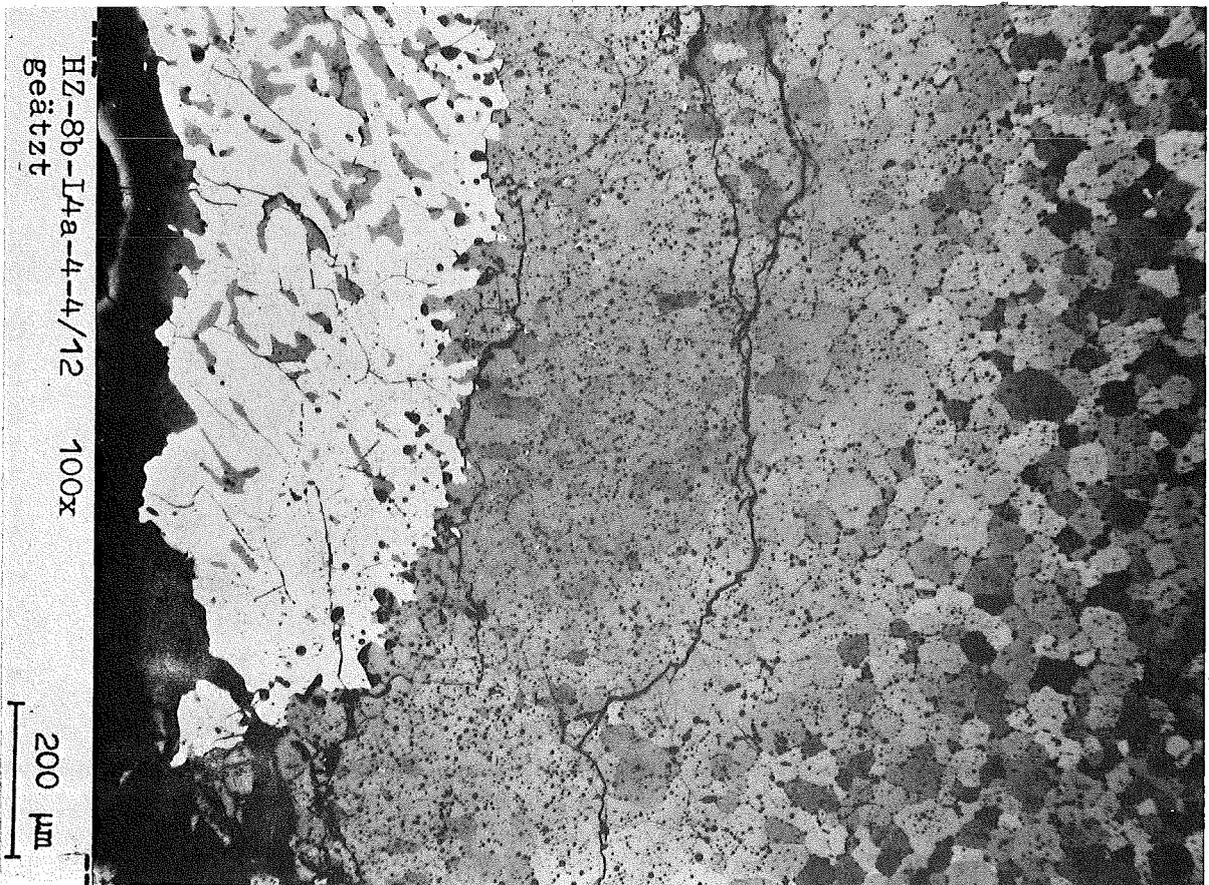
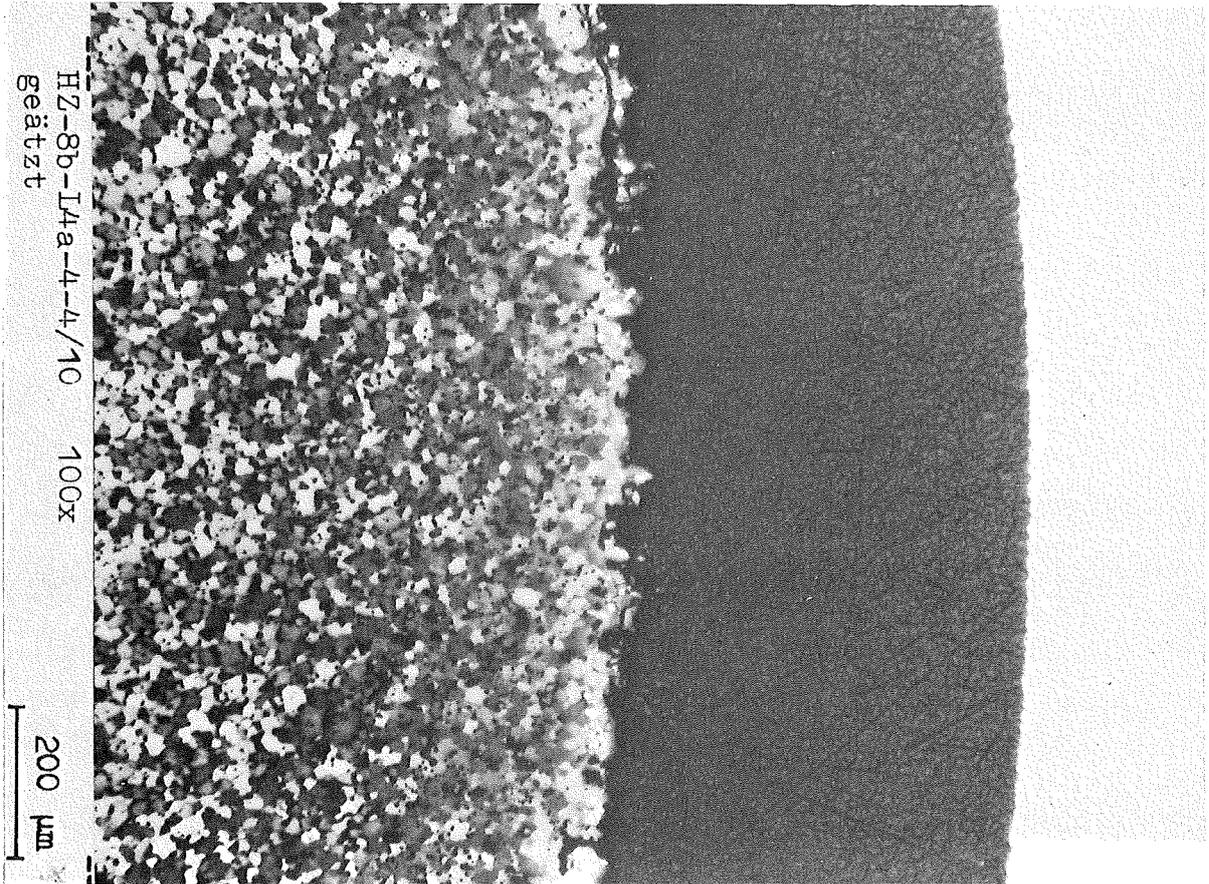
HZ-8b-I4a-4-4/7

100x

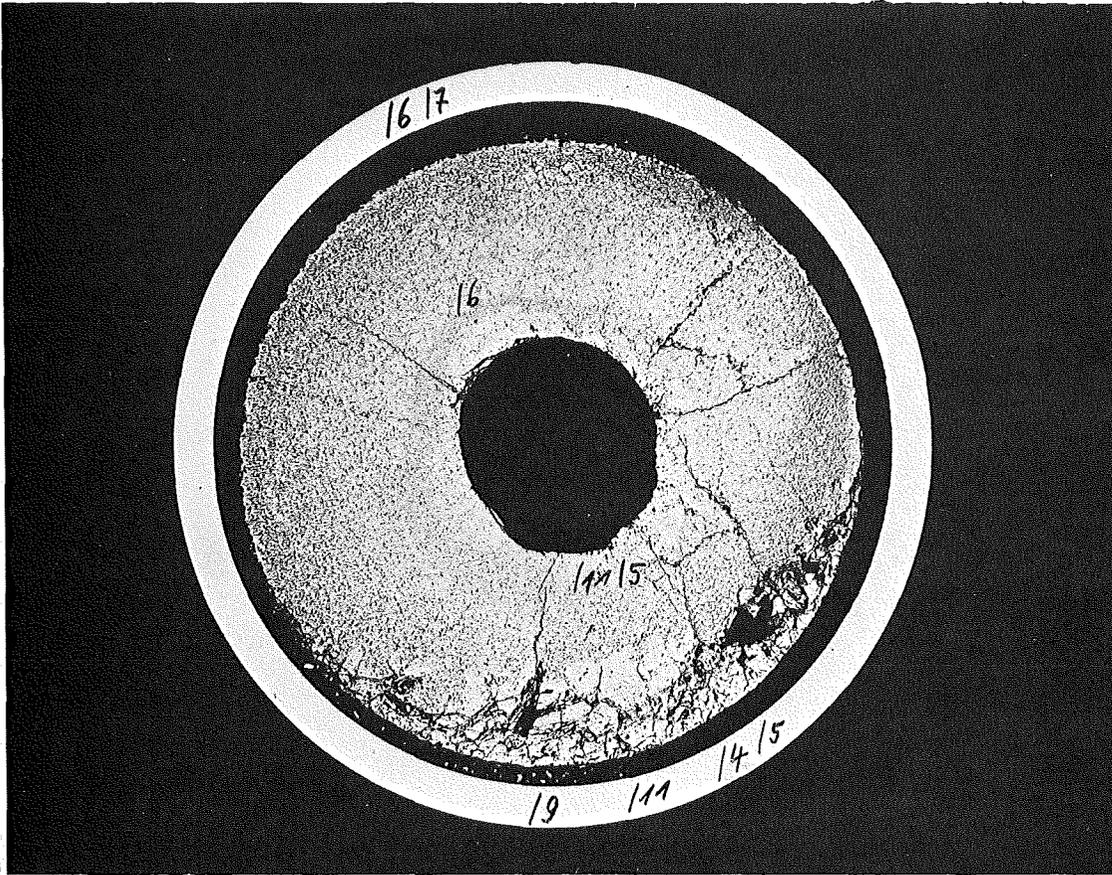
200 μm



- I/21 -
zu Prüfling L4-4
A1

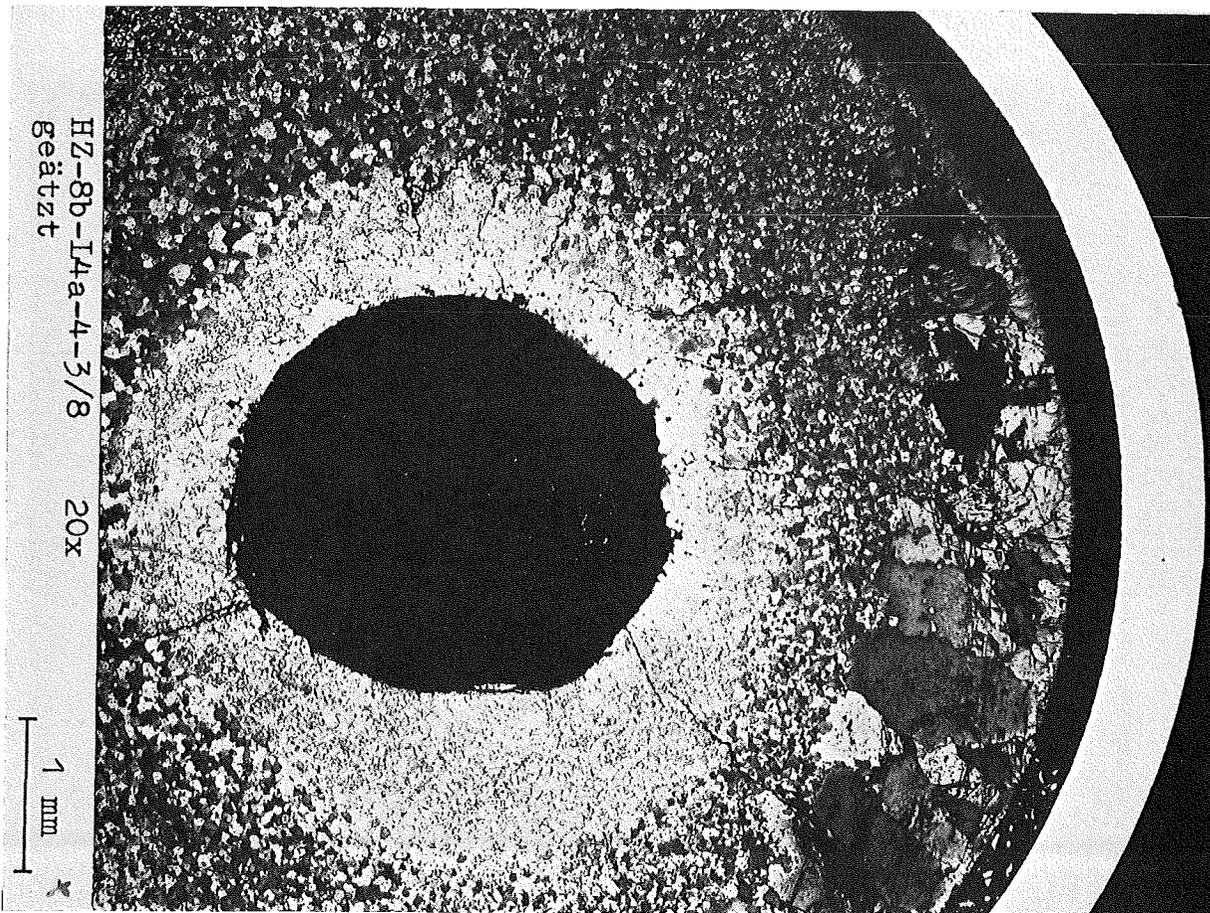


-1/22-
zu Prüfling L4-4
A2



HZ-8b-I4a-4-3/3 10x

1 mm



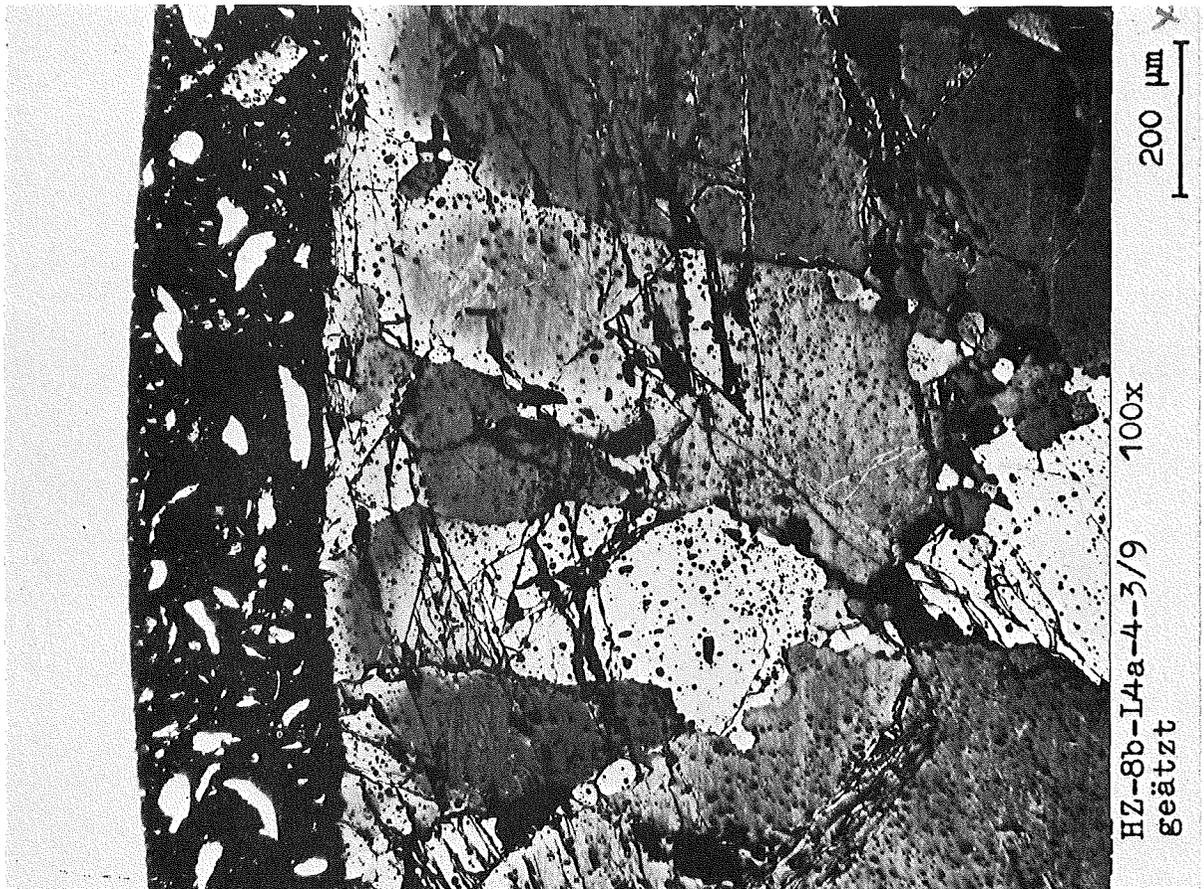
HZ-8b-I4a-4-3/8
geätzt 20x

1 mm

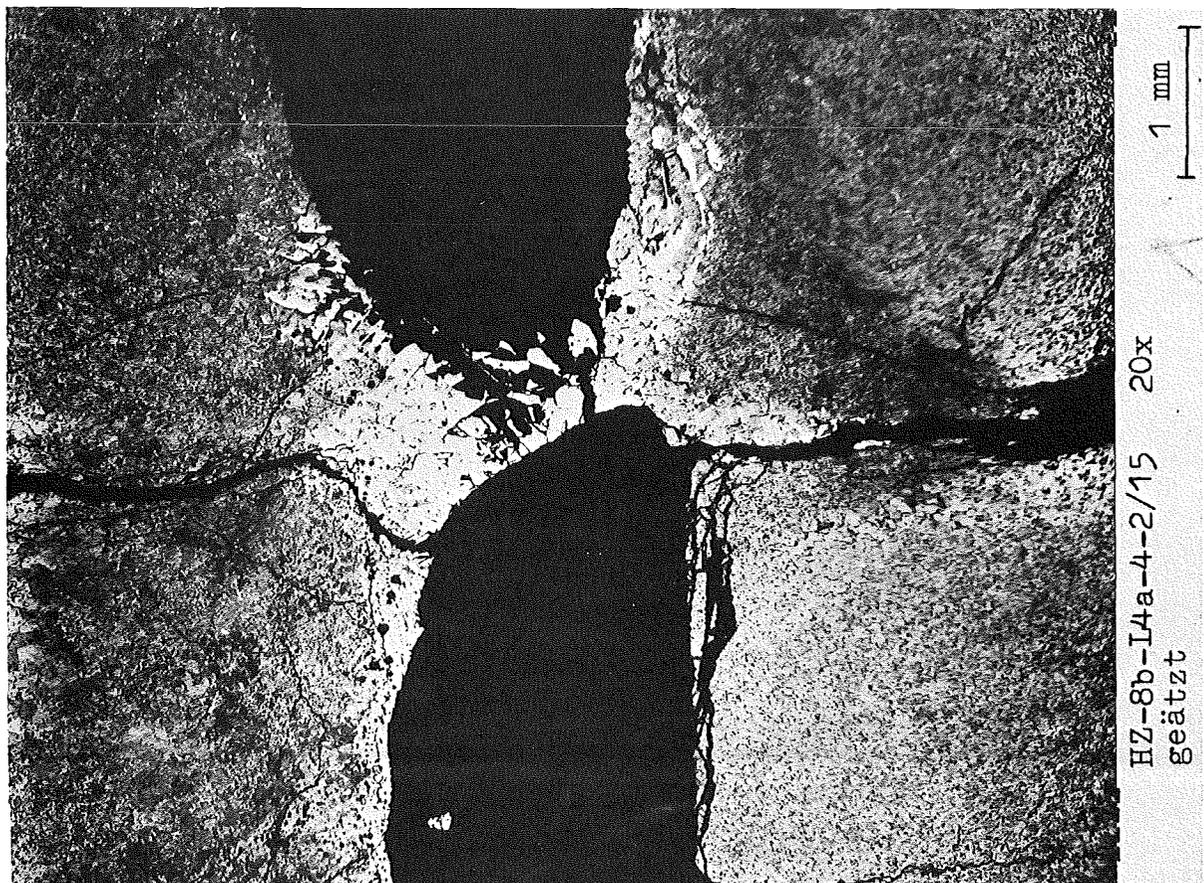
1 mm

- I/23-
zu Prüfling L4-4

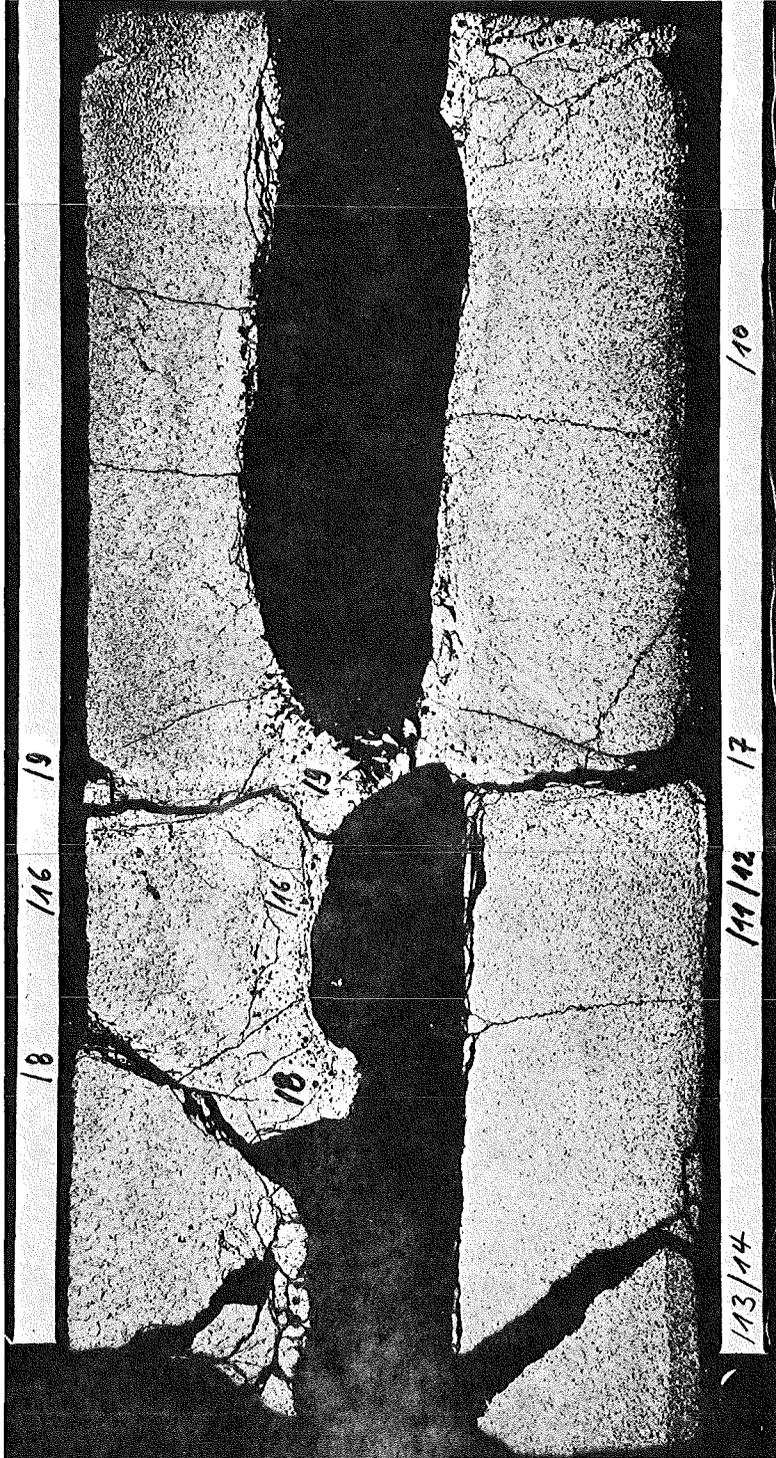
A2



A3

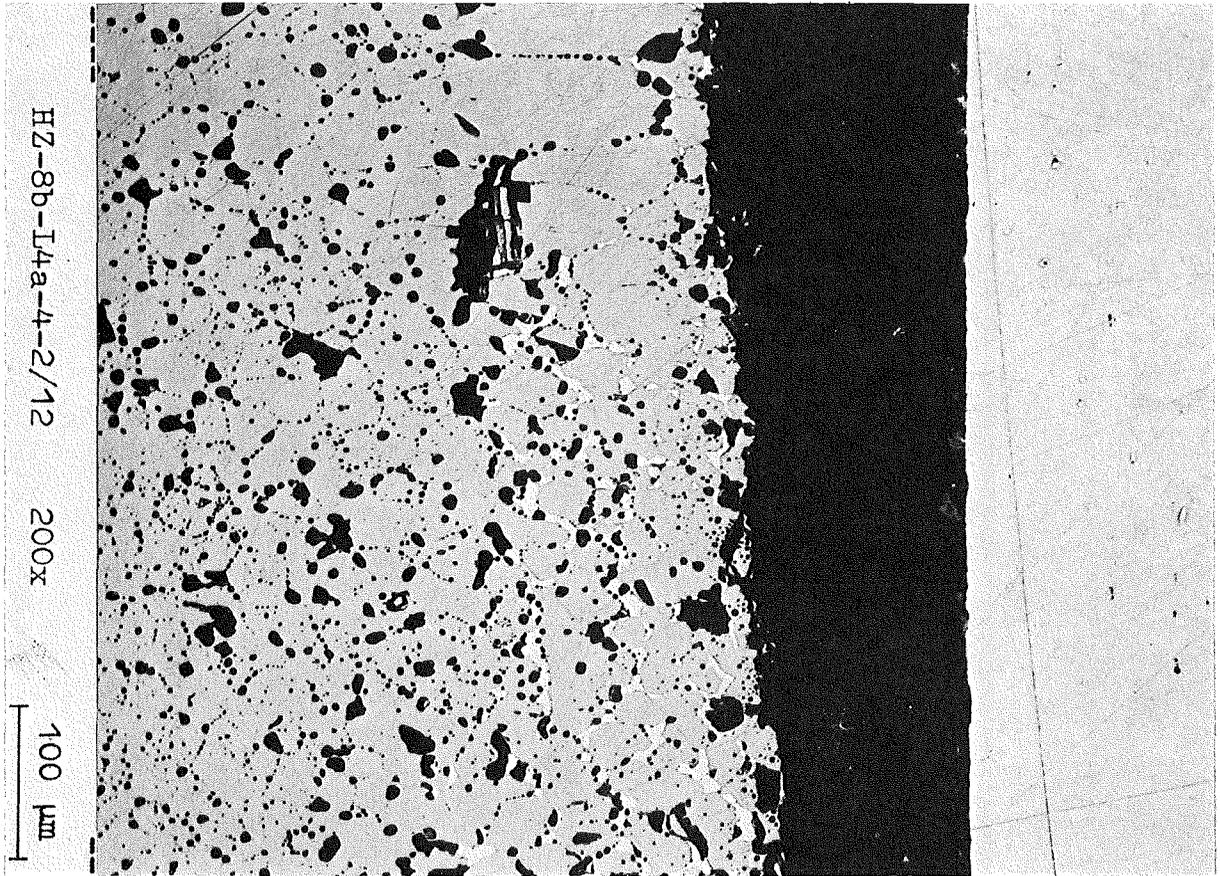


A3

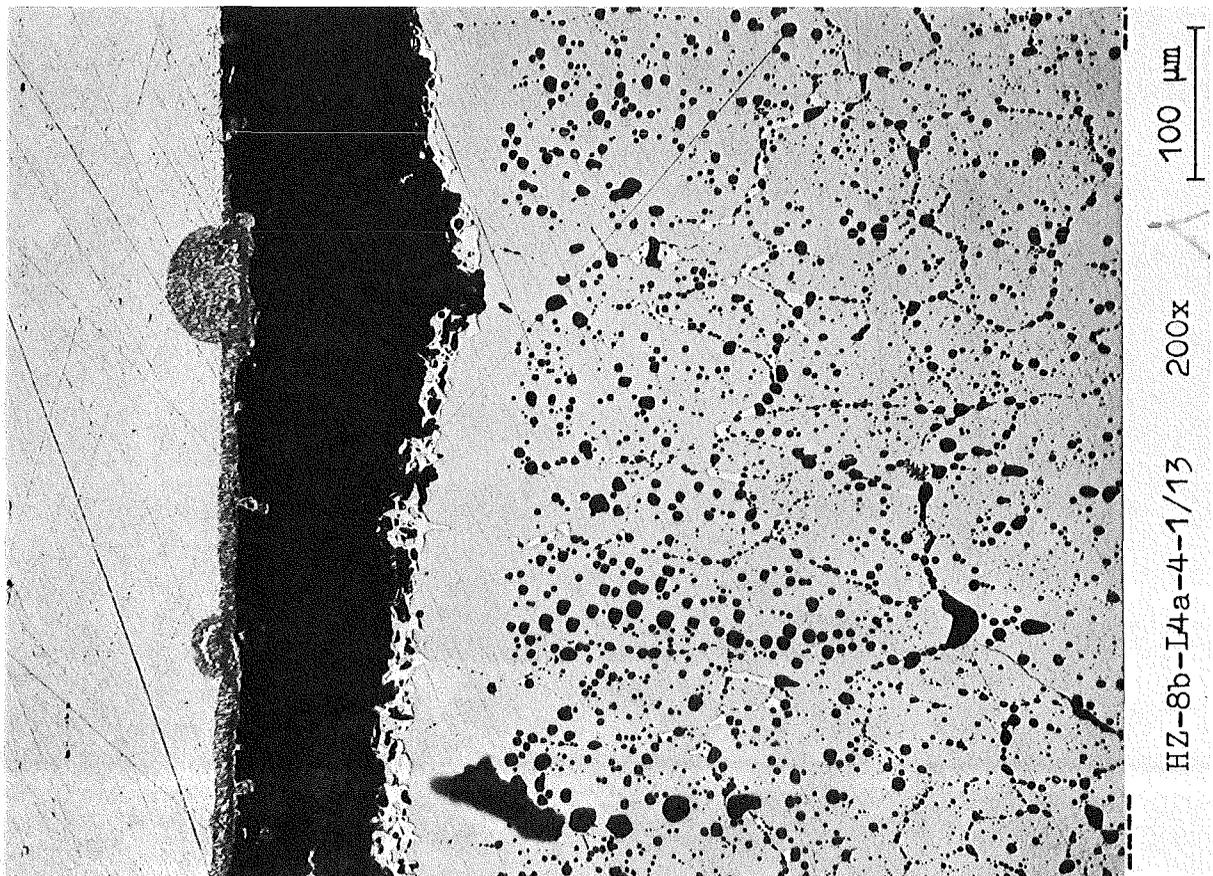


1mm

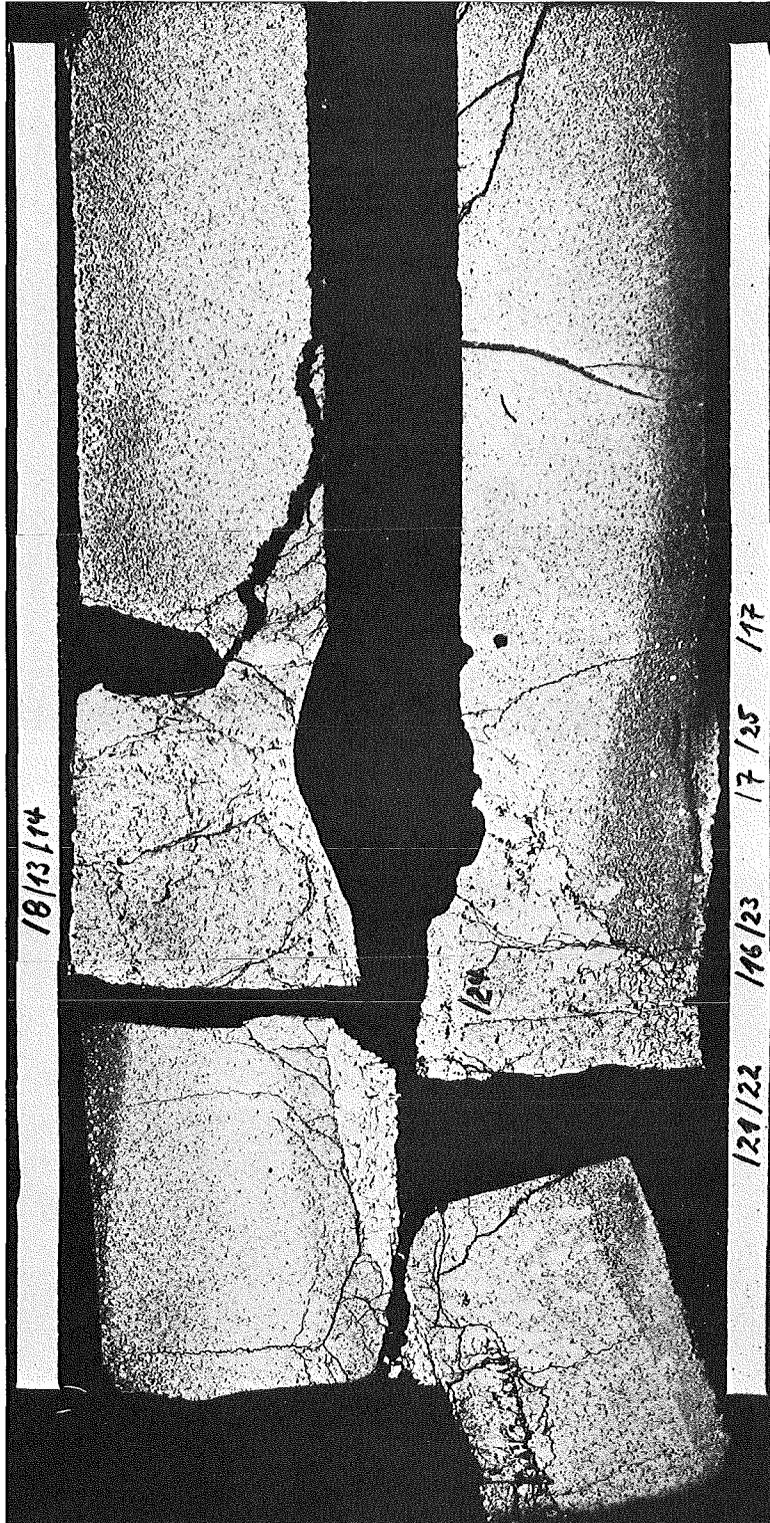
- 1/25 -
zu Prüfling L4-4
A3



A4



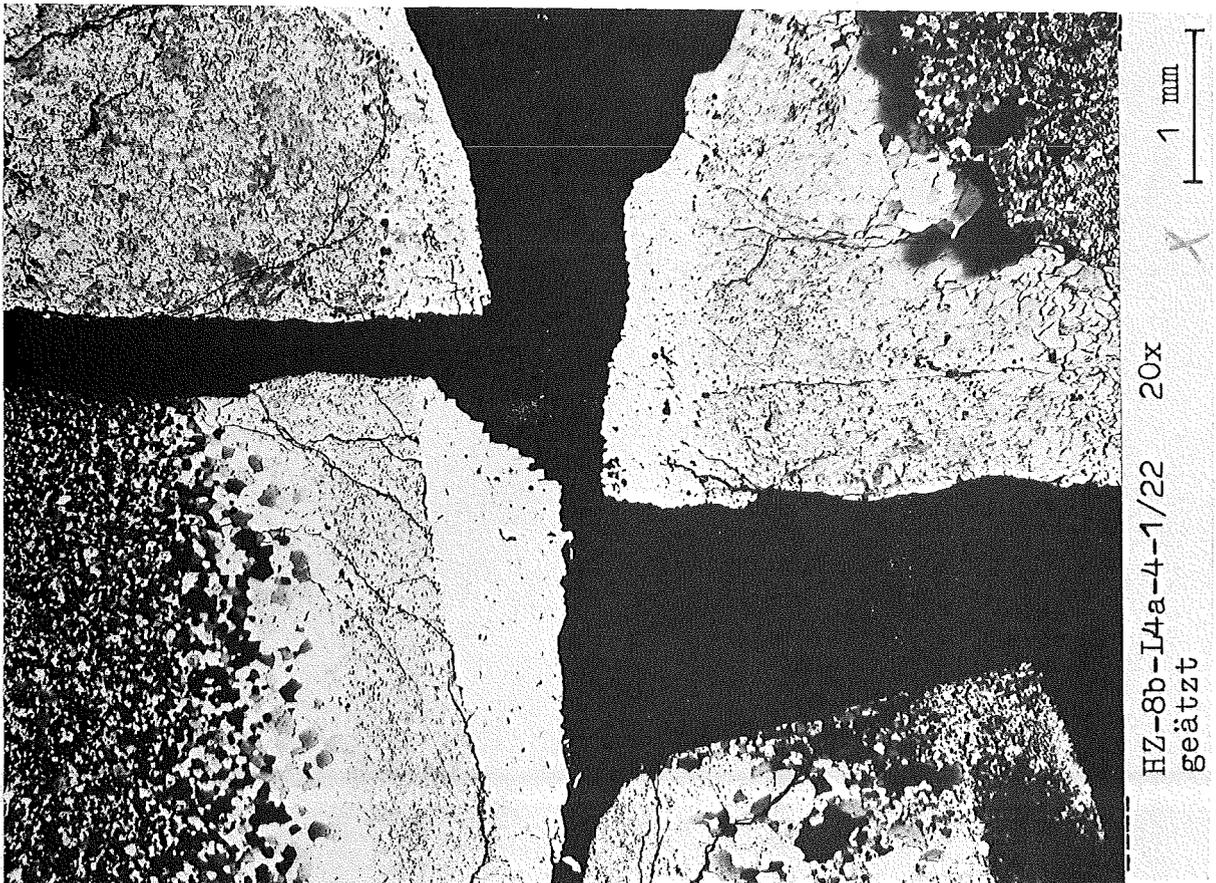
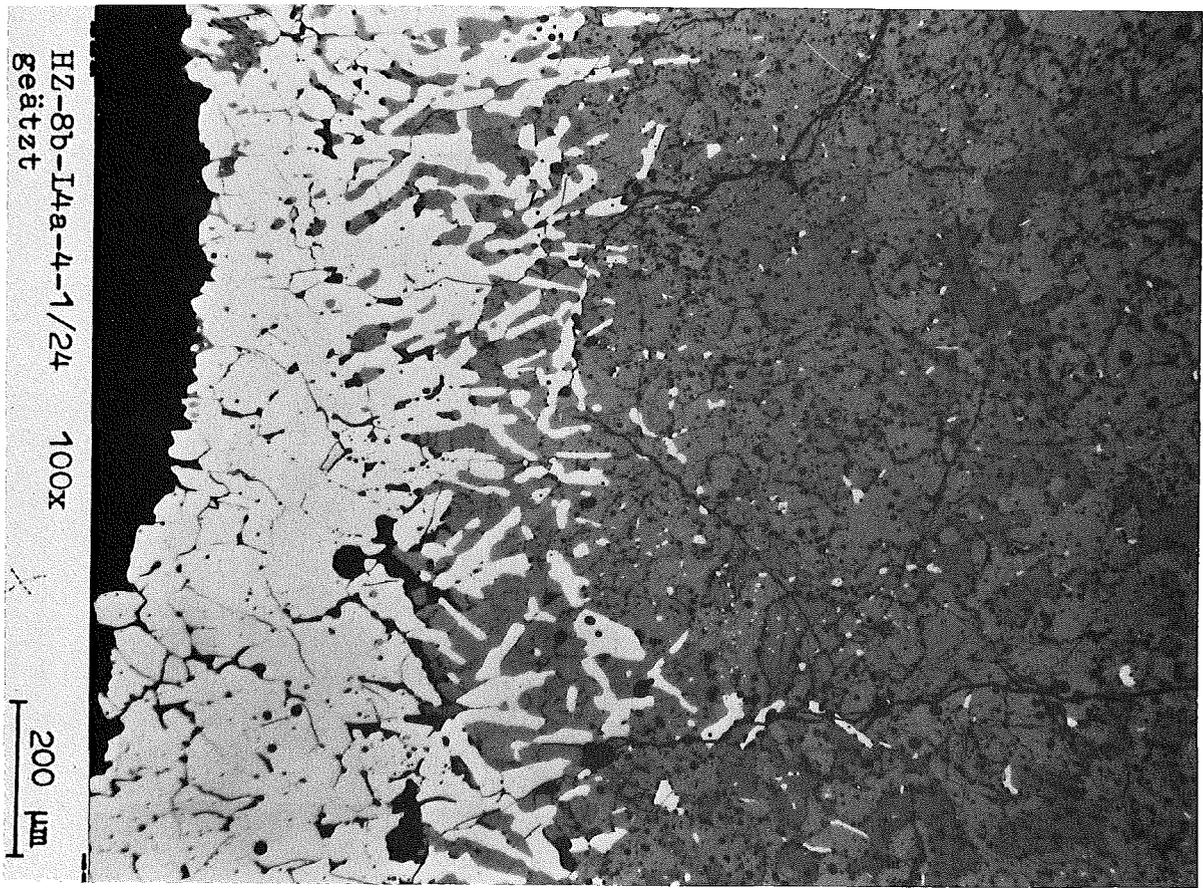
A 4



