

KfK 2577
März 1978

Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung der (U, Pu) C-Prüflinge der Kapselversuchsgruppen 6a und 6c

H. Steiner, P. Weimar
Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

Kernforschungszentrum Karlsruhe

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

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE GMBH

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

K f K 2577

Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung der (U,Pu)C-
Prüflinge der Kapselversuchsgruppen 6a und 6c

H. Steiner

P. Weimar

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH., Karlsruhe

K u r z f a s s u n g

Im Rahmen des DeBeNe Karbid-Programmes zur Entwicklung eines Karbid-Brennelementes wurden in den Versuchsgruppen 6a und 6c 13 gekapselte gasgebundene (He- bzw. Ar-Bindung) Prüflinge im thermischen Fluß des FR2 bestrahlt. Das Experiment sollte erste Ergebnisse zum Brennstoffschwellen, zur Spaltgasfreisetzung und zur Verträglichkeit zwischen karbidischem Brennstoff und Hülle bringen. Die Fertigungsspalte wurden mit 50 bzw. 90 μm extrem klein gewählt, damit sich schon bei niederen Abbränden merkliche Effekte zeigen.

Bei Stableistungen von 800 bis 1100 W/cm und Hülltemperaturen von 450 bis 600 $^{\circ}\text{C}$ wurde bis zu Abbränden von ca. 20, 50 und 70 mWd/kgM bestrahlt.

Die Brennstabhülle war aus austenitischem Edelstahl der Werkstoffnummer 1.4988 mit einem Durchmesser von 10 mm und einer Wandstärke von 0,55 mm. Der Brennstoff lag in Tablettenform vor und bestand aus Mischkarbid mit 15 % PuC-Anteil. Aufgrund der geringen Fertigungsspalte hatten die Brennstäbe relativ hohe Schmierdichten von 82 - 86 % TD bei Tablettendichten von 83 bis 88 % TD.

Die Prüflinge zeigten beträchtliche Hüllverformungen (bis zu 3 %). Hülldefekte traten ab einer Verformung von etwa 1,6 % auf und zwar insgesamt bei 4 Prüflingen. Ursache dafür war die mechanische Wechselwirkung zwischen Hülle und schwellendem Brennstoff.

Trotz der hohen Stableistungen von bis zu 1100 W/cm blieb die thermische Belastung des Brennstoffes niedrig in Konsequenz der guten Wärmeableitung aus der Brennstoff-Tablette. Hier wirkten sich die kleinen Fertigungsspalte günstig aus. Infolge des niedrigen Temperaturniveaus im Brennstoff war die Spaltgasfreisetzung gering; Pu- sowie Cs-137-Transport im nennenswerten Umfang fanden nicht statt. Über eine Umverteilung der M_2C_3 -Phase kann wegen ausstehenden Röntgenfeinstrukturuntersuchungen nichts gesagt werden. Eine chemische Wechselwirkung Hülle/Brennstoff fand nicht statt. Die Aufkarburierung des Hüllmaterials erstreckte sich von 25 % bei 500 $^{\circ}\text{C}$ auf 40 % bei 650 $^{\circ}\text{C}$ Hüllmittentemperatur. Eine quantitative C-Bestimmung im Hüllmaterial ist vorgesehen.

In der vorliegenden Dokumentation wird nach Darstellung von Aufgabe und Ziel des Experimentes eine detaillierte Beschreibung der Prüflingsauslegung, der Spezifikation, der Herstellung, des Bestrahlungsablaufes und der Nachuntersuchung gegeben. Den Abschluß bildet eine modellmäßige Analyse verschiedener Bestrahlungsphänomene.

A b s t r a c t

Design, irradiation and post-irradiation examination of the (U,Pu)C fuel pins of the test groups 6a and 6c.

In the frame of the DeBeNe carbide program for the development of a carbide bundle 13 encapsulated gas-bonded fuel pins of the experimental groups 6a and 6c were irradiated in the thermal flux of the FR2. The experiment was intended to yield first results on fuel swelling, fission gas release, and fuel/clad compatibility. The as-fabricated gaps between the fuel and clad were chosen extremely small (50, 90 μm rad.) so that already at low burnup relevant effects would appear.

The fuel pins were irradiated to burnups of about 20, 50 and 70 MWD/kg M at linear rod powers of 800 to 1100 W/cm and clad outer temperatures of 450 to 600 $^{\circ}\text{C}$.

The clad consisted of 1.4988 stainless steel and had a diameter of 10 mm and a wall thickness of 0.55 mm. Mixed carbide fuel pellets were used with a Pu-content of 15 %. On account of the small gap widths the smear density of the fuel pins was relatively high (82-86 % TD). These values result from pellet densities between 83 and 88 % TD.

The fuel pins showed considerable clad deformations (up to 3 %). Clad defects occurred on four fuel pins in total as from deformations of about 1.6 %. These defects were entailed by the fuel swelling which resulted in mechanical interaction between fuel and clad.

In spite of the high linear rod powers up to 1100 W/cm the thermal load of fuel remained low as a result of the effective heat conduction through the gap between the fuel and clad. On account of the low fuel temperature the fission gas release remained small and Pu- and Cs-transport was found to be unimportant. Concerning the M_2C_3 redistribution, the X-ray structure examinations should be awaited. No chemical interaction took place between the fuel and clad. The carburization of the clad ranged from 25 % at 500 $^{\circ}\text{C}$ to 40 % at 650 $^{\circ}\text{C}$ clad midwall temperature. It is planned to determine quantitatively the carbon content in the clad material.

The documentation in this report presents the objectives of the experiment, a detailed description of design, specification and fabrication of the pins, the irradiation history, and the post-irradiation examination. In conclusion several irradiation aspects of the fuel pins are analyzed by means of computer codes.

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

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

Februar 1978

H. Steiner, P. Weimar

<u>Inhalt:</u>	<u>Seite:</u>
1. Einleitung	2
2. Aufgabe und Ziel des Experiments	3
3. Auslegung	4
3.1 Auslegungsdaten	4
3.2 Thermische Auslegung	6
3.3 Mechanische Auslegung der Brennstäbe	7
4. Spezifikation	9
4.1 Brennstoff	9
4.2 Hülle	10
4.3 Brennstab	12
5. Herstellung	13
5.1 Brennstoff	13
5.2 Brennstab	16
6. Bestrahlungseinrichtung	16
7. Ablauf der Bestrahlung	18
7.1 Reaktorzyklen und Neutronenfluß	18
7.2 Temperatur und Stableistung	18
7.3 Messung der Zentraltemperatur	24
7.4 Thermische Abbrandberechnung	25
8. Zerstörungsfreie Nachuntersuchung	26
8.1 Äußere Vermessung	26
8.2 Durchleuchtung	31
8.3 γ -Profile und γ -Spektren	32
9. Zerstörende Nachuntersuchung	34
9.1 Spaltgasbestimmungen	34
9.2 Keramografie	36
9.3 Radiochemische Abbrandbestimmung	38
10. Modelltheoretische Untersuchung	39
10.1 Thermische Analyse	39
10.2 Analyse der Brennstoffstruktur	42
10.3 Mechanische Analyse	44
11. Schlußbetrachtung	
Literatur	
Nomenklatur	
Anhang I und II	

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 FR2, also im thermischen Fluß.

Experiment	Vg6a	Vg6c	Vg6d	Vg6e
Zahl der Prüflinge	7	6	3	3
Bindung	He	Ar	He	Na
Brennstoff:				
Pu/U+Pu (%)	15	15	15	15
Tab.Durchm. (mm)	8,85	8.81	8.4	8.4
Sinterdichte (%TD)	83/87	85/88	92	92
Schmierdichte (%TD)	82/86	83/86	82	82
Spaltbreite diam. (μ m)	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. Stableistg. (W/cm)	1100-1400	1200	800-1000	800-1200
max. Hülltemp. ($^{\circ}$ C)	650	600	450-550	450-600
max. Abbrand (MWd/kgM)	13-48	23-70	70/80	70

Die Stäbe der Untergruppen 6d und 6e werden z.Zt. noch im Reaktor bestrahlt, deshalb werden hier nur die beiden Untergruppen 6a und 6c dokumentiert.

Der vorliegende Bericht beinhaltet alle Einzelheiten von Auslegung, Spezifikation und Prüflingsherstellung. Weiterhin werden der Bestrahlungsablauf sowie die zerstörungsfreie und zerstörende Nachuntersuchung beschrieben. Beschlossen wird dieser Bericht mit einer modelltheoretischen Untersuchung verschiedener Phänomene.

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

Zeitraum	Teilarbeit	Institution/Beteiligte
1969/70	Versuchsauslegung	AEG-Telefunken, TU A. Gerken, R. von Jan, H. Meisner, K. Richter
1971/72	Herstellung des Brennstoffes Herstellung der Stäbe Organisation der Bestrahlung und Betreuung	TUI - K. Richter Fa. ALKEM - AEG IMF - Depisch, Fiedler Häfner
1971/74	Bestrahlung im FR2	Abt.Reaktorbetriebe FR2
1975/76	Organisation der Nach- untersuchung und Betreuung	IMF - P. Weimar
1975	Zerstörungsfreie Nachuntersuchung	RBT/HZ - Scheeder, Enderlein
1975	Spaltgasuntersuchung	RBT/HZ - Schweigel
1975/76	Keramografie	RBT/HZ - Pejisa, Weiser
1976	Abbrandbestimmung	IRCh - Wertenbach
1977	Modelltheor. Analyse	IMF III - Steiner
1977	Dokumentation der Ergebnisse	IMF III - Steiner, Weimar

2. Aufgabe und Ziel des Experiments

Im Rahmen des PSB-Bestrahlungsprogramms für Karbid-Brennstäbe werden im thermischen Fluß des FR2 13 Stäbe mit (U,Pu)C-Brennstoff der Versuchsgruppen 6a und 6c bestrahlt /1/. Entsprechend dem niederen Flußniveau im FR2 wird die Bestrahlung bei ca. 1000 W/cm durchgeführt, was - bezogen auf den Temperaturabfall im Brennstoff - bei einer Flußabsenkung von 0,67 einer Stableistung von 670 W/cm im schnellen Fluß entspricht. Dadurch wird die Aussagekraft der Experimente für spätere Bestrahlungen unter realistischen Schnellbrüterbedingungen etwas eingeschränkt.

Das Versuchsziel liegt darin, erste Erfahrungen über das Verhalten des gasgebundenen Karbidkonzepts zu gewinnen. Im Vordergrund steht dabei die Frage nach dem Brennstoffschwellen und der Spaltgasfreisetzung. Da bei der geplanten Bestrahlung im FR2 der maximale Abbrand zweckmäßigerweise auf 5 % FIMA zu begrenzen ist, wird eine hohe Schmierdichte (und folglich eine kleine Fertigungsspaltbreite) gewählt, damit das Brennstoffschwellen auch nach außen hin sichtbar wird. Inwiefern eine Erhöhung der Brennstofftemperatur sich günstig auf das Brennstoffschwellen auswirkt, muß 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 hofft man, das Schwellen des Brennstoffs in die Porosität hinein zu lenken.

Es sind drei Abbrandstufen vorgesehen und zwar 4500 MWd/tM, ca. 23000 MWd/tM und ca. 45000 MWd/tM entsprechend einer Zyklenzahl von 1, 5 und 10. Dadurch erhält man Aufschluß über den zeitlichen Verlauf verschiedener Bestrahlungsphänomene. Neben dem Brennstoffschwellen und der Spaltgasfreisetzung waren hier erste Aussagen über die Wanderung von Spaltprodukten und Plutonium von besonderem Interesse.

Durch die Messung der Brennstoffzentraltemperatur mit Hilfe von Thermoelementen bei den Prüflingen der Vg 6c ist eine experimentelle Bestimmung des Wärmedurchgangs während der Bestrahlung möglich.

3. Auslegung

Die Auslegung der Versuchsgruppen 6a und 6c 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 /2/ durchgeführt. Sie ist in /1/ zu finden.

3.1 Auslegungsdaten

Die für die Auslegung und die Spezifikation erforderlichen Grunddaten sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Bis auf die Art der Bindung und die Größe des Fertigungsspalts ist die Auslegung der beiden Versuchsgruppen a und c im wesentlichen identisch. Bei den Prüflingen von 6c ist noch anzumerken, daß die Tabletten der oberen Hälfte der Säule zur Aufnahme von Zentral-Thermoelementen mit einer Bohrung von 2,2 mm Durchmesser versehen werden.

Tabelle 1: Auslegungsparameter der Kapselbestrahlungsversuche 6a und 6c im FR2

Brennstofftyp	(A)	(C)
Brennstoff:		
Material	(U,Pu)C unter N ₂ hergest.	(U,Pu)C unter Ar-Atm.hergest.
Anreicherung:	U _{nat}	U _{nat}
Pu(Gew.%)	15	15
Theoret.Dichte (g/cm ³)	13,6	13,6
Tablettendichte (% TD)	86	86
Tablettendurchm. (mm)	8,85	8,81
Tablettenhöhe (mm)	10,0	10,0
Hülle:		
Material	1.4988	1.4988
Außendurchm. (mm)	10,0	10,0
Wandstärke (mm)	0,55	0,55
Brennstab:		
Bindung	He	Ar
Fülldruck (at)	1	1
Schmierdichte (%TD)	85	84
Radialspalt (µm)	25	45
Stabteilung:		
Oberer Endstopfen (mm)	25	25
Spaltgasraum (mm)	128	128
Spaltstoff (mm)	300	300
Rh-Plättchen (mm)	1	1
Unterer Endstopfen (mm)	27	27
Gesamtlänge (mm)	475	475
Betriebsbedingungen:		
Nominelle Stableistg. (W/cm) ^{+) 1000}	1000	1000
Max. Stableistung (W/cm) ^{++) 1150}	1150	1150
Max. Hülltemperatur innen (°C)	725	725
Abbrand (MWd/kgMe)	4,5; 22,5; 45	4,5; 22,5; 45

+) örtl. Maximum der über den Zyklus gemittelten Stableistung

++) max. zulässige Stableistung zu Beginn eines Zyklus

3.2 Thermische Auslegung

Die zur Auslegung verwendeten Stoffdaten für Wärmeleitfähigkeit und thermische Dehnung von Brennstoff und Hülle sind in /1/ 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/3,4,5/,die allerdings noch einen großen Streubereich aufweisen.

$$\begin{aligned} h_{\text{gap}}^{\text{He}} &= 1,0 - \underline{1,3} - 2,0 \text{ W/cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C} \\ h_{\text{gap}}^{\text{Ar}} &= 0,3 - \underline{0,4} - 0,6 \text{ W/cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Dabei ist ein leichter Kontaktdruck angenommen.

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

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

(Die Notation ist im Anhang erklärt).

Die Brennstoffzentraltemperatur T_{z} erhält man aus der Integration des Wärmeleitungsintegrals /1/

$$\chi = \frac{4\pi}{f} \int_{T_{\text{Ba}}}^{T_{\text{z}}} \lambda_{\text{f}} dT \quad (2)$$

$$T_{\text{z}} = 200 \left\{ \sqrt{\frac{\chi \cdot f}{(1-P)^{2/3} C_{\text{uc}} \cdot 4\pi} + 0,19 \cdot T_{\text{fa}} + 2,5 \cdot 10^{-5} T_{\text{fa}}^2 + 19^2 - 19} \right\} \quad (3)$$

Die Flußabsenkung f wird dabei zu 0,67 angenommen. In Abb. 1 sind T_{z} und T_{fa} in Abhängigkeit von der Stableistung für He- und Ar-gebundene Stäbe aufgetragen. Die Unsicherheit in den Stoffdaten hat zur Folge, daß die Brennstofftemperaturen nur innerhalb gewisser Bänder bekannt sind.

Speziell für die Ar-gebundenen Brennstäbe sind diese beträchtlich. Für die Meßstellen der Zentraltemperatur ergeben sich wegen der zentralen Bohrung von 2,2 mm etwas niedrigere Werte für T_z und zwar entsprechend der Beziehung:

$$\Delta T_z = (T_z - T_{fa}) \cdot \frac{2x^2}{1-x^2} \ln x$$

$$\approx 0,18 (T_z - T_{fa}) \quad \left(x = \frac{r_{fi}}{r_{fa}}\right) \quad (4)$$

Die zugehörigen Temperaturverläufe sind in Abb. 1 gestrichelt gezeichnet.

Für $h_{\text{gap}}^{\text{Ar}} = 0,3 \text{ W/cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ liegt die maximale Brennstoffzentraltemperatur (entsprechend $\chi_{\text{max}} = 1150 \text{ W/cm}$) in den Ar-gebundenen Brennstäben bei ca. $2450 \text{ } ^\circ\text{C}$, also in der Nähe des Schmelzpunktes ($T_s = 2480 \text{ } ^\circ\text{C}$). Die Annahme eines Wertes von $0,3 \text{ W/cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ dürfte allerdings bei dieser hohen Stabileistung ausgesprochen pessimistisch sein, so daß mit großer Wahrscheinlichkeit ein Schmelzen des Brennstoffs ausgeschlossen ist.

3.3 Mechanische Auslegung der Brennstäbe

Die Hüllrohre werden durch Innendruck und durch thermische Spannungen zyklisch beansprucht. Die thermischen Spannungen sind für alle zwei Brennstabtypen gleich groß, entsprechend einem Temperaturabfall in der Hülle von $\Delta T_H = 94 \text{ } ^\circ\text{C}$ bei einer Stabileistung 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 und für die Ar-gebundenen Stäbe, entsprechend den höheren Brennstofftemperaturen, eine Freisetzung von 80 %. Bei einem Zielabbrand von 45 MWd/kgMe hat man damit im ersten Fall einen Gasdruck von 15 atü und im zweiten Fall einen von 55 atü. Über den Brennstoffschwellendruck läßt sich noch keine exakte Aussage machen. Bei der Berechnung der Hüllrohrverformung nach CRASH /2/ wurde deshalb der Innendruck (Gas + Schwellen) variiert. Die Materialdaten sind dabei aus /6/ 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/kgMe sind in Tabelle 2 aufgeführt. und zwar für Innendrucke von 40, 80 120 und 160 atü.

Tabelle 2: Ergebnisse der CRASH-Rechnung für eine Standzeit von 8 400 h
(45 000 MWd/tMe Abbrand)

Innendruck (Gas + Schwellen) am Ende der Standzeit atü		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 atü erreicht. Dies bedeutet, daß sich bei He-Bindung bzw. bei Ar-Bindung ein Schwelldruck von maximal 145 atü bzw. 105 atü aufbauen darf.

4. Spezifikation

Die Spezifikationen von Brennstoff, Hülle und Brennstab sind in /1/ aufgeführt. In den folgenden Abschnitten werden die wesentlichen Teile der Einzelspezifikationen zusammengestellt.

4.1 Brennstoff

Brennstabtyp	A	C
Tablettendichte (% TD \pm 2 %)	86	86 ⁺⁾
Tablettendurchmesser (mm \pm 10 μ m)	8,85	8,81
Spalt (μ)	25	40
Brennstofflänge (mm)	300 \pm 2	
Tablettenlänge (mm)	10 \pm 1	
Anreicherung	$\frac{\text{Pu}}{\text{U+Pu}} = 15 \text{ w/o} \pm 0,5$ (Cerimetrie)	
Isotopenzusammensetzung	U = Natururan	
	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		
UPu-Monokarbid mit max. 25 % M_2C_3	Produkt I	
UPu " " 15 % M_2C_3	Produkt II	
Kohlenstoffäquivalent = C + $\frac{12}{16}$ O + $\frac{12}{14}$ N		
Produkt I	4,75 - 5,25 \pm 0,1 Gew.%	
Produkt II	4,75 - 5,10 \pm 0,1 Gew.%	

⁺⁾ Die obere Hälfte der Tablettensäule hat eine zentrale Bohrung von 2,2 \pm 0,1 mm zur Zentraltemperaturmessung.

Freier Kohlenstoff = 0 % (Leitfähigkeitsmessung)

Grenze Analysengenauigkeit \approx 500 ppm

U-Pu Metall = 0 %

Grenze Analysengenauigkeit (Metallographie)

MC₂ = 0 %

Grenze Analysengenauigkeit (Metallographie)

Sauerstoffgehalt (Gaschromatographie)

Produkt I < 8000 ppm \pm 10 % rel.

Produkt II < 4000 ppm

Stickstoffgehalt (Gaschromatographie)

Produkt I < 5000 ppm

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 -Autoradiographie)

Pu-Partikel < 300 μ m

4.2 Hülle

Die Rohre müssen nach einem einheitlichen Schema durchgehend numeriert werden, wobei die Numerierung an der Stelle des Prüfbeginns der Ultraschallprüfung mit Aufklebestreifen licht- und waschecht anzubringen ist. Für jedes Rohr wird ein Prüfzeugnis erstellt. Die Prüfzeugnisse des Herstellerwerkes müssen den Werksabnahmezeugnissen nach DIN 50049/3B entsprechen und von unabhängigen Sachverständigen durchgeführt werden.

4.2.1 Material

X8NiMoVNb 1613 (Werkstoff Nr. 1.4988)

Herstellungsverfahren

Das Material soll im Vakuum erschmolzen und umgeschmolzen werden.

Chemische Zusammensetzung (Gew.%)

	<u>1.4988</u>
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
Phosphor	-
Silizium	0,3 - 0,6
Bor	max. 20 ppm
Stickstoff	0,1 %.

4.2.2 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-Vidigage-Verfahren.

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

4.2.3 Oberflächenbeschaffenheit

Rauhigkeit innen und außen: $\max 2, \mu\text{m} (R_v)$

Prüfung mit Perth-O-Meter an mindestens drei Rohren pro Charge und Lot (längs und quer)

Oberflächenriefen und Fehler:

max. $20, \mu\text{m}$ od. kleiner 5 % der Wandstärke

Definition: Riefen ≥ 10 mm lang

Fehler ≤ 10 mm lang

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

Längsfehler: $\lambda = 10$ 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 1/sec.

Oberflächenrisse: nicht zulässig

Definition: Risse 10 % der Wandstärke

Prüfung mit Farbeindringenverfahren, 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.

4.2.4 Materialbedingungen

Vorbehandlung: 10 - 20 % kaltverformt - Wärmebehandlung

Korngröße: Mindestens ASTM 7 entsprechend ASTM E 112 - 63

Prüfung an mindestens zwei Rohren pro Charge und Lot.

Mechanische Eigenschaften:

Zugfestigkeit, Streckgrenze, Bruchdehnung, max. und min. Werte bei Raumtemperatur und 650°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, Tab. I, Class I

Abdruckversuch:

nach DIN 50 104 mit ≤ 100 at Druck

jedes Rohr wird mit Wasser auf ≤ 100 at 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

4.3.1 Komponenten der Brennstäbe

Brennstoff:

Der Brennstoff aus (U,Pu) Mischkarbid-Sinterkörpern wird vom TUI 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.

4.3.2 Fertigung der Brennstäbe

Identifizierung:

Die fertigen Brennstäbe müssen den Angaben und Toleranzen der Zeichnungen unter 3.1 entsprechen. Die zu variierenden Parameter und die jeder Stabserie zugeordneten Stabnummern sind tabellarisch unter 2.1 zusammengestellt.

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 % Ar bzw. He zu fluten. Bei der Stabserie C werden außerdem zentrale Thermoelemente eingesetzt. Im fertigen Brennstab soll der Edelgasgehalt bei Gas-bonding 95 % betragen.

5. Herstellung

5.1 Brennstoff

Die Brennstoffe der verschiedenen Stäbe wurden beim Transurane Institut (TUI) hergestellt /7/. Die Herstellung geschah in Handschuhkästen unter gereinigtem Stickstoff für das Produkt I (Charge Nr. C25 - 3.19) und unter Argon-Atmosphäre für das Produkt II (übrige Chargen). Die Analysenwerte sind in der Tabelle 3 zu finden.

Tabelle 3 : Analysendaten pro Brennstofftype

Brennstab-Type	A				C		
Reaktionsprodukt: O (Gew.%)	~ 0,8				~ 0,45		
Gesinterte Pellets: Sinteratmosphäre	Ar	V a k u u m					
Charge Nr.	C25-3.19	C28-3.1	C28-3.2	C26-3.3	C30-3.2	C32-3.9	C32-3.11
Pu / U+Pu	0,152	0,151	0,151	0,154	0,1495	0,152	0,152
C (Gew.%)	4,67-4,72	4,65-4,73	4,65-4,72	4,65-4,75	4,59-4,64	4,53-4,58	4,50-4,58
O (Gew.%)	0,60-0,71	0,36-0,55	0,23-0,30	0,27-0,45	0,30-0,41	0,30-0,55	0,35-0,50
N (Gew.%)	< 0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Röntgenanalyse ⁺⁾	~ 14 % M ₂ C ₃	~10 % M ₂ C ₃	MC	~4 % M ₂ C ₃	MC	MC	MC
Pelletdichte (% TD)	82,6	86,7	87,6	87,0	88,1	87,1	84,8

⁺⁾ Hauptphase MC

Entgegen den Erwartungen entsprach der Sauerstoff- und Stickstoffgehalt von Charge C25-3.19 dem der übrigen Chargen. Der letztere blieb weit unter den von der Spezifikation gesetzten Grenzen (siehe Tabelle 3). Die Analysenwerte der metallischen Verunreinigungen für einige Chargen sind in Tabelle 4 aufgeführt. Beim Fe-Gehalt konnte die Spezifikation nicht immer eingehalten werden.

Bezüglich des F- und Cl-Gehaltes wurden an einigen Proben Stichproben durchgeführt. Diese brachten folgendes Ergebnis:

Cl < 5 ppm

F = 4 - 6 ppm.

Tabelle 4: Metall. Verunreinigungen

Charge Nr. Element	C 25- 3.19	C 26- 3.3	C 28- 3.1	C 28- 3.2	C 30- 3.2	C 32- 3.9	C 32- 3.11
Cd						<0,2	<0,2
Al	15	15	15	<15	10	<5	<5
B	0,5	0,5	<0,5	< 0,5		<0,2	<0,2
Si		-	<30	<30	10	30	30
Fe	1000	1000	1000	1000	1500	500	1000
Mg	<5	<5	2	2	10	2	2
Mn	<1	<1	<2	<2	1	<2	<2
Pb	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
B		0,5	<0,5	<0,5			
W	500	100	300	25	50	10	<5
Cr	150	150	<5	<5	10	<5	<5
Ni	<4	<4	4	4	<4	5	10
Bi	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Mo	10	10	50	50	200	10	10
Sn	<1	<1	<1	<1	<2	<2	<2
V	<40	<40	<15	<15		1	1
Ca		<100	<100	<100			
Ag						<0,2	<0,2
Na	<40	<40	<40	<40			
Zn	<50	<50	<50	<50		<50	<50

5.2 Brennstab

Die Stabfertigung erfolgte bei der Firma Alkem. In Tabelle 5 und 6 sind die wichtigsten Stabdaten wie Länge und Gewicht der Brennstoffsäule sowie Tablettendichte- und -durchmesser aufgeführt. Der besseren Übersicht wegen ist auch der Bezug zwischen der KVE-Nummer, der Stabnummer und Bezeichnung der Tablettensäule nach TUI hergestellt.

Bei den Prüflingen von 6c wurde entgegen der Auslegung die Brennstoffsäule um 20 mm verkürzt. Am unteren Stabende wurde ein Stützrohr von 25 mm Länge eingebracht (siehe Abb. 6).

Die obere Hälfte der Tablettensäule liegt bei diesen Prüflingen in Form von Hohlpellets vor, um die Zentral-Thermoelemente aufzunehmen. Die Zentralbohrung hatte einen Durchmesser von 2,2 mm.

Der Stabdurchmesser lag bei allen Prüflingen innerhalb der Spezifikation, während der Zapfenschlag bei den Stäben 6/12, 6/15 und 6/31 der Vg 6c und beim Stab 6/26 der Vg 6a sich außerhalb der Toleranz befand. Die gemessene Leckrate war bei allen Prüflingen der Vg 6c kleiner als $1 \cdot 10^{-8}$ Torr l/sec.

6. Bestrahlungseinrichtung

Die Bestrahlung der Prüflinge wird in einwandigen NaK-Kapseln des Typs 7 /8/ durchgeführt. Diese Kapseln zeigen den in Abb. 2 dargestellten Aufbau. Sie setzten sich aus drei Baueinheiten zusammen: Der Bestrahlungskapsel, dem Ober- teil 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 Stableistung und der Hülloberflächentemperaturen erfolgt über die kapselspezifische Temperaturstableistungscharakteristik (Abb. 3). In der Abbildung 4 ist der Vollständigkeit halber der radiale Temperaturverlauf für eine Stableistung von 1150 W/cm dargestellt.

Tabelle 5: Herstellungsdaten für die Brennstäbe der Versuchsgruppe 6a

KVE Nr.	Stab-Nr.	Chargen-Nr.	Säulen-Nr.	Brennstoff-säulenlänge (mm)	Brennstoff-säulengewicht (g)	Tabletten-dichte (% TD)	Tablettendurchm. (mm)
91	6/1	C28.3.1	A4-B4-C4	299,0	216,04	86,7	8,85
92	6/2	C25.3.19	D4-E4-F4	301,0	208,54	83,6	8,85
93	6/26A	C25.3.19	G5-H5-J5 (27 Tabletten)	300,6	208,10	82,6	8,85
		C28.3.1	3 Reservetabl.				
94	6/3	C28.3.1	G4-H4-J4	301,2	217,93	86,7	8,85
99	6/27	C25.3.19	A6-B6-C6 (29 Tabletten)	302,0	209,57	82,6	8,85
		C28.3.2	1 Tablette aus Kontrollstab				
102	6/26	C28.3.2	D5-E5-F5 (29 Tabletten)	301,47	217,80	87,6	8,85
		C25.3.19	A5-B5-C5 (1 Tablette)				
103	6/36	C28.3.2	A7-B7-C7 (20 Tabletten)	299,6	217,00	87,6	8,85
		C26.3.3	(8 Tabletten)				
		C25.3.19	A5-B5-C5 (2 Tabletten)				

Tabelle 6: Herstellungsdaten für die Brennstäbe der Versuchsgruppe 6c

KVE Nr.	Stab-Nr.	Chargen-Nr.	Säulen-Nr.	Brennstoff-säulenlänge (mm)	Brennstoff-säulengewicht (g)	Tabletten-dichte (% TD)	Tabletten-durchmesser (mm)
104	6/11	C32.3.11	C7	280,0	190,33	84,8	8,81
108	6/12	C32.3.11	C6	280,5	192,45	84,8	8,81
110	6/14	C30.3.2	C1	280,3	198,71	88,1	8,81
111	6/15	C32.3.9	C3	281,6	197,66	87,1	8,81
114	6/30	C32.3.9	C4	278,1	194,82	87,1	8,81
115	6/31	C30.3.2	C2	281,1	199,04	88,1	8,81

In den Kapseln für die Stäbe der Serie 6c erhält der obere Endstopfen der Nb-Kapsel eine zentrale Bohrung, durch die das Hochtemperatur-Thermoelement zur Messung der Zentraltemperatur geführt wird.

Ab KVE 99 wurde in die Kapsel zur Vermeidung der bisherigen Temperaturschwankungen zusätzlich ein dünnwandiges "Antikonvektionsrohr" eingebaut. Außerdem wurden Thermoelemente von 1 statt 0,5 mm Durchmesser verwendet.

7. Ablauf der Bestrahlung

7.1 Reaktorzyklen und Neutronenfluß

Die Bestrahlung der Prüflinge der Vg 6a, 6c begann mit Einbau der KVE 91 und 93 am 19.7.1971 in Zyklus F/1971 und endete mit dem Ausbau des KVE 104 nach Zyklus C/75 am 7.7.1975. In Tabelle 7 sind die wesentlichen Informationen über die relevanten Zyklen sowie die mittleren Neutronenflüsse in den jeweiligen Bestrahlungspositionen gemäß /9/ zusammengestellt. Neben der Zahl der Volllasttage sind die der Schnellschlüsse und Abschaltungen für alle Zyklen im einzelnen aufgeführt. Des weiteren sind in Tabelle 7 die betreffenden Bestrahlungspositionen zu finden. Die Lage der Kapselversuchseinsätze im FR2-Core geht aus der Positionskarte des FR2 (siehe Abb. 5) hervor.

7.2 Temperatur und Stabileistung

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-Stabileistungscharakteristik aus der Meßtemperatur gewonnen werden (siehe Abb. 3), desgleichen auch die Stabileistung. Die Verteilung der Thermoelement-Meßstellen über die Stablänge wie auch die Tiefe der zentralen Bohrung bei den Prüflingen der Serie 6c sind den Stabzeichnungen (Abb. 6) zu entnehmen.

Als entscheidendes Ergebnis der Meßwert-Auswertung sind die zeitlichen Verläufe der Hülloberflächentemperatur in den Abbildungen 7 - 27 aufgetragen. In den Tabellen 8-11 sind die aus einer linearen Approximation gewonnenen Werte für Stabileistung und Hülltemperatur zu Beginn und Ende eines jeden Zyklus dargestellt. Aufgrund des sägezahnartigen Betriebsverlaufes sind dies die wesentlichen Kennwerte für die modelltheoretische Auswertung. Die Stabileistungen 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 7: Bestrahlungspositionen der Kapselversuchsgruppen 6a und 6c mit den jeweiligen mittleren Flüssen $\bar{\Phi}$ (in 10^{13} n/cm²sec)

	Jahr	1 9 7 1					1 9 7 2								1 9 7 3							1 9 7 4							1 9 7 5			
		Zyklus	F	G	H	I	K	A	B	C	D	E	F	G	H	A	B	C	D	E	F	G	A	B	C	E	F	G	A	B	C	
FR 2 - Betrieb	Vollast-Tage	13,2 ⁺ 14,1 ⁺⁺	26,4	24,3	25,8	28,9	37,2	30,5	36,6	38,2	38,5	32,0	38,1	39,1	40,0	38,6	38,3	36,5	37,2	39,9	45,9	45,9	45,6	50,2	45,5	45,0	45,5	38,3	45,3	44,3		
	SS	2	2	-	-	-	-	4	3	2	4	2	1	1	1	2	2	4	7	1	1	-	-	3	1	4	-	2	1	2		
	A	2	-	2	2	2	1	3	2	2	1	1	2	-	-	-	-	4	-	-	1	-	6	-	2	1	-	-	2			
Vg. 6a	KVE 91 $\bar{\Phi}$	53 11 6,9																														
	KVE 93 $\bar{\Phi}$	53 31 5,2																														
	KVE 94 $\bar{\Phi}$		45 23 6,7	45 23 6,7	49 23 6,5	49 23 6,5																										
	KVE 99 $\bar{\Phi}$							49 23 6,6	49 23 6,5	49 23 6,5	49 23 6,6	49 23 6,7																				
	KVE 102 $\bar{\Phi}$										53 11 6,7	53 11 6,7	53 11 6,6	53 11 6,5	53 11 6,5	53 11 6,5	53 11 6,4	53 11 6,4	53 11 6,3													
	KVE 103 $\bar{\Phi}$										53 23 6,3	53 23 6,4	53 23 6,4	53 23 6,5	53 23 6,5	49 23 6,7	49 23 7,2	49 23 7,0	49 23 7,0	49 23 6,5												
Vg. 6c	KVE 104 $\bar{\Phi}$																37 23 5,3	57 11 5,6	53 11 6,0	53 11 5,7	45 23 7,2	45 23 7,0	45 23 6,7	45 23 6,8	45 23 6,5	45 23 6,7	45 23 6,7	45 23 6,6	45 23 6,7			
	KVE 108 $\bar{\Phi}$												50 30 5,7	50 30 5,7	52 28 5,6	52 28 5,5	44 24 6,6	44 24 6,7	44 24 6,9	44 24 7,0	44 24 6,7	44 24 6,7										
	KVE 110 $\bar{\Phi}$													37 23 5,7	40 30 4,0	40 30 4,2	52 28 5,3	52 28 5,3	52 28 5,2	48 28 6,5	48 28 6,2	48 28 6,2	48 28 6,0	48 28 5,8	48 28 6,0	48 28 5,9						
	KVE 111 $\bar{\Phi}$														57 23 6,2	53 23 7,1	53 23 7,2	53 23 7,0	53 23 6,5	49 23 5,9	49 23 6,6											
	KVE 114 $\bar{\Phi}$																57 23 6,7	57 23 6,4	57 23 6,0	57 23 6,0	57 23 5,8											
	KVE 115 $\bar{\Phi}$																	40 30 4,8	49 7 6,4	57 11 6,6	53 23 5,9	53 23 6,6	49 23 6,0									

+ für KVE 91/ ++ für KVE 93 / SS = Schnellschluß / A = Abschaltung

Tabelle 8: Stabileistung der Prüflinge am Anfang und Ende des Zyklus für jedes TE der Vg. 6a

Prüfling Nr.	TE Nr.	Stableistg. (W/cm)	Jahr																			
			1 9 7 1					1 9 7 2					1 9 7 3									
			Zyklus	F	G	H	I	K	A	B	C	D	E	F	G	H	A	B	C	D	E	
6/1	5	X _{Anfang}	1046																			
		X _{Ende}	918																			
	6	X _A	240																			
		X _E	444																			
7	X _A	166																				
	X _E	131																				
8/9/10	X _A	1093																				
	X _E	875																				
6/26	5	X _A	516																			
		X _E	1026																			
	6	X _A	854																			
		X _E	135																			
7	X _A	455																				
	X _E	1089																				
8/9/10	X _A	558																				
	X _E	1127																				
6/3	5	X _A		1124	1154	1127	1084															
		X _E		989	1000	1016	1004															
	6	X _A		1099	1137	1113	1069															
		X _E		987	990	1018	1009															
7	X _A		1100	1143	1125	1081																
	X _E		1021	1024	1060	1033																
8/9/10	X _A		968	901	915	828																
	X _E		915	869	822	795																
6/27	5	X _A							1101	1106	1074	1013	1048									
		X _E							1020	1012	960	860	937									
	6	X _A							1062	1065	1032	968	1003									
		X _E							996	987	945	840	913									
7	X _A							1038	1035	994	940	985										
	X _E							1013	994	941	849	926										
8/10	X _A							876	688	676	639	662										
	X _E							644	646	665	606	587										
6/26	5	X _A									1174	1152	978	1221	1047	915	905	855	784			
		X _E									980	906	901	931	886	818	804	734	687			
	6	X _A										1144	1121	953	1168	1009	897	880	894	783		
		X _E										971	905	891	909	879	812	805	750	673		
7	X _A										1198	1165	987	1218	1068	938	919	947	832			
	X _E										1055	943	950	967	944	866	867	815	719			
8/9/10	X _A										1175	1155	935	1135	992	867	884	898	792			
	X _E										1066	957	917	904	907	830	864	790	700			
6/36	5	X _A									936	926	951	897	870	944	872	854	883	871		
		X _E									808	858	839	764	745	804	725	717	761	695		
	6	X _A										889	899	929	883	842	927	868	841	879	864	
		X _E										790	866	843	773	754	799	723	728	775	700	
7	X _A										949	927	968	946	932	1002	945	921	963	929		
	X _E										848	937	926	843	840	891	817	809	858	780		
8/9/10	X _A										884	865	906	866	839	928	865	835	868	821		
	X _E										798	899	863	789	778	830	767	740	782	719		

Tabelle 1Q

Anfangs- und Endtemperatur der Prüflinge an der Hüllaußenwand für jedes TE der Vg. 6a

Prüfling Nr.	TE Nr.	Jahr Temp. °C	1971					1972					1973													
			Zyklus					F	G	H	I	K	A	B	C	D	E	F	G	H	A	B	C	D	E	
			F	G	H	I	K	A	B	C	D	E	F	G	H	A	B	C	D	E						
6/1	5	T _A T _E	583 519																							
	6	T _A T _E	180 282																							
	7	T _A T _E	143 126																							
	8/9/10	T _A T _E	607 497																							
6/26	5	T _A T _E	318 573																							
	6	T _A T _E	487 128																							
	7	T _A T _E	287 605																							
	8/9/10	T _A T _E	339 618																							
6/3	5	T _A T _E		622 554	637 560	623 568	602 562																			
	6	T _A T _E		609 553	628 555	617 569	595 564																			
	7	T _A T _E		610 570	632 572	623 590	600 577																			
	8/9/10	T _A T _E		544 518	510 495	518 471	474 458																			
6/27	5	T _A T _E								611 570	613 566	597 540	567 491	584 529												
	6	T _A T _E								591 559	593 554	577 533	544 481	562 517												
	7	T _A T _E								579 567	578 558	557 531	531 485	553 523												
	8/10	T _A T _E								498 382	404 384	399 398	380 364	392 372												
6/26	5	T _A T _E										647 551	636 514	549 511	670 526	584 503	518 469	513 462	488 428	453 404						
	6	T _A T _E										632 546	621 513	537 506	644 515	565 497	509 467	501 463	507 436	452 397						
	7	T _A T _E										659 588	643 532	554 535	669 544	594 532	530 494	520 494	534 468	476 421						
	8/9/10	T _A T _E										648 593	638 539	528 519	627 513	557 514	494 476	502 492	509 455	456 410						
6/36	5	T _A T _E										528 465	523 490	536 480	509 443	496 433	532 462	496 423	488 419	502 441	496 408					
	6	T _A T _E										505 456	510 494	525 482	502 447	481 438	524 460	495 422	481 425	500 448	493 411					
	7	T _A T _E										535 484	524 529	544 523	533 482	527 481	561 506	533 469	521 465	542 489	525 451					
	8/9/10	T _A T _E										502 459	493 510	513 492	486 455	488 449	524 475	493 444	478 431	495 451	417 420					

Tabelle 11: Anfangs- und Endtemperatur der Prüflinge an der Hüllaußenwand für jedes TE der Vg. 6c

Prüfling Nr.	TE Nr.	Temp. °C	Jahr		1 9 7 3							1 9 7 4							1 9 7 5		
			Zyklus	G	H	A	B	C	D	E	F	G	A	B	C	E	F	G	A	B	C
6/11	5	T _{Anfang}					453	434	520	505	631	640	577	572	506	480	510	438	407	372	
		T _{Ende}					382	371	451	461	527	501	482	482	416	411	435	373	351	304	
	6	T _A					460	430	518	505	635	655	589	547	510	491	516	455	433	400	
		T _E					393	373	460	473	551	524	500	493	435	432	453	401	389	328	
7	T _A					456	433	502	481	590	609	549	541	490	468	481	425	408	382		
	T _E					404	372	455	462	525	501	488	495	423	419	435	394	381	325		
8/9/10	T _A					466	438	512	484	580	592	557	520	470	445	452	399	374	336		
	T _E					415	382	468	473	524	505	488	480	414	409	419	380	356	300		
6/12	5	T _A	570	570	586	529	576	617	575	601	554	575									
		T _E	468	502	503	443	489	454	475	529	531	486									
	6	T _A	557	560	570	513	543	589	76	72	124	83									
		T _E	465	501	495	434	469	0	71	148	129	74									
7	T _A	563	569	578	527	533	577	610	632	590	594										
	T _E	492	517	515	457	477	538	532	547	505	478										
8/9/10	T _A	547	554	576	514	517	551	575	589	551	560										
	T _E	488	525	512	451	468	517	507	521	483	433										
6/14	6	T _A		542	589	531	525	555	531	580	518	536	506	490	438	425					
		T _E		485	499	426	454	481	457	424	438	409	426	408	360	352					
	7	T _A		542	589	528	527	560	529	661	601	611	551	534	491	470					
T _E			493	507	431	466	495	473	579	516	480	490	475	416	405						
8/9/10	T _A		557	596	534	529	562	517	630	584	579	509	492	467	458						
	T _E		515	521	444	478	497	470	565	512	461	465	448	385	402						
6/15	6	T _A			529	524	535	556	513	596	556										
		T _E			468	461	461	483	448	513	479										
	7	T _A			517	523	528	556	517	574	536										
T _E				471	465	469	499	454	524	479											
8/9/10	T _A			510	520	528	559	495	576	519											
	T _E			474	475	475	491	452	515	484											
6/30	5	T _A				570	572	579	519	535											
		T _E				492	484	484	445	467											
	6	T _A				525	533	540	481	500											
		T _E				464	453	460	423	451											
7	T _A				509	530	543	486	499												
	T _E				472	464	480	427	455												
8/9/10	T _A				489	513	520	465	474												
	T _E				461	455	457	426	449												
6/31	5	T _A					534	482	462	580	538	609									
		T _E					470	425	407	511	454	485									
	6	T _A					516	459	438	551	512	587									
		T _E					435	418	396	492	444	474									
7	T _A					500	444	408	517	488	564										
	T _E					422	403	380	481	438	470										
8/9/10	T _A					501	434	427	537	497	582										
	T _E					421	383	401	499	451	486										

7.3 Messung der Zentraltemperatur

Die Prüflinge von 6c waren mit Zentralthermoelementen bestückt (siehe Abb. 6). Durch die Messung der Zentraltemperatur ist eine experimentelle Bestimmung der Wärmedurchgangszahl möglich. Dies soll im folgenden kurz diskutiert werden.

Eine zweimalige Integration der Wärmeleitungsgleichung für den Brennstoff liefert folgende Beziehung zwischen Brennstoffzentral- und Brennstoffrandtemperatur:

$$T_{fa} = T_z - \frac{1}{2\lambda_f} \left[u_o \left(\frac{r_{fa}^2 - r_{fi}^2}{2} - r_{fi}^2 \ln \frac{r_{fa}}{r_{fi}} \right) + \frac{u_1}{2} \left(\frac{1}{4} (r_{fa}^2 - r_{fi}^2) - r_{fi}^4 \ln \frac{r_{fa}}{r_{fi}} \right) \right]$$

Dabei wurde die Wärmeleitfähigkeit λ_f als konstant angenommen und für die Wärmequellendichte u folgender Ansatz verwendet:

$$u = u_o + u_1 r^2.$$

Aus der nach /10/ gerechneten Flußabsenkung im Brennstoff (siehe Abb.28) ergibt sich in guter Näherung:

$$u_o = \frac{\chi}{\pi(r_{fa}^2 - r_{fi}^2)} \frac{1}{2 + \left(\frac{r_{fi}}{r_{fa}}\right)^2}$$

$$u_1 = \frac{2 u_o}{r_{fa}}$$

Die Hüllinnentemperatur läßt sich aus der Hüllaußentemperatur nach

$$T_{Hi} = T_{Ha} + \frac{\chi}{2\pi\lambda_H} \ln \frac{r_{Ha}}{r_{Hi}}$$

berechnen.

Damit kann dann der Temperatursprung im Spalt berechnet werden:

$$\Delta T_{gap} = T_{fa} - T_{Hi}$$

und daraus ergibt sich h_{gap} zu:

$$h_{\text{gap}} = \frac{\chi}{\Delta T_{\text{gap}} \cdot 2\pi r_{\text{Hi}}}$$

Stableistung und Hüllaußentemperatur sind, wie unter 7.2 näher erläutert, über die Kapselcharakteristik durch die Meßstellentemperatur bestimmt.

Da sich das Zentralthermoelement etwa in Höhe von TE 7 befindet, wurden dessen Meßwerte zur Auswertung hinzugezogen.

Leider sind einige der Zentralthermoelemente schon von vorneherein ausgefallen bzw. lieferten Werte für die Zentraltemperatur, die außerhalb jedes vernünftigen Betriebs lagen ($T_z < 700^\circ\text{C}$), so daß sich die Auswertung nur bei drei Kapselversuchseinsätzen überhaupt lohnte. Die Ergebnisse sind in den Abb. 29-32 zu sehen. Es sind hier die Zentraltemperatur T_z und die Wärmedurchgangszahl h_{gap} gegen die Zeit aufgetragen. Die modelltheoretische Analyse dieser Werte folgt in 11.1, so daß hier nicht näher darauf eingegangen werden braucht. Über die Fehlergrenzen bei h_{gap} kann man schwerlich exakte Aussagen machen. Zum einen sind die Messungen der Zentralthermoelemente mit Fehlern behaftet, desgleichen auch die Bestimmung von Leistung und Hülltemperatur. Weiter bestehen noch Unsicherheiten bei der Wärmeleitfähigkeit des Brennstoffes /11/ und bei der Flußabsenkung.

7.4 Thermische Abbrandberechnung

Die Berechnung des thermischen Abbrandes A_i in einem bestimmten Zyklus i geschieht nach folgender Formel:

$$A_i = \frac{l}{m_e} \chi_i t_i \cdot 10^{-3} \quad (\text{MWd/kg Me})$$

mit

l = Brennstofflänge (cm)

m_e = Schwermetallgewicht (g)

χ_i = mittlere Stableistung im Zyklus i (W/cm)

t_i = Zyklusdauer (Vollastäquivalent) (d)

Der Gesamtabbrand errechnet sich dann durch Aufsummation der A_i :

$$A_{\text{ges}} = \sum_{i=1}^n A_i.$$

In den Tabellen 12 und 13 sind für die jeweiligen TE-Positionen die Abbrände in den einzelnen Bestrahlungszyklen eingetragen. Der gesamte Abbrand an der entsprechenden TE-Position ist in der letzten Spalte zu finden. Die Stabileistungen χ_i wurden durch arithmetische Mittelung aus den betreffenden Werten zu Beginn und Ende eines Zyklus gebildet.

8. Zerstörungsfreie Nachuntersuchung

8.1 Äußere Vermessung

Die äußere Vermessung bestand in einer Durchmesser- und Durchbiegungsbestimmung der Prüflinge vor und nach der Bestrahlung.

Die Durchmesserbestimmungen wurden auf einer Meßbank mit Hilfe eines induktiven Wegaufnehmers in Form von sogenannten "Wendelschrieben" aufgezeichnet. Hierbei wurde ein Tastkopf mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 5 mm/U an dem rotierenden Prüfling vorbeigeführt. Der Meßkopf hatte die Form eines Keiles mit abgerundeten Schneiden ($r = 0,6$ mm). Es wurden von 13 Prüflingen im bestrahlten und unbestrahlten Zustand Wendelschriebe angefertigt. Durchmesseränderungen von ± 1 μ m werden angezeigt. In den Abbildungen 33-34 werden von 10 Prüflingen die Durchmesseränderungen in Prozent vom Nominaldurchmesser 10,0 mm aufgeführt.

Eine Längenmessung nach der Bestrahlung erfolgte nicht, da die eine Bezugs-kante sich während der Bestrahlung verändert hatte. Die Durchbiegung wurde teils mit den Tastern teils mittels einer Rasterplatte bestimmt. Letztere Werte werden in nachfolgender Tabelle mit R gekennzeichnet.

Tabelle 14: Durchbiegung der Prüflinge nach der Bestrahlung

Prüfling	Δ_f (μ m)
6/26	380
6/27	~4000 R
6/26	200
6/36	80
6/12	~ 500 R
6/14	600
6/15	500 R
6/30	~ 500 R

Tabelle 12: Lokaler Abbrand A (MWd/kgMe) für jedes Thermoelement und Zyklus der Vg 6a

Jahr	1971					1972					1973					A _{ges}				
	Zyklus	F	G	H	I	K	A	B	C	D	E	F	G	H	A		B	C	D	E
Prüfling Nr.	TE Nr.																			
6/1	5	1,89																		1,89
	6	0,66																		0,66
	7	0,29																		0,29
	8/9/10	1,36																		1,36
6/26 A	5	1,70																		1,70
	6	1,06																		1,06
	7	1,66																		1,66
	8/9/10	1,41																		1,41
6/3	5		4,05	3,87	4,01	4,38														16,31
	6		4,00	3,82	3,99	4,36														16,17
	7		4,06	3,89	4,09	4,43														16,47
	8/9/10		3,61	2,61	3,25	3,40														12,87
6/27	5							4,69	5,62	5,65	5,24	4,61								25,81
	6							4,55	5,45	5,49	5,05	4,45								24,99
	7							4,54	5,39	5,37	5,00	4,44								24,74
	8/10							3,36	3,54	3,75	3,48	2,90								17,03
6/26	5									6,27	6,03	4,58	6,23	5,75	5,27	5,02	4,63	4,09		47,87
	6									6,16	5,94	4,49	6,02	5,60	5,20	4,95	4,79	4,05		47,20
	7									6,56	6,18	4,72	6,33	5,98	5,49	5,25	5,14	4,32		49,97
	8/9/10									6,52	6,19	4,51	5,91	5,64	5,16	5,14	4,92	4,15		48,14
6/36	5									4,84	4,99	4,16	4,59	4,58	5,07	4,48	4,37	4,36	4,22	45,66
	6									4,66	4,94	4,12	4,58	4,53	5,01	4,46	4,36	4,39	4,22	45,27
	7									4,99	5,21	4,40	4,94	5,03	5,49	4,94	4,81	4,83	4,61	49,25
	8/9/10									4,67	4,93	4,11	4,57	4,58	5,10	4,58	4,37	4,38	4,15	45,44

Tabelle 13: Lokaler Abbrand A (MWd/kgMe) für jedes TE u. Zyklus der Vg 6c

Jahr		1972		1973							1974							1975			A _{ges}
Zyklus		G	H	A	B	C	D	E	F	G	A	B	C	E	F	G	A	B	C		
Prüfling Nr.	TE Nr.																				
6/11	5					3,69	3,37	4,28	4,56	6,46	6,36	5,80	6,34	4,93	4,68	5,07	3,57	3,88	3,30	66,29	
	6					3,78	3,36	4,31	4,62	6,63	6,60	5,98	6,38	5,07	4,88	5,22	3,80	4,28	3,62	68,53	
	7					3,82	3,37	4,21	4,43	6,19	6,16	5,66	6,22	4,88	4,66	4,89	3,61	4,08	3,49	65,67	
	8/9/10					3,92	3,44	4,33	4,51	6,12	6,13	5,59	5,92	4,70	4,45	4,61	3,40	3,70	3,16	63,98	
6/12	5	4,74	5,04	5,25	4,46	4,91	5,17	4,69	5,46	6,00	5,86									51,58	
	6	4,65	4,98	5,13	4,33	4,63	1,81	0,03	0,48	0,79	0,10									26,93	
	7	4,82	5,12	5,28	4,53	4,62	4,94	5,16	5,73	6,07	5,93									52,20	
	8/9/10	4,72	5,08	5,25	4,43	4,49	4,63	4,85	5,36	5,68	5,57									50,06	
6/14	6		4,80	5,25	4,38	4,45	4,53	4,37	4,77	5,19	5,12	5,01	5,28	4,16	3,98					61,29	
	7		4,84	5,29	4,39	4,52	4,63	4,44	6,07	6,21	6,05	5,69	6,04	4,84	4,59					67,20	
	8/10		5,04	5,41	4,48	4,59	4,66	4,36	5,82	6,08	5,72	5,27	5,56	4,50	4,49					65,98	
6/15	6			4,78	4,55	4,57	4,58	4,26	5,37	5,72										33,82	
	7			4,73	4,57	4,57	4,65	4,30	5,31	5,59										33,72	
	8/9/10			4,70	4,60	4,60	4,63	4,18	5,27	5,65										33,63	
6/30	5				4,89	4,82	4,63	4,21	4,73											23,28	
	6				4,51	4,46	4,33	3,92	4,46											21,68	
	7				4,47	4,50	4,44	3,96	4,47											21,84	
	8/9/10				4,31	4,36	4,21	3,85	4,30											21,03	
6/31	5					4,60	3,90	3,78	5,26	5,43	6,08									29,05	
	6					4,32	3,76	3,60	5,00	5,21	5,88									27,77	
	7					4,17	3,60	3,37	4,75	5,02	5,71									26,62	
	8/9/10					4,17	3,46	3,57	4,96	5,17	5,92									27,25	

Tabelle 15 gibt einen Einblick in die Defektrate des Experiments (4 von 13 Stäben waren am Bestrahlungsende defekt). Es zeigte sich, daß ein Diametralspalt von 50 μm He nur geringe Standzeiten, d.h. Abbrände, adaptieren kann. Bei der Gruppe C (Ar-90 μm) zeigt sich sehr gut eine lineare Abhängigkeit von Abbrand bzw. Bestrahlungszeit. Bis zu 290d entsprechend 1,6 % bleibender Hüllrohrdehnung infolge Brennstoffschwellen bleiben die Hüllrohre intakt.

Tabelle 15: Schadensstatistik Vg 6 a und c

Gruppe	KVE-Prüfling	Hüllrohrdehnung max. (%)	Bemerkung
A He-50 μm	91 / 6.1	-	Bestrahlung nach 13d wegen TE-Schwellen abgebrochen
	92 / 6.2	-	Bestrahlung wegen zu gerin. NaK-Menge im KVE abgebrochen
	93 / 6.26 A	1,8 punktuell	Abgebrochen wegen TE-Ausfall nach 16d, i n t a k t
	94 / 6.3	0,5	106d,
	99 / 6.27	1,4	174d, d e f e k t
	102 / 6.26	1,4	335d,
	103 / 6.36	1,6	370d,
C Ar-90 μm	104 / 6.11	3,0	603d, d e f e k t
	108 / 6.12	2,8	395d, d e f e k t
	110 / 6.14	3,0	540d, d e f e k t
	111 / 6.15	1,2	273d,
	114 / 6.30	0,5	188d,
	115 / 6.31	-	242d, wurde nicht vermessen, da für Eichversuch für KVE-Instrumentierung verwendet.

Die äußere Inspektion der Prüflinge zeigte, daß bei den defekten Stäben bis zu 55 mm lange Axialrisse an den Enden der Thermoelement-Laschen auftraten (siehe Abb. 35-38).

Prüfling 6/27 (Abb. 35) zeigt eine stark "verkrustete" Schadensstelle am oberen Brennstoffsäulenende. Wie die Betatron-Aufnahme (Anhang II) zeigte, besaß dieser Prüfling ursprünglich große Spalte in der Brennstoffsäule, die im Betrieb zuwachsen (poröse Zonen); am Bestrahlungsbeginn war infolgedessen die Brennstoffsäule zu lang und ragte über den NaK-Spiegel der Kapsel hinaus. Es kam daher zu einer Überhitzung und Aufblähung des Hüllrohres und Brennstoffes. Der hieraus resultierende Hüllrohrdefekt ist daher als atypisch anzusehen.

Im Gegensatz hierzu sind die in den Abbildungen 36 - 38 dargestellten axialen Risse der Prüflinge 6/11, 6/12 und 6/14 als typische "end of life"-Fehler eines Karbid-Stabes anzusehen. Die Abbrände liegen hier durchweg über 5 %; der Brennstoff hat das Schwellvolumen aufgebraucht und die Hülle wurde über 1,5 % gedehnt. Interessant ist die Tatsache, daß die Risse jeweils in Nachbarschaft von Thermoelementlaschen auftreten, die tatsächlich eine Störstelle im Verlauf der Tangentialspannung (Spannungsspitze) darstellen.

8.2 Durchleuchtung

Die genaue Kenntnis der inneren Geometrie des Brennstabes ist wichtig für die Festlegung eines Schnittplanes für die nachfolgende zerstörende Nachuntersuchung (Keramografie). Beim Mischkarbidbrennstoff ist zwar die Bildung eines Zentralkanals aufgrund der geringeren radialen Temperaturgradienten nicht zu erwarten, wohl aber das Auftreten von Abkühlungsrisse, die oft Barrieren für den Transport von Spaltprodukten bzw. MC-Phasen darstellen. Wegen der starken Eigenstrahlung der Prüflinge ist die übliche Röntgendurchstrahlung problematisch. Im vorliegenden Fall wurde die Durchleuchtung mit einem Betatron vorgenommen, das eine harte Röntgenstrahlung von max. 18 MeV aussendet. Bei einer solch hohen γ -Energie ist das Element Fe weitgehend transparent. Mit Hilfe einer Eisenplatte kann daher die Eigenstrahlung der Prüflinge gegen den Aufnahmeilm abgeschirmt werden, ohne daß die Intensität der harten γ -Strahlung des Betatrons nennenswert geschwächt wird.

Die Außenränder der zylinderförmigen Stäbe werden durch einen sogenannten Dickenausgleich aus Blei vor einer Überstrahlung geschützt. 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 Aufnahmeilm.

Auf diese Art wurden bei Durchleuchtungszeiten zwischen 10 und 30 Minuten die in der angefügten Prüflingsdokumentation (Anhang II) wiedergegebenen Durchstrahlungsbilder hergestellt. Die durch die Betatron-Durchleuchtung erzeugten Aufnahmen wiesen 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 Originalfilme, die auch zur Beurteilung und Auswertung allein herangezogen wurden. Es wurde mittels dieser Filme die Länge der Brennstoffsäulen verglichen (Tabelle 16).

Tabelle 16 : Aus Röntgenfilmen ermittelte Veränderung der Brennstoffsäulenlänge

Stab-Nr.	Länge vor Bestrahlung (mm)	Länge nach Bestrahlung (mm)	$\Delta l/l$ (mm)	$\Delta l/l$ (%)
6/1	299,0	295,0	-4,0	-1,34
6/26A	302,0	298,0	-4,0	-1,32
6/3	300,6	297,6	-3,0	-0,99
6/27	302,0	312,5	+10,5	+3,48
6/26	300,0	303,6	+3,6	+1,20
6/36	299,6	300,7	+1,1	+0,37
6/11	280,0	280,0	0	0
6/12	280,5	279,0	-1,5	-0,53
6/14	280,3	282,0	+1,7	+0,61
6/15	281,6	281,6	+ 0	0
6/30	278,0	272,2	-0,8	-0,28

8.3 γ -Profile und γ -Spektren

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

Als Detektor diente hierzu ein Halbleiterkristall (GeLi) mit nachgeschaltetem 400-Kanal-Analysator. Profile und Spektren wurden mit einem schlitzförmigen Kollimator mit den Maßen 0,5 mm x 20 mm x 700 mm durch die Abschirmwand der Heißen Zellen aufgenommen.

Es wurde von jedem Prüfling ein sogenanntes integrales γ -Profil aufgenommen, das die γ -Aktivität im Bereich von 400 bis 1700 keV umfaßte. Dann wurden an einigen Stellen der Brennstoffsäule γ -Spektren aufgenommen. Zu den Profilen, die an allen Prüflingen gemessen wurden, zählte auch das Zr/Nb-95-Profil. Vom Spalt-Zirkon ist bekannt, daß es sich in Oxidbrennstoff unter den hier betrachteten Bestrahlungsbedingungen nicht an- oder abreichert. Somit kann das Zr/Nb-95 Profil in besonderem Maße als Brennstoff-Indikator zur Ermittlung von Brennstoff-Verlagerungen herangezogen werden. Bei kurzen Bestrahlungszeiten ist dem Profil auch der axiale Stableistungsverlauf zu entnehmen.

Die Abbildungen 39-49 geben die γ -Profile von 11 vermessenen Prüflingen wieder. Es wird jeweils das integrale γ -Profil und ein weiteres Nuklidprofil (Zr/Nb-95) bzw. Cs-137-Scan wiedergegeben. Im einzelnen ist folgendes zu bemerken: Prüfling 6/1 wurde nur 13d bestrahlt (TE-Ausfall ; Abklingzeit von 990d). Der integrale Scan deutet auf einen flachen Flußverlauf hin. Ein Tabletten-Spalt wird durch einen starken Aktivitätseinbruch markiert. Dasselbe gilt für Prüfling 6/26 A mit einer Bestrahlungszeit von nur 16d und ca. 1000 d Ablingzeit. Prüfling 6/3 wurde nach 106d Bestrahlung defekt entladen. Trotz der langen Ablingzeit kann ein Zr/Nb 95-Profil und ein Cs-137 Scan aufgenommen werden. Die Aktivitätssenke im oberen Stabdrittel markiert einen Tabletten-spalt. Prüfling 6/27 war defekt, er wurde nach 174 d ausgebaut. Die Impulsrate ist hier aufgrund geringerer Abklingzeit (571 d) besser. Der Defekt ist auf Abbildung 35 deutlich erkennbar. Das Cs-137-Profil zeigt im Bereich des Plenums, daß hier vermutlich NaK des Kühlmittels eindrang (Erklärung des Schadens siehe Kap.8.1). Prüfling 6/26 wurde 335 d bestrahlt und nach 351 d γ -spektrometriert. Die Integral-Zr/Nb-Profile geben gut die Tablettenstoßstellen wieder. Der Prüfling blieb unbeschädigt. Der Stab 6/36 wurde 370 d bestrahlt und nach 303 d vermessen. Die Profile sind analog dem Prüfling 6/26. Der Brennstab 6.11 wurde insgesamt 603 d bestrahlt. 190d danach wurden die Nuklid-Profile aufgenommen. Es zeigen sich auch hier gut die Tablettenstöße. Dasselbe gilt für die Prüflinge 6/12 bzw. 6/14, die ca. 400 d bzw. 540 d bestrahlt wurden und ebenfalls Hüllrisse aufwiesen. Beim Cs-137-Profil im Bereich des Plenums von Prüfling 6/14 ist wiederum eingedrungenes NaK, das mit Cs verunreinigt wurde, festzustellen.

Die Prüflinge 6/15 bzw. 6/30 wurden 273 d bzw. 188 d bestrahlt. Sie blieben intakt und ihre Profile weisen keine nennenswerten Besonderheiten auf. Prüfling 6.31 wurde für einen Thermoelementtest des KVE 115 im Einbauzustand belassen und gegläht. Eine γ -Spektrometrie nach der Bestrahlung fand nicht statt.

9. Zerstörende Nachuntersuchung

9.1 Spaltgasbestimmungen

Bei den experimentellen Spaltgasuntersuchungen an den bestrahlten Prüflingen werden Messungen durchgeführt / 12/ zur Bestimmung

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

Zu diesem Zweck wird der Prüfling zuerst radial im Bereich des Spaltgasplenum perforiert und das freie Spaltgas abgezogen mit anschließender Heliumspülung. Die Zusammensetzung des Spaltgases wird gaschromatografisch ermittelt, wobei die Menge an Xe, Kr quantitativ bestimmt wird. Hierauf folgt eine manometrische Messung des freien Volumens (Hohlräume, offene Poren) innerhalb der Brennstabhülle.

Für die weiteren Spaltgasbestimmungen (Anteile in geschlossener Porosität bzw. im Brennstoffgitter gelöst) wird im sogen. Schnittplan des Prüflings eine Brennstoffprobe von ca. 1,5 g Gewicht bereitgestellt. Die Probe wird zuerst in einer gasdichten Kugelmühle aus Edelstahl ca. 2 Stunden gemahlen, wobei eine Partikelgröße von weniger als 1 μ m erreicht wird. Das hierbei freigesetzte "Porensplaltgas" umfaßt alles Gas, das sich in geschlossener Porosität mit Porengrößen $\geq 1 \mu$ m befand. Nach der gaschromatografischen Bestimmung dieses Anteils wird die gemahlene Brennstoffprobe schließlich in HNO_3 aufgelöst. Dabei wird sowohl der im Brennstoff gelöste Anteil, das "Gittersplaltgas" und der in den kleinen Poren ($\leq 1 \mu$ m) enthaltene Anteil bestimmt.

Die für eine weitere Auswertung wichtigen Ergebnisse sind in einigen Tabellen zusammengefaßt. Tabelle 17 bringt für alle untersuchten Prüflinge dieser Gruppe die Anteile V_F , V_P und V_G und in einer weiteren Spalte die berechnete theoretische Spaltgasgesamtmenge des Prüflings. Die Berechnung erfolgte unter der Annahme, daß 0,30 langlebige Gasatome pro Spaltung entstehen.

Die letzte Spalte enthält die gerechneten Abbrände nach 7.2.

Tabelle 17: Versuchsgruppe 6 - Spaltgasanalysen (A+C)

KVE- Prüfling	V_F		V_P		V_G		$V_{ges.}$		a (MWd/ kg M)
	cm ³	%	cm ³	%	cm ³	%	cm ³ gem.	cm ³ ger.	
94/6.3	2,23	4,3	32,89	64,2	16,07	31,5	51,19	74,89	13,50
99/6.27	-	-	35,05		86,23		-	116,80	21,90
102/6.26	24,05	10,03	67,56	29,1	140,77	60,6	225,40	254,30	48,25
103/6.36	25,21	17,10	45,12	30,6	77,15	52,3	147,50	254,50	46,10
104/6.11	-	-	166,20	-	127,80	-	-	316,68	65,40
108/6.12	-	-	129,96		98,06		-	229,70	46,90
110/6.14	-	-	157,52	-	72,46	-	-	330,10	65,22
111/6.15	-	-	53,54	-	107,35	-	-	169,50	33,70
114/6.30	2,17	2,20	17,94	17,2	84,03	80,6	104,2	107,70	21,70

Von Prüfling 6.11 wurden 3 Abbrand- bzw. Spaltgasproben entnommen.

Abbildung 50 enthält die gemessene Porengasmenge V_P bzw. den radiochemisch bestimmten Abbrand.

Abbildung 50 gibt in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der γ -Spektrometrie den nahezu konstanten Verlauf der Stabileistung wieder. Die spezifische Spaltgaserzeugung hat in Stabmitte ein leichtes Maximum, während der Abbrandverlauf zum oberen Stabende leicht ansteigt.

In Abbildung 51 wird die bereits frühere Feststellung /13/ bestätigt, daß die im Gitter gelöste Gasmenge im Karbid nahezu unabhängig vom Abbrand ist. Abbildung 52 zeigt die ebenfalls in /13/ beobachtete Abhängigkeit des Porensplattgases vom Abbrand.

9.2 Keramografie

Es wurden insgesamt 10 Prüflinge keramografisch untersucht und zwar wurden durchweg Querschliffe angefertigt. Art und Umfang der Untersuchungen pro Prüfling bestimmten sich hierbei aus der Information, die aus der zerstörungsfreien Voruntersuchung hervorging. Im Anhang II sind hiervon jeweils Übersichtsaufnahmen, zusammengesetzte Übersichten und Detailausschnitte wiedergegeben.

9.2.1 Aufkarburierung der Hüllrohre

Wie bei den anderen Karlsruher Karbidbestrahlungsexperimenten interessierte hier die Frage nach einer Aufkarburierung der Hüllrohre während der Bestrahlung im Reaktor und die etwaigen Folgen dieser Hüllrohrversprödung. Es wurde deshalb jeweils an einem Querschliff die Hülle geätzt und ein Mikrohärt-Verlauf (MHV 50) aufgenommen

In Abbildung 53-62 werden die Mikrohärtverläufe an den geätzten Hüllen wiedergegeben. Es muß allerdings an dieser Stelle betont werden, daß diese Darstellung nur einen Eindruck der Aufkarburierung an dieser Stelle vermitteln kann. Es wurde nämlich beobachtet, daß die azimutale Aufkarburierung sehr unterschiedlich sein kann. Sie ist ebenfalls in axialer Richtung gemäß dem mittleren Temperaturprofil variabel. In Tabelle 18 werden die Aufkarburierungstiefe und die Mikrohärtsteigerung der einzelnen Prüflinge mit der jeweiligen Standzeit und der mittleren Hüllinnentemperatur verglichen. Es zeigt sich - wie zu erwarten war - daß die Aufkarburierungstiefe exponentiell mit der Temperatur ansteigt. Die bei 650°C gefundene Aufkarburierung von ca. 40 % der Hülldicke deckt sich mit Ergebnissen einer schnellen Bestrahlung in Dounreay (DFR 330/I). Anrisse an der Hüllinnenseite wurden nicht beobachtet.

Tabelle 18: Aufkarburierungswerte der einzelnen Prüflinge (Hüllwandstärke 550 μm , Hüllrohrmaterial 1.4988)

Prüfling Nr.	Gas	Vollasttage (d)	Aufkarburierungstiefe		mittl. Stableistg. (W/cm)	Mikrohärteerh. (innen-außen) (%)	Hüllinnentemp. (mittl.) (°C)
			(μm)	(%)			
6.26A	Ar	14,1	45	8,2	669	23	515
6.3		106,0	0	0	876	-	678
6.27		175,8	215	39,1	859	55	652
6.26		339,3	125	22,7	934	23	610
6.36		376,5	100	18,2	843	15	570
6.11		He	603,3	130	23,6	800	78
6.12	399,4		155	28,2	864	110	520
6.14	574,6		145	26,4	877	62	587
6.15	276,3		40	7,3	894	30	597
6.30	190,5		40	7,3	844	7	597

9.3 Radiochemische Abbrandbestimmung

Zur Stützung der thermischen Abbrandbestimmung wurden die Abbrände der Prüflinge (Ausnahmen: 91, 92, 93, 94, 99, 115) durch radiochemische Isolierung und quantitative Analyse bestimmter Spaltprodukte ermittelt. Als Abbrandindikator dienten die Spaltprodukte Ce-144 und Nd-148. Cs-137 war als Abbrandmonitor nicht geeignet. Die über die Pu-Abreicherung bestimmten Werte streuten zu stark /14/. Aus den zwei Einzelwerten wurde ein gewichteter Mittelwert bestimmt. Die Anteile der einzelnen Spaltquellen wurden wie folgt angenommen /14/:

rein-thermische Spaltung: U-235 1,20 %
 Pu-239 97,60 %
 Pu-241 1,20 %.

9.3.1 Vergleich der radiochemischen und berechneten Abbrände

Aus der radiochemischen Abbrandbestimmung ergaben sich die Werte in % FIMA. Zum folgenden Vergleich wurden diese Werte in MWd/kg M umgerechnet. Unter der Annahme einer reinen Pu-239-Spaltung ergibt sich ein Umrechnungswert von 1 % FIMA $\hat{=}$ 9,5 MWd/kg M.

Tabelle 19: Radiochemische Abbrandbestimmung - Vergleich zur Rechnung

KVE-Nr.	Prüfling Nr.	Abbrand gerechn.	(MWd/kg M) gem.	Abweichung $\frac{2-1}{1}$ ΔA (%)	Symbol (Abb. 63)
102	6/26	48,25	44,75	+ 7,82	x
103	6/36	46,10	48,17	- 4,30	●
104	6/11	65,40	78,38	- 16,60	○
108	6/12	46,90	58,62	- 20,00	△
110	6/14	65,22	72,87	- 10,50	△
111	6/15	33,70	35,91	- 6,15	□
114	6/3	21,70	23,75	- 8,63	■
				- 8,34 (Mittel)	

Tabelle 19 bringt in der vorletzten Spalte die Abweichung der gerechneten Abbrandwerte gegenüber den radiochemisch bestimmten Werten. Derselbe Inhalt wird in Abbildung 63 wiedergegeben. Man sieht, daß die berechneten Werte mit einer Ausnahme durchweg kleiner sind als die radiochemisch bestimmten. Die mittlere Abweichung beträgt - 8.34 %. Eine plausible Erklärung ist die Tatsache, daß die über Thermoelementen bestimmten Temperaturen, Stableistungen und Abbrände nur im Idealfall den "wahren" Wert treffen können. Normalerweise zeigen sie eine negative Abweichung. Die prozentuale Abweichung ist hier als gering im Vergleich mit anderen FR2-Versuchsgruppen anzusehen.

10. Modelltheoretische Untersuchungen

Die modelltheoretische Analyse des Bestrahlungsverhaltens der Prüflinge der Vg 6a und 6c wird sich auf zwei Schwerpunkte konzentrieren:

1. Thermische Belastung des Brennstoffs
2. Mechanische Wechselwirkung zwischen Brennstoff und Hülle

Bei Punkt 1 wird ein Vergleich der bei den Prüflingen von 6c experimentell bestimmten Wärmedurchgangszahlen (siehe Abschnitt 7.3) mit theoretisch berechneten im Vordergrund stehen. Bei Punkt 2 wird zu klären sein, welche Mechanismen in erster Linie für die aufgetretenen Hülldehnungen verantwortlich zu machen sind. In Frage kommen hier einmal das Brennstoffschwellen und zum anderen die zyklische Betriebsweise.

10.1 Thermische Analyse

Stellvertretend für die Prüflinge von Vg 6c wurde das thermische Verhalten des KVE 108 in den ersten zwei Bestrahlungszyklen näher analysiert. Wenn gleich die Fertigungsspalte klein waren ($45 \mu\text{m}$ radial), so ist doch die Annahme plausibel, daß zumindest im ersten und möglicherweise auch noch teilweise im 2. Bestrahlungszyklus der Spalt (partiell) offen war.

In Abbildung 64 ist die thermische Differenzdehnung als Funktion der Brennstoffzentraltemperatur zu sehen. Erst bei ca. 1550°C wäre demnach der Spalt geschlossen. Die experimentell ermittelten Zentraltemperaturen liegen aber deutlich unter diesem Wert (siehe Abb. 29-32).

