

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

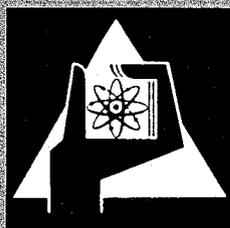
August 1971

KFK 1239

Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung
der UO_2 -Brennstab-Prüflinge
in der FR 2-Kapsel-Versuchsgruppe 3

D. Geithoff, D. Freund, K. Kummerer



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

August 1971

KFK 1239

Institut für Material- und Festkörperforschung

Projekt Schneller Brüter

Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung der UO_2 -Brennstab-
Prüflinge in der FR 2-Kapsel-Versuchsgruppe 3

von

D. Geithoff, D. Freund, K. Kummerer

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

3.9.1971

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

Die in diesem Bericht beschriebenen Bestrahlungsversuche basieren auf der Zusammenarbeit mehrerer Arbeitsgruppen im Kernforschungszentrum. Die vielfältige Mühe und Sorgfalt aller Beteiligten sei ausdrücklich anerkannt. Auch danken wir allen, die unmittelbar zur Abfassung dieser Dokumentation beitrugen, insbesondere Herrn W. Ernst für die Ausarbeitung der Faltblätter und grafischen Darstellungen und Frau B. Hauth für die Reinschrift des Manuskriptes.

30. Juli 1971

D. Geithoff, D. Freund, K. Kummerer

KURZFASSUNG

Im Rahmen der FR 2-Kapselversuchsgruppe 3 kamen 34 Brennstabprüflinge im thermischen Fluß des FR 2 zur Bestrahlung. Die Prüflinge enthielten UO_2 -Brennstoff in Tablettenform oder als einvibrierte Partikel. Die Umhüllung war aus Edelstahl. In einigen Proben war CeO_2 zur chemischen Simulation von PuO_2 zugesetzt worden. Bei Stabileistungen bis zu 700 W/cm und einer Hüllrohrtemperatur um 600 °C wurden Abbrände bis 85 MWd/kg M erreicht. Die Nachuntersuchung der Prüflinge weist typische Strukturveränderungen im Brennstoff (Zentralloch, Radialrisse) auf, während die Hülle unbeeinflusst blieb.

Der vorliegende Bericht stellt eine Dokumentation dar, in der alle Einzelheiten über die Versuchsziele, die Auslegung, Konstruktion und Spezifikation der Prüflinge, über die Probenherstellung und ihre Prüfung vor der Bestrahlung, die gesamte Bestrahlungsgeschichte sowie schließlich die zerstörungsfreie und zerstörende Nachuntersuchung der bestrahlten Stäbe zusammengestellt sind.

A B S T R A C T

In an irradiation experiment called "Capsule Group No. 3" 34 fuel pins were irradiated in a thermal flux in the FR 2-Reactor. The pins contained UO_2 -pellets or vibrocompacted UO_2 -particles as fuel with stainless steel cladding. In some specimens CeO_2 had been added for chemical simulation of PuO_2 .

At rod powers up to 700 W/cm and cladding temperatures around 600°C burnups up to 85 MWd/kg M were achieved. Postirradiation examination of the pins showed the typical restructuring of the fuel (formation of central voids, radial cracks) while there were no visible effects on the cladding.

This report is a documentation in which all details on the following subjects are compiled:

- aim of the experiment
- pin design and specification
- preparation of the specimens
- pre-irradiation testing
- irradiation history
- nondestructive and destructive postirradiation examination

<u>Inhalt:</u>	Seite
1. Einführung	1
2. Aufgabenstellung und Versuchsziel	3
3. Auslegung der Versuchsgruppe	5
4. Konstruktion der Prüflinge und Spezifikationen	7
4.1 Der Aufbau der Brennstäbe	7
4.2 Brennstoffspezifikationen	7
4.3 Spezifikationen für die Hülle	12
4.4 Brennstabspezifikationen	12
5. Herstellung der Prüflinge	13
5.1 Ausgangspulver für die Brennstoffherstellung	14
5.2 Tablettenherstellung	14
5.3 Herstellung des Pulverbrennstoffes	20
5.4 Nachweis der Brennstoffeigenschaften	23
5.5 Hüll- und Strukturmaterial	29
5.6 Hüllrohrprüfung	31
5.7 Herstellung der Stäbe mit Tablettenbrennstoff	32
5.8 Herstellung der Stäbe mit vibriertem Brennstoff	46
5.9 Prüfungen an den fertigen Stäben	46
6. Bestrahlungseinrichtung	48
7. Ablauf der Bestrahlung	53
7.1 Reaktorzyklen	53
7.2 Neutronenfluß	53
7.3 Temperatur und Stabileistung	57
7.4 Thermische Abbrandberechnung	59
8. Transport und Demontage der KVE	75
9. Zerstörungsfreie Untersuchung	75
9.1 Äußere Vermessung	75
9.2 Durchleuchtung	76
9.3 γ -Profile und γ -Spektren	77
10. Spaltgasbestimmungen	78
11. Keramografie	83
12. Radiochemische Abbrandbestimmungen	84
13. Dokumentation der zerstörungsfreien und keramografischen Nachuntersuchung	85
14. Schlußfolgerungen	88
Literatur	89

1. Einführung

Die Entwicklungsarbeiten für Brennelemente schneller Brutreaktoren im Kernforschungszentrum Karlsruhe enthalten ein umfangreiches Bestrahlungsprogramm für Brennstoffe, Hüllmaterial und Brennstabproben. Die ersten Brennstabbestrahlungsversuche fanden im Karlsruher Forschungsreaktor FR 2 statt und zwar ausschließlich an Proben mit oxidischem Brennstoff und Edelstahlumhüllung. Im FR 2 gibt es zwei Typen von Versuchseinrichtungen, die für Stabbestrahlungen geeignet sind, nämlich

- das Helium-Loop und
- die Kapselversuchseinsätze (KVE).

Während im He-Loop nur Einzelproben nacheinander zur Bestrahlung kommen können, ist es möglich, auf Brennelement- oder Isotopenkanalpositionen des FR 2 nebeneinander ganze Serien von KVE gleichzeitig zu bestrahlen. Die ersten "Kapselbestrahlungen" im FR 2 sind in die Versuchsgruppen 1 bis 5 eingeteilt gemäß folgender Übersicht [1]:

FR 2-Kapsel-Versuchsgruppe	Anzahl der Stabproben	Brennstoff
1	24	UO ₂ , UO ₂ -Mo
2	31	UO ₂ , UO ₂ -CeO ₂ , UO ₂ -CeO ₂ -Mo
3	34	UO ₂ , UO ₂ -CeO ₂
4a	28	UO ₂ -PuO ₂
4b	35	UO ₂ -PuO ₂
4c	12	UO ₂ -PuO ₂
5a	9	UO ₂ -PuO ₂
5b	18	UO ₂ -PuO ₂

Dieser KFK-Bericht faßt alle Einzelheiten für die 34 Prüflinge der Kapselversuchsgruppe 3 zusammen. Er beginnt mit der Aufgabenstellung und der Versuchsauslegung, beschreibt Spezifikationen und Herstellung der Prüflinge sowie die Details des tatsächlichen Bestrahlungsablaufes selbst und stellt schließlich die gesamte zerstörungsfreie und keramografische Nachuntersuchung in den Heißen Zellen in einer umfassenden Dokumentation dar. Die Zusammenstellung basiert auf einer Vielzahl von internen Niederschriften und persönlichen Mitteilungen. Die Hauptarbeit in all ihren Phasen

verteilte sich auf die Jahre 1965 bis 1970, wobei erste Überlegungen in das Jahr 1964 zurückreichen und die abschließende Zusammenfassung und Auswertung im Jahre 1971 erfolgt.

Diese Zeitspanne von etwa 7 Jahren ist durchaus charakteristisch für ein solches vielfältiges und umfangreiches Unternehmen. In dieser langen Zeit haben sich viele Personen in den verschiedensten Arbeitsbereichen damit befaßt. In der nachfolgenden Übersicht ist der Zeitablauf grob dargestellt, außerdem sind die für jeden Teilaspekt hauptverantwortlichen Stellen bzw. Personen angegeben:

Zeitraum	Teilarbeit	Institution und Hauptbeteiligte
1964/65	Vorüberlegungen und Versuchsauslegung	TAR, Kummerer, Karsten
1965/67	Bestrahlungskapseln	TRE, Bojarsky, Häfner
1966	Spezifikationen	TAR, Karsten, Kummerer
1966	Herstellung der Prüflinge	Firma Nukem, Wolfgang/Hanau
1966/68	Organisation der Bestrahlung und Betreuung	TRE, Häfner TAR, Gerken
1967/69	Bestrahlung im FR 2	Abteilung Reaktorbetrieb FR 2
1966/70	Organisation der Nachuntersuchung und Betreuung	IMF, Geithoff
1968/70	Zerstörungsfreie Nachuntersuchung	RB/Z, Scheeder, Enderlein
1968/70	Spaltgasuntersuchungen	RB/CuM, Gräbner
1968/70	Keramografie in den Heißen Zellen	RB/Z, Krautwedel, Pejša
1971	Zusammenfassung und Dokumentation der Ergebnisse	IMF, Geithoff, Freund, Kummerer

Es handelt sich hier um einen Bestrahlungsversuch, dessen Konzipierung ziemlich am Anfang unserer Brennelement-Entwicklungsarbeiten steht, wobei der damalige Kenntnisstand und die damaligen experimentellen Möglichkeiten und Randbedingungen zu beachten sind. Naturgemäß gab es eine Weiterentwicklung während der Versuchsvorbereitung und während des Versuches, in

deren Folge Versuchsschwerpunkte aufgegeben, verschoben oder neu gesetzt wurden. Anfänglich z.B. war die vorgesehene Prüflingsanzahl mit 64 Stück weit größer. Bei der tatsächlichen Durchführung des Versuches wurden dann die meisten Prüflinge mit CeO_2 -Zusatz weggelassen zugunsten der früher einsetzenden Bestrahlungen an Pu-haltigen Prüflingen (Kapselversuchsgruppe 4a). Aus dem gleichen Grund wurden auch nur etwa die Hälfte der ursprünglich vorgesehenen UO_2 -Prüflinge tatsächlich gefertigt und bestrahlt.

Alle diese Einzelheiten interessieren heute nur mehr den Forschungs-Historiker. Wir beschränken uns daher in der weiteren Darstellung auf die tatsächlich zur Bestrahlung gelangten 34 Prüflinge dieser Versuchsgruppe. Wir weisen aber darauf hin, daß in einer derartig komplexen wissenschaftlich-technologischen Forschungsaufgabe Überflüssigkeiten und Irrwege unvermeidlich sind. Sie tragen umgekehrt als "Regulativum im Planspiel" sogar wesentlich zum Erfolg bei.

2. Aufgabenstellung und Versuchsziel

Die Kapsel-Versuchsgruppe 3 bringt stabförmige Prüflinge mit Oxidbrennstoff zur Bestrahlung, wobei sowohl im Aufbau des Prüflings selbst als auch in den Bestrahlungsbedingungen eine Simulation der Verhältnisse für Brennstäbe in schnellen Reaktoren angestrebt wird. Die wesentlichen Unterschiede im Vergleich zu echten Schnellbrüter-Brennstäben liegen in folgenden Beschränkungen:

- Die Stablänge der Kurzstäbe beträgt nur einen Bruchteil echter Brüterbrennstäbe.
- Der Kurzstab enthält keine axialen Brutstoff-Partien.
- Der Brennstoff enthält kein Plutonium. In nuklearer Hinsicht wird Pu durch U-235-Anreicherung ersetzt. 4 Stäbe enthalten außerdem CeO_2 als mögliche chemische Simulation des PuO_2 .
- Die Bestrahlung erfolgt in einem thermischen Fluß.
- Die Wärmeübertragung nach außen geschieht über stagnierendes Natrium.

Die Aufgabenstellung der Versuchsgruppe läßt sich folgendermaßen beschreiben:

- Es sollen Oxidstabproben unter simulierten Schnellbrüterbedingungen bis zu hohen Abbränden bestrahlt werden.
- Als Parametervariation wird Brennstoff-Form und Brennstoff-Dichte gewählt.
- Der Zielabbrand wird variiert.
- Nachdem sich die früheren Kapseltypen mit Pb-Bi-Legierung als Wärmeübertrager nicht bewährt hatten, wird nun ein neuer Kapseltyp mit Na als Übertragungsmedium am Prüfling erstmals erprobt.
- Es wird untersucht, ob sich CeO_2 als Simulation für PuO_2 in einem Mischoxid sinnvollerweise verwenden läßt.
- Die experimentellen Erfahrungen dienen schließlich der Vorbereitung von Bestrahlungen PuO_2 -haltiger Prüflinge in den FR 2-Kapsel-Versuchsgruppen 4 und 5.

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

- Bleiben die Stabprüflinge bis zum Zielabbrand intakt ?
- Ändert sich die äußere Geometrie, erfolgt insbesondere eine Hüllaufweitung ?
- Wie ist die radiale und axiale Strukturverteilung im Brennstoff nach der Bestrahlung ?
- Wie bildet sich der Zentralkanal im Brennstoff aus ?
- Wie groß ist der Anteil des freigesetzten Spaltgases, welcher Anteil befindet sich in den geschlossenen Poren ?
- Wie ist die Verteilung der Spaltprodukte ?
- Wie sind die Einflüsse und Veränderungen durch den CeO_2 -Zusatz in einigen Proben ?
- Ist der neue Kapseltyp für hohe Abbrände geeignet ?

3. Auslegung der Versuchsgruppe

Die 34 Prüflinge der Versuchsgruppe haben gleichen Aufbau und gleiche äußere Abmessungen. Ihre Auslegung unterscheidet sich

- in der Brennstoffzusammensetzung: UO_2 oder UO_2-CeO_2
- in der Brennstoff-Form: Tabletten, Zylindermantel geschliffen oder ungeschliffen; Pulver zum Ein-vibrieren, gesintert oder geschmolzen
- in der Brennstoffdichte: 88 oder 93 % th.D. bei den Tabletten, 85 % th.D. beim vibrierten Pulver
- im Hüllmaterial: X4CrNiNb 2025 oder X8CrNiMoVNb 1613

Die Verteilung der 34 Prüflinge auf diese Auslegungsvarianten zeigt Tabelle I.

Die wesentlichen Bestrahlungsbedingungen sind durch Stableistung, Hüllwandtemperatur und Abbrand gegeben. Gemäß der Auslegung der Versuchsgruppe waren vorgesehen

- für die Temperatur an der Außenoberfläche der Hüllwand: maximal $700^{\circ}C$
- für die Stableistung: maximal 700 W/cm
- für den Abbrand: 10 - 80 MWd/kg M

Für die Bestrahlung waren normale Brennelement-Positionen des FR 2 vorgesehen. Der nuklearen Auslegungsrechnung wurde ein ungestörter thermischer Neutronenfluß von maximal $1 \cdot 10^{14}$ n/cm² sec zugrundegelegt. Für einen Brennstoffdurchmesser von 6,4 mm und einer UO_2 -Dichte von 90 % th.D. benötigt man (bei einem Abschwächungsfaktor von 0,85 in der Bestrahlungskapsel) eine U-235-Anreicherung von etwa 11,5 Gew.-%, um eine Stableistung von 600 W/cm zu erreichen [4]. Diese Anreicherung wurde für den Brennstoff aller Prüflingstypen festgesetzt. Da zur Zeit der Auslegung die Flußverhältnisse in den Bestrahlungspositionen nicht sehr genau bekannt waren und weiterhin die Flußabschwächung in der Bestrahlungseinrichtung und im Prüfling selbst nur aus etwas unsicheren theoretischen Überlegungen herzuleiten waren, wurde darauf verzichtet, für die einzelnen Prüflingstypen je nach ihrer unterschiedlichen UO_2 -Dichte eine gesonderte U-235-Anreicherung zu ermitteln.

Tabelle I: Einteilung und Auslegung der Versuchsgruppe

Prüflings- typ	Anzahl der Prüflinge	Einzel- bezeichnung	Brennstoff- zusammensetzung	Brennstoff-Form g = geschliffen u = ungeschliffen	Brennstoff- Dichte % th.D.	Hüllmaterial
A	5	2,6,10,14,AG	UO ₂	Tabletten, g	88	X4CrNiNb 2025
B	5	4,8,12,16,BU	UO ₂	Tabletten, u	88	
C	5	3,7,11,15,CG	UO ₂	Tabletten, g	93	
D	5	1,5,9,13,DU	UO ₂	Tabletten, u	93	
I	5	33,35,37,39,IS	UO ₂	Pulver, gesintert	85	X4CrNiNb 2025
K	5	34,36,38,40,KM	UO ₂	Pulver, geschmolzen	85	
L	1	L8	UO ₂ -CeO ₂	Tabletten, g	88	X8CrNiMoVNB 1613
	1	L9	UO ₂ -CeO ₂	Tabletten, g	93	
M	1	MS	UO ₂ -CeO ₂	Pulver, gesintert	85	X4CrNiNb 2025
	1	MM	UO ₂ -CeO ₂	Pulver, geschmolzen	85	

4. Konstruktion der Prüflinge und Spezifikationen

In diesem Abschnitt wird zuerst der technische Aufbau der Prüflinge beschrieben und anschließend die Spezifikationen für die Herstellung und Voruntersuchung. Die folgenden Unterkapitel verwenden Auszüge aus internen Notizen und Berichten [2, 3], die nicht veröffentlicht sind.

4.1 Der Aufbau der Brennstäbe

Die Stabprüflinge haben bei einer Gesamtlänge von 172 mm folgende Längenverteilung (von oben nach unten):

Oberer Endstopfen	21 mm	} 172 mm
Einsatzstück mit Sintermetallfilter	5 mm	
Spaltgasraum mit Druckfeder	42 mm	
Einsatzstück mit Rhodium-Plättchen	7 mm	
Isoliertablette	5 mm	
Brennstoffsäule	80 mm	
Unterer Endstopfen mit Rhodium-Plättchen	12 mm	

Der Außendurchmesser der Stäbe beträgt 7,4 mm bei einer Hüllwandstärke von 0,5 mm. Die Einzelheiten der Konstruktion sind in einer GFK-Werkstattzeichnung (Abb. 1) sowie in der zugehörigen technischen Ergänzung der Firma Nukem (Abb. 2) enthalten. Die Brennstoffsäule ist oben und unten durch Rh-Scheiben mit 1 mm Dicke abgeschlossen, wodurch die Aufwölbung des Neutronenflusses verhindert werden soll. Die Sintermetallfilter sollen den Brennstoffstaub vom Spaltgasraum bzw. vom Hohlraum im oberen Stopfen fernhalten. Die Feder im Spaltgasraum dient zur Transportsicherung vor der Bestrahlung. Die Prüflinge sind am oberen Endstopfen dauerhaft gekennzeichnet.

4.2 Brennstoffspezifikationen

4.2.1 Chemische Zusammensetzung

- Der Brennstoff in den Prüflingstypen A, B, C, D, I und K ist reines UO_2 .
- Der Brennstoff in den Prüflingstypen L und M ist ein UO_2 - CeO_2 -Gemisch mit 15 Mol-% CeO_2 . Der entsprechende Gewichtsanteil an CeO_2 ist spezifiziert zu
$$10,1 \pm 0,1 \text{ Gew.-% } CeO_2$$
- Das O/U-Verhältnis in UO_2 soll $2,0 \pm 0,015$ betragen.

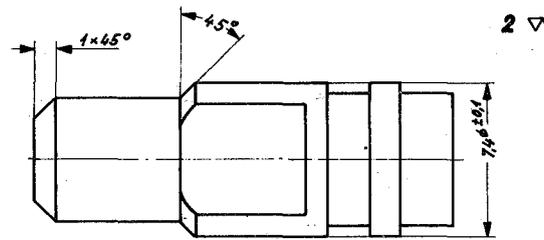
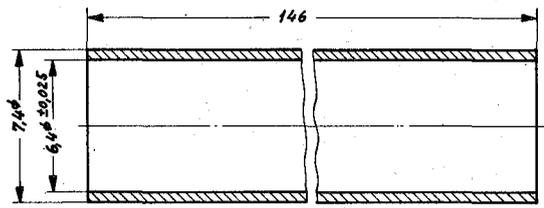
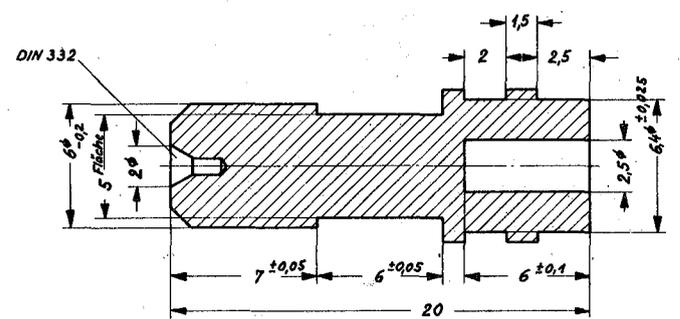
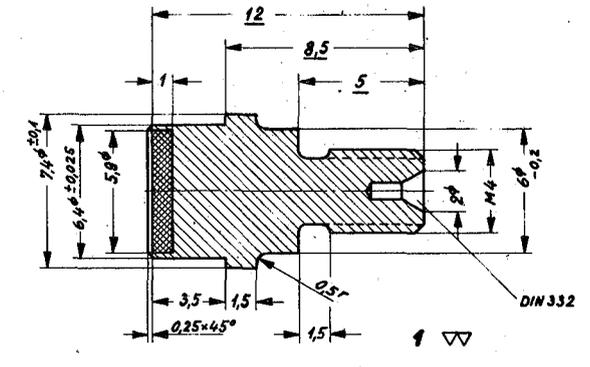
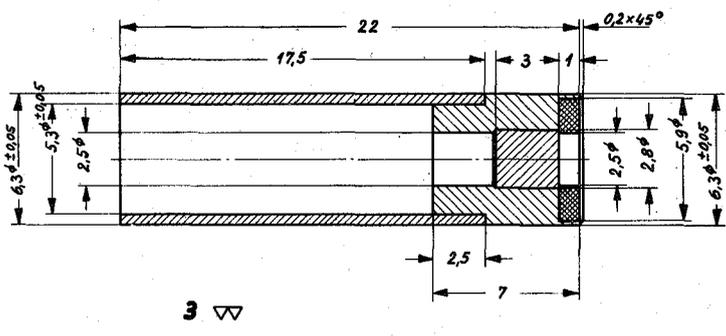
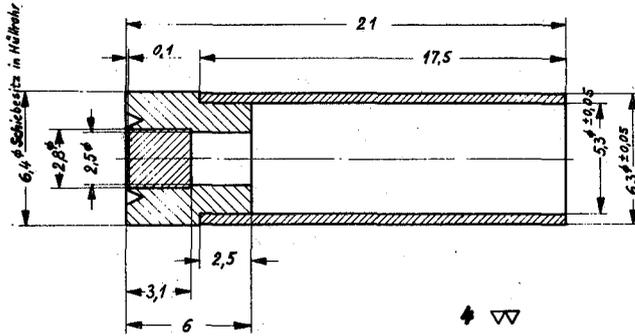
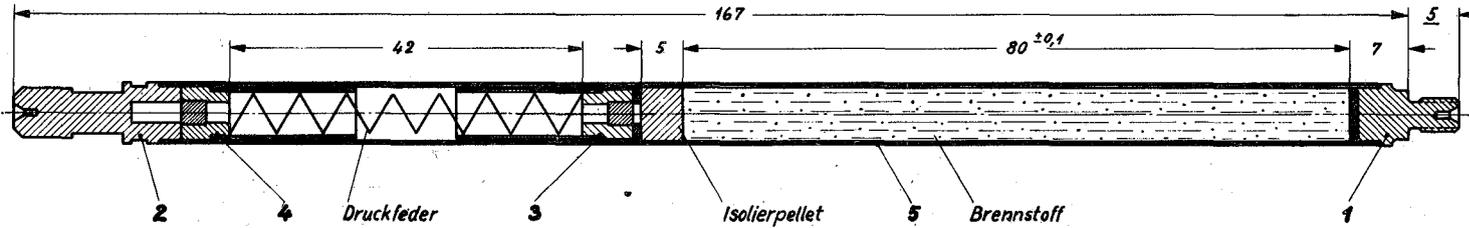


Abb. 1 BE - Prüfling für FR 2 - Kapsel - Versuchsgruppe 3
(GFK - Zeichnung TA 2K - 16 - 07 - 2 - 1560)

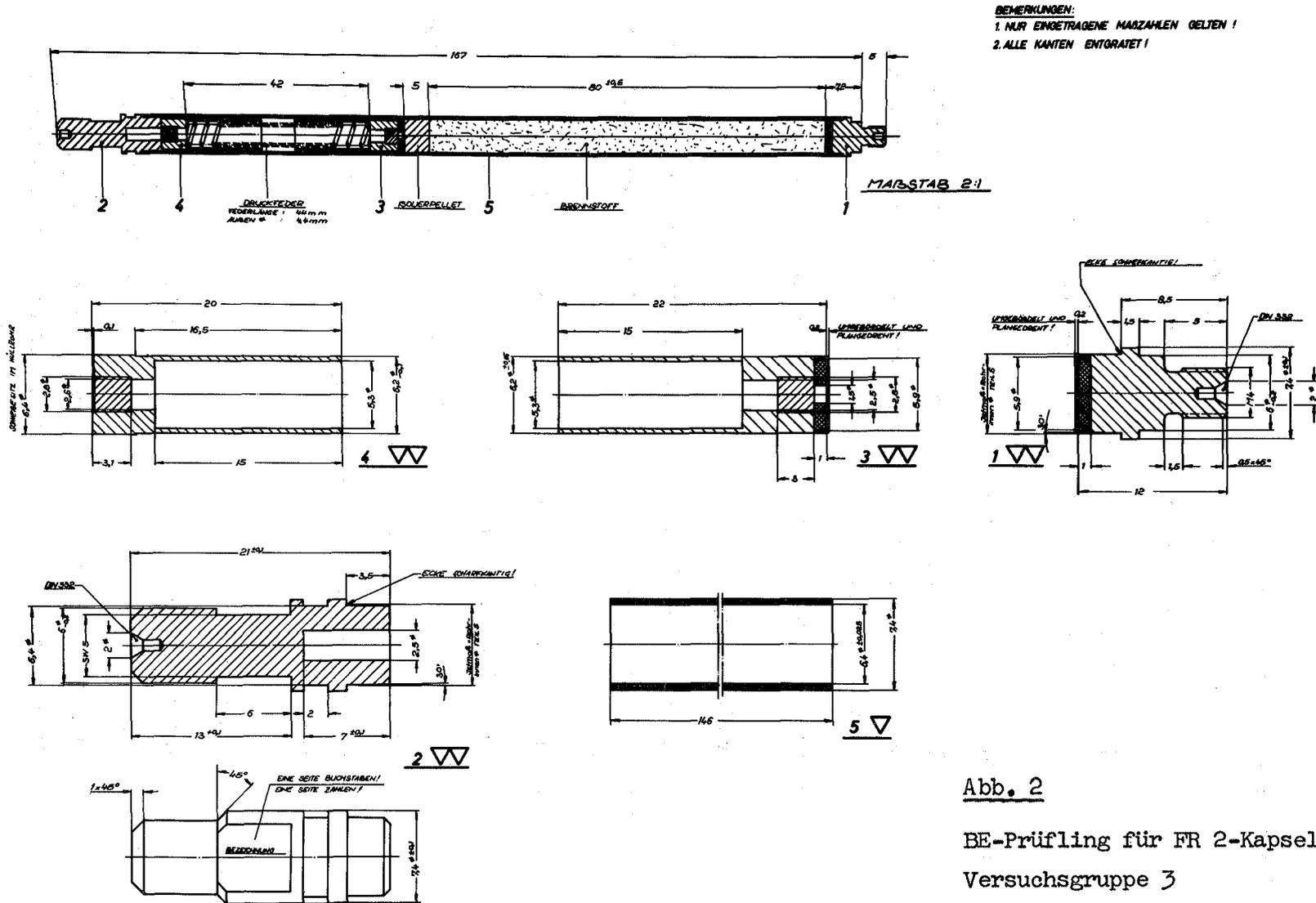


Abb. 2

BE-Prüfling für FR 2-Kapsel-
Versuchsgruppe 3

(Zeichnung BE-430/66 der Fa. Nukem)

- Die chemische Reinheit soll Reaktorbrennstoffen entsprechen. Die Neutronenabsorption der Verunreinigungen soll nicht über 2,5 ppm Boräquivalent liegen.

4.2.2 Isotopenzusammensetzung

- Im reinen UO_2 -Brennstoff beträgt die Anreicherung $11,5 \pm 0,1$ Gew.-% U-235 im Uran.
- Im Mischbrennstoff beträgt die Anreicherung $11,5 \pm 0,1$ Gew.-% U-235 im Uran-Anteil.

4.2.3 Homogenität im Mischbrennstoff

- Die Komponenten des Mischbrennstoffes sollen zu größtmöglicher Homogenität zusammengesintert bzw. zusammengesmolzen werden.
- Die Partikelgröße soll kleiner als 0,05 mm sein.

4.2.4 Brennstoff-Form

Entsprechend der Zusammenstellung in der Tabelle I sind sowohl für reines UO_2 als auch für UO_2-CeO_2 folgende Brennstoff-Formen vorgesehen:

- Tabletten, gepreßt und gesintert, ungeschliffen.
- Tabletten, gepreßt und gesintert, geschliffen.
- Pulverbrennstoff, vibrierfähig, bestehend aus abgerundeten und gesinterten Partikeln.
- Pulverbrennstoff, vibrierfähig, bestehend aus geschmolzenen Partikeln.

4.2.5 Brennstoffdichte

- Tablettendichte in 2 Varianten, nämlich 88 ± 2 % th.D. und 93 ± 2 % th.D.
- Dichte des einvibrierten Brennstoffes: 85 % th.D.
Dabei sind auf 1 cm Brennstoffsäulenlänge Schwankungen von ± 5 % th.D. zulässig. Die integrale Schwankung darf ± 2 % th.D. nicht überschreiten.

4.2.6 Tablettengeometrie

Es ist nur der Tablettendurchmesser spezifiziert und zwar

- bei geschliffenen Tabletten auf $6,25 \pm 0,01$ mm,
- bei ungeschliffenen Tabletten auf $6,25 \pm 0,05$ mm.

4.2.7 Oberfläche der Tabletten

- Die Mantelflächen der Tabletten werden bei den Prüflingstypen A, C und L geschliffen, bei den Prüflingstypen B und D bleiben sie ungeschliffen.
- In den Stirn- und Mantelflächen sind Kantenabplatzungen von 0,3 mm Tiefe allgemein zulässig. Außerdem sind zulässig:
 - a) 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.
 - b) Haarrisse von 0,1 mm Weite und 2 mm Länge.

4.2.8 Untersuchungen und Prüfungen am Brennstoff

Damit die Ergebnisse des Bestrahlungsversuches möglichst vergleichbare Aussagen liefern, soll der Brennstoff bei der Herstellung so gut wie möglich untersucht werden, insbesondere auf:

- | | | |
|--------------------------------------|---|--------------------------------------|
| - Chemische Reinheit | } | am Ausgangsmaterial |
| - Isotopenzusammensetzung | | |
| - BET-Oberfläche | | |
| - Stöchiometrie | } | an Tabletten und
Pulverbrennstoff |
| - Fluor- und H ₂ O-Gehalt | | |
| - Keramografie | | |
| - Dichte | } | bei den Tabletten |
| - Außenmaße | | |

4.3 Spezifikationen für die Hülle

4.3.1 Werkstoffe

Für die Hüllrohre und Endstopfen ist austenitischer Edelstahl nach 2 Werkstofftypen vorgesehen, nämlich

- 20/25 CrNiNb-Stahl, DIN-Bezeichnung X4CrNiNb 2025
- 16/13 CrNiNb-Stahl, DIN-Bezeichnung X8CrNiMoVb 1613
Werkstoff-Nr. 1.4988

Für die zuerst gefertigten Prüflinge wird der 20/25-CrNiNb-Stahl verwendet. Nach Anlieferung von 16/13-CrNiNb-Hüllrohren kommen diese zum Einsatz.

4.3.2 Abmessungen der Hüllrohre

Es ist spezifiziert

- der Innendurchmesser der Hüllrohre auf $6,4 \pm 0,05$ mm
(nach Möglichkeit $\pm 0,025$ mm)
- die Wandstärke auf $0,5 \pm 0,025$ mm .

4.3.3 Hüllrohrprüfungen

Alle Hüllrohre sind der Riß-, Rauigkeits- und Maßprüfung zu unterziehen. Es sind Werksatteste der Rohrhersteller beizustellen.

4.4 Brennstabspezifikationen

4.4.1 Innere Geometrie

- Die Länge der Brennstoffsäule beträgt 80 ± 1 mm.
- Bei den Prüflingen mit Tablettenbrennstoff soll die Dichte und Position jeder einzelnen Tablette bekannt sein.
- In jedem der beiden Endstopfen des Stabes ist (zur Verhinderung einer Flußaufwölbung) eine Rhodium-Scheibe mit 1,0 mm Stärke einzusetzen.

4.4.2 Äußere Geometrie

- Die gesamte Länge des Stabes beträgt $172,0 \pm 0,5$ mm.
- Die Durchbiegung kann maximal 0,1 mm betragen.

4.4.3 Helium-Füllung

- Die Stabprüflinge erhalten vor dem Zuschweißen eine Helium-Füllung.

4.4.4 Prüfung am fertigen Brennstab

An den fertigen Stäben sind folgende Prüfungen durchzuführen:

- Maßkontrolle
- Dichtheitsprüfung
- Röntgenprüfung der Schweißnaht
- Gesamtgewicht

5. Herstellung der Prüflinge

Die Firma Nukem, Wolfgang bei Hanau, hat alle Prüflinge auf der Basis der Spezifikationen hergestellt und zahlreiche Untersuchungen an den Prüflingskomponenten und an den fertigen Stäben durchgeführt. Insgesamt wurden 42 Prüflinge gefertigt. Wir geben hier für die zur Bestrahlung gekommenen 34 Prüflinge einen ausführlichen Auszug aus dem zugehörigen Nukem-Prüfbericht Nr. 6 [3]. Die Ausführungsmerkmale und deren Zuordnung zur Kennzeichnung wurden bereits in Tabelle I angegeben.

Die Kennzeichnung mit Zahlen oder Buchstaben, z.B. 16 oder DU oder L8 ist mit Schlagzahlen auf eine der beiden oberen Anfräsungen am oberen Endstopfen aufgebracht.

Die folgenden Abschnitte beschreiben die Herstellung des Brennstoffes und die Fertigung der Stäbe einschließlich der Zwischen- und Endprüfungen.

5.1 Ausgangspulver für die Brennstoffherstellung

Das UO_2 -Ausgangspulver mit angereichertem Uran wies folgende Materialdaten auf:

- BET-Oberfläche $5,1 \text{ m}^2/\text{g}$
- O/U-Verhältnis $2,08$
- Primärpartikelgröße $0,02 \text{ bis } 0,2 \mu$
- Boräquivalent der Verunreinigungen $0,61 \text{ ppm}$
- U-235-Gehalt im Uran $11,5 \text{ Gew.-%}$

Das CeO_2 -Ausgangspulver enthielt ca. 500 ppm an Seltenen Erden, woraus sich ein Boräquivalent von mehreren 100 ppm ergibt. Die BET-Oberfläche betrug $18,6 \text{ m}^2/\text{g}$. Weitere Kontrollwerte liegen nicht vor.

5.2 Tablettenherstellung

5.2.1 UO_2 -Tabletten

Zur Herstellung reiner UO_2 -Tabletten wurde das UO_2 -Ausgangspulver mit Zusatz von 1 % Polyvinylalkohol und 1,3 % Stearinsäure in einem Mischer naß plastifiziert, dann durch ein Sieb gedrückt und 48 Stunden lang bei 55°C getrocknet. Nach dem Pressen zu Grünlingen erfolgte das Entwachsen in CO_2 -Atmosphäre. Das Sintern geschah in einem Schachtofen unter H_2 -Atmosphäre. Für das Schleifen der Zylindermäntel wurde eine Spitzenlos-Schleifmaschine verwendet.

In Tabelle II sind die wesentlichen Herstellungsgrößen für die verschiedenen UO_2 -Tabletten-Typen eingetragen. Bei den Entwachsungs- und Sinterzeiten handelt es sich um die reinen Haltezeiten bei der angegebenen Temperatur. Die Abbildungen 3 bis 6 bringen für jede der UO_2 -Tabletten-Typen A, B, C und D die Gefügebildungen aus der Mitte eines Tablettenquerschliffes und eines 0,3 mm tiefen Anschliffes der Mantelfläche sowie Aufnahmen von Stirn- und Mantelflächen.

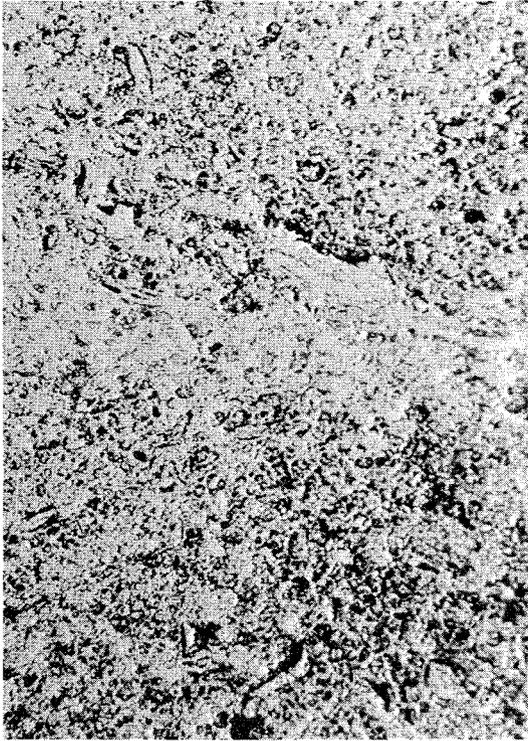
5.2.2 UO_2 - CeO_2 -Tabletten

Die beiden Ausgangspulver UO_2 und CeO_2 wurden in der Zusammensetzung

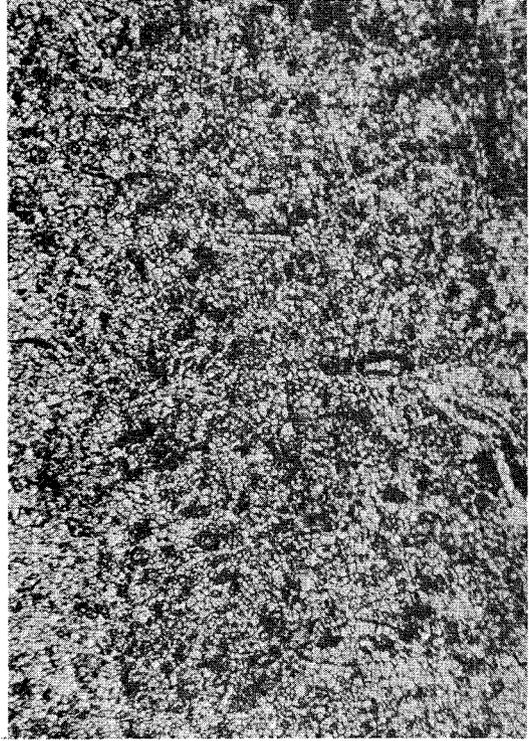
	89,9 Gew.-% UO_2
	10,1 Gew.-% CeO_2

Tabelle II: Herstellungsdaten für Tablettenbrennstoff

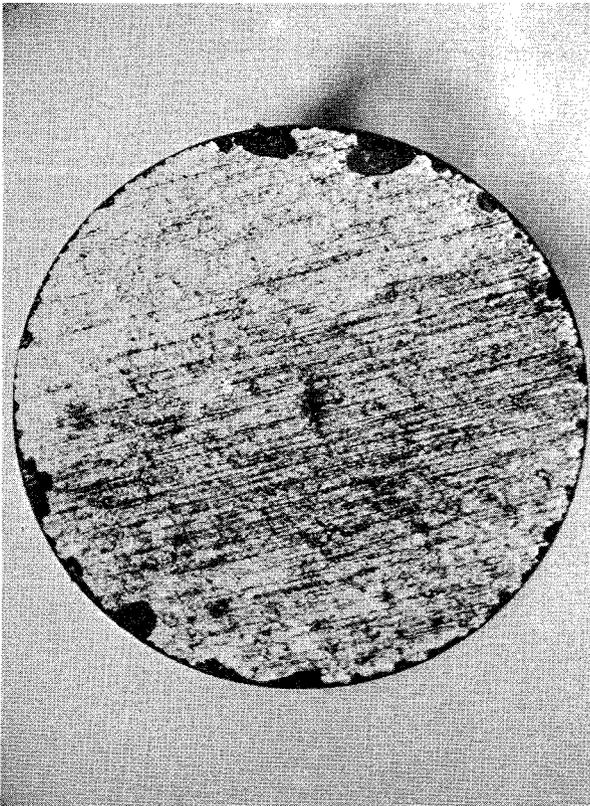
Typ		A	B	C	D	L8	L9
Brennstoff		UO ₂ -CeO ₂	UO ₂ -CeO ₂				
Oberfläche		geschliffen	ungeschliffen	geschliffen	ungeschliffen	geschliffen	geschliffen
Solldichte		88 % th.D.	88 % th.D.	93 % th.D.	93 % th.D.	88 % th.D.	93 % th.D.
Grünlinge	Durchmesser (mm)	7,93	7,93	7,93	7,93	7,53	7,53
	Höhe (mm)	11,00	11,30	11,00	10,30	10,40	10,40
	Mittl.Dichte(g/cm ³)	5,25	4,84	5,55	5,10	5,83	6,00
	Preßdruck (t/cm ²)	2	2	2	2	4,6	4,8
	Entwachsen	4 h/860°C	4 h/860°C	4 h/860°C	4 h/860°C	2 h/860°C	2 h/860°C
Tabletten	Sintern	2 h/1500°C	2 h/1550°C	2 h/1600°C	2 h/1700°C	2 h/1550°C	2 h/1600°C
	Durchmesser, (mm) ungeschliffen	6,31	6,23		6,26	6,45	6,45
	Durchmesser, (mm) geschliffen	6,249		6,256		6,25	6,25
	Höhe (mm)	8,00	8,90	7,90	8,00	8,90	8,90
	Dichte (%th.D.)	ca. 88	ca. 88	ca. 93	ca. 93	ca. 88	91,6



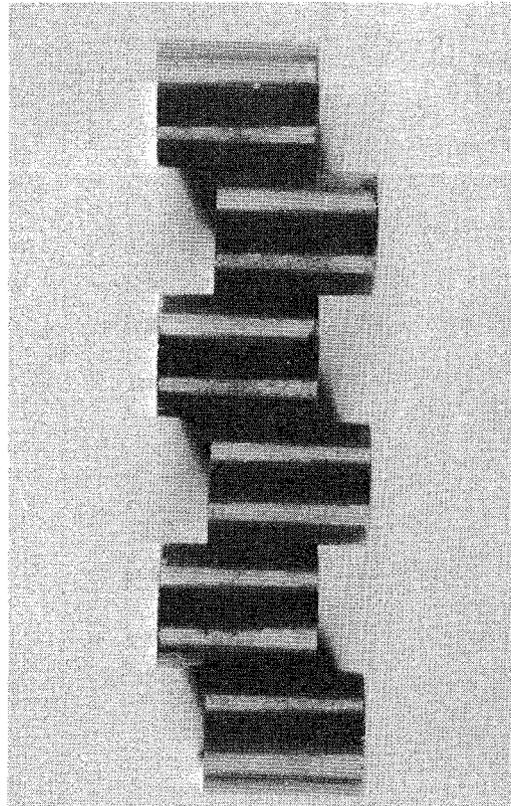
Querschliff, Zentrum
V = 200x



Längsschliff, Randzone
V = 200x



Stirnfläche, V = 12x



Mantelflächen, V = 3x

Abb. 3 UO₂-Tabletten, Typ A, 88 % th.D., geschliffen

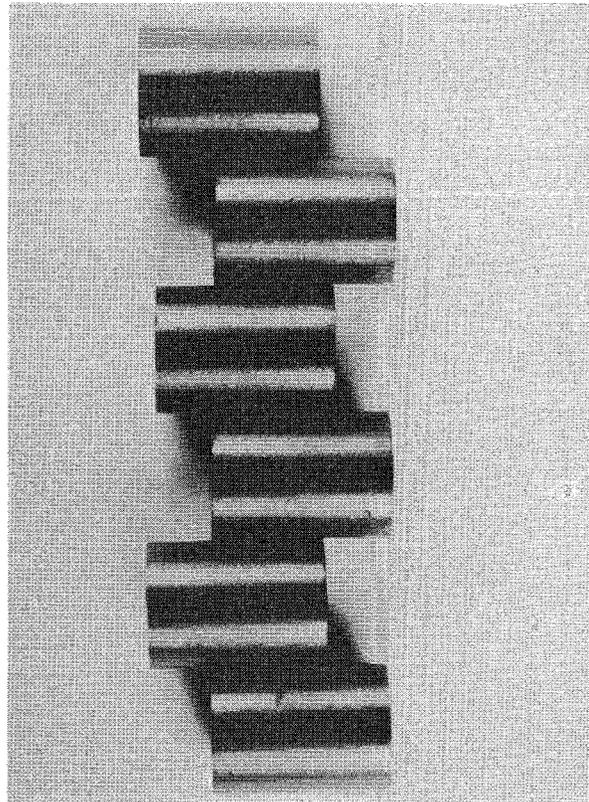
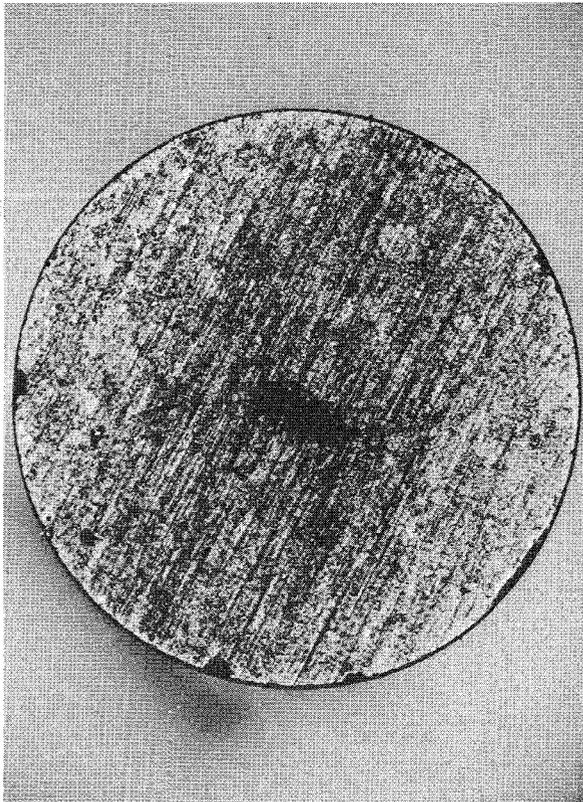
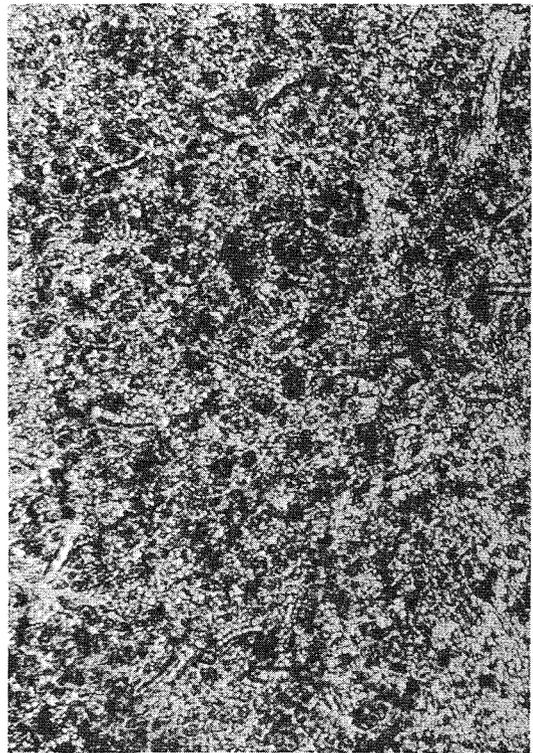
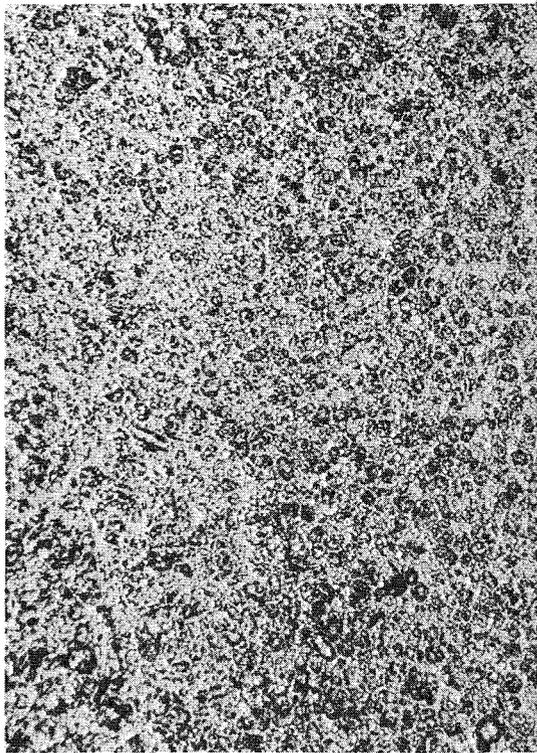


Abb. 4 UO₂-Tabletten, Typ B, 88 % th.D., ungeschliffen

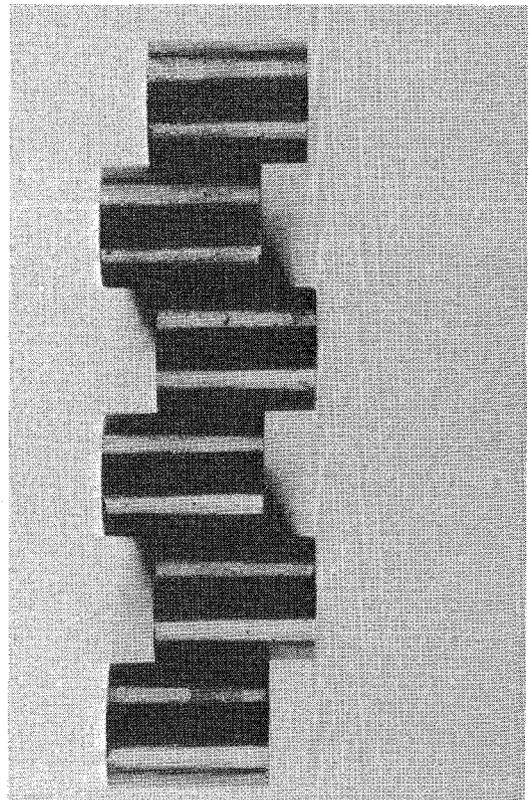
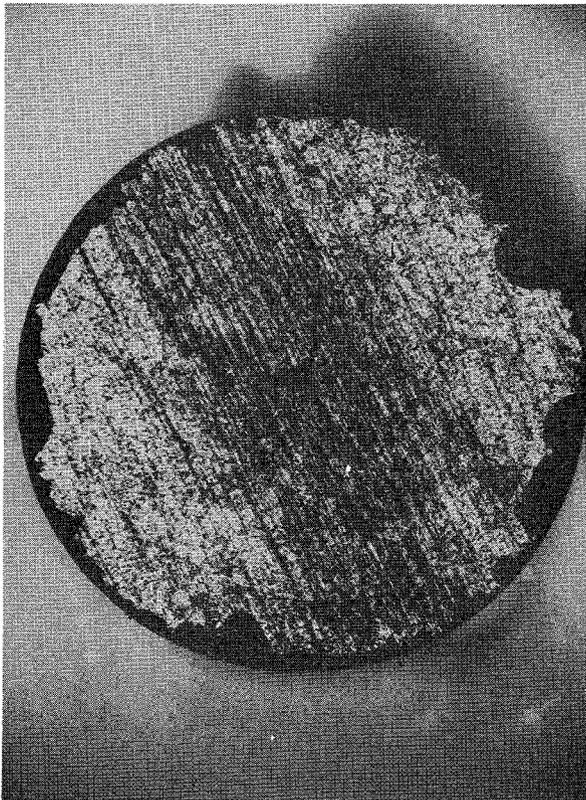
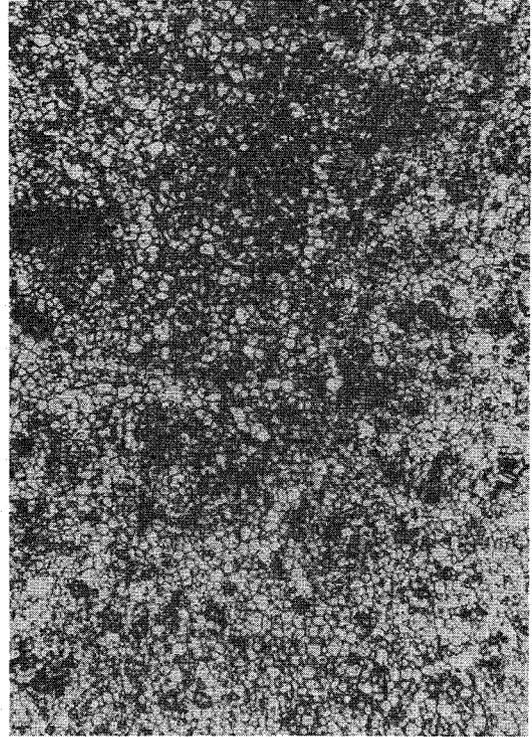
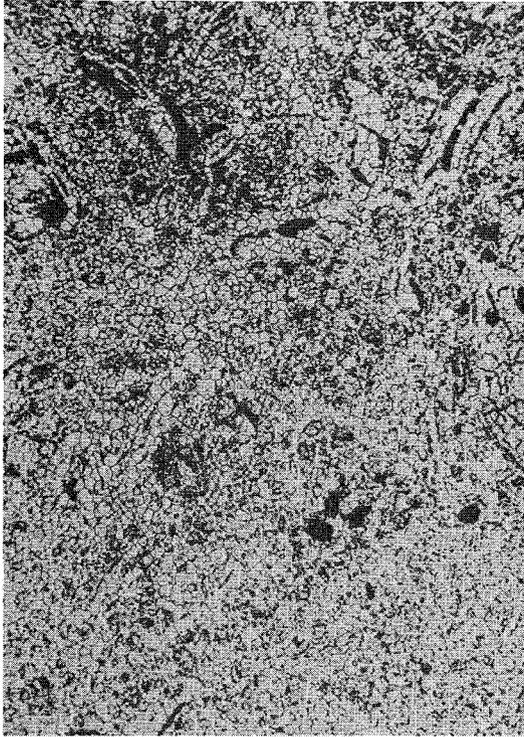


Abb. 5 UO_2 -Tabletten, Typ C, 93 % th.D., geschliffen

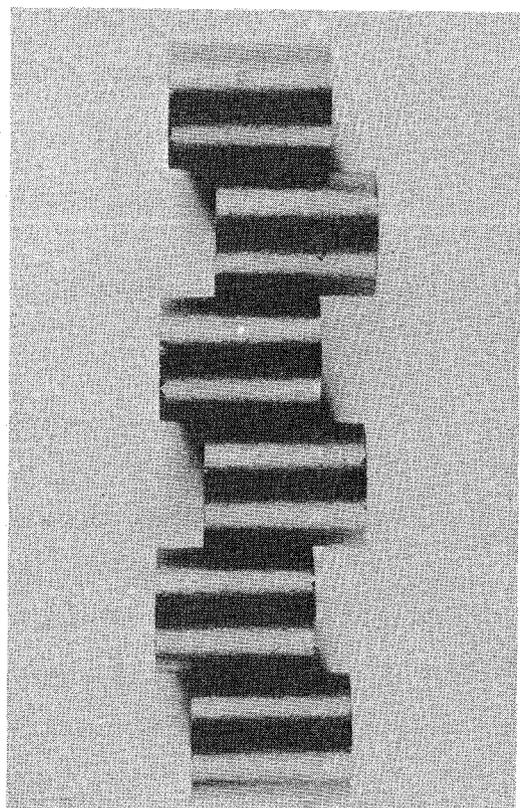
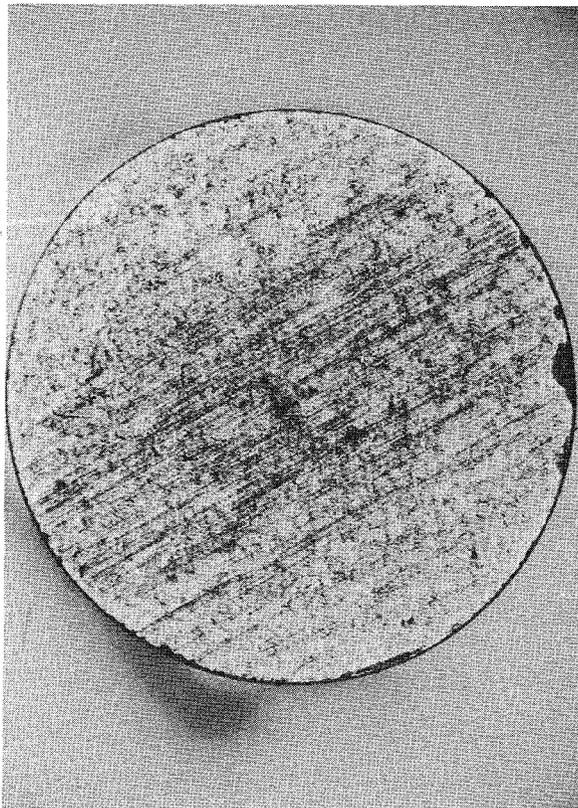
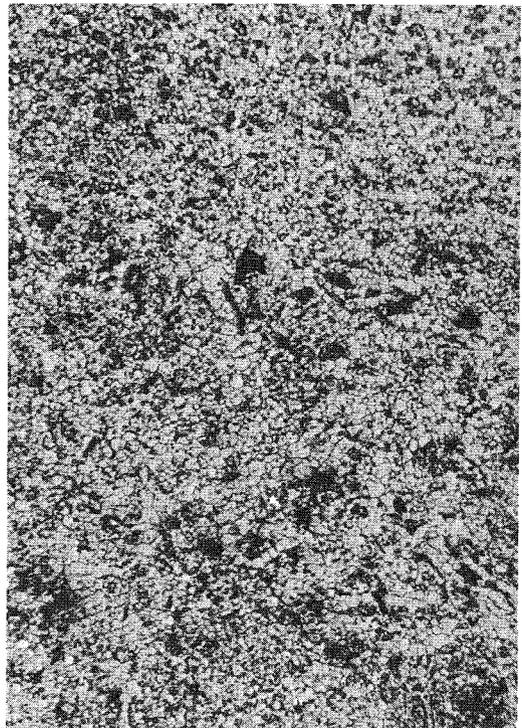
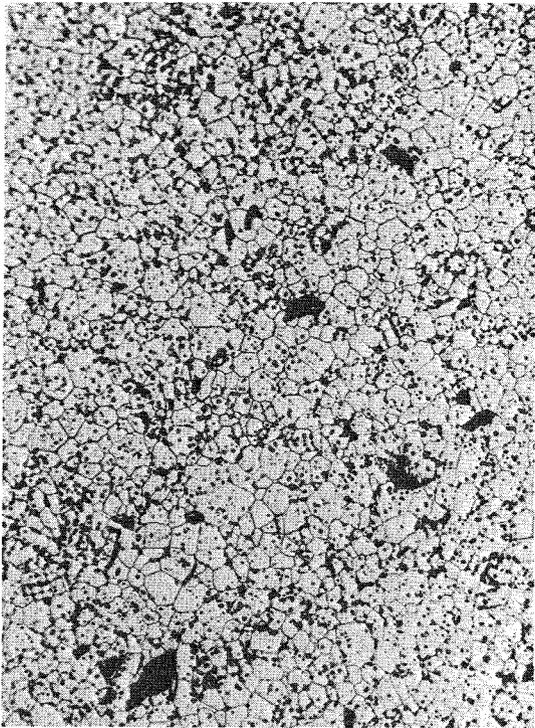


Abb. 6 UO₂-Tabletten, Typ D, 93 % th.D., ungeschliffen

in einem Taumelmischer im trockenen Zustand zur größtmöglichen Homogenität vermischt. Das Plastifizieren und Trocknen des Mischpulvers erfolgte genauso wie beim UO_2 (siehe 5.2.1). Das Pressen, Entwachsen und Sintern geschah analog zum UO_2 , aber unter teilweise geänderten Bedingungen, siehe Tabelle II. Die Abbildungen 7 und 8 bringen für die beiden Typen L8 und L9 Gefüge- und Oberflächenaufnahmen.

5.2.3 Isoliertabletten

Die Merkmale der Isoliertabletten aus UO_2 mit Natururan sind:

- | | |
|---------------|-----------------------|
| - Durchmesser | 6,25 ± 0,01 mm |
| - Höhe | 5,03 bis 5,05 mm |
| - Dichte | 96,2 bis 97,2 % th.D. |

5.3 Herstellung des Pulverbrennstoffes

In den Stabproben mit einvibriertem Brennstoff kamen zwei Sorten von Pulverbrennstoff zur Anwendung, nämlich

- Pulverbrennstoff aus gesinterten Partikeln
- Pulverbrennstoff aus geschmolzenen Partikeln.

5.3.1 Vibrierpulver aus gesinterten Partikeln

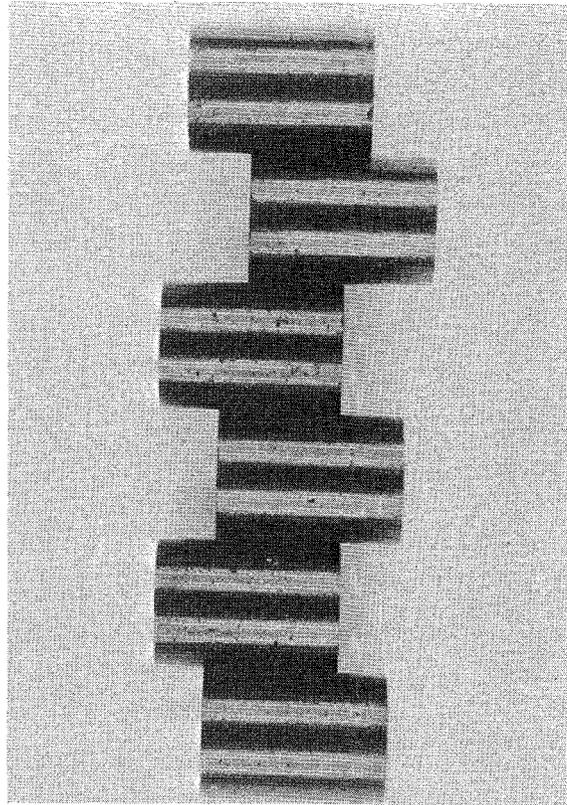
Zu dessen Herstellung diente als Ausgangsmaterial entweder

- UO_2 -Ausgangspulver gemäß 5.1
- oder eine
- UO_2 - CeO_2 -Mischung mit 10,1 Gew.-% (= 15 Mol.-%) CeO_2 , welches in einem Taumelmischer zu größtmöglicher Homogenität vermischt worden war.

