

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

Dezember 1973

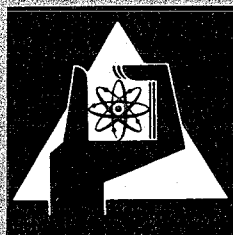
KFK 1521

Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

**Kurzzeitbestrahlung oxidischer Brennstab-Prüflinge der
FR 2-He-Loop-Versuchsgruppe 2**

**Auslegung – Herstellung – Bestrahlung –
Nachuntersuchung – Auswertung**

H. Hoffmann, D. Geithoff, A. Gerken



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

KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

K F K 1521

Institut für Material- und Festkörperforschung
Projektleitung Schneller Brüter⁺

Projekt Schneller Brüter

Kurzzeitbestrahlung oxidischer Brennstab-Prüflinge der
FR 2-He-Loop-Versuchsgruppe 2

Auslegung - Herstellung - Bestrahlung - Nachuntersuchung - Auswertung

von

H. Hoffmann, D. Geithoff, A. Gerken⁺

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

<u>Inhalt:</u>	Seite
1. Einleitung	1
2. Aufgabenstellung und Versuchsziel	2
3. Auslegung der Versuchsgruppe	5
4. Spezifikation und Aufbau der Brennstab-Prüflinge	7
4.1 Aufbau der Brennstab-Prüflinge	7
4.2 Spezifikation des Ausgangsmaterials	10
4.3 Spezifikation des Brennstoffes	10
4.4 Spezifikation des Hüll- und Stopfenmaterials	13
4.5 Spezifikation der Stab-Prüflinge	14
5. Herstellung der Brennstab-Prüflinge	16
5.1 Das Ausgangspulver	16
5.2 Herstellung der Brennstofftabletten	18
5.3 Herstellung des Pulverbrennstoffes	18
5.4 Nachweis der Brennstoffeigenschaften	22
5.5 Hüll- und Strukturmaterial	26
5.6 Hüllrohrprüfung	28
5.7 Herstellung der Stab-Prüflinge mit Tablettenbrennstoff	28
5.8 Herstellung der Brennstabprüflinge mit Pulver-Brennstoff	30
5.9 Prüfungen an den fertigen Brennstab-Prüflingen	31
6. Bestrahlungseinrichtung	34
7. Bestrahlung der Prüflinge	34
7.1 Zeitlicher Ablauf der Bestrahlung	34
7.2 Temperatur- und Leistungsverlauf	38
8. Zerstörungsfreie Nachuntersuchung	45
8.1 Visuelle Kontrolle und äußere Vermessung	45
8.2 Durchleuchtung	47
8.3 γ -Profile und γ -Spektren	48
9. Keramografie	49

	Seite
10. Thermische und mechanische Analyse der Brennstäbe	53
10.1 Das axiale und radiale Temperaturprofil	53
10.2 Analyse des Wärmeübergangs Brennstoff/Hülle	56
10.3 Analyse der Strukturzonen	59
10.4 Zentralkanalbildung und Schmelzkavernen	61
10.5 Mechanische Wechselwirkung des Brennstoffes mit der Hülle	65
10.6 Thermische Analyse der drei Brennstäbe mit Zentraltemperaturmessung	67
11. Schlußfolgerungen	69
Literatur	72
Anhang I Tablettenlisten, Tabellen I/1 bis I/9	
Anhang II Dokumentation der Nachuntersuchung	
Anhang III Temperaturprofile der Brennstababschnitte (Abb. 1 bis Abb. 42)	

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

Der in dem vorliegenden Bericht dokumentierte 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 dieser Dokumentation beitrugen, insbesondere den Herren W. Ernst und E. Lang für die Ausarbeitung der Faltblätter und graphischen Darstellungen und Frau B. Hauth für die Reinschrift des Manuskriptes.

September 1973

H. Hoffmann, D. Geithoff, A. Gerken

KURZFASSUNG

Das Ziel des Bestrahlungsexperimentes lag darin, die Umstrukturierung des Brennstoffes (Zentralkanal-, Stengelkornbildung etc.) während der ersten Bestrahlungsstunden zu studieren. Auch sollte die Auswirkung partiellen Brennstoffschmelzens und die Wechselwirkung Brennstoff/Hülle nach erfolgtem Schließen des vorgegebenen Spaltes (von 50 bzw. 125 μm) erforscht werden.

Unter dem Namen "He-Loop-Versuchsgruppe 2" wurden im FR 2 43 Brennstabprüflinge in der Zeit von Oktober 1966 bis November 1968 nacheinander bestrahlt. Die Bestrahlung erfolgte in einem instrumentierten Loop-Einsatz mit strömendem He als Kühlmittel. Die Prüflinge enthielten UO_2 -Brennstoff (7,5 % U-235) in Form von Tabletten (mit und ohne beidseitiger Stirneinsenkung) bzw. gesinterten bzw. geschmolzenen Partikeln mit Schmierdichten von 80, 85 und 90 % th.D. Die mit Tabletten gefüllten Kurzstäbe hatten eine Länge von 177 mm und am oberen Ende ein Plenum von 10 mm Länge; die Prüflinge mit einvibriertem Brennstoff (182,5 mm lang) besaßen kein Gas-Plenum. Die Hülle war aus Edelstahl (Werkstoff Nr. 1.4988) mit einem Außendurchmesser von 12,0 mm und einer Wandstärke von 1,0 mm.

Die Bestrahlung wurde bei unterschiedlichen Stableistungen (500, 750 und 1000 W/cm) und verschiedenen Bestrahlungszeiten (10 min, 2 h, 24 h) durchgeführt. Die Hüllaußentemperatur lag zwischen 500 und 620°C. An einem Prüfling wurde eine Innendruck- und an drei Prüflingen eine Zentraltemperaturmessung durchgeführt.

Dieser Bericht enthält die ausführliche Dokumentation der Herstellungs-, Bestrahlungs- und Nachuntersuchungsdaten wie auch die Auswertung bezüglich der thermischen Analyse.

Trotz der z.T. hohen Stableistungen (bis 1000 W/cm) und der damit verbundenen großen Schmelzzonen im Brennstoff, waren alle Stäbe während der Bestrahlung intakt geblieben und es wurden keine Durchmessererweiterungen festgestellt. Die Innendruck- und Zentraltemperaturmessung waren nicht erfolgreich.

Die thermische Analyse an jeweils einem unteren und einem mittleren Stababschnitt durchgeführt, erbrachte folgende Ergebnisse:

- Die errechneten Temperaturprofile ergaben keine gute Übereinstimmung mit den den Strukturzonenradien zugeordneten Temperaturen.
- Der Wärmeübergang Brennstoff/Hülle erwies sich als von der Stableistung (Kontaktdruck) abhängig.
- Die Temperaturgrenze für die Stengelkornzone ließ sich als Funktion der Stableistung und Bestrahlungszeit darstellen.

A B S T R A C T

Short-Term Irradiation of Oxide Fuel Pins of the FR 2-He-Loop-Group No.2 Specification - Fabrication - Irradiation - Postirradiation Examination - Analysis

The aim of this irradiation experiment was to study the restructuring of the fuel, especially the formation of the central hole and the columnar grain zone within the first hours of irradiation. In addition, the influence of partly molten fuel on the cladding and the diameter changes of cladding after gap closure were to be analysed.

The so-called "He-Loop-Group 2" was an irradiation experiment which consisted of 43 fuel pins successively irradiated in the reactor FR 2 from October 1966 till November 1968. Irradiation was performed in a specifically instrumented central loop with flowing He as a coolant. The fuel pins contained UO_2 as the fuel (7.5 % enrichment) with smear densities of 80, 85 and 90 % T.D. in the form of pellets (with and without dishings on both sides) or vibrocompacted particles. The short pins accommodating the pellets were 177 mm long with a gas plenum at the top. The pins with vibrocompacted particles (182.5 mm long) had no plenum. The austenitic stainless steel cladding had an outer diameter of 12 mm and 1 mm wall thickness.

The fuel pins had been irradiated at various linear rod powers (500, 750, and 1000 W/cm) and over different irradiation times (10 min, 2 h, 24 h). The cladding surface temperatures lay between 500 and 620 °C. In one pin the gas pressure was monitored; whereas in three other pins the central temperature was measured.

In spite of high linear rod powers (up to 1000 W/cm) and extended melting zones in the fuel all pins remained intact during irradiation. No diameter increase of the cladding was detected. The measurements of the gas pressure and the central temperature were not successful.

This report includes not only the detailed documentation of the fabrication, irradiation and postirradiation data, but also the results of the thermal analysis. The thermal analysis carried out at a lower and a central fuel pin cross section gives the following results:

- The calculated temperature profiles are not in good agreement with the temperatures of the structure radii.
- The heat transfer fuel/cladding turned out to be a function of the linear rod power (contact pressure).
- The temperature for the formation of columnar grain zones shows the dependence of the linear rod power and the irradiation time.

1. Einleitung

Für die Bestrahlung von Brennstab-Prüflingen in einem speziellen He-Loop im FR 2 war eine lange Vorbereitungszeit notwendig. Zuerst mußte die Bestrahlungseinrichtung mit in-pile-Strecke und out-pile-Anlagen konzipiert und gebaut werden (1963 - 1965). Bei der ersten Konzeption war der Einsatz fest im Zentralkanal des FR 2 montiert, so daß nur jeweils zwischen den Bestrahlungszyklen die Proben ein- und ausgebaut werden konnten. Der Einsatz konnte ein oder vier Stäbe bis zu einem Durchmesser von 14 mm und einer Brennstablänge von ca. 300 mm aufnehmen.

In der Versuchsgruppe 1 wurden dann UO_2 -haltige Stäbe in diesem sogenannten Langzeitloopeinsatz bis zu einem Abbrand von ca. 25.000 MWd/t M bestrahlt. Da es sich hier um die erste GfK-Brennstabbestrahlung überhaupt und dazu noch in einer sehr komplizierten Bestrahlungsmaschine handelte, hatte dieses Unternehmen in vielerlei Hinsicht prototypischen Charakter. Im Vordergrund stand die Loop-Erprobung und das Sammeln von Erfahrung auf dem Bestrahlungssektor.

In einer Spezifikation vom Mai 1965 wurden bereits drei weitere Versuchsgruppen konzipiert, von denen dann die ersten beiden auch tatsächlich durchgeführt worden sind. Es sind dies die Versuchsgruppen 2 und 3. Sie sollten in einem speziellen Kurzzeiteinsatz bestrahlt werden, wobei das Anfahrverhalten von UO_2 -Brennstab-Prüflingen (Vg. 2) bzw. U/ PuO_2 -Brennstab-Prüflingen (Vg. 3) im Mittelpunkt des Interesses stand.

Die Versuchsgruppe 4 sollte wiederum, wie die Versuchsgruppe 1, eine Langzeitbestrahlung sein, jetzt aber mit U/ PuO_2 -Prüflingen. Sie kam nicht mehr zur Ausführung. Es hatte sich inzwischen gezeigt, daß man im FR 2-Helium-Loop eine ausgezeichnete Kurzzeitbestrahlungsmaschine besaß, deren Leistungsfähigkeit entsprechend der Auslegung genützt werden sollte. Eine Langzeitbestrahlung in dieser Maschine würde jedoch dem Wert dieser Bestrahlungseinrichtung nicht gerecht werden. Inzwischen war es auch gelungen, für den FR 2 eine Bestrahlungskapsel zu entwickeln, die speziell für Langzeitbestrahlungen ausgelegt worden war, so daß tatsächlich auch kein echter Bedarf mehr für Langzeitbestrahlungen im He-Loop bestand.

Bestrahlungen im neuentwickelten Kurzzeiteinsatz zeichnen sich durch die Möglichkeit einer großen Parametervariation aus. Das bezieht sich in erster

2.11.1973

Linie auf die Betriebsparameter. So können die Stableistung, die Hülltemperatur und auch die Bestrahlungszeit in weiten Bereichen stufenlos geregelt werden. Diese Flexibilität wird dadurch erreicht, daß der Kurzzeiteinsatz während des Reaktorbetriebes in jede beliebige Corehöhe gefahren werden kann und eine Neubeladung während des Reaktorbetriebes möglich ist. Außerdem kann an den Stäben wahlweise die Zentraltemperatur oder der innere Druckaufbau gemessen werden.

An dem Experiment Loop-Versuchsgruppe 2 wurde über einen Zeitraum von sieben Jahren gearbeitet. Allerdings trat nach dem Abschluß der Nachuntersuchung eine Verzögerung von ca. 2 Jahren ein, die auf den Personalmangel bei der Auswertung zurückzuführen ist. In der folgenden Abb. 1 sind der zeitliche Ablauf der einzelnen Arbeitsschritte und die an der Arbeit beteiligten Mitarbeiter angegeben.

2. Aufgabenstellung und Versuchsziel

Beim Betrieb von Kernreaktoren lassen sich für die Brennstäbe drei Belastungsphasen unterscheiden. Zuerst ist zu nennen die Anfahrphase der Brennstäbe. Daran schließt sich die stationäre Abbrandphase an. Außerdem sind zyklische Belastungen mit und ohne Leistungsüberschläge zu berücksichtigen. Aus dem damit gegebenen breiten experimentellen Aufgabengebiet wurden für die Loop-Versuchsgruppe 2 das Anfahrverhalten und der Einfluß von Leistungsüberhöhungen auf das Stabverhalten ausgewählt. Zu diesen Komplexen gab es zum Zeitpunkt der Untersuchung noch nicht genügend gesicherte Erfahrungen. Das Anfahrverhalten wird charakterisiert durch die Größen:

- Stableistung (evtl. Stableistungsgradient)
- Hülltemperatur
- thermische Brennstoff- und Hüllrohrausdehnung und die daraus resultierende mechanische Wechselwirkung zwischen Brennstoff und Hülle
- Strukturumwandlungen im Brennstoff und deren zeitlicher Ablauf (Risse, Zentralkanal etc.)
- Brennstoffdichte, -geometrie und -form
- zeitlicher Ablauf der Vorgänge.

Arbeitstitel	VERantwortliche Mitarbeiter	Abtei- lung	Z e i t r a u m								
			1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972
Versuchskonzeption und Spezifikation	Dr. Kummerer Dr. Karsten	IAR		—	—						
Planung und Bau des Bestrahlungs- einsatzes	DI. Reiser Ing.Deckers Ing. Piel	IRE	—	—	—						
Herstellung der Brennstäbe		NUKEM			—						
Durchführung der Bestrahlung	DI.Rappenberg Ing.Deckers Ing.Piel	RB IRE IRE				—	—	—			
Wissenschaftliche Betreuung während der Bestrahlung	Dr. Karsten DI. Gerken	IAR				—	—	—			
Nachuntersuchung der Stäbe	DI. Scheeder DI. Enderlein DI. Krautwedel	HZ				—	—	—			
Wissenschaftliche Betreuung der Nachuntersuchung	Dr. Geithoff	IAR				—	—	—			
Auswertung und Abschlußbericht	Dr. Geithoff DP. Hoffmann DI. Gerken	IMF IMF PSB/PL									—

Abb.1 Zeitlicher Ablauf der Arbeitsschritte für das Experiment Loop-Vg.2

Beim Hochfahren des Brennstab-Prüflings auf Leistung kommt es aufgrund des Temperaturgradienten im Brennstoff sehr bald zu einem mehrfachen Zerreißen der Brennstofftabletten. Der Spalt zwischen Brennstoff und Hülle nimmt mit fortschreitender Leistungserhöhung ab (wegen der stärkeren Brennstoffausdehnung im Vergleich zur Hülle). Er verschwindet bei kleinen Ausgangsspaltweiten (ca. 50 μ radial), bevor der Nennwert der Stableistung erreicht ist. In einem solchen Fall tritt eine mechanische Wechselwirkung zwischen dem Brennstoff und der Hülle auf, die unter gewissen Randbedingungen zu einer Hüllrohrverformung führen kann. Unter welchen Bedingungen ist das der Fall? Das war eine der Schwerpunktsfragen, die sich durch die Auslegung der Loop-Versuchsgruppe 2 zog. Variiert wurden vor diesem Hintergrund die Stableistung (500, 750, 1000 W/cm), die Brennstoffform (Tabletten, Pulver), die Spaltweite (50, 125 μ radial) und die Tablettendichte (93, 88 % th.D.).

Ein weiterer Gesichtspunkt war der zeitliche Ablauf und die Parameterabhängigkeit der Umstrukturierung. Wie groß wird der Zentralkanal? Wie ist seine Abhängigkeit von der Stableistung (d.h. der Zentraltemperatur), der Brennstoffdichte, der Spaltweite und der Brennstoffform? Um die zeitliche Abhängigkeit der Umstrukturierung im Brennstoff aufzeigen zu können, wurden drei Bestrahlungszeiten gewählt (10 min, 2 h, 24 h). Dabei wurde davon ausgegangen, daß bei 10 min Bestrahlung in Stäben ohne zentralem Schmelzen eine Umstrukturierung noch im Anfangsstadium liegt. Nach 2 h Bestrahlungszeit könnte der Prozeß der Umstrukturierung schon im Gange sein. Nach 24 h dürfte dieser Prozeß schon weit fortgeschritten sein und unter gewissen Bedingungen bereits zum Abschluß gekommen sein.

Der dritte Fragenkomplex betraf das Temperaturfeld im Brennstab. Hier ging es einerseits um die zeitliche Abhängigkeit und andererseits um die Parameterabhängigkeit. Als Parameter wurden gewählt: drei Stableistungen (500, 750, 1000 W/cm), zwei Spaltweiten (50, 125 μ radial), zwei Tablettendichten (93, 88 % th.D.) und vier Brennstoffformen (Tabletten, ohne/mit Stirneinsenkung, gesintertes Pulver, geschmolzenes Pulver). Weiterhin sollte in fünf Prüflingen der zeitliche Verlauf der Zentraltemperatur mit Thermoelementen gemessen werden.

Im vierten Problemkreis wurde das Überlastverhalten angesprochen. Dazu wurde die Stableistung innerhalb weniger Minuten auf den gewünschten Maximalwert hochgefahren und dort eine Zeitlang gehalten (10 min, 2 h, 24 h). Als Leistungsstufen wurden 750 W/cm und 1000 W/cm gewählt. Bei 750 W/cm dürfte etwa 1/4 des Brennstoffvolumens geschmolzen sein. Bei 1000 W/cm beträgt das

Schmelzvolumen ca. 50 %. Die vordringliche Fragestellung bei diesen simulierten Überlastversuchen zielt auf die Integrität des Systems. Kommt es zu Stabdefekten oder zumindest zu lokalen Hüllrohrschwächungen und Hüllrohraufweitungen und wovon hängen sie ab ?

Dahinter steht dann die Frage nach den Brennstoffverlagerungen in axialer und radialer Richtung. Bleibt das Schmelzgut im Bereich des Zentralkanals? Wie groß ist die Viskosität der Schmelze? Und schließlich ist zu nennen die Frage nach dem Temperaturprofil in einem teilweise geschmolzenen Brennstab. Wiederum wurden alle diese Fragen in Abhängigkeit mehrerer Parameter untersucht. Sie wurden bereits genannt. Es sind dies die Bestrahlungszeit, die Brennstoffdichte, die Brennstoffgeometrie und die radiale Spaltweite.

3. Auslegung der Versuchsgruppe

Die Versuchsgruppe 2 beinhaltet die Bestrahlung von 43 UO_2 -Brennstab-Prüflingen im FR 2. Die Hüllrohrlänge, das Hüllmaterial und die Anreicherung im Brennstoff waren bei allen Stäben gleich, die übrigen Auslegungsparameter jedoch verschieden:

- Hüllmaterial: X8 Cr Ni Mo V Nb 16/13 (Werkstoff-Nr. 1.4988)
- Brennstoff-Zusammensetzung: UO_2 ; 7,5 Gew.-% U-235 im Uran
- Brennstoff-Form: Tabletten mit und ohne beidseitiger Stirneinsenkung (Zylindermantel geschliffen und ungeschliffen)
Pulver zum Einvibrieren (gesinterte und geschmolzene Partikel)
- Brennstoff-Dichte: 88, 90 und 93 % th.D. bei den Tabletten, 85 % beim vibrierten Pulver.

Die Bestrahlungen sollen nacheinander in einem speziellen Loop-Einsatz in zentraler Position des FR 2 durchgeführt werden. Für die nuklearen Auslegungsrechnungen $\int \bar{1} \int$ wurde ein maximaler ungestörter thermischer Neutronenfluß von 1×10^{14} n/cm² sec zugrundegelegt. Für einen Brennstoffradius von 5 mm, einer Brennstoffdichte von 90 % th.D., einer Anreicherung von 7,5 Gew.-% U-235 und einer Flußabschwächung durch den Loop-Einsatz von 15 % errechnete sich die Stableistung zu maximal 1000W/cm.

Tabelle 1 Auslegung der He-Loop-Versuchsgruppe 2

Stableistung (W/cm)										Brennstoff- dichte (%)	Schmier- dichte (%)	Rad.Spaltw. (μm) Einsenkung	Zahl der Prüflinge	Brennstoff-Form		
500		750			1000		400									
Bestrahlungszeit										Brennstoff- dichte (%)	Schmier- dichte (%)	Rad.Spaltw. (μm) Einsenkung	Zahl der Prüflinge	Brennstoff-Form		
10 min	2 h	24 h	10 min	2 h	24 h	10 min	2 h	24 h	24 h							
Prüflings- Bezeichnung	L 1	L 2	-	L 1x	L 2x	-	L 1z	L 2z	-	L 3 ⁺	93	90	50; nein	7	Tabletten	
	L 4	L 5	L 6	L 7	L 8	L 9	L 10	L 11	L 12	L 13 ⁺	88	85	50; nein	10	(geschliffen)	
	-	L 14	-	-	L 15	-	-	L 16	-	L 17 ⁺	93	85	50; ja	4		
	-	-	-	L 18	L 19	-	L 20	L 21	-	L 22 ⁺	90	85	125; nein	5	Tabletten	
	-	-	L 23	L 24	L 25	L 26	-	-	-	L 27 ⁺	90	80	125; ja	5	(ungeschliffen)	
	-	L 28	L 29*	L 30	L 31	L 32*	L 33	L 34	-	-	85	85	-	7	Pulver, gesin- terte Partikel	
	-	L 35	-	L 36	L 37	L 38*	-	L 39	-	-	85	85	-	5	Pulver geschm.Partikel	

* für Innendruckmessung vorgesehen

+ für Zentraltemperaturmessung vorgesehen (die 4 untersten Tabletten besitzen Zentralloch)

Als Bestrahlungsparameter werden 3 Bestrahlungszeiten und 3 Stableistungen gewählt:

- Bestrahlungszeit: 10 min; 2 h; 24 h
- Stableistung: 500, 750, 1000 W/cm
- Hüllaußentemperatur: 500°C

Die Verteilung der 43 Prüflinge mit der fortlaufenden Bezeichnung L 1, L 1x, L 2z, L 2, L 2x, L 2z, L 3, L 4 ... L 39 auf die Auslegungsvarianten zeigt Tabelle 1.

Ergänzend zu diesem Bestrahlungsprogramm sollen noch 2 weitere Meßreihen durchgeführt werden: Die Prüflinge L 29, L 32 und L 38 sind für Innendruckmessungen (ursprünglich waren die 12 Prüflinge L 28 bis L 39 dafür vorgesehen) und die Prüflinge L 3, L 13, L 17, L 22 und L 27 für Zentraltemperaturmessungen ausgerüstet.

4. Spezifikation und Aufbau der Brennstab-Prüflinge

Den Ausführungen dieses Kapitels liegen Notizen und Berichte [2, 3] zugrunde, die nicht veröffentlicht sind.

4.1 Aufbau der Brennstab-Prüflinge

In Tabelle 2 sind die äußeren und inneren Abmessungen der Brennstab-Prüflinge zusammengestellt. Die innere Länge beträgt bei allen Prüflingen 150 mm. Bei Pulverfüllung ist diese Abmessung identisch mit der Brennstoffsäulenlänge; bei Tablettenfüllung ist die Brennstoffsäulenlänge 140 mm lang (10 mm entfallen hier auf das Plenum mit Druckfeder). Die Außenabmessungen differieren etwas durch die verschiedenen langen unteren Endstopfen, die zur Aufnahme der Kapillarrohre und Thermolemente vorgesehen sind (Abb. 2). Die Stirnseiten der Brennstoffsäulen sind mit 1 mm starken Endscheiben aus Rhodium, zur Vermeidung der Flußaufwölbung, abgedeckt. Diese Scheiben sind jeweils in die Endstopfen eingebördelt bzw. zur Plenumseite hin lose aufgelegt. Der untere Endstopfen der partikelgefüllten Proben enthält einen Filterstopfen aus gesintertem Edelstahl, der Brennstoffstaub bei der Druckmessung zurückhalten soll.

Die Kennzeichnung der Brennstab-Prüflinge ist mit 1 mm hohen Zahlen und Buchstaben auf der Mantelfläche des oberen Endstopfens eingeschlagen.

Tabelle 2 Maße der Brennstab-Prüflinge

	Tablettenprüflinge L 1, L 2, L 4 - L 12, L 14 - L 16, L 18 - - L 21, L 23 - L 26	Tablettenprüflinge für Zentraltemperaturmessung L 3, L 13, L 17, L 22, L 27	Prüflinge mit vibriertem Brennstoff L 28 - L 39
Oberer Endstopfen (mit/ohne Rh-Scheibe)	13,5 mm	13,5 mm	13,5 mm
Brennstoffsäule	140,0 mm	140,0 mm	150,0 mm
Druckfeder (mit Rh-Scheibe)	10,0 mm	10,0 mm	-
Unterer Endstopfen (mit Rh-Scheibe)	13,5 mm	19,0 mm	19,0 mm
G e s a m t l ä n g e	177,0 mm	182,5 mm	182,5 mm
Außendurchmesser	12,0 ± 0,25 mm	12,0 ± 0,25 mm	12,0 ± 0,25 mm
Wandstärke	1,0 ± 0,1 mm	1,0 ± 0,1 mm	1,0 ± 0,1 mm

1
∞
1

4.2 Spezifikation des Ausgangsmaterials

4.2.1 Chemische Zusammensetzung

Das verwendete Ausgangspulver ist nuklearreines UO_2 -Pulver der Firma NUKEM. Die Gesamtverunreinigung darf 1500 ppm im Gewichtsanteil, entsprechend 4,0 ppm Boräquivalent, nicht überschreiten.

4.2.2 Isotopenzusammensetzung

Das Gewichtsverhältnis von U-235 zu U-238 (einschließlich des unbekanntes Gehaltes sonstiger U-Isotope) soll sein:

$$\frac{\text{U-235}}{\text{U-238}} = 0,081 \pm 0,002$$

4.2.3 Physikalische Eigenschaften

Als Richtwerte für die physikalischen Eigenschaften dienen die folgenden Werte:

BET-Oberfläche	1,5 - 4,0 m^2/g
O/U-Verhältnis	2,1 \pm 0,05
Primärpartikelgröße	< 1 μm
mittlere Sekundäragglomerate	ca. 20 μm

4.3 Spezifikation des Brennstoffes

4.3.1 Chemische Zusammensetzung

Der Brennstoff in allen Prüflingen ist reines UO_2

4.3.2 Isotopenverhältnis und Stöchiometrie

$$\frac{\text{U-235}}{\text{U-238}} = 0,081 \pm 0,002$$

Inbegriffen in U-235 sind die unbekanntes Anteile der anderen U-Isotope. Das Sauerstoff/Uran-Verhältnis soll 2,0 \pm 0,015 betragen.

4.3.3 Chemische Verunreinigungen

An chemischen Verunreinigungen sind insgesamt zulässig: 2000 ppm, entsprechend 4 ppm Boräquivalent. Im einzelnen gelten folgende Höchstwerte:

	Verunreinigung	Grenzwert in ppm
Gase:	N ₂	100
	H ₂ O	100
Halogene:	Cl	25
	F	25
Neutronengifte:	B	} mit allen Verun- reinigungen max. 4,0 ppm Boräquivalent
	Seltene Erden	
	Cd	1
Sonstige Nichtmetalle:	C	150
Sonstige Metalle:	Ag	50
	Ca	25
	Co	50
	Cr	50
	Cu	100
	Fe	500
	Mg	25
	Mn	50
	Mo	100
	Ni	50
	Pb	100
	V	50
	W	50
	Al + Si + Ti	100

4.3.4 Brennstoff-Form

Gemäß Tabelle 1 sind folgende Brennstoff-Formen spezifiziert:

- Tabletten, gesintert, ungeschliffen
- Tabletten, gesintert, ungeschliffen mit beidseitiger Stirneinsenkung
- Tabletten, gesintert, geschliffen
- Tabletten, gesintert, geschliffen mit beidseitiger Stirneinsenkung
- Pulverbrennstoff aus geschmolzenen Partikeln
- Pulverbrennstoff aus abgerundeten und gesinterten Partikeln

4.3.5 Brennstoffdichte

- Die Tablettendichten betragen 88, 90 und $93 \pm 2\%$ der theoretischen Dichte
- Die Dichte des einvibrierten Brennstoffes ist auf 85% th.D. spezifiziert; auf 5 mm Länge sind Abweichungen von $\pm 5\%$, über die gesamte Brennstoffsäule nur $\pm 2\%$ erlaubt.

4.3.6 Tablettendurchmesser

Die geschliffenen Tabletten sollen einen Durchmesser von $9,90 \pm 0,01$ mm und die ungeschliffenen Tabletten einen von $9,75 \pm 0,03$ mm haben.

4.3.7 Stirnflächeneinsenkung

Die Tabletten der Prüflinge L14 bis L17 und L23 bis L27 sind an beiden Stirnflächen mit je einer Einsenkung von $2,5\%$ des Tablettenvolumens zu versehen. Eine Stegbreite von 1,0 mm ist vorzusehen.

4.3.8 Oberflächen der Tabletten

In der Stirn- und Mantelfläche sind Kantenabplatzungen von 0,3 mm Tiefe allgemein zulässig; außerdem sind zulässig:

- Kantenabplatzungen, 0,5 mm in die Mantelfläche und 1 mm in die Stirnfläche reichend, mit einer Maximalbreite von 2 mm, wenn die gleiche Stegbreite dazwischenliegt.
- Haarrisse von 0,1 mm Weite und 2 mm Länge.

4.4 Spezifikation des Hüll- und Stopfenmaterials

4.4.1 Chemische Zusammensetzung

Als Hüll- und Stopfenmaterial kommt der Stahl X8CrNiMoVNb 16/13 (Werkstoff-Nr. 1.4988) zur Verwendung. Die Richtanalyse dieses Stahles ist:

Element	Gew.-%
C	0,08
Ni	12,5 - 14,5
Cr	15,5 - 17,5
Mo	1,1 - 1,5
V	0,65 - 1,2
Nb	10 x C
Mn	1,0 - 1,5
Si	0,3 - 0,6
B	max. 20 ppm
N ₂	0,1
Fe	Rest

4.4.2 Hüllrohrmaße

Die geometrischen Abmessungen sind wie folgt spezifiziert:

Länge	156 ± 0,5 mm
Durchmesser , außen	12,0 ± 0,25 mm
Durchmesser, innen	10,0 ± 0,05 mm
Wandstärke	1,0 ± 0,1 mm
<u>Durchbiegung</u>	0,1 mm
Ovalität	innerhalb der Durchmessertoleranzen

4.4.3 Oberflächenbeschaffenheit

Rauhigkeit	< 2 µm
Kratzer, Risse	< 30 µm Tiefe

4.4.4 Mechanische Daten

Richtwerte für Raumtemperatur sind:

Streckgrenze	25 - 50 kp/mm ²
Zugfestigkeit	55 - 80 kp/mm ²
Einschnürung	~ 35 %

4.5 Spezifikation der Stab-Prüflinge

4.5.1 Fertigung

Die metallischen Einzelteile sind gemäß Abb. 2 (Zeichnungs-Nr. IRE 2-PSB-40.02-1-1780) herzustellen. Es gelten die angegebenen Maße und Toleranzen.

4.5.2 Innere Geometrie

- Die Länge der Pulverbrennstoffsäule beträgt: $150 \begin{matrix} + 0,5 \\ - 1,0 \end{matrix}$ mm
- Die Länge der Tablettensäule beträgt: 140 ± 1 mm
- Die Stirnflächen der Tablettensäulen sind mit 1 mm starken Rh-Scheiben (zur Verhinderung einer Flußaufwölbung) abzudecken.
- Auf die Tablettensäule ist gemäß Abb. 2 eine Druckfeder zur Transportsicherung vor der Bestrahlung zu setzen.
- Bei den Prüflingen mit Tablettenbrennstoff soll die Dichte und die Position jeder einzelnen Tablette bekannt sein.
- Je Säulenlänge sollen 4 Hüllinnendurchmesserwerte in äquidistanten Abständen angegeben werden.

4.5.3 Äußere Geometrie

Die Prüflinge haben folgende Maße:

- Äußere Länge bis zu den Stopfenenden: $177,0 \pm 0,5$ mm
(Prüfling L1, L2, L4 - L12, L14 - L16,
L18 - L21, L23 - L26)
- Äußere Länge bis zu den Stopfenenden: $182,5 \pm 0,5$ mm
(Prüfling L3, L13, L17, L22, L27,
L28 - L39)
- Außendurchmesser $12,0 \pm 0,25$ mm

4.5.4 Helium-Füllung

Die Prüflinge L1-L27 sind unter Helium (1 atm) zu füllen und zu verschließen. Die Prüflinge L28 - L39 sind in einem späteren Arbeitsgang unter einem He-Druck von 5 atm zu verschließen.

4.5.5 Verschließen der Prüflinge

Die Prüflinge werden mit den vorgearbeiteten oberen Endstopfen verschlossen und gasdicht zugeschweißt. Die Schweißnaht muß innerhalb der Durchmesser-toleranzen liegen. Gewinde an den Endstopfen sind nach dem Schweißen zu fertigen.

4.6 Prüfungen

4.6.1 Prüfungen am Ausgangsmaterial

Das Brennstoffpulver ist auf

- chemische Verunreinigungen
- das Mischungsverhältnis
- und physikalische Eigenschaften wie
 - BET-Oberfläche
 - O/U-Verhältnis
 - Primärpartikelgröße
 - Größe der Sekundäragglomerate

zu untersuchen.

4.6.2 Prüfungen am Brennstoff

Der fertige Brennstoff soll auf

- chemische Reinheit
 - Isotopenzusammensetzung
 - Stöchiometrie
- analysiert werden.

An den Tabletten ist die Dichte, die Höhe und der Durchmesser zu bestimmen. Die Säulenlänge und das Säulengewicht ist zu ermitteln. An einer Tablette jeder Sorte sind keramografische Untersuchungen vorzunehmen.

Am vibrierfähigen Pulver sind Untersuchungen auf

- axiale Dichteverteilung
- mittleren Partikeldurchmesser
- prozentuale Zusammensetzung bezüglich der Kornfraktionen
- Rüttel- und Auftriebsdichten

notwendig; außerdem sollen keramografische Untersuchungen durchgeführt werden.

4.6.3 Prüfungen am Hüllrohr

Die Hüllrohre sind der Reiß-, Rauigkeits- und Maßprüfung zu unterziehen.

4.6.4 Prüfungen an den fertigen Prüflingen

An den Prüflingen sind folgende Prüfungen durchzuführen:

- He-Lecktest
- Röntgenprüfung der Schweißnaht
- Gewichtskontrolle
- Maßkontrolle

5. Herstellung der Brennstab-Prüflinge

Die Firma NUKEM in Wolfgang bei Hanau hat die 43 Prüflinge nach obiger Spezifikation [2] angefertigt und die geforderten Prüfungen durchgeführt. Dieses Kapitel umfaßt die Herstellung des Brennstoffes, die Fertigung der Stäbe und die zahlreichen Prüfungen [3].

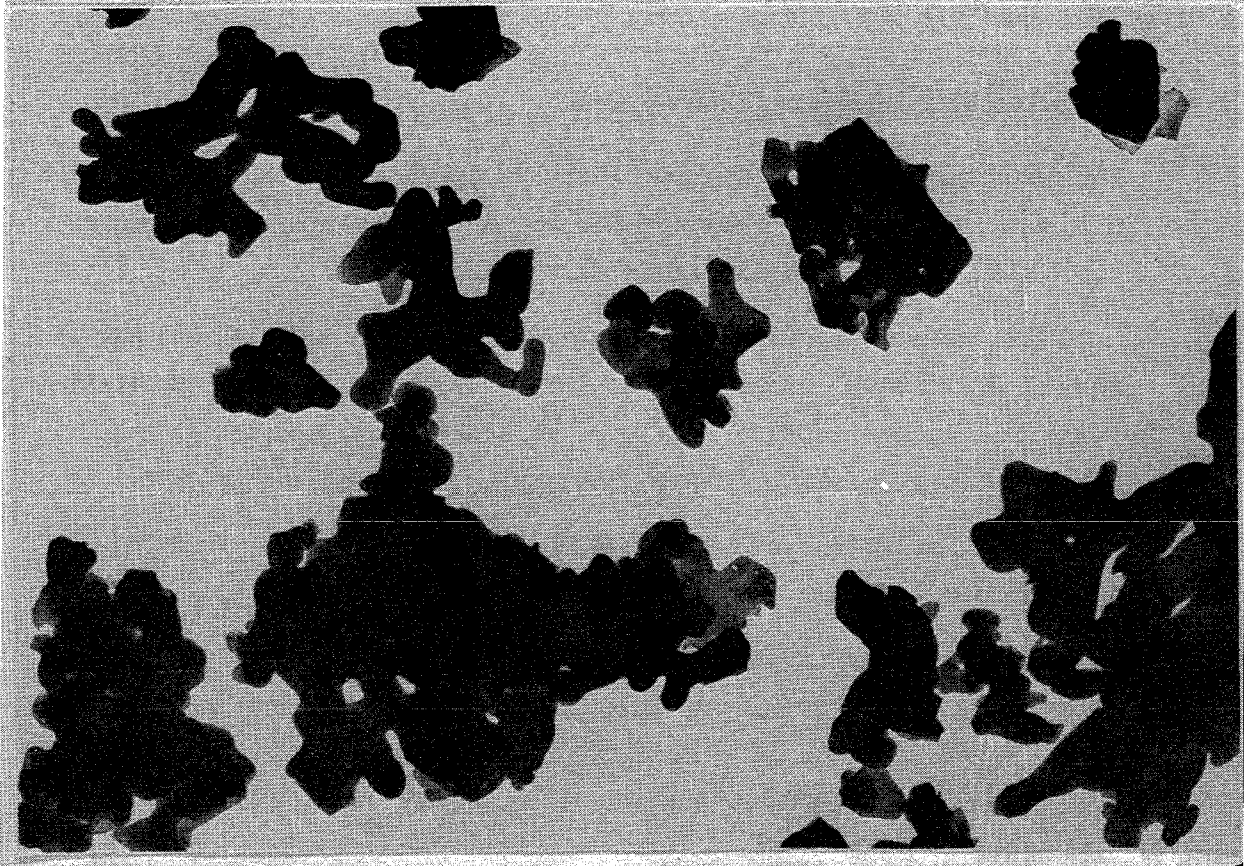
Die Ausführungsmerkmale und deren Zuordnung zur Anzahl und Kennzeichnung der Prüflinge wurden bereits in Tabelle 1 angegeben. Die Kennzeichnung wurde mit 1 mm hohen Buchstaben und Zahlen auf die Mantelfläche des oberen Endstopfens eingeschlagen.

5.1 Das Ausgangspulver

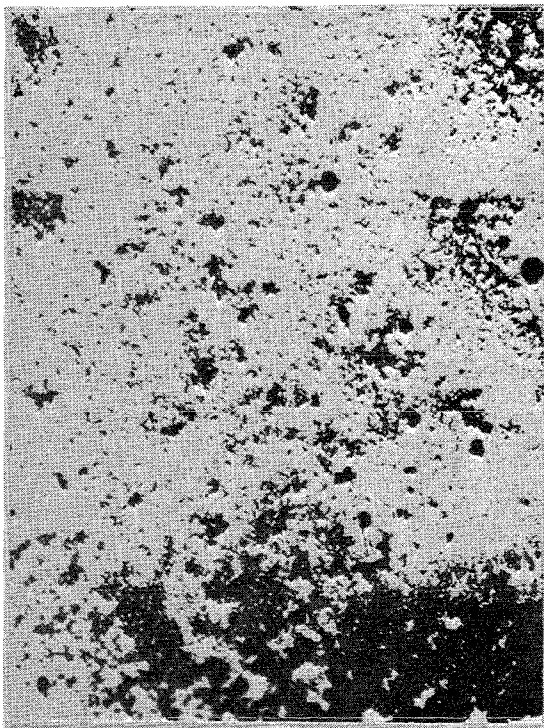
Das Ausgangspulver, das für die Tabletten- und Partikelbrennstoffe benutzt wurde, wies folgende Materialdaten auf:

- | | |
|------------------------|-----------------------|
| - BET-Oberfläche | 2,6 m ² /g |
| - O/U-Verhältnis | 2,03 |
| - Primärpartikelgröße | 0,04 bis 0,5 µm |
| - U-235-Gehalt im Uran | 7,5 Gew.-% |

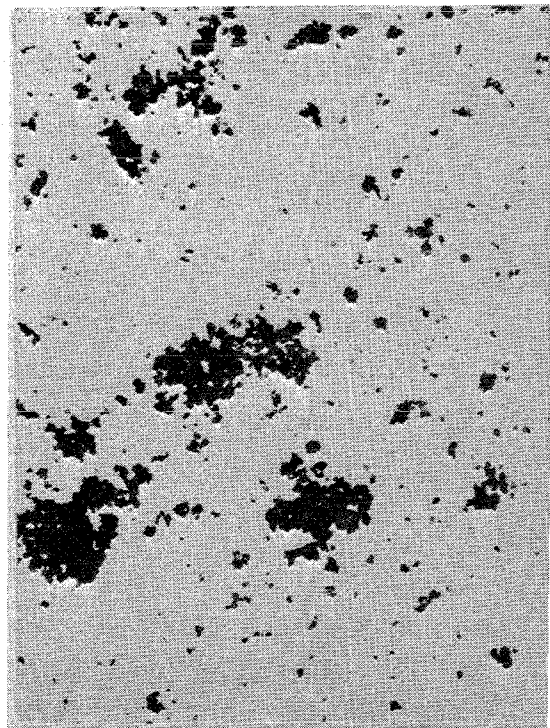
Abb. 3 zeigt eine elektronenoptische Aufnahme der Primärpartikel und zwei optische Aufnahmen der Sekundäragglomerate.



Elektronenopt. Aufnahme der Primärpartikeln
V = 50000 : 1



Aufnahmen der Sekundäragglomerate
V = 100 : 1



V = 400 : 1

UO₂ - Ausgangspulver

Abb.:3

5.2 Herstellung der Brennstofftabletten

Das Ausgangspulver wurde granuliert, zu Grünlingen verpreßt und nach dem Entwachsen unter H_2 -Atmosphäre gesintert. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die wesentlichen Herstellungsdaten.

Im Gegensatz zur Spezifikation wurden alle Tabletten auf den geforderten Zylinderdurchmesser geschliffen. Es erfolgte keine Maßsintierung. Die Tablettenhöhen schwanken zwischen 13,70 und 14,40 mm; für die Tablettensäulen wurden geeignete Tabletten ausgewählt.

Aus jeder Tablettenserie wurden 4 Tabletten mit einer zentralen Bohrung zur Aufnahme der Thermolemente versehen.

In Abb. 4 sind typische Aufnahmen für die Tablettenserie mit 93 % th.D. zusammengestellt; sie zeigt eine Aufnahme einer angeschliffenen Stirnfläche ohne Einsenkung, einer Stirnfläche mit Einsenkung, von Mantelflächen und eine Gefügaufnahme aus der Mitte eines Tablettenquerschliffes.

5.3 Herstellung des Pulverbrennstoffes

In den Prüflingen mit einvibriertem Brennstoff kamen 2 Sorten von Pulverbrennstoff zur Anwendung:

- Pulverbrennstoff aus gesinterten Partikeln,
- Pulverbrennstoff aus geschmolzenen Partikeln.

5.3.1 Vibrierpulver aus gesinterten Partikeln

Das Ausgangspulver (s. Kap. 5.1) wurde plastifiziert und verpreßt. Die Grünlinge wurden gemahlen und das Mahlgut abgerundet und in 4 Fraktionen abgesiebt. Der Anteil der Kornfraktionen am Ausgangspulver betrug:

Fraktion I	(2,00 - 1,20 mm Korngröße)	40 %
Fraktion II	(1,25 - 1,00 " ")	20 %
Fraktion III	(0,4 - 0,25 " ")	25 %
Fraktion IV	(0,09 " ")	15 %

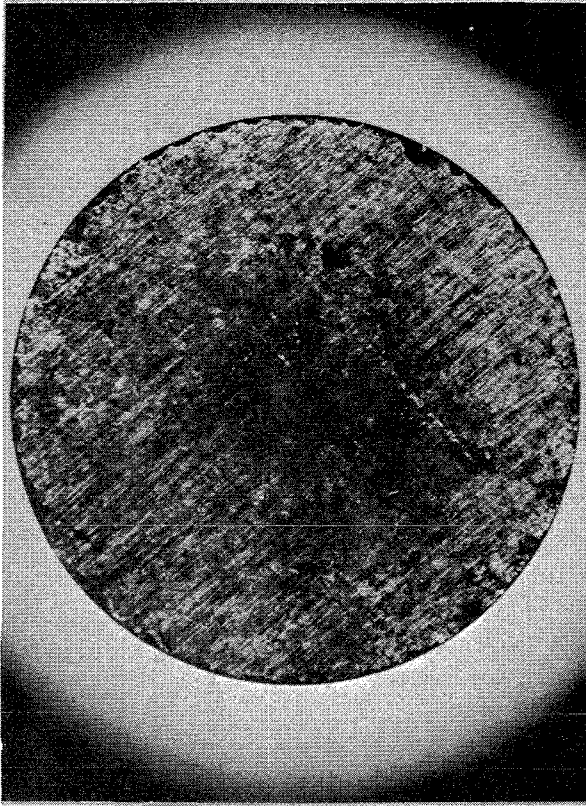
Die Partikel wurden anschließend unter H_2 -Atmosphäre bei $1750^{\circ}C$ (2 h lang) gesintert. Form und Gefügestruktur ist Abb. 5 zu entnehmen.

Tabelle 3

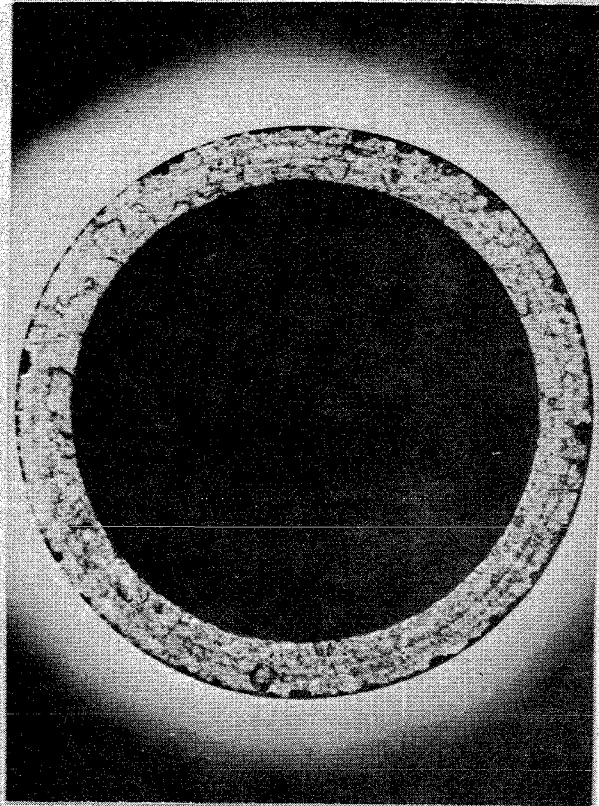
Herstellungsdaten für den Tablettenbrennstoff

Prüflings-Nr. ⁺⁾	L1, L1x, L1z, L2, L2x, L2z (L3)	L18 bis L21 (L22)	L4 bis L12 (L13)	L14 bis L16 (L17)	L23 bis L26 (L27)
Solldichte	93 % th.D.	90 % th.D.	88 % th.D.	93 % th.D.	90 % th.D.
Mantelfläche	geschliffen	geschliffen	geschliffen	geschliffen	geschliffen
Stirneinsenkung (beidseitig)	nein	nein	nein	ja	ja
Preßdruck	3,5 t/cm ²	2,2 t/cm ²	1,7 t/cm ²	3,5 t/cm ²	3,1 t/cm ²
Sintern	1 h/1600°C	1 h/1500°C	1 h/1500°C	1 h/1600°C	1 h/1500°C
Höhe ungeschl.	13,70 - 14,40 mm	13,70 - 14,20 mm	13,82 - 14,20 mm	13,73 - 14,08 mm	13,84 - 14,18 mm
Durchmesser (geschliffen)	9,90 ± 0,01 mm	9,75 ± 0,01 mm	9,90 ± 0,01 mm	9,90 ± 0,01 mm	9,75 ± 0,01 mm
mittl. Dichte	93 % th.D.	90 % th.D.	89 % th.D.	93 % th.D.	90 % th.D.
Einsenkung	-	-	-	4,6 Vol.-%	5,1 Vol.-%

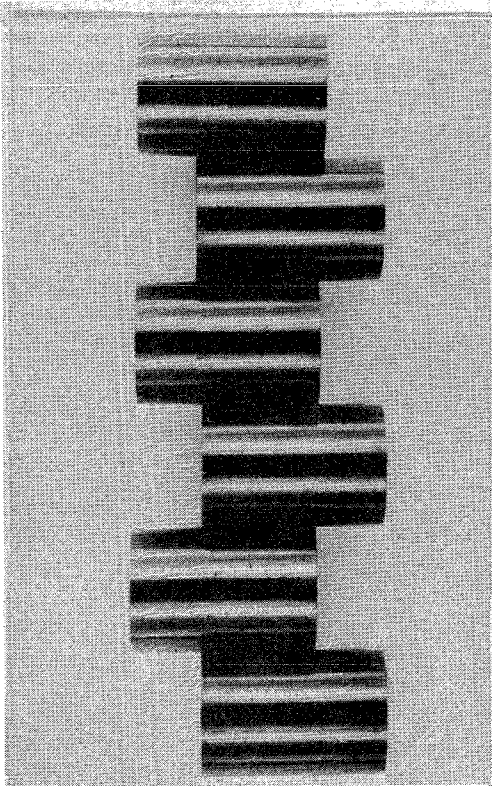
+) Für die in Klammern gesetzten Prüflinge wurden 4 Tabletten mit einer zentralen Bohrung von
 $\varnothing = 1,8 \pm 0,05$ mm versehen.



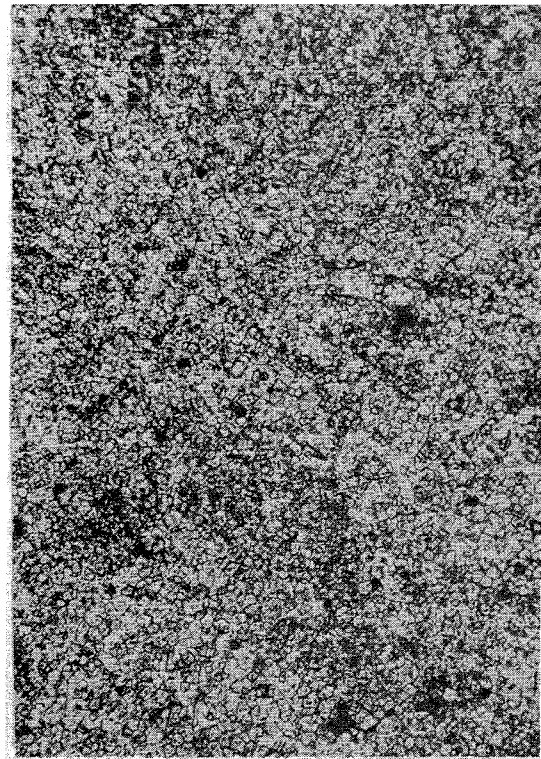
Stirnfläche
V = 7,5x



Stirnfläche, Einsenkung mit Steg
V = 7,5x



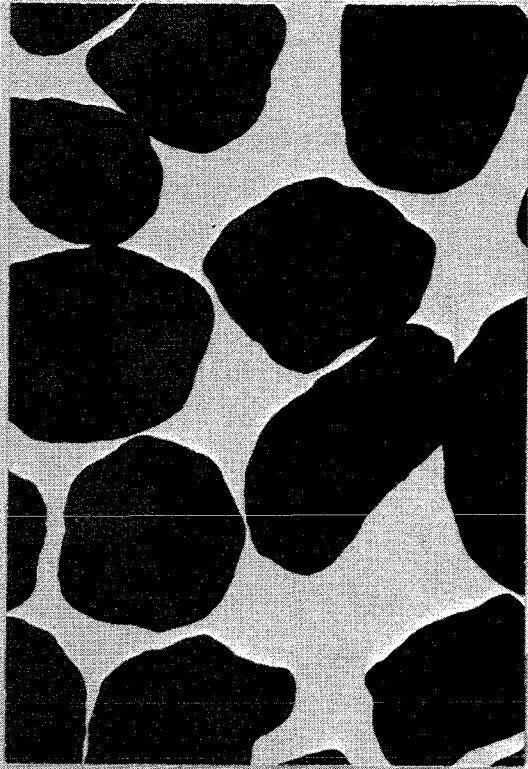
Mantelfläche
V = 1,6x



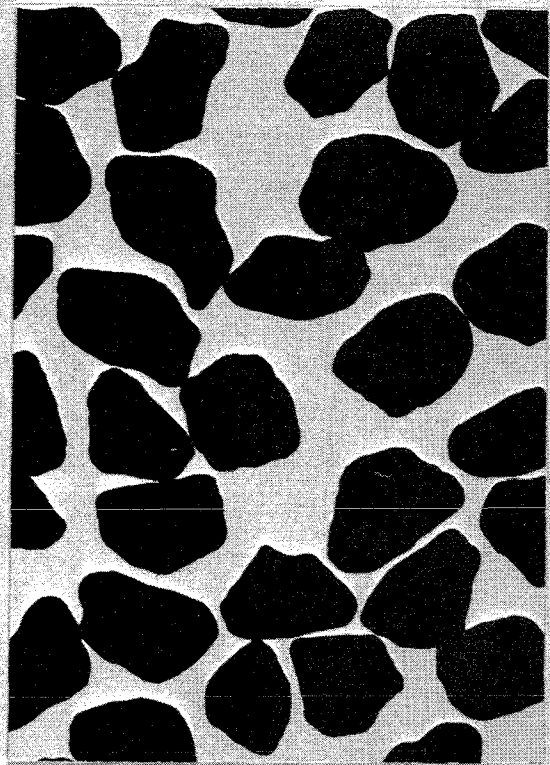
Querschliff, Zentrum
V = 225x

UO₂ - Tabletten
93% th. D., geschliffen

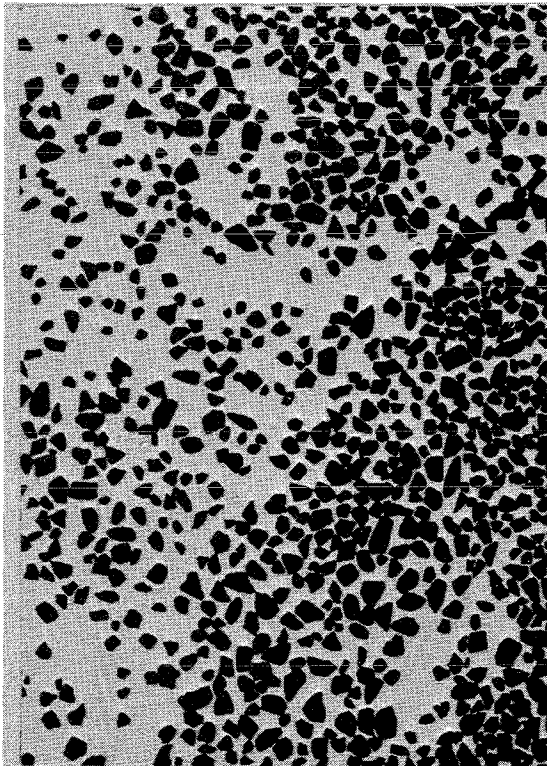
Abb.: 4



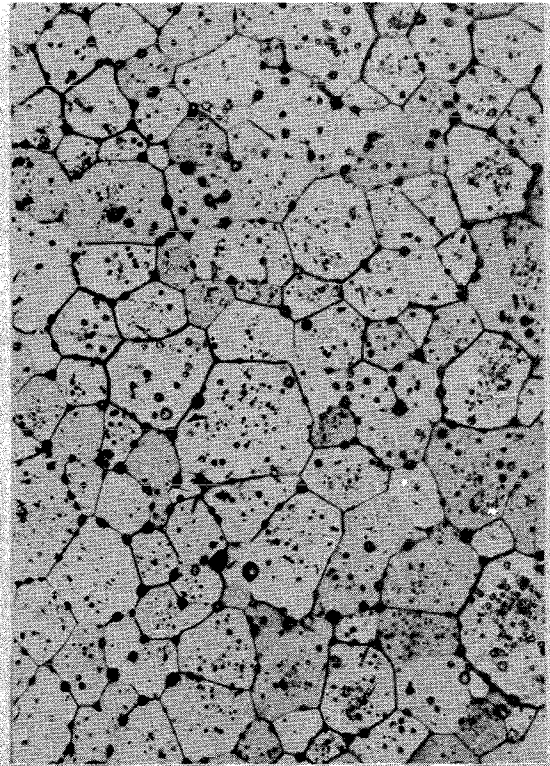
Kontur, Fraktion I
V = 10 x



Kontur, Fraktion II
V = 10 x



Kontur, Fraktion III
V = 10 x



Gefüge eines Grobpartikels
V = 400 x

Gesinterte UO_2 -Partikel

Abb.: 5

5.3.2 Vibrierpulver aus geschmolzenen Partikeln

Das Ausgangspulver (s. Kap. 5.1) wurde in einem elektrischen Schmelzofen in direktem Stromdurchgang unter Argon-Atmosphäre geschmolzen. Das Schmelzgut wurde gebrochen, gemahlen und in 4 Fraktionen abgeseibt. Der Anteil der einzelnen Fraktionen betrug:

Fraktion I	(2,00 - 1,20 mm Korngröße)	40 %
Fraktion II	(1,20 - 0,80 mm ")	20 %
Fraktion III	(0,50 - 0,20 mm ")	15 %
Fraktion IV	(0,10 mm ")	25 %

Die Partikel wurden bei 1000 °C (H_2 -Atmosphäre, 4 h lang) stöchiometrisch gegläht. Abb. 6 vermittelt einen Eindruck von der Form der gebrochenen Partikel.

5.4 Nachweis der Brennstoffeigenschaften

5.4.1 Spaltstoff-Anreicherung

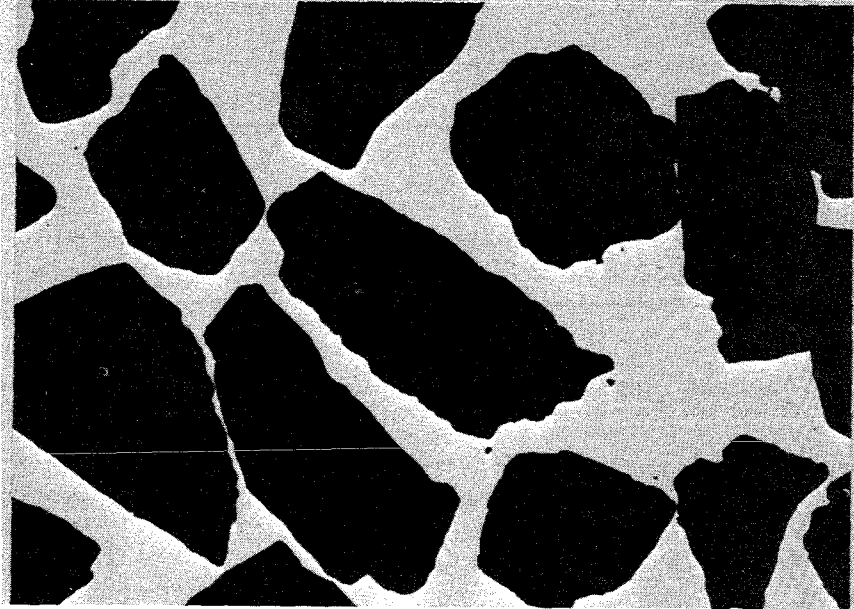
Das UO_2 -Ausgangspulver (s. Kap. 5.1) mit 7,5 Gew.-% U-235 im Urananteil wurde durch Mischen von 35,03 % angereichertem Uran mit Uran natürlicher Isotopenzusammensetzung hergestellt. Die hierbei benutzten Mengen sind in dem Mischprotokoll in Tabelle 4 zusammengestellt.

Eine Isotopenanalyse wurde im Einverständnis mit der GfK nicht durchgeführt.

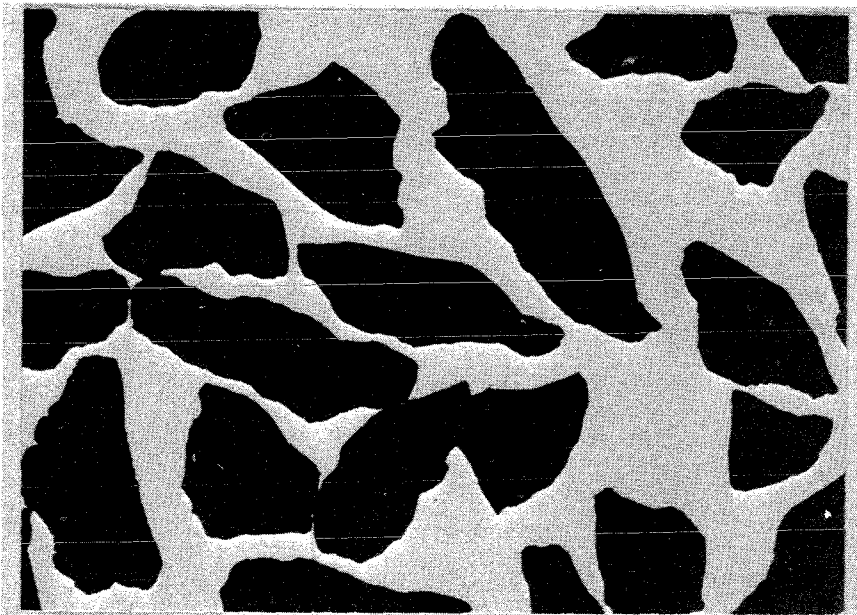
5.4.2 Chemische Verunreinigungen

Die Anteile der Verunreinigungen wurden sowohl am Ausgangspulver als auch an den fertigen Brennstoffen ermittelt. Das Boräquivalent bleibt weit unter dem Grenzwert von 4 ppm. Die Analyse der Verunreinigungen ist in Tabelle 5 wiedergegeben.

An allen Brennstoffsorten wurde ermittelt: Das O/U-Verhältnis, der Wasser- und der Restgasgehalt. Tabelle 6 gibt eine Übersicht über die ermittelten Werte.



Kontur, Fraktion I
V = 10 x



Kontur, Fraktion II
V = 10 x

Geschmolzene UO_2 -Partikel

Abb.: 6

Tabelle 4 Mischprotokoll für das angereicherte UO₂-Ausgangspulver

Charge	Brennstoff-Mengen	U-235-Anreicherung	U-235
1	2,829 kg	35,0293 %	0,9910 kg
2	11,471 kg	0,7106 %	0,0815 kg
S u m m e	14,300 kg	7,5 %	1,0725 kg

Tabelle 5 Analyse der Verunreinigungen

	Element	Ausgangs- pulver (ppm)	Tabletten- brennstoff (ppm)	gesinterte Partikel (ppm)	geschmolzene Partikel (ppm)
Gase	N ₂	3	3	2	2
Halogene	F	21	12	5	8
	Cl	3	3	3	3
Neutronen- gifte	B	0,18	0,08	0,08	0,1
	Cd	0,07	0,07	0,07	0,07
sonstige Nicht- metalle	C	130/135	47/50	26	22/25
	Si	8	150	100	130
sonstige Metalle	Ag	0,09	0,09	8	1
	Al	220	230	250	210
	Co	1	1	1	1
	Cr	8	12	12	15
	Cu	1,9	1,9	2,1	2,1
	Ca	20	20	20	20
	Fe	87	200	60	44
	Mg	5	3	3	5
	Mo	6	20	24	15
	Mn	2	2	8	1
	Ni	2	10	8	2
	Pb	1	1	1	1
	Sn	5	5	5	5
	Ti	6	6	7	7
	V	3	3	3	3
W	2	2	2	2	
Boräquivalent		0,33	0,28	0,21	0,23

Tabelle 6 Gasförmige Verunreinigungen und O/M -Verhältnisse

Brennstoff-Form	Prüflings-Nr.	H ₂ O-Gehalt (ppm)	O/U-Verhältnis	Restgas-Gehalt (ml/g)	CO (ml/g)	H ₂ (ml/g)	
UO ₂ -Ausgangspulver	-	0,23	2,03				
Tabletten	93 % th.D. 9,90 ø	L1, L1x, L1z L2, L2x, L2z L3	6	2,01	0,005 0,001	Spuren Spuren	Spuren Spuren
	88 % th.D. 9,90 ø	L4 bis L12 L13	33	2,01	0,05 0,07	0,01 0,01	0,04 0,06
	93 % th.D. 9,90 ø Stirneinsenkung	L14 bis L16 L17	2	2,01	0,005 0,008	Spuren Spuren	Spuren Spuren
	90 % th.D. 9,75 ø	L18 bis L21 L22	21	2,01	0,02 0,04	Spuren 0,01	Spuren 0,03
	90 % th.D. 9,75 ø Stirneinsenkung	L23 bis L26 L27	41	2,02	0,05 0,09	0,01 0,04	0,02 0,07
	Pulver	gesinterte Partikel	L28 bis L34	17 ⁺⁾	2,00	0,06	0,01
geschmolzene Partikel		L35 bis L39	12 ⁺⁾	2,01	0,05	0,02	0,03

+) Die Angaben stellen den gemessenen Wassergehalt des getrockneten Granulates vor dem Einfüllen in die Proben dar. Da die Prüflinge mit Partikelfüllung nicht dicht verschlossen wurden, kann der Wassergehalt, zur Zeit der Bestrahlung, höher liegen.

5.5 Hüll- und Strukturmaterial

5.5.1 Hüllrohre

Aus einer Herstellungscharge der Fa. Mannesmann AG vom Jahre 1962 wurden 10 Rohre mit einer Anlieferlänge von 1 m verwendet. Die Rohre waren nahtlos gezogene austenitische Stahlrohre aus dem Werkstoff X8CrNiMoVNb 16/13 (Werkstoff-Nr. 1.4988) mit einem Innendurchmesser von $10,00 \pm 0,05$ mm und einer Wandstärke von $1,0 \pm 0,1$ mm. Die Schmelzanalyse und die Fertigungswerte sind mit Protokollen des Herstellers belegt; einen Auszug hiervon geben die Tabellen 7 und 8 wieder.

5.5.2 Rundmaterial

Das Rundmaterial aus Edelstahl X8CrNiMoVNb 1613 mit einem Rohrdurchmesser von 15 mm zur Fertigung der Endstopfen wurde auf der Mantelfläche feinstgedreht und mit Ultraschall auf Fehlerfreiheit geprüft. Für die Drehteile wurden nur Abschnitte ohne Fehleranzeige verwendet.

5.5.3 Endscheiben aus Rhodium

Die Rh-Scheiben wurden von der Fa. Degussa, Hanau geliefert. Nach Angaben des Herstellers hat das Rhodium einen Reinheitsgrad $> 99,9$ %. Die Rhodium-Scheiben, zur Verhinderung der Flußaufwölbung, wurden an den Stirnseiten der Tablettensäulen angebracht, entweder in die Endstopfen eingebördelt oder, im Falle eines Gasplenums, lose in den Prüfling eingeführt.

5.5.4 Druckfedern und Filterstopfen

Die Druckfedern und Filterstopfen wurden von der GfK besorgt und dem Prüflingshersteller übergeben. Die Druckfedern sind aus dem Edelstahl X12CrNi 1717 (Werkstoff-Nr. 1.4310) und die Filterstopfen aus Sintermetall der Zusammensetzung 18 % Cr, 12,5 % Ni, 2,2 % Mo, 0,6 % Si, Rest Fe gefertigt.

Tabelle 7 Schmelz-Analyse des Hüllrohrmaterials

Werkstoff	Nr. der Schmelze	A n a l y s e									
		C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %	Ni %	Ta/Nb %	V %
X 8 Cr Ni Mo V Nb 16/13 Werkstoff-Nr. 1.4988	40 344	0,07	0,40	1,22	0,018	0,007	17,10	1,3	13,61	0,85	0,70

Tabelle 8 Festigkeitswerte der Hüllrohre

Hüllrohr-Abmessungen		Streckgrenze (kp/mm ²)	Zugfestigkeit (kp/mm ²)	Dehnung Lo = 5 do (%)	Warm-Streckgrenze 400°C (kp/mm ²)
Außendurchmesser (mm)	Wanddicke (mm)				
12	1,0	34,8	68,0	50	24,9

5.6 Hüllrohrprüfung

Die Hüllrohre wurden mittels Ultraschall auf äußere und innere Oberflächenfehler und auf ihre Wandstärke geprüft. Die mit 30 µm Tiefe spezifizierte Grenze der zulässigen Oberflächenfehler konnte nicht eingehalten werden. Im Einverständnis mit der GfK wurde die Grenztiefe auf 60 µm heraufgesetzt.

Die Wanddickenprüfung erfolgte mit einem Testrohr, dessen Rohraußendurchmesser eine Stufe von - 0,1 mm aufwies. Die mittlere Wandstärke lag zwischen 1,000 und 0,980 mm. Die Hüllrohrinnendurchmesser wurden in äquidistantem Abstand von 10 mm mit einem mechanischen Innenmeßgerät vermessen. Die Schwankungen der Innendurchmesser und Wandstärken lagen innerhalb der spezifizierten Toleranzen.

In Tabelle 9 sind die Ergebnisse der Hüllrohrprüfung zusammengestellt. Die Innendurchmesserwerte sind Mittelwerte aus 2 Messungen in verschiedenen Ebenen; es wurden die maximalen und minimalen Mittelwerte angegeben. Die Hüllaußendurchmesser wurden nicht gemessen, sie können durch Addition aus den Innendurchmesser- und den Wandstärkenwerten errechnet werden. Die maximalen Differenzen der Einzelmeßwerte der beiden Ebenen ergeben die maximalen Ovalitäten. Außerdem sind die verwendeten Hüllrohrabschnitte angegeben; die erste Zahl gibt die Rohrnummer, die zweite Zahl die Zählnummer des Abstiches an.

5.7 Herstellung der Stab-Prüflinge mit Tablettenbrennstoff

5.7.1 Auswahl der Tabletten

Jede Tablette wurde einzeln auf Höhe und Durchmesser vermessen; der mittlere Durchmesser wurde durch 3, die Höhe durch 1 Messung ermittelt. Die hierbei festgestellten Abweichungen von der **Zylinderform** lagen bei maximal 4 µm; die Fehler der Planparallelität betragen maximal 60 µm.

Die Dichten der Tabletten wurden aus dem Gewicht und den geometrischen Abmessungen errechnet.

Für die Tablettensäulen wurden ausgewählte Tabletten benutzt, deren Oberflächengüte innerhalb der spezifizierten Grenzen lag.

Tabelle 9 Ergebnisse der Hüllrohrprüfung

Prüfling	Rohr-Abschnitt	Innendurchmesserbereich (mm)	Wandstärke (mm)	maximale Ovalitäten d. Innendurchm. (mm)
L 1	2/1	10,001 - 10,011	1,000 - 1,005	0,014
L 1x	2/2	10,002 - 10,007	1,000 - 1,005	0,010
L 1z	2/3	10,004 - 10,012	1,000 - 1,005	0,007
L 2	2/4	10,003 - 10,015	1,000 - 1,005	0,023
L 2x	13/1	10,005 - 10,020	ca. 0,980	0,021
L 2z	2/6	10,005 - 10,025	1,000 - 1,005	0,013
L 3	9/5	9,995 - 10,000	ca. 0,995	0,015
L 4	9/1	9,986 - 10,003	ca. 0,995	0,018
L 5	9/2	9,985 - 9,991	ca. 0,995	0,010
L 6	9/3	9,985 - 9,993	ca. 0,995	0,015
L 7	9/4	9,983 - 9,993	ca. 0,995	0,008
L 8	10/1	9,984 - 10,006	ca. 0,980	0,023
L 9	6/4	10,006 - 10,015	ca. 0,980	0,014
L 10	10/3	9,989 - 9,996	ca. 0,980	0,011
L 11	10/4	9,983 - 9,993	ca. 0,980	0,013
L 12	10/5	9,988 - 9,992	ca. 0,980	0,007
L 13	9/6	9,993 - 9,999	ca. 0,995	0,018
L 14	10/6	9,989 - 9,995	ca. 0,980	0,008
L 15	11/1	9,984 - 9,991	ca. 0,980	0,017
L 16	11/2	9,983 - 9,992	ca. 0,980	0,015
L 17	6/1	9,990 - 10,002	ca. 0,980	0,007
L 18	11/3	9,989 - 9,996	0,980 - 1,000	0,019
L 19	11/4	9,984 - 9,996	0,980 - 1,000	0,013
L 20	11/5	9,984 - 9,990	0,980 - 1,000	0,022
L 21	11/6	10,000 - 10,015	0,980 - 1,000	0,030
L 22	6/2	9,992 - 10,003	ca. 0,980	0,019
L 23	13/2	10,002 - 10,012	ca. 0,980	0,015
L 24	13/4	9,991 - 9,997	ca. 0,980	0,010
L 25	13/5	9,996 - 10,002	ca. 0,980	0,010
L 26	13/6	9,991 - 10,000	ca. 0,980	0,009
L 27	4/3	10,009 - 10,016	ca. 1,000	0,012
L 28	4/4	9,980 - 9,998	ca. 1,000	0,016
L 29	5/2	9,983 - 9,996	ca. 1,000	0,016
L 30	5/3	9,986 - 9,997	ca. 1,000	0,012
L 31	5/4	9,989 - 9,995	ca. 1,000	0,009
L 32	8/2	9,987 - 9,996	ca. 0,980	0,009
L 33	8/3	9,987 - 9,994	ca. 0,980	0,013
L 34	8/4	9,988 - 10,001	ca. 0,980	0,010
L 35	1/1	9,999 - 10,009	ca. 0,990	0,013
L 36	1/2	9,999 - 10,010	ca. 0,990	0,014
L 37	1/3	10,004 - 10,011	ca. 0,990	0,021
L 38	1/4	10,006 - 10,013	ca. 0,990	0,012
L 39	6/5	9,990 - 10,007	ca. 0,980	0,027

5.7.2 Tablettensäulen

Jede Tablettensäule enthält 10 Tabletten. Die Einzelwerte der Tabletten (Höhe, Durchmesser, Dichte) sind in den Tabellen im Anhang I zusammengestellt. Außerdem ist die Gesamthöhe und das Gewicht der Tablettensäule angeführt. Die Einzeltabletten sind durchnummeriert; die Nummern laufen von unten nach oben, d.h. Tablette Nr. 1 liegt über dem unteren Endstopfen, Tablette Nr. 10 unter der Druckfeder.

5.7.3 Einfüllen und Verschließen der Prüflinge

Zuerst wurden die unteren Endstopfen (mit den eingebördelten Rh-Scheiben) mit den Hüllrohren verschweißt und dann die Tablettensäulen eingeschoben. Anschließend wurde die zweite Rh-Scheibe mit der Druckfeder eingeführt. Mit Ausnahme der Prüflinge L 3, L 13, L 17, L 22, L 27, die für Zentraltemperaturmessungen vorgesehen waren, wurden die Prüflinge vor dem Eindrücken und Verschweißen der oberen Endstopfen 15 min lang evakuiert und dann 2 min lang mit He geflutet. Die Endstopfen wurden entgegen der Abb. 1 mit einem größten Durchmesser von 12 mm (statt 13 mm) ausgeführt, da hierdurch günstigere Schweißbedingungen vorlagen. Das Schweißen selbst erfolgte unter Argon-Atmosphäre mit einer W-Elektrode nach dem WIG-Verfahren; die Schweißgeschwindigkeit betrug 475 mm/min.

5.7.4 Rhodium-Scheiben

Die Stirnflächen der Tablettensäulen wurden mit Rh-Scheiben (1 mm dick) zur Verhinderung der Flußaufwölbung abgedeckt. Eine Rh-Scheibe war in den unteren Endstopfen eingebördelt, die andere lag auf der obersten Tablette und übertrug gleichzeitig den Federdruck auf die Brennstoffsäule.

5.8 Herstellung der Brennstabprüflinge mit Pulver-Brennstoff

Über das Einvibrieren des Partikelbrennstoffes liegen vom Hersteller keine genauen Angaben vor. Im Gegensatz zu den Tablettenprüflingen wurden zuerst die oberen Endstopfen eingeschweißt, dann der Brennstoff einvibriert und anschließend der untere Endstopfen mit den Hüllrohren verschweißt. Das Schweißverfahren entsprach dem von Kap. 5.7.3. Der untere Endstopfen besaß eine zentrale Bohrung zur Aufnahme der Kapillare für die Innendruckmessung; außerdem enthielt

er einen Filterstopfen aus Sinterstahl zur Zurückhaltung des Brennstoffstaubes. Die Prüflinge waren also nicht gasdicht verschlossen.

Neun der zwölf mit Bohrungen für Druckmeßkapillaren versehenen partikelgefüllten Proben wurden nachträglich am unteren Endstopfen verschlossen. Hierzu wurde ein abgesetzter Stopfen von 3,5 mm Durchmesser in die Kapillarbohrung geführt und verschweißt. Die äußere Kontur des Stopfens blieb dadurch erhalten. Vor dem Verschließen wurden die Prüflinge zur Trocknung der Partikelsäulen unter Vakuum ausgeheizt und mit He geflutet. Die Schweißung erfolgte ebenfalls unter Helium. Die Prüflinge L 29, L 32 und L 38 blieben weiterhin unverschlossen, da sie zur Innendruckmessung vorgesehen waren.

Entgegen Abb. 2 wurden die Endstopfen mit einem größten Durchmesser von 12 mm (statt 13 mm) ausgeführt, da hierdurch günstigere Schweißbedingungen vorlagen und das nachträgliche Überdrehen der Schweißnähte unterbleiben konnte. Die Rh-Scheiben waren in die Endstopfen eingebördelt.

In Tabelle 10 sind Gewicht, Dichte und Länge der einvibrierten Partikelsäulen zusammengefaßt. Die maximalen Dichteschwankungen wurden durch Gammastrahlen-Absorption ermittelt; sie liegen innerhalb der zulässigen Streubreite von $\pm 5\%$ der mittleren Vibrierdichte über 5 mm Säulenlänge.

5.9 Prüfungen an den fertigen Brennstab-Prüflingen

Die Röntgenprüfungen der Schweißnähte zeigten einwandfreie Verbindungen zwischen Hüllrohr und Endstopfen. Ebenso waren die Schweißnähte an den unteren Endstopfen mit Kapillarrohr-Anschluß ohne Befund. Die größten Durchmesser, über die Schweißnähte gemessen, lagen zwischen 12,05 und 12,24 mm. Nur beim Prüfling L 5 überschreitet der Durchmesser einer Schweißnaht örtlich das sich aus maximalem Innendurchmesser plus 2x Wandstärke ergebende Maß von 12,25 mm um 0,05 mm.

Die Dichtheitsprüfung mittels He-Lecktest ergab eine Leckrate $< 10^{-8}$ Torr-liter/sec. Es wurden die Stablängen zwischen den Stirnflächen der Endstopfen und der "Schlag" der Prüflinge gemessen. Die zulässigen Längentoleranzen ($\pm 0,5$ mm) und die Durchkrümmung der Proben (maximal 0,1 mm) wurden nicht überschritten. Die Meßwerte und die Gesamtgewichte sind in Tabelle 11 zusammengestellt.

Tabelle 10 Materialdaten der Pulverprüflinge

Partikelbrennstoff	Prüfling	Füllgewicht (g)	Länge der vibr. Säule (mm)	Mittlere Vibrierdichte (% th.D.)	Maximale Dichteschwankung (% der mittleren Dichte)	
					nach oben	nach unten
gesinterte UO ₂ -Partikel	L 28	111,20	150,0	86,1	+ 1,9	- 1,7
	L 29	109,25	149,8	84,6	+ 2,7	- 2,6
	L 30	109,40	149,0	85,3	+ 2,5	- 1,7
	L 31	109,51	150,0	84,7	+ 1,7	- 4,0
	L 32	108,93	149,8	85,0	+ 3,4	- 2,1
	L 33	109,13	149,0	85,0	+ 1,5	- 1,7
	L 34	109,15	149,0	85,0	+ 1,3	- 1,7
geschmolzene UO ₂ -Partikel	L 35	109,65	150,4	84,6	+ 2,6	- 2,3
	L 36	110,04	150,5	84,9	+ 1,1	- 2,7
	L 37	110,07	150,1	85,1	+ 1,5	- 1,3
	L 38	109,96	150,0	85,1	+ 1,1	- 0,8
	L 39	110,02	150,3	85,0	+ 1,1	- 1,5

Tabelle 11 Maße und Gewicht der fertigen Prüflinge

Prüfling	Länge (mm)	Schlag (mm)	Gewicht (g)	Gewicht ⁺ (g)
L 1	177,4	0,18	166,8	
L 1x	176,9	0,19	166,0	
L 1z	177,2	0,13	166,8	
L 2	177,2	0,12	166,7	
L 2x	177,5	0,05	166,5	
L 2z	177,0	0,15	166,4	
L 3	182,3	0,17	163,8	
L 4	177,5	0,11	160,0	
L 5	177,1	0,14	160,6	
L 6	176,9	0,20	160,8	
L 7	177,5	0,19	160,0	
L 8	177,3	0,17	160,5	
L 9	177,1	0,12	160,8	
L 10	177,3	0,17	160,3	
L 11	177,0	0,04	161,5	
L 12	176,7	0,10	160,5	
L 13	182,7	0,15	158,9	
L 14	177,4	0,13	161,7	
L 15	177,4	0,19	161,7	
L 16	177,3	0,19	161,9	
L 17	182,6	0,15	159,8	
L 18	177,1	0,17	159,4	
L 19	177,0	0,18	159,7	
L 20	177,2	0,13	158,7	
L 21	177,3	0,17	158,5	
L 22	182,7	0,15	158,5	
L 23	177,2	0,13	154,0	
L 24	177,6	0,18	153,8	
L 25	176,9	0,18	154,1	
L 26	176,8	0,06	153,8	
L 27	182,6	0,08	152,4	
L 28	182,8	0,13	165,5	165,5
L 29	182,8	0,19	162,8	
L 30	182,8	0,20	164,3	164,4
L 31	182,9	0,20	163,0	163,1
L 32	182,9	0,12	163,4	
L 33	182,8	0,08	163,7	163,8
L 34	182,8	0,10	162,9	163,0
L 35	182,9	0,13	162,6	162,7
L 36	182,8	0,16	163,5	163,7
L 37	182,8	0,15	163,7	163,8
L 38	182,9	0,19	163,2	
L 39	182,9	0,11	163,5	163,6

⁺) Gewicht nach dem nachträglichen Verschließen

6. Bestrahlungseinrichtung

Die Bestrahlung der Prüflinge erfolgte in einem instrumentierten Spezial-Loop-Einsatz [4] auf zentraler Position des FR 2. Die Prüflinge wurden mit strömendem He gekühlt; hierfür stand ein kompletter He-Kreislauf mit Pumpen, Wärmetauchern, Filtern, Nebenkreisläufen und Regeleinrichtungen zur Verfügung. Die Prüflinge konnten bei eingeschaltetem Reaktor in den Zentralkanal eingefahren und ausgeschleust werden. Dies war dadurch möglich, daß nicht wie beim FR 2-Abbrand-Loop [5] der gesamte Versuchseinsatz ausgebaut werden mußte, sondern daß bei vollem Kreislaufbetrieb nur der Prüfling mit der Prüflingshalterung entfernt werden mußte. In dem Versuchseinsatz hat nur 1 Prüfling Platz, so daß die Bestrahlung der 43 Prüflinge nacheinander erfolgte (von Oktober 1966 bis November 1968). Die Abb. 7 zeigt die technischen Details dieses Versuchseinsatzes.

Der Prüfling befindet sich in einem Gasführungsrohr und wird von oben nach unten mit strömendem He von ca. 30 atü gekühlt (Gaseintrittstemperatur ca. 70°C, Gasaustrittstemperatur ca. 130°C). Die Durchsatzmenge lag je nach Stableistung zwischen 15 und 45 m³/h. Prüfling und Gasführungsrohr sind innerhalb des wassergekühlten Druckrohres frei beweglich und können in jede beliebige Lage gefahren werden. Das Gasführungsrohr ist nicht druckbeansprucht, da zwischen Gasführungsrohr und Druckrohr stagnierendes He von ebenfalls 30 atü ist.

Jeder Prüfling wird mit maximal 6 Thermoelementen (s. Abb. 8) ausgerüstet. Die Thermoelemente T 107, T 108, T 109 sind jeweils um 120°, die Thermoelemente T 103 und T 106 um ca. 180° versetzt. Die genannten Thermoelemente und T 104 geben die Hüllaußentemperaturen des Prüflings in 3 verschiedenen Höhen an. Die Gaseintrittstemperatur wird mit einem Thermoelement (T 111) und die Gasaustrittstemperatur mit 2 Thermoelementen (T 105, T 112) in der Wirbelkammer unterhalb des Prüflings gemessen.

7. Bestrahlung der Prüflinge

7.1 Zeitlicher Ablauf der Bestrahlung

Die Bestrahlung begann mit dem Prüfling L 1 am 18.10.1966. Wegen des Ausfalls einiger Thermoelemente konnte die Leistung nicht eingeregelt werden. Bei den nachfolgenden sechs Prüflingen wurde die Stableistung

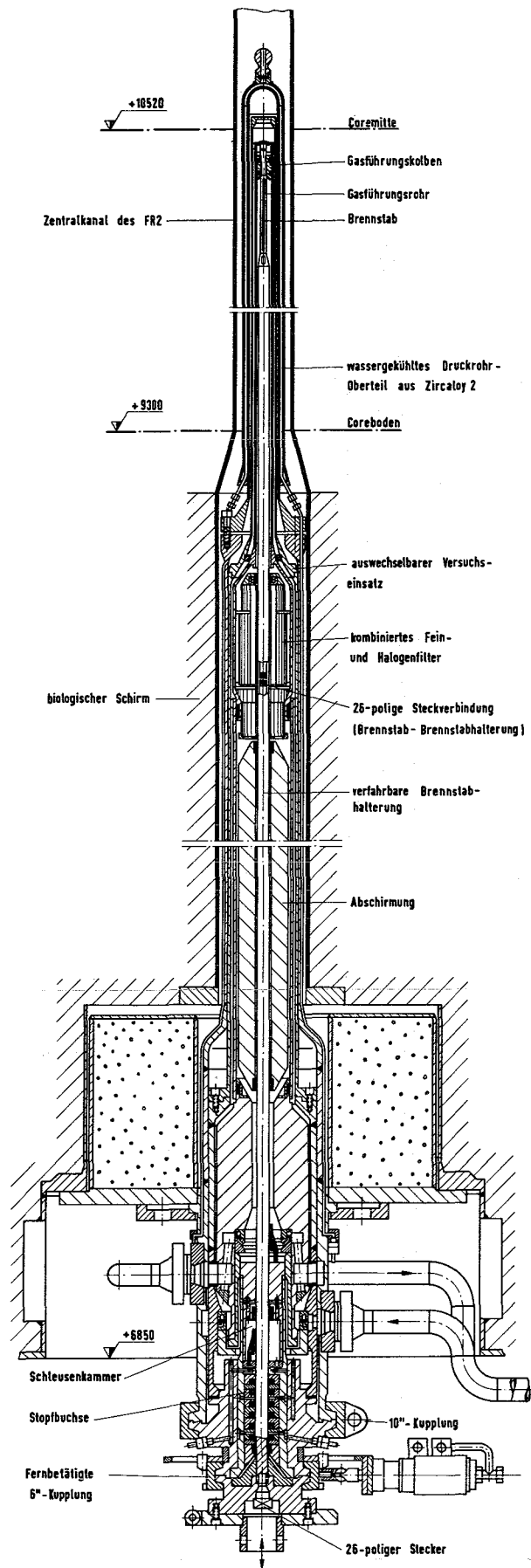
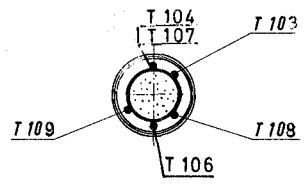
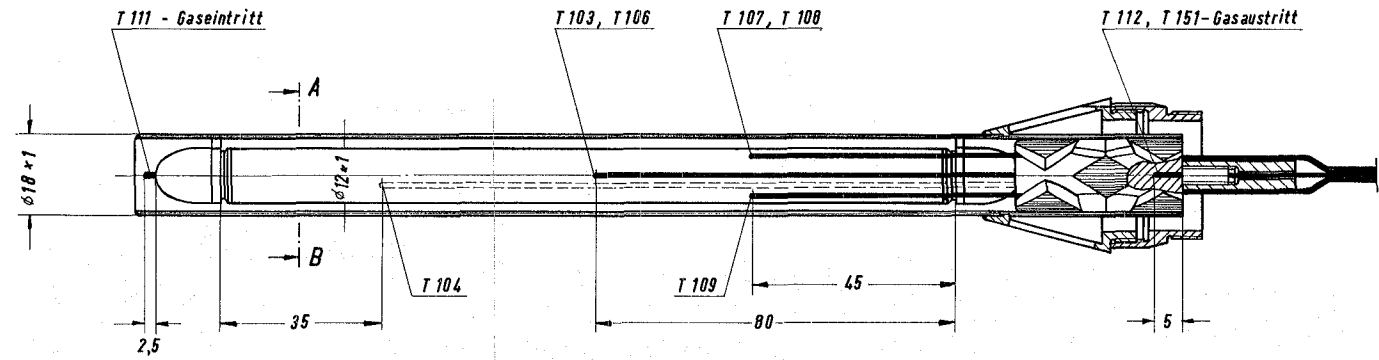


Abb. 7

Spezial - Loopeinsatz

8 7 6 5 4 3 2 1



Schnitt A-B

Für diese Zeichnung behalten wir uns alle Rechte vor, auch für den Fall der
 Patentierung oder Gebrauchsmarkeneintragung. Ohne unsere vorherige Zustim-
 mung dürfen diese Zeichnungen, insbesondere die Erfindung, nicht in irgend-
 welcher Weise, insbesondere durch Nachdruck, Vervielfältigung oder Ver-
 öffentlichung, in irgendeiner Form, auszuleihen, zu reproduzieren, zu kopie-
 ren, zu übertragen, zu veröffentlichen, zu verbreiten, zu veräußern, zu
 mitschreiben, zu mitschreiben, zu mitschreiben, zu mitschreiben, zu
 ersetzen und können strafrechtliche Folgen haben.

Paßmaß	Abmaß

Buch- stabe	Kommt vor	Änderung	Tag	Name

Abb. 8 :

Teil	Stück	Benennung	Werkstoff	Abmessung	Zeichngs. Nr. Norm	Bemerkung
Oberflächenzeichen	~	▽	▽▽	▽▽▽	▽▽▽▽	Freimaßtoleranz
Rauhiefe max. in μ	1000	40	10	4	1,6	± 0,1 ± 0,2
1972	Tag	Name	Werkstoff	Gesellschaft für Kernforschung m. b. H. 7500 Karlsruhe Postfach 947		Zugeh. Zeichng.
gez.	3. 2.	Reuter				Ersatz für
gepr.						Ersetzt durch
ges.						Zeichnungs Nr.
Maßstab	Benennung					
1:1	Instrumentierter Brennstab (FR 2 Projekt 26 He - Loop)				IMF-02-3-4411	

aufgrund einer Fehlmessung nicht richtig eingestellt (L 1x, L 2, L 5, L 2x, L 8, L 2Z). Sie wurde nachträglich durch die Bestrahlungsposition korrigiert, was sicher nur mit einem Fehler von $\pm 25\%$ möglich war. Anfang 1967 wurden dann Messungen zur Leistungsbestimmung im He-Kurzzeit-loop durchgeführt. Sie ergaben, daß der Gesamtfehler der Leistungsbestimmung (aus Gasdurchsatz x Aufheizspanne) maximal $7,6\%$ (Summe der Einzelfehler) betragen dürfte. Die mittlere quadratische Fehlerabweichung beträgt dann 5% . Mitte 1967 stellte sich nach einer Bypassmessung des He-Stromes heraus, daß bisher mit einer zu kleinen Bypassmenge gerechnet worden war. Daraufhin wurden die Leistungsdaten aller bereits bestrahlten Prüflinge korrigiert (L 4, L 14, L 6, L 7, L 18, L 24, L 15, L 19, L 9, L 1Z, L 10, L 11). Weiter wurde der Bypass durch konstruktive Änderungen ganz wesentlich reduziert, so daß sein Einfluß auf die Leistungsbestimmung ohnehin klein bleibt.

Bei einigen Prüflingen verlief die Bestrahlung anders als vorgesehen (Ausfall von TE's, Vertauschung etc.). Betroffen davon sind die Prüflinge L 2Z, L 2X, L 6, L 26, L 29. Bei L 3 und L 17 konnte wegen TE-Defekt keine Zentraltemperaturmessung durchgeführt werden. Die Innendruckmessung bei L 32 brachte keine in sich konsistente Werte. In der nachfolgenden Tabelle sind alle Brennstab-Prüflinge zusammengefaßt, deren Bestrahlung nicht nach Plan verlaufen ist.

Brennstab-Prüfling	aufgetretene Fehler	mittl. Fehler für die Stableistung
L 1	Ausfall mehrere Thermoelemente - keine Leistungsbestimmung erfolgt -	-
L 1X, L 2, L 5, L 2X, L 8, L 2Z	Fehlmessung des Gasstromes - Leistung wurde nachträglich aus der Bestrahlungsposition best.	$\pm 20\%$
L 4, L 14, L 6, L 7, L 18, L 24, L 15, L 19, L 9, L 1Z, L 10, L 11	Bypassmenge zu groß. Alle Leistungsdaten mußten nachträglich korrigiert werden.	$\pm 15\%$
L 2Z, L 2X, L 6, L 26, L 29	Ausfall von Thermoelementen, Vertauschung bzw. Austausch von Prüflingen	$\pm 5\%$
L 3, L 17	Keine Zentraltemperaturmessung wegen Ausfall der Thermoelemente	$\pm 5\%$
Rest (20 Prüflinge)	k e i n e	$\pm 5\%$

Das Ein- und Ausfahren des Prüflings wurde mit einer Hubwerksgeschwindigkeit von 2 mm/s durchgeführt. Das bedeutet, daß der Leistungsanstieg von 10 auf 100 % in etwa 10 min durchlaufen wurde. Die Bestrahlungszeit wird vom Beginn der Bestrahlung unter Sollstableistung bis zum Ende der Bestrahlung unter Sollstableistung gerechnet.

7.2 Temperatur- und Leistungsverlauf

Die Hüllaußentemperatur wurde für alle Prüflinge auf $500 \pm 50^\circ\text{C}$ konstant geregelt. Allerdings gab es zwischen den drei Regelthermoelementen, die auf gleicher Höhe an der unteren Hälfte der Brennstoffsäule angebracht waren, bereits Differenzen bis zu 80°C . Sie sind zurückzuführen auf die Befestigungstechnik der Thermoelemente. Das Aufpunkten der Thermoelemente auf die Hülle erfolgte von Hand, dadurch waren leichte geometrische Unterschiede nicht zu vermeiden, die jedoch bereits einen großen Einfluß auf die Meßtemperaturen hatten. Aus diesem Grunde ist es recht schwierig und wenig sinnvoll, für die einzelnen Prüflinge gesondert Hüllaußentemperaturen anzugeben.

Für die axiale Temperaturverteilung besteht jedoch ein fester Zusammenhang mit der Stableistung. Obwohl das Kühlgas von oben nach unten den Kanal durchströmt und sich dabei zwischen 50 und 70°C aufheizt, wird die Prüflingshülle in der Regel nach oben hin heißer. Wenn wir für die untere Schnittebene 500°C Hüllaußentemperatur zugrunde legen, dann ergeben sich für die mittlere und obere Ebene folgende Werte:

Prüflinge mit der mittl. Stableistung	H ü l l a u ß e n t e m p e r a t u r		
	(geregelt) untere Schnittebene	mittlere Schnittebene	obere Schnittebene
< 700	500 °C	560 °C	620 °C
700 - 850	500 "	535 "	570 "
> 850	500 "	500 "	500 "

In Tab. 12 sind die Bestrahlungsdaten zusammen mit den Auslegungsdaten wiedergegeben. Abb. 9 gibt den axialen Verlauf der Stableistung für die einzelnen Prüflinge wieder, so wie er sich aus dem γ -Profil (Zr/Nb-95) ergab.

Wenn zentrales Schmelzen vorlag, dann konnte das γ -Profil den axialen Verlauf nicht korrekt wiedergeben. Ein Teil der Schmelze verlagerte sich beim Herausfahren aus dem Reaktor axial nach unten. Dadurch

Tabelle 12 Tabelle mit den Bestrahlungsdaten der He-Loop-Versuchsgruppe 2

gewünschte		Prüfling	bestrahlt am	Brennstoff-Form Tablettendichte (% th.D.) Schmierdichte (% th.D.) Spaltweite (rad.) (µm) Einsenkung (Vol.%)	Tatsächliche Werte			
Stab- lei- stung (W/cm)	Bestrah- lungs- zeit				mittl. Leist. (W/cm)	Zeit	mittlere Hüllaußen- temperatur (°C)	
500	10 min	L 1	18.10.66	Tabletten -93-90-50-0	Ausfall der TE		-	
		L 4	30.03.67	Tabletten -88-85-50-0	510	10 min	560	
	2 h	L 2	22.11.66	Tabletten -93-90-50-0	680 ⁺	2 h	560	
		L 5	13.12.66	Tabletten -88-85-50-0	370 ⁺	1,95 h	560	
		L 14	29.03.67	Tabletten -93-85-50-5	490	2 h	560	
		L 28	19.07.67	Pulver, gesintert - 85	490	2,06 h	560	
		L 35	26.07.67	Pulver, geschmolzen - 85	550	2,05	560	
	24 h	L 6	26.04.67	Tabletten -88-85-50-0	560	2 h	560	
		L 23	12.06.67	Tabletten -90-80-125-5	520	24,5 h	560	
		L 29	22.02.68	Pulver, gesintert -85	500	49 min	560	
	750	10 min	L 1x	23.11.66	Tabletten -93-90-50-0	720 ⁺	9 min	535
			L 7	22.03.67	Tabletten -88-85-50-0	750	10 min	535
L 18			06.04.67	Tabletten -90-85-125-0	900	12 min	500	
L 24			13.04.67	Tabletten -90-80-125-5	710	31 min	535	
L 30			18.07.67	Pulver, gesintert -85	740	12 min	535	
L 36			07.09.67	Pulver, geschmolzen -85	725	14 min	535	
2 h		L 2x	17.11.66	Tabletten -93-90-50-0	940 ⁺	1,31 h	500	
		L 8	19.12.66	Tabletten -88-85-50-0	490 ⁺	2,17 h	560	
		L 15	17.01.67	Tabletten -93-85-50-5	610	1,9 h	560	
		L 19	21.03.67	Tabletten -90-85-125-0	740	2,0 h	535	
		L 25	05.04.67	Tabletten -90-80-125-5	760	2,0 h	535	
		L 31	11.07.67	Pulver, gesintert -85	770	2,1 h	535	
		L 37	28.07.67	Pulver, geschmolzen -85	760	2,0 h	535	
		24 h	L 9	01.03.67	Tabletten -88-85-50-0	750	24,0 h	535
L 26	14.06.67		Tabletten -90-80-125-5	740	2,15 h	535		
L 32	11.09.67		Pulver, gesintert -85	700	24,05 h	535		
L 38	14.11.67		Pulver, geschmolzen -85	730	24,28 h	535		
1000	10 min	L 1z	09.03.67	Tabletten -93-90-50-0	950	11 min	500	
		L 10	08.03.67	Tabletten -88-85-50-0	980	11 min	500	
		L 20	19.02.68	Tabletten -90-85-125-0	1000	24 h	500	
		L 33	06.02.68	Pulver, gesintert -85	1000	10 min	500	
	2 h	L 2z	06.12.66	Tabletten -93-90-50-0	380 ⁺	2,0 h	560	
		L 11	07.03.67	Tabletten -88-85-50-0	900	2,0 h	500	
		L 16	09.05.67	Tabletten -93-85-50-5	890	2,0 h	500	
		L 21	07.06.67	Tabletten -90-85-125-0	960	2,1 h	500	
		L 34	16.11.67	Pulver, gesintert -85	930	2,18 h	500	
		L 39	05.02.68	Pulver, geschmolzen -85	1000	2,0 h	500	
24 h	L 12	02.05.67	Tabletten -88-85-50-0	960	24,3 h	500		
400	24 h	L 3	03.07.67	Tabletten -93-90-50-0	470	24,11 h	560	
		L 13	14.10.68	Tabletten -88-85-50-0	500-850	5,69 d	560	
		L 17	21.06.67	Tabletten -93-85-50-5	480	24,27 h	560	
		L 22	30.10.68	Tabletten -90-85-125-0	500-650	13,545d	560	
		L 27	15.11.68	Tabletten -90-80-125-5	500-850	8,72 d	560	

+) Stableistung wurde nachträglich aus der Bestrahlungsposition bestimmt.

Änderungen gegenüber dem Plan: L 2z wurde mit L2x vertauscht; L 6, L 26 wegen TE-Ausfall statt 24 h nur 2 h bestrahlt; bei L 3 und L 17 ist Zentraltemperaturmessung ausgefallen; L 20 statt 10 min 24 h bestrahlt; L 29 wegen TE-Ausfall vorzeitiger Abbruch.

o Schnittebene für Radialschnitte (Querschlitze)

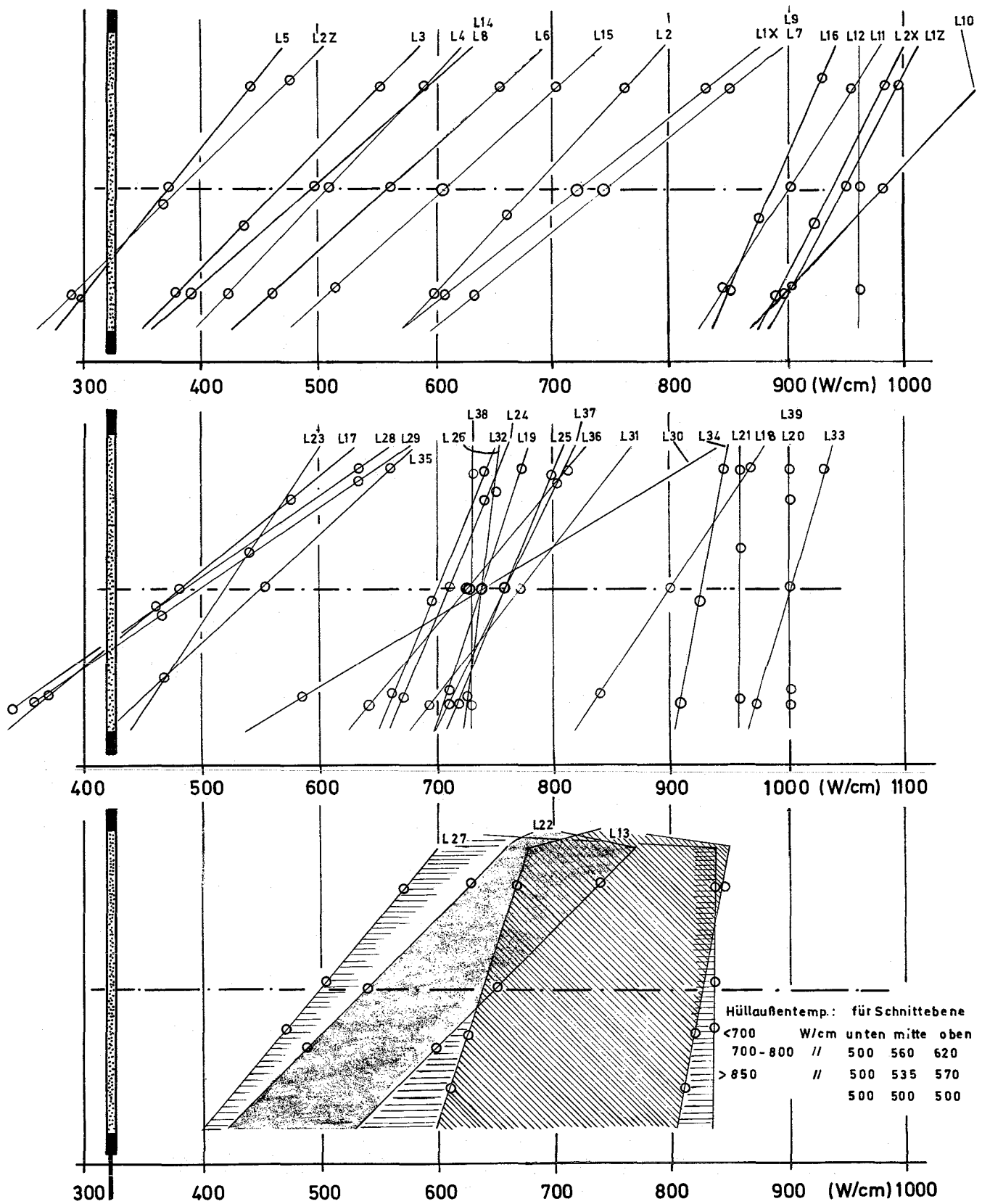


Abb.9: Axialer Verlauf der Stableistung

entsteht bei der Betrachtung des γ -Profils der falsche Eindruck, daß die Stableistung im oberen geschmolzenen Bereich stark reduziert war. Das trifft jedoch in Wirklichkeit nicht zu. Solange die Schmelze während der Bestrahlung nicht nach unten läuft - und das dürfte mit guter Näherung für alle Stäbe mit einer Schmierdichte $\geq 85\%$ gelten - findet überhaupt kein Leistungsabfall statt. Kommt es schon während der Bestrahlung zu einem Herunterlaufen der Schmelze, was für Schmierdichten $< 85\%$ th.D. zu erwarten ist, dann sinkt dadurch die Leistung nur sehr geringfügig ab. Ein Herunterlaufen der Schmelze bis zu ca. 40% des Brennstoffradius reduziert die Stableistung in diesem Bereich nur um ca. 5% (wegen der rad. Flußabsenkung). Die axialen γ -Profile zeigen jedoch in solchen Fällen einen Abfall von ca. $30 - 40\%$. Aus diesem Grunde konnte sich bei vorliegendem zentralen Schmelzen die Ermittlung der axialen Leistungsverteilung nur zum Teil auf das γ -Profil abstützen.

Man erkennt aus Abb. 9, daß für die Prüflinge L 13, L 22 und L 27 (mit Zentraltemperaturmessung) ein größerer Leistungsbereich durchfahren wurde. In den Abb. 10 - 12 ist für diese Prüflinge die Bestrahlungsgeschichte im einzelnen aufgezeichnet. Bei diesen Prüflingen wurde die Stableistung so eingeregelt, daß die Zentraltemperatur im Bereich von $2100^{\circ}\text{C} \pm 30^{\circ}\text{C}$ konstant blieb.

Bei L 22 wurden nach 6 Tagen Bestrahlungszeit 5 kurze Leistungszyklen gefahren (0,5 h Leistung + 0,5 h Abschaltung). Dadurch sollte erreicht werden, daß sich ein evtl. im Brennstab noch vorliegender Restspalt zwischen Brennstoff und Hülle schließt.

Der Prüfling L 27 wurde nach $6 \frac{1}{2}$ Tagen Bestrahlungszeit einer stufenförmigen Leistungserhöhung bis zu dem Maximalwert von 840 W/cm unterworfen. Dabei zeigte sich, daß das zentrale Thermoelement die Leistungssteigerung nicht in voller Höhe mitregistrierte und in den beiden letzten Tagen der Bestrahlung (bei $X = 840 \text{ W/cm konst.}$) die Meßwerte stark abfielen.

Der Prüfling L 13 zeigte schon zu Beginn der Bestrahlung trotz Leistungssteigerung einen starken Abfall der Zentraltemperatur. Dieser war nach 30 h Bestrahlungszeit wieder rückläufig.

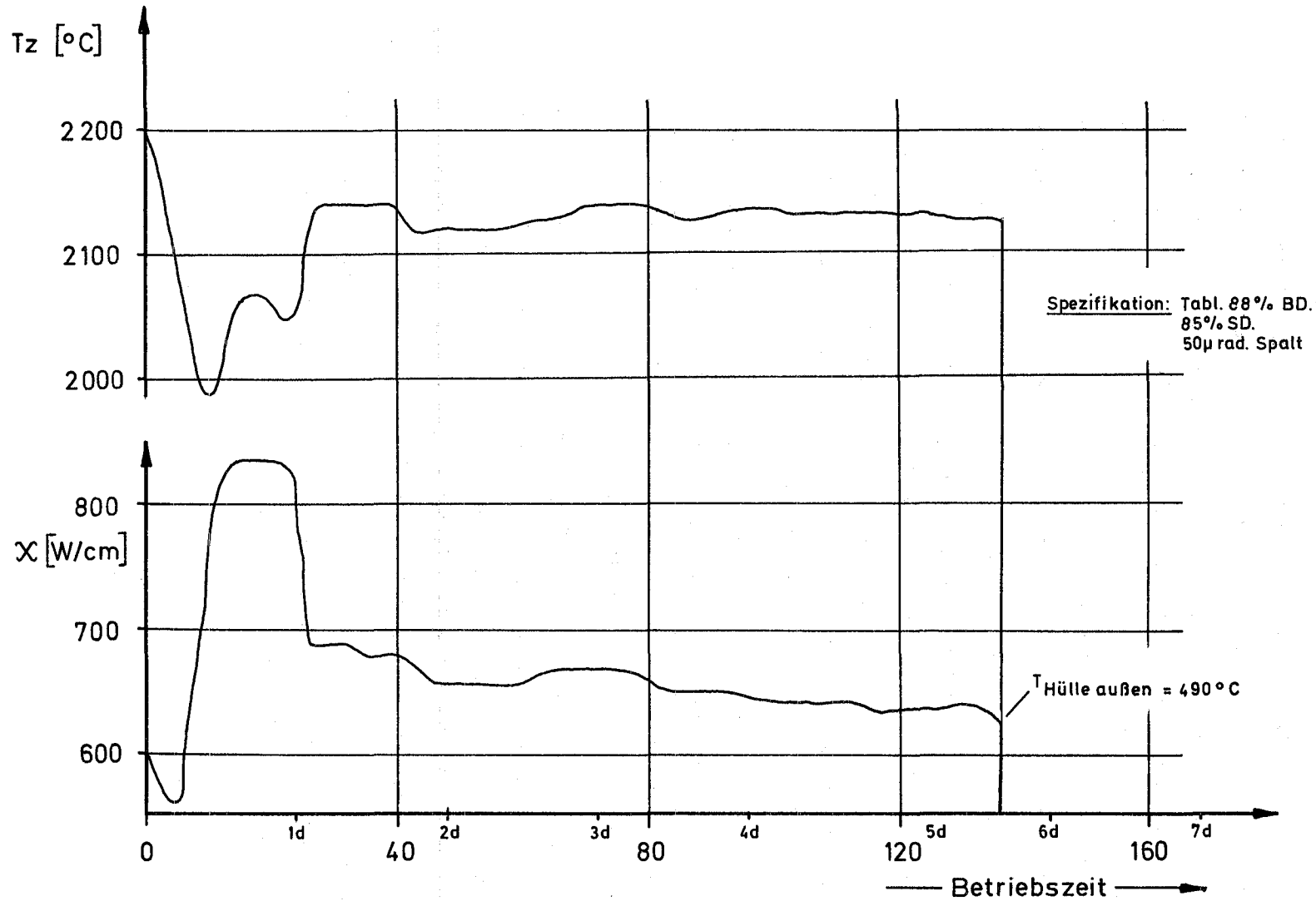


Abb.10: Betriebsablauf f\u00fcr L13 mit Zentraltemperaturmessung

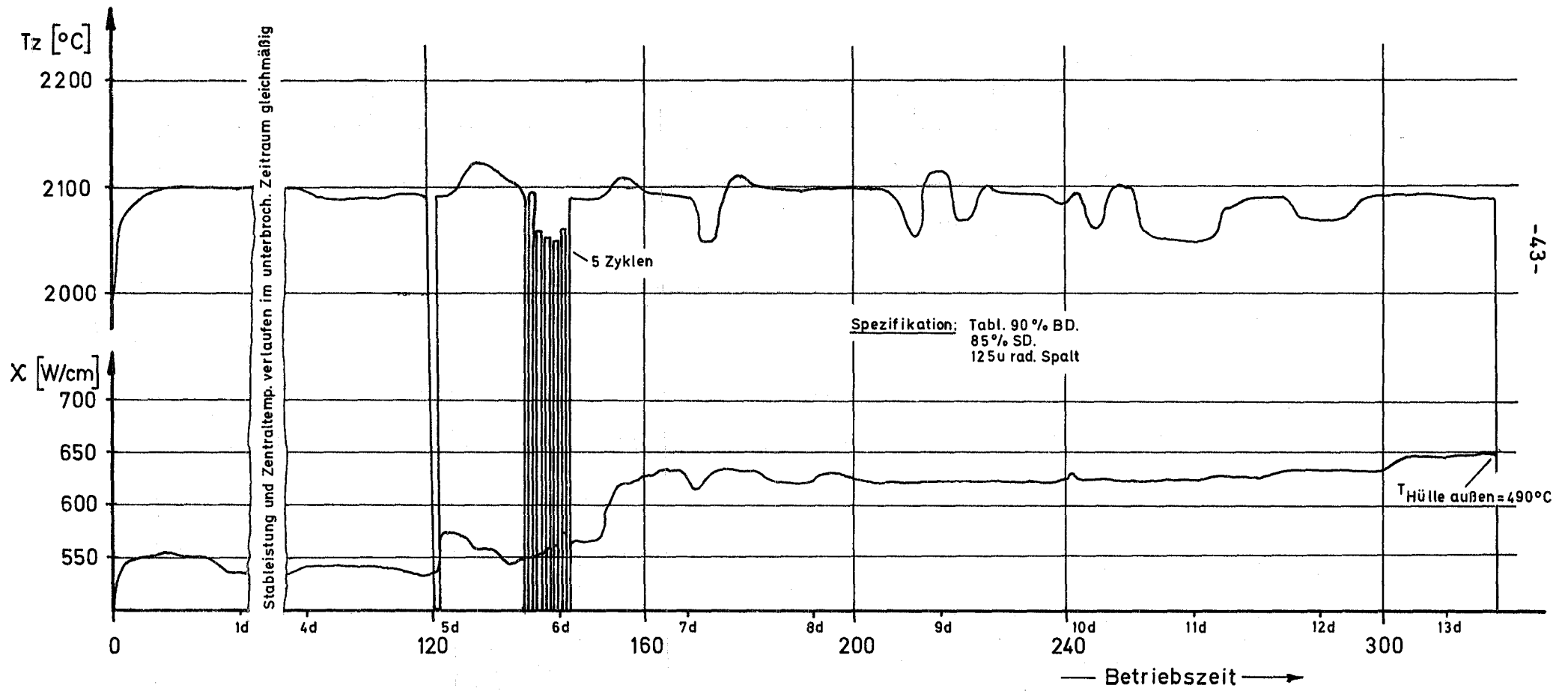


Abb.11: Betriebsablauf für L22 mit Zentraltemperaturmessung

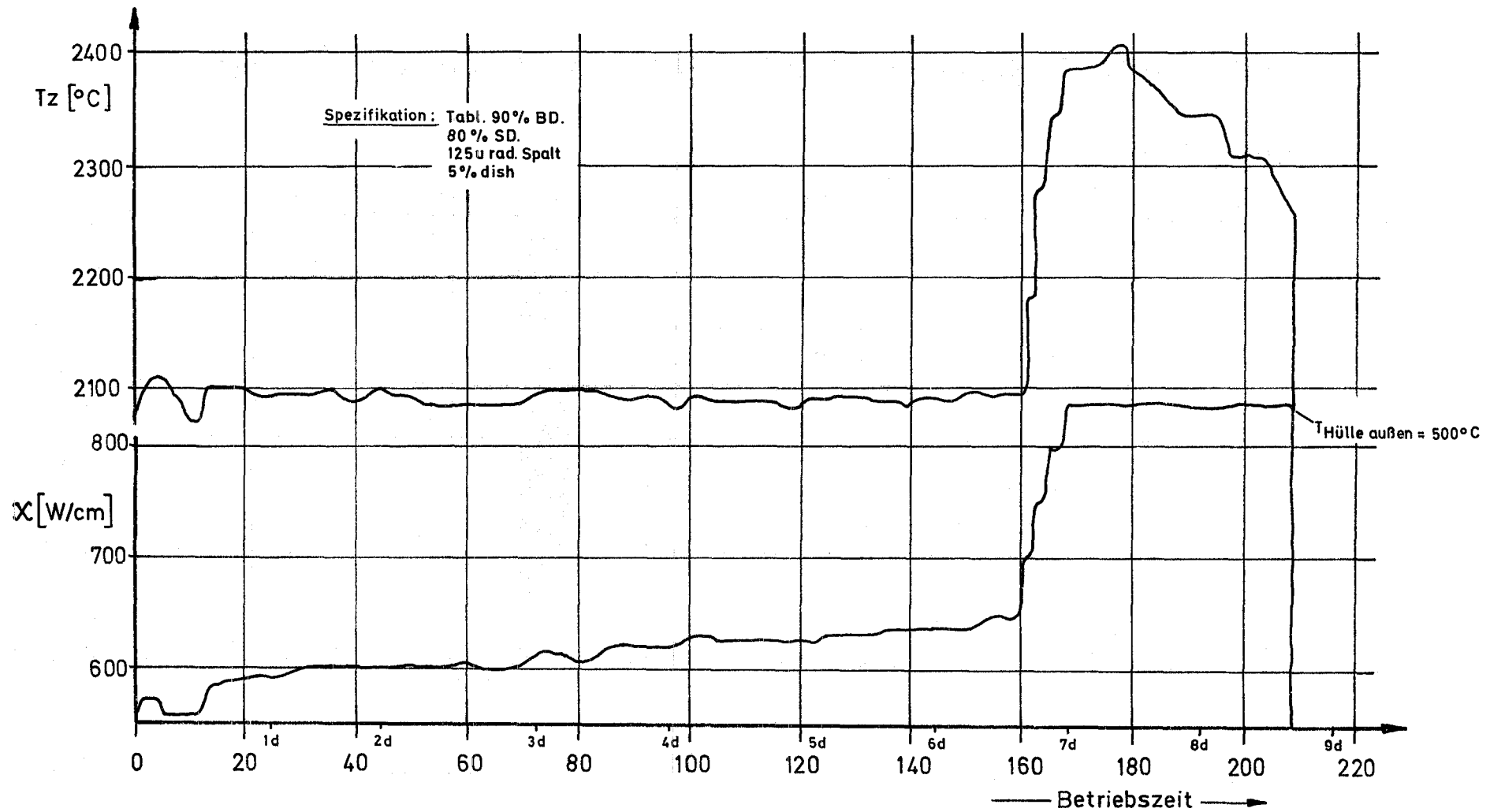


Abb. 12: Betriebsablauf für L27 mit Zentraltemperaturmessung

8. Zerstörungsfreie Nachuntersuchung

8.1 Visuelle Kontrolle und äußere Vermessung

Die zerstörungsfreie Nachuntersuchung wurde durch die visuelle Kontrolle mit einem Periskop eingeleitet. Hierbei konnten wesentliche Besonderheiten, die sich auf das Bestrahlungsverhalten der Prüflinge beziehen, nicht beobachtet werden. Als äußerlich leicht erkennbare Veränderungen wurden allerdings Verfärbungen der Hülle bei fast allen Prüflingen registriert. Gewöhnlich war die Hülle im Bereich des Spaltgas-Raums blank geblieben und über die ganze Länge der Brennstoffsäule dunkel angelaufen (Anhang II, L-11). Die beobachteten Farbtönungen schwankten zwischen schwarz und hellblau, wobei Schattierungen von schwarz vorherrschend waren. In einigen Fällen traten auch ringförmig wechselnde Farbstufen auf (Anhang II, L 28). Eine Beziehung zwischen Bestrahlungsparametern wie Hülltemperatur oder Bestrahlungsdauer einerseits und Intensität der Schwärzung andererseits, war nicht herzustellen. Als Ursache für die Verfärbungen wird eine Verunreinigung des Kreislauf-Heliums mit Spuren von Sauerstoff angenommen.