1mm

- 1/27 -
zu Prüfling L4-4

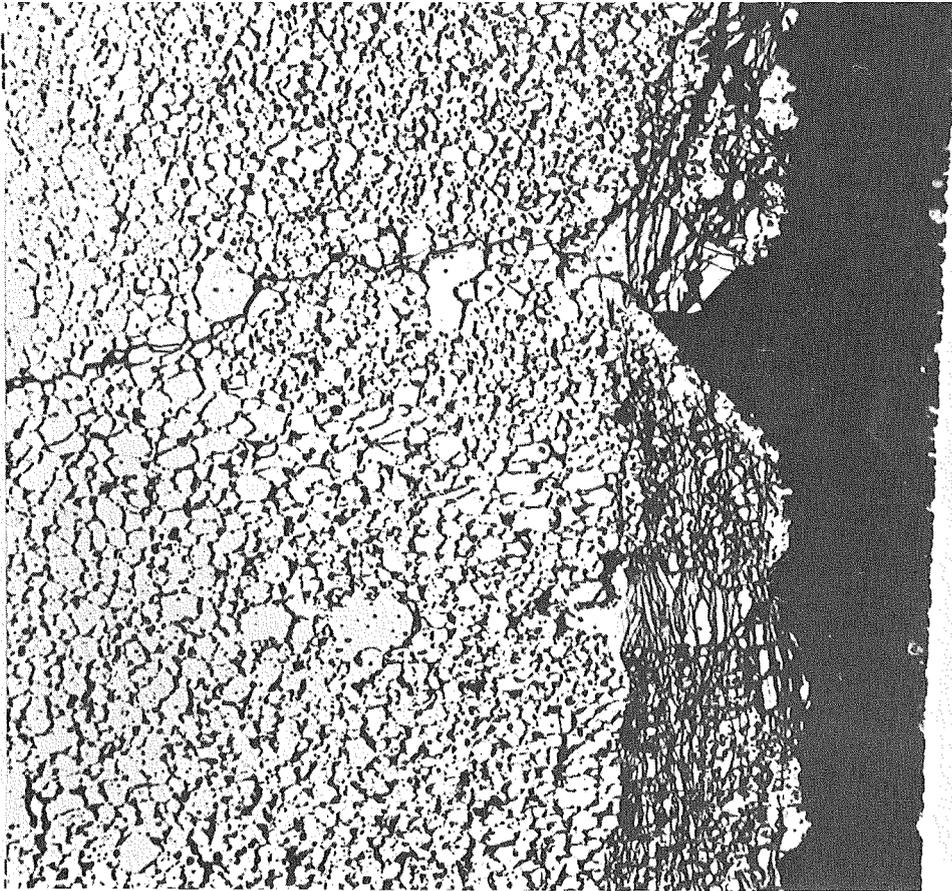
A4



-1/28-
zu Prüfling L4-4
A4

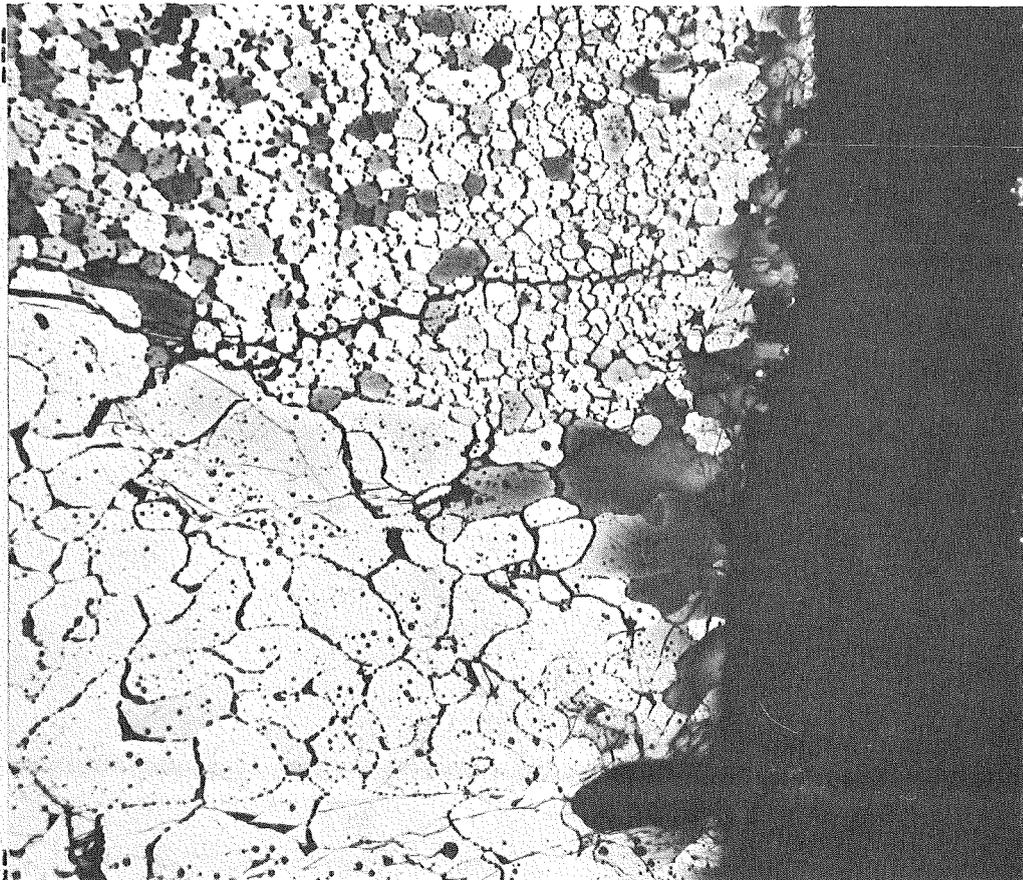
HZ-8b-I4a-4-1/17 100x

200 μm



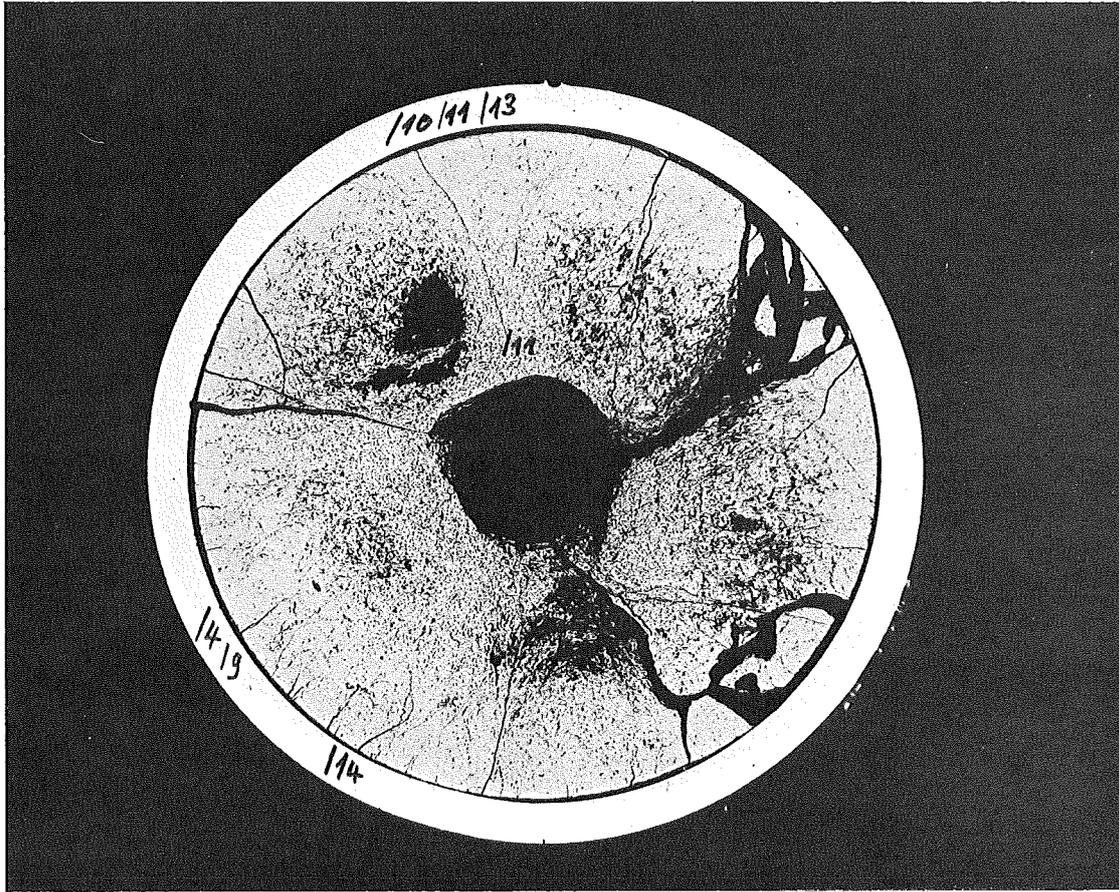
HZ-8b-I4a-4-1/23
geätzt 100x

200 μm



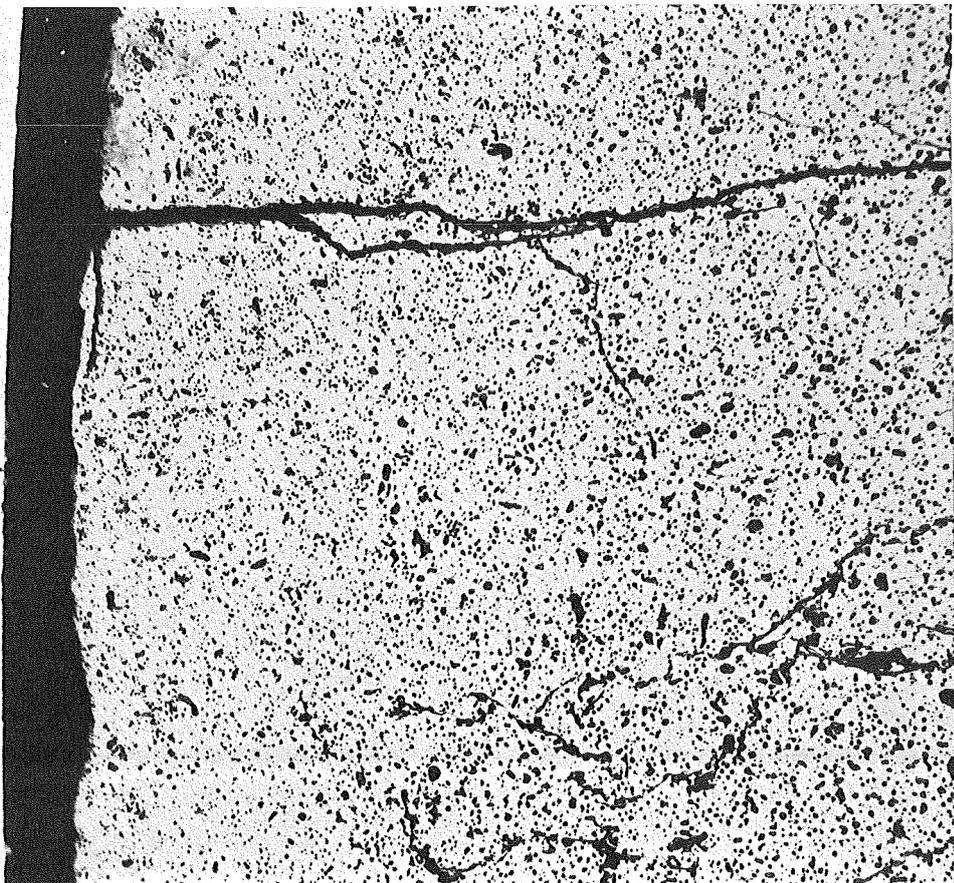
- 1/33 -
zu Prüfling L4-5

A1



HZ-8b-4a-I4/5-1/3 10x

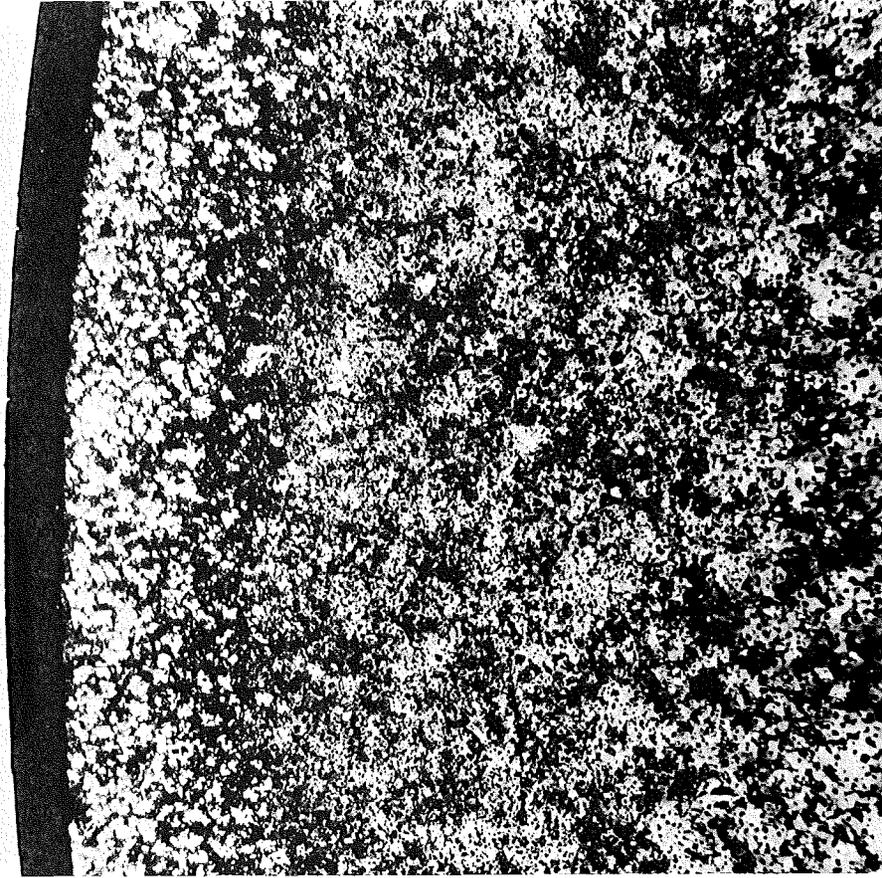
1mm



HZ-8b-4a-I4/5-1/9 200x

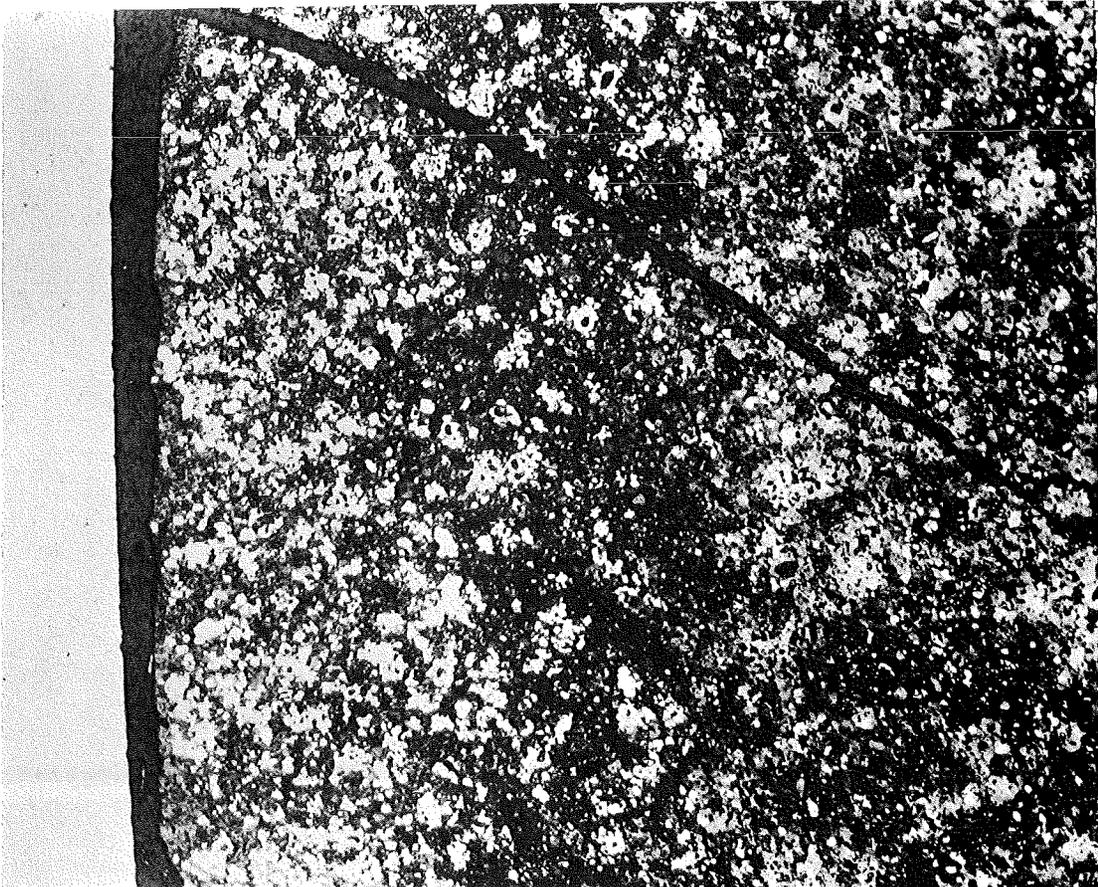
- I/34 -
zu Prüfling L4-5

A1



HZ-8b-4a-I4/5-1/13
100x
geätzt

200 μm

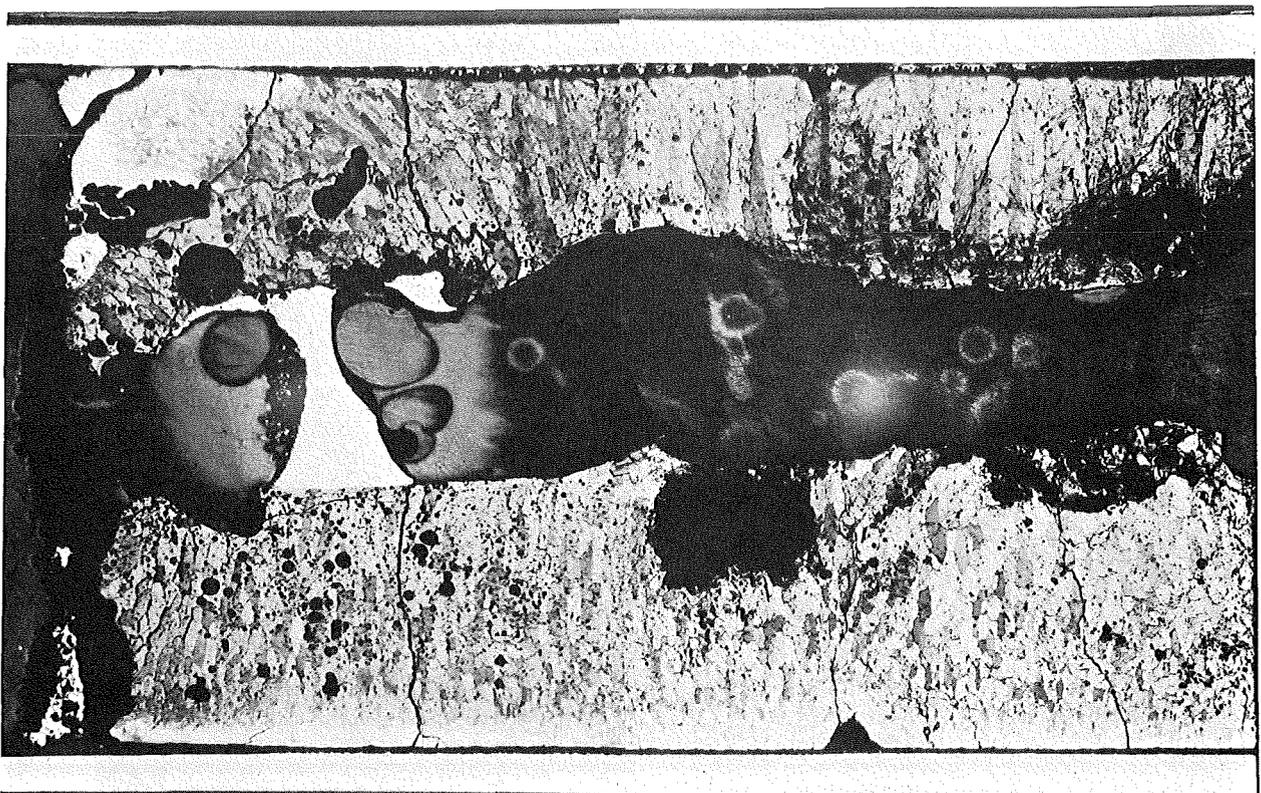
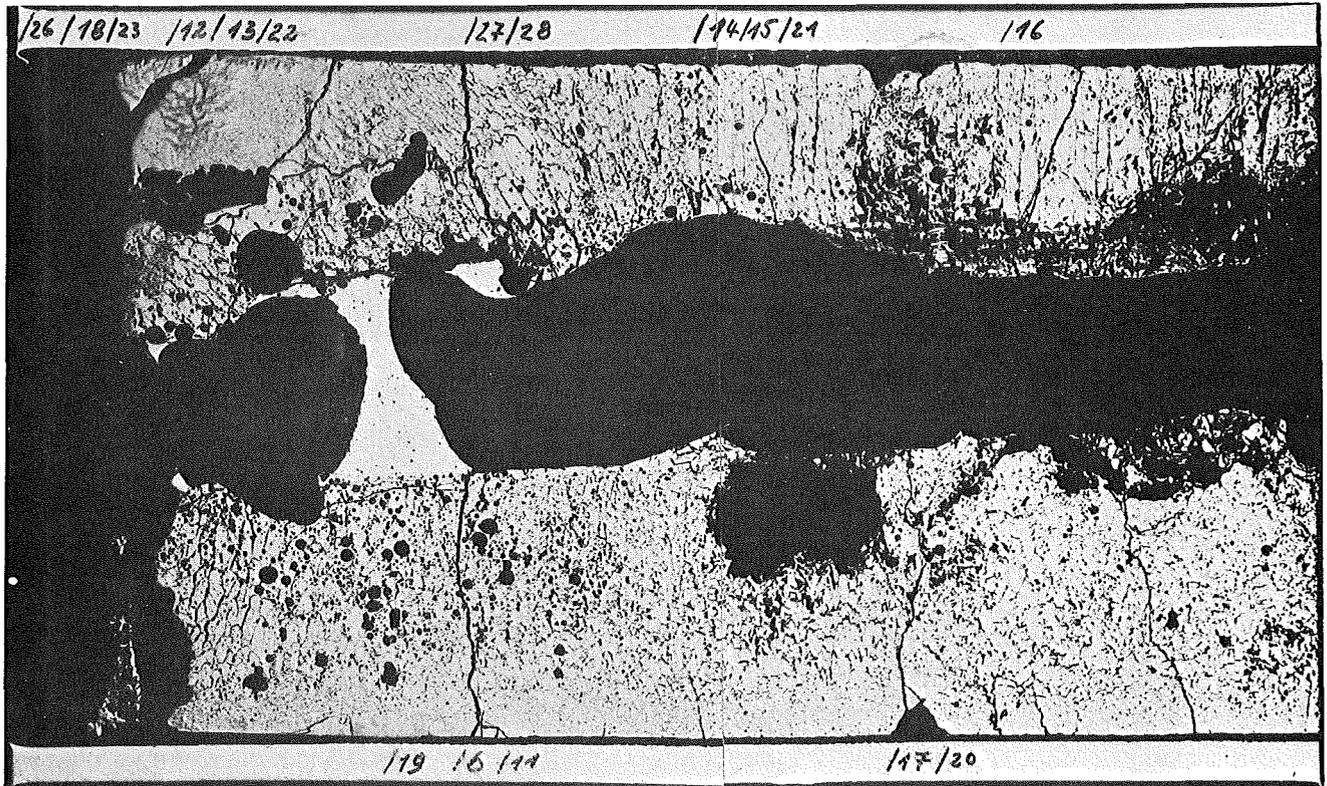


HZ-8b-4a-I4/5-1/14
200x
geätzt

100 μm

- I/39 -
zu Prüfling L4-6

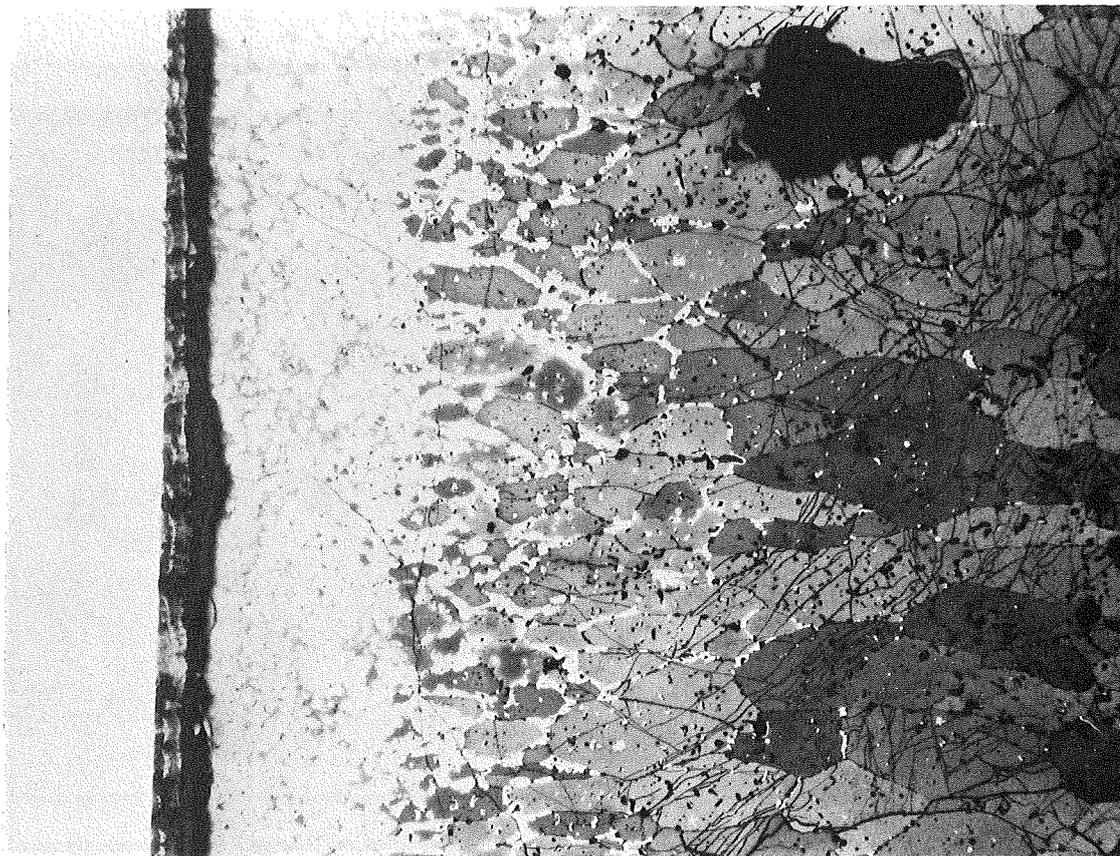
A1



geätzt

1mm

- I/40 -
zu Prüfling L4-6
A1



HZ-8b-4a-I4/6-3/19 100x
geätzt

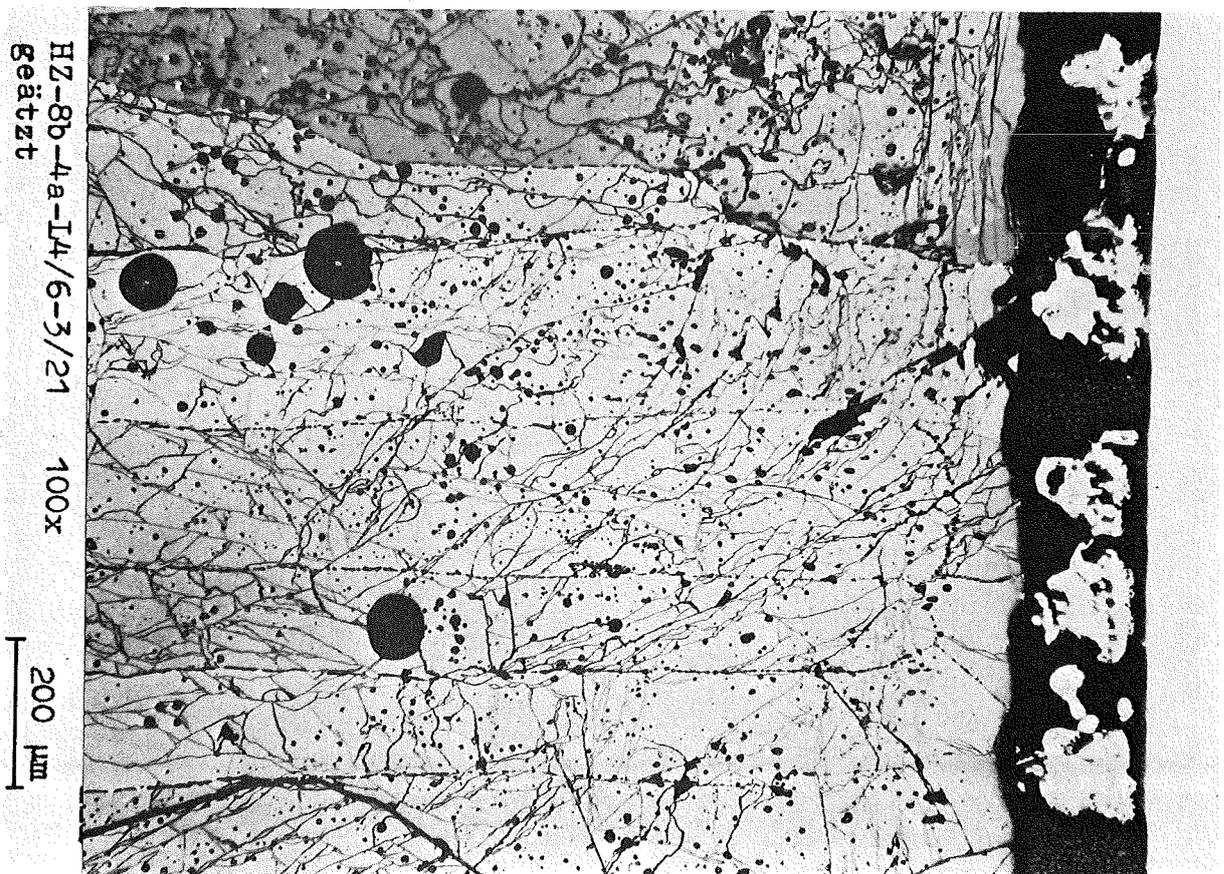
200 μm



HZ-8b-4a-I4/6-3/20 100x
geätzt

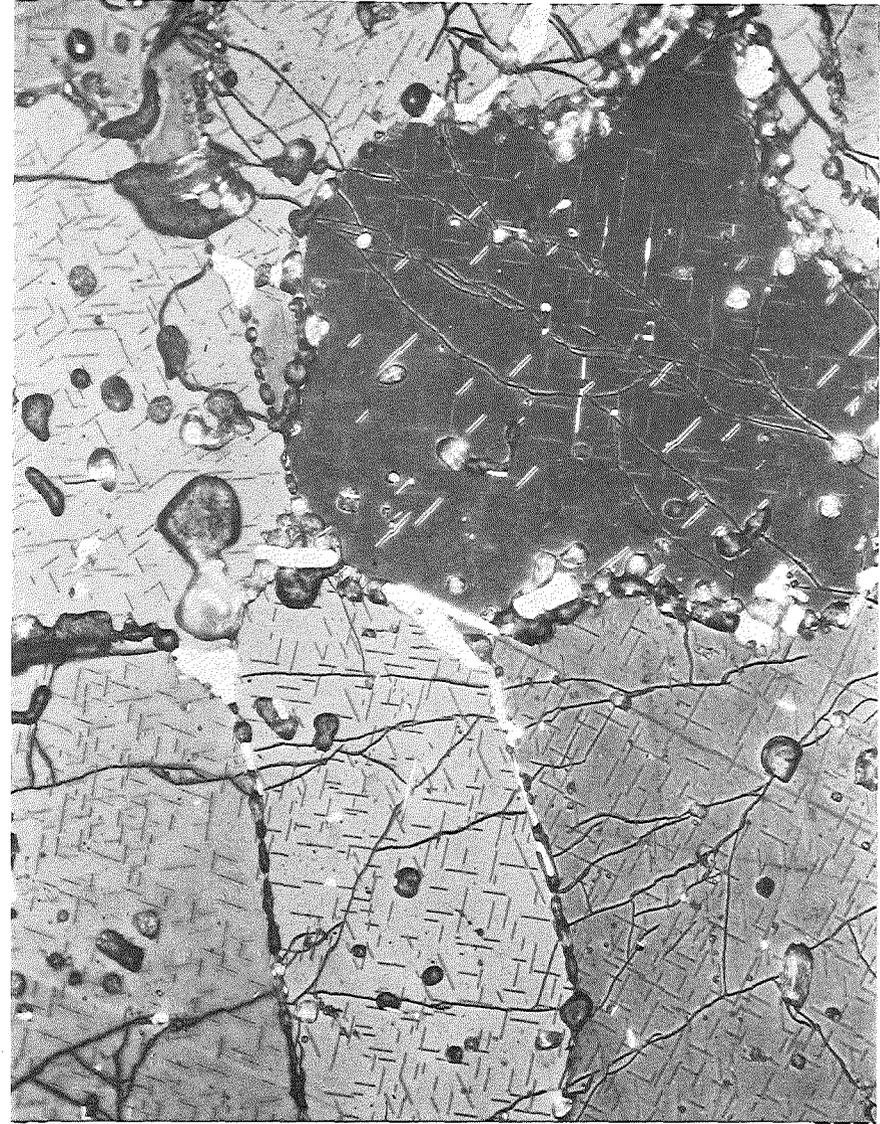
200 μm

-1/41-
zu Prüfling L4-6
A1





HZ-8b-4a-I4/6-3/28 1000x geätzt

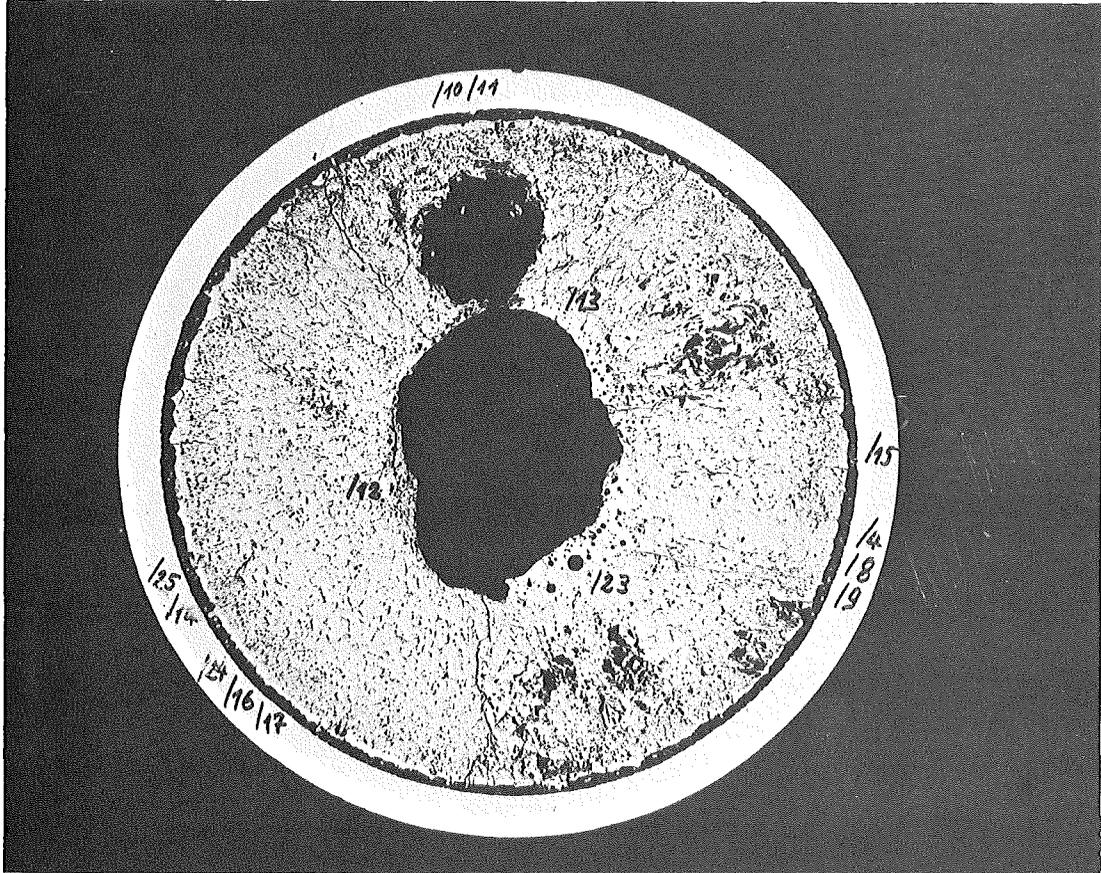


HZ-8b-4a-I4/6-3/27 500x geätzt

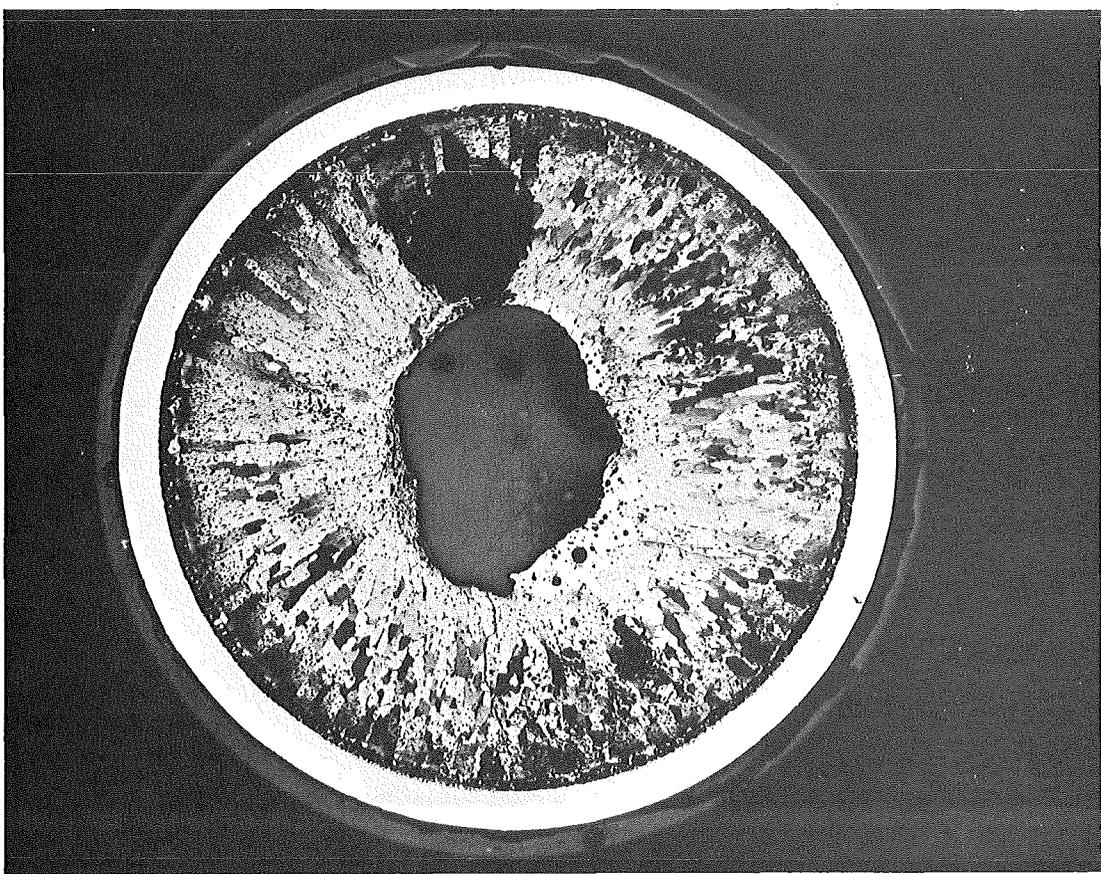
40 µm

- 1/42 -
zu Prüfung L4-6
A 1

-1/45-
zu Prüfling L4-6
A 2



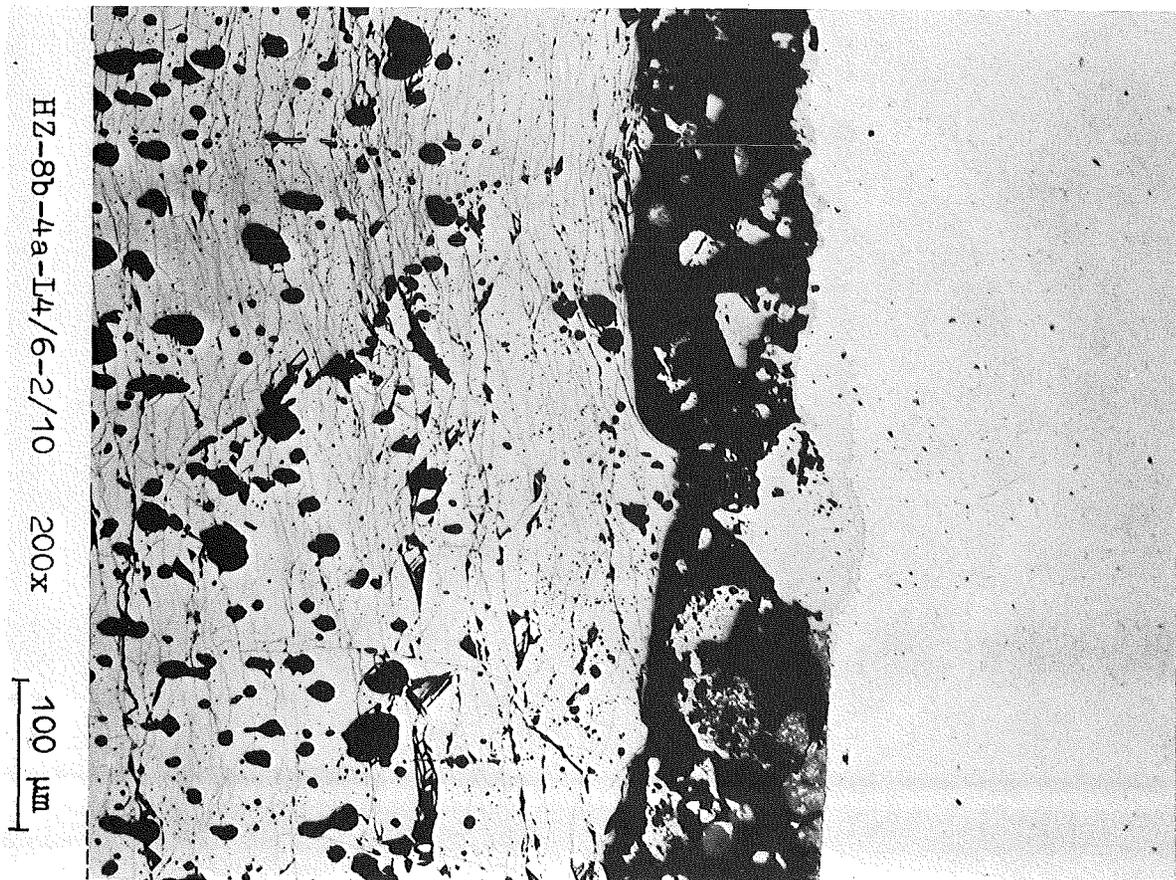
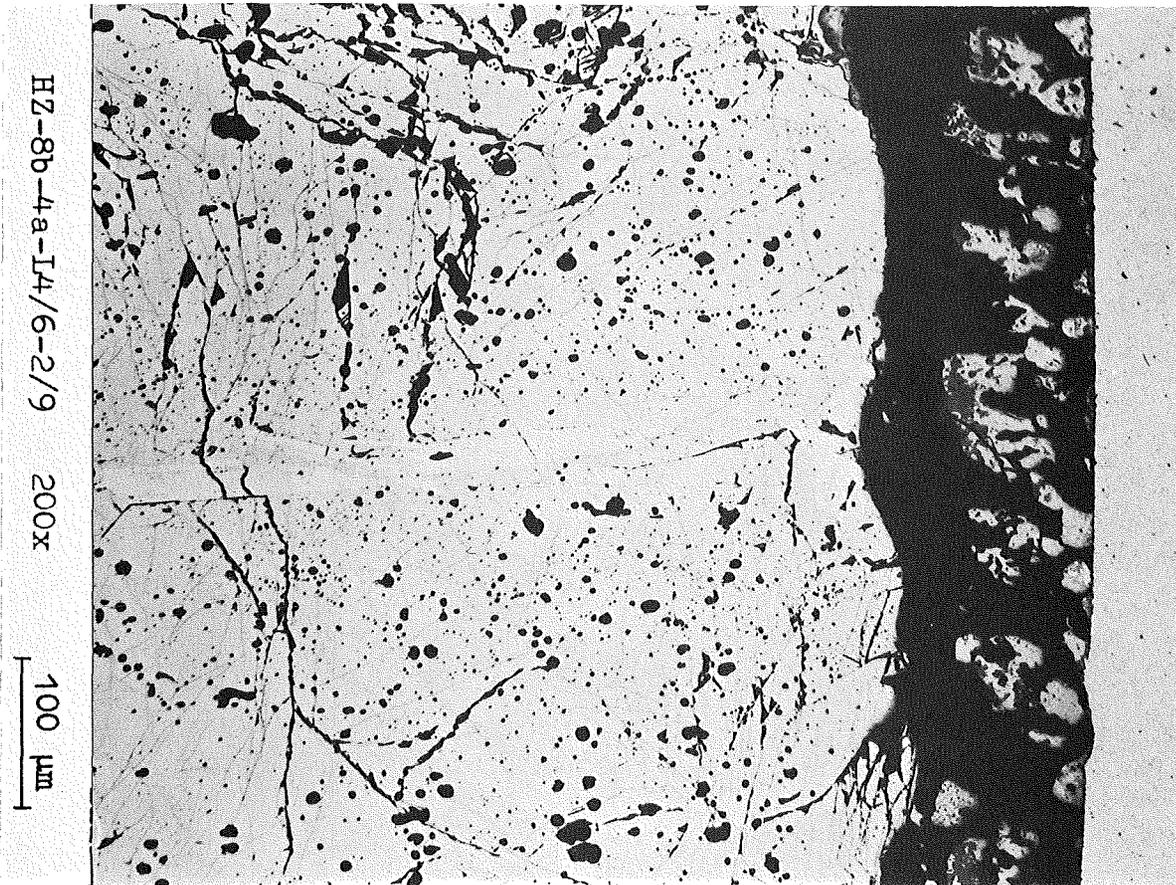
HZ-8b-4a-I4/6-2/3 10x



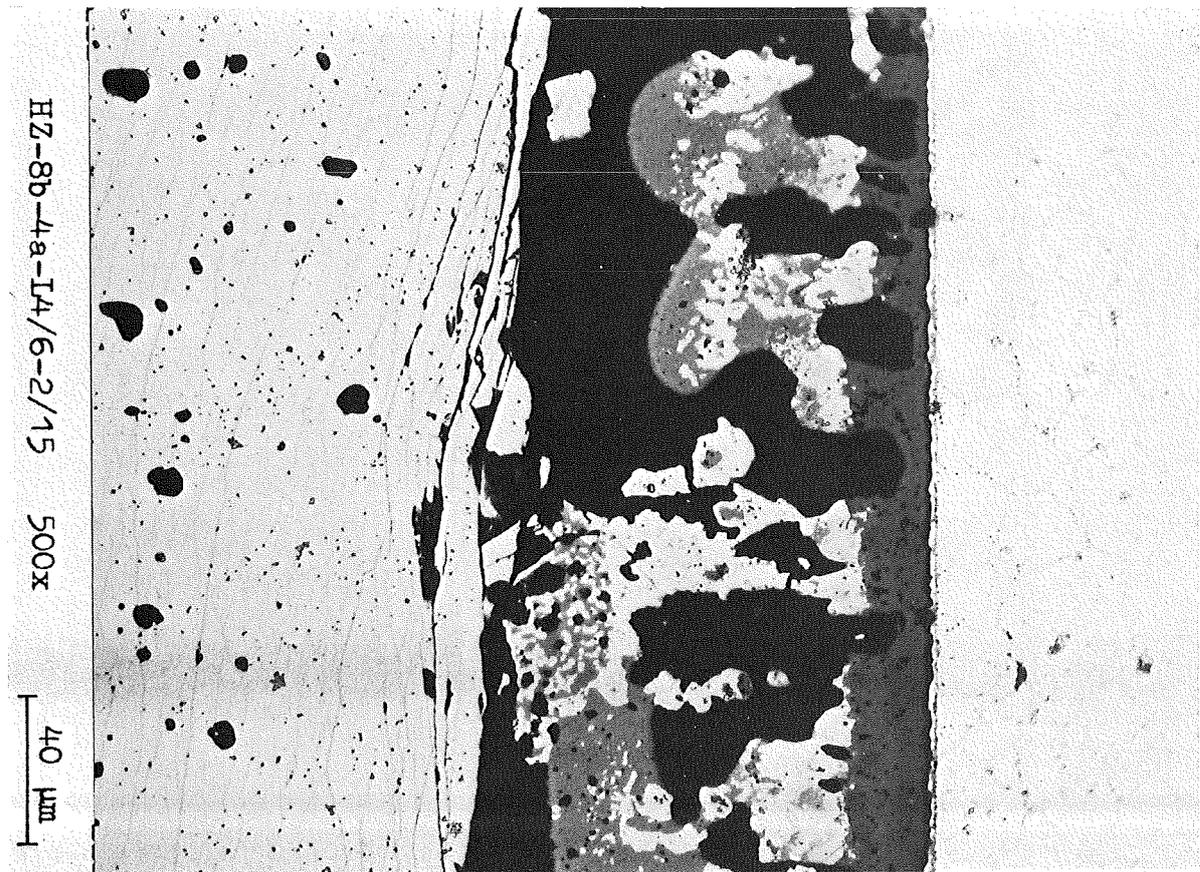
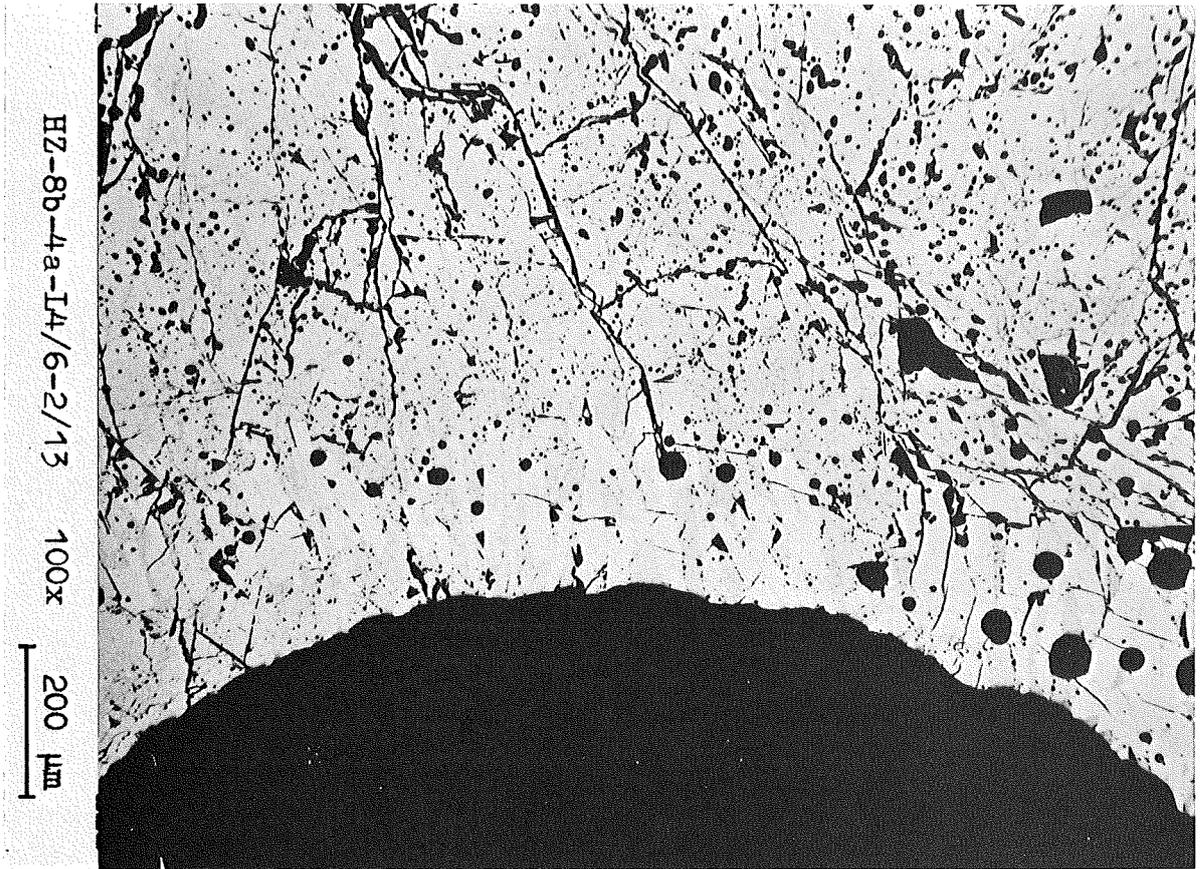
HZ-8b-4a-I4/6-2/18 10x geätzt

1mm

- 1/46 -
zu Prüfling L4-6
A 2



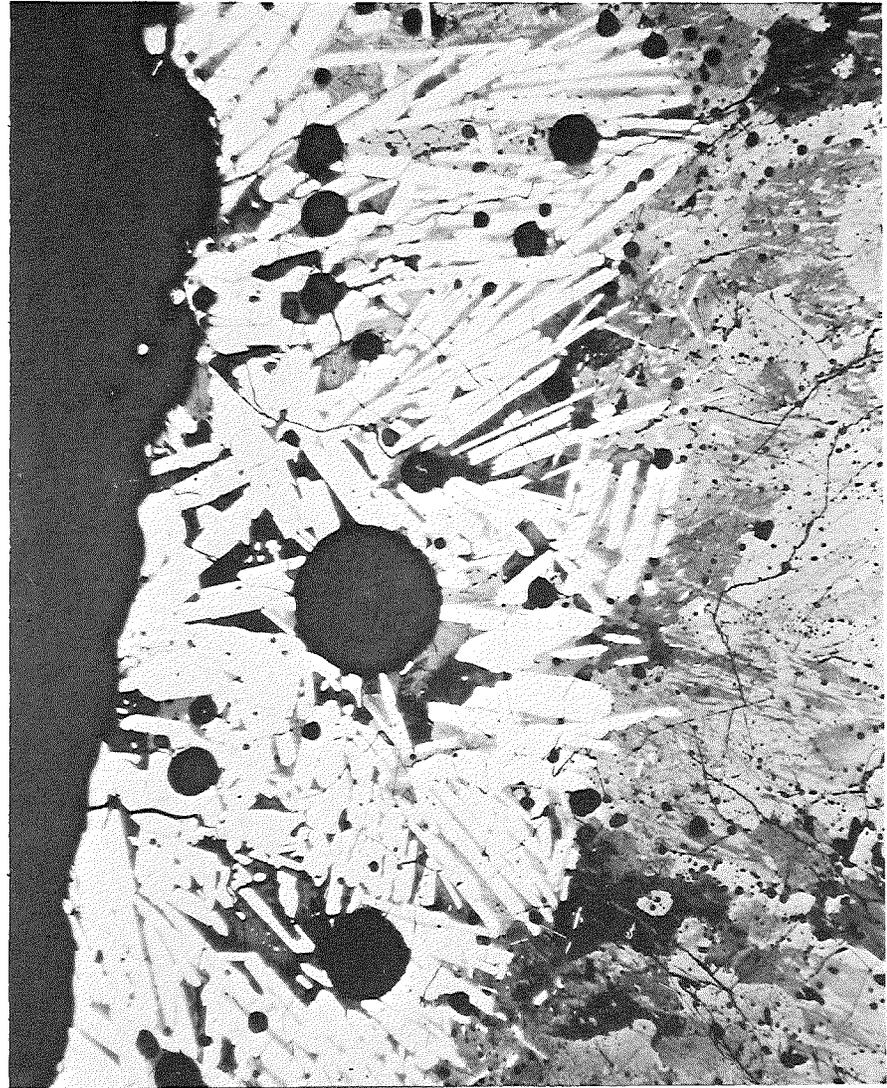
- 1/47 -
zu Prüfling L4-6
A 2





HZ-8b-4a-I4/6-2/25 200x
geätzt

100 μm

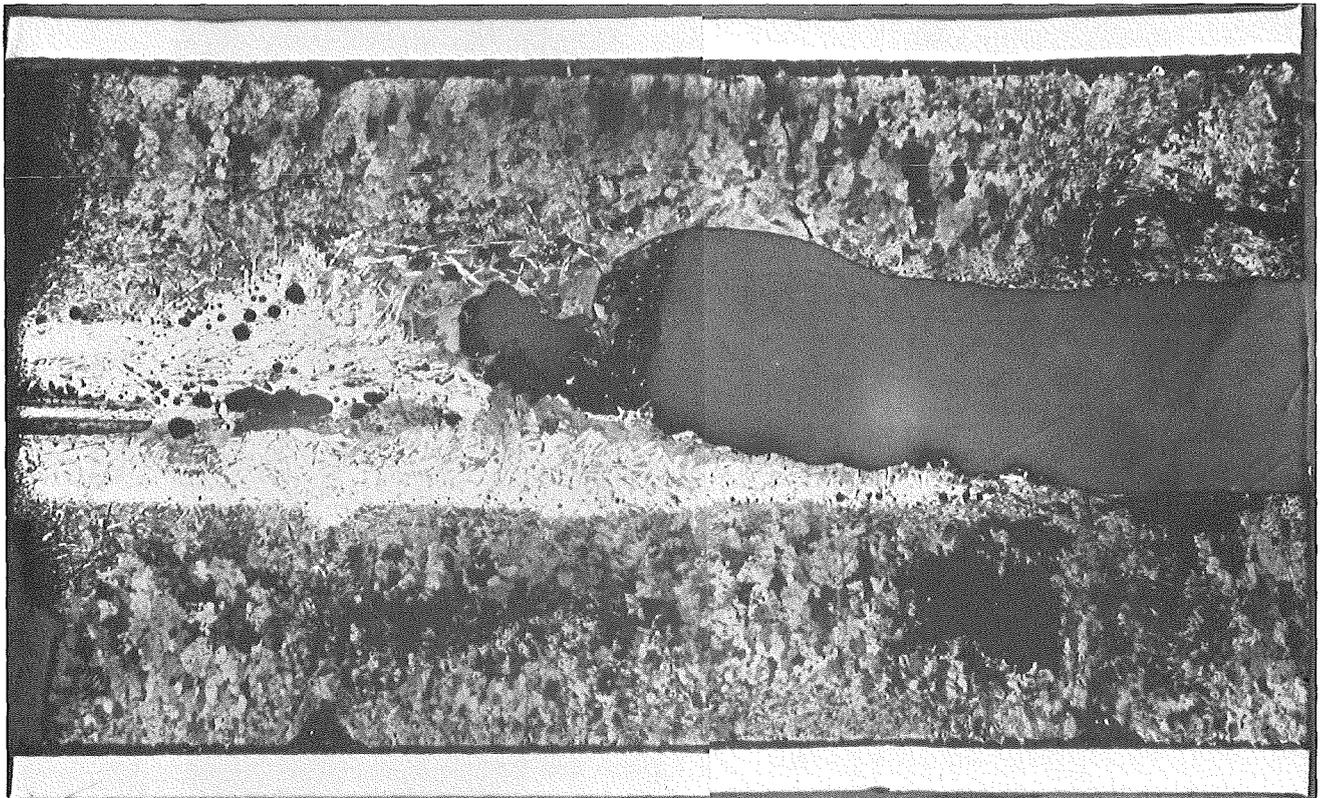
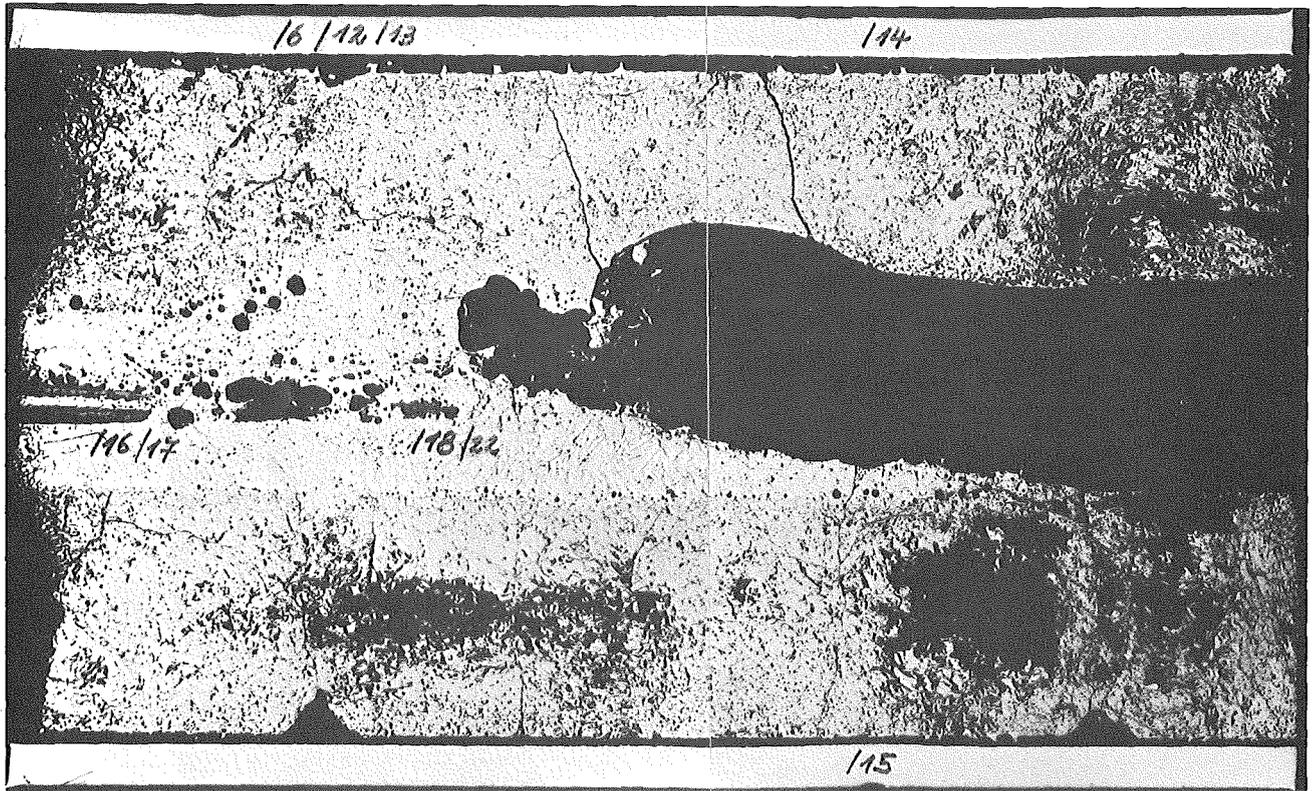