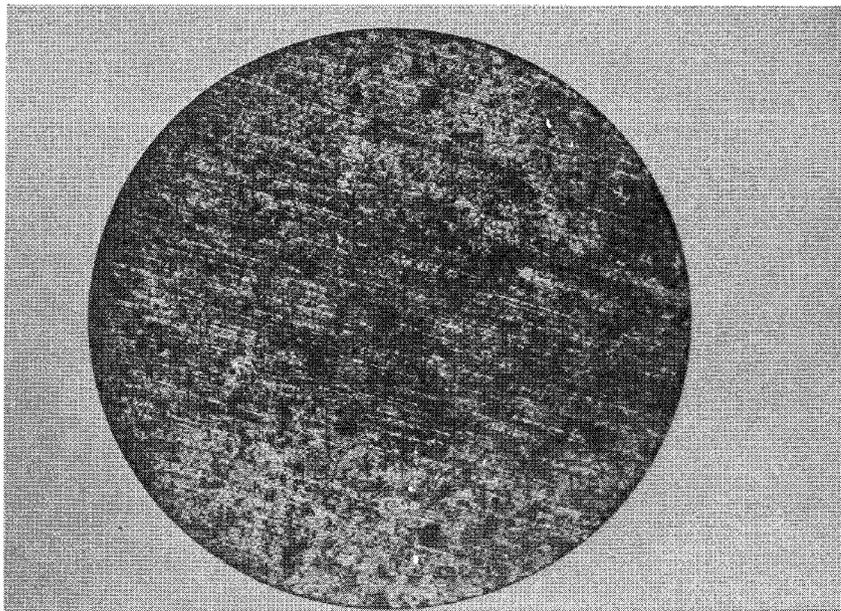
In beiden Varianten wurde das Ausgangsmaterial durch Zusatz von 1 % Carbowax M20 und 1 % Stearinsäure plastifiziert und zu Grünlingen verpreßt. Diese Grünlinge wurden dann in einer Hammermühle mit 10 mm-Lochsieb gemahlen und in einem Lödige-Mischer abgerundet, wobei in mehreren Zeitabständen verschiedene Fraktionen abgerundeter Partikel entnommen wurden. Hierauf folgte eine 18 h-Entwachsung unter CO_2 -Atmosphäre bei bis zu



Querschliff, Zentrum, $V = 200x$



Mantelflächen, $V = 3x$



Stirnfläche, $V = 12,5 x$

Abb. 7 UO_2-CeO_2 -Tabletten, Typ I8, 88 % th.D., geschliffen

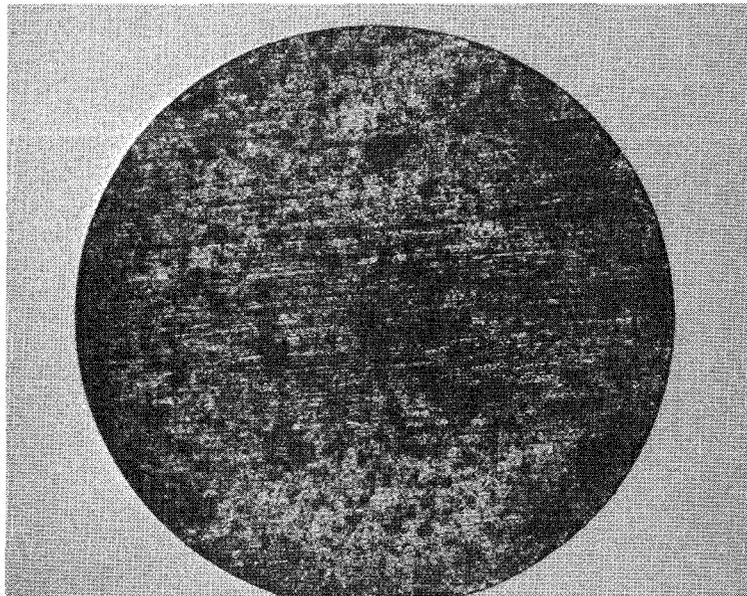
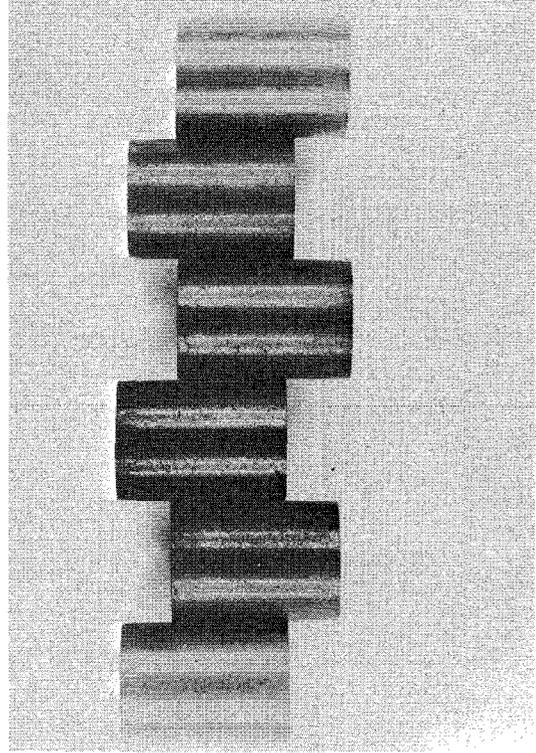
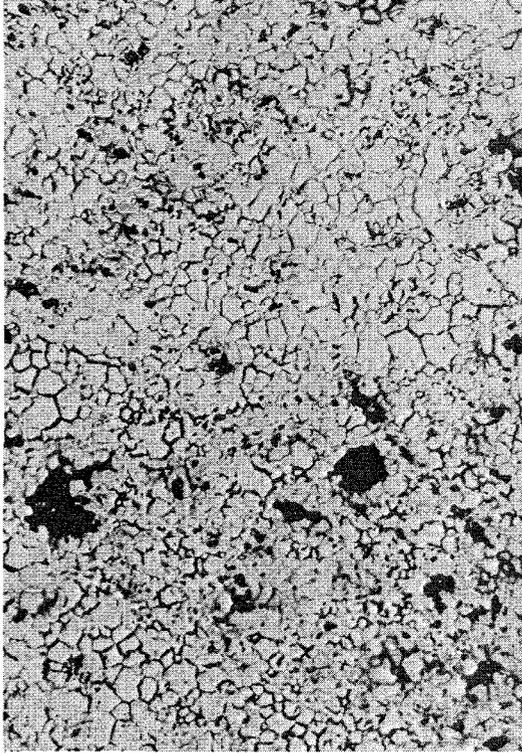


Abb. 8 $\text{UO}_2\text{-CeO}_2$ -Tabletten, Typ L9, 93 % th.D., geschliffen

650°C ansteigender Temperatur. Anschließend wurden die abgerundeten Partikel unter H₂-Atmosphäre gesintert. Das fertige Vibrierpulver setzt sich aus 3 definierten Kornfraktionen und dem Feinanteil zusammen.

In Tabelle III sind einige Herstellungsdaten sowie charakteristische Partikeleigenschaften angegeben. Die Abbildungen 9 und 10 bringen Form und Gefügestruktur von gesinterten Partikeln.

5.3.2. Vibrierpulver aus geschmolzenen Partikeln

Zu dessen Herstellung dienten die gleichen Ausgangspulver wie bei den gesinterten Partikeln (siehe 5.3.1). Diese Ausgangspulver wurden in einem elektrischen Schmelzofen in direktem Stromdurchgang unter Argon-Atmosphäre geschmolzen. Das Schmelzgut wurde dann in einem Backenbrecher gebrochen und gemahlen und hierauf in Fraktionen abgesiebt. Abschließend wurden die UO₂-Partikel-Fraktionen 4 h bei 1000°C unter H₂-Atmosphäre stöchiometrisch geglüht und unter Argon abgekühlt. Beim UO₂-CeO₂ fand keine abschließende Glühbehandlung statt.

In Tabelle IV sind für diese geschmolzenen Partikel die Kenn-
daten der Fraktionen angegeben. Die Abbildungen 11 und 12 vermitteln einen Eindruck über die rauhe, eckige Form der geschmolzenen Partikel.

5.4 Nachweis der Brennstoffeigenschaften

5.4.1 Spaltstoff-Anreicherung

Das UO₂-Ausgangspulver mit 11,5 Gew.-% U-235 im Uran-Anteil wurde durch Mischen von 35,03 % angereichertem Uran mit Natururan hergestellt, siehe hierzu das Mischprotokoll in Tabelle V nach Angaben der Firma Nukem.

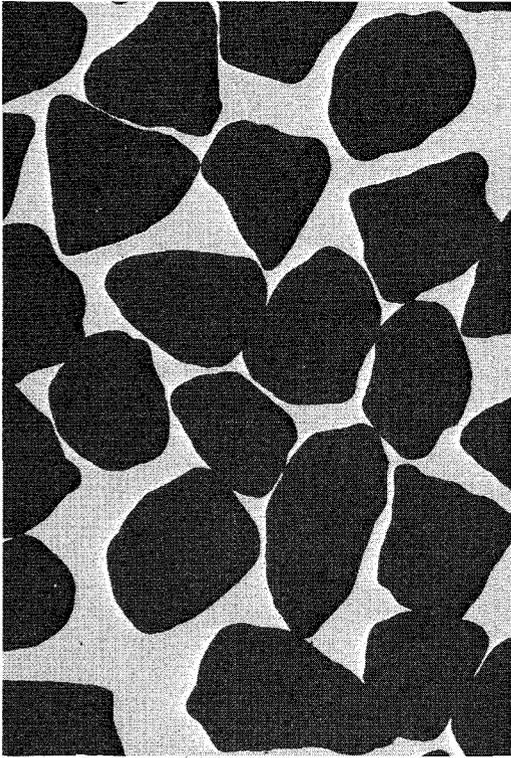
Die Isoliertabletten enthalten Natururan.

Tabelle III: Herstellung und Eigenschaften gesinterter Partikel

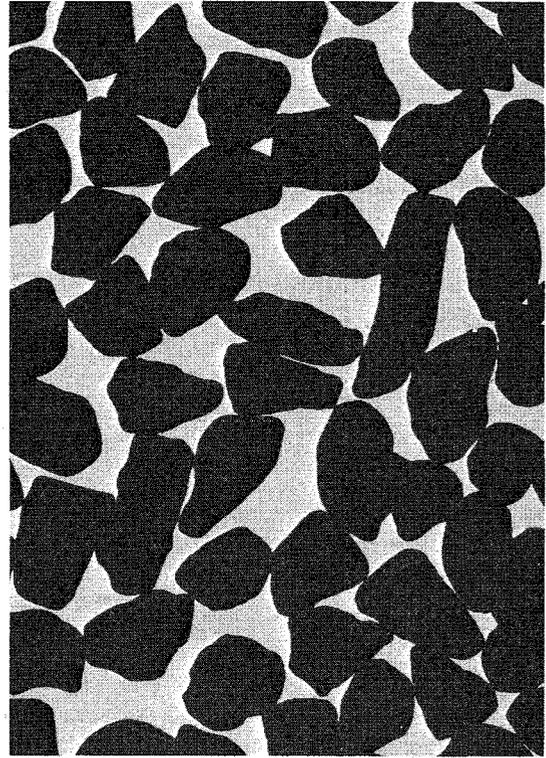
			UO ₂ -Partikel		UO ₂ -CeO ₂ -Partikel	
Zusammensetzung			100 % UO ₂		89,9 % UO ₂ , 10,1 % CeO ₂	
Spaltstoffgehalt			11,5 % U-235 im U		11,5 % U-235 im U	
Preßdruck der Grünlinge (t/cm ²)			8,4		11,2	
Grünlingsdichte (g/cm ³)			6,3		6,37	
Sintern der abgerund. Partikel			2 h/1600°C		2 h/1500°C	
Fraktion	Korngröße (mm)	Anteil am Vibrierpulver	Rütteldichte (g/cm ³)	Auftriebsdichte (g/cm ³)	Rütteldichte (g/cm ³)	Auftriebsdichte (g/cm ³)
I	1,50-1,25	40 %	6,56	10,64	5,55	9,64
II	1,00-0,80	20 %	6,72	10,54	5,72	9,54
III	0,25-0,10	25 %	7,06	10,50	6,07	9,46
Feinanteil	< 0,09	15 %	nicht gemessen		nicht gemessen	

Tabelle IV: Herstellung und Eigenschaften geschmolzener Partikel

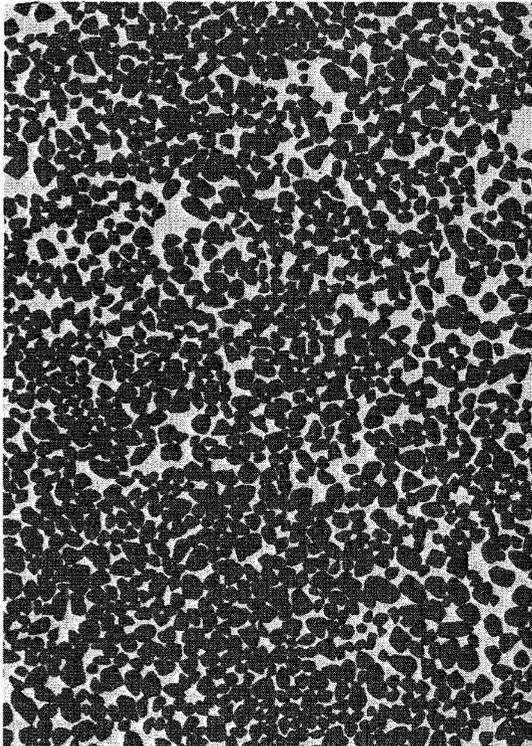
			UO ₂ -Partikel		UO ₂ -CeO ₂ -Partikel	
Zusammensetzung			100 % UO ₂		89,9 % UO ₂ , 10,1 % CeO ₂	
Spaltstoffgehalt			11,5 % U-235 im U		11,5 % U-235 im U	
Fraktion	Korngröße (mm)	Anteil am Vibrierpulver	Rütteldichte (g/cm ³)	He-Pyknometerd. (g/cm ³)	Rütteldichte (g/cm ³)	He-Pyknometerdichte (g/cm ³)
I	2,0-1,2	40 %	5,55	10,88	5,23	10,31
II	1,2-0,8	20 %	5,49	10,89	5,38	10,41
III	0,5-0,2	15 %	5,35	10,84	5,42	10,54
Feinanteil	< 0,1	25 %	nicht gemessen		nicht gemessen	



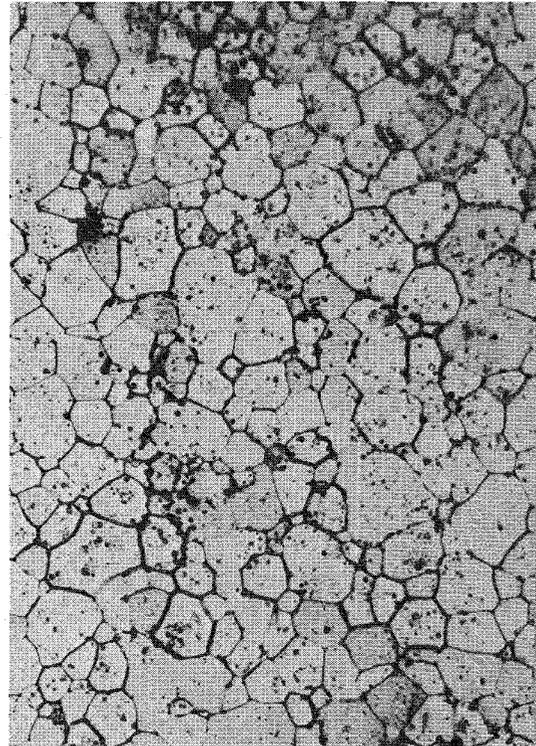
Kontur, Fraktion I
V = 10x



Kontur, Fraktion II
V = 10x



Kontur, Fraktion III
V = 10x



Gefüge eines Grobpartikels
V = 400x

Abb. 9 Form und Gefügestruktur von gesinterten Partikeln aus UO_2

Tabelle V: Mischprotokoll für das angereicherte UO_2 -Ausgangspulver

U-Element	U-235-Anreicherung	U-235
2,798 kg	35,0293 %	0,9801 kg
6,102 kg	0,7106 %	0,0434 kg
8,900 kg	11,5000 %	1,0235 kg

Tabelle VI: Verunreinigungen im Brennstoff

Typ	Brennstoff-Form	Bor-äquivalent (ppm B)	H ₂ O-Gehalt (ppm)	O/U-Verhältnis	Restgasgehalt (ml/g)
A	UO ₂ -Tabl., 88 %, g	1,29	29	2,01	0,06/0,18
B	UO ₂ -Tabl., 88 %, u	1,29	19	2,01	0,04
C	UO ₂ -Tabl., 93 %, g	1,29	2	2,01	0,03/0,02
D	UO ₂ -Tabl., 93 %, u	1,29	1	2,01	0,01/0,02
J	UO ₂ -Partik., gesintert	0,61	15	2,00	0,06/0,06
K	UO ₂ -Partik., geschmolzen	0,60	13	2,00	0,03/0,04
L8	UO ₂ -CeO ₂ -Tabl., 88 %, g	> 100	144	~ 2	0,05/0,02
L9	UO ₂ -CeO ₂ -Tabl., 93 %, g	> 100	98	~ 2	0,02/0,02
MS	UO ₂ -CeO ₂ -Part., gesint.	> 100	27	~ 2	0,07/0,06
MM	UO ₂ -CeO ₂ -Part., geschm.	> 100	26	~ 2	0,08/0,10
UO ₂ -Isoliertabletten		0,57	< 10	2,00	0,01/0,03

5.4.2 Chemische Reinheit und Stöchiometrie

Die Anteile an Verunreinigungen in den Brennstoffen wurden an dem Ausgangspulver und an den fertigen Tabletten und Partikeln ermittelt. In den UO_2 -Brennstoffen bleibt das Boräquivalent weit unter dem Grenzwert von 4 ppm. In den CeO_2 -haltigen Brennstoffen ist dagegen das Boräquivalent wegen der Verunreinigungen an Seltenen Erden (siehe 5.1) relativ hoch.

Der Wassergehalt wurde an allen Brennstoffsorten ermittelt, bei den Partikelbrennstoffen unmittelbar vor dem Einvibrieren des getrockneten Granulats. Das O/Me-Verhältnis konnte nur bei den reinen UO_2 -Brennstoffen bestimmt werden, da für UO_2 - CeO_2 keine verlässliche Meßmethode bekannt ist.

Eine Übersicht über die ermittelten Werte für die einzelnen Brennstoffsorten bringt Tabelle VI.

5.4.3 Restgasgehalt

An allen Brennstoffausführungen wurde mittels Heißextraktion der Restgasgehalt bestimmt (überwiegend H_2). In Tabelle VI sind die Meßwerte (meist von zwei Proben) eingefügt. Dieser Gesamtgasgehalt bezieht sich auf 0°C und 760 Torr, die Meßgenauigkeit liegt bei $\pm 0,02$ ml/g.

5.5 Hüll- und Strukturmaterial

5.5.1 Hüllrohre aus Edelstahl X4CrNiNb 2025

Aus einer Herstellungsladung der Firma Mannesmann vom Jahre 1965 wurden 8 Rohre (Lieferlänge 1,25 m) verwendet. Die Rohre waren nahtlos gezogen und hatten einen Außendurchmesser von 7,4 mm und eine Wandstärke von $0,5 \pm 0,05$ mm. Die Schmelzanalyse und die Festigkeitswerte sind mit Protokollen des Herstellers belegt, Auszug siehe Tabelle VII.

5.5.2 Hüllrohre aus Edelstahl X8CrNiMoVNb 1613

Die zur Verwendung gekommenen 2 Hüllrohre, mit einer Lieferlänge von 1,0 m, stammen aus einer Herstellungsladung der

Tabelle VII: Schmelzanalyse und Festigkeit des Hüllrohrmaterials

	Edelstahl	X4CrNiNb 2025	W.-Nr. 1.4988 X8CrNiMoVNb 1613
	Schmelze Nr.	3 SL-2060	25116
Zusammensetzung in %	C	0,02	0,05
	Cr	20,41	16,30
	Ni	25,71	13,65
	Mo		1,42
	V		0,77
	Nb	0,59	0,66
	Fe	Rest	Rest
Streckgrenze (kp/mm ²)		48,3	30,2 / 33,4
Zugfestigkeit (kp/mm ²)		62,1	61,8 / 62,4
Dehnung (%)		37,5	54,5 / 51,0

Firma Mannesmann vom Jahre 1966. Einzelheiten zur Schmelzanalyse und zur Festigkeit sind ebenfalls in Tabelle VII enthalten.

5.5.3 Rundmaterial

Das Rundmaterial aus den beiden Edelmetalltypen zur Fertigung der Endstopfen und Federhülsen wurde auf der Mantelfläche feinstgedreht und mit Ultraschall auf Fehlerfreiheit geprüft. Die Drehteile wurden aus einwandfreien Rundstangen oder Abschnitten gefertigt.

5.5.4 Endscheiben aus Rhodium

Die zur Verhinderung der Flußaufwölbung dienenden Rhodiumscheiben wurden von der Firma Degussa, Hanau, geliefert. Das Rh hat einen Reinheitsgrad > 99,9 %.

5.5.5 Druckfedern und Filterstopfen

Die Druckfedern und Filterstopfen wurden von der GFK besorgt und dem Prüflingshersteller übergeben.

Das Material der Druckfedern ist

Edelstahl, Werkstoff-Nr. 1.4310

Zusammensetzung X12CrNi 1717

Die Filterstopfen sind aus Sintermetall der Zusammensetzung 18 % Cr, 12,5 % Ni, 2,2 % Mo, 0,6 % Si, Rest Fe.

5.6 Hüllrohrprüfung

Die Hüllrohre wurden mit Ultraschall auf äußere und innere Oberflächenfehler und auf Wanddicke geprüft. Der Innendurchmesser wurde kontinuierlich mit einer pneumatischen Prüfanlage ermittelt.

Alle ausgewählten Rohrabschnitte waren frei von unzulässigen Oberflächenfehlern. Die mittlere Wandstärke lag immer um etwa 0,02 mm unterhalb des spezifizierten Wertes, das im übrigen nicht unzulässig breite Toleranzfeld ist nach unten verschoben. Die Schwankungen

des Innendurchmessers genügt den Spezifikationen. In Tabelle VIII sind die wichtigsten zahlenmäßigen Ergebnisse der Hüllrohrprüfung zusammengestellt. Außerdem ist die Zuordnung der einzelnen Rohrab-schnitte zu den Brennstäben angegeben.

5.7 Herstellung der Stäbe mit Tablettenbrennstoff

5.7.1 Auswahl der Tabletten

Die für einen Brennstab ausgewählten Tabletten wurden nach Durchmesser und Höhe einzeln vermessen. Die Abweichungen von der Zylinderform ist bei den geschliffenen Tabletten maximal 4μ , bei den ungeschliffenen Tabletten maximal 30μ . Die Planparallelität der Stirnflächen weist einen Fehler von maximal 60μ auf. Aus den geometrischen Abmessungen und dem Gewicht wurde die Dichte der Tabletten errechnet. Zur Verwendung gelangten nur Tabletten, deren Oberflächengüte innerhalb der spezifizierten Grenzen lag.

5.7.2 Tablettensäulen

Jede Tablettensäule enthält 9 oder 10 Brennstofftabletten und eine Isoliertablette. Die Tabellensammlung IX/1 bis IX/22 umfaßt alle Einzelangaben der Tabletten sowie die Summen- und Mittelwerte für die zusammengestellten Säulen. Die Nummern der Tabletten laufen von unten nach oben. Über der obersten Tablette Nr. 9 oder 10 liegt dann die Isolier-tablette.

5.7.3 Einfüllen und Verschließen der Stäbe

Zuerst wurde der untere Endstopfen eingeschweißt und dann die Tablettensäule sowie die Einführungshülsen mit Druckfeder eingeschoben. Vor dem Eindrücken des oberen Endstopfens wurden die Proben mit Helium (Druck 1 atm) gefüllt. Das Verschweißen beider Endstopfen erfolgte mit einer W-Elektrode unter Argon-Atmosphäre nach dem WIG-Verfahren.

Tabelle VIII: Ergebnisse der Hüllrohrprüfung

Rohr-Nr. Material	Gemessene Wandstärke (mm)	Rohr- Abschnitt Nr.	Innendurchmesser- bereich (mm)	verwendet für Brenn- stab-Nr.
M4 X4CrNiNb 2025	0,45 ... 0,50	M4/1 M4/2 M4/3 M4/5 M4/6 M4/8	6,43 ... 6,44 6,42 ... 6,43 6,43 ... 6,44 6,42 ... 6,44 6,43 ... 6,44 6,42 ... 6,44	2 6 10 14 AG 4
M8 X4CrNiNb 2025	0,45 ... 0,48	M8/1 M8/3 M8/6 M8/7 M8/8	6,43 ... 6,44 6,43 ... 6,44 6,43 ... 6,44 6,43 ... 6,44 6,43 ... 6,44	8 12 16 BU 3
M15 X4CrNiNb 2025	0,45 ... 0,47	M15/1 M15/2	6,42 ... 6,44 6,42 ... 6,43	7 11
M19 X4CrNiNb 2025	0,46 ... 0,49	M19/1 M19/2 M19/3 M19/4	6,43 ... 6,44 6,43 ... 6,45 6,43 ... 6,44 6,43 ... 6,44	36 38 40 KM
M23 X4CrNiNb 2025	0,46 ... 0,49	M23/1 M23/3 M23/5 M23/6	6,43 ... 6,44 6,43 ... 6,44 6,43 ... 6,44 6,43 ... 6,44	33 37 IS 34
M39/X4CrNiNb 2025	0,45 ... 0,48	M39/3	6,43 ... 6,44	15
M48 X4CrNiNb 2025	0,45 ... 0,49	M48/2 M48/3 M48/4 M48/6 M48/7 M48/8	6,43 ... 6,45 6,43 ... 6,45 6,43 ... 6,44 6,43 ... 6,44 6,43 ... 6,44 6,42 ... 6,44	CG 1 5 9 13 DU
M50 X4CrNiNb 2025	0,47 ... 0,49	M50/1 M50/4 M50/5 M50/6	6,43 ... 6,44 6,42 ... 6,44 6,42 ... 6,44 6,42 ... 6,44	MS 39 MM 35
M1 + M5 X8CrNiMoVNB 1613	0,49 ... 0,52	M1/3 M5/1	6,38 ... 6,39 6,38 ... 6,39	L8 L9

Tabellensammlung IX/1 bis IX/22, Übersicht

Tabelle	P r ü f l i n g s -	
	Nr.	Typ
IX/1	2	A
IX/2	6	
IX/3	10	
IX/4	14	
IX/5	AG	
IX/6	4	B
IX/7	8	
IX/8	12	
IX/9	16	
IX/10	BU	
IX/11	3	C
IX/12	7	
IX/13	11	
IX/14	15	
IX/15	CG	
IX/16	1	D
IX/17	5	
IX/18	9	
IX/19	13	
IX/20	DU	
IX/21	18	L
IX/22	19	

Tabelle IX/1: Tablettensäule für Prüfling 2

Brennstoff: UO_2 -Tabletten, geschliffen
 Solldichte: 88% th.D.
 Länge der Brennstoffsäule (gemessen): 80,2 mm
 Gewicht der Brennstoffsäule (gemessen): 23,9 g

		Durchmesser (mm)	Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)
Isoliertablette		6,25	5,05	97,0
Brennstoffsäule	Tablette Nr. 10		8,00	88,2
	9		8,04	88,2
	8		8,00	86,9
	7	6,249	7,98	88,8
	6	+ 0,005	8,04	86,7
	5	- 0,003	7,99	89,7
	4		8,04	88,2
	3		7,99	88,0
	2		7,99	87,8
	1		7,99	88,7
	Summe			80,06
Mittelwert				88,12

Tabelle IX/2: Tablettensäule für Prüfling 6

Brennstoff: UO_2 -Tabletten, geschliffen
 Solldichte: 88% th.D.
 Länge der Brennstoffsäule (gemessen): 80,0 mm
 Gewicht der Brennstoffsäule (gemessen): 24,0 g

		Durchmesser (mm)	Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)
Isoliertablette		6,25	5,05	96,7
Brennstoffsäule	Tablette Nr. 10		8,00	88,4
	9		7,99	89,5
	8		8,00	87,3
	7	6,249	8,00	88,5
	6	+ 0,005	8,00	87,3
	5	- 0,003	7,99	89,5
	4		7,99	88,1
	3		8,00	88,2
	2		7,98	87,6
	1		8,00	88,5
	Summe			79,95
Mittelwert				88,29

Tabelle IX/3: Tablettensäule für Prüfling 10

Brennstoff: UO_2 -Tabletten, geschliffen
 Solldichte: 88% th.D.
 Länge der Brennstoffsäule (gemessen): 80,0 mm
 Gewicht der Brennstoffsäule (gemessen): 24,0 g

		Durchmesser (mm)	Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)
Isoliertablette		6,25	5,04	96,4
Brennstoffsäule	Tablette Nr. 10		8,01	89,0
	9		7,97	88,0
	8		7,98	87,8
	7	6,249	8,00	89,5
	6	+ 0,005	8,00	89,2
	5	- 0,003	7,98	87,7
	4		8,00	88,9
	3		7,98	89,1
	2		7,98	89,7
	1		7,99	89,7
	Summe			79,89
Mittelwert				88,86

Tabelle IX/4: Tablettensäule für Prüfling 14

Brennstoff: UO_2 -Tabletten, geschliffen
 Solldichte: 88% th.D.
 Länge der Brennstoffsäule (gemessen): 80,1 mm
 Gewicht der Brennstoffsäule (gemessen): 23,9 g

		Durchmesser (mm)	Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)
Isoliertablette		6,25	5,03	96,8
Brennstoffsäule	Tablette Nr. 10		7,99	89,1
	9		7,99	88,0
	8		8,00	89,7
	7	6,249	8,04	88,9
	6	+ 0,005	8,05	88,9
	5	- 0,003	8,03	87,8
	4		7,97	86,3
	3		8,00	89,7
	2		8,00	88,2
	1		8,00	89,0
	Summe			80,07
Mittelwert				88,56

Tabelle IX/5: Tablettensäule für Prüfling AG

Brennstoff: UO₂-Tabletten, geschliffen

Solldichte: 88% th.D.

Länge der Brennstoffsäule (gemessen): 80,0 mm

Gewicht der Brennstoffsäule (gemessen): 24,0 g

		Durchmesser (mm)	Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)
Isoliertablette		6,25	5,05	96,5
Brennstoffsäule	Tablette Nr. 10		7,99	89,1
	9		7,98	87,6
	8		7,98	89,2
	7	6,249	8,00	89,5
	6	+ 0,005	7,99	89,7
	5	- 0,003	7,99	89,2
	4		7,99	87,3
	3		8,00	89,6
	2		7,96	88,6
	1		8,00	89,7
	Summe			79,88
Mittelwert				88,95

Tabelle IX/6: Tablettensäule für Prüfling 4

Brennstoff: UO₂-Tabletten, ungeschliffen

Solldichte: 88% th. D.

Länge der Brennstoffsäule (gemessen): 80,3 mm

Gewicht der Brennstoffsäule (gemessen): 23,7 g

		Durchmesser (mm)	Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)
Isoliertablette		6,25	5,09	96,7
Brennstoffsäule	Tablette Nr. 10	-	-	-
	9	6,226	8,88	88,2
	8	6,233	8,91	88,4
	7	6,233	8,90	88,5
	6	6,237	8,92	88,1
	5	6,233	8,89	88,7
	4	6,243	8,92	88,1
	3	6,230	8,90	88,3
	2	6,230	8,90	88,3
	1	6,223	8,90	87,9
	Summe			80,12
Mittelwert		6,232		88,28

Tabelle IX/7: Tablettensäule für Prüfling 8

Brennstoff: UO_2 -Tabletten, ungeschliffen
 Solldichte: 88% th.D.
 Länge der Brennstoffsäule (gemessen): 80,3 mm
 Gewicht der Brennstoffsäule (gemessen): 23,7 g

		Durchmesser (mm)	Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)
Isoliertablette		6,25	5,05	96,5
Brennstoffsäule	Tablette Nr. 10	-	-	-
	9	6,233	8,91	88,2
	8	6,233	8,92	88,7
	7	6,237	8,91	88,1
	6	6,243	8,92	88,5
	5	6,230	8,91	88,5
	4	6,233	8,90	88,2
	3	6,230	8,90	88,5
	2	6,230	8,92	88,5
	1	6,240	8,91	87,6
	Summe			80,20
Mittelwert		6,234		88,31

Tabelle IX/8: Tablettensäule für Prüfling 12

Brennstoff: UO_2 -Tabletten, ungeschliffen
 Solldichte: 88% th.D.
 Länge der Brennstoffsäule (gemessen): 80,4 mm
 Gewicht der Brennstoffsäule (gemessen): 23,7 g

		Durchmesser (mm)	Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)
Isoliertablette		6,25	5,03	96,2
Brennstoffsäule	Tablette Nr. 10	-	-	-
	9	6,227	8,90	88,2
	8	6,233	8,92	88,8
	7	6,230	8,90	88,3
	6	6,227	8,92	87,7
	5	6,230	8,93	88,4
	4	6,237	8,91	88,4
	3	6,233	8,91	88,6
	2	6,227	8,89	89,3
	1	6,243	8,95	87,6
	Summe			80,23
Mittelwert		6,232		88,37

Tabelle IX/9: Tablettensäule für Prüfling 16

Brennstoff: UO₂-Tabletten, ungeschliffen

Solldichte: 88²% th.D.

Länge der Brennstoffsäule (gemessen): 80,3 mm

Gewicht der Brennstoffsäule (gemessen): 23,7 g

		Durchmesser (mm)	Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)
Isoliertablette		6,25	5,05	97,2
Brennstoffsäule	Tablette Nr. 10	-	-	-
	9	6,237	8,93	87,9
	8	6,233	8,91	88,8
	7	6,233	8,90	88,7
	6	6,233	8,90	87,1
	5	6,243	8,93	88,8
	4	6,230	8,90	87,7
	3	6,240	8,93	87,7
	2	6,233	8,92	88,4
	1	6,237	8,91	87,6
	Summe			80,23
Mittelwert		6,235		88,08

Tabelle IX/10: Tablettensäule für Prüfling BU

Brennstoff: UO₂-Tabletten, ungeschliffen

Solldichte: 88²% th.D.

Länge der Brennstoffsäule (gemessen): 80,4 mm

Gewicht der Brennstoffsäule (gemessen): 23,6 g

		Durchmesser (mm)	Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)
Isoliertablette		6,25	5,05	96,8
Brennstoffsäule	Tablette Nr. 10	-	-	-
	9	6,237	8,92	87,9
	8	6,227	8,90	87,7
	7	6,233	8,92	88,1
	6	6,233	8,92	88,0
	5	6,233	8,92	88,0
	4	6,233	8,92	87,7
	3	6,240	8,92	87,6
	2	6,253	8,92	88,5
	1	6,227	8,90	87,4
	Summe			80,24
Mittelwert		6,235		87,88

Tabelle IX/11: Tablettensäule für Prüfling 3

Brennstoff: UO_2 -Tabletten, geschliffen
 Solldichte: 93²% th.D.
 Länge der Brennstoffsäule (gemessen): 80,2 mm
 Gewicht der Brennstoffsäule (gemessen): 26,2 g

		Durchmesser (mm)	Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)
Isoliertablette		6,25	5,05	96,6
Brennstoffsäule	Tablette Nr. 10		7,90	96,6
	9		7,91	92,6
	8		7,91	93,1
	7	6,256	7,93	93,3
	6	+ 0,002	7,88	93,4
	5	- 0,003	7,96	92,5
	4		7,91	94,1
	3		7,92	93,8
	2		7,92	94,1
	1		8,91	94,0
	Summe			80,15
Mittelwert				93,44

Tabelle IX/12: Tablettensäule für Prüfling 7

Brennstoff: UO_2 -Tabletten, geschliffen
 Solldichte: 93²% th.D.
 Länge der Brennstoffsäule (gemessen): 80,2 mm
 Gewicht der Brennstoffsäule (gemessen): 25,2 g

		Durchmesser (mm)	Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)
Isoliertablette		6,25	5,05	96,4
Brennstoffsäule	Tablette Nr. 10		7,92	94,1
	9		7,92	93,3
	8		7,90	94,1
	7	6,256	7,92	93,5
	6	+ 0,002	7,92	93,5
	5	- 0,003	7,92	94,1
	4		7,91	93,8
	3		7,92	93,8
	2		7,91	93,4
	1		8,85	93,6
	Summe			80,09
Mittelwert				93,72

Tabelle IX/13: Tablettensäule für Prüfling 11

Brennstoff: UO_2 -Tabletten, geschliffen
 Solldichte: 93% th.D.
 Länge der Brennstoffsäule (gemessen): 80,1 mm
 Gewicht der Brennstoffsäule (gemessen): 25,2 g

		Durchmesser (mm)	Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)
Isoliertablette		6,25	5,04	96,5
Brennstoffsäule	Tablette Nr. 10		7,90	94,1
	9		7,95	93,8
	8		7,91	93,0
	7	6,256	7,96	93,0
	6	+ 0,002	7,92	94,7
	5	- 0,003	7,91	94,7
	4		7,90	93,0
	3		7,91	93,4
	2		7,90	93,8
	1		8,84	93,3
	Summe			80,10
Mittelwert				93,68

Tabelle IX/14: Tablettensäule für Prüfling 15

Brennstoff: UO_2 -Tabletten, geschliffen
 Solldichte: 93% th.D.
 Länge der Brennstoffsäule (gemessen): 80,1 mm
 Gewicht der Brennstoffsäule (gemessen): 25,2 g

		Durchmesser (mm)	Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)
Isoliertablette		6,25	5,05	97,2
Brennstoffsäule	Tablette Nr. 10		7,90	93,3
	9		7,91	93,8
	8		7,91	93,1
	7	6,256	7,92	93,3
	6	+ 0,002	7,91	93,8
	5	- 0,006	7,92	94,1
	4		7,91	93,8
	3		7,91	94,5
	2		7,89	92,6
	1		8,95	94,0
	Summe			80,13
Mittelwert				93,63

Tabelle IX/15: Tablettensäule für Prüfling CG

Brennstoff: UO_2 -Tabletten, geschliffen

Solldichte: 93²% th.D.

Länge der Brennstoffsäule (gemessen): 80,4 mm

Gewicht der Brennstoffsäule (gemessen): 25,2 g

		Durchmesser (mm)	Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)
Isoliertablette		6,25	5,03	96,4
Brennstoffsäule	Tablette Nr. 10		7,90	93,5
	9		7,92	93,8
	8		7,91	94,3
	7	6,256	7,95	93,0
	6	+ 0,002	7,90	93,3
	5	- 0,005	7,89	93,8
	4		7,97	93,3
	3		7,91	93,8
	2		7,97	93,8
	1		9,00	94,1
	Summe			80,32
Mittelwert				93,67

Tabelle IX/16: Tablettensäule für Prüfling 1

Brennstoff: UO_2 -Tabletten, ungeschliffen

Solldichte: 93²% th.D.

Länge der Brennstoffsäule (gemessen): 80,0 mm

Gewicht der Brennstoffsäule (gemessen): 24,9 g

		Durchmesser (mm)	Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)
Isoliertablette		6,25	5,05	96,5
Brennstoffsäule	Tablette Nr. 10	6,243	8,00	92,6
	9	6,237	8,00	93,0
	8	6,240	8,00	92,6
	7	6,277	8,00	92,5
	6	6,243	8,00	92,6
	5	6,263	8,01	93,0
	4	6,257	8,05	92,4
	3	6,247	8,02	92,4
	2	6,237	8,01	92,9
	1	6,267	8,00	92,5
	Summe			80,09
Mittelwert		6,251		92,65

Tabelle IX/17: Tablettensäule für Prüfling 5

Brennstoff: UO_2 -Tabletten, ungeschliffen
 Solldichte: 93% th.D.
 Länge der Brennstoffsäule (gemessen): 80,0 mm
 Gewicht der Brennstoffsäule (gemessen): 24,9 g

		Durchmesser (mm)	Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)
Isoliertablette		6,25	5,05	96,4
Brennstoffsäule	Tablette Nr. 10	6,247	8,00	92,6
	9	6,247	7,99	93,1
	8	6,273	8,00	93,4
	7	6,247	7,99	92,5
	6	6,240	8,00	93,0
	5	6,260	8,00	93,2
	4	6,263	8,00	93,4
	3	2,267	8,00	93,2
	2	6,237	8,01	92,4
	1	6,277	7,97	91,5
	Summe			79,96
Mittelwert		6,256		92,83

Tabelle IX/18: Tablettensäule für Prüfling 9

Brennstoff: UO_2 -Tabletten, ungeschliffen
 Solldichte: 93% th.D.
 Länge der Brennstoffsäule (gemessen): 80,0 mm
 Gewicht der Brennstoffsäule (gemessen): 25,0 g

		Durchmesser	Höhe	Dichte
Isoliertablette		6,25	5,04	96,8
Brennstoffsäule	Tablette Nr. 10	6,247	8,00	93,1
	9	6,257	7,99	93,0
	8	6,253	8,05	93,0
	7	6,233	8,00	93,1
	6	6,270	8,00	92,9
	5	6,240	7,98	92,6
	4	6,273	7,99	92,6
	3	6,273	8,00	93,4
	2	6,240	7,99	93,0
	1	6,247	8,01	92,4
	Summe			80,01
Mittelwert		6,253		92,91

Tabelle IX/19: Tablettensäule für Prüfling 13

Brennstoff: UO_2 -Tabletten, ungeschliffen
 Solldichte: 93% th.D.
 Länge der Brennstoffsäule (gemessen): 80,0 mm
 Gewicht der Brennstoffsäule (gemessen): 24,9 g

		Durchmesser (mm)	Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)
Isoliertablette		6,25	5,05	96,2
Brennstoffsäule	Tablette Nr. 10	6,267	8,01	93,2
	9	6,260	8,00	93,4
	8	6,250	8,00	92,4
	7	6,260	8,00	92,4
	6	6,253	8,00	92,7
	5	6,250	7,98	93,0
	4	6,270	8,00	92,1
	3	6,237	8,05	92,5
	2	6,253	8,00	93,1
	1	6,253	7,99	92,7
	Summe			80,03
Mittelwert		6,255		92,75

Tabelle IX/20: Tablettensäule für Prüfling DU

Brennstoff: UO_2 -Tabletten, ungeschliffen
 Solldichte: 93% th.D.
 Länge der Brennstoffsäule (gemessen): 80,0 mm
 Gewicht der Brennstoffsäule (gemessen): 24,9 g

		Durchmesser (mm)	Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)
Isoliertablette		6,25	5,03	96,7
Brennstoffsäule	Tablette Nr. 10	6,237	7,99	91,9
	9	6,267	8,00	92,5
	8	6,260	7,96	92,1
	7	6,257	8,00	93,4
	6	6,237	8,05	92,5
	5	6,260	8,03	92,6
	4	6,260	7,98	92,5
	3	6,250	7,98	91,8
	2	6,220	8,01	92,4
	1	6,273	7,98	93,2
	Summe			79,98
Mittelwert		6,252		92,49

Tabelle IX/21: Tablettensäule für Prüfling L8

Brennstoff: UO_2-CeO_2 -Tabletten, geschliffen

Solldichte: 88% th.D.

Länge der Brennstoffsäule (gemessen): 79,8 mm

Gewicht der Brennstoffsäule (gemessen): 22,5 g

		Durchmesser (mm)	Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)
Isoliertablette		6,25	5,05	97,0
Brennstoffsäule	Tablette Nr. 10	-	-	-
	9	6,246	8,82	86,5
	8	6,250	8,99	89,5
	7	6,250	8,85	89,0
	6	6,250	8,87	89,0
	5	6,248	8,85	88,7
	4	6,249	8,85	89,0
	3	6,249	8,85	86,9
	2	6,248	8,84	87,3
	1	6,251	8,91	88,4
	Summe			79,83
Mittelwert		6,249		88,26

Tabelle IX/22: Tablettensäule für Prüfling L9

Brennstoff: UO_2-CeO_2 -Tabletten, geschliffen

Solldichte: 93% th.D.

Länge der Brennstoffsäule (gemessen): 80,1 mm

Gewicht der Brennstoffsäule (gemessen): 23,4 g

		Durchmesser (mm)	Höhe (mm)	Dichte (% th.D.)
Isoliertablette		6,25	5,06	96,8
Brennstoffsäule	Tablette Nr. 10	-	-	-
	9	6,254	8,92	91,9
	8	6,253	8,86	91,5
	7	6,252	8,84	91,8
	6	6,254	8,92	91,2
	5	6,255	9,03	91,7
	4	6,252	8,93	91,2
	3	6,254	8,87	91,2
	2	6,258	8,83	91,9
	1	6,255	8,88	91,2
	Summe			80,08
Mittelwert		6,254		91,51

5.7.4 Rhodium-Endscheiben

Die unteren Endstopfen der Prüflinge sowie alle unteren Hülsen (mit Ausnahme der Stäbe L8 und L9) sind auf den brennstoffseitigen Stirnflächen mit 1 mm dicken, eingebördelten Rh-Scheiben versehen.

5.7.5 Filterstopfen

Zur Vermeidung von Kontaminationen durch Brennstoffstaub bei späteren Spaltgasuntersuchungen sind in der unteren Führungshülse sowie im oberen Endstopfen Filtereinsätze aus gesintertem Edelstahl eingebaut.

5.8 Herstellung der Stäbe mit vibriertem Brennstoff

Über das Einvibrieren des Brennstoffes liegen vom Hersteller keine genauen Angaben vor. Die Fertigung der Prüflinge ist analog zu den Tabletten-Stäben. An beiden Enden der Brennstoffsäule befinden sich Rh-Scheiben. Vor dem Verschweißen wurde ebenfalls mit Helium gefüllt, wobei zweimal gespült wurde.

Die Merkmale der einvibrierten Partikelsäulen (Dichte, Säulenlänge und Gewicht) sind in der Tabelle X zusammengefaßt. Die Dichteschwankungen der vibrierten Partikelsäulen wurden durch Gamma-Absorption ermittelt.

Beim Stab MS mit gesinterten UO_2 - CeO_2 -Partikeln wurde der spezifizierte Dichtebereich nicht erreicht. Die Dichteschwankungen (bezogen auf den Mittelwert) lagen bei allen Prüflingen innerhalb der zulässigen Streubreite.

5.9 Prüfungen an den fertigen Stäben

Alle Schweißnähte wurden geröntgt. Die Verbindungen zwischen den Hüllrohren und Endstopfen ist einwandfrei. Bei einigen Proben liegt der Schweißnahtdurchmesser örtlich bis zu 0,05 mm über dem rechnerisch festgelegten Außendurchmesser (= Innendurchmesser + 2 x Wandstärke).

Die Dichtheitsprüfung mittels He-Lecktest ergab eine Leckrate $< 10^{-8}$ Torr-liter/sec.

Tabelle X: Vibrierte Brennstoffsäulen

Prüflingstyp Partikelbrennstoff	Prüfling	Füllgewicht (g)	Länge der vibrierten Säule (mm)	Mittlere Vibrier- dichte (% th.D.)	Maximale Dichteschwankung in % der mittleren Dichte	
					nach oben	nach unten
I UO ₂ , gesintert	33	24,18	80,00	85,63	+ 2,7	- 3,0
	35	24,19	80,30	85,38	+ 1,4	- 1,8
	37	24,28	80,00	85,99	+ 2,5	- 2,5
	39	24,25	80,20	85,69	+ 1,9	- 1,8
	IS	24,26	80,50	85,39	+ 3,2	- 4,8
K UO ₂ , geschmolzen	34	23,64	80,10	83,64	+ 3,2	- 4,4
	36	23,50	79,95	83,28	+ 3,7	- 3,1
	38	24,05	79,85	85,35	+ 4,1	- 3,1
	40	23,50	80,10	83,14	+ 4,7	- 3,2
	KM	24,04	80,25	84,86	+ 4,1	- 4,2
M UO ₂ -CeO ₂ , gesintert UO ₂ -CeO ₂ , geschmolzen	MS	21,81	80,20	81,21	+ 4,1	- 2,1
	MM	22,55	80,20	84,03	+ 3,4	- 4,4

Abschließend wurden die Längenmaße zwischen den Stirnflächen der Stäbe gemessen sowie die Krümmung der Proben durch Messung des "Schlages" beim Drehen ermittelt. Die Toleranzen für die Länge und die Krümmung (= ca. die Hälfte des Schlages) sind nicht überschritten. Diese Meßwerte sowie die Gewichte sind in Tabelle XI zusammengestellt.

6. Bestrahlungseinrichtung

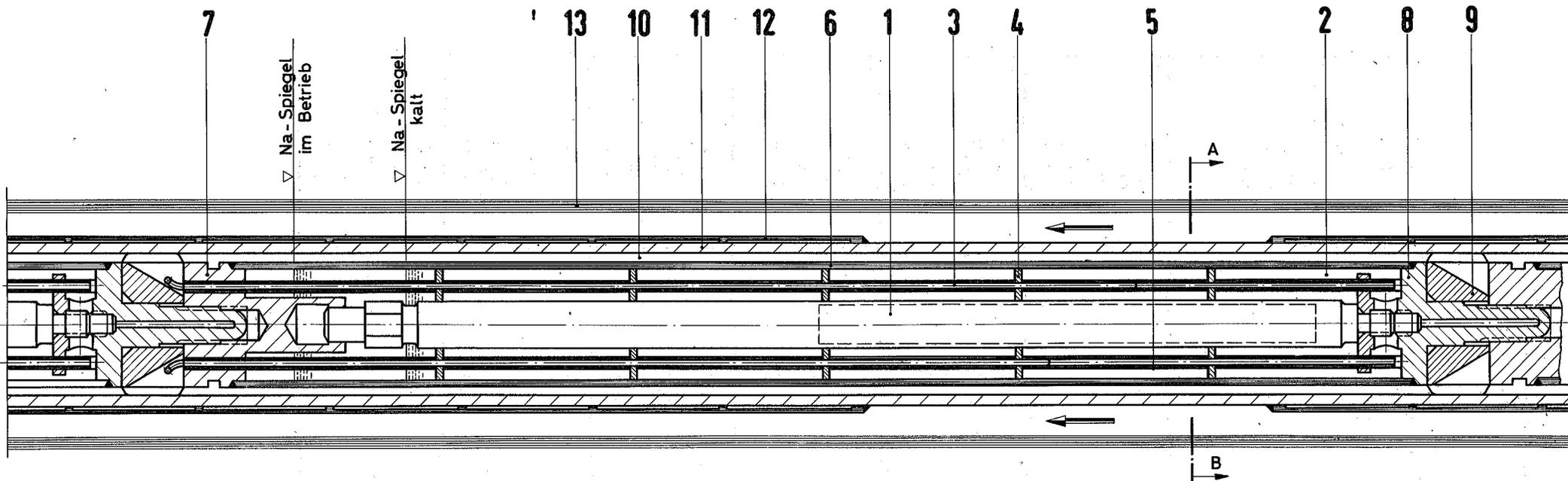
Die Bestrahlung der Prüflinge erfolgte in Kapselversuchseinsätzen auf Brennelementpositionen des FR 2. Bei diesen Kapselversuchseinsätzen handelt es sich um instrumentierte Natrium-Bleiwismut-Doppelkapseln (Typ 4 der in Karlsruhe entwickelten KVE-Reihe). Dieser KVE-Typ [5] erlaubt bei Testbrennstäben von 7,4 mm Durchmesser bis zu 700 W/cm Stableistung und ist auch für hohe Abbrände geeignet. Die maximalen Hüllrohroberflächentemperaturen betragen 550°C bei Natrium-Füllung und 700°C bei NaK-Füllung.

In dieser Bestrahlungseinrichtung wird jeder Brennstabprüfling in eine Einzelkapsel eingesetzt, siehe Zeichnung in Abb. 13. Zur Wärmeübertragung im Ringspalt zwischen Brennstab und Kapselwand wurde bei dieser Versuchsgruppe Natrium verwendet. Bis zu 4 dieser dichtverschlossenen Kapseln wurden längs aneinandergesetzt und in eine äußere Kapsel eingesetzt, siehe Zeichnung in Abb. 14. Der Ringspalt zwischen den inneren Kapseln und dem äußeren Kapselrohr ist mit der eutektischen Blei-Wismut-Legierung ausgefüllt. Im Na-Spalt jeder inneren Kapsel wird mit Thermoelementen die Temperatur kontinuierlich gemessen und registriert.

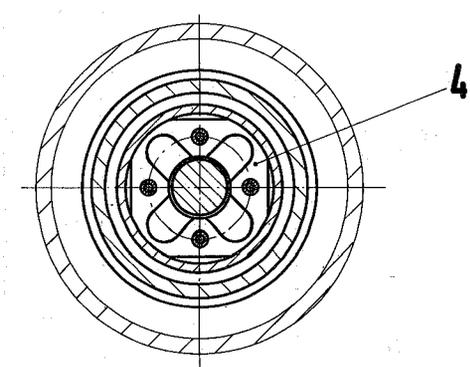
Für die Versuchsgruppe 3 kamen insgesamt 13 Versuchseinsätze zur Bestrahlung, nämlich die KVE Nr. 20 bis 32. Die Verteilung der Prüflinge auf diese KVE ist in Tabelle XII wiedergegeben. Außerdem sind dort einzelne Hinweise für den Kapselaufbau angefügt, da einige Details unterschiedlich waren.

Tabelle XI: Maße und Gewicht der fertigen Stäbe

Prüflings- typ	Prüfling	Länge (mm)	Schlag (= 2x Durchbiegung) (mm)	Gewicht (g)
A	2	167,1	0,18	50,6
	6	167,1	0,08	50,5
	10	167,2	0,09	50,7
	14	167,1	0,18	50,6
	AG	167,1	0,17	50,5
B	4	167,0	0,13	50,5
	8	167,1	0,12	50,5
	12	167,2	0,18	50,5
	16	167,1	0,11	50,5
	BU	167,2	0,12	50,4
C	3	167,2	0,10	52,0
	7	167,2	0,16	51,9
	11	167,2	0,08	51,9
	15	167,1	0,16	52,0
	CG	167,1	0,09	52,1
D	1	167,3	0,17	51,8
	5	167,2	0,18	51,8
	9	167,2	0,15	51,9
	13	167,2	0,12	51,8
	DU	167,1	0,11	51,7
IS	33	167,2	0,09	50,8
	35	167,2	0,14	50,9
	37	167,2	0,13	51,1
	39	167,1	0,14	51,0
	IS	167,1	0,10	51,0
K	34	167,2	0,11	50,4
	36	167,2	0,16	50,3
	38	167,2	0,11	50,6
	40	167,1	0,15	50,3
	KM	167,3	0,15	50,9
L	L8	167,2	0,10	49,4
	L9	167,2	0,12	50,3
M	MS	167,3	0,16	48,5
	MM	167,3	0,15	49,3



Schnitt A-B



- 1 Brennstabsprüfling mit Spaltgasplenum 7,4 mm Can ϕ
- 2 Na- bzw. NaK-Spalt 5,3mm dick
- 3 Thermoelement 1mm ϕ in Fingerhutröhrchen
- 4 Zentrierplatten
- 5 Distanzhalter
- 6 Edelstahlkapsel 20mm ϕ x 1 mm Wand
- 7 Endstopfen
- 8 Na- Einfüllstopfen
- 9 Zwischenstück
- 10 Pb-Bi- Spalt 1,5mm dick
- 11 Äußere Kapsel 26mm ϕ x 1,5mm Wand
- 12 Wärmedämmung
- 13 Wasserführungsrohr. 40mm ϕ x 2 mm Wand

Abb. 13 Ausschnitt aus der Na-PbBi - Doppelkapsel

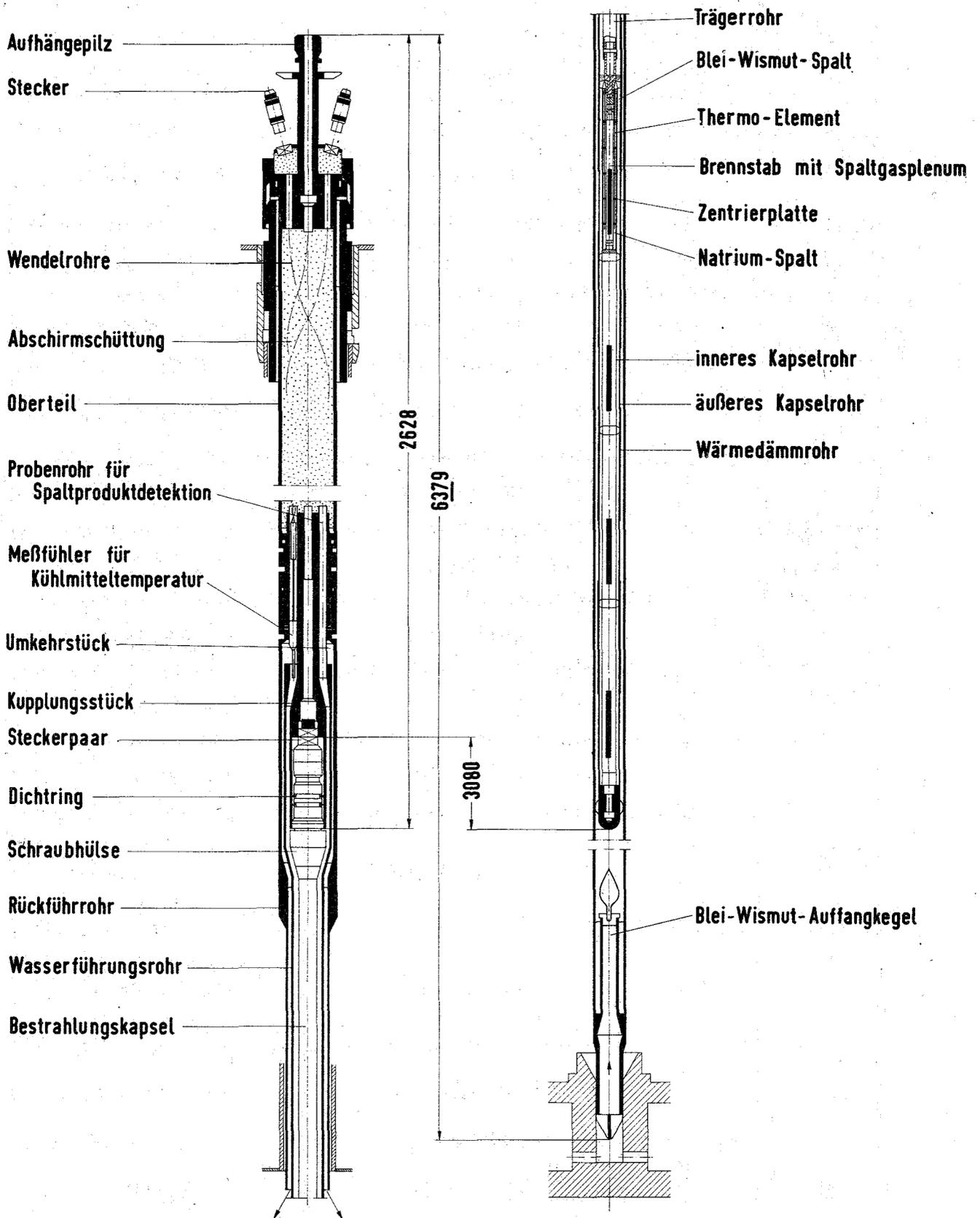


Abb.: 14 Kapselversuchseinsatz mit Na-Pb -
Doppelkapsel (Typ 4)

Tabelle XIII: Zuordnung der Prüflinge zu den KVE

KVE	Brennstab- prüflinge	Detailaufbau nach Zeichnung	Thermoelemente nach Zeichnung
20	1 5 7	IRE 2-06-0-2115	IRE 2-06-2-2107
21	11 13	IRE 2-06-0-2120	IRE 2-06-2-2121
22	18 19	wie KVE 21	IRE 2-06-2-2127
23	3 9 MM	IRE 2-06-0-2183	IRE 2-06-2-2184
24	4 6	IRE 2-06-0-2123	IRE 2-06-2-2193
25	2 MS	wie KVE 24	wie KVE 24
26	8 10	wie KVE 24	wie KVE 24
27	12 14	wie KVE 24	wie KVE 24
28	BU 16	wie KVE 24	wie KVE 24
29	15 AG CG DU	IRE 2-06-0-2190	IRE 2-06-2-2307
30	33 34 35 36	wie KVE 29	wie KVE 29
31	37 38 39	IRE 2-06-0-2191	IRE 2-06-2-2334
32	40 KM IS	wie KVE 31	wie KVE 31

7. Ablauf der Bestrahlung

7.1 Reaktorzyklen

Die dreizehn Kapselversuchseinsätze KVE 20 bis KVE 32 der Versuchsgruppe 3 wurden im FR 2 zwischen einem und 21 Reaktorzyklen bestrahlt. Die vorgesehenen Bestrahlungszeiten konnten lediglich bei drei Kapseln (KVE 23, 25 und 32) nicht erreicht werden, da infolge von Thermoelementdefekten bzw. überhöhten Temperaturen an den Kapseln die Bestrahlung abgebrochen werden mußte.

In Tabelle XIII ist der zeitliche Bestrahlungsablauf der einzelnen KVE zusammengestellt. Neben den Zeitangaben sind die Bestrahlungspositionen mit den einzelnen Zyklen sowie alle Abschaltungen und Schnellschlüsse aufgeführt, die ein qualitatives Maß für die thermisch-zyklische Belastung der Brennstab-Prüflinge darstellen. Bei den Abschaltungen sind neben den echten Abschaltungen auch Leistungsreduktionen auf Leistungen $N < 10^{-3} N_{\text{nom}}$ mit $N_{\text{nom}} = 44 \text{ MW}$ Nominalleistung berücksichtigt worden.

In der Positionskarte des FR 2-Cores (Abb. 15) sind die von der Versuchsgruppe 3 benutzten Brennelement-Positionen gekennzeichnet. Außerdem sind die Isotopenkanal-Positionen markiert, in denen Flußmessungen durchgeführt wurden, auf die im folgenden Abschnitt näher eingegangen wird.

7.2 Neutronenfluß

Im Bestrahlungszeitraum der Versuchsgruppe 3 sind verschiedene Messungen des thermischen Flusses in den Isotopenkanal-Positionen des FR 2 (Abb. 15) durchgeführt worden [6]. Es handelt sich um Messungen des vertikalen Flußverlaufs, bei denen Co-Sonden als Flußdetektoren eingesetzt wurden. In Tabelle XIV sind die Flußwerte der verschiedenen Messungen in den Isotopenkanälen in Höhe der Prüflingsmitten zusammengestellt. Unter den Flußwerten ist der Zeitpunkt der Messung sowie die Stellung der Trimmabschaltstäbe (TA) in mm angegeben. Die TA waren alle gleich tief in die entsprechende Stellung eingefahren.

Die Auswertung der Messungen zeigt über einen längeren Zeitraum im Mittel keinen ausgeprägten Trend nach niedrigeren Flüssen. Den Messungen mit gleichmäßiger TA-Eintauchtiefe entnimmt man, wie der Fluß sich mit wachsender Eintauchtiefe in den unteren Core-Bereich verschiebt.

Tabelle XIII: Bestrahlungsablauf der Kapselversuchseinsätze der Ver-
suchsgruppe 3

KVE Nr.	Bestrahlungs- zeitraum	Betr.-Zeit (Voll.)(d)	Core- Pos.	Anz. Zykl.	Abschaltng. (A)		Bemerkungen
					Schnellschl.(S) A	S	
20	17.3.67-17.4.67	30	42/08	1	1	1	nach Plan
21	23.4.67-31.7.67	87,5	42/08 44/08 44/12	1 1 1	2 2 4	1 1 1	nach Plan
22	23.4.67-30.6.69	606,8	36/12 44/28 50/16	1 1 19	2 2 42	1 1 37	nach Plan
23	25.5.67-18.9.67	87	36/12 44/08 44/12	1 1 1	2 4 1	1 1 5	Bestrahlung abgebr., überh. TE-Anzeige
24	1.7.67-6.10.69	609,6	36/12 44/08 44/12 44/16	1 7 1 12	4 12 1 34	1 17 3 17	nach Plan
25	1.7.67-22.7.68	280,2	40/30 40/20 44/22	1 6 3	4 11 6	1 12 9	Bestrahlung abgebr., TE-Ausfall
26	1.7.67-13.5.68	220,5	42/04 40/12 44/12	1 1 6	4 1 11	1 5 12	nach Plan
27	21.8.67-10.2.69	399,4	36/16 40/12 50/12	1 11 2	1 23 3	5 19 2	nach Plan
28	21.8.67-25.8.69	542,8	40/08 50/08 42/28 44/22 54/16	2 4 3 9 1	4 7 6 21 5	5 7 9 16 0	nach Plan
29	23.9.67-8.4.68	132,5	40/28	5	10	7	nach Plan
30	23.9.67-22.7.68	223	36/16 40/08	1 7	3 13	0 16	nach Plan
31	27.10.67-17.3.69	371,3	40/08 36/16 54/10 54/12 54/16	4 1 1 4 3	7 1 1 11 6	7 5 3 4 4	nach Plan
32	27.10.67-29.1.68	45,5	36/16	2	4	3	Bestr. abgebr. überh. TE-Anz.

