

KfK 2947
Mai 1980

**Auslegung, Bestrahlung
und Nachuntersuchung
der (U, PU) C-Prüflinge
der Kapselversuchsgruppe
FR 2-6d**

F. Bauer, W. Ernst, P. Weimar
Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

KfK 2947

Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung der (U,Pu)C-Prüflinge
der Kapselversuchsgruppe FR 2-6d

F. Bauer

W. Ernst

P. Weimar

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH., Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

Zusammenfassung

Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung der (U,Pu)C-Prüflinge der Kapselversuchsgruppe FR 2-6d

Es wurden - im Rahmen der Kapselversuchsgruppe FR 2-6d - 3 Mischkarbidbrennstäbe (92 % th.D. Tablettendichte) mit großem Radialspalt (250 μm) im thermischen Fluß des FR 2 bestrahlt. Das Hüllmaterial bestand aus dem Stahl der Werkstoff-Nr. 1.4988. Die Standzeit im Reaktor betrug max. 680 Tage, der Abbrand max. 7,4 %. Die Stäbe waren an der Hülloberfläche mit 6 Thermoelementen bestückt.

Während der Bestrahlung in der NaK-Kapsel konnten keine nennenswerten Unregelmäßigkeiten der Temperaturanzeige festgestellt werden. Bei dem Entladen der Kapsel in den Karlsruher Heißen Zellen stellte sich heraus, daß alle 3 Stäbe z.T. beachtliche Hüllrisse aufwiesen.

Die Profilometrie der Stäbe zeigte Durchmesserzunahmen von 4,5 bis 6,0 %. Die Aufkarburierungswerte der Hüllen lagen in der bisher beobachteten erträglichen Größenordnung für Stäbe, die mit moderierter Stableistung gefahren wurden ($T_{\text{clad}} \approx \leq 600^{\circ}\text{C}$). Die keramografische Untersuchung erbrachte keine neuen Erkenntnisse im Vergleich zu den Beobachtungen der übrigen Stäbe dieser Serie (KfK 2577).

Abstract

Design, irradiation and post-irradiation examination of the (U,Pu)C fuel pins of the test group FR 2-6d

In the frame of the capsule group 6d three mixed carbide pins (pellet-density 92 % T.D.) with a big radial gap (250 μm) were irradiated in the thermal neutron flux of FR 2. The cladding material consisted of the austenitic steel No. 1.4988. The exposure time in the reactor was up to 680 days, the burnup was 7.4 at %. The pins were instrumented on their surface with 6 thermocouples each. During irradiation in the NaK capsule no bigger irregularities in temperature readings were found. During dismantling in Karlsruhe Hot Cells the capsules it was found that all 3 pins showed cracks on their clads. The profilometry of the pins showed diameter increases from 4.5 to 6.0 %. The carburization of the cladding proved the same tolerable magnitude as found for pins irradiated with moderate rod powers ($T_{\text{clad}} \leq 600^{\circ}\text{C}$). Comparing ceramography with that of other pins of the same capsule group (KfK 2577) no bigger differences in structure were found.

I n h a l t :

1. Einleitung
2. Aufgabe und Ziel des Experiments
3. Auslegung
 - 3.1 Auslegungsdaten
 - 3.2 Thermische Auslegung
 - 3.3 Mechanische Auslegung der Brennstäbe
4. Spezifikationen
 - 4.1 Brennstoffspezifikation
 - 4.2 Hülle
 - 4.3 Brennstab
5. Herstellung
 - 5.1 Brennstoff
 - 5.2 Brennstab
6. Bestrahlungseinrichtung
7. Ablauf der Bestrahlung
 - 7.1 Reaktorzyklen und Neutronenfluß
 - 7.2 Temperatur und Stableistung
8. Zerstörungsfreie Nachuntersuchung
 - 8.1 Äußere Vermessung
 - 8.2 Durchleuchtung
 - 8.3 Gamma-Profile
9. Zerstörende Nachuntersuchung
 - 9.1 Spaltgase
 - 9.2 Keramografie
10. Diskussion der Ergebnisse

Literatur

Anhang I

1. Einleitung

Als Vorläufer verschiedener Bündelexperimente im DFR, PFR und in der KNK stellt die Versuchsgruppe Vg.6 einen breit angelegten Parametertest dar, bei dem erste Ergebnisse zum Schwellverhalten, zur Spaltgasfreisetzung und zur Verträglichkeit zwischen Brennstoff und Hülle in Abhängigkeit der interessierenden Parameter gewonnen werden sollen. Es handelt sich dabei um einen Kapselversuch im FR 2, also im thermischen Fluß. In der folgenden Übersicht werden die 4 Versuchsgruppen des Experiments Vg. 6 dargestellt.

Experiment	Vg.6a	Vg.6c	Vg.6d	Vg.6e
Zahl der Prüflinge	7	6	3	3
Bindung	He	Ar	He	Na
Brennstoff:				
Pu/U+Pu (%)	15	15	15	15
Tabl.-Durchmesser (mm)	8,85	8,81	8,40	8,40
Sinterdichte (% th.D.)	83/87	85/88	92	92
Schmierdichte (% th.D.)	82/86	83/86	82	82
Spaltbreite diam. (µm)	50	90	500	500
Hülle:				
Werkstoff	1.4988	1.4988	1.4988	1.4988
Wandstärke (mm)	0,55	0,55	0,55	0,55
Bestrahlungsbedingungen:				
lin. Stableistung (W/cm)	1100-1400	1200	800-1000	800-1200
max. Hülltemperatur (°C)	650	600	450-550	450-600
max. Abbrand (MWd/kg Me)	13-48	23-70	70/80	70

Die Nachuntersuchungsergebnisse der Versuchsgruppen 6a und 6c wurden bereits in KfK 2577 /1/ dokumentiert.

Der vorliegende Bericht beinhaltet alle Einzelheiten von Auslegung, Spezifikation und Prüflingsherstellung der Vg. 6d. Weiterhin werden der Bestrahlungsablauf sowie die zerstörungsfreie und zerstörende Nachuntersuchung beschrieben.

In der folgenden Übersicht ist der Zeitablauf des Experiments dargestellt. Es sind dabei die für die einzelnen Experimentabschnitte verantwortlichen Stellen und Personen angegeben.

Zeitraum	Teilarbeit	Institution / Beteiligte
1969/70	Versuchsauslegung	AEG-Telefunken, TU-I A. Gerken, R. von Jan, H. Meisner, K. Richter
1972/74	Herstellung des Brennstoffs Herstellung der Stäbe Organisation der Bestrahlung und Betreuung	TU-I / K. Richter Fa. ALKEM / AEG IMF / G. Senski, H. Häfner
1974/77	Bestrahlung im FR 2	Abt. Reaktorbetriebe FR 2
1979	Organisation der Nachuntersuchung und Betreuung	IMF / P. Weimar
1979	Zerstörungsfreie Nachuntersuchung	RBT/HZ / H. Enderlein, M. Scheeder
1979	Keramografie	RBT/HZ / S. Weih
1979/80	Dokumentation der Ergebnisse	IMF / F. Bauer, W. Ernst, P. Weimar

2. Aufgabe und Ziel des Experiments

Im Rahmen des PSB-Bestrahlungsprogramms für Karbid-Brennstäbe wurden im thermischen Fluß des FR 2 drei Stäbe mit (U,Pu)C-Brennstoff der Versuchsgruppe 6d bestrahlt /2/. Entsprechend dem niederen Flußniveau im FR 2 wurde die Bestrahlung bei ca. 1000 W/cm durchgeführt, was - bezogen auf den Temperaturabfall im Brennstoff - bei einer Flußabsenkung von 0,67 einer Stabileistung von 670 W/cm im schnellen Fluß entspricht. Dadurch wird die Aussagekraft der Experimente für spätere Bestrahlungen unter realistischen Schnellbrüterbedingungen etwas eingeschränkt.

Das Versuchsziel lag darin, erste Erfahrungen über das Verhalten des gasgebundenen hochdichten Karbidkonzepts zu gewinnen. Im Vordergrund stand dabei die Frage nach dem Brennstoffschwellen und der Spaltgasfreisetzung.

Da bei der geplanten Bestrahlung im FR 2 der maximale Abbrand zweckmäßigerweise auf 8 % FIMA zu begrenzen war, wurde eine hohe Tablettendichte und eine große Fertigungsspaltbreite gewählt. Inwiefern eine Erhöhung der Brennstofftemperatur sich günstig auf das Brennstoffschwellen auswirkt, mußte durch den vorliegenden Versuch beantwortet werden.

Zum einen soll sich zwar durch diese Maßnahme die Spaltgasfreisetzung steigern lassen, zum andern wird aber das Wachstum der Blasen und Poren im Brennstoff durch höhere Diffusion von Spaltgasen und geringere mechanische Festigkeit desselben beschleunigt. Durch die Wahl einer sehr kriechfesten Hülle hoffte man, das Schwellen des Brennstoffs in die Porosität hinein zu lenken.

3. Auslegung

Die Auslegung der Versuchsgruppen 6a, 6c, 6d und 6e wurde auf der Grundlage der 1969 bekannten Stoffdaten für karbidische Brennstoffe und des verwendeten Hüllmaterials 1.4988 mit Hilfe von einfachen Handformeln und mit Hilfe des Rechenprogramms CRASH /3/ durchgeführt. Sie ist in /2/ zu finden.

3.1 Auslegungsdaten

Die für die Auslegung und die Spezifikation erforderlichen Grunddaten sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

3.2 Thermische Auslegung

Die zur Auslegung verwendeten Stoffdaten für Wärmeleitfähigkeit und thermische Dehnung von Brennstoff und Hülle sind in /2/ detailliert erläutert, so daß hier darauf verzichtet werden kann. In Ermangelung eines zuverlässigen Modells zur Berechnung der Wärmedurchgangszahl im Spalt zwischen Brennstoff und Hülle stützt man sich auf experimentelle Daten, die allerdings noch einen großen Streubereich aufweisen.

$$h_{\text{gap}}^{\text{He}} = 1,0 - \underline{1,3} - 2,0 \text{ W/cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Dabei ist ein leichter Kontaktdruck angenommen.

Tabelle 1: Auslegungsparameter der Kapselversuchsgruppe 6d im FR 2

Brennstoff:

Material (U,Pu)C unter Vakuum hergestellt

Anreicherung:

Pu (Gew.-%)	15
Theoretische Dichte (g/cm ³)	13,6
Tablettendichte (% th.D.)	92
Tablettendurchmesser (mm)	8,4
Tablettenhöhe (mm)	10,0

Hülle:

Material	1.4988
Außendurchmesser (mm)	10,0
Wandstärke (mm)	0,55

Brennstab:

Bindung	He
Fülldruck (at)	1
Schmierdichte (% th.D.)	82
Radialspalt (µm)	250

Stabteilung:

Oberer Endstopfen (mm)	25
Spaltgasraum (mm)	128
Spaltstoff (mm)	300
Rh-Plättchen (mm)	1
Unterer Endstopfen (mm)	27
Gesamtlänge (mm)	475

Betriebsbedingungen:

Nominelle Stableistung (W/cm) ⁺	1000
Maximale Stableistung (W/cm) ⁺⁺	1150
Maximale Hülltemperatur innen (°C)	725
Abbrand (MWd/kg Me)	80 (45)

+)
+)
()

örtl. Maximum der über den Zyklus gemittelten Stableistung
max. zulässige Stableistung zu Beginn eines Zyklus
spezifizierter Wert

Bei einer bestimmten Hüllaußentemperatur T_{Ha} ist die Brennstoffrandtemperatur T_{fa} durch folgende Gleichung bestimmt:

$$T_{fa} = T_{Ha} + \frac{\chi}{2 \cdot \pi} \left[\frac{1}{\lambda_H} \ln (r_{Ha}/r_{Hi}) + \frac{1}{r_{Hi} \cdot h_{gap}} \right]$$

T_{Ha}	=	Hüllaußentemperatur
χ	=	Stableistung
r_{Ha}	=	Hüllaußenradius
r_{Hi}	=	Hüllinnenradius
h_{gap}	=	Wärmedurchgangszahl im Spalt

Die Flußabsenkung wurde mit 0,67 angenommen.

3.3 Mechanische Auslegung der Brennstäbe

Die Hüllrohre werden durch Innendruck und durch thermische Spannungen zyklisch beansprucht. Der Temperaturabfall in der Hülle beträgt 94°C bei einer Stableistung von 1150 W/cm . Eine Innendruckbelastung kommt sowohl aufgrund des Spaltgasdruckaufbaus als auch aufgrund von Festkörperdruck zustande. Der Spaltgasdruckaufbau ist eine Funktion der Freisetzung. Für die He-gebundenen Stäbe wird eine solche von 20 % angenommen. Bei einem Zielabbrand von 45 MWd/kg Me hat man einen Gasdruck von 15 bar. Über den Brennstoffschwelldruck läßt sich noch keine exakte Aussage machen. Bei der Berechnung der Hüllrohrverformung nach CRASH /3/ wurde deshalb der Innendruck (Gas + Schwellen) variiert. Die Materialdaten sind dabei aus /4/ übernommen. Der Innendruck wird als linear mit dem Abbrand wachsend angenommen. Die Beurteilung des Hüllrohrstandzeitverhaltens erfolgt nach drei Kriterien:

1. max. Hüllrohraufweitung durch Kriechen
2. max. plastische Verformung einer Randfaser
3. max. Wechseldehnung einer Randfaser je Zyklus (gegen Ermüdungsbruch).

Durch die max. Hüllrohraufweitung wird im wesentlichen der zulässige Innendruck bestimmt. Die Kriterien 2 und 3 erlauben eine Beurteilung der thermischen Spannungen.

Die Ergebnisse der CRASH-Rechnungen für eine Standzeit von 8400 h entsprechend einem Zielabbrand von 45 MWd/kg Me sind in Tabelle 2 aufgeführt und zwar für Innendrucke von 40, 80, 120 und 160 bar.

Tabelle 2: Ergebnisse der CRASH-Rechnung für eine Standzeit von 8400 h (45000 MWd/t Me Abbrand)

Innendruck (Gas + Schwellen) am Ende der Standzeit (bar)		40	80	120	160
Hüllrohraufweitung	tats. %	0,027	0,044	0,070	0,15
durch Kriechen	zul. %	0,15	0,15	0,15	0,15
plast. Verformung	tats. %	0,054	0,054	0,054	0,054
im 1. Zyklus	zul. %	0,2	0,2	0,2	0,2
Wechseldehnung je	tats. %	0,1	0,1	0,1	0,1
Zyklus	zul. %	1	1	1	1

Dabei sind zulässige und berechnete Dehnungen einander gegenübergestellt. Gemäß den Ergebnissen der Rechnung sollten die thermischen Spannungen allein noch keine Gefahr für die Hülle darstellen. Die zulässige Kriechaufweitung der Hülle wird bei einem Innendruck von 160 bar erreicht. Dies bedeutet, daß sich bei He-Bindung ein Schwellendruck von maximal 145 bar aufbauen darf.

4. Spezifikationen

Die Einhaltung der Spezifikationen wird durch Prüfprotokolle nachgewiesen.

4.1 Brennstoffspezifikation

- Tablettendichte 92 % th.D.
- Tablettendurchmesser 8,40 mm
- rad. Spalt 250 µm
- Brennstofflänge 300 ± 2 mm

- Tablettenlänge	10 \pm 1 mm
- Anreicherung	Pu/U+Pu = 15 % \pm 0,5 U = Natururan
- Isotopenzusammensetzung:	Pu-239 90,9 \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
- Chemische Zusammensetzung	Produkt II 15 % M ₂ C ₃
- Kohlenstoffäquivalent	C + $\frac{12}{16}$ O + $\frac{12}{14}$ N Produkt II 4,75 - 5,10 \pm 0,1 Gew.-%
- Freier Kohlenstoff	0 % (Leitfähigkeitsmessung)
Grenze Analysengenauigkeit	\approx 500 ppm
- U-Pu-Metall	0 %
Grenze Analysengenauigkeit	(Metallografie)
- MC ₂	0 %
Grenze Analysengenauigkeit	(Metallografie)
- Sauerstoffgehalt	(Gaschromatographie)
Produkt II	< 4000 ppm
- Stickstoffgehalt	(Gaschromatographie)
Produkt II	< 500 ppm
- Metall. Verunreinigungen (ppm \pm 15 % rel.) (Emissionsspektrographie)	Total < 2000 ppm jedoch jedes Element < 500 ppm Ausnahme Fe < 2000 ppm und Bor < 2 ppm
- Boräquivalent	< 5 ppm
Chlor- und Fluorgehalt	< je 20 ppm
- U-Pu Homogenität	(α -Autoradiografie)
Pu-Partikel	< 300 μ m

4.2 Hülle

Die Rohre sollen nach einem einheitlichen Schema durchgehend numeriert werden. Für jedes Rohr wird ein Prüfzeugnis erstellt. Die Prüfzeug-

nisse des Herstellerwerkes müssen den Werksabnahmezeugnissen nach DIN 50049/3B entsprechen und von unabhängigen Sachverständigen ausgestellt werden.

Material:

X8NiMoVnb 1613 (Werkstoff Nr. 1.4988)

Herstellungsverfahren:

Das Material soll im Vakuum erschmolzen und umgeschmolzen werden.

Chemische Zusammensetzung (Gew.-%):

- Kohlenstoff	max. 0,1
- Nickel	12,5 - 14,5
- Chrom	15,5 - 17,5
- Eisen	Rest
- Molybdän	1,1 - 1,5
- Niob	max. 10xC+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 %

Abmessungen:

Außendurchmesser $10,0 \pm 0,03$ mm oder $\leq 0,5$ % bzw. mit geeigneten pneumatischen oder mechanischen Verfahren kontinuierlich über die ganze Rohrlänge.

Innendurchmesser: $8,9 \pm 0,03$ mm oder $\leq 0,5$ %. Über die ganze Rohrlänge kontinuierlich mit pneumatischen, mechanischen oder elektromechanischen Verfahren.

Wanddicke: $0,55 \pm 0,03$ mm

Ovalität: Innerhalb der Außendurchmessertoleranz.

Wanddicken-Exzentrizität: $\leq 0,03$ mm, bezogen auf die Wanddicke, Messungen in jeweils 30 cm Abstand mit dem Ultraschall-Verfahren.

Geradheit: 1:1500, bezogen auf jeweils 30 cm Länge.

Oberflächenbeschaffenheit:

Rauhigkeit innen und außen: max. 2 μm (R_v)

Prüfung mit Perth-O-Meter (längs und quer).

Oberflächenriefen und Fehler: max. 20 μm oder kleiner 5 % der Wandstärke. Definition: Riefen \geq 10 mm lang; Fehler \leq 10 mm lang.

Prüfung mit Ultraschall-Vidigage-Verfahren in Längs- und Querrichtung mit folgenden vorgegebenen Testfehlern:

- Längsfehler: $\lambda = 10 \text{ mm}$
 $\chi = 60^\circ$
Tiefe: 5 % der Wandstärke

- Querfehler: umlaufend, innen und außen
 $\chi = 60^\circ$
Tiefe: 5 % der Wandstärke

Prüfgeschwindigkeit: Steigung der Prüfspirale ca. 1 - 2 mm,
Drehzahl ca. 2 /sec.

- Oberflächenrisse: nicht zulässig
Definition: Risse 10 % der Wandstärke

Prüfung mit Farbeindringverfahren, Diffutherm.

Oberflächenbeschaffenheit: Innere und äußere Oberfläche muß frei von Anlauffarben, Öl, Schmutz, Metallspänen und sonstigen Fremdkörpern sein. Prüfung mit geeigneten optischen Verfahren, z.B. ausgeleuchteter Großlupe bzw. Lichtschnittmikroskop.

Materialbedingungen

Vorbehandlung: 10 - 20 % kaltverformt - Wärmebehandlung

Korngröße: Mindestens ASTM 7 entsprechend ASTM E 112-63

Mechanische Eigenschaften: Zugfestigkeit, Streckgrenze, Bruchdehnung, max. und min. Werte bei Raumtemperatur und 650 $^\circ\text{C}$.

Spannungs- und Dehnungsdiagramm an mindestens 5 % der Rohre.

Innere Fehler: Kleiner 5 % der Wandstärke (Ultraschall-Vidigage).

Einschlüsse: Kleiner 0,05 mm oder 10^{-3} mm^2 .

Mit Ultraschall- Vidigage-Verfahren bzw. metallographisch, entsprechend Methode A ASTM 45-63, Tabelle I, Class I.

Abdrückversuch: nach DIN 50 104 mit ≤ 100 bar Druck.

Jedes Rohr wird mit Wasser auf ≤ 100 bar Innendruck während zwei Minuten geprüft. Es dürfen keine bleibenden Verformungen auftreten.

Querfaltversuch: Pro Rohr wird ein Stück von 25 mm geprüft. Die Prüfung und Begutachtung erfolgt nach DIN 50 136.

Aufweitversuch: Pro Rohr ein Versuch. Die Prüfung und Begutachtung erfolgt nach DIN 50 135.

4.3 Brennstab

Komponenten der Brennstäbe:

- Brennstoff:

Der Brennstoff aus (U,Pu) Mischkarbid-Sinterkörpern wurde vom TU-I in Form von fertigelegten 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. Der Brennstoff kann nur unter Schutzgas oder Vakuum gehandhabt werden.

Fertigung der Brennstäbe:

- Identifizierung:

Die fertigen Brennstäbe müssen den Angaben der Tabelle 1 unter 3.1 entsprechen.

Die Bezeichnung der Stäbe erfolgt an dafür vorgesehenen Flächen am unteren Endstopfen. Fertigungsbegleitkarten sollen angelegt werden. Die Nummern von Hülle und Brennstoffsäule sind für jeden Stab zu registrieren.

- Schweißen:

Alle Schweißungen sind nach dem neuesten Stand der Technik auszuführen. Die Schweißnähte sollen im Durchmesser nicht mehr als

0,2 mm erhöht sein. Die Zusammensetzung des Schutzgases ist anzugeben.

- Qualifikationsschweißungen:

In Vorversuchen ist festzulegen, ob unter Helium oder Argon geschweißt wird. In einer Versuchsreihe sind optimale Schweißnahtformen zu ermitteln. Zwecks Optimierung und zur Aufstellung einer Standardreihe sind die Schweißnähte röntgenografisch, nach dem Farbeindringverfahren und metallografisch zu untersuchen. Die Schweißparameter aller Schweißungen sind zu registrieren.

- Produktionsschweißungen:

Die Schweißparameter aller Schweißungen sind zu registrieren. Eventuelle Unregelmäßigkeiten sind gesondert auszuweisen.

- Gasfüllung:

Die gefüllten Brennstäbe sind unter leichtem Überdruck (800 - 850 Torr) mit trockenem 99,995 % He zu fluten. Im fertigen Brennstab soll der Edelgasgehalt 95 % betragen.

5. Herstellung

5.1 Brennstoff

Der Brennstoff wurde beim TU-I hergestellt /5/. Die Herstellung geschah in Handschuhkästen unter Argon-Atmosphäre für das Produkt II. Die Analysenwerte sind in Tabelle 3 zu finden.

Tabelle 3: Analysendaten des Brennstofftyps D

Reaktions-Produkt: O(Gew.-%)	0,45
Gesinterte Tabletten	
Sinteratmosphäre	Vakuum
Chargen Nr.	C32-3.8
Pu/U+Pu	0,152
C (Gew.-%)	4,65 - 4,73
O (" ")	0,25 - 0,45
N (" ")	0,05
Röntgen-Analyse (Hauptphase MC)	14 % M_2C_3
Tablettendichte (% th.D.)	92,1

Die Analysenwerte der metallischen Verunreinigungen der Charge C32-3.8 sind in der nachfolgenden Tabelle 4 aufgeführt. Stichprobenmessungen betr. des F- und Cl-Gehaltes an einigen Proben erbrachten das folgende Ergebnis:

Cl < 5 ppm ; F = 4 bis 6 ppm

Tabelle 4: Metallische Verunreinigungen des Brennstoffs
(ppm)

Element	Charge Nr. C32-3.8
Cd	< 0,2
Al	< 5
B	< 0,2
Si	10
Fe	20
Mg	5
Mn	< 2
Pb	< 1
W	< 5
Cr	< 5
Ni	< 2
Bi	< 1
Mo	< 1
Sn	< 2
V	< 1
Ag	0,2
Zn	< 50

5.2 Brennstab

Die Stabfertigung erfolgte bei der Firma ALKEM /6/. In Tabelle 5 werden die wichtigsten Herstellungsdaten der 3 Brennstäbe der Versuchsgruppe 6d wiedergegeben.

Tabelle 5: Herstellungsdaten der Brennstäbe der Versuchsgruppe 6d

KVE	Stab Nr.	Charge Nr.	Säulen Nr.	Brennstoff- säulenlänge (mm)	Brennstoff- gewicht (g)	Tabletten- dichte (% th.D.)	Tabletten- durchm. (mm)
127	6D2	C32-3.8	425/2	300,12	208,631	92,1	8,40
128	6D3		425/3	300,58	208,838	92,1	8,40
130	6D1		425/1	300,38	208,886	92,1	8,40

Abb. 1 zeigt den Aufbau des Brennstabs.

6. Bestrahlungseinrichtung

Die Bestrahlung der Prüflinge wird in einwandigen NaK-Kapseln durchgeführt. Diese Kapseln zeigen den in Abb. 2 dargestellten Aufbau. Sie setzen sich aus drei Baueinheiten zusammen: Der Bestrahlungskapsel, dem Oberteil und der Kühlwasserführung. Die Bestrahlungskapsel besteht aus einem nahtlos gezogenen Rohr aus einer hochwarmfesten Niob-Legierung mit 1 % Zr. Diese Niob-Kapsel ist mit der eutektischen Na-78-K-Legierung gefüllt. Im NaK-Raum befindet sich ein Zwischenrohr aus derselben Nb-Legierung, um einmal den gewünschten Kapseldurchmesser einstellen zu können und zum anderen eine nennenswerte Konvektion im NaK-Spalt zu vermeiden. Das Zwischenrohr ist innen glatt, so daß aufsteigende Gasblasen möglichst nicht haften bleiben und später im Betrieb einen "burnout" verursachen können.

Maximal 6 Thermoelemente, die direkt auf die Hülle aufgeheftet sind, dienen zur Messung der Hülltemperatur in jeder Kapsel. Sie sind in den oberen Endstopfen hart eingelötet. Die Bestimmung der Stabileistung und der Hülloberflächentemperaturen erfolgt über die kapselspezifische Temperaturstabileistungscharakteristik (Abb. 3). In der Abb. 4 ist der Vollständigkeit halber der radiale Temperaturverlauf für eine Stabileistung von 1150 W/cm dargestellt.

7. Ablauf der Bestrahlung

7.1 Reaktorzyklen und Neutronenfluß

Die Bestrahlung der Prüflinge der Versuchsgruppe 6d begann mit Einbau der KVE 127 und 128 am 13.5.1974 in Zyklus C/74 und endete mit dem Ausbau des KVE 130 nach Zyklus A/77 am 14.3.1977. In Tabelle 6 sind die wesentlichen Informationen über die relevanten Zyklen sowie die mittleren Neutronenflüsse in den jeweiligen Bestrahlungspositionen zusammengestellt. Neben der Zahl der Vollasttage sind die der Schnellschlüsse und Abschaltungen für alle Zyklen im einzelnen aufgeführt. Des weiteren sind in Tabelle 6 die betreffenden Bestrahlungspositionen zu finden. Die Lage der Kapselversuchseinsätze im FR 2-Core geht aus der Positionskarte des FR 2 (Abb. 5) hervor.

7.2 Temperatur und Stableistung

Wie in Abschnitt 6 näher beschrieben wird die Hülltemperatur durch 6 Thermoelemente bestimmt. Diese Thermoelemente sind zwar direkt auf die Hülle aufgeheftet, aufgrund ihrer endlichen Dicke messen sie aber nicht die Hüllaußentemperatur. Diese Größe kann aber über die kapselspezifische Temperatur-Stableistungscharakteristik aus der Meßtemperatur gewonnen werden (siehe Abb. 3), desgleichen auch die Stableistung /7/. Die Verteilung der Thermoelement-Meßstellen über die Stablänge ist der Stabzeichnung (Abb. 1) zu entnehmen.

Als entscheidendes Ergebnis der Meßwert-Auswertung sind die zeitlichen Verläufe der Hülloberflächentemperatur in den Abb. 6 bis 16 aufgetragen. In den Tabellen 7 bis 9 sind die aus einer linearen Approximation gewonnenen Werte für Stableistung und Hülltemperatur zu Beginn und Ende eines jeden Zyklus sowie für den Abbrand dargestellt. Aufgrund des sägezahmartigen Betriebsverlaufes sind dies die wesentlichen Kennwerte für eine modelltheoretische Auswertung. Die Stableistungen lagen etwa zwischen 800 und 1100 W/cm und die Hüllaußentemperaturen zwischen 450 und 600 °C, womit ein Bereich überstrichen wurde, der für ein Karbid-Brennelement repräsentativ ist.

Tabelle 6: Bestrahlungspositionen der Kapselversuchsgruppe 6d mit den jeweiligen mittleren Flüssen

$$\bar{\phi} \text{ (} 10^{13} \text{ n/cm}^2\text{sec)}$$

J a h r	1 9 7 4					1 9 7 5							1 9 7 6							1977
Z y k l u s	C	D	E	F	G	A	B	C	D	E	F	G	A	B	C	D	E	F	G	A
Vollast- tage	50,2	0	45,5	45	45,5	38,3	45,3	44,3	0	44,4	44,6	44,6	45,4	37,4	42,3	0	42,9	42,1	30,1	42,3
SS ⁺)	3	a.	0	4	0	2	1	2	0	1	1	2	0	3	2	a.	4	3	3	2
A	6	Betr.	0	3	1	0	0	2	0	2	1	1	1	2	2	Betr.	1	4	4	1
KVE 127	49	-	49	53	53	53	53	53	-	45	45	45	45	45	45					
$\bar{\phi}$	5	-	5	11	11	11	11	11	-	23	23	23	23	23	23					
	3,15		4,66	7,62	7,14	7,05	7,40	8,15		8,44	8,78	7,62	8,01	7,80	9,04					
KVE 128	37	-	37	57	41	53	49	49	-	49	49	49	49	49	49	0	49	49		
$\bar{\phi}$	11	-	11	11	31	23	23	23	-	23	23	23	23	23	23	0	23	23		
	3,33		4,71	6,19	8,55	8,20	9,07	9,31		8,98	9,35	8,37	8,61	8,41	9,39		8,46	8,63		
KVE 130			41	41	41	57	57	57	-	57	53	53	53	53	53	0	53	53	53	53
$\bar{\phi}$			31	31	31	23	23	23	-	23	11	23	23	23	23	0	23	23	23	23
			6,05	6,25	6,09	6,90	6,80	7,64		6,51	7,12	7,42	7,92	7,70	8,78		7,85	8,09	7,91	8,12

+) SS = Schnellschluß; A = Abschaltung

Tabelle 7: Stabileistung der Prüflinge am Anfang und Ende des Zyklus für jedes TE der Vg. 6d

J a h r			1 9 7 4							1 9 7 5							1 9 7 6							1977
Z y k l u s			C	D	E	F	G	A	B	C	D	E	F	G	A	B	C	D	E	F	G	A		
Prüf- ling	TE- Nr.	Stabl. (W/cm)																						
6D2	5	X _A	693	-	712	1028	981	965	903	916	-	1032	1025	803	745	768	794							
		X _E	654	-	595	880	893	882	815	821	-	844	813	707	693	717	717							
	6	X _A	857	-	747	1035	982	961	888	894	-	972	959	744	700	734	787							
		X _E	668	-	641	907	897	884	812	814	-	813	786	697	685	707	731							
	7	X _A	779	-	730	1018	981	990	924	952	-	1040	1095	788	737	740	809							
		X _E	720	-	629	972	974	971	878	904	-	934	861	755	730	739	787							
8	X _A	579	-	667	932	863	854	802	824	-	871	958	743	634	717	803								
	X _E	692	-	604	875	863	832	778	801	-	851	847	728	662	741	803								
9	X _A	732	-	670	1020	917	944	860	846	-	893	921	691	688	665	755								
	X _E	671	-	593	944	909	953	846	813	-	827	813	678	716	692	763								
10	X _A	698	-	635	872	866	857	813	841	-	905	886	684	602	649	740								
	X _E	598	-	575	962	924	825	802	814	-	777	758	678	639	677	757								
6D3	5	X _A	566	-	607	832	1107	943	962	941	-	942	953	807	757	788	859	-	732	734				
		X _E	586	-	531	733	923	826	848	783	-	790	784	731	712	734	758	-	634	622				
	6	X _A	612	-	627	820	1039	904	929	913	-	902	915	757	708	712	778	-	650	652				
		X _E	688	-	534	719	885	810	839	773	-	773	758	702	662	679	695	-	571	554				
	7	X _A	548	-	619	831	1076	921	939	938	-	917	933	803	736	745	830	-	716	736				
		X _E	598	-	556	793	952	853	885	823	-	812	824	757	717	734	779	-	659	640				
8	X _A	745	-	653	781	1040	966	962	965	-	928	949	742	667	670	733	-	625	632					
	X _E	695	-	592	721	961	948	926	859	-	837	798	725	669	669	700	-	578	565					
9	X _A	552	-	523	787	979	861	858	906	-	885	903	688	634	638	718	-	617	624					
	X _E	529	-	474	779	921	830	867	827	-	803	730	684	644	644	700	-	570	557					
10	X _A	735	-	572	729	1048	937	941	952	-	920	949	768	694	706	776	-	660	668					
	X _E	650	-	503	704	956	909	917	858	-	845	818	746	704	713	745	-	616	604					
6D1	5	X _A	-	-	1028	1063	1102	979	888	961	-	896	894	806	743	679	739	-	632	673	642	641		
		X _E	-	-	833	866	894	856	803	839	-	780	694	733	675	615	635	-	586	598	580	591		
	6	X _A	-	-	900	912	936	831	772	875	-	822	809	765	703	686	730	-	603	642	602	596		
		X _E	-	-	709	745	784	758	736	787	-	713	681	723	645	640	636	-	579	573	547	557		
	7	X _A	-	-	924	937	959	860	798	915	-	831	871	755	739	742	805	-	670	712	651	645		
		X _E	-	-	758	800	837	816	788	847	-	750	716	769	714	708	722	-	663	651	617	635		
8	X _A	-	-	873	928	927	817	723	839	-	741	783	719	661	662	736	-	612	646	588	581			
	X _E	-	-	792	800	815	789	741	794	-	690	669	712	660	664	674	-	614	596	560	575			
9	X _A	-	-	766	879	872	806	717	800	-	745	744	705	645	648	730	-	595	628	572	573			
	X _E	-	-	728	753	811	787	730	789	-	697	657	713	627	633	667	-	600	584	554	570			
10	X _A	-	-	812	842	843	673	607	723	-	620	704	625	577	622	685	-	577	624	578	577			
	X _E	-	-	723	730	725	638	624	688	-	574	538	622	628	633	635	-	581	590	558	569			

X_A = X_{Anfang}, X_E = Ende

Tabelle 8: Anfangs- und Endtemperatur der Prüflinge an der Hüllaußenwand für jedes TE der Vg. 6d

J a h r			1 9 7 4					1 9 7 5					1 9 7 6					1977						
Z y k l u s			C	D	E	F	G	A	B	C	D	E	F	G	A	B	C	D	E	F	G	A		
Prüf- ling	TE- Nr.	Temp. °C																						
6D2	5	T _A	408	-	418	574	551	543	512	519	-	576	573	463	435	446	459							
		T _E	389	-	360	501	507	502	469	472	-	483	468	415	409	420	421							
	6	T _A	490	-	435	577	551	541	505	509	-	546	540	434	412	429	455							
		T _E	397	-	383	514	509	503	467	468	-	468	455	411	405	416	427							
	7	T _A	451	.	427	569	551	555	522	536	-	580	607	456	431	432	466							
		T _E	422	-	377	546	547	546	500	512	-	528	491	439	427	431	455							
8	T _A	352	-	396	526	492	488	462	473	-	496	540	433	379	421	463								
	T _E	408	-	365	499	493	477	450	462	-	487	484	426	393	432	463								
9	T _A	428	-	397	570	519	533	491	484	-	507	521	408	406	395	439								
	T _E	398	-	360	532	515	537	484	468	-	475	468	401	420	408	443								
10	T _A	411	-	380	497	494	489	468	482	-	513	504	404	364	387	432								
	T _E	362	-	350	541	523	474	463	469	-	450	441	401	382	401	440								
6D3	5	T _A	346	-	367	477	613	532	541	531	-	531	537	465	440	456	490	-	427	429				
		T _E	356	-	329	428	522	474	485	453	-	457	454	427	418	429	440	-	379	374				
	6	T _A	369	-	376	472	579	513	525	517	-	512	518	440	416	418	450	-	387	389				
		T _E	406	-	330	421	503	466	481	448	-	448	441	413	393	402	410	-	349	340				
	7	T _A	337	-	372	477	597	521	530	530	-	519	527	463	430	434	476	-	420	430				
		T _E	362	-	341	458	537	487	503	473	-	467	473	440	421	429	451	-	392	383				
8	T _A	434	-	389	452	580	543	541	543	-	525	535	433	396	397	428	-	375	379					
	T _E	410	-	359	422	540	534	524	491	-	480	460	424	397	397	412	-	352	346					
9	T _A	339	-	325	455	550	492	490	514	-	503	512	406	380	382	421	-	371	375					
	T _E	328	-	301	451	521	476	494	475	-	463	427	404	385	384	412	-	348	342					
10	T _A	429	-	349	427	584	529	531	536	-	521	535	445	409	415	450	-	392	396					
	T _E	388	-	315	414	538	520	519	490	-	484	471	435	414	419	434	-	371	365					
6D1	5	T _A	-	-	574	591	610	550	505	541	-	509	508	464	433	402	431	-	379	399	383	383		
		T _E	-	-	478	494	508	489	463	481	-	452	409	428	400	370	380	-	356	362	353	358		
	6	T _A	-	-	511	517	528	476	448	499	-	472	466	444	413	405	427	-	365	383	364	361		
		T _E	-	-	417	434	454	441	430	455	-	419	403	423	385	383	380	-	352	350	337	342		
	7	T _A	-	-	523	529	540	491	460	518	-	477	496	439	432	433	464	-	397	418	388	385		
		T _E	-	-	441	461	480	469	456	485	-	437	420	446	419	416	423	-	394	388	371	380		
8	T _A	-	-	497	524	524	470	423	481	-	432	453	421	393	393	430	-	369	385	357	354			
	T _E	-	-	457	461	469	456	432	458	-	407	397	418	393	394	399	-	369	361	343	350			
9	T _A	-	-	445	500	497	464	421	462	-	434	434	414	385	386	427	-	360	377	349	350			
	T _E	-	-	426	438	467	455	427	456	-	411	391	419	376	379	396	-	363	355	340	348			
10	T _A	-	-	468	482	482	399	366	423	-	373	414	375	352	374	405	-	352	374	352	352			
	T _E	-	-	424	427	424	382	374	406	-	350	332	374	377	379	380	-	354	358	342	347			

T_A = T_{Anfang}; T_E = T_{Ende}

Tabelle 9 : Lokaler Abbrand A (MWD/kg M) für jedes TE und Zyklus der Vg. 6d

J a h r		1 9 7 4					1 9 7 5							1 9 7 6							1977		
Z y k l u s		C	D	E	F	G	A	B	C	D	E	F	G	A	B	C	D	E	F	G	A		
Prüf- ling	TE- Nr.																					A _{ges}	
6D2	5	5,10	o	4,49	6,48	6,43	5,34	5,87	5,81	o	6,29	6,19	5,09	4,93	4,19	4,83							71,05
	6	5,77	o	4,77	6,60	6,45	5,34	5,81	5,71	o	5,99	5,88	4,86	4,75	4,07	4,85							70,84
	7	5,68	o	4,67	6,76	6,72	5,67	6,16	6,21	o	6,63	6,59	5,20	5,04	4,18	5,10							74,59
	8	4,82	o	4,37	6,14	5,93	4,88	5,40	5,44	o	5,78	6,08	4,96	4,44	4,12	5,13							67,48
	9	5,31	o	4,34	6,67	6,27	5,49	5,83	5,55	o	5,77	5,84	4,62	4,82	3,83	4,85							69,20
	10	4,90	o	4,16	6,24	6,15	4,87	5,52	5,54	o	5,64	5,54	4,59	4,26	3,75	4,78							65,93
6D3	5	4,36	o	3,92	5,32	6,97	5,12	6,19	5,77	o	5,81	5,85	5,18	5,04	4,30	4,16	o	4,43	4,31				77,73
	6	4,93	o	3,99	5,23	6,61	4,96	6,05	5,64	o	5,62	5,64	4,92	4,70	3,93	4,70	o	3,96	3,84				74,70
	7	4,34	o	4,04	5,52	6,96	5,13	6,23	5,89	o	5,80	5,92	5,26	4,99	4,18	5,14	o	4,46	4,38				78,25
	8	5,45	o	4,28	5,10	6,87	5,54	6,46	6,10	o	5,93	5,89	4,95	4,59	3,78	4,58	o	3,90	3,81				77,22
	9	4,10	o	3,43	5,33	6,53	4,89	5,90	5,80	o	5,66	5,50	4,63	4,39	3,62	4,53	o	3,85	3,76				71,91
	10	5,24	o	3,69	4,87	6,88	5,34	6,35	6,06	o	5,92	5,96	5,10	4,80	4,01	4,86	o	4,14	4,04				77,28
6D1	5	-	-	6,40	6,56	6,86	5,31	5,78	6,03	o	5,63	5,35	5,19	4,87	3,66	4,39	o	3,95	4,04	2,78	3,94	80,74	
	6	-	-	5,53	5,63	5,91	4,60	5,16	5,57	o	5,15	5,02	5,02	4,63	3,75	4,36	o	3,84	3,87	2,62	3,69	74,34	
	7	-	-	5,79	5,91	6,17	4,85	5,43	5,90	o	5,31	5,35	5,14	4,99	4,10	4,88	o	4,33	4,34	2,88	4,10	79,47	
	8	-	-	5,73	5,87	5,98	4,65	5,01	5,47	o	4,81	4,90	4,83	4,54	3,75	4,51	o	3,98	3,95	2,61	3,70	74,27	
	9	-	-	5,14	5,55	5,78	4,61	4,95	5,32	o	4,84	4,72	4,78	4,37	3,62	4,47	o	3,88	3,86	2,56	3,66	72,12	
	10	-	-	5,28	5,35	5,39	3,80	4,21	4,73	o	4,01	4,19	4,21	4,14	3,55	4,22	o	3,76	3,86	2,59	3,67	66,94	

1
18

8. Zerstörungsfreie Nachuntersuchung

8.1 Äußere Vermessung

Die Stabdurchmesser wurden vor und nach der Bestrahlung mittels sog. Wendelschrieben aufgezeichnet. Hierbei wird ein Tastkopf mit induktivem Wegaufnehmer mit einem Vorschub von 5 mm/Umdrehung an dem rotierenden Prüfling vorbeigeführt. Der Meßschneidenradius beträgt 0,6 mm. Es können so Durchmesseränderungen bis zu $\pm 1 \mu\text{m}$ genau angezeigt werden. In den Abb. 17 bis 19 werden die prozentualen Durchmesseränderungen der Stäbe 6D1, 6D2 und 6D3 wiedergegeben. Wie man den Abbildungen entnehmen kann, traten recht beachtliche Durchmesseränderungen von 5 bis 6 % infolge Brennstoffschwellens auf. Stab 6D1 war an 2 Stellen beim Entnehmen aus der Kapsel gebrochen. Alle Stäbe hatten starke Hüllschäden in Form von Rissen (s. Tabelle 10). Erstaunlich bleibt die Tatsache, daß aus den TE-Verläufen während der Bestrahlung nicht auf einen Stabschaden (ebenfalls nicht auf den Zeitpunkt!) geschlossen werden konnte.

Tabelle 10: Rißlängen der 3 Stäbe

KVE/ Stab	Anzahl der Risse für eine Rißlänge von			Bemerkungen
	<20 mm	>30 mm	>50 mm	
127/D2	8	2	2	
128/D3	4	4	1	
130/D1	2	4	2	bei Demontage an 2 Stellen gebrochen

In den Abb. 20 bis 22 werden die Hüllrisse dokumentiert. Die Form der Hüllanrisse läßt auf eine stärkere plastische Verformung schließen.

8.2 Durchleuchtung

Die Durchleuchtung der 3 Stäbe wurde wegen der höheren Schwermetall-dichte im Vergleich zu oxidischen Brennelementen mittels eines Beta-trons vorgenommen. Das Betatron bedient sich einer 18 MeV-Bremsstrahlung, die auch Brennstäbe hoher Brennstoffdichte durchdringt. Es können so die Abkühlrisse und Tablettenstöße (s. Abb. 23 bis 26) gut sichtbar gemacht werden. Infolge der moderaten Stableistung von ca. 766 W/cm kam es zu keinen größeren Porositätsansammlungen im Stabinnern.

8.3 γ -Profile

Zur Charakterisierung der Brennstoffsäulen hinsichtlich der Rißstruktur, des axialen Leistungsverlaufes der Brennstoffverlagerung und der Spaltproduktwanderung wurden die Prüflinge γ -spektrometrisch untersucht. In dieser Untersuchung wurden die γ -Aktivität entlang der Stabachse als γ -Profil erstellt. Als Detektor diente hierzu ein Halbleiterkristall (GeLi) mit nachgeschaltetem 2000-Kanal-Analysator. Profile und Spektren wurden mit einem schlitzförmigen Kollimator mit den Maßen 0,5 mm x 20 mm x 700 mm durch die Abschirmwand der Heißen Zellen aufgenommen.

Infolge der langen Abklingzeiten von 849 d bis 1094 d konnten neben einem integralen γ -Scan nur noch die axialen γ -Profile des Cs-137 und Ru-106 aufgenommen werden (Abb. 27 bis 29).

Gut sichtbar sind die Tablettenstöße der Stäbe (Aktivitäts-Senken) 6D2 und 6D3 anhand der Cs-137-Profile, während beim gebrochenen Stab 6D1 der Cs-137-Scan sich wesentlich mehr geglättet darstellt. Offensichtlich ist hier ein größerer Betrag des Spalt-Cäsiums vom eindringenden Na herausgelöst worden.