In den Abbildungen 65,66,67 sind die nach GAPRS /15/ gerechneten Werte der Wärmedurchgangszahl, der Brennstoffrand- und der Brennstoffzentraltemperatur gegen die Heißspaltbreite aufgetragen und zwar bei drei charakteristischen Zeitpunkten, nämlich zu Beginn und Ende des ersten Zyklus und zu Beginn des zweiten Zyklus. Das in GAPRS verwendete Modell zur Berechnung der Wärmedurchgangszahl geht von der Annahme eines konzentrischen Spalts zwischen Hülle und Brennstoff aus. Dieses hat zusammen mit der Tatsache, daß das als Füllgas verwendete Argon sehr schlechte Wärmeleitungseigenschaften hat, den sehr raschen Abfall der Wärmedurchgangszahl h_{gap} zur Folge. Innerhalb eines Bereichs von $20 \mu\text{m}$ ändert sich diese um ca. einen Faktor 4.

Dieser rasche Abfall von h_{gap} ist natürlich theoretisch unbefriedigend und auch nicht realistisch. Die tatsächlich im Stab vorliegenden Verhältnisse kann man dann besser modellieren, wenn man das Aufreißen der Tabletten beim ersten Anfahren infolge der Wärmespannungen und ein Verschieben von Tablettenbruchstücken in Rechnung stellt. Ein Teil der Spannungsenergie wird beim Aufreißen in Bewegungsenergie umgewandelt, des weiteren können Schwingungen des Stabes dafür verantwortlich sein, daß sich Teile der Tabletten an die Hülle anlegen. Wie groß die Teile sind, ist von vorneherein nicht bekannt, auch dürfte dies gewissen statistischen Schwankungen unterworfen sein.

Durch Variation des Kontaktwinkels, das ist der Winkel, den die Kontaktfläche aufspannt, bekommt man aber brauchbare Aussagen. Zur Berechnung der Temperaturverteilung im Brennstab wurde das Rechenmodell TRISS /16/ entwickelt, das die Lösung der Wärmeleitungsgleichung bei stufenartiger Änderung der Wärmedurchgangszahl leistet. Das Rechenmodell TRISS basiert auf einer Fourier-Reihenentwicklung der Temperaturverteilung, es ist in /16/ näher beschrieben.

In den Abbildungen 68,69,70 ist die maximale Brennstofftemperatur gegen den Kontaktwinkel α aufgetragen und zwar zu Beginn und Ende des ersten Zyklus und zu Beginn des zweiten Zyklus. Der Wert der Wärmedurchgangszahl über den Teil des Umfangs, wo der Spalt offen ist, $h_{\text{gap}}^{(2)}$ wurde innerhalb von Bereichen variiert, die durch die Rechnungen mit GAPRS nahegelegt werden.

Zu Beginn des ersten Zyklus z.B. ist ein Wert von $h_{\text{gap}}^{(2)} = 0,4 \text{ W/cm}^2 \text{ K}$ als realistisch anzusehen. Um den Einfluß von $h_{\text{gap}}^{(2)}$ zu testen wurde diese Größe dann noch zwischen 0,3 und 0,5 $\text{W/cm}^2 \text{ K}$ variiert.

In den Abbildungen 68 bis 70 ist zusätzlich der experimentelle Wert von T_z eingetragen. Für Kontaktwinkel α in der Nähe von π werden diese experimentellen Werte durch die Rechnung reproduziert. Des weiteren ersieht man, daß die so bestimmten Kontaktwinkel mit dem Abbrand zunehmen. Dies ist nicht unrealistisch, denn man kann erwarten, daß sich der Brennstoff im Laufe des Betriebes immer mehr an die Hülle anlegt.

Der starke Anstieg der Wärmedurchgangszahl h_{gap} des Prüflings 6/12 (KVE 108) im zweiten Bestrahlungszyklus (siehe Abb. 29) deutet darauf hin, daß sich hier der Spalt vollständig geschlossen und ein gewisser Kontaktdruck zwischen Hülle und Brennstoff aufgebaut hat. Dies wird auch durch die Rechnung mit GAPRS bestätigt, welche für geschlossenen Spalt einen Wert von $h_{\text{gap}} = 1,5 \text{ W/cm}^2 \text{ K}$ liefert (siehe Abb. 65).

Für den Fall, daß mechanische Wechselwirkung zwischen Brennstoff und Hülle vorliegt, benötigt man zur Berechnung des Wärmedurchgangs den Kontaktdruck P_{Kont} . Dessen Bestimmung leistet das Rechenprogramm PSTAT, auf das im Zusammenhang mit der Behandlung der mechanischen Wechselwirkung näher eingegangen wird. Für den Beitrag zur Wärmedurchgangszahl, der vom Kontaktdruck herrührt, wurde gemäß / 17 / folgender Ausdruck verwendet:

$$h_c = 0,85 \tanh(P_{\text{Kont}} / 85,0)$$

$P_{\text{Kont}} \quad (\text{kp/cm}^2)$

Ein einfacher linearer Ansatz, wie er z.B. im Ross-Stoute-Modell /3/u.in /18/ verwendet wird, ist theoretisch unbefriedigend, da man eine Sättigung bei höheren Kontaktdrücken erwartet / 19 /.

In den Abb. 71 bis 73 sind die für die KVE 108, 111 und 115 berechneten Werte der Wärmedurchgangszahl für die Zyklen zu sehen, in denen Messungen der Zentraltemperatur vorliegen und bei denen aller Wahrscheinlichkeit nach mechanische Wechselwirkung zwischen Brennstoff und Hülle vorlag.

Aufgrund der sehr niedrigen Stableistung in den ersten drei Bestrahlungszyklen kann man beim KVE 115 damit rechnen, daß es erst im 4. Zyklus zu Wechselwirkung gekommen ist. Dies wird auch durch die Zentraltemperaturmessung nahegelegt. Was den KVE 108 anbetrifft, so ist hier das Zentral-Thermoelement nach dem 2. Bestrahlungszyklus ausgefallen (siehe Abb. 29). Für einen Vergleich zwischen Theorie und Experiment steht also nur die Messung im 2. Zyklus zur Verfügung. Bei der Rechnung wurde von der vereinfachenden Annahme ausgegangen, daß sich mit Beginn des 2. Zyklus ein Kontaktdruck aufbaut. Dies ist bei einem Vergleich von Abb. 71 mit Abb. 29 also dem gerechneten mit dem gemessenen Wert von h_{gap} zu berücksichtigen.

Generell ersieht man aus den Abb. 71 bis 73, daß durch die Rechnung eine stetige Zunahme des Wärmedurchgangs mit dem Abbrand, wie sie nach dem Experiment zu erwarten ist, nicht geliefert wird. Man erhält sogar eine leichte Abnahme von h_{gap} . Eine stetige Zunahme der Wärmedurchgangszahl im Laufe des Betriebes kann eigentlich nur resultieren aus einer Reduktion der Rauigkeiten von Brennstoff und Hülle, da eine stetige Zunahme des Kontaktdrucks aufgrund des linearen Zusammenhangs zwischen Hülldehnung und Abbrand nicht plausibel ist und man zum anderen - wie oben schon ausgeführt - eine Sättigung mit wachsendem Kontaktdruck erwartet.

Aufgrund des sehr geringen Datenmaterials wurde darauf verzichtet, die berechneten Werte durch Wahl von zeitlich veränderlichen Rauigkeiten an die experimentellen Ergebnisse anzupassen. Des weiteren sind auch diese mit Fehlern behaftet, über deren Größe man keine sehr genauen Aussagen machen kann (siehe 7.3).

10.2 Analyse der Brennstoffstruktur

Bei den Prüflingen mit höherem Abbrand kann man in der Regel verschiedene Strukturzonen im Brennstoff unterscheiden (siehe Anhang II).

Vom Standpunkt der thermischen Analyse des Brennstoffs ist nun eine Zuordnung von Temperatur und Struktur von besonderem Interesse, speziell interessiert die Temperatur an der Grenze der Zone erhöhter Porosität (Strukturgrenze) im Brennstoffinnern.

In den Heißen Zellen / 20/ wurde nun an verschiedenen Schliffen die Porosität mit einem "Quantimet" bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abb. 74,75 zu sehen. Für die modellmäßige Auswertung sind speziell die Prüflinge interessant, die eine Zone stark erhöhter Porosität im Brennstoffinnern zeigen, also die Prüflinge 6/14 und 6/26 sowie der Prüfling 6/36, der aber nicht vermessen wurde.

Nach / 21/ sind die Bildung und das Wachstum von optisch sichtbaren Spaltgasblasen eine Funktion der Brennstofftemperatur und des Abbrandes, und zwar bilden sich mit wachsendem Abbrand die Blasen bei niedrigeren Brennstofftemperaturen. Falls also die thermischen Bedingungen im Laufe des Abbrandes nicht zu sehr unterschiedlich waren, kann man annehmen, daß die hochporöse Zone mit der Zeit langsam nach außen wächst.

Für die beiden Prüflinge 6/26 und 6/36 wurde nun der heißeste Zustand in den letzten paar Zyklen als verantwortlich für die letztendliche Ausbildung der Struktur ausgewählt. Die entsprechenden radialen Temperaturprofile sind in den Abbildungen 76-78 dargestellt. Unter dem Temperaturprofil ist jeweils eine vereinfachte Skizze der Brennstoffstruktur zu sehen. Danach liegt also bei beiden Prüflingen die Strukturgrenze der inneren Zone bei etwa 1000 °C. Nach /21/ findet man bei 1000 °C optisch sichtbare Blasen an den Korngrenzen nach einem Abbrand von etwa 7 % FIMA und bei 1200 °C nach einem Abbrand von ca. 4,5 % FIMA. Da bei beiden Prüflingen der Zielabbrand nur bei ca. 5 % FIMA lag, besteht also keine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen in /21/.

Der Prüfling 6/14 erreichte einen Abbrand von mehr als 7 % FIMA. Deshalb wurde hier das Temperaturprofil bei ca. 4,5 % FIMA und gegen Ende der Bestrahlung berechnet. Die Ergebnisse sind in Abb. 77 zu sehen. Man findet eine gute Übereinstimmung mit /21/. Beim niedrigen Abbrand (ca. 4,5 % FIMA) liegt die Strukturgrenze etwas über 1200 °C, beim hohen Abbrand bei knapp 1000 °C. Nachzutragen ist noch, daß bei allen drei Prüflingen eine Wärmedurchgangszahl von $2 \text{ W/cm}^2 \text{ K}$ angenommen wurde.

10.3 Mechanische Analyse

Bei den Prüflingen der Versuchsgruppen 6a und 6c wurden beträchtliche Hüllverformungen festgestellt und zwar wurden Werte bis zu etwa 3 % erreicht (siehe Abb. 33+34). Eine der Hauptaufgaben der modelltheoretischen Analyse muß darin bestehen, diese Hüllverformungen zu erklären, d.h. einmal ihre Ursachen festzustellen und zum anderen sie mit Hilfe von Rechenmodellen möglichst quantitativ zu reproduzieren. Im Zusammenhang damit wird auch die Frage nach den Ursachen für die bei einigen Prüflingen aufgetretenen Defekte zu beantworten sein.

Wie man aus Abb. 79 ersieht, nimmt die Hüllverformung in etwa linear mit dem Abbrand zu und zwar liegen die Datenpunkte sowohl von 6a als auch von 6c in etwa bei derselben Ausgleichsgeraden. Aus dem Rahmen fällt eigentlich nur der Prüfling 6/26A, der bei sehr niedrigem Abbrand schon eine große Hüllverformung zeigt. Wie man aus dem Hülldehnungsprofil (s. Abb. 33) ersieht, sind bei diesem Prüfling ausgesprochene Verformungsspitzen aufgetreten. Die Ursachen für diese Spitzen sind zu suchen in lokalen Wechselwirkungen zwischen Hülle und Brennstoff durch Brennstoffbruchstücke im Spalt, oder - was viel wahrscheinlicher ist - in Kapseldefekten wie ungenügende Wärmeableitung aus der Kapsel.

Ein signifikanter Einfluß der Bindung (He/Ar), des Fertigungsspalt ($50/90 \mu\text{m}$ diam.) sowie der Tablettendichte (82,5 / 84,5 / 88 % TD) auf die Hülldehnung läßt sich nicht erkennen. Dazu waren auch z.B. bei den letzten beiden Größen die Variationen zu gering. Des weiteren ist bei geschlossenem Spalt der Einfluß der Bindung auf die Brennstofftemperatur gering. Die verglichen mit He geringere Wärmeleitfähigkeit von Ar wird dann durch die wesentlich kleinere Extrapolationslänge in etwa kompensiert.

Die Prüflinge von 6a und 6c waren einem relativ harten Zyklrierbetrieb unterworfen (siehe 7.2). Man sollte also auch wegen der kleinen Fertigungsspalte eine erste Antwort auf die Frage erhalten, in welchem Verhältnis bei Karbid-Brennstäben die Belastung durch zyklischen Leistungsbetrieb und durch das Brennstoffschwellen zueinander stehen. Als Maß für die zyklische Belastung der Brennstäbe wurde - wie bei Oxid-Brennstäben / 22/ - die Summe der normierten Leistungssprünge gewählt:

$$\sum_{i=1}^n \Delta \chi_i^{\text{norm}} = \sum_{i=1}^n 2 \cdot \frac{\chi_{i+1}^A - \chi_i^E}{\chi_{i+1}^A + \chi_i^E}$$

(Nomenklatur ist im Anhang erklärt.)

Es wird also die Leistungsüberhöhung bezogen auf den Endzustand des vorhergehenden Zyklus berechnet und auf eine mittlere Stableistung normiert.

Dieses Maß hat sich bei der mechanischen Analyse von FR2-Versuchsgruppen bewährt.

In Abb. 80 ist für die verschiedenen Prüflinge von 6a und 6c diese Größe gegen den Abbrand aufgetragen. Man sieht also, daß die zyklische Belastung der Brennstäbe in etwa linear mit dem Abbrand anwächst. Da nun auch eine Hüllverformung durch Schwellen des Brennstoffes nach den bisherigen Erfahrungen nahezu linear mit dem Abbrand zunimmt, kann im Gegensatz zur Vg 5b /22/ hier nicht direkt aus den Hüllverformungen auf den Mechanismus der mechanischen Wechselwirkung geschlossen werden. Man ist also auf Modellrechnungen angewiesen.

Dazu diene das Rechenprogramm PSTAT / 23/ , das den Brennstoff nach einem Zweizonenmodell behandelt. Als wesentliche Materialparameter gehen in dieses Modell, was die Brennstoffseite anbetrifft, die Schwell- und Kriechrate des Brennstoffs ein, wobei im äußeren kalten Brennstoffring das bestrahlungsinduzierte Kriechen dominiert. Beide Parameter sind im Moment noch relativ unsicher, insbesondere ist eine mögliche Porositätsabhängigkeit des Kriechens noch nicht endgültig geklärt. Deshalb konnte das Ziel bei der Nachrechnung der Hülldehnungen mit PSTAT nur darin bestehen, unter Wahl von vernünftigen Werten für die betreffenden Materialparameter eine gute Anpassung der gerechneten Werte an die gemessenen zu finden. Bei der linearen Schwellrate des Brennstoffes wurde nun ein Wert von 0,8 %/10 MWd/Kg Me angenommen, für das Brennstoffkriechen wurden die in /24/ publizierten Werte verwendet mit einer Porositätskorrektur von $1 + \frac{p^2}{8}$ nach /25/, wie sie für Oxid-Brennstoffe üblich ist.

In Abb. 81 sind die mit PSTAT gerechneten Werte der Hülldehnung gegen die gemessenen aufgetragen. Da die Zahl der Prüflinge deutlich über der der Anpassungsparameter (2) liegt, kann das Ergebnis als Beweis für die Brauchbarkeit der in PSTAT verwendeten Modellvorstellungen angesehen werden.

Es hat sich bei den Rechnungen gezeigt, daß die Hüllverformungen zum weitaus überwiegenden Teil auf das Brennstoffschwellen zurückzuführen sind. Der Beitrag durch die zyklische Betriebsweise ist gering. Dies hängt mit dem niedrigen Temperaturniveau des Brennstoffes zusammen; die thermische Differenzdehnung zwischen Hülle und Brennstoff ist klein. Als wesentlicher Beitrag bleibt dann die Bildung von irreversiblen Rißvolumen. In PSTAT ist angenommen, daß beim Rauf-Runterschalten der Leistung 1 Umfangriß und 6 Radialrisse entstehen.

Ein Effekt ist im Zusammenhang mit dem zyklischen Leistungsbetrieb von besonderem Interesse und soll deshalb anhand der Ergebnisse des Prüflings 6/12 kurz diskutiert werden. Bei der Bestrahlung der Vg 6a und 6c folgten des öfteren Zyklen mit hoher Stableistung und hoher Hülltemperatur auf solche, die mit niedriger Stableistung und Hülltemperatur beendet wurden. Im alten Zyklus hat sich also aufgrund der geringen Kriechfähigkeit der Hülle ein hoher Kontaktdruck aufgebaut. Beim Anfahren im nächsten Zyklus erhält man dann für diese Größe einen Wert, der weit über dem den thermischen Bedingungen entsprechenden Gleichgewichtszustand liegt. Dies ist in Abb. 82 zu sehen, wo für den Prüfling 6/12 der zeitliche Verlauf des Kontaktdruckes in den Zyklen 2, 3 und 4 aufgetragen ist. In der Abb. 83 sind zur besseren Übersicht die zugehörigen Betriebsbedingungen dargestellt.

Die obige Aussage, daß das Brennstoffschwellen in erster Linie für die Hüllverformung verantwortlich ist, hat zur Konsequenz, daß die aufgetretenen Defekte eine Folge von Langzeiteffekten gewesen sein müssen und nicht auf kurzfristige Überbeanspruchung zurückzuführen sind. Aus den Metallografien des Prüflings 6/12 (KVE 108) an den Defektstellen kann man sehen (siehe Dokumentation der zerstörenden Nachuntersuchung), daß die Brüche interkristallin sind. Daraus läßt sich der Schluß ziehen, daß der Prüfling 6/12 höchstwahrscheinlich unter Kriechbeanspruchung defekt wurde und zwar infolge von Hochtemperaturversprödung.

11. Schlußbetrachtung

Durch die Bestrahlung von 13 gasgebundenen Karbid-Prüflingen konnten im Hinblick auf die Stabauslegung eines Karbid-Brennelementes wichtige Erfahrungen über das Bestrahlungsverhalten von Karbid-Brennstäben gewonnen werden.

Trotz hoher linearer Stableistungen von 1000 W/cm und mehr war infolge der kleinen Fertigungsspalte von 50 bzw. 90 μm die thermische Belastung des Brennstoffes gering. Eine Brennstoff-Temperatur von 1300 $^{\circ}\text{C}$ wurde nur an Defektstellen wesentlich überschritten. Infolge der niedrigen Brennstofftemperaturen kam es zu keiner nennenswerten Pu-Umverteilung und die Spaltgasfreisetzung blieb gering. Maximal wurden Freisetzungswerte von 17 % erreicht.

Es hat sich gezeigt, daß man zur Aufnahme des Brennstoffschwellens größere Fertigungsspalte vorsehen muß, falls man Abbrände von 7 % FIMA und mehr ohne Hülldefekte erreichen will. Bedingt durch die geringen Fertigungsspalte hat die mechanische Wechselwirkung zwischen Hülle und Brennstoff sehr früh eingesetzt. Die zum Teil beträchtlichen Hüllverformungen (bis ca. 3 %) sind in erster Linie eine Folge des Brennstoffschwellens. Die zyklische Belastung spielt hierbei eine vergleichsweise geringe Rolle. Die hohen Hülldehnungsraten von max. 0,6 %/% FIMA sind für Karbid-Brennstäbe mit Schmierdichten von 82-85 % TD typisch.

Hinsichtlich der Aufkarburierung der Hüllrohre hat sich gezeigt, daß dieselbe erst ab 650 $^{\circ}\text{C}$ nennenswerte Eindringtiefen (ca. 40 % Hüllwandstärke) erreicht. Weitere Untersuchungen müssen erst zeigen, inwieweit diese Aufkarburierung die Festigkeit der Hüllrohre herauf- und die Duktilität damit herabsetzt.



Literatur:

- /1/ A. Gerken:
Auslegung und Spezifikation des UC/PuC-Brennstabbestrahlungs-
versuchs im FR2 im Rahmen der Versuchsgruppe 6,
(1969) unveröffentlicht
- /2/ M. Guyette:
CRASH, Computer-program for the analysis of creep and plasticity
in fuel pin sheets,
KFK-Bericht Nr. 1050 (1969)
- /3/ A.M. Ross and R.L. Stoute:
Heat Transfer Coefficient Between UO_2 and Zircaloy-2,
AECL-1552 (1962)
- /4/ J.A.L. Robertson, et al.:
Temperature Distribution in UO_2 Fuel Elements,
Journ. Nucl. Mat. 7, S. 225 (1962)
- /5/ A.S. Bain:
 UO_2 /Sheath Heat Transfer during Irradiation,
Nuclear Applications, Vol. 3, April 1967
- /6/ D.D. Cloß:
Physikalische und mechanische Eigenschaften von Hüllmaterialien,
(1968) unveröffentlicht
- /7/ G. Kramer, et al.:
Herstellung von Mischkarbidbrennstoff ($U_{0,85}Pu_{0,15}$) für die
Bestrahlungsversuche Vg6
(1974) unveröffentlicht
- /8/ H. Häfner:
Sicherheitsbericht für FR2-Kapselversuchseinsätze mit einwandigen
NaK-Kapseln (Typ 7) zur Bestrahlung von Hochleistungsbrennstäben,
(1969) unveröffentlicht

- /9/ W. Comper:
persönliche Mitteilung
- /10/ L. Steinbock:
Das Brennstabauslegungs- und Überwachungssystem MERKUR,
KFK-Bericht Nr. 2163 (1970)
- /11/ A.B.G. Washington:
Preferred Values for the Thermal Conductivity of Sintered Ceramic
Fuel for Fast Reactor Use,
TRG-Report Nr. 2236, Sept. 1963
- /12/ H. Gräbner:
Spaltgasmessungen, (1970) unveröffentlicht
- /13/ D. Freund, et al.:
Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung der UC + (UPu)C-
Brennstäbe der Versuchsgruppen Mol 11/K1 und Mol 11/K2,
KFK-Bericht Nr. 2268 (1976)
- /14/ H. Wertenbach:
persönliche Mitteilung
- /15/ M. Heck, H. Steiner:
Hinweise und Erläuterungen zur Anwendung des Rechenprogramms
GAPRS in der erweiterten Fassung
(1977) unveröffentlicht
- /16/ H. Steiner:
Der Wärmedurchgang in Karbid-Brennstäben mit mittleren bis großen
Fertigungsspalten beim Anfahren, KFK-Bericht Nr. 2472 (1977)
- /17/ H. Többe:
Das Brennstabrechenprogramm IAMBUS zur Auslegung von Schnellbrüter-
Brennstäben
(1975) unveröffentlicht

- /18/ T.M. Cetinkale and Fishenden:
Thermal conductance of metal surfaces in contact, Proc. of the
General Discussion on the Heat Transfer, London, S.271.275 (1951)
- /19/ R. Godesar:
Untersuchungen des Einflusses des Wärmedurchgangskoeffizienten im
Spalt zwischen Brennstoff und Hülle auf die sicherheitstechnische
Auslegung von stabförmigen Brennstäben für Schnelle Brutreaktoren,
Dissertation TH Aachen (1972)
- /20/ H. Hellriegel:
persönliche Mitteilung
- /21/ R. Paris:
Some Observations on the Micro Structures of Mixed Carbide Fuel
Irradiated up to 10 % Burnup of Heavy Atoms
AERE-7804 (1974)
- /22/ P. Weimar, D. Freund, H. Steiner:
FR2-Kapselversuchsgruppe 5b, Auslegung, Bestrahlung und Nachunter-
suchung der UO_2/PuO_2 Brennstabprüflinge,
KFK-Bericht Nr. 2222 (1976)
- /23/ H. Steiner:
Programmbeschreibung von PSTAT,
interne Notiz, unveröffentlicht
- /24/ D.J. Clough:
Observations on the Low Temperature Creep Properties of Uranium
Carbide under Irradiation
AERE-R 7772 (1974)
- /25/ D. Brucklacher, W. Dienst:
Creep Behaviour of Ceramic Nuclear Fuels under Neutron Irradiation,
Journ. Nucl. Mat. 42, S. 285 (1972)

Nomenklatur

T_{fa}	=	Brennstoffrandtemperatur ($^{\circ}\text{C}$)
T_z	=	Brennstoffzentraltemperatur ($^{\circ}\text{C}$)
T_{Ha}, T_{Hi}	=	Hüllaußen- bzw. Hüllinnentemperatur ($^{\circ}\text{C}$)
r_{Ha}, r_{Hi}	=	Hüllaußen- bzw. Hüllinnenradius (cm)
r_{fa}, r_{fi}	=	Tablettenaußen- bzw. Tabletteninnenradius (cm)
λ_f, λ_H	=	Wärmeleitfähigkeit von Brennstoff bzw. Hülle (W/cm)
χ	=	lineare Stabileistung (W/cm)
h_{gap}	=	Wärmedurchgangszahl im Spalt zwischen Brennstoff und Hülle (W/cm $^{\circ}\text{C}$)
C_{UC}	=	UC-Anteil im Brennstoff
f	=	Mittelwert der Flußabsenkung
U	=	Wärmequellendichte (W/cm ³)
p_{Kont}	=	Kontaktdruck (at)
χ_i^A, χ_i^E	=	lineare Stabileistung zu Beginn eines Zyklus i bzw. zu Ende dieses Zyklus.

A n h a n g I

Diagramme und Zeichnungen

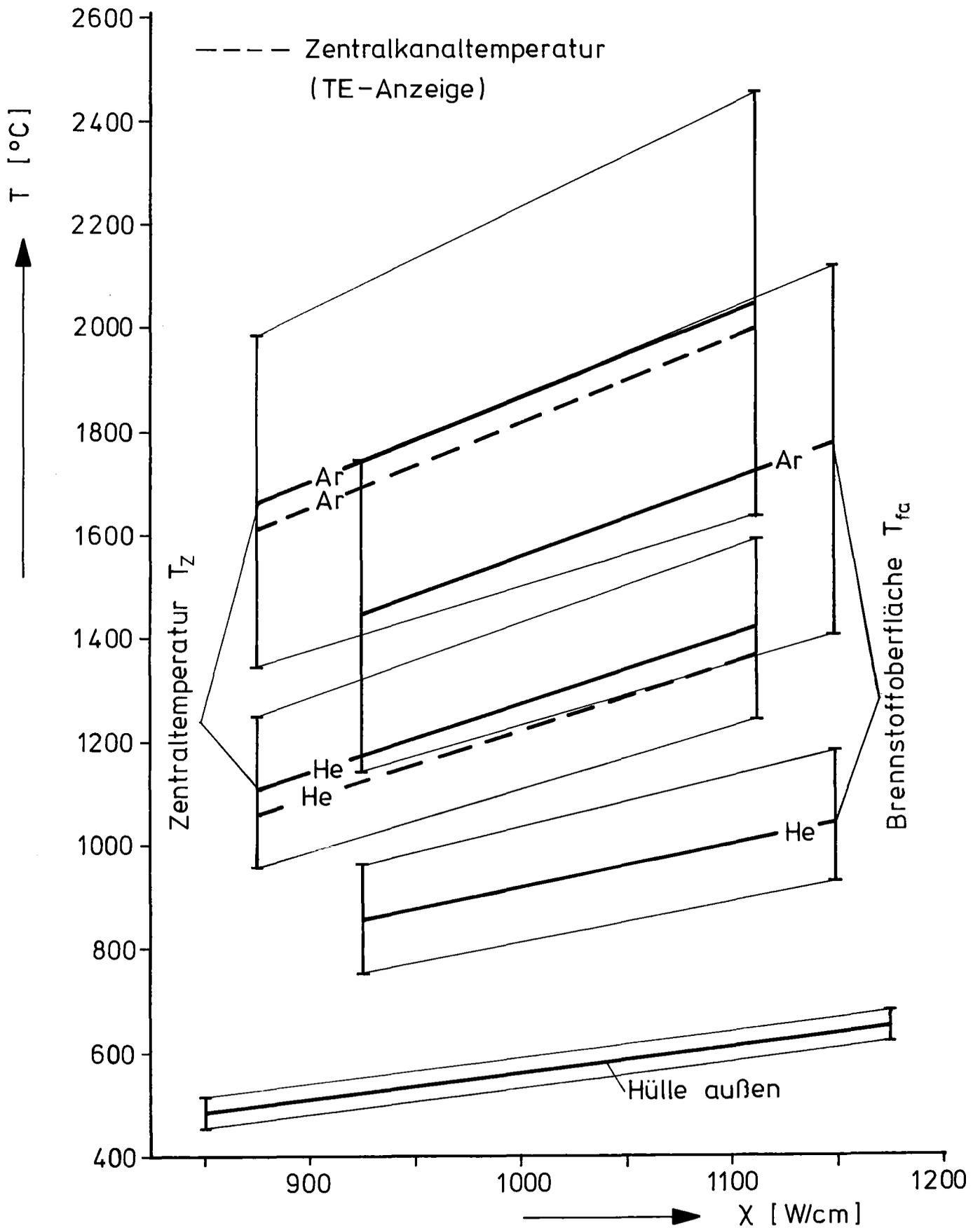
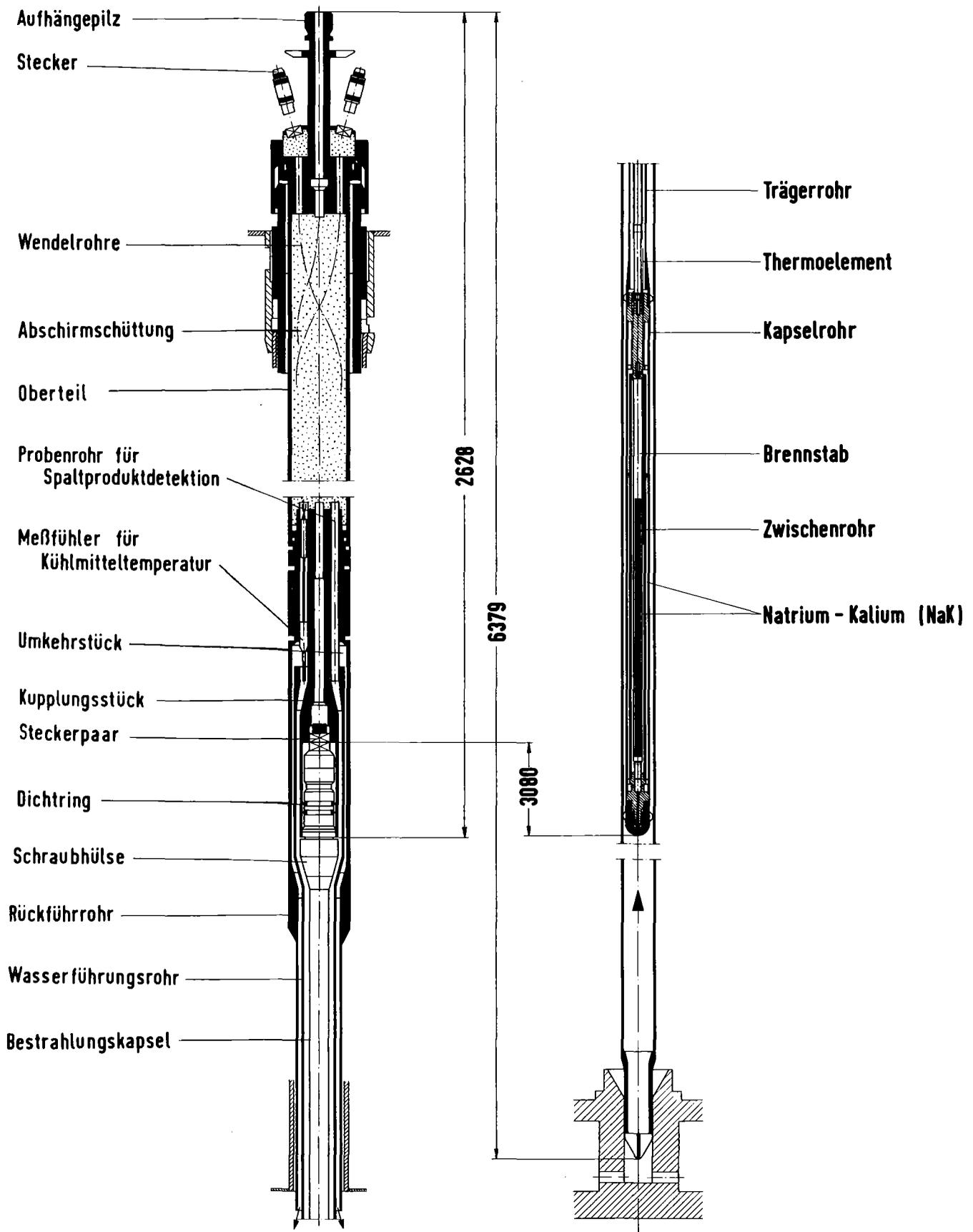
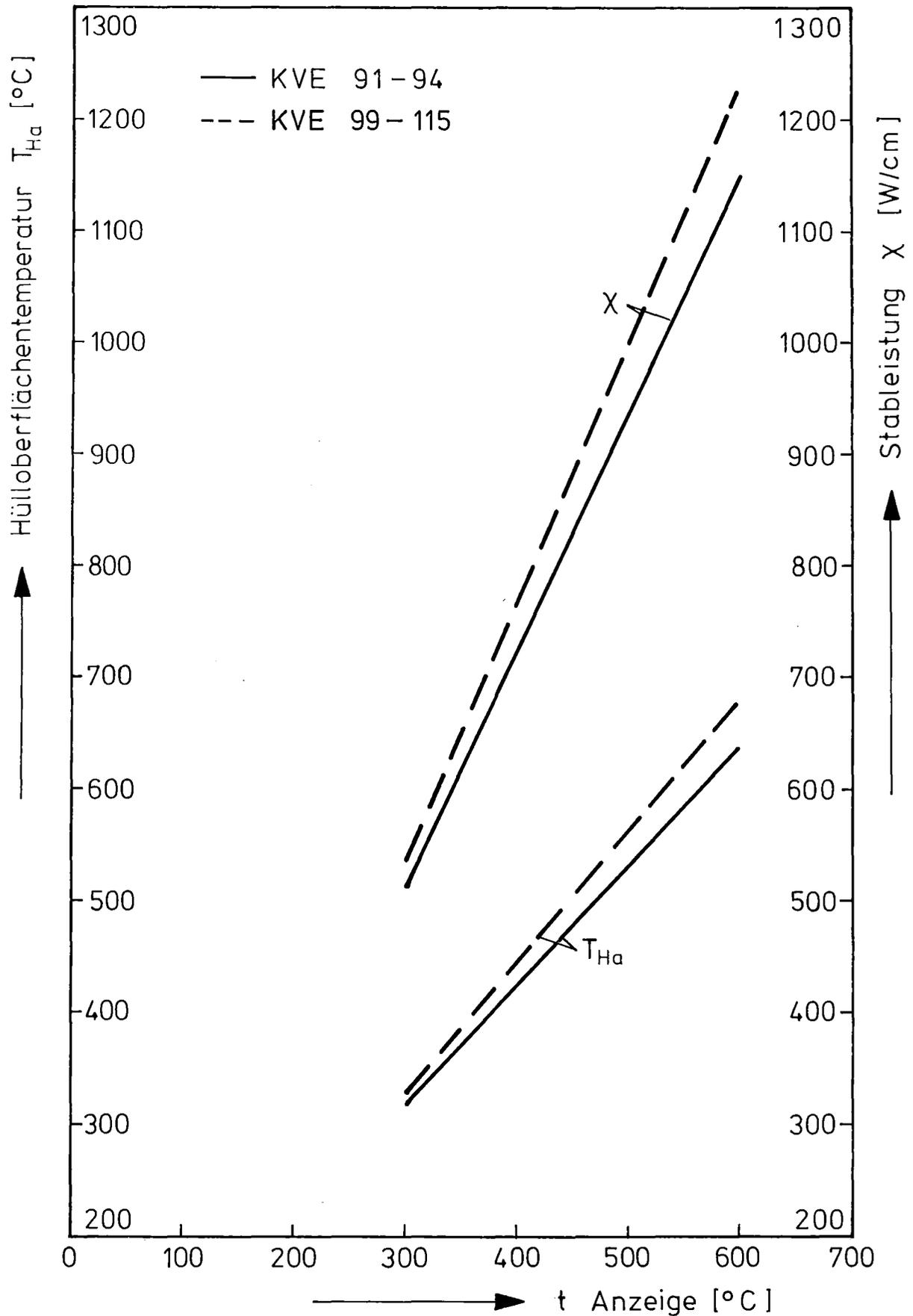


Abb. 1 Brennstofftemperaturen in Abhängigkeit von der Stabileistung (Start) bei verschiedenen Bindungen



FR2 – Kapselversuchseinsatz Typ 7
für die Versuchsgruppe 6a und 6c

Abb. 2



FR 2-Kapsel-Versuchsggr. 6

Temperatur-Stableistungskarakteristik Kapseltyp 7

Abb. 3

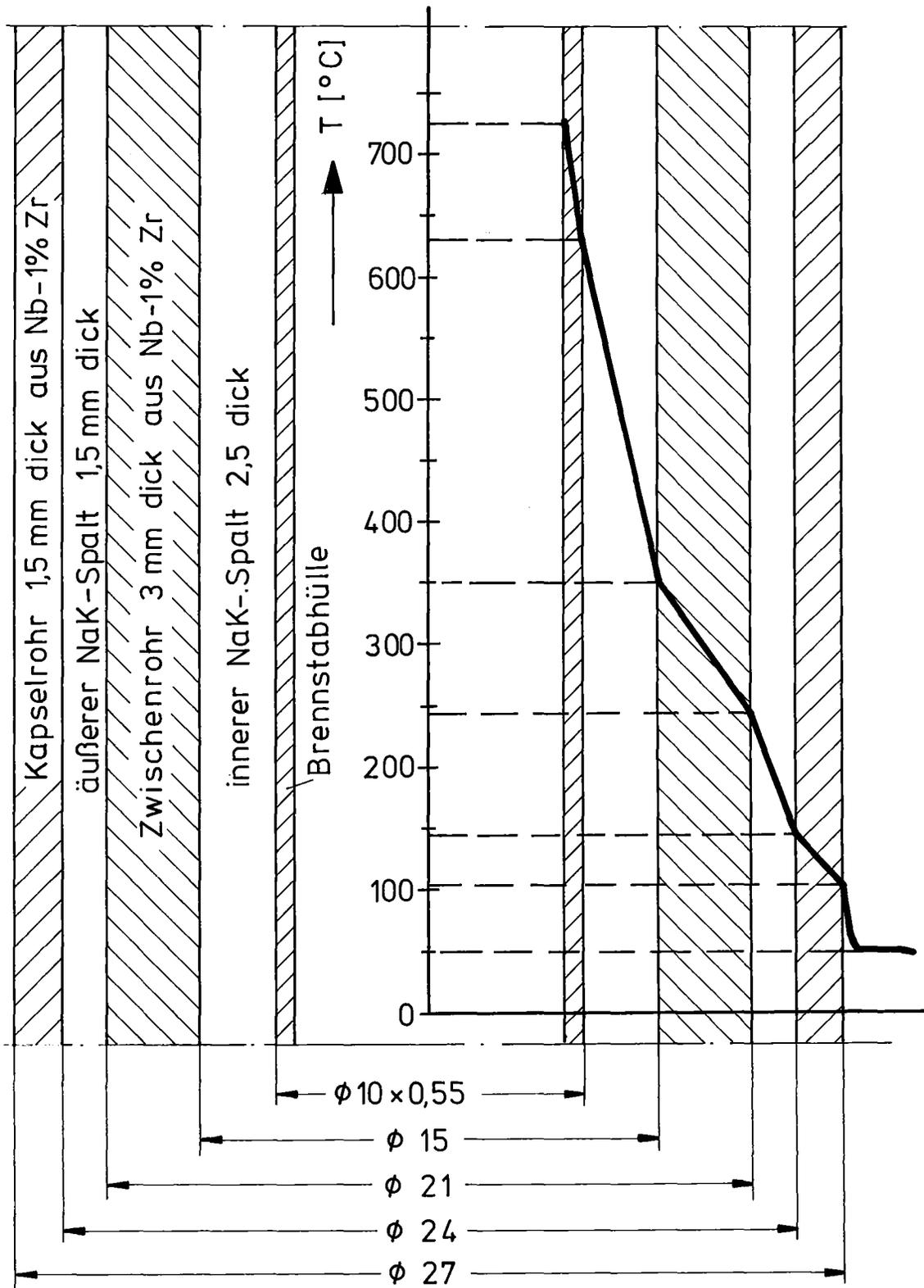


Abb. 4 Temperaturverlauf innerhalb der Bestrahlungskapsel vom Typ 7 (Stableistung $\chi = 1150 \text{ W/cm}$)

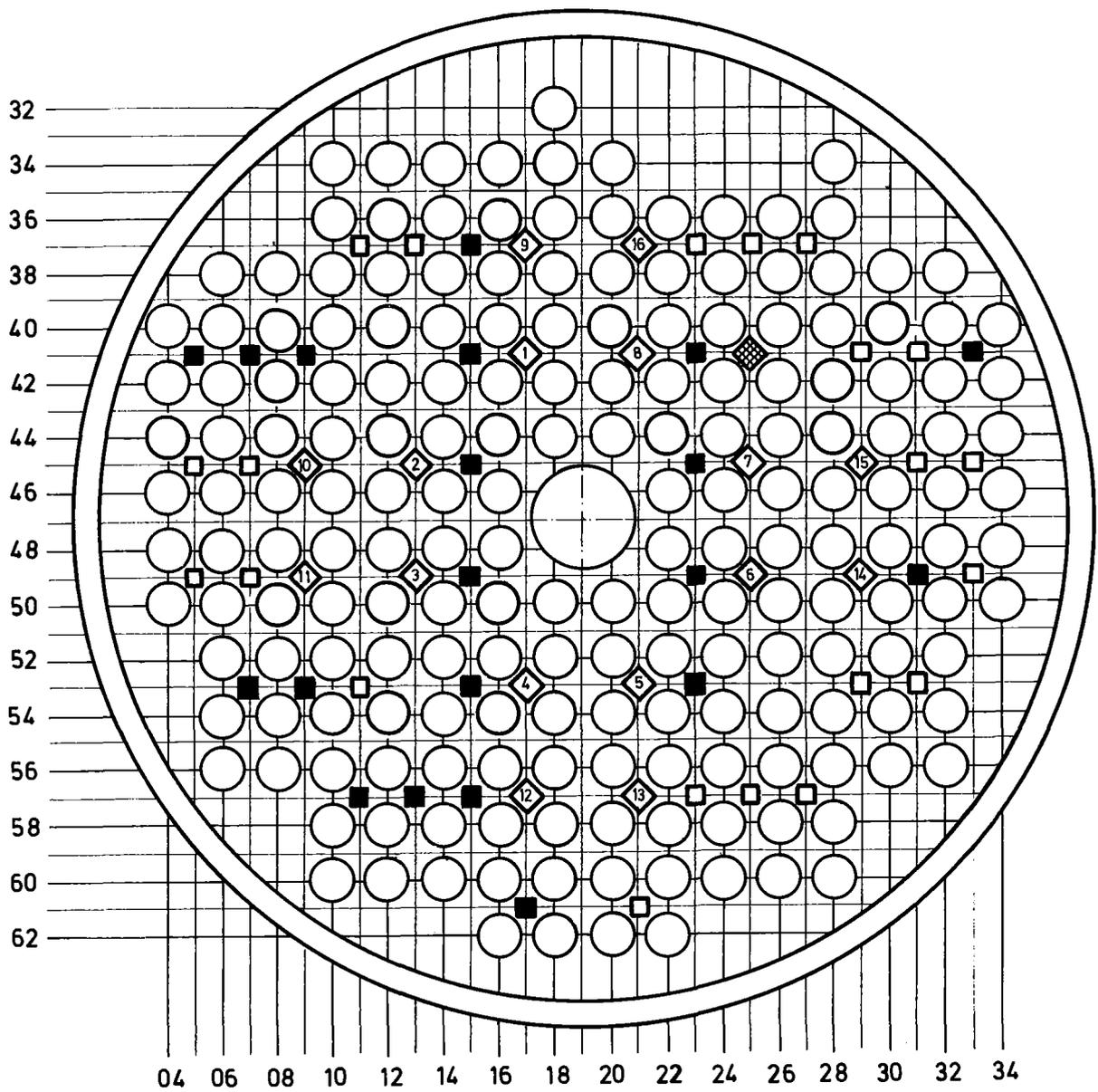
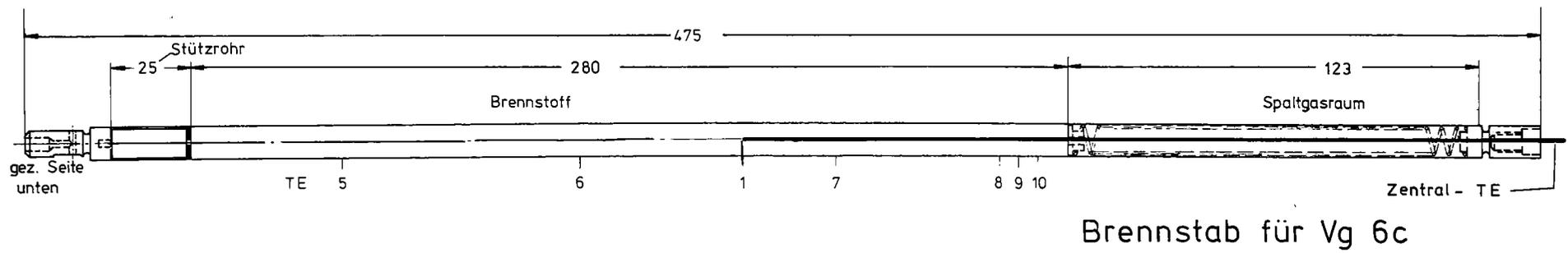
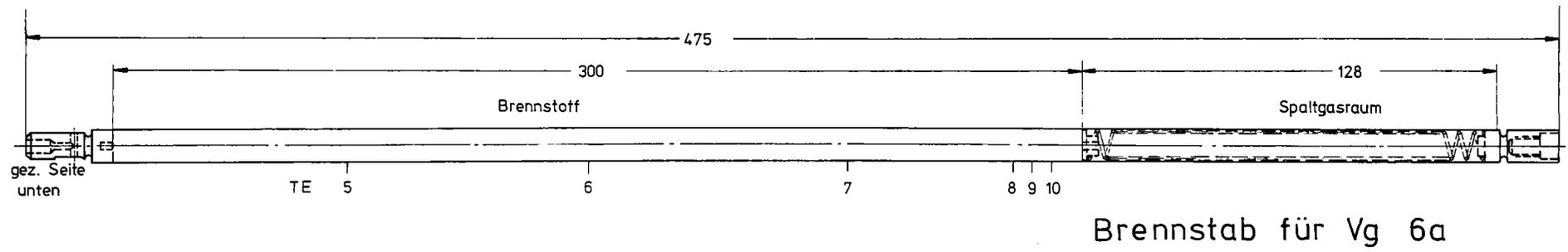


Abb. 5: Positionskarte
FR 2 - Core

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



Brennstababmessungen der Versuchsgruppe 6

Abb. 6

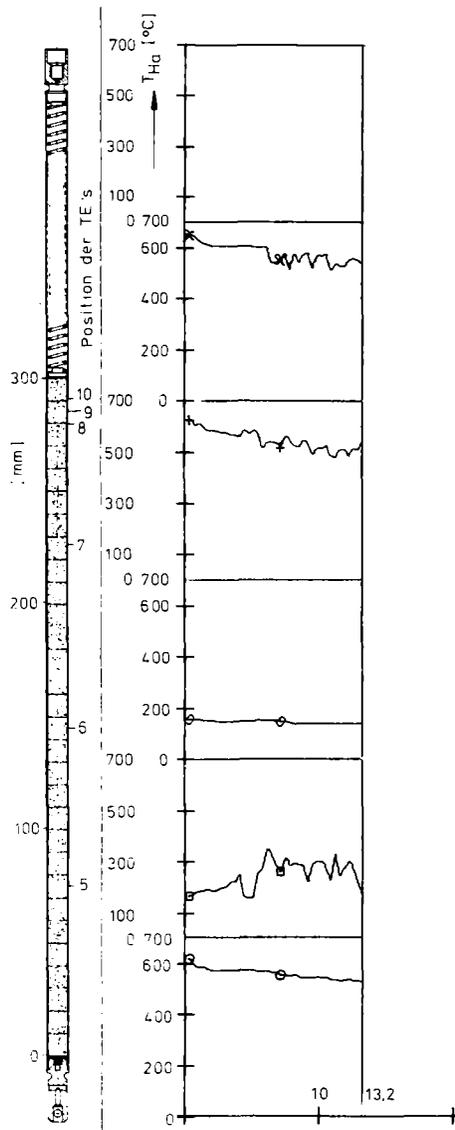


Abb. 7 Karbid-Bestrahlung Kapselversuchsgruppe 6
 KVE 91 Blatt 1 von 1
 Hülloberflächentemperaturen als Funktion der Zeit von Prüfling 6/1

Bestrahlungszeit [Vollasttage] →

Thermoelement Nr.	5	6	7	8	10
Zeichen	○	□	◇	+	x

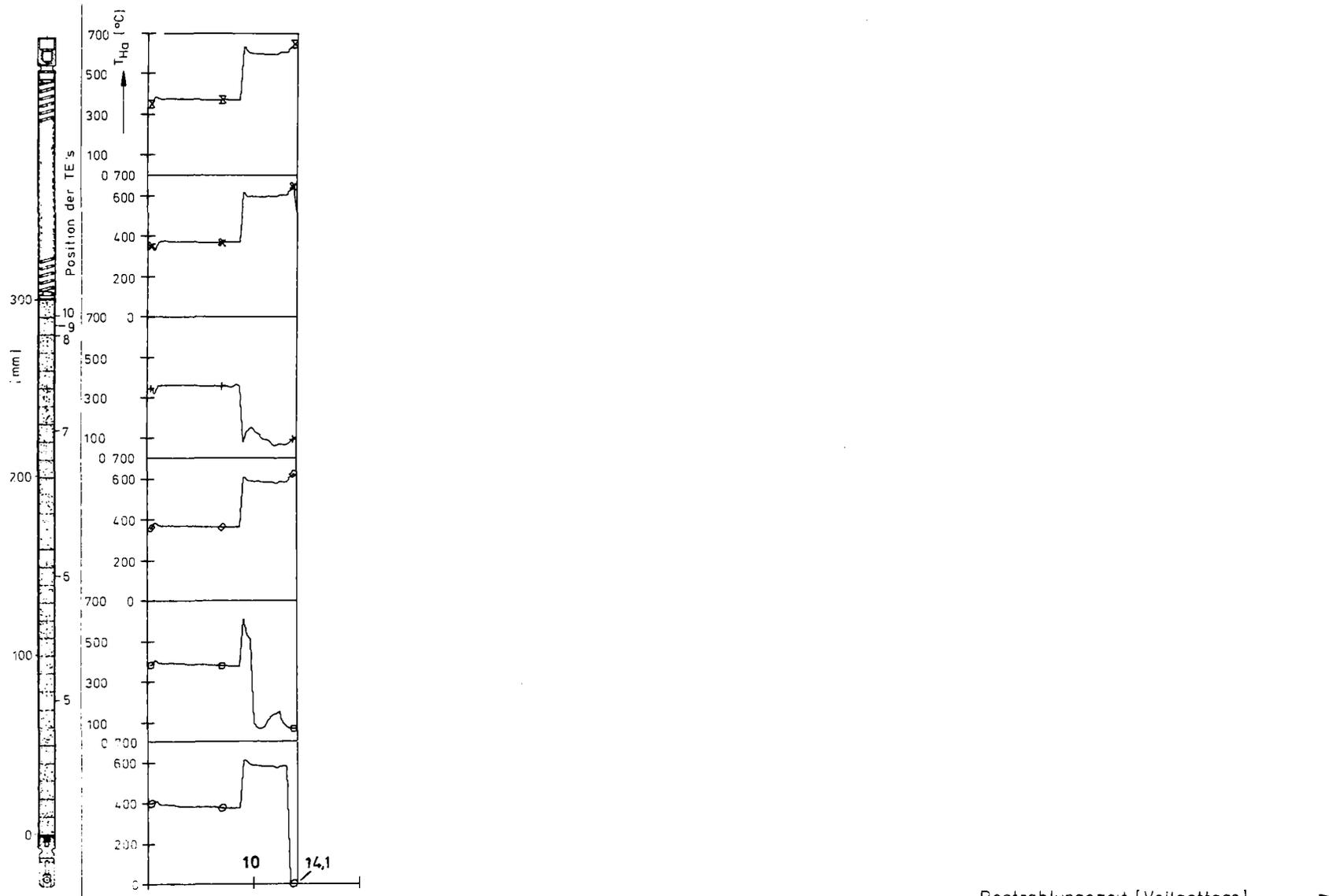


Abb. 8 Karbid-Bestrahlung Kapselversuchsgruppe 6
 KVE 93 Blatt 1 von 1
 Hulloberflächentemperaturen als Funktion der Zeit von Prüfling 6/26A

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

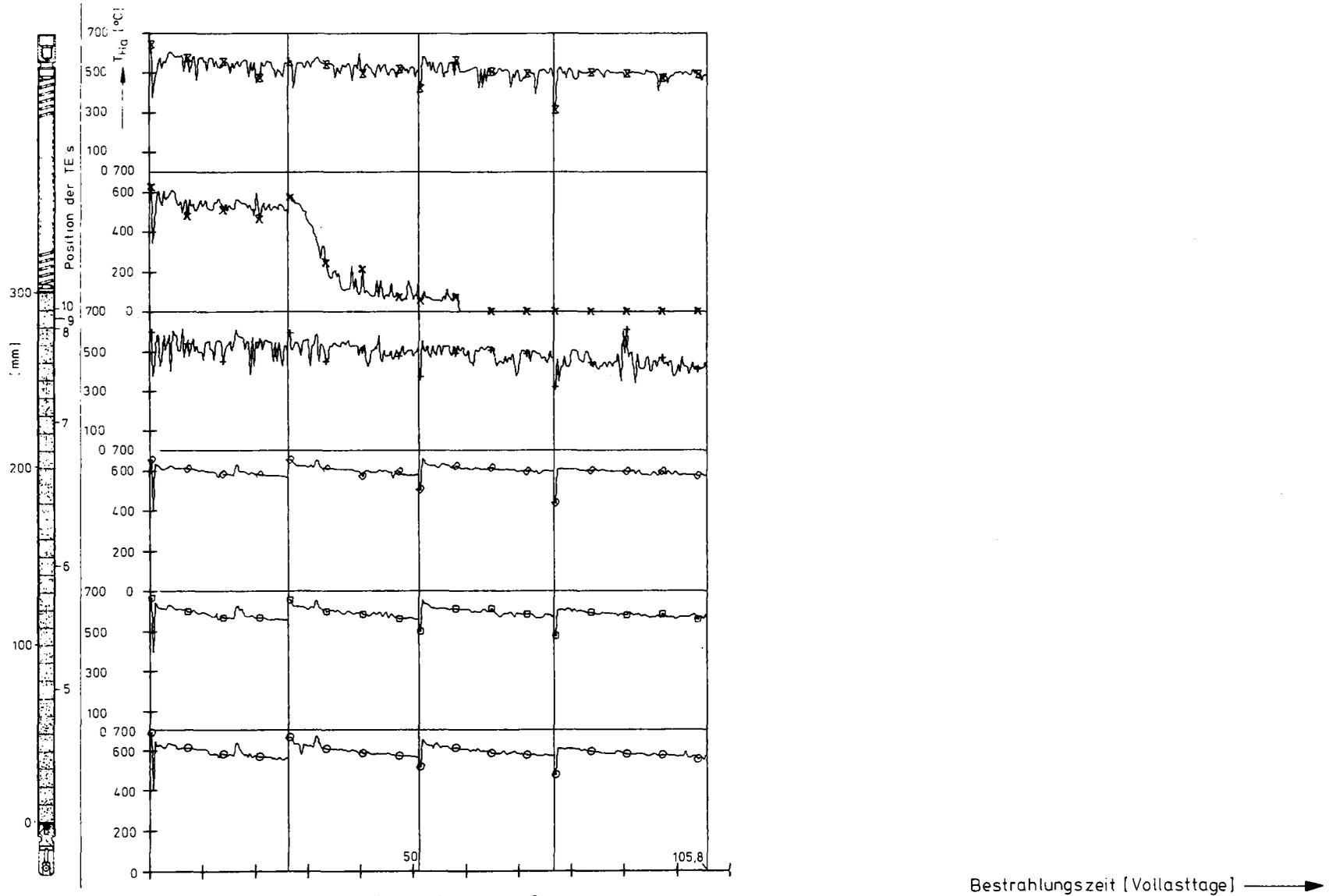


Abb. 9 Karbid-Bestrahlung Kapselversuchsgruppe 6
 KVE 94 Blatt 1 von 1
 Hülloberflächentemperaturen als Funktion der Zeit von Prüfling 6/3

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

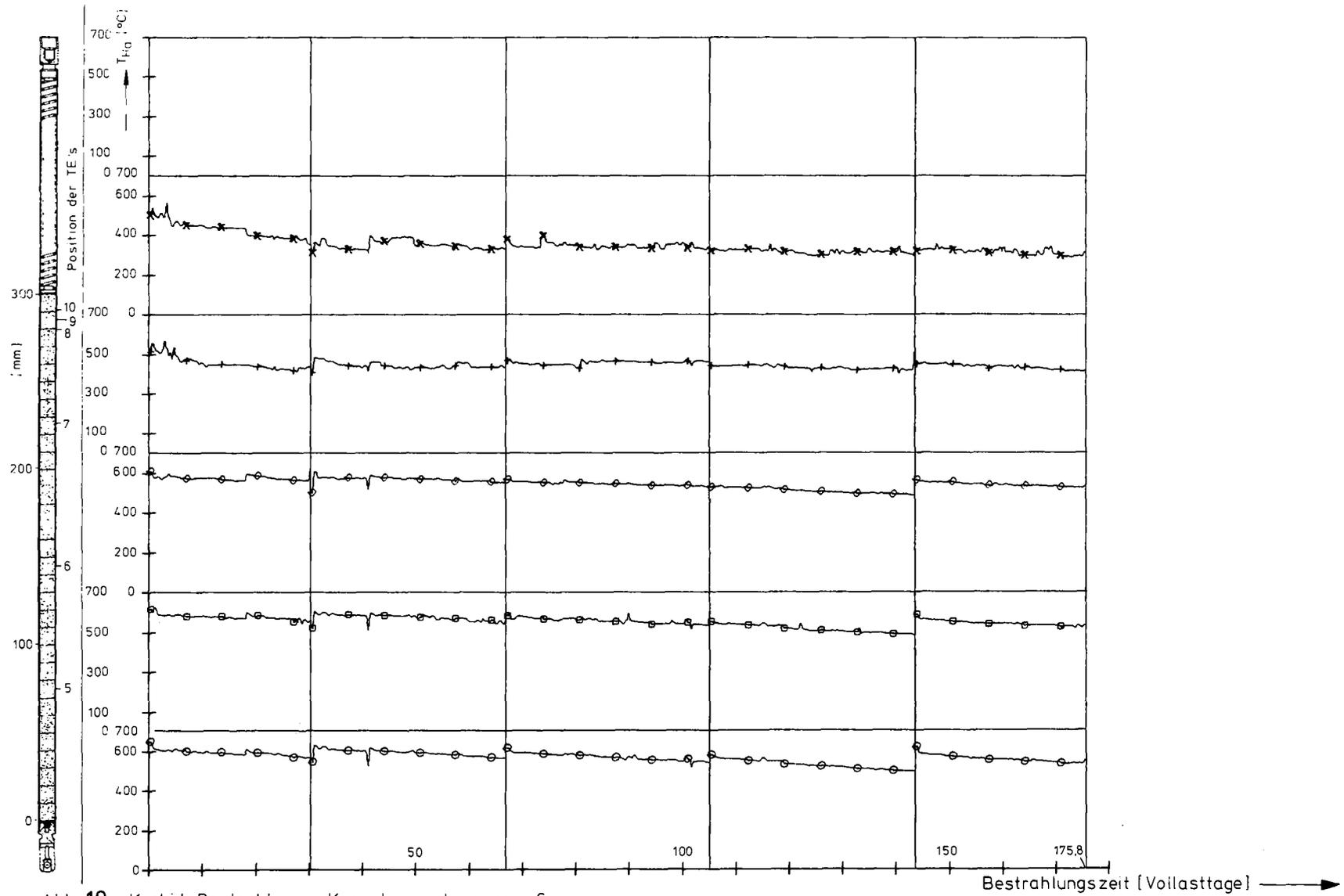


Abb. 10 Karbid-Bestrahlung Kapselversuchsgruppe 6
 KVE 99 Blatt 1 von 1
 Hülloberflächentemperaturen als Funktion der Zeit von Prüfling 6/27

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

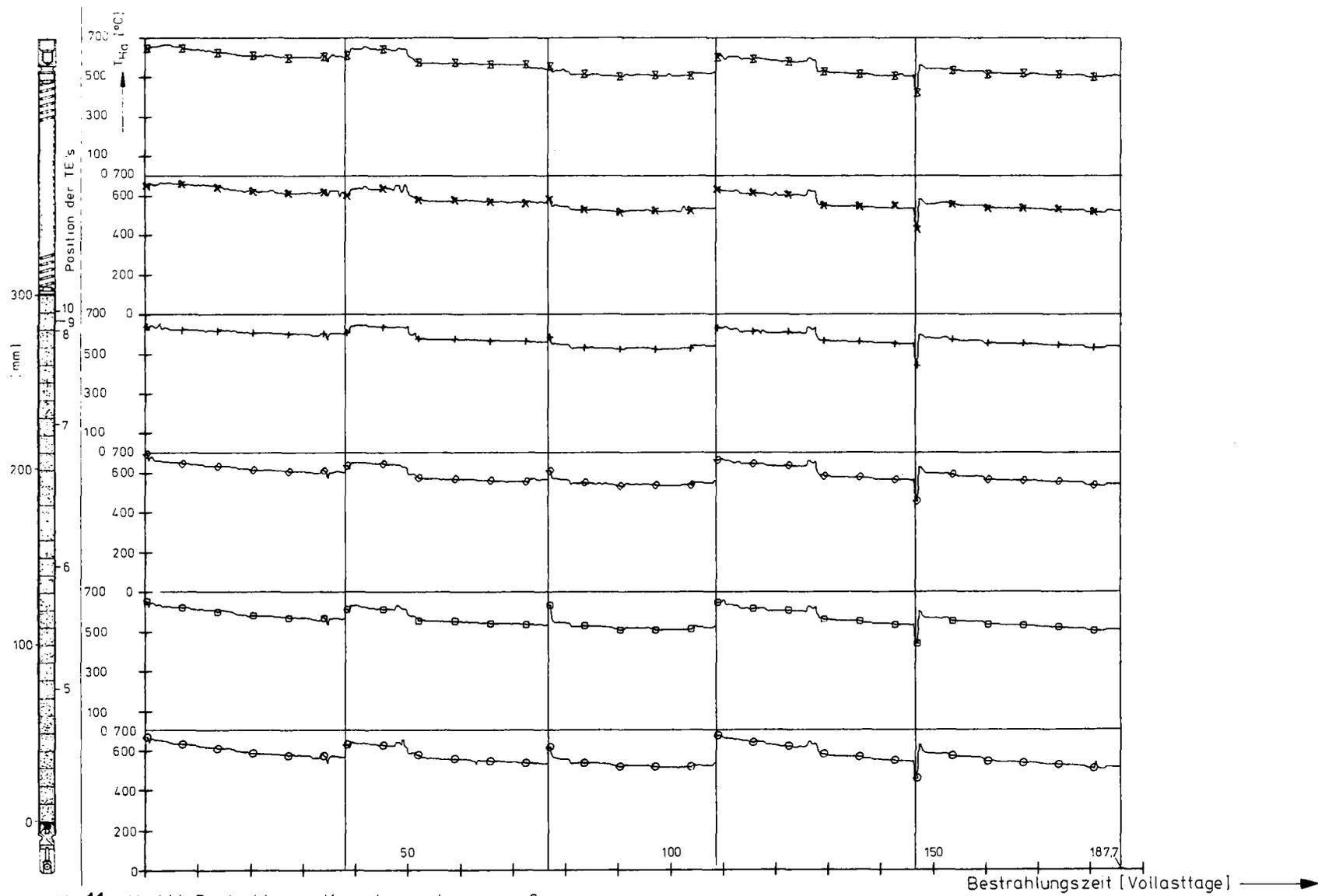


Abb. 11 Karbid-Bestrahlung Kapselversuchsgruppe 6
 KVE 102 Blatt 1 von 2
 Hülloberflächentemperaturen als Funktion der Zeit von Prüfling 6/26

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

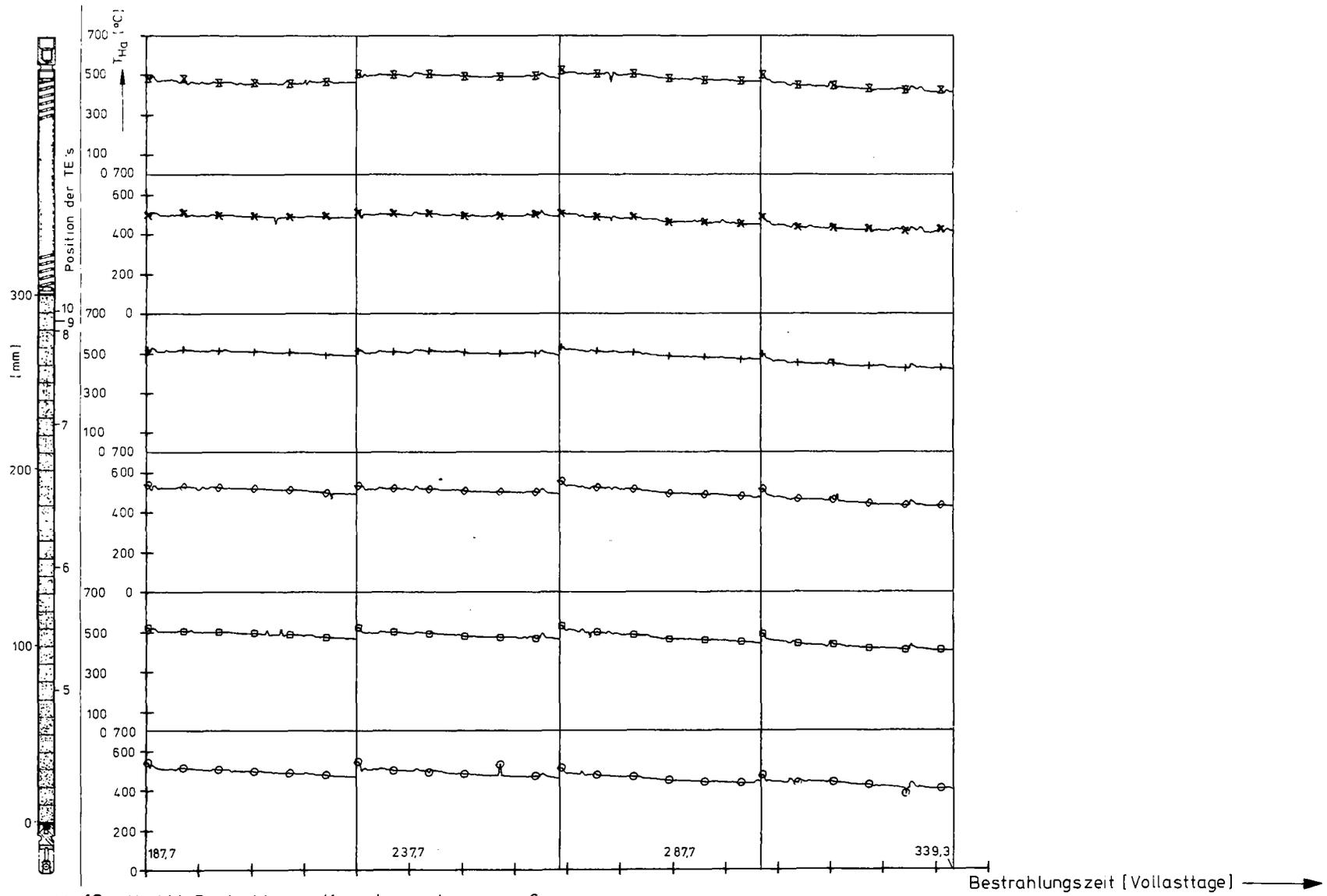


Abb. 12 Karbid-Bestrahlung Kapselversuchsgruppe 6
 KVE 102 Blatt 2 von 2
 Hülloberflächentemperaturen als Funktion der Zeit von Prüfling 6/26

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

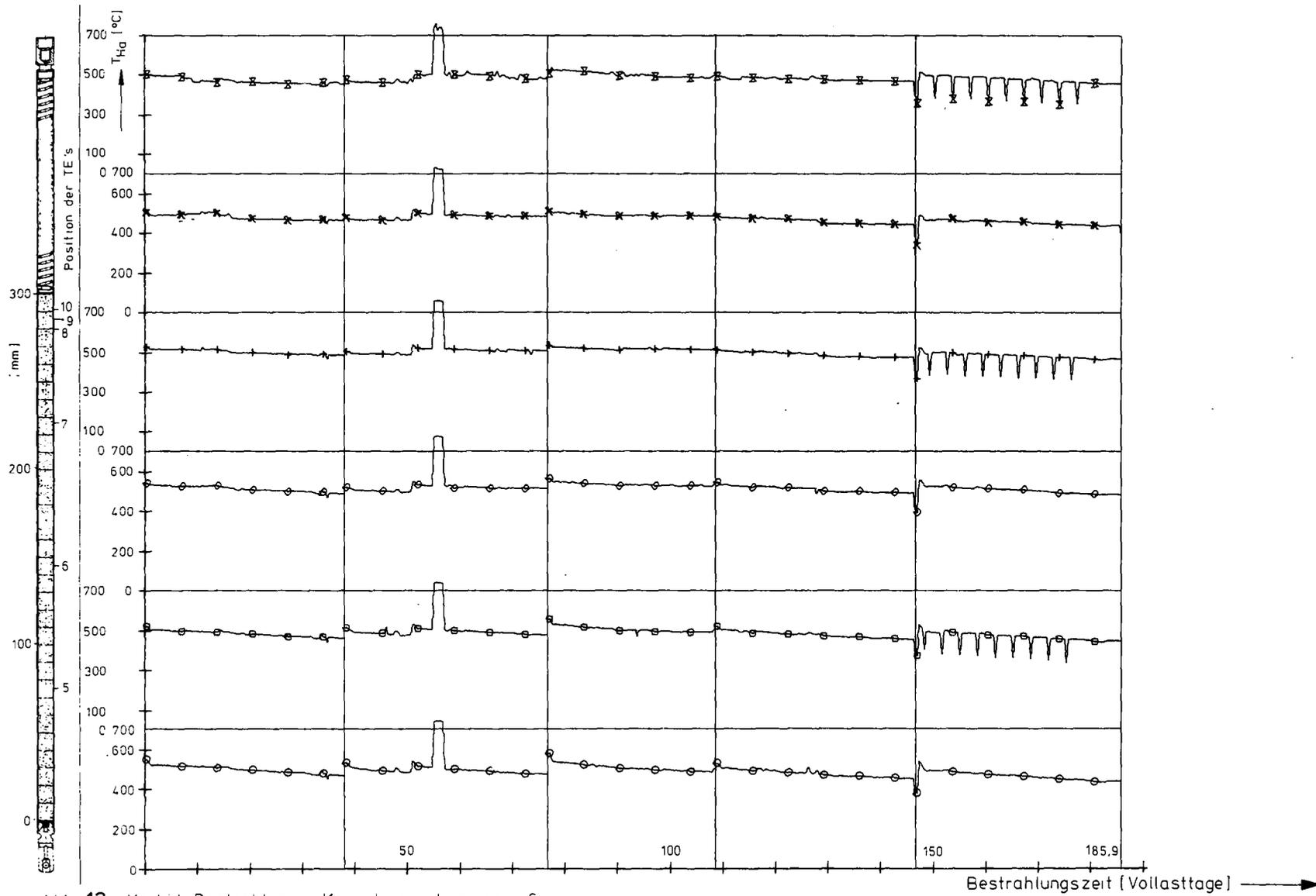


Abb. 13 Karbid-Bestrahlung Kapselversuchsgruppe 6

KVE 103 Blatt 1 von 2

Hüloberflächentemperaturen als Funktion der Zeit von Prüfling 6/36

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

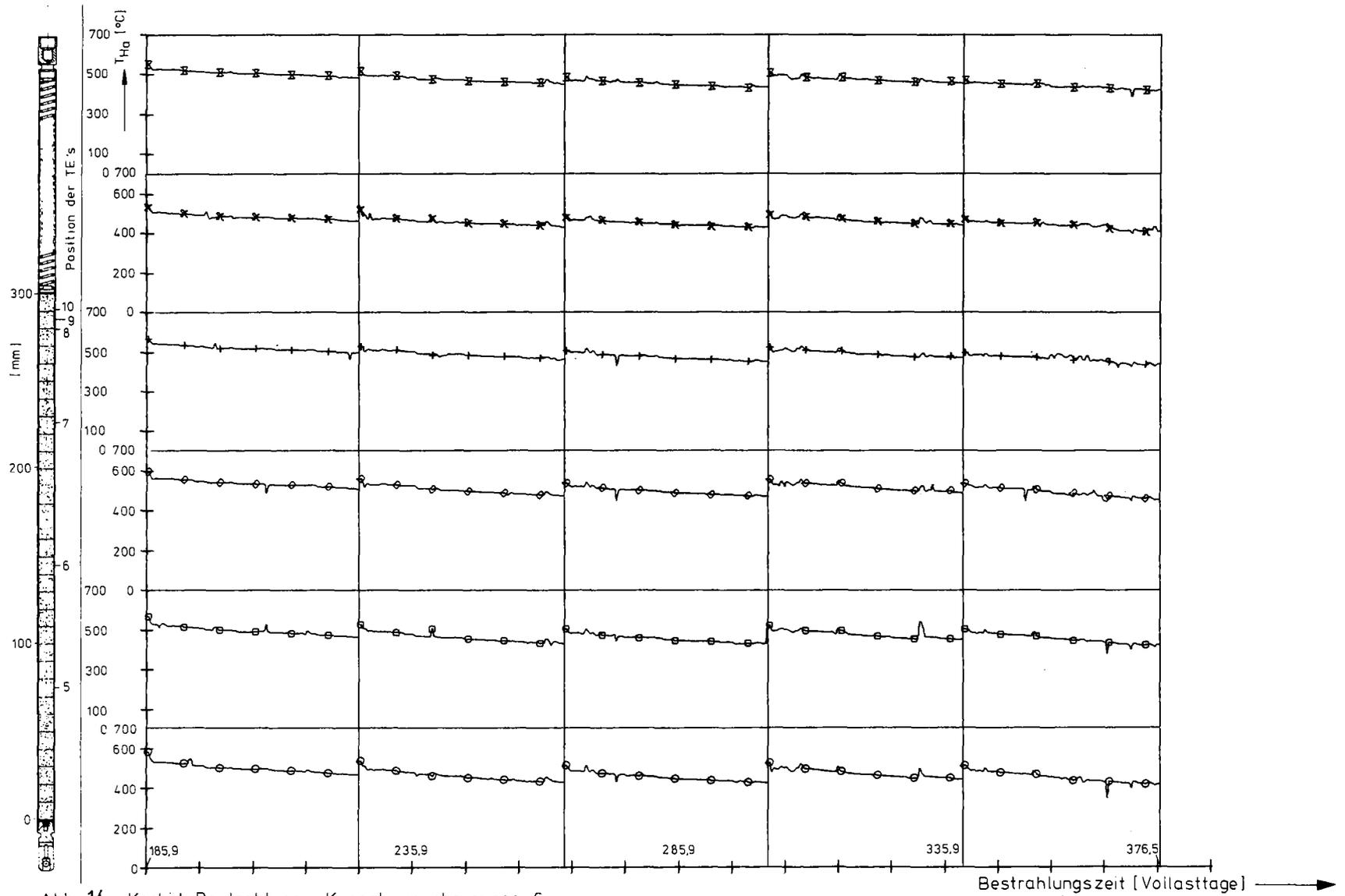


Abb. 14 Karbid-Bestrahlung Kapselversuchsgruppe 6
 KVE 103 Blatt 2 von 2
 Hülloberflächentemperaturen als Funktion der Zeit von Prüfling 6/36