An zwei Prüflingen (L 19 und L 26) waren mehrere Thermoelement-Halter von der Hülle abgerissen, was dazu führte, daß die Temperatur-Meßstellen nicht mehr unmittelbar auf der Hülloberfläche lagen. Stark abgelenkt war je ein Thermoelement bei zwei anderen Prüflingen (L 10 und L 14). Es war jedoch nicht festzustellen, ob diese Defekte vor, während oder nach der Bestrahlung eingetreten waren.

Das Aussehen der Prüflinge wurde durch jeweils zwei Ganzfotos dokumentiert, wobei nach der ersten Aufnahme der Prüfling 180° um seine Längsachse gedreht wurde.

Vor der Vermessung der Außendimensionen wurden die Thermoelemente von der Hülle entfernt. Zurück blieben jedoch Teile der Thermoelementhalter, wodurch die Vermessung erschwert wurde.

Der Außendurchmesser wurde über die gesamte Stablänge mit einem induktiven Wegaufnehmer als Meßtaster bestimmt. Hierzu wurde der Prüfling in eine Meßbank eingespannt und zwei diametral gegenüberliegende Mantellinien abgetastet. Die Messung wurde in einer um 90° verdrehten Orientierungsebene wiederholt. Alle Meßwerte wurden mit einem

Makrograph-Formgestaltschreiber kontinuierlich aufgezeichnet. Durch Vergleich mit den vor der Bestrahlung auf die gleiche Art aufgenommenen Meßdaten waren die Dimensionsänderungen zu bestimmen. Hierbei ergaben sich Schwierigkeiten wegen der verwendeten Meßtaster. Im Anfang standen nur sog. Kugeltaster mit einem Kugelradius von 1,25 mm zur Verfügung. Abgesehen von der Tatsache, daß sich kleine, örtlich begrenzte Höhenänderungen nicht befriedigend darstellen lassen, kann die Vermessung nur an einem genau zentrisch eingespannten Prüfling vorgenommen werden, da andernfalls der Taster von der idealen Mantellinie abwandert. Diese Voraussetzung war bei der Vermessung nicht uneingeschränkt gegeben. Damit war eine präzise Bestimmung der Durchmesser-Veränderungen nicht möglich. Die Situation wurde nur wenig verbessert, als ein Teil der Prüflinge mit einem Schneidentaster (Radius der Schneide 0,7 mm) vermessen wurde, da immerhin die Vorvermessung mit Kugeltastern durchgeführt worden war. Der Vergleich der Messungen führte zu dem Scheinergebnis, daß bei fast allen Prüflingen eine Durchmesser-Verminderung von durchschnittlich etwa 150 µm eingetreten war. Dies traf selbst für den Prüfling L 1 zu, der nur wenige Minuten bestrahlt worden war und zwar bei so niedriger Stableistung, daß der Brennstoff keine Anzeichen von Umstrukturierung zeigte. Aus dem Verlauf des Außendurchmessers entlang der Stabachse kann jedoch mit einiger Sicherheit geschlossen werden, daß sich die Prüflinge überhaupt nicht verändert haben. Eine durch die Ausdehnung des Brennstoffes hervorgerufene Durchmesseränderung sollte sich nur auf den Bereich der Brennstoffsäule erstrecken, mithin den Spaltgasraum auf seinem alten Durchmesser belassen. Damit müßte in den Mantelschrieben eine stufenhafte Durchmesseränderung am Übergang sichtbar werden. Ein solcher Effekt wurde jedoch nie beobachtet. Für die Auswertungen wurde daher davon ausgegangen, daß sich der Außendurchmesser aller Stäbe durch die Bestrahlung nicht verändert hat.

Bei der Bestimmung der Stablänge über die Zapfen ergaben sich ebenfalls Verminderungen von durchschnittlich etwa 150 µm (0,1 %). Hier dürfte die unterschiedliche Art der Messung, einmal mit der Hand vor der Bestrahlung, das andere Mal in der Zelle mit dem Manipulator, dafür verantwortlich sein. Die gemessenen Längenänderungen wurden ebenfalls nicht in die Auswertungen miteinbezogen.

8.2 Durchleuchtung

Die Prüflinge dieser Versuchsgruppe wurden bei Stableistungen betrieben, die eine Umstrukturierung des Brennstoffes erwarten ließen. Insbesondere wurde erwartet, daß sich durch Porenwanderung Zentralkanäle und durch partielles Brennstoffschmelzen größere Kavernen in der Brennstoffsäule gebildet haben.

Um die anschließende zerstörende Nachuntersuchung, insbesondere die Keramografie, möglichst gerichtet anzusetzen, ist eine Kenntnis der nun vorliegenden inneren Geometrie erforderlich. Auch die Anzahl der für die Charakterisierung des Prüflings notwendigen Schnittebenen kann erheblich eingeschränkt werden, wenn bereits vor dem Zerschneiden eine gezielte Auswahl erfolgen kann.

Eine Durchleuchtung des Prüflings mit der üblichen Röntgentechnik ist nicht durchführbar, weil erstens der bestrahlte Prüfling selbst eine Strahlenquelle darstellt und zweitens eine 1 cm dicke Säule aus Urandioxid für niederenergetische Röntgenstrahlen praktisch undurchdringbar ist. In unserem Falle wurde die Durchleuchtung mit einem Betatron vorgenommen, das eine harte γ -Strahlung (Bremsstrahlung) mit einer Maximalenergie von 18 MeV aussendet. Die mittlere Energie dieser Strahlung liegt bei etwa 10 MeV. Für ca. 10 MeV zeigt die γ -Absorptionskurve für das Element Eisen ein Minimum. Andererseits kann die vom Prüfling ausgehende niederenergetische γ -Strahlung der Spaltprodukte durch Eisenplatten wirkungsvoll absorbiert werden. So wurde die Kassette mit dem Aufnahmefilm mit Eisen gegen den Prüfling abgeschirmt. Eine Abbildung der inneren Prüflingsgeometrie ohne störenden "Spaltprodukt-Schatten" war auf diese Weise möglich.

Um eine Randüberstrahlung zu vermeiden, wurden die zylinderförmigen Prüflinge in einem dem Durchmesser angepaßten Dickenausgleichskörper aus Blei durchleuchtet, wobei das Blei noch zusätzlich als Abschirmung für den Aufnahmefilm wirkte. Auf diese Art wurden bei Durchleuchtungszeiten zwischen 10 und 30 Minuten die in der angefügten Prüflingsdokumentation wiedergegebenen Bilder hergestellt. Jeder Prüfling wurde in zwei Orientierungen, die um 90° verschoben waren, durchleuchtet. Es wird in diesem Bericht jedoch nur eine Aufnahme und zwar die mit den am besten sichtbaren Details wiedergegeben.

Die durch Betatron-Durchleuchtung erzeugten Aufnahmen weisen in den Originalfilmen einen hohen Schwärzungsgrad auf. Sie sind deshalb nur unter Verlust einiger Zeichnungsdetails auf Fotopapier zu kopieren. Bei der Auswertung der Aufnahmen wurden daher stets die Originalfilme zur Beurteilung herangezogen.

8.3 γ -Profile und γ -Spektren

Zur Charakterisierung der Brennstoffsäulen hinsichtlich Rißstruktur, axialen Leistungsverlaufes, Brennstoffverlagerung und Spaltproduktverhaltens wurden die Prüflinge γ -spektrometrisch untersucht. Es wurden im wesentlichen γ -Profile über die Stablänge für verschiedene γ -Energie-Bereiche aufgenommen. Um die geeigneten Energiebereiche zu ermitteln, war es notwendig, mindestens ein γ -Spektrum von jedem Prüfling zu erstellen. Von einer ausgedehnten Untersuchung der Spaltproduktwanderung wurde jedoch abgesehen, da der verwendete γ -Detektor die γ -Linien nur unzureichend auflöste.

Als Detektor diente ein NaJ-Kristall mit den Abmessungen 1,5x1,5 Zoll. Die Profile und Spektren wurden durch einen Schlitzkollimator von 0,5 mm Weite aufgenommen, wobei die Prüflinge während der Messung um ihre Längsachse rotierten. Durch die Rotation sollte erreicht werden, daß Aktivitätsansammlungen im radialen Außenbereich des Brennstoffes nicht durch eine zufällig ungünstige Orientierung des Prüflings zum Detektor unentdeckt blieben.

Bei der üblichen Art der Untersuchung wurde zunächst vom Prüfling durch den Kollimator ein typisches γ -Spektrum aufgenommen. Dazu wurde ein Bereich der Brennstoffsäule gewählt, der als möglichst ungestört angesehen wurde, d.h. in dem keine Spaltprodukt-Anreicherungen zu vermuten waren. Es war dies gewöhnlich die Mitte der Brennstoffsäule. An Hand des γ -Spektrums wurden dann Energiebereiche für das Aufnehmen von Profilen ausgewählt. Für jeden Prüfling wurde, unabhängig vom γ -Spektrum, ein integrales Profil aufgenommen, das alle γ -Energien in einem sehr breiten Energiegebiet umfaßte. Als untere Grenze wurden anfangs ca. 60 keV, später ca. 600 keV gewählt. Die obere Grenze lag meßtechnisch bedingt bei etwa 1,4 MeV.

Die für die weiteren Profile ausgewählten Energiebereiche waren sehr unterschiedliche. Je nach Abklingzeit wurde die Verteilung für kurz-

lebige oder langlebige Spaltprodukte ermittelt. Am häufigsten wurde das Zr/Nb-95-Profil aufgenommen, da es am besten die Verteilung des Brennstoffes sowie das axiale Leistungsprofil wiedergibt. In einigen Fällen wurde zu diesem Zweck auch das Nuklid Ce-144 (γ -Energie 134 keV) herangezogen. Weitere untersuchte Nuklide waren La/Ba-140, J-131 und Xe-133.

In den Faltblättern der Prüflingsdokumentation sind jeweils die aussagekräftigsten γ -Profile dargestellt.

9. Keramografie

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

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

Das Ziel der Keramografie war einerseits eine typische Verhaltensweise für bestimmte Parameterkombinationen aufzuzeigen, andererseits Besonderheiten im Stabverhalten darzulegen. Für das erstere Ziel wurden in jedem Stab Schnittebenen ausgesucht, die in möglichst ungestörten, regelmäßigen Bereichen, meist in Stabmitte lagen. Singuläre Brennstoffstrukturen wurden häufig am oberen Säulenende beobachtet und untersucht.

Eine vergleichende Auswertung, bei der die Zentralkanalgröße, der Brennstoff/Hülle-Spalt und die konzentrischen Strukturzonen im Brennstoff vermessen wurde, ist praktisch nur an Querschliffen möglich, weshalb die als typisch

angesehenen Brennstoffabschnitte als Querschliffe ausgeführt wurden. Für die Beobachtung spezieller Verhaltensweisen erwiesen sich Längsschliffe als besonders brauchbar. Sie erlauben den Verlauf eines Phänomens entlang der Stabachse bis zu einer Länge von 20 mm zu verfolgen.

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

Aufnahmetyp	Vergrößerung	Verarbeitung der Untersuchungsfläche
1. Totalaufnahme	15 x	a) poliert b) geätzt
2. $\beta\gamma$ -Autoradiografie	15 x	poliert
3. Mittelvergrößerung	25 x	a) poliert b) geätzt
4. Panorama-Aufnahme über den Säulenradius	100 x	a) poliert b) geätzt
5. Detailaufnahmen	100 x 200 x 500 x	a) poliert b) geätzt

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

1. Radius des Zentralkanals
2. Radius der Seigerzone
3. Radius der Schmelzzone
4. Radius der Stengelkornzone
5. Radius der ungerichteten Kornwachstumszone

Die wichtigsten Radien sind, zusammen mit den Eingabedaten für das Rechenprogramm BESTAW, in Tabelle 13 angegeben.

Eine Untersuchung der Hülle wurde nur für den Fall vorgesehen, daß im Brennstoffschliff Hinweise auf eine Wechselwirkung mit dem Brennstoff oder dem Kühlmittel vorlägen. Solche Effekte wurden in der hier dargestellten Versuchsgruppe nicht beobachtet.

Tabelle 13

Herstellungs-, Bestrahlungs- und Auswertungsdaten der Brennstäbe für die thermische Analyse

Bezeichnung der Stäbe Schnittebene		LIX	LIZ	L 2	L2X	L2Z	L 3	L 4	L 5	L 6	L 7	L 8
		u m	u m	u m	u m	u m	u m	u m	u m	u m	u m	u m
Stableistung	W/cm	605 720	900 950	595 660	890 920	290 365	380 435	420 510	300 370	460 560	635 745	390 495
Schmierdichte	ZTD	0,91	0,91	0,915	0,915	0,926	0,91	0,86	0,87	0,87	0,87	0,866
Hüllaußentemperatur	°C	500 535	500 500	500 560	500 500	500 560	500 535	500 560	500 560	500 560	500 535	500 560
Bestrahlungszeit	d	0,007	0,007	0,08	0,06	0,08	1,0	0,007	0,08	0,08	0,007	0,08
rad. Spaltweite	μ	45	45	47	45	45	45	47	45	45	45	45
Brennstoffporosität	l	0,07	0,07	0,067	0,065	0,065	0,073	0,12	0,11	0,11	0,112	0,115
Radius Kornwachstum	cm	0 0,18	0,35 0,35	0,35 0,36	0,31 0,35	0 0	0 0	0 0	0 0	0,24 0,34	0,27 0,30	0 0,30
Radius Stengelkorn	cm	0 0,18	0,35 0,35	0,27 0,30	0,31 0,35	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0,27 0,30	0 0
Radius Schmelzzone	cm	0 0,15	0,22 0,24	0 0,13	0,22 0,24	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0,16 0,21	0 0
Temperaturgrenze Kornwachstum	°C	1850	1850	1550	1550	1550	1500	0 0	0 0	1550	1850	1550
Temperaturgrenze Stengelkorn	°C	2150	2150	1850	1850	1850	1800	0 0	0 0	1850	2150	1850
Zentralkanalradius	cm	0 0	0 0,06	0,10 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0,07 0	0 0
Wärmeübergang im Spalt	W/cm ² grd	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Wärmeübergang im Spalt, unterer Wert	W/cm ² grd	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,4 0,6	0,6
Wärmeübergang im Spalt, oberer Wert	W/cm ² grd	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
Bezeichnung der Stäbe Schnittebene		L 9	L10	L11	L12	L13	L14	L15	L16	L17	L18	L19
		u m	u m	u m	u u	u m	u m	u m	u m	u m	u m	u m
Stableistung	W/cm	630 750	895 980	845 900	960 960	810 820	390 495	515 605	350 375	360 480	840 900	710 740
Schmierdichte	ZTD	0,88	0,864	0,862	0,87	0,866	0,875	0,87	0,882	0,876	0,862	0,86
Hüllaußentemperatur	°C	500 535	500 500	500 535	500 500	500 500	500 560	500 560	500 500	500 560	500 500	500 535
Bestrahlungszeit	d	1,0	0,007	0,08	1,0	1,0	0,08	0,08	0,08	1,0	0,008	0,08
rad. Spaltweite	μ	45	45	45 0,45	45	45	45	45	45	45	125	125
Brennstoffporosität	l	0,104	0,118	0,109	0,11	0,115	0,062	0,065	0,062	0,058	0,094	0,094
Radius Kornwachstum	cm	0,40 0,41	0,32 0,35	0,41 0,40	0,41 0,44	0,41 0,43	0,15 0,20	- -	0,40 0,42	0,15 0,27	0,26 0,31	0,40 0,41
Radius Stengelkorn	cm	0,31 0,31	0,32 0,35	0,33 0,35	0,34 0,38	0,34 0,38	0 0	- -	0,35 0,39	0 0	0,26 0,31	0,33 0,35
Radius Schmelzzone	cm	0,17 0,23	0,23 0,31	0,24 0,31	0,24 0,24	0 0	0 0	- -	0,25 0,31	0 0	0,15 0,20	0,22 0,27
Temperaturgrenze Kornwachstum	°C	1500	1850	1550	1500	1500	1550		1550	1500	1850	1550
Temperaturgrenze Stengelkorn	°C	1800	2150	1850	1800	1800	1850		1850	1800	2150	1850
Zentralkanalradius	cm	0 0	0,12 0,08	0 0	0 0	0,09 0,09	0 0	0 0	0 0	0,10 0,00	0,09 0,10	0,025 0,06
Wärmeübergang im Spalt	W/cm ² grd	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Wärmeübergang im Spalt unterer Wert	W/cm ² grd	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Wärmeübergang im Spalt oberer Wert	W/cm ² grd	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4

- Bildmaterial nicht vollständig, oder aus dem vorhandenen Bildmaterial nicht bestimmbar.

Tabelle 13

Herstellungs-, Bestrahlungs- und Auswertungsdaten der Brennstäbe für die thermische Analyse

Bezeichnung der Stäbe		L20		L21		L22		L23		L24		L25		L26		L27		L28		L29	
Schnittebene		u	m	u	m	u	m	u	m	u	m	u	m	u	m	u	m	u	m	u	m
Stableistung	W/cm	1000	1000	960	960	600	650	--	540	670	710	715	760	725	740	835	835	340	460	360	465
Schmierdichte	%TD	0,856		0,855		0,855		0,84		0,835		0,856		0,83		0,815		0,861		0,846	
Hüllaußentemperatur	°C	500	500	500	500	500	560		560	500	535	500	535	500	535	500	500	500	500	500	560
Bestrahlungszeit	d	0,007		0,08		13,4		1,05		0,02		0,11		0,08		8,7		0,08		0,035	
rad. Spaltweite	μ	125		125		125		130		125		125		125		125		0		0	
Brennstoffporosität	l	0,098		0,10		0,10		0,095		0,10		0,098		0,105		0,10		0,139		0,154	
Radius Kornwachstum	cm	0,43	0,42	0,43	0,43	0,40	0,40	0	0,42	0,30	0,33	0,44	0,46	0,44	0,46	0,39	0,40	0,07	0,25	0,15	0,27
Radius Stengelkorn	cm	0,36	0,38	0,38	0,39	0,31	0,33	0	0,35	0,30	0,33	0,31	0,36	0,35	0,41	0,33	0,34	0	0	0	0
Radius Schmelzzone	cm	0,29	0,30	0,29	0,32	0	0	0	0	0,18	0,27	0,20	0,31	0,15	0,35	0	0	0	0	0	0
Temperaturgrenze Kornwachstum	°C	1850		1550		1400		1500		1700		1550		1550		1400		1550		1550	
Temperaturgrenze Stengelkorn	°C	2150		1850		1700		1800		2000		1850		1850		1700		1850		1800	
Zentralkanalradius	cm	0,03	0,04	0	0	0,11	0,10	0	0,17	0,08	0	0	0,04	0,12	0	0,15	0,15	0	0	0	0
Wärmeübergang im Spalt	W/cm ² grd	1,2		1,2		1,2		1,2		1,2		1,2		1,2		1,2		1,2		1,2	
Wärmeübergang im Spalt, unterer Wert	W/cm ² grd	0,6		0,6		0,6		0,6		0,6		0,6		0,6		0,6		0,6		0,6	
Wärmeübergang im Spalt, oberer Wert	W/cm ² grd	2,4		2,4		2,4		2,4		2,4		2,4		2,4		2,4		2,4		2,4	
Bezeichnung der Stäbe		L30		L31		L32		L33		L34		L35		L36		L37		L38		L39	
Schnittebene		u	m	u	m	u	m	u	m	u	m	u	m	u	m	u	m	u	m	u	m
Stableistung	W/cm	585	740	690	770	665	695	970	1000	930	930	465	550	640	730	710	760	730	730	1000	1000
Schmierdichte	%TD	0,853		0,847		0,85		0,85		0,85		0,846		0,849		0,851		0,851		0,85	
Hüllaußentemperatur	°C	500	535	500	535	500	535	500	500	500	500	500	560	500	535	500	535	520	500	500	500
Bestrahlungszeit	d	0,007		0,08		1,0		0,007		0,08		0,08		0,008		0,08		1,0		0,08	
rad. Spaltweite	μ	0		0		0		0		0		0		0		0		0		0	
Brennstoffporosität	l	0,147		0,153		0,15		0,15		0,15		0,154		0,151		0,149		0,149		0,15	
Radius Kornwachstum	cm	-	0,21	0,33	0,35	0,42	0,44	0,31	0,37	0,40	0,40	0,22	0,26	0,24	0,28	0,33	0,35	0,42	0,44	0,38	0,41
Radius Stengelkorn	cm	-	0,21	0,24	0,29	0,38	0,39	0,31	0,37	0,33	0,38	0	0,22	0,24	0,28	0,20	0,31	0,40	0,42	0,37	0,37
Radius Schmelzzone	cm	-	0,10	0	0,13	0,24	0,25	0,23	0,31	0,24	0,31	0	0	0,05	0,14	0	0,15	0,22	0,30	0,26	0,32
Temperaturgrenze Kornwachstum	°C	1850		1550		1500		1850		1550		1550		1850		1550		1500		1550	
Temperaturgrenze Stengelkorn	°C	2150		1850		1800		2150		1850		1850		2150		1850		1800		1850	
Zentralkanalradius	cm	-	0,05	0,07	-	0,05	0,05	0	0,06	0	0	0	0,05	0,01	0	0,09	0,10	0,04	0,10	0	0
Wärmeübergang im Spalt	W/cm ² grd	1,2		1,2		1,2		1,2		1,2		1,2		1,2		1,2		1,2		1,2	
Wärmeübergang im Spalt, unterer Wert	W/cm ² grd	0,6		0,6		0,6		0,6		0,6		0,6		0,6		0,6		0,6		0,6	
Wärmeübergang im Spalt, oberer Wert	W/cm ² grd	2,4		2,4		2,4		2,4		2,4		2,4		2,4		2,4		2,4		2,4	

- Bildmaterial nicht vollständig, oder aus dem vorhandenen Bildmaterial nicht bestimmbar.

10. Thermische und mechanische Analyse der Brennstäbe

Die Grundlage einer quantitativen Brennstabanalyse bildet das radiale und axiale Temperaturprofil. Sowohl für die Brennstoffumlagerungen nach erfolgtem Schmelzen, als auch für die Bildung der Strukturzone und deren zeitlichem Aufbau ist die Temperaturverteilung im Brennstoff die maßgebende Größe. Jedoch auch die mechanische Wechselwirkung zwischen Brennstoff und Hülle wird vom Temperaturprofil bestimmt. Das gilt für den Brennstoffschwelldruck - der hier nicht weiter betrachtet wird, da es sich um Kurzzeitversuche handelt - als auch für die thermische Ausdehnung von Brennstoff und Hülle, die unter gewissen Randbedingungen (kleiner Spalt, hohe Stableistung) zu einer starken Kurzzeitbelastung für die Hülle führen kann.

10.1 Das axiale und radiale Temperaturprofil

Für die thermische Auswertung werden die mittlere und untere Schnittebene herangezogen. Bei der oberen Schnittebene muß die thermische Analyse entfallen, da bei den meisten Prüflingen axiale Brennstoffverlagerungen auftraten, die in diesem Bereich zu unübersichtlichen Verhältnissen führten (siehe hierzu Kap. 10.4). Das axiale Temperaturprofil wird im wesentlichen durch das axiale Leistungsprofil bestimmt (Abb. 9). Die Hülltemperaturen variieren von unten nach oben nur sehr gering (s. Kap. 7.2). Im allgemeinen läßt sich bezüglich des thermischen Verhaltens jeder Schnitt für sich allein betrachten, da größere axiale Brennstoffverlagerungen während der Bestrahlung - wie bereits erwähnt - auszuschließen sind und ihr Einfluß auf das Temperaturfeld wegen der radialen Flußabschirmung ohnehin klein bleibt.

Die das thermische Verhalten charakterisierenden Daten der Querschliffe sind in Abb. 13 zusammengestellt. Es sind dies die Brennstoffdichte, die Stableistung, die Bestrahlungszeit, die Brennstoffform und die radiale Spaltweite. Insgesamt können 84 Radialschnitte thermisch ausgewertet werden. Sie umspannen das ganze Spektrum der Loop-Versuchsgruppe 2:

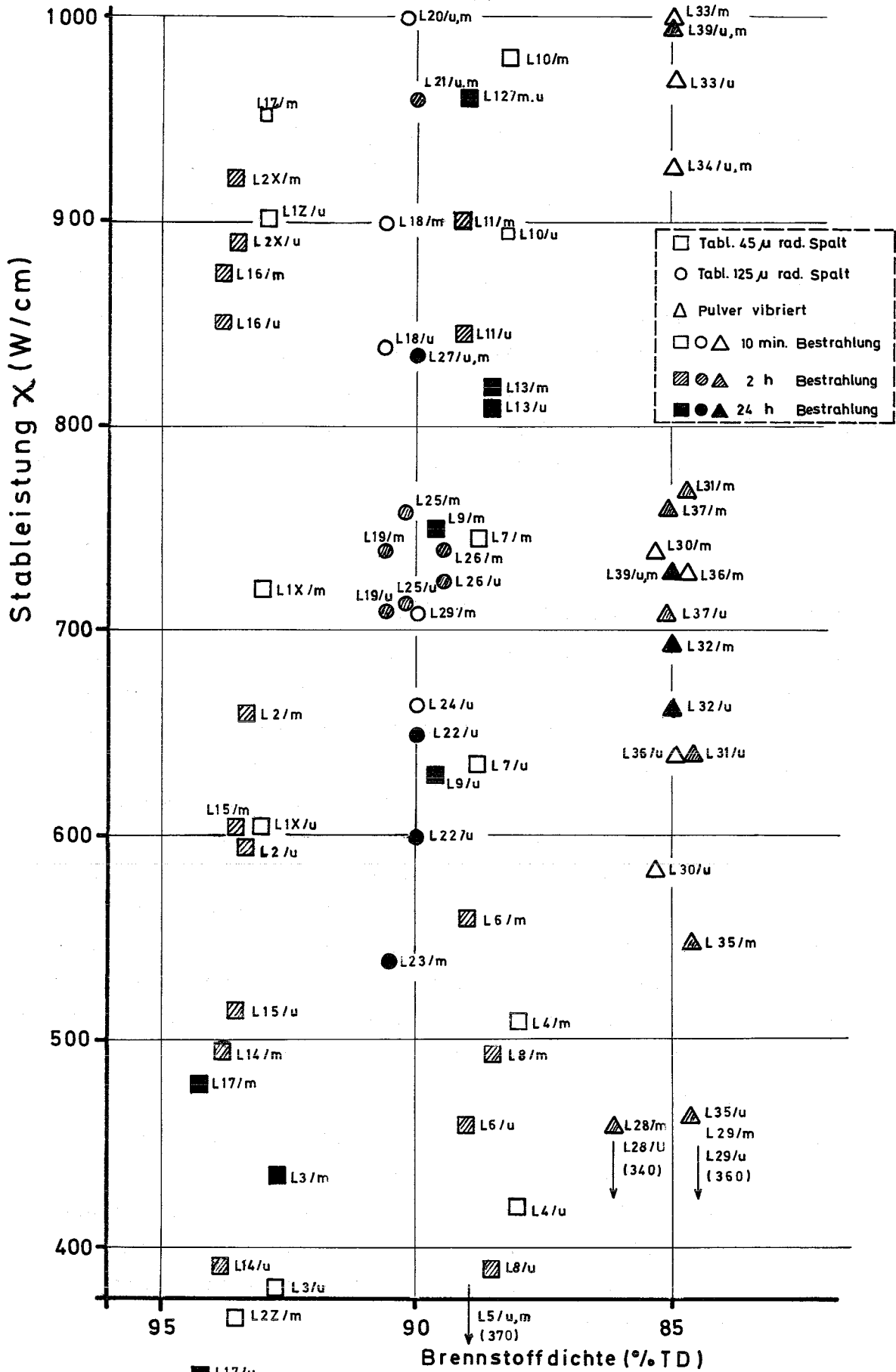


Abb.13: Auslegungs- u. Bestrahlungsdaten der Querschliffe (untere u. mittlere Schliffebene)

- Stabileistung: 350 - 1000 W/cm
- Brennstoffdichte: 85 - 95 % th.D.
- Bestrahlungszeit: 10 min - 10 Tage

Das radiale Temperaturprofil wurde mit Hilfe des Rechenprogrammes BESTAW ermittelt [6]. Es ist speziell für Auswertungsfragen entwickelt worden und es gestattet neben den Betriebs-, Stoff- und Geometriedaten des Querschliffes auch die Strukturzonen der Schliffbildanalyse zu berücksichtigen.

Die Flußabsenkung im Brennstoff wird im Programm mit einer kubischen Parabel approximiert, wobei die integrale Flußabsenkung nach [7] zu $f = 0,90$ ermittelt wurde. Damit ergibt sich für die radiale Leistungsverteilung im Brennstab die Funktion:

$$q(r) = \frac{1,6 \cdot \kappa}{\tilde{\mu} \cdot R^2} \left(0,37 + \frac{r^3}{0,20} \right)$$

mit

- R = Brennstoffaußenradius (cm)
- r = laufender Brennstoffradius (cm)
- q(r) = Leistungsdichte (W/cm³)

Die Wärmeleitfähigkeit des Brennstoffes wird als Funktion der Temperatur und der Porosität nach [8] eingeführt:

$$k \text{ (W/cm } ^\circ\text{K)} = (1 - P^{2/3}) \left(\frac{41,2}{T + 4,9} + 6,55 \cdot 10^{-13} T^3 \right)$$

mit

- T = Temperatur (°K)
- P = Porosität
- k = Wärmeleitfähigkeit (W/cm °K)

Es werden zwei Fälle unterschieden: Im ersten Fall wird die Brennstoffporosität über den Radius konstant gehalten (= Anfahrbedingung), im zweiten Fall wird eine Verdichtung des Brennstoffes im heißen Bereich ($T \geq 1800$ °C) auf 95 % th.D. berücksichtigt, wobei gleichzeitig

ein Zentralkanal nach dem Zweizonenmodell errechnet wird. Das Temperaturprofil wird jedoch nur dann mit diesem Zentralkanal gerechnet, wenn aus der Schliffbildanalyse kein Zentralkanalradius ermittelt wurde.

Für den Wärmeübergang Brennstoff/Hülle wurden drei Werte eingegeben (0,6; 1,2 und 2,4 W/cm²grd). Ein vierter Rechenlauf verwendet eine im Programm selbst ermittelte Wärmeübergangszahl β . Dabei wird für einen sogenannten effektiven Heißspalt (Rauigkeit + Welligkeit + heißer, offener Restspalt) β für eine bestimmte Füllgasmischung ermittelt. Dieser effektive Heißspalt ist ebenfalls ein Eingabewert. In unserem Fall wurde von der begründeten Voraussetzung ausgegangen, daß der Fertigungsspalt durch die thermische Ausdehnung des Brennstoffes geschlossen wird (heißer, offener Restspalt = 0 μ m, Rauigkeit + Welligkeit = 7 μ m).

In Tabelle 13 sind alle variablen Eingabedaten zusammengestellt. Dort finden sich auch die Radien der Strukturzonen und die zugeordneten Temperaturgrenzen. Für die Abhängigkeit der Temperaturgrenzen von der Bestrahlungszeit kann z.Zt. nur auf halbquantitatives Datenmaterial zurückgegriffen werden [9].

In Anhang II finden sich die ausgedruckten Temperaturprofile für die oben genannten Bedingungen. Insgesamt sind 4 x 2 Temperaturprofile (ohne/mit Verdichtung der heißen Zone) und die Temperaturgrenzen der einzelnen Strukturzonen (Schmelz-, Stengelkorn- und Kornwachstumszone) angegeben.

10.2 Analyse des Wärmeübergangs Brennstoff/Hülle

Bei Kurzzeitbestrahlungen ist nicht zu erwarten, daß sich die Wärmeleitfähigkeit des Brennstoffes während der Bestrahlung außer durch Verdichtung merklich ändert. Wenn es, wie die Abbildungen in Anhang III zeigen, zu keiner guten Übereinstimmung zwischen den Temperaturgrenzen der Strukturzonen und den errechneten Temperaturprofilen kommt, dann dürften dafür der Wärmeübergang Brennstoff/Hülle und die Temperaturgrenzen selbst verantwortlich sein.

Der Wärmeübergang Brennstoff/Hülle ist bei geschlossenem Spalt von der Oberflächenrauigkeit und -welligkeit, dem Kontaktdruck und der Gasmischung zwischen den Kontaktbrücken abhängig. Im vorliegenden Fall ist der Anteil der Wärmeleitung durch Helium gegenüber SNR-Brennstäben stark reduziert. Das rührt her von dem sehr kleinen Gasplenum in dieser Versuchsserie, so daß gleich zu Beginn der Bestrahlung die Wärmeleitfähigkeit der Gasmischung im wesentlichen durch die freigesetzten Restgase (50 % H₂O; 50 % CO₂) des Brennstoffes bestimmt wird (Verhältnis He : Restgas wie 1:10 gegenüber etwa 1:1 bei SNR-Stäben (mit 0,1 cm³ Restgas je Gramm Brennstoff)). Im Vergleich zu einem reinen He-Spalt von ca. 20 µm ergeben sich dann etwa folgende Werte:

20 µm - He	- 1000 °C -	β = 2 W/cm ² grd
20 µm - He/Restgas (1:1)	- 1000 °C -	β = 1 W/cm ² grd
20 µm - He-Restgas (1:10)	- 1000 °C -	β = 0,4 W/cm ² grd

Das hat nun zur Folge, daß der Wärmedurchgang durch den Spalt bei der Loop-Versuchsgruppe 2 stärker durch den Wärmeübergang an den Festkörperkontaktbrücken beeinflusst wird, als das bei SNR-Brennstäben in der ersten Betriebsphase der Fall ist. Aus diesem Grunde sollte bei dieser Versuchsgruppe eine stärkere Abhängigkeit der Wärmedurchgangszahl vom Brennstoffkontaktdruck vorliegen.

In Abb. 14 ist das untersucht worden. Als Maßstab für den unbekanntem Kontaktdruck ist die Stableistung anzusehen. Zur Ermittlung der einzelnen Meßpunkte wurden die Temperaturprofile der zentral geschmolzenen Proben (siehe Anhang III) soweit verschoben, bis sie durch die den Schmelzradien zugeordneten Schmelztemperatur liefen. Damit ergab sich dann für jeden Fall eine genau berechenbare Wärmeübergangszahl. Das Aufhängen der Temperaturprofile an der Schmelztemperatur ist sinnvoll und auch zulässig, da sie die am genauesten bekannte Temperaturgrenze ist und auch über die Definition des Schmelzradius in der Keramografie heute klare Aussagen existieren (porenfreier Bereich).

Die Abb. 14 zeigt die erwartete Abhängigkeit der Wärmeübergangszahl von der Stableistung. Einige Brennstäbe fallen aus dem Bild heraus, was sich bei den vibrierten Stäben mit der leicht unterschiedlichen

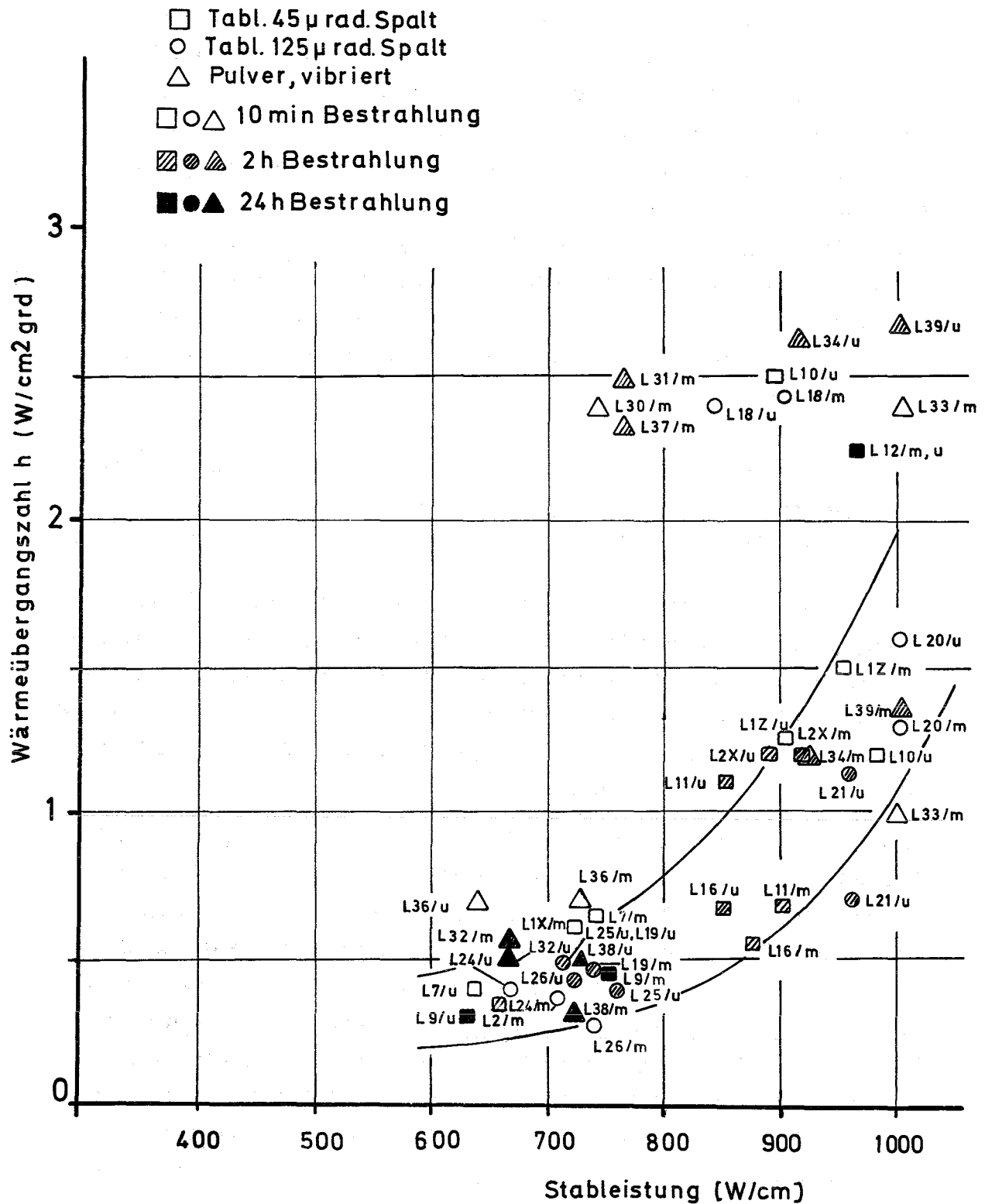


Abb.14 : Wärmeübergang im Spalt in Abhängigkeit von der Stableistung (ermittelt mit einem Temperaturprofil, das auf die experimentell ermittelte Schmelzzone führte)

Verteilung der Kornfraktionen am Brennstoffrand erklären läßt (feines Korn am Brennstoffrand ergibt guten Wärmeübergang). Verbleiben noch die Stäbe L 18, L 10 und L 12, für deren Ausscheren jedoch keine plausible Begründung angegeben werden kann.

Es sollte bei dieser Darstellung nicht unbeachtet bleiben, daß ein Fehler in der Stableistung von $\pm 5\%$ bei z.B. 900 W/cm sich auf die Wärmeübergangszahl gleich mit einer Fehlerbreite von $\pm 30\%$ überträgt. Auf diesem Hintergrund muß die erreichte Übereinstimmung der einzelnen Meßpunkte untereinander als gut bezeichnet werden.

Die Wärmeübergangszahl ohne Kontaktdruck läßt sich aus dem Bild zu etwa $0,3 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$ ermitteln (Asymptote für $\lambda \rightarrow 0$). Das entspricht einem heißen Nullspalt (Rauhigkeit + Welligkeit) von ca. 25 μm .

Weiterhin ist interessant, daß offenbar die Fertigungsspaltbreite bei diesem Bestrahlungsversuch auf den Wärmedurchgang keinen Einfluß hatte. Allerdings ist ein radialer Spalt von max. 125 μm bei 12 mm dicken Brennstäben nicht als ein großer Spalt anzusprechen.

10.3 Analyse der Strukturzonen

In gleicher Weise wie in Kap. 10.2 wurden die Strukturzonen in Abhängigkeit von der Temperatur, der Stableistung und der Bestrahlungszeit ermittelt. Die Strukturzonen der Schliffbildauswertung (Stengelkorngrenze, Kornwachstumsgrenze) wurden in ein am Schmelzradius und Schmelzpunkt ($T_s = 2840^\circ\text{C}$) aufgehängtes Temperaturprofil eingezeichnet und für diese Punkte die Temperaturen aus den so gewonnenen Diagrammen entnommen.

Das Ergebnis ist in Abb. 15 dargestellt. Für eine Bestrahlungszeit von 10 min fallen die Strukturgrenzen der Kornwachstums- und der Stengelkornzone zusammen. Die Abhängigkeit der Temperaturgrenzen von der Stableistung und damit vom Temperaturgradienten ist klar erkennbar. Insgesamt liegt das Temperaturband sehr hoch (2700°C für 600 W/cm \rightarrow 2200°C für 1000 W/cm) (Abb. 15, oberes Bild).

Bei einer Bestrahlungszeit von zwei Stunden ist die Abhängigkeit der Temperaturgrenze von der Stableistung bei der Stengelkornbildung ebenfalls erkennbar (Abb. 15, mittleres Bild). Das Band liegt im

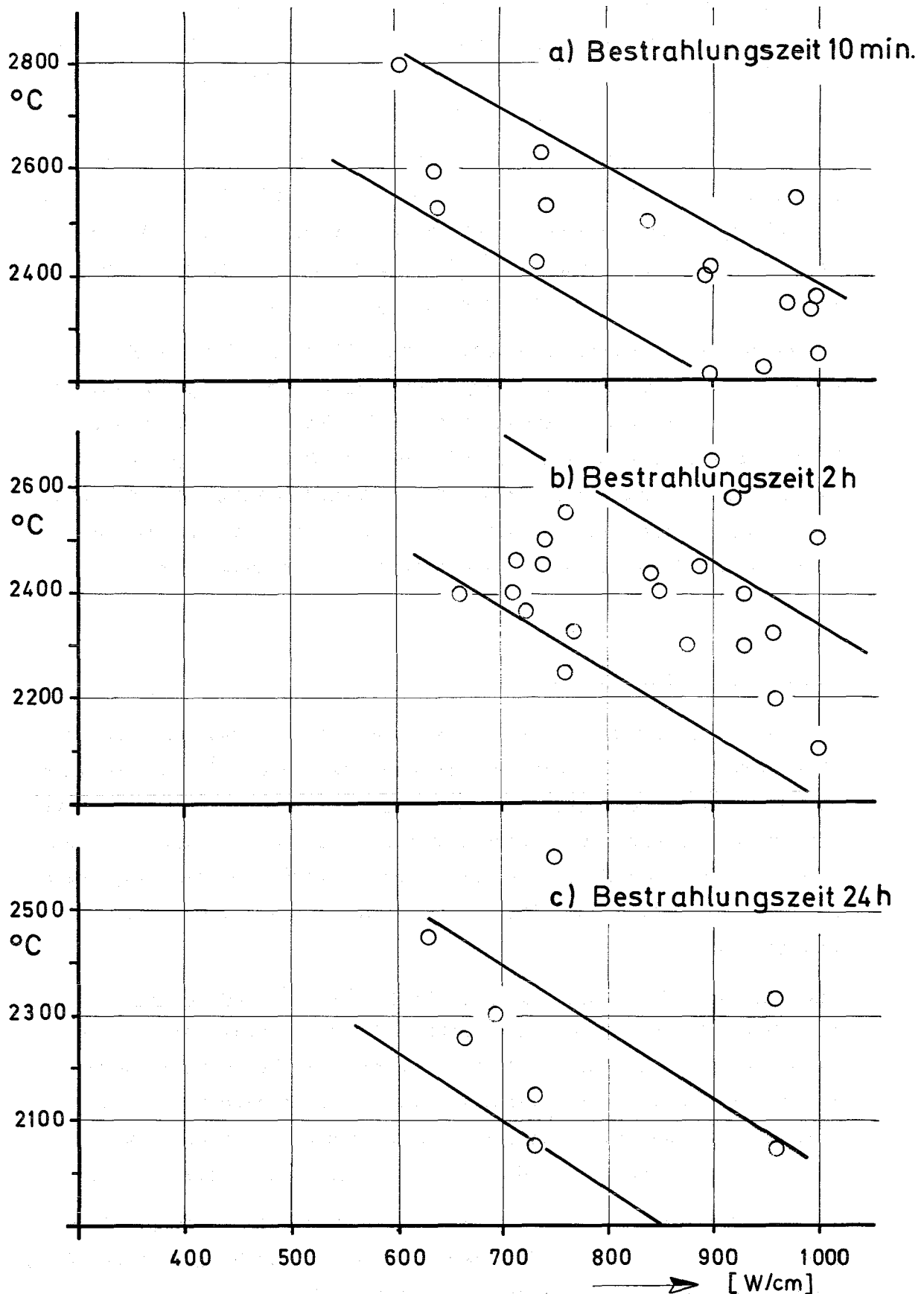


Abb.15: Temp.grenze d.Stengelkornbildung als Funktion v. Stableistung u. Bestrahlungszeit

gleichen Temperaturbereich wie bei 10 min Bestrahlungszeit. Das heißt also, daß innerhalb einer Bestrahlungszeit von 2 Stunden keine relevante Zeitabhängigkeit nachweisbar ist.

Für die Bestrahlungszeit von 24 Stunden (Abb. 15, unteres Bild) liegen nur einige wenige Punkte vor. Auch hier läßt sich für die Temperaturgrenzen der Stengelkornbildung eine Abhängigkeit von der Stableistung erkennen und, was in diesem Zusammenhang wichtiger ist, das eingezeichnete Band liegt um ca. 300°C tiefer als bei den kürzeren Bestrahlungszeiten. Dadurch wird der Zeitmaßstab für die Stengelkornbildung erkennbar.

Die Temperaturgrenze des ungerichteten Kornwachstums ist, wie in Abb. 16 des untere und mittlere Bild zeigen, erwartungsgemäß nicht von der Stableistung (= Temperaturgradienten) abhängig. Bei der Bestrahlungszeit von 10 min liegt praktisch noch kein ungerichtetes Kornwachstum vor. Bei der Schliffbildauswertung ließen sich die Radien der Stengelkorn- und ungerichteten Kornwachstumszone nicht separieren. Überraschend ist in Abb. 16 die große Streubreite der Meßpunkte, die eine weiterführende Interpretation sehr erschwert.

10.4 Zentralkanalbildung und Schmelzkavernen

Wie im vorhergehenden Kapitel gezeigt wurde, ist die Umstrukturierung des Brennstoffes nach 24 h Bestrahlungszeit noch nicht abgeschlossen: Die Temperaturgrenze der Stengelkornbildung liegt für einen Stableistungsbereich von 600 - 1000 W/cm zwischen 2400°C und 1900°C . Für den Endzustand werden aber 1700°C als Temperaturgrenze abgeschätzt. Hieraus folgt, daß die Zentralkanalbildung, die eine Folge der Umstrukturierung ist, ebenfalls noch nicht abgeschlossen ist.

Ist der Zentralkanalbildung noch partielles zentrales Schmelzen des Brennstoffes überlagert, so läßt sich eine Aussage über die Bildung des Zentralkanals nur indirekt und zwar über eine Volumen- und Massenbilanz des gesamten Stabes gewinnen. Wie die nachfolgende Analyse bezüglich der Schmelzkavernenlänge zeigen wird, ist die Zentralkanalbildung, einschließlich der Kavernenbildung, nach 24 h Bestrahlungszeit ebenfalls noch nicht abgeschlossen.

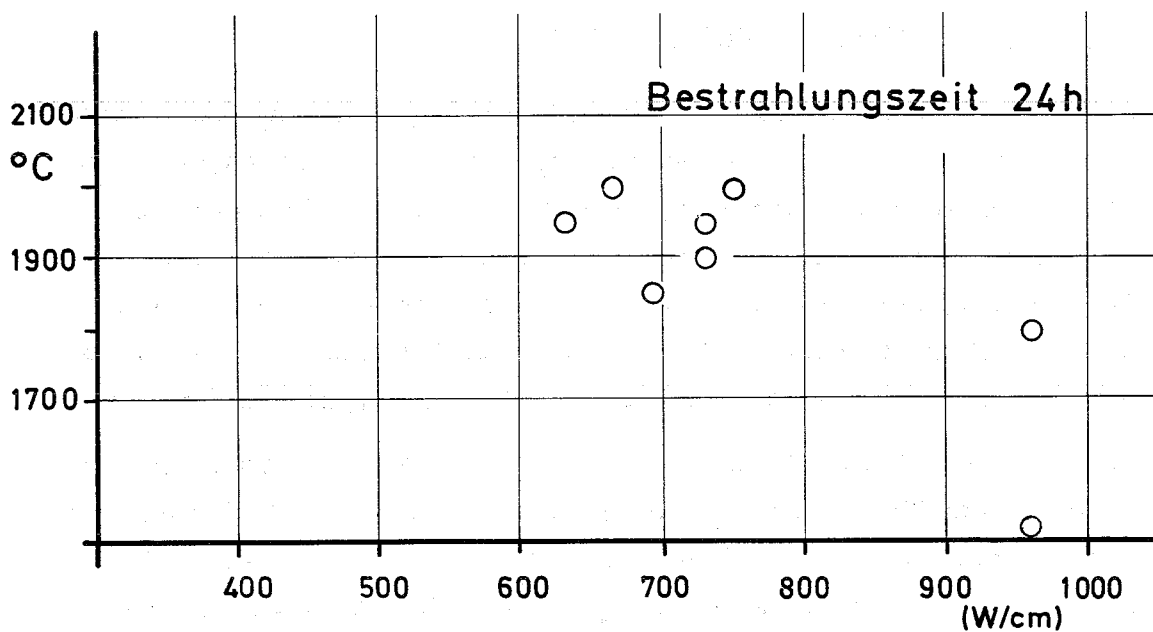
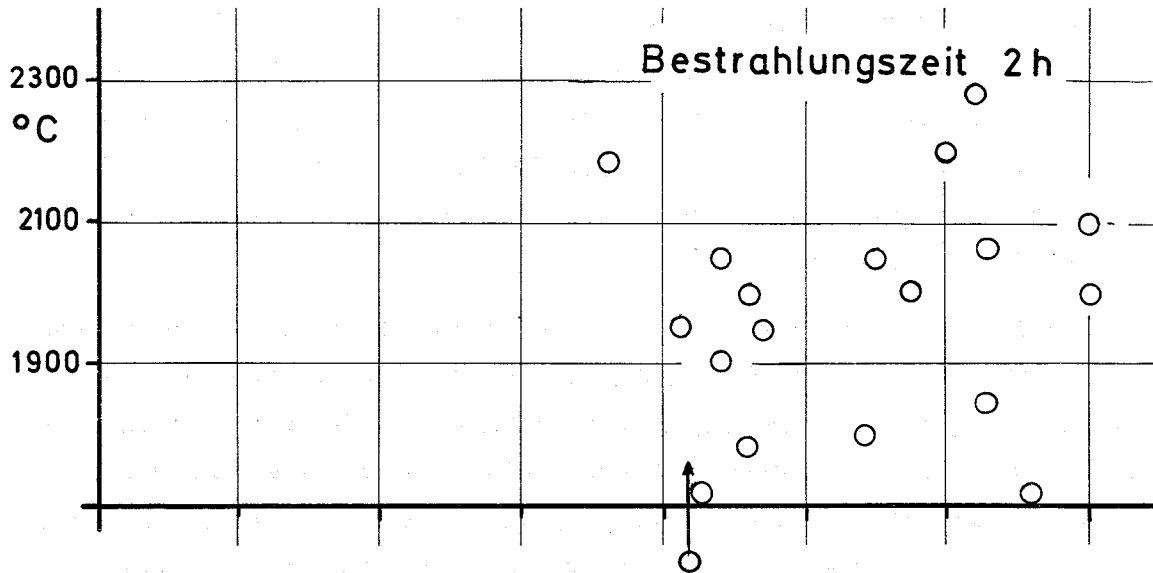


Abb.16: Temp.grenze d.Kornwachstums als Funktion von Stableistung u. Bestrahlungszeit

Bei genügend hoher Stableistung ($\kappa > 650 \text{ W/cm}$) kommt es im Zentrum der Brennstoffsäule zu partiellem Schmelzen. Dies ist mit einer Volumenvergrößerung des schmelzenden UO_2 verbunden. Liegt die Brennstoffdichte bei ca. 90 % th.D., so wird die Schmelzausdehnung durch die Brennstoffporosität aufgefangen. Liegt die Brennstoffdichte hingegen niedriger, so führt dies schon während der Bestrahlung zu geringen axialen Verlagerungen der Schmelze. Bei der Abkühlung erstarrt der Brennstoff weitgehend porositätsfrei, so daß das von der Schmelze beanspruchte Mehrvolumen frei wird. Dies führt zur sog. Kavernenbildung, das sind rübenähnliche zentrale Hohlräume am oberen Ende der Prüflinge [10] (siehe Anhang II).

In Abb. 17 sind die gemessenen Kavernenlängen verschiedener Stäbe als Funktion der Stableistung aufgetragen. Zum Vergleich ist ein errechneter Wert, der als von der Stableistung unabhängig abgeschätzt wurde, mitangegeben (strichpunktierte Linie). Hierbei wurde von der Annahme ausgegangen, daß die theoretische Dichte der erstarrten Schmelze 99 % th.D. beträgt und eine Verdichtung in der plastischen Zone des Brennstoffes durch Porenwanderung noch nicht stattgefunden hat. Unter der Annahme einer konstanten Stableistung über die Probenlänge, einer zylindrischen Gestalt der Kaverne und einer Schmierdichte des Brennstoffes von 86 % th.D. errechnet sich die Schmelzkavernenlänge zu :

$$l_K = l_B \cdot \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1} = 150 \cdot \frac{99 - 86}{99} \approx 20 \text{ (mm)}$$

mit

$$\begin{aligned} l_K, l_B &= \text{Länge der Kaverne bzw. des Brennstabes} \\ \rho_1 &= \text{Dichte der erstarrten Schmelze} \\ \rho_2 &= \text{Schmierdichte} \end{aligned}$$

Der Vergleich zwischen dem errechneten und den gemessenen Werten liefert für niedrige Stableistungen teilweise Übereinstimmung. Mit steigender Stableistung und zunehmender Bestrahlungszeit wächst die Kavernenlänge, was auf die Porenwanderung zurückgeführt werden kann. Am Schmelzradius ankommende Linsenporen werden an das obere Stabende gespült und bilden dort, schon während des Betriebes, eine Kaverne. Insgesamt bestätigt auch Abb. 17, daß die Zentralkanalbildung auch nach 24 h Bestrahlungszeit noch nicht abgeschlossen ist.

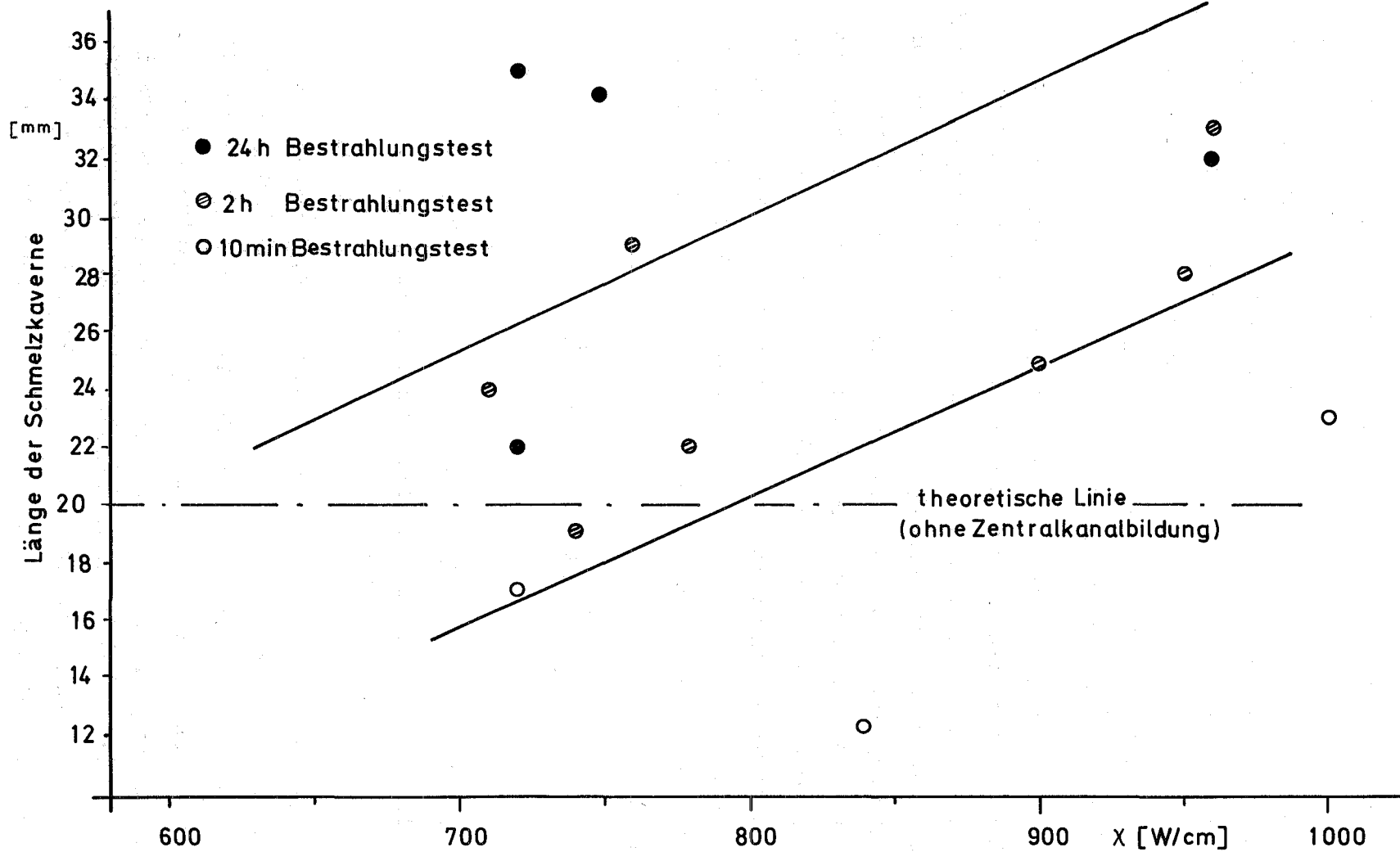


Abb.17: Länge der Schmelzkaverne als Funktion der Stabileistung und der Bestrahlungszeit bei einer Brennstoffschmierdichte von 85-87% TD.

Abschließend kann gesagt werden, daß die zentralen Hohlräume am oberen Stabende Schmelzkavernen sind und diese vorzugsweise in der Abkühlungsphase gebildet wurden. Bei hohen Stableistungen und größeren Bestrahlungszeiten enthalten sie einen zusätzlichen Anteil, der durch die Porenwanderung hervorgerufen wurde.

10.5 Mechanische Wechselwirkung des Brennstoffes mit der Hülle

Bei den Brennstab-Proben mit 50 µm radialem Spalt befindet sich, wie nachfolgend gezeigt wird, der Brennstoff ab ca. 400 W/cm mit der Hülle in Kontakt. Es erhebt sich die Frage, ob eine weitere Leistungserhöhung (zum Teil bis 1000 W/cm) zu Hüllrohrschäden führen kann. Die Leistungserhöhung führt, infolge der relativ größeren thermischen Ausdehnung des Brennstoffes und des "Restrain" der Hülle, zu einem Kontaktdruckaufbau, der von der Größe der Leistungserhöhung abhängt. Ist die durch den Kontaktdruck hervorgerufene Tangentialspannung in der Hülle kleiner (größer) als die Streckgrenze ($\sigma_{0,2}$ %) des Hüllmaterials, so führt dies zu einer elastischen (plastischen) Verformung der Hülle.

Wie die Vermessungsprotokolle zeigen, wurde bei keinem der Stäbe eine Hüllrohraufweitung festgestellt. Die Hüllrohrspannungen blieben also in jedem Fall unterhalb der Streckgrenze. Kriechverformungen sind wegen der kurzen Standzeiten auszuschließen. Das gilt für Stableistungen bis 1000 W/cm und radialen Spaltweiten bis herunter zu 50 µm radial.

Rechnet man die thermische Ausdehnung des Brennstoffes und der Hülle, unter der Annahme eines Zweizonenmodells (elastische Zone mit unbehinderter und plastische Zone mit behinderter Ausdehnung) und gestaffelten Wärmeübergangszahlen (gemäß Abb. 14) nach, so erhält man ein überraschendes Ergebnis: Die thermische Ausdehnung des Brennstoffes nimmt trotz steigender Stableistung ab 600 W/cm nicht mehr zu (siehe Abb. 18). Das gilt, wenn man der Plastizitätsgrenze eine definierte Temperatur zuordnet ($T_{pl} = \text{const.}$). Der ursprünglich vorgegebene radiale Spalt von 50 µm wird durch die thermische Ausdehnung der Hülle (unterste Kurve in Abb. 18) um weitere 50 µm vergrößert. Läßt man für den Brennstoff eine freie Ausdehnung zu (strichpunktierte Kurve), so stellt man in Übereinstimmung mit der Schlifffbildanalyse fest, daß sich der Spalt ab einer Stableistung von ca. 400 W/cm

$$\Delta R_{\text{Brennstoff}} = \int_R^{r_{pl}} \frac{1}{\chi} \cdot T \cdot dr + \delta(T_{pl}) \cdot T_{pl} \cdot r_{pl} \quad (\text{Zweizonenmodell})$$

$$\delta_{Br} = 2,3 \cdot 10^{-9} \cdot T - 8 \cdot 10^{-6} \quad (\text{n.W. Aisch, Siemens AG, RE5-30/66})$$

Randbedingungen: $T_{Ha} = 500^\circ\text{C}$ $\beta = 0.3 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$ für $\chi = 400 \text{ W/cm}$ (Abb.14)
 0.4 $\text{W/cm}^2 \text{ grad}$ für $\chi = 600 \text{ W/cm}$
 0.6 $\text{W/cm}^2 \text{ grad}$ für $\chi = 800 \text{ W/cm}$
 1.2 $\text{W/cm}^2 \text{ grad}$ für $\chi = 1000 \text{ W/cm}$

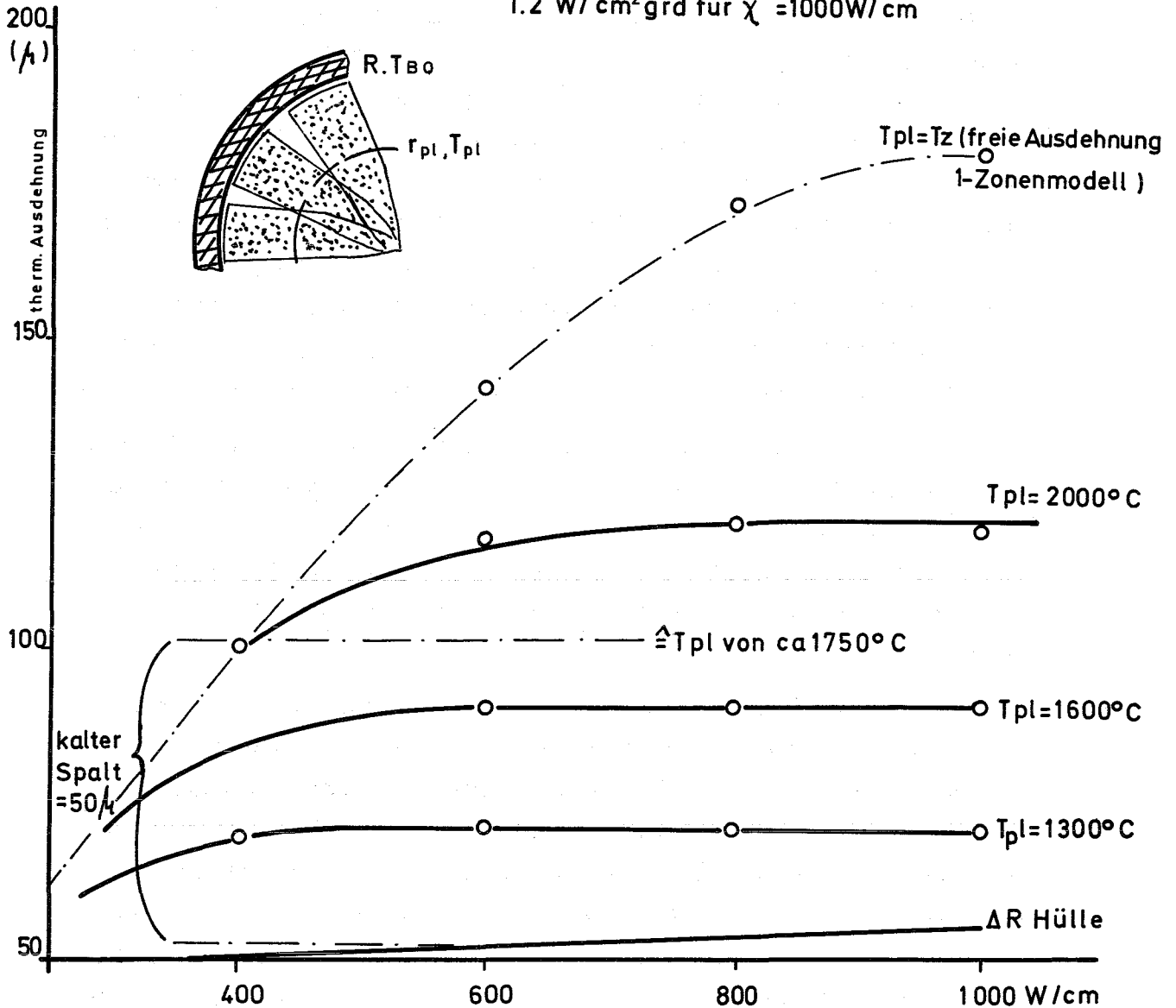


Abb.18: Thermische Ausdehnung des Brennstoffes(nach dem Zweizonenmodell und T_{pl} als Parameter) und der Hülle als Funktion der Stableistung.

schließt ($\Delta R \geq 100 \mu\text{m}$). Steigt die Stableistung weiter an, dann wird die zusätzliche Brennstoffausdehnung in der plastischen Zone in die Porosität hineingelenkt. Die plastische Zone vergrößert sich einmal dadurch, daß mit steigender Stableistung das Temperaturniveau ansteigt, andererseits dadurch, daß auf Grund des gleichzeitig zunehmenden Kontaktdruckes die Plastizitätstemperatur abgesenkt wird. Ab 600 W/cm^2 - und das ist nun das überraschende Ergebnis - bleibt die Plastizitätstemperatur konstant. Das erkennt man in Abb. 18 daran, daß ab dieser Stableistung die Linien mit $T_{pl} = \text{const.}$ in eine Horizontale einmünden. Im Falle der Loop-Versuchsgruppe 2, mit einem Kaltspalt von ca. $50 \mu\text{m}$ radial, hat sich T_{pl} ab 600 W/cm^2 auf einen Wert von 1750°C eingependelt.

10.6 Thermische Analyse der drei Brennstäbe mit Zentraltemperaturmessung

Die Brennstäbe L 22 und L 27 zeigen trotz der relativ hohen Stableistung am Ende der Bestrahlungszeit keine Schmelzzone. Der Prüfling L 13 zeigt nur eine kleine Restschmelze am Hochtemperaturthermoelement (W/Re), obwohl die Stableistung schon nach kurzer Betriebszeit (14 h) auf 820 W/cm^2 angehoben wurde. Gemäß der thermischen Analyse in Kap. 10.1 sollten die Zentraltemperaturen nach erfolgter Zentralkanalausbildung bei ca. 2800°C (bei L 13), 2700°C (bei L 27) und 2200°C (bei L 22) liegen (mit $\beta = 1,2 \text{ W/cm}^2 \text{ grad.}$ gerechnet). Ohne Zentralkanal lauten die Temperaturen 3200°C (L 13, L 27) und 2400°C (L 22). Das zentrale Thermoelement zeigte jedoch in keinem Falle Temperaturen $\geq 2400^\circ\text{C}$ (s. Abb. 10 - 12).

Wie lassen sich diese Widersprüche aufklären? Bei L 13 ist das relativ einfach. Hier wurde in den Schliffbildern definitiv eine Restschmelze gefunden. Das ist ein klarer Beweis dafür, daß der Brennstoff im Laufe seiner Lebensgeschichte einmal über die Schmelztemperatur hinaus erhitzt wurde. Das kann jedoch nur innerhalb der ersten 24 h erfolgt sein, wenn man sich die Betriebsgeschichte anschaut (Abb. 10).

Daraus kann der Schluß gezogen werden, daß das Hochtemperaturthermoelement mindestens für den Zeitraum von 2 - 24 h Bestrahlungszeit keine richtigen Meßwerte lieferte.

Bei L 22 zeigt sich eine recht gute Übereinstimmung zwischen der Zentraltemperaturmessung und dem errechneten Temperaturprofil ($2100\text{ }^{\circ}\text{C}$ gegenüber $2200\text{ }^{\circ}\text{C}$ bei $1,2\text{ W/cm}^2\text{grd.}$). Auch die Temperaturgrenzen der Strukturzonen sind in guter Übereinstimmung mit diesem Temperaturprofil ($T_{\text{St.Korn}} = 1800\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $T_{\text{Kornw.}} = 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$). Die Zentralkanalbildung kann praktisch als abgeschlossen gelten. Das Rechenprogramm ermittelte einen um 5 % größeren Zentralkanalradius als die Schliffbildvermessung.

Der Brennstabprüfling L 27 zeigt bezüglich der Zentraltemperatur und der Temperaturgrenzen der Strukturzonen keine Übereinstimmung mit den Ergebnissen des Rechenprogrammes (vergl. Anhang III mit Abb. 12). Die Brennstoffstruktur entspricht einer Stableistung von $600 - 650\text{ W/cm}$. Ein Blick in den Betriebsablauf (Abb. 12) zeigt, daß der Prüfling tatsächlich etwa 7 Tage lang bei dieser Leistung bestrahlt wurde. Erst am vorletzten Bestrahlungstag wurde die Stableistung auf ca. 840 W/cm hochgefahren. Offenbar hat aber eine Zeit von ca. 40 h nicht ausgereicht, die Strukturzonen weiter nach außen zu verschieben.

Die Abb. 12 zeigt weiter, daß die Zentraltemperaturmeßstelle die stufenförmige Leistungserhöhung nicht voll mitregistriert hat und daß zum Ende der Bestrahlung die Meßwerte stark abgefallen sind. Offenbar wurde der Isolator im Thermoelement leitend, so daß die Meßstelle axial aus der heißen Zone heraus wanderte. Der starke Abfall in den letzten 30 h der Bestrahlungszeit ließe sich nur dann z.T. durch eine Verbesserung der Wärmeleitung im Brennstoff erklären, wenn sich die Stengelkornzone merklich nach außen verschoben hätte. Das ist jedoch, wie wir oben gesehen haben, nicht erfolgt.

Aus diesem Tatbestand ergibt sich, daß in der letzten Betriebsphase im Brennstab weit höhere Temperaturen geherrscht haben, als durch das Zentraltemperaturthermoelement angezeigt worden sind. Die Computerrechnung legt eine maximale Zentraltemperatur von $2700\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $2900\text{ }^{\circ}\text{C}$ nahe.

11. Schlußfolgerungen

Diese Arbeit enthält die ausführliche Dokumentation der Herstellungs-, Bestrahlungs- und Nachuntersuchungsdaten der He-Loop-Versuchsgruppe 2 wie auch die Auswertung bezüglich der thermischen Analyse. Die 43 mit UO_2 -Brennstoff (7,5 % mit U-235 angereichert) gefüllten Prüflinge wurden im Kurzzeit-Loop des FR 2 bestrahlt. Es wurden Bestrahlungszeiten von 10 min, 2 h und 24 h und Stabileistungen von 500, 750 und 1000 W/cm gewählt. Daneben fanden Bestrahlungen mit Innendruck- und Zentraltemperaturmessung statt. Die in Kapitel 2 und 3 formulierten Aufgaben und Versuchsziele wurden nicht alle erreicht.

Auf der Positiv-Seite der Bilanz stehen folgende Versuchziele:

1. Die nach den Auslegungsrechnungen ermittelte Stabileistung von maximal 1000 W/cm ebenso wie die Hüllaußentemperatur von 500 °C konnte im Experiment eingestellt werden. Abgesehen von einigen Ausnahmen, die durch Thermoelementdefekte und Fehlmessung des Kühlgasstromes verursacht wurden, konnten die in der Aufgabenstellung spezifizierten Bestrahlungsdaten eingehalten werden.
2. Die Brennstab-Prüflinge blieben intakt, obwohl nach einer Stabileistung von ca. 400 W/cm der vorgegebene radiale Spalt von 50 µm geschlossen war und eine Wechselwirkung Brennstoff-Hülle bei allen Prüflingen einsetzte. Auch ein zentrales partielles Schmelzen des Brennstoffes führte nicht zu einem Stabversagen.
3. Aus den Dimensionsmessungen der Hülle vor und nach der Bestrahlung wurde geschlossen, daß keine Durchmesseränderungen während des Betriebes aufgetreten waren. Hieraus wurde abgeleitet, daß die Tangentialspannungen in der Hülle niedriger als die Streckgrenze des Hüllmaterials waren.
4. Die Ausbildung der Strukturzonen konnte, durch die große Variation der Bestrahlungsdaten (Stabileistung, Bestrahlungszeit) in allen Stufen untersucht werden. Es bildeten sich folgende Strukturzonen aus: Seiger-, Schmelz-, Stengelkorn- (große und kleine) und ungerichtete Kornwachstumszone. Ein partielles zentrales Schmelzen des Brennstoffes führte beim Abkühlen zur sogenannten Kavernenbildung am oberen Stabende.

Die nicht geschmolzenen Stäbe zeigen, infolge des linear ansteigenden Stableistungsprofils, einen von unten nach oben zunehmenden Zentralkanal.

5. Der speziell für Kurzzeitbestrahlungen entwickelte Loop-Einsatz hat sich bestens bewährt. Er gestattet in zentraler Position des FR 2 Bestrahlungen mit großer Parametervariation und außerdem wahlweise Zentraltemperatur- oder Innendruckmessungen durchzuführen.

Auf der Negativ-Seite der Bilanz stehen:

1. Der Ausfall zahlreicher Thermoelemente und die vereinzelte Fehlmessung des Kühlgasstromes führte zu Fehlern bei der Stableistungsbestimmung bis zu $\pm 20\%$.
2. Die nur an einem Prüfling durchgeführte Innendruckmessung brachte keine in sich konsistente Werte.
3. Die Zentraltemperaturmessung konnte infolge Thermoelementdefekte nur an 3 Prüflingen durchgeführt werden. An Hand der thermischen Analyse konnte gezeigt werden, daß für Stableistungen $> 700 \text{ W/cm}$ die angezeigten Meßwerte falsch waren. Dies läßt die übrigen Werte ebenfalls als sehr fraglich erscheinen, so daß abschließend gesagt werden kann, daß das Unternehmen bezüglich der Zentraltemperatur- und der Innendruckmessung als gescheitert angesehen werden kann.
4. Die Vor- und Nachvermessung der Hüllaußendurchmesser mit sogenannten Kugeltastern als induktive Wegaufnehmer waren ungenau. Die Versuchsgruppe eignet sich deshalb nicht für die Durchführung von Spannungs-Dehnungs-Analysen.

Die thermische Analyse, die an einer mittleren und einer unteren Schnittebene der Prüflinge durchgeführt wurde, erbrachte folgende Ergebnisse:

1. Die mit verschiedenen Wärmeübergangszahlen errechneten Temperaturprofile stimmten mit den, den Strukturzonenradien zugeordneten Temperaturen

nicht gut überein. Die Diskrepanzen werden auf Ungenauigkeiten bezüglich der Wärmeübergangszahlen und der Temperaturgrenzen zurückgeführt.

2. Bei den partiell geschmolzenen Prüflingen konnte eine Abhängigkeit der Wärmeübergangszahl vom Kontaktdruck indirekt nachgewiesen werden.
3. Bei den gleichen Prüflingen erwies sich die Temperaturgrenze für die Stengelkornbildung als von der Stableistung und der Bestrahlungszeit abhängig. Eine ähnliche Abhängigkeit konnte für die Temperaturgrenze des ungerichteten Kornwachstums nicht nachgewiesen werden.
4. Die Länge der beim Abkühlen entstandenen zentralen Schmelzkaverne n am oberen Stabende wurde zu 20 mm abgeschätzt. Bei höheren Stableistungen und größeren Bestrahlungszeiten verursachte die Porenwanderung eine Zunahme dieser Kavernenlänge.

Die Auswertung der He-Loop-Versuchsgruppe 2 umfaßt noch die quantitative Erfassung von Riß- und Porenvolumenverteilungen ausgesuchter Prüflingsabschnitte und deren Vergleich mit modelltheoretisch gewonnenen (über SATURN-1a [11]). Diese ist jedoch an anderer Stelle erschienen [12].

Literatur:

- [1] H. Beißwenger:
Die Auslegung und Durchführung von Brennelement-Bestrahlungs-
experimenten, Beitrag XI in KFK 700 (1967)
- [2] G. Karsten:
Neufassung des Bestrahlungsprogrammes und der Spezifikationen
von Bestrahlungsproben für FR 2-Loop-Experimente, Versuchs-
gruppe 2, Kurzzeitbestrahlungen (unveröffentlicht)
- [3] W. Otto:
Die Herstellung von Bestrahlungsproben für Loop-Experimente
in der Versuchsgruppe 2 im FR 2 (unveröffentlicht)
- [4] H. Deckers:
Sicherheitsbericht für Versuchseinrichtung für Kurzzeitbe-
strahlungen zum FR 2-Abbrand-Loop (unveröffentlicht)
- [5] H. Reiser:
Sicherheitsbericht für FR 2-Abbrand-Loop (unveröffentlicht)
- [6] A. Gerken, A. Wickenhäuser:
Programm BESTAW, ein Fortran-Programm für die IBM-360 zur
thermischen Bestrahlungsauswertung von oxidischen Brennstäben
(unveröffentlicht)
- [7] H. Beißwenger:
Berechnung der Stableistung, des Wärmeleitintegrals und des
Temperaturverlaufes bei zylindrischen Brennstoffproben mit
Folgerungen für Bestrahlungsversuche (unveröffentlicht)
- [8] G. Karsten, H. Kämpf, A. Gerken with Contribution of M. Guyette:
Theoretical and Computer Analysis on the Behaviour of Fast
Reactor Fuel Pins and Related Parts of the Core under Operational
Conditions, KFK 878 (1968)
- [9] H. Sari:
persönliche Mitteilung (unveröffentlicht)
- [10] D. Geithoff:
Schmelzphänomene in UO_2 -Bestrahlungsproben, KFK 980 (1969)
- [11] H. Kämpf, H. Elbel, F. Depisch:
Das Rechenprogramm SATURN-la für Brennstäbe, KFK 1575 (1972)
- [12] H. Hoffmann:
Analyse der Leervolumenverteilung in Oxid-Brennstäben hoher
Stableistung, KFK 1863 (1973)

A n h a n g I

Tablettenlisten, Tabellen I/1 bis I/9

Tabelle I/1 Tablettensäulen der Prüflinge L 1, L lx und L lz

Prüfling	L 1		L lx		L lz	
Tablettendurchmesser (mm)	9,900 + 0,002 - 0,006		9,90 + 0,002 - 0,006		9,90 + 0,002 - 0,006	
Säulenlänge +) (mm)	140,9		140,5		140,5	
Säulengewicht (g)	110,9		110,0		110,9	
Solldichte (% th.D.)	93,0		93,0		93,0	
mittlere Dichte (% th.D.)	93,43		92,77		93,2	
Schmierdichte (% th.D.)	91,46		90,85		91,2	
Einzeltabletten Nr.	Tabl.- Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)	Tabl.- Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)	Tabl.- Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)
10	13,97	93,5	13,97	92,3	14,02	92,5
9	14,12	93,5	13,88	92,9	14,07	94,0
8	14,25	93,8	14,01	92,3	14,17	92,7
7	14,00	93,5	14,30	93,3	14,06	92,8
6	14,08	93,6	13,89	93,2	14,08	94,6
5	14,16	93,1	14,20	92,1	14,15	92,4
4	13,94	93,0	14,14	91,9	14,04	93,2
3	14,01	93,7	14,40	93,6	13,93	93,0
2	13,98	93,0	13,70	92,9	14,08	93,0
1	14,21	93,6	13,91	93,2	14,25	93,8

+)
Als Summe der Tablettenhöhen

Tabelle I/2

Tablettensäulen der Prüflinge I2, I2x und I2z

Prüfling	L 2		L 2x		L 2z	
Tablettendurchmesser (mm)	9,90 + 0,002 - 0,006		9,90 + 0,002 - 0,006		9,90 + 0,002 - 0,006	
Säulenlänge ⁺) (mm)	140,7		140,5		140,7	
Säulengewicht (g)	110,7		110,4		110,5	
Solldichte (% th.D.)	93,0		93,0		93,0	
mittlere Dichte (% th.D.)	92,24		93,15		93,09	
Schmierdichte (% th.D.)	91,22		91,077		90,96	
Einzeltabletten Nr.	Tabl.- Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)	Tabl.- Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)	Tabl.- Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)
10	14,17	93,5	14,06	93,6	14,13	93,6
9	14,08	93,3	14,10	93,5	14,13	93,3
8	13,95	93,1	14,05	93,5	14,02	93,5
7	14,20	93,7	14,08	93,2	13,87	93,4
6	14,13	93,5	14,07	93,5	14,05	93,6
5	13,95	93,5	13,96	92,3	14,08	92,2
4	13,95	93,2	14,04	93,3	13,97	92,3
3	13,93	93,2	14,08	94,0	14,03	92,4
2	14,02	92,4	13,87	93,0	14,35	93,5
1	14,20	93,2	14,02	91,6	13,97	93,1

⁺) Als Summe der Tablettenhöhen

Tabelle I/3 Tablettensäulen der Prüflinge L 3 bis L 5

Prüfling	L 3 ⁺)		L 4		L 5	
Tablettendurchmesser (mm)	9,90 + 0,002 - 0,006		9,90 + 0,006 - 0,003		9,90 + 0,006 - 0,003	
Säulenlänge ⁺⁺⁾ (mm)	140,5		139,9		139,5	
Säulengewicht (g)	108,2		104,2		104,6	
Solldichte (% th.D.)	93,0		88,0		88,0	
mittlere Dichte (% th.D.)	92,72		88,42		89,04	
Schmierdichte (% th.D.)	90,91		86,75		87,48	
Einzeltabletten Nr.	Tabl.- Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)	Tabl.- Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)	Tabl.- Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)
10	13,90	92,8	14,00	87,9	13,89	87,8
9	14,05	92,3	13,97	89,2	13,89	89,7
8	13,89	93,1	13,88	88,3	13,90	89,8
7	14,02	92,0	13,93	89,7	13,88	88,4
6	14,07	92,3	14,16	86,2	13,83	88,7
5	13,99	92,8	13,96	87,8	14,02	89,5
4	13,96	93,2	13,94	88,9	13,88	89,9
3	14,17	94,0	13,90	88,4	13,79	87,9
2	14,14	92,3	13,92	88,8	13,98	89,2
1	14,09	92,4	14,03	89,0	14,19	89,4

+) Für Messung der Zentraltemperatur, Tabl. Nr. 1 bis 4 zentrisch durchbohrt

++) Als Summe der Tablettenhöhen

Tabelle I/4 Tablettensäulen der Prüflinge L 6 bis L 8

Prüfling	L 6		L 7		L 8	
Tablettendurchmesser (mm)	9,90 + 0,006 - 0,003		9,90 + 0,006 - 0,003		9,90 + 0,006 - 0,003	
Säulenlänge ^{+) (mm)}	140,1		139,6		140,3	
Säulengewicht (g)	105,0		104,0		104,5	
Solldichte (% th.D.)	88,0		88,0		88,0	
mittlere Dichte (% th.D.)	88,89		88,45		88,34	
Schmierdichte (% th.D.)	87,31		86,90		86,70	
Einzeltabletten Nr.	Tabl.- Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)	Tabl.- Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)	Tabl.- Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)
10	13,93	89,7	14,01	88,6	14,07	88,8
9	13,94	88,9	13,86	88,5	14,01	86,2
8	14,03	88,4	13,95	88,7	14,10	87,1
7	14,11	87,6	14,07	87,8	13,83	88,0
6	13,96	89,4	14,15	86,2	14,02	89,3
5	13,95	89,7	13,77	87,9	14,00	89,8
4	14,07	87,9	13,87	90,0	14,06	88,7
3	14,01	87,8	13,92	88,6	14,03	88,4
2	13,95	89,8	13,93	88,7	13,94	88,8
1	13,96	89,7	13,97	89,5	14,04	88,3

^{+) Als Summe der Tablettenhöhen}

Tabelle I/5 Tablettensäulen der Prüflinge L 9 bis L 11

Prüfling	L 9		L 10		L 11	
Tablettendurchmesser (mm)	9,90 + 0,006 - 0,003		9,90 + 0,006 - 0,003		9,90 + 0,006 - 0,003	
Säulenlänge ^{+) (mm)}	140,2		140,2		140,4	
Säulengewicht (g)	104,6		104,2		105,5	
Solldichte (% th.D.)	88,0		88,0		88,0	
mittlere Dichte (% th.D.)	88,45		88,16		89,13	
Schmierdichte (% th.D.)	86,50		86,53		87,57	
Einzeltabletten Nr.	Tabl.- Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)	Tabl.- Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)	Tabl.- Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)
10	14,04	89,7	14,01	88,2	13,95	89,2
9	14,10	89,2	14,07	88,3	14,06	89,7
8	13,94	89,1	14,14	87,4	14,02	88,5
7	14,20	90,0	13,91	88,7	13,96	89,7
6	13,99	89,7	13,91	88,5	14,01	89,1
5	13,83	89,4	14,17	87,1	14,05	89,4
4	13,98	86,8	13,88	87,4	14,12	89,4
3	13,82	86,4	13,84	89,6	14,09	88,8
2	14,08	86,4	14,03	88,0	13,99	88,7
1	14,03	87,9	14,05	88,4	13,99	88,8

^{+) Als Summe der Tablettenhöhen}

Tabelle I/6 Tablettensäulen der Prüflinge L 12 bis L 16

Prüfling	L 12		L 13 ⁺)		L 14		L 15		L 16	
Tablettendurchmesser (mm)	9,90 + 0,006 - 0,003		9,90 + 0,006 - 0,003		9,90 + 0,001 - 0,007		9,90 + 0,001 - 0,007		9,90 + 0,001 - 0,007	
Säulenlänge ⁺⁺⁾ (mm)	140,3		140,0		139,6		139,8		139,9	
Säulengewicht (g)	104,5		103,2		105,5		105,5		105,8	
Solldichte (% th.D.)	88,0		88,0		93,0		93,0		93,0	
mittlere Dichte (% th.D.)	88,36		88,69		93,85		93,75		93,89	
Schmierdichte (% th.D.)	86,78		86,99		92,11		92,11		92,24	
Einzeltabletten Nr.	Tabl.- Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)	Tabl.- Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)	Tabl.- Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)	Tabl.- Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)	Tabl.- Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)
10	13,98	88,1	14,03	88,4	13,99	93,8	13,93	93,5	13,92	94,0
9	14,12	87,1	14,00	88,2	13,93	94,1	13,94	94,0	13,93	94,0
8	14,12	88,9	14,04	88,4	13,91	94,0	13,91	93,3	13,95	94,2
7	13,94	88,8	13,89	88,5	13,90	94,0	14,08	93,1	14,02	93,7
6	13,91	88,0	14,14	88,6	13,91	94,0	13,89	94,1	14,00	94,0
5	13,95	89,2	13,96	88,9	13,90	94,1	13,96	93,8	13,93	93,7
4	13,96	88,4	13,93	88,9	13,91	93,2	14,01	94,1	13,89	94,0
3	14,04	87,5	13,79	90,0	13,95	93,5	14,00	93,7	13,92	93,8
2	13,97	89,1	14,01	88,9	13,88	93,8	14,11	94,2	13,98	93,5
1	14,02	88,5	13,97	88,1	14,02	94,0	13,73	93,7	14,00	94,0

⁺) Für Messung der Zentraltemperatur, Tabl. Nr. 1 bis 4 zentrisch durchbohrt
⁺⁺⁾ Als Summe der Tablettenhöhen

Tabelle I/7

Tablettensäulen der Prüflinge L 17 bis L 21

Prüfling	L 17 ⁺)		L 18		L 19		L 20		L 21	
Tablettendurchmesser (mm)	9,90 + 0,001 - 0,007		9,75 + 0,003 - 0,005		9,75 + 0,003 - 0,005		9,75 + 0,003 - 0,005		9,75 + 0,003 - 0,005	
Säulenlänge ⁺⁺⁾ (mm)	139,6		140,1		140,1		139,5		139,6	
Säulengewicht (g)	104,1		103,4		103,8		102,7		102,8	
Solldichte (% th.D.)	93,0		90,0		90,0		90,0		90,0	
mittlere Dichte (% th.D.)	93,95		90,42		90,62		90,09		90,14	
Schmierdichte (% th.D.)	92,15		86,08		86,32		85,86		85,57	
Einzeltabletten Nr.	Tabl.- Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)	Tabl.- Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)	Tabl.- Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)	Tabl.- Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)	Tabl.- Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)
10	14,02	94,2	13,99	90,6	13,966	90,4	13,80	89,7	13,97	90,2
9	13,90	94,4	13,98	90,3	13,88	90,2	13,87	90,0	13,77	90,4
8	13,86	94,2	14,00	90,6	13,97	89,9	13,95	90,2	14,04	89,5
7	13,98	94,3	14,14	88,7	13,93	90,2	13,82	90,6	13,93	90,0
6	13,93	93,5	14,00	92,0	14,05	90,7	13,97	89,7	13,85	90,0
5	13,91	93,8	14,10	90,6	13,98	90,5	13,86	90,6	13,95	89,9
4	13,92	93,6	13,70	90,0	14,10	90,3	13,99	90,1	13,94	90,4
3	13,80	94,0	13,87	90,7	13,91	91,9	14,04	89,8	13,84	91,2
2	13,90	93,7	14,05	90,8	13,95	90,7	14,04	90,3	14,18	88,2
1	13,96	93,8	13,98	89,9	14,18	91,4	14,04	89,7	13,92	91,6

+) Für Messung der Zentraltemperatur, Tabl. Nr. 1 bis 4 zentrisch durchbohrt

++) Als Summe der Tablettenhöhen

Tabelle I/8

Tablettensäulen der Prüflinge L 22 bis L 24

Prüfling	L 22 ⁺)		L 23		L 24	
Tablettendurchmesser (mm)	9,75 + 0,003 - 0,005		9,75 + 0,004 - 0,003		9,75 + 0,004 - 0,003	
Säulenlänge ⁺⁺⁾ (mm)	140,2		139,9		139,6	
Säulengewicht (g)	102,4		98,1		97,8	
Solldichte (% th.D.)	90,0		90,0		90,0	
mittlere Dichte (% th.D.)	90,71		90,07		89,94	
Schmierdichte (% th.D.)	86,28		85,50		85,60	
Einzeltabletten Nr.	Tabl.- Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)	Tabl.- Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)	Tabl.- Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)
10	13,98	90,6	13,96	90,2	13,95	90,5
9	13,93	90,8	13,90	90,2	13,96	90,3
8	14,06	89,9	13,95	90,0	13,97	89,8
7	14,20	90,2	14,08	88,6	13,96	90,5
6	13,95	91,6	13,85	90,6	13,88	90,0
5	14,07	90,3	13,94	91,5	13,98	89,9
4	14,00	91,0	13,93	90,1	13,95	89,8
3	13,90	91,9	14,00	90,0	13,84	88,6
2	14,04	90,4	13,92	90,5	13,90	90,5
1	13,92	90,4	14,06	89,0	14,00	89,5

⁺) Für Messung der Zentraltemperatur, Tabl. 1 bis 4 zentrisch durchbohrt

⁺⁺⁾ Als Summe der Tablettenhöhen

Tabelle I/9

Tablettensäulen der Prüflinge L 25 bis L 27

Prüfling	L 25		L 26		L 27 ⁺)	
Tablettendurchmesser (mm)	9,75 + 0,004 - 0,003		9,75 + 0,004 - 0,003		9,75 + 0,004 - 0,003	
Säulenlänge ⁺⁺⁾ (mm)	139,8		140,2		140,1	
Säulengewicht (g)	98,1		98,0		97,1	
Solldichte (% th.D.)	90,0		90,0		90,0	
mittlere Dichte (% th.D.)	90,14		89,88		89,94	
Schmierdichte (% th.D.)	85,71		85,51		85,28	
Einzeltabletten Nr.	Tabl.- Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)	Tabl.- Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)	Tabl.- Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)
10	13,90	90,4	13,94	88,5	13,95	90,5
9	14,18	88,4	13,90	89,5	13,96	90,3
8	13,90	90,6	14,02	89,1	13,97	89,8
7	13,95	89,8	14,00	89,5	13,96	90,5
6	13,93	90,2	14,00	89,0	13,88	90,0
5	13,93	90,4	14,00	90,3	13,98	89,9
4	14,05	89,8	13,93	90,3	13,95	89,8
3	13,85	90,5	14,07	90,2	13,84	88,6
2	13,97	90,6	13,93	90,7	13,90	90,5
1	13,97	90,7	14,13	91,5	14,00	89,5

+) Für Messung der Zentraltemperatur, Tabl. 1 bis 4 zentrisch durchbohrt
 ++) Als Summe der Tablettenhöhen

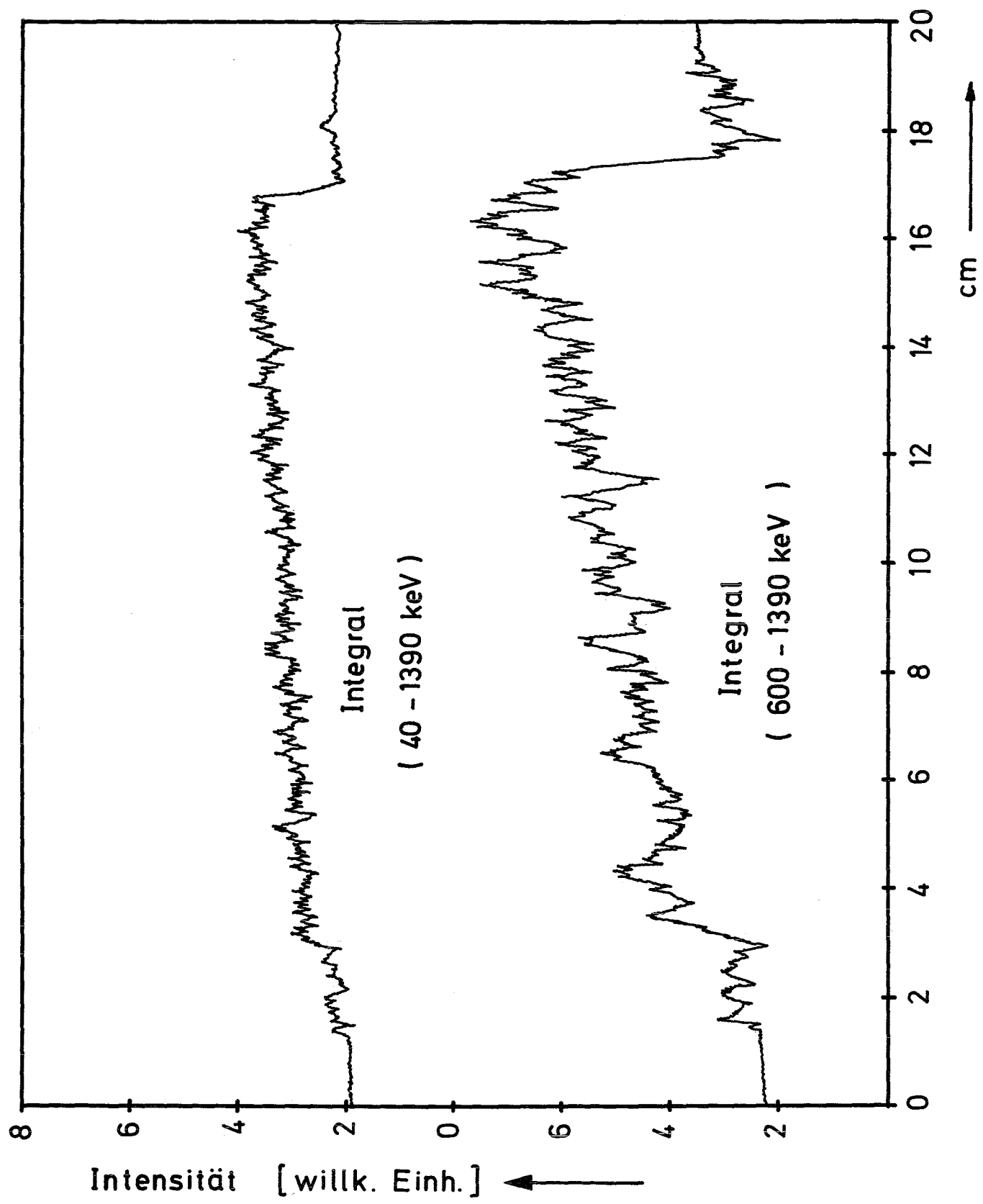
A n h a n g I I

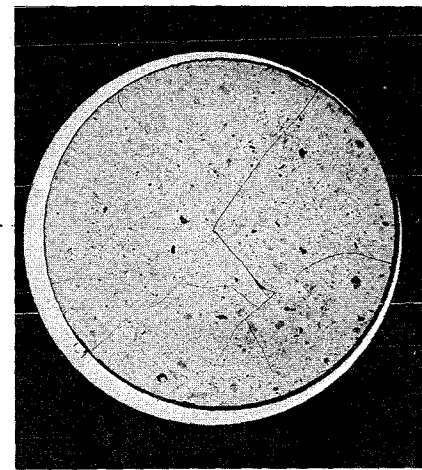
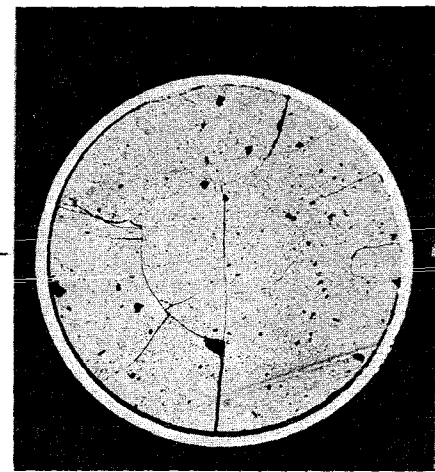
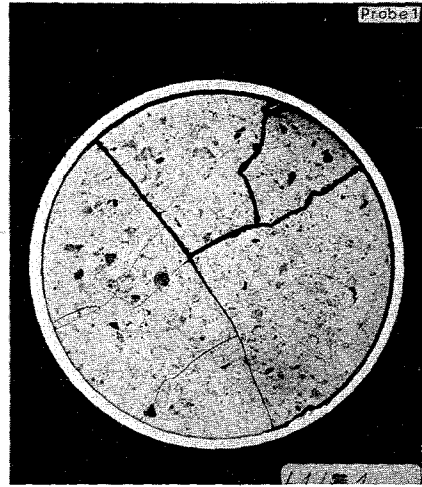
Dokumentation der Nachuntersuchung

Für jeden Stab wurde ein vierseitiges Falblatt zusammengestellt. Jedes dieser Blätter enthält, von links beginnend:

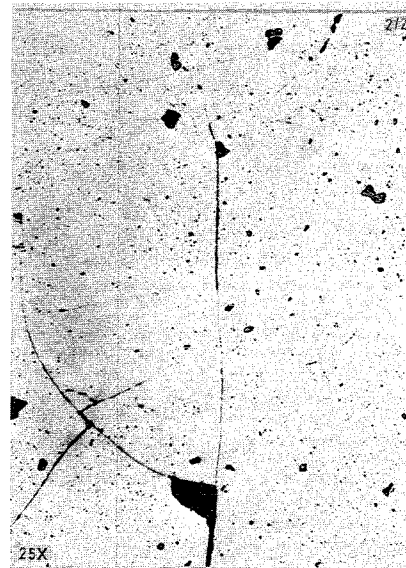
- ein bzw. zwei γ -Profile
- eine Stabzeichnung
- Längs- und Querschliffe verschiedener Stababschnitte
- die dazugehörenden $\beta\gamma$ -Autoradiografien
- Detailaufnahmen aus nebenstehenden Übersichtsaufnahmen
- eine Tabelle mit den Material- und Bestrahlungsdaten
- eine lichtoptische Aufnahme und
- eine Betatrondurchleuchtung des Prüflings

γ -Profile





2 mm



1mm

Prüfling L 1

Brennstoff :

Form : Tabletten, geschl.
 Zusammensetzung : UO_2 (7,5 % U-235)
 Tablettendichte : 93,4 % th.D.

Hülle :

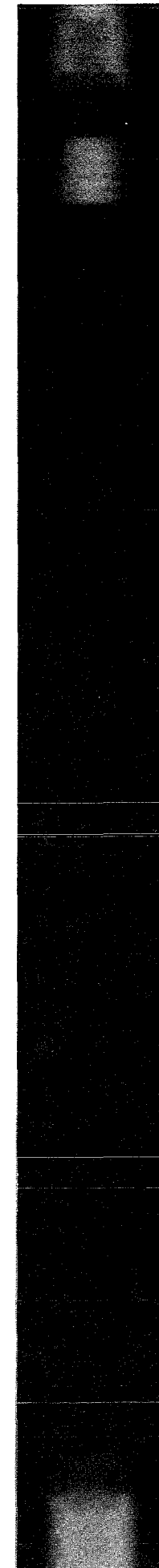
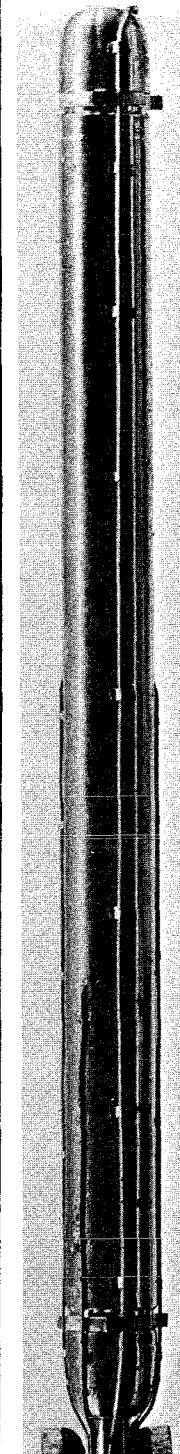
Material : X8CrNiMoVNb 16/13
 W.-Nr. 1.4988
 Außendurchmesser : 12 mm
 Wandstärke : 1,0 mm

Brennstab :

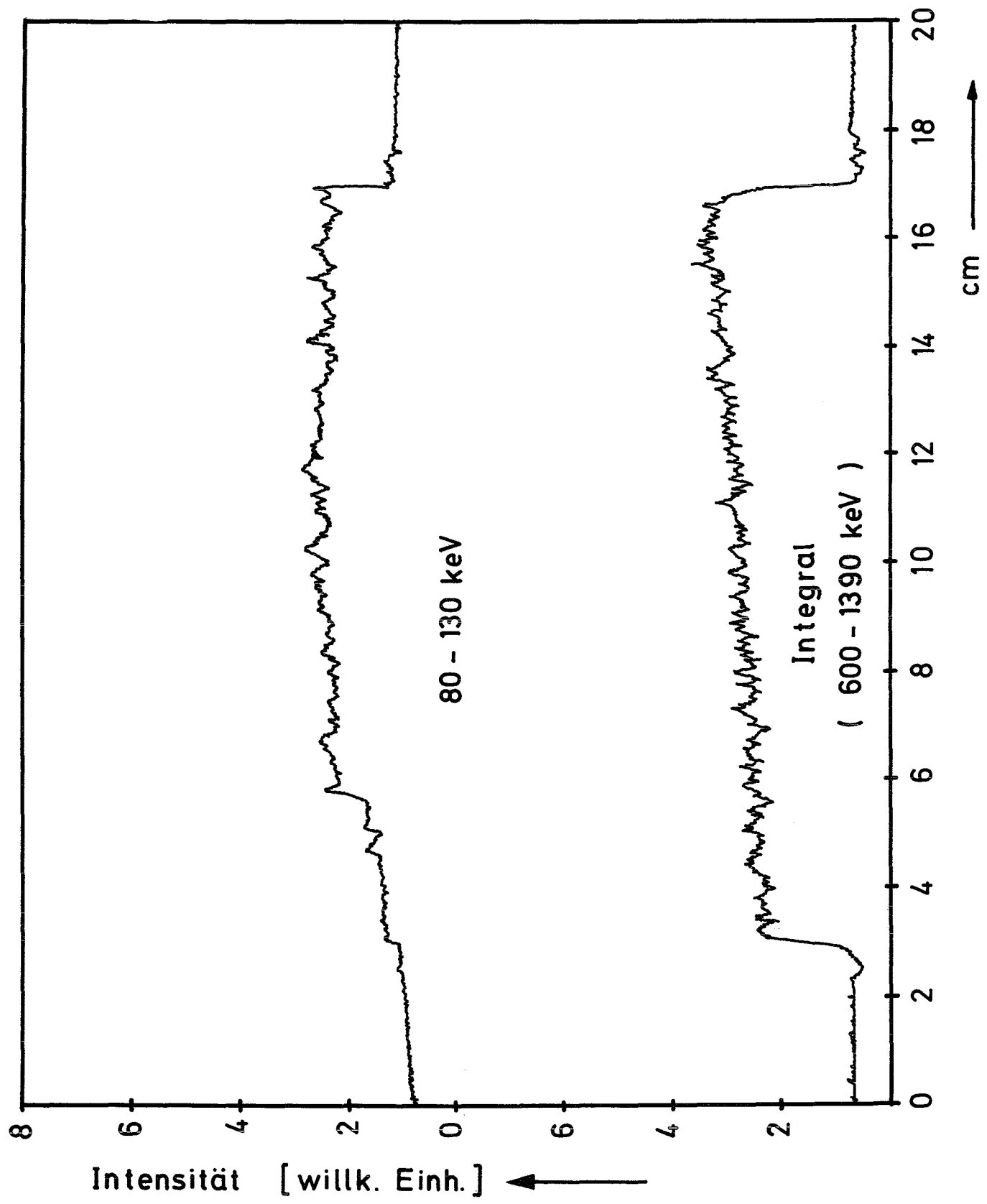
Gesamtlänge : 177,4 mm
 Länge der Brennstoffsäule : 140,9 mm
 Gewicht der " : 110,9 g
 Radiale Spaltweite : 53 μ m
 Schmierdichte : 91,5 % th.D.

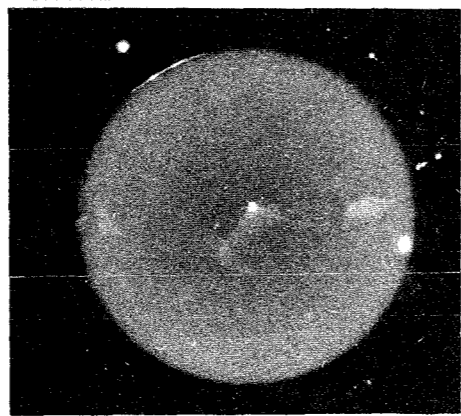
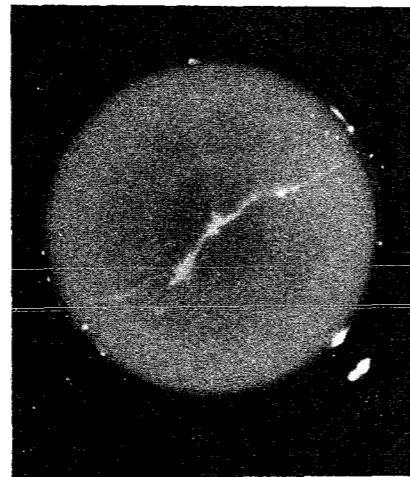
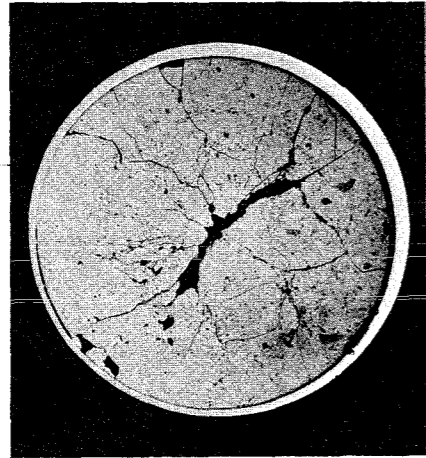
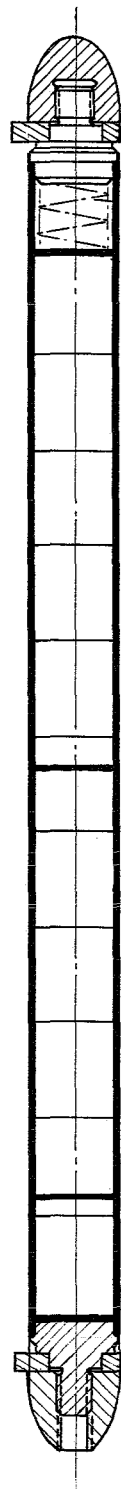
Bestrahlung :

Zeit : 18.10.1966
 Dauer : 10 min
 mittl. Stableistung : —
 mittl. Hüllaußentemp. : —

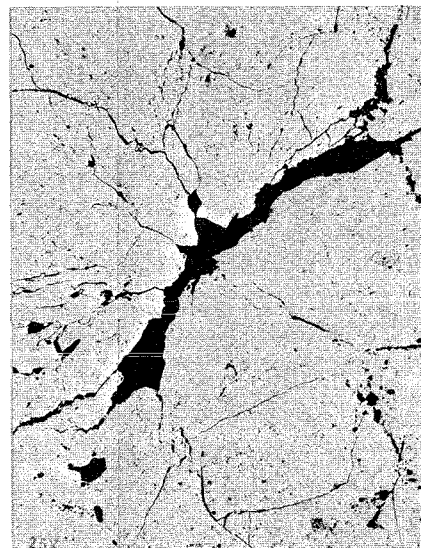


γ - Profile





2 mm



1mm

Prüfling L 1x

Brennstoff :

Form : Tabletten, geschl.
Zusammensetzung : UO_2 (7,5 % U-235)
Tablettendichte : 92,8 % th.D.

Hülle :

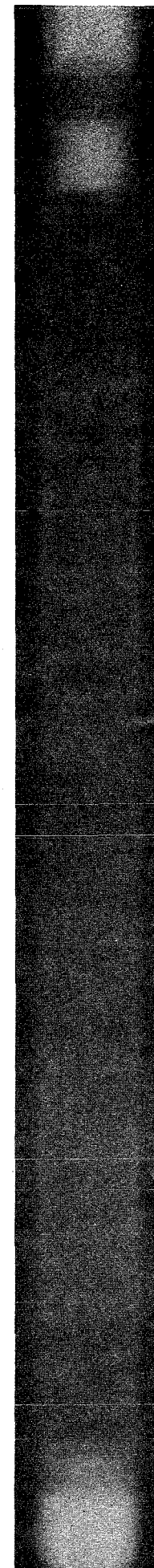
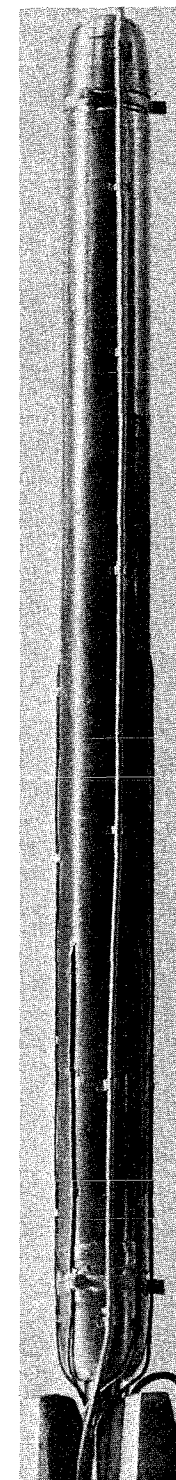
Material : X8CrNiMoVNb 16/13
W.-Nr. 1.4988
Außendurchmesser : 12 mm
Wandstärke : 1,0 mm

Brennstab :

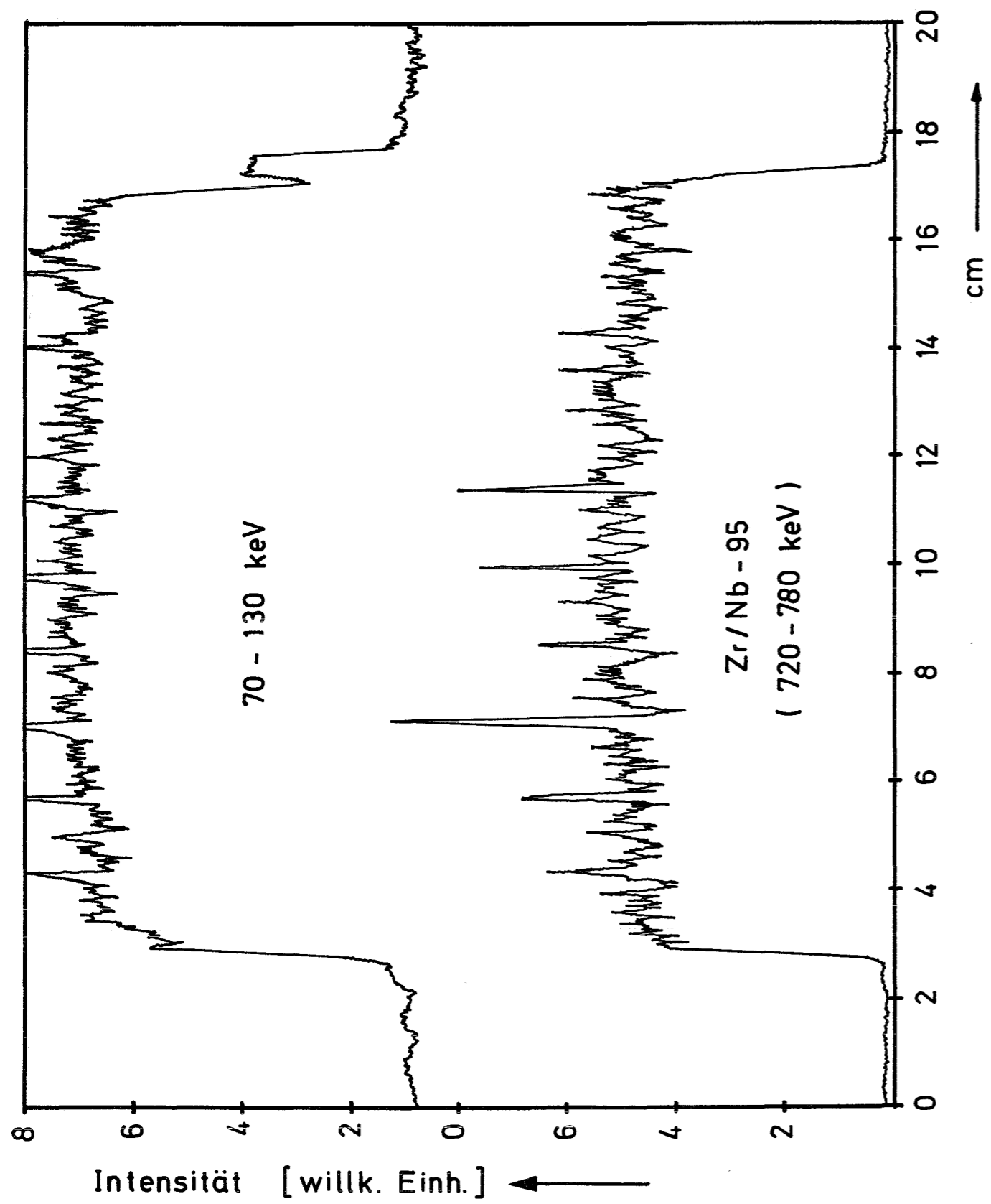
Gesamtlänge : 176,9 mm
Länge der Brennstoffsäule : 140,5 mm
Gewicht der " : 110,0 g
Radiale Spaltweite : 52 μ m
Schmierdichte : 90,9 % th.D.

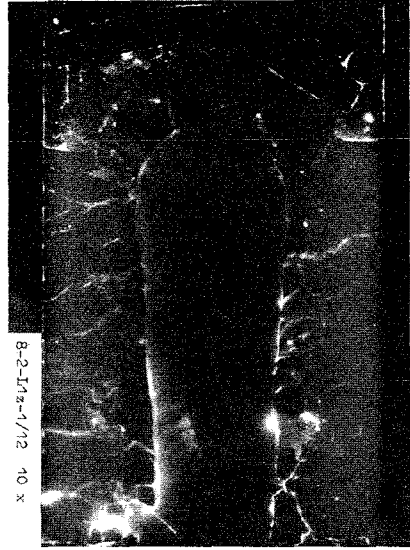
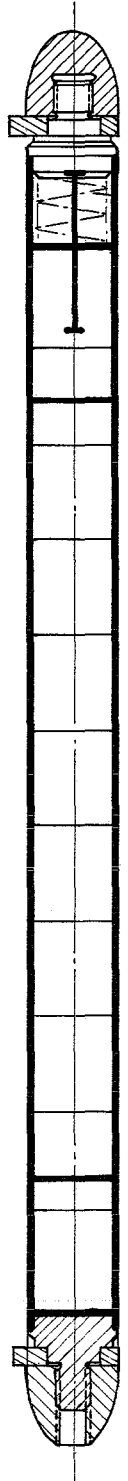
Bestrahlung :

Zeit : 23.11.66
Dauer : 9 min
mittl. Stableistung : 720 W/cm
mittl. Hüllaußentemp. : 535°C

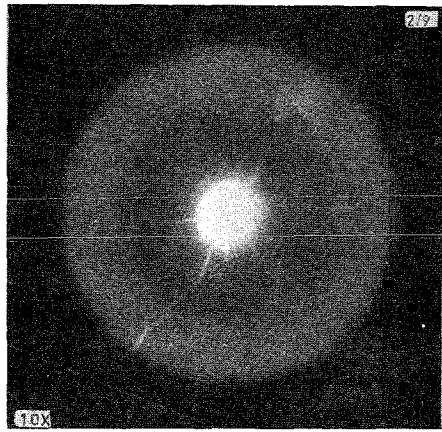
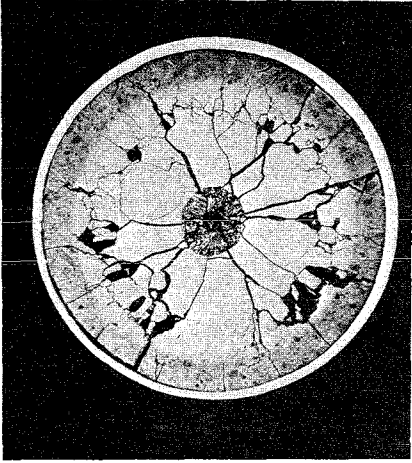


γ - Profile



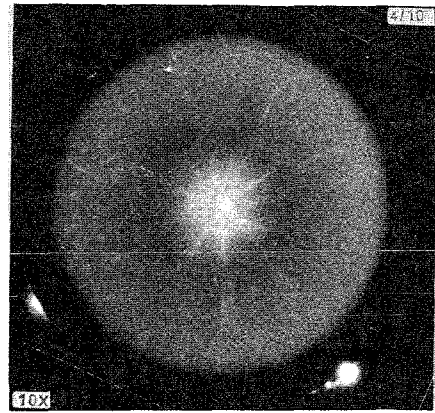
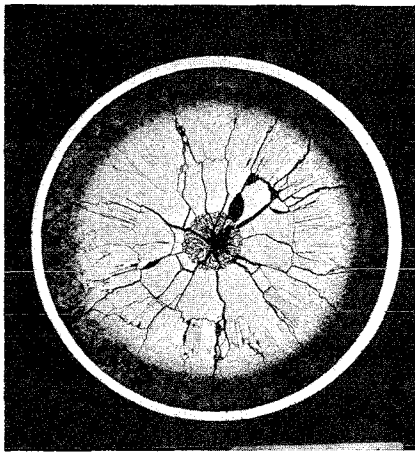


B-2-172-1/12 10x



10x

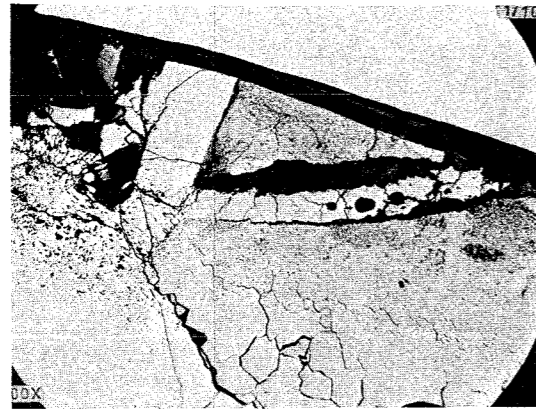
2/9



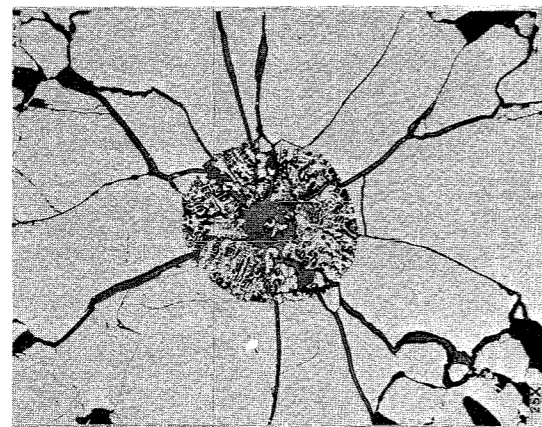
10x

4/10

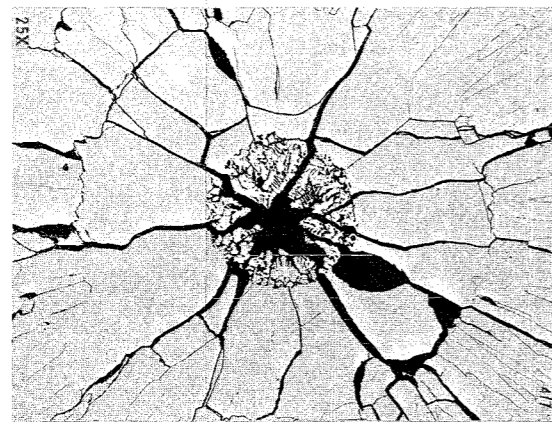
2 mm



0.2 mm



1 mm



1 mm

Prüfling L 1z

Brennstoff :

Form : Tabletten, geschl.
 Zusammensetzung : $UO_2(7,5\% U-235)$
 Tablettendichte : 93,2 % th.D.