HZ-8b-4a-I4/6-2/23 100x
geätzt

200 μm

- I/51-
zu Prüfling L4-6

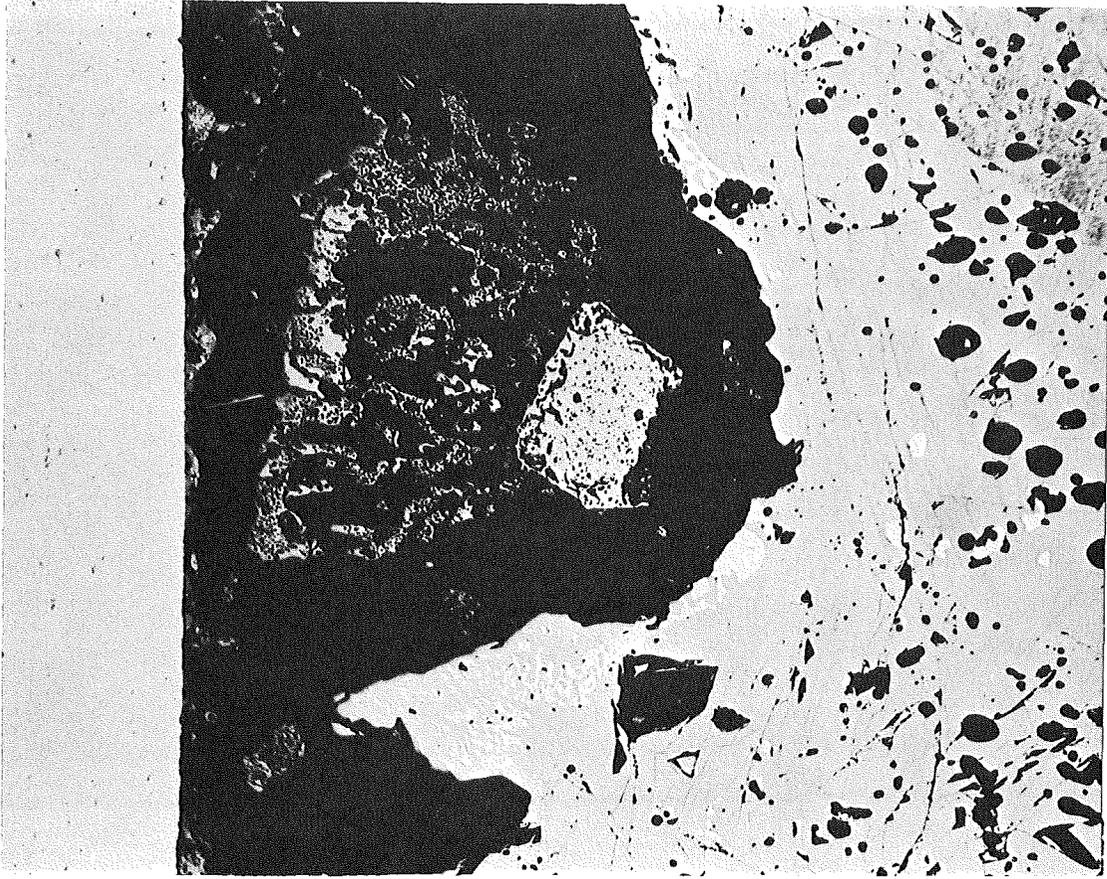
A3



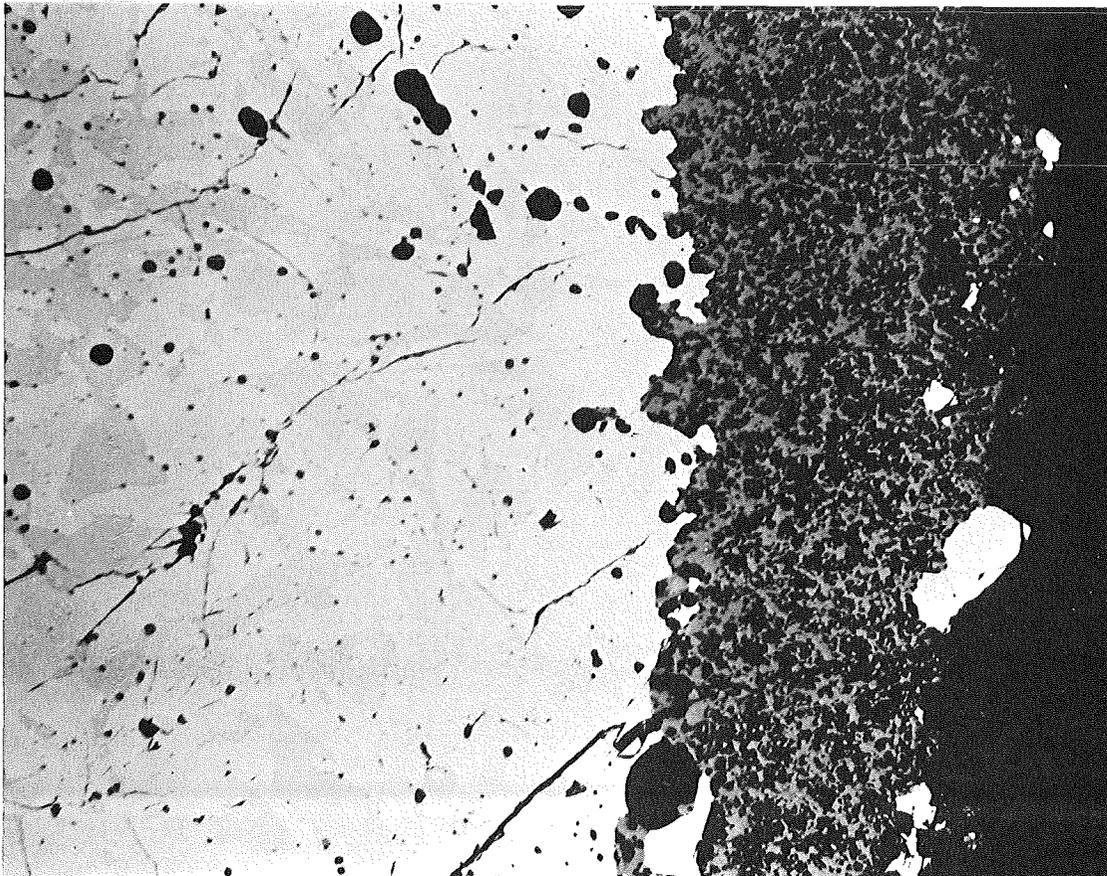
geätzt

1mm

-I/52-
zu Prüfling L4-6
A3

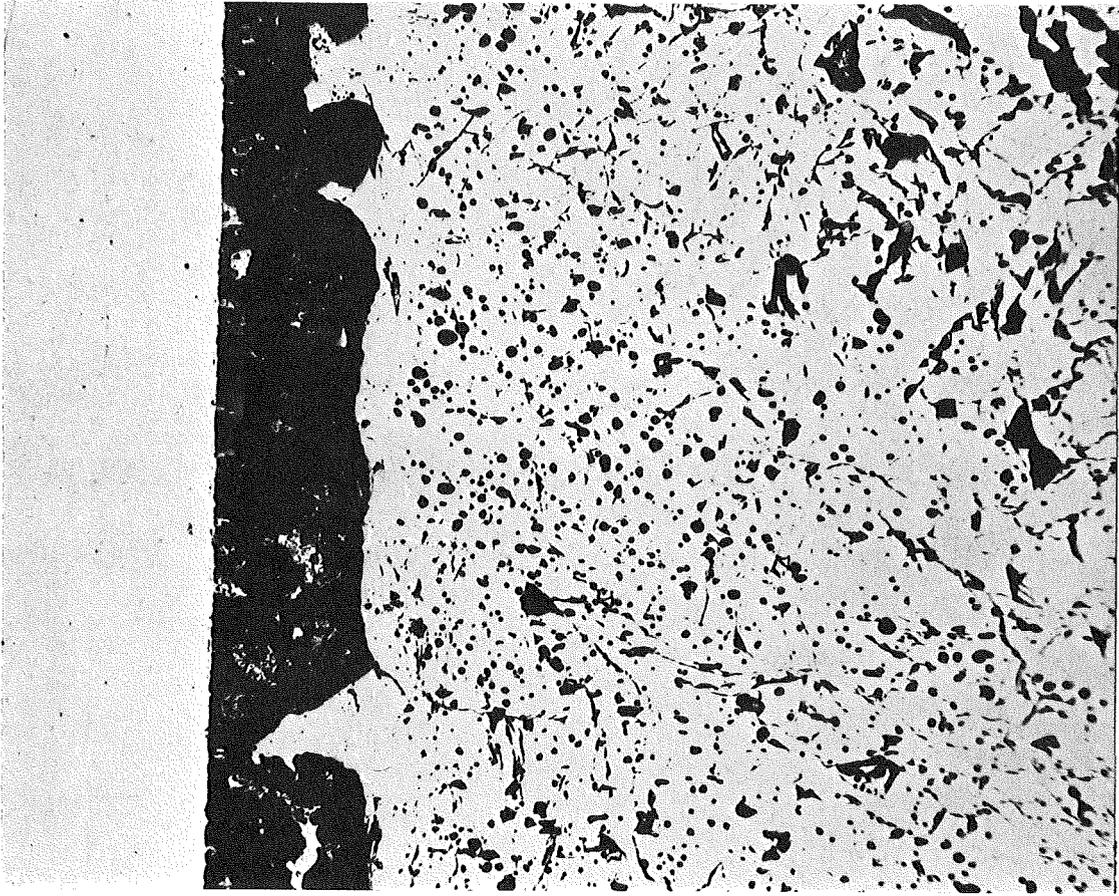


HZ-8b-4a-I4/6-1/12 200x
100 μm



HZ-8b-4a-I4/6-1/13 200x
100 μm

- I/53 -
zu Prüfling L4-6
A 3

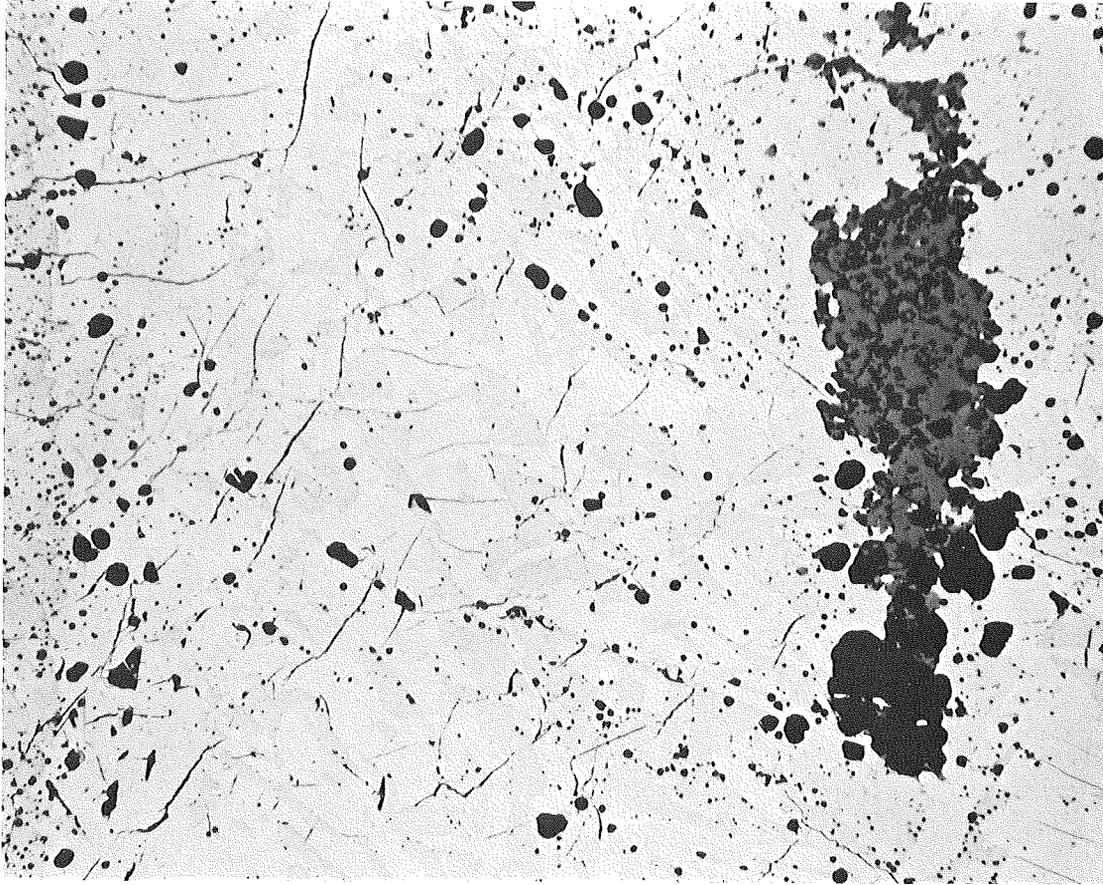


HZ-8b-4a-IA/6-1/14 100x 200 μm

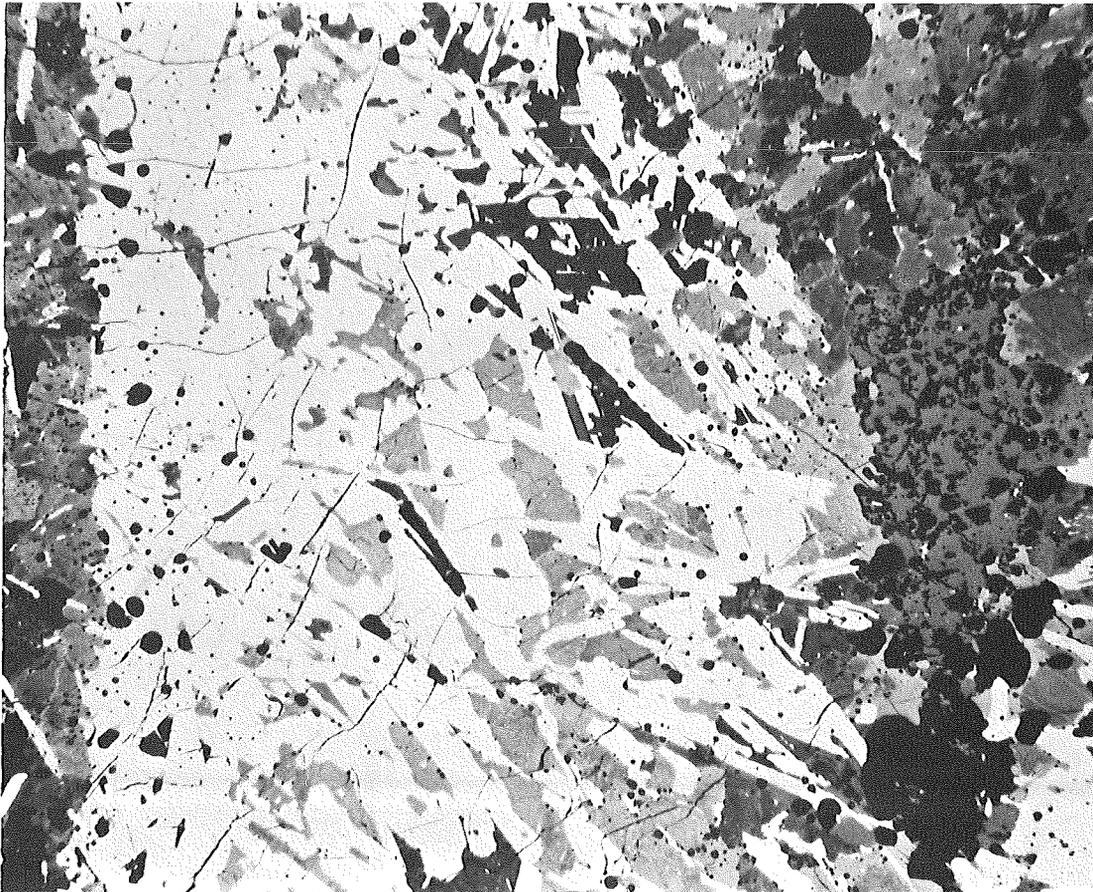


HZ-8b-4a-IA/6-1/17 200x 100 μm

- I/54 -
zu Prüfling L4-6
A 3

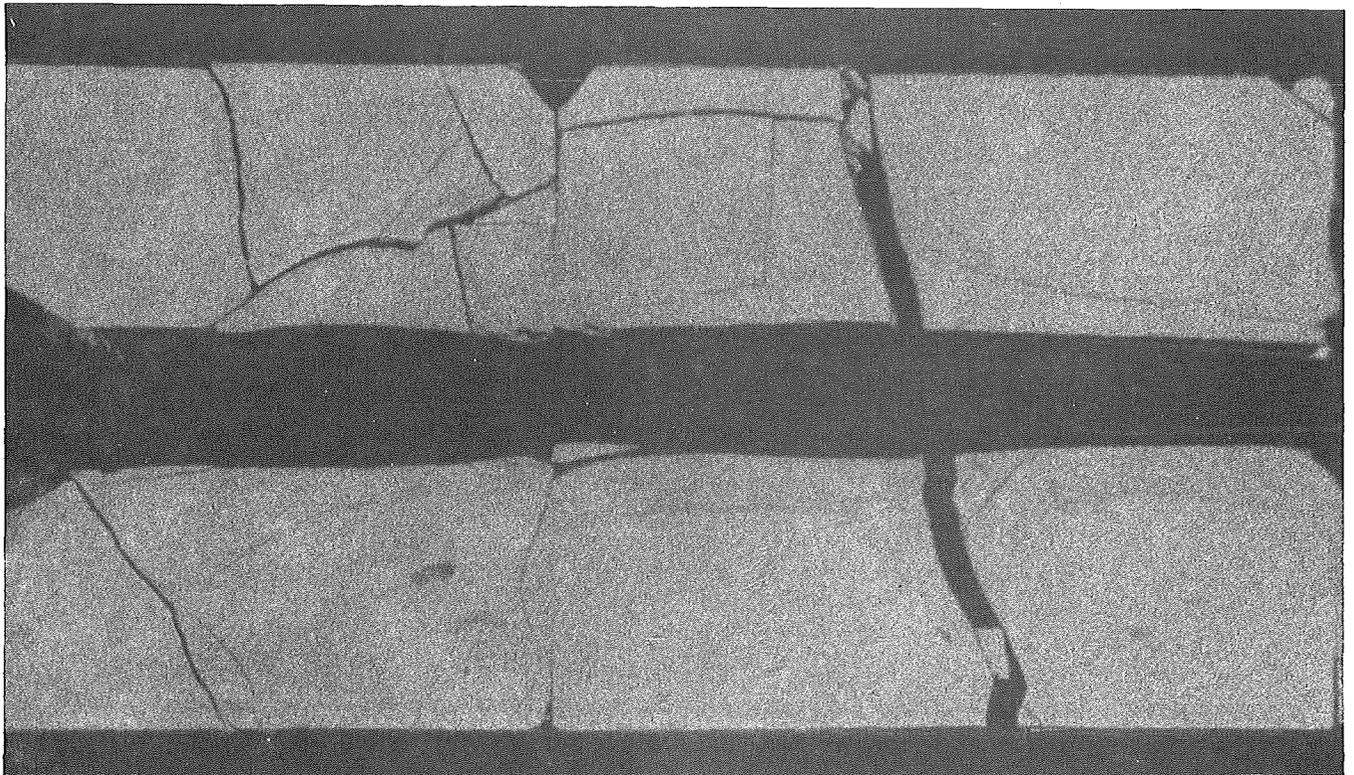
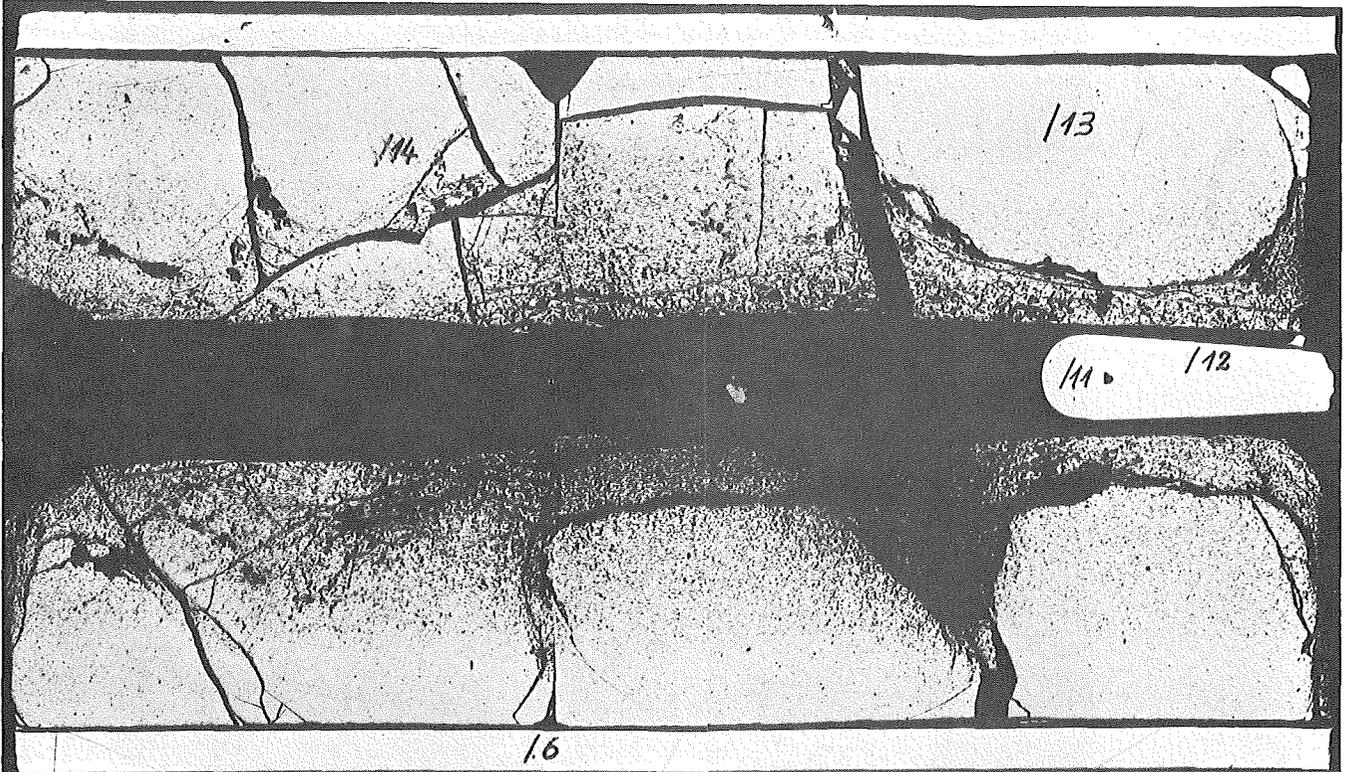


HZ-8b-4a-I4/6-1/18 100x 200 µm



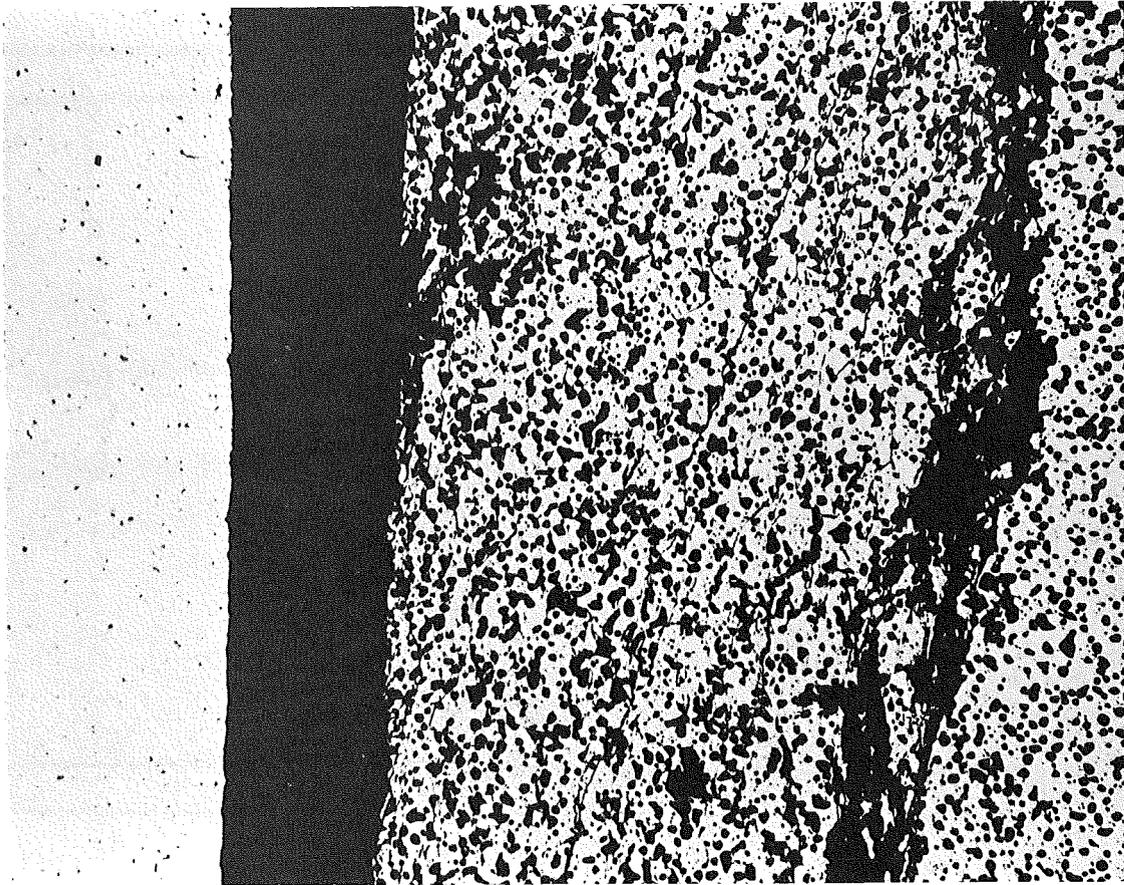
HZ-8b-4a-I4/6-1/22
Geätzt 100x 200 µm

- I/59 -
zu Prüfling L4-7
A 1



1 mm

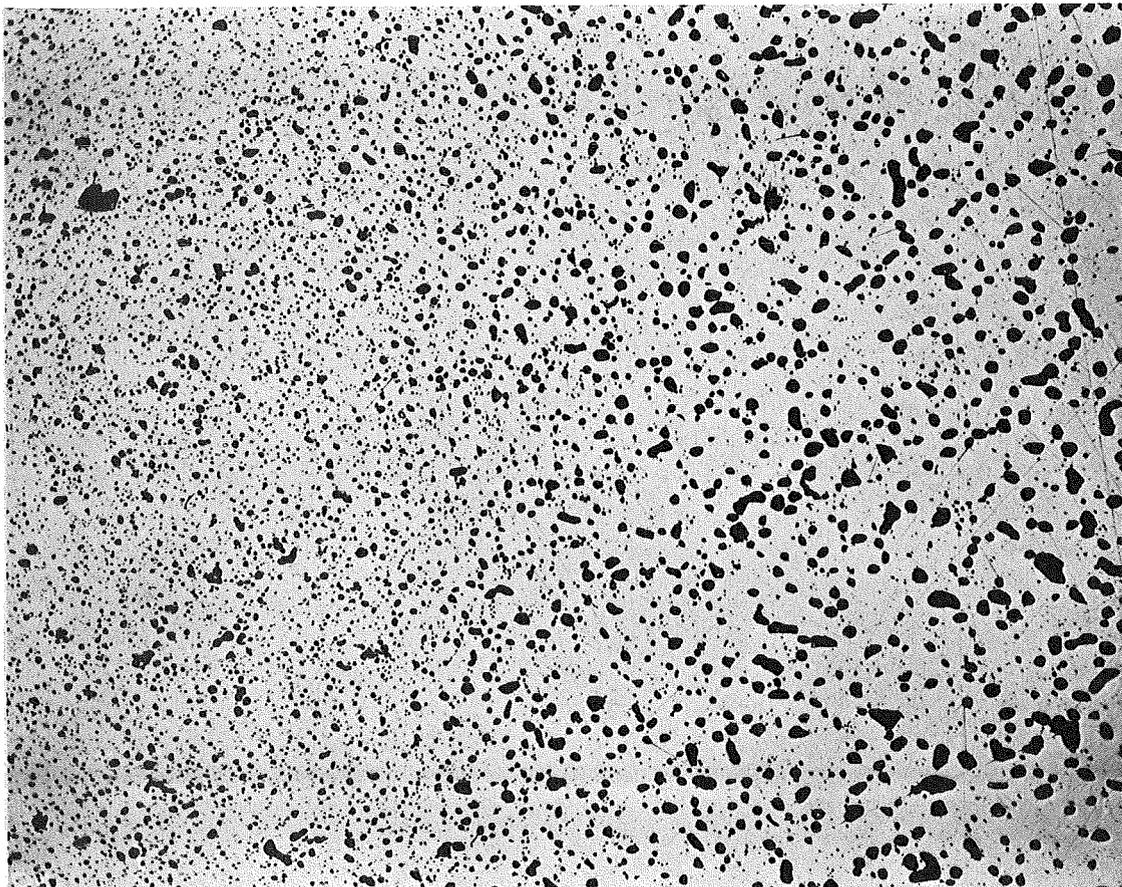
-I/60-
zu Prüfling L4-7
A1



200 μm

HZ-8b-4a-I4/7-1/12 100x

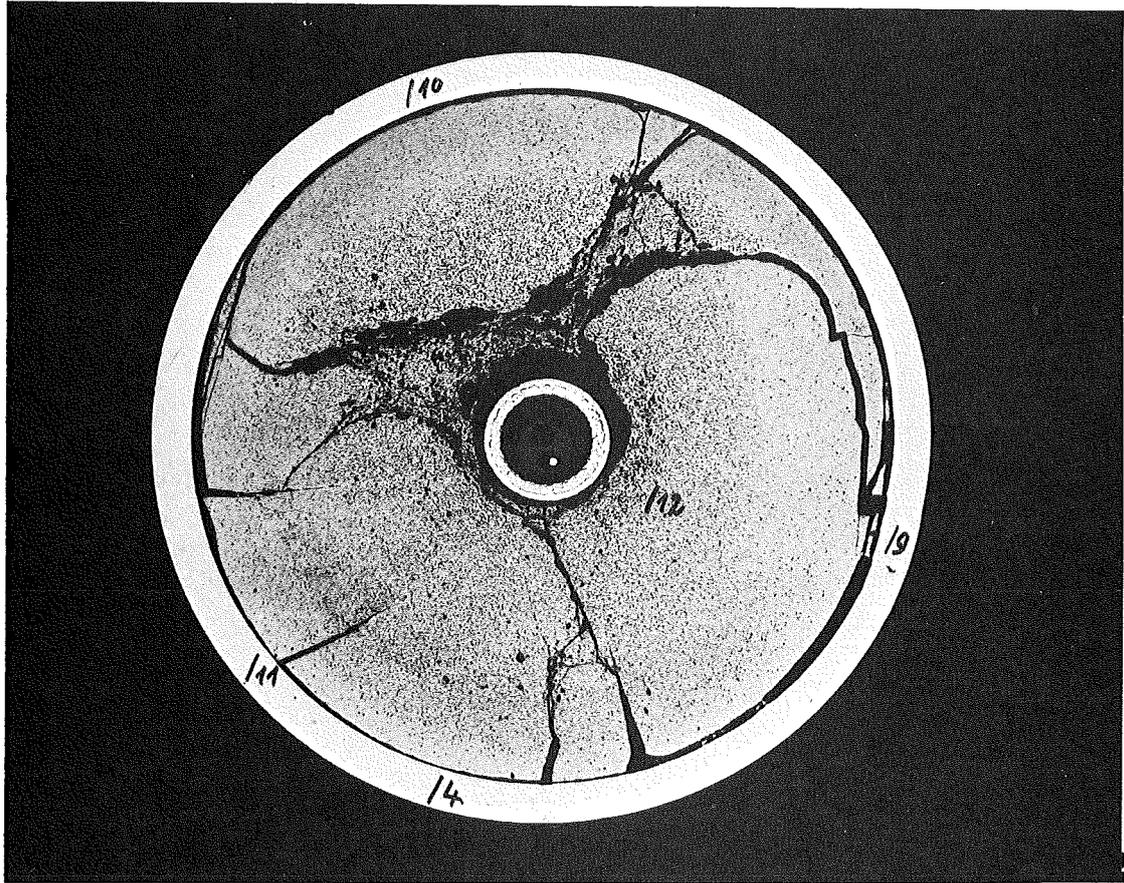
TE



100 μm

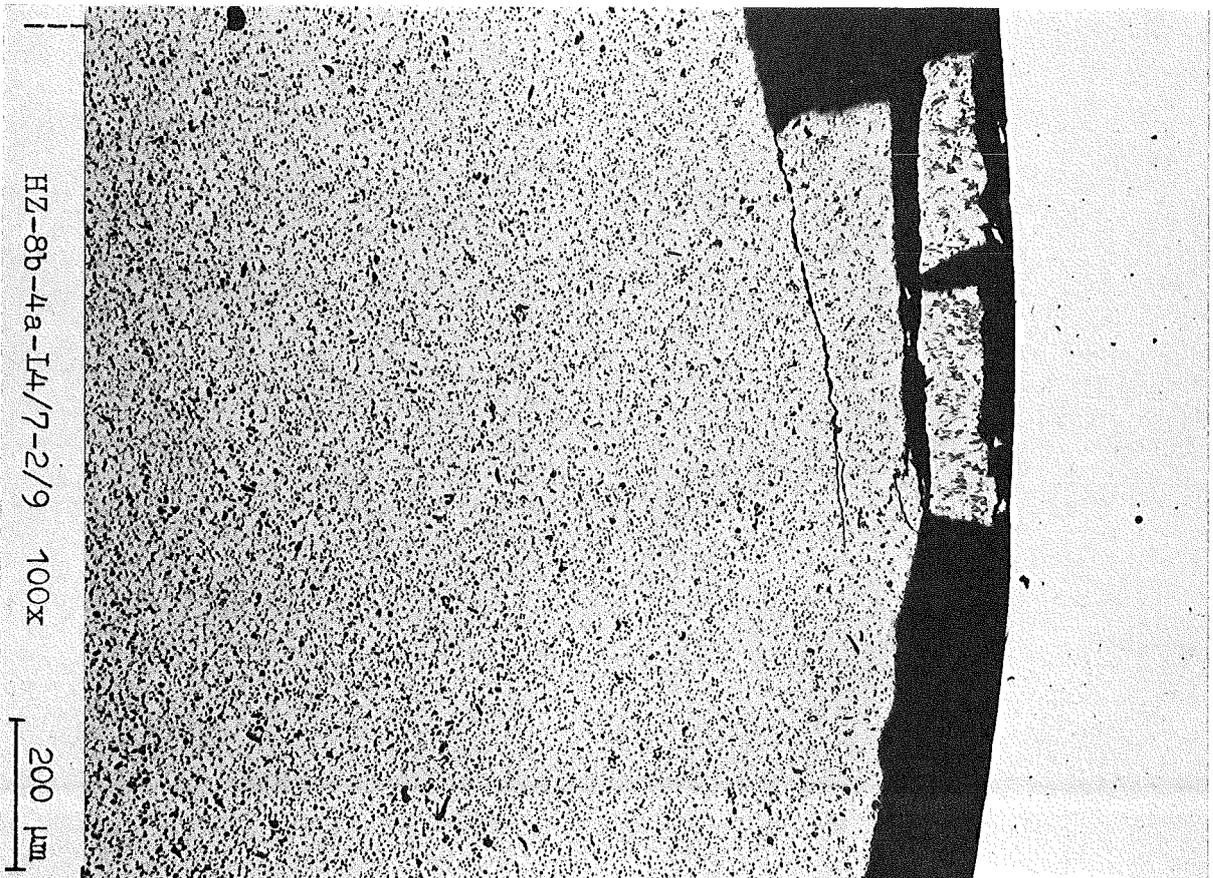
HZ-8b-4a-I4/7-1/13 200 x

- I/63 -
zu Prüfling L4-7
A 2



HZ-8b-4a-I4/7-2/3 10 x

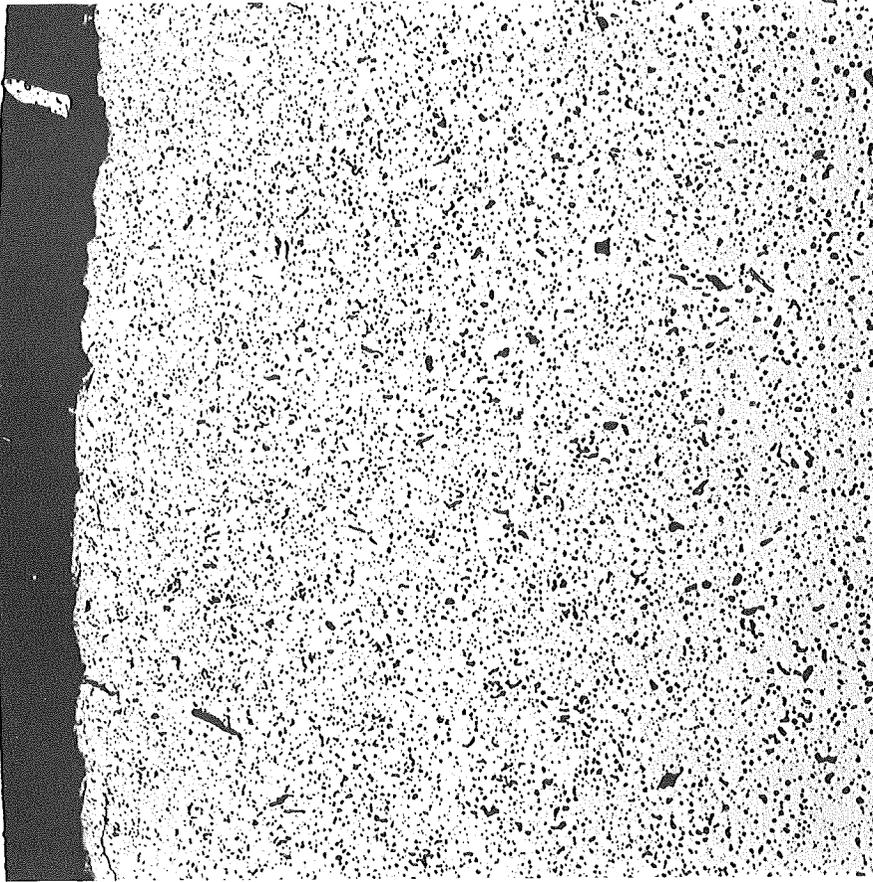
1 mm



HZ-8b-4a-I4/7-2/9 100x

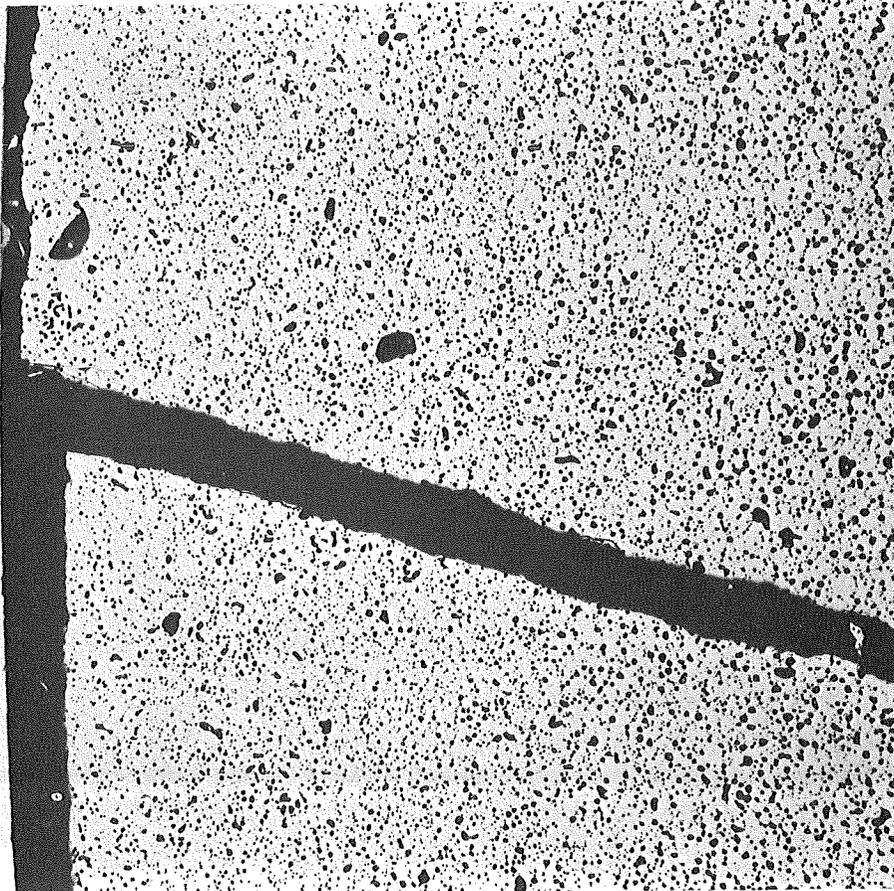
200 µm

- I/64 -
zu Prüfling L4-7
A 2



100 μm

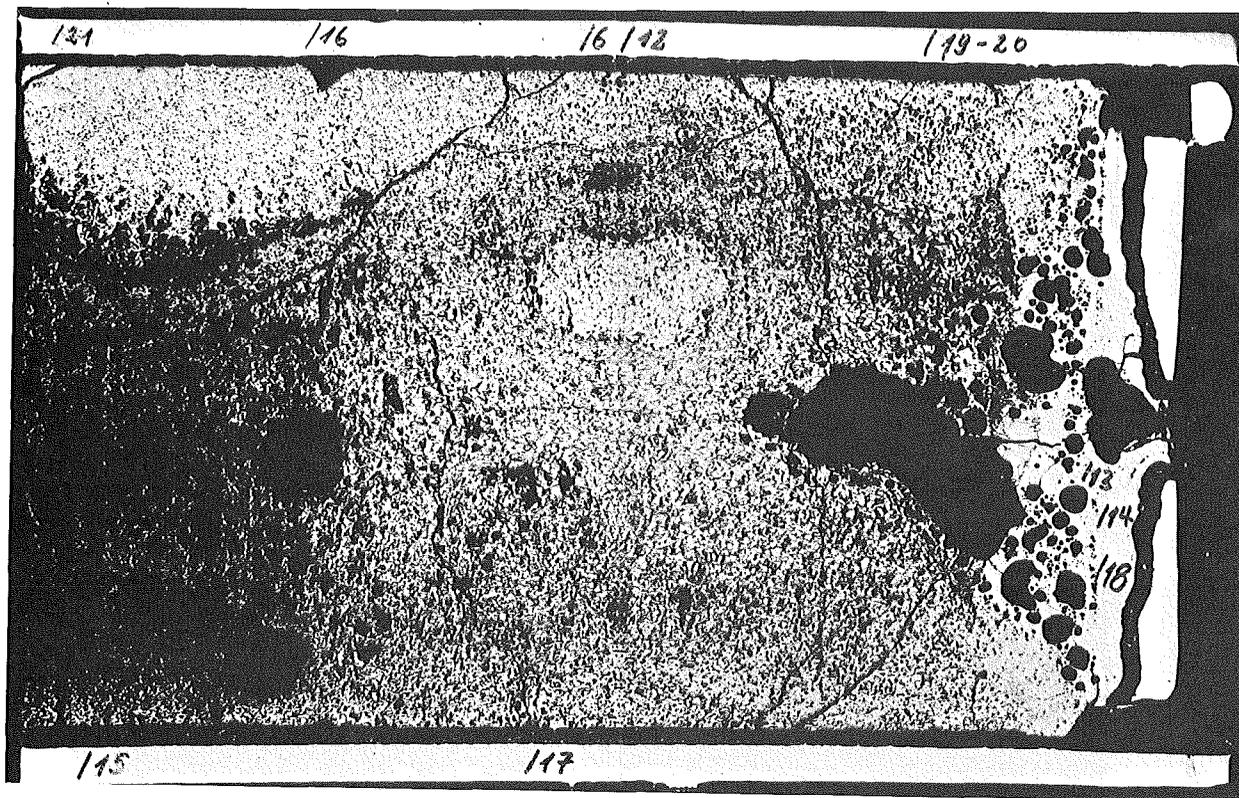
HZ-8b-4a-I4/7-2/10 200 x



100 μm

HZ-8b-4a-I4/7-2/11 200 x

-1/69 -
zu Prüfling L4-8
A 1



1 mm



200 μm

HZ-8b-4a-14/8-3/16 100 x

-1/70-
zu Prüfling L4-8

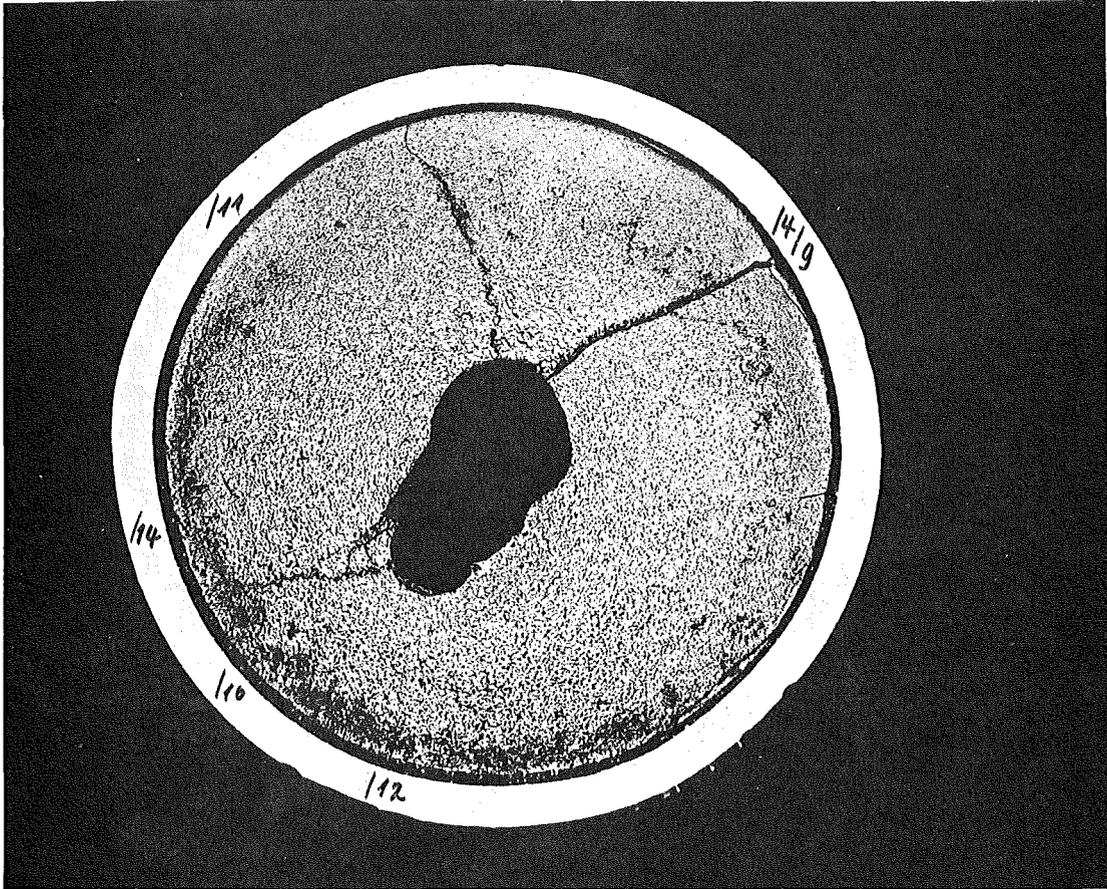
A1



b-4a-L4/8-3/20 20 x

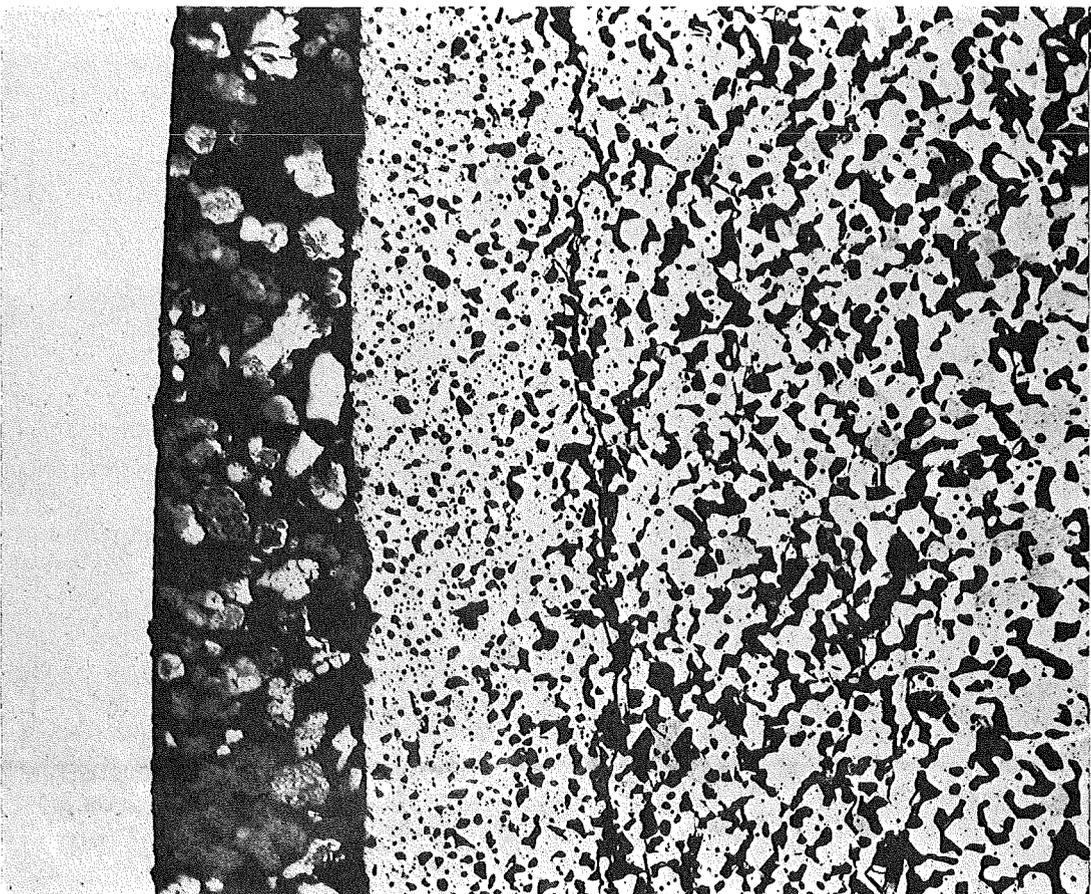
1 mm

-1/73 -
zu Prüfling L4-8
A 2



1 mm

HZ-8b-4a-I4/8-2/3 10x



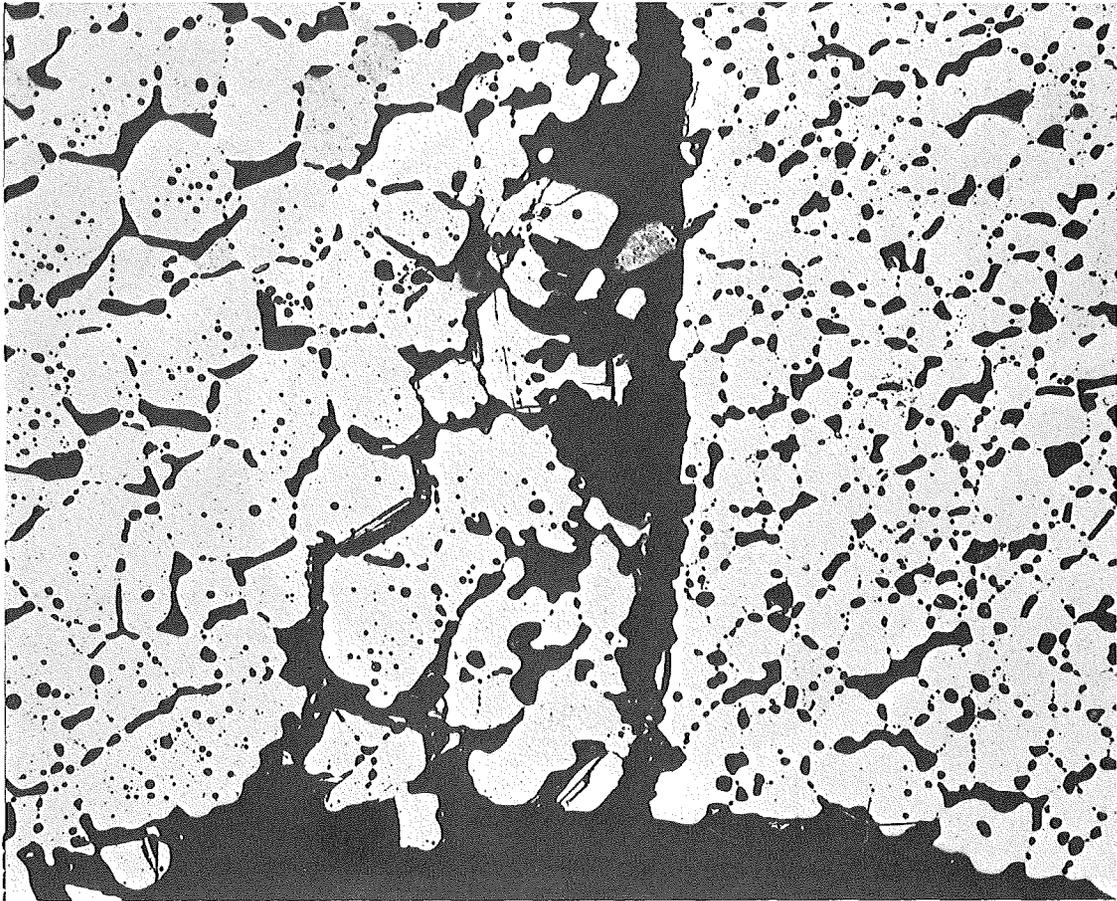
100 μ m

HZ-8b-4a-I4/8-2/11 200 x

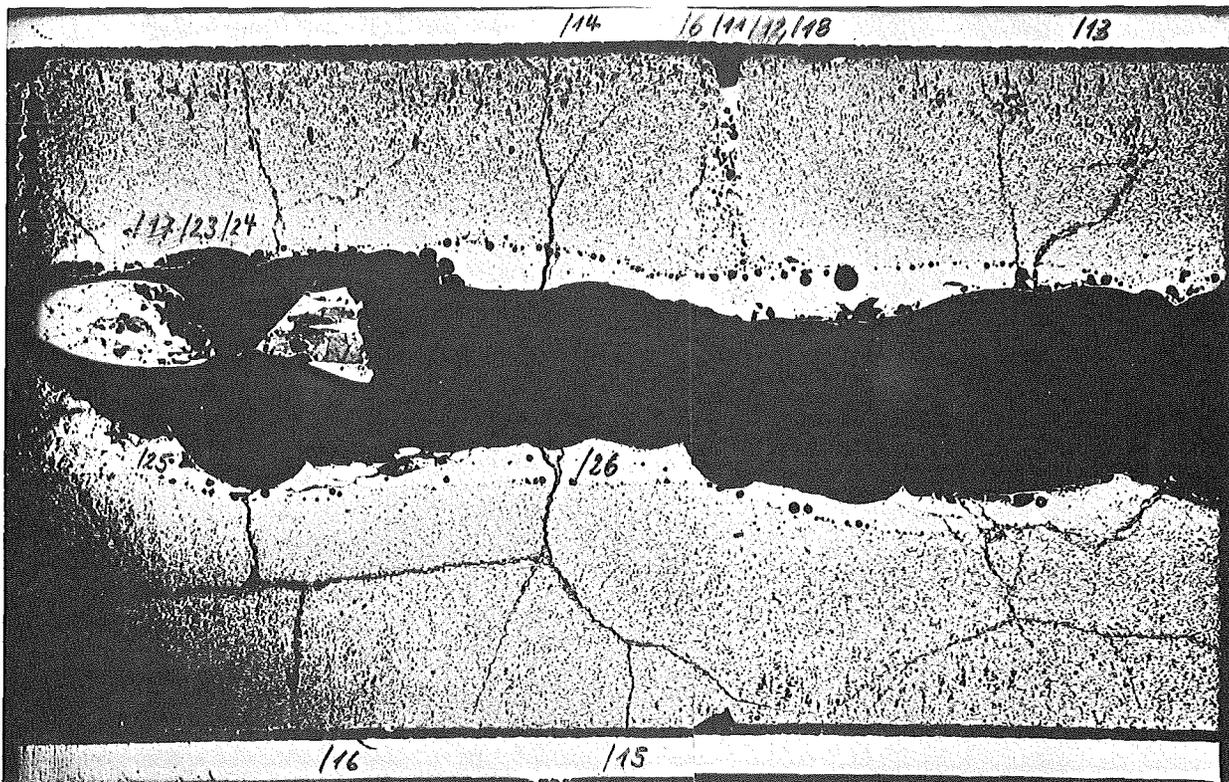
-1/74-
zu Prüfling L4-8
A 2

HZ-8b-4a-I4/8-2/9 200 x

100 μ m



A 3



1 mm

A n h a n g II

Prüfzeugnisse und Stabbegleitkarten

| | | |
|--------------------------|---|----------------------------------|
| AEG TELEFUNKEN | Fachbereich Kernreaktoren Fachgebiet Schnelle Reaktoren Brennelemente | E 325 Qualitäts- kontrolle |
|--------------------------|---|----------------------------------|