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

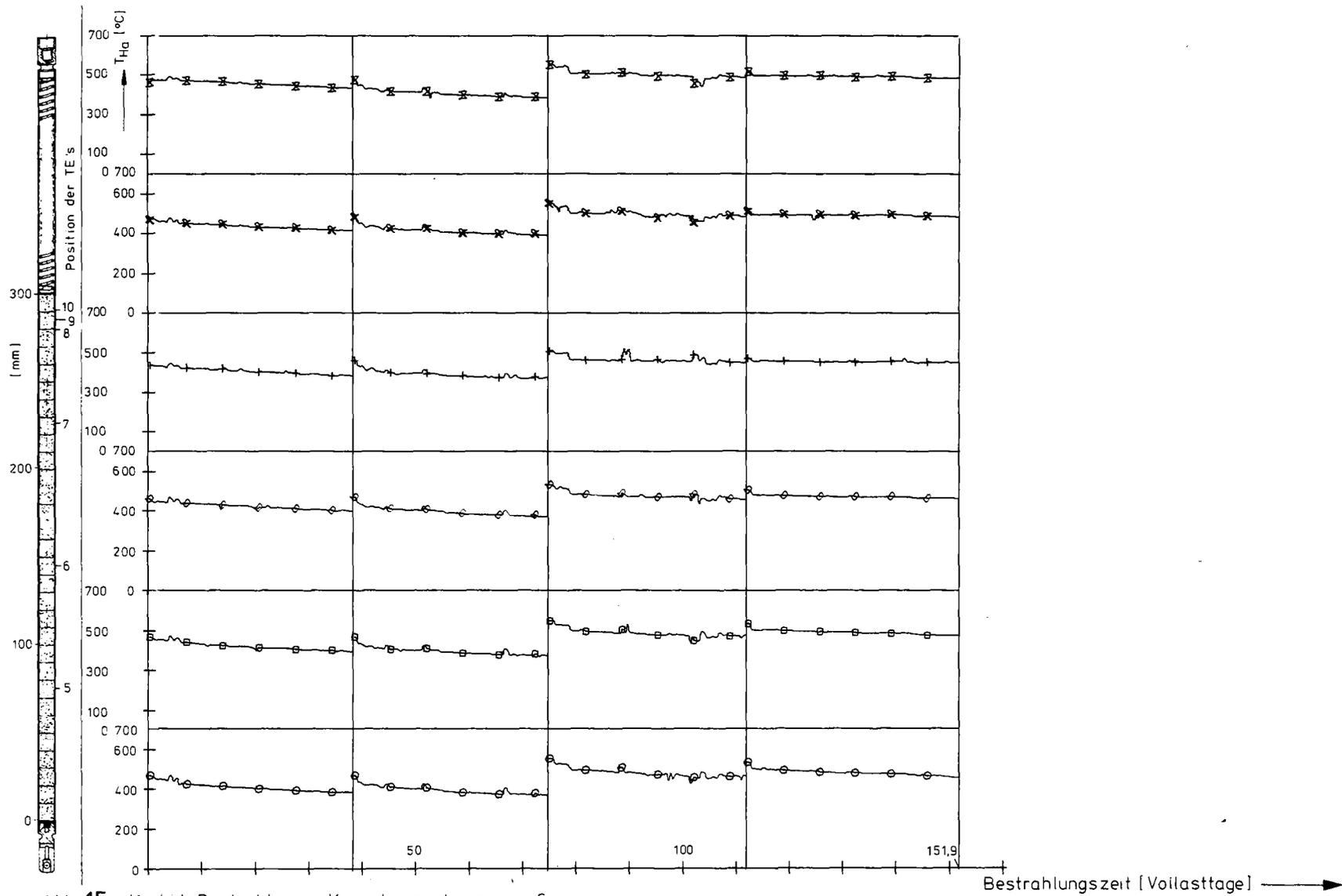


Abb. 15 Karbid-Bestrahlung Kapselversuchsgruppe 6

KVE 104 Blatt 1 von 4

Hüloberflächentemperaturen als Funktion der Zeit von Prüfling 6/11

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

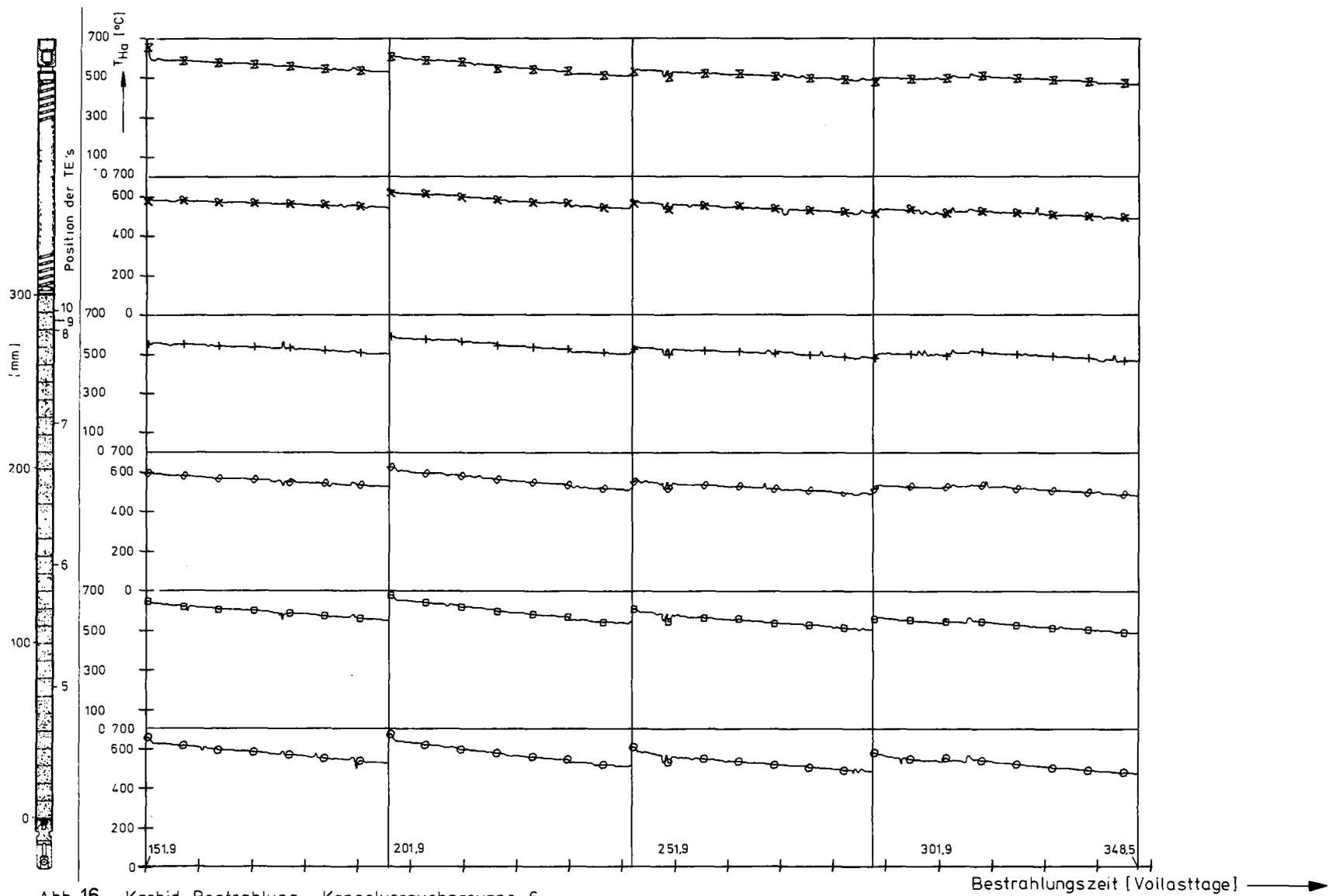


Abb. 16 Karbid-Bestrahlung Kapselversuchsgruppe 6

KVE 104 Blatt 2 von 4

Hüloberflächentemperaturen als Funktion der Zeit von Prüfling 6/11

Thermoelement Nr.	5	6	7	8	9	10
Zeichen	o	□	◇	+	x	⊗

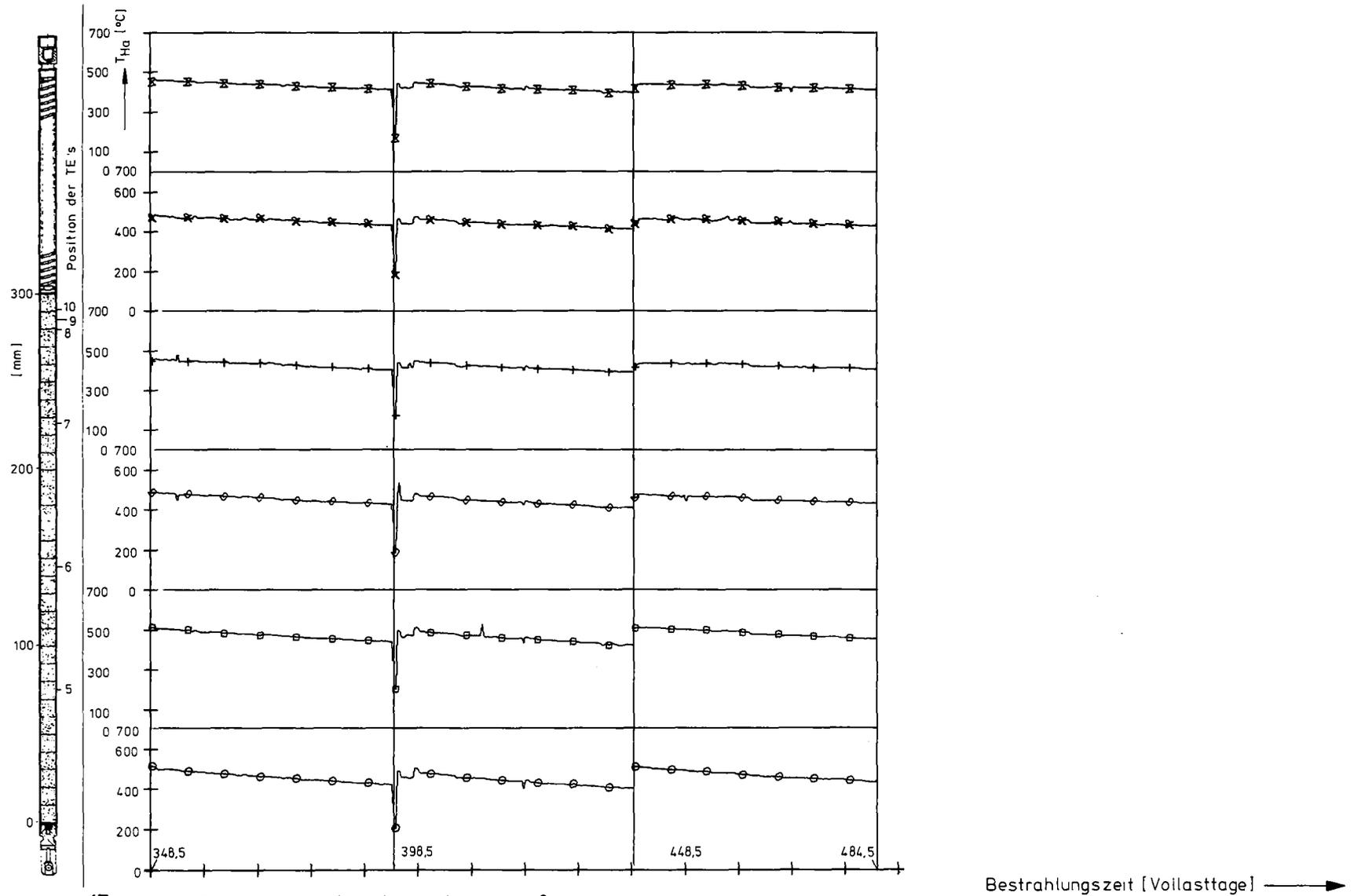


Abb. 17 Karbid-Bestrahlung Kapselversuchsgruppe 6
 KVE 104 Blatt 3 von 4
 Hülloberflächentemperaturen als Funktion der Zeit von Prüfling 6/11

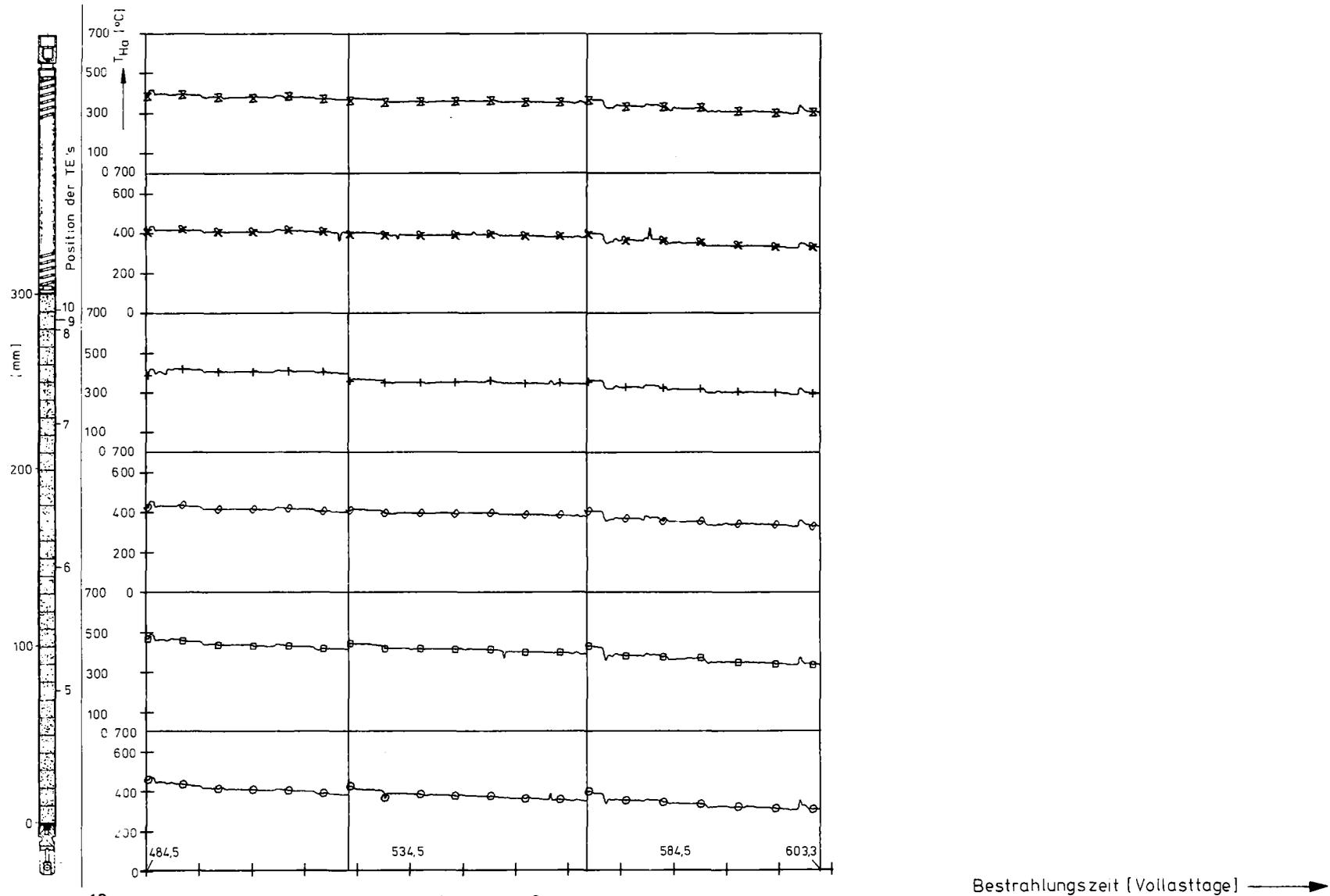


Abb. 18 Karbid-Bestrahlung Kapselversuchsgruppe 6
 KVE 104 Blatt 4 von 4
 Hülloberflächentemperaturen als Funktion der Zeit von Prüfling 6/11

Thermoelement Nr	5	6	7	8	9	10
Zeichen	o	□	◇	+	x	⊗

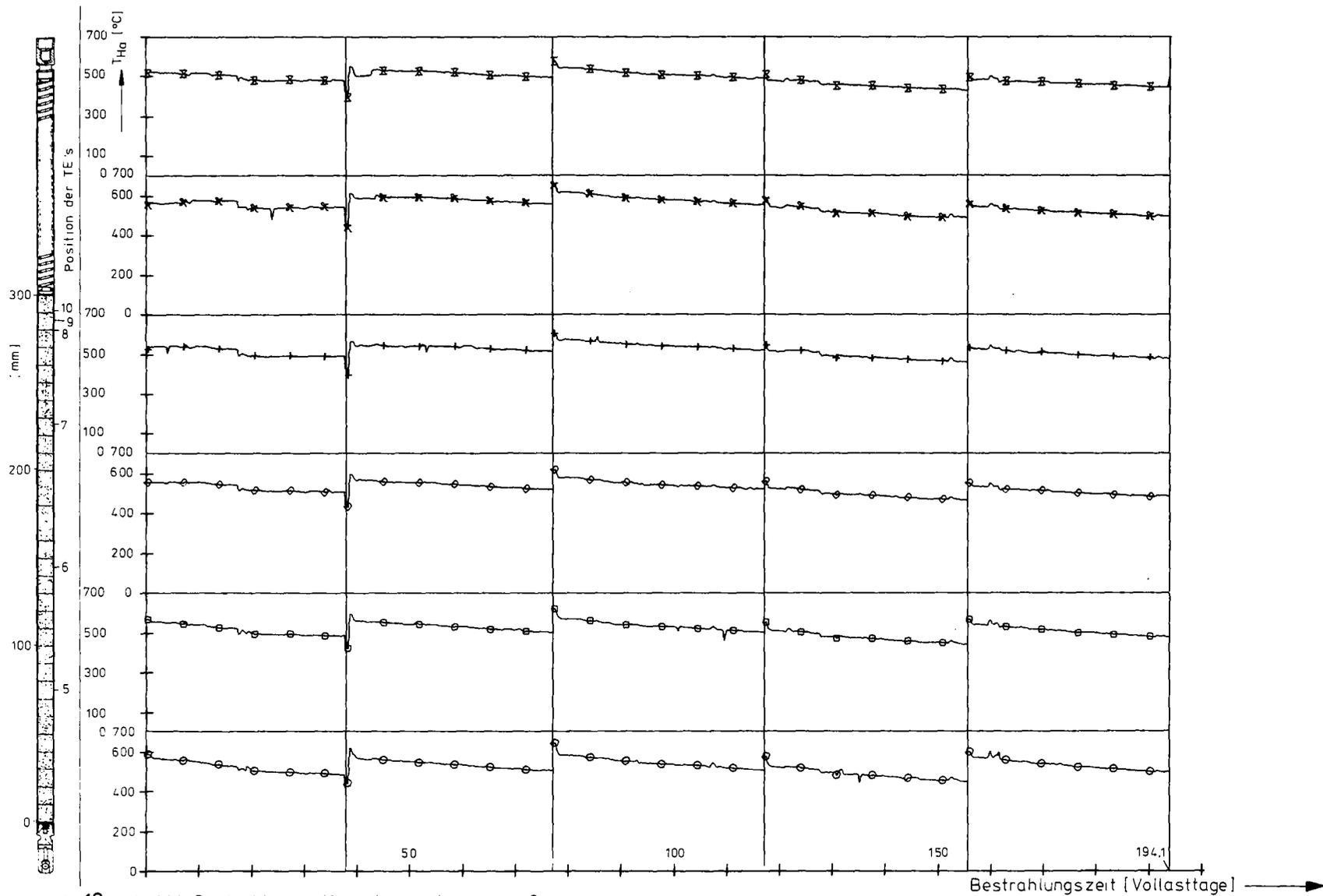


Abb. 19 Karbid-Bestrahlung Kapselversuchsgruppe 6
 KVE 108 Blatt 1 von 2
 Hülloberflächentemperaturen als Funktion der Zeit von Prüfling 6/12

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

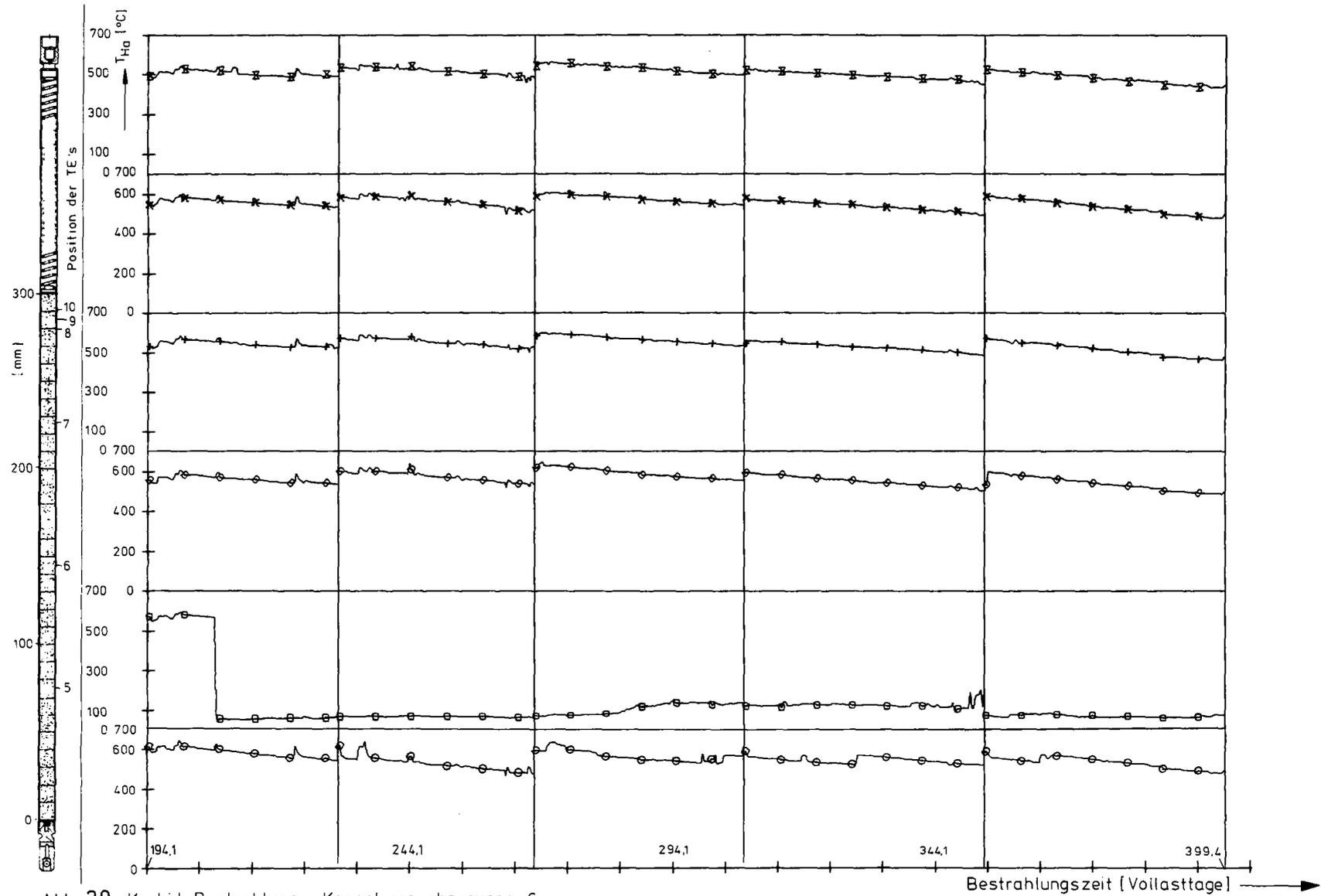


Abb. 20 Karbid-Bestrahlung Kapselversuchsgruppe 6
 KVE 108 Blatt 2 von 2
 Hülloberflächentemperaturen als Funktion der Zeit von Prüfling 6/12

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

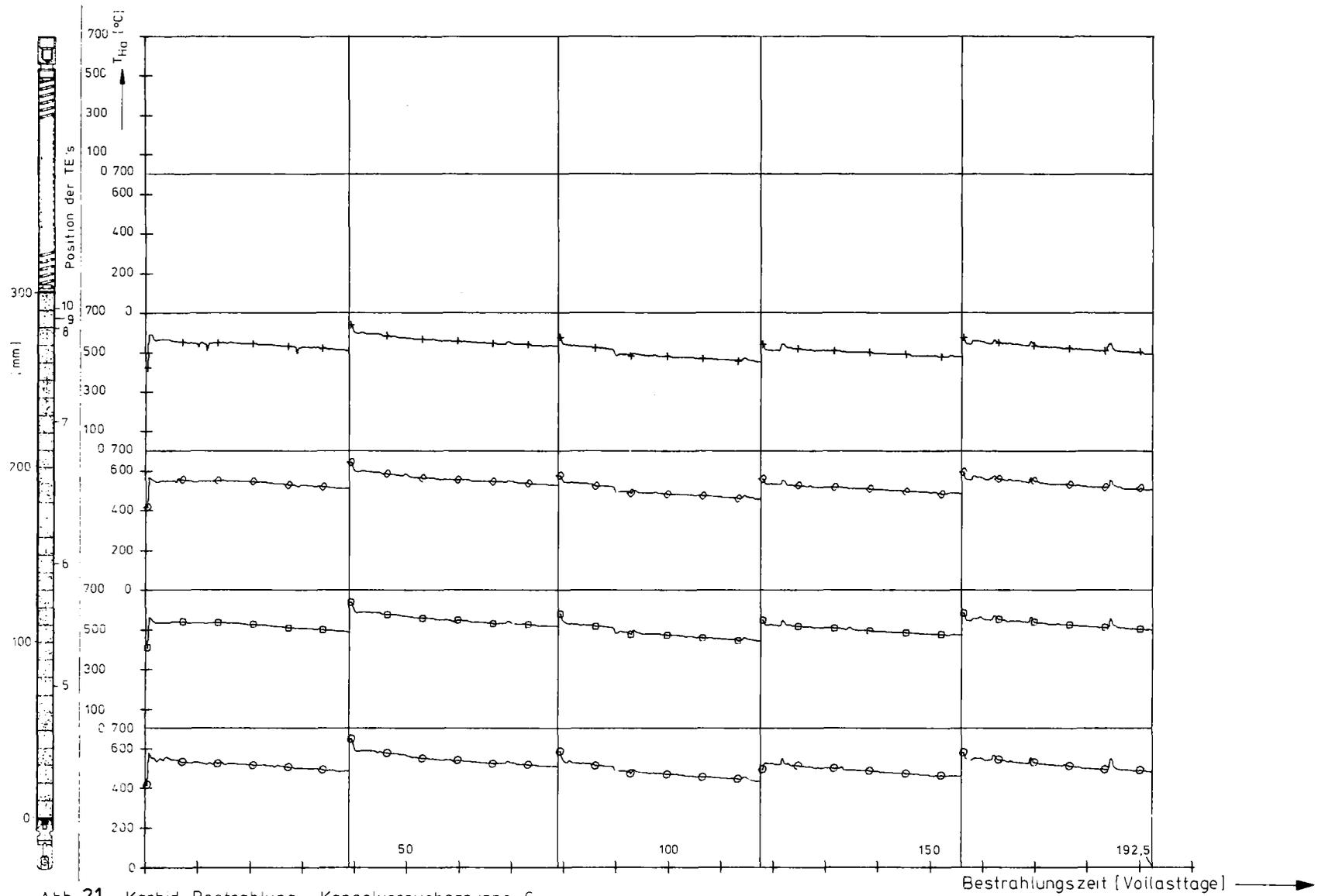


Abb. 21 Karbid-Bestrahlung Kapselversuchsgruppe 6
 KVE 110 Blatt 1 von 3
 Hulloberflächentemperaturen als Funktion der Zeit von Prüfling 6/14

Thermoelement Nr	6	7	8	10
Zeichen	○	□	◇	+

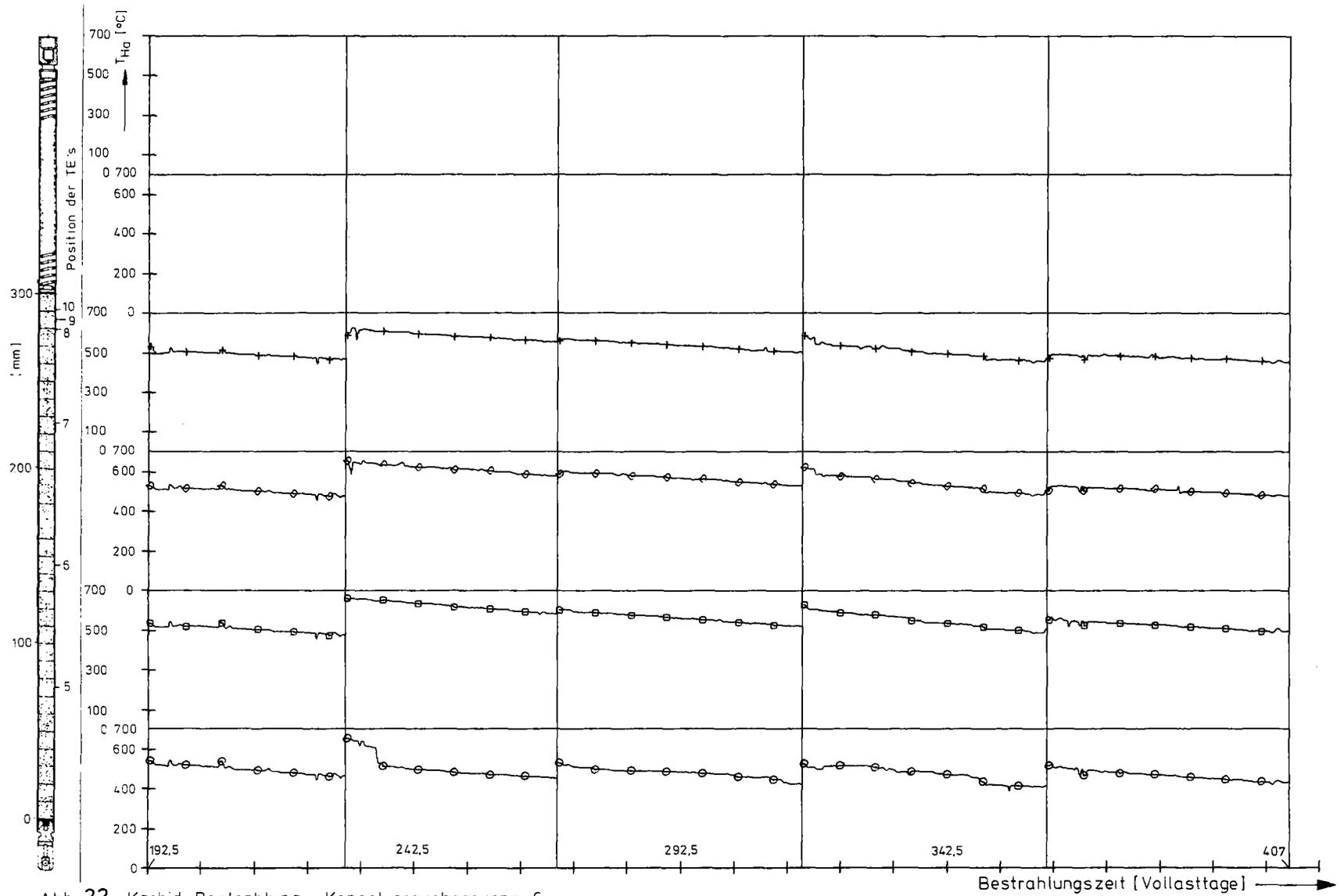


Abb. 22 Karbid-Bestrahlung Kapselversuchsgruppe 6
 KVE 110 Blatt 2 von 3
 Hülloberflächentemperaturen als Funktion der Zeit von Prüfling 6/14

Thermoelement Nr	6	7	8	10
Zeichen	○	□	◇	+

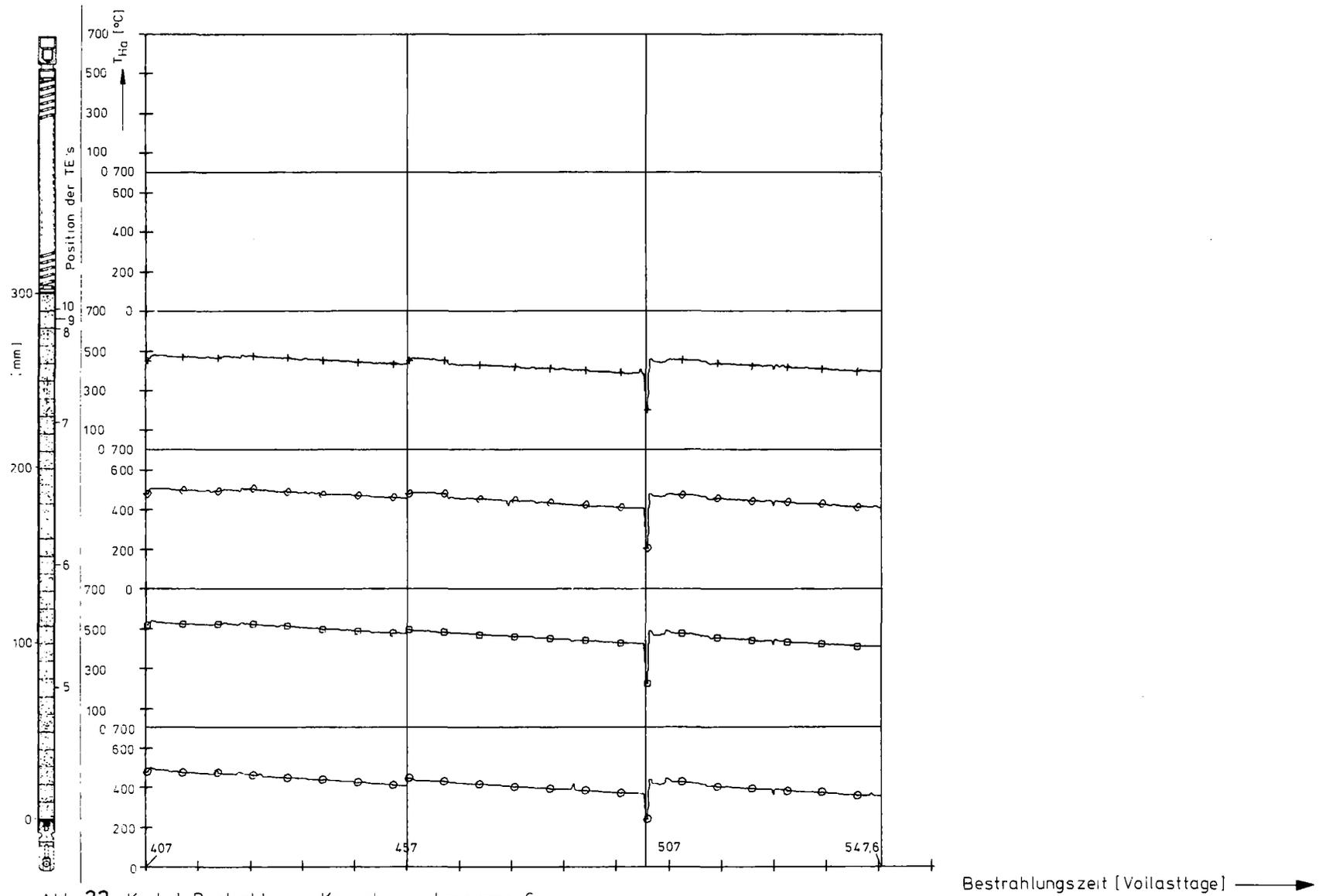


Abb. 23 Karbid-Bestrahlung Kapselversuchsgruppe 6
 KVE 110 Blatt 3 von 3
 Hülloberflächentemperaturen als Funktion der Zeit von Prüfling 6/14

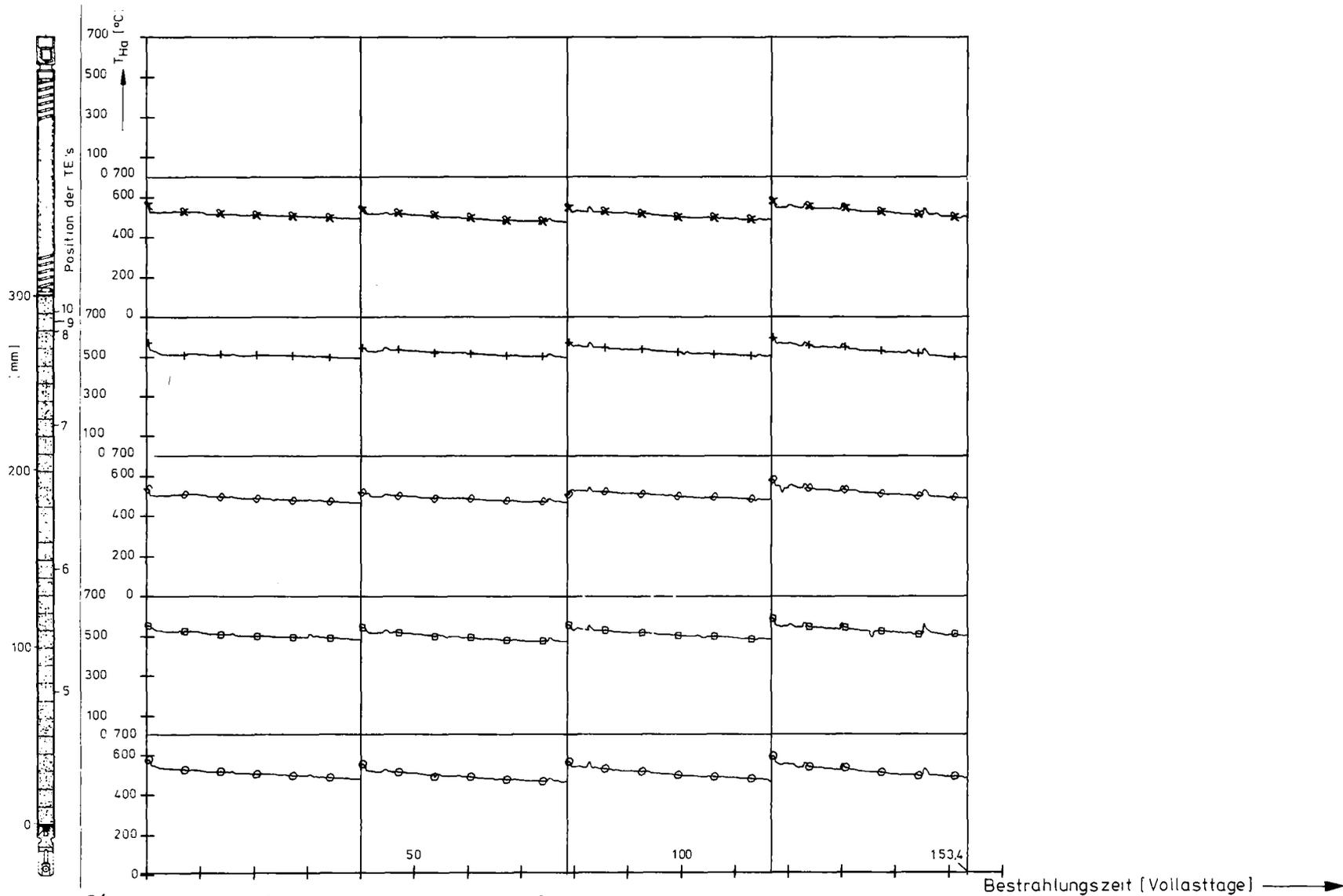


Abb. 24 Karbid-Bestrahlung Kapselversuchsgruppe 6
 KVE 111 Blatt 1 von 2
 Hülloberflächentemperaturen als Funktion der Zeit von Prüfling 6/15

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

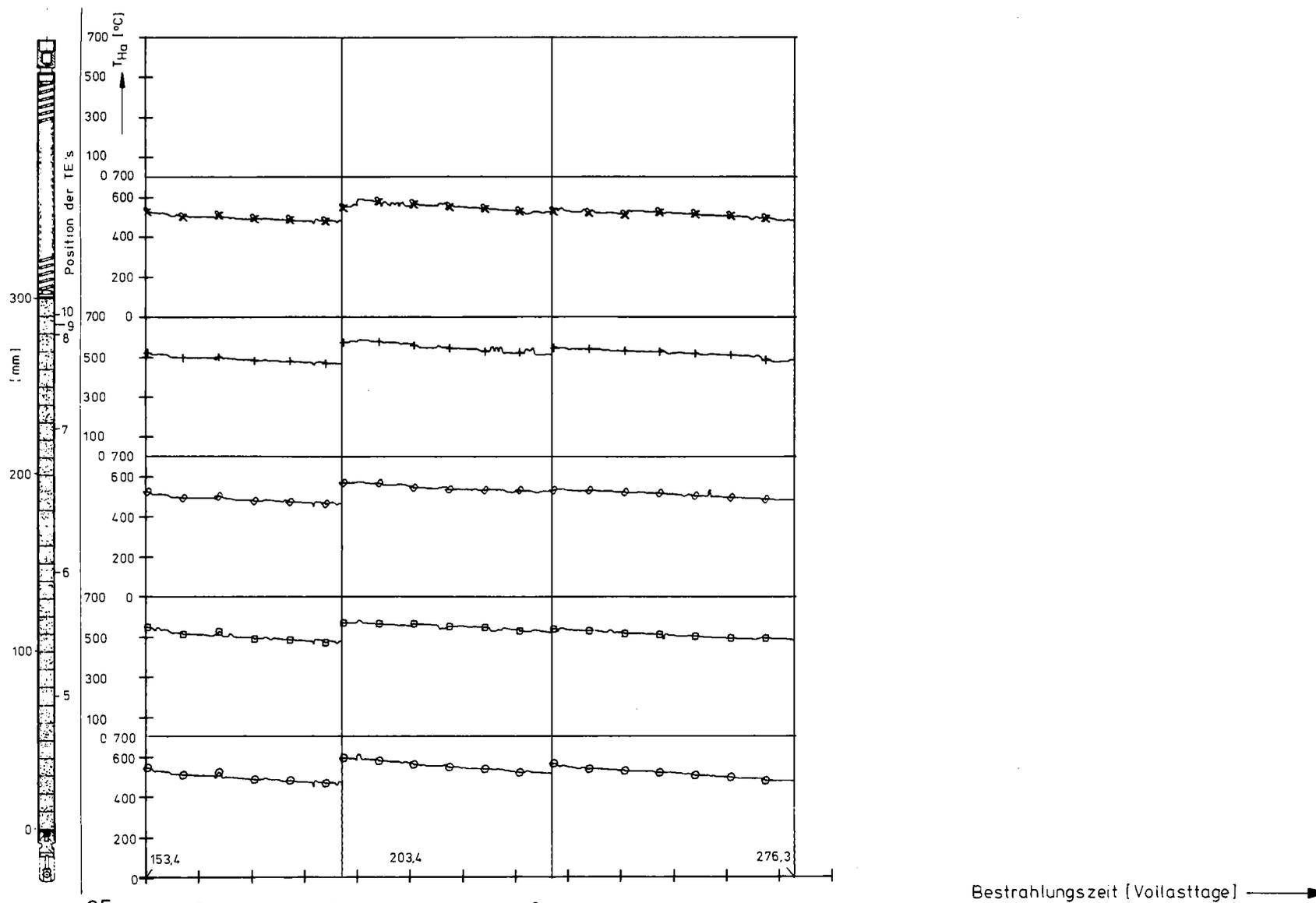


Abb. 25 Karbid-Bestrahlung Kapselversuchsgruppe 6
 KVE 111 Blatt 2 von 2
 Hülloberflächentemperaturen als Funktion der Zeit von Prüfling 6/15

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

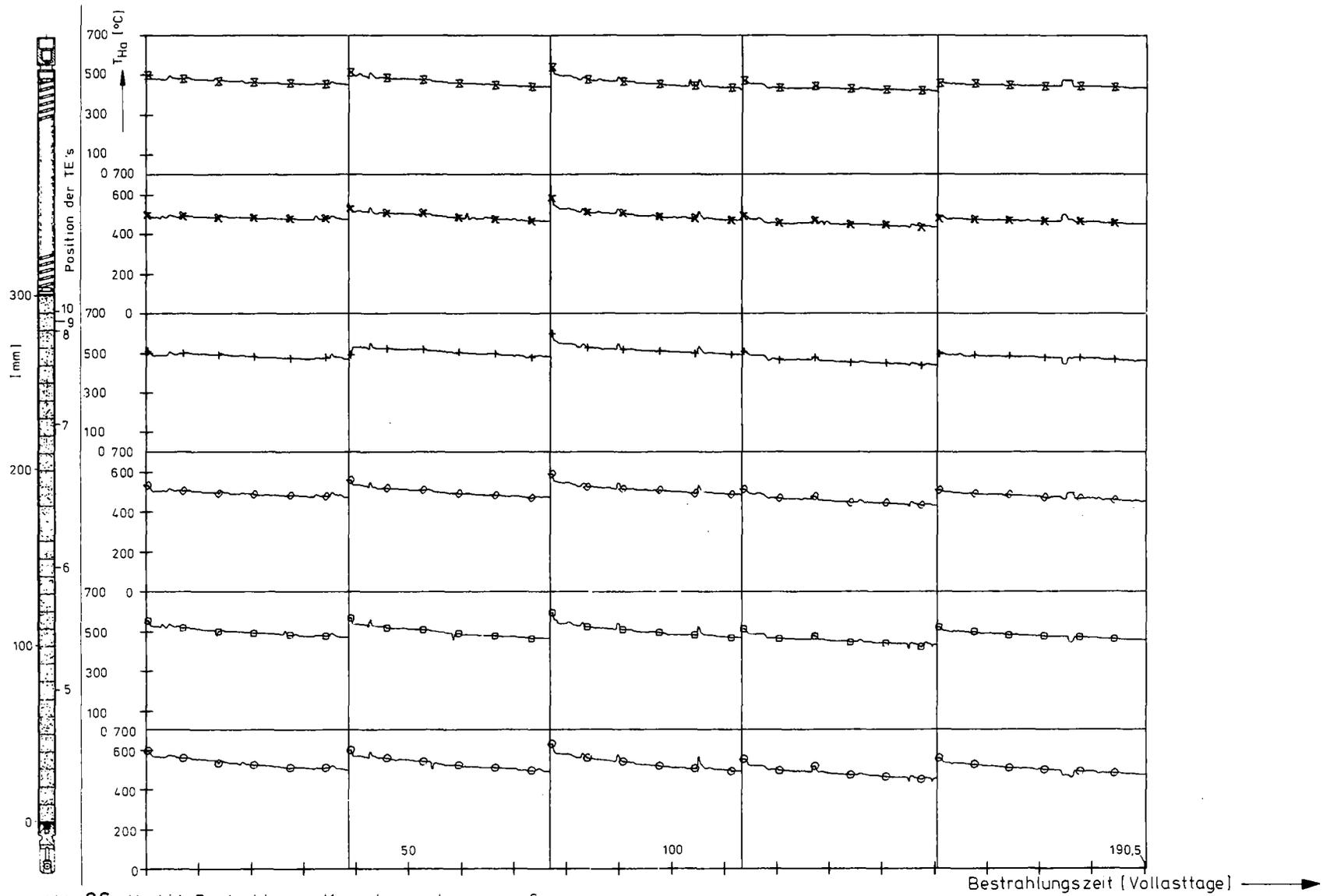


Abb. 26 Karbid-Bestrahlung Kapselversuchsgruppe 6
 KVE 114 Blatt 1 von 1
 Hülloberflächentemperaturen als Funktion der Zeit von Prüfling 6/30

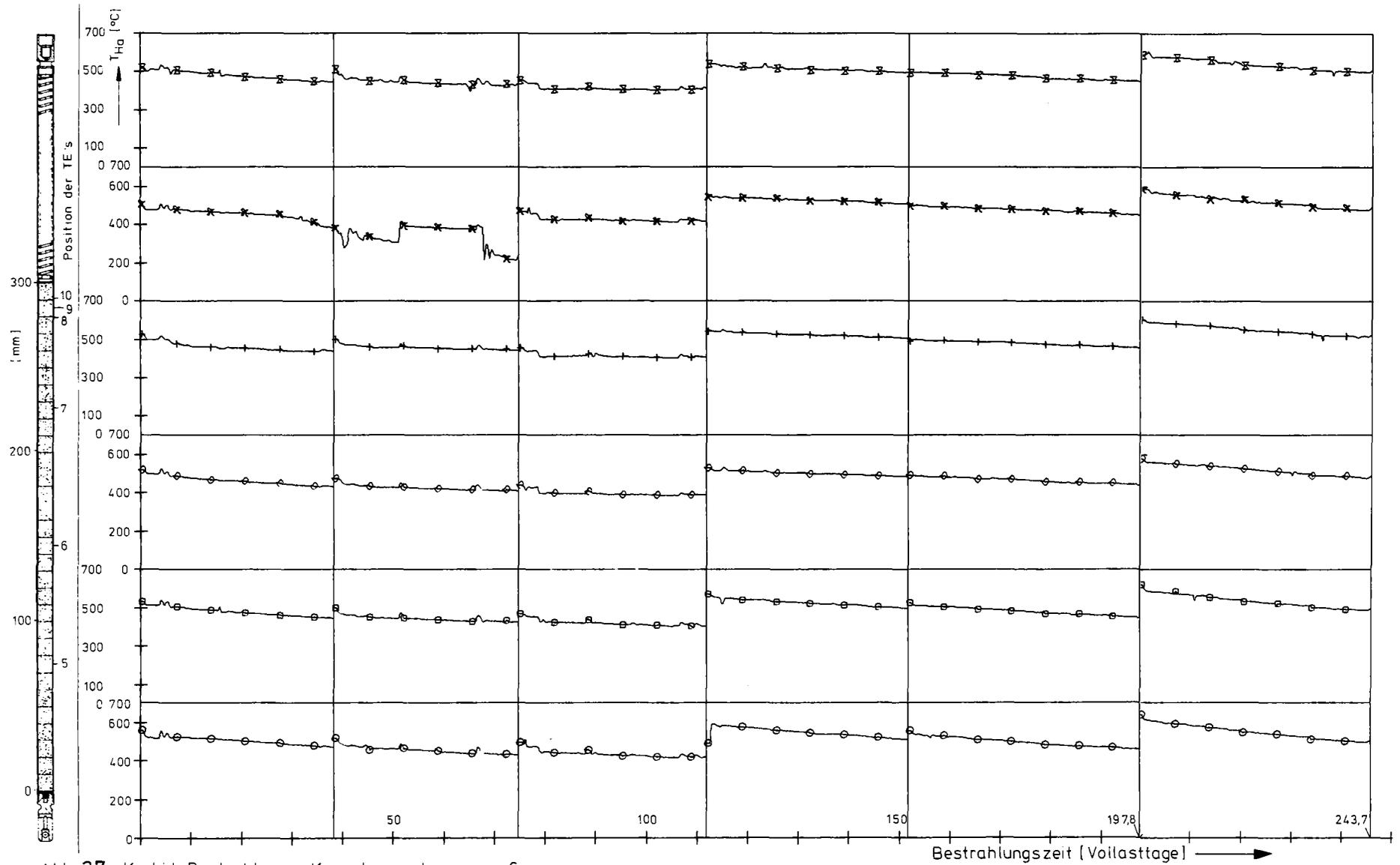


Abb. 27 Karbid-Bestrahlung Kapselversuchsgruppe 6
 KVE 115 Blatt 1 von 2
 Hülloberflächentemperaturen als Funktion der Zeit von Prüfling 6/31

Thermoelement Nr	5	6	7	8	9	10
Zeichen	o	□	◇	+	x	⊗

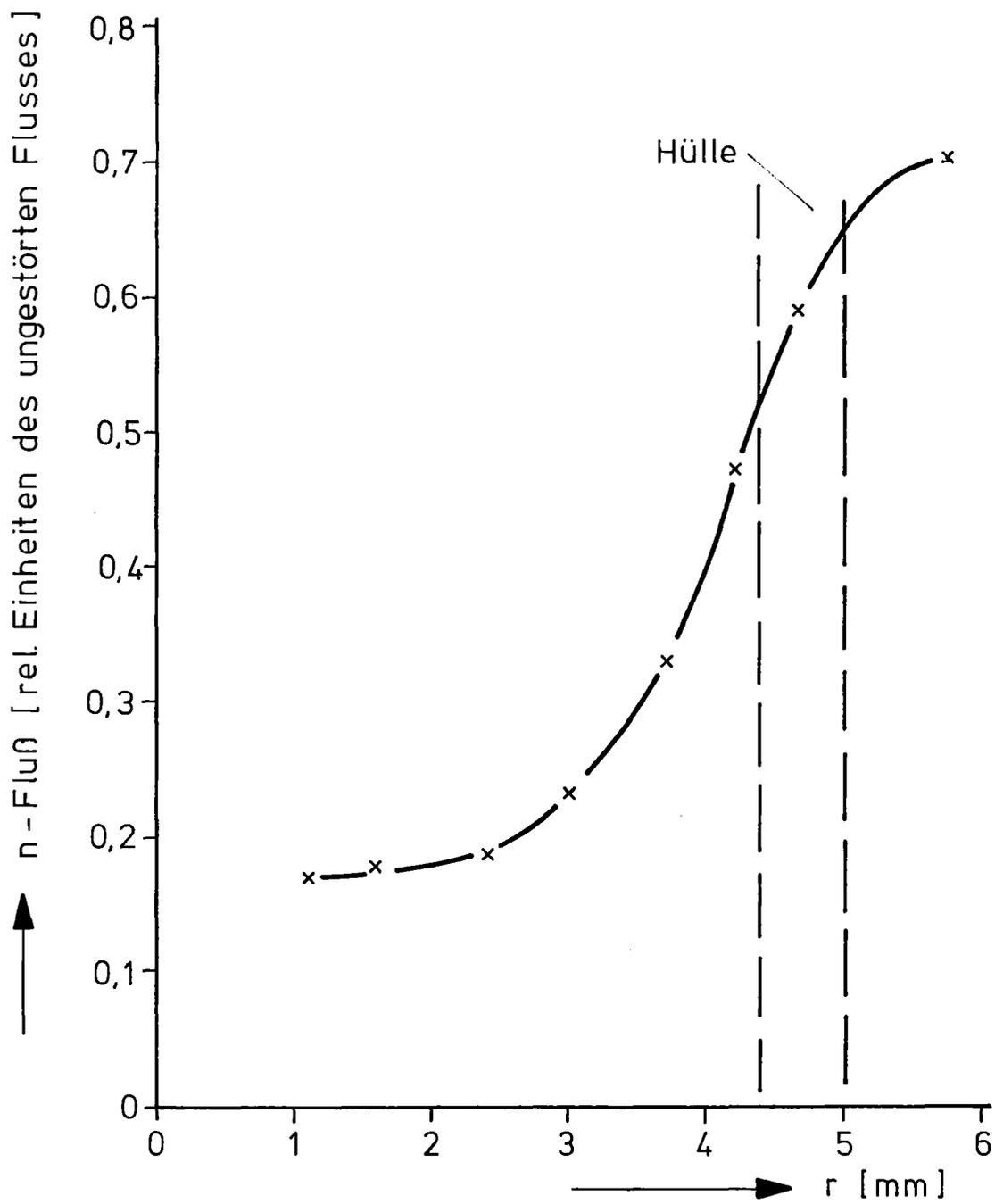


Abb. 28 Flußabsenkung im KVE 108 im ersten Zyklus (gerechnet nach MERKUR)

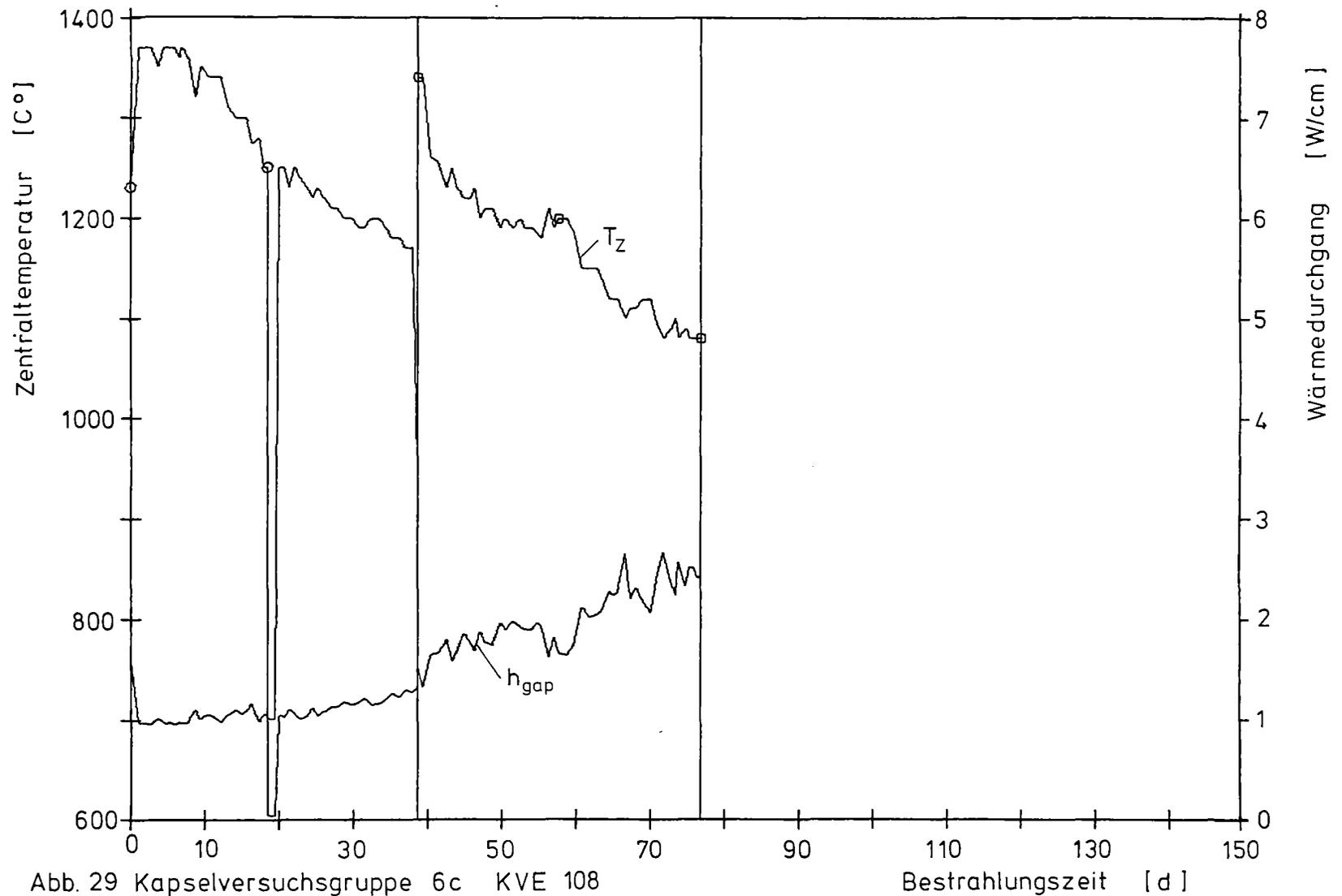


Abb. 29 Kapselversuchsgruppe 6c KVE 108

Zentraltemperatur und Wärmedurchgang

Zeichen
Zyklus Nr.

○	□	◇	+	×	⊗	⊗	△	▽	●
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

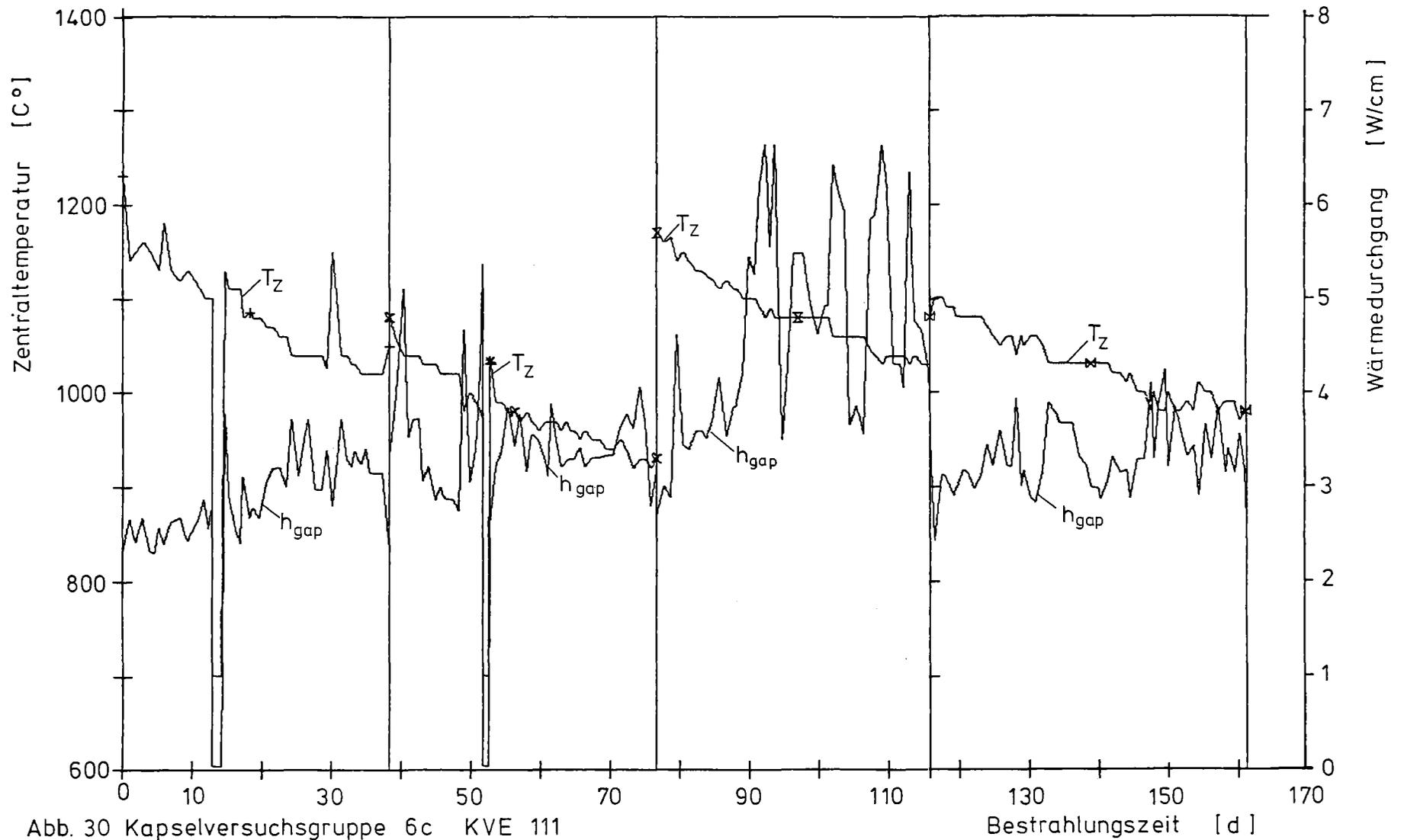


Abb. 30 Kapselversuchsgruppe 6c KVE 111

Zentraltemperatur und Wärmedurchgang

Zeichen	○	□	◇	+	×	⊗	⊗	△	▽	●
Zyklus Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

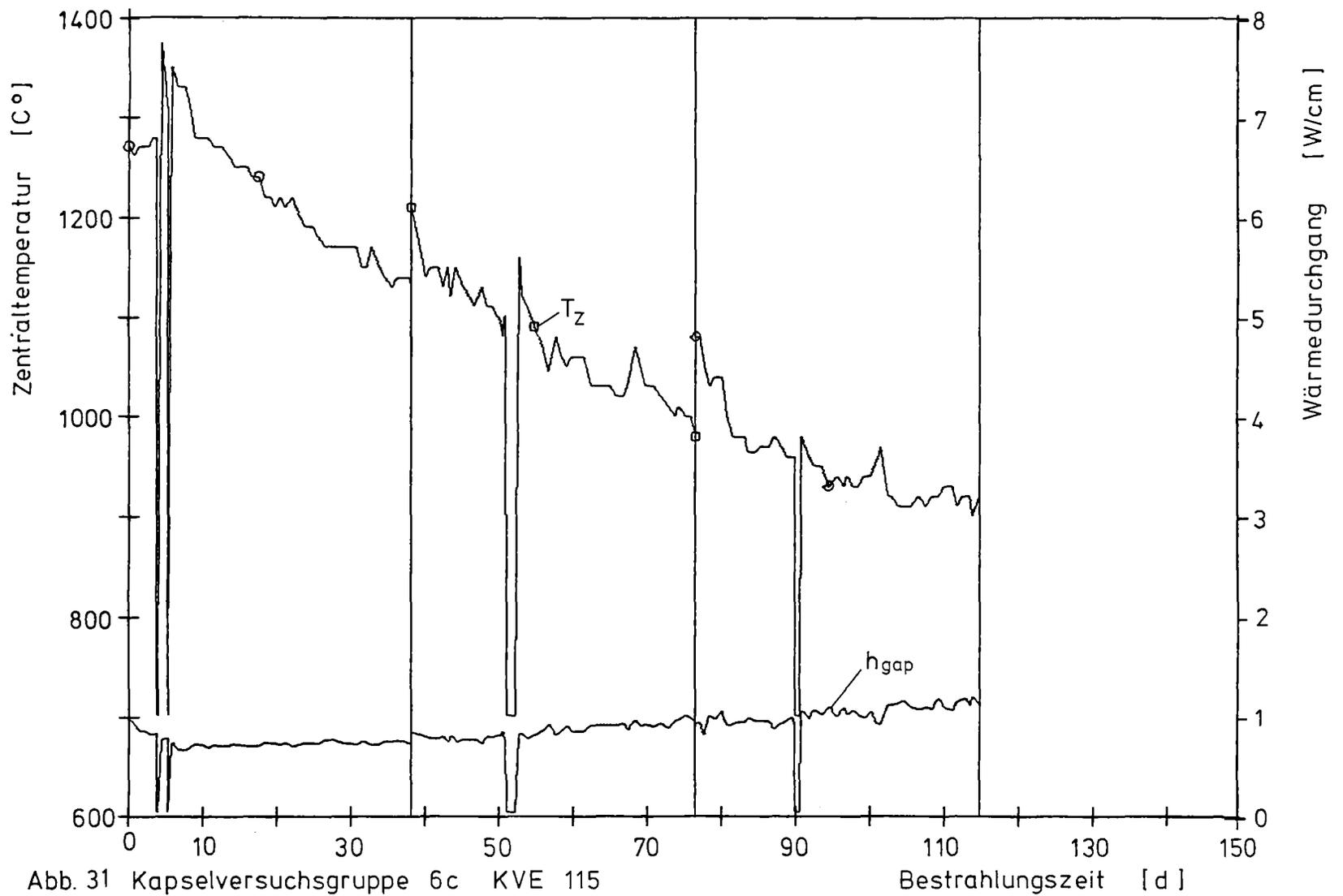


Abb. 31 Kapselversuchsgruppe 6c KVE 115

Zentraltemperatur und Wärmedurchgang

Zeichen

Zyklus Nr.

○	□	◇	+	×	⊗	⊗	△	▽	●
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

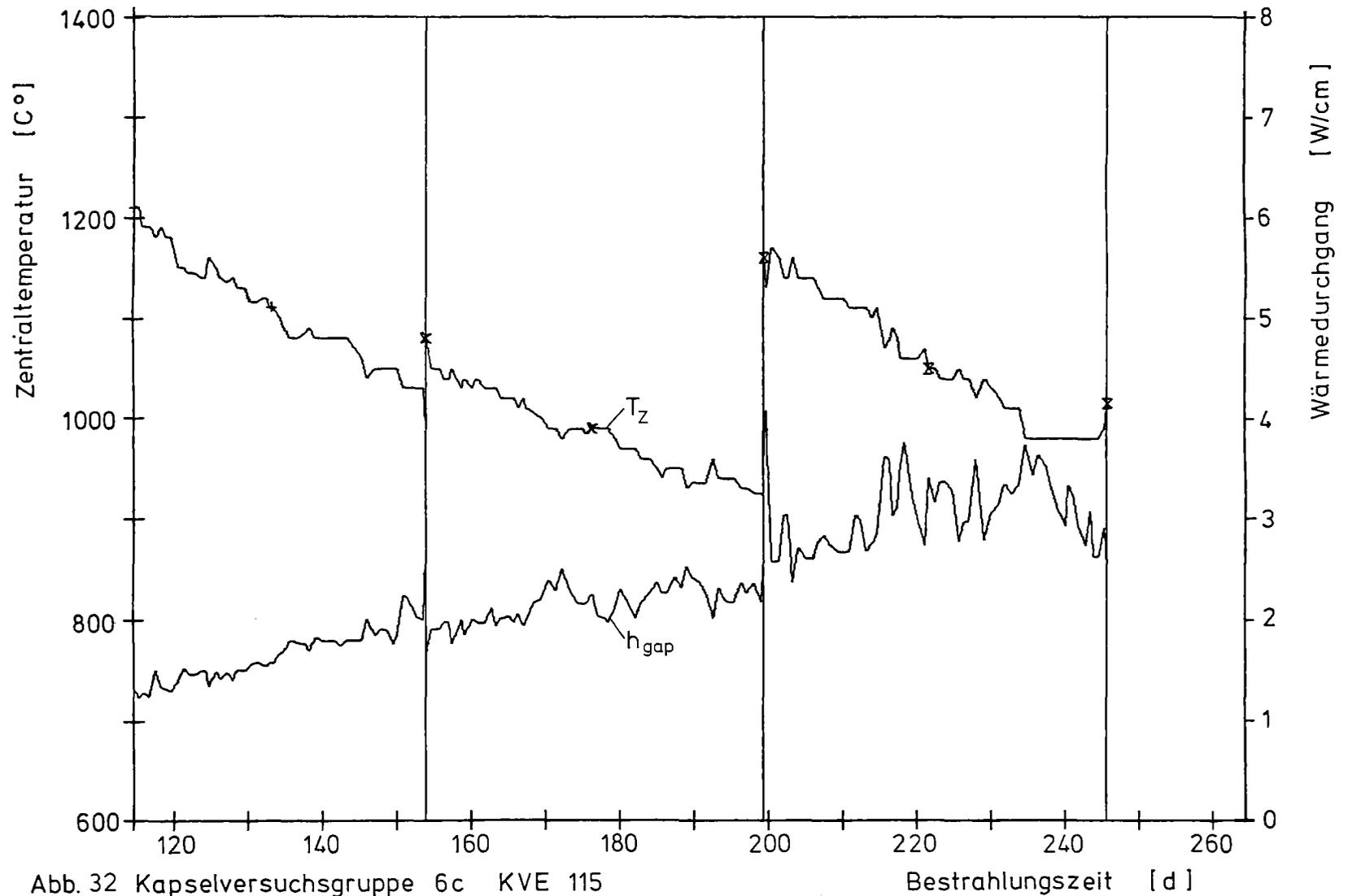
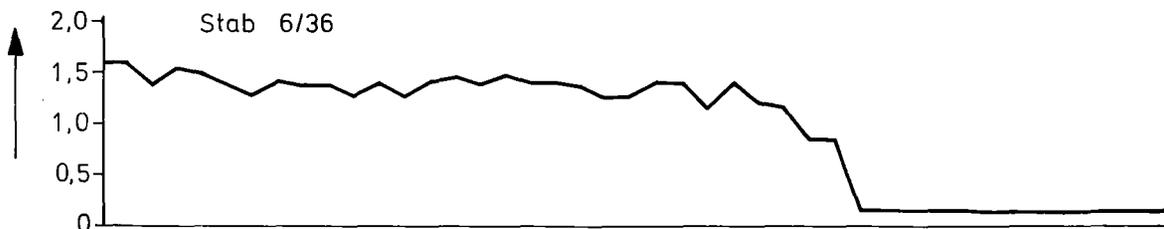
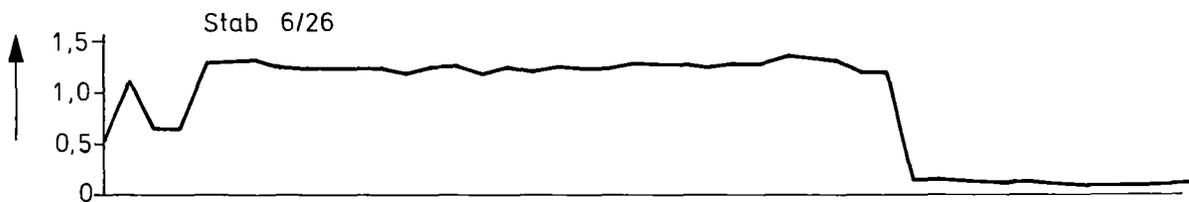
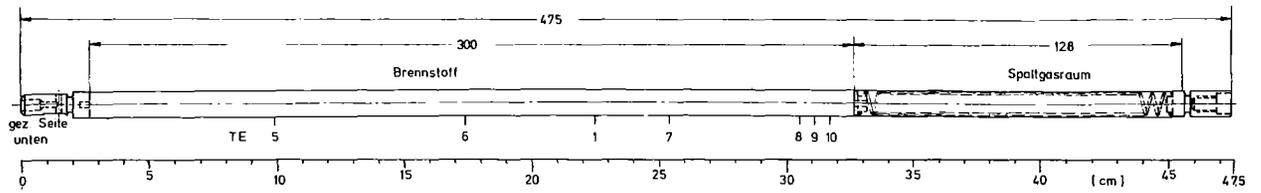


Abb. 32 Kapselversuchsgruppe 6c KVE 115

Zentraltemperatur und Wärmedurchgang

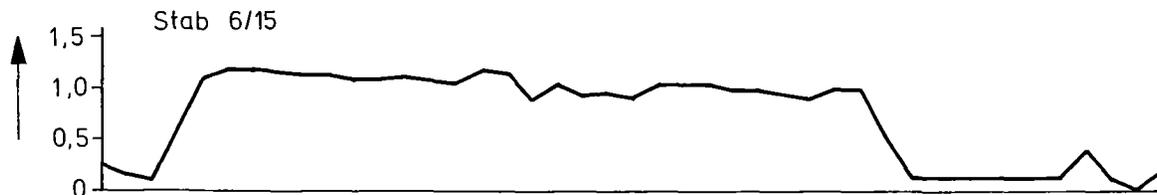
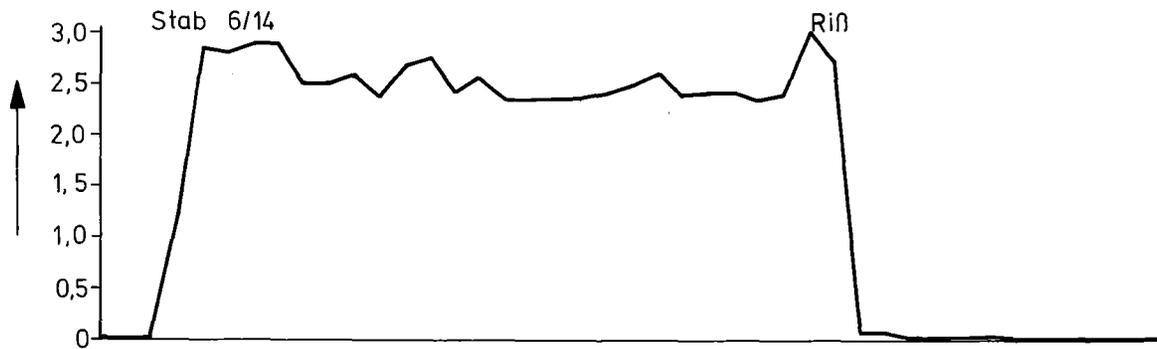
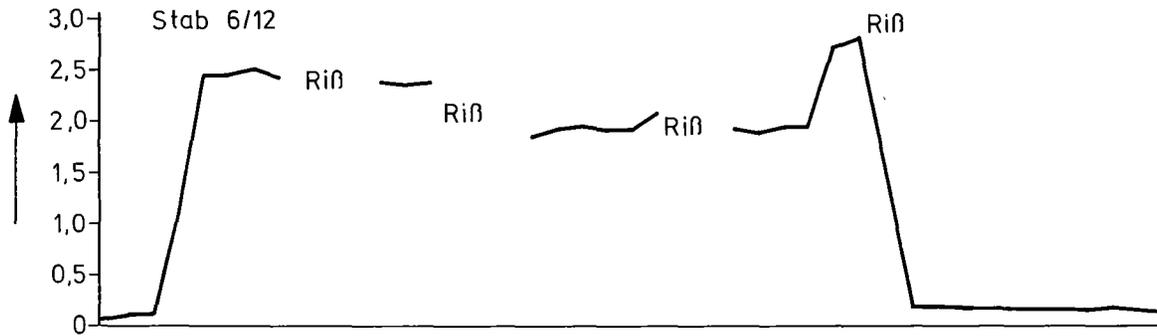
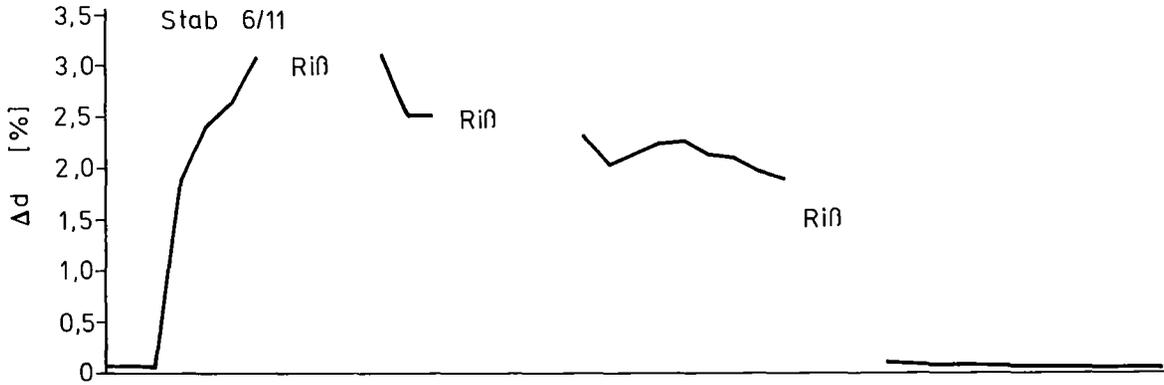
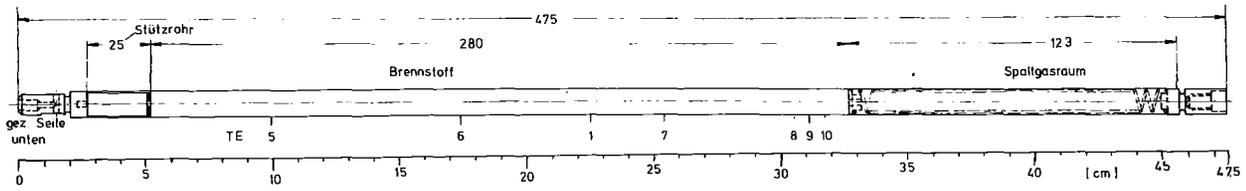
Zeichen
Zyklus Nr.