9. Zerstörende Nachuntersuchung

9.1 Spaltgase

Da die 3 Prüflinge während der Bestrahlung Hüllrisse erlitten, konnten keine freigesetzten Spaltgase (V_F) gemessen werden.

Die sog. gebundenen Gase, bestehend aus Porengas (V_P) und Gitterspaltgas (V_G), wurden nach der bewährten Methode / 1 / an kleinen Brennstoffproben von ca. 5 g Gewicht ermittelt und dann unter Berücksichtigung des Abbrandprofils auf den gesamten Spaltstoffgehalt hochgerechnet.

Tabelle 11 gibt die Messung der Porengase und Gittergase wieder.

Tabelle 11: Gebundene Spaltgase (cm^3)

Prüfling	Abbrand gerechnet (MWd/kg Me)	Porengas (cm^3)			Gittergas (cm^3)			Gesamtgas gerechnet (cm^3)
		Xe	Kr	$\bar{\Sigma}$	Xe	Kr	$\bar{\Sigma}$	
D1	74,67	53,30	3,11	56,41	355,12	20,21	375,33	414 (431)
D2	69,87	73,84	4,36	78,20	221,69	12,67	234,36	410
D3	76,21	84,49	4,68	89,17	278,72	15,25	293,97	423

() gemessen = $\Sigma V_G + V_P$

Auffallend an Tabelle 11 sind die verhältnismäßig hohen Gittergasanteile, die bisher an Karbidprüflingen noch nicht beobachtet wurden. Es muß weiteren Experimenten vorbehalten bleiben, zu klären, ob dies mit den hochdichten Karbidpellets ($\approx 92\%$ th.D.) korreliert werden muß.

In Tabelle 12 sind die Kr/Xe-Verhältnisse und die spezifischen Spaltgaswerte nochmals aufgeführt.

Tabelle 12: Kr/Xe-Verhältnisse und spez. Spaltgaswerte

Prüfling	V_P (cm^3/g)	Kr/Xe	V_G (cm^3/g)	Kr/Xe
D1	0,27	1:17,1	1,80	1:17,6
D2	0,37	1:16,9	1,12	1:17,5
D3	0,43	1:18,0	1,41	1:18,3

Die Kr/Xe-Werte zeigen den gewohnten Wert von ca. 1:17, der bereits in früheren Experimenten für thermische Bestrahlung gefunden und erklärt werden konnte / 8 /.

9.2 Keramografie

Es wurden pro Prüfling 3 bzw. 4 Querschliffe angefertigt (s. Anhang I). Bei einigen Prüflingen mit sichtbarem Hüllinnenangriff wurden die Hüllrohre geätzt und anschließend ein Mikrohärteprofil (MHV 50) über die Hüllwandstärke aufgenommen. In den Abb. 30 bis 36 werden diese Bilder wiedergegeben. Die Aufkarburierungstiefen werden mit der Hüllinnentemperatur in der nachfolgenden Tabelle 13 verglichen. Wie man der Abb. 11 entnehmen kann, hat eine nennenswerte Aufkarburierung nur bei Prüfling D2 stattgefunden. Letzteres bestätigt die schon im KfK 2577 festgehaltene Erkenntnis, daß eine nennenswerte Reaktion der Hülle mit dem Karbidbrennstoff erst ab Temperaturen größer 600 °C auftritt.

Tabelle 13: Mikrohärtten der Stäbe der Vg. 6d

KVE Nr./Prüfl.	Stand- zeit (d)	\bar{T}_{Ha} (°C)	\bar{T}_{Hi} (°C)	MHV ₅ außen/innen (kp/mm ²)	Aufkarb.- tiefe t (%)	Lokale Stabl.χ (W/cm)	Gesamt- abbrand (Mwd/kg M)
127/D2	573	492	572	330/800 270/400	36-50	862	69,8
128/D3	658	455	528	300/400	11	788	76,2
130/D1	680	421	488	450/700	39	718	74,2

Im Anhang I werden die keramografischen Schliffe der 3 Prüflinge wiedergegeben.

Schon bei den Übersichtsaufnahmen ist die starke Verdichtung der hüllnahen Bereiche zu erkennen. Die β/γ-Autoradiografien zeigen die starke Flußabsenkung im thermischen Fluß; diese Isotherme ist

häufig identisch mit konzentrischen Pu-Anreicherungen (siehe α -Autoradiografie). Bei Prüfling D1 zeigt sich bei Schliff 3 ein exzentrischer Zentralkanal, weiterhin fällt bei dieser Probe der mit losen Karbidpartikeln aufgefüllte Spalt zwischen Hülle und Brennstoff auf. Die an einigen Stellen der Querschliffe angefertigten Panoramaaufnahmen zeigen sehr gut den Weg der Spaltgasporen im Brennstoff. Einige Querschliffe dieser Serie wurden quantitativ hinsichtlich ihrer radialen Porenverteilung untersucht. Abb. 37 zeigt für die 3 Prüflinge die gemessenen radialen Porositätsprofile. Die Pelletdichte vor der Bestrahlung betrug 92 % th.D., der diametrale Spalt 500 μm , die Schmierdichte somit 82 % th.D. Da bei allen 3 Prüflingen der Spalt durch Brennstoffschwellen voll aufgebraucht ist, sollte der Wert $1 - \bar{P}$ wieder die Schmierdichte ergeben. Die für die 3 Prüflinge ermittelten Werte lauten wie folgt: 84,3 - 75,8 - 80,4 % th.D. Unter Berücksichtigung einer gemessenen Hüllrohraufweitung von 2,5% ergibt sich eine Soll-Schmierdichte von 78,6 % th.D. oder eine gemittelte Porosität von 21,4 %. Der Vergleich mit den gemessenen Werten zeigt, daß dies für die Prüflinge D2 und D3 in etwa zutrifft. Prüfling D1 zeigt hingegen eindeutig eine Erhöhung der mittleren Schmierdichte um ca. 5 %, was nur durch einen axialen Brennstofftransport erklärbar ist.

Generell ist bei den Prüflingen D2 und D3 in der Außenzone eine Erhöhung der Dichte auf ca. 95 % th.D. feststellbar, bei $r/2$ und $r = 0$ kann man eine Abnahme derselben auf ca. 70 % feststellen. Eine Ausnahme stellt hier der kältere Stab D1 ($T_{\text{HA}} = 405^{\circ}\text{C}$) dar, bei dem das Profil von 15 % außen, 80 % Mitte, auf 70 % innen variiert. Die entsprechenden Querschliffe, an denen die Porosität mittels Quantimet gemessen wurde, sind in den Abbildungen im Anhang I dargestellt.

10. Diskussion der Ergebnisse

Die Bestrahlung der 3 Mischkarbidstäbe mit hoher Tablettendichte und großem Diametralspalt zeigte eindeutig, daß es bei Stableistungen von 800 - 1000 W/cm nicht genügt, einen größeren Spalt zwischen Hülle und Tablette vorzusehen, um schadenfrei hohe Abbrände erzielen zu können. Bei Schmierdichten von größer gleich 80 % th.D. sind im betroffenen Stableistungsbereich moderate Tablettendichten (85 % th.D.) besser geeignet, das Karbidschwellen bis zu Abbränden von 7 bis 8 at % aufzufangen. Ein Konzept mit hochdichtem Tablettenbrennstoff ist nur brauchbar, wenn man mit der Schmierdichte deutlich unter 80 % th.D. geht, was allerdings zu extrem großen Fertigungsspalten Brennstoff/Hülle führt /9/.

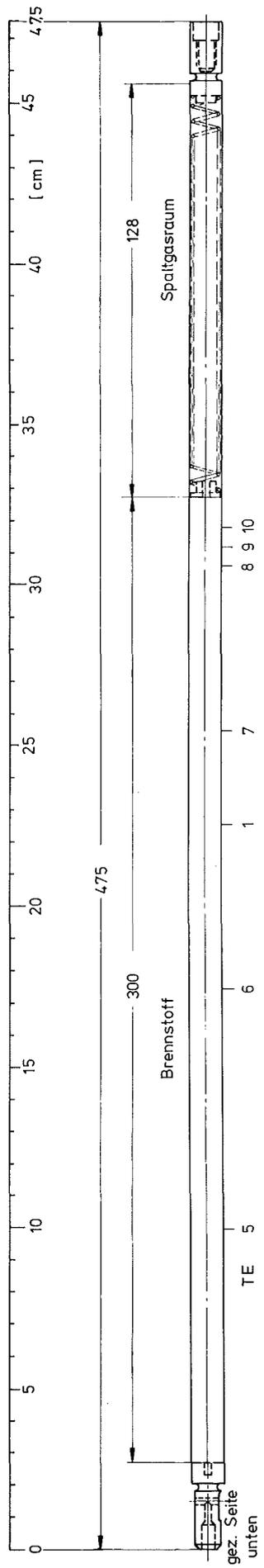
Es muß bei der vorliegenden Bestrahlung berücksichtigt werden, daß es sich um eine rein thermische Bestrahlung handelte. Mit Hilfe der β/γ -Autoradiographien ist leicht feststellbar, daß die Spaltungen überwiegend im äußeren Drittel des Brennstabquerschnitts auftreten. Es ist denkbar, daß bei Bestrahlung mit schnellen Neutronen infolge der Ausnutzung der gesamten Querschnittsfläche zur Spaltung das Stabverhalten verbessert würde.

Danksagung

Wir danken Herrn Dr. Steiner für einige anregende Diskussionen und Fr. Hauth für die Reinschrift des Manuskriptes.

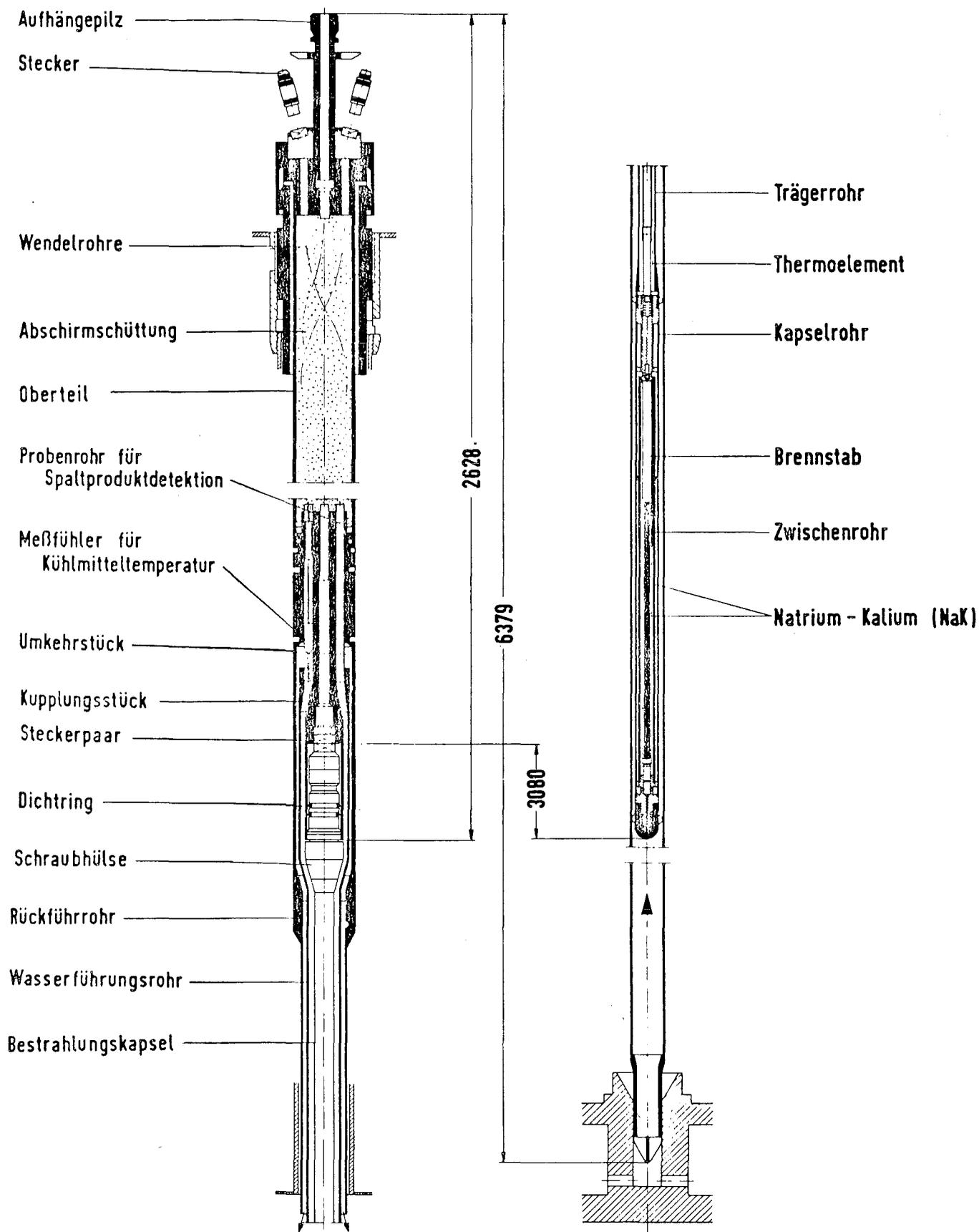
Literatur:

- /1/ H. Steiner, P. Weimar:
Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung der (U,Pu)C-Prüflinge
der Kapselversuchsgruppen 6a und 6c,
KfK-Bericht Nr. 2577 (1978)
- /2/ A. Gerken:
unveröffentlichte Ergebnisse
- /3/ M. Guyette:
CRASH, Computer-program for the analysis of creep and plasticity
in fuel pin sheets,
KfK-Bericht Nr. 1050 (1969)
- /4/ K.D. Cloß:
unveröffentlichte Ergebnisse
- /5/ G. Kramer, et al.:
unveröffentlichte Ergebnisse
- /6/ H. Seidel:
unveröffentlichte Ergebnisse
- /7/ M. Heck:
unveröffentlichte Ergebnisse
- /8/ H. Zimmermann:
Spaltgasverhalten in Oxid-Brennstäben für Schnelle Brüter,
KfK-Bericht Nr. 2057 (1975)
- /9/ H. Steiner:
Die Bestrahlungserfahrungen mit Karbidbrennstäben im Rahmen des
KfK-Karbid-Bestrahlungsprogramms,
Reaktortagung Berlin (1980)



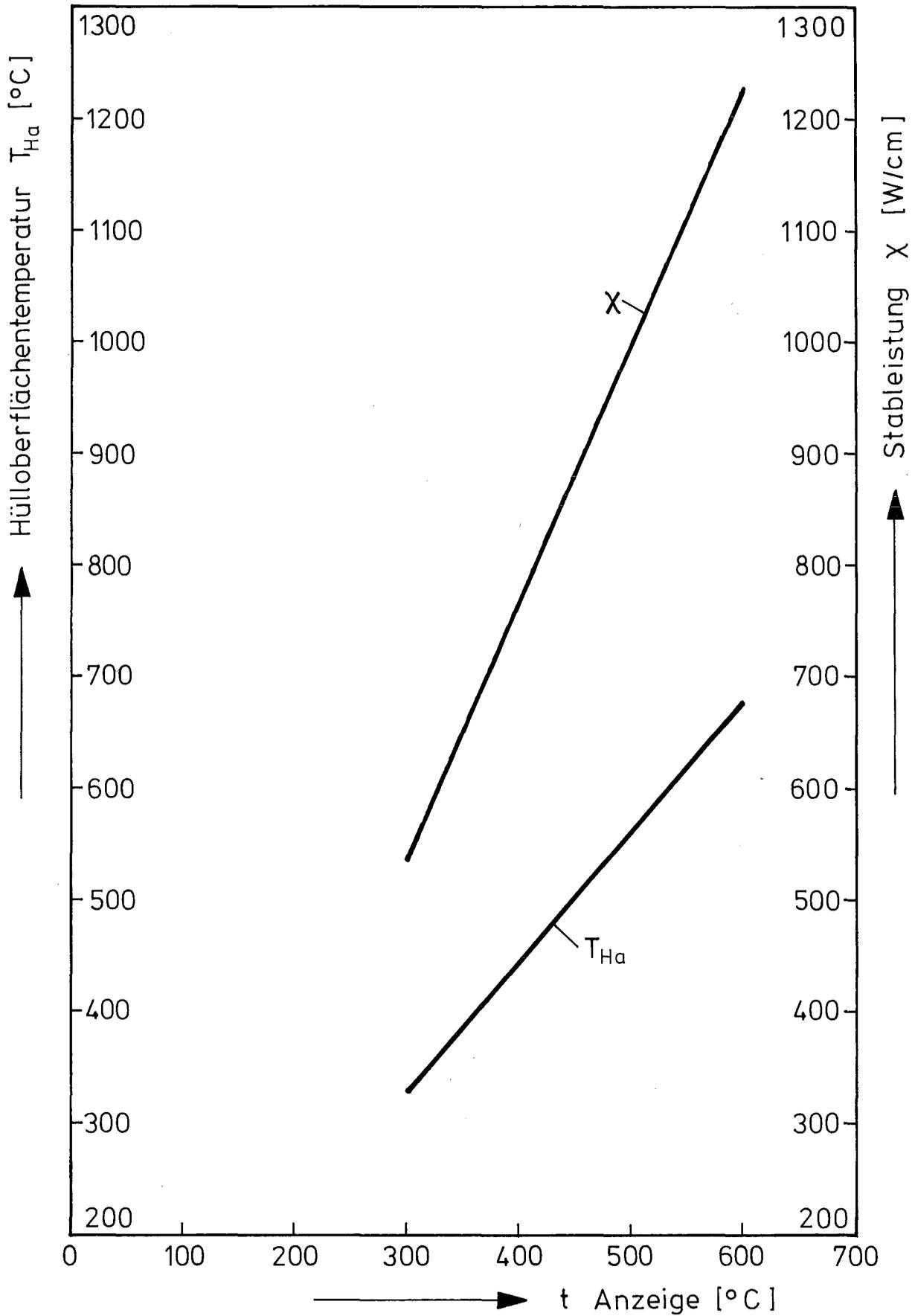
Brennstababmessungen der Versuchsgruppe 6D

Abb. 1



FR2 - Kapselversuchseinsatz Typ 7
für die Versuchsgruppe 6D

Abb. 2



FR 2-Kapsel-Versuchsgr. 6 D
 Temperatur-Stableistungscharakteristik Kapseltyp 7

Abb. 3

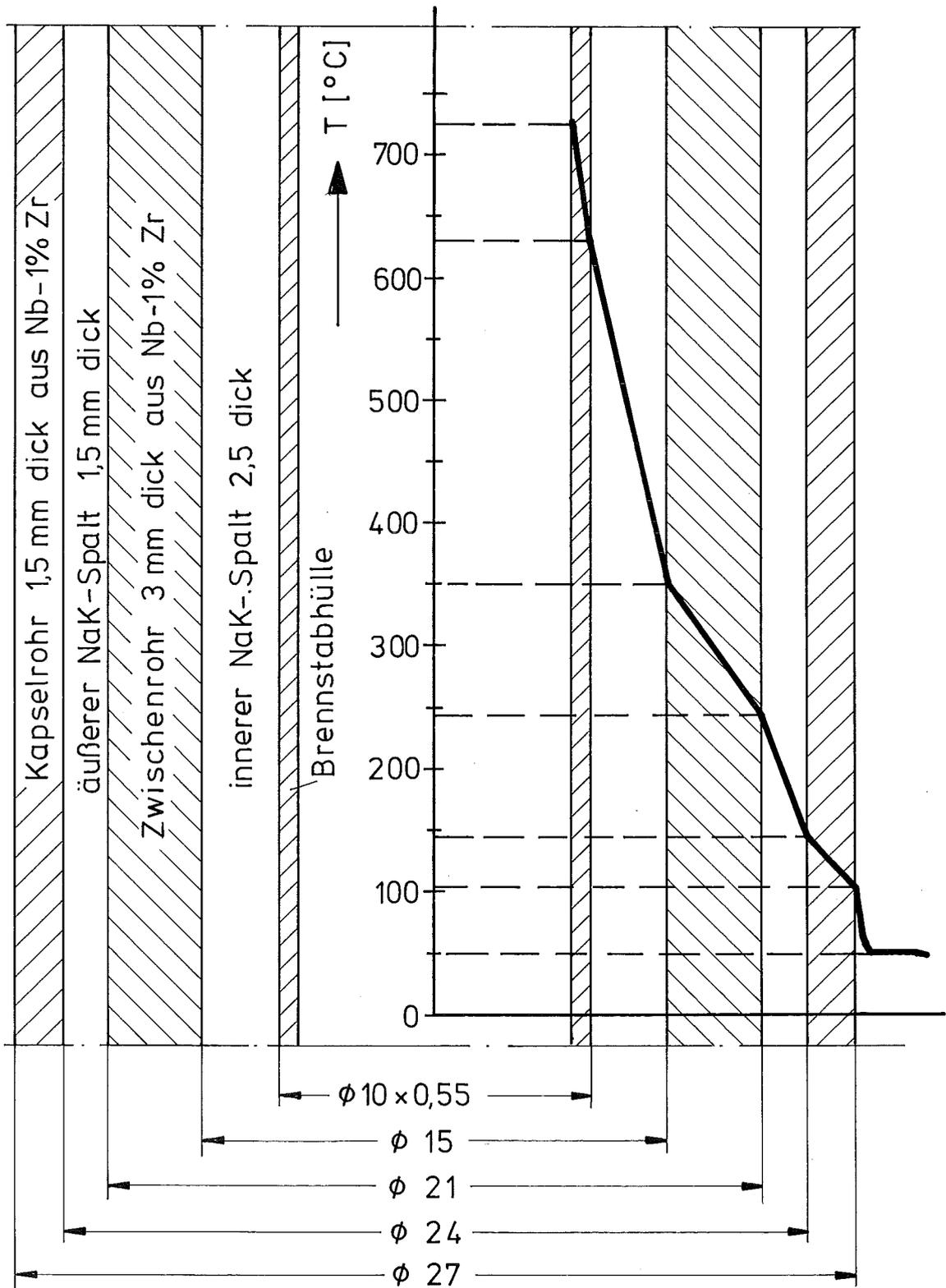


Abb. 4 Temperaturverlauf innerhalb der Bestrahlungskapsel vom Typ 7 (Stableistung $\chi = 1150 \text{ W/cm}$)

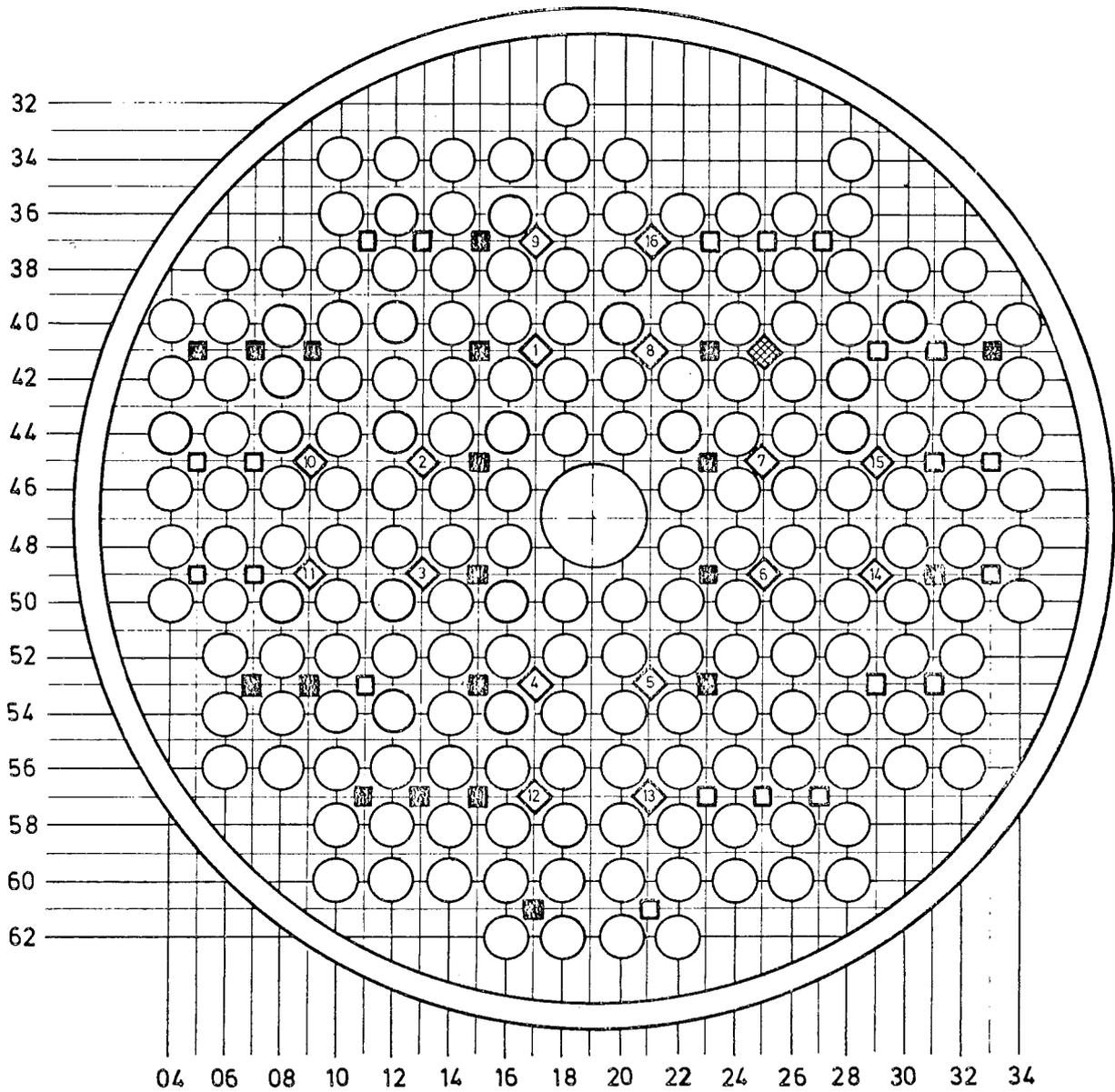


Abb. 5: Positionskarte
FR 2 - Core

- Brennelementposition
- ◇ Trimm - Abschaltstab
- ▣ Feinregelstab
- Isotopenkanal-Position
- zu Flußmessungen benutzte Isotopenkanal - Positionen

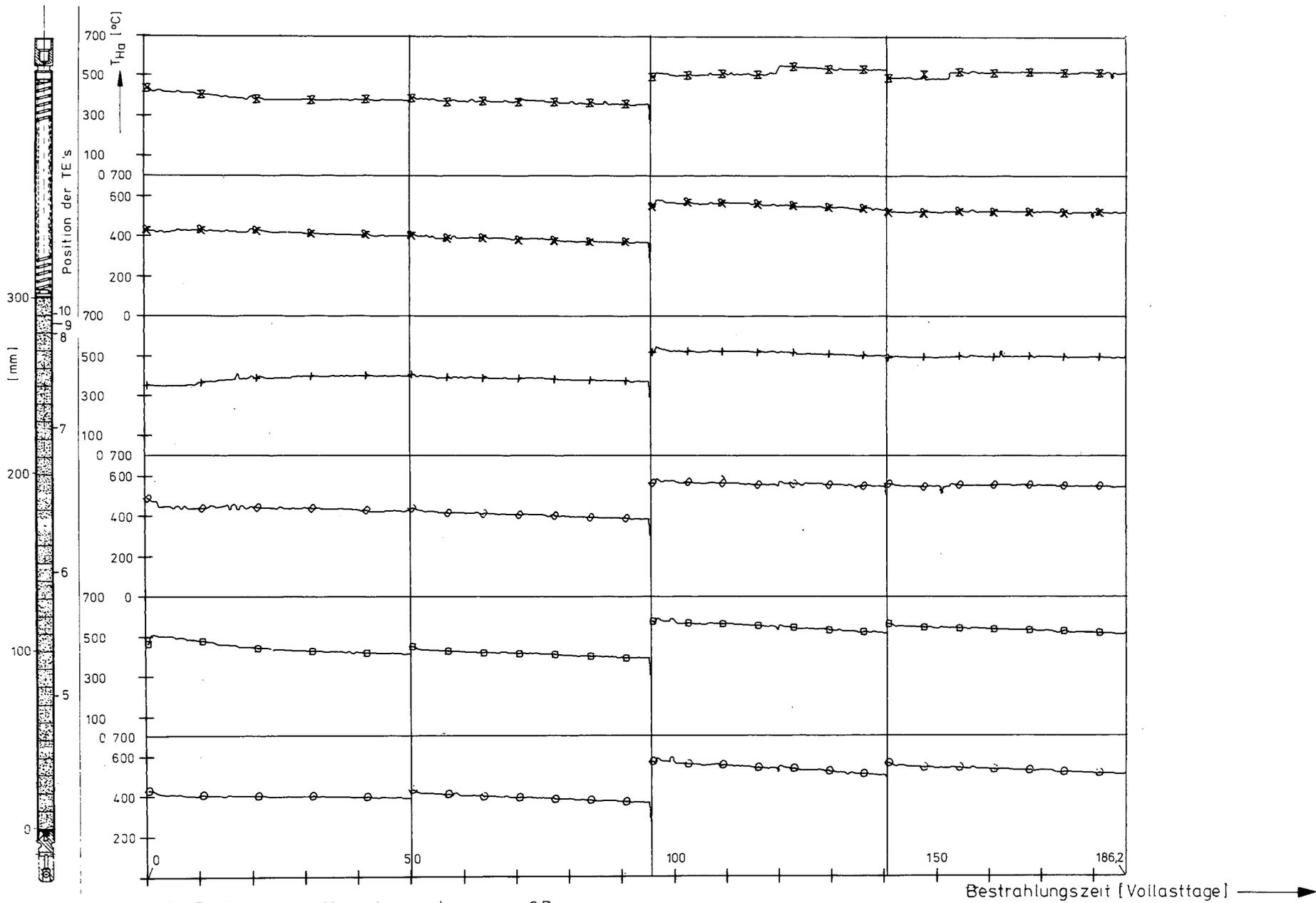


Abb. 6 Karbid-Bestrahlung Kapselversuchsgruppe 6D
 KVE 127 Blatt 1 von 3
 Hülloberflächentemperaturen als Funktion der Zeit von Prüfling 6D.2

Thermoelement Nr.	5	6	7	8	9	10
Zeichen	○	□	◇	+	×	⊠

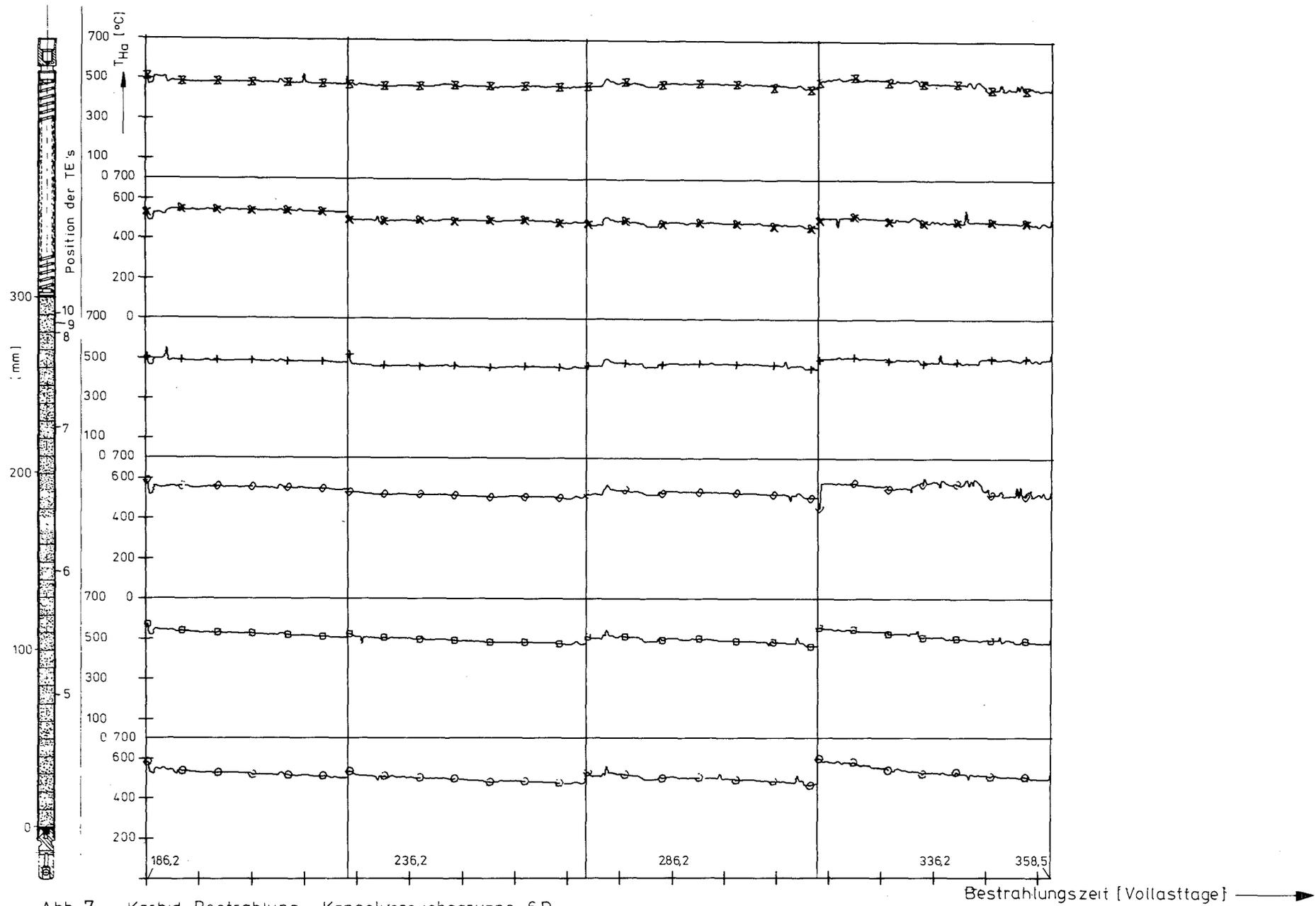


Abb. 7 Karbid-Bestrahlung Kapselversuchsgruppe 6D
 KVE 127 Blatt 2 von 3
 Hulloberflächentemperaturen als Funktion der Zeit von Prüfling 6D2

Thermoelement Nr	5	6	7	8	9	10
Zeichen	○	□	◇	+	×	⊗

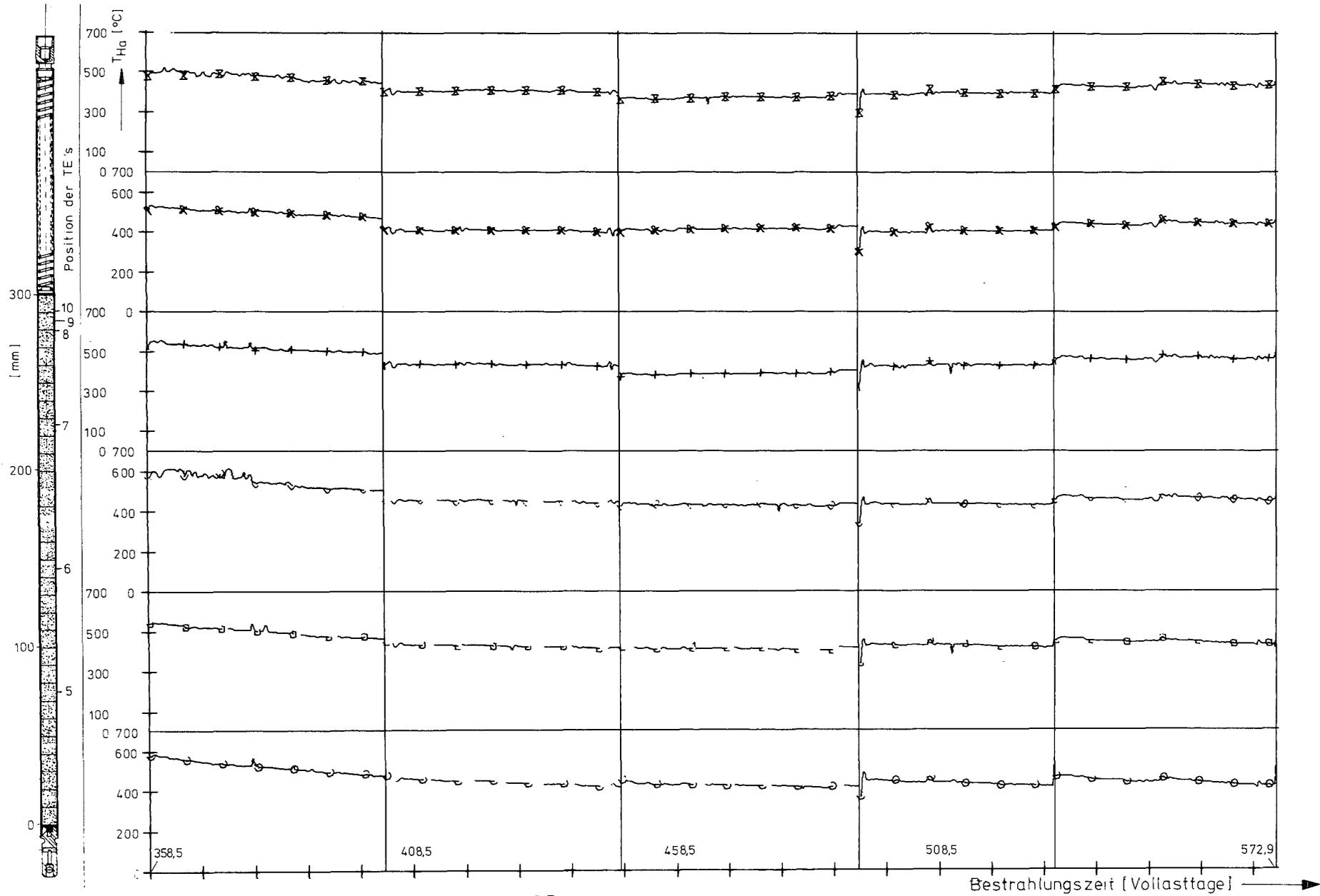


Abb. 8 Karbid-Bestrahlung Kapselversuchsgruppe 6D
 KVE 127 Blatt 3 von 3
 Hülloberflächentemperaturen als Funktion der Zeit von Prüfling 6D2

Thermoelement Nr.	5	6	7	8	9	10
Zeichen	○	□	◇	+	×	⊗

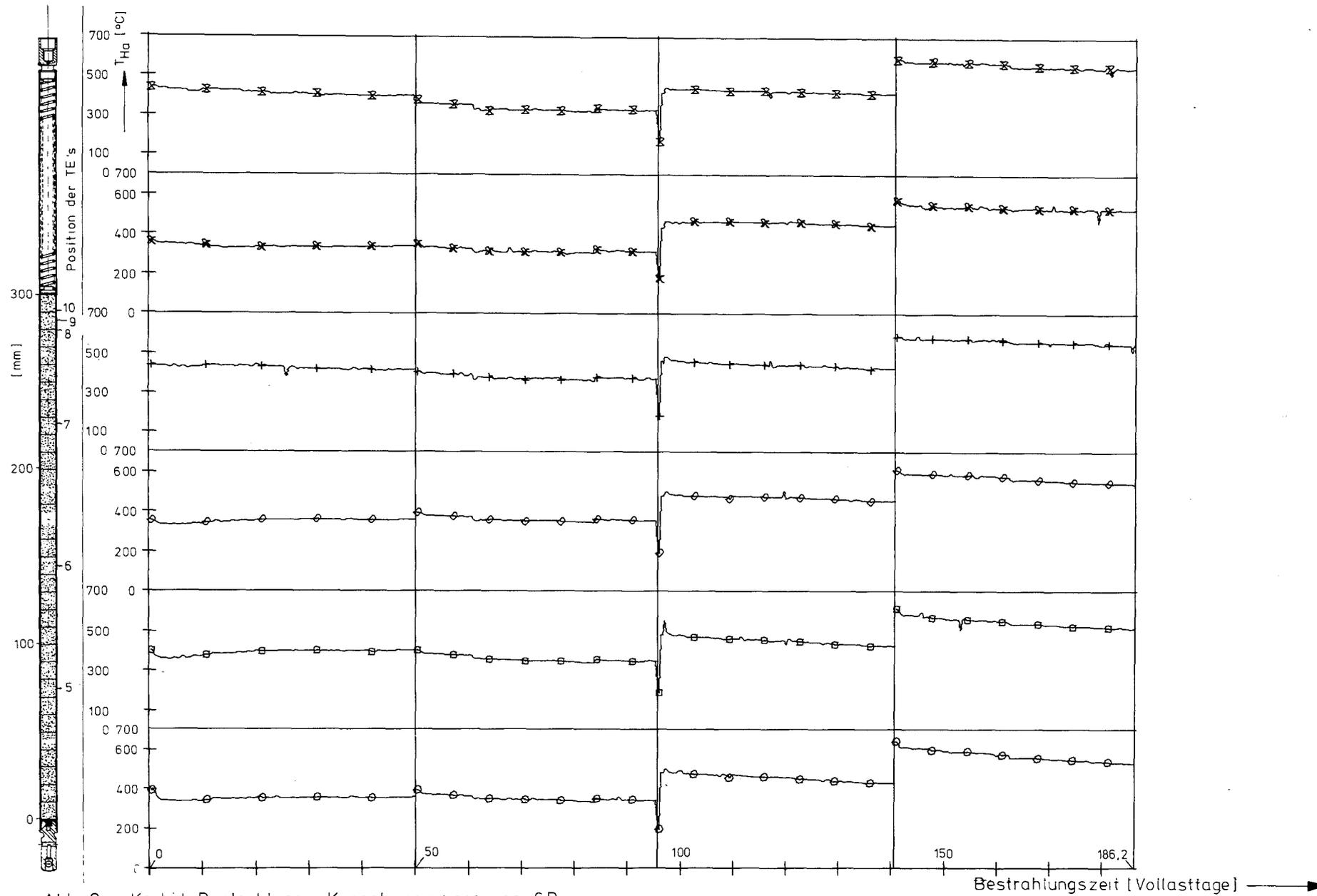


Abb. 9 Karbid-Bestrahlung Kapselversuchsgruppe 6D
 KVE 128 Blatt 1 von 4
 Hülloberflächentemperaturen als Funktion der Zeit von Prüfling 6D3

Thermoelement Nr.	5	6	7	8	9	10
Zeichen	○	□	◇	+	×	⊗

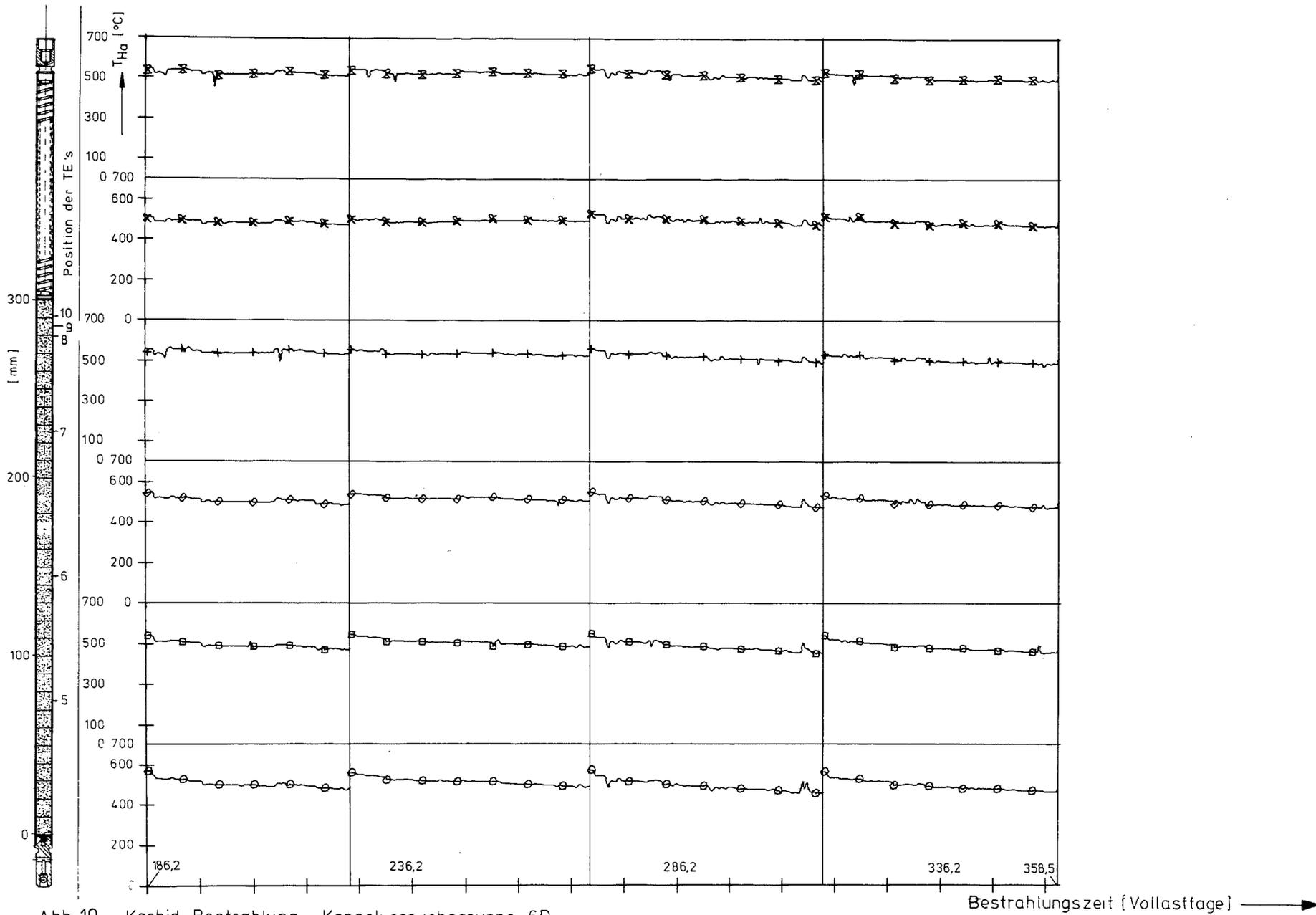


Abb. 10 Karbid-Bestrahlung Kapselversuchsgruppe 6D
 KVE 128 Blatt 2 von 4
 Hülloberflächentemperaturen als Funktion der Zeit von Prüfling 6D3