Hülle :

Material : X8CrNiMoVNb 16/13
 W.-Nr. 1.4988
 Außendurchmesser : 12 mm
 Wandstärke : 1,0 mm

Brennstab :

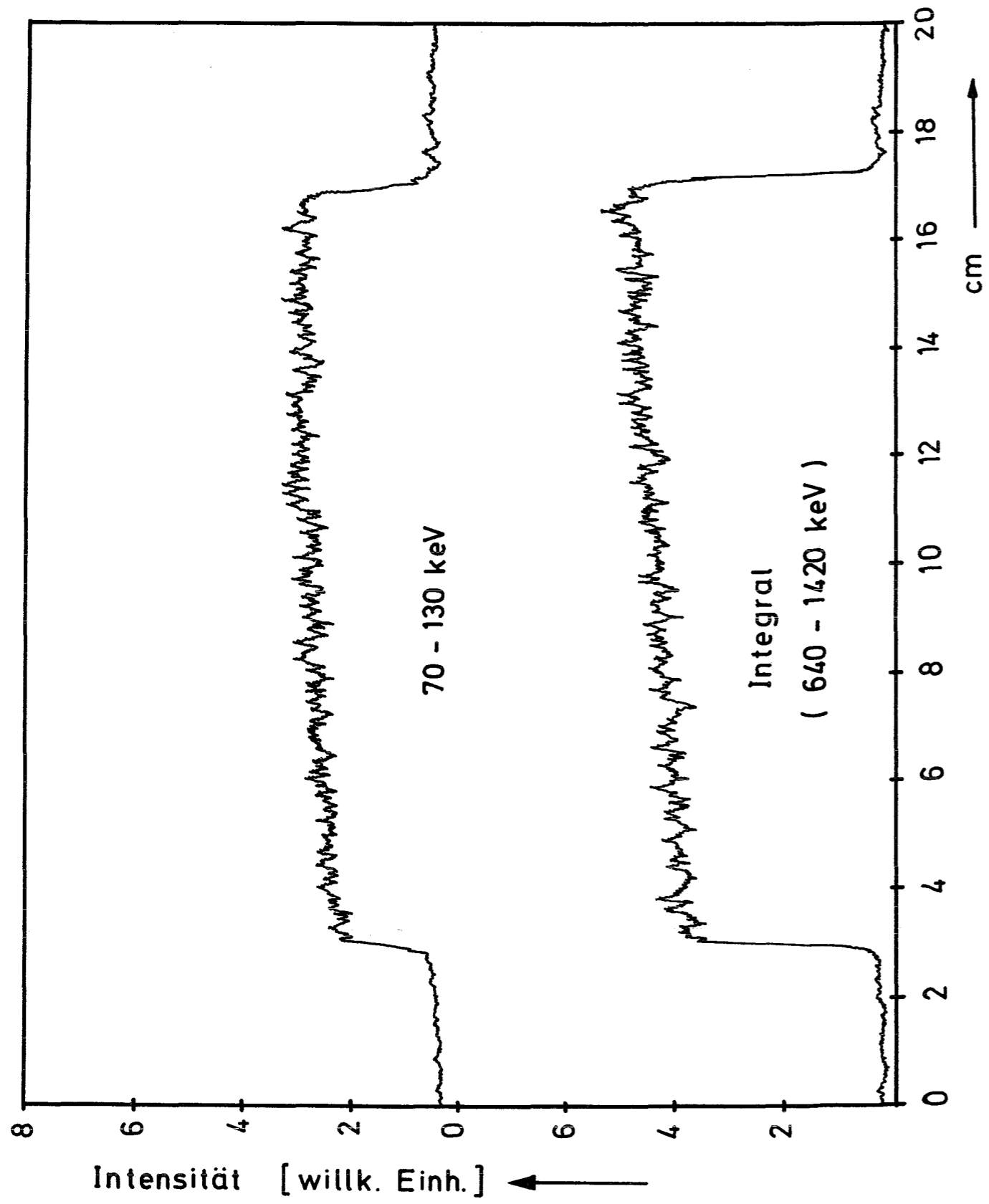
Gesamtlänge : 177,2 mm
 Länge der Brennstoffsäule : 140,5 mm
 Gewicht der " : 110,9 g
 Radiale Spaltweite : 54 μm
 Schmierdichte : 91,2 % th.D.

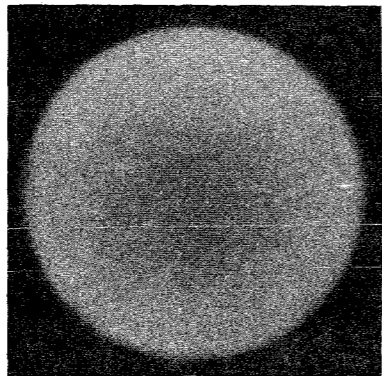
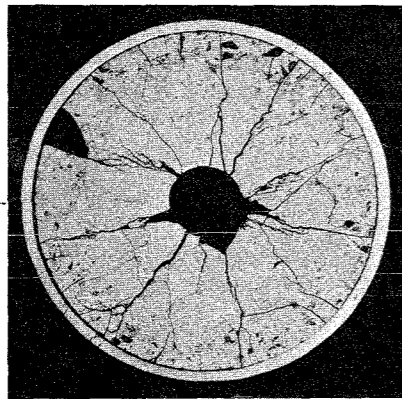
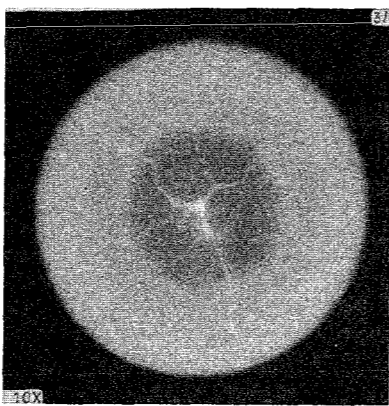
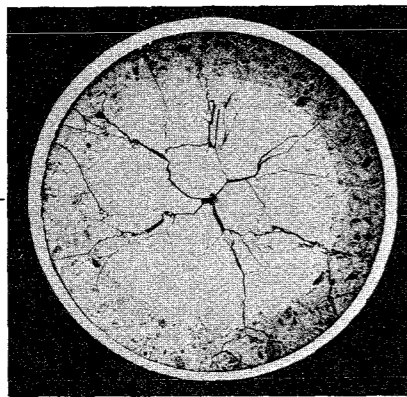
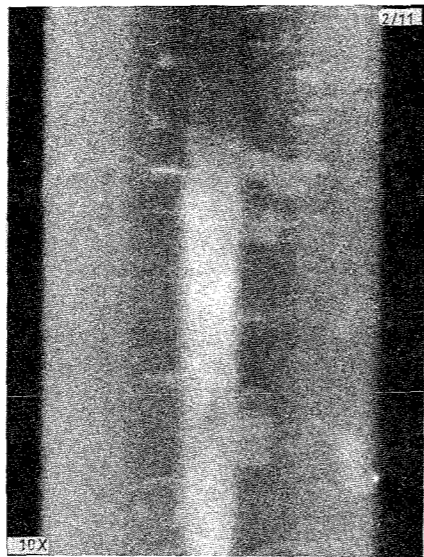
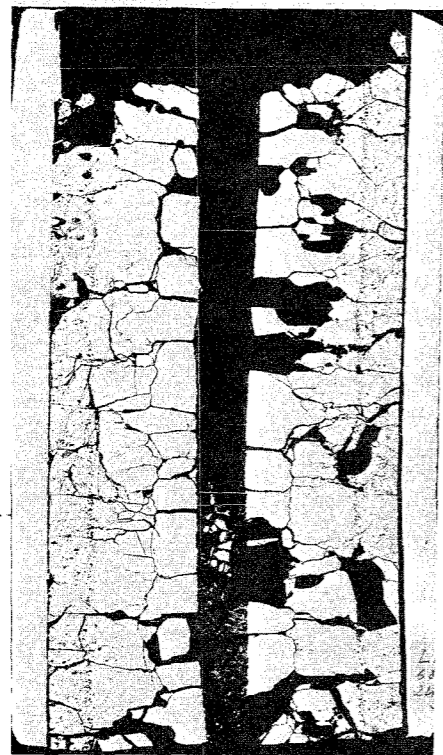
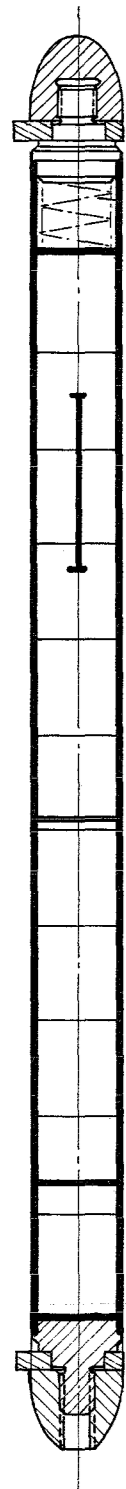
Bestrahlung :

Zeit : 9.3.67
 Dauer : 11 min
 mittl. Stableistung : 950 W/cm
 mittl. Hüllaußentemp. : 500°C

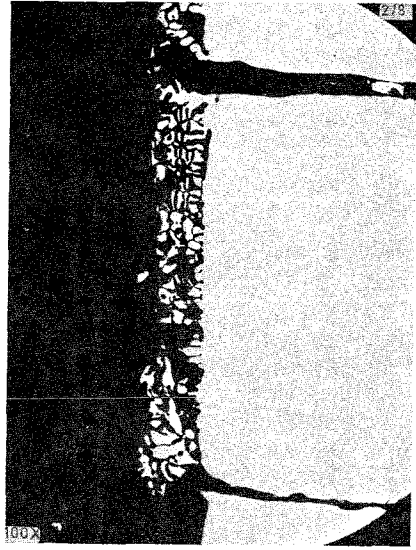


γ - Profile

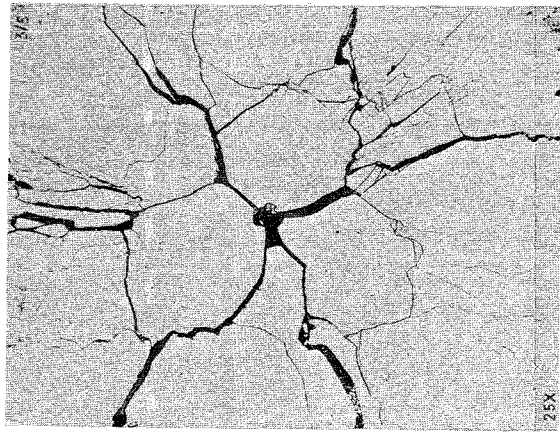




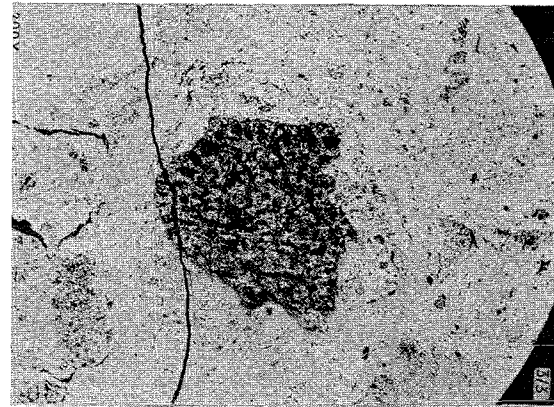
2 mm



0.2 mm



1mm



0.1 mm

Prüfling L 2

Brennstoff :

Form : Tabletten, geschl.
 Zusammensetzung : UO_2 (7,5 % U-235)
 Tablettendichte : 93,2 % th.D.

Hülle :

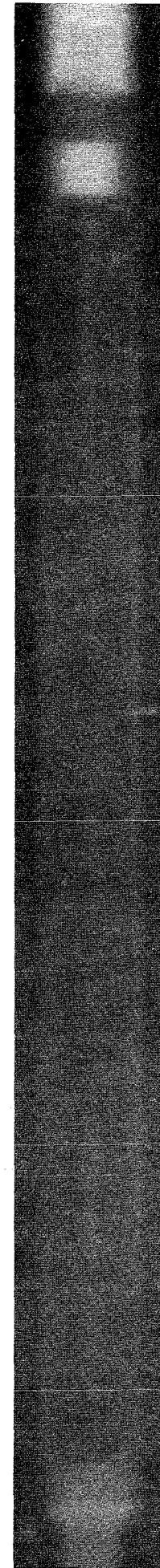
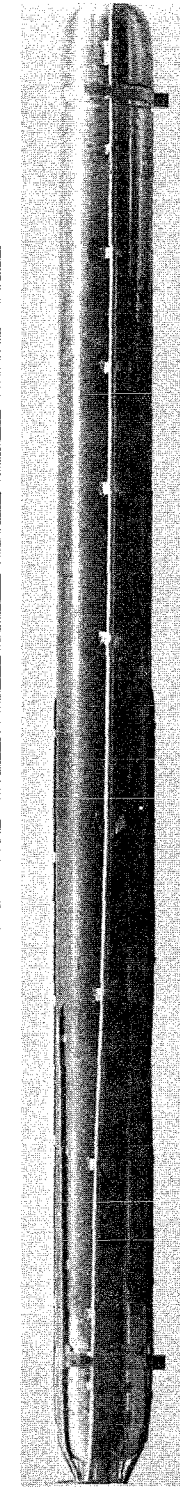
Material : X8CrNiMoVNb 16/13
 W.-Nr. 1.4988
 Außendurchmesser : 12 mm
 Wandstärke : 1,0 mm

Brennstab :

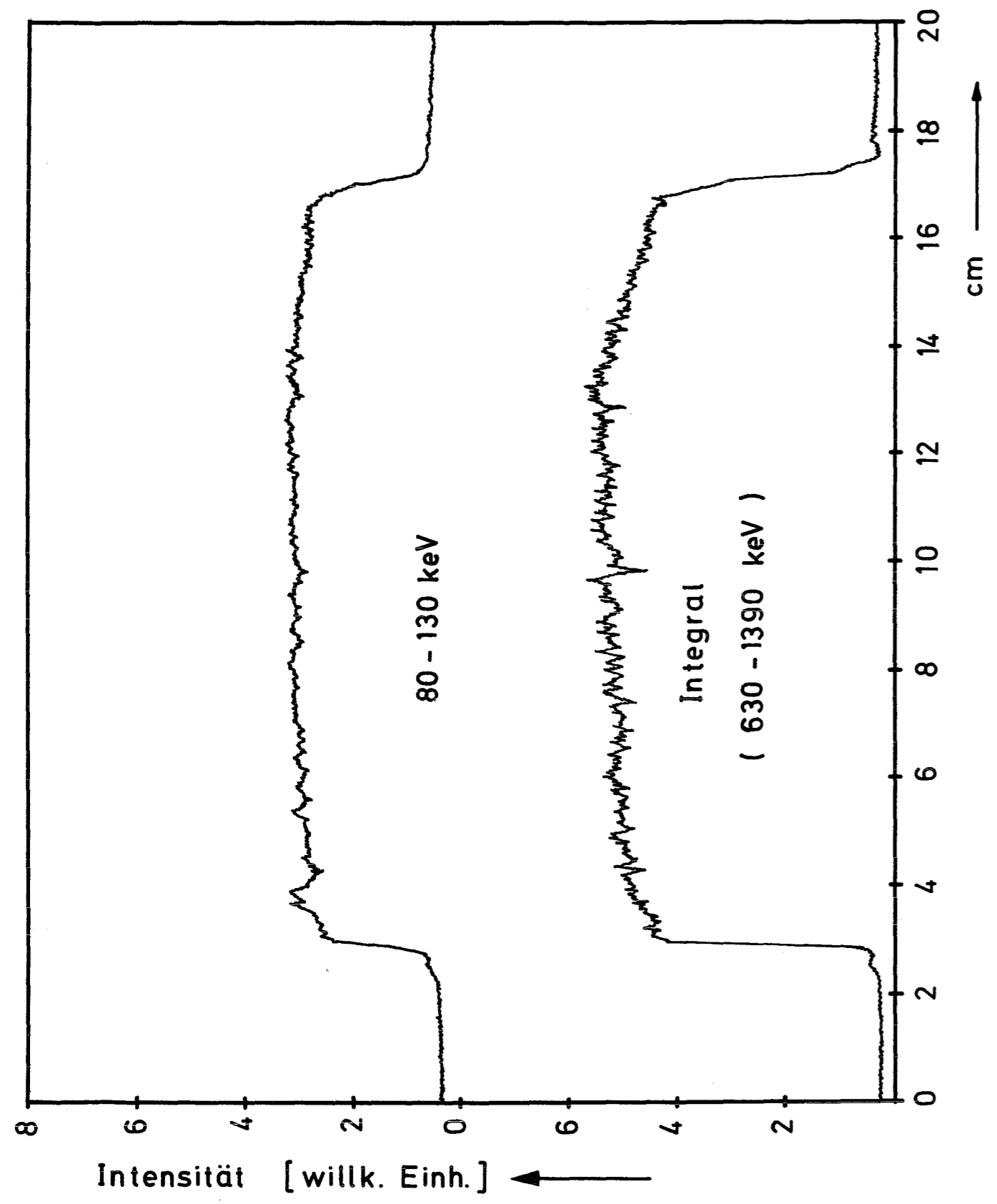
Gesamtlänge : 177,2 mm
 Länge der Brennstoffsäule : 140,7 mm
 Gewicht der " : 110,7 g
 Radiale Spaltweite : 55 μ m
 Schmierdichte : 91,2 % th.D.

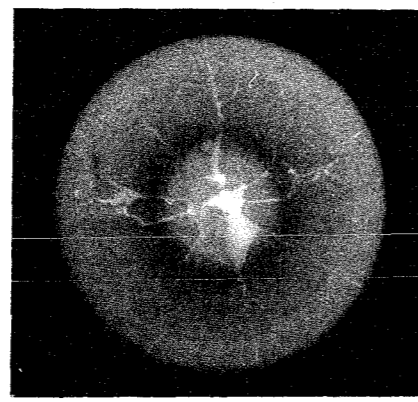
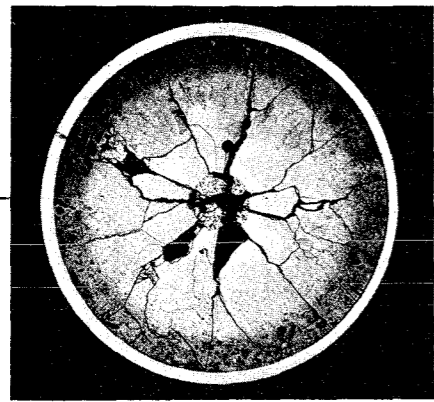
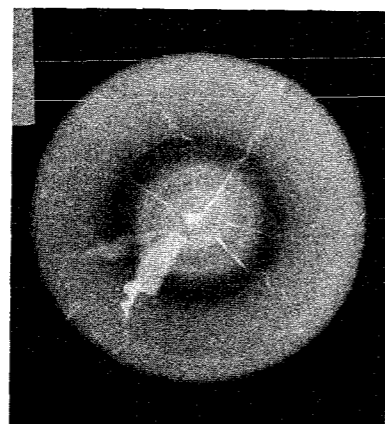
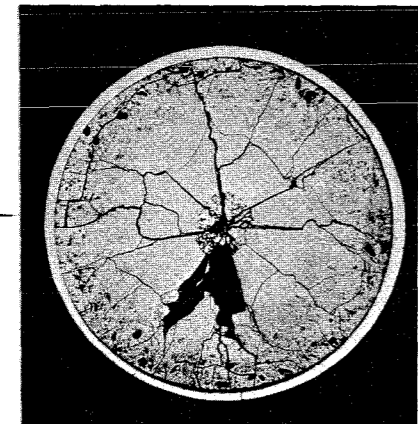
Bestrahlung :

Zeit : 22.11.66
 Dauer : 2 h 01 min
 mittl. Stableistung : 680 W/cm
 mittl. Hüllaußentemp. : 560°C



γ - Profile





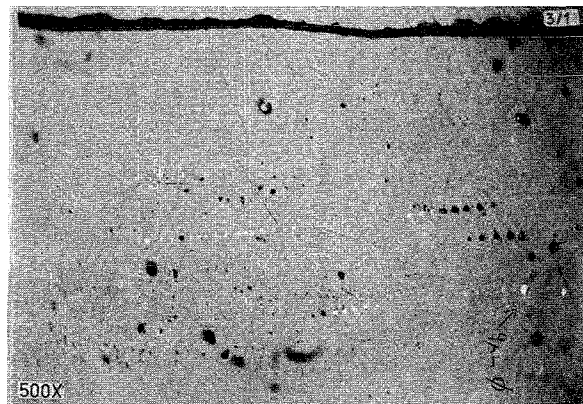
2mm



1mm



1mm



20µm



1mm

Prüfling L 2x

Brennstoff :

Form : Tabletten, geschl.

Zusammensetzung : UO_2 (7,5 % U-235)

Tablettendichte : 93,2 % th.D.

Hülle :

Material : X8CrNiMoV Nb 16/13
W.-Nr. 1.4988

Außendurchmesser : 12 mm

Wandstärke : 1,0 mm

Brennstab :

Gesamtlänge : 177,5 mm

Länge der Brennstoffsäule : 140,5 mm

Gewicht der " : 110,4 g

Radiale Spaltweite : 56 µm

Schmierdichte : 91,1 % th.D.

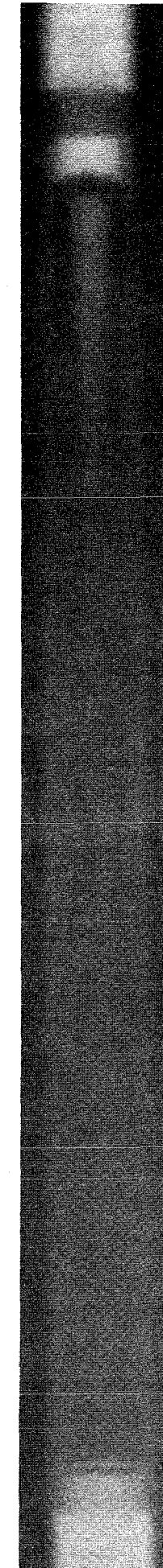
Bestrahlung :

Zeit : 17.11.66

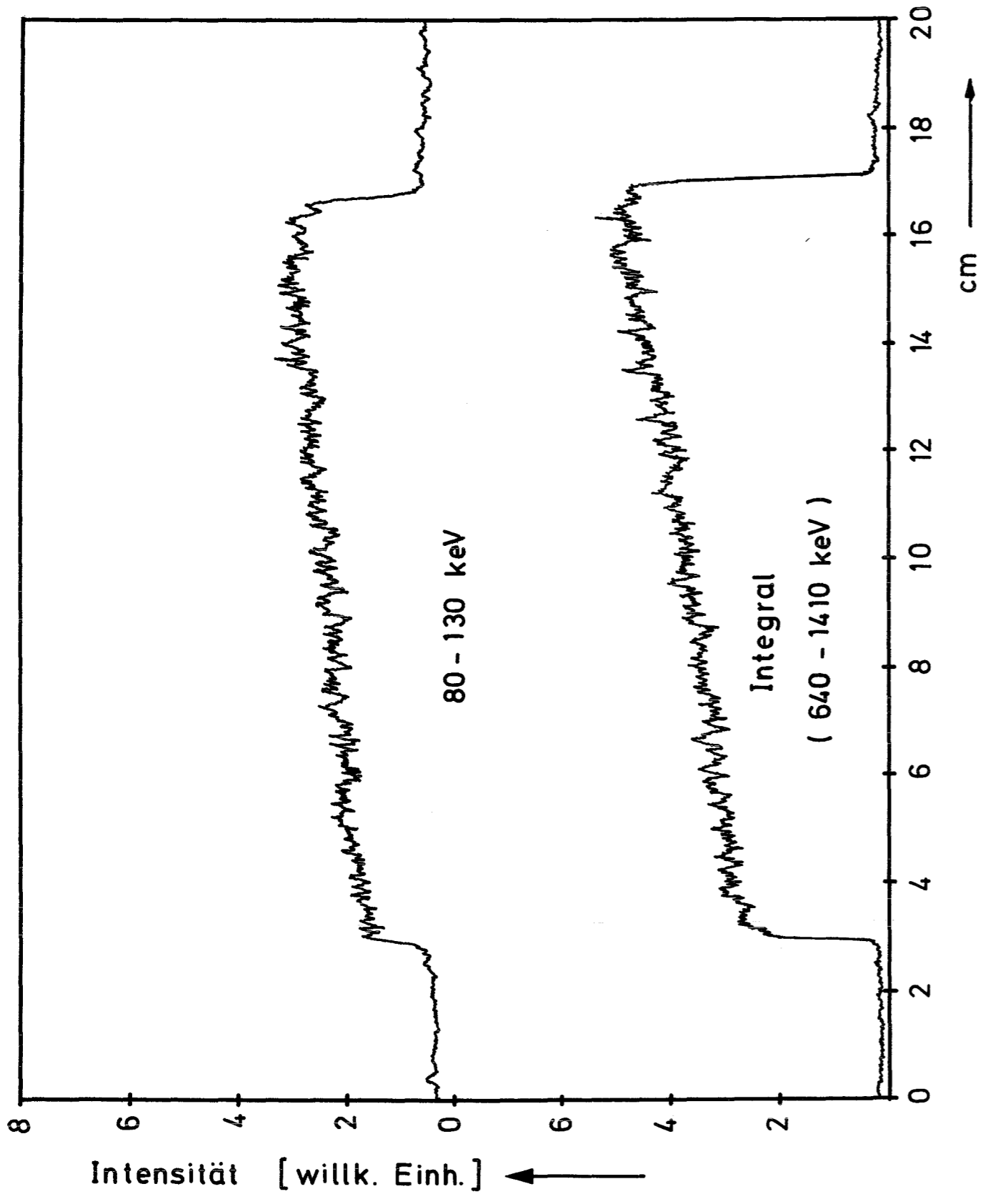
Dauer : 1 h 19 min

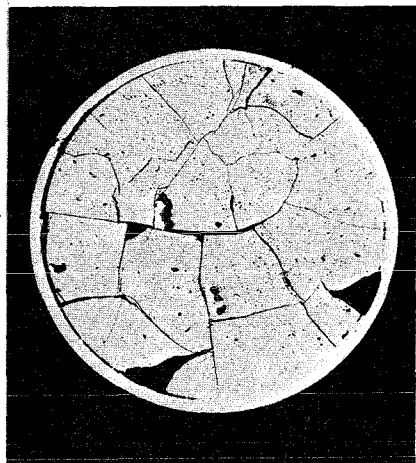
mittl. Stableistung : 940 W/cm

mittl. Hüllaußentemp. : 500°C

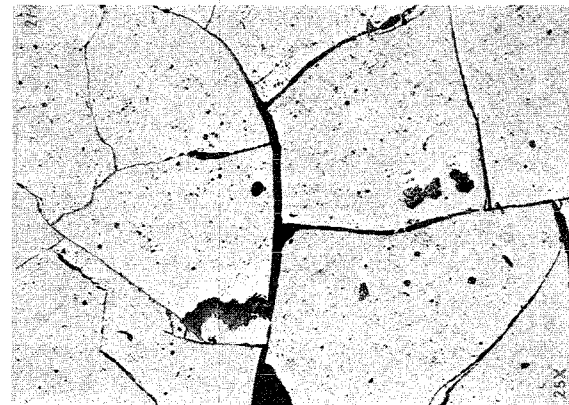


γ - Profile





2mm



1mm

Prüfling L 2z

Brennstoff :

Form : Tabletten, geschl.
Zusammensetzung : UO_2 (7,5 % U-235)
Tablettendichte : 93,1 % th.D.

Hülle :

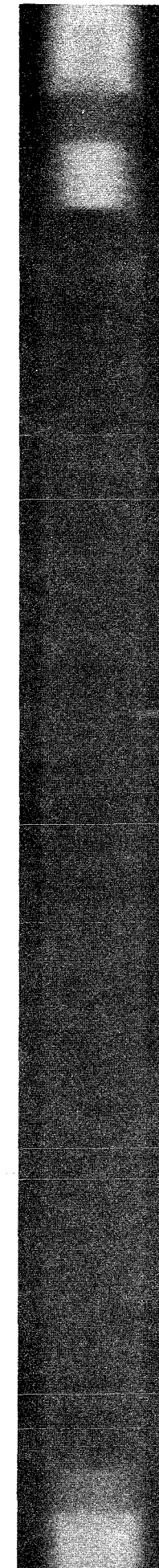
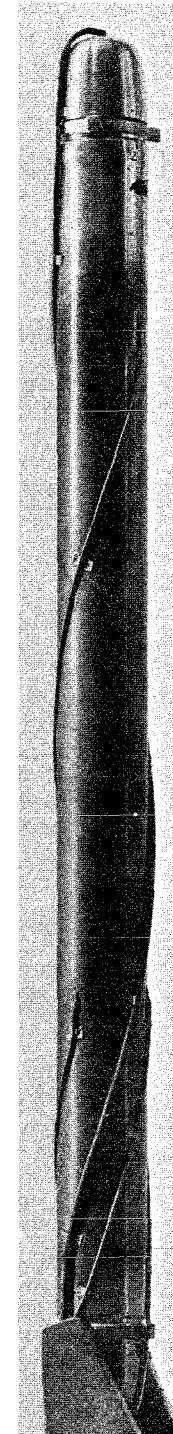
Material : X8CrNiMoVNb 16/13
W.-Nr. 1.4988
Außendurchmesser : 12 mm
Wandstärke : 1,0mm

Brennstab :

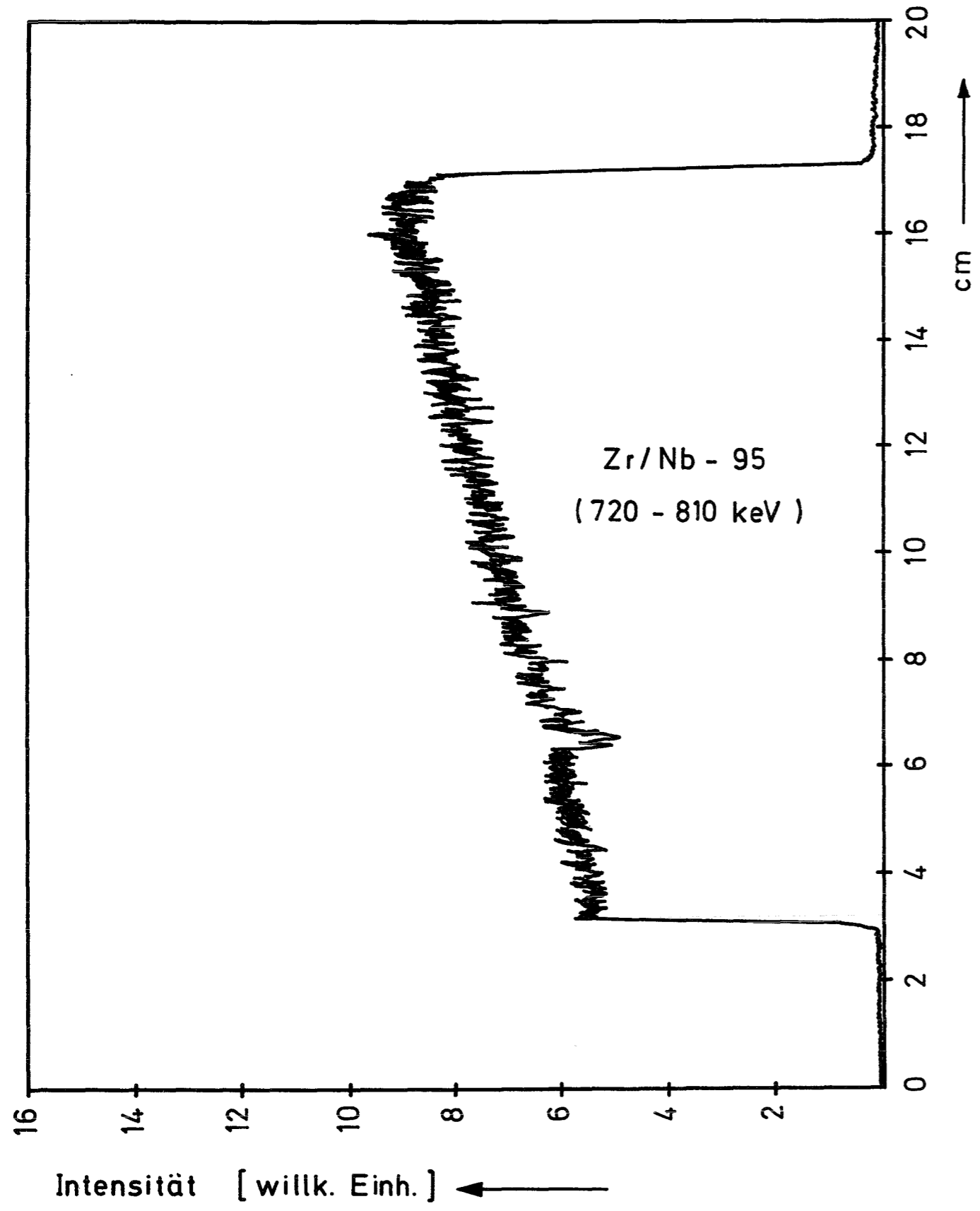
Gesamtlänge : 177,0 mm
Länge der Brennstoffsäule : 140,7 mm
Gewicht der " : 110,5 g
Radiale Spaltweite : 57 μ m
Schmierdichte : 91,0 % th.D.

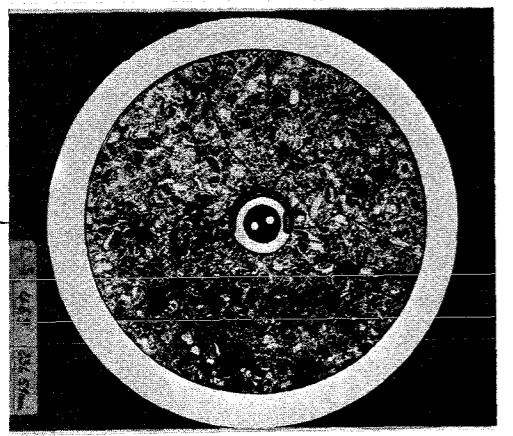
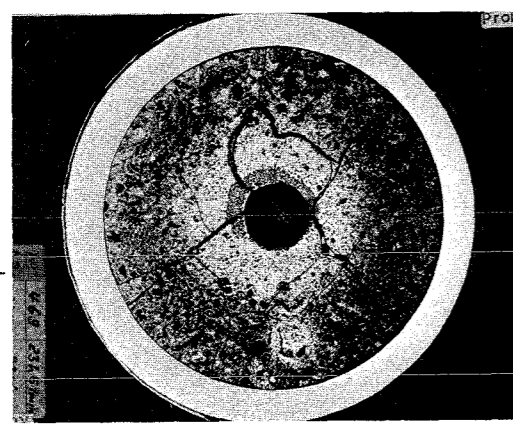
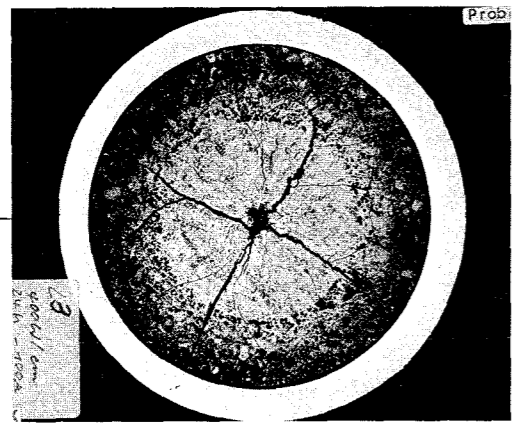
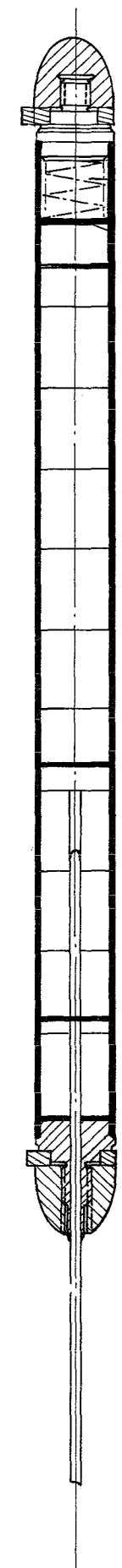
Bestrahlung :

Zeit : 6.12.66
Dauer : 2 h 02 min
mittl. Stableistung : 380 W/cm
mittl. Hüllaußentemp. : 560°C

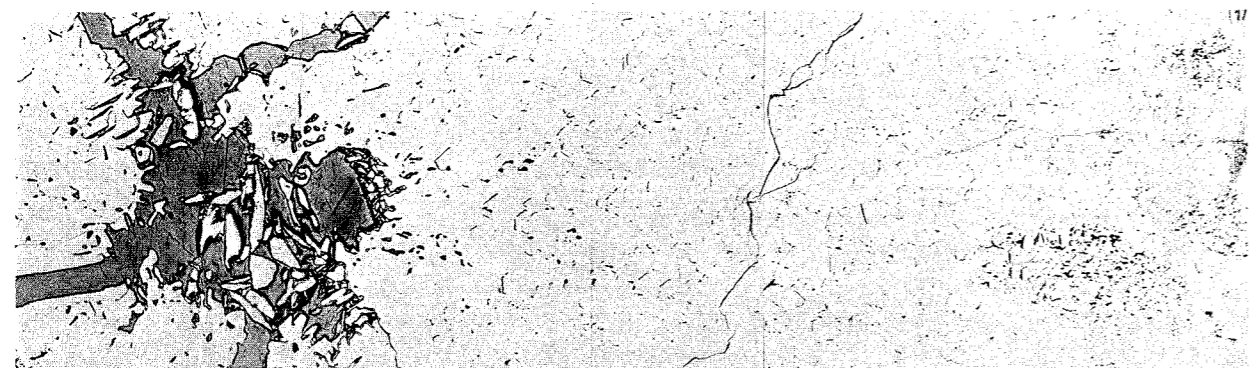


γ - Profil

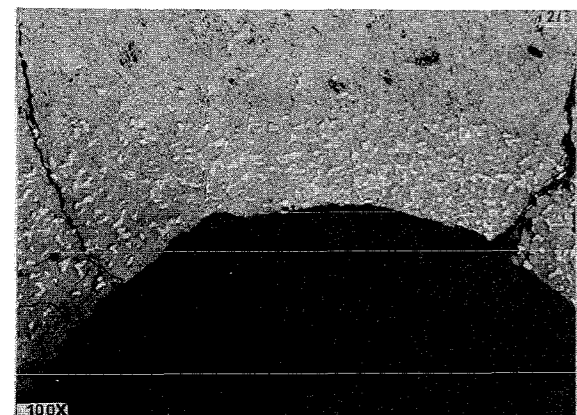




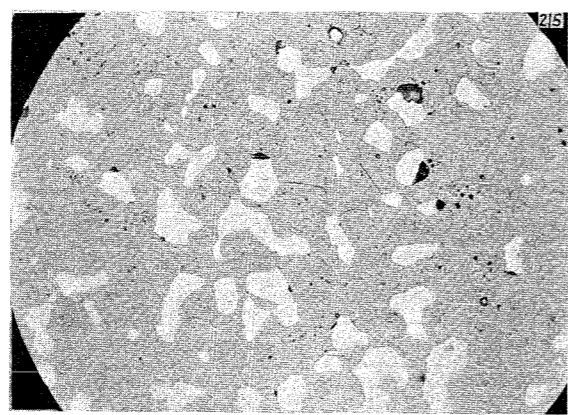
2mm



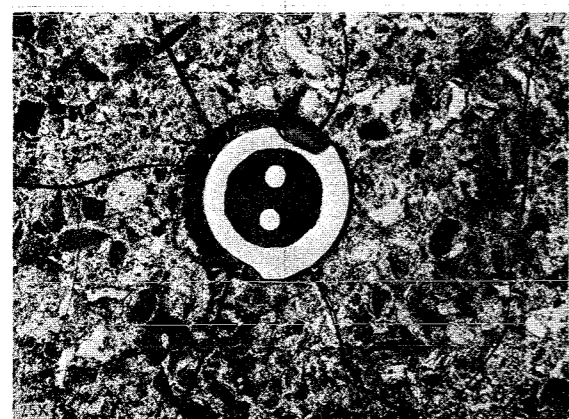
0.2 mm



0.2 mm



20 μm



1 mm

Prüfling L 3

Brennstoff :

Form : Tabletten, geschl.
4 Stck, mit Zentral-
loch +)

Zusammensetzung : UO₂ (7,5 % U-235)

Tablettendichte : 92,7 % th.D.

Hülle :

Material : X8CrNiMoVNb 16/13
W.-Nr. 1.4988

Außendurchmesser : 12 mm

Wandstärke : 1,0 mm

Brennstab :

Gesamtlänge : 182,3 mm

Länge der Brennstoffsäule : 140,5 mm

Gewicht der " : 108,2 g

Radiale Spaltweite : 49 μm

Schmierdichte : 90,9 % th.D.

Bestrahlung :

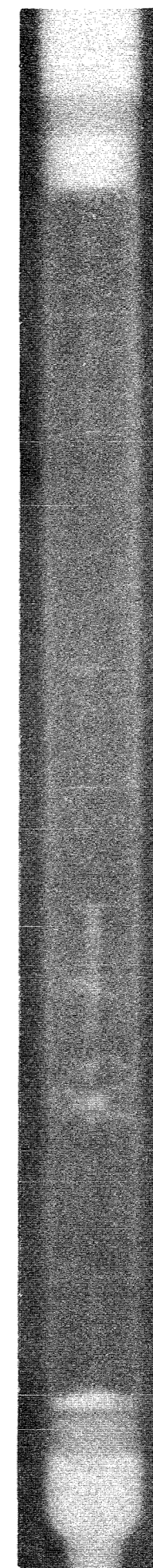
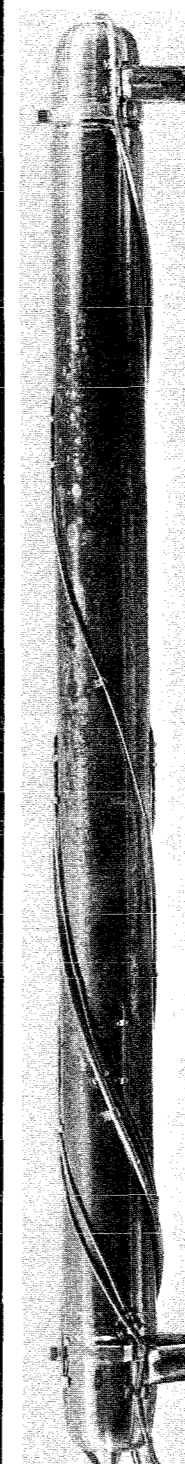
Zeit : 3.7. bis 4.7.67

Dauer : 24 h 07 min

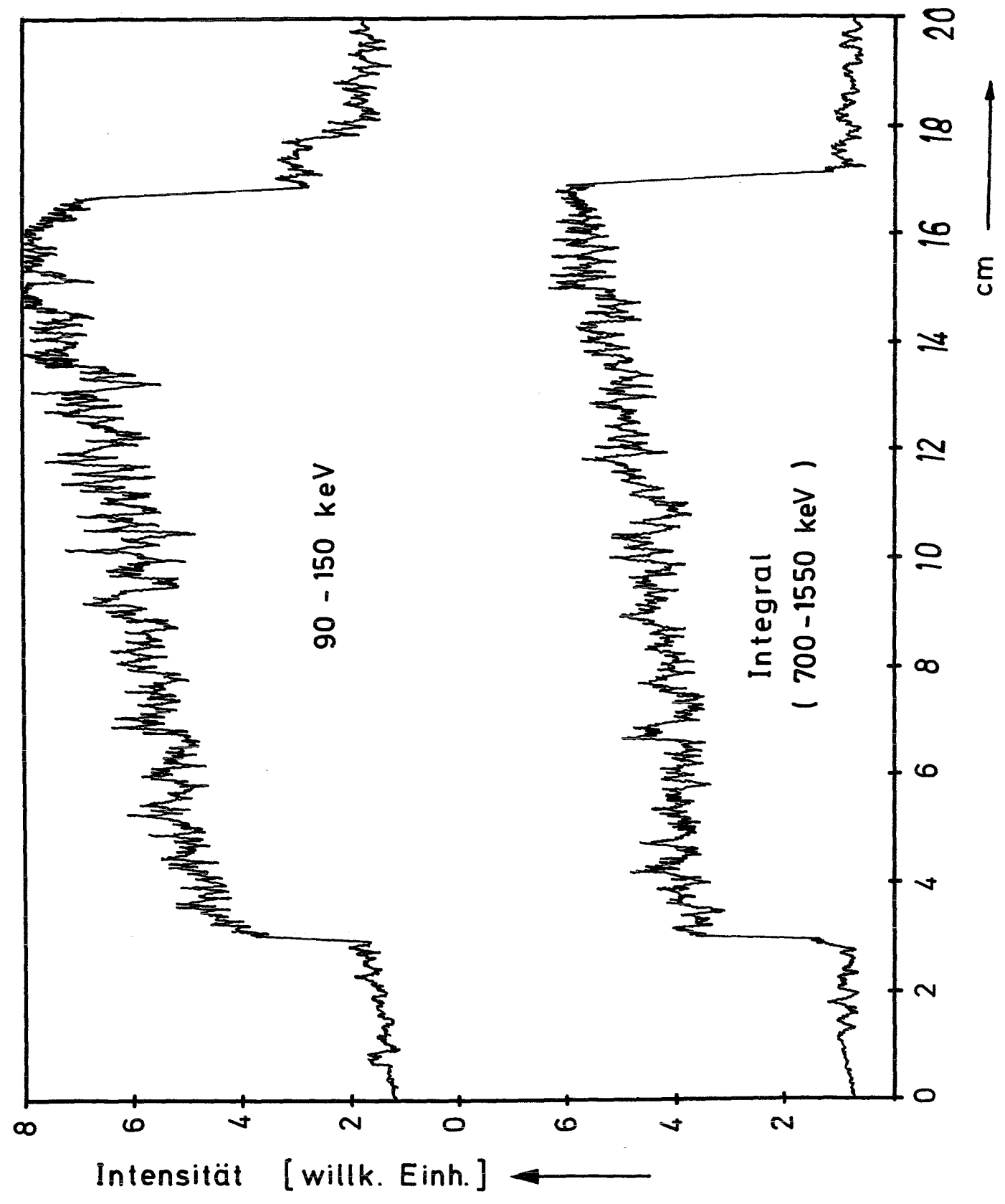
mittl. Stableistung : 470 W/cm

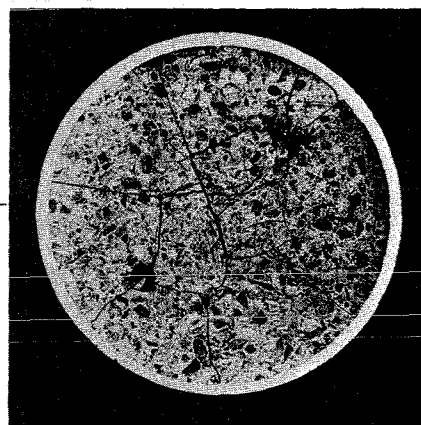
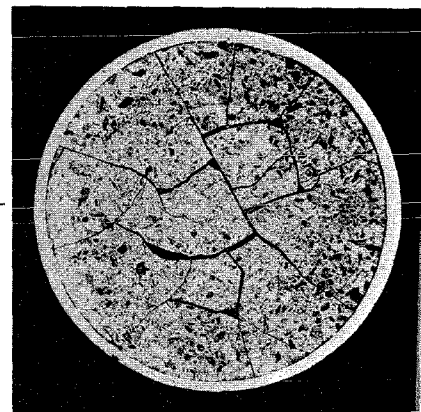
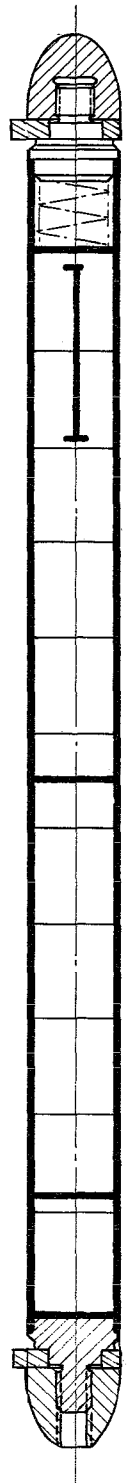
mittl. Hüllaußentemp. : 560°C

+) Zentraltemperaturmessung



γ - Profile





2mm

Prüfling L 4

Brennstoff :

Form : Tabletten, geschl.
Zusammensetzung : UO_2 (7,5 % U-235)
Tablettendichte : 88,4 % th.D.

Hülle :

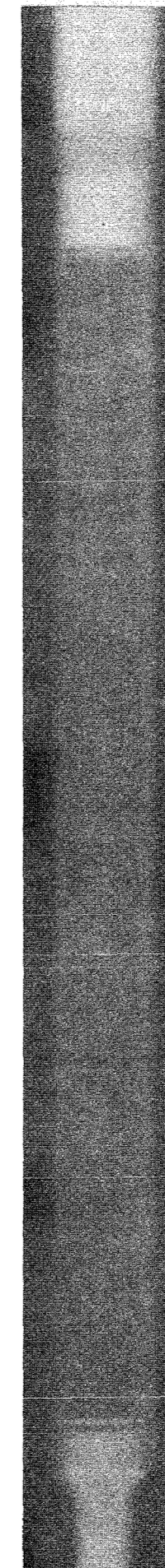
Material : X8CrNiMoVNb 16/13
W.-Nr. 1.4988
Außendurchmesser : 12 mm
Wandstärke : 1,0 mm

Brennstab :

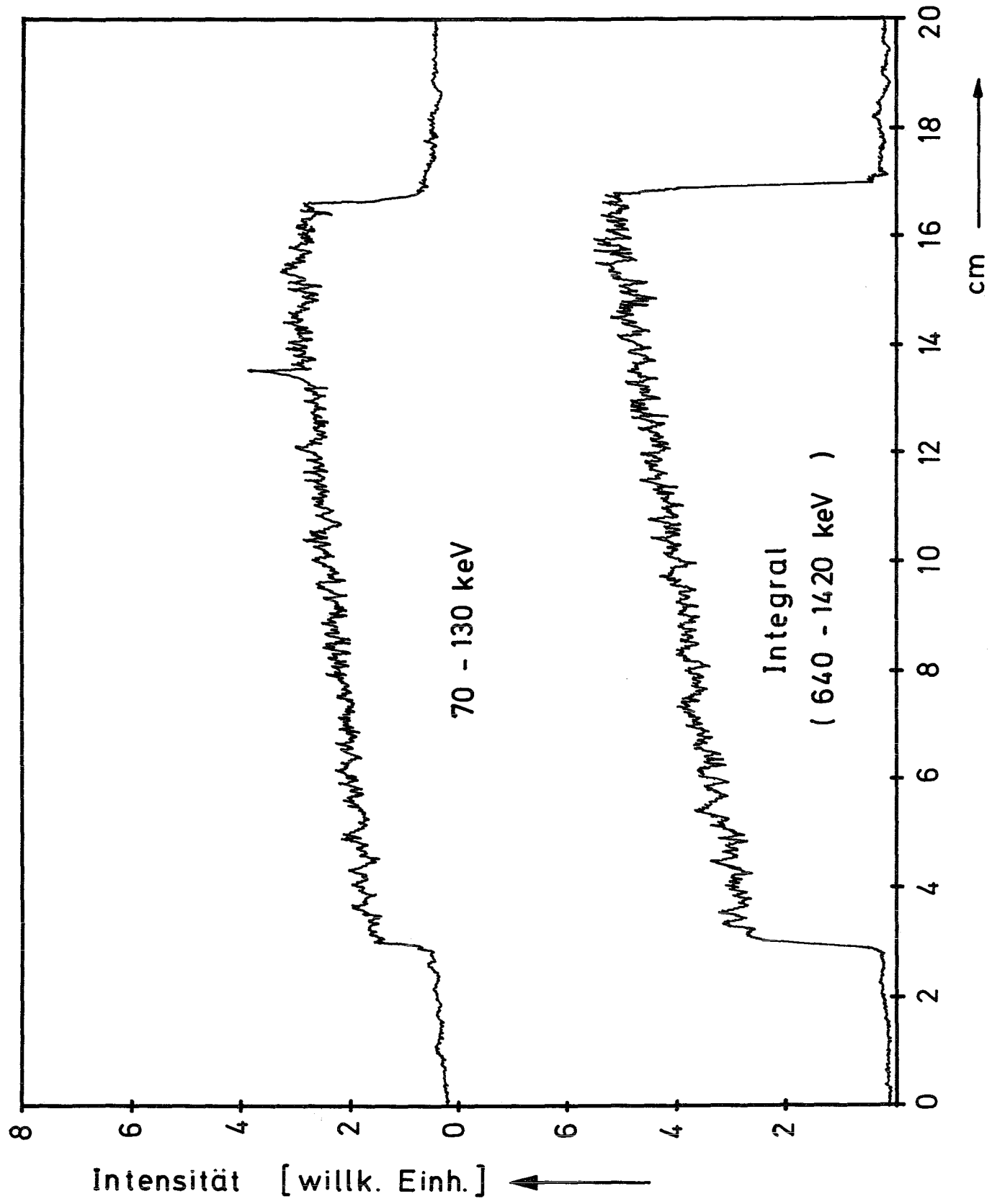
Gesamtlänge : 177,5 mm
Länge der Brennstoffsäule : 139,9 mm
Gewicht der " : 104,2 g
Radiale Spaltweite : 47 μ m
Schmierdichte : 86,8 % th.D.

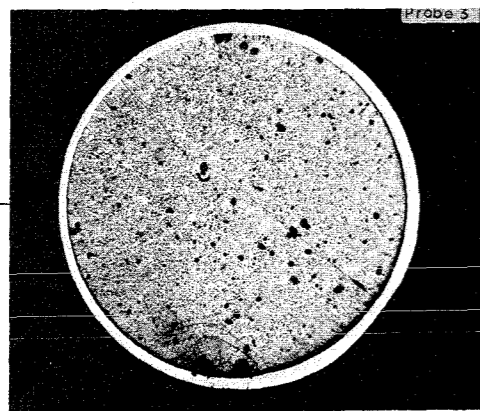
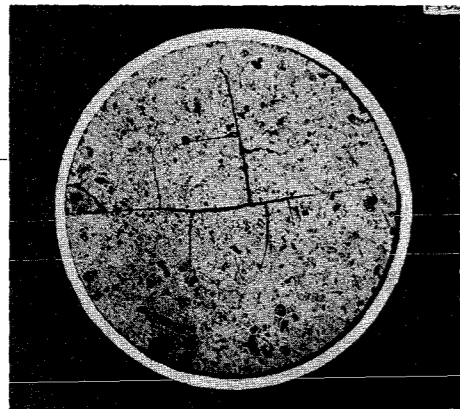
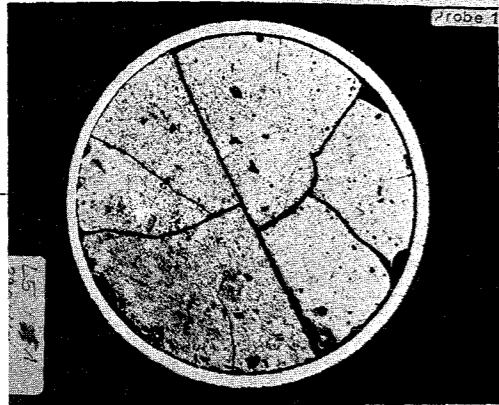
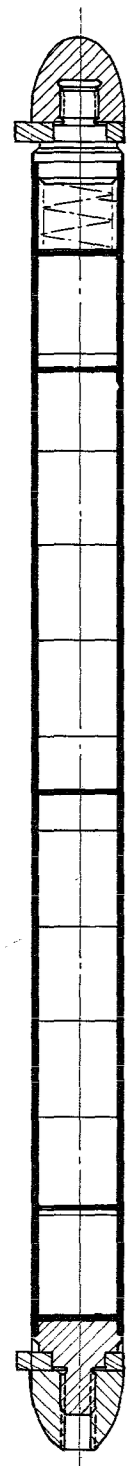
Bestrahlung :

Zeit : 30.3.67
Dauer : 10 min
mittl. Stableistung : 510 W/cm
mittl. Hüllaußentemp. : 560°C

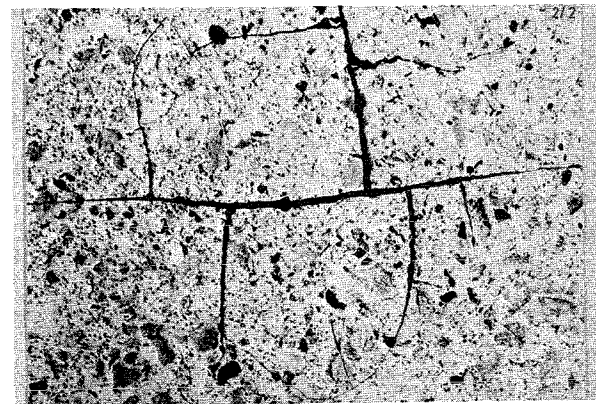
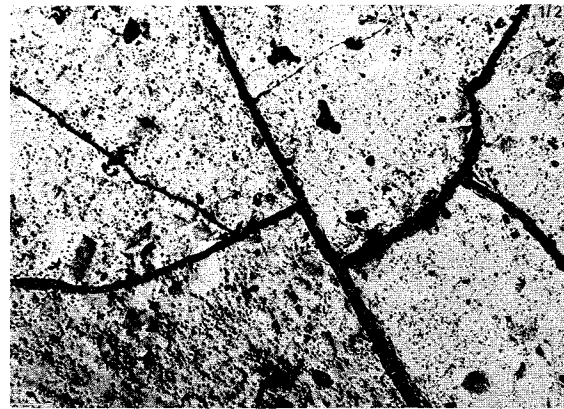


γ - Profile





2mm



1 mm

Prüfling L 5

Brennstoff :

Form : Tabletten, geschl.
 Zusammensetzung : UO_2 (7,5 % U-235)
 Tablettendichte : 89,0 % th.D.

Hülle :

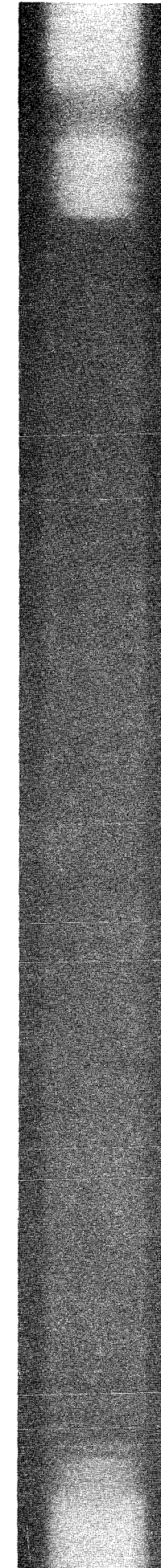
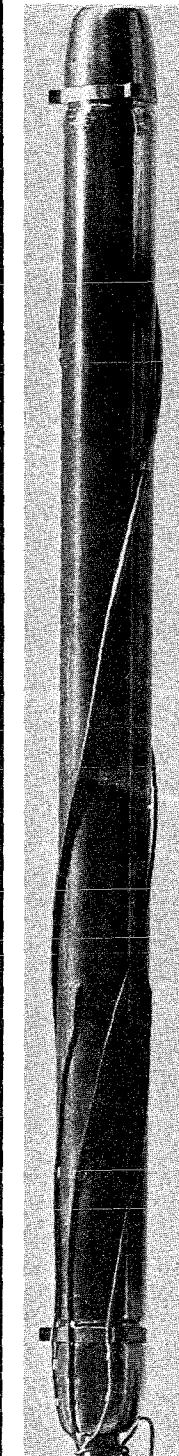
Material : X8CrNiMoV Nb 16/13
 W.-Nr. 1.4988
 Außendurchmesser : 12 mm
 Wandstärke : 1,0 mm

Brennstab :

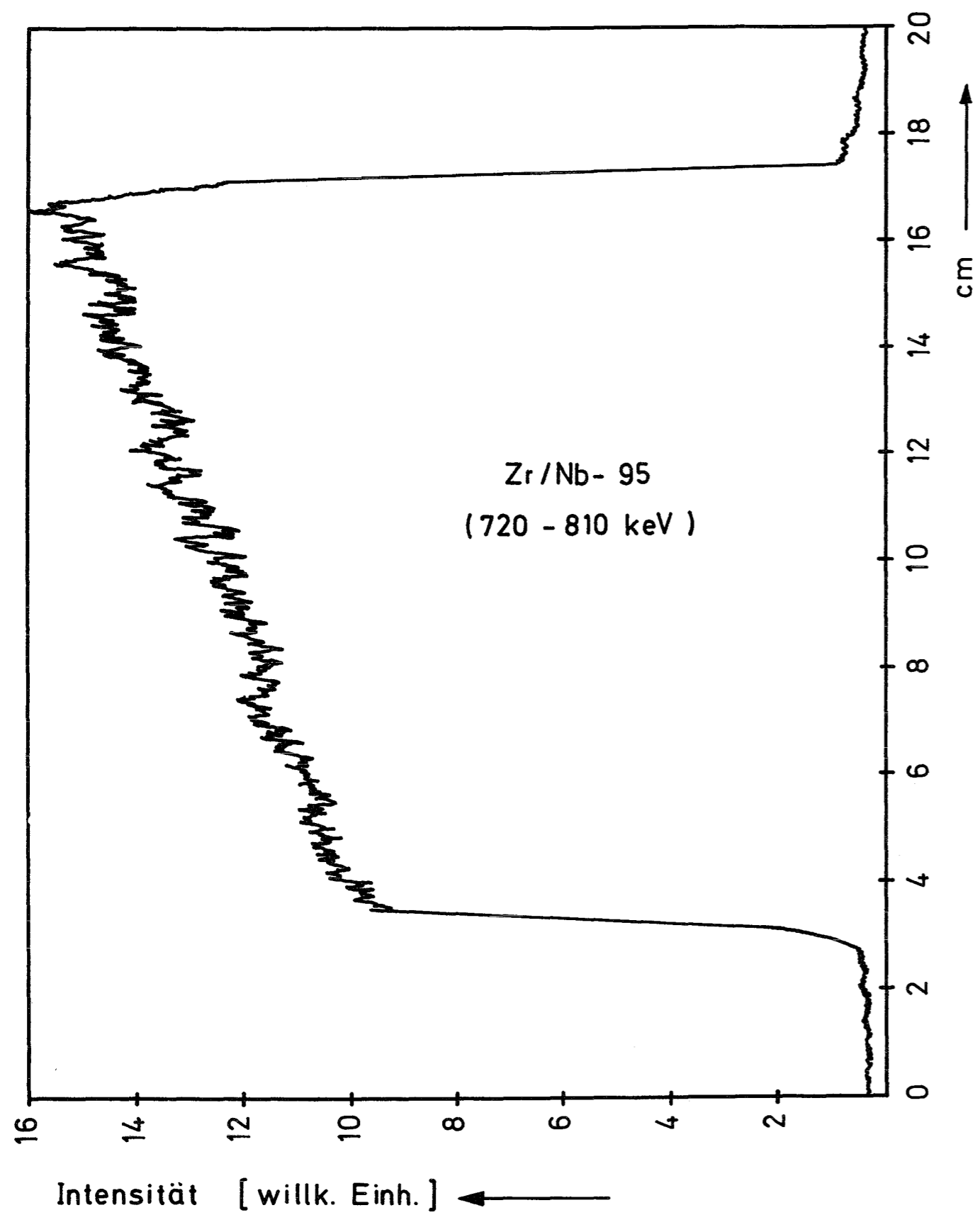
Gesamtlänge : 177,1 mm
 Länge der Brennstoffsäule : 139,5 mm
 Gewicht der " : 104,6 g
 Radiale Spaltweite : 44 μ m
 Schmierdichte : 87,5 % th.D.

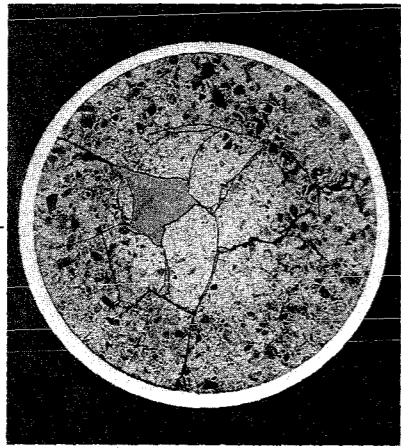
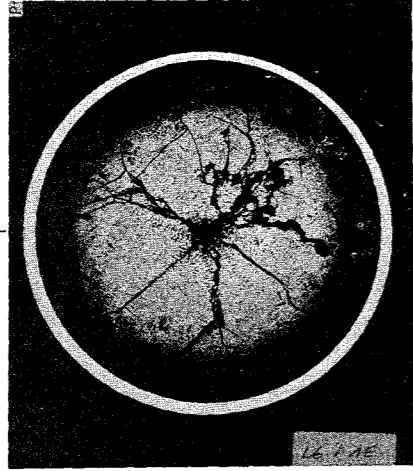
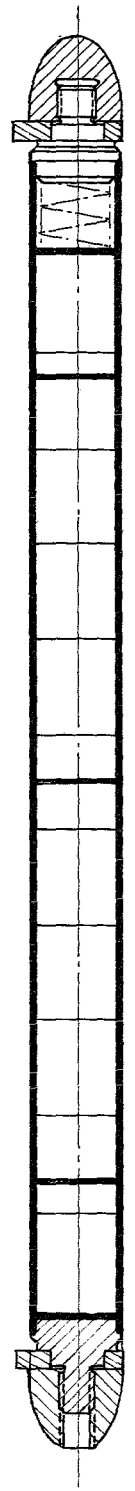
Bestrahlung :

Zeit : 13.12.66
 Dauer : 1 h 57 min
 mittl. Stableistung : 370 W/cm
 mittl. Hüllaußentemp. : 560 °C

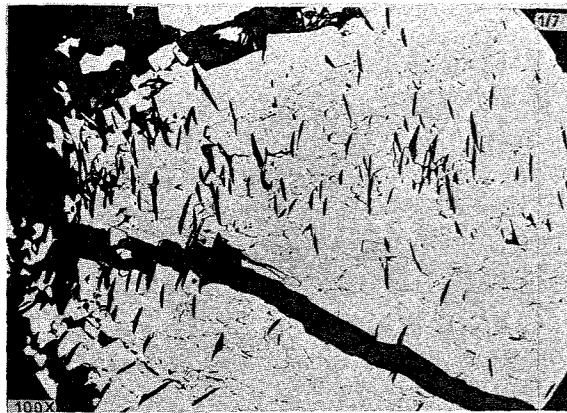


γ - Profil

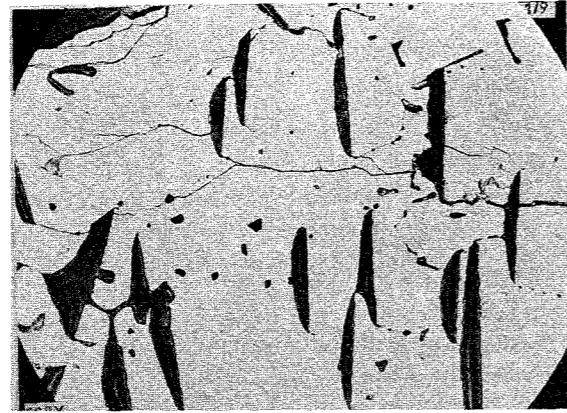




2 mm

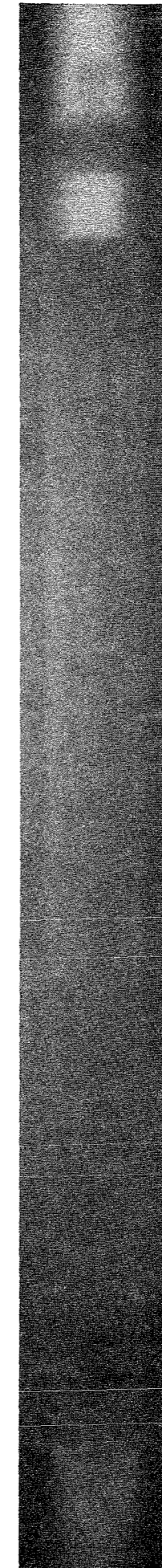
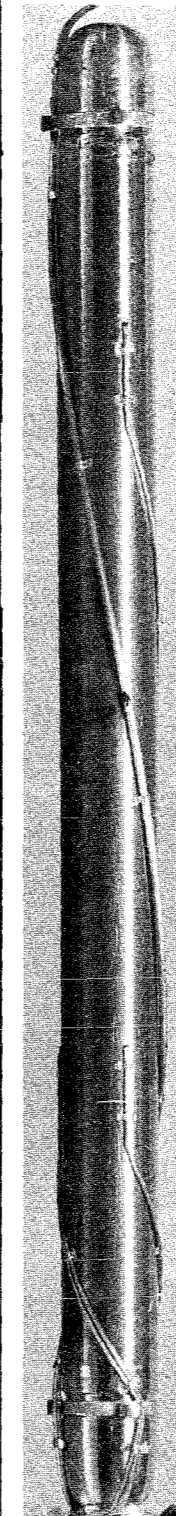


0.2mm

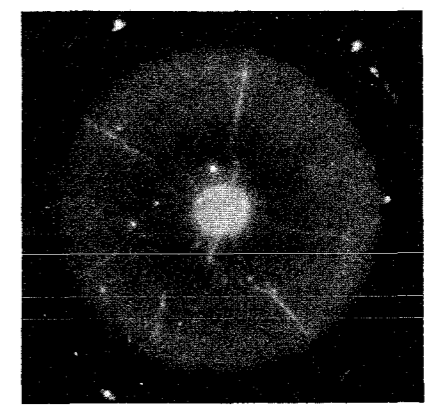
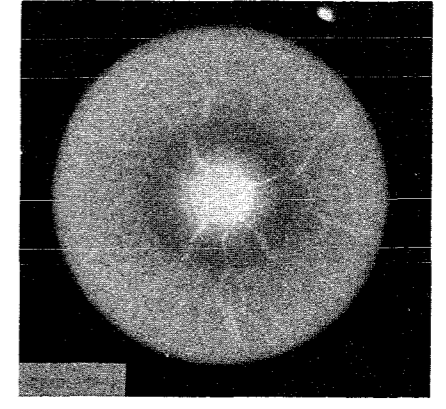
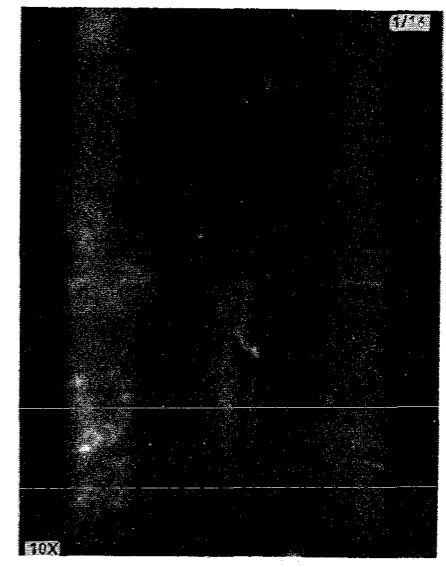
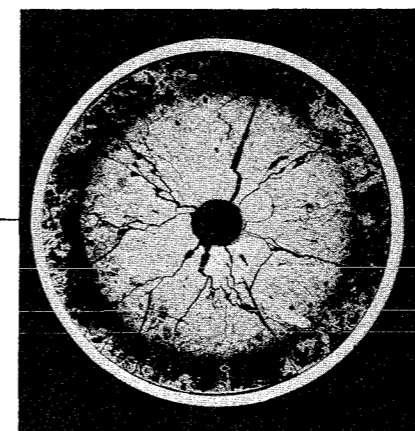
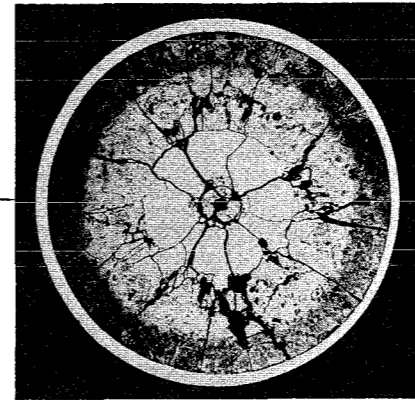
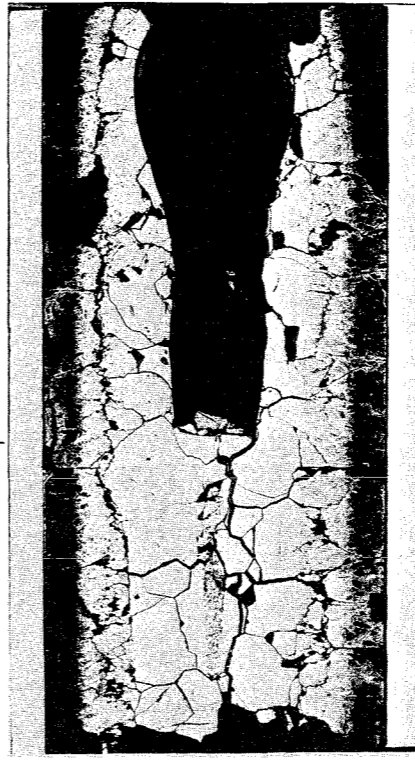
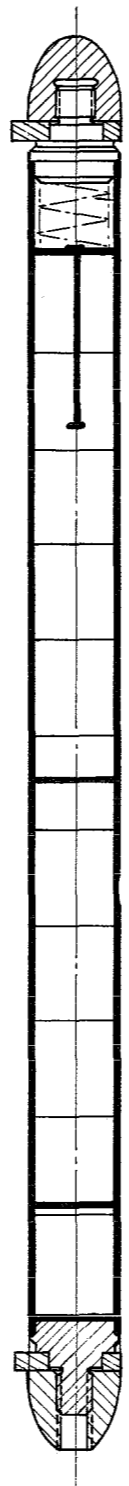
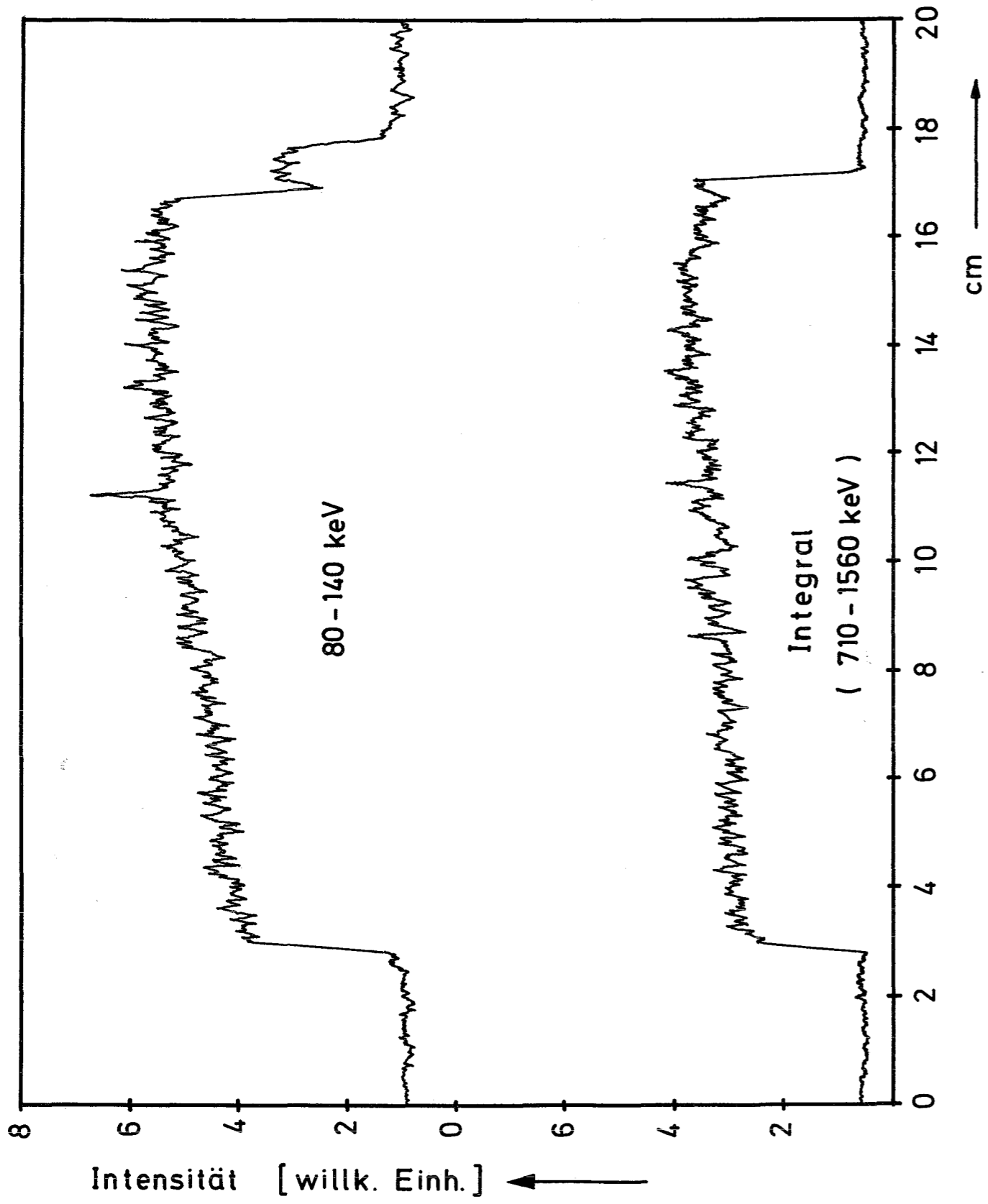


20μm

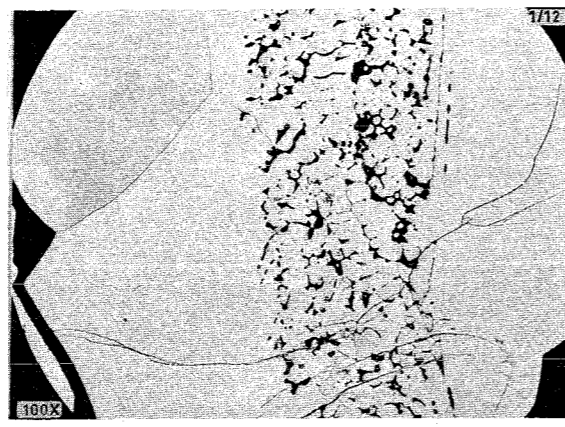
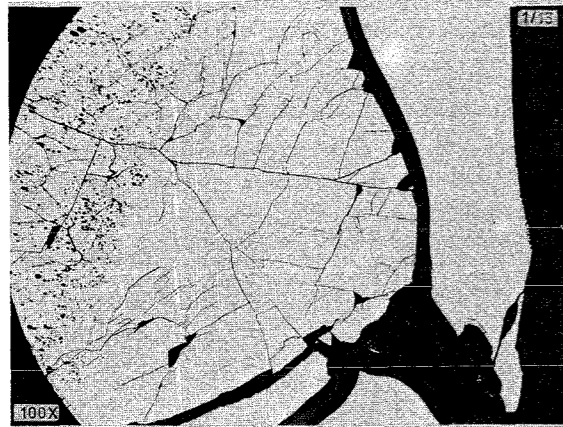
Prüfling		L 6
<u>Brennstoff :</u>		
Form	:	Tabletten, geschl.
Zusammensetzung	:	UO ₂ (7,5 % U-235)
Tablettendichte	:	88,9 % th.D.
<u>Hülle :</u>		
Material	:	X8CrNiMoVNb 16/13 W.-Nr. 1.4988
Außendurchmesser	:	12 mm
Wandstärke	:	1,0 mm
<u>Brennstab :</u>		
Gesamtlänge	:	176,9 mm
Länge der Brennstoffsäule	:	140,1 mm
Gewicht der "	:	105,0 g
Radiale Spaltweite	:	45 μm
Schmierdichte	:	87,3 % th.D.
<u>Bestrahlung :</u>		
Zeit	:	26.4. - 27.4.67
Dauer	:	2 h 01 min
mittl. Stableistung	:	560 W/cm
mittl. Hüllaußentemp.	:	560 °C



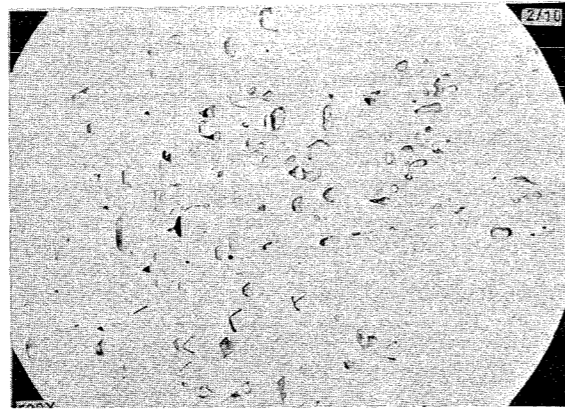
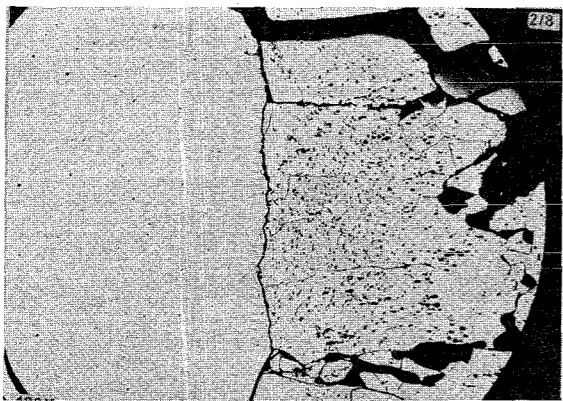
γ - Profile



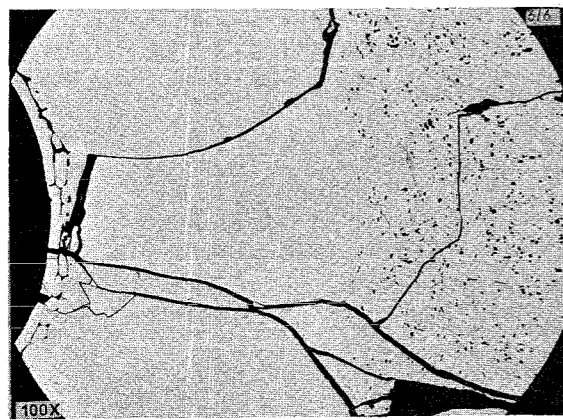
2mm



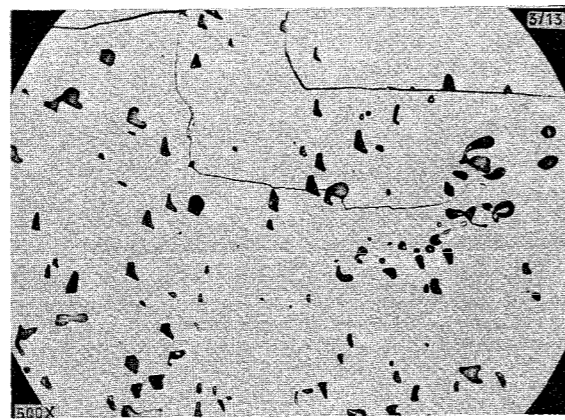
0.2 mm



20 μm



0.2 mm



20 μm

Prüfling L 7

Brennstoff :

Form : Tabletten, geschl.
 Zusammensetzung : UO_2 (7,5 % U-235)
 Tablettendichte : 88,5 % th.D.

Hülle :

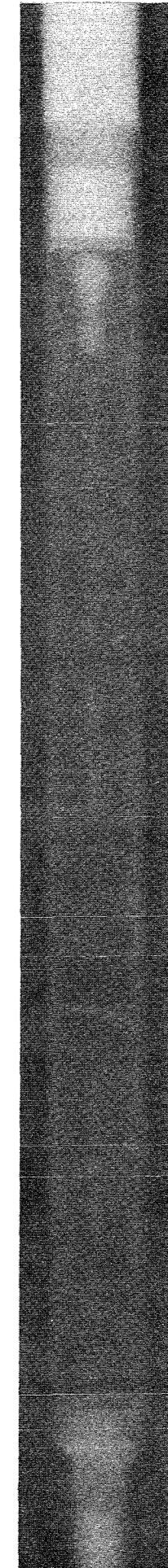
Material : X8CrNiMoVNb 16/13
 W.-Nr. 1.4988
 Außendurchmesser : 12 mm
 Wandstärke : 1,0 mm

Brennstab :

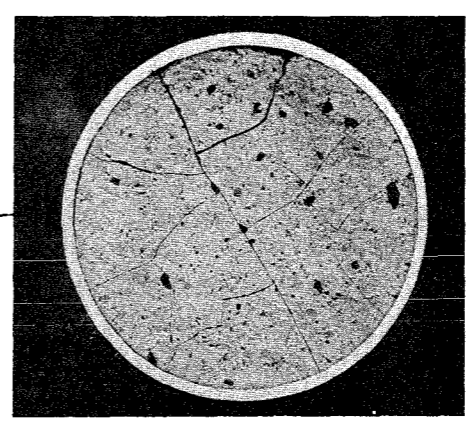
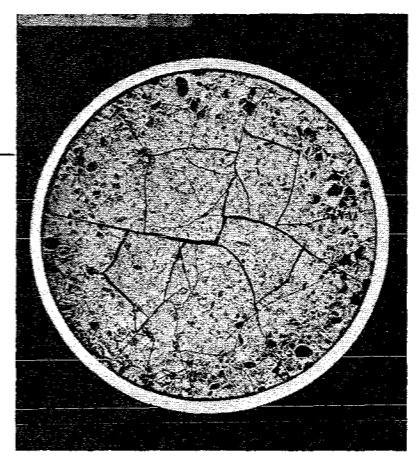
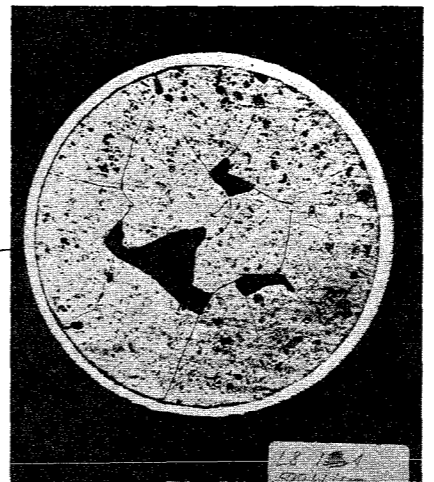
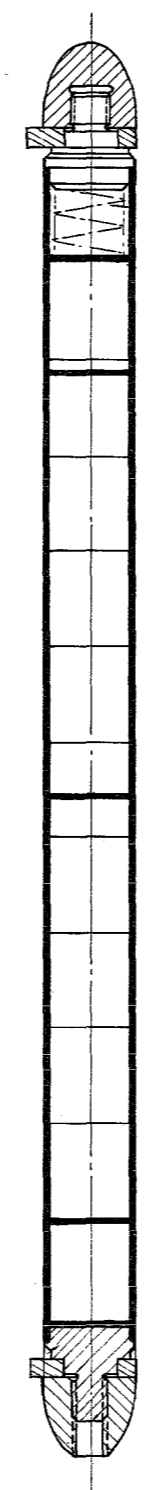
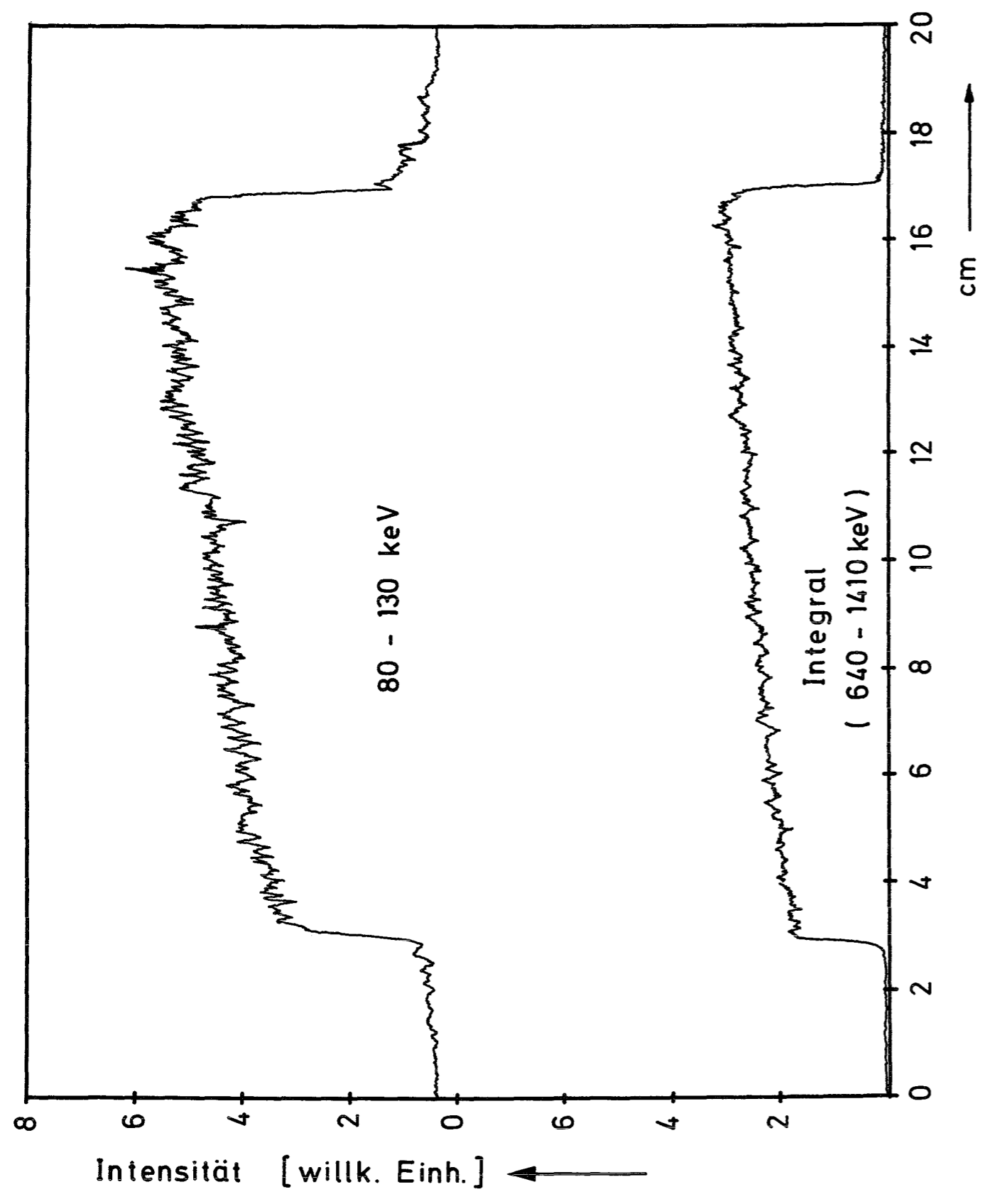
Gesamtlänge : 177,5 mm
 Länge der Brennstoffsäule : 139,6 mm
 Gewicht der " : 104,0 g
 Radiale Spaltweite : 44 μm
 Schmierdichte : 86,9 % th.D.

Bestrahlung :

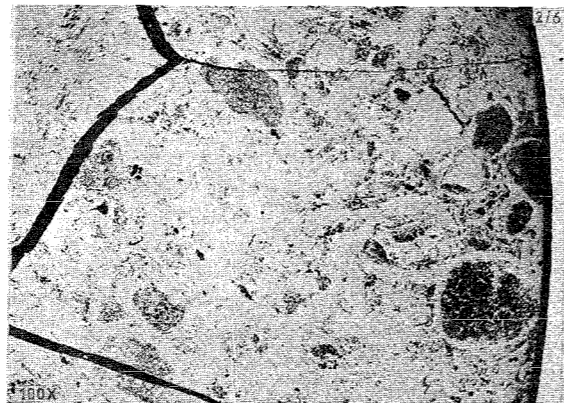
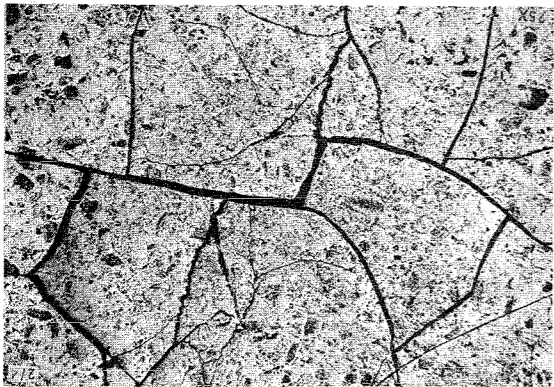
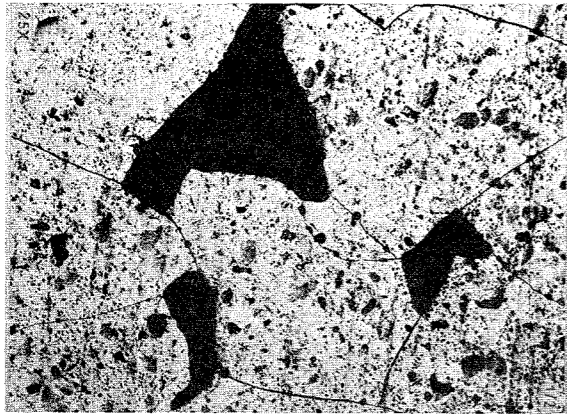
Zeit : 22.3.67
 Dauer : 10 min
 mittl. Stableistung : 750 W/cm
 mittl. Hüllaußentemp. : 535 °C



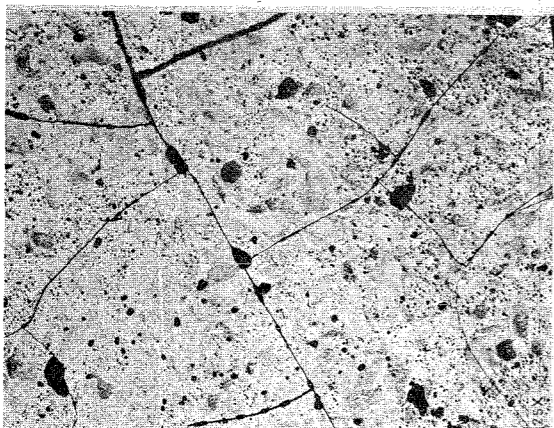
γ - Profile



2mm



0.2 mm



1 mm

Prüfling L 8

Brennstoff :

Form : Tabletten, geschl.
 Zusammensetzung : UO_2 (7,5 % U-235)
 Tablettendichte : 88,3 % th.D.

Hülle :

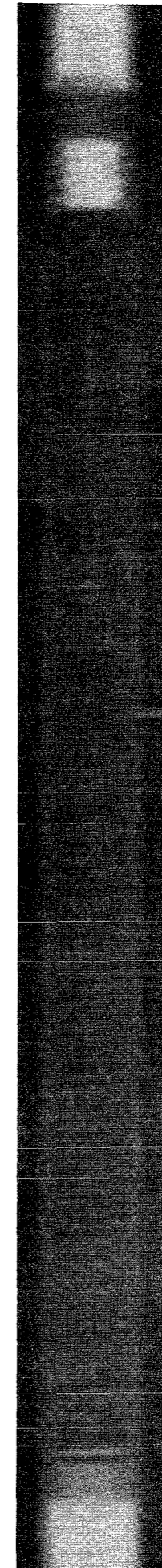
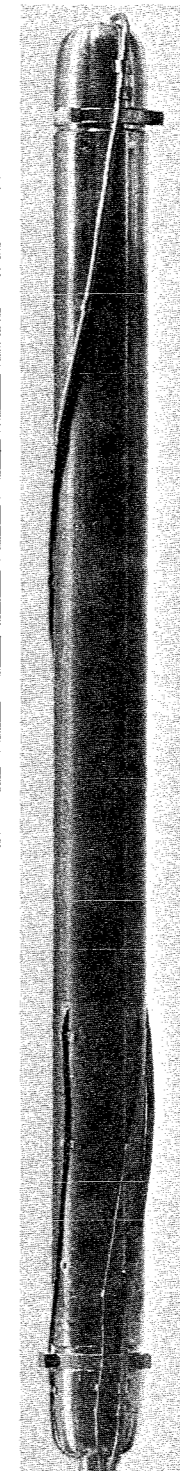
Material : X8CrNiMoVNb 16/13
 W.-Nr. 1.4988
 Außendurchmesser : 12 mm
 Wandstärke : 1,0 mm

Brennstab :

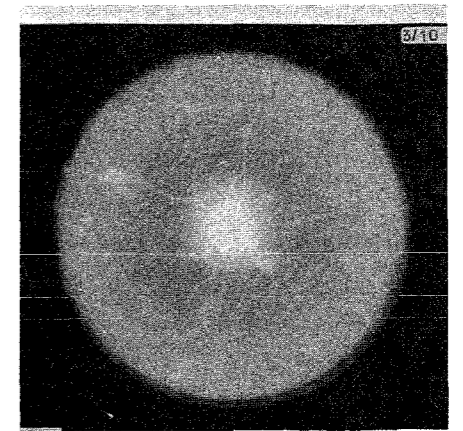
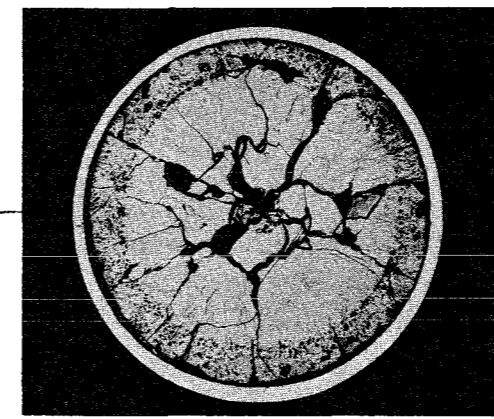
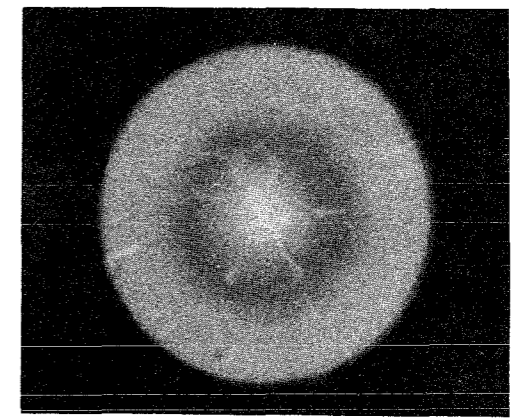
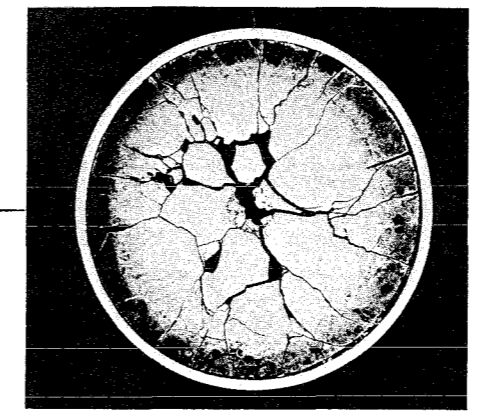
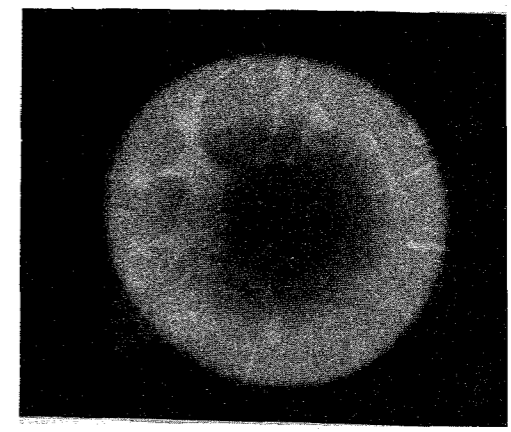
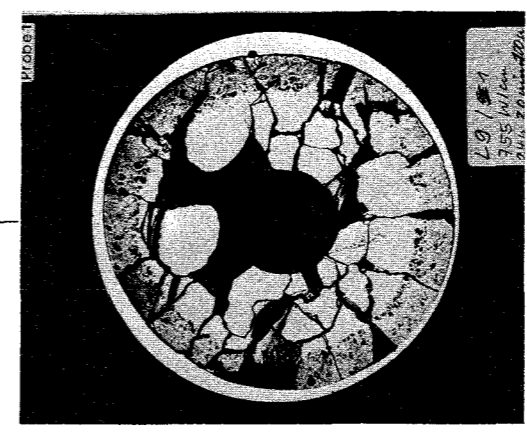
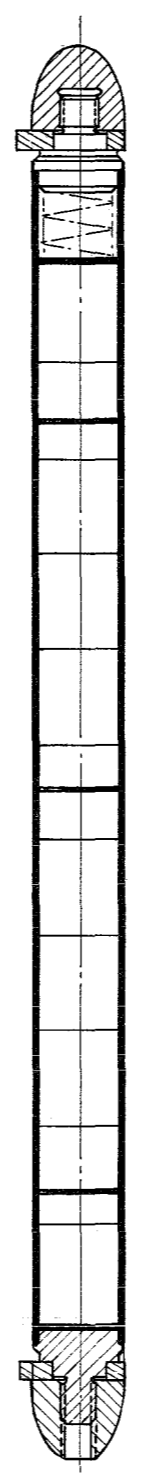
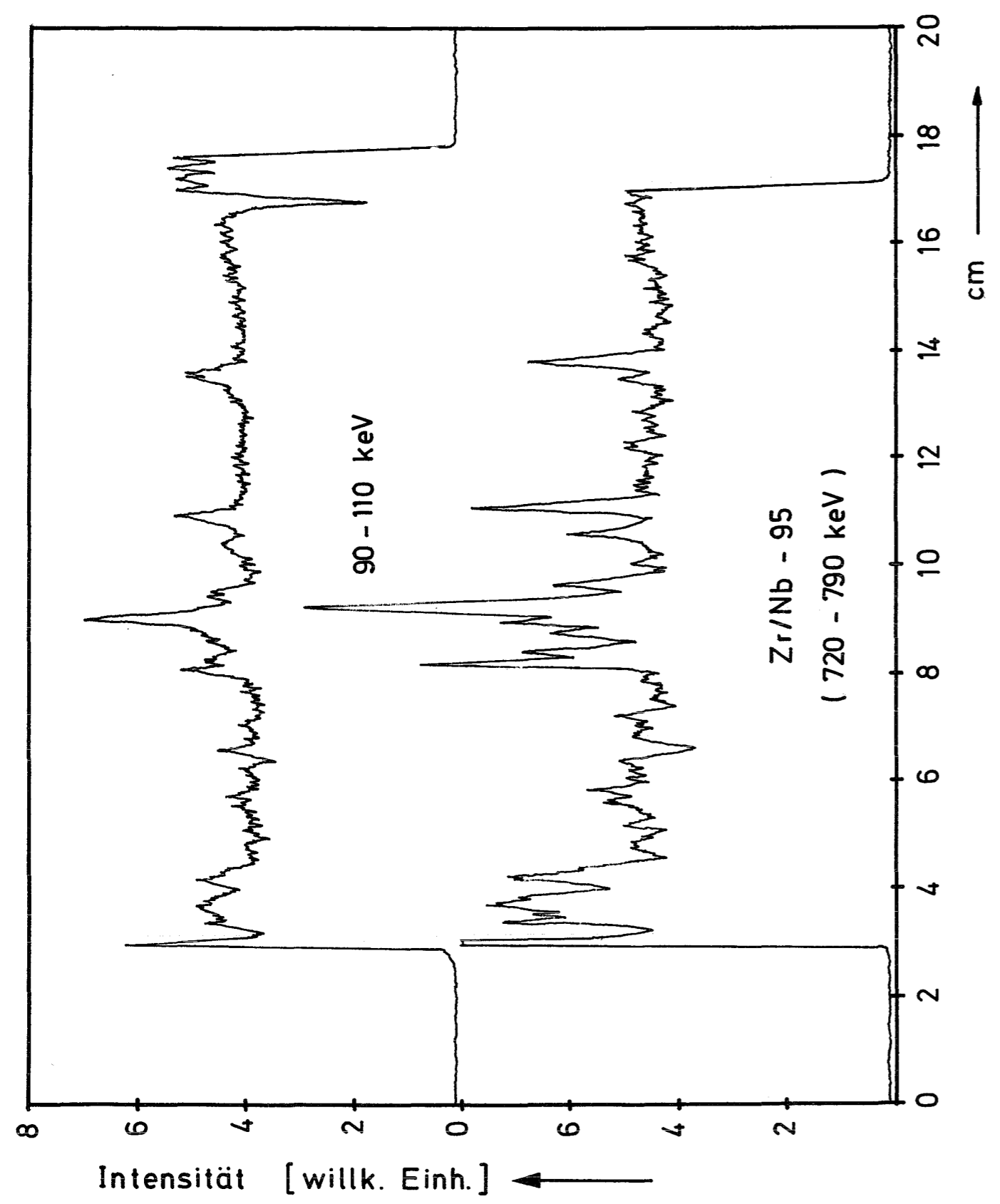
Gesamtlänge : 177,3 mm
 Länge der Brennstoffsäule : 140,3 mm
 Gewicht der " : 104,5 g
 Radiale Spaltweite : 48 μ m
 Schmiedichte : 86,7 % th.D.

Bestrahlung :

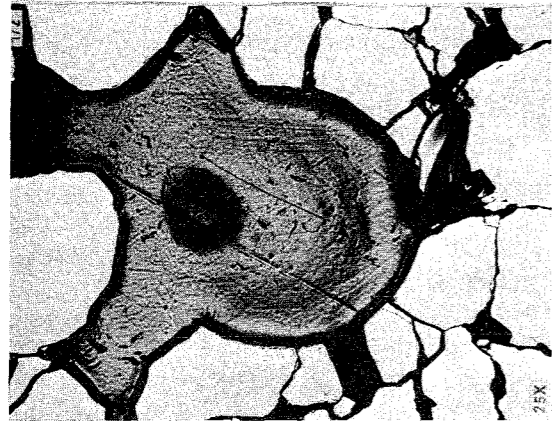
Zeit : 19.12.66
 Dauer : 2 h 10 min
 mittl. Stableistung : 490 W/cm
 mittl. Hüllaußentemp. : 560°C



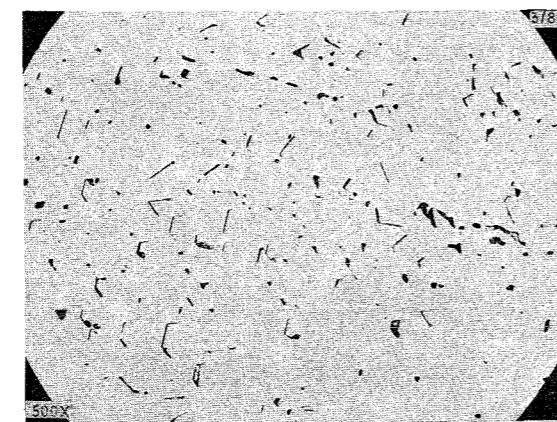
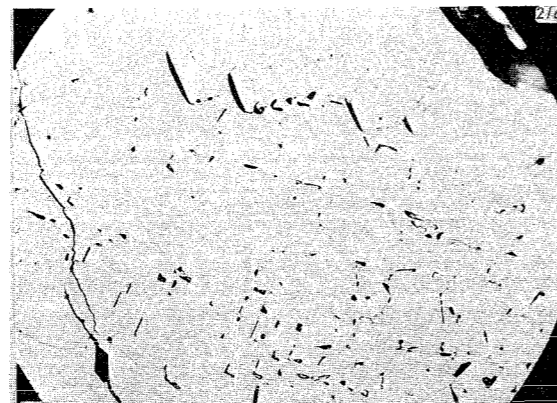
γ - Profile



2mm



1 mm



20 μm

Prüfling L 9

Brennstoff :

Form : Tabletten, geschl.
 Zusammensetzung : UO_2 (7,5 % U-235)
 Tablettendichte : 88,5 % th.D.

Hülle :

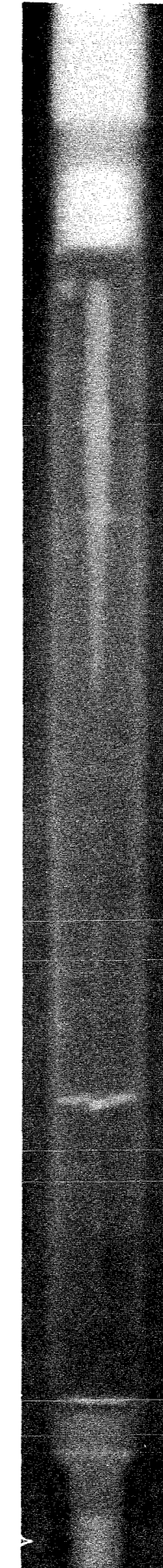
Material : X8CrNiMoVNb16/13
 W.-Nr. 1.4988
 Außendurchmesser : 12 mm
 Wandstärke : 1,0 mm

Brennstab :

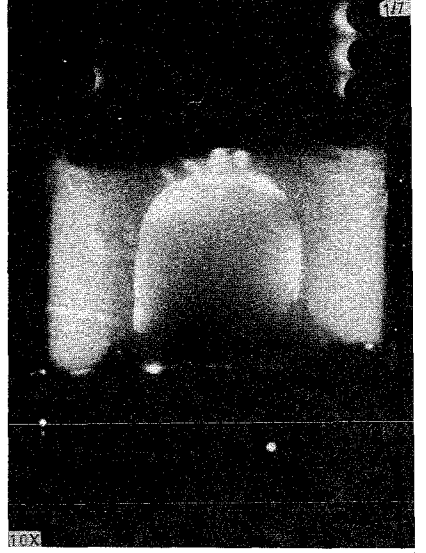
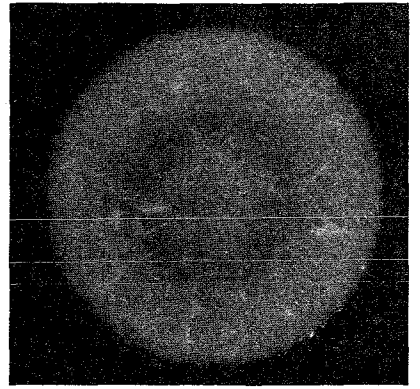
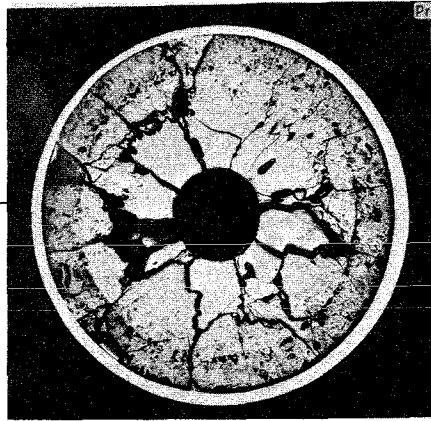
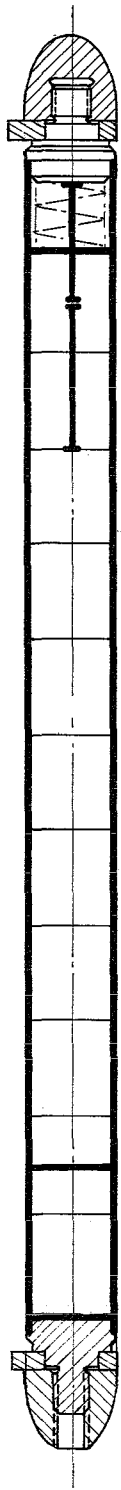
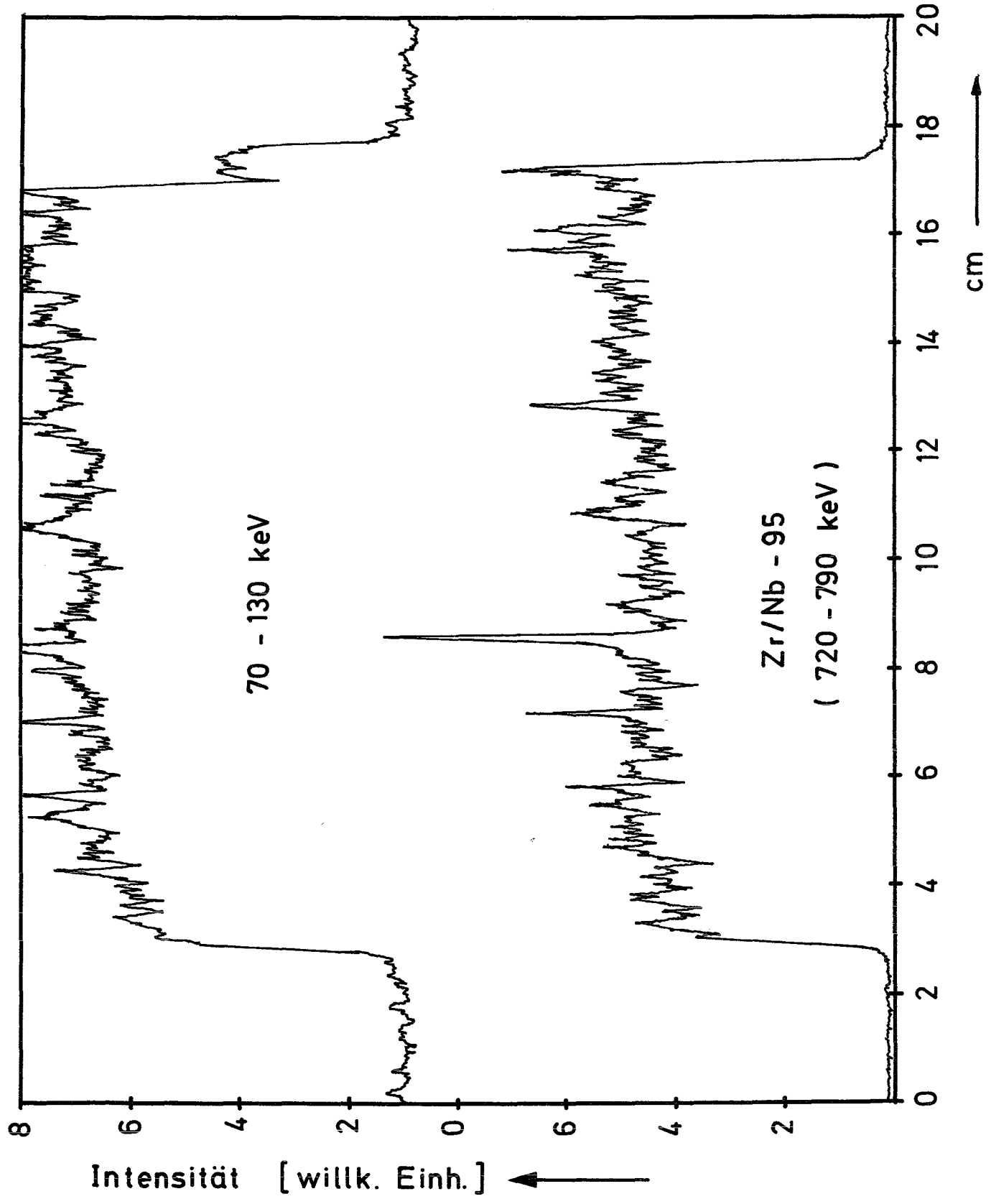
Gesamtlänge : 177,1 mm
 Länge der Brennstoffsäule : 140,2 mm
 Gewicht der " : 104,6 g
 Radiale Spaltweite : 55 μm
 Schmierdichte : 86,5 % th.D.

Bestrahlung :

Zeit : 1.3. - 2.3.67
 Dauer : 24 h
 mittl. Stableistung : 750 W/cm
 mittl. Hüllaußentemp. : 535°C



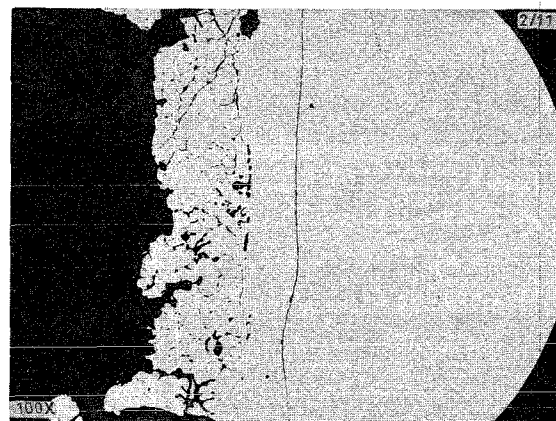
γ - Profile



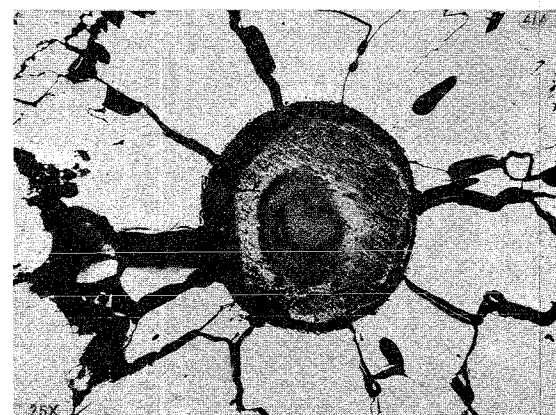
2 mm



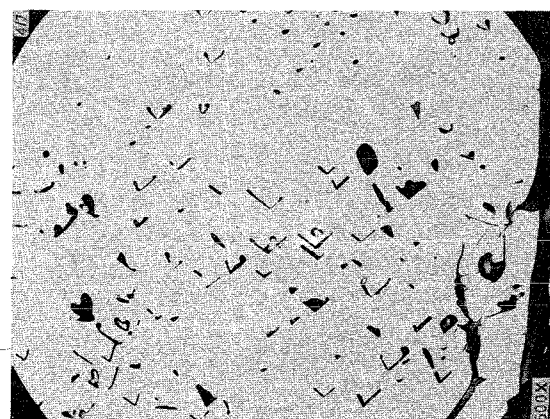
0.2 mm



0.2 mm



1 mm



20 μm

Prüfling L 10

Brennstoff :

Form : Tabletten, geschl.
 Zusammensetzung : UO_2 (7,5 % U-235)
 Tablettendichte : 88,2 % th.D.