○	□	◇	+	×	⊗	∞	△	▽	●
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10



Durchmesser nach der Bestrahlung
von Versuchsgruppe 6a

Abb. 33



Durchmesser nach der Bestrahlung von Versuchsgruppe 6c

Abb. 34

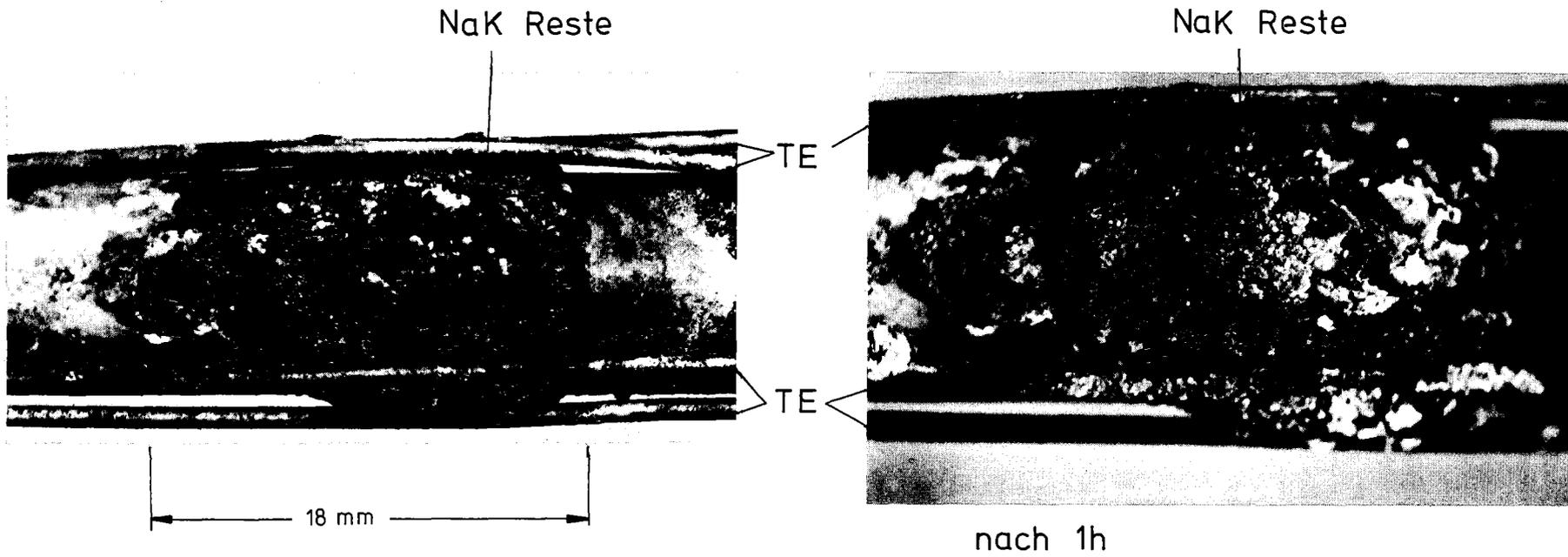
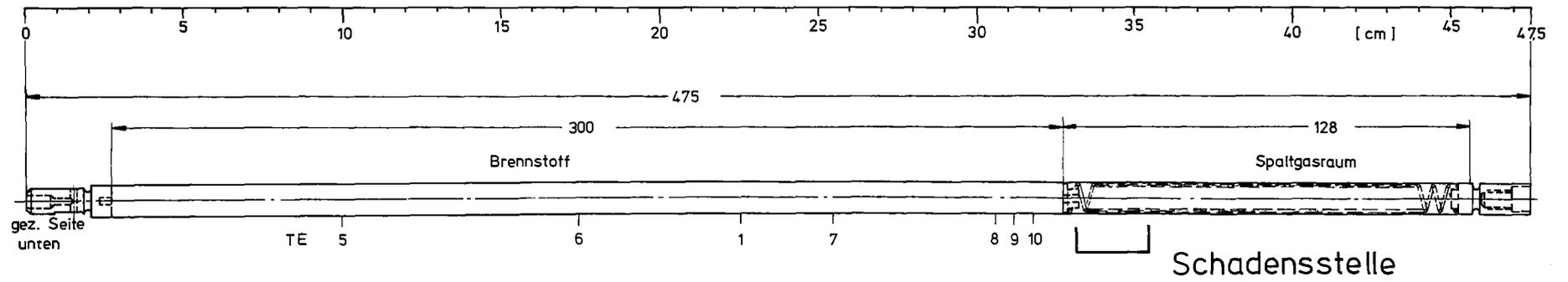
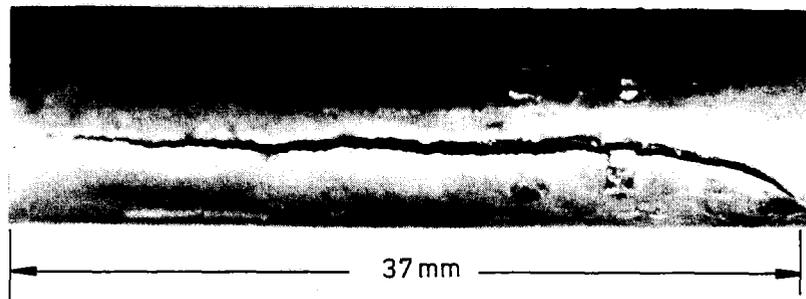
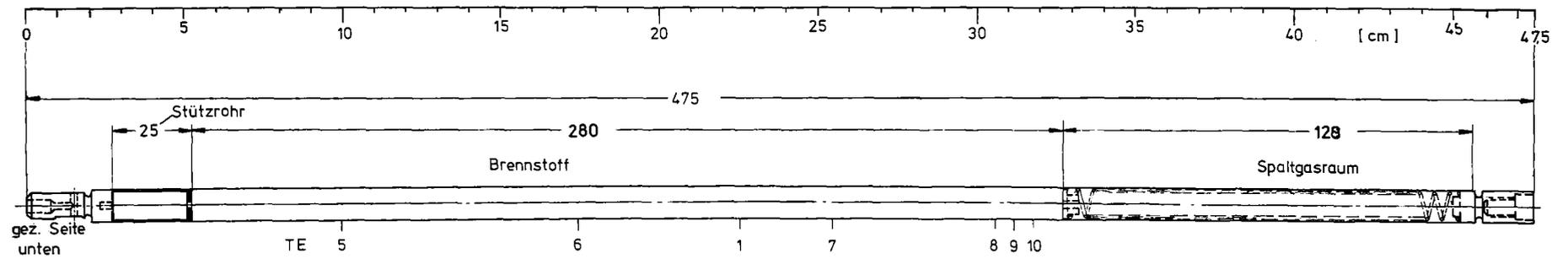
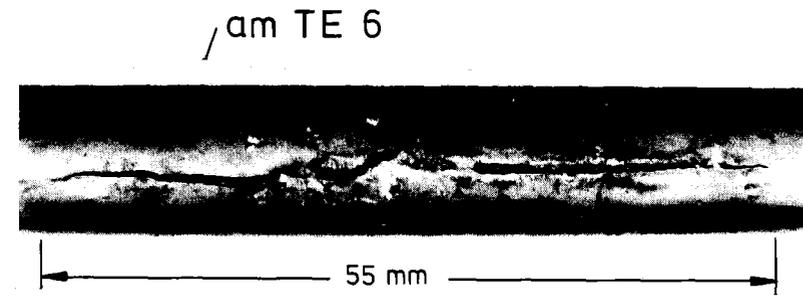
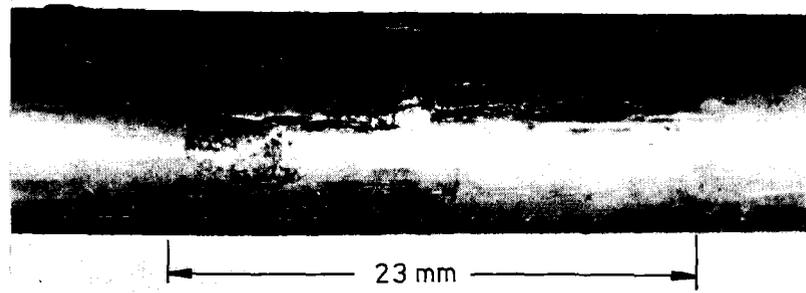


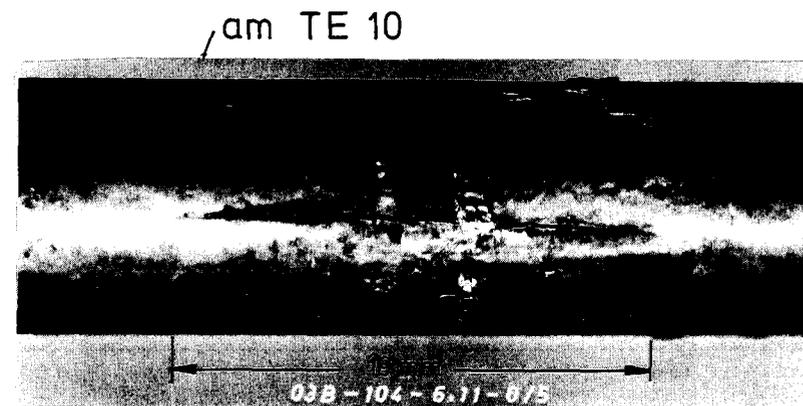
Abb. 35 Detailaufnahmen der Schadensstelle von Stab 6/27 im Zeitabstand 1h



am TE 5



am TE 6



am TE 10

Abb. 36 Detailaufnahmen der Schadensstellen von Stab 6/11

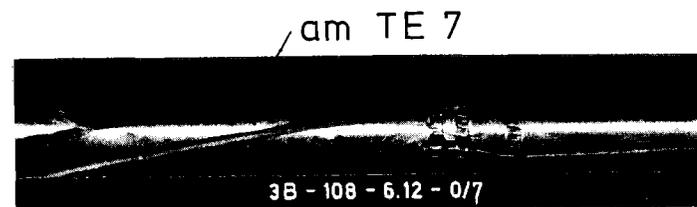
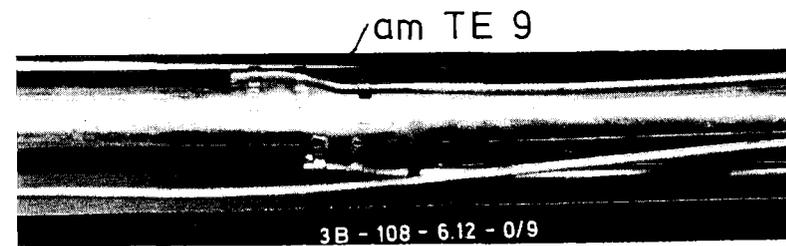
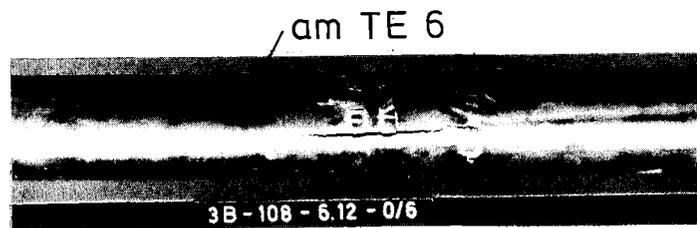
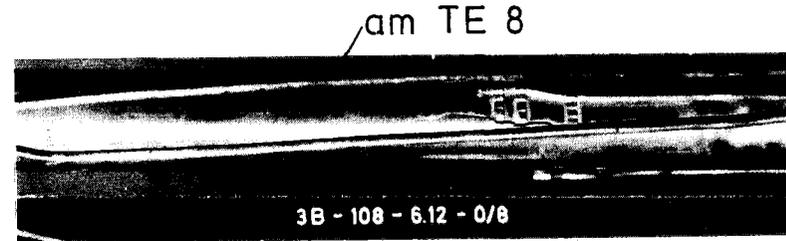
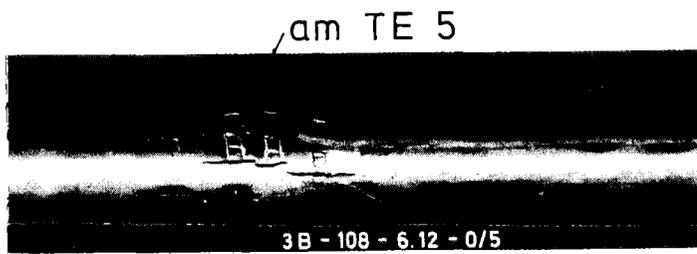
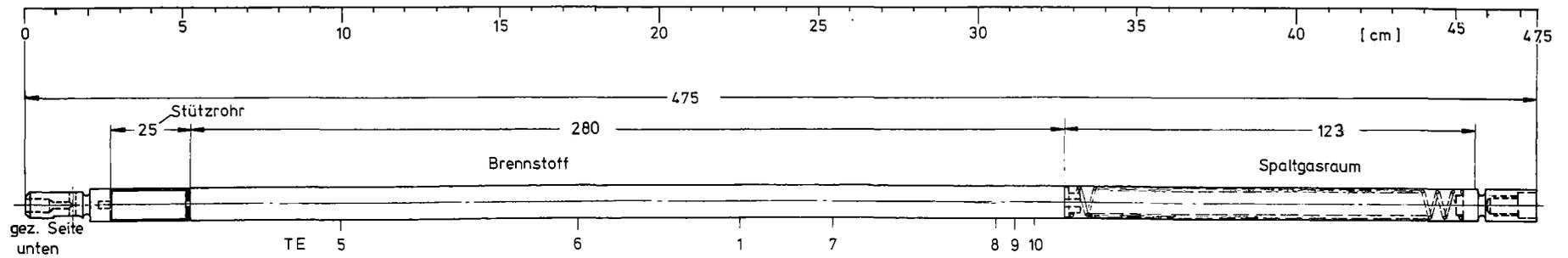


Abb. 37 Detailaufnahmen der Schadensstellen von Stab 6/12

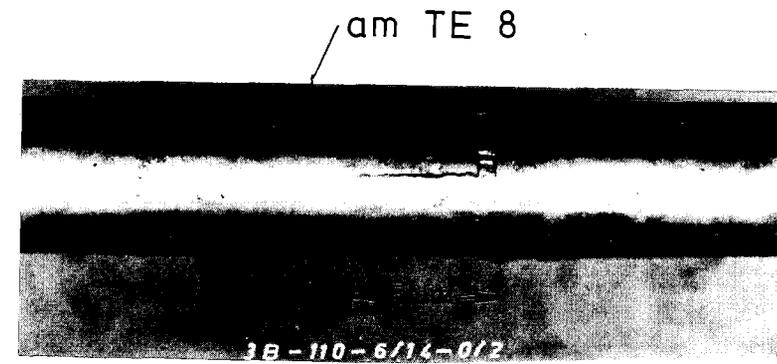
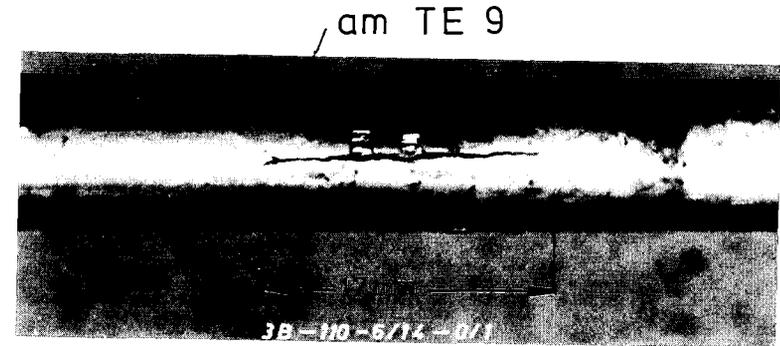
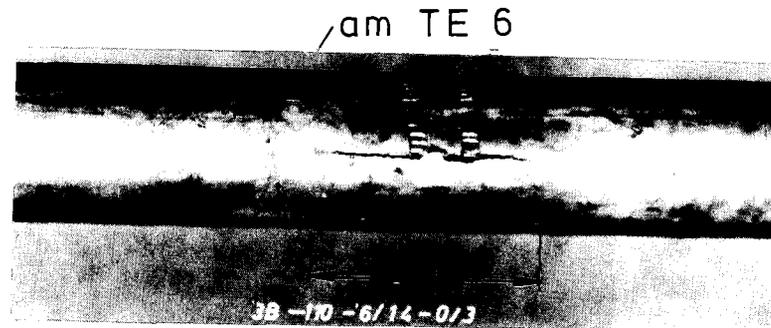
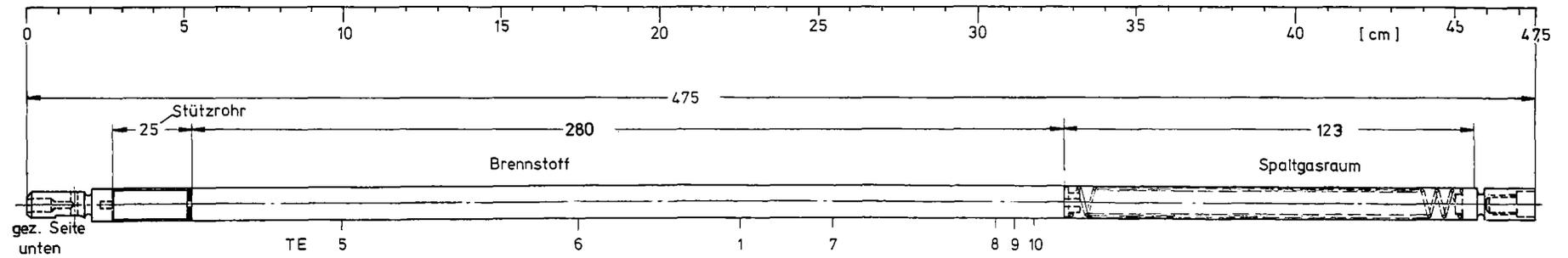
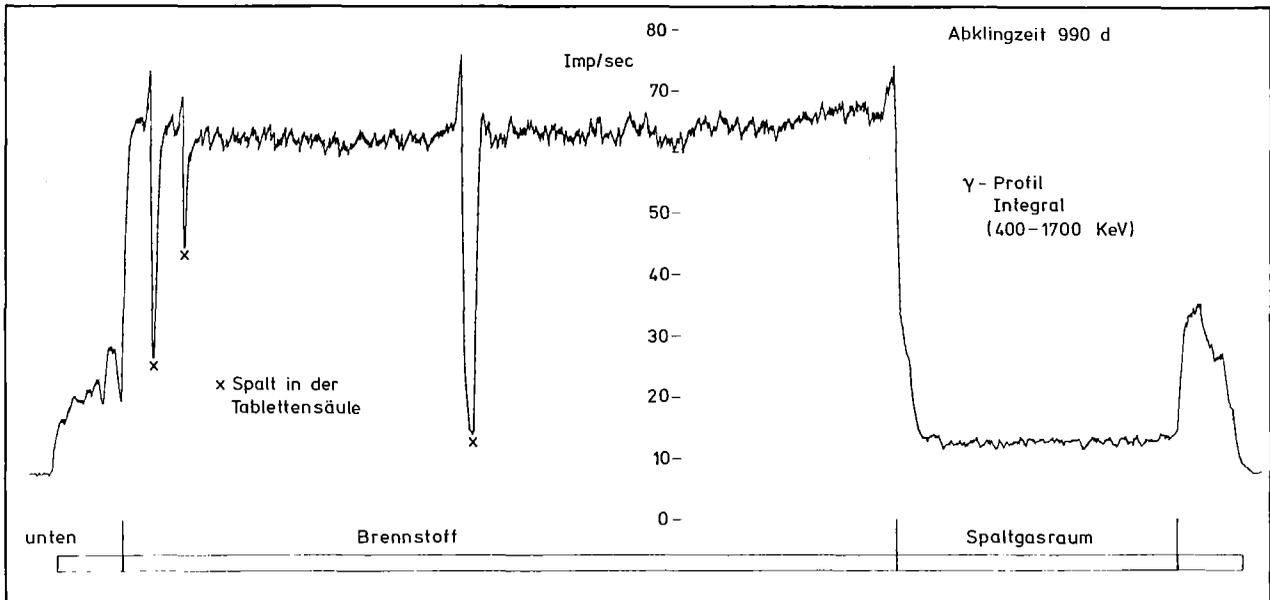


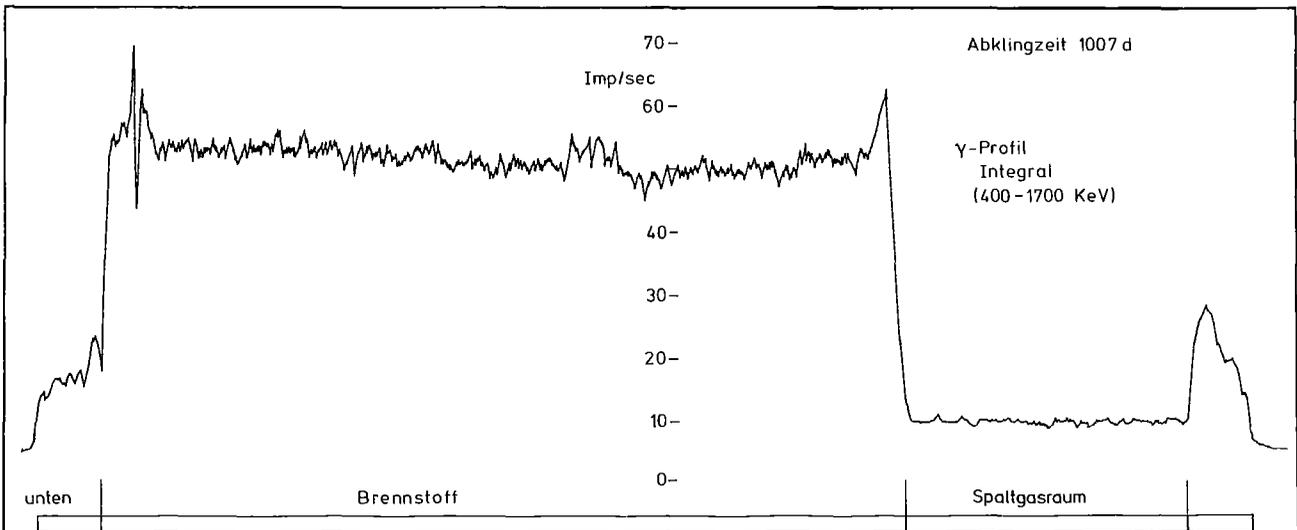
Abb. 38 Detailaufnahmen der Schadensstellen von Stab 6/14



GfK Karlsruhe
IMF/III

γ-Profile von Prüfling 6/1

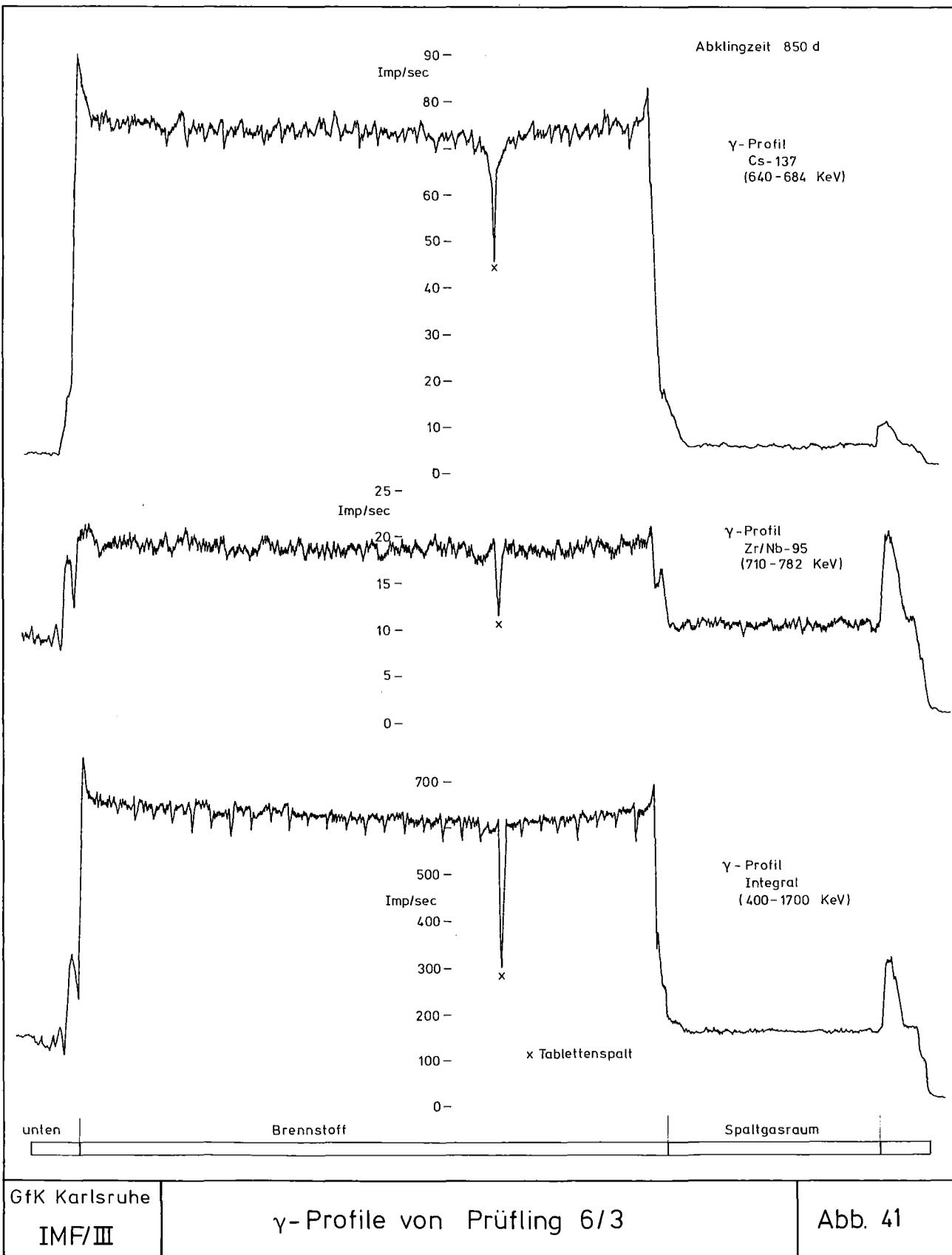
Abb. 39

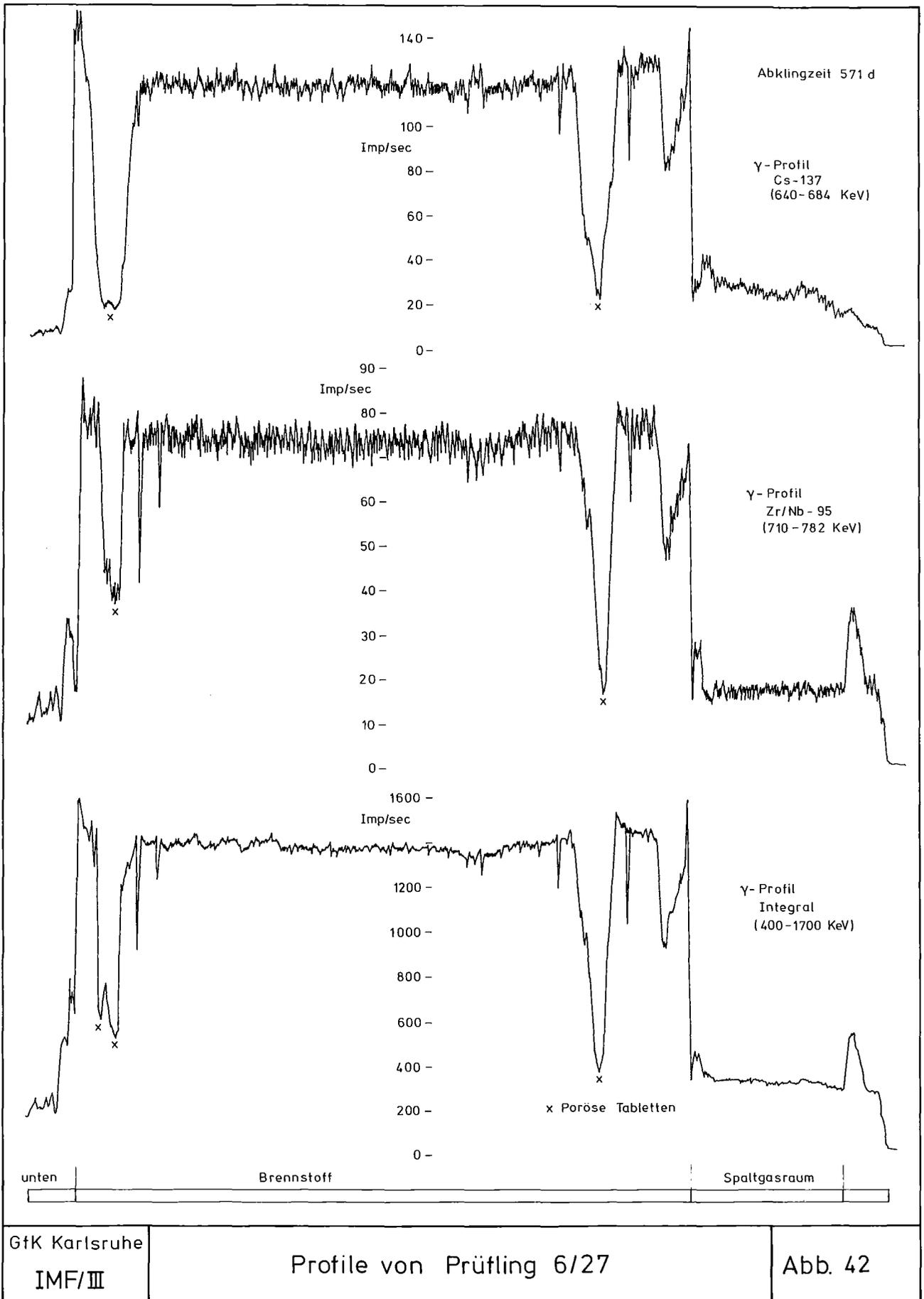


GfK Karlsruhe
IMF/III

γ-Profile von Prüfling 6/26A

Abb. 40



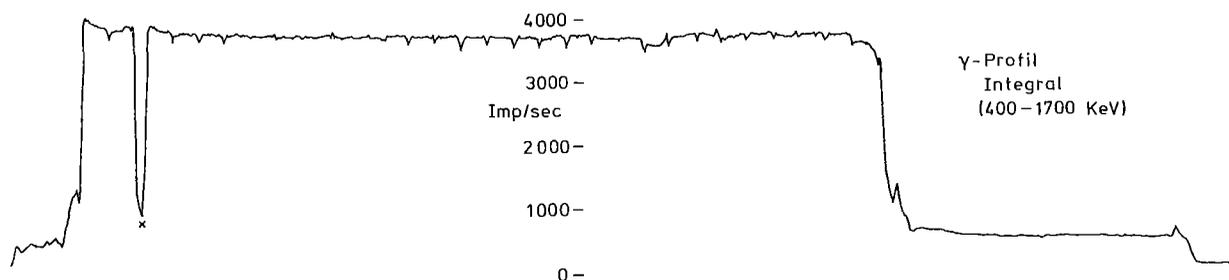
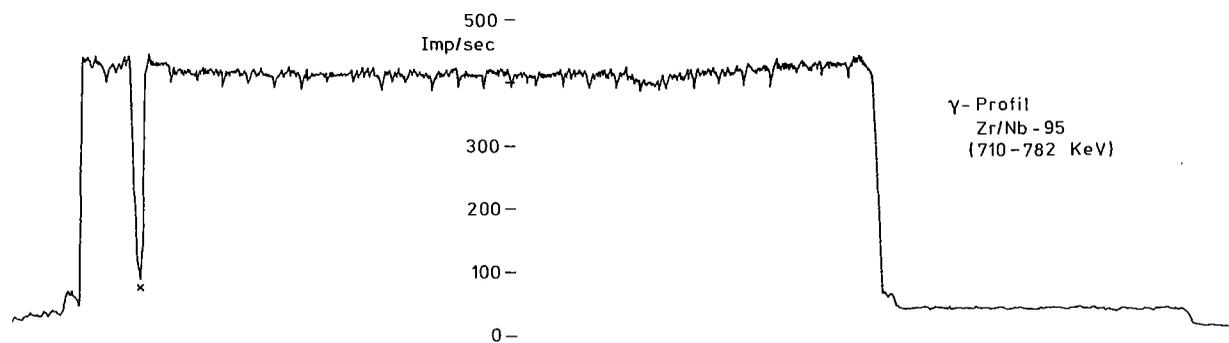
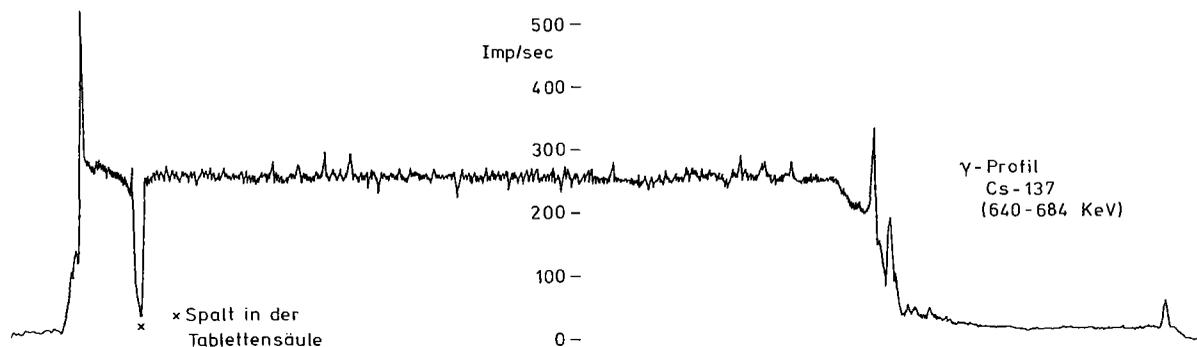


GfK Karlsruhe
IMF/III

Profile von Prütling 6/27

Abb. 42

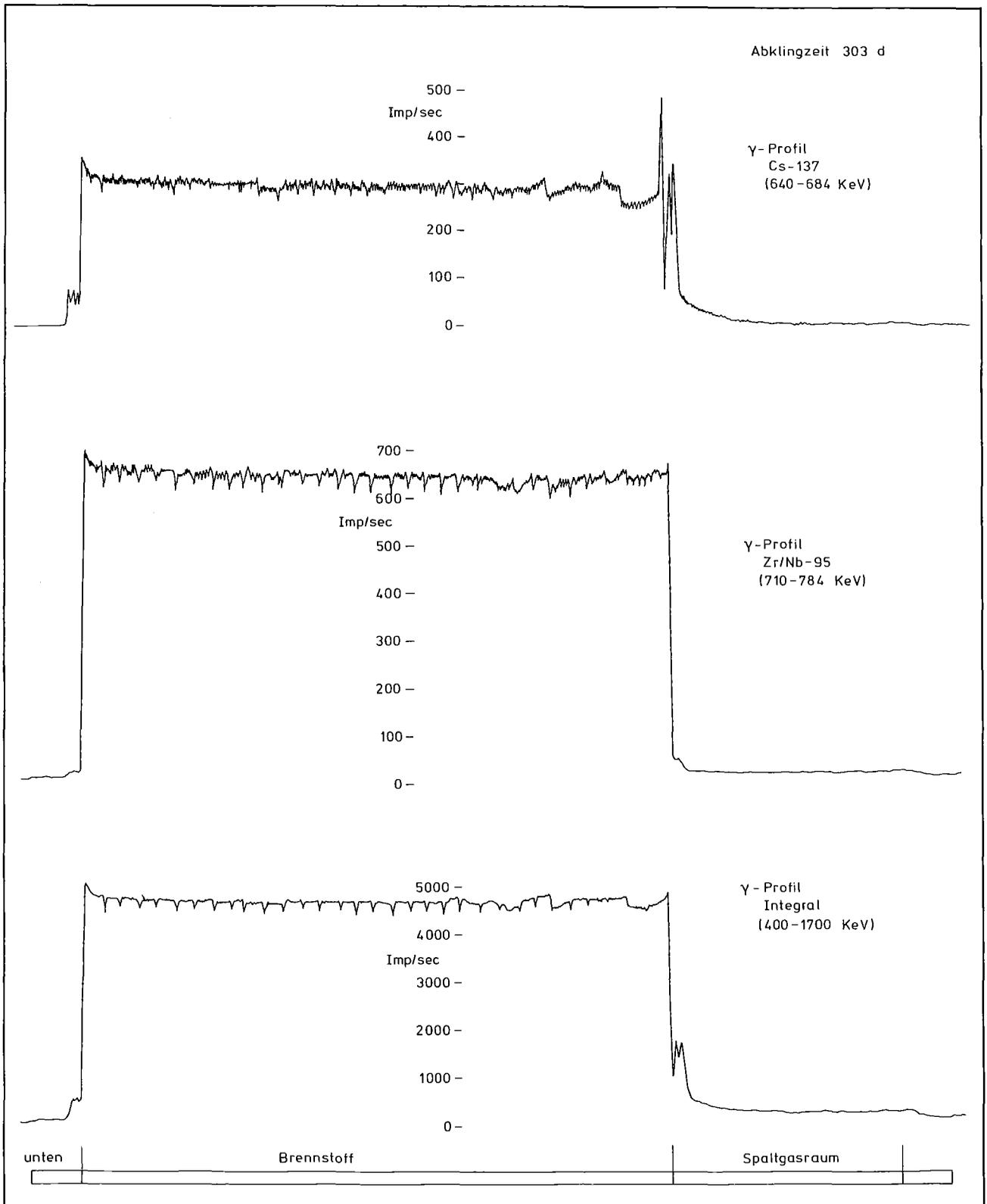
Abklingzeit 351 d



GfK Karlsruhe
IMF/III

γ-Profile von Prüfling 6/26

Abb. 43

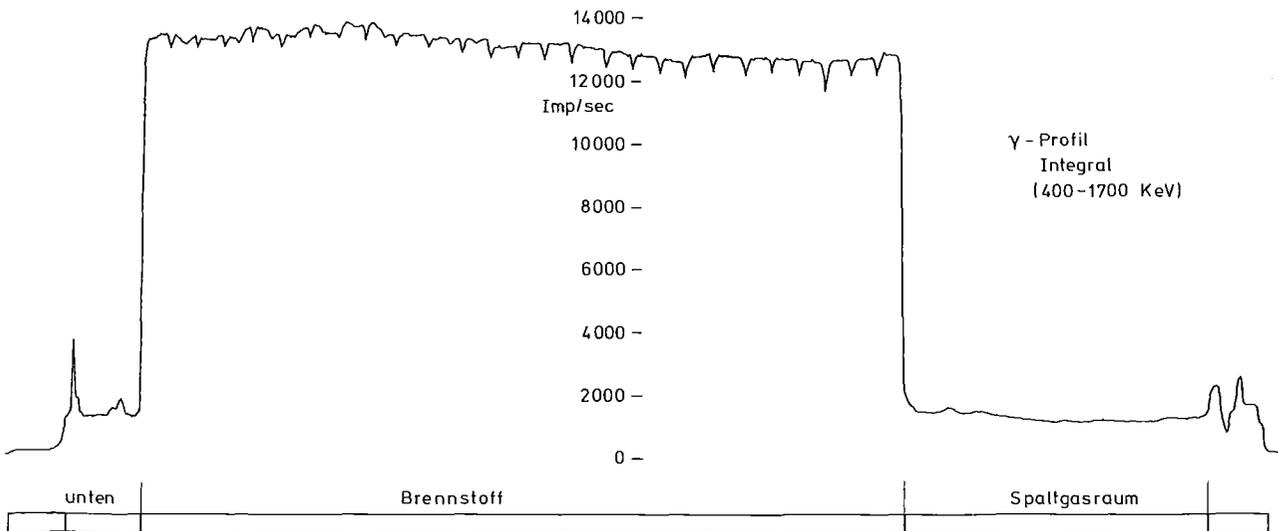
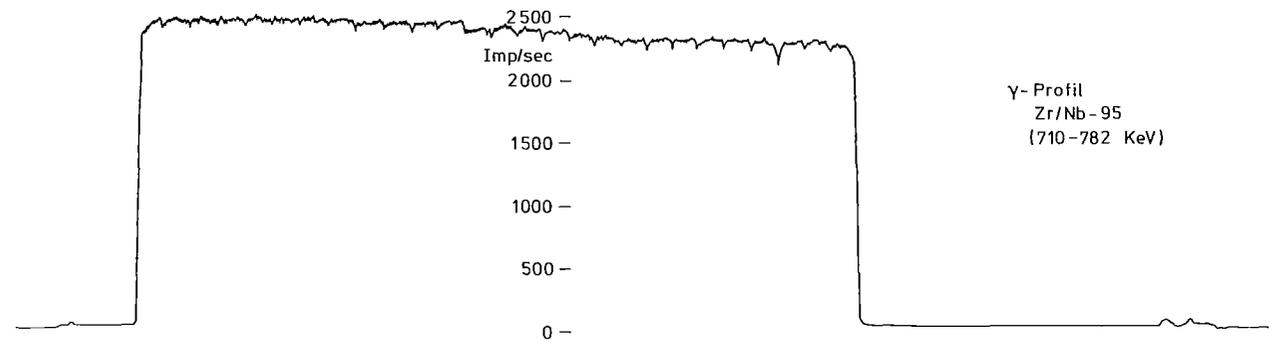
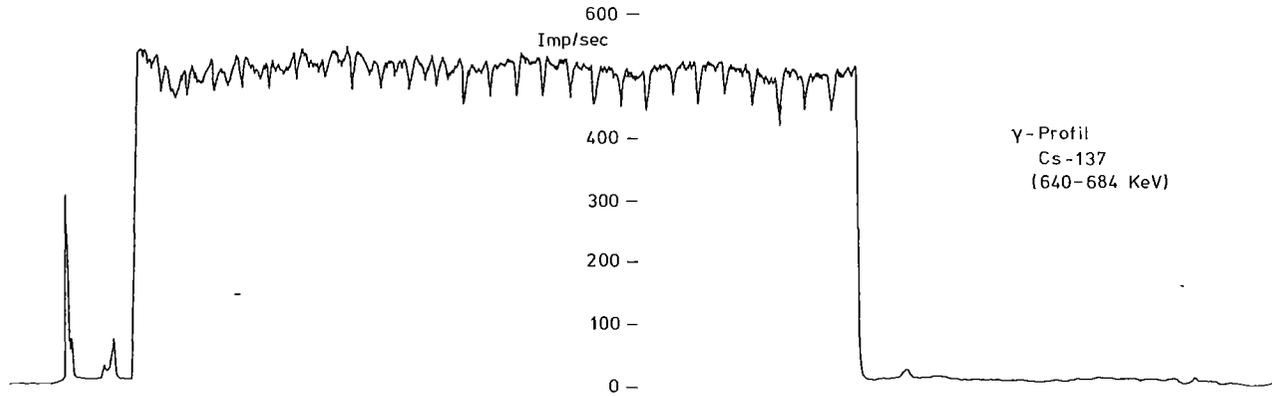


GfK Karlsruhe
IMF/III

γ-Profile von Prüfling 6/36

Abb. 44

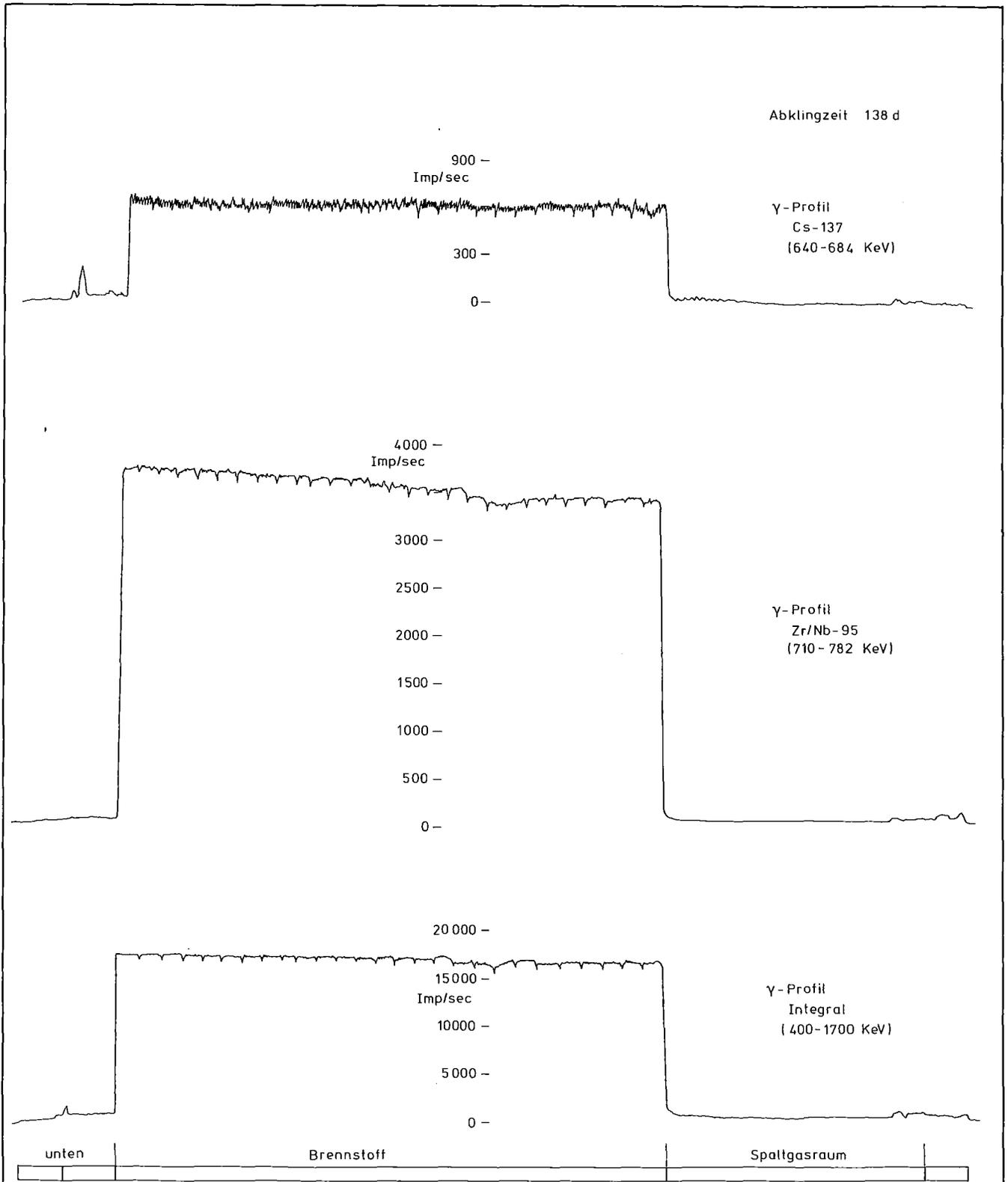
Abklingzeit 190 d



GfK Karlsruhe
IMF/III

γ-Profile von Prütling 6/11

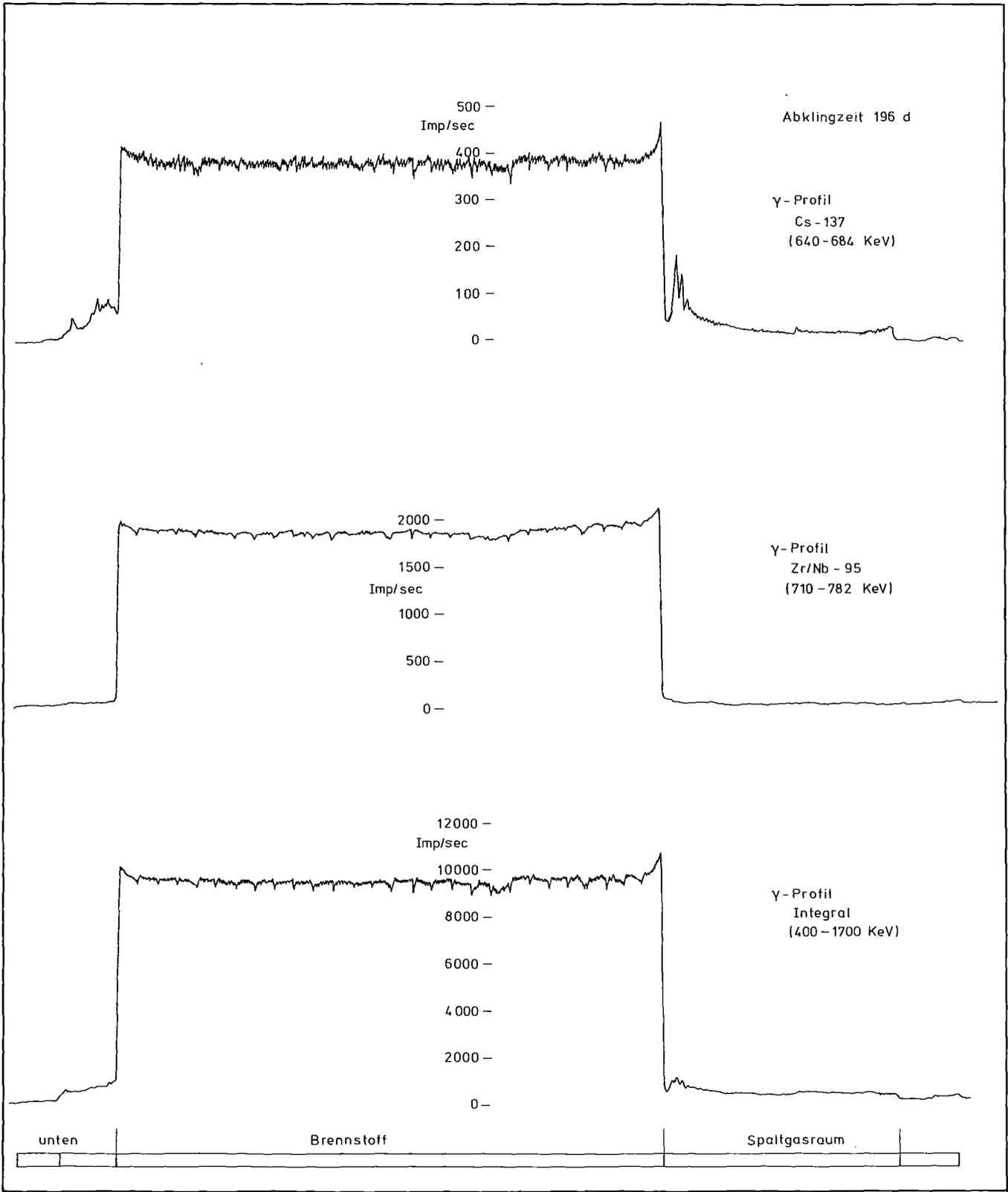
Abb. 45



GfK Karlsruhe
IMF/III

γ-Profile von Prüfling 6/12

Abb. 46



GfK Karlsruhe
IMF/III

γ-Profile von Prüfling 6/15

Abb. 48

Abklingzeit 254 d

γ -Profil
Cs-137
(640-684 KeV)

300 -
Imp/sec
100 -
0 -

γ -Profil
Zr/Nb-95
(710-782 KeV)

1200 -
Imp/sec
1000 -
800 -
600 -
400 -
200 -
0 -

γ -Profil
Integral
(400-1700 KeV)

6000 -
Imp/sec
5000 -
4000 -
3000 -
2000 -
1000 -
0 -

unten

Brennstoff

Spaltgasraum

GfK Karlsruhe
IMF/III

γ -Profile von Prüfling 6/30

Abb. 49

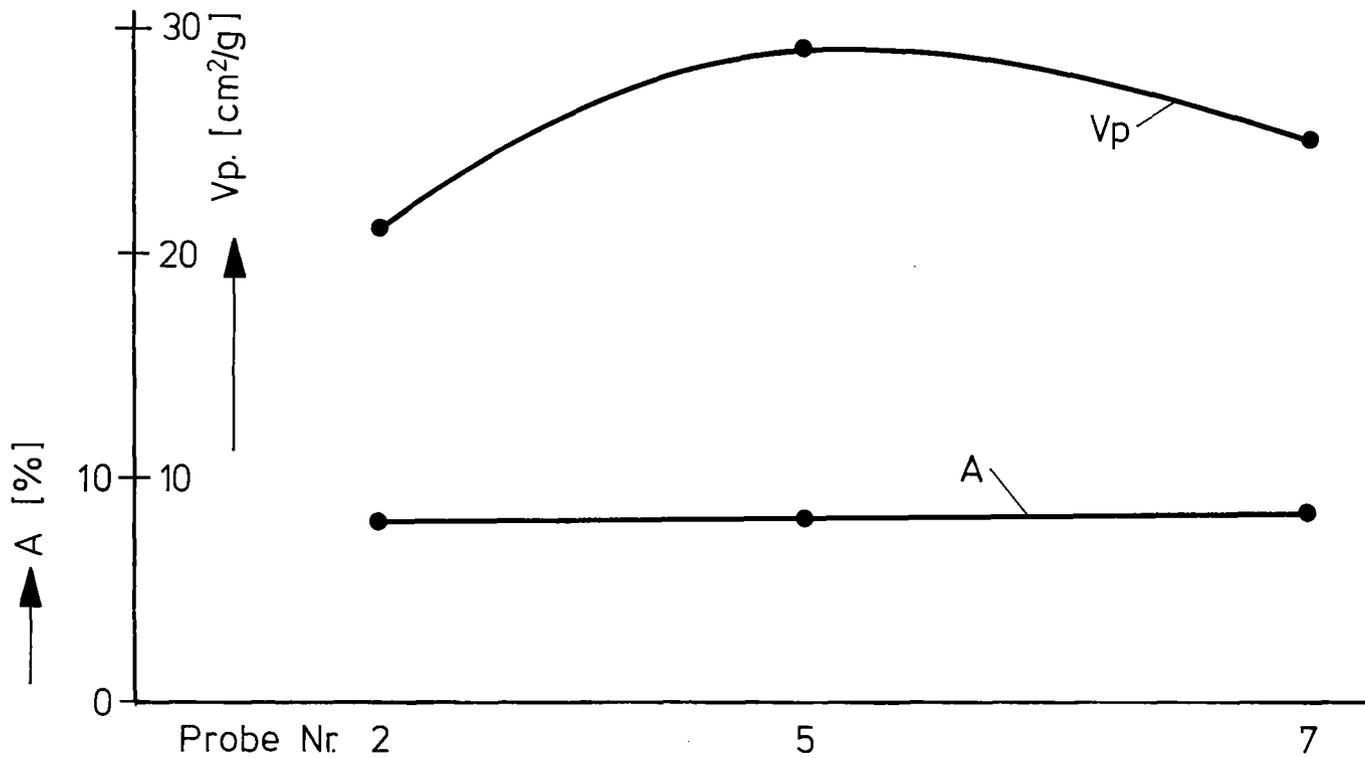
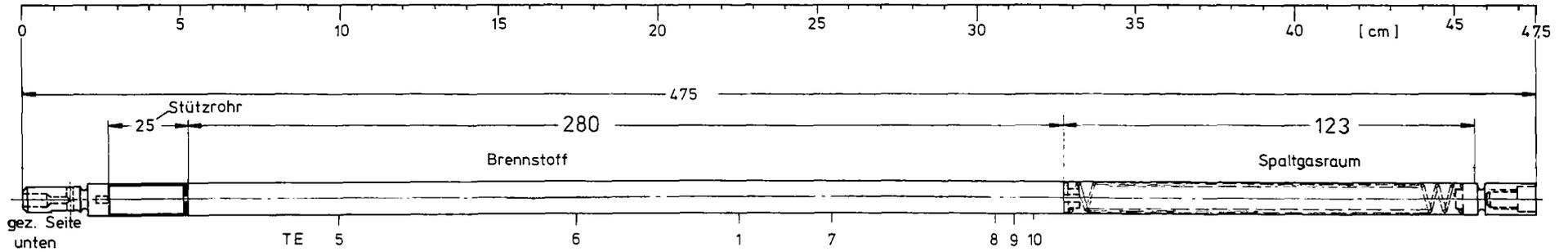


Abb.50 Porensplattgas und Abbrandverteilung in Stab 6/11

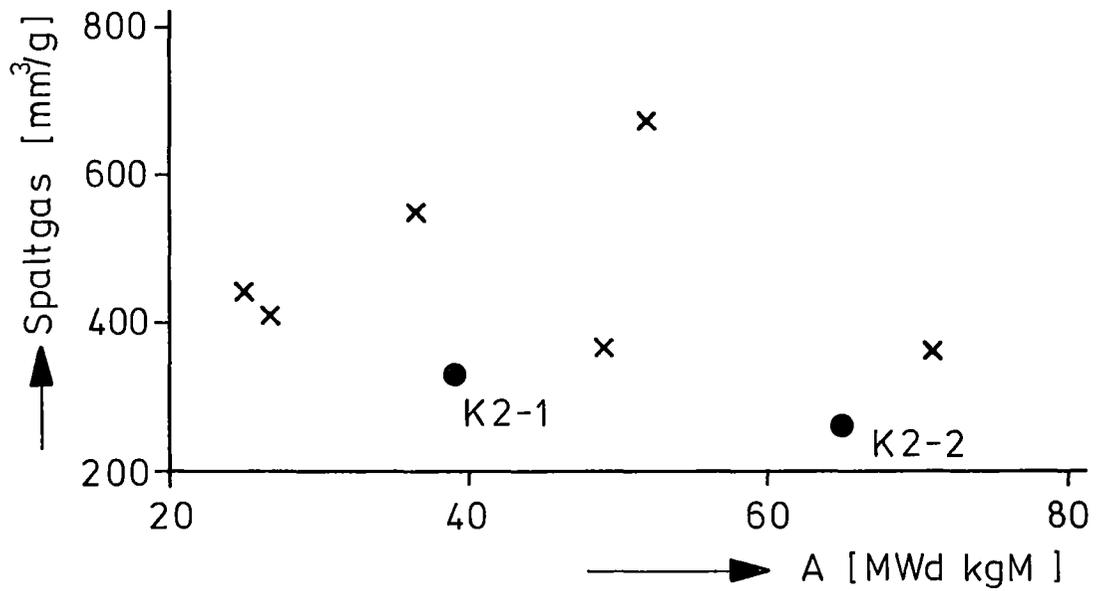


Abb.51 Spezifisches Gitterspaltgas in Abhängigkeit vom Abbrand

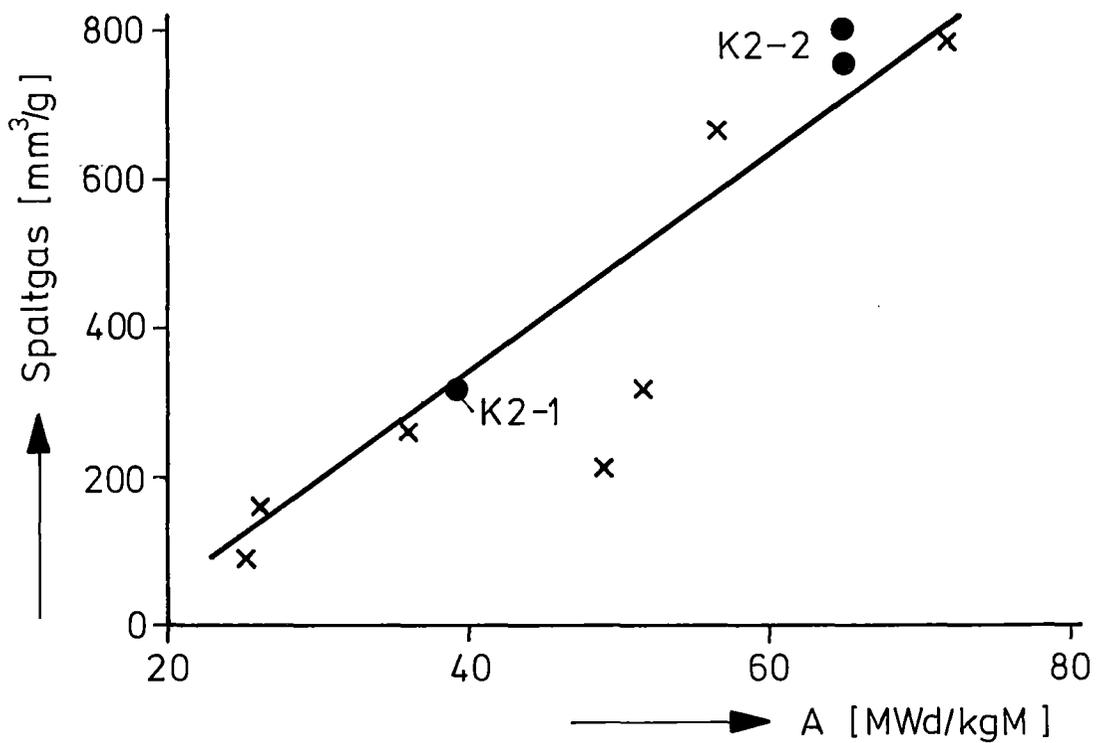
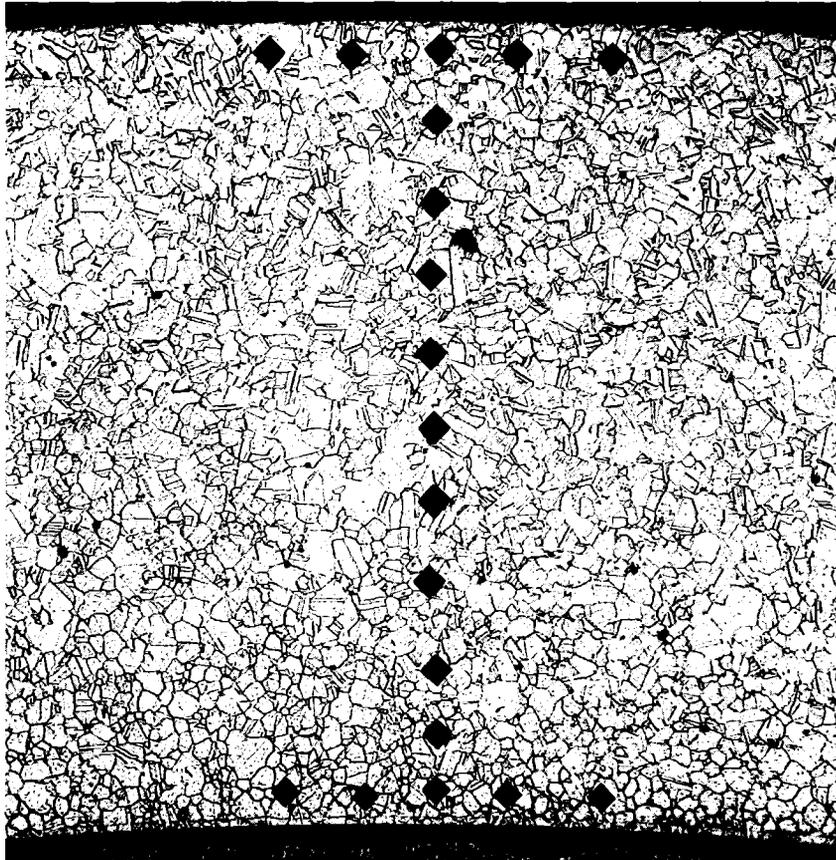


Abb. 52 Spezifisches Porensplattgas in Abhängigkeit vom Abbrand

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H. Karlsruhe Abteilung Reaktorbetrieb	HZ 3B Projekt	93 Obereinheit	6/26A Untereinheit	1 Probe
zugehörige Proj. Nr.				
Datum: 26.1.76	Unterschrift: <i>Weiser</i>		Blatt:	von:



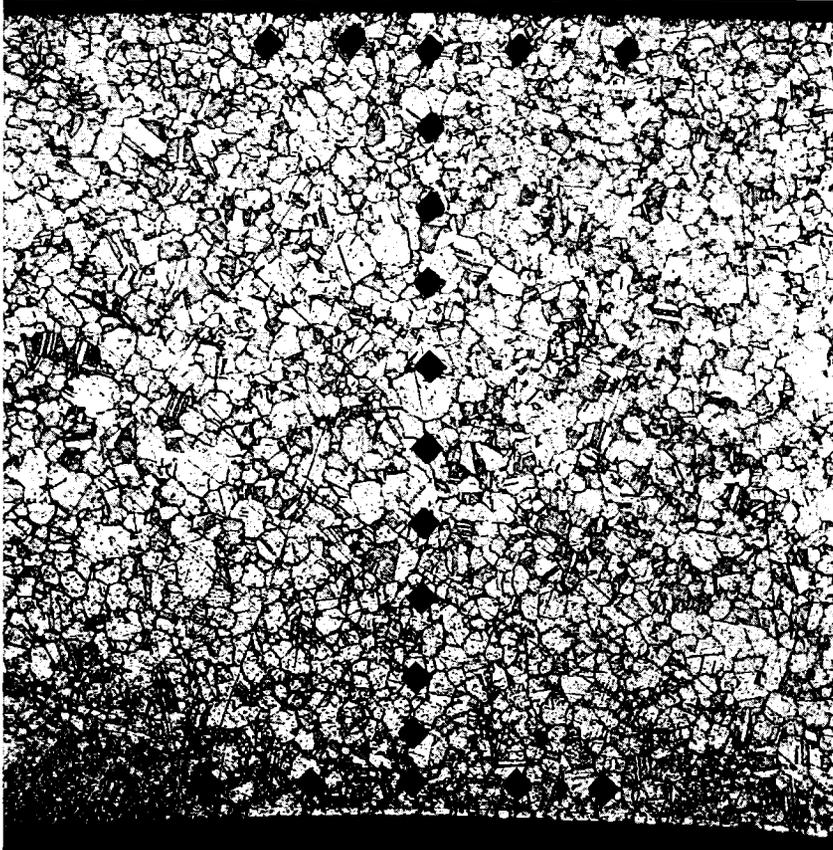
0,1 mm

Mikrohärteprüfung MHV 0,05 kp , Werkstoff 1.4988

Mittelwert von außen nach innen	198 kp/mm ² + 12
	227 "
	195 "
	188 "
	192 "
	201 "
	182 "
	186 "
	199 "
	225 "
innen	244 kp/mm ² + 9

Abb. 53 Mikrohärtemessung am Stab 6/26A Schnitt 1

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H. Karlsruhe Abteilung Reaktorbetrieb	HZ 3B Projekt	94 Obereinheit	6/3 Untereinheit	1 Probe
zugehörige Proj. Nr.				
Datum: 26.1.76	Unterschrift: <i>Wasser</i>	Blatt: von:		



0,1 mm

Mikrohärteprüfung MHV 0,05 kp , Werkstoff 1.4988

Mittelwert von außen nach innen $234 \pm 9 \text{ kp/mm}^2$

234

232

206

199

210

204

212

210

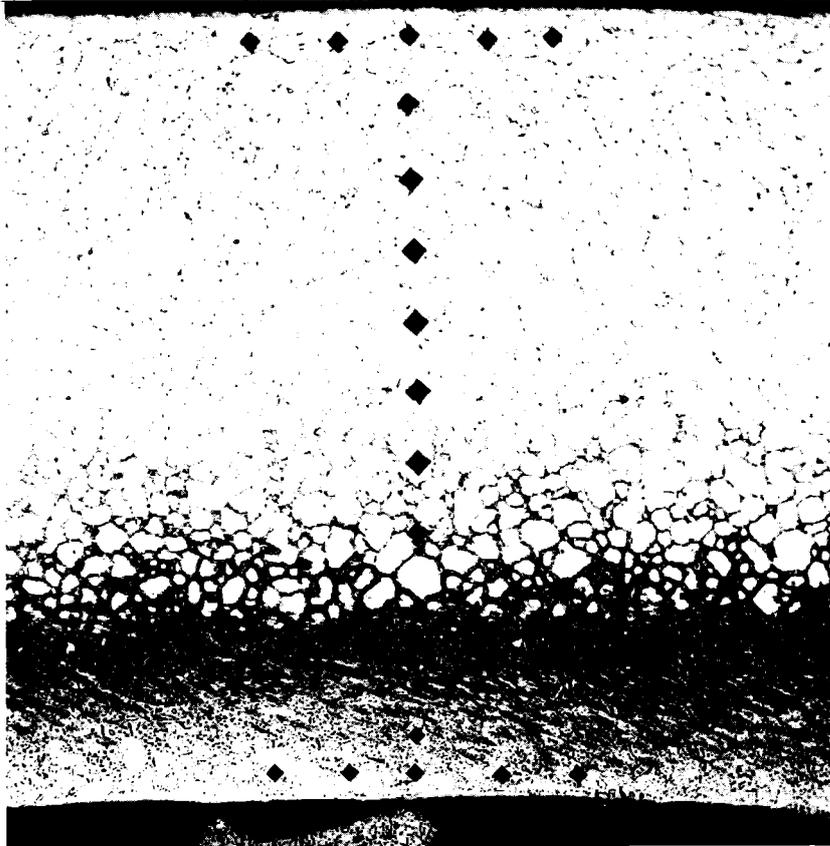
221

innen

$219 \pm 12 \text{ kp/mm}^2$

Abb. 54 Mikrohärtemessung am Stab 6/3 Schnitt 1

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H. Karlsruhe Abteilung Reaktorbetrieb	HZ 3B Projekt	99 Obereinheit	6/27 Untereinheit	2 Probe
zugehörige Proj. Nr.				
Datum: 26.1.76	Unterschrift: Weiser	Blatt:	von:	



0,1 mm

Mikrohärteprüfung MHV 0,05 kp , Werkstoff 1.4988

Mittelwert von außen nach innen $445 \pm 17 \text{ kp/mm}^2$

371

332

271

265

280

286

362

473

480

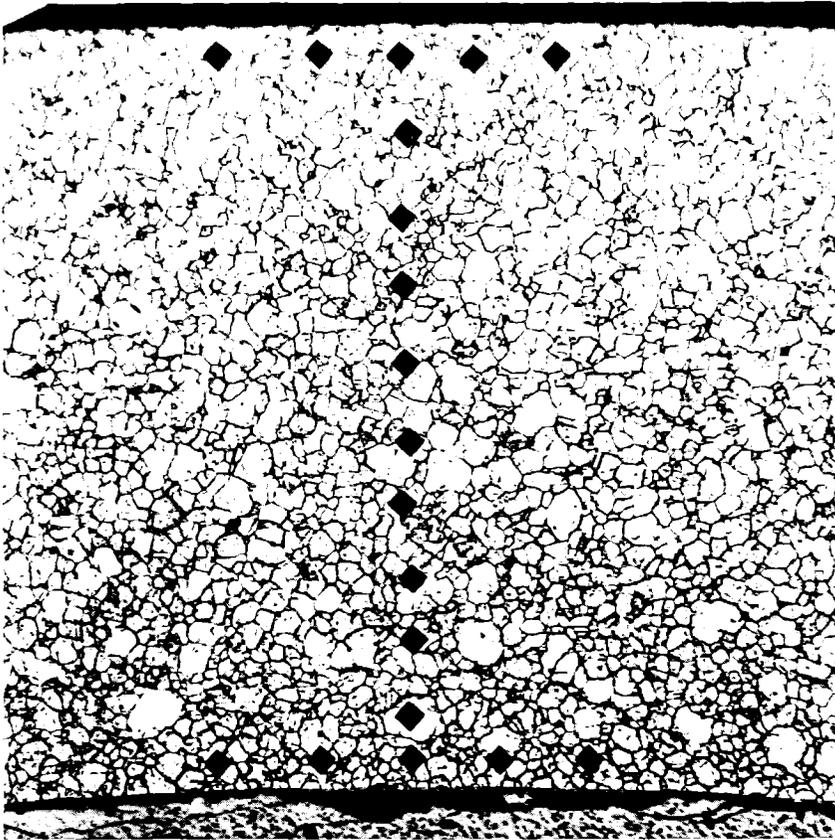
677

innen

$629 \pm 45 \text{ kp/mm}^2$

Abb. 55 Mikrohärtemessung am Stab 6/27 Schnitt 2

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H. Karlsruhe Abteilung Reaktorbetrieb	HZ 3B Projekt	102 Obereinheit	6/26 Untereinheit	2 Probe
zugehörige Proj. Nr.				
Datum: 15.12.75	Unterschrift: Weiser	Blatt:	von:	



0,1mm

Mikrohärteprüfung MHV 0,05 kp , Werkstoff 1.4988

Mittelwert von außen nach innen $230 \pm 6 \text{ kp/mm}^2$

225

227

236

232

227

227

236

261

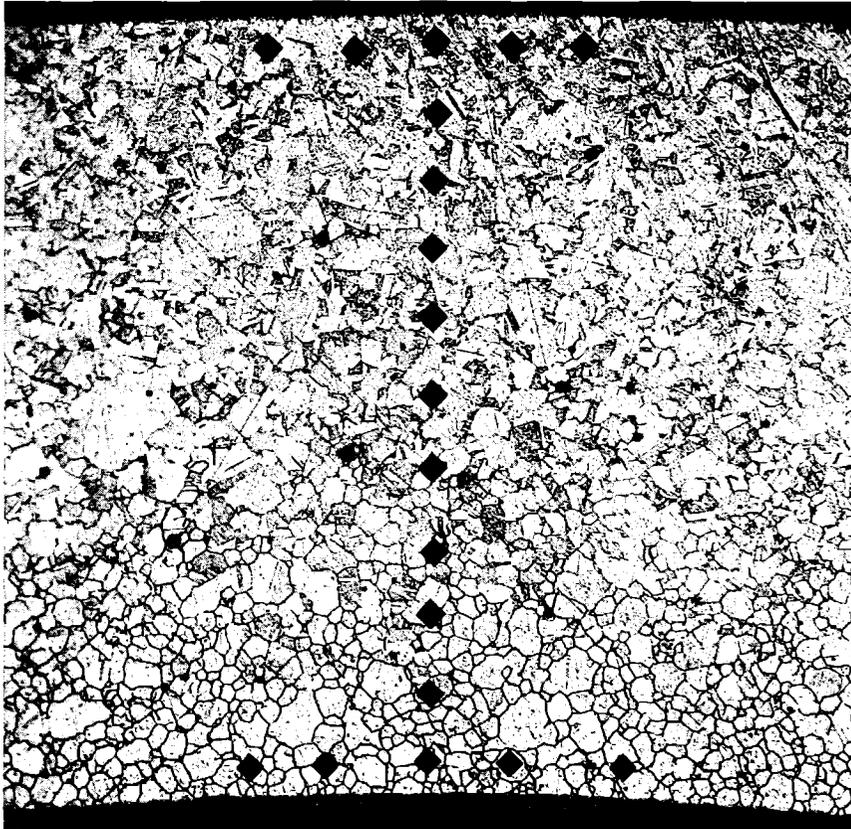
271

innen

$300 \pm 15 \text{ kp/mm}^2$

Abb. 56 Mikrohärtemessung am Stab 6/26 Schnitt 2

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H. Karlsruhe Abteilung Reaktorbetrieb	HZ 3B Projekt	103 Obereinheit	6/36 Untereinheit	4 Probe
zugehörige Proj. Nr.				
Datum: 26.1.76	Unterschrift: Weiser	Blatt:	von:	