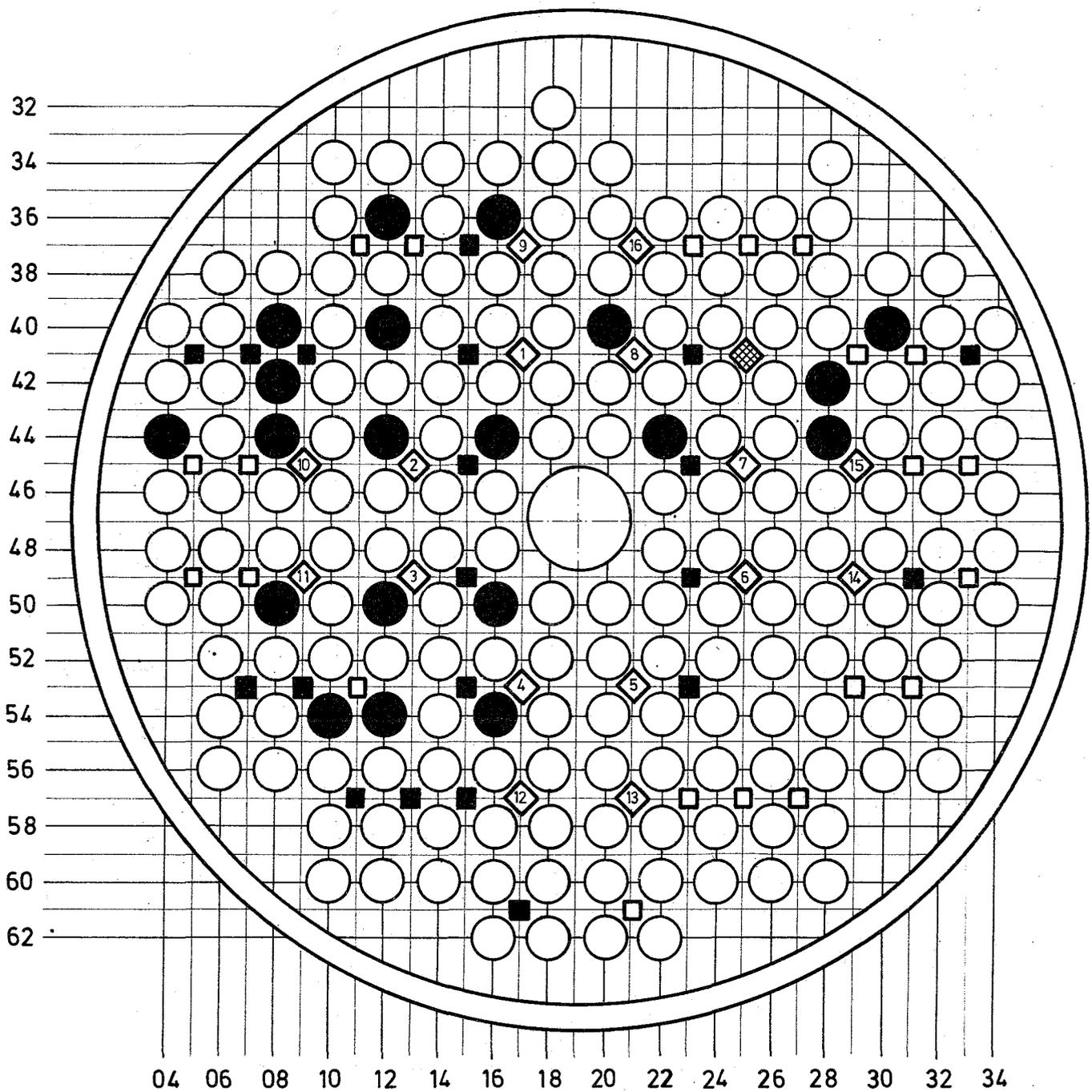


Abb.15: Positionskarte
FR 2 - Core

- von KVE benutzte BE-Position
- Brennelementposition
- ◇ Trimm-Abschaltstab
- ⊠ Feinregelstab
- Isotopenkanal-Position
- zu Flußmessungen benutzte Isotopenkanal-Positionen

Tabelle XIV: Vertikaler Verlauf des thermischen Flusses in den Isotopenkanal-Positionen in Höhe der Prüflingsmitte
 $(\phi_{th} \times 10^{-13} / \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1} /)$

Iso. ϕ_{th}	37/15	41/05	41/07	41/09	41/15	41/23	41/33	45/15	45/23	49/15	49/23	49/31	53/07	53/09	51/15	53/23	57/13	57/15	61/17
	7,9 (7/68) 525 mm	4,2 (3/67) 1020mm	6,2 (4/67) 720 mm	7,1 (4/67) 720 mm	8,9 (4/67) 720 mm	7,3 (4/67) 720 mm	4,4 (7/68) 525 mm	9,0 (4,67) 720 mm	7,8 (4/67) 720 mm	8,8 (4/67) 720 mm	8,3 (4/67) 635 mm	5,3 (4/67) 720 mm	6,9 (7/68) 525 mm	6,8 (4/67) 720 mm	8,2 (4/67) 720 mm	6,8 (4/67) 720 mm	6,3 (4/67) 720 mm	6,8 (4/67) 720 mm	5,0 (7/68) 525 mm
	7,5 (1/69) 430 mm	4,7 (4/67) 640 mm		7,4 (7/68) 525 mm	8,8 (7/68) 525 mm		4,9 (1/69) 430 mm	8,9 (7/68) 525 mm		8,9 (7/68) 525 mm	6,2 (3/67) 1020mm	6,5 (7/68) 525 mm		7,6 (7/68) 525 mm	8,6 (7/68) 525 mm	7,3 (7/68) 525 mm		7,3 (7/68) 525 mm	
				7,1 (1/69) 430 mm	7,9 (1/69) 430 mm			8,4 (1/69) 430 mm		8,3 (1/69) 430 mm								7,5 (1/69) 430 mm	
	8,2	5,0	6,7	8,1	9,6	8,6	4,6	9,6	8,7	9,4	8,6	6,4	7,1	7,4	8,7	7,4	6,8	7,3	5,1
	7,5	5,0		7,5	9,0		5,1	8,9		8,9	7,7	6,6		7,6	8,6	7,3		7,4	
				7,1	8,0			8,3		8,3									7,7
	8,1	5,4	6,8	8,2	9,8	9,3	4,6	9,7	9,1	9,4	8,6	7,0	7,0	7,4	8,8	7,6	6,9	7,4	5,1
	7,3	4,8		7,4	8,9		5,0	8,7		8,6	8,8	6,6		7,3	8,3	7,2		7,2	
				6,9	7,8			8,0		8,1							7	7,5	
	7,6	5,6	6,6	7,9	9,5	9,3	4,4	9,4	9,1	9,1	8,3	7,1	6,6	7,1	8,4	7,4	6,6	7,0	5,0
	6,8	4,7		7,0	8,3		4,7	8,2		8,3	9,4	6,3		6,8	7,8	7,0		6,7	
				6,5	7,3			7,5		7,6								7,1	

Erläuterung:

Spalte 1: $\phi_{th} = 7,9 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$ bei TA-Stellung 525 mm, gemessen Juli 1968 in Iso.-Kanal 37/15 in Höhe der oberen Prüflingsmitte
 $\phi_{th} = 7,5 \times 10^{13} \text{ " " " " 430 mm, " Jan. 1969 " " " "$
 (entsprechend für die folgenden Prüflinge und Iso.-Kanäle)

Der Fluß kann sich hierbei um bis zu 50 % verändern (s. Spalte 49/23 der Tabelle XIV). Eine Zuordnung des Flusses zu den einzelnen KVE-Positionen kann im Rahmen dieser Dokumentation nicht erfolgen.

Wie neuere Rechnungen mit dem Zellprogramm WIMS [7] zeigen, beträgt die Flußabschwächung entgegen den Annahmen bei der Auslegung in der Na/PbBi-Doppelkapsel tatsächlich etwa 30 %. Die Flußmessungen zeigen weiterhin, daß der Fluß über die Prüflingslänge als nahezu konstant angenommen werden kann.

7.3 Temperatur und Stableistung

Die bei den Bestrahlungen der Versuchsgruppe 3 verwendeten Na/PbBi-Doppelkapseln [5] sind mit Thermoelementen ausgestattet, welche die Messung der Na-Temperatur in Höhe der Bestrahlungsprüflinge gestatten. Aus diesem Meßwert kann die Hülloberflächentemperatur sowie die Stableistung des Prüflings ermittelt werden. Wie Eichversuche zeigen, besteht gute Übereinstimmung zwischen experimentell und rechnerisch ermittelten Werten [8]. Abweichungen von maximal 20° rühren von der Einbringung der Thermoelemente in Tauchrohren mit 0,2 mm Spiel her. Der Gesamtfehler der Temperaturbestimmung wird auf $\pm 5\%$ abgeschätzt.

Die Umrechnung der Meßwerte erfolgt graphisch über die linearen Darstellungen

$$T_{Ha} = 1,25 \cdot T_m - 25 \quad \text{Hülloberflächentemperatur } (^{\circ}\text{C}) \quad (1)$$

$$\lambda = 1,885 \cdot T_m - 165,5 \quad \text{lin. Stableistung} \quad (\text{W/cm}) \quad (2)$$

für $T_m \geq 90^{\circ}\text{C}$, wobei T_m die Meßstellentemperatur bedeutet.

Die Mittelung der Thermoelementanzeige erfolgt linear über jeweils einen Reaktorzyklus. Die mittlere Abweichung der Prüflingstemperatur von dieser linearen Approximation beträgt etwa $\pm 1\%$. Zu Beginn eines jeden Zyklus liegen die Anfangstemperaturen im Mittel etwa 15 bis 20° über dem mittleren Anfangswert, um nach einigen Stunden auf den Mittelwert zurückzugehen (Temperaturerhöhung in der Anfahrphase).

Die Auswertung der Meßwerte umfaßt tabellarische und grafische Darstellungen des zeitlichen und axialen Verlaufs der Hülloberflächentemperaturen und der Stableistungen der einzelnen Prüflinge. Die geometrische Zuordnung der Meßwerte zu den Prüflingen ist aus dem Instrumentierungsplan (Tabelle XV) ersichtlich. Die Zahlen neben den TE-Nummern bedeuten die Lage des Thermoelements in mm vom unteren

Tabelle XV: Instrumentierungsplan der Versuchsgruppe 3

	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
80 mm										<u>DU</u> TE Höhe 7 40	<u>36</u> TE Höhe 7 40		
0													
80 mm	<u>Prüfl. 1</u> TE Höhe Nr. 6 40			<u>MM</u> TE Höhe Nr. 6 40						<u>CG</u> 6 55 5 25	<u>35</u> 6 55 5 25	<u>39</u> 6 40	<u>IS</u> 6 40
0													
80 mm	<u>Prüfl. 5</u> 5 70 4 40 3 15	13 6 40	L9 6 40	9 5 65 4 40 3 25	6 6 40	MS 6 40	10 6 40	14 6 40	BU 6 40	AG 4 55 4 55 3 25	34 4 55 4 55 3 25	38 5 70 4 40 3 15	KM 5 70 4 40 3 25
0													
80 mm	<u>Prüfl. 7</u> 1 40	11 3 80 2 75 1 40	18 3 75 2 40 1 40	3 1 40	4 3 65 2 40 1 10	2 3 65 2 40 1 10	8 3 65 2 40 1 10	12 3 65 2 40 1 10	16 3 65 2 40 1 10	15 2 55 1 25	33 2 55 1 25	37 2 60 1 20	40 2 60 1 20
0													

Prüflingsende entsprechend der Skizze. In Tabelle XVI sind die einer linearen Approximation entsprechenden Anfangs- und Endwerte der Hülloberflächentemperatur eines jeden Prüflings je Zyklus zusammengestellt. In den Abb. 16 bis 21 ist der zeitliche Temperaturverlauf sämtlicher Prüflinge dargestellt. Hierbei wurden jeweils die Thermoelemente zur Auswertung hinzugezogen, die etwa den Temperaturmittelwert, bezogen auf die Prüflingslänge, anzeigen. In den Abb. 22 bis 27 ist der axiale Verlauf der Hülltemperatur sämtlicher Prüflinge mit 2 - 3 Thermoelementen dargestellt, wobei der Anfangs-, End- und Maximalverlauf ausgewählt wurde. Schließlich sind in Tabelle XVII die nach Gl. (2) berechneten mittleren und maximalen Stableistungen aller Prüflinge zusammengefaßt, wovon die mittleren zur Bestimmung des Abbrandes herangezogen werden.

7.4 Thermische Abbrandberechnung

Die Berechnung des mittleren Abbrandes \bar{A} der Prüflinge wird über die aus den Temperaturwerten gewonnenen mittleren Stableistungen $\bar{\chi}$ (s.o.) nach der Gleichung

$$\bar{A} = \bar{\chi} \cdot \frac{l \cdot t_v}{G} \quad (\text{MWd/kg M}) \quad (3)$$

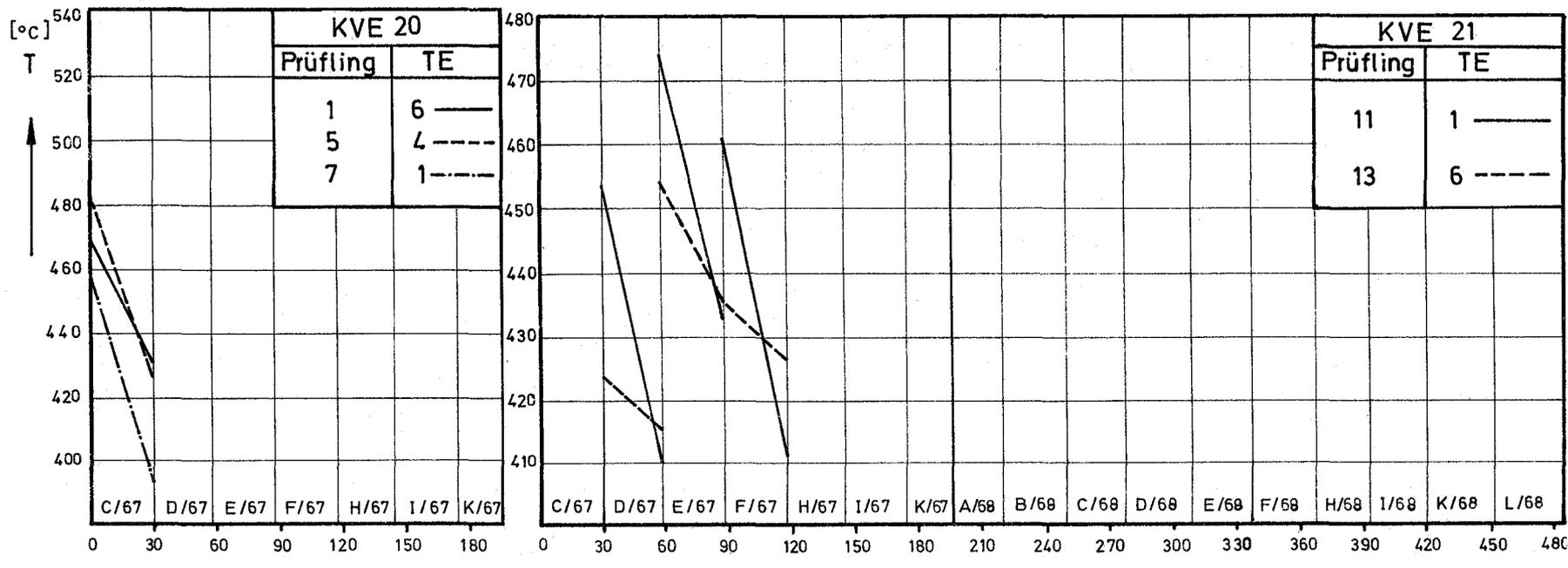
mit

- l = Brennstofflänge (cm)
- t_v = Bestrahlungszeit (Vollastäquivalent) (d)
- G = Brennstoffgewicht (Metall) (g)

durchgeführt. In Tabelle XVIII sind die Abbrandwerte für jeden Prüfling mit Angabe des ausgewerteten Thermoelements aufgeführt. Diese Werte stellen die Summe der Teilabbrände in den einzelnen Zyklen dar. Eine Kontrollrechnung mit einer über die gesamte Bestrahlungszeit gemittelten Stableistung zeigt Abweichungen von < 1 %. Bei Prüflingen mit einem Thermoelement in Prüflingsmitte kann die berechnete Stableistung i.a. als mittlere Stableistung bezogen auf die Brennstofflänge angesehen werden, wie bei Prüflingen mit 3 Elementen gezeigt werden kann (vergl. Abb. 22 - 27). Bei Prüflingen mit zwei Elementen im oberen und unteren Drittel der Brennstoffsäule kann der Fehler der Abbrandberechnung durch Abweichung von $\bar{\chi}_{TE}$ vom Mittelwert - bezogen auf die Brennstofflänge - etwa ± 5 % betragen.

Tabelle XVI: KVE-Versuchsgruppe 3
 Mittlere Hülloberflächentemperaturen zu Zyklusbeginn und -ende.

KVE	Prüfling/TE	C/67	D/67	E/67	F/67	G/67	H/67	I/67	K/67	A/68	B/68	C/68	D/68	E/68	F/68	H/68	I/68	K/68	L/68	A/69	B/69	C/69	D/69	E/69	G/69	H/69																												
20	1/6 5/5 5/4 5/3 7/1	469 538 485 450 460	429 480 428 395 394																																																			
21	13/6 11/1	-	-	425 455	416 412	455 475	436 434	436 462	428 414	(TE 2 und 3 wie 1 + 5% - 0%)																																												
22	19/6 18/3 18/2 18/1	-	-	370 380 365 314	370 343 436 298	410 417 456 356	397 370 399 326	448 425 452 365	436 387 410 334	443 412 427 348	414 372 391 316	384 381 394 323	381 360 366 304	379 372 354 304	362 354 354 279	347 354 354 278	347 330 330 286	355 347 347 278	342 318 318 253	330 323 309 255	318 292 311 228	323 314 309 235	291 278 272 198	311 294 237 215	285 260 260 191	267 260 242 191	253 242 222 162	242 242 222 174	242 237 206 158	233 210 216 140	228 216 183 141	228 204 167 135	228 210 180 -	198 189 154 -	178 189 155 -	160 170 139 -	154 180 135 -	154 162 135 -	147 158 127 104	147 167 137 112	147 158 123 104	128 147 115 100	128 140 105 90											
23	MM/6 9/5 9/4 9/3 3/1	-	-	-	-	388 436 417 399 394	367 425 405 366 350	393 412 430 405 405	362 412 386 355	468 560 481 475	412 481 462 405																																											
24	6/6 4/3 4/2 4/1	-	-	-	-	-	-	394 397 367 291	342 338 423 245	455 450 425 277	386 405 386 298	404 425 343 266	372 386 394 266	417 438 365 305	384 410 394 277	386 416 366 298	350 506 306 278	367 404 306 278	326 365 336 260	367 380 336 260	326 331 333 282	326 323 323 254	291 311 341 222	356 352 341 267	305 352 278 222	350 408 341 267	305 348 323 222	291 344 318 279	291 314 311 -	277 334 260 -	278 338 272 -	235 297 226 -	349 316 247 -	218 267 210 -	241 321 245 -	205 274 208 -	179 316 266 -	160 311 258 -	210 316 367 242	170 291 354 205	185 293 349 192	155 278 349 192	155 274 338 190	140 271 334 165	192 245 175 -	140 205 145 -	160 242 170 145	140 222 153 128						
25	MS/6 2/3 2/2	-	-	-	-	-	-	311 397 330	287 313 293	481 550 456	412 456 456	468 545 500	412 456 500	444 444 444	444 538 450	372 405 506	333 408 506	365 462 462	306 394 394	336 436 436	296 379 379	321 415 360	260 -																															
26	10/6 8/3 8/2	-	-	-	-	-	-	215 235 193	185 193 166	487 493 450	430 425 380	487 445 394	444 487 386	468 436 386	417 454 350	475 434 381	418 480 350	398 450 386	430 380 334	372 414 367	410 355 304	343 355 304																																
27	14/6 12/3 12/2 12/1	-	-	-	-	-	-	-	-	450 481 418 330	405 418 494 288	456 436 416 256	416 475 374 287	434 430 374 287	405 500 439 344	452 425 397 291	397 341 399 311	416 425 397 268	360 341 394 260	405 334 393 260	355 393 355 279	378 425 309 250	331 401 330 275	348 339 283 275	292 405 336 265	342 338 323 224	293 397 276 258	323 397 366 227	287 348 318 227	320 395 276 255	276 336 272 216	274 338 233 220	242 298 233 193	253 318 233 210	212 272 192 170	230 305 240 193	203 265 205 180																	
28	BU/6 16/3 16/2 16/1	-	-	-	-	-	-	-	-	372 372 348 265	336 334 305 230	354 360 334 254	330 323 296 222	409 406 389 268	379 444 354 268	404 374 389 305	360 338 360 283	379 - 360 283	338 386 313 260	356 341 350 230	313 341 293 230	420 455 393 309	366 438 372 285	394 384 383 285	350 406 383 247	372 412 352 271	323 352 383 226	375 435 366 285	336 374 311 245	358 406 348 265	311 352 287 226	309 356 296 228	267 298 247 193	276 318 262 208	245 276 224 183	267 318 266 208	235 266 217 175	262 318 255 200	230 277 222 180	272 334 268 210	222 274 212 170	229 287 227 181	193 241 192 154	204 260 204 160	181 227 174 147	193 247 187 153	160 210 182 128							
29	DU/7 03/5 03/6 03/3 15/1 15/2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																											
30	36/7 35/6 35/5 34/4 34/3 33/2 33/1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																												
31	39/6 38/5 38/4 38/3 37/2 37/1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																												
32	15/6 KM/5 KM/4 KM/3 40/2 40/1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																												



Hülloberflächen-
temperaturen der
Prüflinge der Ver-
suchsgruppe 3 als
Funktion der Be-
strahlungszeit.

(lineare Mittelung)

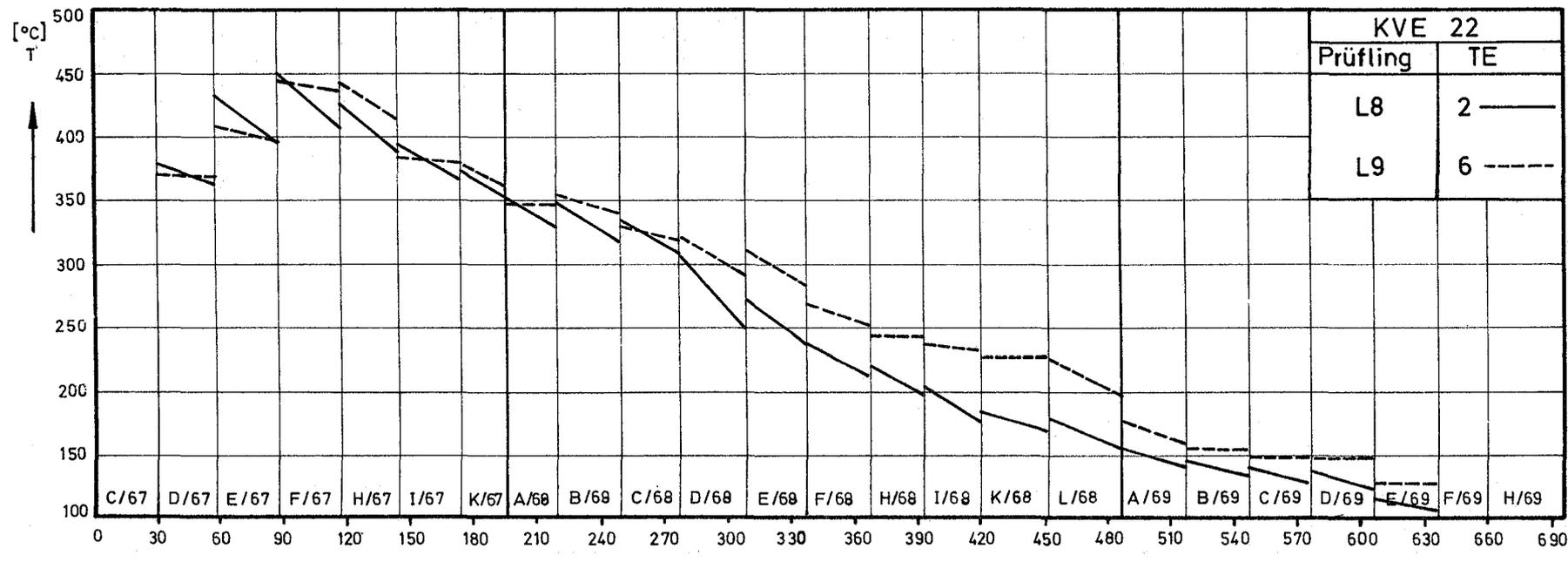
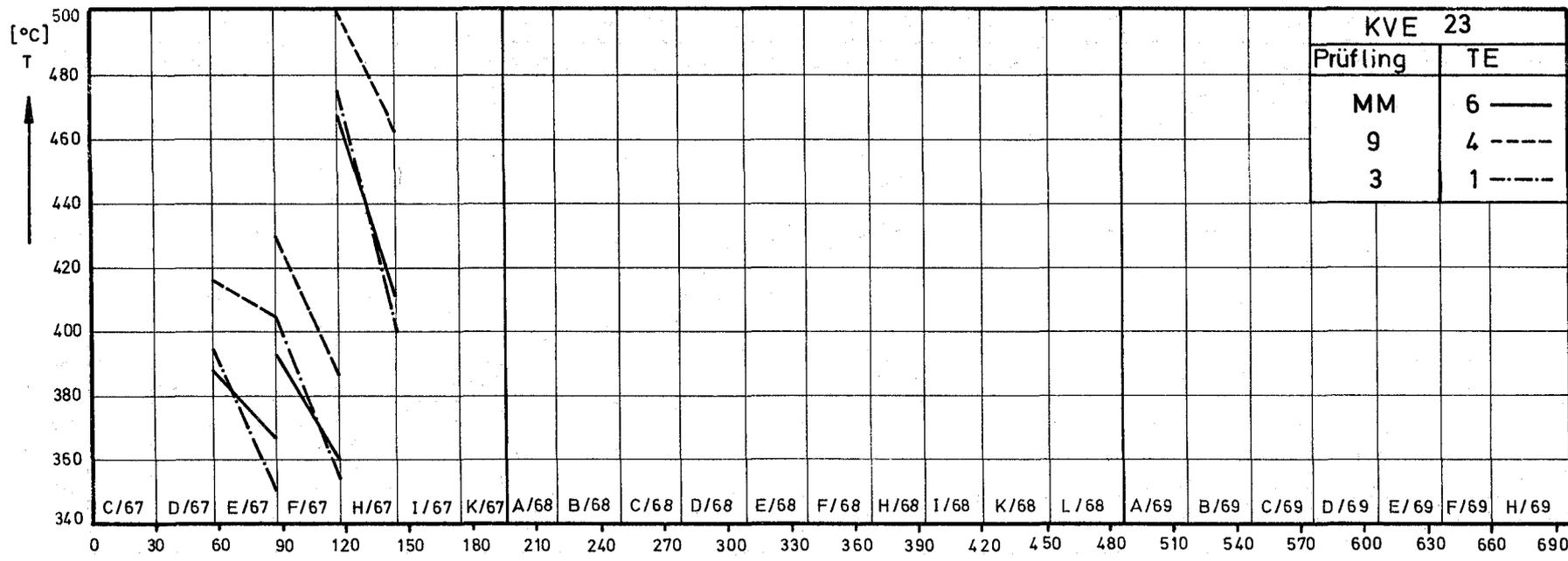


Abb. 16



Hüloberflächen-
temperaturen der
Prüflinge der Ver-
suchsgruppe 3 als
Funktion der Be-
strahlungszeit.

(lineare Mittelung)

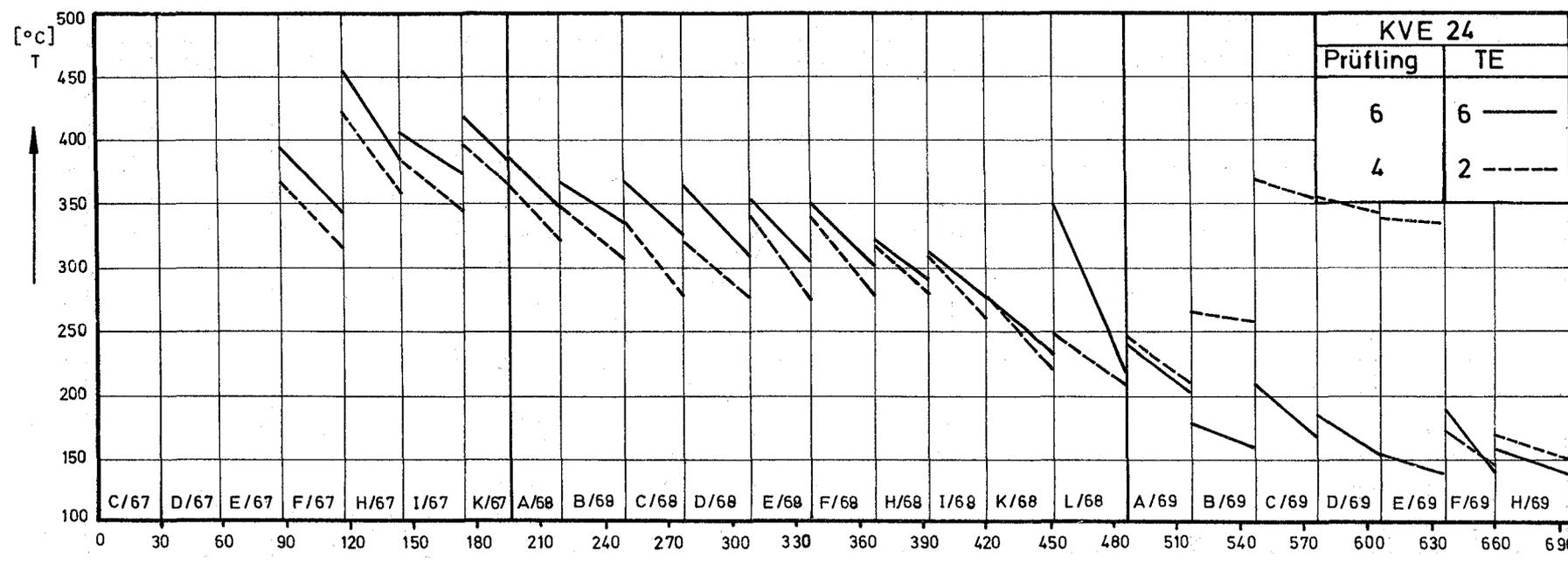
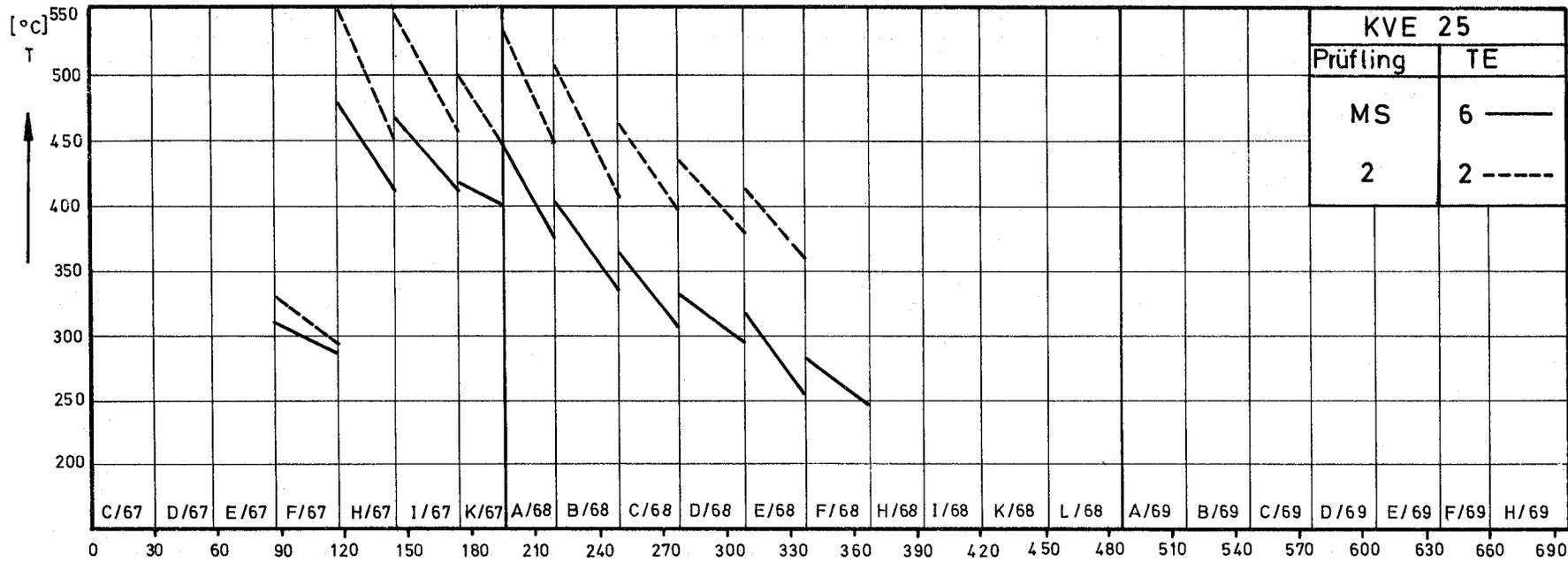


Abb. 17



Hülloberflächen-
temperaturen der
Prüflinge der Ver-
suchsgruppe 3 als
Funktion der Be-
strahlungszeit.

(lineare Mittelung)

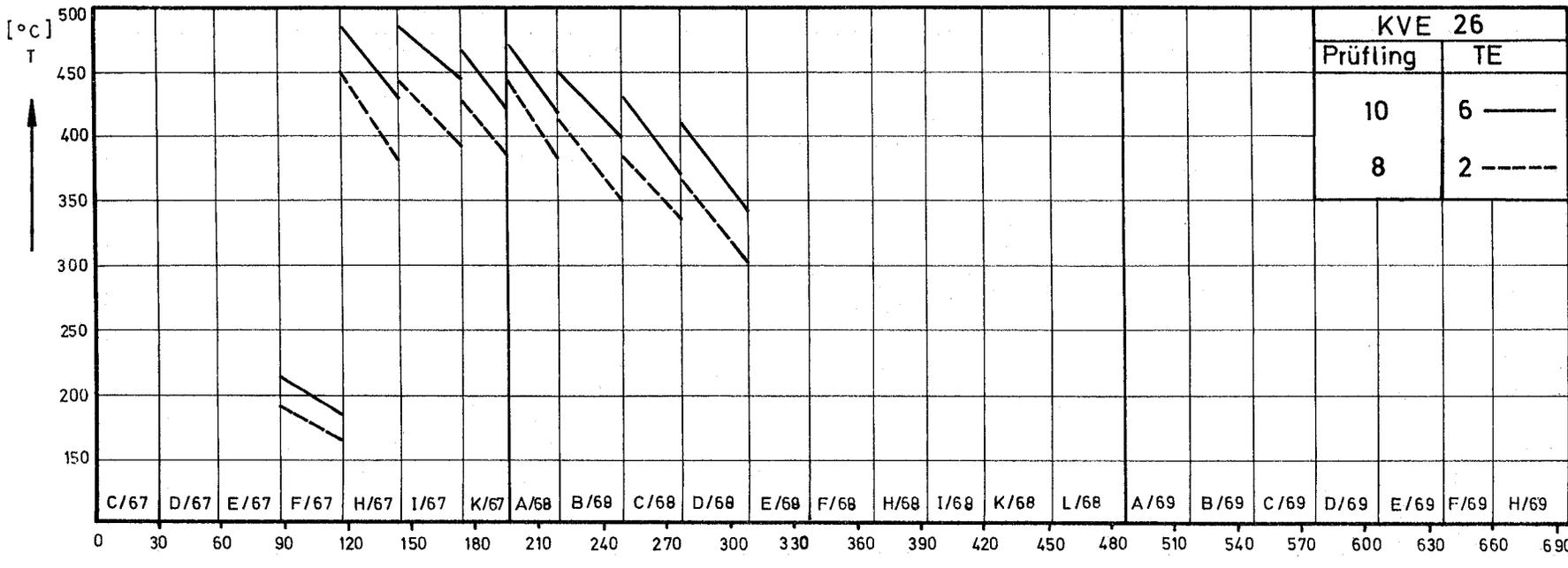


Abb. 18

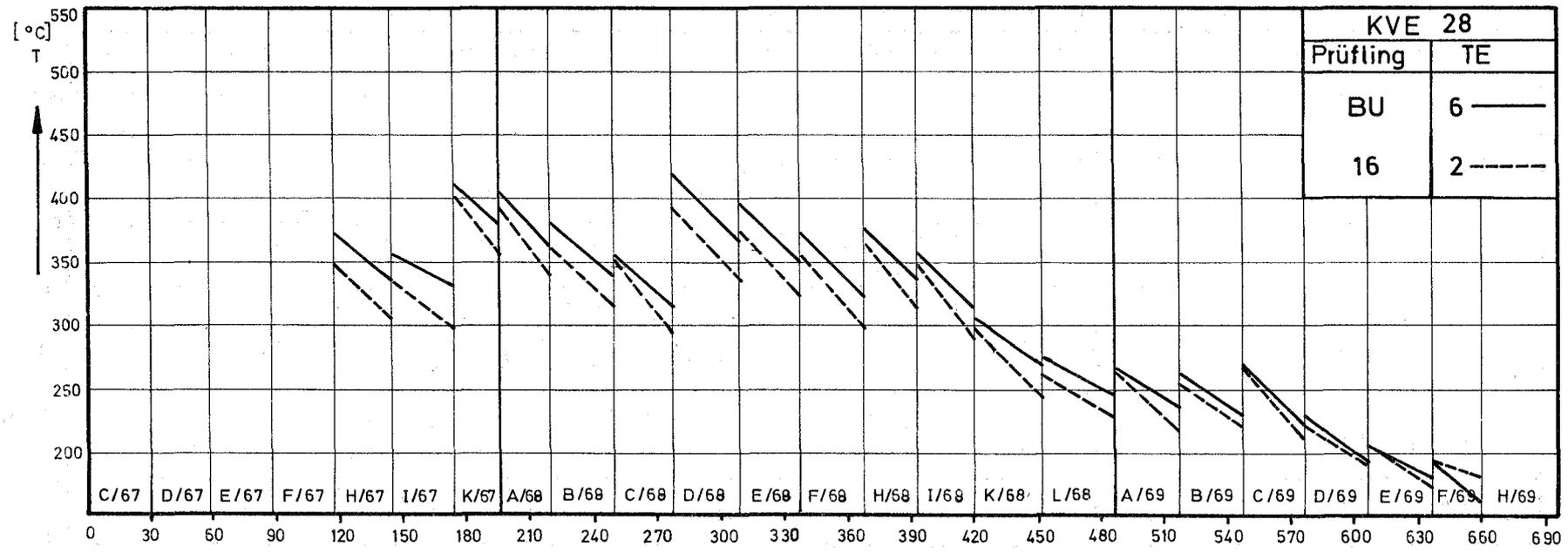
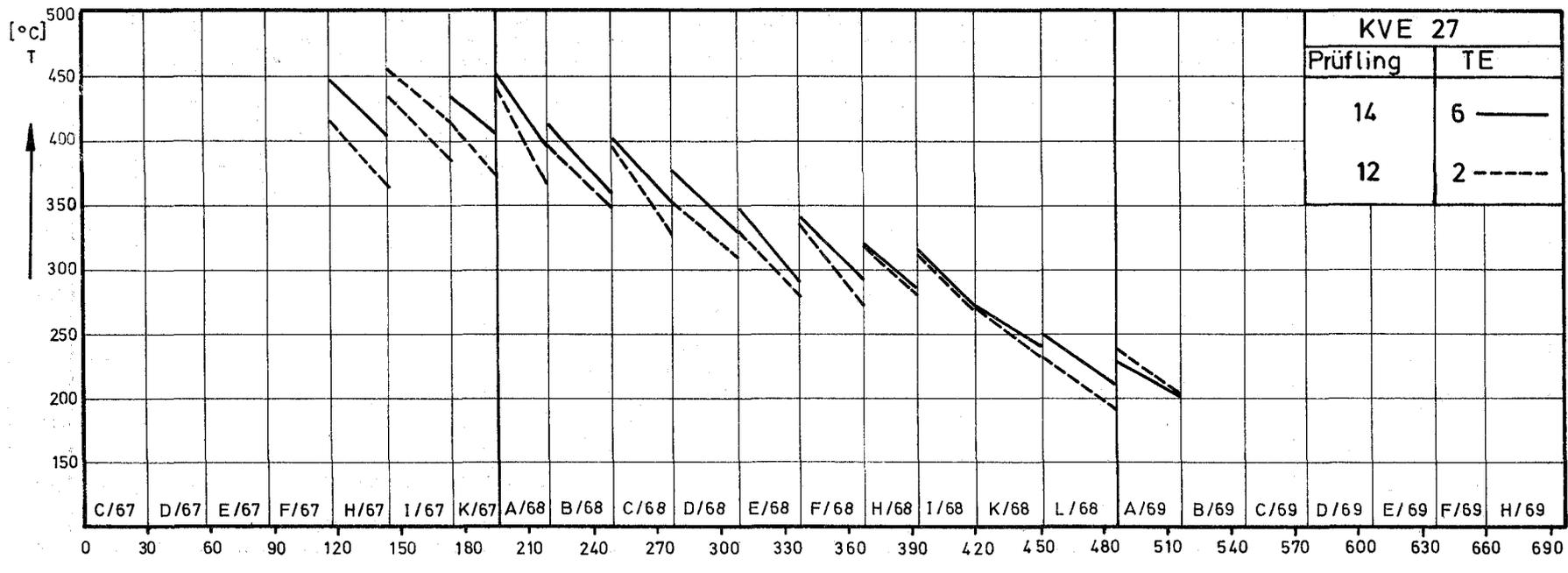
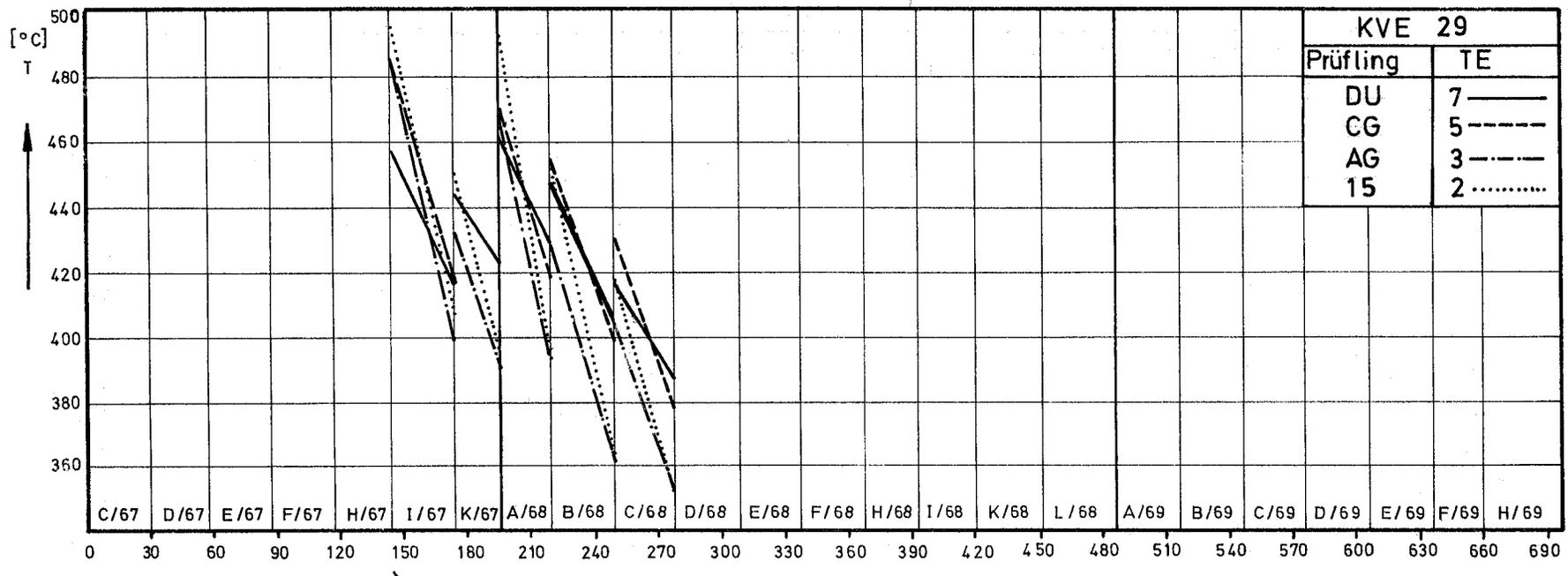
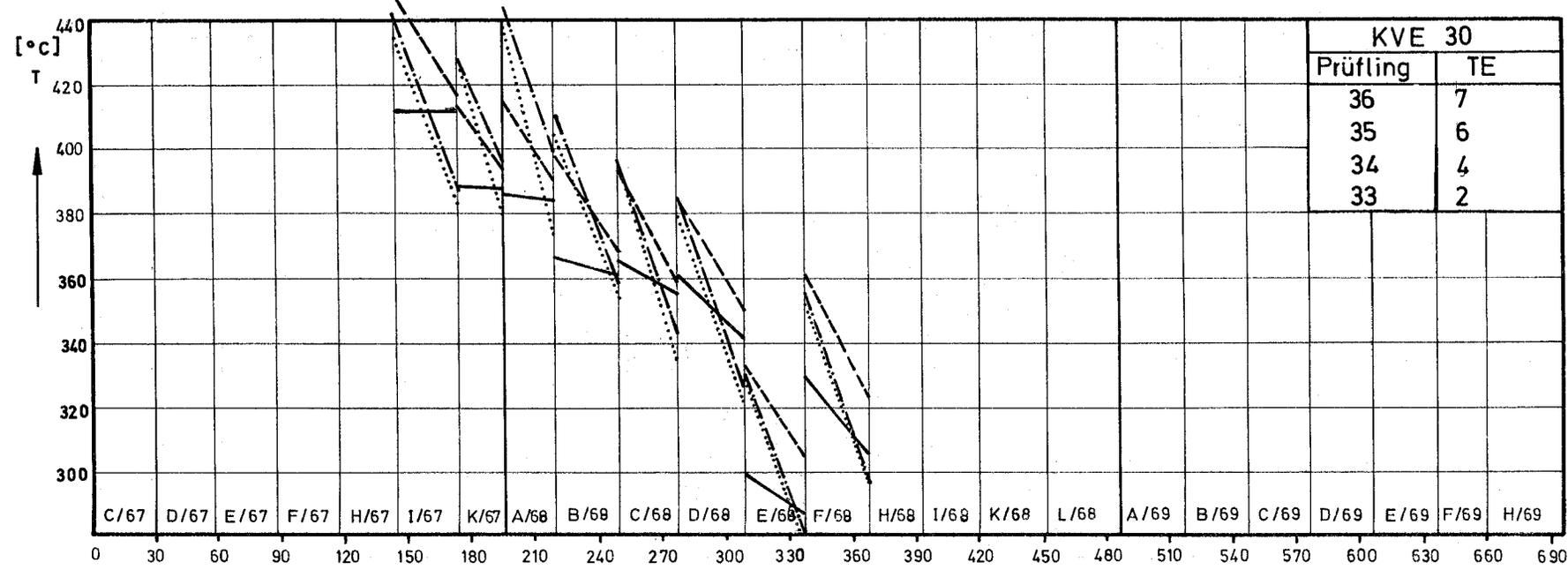


Abb. 19



Hüloberflächen-
temperaturen der
Prüflinge der Ver-
suchsgruppe 3 als
Funktion der Be-
strahlungszeit.

(lineare Mittelung)



Betriebszeit
Vollasttage [d]

Betriebszeit
Vollasttage [d]

Abb. 20

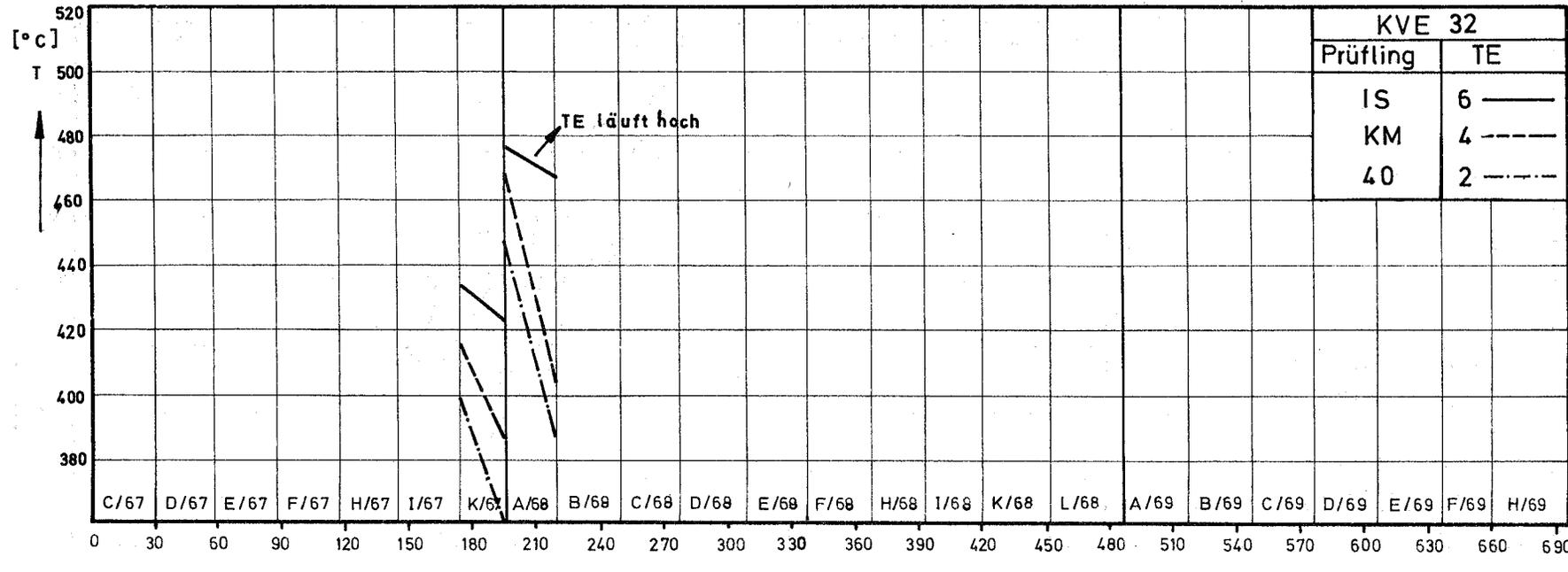
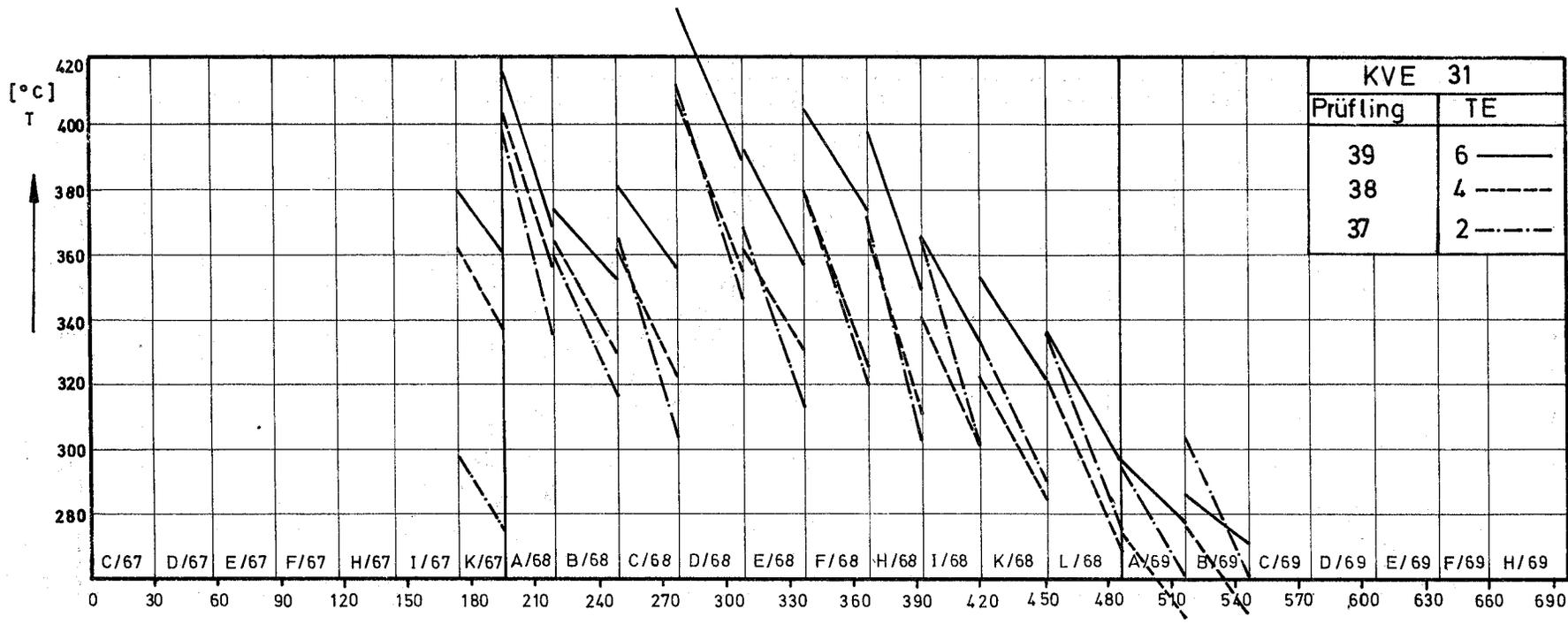
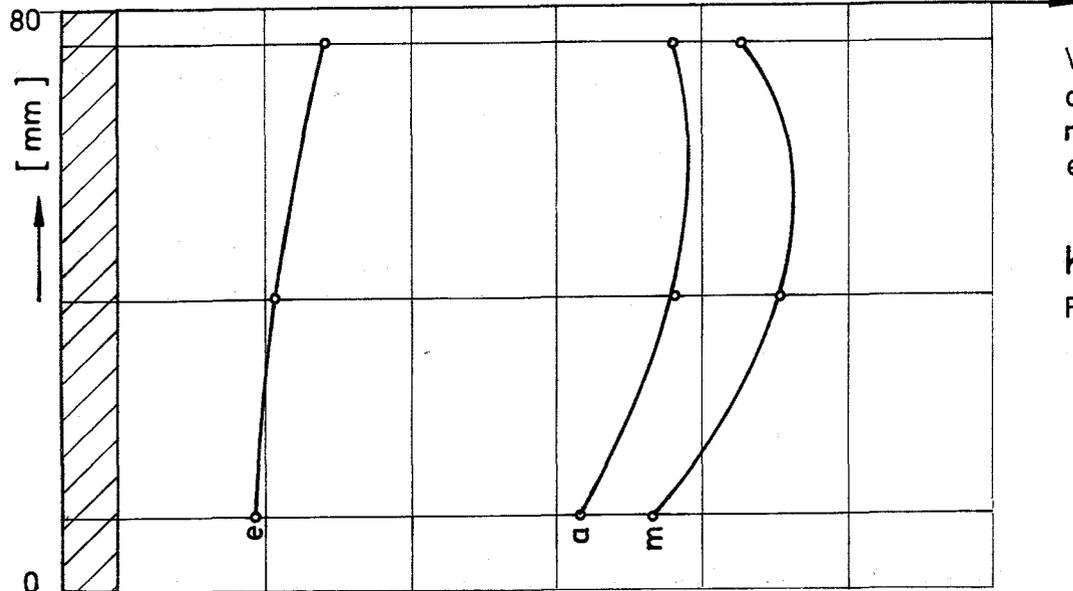
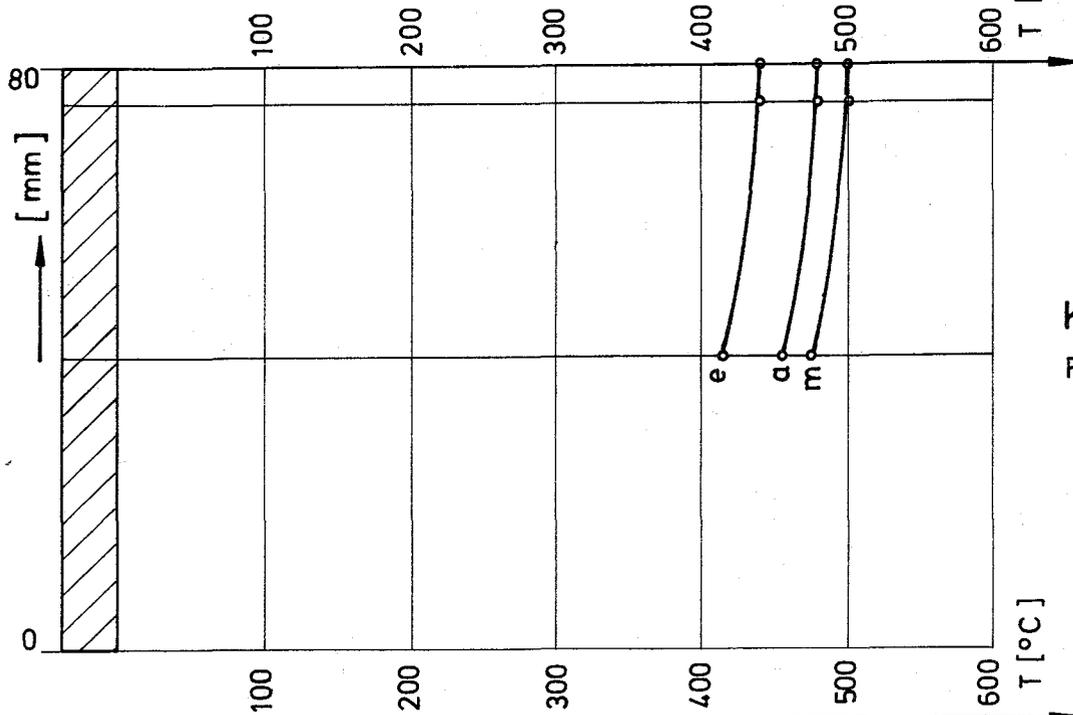
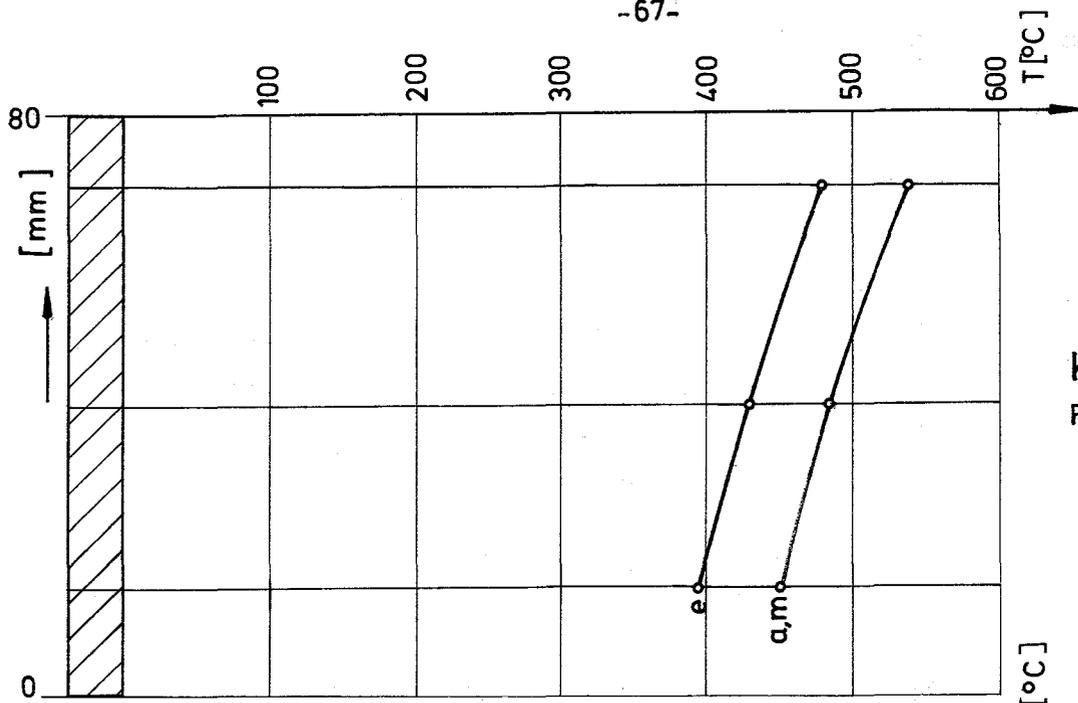
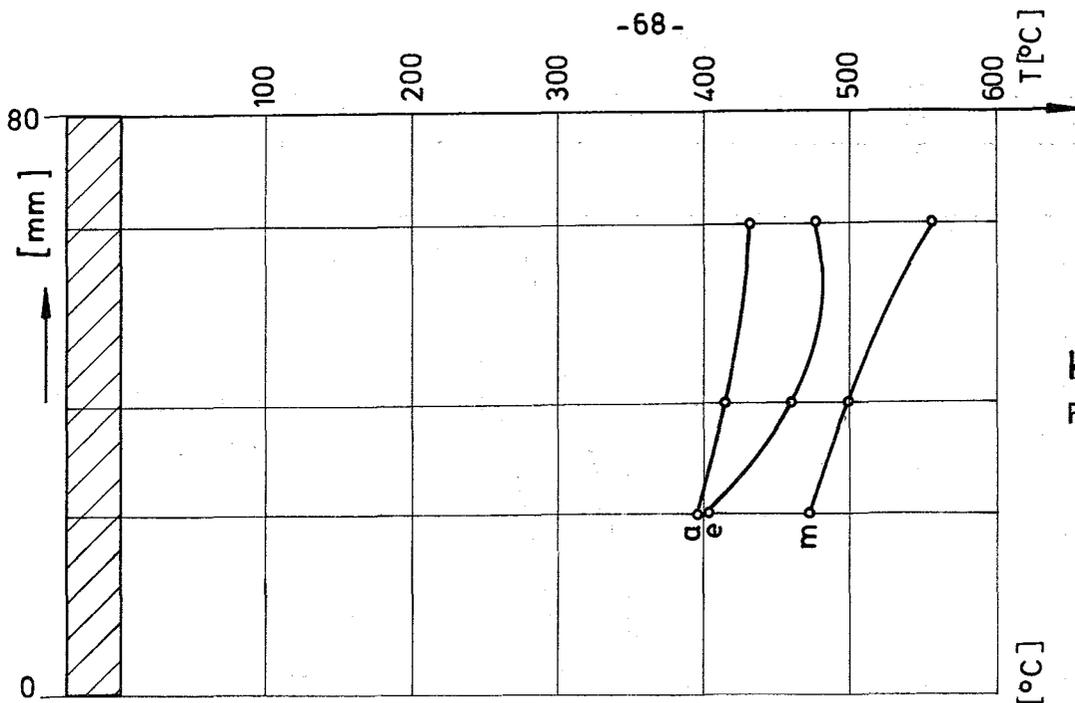


Abb. 21

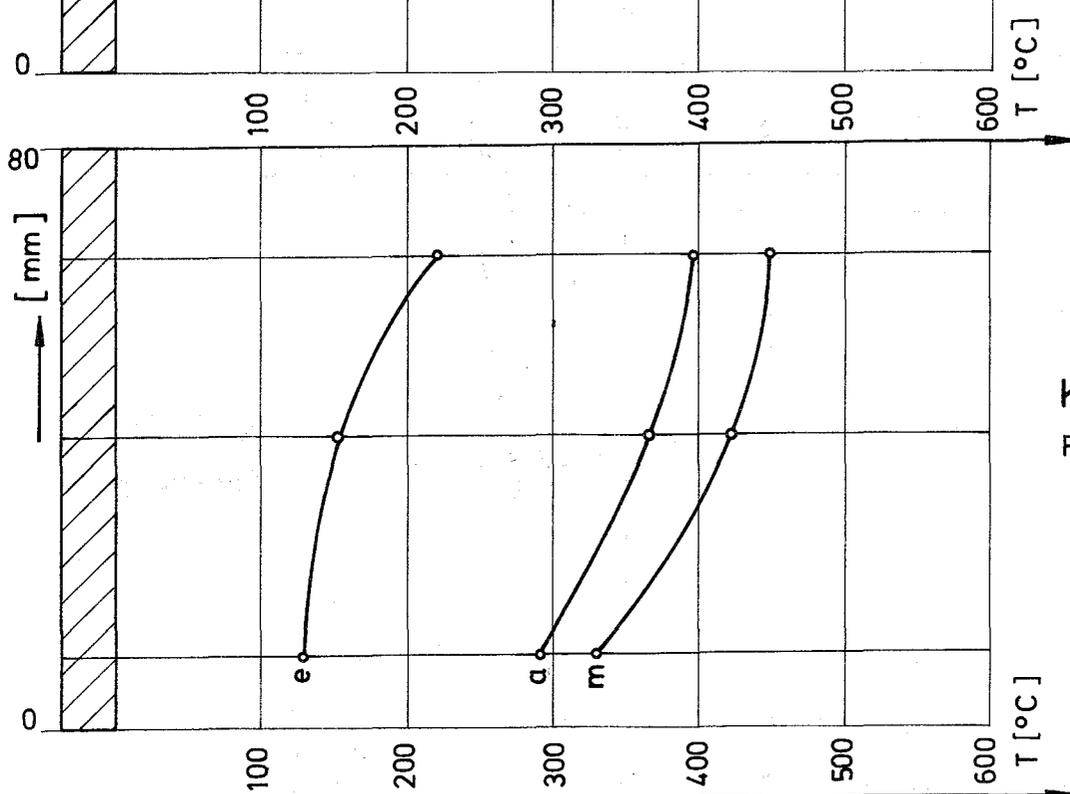


Kapselversuchsgruppe 3
Axiale Temperaturverteilung (Hülloberfläche)