Hülle :

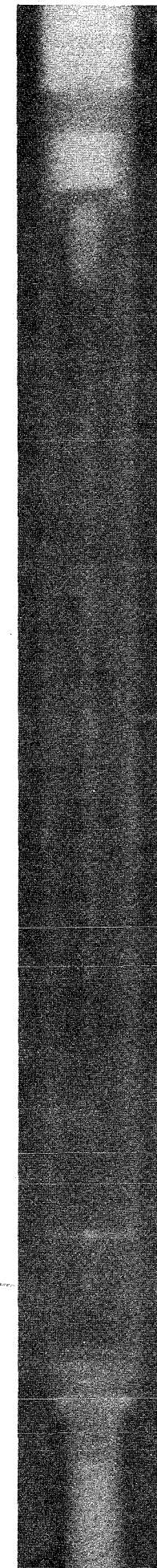
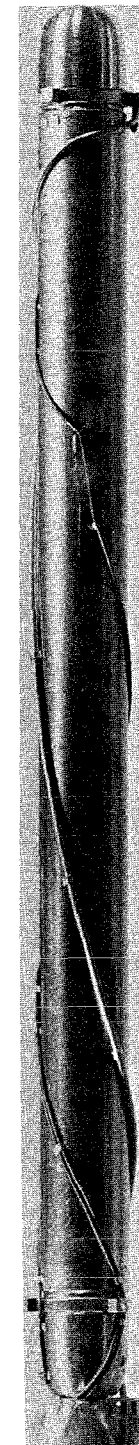
Material : X8CrNiMoVNb 16/13
 W.-Nr. 1.4988
 Außendurchmesser : 12 mm
 Wandstärke : 1,0 mm

Brennstab :

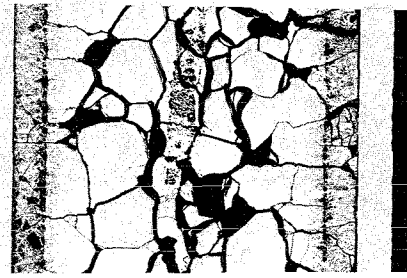
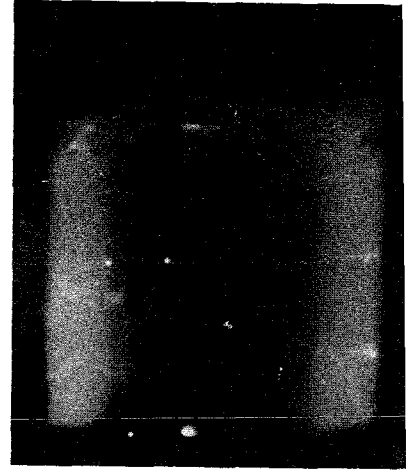
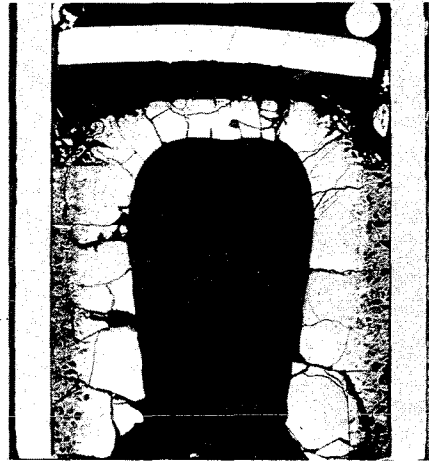
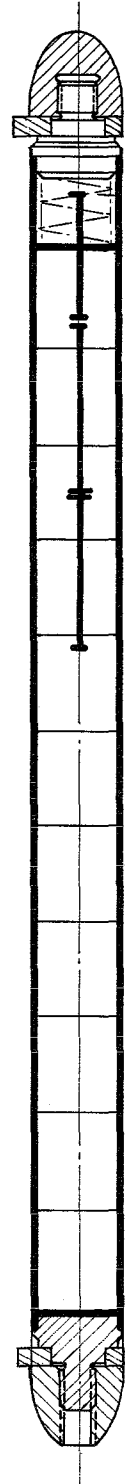
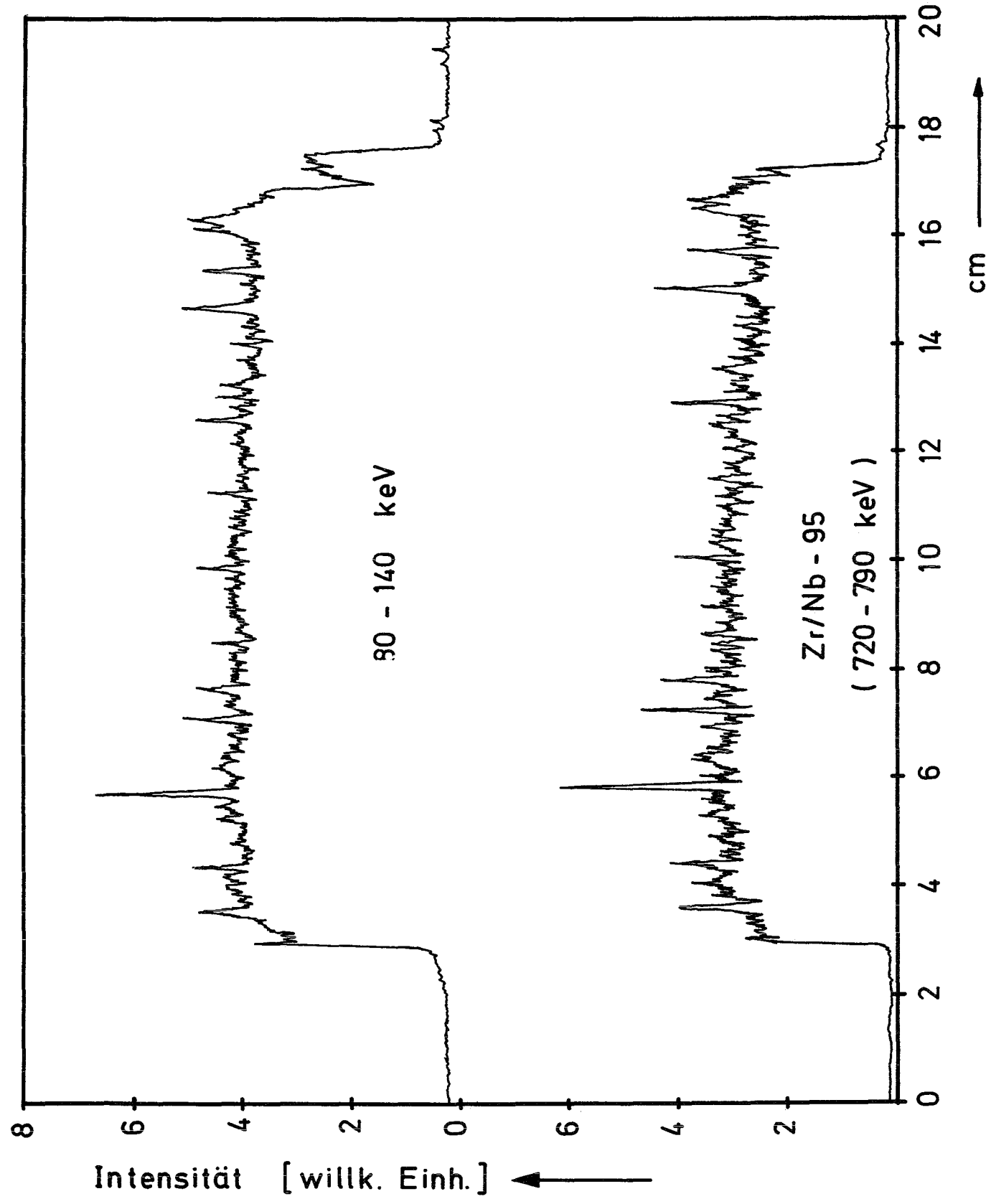
Gesamtlänge : 177,3 mm
 Länge der Brennstoffsäule : 140,2 mm
 Gewicht der " : 104,2 g
 Radiale Spaltweite : 46 μm
 Schmierdichte : 86,5 % th.D.

Bestrahlung :

Zeit : 8.3.67
 Dauer : 11 min
 mittl. Stableistung : 980 W/cm
 mittl. Hüllaußentemp. : 500°C



γ - Profile



2 mm

Prüfling L 11

Brennstoff :

Form : Tabletten, geschl.
Zusammensetzung : UO_2 (7,5 % U-235)
Tablettendichte : 89,1 % th.D.

Hülle :

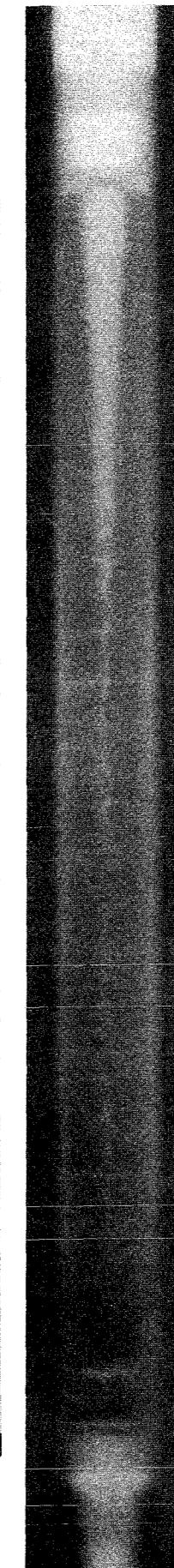
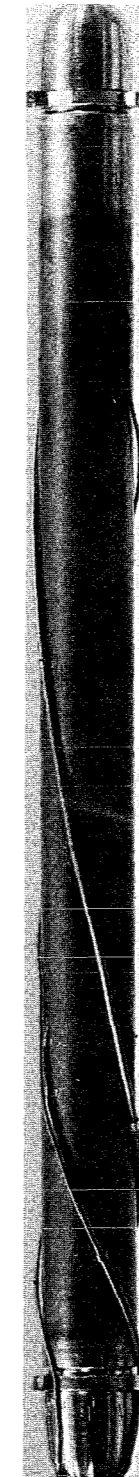
Material : X8CrNiMoVNb 16/13
W.-Nr. 1.4988
Außendurchmesser : 12 mm
Wandstärke : 1,0 mm

Brennstab :

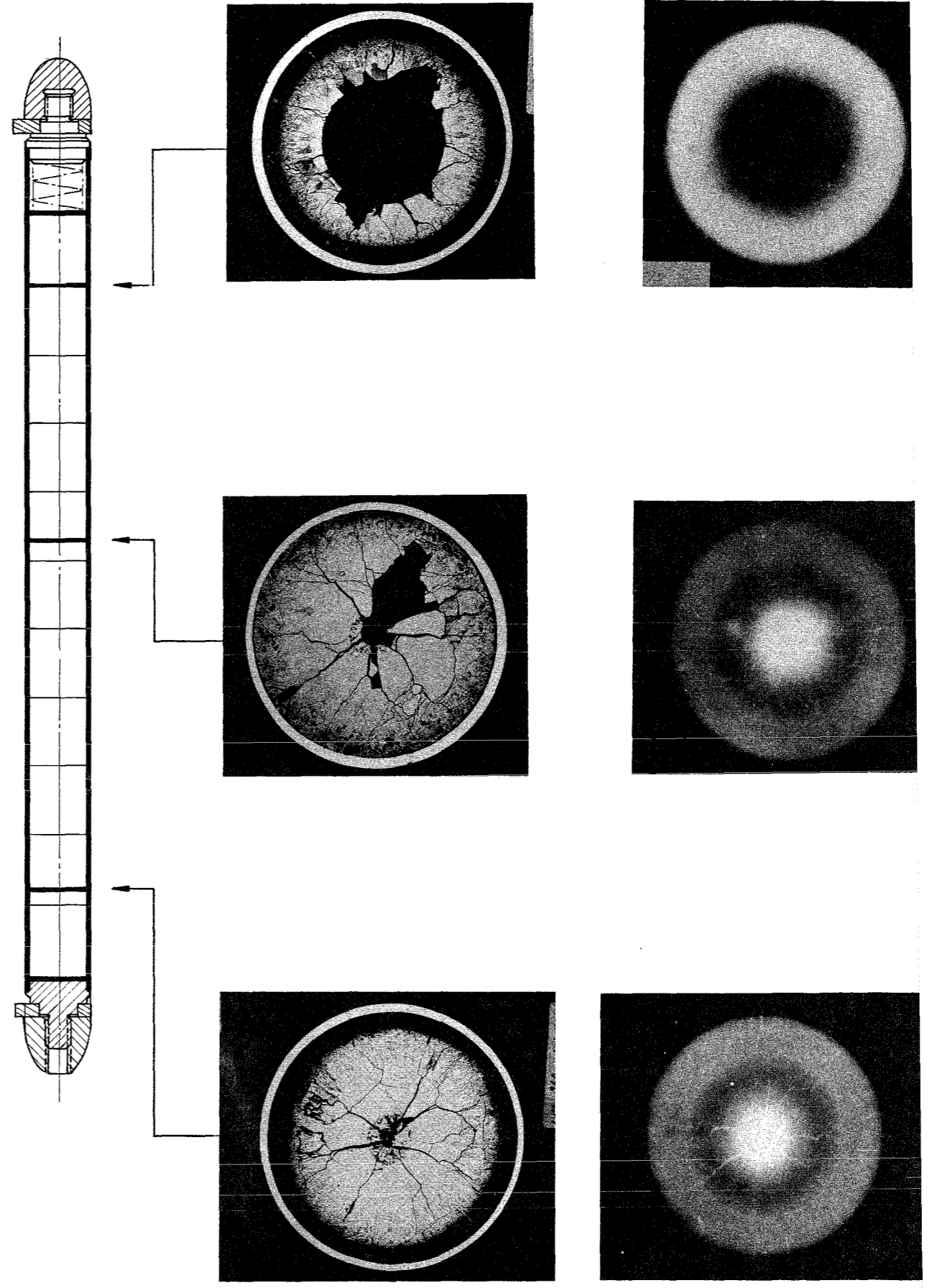
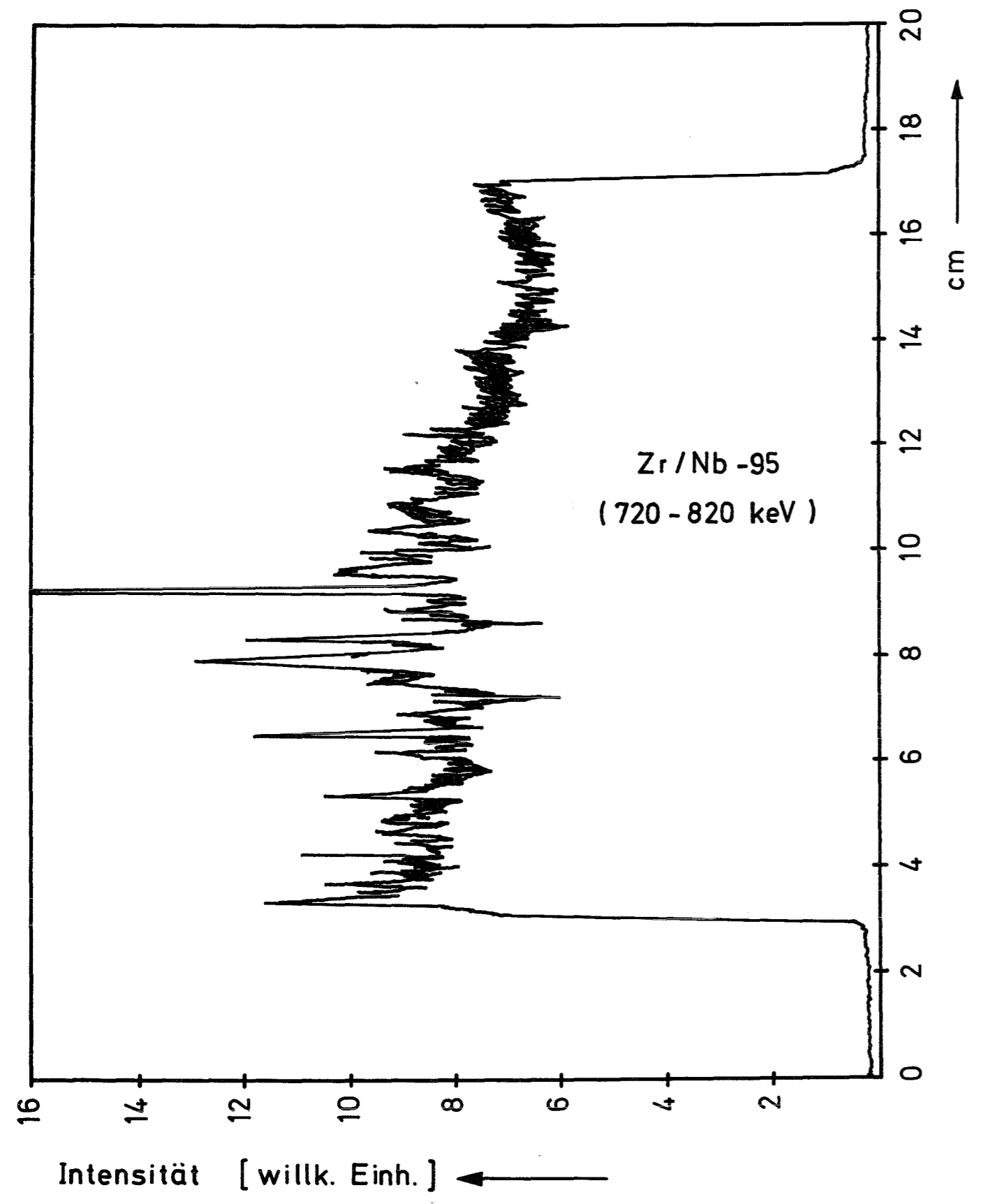
Gesamtlänge : 177,0 mm
Länge der Brennstoffsäule : 140,4 mm
Gewicht der " : 105,5 g
Radiale Spaltweite : 44 μ m
Schmierdichte : 87,6 % th.D.

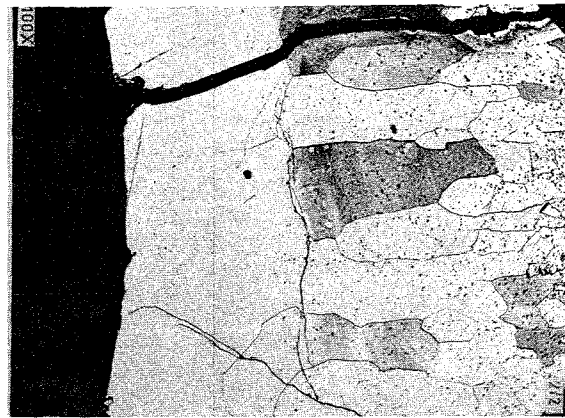
Bestrahlung :

Zeit : 7.3.67
Dauer : 2 h
mittl. Stableistung : 900 W/cm
mittl. Hüllaußentemp. : 500°C

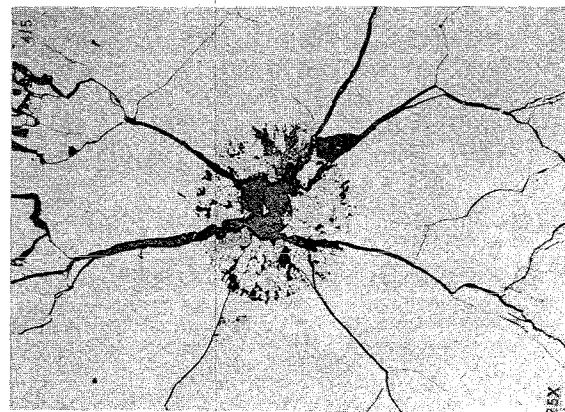


γ - Profil





0.2 mm



1 mm

Prüfling L 12

Brennstoff :

Form : Tabletten, geschl.
 Zusammensetzung : UO_2 (7,5 % U-235)
 Tablettendichte : 88,4 % th.D.

Hülle :

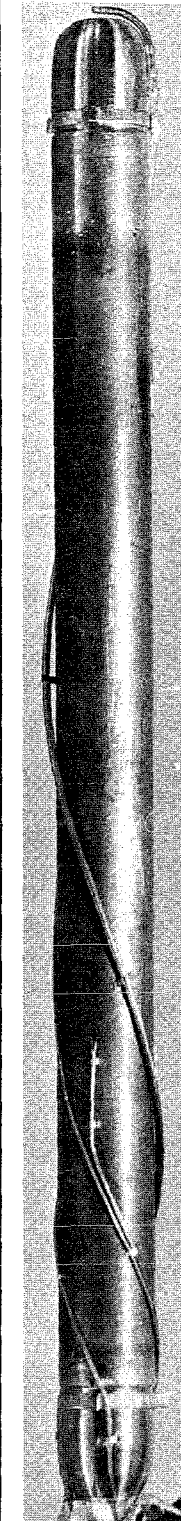
Material : X8CrNiMoVNb 16/13
 W.-Nr. 1.4988
 Außendurchmesser : 12 mm
 Wandstärke : 1,0 mm

Brennstab :

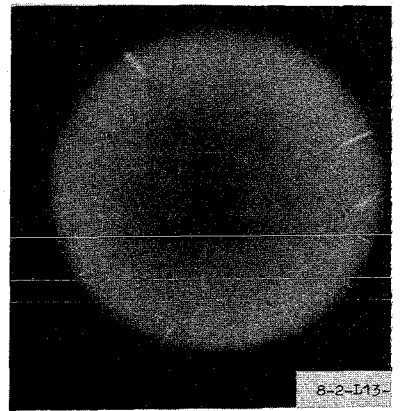
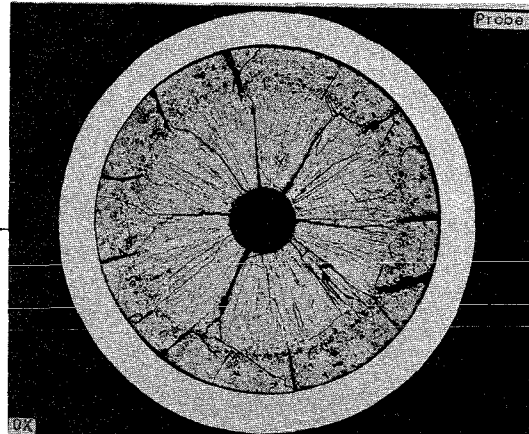
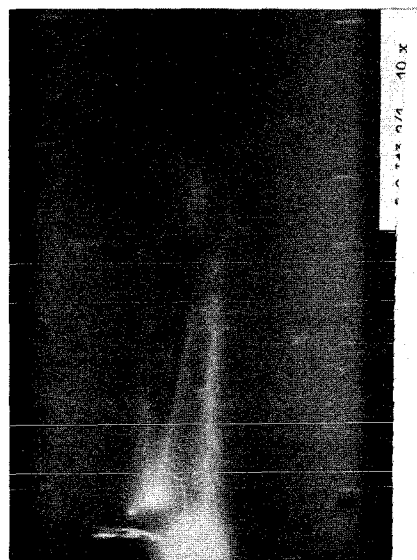
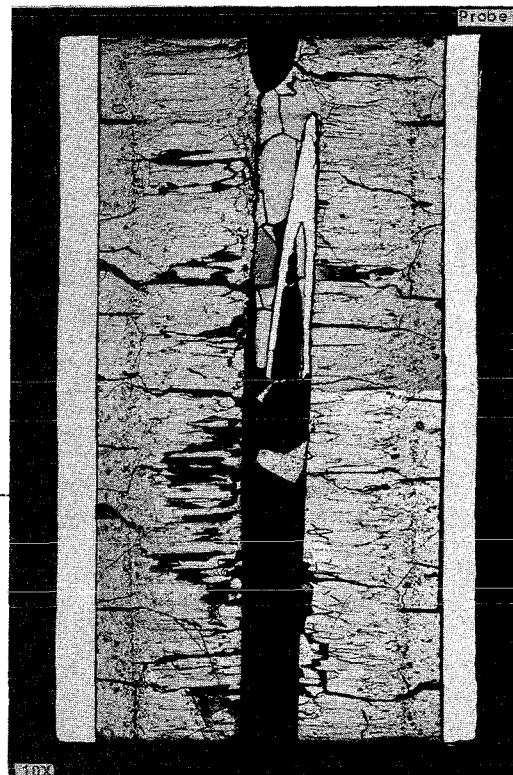
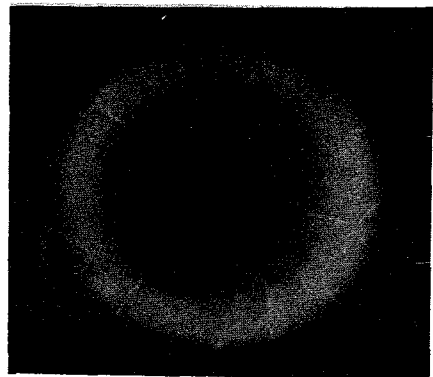
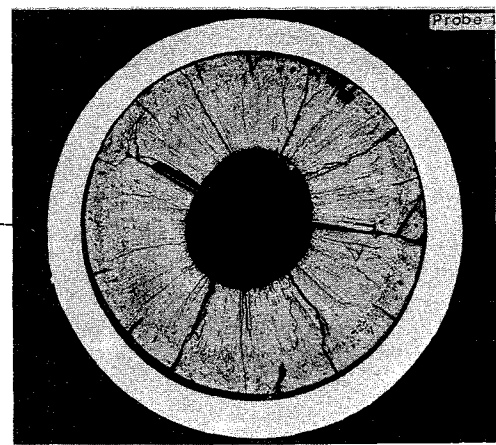
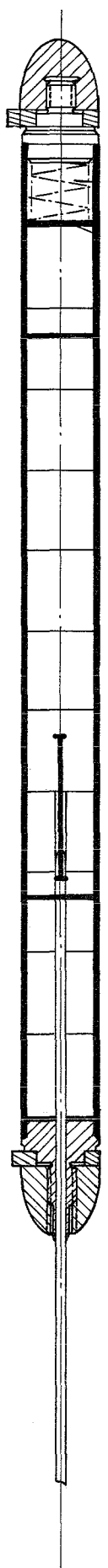
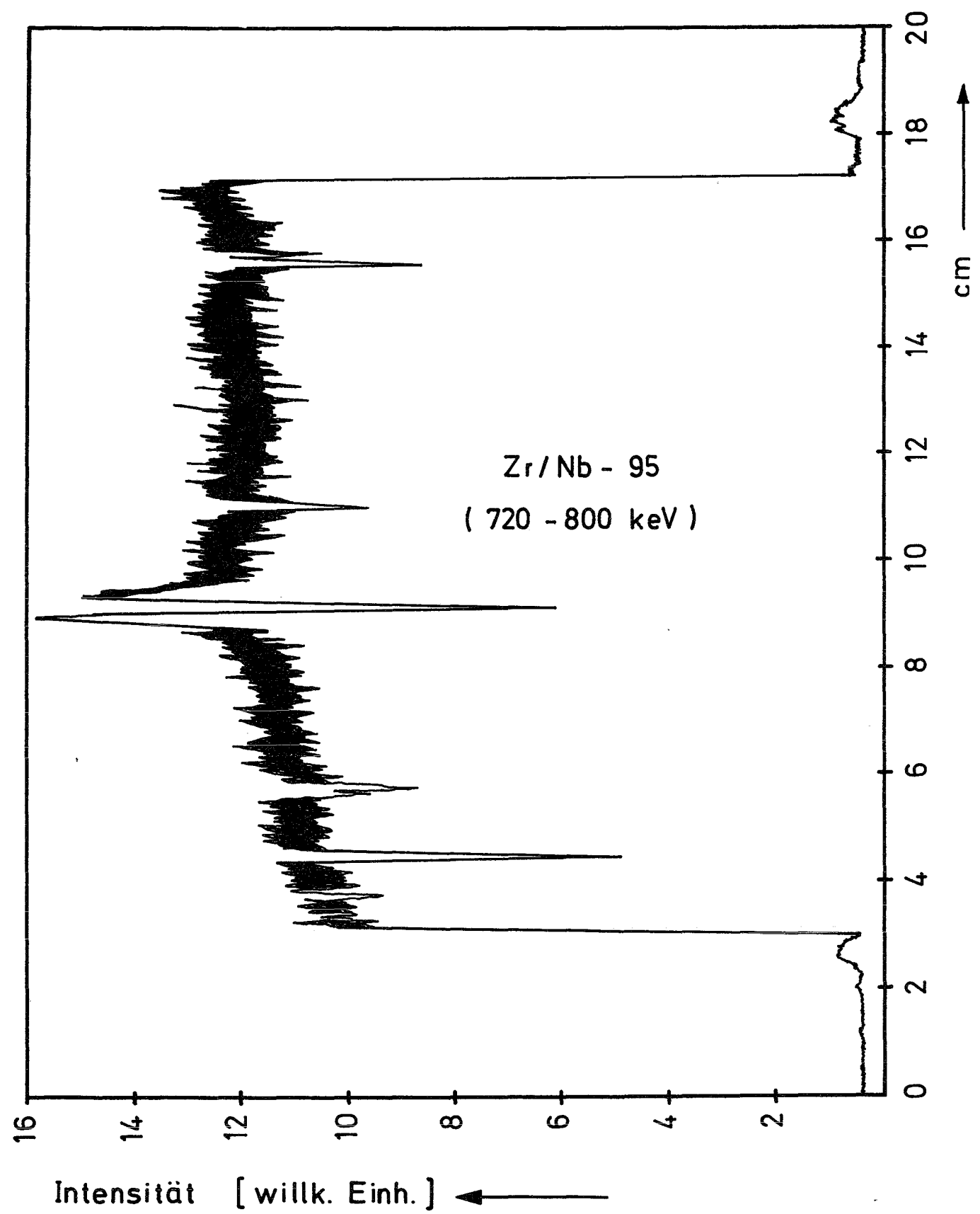
Gesamtlänge : 176,7 mm
 Länge der Brennstoffsäule : 140,3 mm
 Gewicht der " : 104,5 g
 Radiale Spaltweite : 45 μ m
 Schmierdichte : 86,8 % th.D.

Bestrahlung :

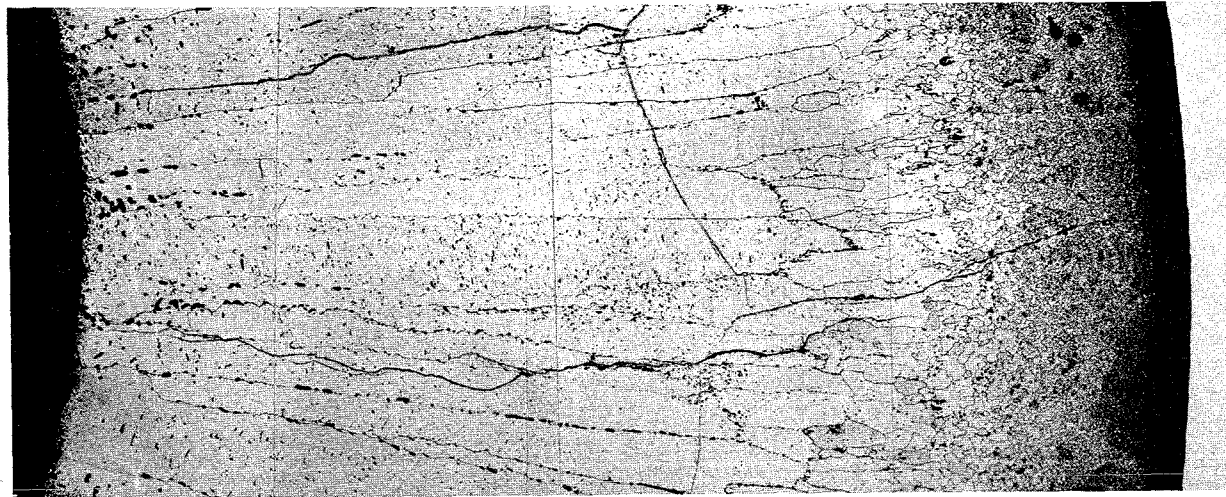
Zeit : 2.5. - 3.5.65
 Dauer : 24 h 18 min
 mittl. Stableistung : 960 W/cm
 mittl. Hüllaußentemp. : 500°C



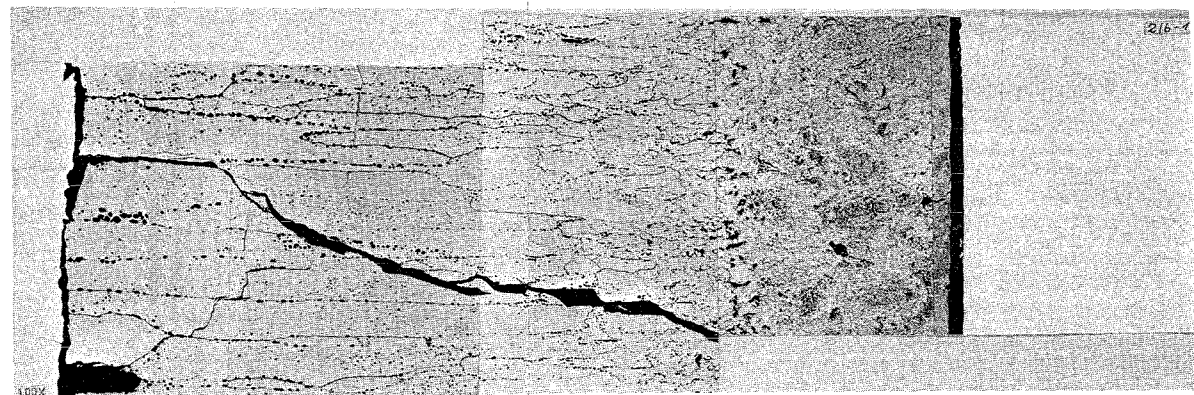
γ - Profil



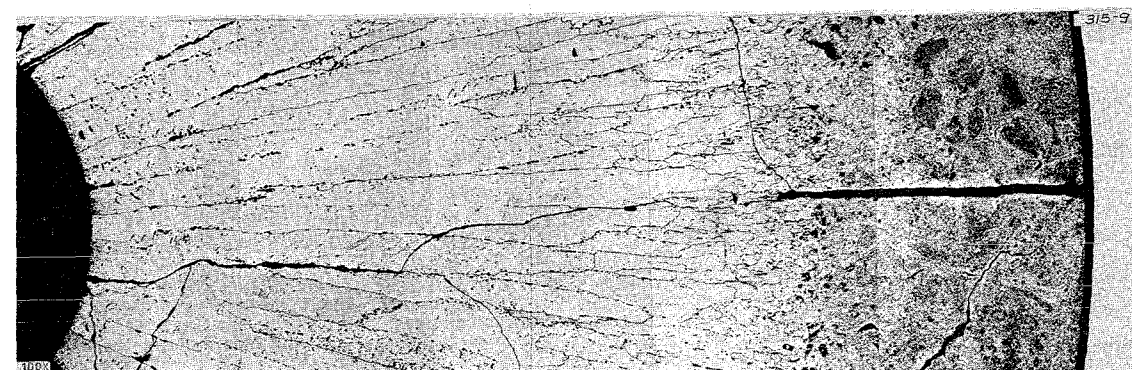
2 mm



0.2 mm



1mm



1mm

Prüfling L 13

Brennstoff :

Form : Tabletten, geschl.
4 Stck. mit
Zentralloch +)

Zusammensetzung : UO_2 , (7,5 % U-235)

Tablettendichte : 88,7 % th.D.

Hülle :

Material : X8CrNiMoVNb 16/13
W.-Nr. 1.4988

Außendurchmesser : 12 mm

Wandstärke : 1,0 mm

Brennstab :

Gesamtlänge : 182,7 mm

Länge der Brennstoffsäule : 140,0 mm

Gewicht der " : 103,2 g

Radiale Spaltweite : 48 μ m

Schmierdichte : 87,0 % th.D.

Bestrahlung :

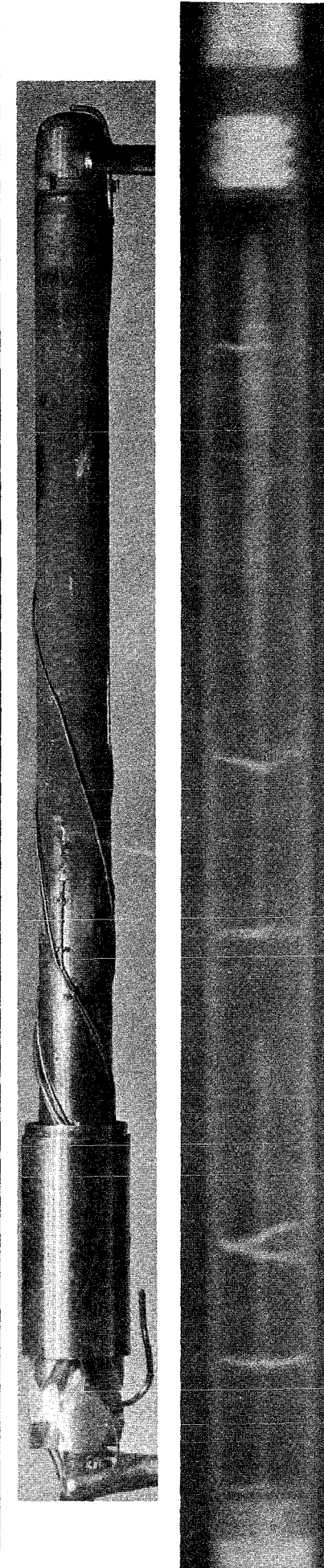
Zeit : 14.10. - 20.10.68

Dauer : 5 d 16 h 32 min

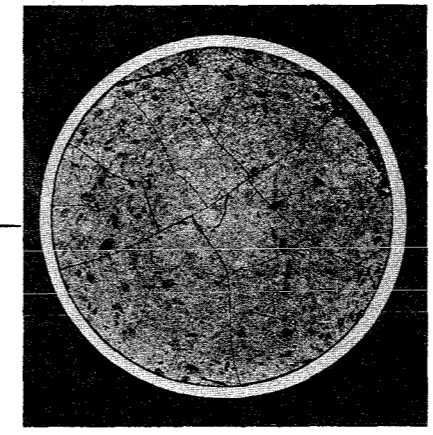
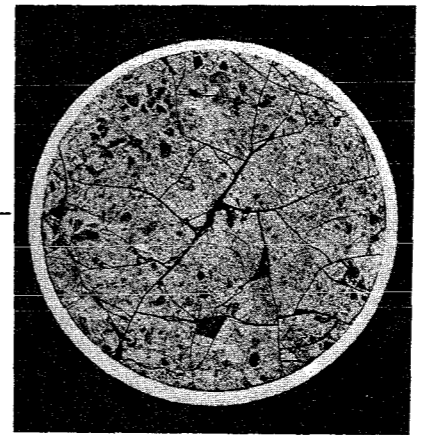
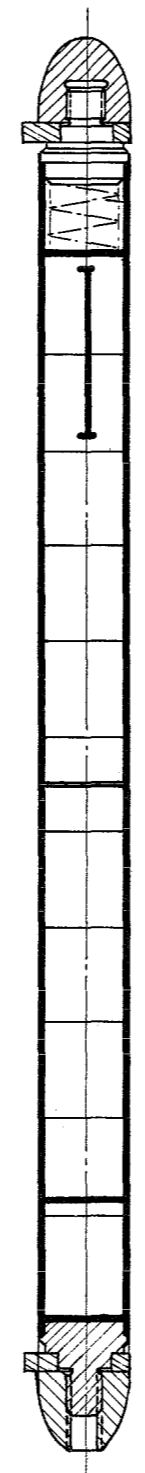
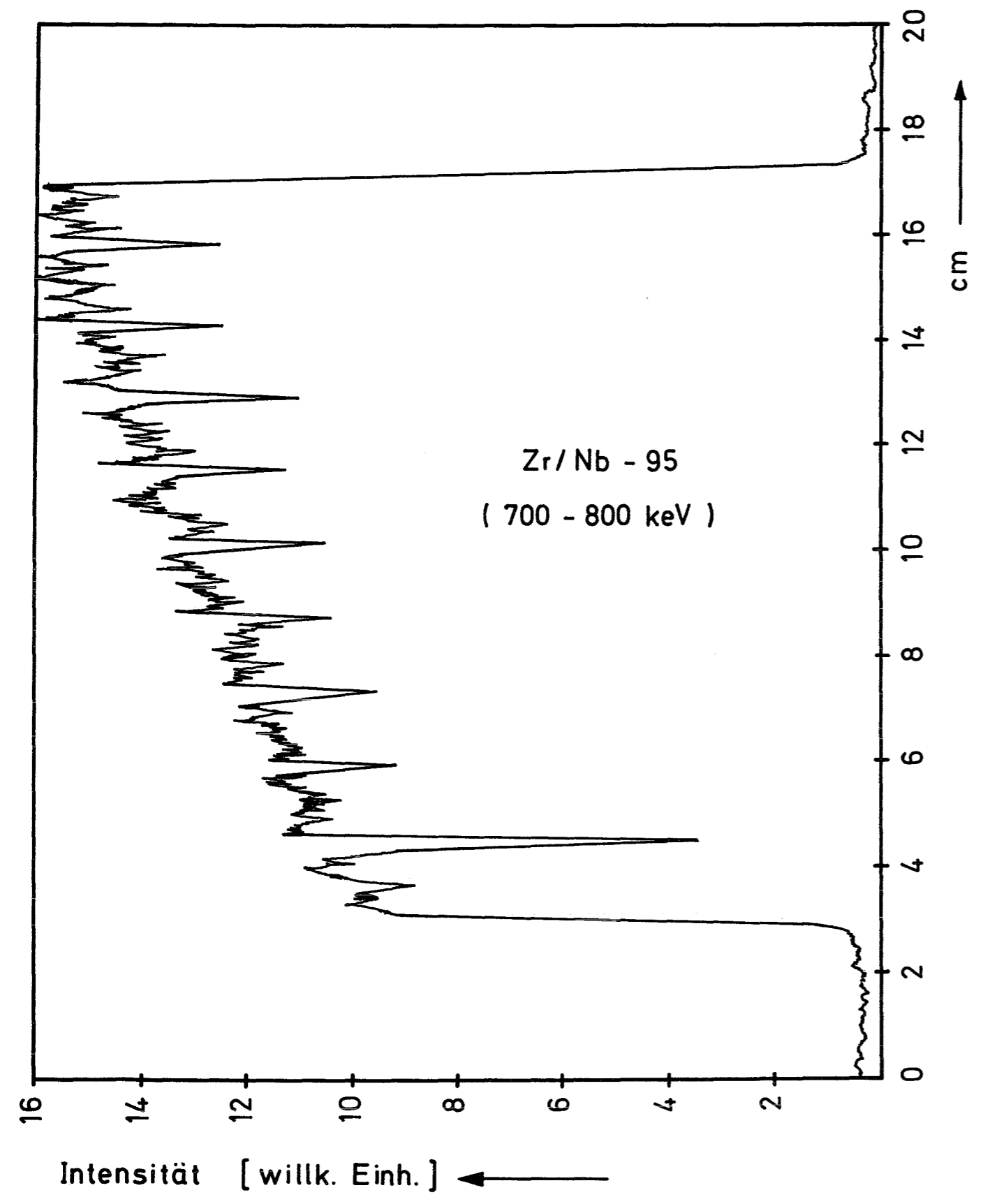
mittl. Stableistung : 670 W/cm

mittl. Hüllaußentemp. : 560°C

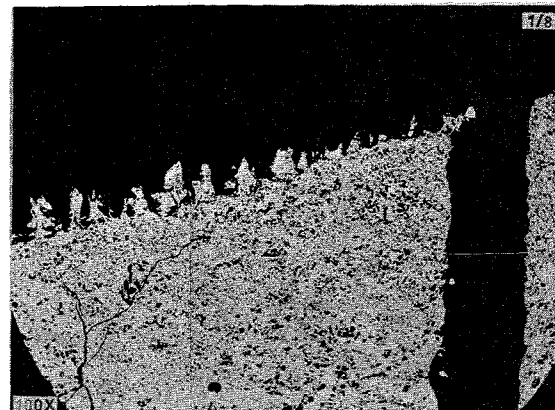
+)
Zentraltemperaturmessung



γ - Profil



2 mm



0.2 mm

Prüfling L 14

Brennstoff :

Form : Tabletten, geschl.,
Stirneinsenkung

Zusammensetzung : UO_2 (7,5 % U-235)

Tablettendichte : 93,9 % th.D.

Hülle :

Material : X8CrNiMoVNb 16/13
W.-Nr. 1.4988

Außendurchmesser : 12 mm

Wandstärke : 1,0 mm

Brennstab :

Gesamtlänge : 177,4 mm

Länge der Brennstoffsäule : 139,6 mm

Gewicht der " : 105,5 g

Radiale Spaltweite : 46 μ m

Schmierdichte : 92,1 % th.D.

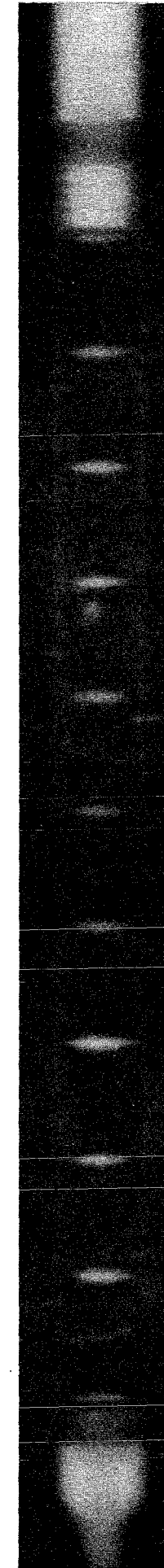
Bestrahlung :

Zeit : 29.3.67

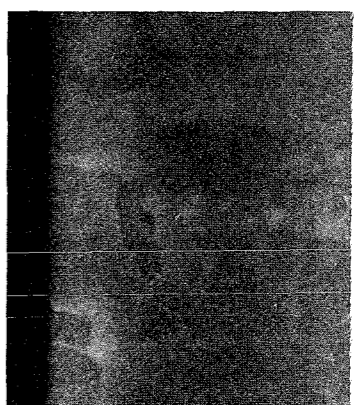
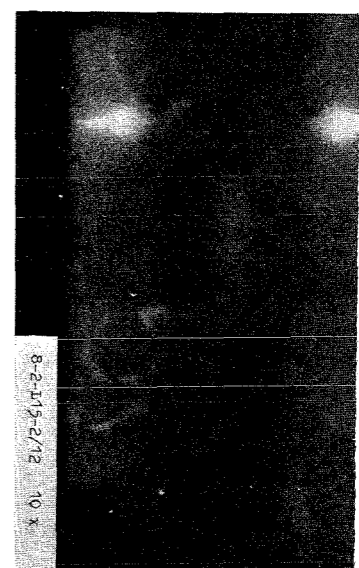
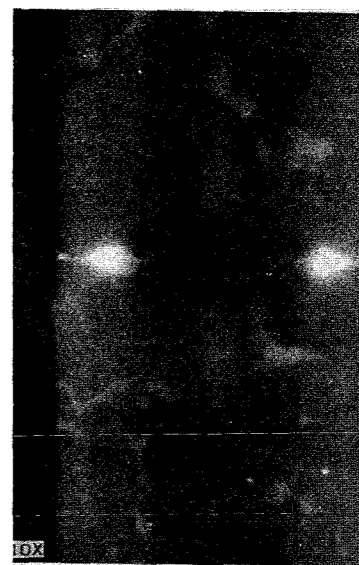
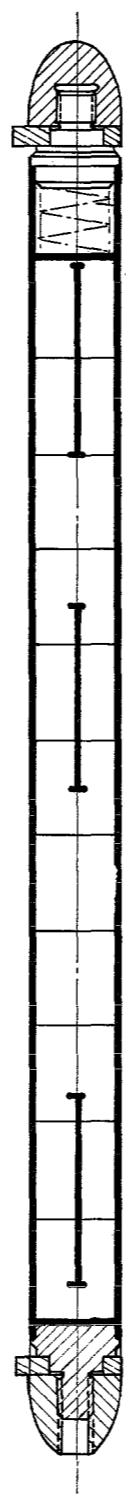
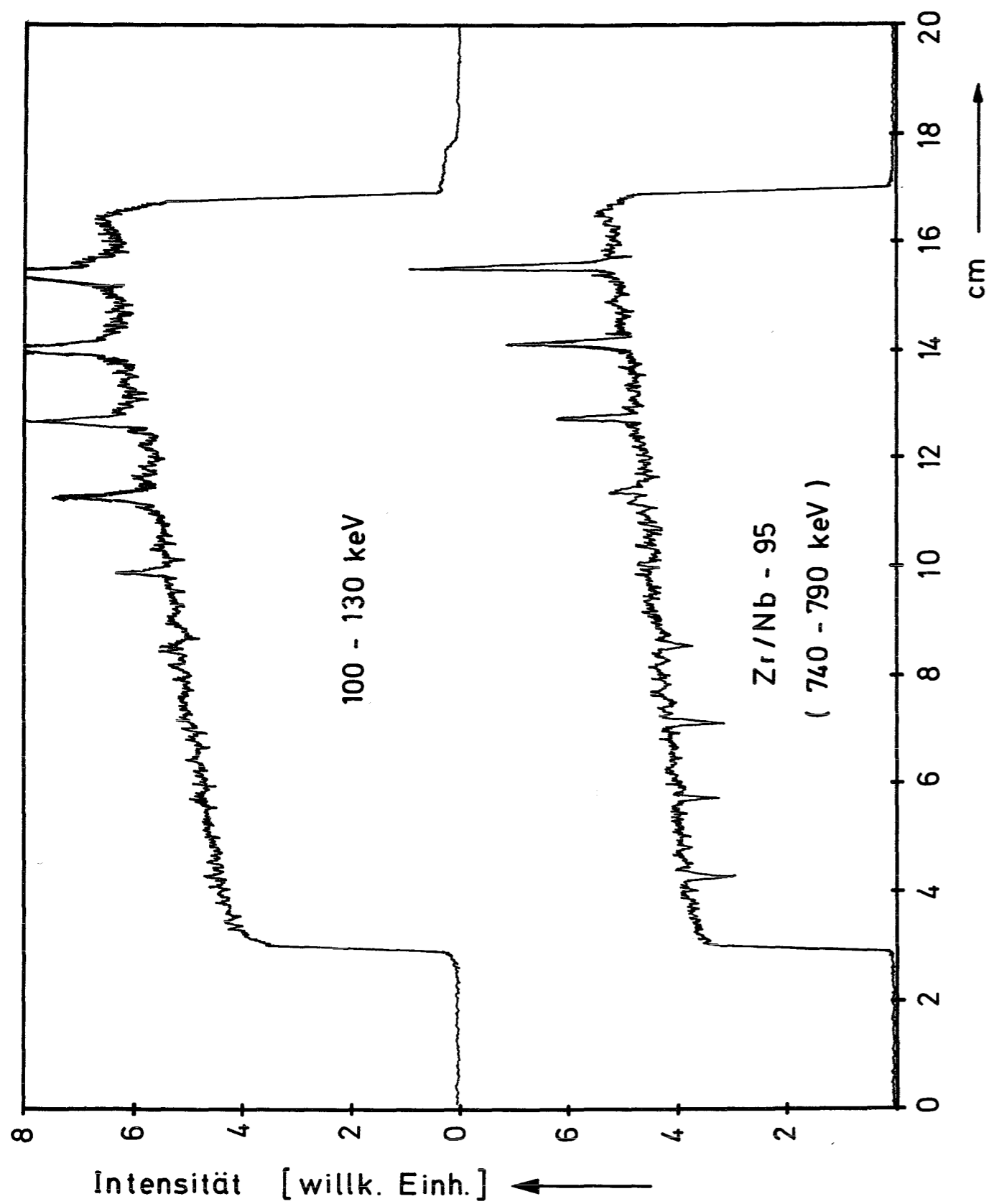
Dauer : 2 h

mittl. Stableistung : 490 W/cm

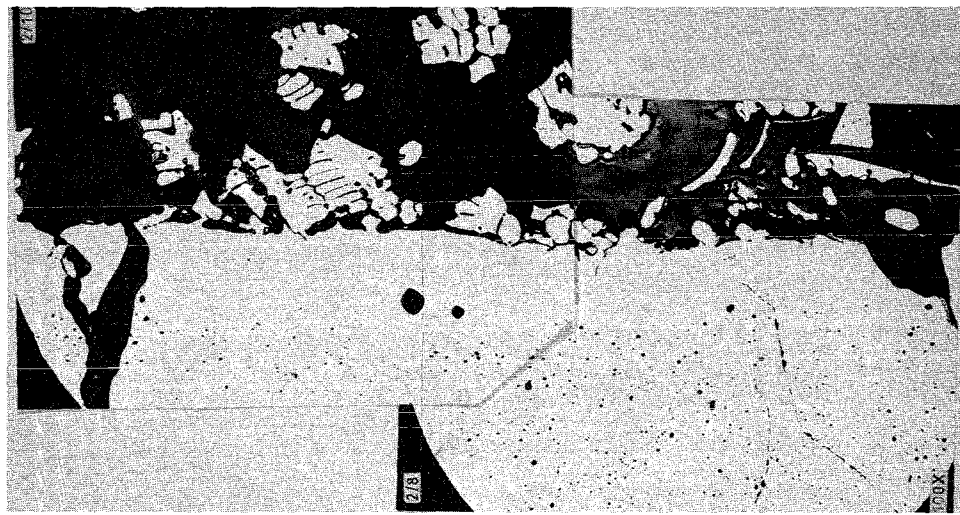
mittl. Hüllaußentemp. : 560°C



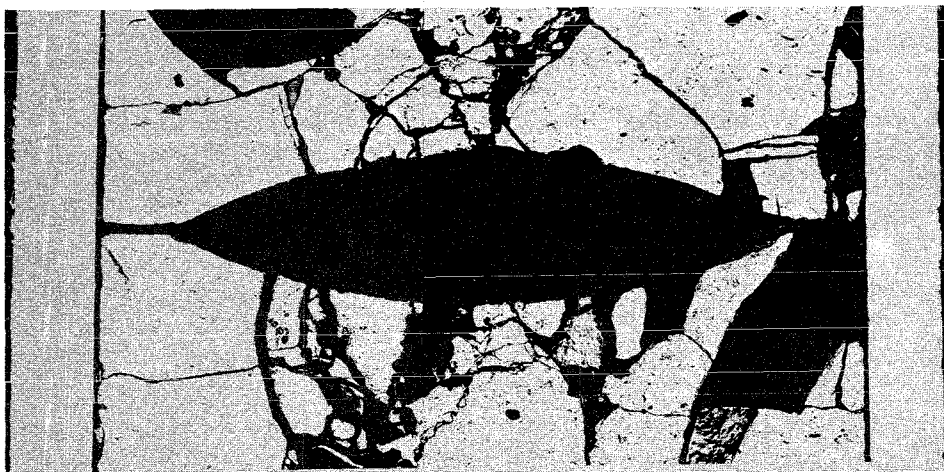
γ - Profile



2mm



0.2 mm



1 mm

Prüfling L 15

Brennstoff :

Form : Tabletten, geschl.,
Stirneinsenkung
Zusammensetzung : UO_2 (7,5 % U-235)
Tablettendichte : 93,8 % th.D.

Hülle :

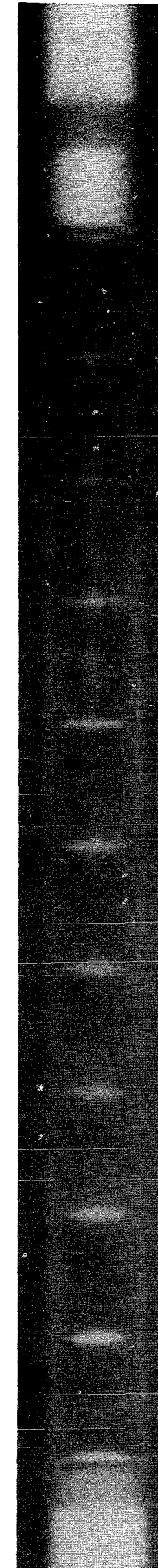
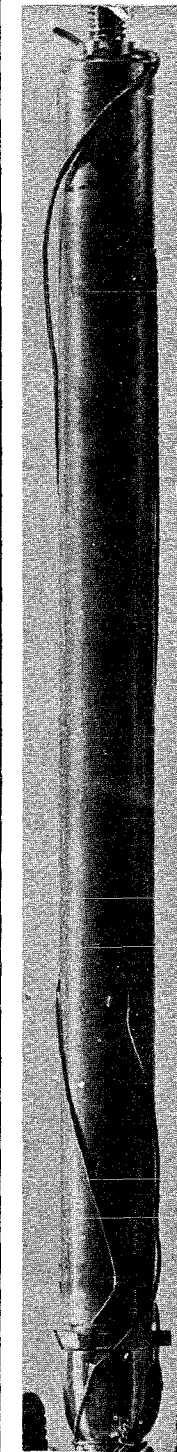
Material : X8CrNiMoVNb 16/13
W.-Nr. 1.4988
Außendurchmesser : 12 mm
Wandstärke : 1,0 mm

Brennstab :

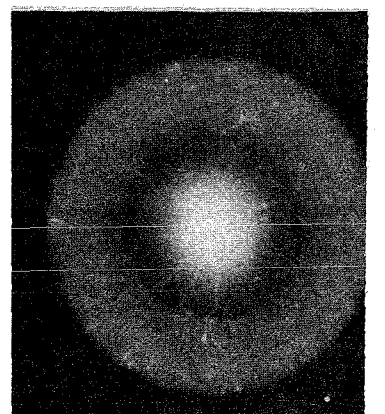
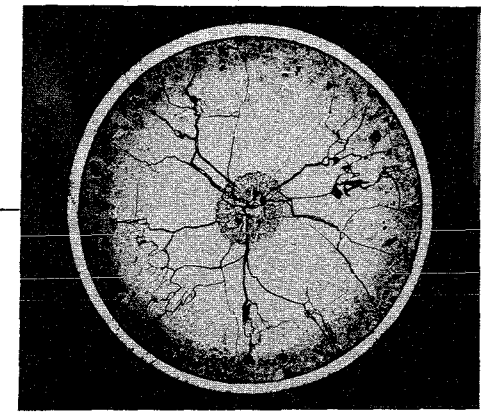
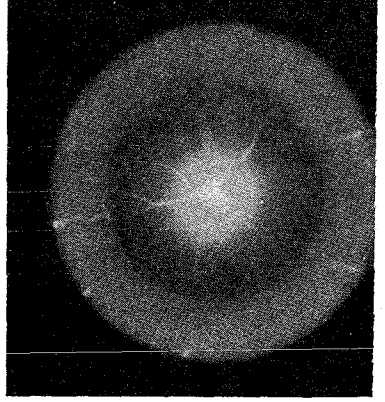
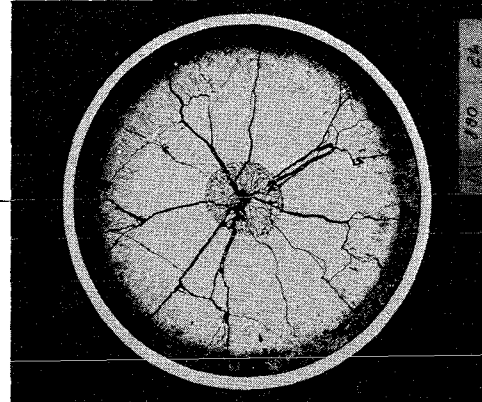
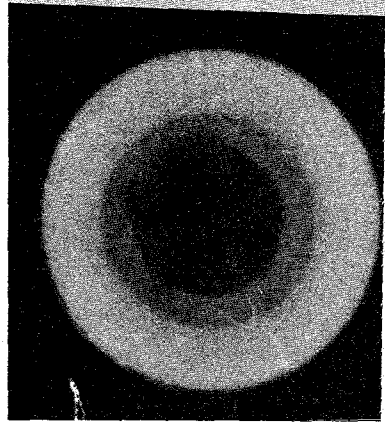
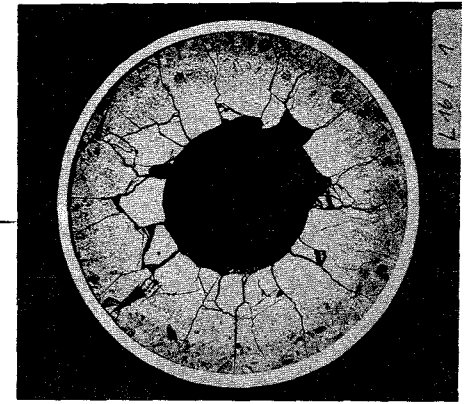
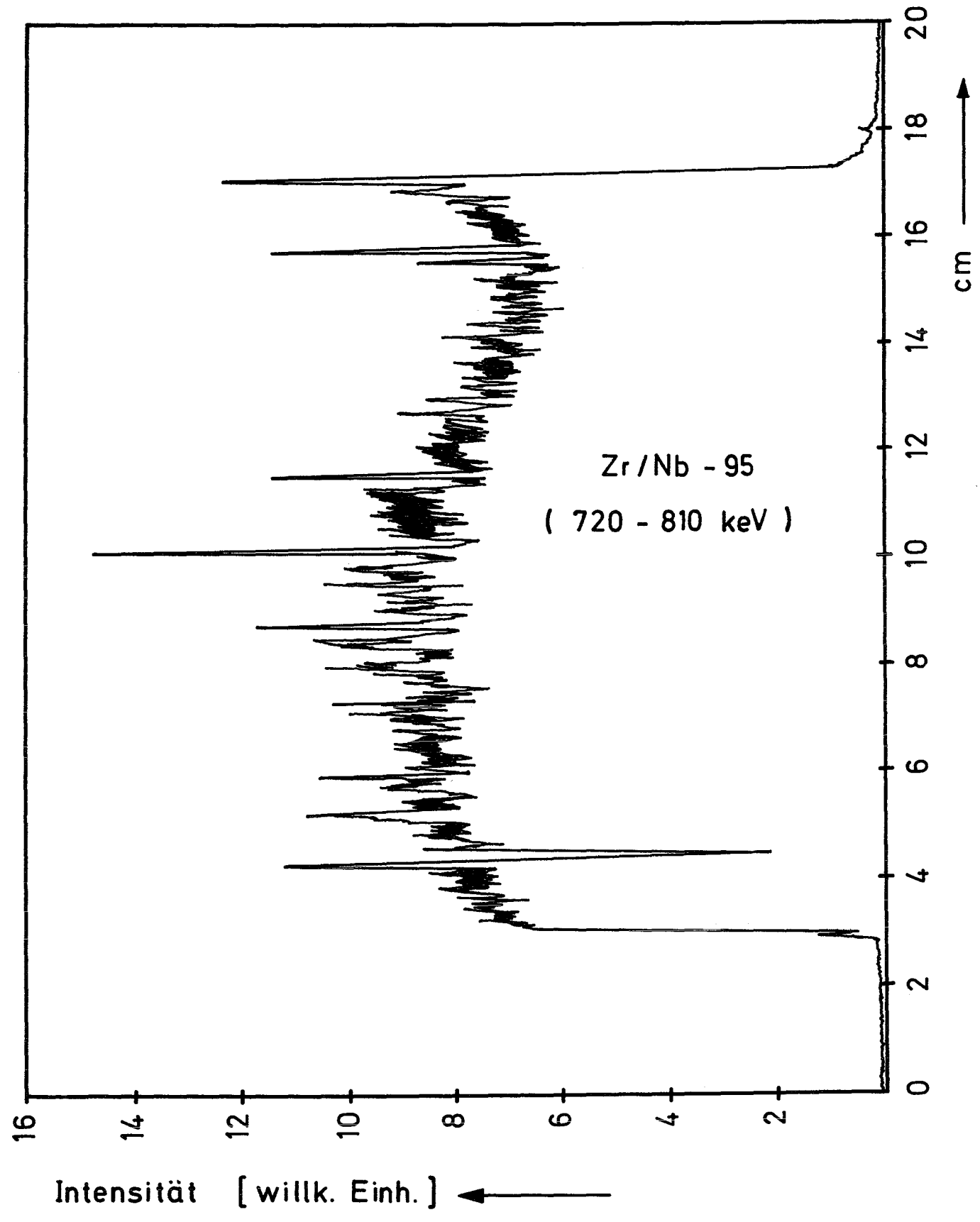
Gesamtlänge : 177,4 mm
Länge der Brennstoffsäule : 139,8 mm
Gewicht der " : 105,5 g
Radiale Spaltweite : 44 μ m
Schmierdichte : 92,1 % th.D.

Bestrahlung :

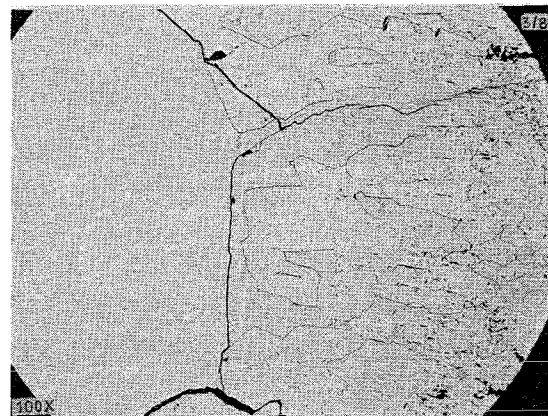
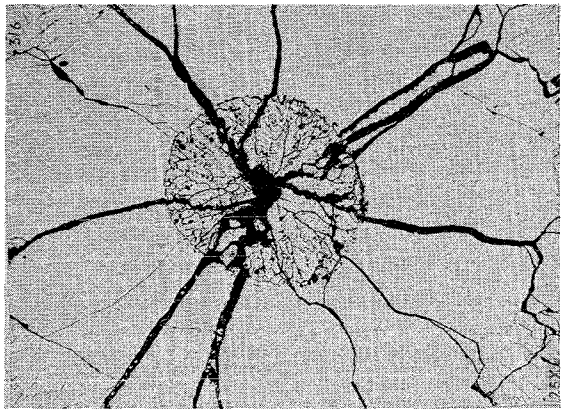
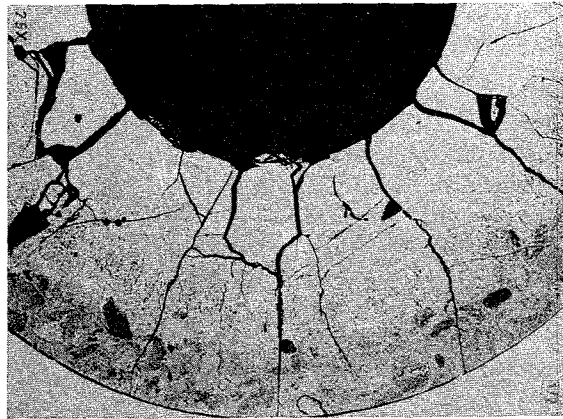
Zeit : 17.1.67
Dauer : 1 h 54 min
mittl. Stableistung : 610 W/cm
mittl. Hüllaußentemp. : 560°C



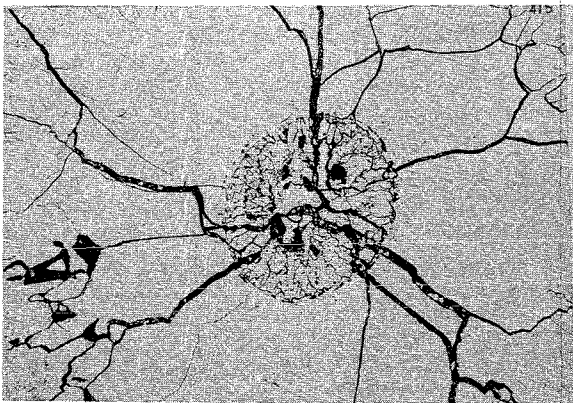
γ - Profil



2 mm



0.2 mm



1 mm

Prüfling L 16

Brennstoff :

Form : Tabletten, geschl.,
Stirneinsenkung
Zusammensetzung : UO_2 (7,5 % U-235)
Tablettendichte : 93,9 % th.D.

Hülle :

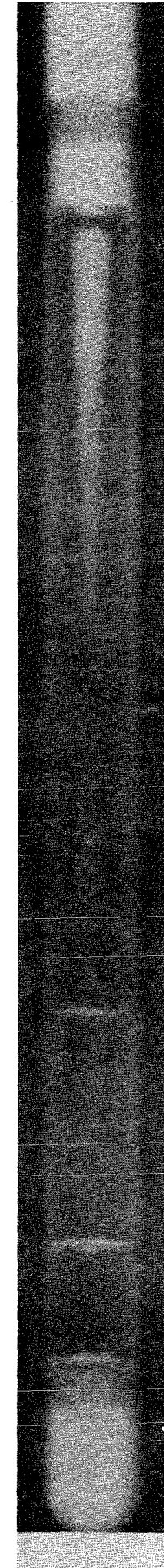
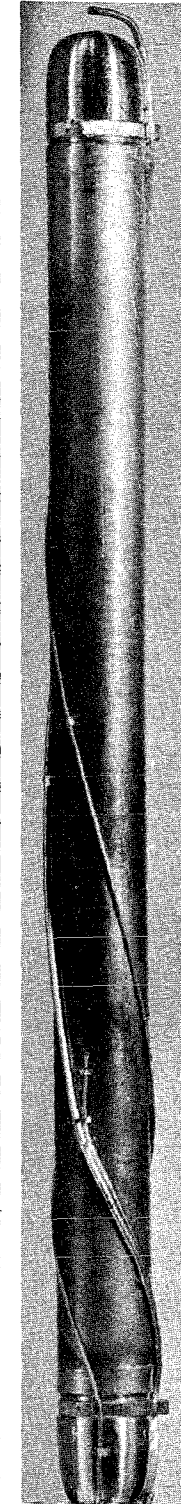
Material : X8CrNiMoVNb 16/13
W.-Nr. 1.4988
Außendurchmesser : 12 mm
Wandstärke : 1,0 mm

Brennstab :

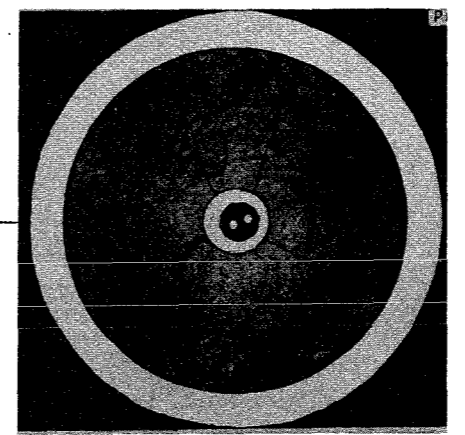
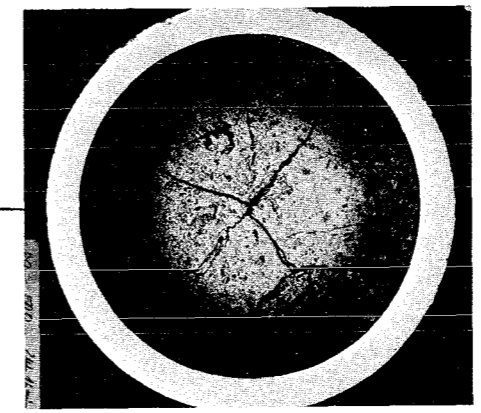
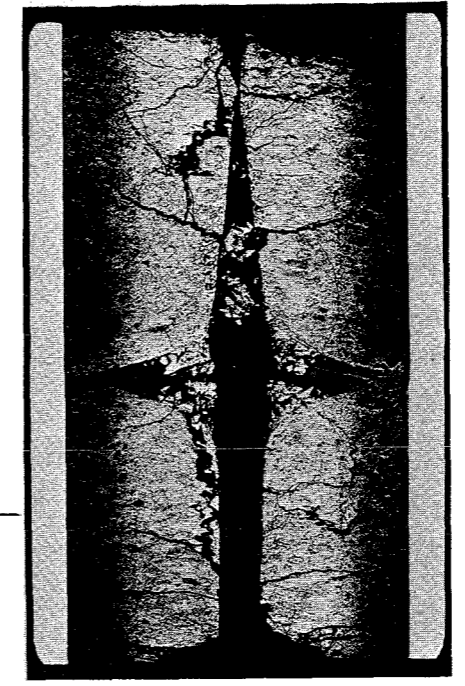
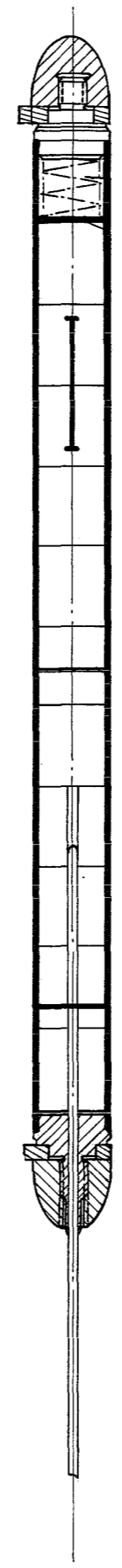
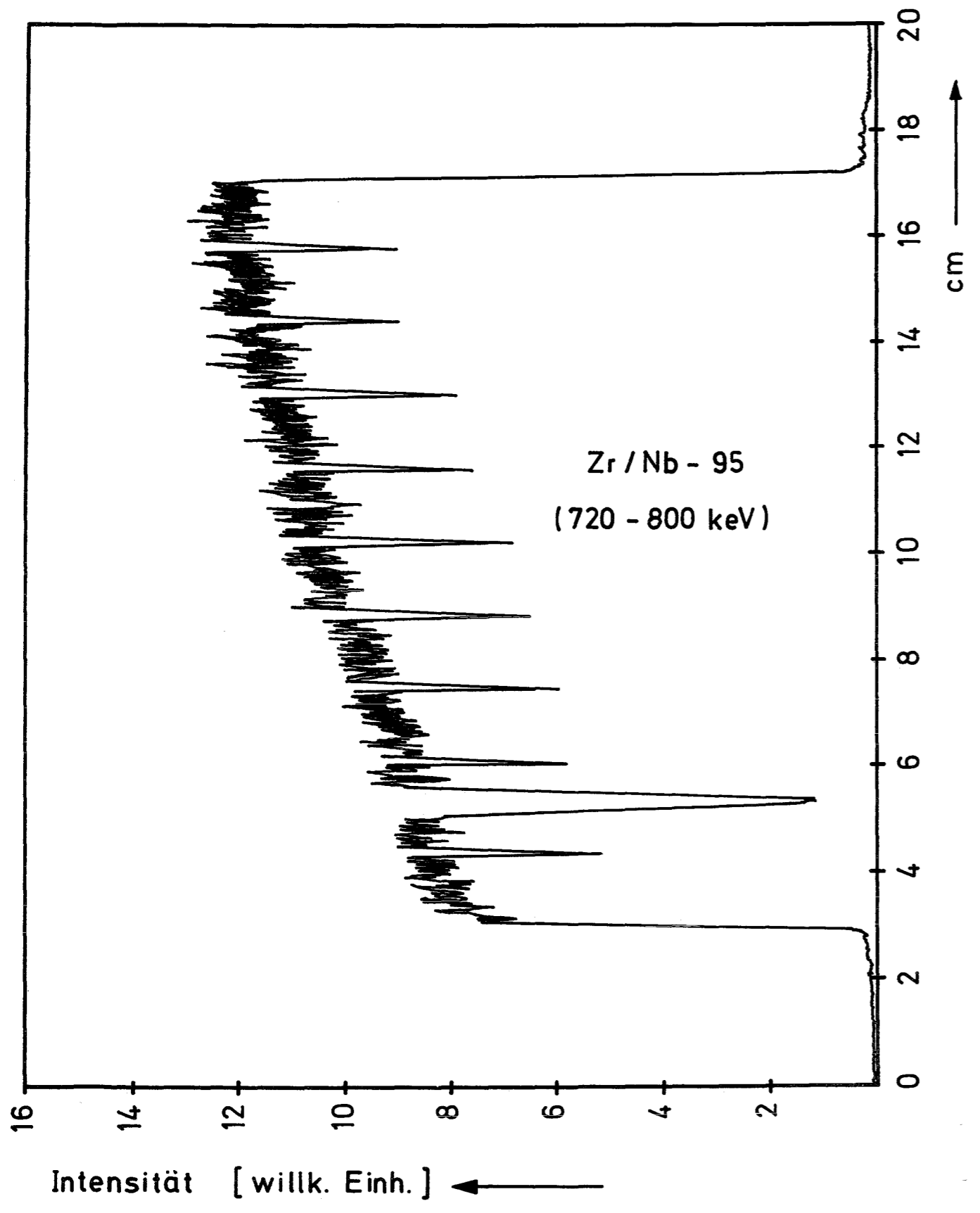
Gesamtlänge : 177,3 mm
Länge der Brennstoffsäule : 139,9 mm
Gewicht der " : 105,8 g
Radiale Spaltweite : 44 μ m
Schmierdichte : 92,2 % th.D.

Bestrahlung :

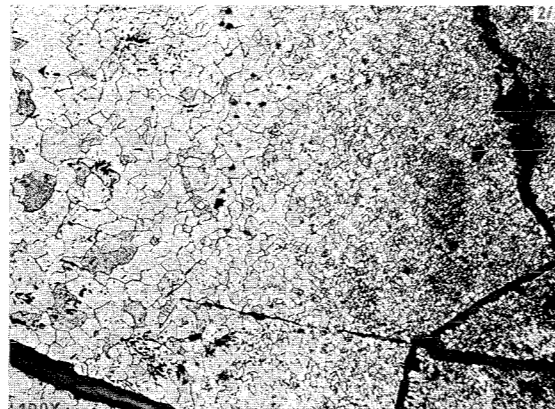
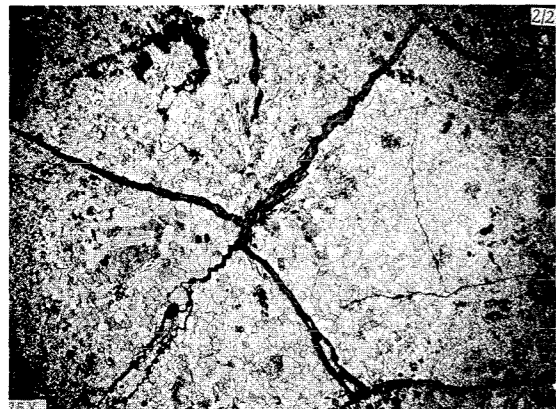
Zeit : 9.5.67
Dauer : 2 h
mittl. Stableistung : 890 W/cm
mittl. Hüllaußentemp. : 500°C



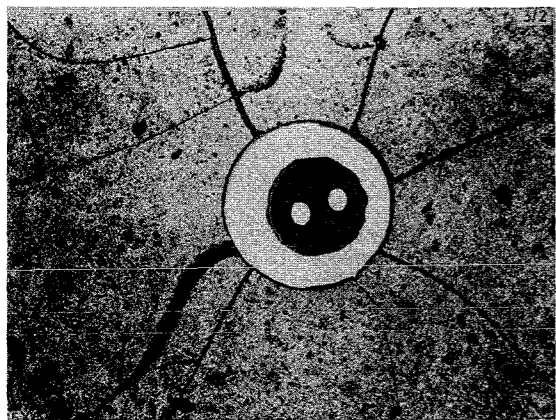
γ - Profil



2 mm



0.2 mm



1mm

Prüfling L 17

Brennstoff :

Form : Tabletten, geschl.,
Stirneinsenkung,
4 St. m. Zentralloch⁺
Zusammensetzung : UO₂ (7,4 % U-235)
Tablettendichte : 94,0 % th.D.

Hülle :

Material : X8CrNiMoVNb 16/13
W.- Nr. 1.4988
Außendurchmesser : 12 mm
Wandstärke : 1,0 mm

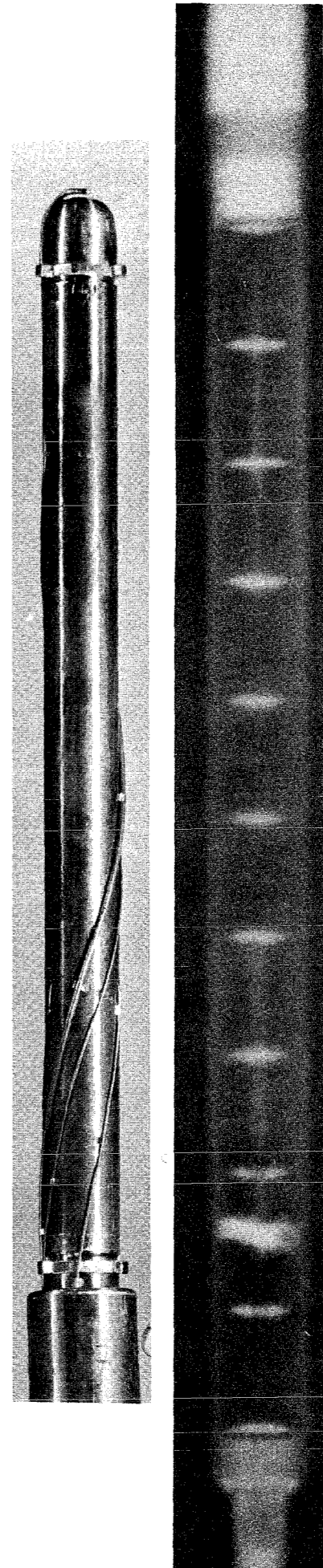
Brennstab :

Gesamtlänge : 182,6 mm
Länge der Brennstoffsäule : 139,6 mm
Gewicht der " : 104,1 g
Radiale Spaltweite : 48 µm
Schmierdichte : 92,2 % th.D.

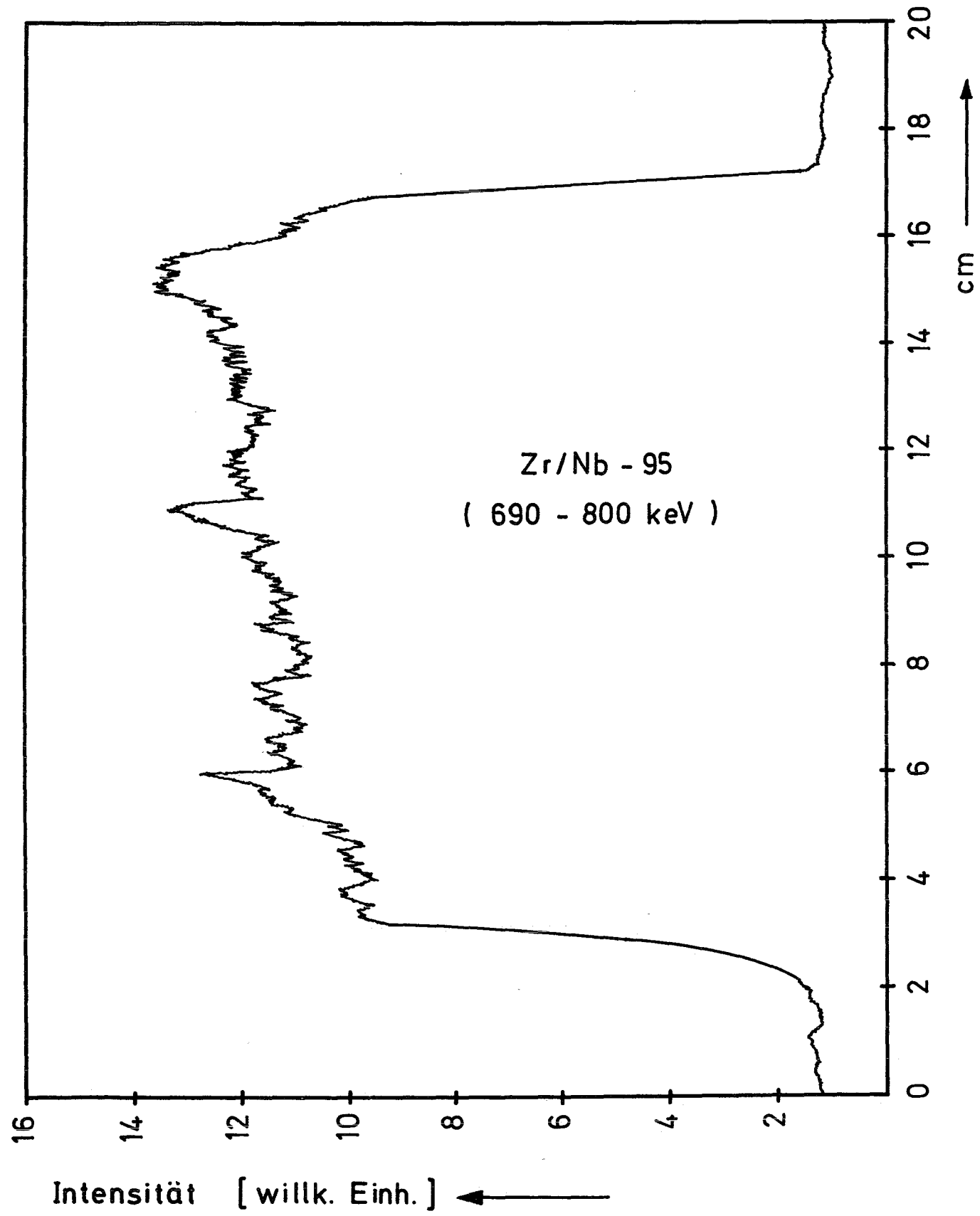
Bestrahlung :

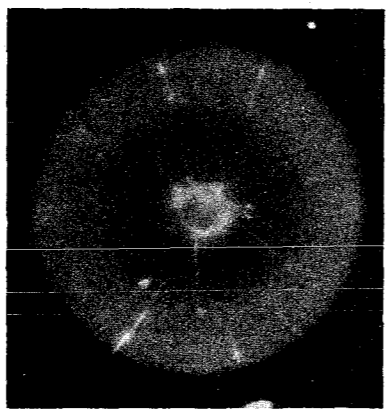
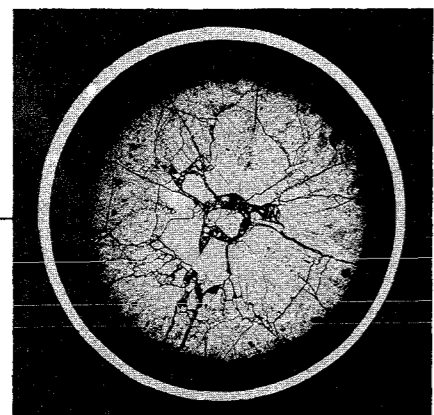
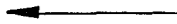
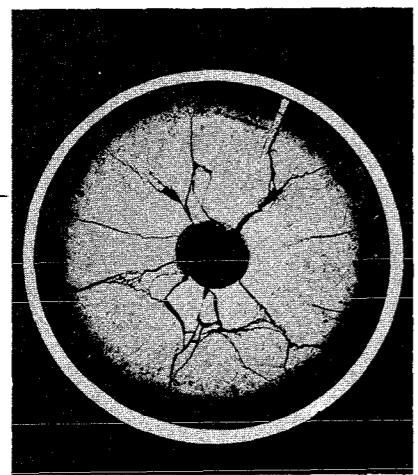
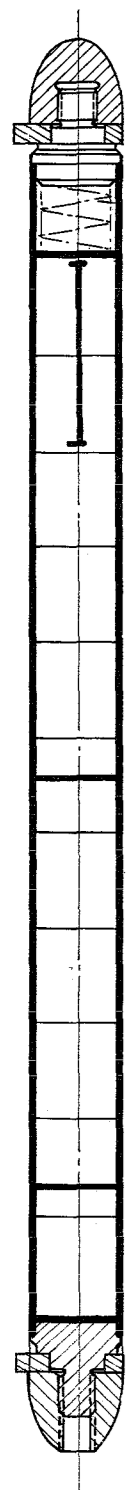
Zeit : 21.6. - 22.6.67
Dauer : 24 h 16 min
mittl. Stabileistung : 480 W/cm
mittl. Hüllaußentemp. : 560°C

⁺) Zentraltemperaturmessung



δ - Profil





2 mm

Prüfling L 18

Brennstoff :

Form : Tabletten, geschl.,
Stirneinsenkung
Zusammensetzung : UO_2 (7,5 % U-235)
Tablettendichte : 90,4 % th.D.

Hülle :

Material : X8CrNiMoVNb 16/13
W.-Nr. 1.4988
Außendurchmesser : 12 mm
Wandstärke : 1,0 mm

Brennstab :

Gesamtlänge : 177,1 mm
Länge der Brennstoffsäule : 140,1 mm
Gewicht der " : 103,4 g
Radiale Spaltweite : 122 μ m
Schmierdichte : 86,1 % th.D.

Bestrahlung :

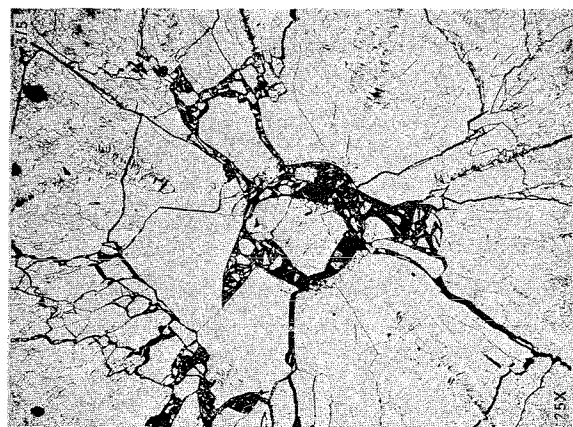
Zeit : 6.4.67
Dauer : 12 min
mittl. Stableistung : 900 W/cm
mittl. Hüllaußentemp. : 500°C



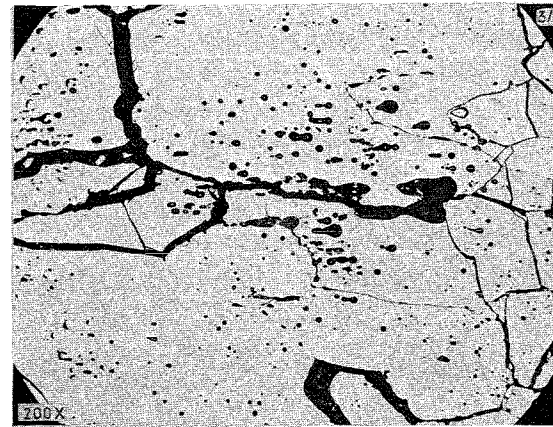
0.5 mm



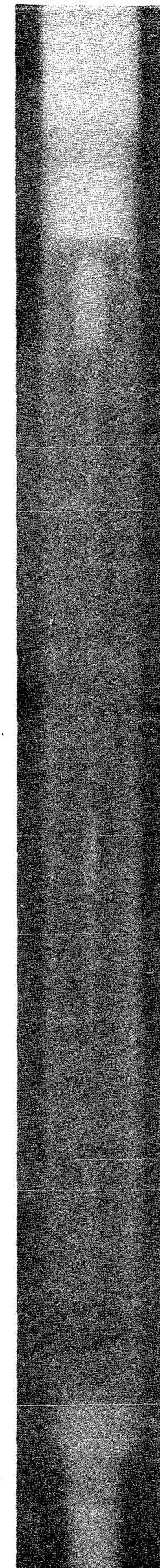
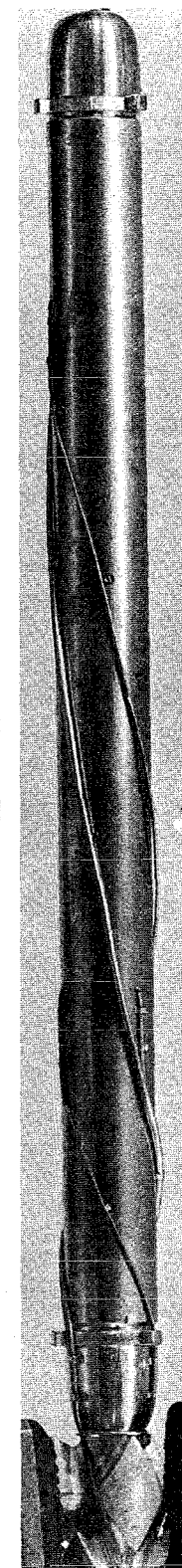
0.2 mm



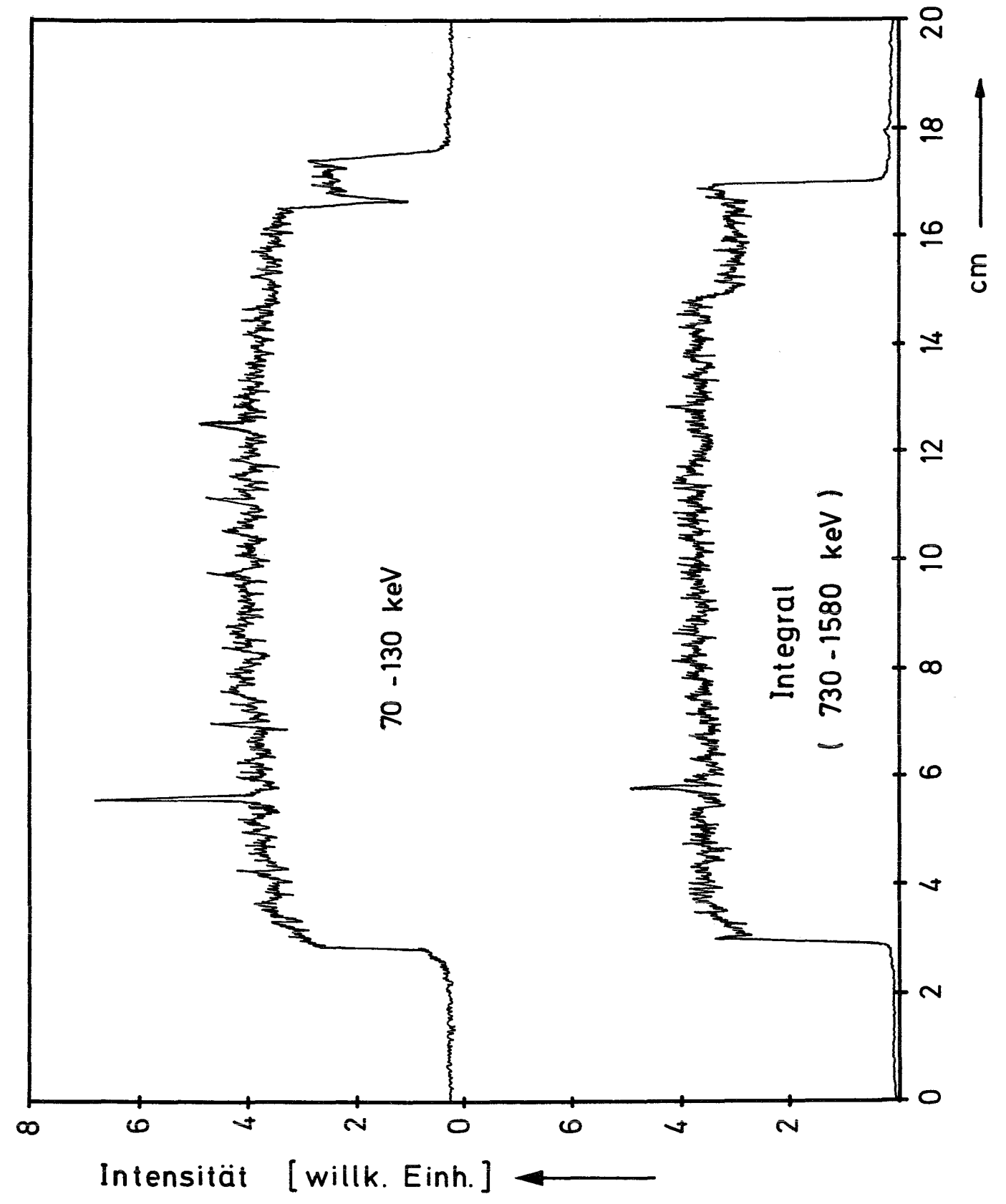
1 mm

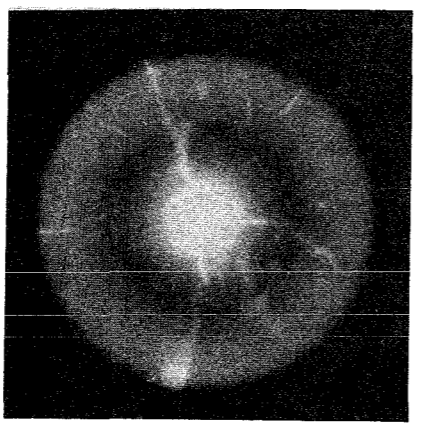
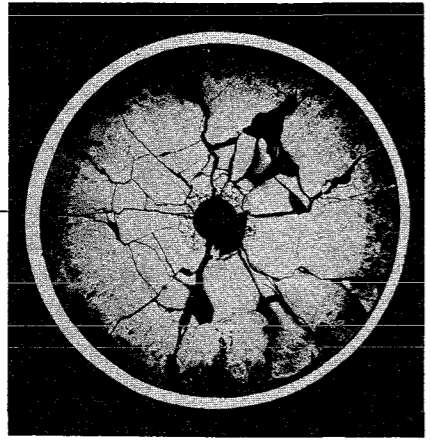
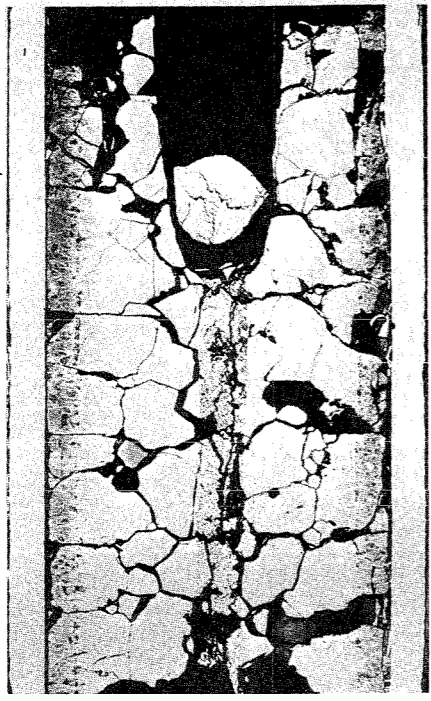
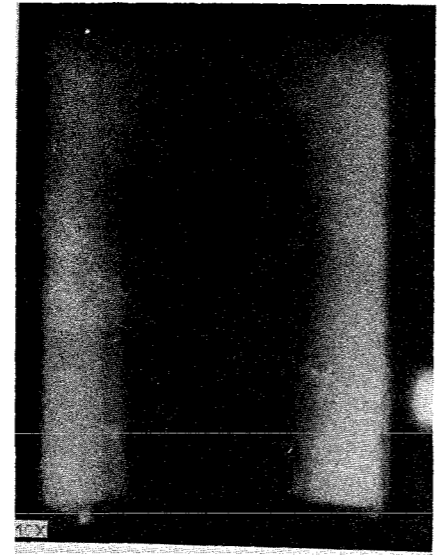
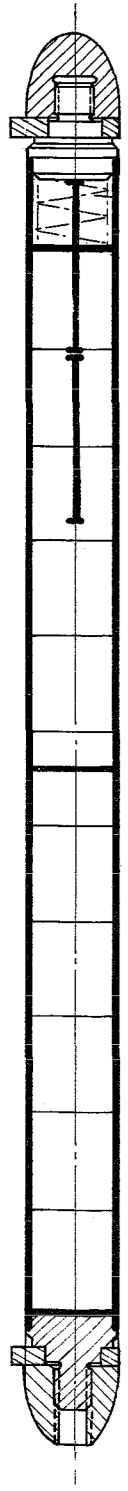


0.1 mm

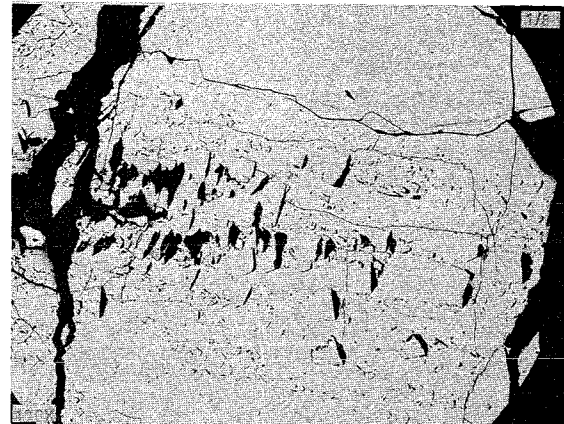


γ - Profile





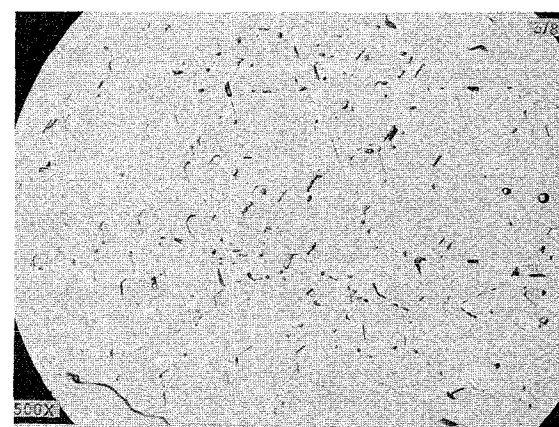
2 mm



0.2 mm



0.2 mm



20 μm

Prüfling L 19

Brennstoff :

Form : Tabletten, geschl.,
Stirneinsenkung
Zusammensetzung : UO_2 (7,5 % U-235)
Tablettendichte : 90,6 % th.D.

Hülle :

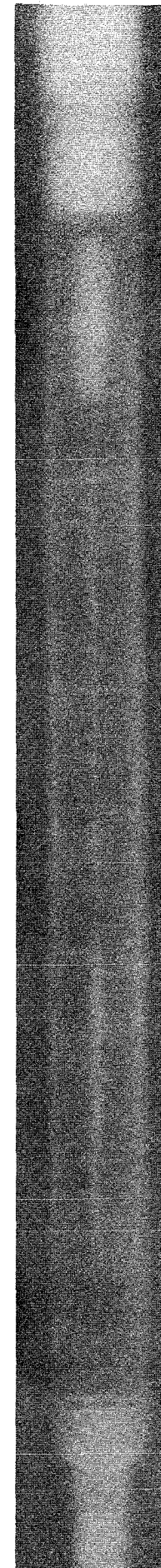
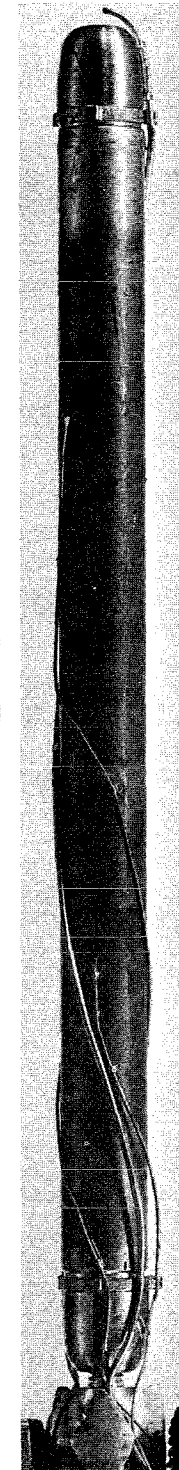
Material : X8CrNiMoVNb 16/13
W.-Nr. 1.4988
Außendurchmesser : 12 mm
Wandstärke : 1,0 mm

Brennstab :

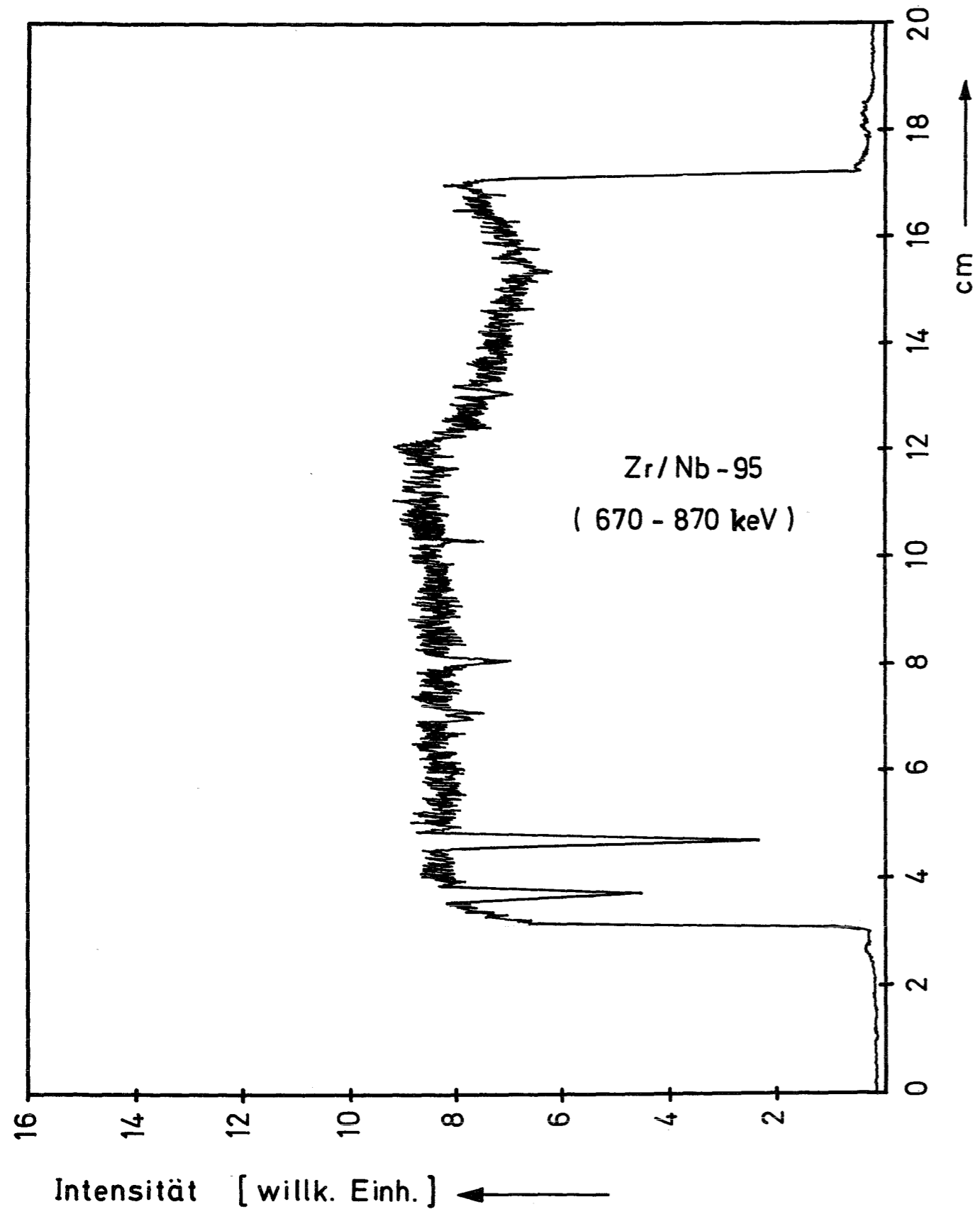
Gesamtlänge : 177,0 mm
Länge der Brennstoffsäule : 140,1 mm
Gewicht der " : 103,8 g
Radiale Spaltweite : 120 μm
Schmierdichte : 86,3 % th.D.

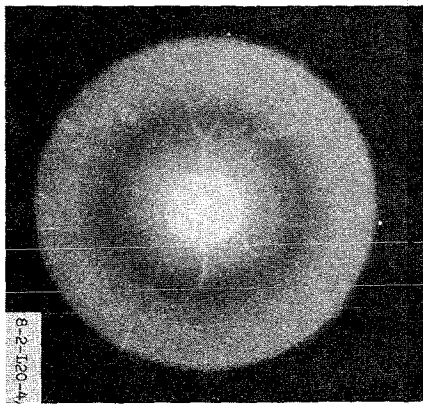
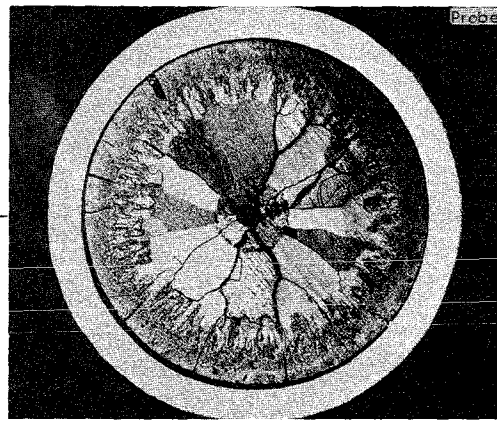
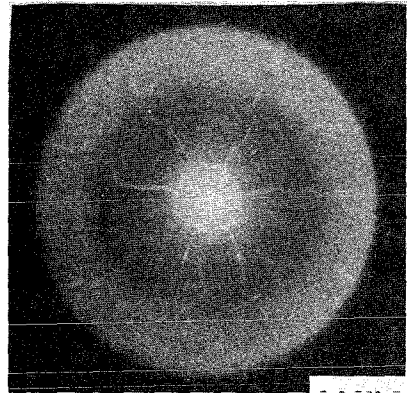
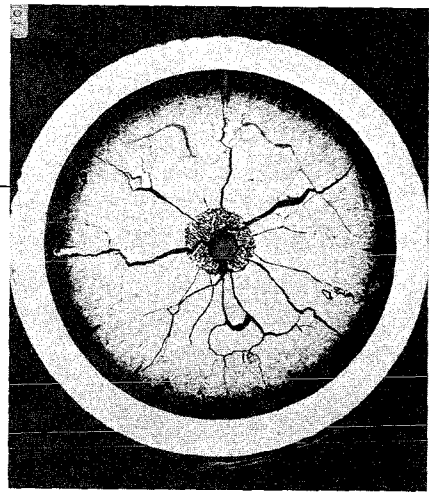
Bestrahlung :

Zeit : 21.3.67
Dauer : 2 h 1 min
mittl. Stableistung : 740 W/cm
mittl. Hüllaußentemp. : 535 °C

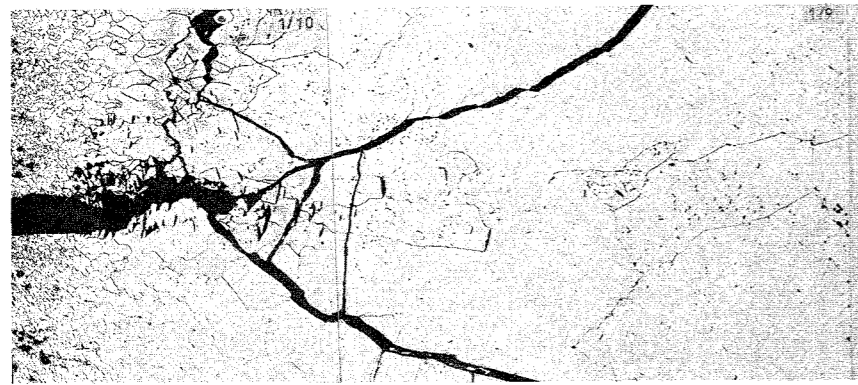


γ - Profil

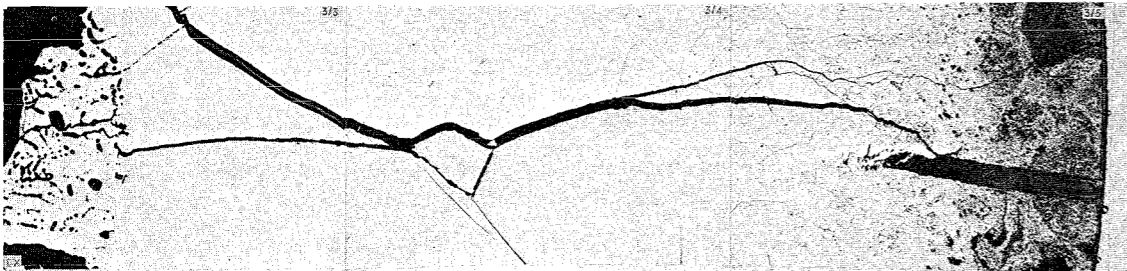
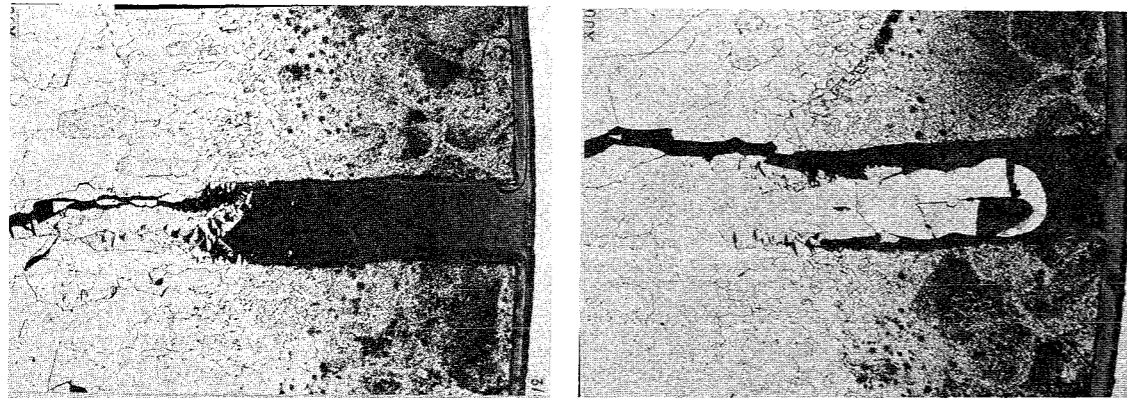




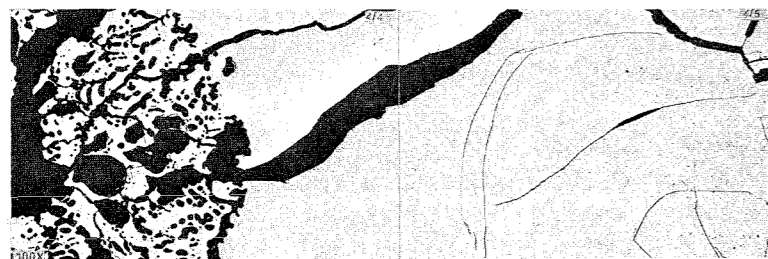
2mm



0.2 mm



1 mm



1 mm

Prüfling L 20

Brennstoff :

Form : Tabletten, geschl.,
Stirneinsenkung
Zusammensetzung : UO_2 (7,5 % U-235)
Tablettendichte : 90,1 % th.D.

Hülle :

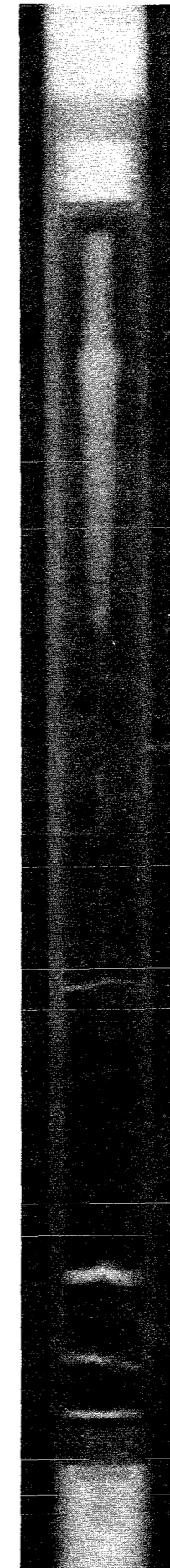
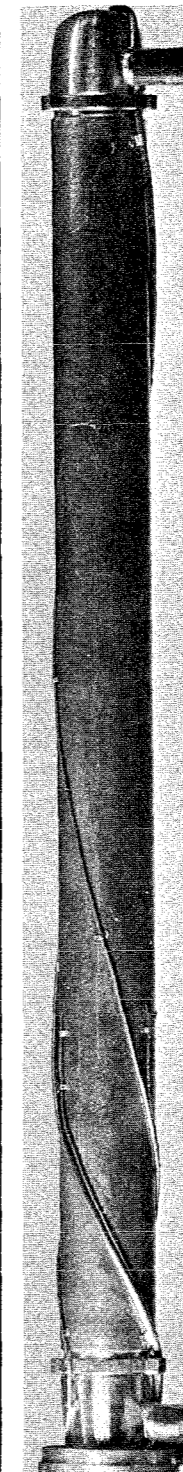
Material : X8CrNiMoVNb 16/13
W.-Nr. 1.4988
Außendurchmesser : 12 mm
Wandstärke : 1,0 mm

Brennstab :

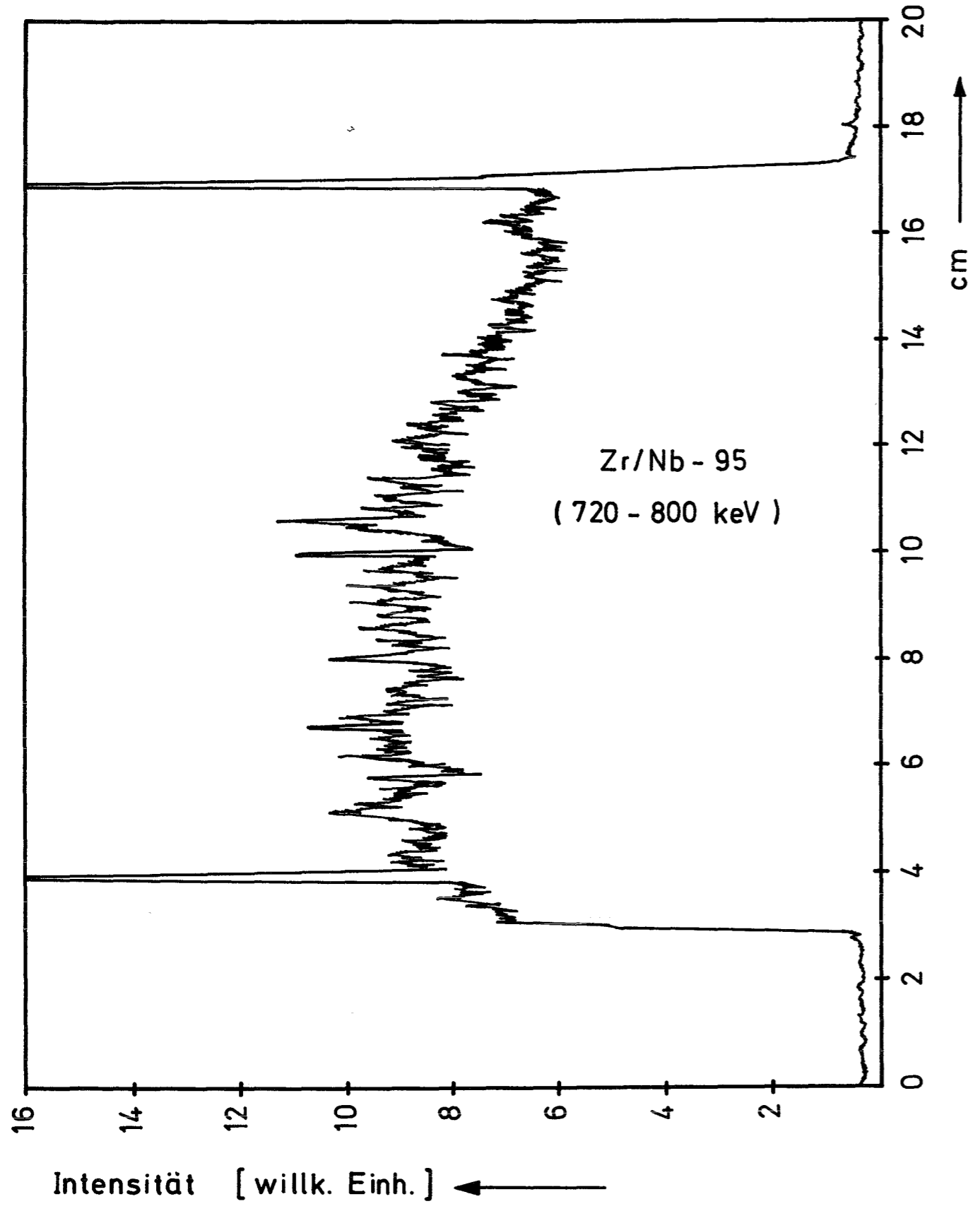
Gesamtlänge : 177,2 mm
Länge der Brennstoffsäule : 139,5 mm
Gewicht der " : 102,7 g
Radiale Spaltweite : 118,5 μ m
Schmierdichte : 85,9 % th.D.