ABNAHMEZEUGNIS
=====

(gemäß DIN 50049 - Bescheinigung über Werkstoffe - 3 B)

Auftraggeber: GfK
Prüfgegenstand: Brennstoffstäbe
FR2-Loop Versuchsgruppe 4 a
Auslieferung an:
Institut für Material und Fest-
körperforschung

Komm.-Nr.: 120 1/5
Aufgabennr.:
Projektnr.:
Kurzbezeichnung: FR2-Loop
Spezifik.-Nr.: PSB-Bericht Nr. 350
Zeichnungsnr.: BE2-001074a
Sondervereinbarungen: JRE2-02-4-3669

Die Abnahme erstreckt sich auf das Brennstoffrohr, einschließlich
Endstopfenschweißung, nicht jedoch auf die Thermaelemente

Umfang der Lieferung:

| Pos. | Stück | Gegenstand | Nr. | Bemerkung |
|------|-------|--|-----|-----------|
| 1 | 8 | UC/PUC-Brennstäbe einseitig verschweißt mit unterem Endstopfen und Thermaelement | | |

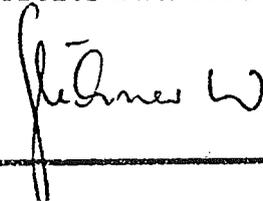
Anlagen: 1 Prüfbericht

Die gestellten Anforderungen sind laut Anlage-n ...¹... erfüllt.

Bemerkung:

AEG-TELEFUNKEN
Fachgebiet Schnelle Reaktoren
Brennelemente
Qualitätskontrolle

8752 Großwelzheim, den 2.9.70.....



| | | |
|--|--------------------|----------------------------|
| AEG E 325 Brennelemente Kontrolle | Prüfbericht | Nr. zu Prüfplatz Nr. |
|--|--------------------|----------------------------|

| | |
|--|---|
| Prüfauftrag: Prüfung von 8 Brennstäben im Rahmen der FR2-LOOP- Versuchsgruppe 4 a | Projekt: FR2-LOOP Versuchsgruppe 4 a Komm. Nr.: 120145 Auftraggeber: GfK |
|--|---|

| | |
|---|---|
| Prüfunterlagen: Spezifikation PSB-Bericht Nr. 350 C Phase Ib | Eingang: Prüftermin: 2.9.1970 |
|---|---|

Prüfresultate:

| Stab Nr. | Schweiß- Nahtüber- höhung | Durch- biegung | Visuell | Länge | US Prüf. | Geo- metrie | Röntgen- prüfung |
|----------|---------------------------------|-------------------|---------|-------|-------------|----------------|---------------------|
|----------|---------------------------------|-------------------|---------|-------|-------------|----------------|---------------------|

| | | | | | | | |
|-----|---------|-------|----------------|-------|-------|-------|----------------|
| 4/1 | < 10,20 | < 0,2 | ohne Befund | i. O. | i. O. | i. O. | ohne Befund |
| 2 | " | " | " | " | " | " | " |
| 3 | " | " | " | " | " | " | " |
| 4 | " | " | " | " | " | " | " |
| 5 | " | " | " | " | " | " | " |
| 6 | " | " | " | " | " | " | " |
| 7 | " | " | " | " | " | " | " |
| 8 | " | " | " | " | " | " | " |

Die Schriebe der US-Prüfung nach Fehlern und Wandstärke, die Röntgen-
 filme und die Abnahmeprotokolle der Hüllrohre liegen vor.

| | |
|---|--|
| Prüfdatum: 2.9.1970 | Prüfer: Glöckner |
| Prüf-oder Abnahme-Zeugnis-Nr.: | Freigabevermerk: Verantwortlich: Glöckner |



Prüfzeugnis

Zeugnis-Nr.

1

ALKEM Auftrag-Nr.:

Erzeugnis:

KT 95

6 FR 2-Vg 4 Stäbe

Prüfverfahren: Vermessung des \emptyset der jeweiligen letzten 3 Hohlpellets

| | | | |
|------------------|--------------|---|------|
| Stab Nr. L 4 - 1 | Pellet Nr. 7 | - | 8,85 |
| | Nr. 8 | - | 8,85 |
| | Nr. 9 | - | 8,85 |
| Stab Nr. L 4 - 2 | Pellet Nr. 7 | - | 8,65 |
| | Nr. 8 | - | 8,66 |
| | Nr. 9 | - | 8,65 |
| Stab Nr. L 4 - 3 | Pellet Nr. 7 | - | 8,83 |
| | Nr. 8 | - | 8,84 |
| | Nr. 9 | - | 8,84 |
| Stab Nr. L 4 - 5 | Pellet Nr. 7 | - | 8,66 |
| | Nr. 8 | - | 8,64 |
| | Nr. 9 | - | 8,65 |
| Stab Nr. L 4 - 6 | Pellet Nr. 7 | - | 8,65 |
| | Nr. 8 | - | 8,65 |
| | Nr. 9 | - | 8,65 |
| Stab Nr. L 4 - 7 | Pellet Nr. 7 | - | 8,65 |
| | Nr. 8 | - | 8,65 |
| | Nr. 9 | - | 8,65 |

Bemerkungen:

ko
 Deibers
 Seibald
 Kun - aus / Dep. 12/8

ZUR PRODUKTION FREIGEgeben:

ja

nein

Name: Pirell

Datum: 1.10.70

Datum:



Bearbeiter

Datum

Geprüft

Datum

Blattzahl

Blatt-Nr.



- II/5 -

Prüfzeugnis

Zeugnis-Nr.:

2

ALKEM Auftrag-Nr.:

KT 95

Erzeugnis:

6 FR2-Vg 4 Stäbe

Prüfunterlage:

Spezifikations Nr. 9.019

Wir bestätigen, daß die in Spez. Nr. 9.019 geforderten Prüfungen ordnungsgemäß durchgeführt wurden.

Die Stäbe Nr. L 4 - 2
L 4 - 5
L 4 - 6
L 4 - 7

entsprechen der Spezifikation

Der Stab Nr. L 4 - 1

kann wegen einem Wolframeinschluß (von Elektrode stammend)

sowie der Stab Nr. L 4 - 3

wegen eines Lunkers ca. 300 µm.
in der Schweißnaht nur vom Abnehmer freigegeben werden.

Bemerkungen:

ZUR PRODUKTION FREIGEgeben:

ja

nein

Nome:

Riedl

1.10.70

Datum:



Bearbeiter

Datum

Geprüft

Datum

Blattzahl

Blatt-Nr.



Brennstabbegleitkarte FR 2-VG4 KT-95

Stab-Nr.:

4-1

Nr. der Brennstoffsäule

A1-B1

| | Soll | Ist |
|--|-------------------------------------|---|
| 1. Säulenlänge: | | |
| a) nach Zuordnungsliste mm..... | 150 ± 1 | 149,8 |
| b) nach Röntgenfilm mm..... | ≤ 151 | i. O. |
| 2. Stablänge mm..... | 210 ± 0,5 | i. O. |
| 3. Stabdurchbiegung mm..... | < 0,2 | i. O. |
| 4. Stab-Außen- ϕ mm..... | 10,00 ± 0,03 | |
| a) Messung 0° | | i. O. |
| b) Messung 90° | | i. O. |
| 5. Schweißnahtüberhöhung mm..... | ≤ 0,2 | |
| a) Naht ...0° | | i. O. |
| b) Naht ...90° | | i. O. |
| 6. Röntgen der 2. Schweißnaht* (2x90° versetzt) | Feder und Scheibe er- kennbar | Wolframeinsatz/ Stab wurde nachgeschweißt |
| 7. Lecktest: Torr. L/sec | < 10 ⁻⁸ | |
| a) He-Lecktest | | i. O. |
| b) Ar-Lecktest ** | | |
| 8. Oberflächenkontamination: | | |
| a) fest dec./min. Stab | < 1250 | 80 |
| b) wischbar Nulleffekt./Stab | < 2 x | i. O. |
| 9. Gesamtstabgewicht | - | 167,53 |
| 10. Oberfläche visuell | Standards | i. O. |
| 11. Überprüfung des Thermoelmentwiderstandes | AEG-Werte | i. O. |

Die mit * bezeichneten Prüfungen wurden von RBG ausgeführt.

Name Datum

Name ... *Picoll*

Datum ... *30. 9. 75*

Die mit ** bezeichneten Prüfungen wurden von AEG ausgeführt.

Name Datum

Bemerkungen zu 2)
Maß 210 war wegen Verschweißung der vorderen Bezugslinie nicht exakt zu messen. Wegen Verschweißung der Schlagzahlen am 2. Endstopfen letzte Zahl der Stabnummer auf Stirnseite Gewinde gesetzt.





Brennstabbegleitkarte FR 2-VG4 KT-95

Stab-Nr.:

L 4 - 2

Nr. der Brennstoffsäule E1 - F1

| | Soll | Ist |
|--|-------------------------------------|--------|
| 1. Säulenlänge: | | |
| a) nach Zuordnungsliste mm.... | 150 ± 1 | 150,2 |
| b) nach Röntgenfilm mm.... | ≤ 151 | i.o. |
| 2. Stablänge mm.... | 210 ± 0,5 | i.o. |
| 3. Stabdurchbiegung mm.... | < 0,2 | i.o. |
| 4. Stab-Außen-∅ mm.... | 10,00 ± 0,03 | |
| a) Messung 0° | | i.o. |
| b) Messung 90° | | i.o. |
| 5. Schweißnahtüberhöhung mm.... | ≤ 0,2 | |
| a) Naht ...0° | | i.o. |
| b) Naht ...90° | | i.o. |
| 6. Röntgen der 2. Schweißnaht* (2x90° versetzt) | Feder und Scheibe er- kennbar | i.o. |
| 7. Lecktest: Torr. L/sec | < 10 ⁻⁸ | |
| a) He-Lecktest | | i.o. |
| b) Ar-Lecktest ** | | |
| 8. Oberflächenkontamination: | | |
| a) fest dec./min. Stab | < 1250 | 40 |
| b) wischbar Nulleffekt./Stab | < 2 x | i.o. |
| 9. Gesamtstabgewicht | - | 163,26 |
| 10. Oberfläche visuell | Standards | i.o. |
| 11. Überprüfung des Thermoelementwiderst. | AEG-Werte | i.o. |

Die mit * bezeichneten Prüfungen wurden von RBG ausgeführt.

Name *K. H.* Datum *1. 10. 70*

Name *Ricoll*

Datum *30. 9. 70*

Die mit ** bezeichneten Prüfungen wurden von AEG ausgeführt.

Name Datum

Bemerkungen zu 2)
Maß 210 war wegen Verschweißung der vorderen Bezugslinie nicht exakt zu messen. Wegen Verschweißung der Schlagzahlen am 2. Endstopfen letzte Zahl der Stabnummer auf Stirnseite Gewinde gesetzt.





Brennstabbelegkarte FR 2-VG4 KT-95

Stab-Nr.:

4-3

Nr. der Brennstoffsäule

C1-D1

| | Soll | Ist |
|--|-------------------------------------|------------------|
| 1. Säulenlänge: | | |
| a) nach Zuordnungsliste mm.... | 150 ± 1 | 150,5 |
| b) nach Röntgenfilm mm.... | ≤ 151 | i.o. |
| 2. Stablänge mm.... | 210 ± 0,5 | i.o. |
| 3. Stabdurchbiegung mm.... | < 0,2 | i.o. |
| 4. Stab-Außen-φ mm.... | 10,00 ± 0,03 | |
| a) Messung 0° | | i.o. |
| b) Messung 90° | | i.o. |
| 5. Schweißnahtüberhöhung mm.... | ≤ 0,2 | |
| a) Naht ... 0° | | i.o. |
| b) Naht ... 90° | | i.o. |
| 6. Röntgen der 2. Schweißnaht* (2x90° versetzt) | Feder und Scheibe er- kennbar | 1 Lunker 200μ |
| 7. Lecktest: Torr. L/sec | < 10 ⁻⁸ | |
| a) He-Lecktest | | |
| b) Ar-Lecktest** | | i.o. fl. |
| 8. Oberflächenkontamination: | | |
| a) fest dec./min. Stab | < 1250 | 80 |
| b) wischbar Nulleffekt./Stab | < 2 x | i.o. |
| 9. Gesamtstabgewicht | - | 167,43 |
| 10. Oberfläche visuell | Standards | i.o. |
| 11. Überprüfung des Thermoelmentwiderstande | AEG-Werte | i.o. |

Die mit * bezeichneten Prüfungen wurden von RBG ausgeführt.

Name Datum 7. 10. 70

Die mit ** bezeichneten Prüfungen wurden von AEG ausgeführt.

Name Datum 2. 10. 70

Bemerkungen/zu 2)

Maß 210 war wegen Verschweißung der vorderen Bezugslinie nicht exakt zu messen. Wegen Verschweißung der Schlagzahlen am 2. Endstopfen letzte Zahl der Stabnummer auf Stirnseite Gewinde gesetzt.

Name Di. coll

Datum 30. 9. 70





Brennstabbegleitkarte FR 2-VG4 KT-95

Stab-Nr.: **L 4 - 5** Nr. der Brennstoffsäule **A2 - B2**

| | Soll | Ist |
|--|-------------------------------------|---------------|
| 1. Säulenlänge: | | |
| a) nach Zuordnungsliste mm..... | 150 ± 1 | <u>150,2</u> |
| b) nach Röntgenfilm mm..... | ≤ 151 | <u>i.0.</u> |
| 2. Stablänge mm..... | 210 ± 0,5 | <u>i.0.</u> |
| 3. Stabdurchbiegung mm..... | < 0,2 | <u>i.0.</u> |
| 4. Stab-Außen-∅ mm..... | 10,00 ± 0,03 | |
| a) Messung 0° | | <u>i.0.</u> |
| b) Messung 90° | | <u>i.0.</u> |
| 5. Schweißnahtüberhöhung mm..... | ≤ 0,2 | |
| a) Naht ... 0° | | <u>i.0.</u> |
| b) Naht ... 90° | | <u>i.0.</u> |
| 6. Röntgen der 2. Schweißnaht* (2x90° versetzt) | Feder und Scheibe er- kennbar | <u>i.0.</u> |
| 7. Lecktest: Torr. L/sec | < 10 ⁻⁸ | |
| a) He-Lecktest | | <u>i.0.</u> |
| b) Ar-Lecktest ** | | |
| 8. Oberflächenkontamination: | | |
| a) fest dec./min. Stab | < 1250 | <u>100</u> |
| b) wischbar Nulleffekt./Stab | < 2 x | <u>i.0.</u> |
| 9. Gesamtstabgewicht | - | <u>163,03</u> |
| 10. Oberfläche visuell | Standards | <u>i.0.</u> |
| 11. Überprüfung des Thermoelementwiderstandes | AEG-Werte | <u>i.0.</u> |

Die mit * bezeichneten Prüfungen wurden von RBG ausgeführt.

Name Keb Datum 7.10.72

Name Picall

Datum 30.9.72

Die mit ** bezeichneten Prüfungen wurden von AEG ausgeführt.

Name Keb Datum

Bemerkungen zu 2)
Maß 210 war wegen Verschweißung der vorderen Bezugslinie nicht exakt zu messen. Wegen Verschweißung der Schlagzahlen am 2. Endstopfen letzte Zahl der Stabnummer auf Stirnseite Gewinde gesetzt.





Brennstabbegleitkarte FR 2-VG4 KT-95

Stab-Nr.: **L 4 - 6**

Nr. der Brennstoffsäule **C 2 - D 2**

| | Soll | Ist |
|--|-------------------------------------|--------------------------------|
| 1. <u>Säulenlänge:</u> | | |
| a) nach Zuordnungsliste mm..... | 150 + 1 | <u>150,0</u> |
| b) nach Röntgenfilm mm..... | ≤ 151 | <u>i.0.</u> |
| 2. Stablänge mm..... | 210 ± 0,5 | <u>i.0.</u> |
| 3. Stabdurchbiegung mm..... | < 0,2 | <u>i.0.</u> |
| 4. <u>Stab-Außen-∅</u> mm..... | 10,00 ± 0,03 | |
| a) Messung 0° | | <u>i.0.</u> |
| b) Messung 90° | | <u>i.0.</u> |
| 5. <u>Schweißnahtüberhöhung</u> mm..... | ≤ 0,2 | |
| a) Naht ... 0° | | <u>i.0.</u> |
| b) Naht ... 90° | | <u>i.0.</u> |
| 6. Röntgen der 2. Schweißnaht* (2x90° versetzt) | Feder und Scheibe er- kennbar | <u>i.0.</u> 1 Lunken < 100µ |
| 7. <u>Lecktest:</u> Torr. L/sec | < 10 ⁻⁸ | |
| a) He -Lecktest | | <u>i.0.</u> |
| b) Ar-Lecktest** | | <u>i.0. 70</u> |
| 8. <u>Oberflächenkontamination:</u> | | |
| a) fest dec./min. Stab | < 1250 | <u>60</u> |
| b) wischbar Nulleffekt./Stab | < 2 x | <u>i.0.</u> |
| 9. Gesamtstabgewicht | - | <u>162,34</u> |
| 10. Oberfläche visuell | Standards | <u>i.0.</u> |
| 11. Überprüfung des Thermoelement iderstandes | AEG-Werte | <u>i.0.</u> |

Die mit * bezeichneten Prüfungen wurden von RBG ausgeführt.

Name K. K. Datum 1.10.70

Name Picoll

Datum 30.9.70

Die mit ** bezeichneten Prüfungen wurden von AEG ausgeführt.

Name Steyn. alfa Datum 2.10.70

Bemerkungen zu 2)

Maß 210 war wegen Verschweißung der vorderen Bezugslinie nicht exakt zu messen. Wegen Verschweißung der Schlagzahlen am 2. Endstopfen letzte Zahl der Stabnummer auf Stirnseite Gewinde gesetzt.





Brennstabbegleitkarte FR 2-VG4 KT-95

Stab-Nr.: 4-7

Nr. der Brennstoffsäule E2-F2

| | Soll | Ist |
|--|-------------------------------------|---------------|
| 1. Säulenlänge: | | |
| a) nach Zuordnungsliste mm..... | 150 ± 1 | <u>149,2</u> |
| b) nach Röntgenfilm mm..... | ≤ 151 | <u>i.O.</u> |
| 2. Stablänge mm..... | 210 ± 0,5 | <u>i.O.</u> |
| 3. Stabdurchbiegung mm..... | < 0,2 | <u>i.O.</u> |
| 4. Stab-Außen-∅ mm..... | 10,00 ± 0,03 | |
| a) Messung 0° | | <u>i.O.</u> |
| b) Messung 90° | | <u>i.O.</u> |
| 5. Schweißnahtüberhöhung mm..... | ≤ 0,2 | |
| a) Naht ...0° | | <u>i.O.</u> |
| b) Naht ...90° | | <u>i.O.</u> |
| 6. Röntgen der 2. Schweißnaht* (2x90° versetzt) | Feder und Scheibe er- kennbar | <u>i.O.</u> |
| 7. Lecktest: Torr. L/sec | < 10 ⁻⁸ | |
| a) He-Lecktest | | <u>i.O.</u> |
| b) He -Lecktest** | | |
| 8. Oberflächenkontamination: | | |
| a) fest dec./min. Stab | < 1250 | <u>50</u> |
| b) wischbar Nulleffekt./Stab | < 2 x | <u>i.O.</u> |
| 9. Gesamtstabgewicht | - | <u>162,64</u> |
| 10. Oberfläche visuell | Standards | <u>i.O.</u> |
| 11. Überprüfung d. Thermoelmentwiderstandes | AEG-Werte | <u>i.O.</u> |

Die mit * bezeichneten Prüfungen wurden von RBG ausgeführt.

Name K. L. Datum 1. 1. 70

Name R. coll

Datum 30. 9. 70

Die mit ** bezeichneten Prüfungen wurden von AEG ausgeführt.

Name Datum

Bemerkungen zu 2)
Maß 210 war wegen Verschweißung der vorderen Bezugslinie nicht exakt zu messen. Wegen Verschweißung der Schlagzahlen am 2. Endstopfen letzte Zahl der Stabnummer auf Stirnseite Gewinde gesetzt.



| Element No. | L4-4 | | L4-8 | |
|-------------------|----------|-------------|----------|--------------|
| Brennstoff Daten | | | | |
| Länge (mm) | 149 | | 150,6 | |
| Gewicht (g) | 91,12 | | 92,25 | |
| Durchmesser (mm) | 8,30 | | 8,30 | |
| Pellet Form | mit Loch | ohne Loch | mit Loch | ohne Loch |
| Länge (mm) | 88 | 61 | 89,8 | 60,8 |
| Dichte (%T.D.) | 87,6 | 87 | 87,6 | 87 |
| Pu/U+Pu | n.a. | 0,1515 | n.a. | 0,1515 |
| C (Gew. %) | 4,63 | 4,66 | 4,64 | 4,66 |
| O " | 0,26 | 0,29 | 0,27 | 0,30 |
| N " | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| Röntgen-analyse + | MC | 2% M_2C_3 | MC | <2% M_2C_3 |
| Chargen Nr | C28.3.2 | C26.3.3 | C26.3.2 | C26.3.3 |

+Hauptphase : MC; Gitterparameter 4.9640 Å

Tabelle 4 : Brennstoff Daten für Brennstab
Nr L4-4 und L4-8

Fuel element control sheet Nr. 2 Vg. 4A pin Nr. 1, 4-4 *

N.B. Im T.U.I. : 2 Reserve pellets Batcl i. C 26. 3.3 u. C 28. 3.2 Totalt isenöl = 11,024 g

Radios Nr. 1698 u. 1699

| cladding: 4988 | | fuel length: 150 ± 1 mm | | | |
|--|-----------|---------------------------------|------------------|---------|----------------------------------|
| blanket I: - | | pellet φ: 8,30 ± 0,01 mm | | | |
| blanket II: - | | pellet density: 87,3 ± 0,3 % | | | |
| fuel: (U, Pu) C | | smear density: % | | | |
| | | result | date | name | remark |
| helitest 1 welding | | gut | torr. l. / sec-1 | | |
| length inside tube | | 175 | mm | | |
| cladding φ (i.D) | | 8,9 | mm | | |
| fuel batch Nr. | | C 28. 3.2.-m. Loch C 26. 3.3 | | | (G ₁ H ₁) |
| pellet φ (d) | | 8,30 | mm | | ± 0,01 mm |
| pellet length | | 149 | mm | | o.L. = 61 mm m.L. = 88 mm |
| fuel length (l) | | - | mm | | Loch β = 2,2 mm |
| fuel weight | | 91,12 | g | | o.L. = 39,05 g m.L. = 52,07 g |
| blanket I weight | | - | g | | |
| blanket II weight | | - | g | | |
| blanket I length | | - | mm | | |
| fuel + blanket I length | | - | mm | | |
| fuel + blanket I + II length | | - | mm | | |
| contamin. before welding | | < 60 | Cmn-1 | | |
| helitest | | 1,5 x 10 ⁻¹ | torr. l. sec-1 | 19.9.72 | Pithan |
| final contam | removable | 0 | Cmn-1 | 20.9.72 | Castel- |
| | fixed | < 150 | Cmn-1 | " | letti |
| Pu XXXX C | | 15,14 | % | 13,800 | g |
| U ^{nat} XXXX C | | | % | 77,320 | g |
|% U ²³⁵ O ₂ N C | | | % | | g |
| | | | % | | g |
| total | | | % | 91,120 | g |
| fuel volume - density | | | cm ³ | | g/cm ³ % th. d. |
| smear volume - density | | 9,27 | cm ³ | 9,83 | g/cm ³ % th. d. |

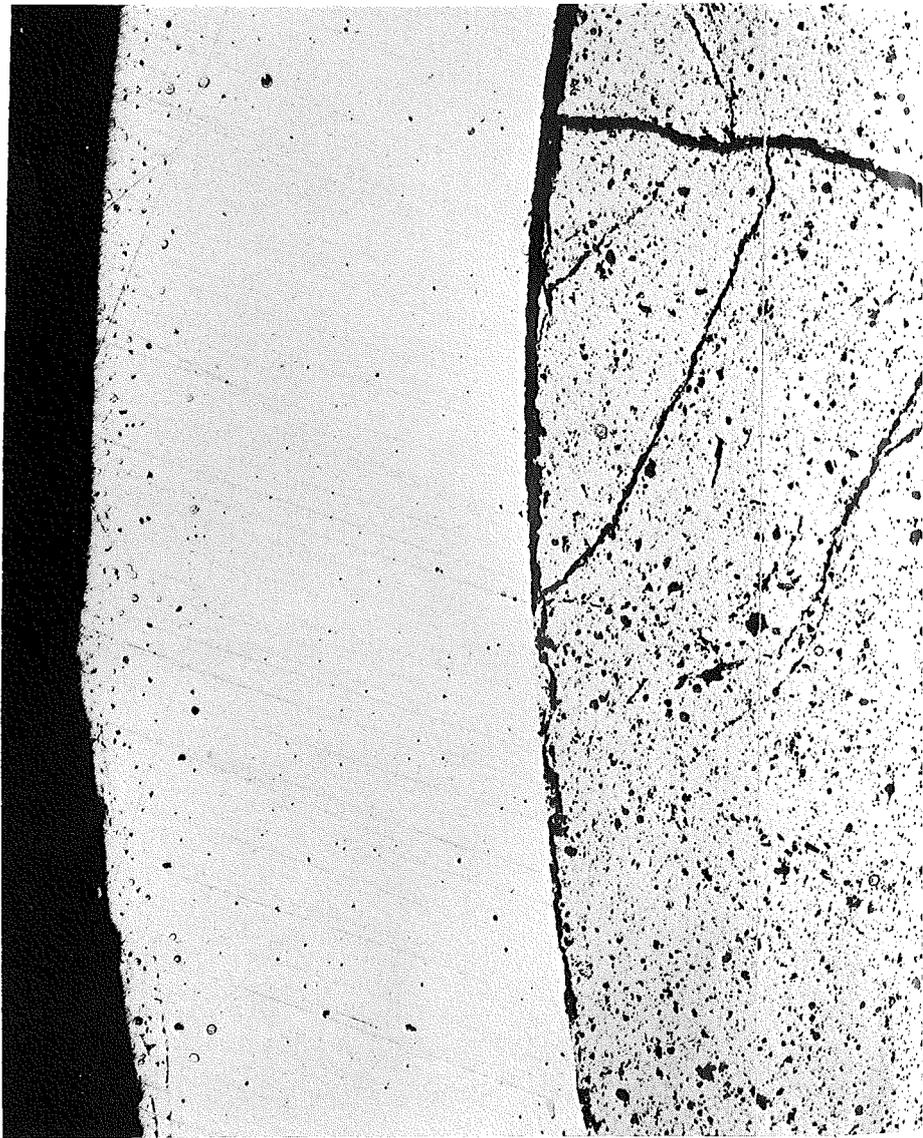
weight for Pu 14,42 % 13,140 g
comptability: U²³⁵ % g

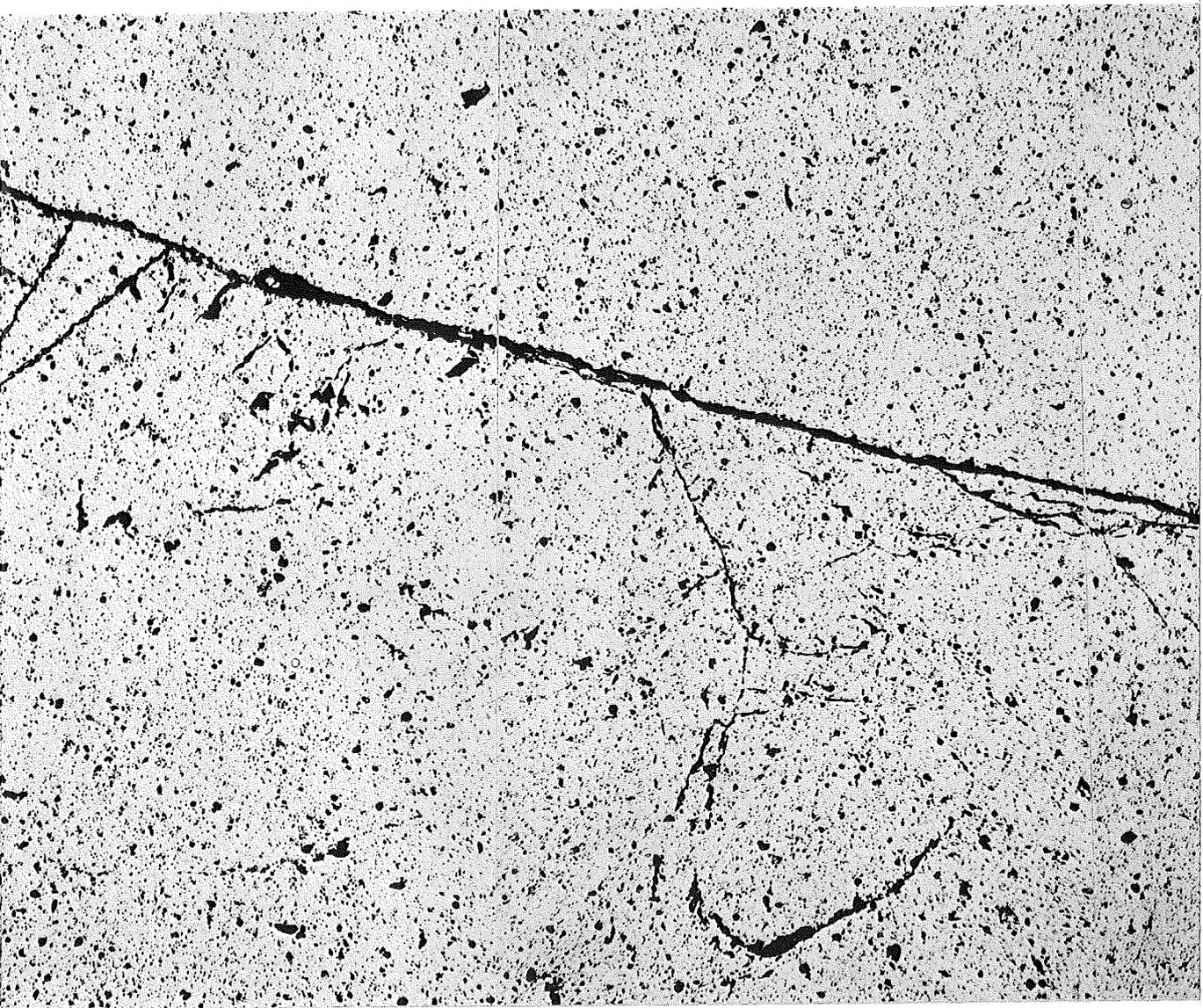
| | | | | |
|---------------------------------------|--|------------------------------|----------|----------------------------------|
| cladding: 4988 | | fuel length: 150 ± 1 mm | | |
| blanket I: - | | pellet φ: 8,30 ± 0,01 mm | | |
| blanket II: - | | pellet density: 87,3 ± 0,3 % | | |
| fuel: (U,Pu) C | | smear density: % | | |
| | result | date | name | remark |
| helitest 1 welding | gut torr. l. sec ⁻¹ | | | |
| length inside tube | 175 mm | | | |
| cladding φ (i. D) | 8,9 mm | | | |
| fuel batch Nr. | C 28. 3.2-m. Loch C 26. 3.3 | | | (G ₂ H ₂) |
| pellet φ (d) | 8,30 mm | | | ± 0,01 mm |
| pellet length | 150,6 mm | | | o.L. = 60,8 mm m.L. = 89,8 mm |
| fuel length (l) | - mm | | | Loch φ = 2,2 mm |
| fuel weight | 92,25 g | | | o.L. = 38,94 g m.L. = 53,31 g |
| blanket I weight | - g | | | |
| blanket II weight | - g | | | |
| blanket I length | - mm | | | |
| fuel + blanket I length | - mm | | | |
| fuel + blanket I + II length | - mm | | | |
| contamin. before welding | < 100 Cmn ⁻¹ | 24.2.72 | Kalbusch | |
| helitest | 1,4 x 10 ⁻¹⁰ torr. l. sec ⁻¹ | 25.2.72 | Pithan | |
| final contam | removable | 0 Cmn ⁻¹ | 25.2.72 | Puel |
| | fixed | < 60 Cmn ⁻¹ | " | " |
| Pu XXX C | 15,14 % | 13,971 g | | |
| U ^{nat} XXX C | % | 78,279 g | | |
| % U ²³⁵ O ₂ N C | % | g | | |
| | % | g | | |
| total | % | 92,250 g | | |
| fuel volume - density | cm ³ | g/cm ³ | | % th. d. |
| smear volume - density | 9,37 cm ³ | 9,85 g/cm ³ | | % th. d. |

Radios N. 1536-1537-1539 n. 1542

weight for Pu 14,42 % 13,303 g

comptability: U²³⁵ % g



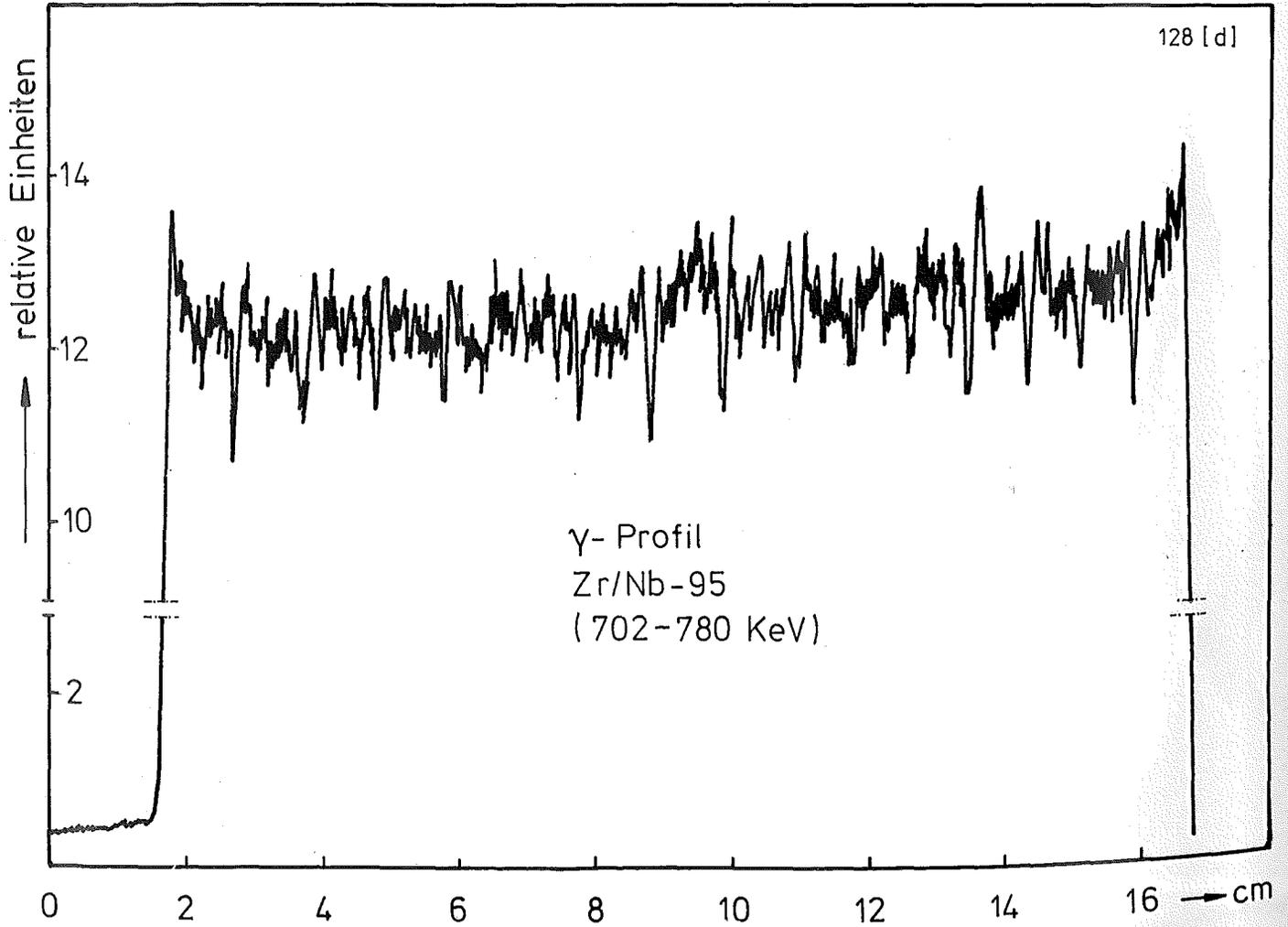
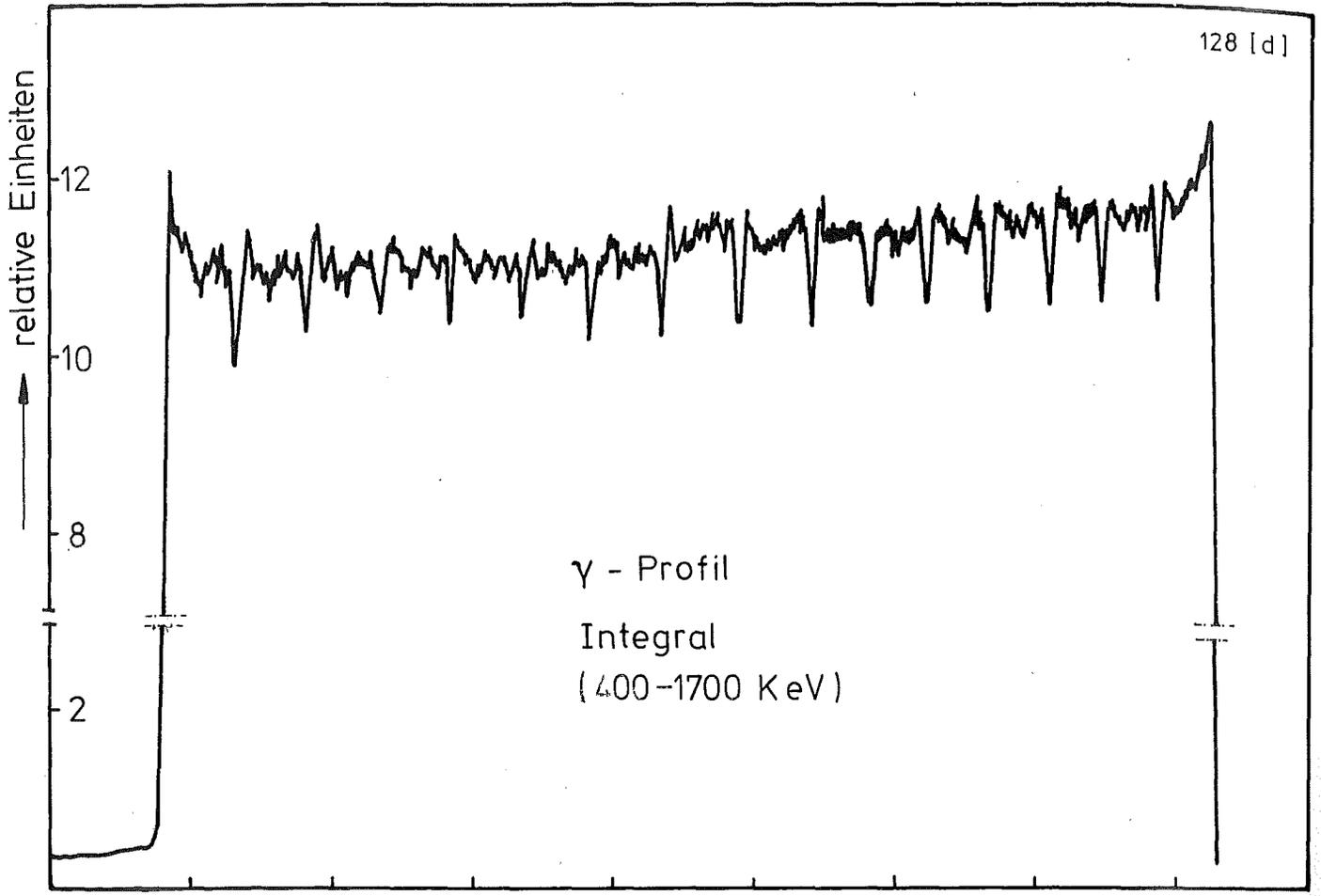


- I/5 -

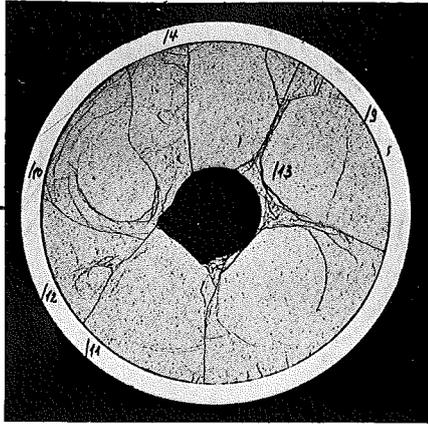
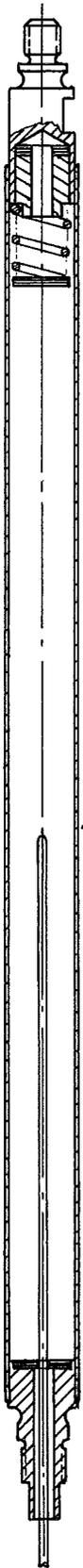
zu Prüfling L4-1

A1

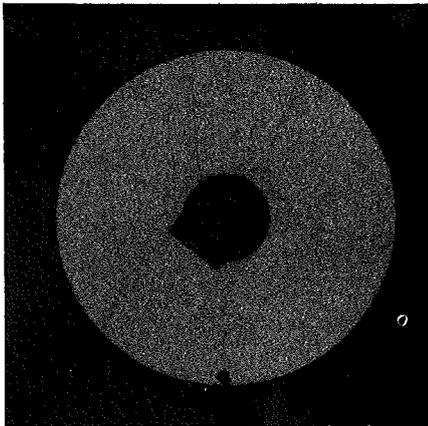




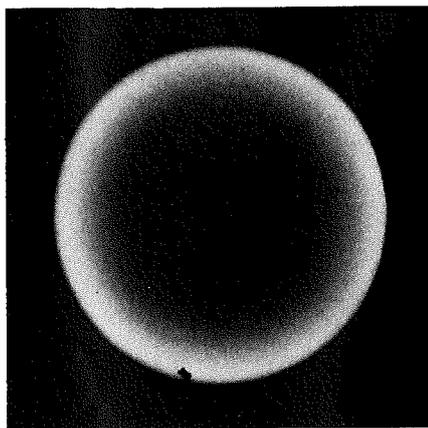
A



1



2



3

TE

1mm



TE

Prüfling L 4-1

Brennstoff :

Form : Tabletten

Zusammensetzung : UC/PuC

Tablettendichte : 86,7 % th.D.