Thermoelement Nr.	5	6	7	8	9	10
Zeichen	○	□	◇	+	×	⊗

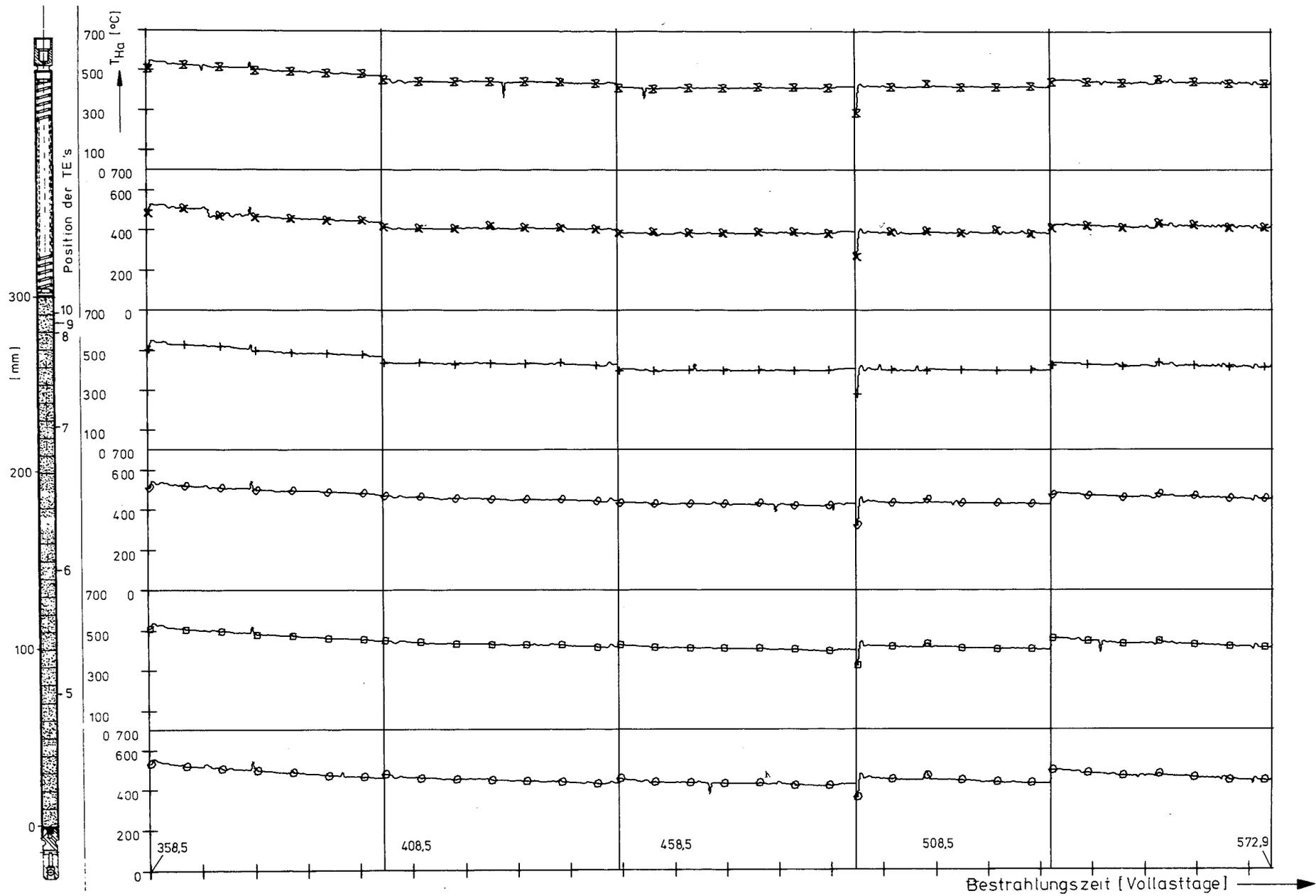


Abb. 11 Karbid-Bestrahlung Kapselversuchsgruppe 6D
 KVE 128 Blatt 3 von 4
 Hülloberflächentemperaturen als Funktion der Zeit von Prüfling 6D3

Thermoelement Nr.	5	6	7	8	9	10
Zeichen	○	□	◇	+	×	⊗

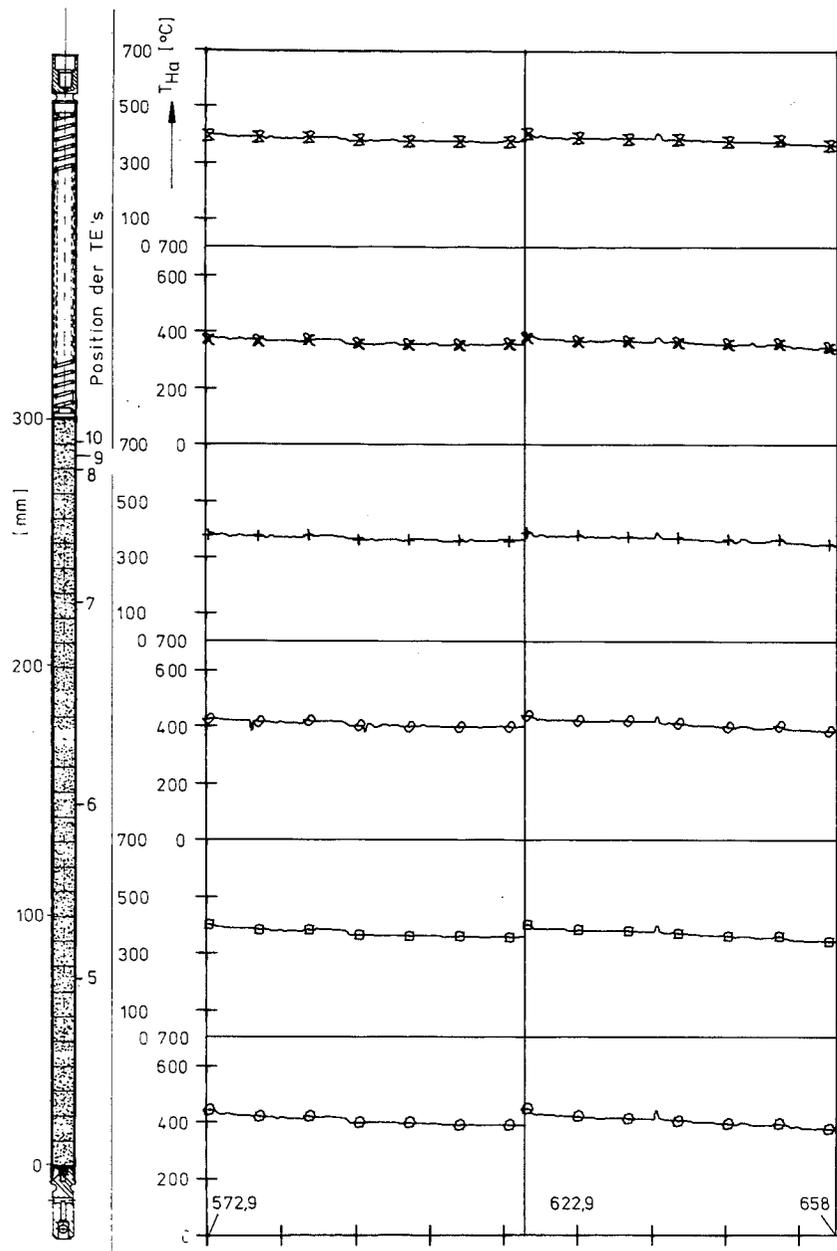


Abb. 12 Karbid-Bestrahlung Kapselversuchsgruppe 6D
 KVE 128 Blatt 4 von 4
 Hülloberflächentemperaturen als Funktion der Zeit von Prüfling 6D3

Bestrahlungszeit [Vollasttage] →

Thermoelement Nr.	5	6	7	8	9	10
Zeichen	○	□	◇	+	×	⊗

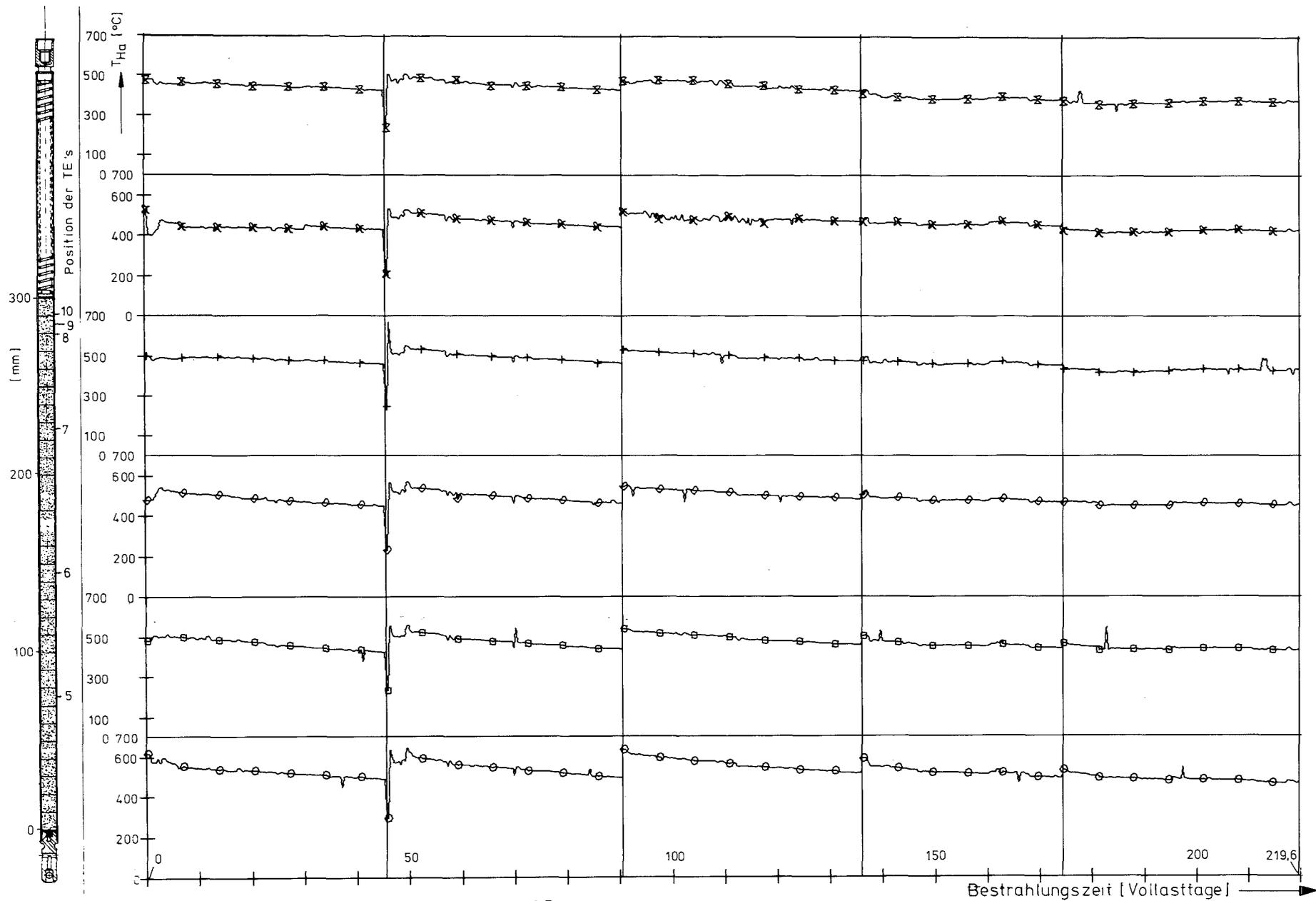


Abb. 13 Karbid-Bestrahlung Kapselversuchsgruppe 6D
 KVE 130 Blatt 1 von 4
 Hülloberflächentemperaturen als Funktion der Zeit von Prüfling 6D1

Thermoelement Nr.	5	6	7	8	9	10
Zeichen	○	□	◇	+	×	⊗

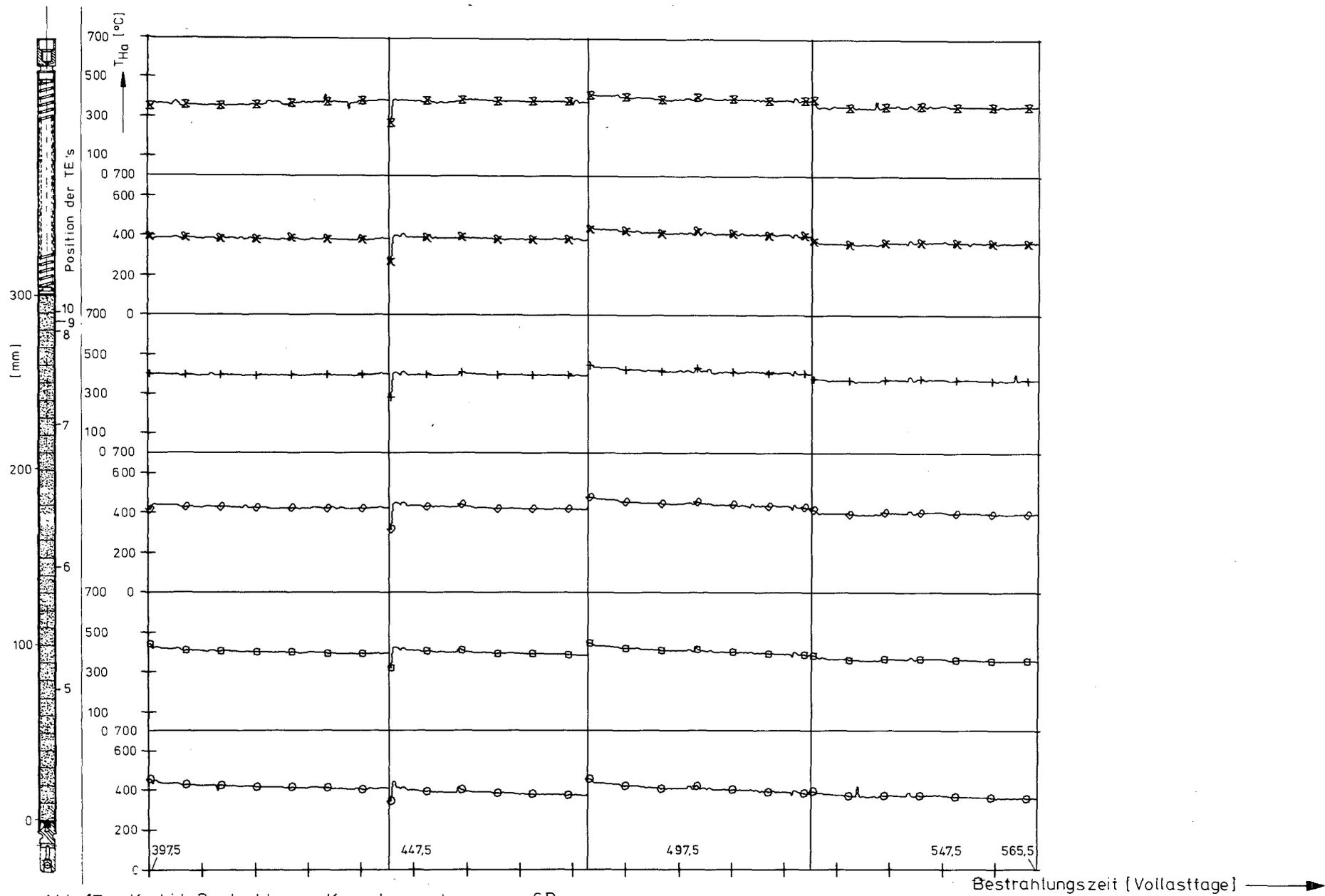


Abb. 15 Karbid-Bestrahlung Kapselversuchsgruppe 6D
 KVE 130 Blatt 3 von 4
 Hülloberflächentemperaturen als Funktion der Zeit von Prüfling 6D1

Thermoelement Nr.	5	6	7	8	9	10
Zeichen	○	□	◇	+	×	⊗

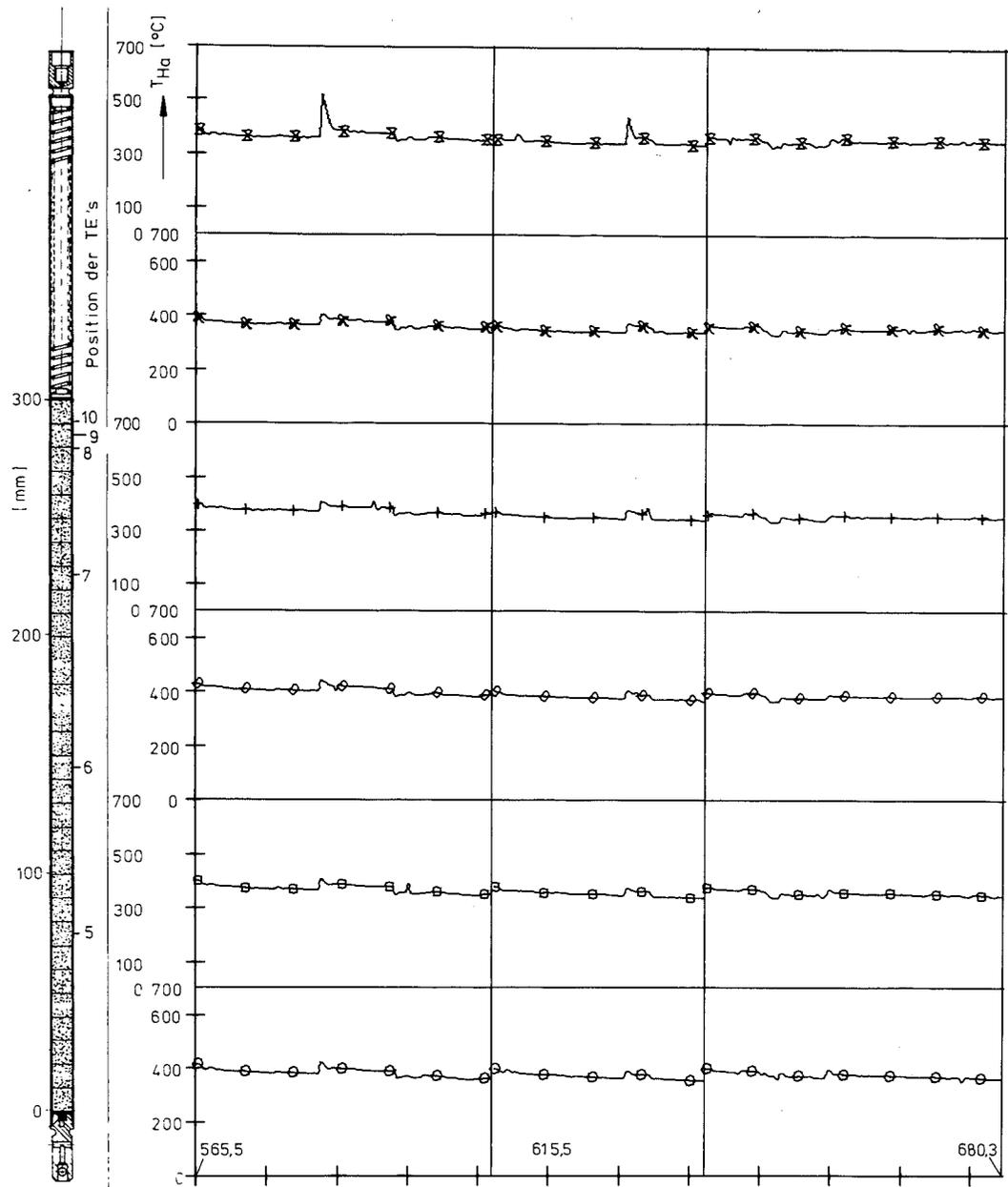
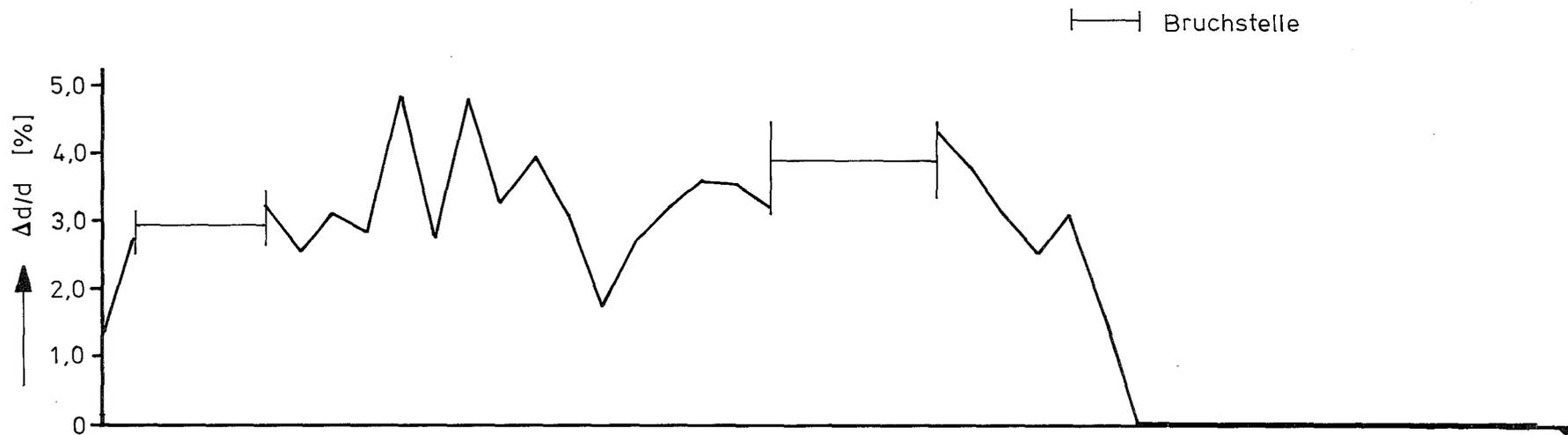
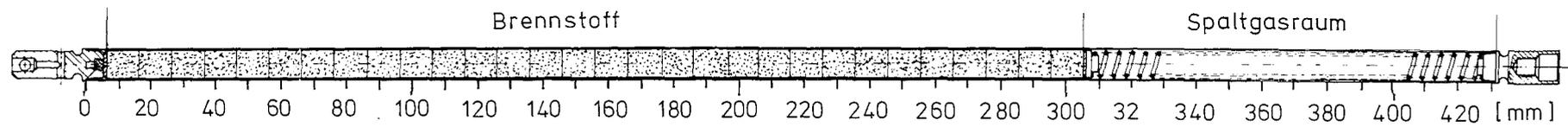


Abb. 16 Karbid-Bestrahlung Kapselversuchsgruppe 6D
 KVE 130, Blatt 4 von 4
 Hülloberflächentemperaturen als Funktion der Zeit von Prüfling 6D1

Bestrahlungszeit [Vollasttage] →

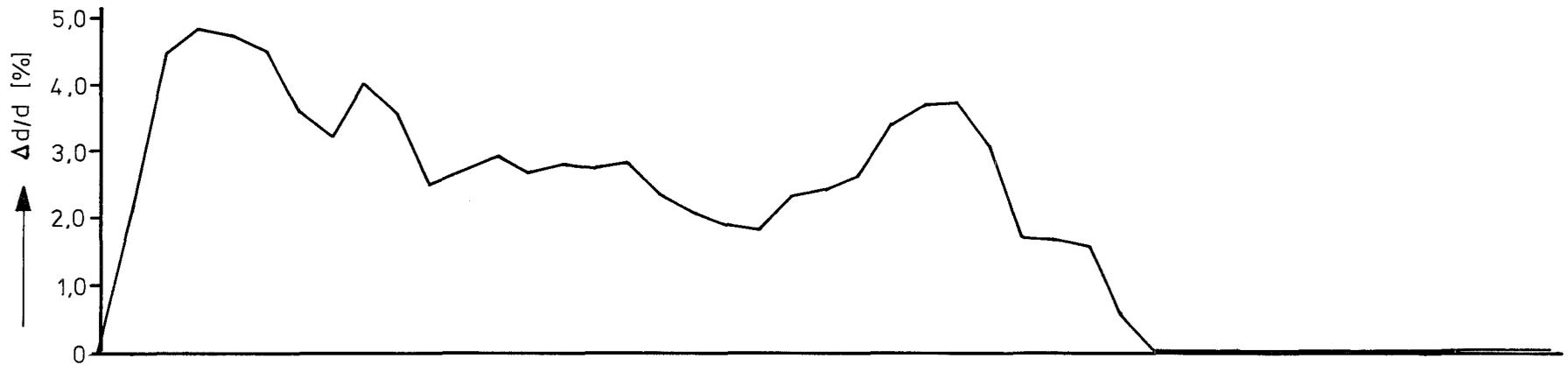
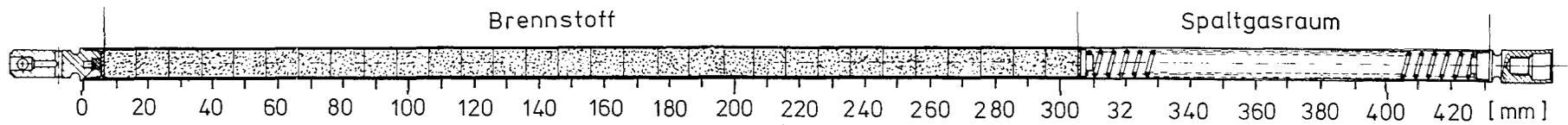
Thermoelement Nr.	5	6	7	8	9	10
Zeichen	○	□	◇	+	×	⊗



Stab 6D.1

Änderungen der Stab-Außendurchmesser

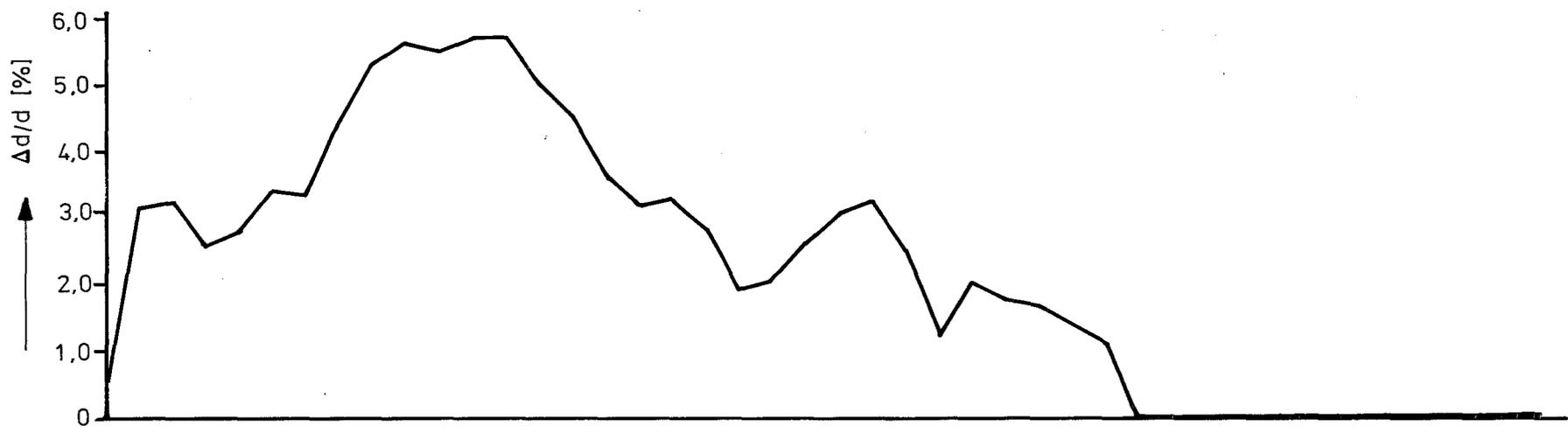
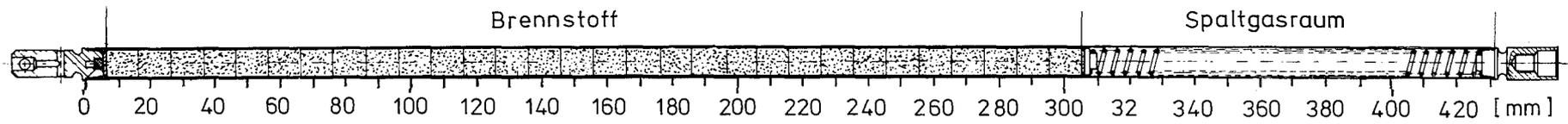
Abb. 17



Stab 6D.2

Änderungen der Stab-Außendurchmesser

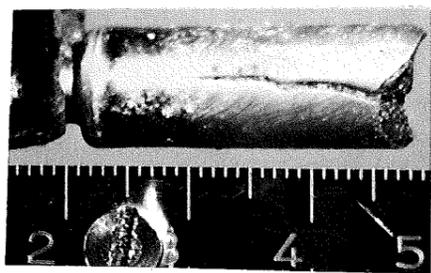
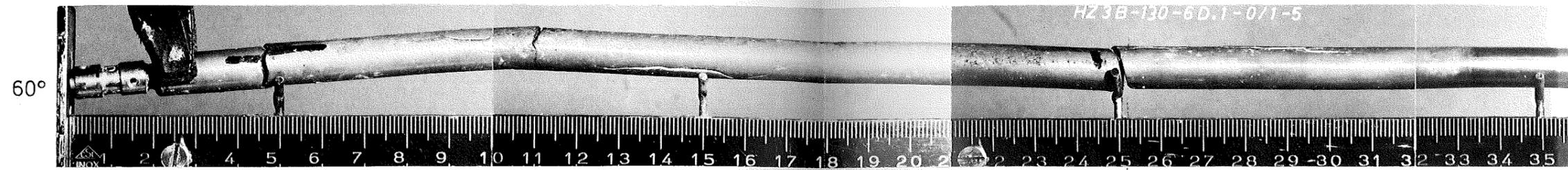
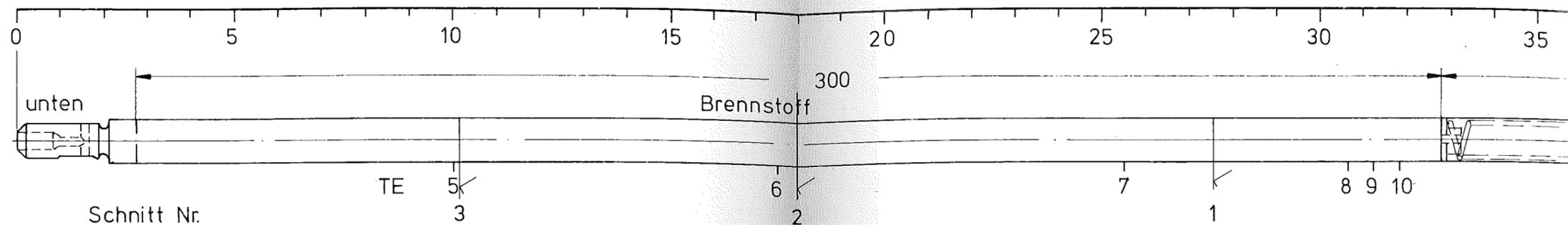
Abb. 18



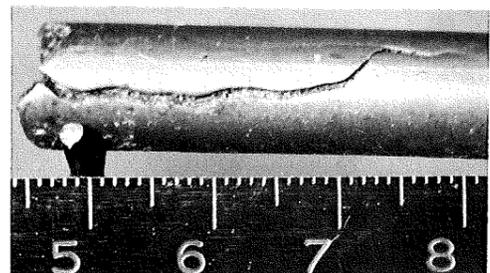
Stab 6D.3

Änderungen der Stab-Außendurchmesser

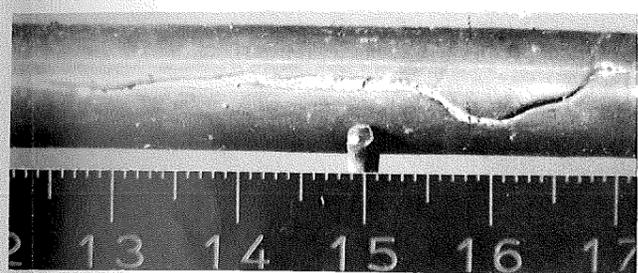
Abb. 19



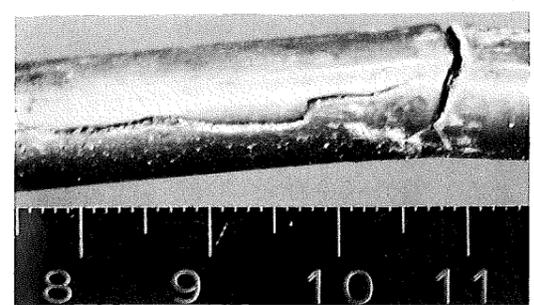
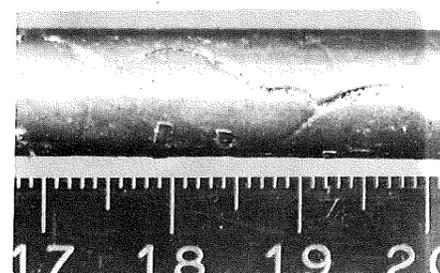
210°



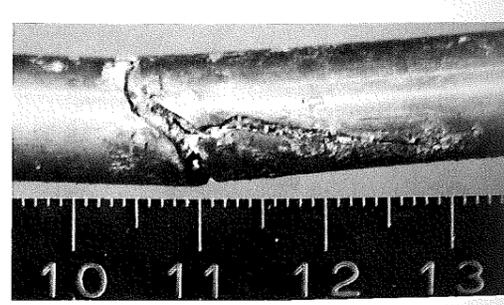
180°



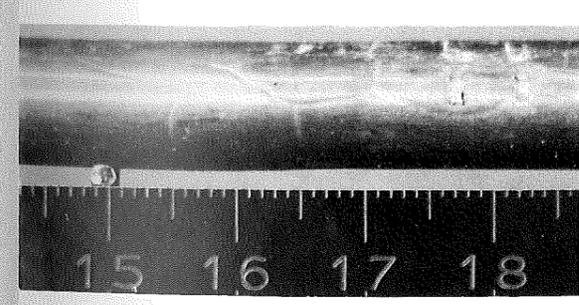
120°



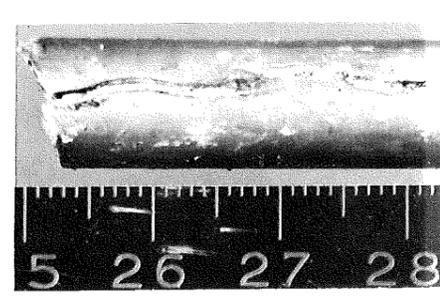
30°



180°

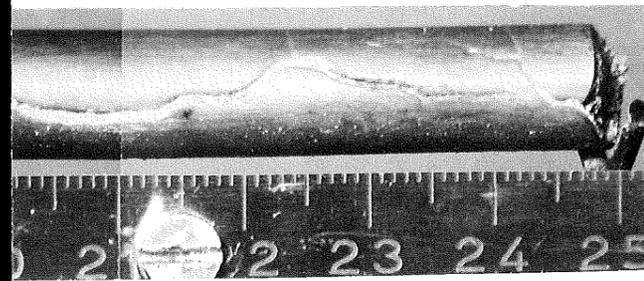
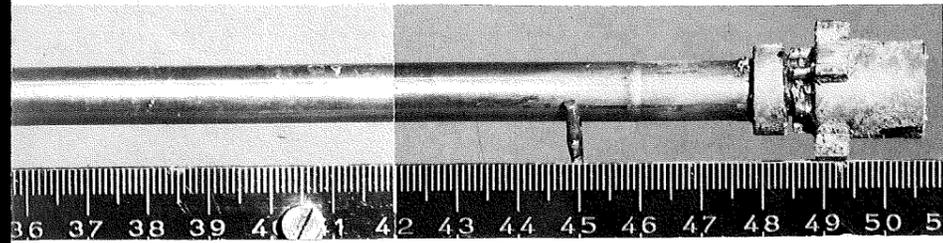
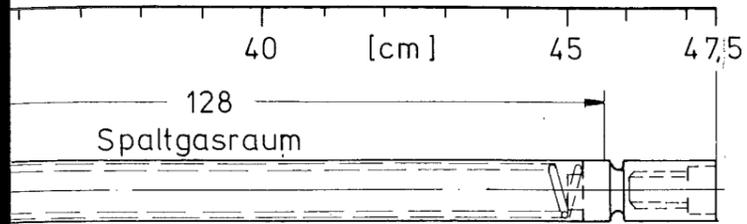


0°

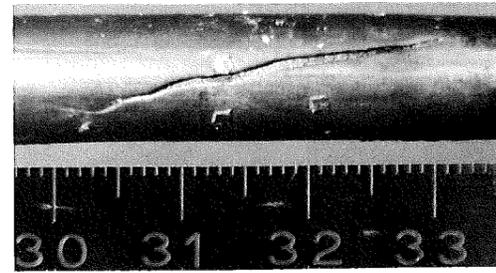
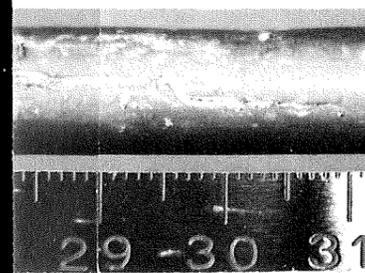
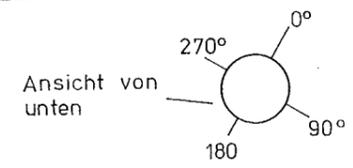


0°

Stab Nr. 6D1 Schnittplan und Orientierung der Hüllrisse

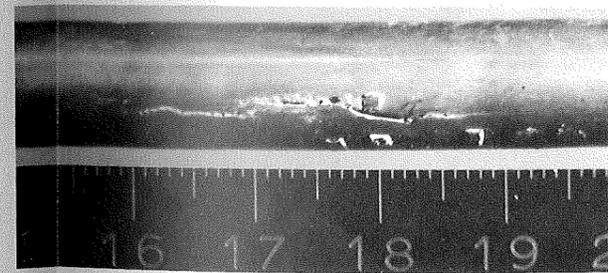
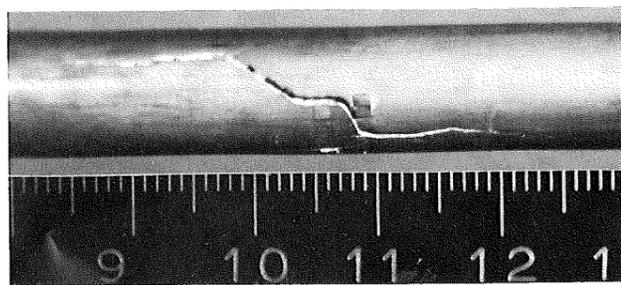
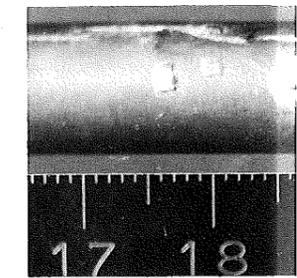
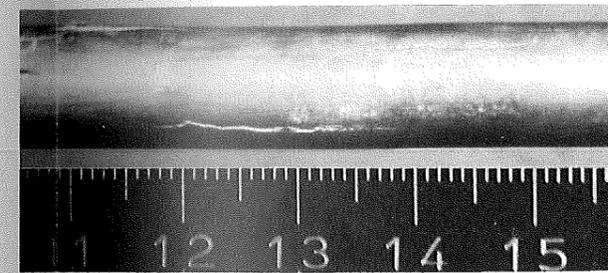
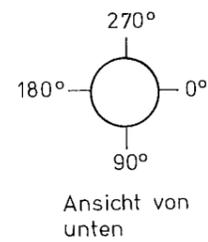
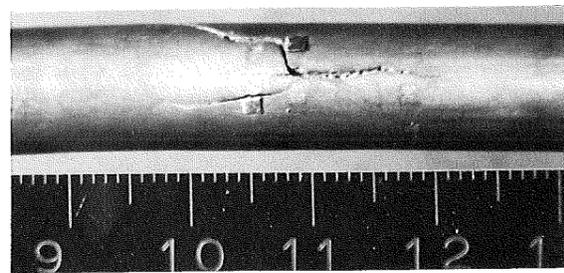
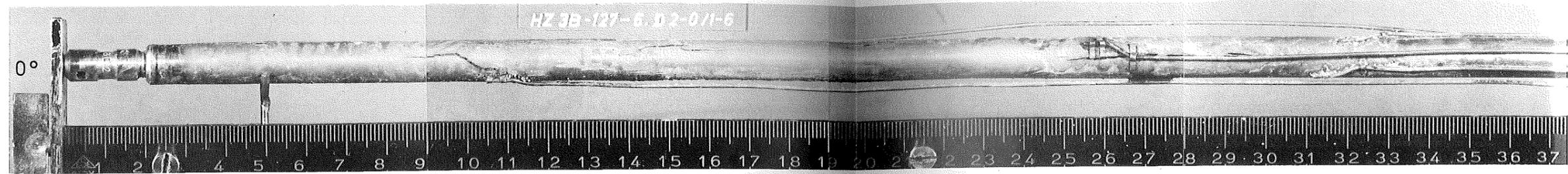
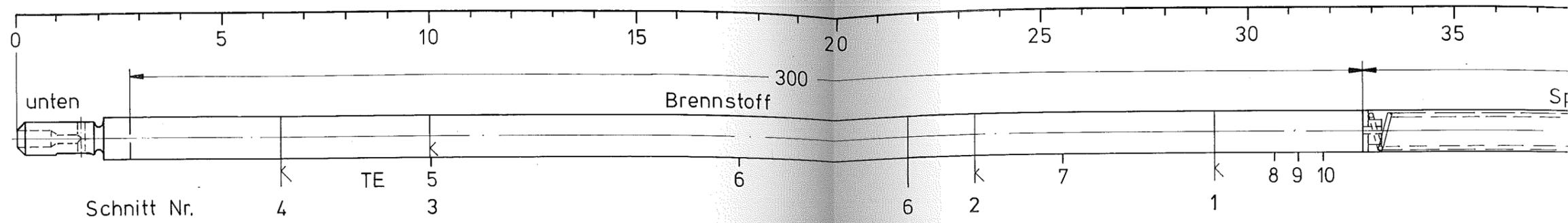


210°

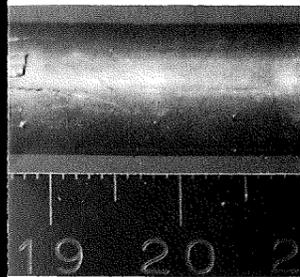
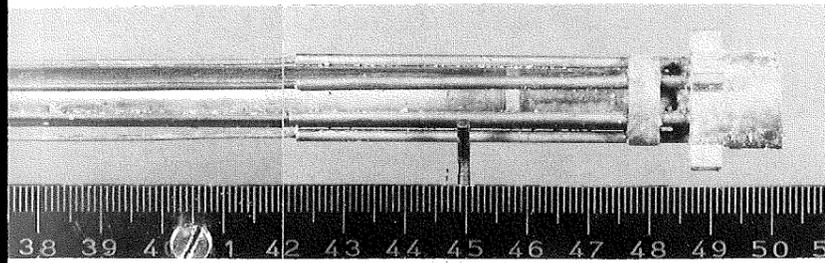
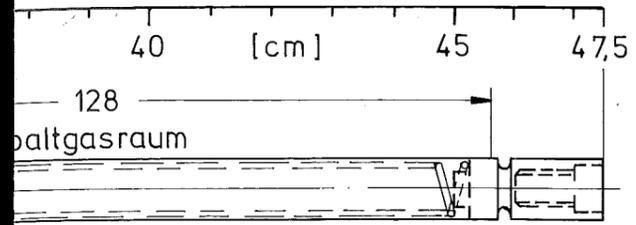


260°

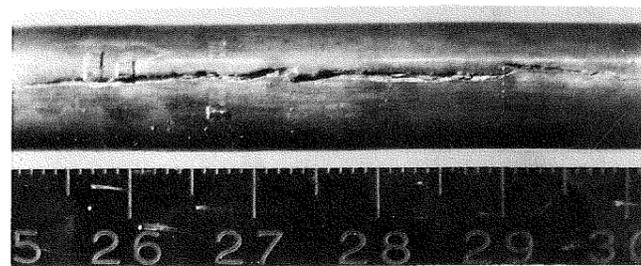
Abb. 20



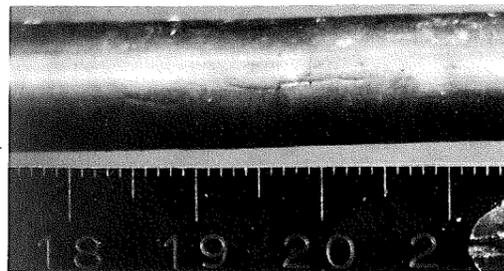
Stab Nr. 6D2 Schnittplan und Orientierung der Hüllrisse