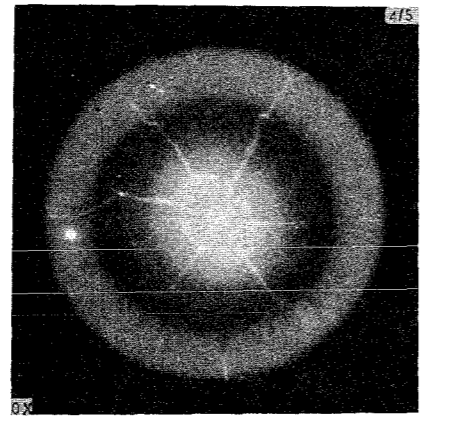
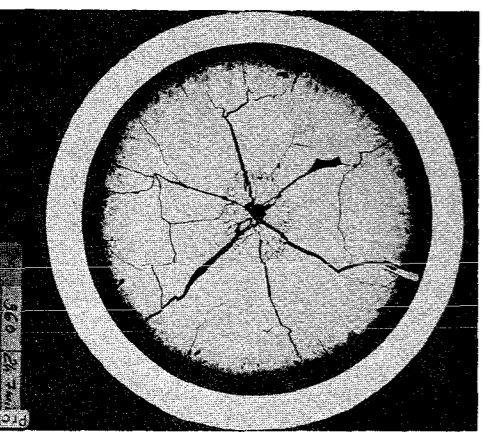
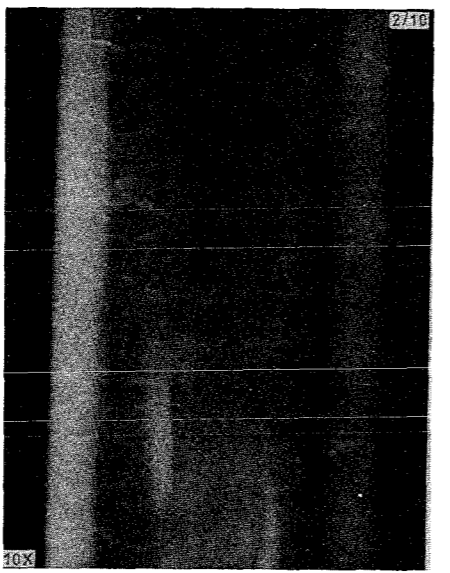
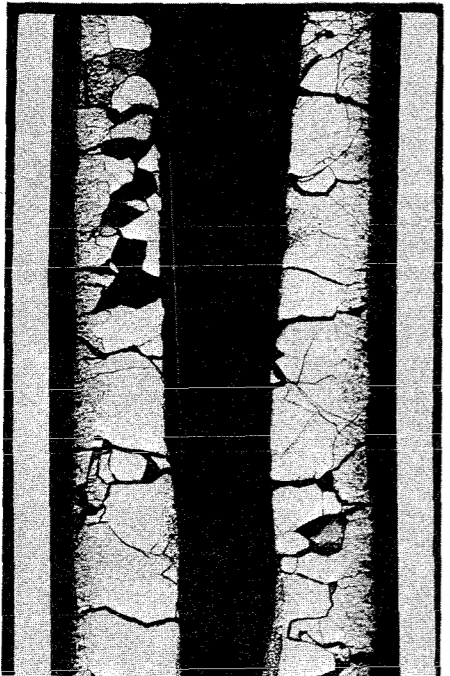
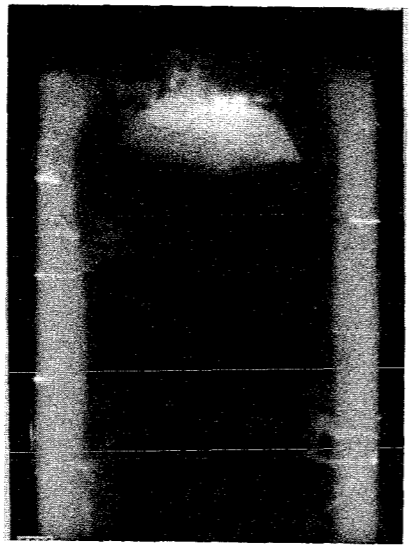
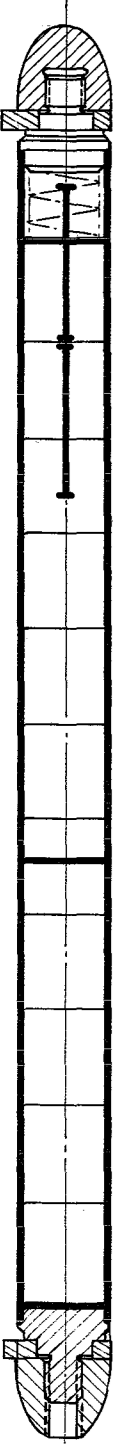
Bestrahlung :

Zeit : 19.2. - 20.2.68
Dauer : 24 h
mittl. Stableistung : 1000 W/cm
mittl. Hüllaußentemp. : 500°C

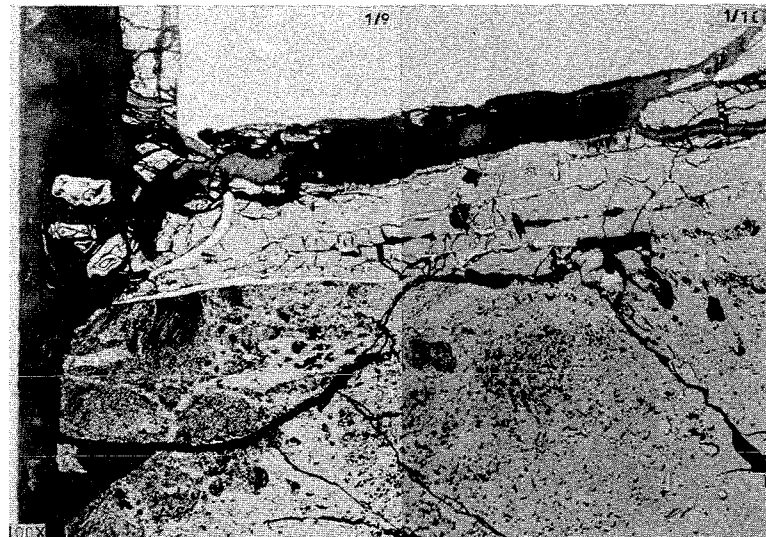


γ - Profil

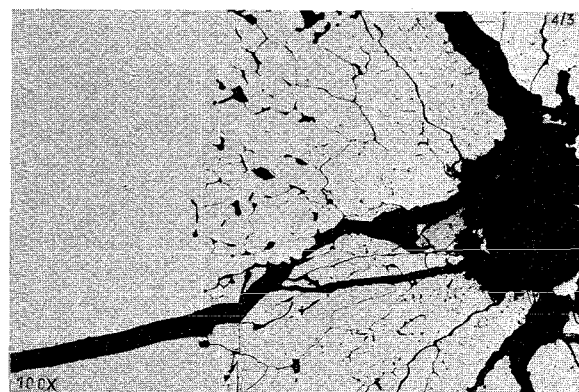
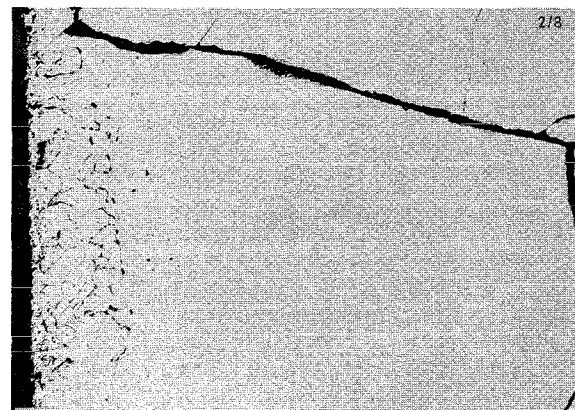




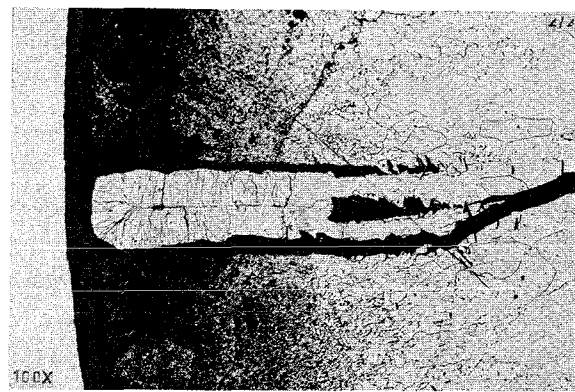
2 mm



0.2 mm



0.2 mm



0.2 mm

Prüfling L 21

Brennstoff :

Form : Tabletten, geschl.,
Stirneinsenkung

Zusammensetzung : UO_2 (7,5 % U-235)

Tablettendichte : 90,1 % th.D.

Hülle :

Material : X8CrNiMoVNb 16/13
W.-Nr. 1.4988

Außendurchmesser : 12 mm

Wandstärke : 1,0 mm

Brennstab :

Gesamtlänge : 177,3 mm

Länge der Brennstoffsäule : 139,6 mm

Gewicht der " : 102,8 g

Radiale Spaltweite : 128,5 μ m

Schmierdichte : 85,6 % th.D.

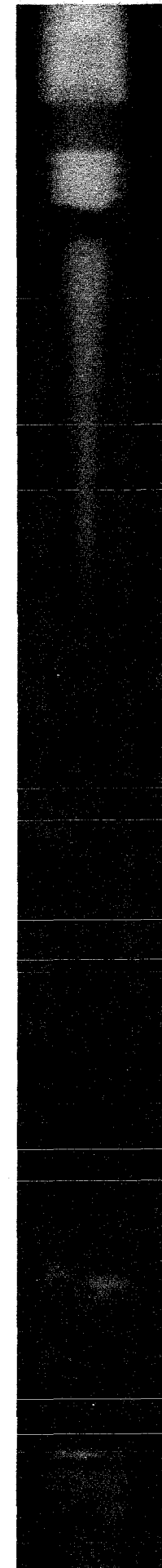
Bestrahlung :

Zeit : 7.6.67

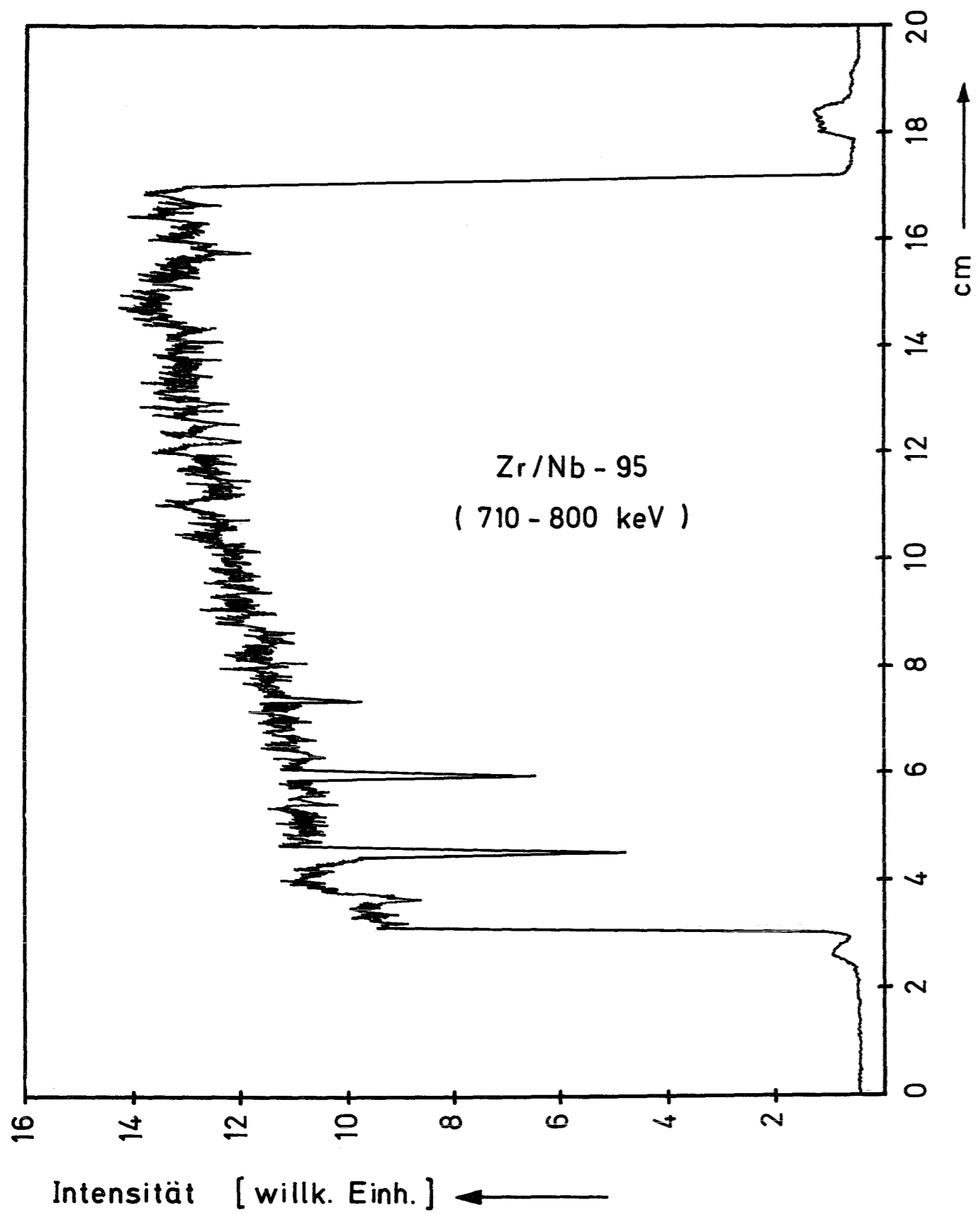
Dauer : 2 h 7 min

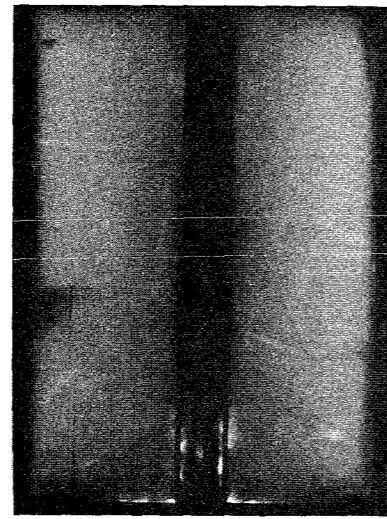
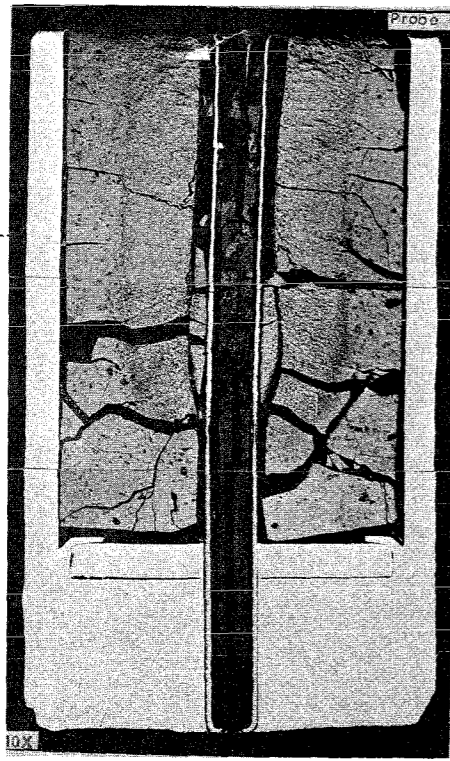
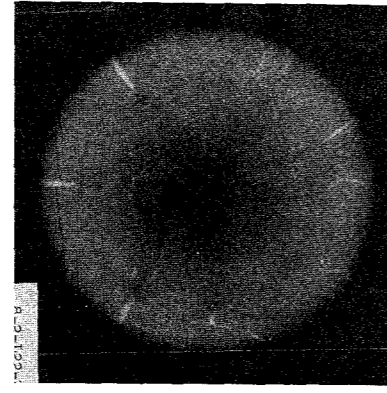
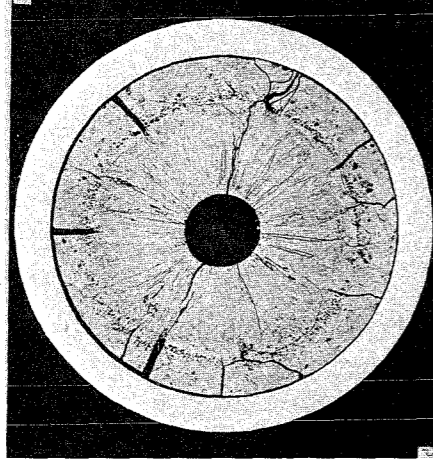
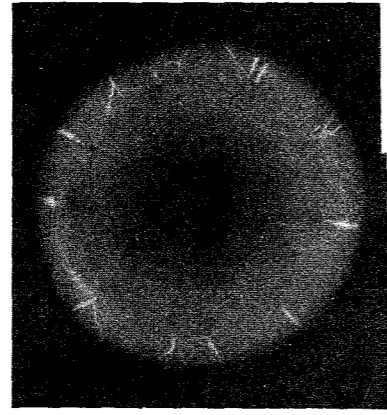
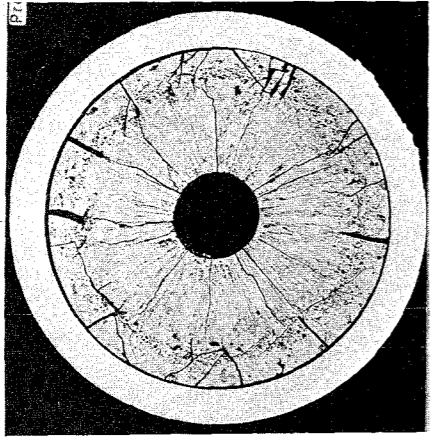
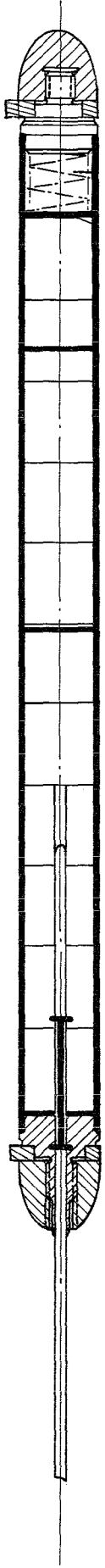
mittl. Stableistung : 960 W/cm

mittl. Hüllaußentemp. : 500°C

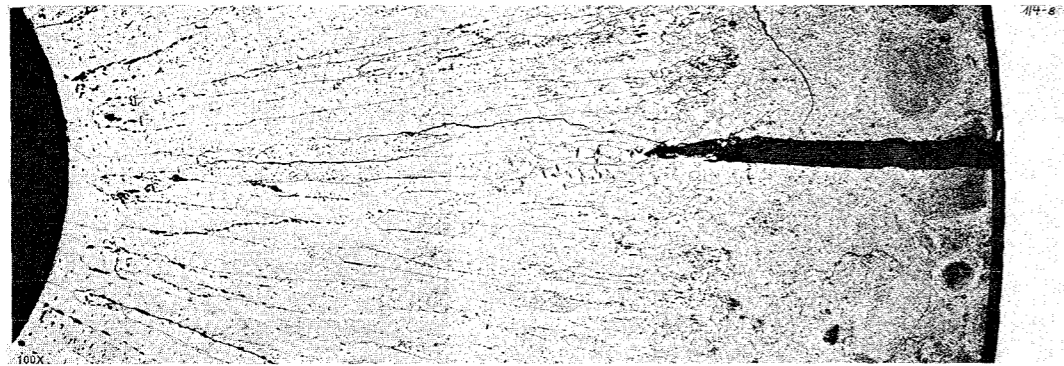


γ - Profil

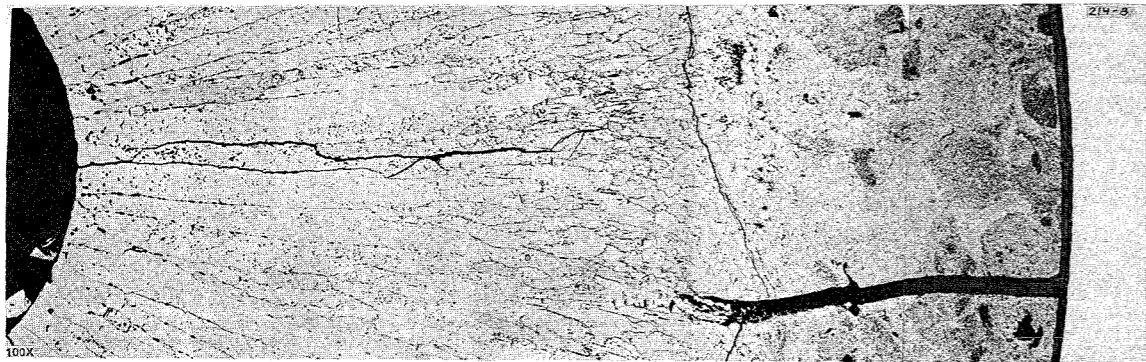




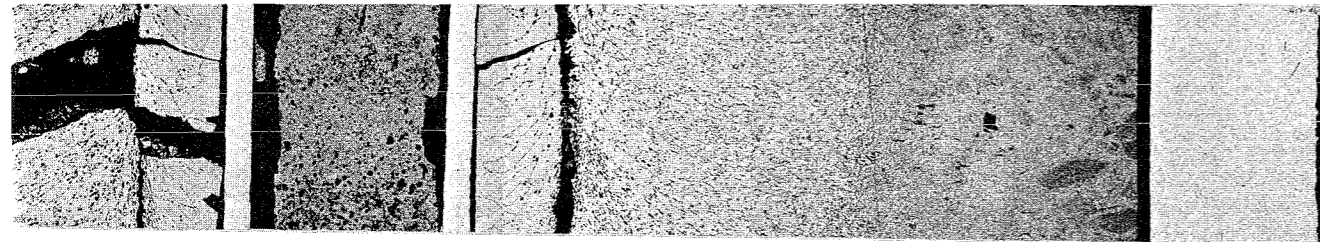
2 mm



1 mm



1 mm



0.5 mm

Prüfling L 22

Brennstoff :

Form : Tabletten, geschl. Stirneinsenkung +
 4 Stck.m. Zentrall.
 Zusammensetzung : UO_2 (7,5 % U-235)
 Tablettendichte : 90,7 % th.D.

Hülle :

Material : X8CrNiMoVNb 16/13
 W.-Nr. 1.4988
 Außendurchmesser : 12 mm
 Wandstärke : 1,0 mm

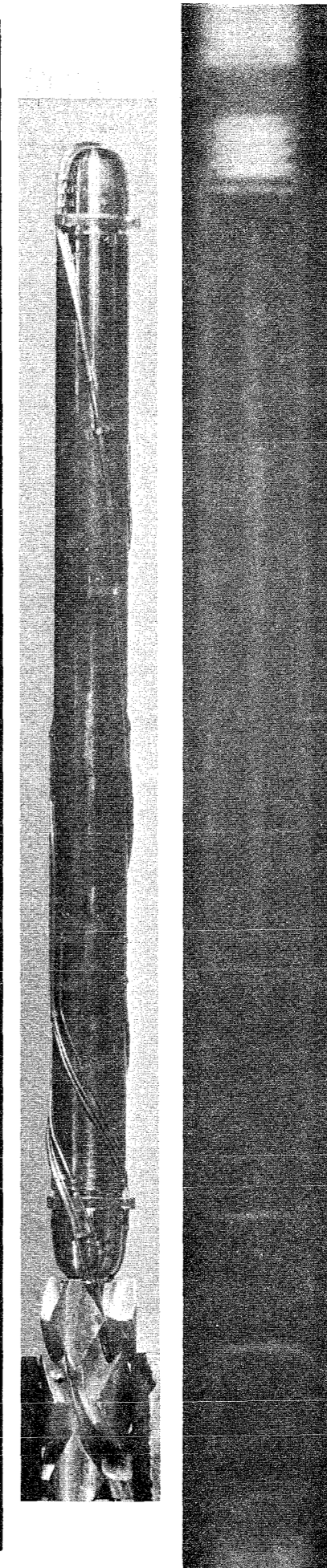
Brennstab :

Gesamtlänge : 182,7 mm
 Länge der Brennstoffsäule : 140,2 mm
 Gewicht der " : 102,4 g
 Radiale Spaltweite : 124,0 μ m
 Schmierdichte : 86,3 % th.D.

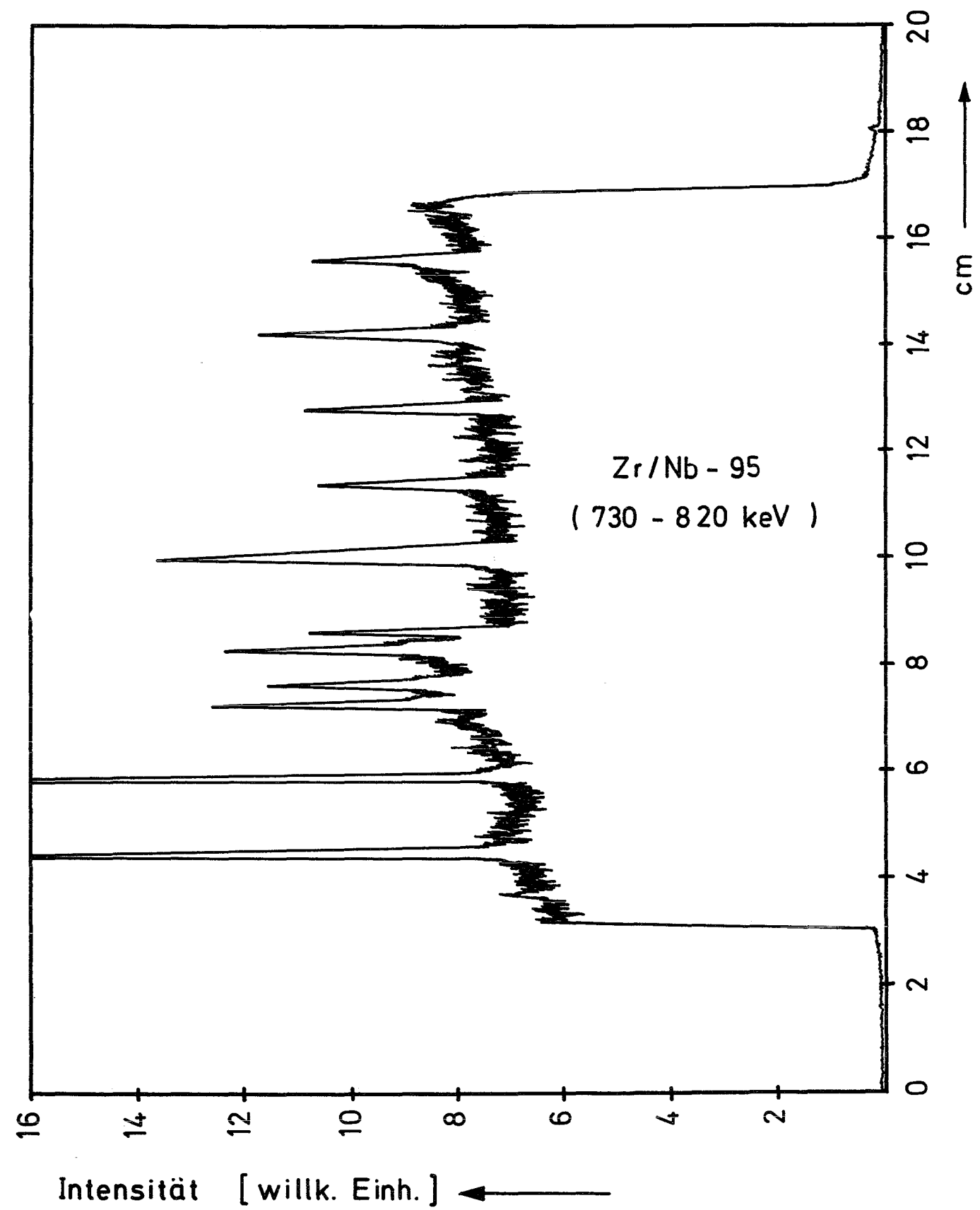
Bestrahlung :

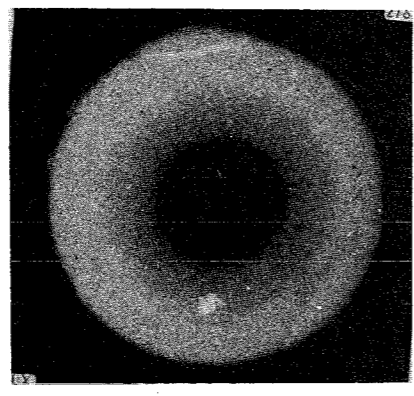
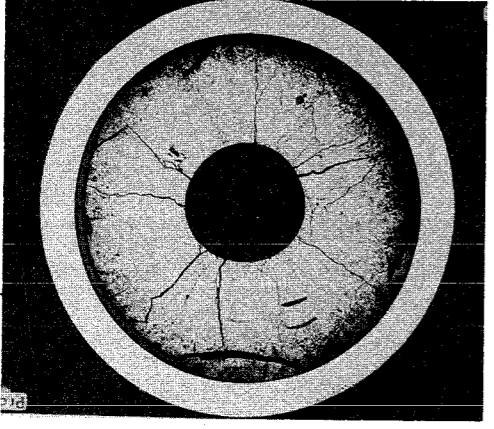
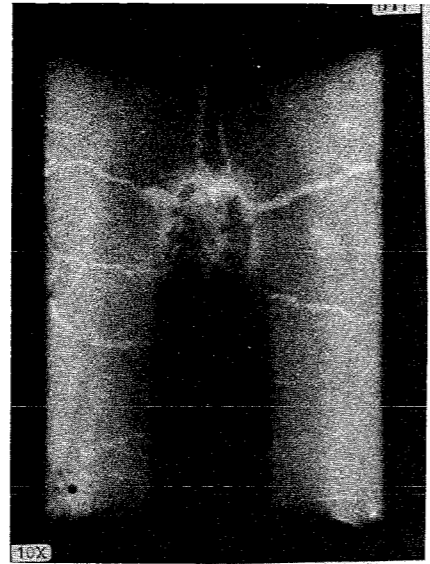
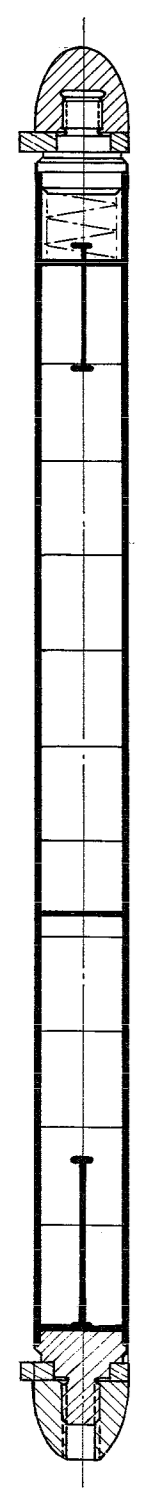
Zeit : 30.10. - 4.11.68
 Dauer : 13 d 13 h 6 min
 mittl. Stableistung : 590 W/cm
 mittl. Hüllaußentemp. : 560°C

+)
 Zentraltemperaturmessung

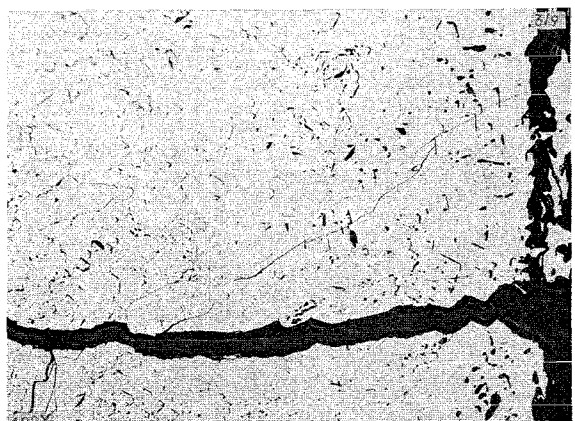
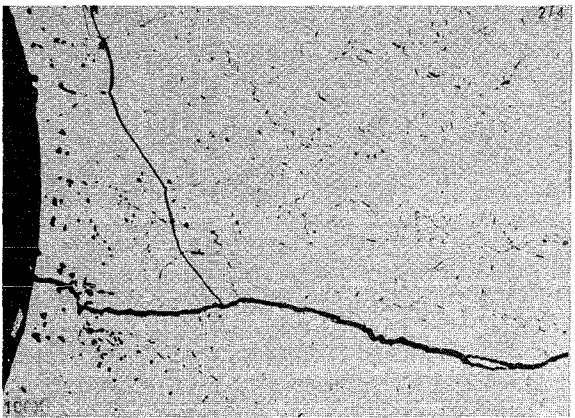
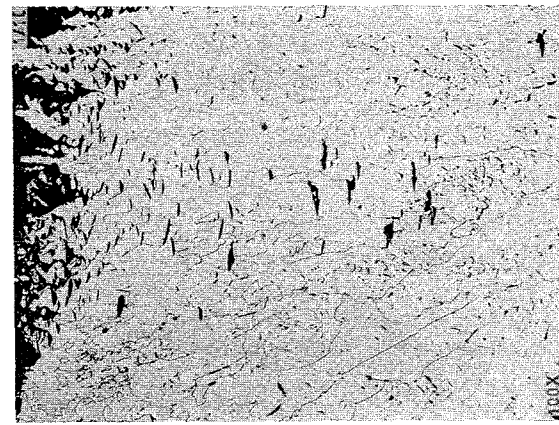
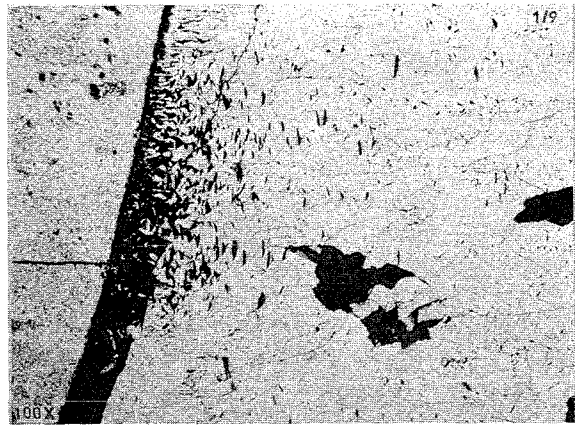


γ - Profil





2 mm



0.2 mm

Prüfling L 23

Brennstoff :

Form : Tabletten, geschl.,
Stirneinsenkung

Zusammensetzung : UO_2 (7,5 % U-235)

Tablettendichte : 90,1 % th.D.

Hülle :

Material : X8CrNiMoVNb16/13
W.-Nr. 1.4988

Außendurchmesser : 12 mm

Wandstärke : 1,0 mm

Brennstab :

Gesamtlänge : 177,2 mm

Länge der Brennstoffsäule : 139,9 mm

Gewicht der " : 98,1 g

Radiale Spaltweite : 128,5 μ m

Schmierdichte : 85,5 % th.D.

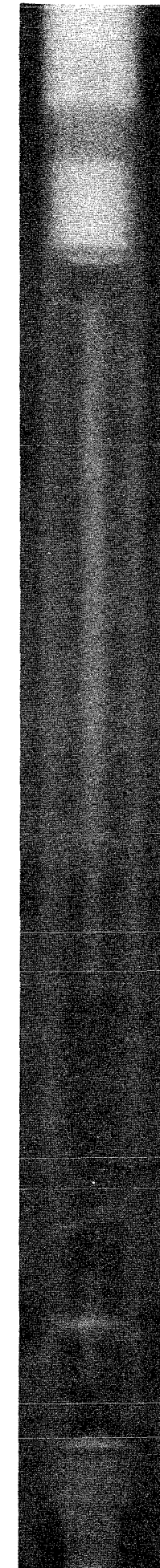
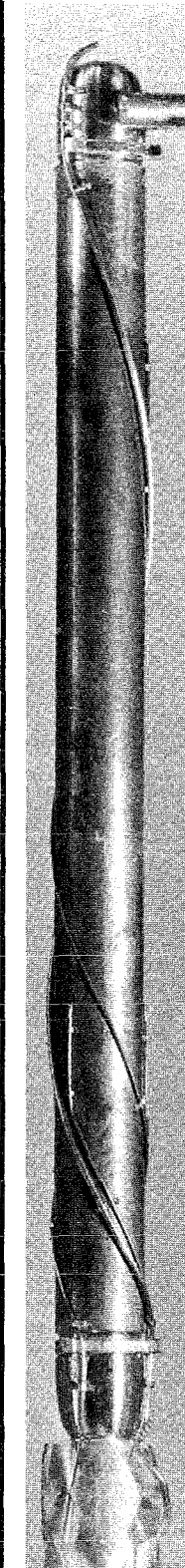
Bestrahlung :

Zeit : 12.6. - 13.6.67

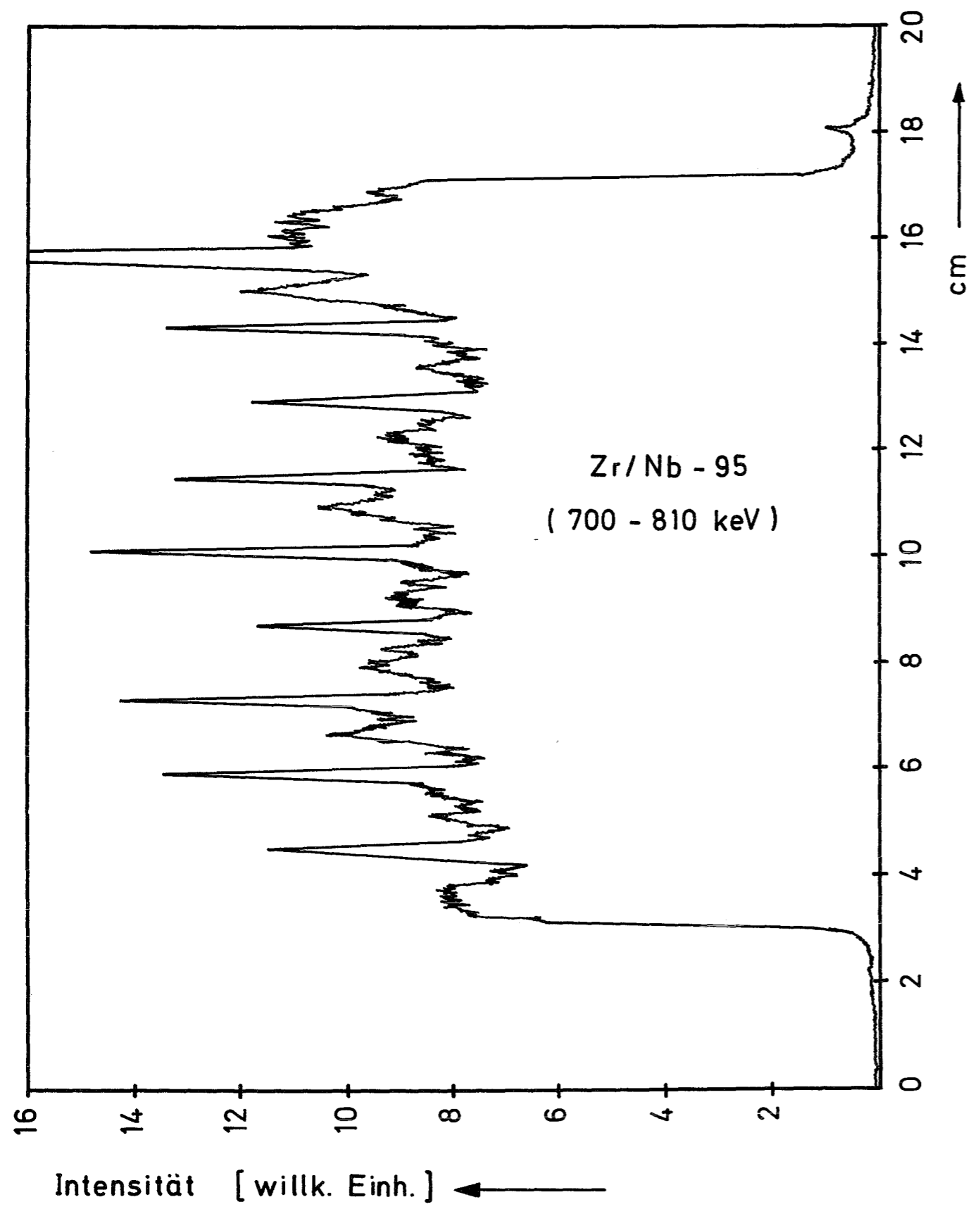
Dauer : 24 h 32 min

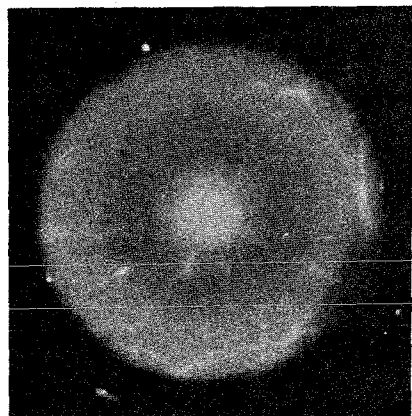
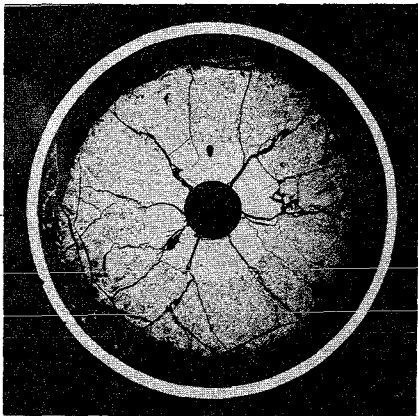
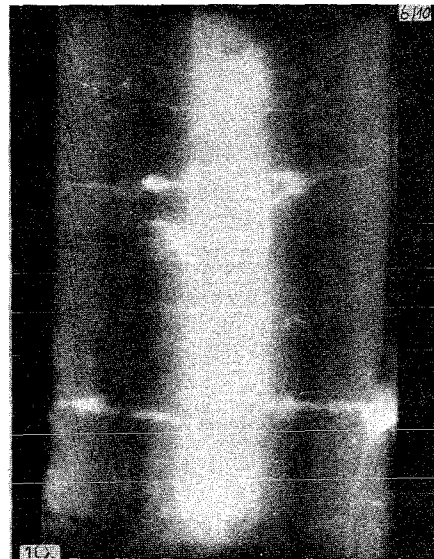
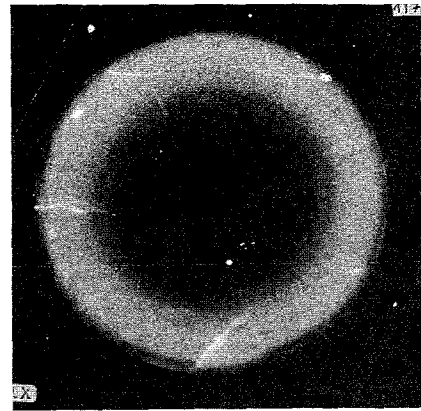
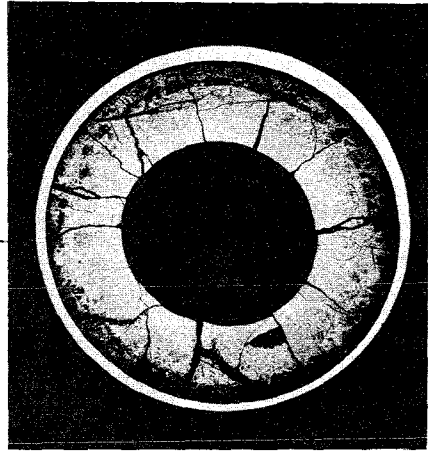
mittl. Stableistung : 520 W/cm

mittl. Hüllaußentemp. : 560°C

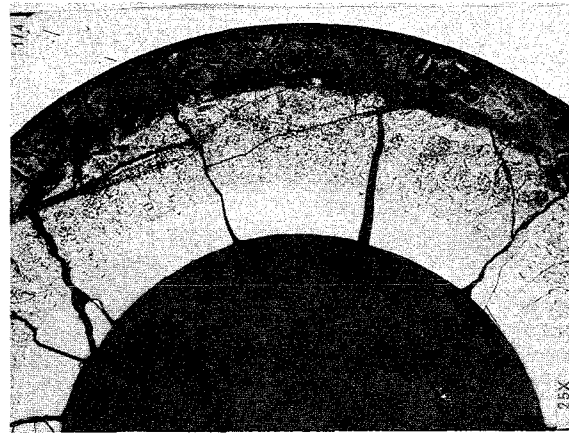


γ - Profil

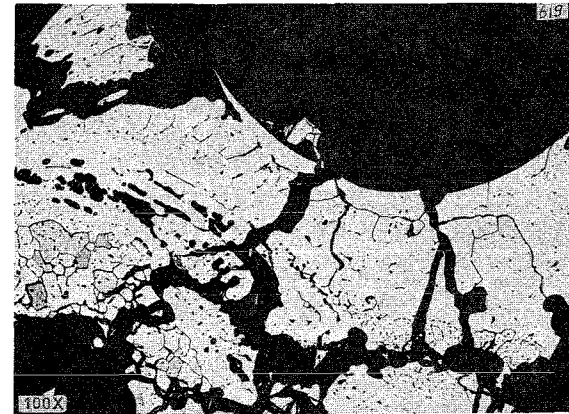
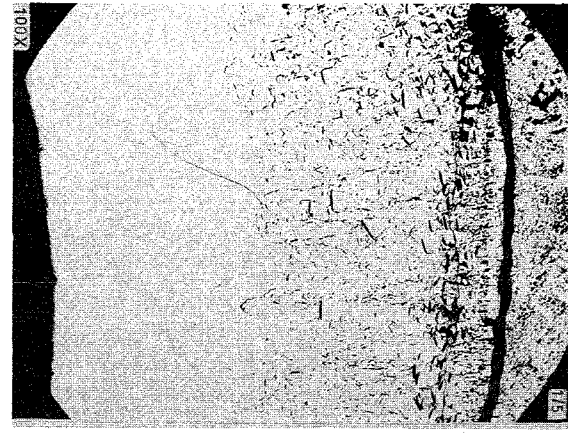




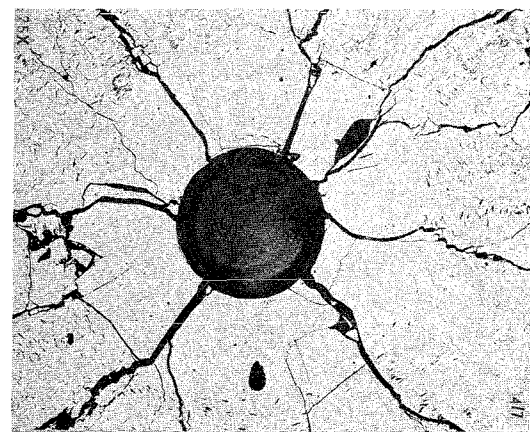
2 mm



1 mm



0.2 mm



1 mm



0.2 mm

Prüfling L 24

Brennstoff :

Form : Tabletten, geschl.,
Stirneinsenkung

Zusammensetzung : UO_2 (7,5 % U-235)

Tablettendichte : 89,9 % th.D.

Hülle :

Material : X8CrNiMoVNb 16/13
W.-Nr. 1.4988

Außendurchmesser : 12 mm

Wandstärke : 1,0 mm

Brennstab :

Gesamtlänge : 177,6 mm

Länge der Brennstoffsäule : 139,6 mm

Gewicht der " : 97,8 g

Radiale Spaltweite : 122,0 μm

Schmierdichte : 85,6 % th.D.

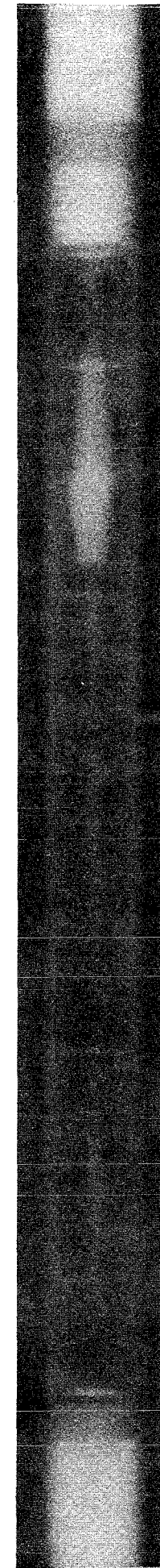
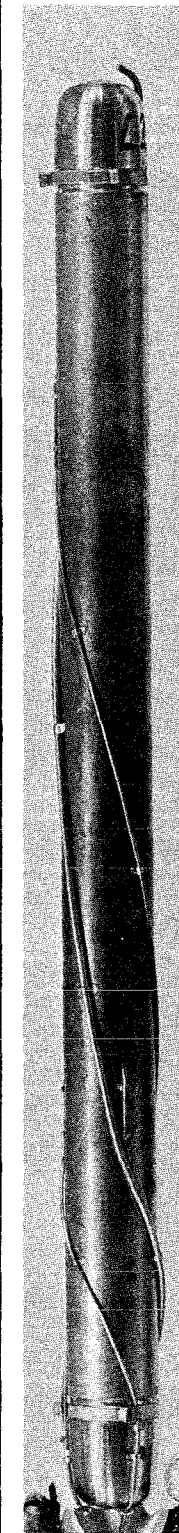
Bestrahlung :

Zeit : 13.4.67

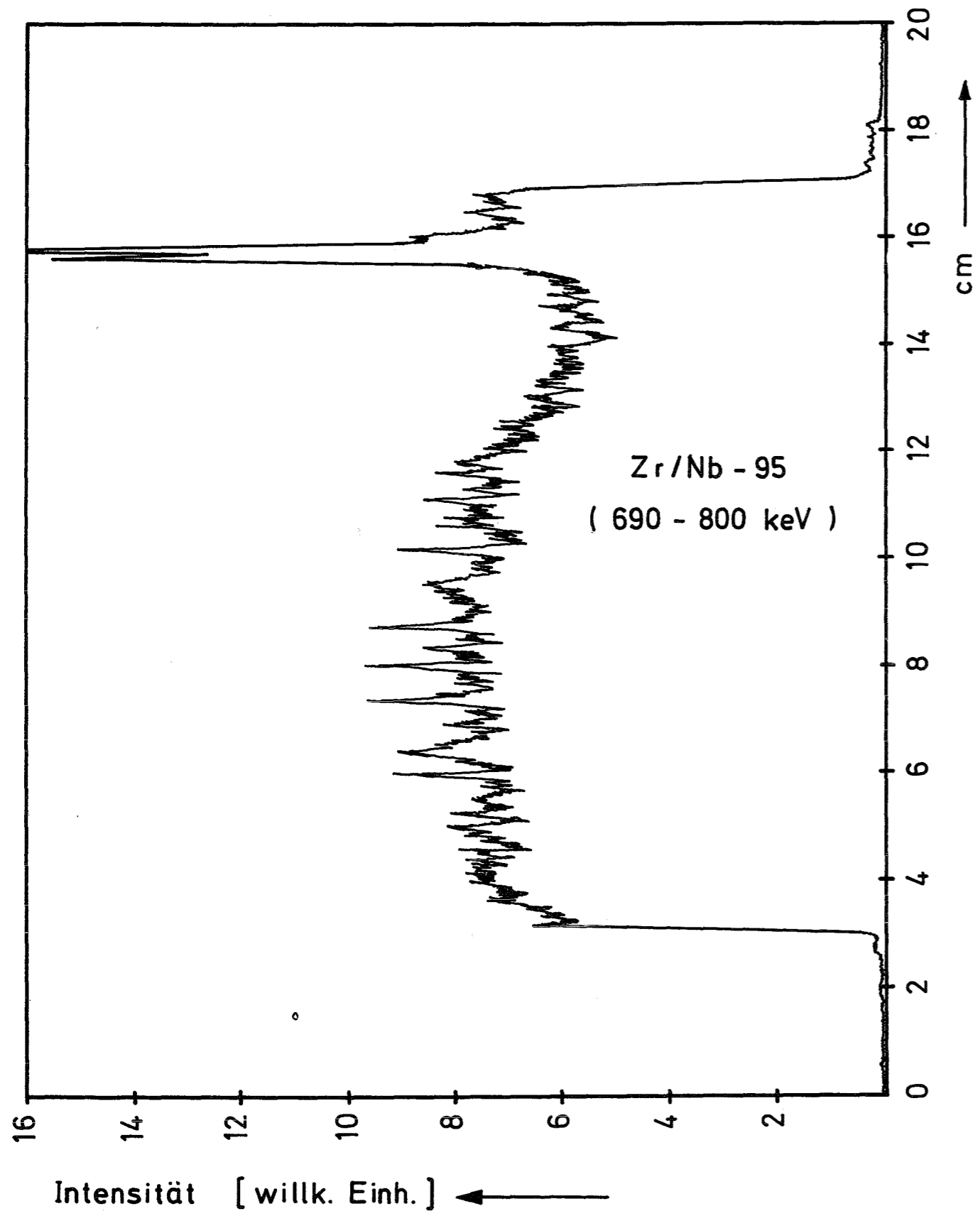
Dauer : 31 min

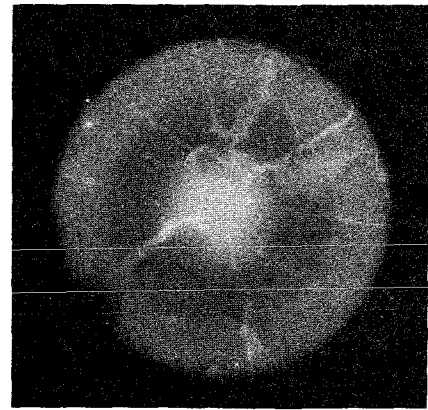
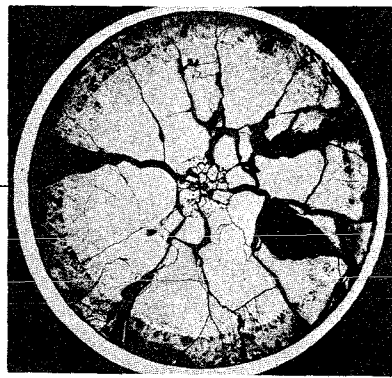
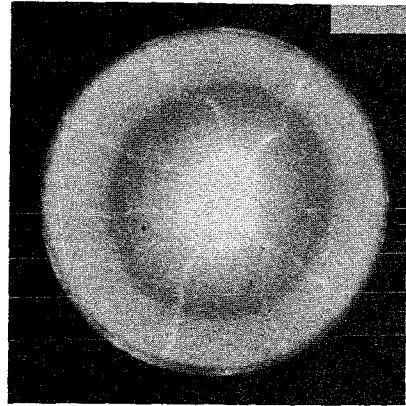
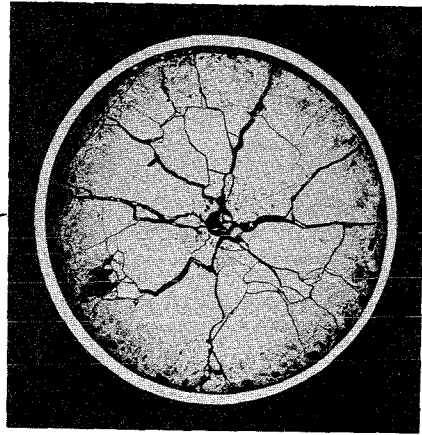
mittl. Stableistung : 710 W/cm

mittl. Hüllaußentemp. : 535°C

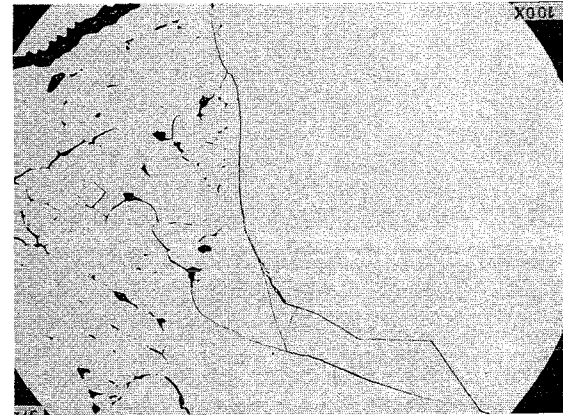
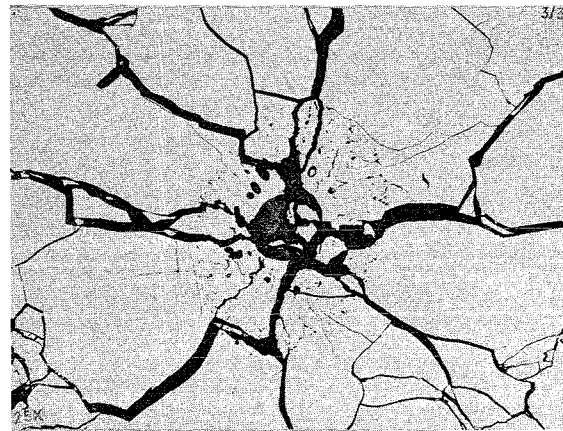


δ - Profil

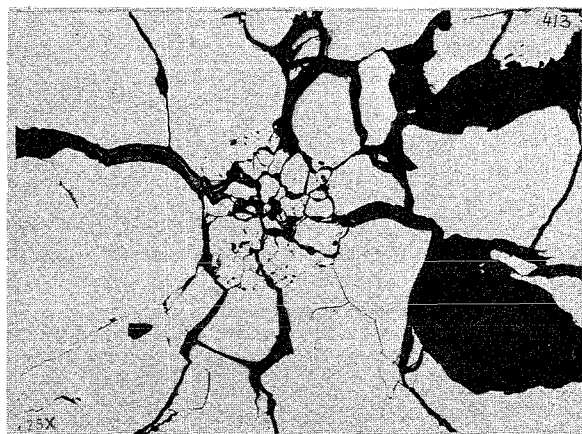




2 mm



—|—
0.2 mm



—|—
1 mm

Prüfling L 25

Brennstoff :

Form : Tabletten, geschl.,
Stirneinsenkung

Zusammensetzung : UO_2 (7,5 % U-235)

Tablettendichte : 90,1 % th.D.

Hülle :

Material : X8CrNiMoVNb 16/13
W.-Nr. 1.4988

Außendurchmesser : 12 mm

Wandstärke : 1,0 mm

Brennstab :

Gesamtlänge : 176,9 mm

Länge der Brennstoffsäule : 139,8 mm

Gewicht der " : 98,1 g

Radiale Spaltweite : 125 μ m

Schmierdichte : 85,7 % th.D.

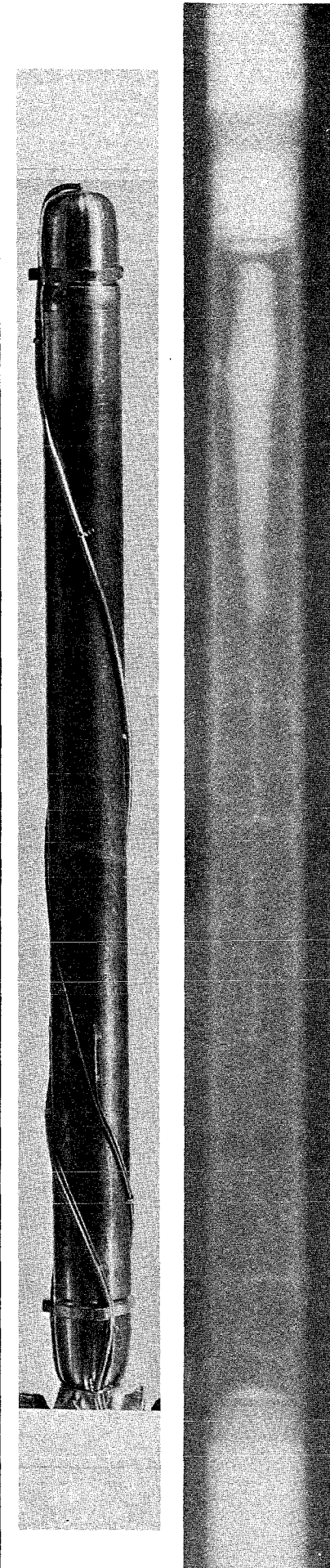
Bestrahlung :

Zeit : 5.4.67

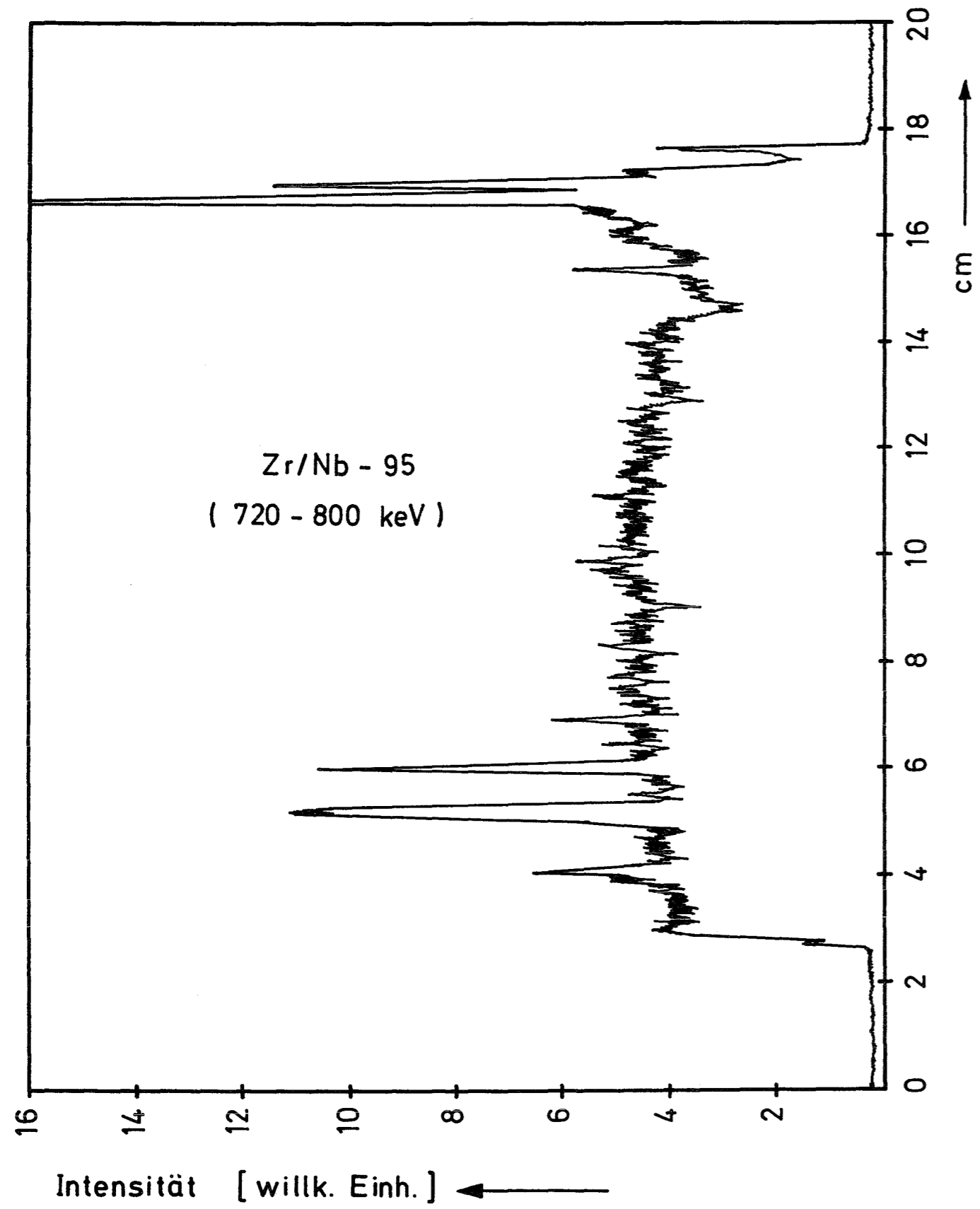
Dauer : 2 h

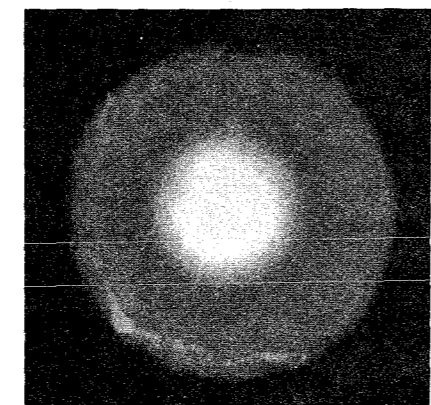
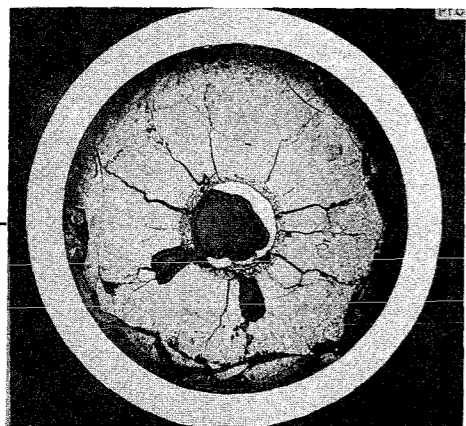
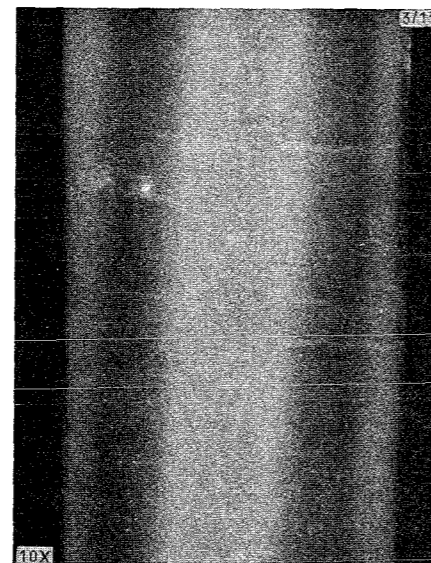
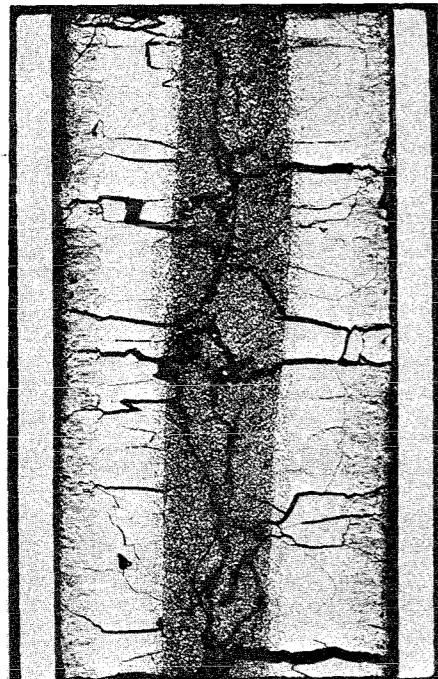
mittl. Stableistung : 760 W/cm

mittl. Hüllaußentemp. : 535°C

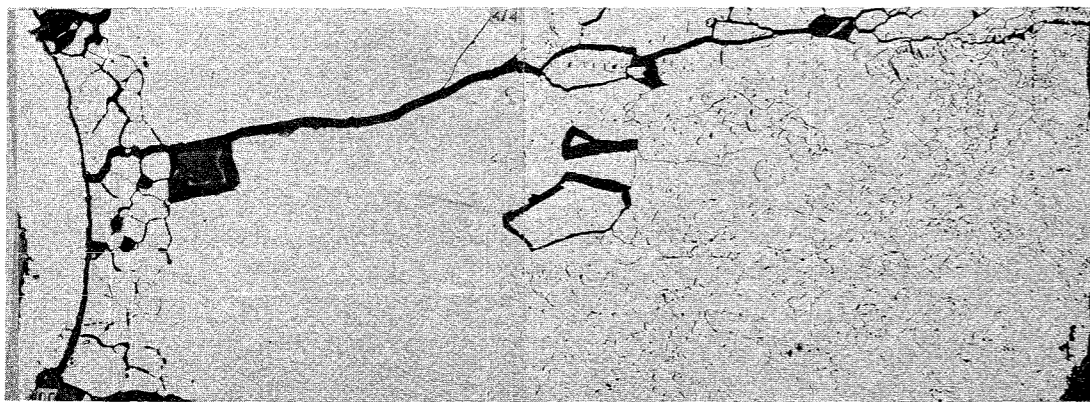
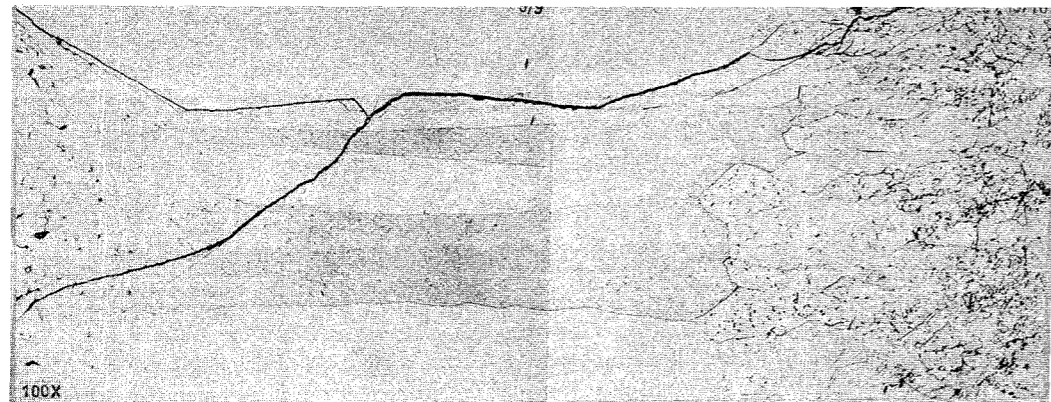
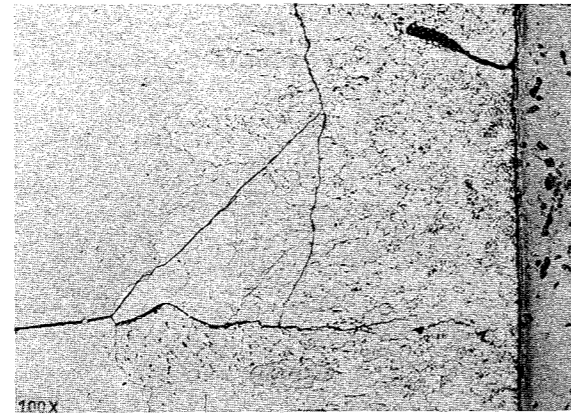
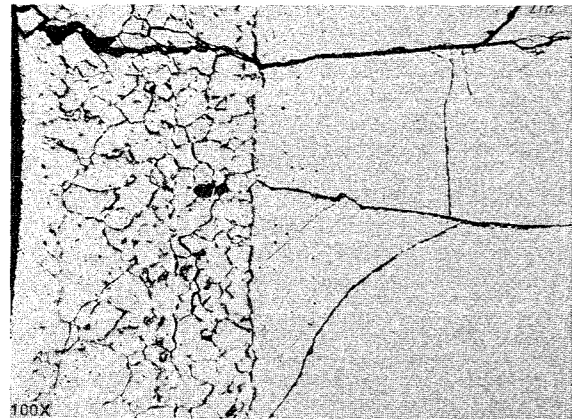


γ - Profil





2 mm



—|—
0.2mm

Prüfling L 26

Brennstoff :

Form : Tabletten, geschl.,
Stirneinsenkung

Zusammensetzung : UO_2 (7,5 % U-235)

Tablettendichte : 89,9 % th.D.

Hülle :

Material : X8CrNiMoVNb 16/13
W.-Nr. 1.4988

Außendurchmesser : 12 mm

Wandstärke : 1,0 mm

Brennstab :

Gesamtlänge : 176,8 mm

Länge der Brennstoffsäule : 140,2 mm

Gewicht der " : 98,0 g

Radiale Spaltweite : 122,5 μ m

Schmierdichte : 85,5 % th.D.

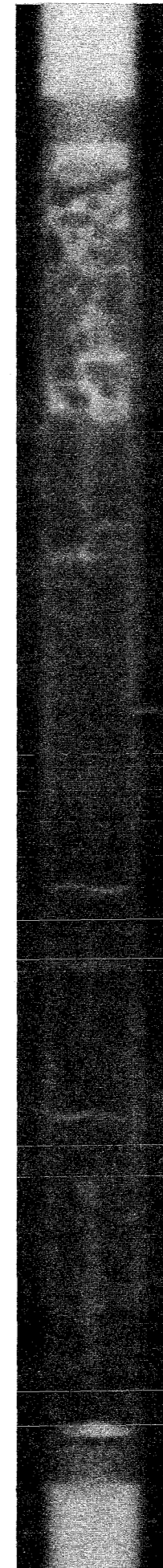
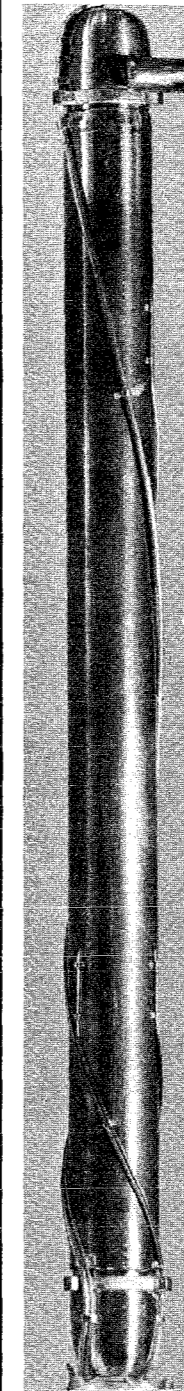
Bestrahlung :

Zeit : 14.6.67

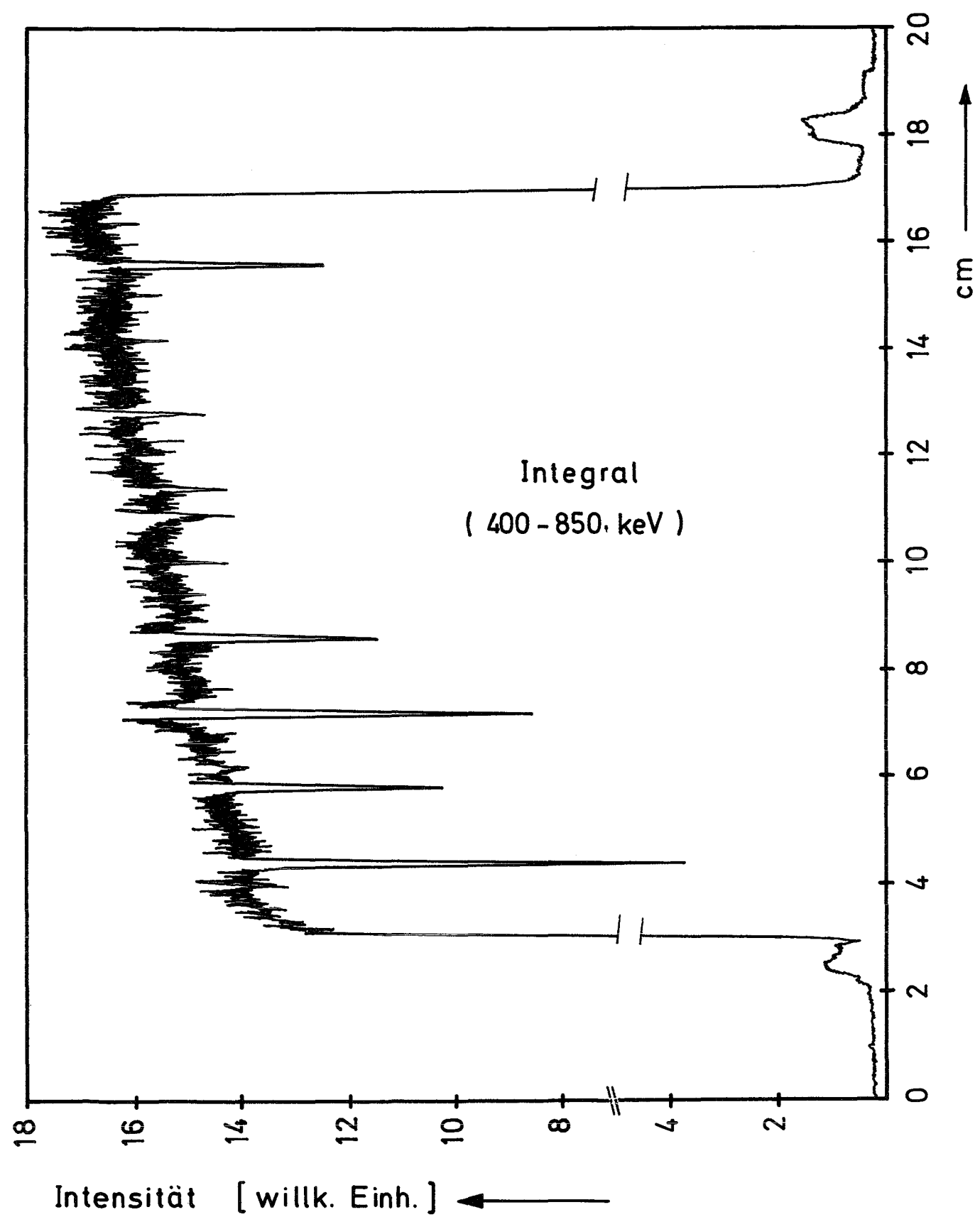
Dauer : 2 h 09 min

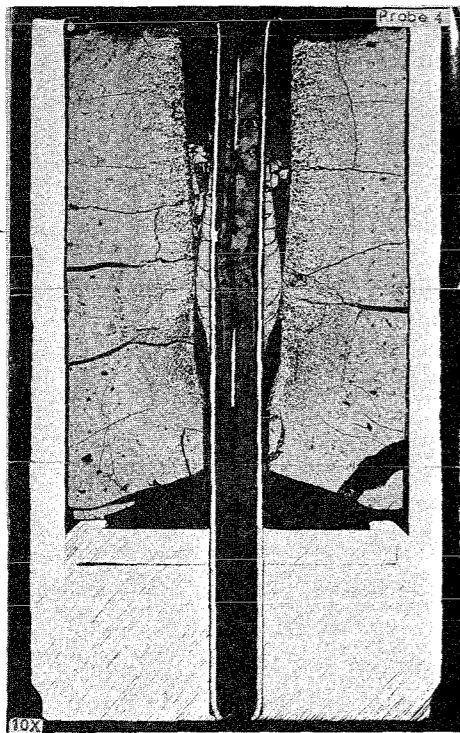
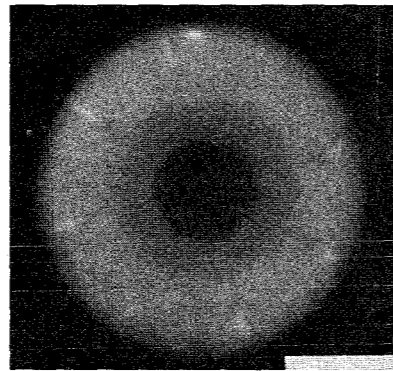
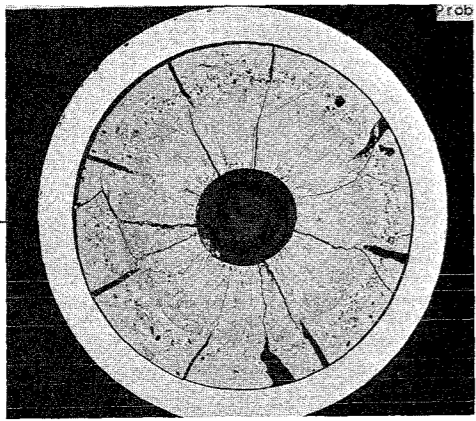
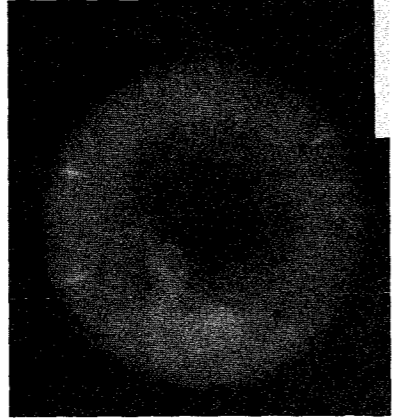
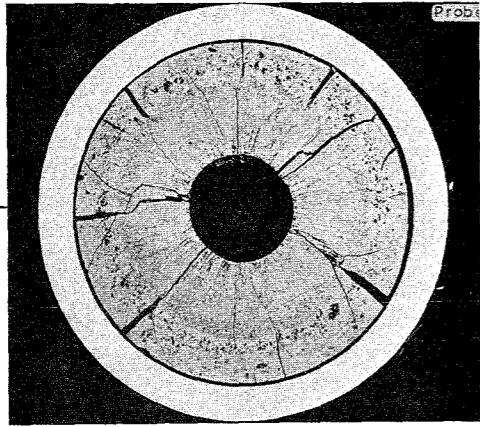
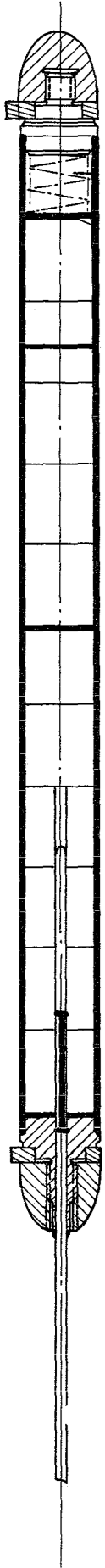
mittl. Stableistung : 740 W/cm

mittl. Hüllaußentemp. : 535°C



γ - Profil





2 mm

Prüfling L 27

Brennstoff :

Form : Tabletten, geschl.,
Stirneinsenkung, 4St.
mit Zentralloch⁺)
Zusammensetzung : UO_2 (7,5 % U-235)
Tablettendichte : 89,9 % th.D.

Hülle :

Material : X8CrNiMoVNb 16/13
W.-Nr. 1.4988
Außendurchmesser : 12 mm
Wandstärke : 1,0 mm

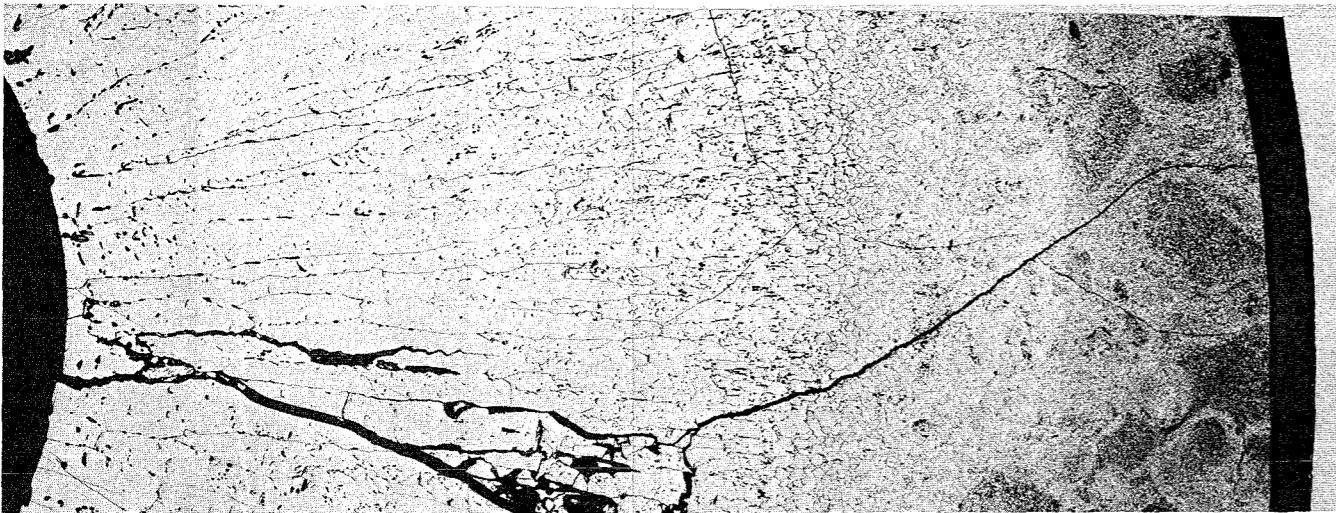
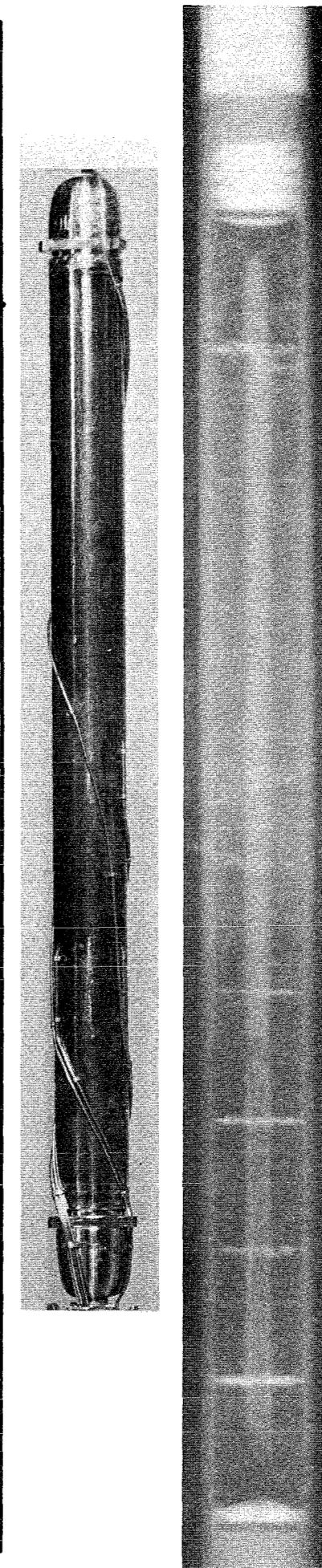
Brennstab :

Gesamtlänge : 182,6 mm
Länge der Brennstoffsäule : 140,1 mm
Gewicht der " : 97,1 g
Radiale Spaltweite : 131,5 μ m
Schmierdichte : 85,3 % th.D.

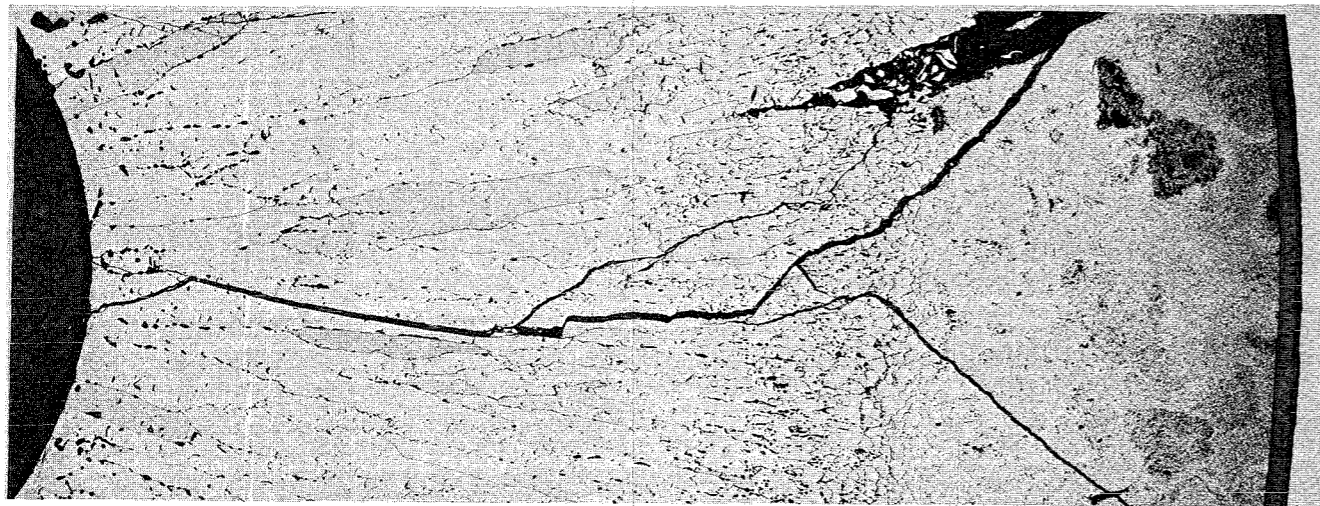
Bestrahlung :

Zeit : 15.11. - 24.11.68
Dauer : 8 d 17 h 11 min
mittl. Stableistung : 660 W/cm
mittl. Hüllaußentemp. : 560°C

+)
Zentraltemperaturmessung



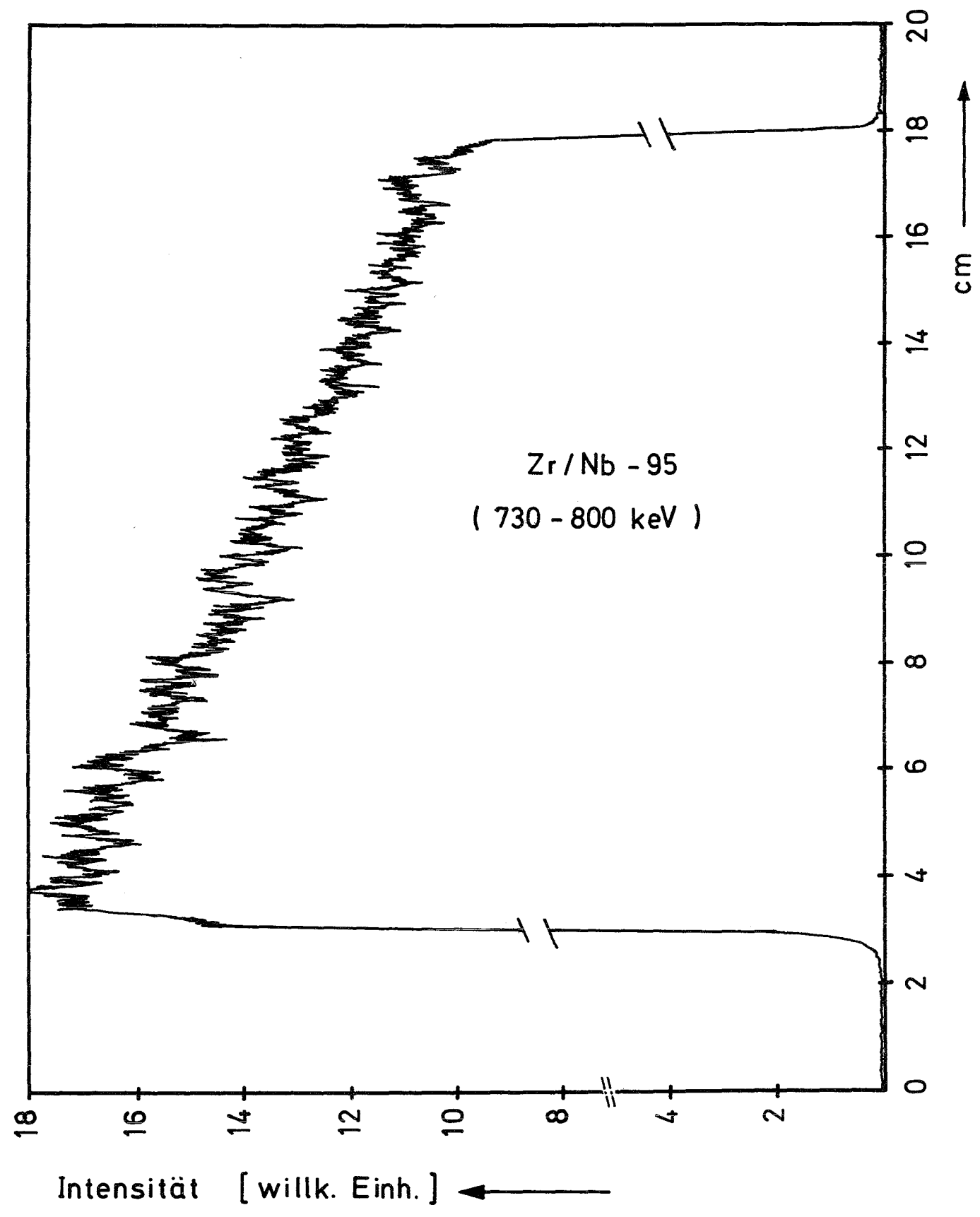
0.2 mm

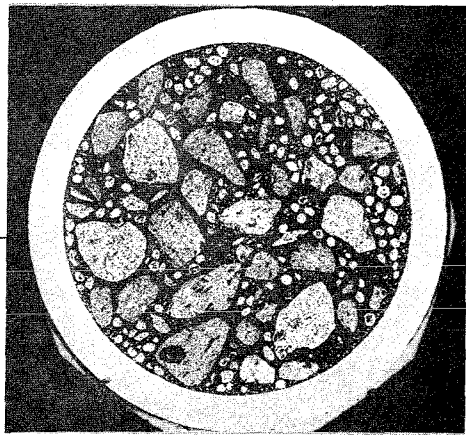
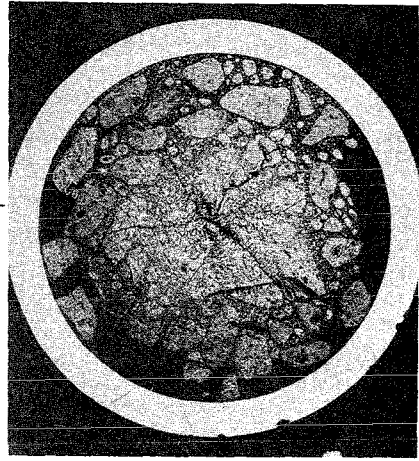
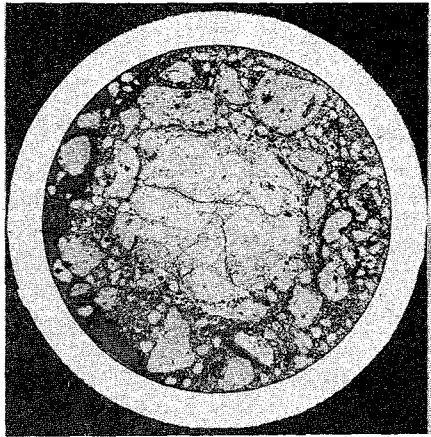


0.5 mm

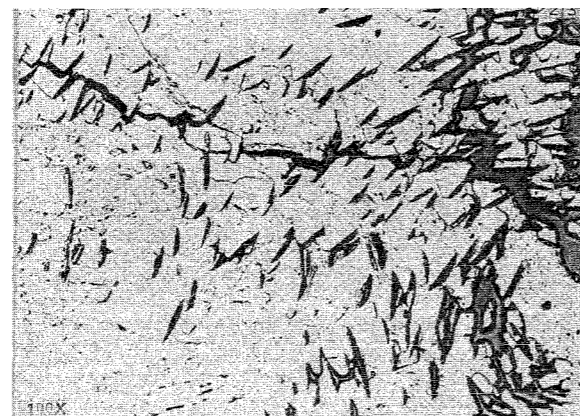
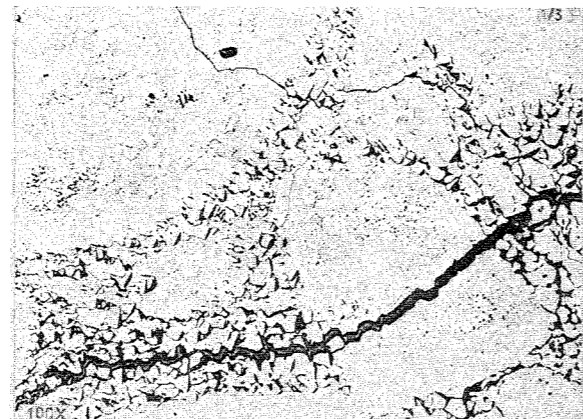
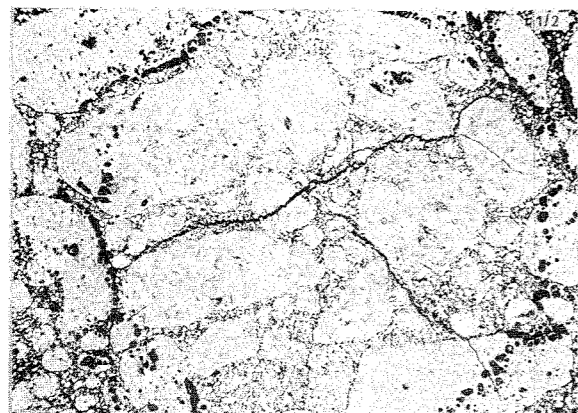


δ - Profil

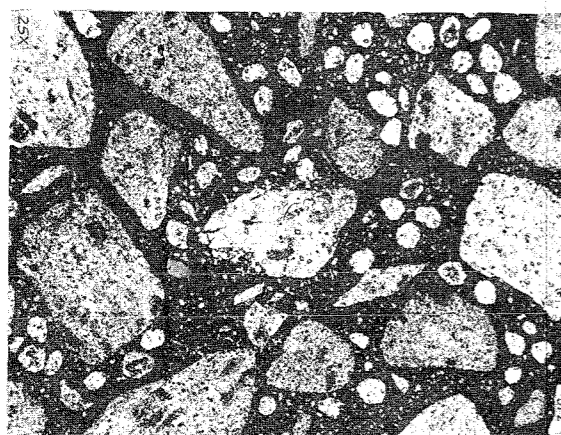




2 mm



0.2 mm



1 mm

Prüfling L 28

Brennstoff :

Form : Pulver, gesinterte Partikel

Zusammensetzung : UO_2 (7,5 % U-235)

Tablettendichte : 86,1 % th.D.

Hülle :

Material : X8CrNiMoVNb 16/13
W.-Nr. 1.4988

Außendurchmesser : 12 mm

Wandstärke : 1,0 mm

Brennstab :

Gesamtlänge : 182,8 mm

Länge der Brennstoffsäule : 150,0 mm

Gewicht der " : 111,2 g

Radiale Spaltweite : --

Schmierdichte : 86,1 % th.D.

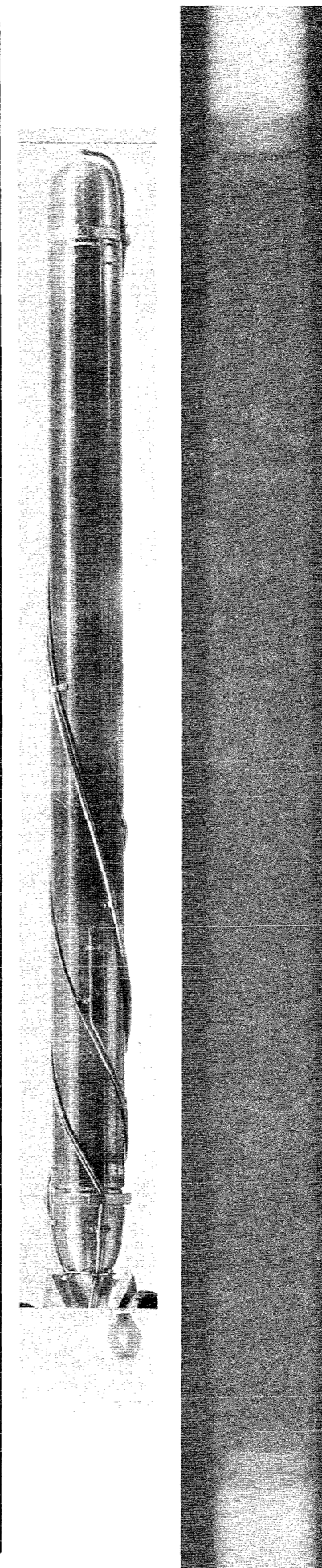
Bestrahlung :

Zeit : 19.7.67

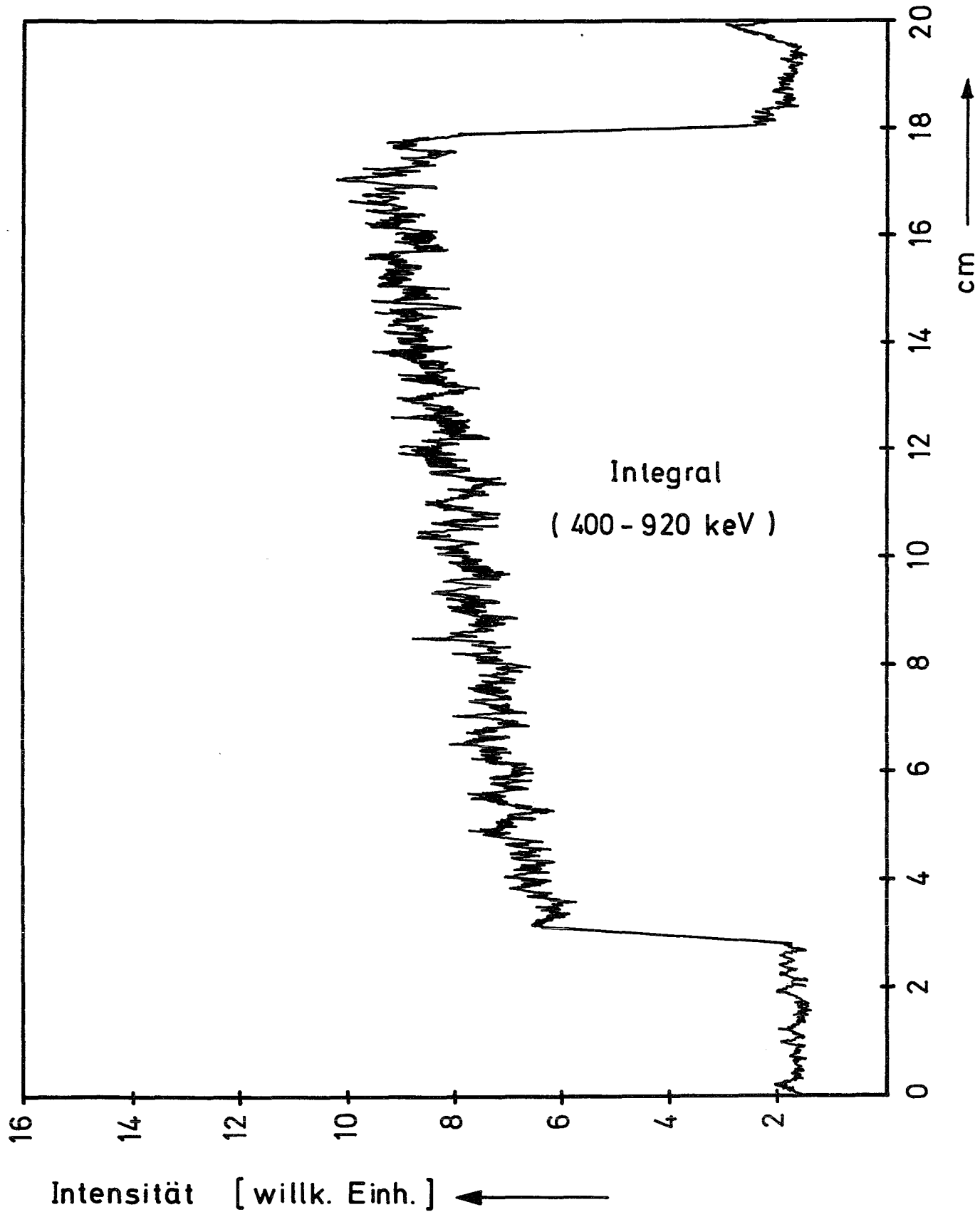
Dauer : 2 h 04 min

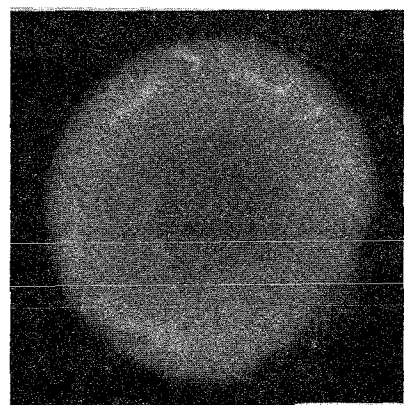
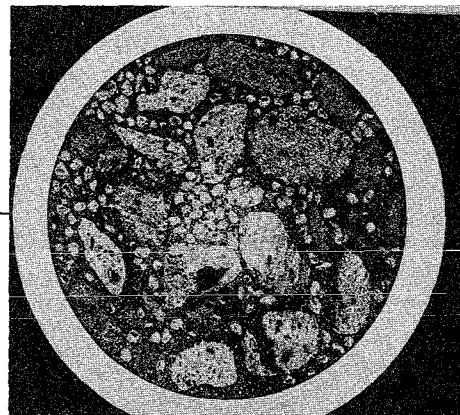
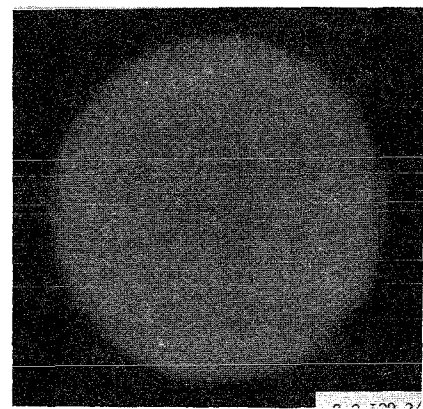
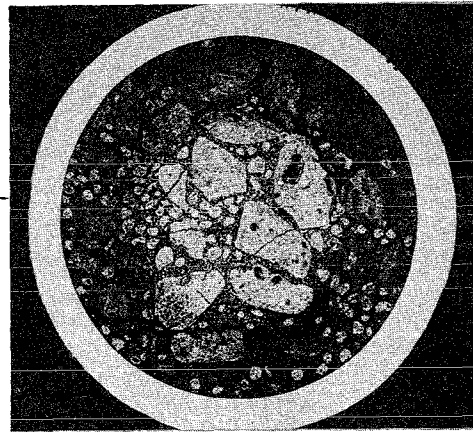
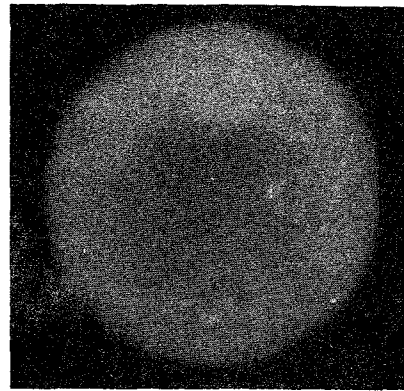
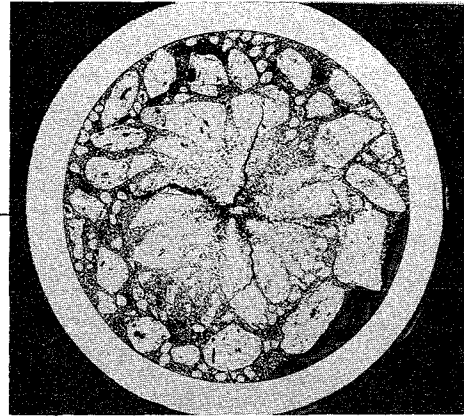
mittl. Stableistung : 490 W/cm

mittl. Hüllaußentemp. : 560°C

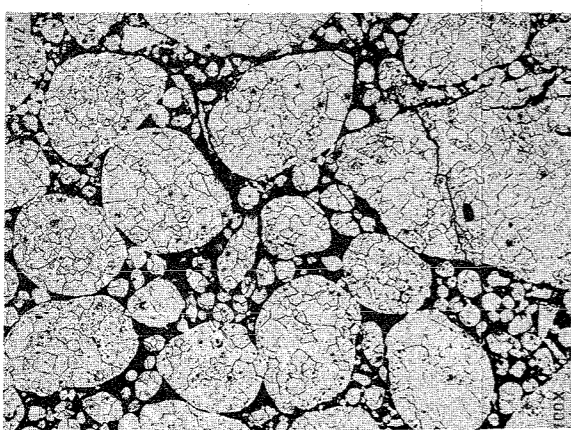
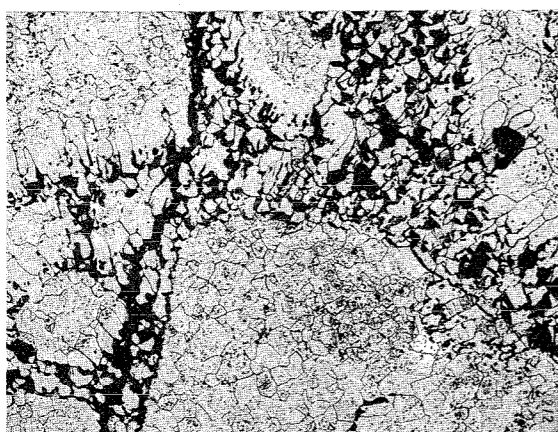


δ - Profil





2 mm



0.2 mm

Prüfling L 29

Brennstoff :

Form : Pulver, gesinterte
Partikel
Zusammensetzung : UO_2 (7,5 % U-235)
Tablettendichte : 84,6 % th.D.

Hülle :

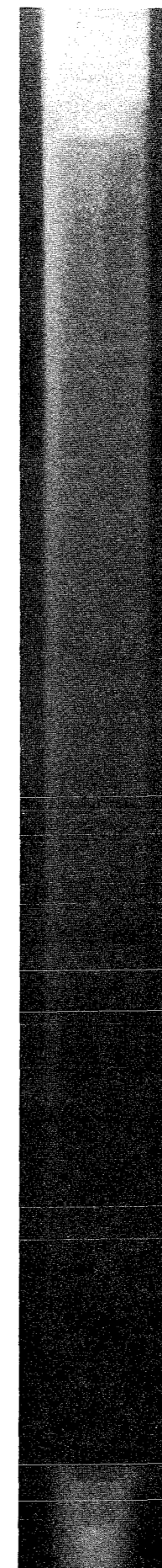
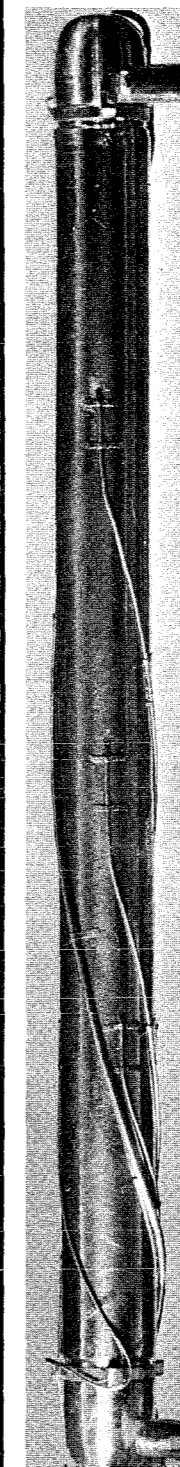
Material : X8CrNiMoVNb 16/13
W.-Nr. 1.4988
Außendurchmesser : 12 mm
Wandstärke : 1,0 mm

Brennstab :

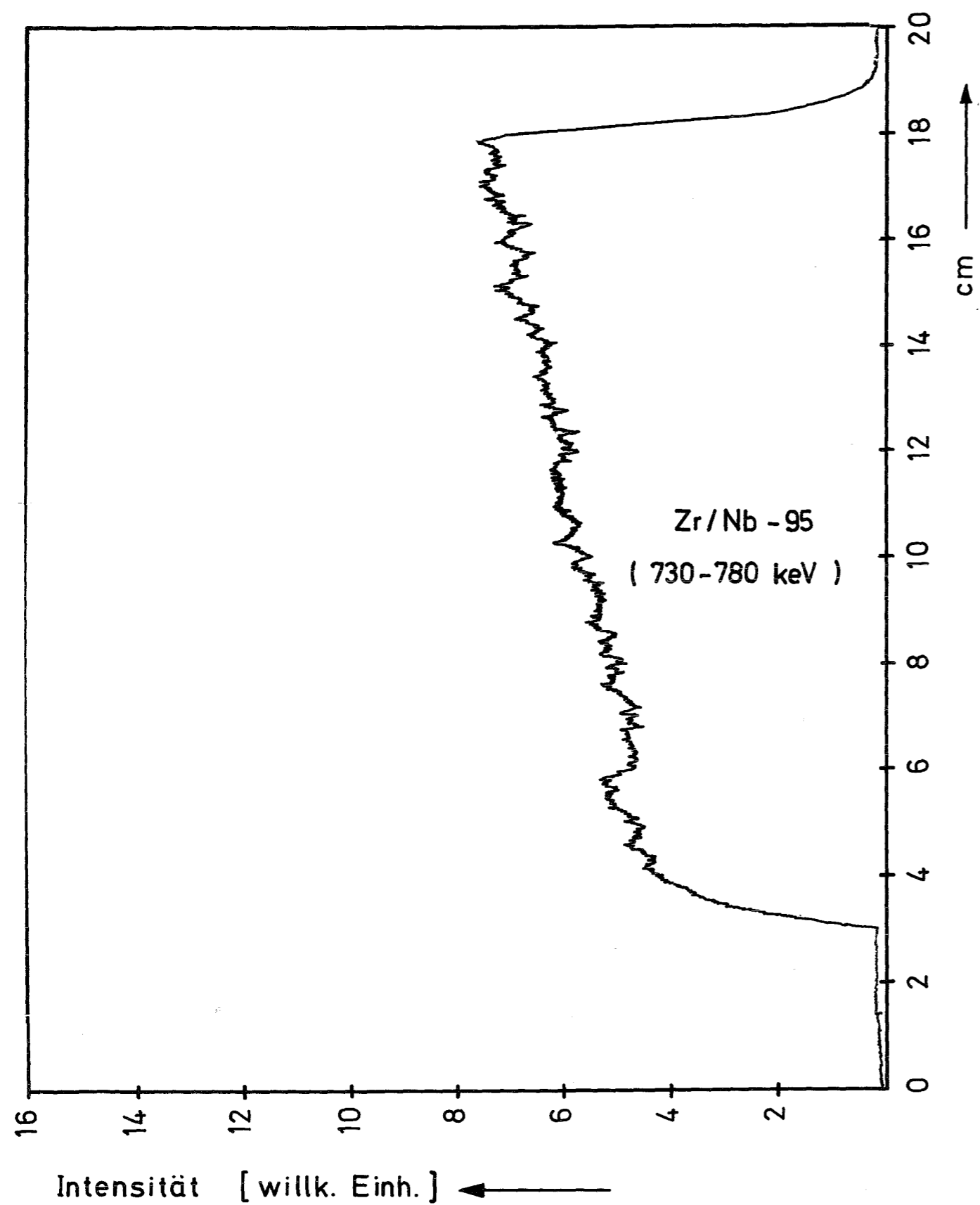
Gesamtlänge : 182,8 mm
Länge der Brennstoffsäule : 149,8 mm
Gewicht der " : 109,25 g
Radiale Spaltweite : --
Schmierdichte : 84,6 % th.D.

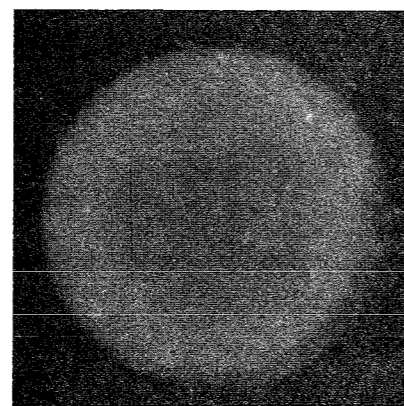
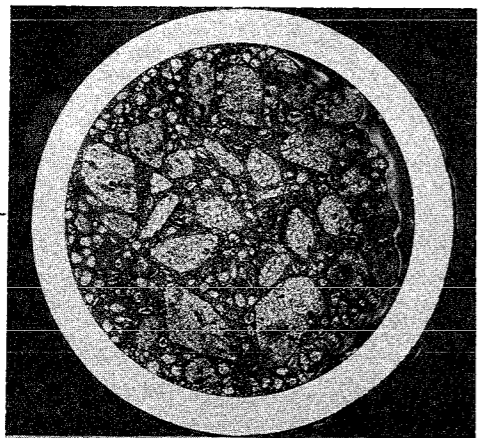
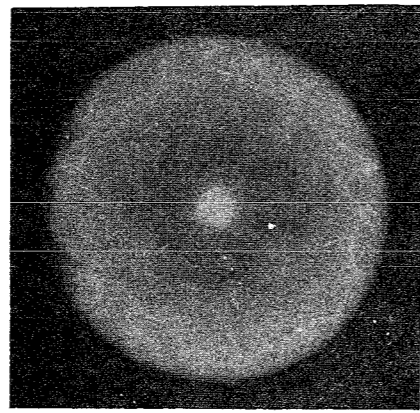
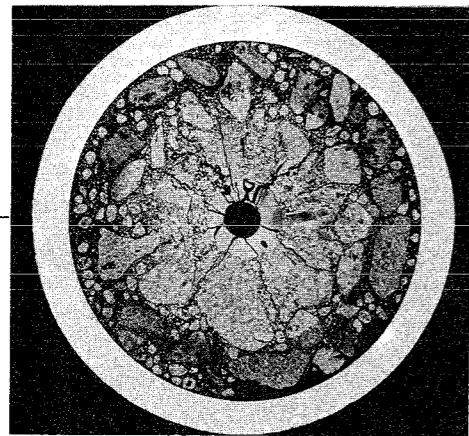
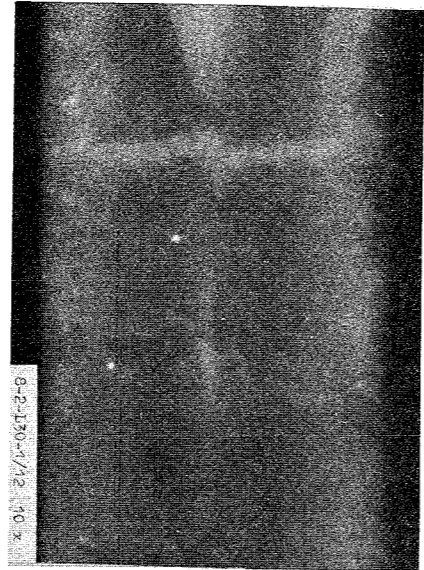
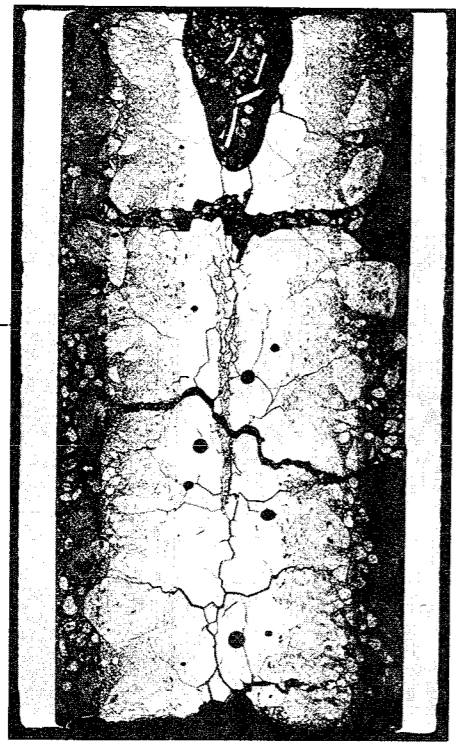
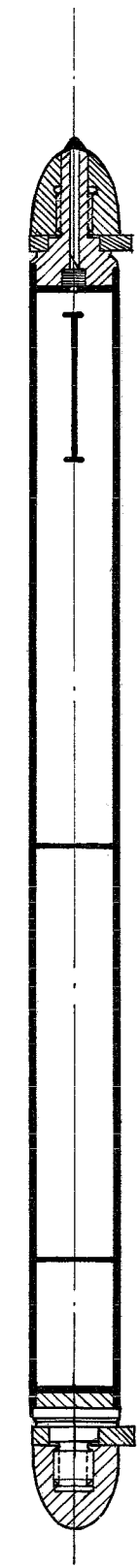
Bestrahlung :

Zeit : 22.2.68
Dauer : 49 min
mittl. Stableistung : 500 W/cm
mittl. Hüllaußentemp. : 560°C

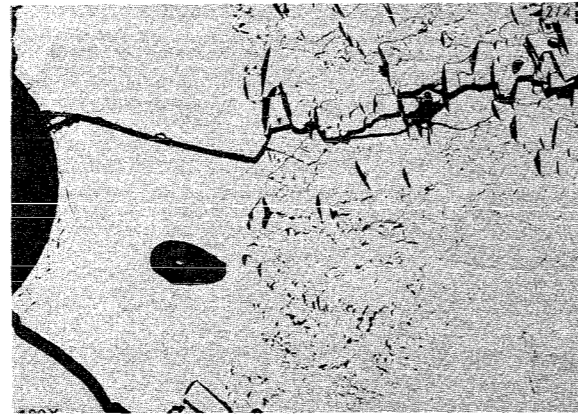
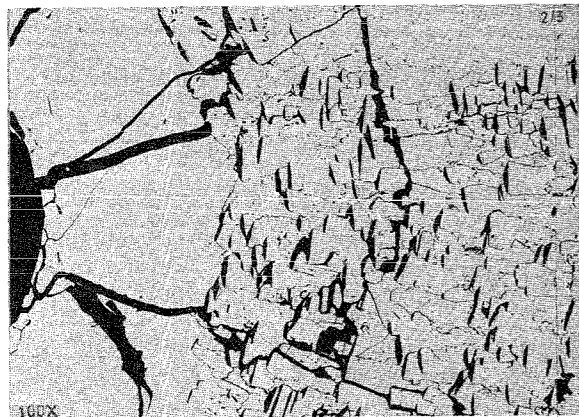
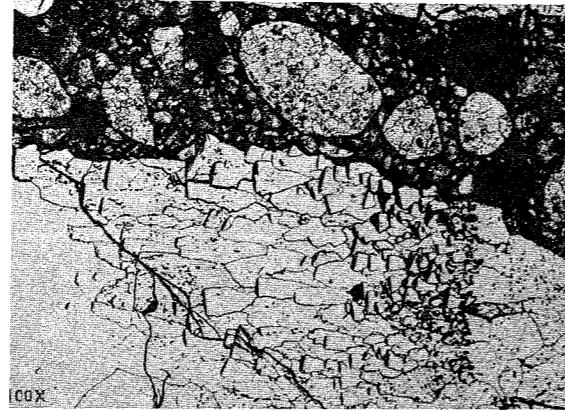
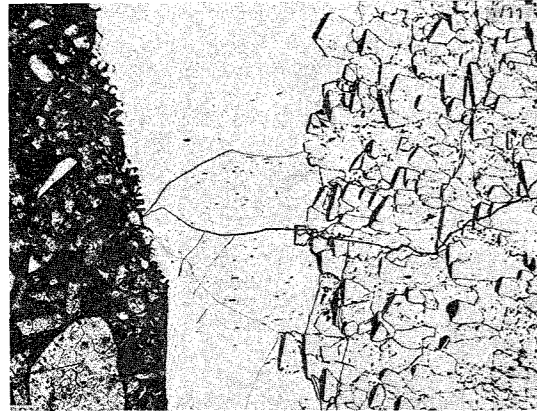


γ - Profil

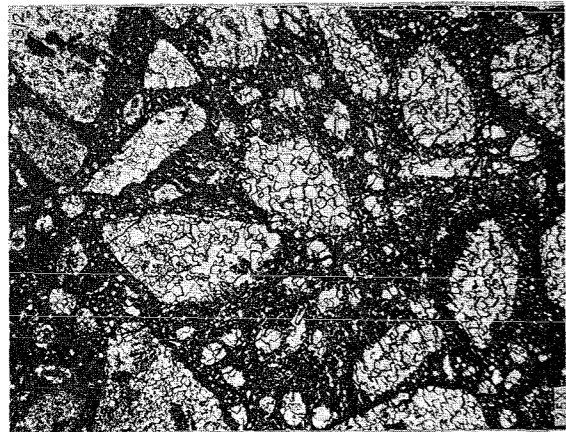




2 mm



0.2 mm



1 mm

Prüfling L 30

Brennstoff :

Form : Pulver, gesinterte Partikel
Zusammensetzung : UO_2 (7,5 % U-235)
Tablettendichte : 85,3 % th.D.