0,1 mm

Mikrohärteprüfung MHV 0,05 kp , Werkstoff 1.4988

Mittelwert von außen nach innen $232 \pm 8 \text{ kp/mm}^2$

236

229

227

225

236

221

234

218

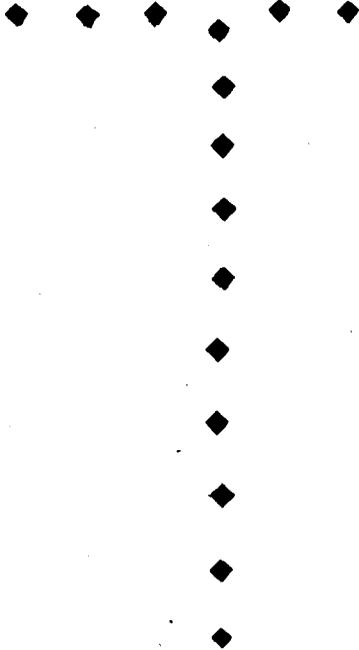
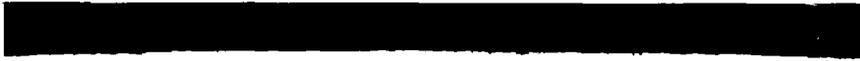
265

innen

$274 \pm 4 \text{ kp/mm}^2$

Abb. 57 Mikrohärtemessung am Stab 6/36 Schnitt 4

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H. Karlsruhe Abteilung Reaktorbetrieb	HZ 3 B	104	6.11	4
	Projekt	Obereinheit	Untereinheit	Probe
zugehörige Proj. Nr.				
Datum: 2.11.70	Unterschrift: Weiser	Blatt:	von:	

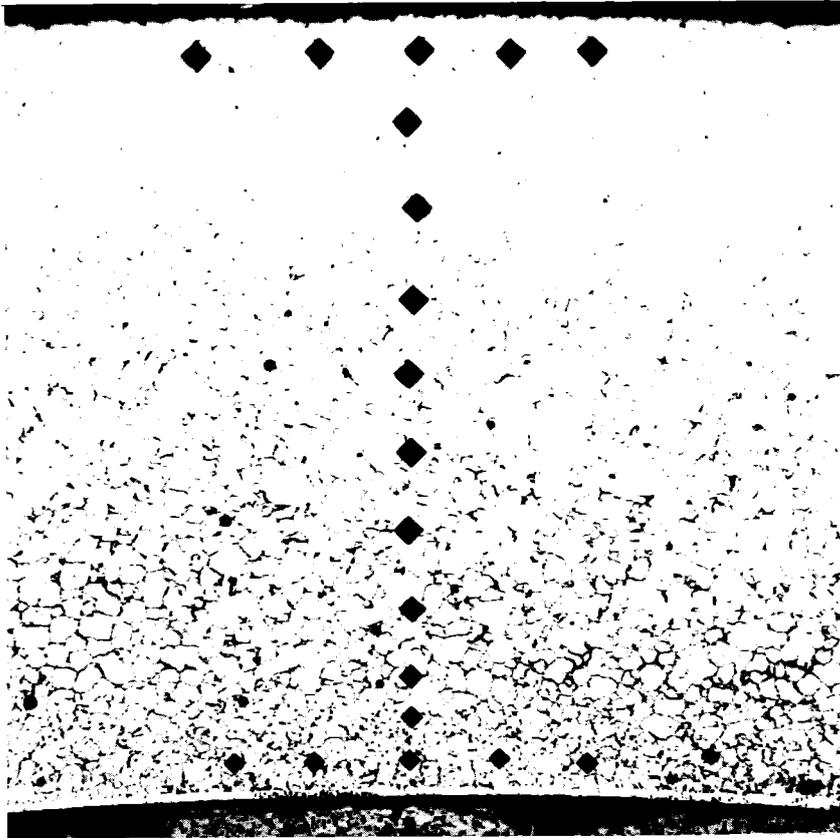


0,1 mm

Mikrohärteprüfung MHV 0,05 kp	Werkstoff 1.4988
Mittelwert von außen nach innen	278 ± 19 kp/mm ²
	274 "
	271 "
	251 "
	249 "
	280 "
	257 "
	249 "
	260 "
	310 "
	391 "
innen	494 ± 45 kp/mm ²

Abb. 58 Mikrohärtemessung am Stab 6/11 Schnitt 4

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H. Karlsruhe Abteilung Reaktorbetrieb	HZ 33 Projekt	108	6/12	6
zugehörige Proj. Nr.		Obereinheit	Untereinheit	Probe
Datum: 16.6 75	Unterschrift: Weiser	Blatt:	von:	



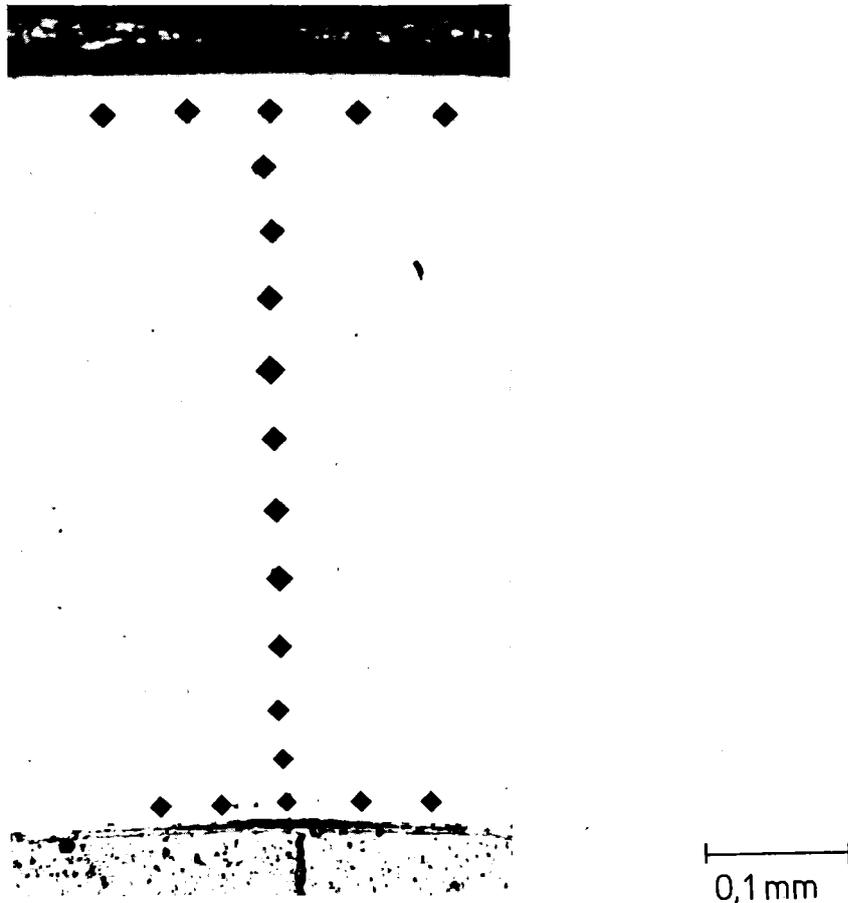
0,1mm

Mikrohärteprüfung MHV 0,05 kp , Werkstoff 1.4988

Mittelwert von außen nach innen	208 ± 9 kp/mm ²
	210 "
	218 "
	214 "
	206 "
	202 "
	227 "
	262 "
	340 "
	423 "
innen	453 ± 8 kp/mm ²

Abb. 59 Mikrohärtemessung am Stab 6/12 Schnitt 6

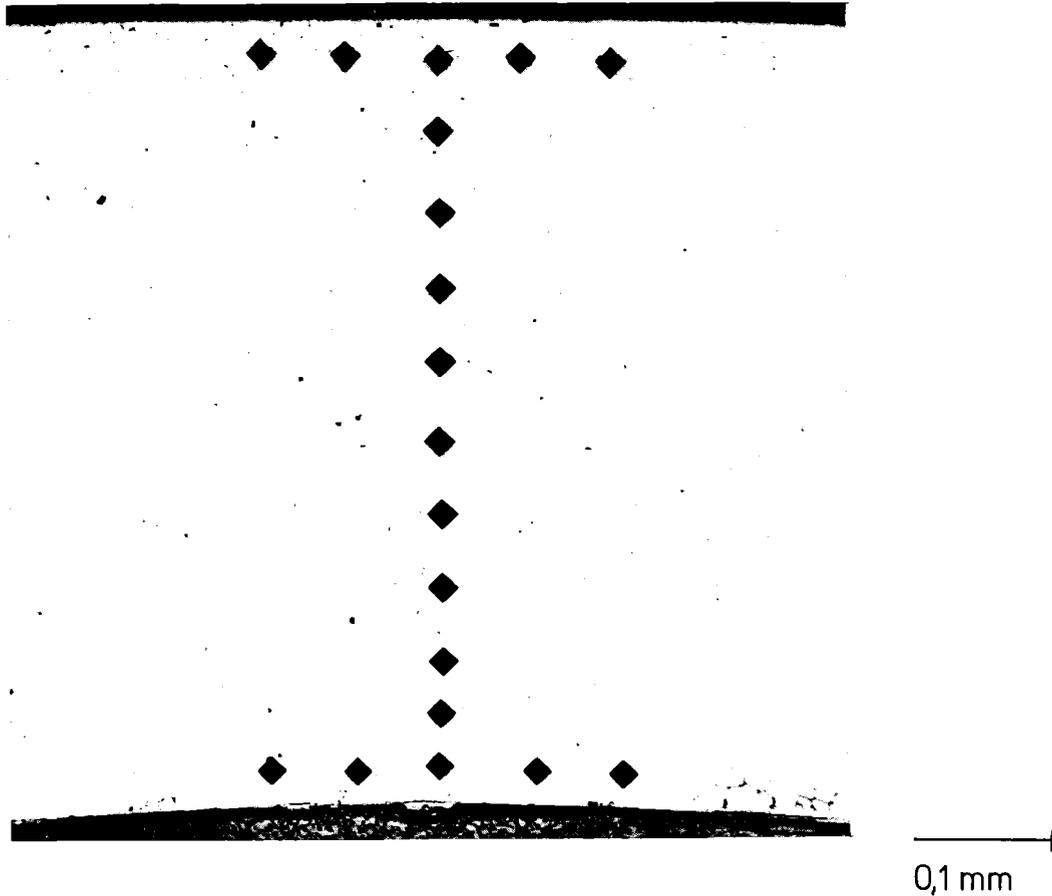
Gesellschaft für Kernforschung m.B.H. Karlsruhe Abteilung Reaktorbetrieb	HZ 3 B	0.10	1.12	1
	Projekt	Obereinheit	Untereinheit	Probe
zugehörige Proj. Nr.				
Datum: 2.1.70	Unterschrift: Waser	Blatt: von		



Mikrohärteprüfung MHV 0,05 kp , Werkstoff 1.4988
Mittelwert von außen nach innen 220 \pm 13 kp/mm²
225
221
221
175
229
223
280
313
345
innen 357 \pm 45 kp/mm²

Abb. 60 Mikrohärtemessung am Stab 6/14 Schnitt 7

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H. Karlsruhe Abteilung Reaktorbetrieb	HZ 3 B Projekt	111 Obereinheit	6/15 Untereinheit	4 Probe
zugehörige Proj. Nr.				
Datum: 16.6.75	Unterschrift: <i>W. Zies</i>		Blatt:	von:

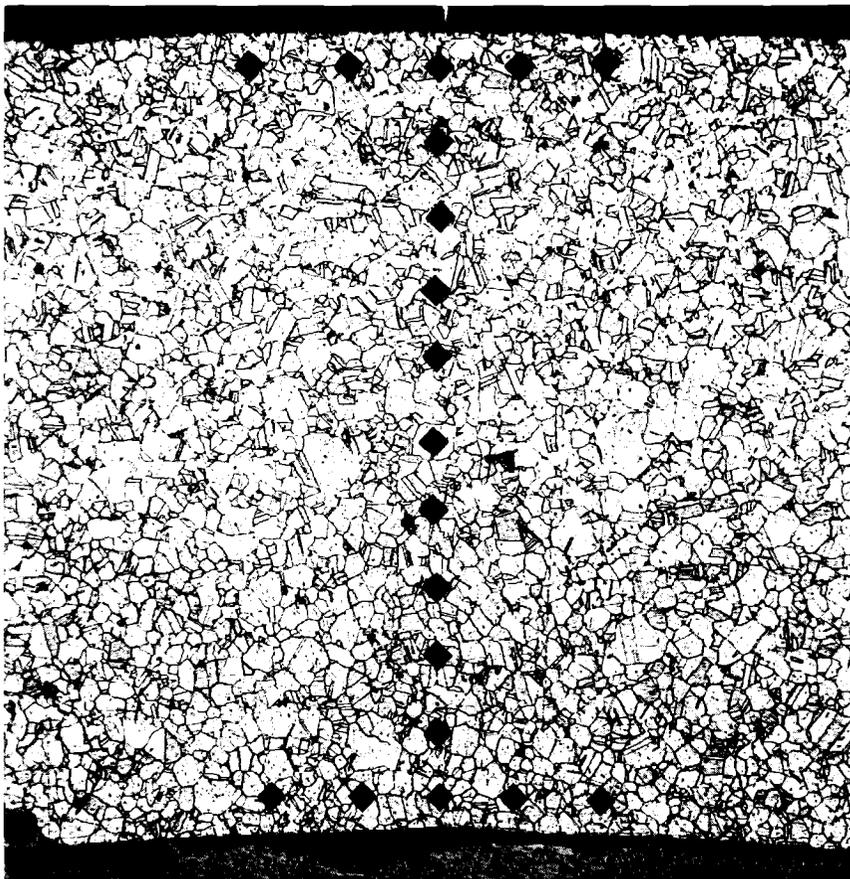


Mikrohärteprüfung MHV 0,05 kp , Werkstoff 1.4988
Mittelwert von außen nach innen 203 \pm 4 kp/mm²

206	"
221	"
210	"
202	"
199	"
201	"
210	"
236	"
236	"
innen	262 \pm 6 kp/mm ²

Abb. 61 Mikrohärtemessung am Stab 6/15 Schnitt 4

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H. Karlsruhe Abteilung Reaktorbetrieb	HZ 3B Projekt	114 Obereinheit	6/30 Untereinheit	1 Probe
zugehörige Proj. Nr.				
Datum: 26.1.76	Unterschrift: Weiser	Blatt:	von:	



0,1 mm

Mikrohärteprüfung MHV 0,05 kp, Werkstoff 1.4988

Mittelwert von außen nach innen $230 \pm 9 \text{ kp/mm}^2$

232

210

206

204

214

208

212

218

234

innen

$248 \pm 12 \text{ kp/mm}^2$

Abb. 62 Mikrohärtemessung am Stab 6/30 Schnitt 1

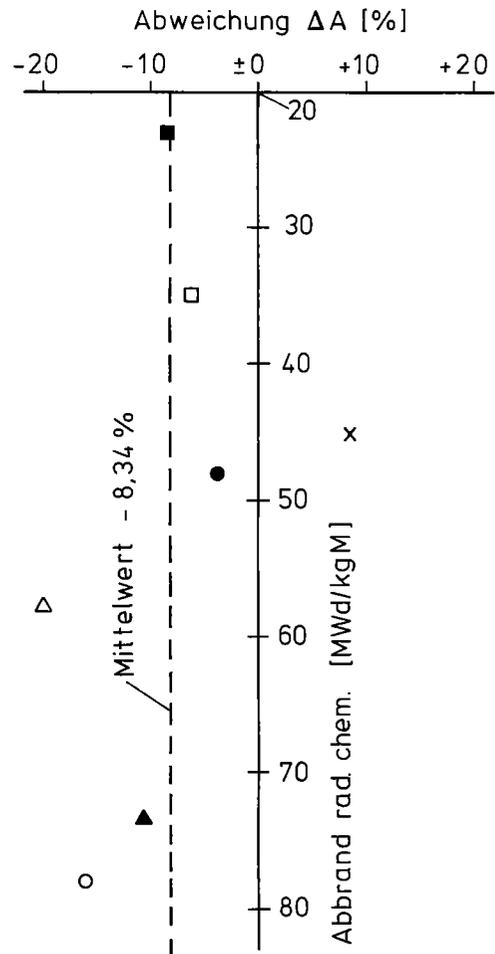


Abb. 63 Abweichung der gerechneten gegenüber den radiochemisch bestimmten Abbrand-Werten

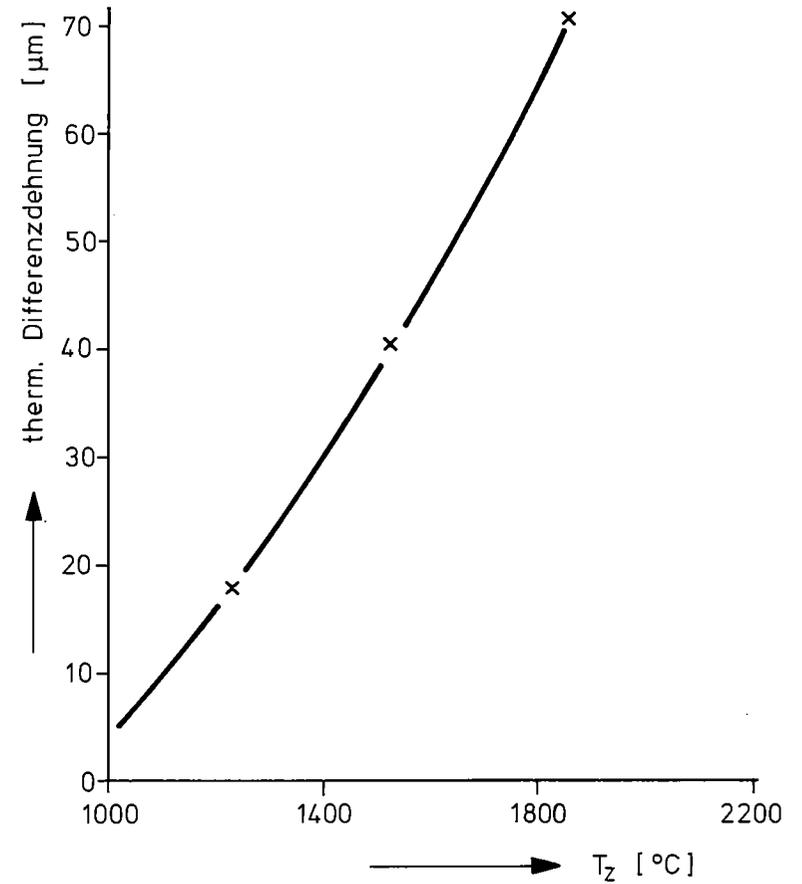


Abb. 64 Thermische Differenzdehnung als Funktion der Zentraltemperatur

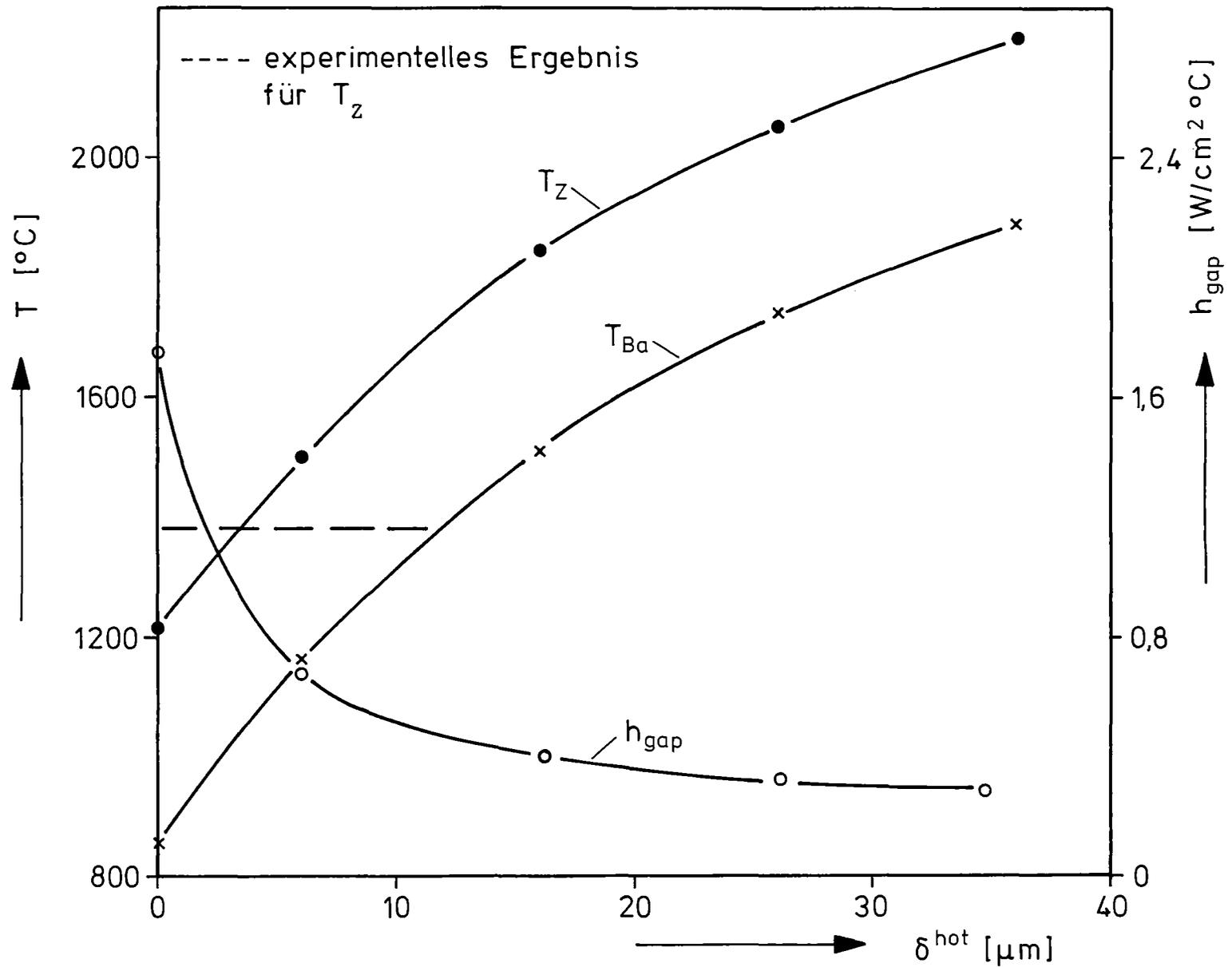


Abb. 65 Zentraltemperatur T_z , Wärmedurchgangszahl h_{gap} und Brennstoffrandtemperatur T_{Ba} als Funktion des Heißspalts δ^{hot} (zu Beginn des 1. Zyklus)

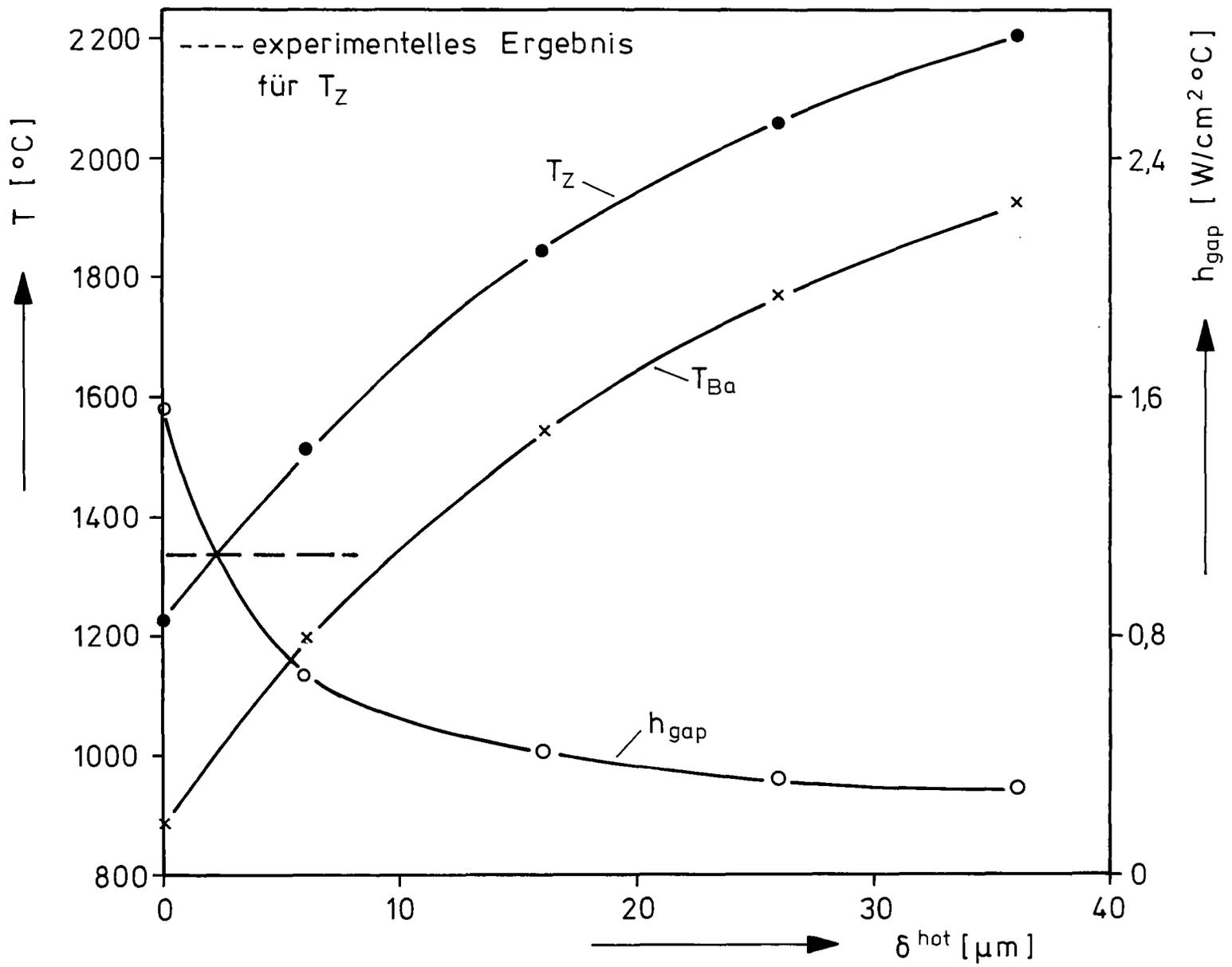


Abb. 66 Zentraltemperatur T_Z , Wärmedurchgangszahl h_{gap} und Brennstoffrandtemperatur T_{Ba} als Funktion des Heißspalts δ^{hot} (zu Beginn des 2. Zyklus)

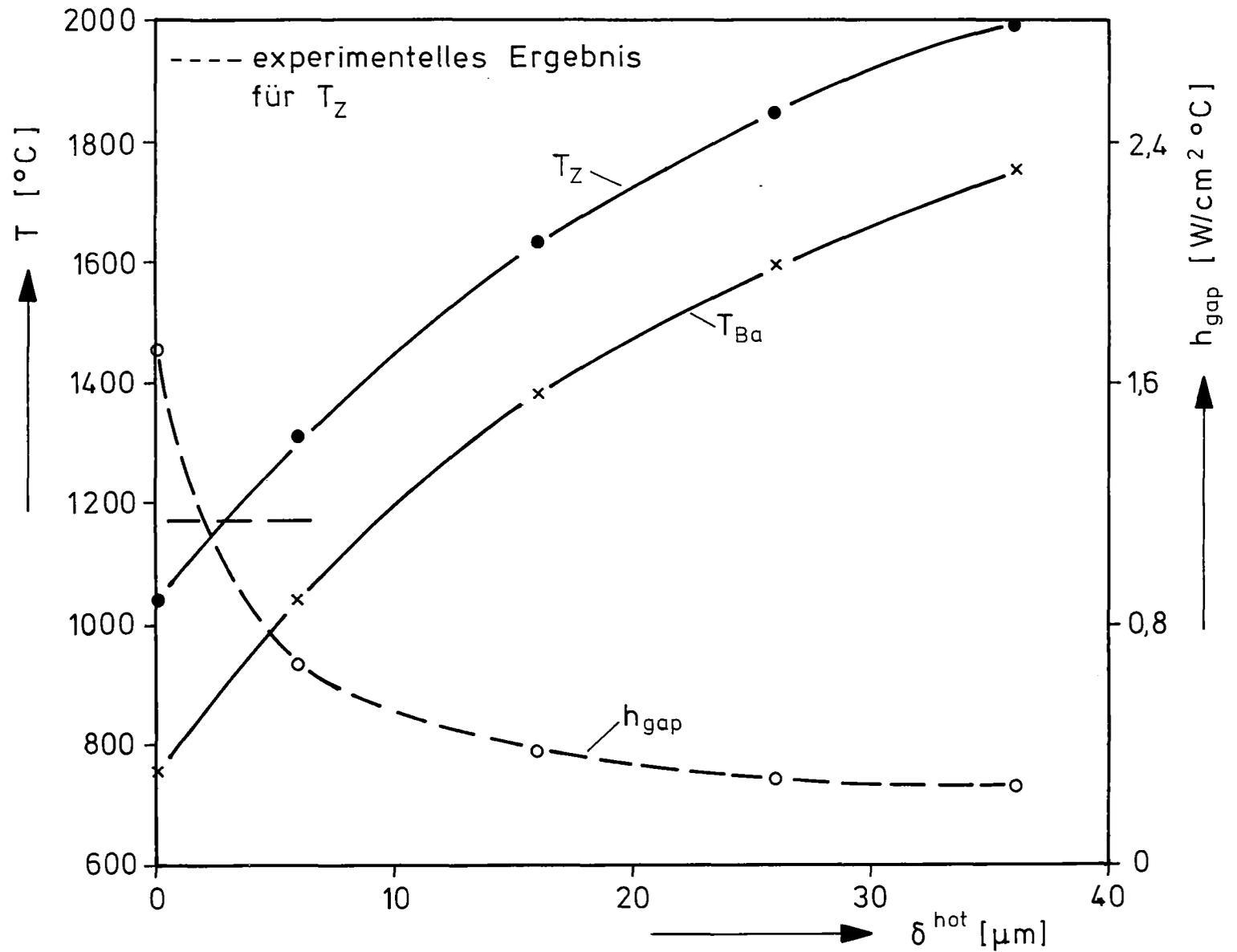


Abb.67 Zentraltemperatur T_Z , Wärmedurchgangszahl h_{gap} und Brennstoffrandtemperatur T_{Ba} als Funktion des Heißspalts δ^{hot} (zu Ende des 1. Zyklus)

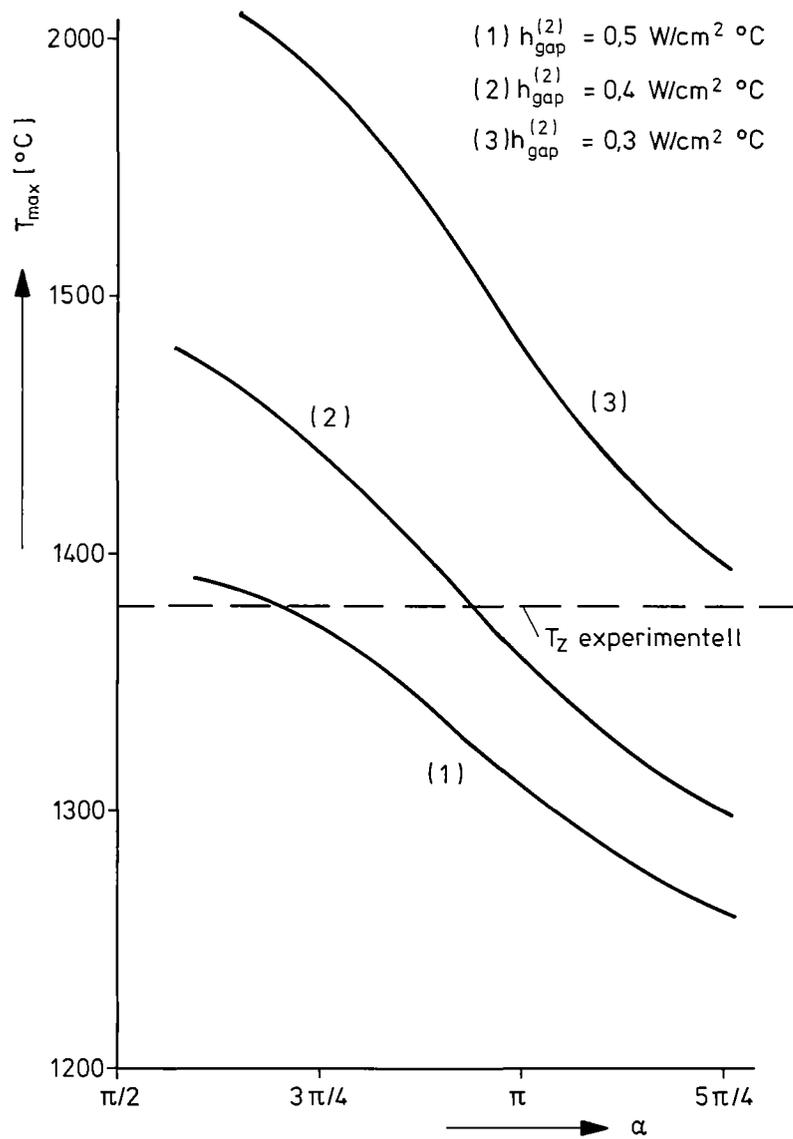


Abb. 68 Maximale Brennstofftemperatur zu Beginn des 1. Zyklus als Funktion des Kontaktwinkels α (KVE 108 TE 7)

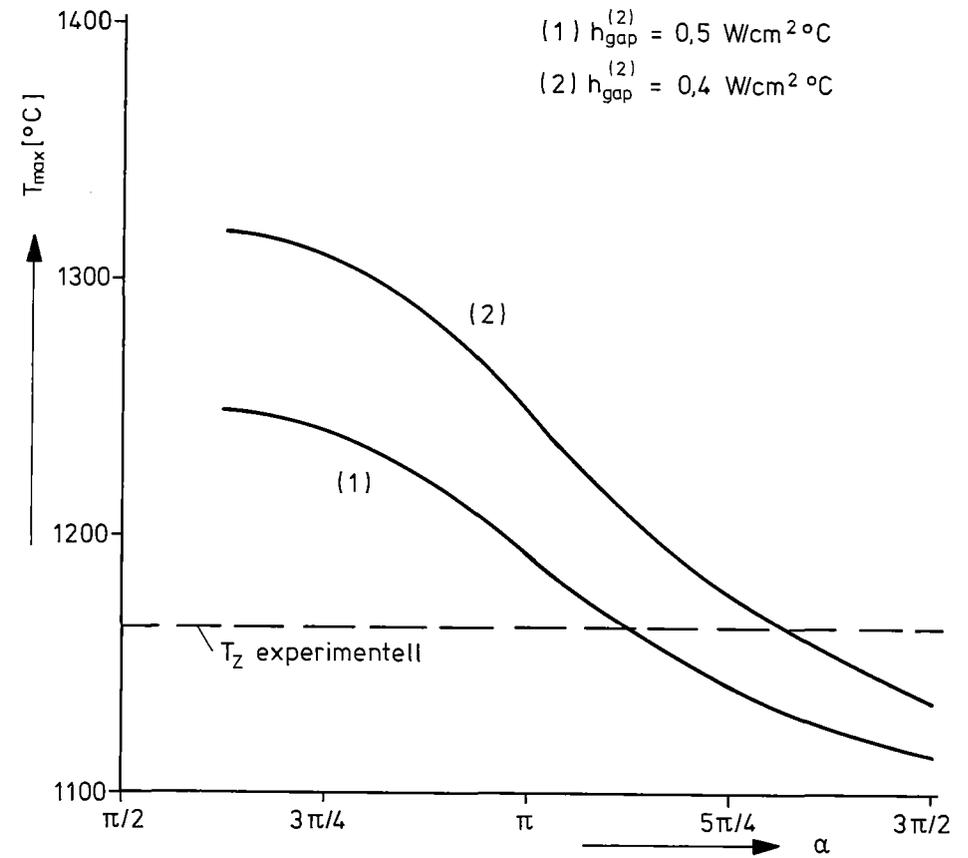


Abb. 69 Maximale Brennstofftemperatur zu Ende des 1. Zyklus als Funktion des Kontaktwinkels α (KVE 108 TE 7)

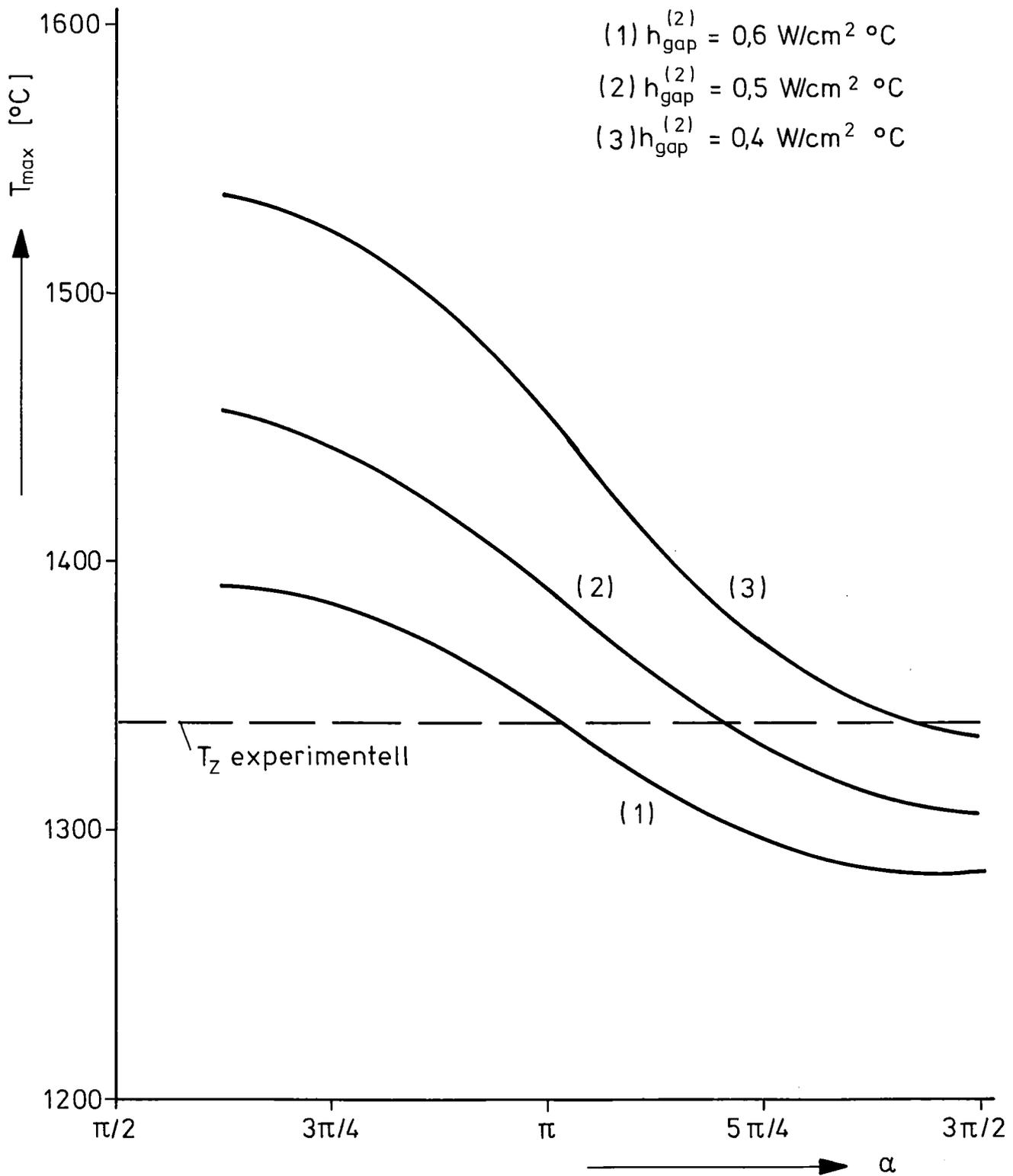


Abb. 70 Maximale Brennstofftemperatur zu Beginn des 2. Zyklus als Funktion des Kontaktwinkels α (KVE 108 TE 7)

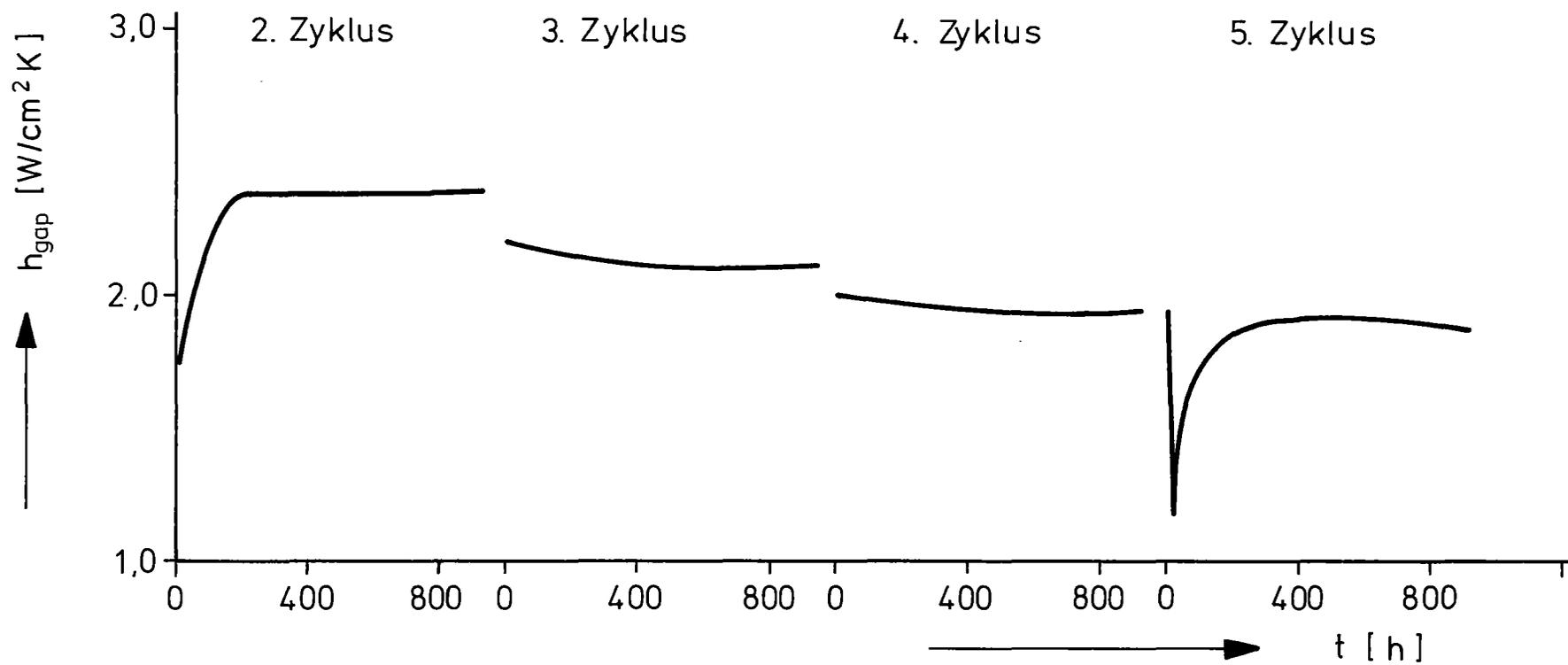


Abb. 71 Zeitlicher Verlauf der berechneten Wärmedurchgangszahl im KVE 108

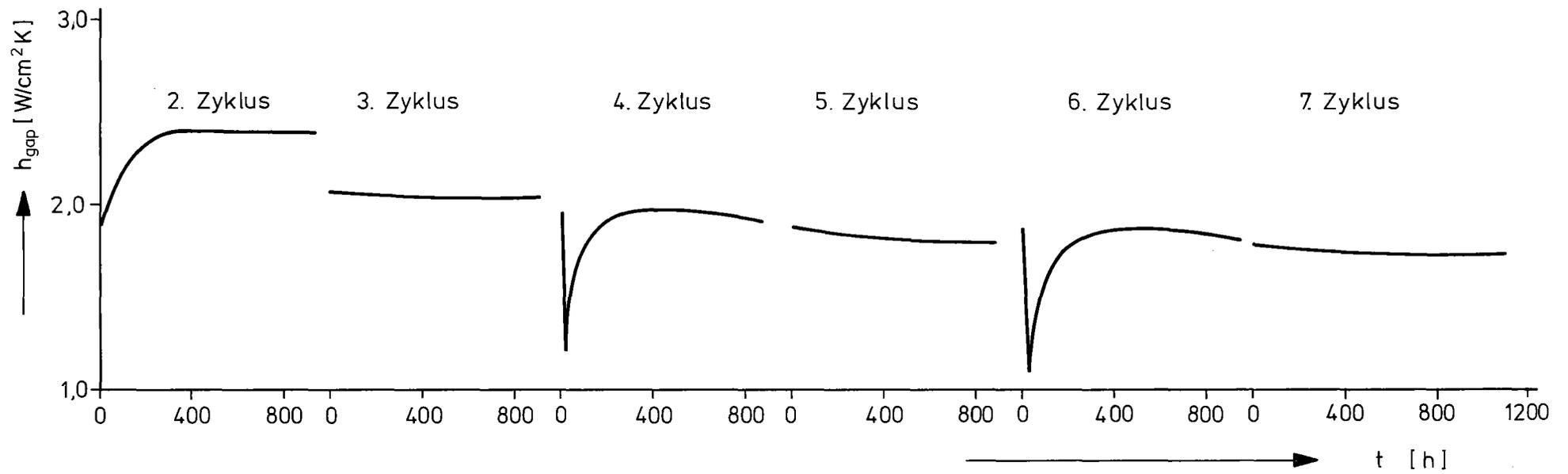


Abb. 72 Zeitlicher Verlauf der berechneten Wärmedurchgangszahl im KVE 111

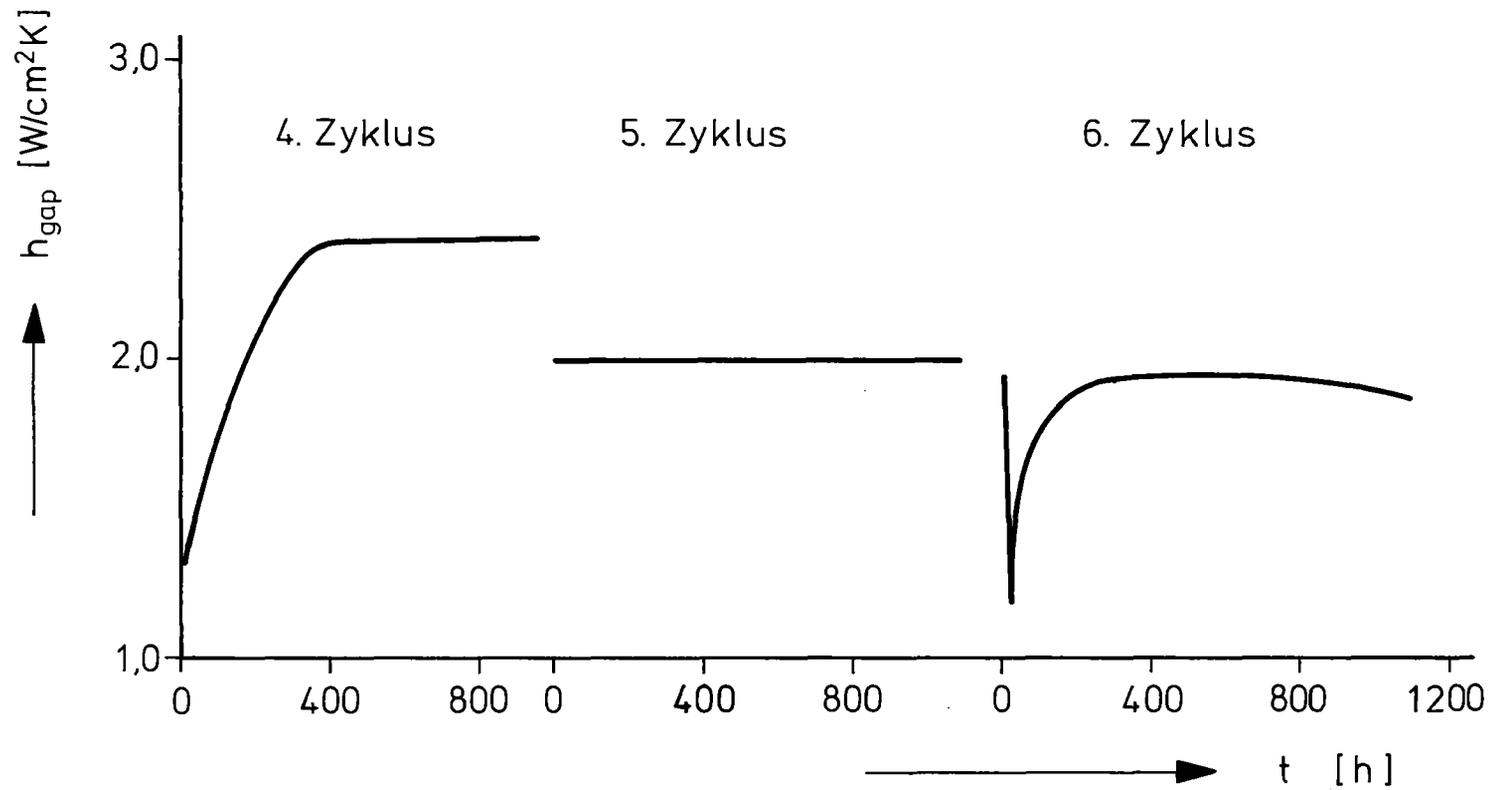
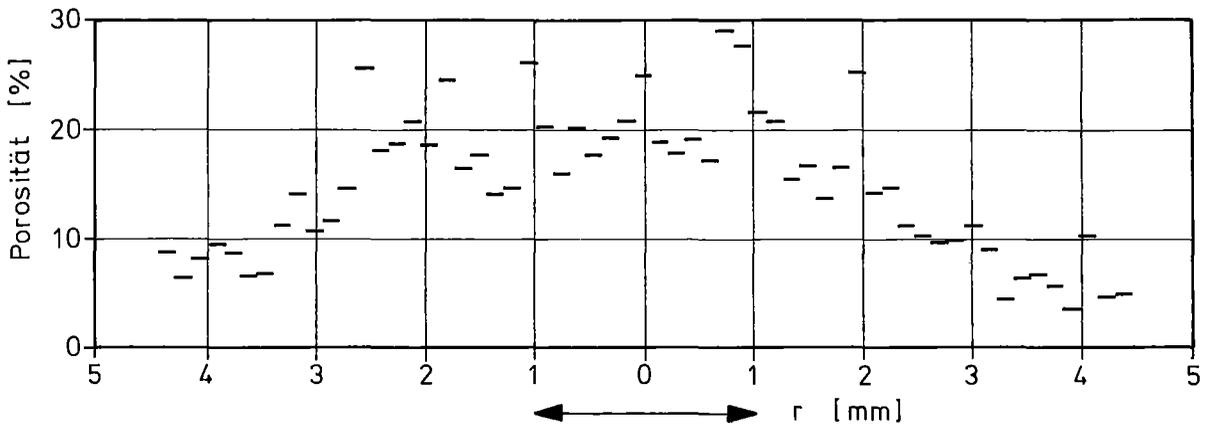
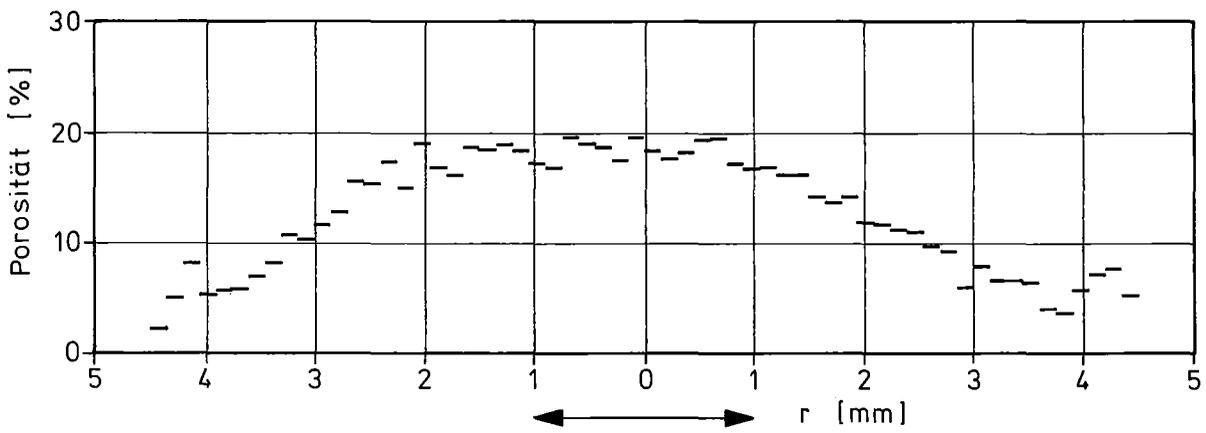


Abb.73 Zeitlicher Verlauf der berechneten Wärmedurchgangszahl im KVE 115

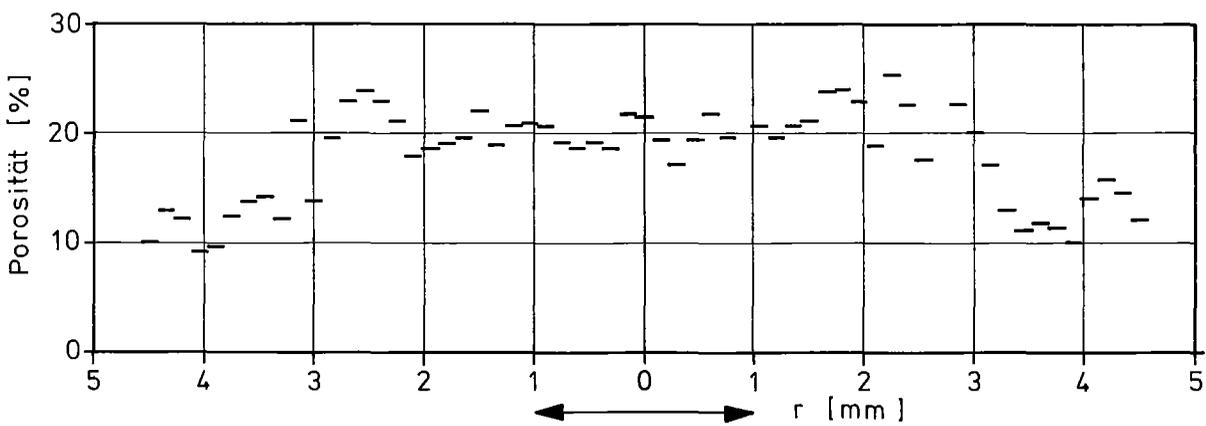
Stab 6/3 Schnitt 1



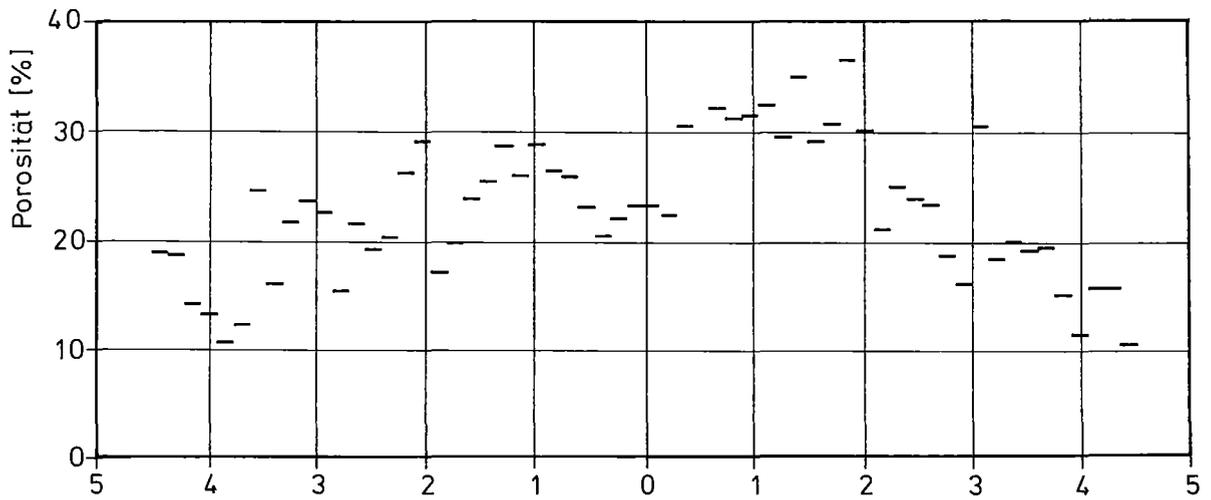
Stab 6/26 Schnitt 1



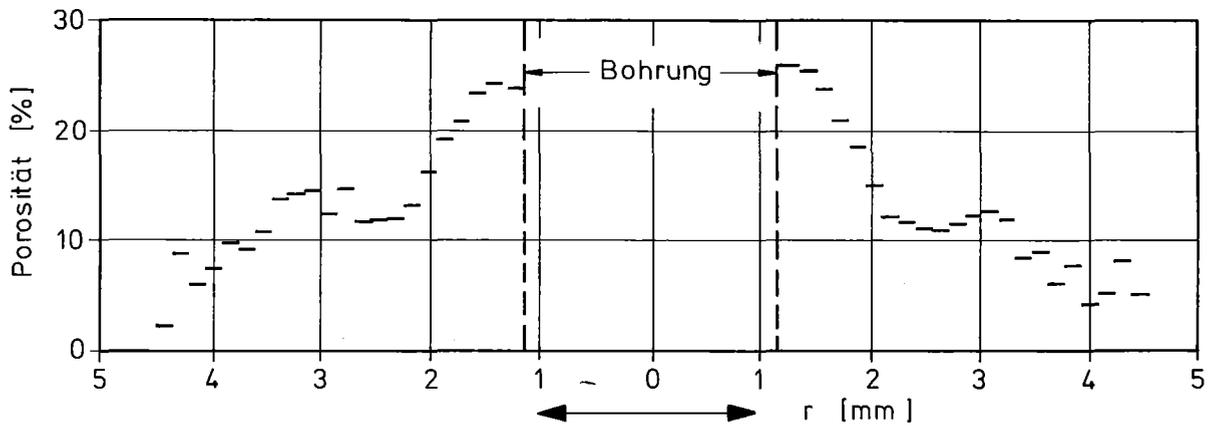
Stab 6/11 Schnitt 4



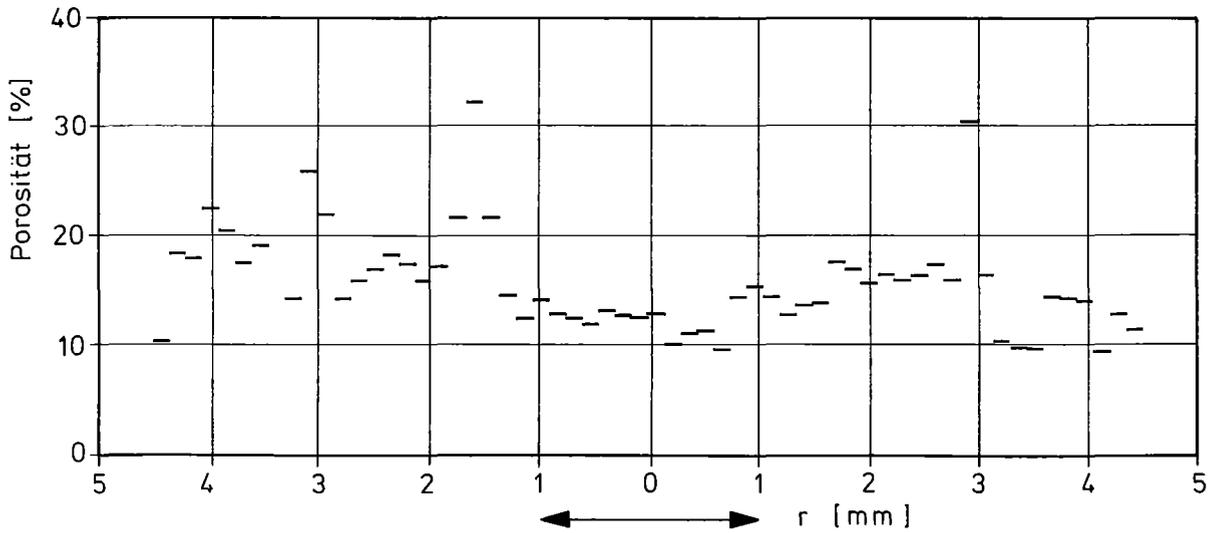
Stab 6/12 Schnitt 1

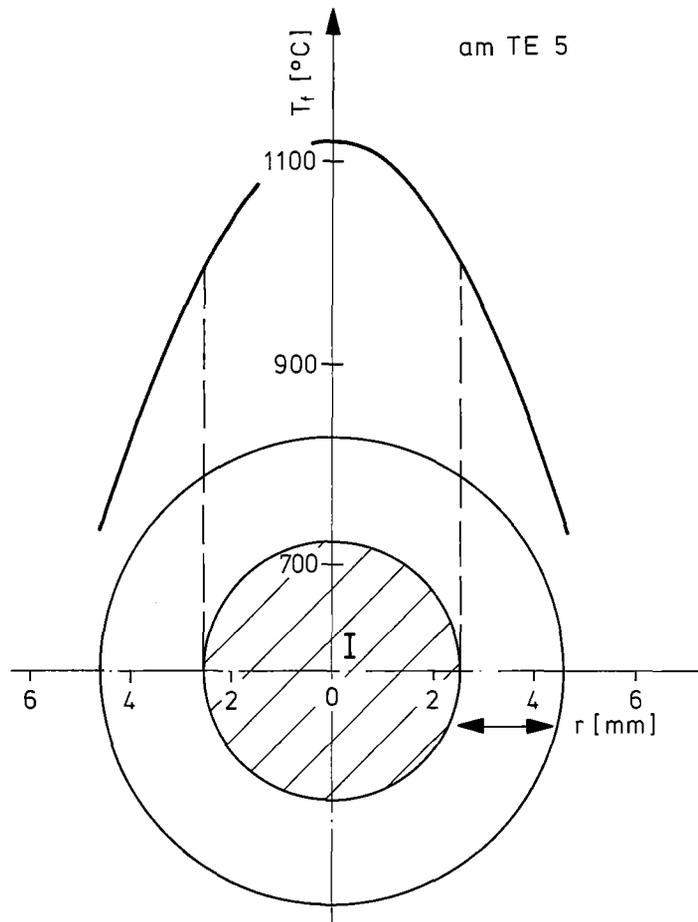


Stab 6/14 Schnitt 4



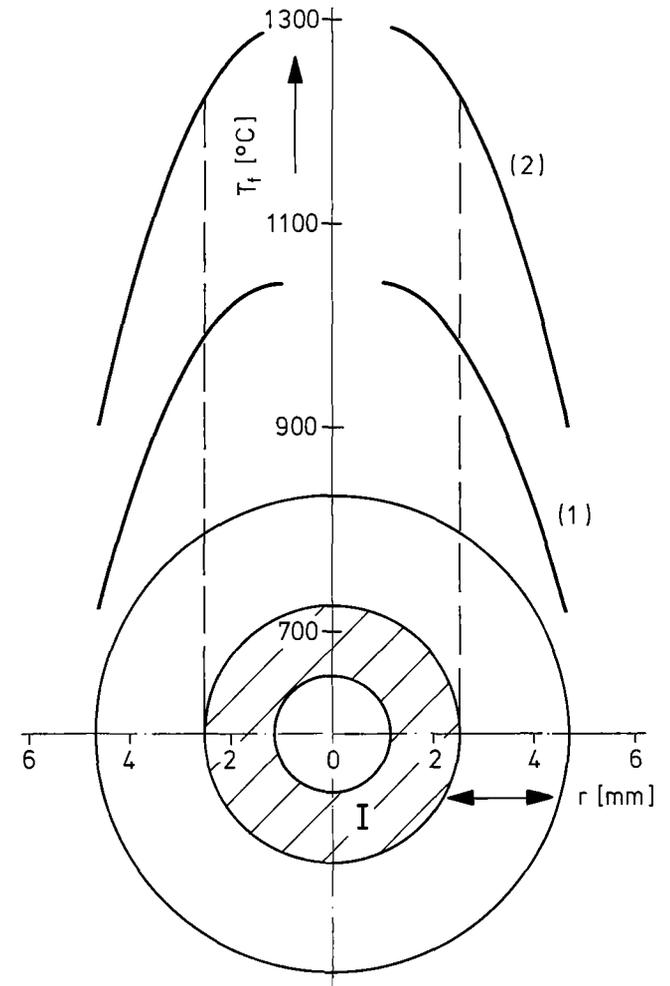
Stab 6/15 Schnitt 1





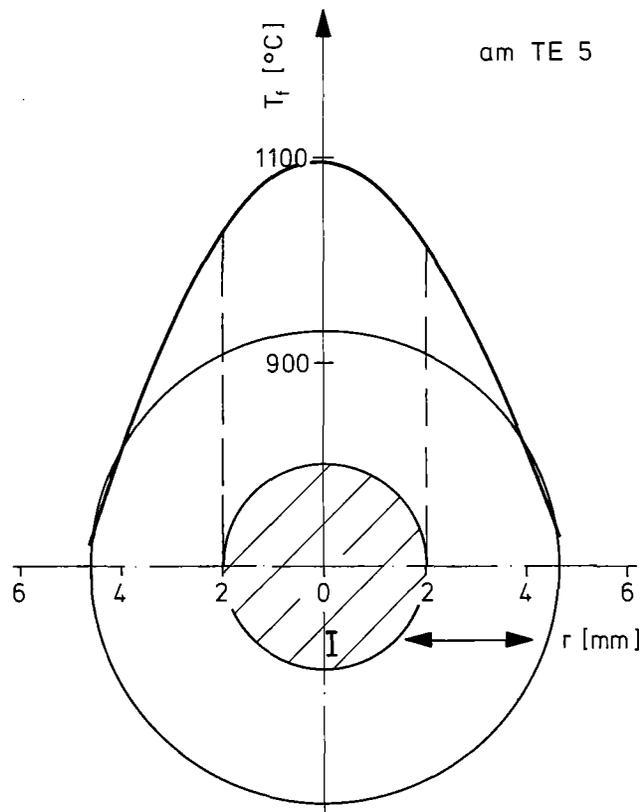
I: Zone erhöhter Porosität

Abb. 76 Radiale Temperaturverteilung im Brennstoff zu Beginn des Zyklus 59 im Prüfling 6/26



I: Zone erhöhter Porosität

Abb. 77 Radiale Temperaturverteilung im Brennstoff zu Beginn des Zyklus 69(1) und zu Beginn des Zyklus 65 (2) im Prüfling 6/14



I: Zone erhöhter Porosität

Abb.78 Radiale Temperaturverteilung im Brennstoff zu Beginn des Zyklus 61 im Prüfling 6/36

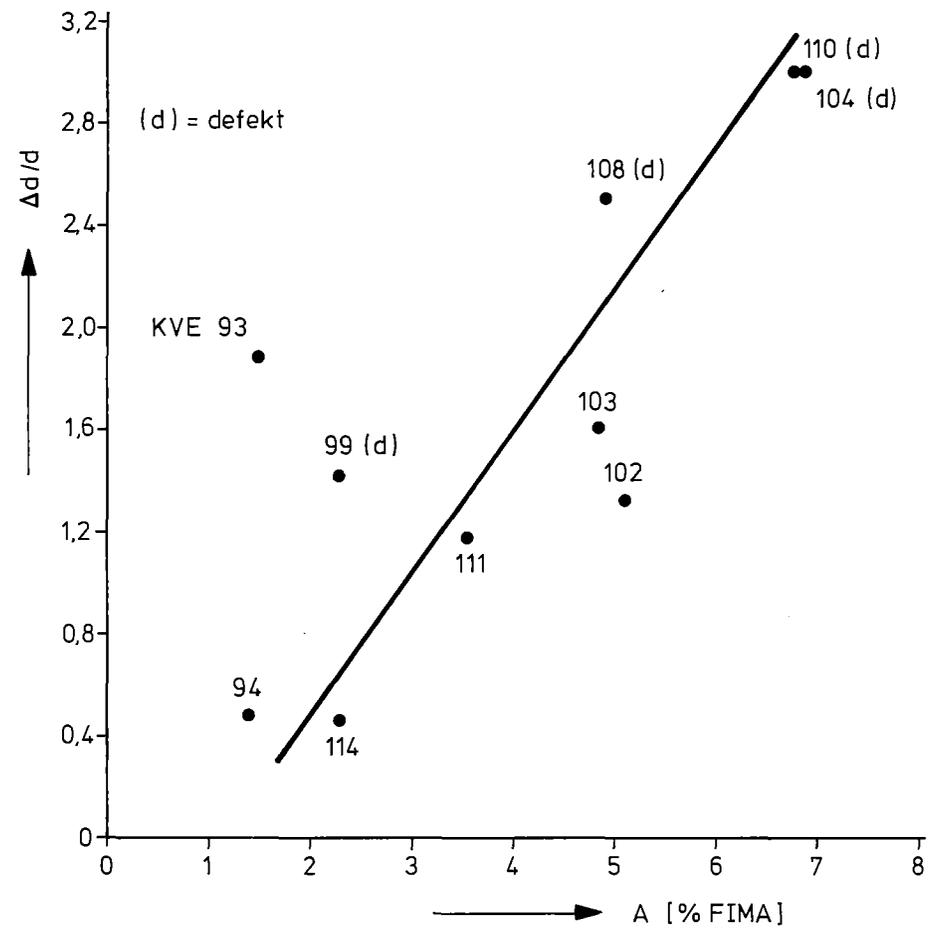


Abb. 79 Hülldehnungen gegenüber gerechneten Abbrand aufgetragen

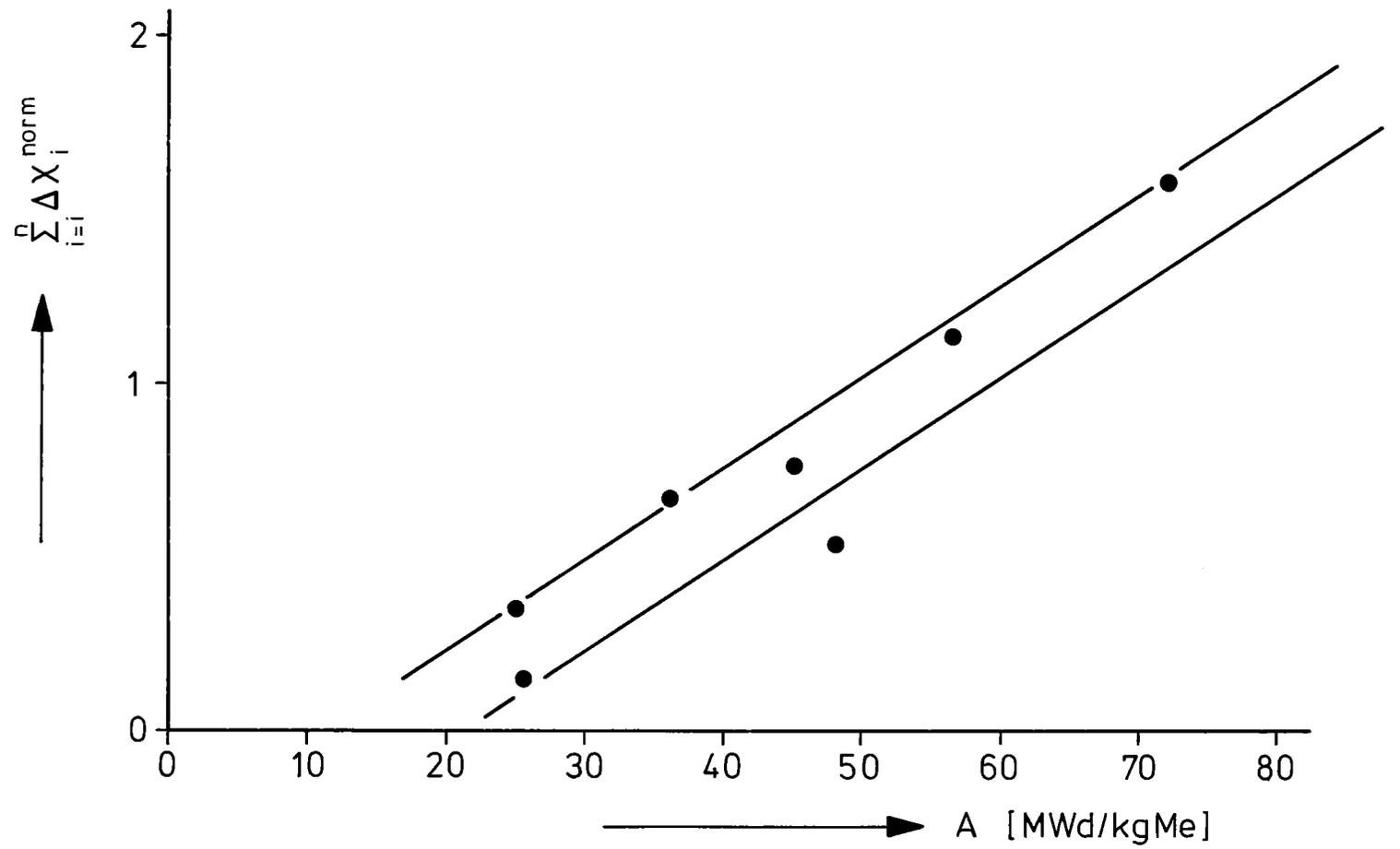


Abb. 80 Summe der normierten Leistungssprünge $\sum \Delta X_i^{norm}$ gegen den gerechneten Abbrand aufgetragen