Hülle :

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 10,0 mm

Wandstärke : 0,55 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 210 mm

Länge der Brennstoffsäule : 150 mm

Radiale Spaltweite : 25 μ m

Gasbindung : Helium

Bestrahlung :

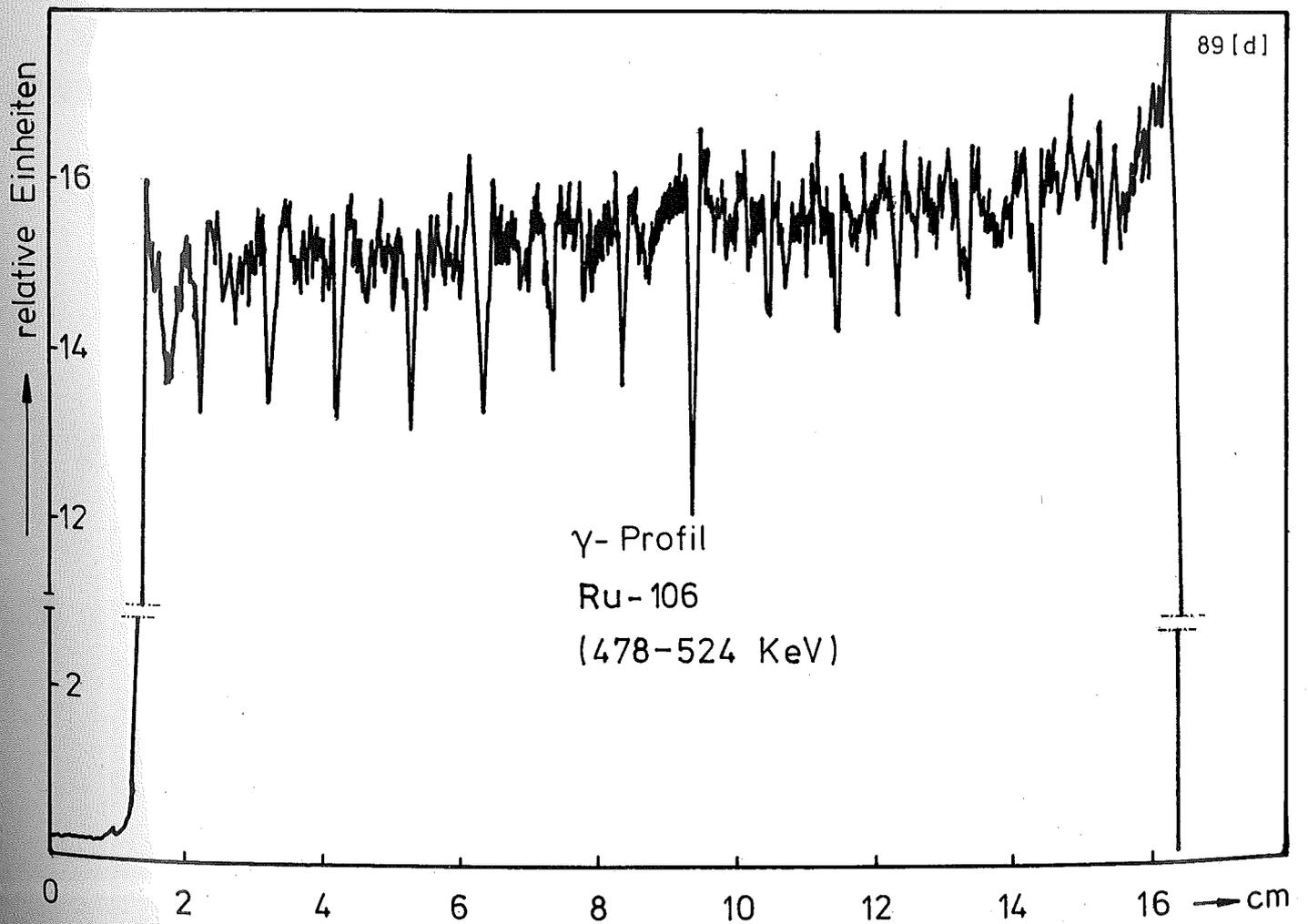
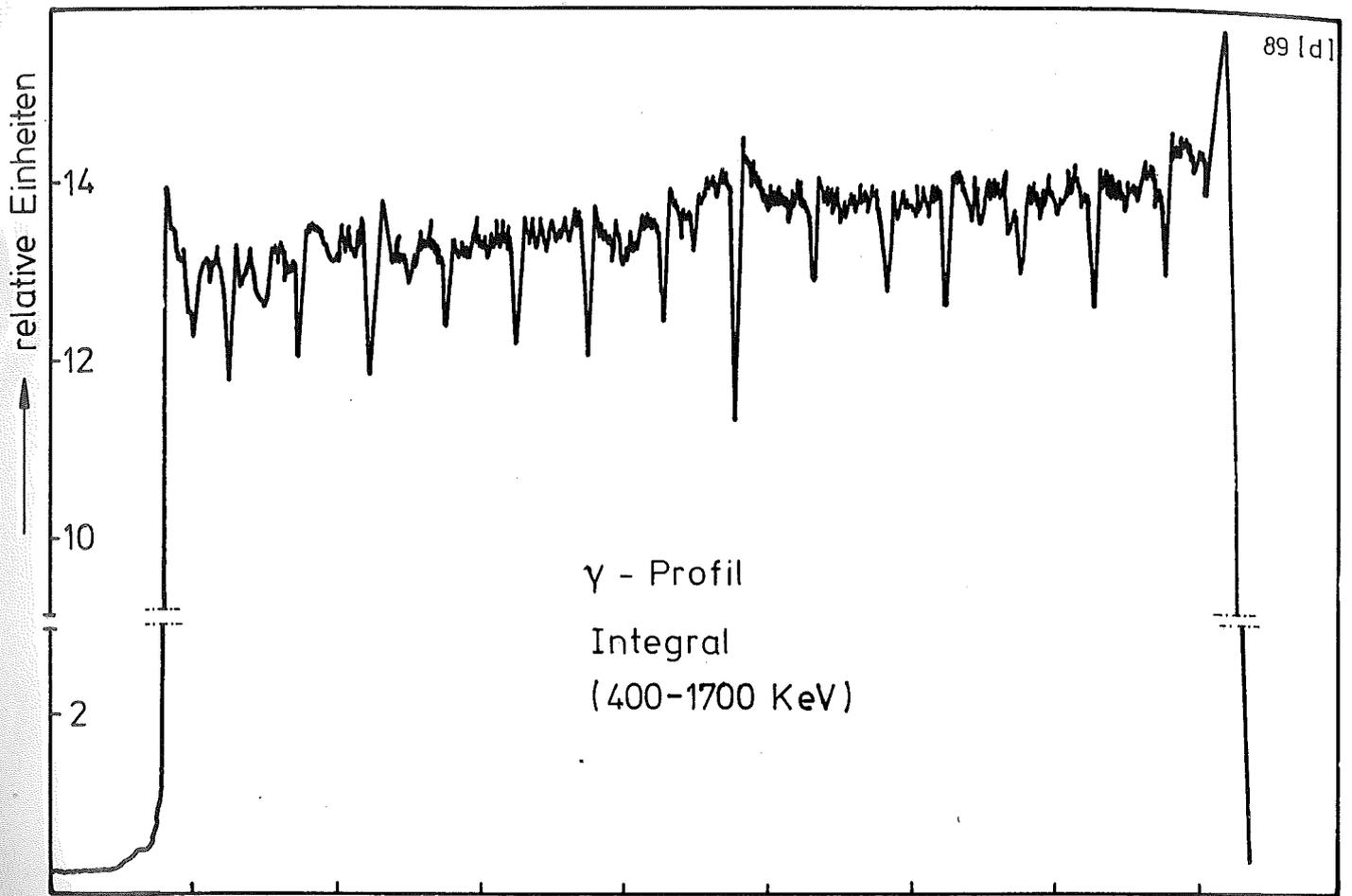
Einrichtung : FR-2 He-Loop

Dauer : 72,3 h

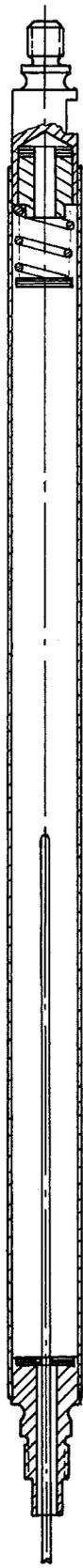
Ende : 29.11.1970

Rechn. Abbrand mittl. : entfällt

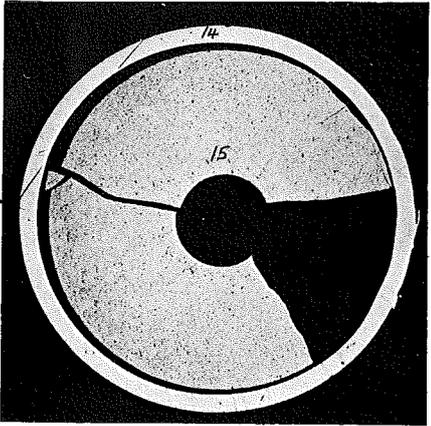
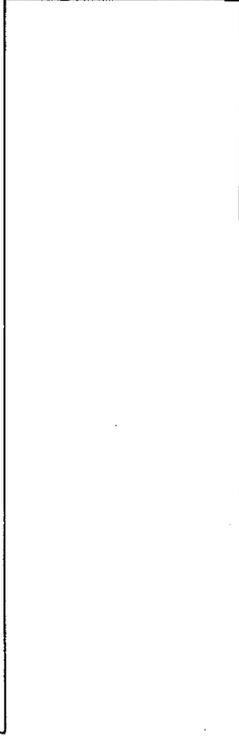
Stableistung max./mittl. : 947 W/cm



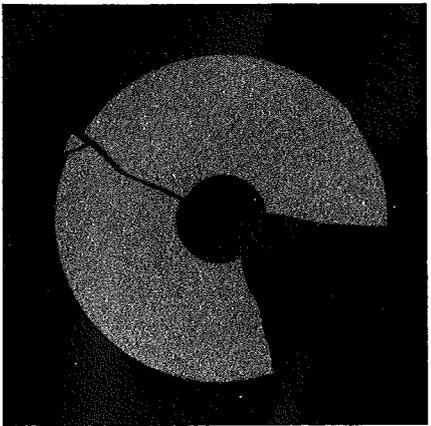
A



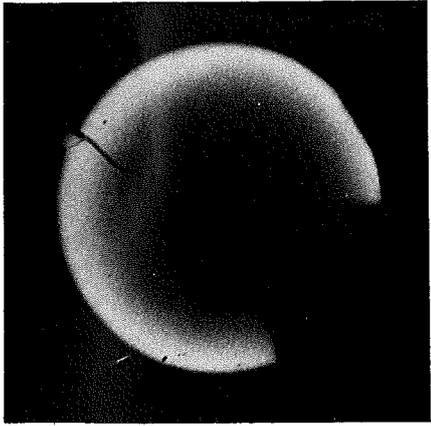
TE



1

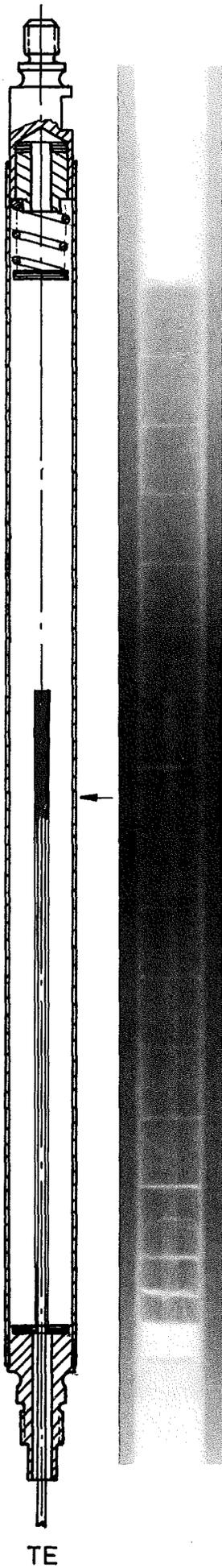


2



3

H
1mm



Prüfling L 4-2

Brennstoff :

Form : Tabletten

Zusammensetzung : UC/PuC

Tablettendichte : 87 % th.D.

Hülle :

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 10,0 mm

Wandstärke : 0,55 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 210 mm

Länge der Brennstoffsäule : 150 mm

Radiale Spaltweite : 125 μ m

Gasbindung : Helium

Bestrahlung :

Einrichtung : FR 2-He-Loop

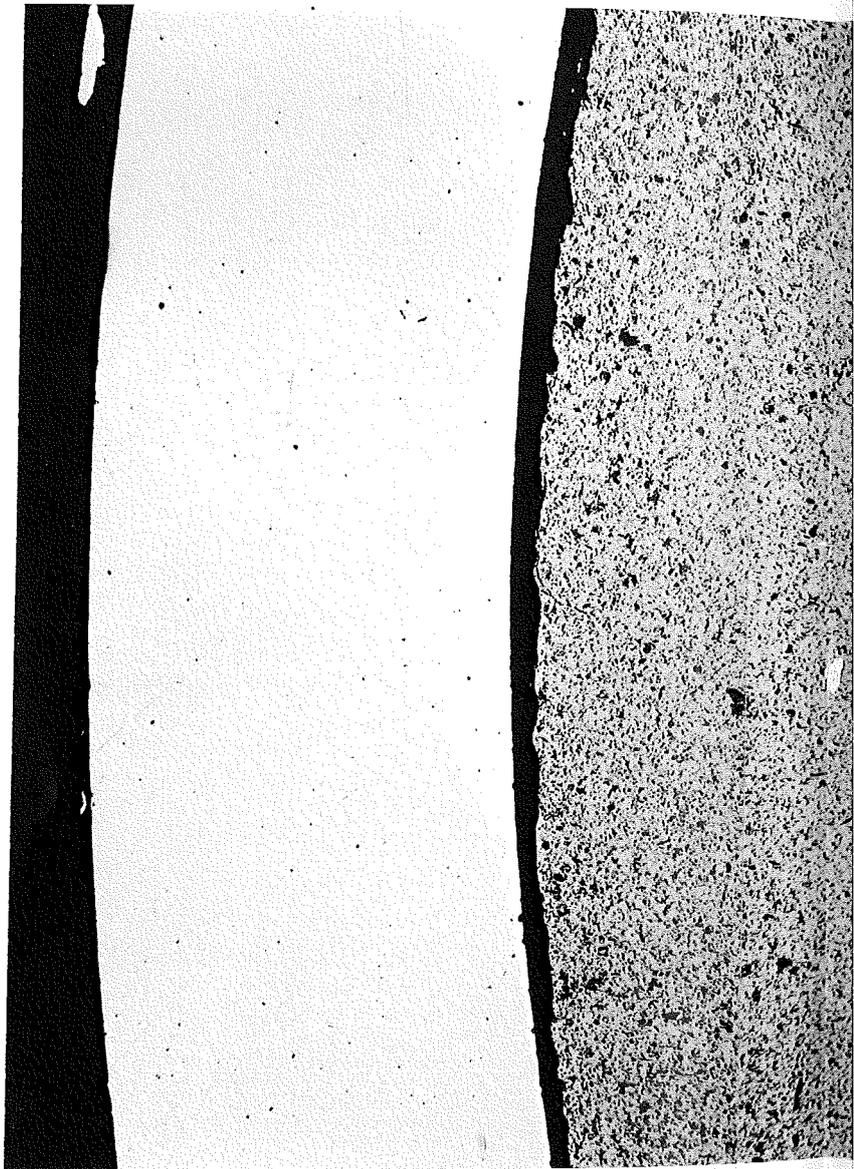
Dauer : 72,2 h

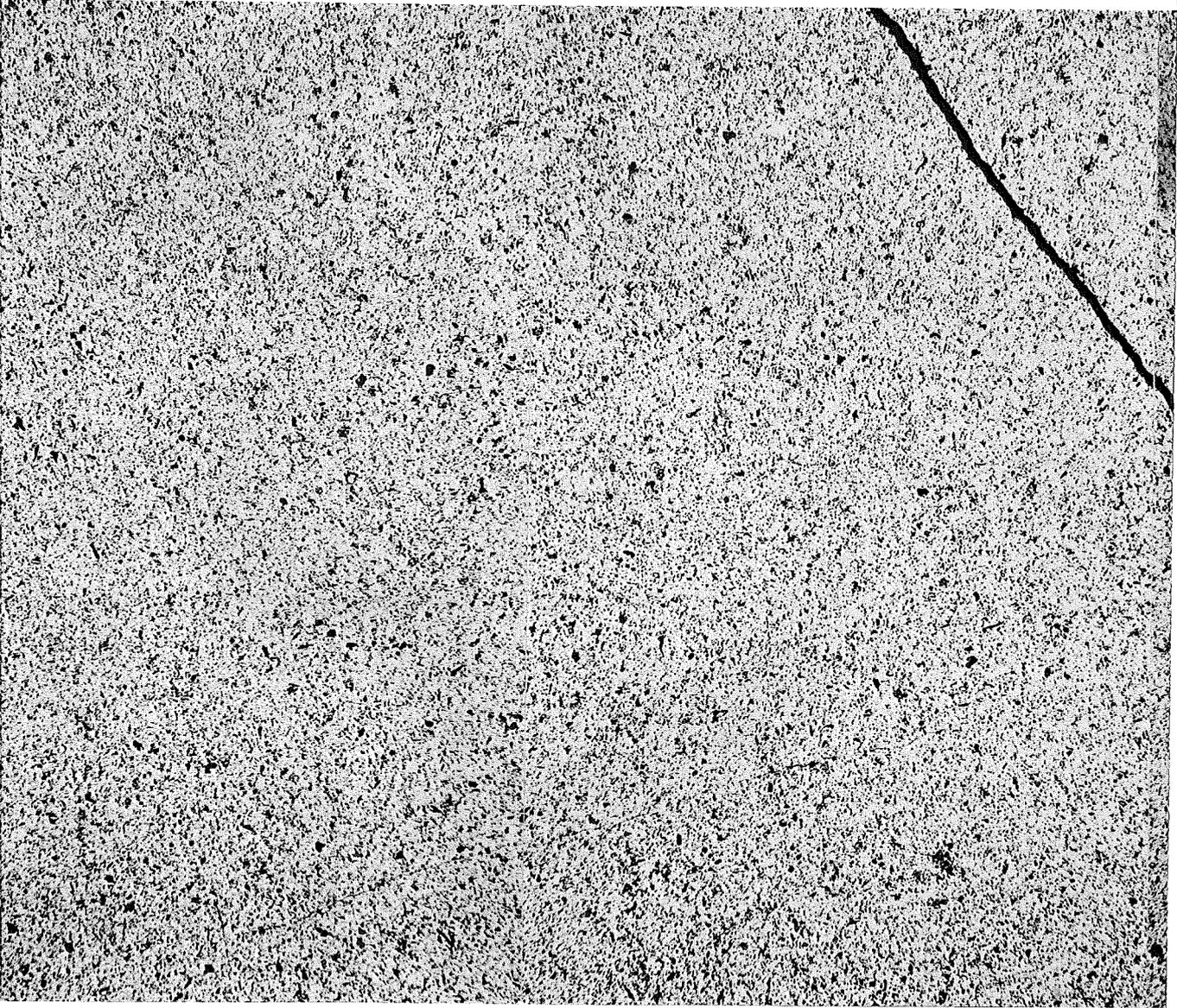
Ende : 4.12.1970

Rechn. Abbrand mittl. : entfällt

Stableistung max./mittl. : 928 W/cm

TE

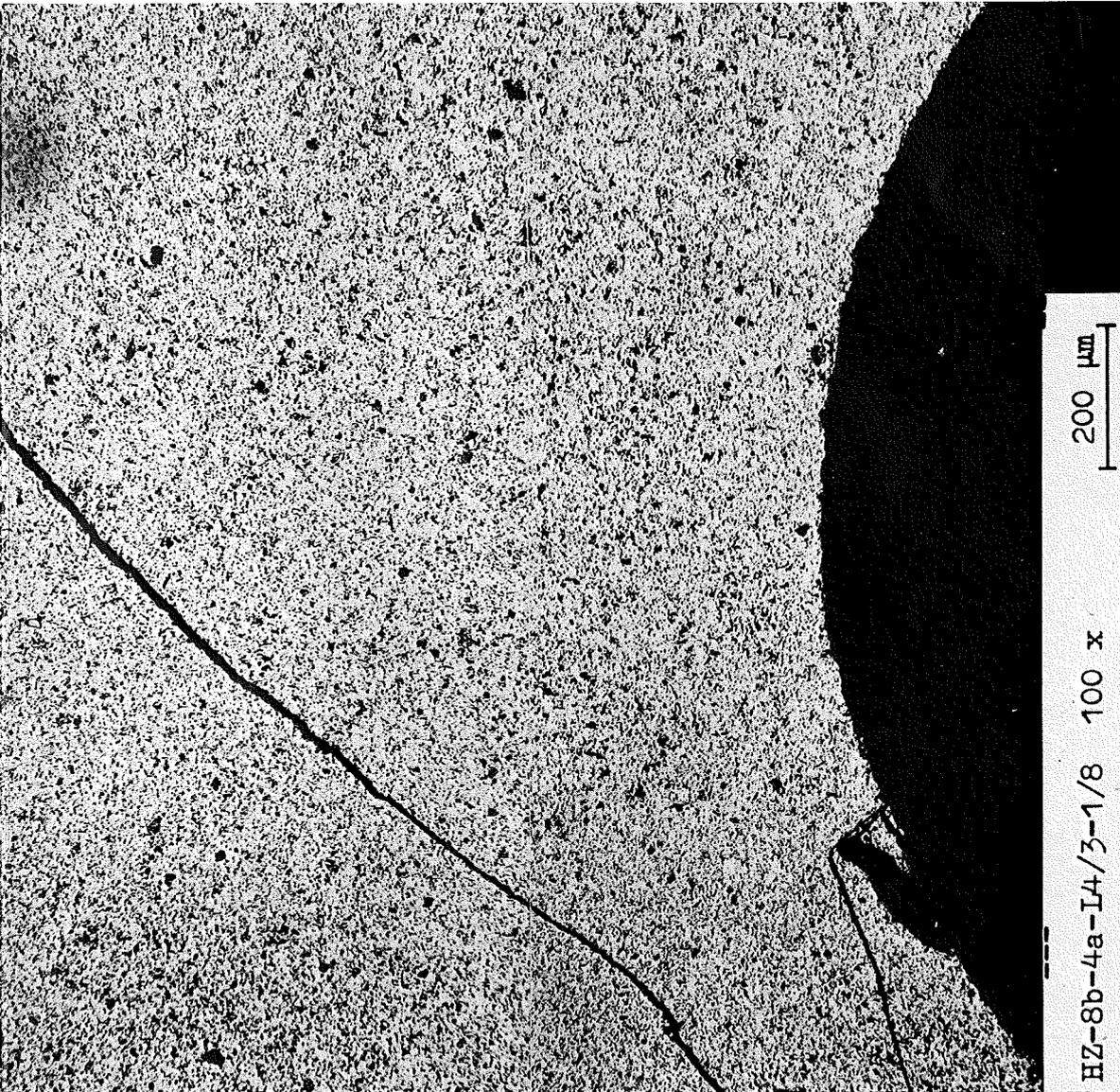


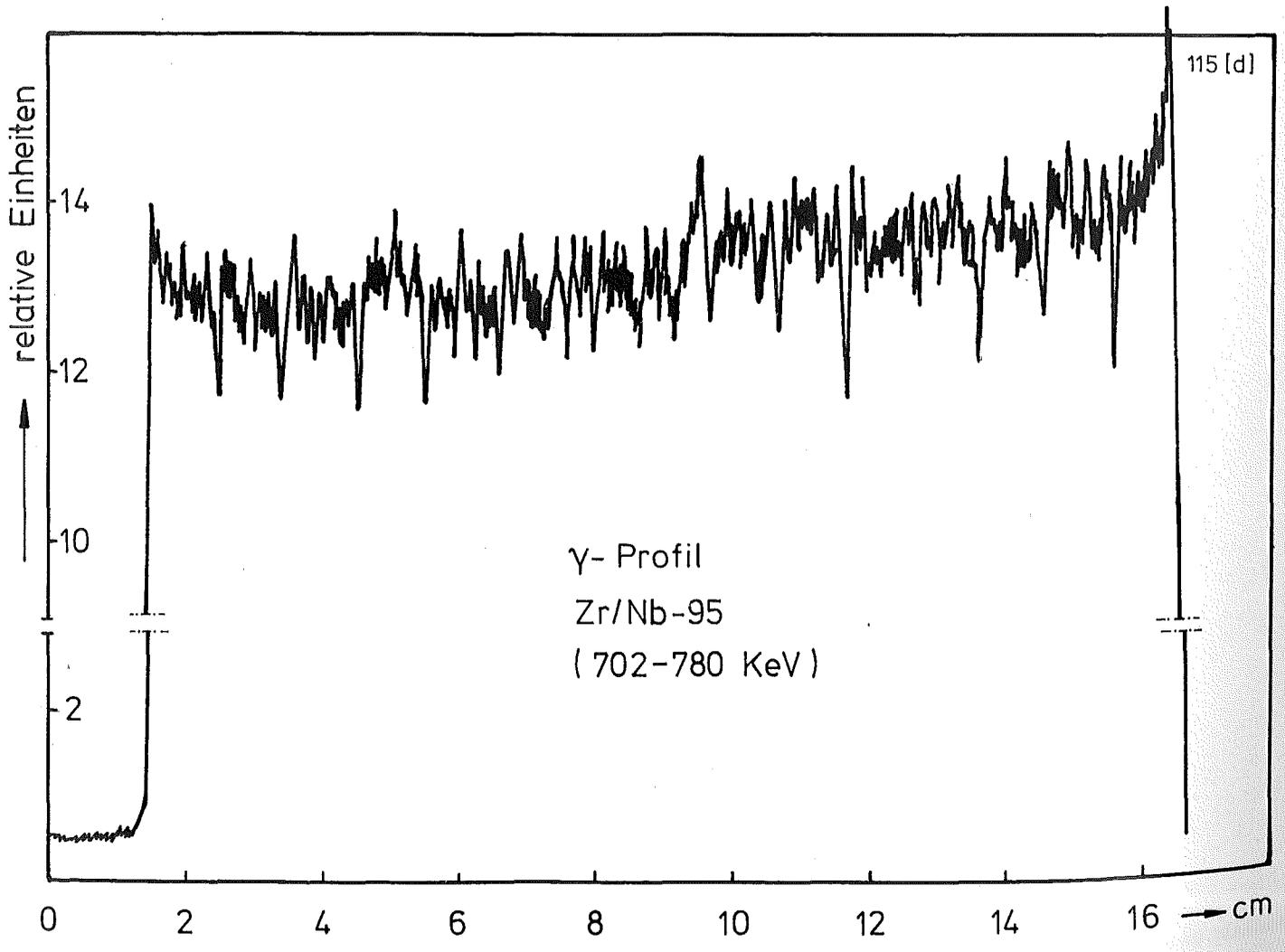
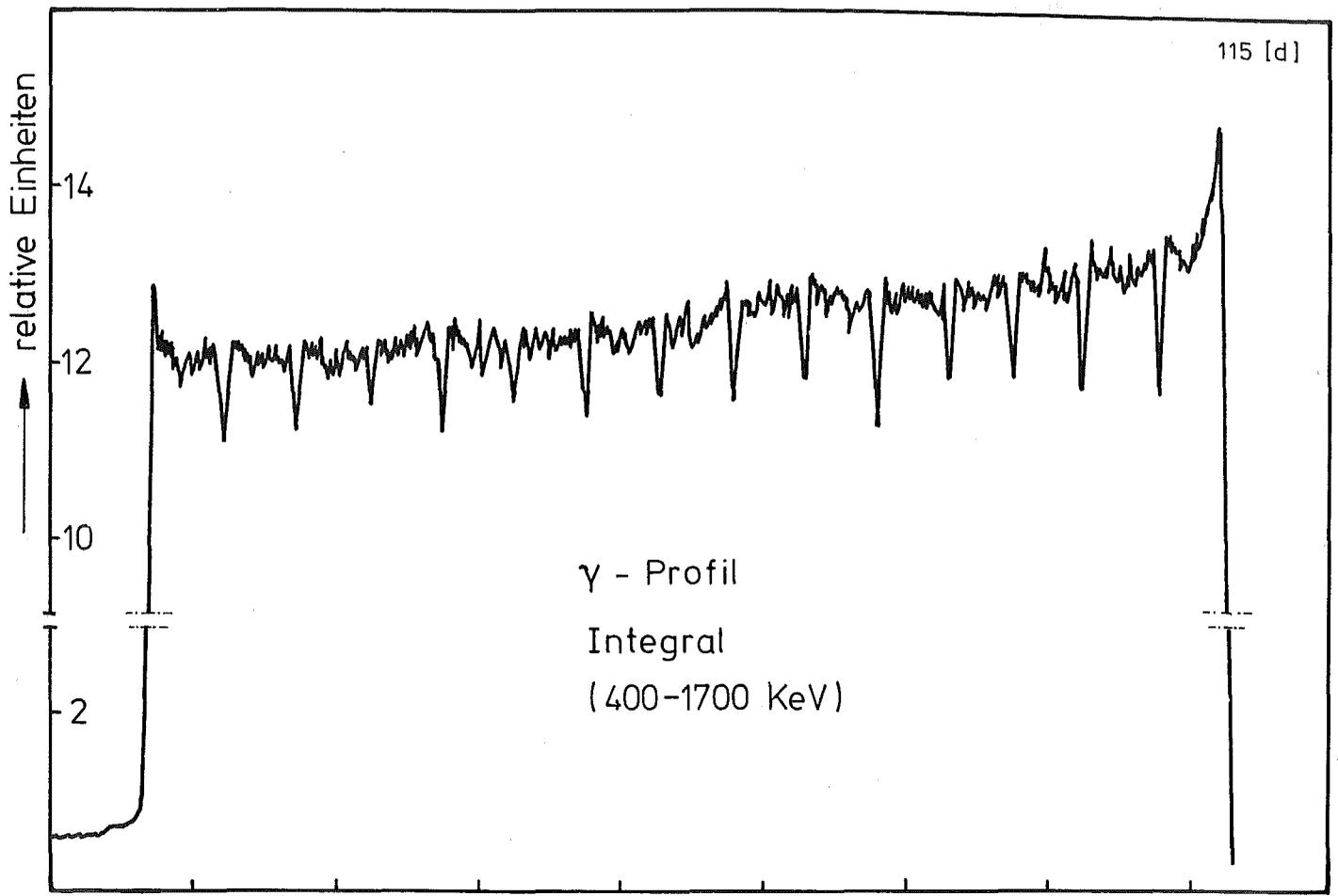


- I/15 -

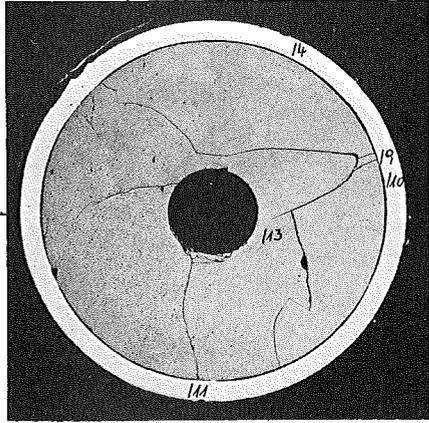
zu Prüfling L4-3

A 1

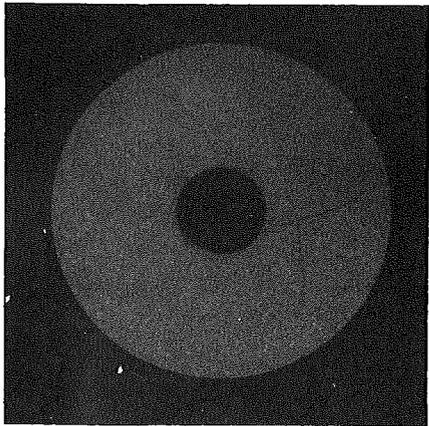




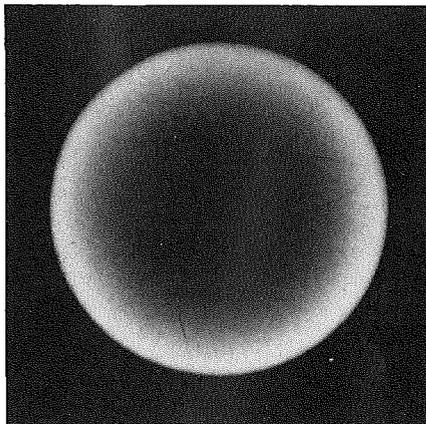
A



1

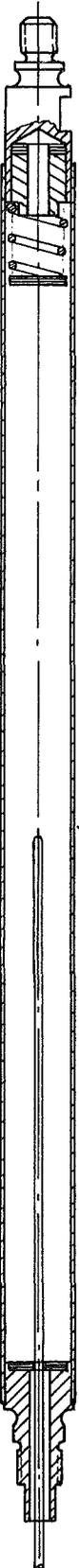


2

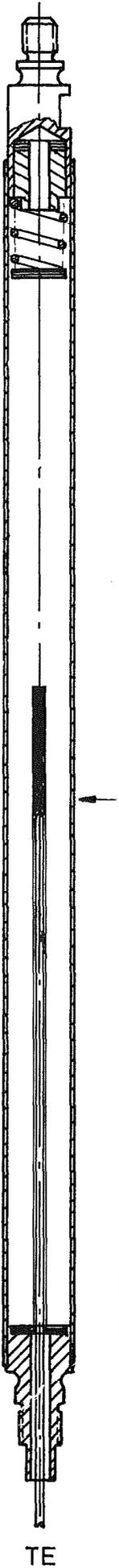


3

1mm



TE



Prüfling L 4-3

Brennstoff :

Form : Tabletten
Zusammensetzung : UC/PuC
Tablettendichte : 86,7 + 87,6 % th.D.

Hülle :

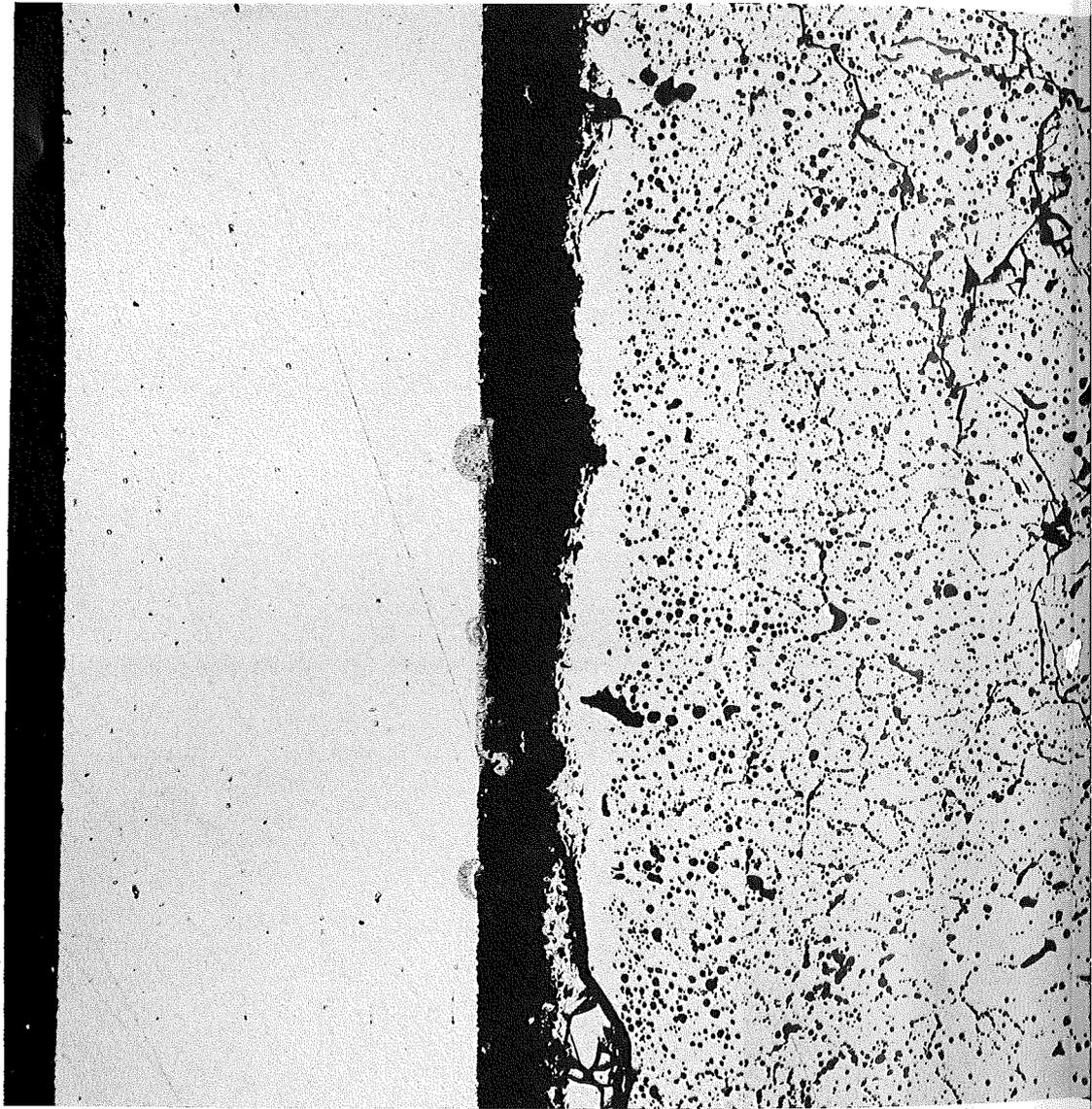
Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 10,0 mm
Wandstärke : 0,55 mm

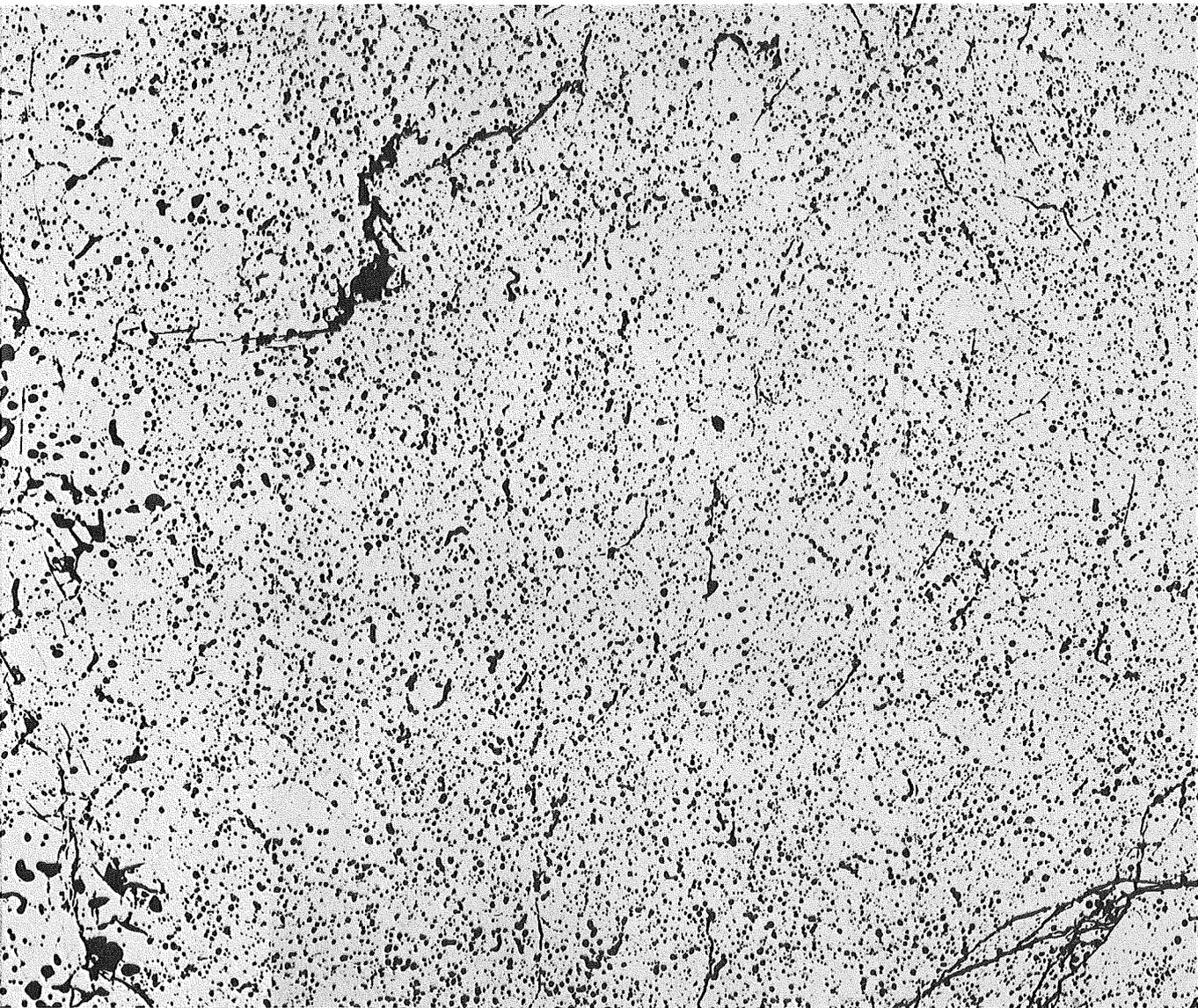
Geometrie :

Länge des Prüflings : 210 mm
Länge der Brennstoffsäule : 150 mm
Radiale Spaltweite : 40 µm
Gasbindung : Argon

Bestrahlung :

Einrichtung : FR 2-He-Loop
Dauer : 72,6 h
Ende : 11.12.1970
Rechn. Abbrand mittl. : entfällt
Stableistung max./mittl. : 1010 W/cm

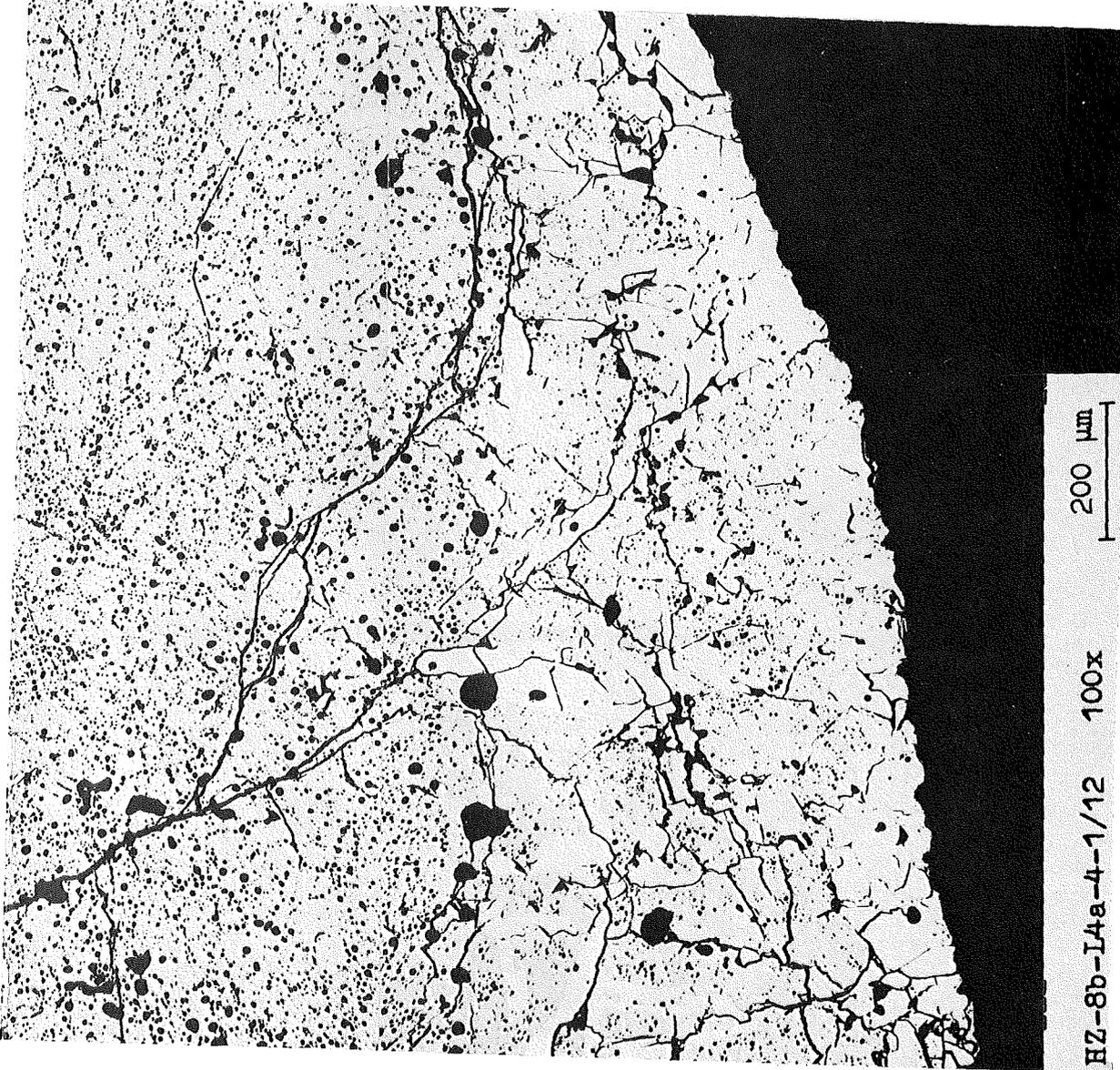


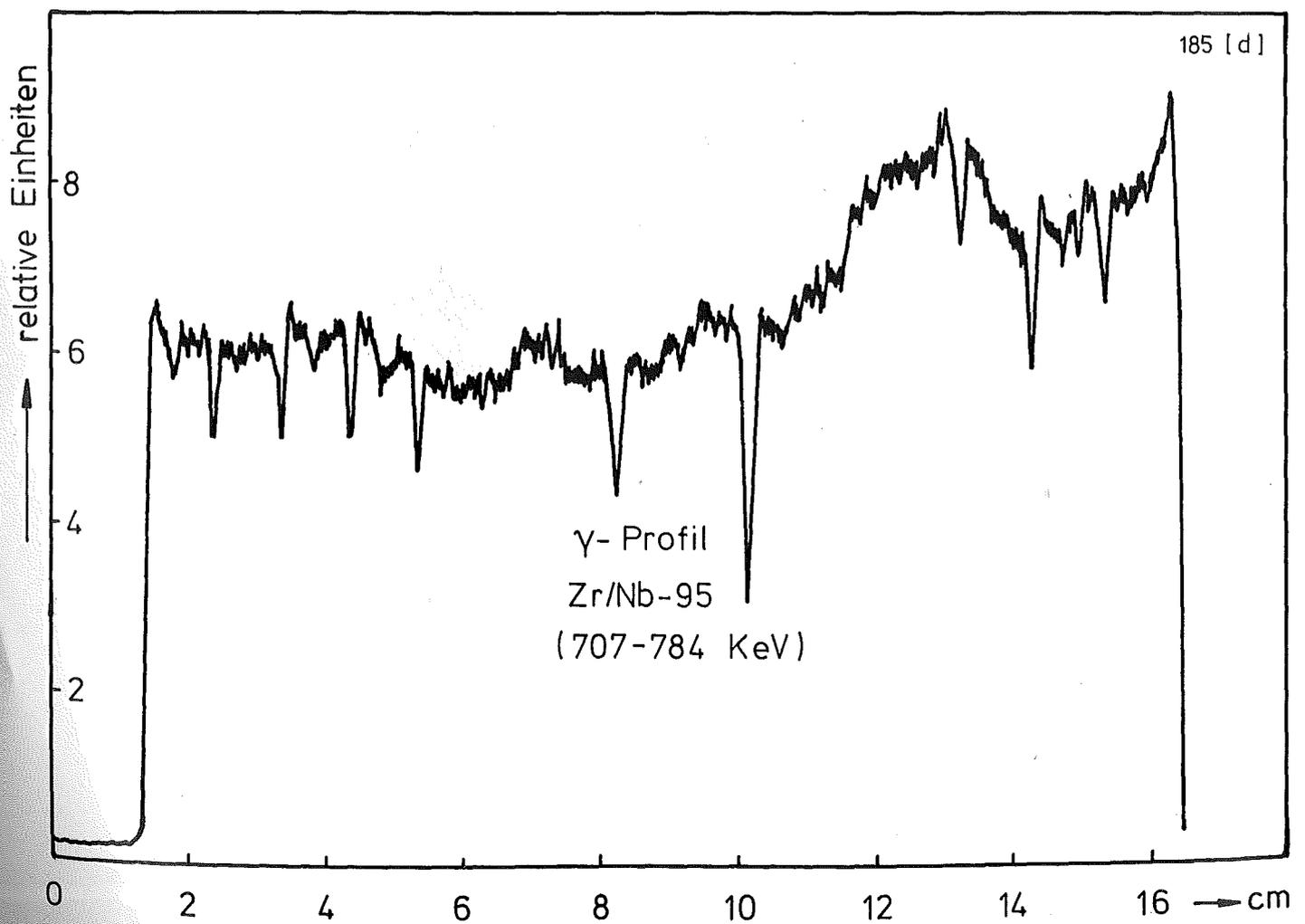
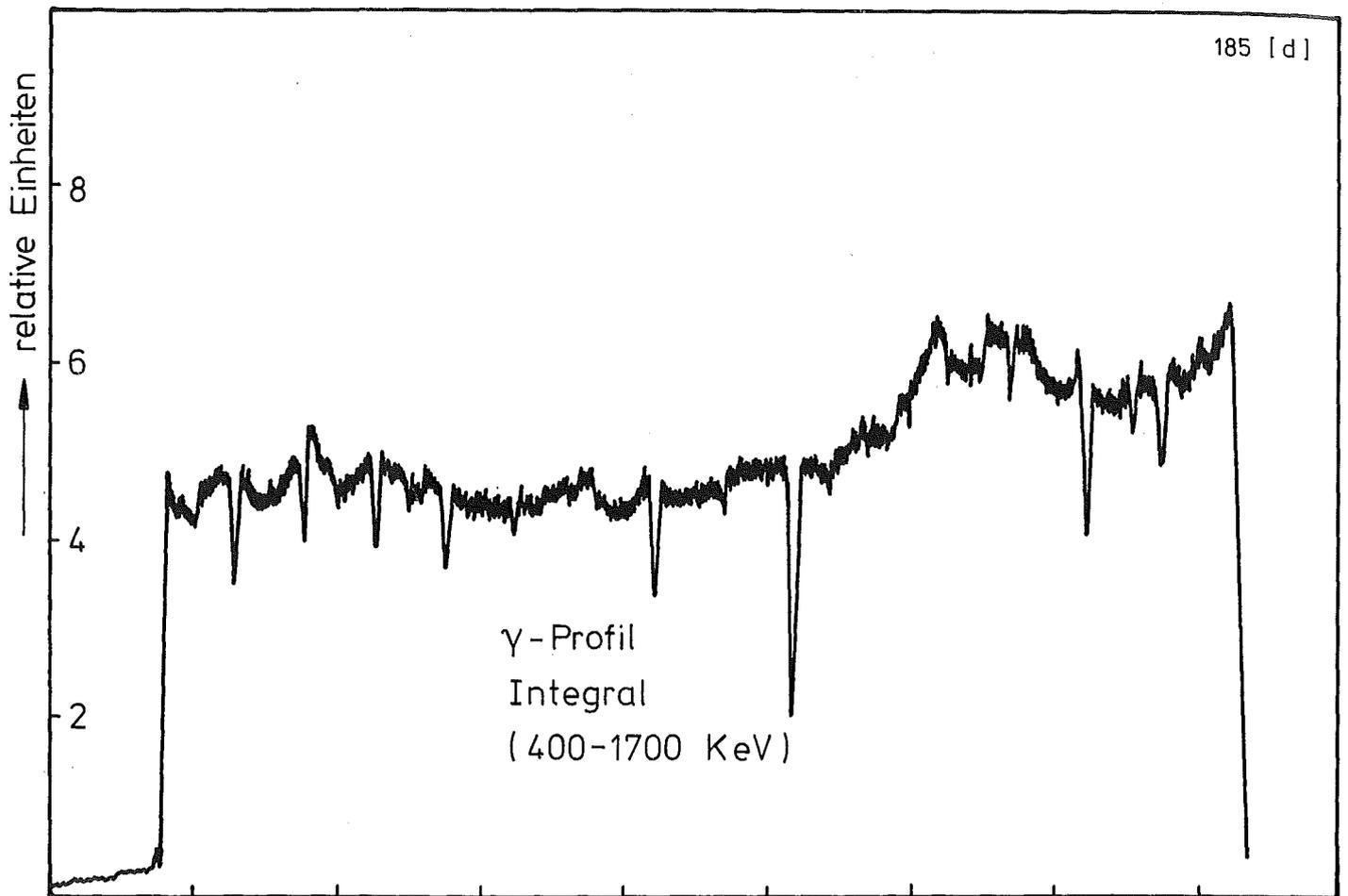


- 1/29 -

zu Prüfling L4-4

A4

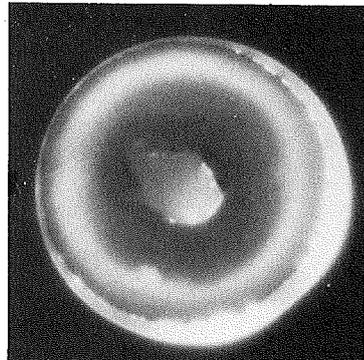
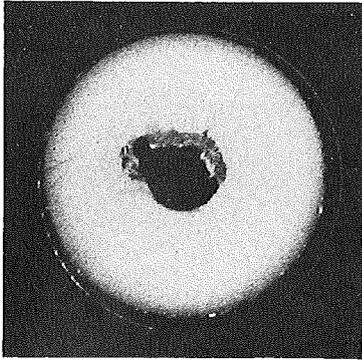




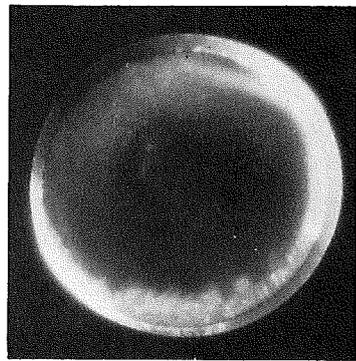
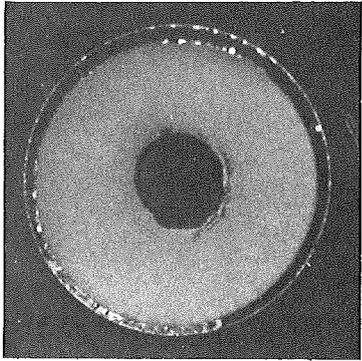
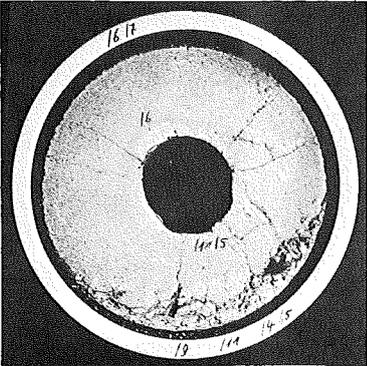
A

B

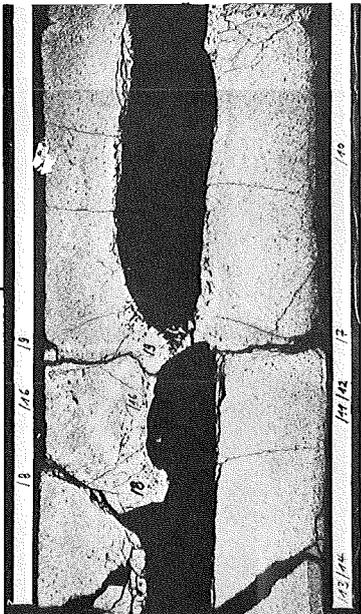
C



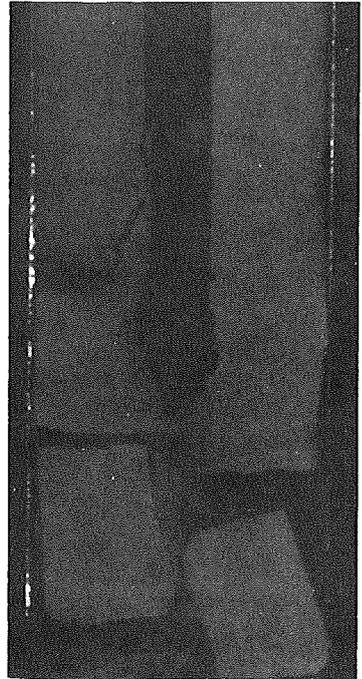
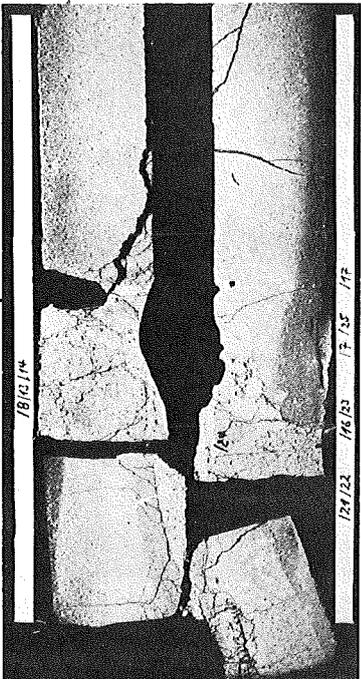
1



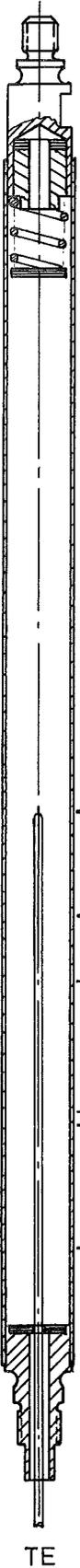
2



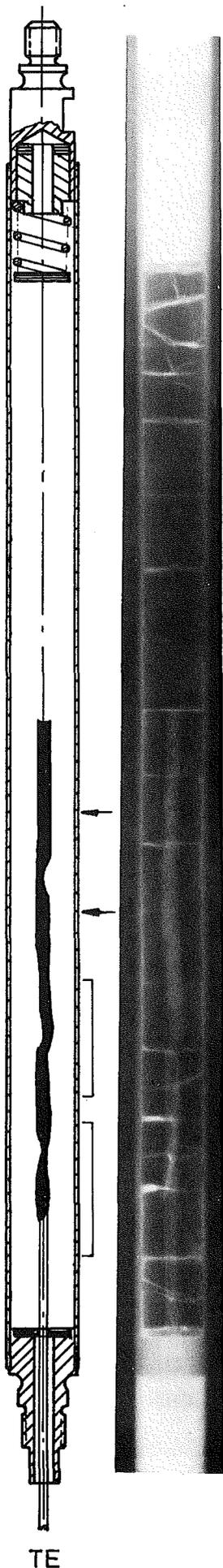
3



4



2 mm



Prüfling L 4-4

Brennstoff :

Form : Tabletten

Zusammensetzung : UC/PuC

Tablettendichte : 87 % th.D.