Hülle :

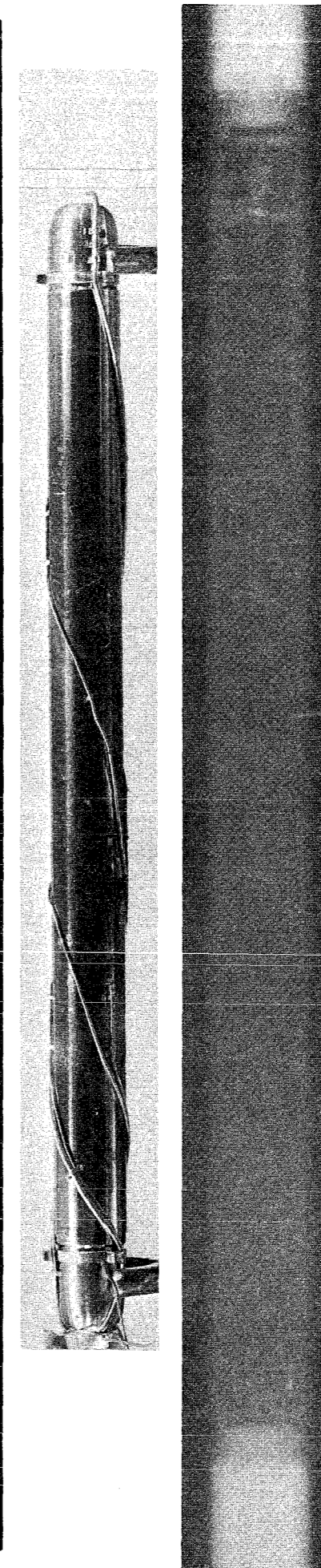
Material : X8CrNiMoVNb 16/13
W.-Nr. 1.4988
Außendurchmesser : 12 mm
Wandstärke : 1,0 mm

Brennstab :

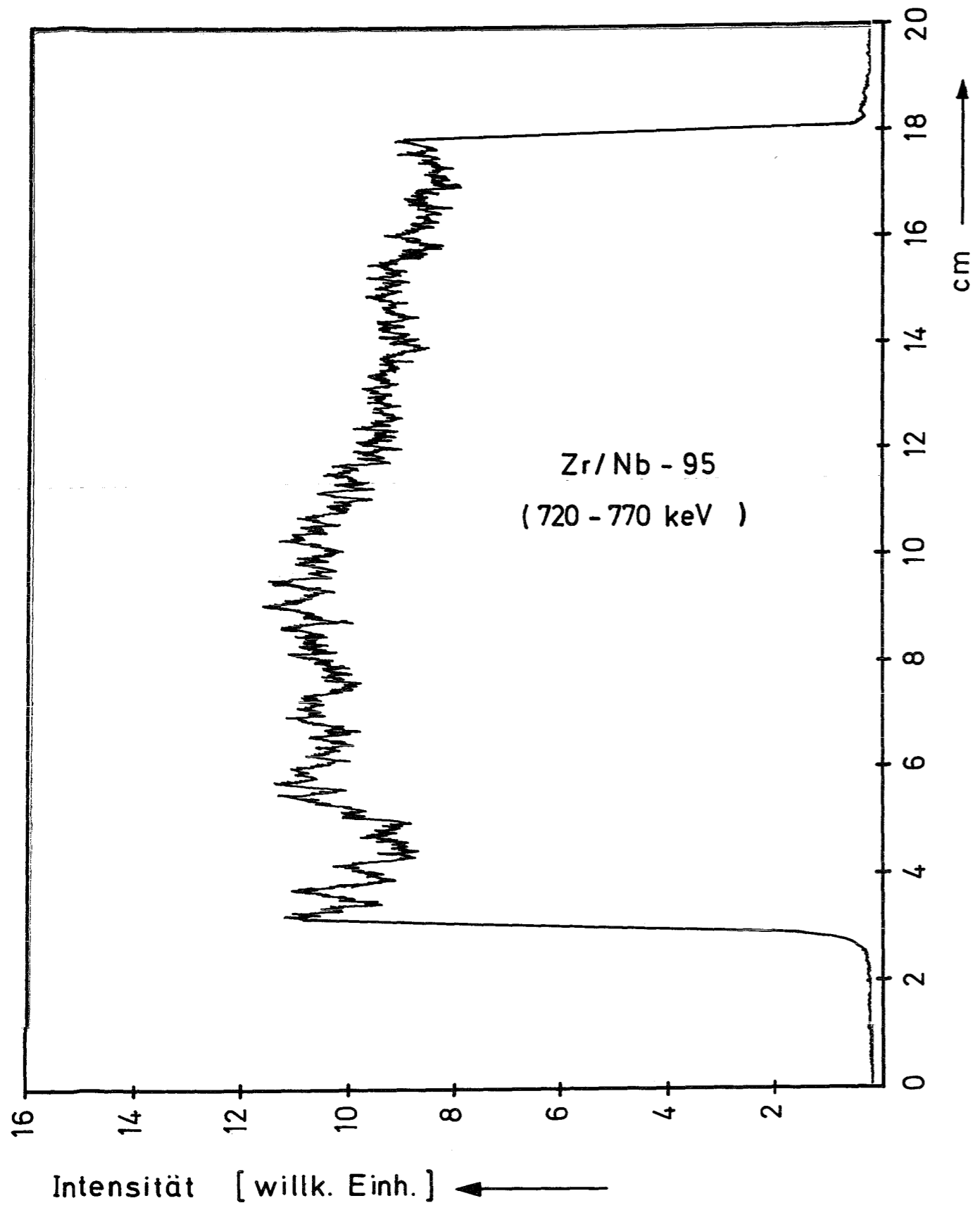
Gesamtlänge : 182,8 mm
Länge der Brennstoffsäule : 149,0 mm
Gewicht der " : 109,4 g
Radiale Spaltweite : --
Schmierdichte : 85,3 % th.D.

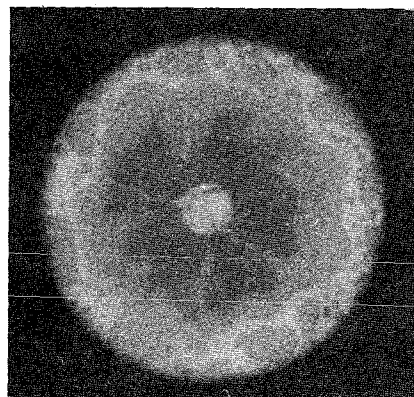
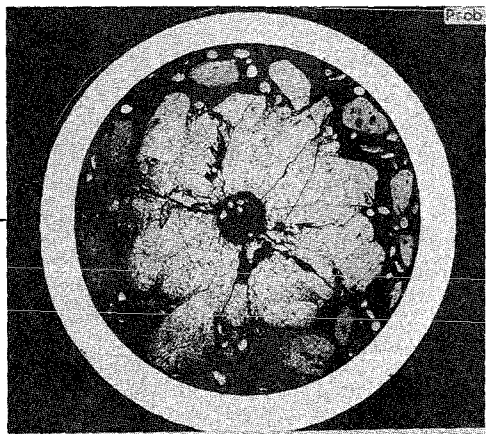
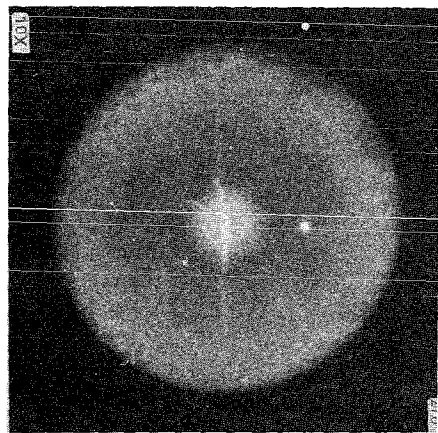
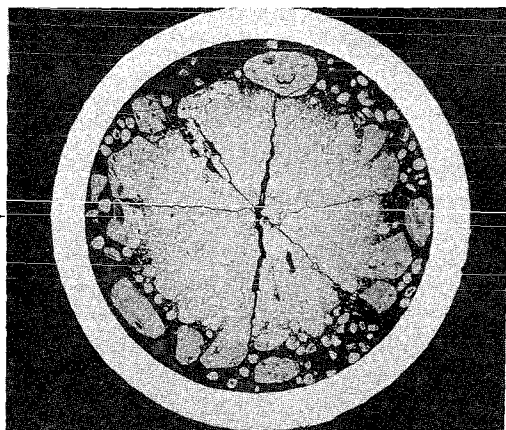
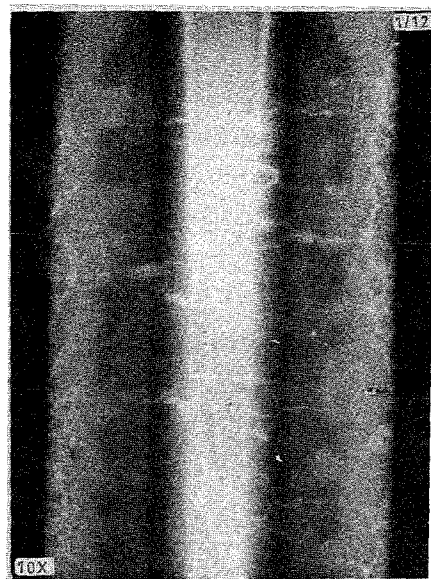
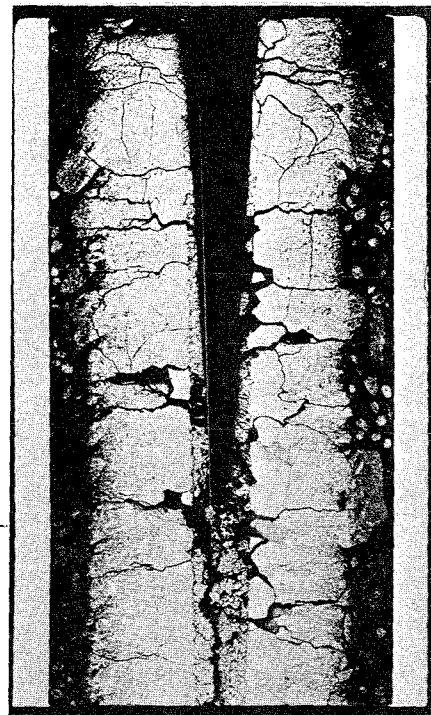
Bestrahlung :

Zeit : 18,7,67
Dauer : 12 min
mittl. Stableistung : 740 W/cm
mittl. Hüllaußentemp. : 535°C

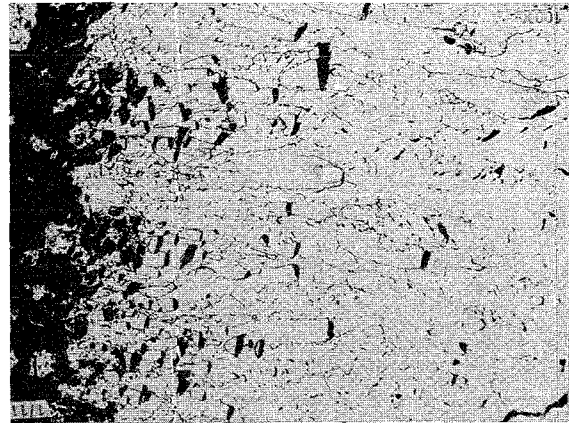


δ - Profil

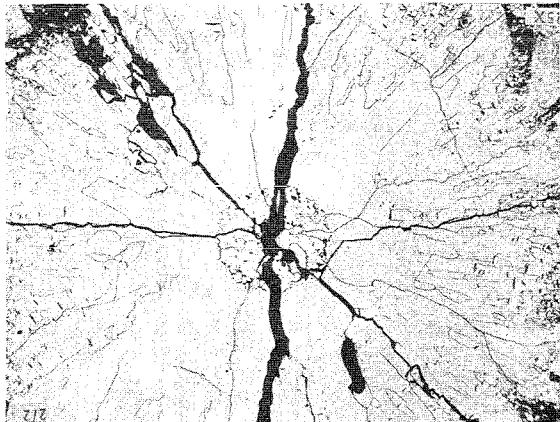
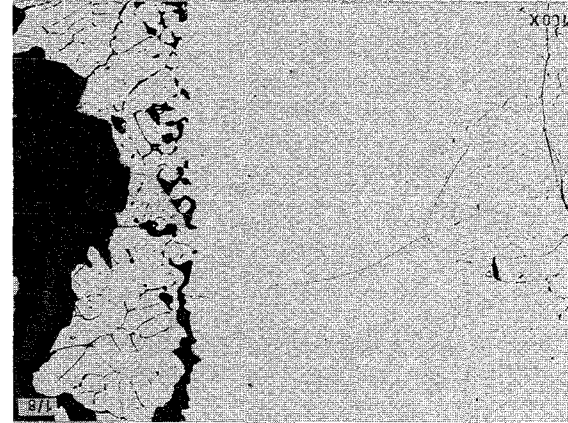




2 mm



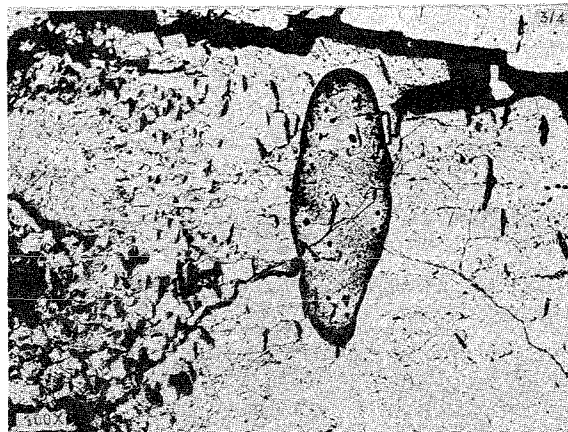
0.2 mm



1 mm



0.2 mm



Prüfling L 31

Brennstoff :

Form : Pulver, gesinterte Partikel
 Zusammensetzung : UO_2 (7,5 % U-235)
 Tablettendichte : 84,7 % th.D.

Hülle :

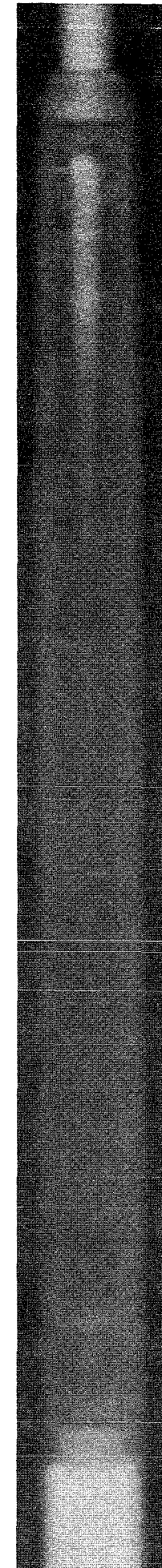
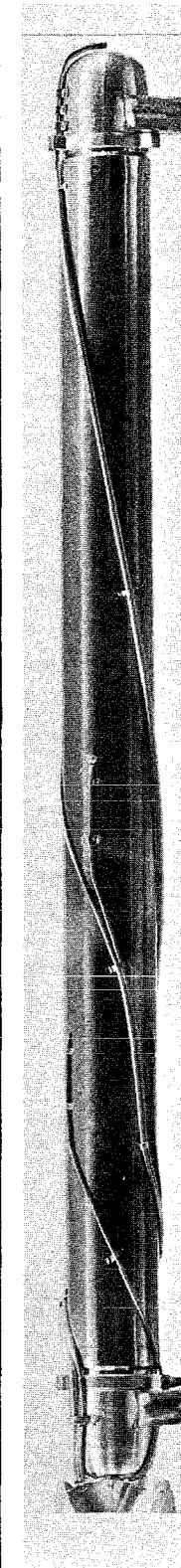
Material : X8CrNiMoVNb 16/13
 W.-Nr. 1.4988
 Außendurchmesser : 12 mm
 Wandstärke : 1,0 mm

Brennstab :

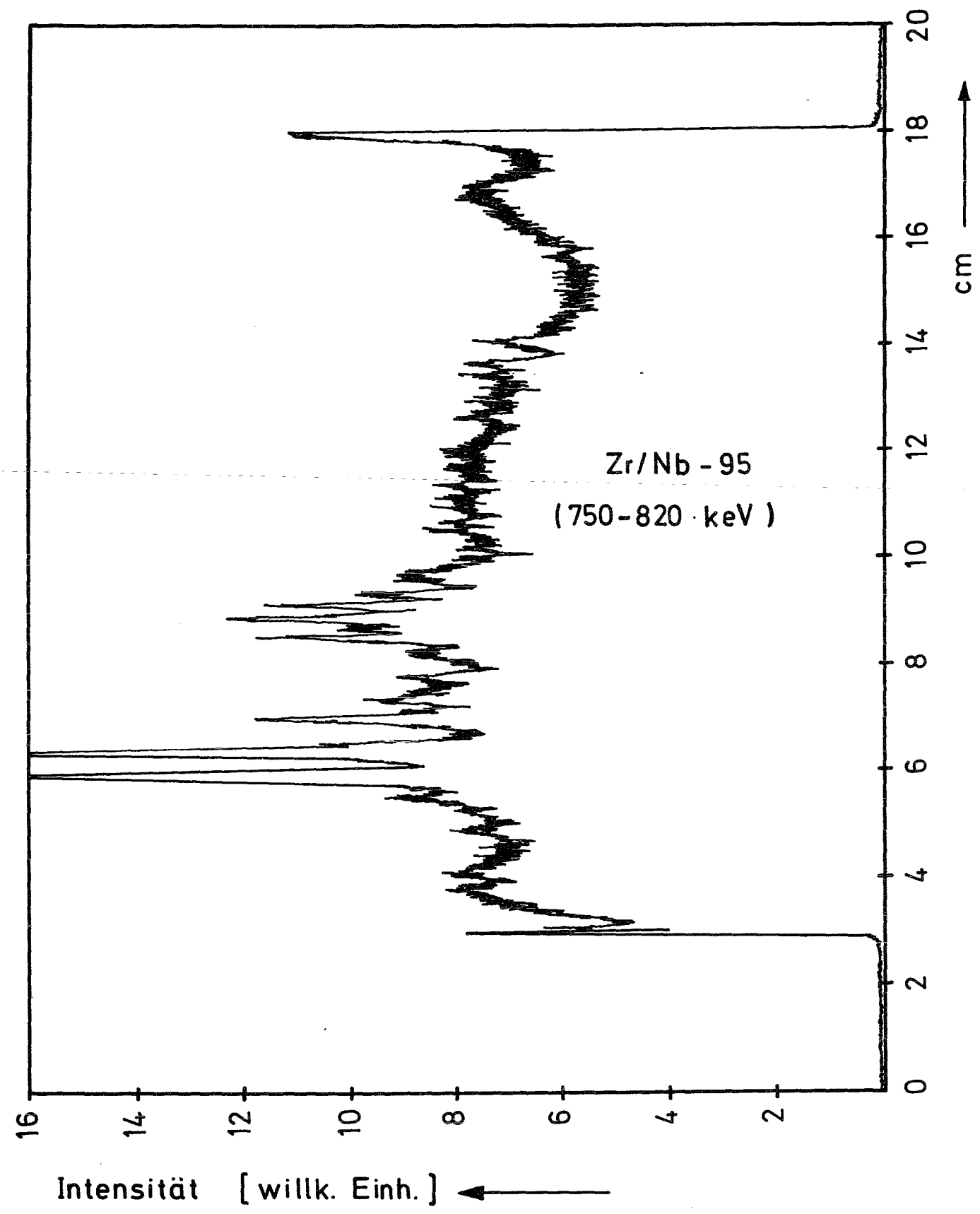
Gesamtlänge : 182,9 mm
 Länge der Brennstoffsäule : 150,0 mm
 Gewicht der " : 109,5 g
 Radiale Spaltweite : --
 Schmierdichte : 84,7 % th.D.

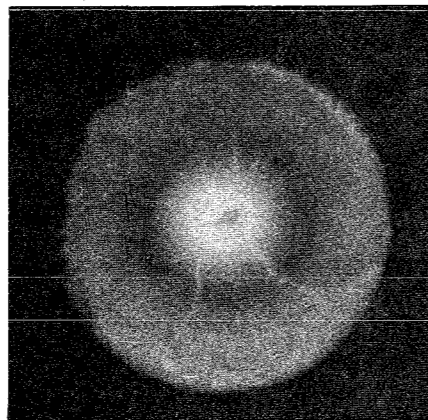
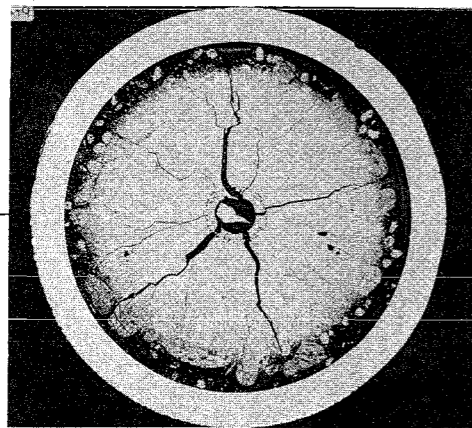
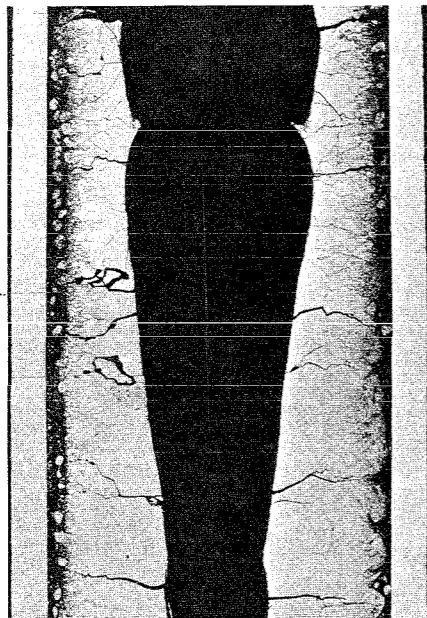
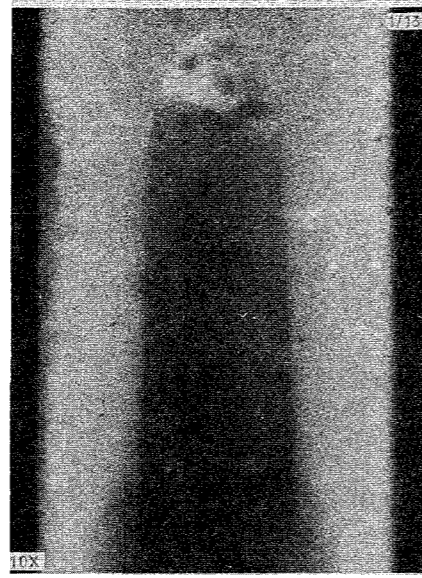
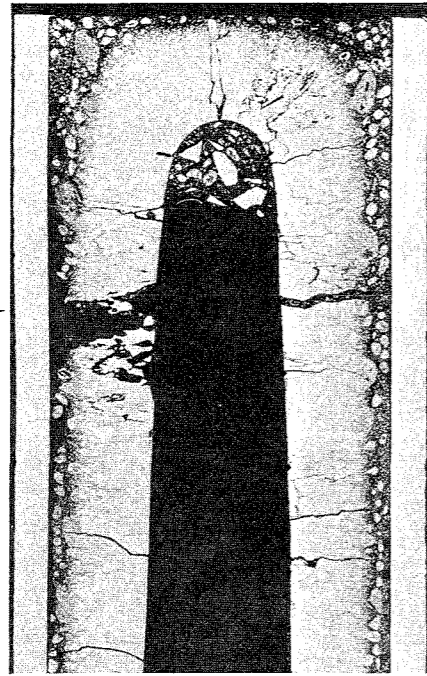
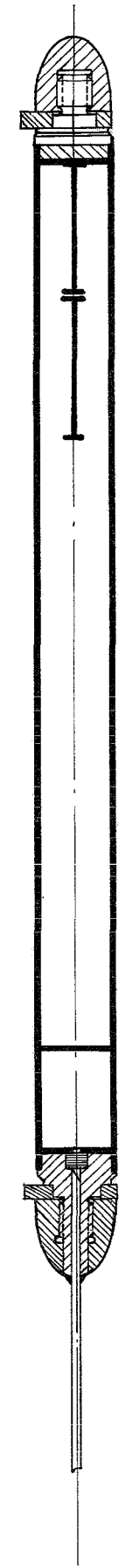
Bestrahlung :

Zeit : 11.7.67
 Dauer : 2 h 06 min
 mittl. Stableistung : 770 W/cm
 mittl. Hüllaußentemp. : 535°C

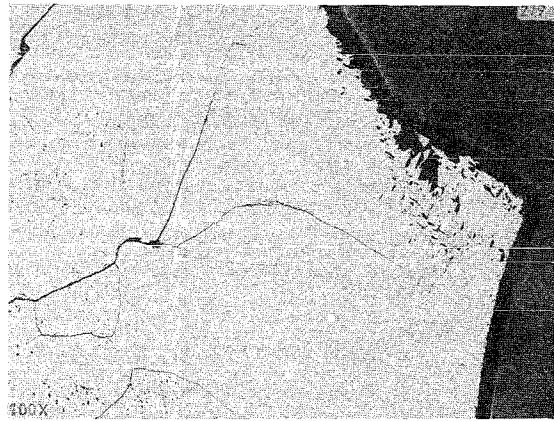
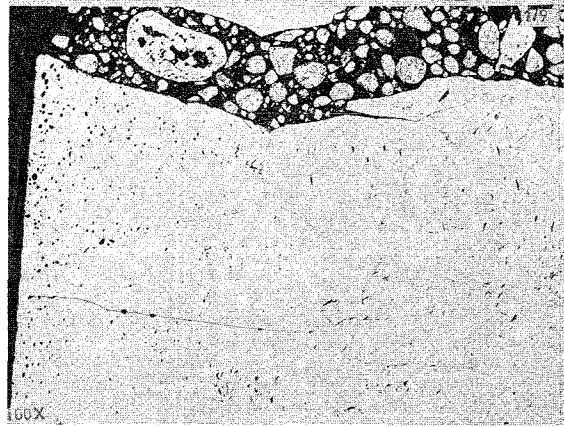


δ - Profil

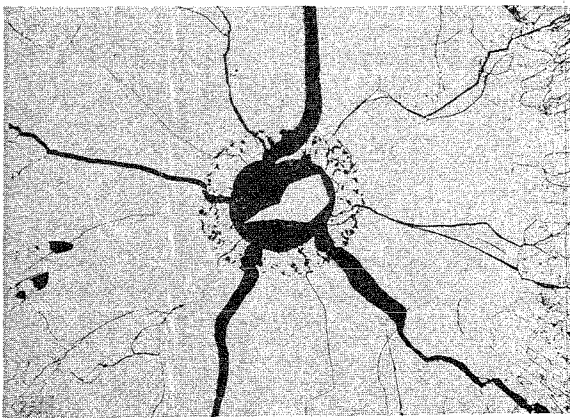




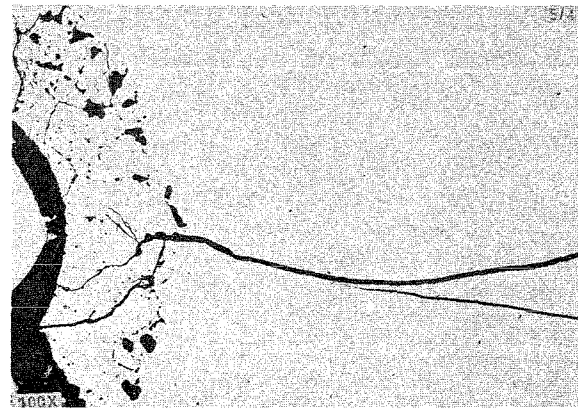
2 mm



0.2 mm



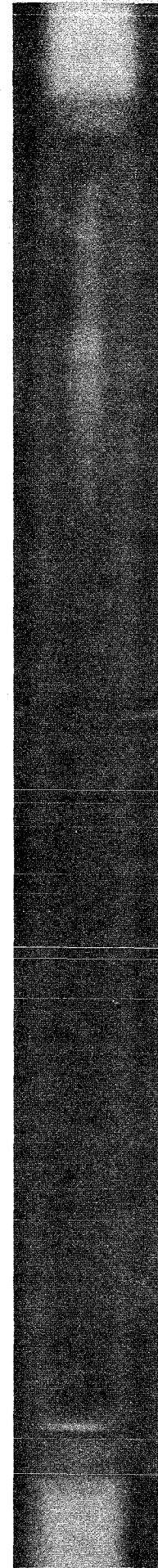
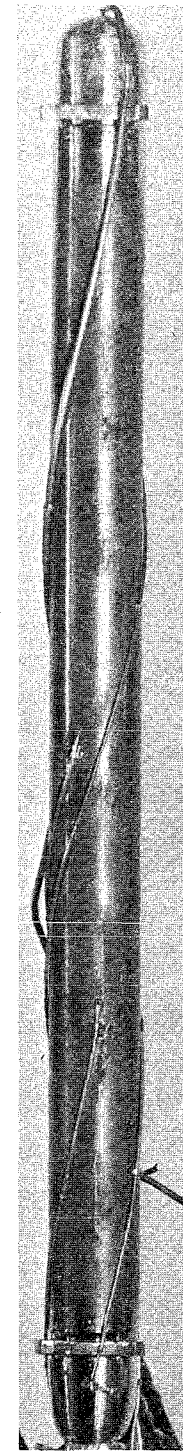
1 mm



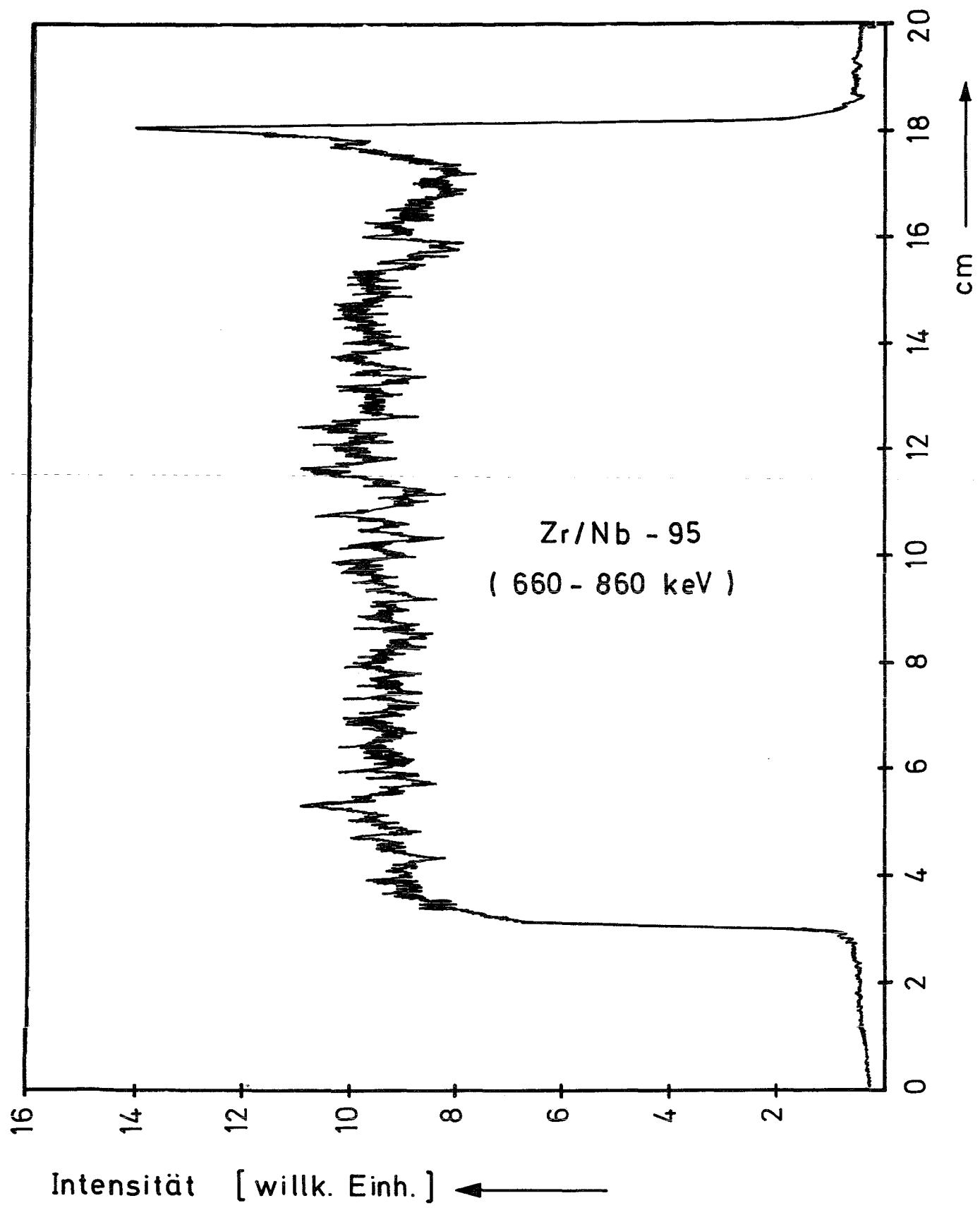
0.2 mm

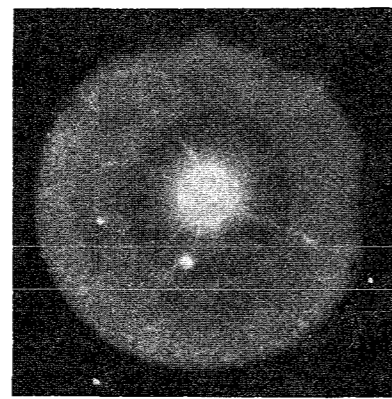
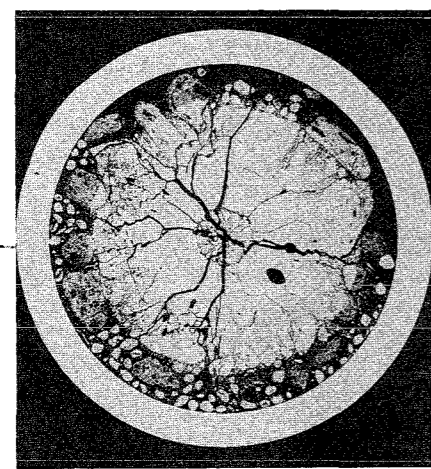
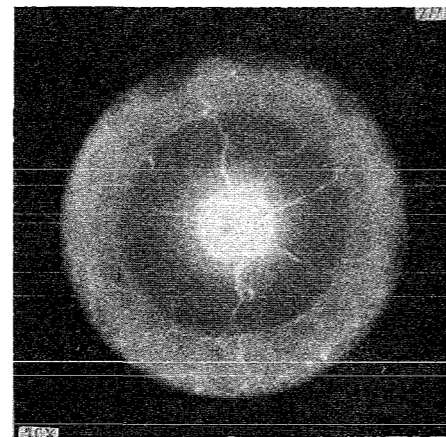
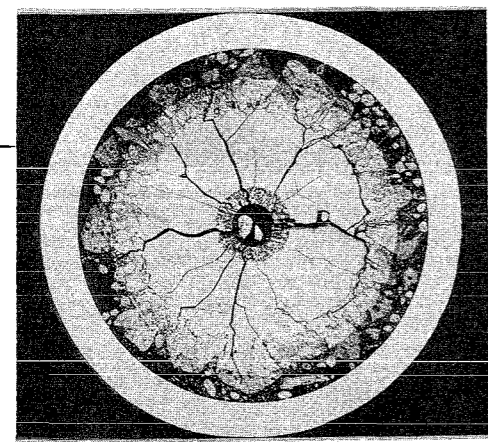
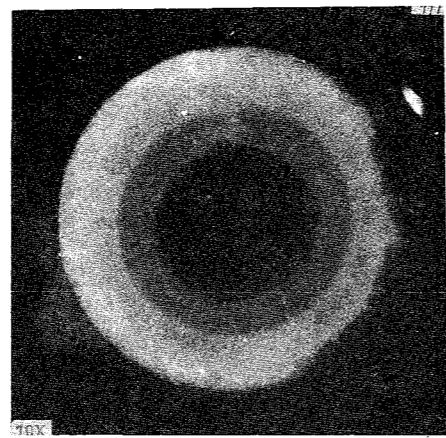
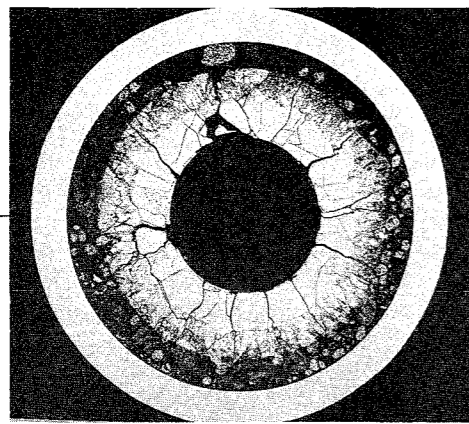
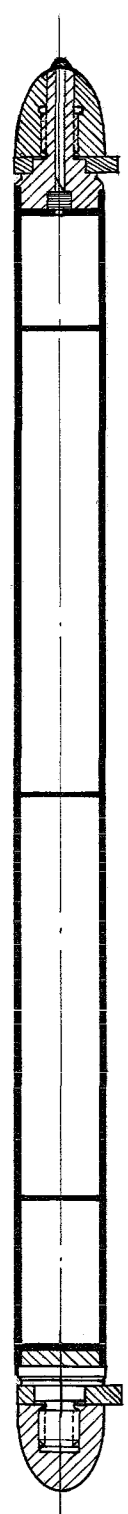
Prüfling		L 32
<u>Brennstoff :</u>		
Form	:	Pulver, gesinterte Partikel +)
Zusammensetzung	:	UO ₂ (7,5 % U-235)
Tablettendichte	:	85,0 % th.D.
<u>Hülle :</u>		
Material	:	X8CrNiMoVnb 16/13 W.-Nr. 1.4988
Außendurchmesser	:	12 mm
Wandstärke	:	1,0 mm
<u>Brennstab :</u>		
Gesamtlänge	:	182,9 mm
Länge der Brennstoffsäule	:	149,8 mm
Gewicht der "	:	109,9 g
Radiale Spaltweite	:	--
Schmierdichte	:	85,0 % th.D.
<u>Bestrahlung :</u>		
Zeit	:	11.9. - 12.9.67
Dauer	:	24 h 02 min
mittl. Stableistung	:	700 W/cm
mittl. Hüllaußentemp.	:	535°C

+) Spaltgasdruckmessung

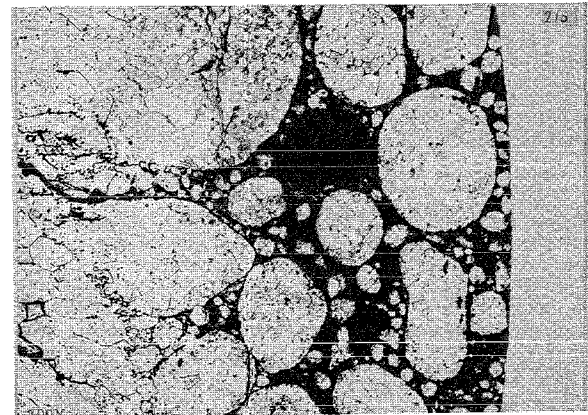
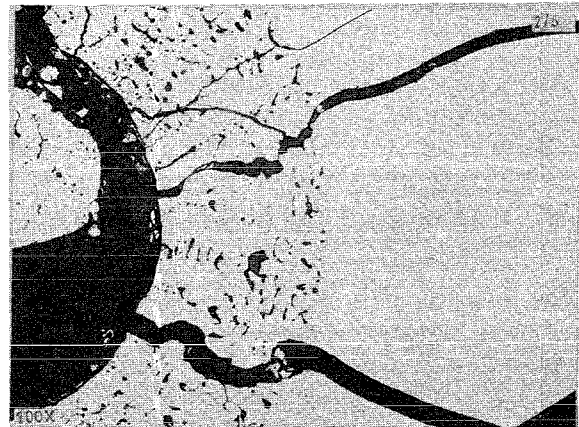
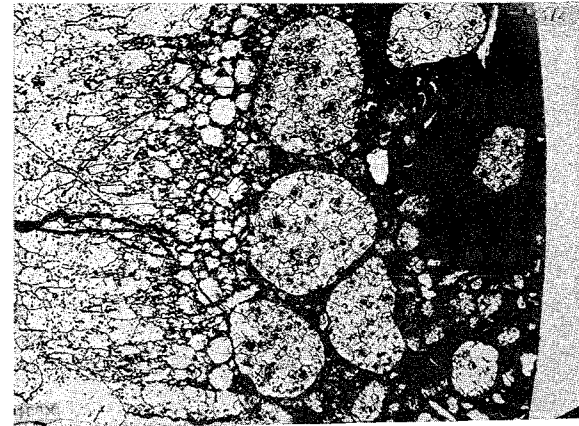
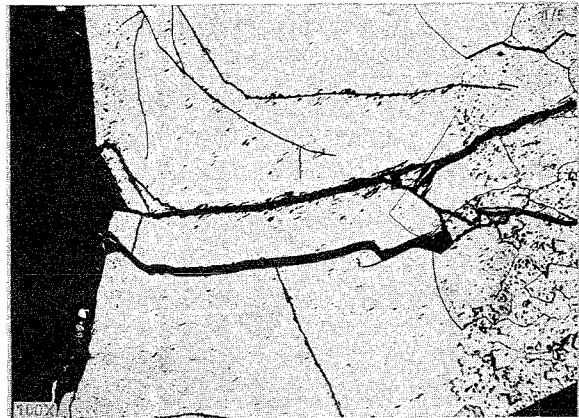


δ - Profil

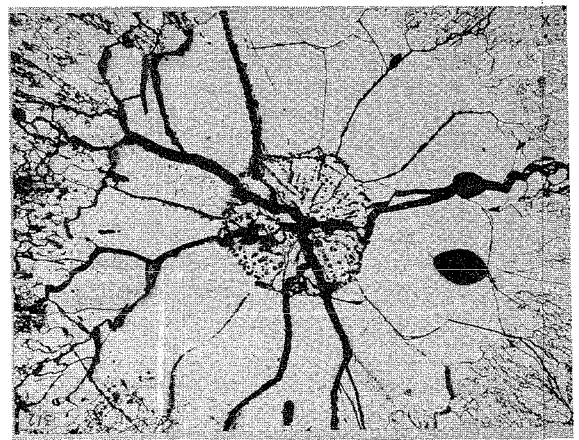




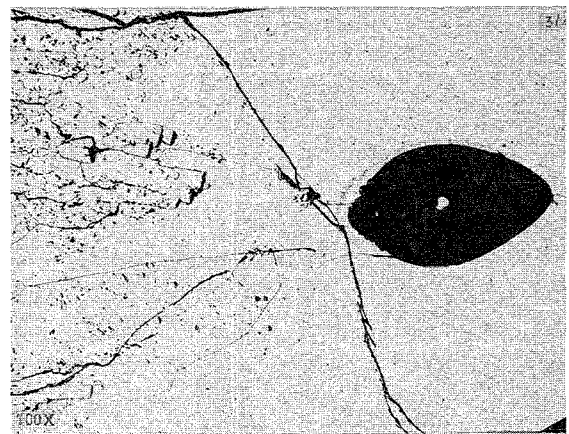
2 mm



0.2 mm



1 mm



0.2 mm

Prüfling L 33

Brennstoff :

Form : Pulver, gesinterte Partikel
 Zusammensetzung : UO_2 (7.5 % U-235)
 Tablettendichte : 85,0 % th.D.

Hülle :

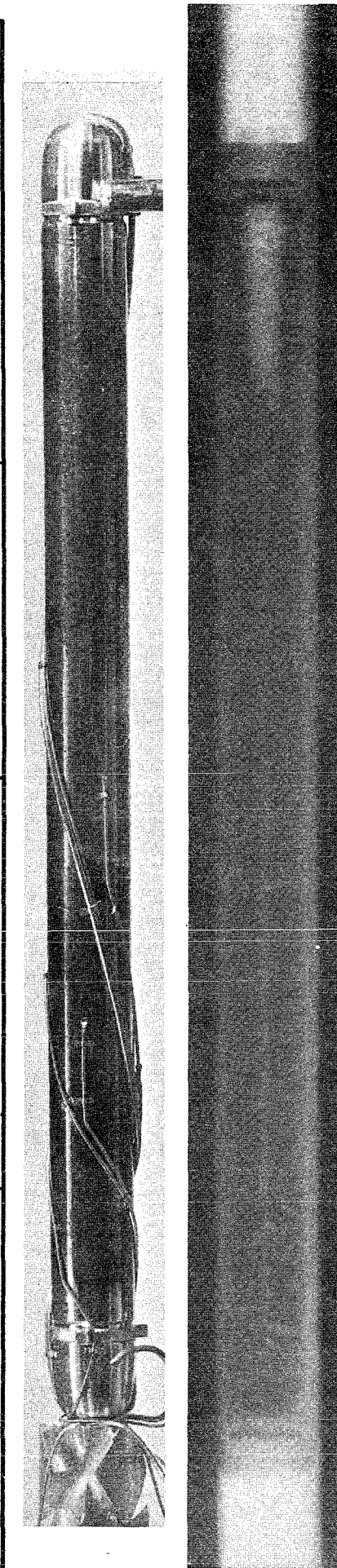
Material : X8CrNiMoVNb 16/13
 W.-Nr. 1.4988
 Außendurchmesser : 12 mm
 Wandstärke : 1,0 mm

Brennstab :

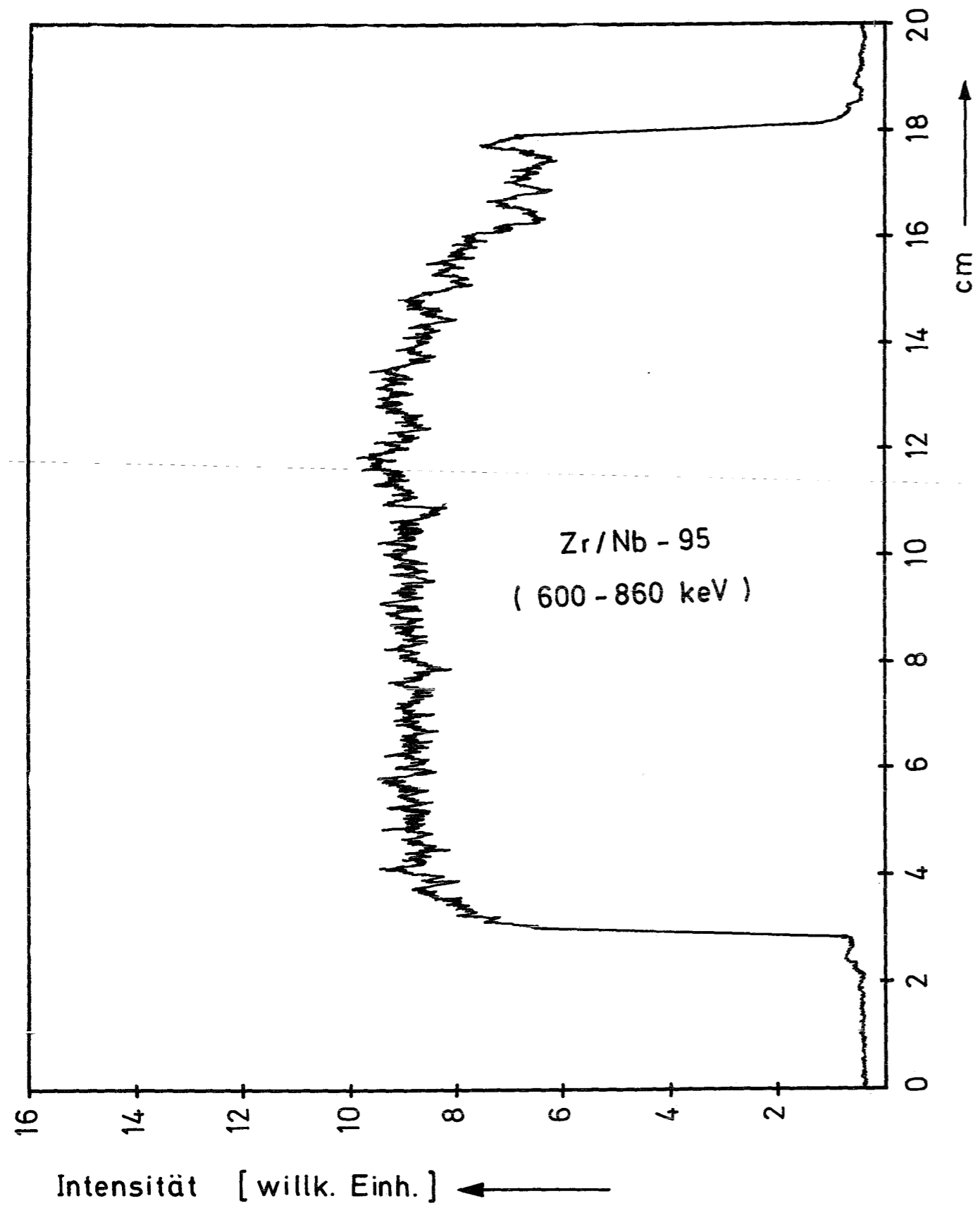
Gesamtlänge : 182,8 mm
 Länge der Brennstoffsäule : 149,0 mm
 Gewicht der " : 109,1 g
 Radiale Spaltweite : --
 Schmiedichte : 85,0 % th.D.

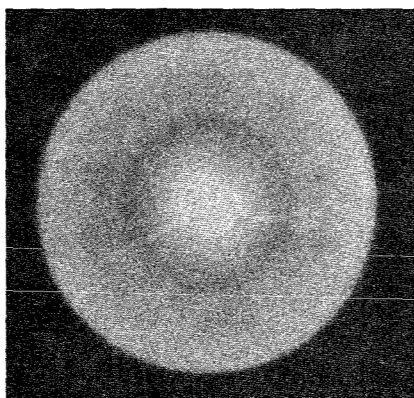
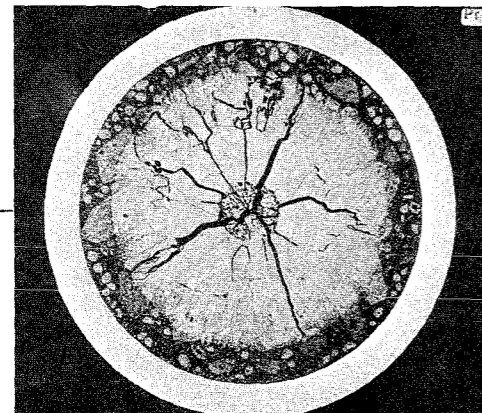
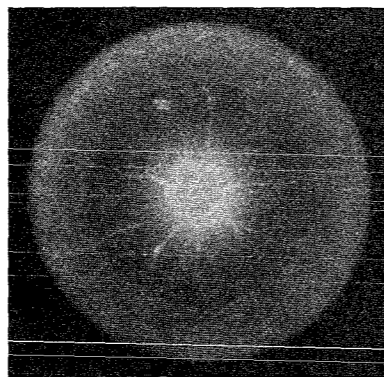
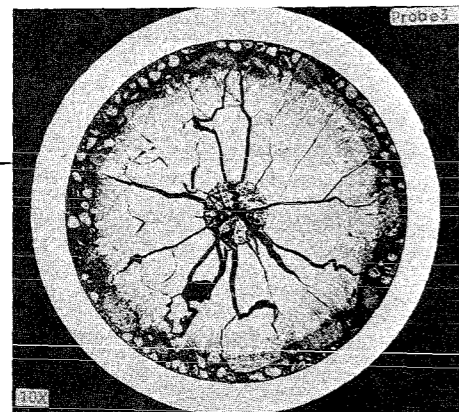
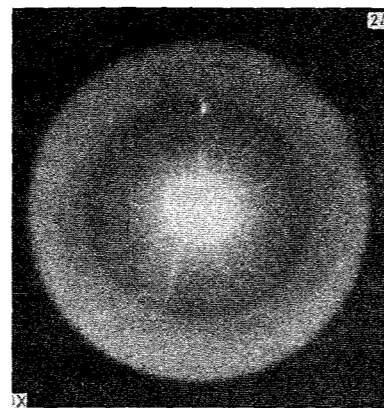
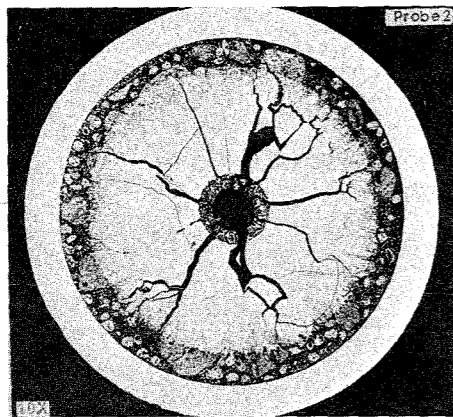
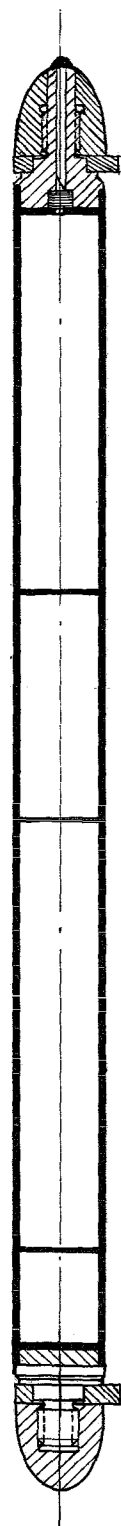
Bestrahlung :

Zeit : 6.2.68
 Dauer : 10 min
 mittl. Stableistung : 1000 W/cm
 mittl. Hüllaußentemp. : 500°C

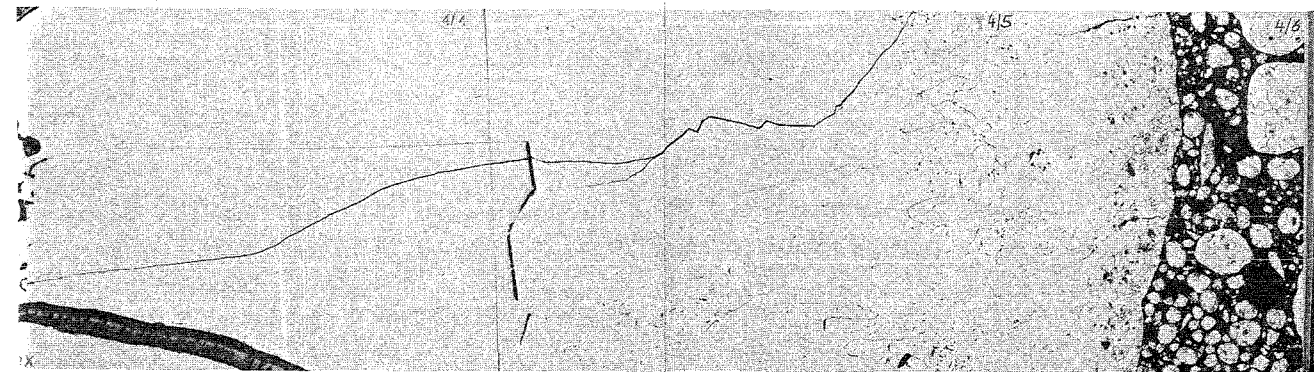
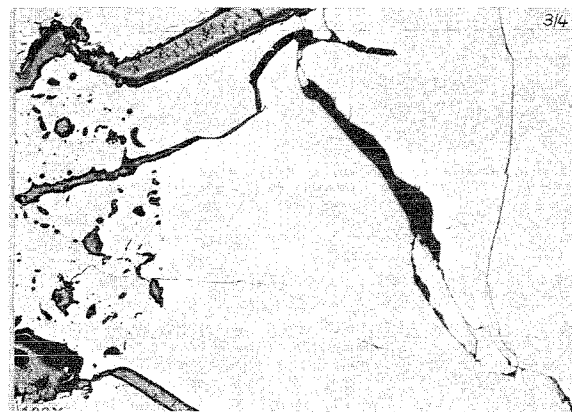
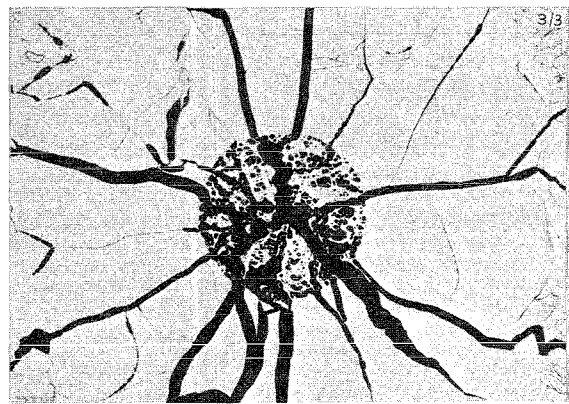
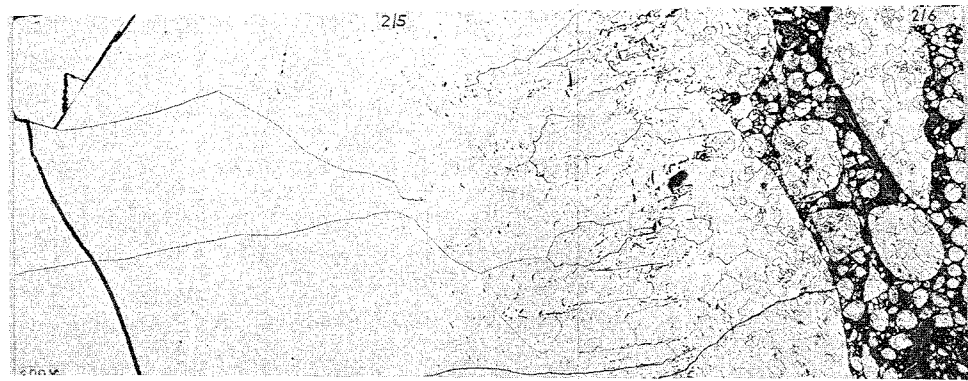


δ - Profil





2 mm



0.2 mm

Prüfling L 34

Brennstoff :

Form : Pulver, gesinterte Partikel
 Zusammensetzung : UO_2 (7,5 % U-235)
 Tablettendichte : 85,0 % th.D.

Hülle :

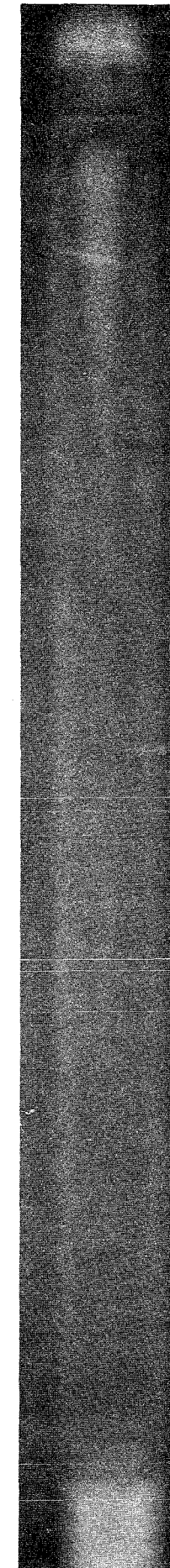
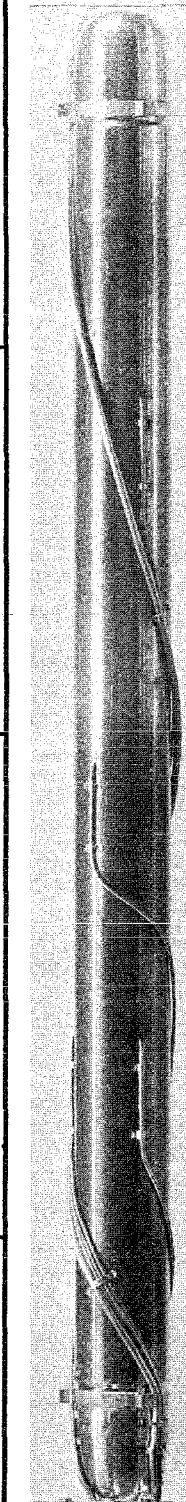
Material : X8CrNiMoVNb 16/13
 W.-Nr. 1.4988
 Außendurchmesser : 12 mm
 Wandstärke : 1,0 mm

Brennstab :

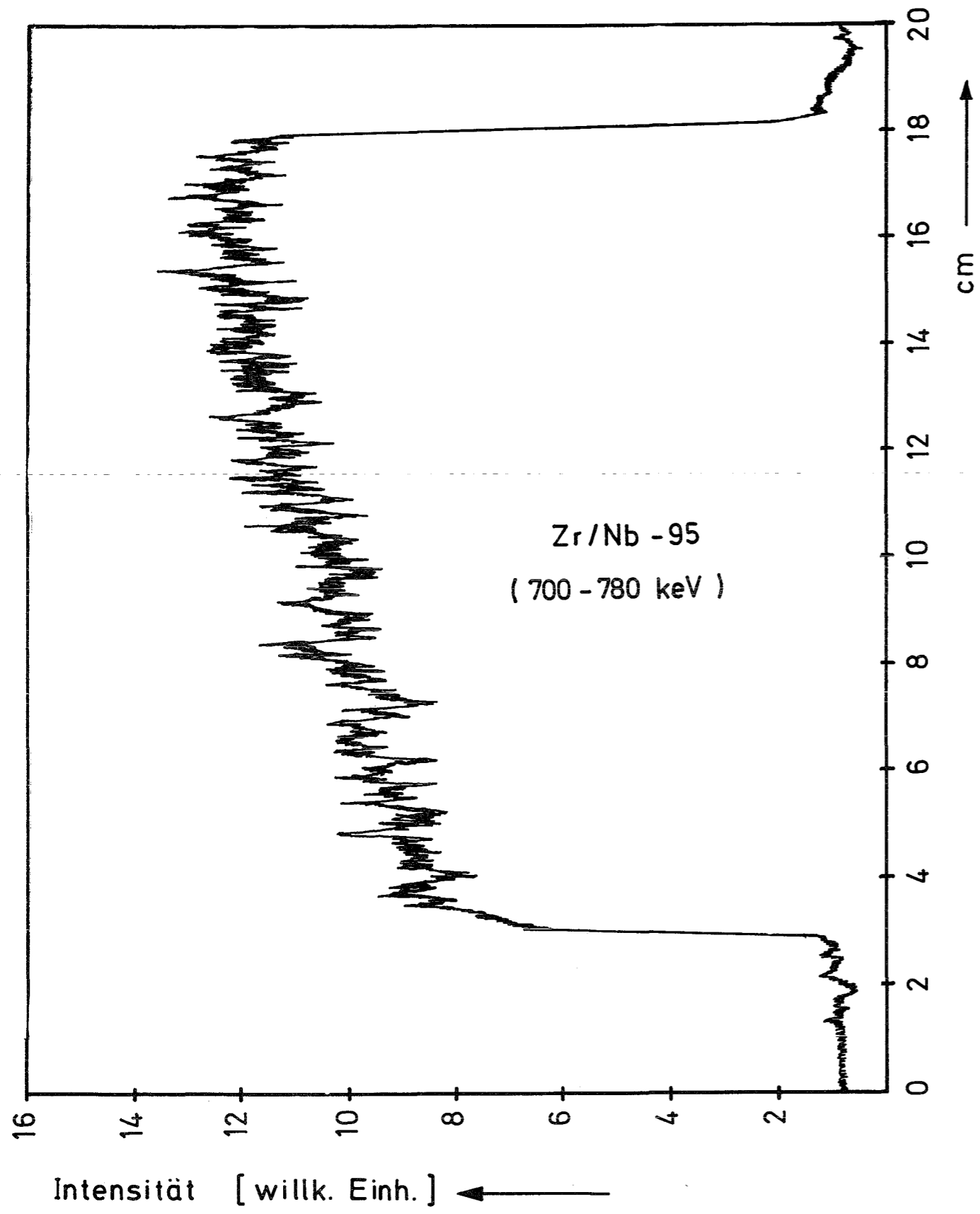
Gesamtlänge : 182,8 mm
 Länge der Brennstoffsäule : 149,0 mm
 Gewicht der " : 109,2 g
 Radiale Spaltweite : --
 Schmierdichte : 85,0 % th.D.

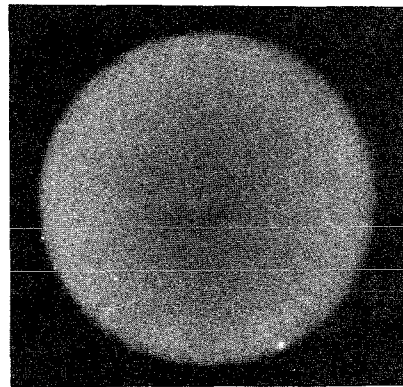
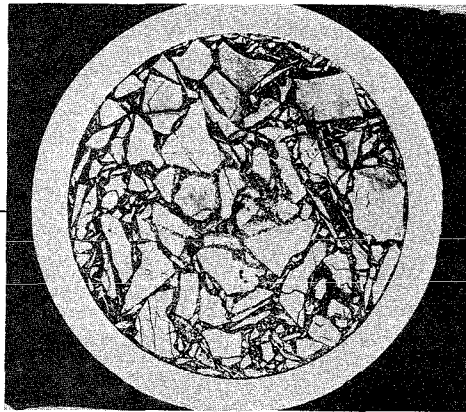
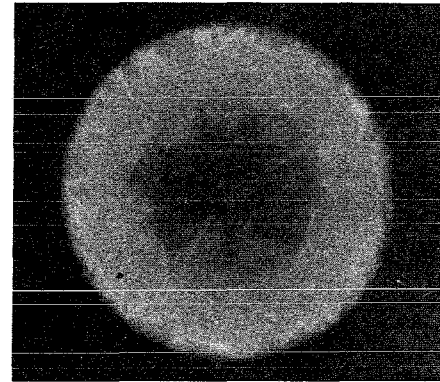
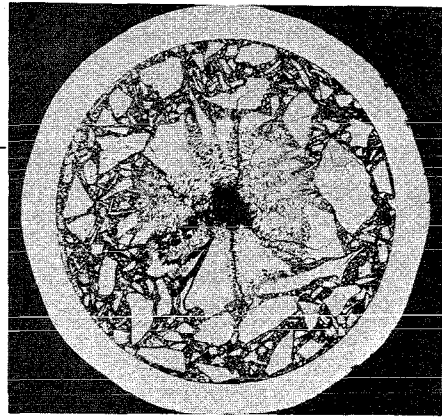
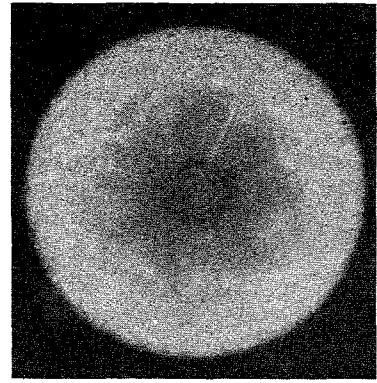
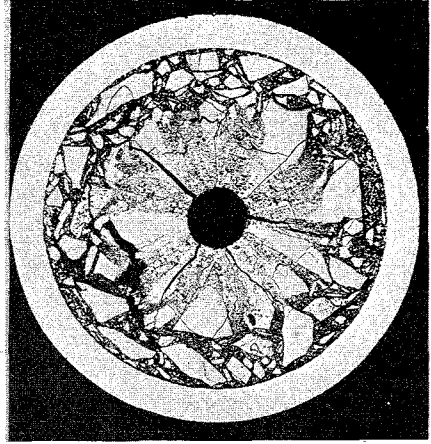
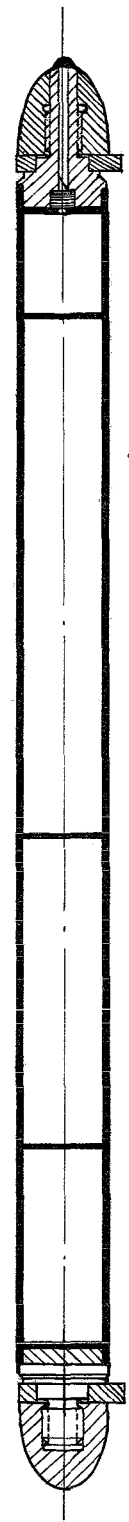
Bestrahlung :

Zeit : 16.11.67
 Dauer : 2 h 11 min
 mittl. Stableistung : 930 W/cm
 mittl. Hüllaußentemp. : 500°C

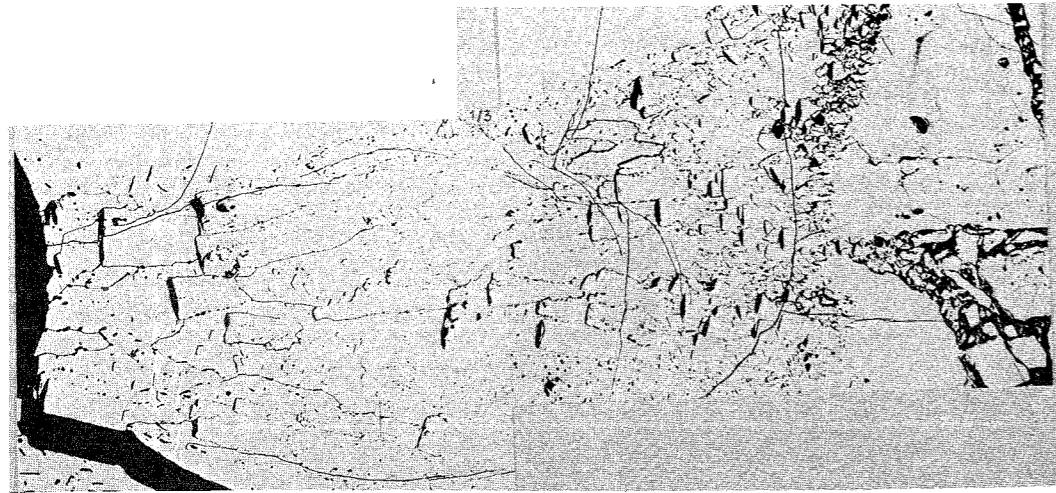


δ - Profil

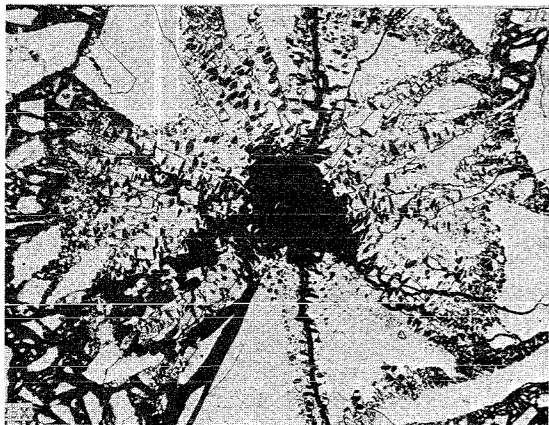




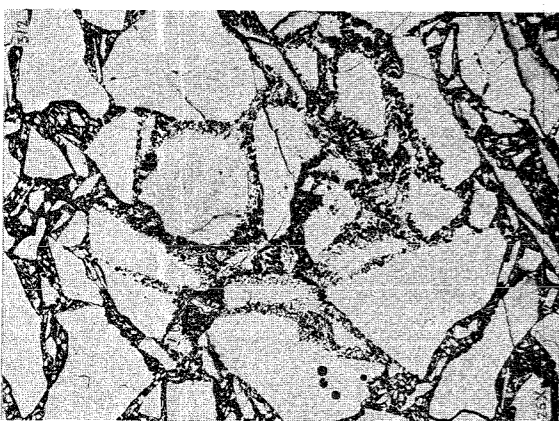
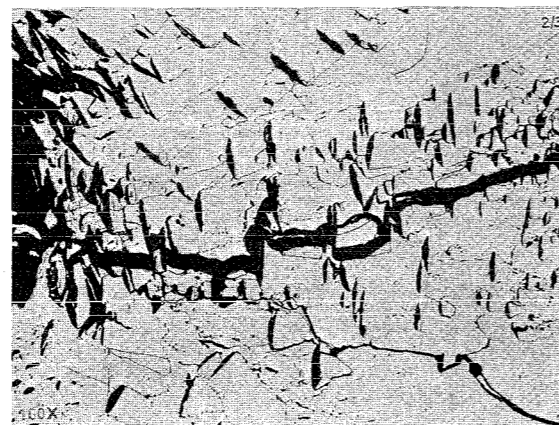
2 mm



0.2 mm



0.2 mm



1 mm

Prüfling L 35

Brennstoff :

Form : Pulver, geschmolzene Partikel
 Zusammensetzung : UO_2 (7,5 % U-235)
 Tablettendichte : 84,6 % th.D.

Hülle :

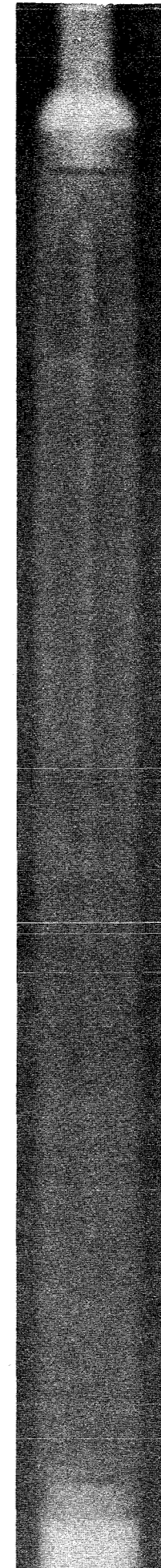
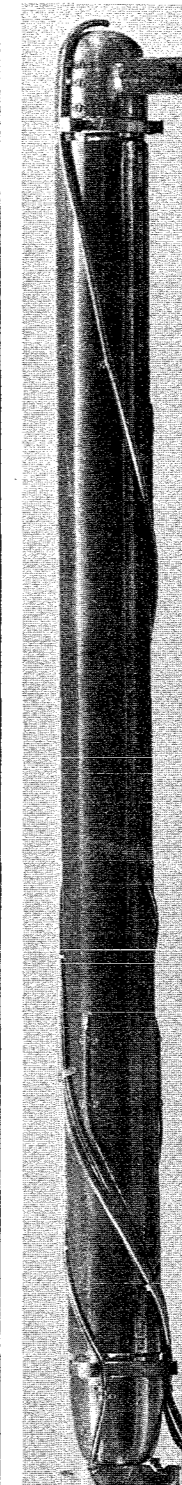
Material : X8CrNiMoVNb 16/13 W,-Nr. 1.4988
 Außendurchmesser : 12 mm
 Wandstärke : 1,0 mm

Brennstab :

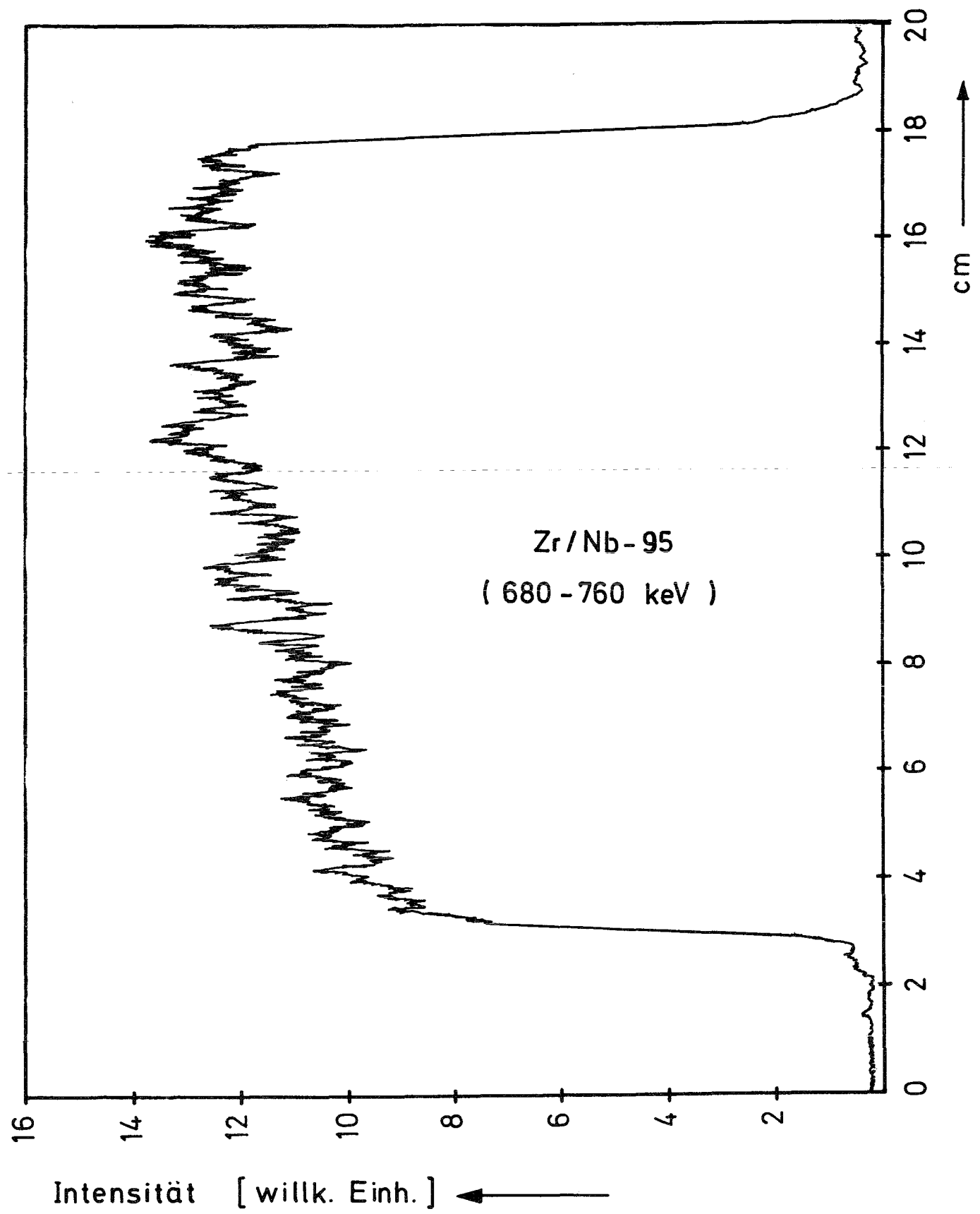
Gesamtlänge : 182,9 mm
 Länge der Brennstoffsäule : 150,4 mm
 Gewicht der " : 109,7 g
 Radiale Spaltweite : --
 Schmierdichte : 84,6 % th.D.

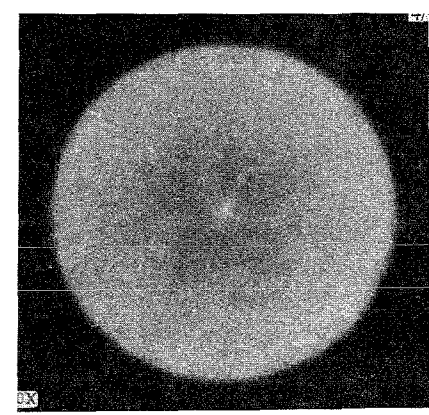
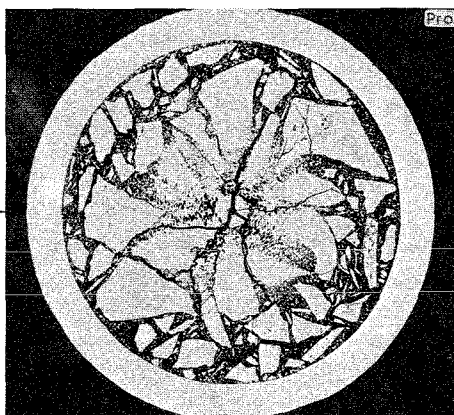
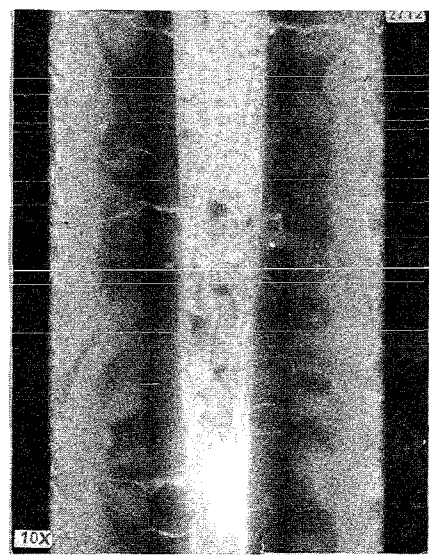
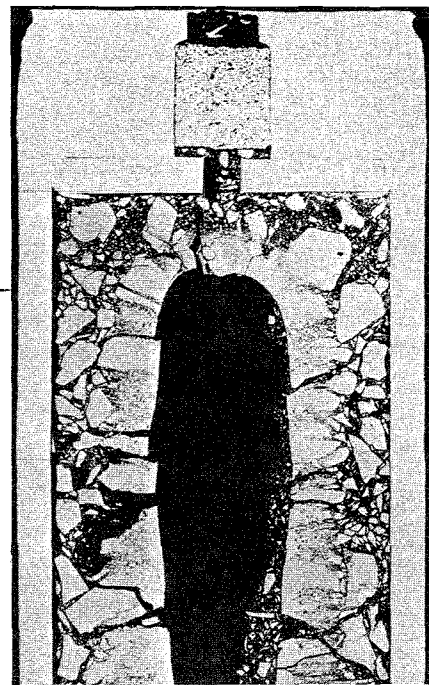
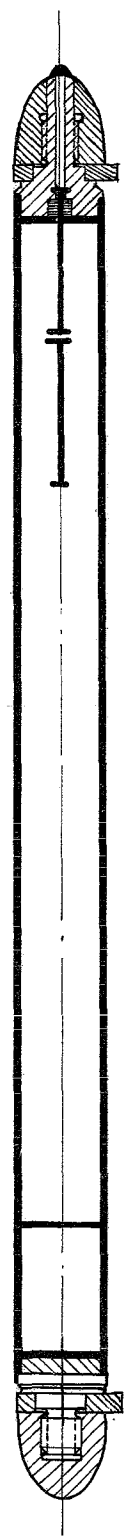
Bestrahlung :

Zeit : 26.7.67
 Dauer : 2 h 03 min
 mittl. Stableistung : 550 W/cm
 mittl. Hüllaußentemp. : 560°C

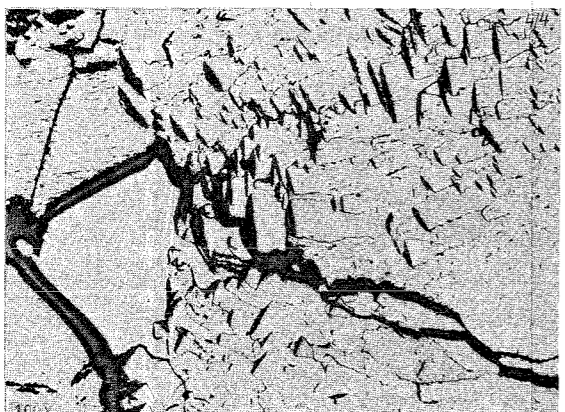
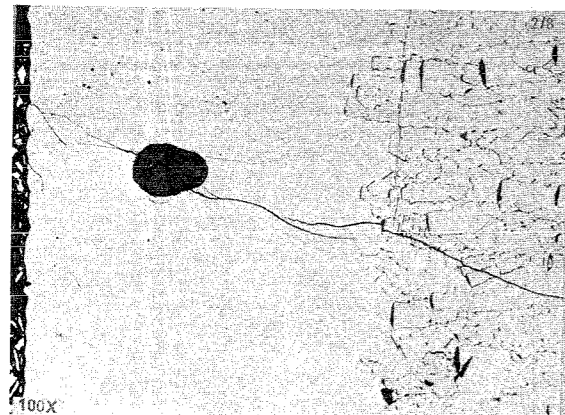
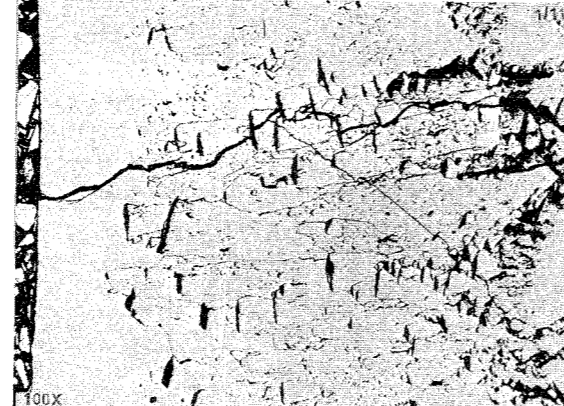


γ - Profil





2 mm



0.2 mm

Prüfling L 36

Brennstoff :

Form : Pulver, geschmolzene Partikel
Zusammensetzung : UO_2 (7,5 % U-235)
Tablettendichte : 84,9 % th.D.

Hülle :

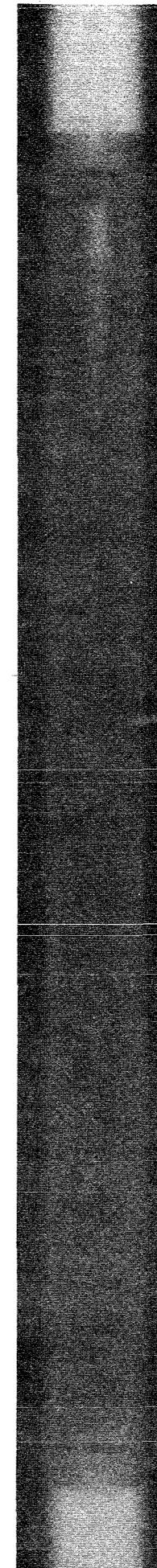
Material : X8CrNiMoVNb 16/13
W.-Nr. 1.4988
Außendurchmesser : 12 mm
Wandstärke : 1,0 mm

Brennstab :

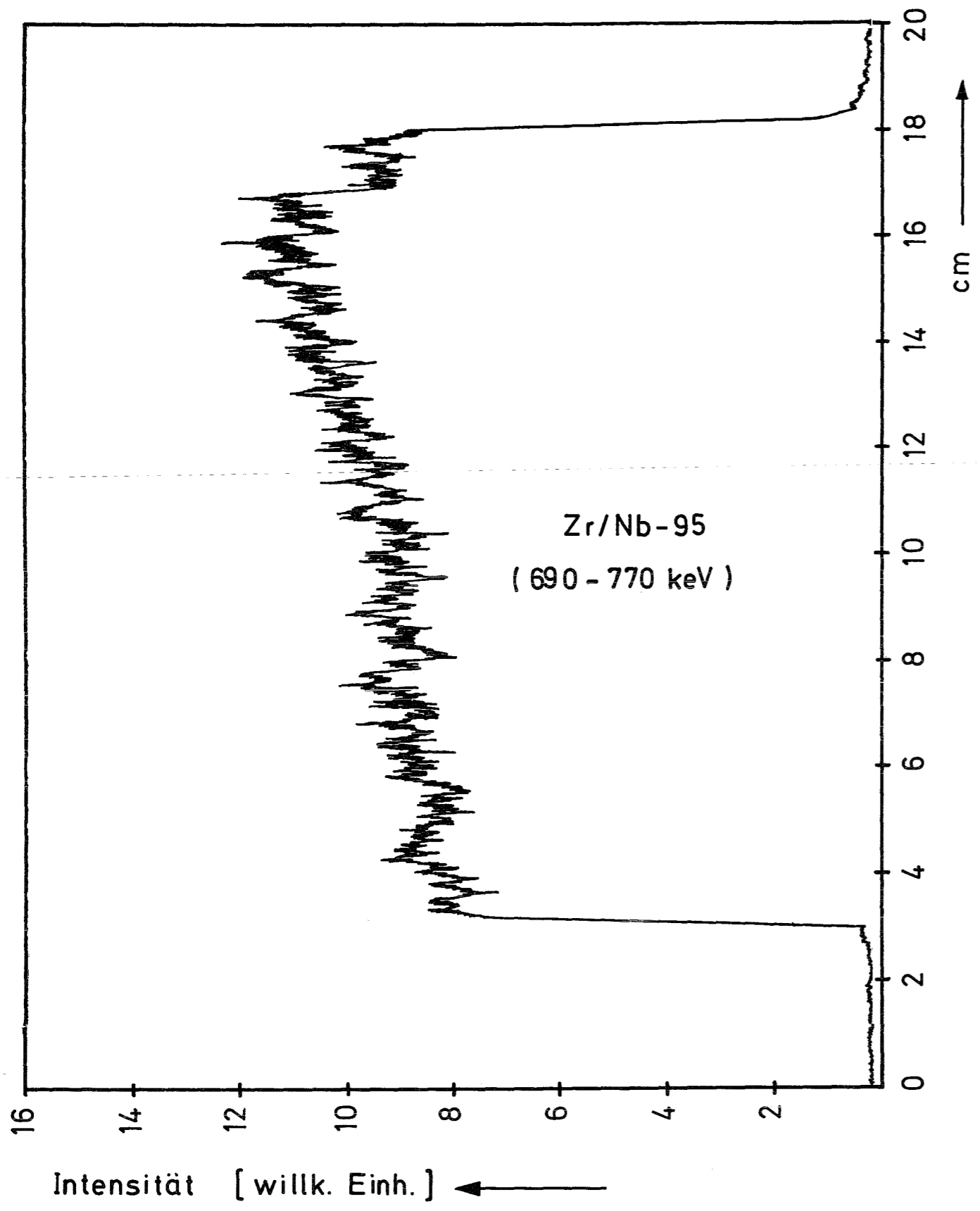
Gesamtlänge : 182,8 mm
Länge der Brennstoffsäule : 150,5 mm
Gewicht der " : 110,0 g
Radiale Spaltweite : --
Schmierdichte : 84,9 % th.D.

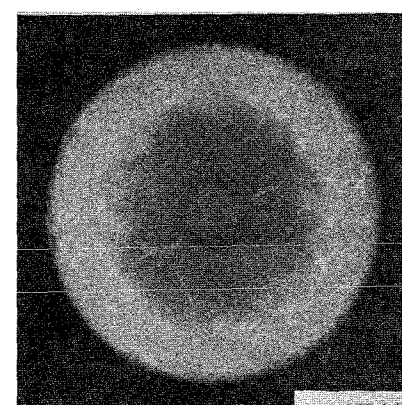
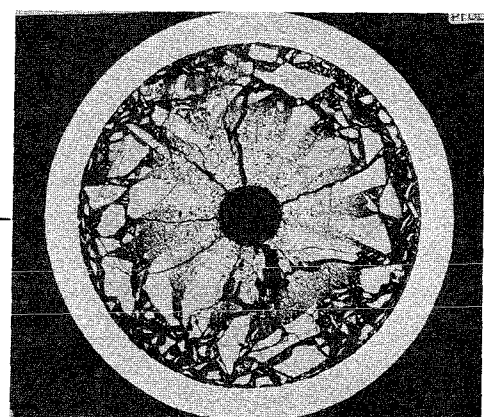
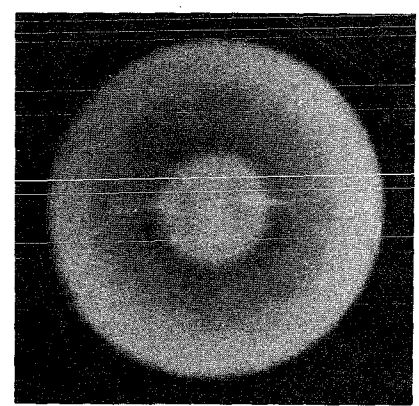
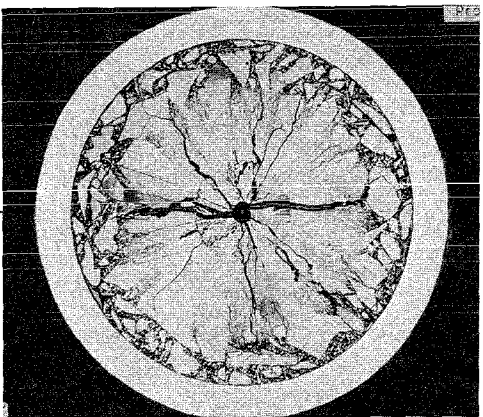
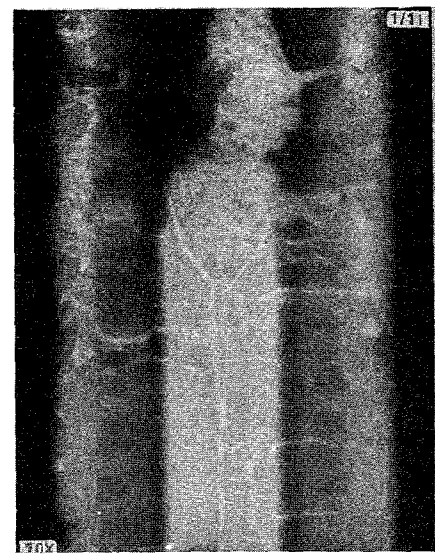
Bestrahlung :

Zeit : 7.9.67
Dauer : 14 min
mittl. Stableistung : 725 W/cm
mittl. Hüllaußentemp. : 535°C

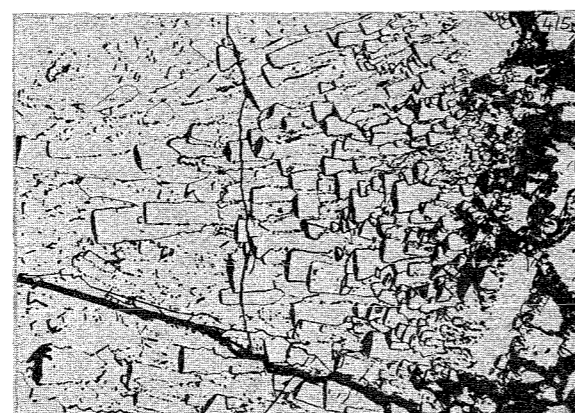
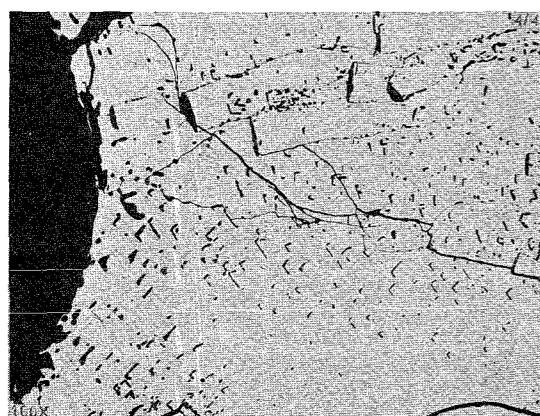
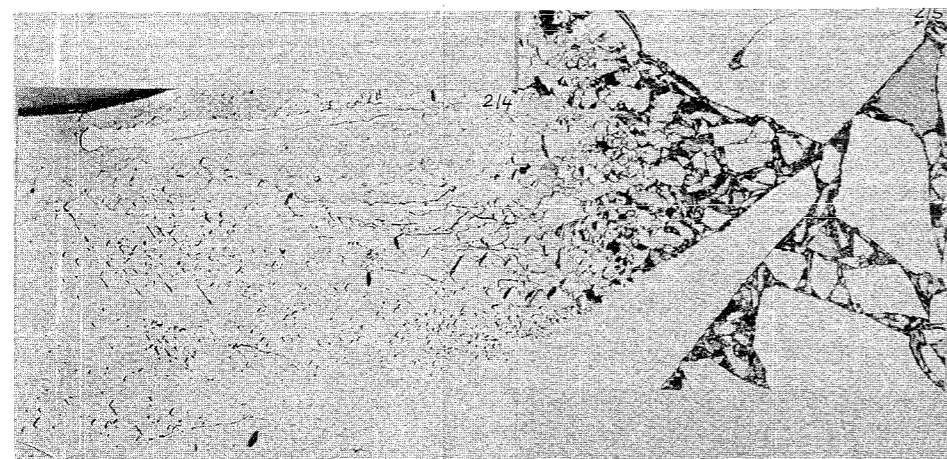
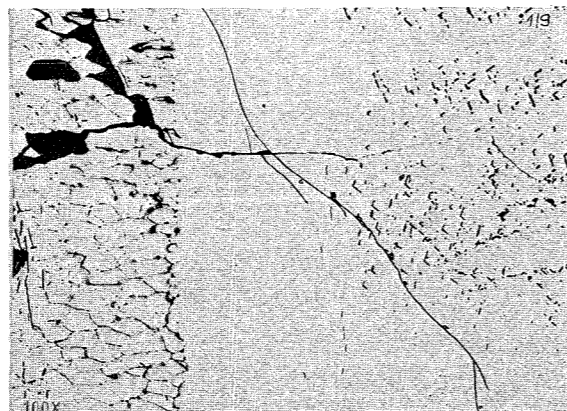
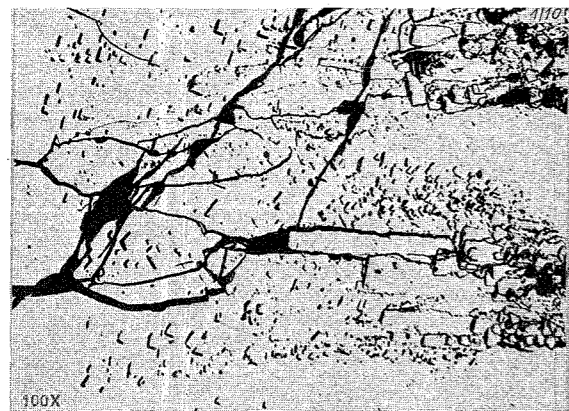


δ - Profil





2 mm



0.2 mm

Prüfling L 37

Brennstoff :

Form : Pulver, geschmolzene Partikel
Zusammensetzung : UO_2 (7,5 % U-235)
Tablettendichte : 85,1 % th.D.

Hülle :

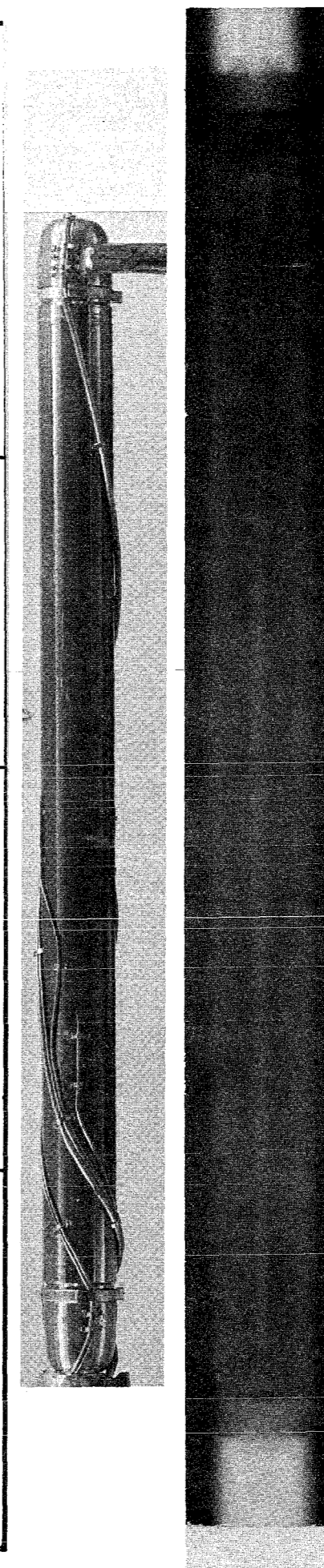
Material : X8CrNiMoVNb 16/13
W.-Nr. 1.4988
Außendurchmesser : 12 mm
Wandstärke : 1,0 mm

Brennstab :

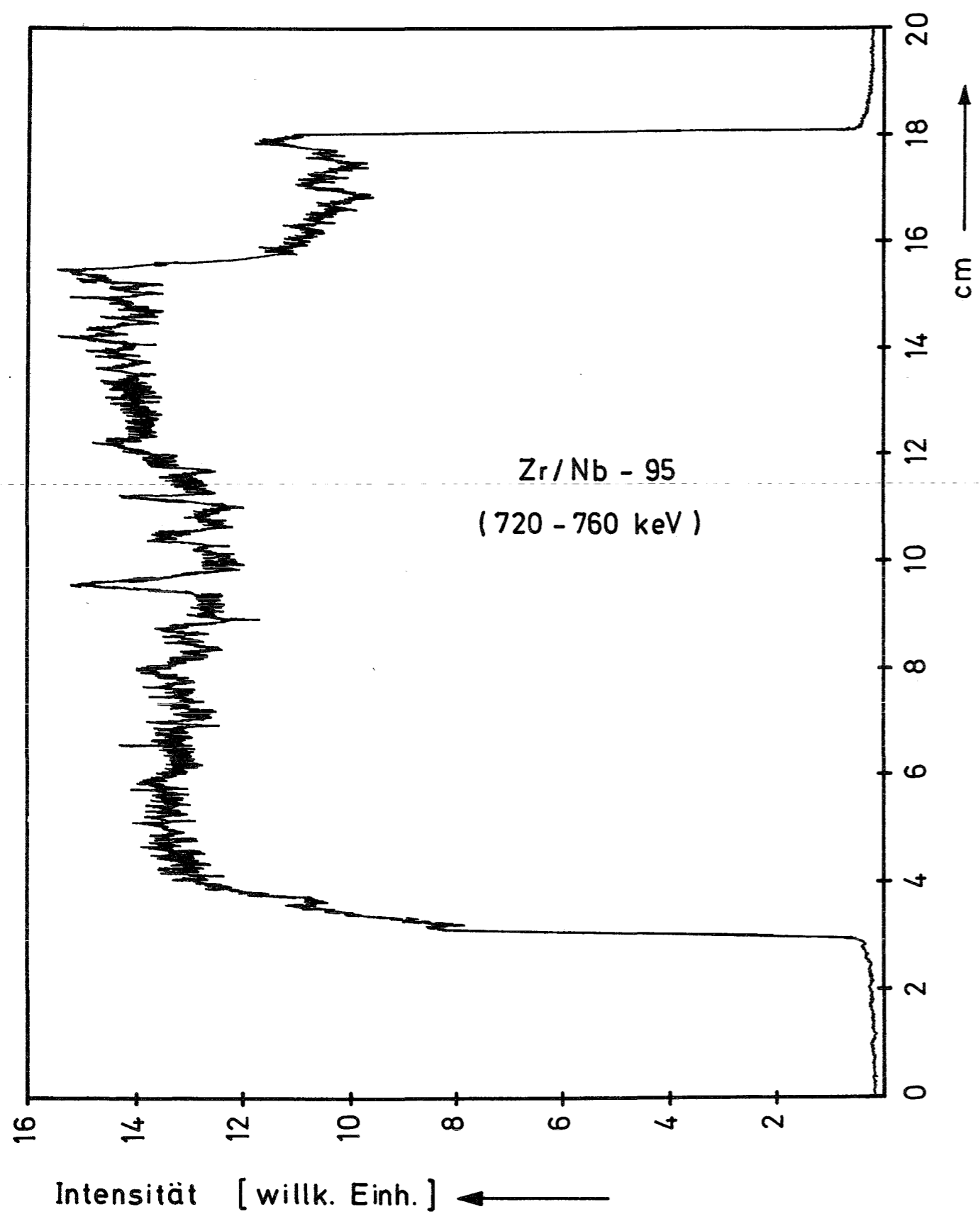
Gesamtlänge : 182,8 mm
Länge der Brennstoffsäule : 150,1 mm
Gewicht der " : 110,1 g
Radiale Spaltweite : -
Schmierdichte : 85,1 % th.D.

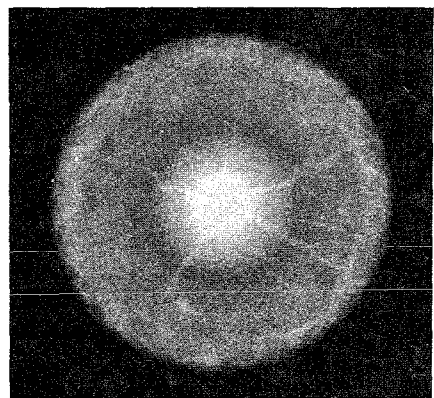
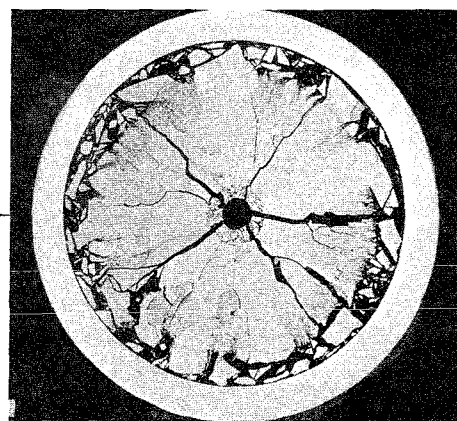
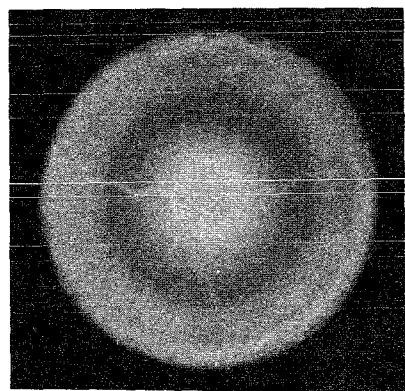
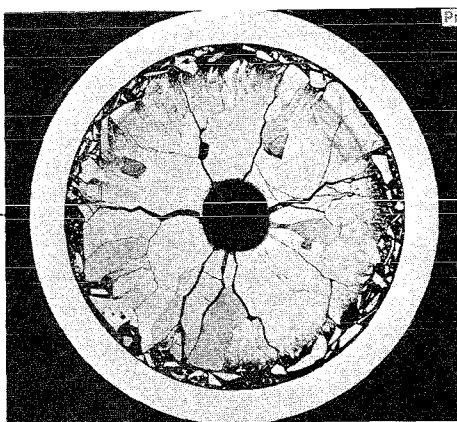
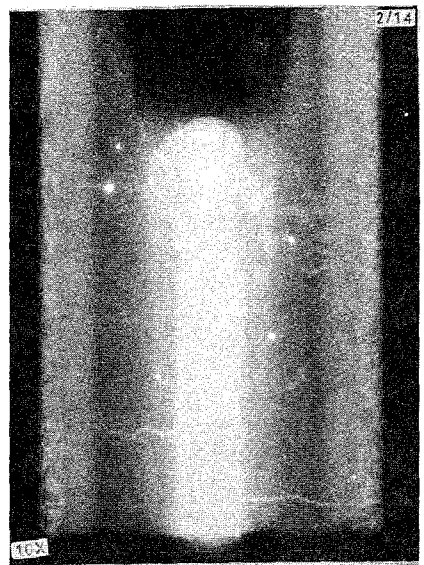
Bestrahlung :

Zeit : 28.7.67
Dauer : 2 h
mittl. Stableistung : 760 W/cm
mittl. Hüllaußentemp. : 535 °C

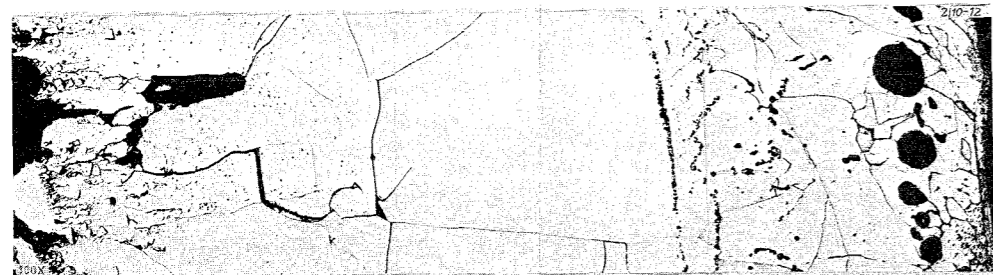


γ - Profil

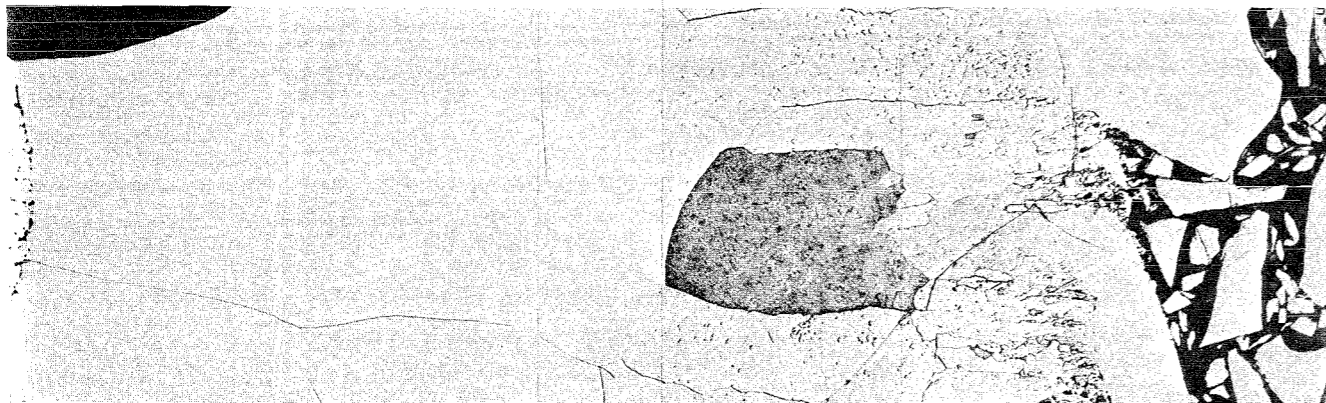




2 mm

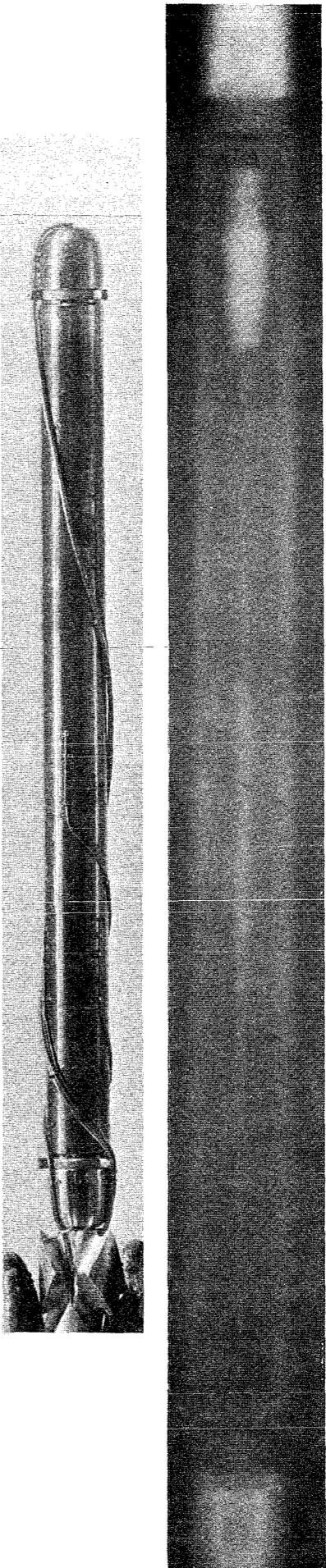


1 mm

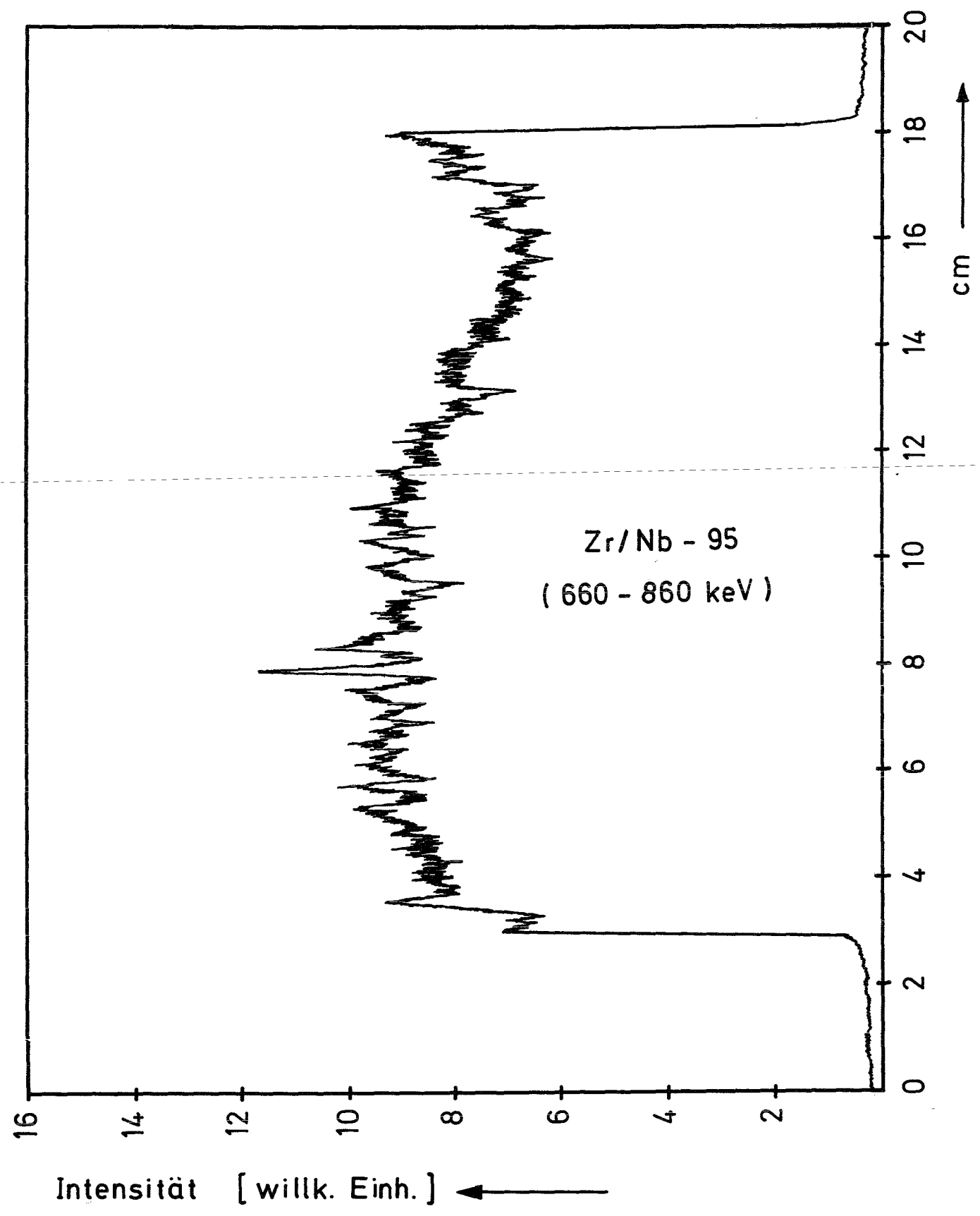


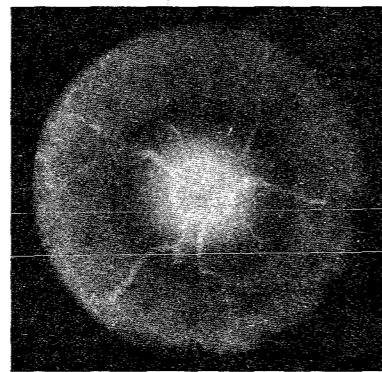
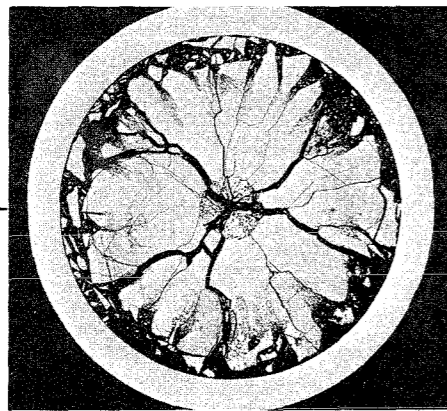
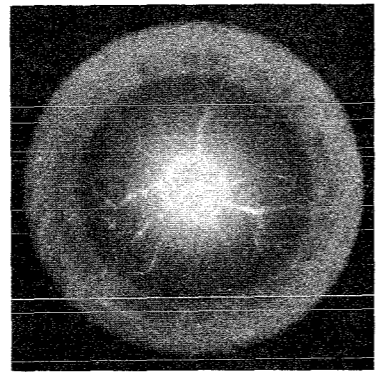
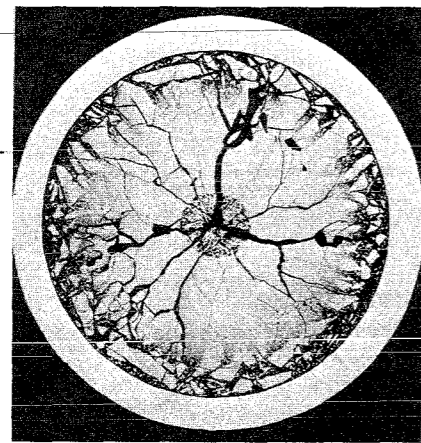
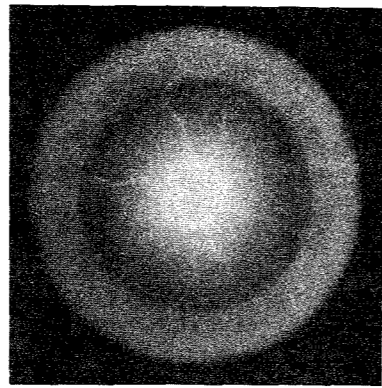
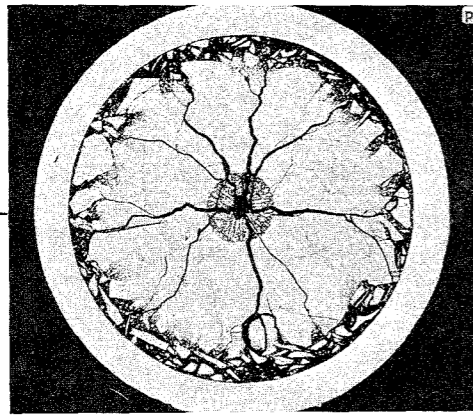
0.2 mm

Prüfling		L 38
<u>Brennstoff :</u>		
Form	:	Pulver, geschm. Partikel
Zusammensetzung	:	UO ₂ (7,5 % U-235)
Tablettendichte	:	85,1 % th.D.
<u>Hülle :</u>		
Material	:	X8CrNiMoVNb 16/13 W.-Nr. 1.4988
Außendurchmesser	:	12 mm
Wandstärke	:	1,0 mm
<u>Brennstab :</u>		
Gesamtlänge	:	182,9 mm
Länge der Brennstoffsäule	:	150,0 mm
Gewicht der "	:	110,0 g
Radiale Spaltweite	:	-
Schmierdichte	:	85,1 % th.D.
<u>Bestrahlung :</u>		
Zeit	:	14.11.-15.11.67
Dauer	:	24 h 17 min
mittl. Stableistung	:	730 W/cm
mittl. Hüllaußentemp.	:	535 °C

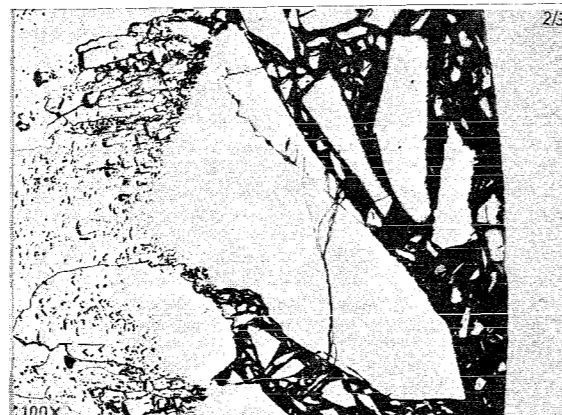
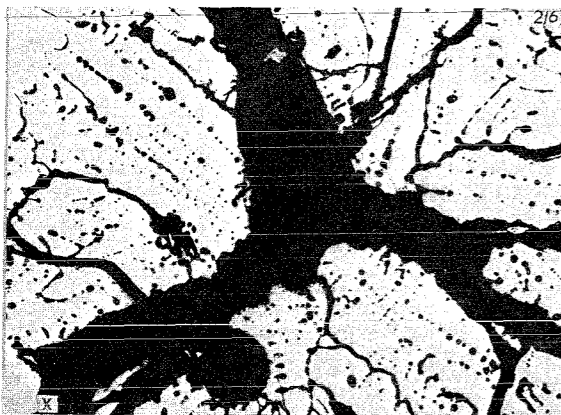
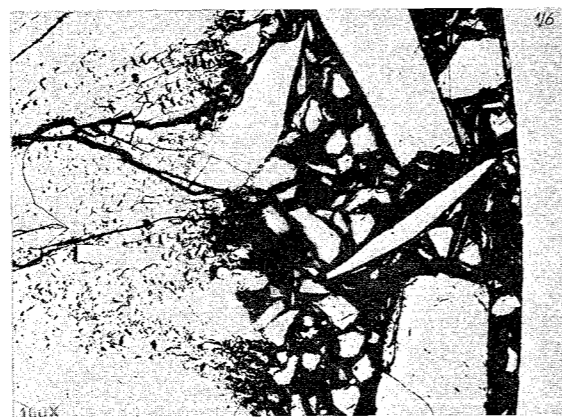
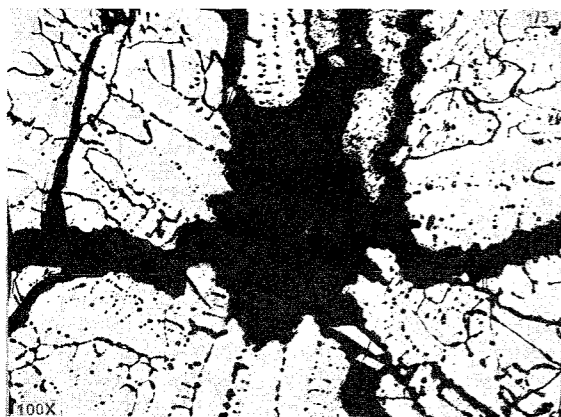


δ - Profil

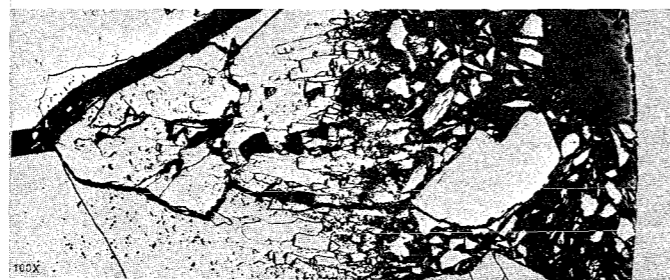
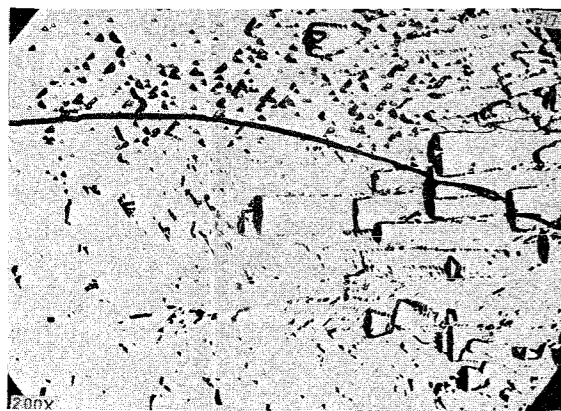




2 mm



0.2 mm



0.1 mm

1 mm

Prüfling L 39

Brennstoff :

Form : Pulver, geschmolzene Partikel
 Zusammensetzung : UO_2 (7,5 % U-235)
 Tablettendichte : 85,0 % th.D.