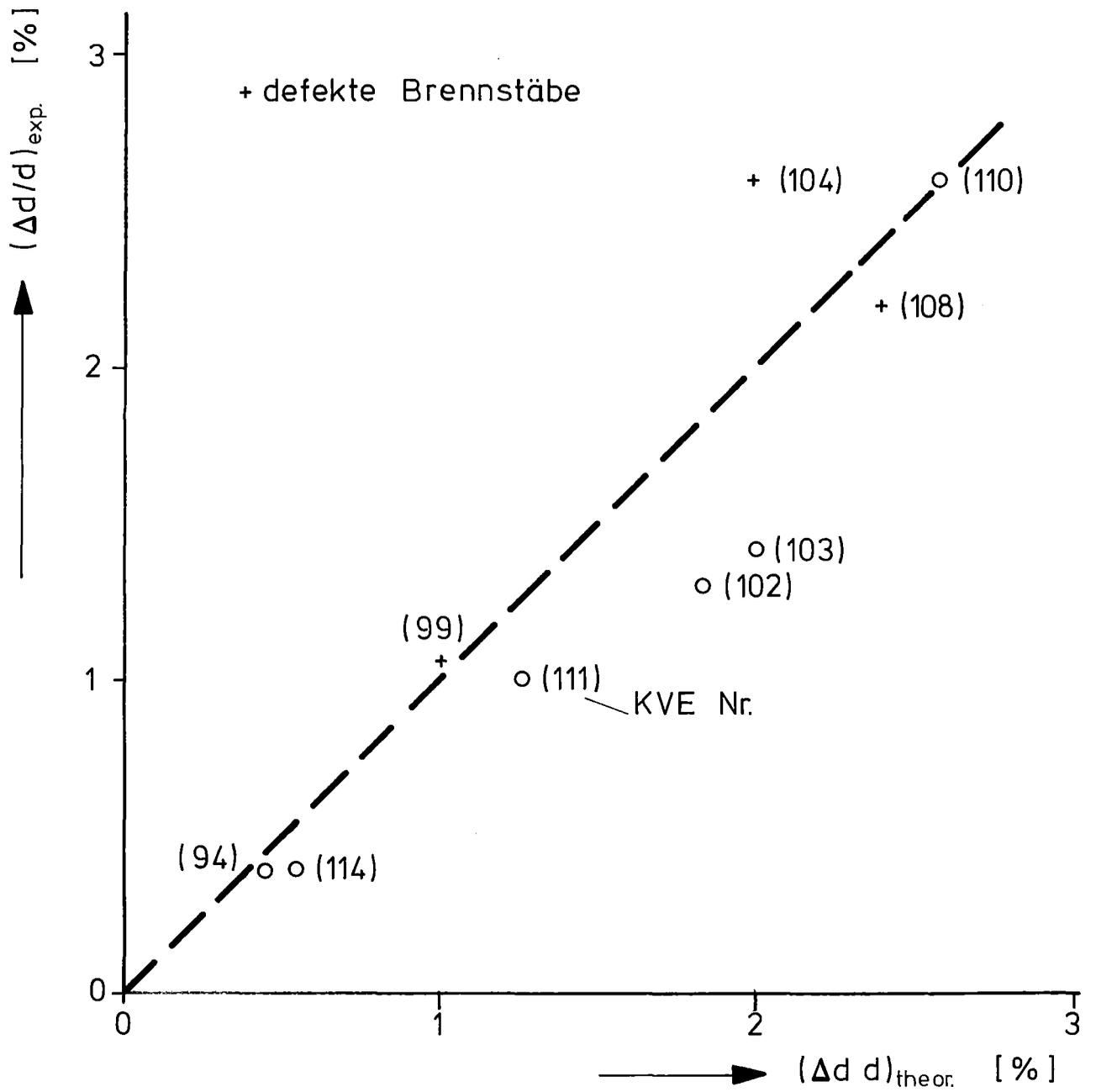


Abb. 81 Hülldehnungen der Vg. 6a und 6c, gemessene Werte gegen gerechnete Werte aufgetragen

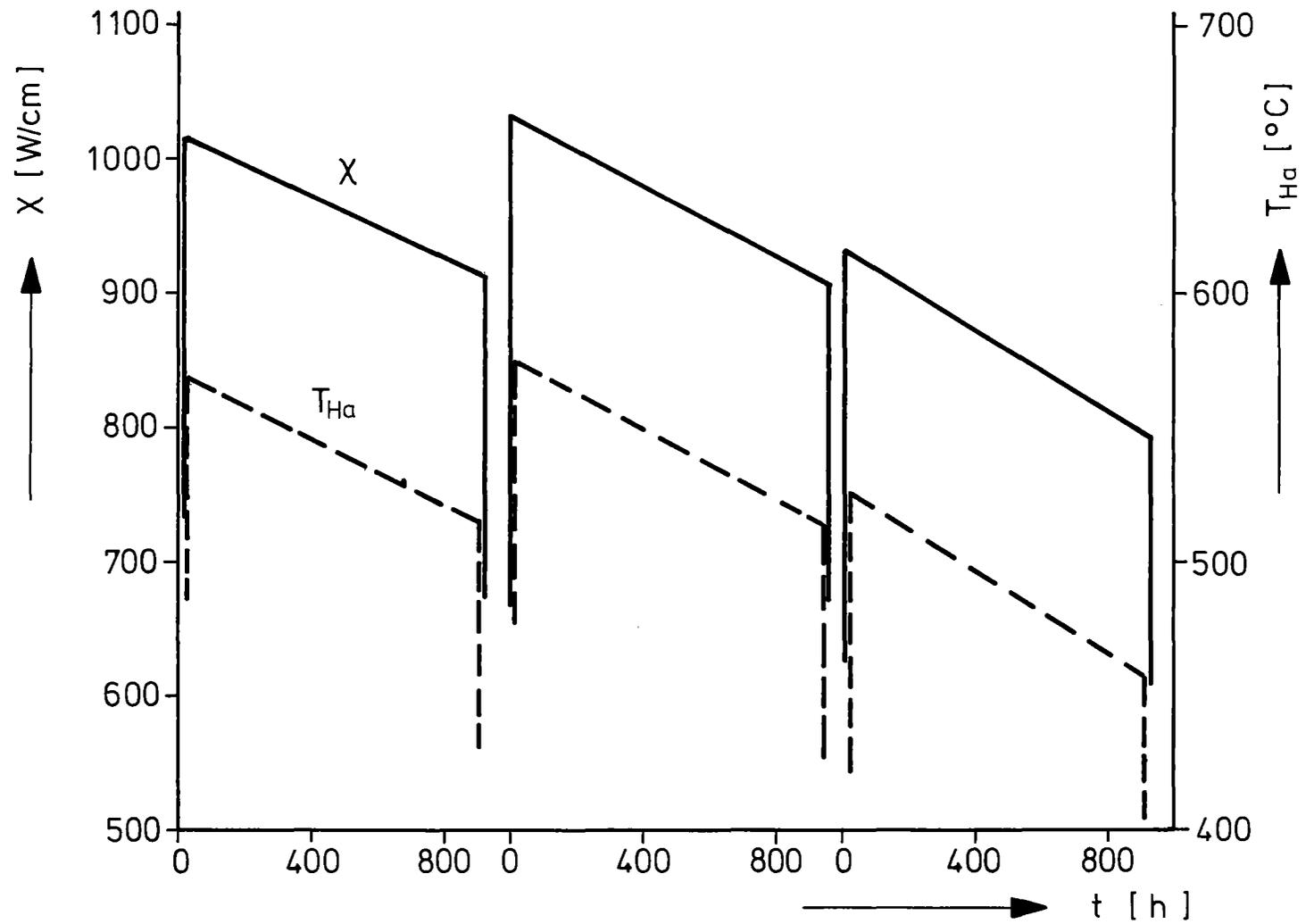


Abb. 82 Stableistung X und Hüllaußentemperatur T_{Ha} des KVE 108 für die ersten drei Rechenzyklen

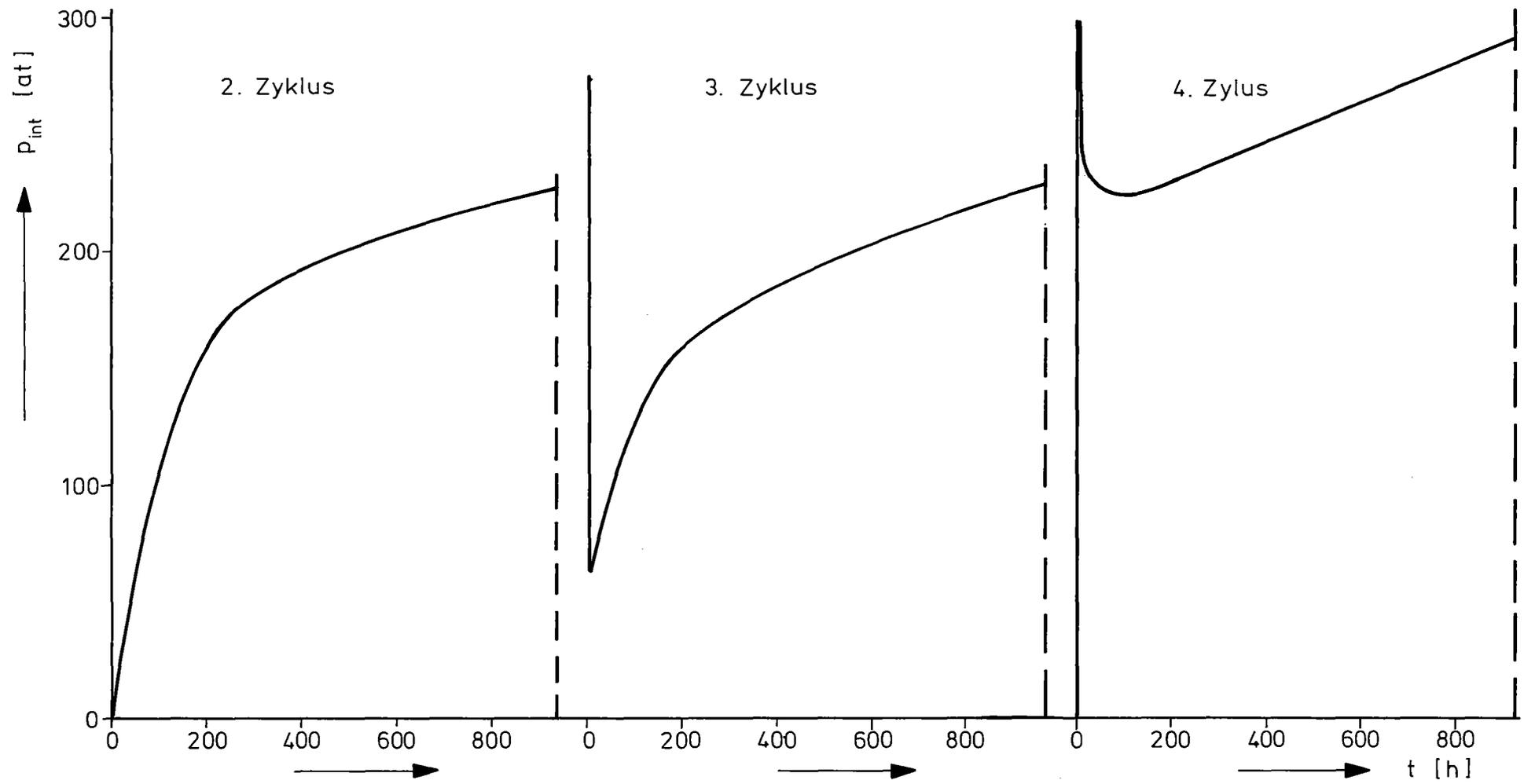


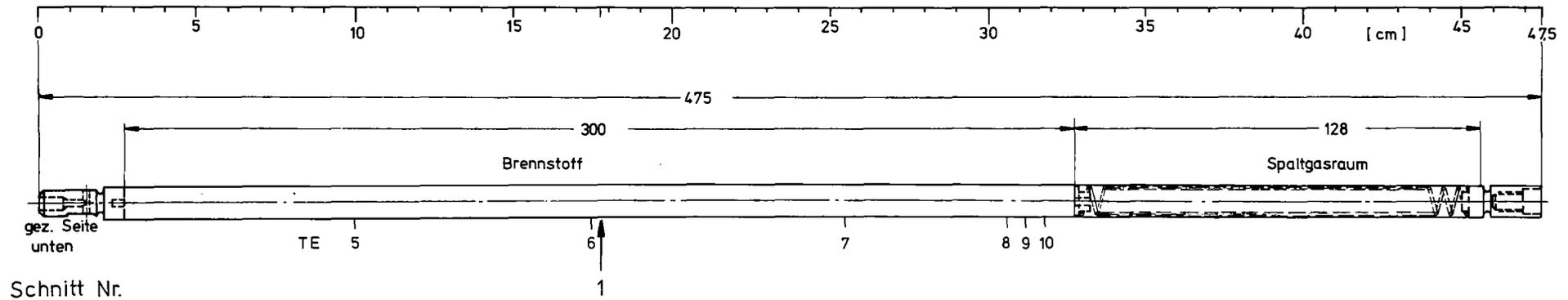
Abb. 83 Kontaktdruck als Funktion der Zeit

A n h a n g II

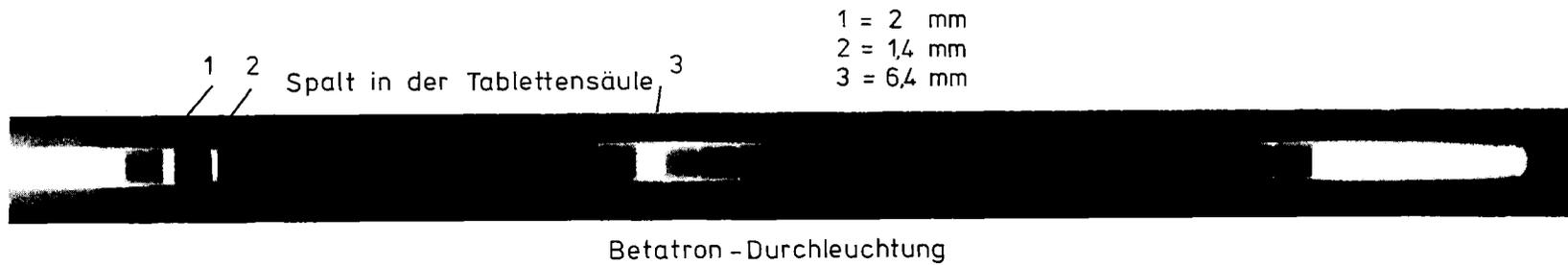
Betatron-Durchleuchtung,

Schnittpläne und

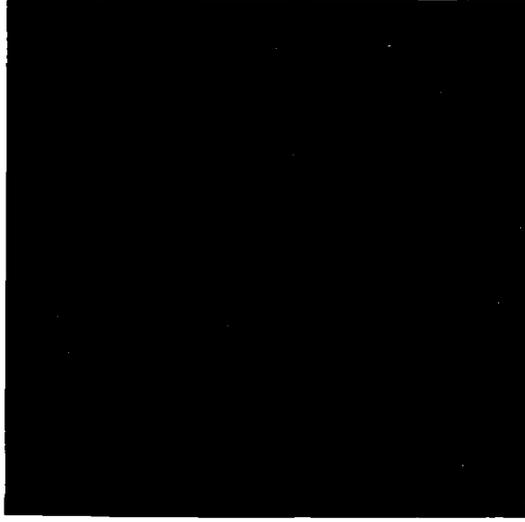
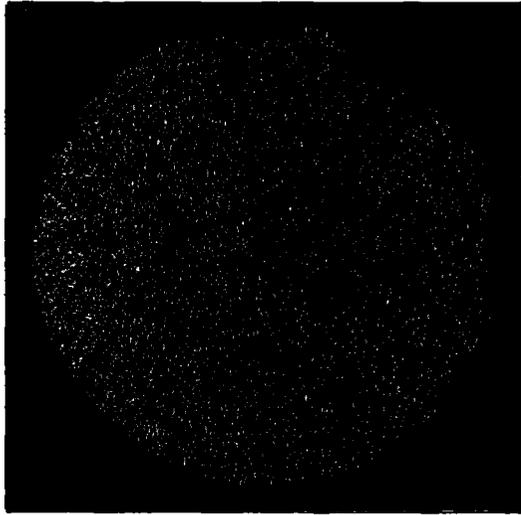
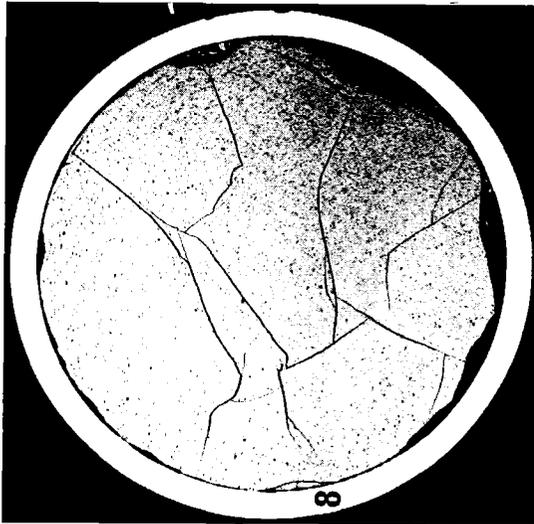
zerstörende Nachuntersuchung



- II/3 -



Schnittplan und Betatron-Durchleuchtung des Prüflings 6/1



Schnitt 1

α (60 sec)

β - γ (720sec)

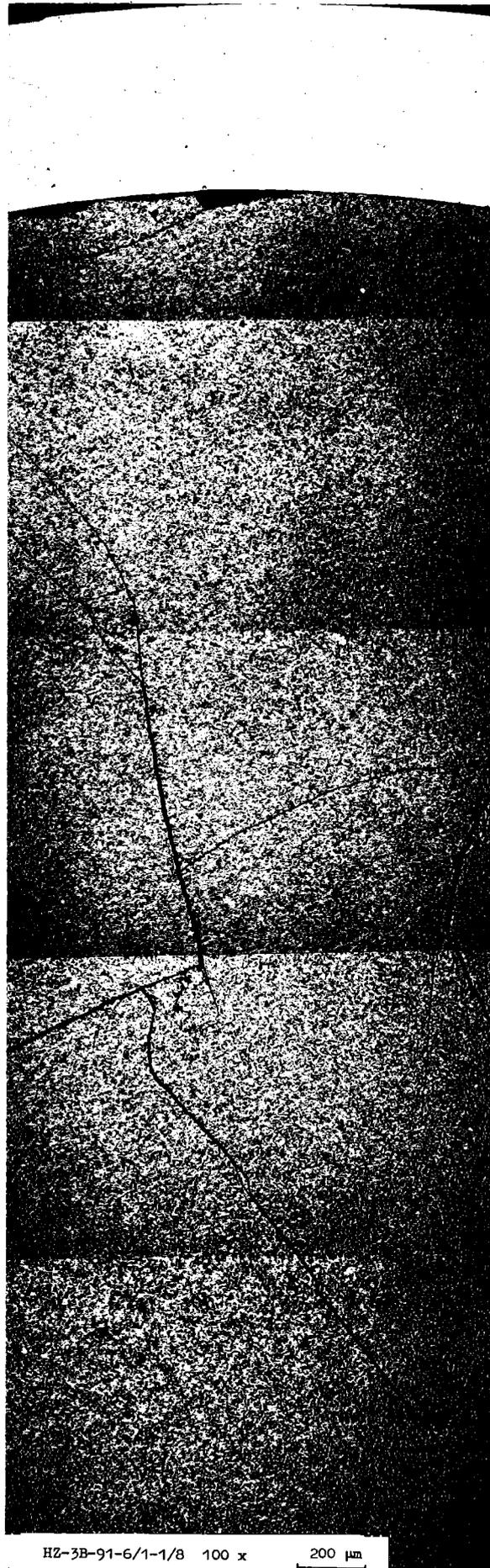
Autoradiografie

2 mm

Vg. 6a Prüfling 6/1 (U,Pu)C

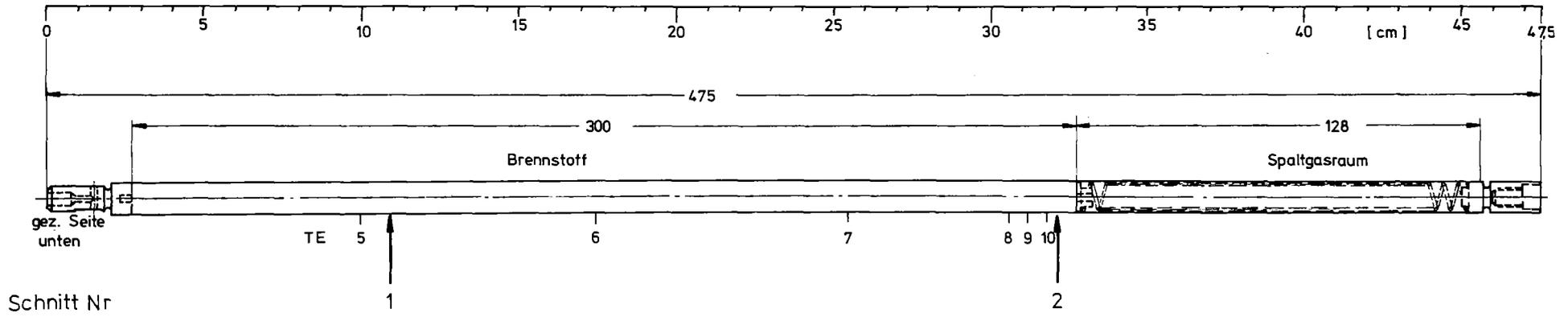
- II/5 -

Stab 6/1 Schnitt 1

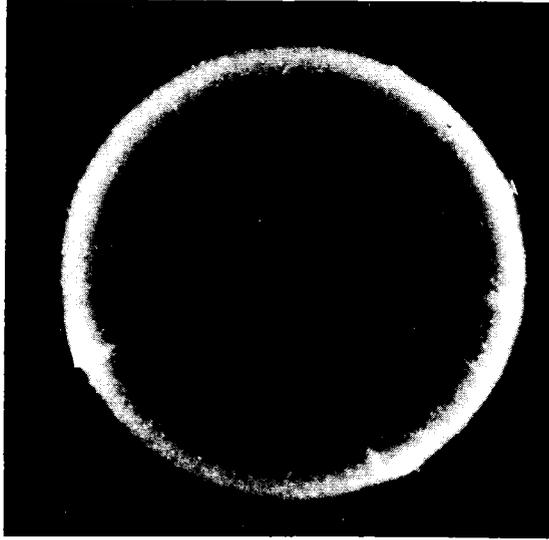
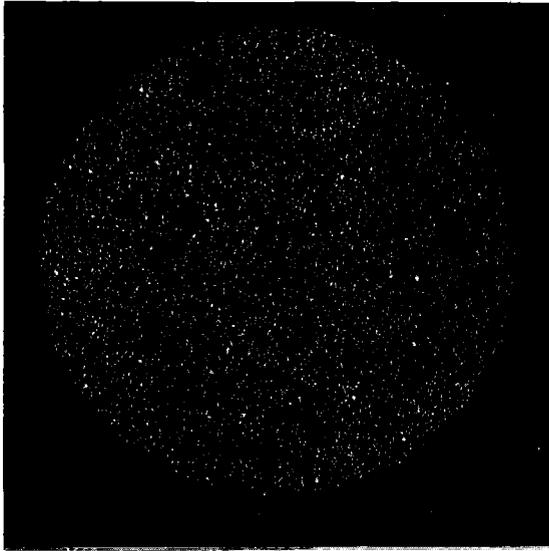
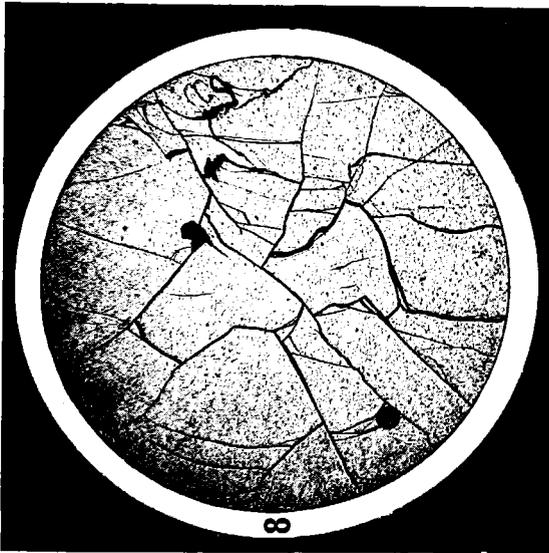


HZ-3B-91-6/1-1/8 100 x

200 μm



Schnittplan und Betatron-Durchleuchtung des Prüflings 6/26A



Schnitt 1

α (80sec)

$\beta - \gamma$ (900sec)

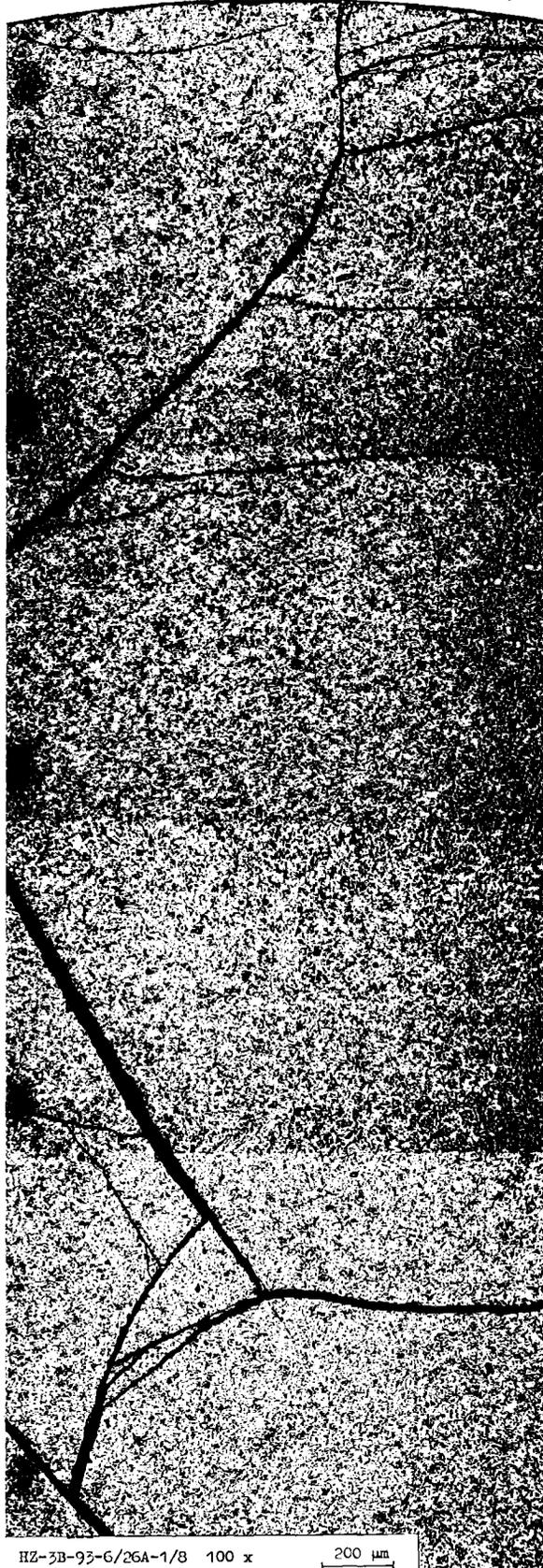
Autoradiografie

—
2mm

Vg. 6a Prüfling 6/26A (U,Pu)C

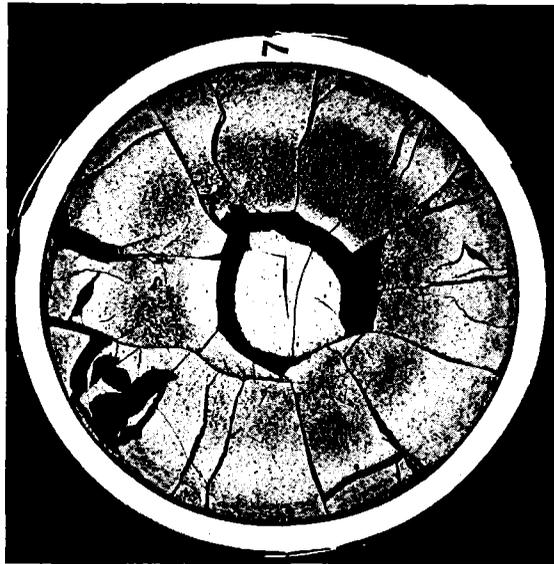
II/8

Stab 6/26A Schnitt 1

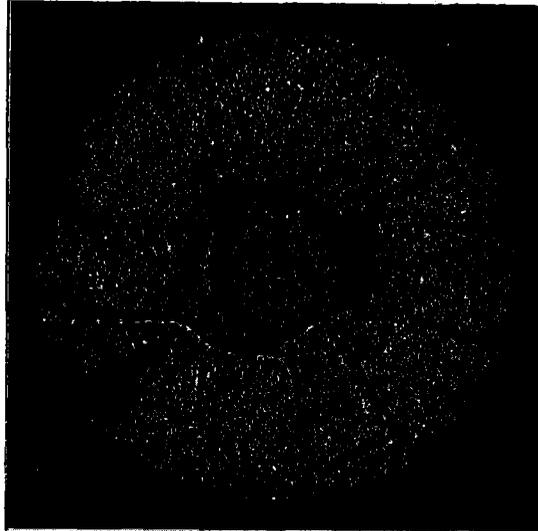


HZ-3B-93-G/26A-1/8 100 x

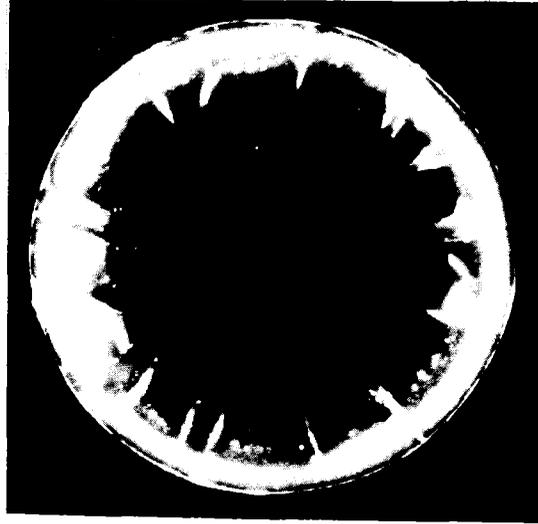
200 μ m



Schnitt 2



α (40sec)



β - γ (960sec)

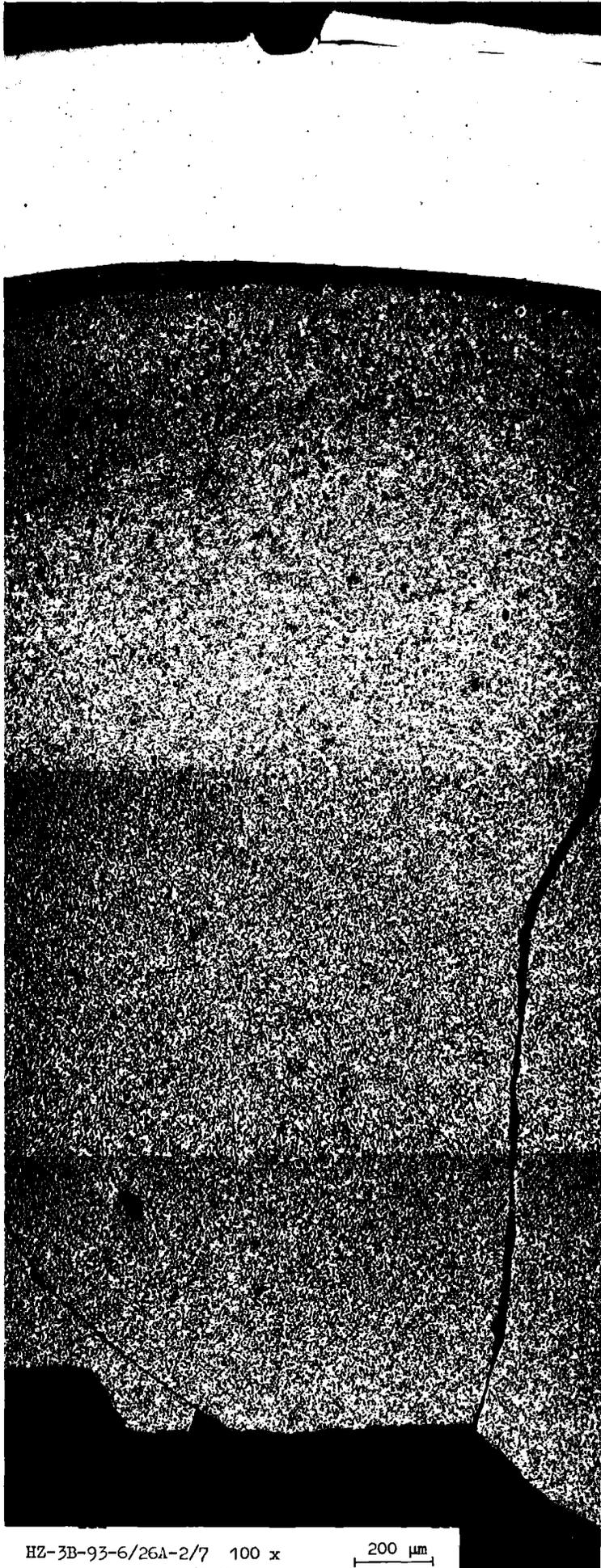
Autoradiografie

2 mm

Vg. 6a Prüfling 6/26A (U,Pu)C

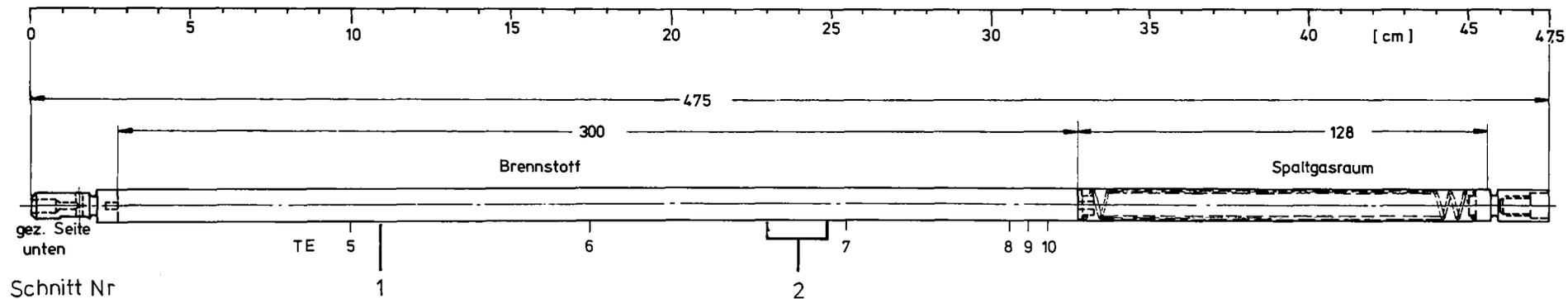
- II/10 -

Stab 6/26A Schnitt 2



HZ-3B-93-6/26A-2/7 100 x

200 μm



Spalt in der Tablettensäule

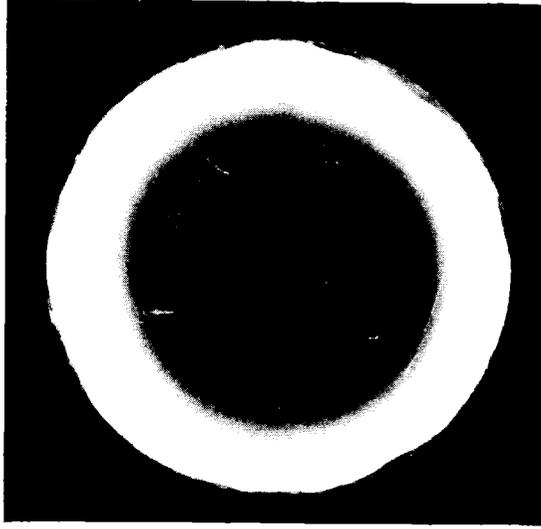
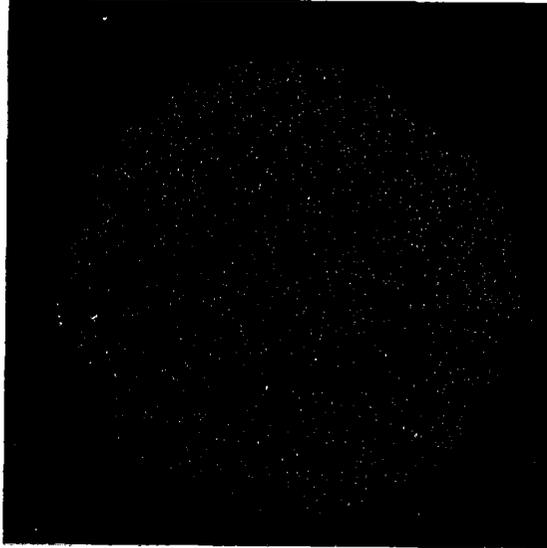
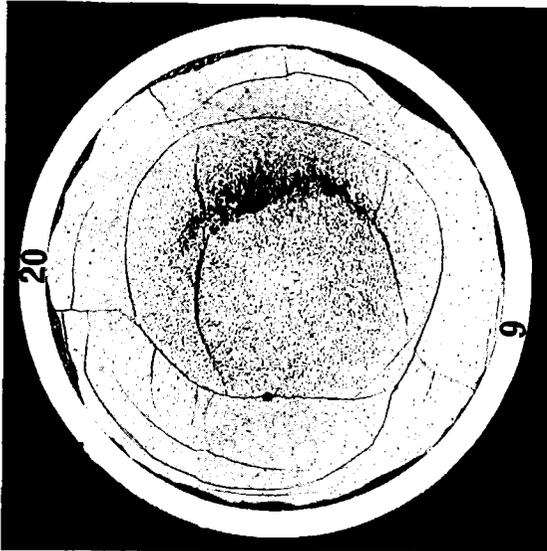
1,4 mm



Betatron-Durchleuchtung

- II/11 -

Schnittplan und Betatron-Durchleuchtung des Prüflings 6/3



Schnitt 1

α (8 sec)

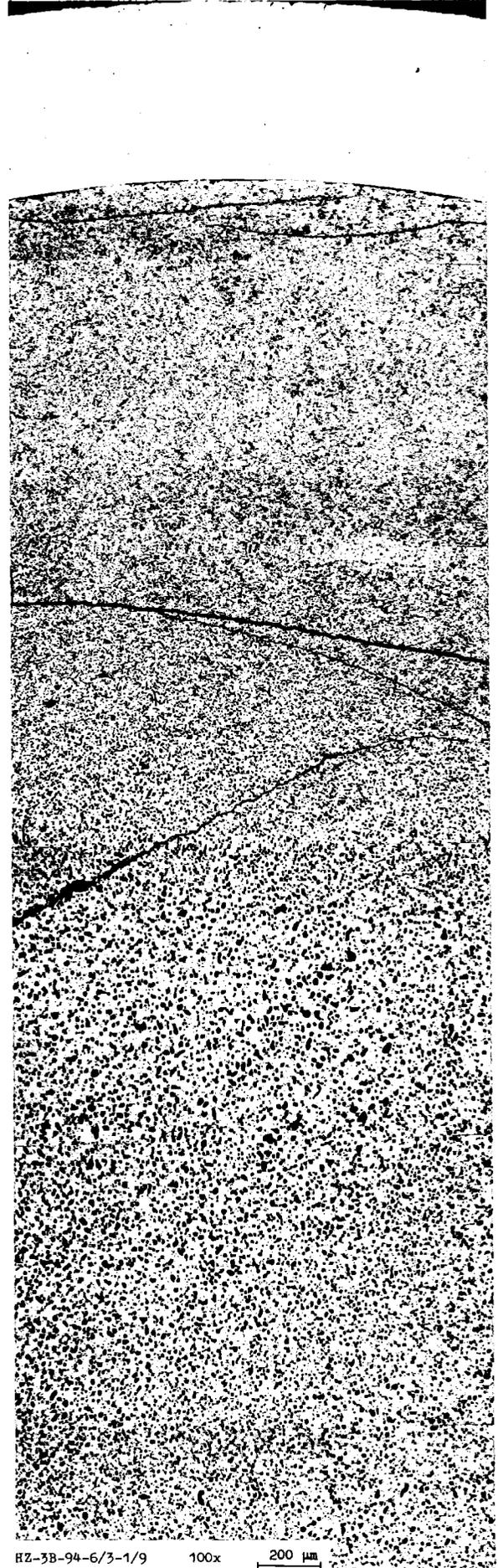
β - γ (225sec)

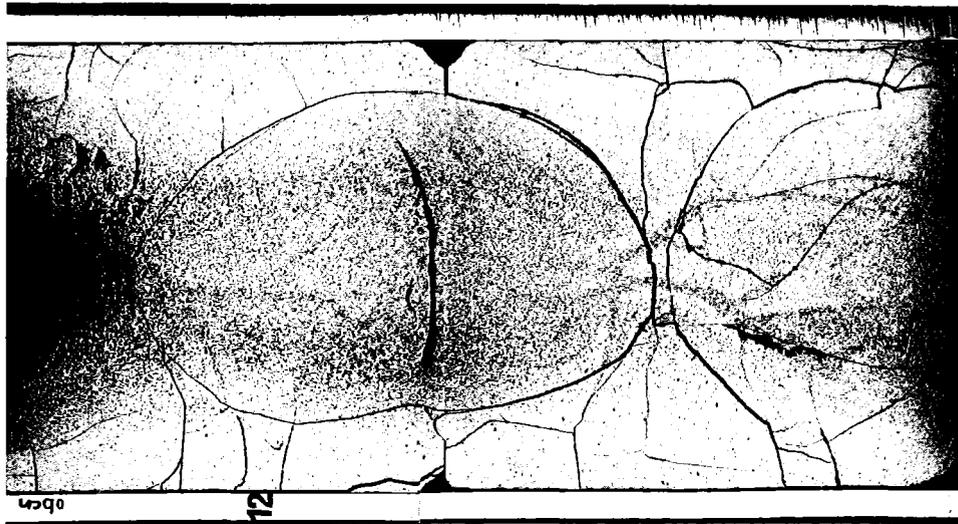
Autoradiografie

—
2mm

Vg. 6a Prufling 6/3 (U,Pu)C

Stab 6/3 Schnitt 1





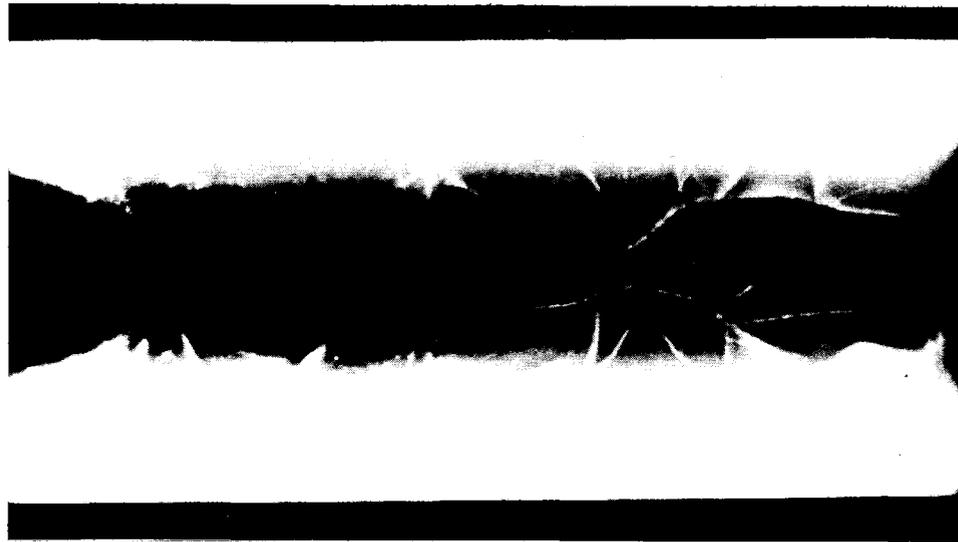
Schnitt 3

2mm



α (8 sec)

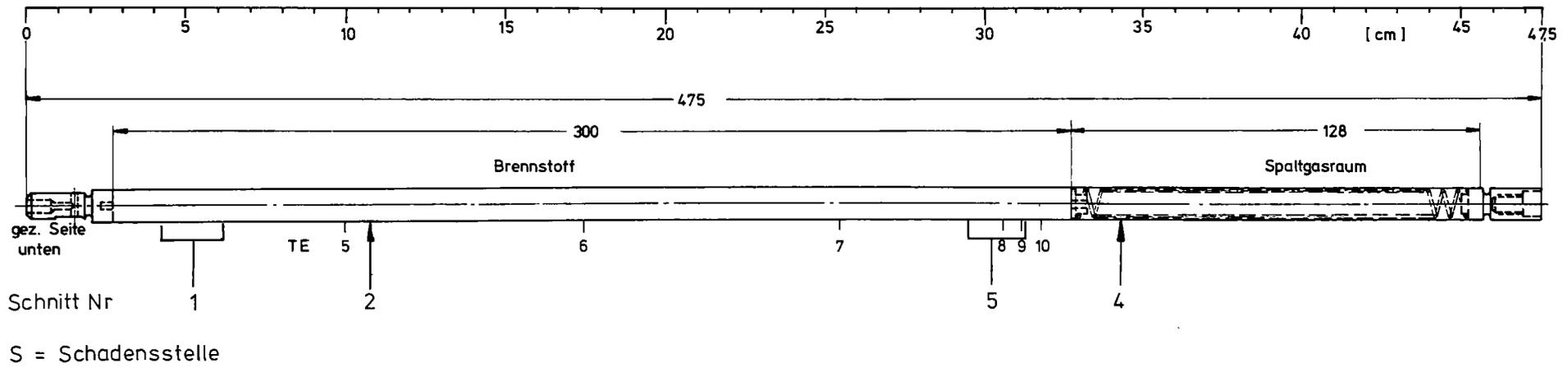
Autoradiografie



β - γ (300sec)

Vg: 6a Prüfling 6/3 (U,Pu)C





1 = 10 mm
 2 = 6,3 mm



Schnittplan und Betatron-Durchleuchtung des Prüflings 6/27



Schnitt 1



α (25 sec)

1mm



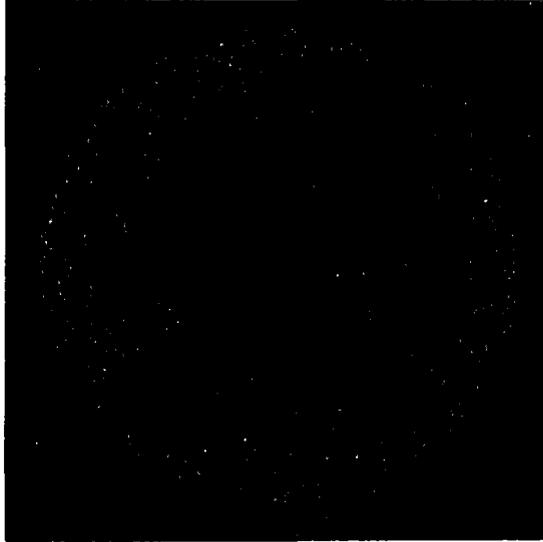
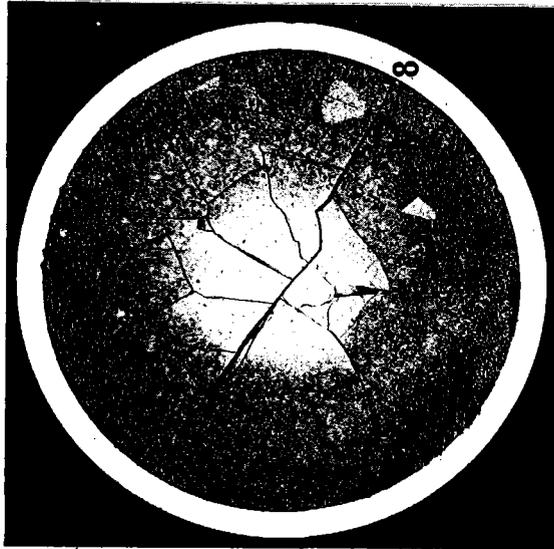
β - γ (900 sec)

Autoradiografie

Vg. 6a Prüfling 6/27 (U,Pu)C

Stab 6/27 Schnitt 1





Schnitt 2

α (30 sec)

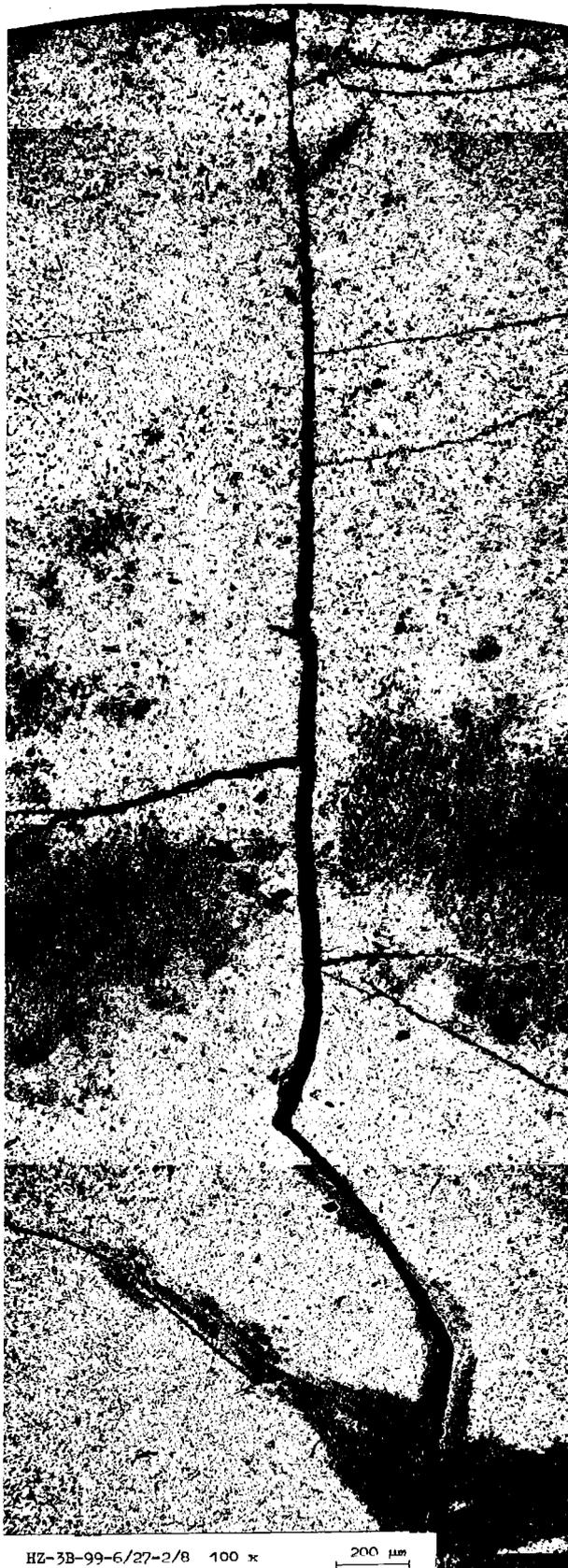
β - γ (40 sec)

Autoradiografie

—
2 mm

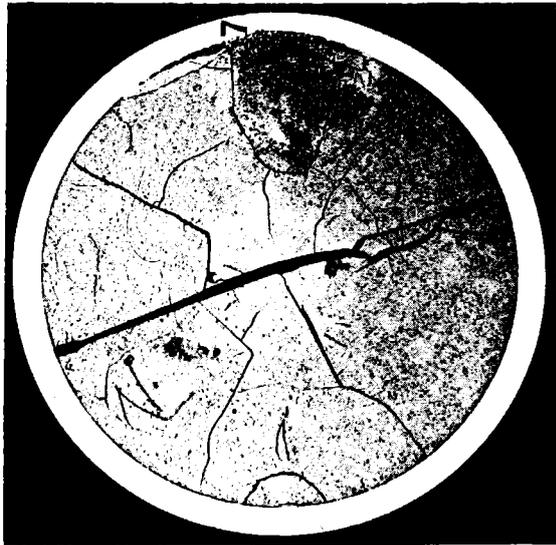
Vg. 6a Prfling 6/27 (U Pu)C

Stab 6/27 Schnitt 2

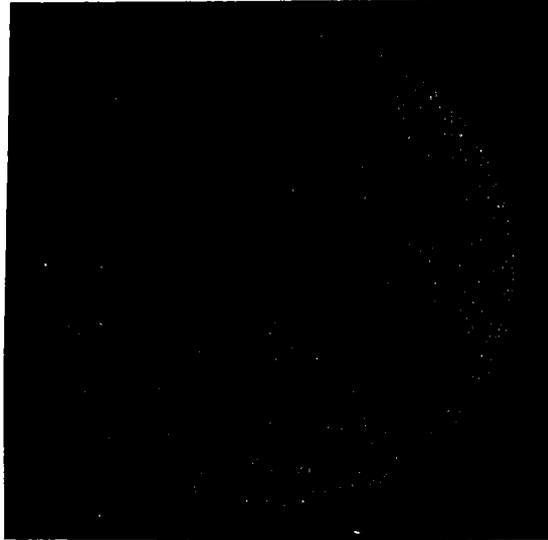


HZ-3B-99-6/27-2/8 100 x

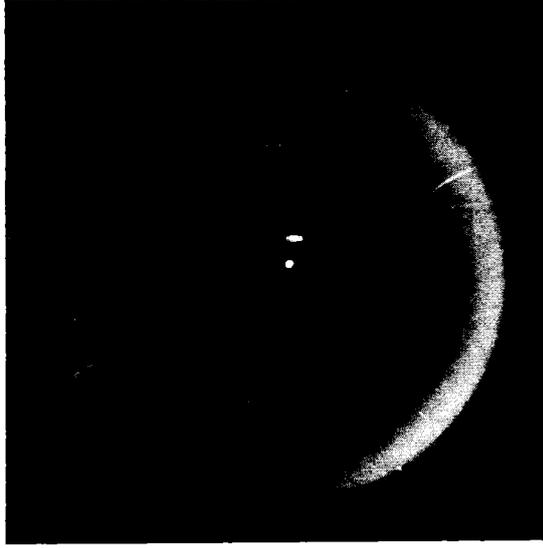
200 μ m



Schnitt 4



α (30sec)



β - γ (40sec)

Autoradiografie

┌───┐
2mm

Vg.6a Prüfling 6/27 (U,Pu)C

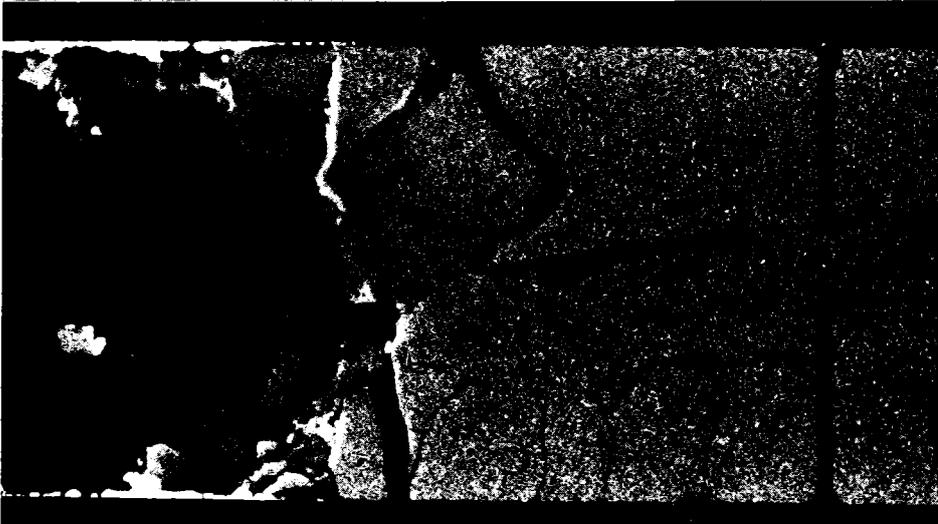
- II/22 -

Stab 6/27 Schnitt 4





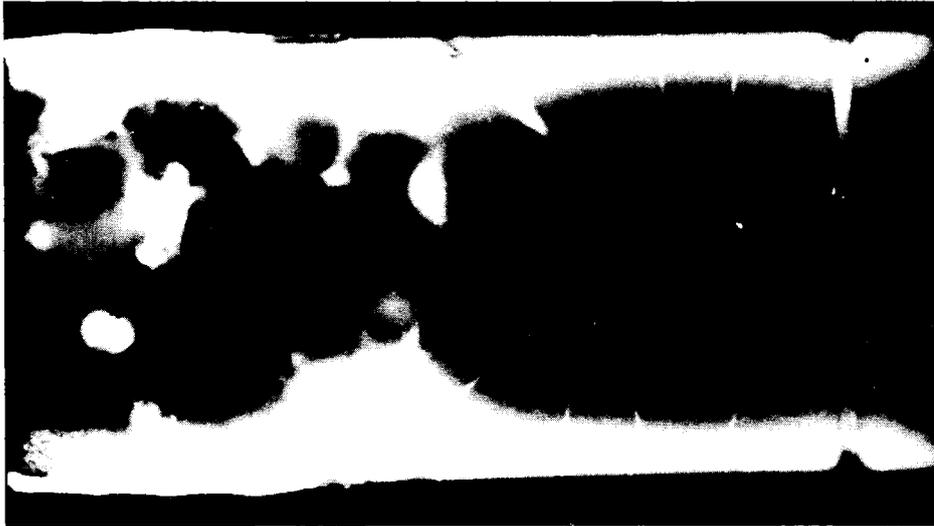
Schnitt 5



α (15 sec)

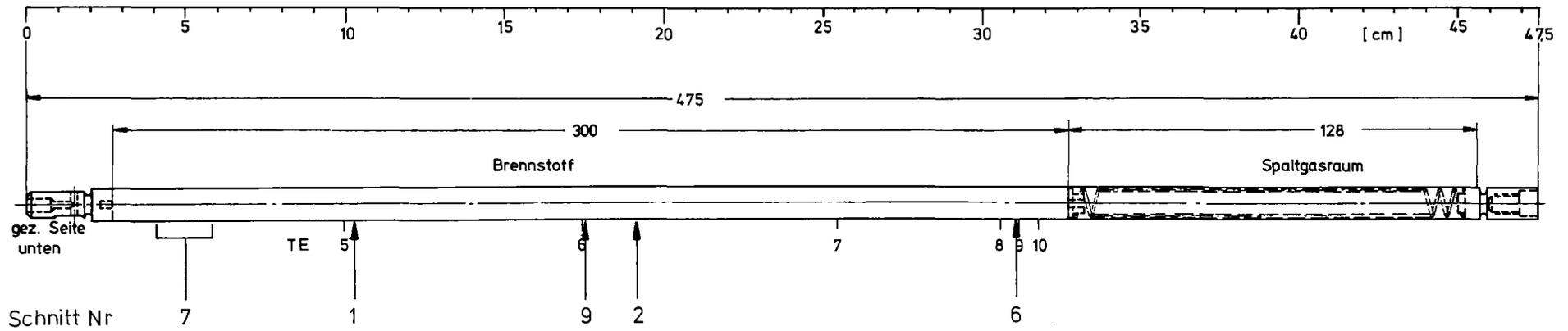
Autoradiografie

2 mm



β - γ (100sec)

Vg. 6a Prufling 6/27 (U,Pu)C

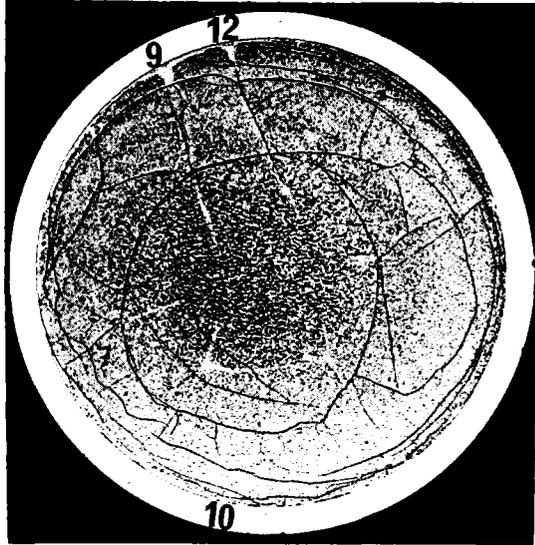


Spalt in der Tablettensäule 3,6 mm



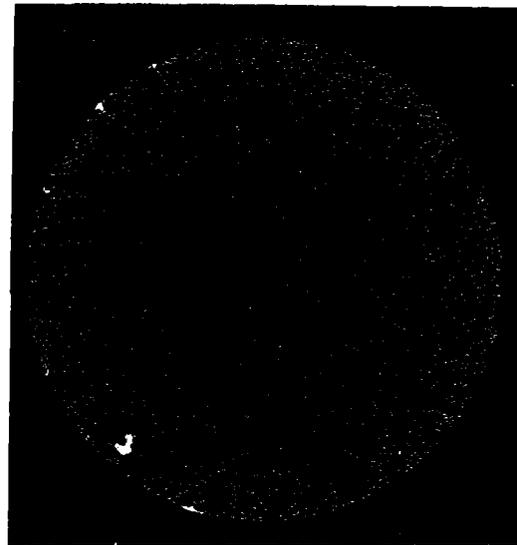
Betatron - Durchleuchtung

Schnittplan und Betatron-Durchleuchtung des Prüflings 6/26

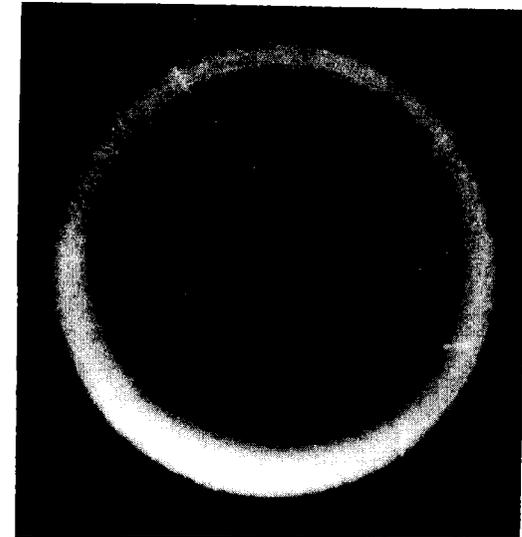


Schnitt 1

2mm



α (8 sec)



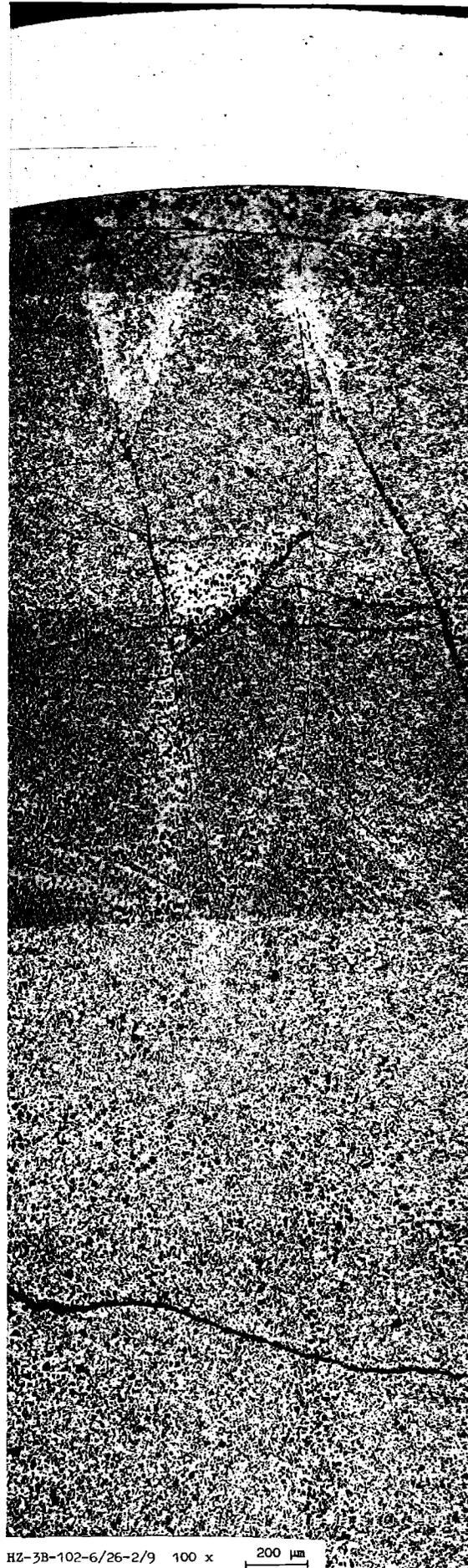
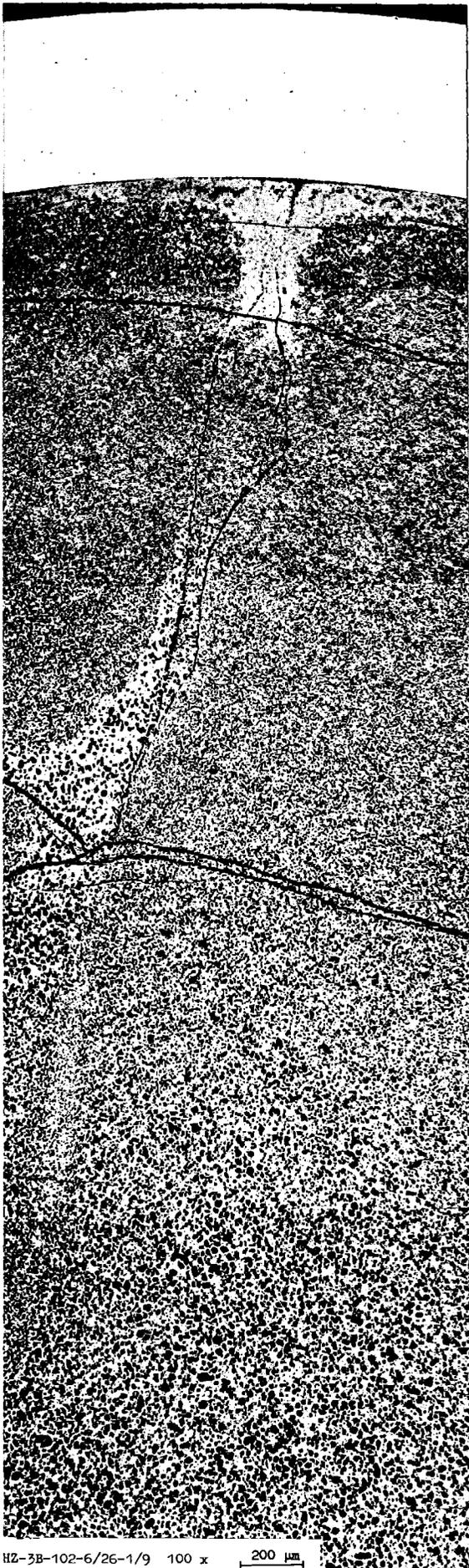
β - γ (25 sec)

Autoradiografie

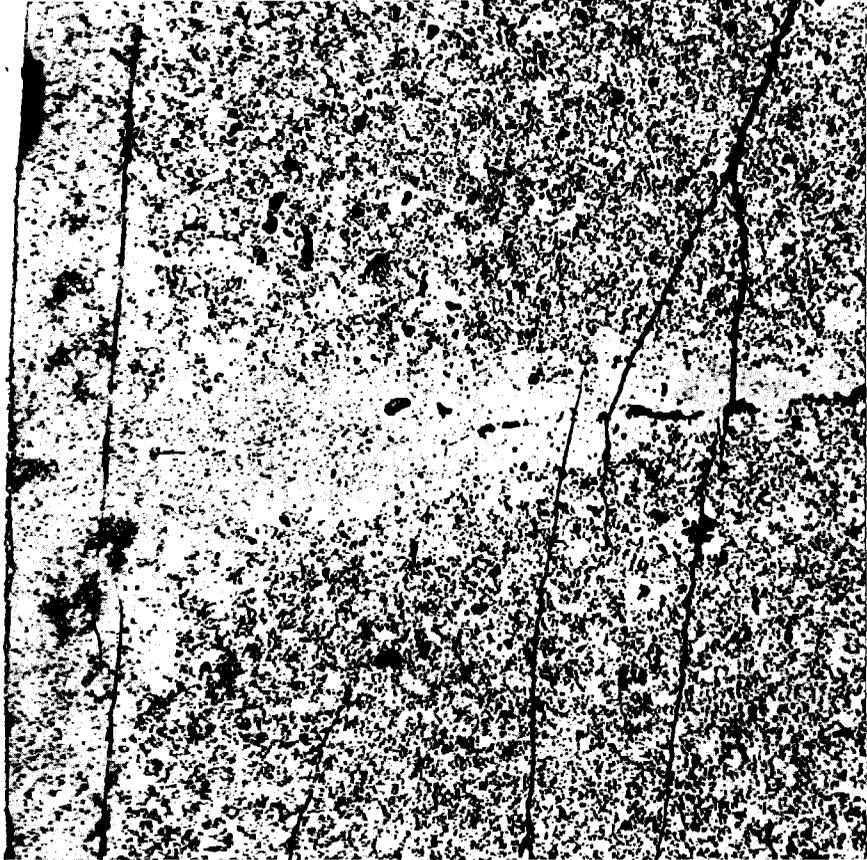
Vg.6a Prüfling 6/26 (U,Pu)C

Schnitt 1

Schnitt 2



Stab 6/26 Schnitt 1



100 μm

200x

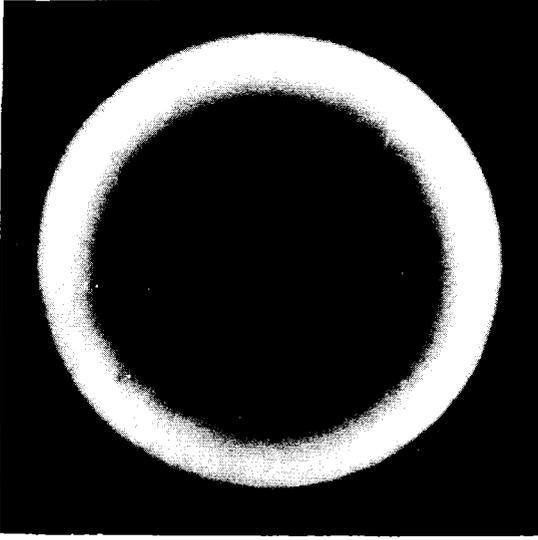
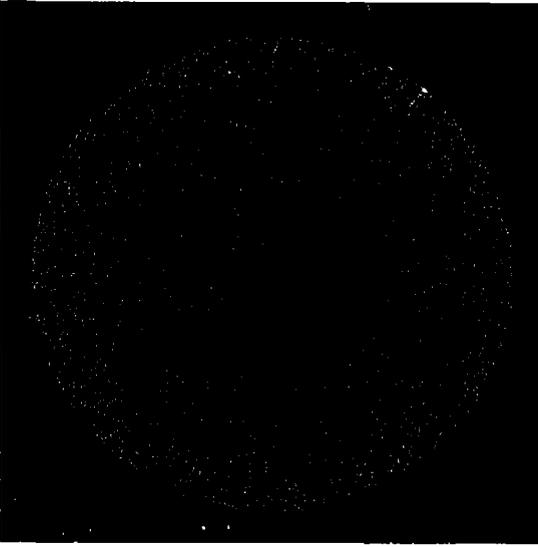
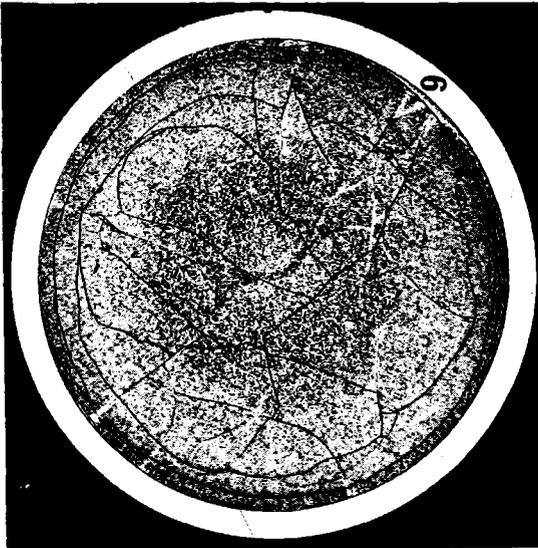
HZ-3B-102-6/26-1/10



40 μm

500x

HZ-3B-102-6/26-1/12



Schnitt 2

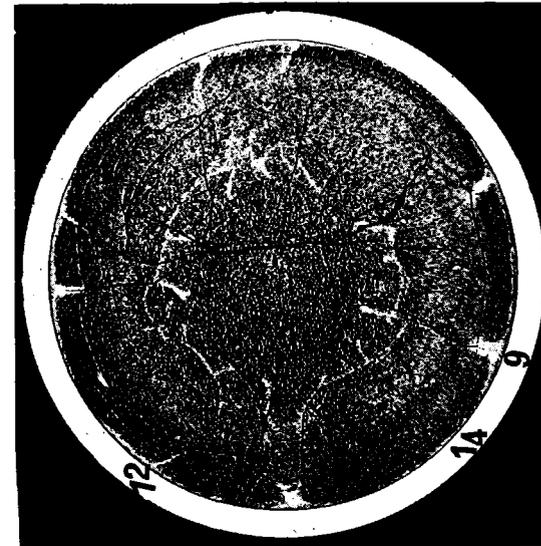
α (8 sec)

β - γ (25 sec)

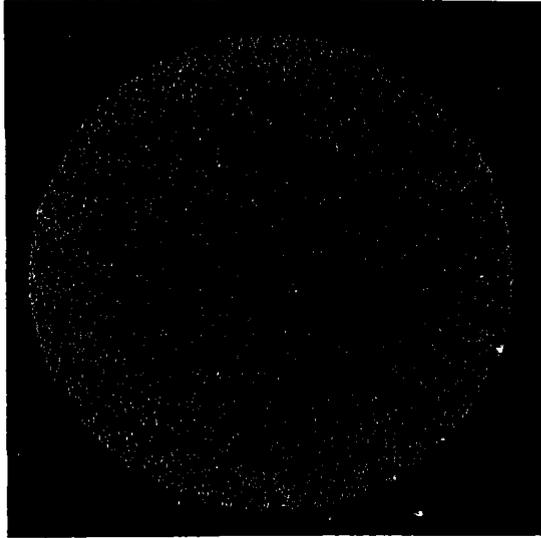
Autoradiografie

2mm

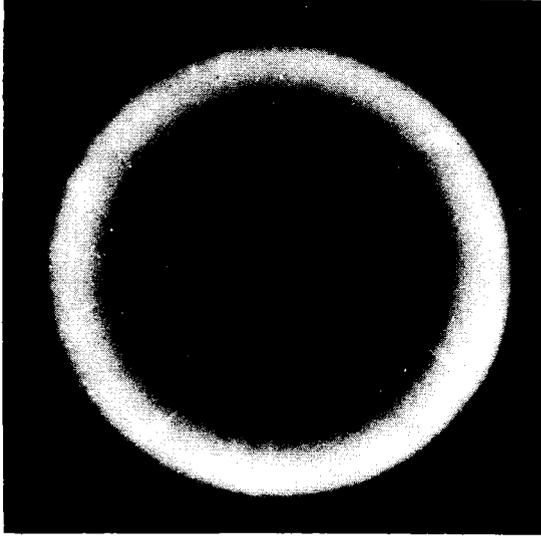
Vg.6a Prüfling 6/26 (U,Pu)C



Schnitt 6



α (8 sec)



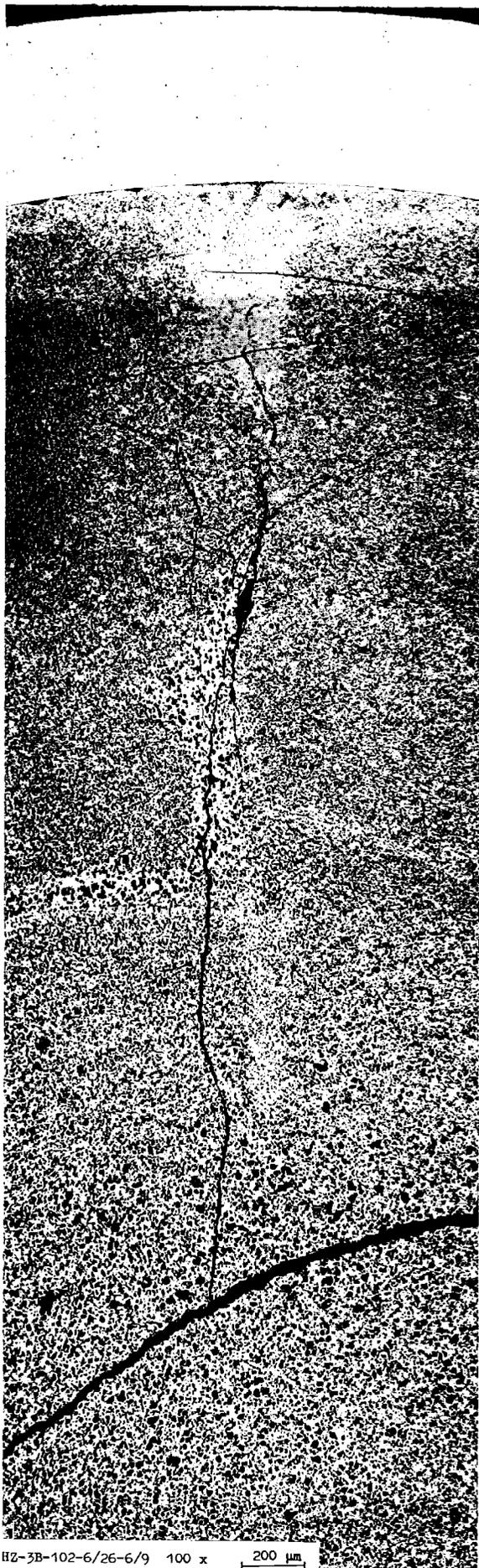
β - γ (25 sec)