40°

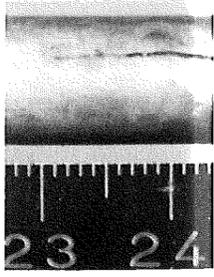
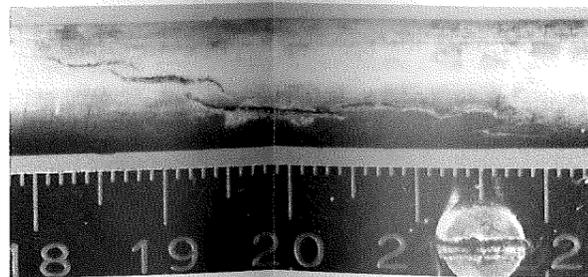
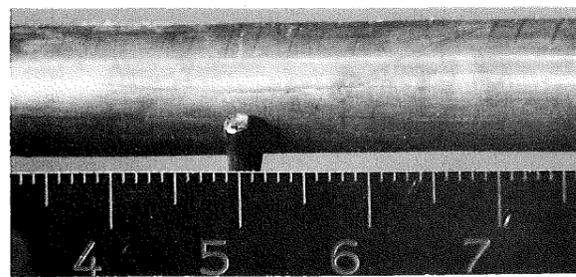
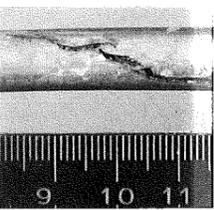
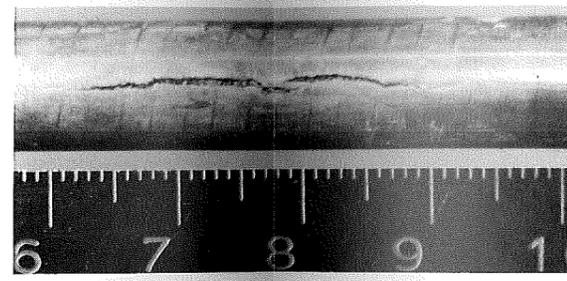
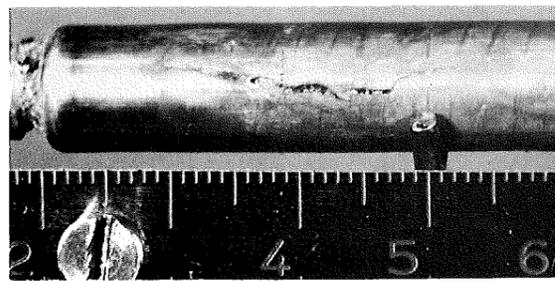
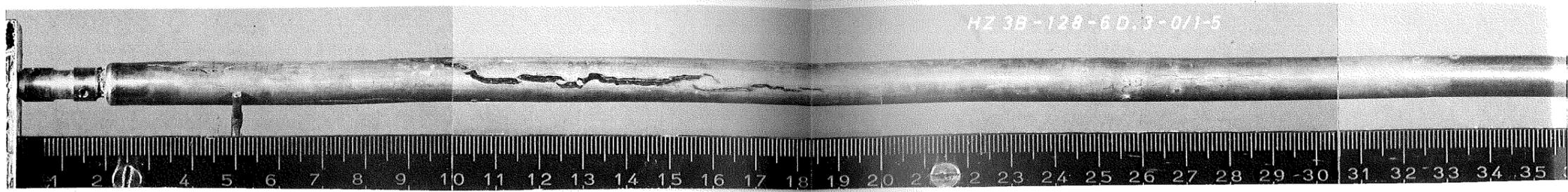
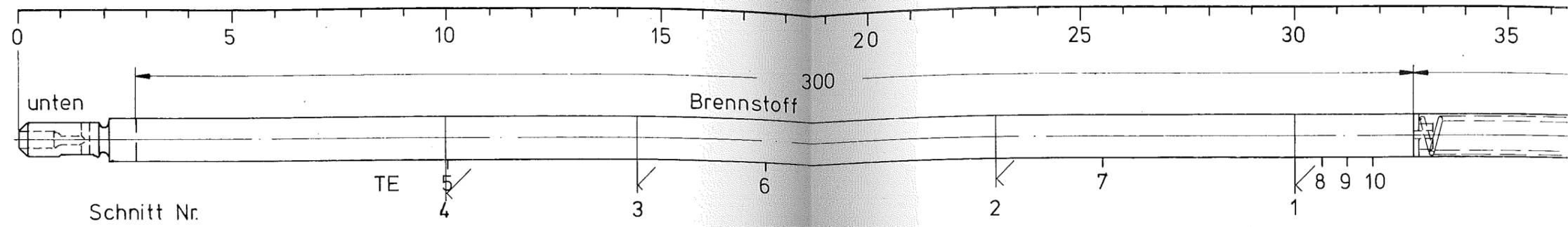


340°



310°

Abb. 21



Stab Nr. 6D3 Schnittplan und Orientierung der Hüllrisse

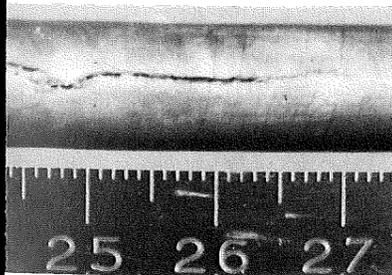
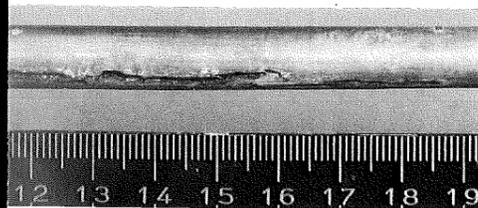
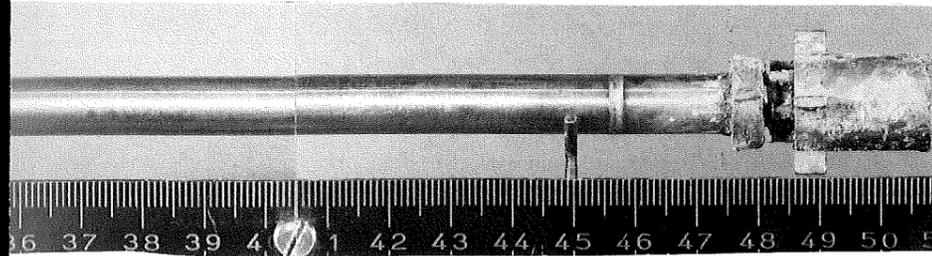
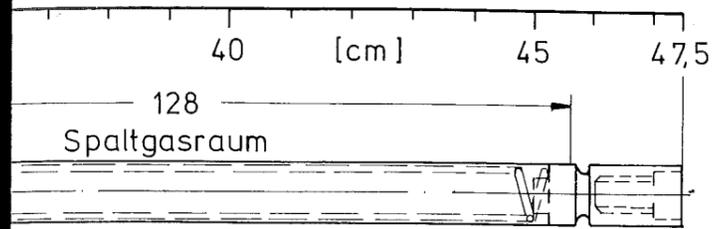
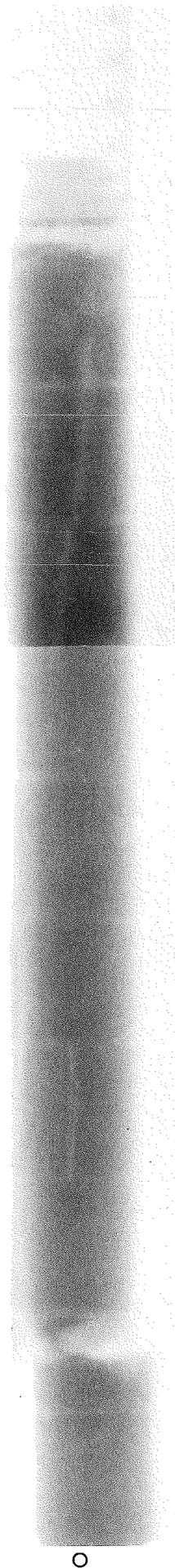
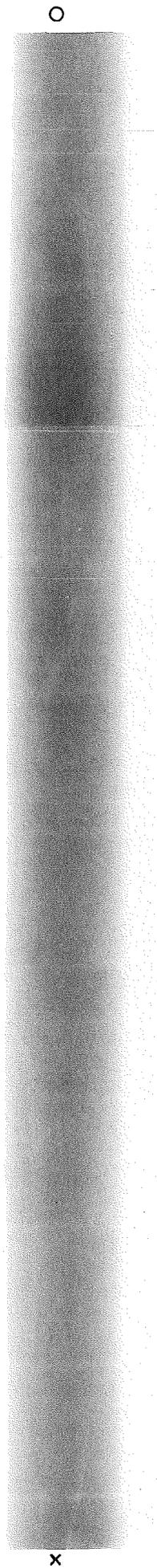
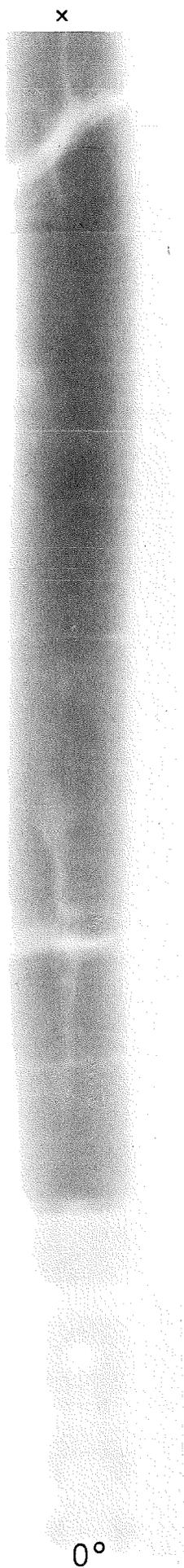
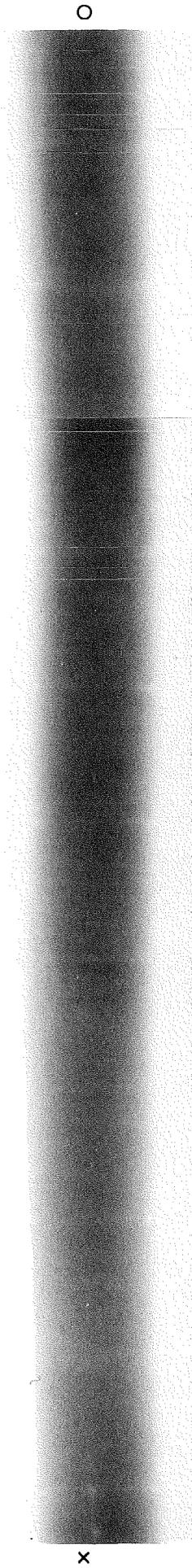
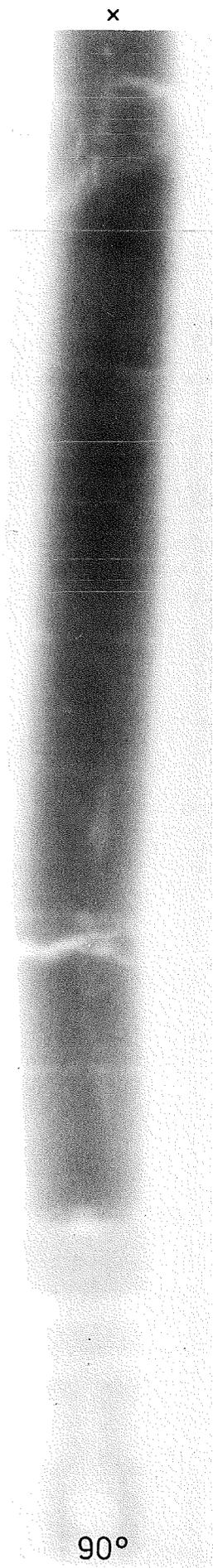


Abb. 22



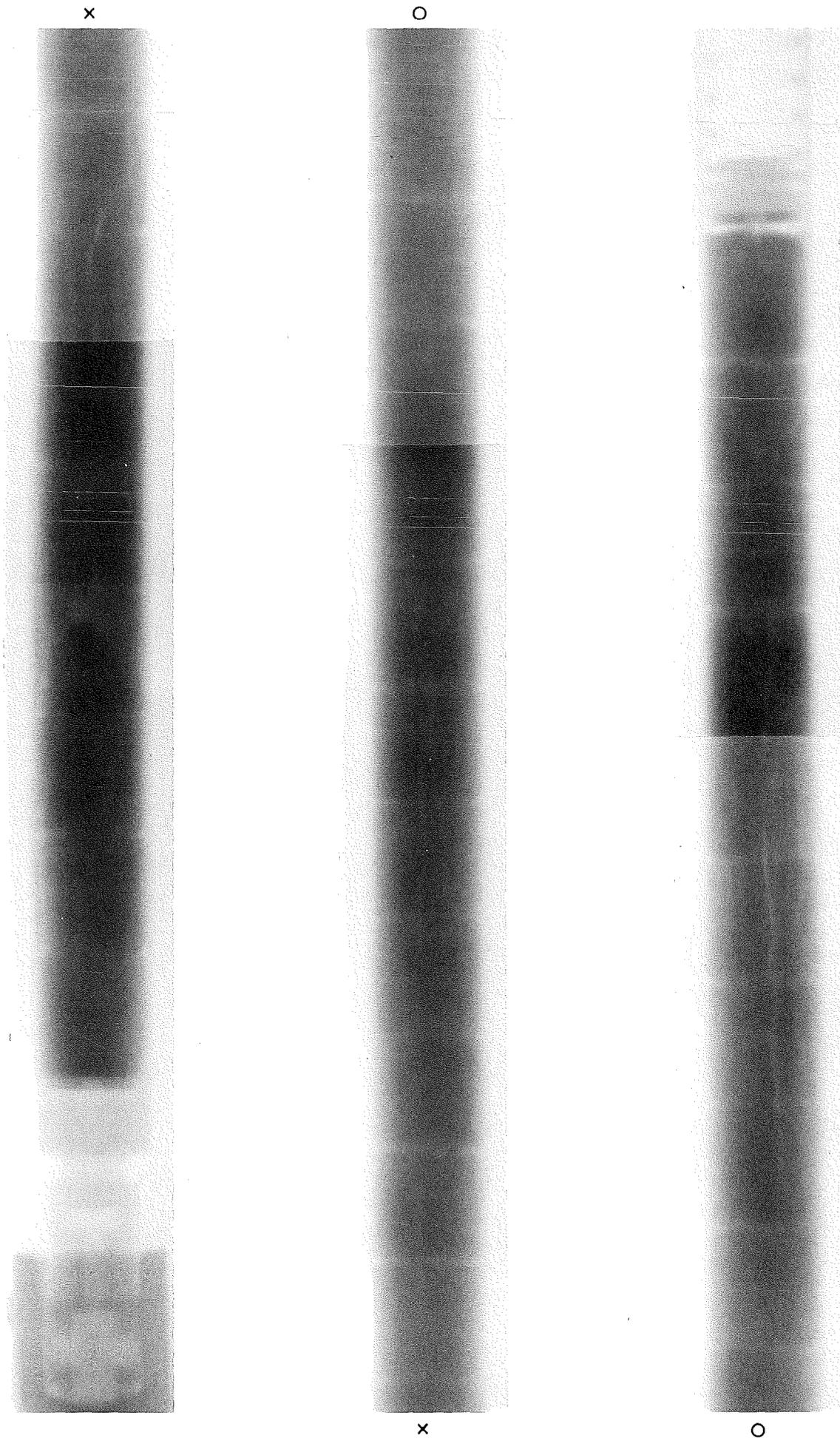
0° Betatron-Durchleuchtung von Stab 6D1

Abb. 23

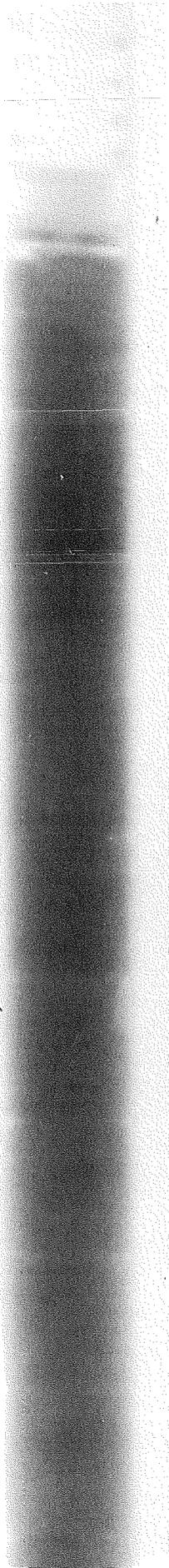
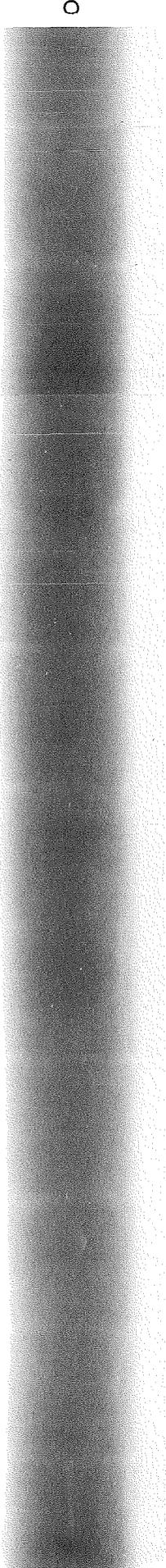
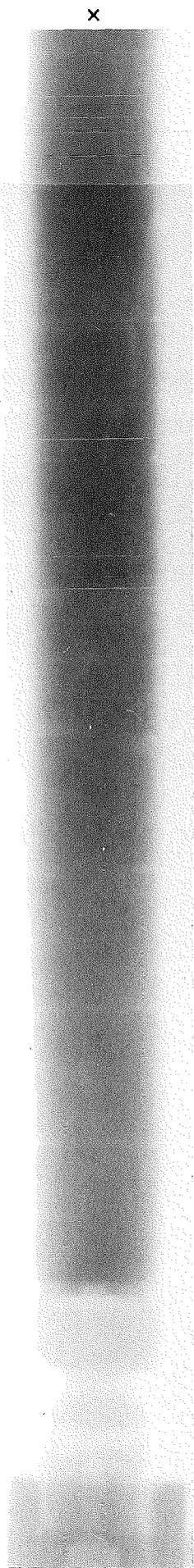


90° Betatron-Durchleuchtung von Stab 6D1

Abb. 24

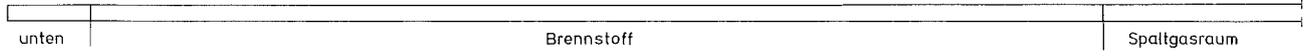
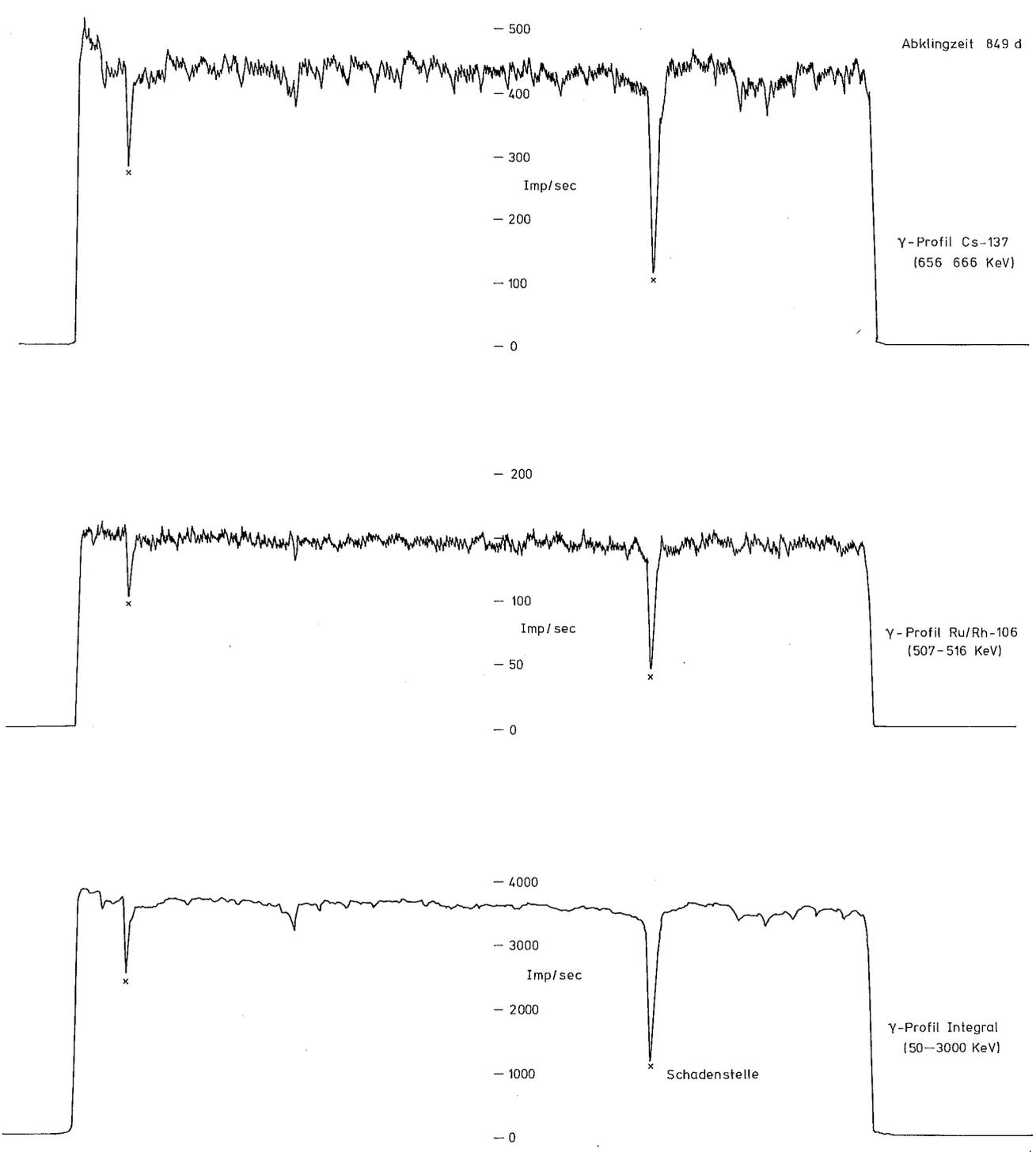


Betatron-Durchleuchtung von Stab 6D 2

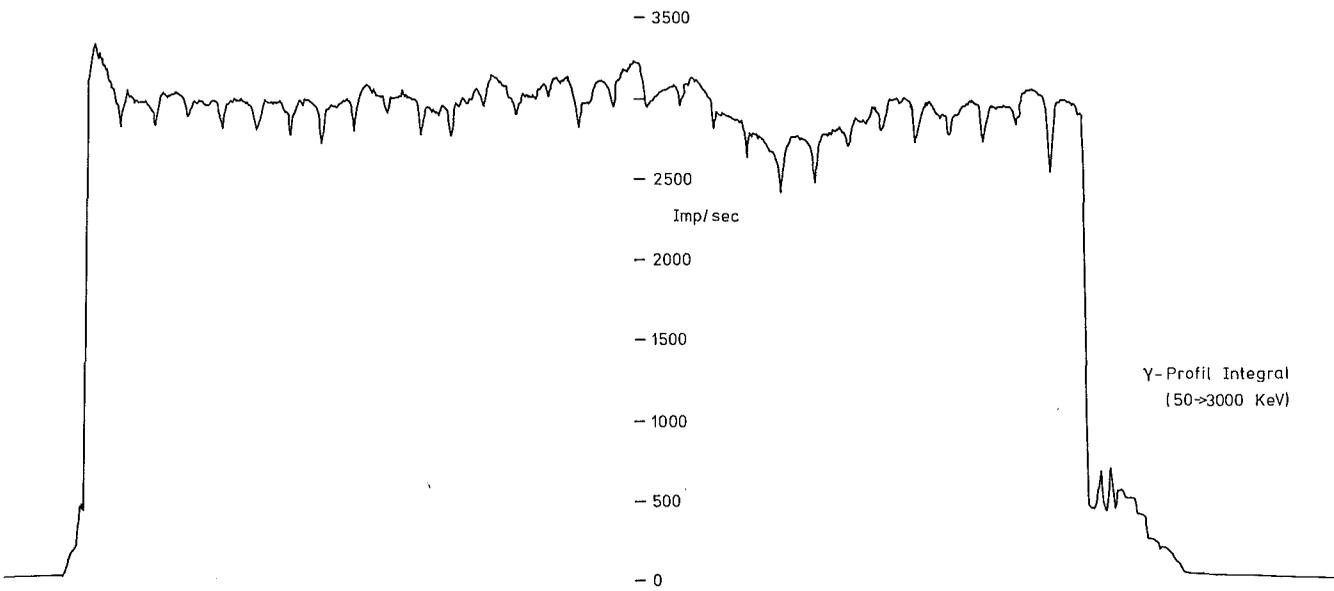
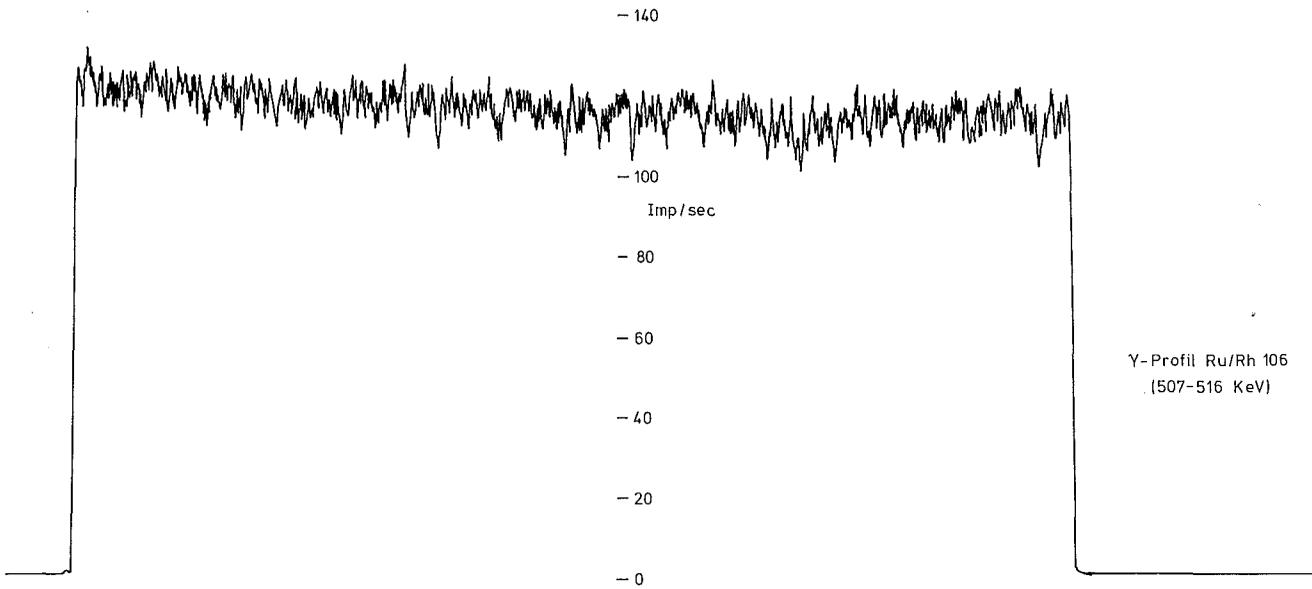
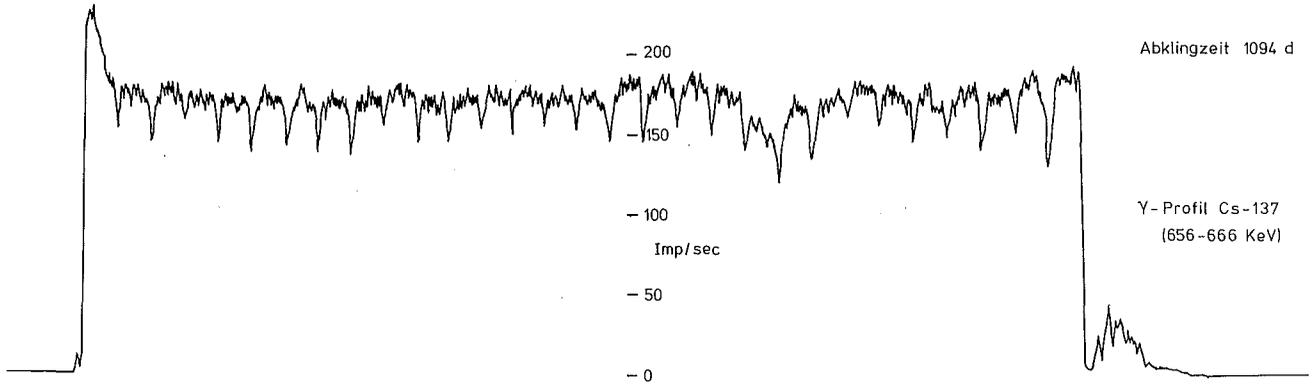


Betatron-Durchleuchtung von Stab 6D 3

Abb. 26



γ-Profile von Prüfling 6D.1



unten | Brutstoff | Spaltgasraum

Y-Profile von Prüfling 6D.2

DATUM: 6.11.79

UNTERSCHRIFT:



Blatt:

von:

PROJEKT 3B

KVE 130

6D.1

2

Mikrohärteprüfung n. Vickers

Projekt Nr.: HZ

Prüflast: 490 N (50 p)

Härteprofil: außen - innen

453 MHV 50

386

321

303

280

277

271

293

293

280

280

340

441

584

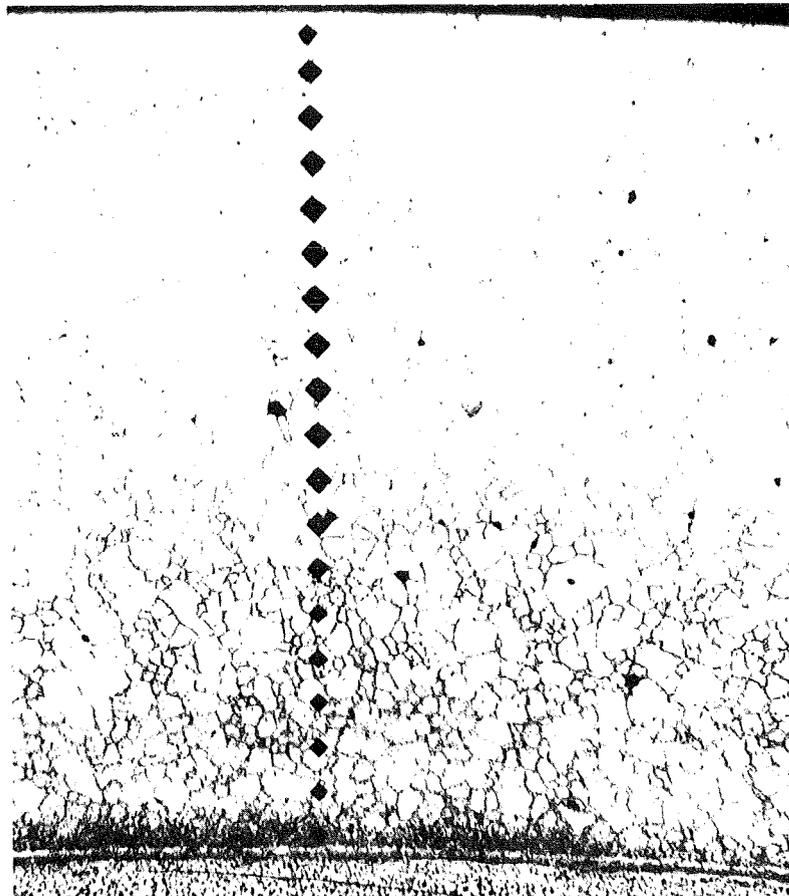
603

584

593

666

701



HZ-3B-KVE 130-6D.1-2/12 200x geätzt | 100 µm

Abb. 30

DATUM: 6.11.79

UNTERSCHRIFT:



Blatt:

von:

PROJEKT 3B

KVE 127

6D.2

1

Mikrohärteprüfung n. Vickers

Projekt Nr.: HZ

Prüflast: 490 N (50 p)

Härteprofil: außen - innen

376 MHV 50

271

257

254

257

268

310

332

435

509

549

603

633

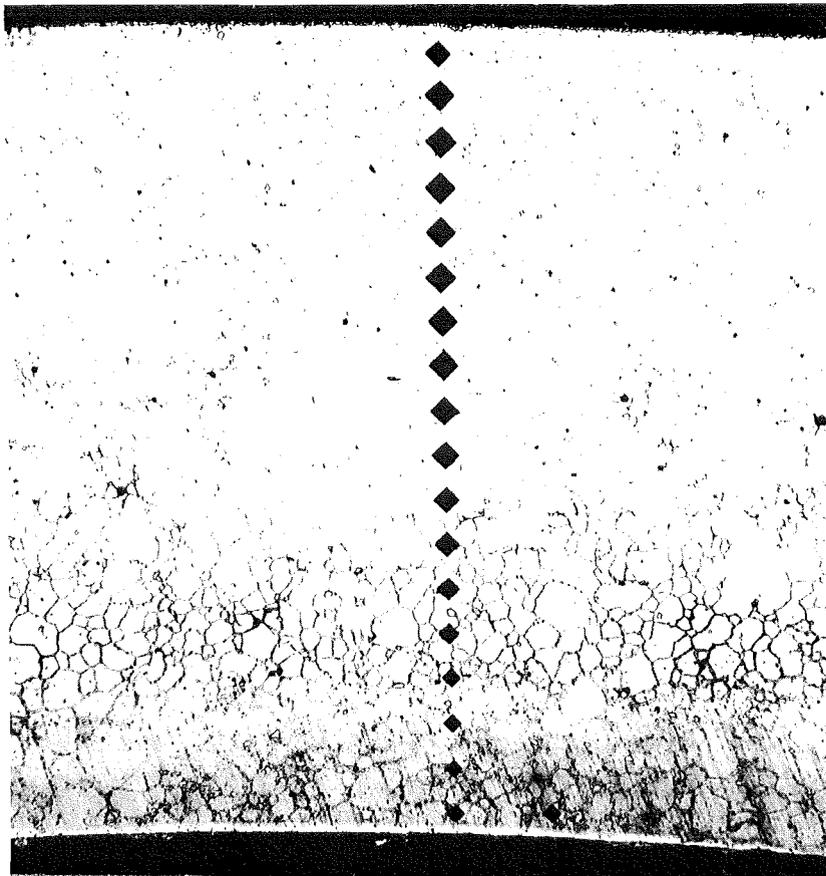
677

689

713

713

701



HZ-3B-KVE 127-6D.2-1/15 200x geätzt

100 µm

DATUM: 6.11.79

UNTERSCHRIFT:



Blatt:

von:

PROJEKT 3B

— KVE 127

— 6 D.2

— 1

Mikrohärteprüfung n. Vickers

Projekt Nr.: HZ

Prüflast: 490 N (50 p)

Härteprofil außen - innen

332 MHV 50

257

236

236

236

244

249

257

265

299

303

332

362

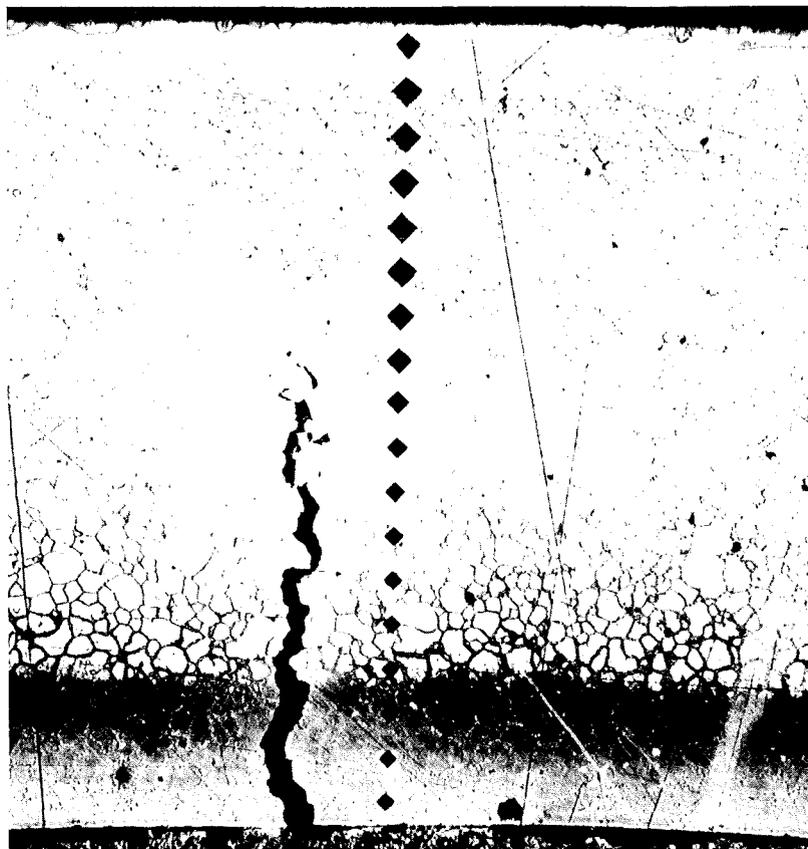
441

501

666

713

795



HZ-3B-KVE 127-6D.2-1/14 200x geätzt

100 µm

DATUM: 6.11.79

UNTERSCHRIFT:



Blatt: von:

PROJEKT 3B

_____ KVE 127

_____ 6D.2

_____ 2

Mikrohärteprüfung n. Vickers

Projekt Nr.: HZ

Prüflast: 490 N (50 p)

Härteprofil: außen - innen

303 MHV 50

257

236

244

232

239

249

262

257

262

260

260

265

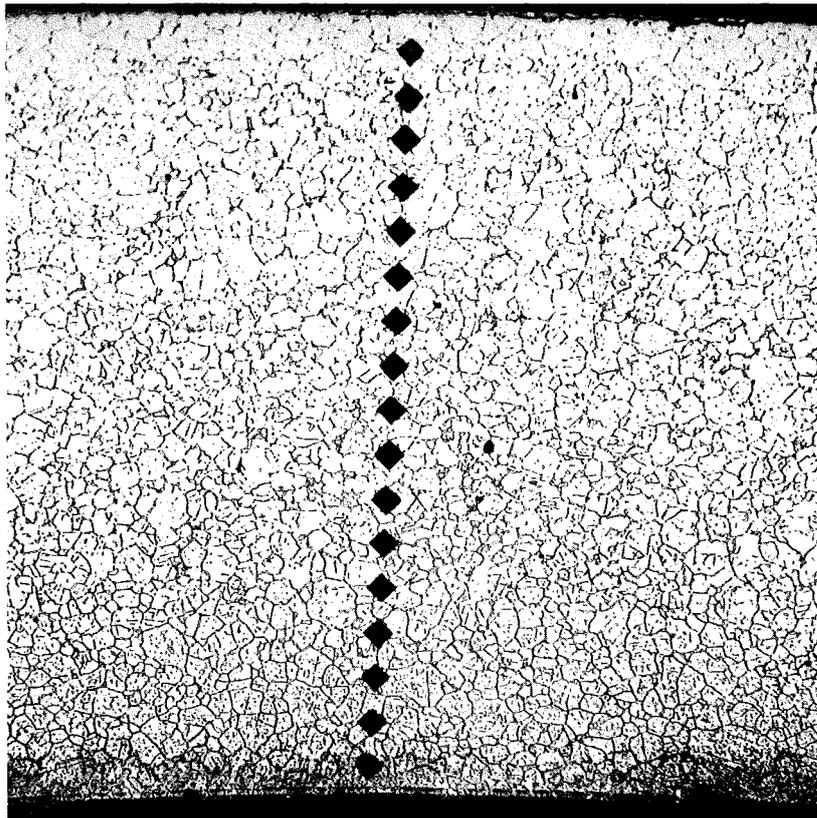
274

280

286

286

321



HZ-3B-KVE 127-6D.2-2/17 200x geätzt

100 μ m

Abb. 33

DATUM: 6.11.79

UNTERSCHRIFT:



Blatt: von:

PROJEKT 3B

KVE 127

6D.2

2

Mikrohärteprüfung n. Vickers

Projekt: HZ

Prüflast: 490 N (50 p)

Härteprofil: außen - innen

271 MHV 50

274

280

283

306

283

310

321

313

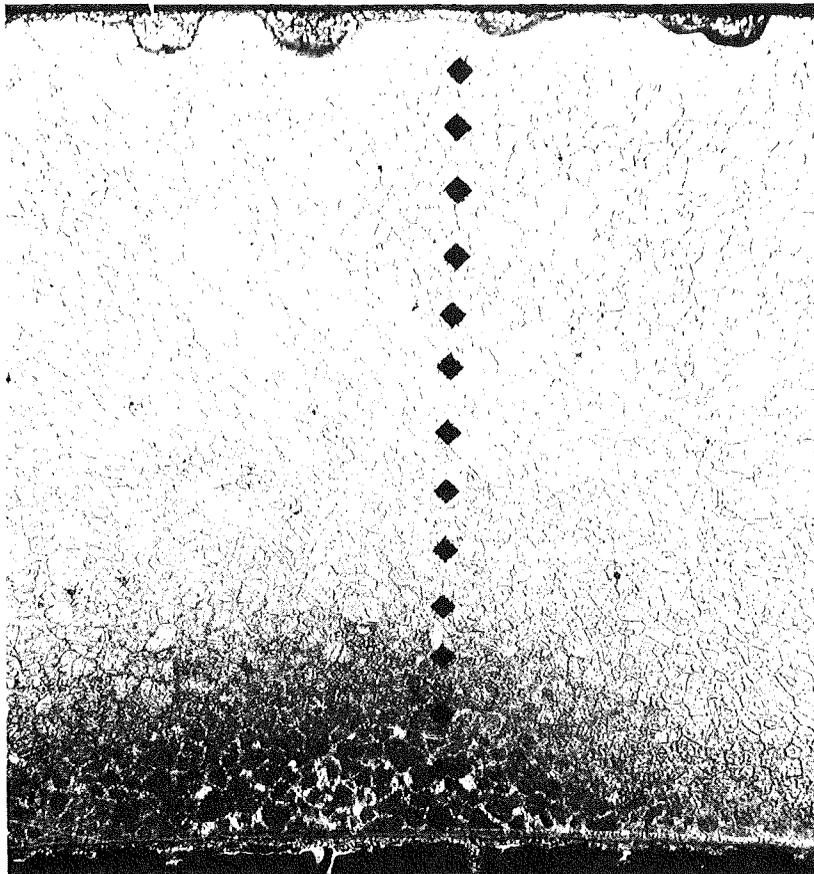
353

371

371

349

401



HZ-3B-KVE 127-6D.2-2/16 200x geätzt

100 μ m

Abb. 34

DATUM: 6.11.79

UNTERSCHRIFT:



Blatt:

von:

PROJEKT 3B

KVE 128

6D.3

2

Mikrohärteprüfung n. Vickers

Projekt Nr.: HZ

Prüflast: 490 N (50 p)

Härteprofil: außen - innen

321 MHV 50

286

274

277

265

271

257

262

268

271

268

262

286

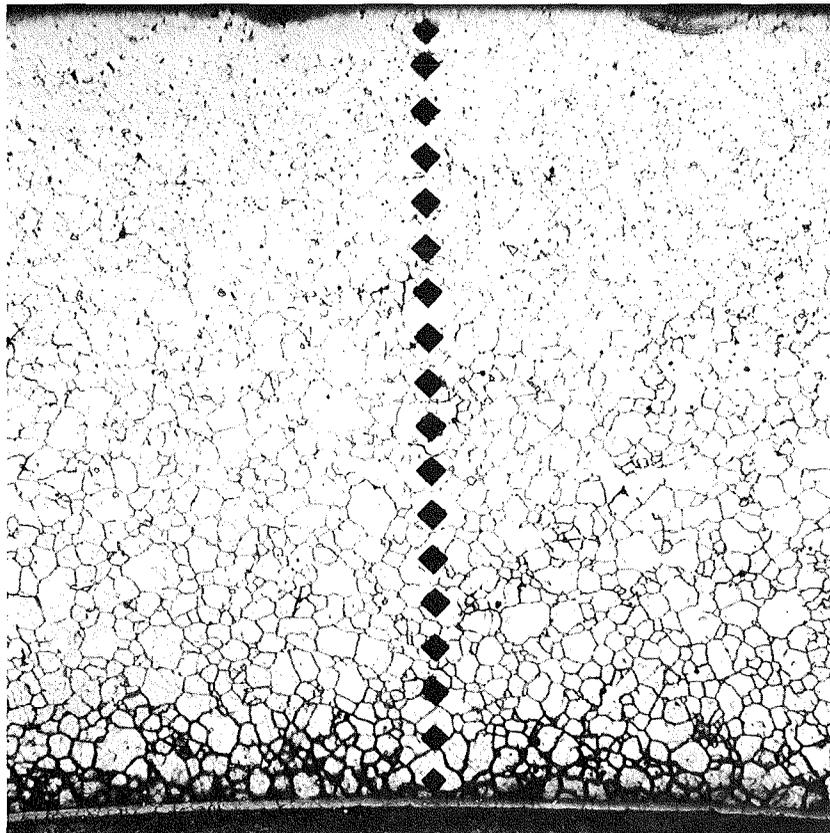
265

303

329

346

396



HZ-3B-KVE 128-6D.3-2/13 200x geätzt

100 μm

DATUM: 6.11.79

UNTERSCHRIFT:



Blatt:

von:

PROJEKT 3B

— KVE128

— 6D.3

— 2

Mikrohärteprüfung n. Vickers

Projekt Nr.: HZ

Prüflast: 490 N (50 p)