Hülle :

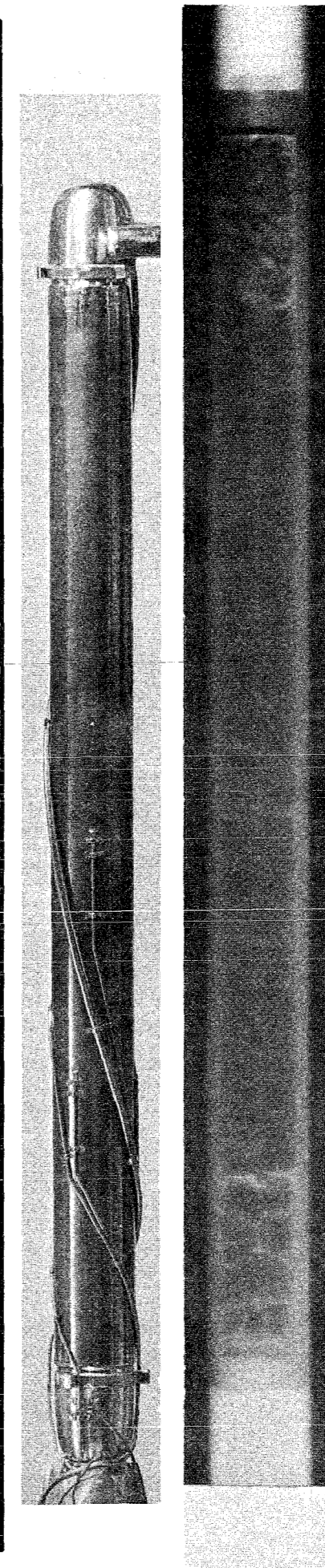
Material : X8CrNiMoVNb 16/13
 W.-Nr. 1.4988
 Außendurchmesser : 12 mm
 Wandstärke : 1,0 mm

Brennstab :

Gesamtlänge : 182,9 mm
 Länge der Brennstoffsäule : 150,3 mm
 Gewicht der " : 110,0 g
 Radiale Spaltweite : -
 Schmiedichte : 85,0 % th.D.

Bestrahlung :

Zeit : 5.2.68
 Dauer : 2 h
 mittl. Stableistung : 1000 W/cm
 mittl. Hüllaußentemp. : 500 °C



A n h a n g I I I

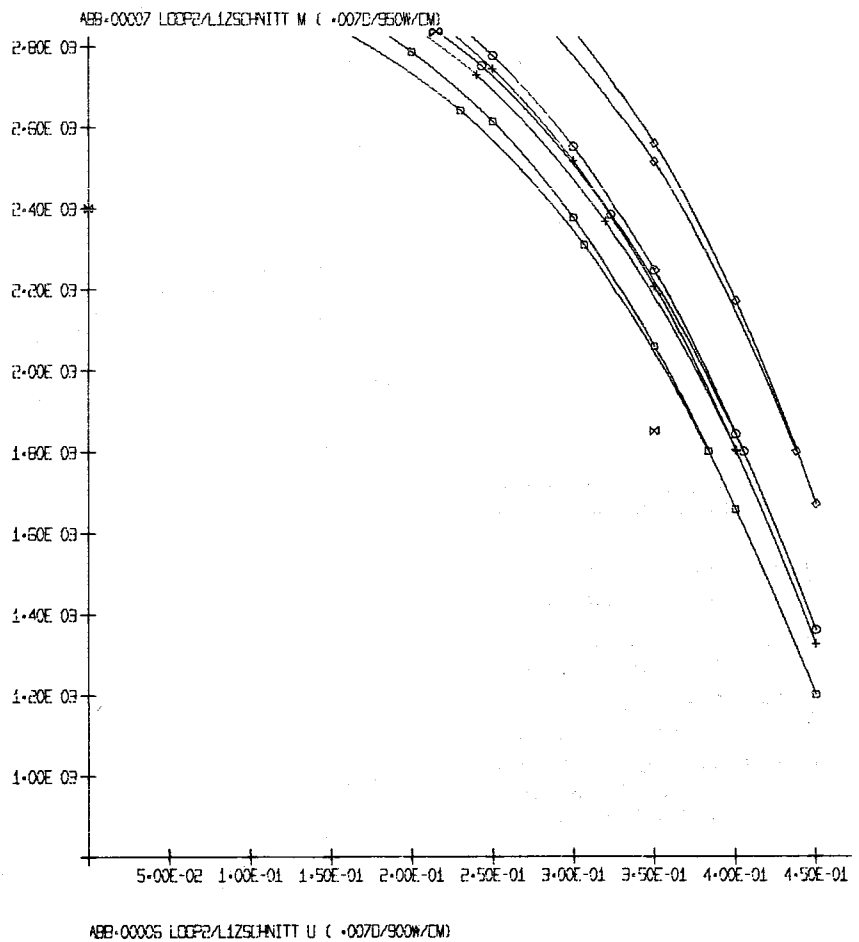
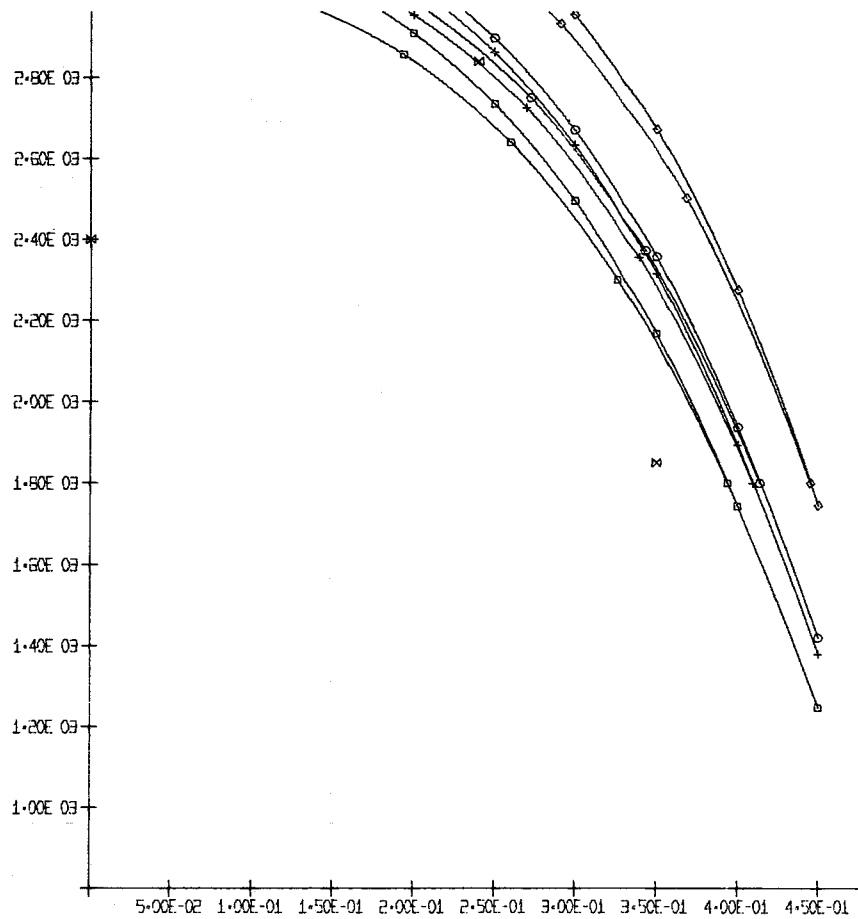
Temperaturprofile der Brennstababschnitte

(U = unterer, M = mittlerer Stababschnitt)

(Abb. 1 bis Abb. 42)

Es sind jeweils 4x2 Temperaturprofile für 4 verschiedene Wärmeübergangszahlen ($h = 0,6 \text{ W/cm}$ bzw. $1,2 \text{ W/cm}$ bzw. $2,4 \text{ W/cm}$ und eine theoretisch ermittelte) und 2 Brennstoffzustände (mit und ohne Verdichtung) aufgetragen.

Zusätzlich sind die Temperaturgrenzen der Strukturzonenradien (Schmelz-, Stengelkorn-, Kornwachstumszone) angegeben. Konnten keine Zonenradien bei der Schliffbildanalyse festgestellt werden, so sind die entsprechenden Temperaturgrenzen auf der Ordinaten ausgedruckt. Bei $2400 \text{ }^\circ\text{C}$ ist zusätzlich die nicht betrachtete Plastizitätsgrenze angegeben.



- ⊗ Grenzen der Struktur-
zonen der Nachunter-
suchung
- Temp.profil für
h = 2.4 W/cm² grad
- Temp.profil für
h = 1.2 W/cm² grad
- ◇-◇-◇ Temp.profil für
h = 0.6 W/cm² grad
- +--+--+ Temp.profil für theor.
ermittelter Wärme-
übergangszahl

Abb.1 : Thermische Analyse des Brennstabes L 1

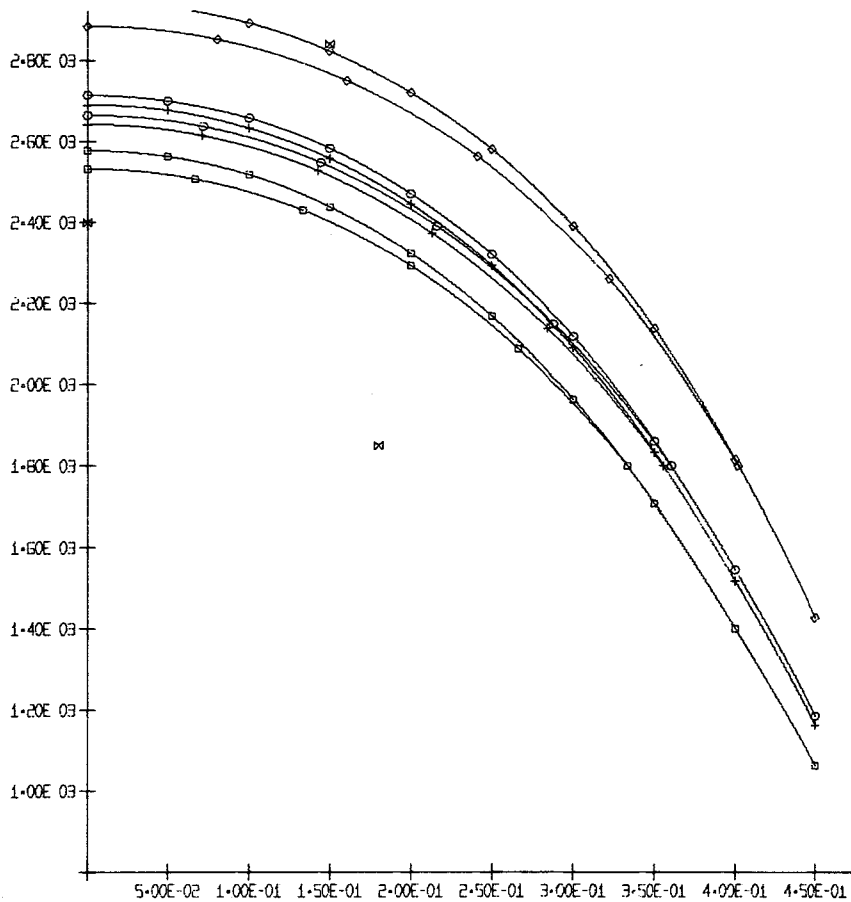


ABB-00019 LQDP2/LIXSCHNITT M (+007D/720W/CM)

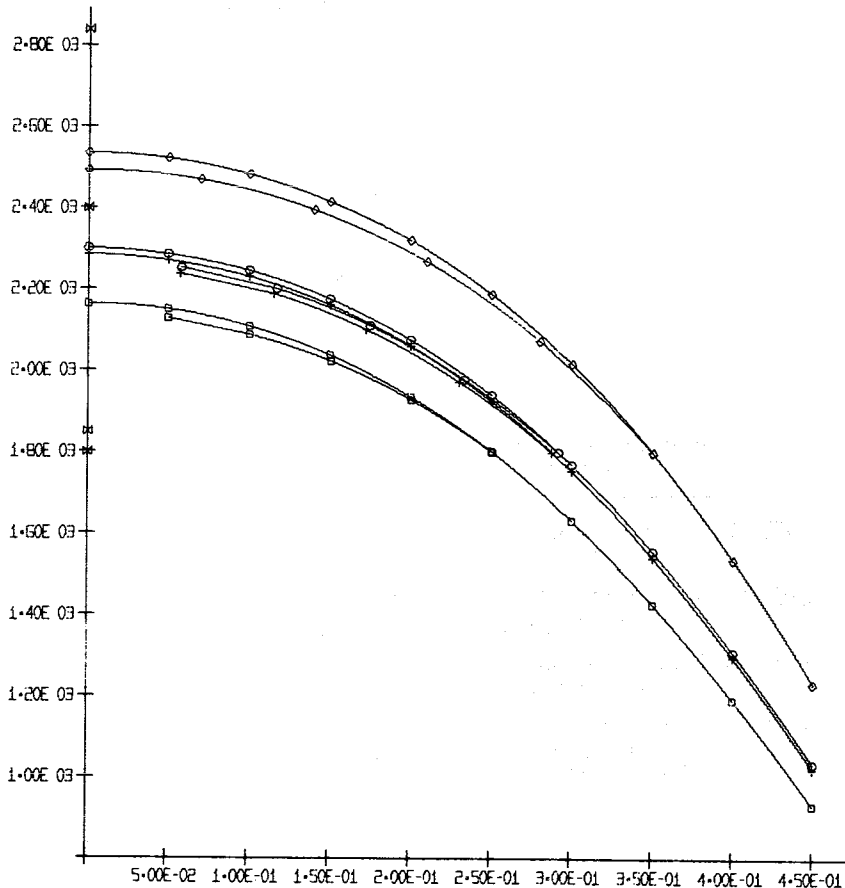


ABB-00018 LQDP2/LIXSCHNITT U (+007D/605W/CM)

- ⊗ Grenzen der Struktur-
zonen der Nachunter-
suchung
- Temp.profil für
h = 2.4 W/cm² grad
- Temp.profil für
h = 1.2 W/cm² grad
- ◇-◇-◇ Temp.profil für
h = 0.6 W/cm² grad
- +--+ Temp.profil für theor.
ermittelte Wärme-
übergangszahl

Abb. 2 : Thermische Analyse des Brennstabes L 1X

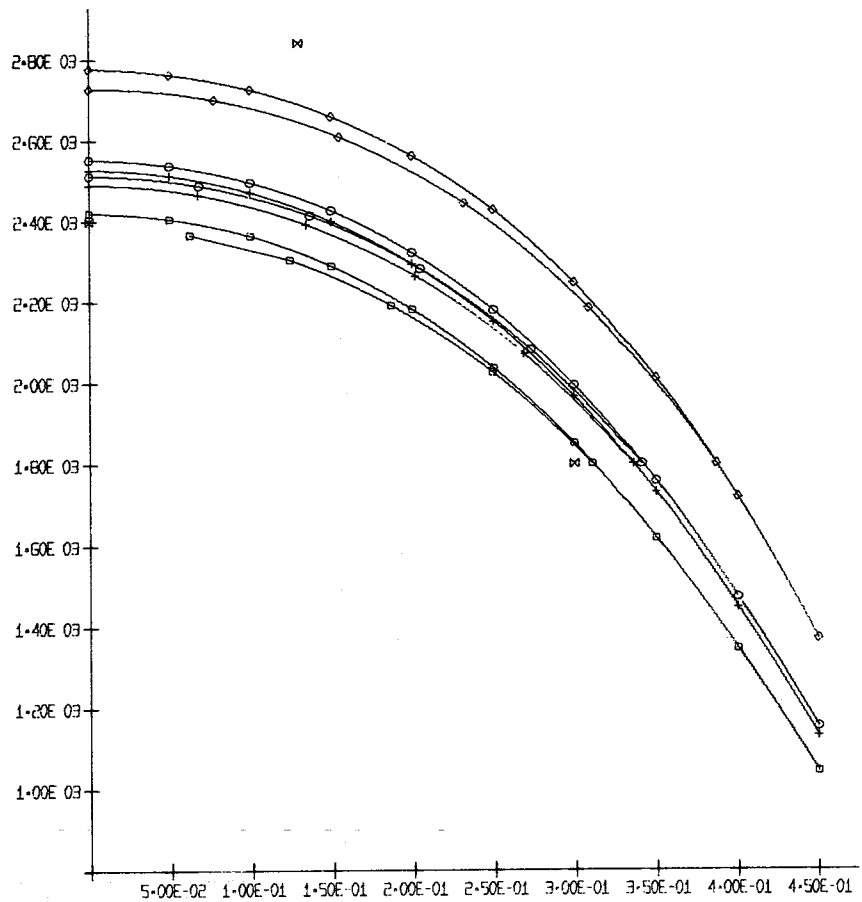


ABB-00003 L00P2/L2 SCHNITT M (+08 D/550W/CM)

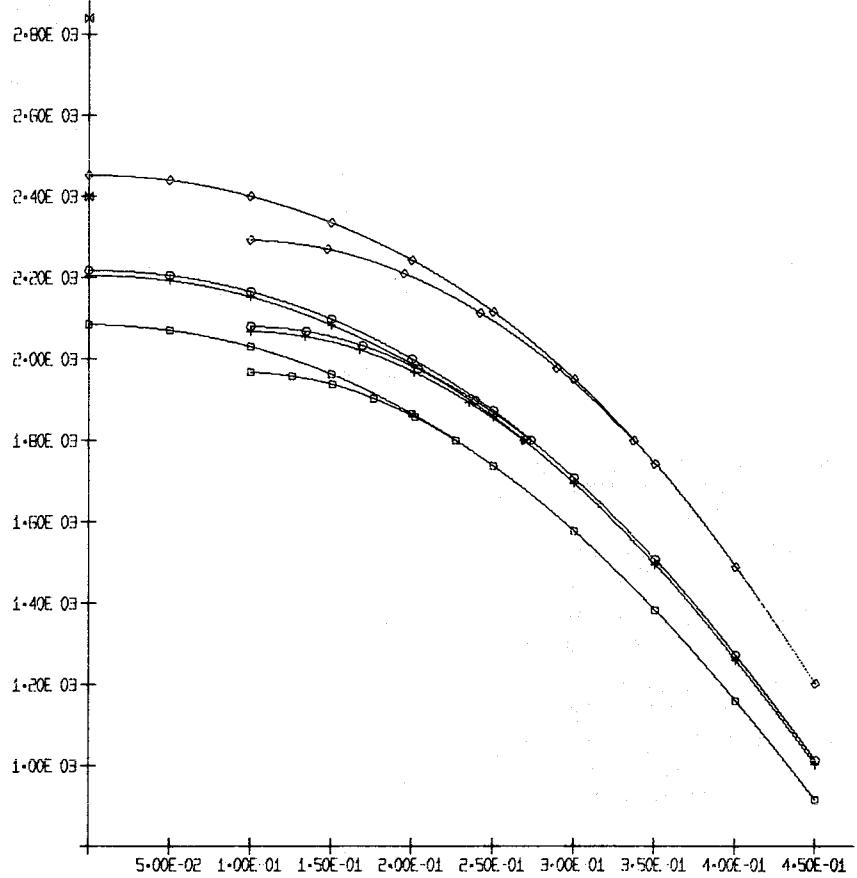


ABB-00002 L00P2/L2 SCHNITT U (+08 D/595W/CM)

- ⊗ Grenzen der Struktur-
zonen der Nachunter-
suchung
- Temp.profil für
 $h = 2.4 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- Temp.profil für
 $h = 1.2 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- ◇-◇-◇ Temp.profil für
 $h = 0.6 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- +--+ Temp.profil für theor.
ermittelter Wärme-
übergangszahl

Abb. 3 : Thermische Analyse des Brennstabes L 2

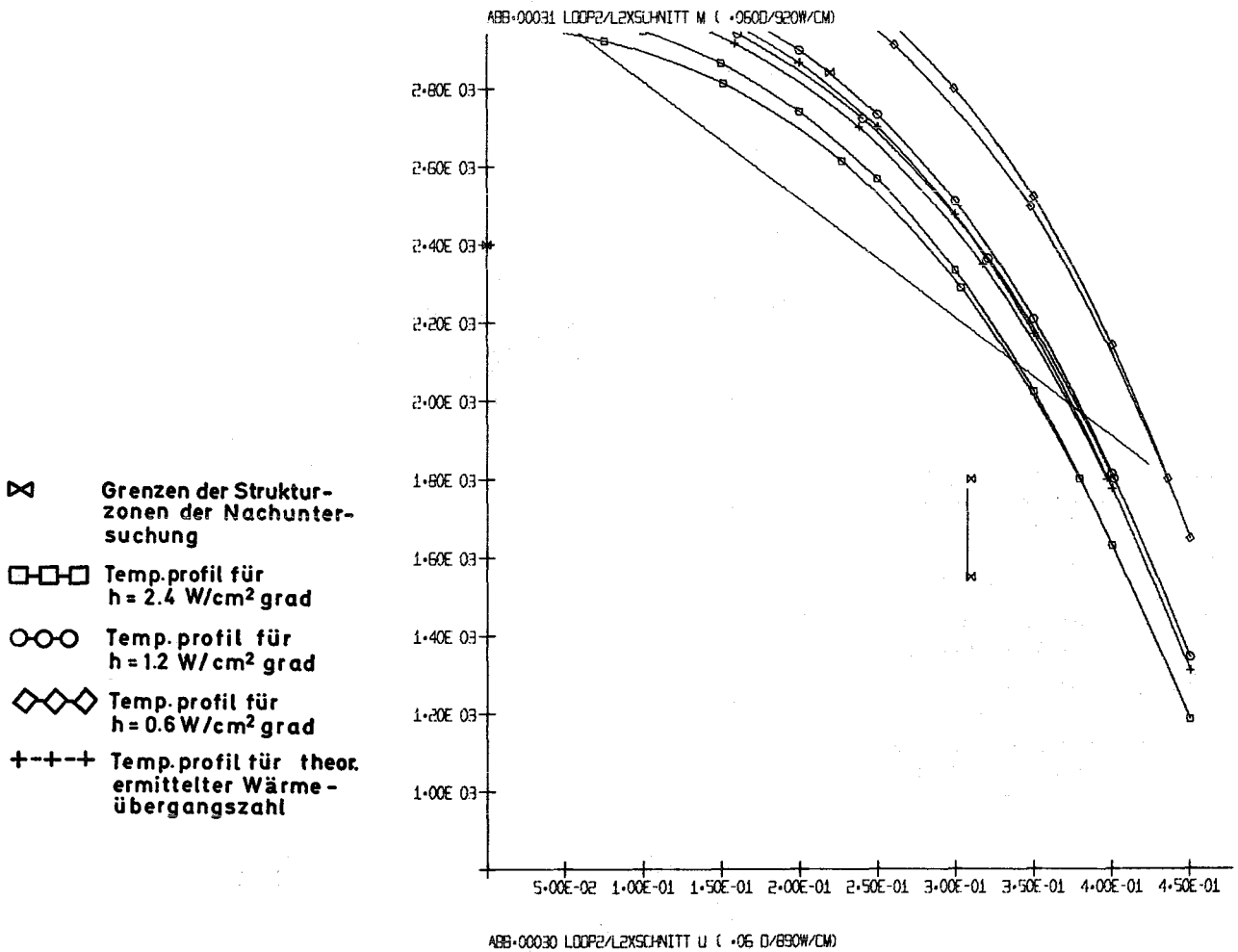
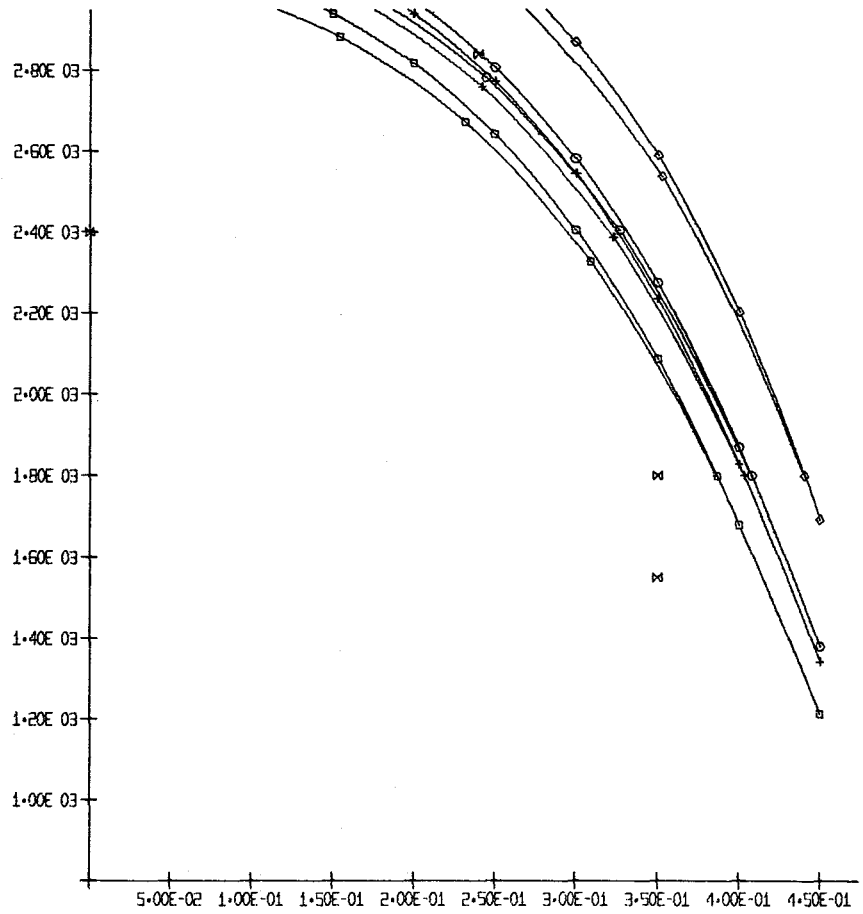


Abb.4 : Thermische Analyse des Brennstabes L 2X

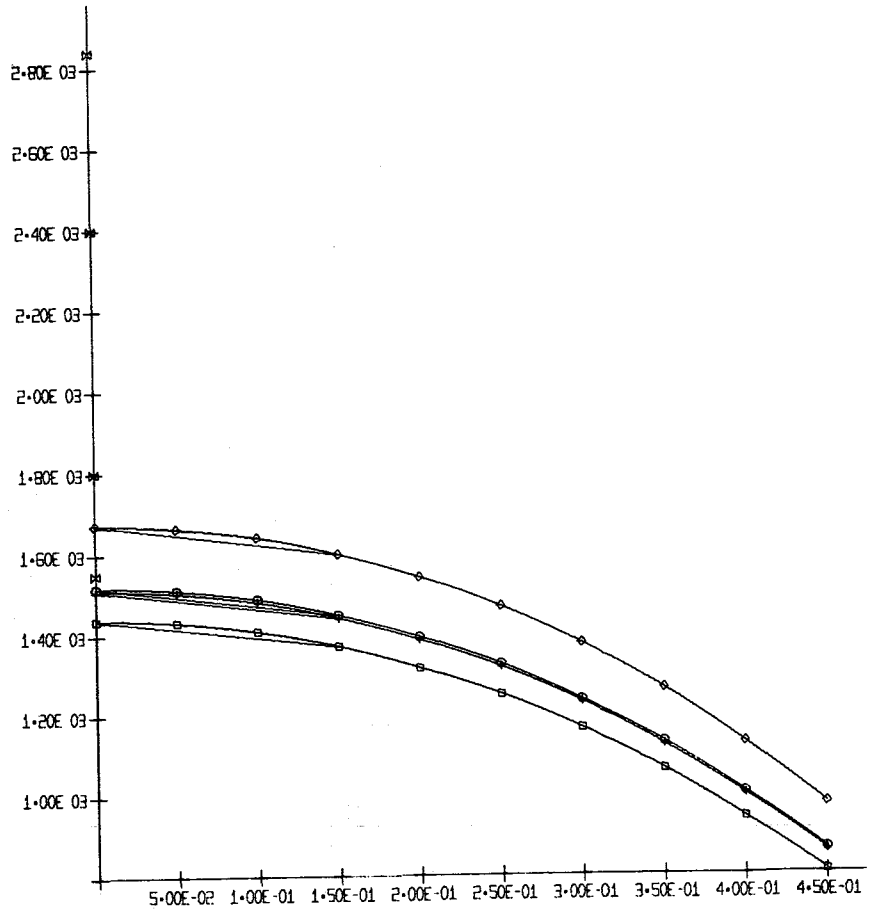


ABB-00061 LOOP2/L2ZSCHNITT M (+08 D/365W/CM)

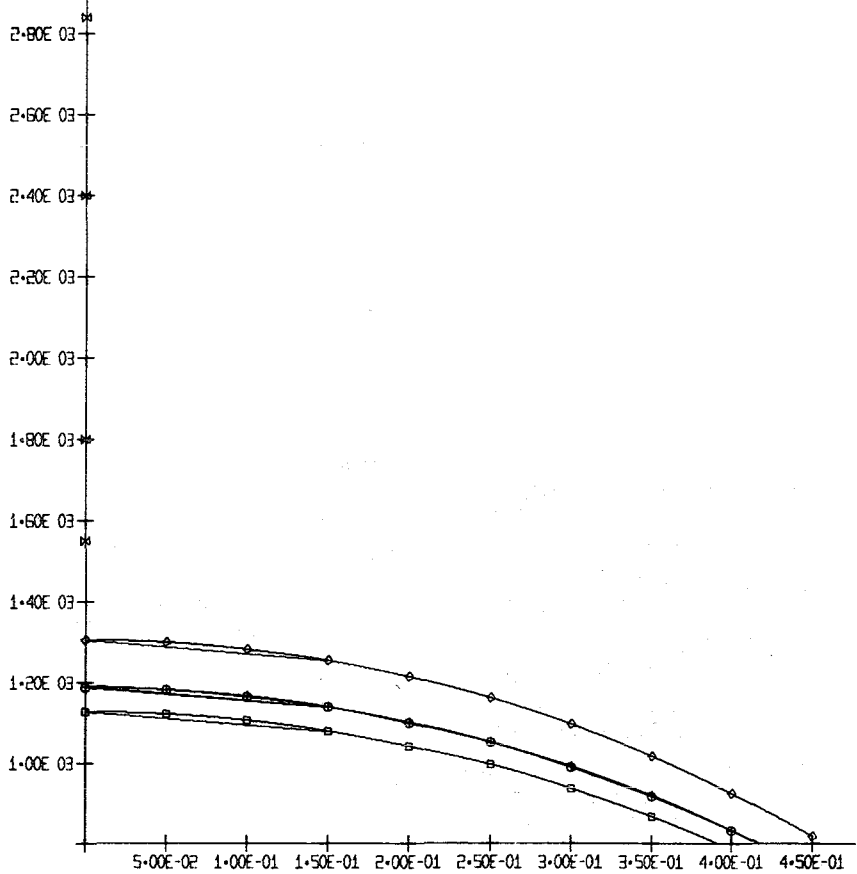


ABB-00060 LOOP2/L2ZSCHNITT U (+08 D/230W/CM)

⊠ Grenzen der Struktur-
zonen der Nachunter-
suchung

□-□-□ Temp.profil für
 $h = 2.4 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$

○-○-○ Temp.profil für
 $h = 1.2 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$

◇-◇-◇ Temp.profil für
 $h = 0.6 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$

+--+--+ Temp.profil für theor.
ermittelter Wärme-
übergangszahl

Abb.5 : Thermische Analyse des Brennstabes L 2Z

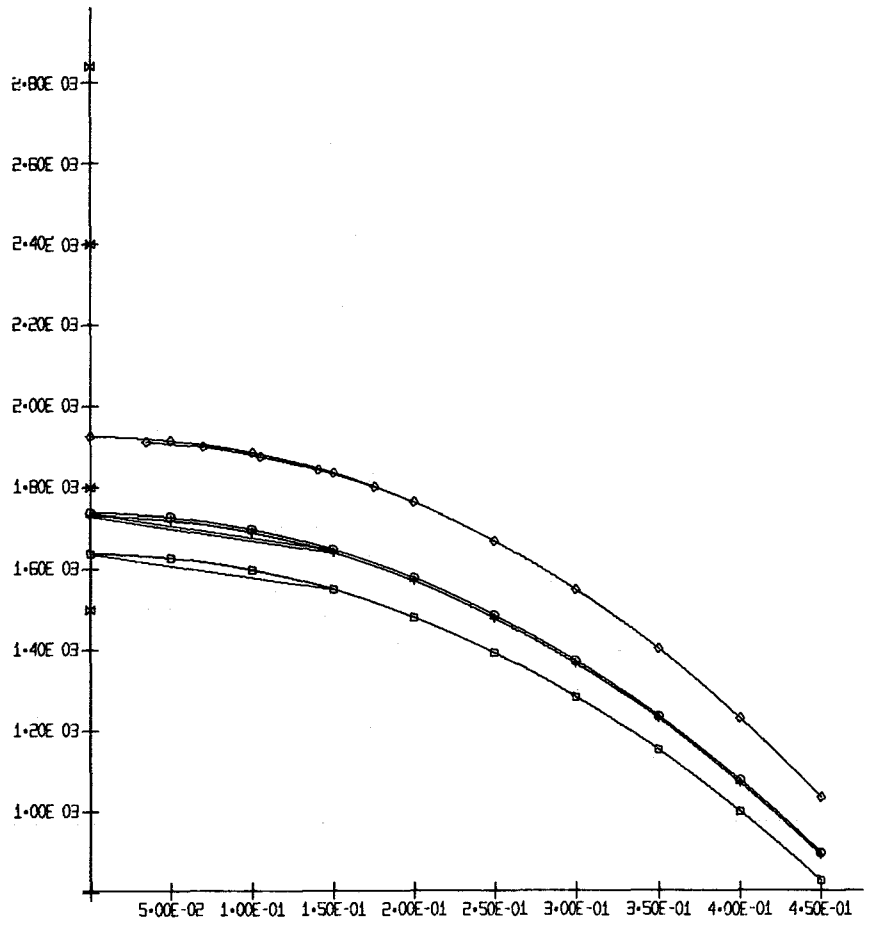


ABB-00075 LOOP2/L3 SCHNITT M (1.00 D/435W/CM)

- ⊠ Grenzen der Struktur-
zonen der Nachunter-
suchung
- Temp.profil für
h = 2.4 W/cm² grad
- Temp.profil für
h = 1.2 W/cm² grad
- ◇-◇-◇ Temp.profil für
h = 0.6 W/cm² grad
- +--+--+ Temp.profil für theo-
ermittelter Wärme-
übergangszahl

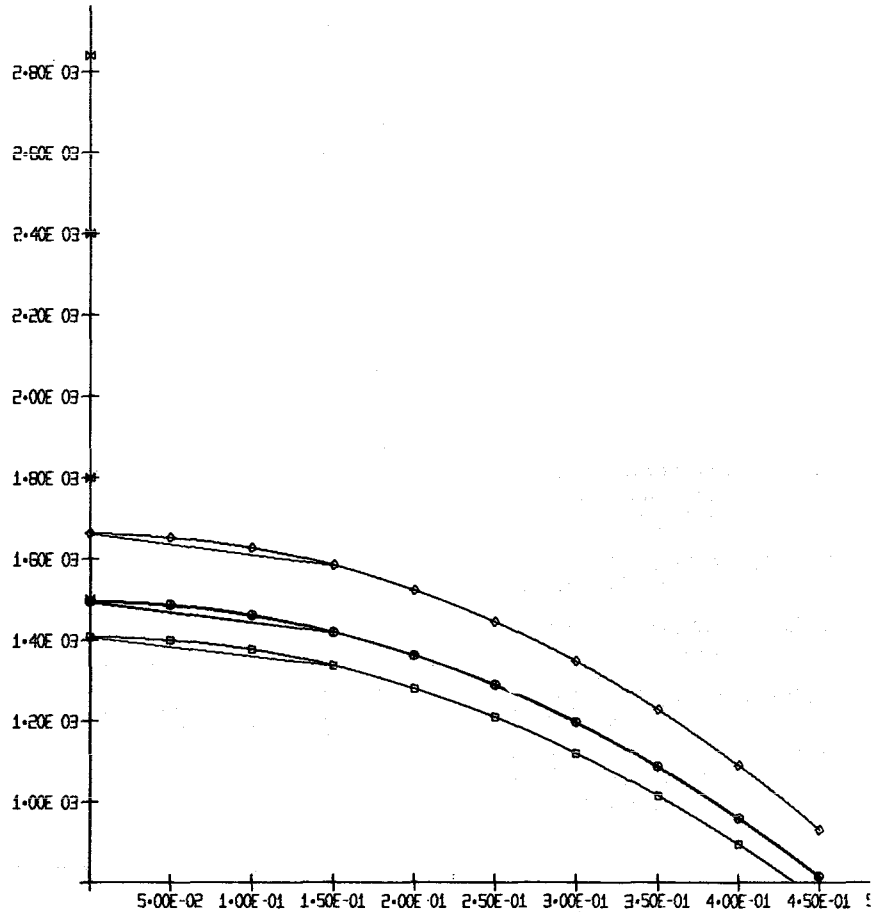


ABB-00074 LOOP2/L3 SCHNITT U (1.00 D/360W/CM)

Abb. 6 : Thermische Analyse des Brennstabes L 3

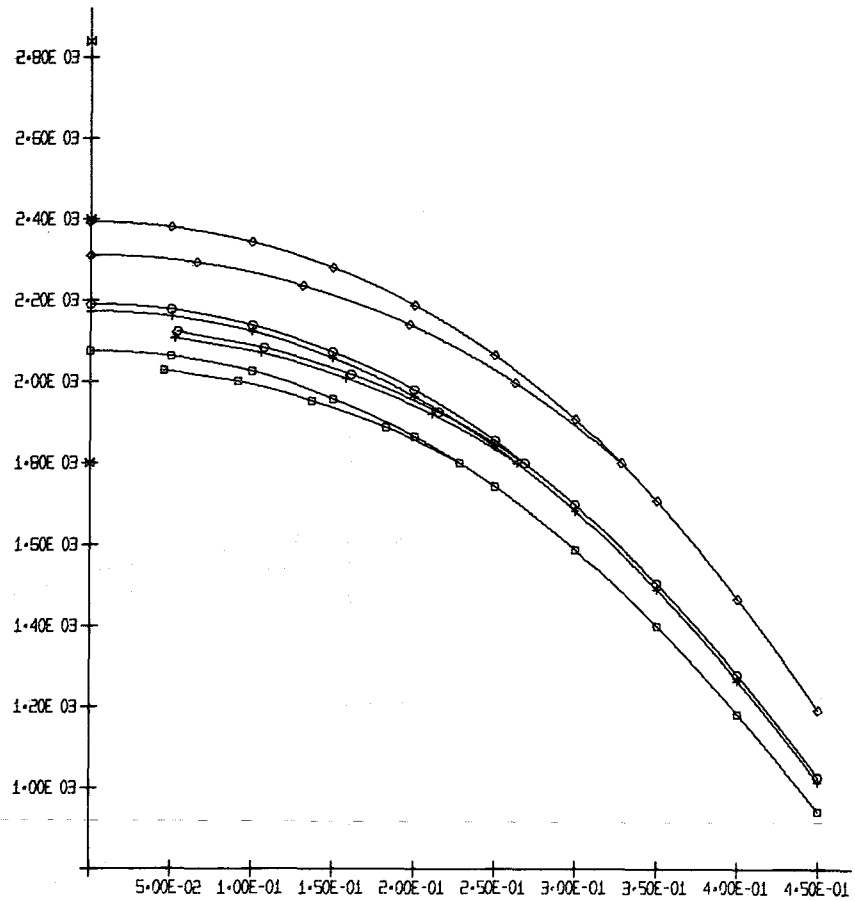


ABB-00002 L00P2/L4 SCHNITT M (0-007D/510W/CM)

- ⊠ Grenzen der Struktur-
zonen der Nachunter-
suchung
- Temp.profil für
h = 2.4 W/cm² grad
- Temp.profil für
h = 1.2 W/cm² grad
- ◇-◇-◇ Temp.profil für
h = 0.6 W/cm² grad
- +--+--+ Temp.profil für theor.
ermittelter Wärme-
übergangszahl

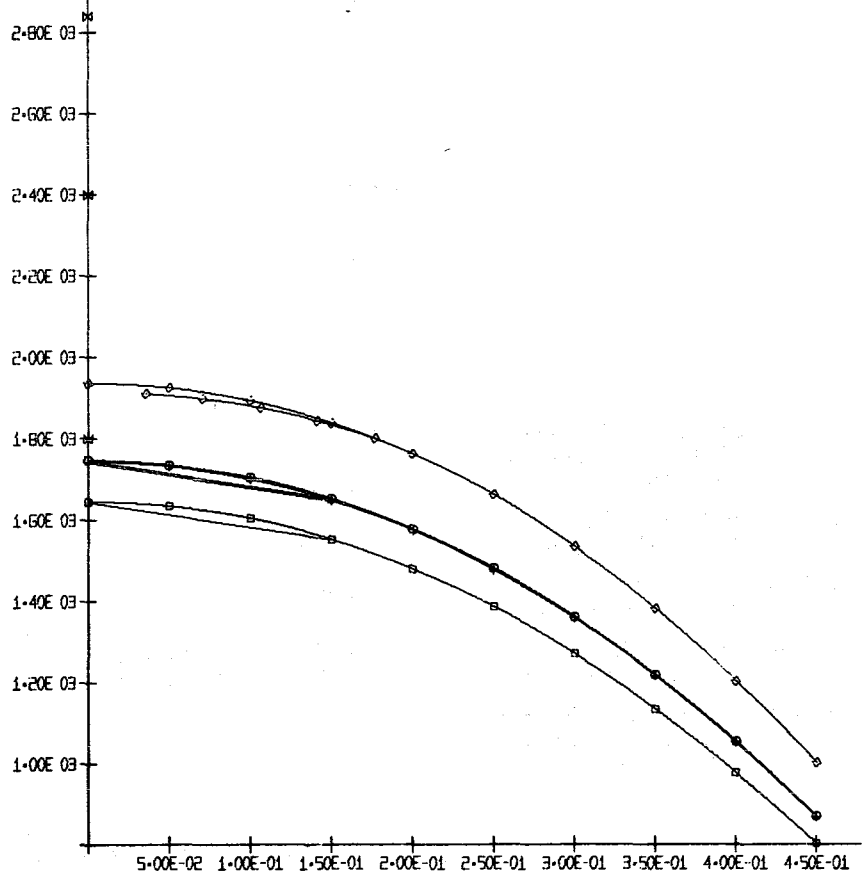


ABB-00001 L00P2/L4 SCHNITT U (0-007D/420W/CM)

Abb. 7 : Thermische Analyse des Brennstabes L 4

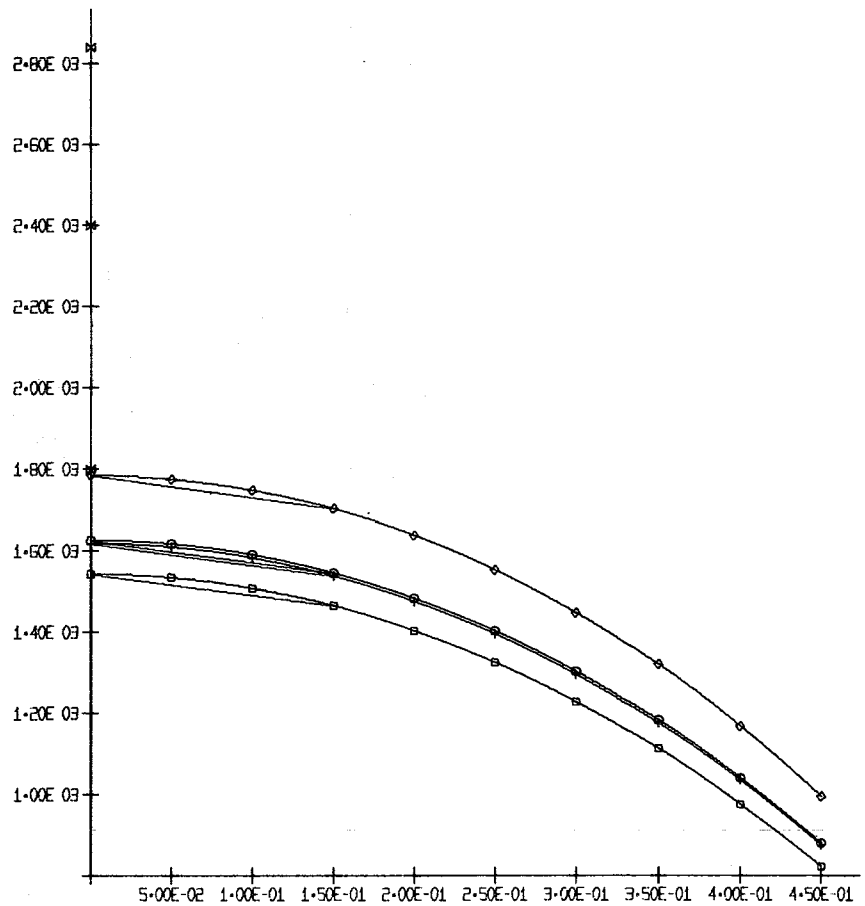


ABB-00005 LOOP2/LS SCHNITT M (+08 D/370W/CM)

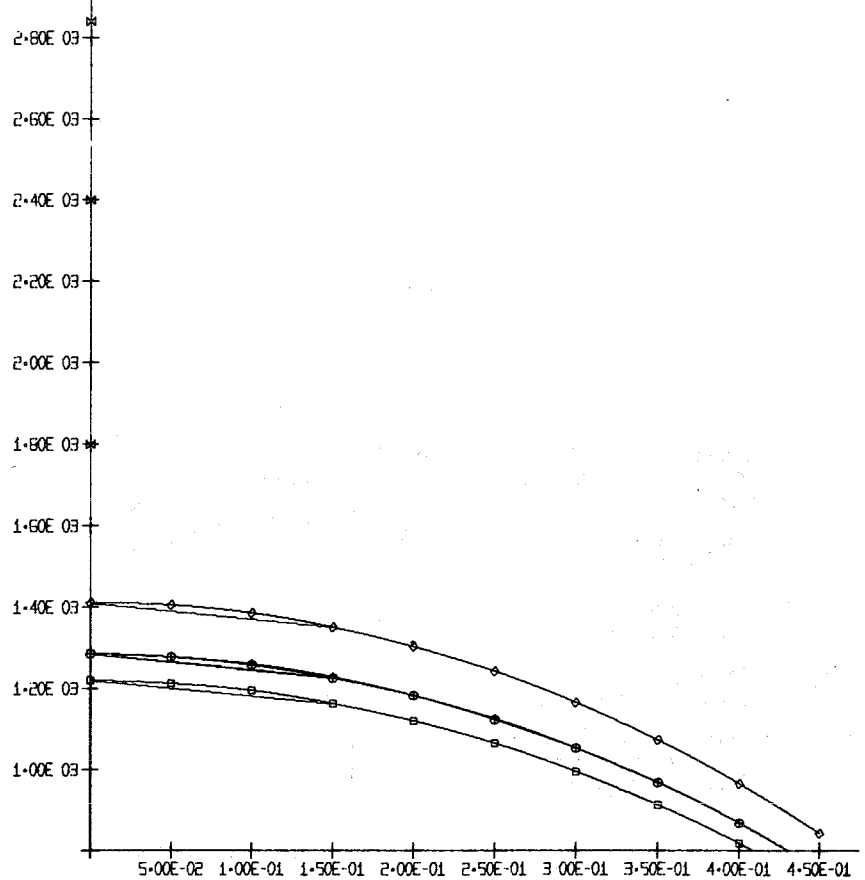


ABB-00004 LOOP2/LS SCHNITT U (+08 D/300W/CM)

- ⊠ Grenzen der Struktur-
zonen der Nachunter-
suchung
- Temp.profil für
 $h = 2.4 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- Temp.profil für
 $h = 1.2 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- ◇-◇-◇ Temp.profil für
 $h = 0.6 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- +--+--+ Temp.profil für theor.
ermittelter Wärme-
übergangszahl

Abb. 8 : Thermische Analyse des Brennstabes L 5

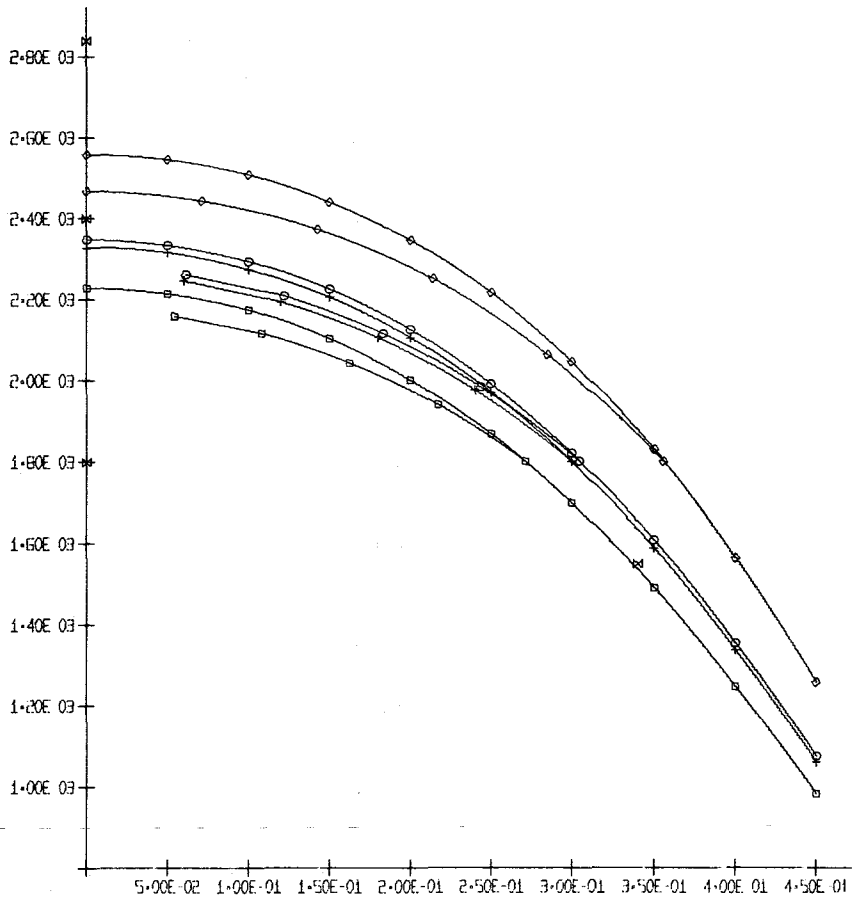


ABB-00013 LOOP2/L5 SCHNITT M (+08 D/560W/CM)

- ⊠ Grenzen der Struktur-
zonen der Nachunter-
suchung
- Temp.profil für
h = 2.4 W/cm² grad
- Temp.profil für
h = 1.2 W/cm² grad
- ◇-◇-◇ Temp.profil für
h = 0.6 W/cm² grad
- +--+--+ Temp.profil für theor.
ermittelter Wärme-
übergangszahl

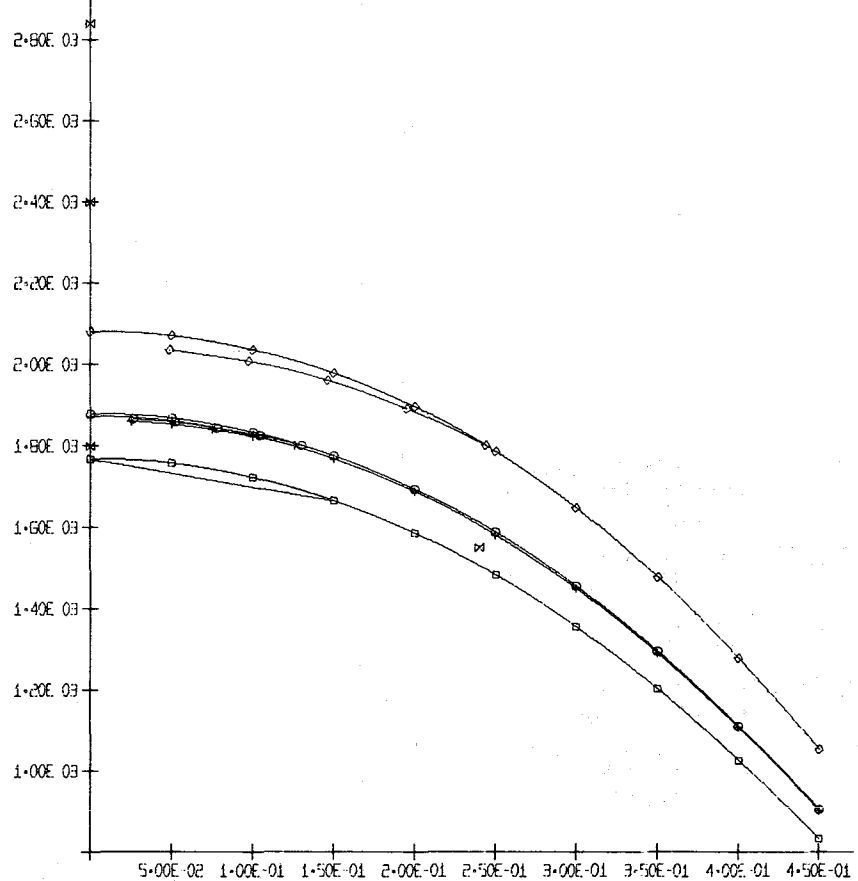


ABB-00012 LOOP2/L5 SCHNITT U (+08 D/460W/CM)

Abb. 9 : Thermische Analyse des Brennstabes L 6

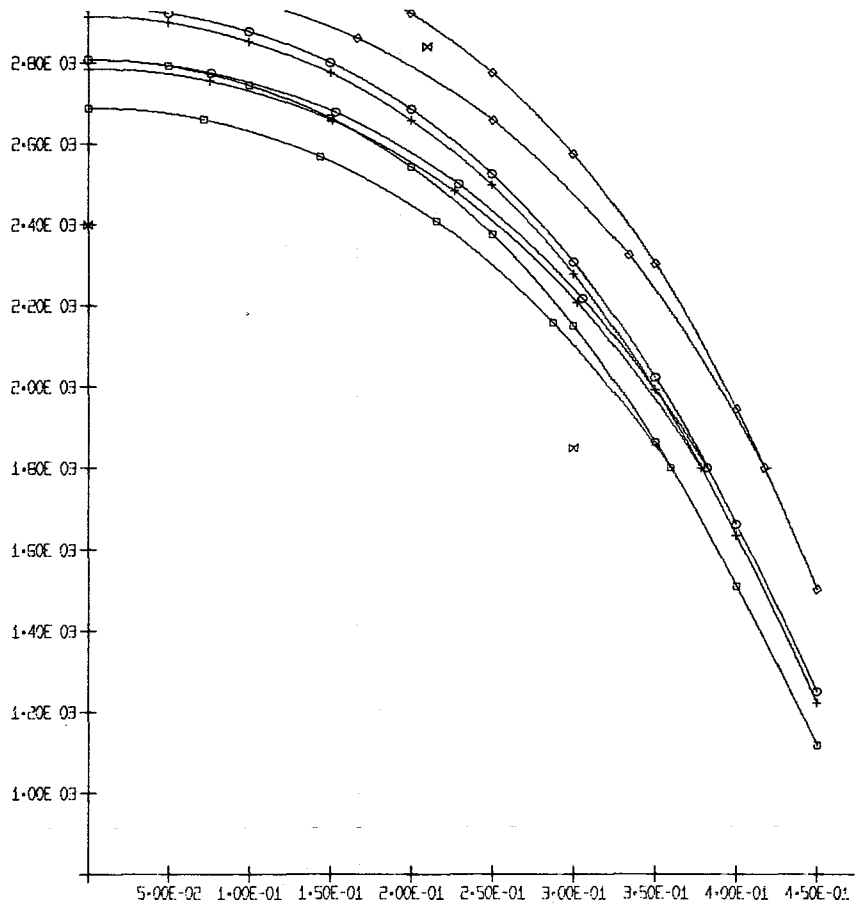


ABB-00021 LÖSP2/L7 SCHNITT M (·007D/745W/CM)

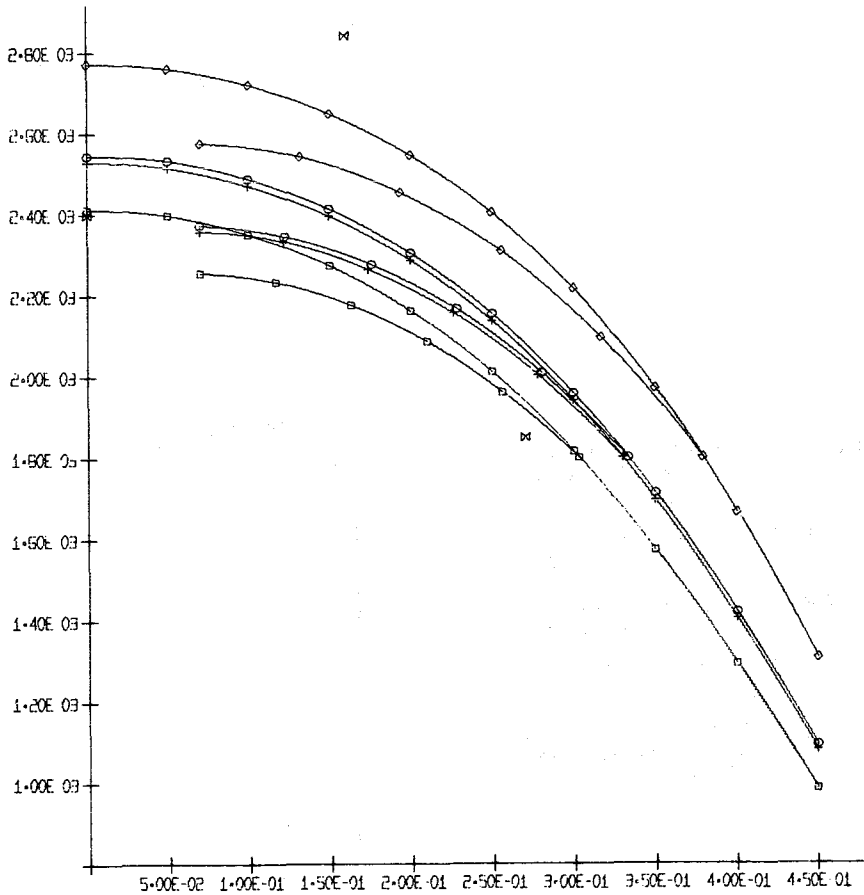


ABB-00020 LÖSP2/L7 SCHNITT U (·007D/535W/CM)

- ⊗ Grenzen der Struktur-
zonen der Nachunter-
suchung
- Temp.profil für
 $h = 2.4 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- Temp.profil für
 $h = 1.2 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- ◇-◇-◇ Temp.profil für
 $h = 0.6 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- +--+--+ Temp.profil für theor.
ermittelter Wärme-
übergangszahl

Abb.10: Thermische Analyse des Brennstabes L 7

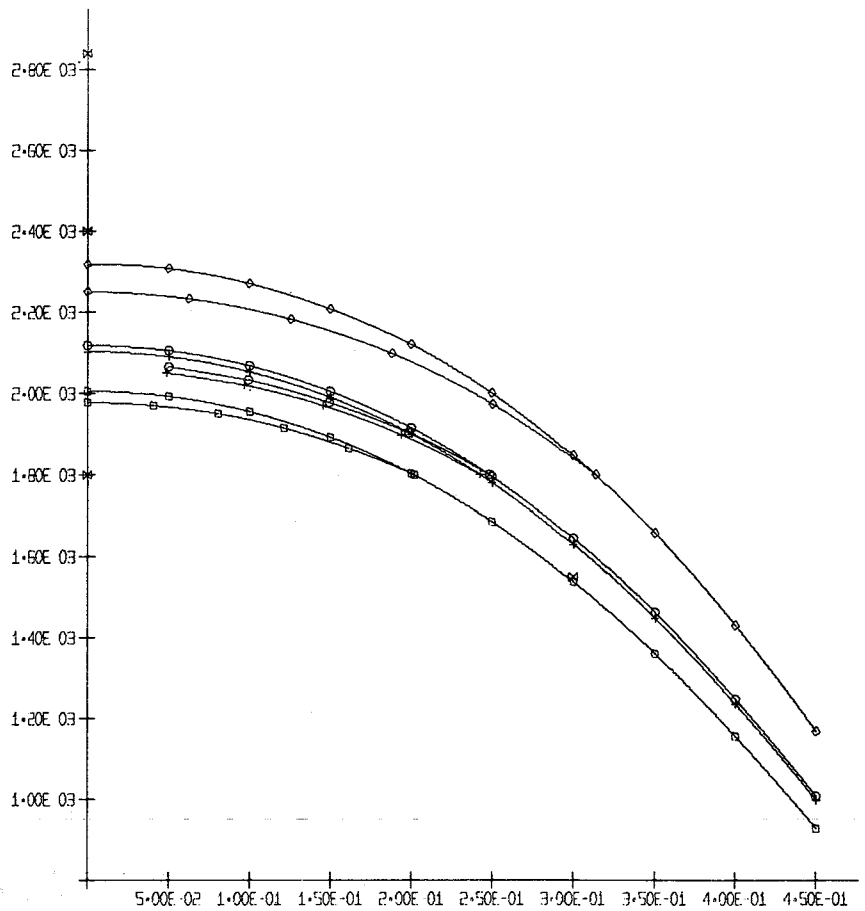


ABB-00033 LÖDP2/L8 SCHNITT M (+08 D/495W/CM)

- ⊗ Grenzen der Struktur-
zonen der Nachunter-
suchung
- Temp.profil für
 $h = 2.4 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- Temp.profil für
 $h = 1.2 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- ◇-◇-◇ Temp.profil für
 $h = 0.6 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- +--+ Temp.profil für theor.
ermittelter Wärme-
übergangszahl

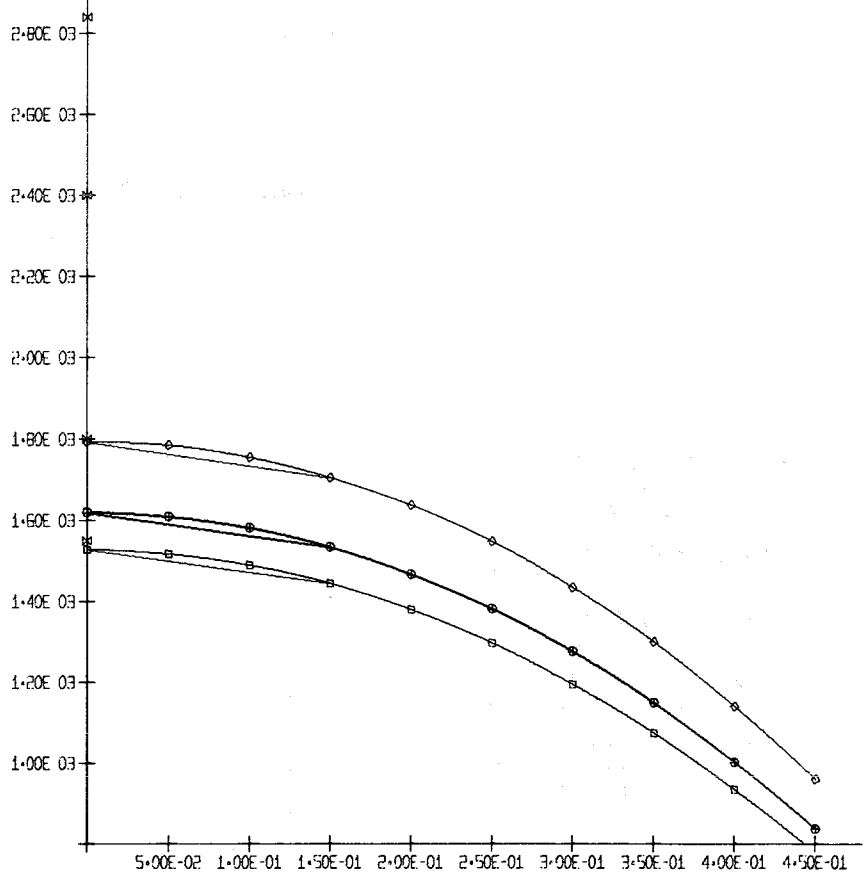


ABB-00032 LÖDP2/L8 SCHNITT U (+08 D/390W/CM)

Abb.11: Thermische Analyse des Brennstabes L 8

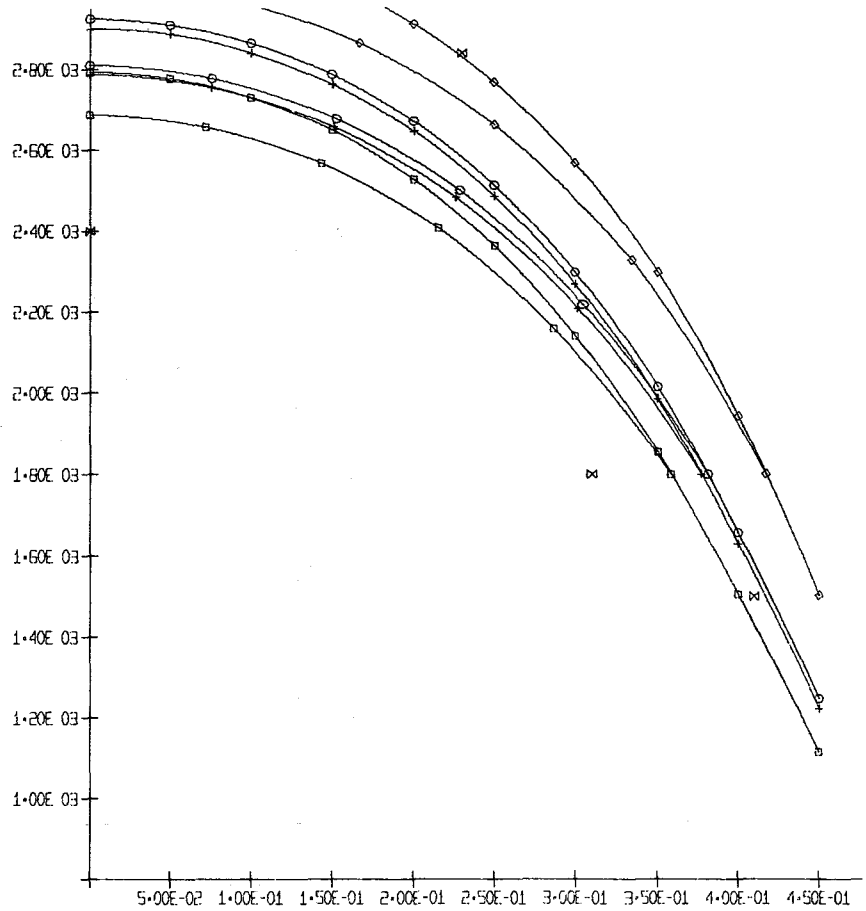


ABB-00045 LÖDFRZ/L9 SCHNITT M (1.00 D/750W/CM)

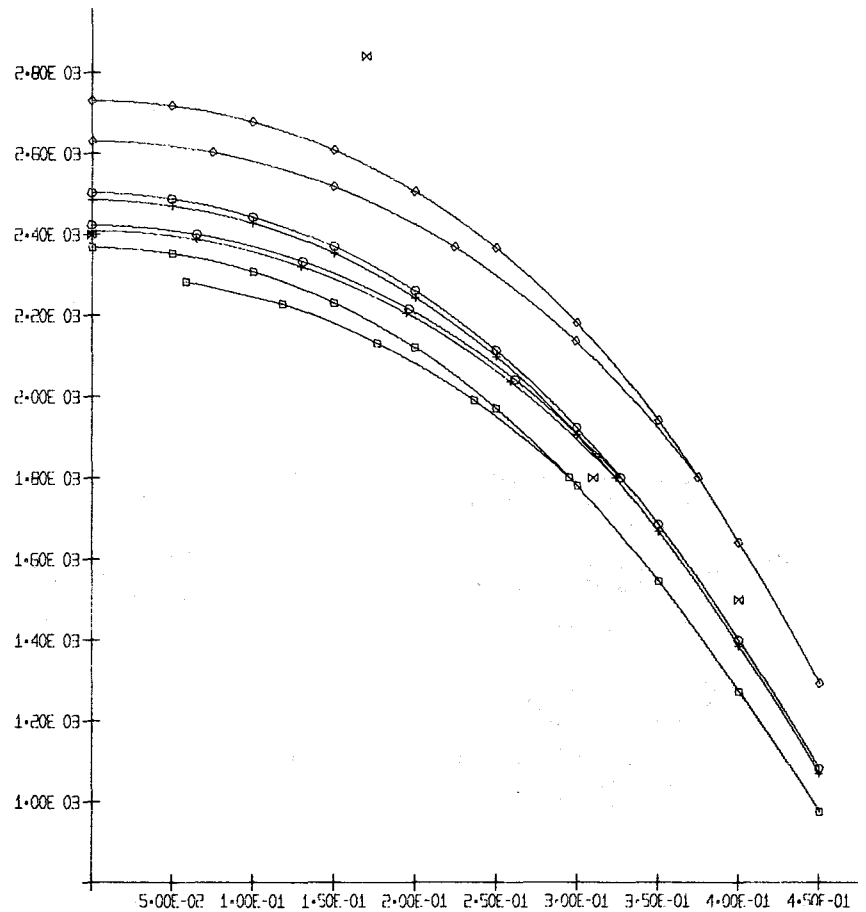


ABB-00044 LÖDFRZ/L9 SCHNITT U (1.00 D/630W/CM)

- ⊠ Grenzen der Strukturzonen der Nachuntersuchung
- Temp.profil für $h = 2.4 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- Temp.profil für $h = 1.2 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- ◇-◇-◇ Temp.profil für $h = 0.6 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- +--+ Temp.profil für theor. ermittelter Wärmeübergangszahl

Abb.12: Thermische Analyse des Brennstabes L 9

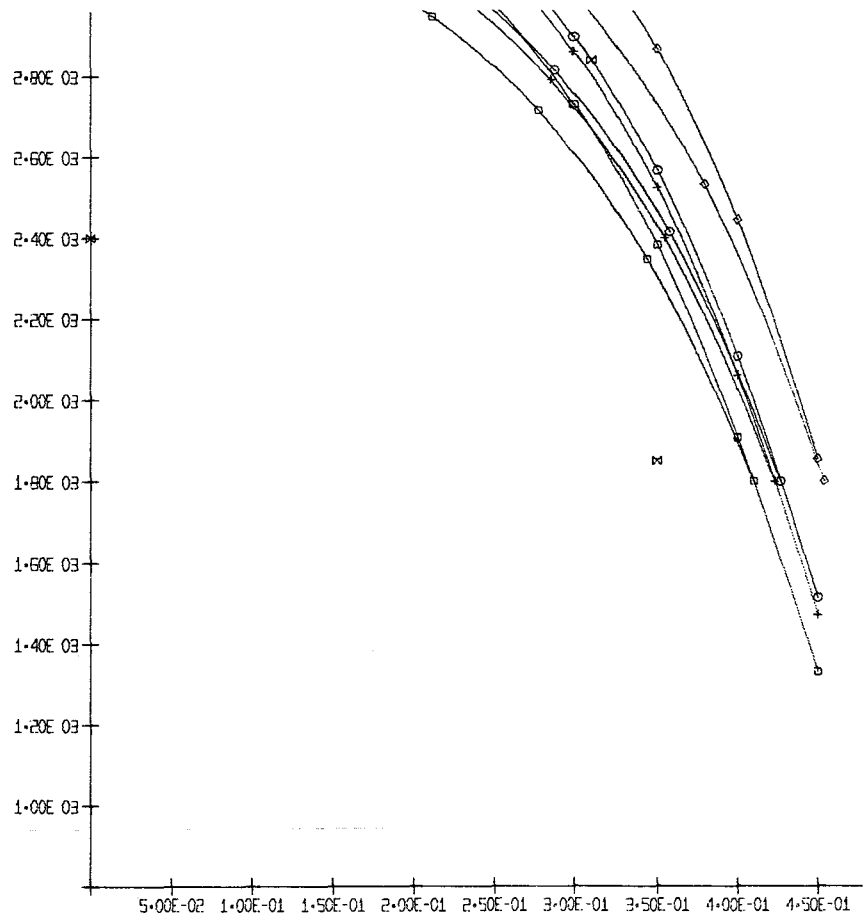


ABB-00055 LÖSP2/L10SLHNITT M (+007D/950W/CM)

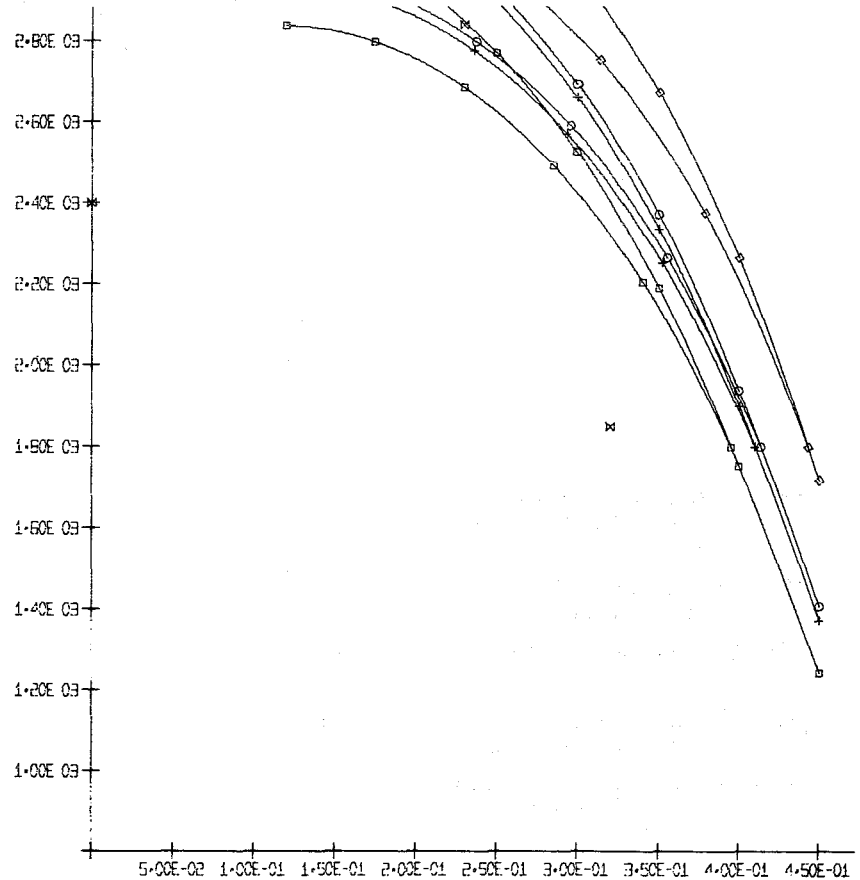
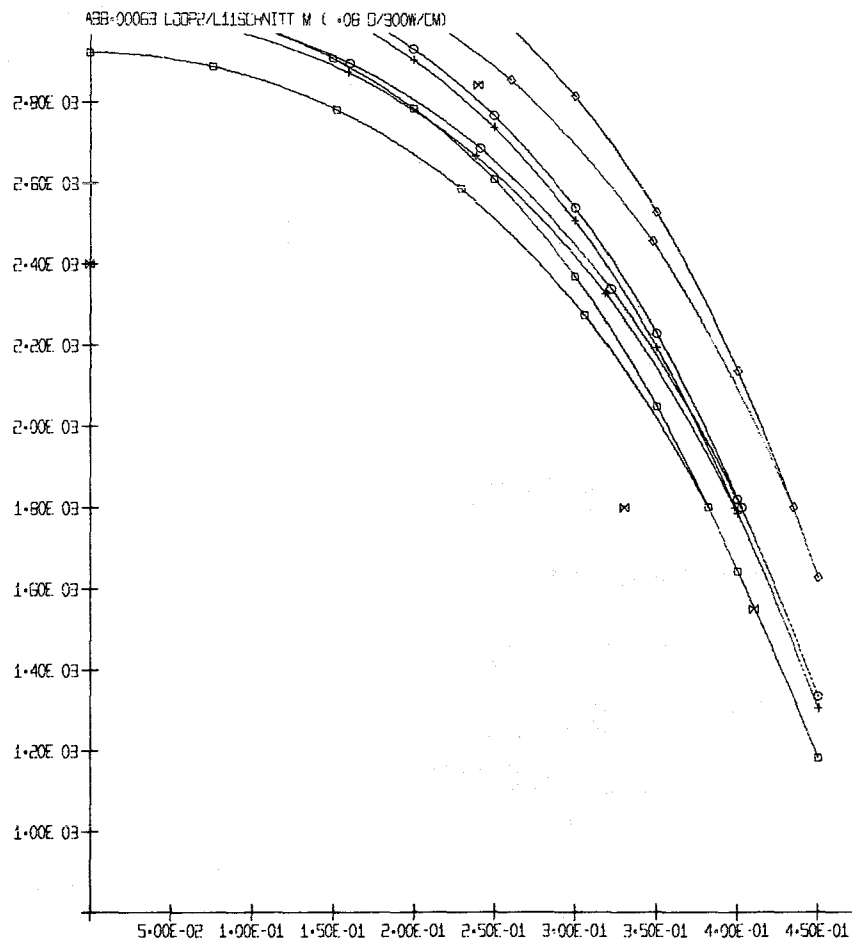
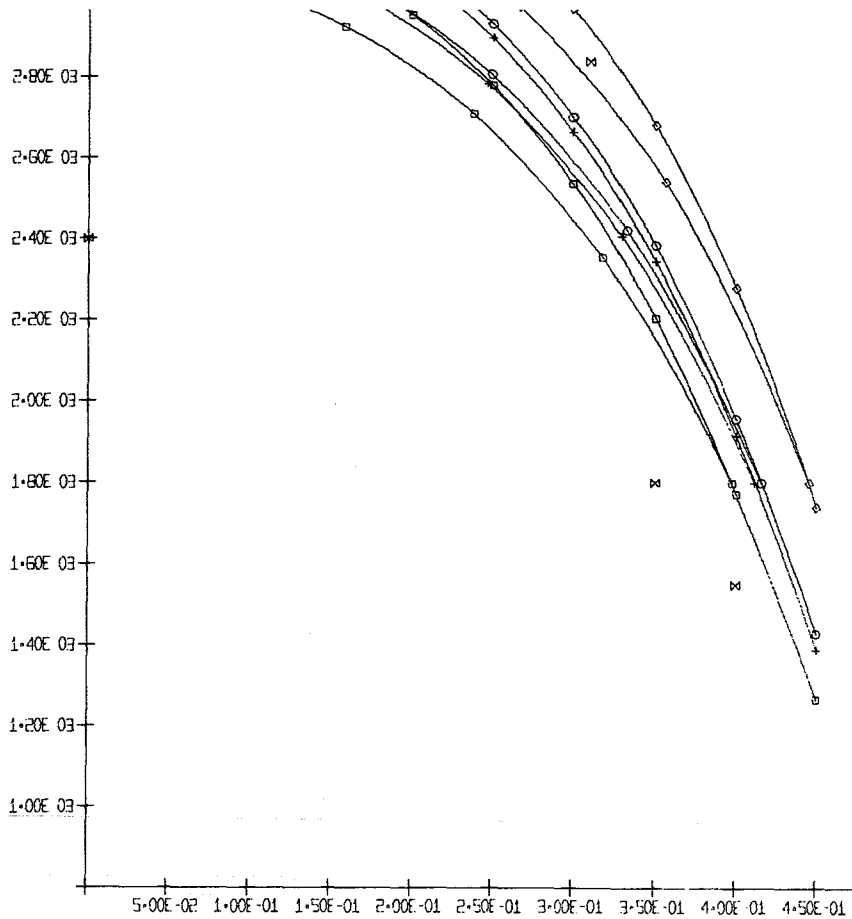


ABB-00003 LÖSP2/L10SLHNITT U (+007D/955W/CM)

- ⊗ Grenzen der Struktur-
zonen der Nachunter-
suchung
- Temp.profil für
h = 2.4 W/cm² grad
- Temp.profil für
h = 1.2 W/cm² grad
- ◇-◇-◇ Temp.profil für
h = 0.6 W/cm² grad
- +--+--+ Temp.profil für theor.
ermittelter Wärme-
übergangszahl

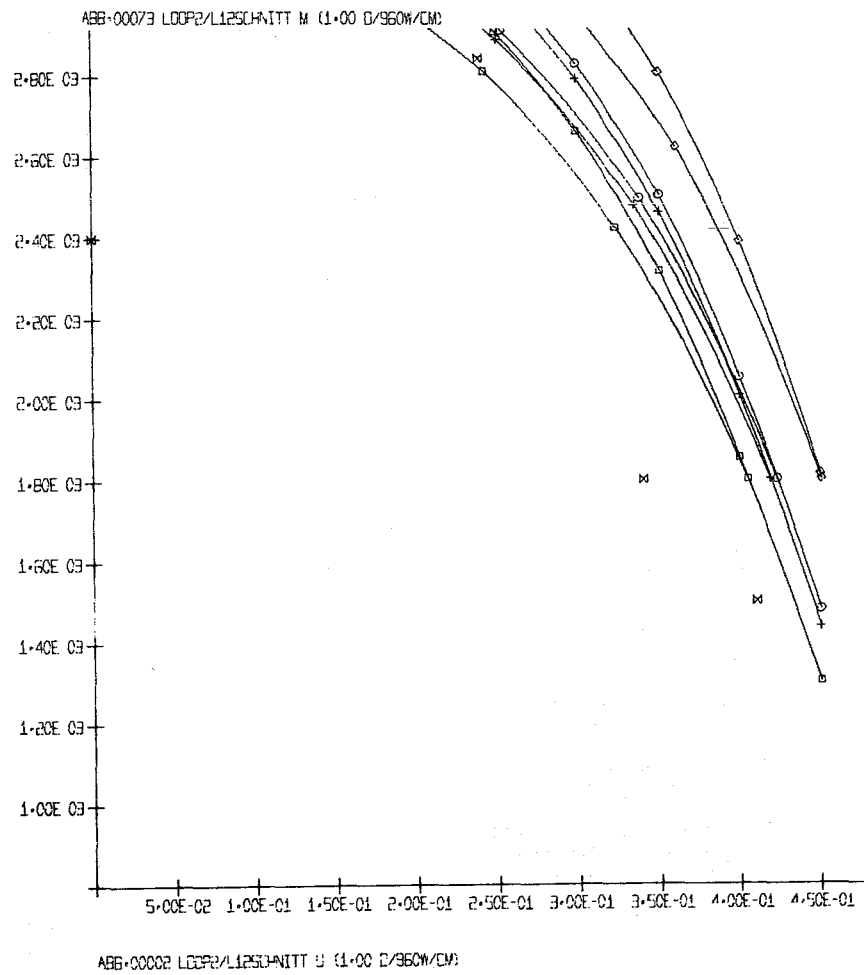
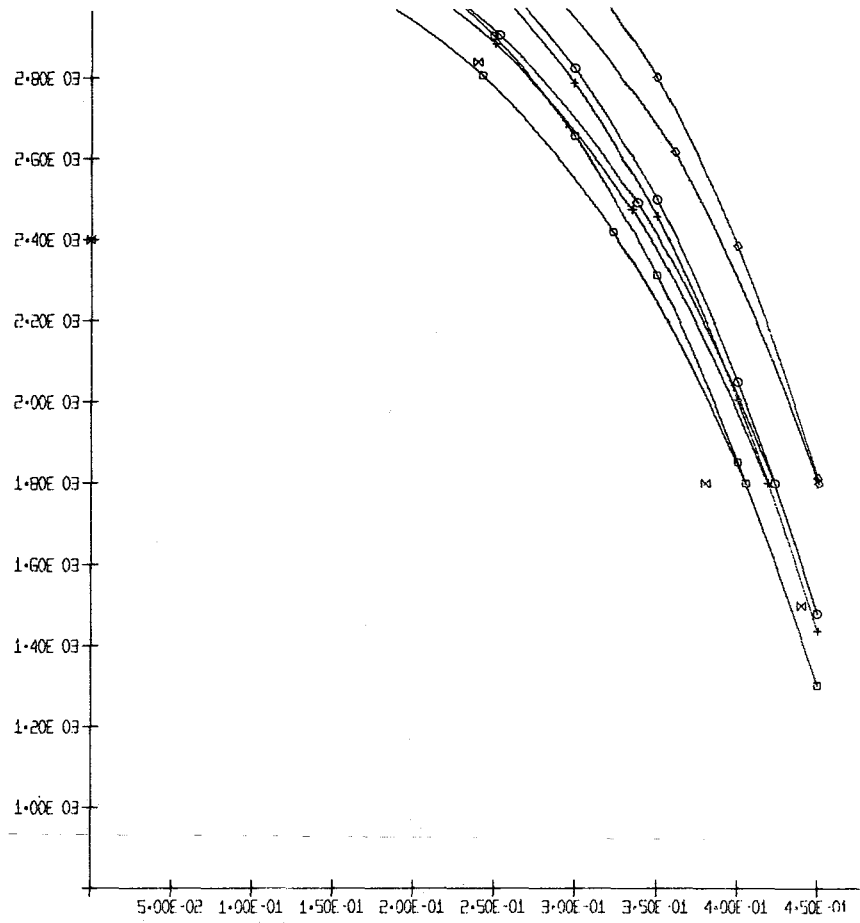
Abb.13: Thermische Analyse des Brennstabes L 10



- ⊗ Grenzen der Strukturzonen der Nachuntersuchung
- Temp.profil für $h = 2.4 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- Temp.profil für $h = 1.2 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- ◇-◇-◇ Temp.profil für $h = 0.6 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- +--+--+ Temp.profil für theor. ermittelter Wärmeübergangszahl

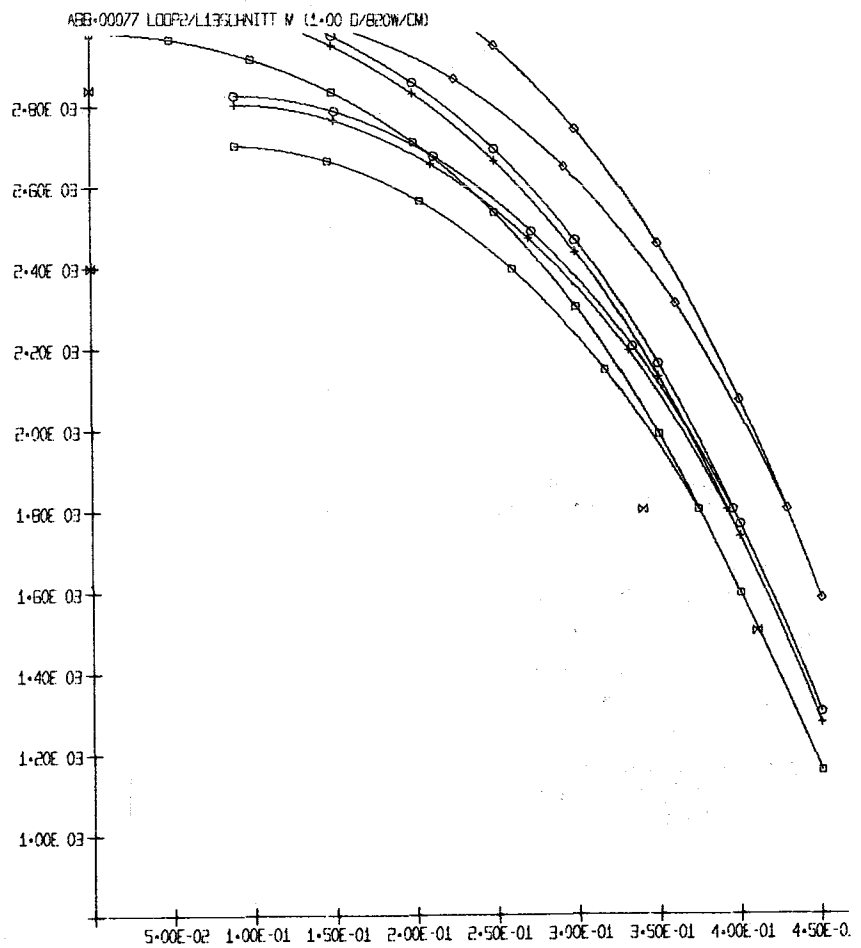
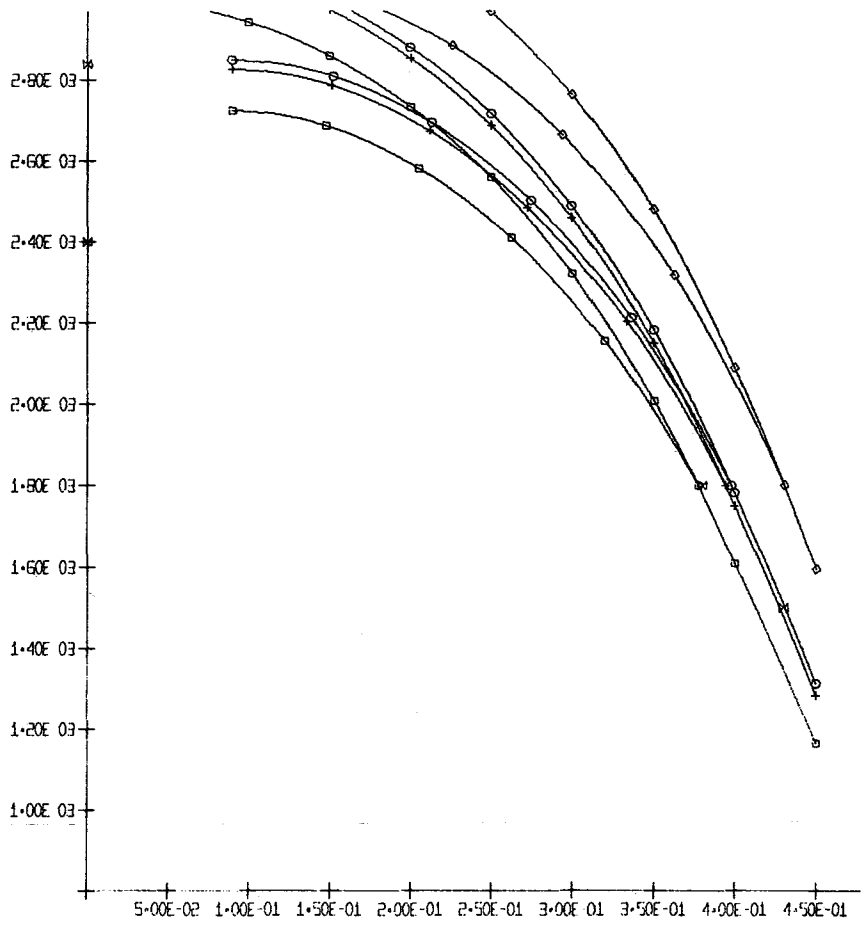
ABB-00062 L00P2/L11SCHNITT U (+08 D/645W/CM)

Abb.14 : Thermische Analyse des Brennstabes L 11



- ⊗ Grenzen der Struktur-
zonen der Nachunter-
suchung
- Temp.profil für
h = 2.4 W/cm² grad
- Temp.profil für
h = 1.2 W/cm² grad
- ◇-◇-◇ Temp.profil für
h = 0.6 W/cm² grad
- +--+--+ Temp.profil für theor.
ermittelter Wärme-
übergangszahl

Abb.15: Thermische Analyse des Brennstabes L 12



- ⊠ Grenzen der Struktur-
zonen der Nachunter-
suchung
- Temp.profil für
 $h = 2.4 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- Temp.profil für
 $h = 1.2 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- ◇-◇-◇ Temp.profil für
 $h = 0.6 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- +--+ Temp.profil für theor.
ermittelter Wärme-
übergangszahl

ABB-00076 LOOP2/L13SCHNITT U (1.00 D/810W/CM)

Abb.16: Thermische Analyse des Brennstabes L13

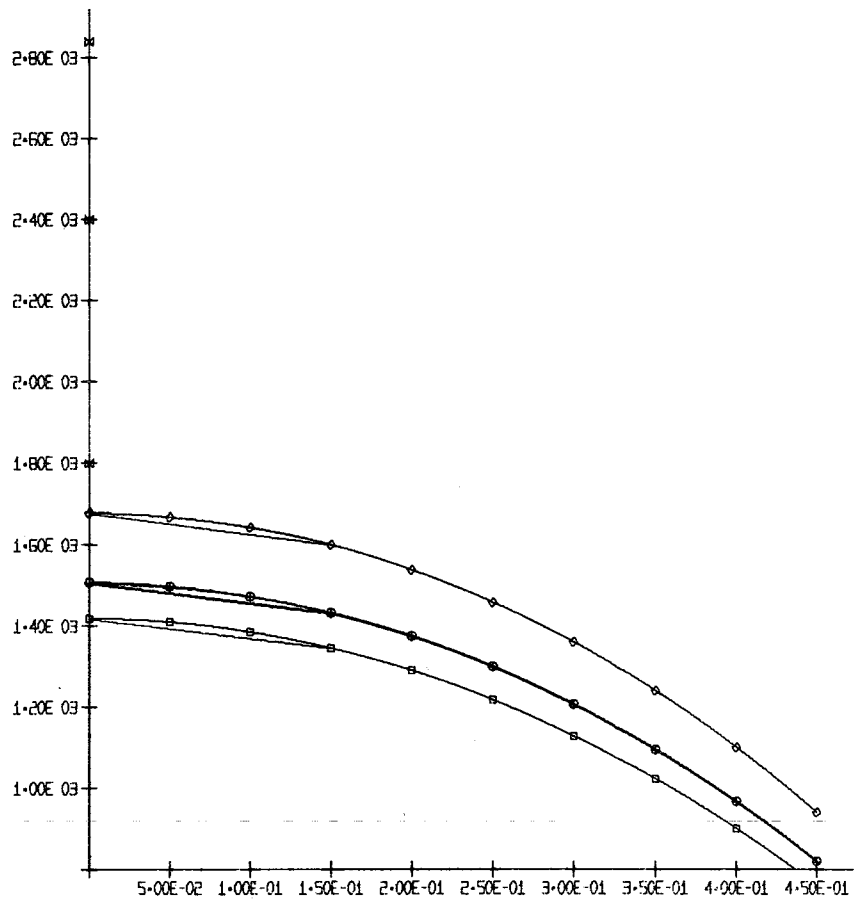


ABB-00006 LOOP2/L14SCHNITT U (+08 D/390W/CM)

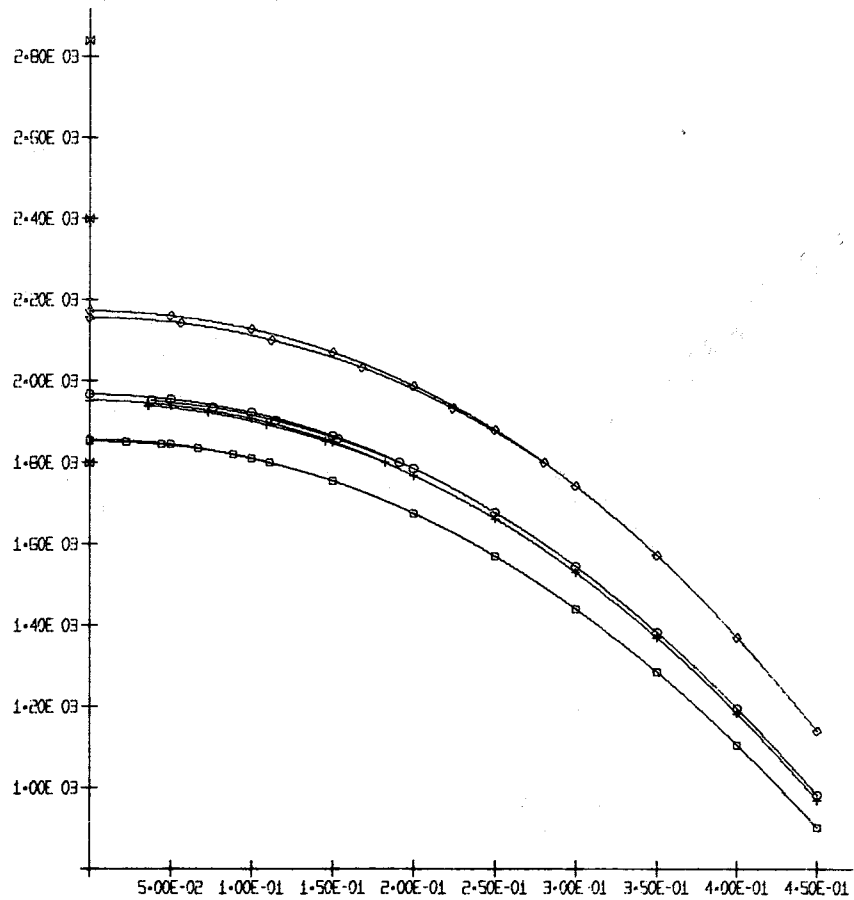


ABB-00007 LOOP2/L14SCHNITT M (+08 D/495W/CM)

- ⊗ Grenzen der Struktur-
zonen der Nachunter-
suchung
- Temp.profil für
h = 2.4 W/cm² grad
- Temp.profil für
h = 1.2 W/cm² grad
- ◇-◇-◇ Temp.profil für
h = 0.6 W/cm² grad
- +--+--+ Temp.profil für theor.
ermittelter Wärme-
übergangszahl

Abb.17: Thermische Analyse des Brennstabes L 14

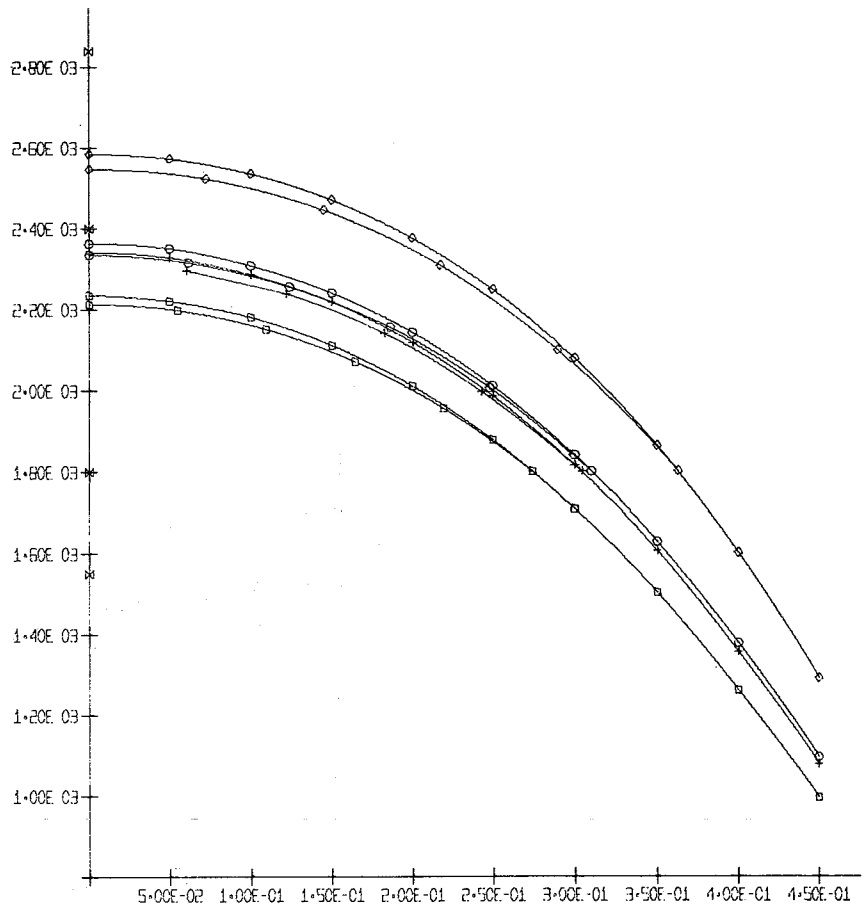


ABB-00035 LÖDFZ/L15SCHNITT M (+08 D/605W/CM)

- ⊗ Grenzen der Strukturzonen der Nachuntersuchung
- Temp.profil für $h = 2.4 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- Temp.profil für $h = 1.2 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- ◇-◇-◇ Temp.profil für $h = 0.6 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- +--+--+ Temp.profil für theor. ermittelter Wärmeübergangszahl

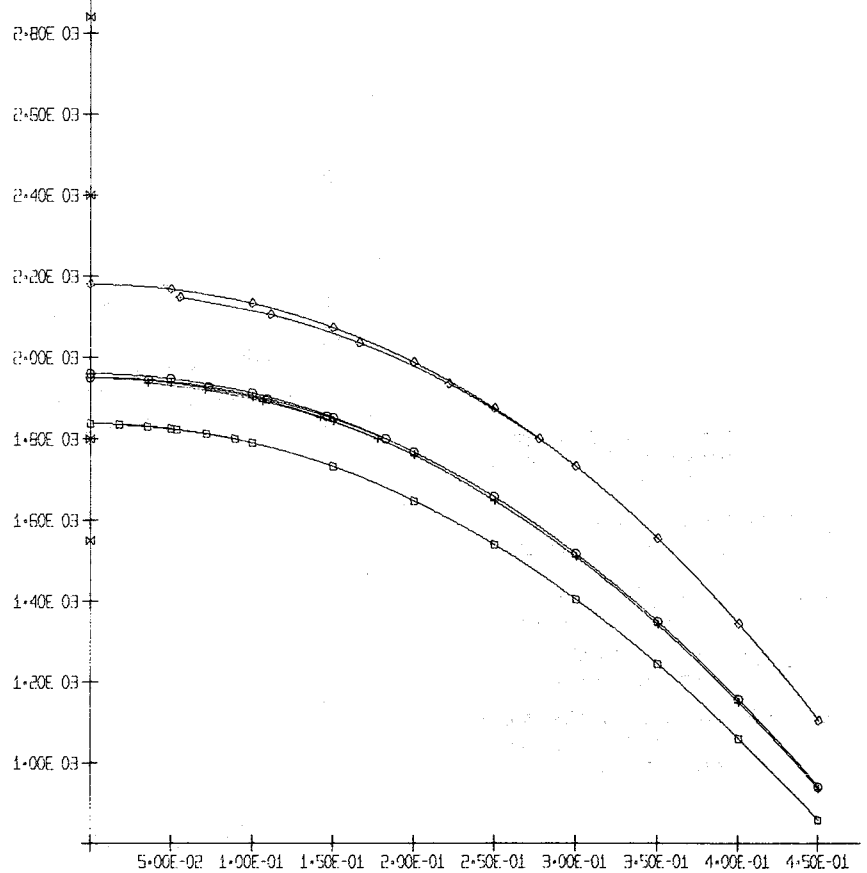
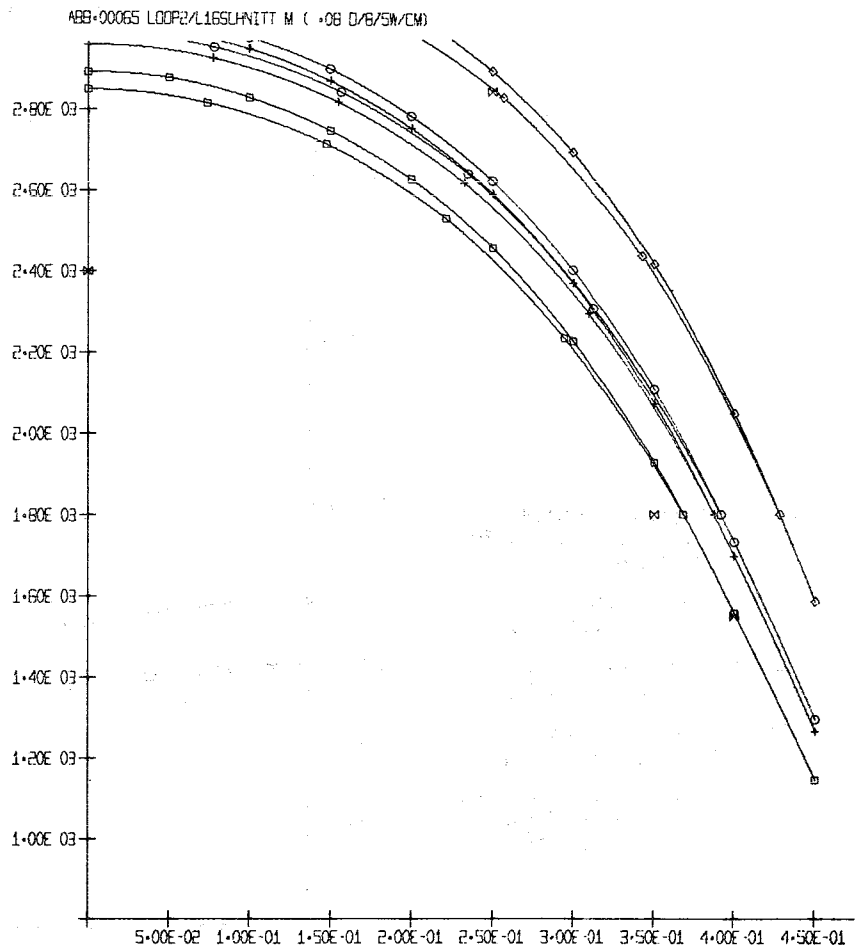
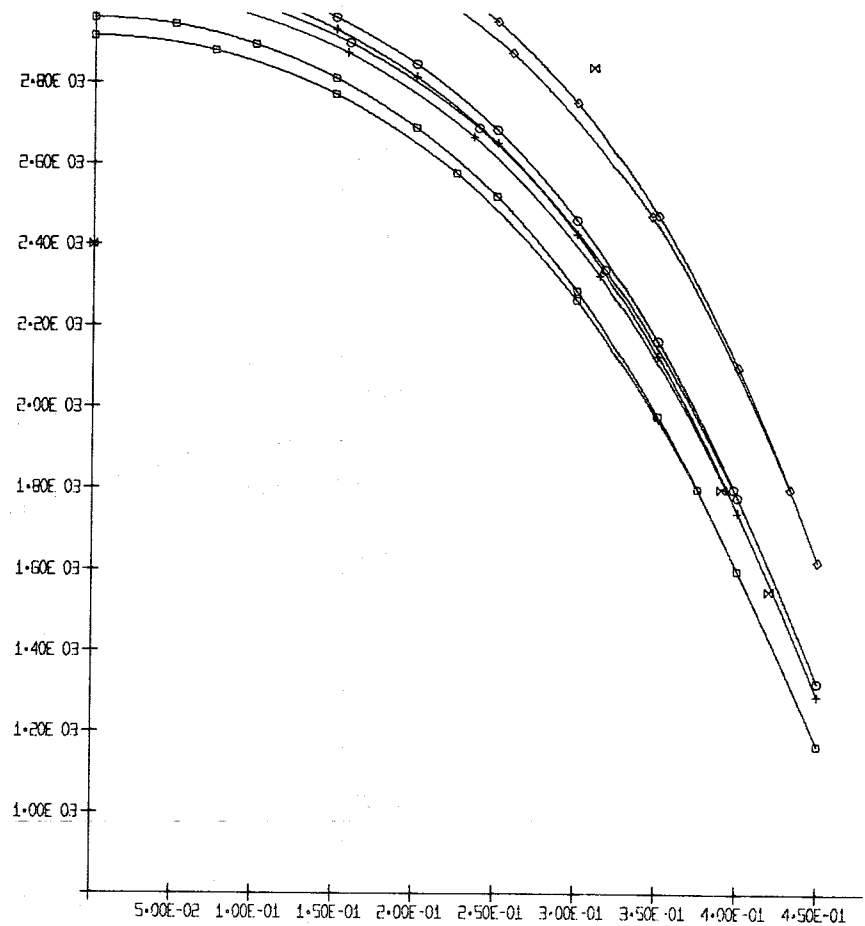


ABB-00034 LÖDFZ/L15SCHNITT U (+08 D/515W/CM)

Abb.18: Thermische Analyse des Brennstabes L 15



- ⊗ Grenzen der Struktur-
zonen der Nachunter-
suchung
- Temp.profil für
 $h = 2.4 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- Temp.profil für
 $h = 1.2 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- ◇-◇-◇ Temp.profil für
 $h = 0.6 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- +--+ Temp.profil für theor.
ermittelter Wärme-
übergangszahl

Abb.19: Thermische Analyse des Brennstabes L 16

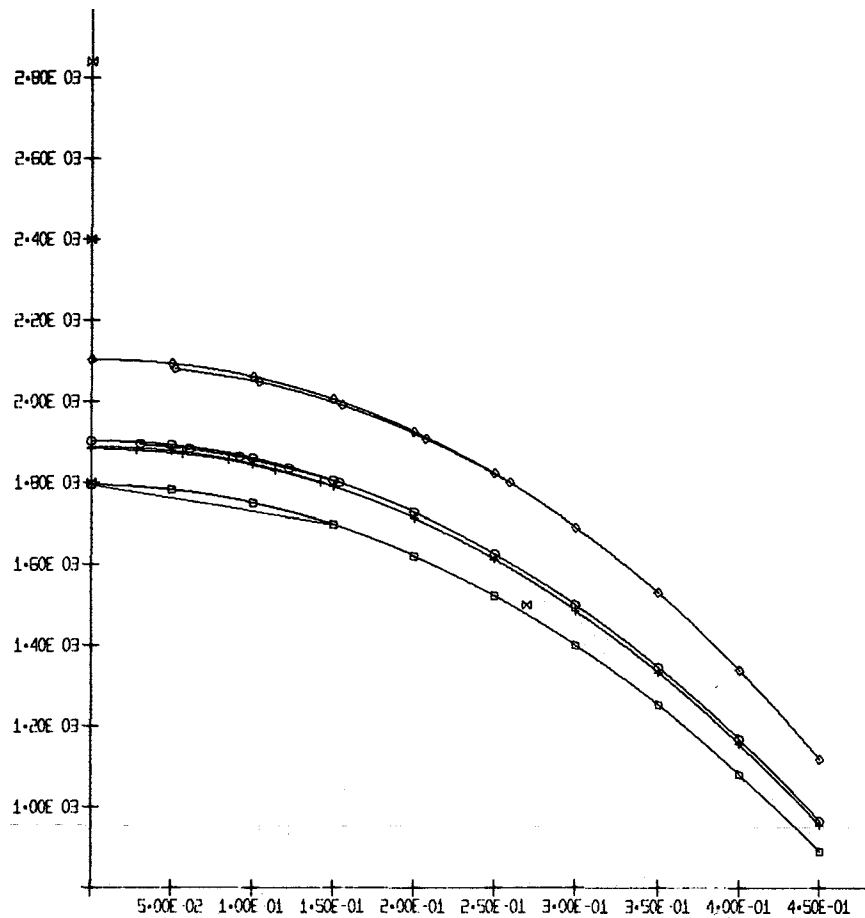


ABB-00079 L00F2/L17SCHNITT M (1.00 D/480W/CM)