Autoradiografie

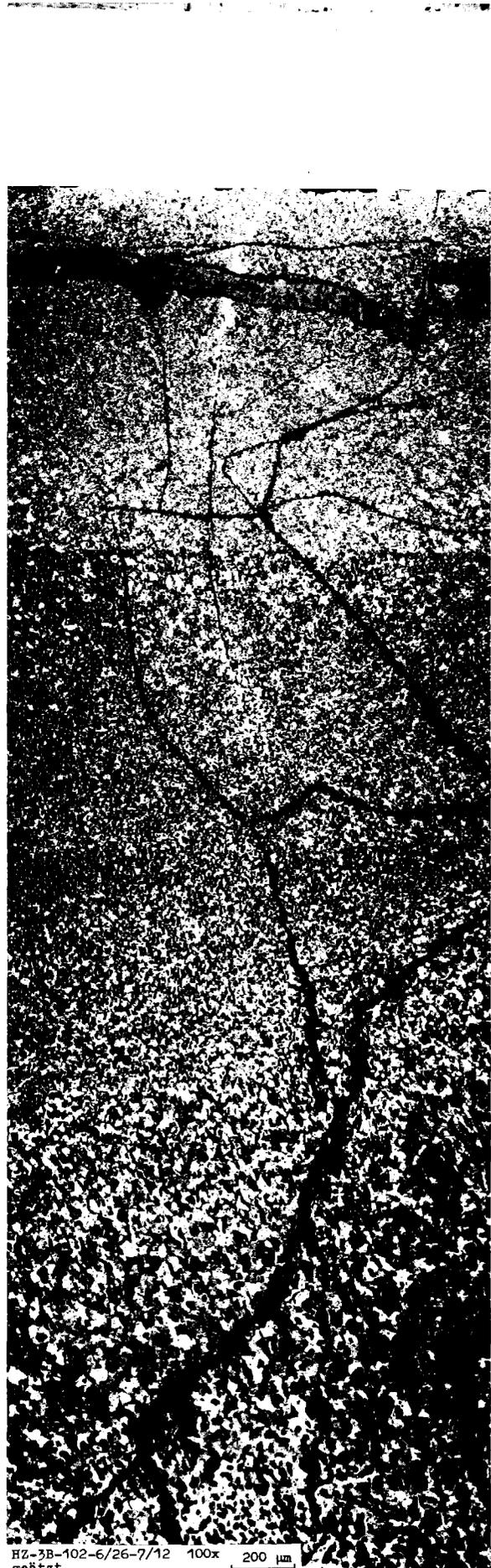
2mm

Vg.6a Prüfling 6/26 (U,Pu)C

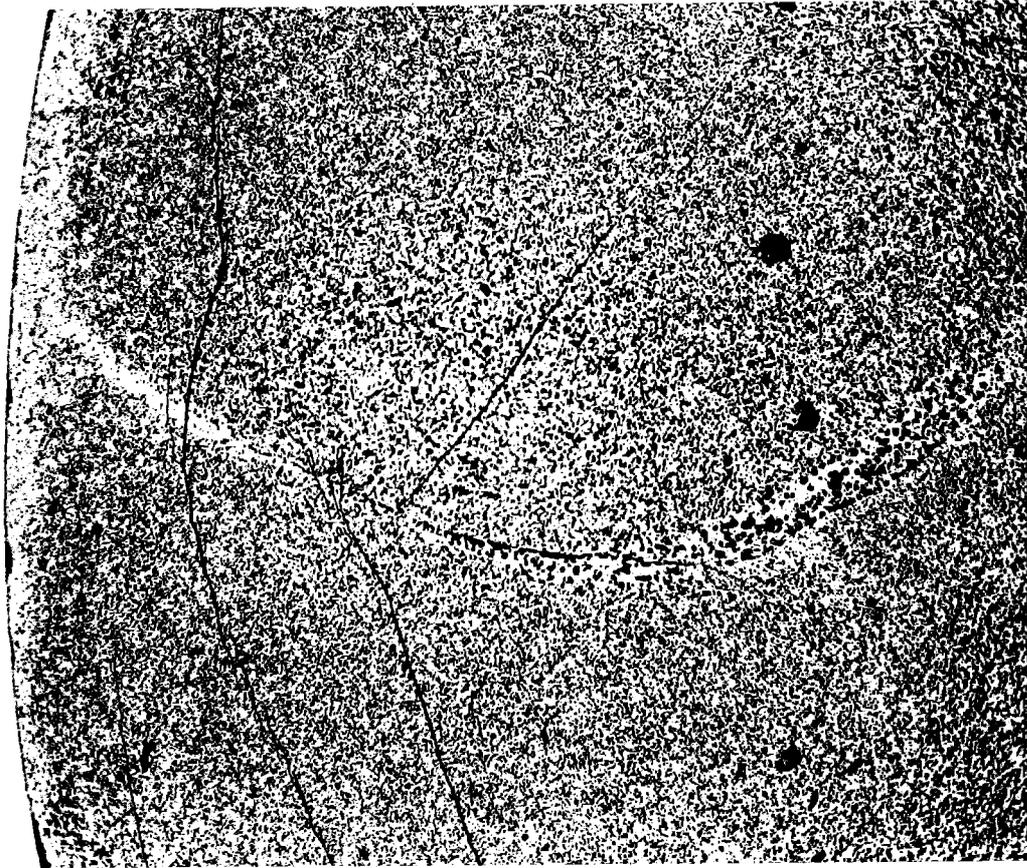
Schnitt 6



Schnitt 7



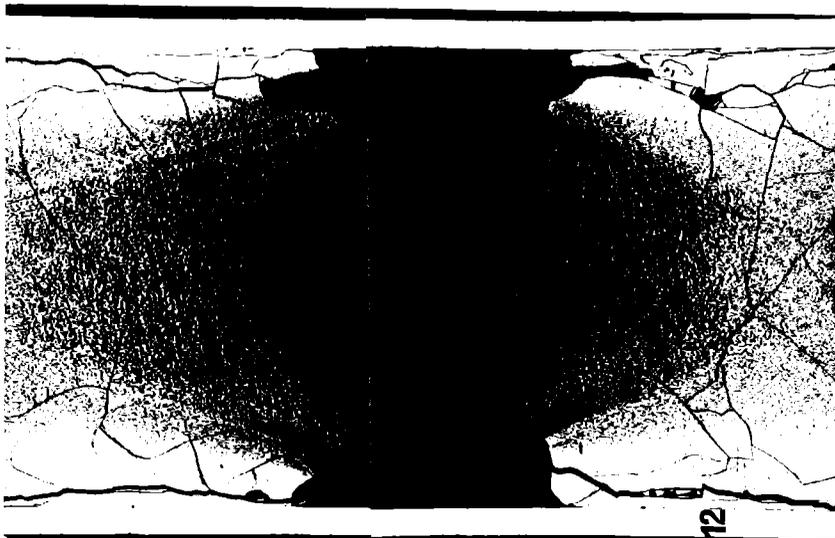
Stab 6/26 Schnitt 6



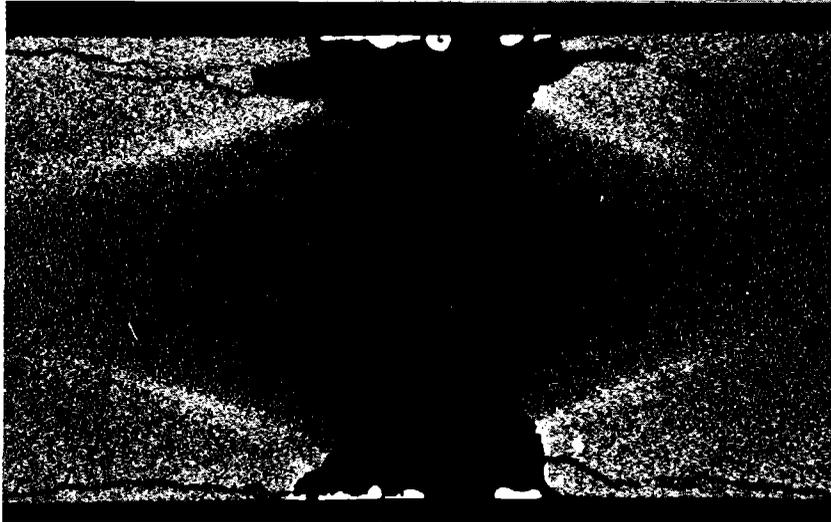
HZ-3B-102-6/26-6/12 60 x



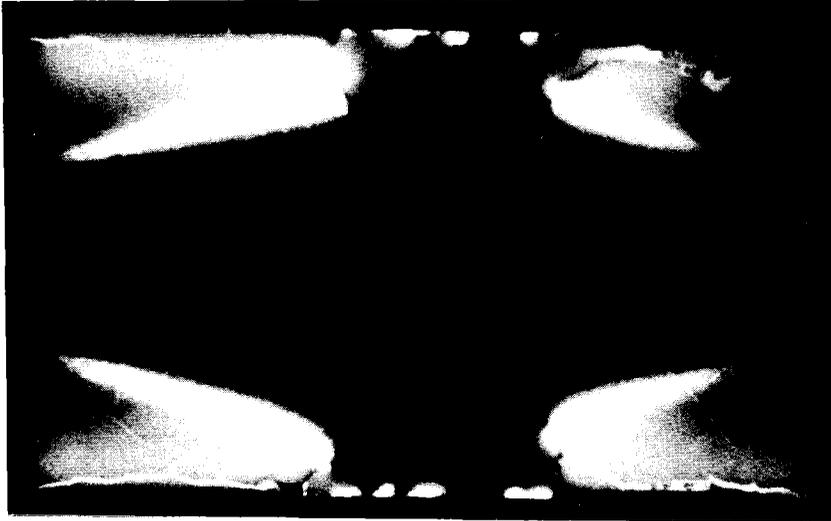
HZ-3B-102-6/26-6/14 500x
getzt



Schnitt 7



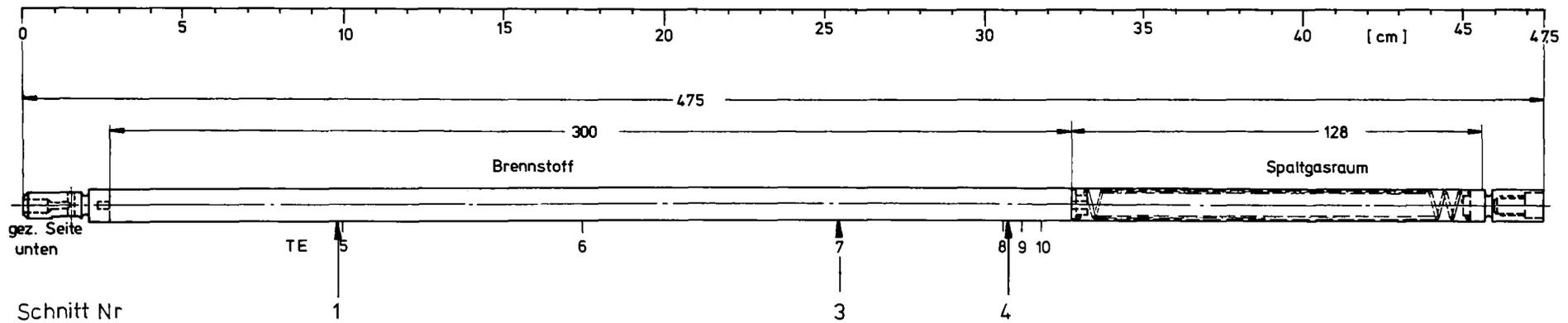
α (12 sec)



β - γ (45 sec)

Autoradiografie

Vg. 6a Prütling 6/26 (U,Pu)C

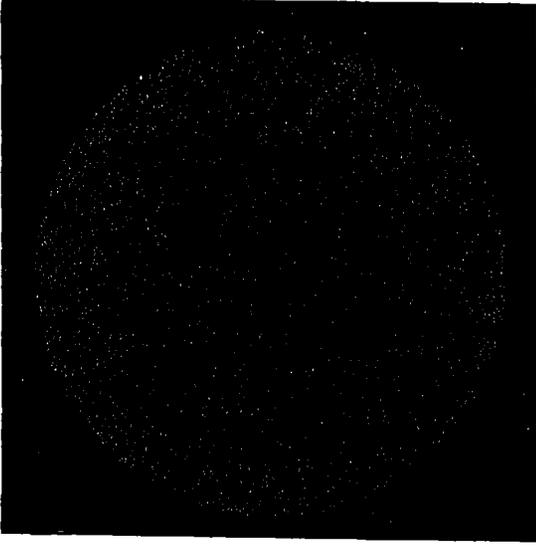
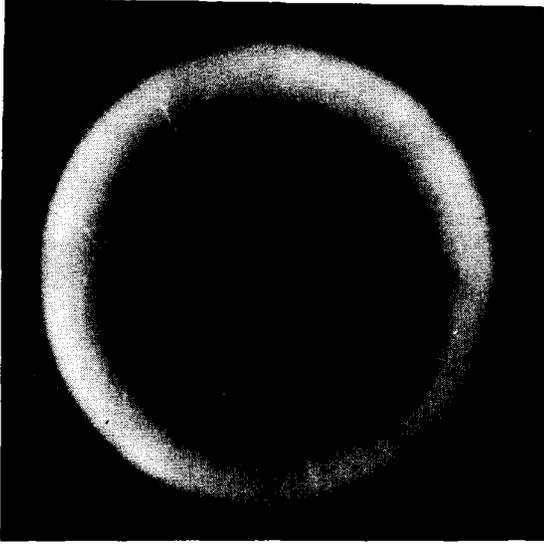
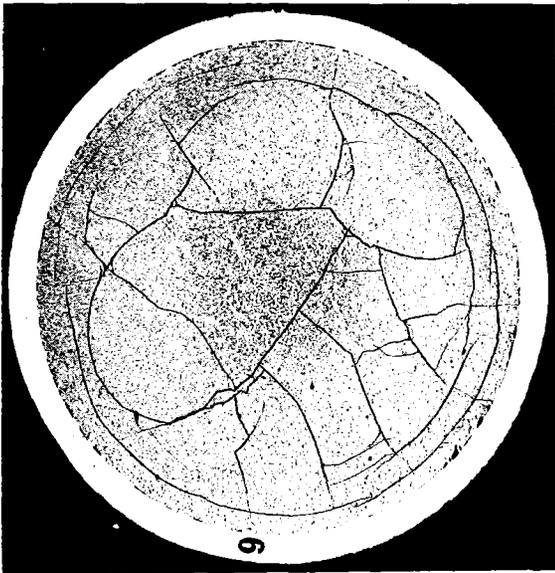


- II/33 -



Betatron-Durchleuchtung

Schnittplan und Betatron-Durchleuchtung des Prüflings 6/36



Schnitt 1

α (10 sec)

β - γ (20 sec)

Autoradiografie

2 mm

Vg.6a Prüfling 6/36 (U,Pu)C

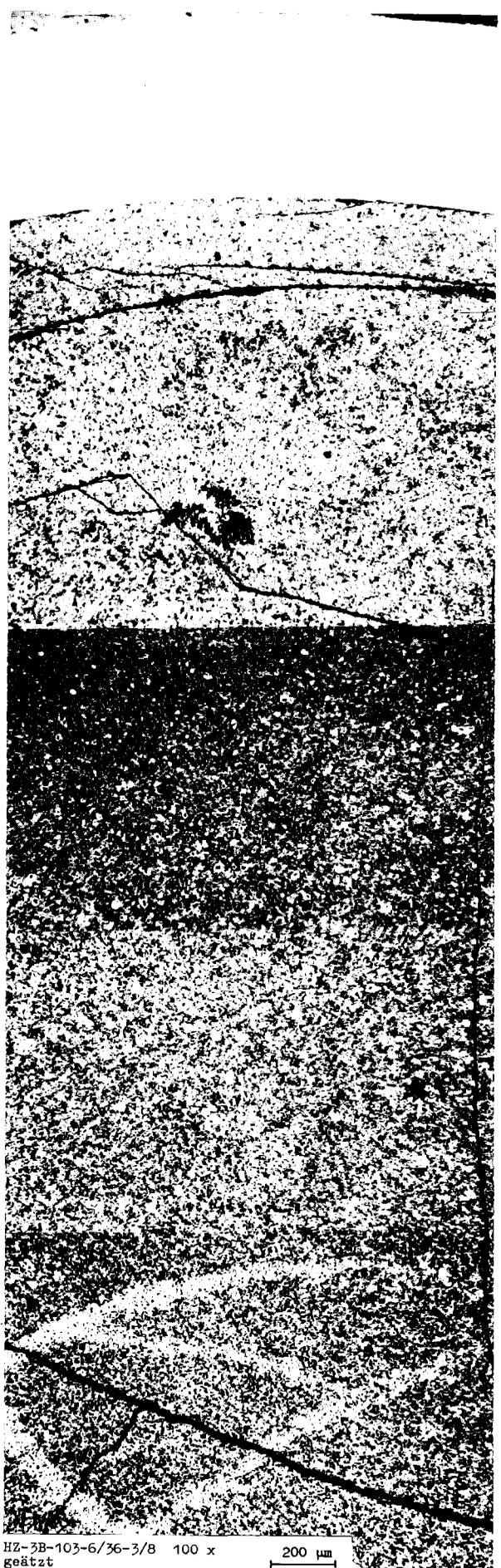
Schnitt 1



Z-3B-103-6/36-1/9 100 x
eätzt

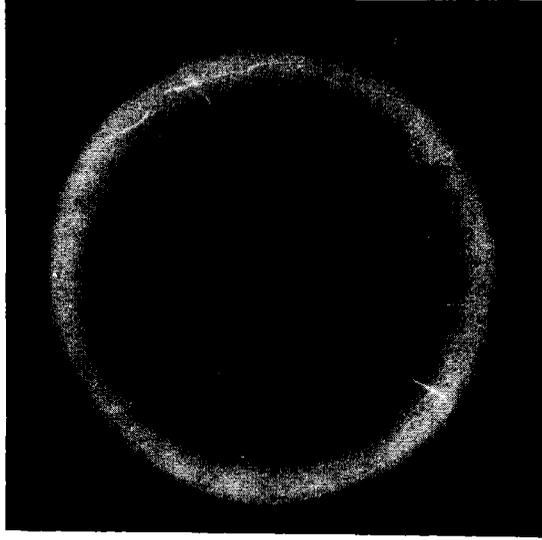
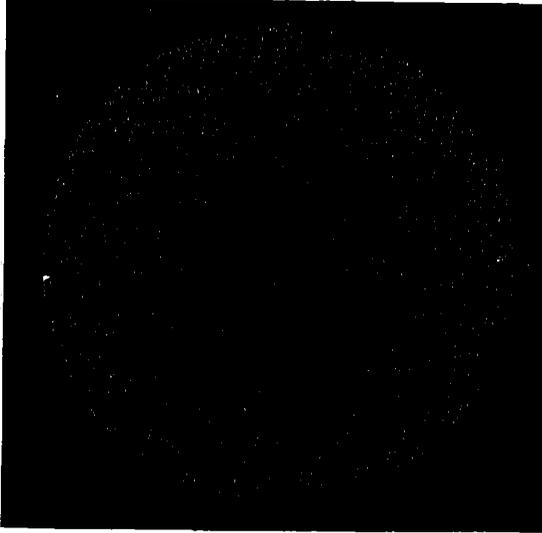
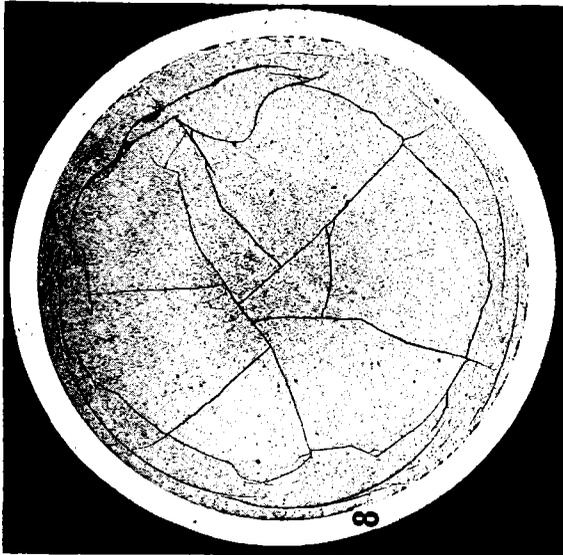
200 μm

Schnitt 3



HZ-3B-103-6/36-3/8 100 x
geätzt

200 μm



Schnitt 3

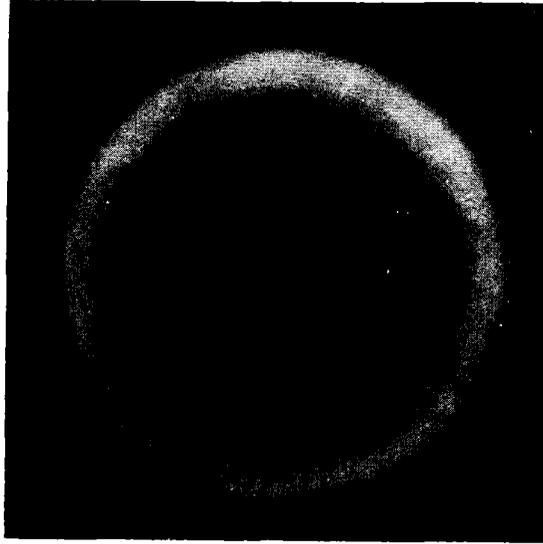
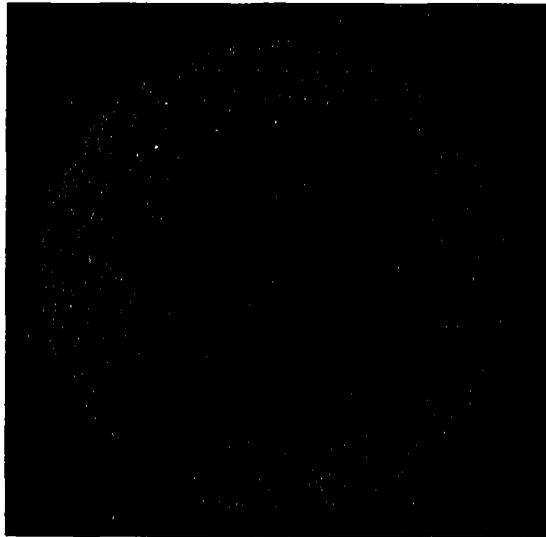
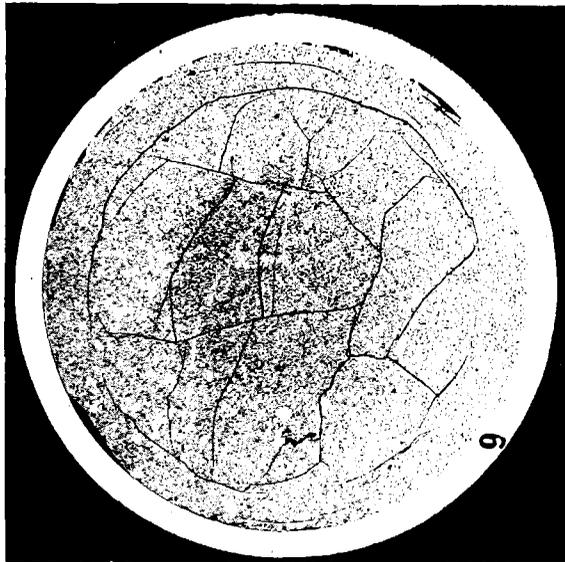
α (10sec)

β-γ (20 sec)

Autoradiografie

2 mm

Vg.6a Prüfling 6/36 (U,Pu)C



Schnitt 4

α (10 sec)

β-γ (20 sec)

Autoradiografie

2mm

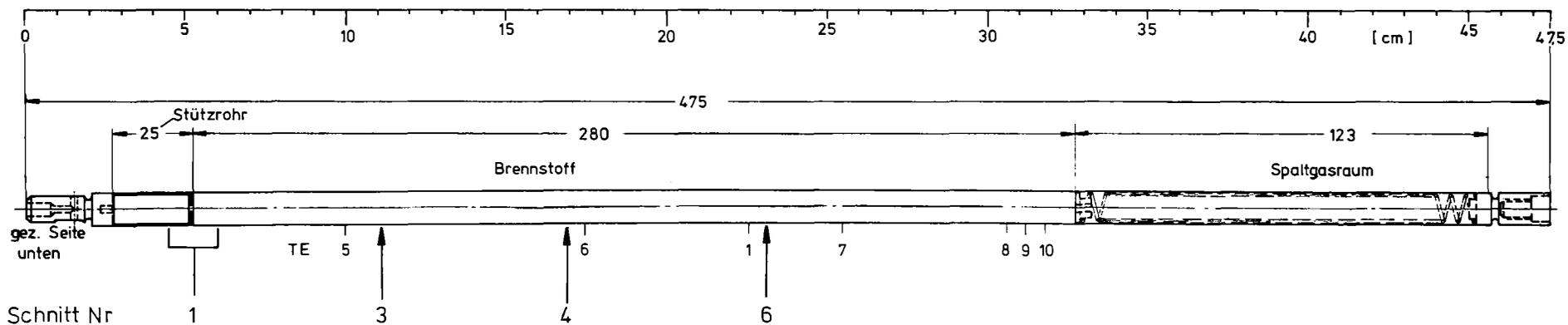
Vg.6a Prüfling 6/36 (U,Pu)C

Stab 6/36 Schnitt 4



Z-3B-103-6/36-4/9 100 x
ätzt

200 μm

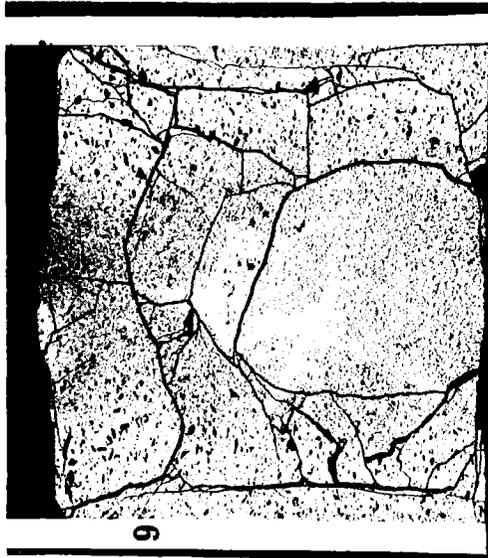


S = Schadensstelle

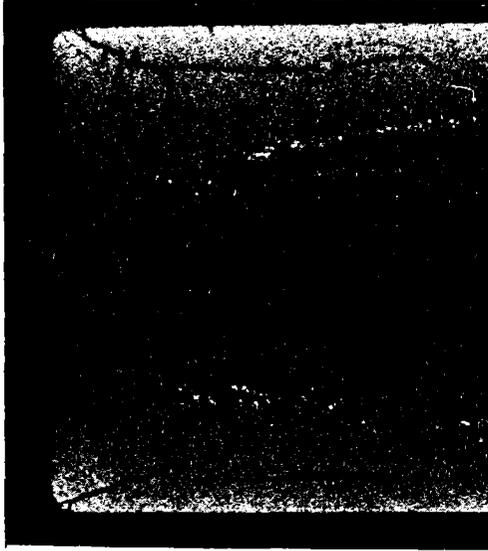


Betatron-Durchleuchtung

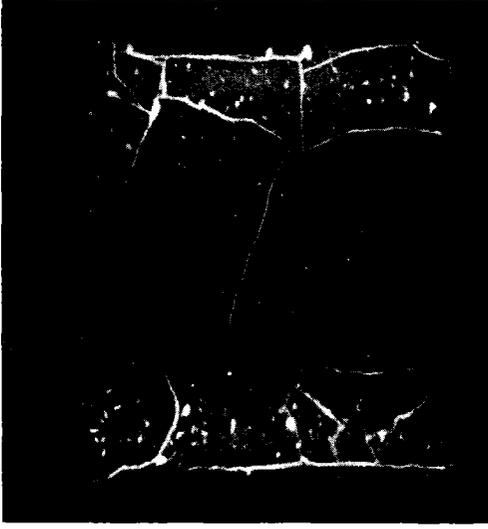
Schnittplan und Betatron-Durchleuchtung des Prüflings 6/11



Schnitt 1



α (10sec)



β - γ (12 sec)

Autoradiografie

┌───┐
2 mm

Vg.6c Prüfling 6/11 (U,Pu)C

Schnitt 1

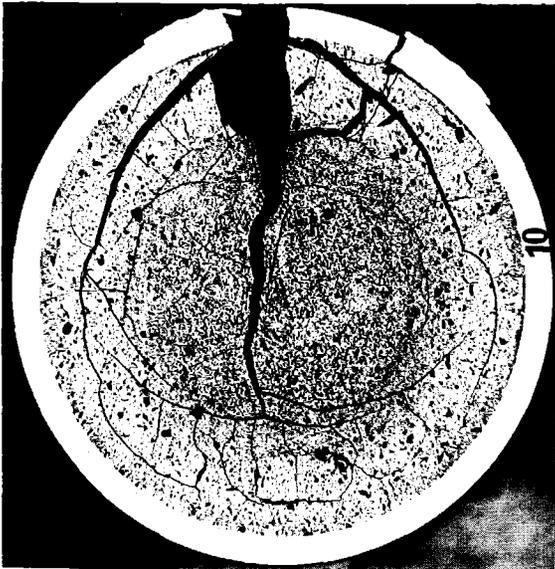
Schnitt 3



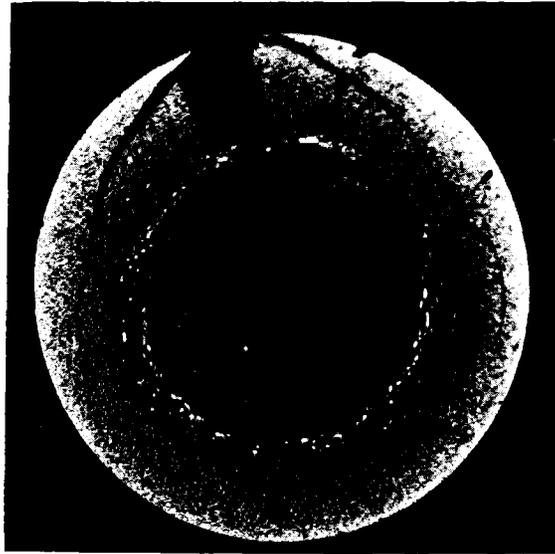
HZ-3B-104-6.11-1/9 100x 200 μm



HZ-3B-104-6.11-3/10 100x 200 μm
geätzt



Schnitt 3



α (10 sec)

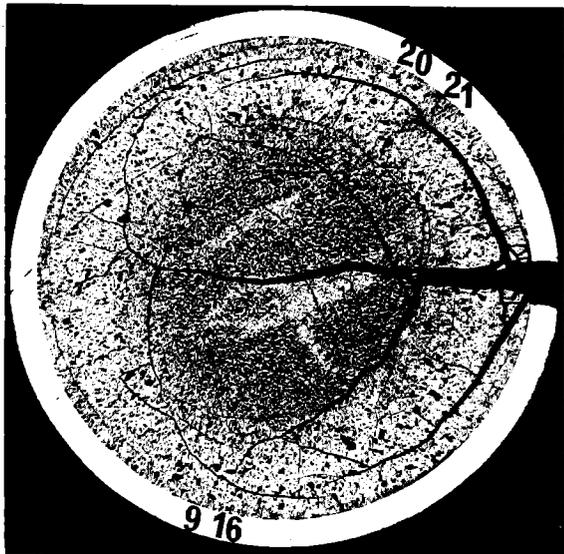


β - γ (12 sec)

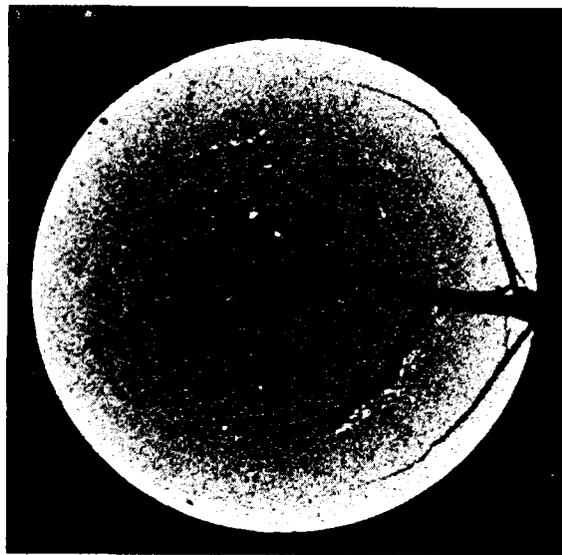
Autoradiografie

2 mm

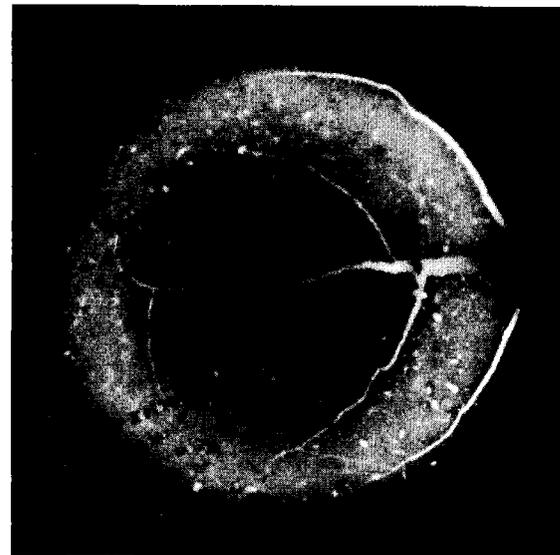
Vg.6c Prufpling 6/11 (U,Pu)C



Schnitt 4



α (10 sec)



β - γ (12 sec)

Autoradiografie

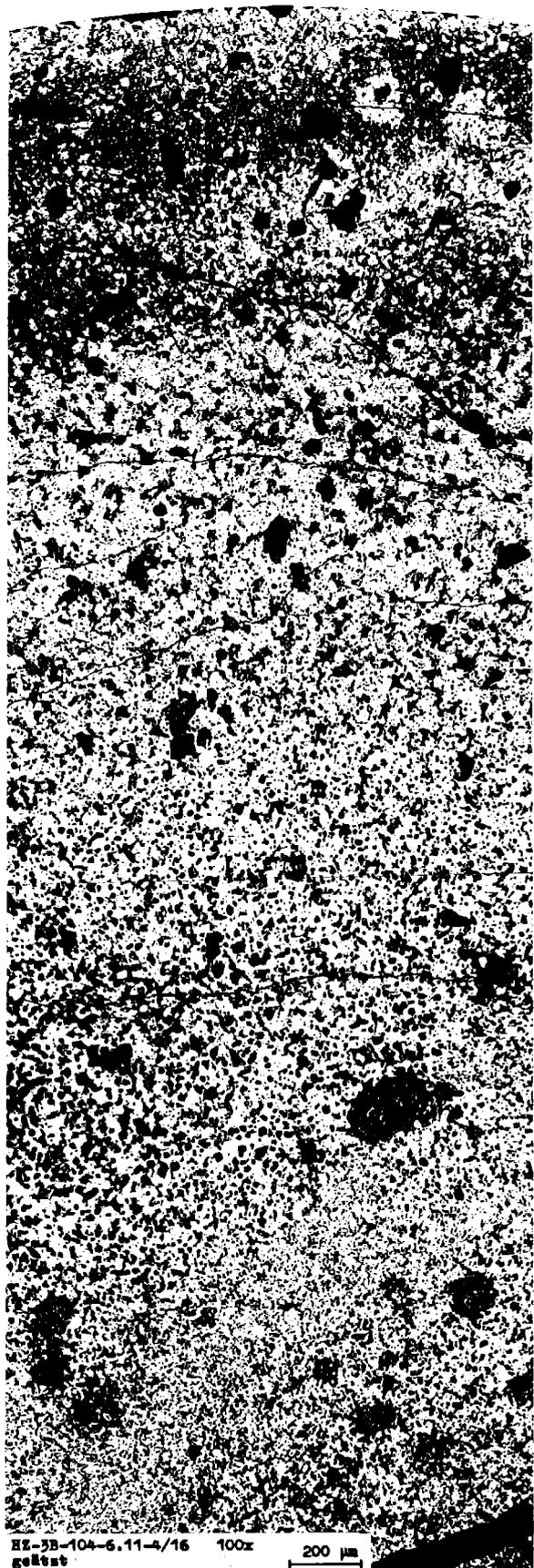
—|—
2 mm

Vg.6c Prüfling 6/11 (U,Pu)C

Stab 6/11 Schnitt 4

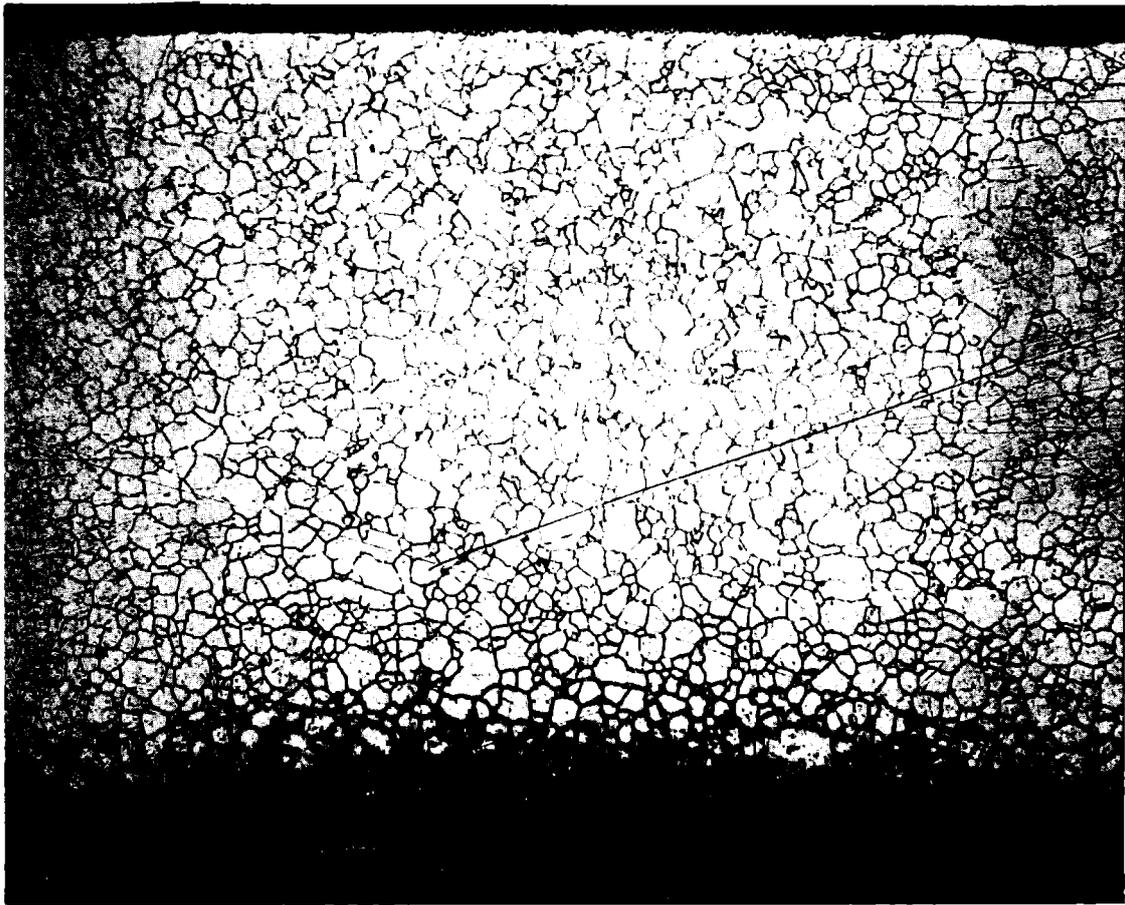


HZ-3B-104-6.11-4/9 100x 200 µm



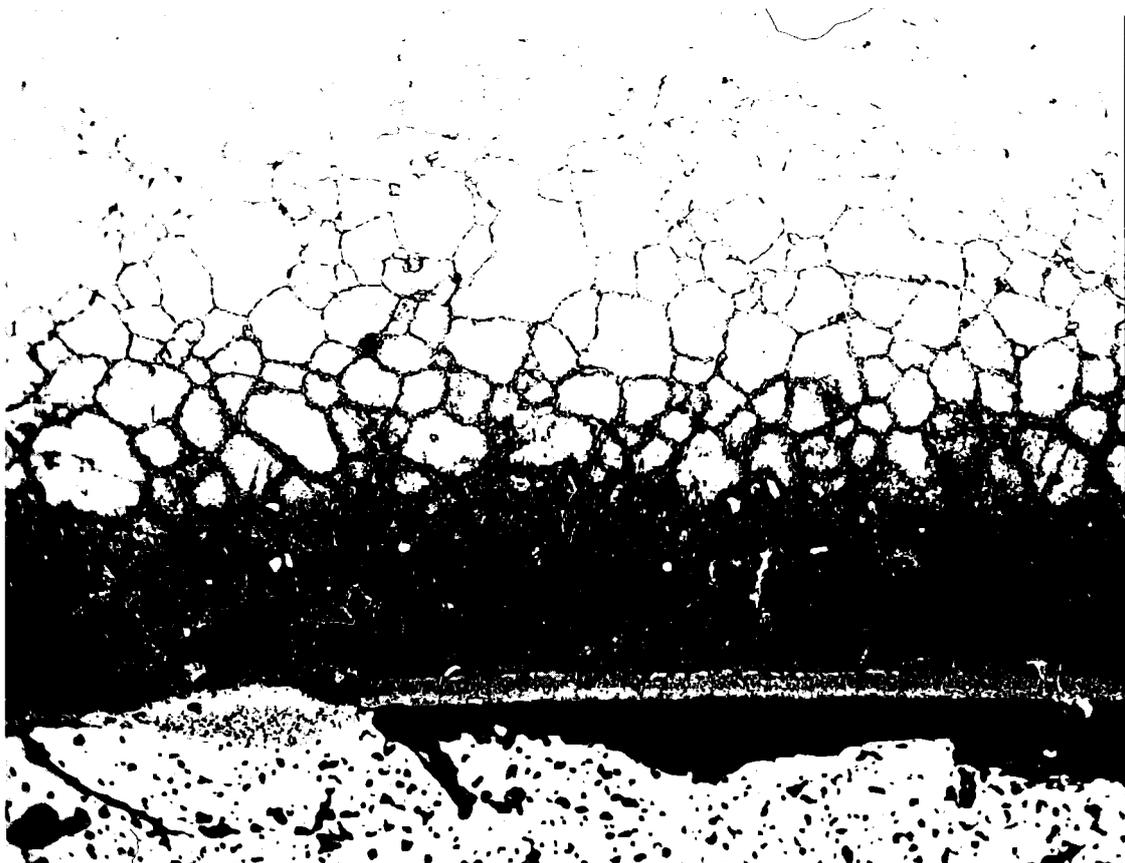
HZ-3B-104-6.11-4/16 100x 200 µm
gefüllt

Stab 6/11 Schnitt 4



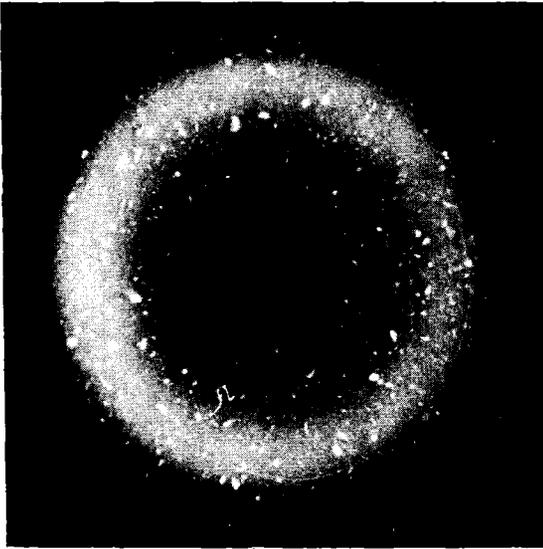
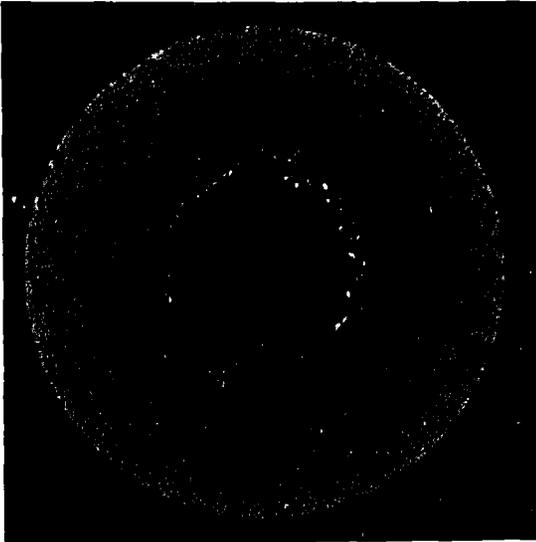
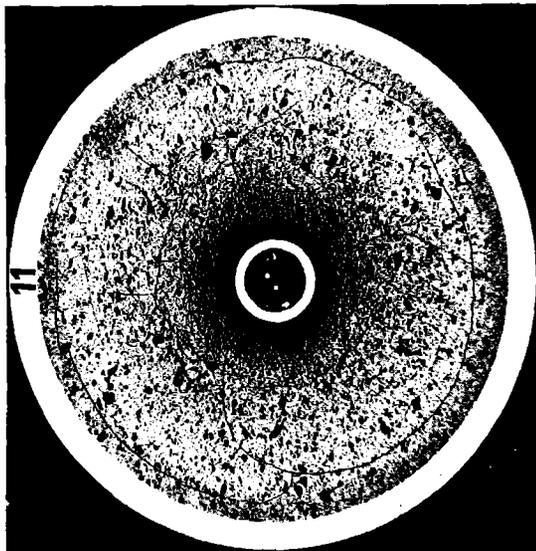
HZ-3B-104-6.11-4/20 200x
geätzt

100 μm



HZ-3B-104-6.11-4/21 500x
geätzt

40 μm



Schnitt 6

α (10sec)

β - γ (12 sec)

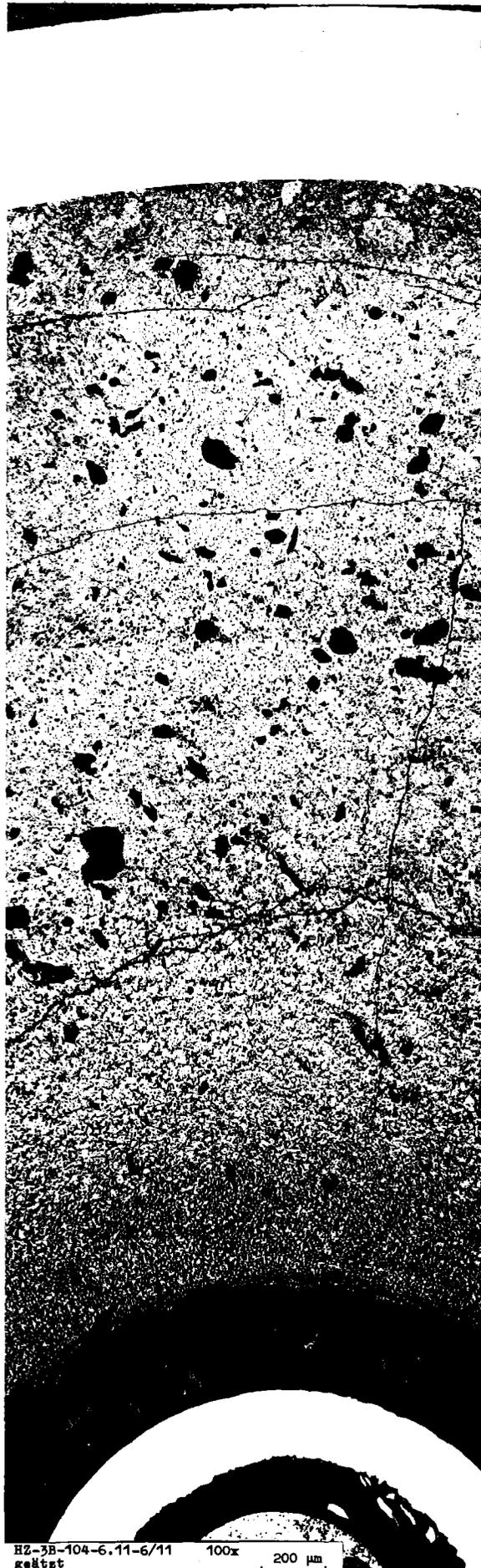
Autoradiografie

2 mm

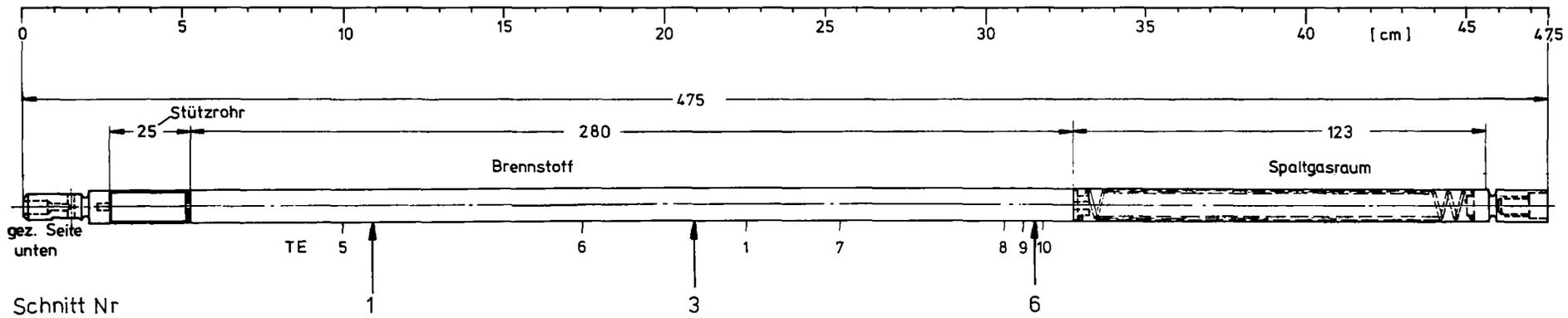
Vg.6c Prüfling 6/11 (U,Pu)C

- II/47 -

Stab 6/11 Schnitt 6



HZ-3B-104-6.11-6/11 100x 200 μm
gästst



S = Schadensstelle

SS

S

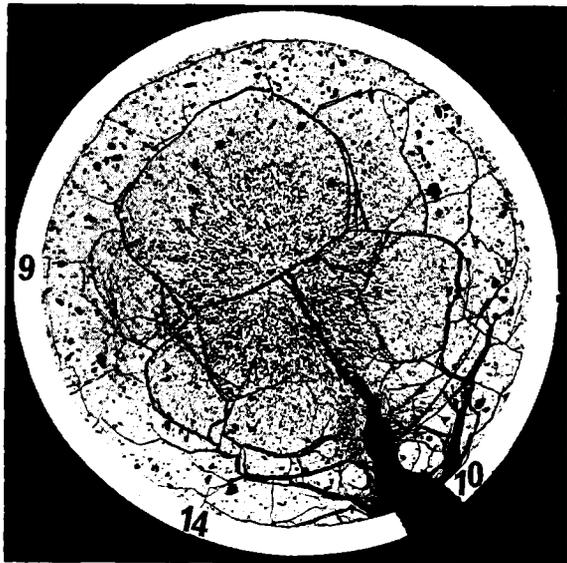
S

SSS

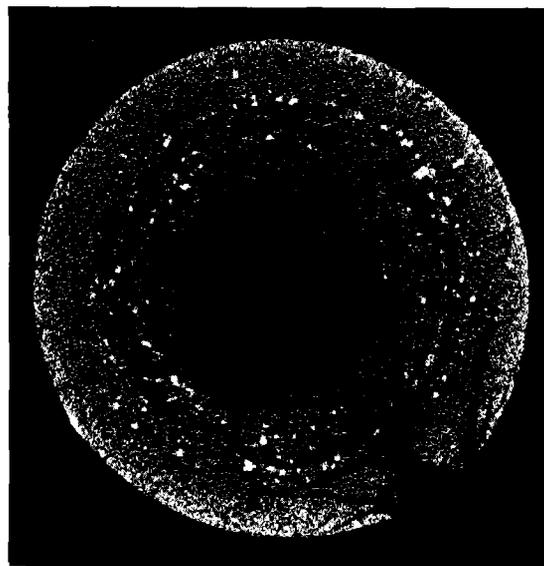


Betatron-Durchleuchtung

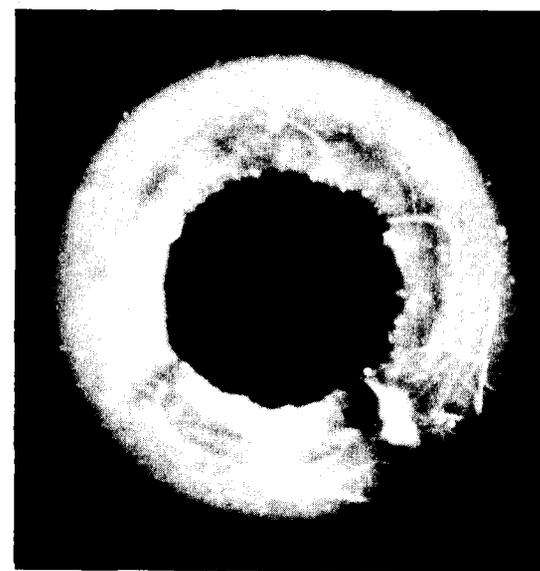
Schnittplan und Betatron-Durchleuchtung des Prüflings 6/12



Schnitt 1



α (8 sec)



β - γ (25 sec)

Autoradiografie

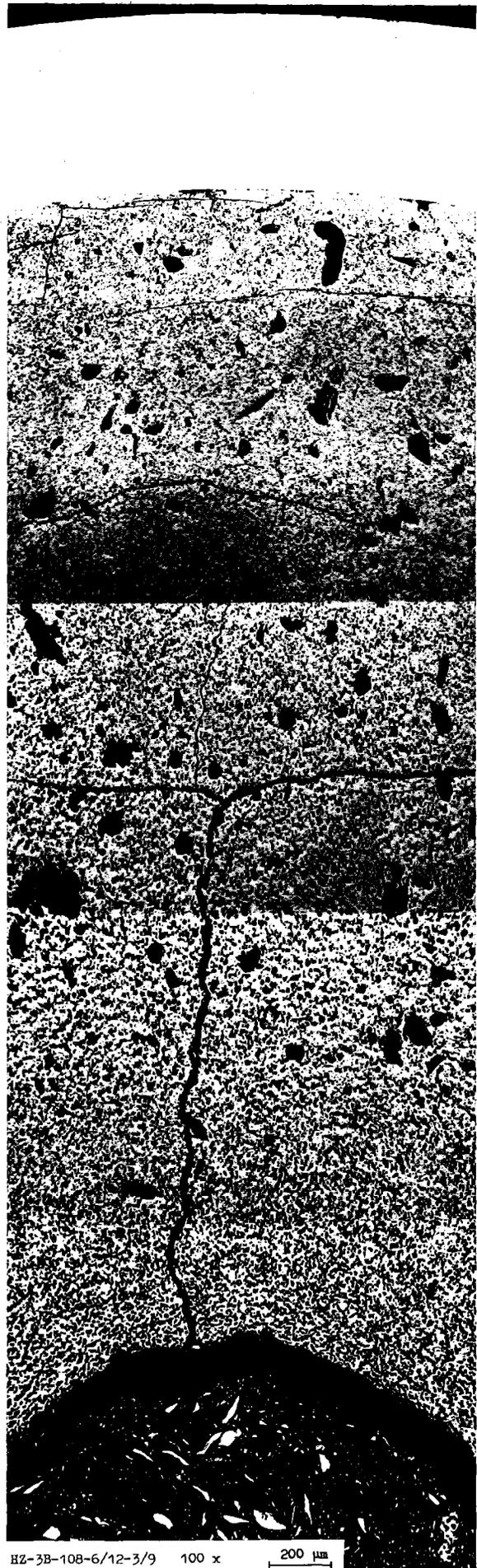
—|—
2mm

Vg.6c Prüfling 6/12 (U,Pu)C

Schnitt 1



Schnitt 3



-II/51-

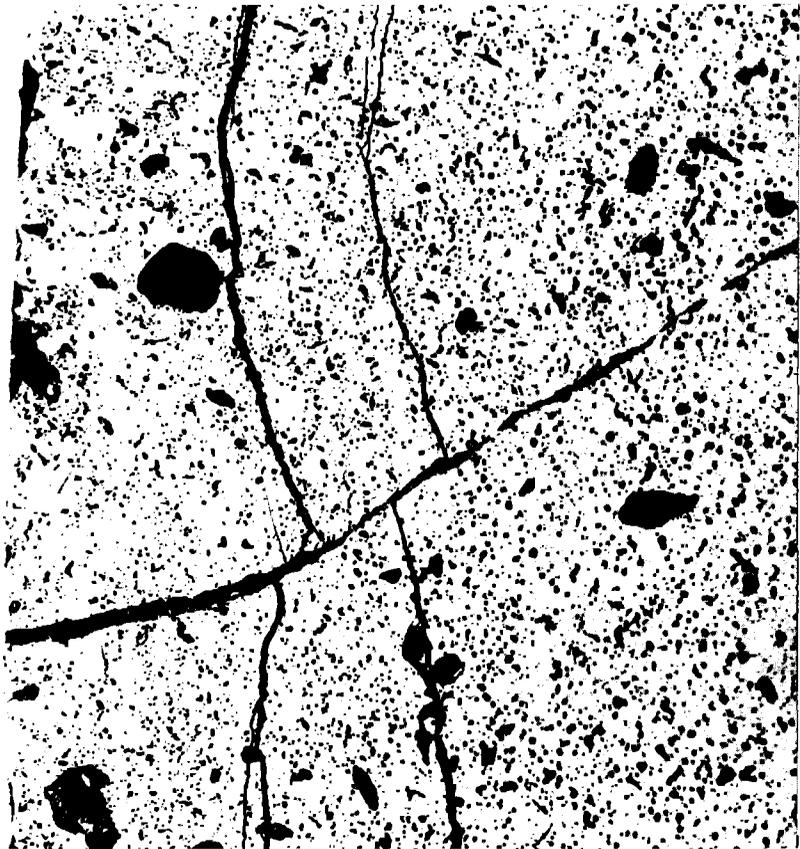
Stab 6/12 Schnitt 1



200 μm

100 x

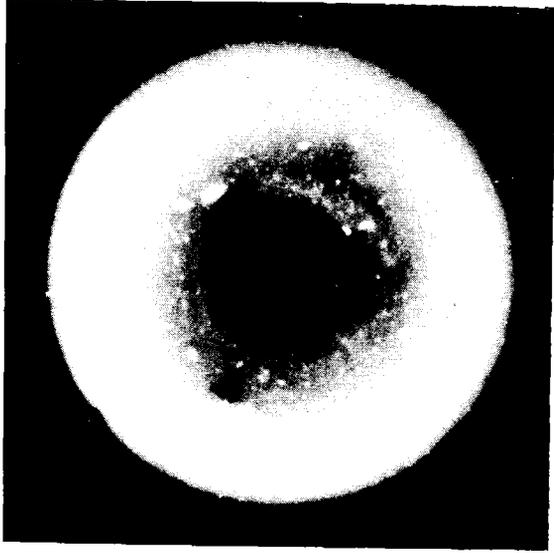
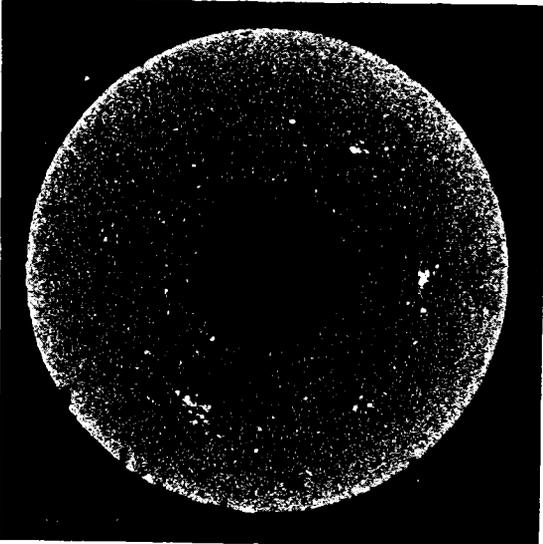
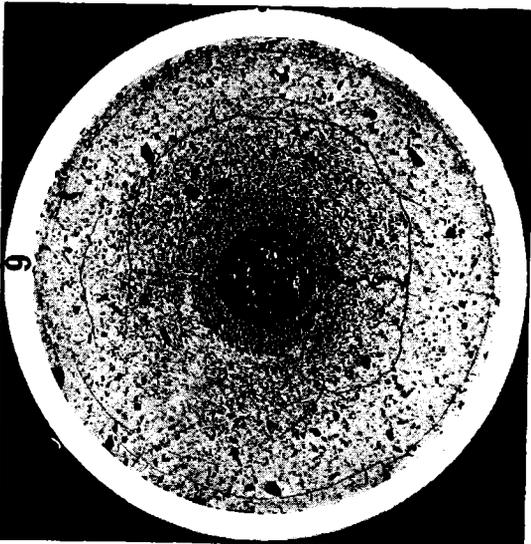
HZ-3B-108-6/12-1/10



100 μm

200x

HZ-3B-108-6/12-1/14



Schnitt 3

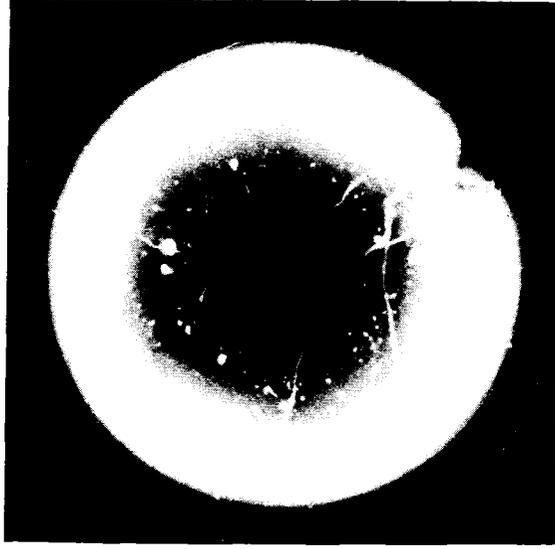
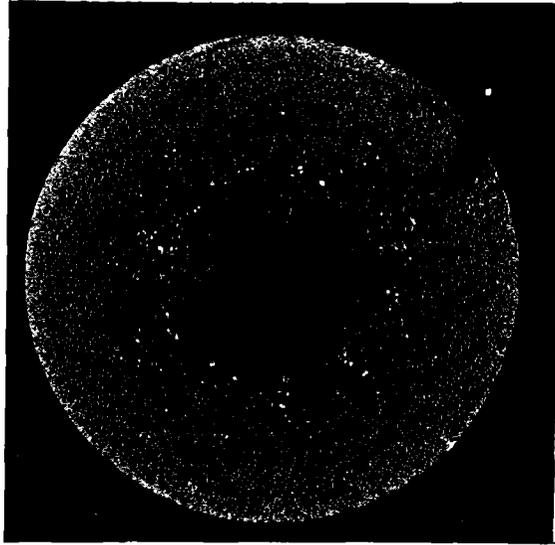
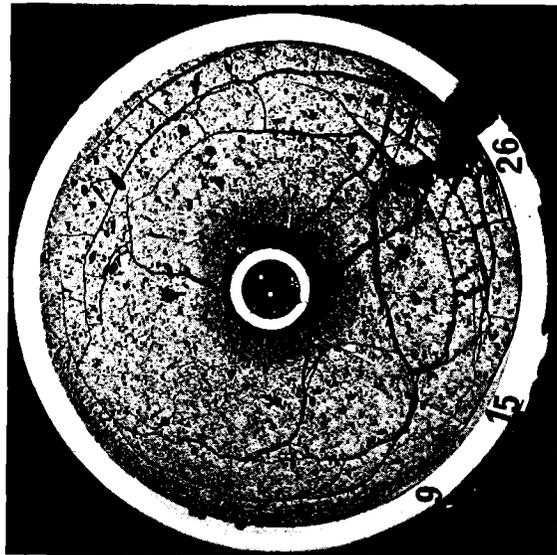
α (8 sec)

β - γ (25 sec)

Autoradiografie

2mm

Vg.6c Prüfling 6/12 (U,Pu)C



Schnitt 6

α (8 sec)

β - γ (25 sec)

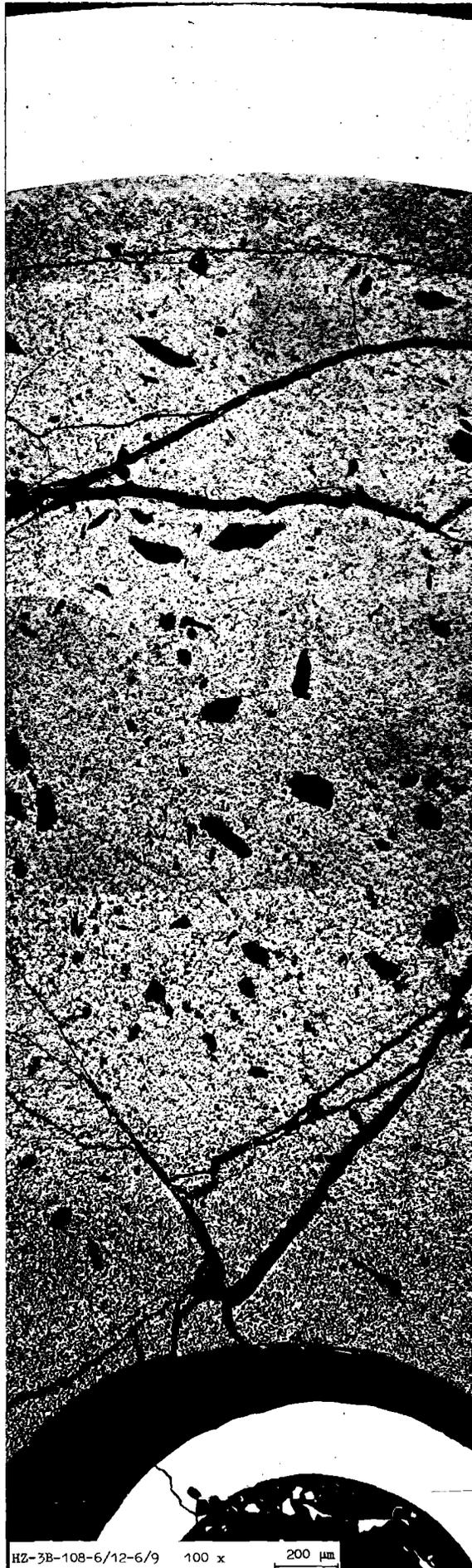
Autoradiografie

2 mm

Vg.6c Prüfling 6/12 (U,Pu)C

- II/54 -

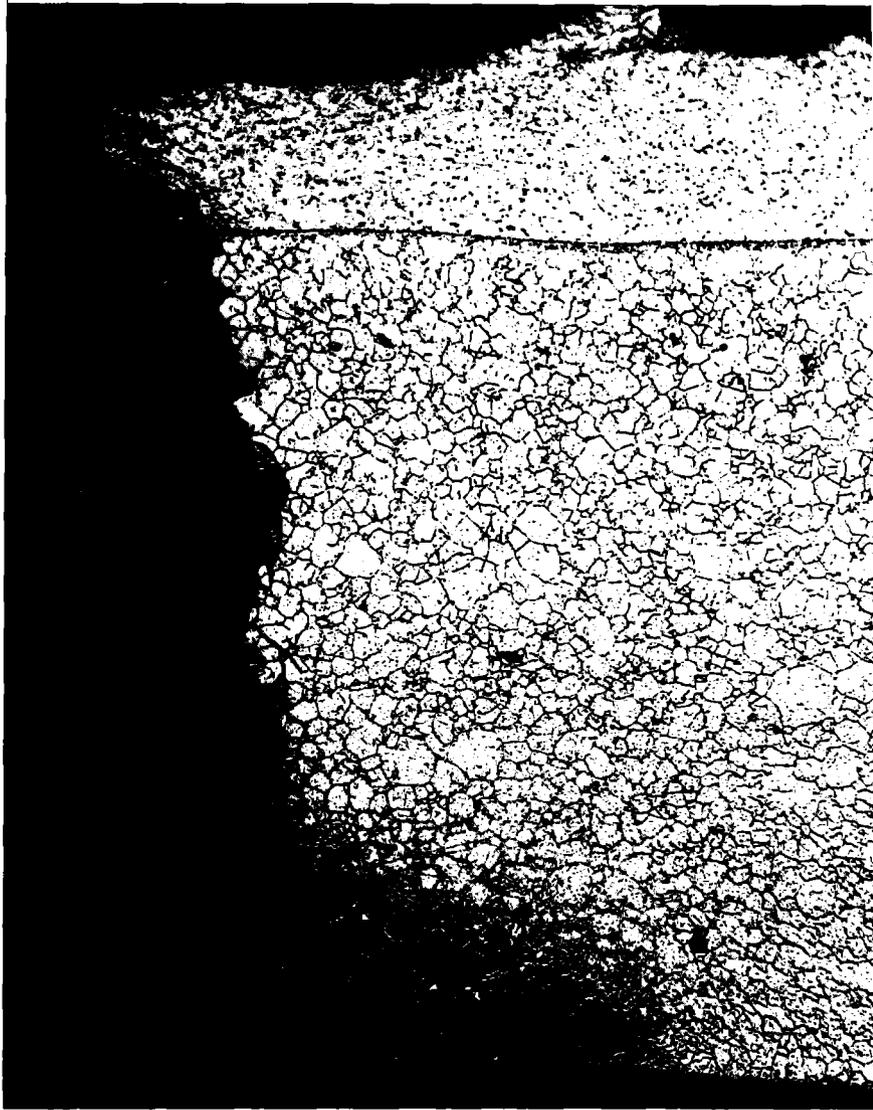
Stab 6/12 Schnitt 6



HZ-3B-108-6/12-6/9

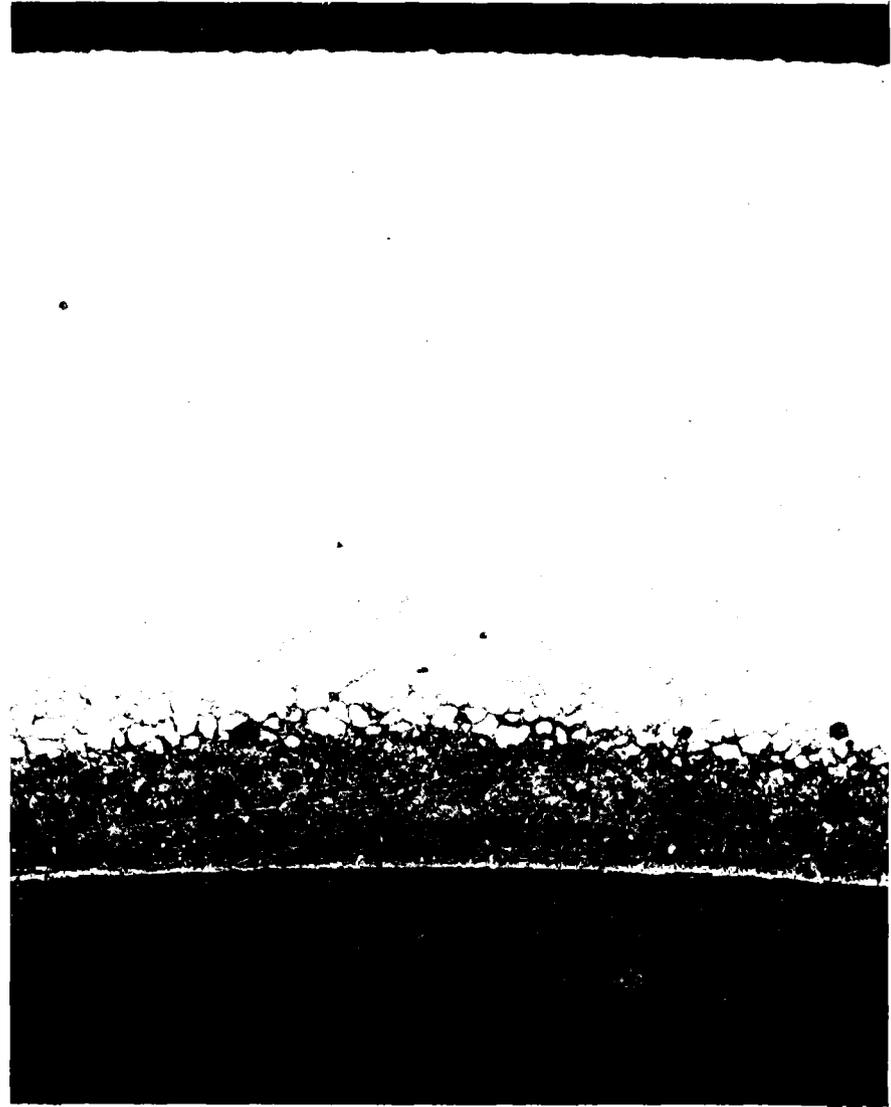
100 x

200 μ m



HZ-3B-108-6/12-6/26 200 x
geätzt

100 μm

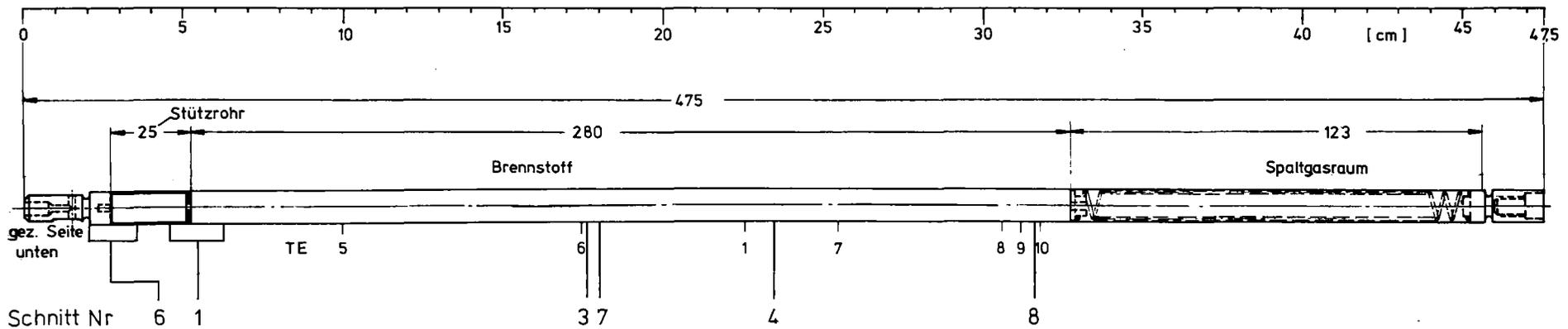


HZ-3B-108-6/12-6/15 200x
geätzt

100 μm

Stab 6/12 Schnitt 6

-II/55-

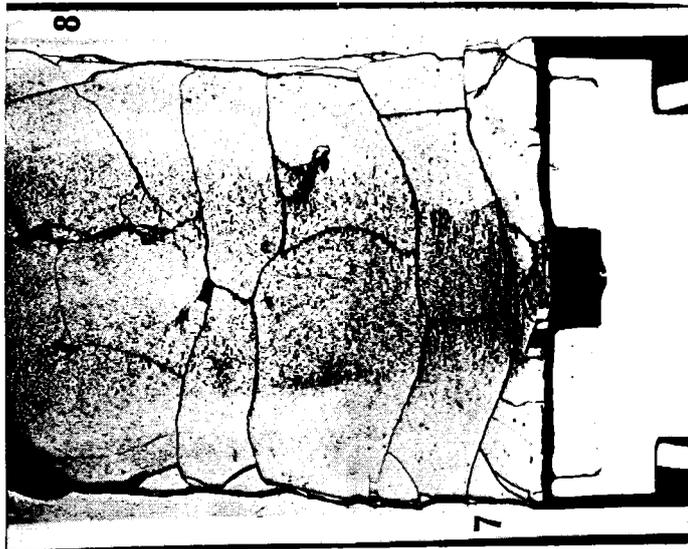


S = Schadensstelle

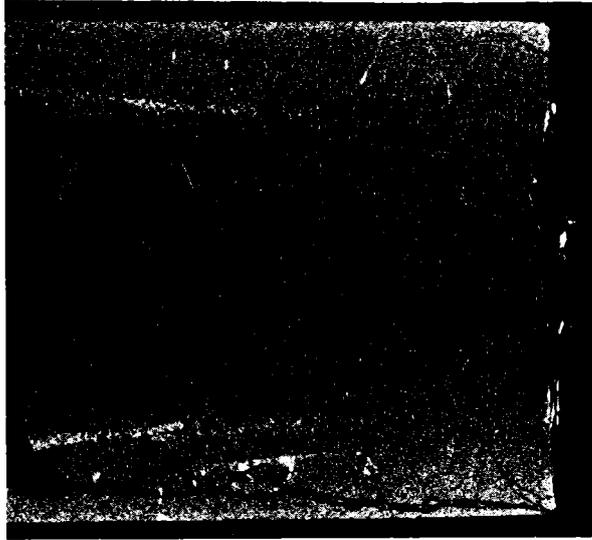


Betatron - Durchleuchtung

Schnittplan und Betatron-Durchleuchtung des Prüflings 6/14



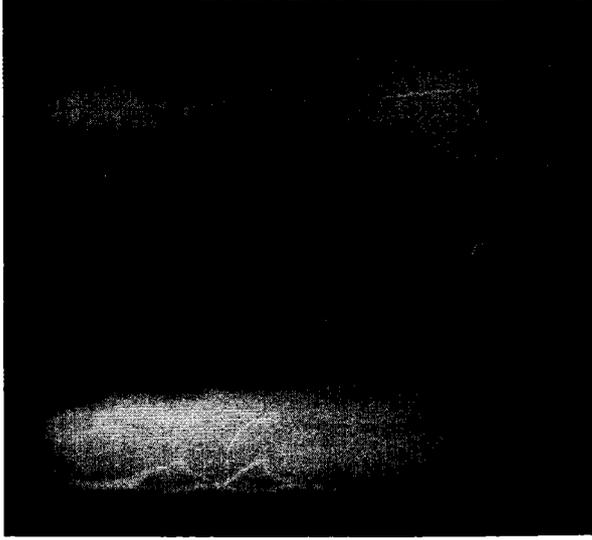
Schnitt 1



α (7 sec)