Härteprofil: außen - innen

286 MHV 60

277

274

268

271

268

268

265

271

271

293

286

289

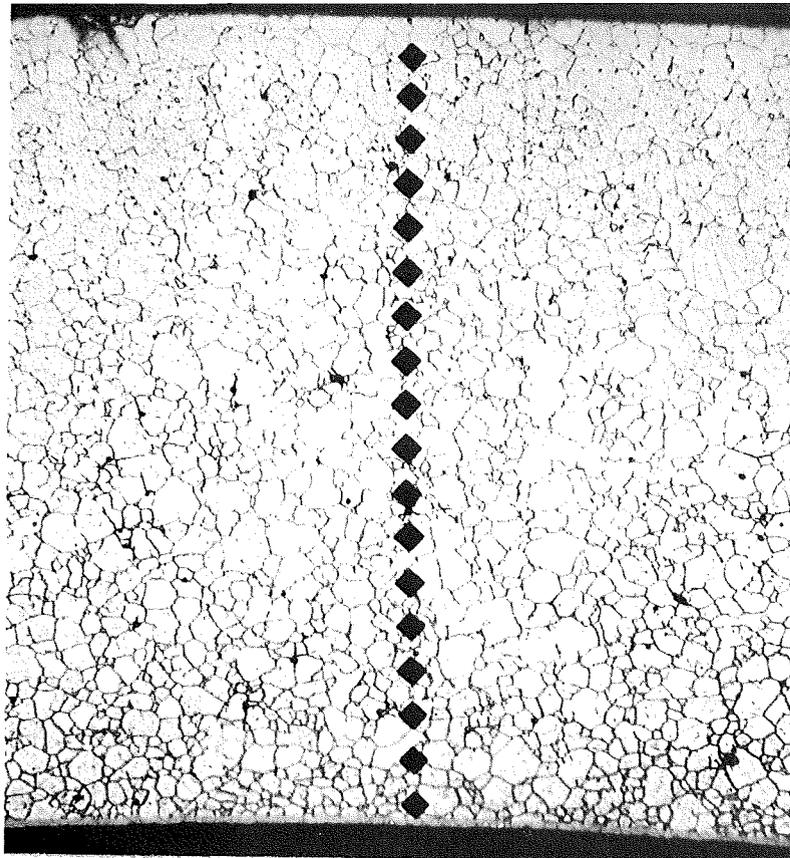
286

293

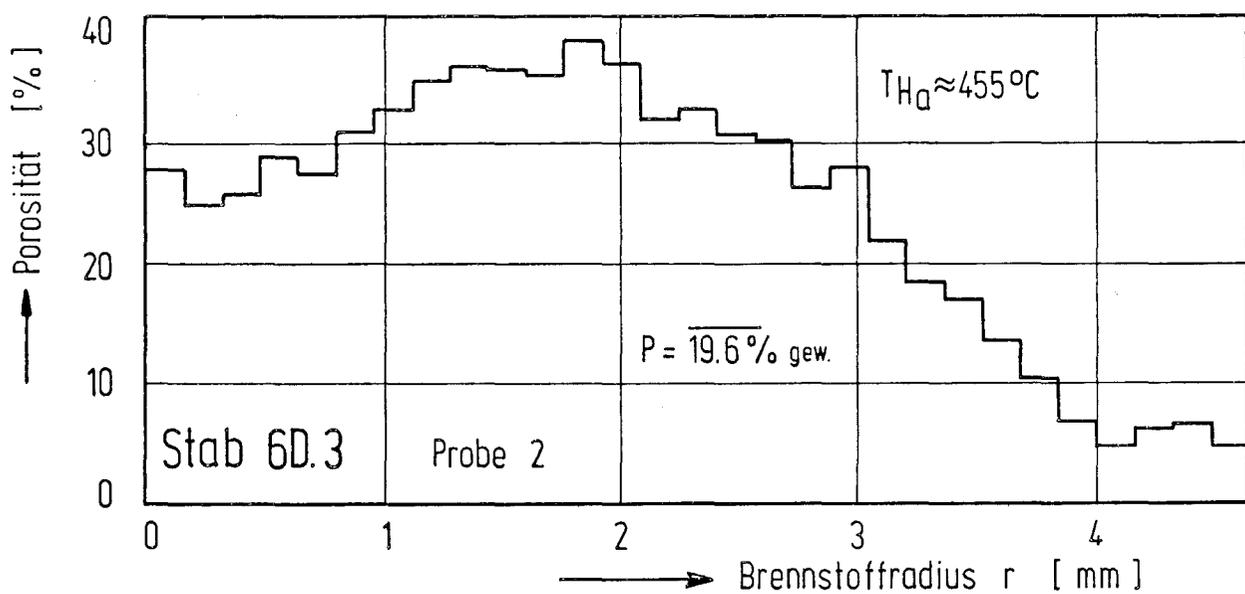
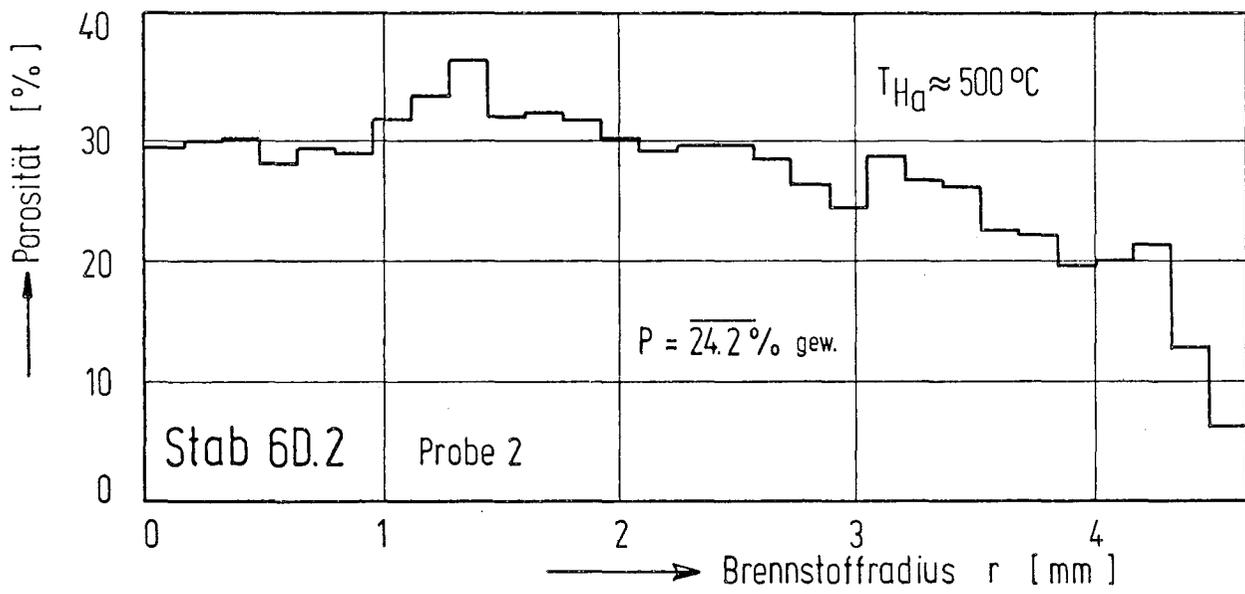
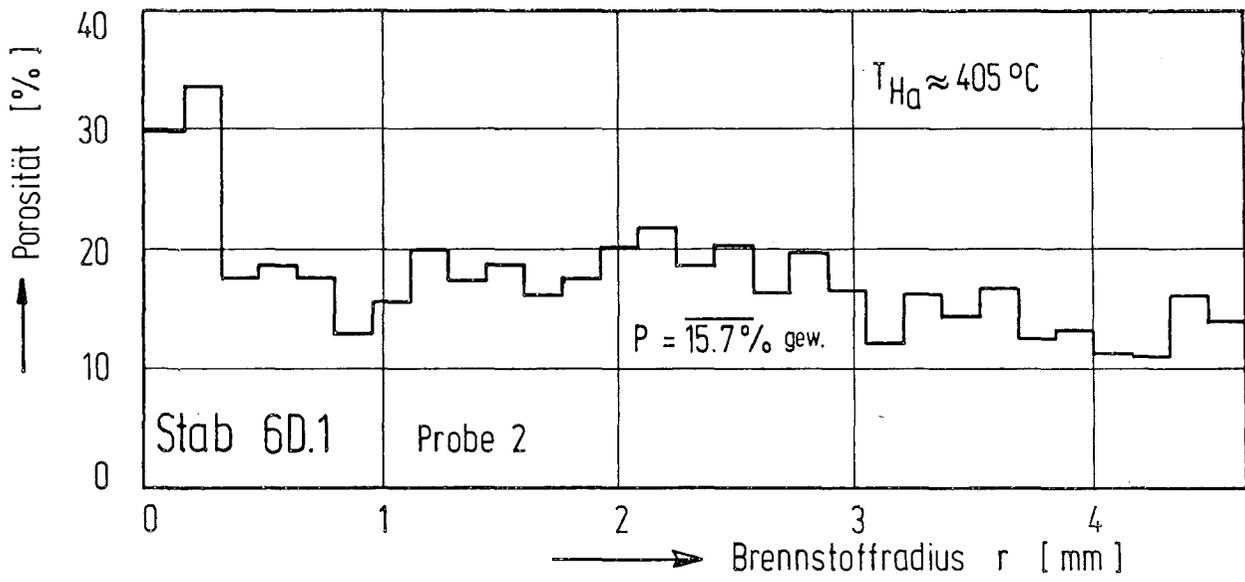
286

286

299



HZ-3B-KVE 128-6D.3-2/12 200x geätzt 100 μm



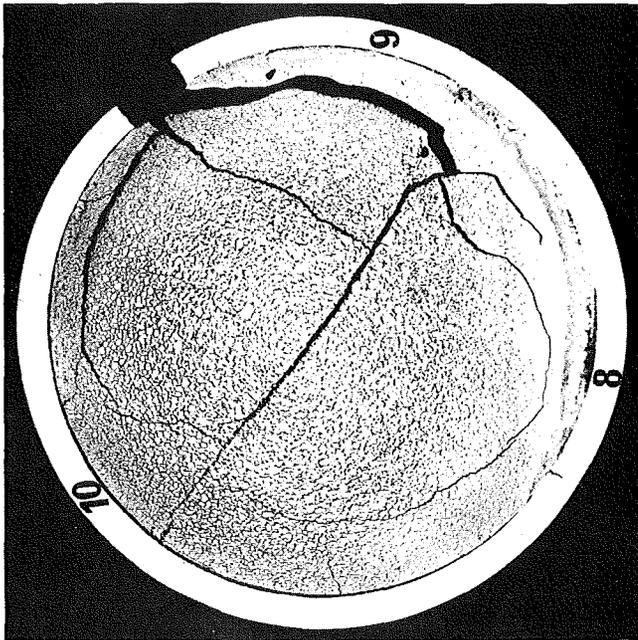
Gemessene radiale Porositätsprofile

Abb. 37

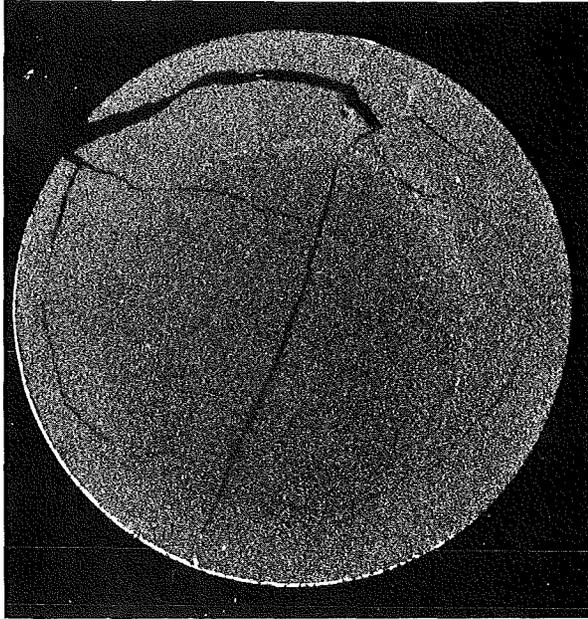
A N H A N G I

Z e r s t ö r e n d e

N a c h u n t e r s u c h u n g

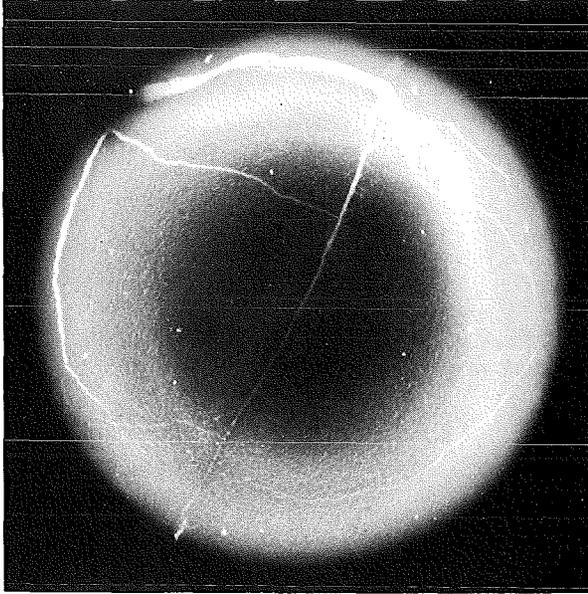


Schnitt 1



α (5 sec)

2 mm



β - γ (20 sec)

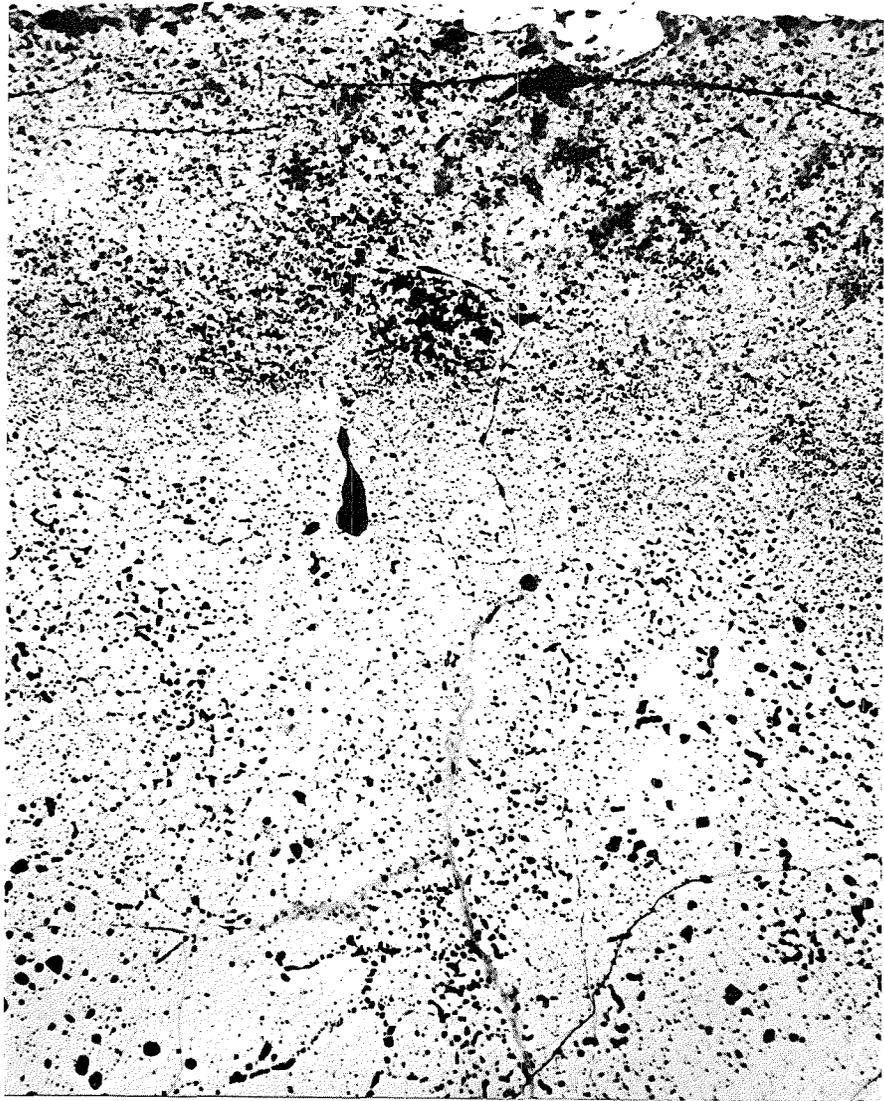
Autoradiografie

Vg. 6 Prüfling 6D.1



HZ-3B-KVE 130-6D.1-1/10 100x

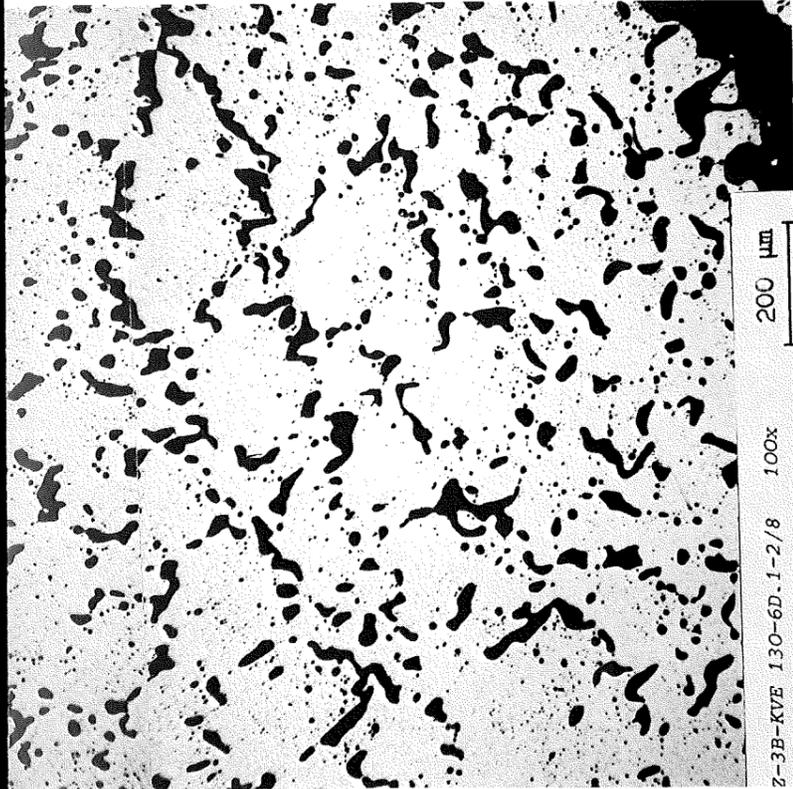
200 μm



HZ-3B-KVE 130-6D.1-1/9 200x

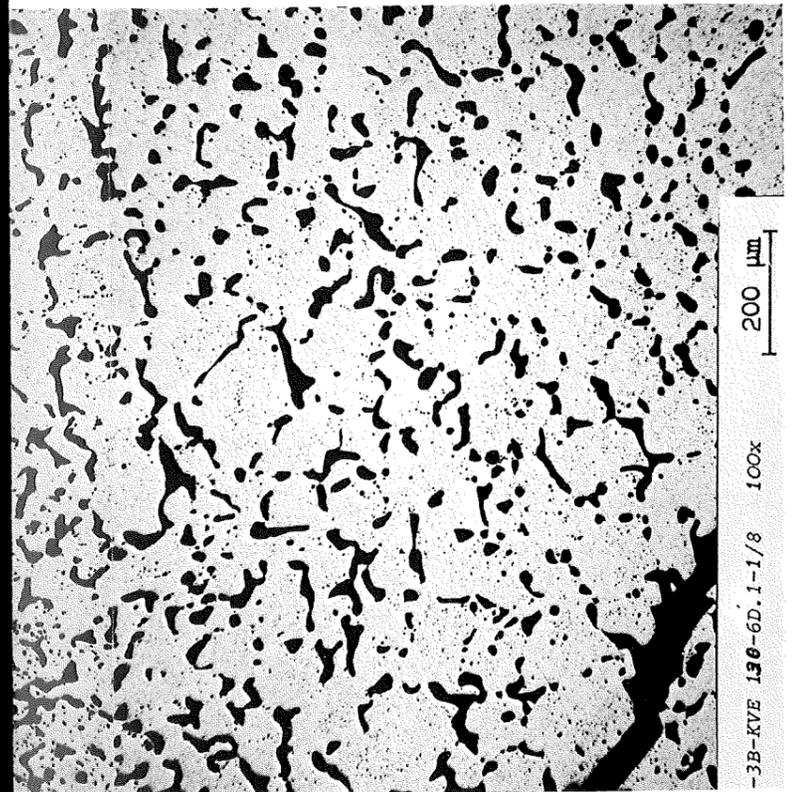
100 μm

Stab 6D.1 Schnitt 1

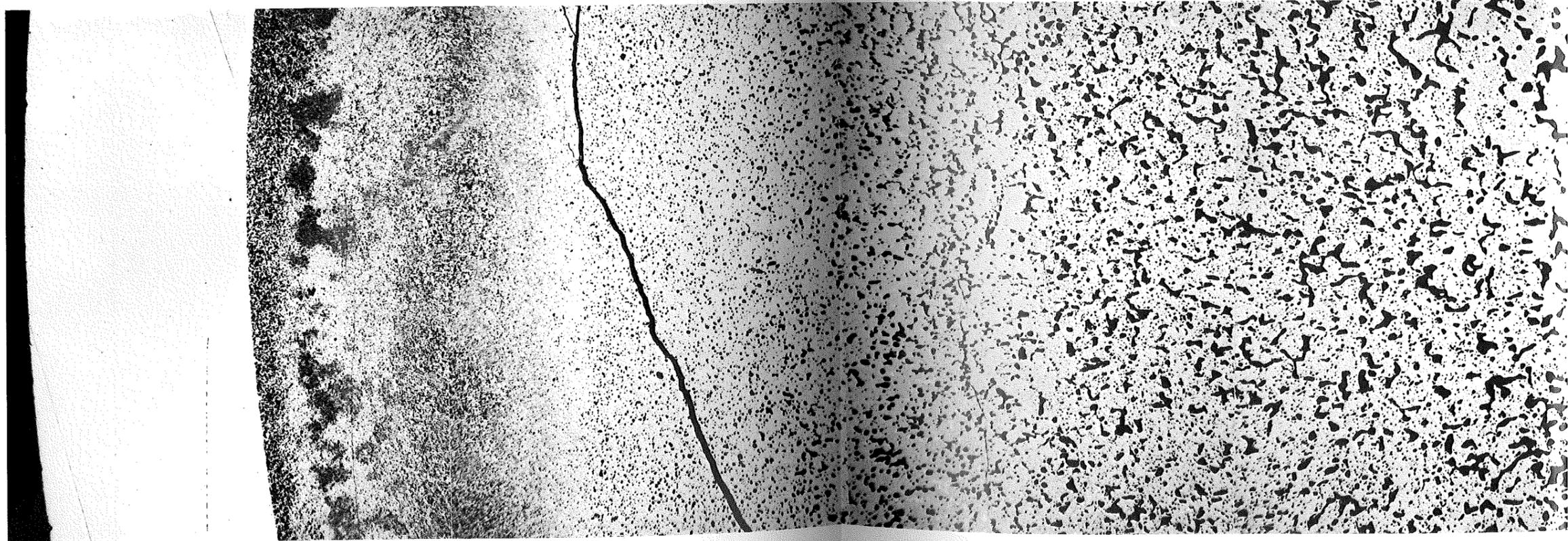
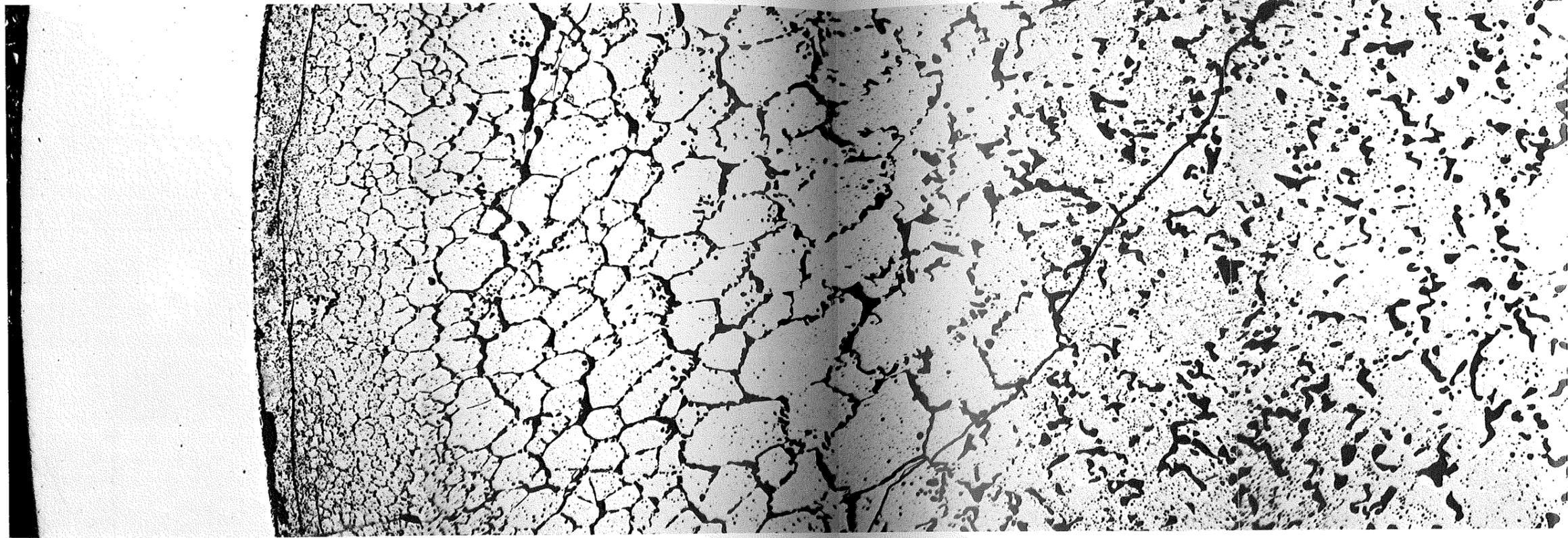


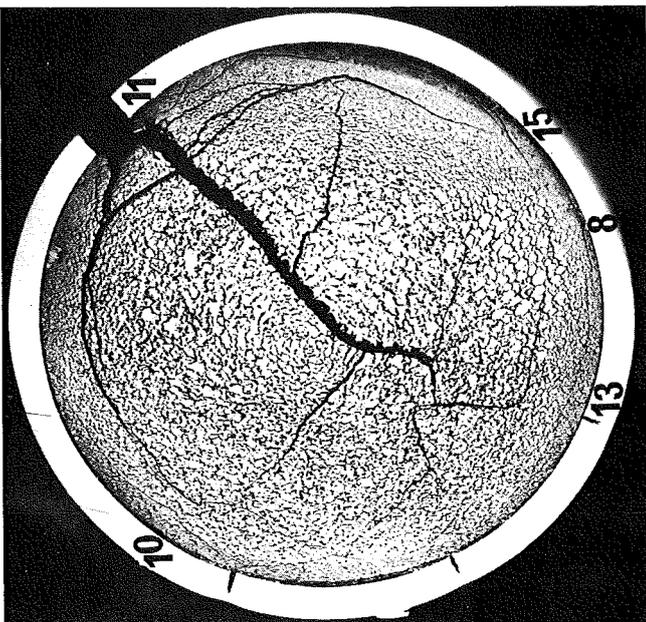
Schnitt 2

Stab 6D.1

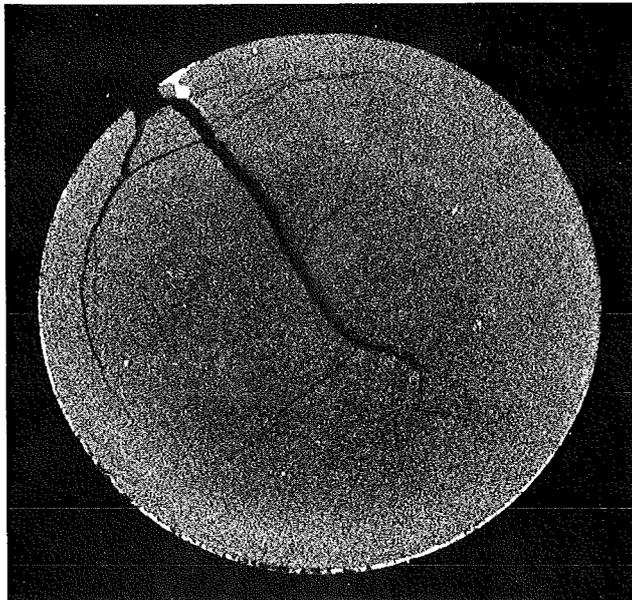


Schnitt 1

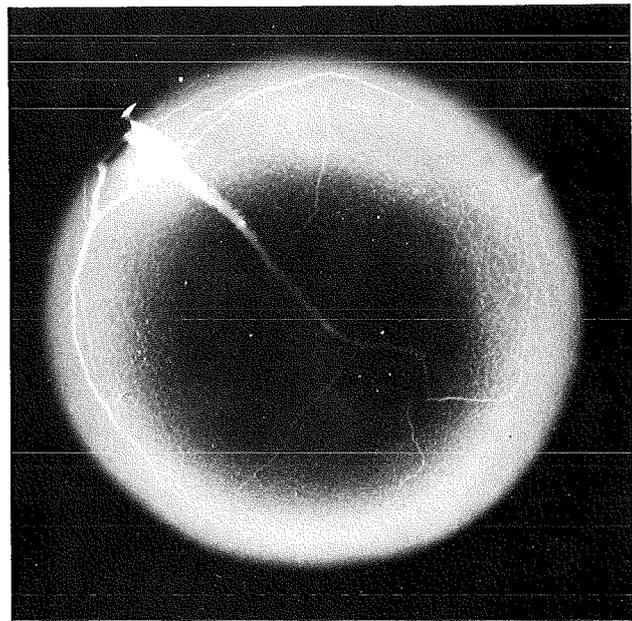




Schnitt 2



α (5 sec)



β-γ (20 sec)

2 mm

Autoradiografie

Vg. 6 Prüfling 6D.1

Stab 6D.1 Schnitt 2



200 μm

100x

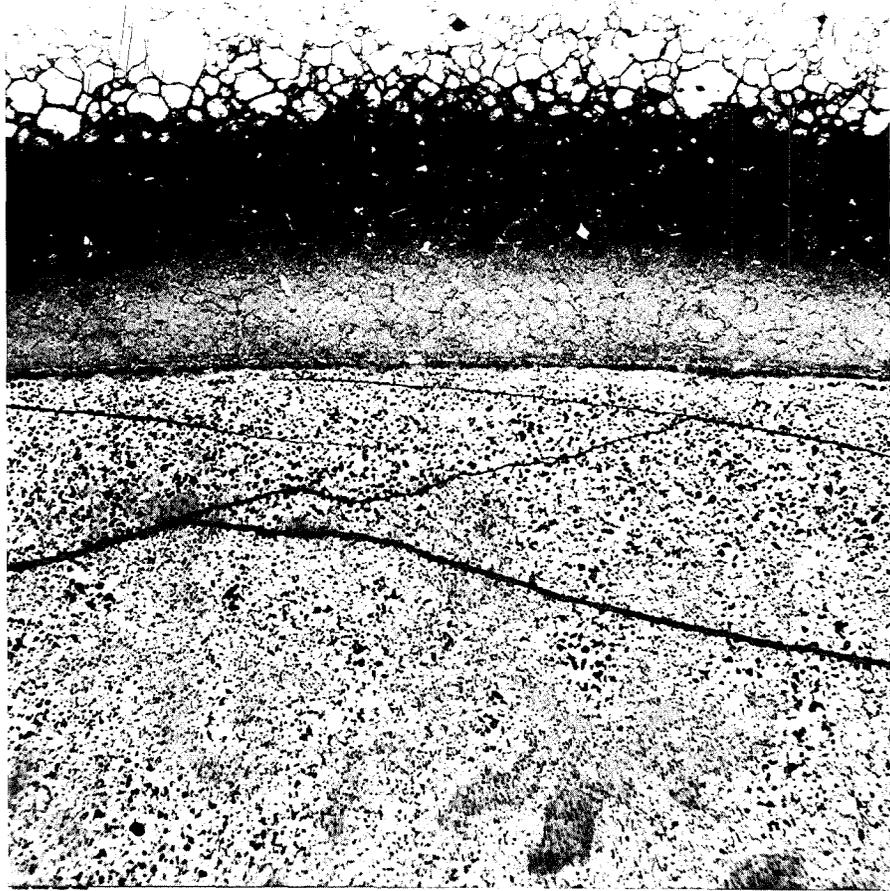
HZ-3B-KVE 130-6D.1-2/10



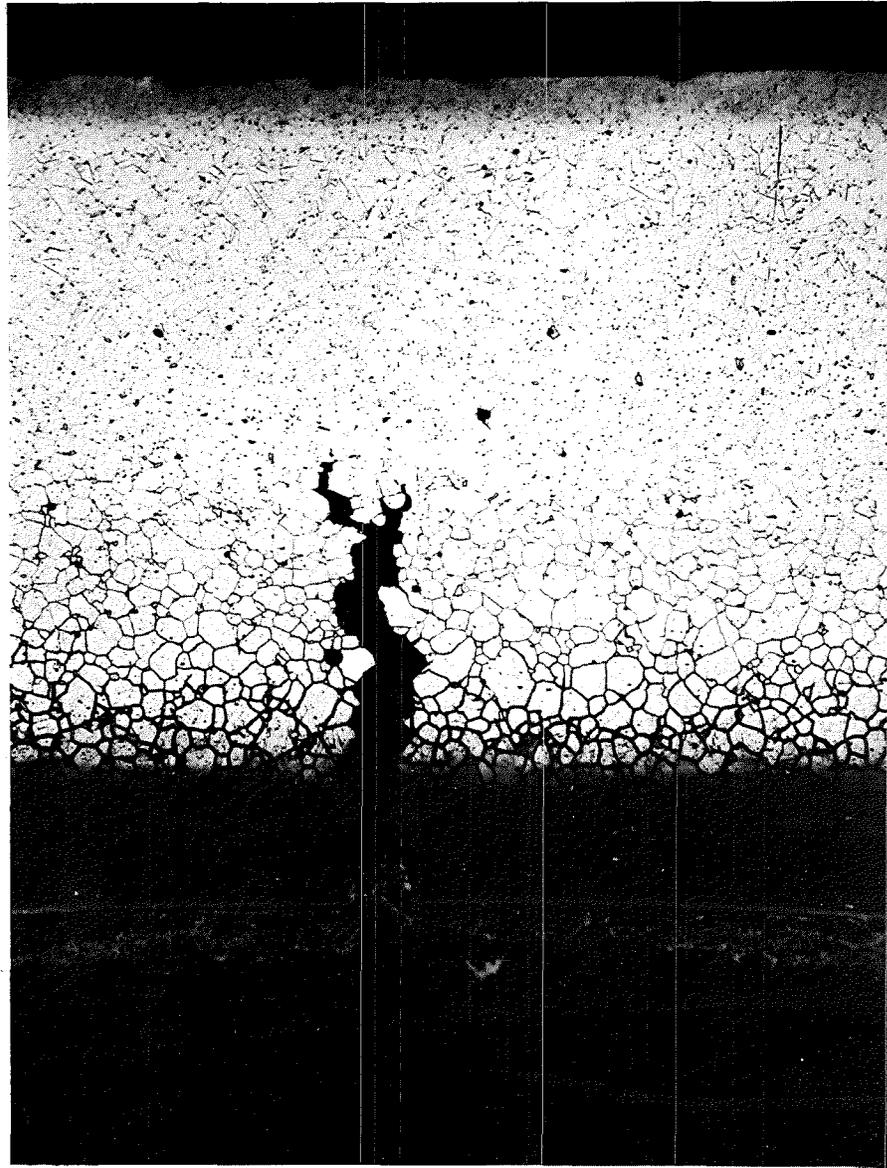
100 μm

200x

HZ-3B-KVE 130-6D.1-2/11

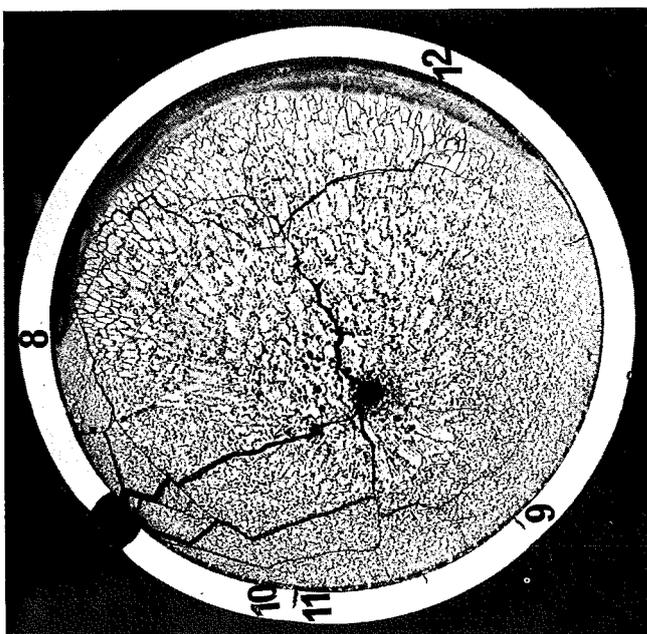


HZ-3B-KVE 130-6D.1-2/15 200x geätzt $100 \mu\text{m}$

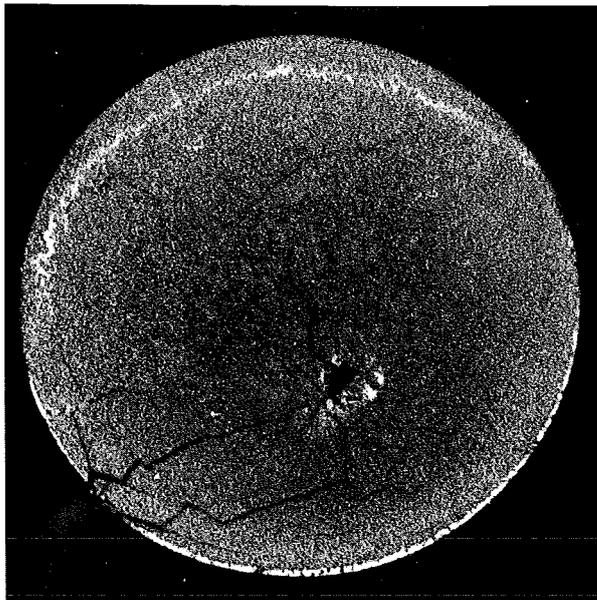


HZ-3B-KVE 130-6D.1-2/13 200x geätzt $100 \mu\text{m}$

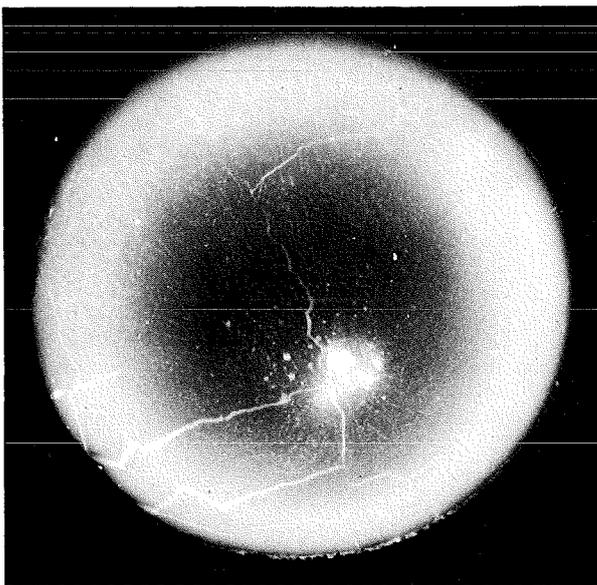
Stab 6D.1 Schnitt 2



Schnitt 3



α (5 sec)



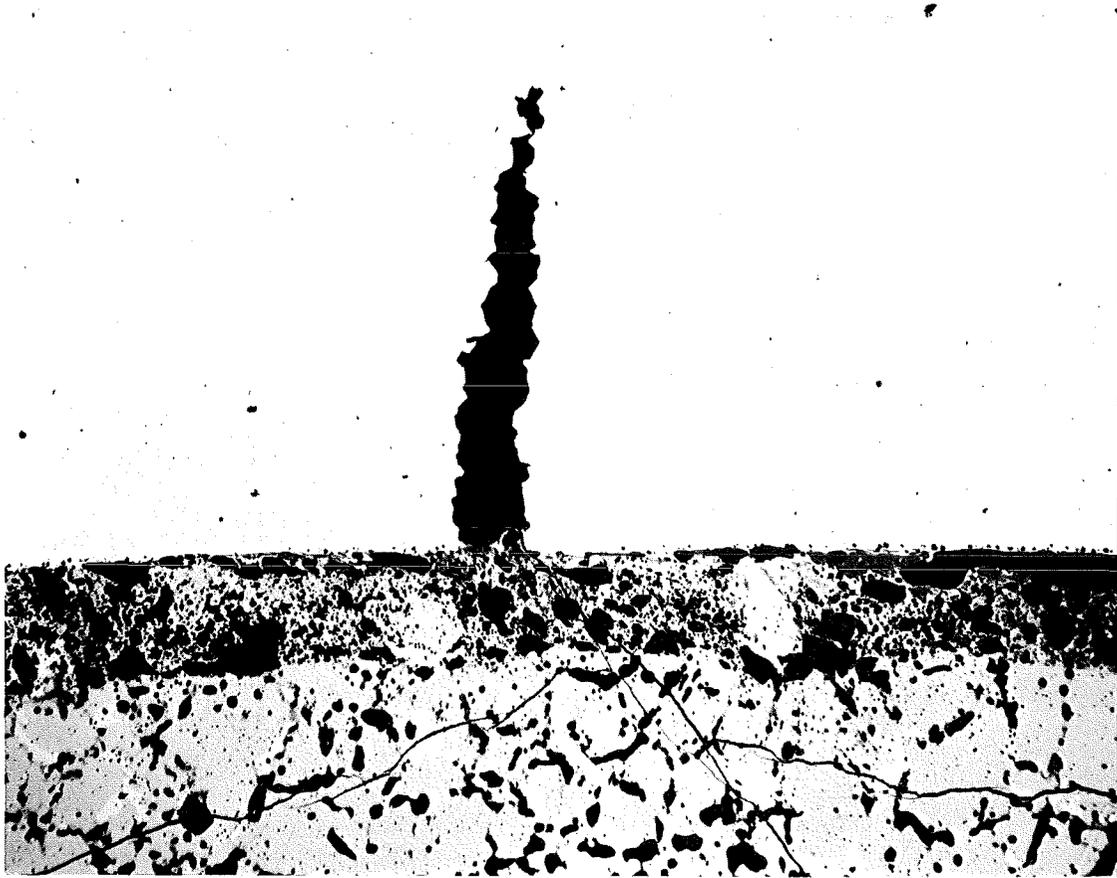
β - γ (20 sec)