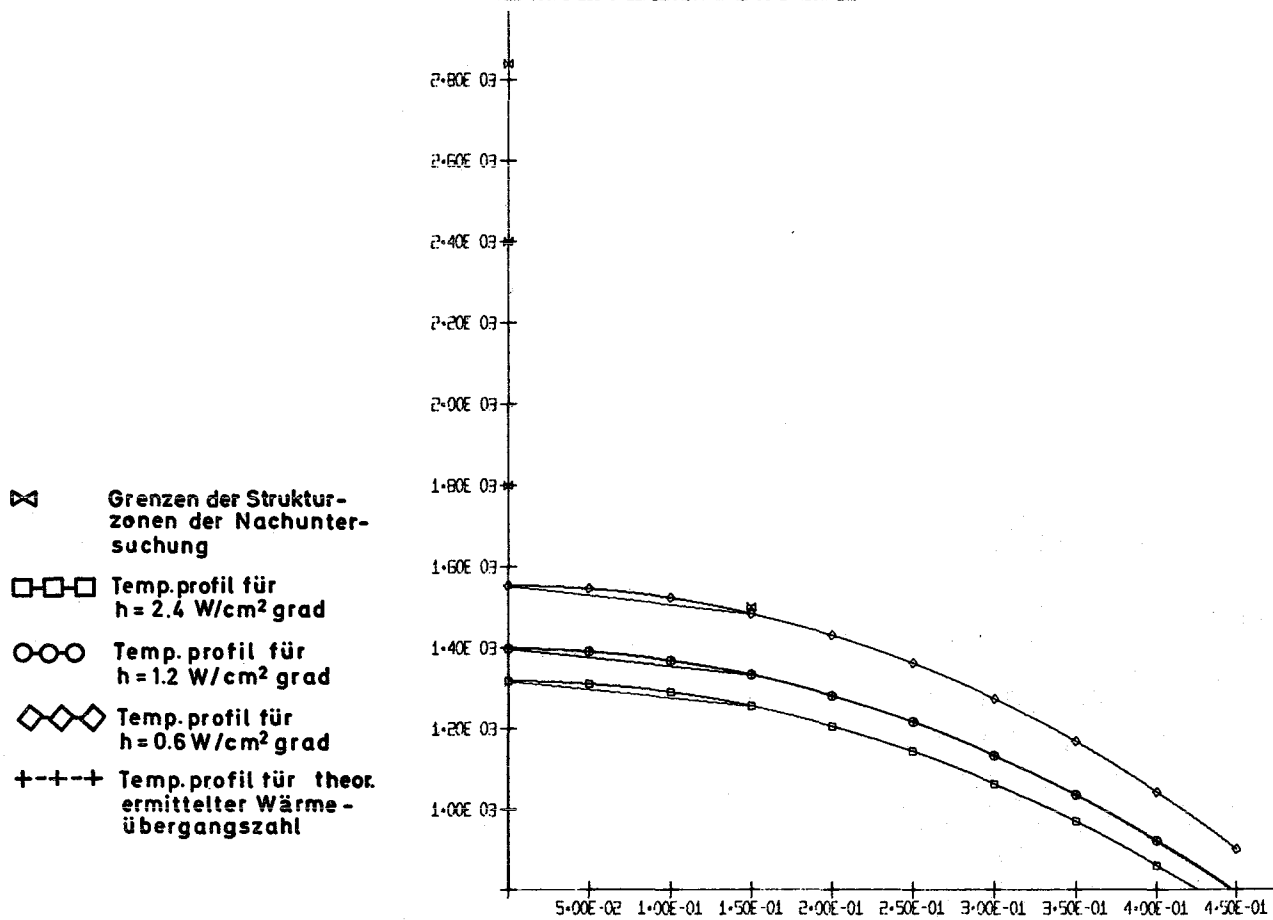
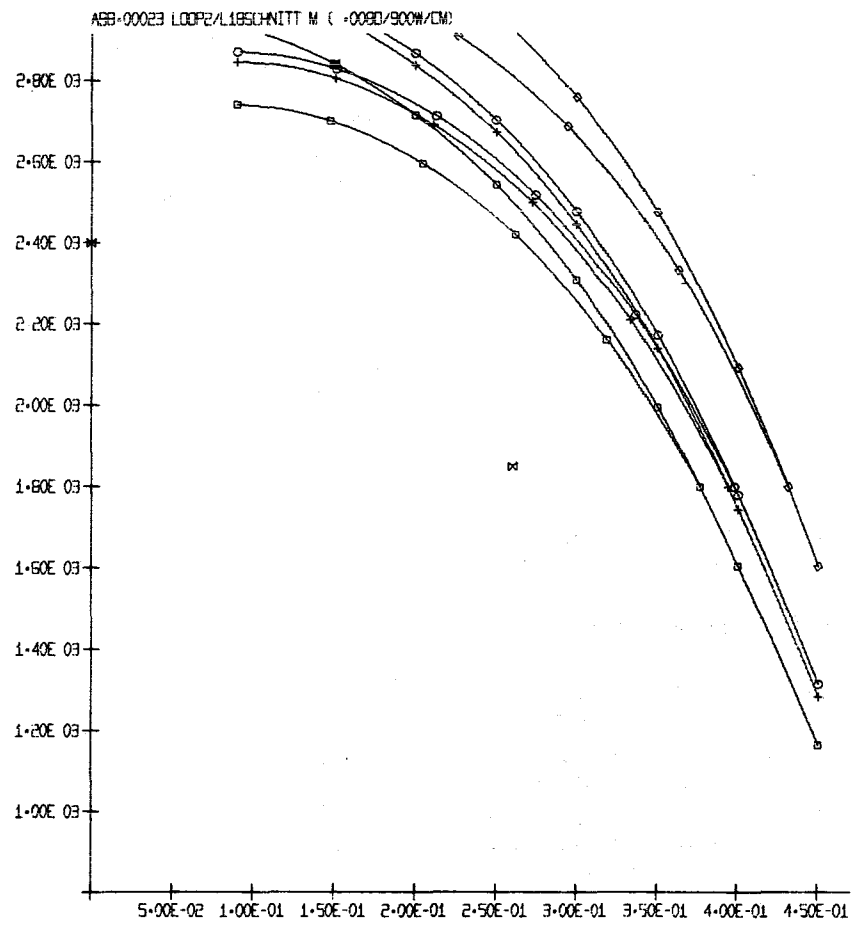
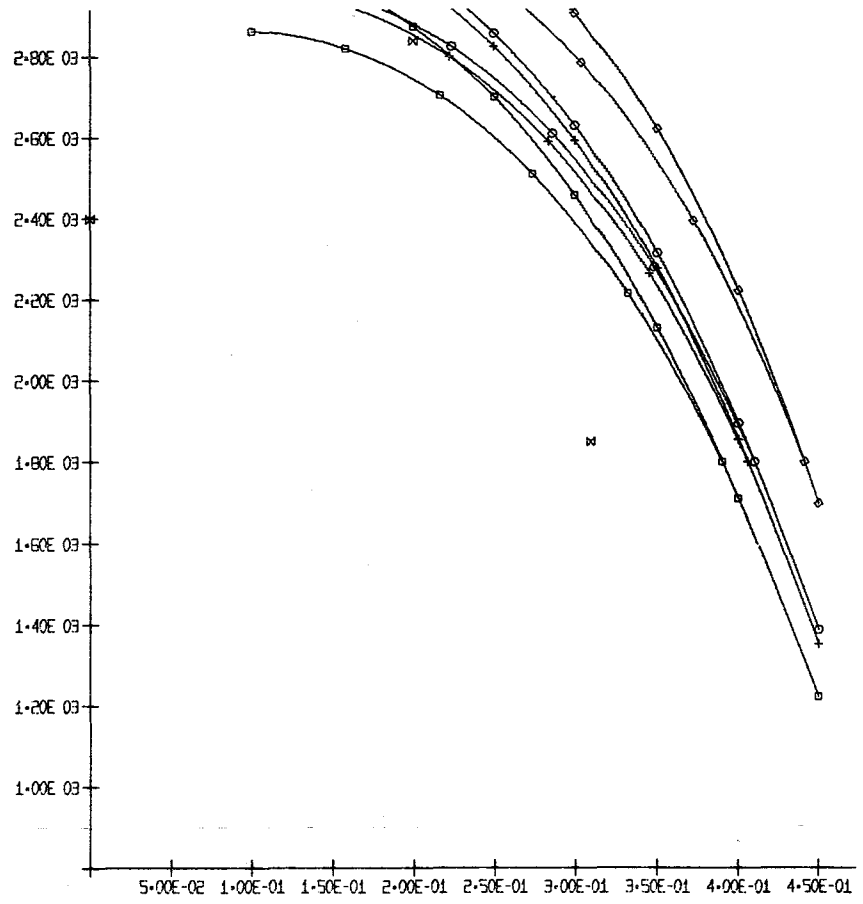


ABB-00078 L00F2/L17SCHNITT U (1.00 D/360W/CM)

Abb.20: Thermische Analyse des Brennstabes L17



- ⊗ Grenzen der Struktur-
zonen der Nachunter-
suchung
- Temp.profil für
 $h = 2.4 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- Temp.profil für
 $h = 1.2 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- ◇-◇-◇ Temp.profil für
 $h = 0.6 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- +--+--+ Temp.profil für theor.
ermittelter Wärme-
übergangszahl

ABB-00022 LÖDFZ/LIBSCHNITT U (+008D/840W/CM)

Abb.21: Thermische Analyse des Brennstabes L18

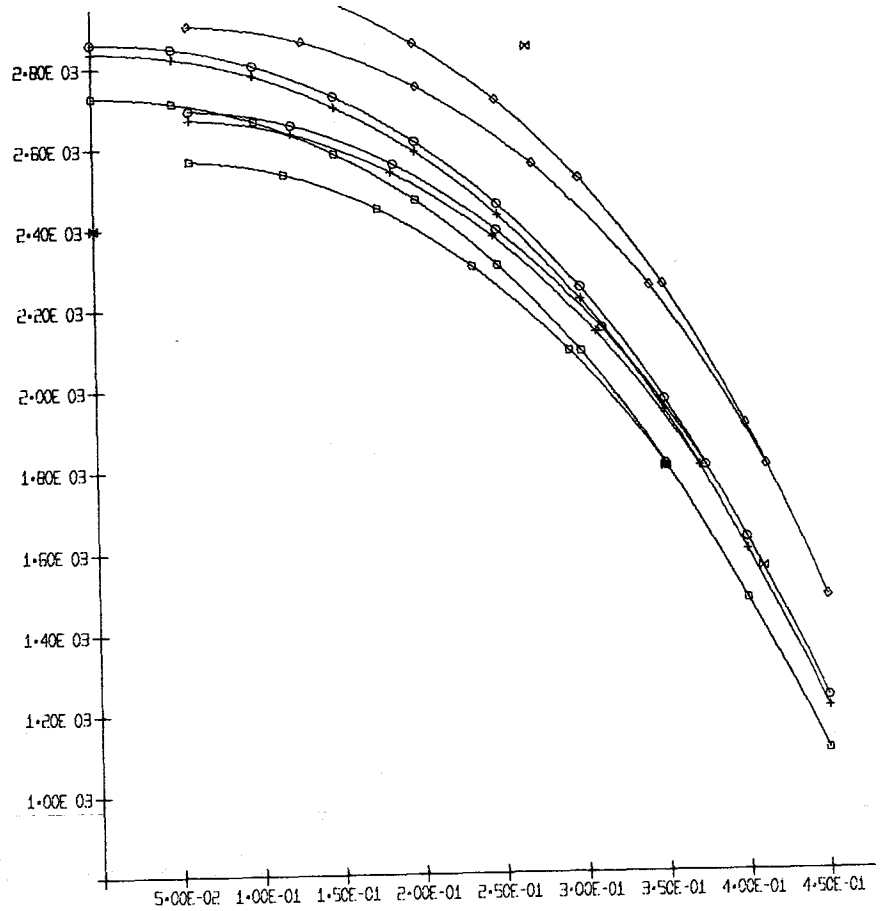


ABB-00037 LOOP2/L195SCHNITT M (+08 D/740W/CM)

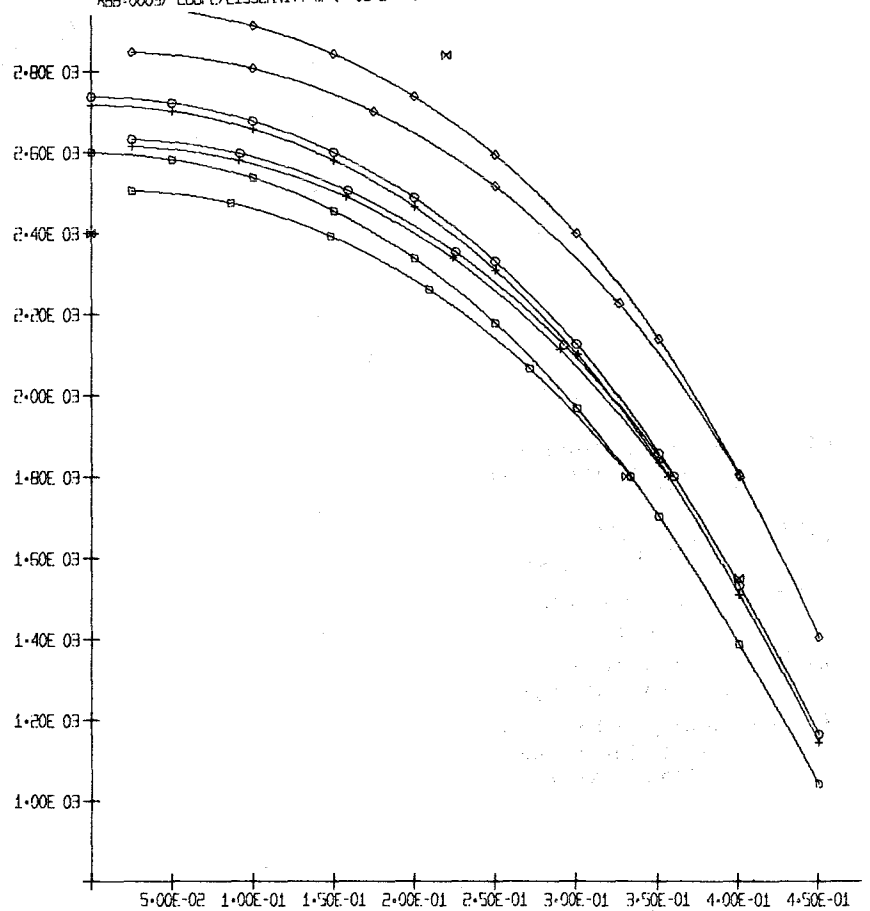
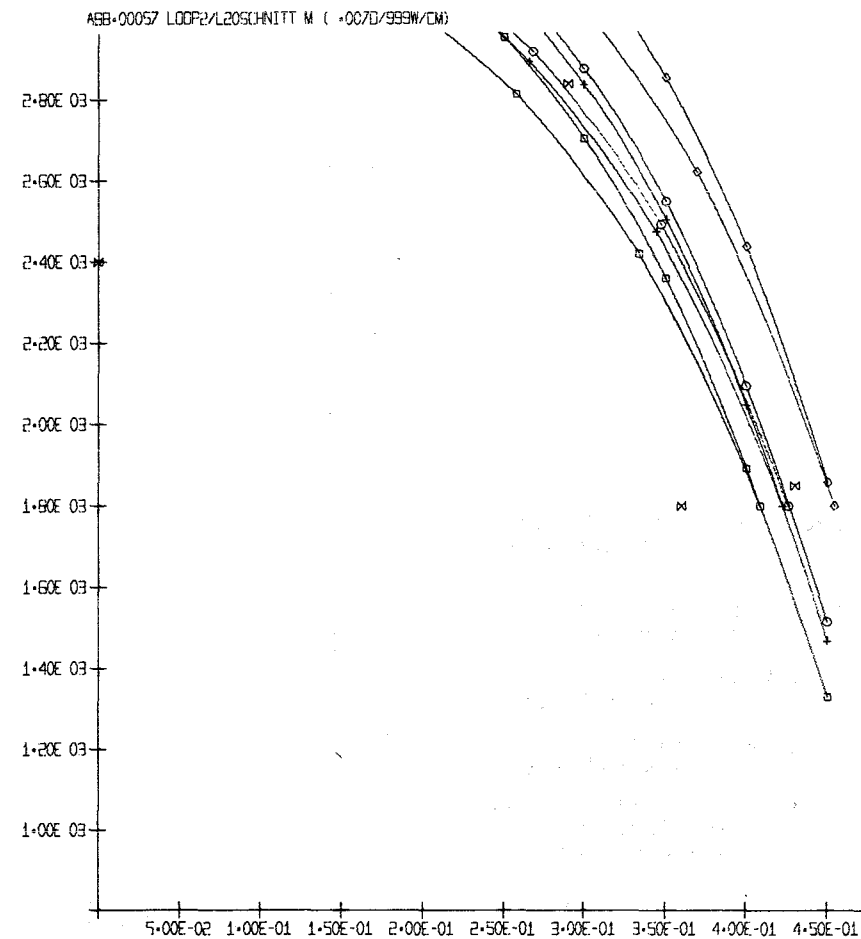
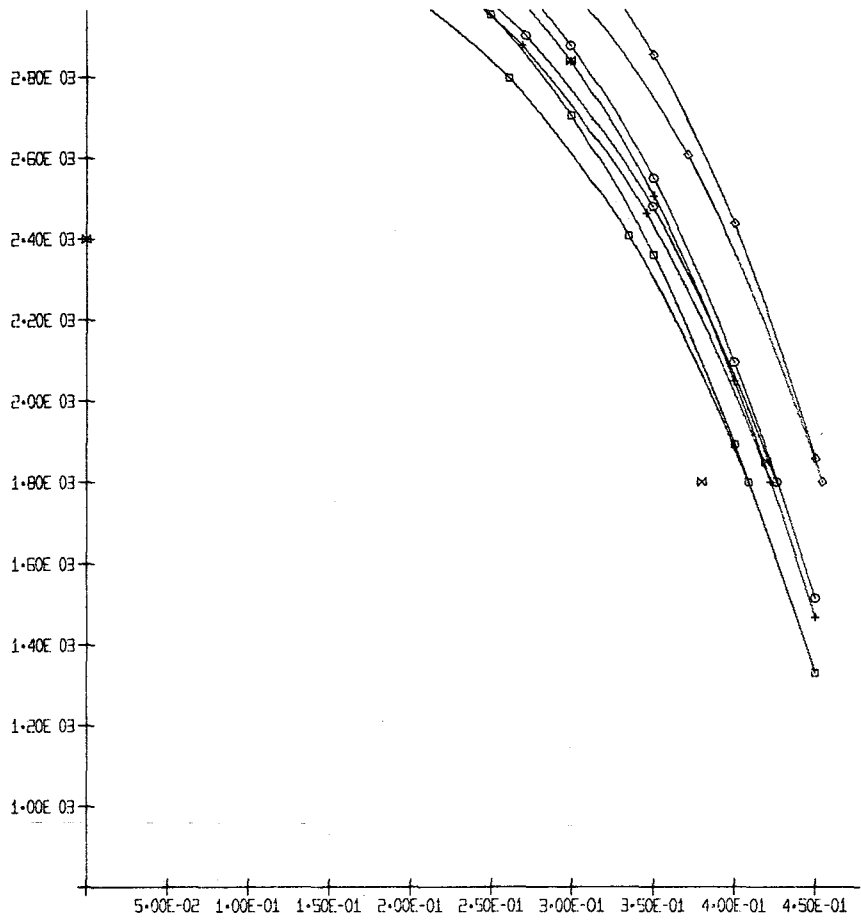


ABB-00036 LOOP2/L195SCHNITT U (+08 D/710W/CM)

- ⊗ Grenzen der Struktur-
zonen der Nachunter-
suchung
- Temp.profil für
 $h = 2.4 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- Temp.profil für
 $h = 1.2 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- ◇-◇-◇ Temp.profil für
 $h = 0.6 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- +--+--+ Temp.profil für theor.
ermittelter Wärme-
übergangszahl

Abb.22: Thermische Analyse des Brennstabes L 19



- ⊠ Grenzen der Struktur-
zonen der Nachunter-
suchung
- Temp.profil für
 $h = 2.4 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- Temp.profil für
 $h = 1.2 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- ◇-◇-◇ Temp.profil für
 $h = 0.6 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- +--+--+ Temp.profil für theor.
ermittelter Wärme-
übergangszahl

ABB-00056 LOGP2/L20SCHNITT U (+007D/999W/CM)

Abb.23: Thermische Analyse des Brennstabes L 20

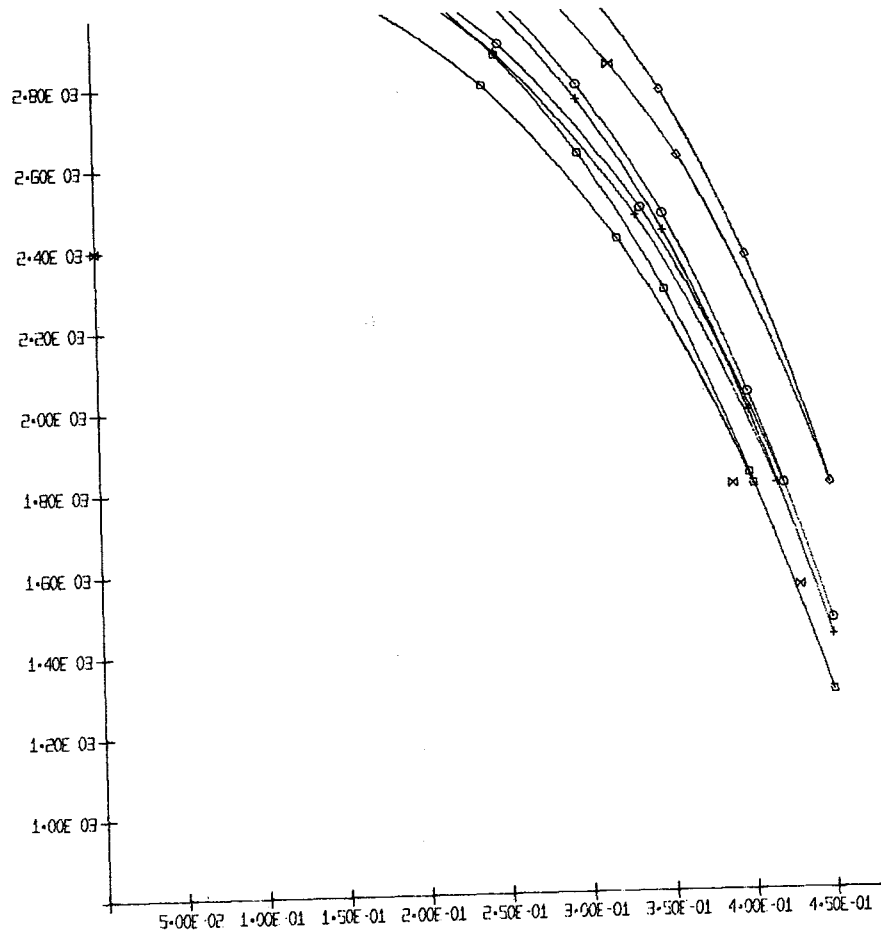


ABB-00067 LOOP2/L21SCHNITT M (+08 D/960W/CM)

- ⊗ Grenzen der Struktur-
zonen der Nachunter-
suchung
- Temp.profil für
 $h = 2.4 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- Temp.profil für
 $h = 1.2 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- ◇-◇-◇ Temp.profil für
 $h = 0.6 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- +--+--+ Temp.profil für theor.
ermittelter Wärme-
übergangszahl

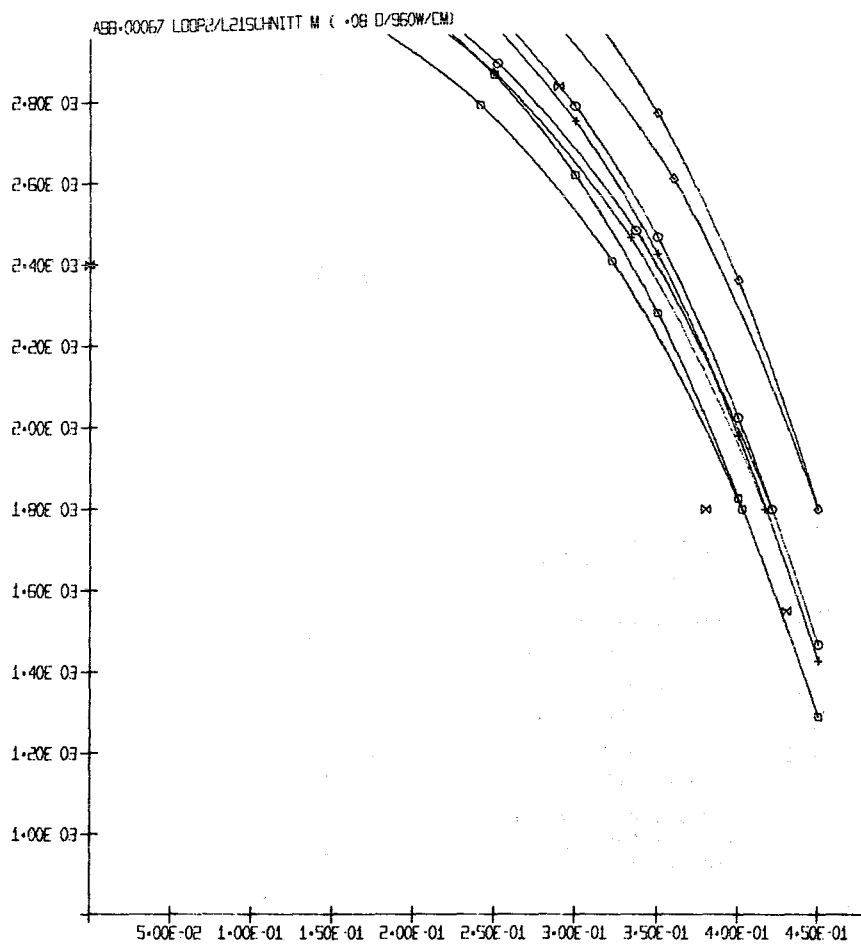


ABB-00066 LOOP2/L21SCHNITT U (+08 D/960W/CM)

Abb.24: Thermische Analyse des Brennstabes L 21

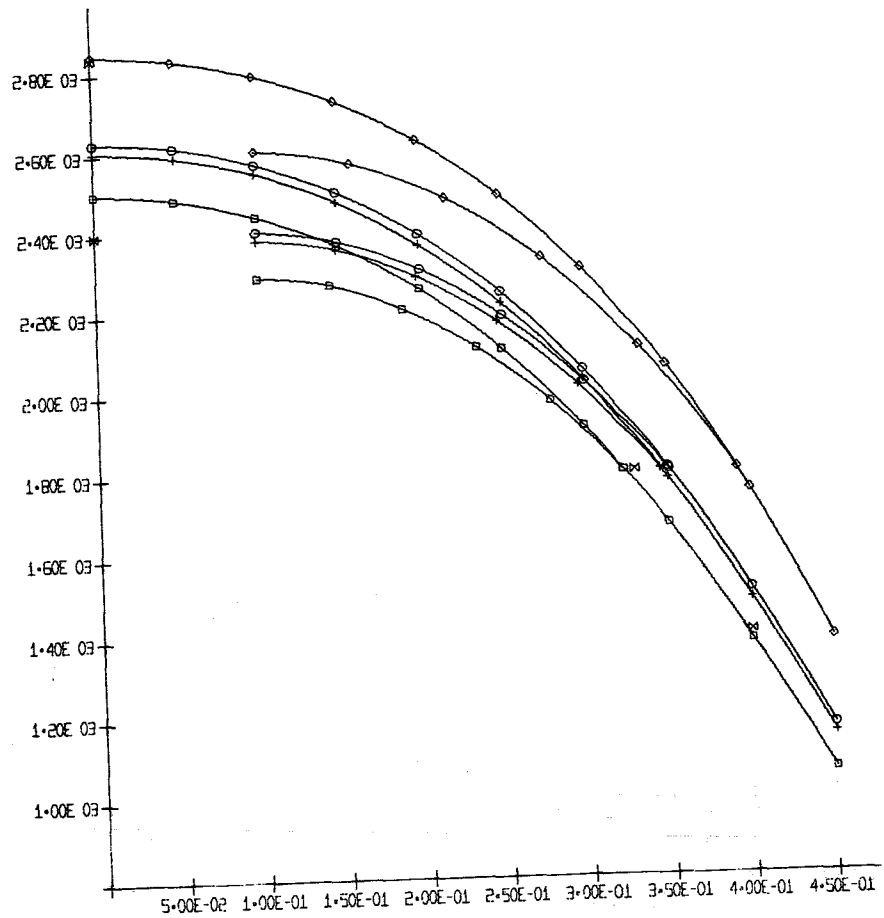


ABB-00081 L00P2/L22SCHNITT M(13.4 D/650W/CM)

- ⊗ Grenzen der Strukturzonen der Nachuntersuchung
- Temp.profil für $h = 2.4 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- Temp.profil für $h = 1.2 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- ◇-◇-◇ Temp.profil für $h = 0.6 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- +--+ Temp.profil für theor. ermittelter Wärmeübergangszahl

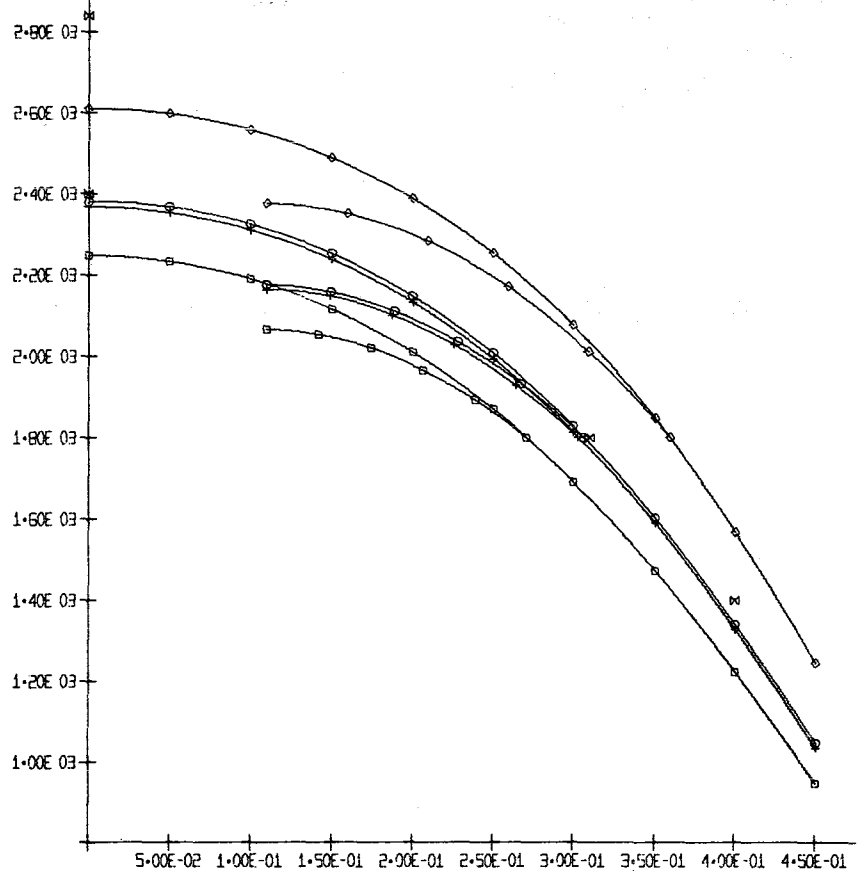


ABB-00080 L00P2/L22SCHNITT U(13.4 D/600W/CM)

Abb.25: Thermische Analyse des Brennstabes L 22

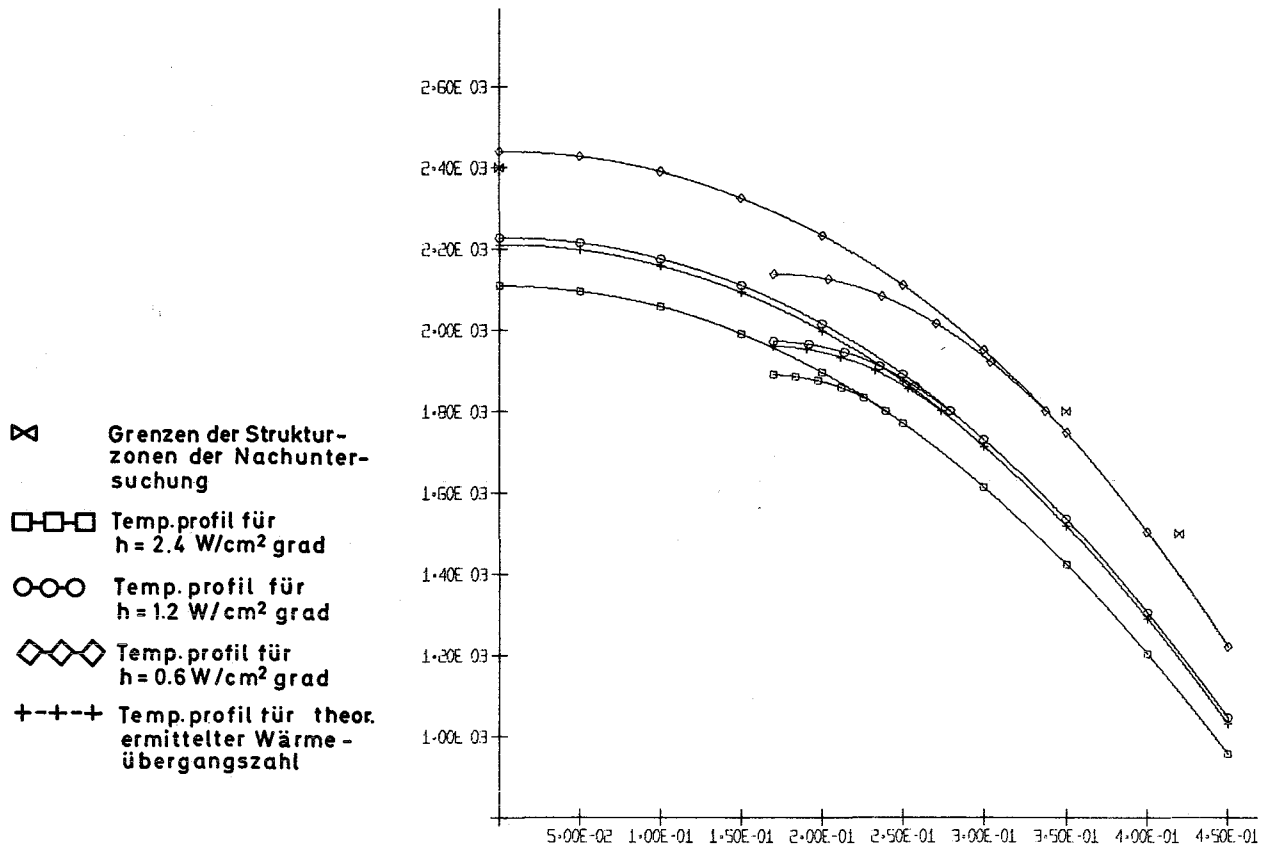
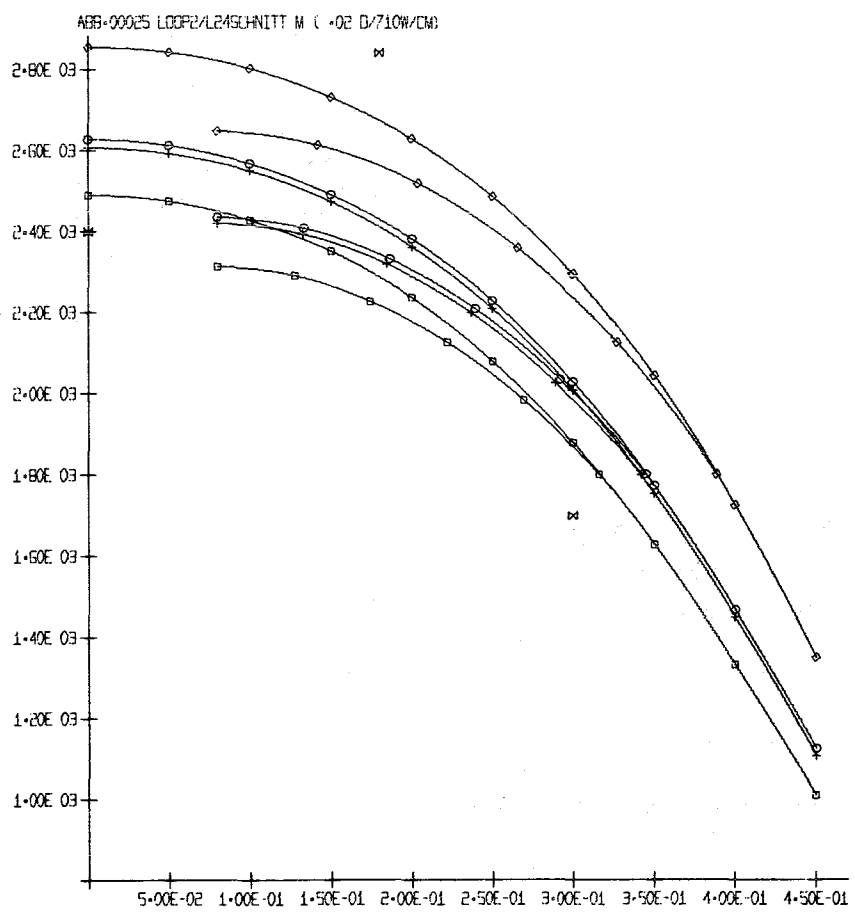
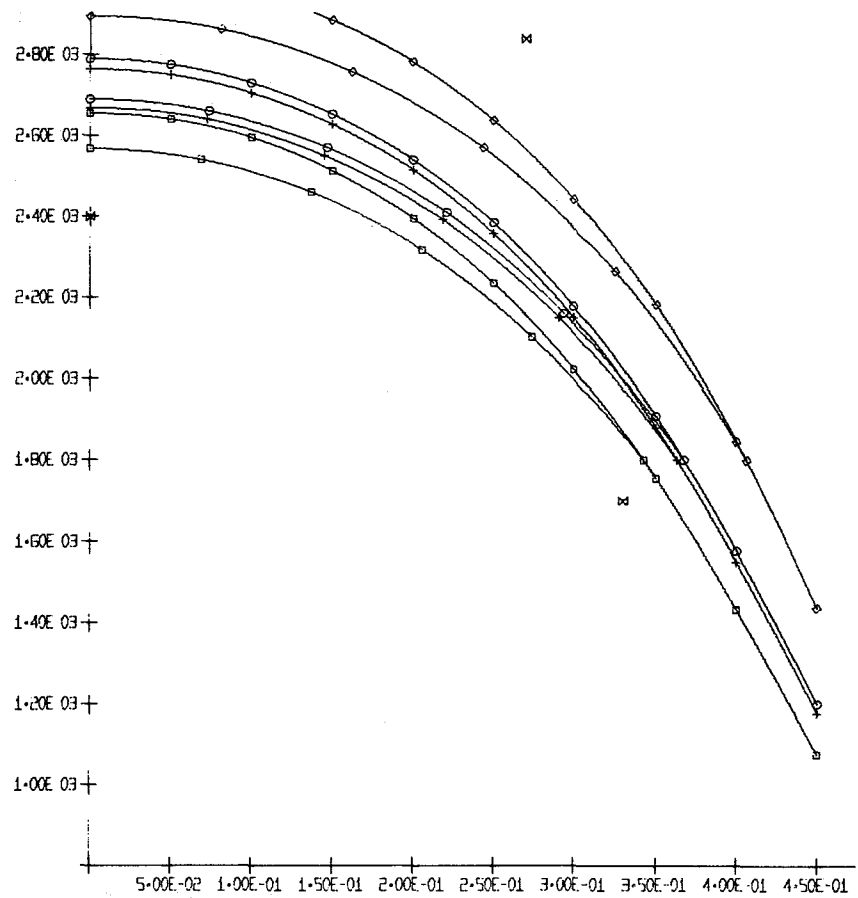


ABB-00005 L00P2/L23SCHNITT M (1.05 D/540W/CM)

Abb.26: Thermische Analyse des Brennstabes L23



- ⊠ Grenzen der Struktur-
zonen der Nachunter-
suchung
- Temp.profil für
 $h = 2.4 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- Temp.profil für
 $h = 1.2 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- ◇-◇-◇ Temp.profil für
 $h = 0.6 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- +--+--+ Temp.profil für theor.
ermittelter Wärme-
übergangszahl

ABB-00024 LOOP2/L24SCHNITT U (·02 D/670W/CM)

Abb.27: Thermische Analyse des Brennstabes L 24

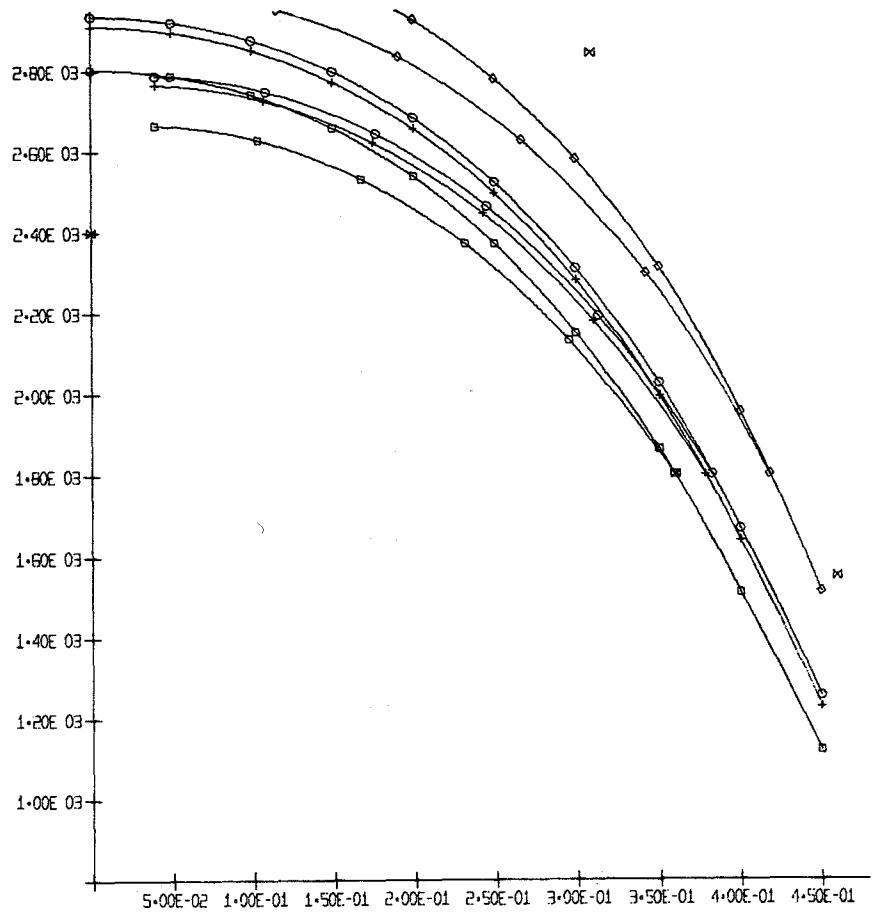


ABB-00039 LOOP2/L25SCHNITT M (+11 D/760W/CM)

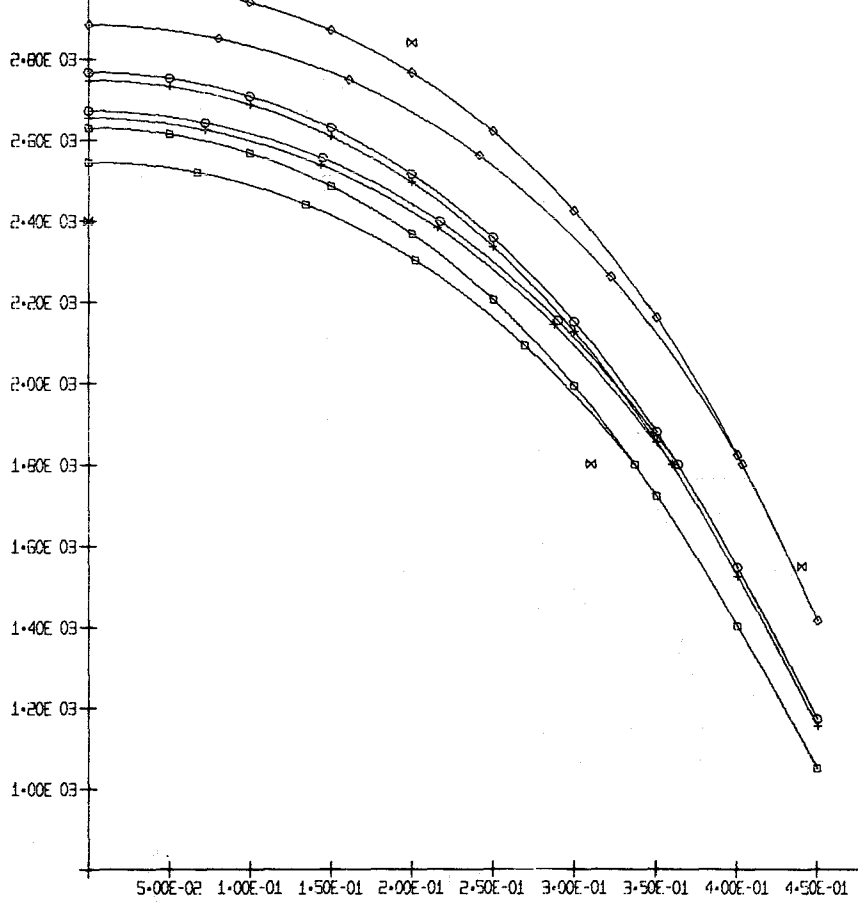


ABB-00038 LOOP2/L25SCHNITT U (+11 D/715W/CM)

- ⊗ Grenzen der Struktur-
zonen der Nachunter-
suchung
- Temp.profil für
 $h = 2.4 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- Temp.profil für
 $h = 1.2 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- ◇-◇-◇ Temp.profil für
 $h = 0.6 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- +--+--+ Temp.profil für theo-
ermittelter Wärme-
übergangszahl

Abb.28: Thermische Analyse des Brennstabes L 25

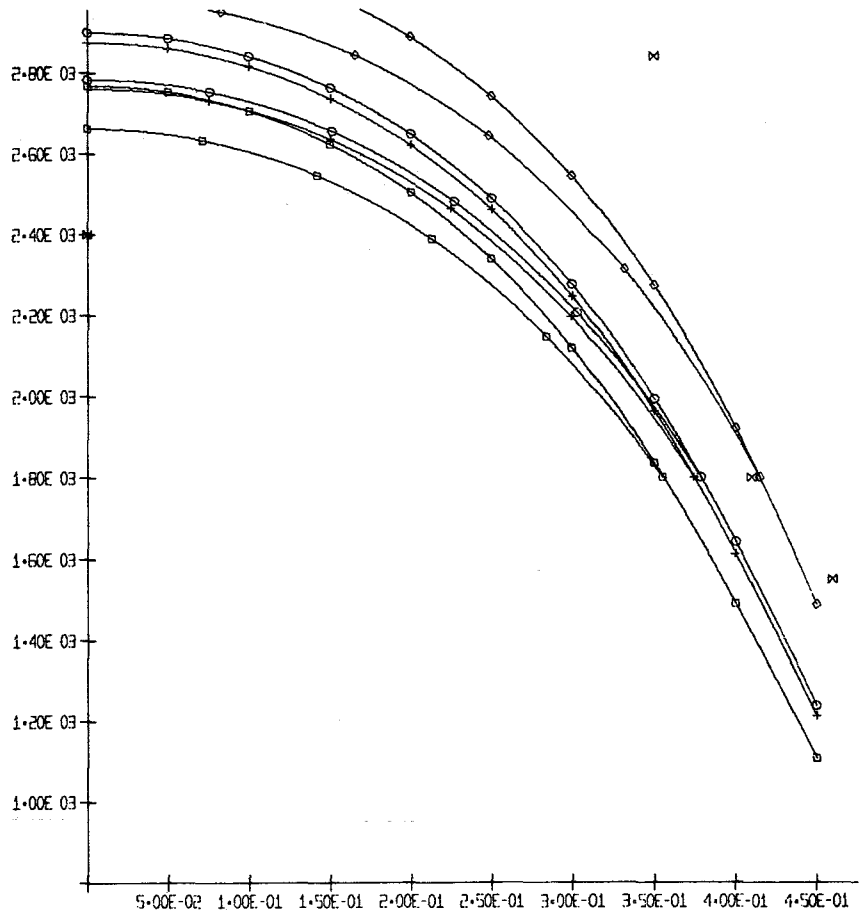
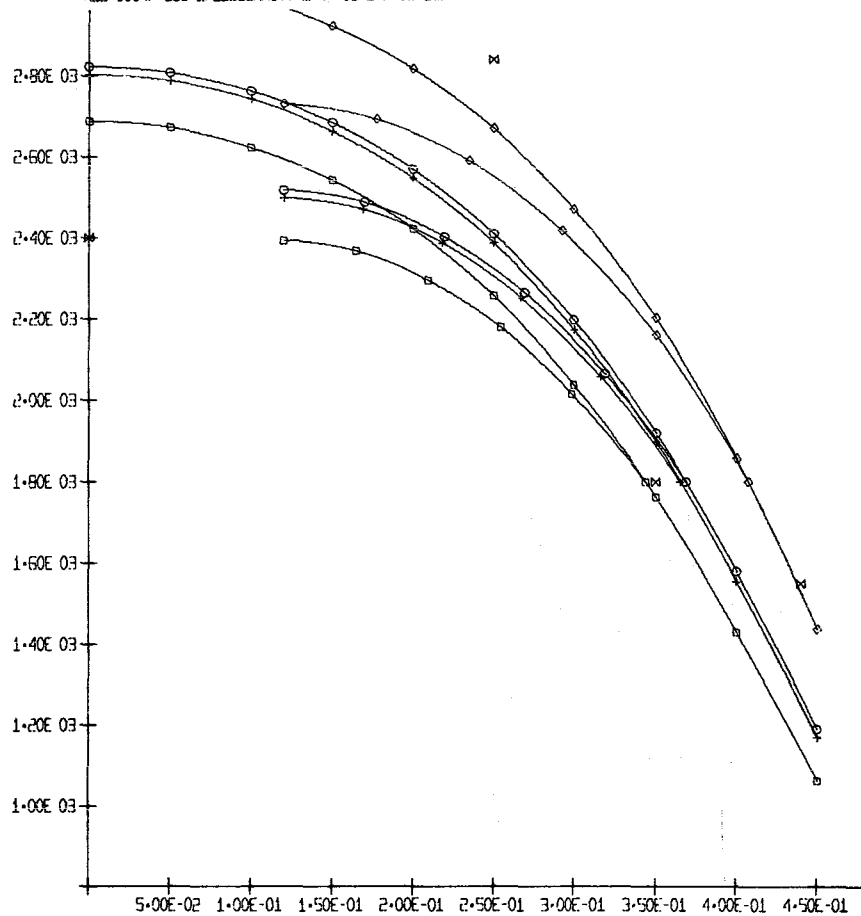


ABB-00047 LOOP2/L26SCHNITT M (+08 D/740W/CM)



- ⊗ Grenzen der Struktur-
zonen der Nachunter-
suchung
- Temp.profil für
 $h = 2.4 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- Temp.profil für
 $h = 1.2 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- ◇-◇-◇ Temp.profil für
 $h = 0.6 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- +--+--+ Temp.profil für theor.
ermittelter Wärme-
übergangszahl

ABB-00046 LOOP2/L26SCHNITT U (+08 D/725W/CM)

Abb.29: Thermische Analyse des Brennstabes L 26

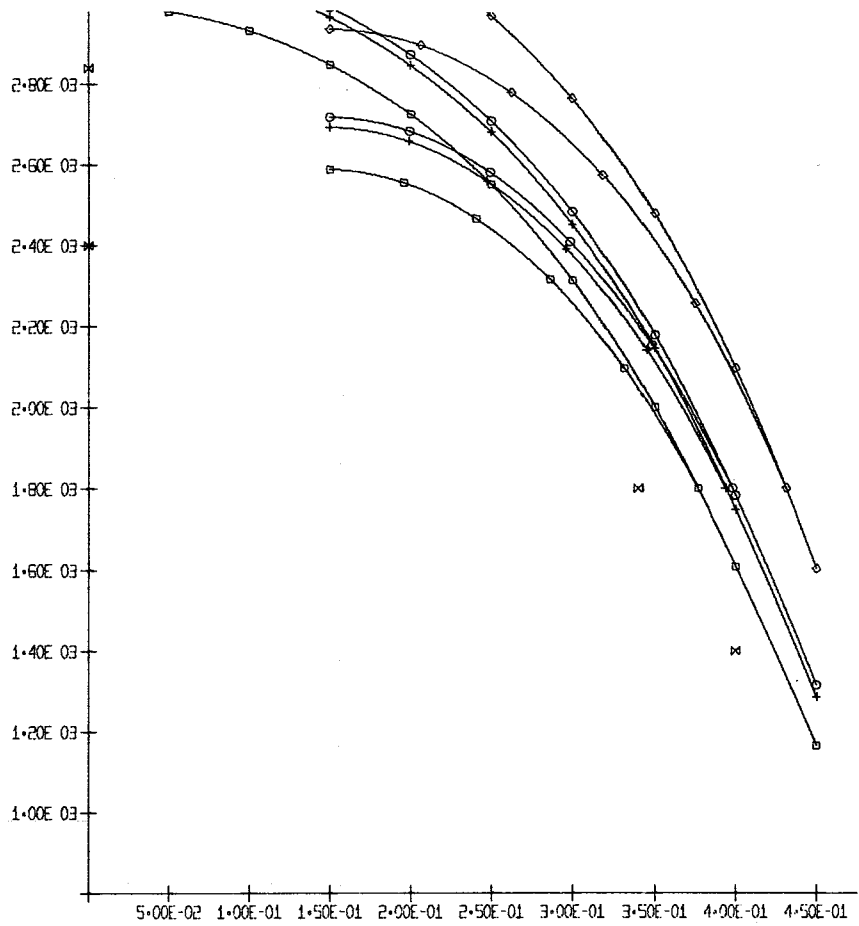


ABB-00083 LOOP2/L27/SCHNITT M (B-7) D/B3FW/CM

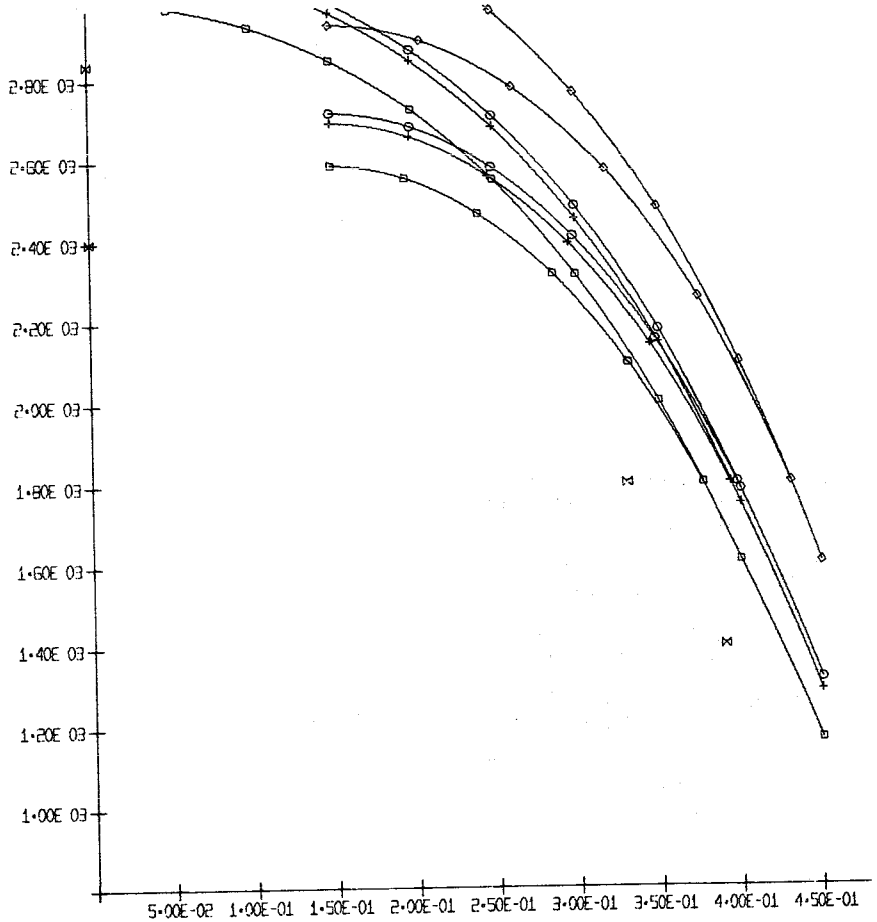


ABB-00082 LOOP2/L27/SCHNITT U (B-7) D/B3FW/CM

- ⊗ Grenzen der Struktur-
zonen der Nachunter-
suchung
- Temp.profil für
 $h = 2.4 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- Temp.profil für
 $h = 1.2 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- ◇-◇-◇ Temp.profil für
 $h = 0.6 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- +--+--+ Temp.profil für theor.
ermittelter Wärme-
übergangszahl

Abb.30: Thermische Analyse des Brennstabes L 27

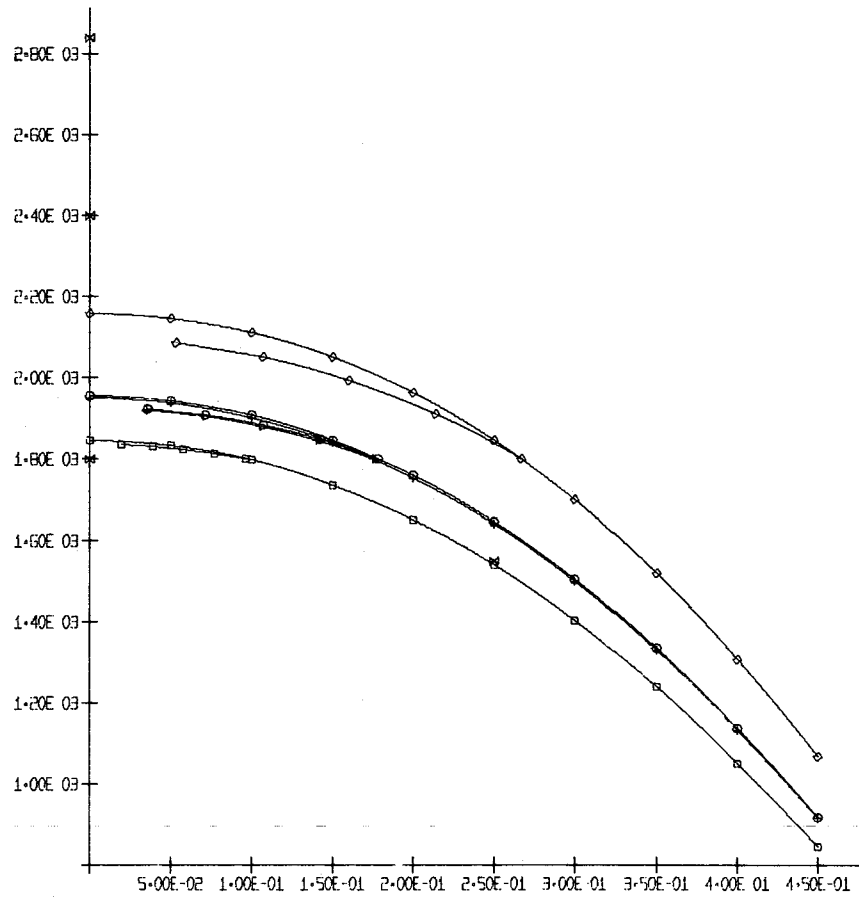


ABB-00009 LOOP2/L285UHNITT M (+08 D/460W/CM)

- ⊗ Grenzen der Strukturzonen der Nachuntersuchung
- Temp.profil für h = 2.4 W/cm² grad
- Temp.profil für h = 1.2 W/cm² grad
- ◇-◇-◇ Temp.profil für h = 0.6 W/cm² grad
- +--+--+ Temp.profil für theor. ermittelter Wärmeübergangszahl

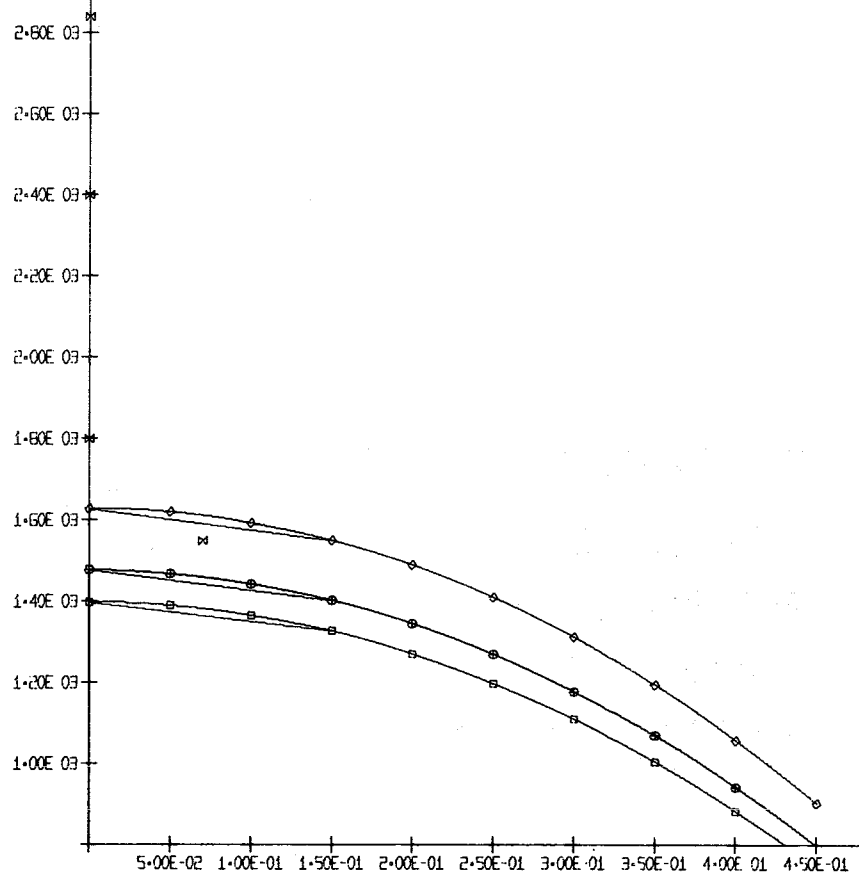


ABB-00008 LOOP2/L285UHNITT U (+08 D/340W/CM)

Abb. 31: Thermische Analyse des Brennstabes L 28

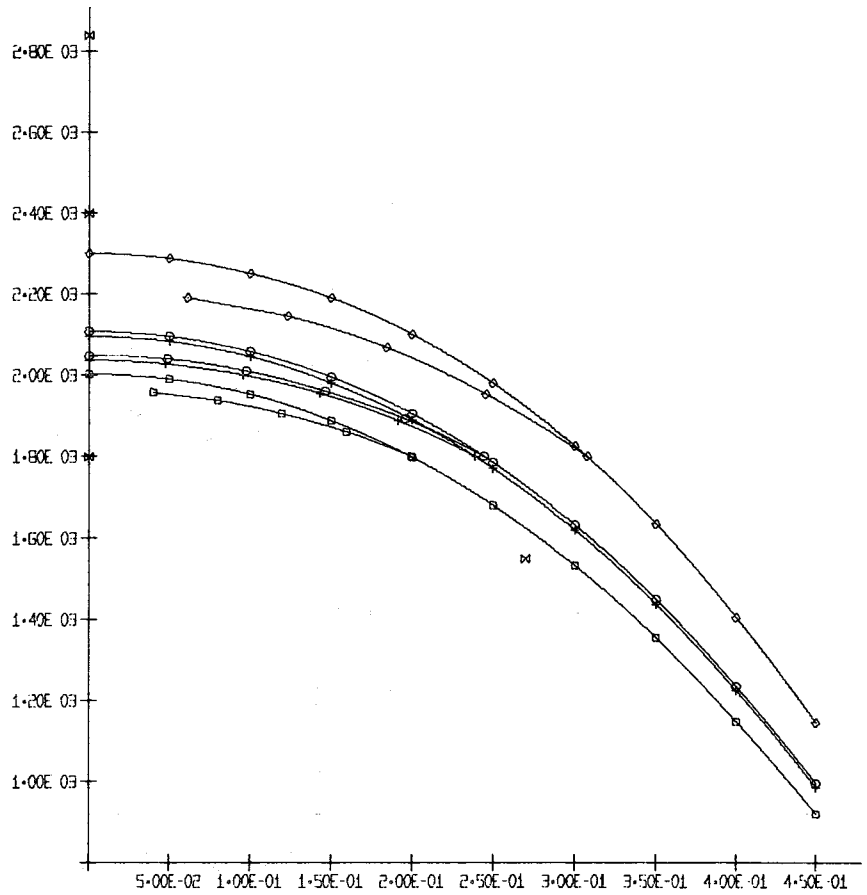


ABB-00017 LDGP2/L29SCHNITT M (·035D/455W/CM)

- ⊠ Grenzen der Struktur-
zonen der Nachunter-
suchung
- Temp.profil für
h = 2.4 W/cm² grad
- Temp.profil für
h = 1.2 W/cm² grad
- ◇-◇-◇ Temp.profil für
h = 0.6 W/cm² grad
- +--+ Temp.profil für theor.
ermittelter Wärme-
übergangszahl

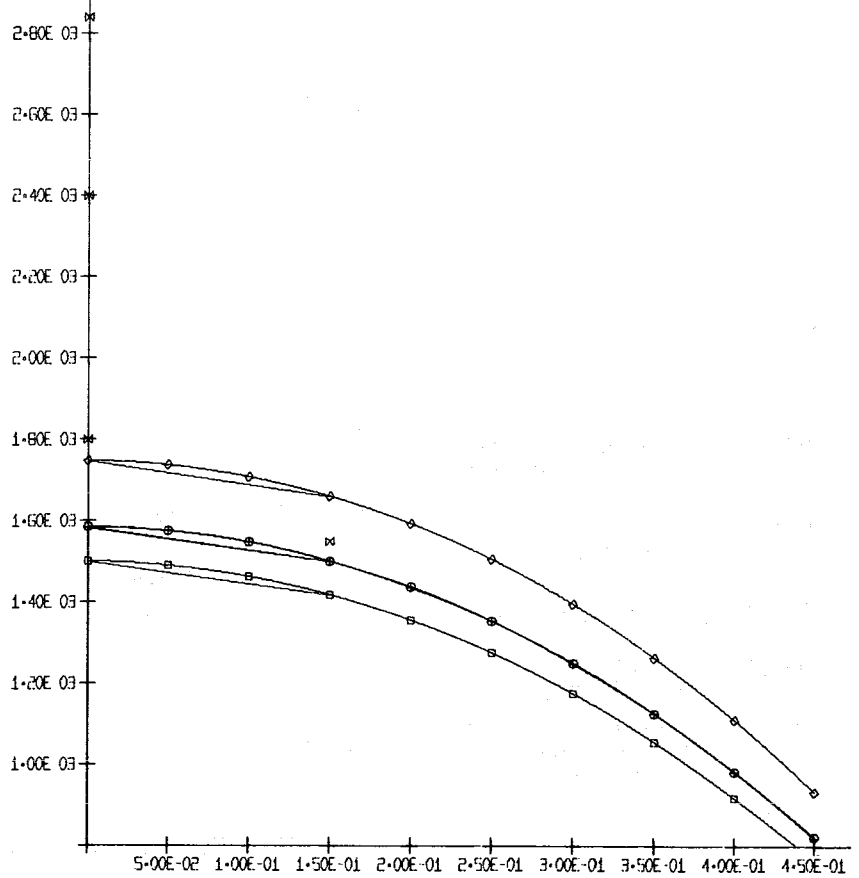


ABB-00015 LDGP2/L29SCHNITT U (·035D/360W/CM)

Abb.32: Thermische Analyse des Brennstabes L 29

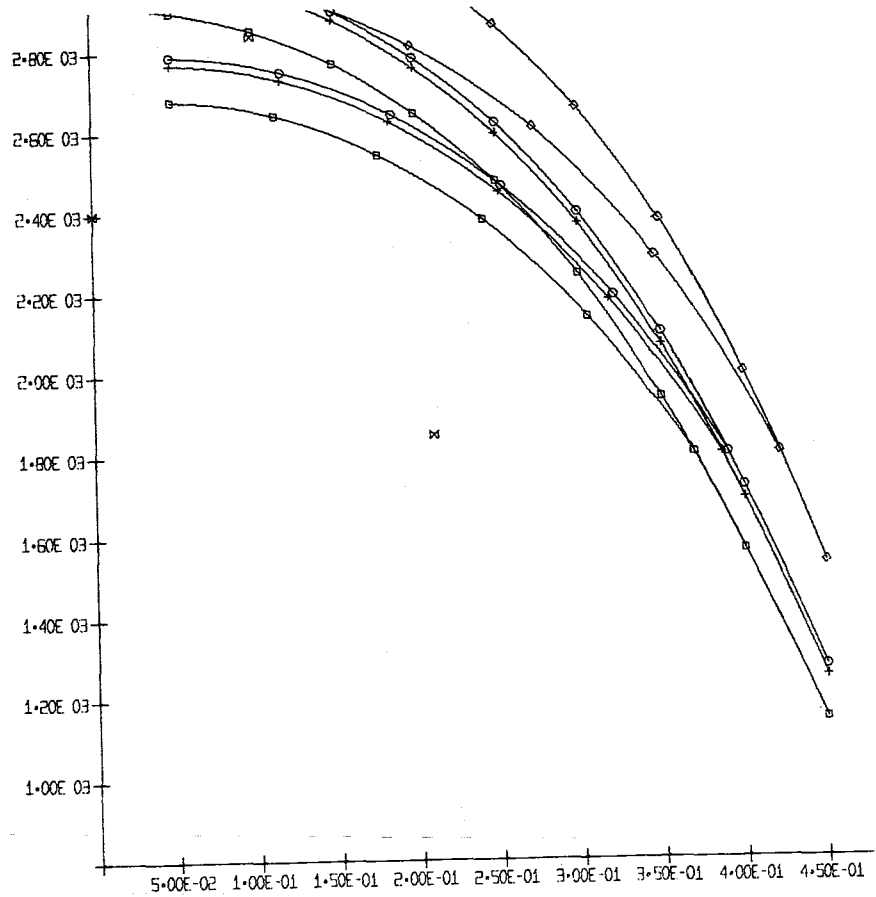


ABB-00027 LÖDR2/L30SCHNITT M (+007D/740W/CM)

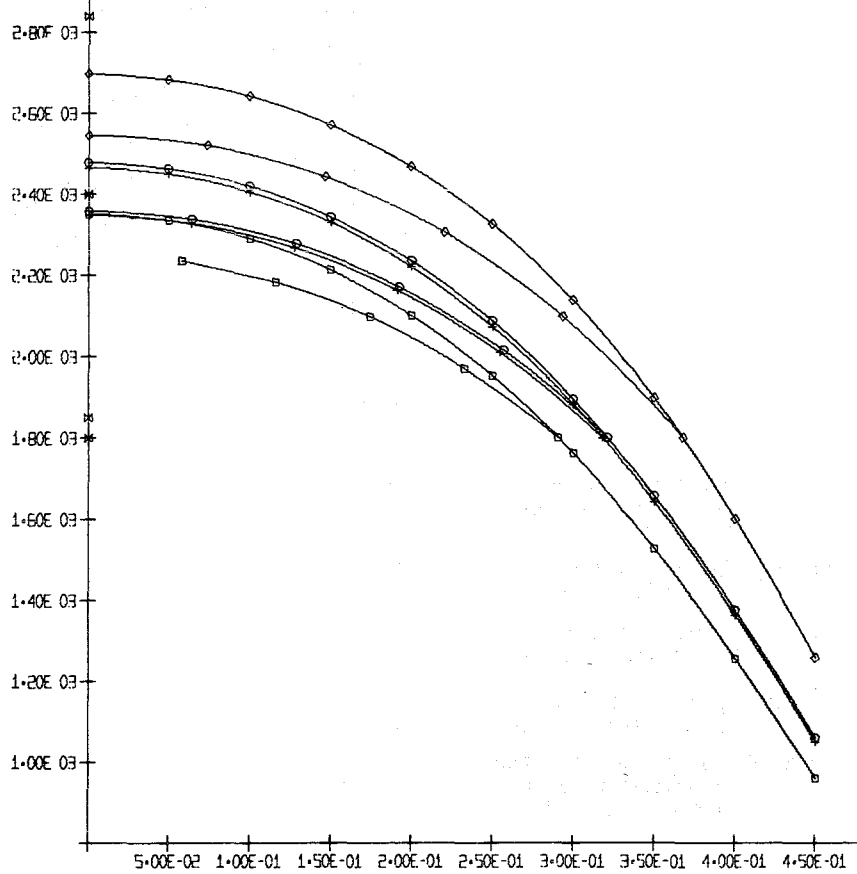


ABB-00026 LÖDR2/L30SCHNITT U (+007D/565W/CM)

- ⊠ Grenzen der Strukturzonen der Nachuntersuchung
- Temp.profil für $h = 2.4 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- Temp.profil für $h = 1.2 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- ◇-◇-◇ Temp.profil für $h = 0.6 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- +--+--+ Temp.profil für theor. ermittelter Wärmeübergangszahl

Abb.33: Thermische Analyse des Brennstabes L 30

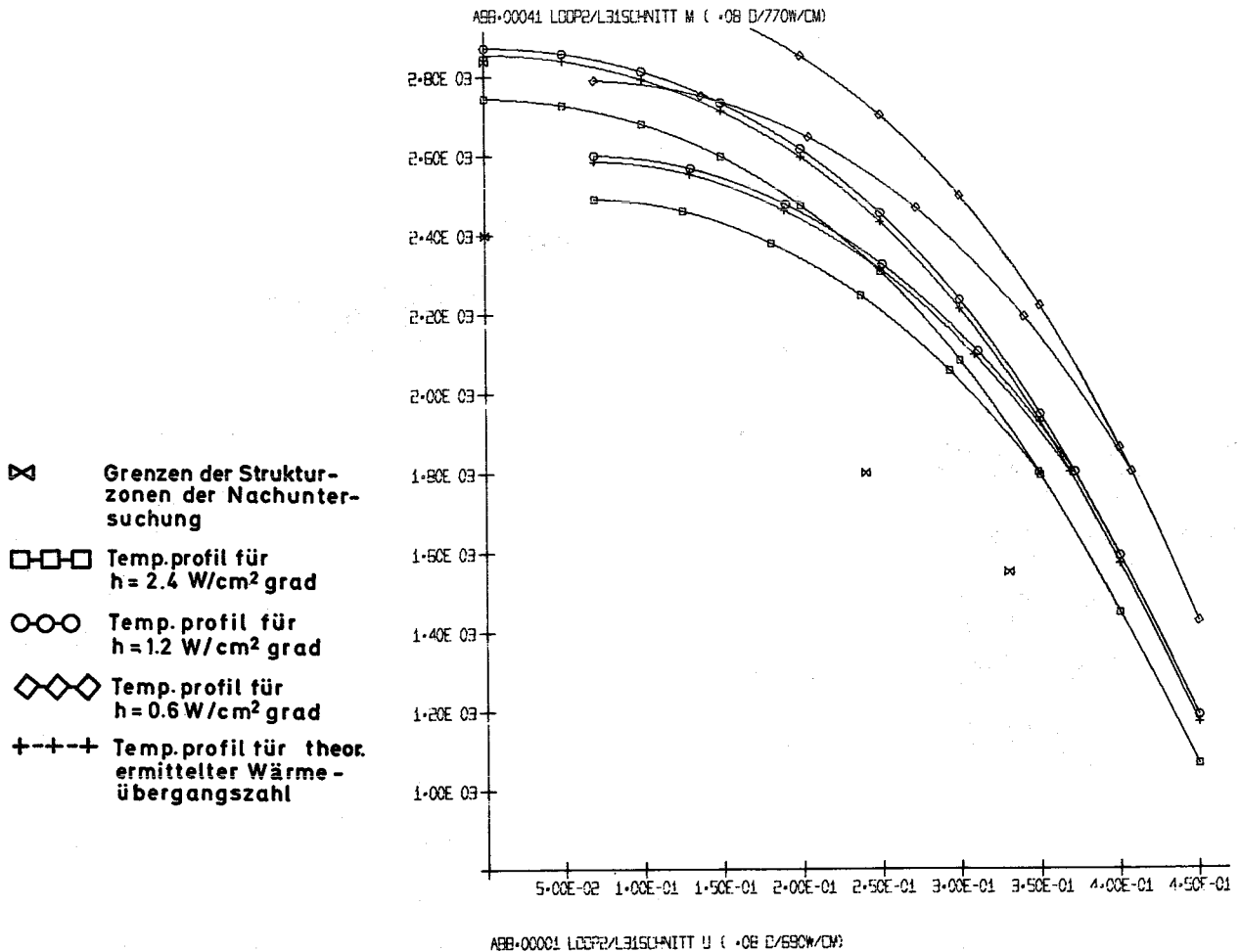
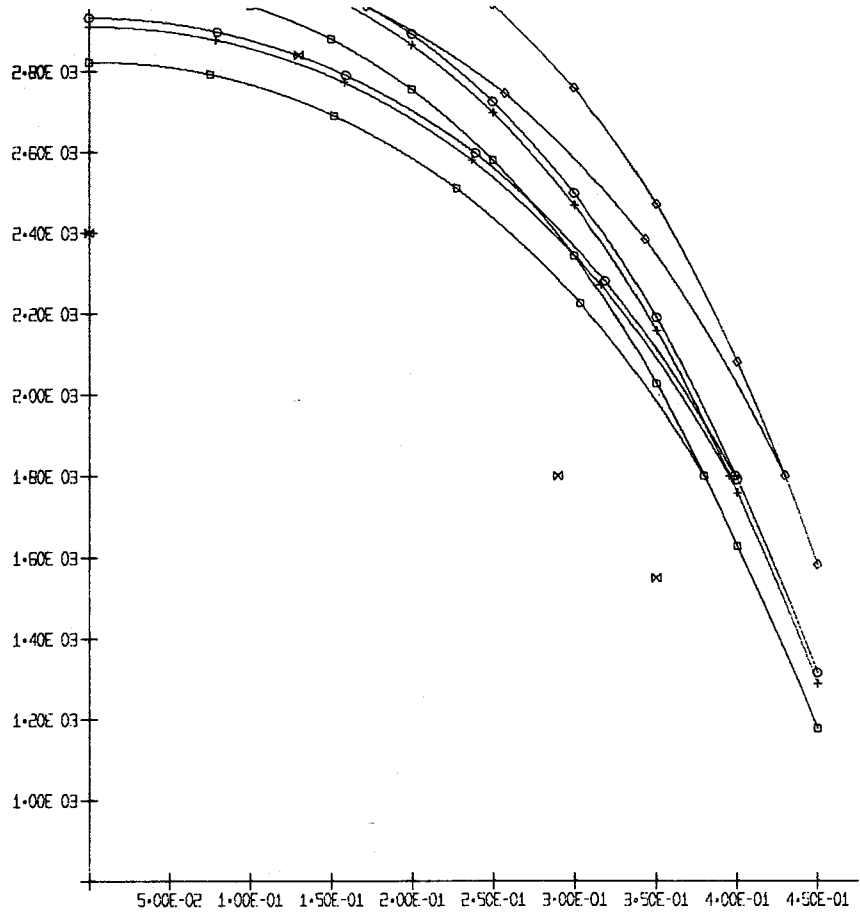
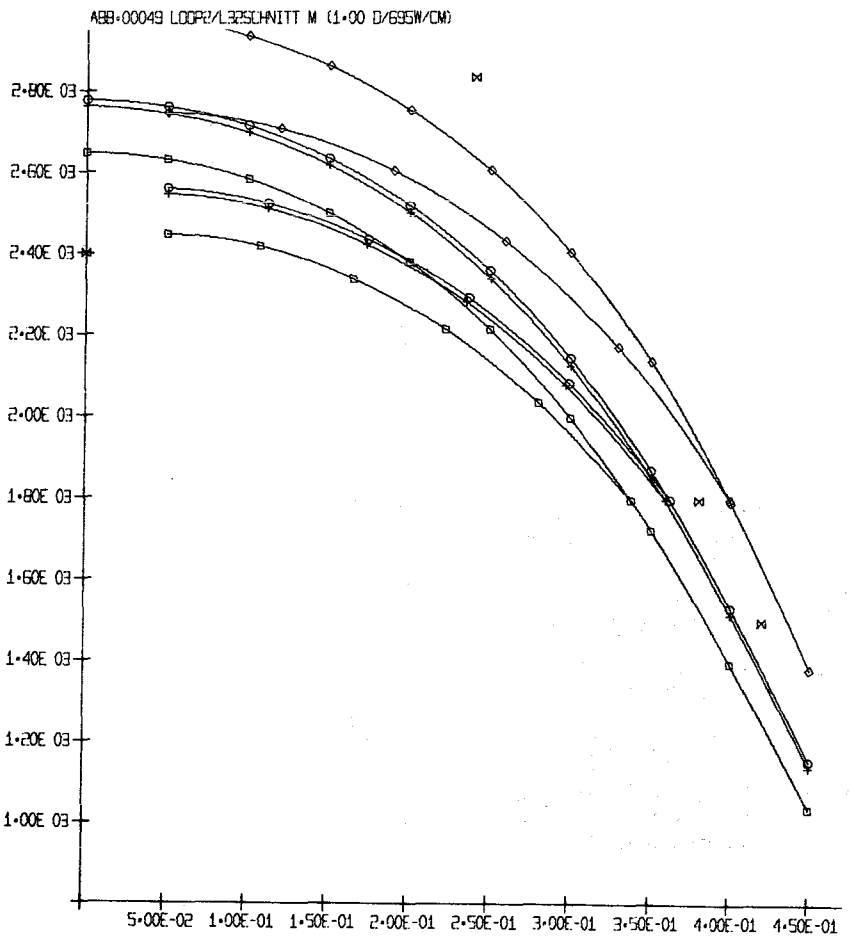
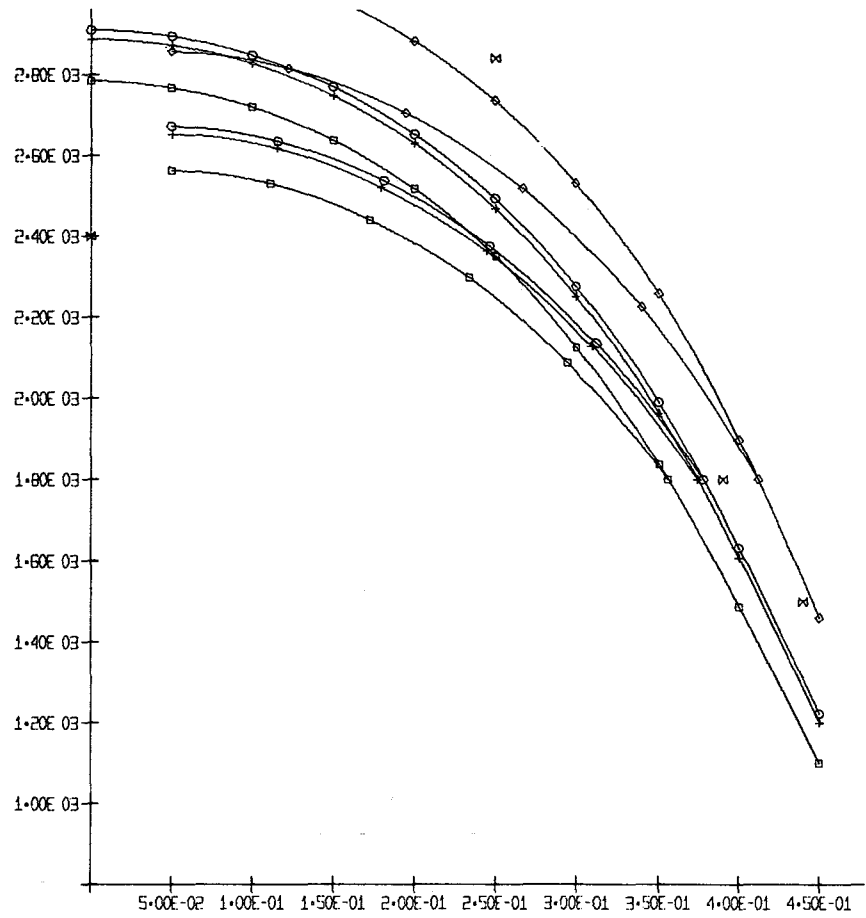


Abb.34: Thermische Analyse des Brennstabes L 31



- ⊗ Grenzen der Struktur-
zonen der Nachunter-
suchung
- Temp.profil für
 $h = 2.4 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- Temp.profil für
 $h = 1.2 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- ◇-◇-◇ Temp.profil für
 $h = 0.6 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- +--+ Temp.profil für theor.
ermittelter Wärme-
übergangszahl

ABB-00049 L00P2/L3ZSCHNITT U (1.00 D/665W/CM)

Abb.35: Thermische Analyse des Brennstabes L 32

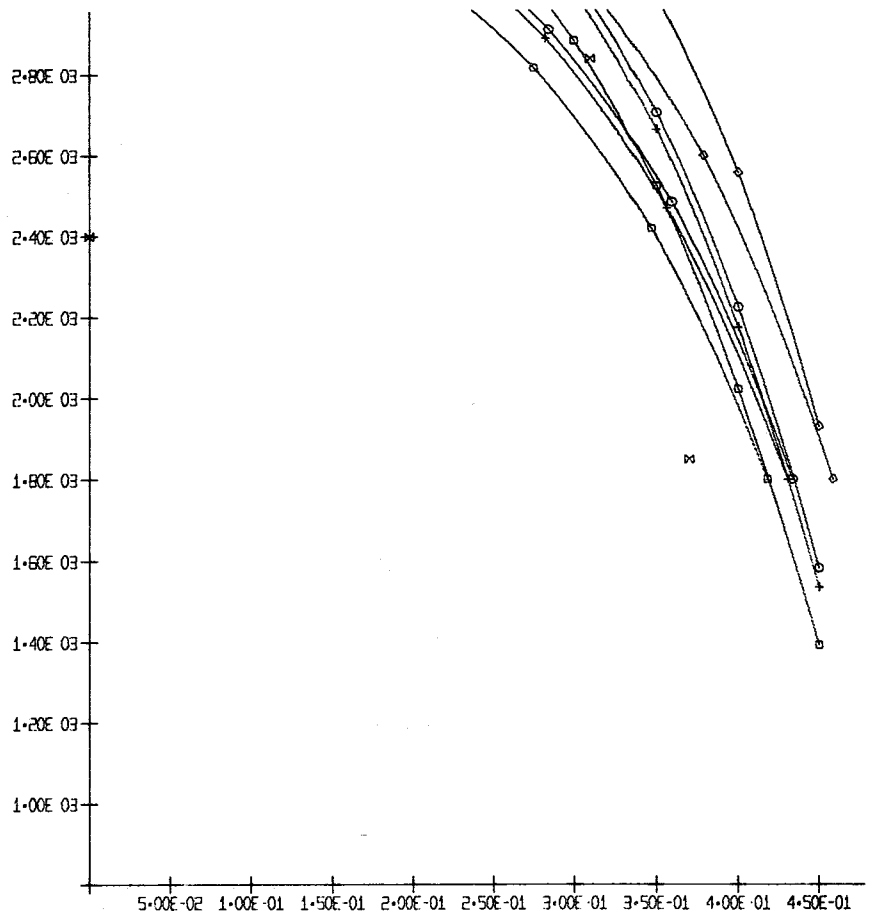


ABB-00059 LÖDFZ/L33SCHNITT M (·0070/99W/CM)

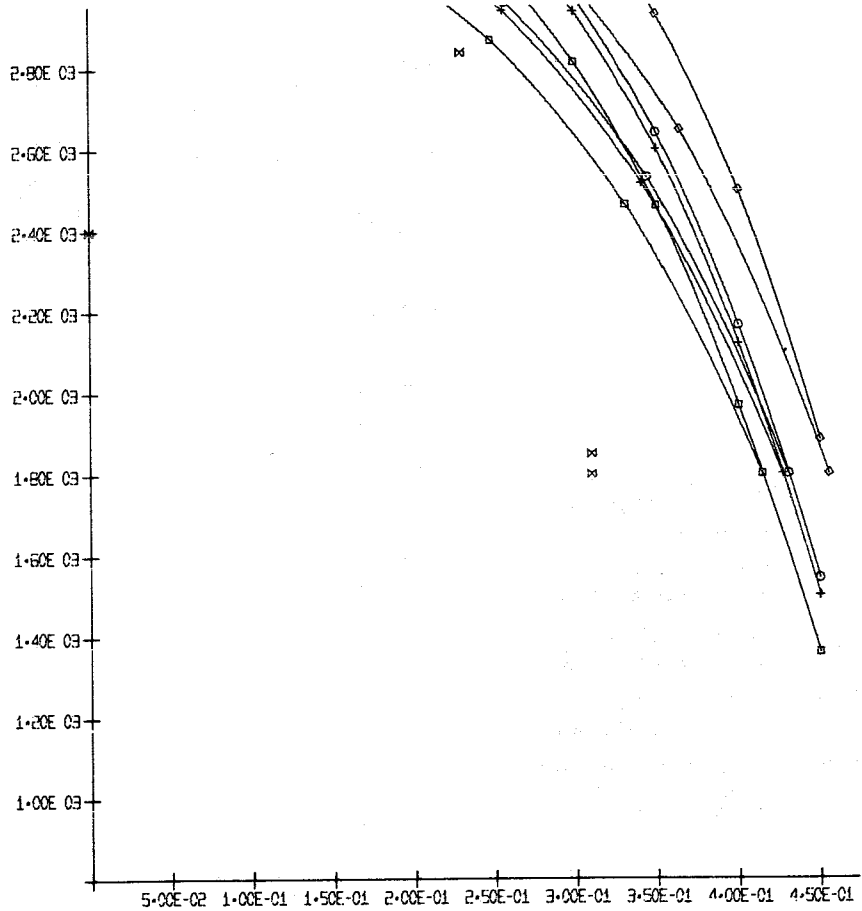


ABB-00004 LÖDFZ/L33SCHNITT U (·0070/97W/CM)

- ⊗ Grenzen der Struktur-
zonen der Nachunter-
suchung
- Temp.profil für
h = 2.4 W/cm² grad
- Temp.profil für
h = 1.2 W/cm² grad
- ◇-◇-◇ Temp.profil für
h = 0.6 W/cm² grad
- +--+--+ Temp.profil für theor.
ermittelter Wärme-
übergangszahl

Abb.36: Thermische Analyse des Brennstabes L 33

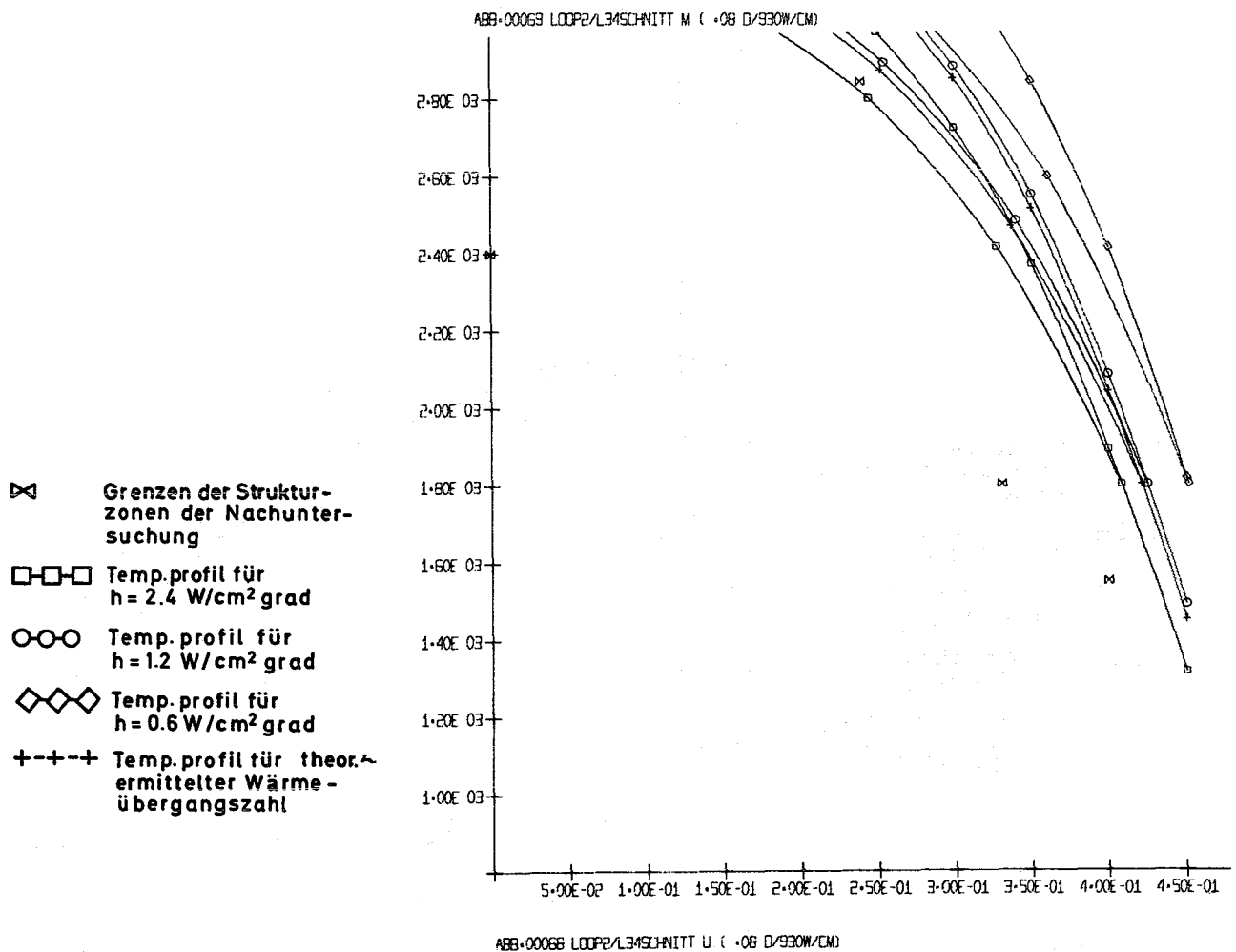
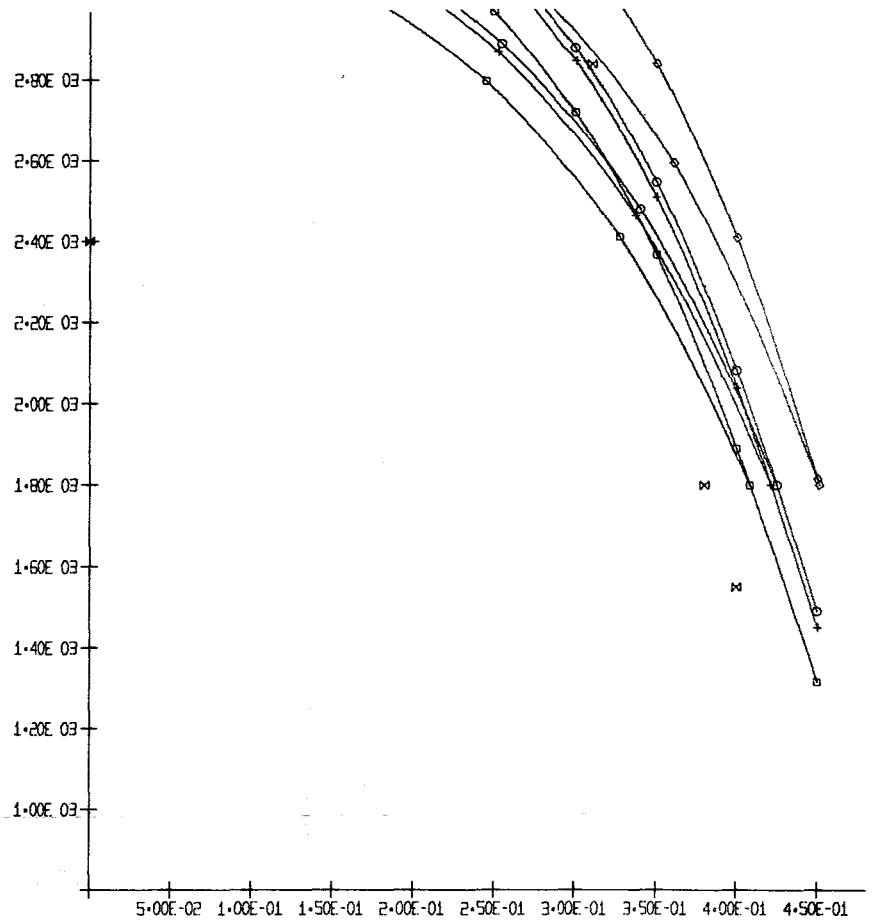


Abb.37: Thermische Analyse des Brennstabes L 34

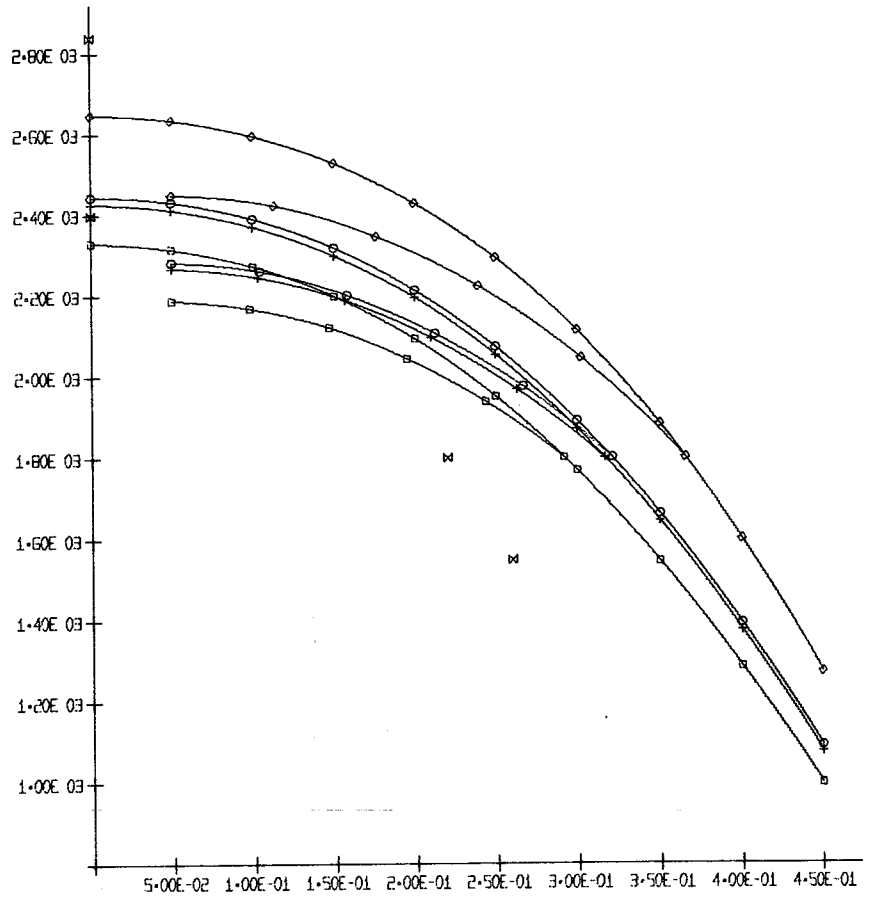


ABB-00011 LOOP2/L35SCHNITT M (·08 D/550W/CM)

- ⊠ Grenzen der Struktur-
zonen der Nachunter-
suchung
- Temp.profil für
h = 2.4 W/cm² grad
- Temp.profil für
h = 1.2 W/cm² grad
- ◇-◇-◇ Temp.profil für
h = 0.6 W/cm² grad
- +--+--+ Temp.profil für theor.
ermittelter Wärme-
übergangszahl

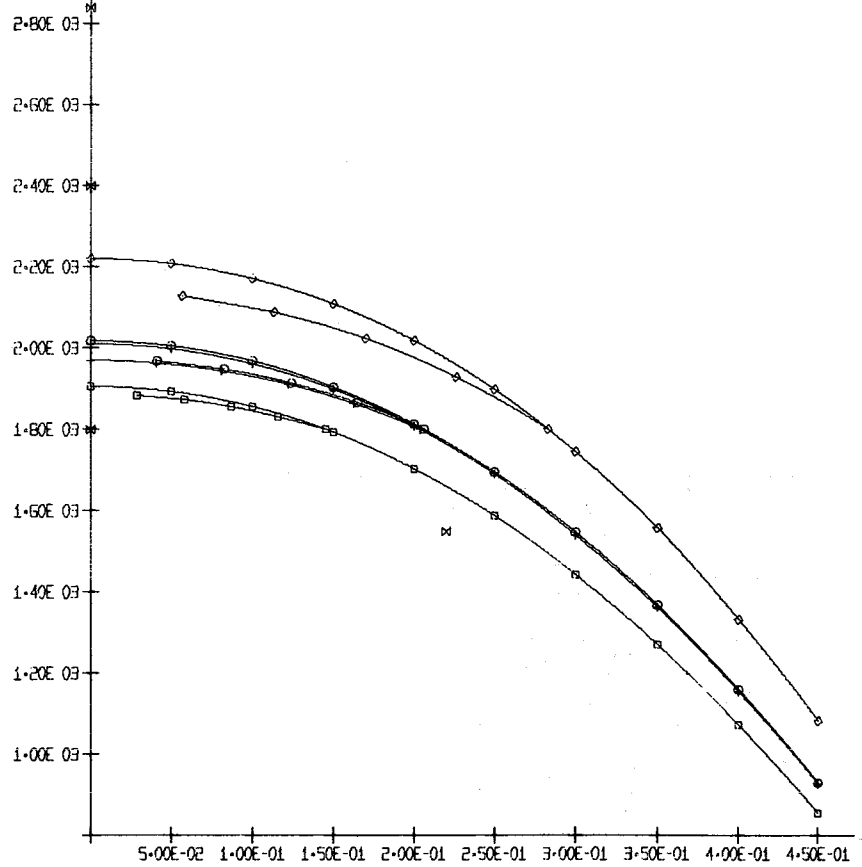


ABB-00010 LOOP2/L35SCHNITT U (·08 D/465W/CM)

Abb.38: Thermische Analyse des Brennstabes L 35

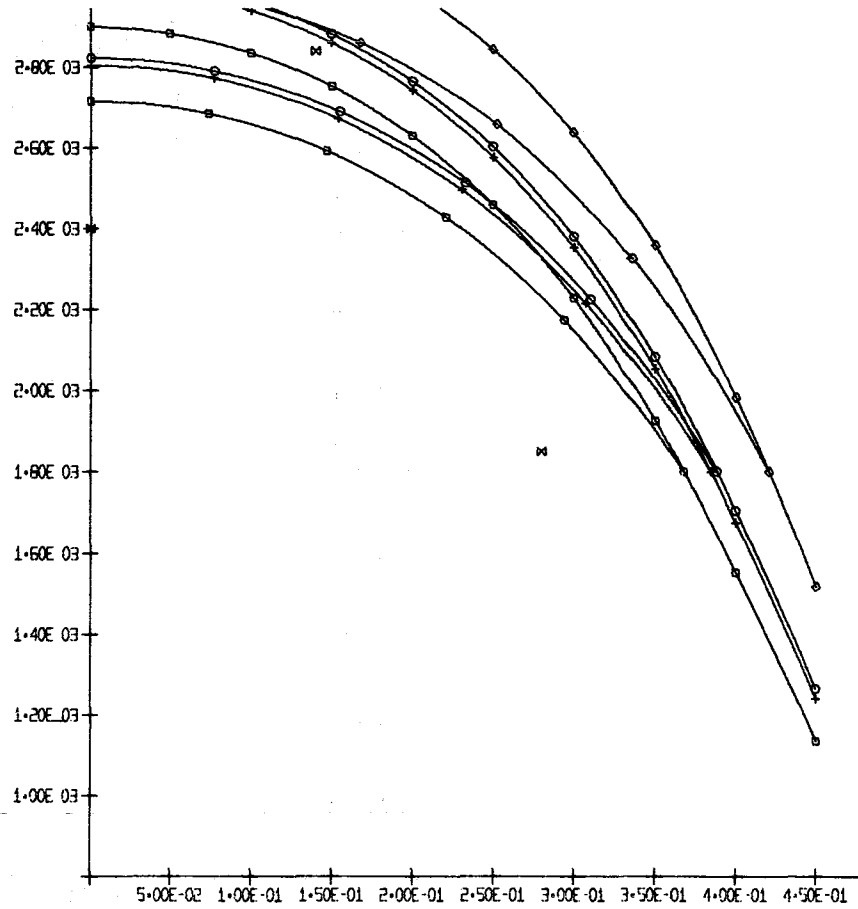
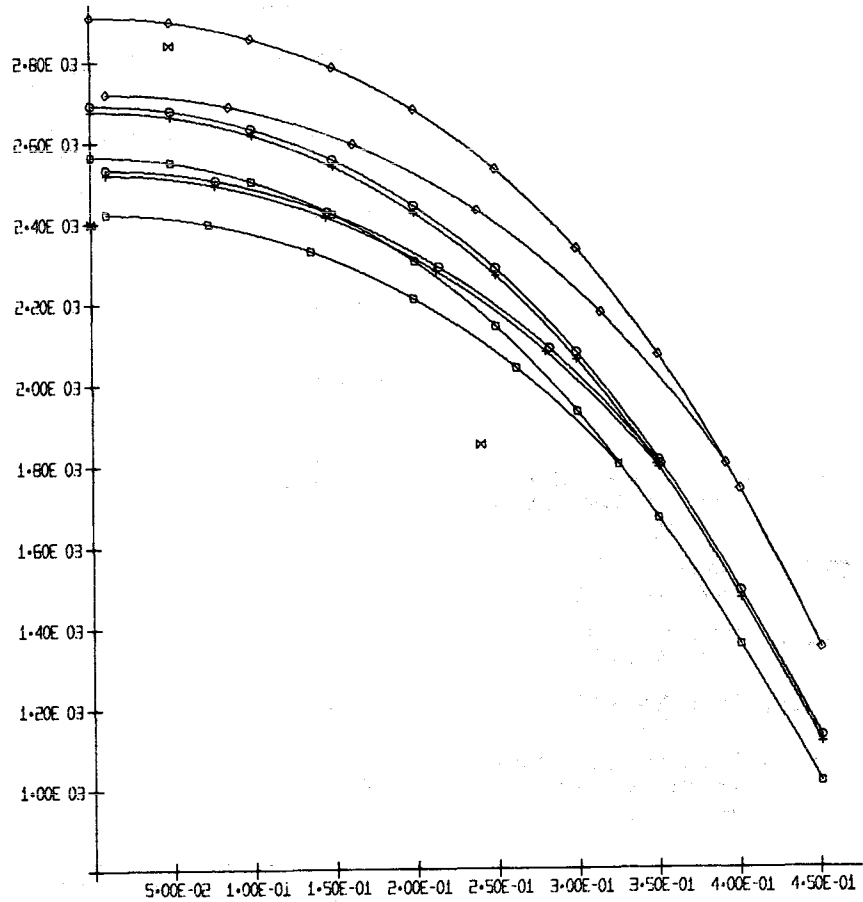


ABB-00029 LÖDFZ/L3FSCHNITT M (+008D/730W/CM)



- ⊗ Grenzen der Struktur-
zonen der Nachunter-
suchung
- Temp.profil für
 $h = 2.4 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- Temp.profil für
 $h = 1.2 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- ◇-◇-◇ Temp.profil für
 $h = 0.6 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- +--+--+ Temp.profil für theo.
ermittelter Wärme-
übergangszahl

ABB-00028 LÖDFZ/L3FSCHNITT U (+008D/640W/CM)

Abb.39: Thermische Analyse des Brennstabes L 36

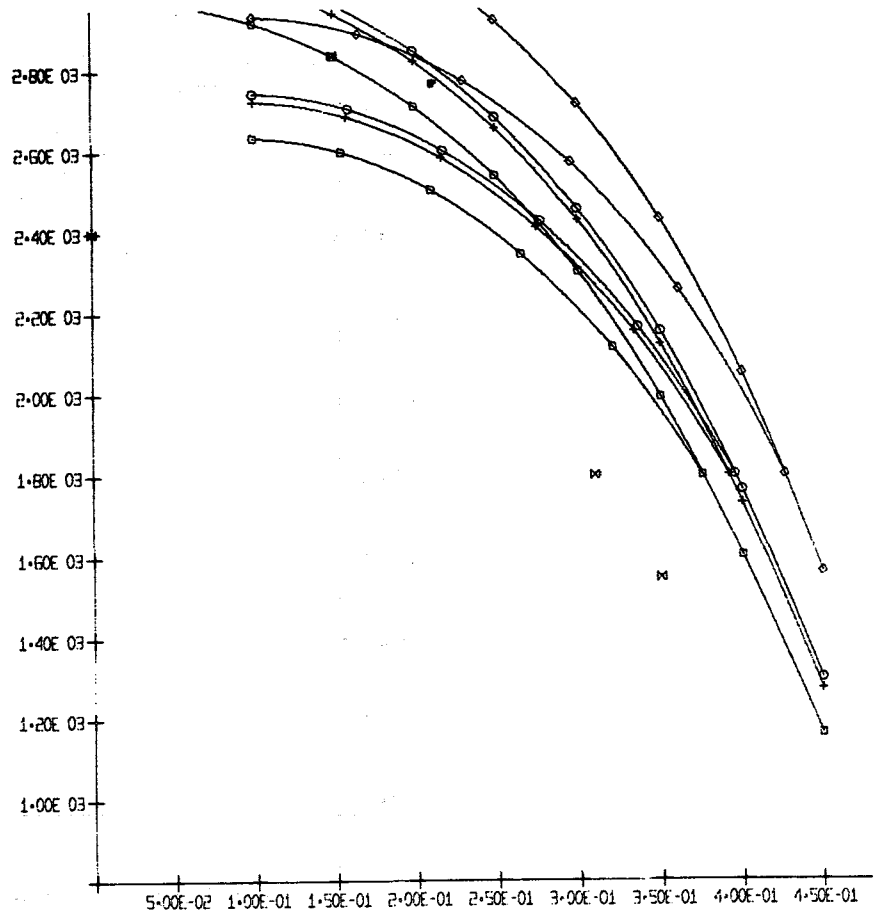


ABB-00043 L00P2/L3/SCHNITT M (+08 D/750W/CM)

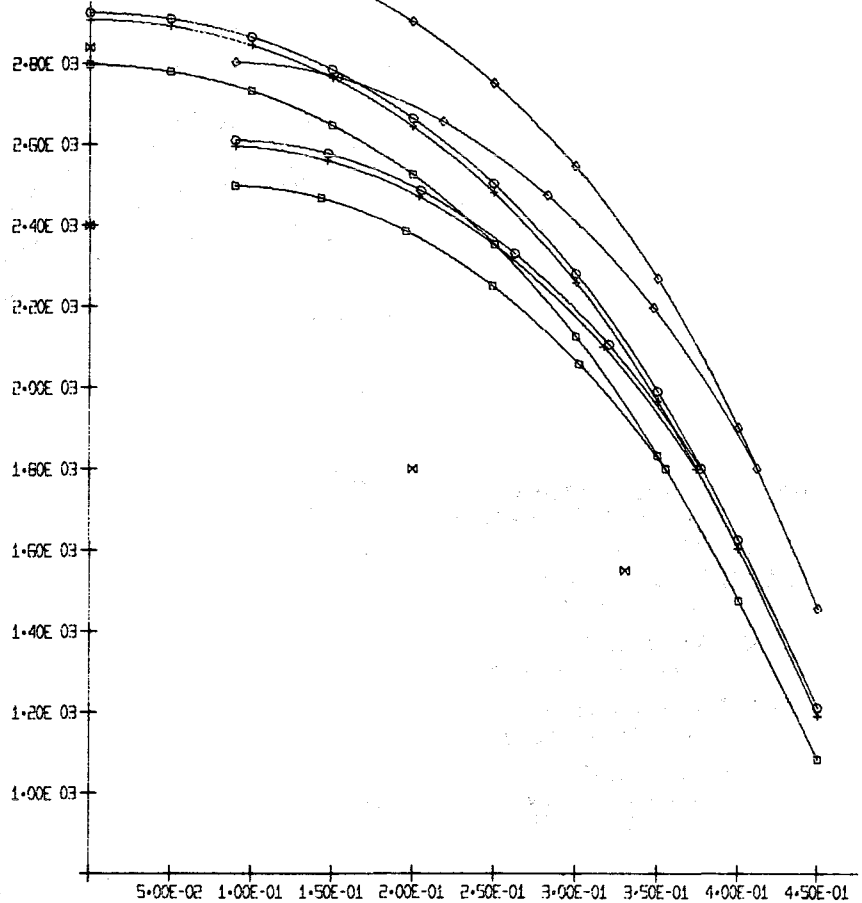


ABB-00042 L00P2/L3/SCHNITT L (+08 D/110W/CM)

- ⊗ Grenzen der Struktur-
zonen der Nachunter-
suchung
- Temp.profil für
 $h = 2.4 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- Temp.profil für
 $h = 1.2 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- ◇-◇-◇ Temp.profil für
 $h = 0.6 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- +--+ Temp.profil für theor.
ermittelter Wärme-
übergangszahl

Abb.40: Thermische Analyse des Brennstabes L37

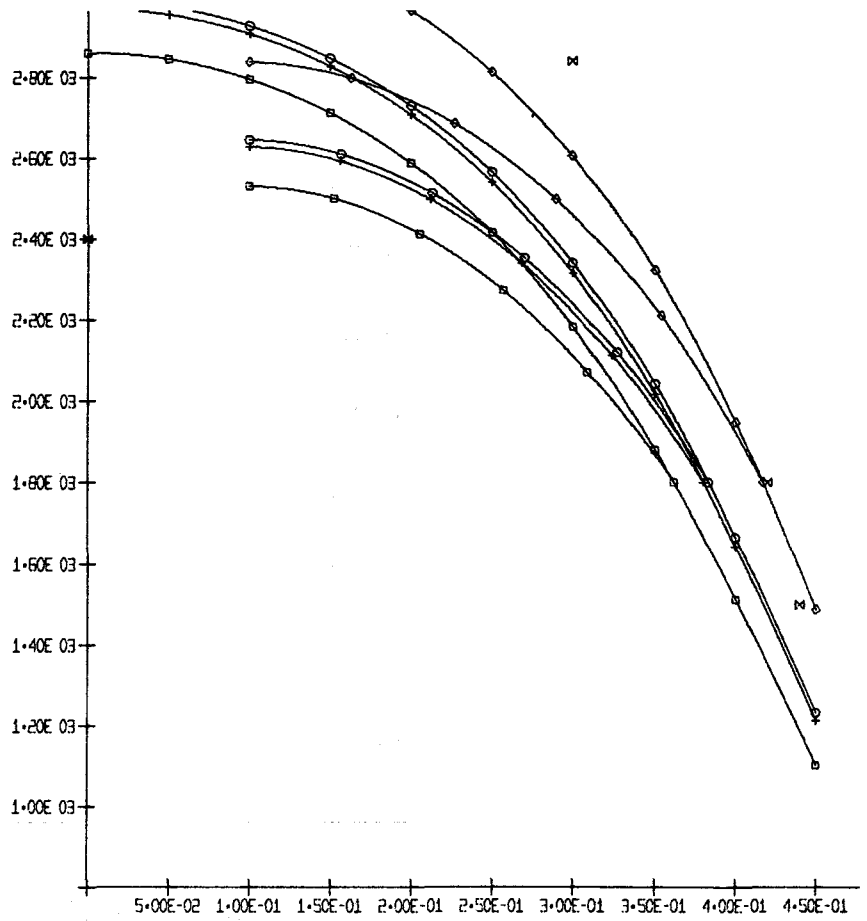


ABB-00051 LOOP2/LABSCHNITT M (1.00 D/730W/CM)

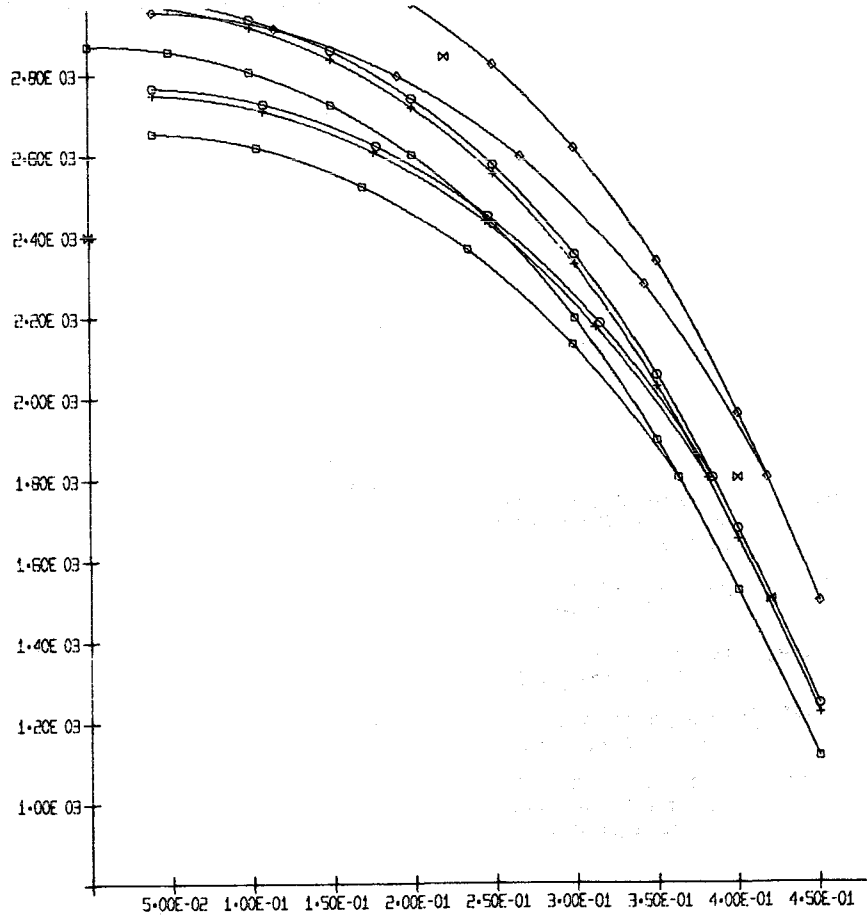


ABB-00050 LOOP2/LABSCHNITT U (1.00 D/730W/CM)

- ⊠ Grenzen der Struktur-
zonen der Nachunter-
suchung
- Temp.profil für
 $h = 2.4 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- Temp.profil für
 $h = 1.2 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- ◇-◇-◇ Temp.profil für
 $h = 0.6 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- +--+ Temp.profil für theo-
ermittelter Wärme-
übergangszahl

Abb.41: Thermische Analyse des Brennstabes L 38

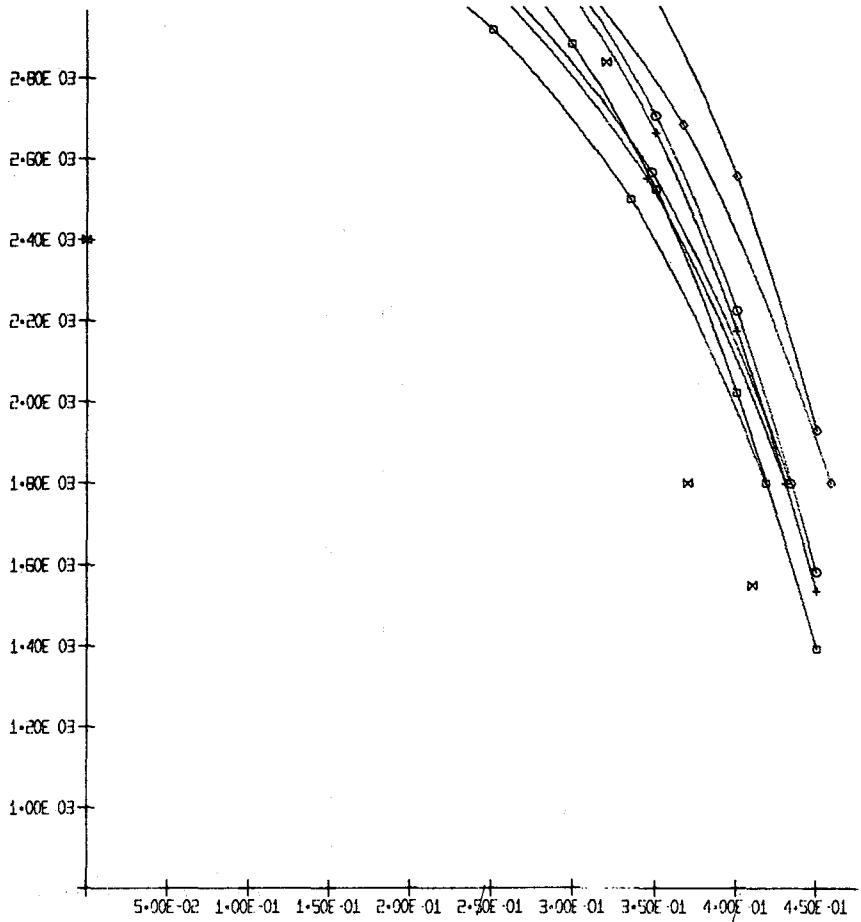


ABB-00071 LÖDFZ/LÖFSCHNITT M (+08 D/333W/CM)

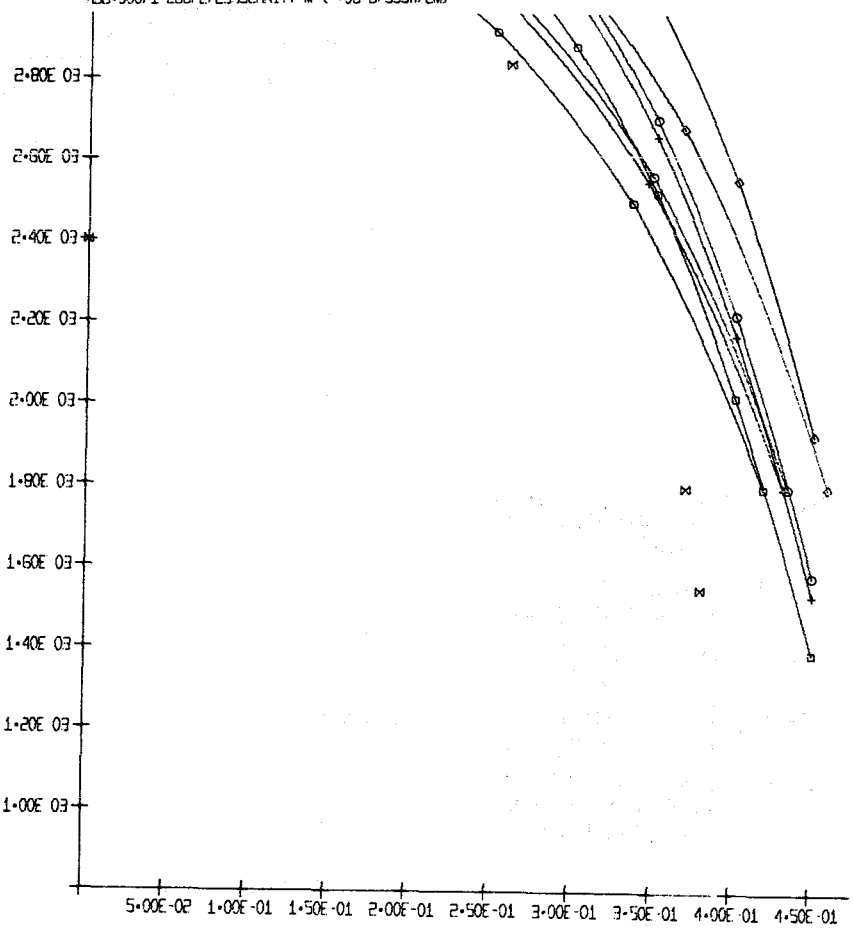


ABB-00070 LÖDFZ/LÖFSCHNITT U (+08 D/333W/CM)

- ⊗ Grenzen der Struktur-
zonen der Nachunter-
suchung
- Temp.profil für
 $h = 2.4 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- Temp.profil für
 $h = 1.2 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- ◇-◇-◇ Temp.profil für
 $h = 0.6 \text{ W/cm}^2 \text{ grad}$
- +--+--+ Temp.profil für theor.
ermittelter Wärme-
übergangszahl

Abb.42: Thermische Analyse des Brennstabes L 39