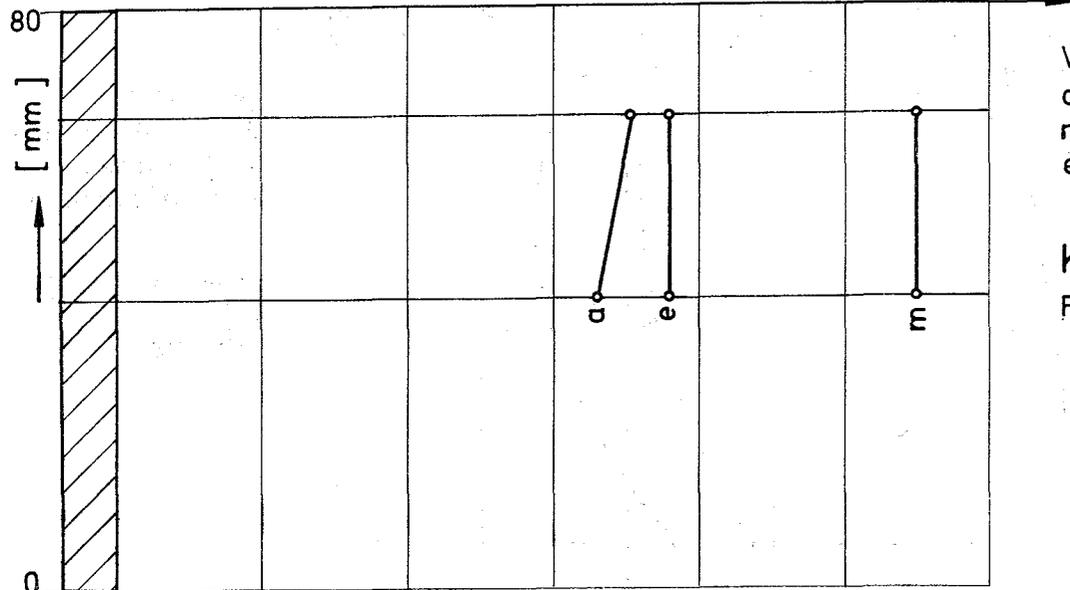
Abb. 22



KVE - Nr. 23
Prüfling 9



KVE - Nr. 24
Prüfling 4

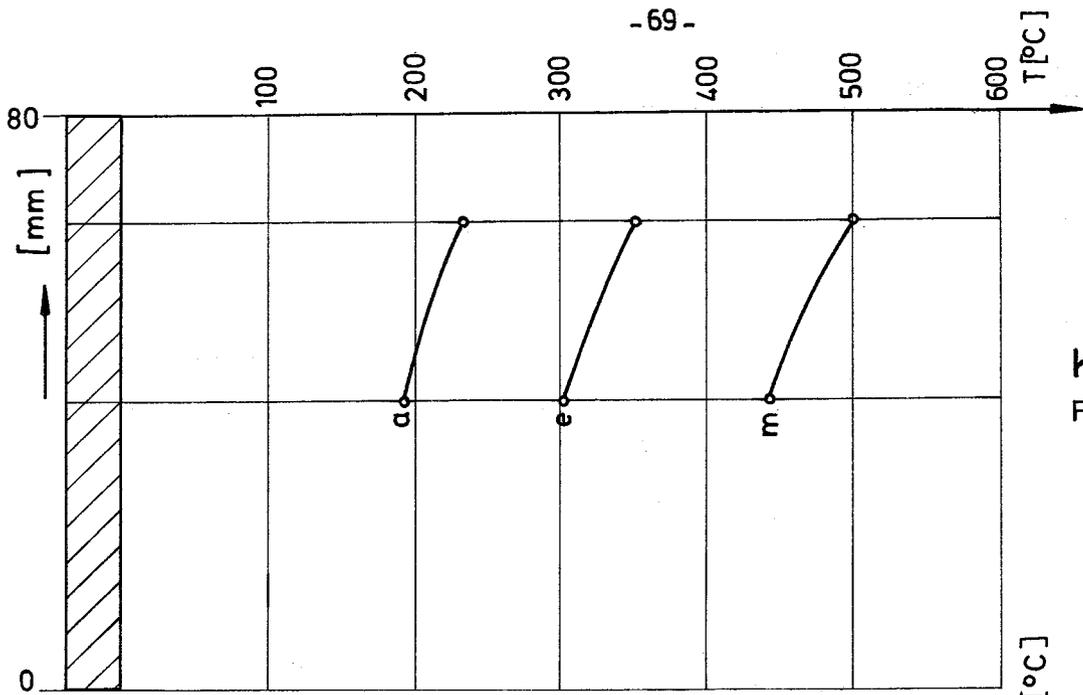


Verteilung :
a - Betriebsbeginn
m - Maximalwert
e - Betriebsende

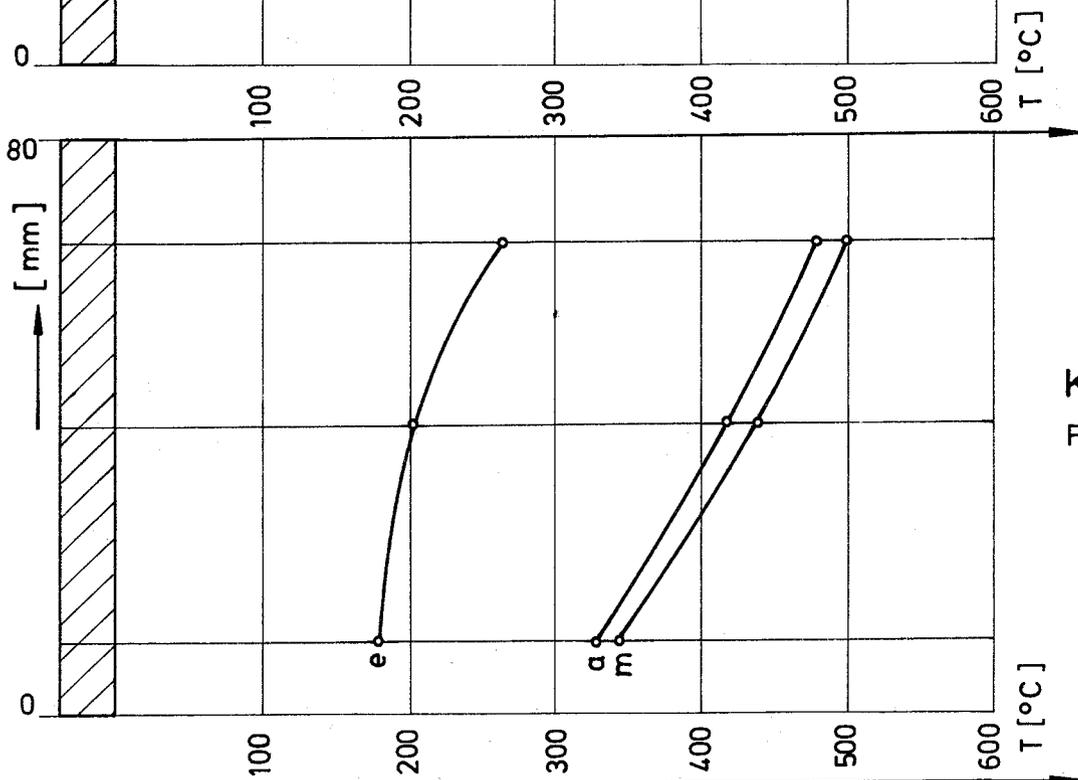
KVE - Nr. 25
Prüfling 2

Kapselversuchsgruppe 3
Axiale Temperaturverteilung (Hülloberfläche)

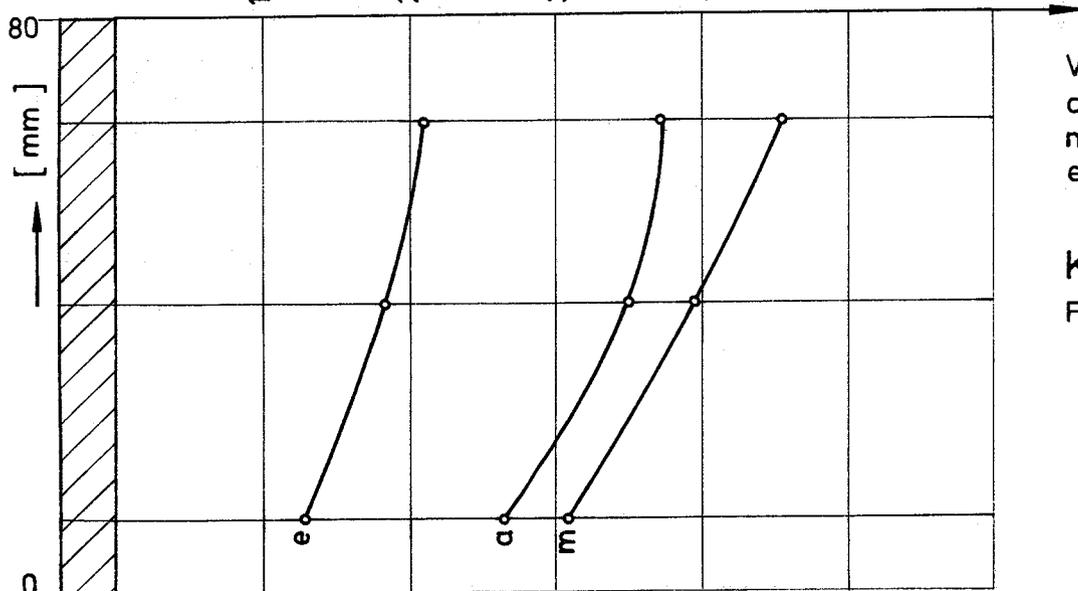
Abb. 23



KVE -Nr. 26
Prüfling 8



KVE -Nr. 27
Prüfling 12

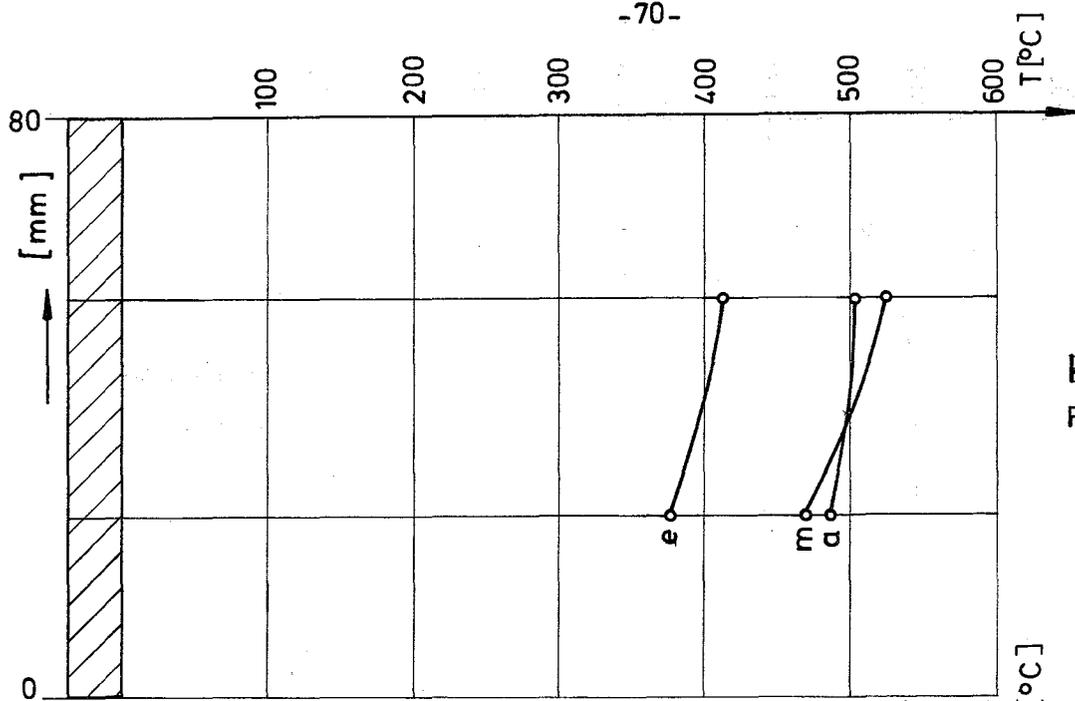


Verteilung :
a - Betriebsbeginn
m - Maximalwert
e - Betriebsende

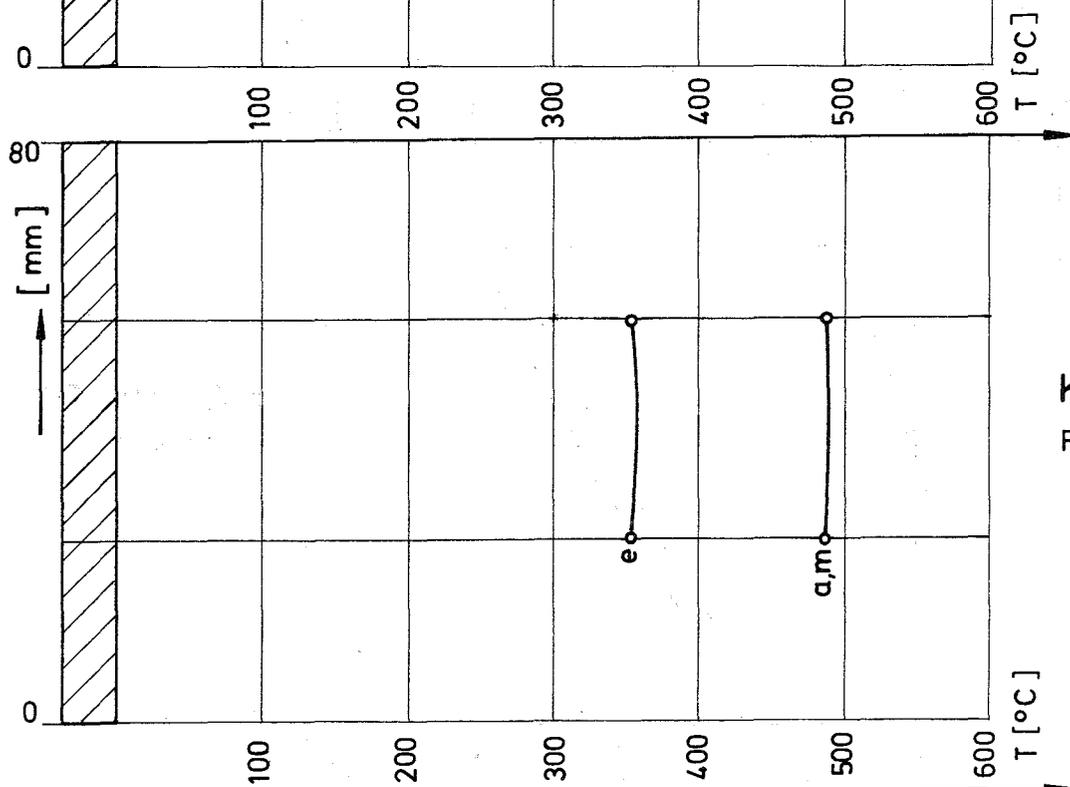
KVE -Nr. 28
Prüfling 16

Kapselversuchsgruppe 3
Axiale Temperaturverteilung (Hülloberfläche)

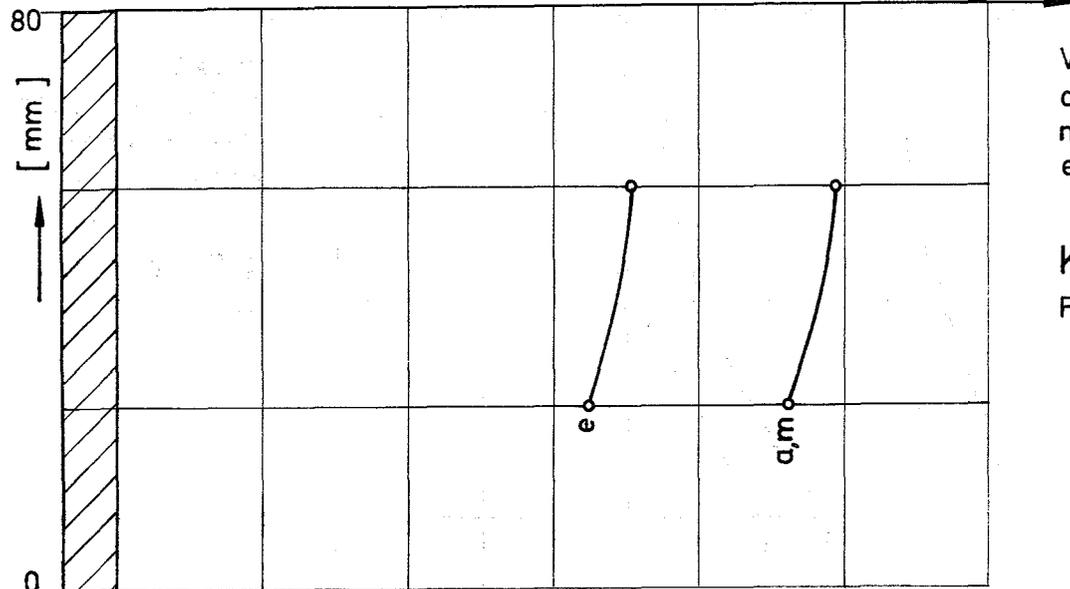
Abb. 24



KVE -Nr. 29
Prüfling CG



KVE -Nr. 29
Prüfling AG

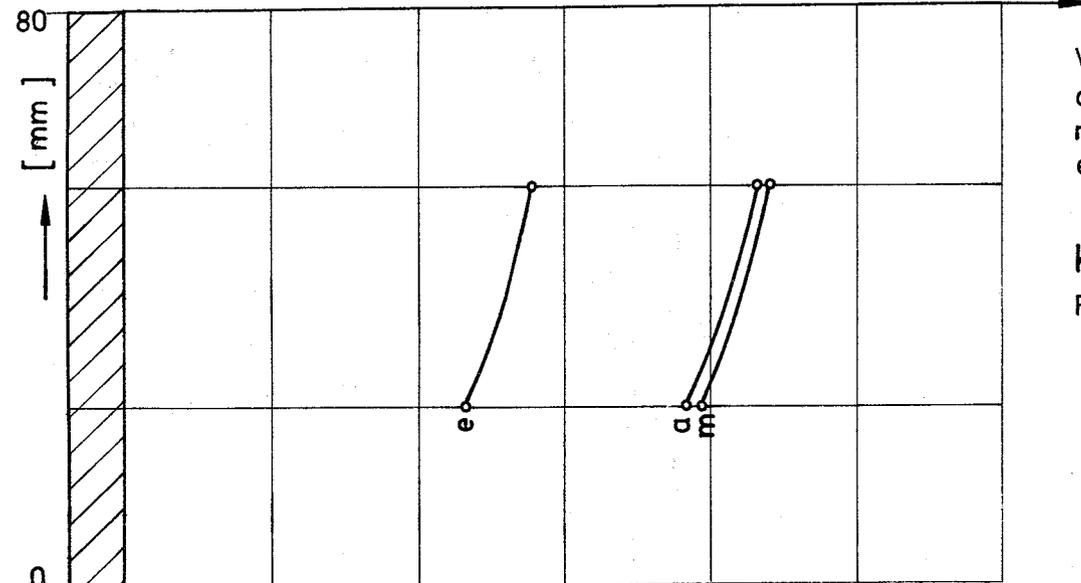
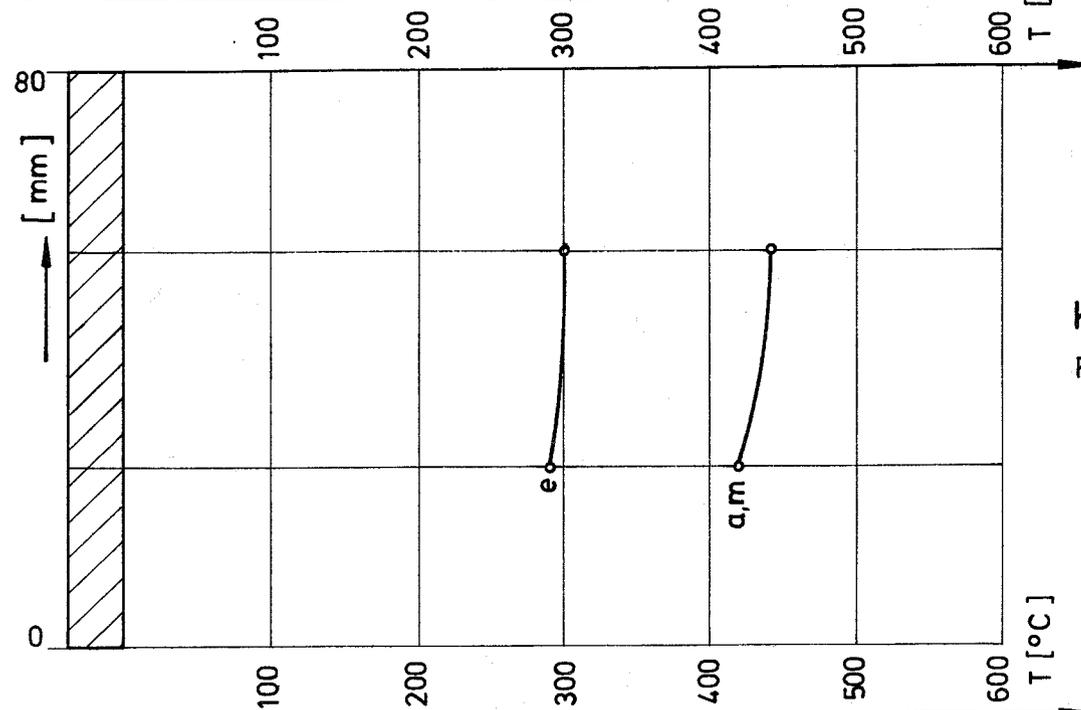
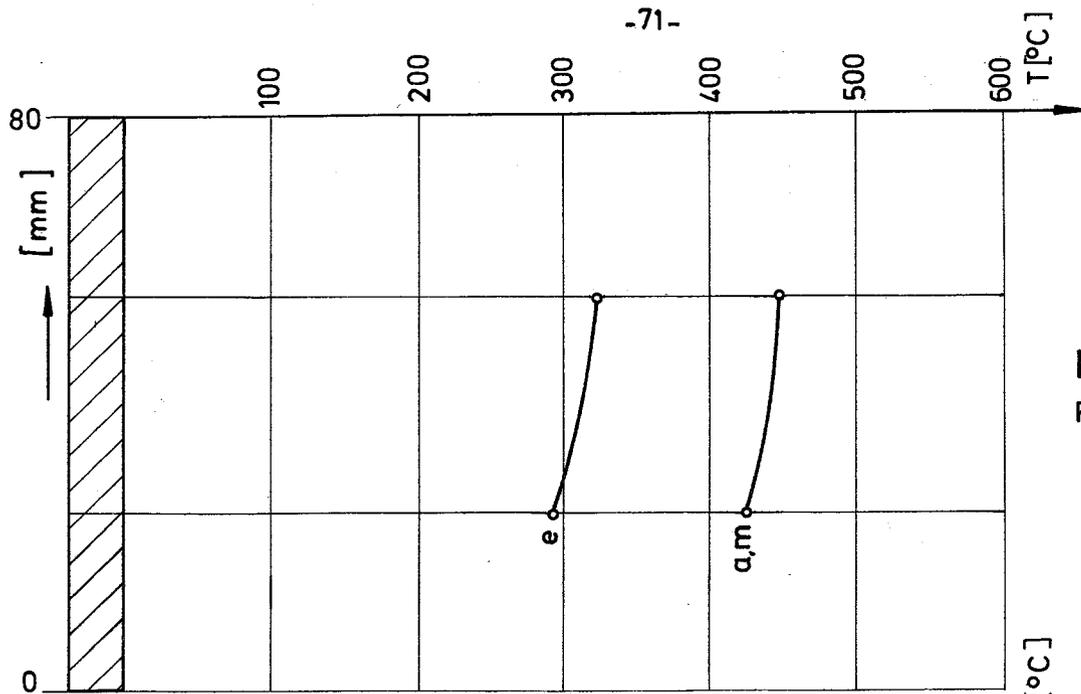


Verteilung :
a - Betriebsbeginn
m - Maximalwert
e - Betriebsende

KVE -Nr. 29
Prüfling 15

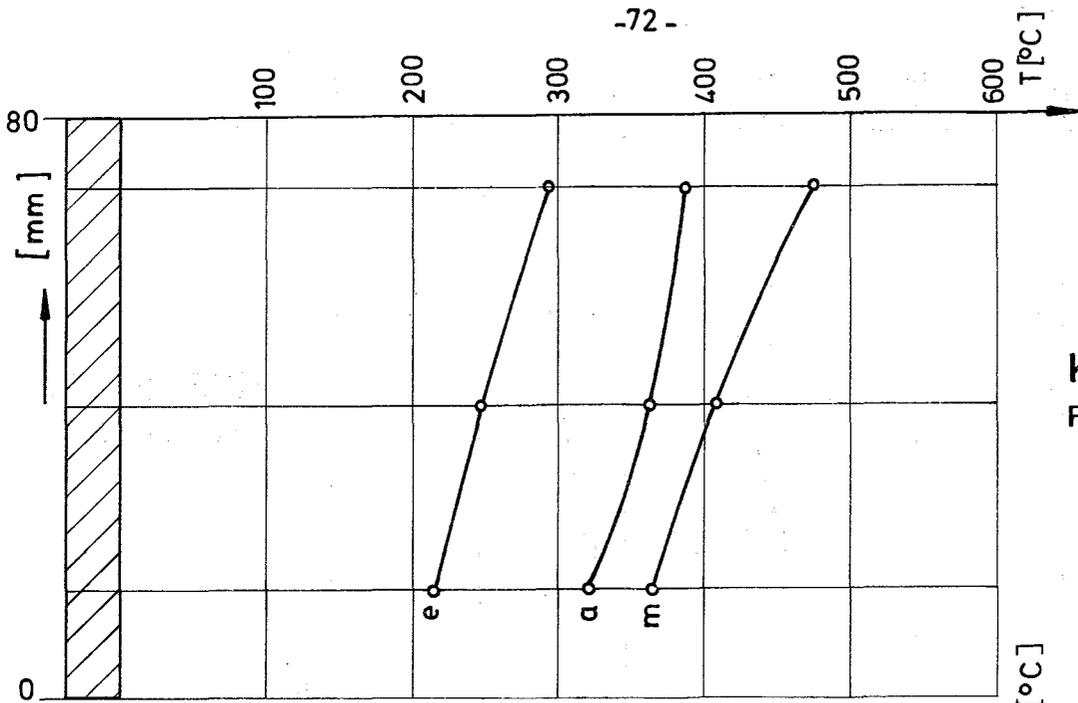
Kapselversuchsgruppe 3
Axiale Temperaturverteilung (Hülloberfläche)

Abb. 25

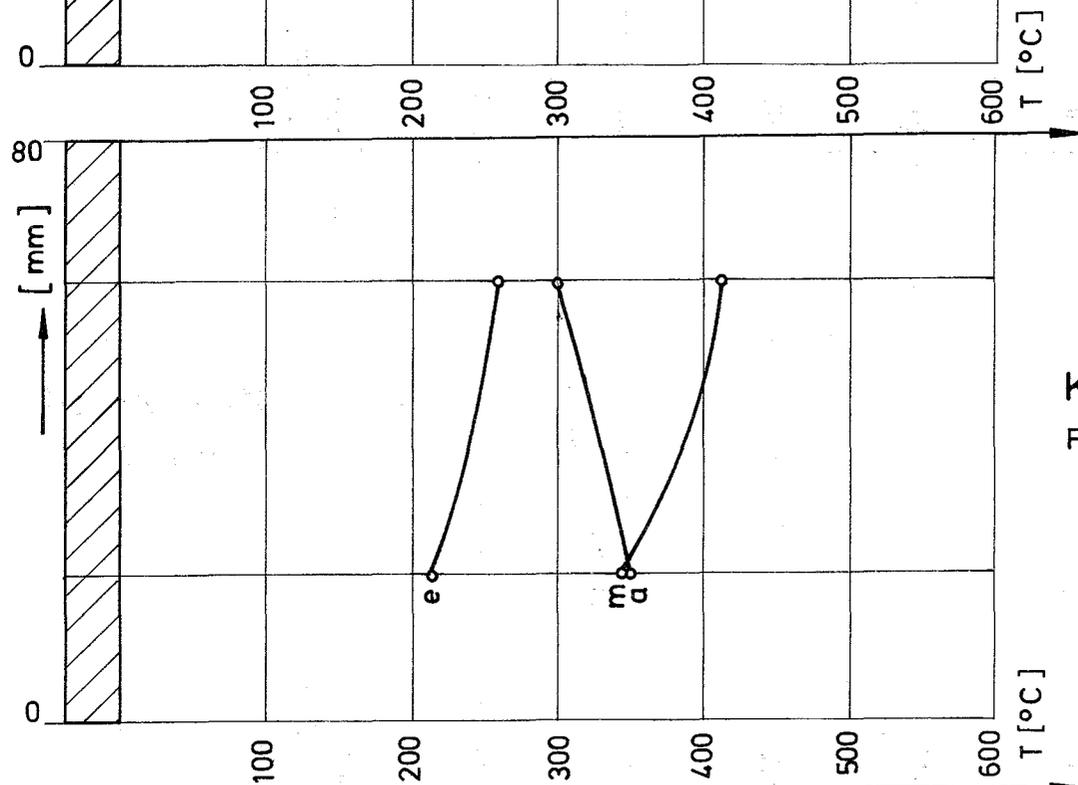


Kapselversuchsgruppe 3
Axiale Temperaturverteilung (Hülloberfläche)

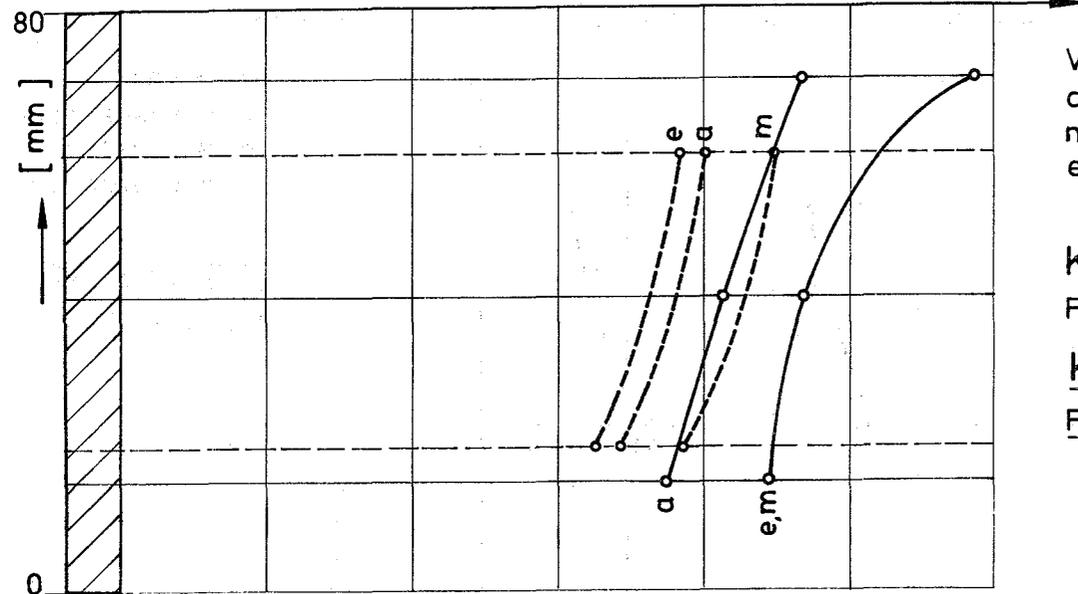
Abb. 26



KVE -Nr. 31
Prüfling 38



KVE -Nr. 31
Prüfling 37



Verteilung :
a - Betriebsbeginn
m - Maximalwert
e - Betriebsende

KVE -Nr. 32
Prüfling KM

KVE-Nr. 32
Prüfling 40

Kapselversuchsgruppe 3
Axiale Temperaturverteilung (Hülloberfläche)

Abb. 27

Tabelle XVIII: Mittlerer Abbrand der Prüflinge der Versuchsgruppe 3

KVE	Prüfling	TE Nr.	\bar{A} (Mwd/kg M)
20	1	6	6,25
	5	4	6,35
	7	1	5,60
21	13	6	16,8
	11	1	17,1
22	L9	6	86,0
	L8	2	76,9
23	MM	6	18,3
	9	4	16,2
	3	1	14,7
24	6	6	65,4
	4	2	68,3
25	MS	6	53,3
	2	2	48,3
26	10	6	44,1
	8	2	39,7
27	14	6	59,2
	12	2	55,7
28	BU	6	66,0
	16	2	60,6
29	DU	7	25,4
	CG	5	24,9
	AG	3	24,7
	15	2	24,3
30	36	7	35,5
	35	6	37,1
	34	4	37,1
	33	2	35,4
31	39	6	57,1
	38	4	52,1
	37	2	51,7
32	IS	6	9,46
	KM	4	8,81
	40	2	8,43

8. Transport und Demontage der KVE

Nach Bestrahlungsende wurden die KVE im Abklingbecken des FR 2 zwischengelagert, wobei sich die Lagerzeit im groben an der Aktivität der Proben, also am Abbrand orientierte. Häufig war jedoch auch die technische Notwendigkeit, zu einem bestimmten Zeitpunkt KVE in die Heißen Zellen zur Untersuchung einzuschleusen, Ursache für eine Verlängerung oder Verkürzung der Zwischenlagerung. Die üblichen Lagerzeiten lagen zwischen drei und sechs Wochen. Danach wurden die KVE ohne besondere Kühlung zu den Heißen Zellen transportiert und eingeschleust. Die Demontage erfolgte üblicherweise unmittelbar nach dem Einschleusen. Sie wurde durch eine Untersuchung kapselspezifischer Effekte (Veränderung des Pb-Bi-Spiegels, Funktion der Thermoelemente u.a.) eingeleitet. Die Brennstoffprüflinge wurden anschließend isoliert, wobei die mit Natrium gefüllten Kurzkapseln aufgeschnitten und die Natrium-Füllungen mit Hilfe von Methanol herausgelöst wurden. Dem Methanol wurde im Laufe des Lösungsvorganges Wasser zugesetzt, um einerseits die Lösegeschwindigkeit zu erhöhen, andererseits die Bildung von Natriummethylat-Krusten zu vermeiden. Dabei ging man davon aus, daß die gebildete Natronlauge die Stahlhülle der Brennstoffprüflinge während der kurzen Verweilzeit im Lösungsbad nicht korrosiv angreift. Zuletzt wurden die Prüflinge mit Wasser von anhaftender Natronlauge befreit.

9. Zerstörungsfreie Untersuchung

9.1 Äußere Vermessung

Alle Brennstoffprüflinge wurden nach der Bestrahlung äußerlich vermessen. Hierbei wurde die Stablänge sowie der Stabdurchmesser entlang der Längsachse bestimmt. Die Durchmesserbestimmungen wurden auf einer Meßbank mit Hilfe eines induktiven Wegaufnehmers als Meßtaster durchgeführt, wobei die Meßwerte kontinuierlich mit einem Makrograph-Formgestalt-Schreiber aufgezeichnet wurden. Von den 4 bei jedem Prüfling vermessenen Mantellinien (Winkelabstand 90°) wurden die jeweils gegenüberliegenden zur Bestimmung des Durchmessers herangezogen. Hierbei wurden die relativen Aufzeichnungen des Formgestalt-Schreibers durch Eichmessungen an einem Meisterbolzen in absolute Meßwerte umgewandelt.

Bei der hier verwendeten Vermessungsmethode muß der Prüfling genau zentral zwischen zwei Dorne eingespannt werden. Geringe Abweichungen von der Ideal-Linie führen zu nur umständlich auswertbaren Schreiberdiagrammen. Ferner sei noch darauf hingewiesen, daß zu Beginn der Untersuchungen ein Taster mit Kugelkopf verwendet wurde, der ebenfalls empfindlich auf nicht genau zentrale Einspannung des Prüflings reagiert. Im späteren Verlauf der Vermessungen wurde der Kugeltaster durch einen Schneidentaster ersetzt. Eine weitere Einschränkung der Auswertung ergibt sich aus der geringen Breite des Schreiberpapiers, das mit 4,5 cm Gesamtbreite nur geringe Zeigerausschläge aufzuzeichnen gestattet, was wiederum dazu führt, daß die Meßwerte nur um den Faktor 50 vergrößert werden können.

Es wurde daher bei der Auswertung der Meßschriebe im wesentlichen auf den gleichmäßigen Verlauf der einzelnen Mantellinien geachtet. Da man bei dieser Versuchsgruppe davon ausgehen kann, daß weder Spaltgasdruck noch Hüllmaterial-Schwellen zu einer Durchmesservergrößerung führt, hätte eine Aufweitung der Hülle nur in der Brennstoffzone erfolgen können. Eine solche Aufweitung hätte sich dann als Sprung am Übergang zwischen Brennstoff- und Spaltgasraum zeigen müssen. Es wurden jedoch bei keinem der untersuchten Prüflinge sprunghafte Änderungen des Außendurchmessers im Übergangsbereich gefunden. Daraus ist zu schließen, daß der Durchmesser der Prüflinge sich während der Bestrahlung nicht verändert hat.

Die Längenmessungen zeigten eine geringfügige Verkürzung aller Prüflinge um 50 bis 200 μm . Da die Längsausdehnung der Prüflinge während der Bestrahlung nicht behindert war und auch sonst keine Mechanismen bekannt sind, die zu einer Verkürzung der Stäbe führen können, wird angenommen, daß unterschiedliche Meßpraktiken vor und nach der Bestrahlung zur oben erwähnten Diskrepanz geführt haben.

9.2 Durchleuchtung

Die innere Geometrie der Brennstoff-Prüflinge wird durch die bei der Bestrahlung auftretenden hohen Brennstoff-Zentraltemperaturen stark verändert. So bildet sich zum Beispiel im Zentrum der Brennstoffsäule ein langgestreckter Hohlraum, dessen Größe und Form Aufschluß über das Stabverhalten unter Bestrahlung liefert. Für einen gerichteten Einsatz

der zerstörenden Untersuchungen, insbesondere der Keramografie, ist daher eine vorherige Kenntnis der Brennstoffgeometrie sehr nützlich. Wegen der starken Eigenstrahlung der Brennstoffprüflinge, durch die bei der Bestrahlung gebildeten Spaltprodukte, ist eine Röntgendurchleuchtung in der üblichen Art jedoch nicht durchführbar.

In unserem Falle wurde die Durchleuchtung mit einem Betatron vorgenommen, das eine harte γ -Strahlung mit einer Maximal-Energie von 18 MeV aussendet. Für diese hohe γ -Energie ist das Element Eisen weitgehend transparent, so daß die Eigenstrahlung der Prüflinge mit Eisen gegen den Aufnahmefilm abgeschirmt werden kann, ohne die Intensität der Durchstrahlungsquelle wesentlich zu schwächen. Um eine Randüberstrahlung zu vermeiden, werden die zylinderförmigen Prüflinge in einen auf den Durchmesser angepaßten Dickenausgleichskörper aus Blei durchleuchtet, wobei das Blei noch zusätzlich als Abschirmung gegen den Aufnahmefilm wirkt. Auf diese Art wurden bei Durchleuchtungszeiten zwischen 10 und 30 Minuten die in den angefügten Prüflings-Dokumentationen wiedergegebenen Röntgenbilder hergestellt. Die durch Betatron-Durchleuchtung erzeugten Aufnahmen weisen in den Originalfilmen einen hohen Schwärzungsgrad auf. Sie sind damit nur unter Verlust einiger Zeichnungsdetails auf Fotopapier zu kopieren. Bei der Auswertung der Aufnahmen werden daher stets die Originalfilme zur Beurteilung herangezogen.

9.3 γ -Profile und γ -Spektren

Zur Charakterisierung der Brennstoffsäulen hinsichtlich Rißstruktur, axialem Leistungsverlauf, Brennstoffverlagerung und Spaltproduktverhalten werden die Prüflinge γ -spektrometrisch untersucht. Diese Untersuchung umfaßt das Aufnehmen von γ -Spektren an vorgegebenen Zonen der Brennstoffsäule und die Erstellung von γ -Profilen (γ -Scanning) über die Gesamtlänge des Prüflings.

Als γ -Detektor diente hierzu am Anfang der Untersuchungen ein Natriumjodid-Kristall (1,5" x 1,5"), der später durch einen Germanium-Halbleiterdetektor ersetzt wurde. Die Profile wurden durch einen 0,5 mm weiten Kollimator aufgenommen, wobei die Prüflinge jeweils um ihre Längsachse rotierten. Durch die Rotation wird erreicht, daß Aktivitätsansammlungen

im Außenbereich des Brennstoffs nicht durch eine zufällige ungünstige Orientierung des Prüflings zum Detektor unbeobachtet bleiben.

Bei der üblichen Art der Untersuchung wurde zunächst vom Prüfling durch ein Kollimator ein γ -Spektrum aufgenommen und zwar an einer Brennstoffzone, bei der keine Spaltproduktansammlungen erwartet wurden. Meist war dies eine Zone in der Mitte der Brennstoffsäule. An Hand des γ -Spektrums wurden dann Energiebereiche für das Aufnehmen von Profilen ausgewählt. Für jeden Prüfling wurde, unabhängig vom jeweiligen γ -Spektrum, ein integrales Profil aufgenommen, das alle γ -Energien oberhalb von 400 keV umfaßte. Die obere Grenze dieses Bereiches wurde durch das verwendete Meßgerät bestimmt, sie lag bei etwa 860 keV.

Weitere Meßbereiche für die Profile waren die γ -Linien der Radio-Nuklide Zr-95/Nb-95, Ce-144, Ru-103, Ba-140/La-140. Aus diesen Gruppen wurde das Zr-95/Nb-95 regelmäßig, die anderen Radio-Nuklide je nach Abklingzeit des Prüflings gemessen, so daß von jedem Prüfling mindestens zwei γ -Profile, das integrale und das Zr-95/Nb-95 zur Verfügung standen.

Beide Profile haben einen unterschiedlichen Aussagewert. Während beim integralen Profil vornehmlich Spaltproduktwanderungen sichtbar werden, gibt das Zr-95/Nb-95 als nicht mobiles Nuklid die Verteilung des Brennstoffs wieder und zwar überlagert vom axialen Leistungsverlauf.

Eine genauere Analyse der häufig auftretenden Aktivitätsspitzen auf bestimmte Radionuklide mußte bei den meisten Prüflingen unterbleiben, da der NaJ-Detektor naturgemäß eine unzureichende Auflösung des sehr komplexen Spaltprodukt- γ -Spektrums erbringt. Erst mit der Umstellung des Meßplatzes auf einen Halbleiterdetektor wurde die Möglichkeit einer intensiven γ -spektrometrischen Untersuchung erschlossen. Sie kam jedoch bei der hier beschriebenen Versuchsgruppe nicht mehr zum Tragen.

10. Spaltgasbestimmungen

Bei den experimentellen Spaltgasuntersuchungen an den bestrahlten Prüflingen werden Messungen durchgeführt [9] zur Bestimmung

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

Zu diesem Zweck wird der Prüfling zuerst an der Stirnseite des oberen Stopfens angebohrt und das freie Spaltgas abgezogen mit anschließender Helium-Spülung. Die Zusammensetzung des Spaltgases wird gaschromatografisch ermittelt, wobei die Menge an Xe, Kr und Kr-85 quantitativ bestimmt wird. Hierauf folgt eine manometrische Messung des freien Volumens (Hohlräume, offene Poren) innerhalb der Brennstabhülle.

Für die weiteren Spaltgasbestimmungen (Anteile in geschlossener Porosität bzw. im Brennstoffgitter gelöst) werden bei der Aufteilung des Prüflings (siehe jeweiligen Schnittplan in den Faltblättern von Kapitel 13) zwei Brennstoffproben von etwa 3 g Gewicht bereitgestellt. Jede Probe wird zuerst in einer gasdichten Kugelmühle aus Edelstahl ca. 2 Stunden gemahlen, wobei eine Mahlfeinheit von weniger als 1μ erreicht wird. Das hierbei freigesetzte "Porenspaltgas" umfaßt alles Gas, das sich in geschlossener Porosität mit Porengrößen $\geq 1 \mu$ befand. Nach der gaschromatographischen Bestimmung dieses Anteils wird die gemahlene Brennstoffprobe schließlich in HNO_3 aufgelöst. Dabei wird der im Brennstoff gelöste Anteil, das "Gitterspaltgas", freigesetzt und bestimmt.

Die für eine weitere Auswertung wichtigen Ergebnisse sind zusammenfassend in einigen Tabellen dargestellt. Tabelle XIX bringt für alle Prüflinge die gemessene Menge an freiem Spaltgas sowie den Spaltgasdruck bei einer (angenommenen) mittleren Betriebstemperatur von 500°C . Die Gasmengenangaben in mm^3 beziehen sich auf 20°C und 760 Torr.

In Tabelle XX sind alle gemessenen Werte für das im Brennstoff gebundene Spaltgas (wieder aufgetrennt nach Krypton und Xenon) enthalten. Die Messungen wurden hierbei an kleinen Brennstoffproben durchgeführt und die Meßergebnisse auf die in einem Prüfling enthaltene Gesamtmenge an Brennstoff umgerechnet.

In Tabelle XXI schließlich wird für jeden Prüfling die Spaltgasbilanz aufgestellt und mit der theoretisch aus dem Abbrand errechneten "Sollmenge" verglichen. Dabei werden für das Poren- und Gitterspaltgas Mittelwerte aus den Angaben in Tabelle XX eingesetzt, wobei allerdings unsichere Werte unberücksichtigt bleiben.

Tabelle XIX: Freies Spaltgas und Spaltgasdruck

KVE	Prüfling	Abbrand (Mwd/kg M)	Freies Spaltgas V_F (mm ³)			Xe/Kr- Verhältnis	Freies Volumen (mm ³)	Spaltgasdruck bei 500°C (atm)
			Krypton	Xenon	gesamt			
20	1	6,25	365	2639	2994	7,2	984	8,0
	5	6,35	239	1885	2124	7,9	996	5,6
	7	5,60	98	952	1050	9,7	997	2,8
21	11	17,1	650	5378	6028	8,3	929	17,1
	13	16,8	639	4082	4721	6,4	927	13,4
22	18	76,9	3320	21800	25120	6,6	844	78,4
	19	86,0	x	x	x	x	835	x
23	3	14,7	634	4380	5014	6,9	668	19,8
	9	16,2	674	5520	6194	8,2	744	22,0
	MM	18,3	995	6522	7517	6,6	909	21,8
24	4	65,4	x	x	x	x	1147	x
	6	68,3	2230	14230	16460	6,4	x	x
25	2	48,3	1503	10480	11983	7,0	935	33,8
	MS	53,3	900	7880	8780	8,8	1034	22,5
26	8	39,7	1290	3350	4640	2,6	1051	11,7
	10	44,1	1365	6280	7645	4,6	1010	20,0
27	12	59,2	4180	28900	33080	6,9	930	95,0
	14	55,7	2690	15700	18390	5,8	910	54,0
28	BU	60,6	4150	35100	39250	8,5	936	112,0
	16	66,0	4230	36700	40930	8,7	999	109,0
29	15	24,3	653	4580	5233	7,0	885	15,6
	AG	25,0	x	x	x	x	1010	x
	CG	24,9	846	5860	6706	6,9	972	18,2
	DU	25,4	702	4920	5622	7,0	859	17,3
30	33	35,4	1162	7850	9012	6,8	1004	23,8
	34	37,1	1425	9870	11295	6,9	991	30,0
	35	37,1	1262	8880	10142	7,0	1010	26,5
	36	35,5	1292	9020	10312	7,0	1064	25,6
31	37	51,7	348	2680	3028	7,7	x	x
	38	52,1	2800	23000	25800	8,2	998	68,4
	39	57,1	4220	35500	39720	8,4	958	109,0
32	40	8,43	246	2008	2254	8,1	1130	5,25
	KM	8,81	239	2615	2854	8,0	1017	7,40
	IS	9,46	372	3100	3472	8,3	1098	8,35

x = keine Werte gemessen

Tabelle XX: Im Brennstoff gebundenes Spaltgas

KVE	Prüfling	Abbrand (MWD/kg M)	Probe Nr.	Porensplattgas (mm ³)			Gittersplattgas (mm ³)			Xe/Kr-Verhältnis	
				Krypton	Xenon	gesamt	Krypton	Xenon	gesamt	Poren	Gitter
20	1	6,25	3-20-1-2	169	900	1069	(28)	(297)	(325)	5,3	(10,6)
			3-20-1-4	196	1081	1277	138	1210	1348	5,5	8,8
	5	6,35	3-20-5-2	178	986	1164	142	1412	1554	5,6	10,0
			3-20-5-4	191	782	973	149	1412	1631	4,1	10,0
	7	5,60	3-20-7-2	(30)	(202)	(232)	(164)	(755)	(919)	(6,7)	(4,6)
			3-20-7-4	275	330	610	(48)	(1810)	(1851)	(1,2)	(38,1)
21	11	17,10	3-21-11-2	433	2846	3279	(339)	2468	2807	6,6	7,6
			3-21-11-5	524	3385	3909	260	2260	2520	6,5	8,7
	13	16,8	3-21-13-2	485	2830	3315	287	2670	2957	5,8	9,3
			3-21-13-5	567	3230	3797	358	3170	3528	5,7	8,9
22	18	76,9	3-22-18-2	3230	23577	26807	641	3422	4063	7,3	5,1
			3-22-18-4	2991	21469	24460	573	2976	3549	7,2	5,2
	19	86,0	3-22-19-2	2594	19793	22387	441	2248	2689	7,8	5,1
			3-22-19-4	2840	19677	22517	756	3878	4634	6,9	5,1
23	3	14,7	3-23-3-3	x	x	x	326	1970	2296	x	7,6
			3-23-3-6	244	1510	1754	286	2200	2486	7,6	7,7
	9	16,2	3-23-9-3	337	1780	2117	204	1880	2084	5,3	9,3
			3-23-9-6	328	1715	2043	162	1625	1787	5,2	10,0
	MM	18,3	3-23-MM-3	260	1275	1535	147	1720	1867	4,9	11,7
			3-23-MM-6	180	835	1015	74	840	914	4,7	10,5
24	4	65,4	3-24-4-0	x	x	x	x	x	x	x	x
	6	68,3	3-24-6-0	x	x	x	x	x	x	x	x
25	2	47,8	3-25-2-2	1640	10350	11990	369	3340	3709	6,3	9,1
			3-25-2-5	895	7760	8655	232	1840	2072	8,7	7,9
	MS	50,7	3-25-MS-2	1220	8320	9540	815	7100	7915	6,8	8,7
			3-25-MS-5	1275	7560	8835	642	5000	5642	5,9	7,8
26	8	39,7	3-26-8-3	824	5000	5824	375	2980	3355	6,1	8,0
			3-26-8-6	900	5840	6740	448	4250	4698	6,5	9,5
	10	44,1	3-26-10-2	1150	6880	8030	440	4230	4670	6,0	9,6
			3-26-10-5	945	5220	6165	377	3210	3787	5,5	8,5
27	12	59,2	3-27-12-0	x	x	x	x	x	x	x	x
	14	55,7	3-27-14-2	2710	20800	23510	900	9200	10100	7,7	10,2
3-27-14-4			2180	16050	18230	914	8960	9874	7,3	9,8	
28	BU	60,6	3-28-BU-2	3790	10200	13990	582	5350	5932	2,7	9,2
			3-28-BU-4	2830	21100	23930	724	6100	6824	7,5	8,4
	16	66,0	3-28-16-2	2340	18150	20490	634	4870	5504	7,8	7,7
			3-28-16-4	2720	21000	23720	742	6300	7042	7,3	8,5
29	15	24,3	3-29-15-2	904	6380	7284	507	4500	5007	6,9	8,4
			3-29-15-5	914	5220	6134	637	5370	6007	5,8	8,4
	AG	25,0	3-29-AG-2	900	5770	6670	155	1290	1445	6,4	8,3
			3-29-AG-5	1020	7300	8320	710	5600	6310	7,2	7,9
CG	24,9	3-29-CG-2	1040	6440	7480	654	2150	2804	6,2	3,3	
		3-29-CG-5	1432	8350	9782	746	5190	5936	5,8	7,0	
	DU	25,4	3-29-DU-2	692	4680	5372	617	5000	5617	6,8	8,1
			3-29-DU-5	720	4670	5390	598	5130	5728	6,5	8,6
30	33	35,4	3-30-33-2	666	4710	5376	421	3070	3491	7,1	7,3
			3-30-33-5	704	5220	5924	494	3600	4094	7,4	7,3
	34	37,1	3-30-34-2	893	6040	6933	x	x	x	(6,8)	x
			3-30-34-5	610	4180	4790	507	3000	3507	7,5	6,0
35	37,1	3-30-35-2	1112	7280	8392	506	3260	3766	6,6	6,4	
		3-30-35-5	752	4430	5182	564	6220	6784	5,9	11,0	
	36	37,5	3-30-36-2	712	3690	4402	284	3410	3694	5,2	12,0
			3-30-36-5	1445	6770	8215	360	3780	4140	4,0	10,5
31	37	51,7	3-31-37-2	1110	6150	7260	387	3640	4027	5,5	9,4
			3-31-37-4	538	5000	5538	772	6400	7172	9,3	8,3
	38	52,1	3-31-38-2	x	x	x	437	4040	4477	6,9	9,2
			3-31-38-4	1660	11600	13260	590	5420	6010	7,0	9,2
	39	57,1	3-31-39-2	1165	8260	9425	380	3360	3740	7,1	8,9
			3-31-39-4	1165	8400	9565	466	4230	4696	7,2	9,1
32	40	8,43	3-32-40-2	204	1345	1549	93	1110	1203	6,6	12,0
			3-32-40-5	266	1155	1421	96	1262	1358	4,3	13,0
	KM	8,81	3-32-KM-2	298	1550	1848	49	406	455	5,2	8,2
3-32-KM-5			250	1740	1990	80	434	514	7,0	5,4	
	IS	9,46	3-32-IS-2	166	716	882	84	990	1074	4,1	11,6
			3-32-IS-5	168	1120	1288	115	950	1065	6,8	8,3

x = keine Werte gemessen / () = unsichere Werte

Tabelle XXI: Spaltgasbilanz

KVE	Prüfling	Abbrand (MWh/kg M)	Freies Spaltgas \bar{V}_F		Porenspaltgas \bar{V}_P		Gitterspaltgas \bar{V}_G		Gesamtspaltgas (mm ³)	
			(mm ³)	(%)	(mm ³)	(%)	(mm ³)	(%)	gemessen	theoretisch
20	1	6,25	2994	54,3	1173	21,3	1348	24,4	5515	4420
	5	6,35	2124	44,4	1068	22,3	1593	33,3	4786	4490
	7	5,60	x	x	x	x	x	x	x	4020
21	11	17,1	6028	49,1	3594	29,2	2664	21,7	12286	12200
	13	16,8	4721	41,0	3556	30,8	3243	28,2	11520	12000
22	18	76,9	25120	46,0	25633	47,0	3800	7	54553	48800
	19	86,0	x	x	22452	x	3670	x	x	54600
23	3	14,7	5014	54,8	1754	19,2	2396	26,0	9164	10500
	9	16,2	6194	60,5	2079	20,4	1937	19,1	10210	11500
	MM	18,3	7210	73,1	1275	12,9	1374	14,0	9859	11700
24	4	65,4	x	x	x	x	x	x	x	
	6	68,3	16460	x	x	x	x	x	x	46400
25	2	48,3	11983	47,5	10322	41,2	2890	11,3	25195	32600
	MS	53,3	8780	35,4	9185	37,1	6792	27,5	24757	33000
26	8	39,7	1625	13,6	6282	52,5	4026	33,9	11933	26600
	10	44,1	7645	40,3	7097	37,4	4227	22,3	18969	29600
27	12	59,2	33080							
	14	55,7	18390	37,3	20880	42,4	9989	20,3	49259	37800
28	BU	60,6	39250	60,6	18960	29,3	6378	10,1	64588	40600
	16	66,0	40930	59,0	22140	32,0	6273	9,0	69343	44200
29	15	24,3	5233	28,4	6709	36,8	6507	14,8	18449	17400
	AG	25,0			7495		3878			17000
	CG	24,9	6706	34,0	8630	43,8	4370	22,2	19707	17800
	DU	25,4	5622	33,8	5381	32,3	5667	33,9	16670	18200
30	33	35,4	9012	49,0	5626	30,5	3791	20,5	18429	24400
	34	37,1	11295	54,0	5861	28,4	3507	17,6	20663	25000
	35	37,1	10142	45,8	6782	30,5	5275	23,7	22199	24800
	36	35,5	10312	50,4	6308	30,6	3920	19,0	20540	23900
31	37	51,7	(3028)	(20,1)	(6399)	(42,4)	5599	(37,5)	(15026)	35700
	38	52,1	25800	58,2	13260	29,9	5243	11,9	44303	35700
	39	57,1	39720	74,5	9495	17,6	4218	7,9	53433	39200
32	40	8,43	2254	45,7	1485	30,2	1281	24,1	4920	5620
	KM	8,81	2854	54,2	1919	36,5	485	9,3	5258	5870
	IS	9,46	3472	61,7	1084	19,6	1069	18,7	5625	6500

x = keine Werte gemessen / () = unsichere Werte

11. Keramografie

Die Untersuchung der Brennstoffstruktur in der Keramografie gehört zu den wichtigsten Punkten der zerstörenden Nachuntersuchung. Sie beginnt mit einer Festlegung der Untersuchungsflächen (Quer- und Längsschliffe). Bei den hier besprochenen Prüflingen mit nur 80 mm Brennstoffsäulenlänge war die Stabileistung über die Brennstofflänge nahezu konstant. Damit reicht es aus, eine Querfläche zu untersuchen, die dann als typisch für den gesamten Prüfling gelten kann. Da sich jedoch in den Betatronaufnahmen gezeigt hatte, daß die Brennstoffgeometrie trotz gleicher Spezifikation eine gewisse Schwankungsbreite aufweist, wurden häufig zwei Schliffe zur Darstellung der Brennstoffstruktur ausgewählt. Eine vergleichende Auswertung, bei der die Zentralkanalgröße, der Tablettenspalt zur Hülle und die konzentrischen Strukturzonen im Brennstoff vermessen werden, ist nur an Querschliffen möglich, weshalb die wichtigsten Untersuchungsebenen als Querschliffe ausgeführt wurden. Für die Beobachtung spezieller Phänomene wurden darüber hinaus am oberen Säulenende Längsschliffe angefertigt, die insbesondere den Sinn hatten, Effekte der Flußaufbeulung wie z.B. partielles Schmelzen am oberen Säulenabschluß zu erkennen, um ihren Einfluß auf die tieferliegenden Querschliffe abzuschätzen.

Für die Dokumentation einer Schliffebene wurde folgendes Schema angewandt:

1. Totalaufnahme der Untersuchungsebene in 10- bis 15-facher Vergrößerung (poliert).
2. β , γ - und α -Autoradiografien in 10- bis 15-facher Vergrößerung (poliert).
3. Mittelvergrößerung (25-fach) der zentralen Brennstoffzonen (poliert).
4. Panorama-Aufnahmen über einen Radius (Vergrößerung 100-fach) poliert und geätzt.
5. Detailaufnahmen unterschiedlicher Vergrößerung (bis 500-fach) poliert und geätzt.

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 besprochenen Versuchsgruppe nicht beobachtet.

12. Radiochemische Abbrandbestimmungen

Die ersten Abbrandwerte wurden aus den während der Bestrahlung gemessenen Kapseltemperaturen errechnet. Zur Stützung dieser Rechenwerte wurde der Abbrand nachträglich auf radiochemischem Wege bestimmt.

Hierbei wurden aus der Brennstoffsäule ca. 7 - 8 mm lange Abschnitte entnommen, die zusammen mit der anhaftenden Stahlhülle analysiert wurden. Die Lage der Probe innerhalb der nur 80 mm langen Brennstoffsäule wurde im wesentlichen dadurch festgelegt, daß weitere Untersuchungen große Teile des Brennstoffs beanspruchten, somit nur Zwischen- und Endstücke für die Abbrand-Analyse zur Verfügung standen. Die Endstücke waren allerdings wegen der unsicheren Leistungsverteilung (Flußaufwölbung, kompensiert durch Rhodium-Plättchen) nicht zur Untersuchung geeignet. Dem Mangel an geeigneten Untersuchungsproben wurde später dadurch begegnet, daß die zur Spaltgas-Bestimmung aufgelösten Brennstoffabschnitte auch zur Abbrand-Analyse verwendet wurden.

Als Abbrand-Indikator wurde das Spaltprodukt Ce-144/Pr-144 gewählt, wofür folgende Gründe entscheidend waren:

1. Ce-144/Pr-144 ist meßtechnisch gut bestimmbar.
2. Das Spaltprodukt bleibt im Brennstoff gelöst und unterliegt im Temperaturgradienten keiner Wanderung.
3. Die Halbwertszeit von 285 Tagen ist genügend lang. Eine Sättigungsaktivität wird bei den hier betrachteten Bestrahlungszeiten nicht erreicht.
4. Die Spaltausbeute der Isobarenreihe 144 ist gut bekannt.

Für die im thermischen Neutronenspektrum des FR 2 bestrahlten Prüflinge wurde die thermische Spaltausbeute von U-235 für die Isobarenreihe 144 mit $y = 5,43\%$ den weiteren Umrechnungen zugrundegelegt. Nicht berücksichtigt wurden hierbei die geringen Anteile der Schnellspaltung von U-238 sowie die Spaltung der gebrüteten Plutoniumisotope hinsichtlich ihrer abweichenden Spaltausbeuten für die Isobarenreihe 144.

Für den Bestrahlungszeitraum wurde vereinfachend angenommen, daß die Bestrahlung gleichmäßig und ohne Unterbrechungen infolge von Reaktorabschaltungen verlief. Entsprechende Korrekturen für den realen Bestrahlungsablauf erniedrigen die berechneten Werte.

Die gemessenen Aktivitätswerte des Abbrand-Indikators wurden nach einer Korrektur für die Abklingzeit nach Bestrahlungsende auf die Uranmenge in der Analysenprobe bezogen. Die Bestimmung des Urans erfolgte hierbei nach der Methode der Röntgenfluoreszenz-Analyse.

Für die Umrechnung in Mwd/kg wurden 10,0 Mwd/kg einem Abbrand von 1,07 % der schweren Atome (hier Uran) gleichgesetzt.

In Tabelle XXII sind die radiochemischen Abbranddaten den thermisch berechneten gegenübergestellt.

Während die radiochemischen Abbrandwerte für die im Schnittplan (siehe Kapitel 13) angegebenen Positionen gelten, wurden die thermisch berechneten Werte für die Thermoelementpositionen (siehe Kapitel 7) bestimmt. Bei den kurzen Brennstoffsäulen dieser Versuchsgruppe liegen diese Punkte nur um wenige Zentimeter auseinander. Eine Normierung auf eine gleichliegende Position wurde daher nicht vorgenommen.

Der Vergleich beider Abbrandwerte zeigt, daß die radiochemischen Angaben in den meisten Fällen (75 %) höher liegen als die berechneten und zwar im Mittel um + 6,6 %. Qualitativ kann diese Divergenz aus dem verwendeten Umrechnungsfaktor von 1,07 % = 10,0 Mwd/kg erklärt werden, bei dem von einer nutzbaren Spaltungsenergie von 200 MeV ausgegangen wird. Für gewöhnlich liegt die nutzbare Spaltungsenergie jedoch niedriger, da Spaltneutronen und hochenergetische γ -Quanten aus dem Brennstoff emittiert werden und somit für die Wärmeerzeugung ausfallen. Dieser Verlust ist je nach Reaktortyp und Bestrahlungsposition unterschiedlich, er liegt bei etwa 10 MeV, entsprechend 5 %. Unter Berücksichtigung dieser Korrektur ist die Übereinstimmung zwischen radiochemisch bestimmten und thermisch errechneten Abbrandwerten im allgemeinen als gut zu bezeichnen. Bei drei KVE (29, 30, 32) treten jedoch Unterschiede von bis zu 20 % auf, für die noch keine Erklärung gefunden wurde.

13. Dokumentation der zerstörungsfreien und keramografischen Nachuntersuchung

In diesem großen Abschnitt des Berichtes ist eine zusammenfassende Dokumentation der zerstörungsfreien und keramografischen Nachuntersuchung gegeben. Eine Auswahl der wichtigsten Ergebnisse ist für jeden einzelnen der 34 Prüflinge in einem 5-seitigen Falblatt zusammengestellt.

Tabelle XXII: Vergleich der Abbrandwerte

KVE Prüfling	Radiochem. Abbrand (Ce-144)	Mittl. Abbrand berechn. aus therm. -Daten	Abweichung der radiochem. Werte von den berechneten	
	MWd/kg	MWd/kg	MWd/kg	%
20/1	6,42	6,25	+ 0,17	+ 2,7
20/5	6,63	6,35	+ 0,28	+ 4,4
20/7	5,71	5,60	+ 0,11	+ 2,0
21/11	18,8	17,1	+ 1,7	+ 9,9
21/13	17,7	16,8	+ 0,9	+ 5,4
22/18	68,9	76,9	- 8,0	-10,4
22/19	(43,6)	86,0	-	-
23/3	16,0	14,7	+ 1,3	+ 8,8
23/9	17,3	16,2	+ 1,1	+ 6,8
23/MM	18,2	18,3	- 0,1	- 0,54
24/6	64,6	65,4	- 0,8	- 1,2
24/4	(40,7)	68,3	-	-
25/MS	52,5	53,3	- 0,8	- 1,5
25/2	48,9	48,3	+ 0,6	+ 1,2
26/8	41,0	39,7	+ 1,3	+ 3,3
26/10	42,9	44,1	- 1,2	- 2,7
27/14	58,7	59,2	- 0,5	- 0,84
27/12	-	55,7	-	-
28/16	63,2	60,6	+ 2,6	+ 4,3
28/BU	62,3	66,0	- 3,7	- 5,6
29/15	27,8	24,3	+ 3,5	+14,4
29/AG	29,6	24,7	+ 4,9	+19,8
29/CG	30,0	24,9	+ 5,1	+20,5
29/DU	26,8	25,4	+ 1,4	+ 5,5
30/33	38,9	35,4	+ 3,5	+ 9,9
30/34	42,9	37,1	+ 5,8	+15,6
30/35	40,2	37,1	+ 3,1	+ 8,4
30/36	40,9	35,5	+ 5,4	+15,2
31/37	54,8	51,7	+ 3,1	+ 6,0
31/38	58,4	52,1	+ 6,3	+ 12,1
31/39	56,2	57,1	- 0,9	- 1,6
32/IS	10,6	9,46	+ 1,1	+12,1
32/KM	10,5	8,81	+ 1,7	+19,2
32/40	9,8	8,43	+ 1,4	+16,3
			Mittelwert	+ 6,4 %

() = Fehlmessung

- Die Titelseite des Faltblattes (Seite ganz rechts) enthält die Material- und Bestrahlungsdaten für den Prüfling sowie eine lichtoptische Aufnahme und eine Durchleuchtung nach der Bestrahlung. Letztere wurde mit einem Betatron angefertigt und läßt die Materialversetzungen in der bestrahlten Brennstoffsäule (z.B. Zentralkanal) gut erkennen.