2 mm

Autoradiografie

Vg. 6 Prüfling 6D.1

Stab 6D,1 Schnitt 3



100 μm

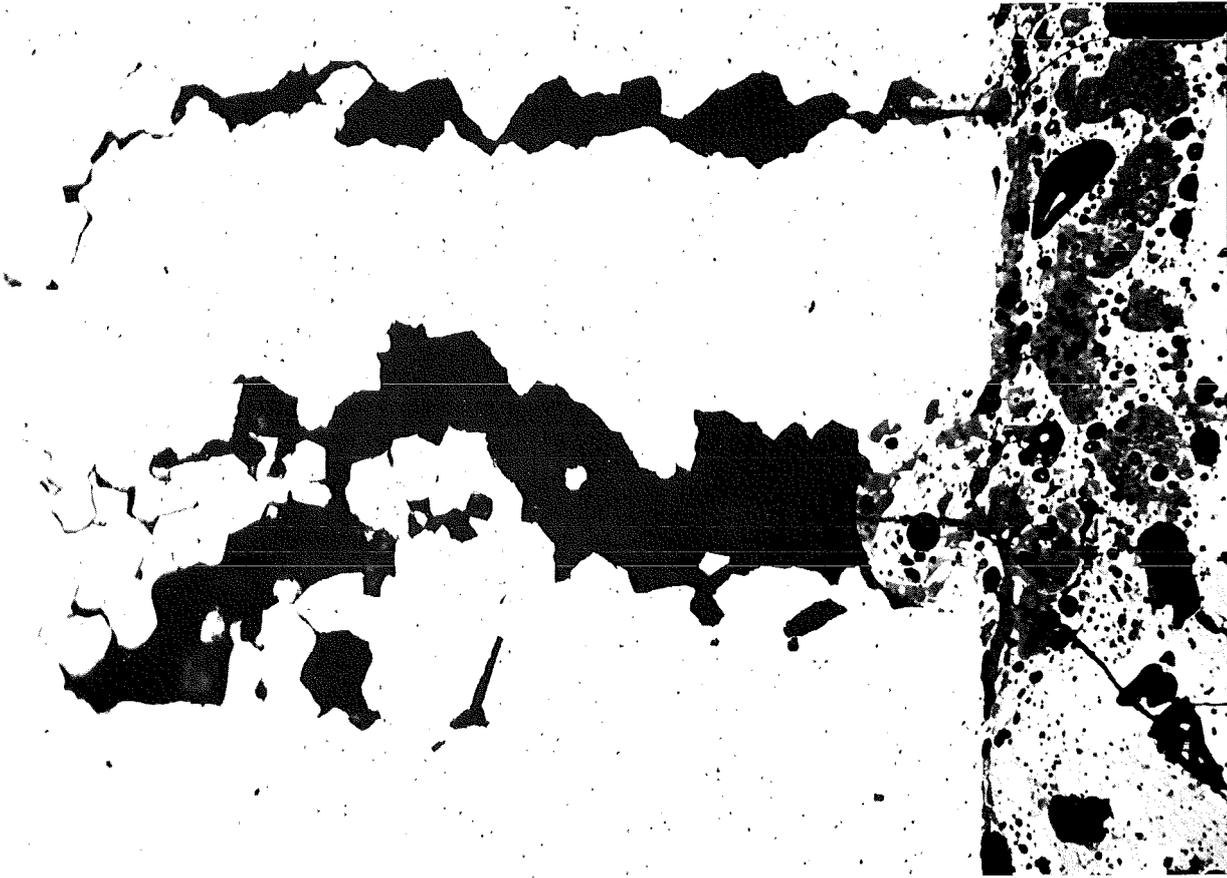
HZ-3B-KVE 130-6D.1-3/9 200x



100 μm

HZ-3B-KVE 130-6D.1-3/10 200x

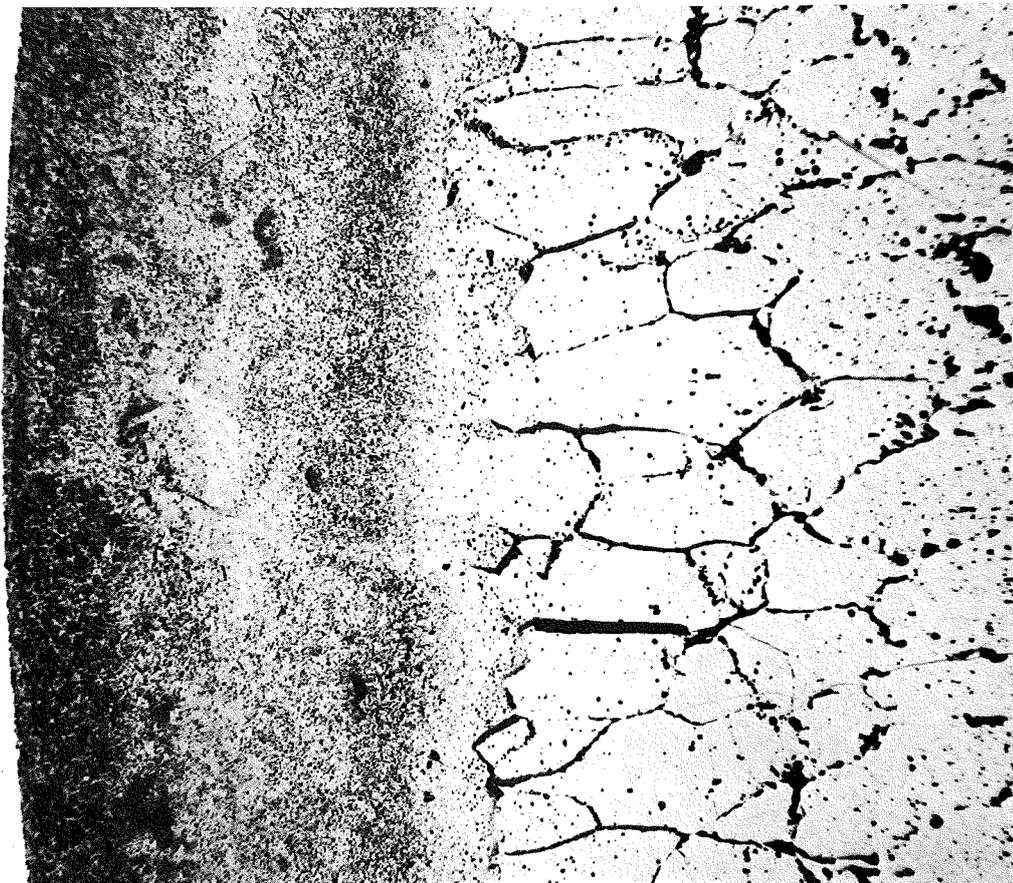
Stab 6D.1 Schnitt 3



40 μm

500x

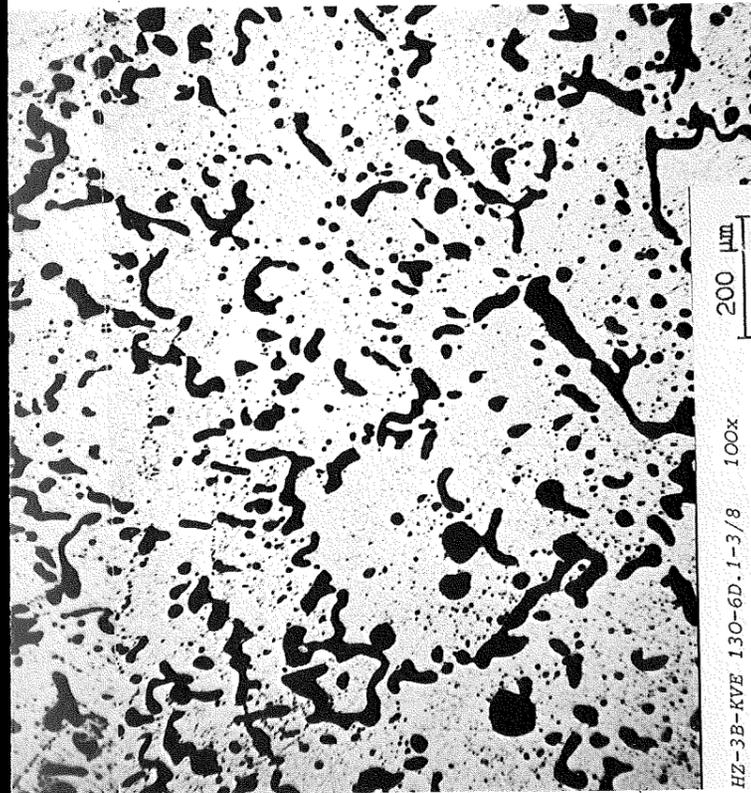
HZ-3B-KVE 130-6D.1-3/11



200 μm

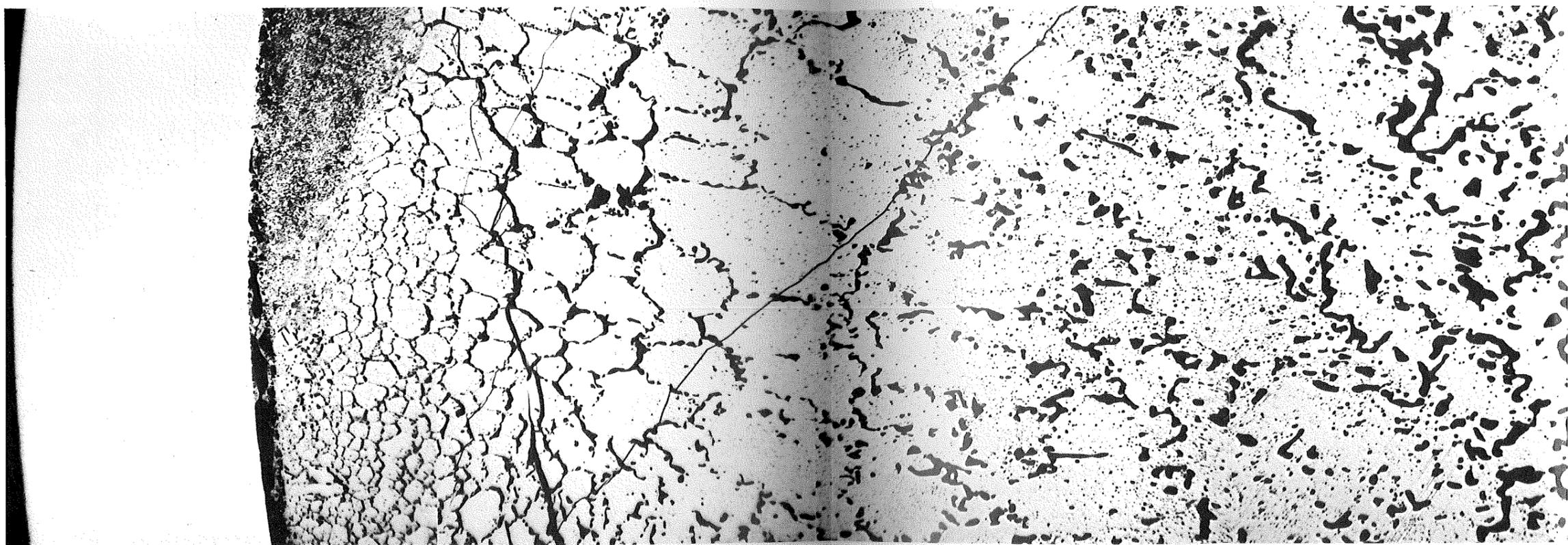
100x

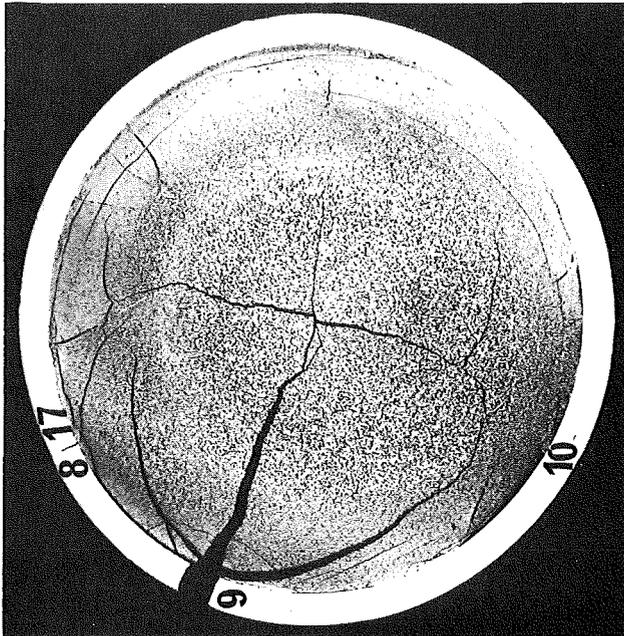
HZ-3B-KVE 130-6D.1-3/12



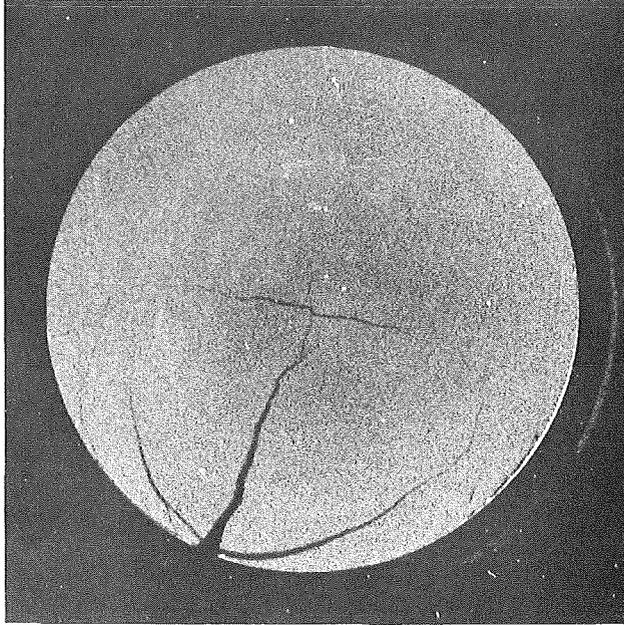
Schnitt 3

Stab 6D.1



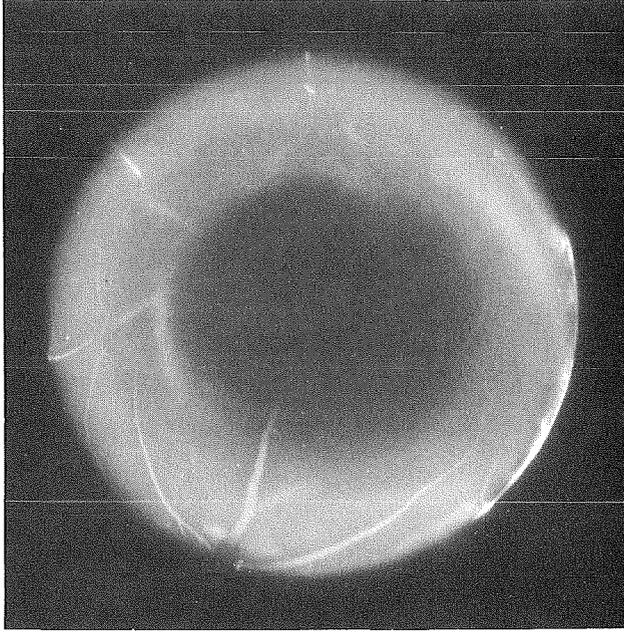


Schnitt 1



α (5 sec)

2 mm



β - γ (20 sec)

Autoradiografie

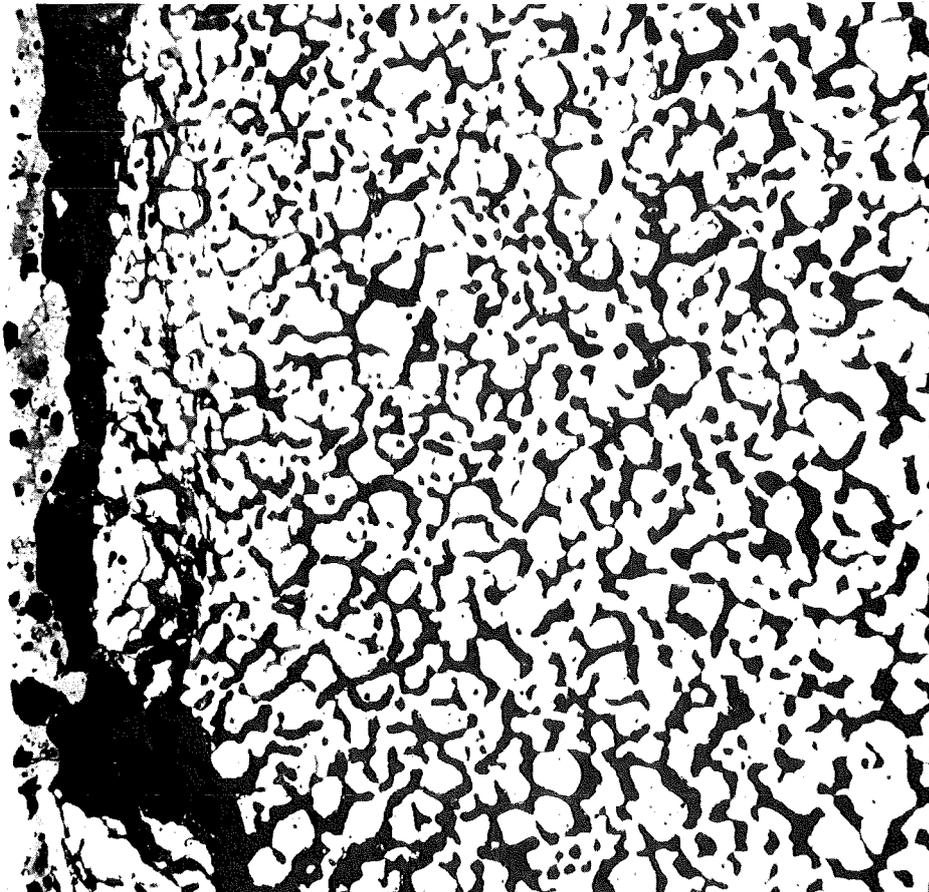
Vg. 6 Prüfling 6D.2

Stab 6D.2 Schnitt 1



200 μm

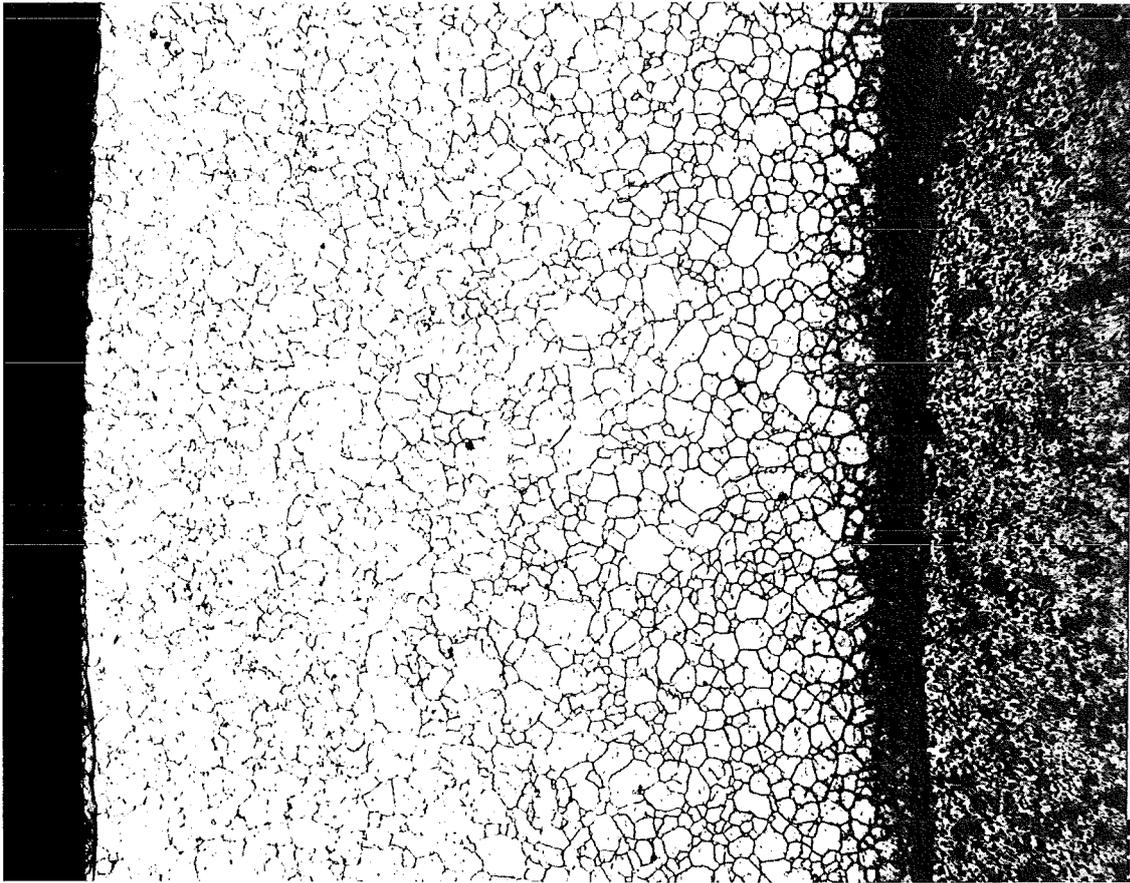
HZ-3B-KVE 127-6D.2-1/9 100x



100 μm

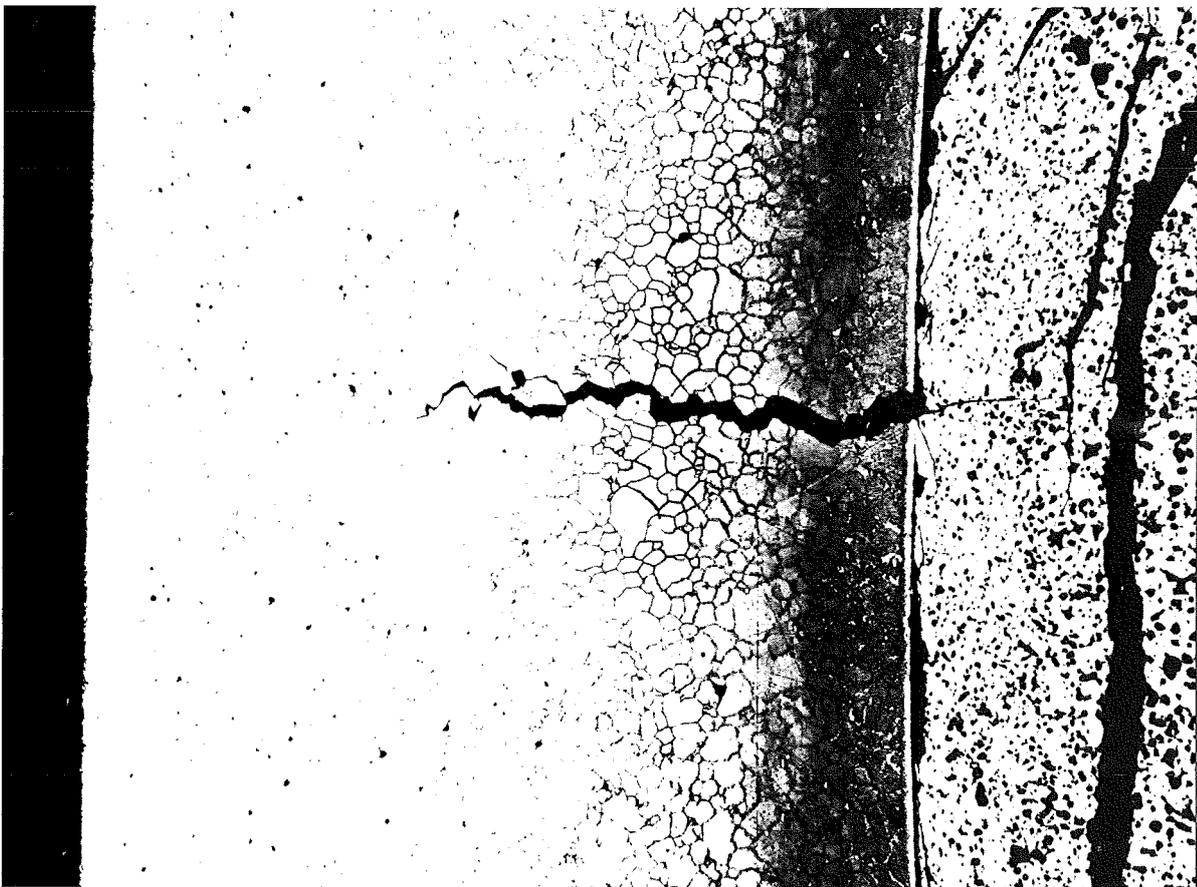
HZ-3B-KVE 127-6D.2-1/10 200x

Stab 6D.2 Schnitt 1



100 μm

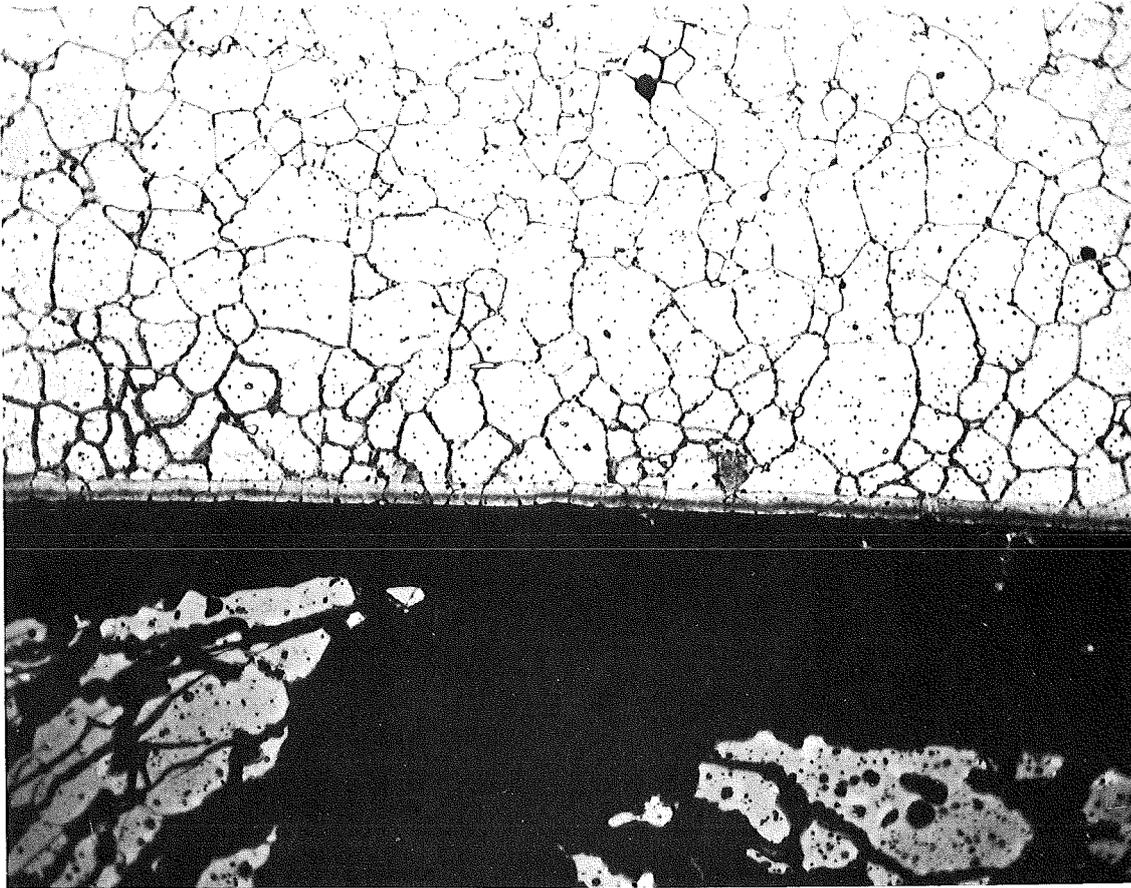
HZ-3B-KVE 127-6D.2-1/16 200x geätzt



100 μm

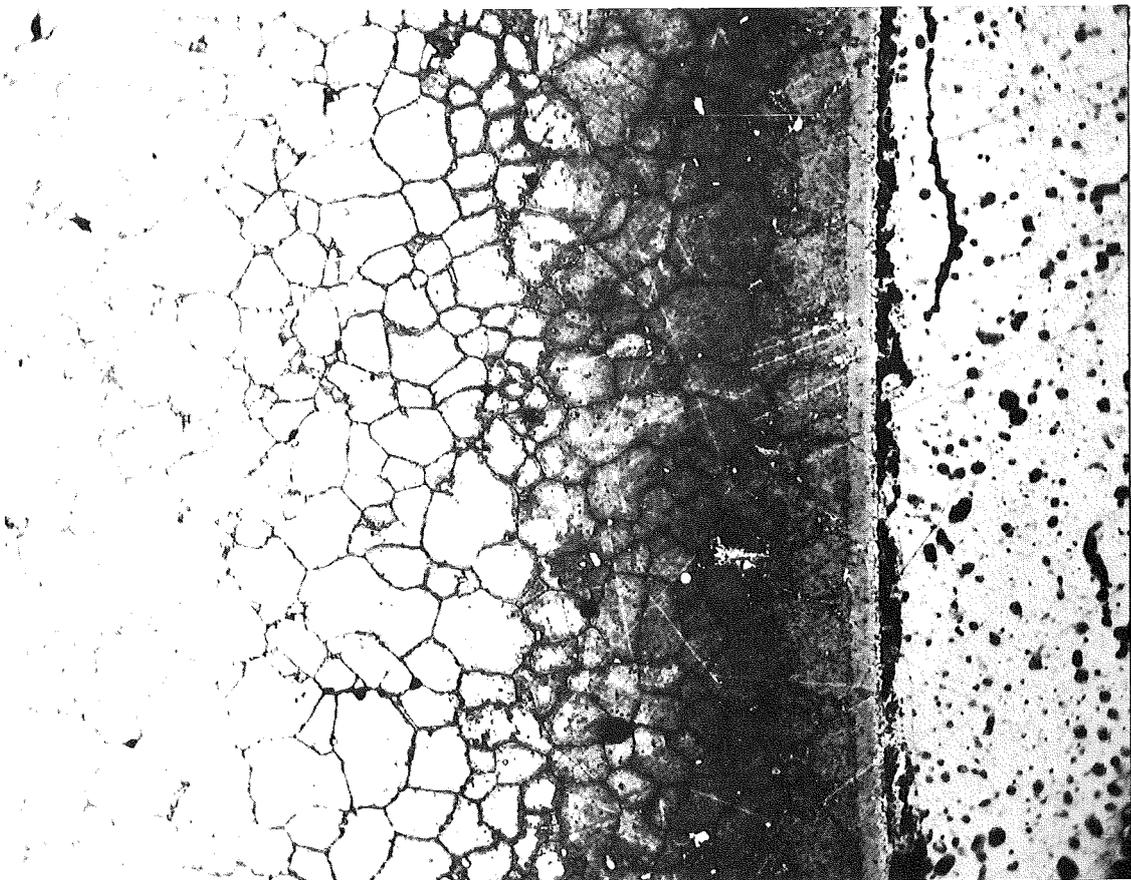
HZ-3B-KVE 127-6D.2-1/17 200x geätzt

Stab 6D.2 Schnitt 1



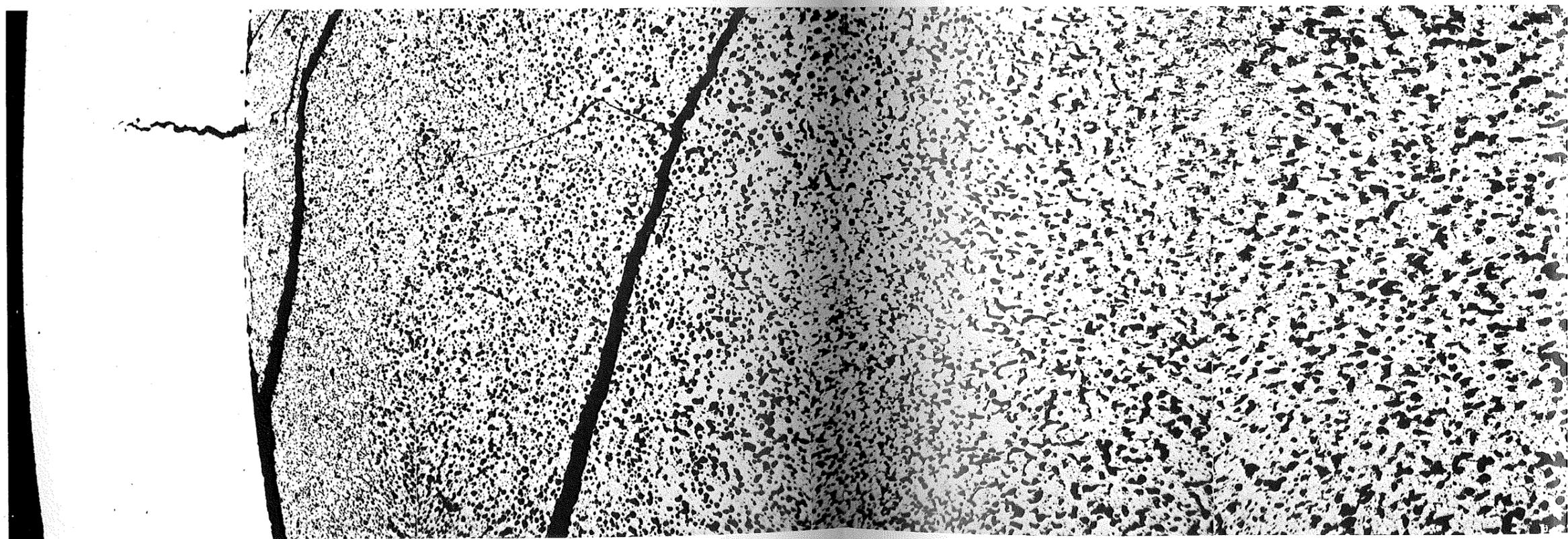
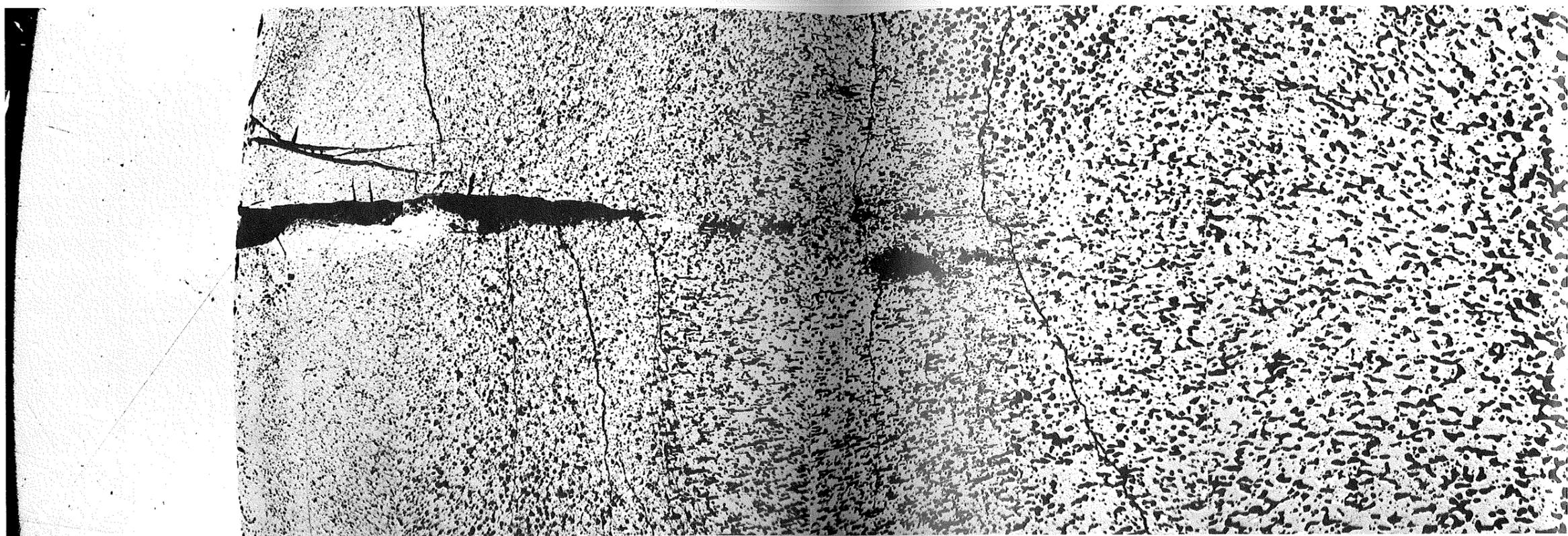
40 μm

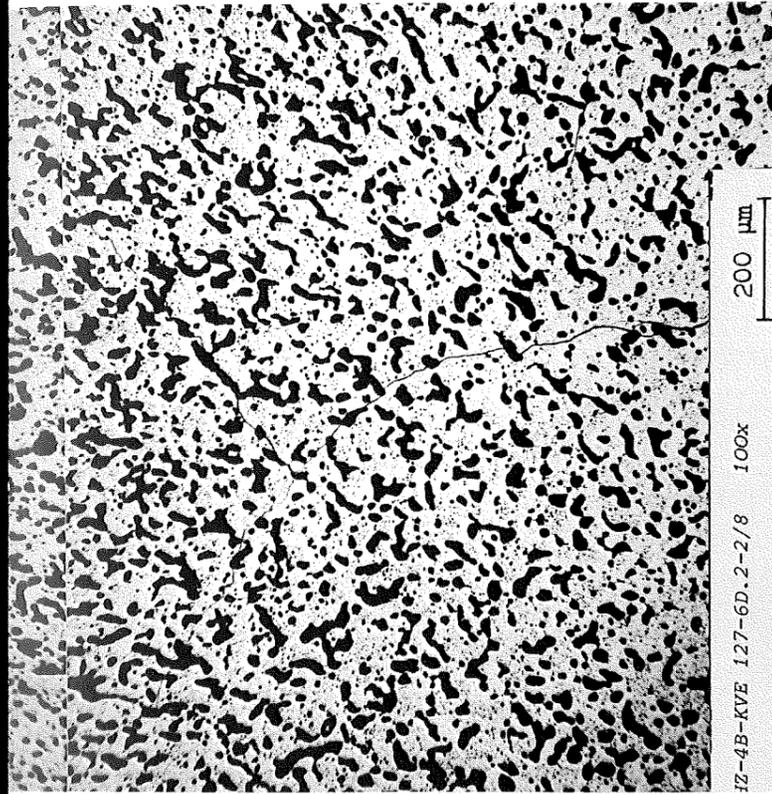
HZ-3B-KVE 127-6D.2-1/19 500x geätzt



40 μm

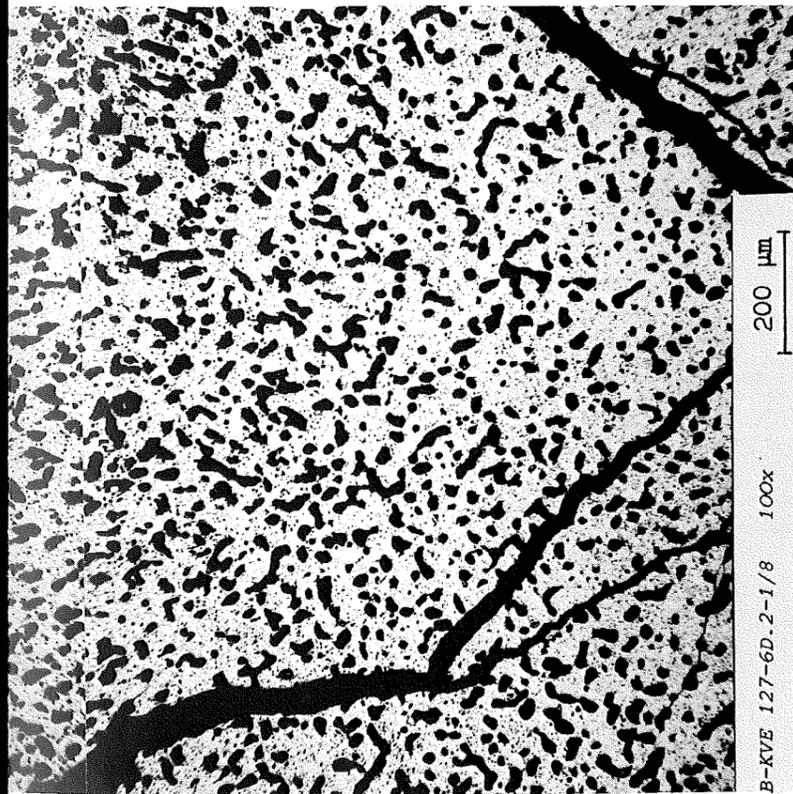
HZ-3B-KVE 127-6D.2-1/20 500x geätzt



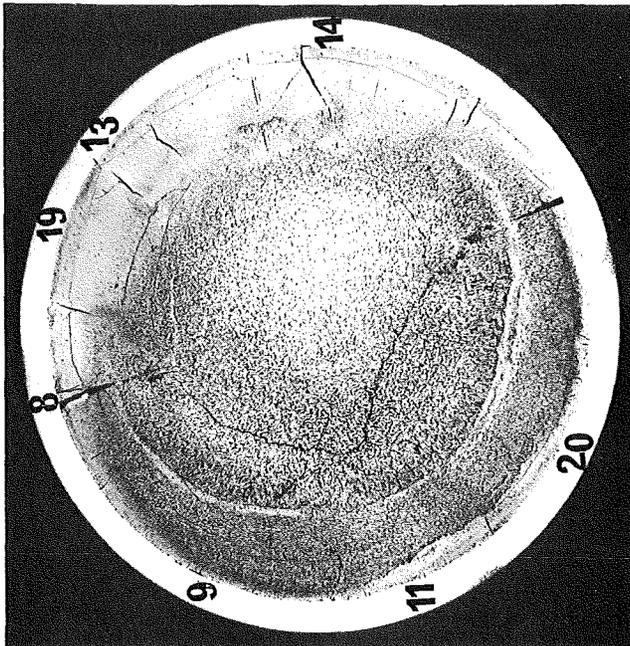


Schnitt 2

Stab 6D.2

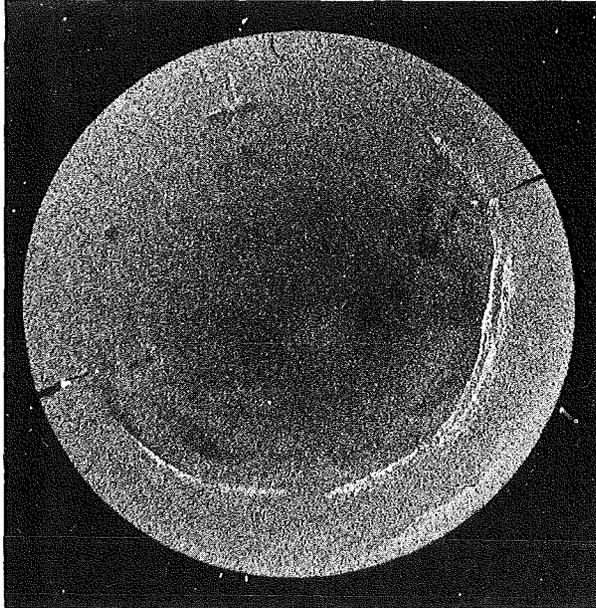


Schnitt 1

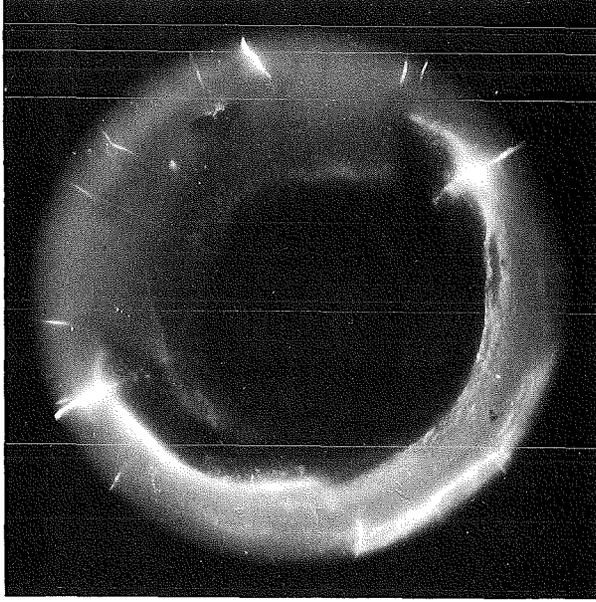


Schnitt 2

2 mm



α (5 sec)

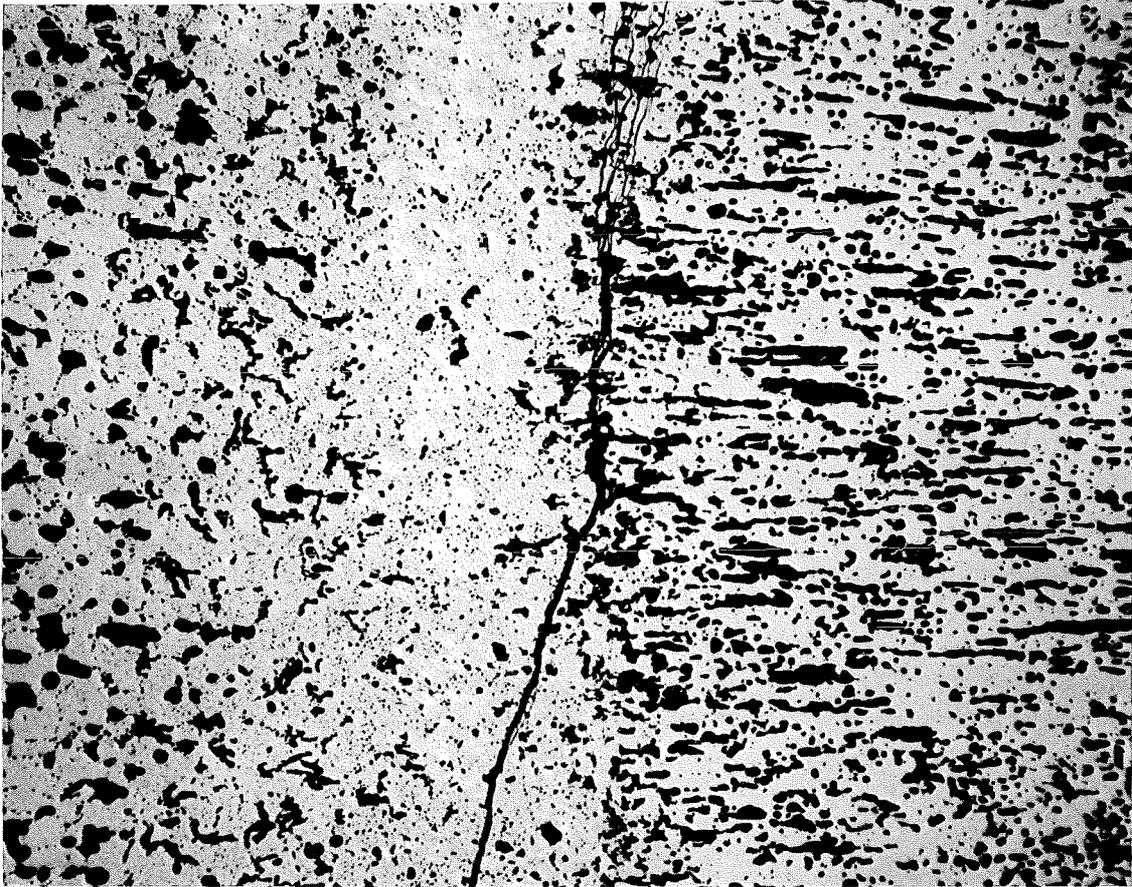


β - γ (20 sec)