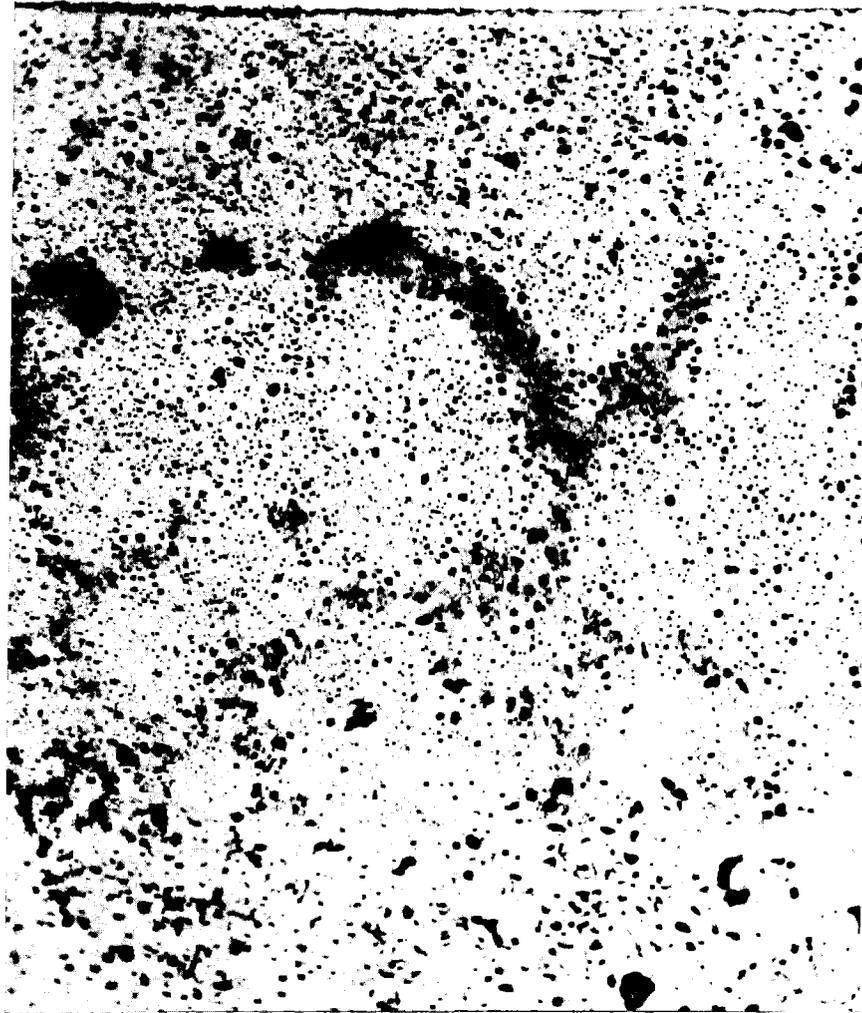
Autoradiografie

2 mm



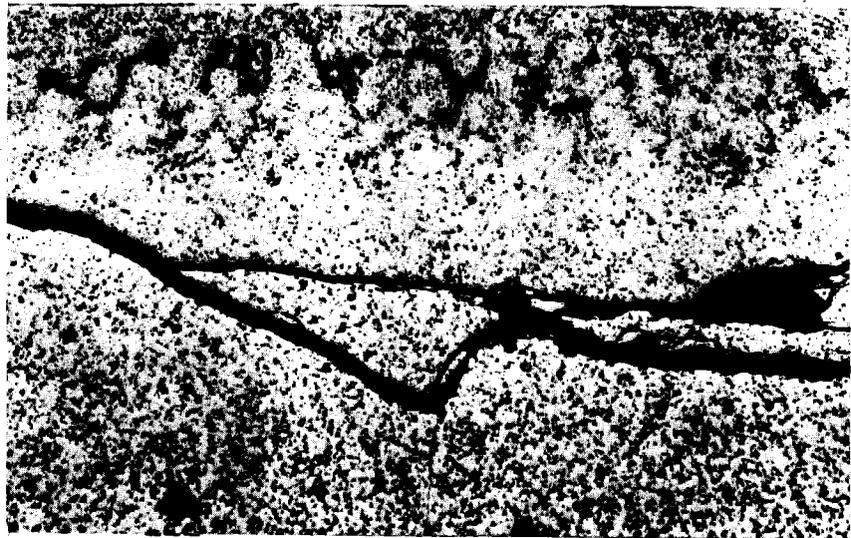
β - γ (40 sec)

Vg.6c Prüfling 6/14 (U,Pu)C



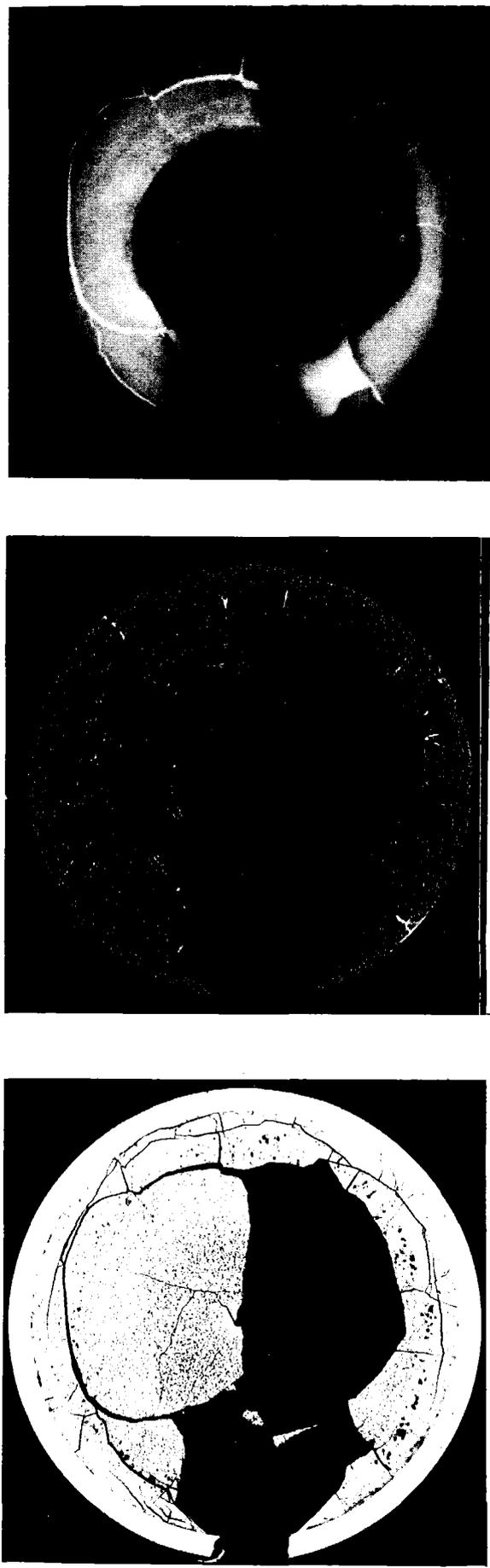
HZ-3B-110-6/14-1/8 500x

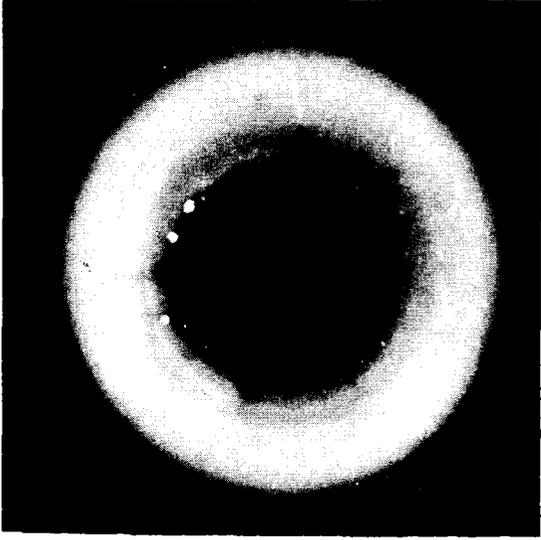
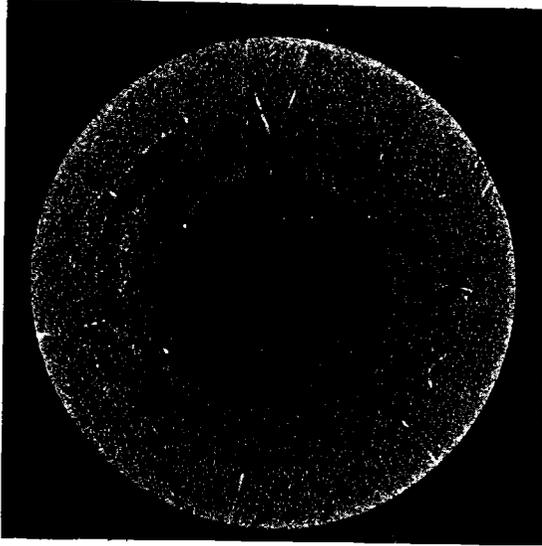
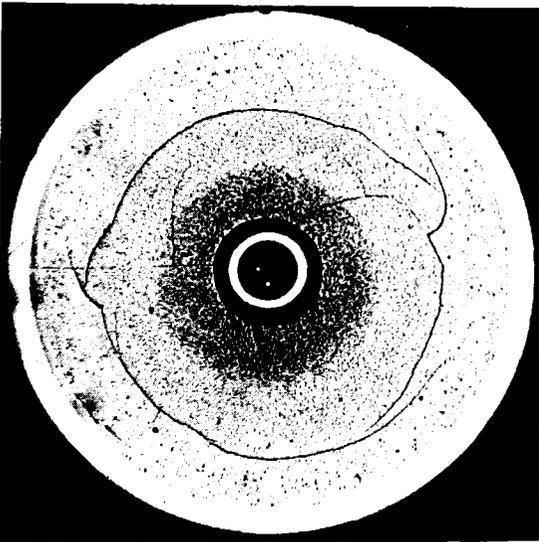
40 μm



HZ-3B-110-6/14-1/7 100 x

200 μm

	<p>Schnitt 3</p> <p>α (7 sec)</p> <p>β-γ (40 sec)</p> <p>Autoradiografie</p> <p>2 mm</p>	<p>Vg.6c Prüfling 6/14 (U,Pu)C</p>
--	--	------------------------------------



Schnitt 4

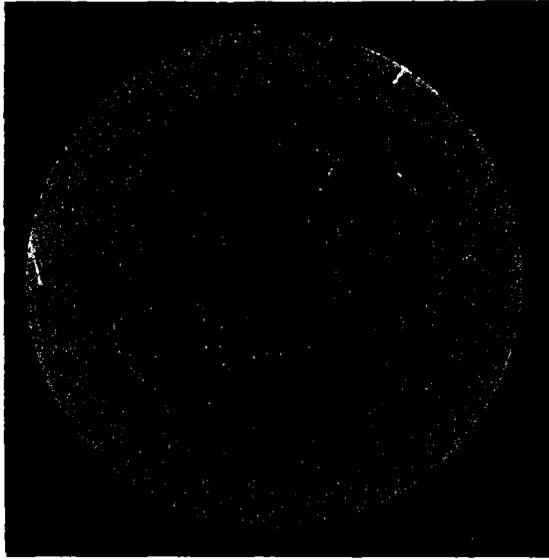
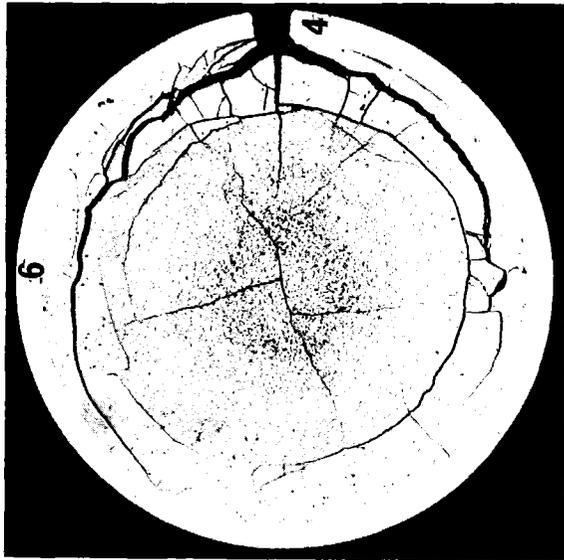
α (7 sec)

β - γ (40 sec)

Autoradiografie

2 mm

Vg.6c Prüfling 6/14 (U,Pu)C



Schnitt 7

α (7 sec)

$\beta - \gamma$ (40 sec)

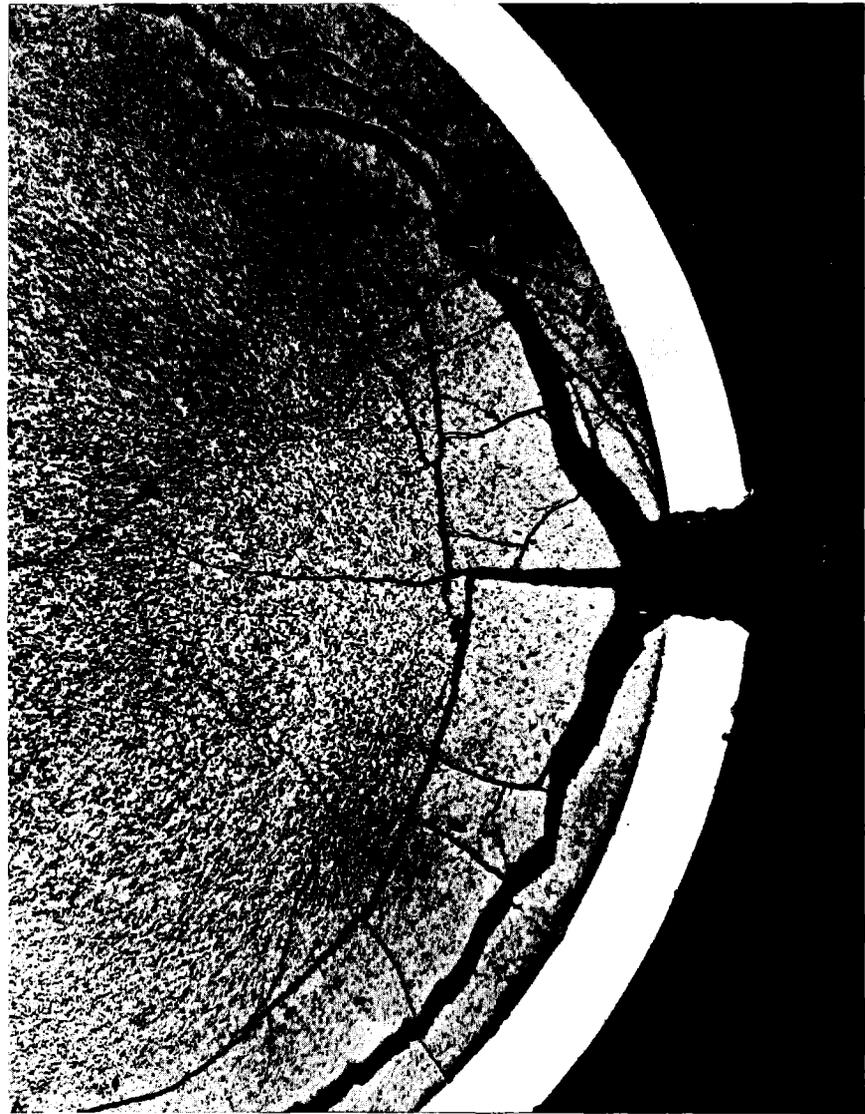
Autoradiografie

2 mm

Vg.6c Prüfling 6/14 (U,Pu)C

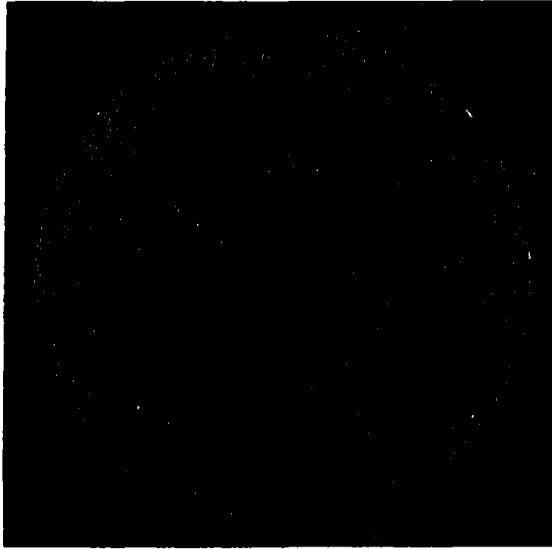
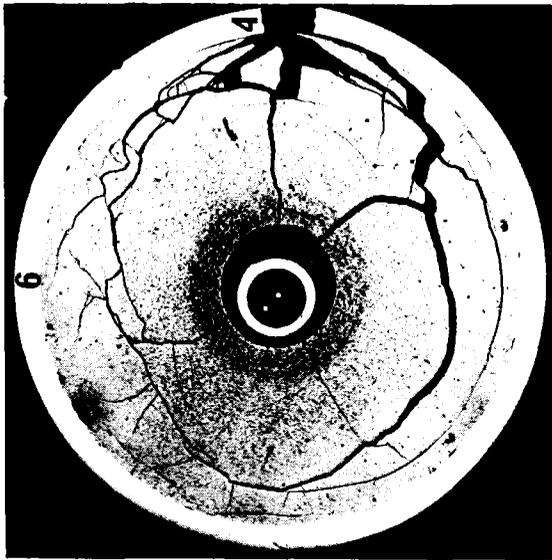


HZ-3B-110-6/14-7/6 100 x geätzt 200 μm



HZ-3B-110-6/14-7/4 20x 1 mm

-II/62-
Stab 6/14 Schnitt 7



Schnitt 8

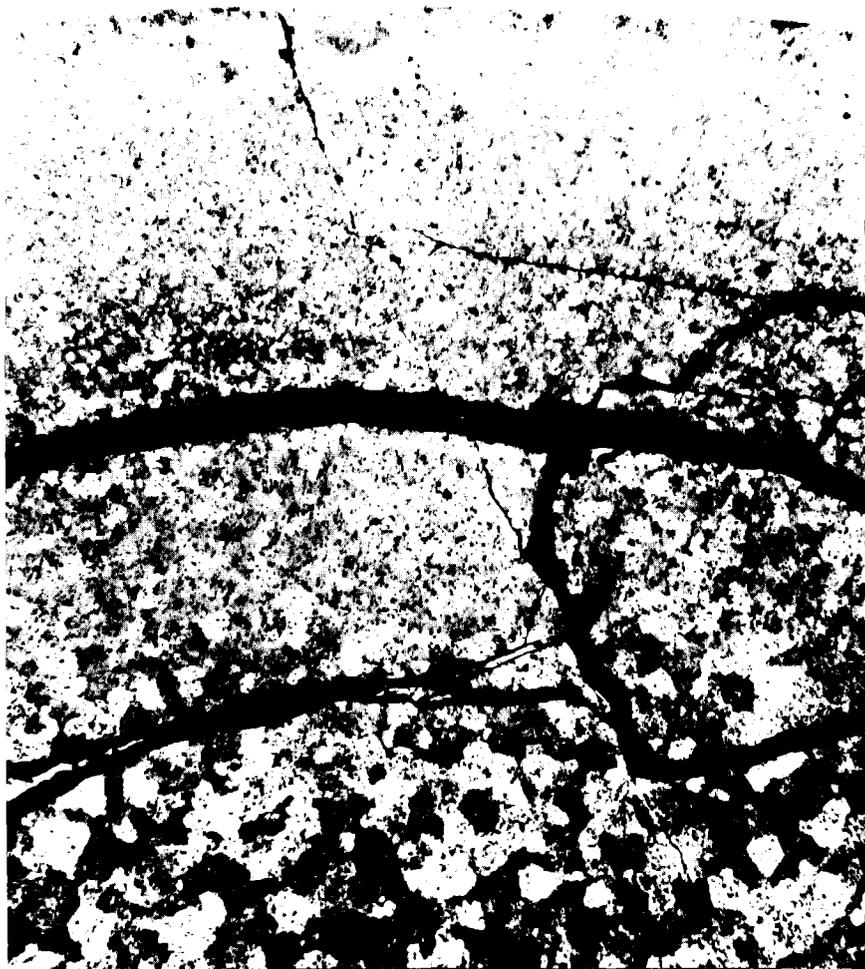
α (7 sec)

β - γ (40 sec)

Autoradiografie

2 mm

Vg.6c Prüfling 6/14 (U,Pu)C



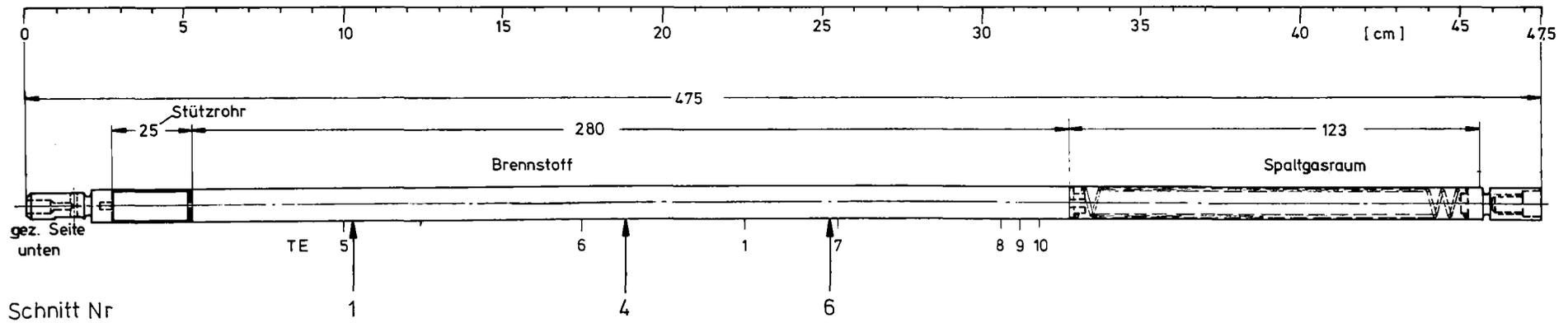
HZ-3B-110-6/14-8/6 100 x geätzt 200 μm



HZ-3B-110-6/14-8/4 20x 1 mm

Stab 6/14 Schnitt 8

-II/64-

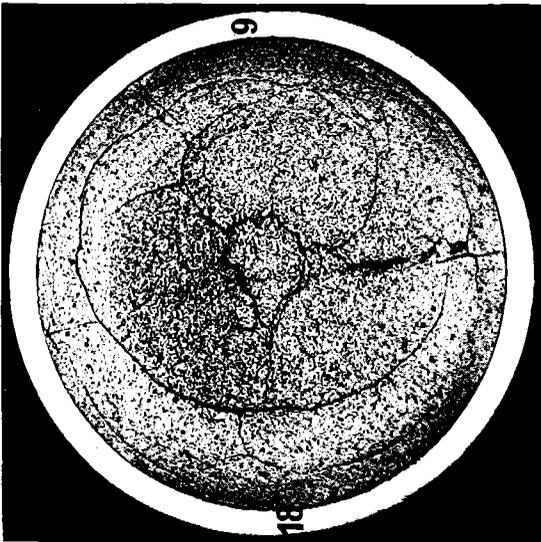


- II/65 -

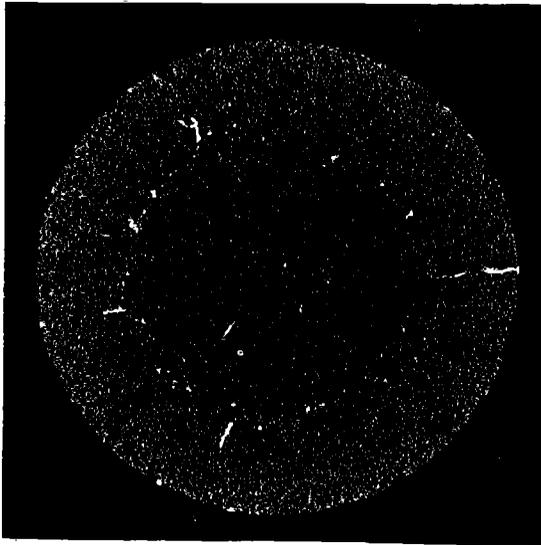


Betatron-Durchleuchtung

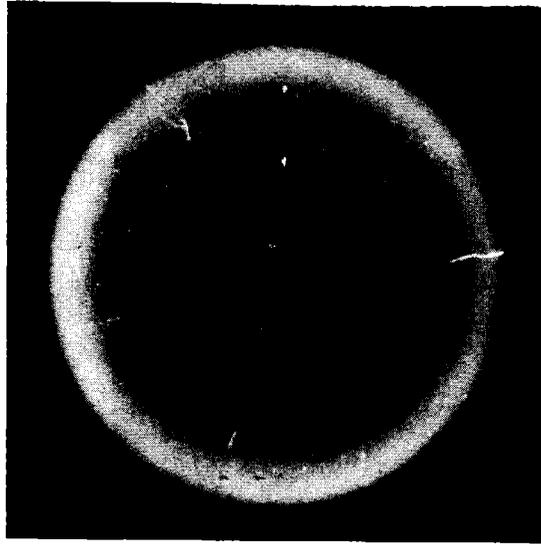
Schnittplan und Betatron-Durchleuchtung des Prüflings 6/15



Schnitt 1



α (8 sec)



β - γ (25 sec)

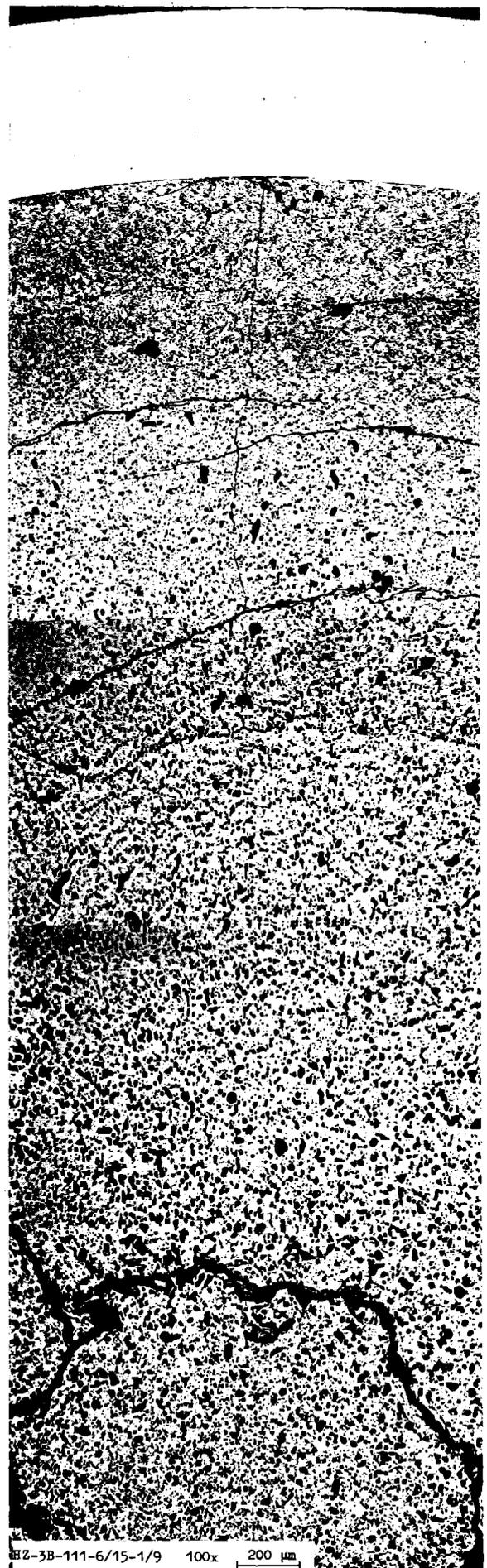
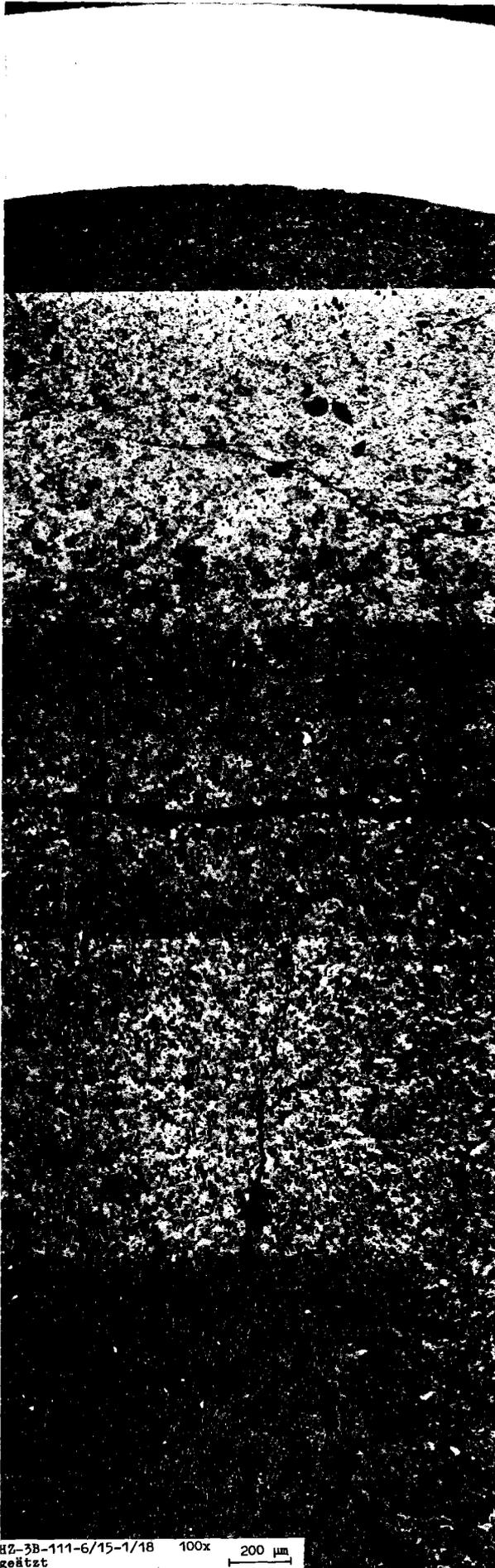
Autoradiografie

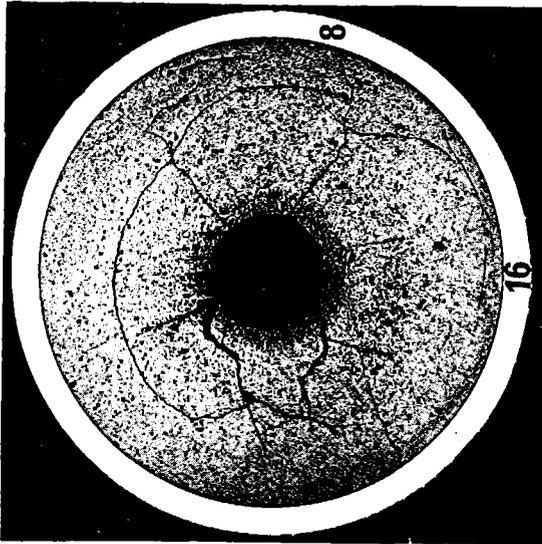
2mm

Vg.6c Prüfling 6/15 (U,Pu)C

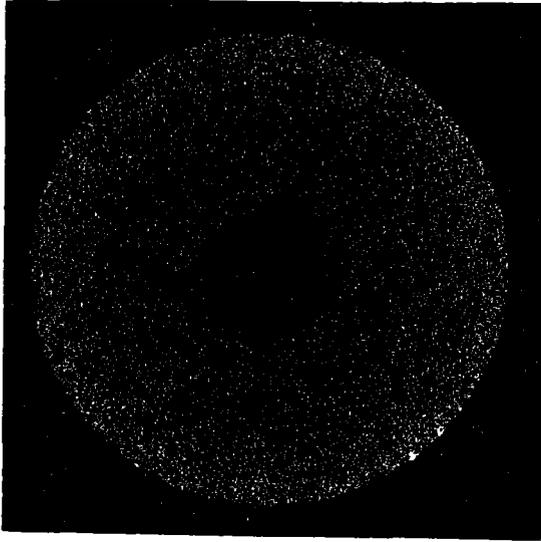
Stab 6/15

Schnitt 1

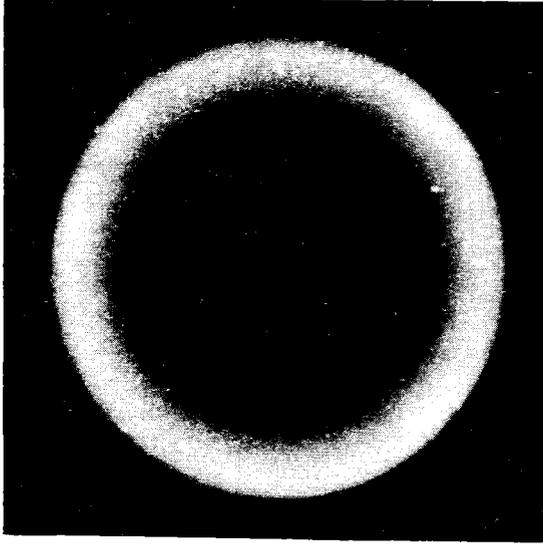




Schnitt 4



α (8 sec)



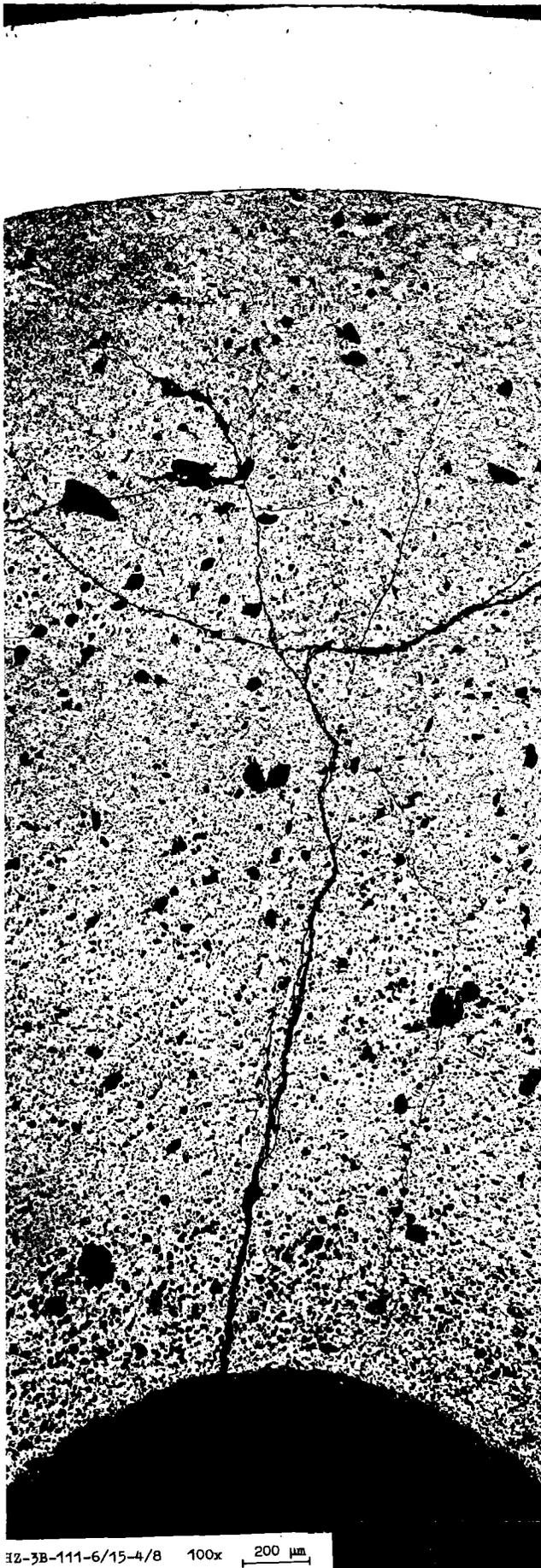
β - γ (25 sec)

Autoradiografie

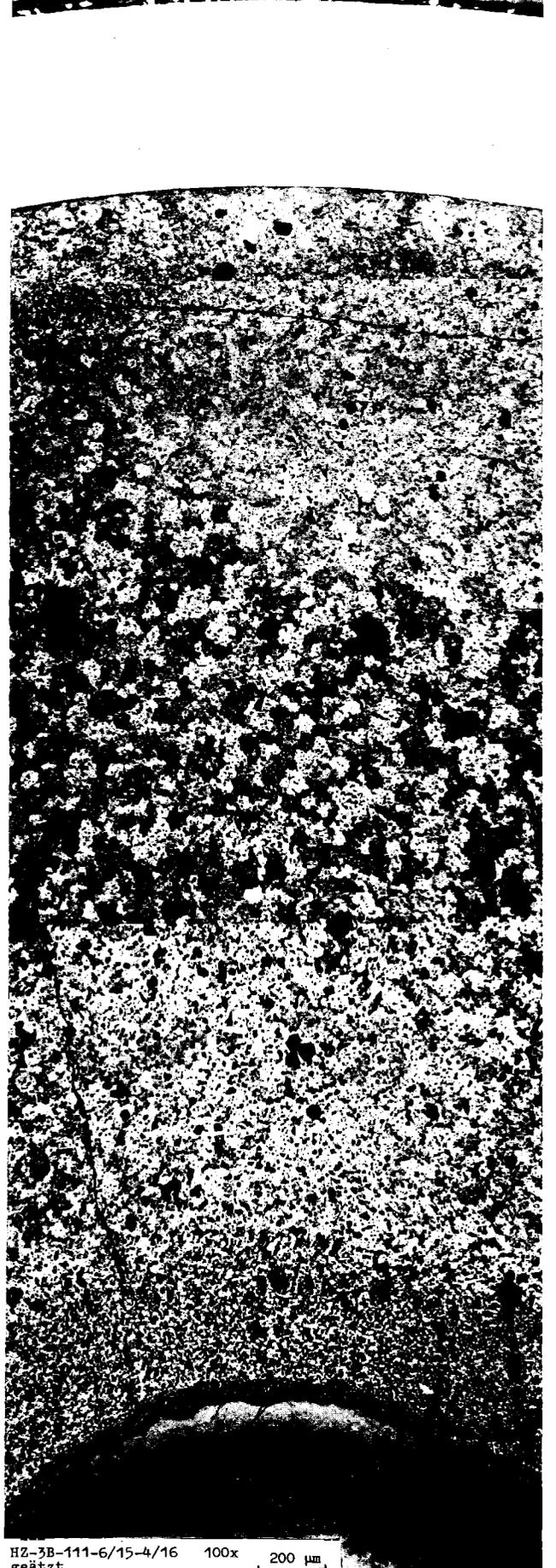
2 mm

Vg.6c Prüfling 6/15 (U,Pu)C

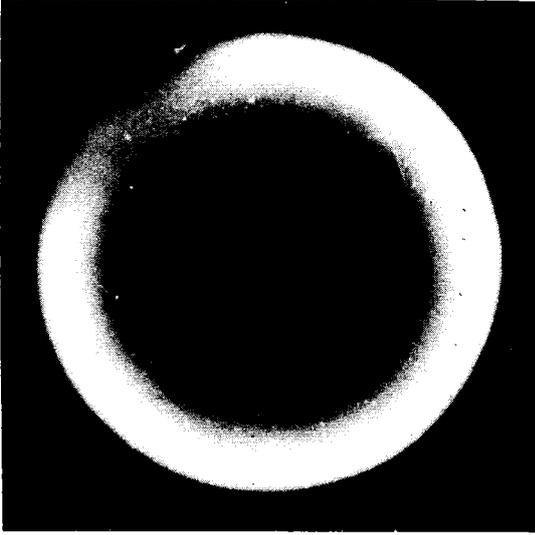
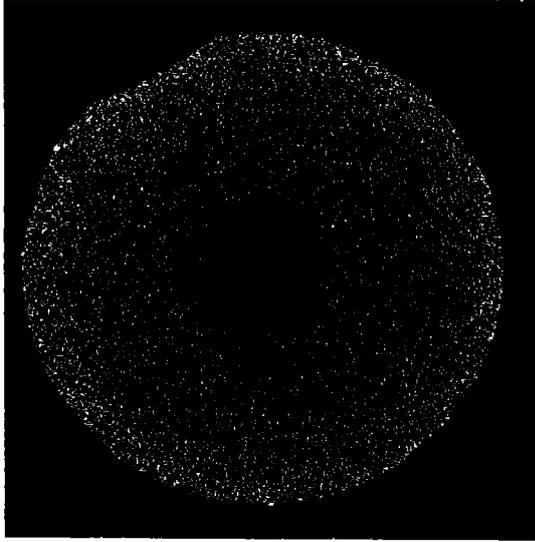
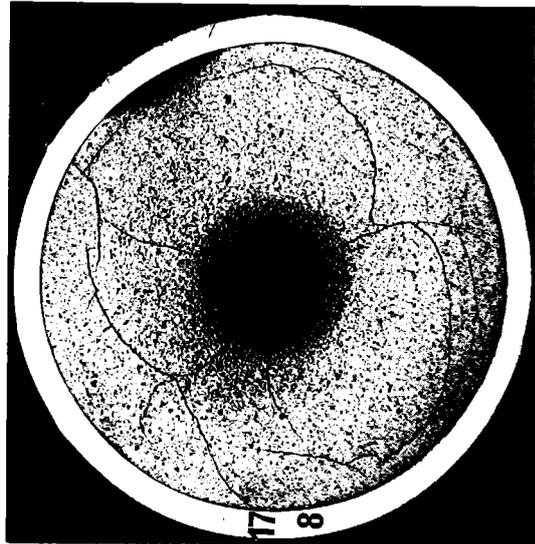
Stab 6/15 Schnitt 4



HZ-3B-111-6/15-4/8 100x 200 μm



HZ-3B-111-6/15-4/16 geätzt 100x 200 μm



Schnitt 6

α (8 sec)

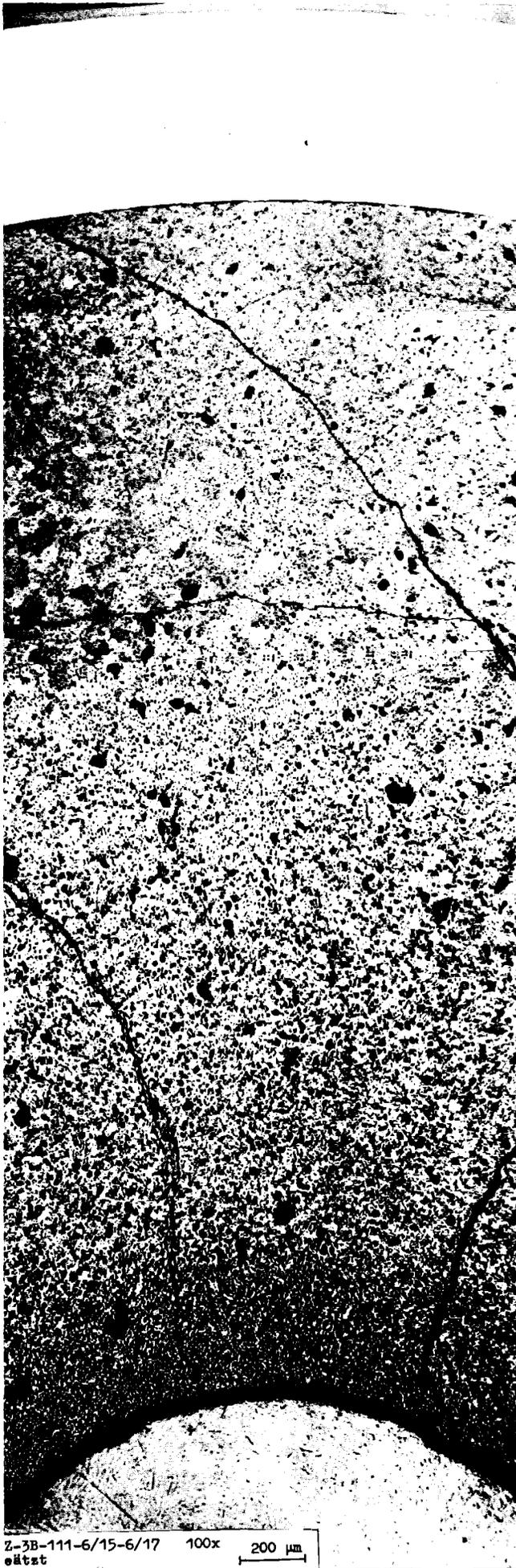
β - γ (25 sec)

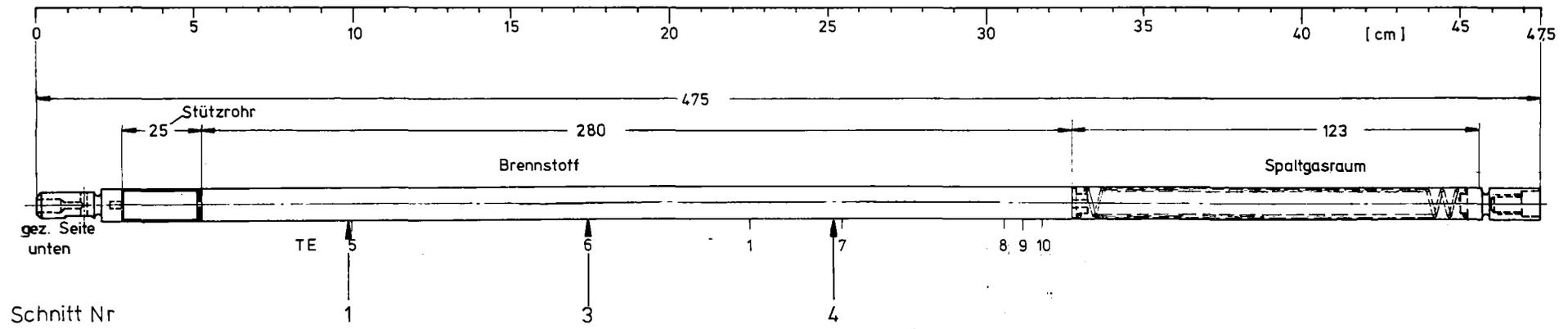
Autoradiografie

2 mm

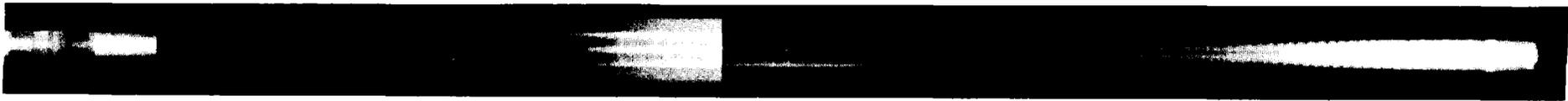
Vg.6c Prüfling 6/15 (U,Pu)C

Stab 6/15 Schnitt 6



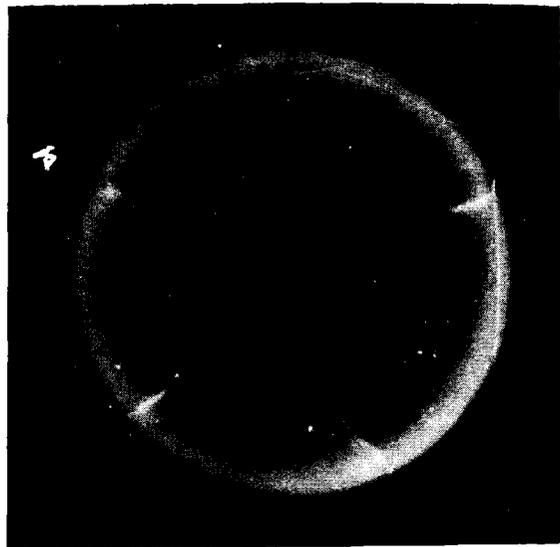
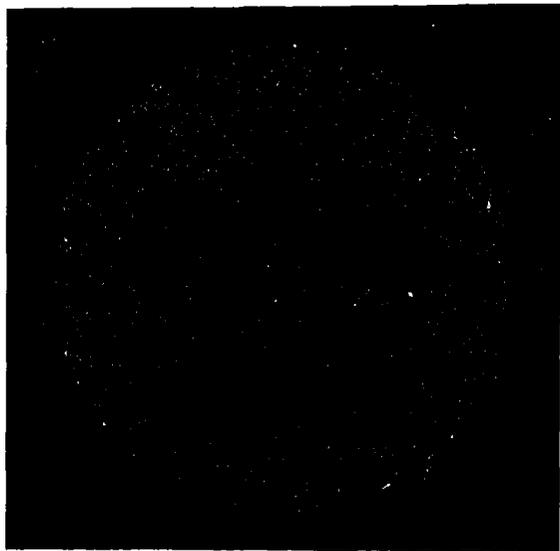
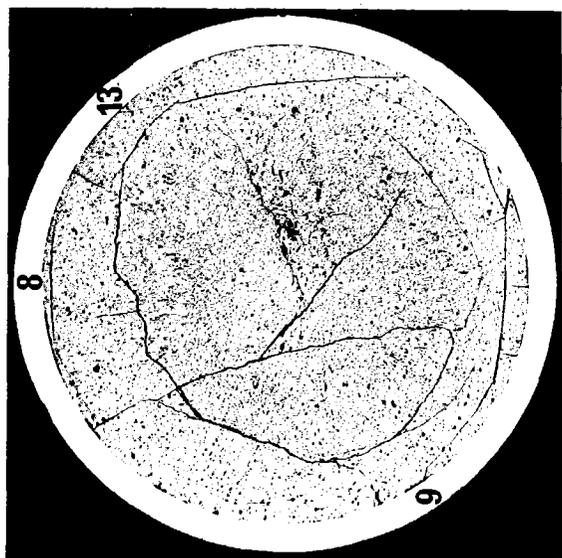


- II/72 -



Betatron - Durchleuchtung

Schnittplan und Betatron-Durchleuchtung des Prüflings 6/30



Schnitt 1

α (10sec)

β - γ (40 sec)

Autoradiografie

2 mm

Vg.6c Prufeling 6/30 (U,Pu)C

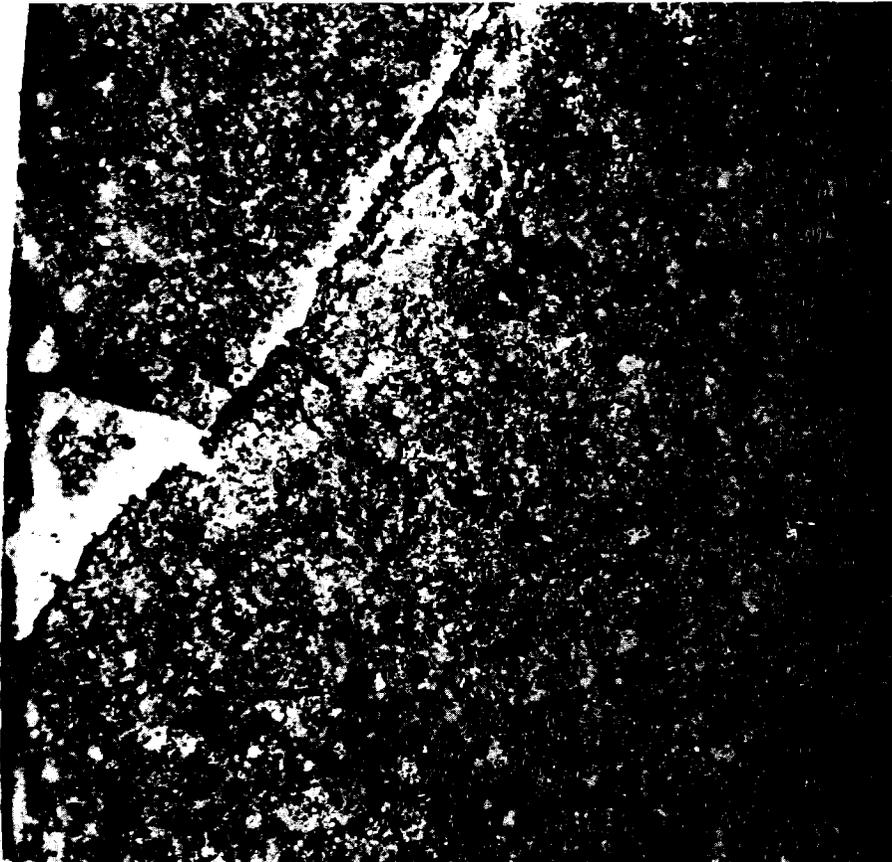
- I/74 -

Stab 6/30 Schnitt 1



HZ-3B-114-6/30-1/9 100x
geätzt

200 μ m

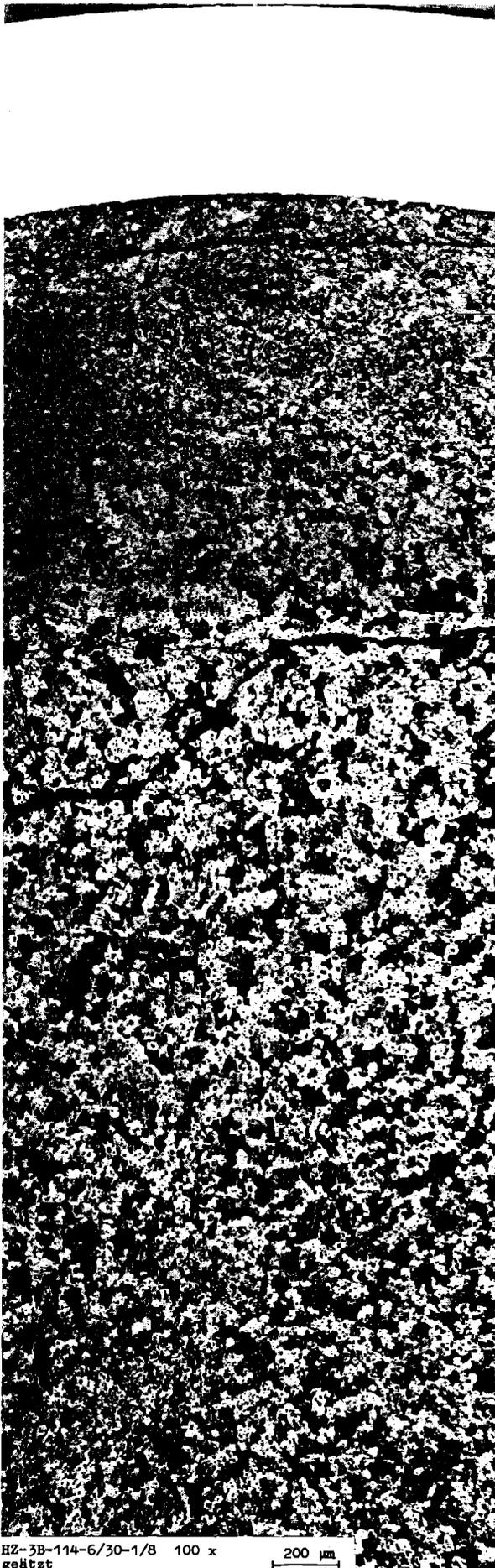


HZ-3B-114-6/30-1/13 200x
geätzt

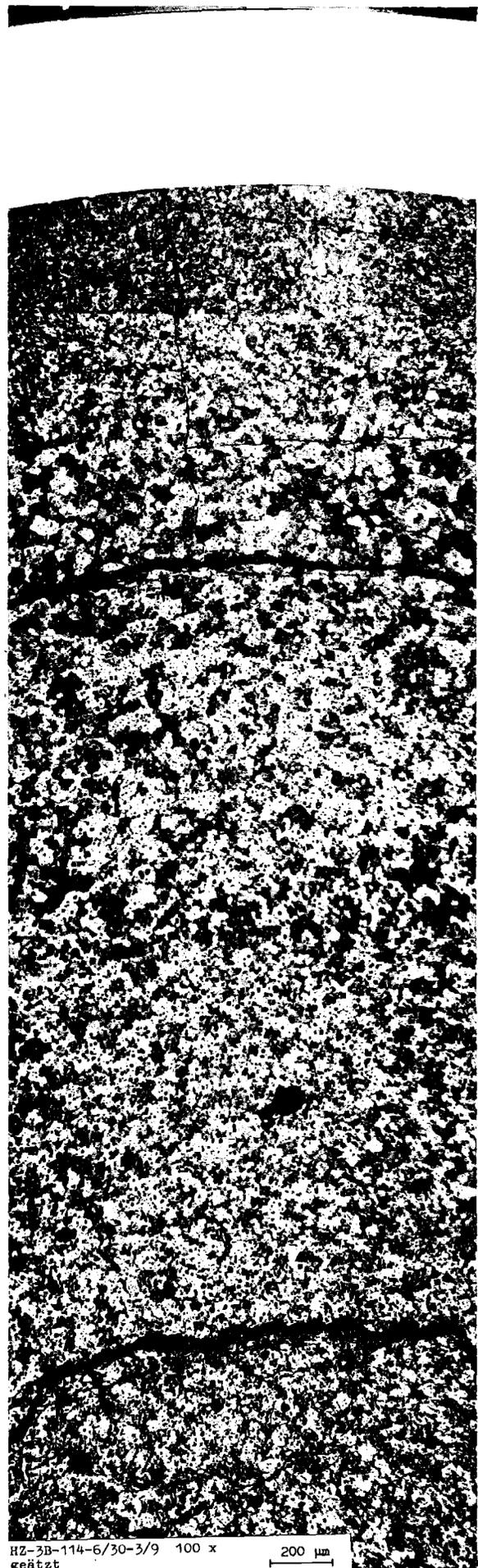
100 μ m

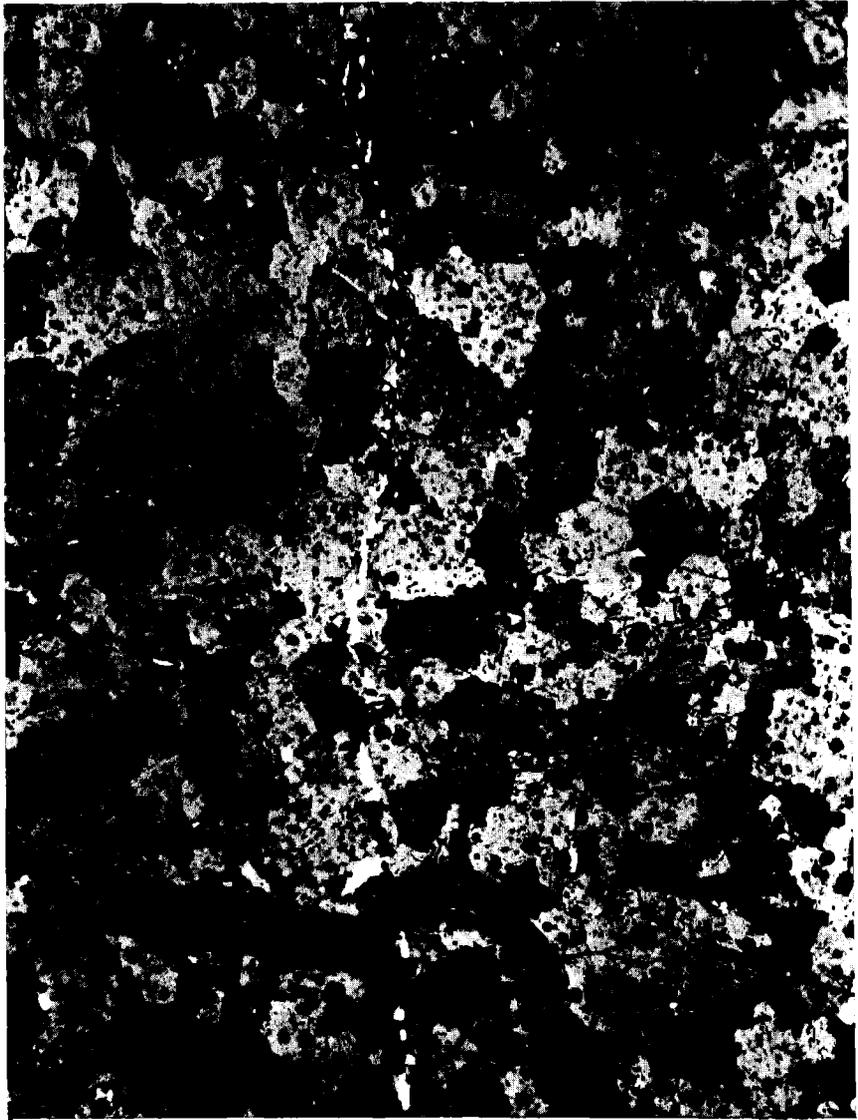
- II/75 -
Stab 6/30

Schnitt 1



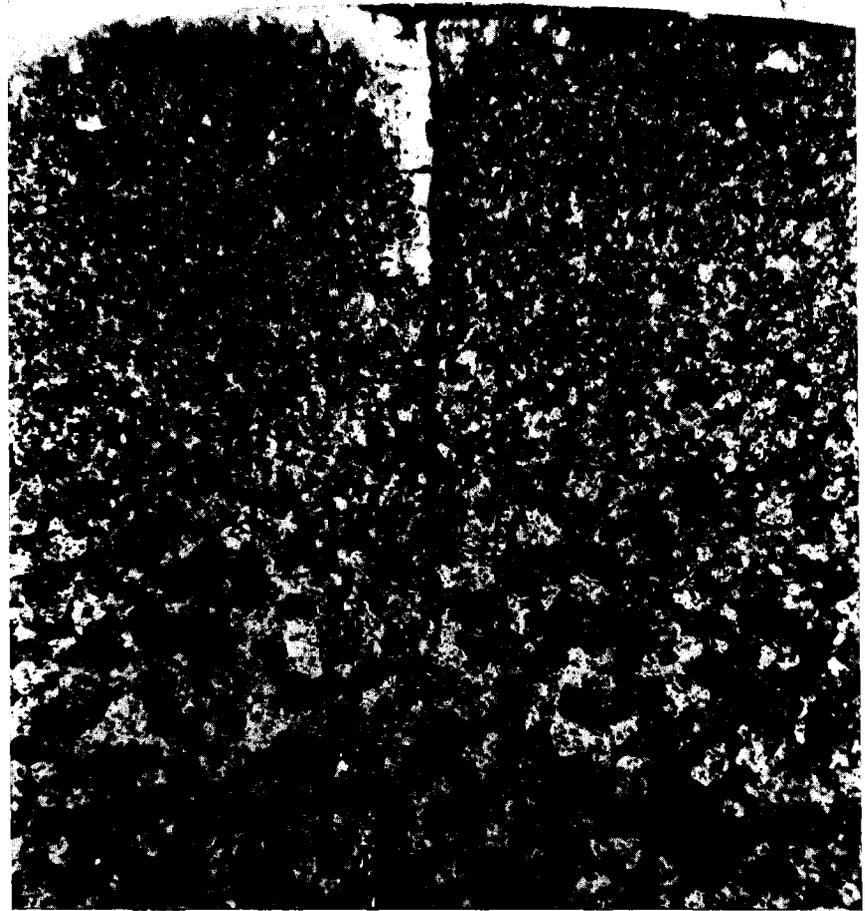
Schnitt 3





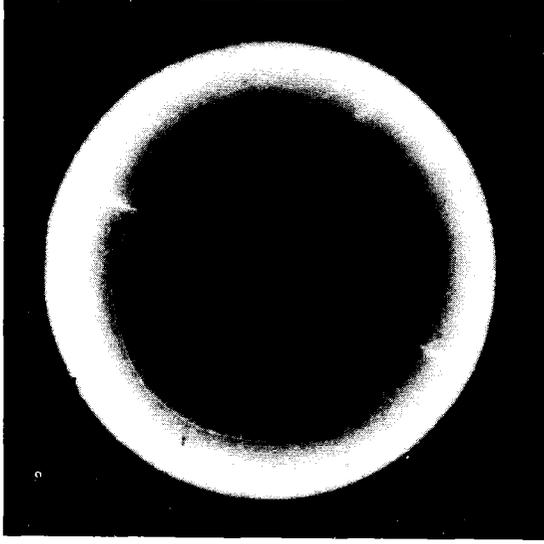
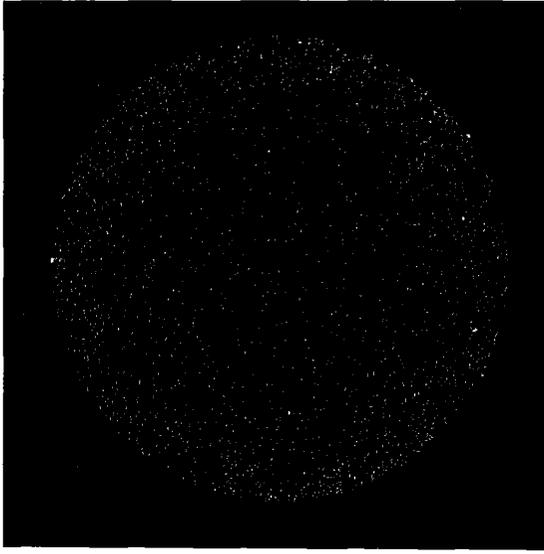
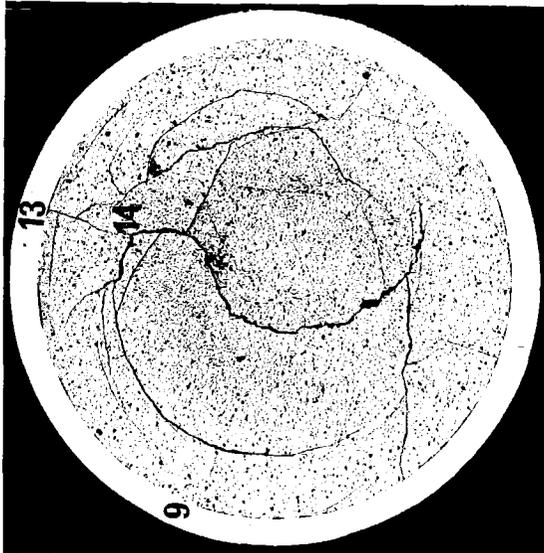
HZ-3B-114-6/30-3/14 200x
geätzt

100 μm



HZ-3B-114-6/30-3/13 100 x
geätzt

200 μm



Schnitt 3

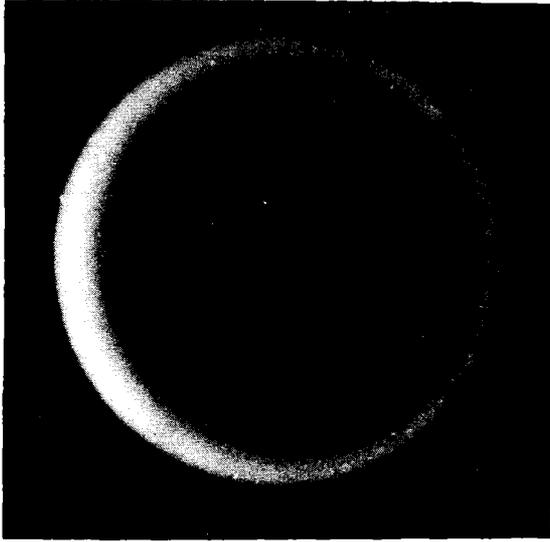
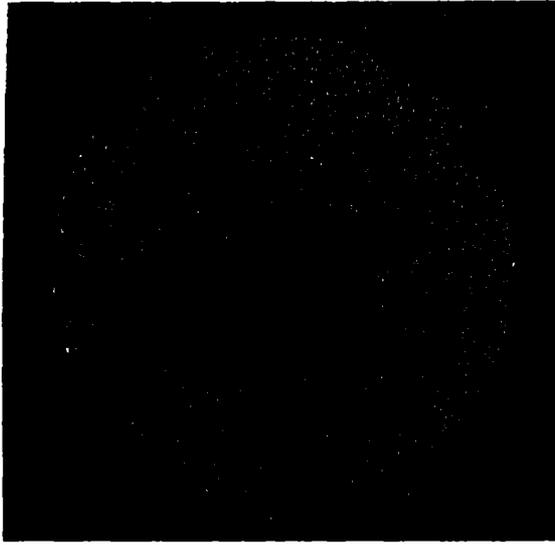
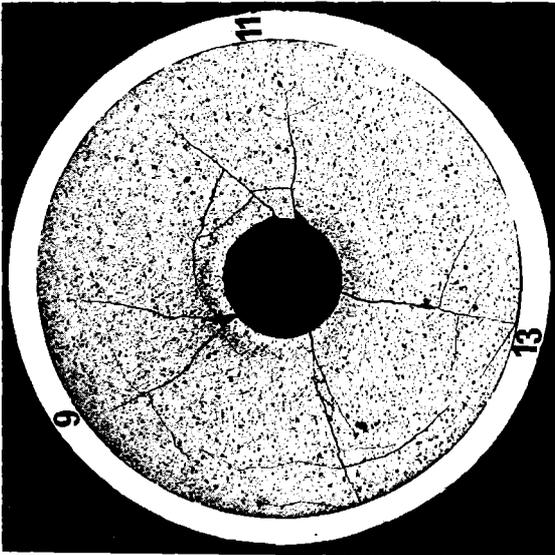
α (10sec)

β - γ (40 sec)

Autoradiografie

2mm

Vg.6c Prüfling 6/30 (U,Pu)C



Schnitt 4

α (10sec)

β - γ (40sec)

Autoradiografie

2mm

Vg.6c Prüfling 6/30 (U,Pu)C

-II/79-

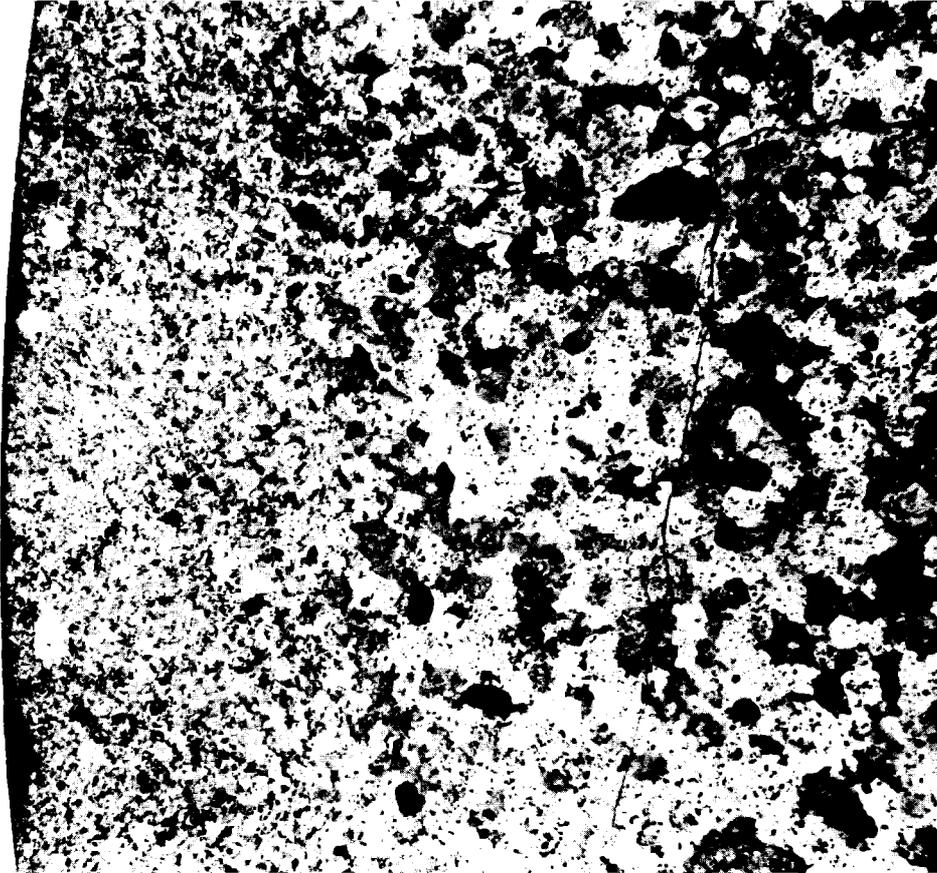
Stab 6/30 Schnitt 4



HZ-3B-114-6/30-4/9 100 x
geätzt

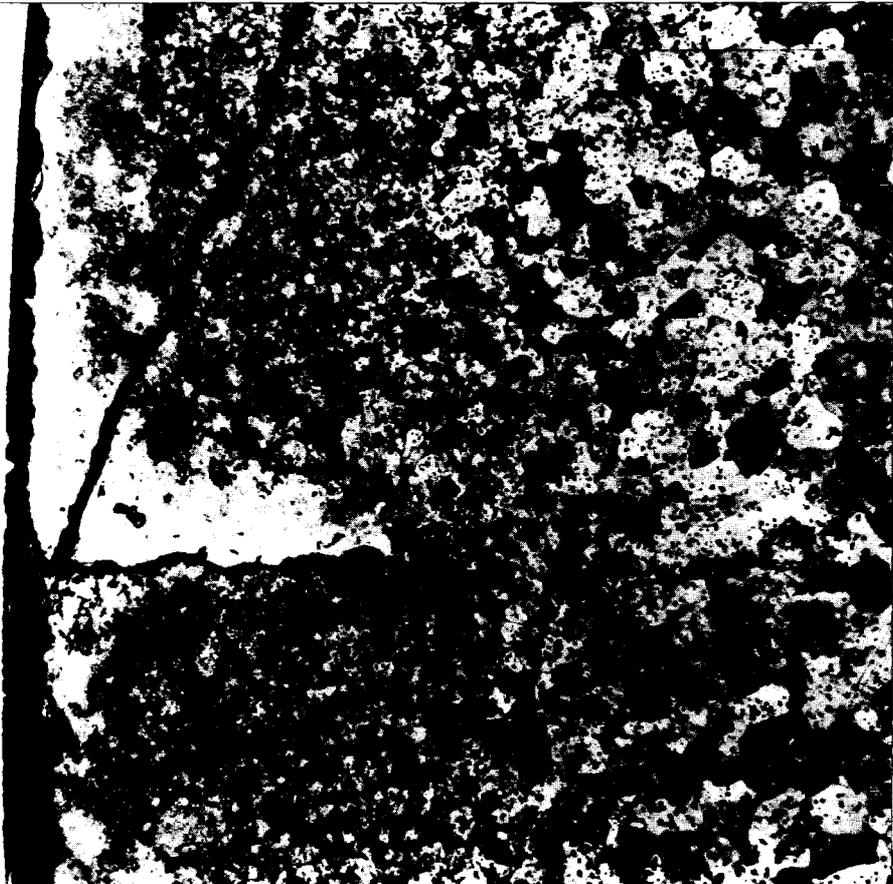
200 μ m

Stab 6/30 Schnitt 4



HZ-3B-114-6/30-4/11 100 x
geätzt

200 μm



HZ-3B-114-6/30-4/13 200x
geätzt

100 μm