- Nach links schließen sich an die Titelseite 2 Seiten mit Aufnahmen von keramografischen Schliffen an. In der technischen Zeichnung des Prüflings sind die 2 oder 3 Stellen der Höhe nach markiert, in die die metallografischen Quer- oder Längsschnitte gelegt wurden. Die Ordnung der Fotografien auf diesen beiden Seiten folgt folgendem Schema (von links nach rechts):
 - (A) Zuerst kommen die lichtoptischen Aufnahmen der Längs- und Querschliffe, Vergrößerung etwa 4-fach.
 - (B) Es schließt sich eine Reihe von Gamme-Autoradiografien an, welche die Spaltproduktverteilung charakterisieren.
 - (C) Bei Prüflingen mit hohen Abbränden folgen Alpha-Autoradiografien, die einen Hinweis auf die Pu-Verteilung geben.
 - (D) und (E) Die letzten beiden Reihen bringen lichtoptische Detailaufnahmen der Schliffe in verschiedener Vergrößerung. Dabei werden Besonderheiten der Materialstruktur bevorzugt dargestellt.

- Die nächste Seite des Faltblattes (wieder nach links gezählt) bringt Gamma-Profile des bestrahlten Stabes, nämlich
 - (A) ein Profil für den integralen Energiebereich 400 bis ca. 850 keV,
 - (B) ein Profil für einen separaten Energiebereich wie Zr/Nb-95, La-140 oder Ce-144.

- Ganz links befindet sich schließlich der Schnittplan für die zerstörende Nachuntersuchung des Prüflings. Dabei ist in die maßstabliche Darstellung des Stabes die Höhenlage der Radialschnitte eingezeichnet sowie der Verwendungszweck der zwischen diesen Schnitten liegenden Brennstoffpartien.

14. Schlußfolgerungen

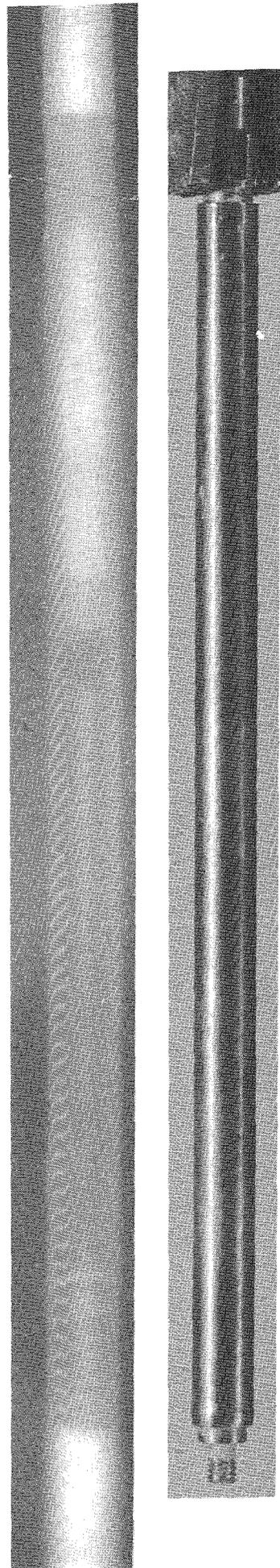
Eine zusammenfassende Wertung für diese Gruppe von Kapselbestrahlungen hat sich an der Aufgabenstellung und am Versuchsziel, wie sie in Kap. 2 formuliert sind, zu orientieren. Diese Ziele wurden im wesentlichen erreicht. Folgende Ergebnisse wurden erzielt:

- 1.) Alle 34 Prüflinge sind intakt geblieben, wobei Abbrände bis zu 85 MWd/kg M erreicht wurden.
- 2.) Eine Änderung der äußeren Geometrie konnte bei keinem Prüfling festgestellt werden.
- 3.) Die radiale und axiale Struktur des Brennstoffes nach Bestrahlung ist typisch für den Stableistungsbereich. Es bildete sich in allen Fällen ein zentraler Hohlraum aus, der ziemlich gleichmäßig die ganze Brennstofflänge durchsetzte.
- 4.) Die Spaltgasfreisetzung streut im Bereich zwischen 30 und 70 %. Der Gasanteil in geschlossenen Poren liegt meist zwischen 20 und 40 %. Die Autoradiographien zeigen konzentrische Zonen von Spaltproduktanreicherungen.
- 5.) Ein CeO_2 -Zusatz ist keine hinreichende Simulation von PuO_2 im Brennstoffgemisch. Durch die geringere CeO_2 -Dichte kommt es zu einer Porositätsverteilung während und nach der Bestrahlung, die nicht typisch für UO_2 - PuO_2 -Brennstoff ist.
- 6.) Der zur Bestrahlung verwendete Typ einer Na/PbBi-Doppelkapsel hat sich bis zu hohen Abbränden gut bewährt. Die Störanfälligkeit der Thermoelemente beendete in einigen Fällen die Bestrahlung vorzeitig.

Die Beantwortung einer Vielzahl von Detailfragen, z.B. hinsichtlich der quantitativen Strukturverteilung nach Bestrahlung oder der Spaltproduktverteilung, erfordert eine weitere gezielte Auswertung der vorliegenden Ergebnisse. Die hier zusammengestellte Dokumentation der ganzen Versuchsgruppe stellt hierfür den Ausgangspunkt dar.

Literatur:

- [1] D. Freund, Auslegung und Bestrahlung von Oxid-Brennstoffproben im FR 2, KFK 1376, erscheint demnächst
- [2] G. Karsten, Spezifikationen und Bestrahlungsprogramm für FR 2-Kapselexperimente, Versuchsgruppe 3, BE/4-Notiz Nr. 47 (1966), nicht veröffentlicht
- [3] W. Otto, Die Herstellung von Bestrahlungsproben für Kapsel-Experimente in der Versuchsgruppe 3 im FR 2, Prüfbericht Nr. 6 der Fa. NUKEM, Wolfgang bei Hanau (1966), nicht veröffentlicht
- [4] H. Beißwenger, Die Auslegung und Durchführung von Brennelement-Bestrahlungsexperimenten, Beitrag XI in KFK 700 (1967)
- [5] H. E. Häfner, Bestrahlung von Brennstäben in instrumentierten Natrium-Bleiwismut-Doppelkapseln, Kerntechnik 12 (1970), 248
- [6] S. Hagen, H. Malauscheck, Messung des thermischen Flusses in den Isotopenkanälen des FR 2, RB-Bericht Nr. 4/70 (1970), nicht veröffentlicht
- [7] M.J. Roth et al., The preparation of input data for WIMS, Winfrith, Report AEEW-R 538, August 1967
- [8] H.E. Häfner, persönliche Mitteilung
- [9] H. Gräbner, Spaltgasmessungen, Beitrag im Jahresbericht 1970 der Heißen Zellen, KFK-Bericht, erscheint demnächst.



Prüfling 1

Brennstoff :

Form	:	Tabletten geschl.
Zusammensetzung	:	UO ₂
Tablettendichte	:	92,7 % th.D.

Hülle :

Material	:	X4CrNiNb2025
Aussendurchmesser	:	7,4 mm
Wandstärke	:	0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings	:	167,3 mm
Länge der Brennstoffsäule	:	80,0 mm
Radiale Spaltweite	:	75,0 µm
Schmierdichte	:	-

Bestrahlung :

Einrichtung	:	FR 2/KVE 20
Dauer	:	30 Vollasttage
Ende	:	17.4.1967
Rechn. Abbrand	:	6250 MWd/t
Stableistung max./mittl.	:	580/550 W/cm

Prüfling 5

Brennstoff :

Form : Tabl. ungeschliffen

Zusammensetzung : UO_2

Tablettendichte : 93 % th.D.

Hülle :

Material : X4CrNiNb 20 25

Aussendurchmesser : 7,4 mm

Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 167,2 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80,0 mm

Radiale Spaltweite : 72,0 μ m

Schmierdichte : -

Bestrahlung :

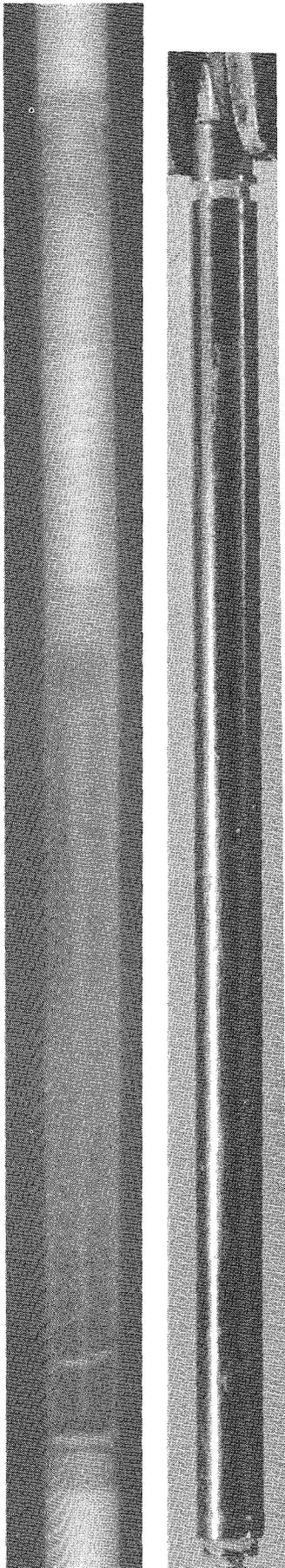
Einrichtung : FR 2/KVE 20

Dauer : 30 Vollasttage

Ende : 17.4.67

Rechn. Abbrand : 6350 MWd/t

Stableistung max./mittl. : 615/560 W/cm



Prüfling 7

Brennstoff :

Form : Tabl. ungeschliffen
Zusammensetzung : UO_2
Tablettendichte : 93 % th.D.

Hülle :

Material : X4CrNiNb 20 25
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 167,2 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80,2 mm
Radiale Spaltweite : 72 μ m
Schmierdichte : -

Bestrahlung :

Einrichtung : FR 2/KVE 20
Dauer : 30 Vollasttage
Ende : 17.4.67
Rechn. Abbrand : 5600 MWd/t
Stableistung max./mittl. : 565/515 W/cm

Prüfling 11

Brennstoff :

Form	:	Tabl. geschliffen
Zusammensetzung	:	UO ₂
Tablettendichte	:	93 % th.D.

Hülle :

Material	:	X4CrNiNb 20 25
Aussendurchmesser	:	7,4 mm
Wandstärke	:	0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings	:	167,2 mm
Länge der Brennstoffsäule	:	80,1 mm
Radiale Spaltweite	:	72 µm
Schmierdichte	:	-

Bestrahlung :

Einrichtung	:	FR 2/KVE 21
Dauer	:	88 Vollasttage
Ende	:	31.7.67
Rechn. Abbrand	:	17 140 MWd/t
Stableistung max./mittl.:	:	585/534 W/cm

Prüfling 13

Brennstoff :

Form : Tabl. ungeschliffen
Zusammensetzung : UO_2
Tablettendichte : 93 % th.D.

Hülle :

Material : X4CrNiNb 20 25
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 167,2 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80,0 mm
Radiale Spaltweite : 72,0 μm
Schmierdichte :

Bestrahlung :

Einrichtung : FR 2/KVE 21
Dauer : 88 Vollasttage
Ende : 31.7.67
Rechn. Abbrand : 16780 MWd/t
Stableistung max./mittl.: 550/522 W/cm

Prüfling I8

Brennstoff :

Form : Tabl. geschliffen
Zusammensetzung : UO_2 - CeO_2 -Gemisch
Tablettendichte : 88 % th.D.

Hülle :

Material : X8CrNiMoVNb 16 13
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 167,2 mm
Länge der Brennstoffsäule : 79,8 mm
Radiale Spaltweite : 80,0 μ m
Schmierdichte : -

Bestrahlung :

Einrichtung : FR 2/KVE 22
Dauer : 607 Vollasttage
Ende : 30.6.69
Rechn. Abbrand : 76 860 Mwd/t
Stableistung max./mittl.: 576/280 W/cm

Prüfling L9

Brennstoff :

Form : Tabl. geschliffen
Zusammensetzung : UO_2 - CeO_2 -Gemisch
Tablettendichte : 81,2 % th.D.

Hülle :

Material : X8CrNiMoVNb 16 13
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 9,5 mm

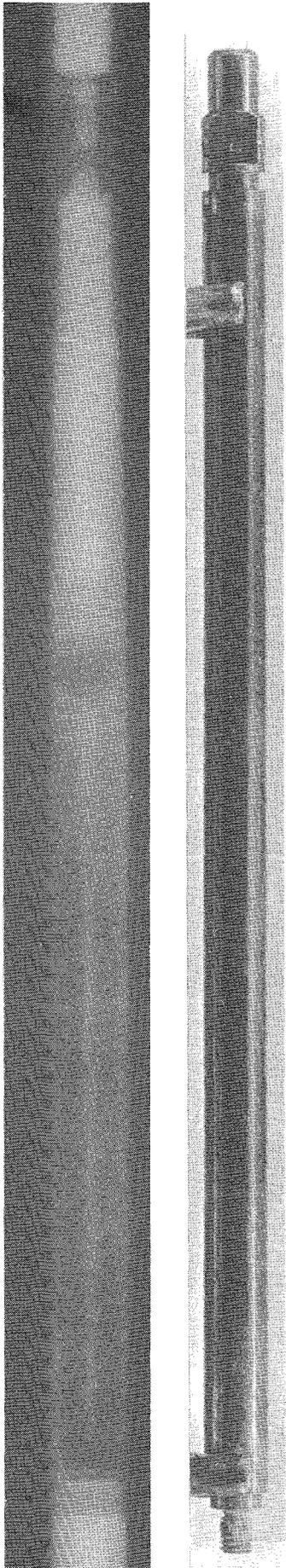
Geometrie :

Länge des Prüflings : 167,2 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80,1 mm
Radiale Spaltweite : 80,0 μ m
Schmierdichte : -

Bestrahlung :

Einrichtung : FR 2/KVE 22
Dauer : 607 Vollasttage
Ende : 30.6.69
Rechn. Abbrand : 86 026 Mwd/t
Stableistung max./mittl.: 557/328 W/cm





Prüfling 3

Brennstoff :

Form : Tabl. geschliffen
Zusammensetzung : UO_2
Tablettendichte : 93 % th.D.

Hülle :

Material : X4CrNiNb 20 25
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 167,2 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80,2 mm
Radiale Spaltweite : 72,0 μm
Schmierdichte : -

Bestrahlung :

Einrichtung : FR 2/KVE 23
Dauer : 87 Vollasttage
Ende : 18.9.67
Rechn. Abbrand : 14 700 MWd/t
Stableistung max./mittl.: 585/465 W/cm

Prüfling 9

Brennstoff :

Form : Tabl. geschliffen
Zusammensetzung : UO_2
Tablettendichte : 93 % th.D.

Hülle :

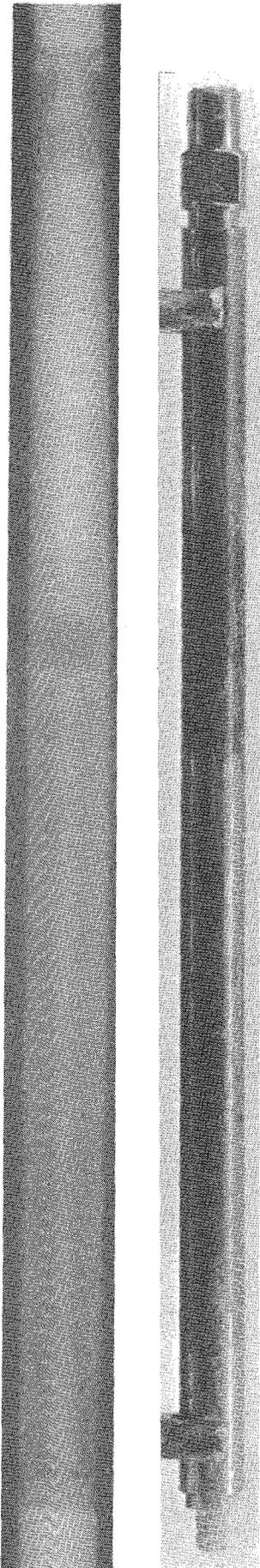
Material : X4CrNiNb 20 25
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 167,2 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80,0 mm
Radiale Spaltweite : 72,0 μ m
Schmierdichte : -

Bestrahlung :

Einrichtung : FR 2/KVE 23
Dauer : 87 Vollasttage
Ende : 189.67
Rechn. Abbrand : 16 160 MWd/t
Stableistung max./mittl. : 640/510 W/cm



Prüfling MM

Brennstoff :

Form : Pulver geschmolzen
Zusammensetzung : UO_2 - CeO_2 -Gemisch
Tablettendichte : -

Hülle :

Material : X4CrNiNb 20 25
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 167,3 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80,2 mm
Radiale Spaltweite : -
Schmierdichte : 84,3 % th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : FR 2/KVE 23
Dauer : 87 Vollasttage
Ende : 18.9.67
Rechn. Abbrand : 18 330 MWd/t
Stableistung max./mittl.: 575/470 W/cm

Prüfling 4

Brennstoff :

Form : Tabl. ungeschliffen

Zusammensetzung : UO_2

Tablettendichte : 88 % th.D.

Hülle :

Material : X4CrNiNb 20 25

Aussendurchmesser : 7,4 mm

Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 167,0 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80,3 mm

Radiale Spaltweite :

Schmierdichte : -

Bestrahlung :

Einrichtung : FR 2/KVE 24

Dauer : 610 Vollasttage

Ende : 6.10.69

Rechn. Abbrand : 68 250 MWd/t

Stableistung max./mittl. : 550/292 W/cm

Prüfling 6

Brennstoff :

Form : Tabl. geschliffen

Zusammensetzung : UO_2

Tablettendichte : 88 % th.D.

Hülle :

Material : X4CrNiNb 20 25

Aussendurchmesser : 7,4 mm

Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 167,1 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80,0 mm

Radiale Spaltweite :

Schmierdichte : -

Bestrahlung :

Einrichtung : FR 2/KVE 24

Dauer : 610 Vollasttage

Ende : 6.10.69

Rechn. Abbrand : 65 425 Mwd/t

Stableistung max./mittl.: 545/284 W/cm

Prüfling 2

Brennstoff :

Form : Tabl. geschliffen

Zusammensetzung : UO_2

Tablettendichte : 88 % th.D.

Hülle :

Material : X4CrNiNb 20 25

Aussendurchmesser : 7,4 mm

Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 167,1 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80,2 mm

Radiale Spaltweite : 90,0 μ m

Schmierdichte : -

Bestrahlung :

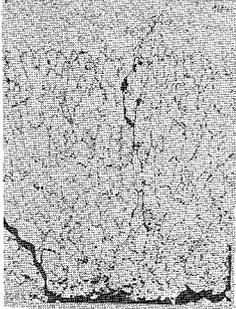
Einrichtung : FR 2/KVE 25

Dauer : 280 Vollasttage

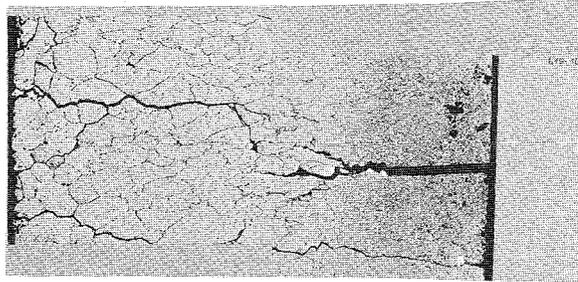
Ende : 22.7.68

Rechn. Abbrand : 50 720 MWd/t

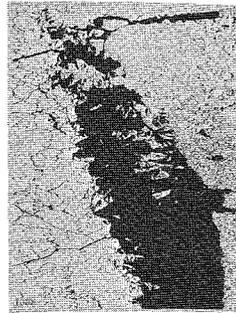
Stableistung max./mittl.: 725/472 W/cm



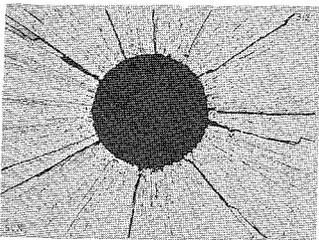
100 μm



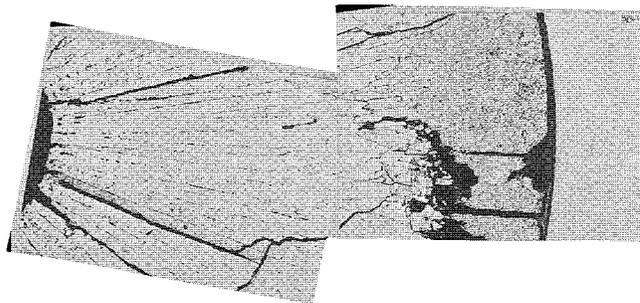
100 μm



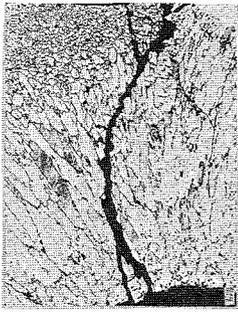
A



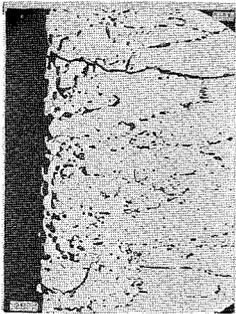
1 mm



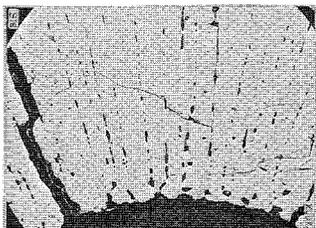
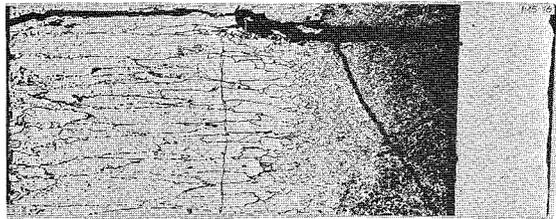
1 mm



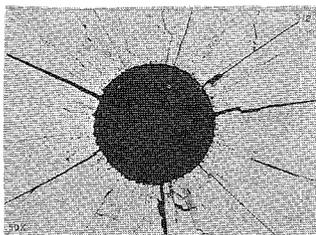
100 μm



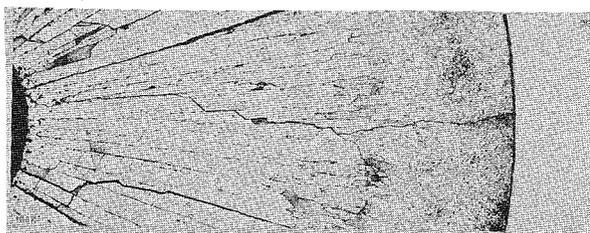
100 μm



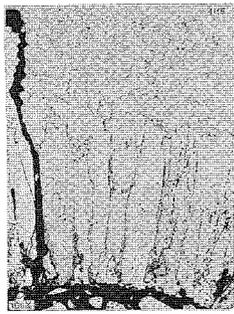
100 μm



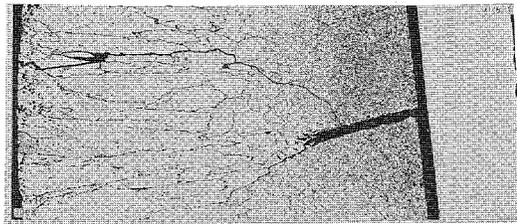
1 mm



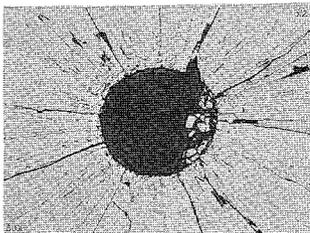
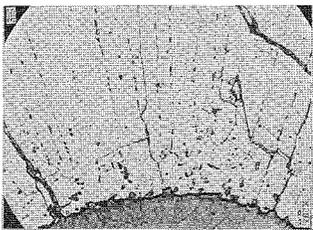
1 mm



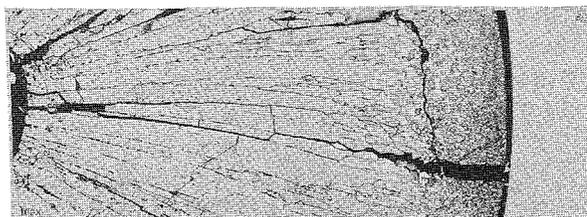
1 mm



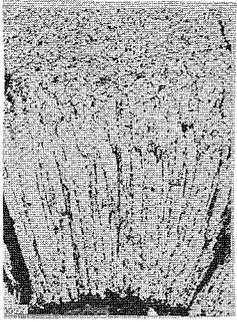
100 μ m



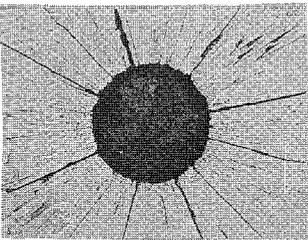
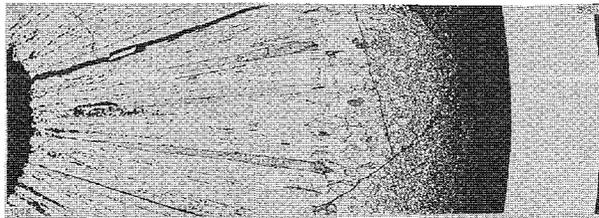
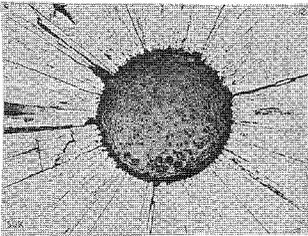
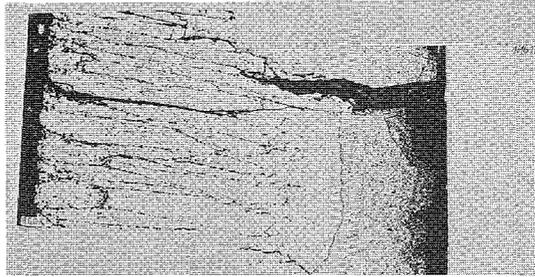
1 mm



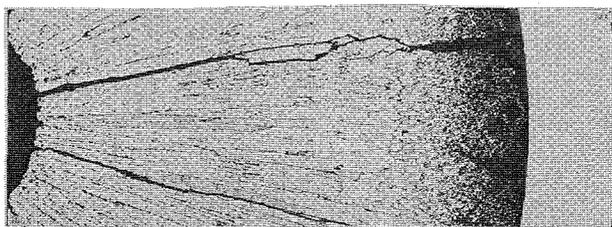
1 mm



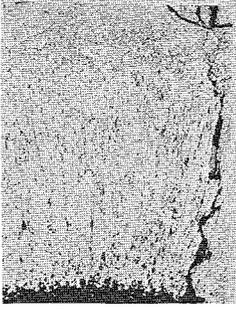
100 μm



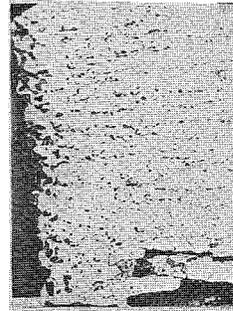
1mm



1mm

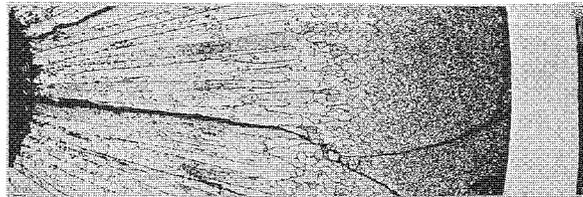
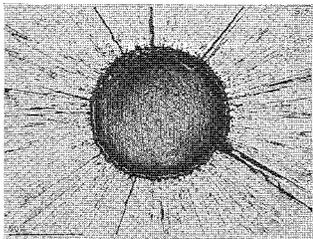
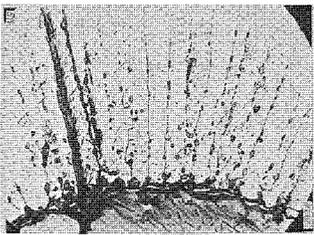


1 mm

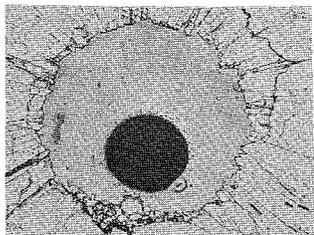


100 μm

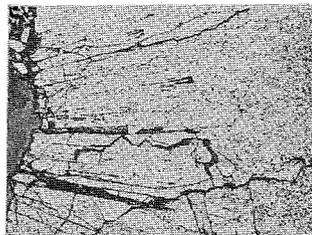
100 μm



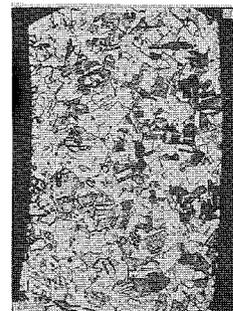
1 mm



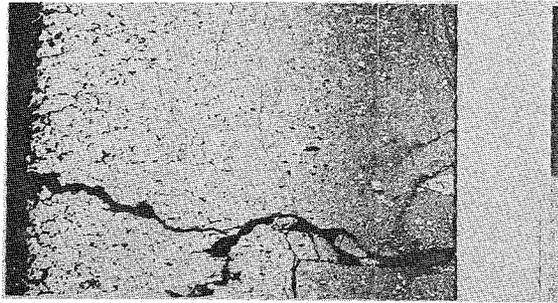
1 mm



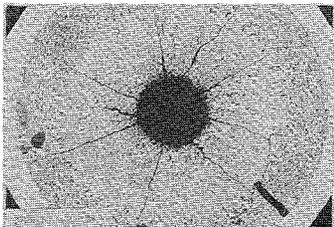
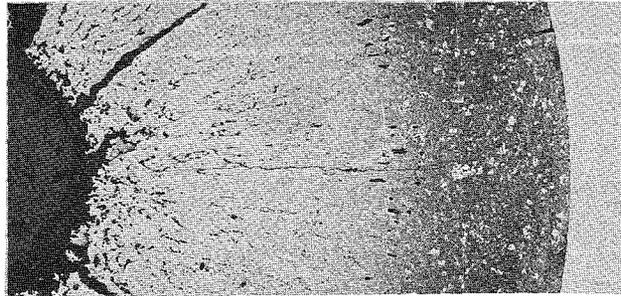
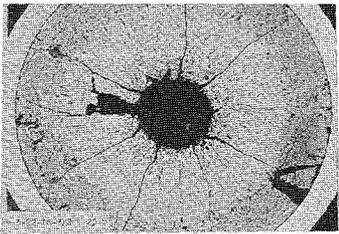
1 mm



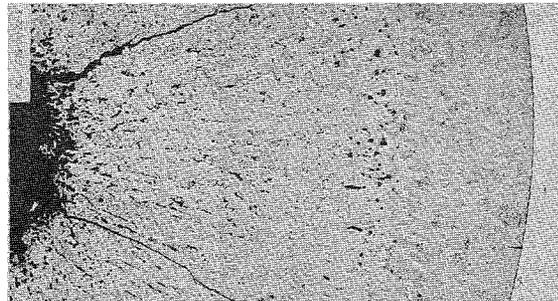
100 μm



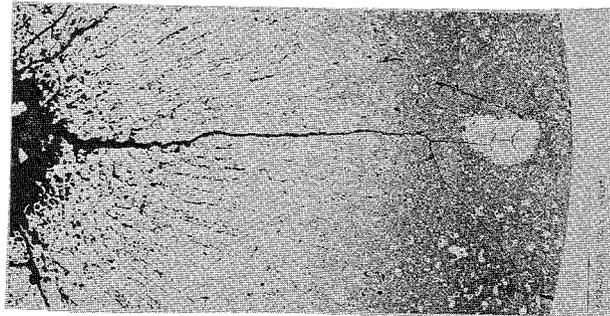
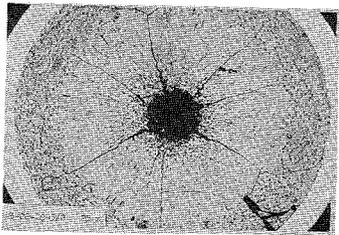
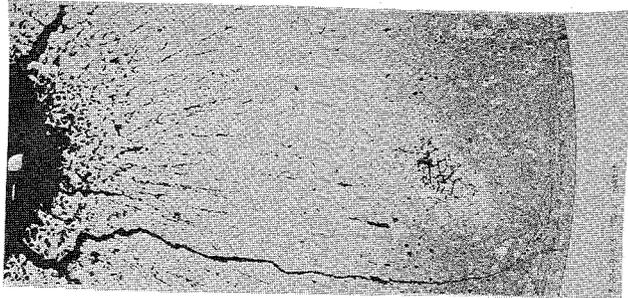
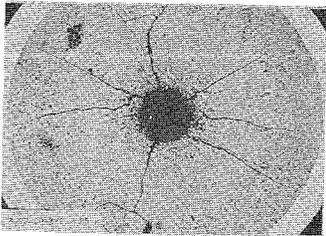
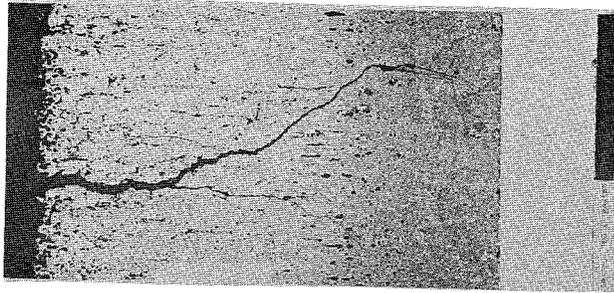
A



1mm

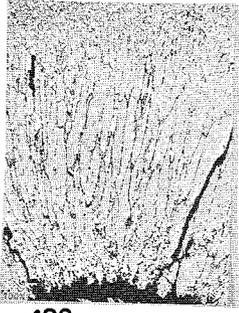


1mm

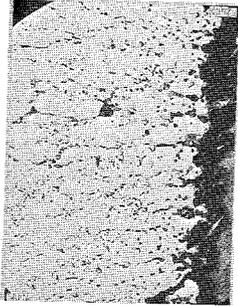


1mm

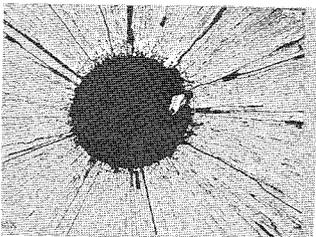
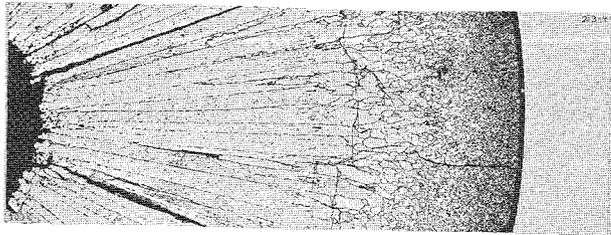
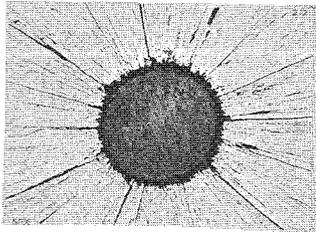
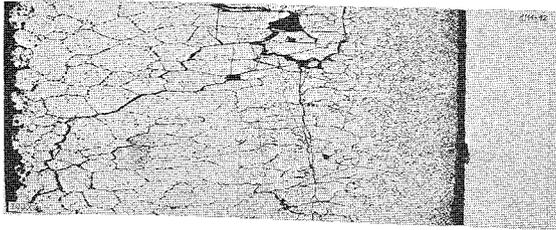
1mm



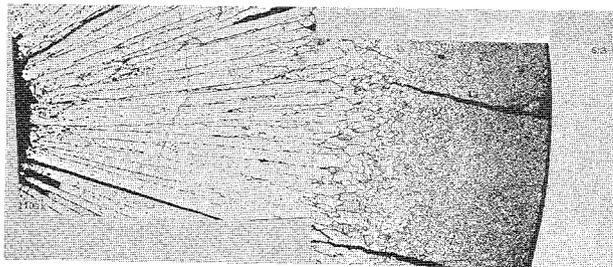
100 μm



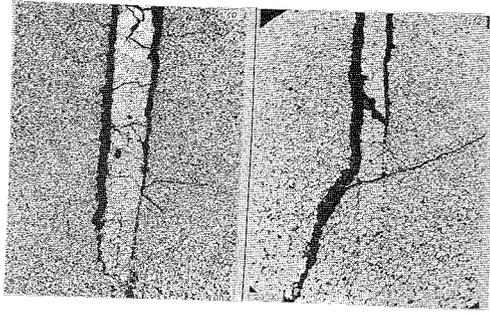
100 μm



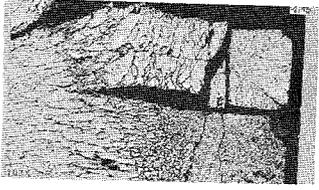
1 mm



1 mm

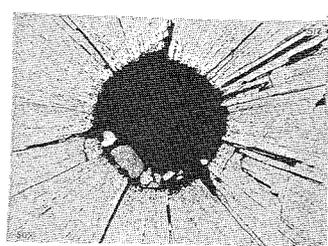
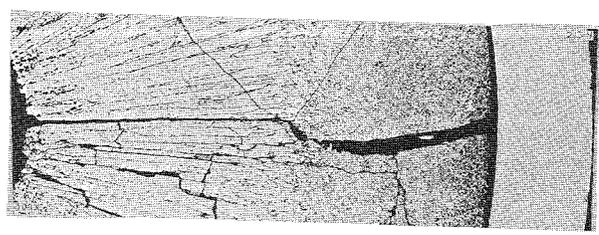
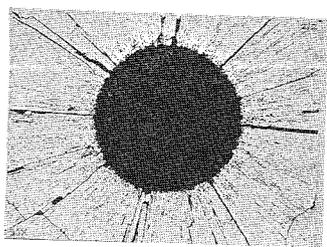
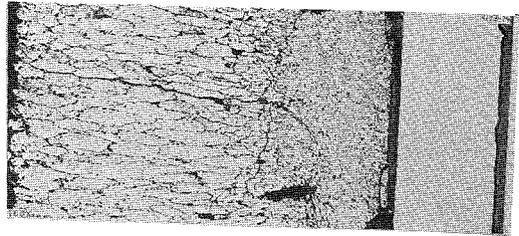


100 μ m

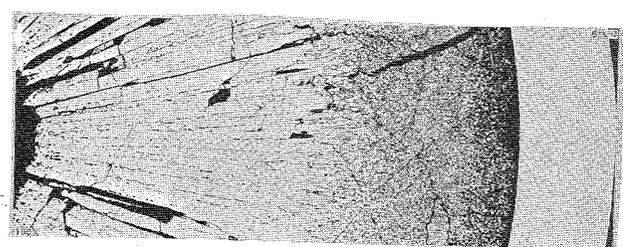


A

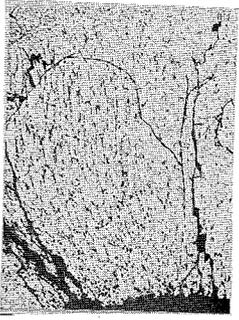
1mm



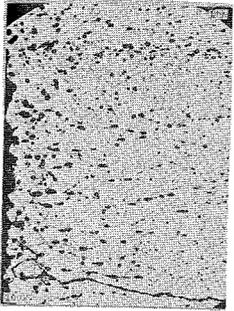
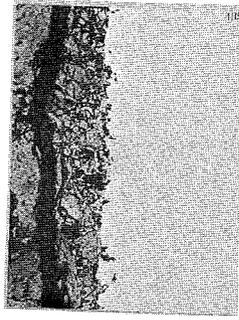
1mm



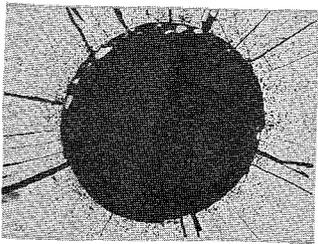
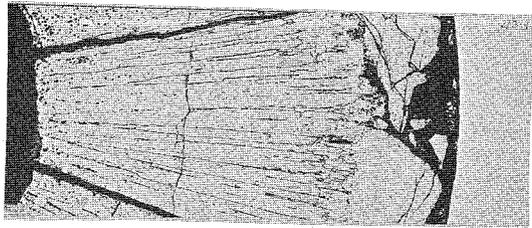
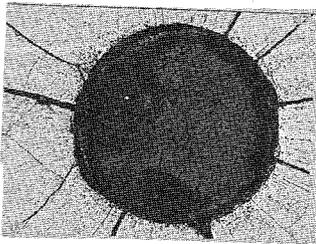
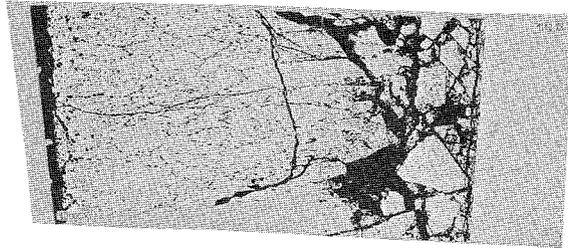
1mm



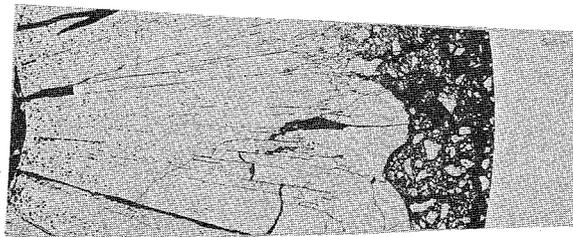
100 μ m



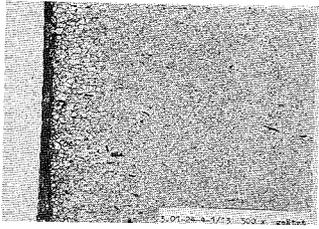
100 μ m



1mm

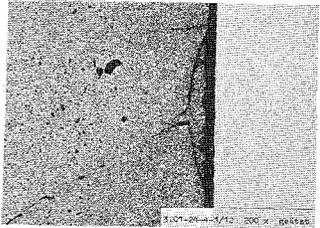


1mm



A

100 μm

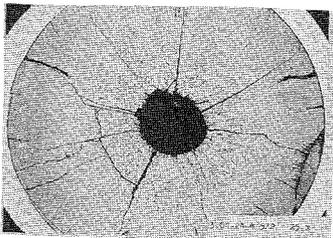
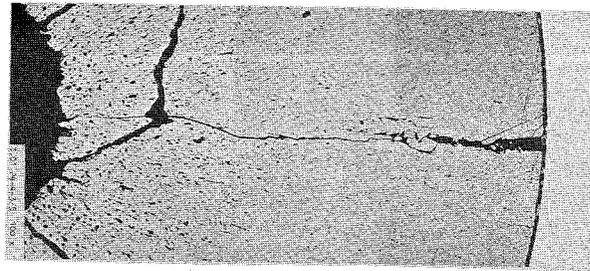
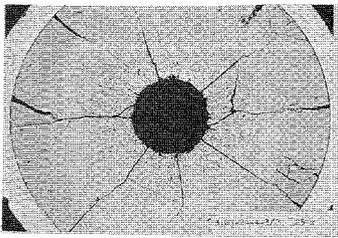


B

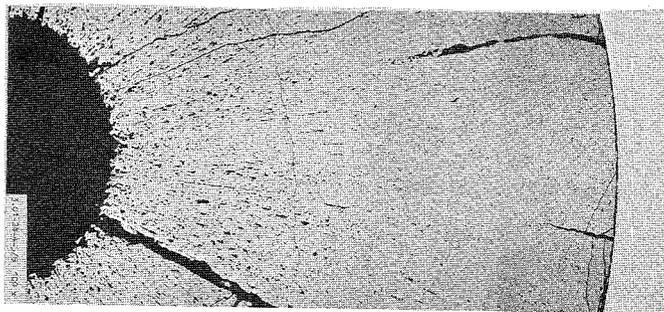
100 μm



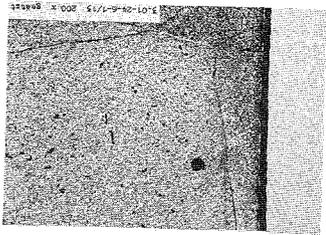
C



1mm

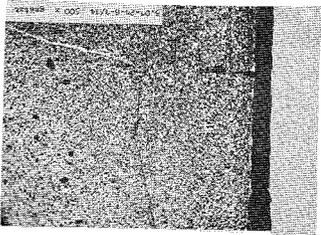


1mm



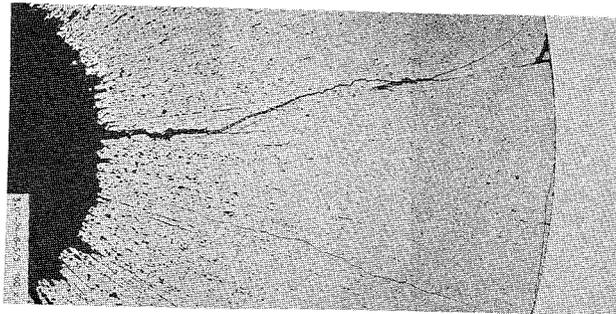
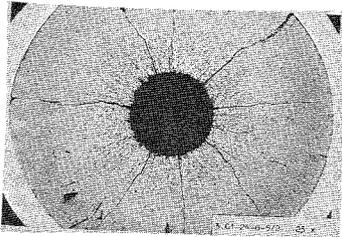
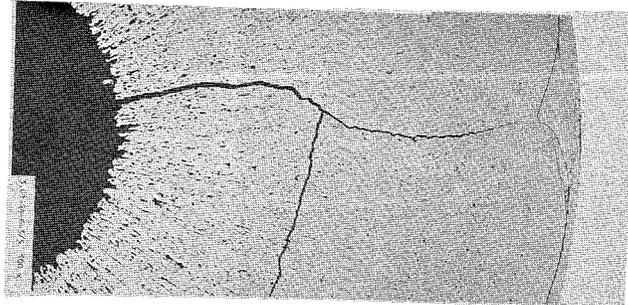
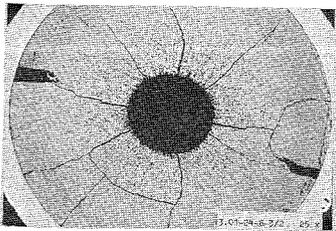
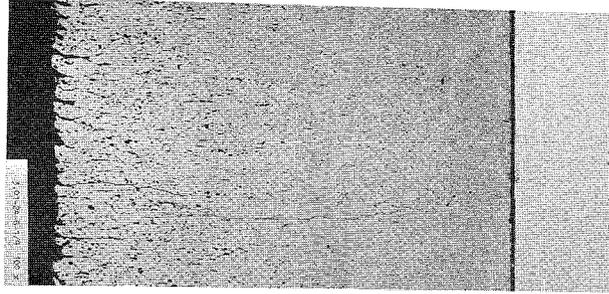
A

100 μm



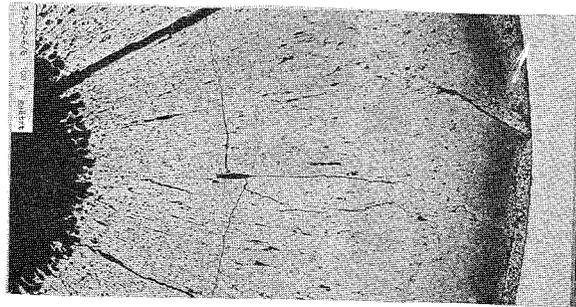
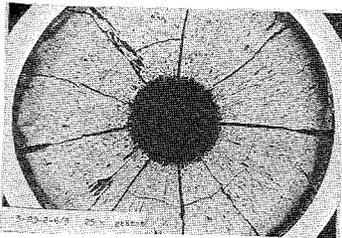
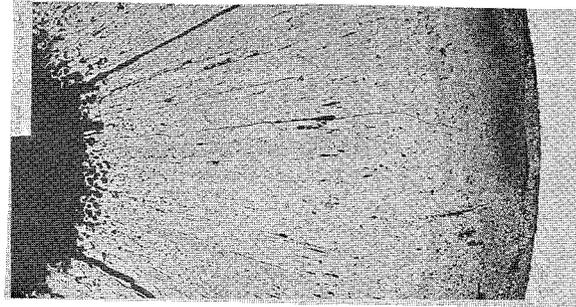
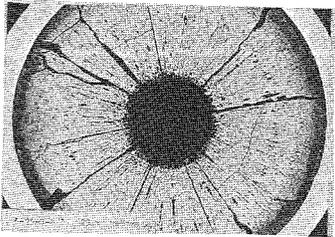
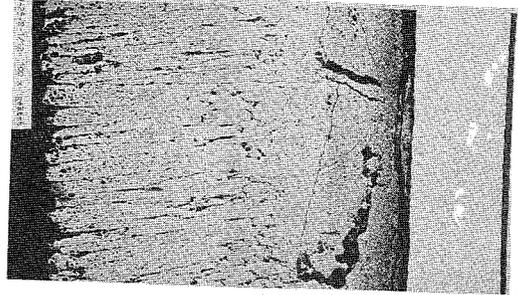
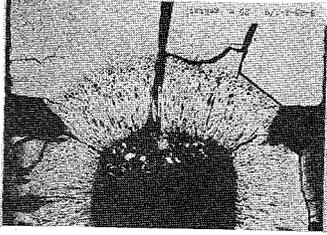
B

100 μm



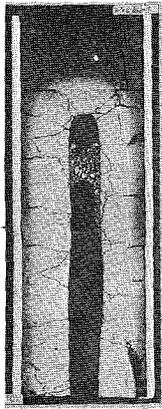
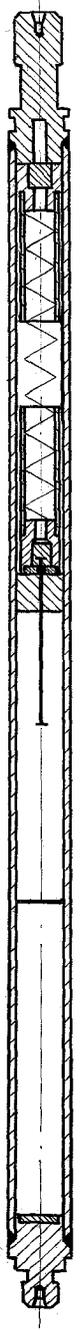
1mm

1mm



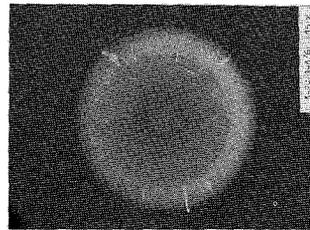
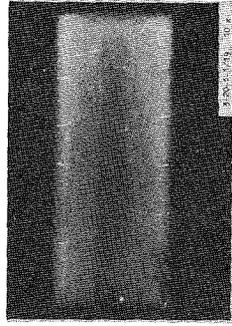
1mm

1mm

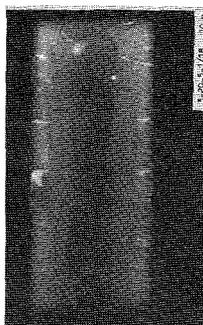
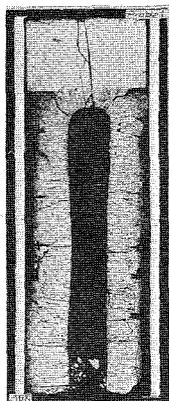
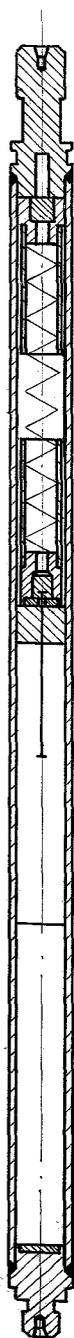


A

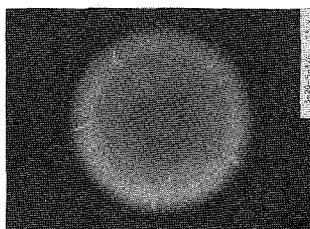
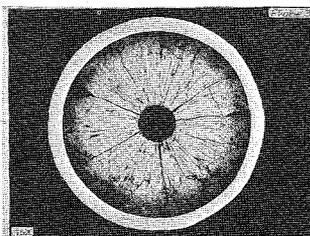
1 mm



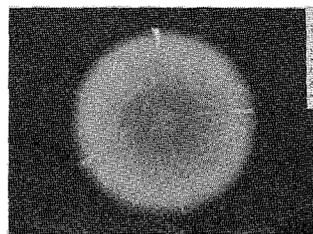
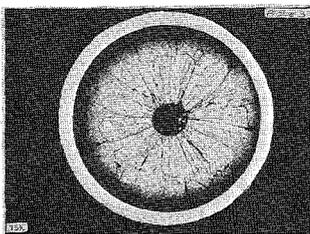
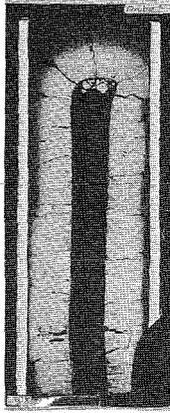
1 mm



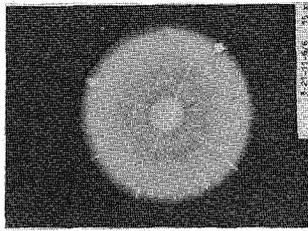
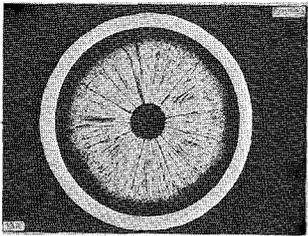
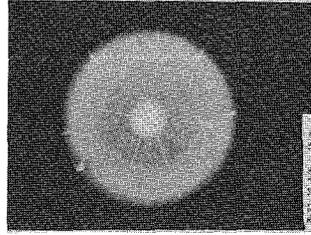
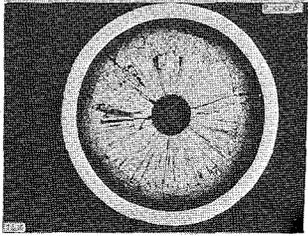
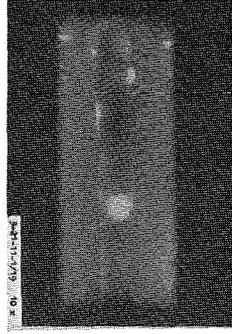
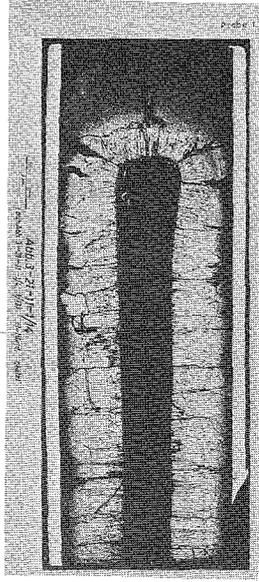
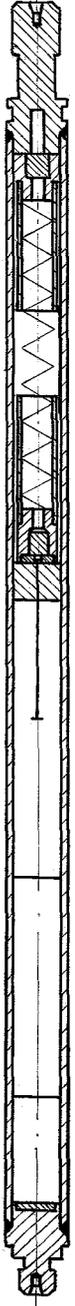
1mm



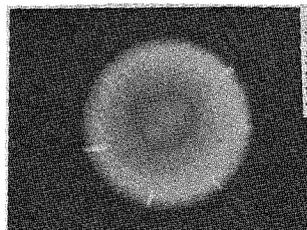
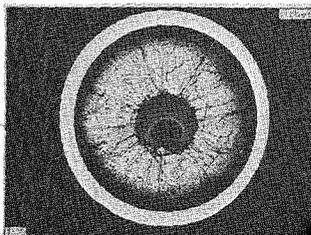
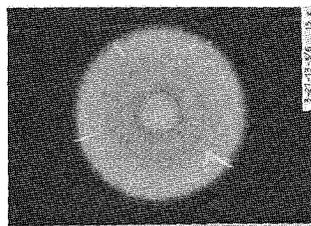
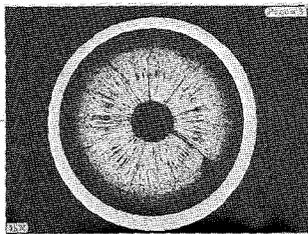
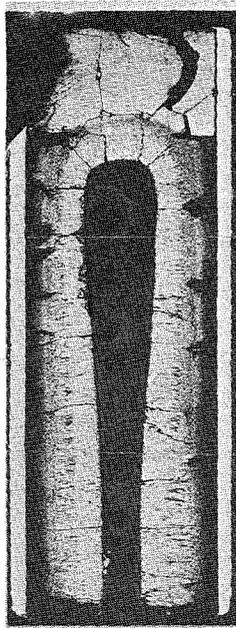
1mm



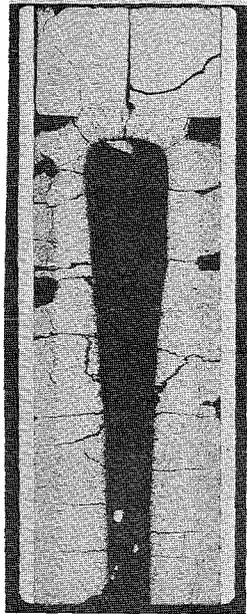
1
1mm



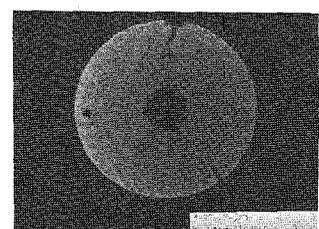
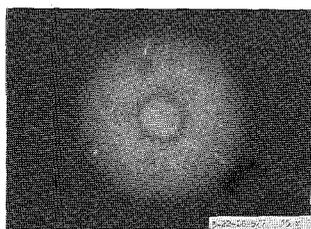
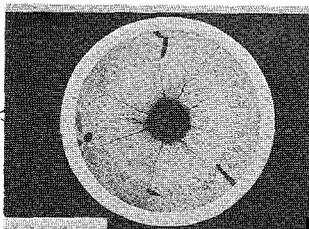
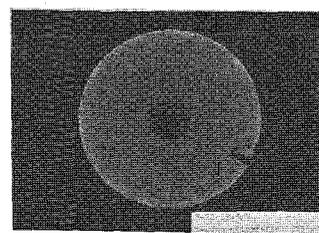
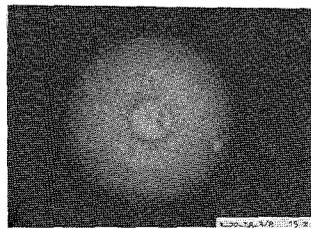
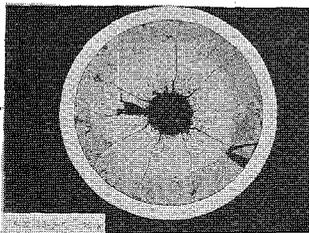
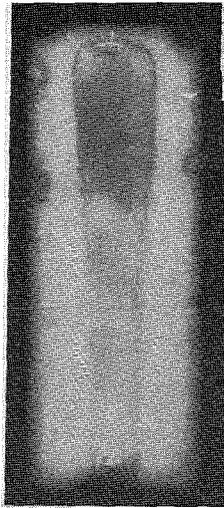
1mm



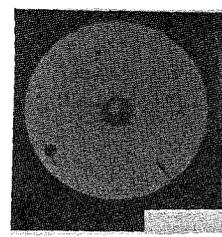
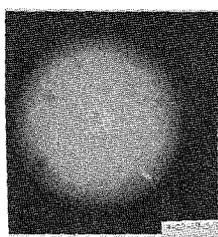
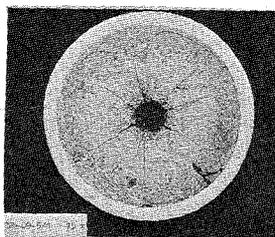
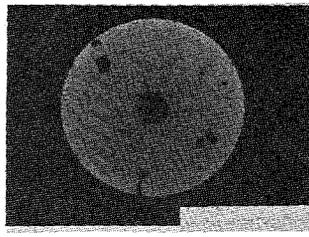
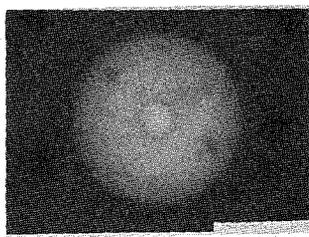
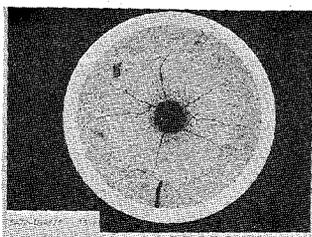
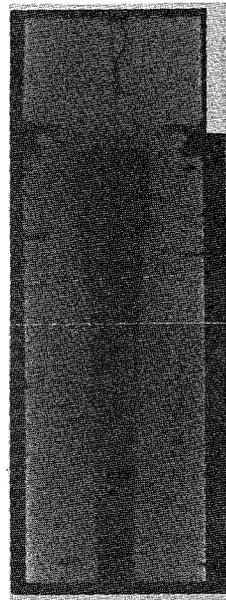
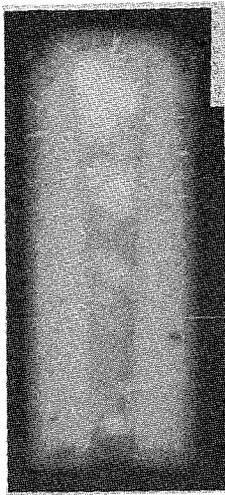
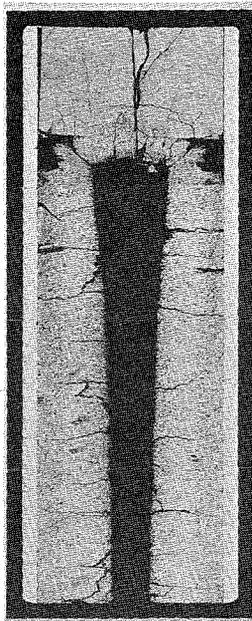
1mm



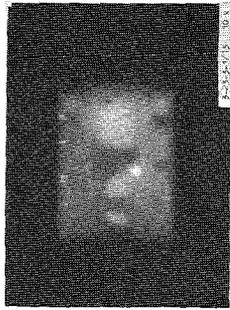
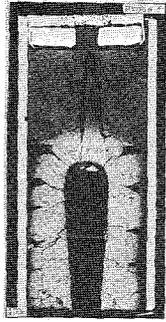
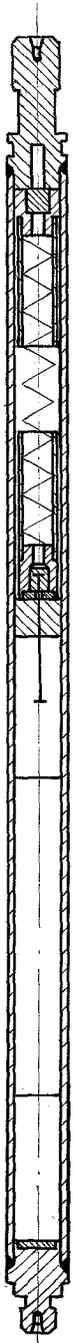
A



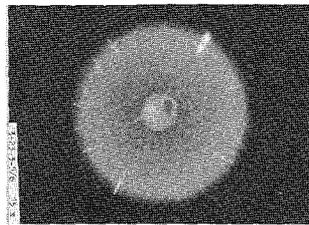
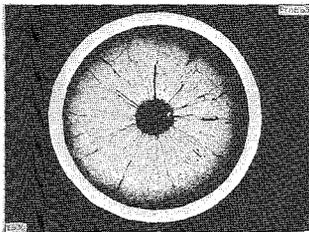
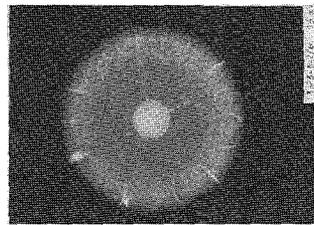
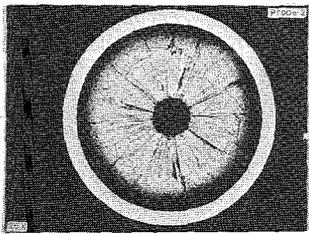
1
1mm



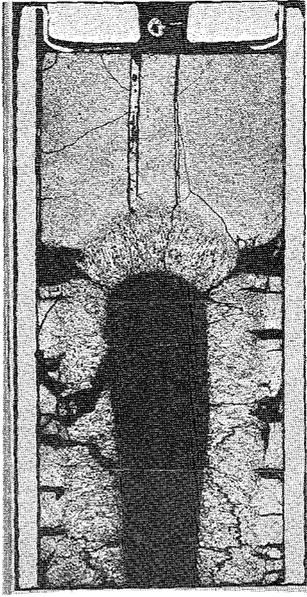
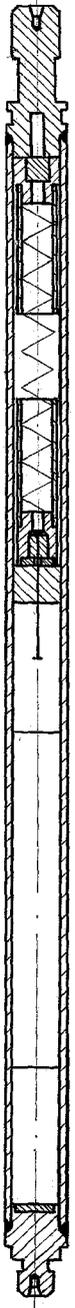
1mm