Autoradiografie

Vg. 6 Prüfling 6D.2

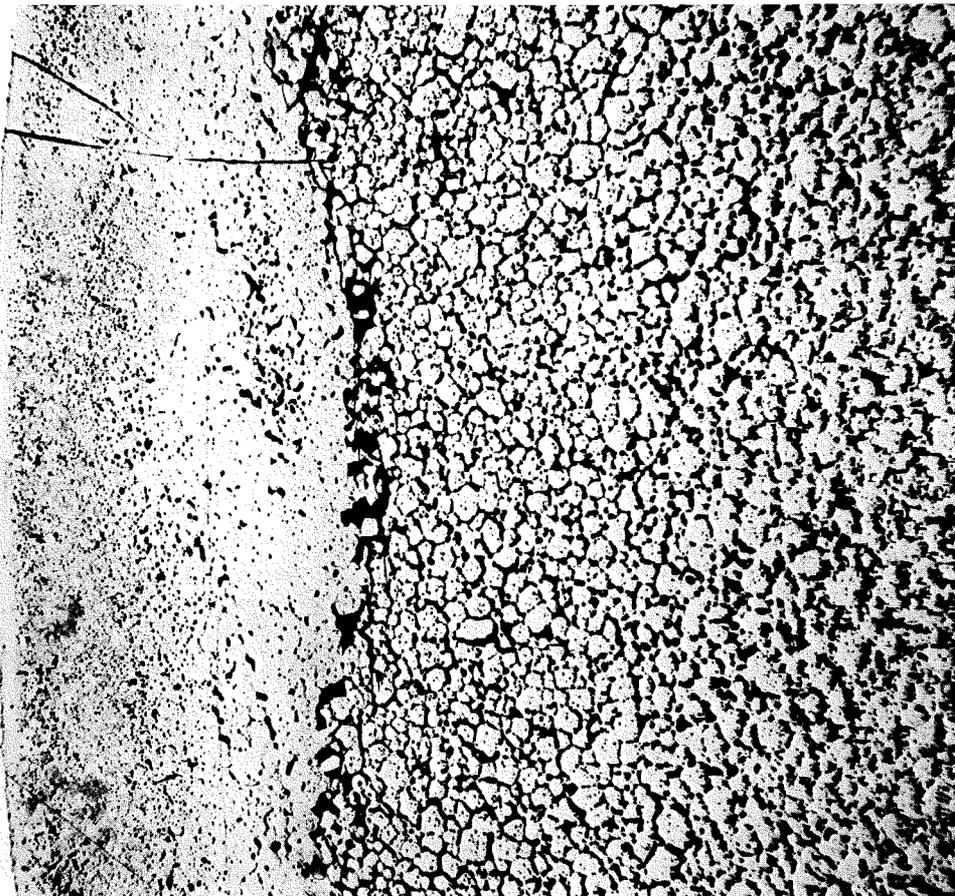
Stab 6D.2 Schnitt 2



100 μm

200x

HZ-3B-KVE 127-6D.2-2/9



200 μm

100x

HZ-3B-KVE 127-6D.2-2/11

Stab 6D.2 Schnitt 2



40 μm

500x

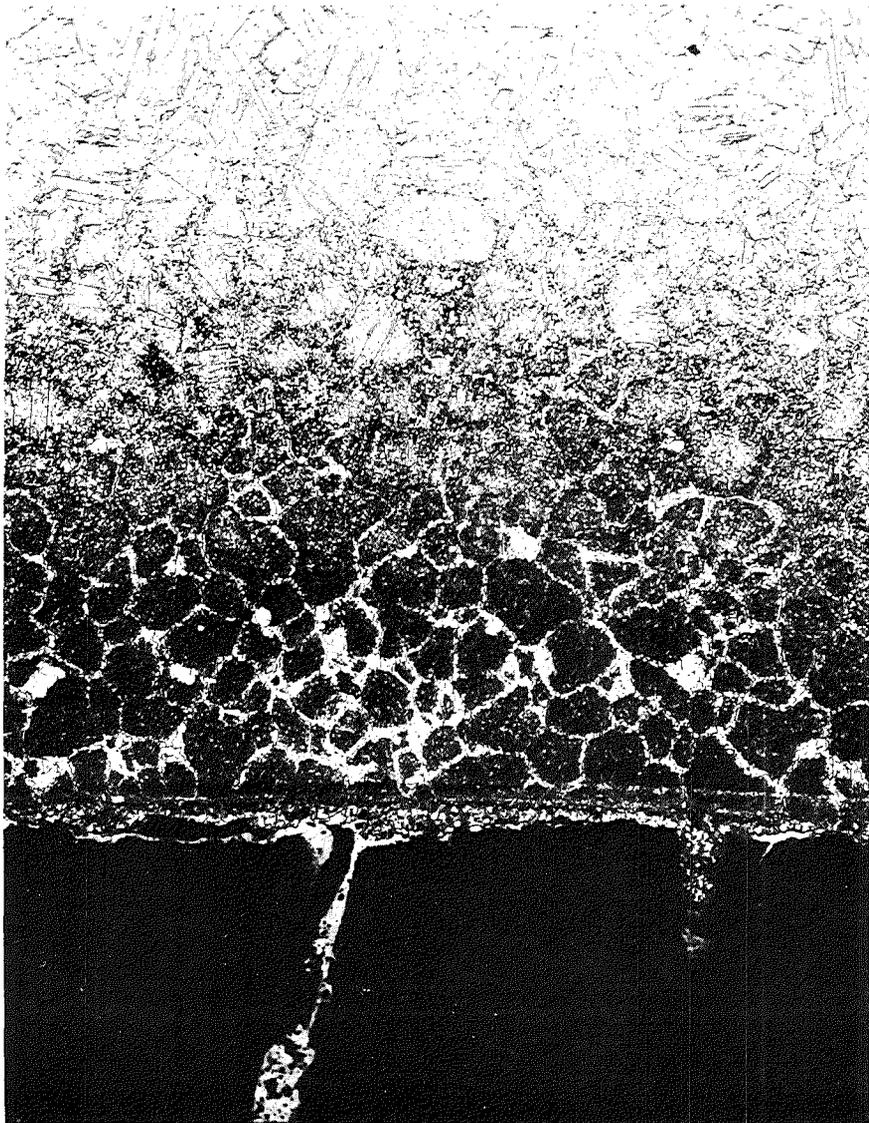
HZ-3B-KVE 127-6D.2-2/13



100 μm

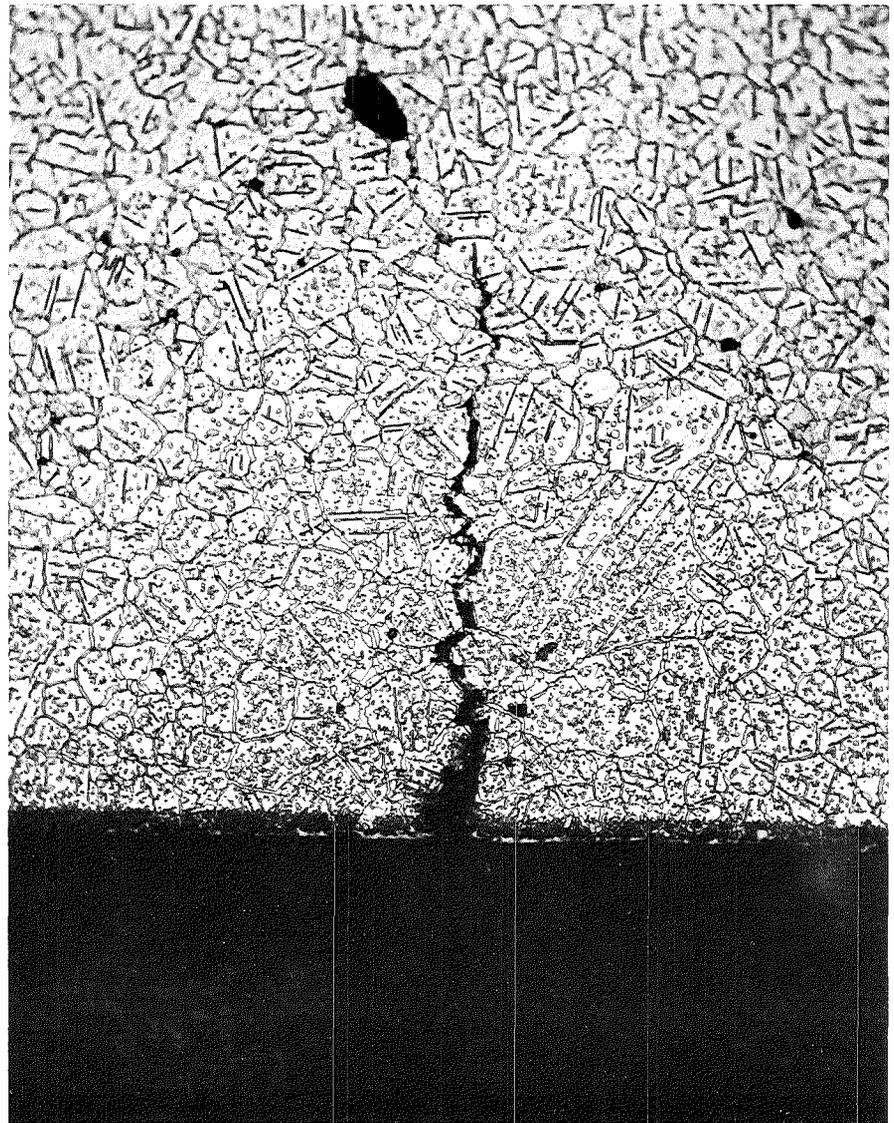
200x

HZ-3B-KVE 127-6D.2-2/14



HZ-3B-KVE 127-6D.2-2/20 500x geätzt

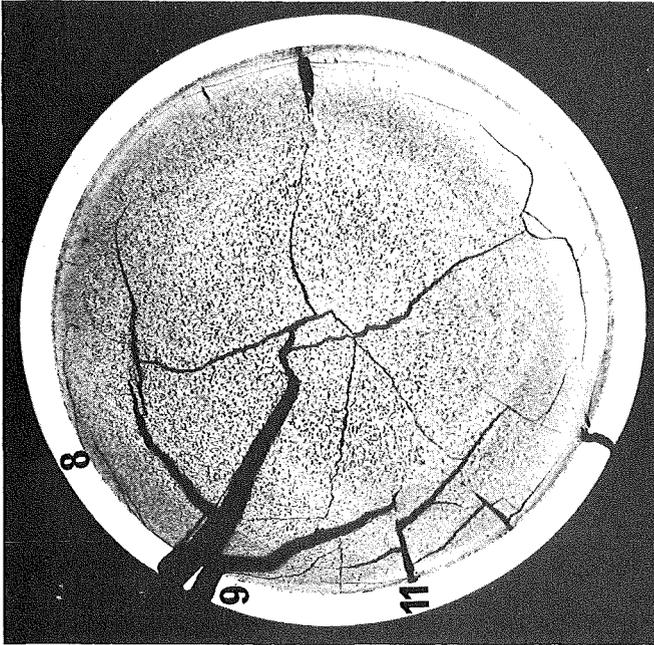
40 μm



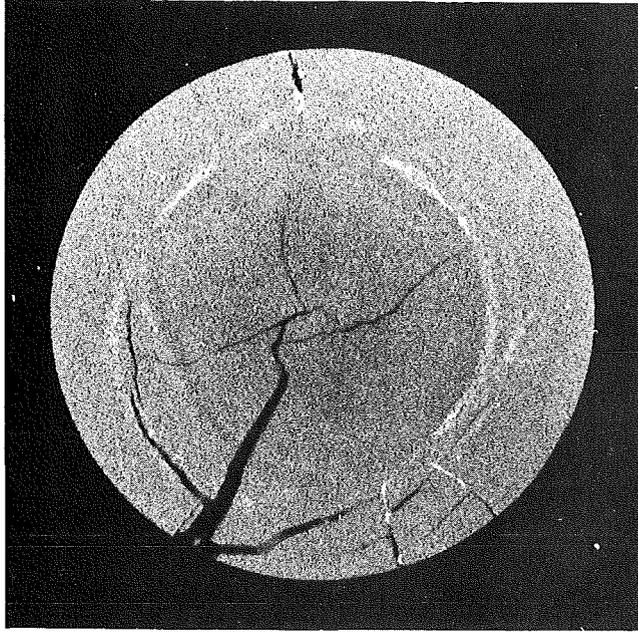
HZ-3B-KVE 127-6D.2-2/19 500x geätzt

40 μm

Stab 6D.2 Schnitt 2

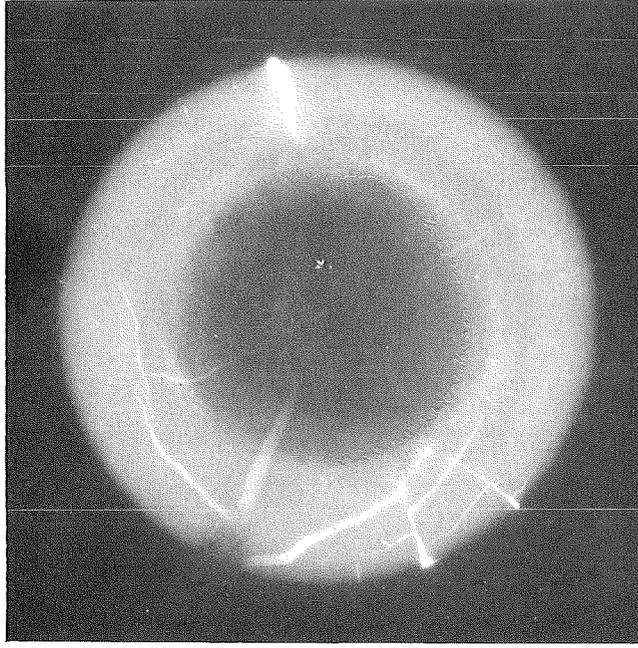


Schnitt 3



α (5 sec)

2 mm

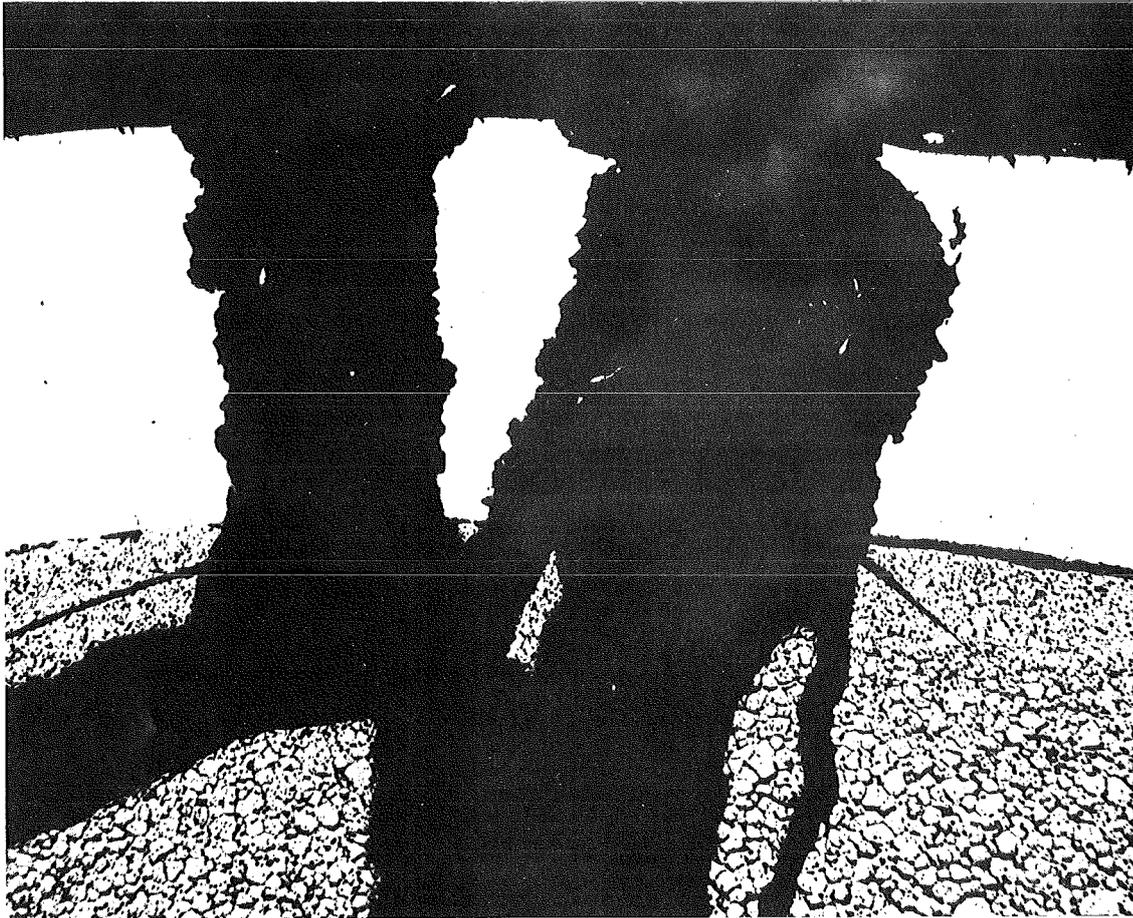


β - γ (20 sec)

Autoradiografie

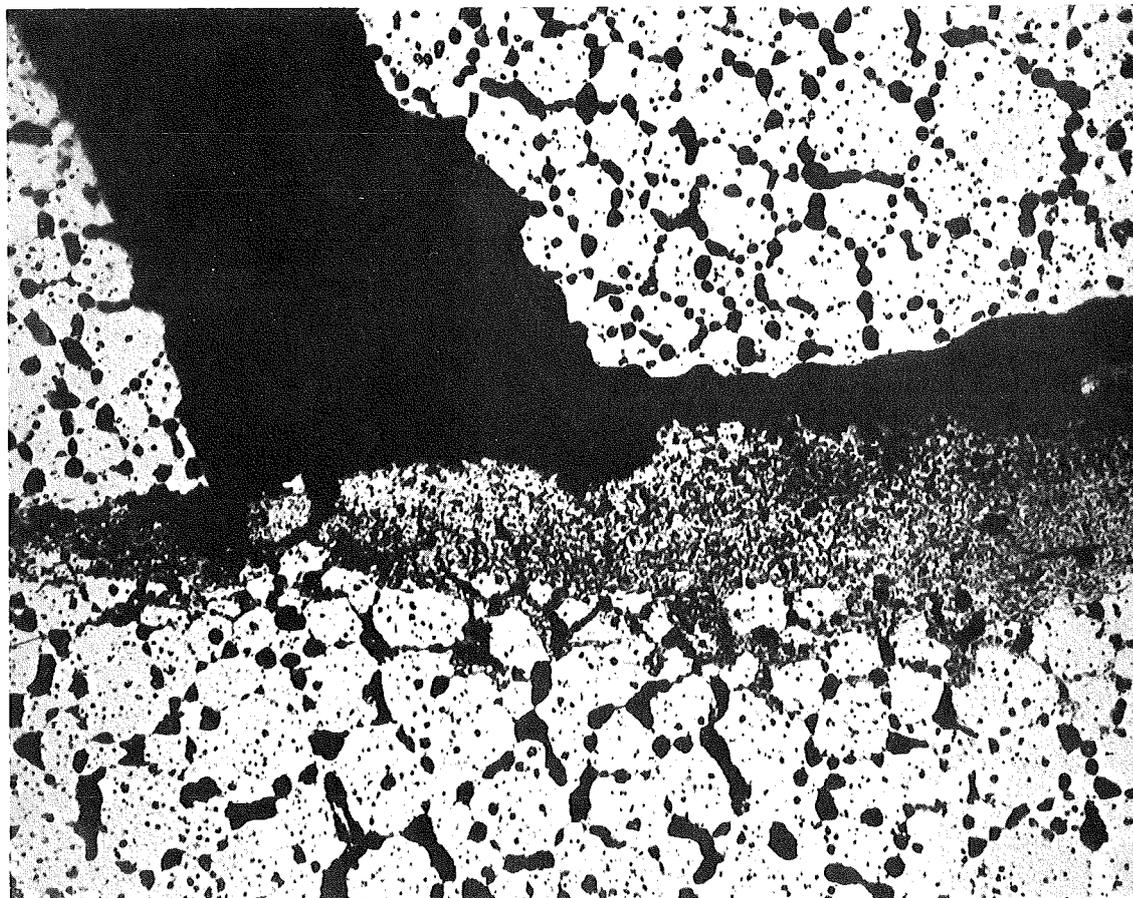
Vg. 6 Prüfling 6D.2

Stab 6D.2 Schnitt 3



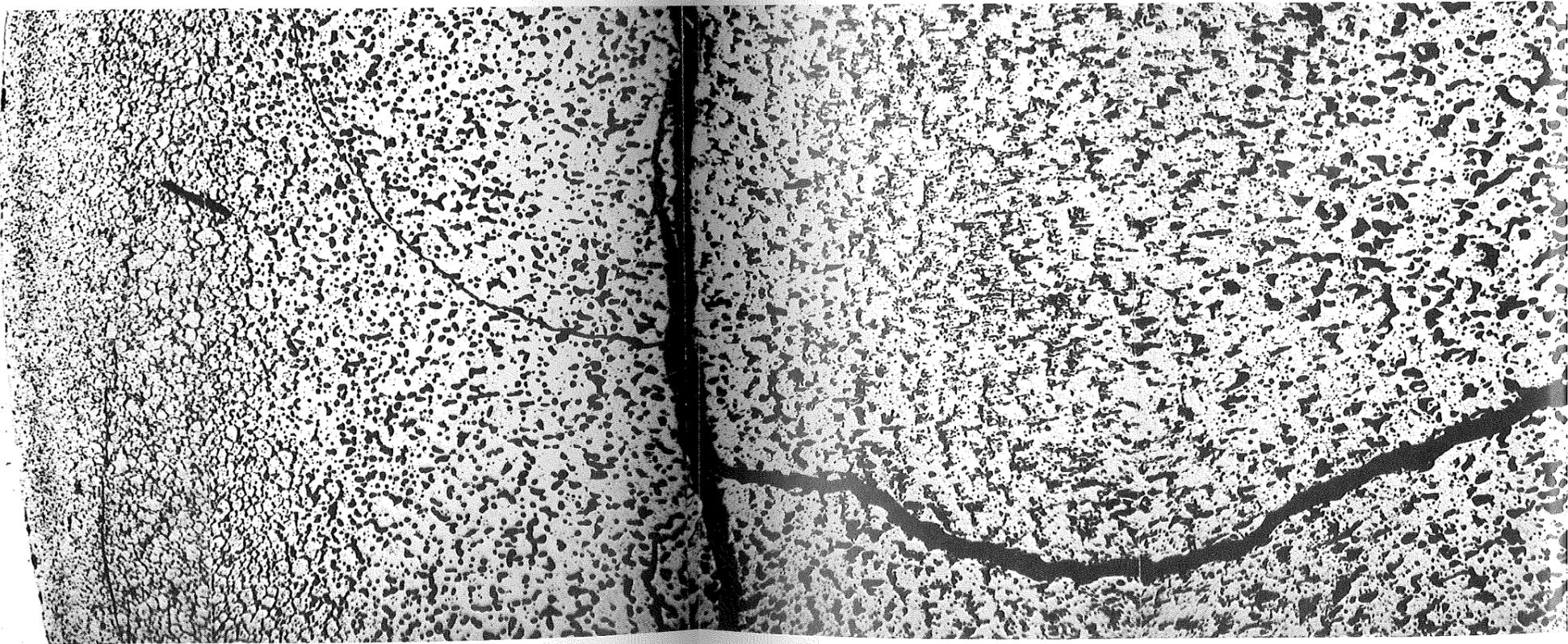
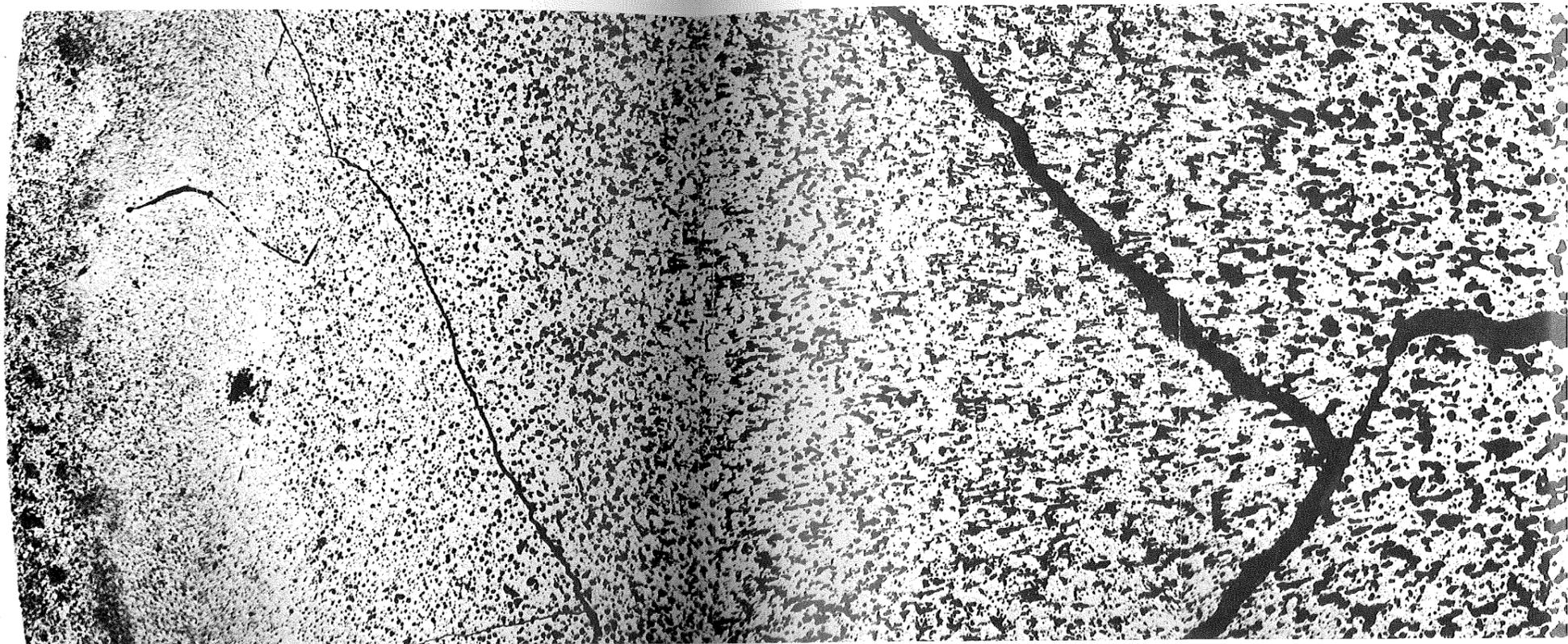
200 μm

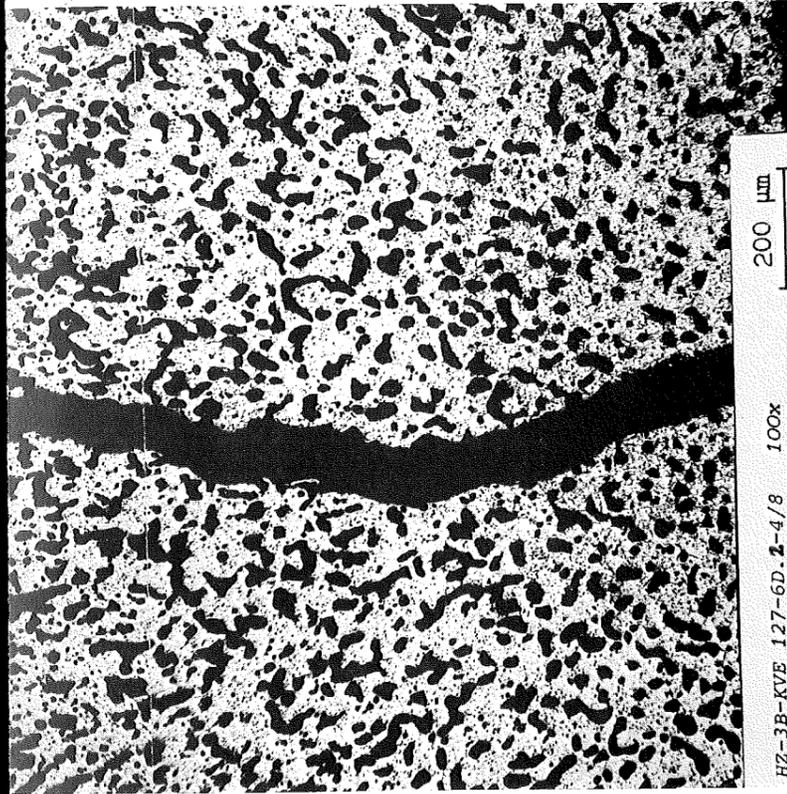
HZ-3B-KVE 127-6D.2-3/9 100x



40 μm

HZ-3B-KVE 127-6D.2-3/11 500x



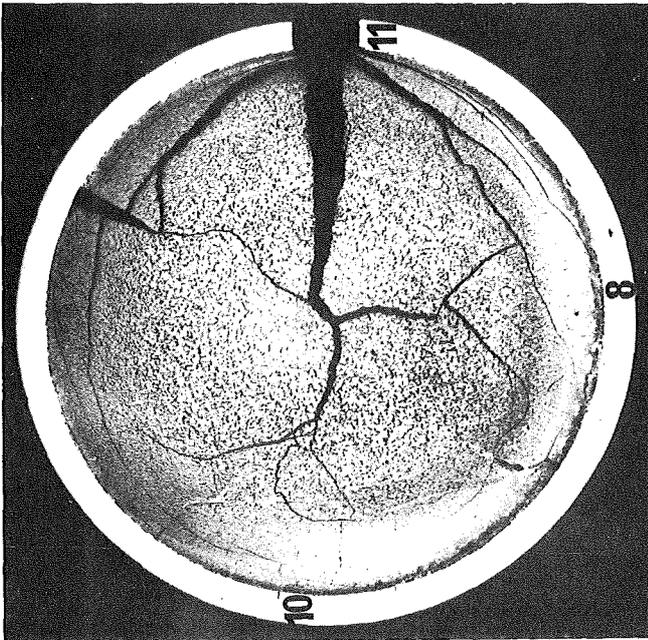


Schnitt 4

Stab 6D.2

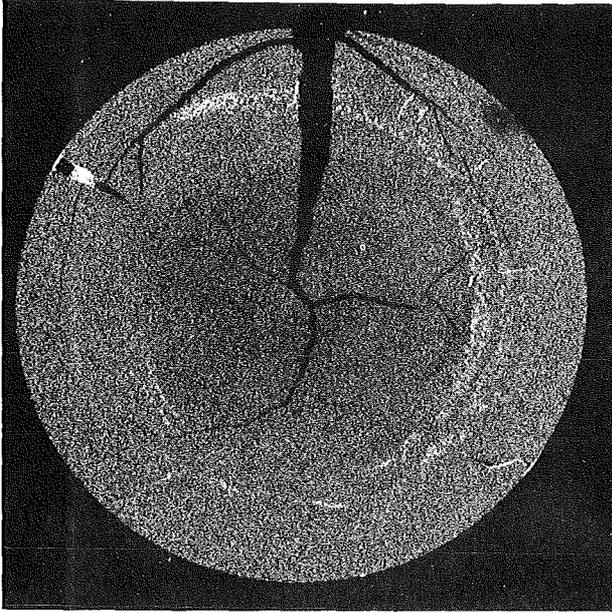


Schnitt 3



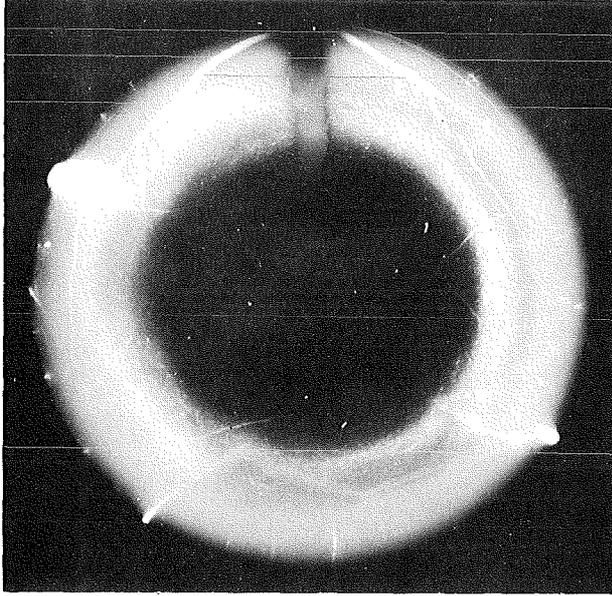
Schnitt 4

2mm



α (5 sec)

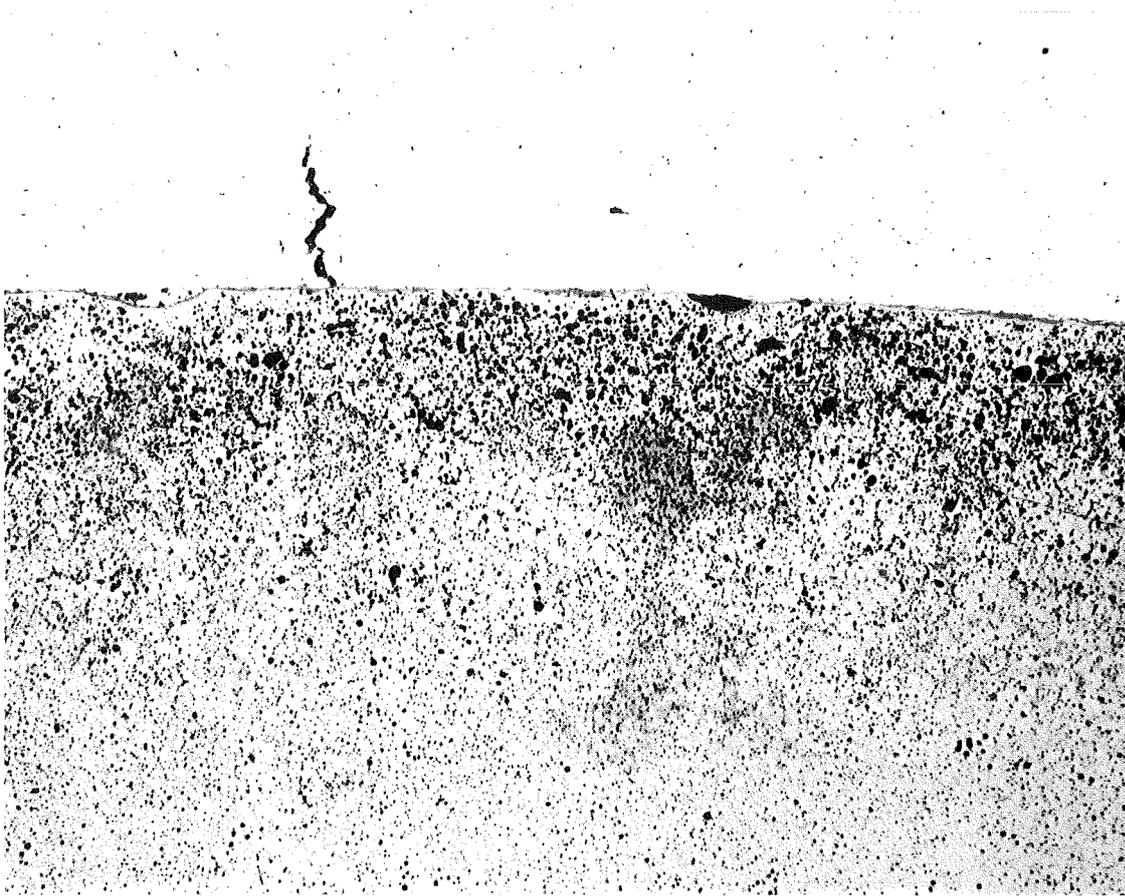
Autoradiografie



β - γ (20 sec)

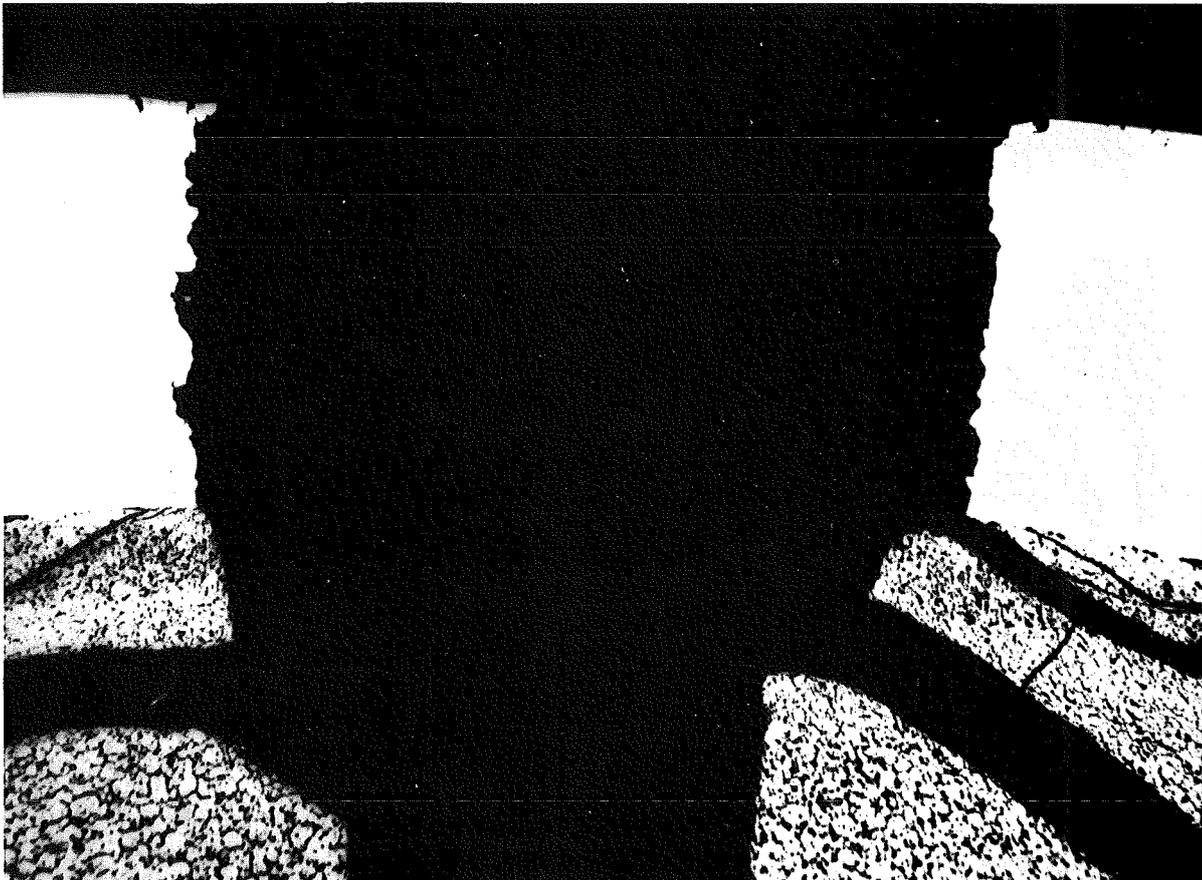
Vg. 6 Prüfling 6D.2

Stab 6D.2 Schnitt 4



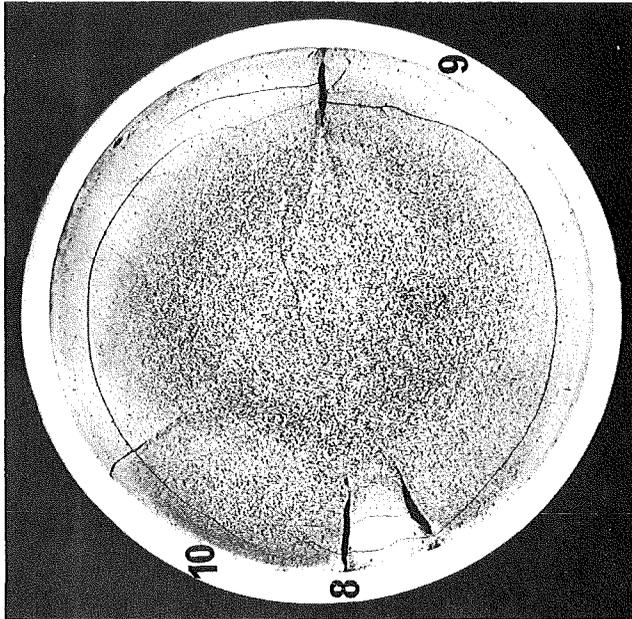
100 μm

HZ-3B-KVE 127-6D.2-4/10 200x

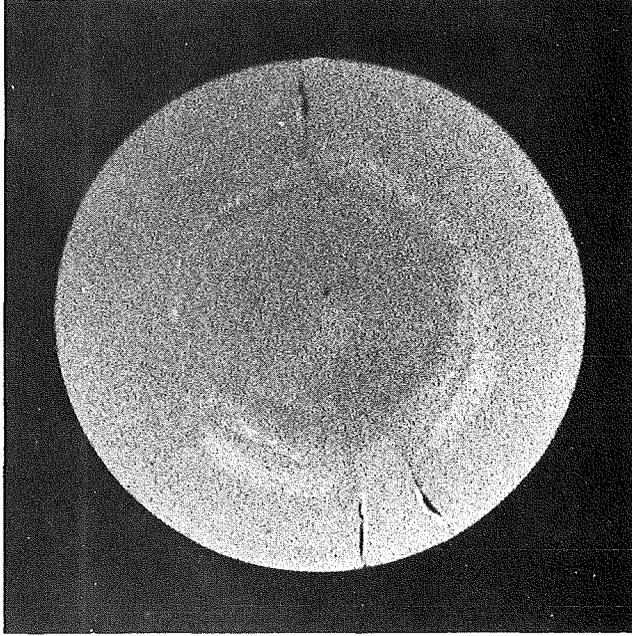


200 μm

HZ-3B-KVE 127-6D.2-4/11 100x

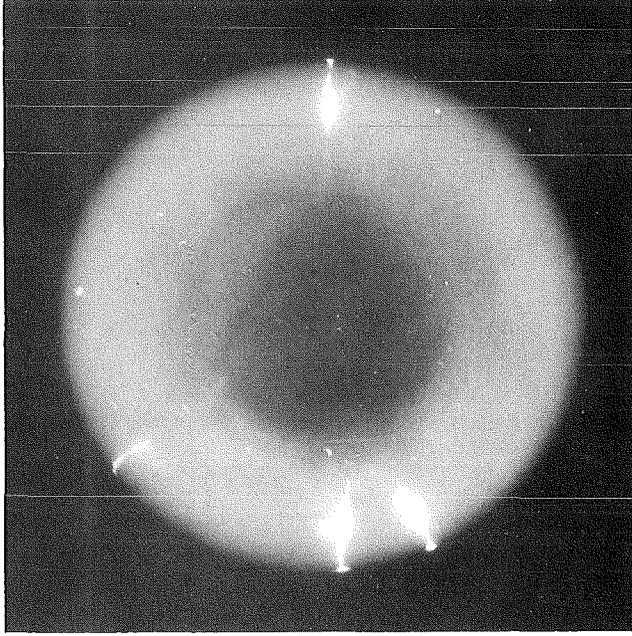


Schnitt 1



α (5 sec)

2 mm

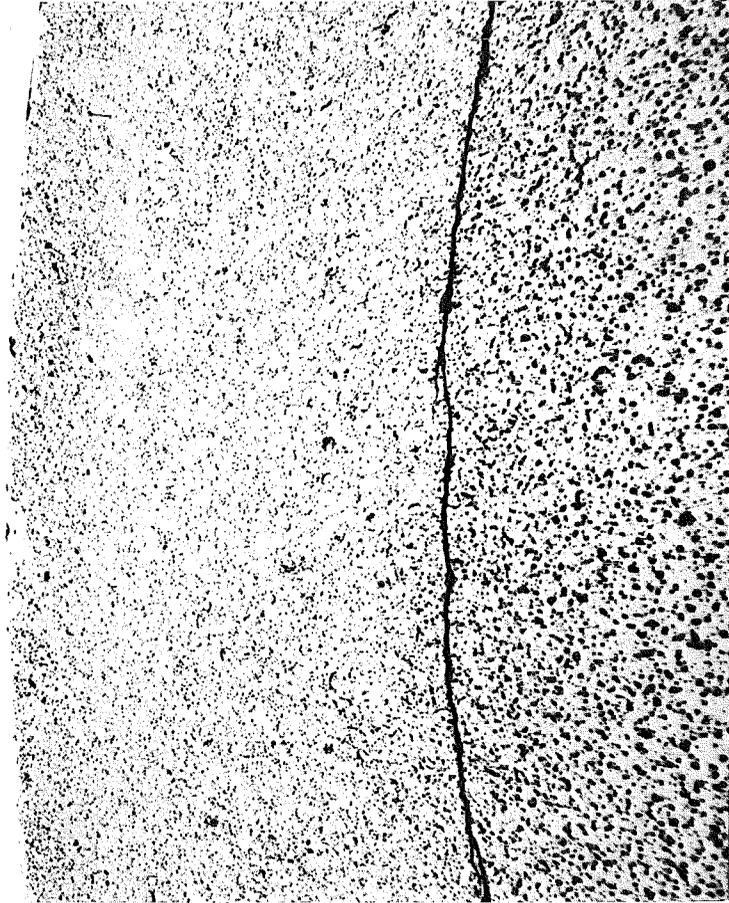


β-γ (20 sec)