Hülle :

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 10,0 mm

Wandstärke : 0,55 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 210 mm

Länge der Brennstoffsäule : 150 mm

Radiale Spaltweite : 300 µm

Gasbindung : Helium

Bestrahlung :

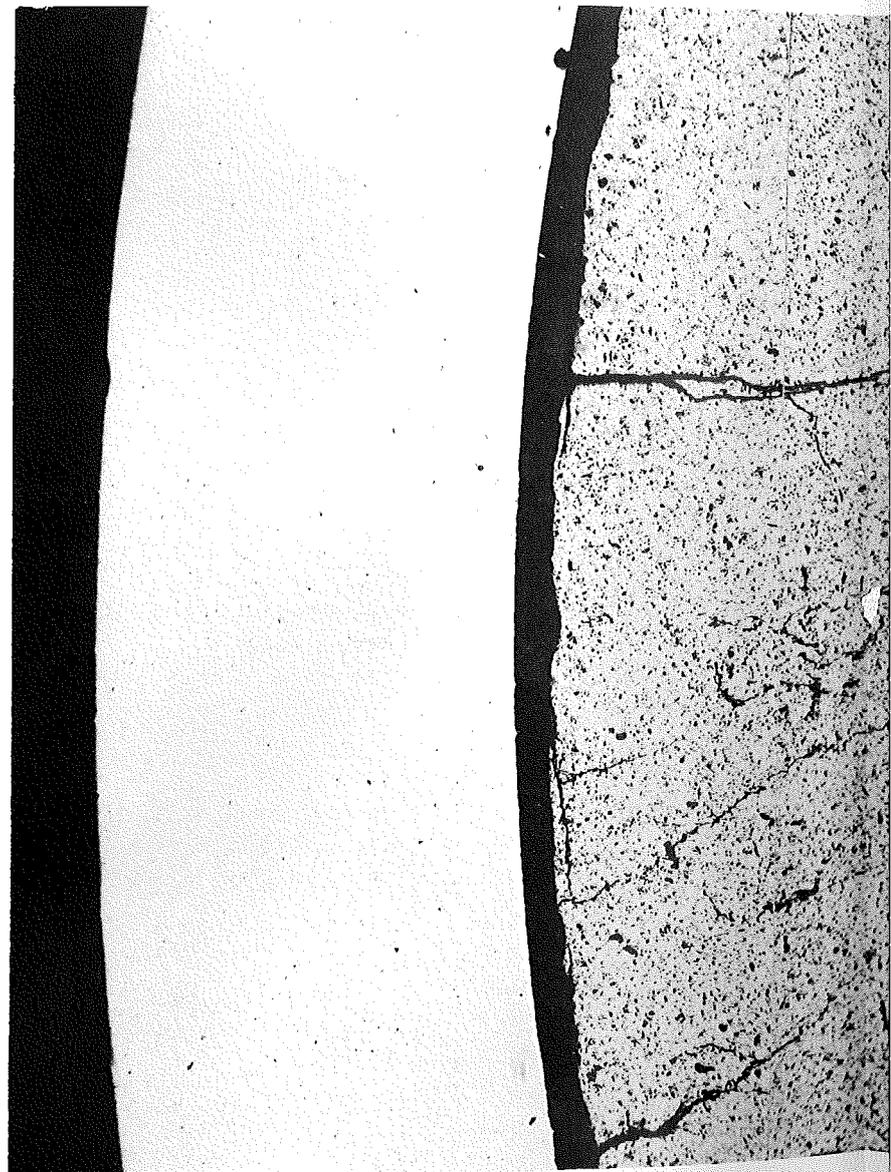
Einrichtung : FR 2-He-Loop

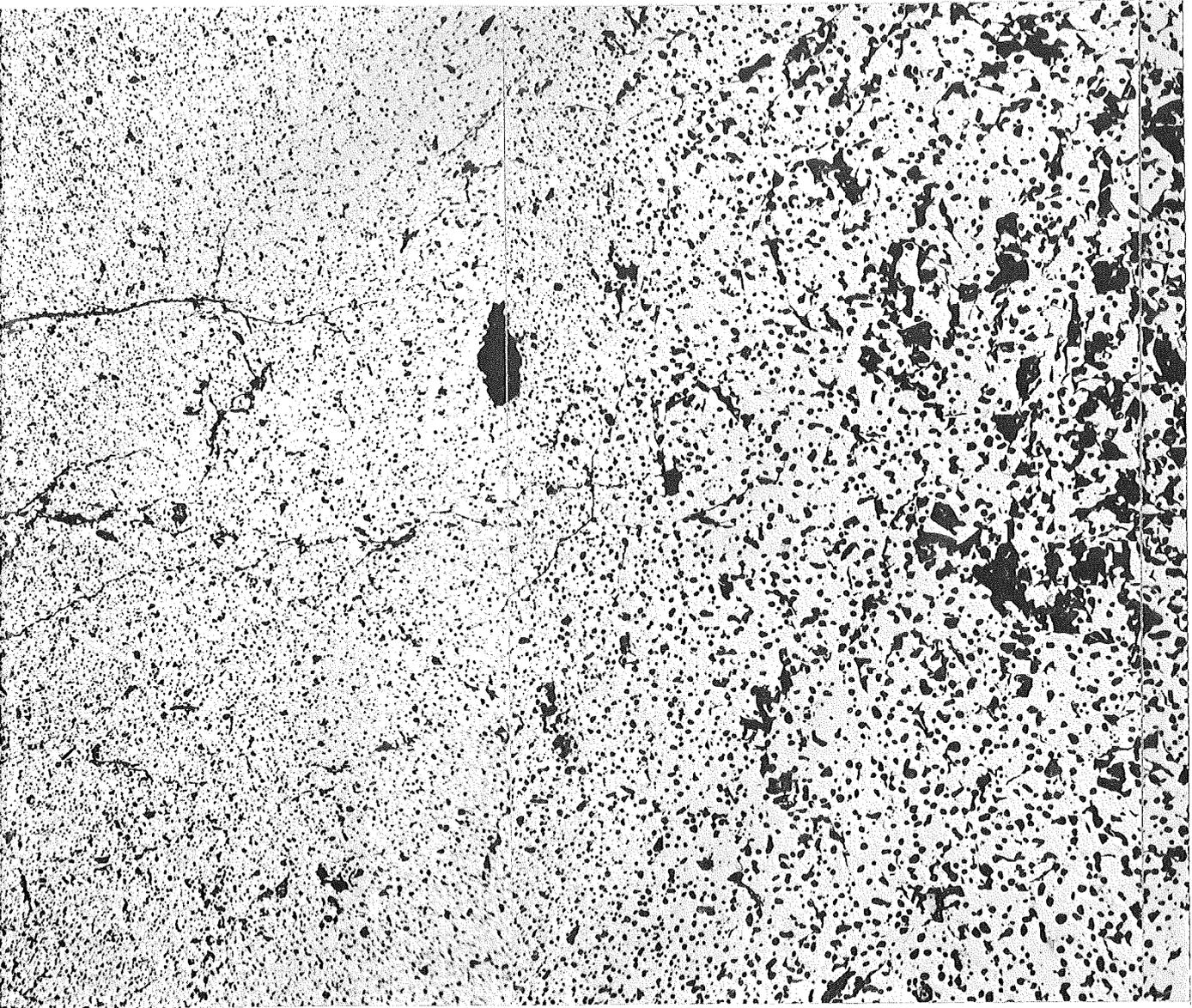
Dauer : 321 h

Ende : 10.12.1972

Rechn. Abbrand mittl. : entfällt

Stableistung max./mittl. : 1100 W/cm

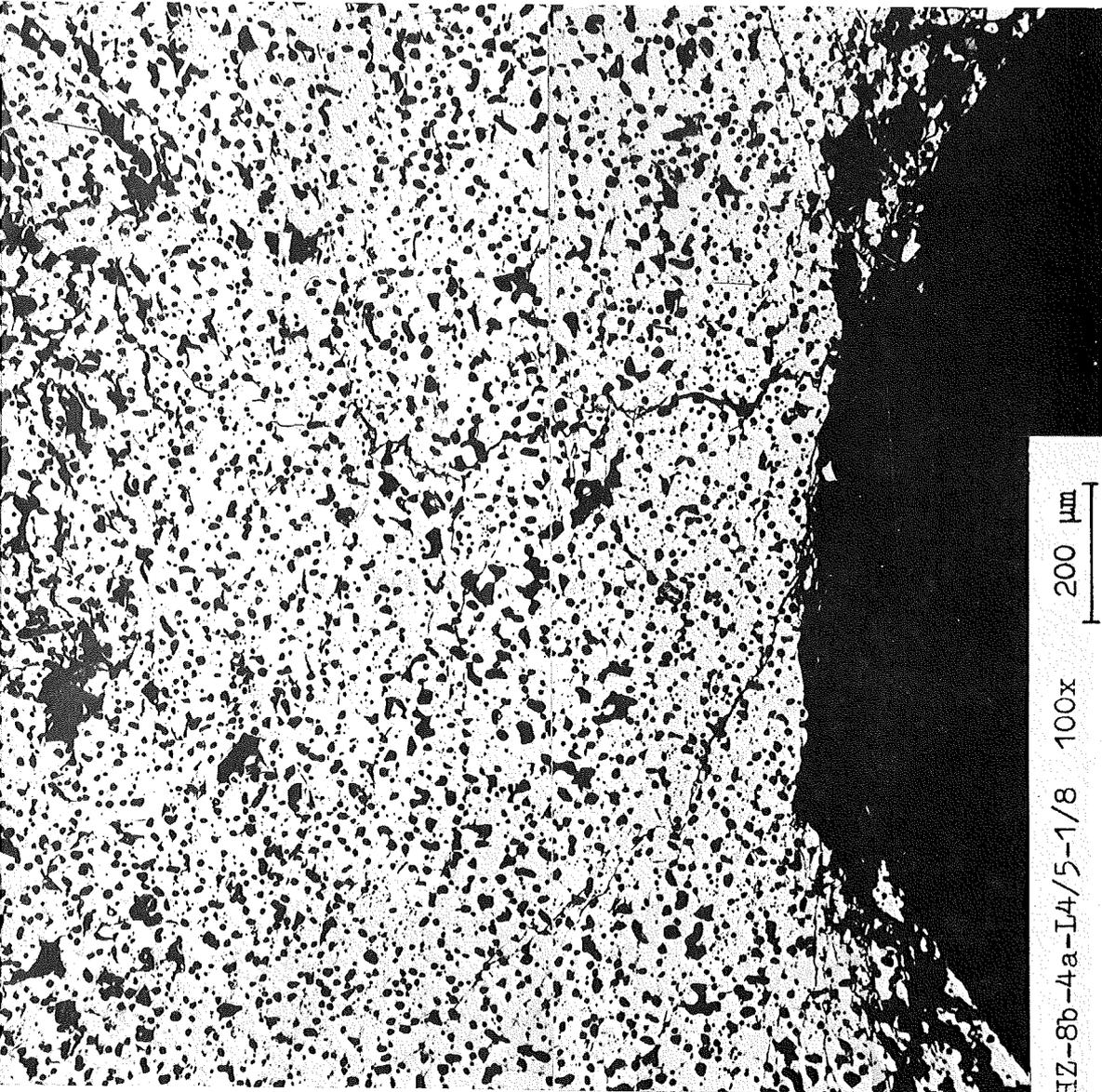


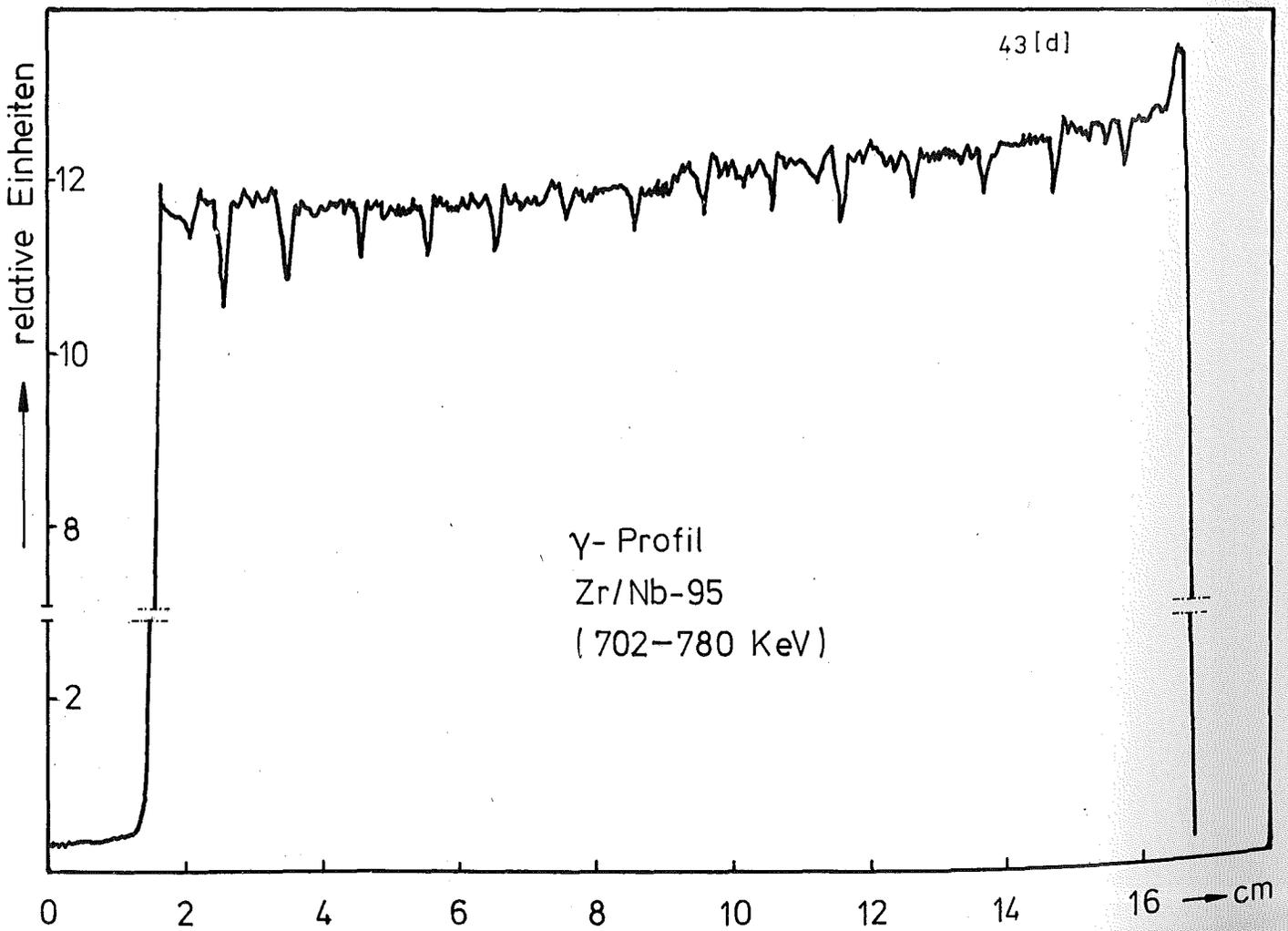
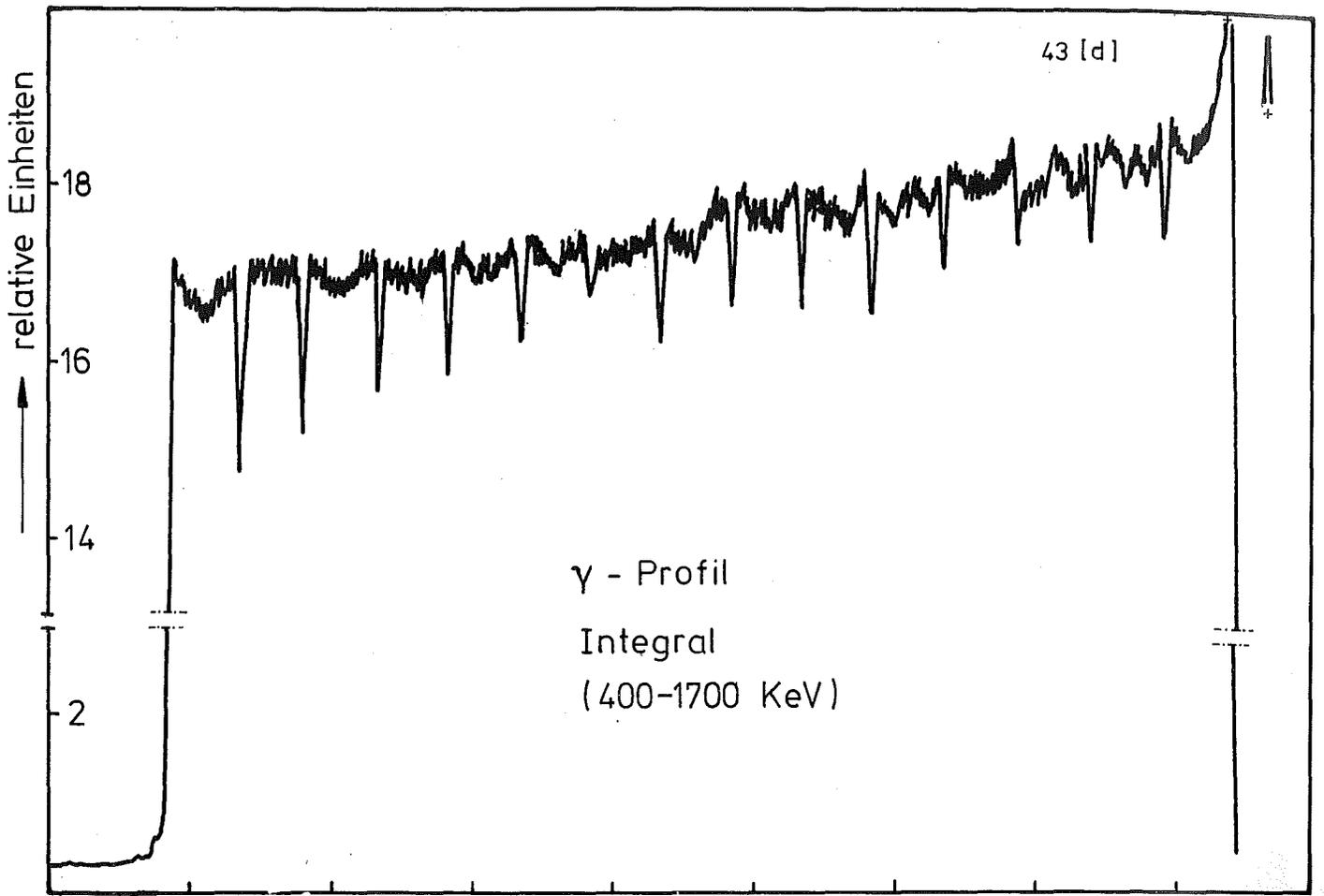


- I/35 -

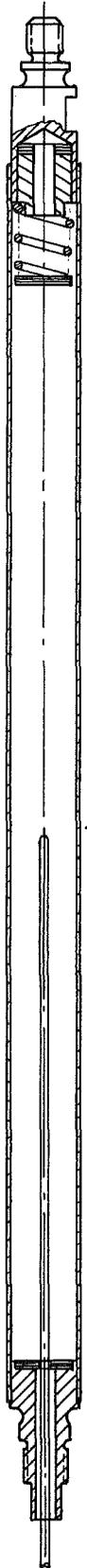
zu Prüfling L4-5

A 1

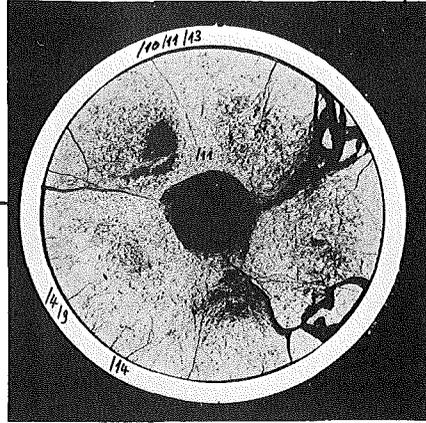




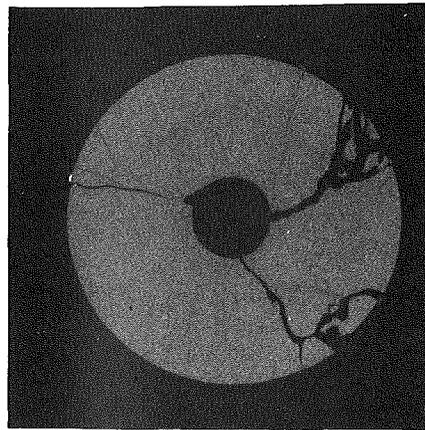
A



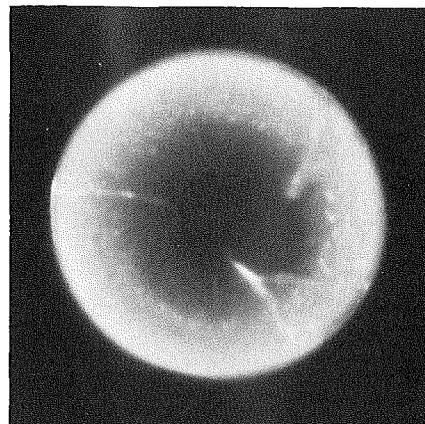
TE



1

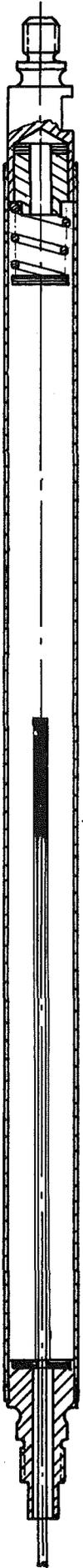


2



3

1mm



Prüfling L 4-5

Brennstoff :

Form : Tabletten

Zusammensetzung : UC/PuC

Tablettendichte : 87 % th.D.

Hülle :

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 10,0 mm

Wandstärke : 0,55 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 210 mm

Länge der Brennstoffsäule : 150 mm

Radiale Spaltweite : 125 μ m

Gasbindung : Helium

Bestrahlung :