1
1mm



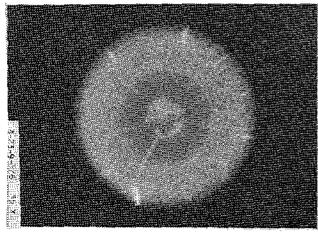
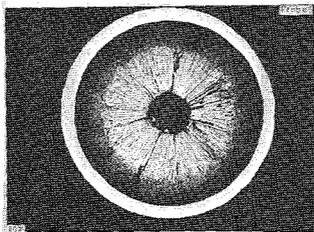
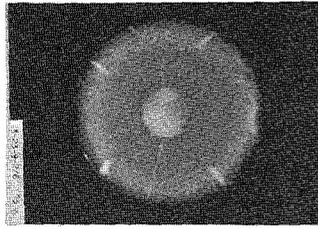
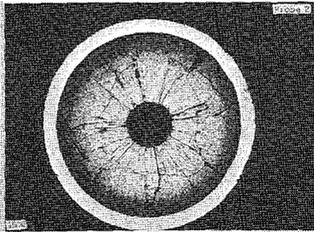
1
1mm



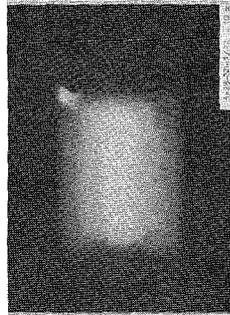
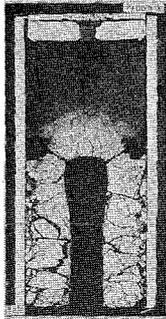
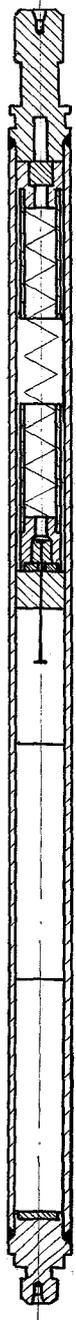
1mm



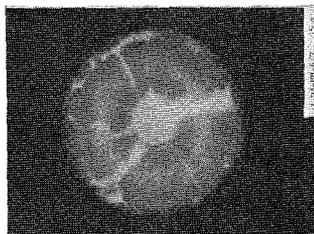
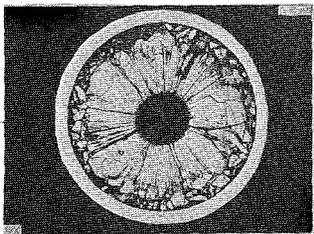
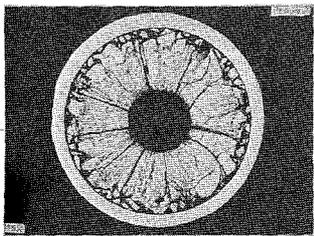
1mm



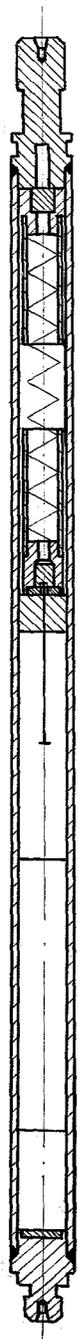
1mm



1mm



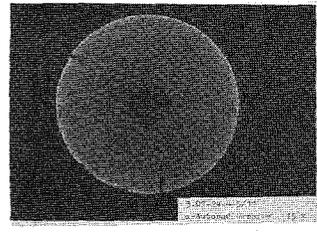
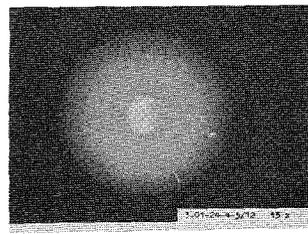
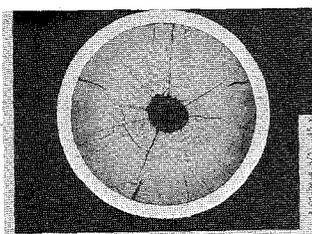
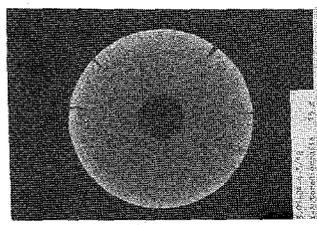
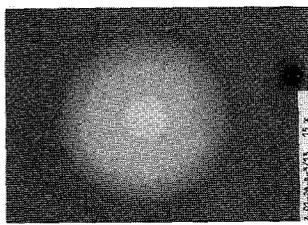
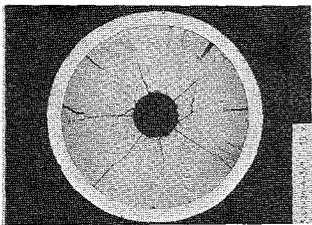
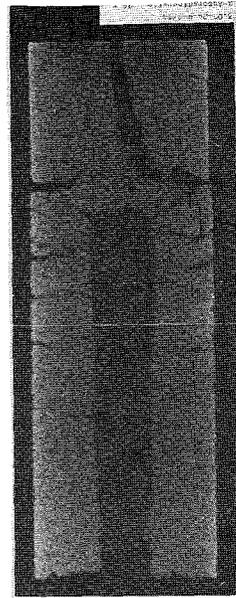
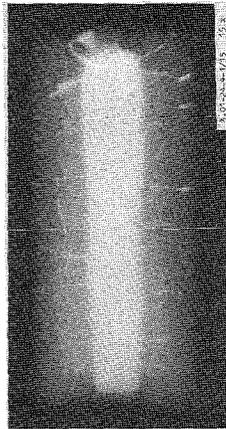
1mm



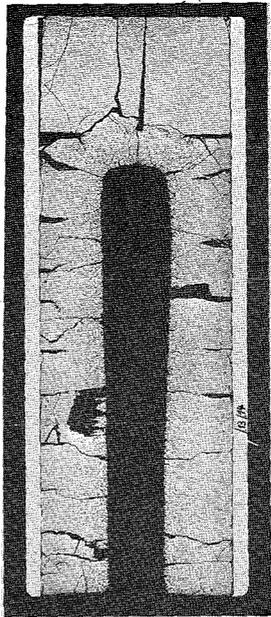
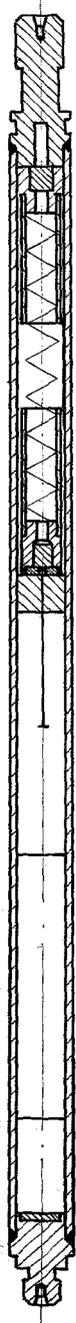
C

A

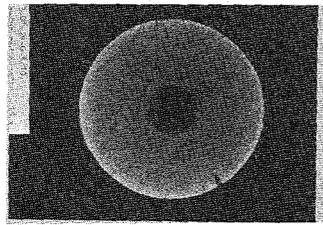
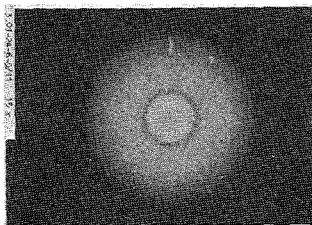
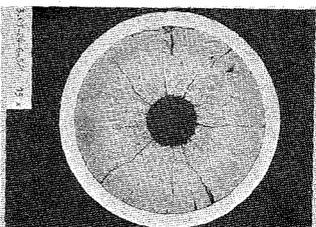
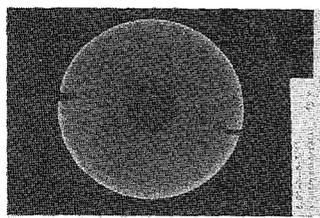
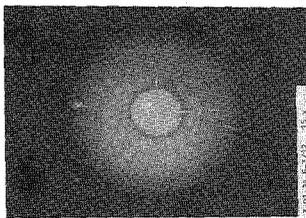
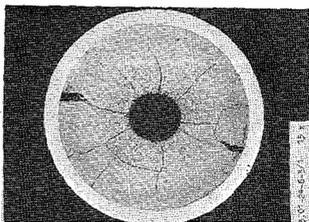
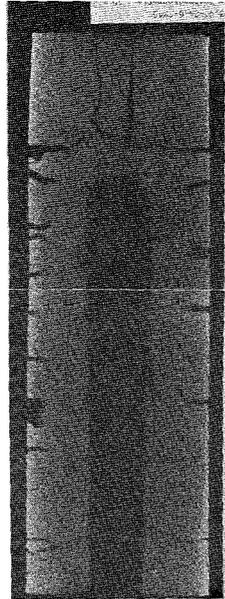
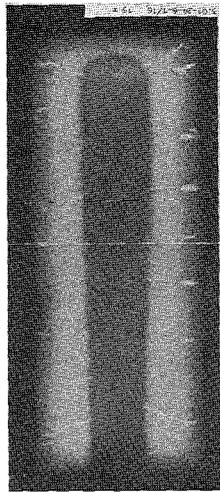
-B



1
1mm



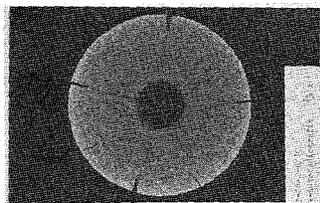
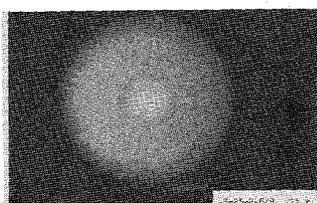
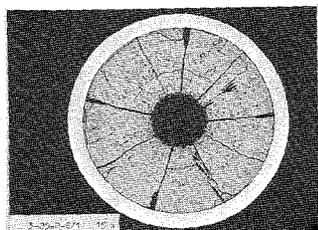
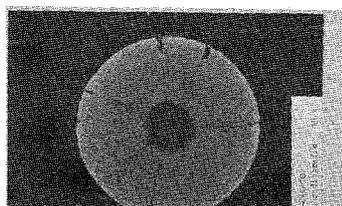
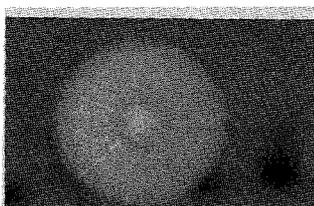
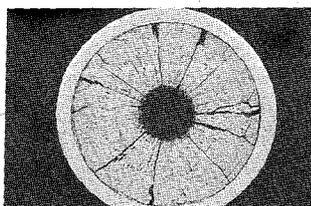
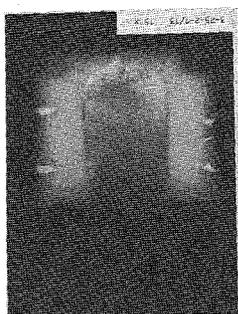
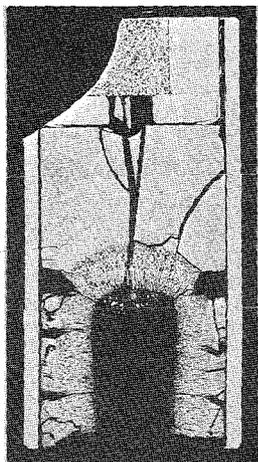
A
B



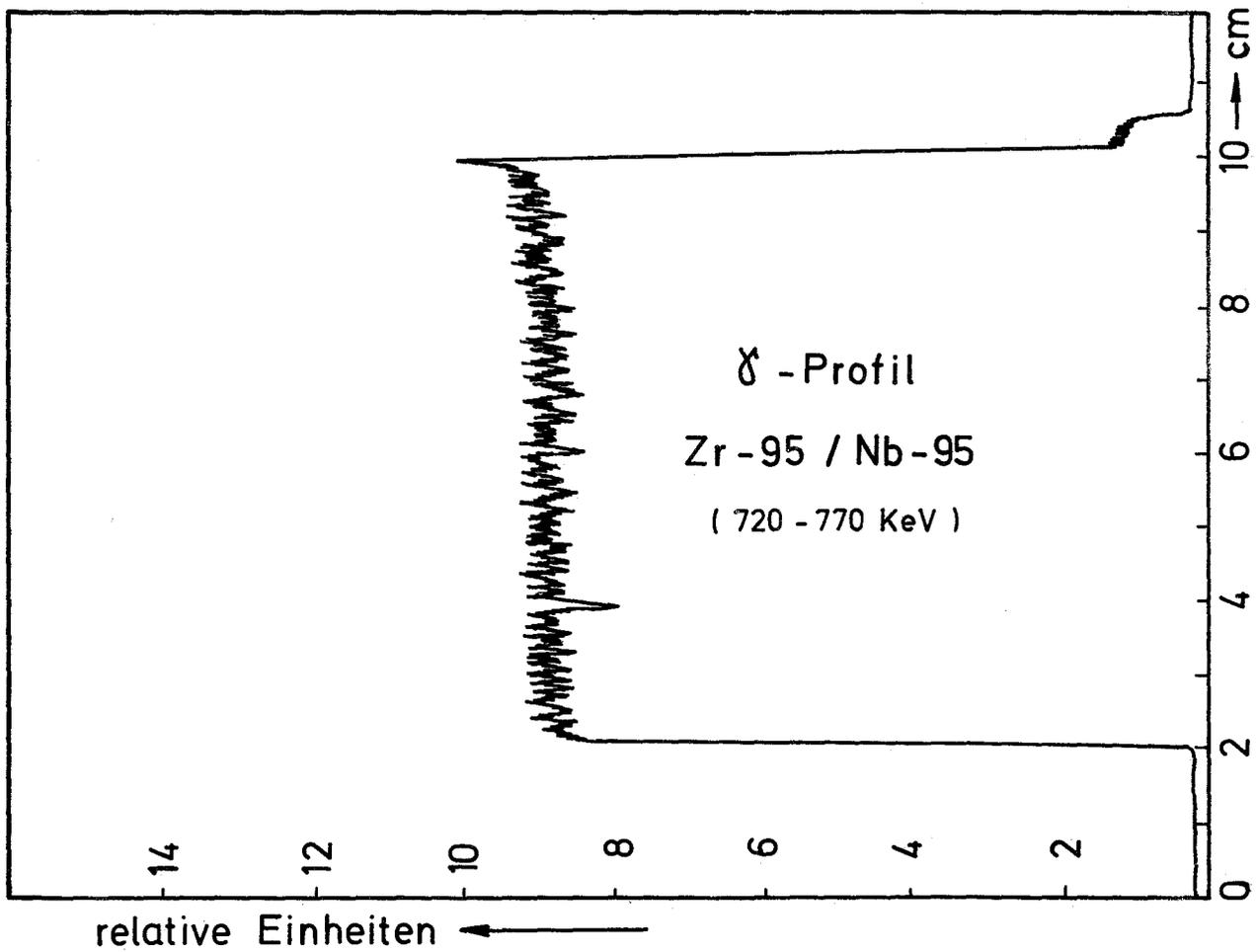
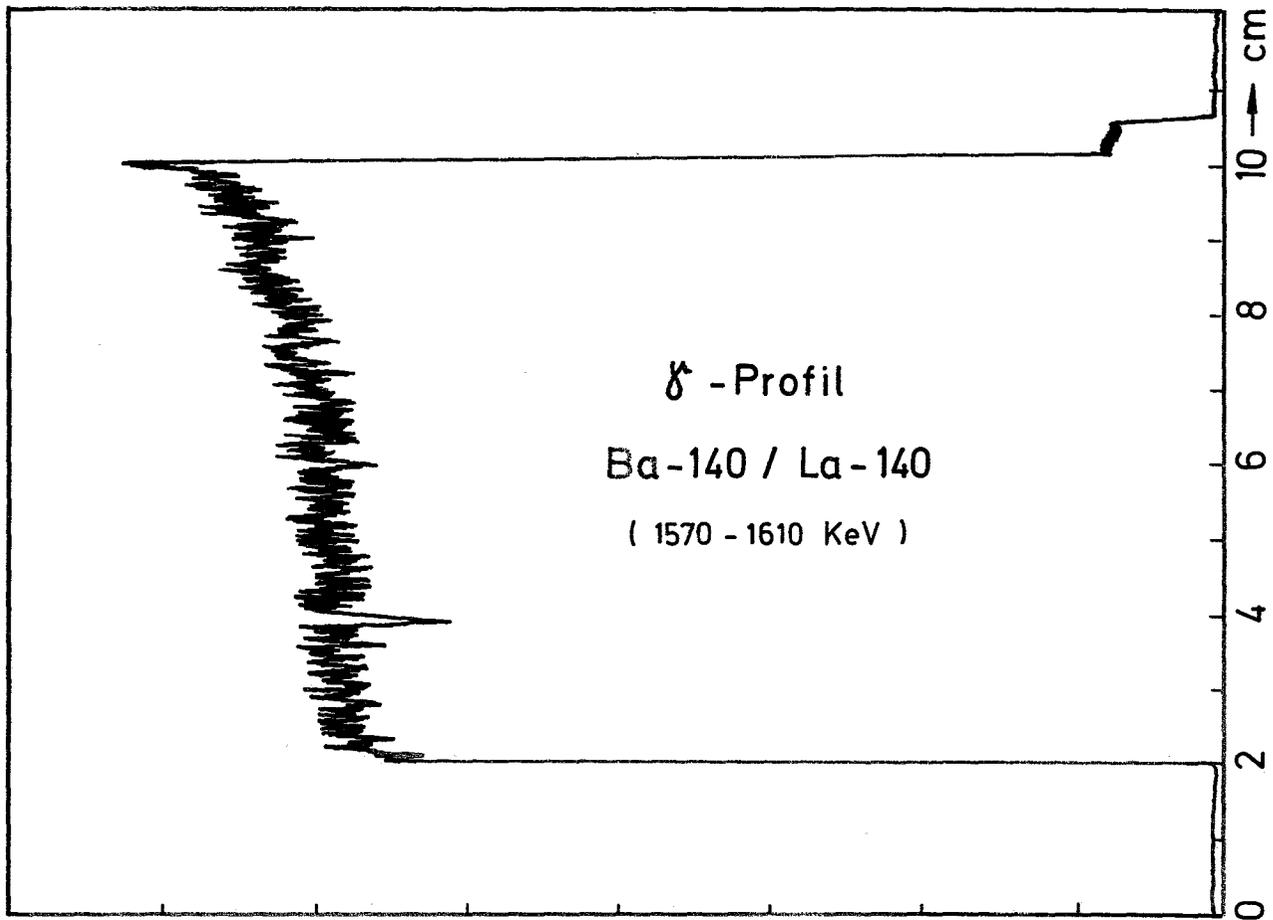
1
1mm

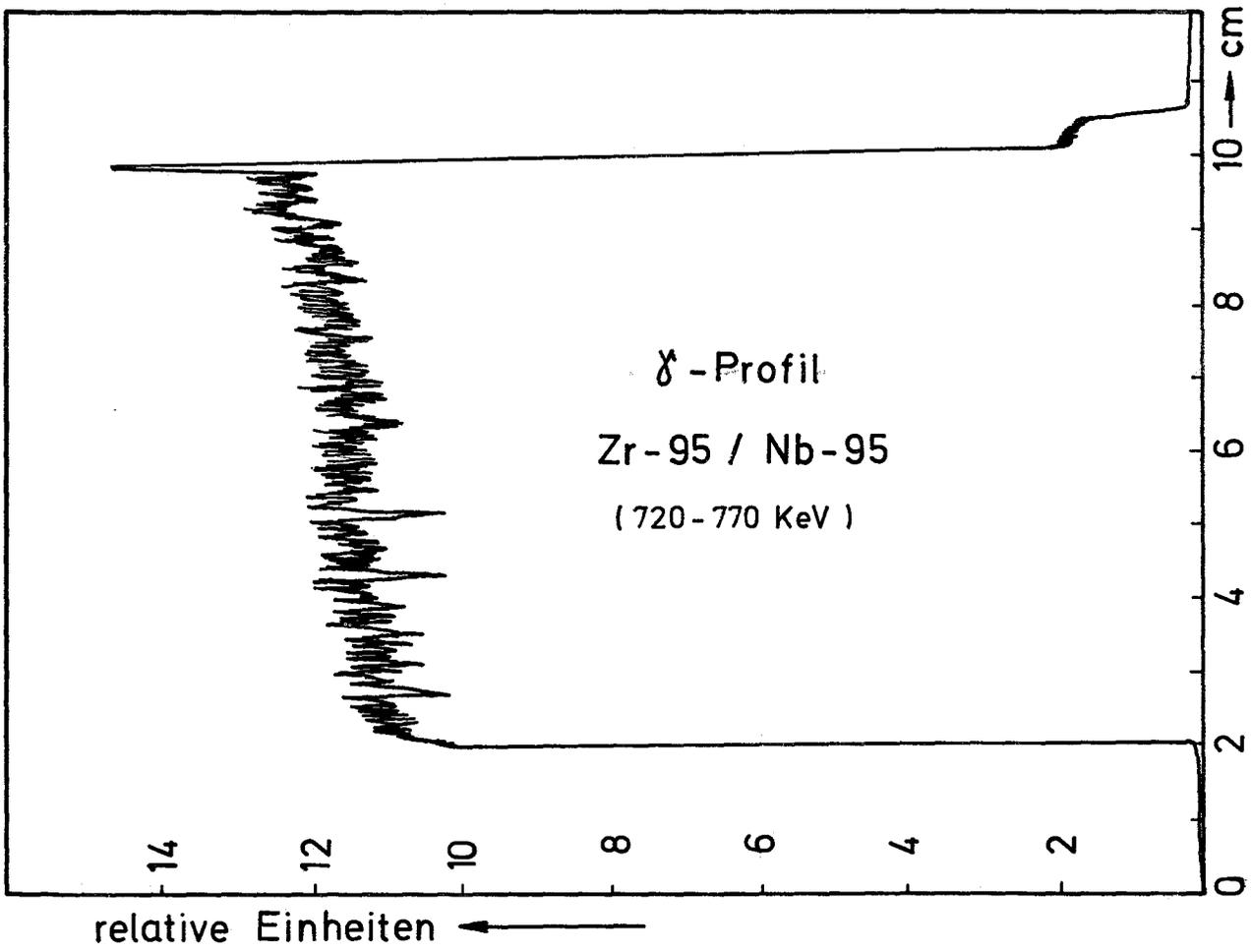
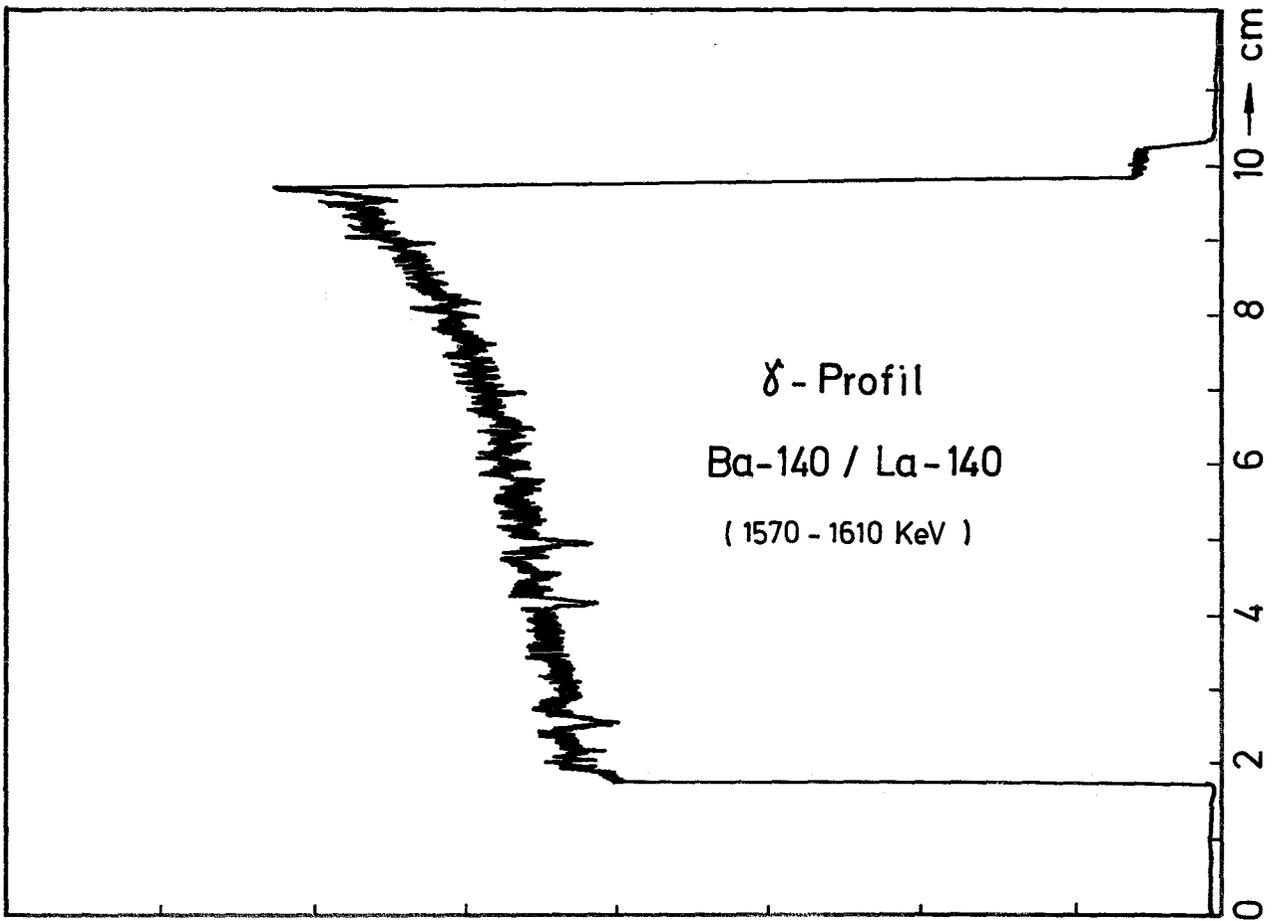


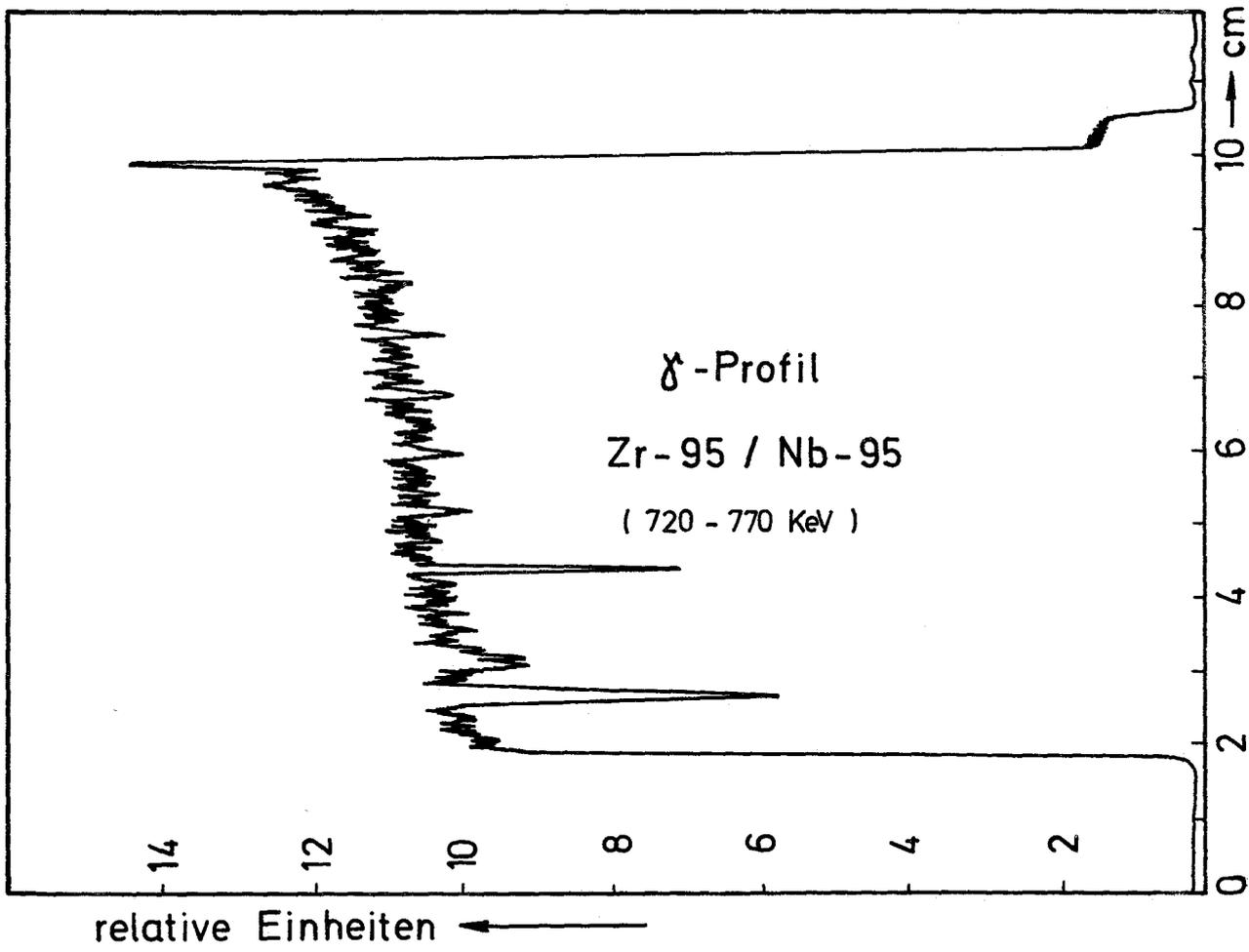
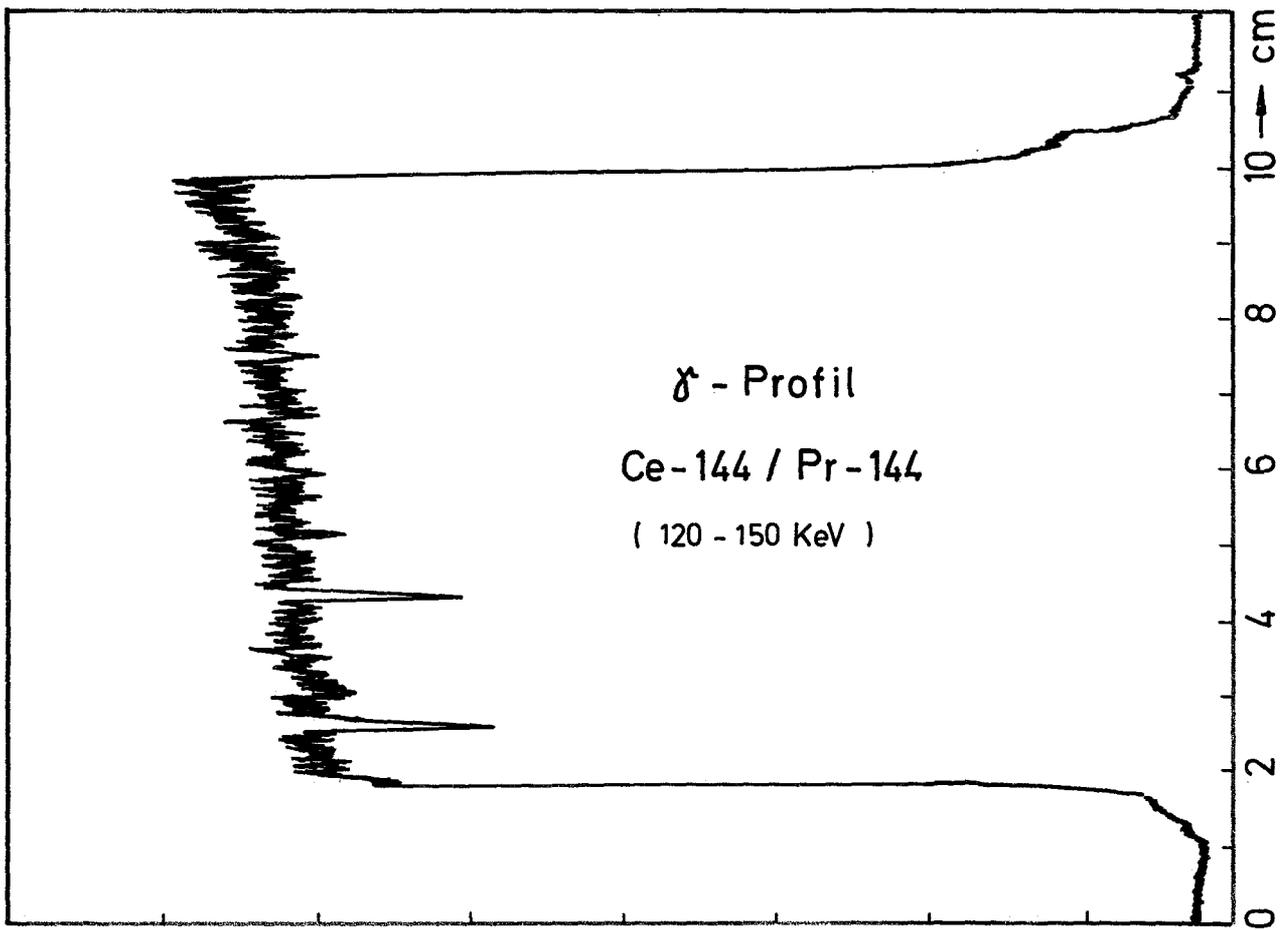
A—

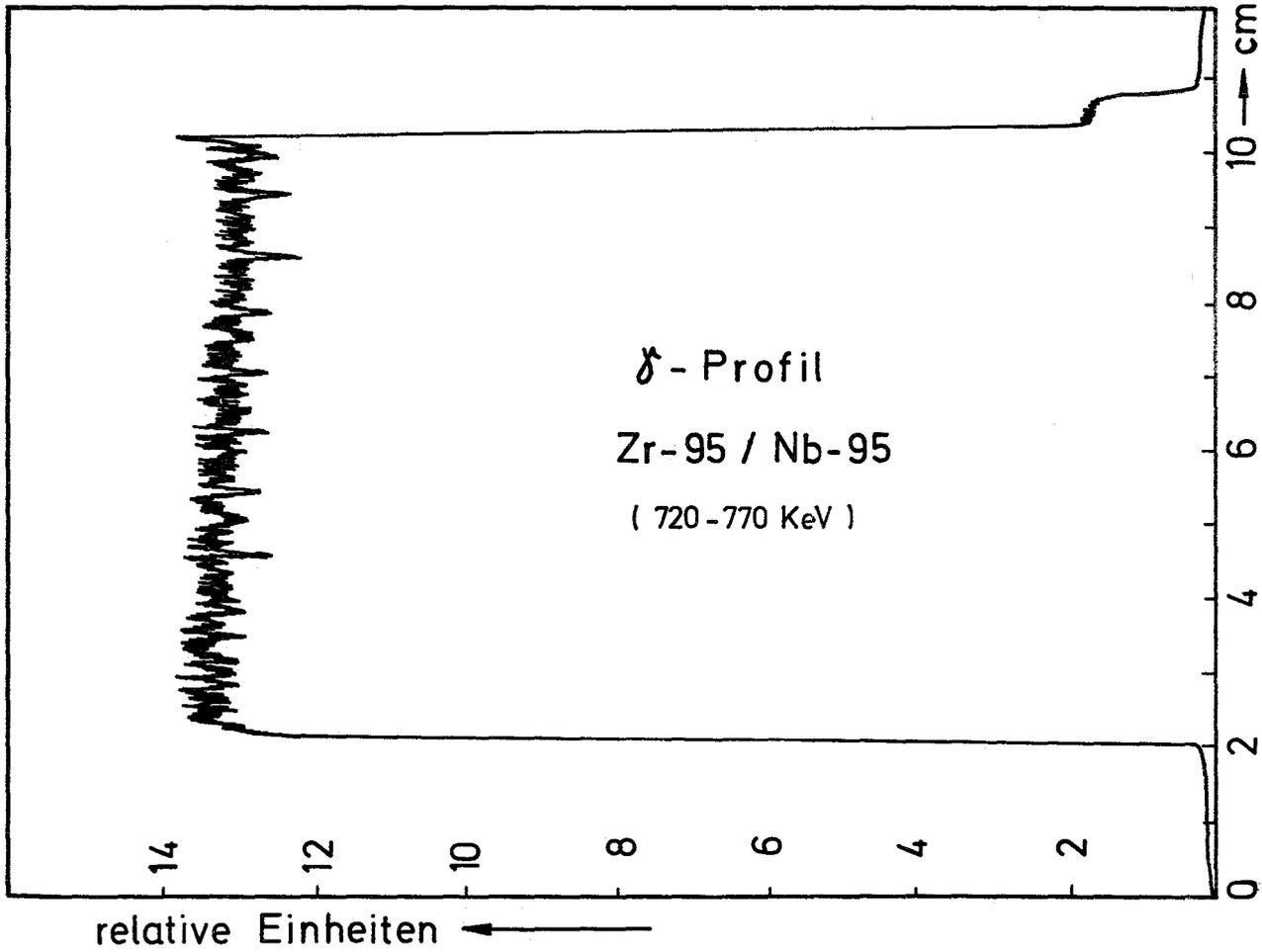
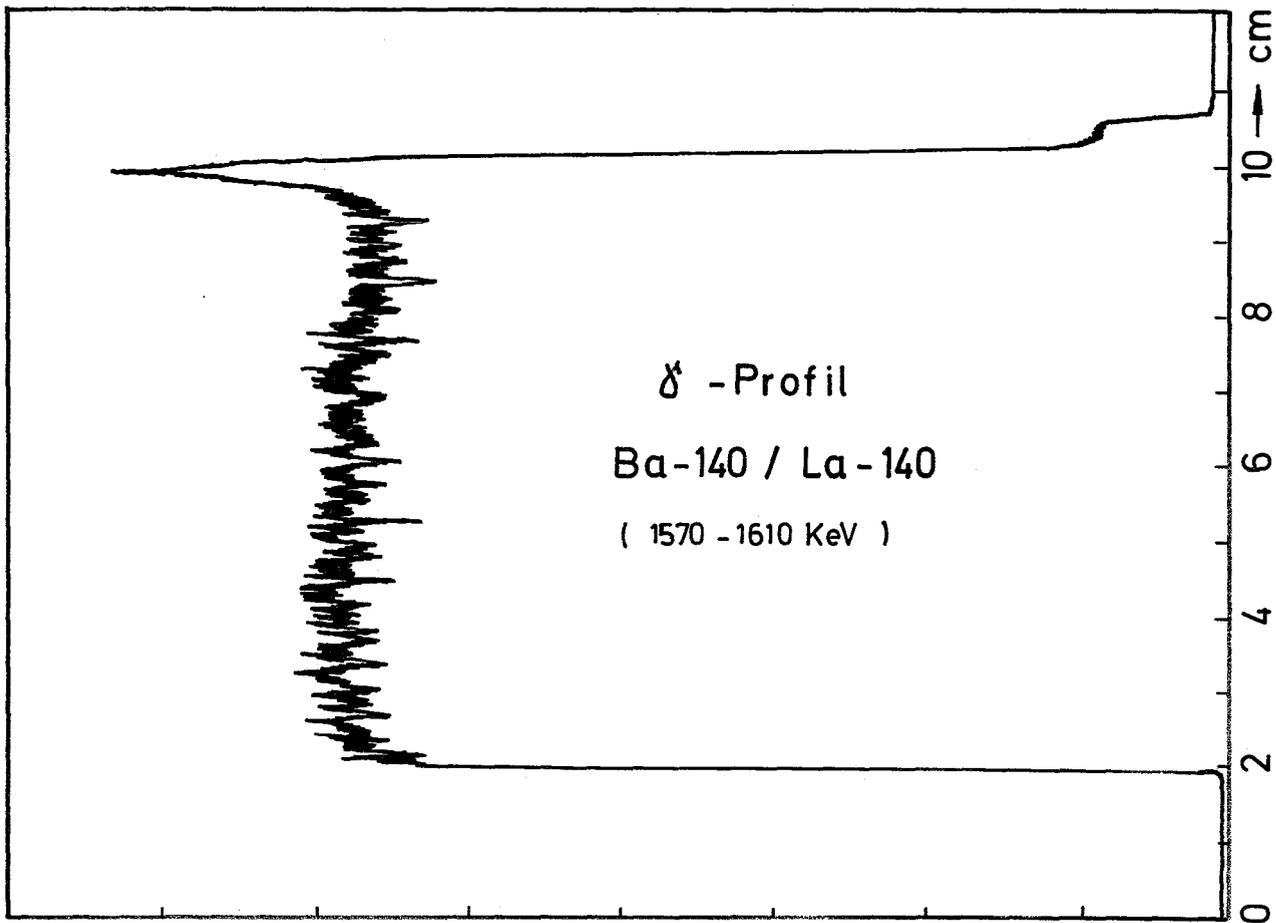


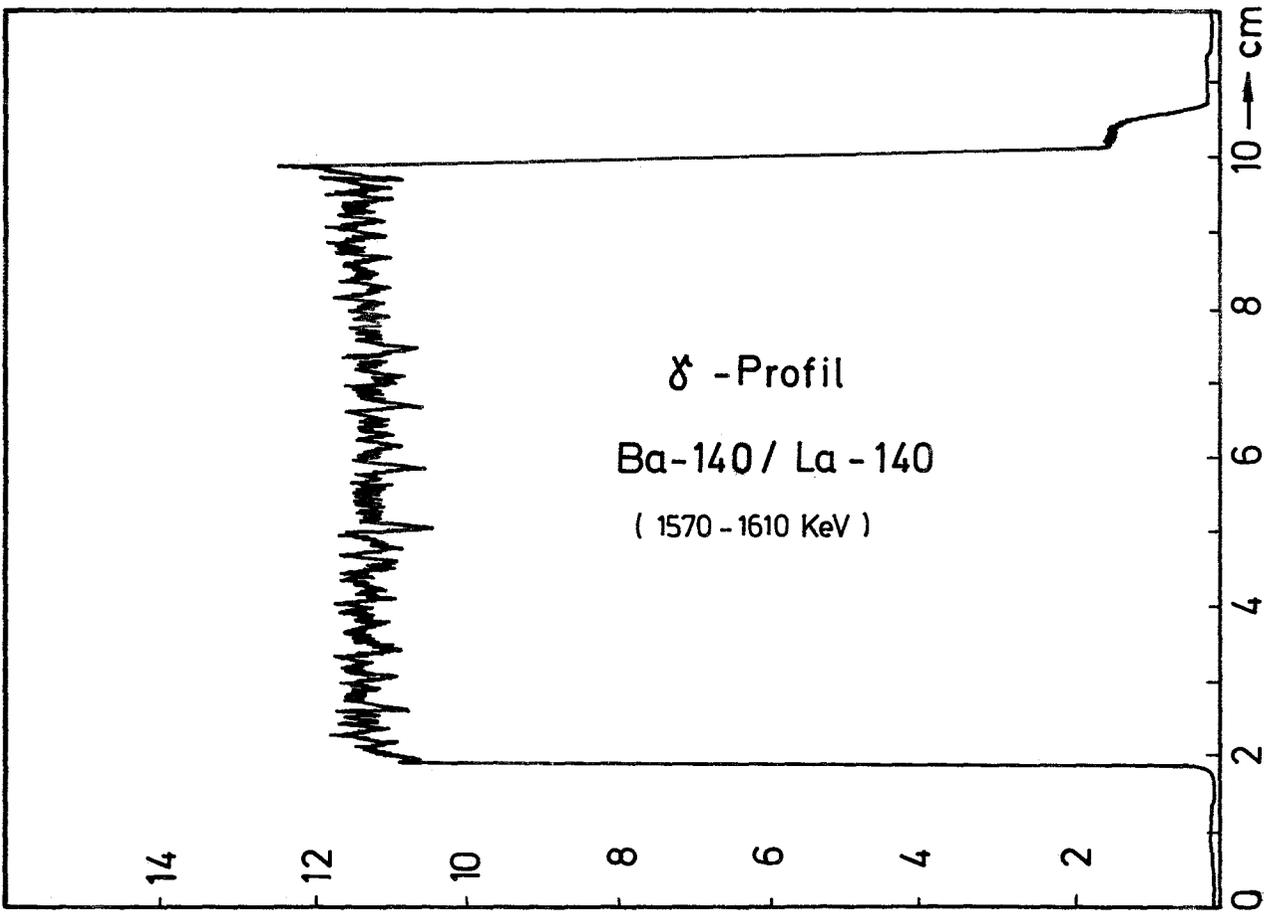
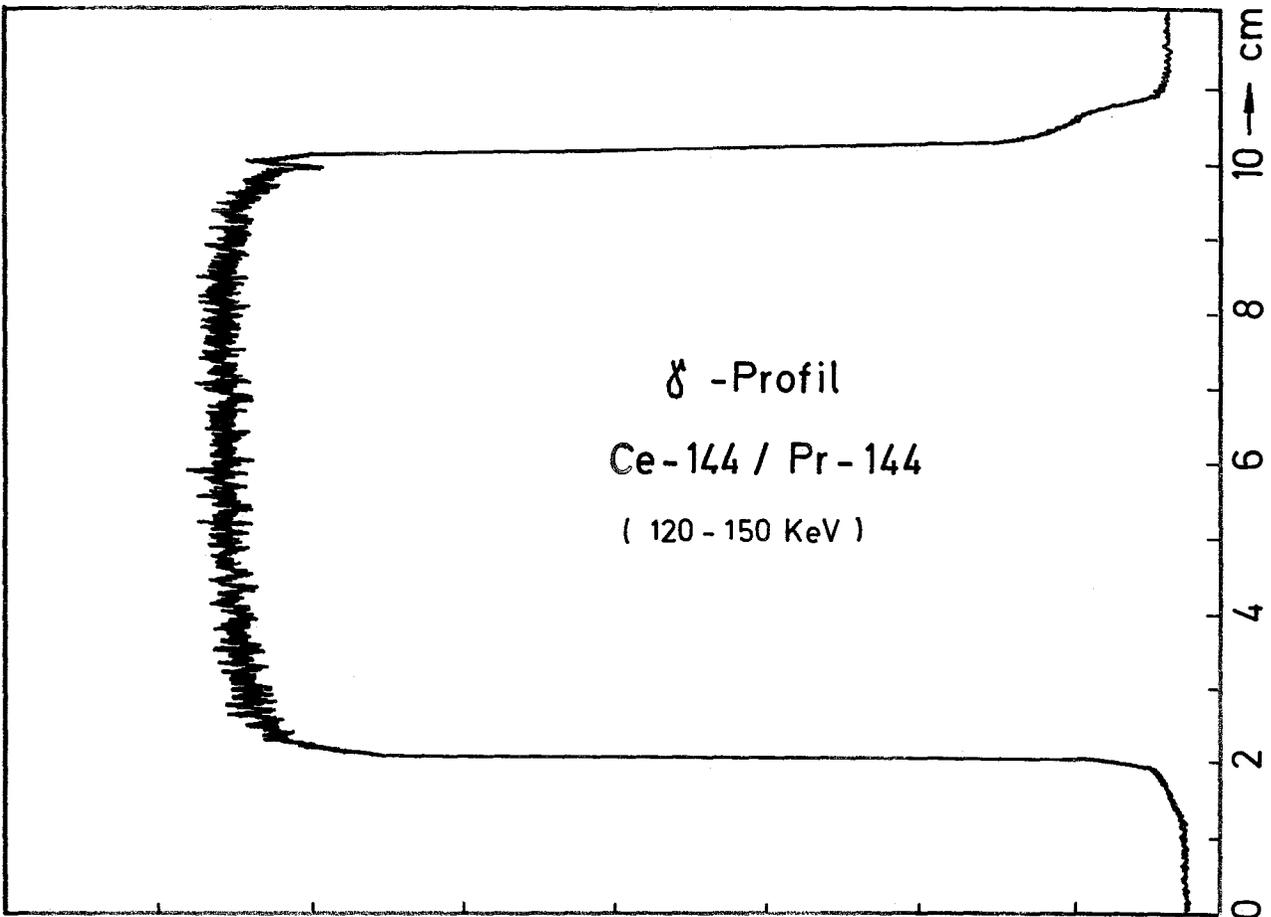
1
1mm



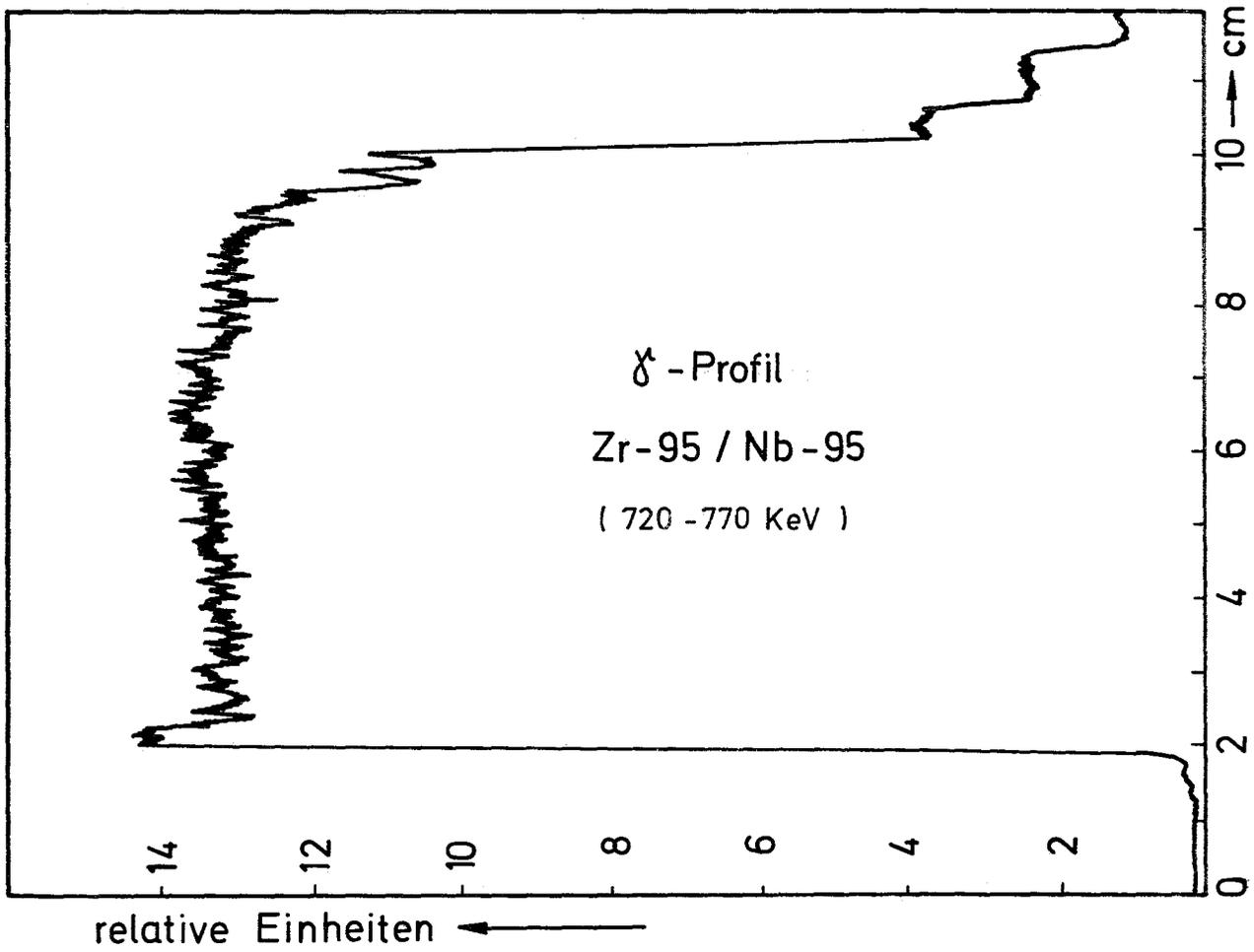
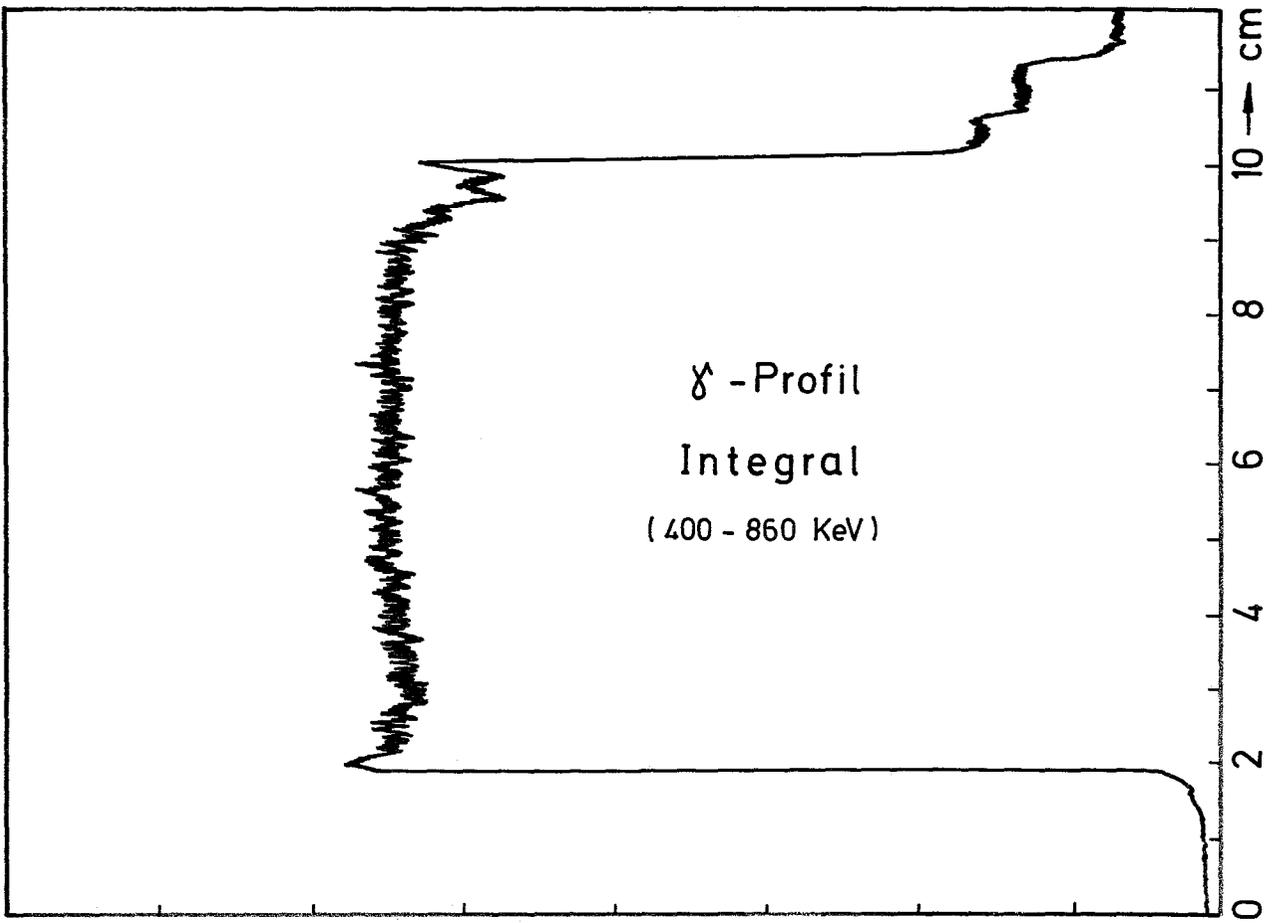


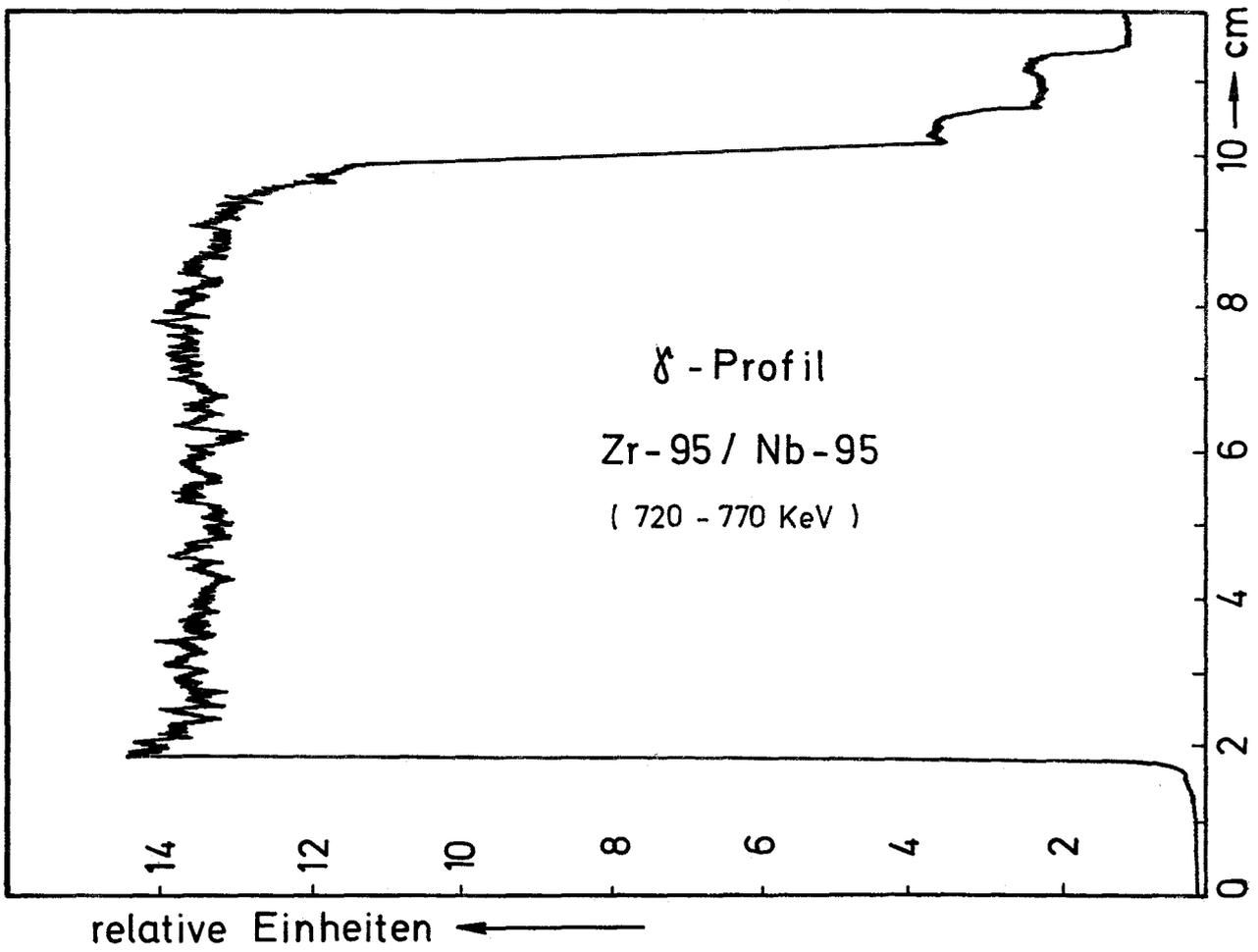
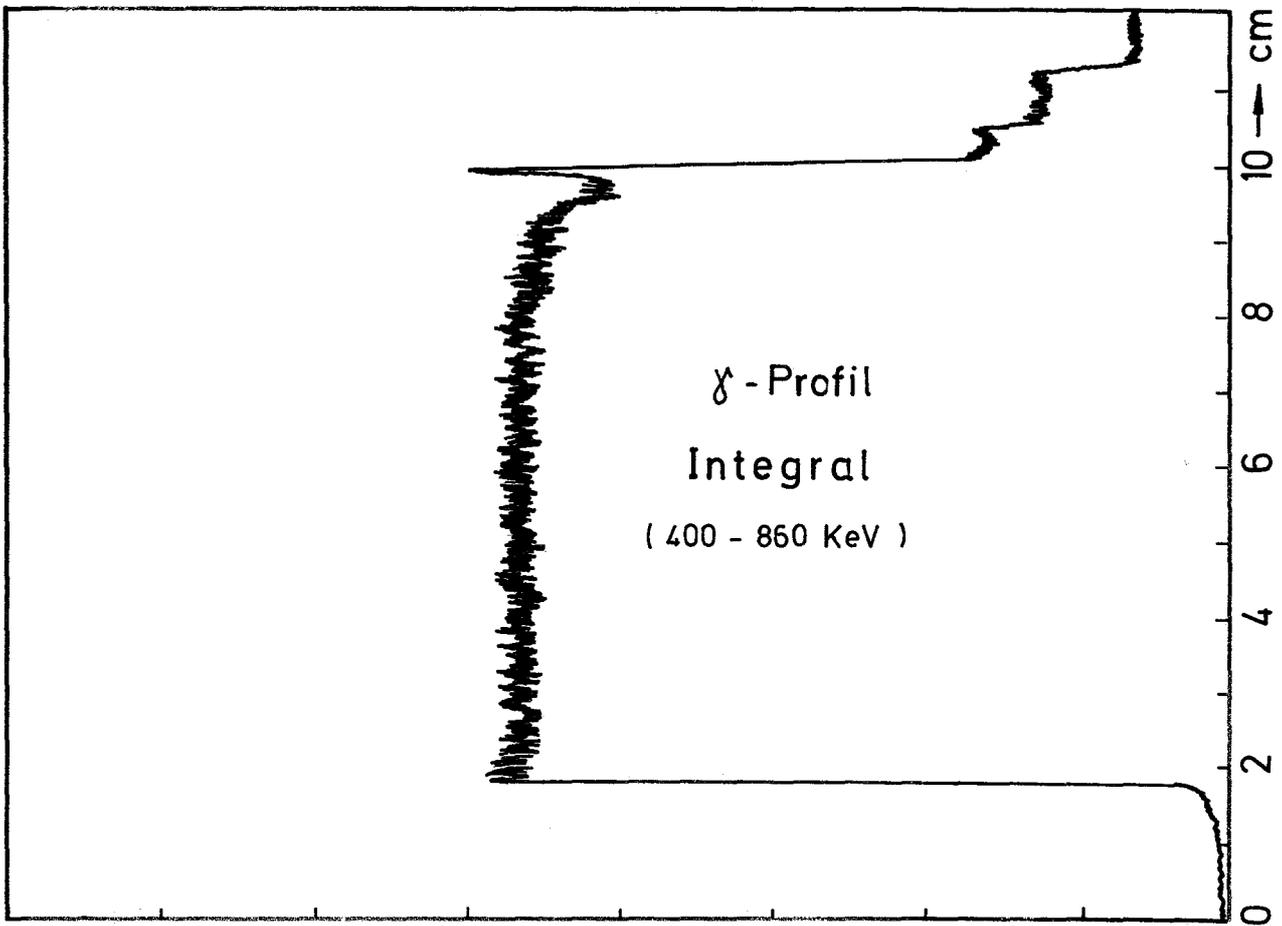