Autoradiografie

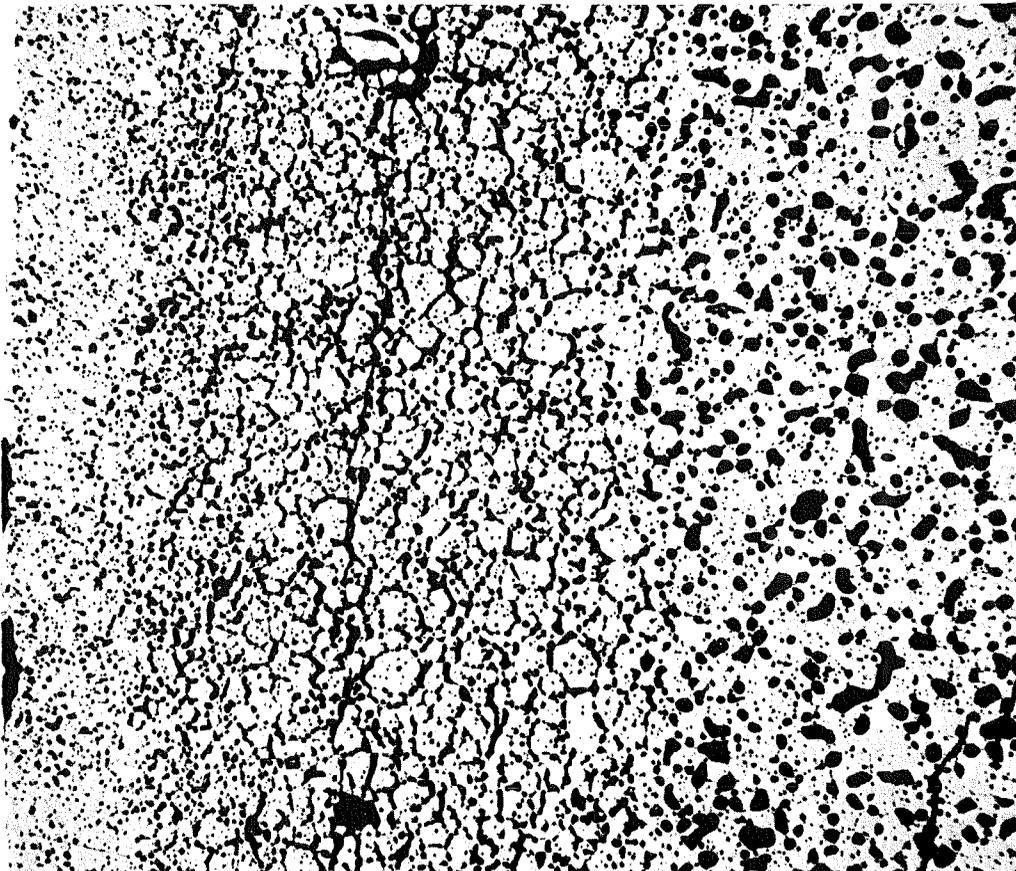
Vg. 6 Prüfling 6D.3

Stab 6D.3 Schnitt 1



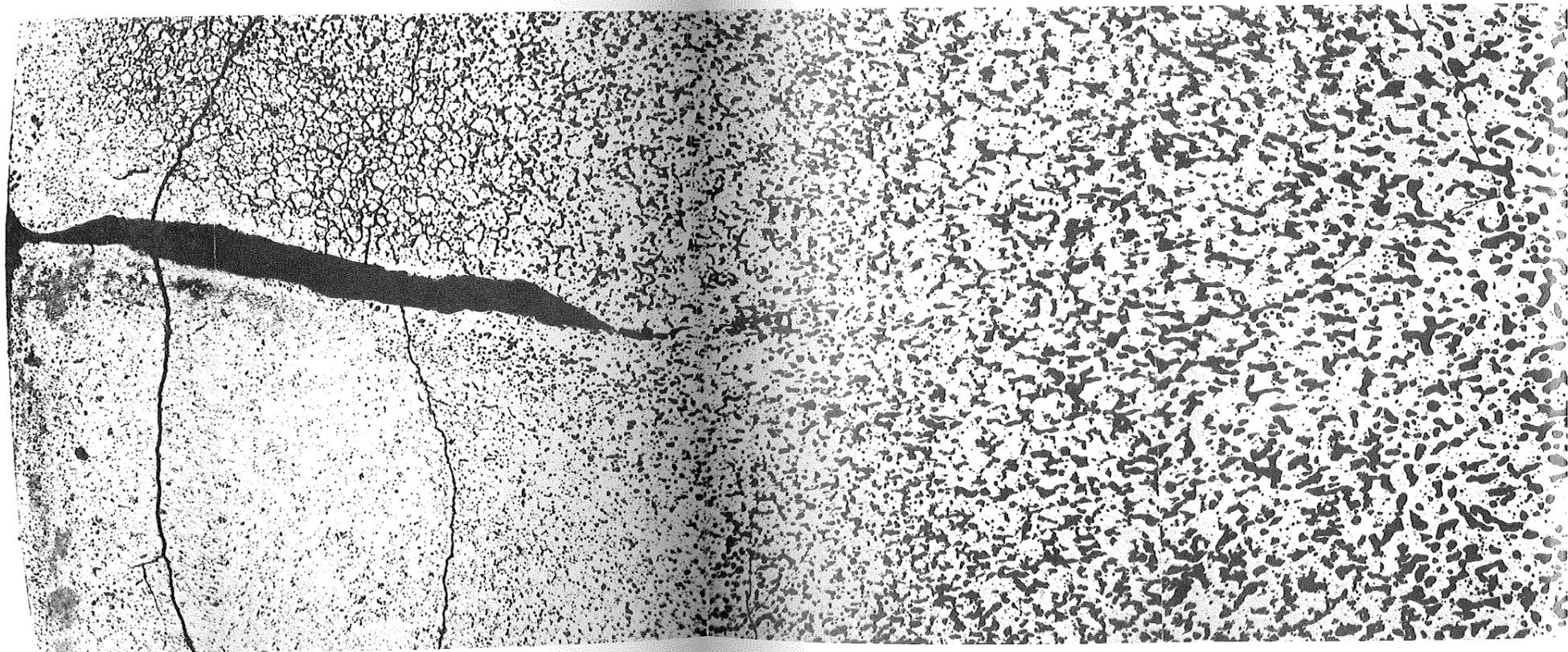
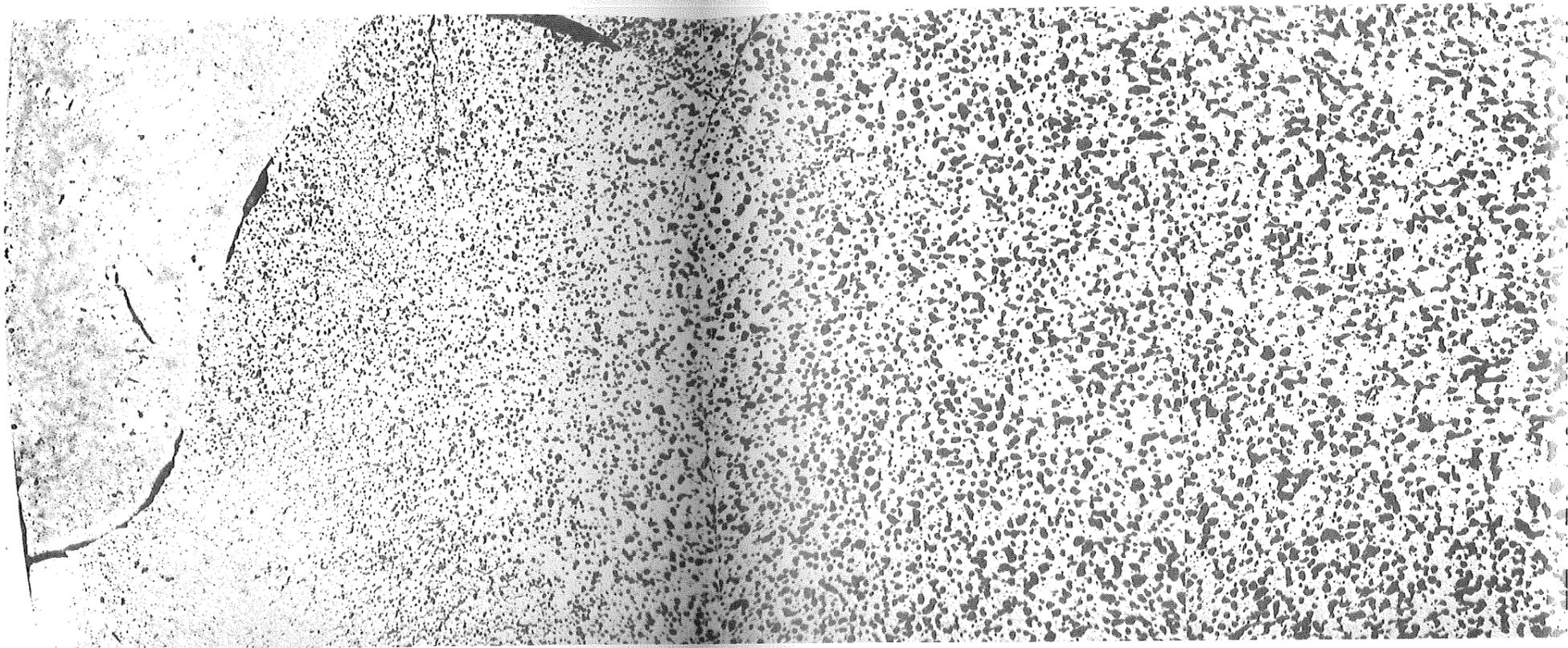
200 μm

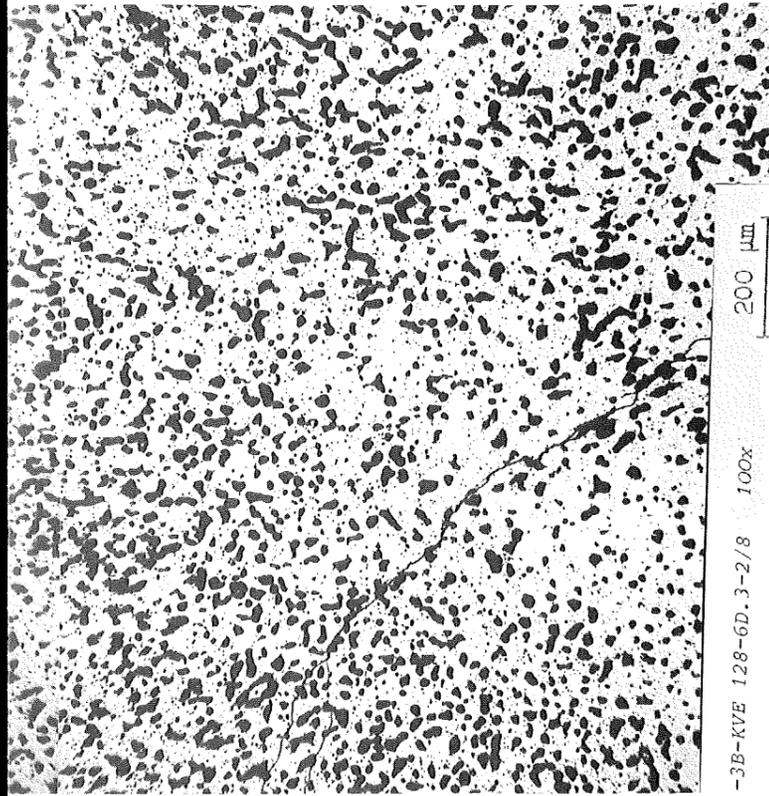
HZ-3B-KVE 128-6D.3-1/9 100x



100 μm

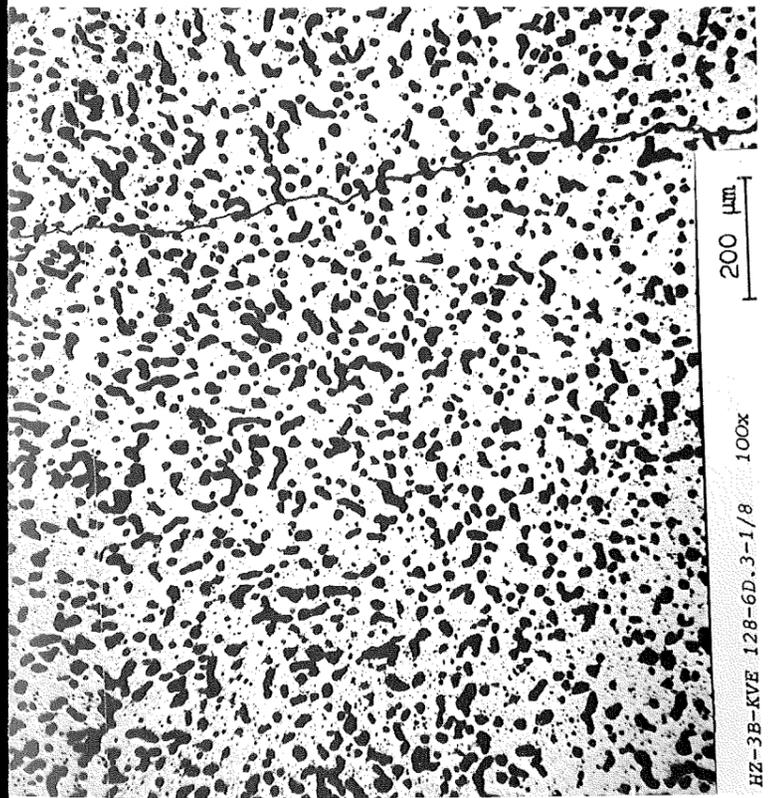
HZ-3B-KVE 128-6D.3-1/10 200x



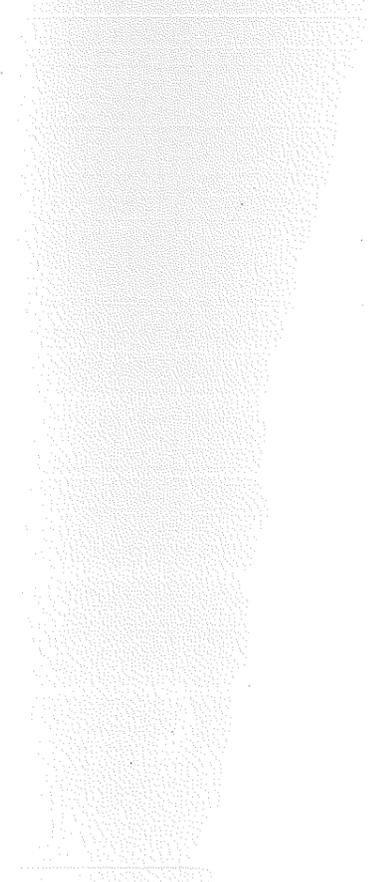


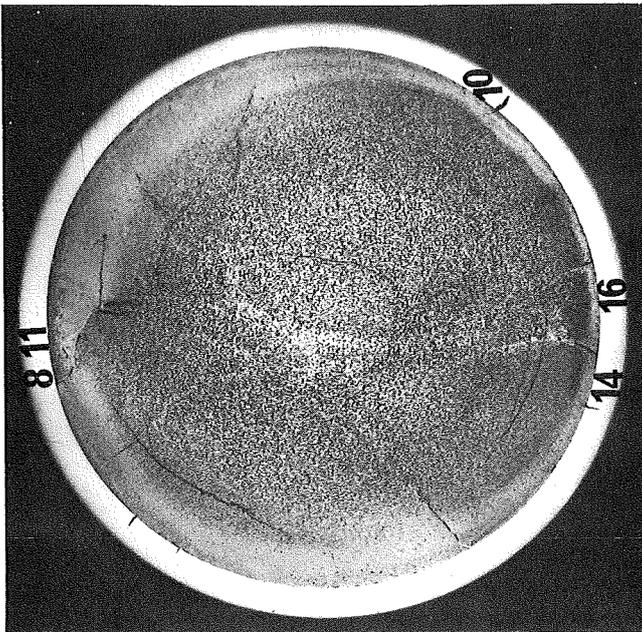
Schnitt 2

Stab 6D.3

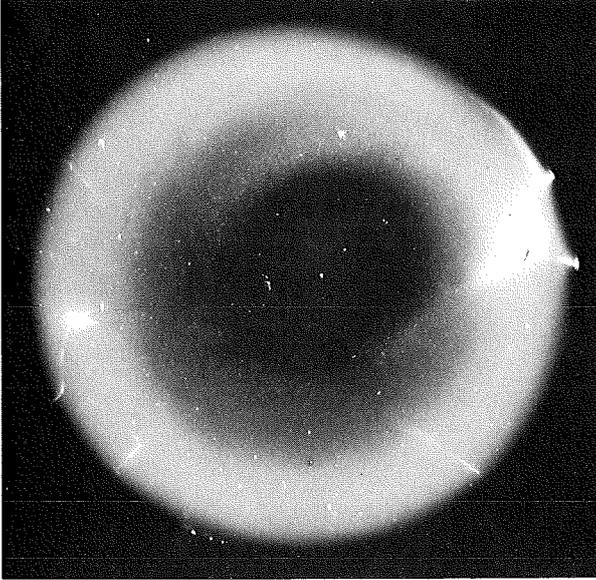


Schnitt 1

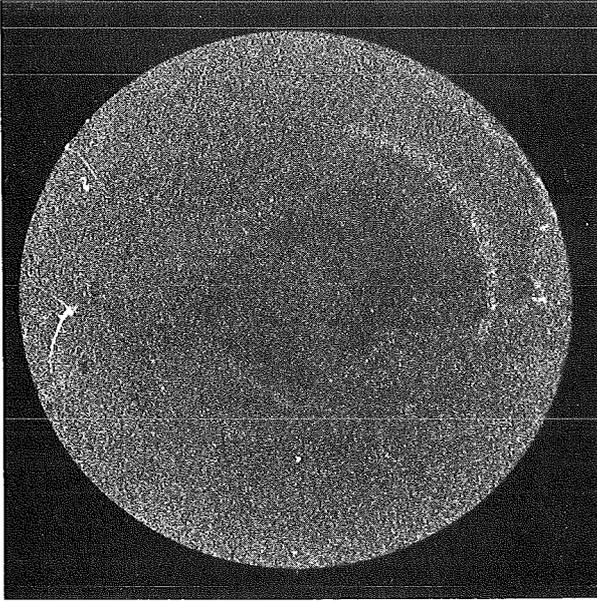




Schnitt 2



α (5 sec)



β - γ (20 sec)

2 mm

Autoradiografie

Vg. 6 Prüfling 6D.3

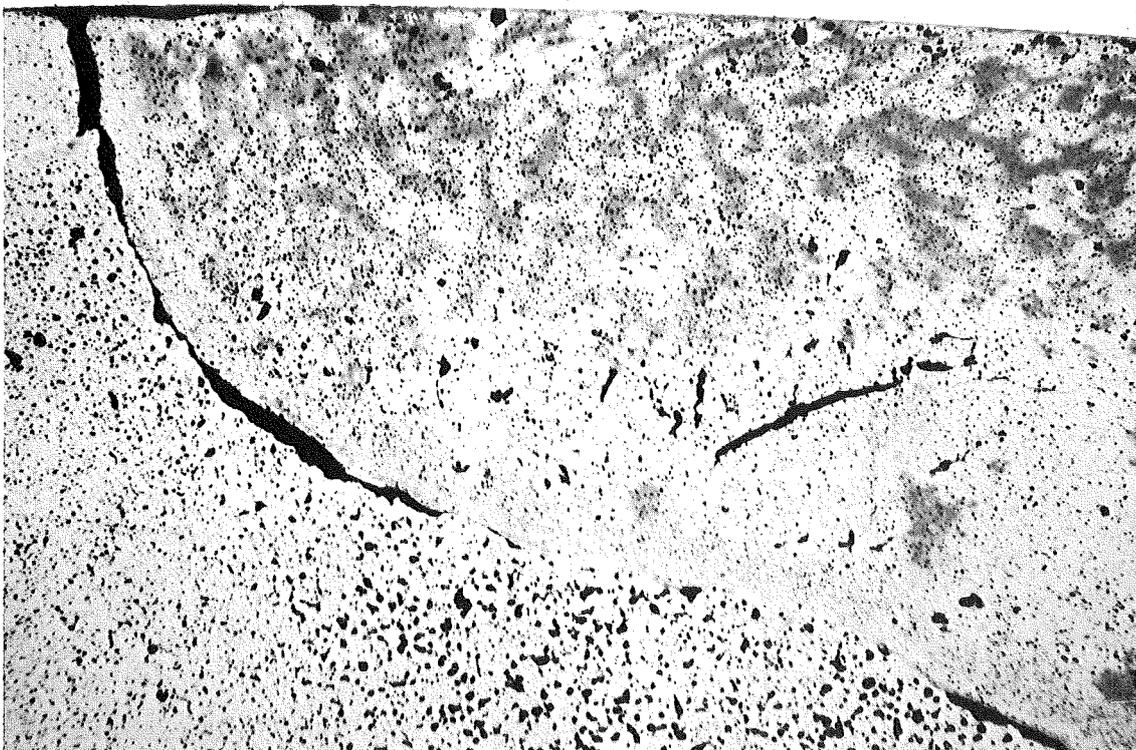
Stab 6D.3 Schnitt 2



200 μm

100x

HZ-3B-KVE 128-6D.3-2/10

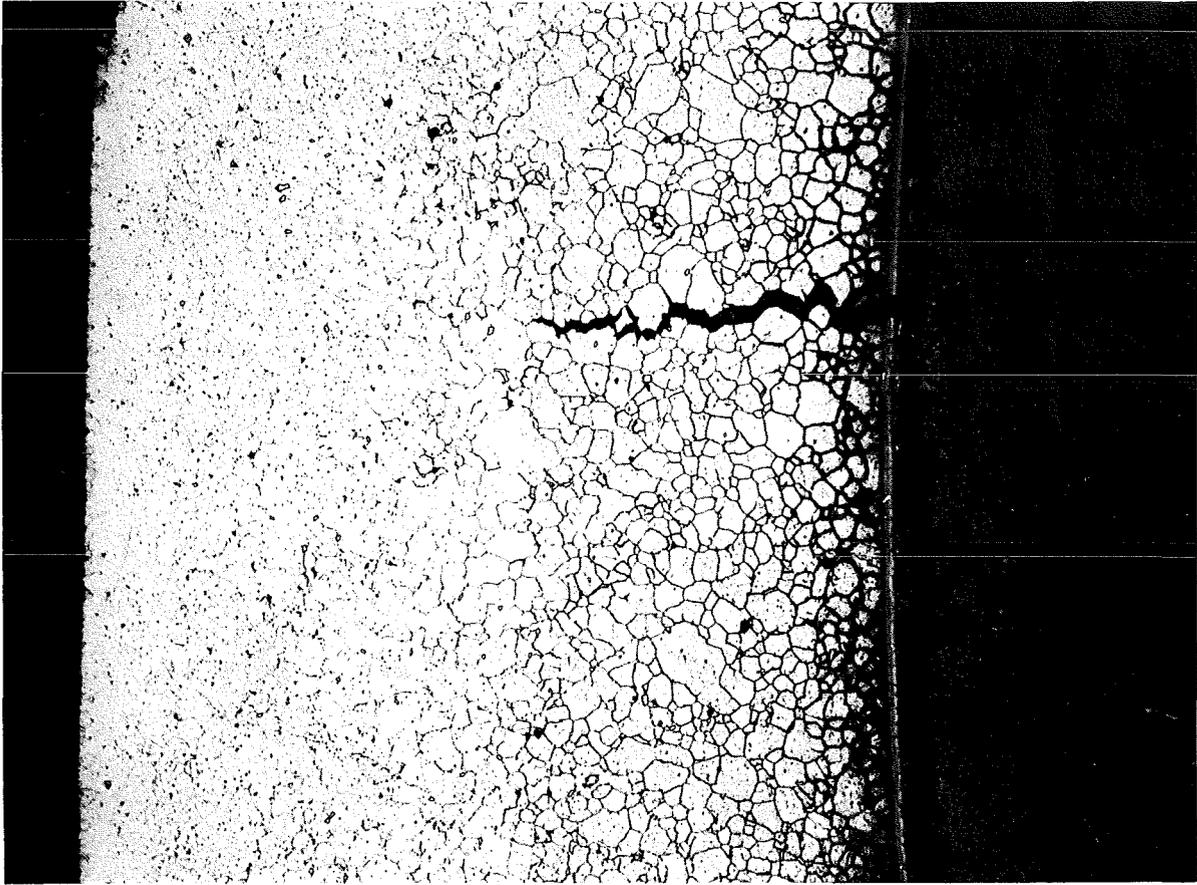


100 μm

200x

HZ-3B-KVE 128-6D.3-2/11

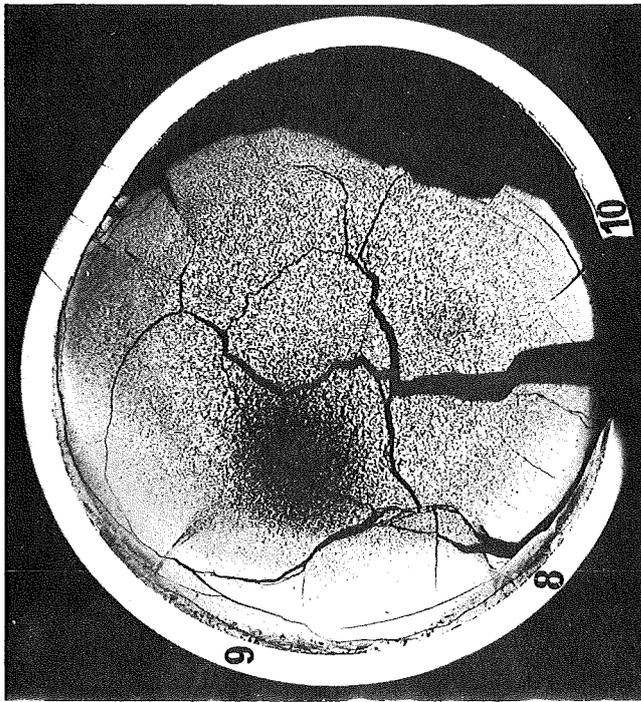
Stab 6D.3 Schnitt 2



HZ-3B-KVE 128-6D.3-2/14 200x geätzt 100 μm



HZ-3B-KVE 128-6D.3-2/16 500x geätzt 40 μm

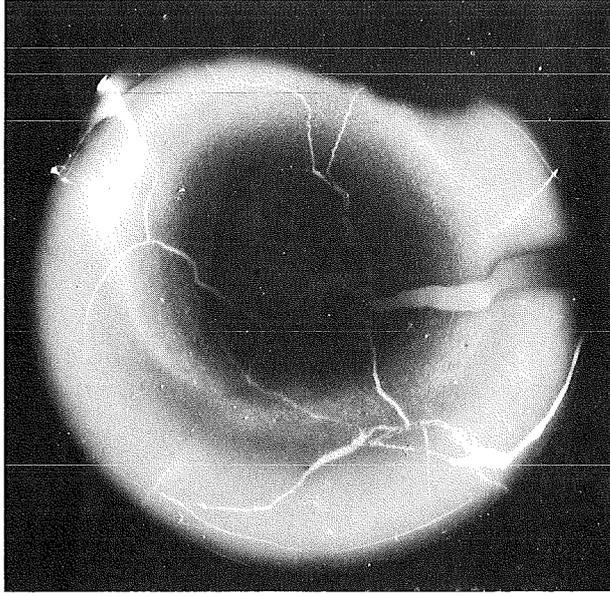


Schnitt 3



α (5 sec)

2 mm

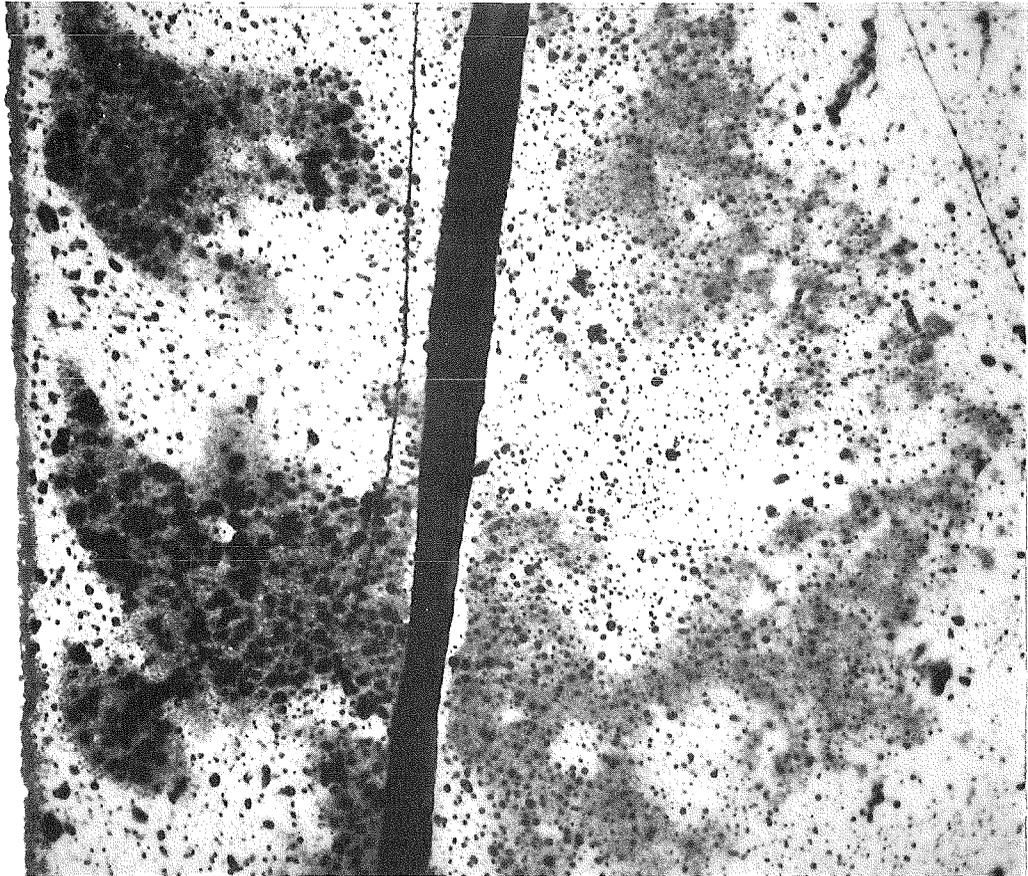


$\beta - \gamma$ (20 sec)

Autoradiografie

Vg. 6 Prüfling 6D.3

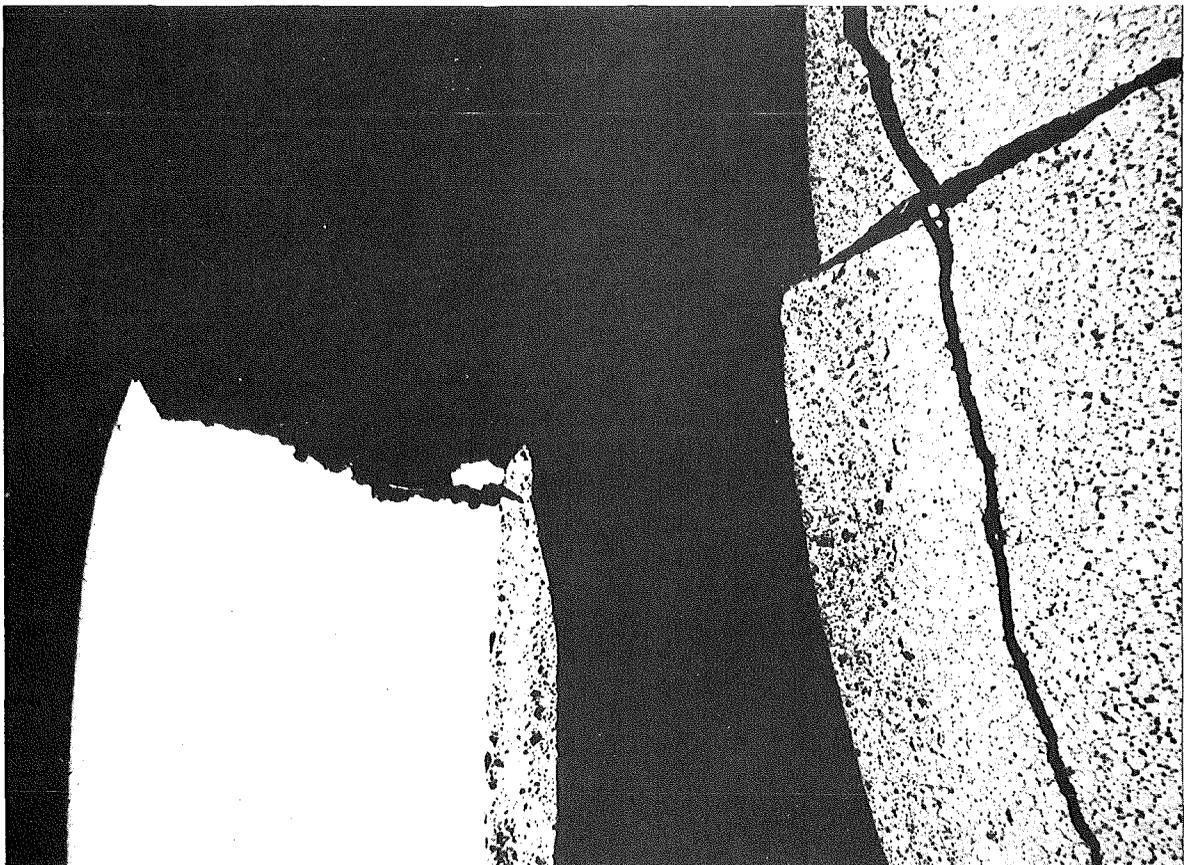
Stab 6D.3 Schnitt 3



40 μm

500x

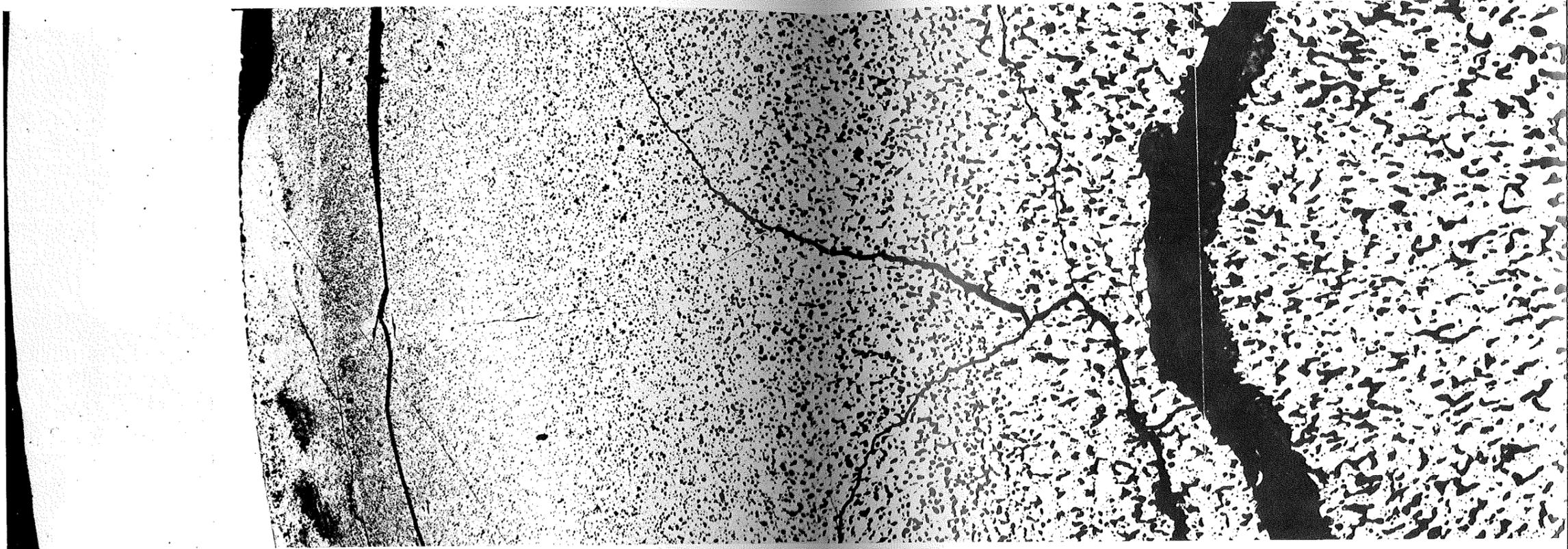
HZ-3B-KVE 128-6D.3-3/9

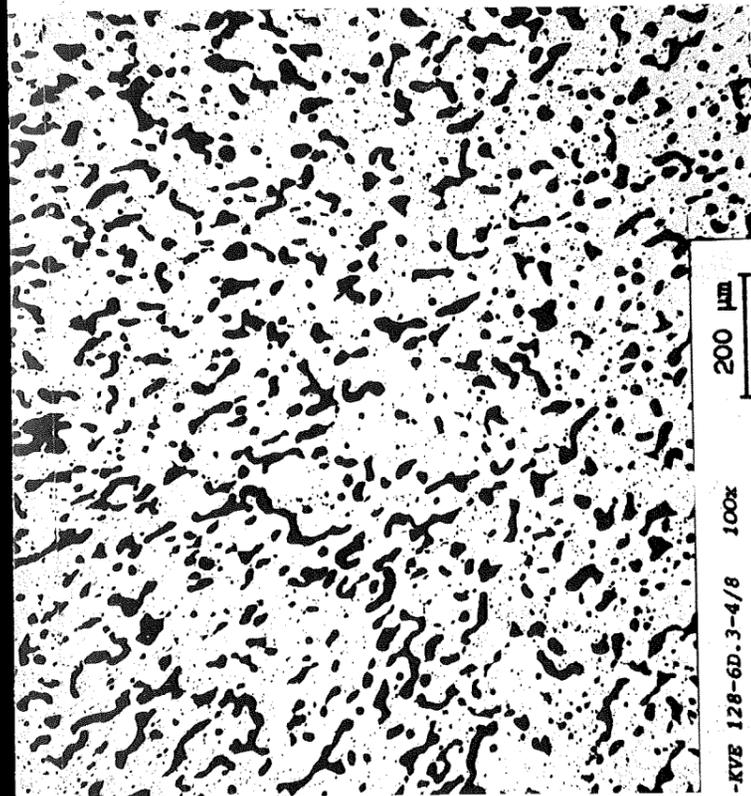


200 μm

100x

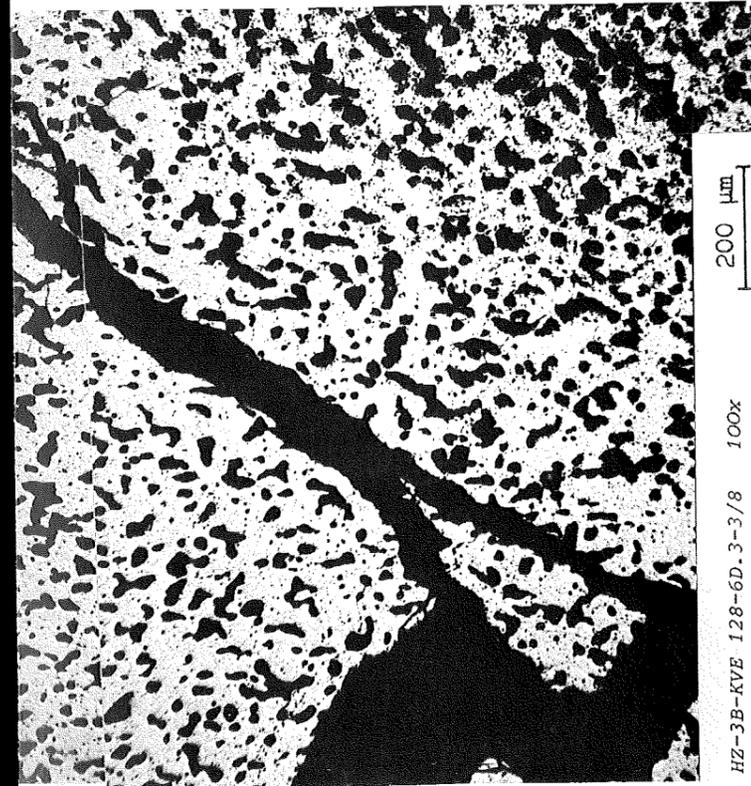
HZ-3B-KVE 128-6D.3-3/10



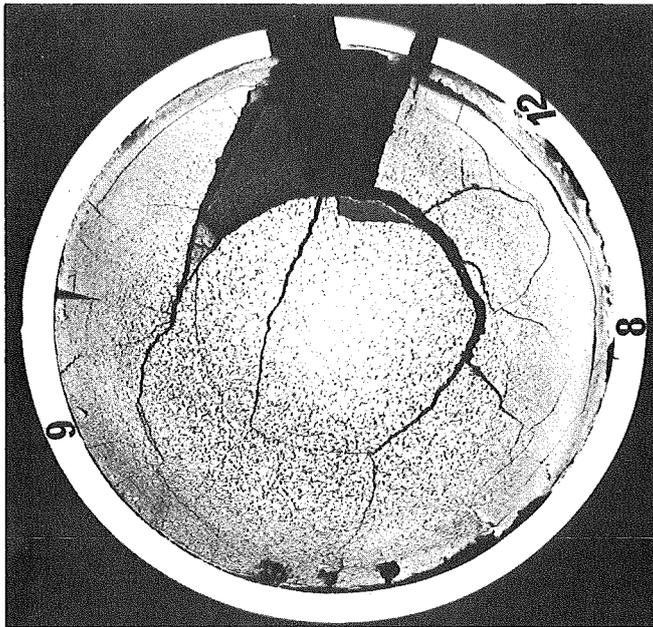


Schnitt 4

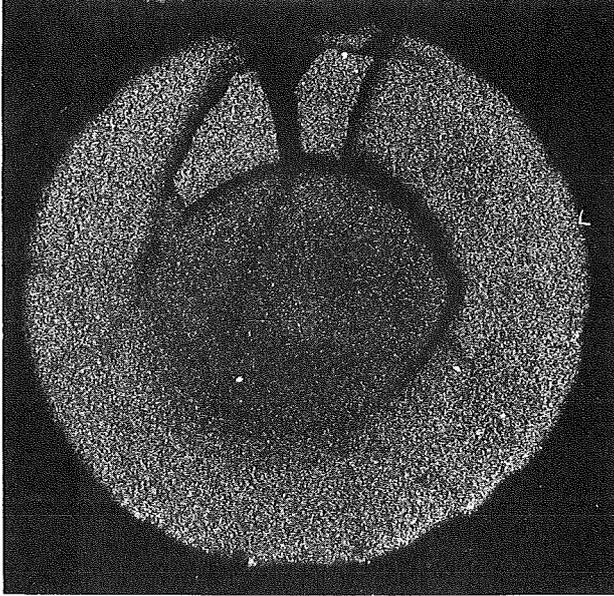
Stab 6D.3



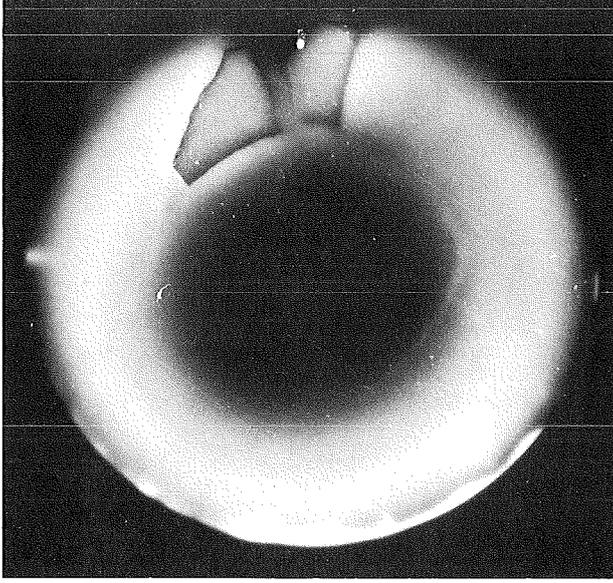
Schnitt 3



Schnitt 4



α (5 sec)



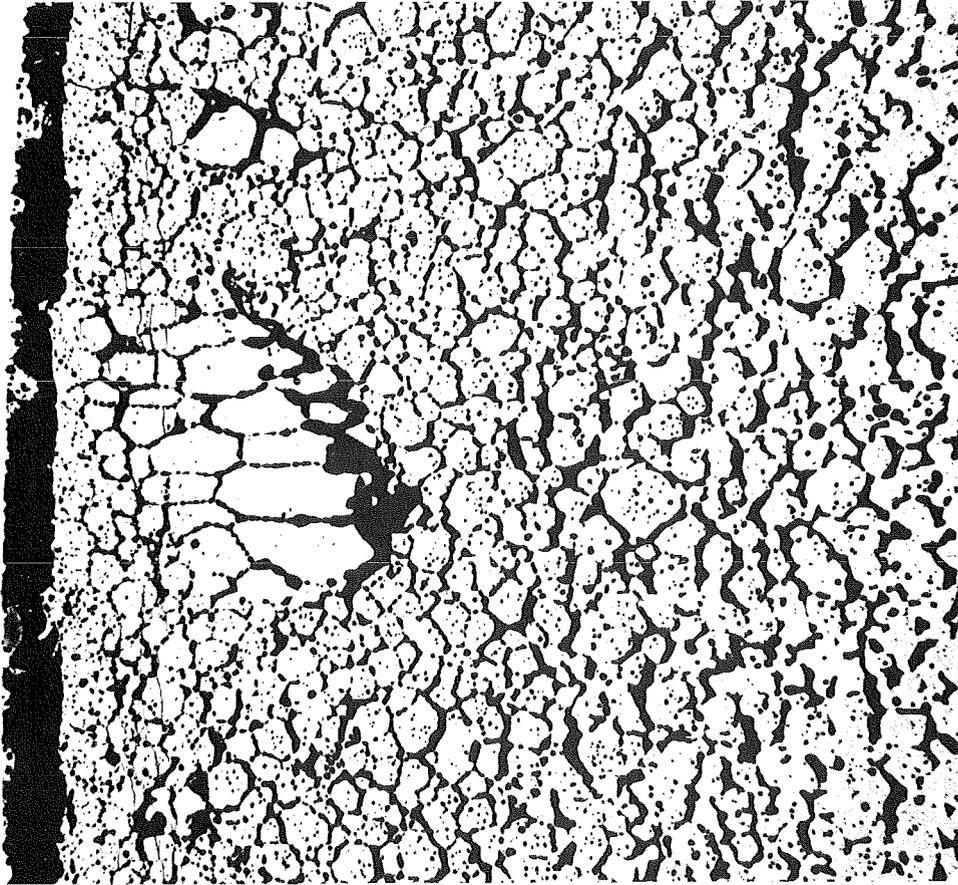
β - γ (20 sec)

2 mm

Autoradiografie

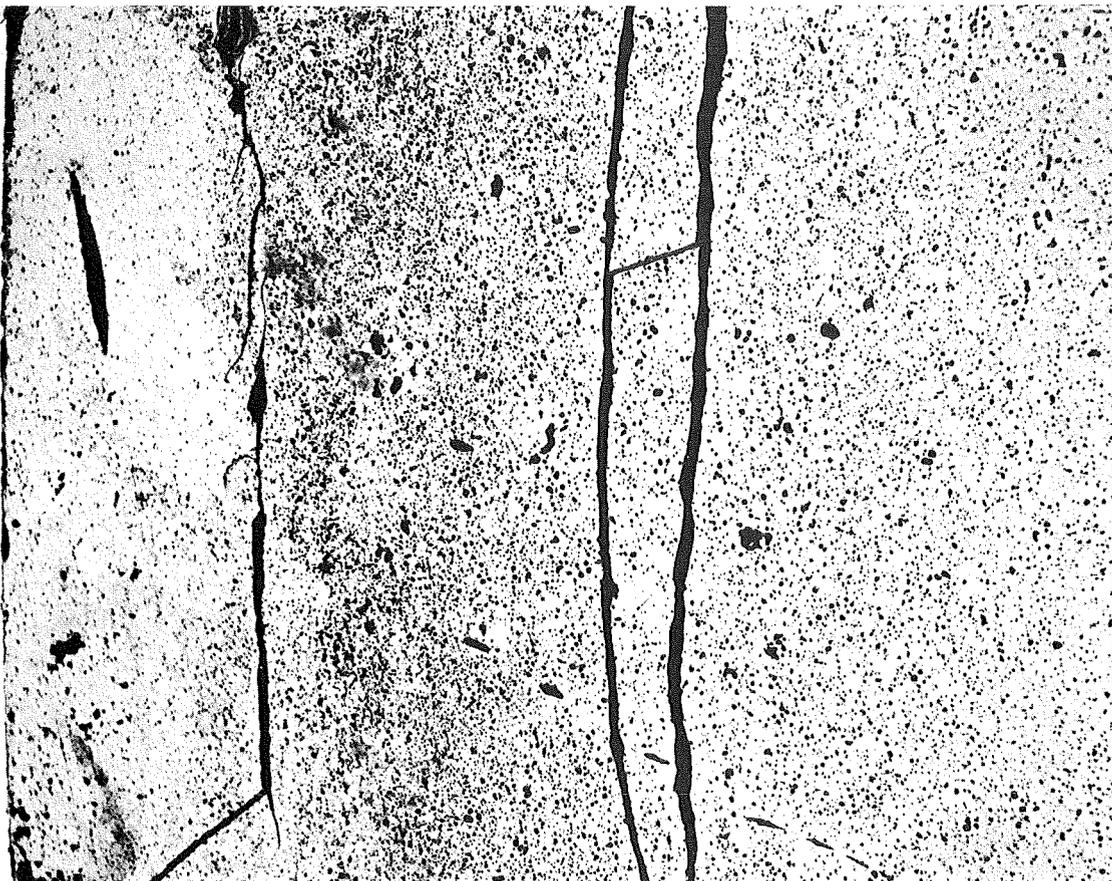
Vg. 6 Prüfling 6D.3

Stab 6D.3 Schnitt 4



100 μm

HZ-3B-KVE 128-6D.3-4/9 200x



100 μm

HZ-3B-KVE 128-6D.3-4/12 200x