Einrichtung : FR 2-He-Loop

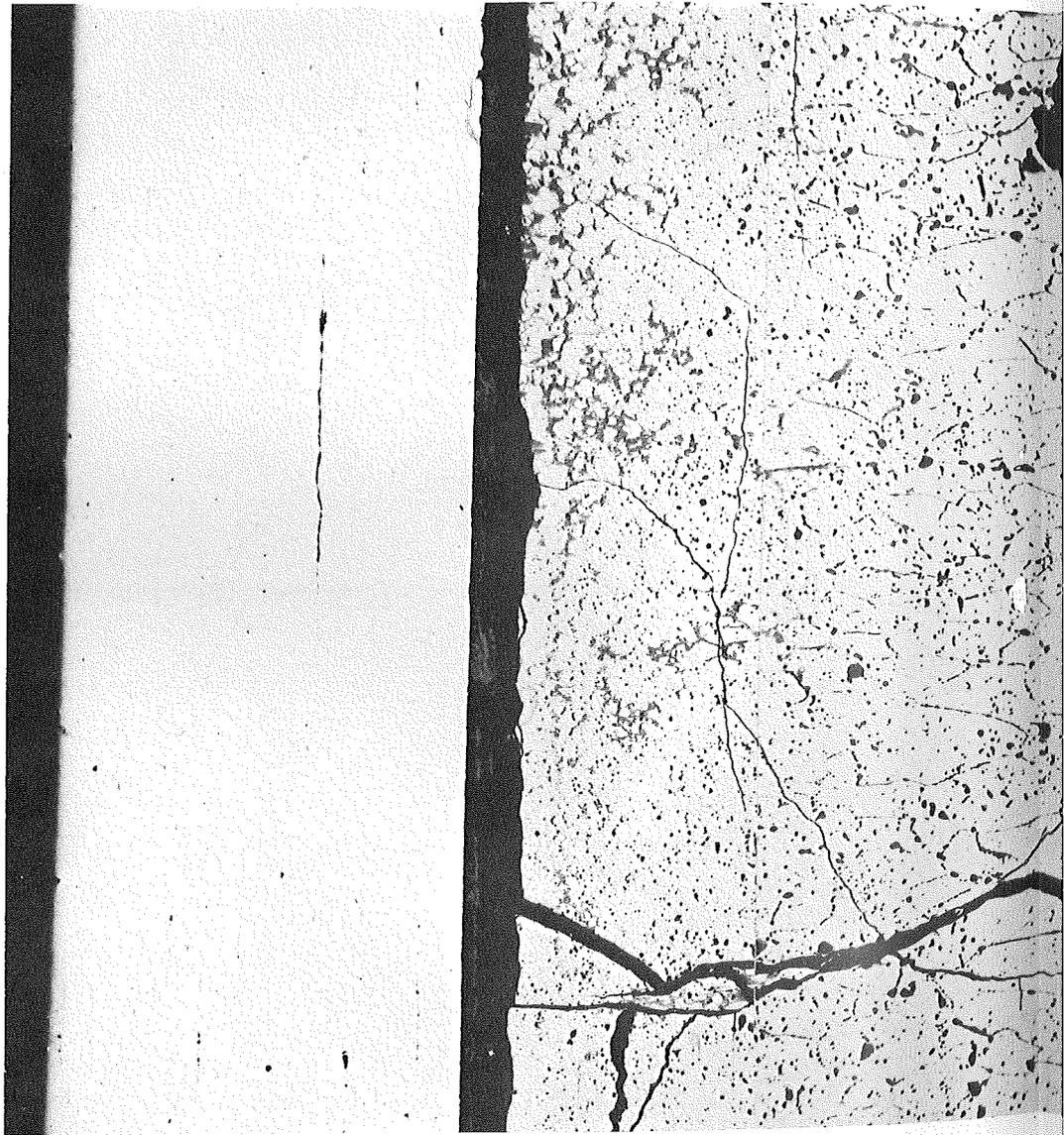
Dauer : 359,5 h

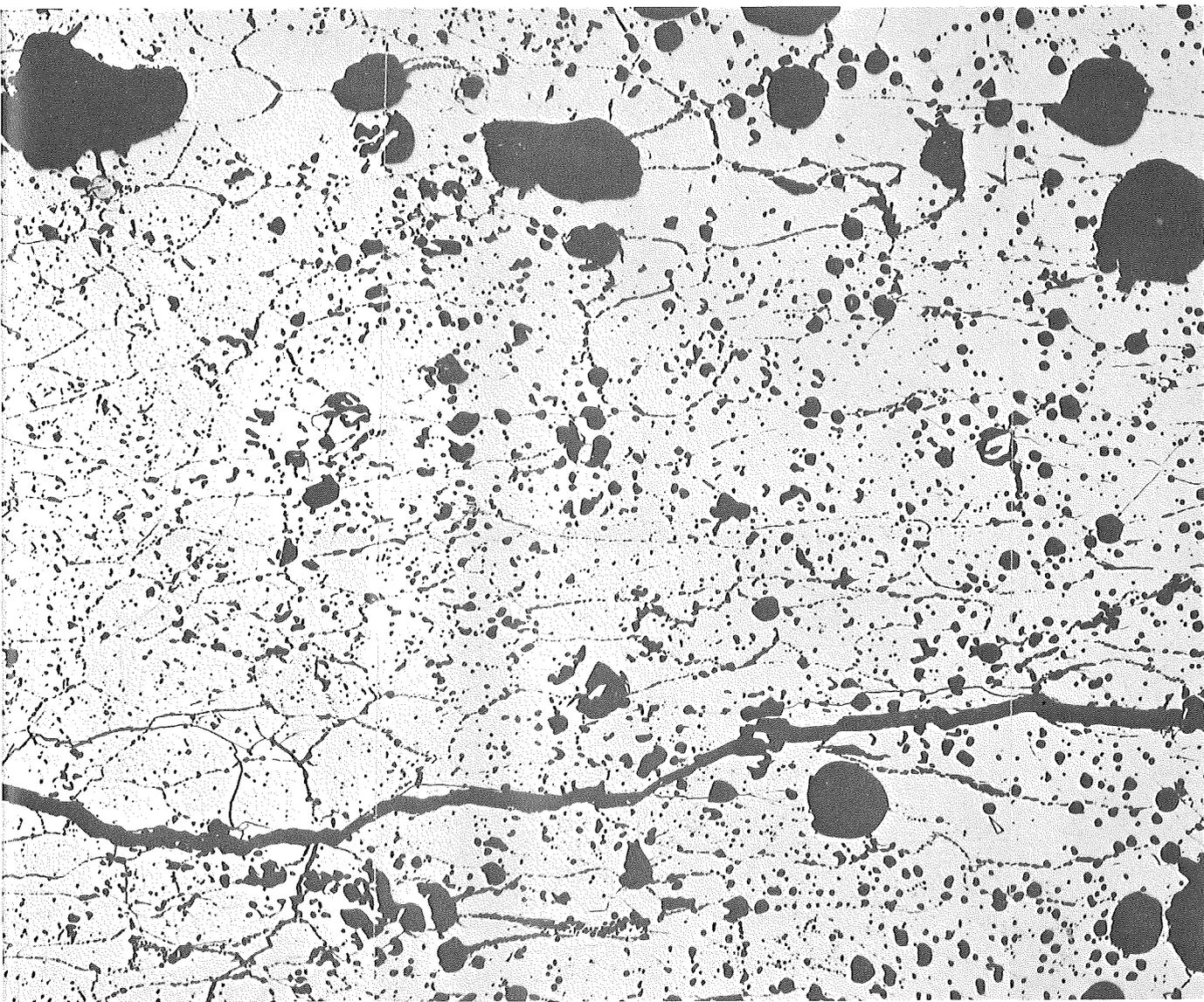
Ende : 18.2.1971

Rechn. Abbrand mittl. : entfällt

Stableistung max./mittl. : 1017 W/cm

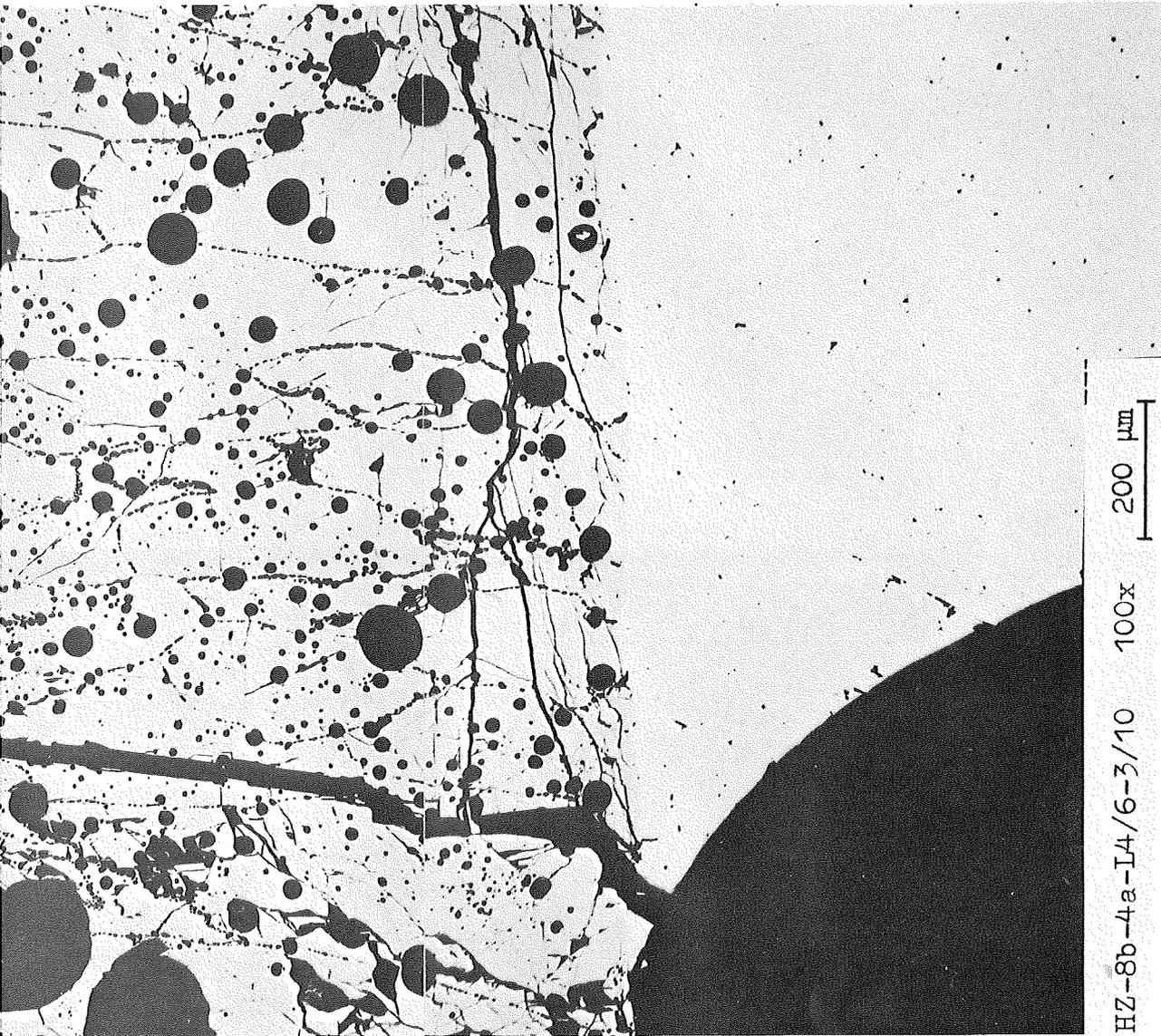
TE

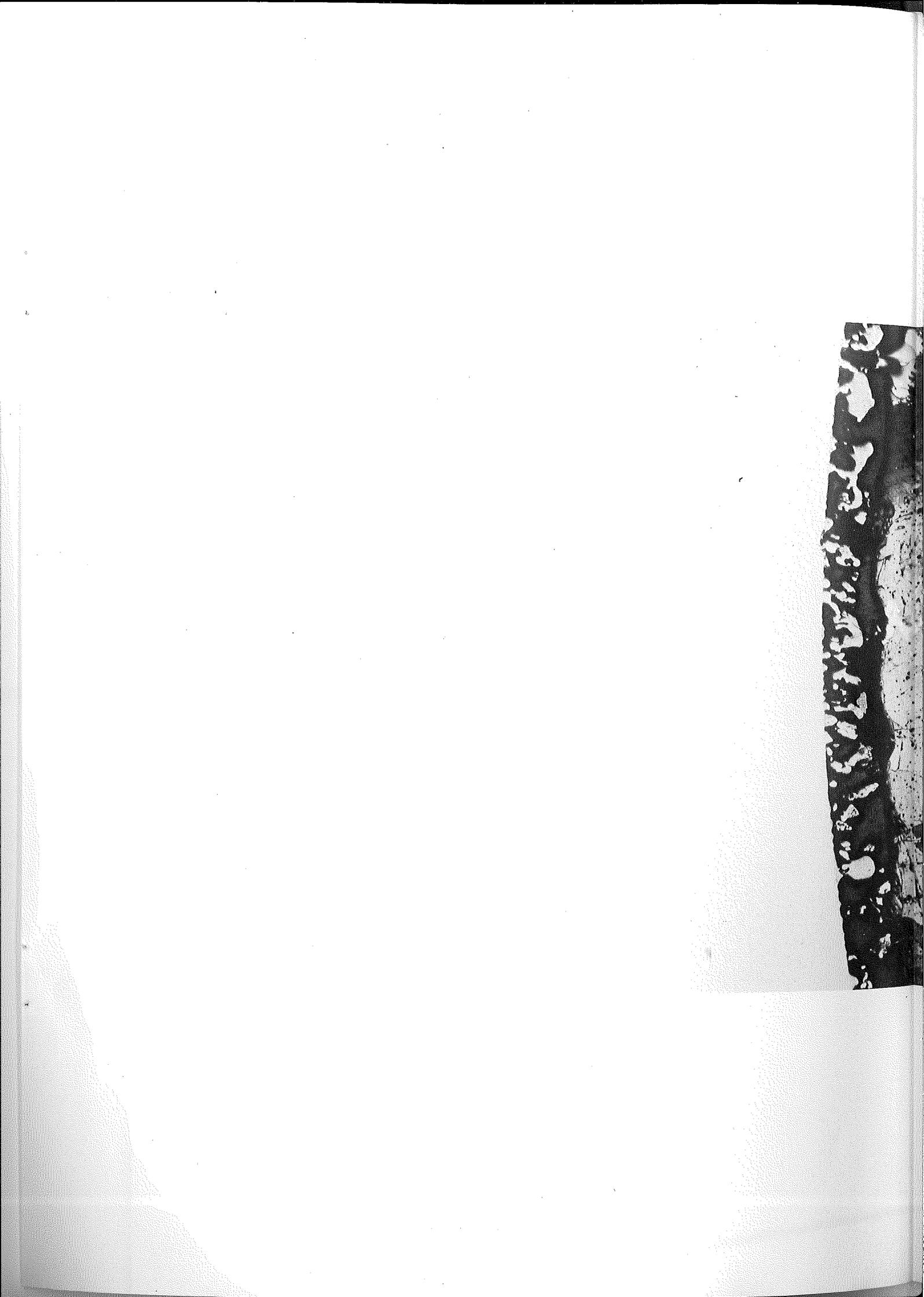




zu Prüfling L4-6

A1

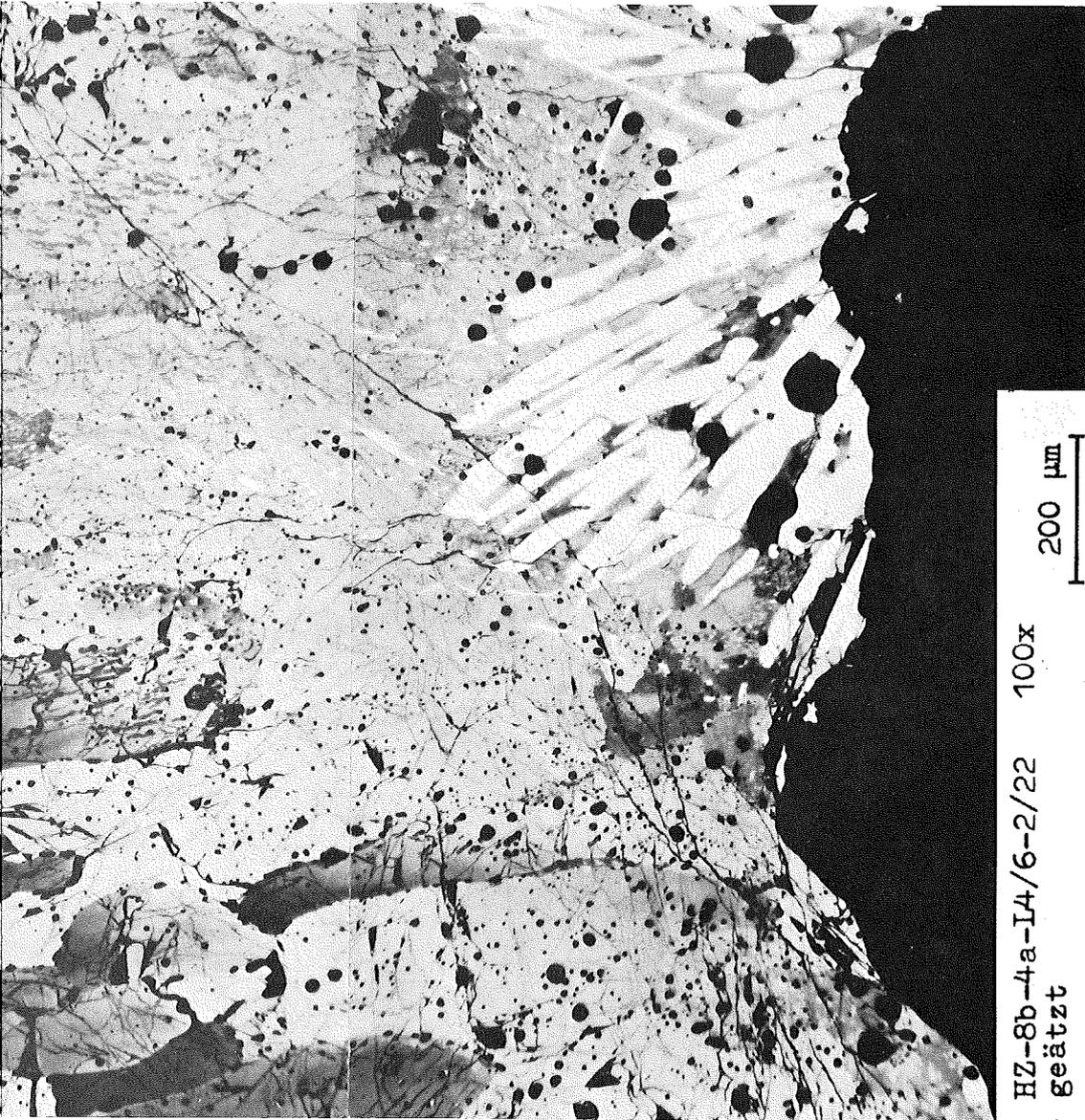


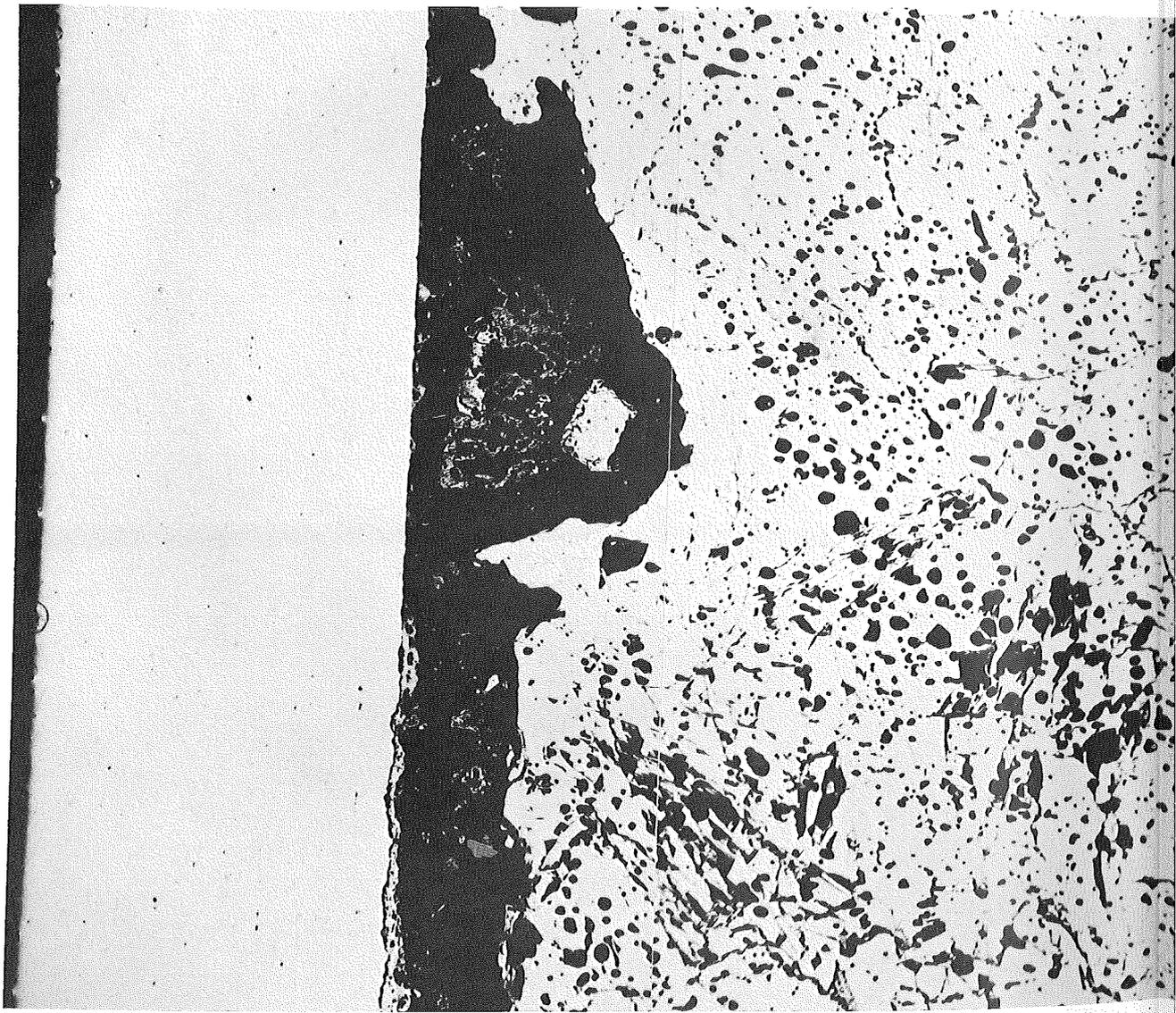


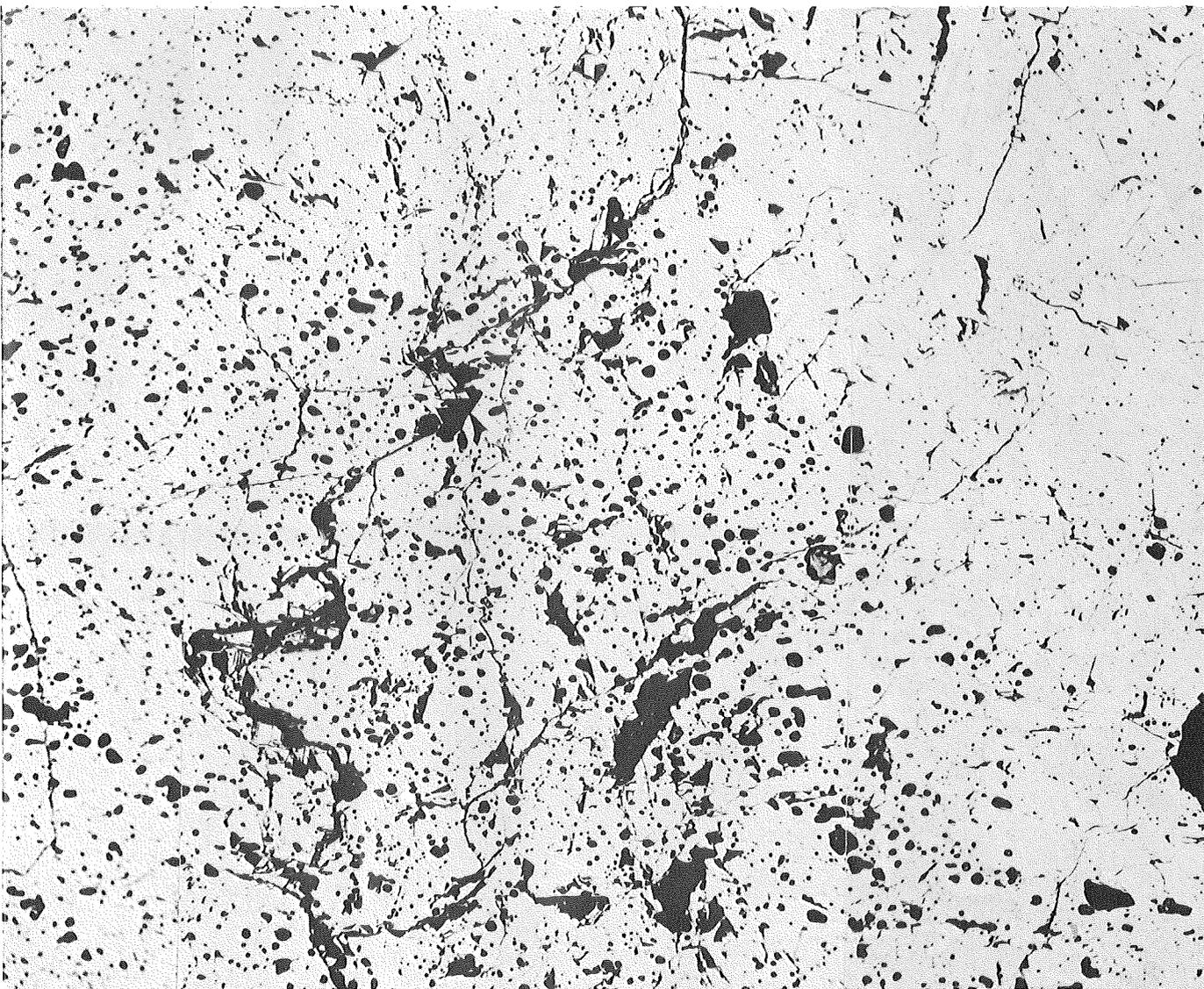


zu Prüfling L4-6

A2



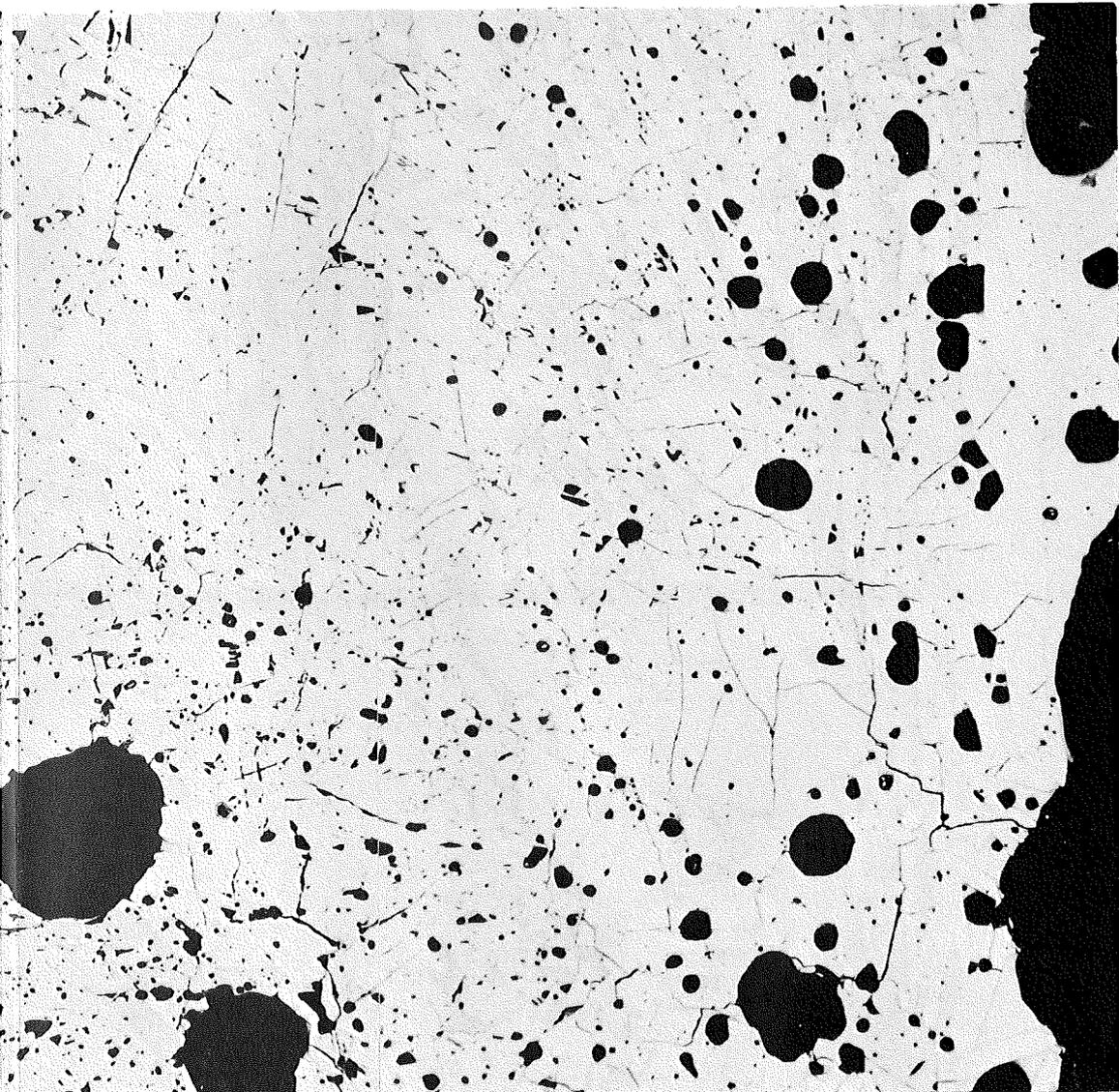


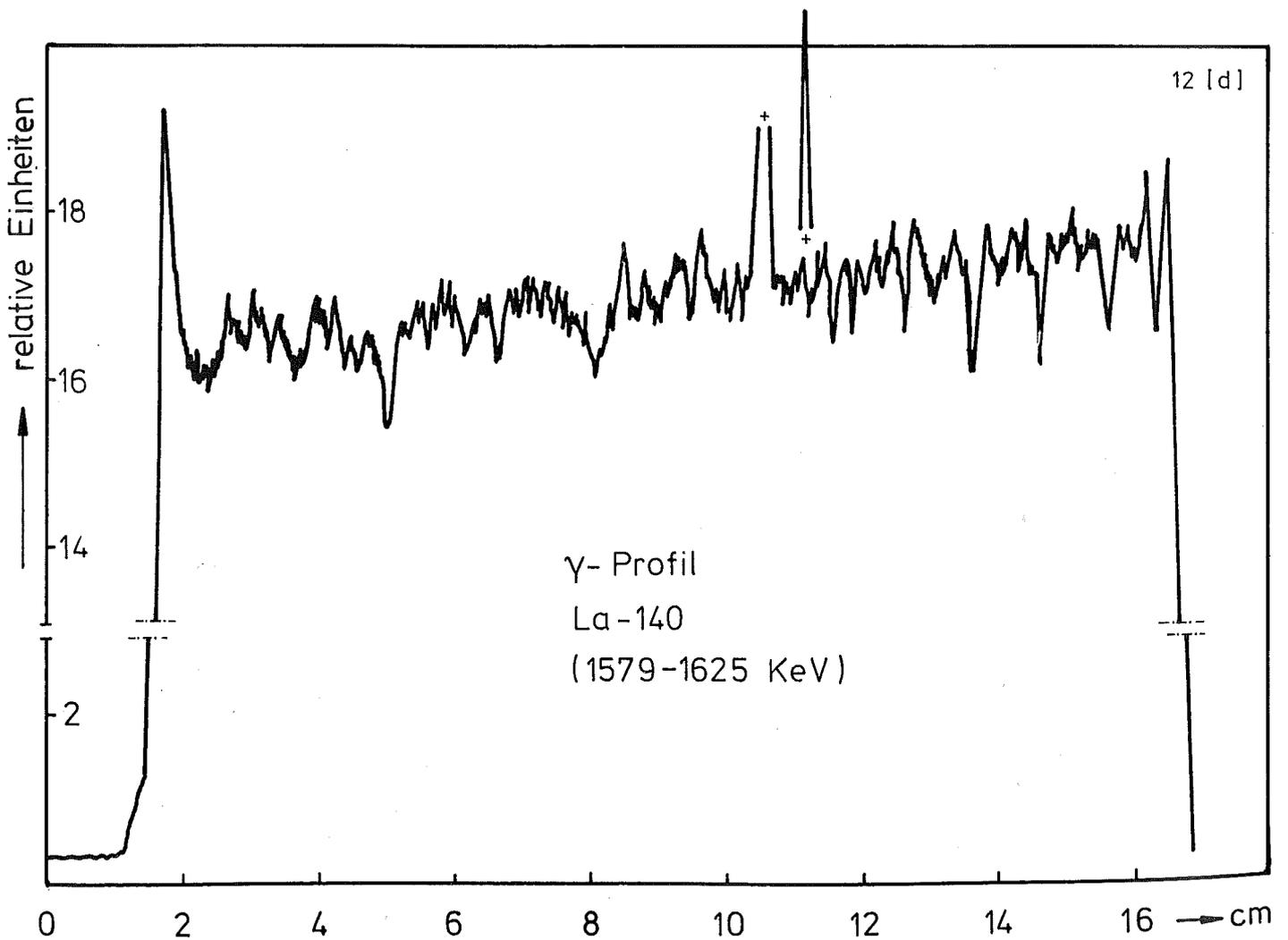
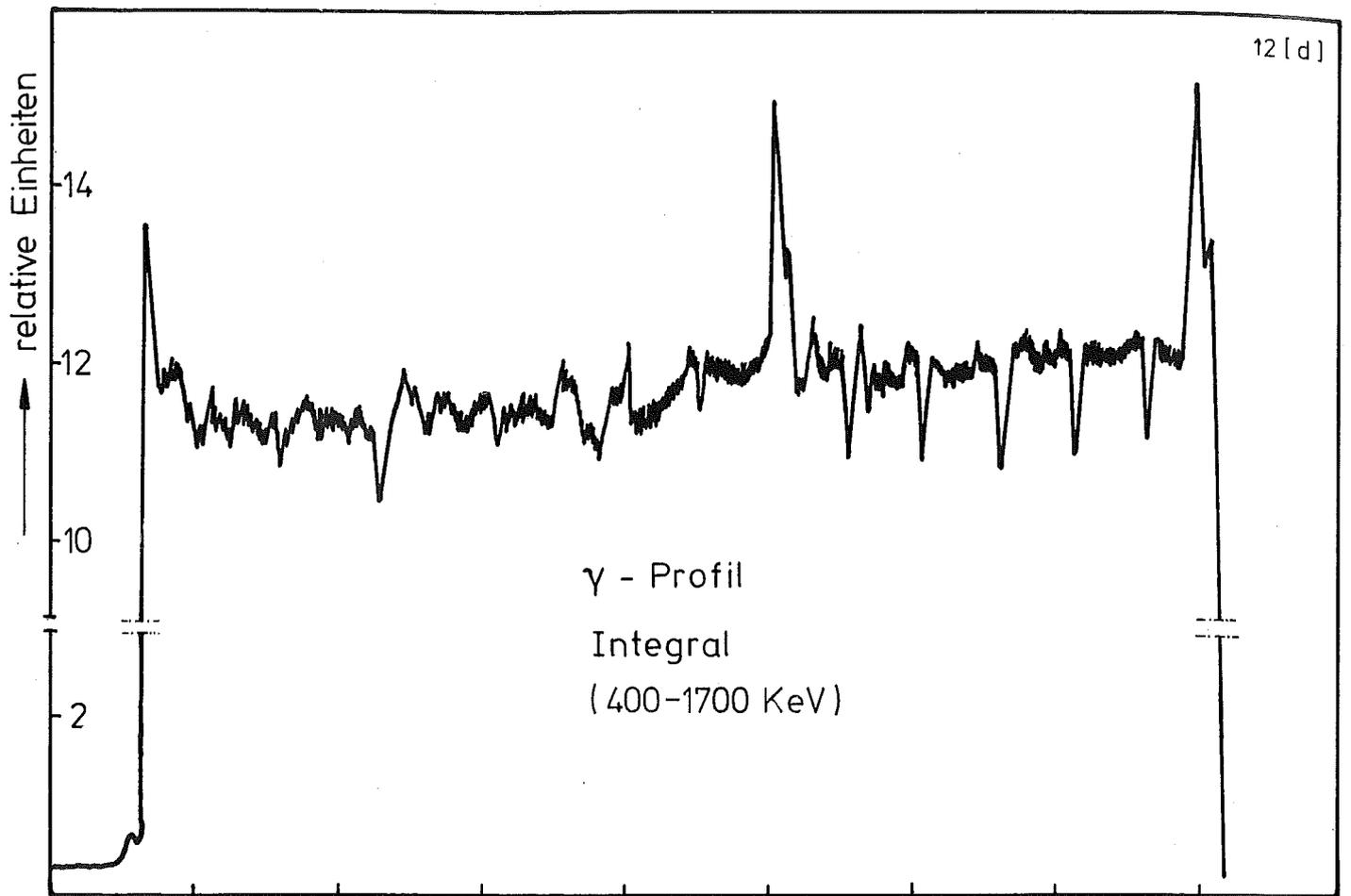


- I/55 -

zu Prüfling L4-6

A 3

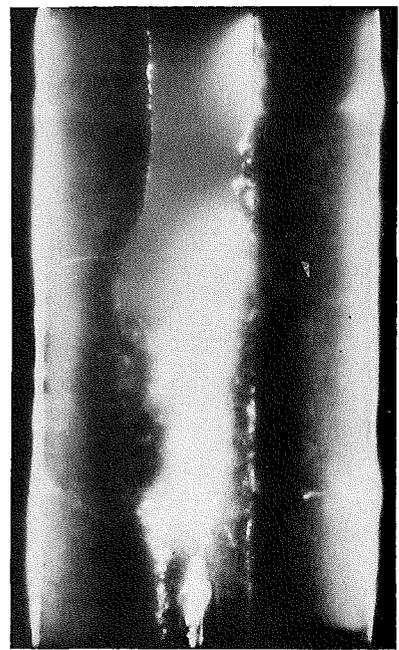
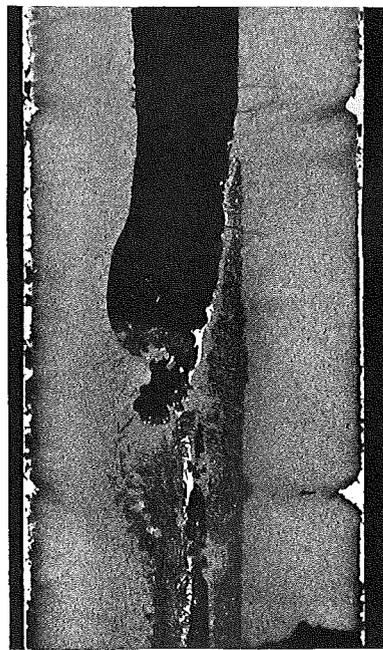
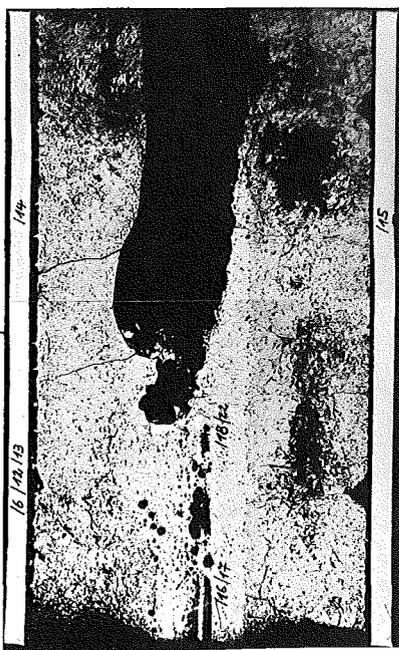
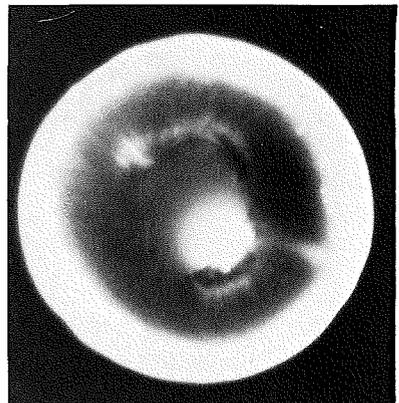
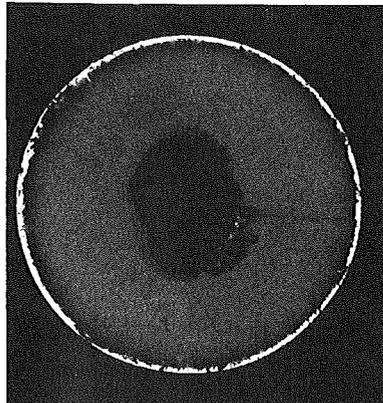
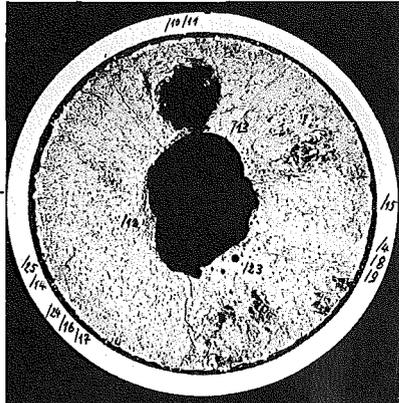
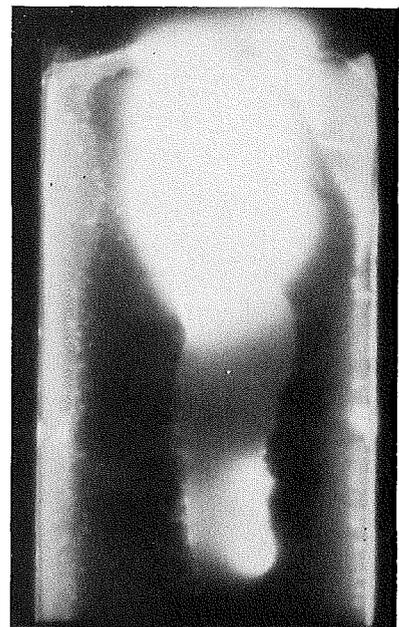
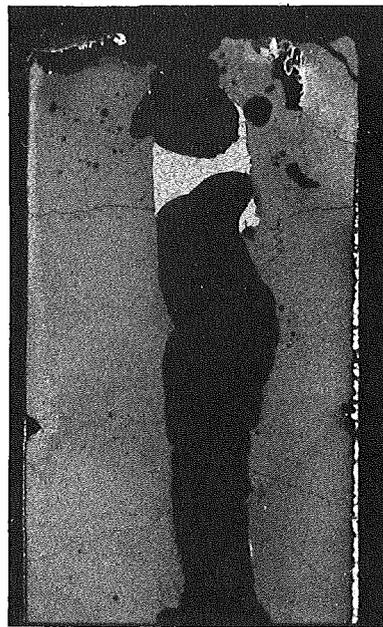
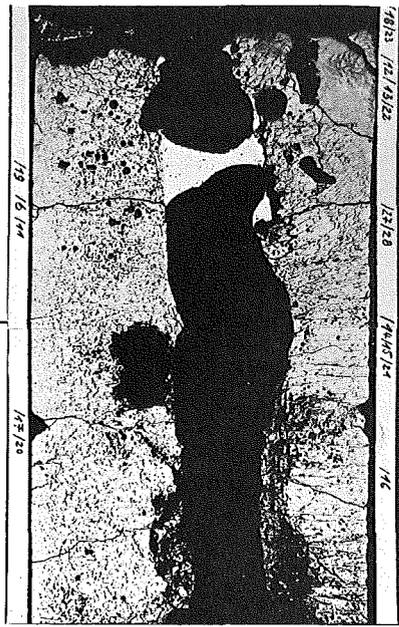




A

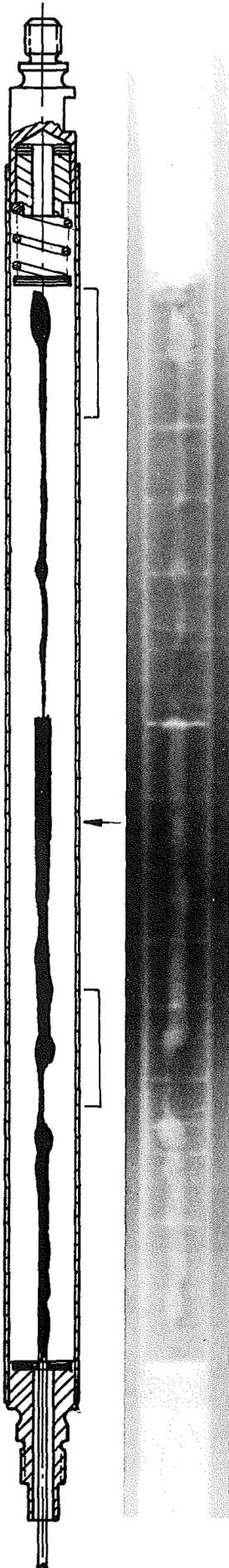
B

C



TE

1 mm



Prüfling L 4-6

Brennstoff :

Form : Tabletten
Zusammensetzung : UC/PuC
Tablettendichte : 87 % th.D.

Hülle :

Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 10,0 mm
Wandstärke : 0,55 mm

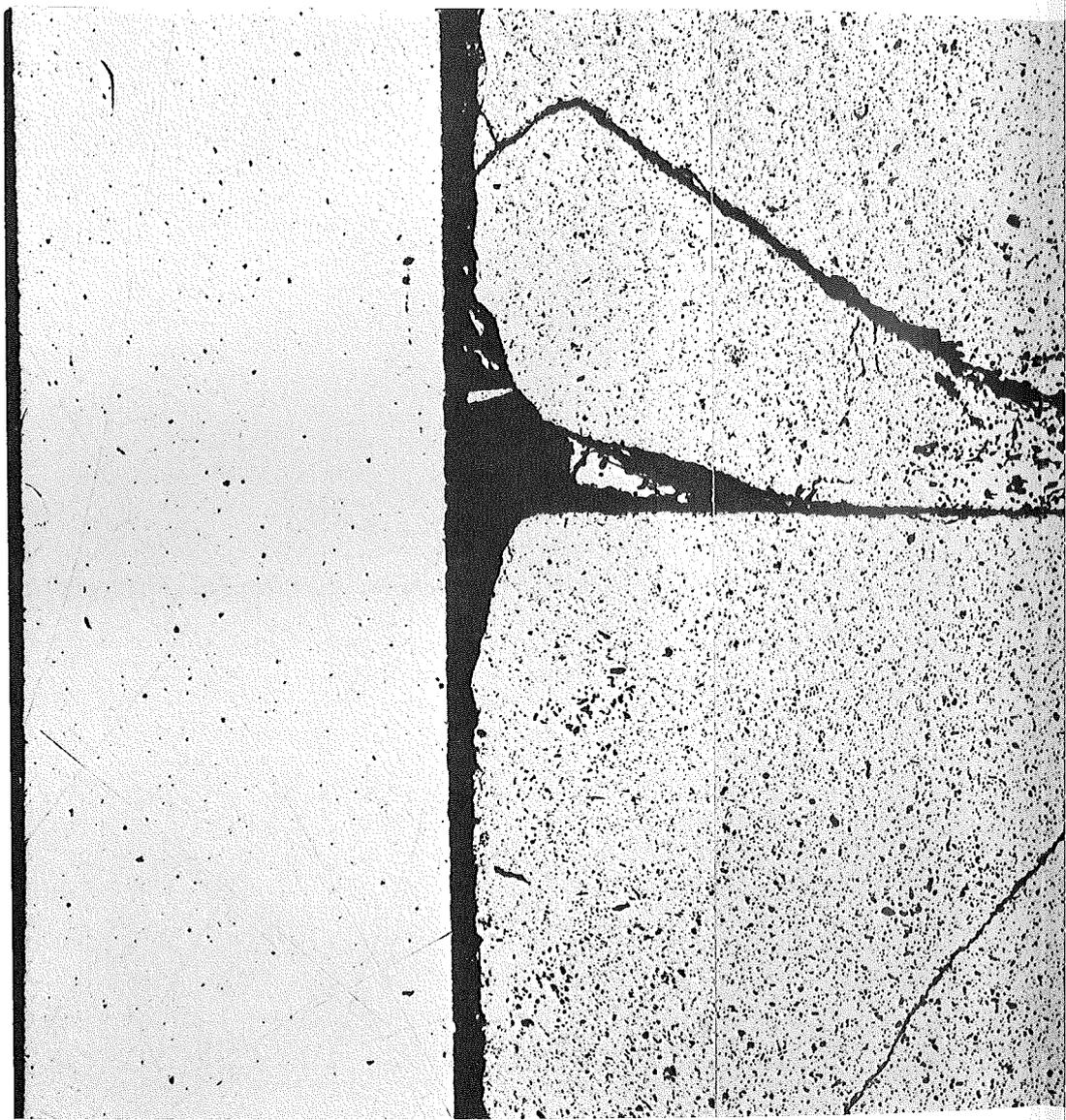
Geometrie :

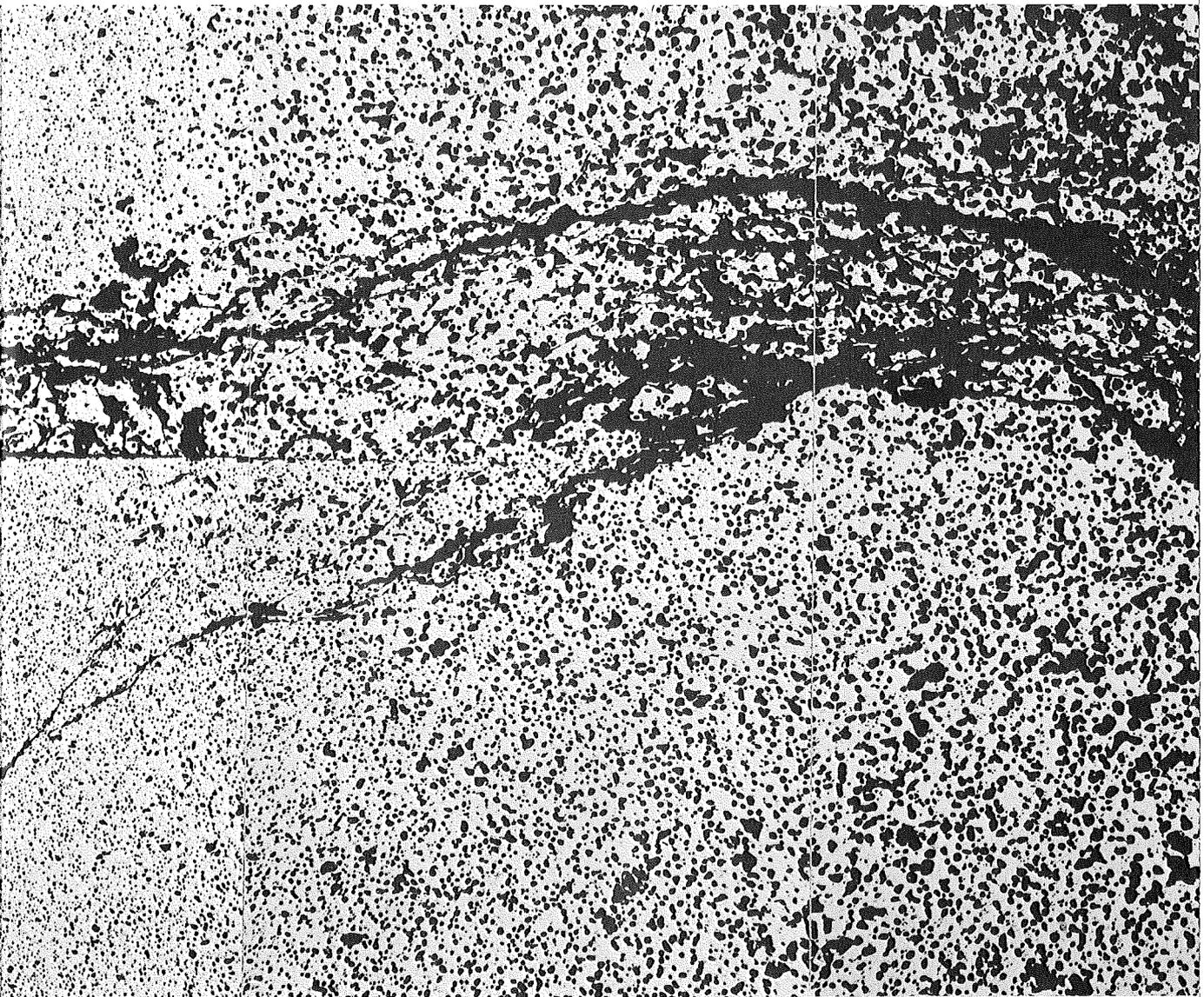
Länge des Prüflings : 210 mm
Länge der Brennstoffsäule : 150 mm
Radiale Spaltweite : 125 µm
Gasbindung : Argon

Bestrahlung :

Einrichtung : FR 2-He-Loop
Dauer : 359,8 h
Ende : 26.3.1971
Rechn. Abbrand mittl. : entfällt
Stableistung max./mittl. : 1012 W/cm

TE

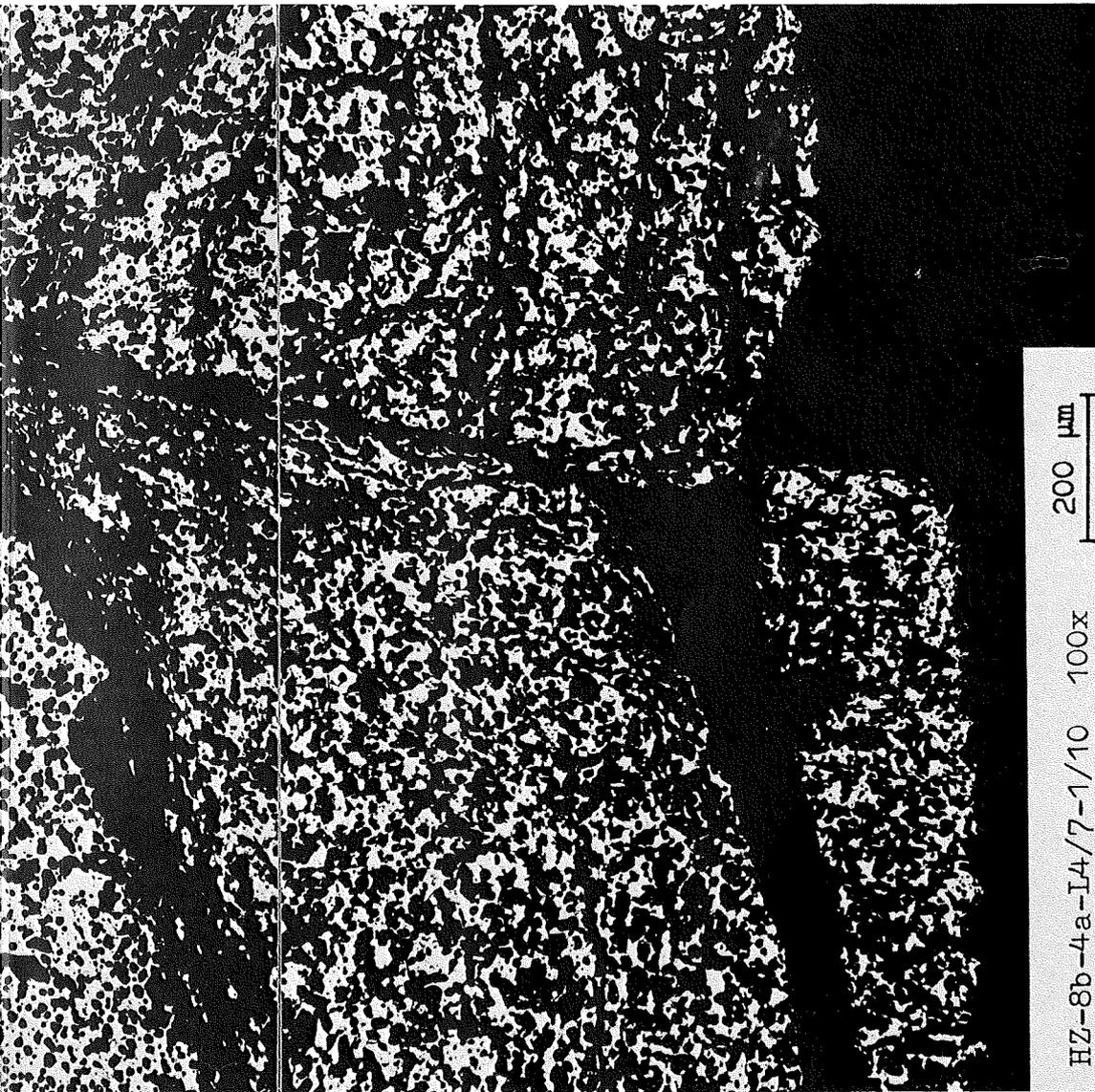


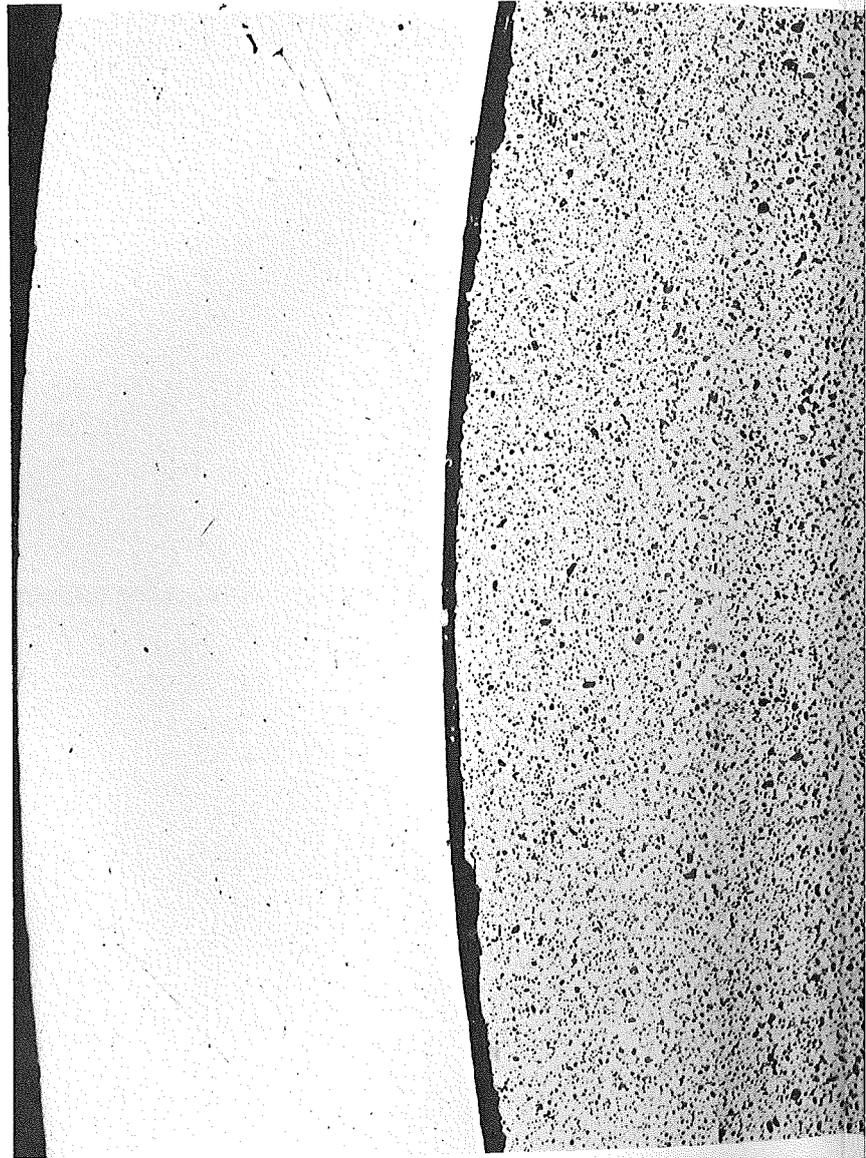


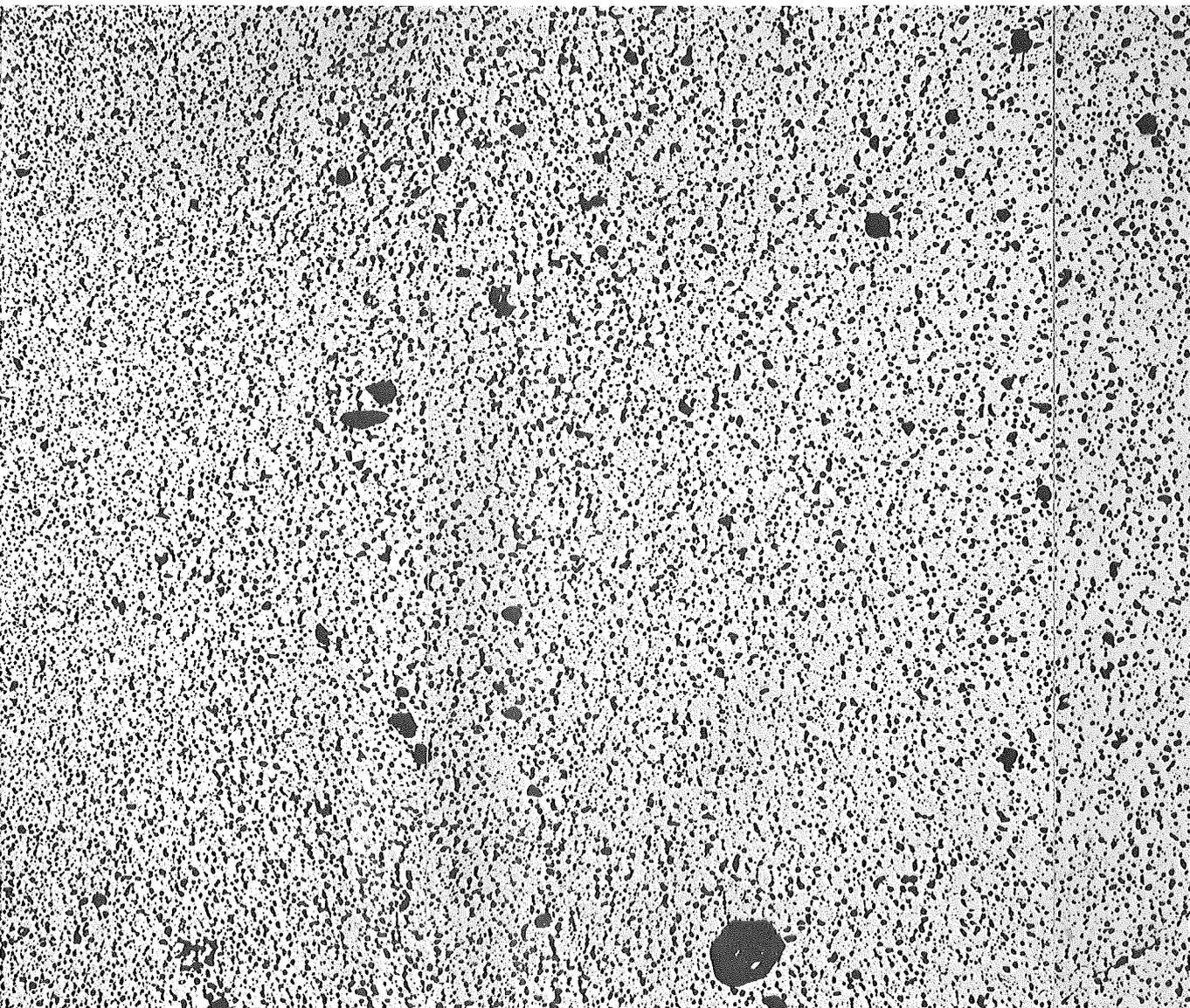
- I/61 -

zu Prüfling L4-7

A1



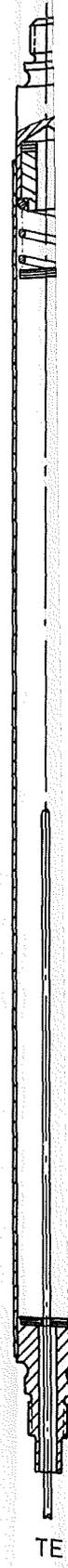
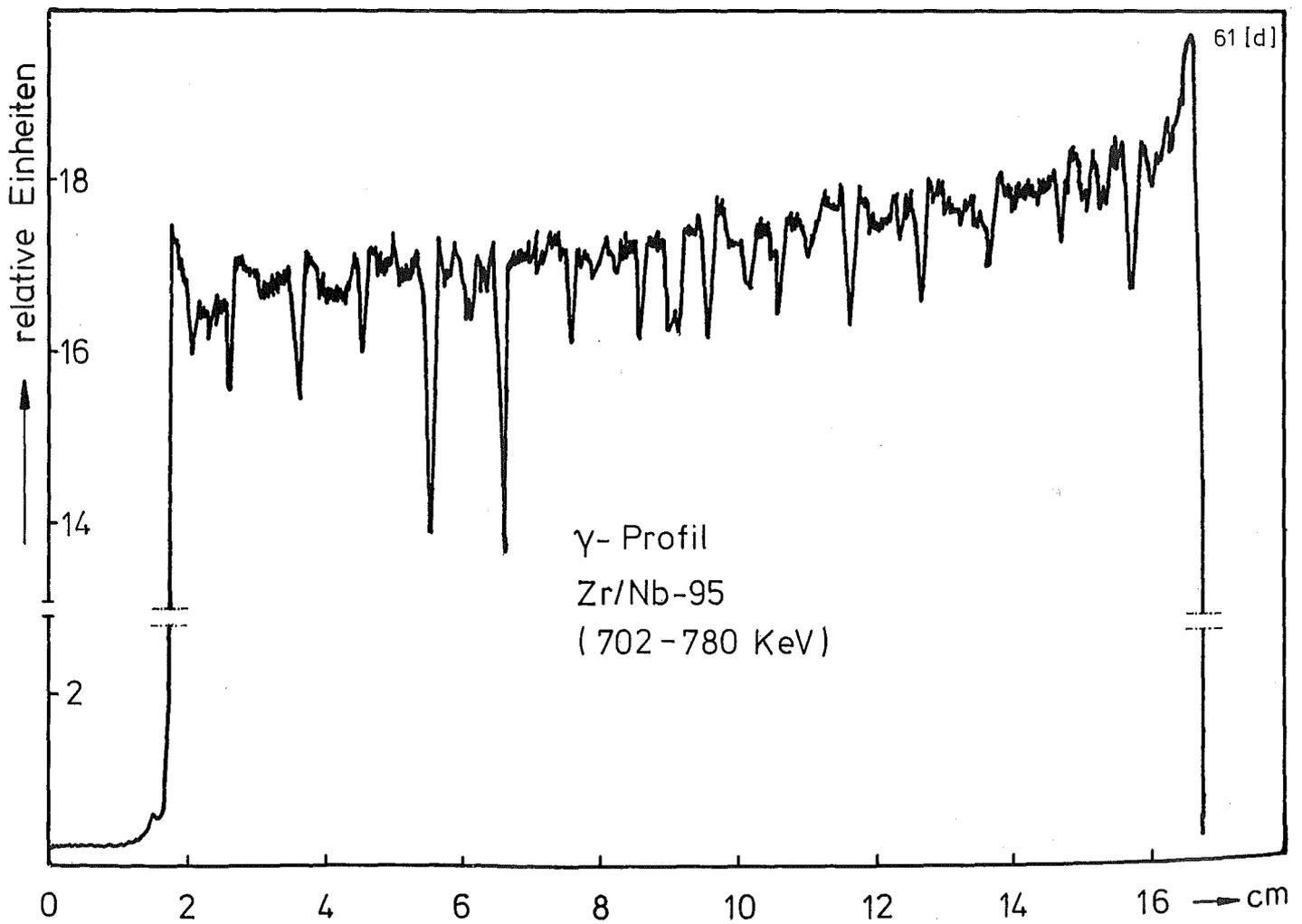
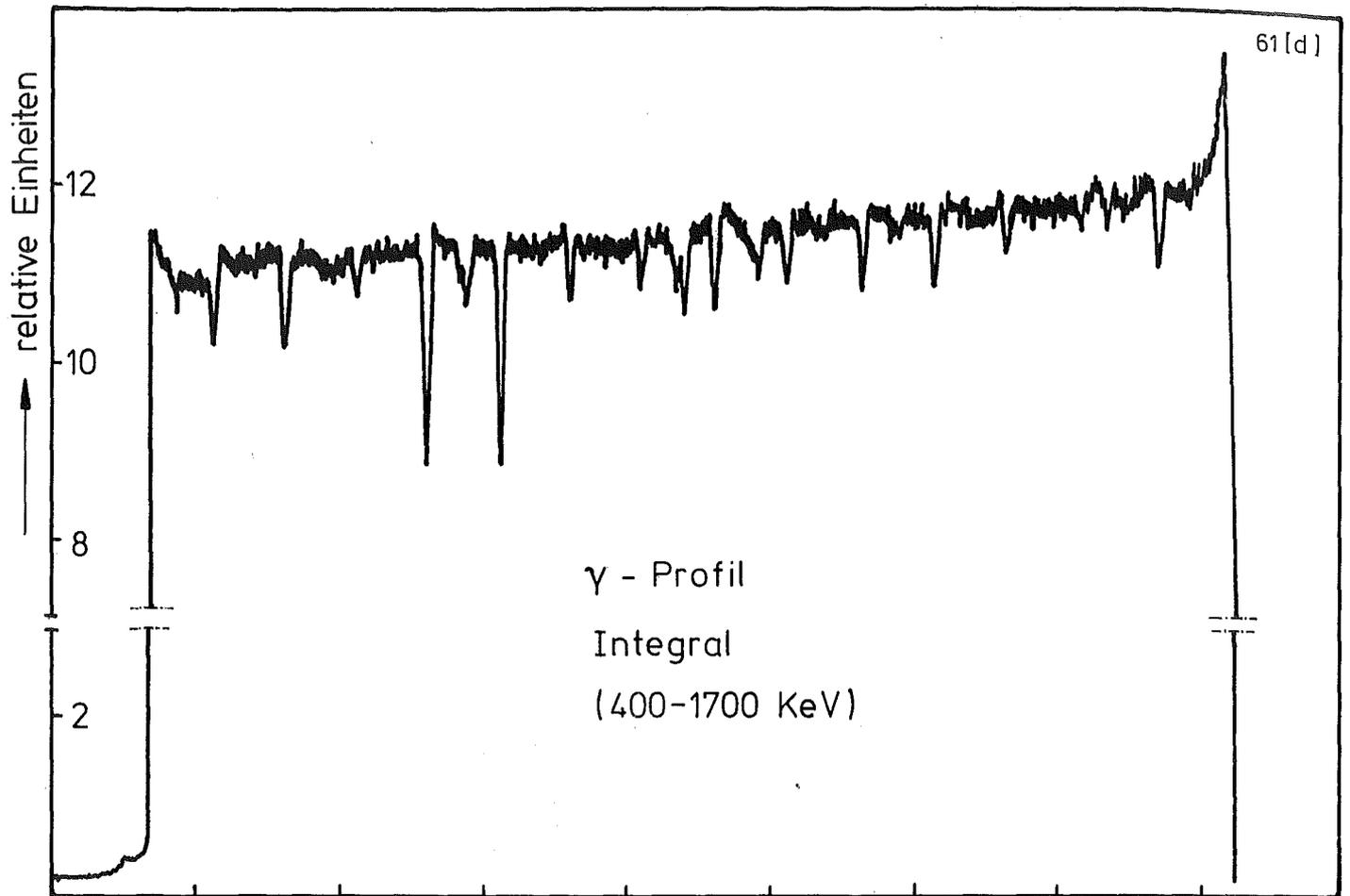




zu Prüfling L4-7

A 2

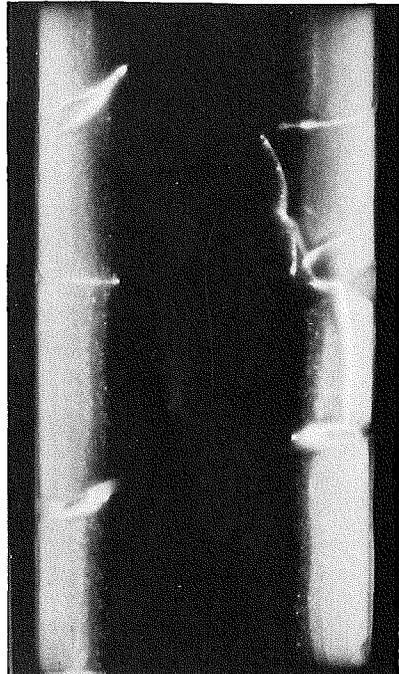
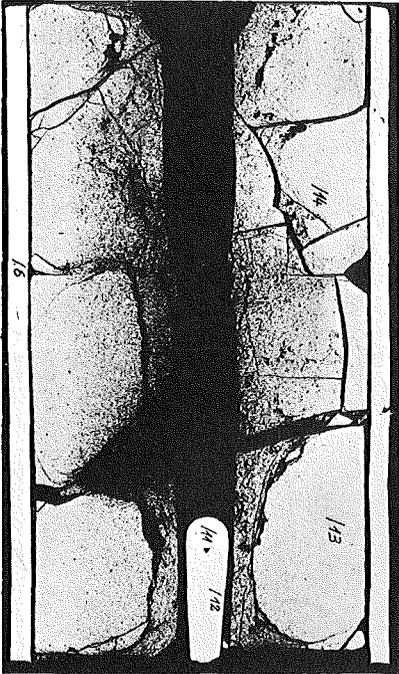




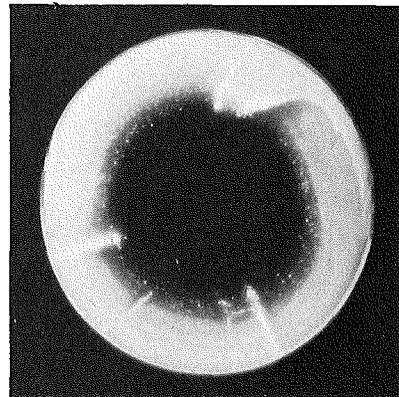
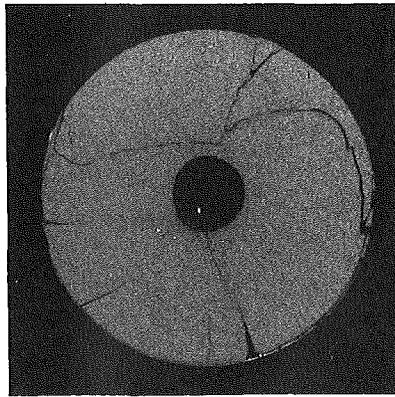
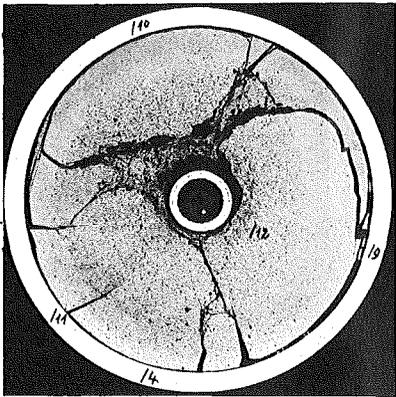
A

B

C

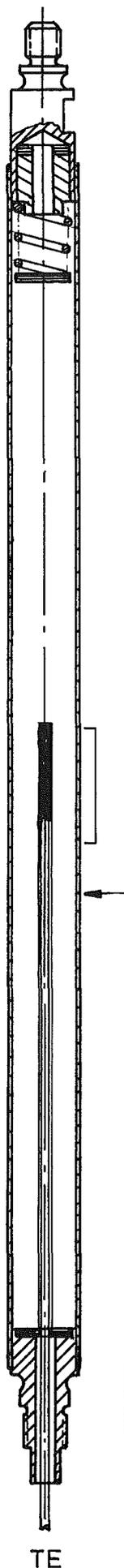


1



2

1mm



Prüfling L 4-7

Brennstoff :

Form : Tabletten
Zusammensetzung : UC/PuC
Tablettendichte : 87 $\frac{1}{2}$ th.D.