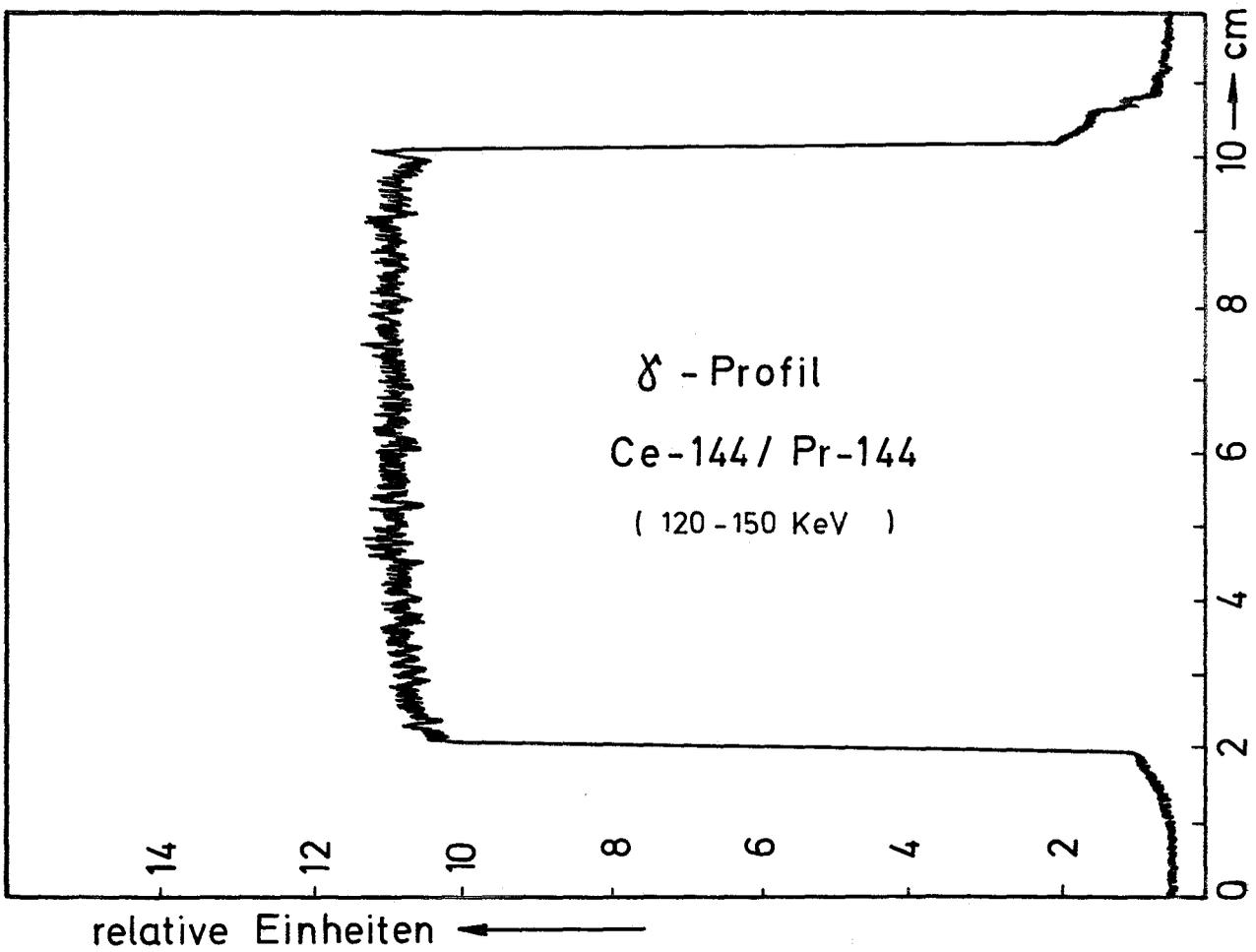
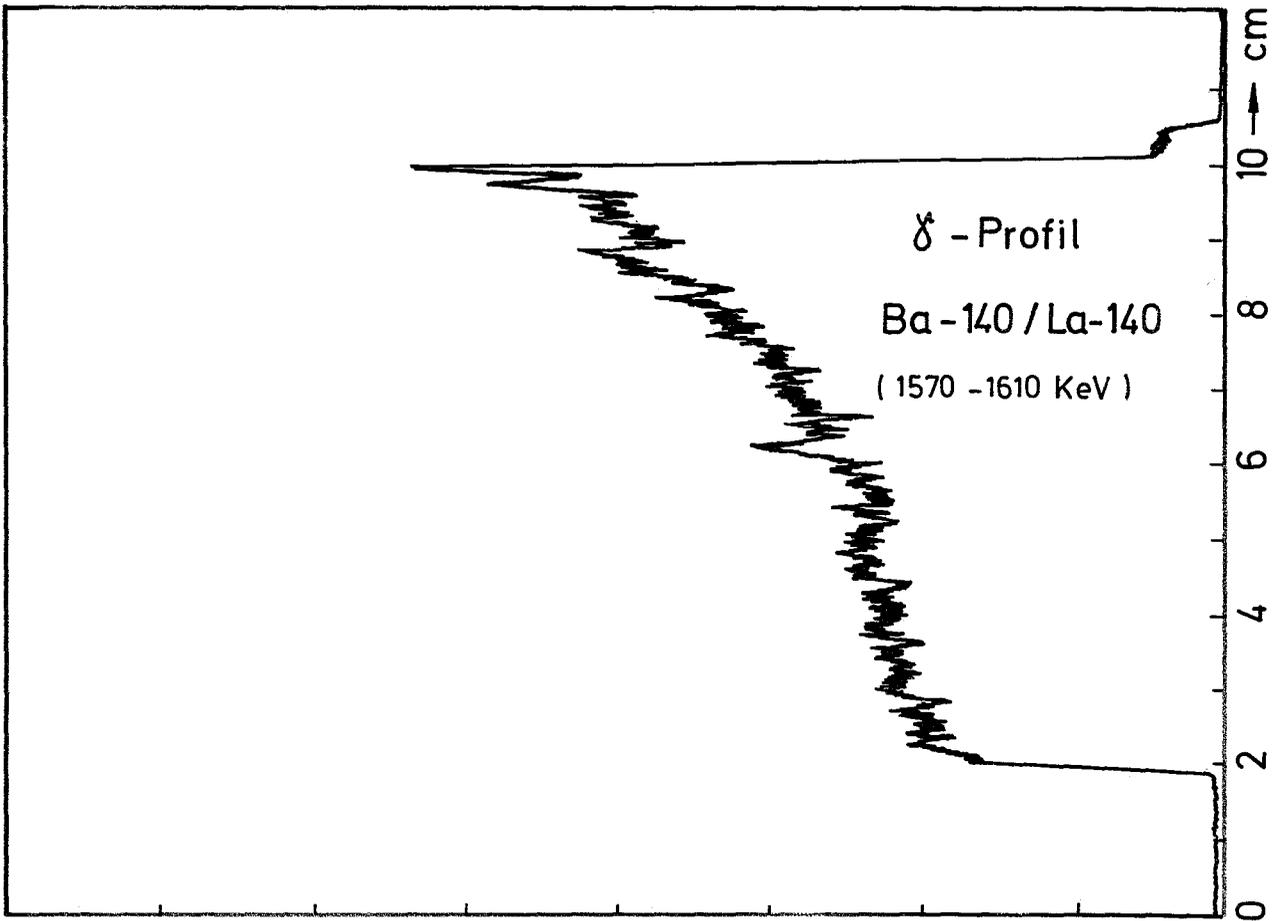


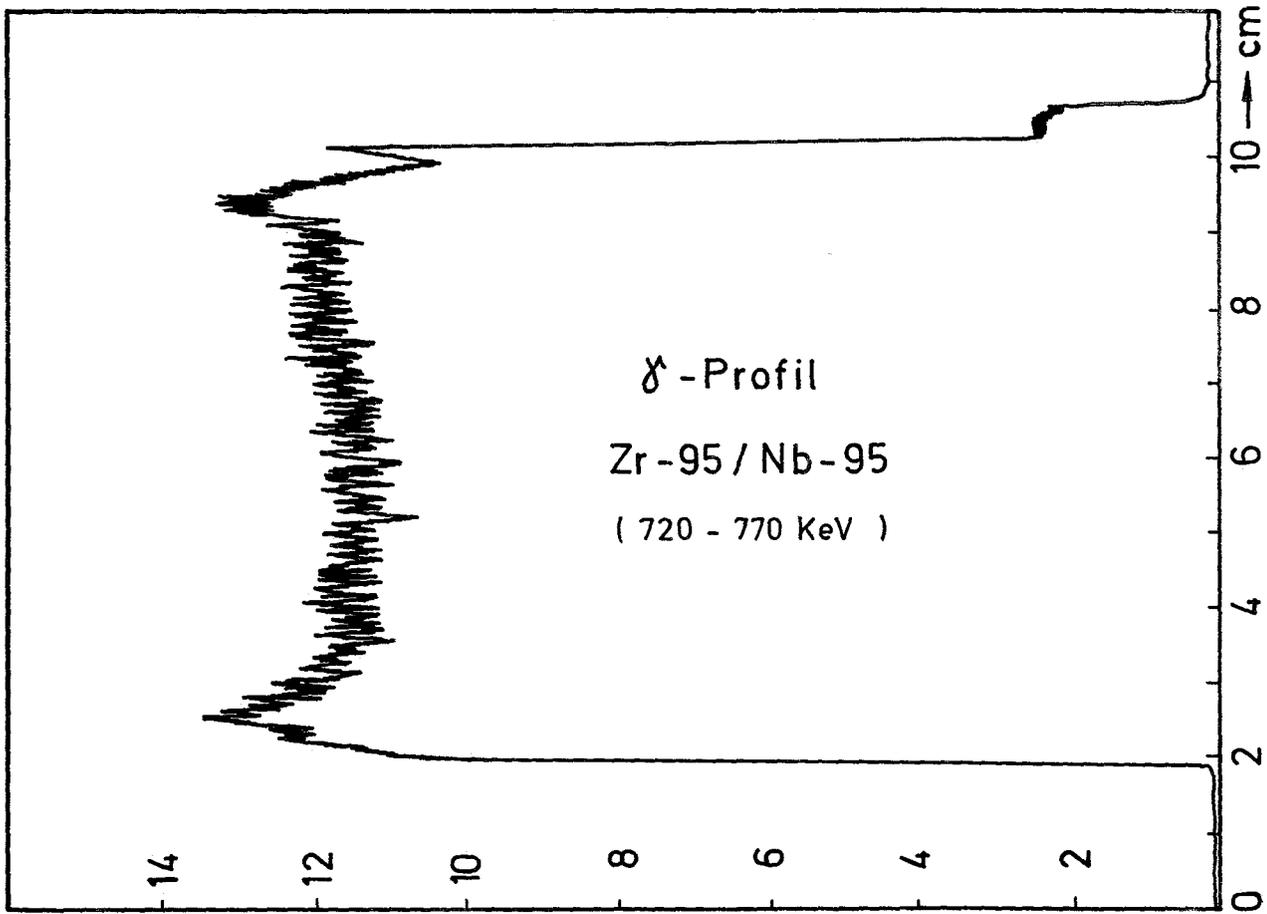
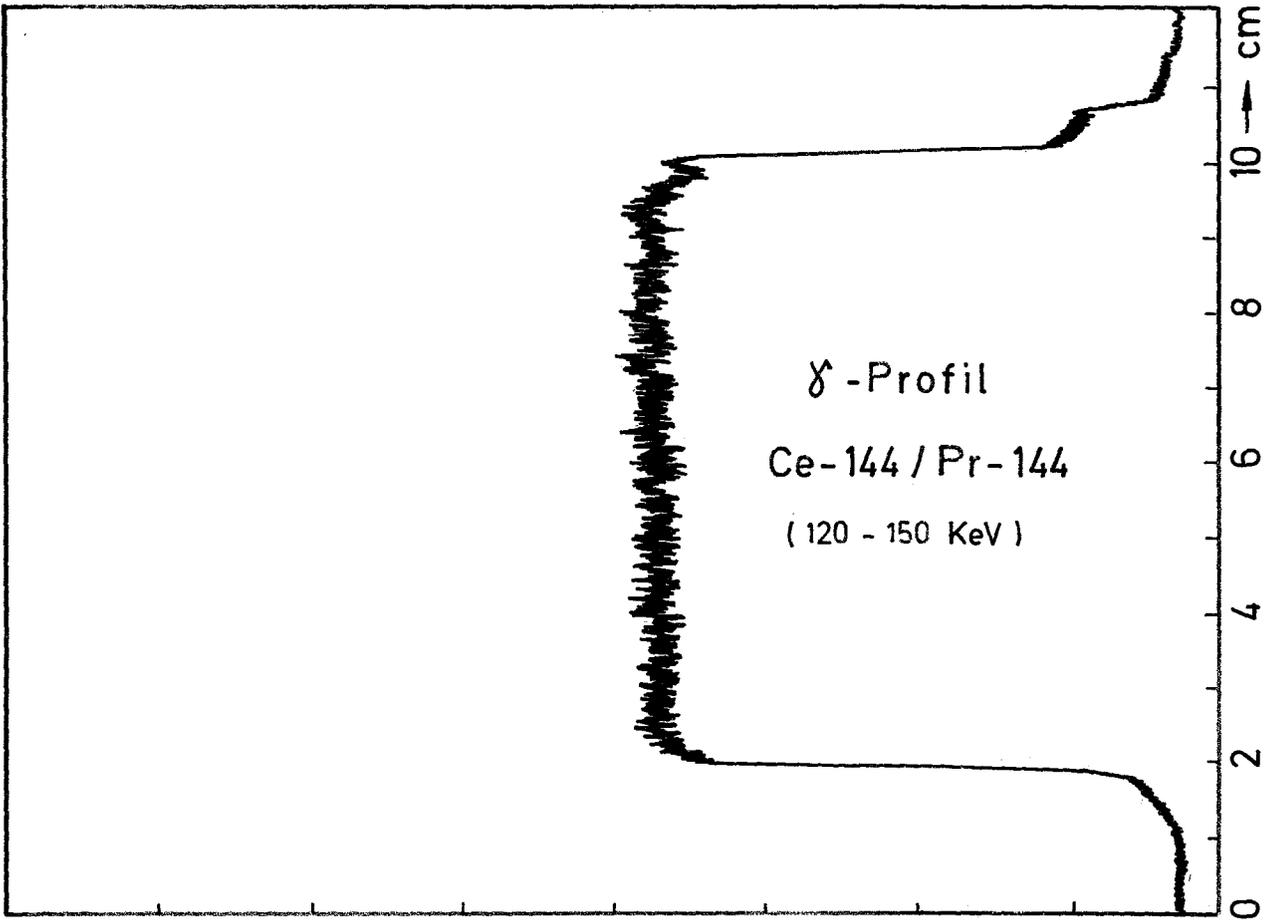


relative Einheiten \uparrow

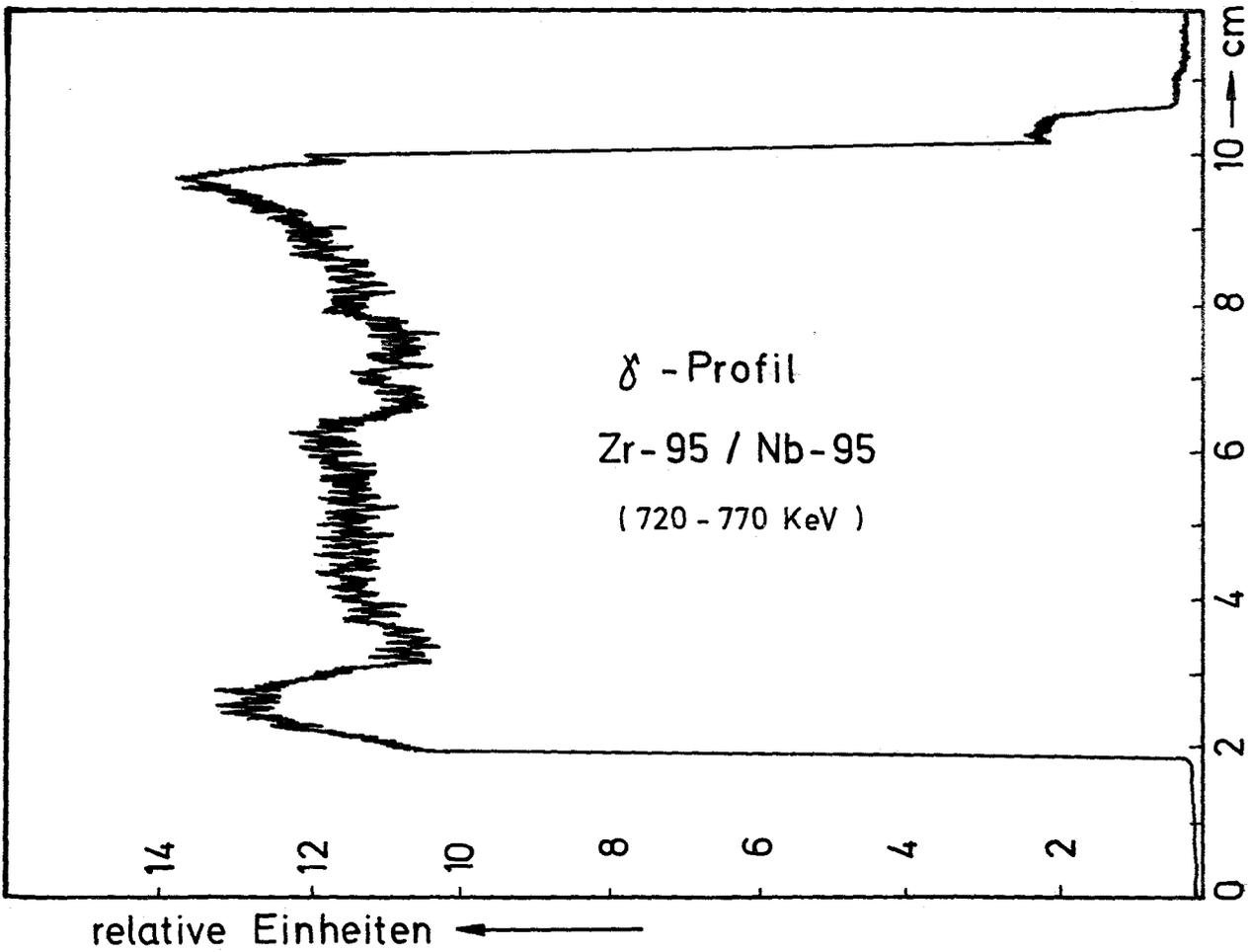
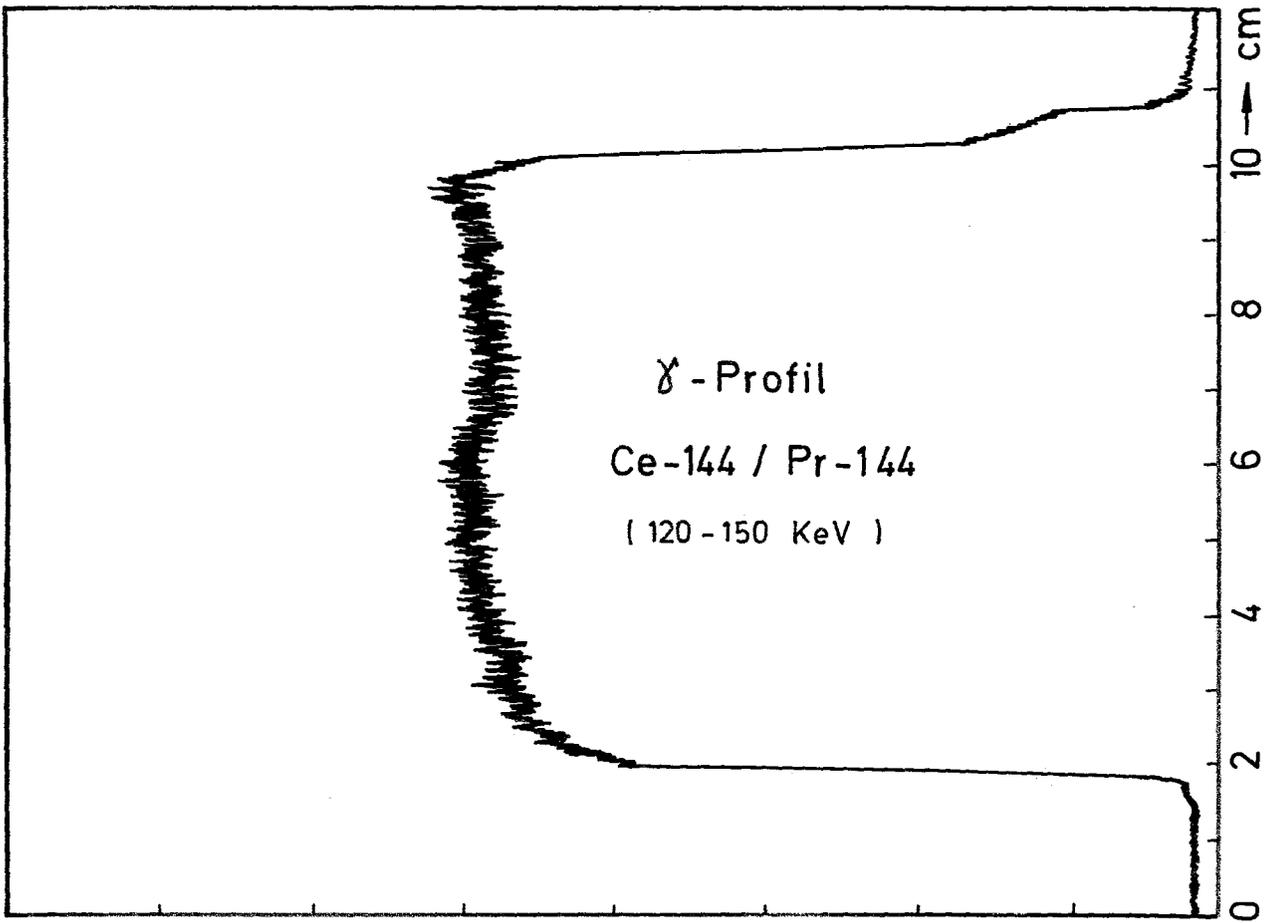


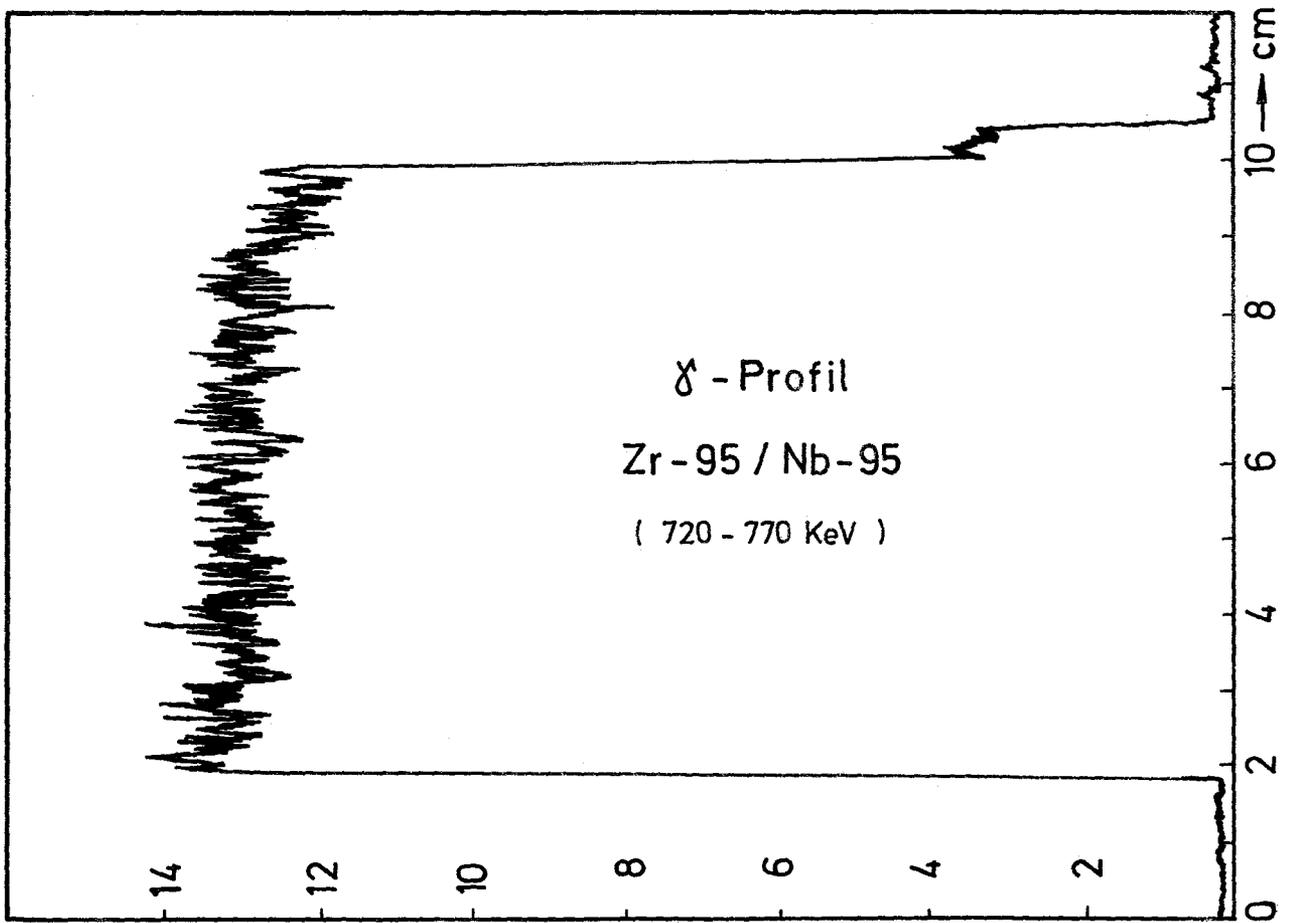
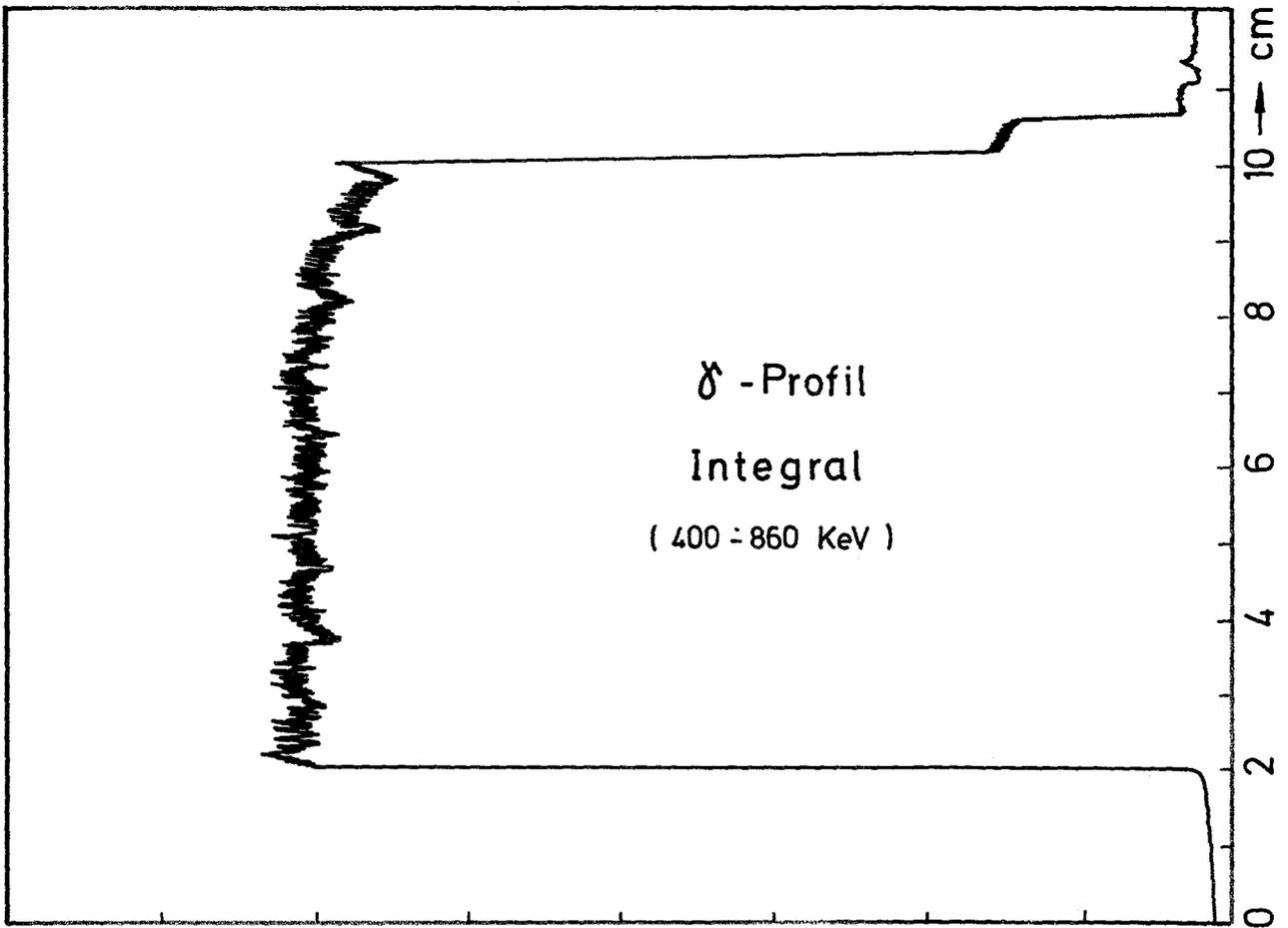




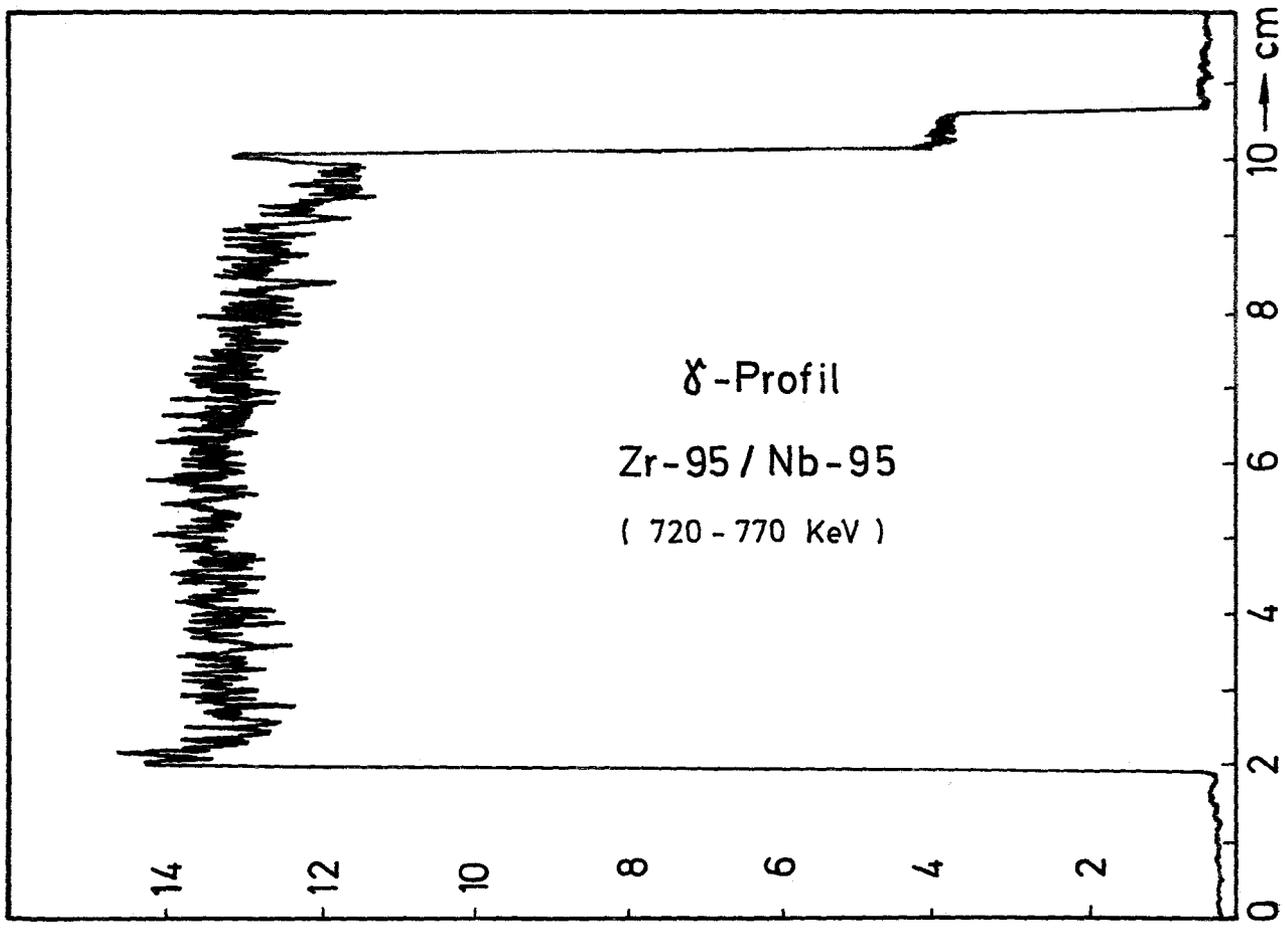
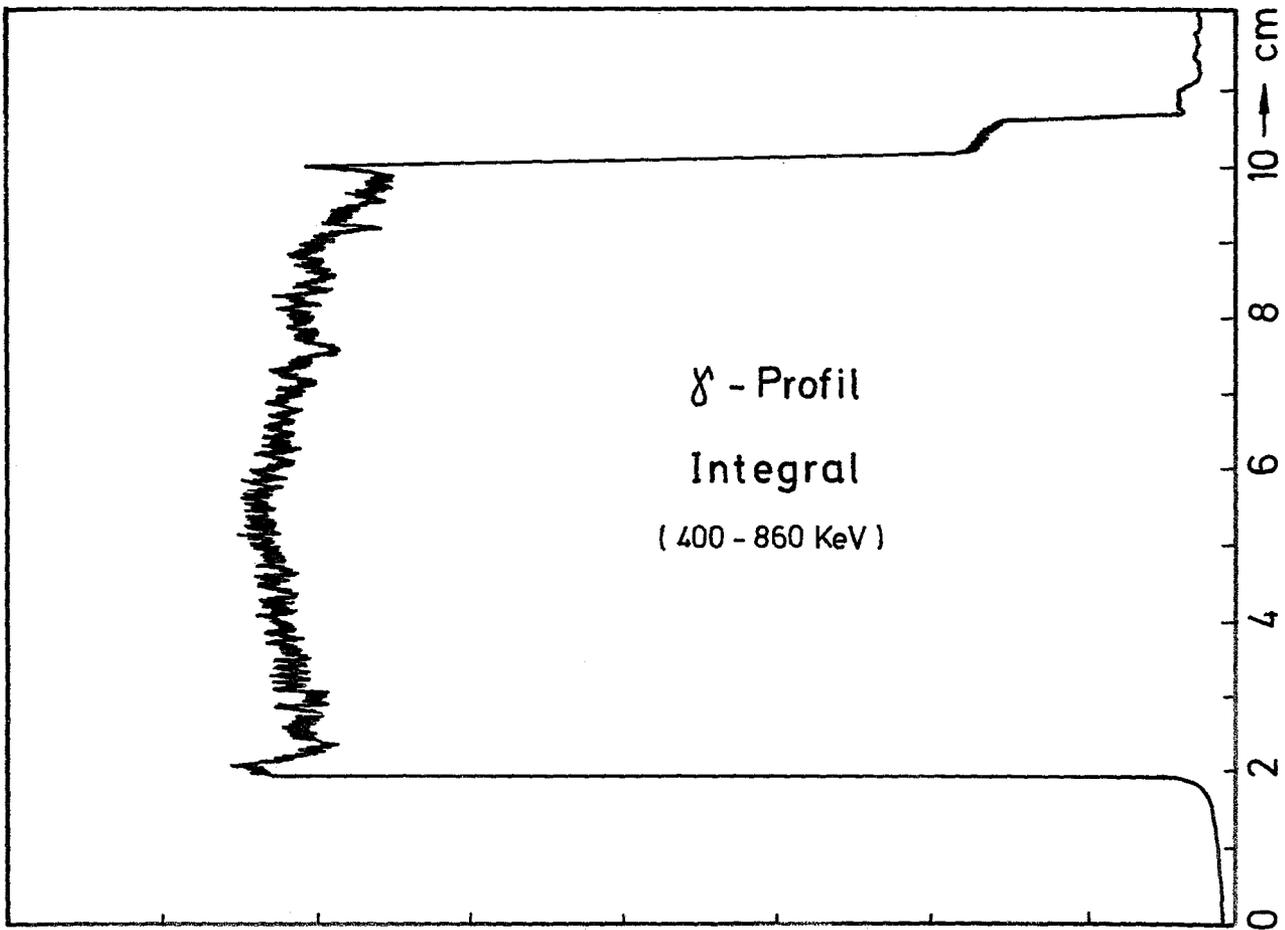


relative Einheiten \uparrow

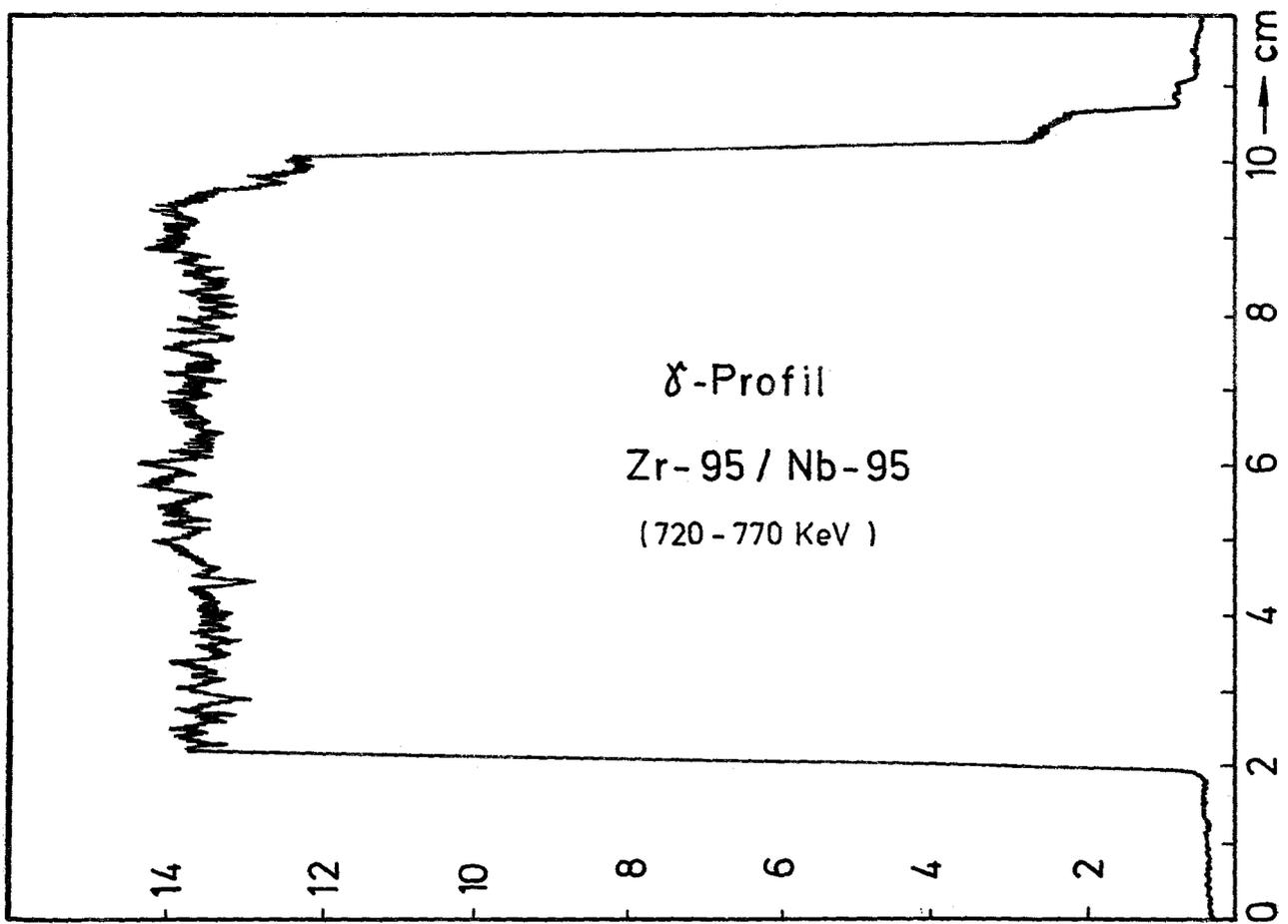
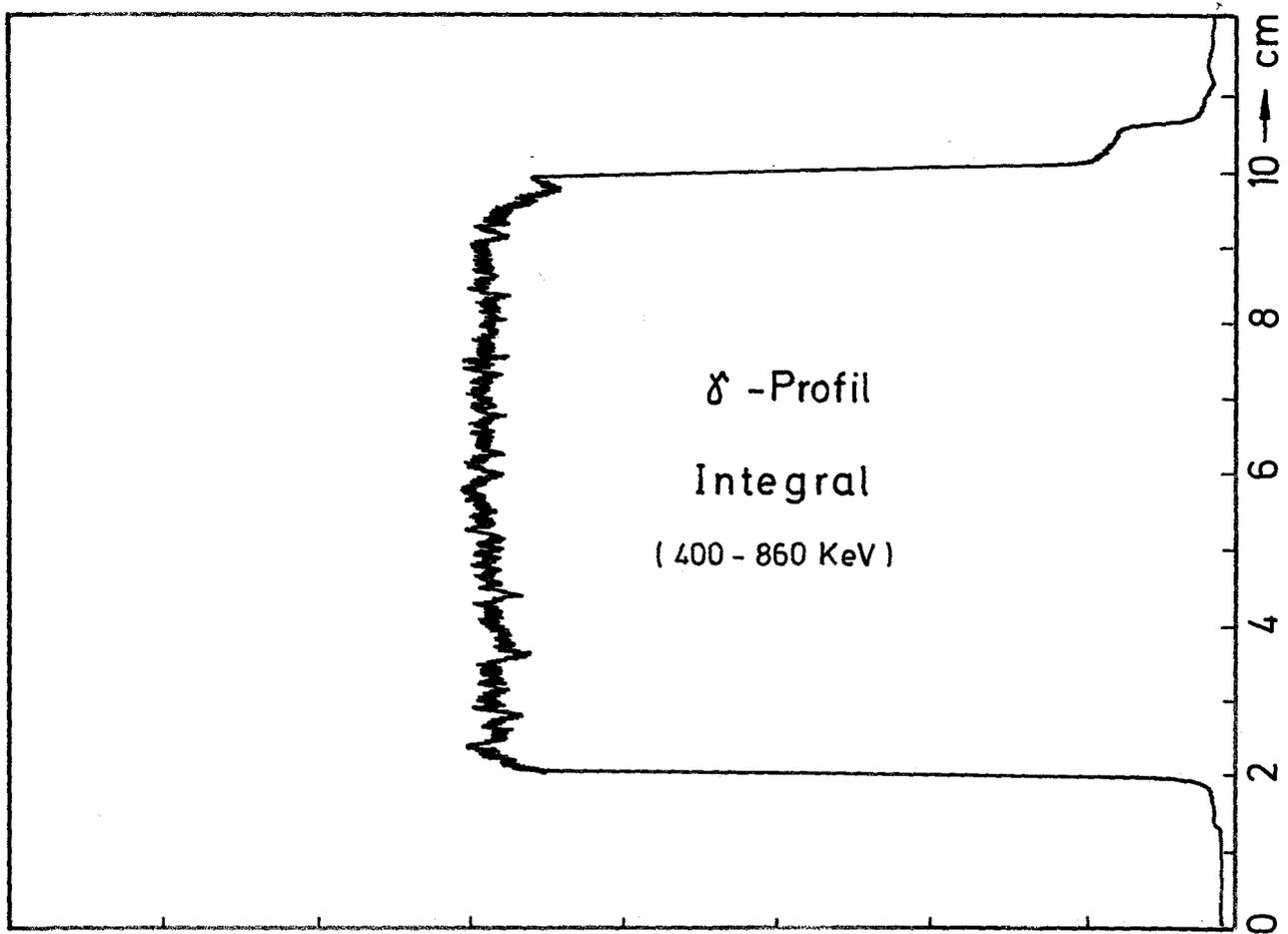




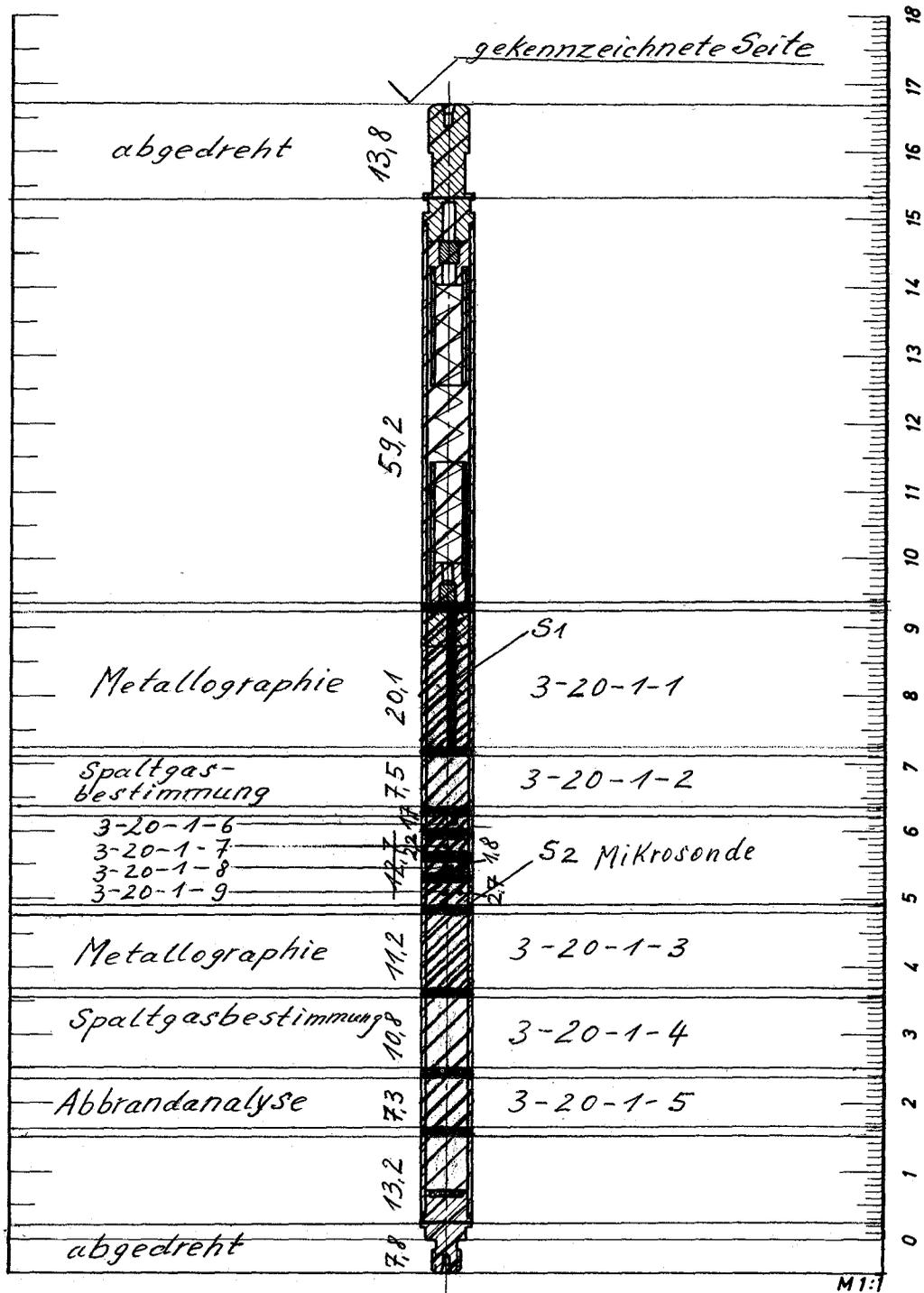
relative Einheiten \leftarrow

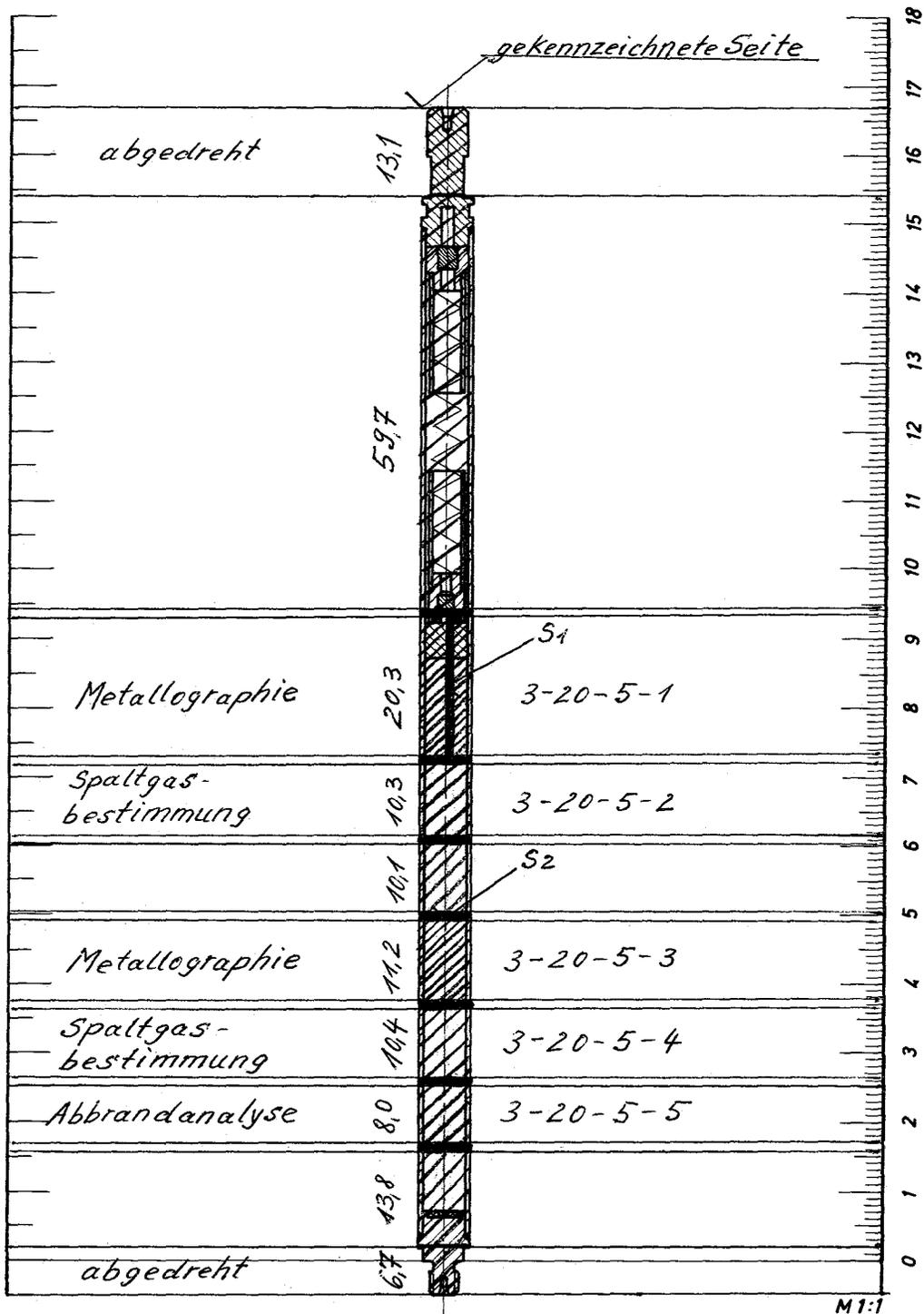


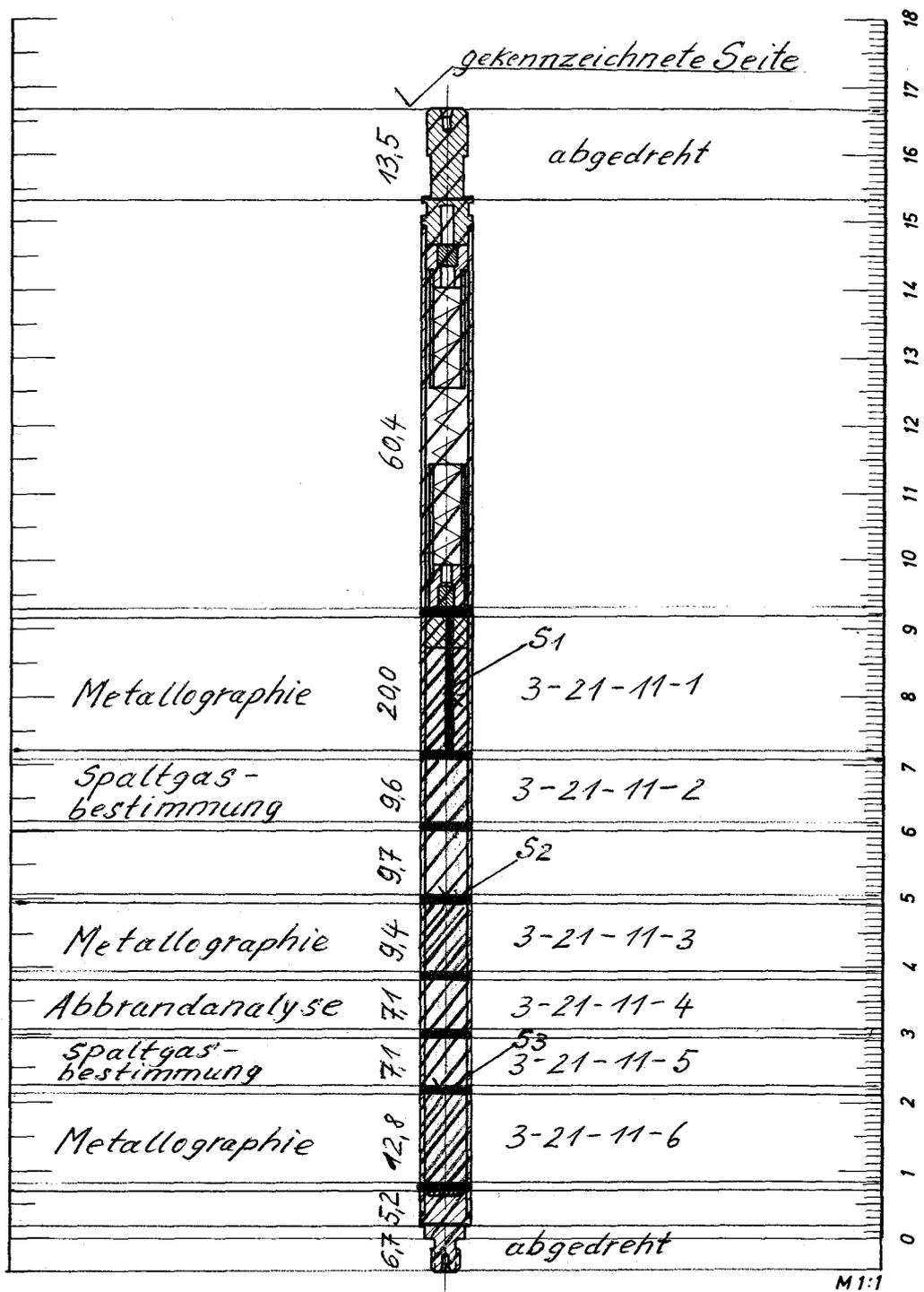
relative Einheiten \leftarrow

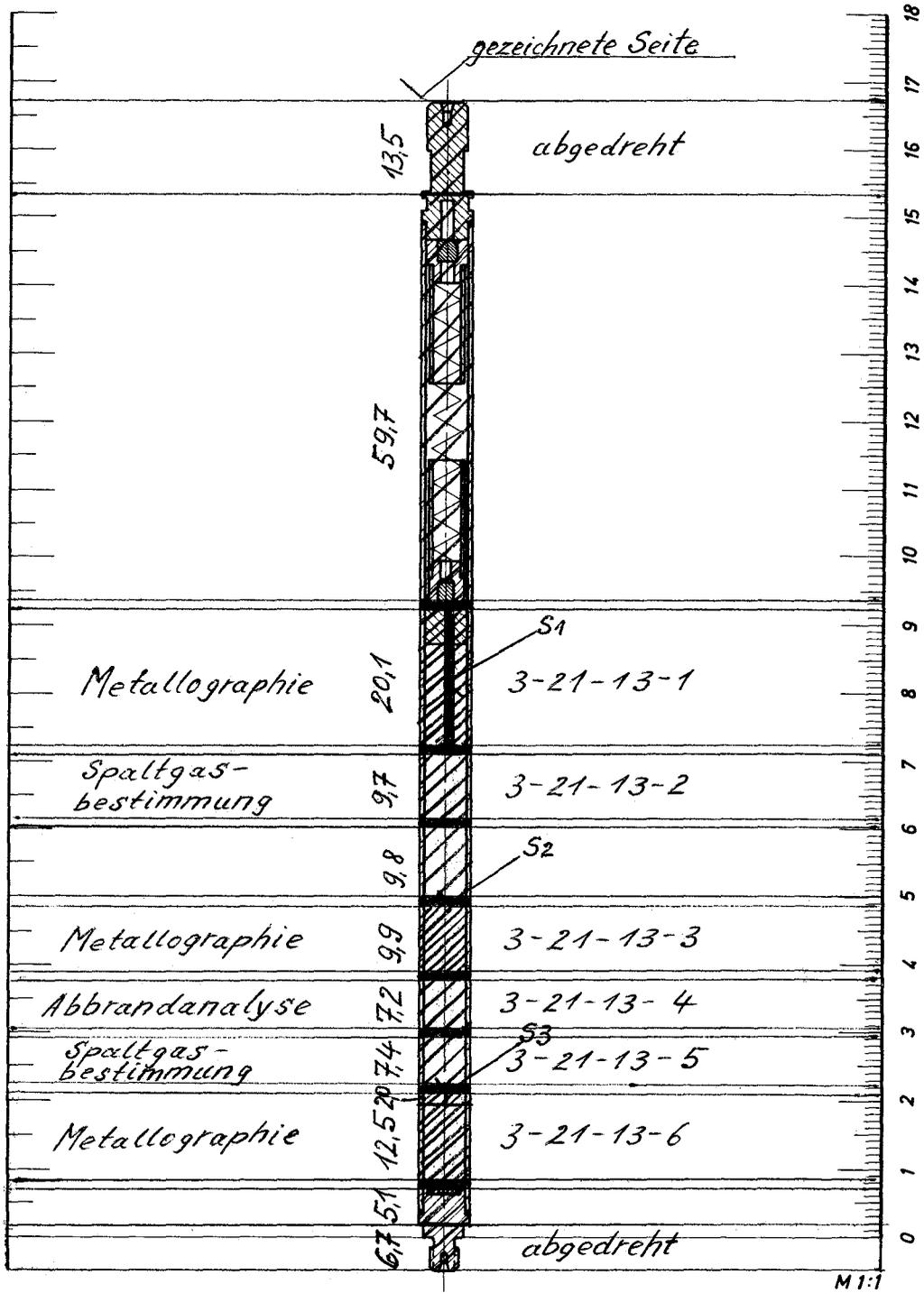


relative Einheiten \leftarrow









Metallographie

Spaltgasbestimmung

Metallographie

Abbrandanalyse

Spaltgasbestimmung

Metallographie

Gesamtbrennstoffmenge: 22,5 gr.

Oberflächentemperatur:

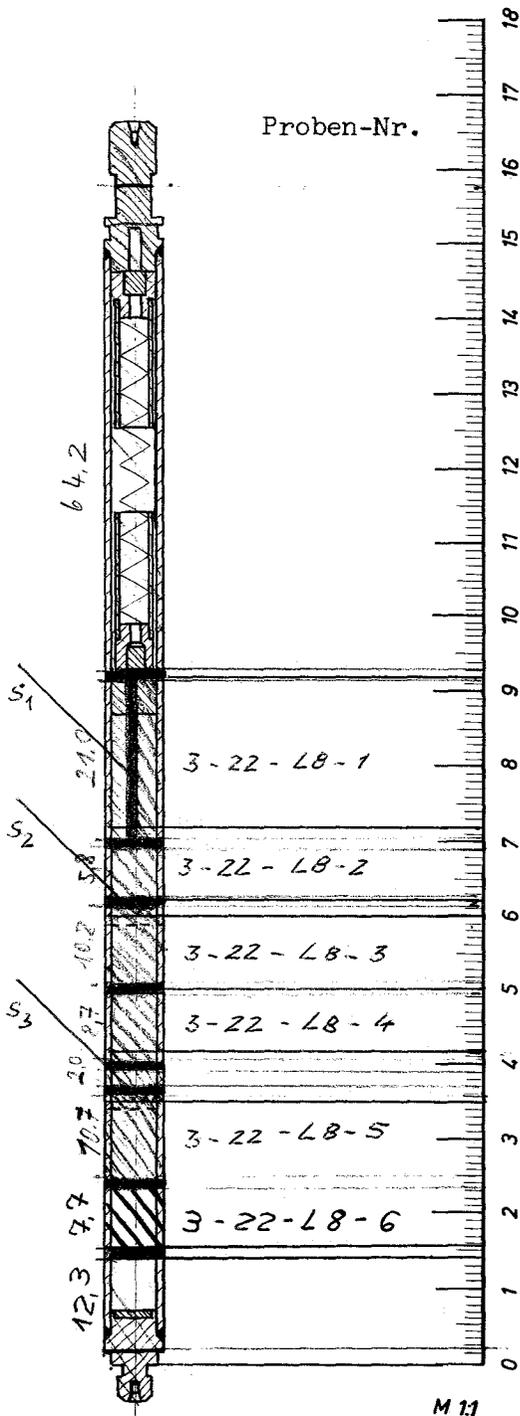
Gesamtspaltstoffmenge: 2,5 gr.

Bestrahlungsdauer: 614 d

Brennstoff: $UO_2 - CeO_2$, Tabl. geschl. 88 % th. D. Bestrahlungsende: 3. 5. 69

Stableistung:

Rechn. Abbrand:



Unters. 1. Visuelle Inspektion

2. Röntgengrobstrukturprüfung

3. γ -scanning

4. Dimensionskontrolle

~~5. Dichtheitsprüfung~~

6. Freie Spaltgase messen

7. Freies Volumen messen

8. Abbrandanalyse zur RCH

Probe: 3-22-LB-2
3-22-LB-6

9. Gebundene und gelöste Spaltgase bestimmen

Probe: 3-22-LB-2; 4

10. Metallographische Untersuchungen

Probe: 3-22-LB-1; 3; 5

11. Autoradiographie α , β - γ

Probe: 3-22-LB-1; 3; 5

~~12. Mikroprobenentnahme~~

Probe:

Nicht für Mikroproben schneiden.