Hülle :

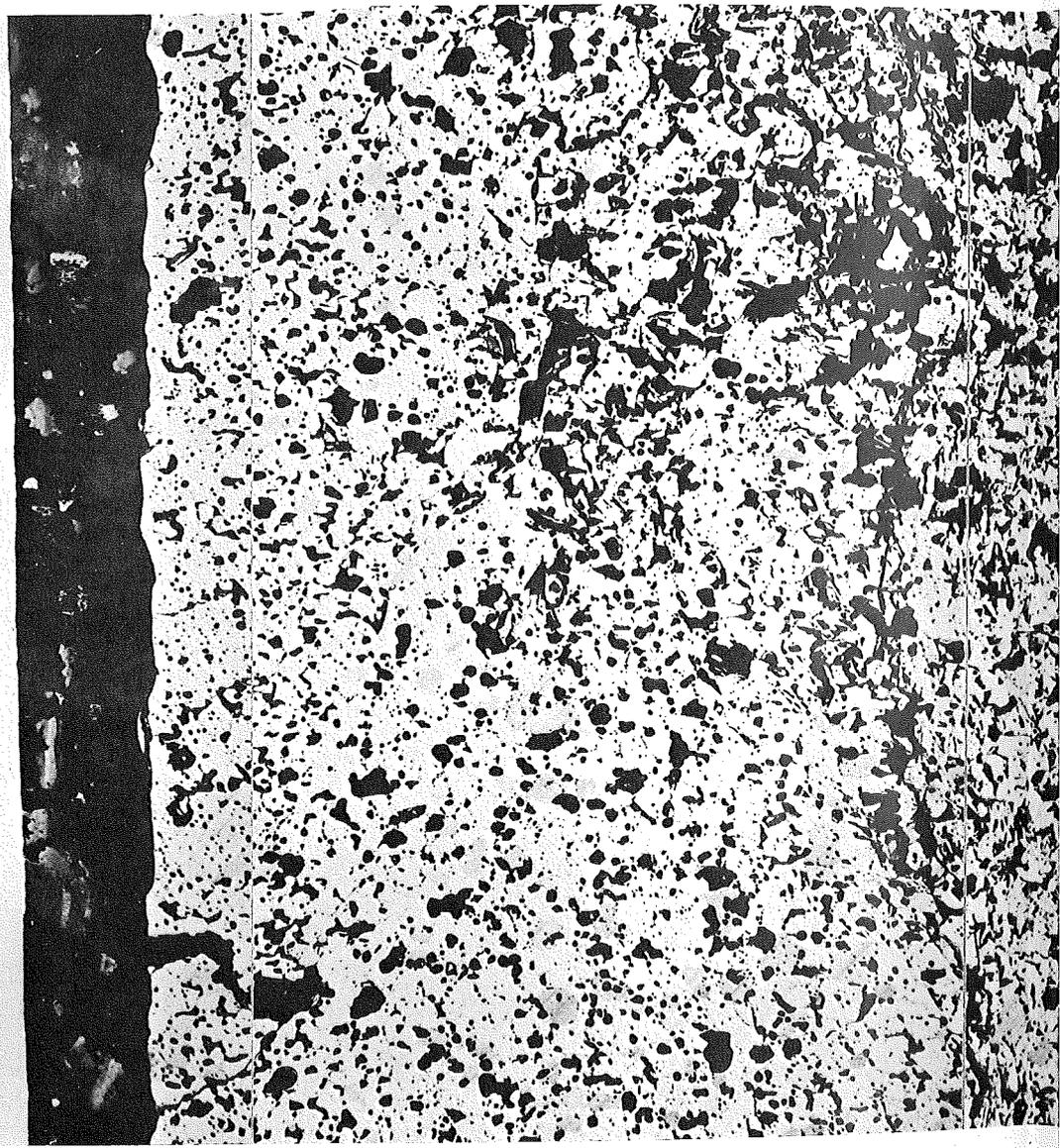
Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 10,0 mm
Wandstärke : 0,55 mm

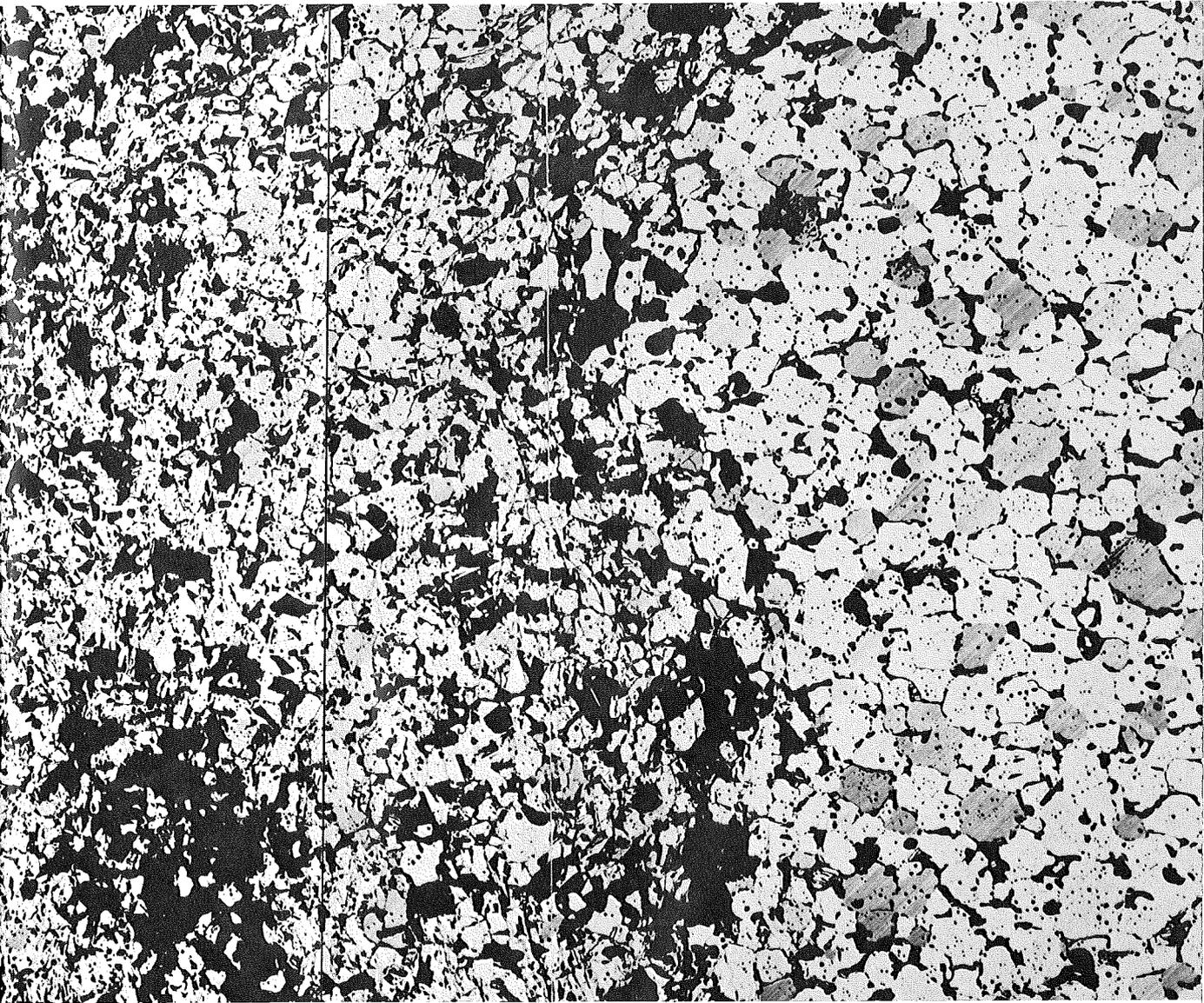
Geometrie :

Länge des Prüflings : 210 mm
Länge der Brennstoffsäule : 150 mm
Radiale Spaltweite : 125 μ m
Gasbindung : Helium

Bestrahlung :

Einrichtung : FR 2-He-Loop
Dauer : 337,5 h
Ende : 29.1.1971
Rechn. Abbrand mittl. : entfällt
Stableistung max./mittl. : 1000 W/cm

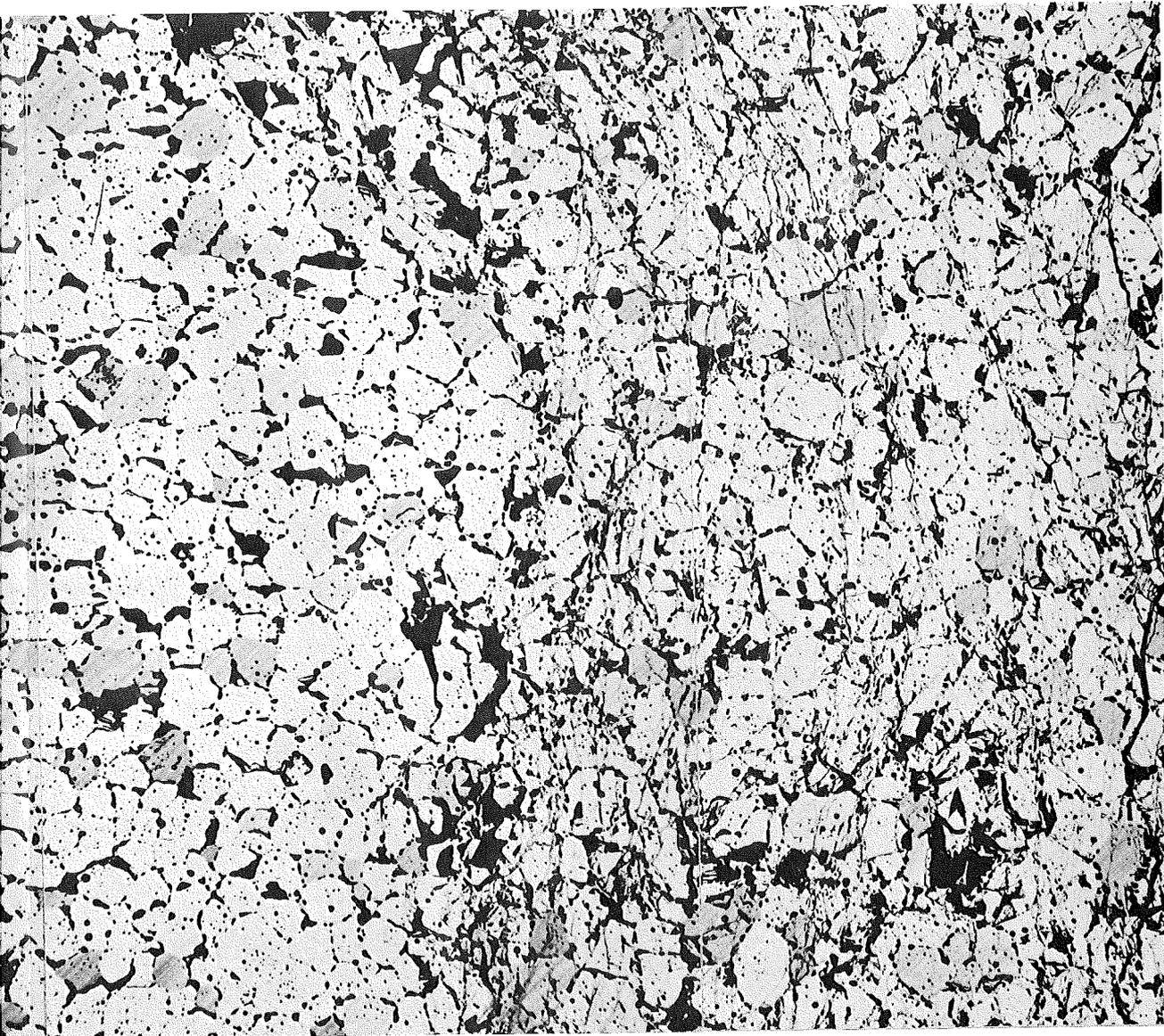




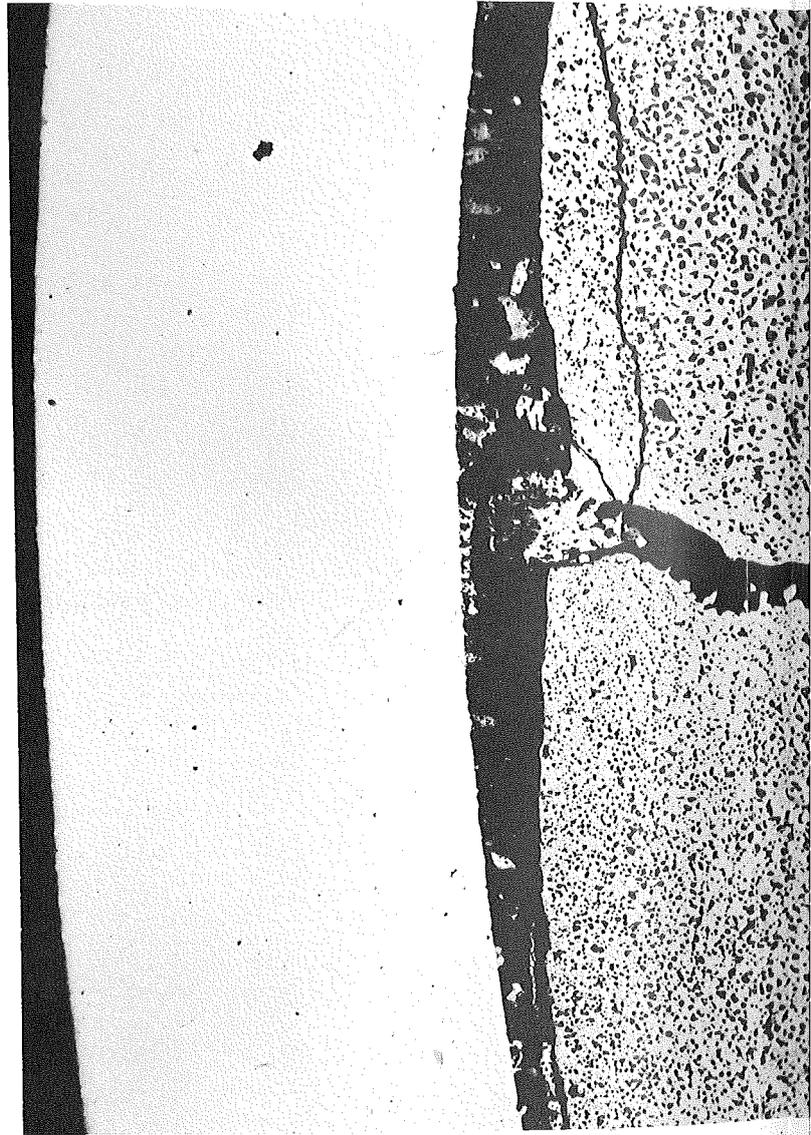
-1/71-

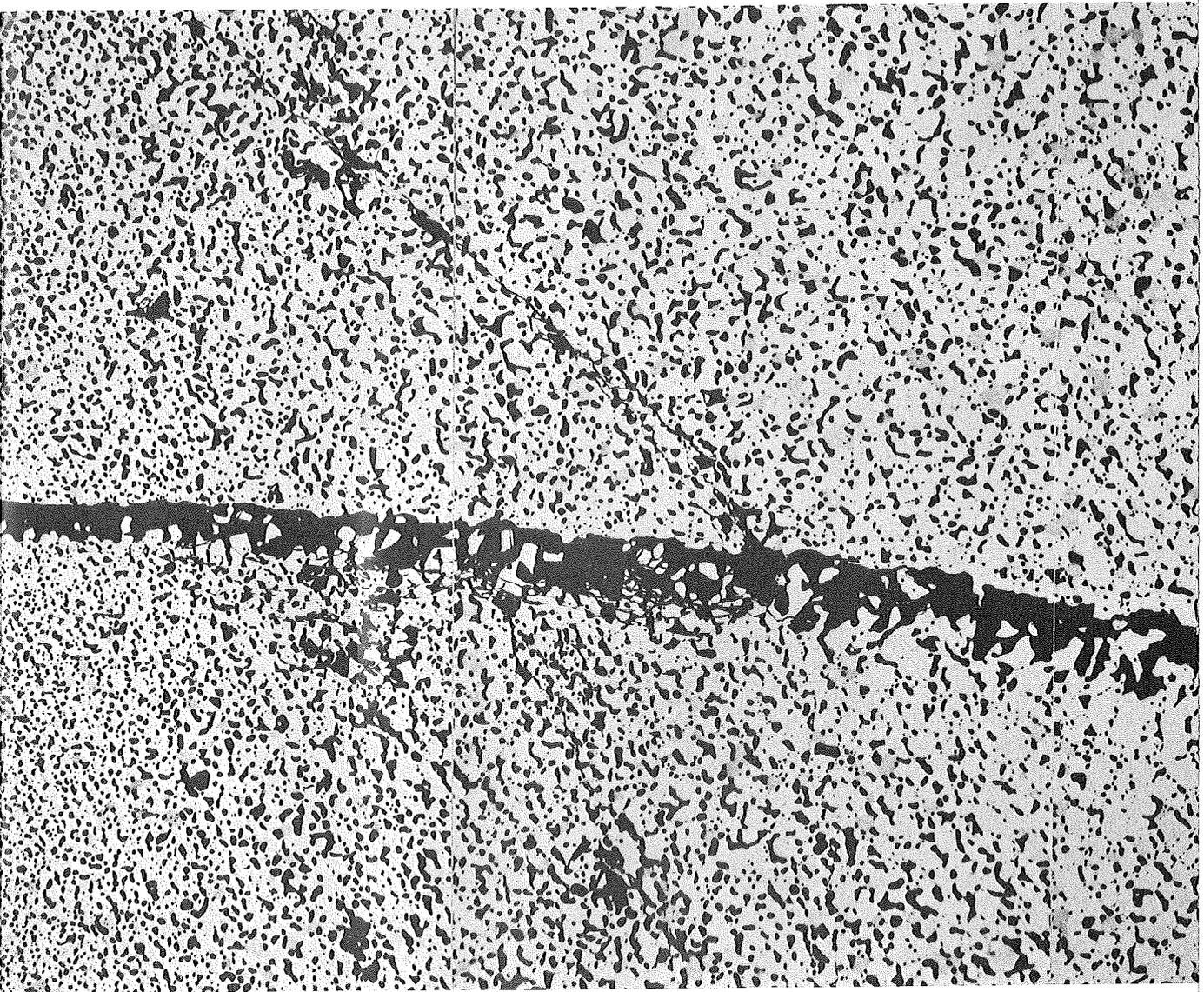
zu Prüfling L4-8

A1



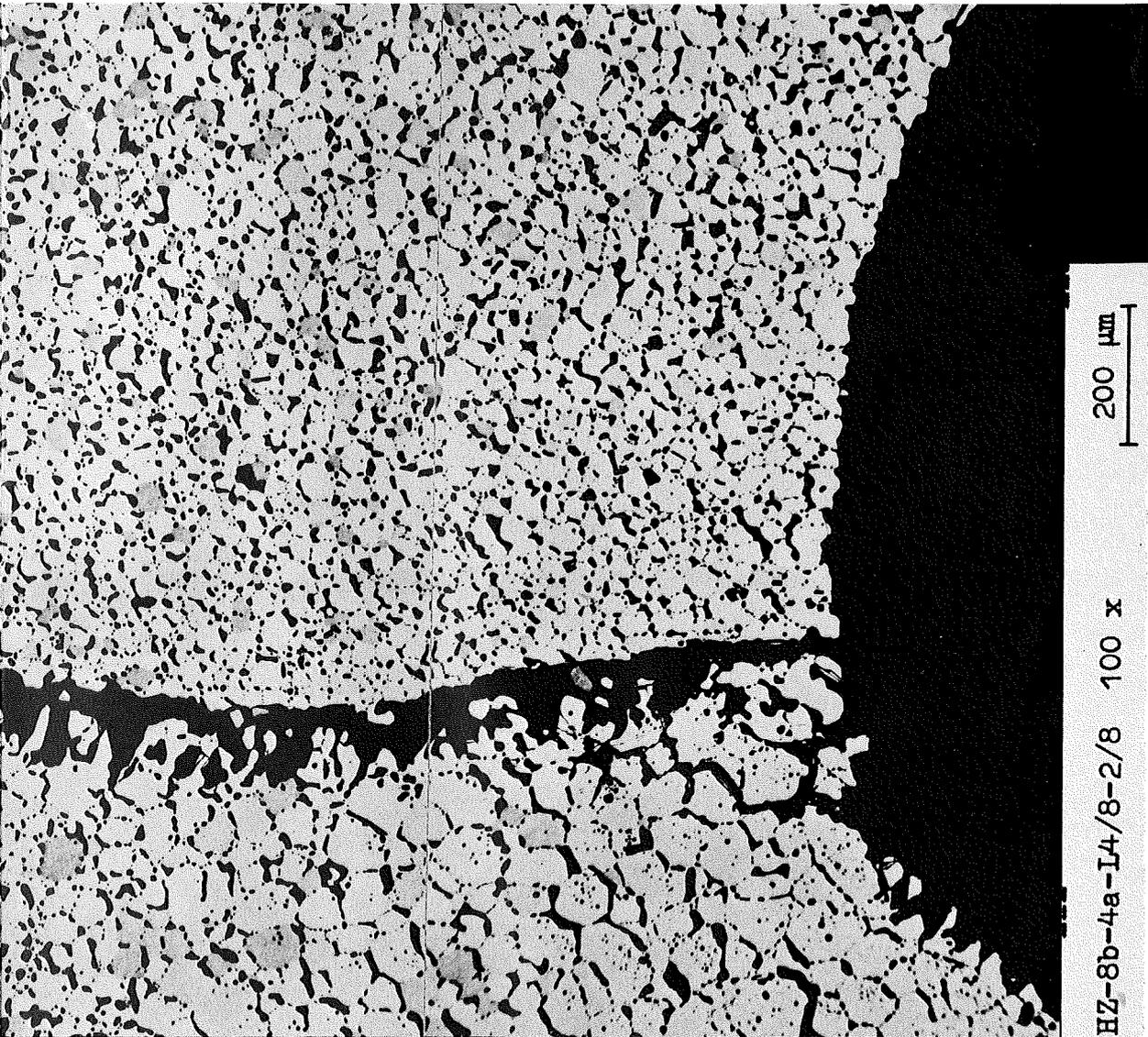
200 μm



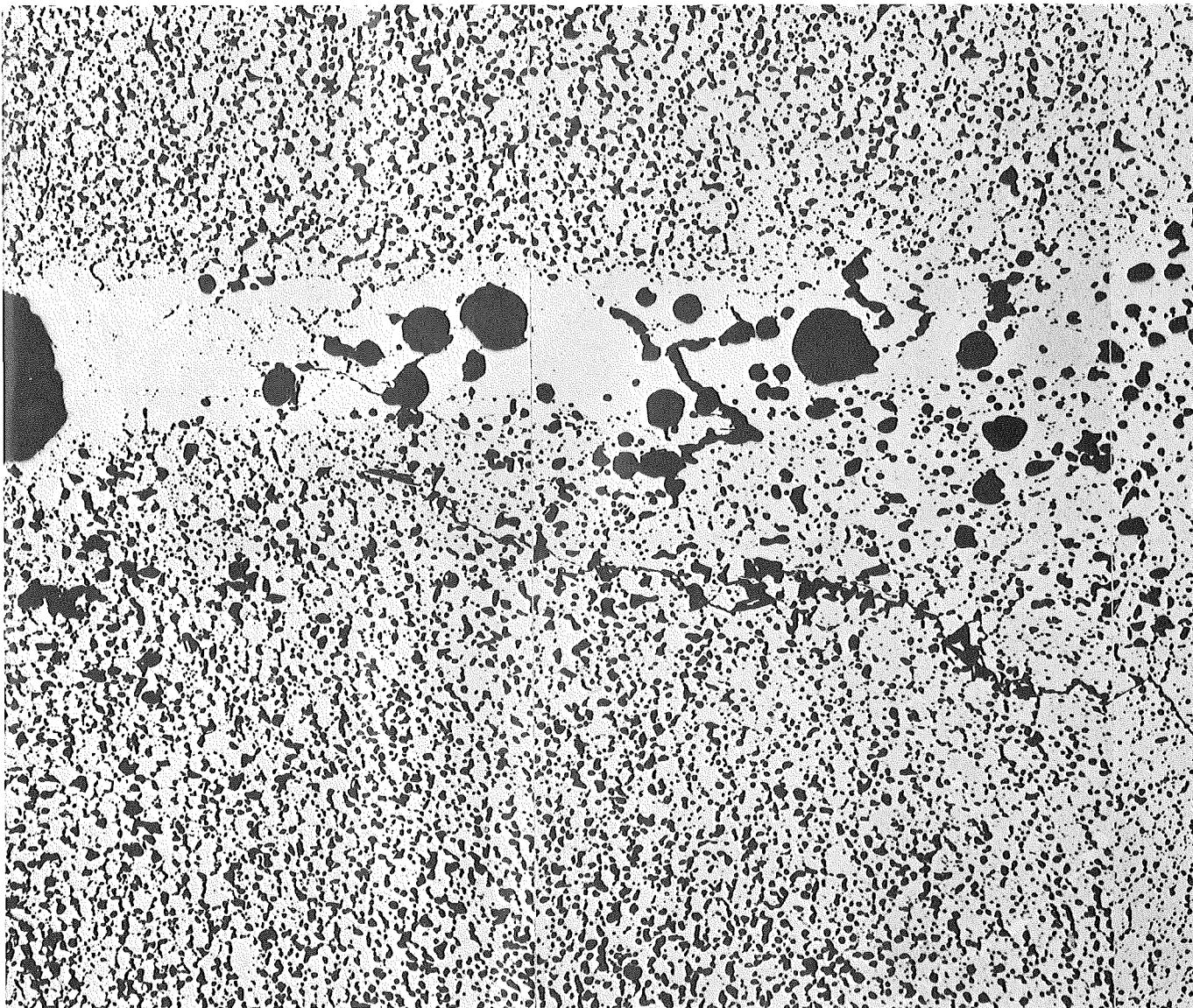


zu Prüfling L4-8

A2



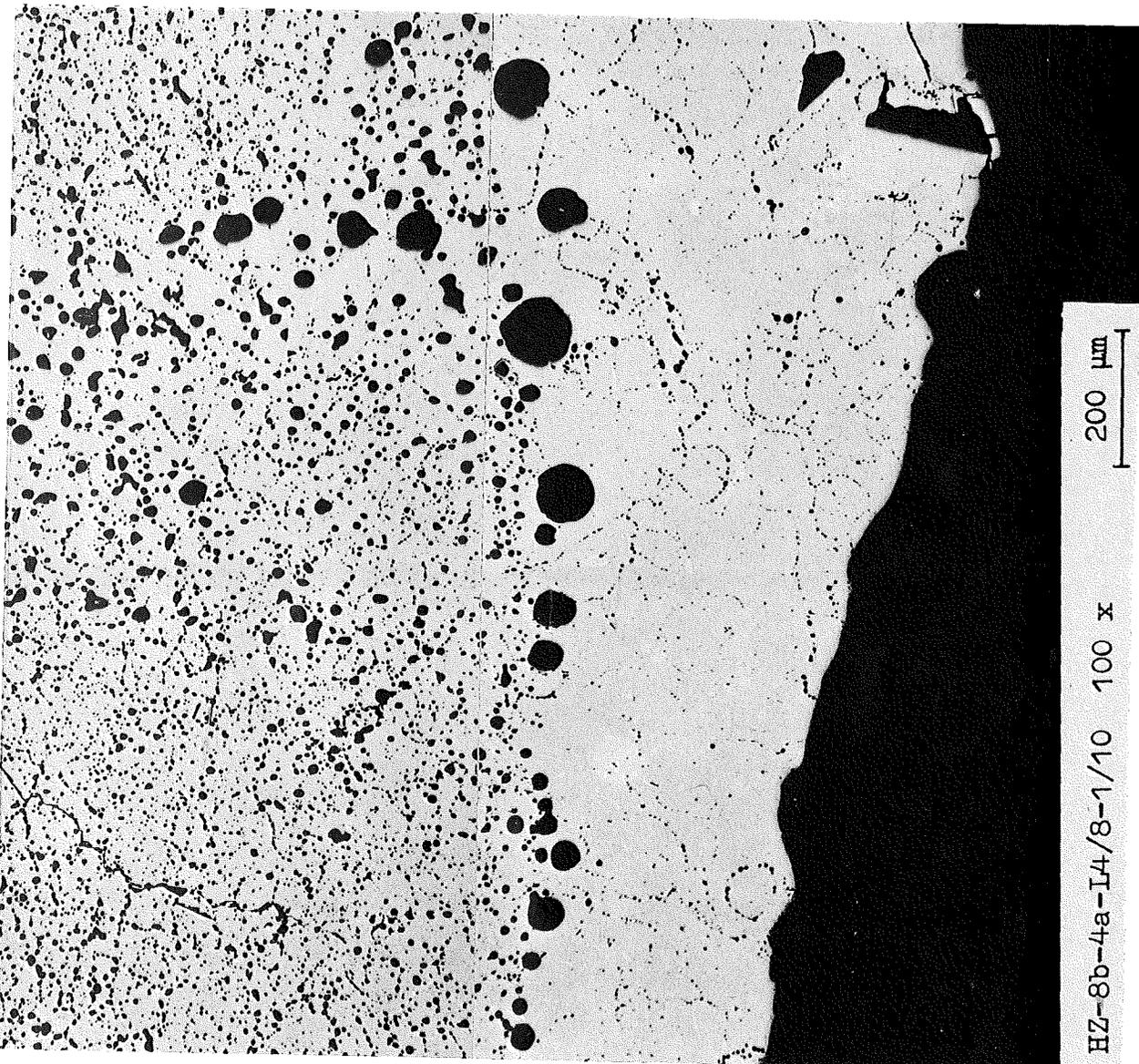




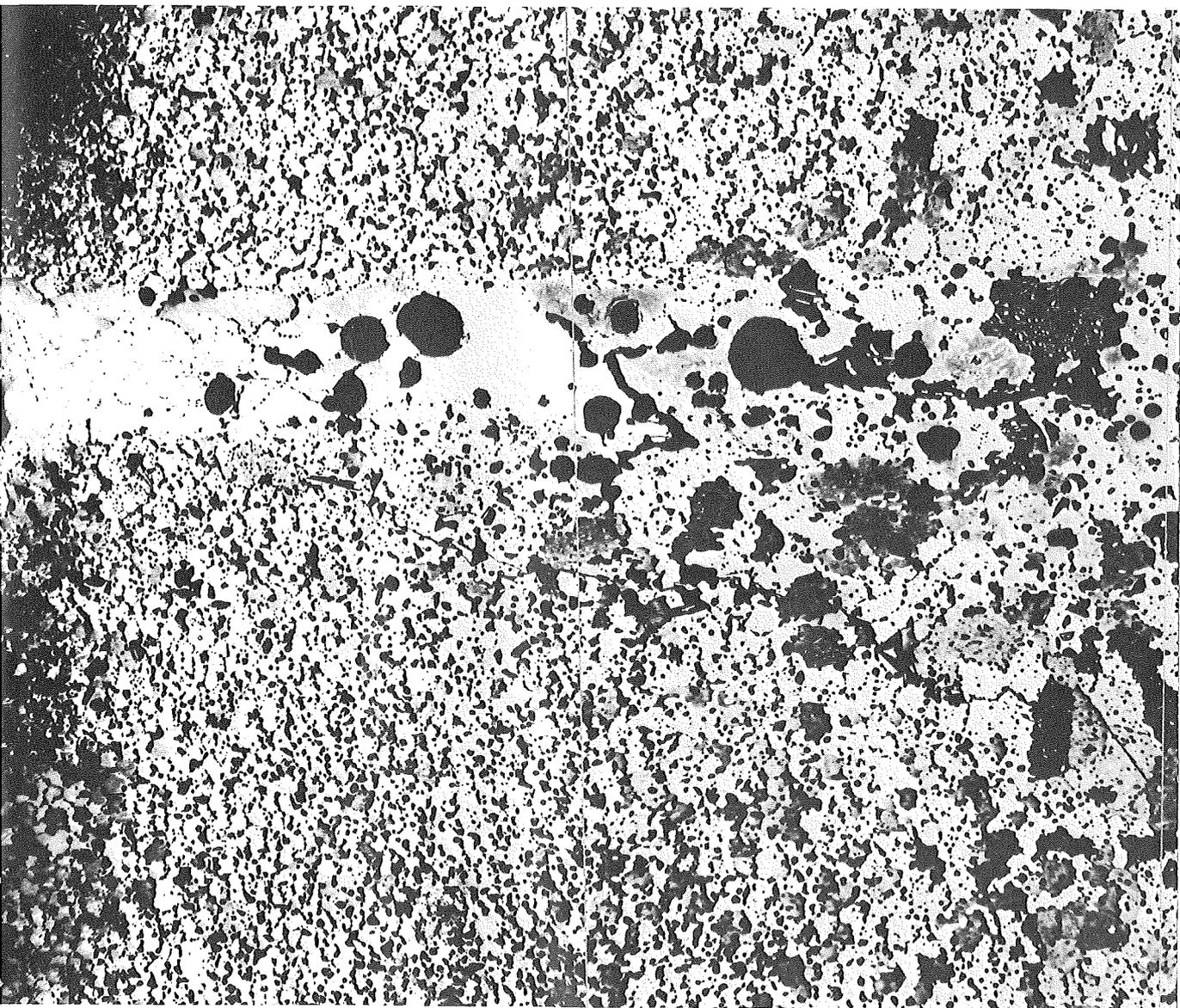
-1/77-

zu Prüfling L4-8

A3



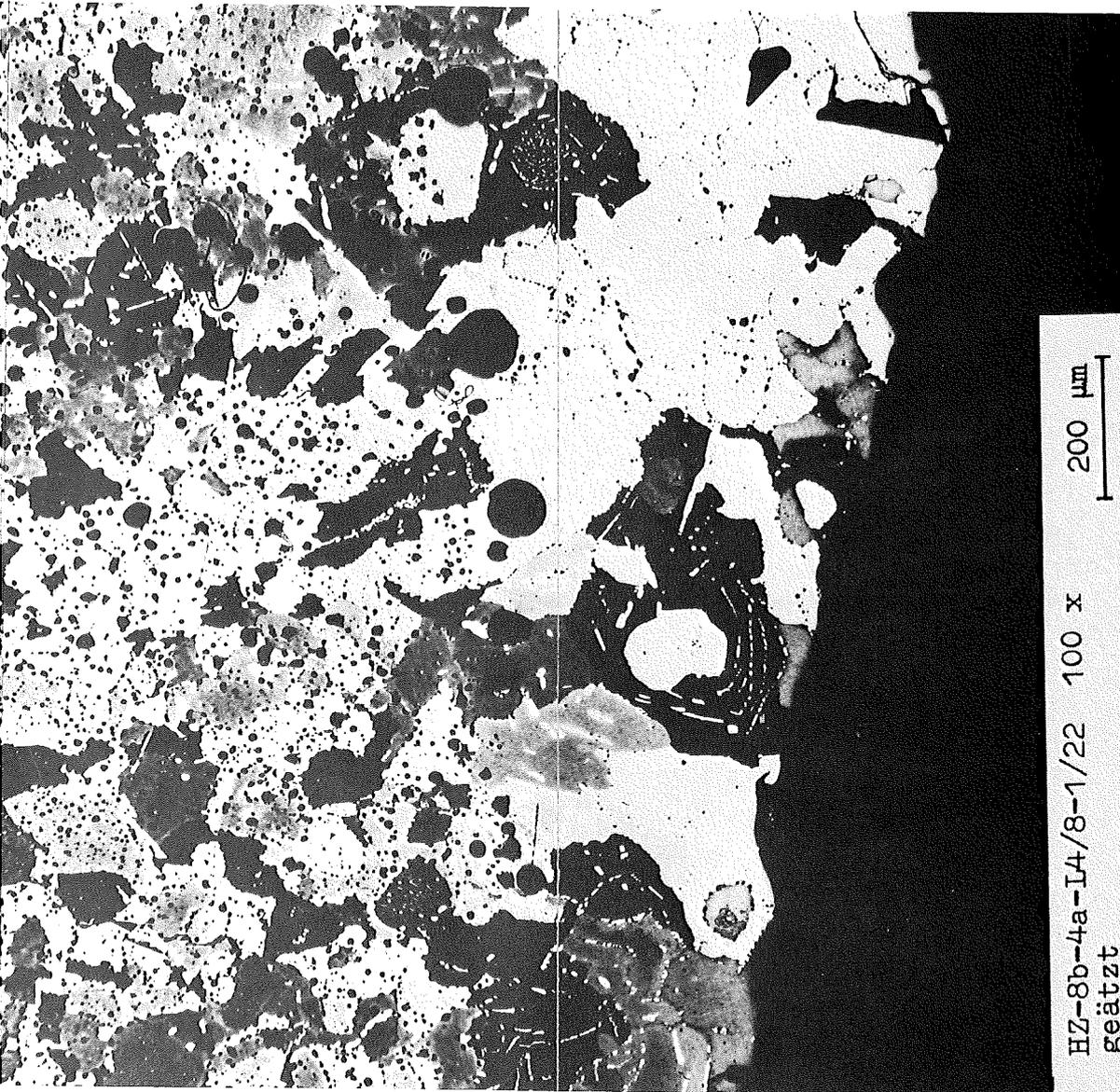




- 1/79 -

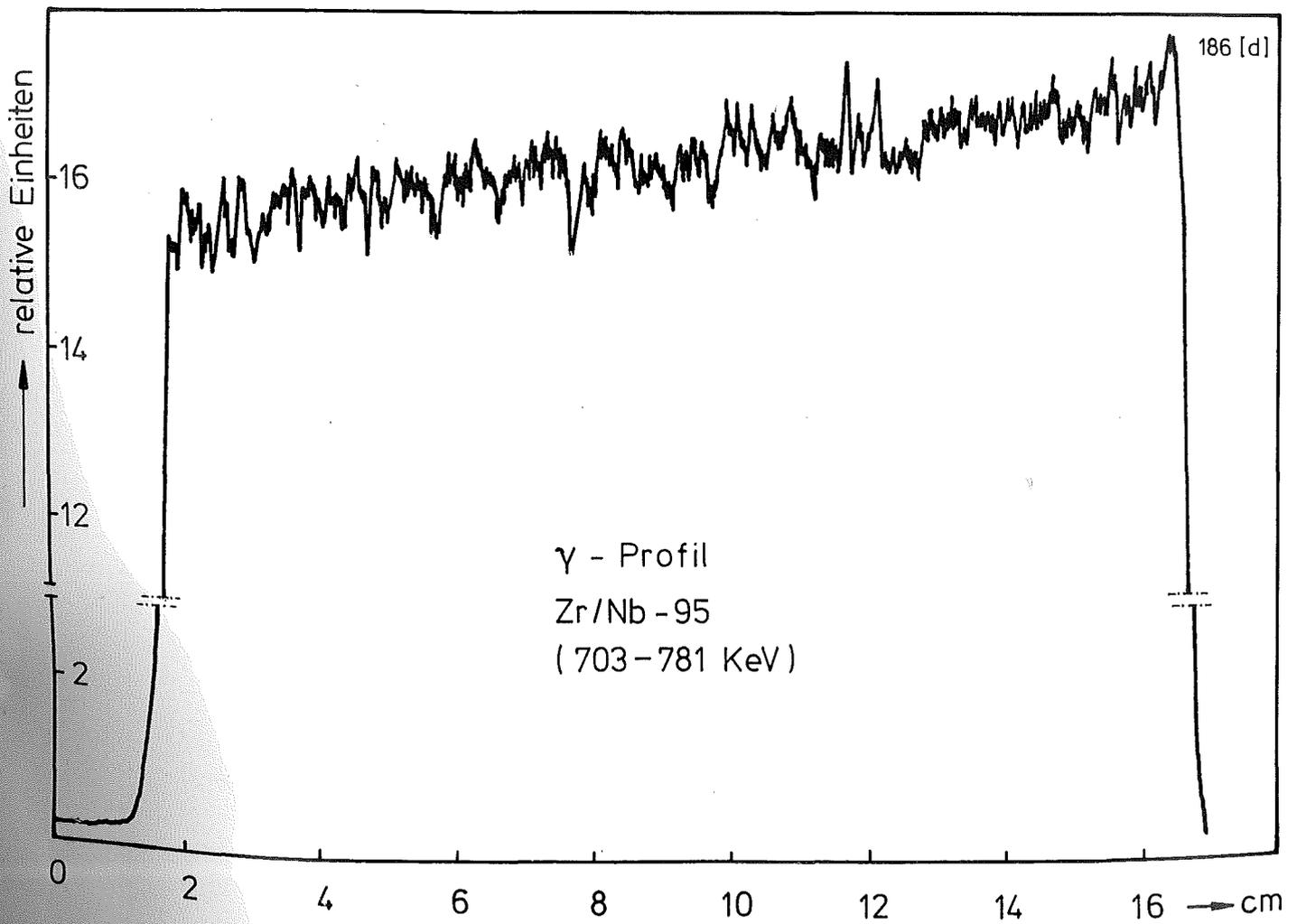
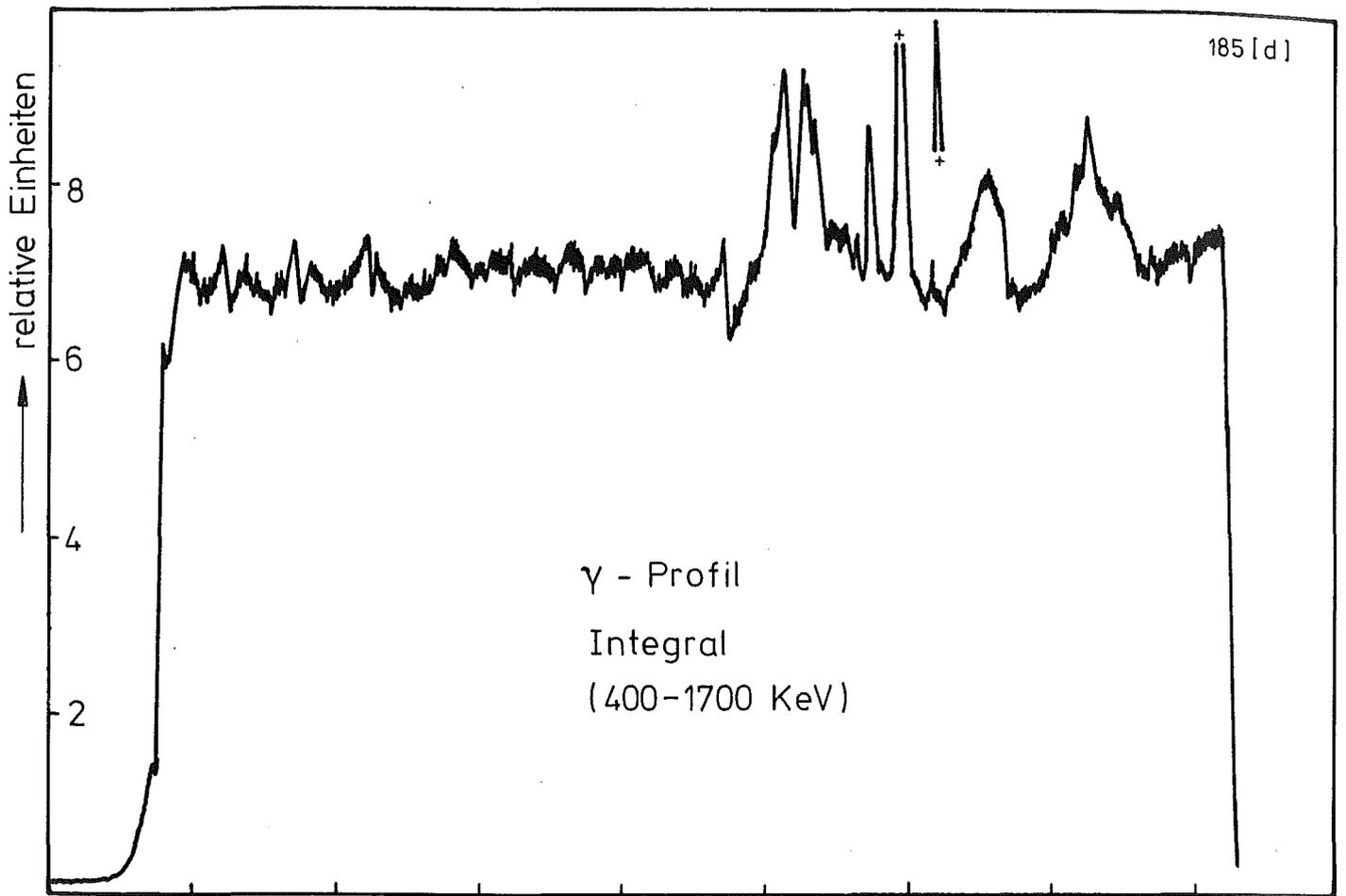
zu Prüfling L4-8

A3



geätzt

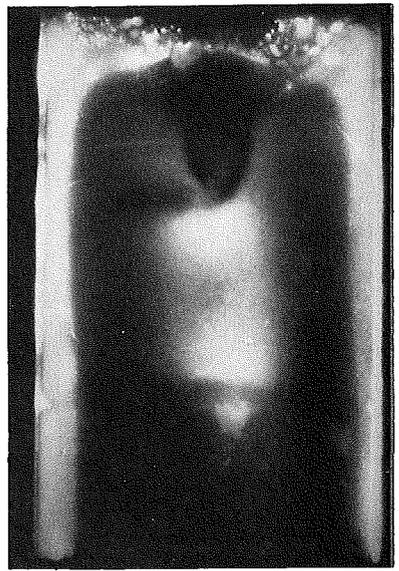
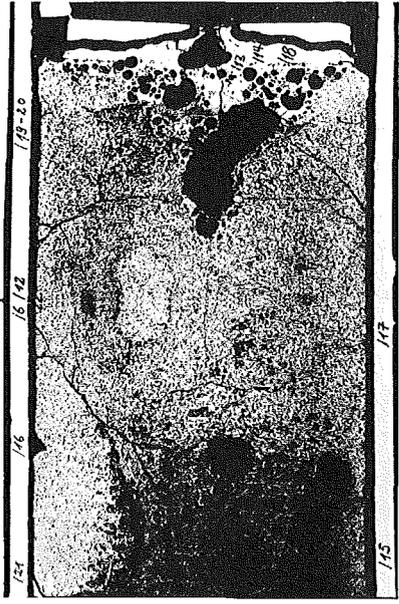
/6



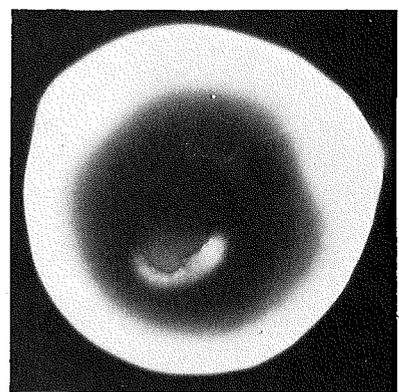
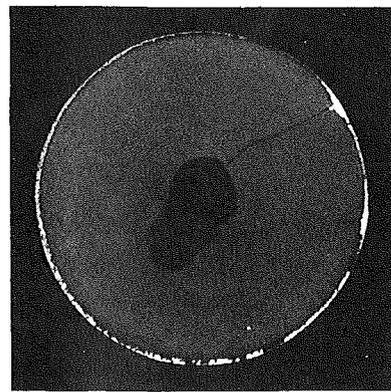
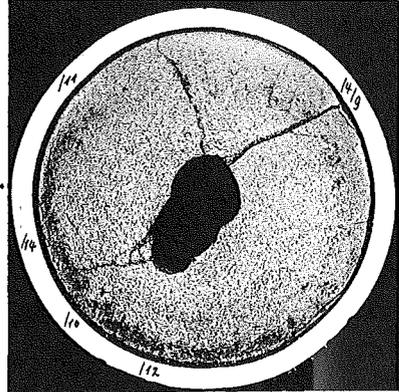
A

B

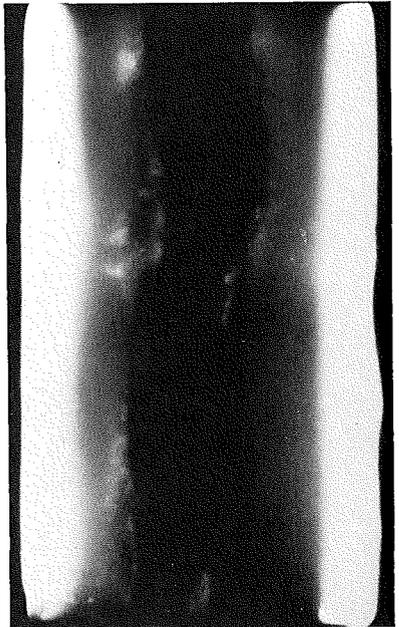
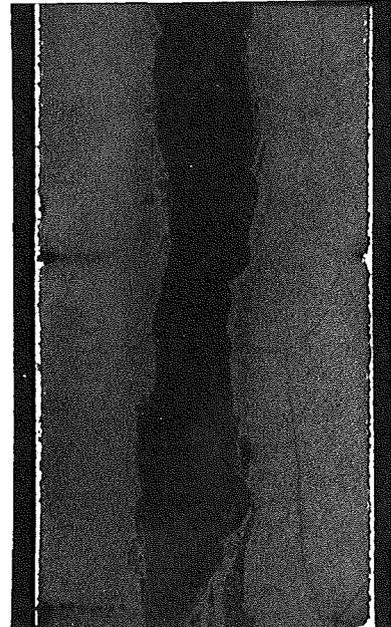
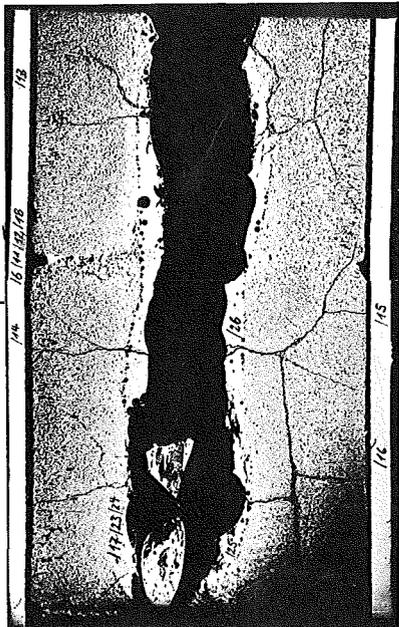
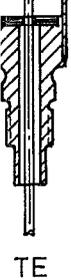
C



1

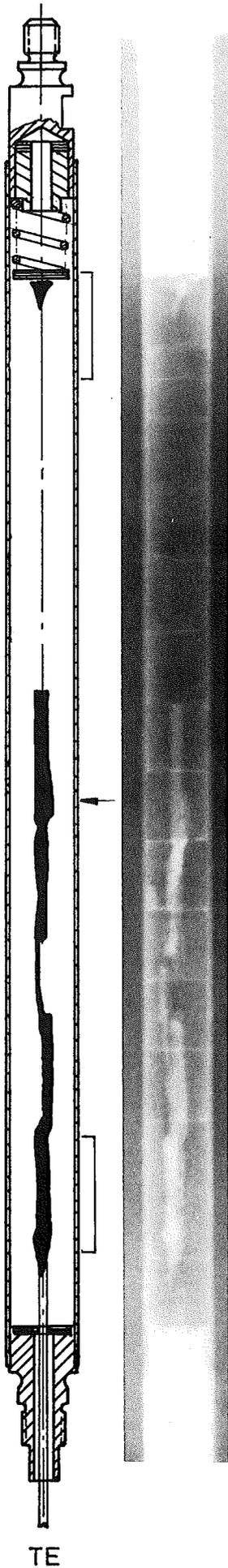


2



3

1mm



Prüfling L 4-8

Brennstoff :

Form : Tabletten
Zusammensetzung : UC/PuC
Tablettendichte : 87 % th.D.

Hülle :

Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 10,0 mm
Wandstärke : 0,55 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 210 mm
Länge der Brennstoffsäule : 150 mm
Radiale Spaltweite : 300 µm
Gasbindung : Helium

Bestrahlung :

Einrichtung : FR 2-He-Loop
Dauer : 456 h
Ende : 16.4.1972
Rechn. Abbrand mittl. : entfällt
Stableistung max./mittl. : 1006 W/cm