Gesamtbrennstoffmenge: 23,4 gr

Oberflächentemperatur:

Gesamtspaltstoffmenge: 2,13 gr

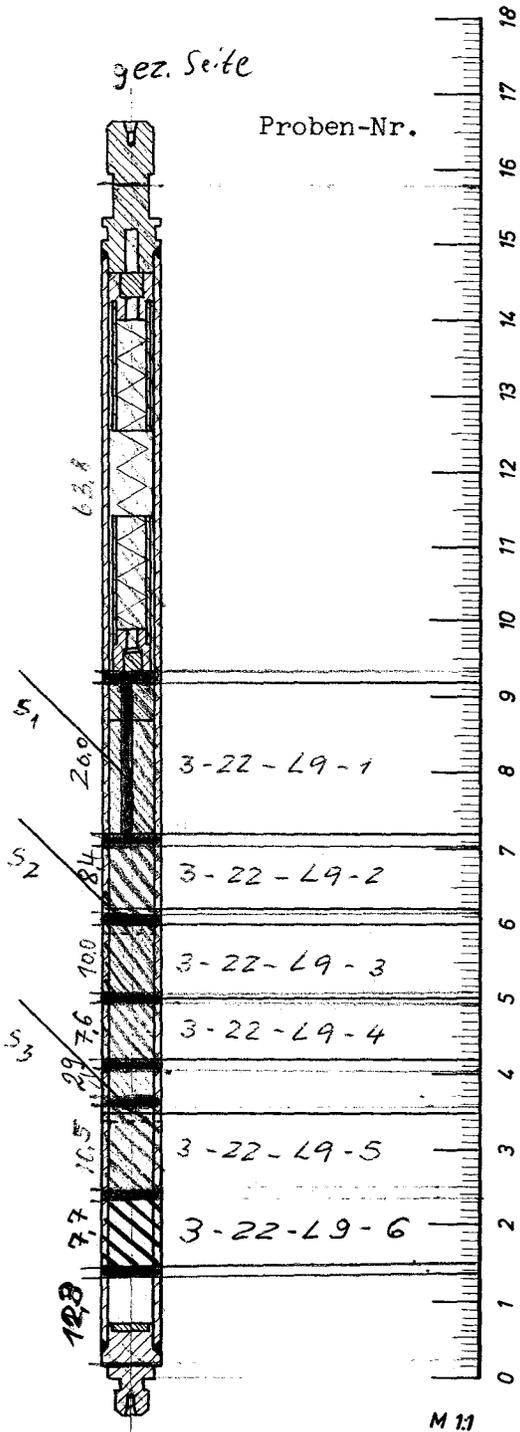
Bestrahlungsdauer: 614 d

Brennstoff: $UO_2 - CeO_2$, Tabl. geschl. 93% H₂O

Bestrahlungsende: 3. 5. 69

Stableistung:

Rechn. Abbrand:



Unters. 1. Visuelle Inspektion

2. Röntgengrobstrukturprüfung

3. γ -scanning

4. Dimensionskontrolle

~~5. Dichtheitsprüfung~~

6. Freie Spaltgase messen

7. Freies Volumen messen

8. Abbrandanalyse zur RCH

Probe: 3-22-L9-2

3-22-L9-6

9. Gebundene und gelöste Spaltgase bestimmen

Probe: 3-22-L9-2; 4

10. Metallographische Untersuchungen

Probe: 3-22-L9-1, 3, 5

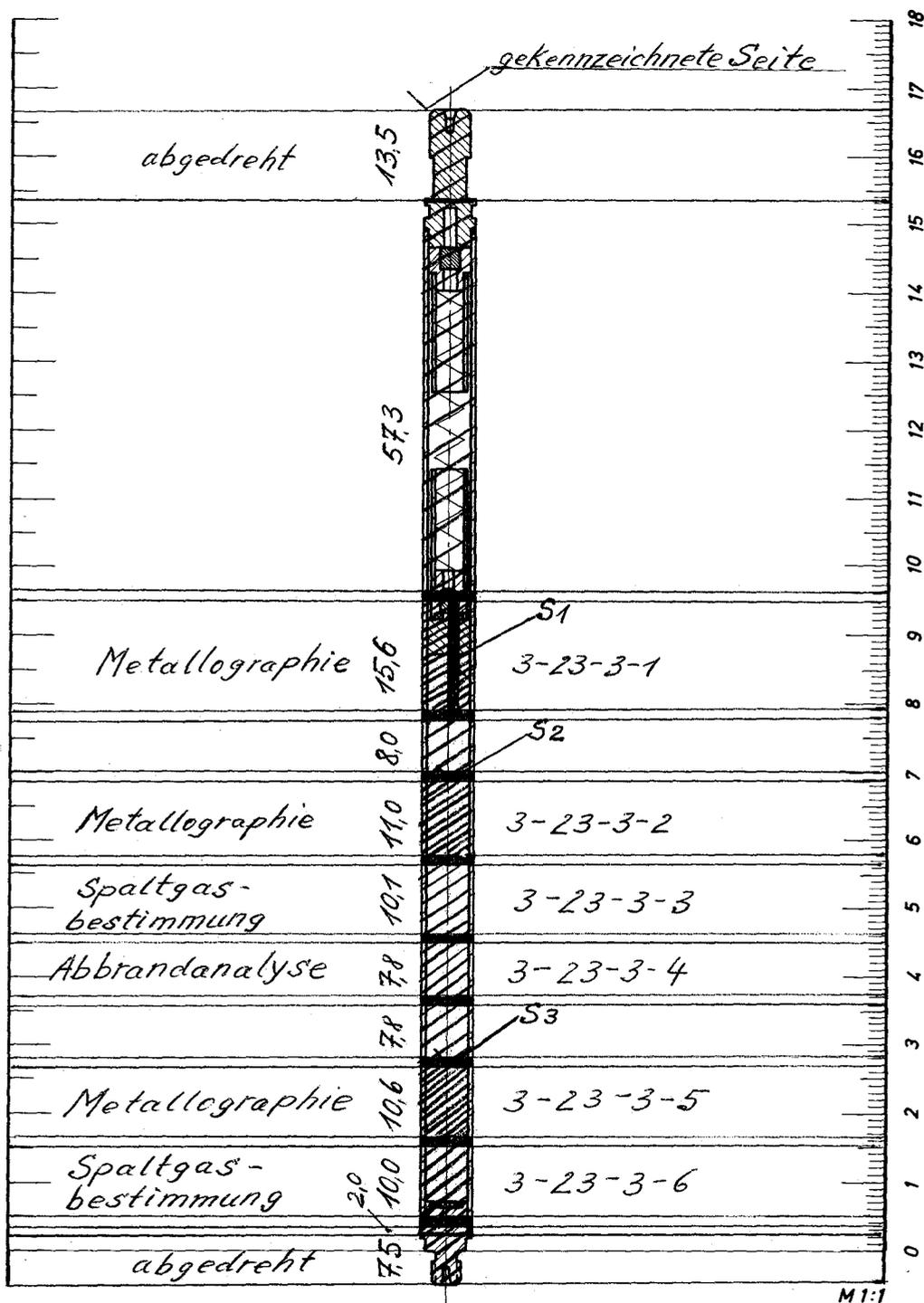
11. Autoradiographie α, β, γ

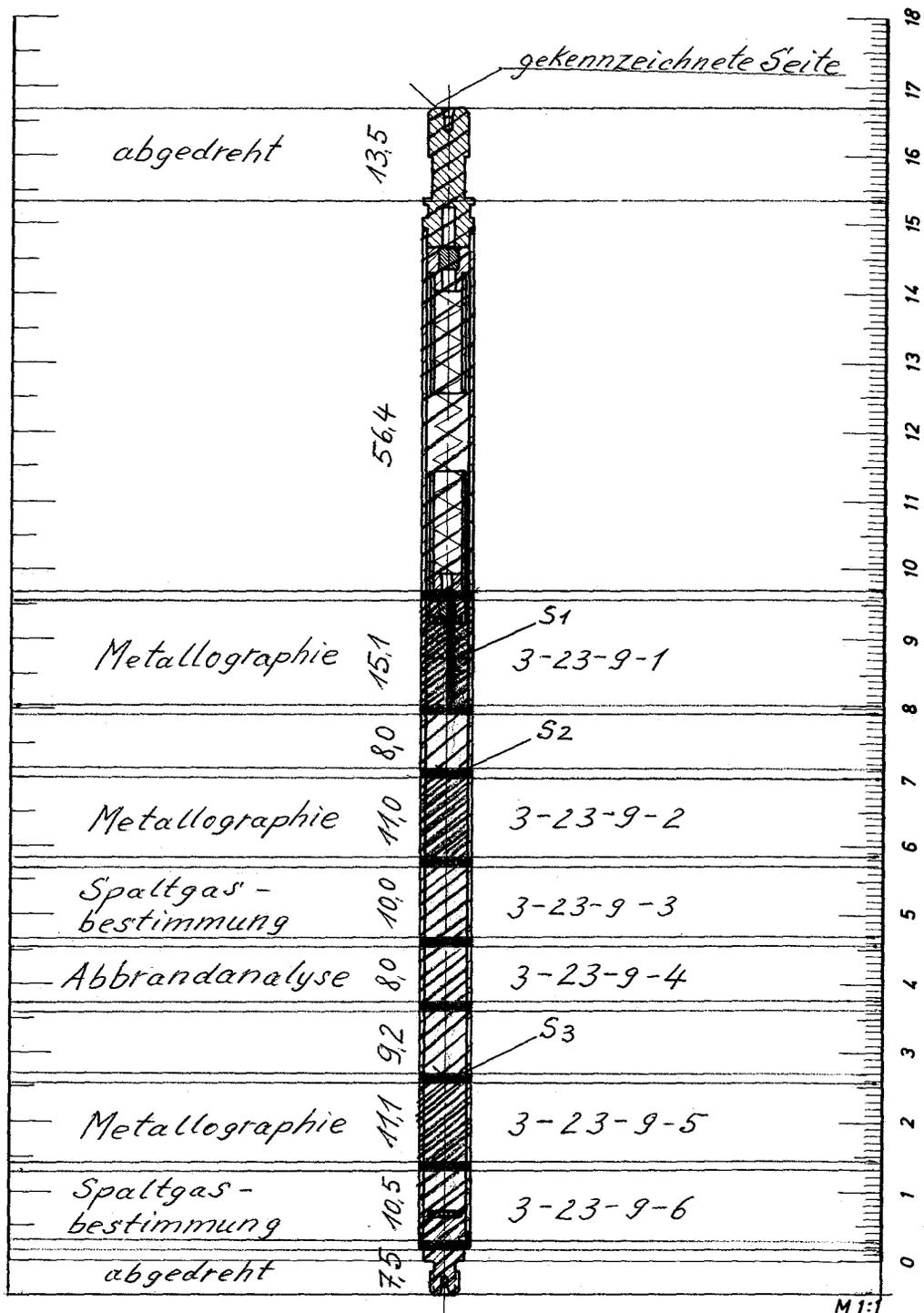
Probe: 3-22-L9-1, 3, 5

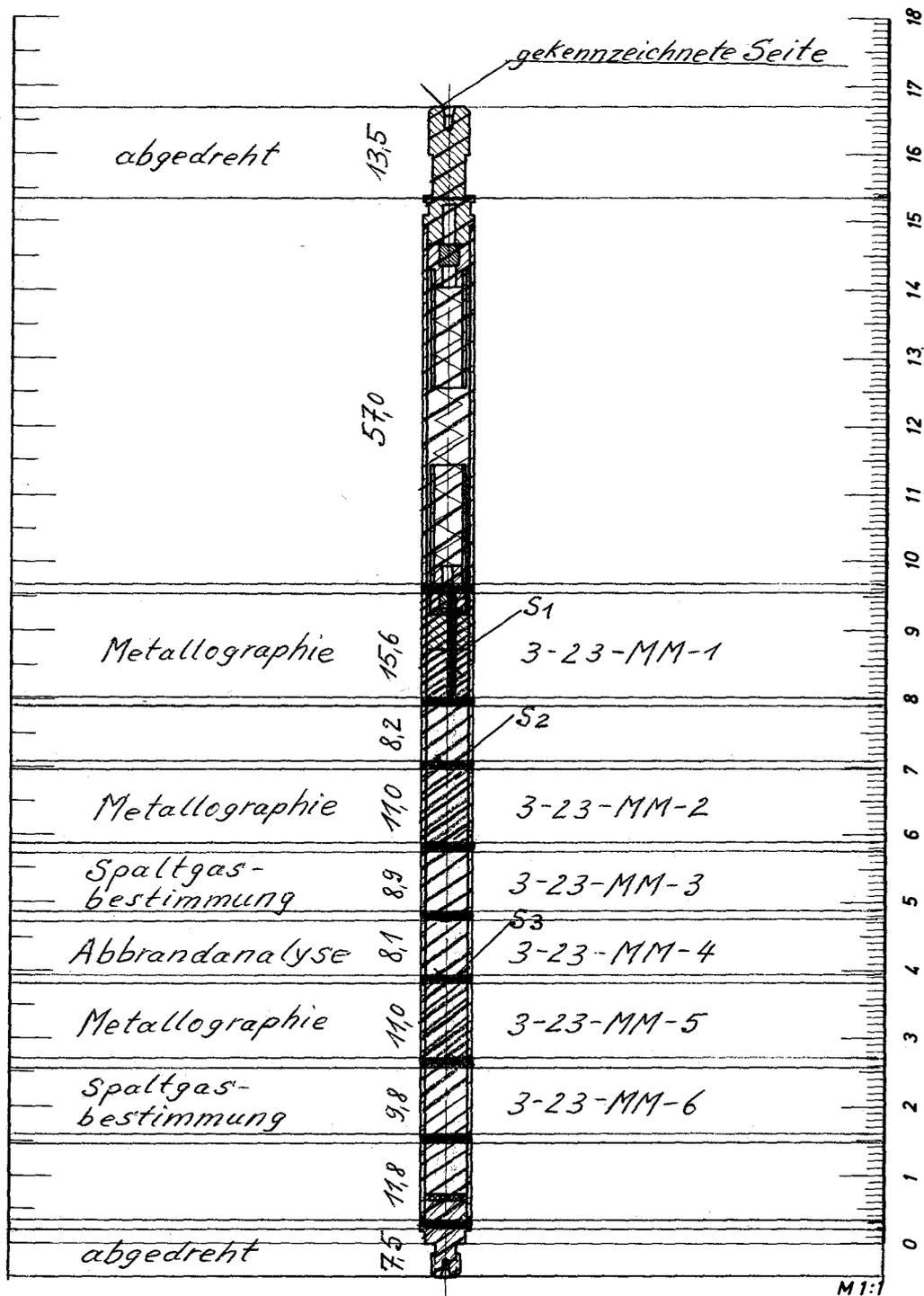
~~12. Mikroprobenentnahme~~

~~Probe:~~

Nicht für Mikroproben schneiden.

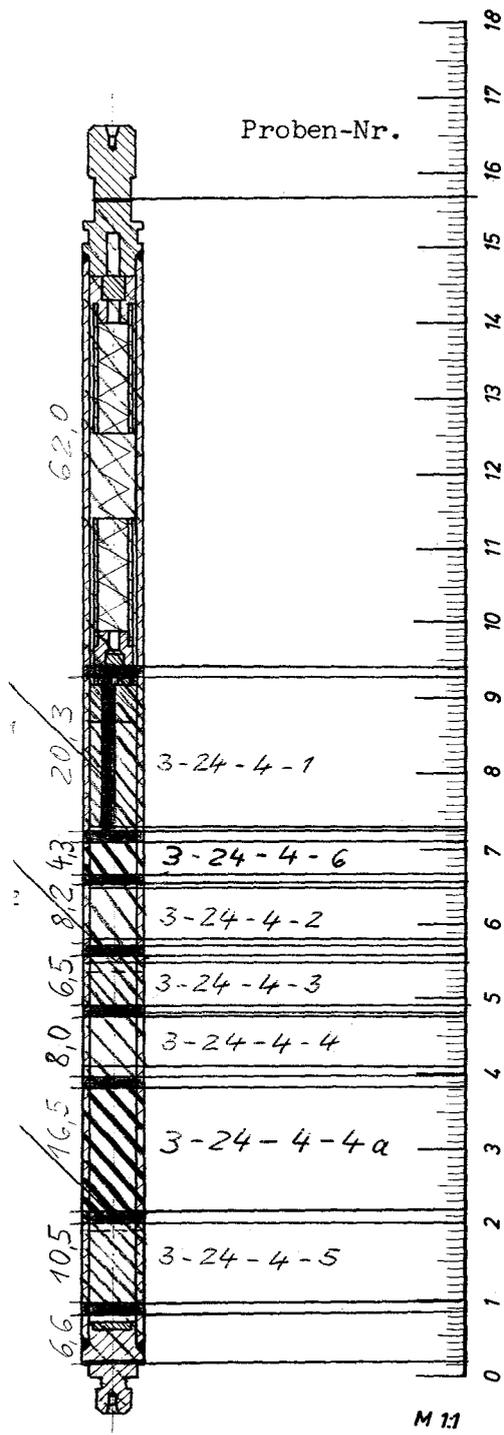






Gesamtbrennstoffmenge: 23,7 gr.
 Gesamtsplattstoffmenge: 2,4 gr.
 Brennstoff: UO₂ - Tabl. gerhlt. 88% H₂O
 Stableistung: 550 W/cm max.
 330 " mit Hl.

Oberflächentemperatur:
 Bestrahlungsdauer: 614 d
 Bestrahlungsende: 3.5.69
 Rechn. Abbrand: 69.200 MWd/t

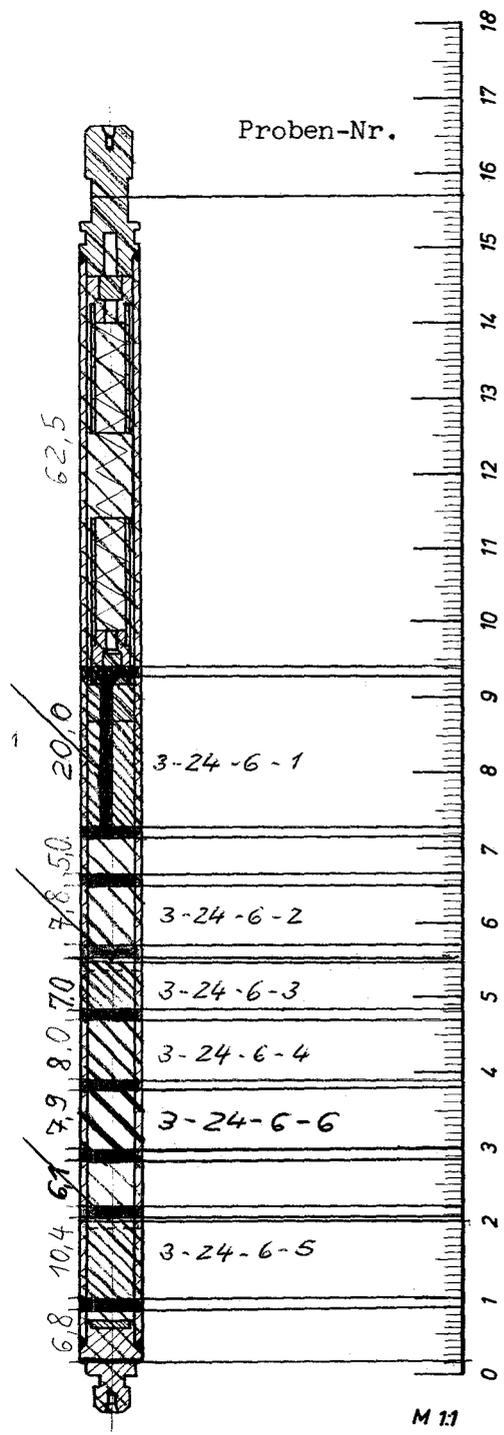


- Unters. 1. Visuelle Inspektion
2. Röntgengrobstrukturprüfung
3. γ -scanning
4. Dimensionskontrolle
- ~~5. Dichtheitsprüfung~~
- ~~6. Freie Spaltgase messen~~
- ~~7. Freies Volumen messen~~
8. Abbrandanalyse zur RCH
 Probe: 3-24-4-2
 3-24-4-6
9. Gebundene und gelöste Spaltgase bestimmen
 Probe: 3-24-4-2; 4; 4a
10. Metallographische Untersuchungen
 Probe: 3-24-4-1; 3; 5
11. Autoradiographie (P, γ - α)
 Probe: 3-24-4-1; 3; 5
- ~~12. Mikroprobenentnahme~~
 Probe:

keine Mikrosondenproben!

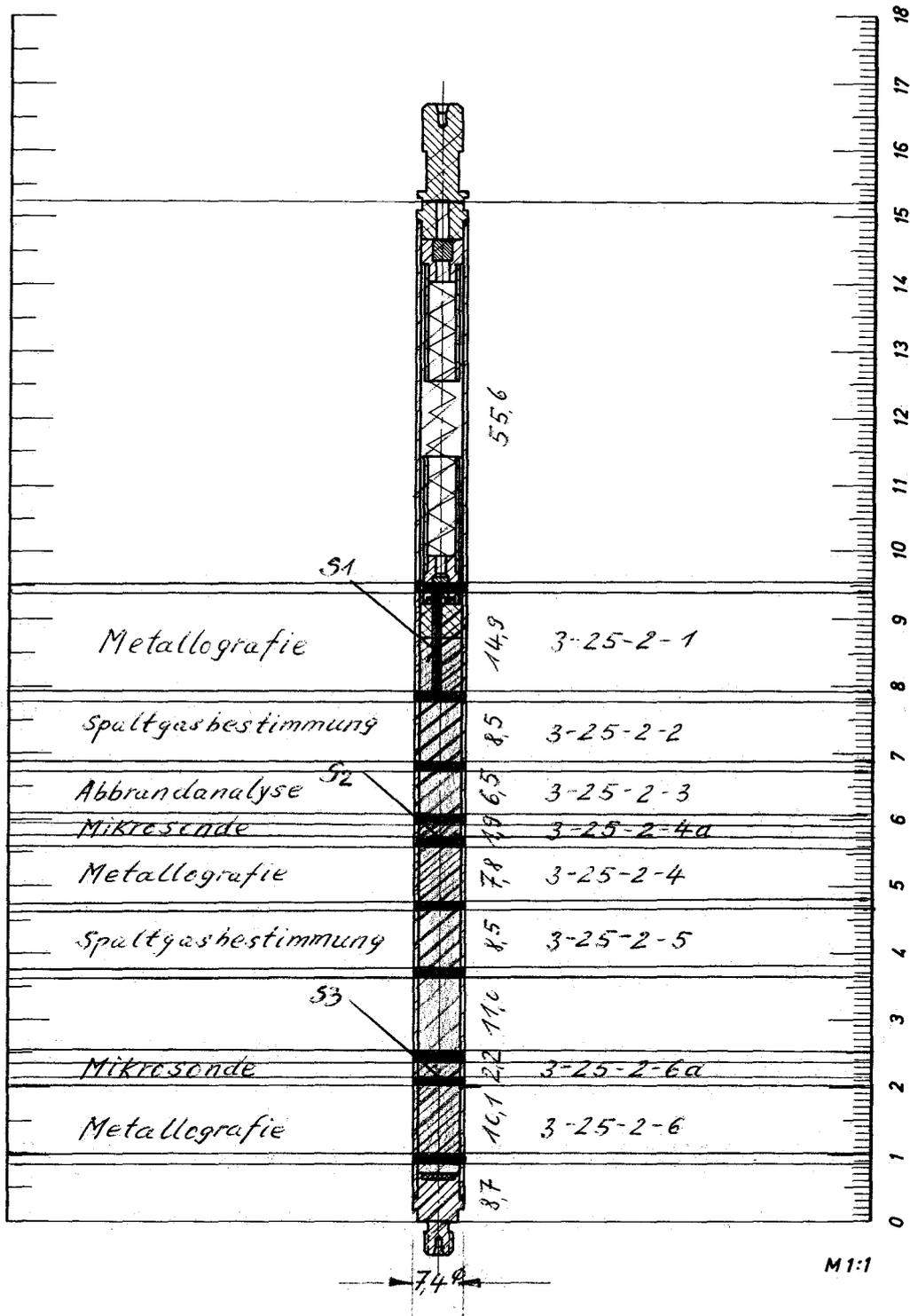
Gesamtbrennstoffmenge: 24,0 gr.
 Gesamtsplattstoffmenge: 2,43 gr.
 Brennstoff: UO₂ - Tabl. gerchl., 88% H.D.
 Stabileistung: 545 W/cm max.
 293 W/cm mittl.

Oberflächentemperatur:
 Bestrahlungsdauer: 614 d
 Bestrahlungsende: 3.5.69
 Rechn. Abbrand: 61.000 MWd/t



- Unters. 1. Visuelle Inspektion
2. Röntgengrobstrukturprüfung
3. γ -scanning
4. Dimensionskontrolle
- ~~5. Dichtheitsprüfung~~
- ~~6. Freie Spaltgase messen~~
- ~~7. Freies Volumen messen~~
8. Abbrandanalyse zur RCH
 Probe: 3-24-6-4
 3-24-6-6
9. Gebundene und gelöste Spaltgase bestimmen
 Probe: 3-24-6-2; 4
10. Metallographische Untersuchungen
 Probe: 3-24-6-1; 3; 5
11. Autoradiographie (β , γ - α)
 Probe: 3-24-6-1; 3, 5
12. Mikroprobenentnahme
 Probe:

keine Mikrosondenproben



Prüfling MS

Brennstoff :

Form : Pulver, gesintert
Zusammensetzung : UO_2 - CeO_2 -Gemisch
Tablettendichte : -

Hülle :

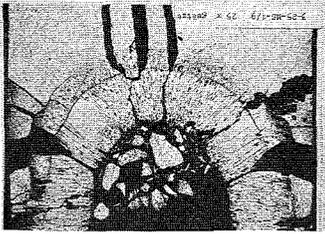
Material : X4CrNiNb 20 25
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

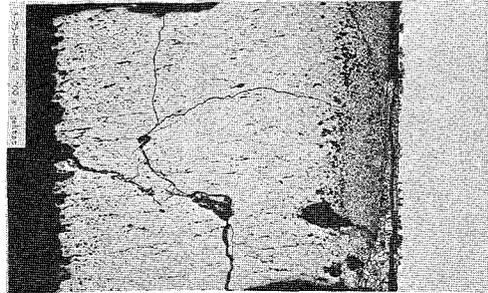
Länge des Prüflings : 167,3 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80,2 mm
Radiale Spaltweite : -
Schmierdichte : 81,21 % th.D.

Bestrahlung :

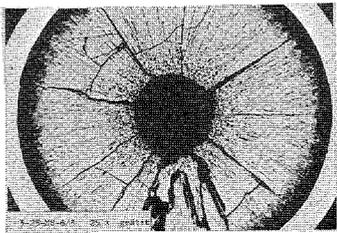
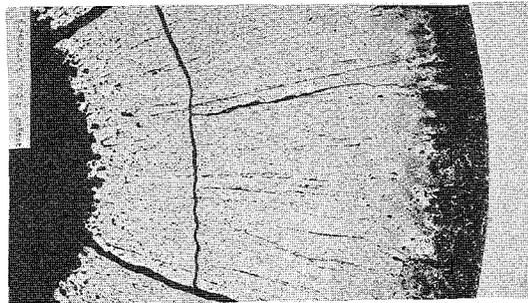
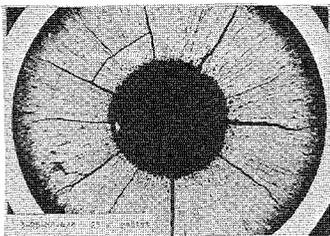
Einrichtung : FR 2/KVE 25
Dauer : 280 Volllasttage
Ende : 22.7.68
Rechn. Abbrand : 52 500 MWd/t
Stableistung max./mittl.: 593/406 W/cm



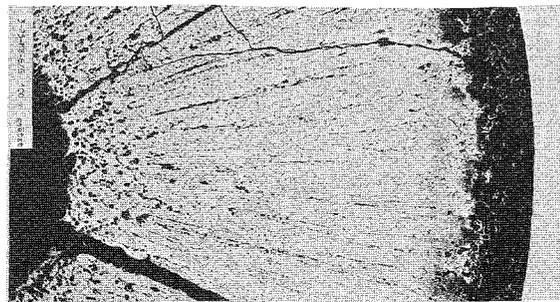
100 μ m



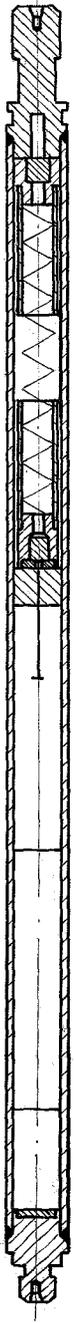
A



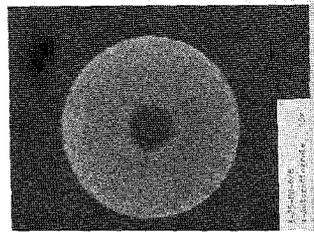
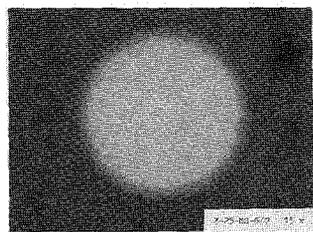
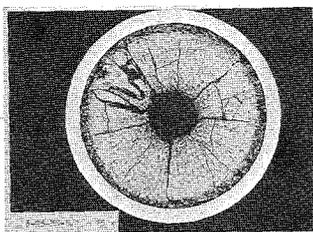
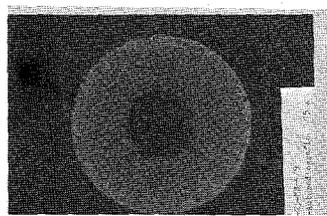
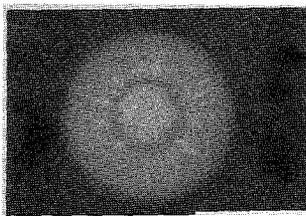
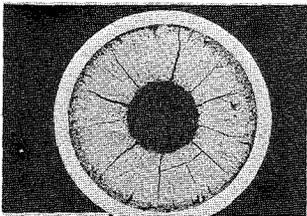
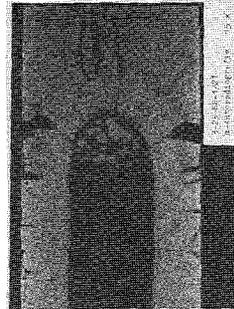
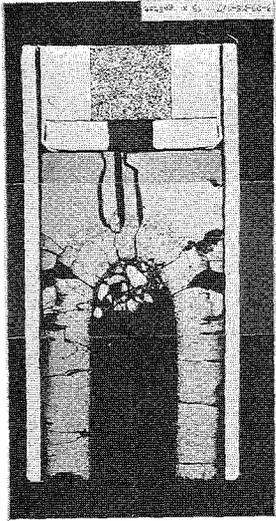
1mm



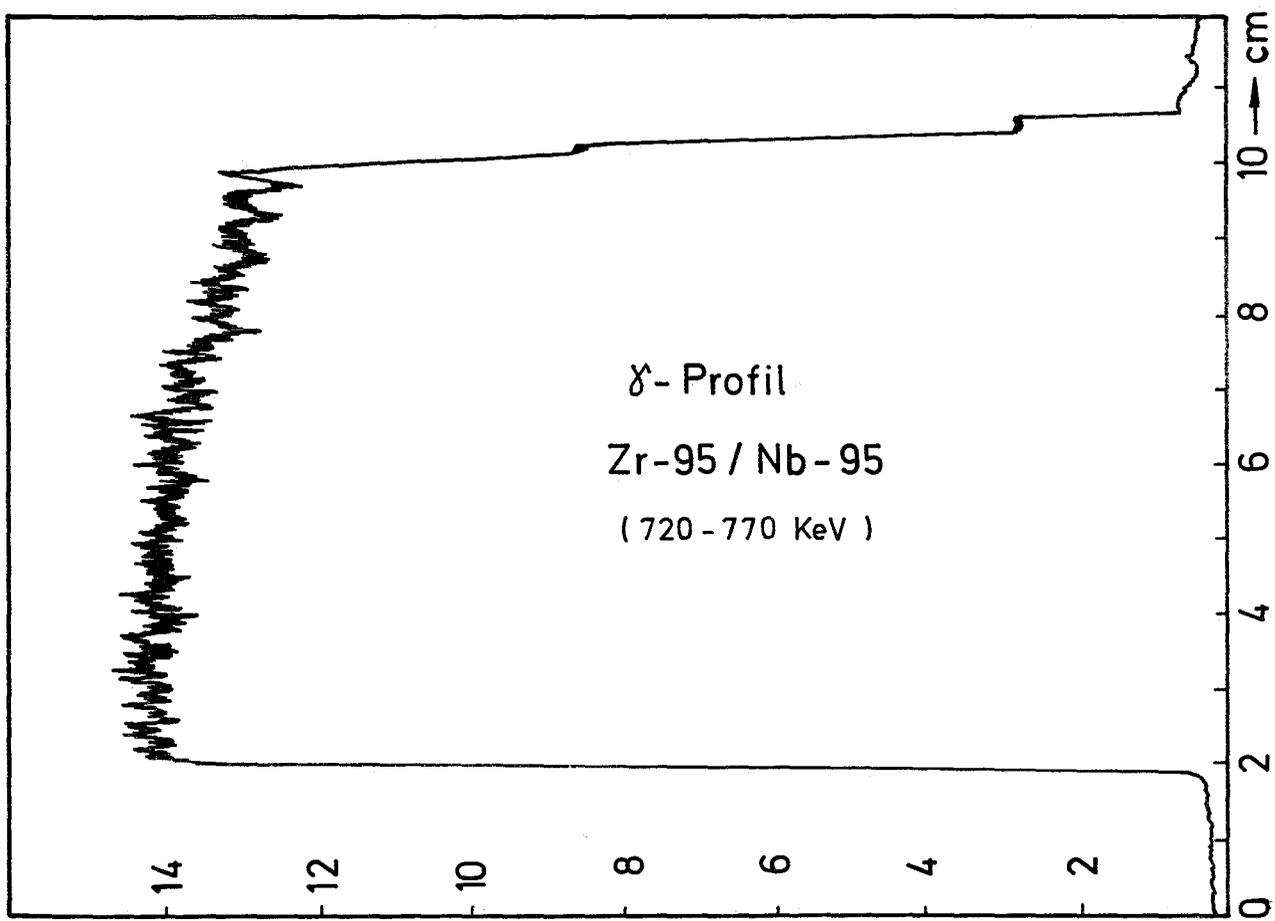
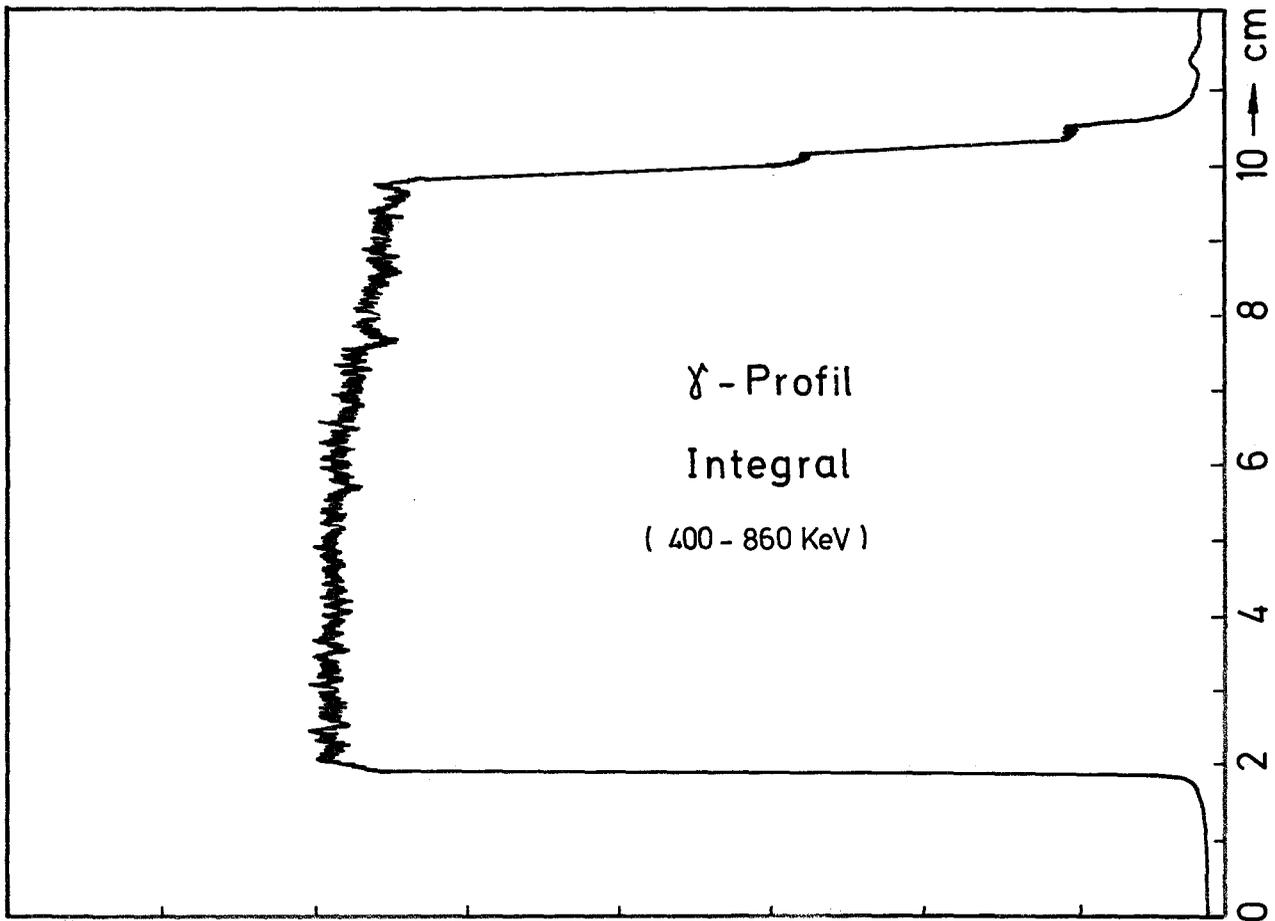
1mm



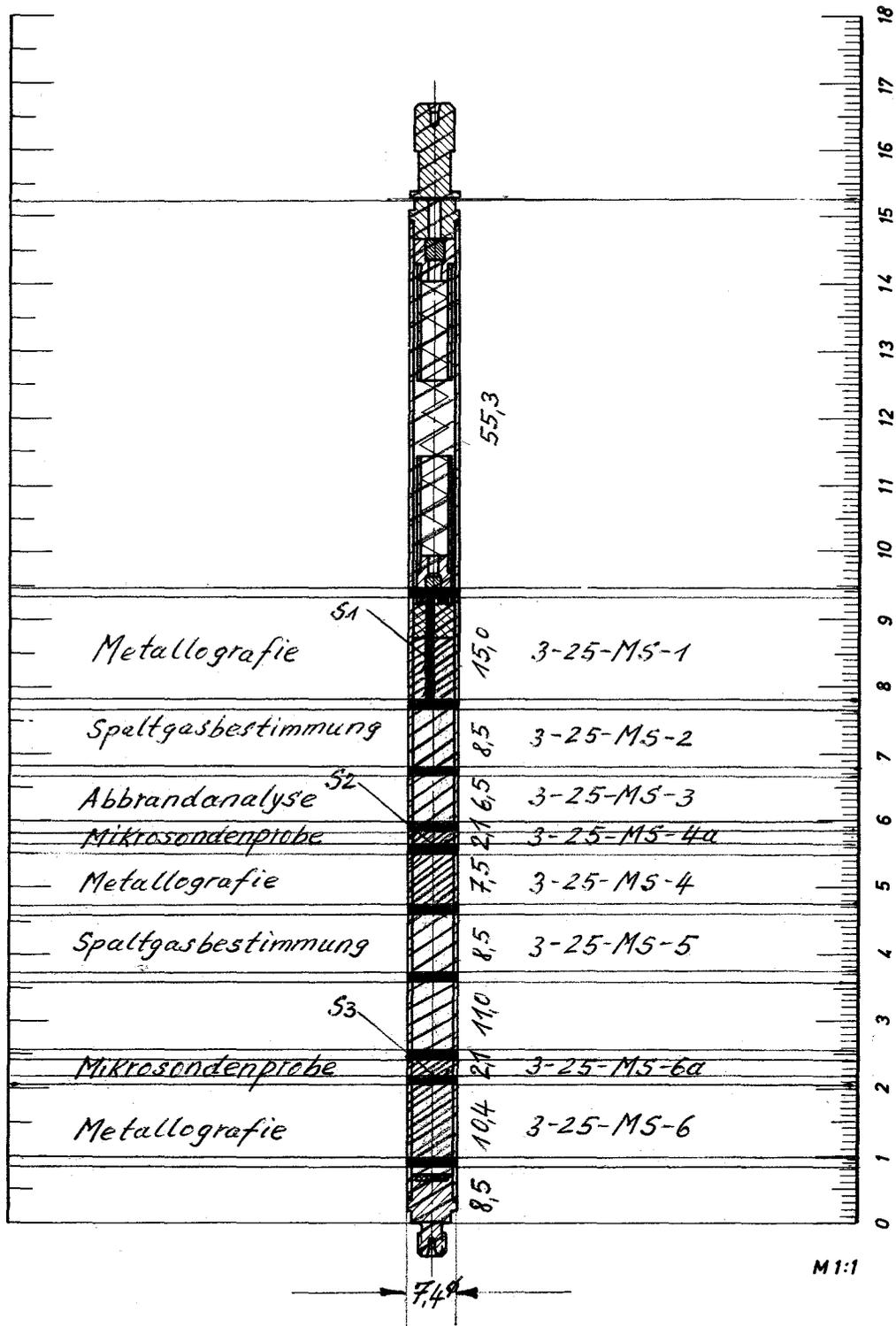
A



1
1mm



relative Einheiten \leftarrow



M1:1

Prüfling 8

Brennstoff :

Form : Tabl. ungeschliffen
Zusammensetzung : UO_2
Tablettendichte : 88 % th.D.

Hülle :

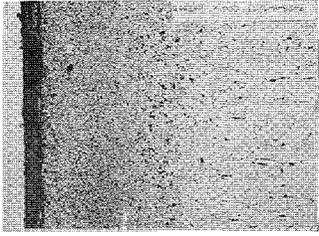
Material : X4CrNiNb 20 25
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

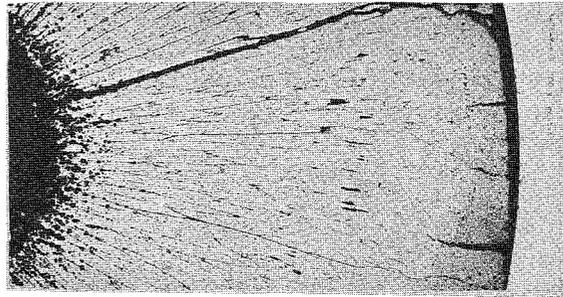
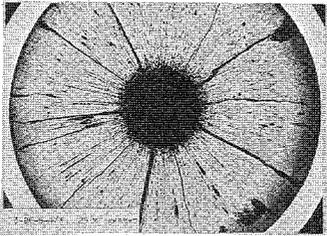
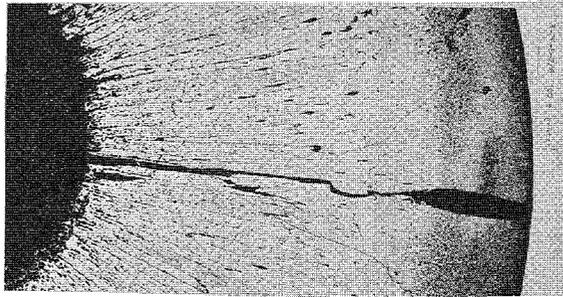
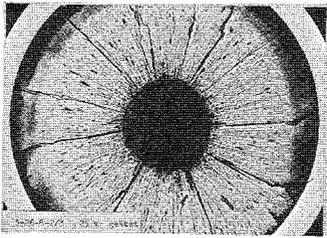
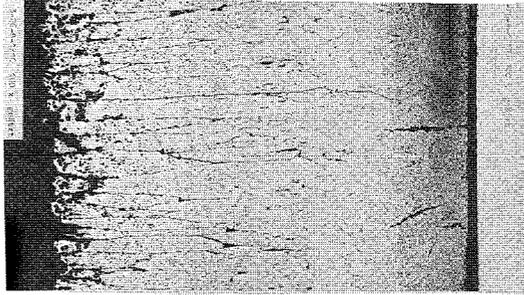
Länge des Prüflings : 167,1 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80,3 mm
Radiale Spaltweite : 100,0 μm
Schmierdichte : -

Bestrahlung :

Einrichtung : FR 2/KVE 26
Dauer : 221 Vollasttage
Ende : 13.5.68
Rechn. Abbrand : 39 730 MWd/t
Stableistung max./mittl.: 630/458 W/cm

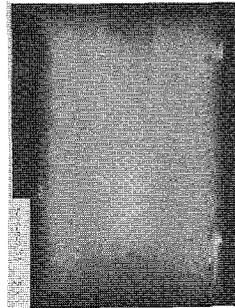
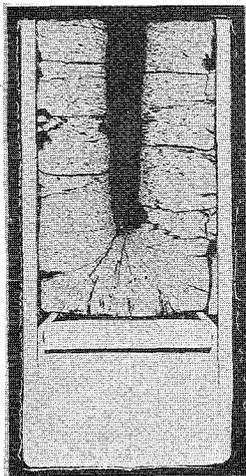
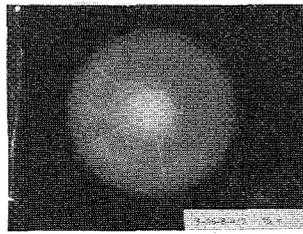
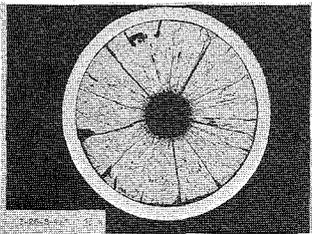
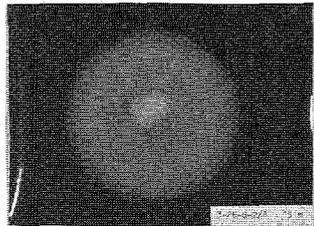
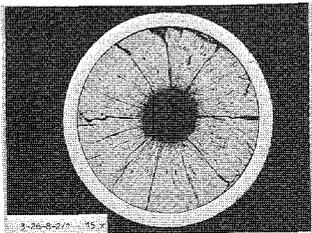
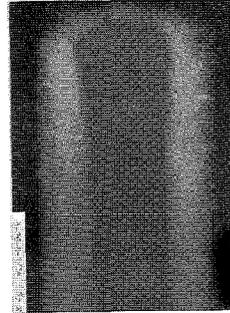
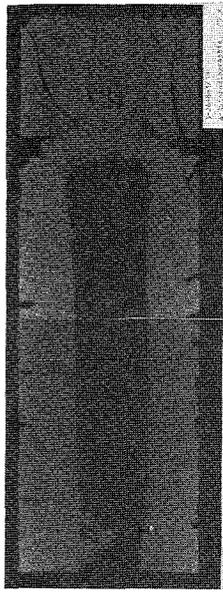
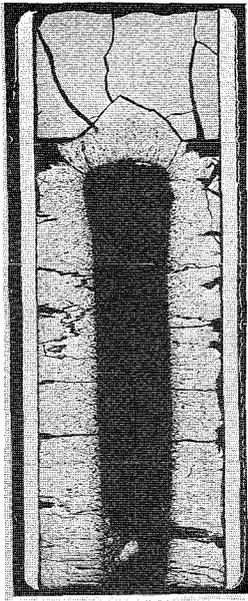
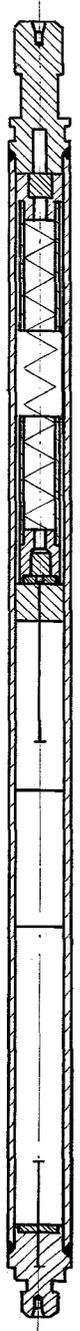


100 μ m

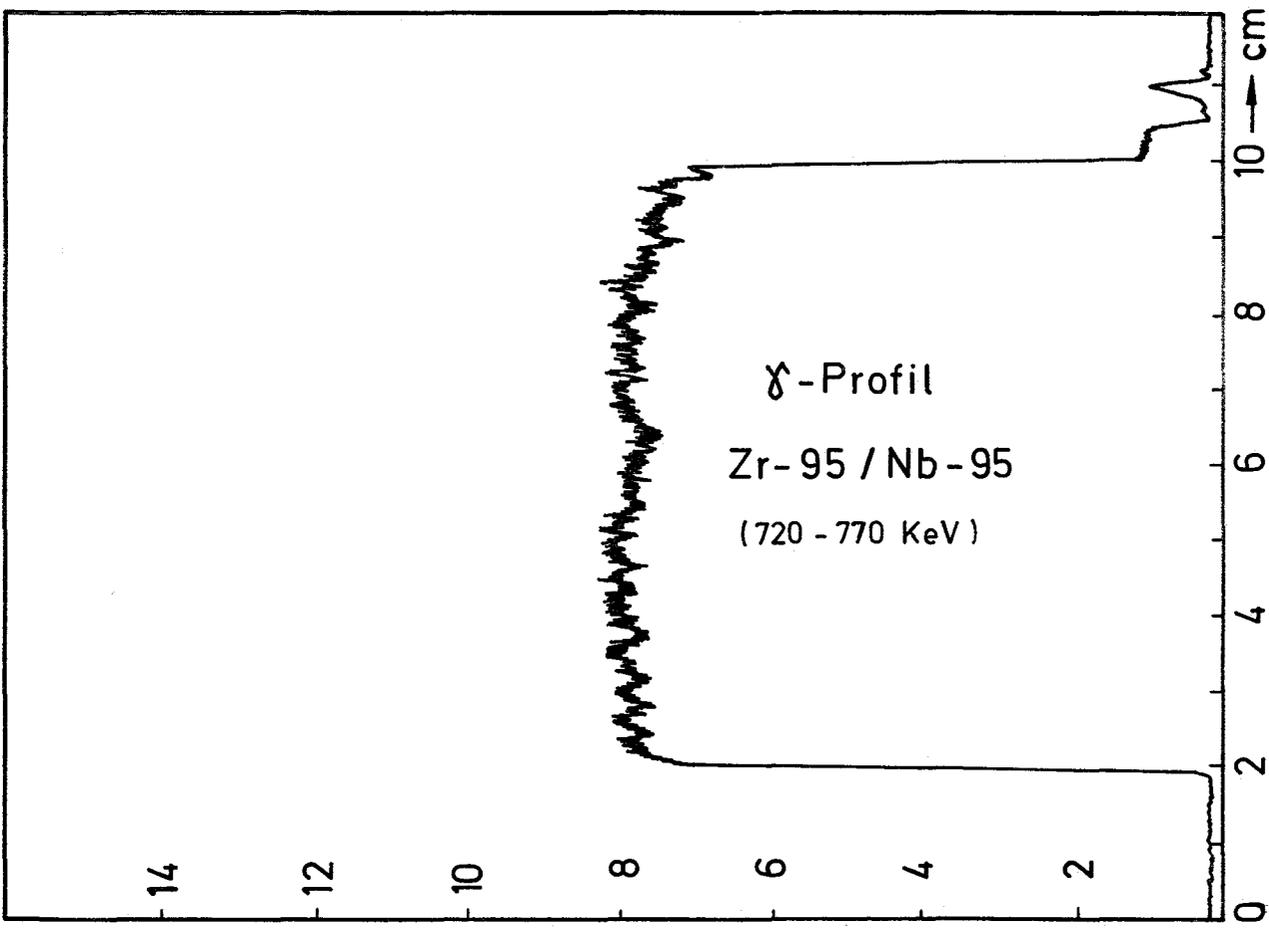
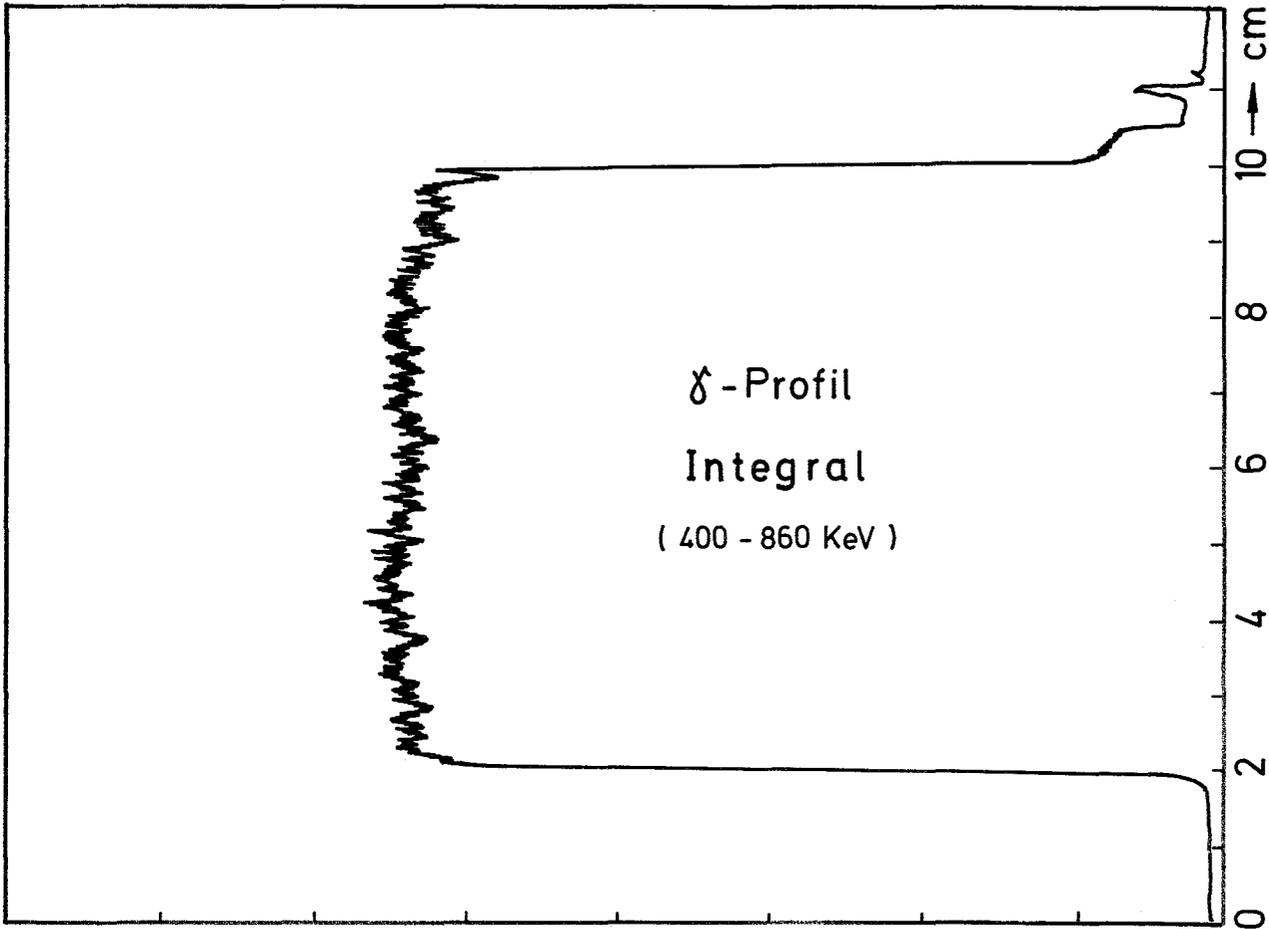


1mm

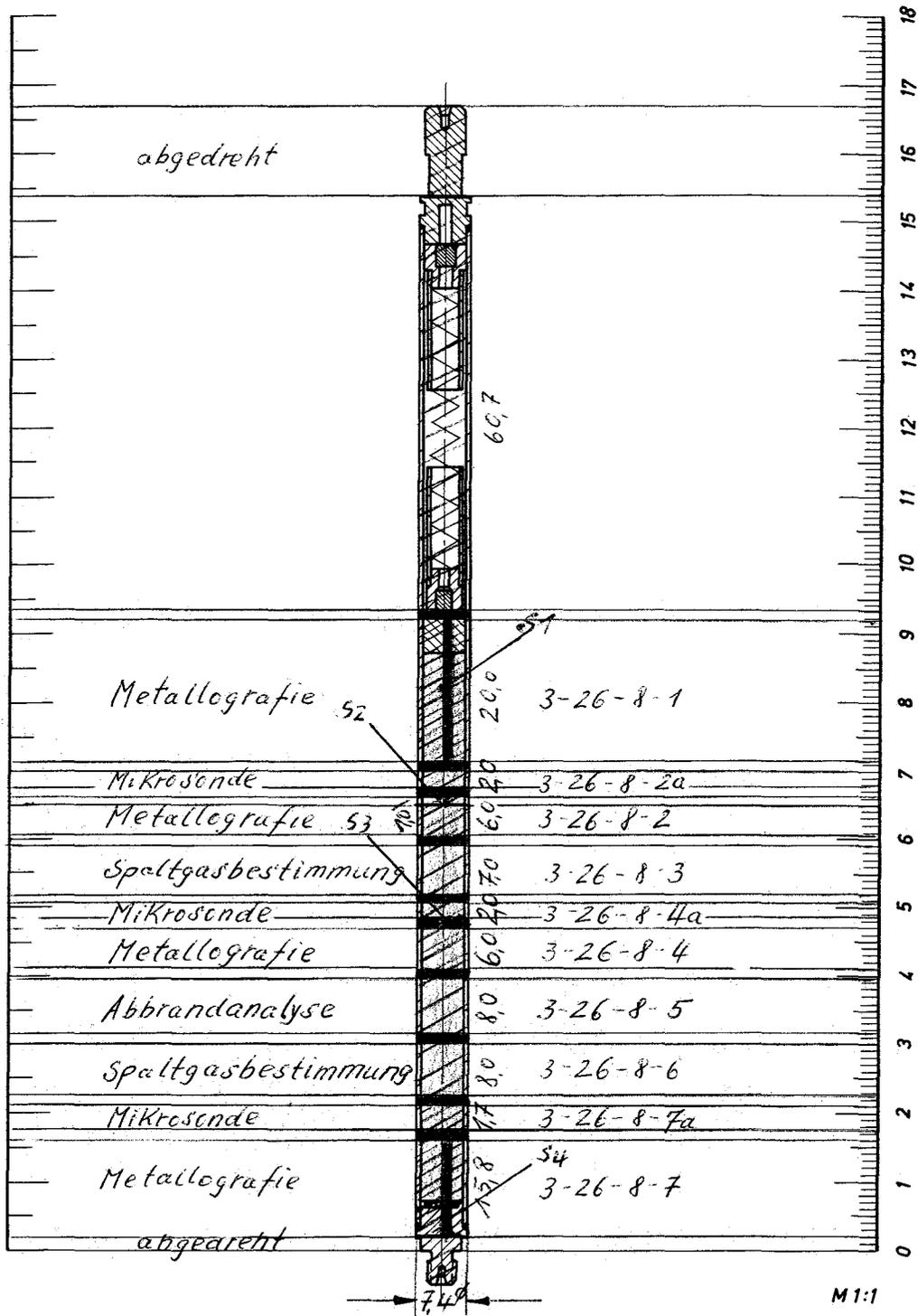
1mm



1
1 mm



relative Einheiten \leftarrow



Prüfling 10

Brennstoff :

Form : Tabl. geschliffen
Zusammensetzung : UO_2
Tablettendichte : 88 % th.D.

Hülle :

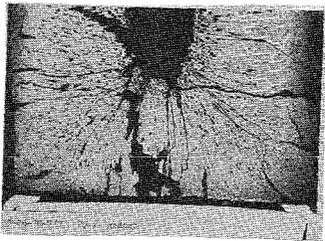
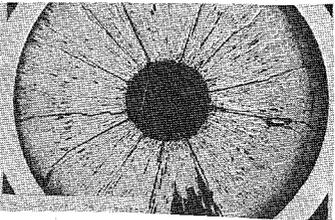
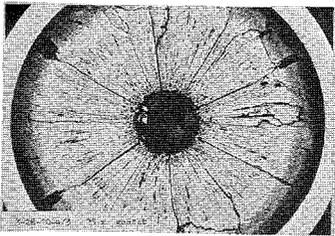
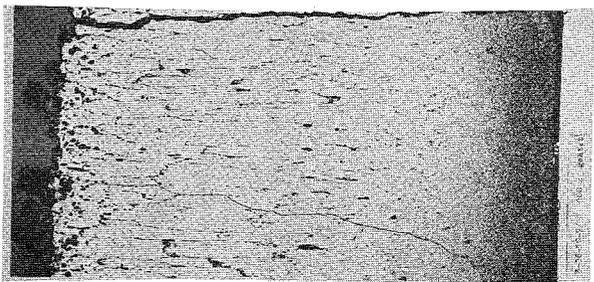
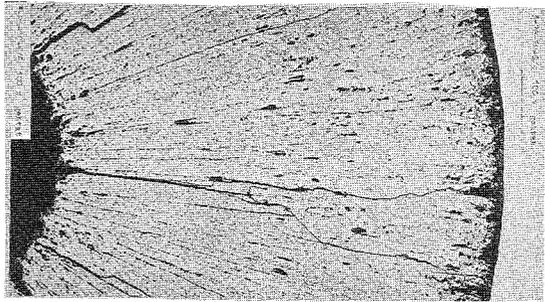
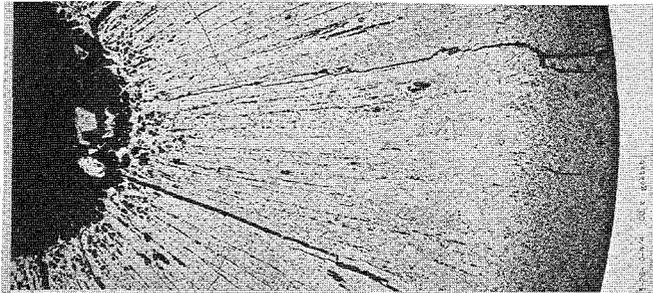
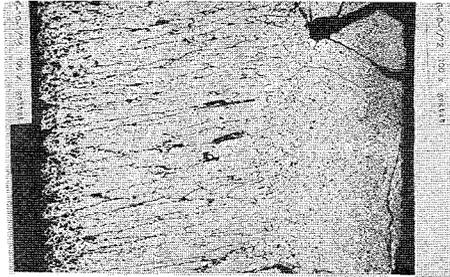
Material : X4CrNiNb 20 25
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 167,2 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80,0 mm
Radiale Spaltweite : 90,0 μm
Schmierdichte : -

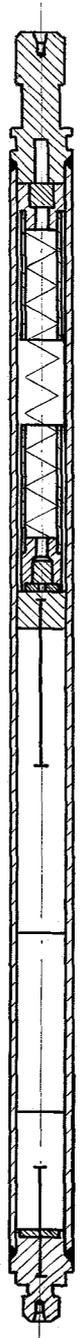
Bestrahlung :

Einrichtung : FR 2/KVE 26
Dauer : 221 Vollasttage
Ende : 13.5.68
Rechn. Abbrand : 44 120 MWd/t
Stableistung max./mittl. : 634/515 W/cm

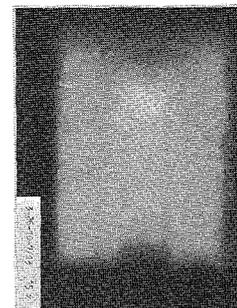
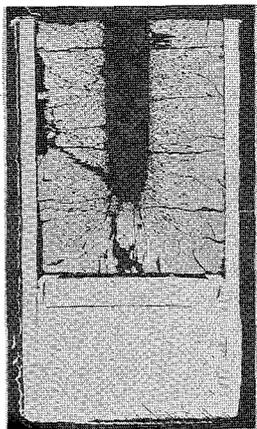
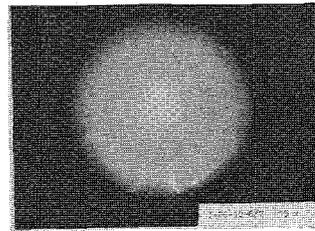
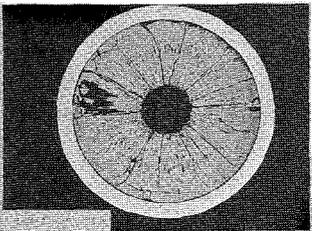
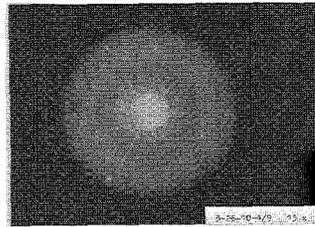
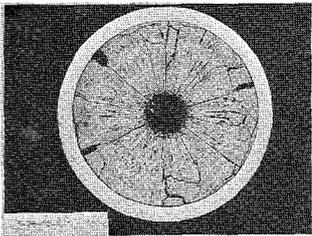
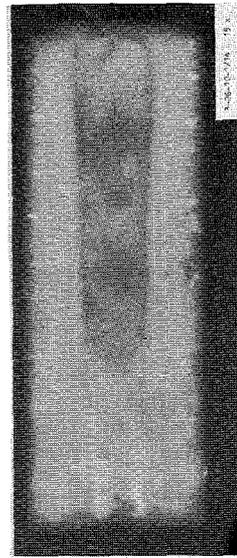
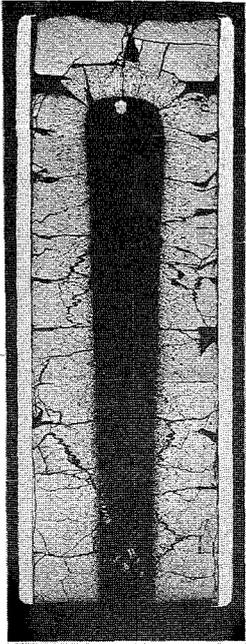


1mm

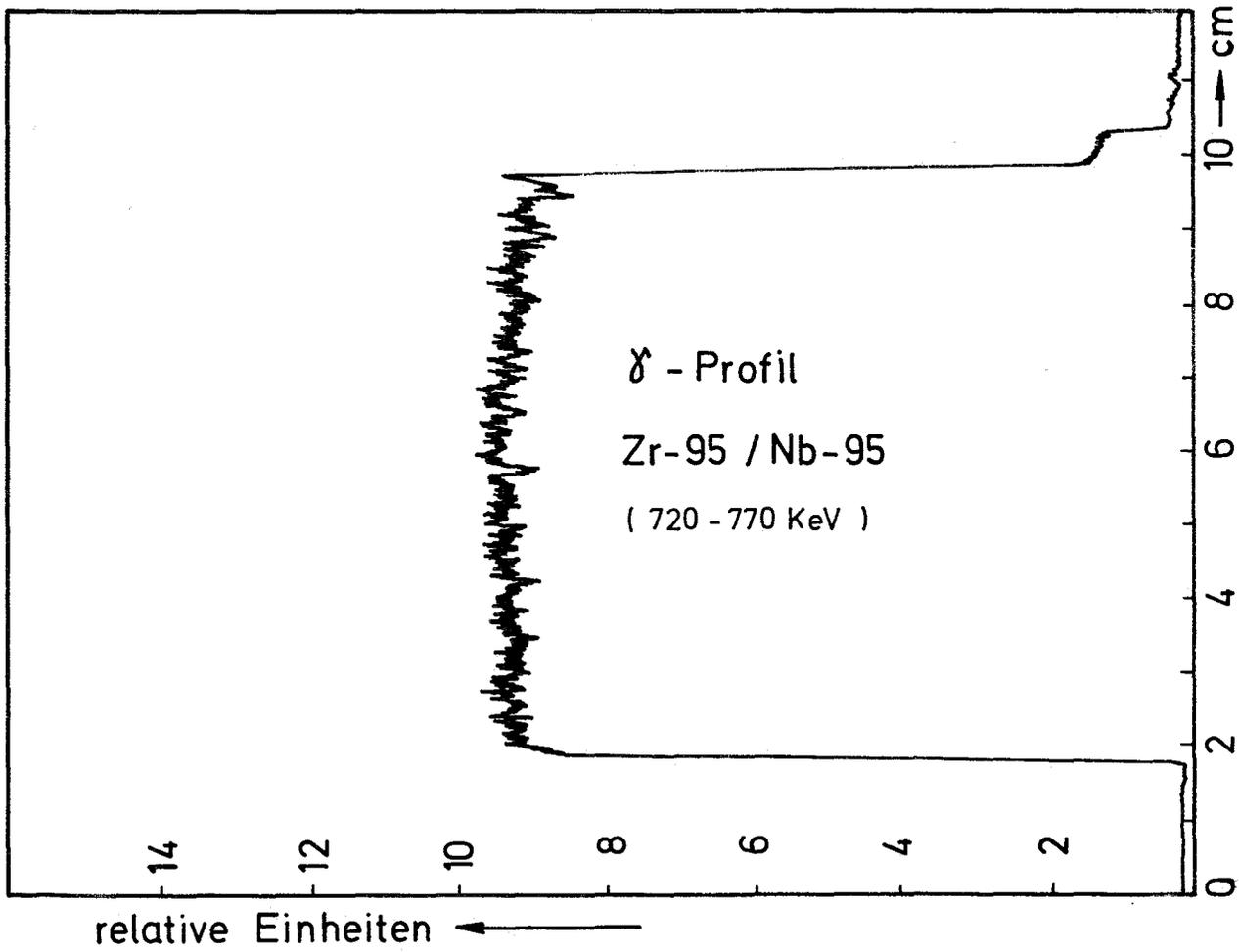
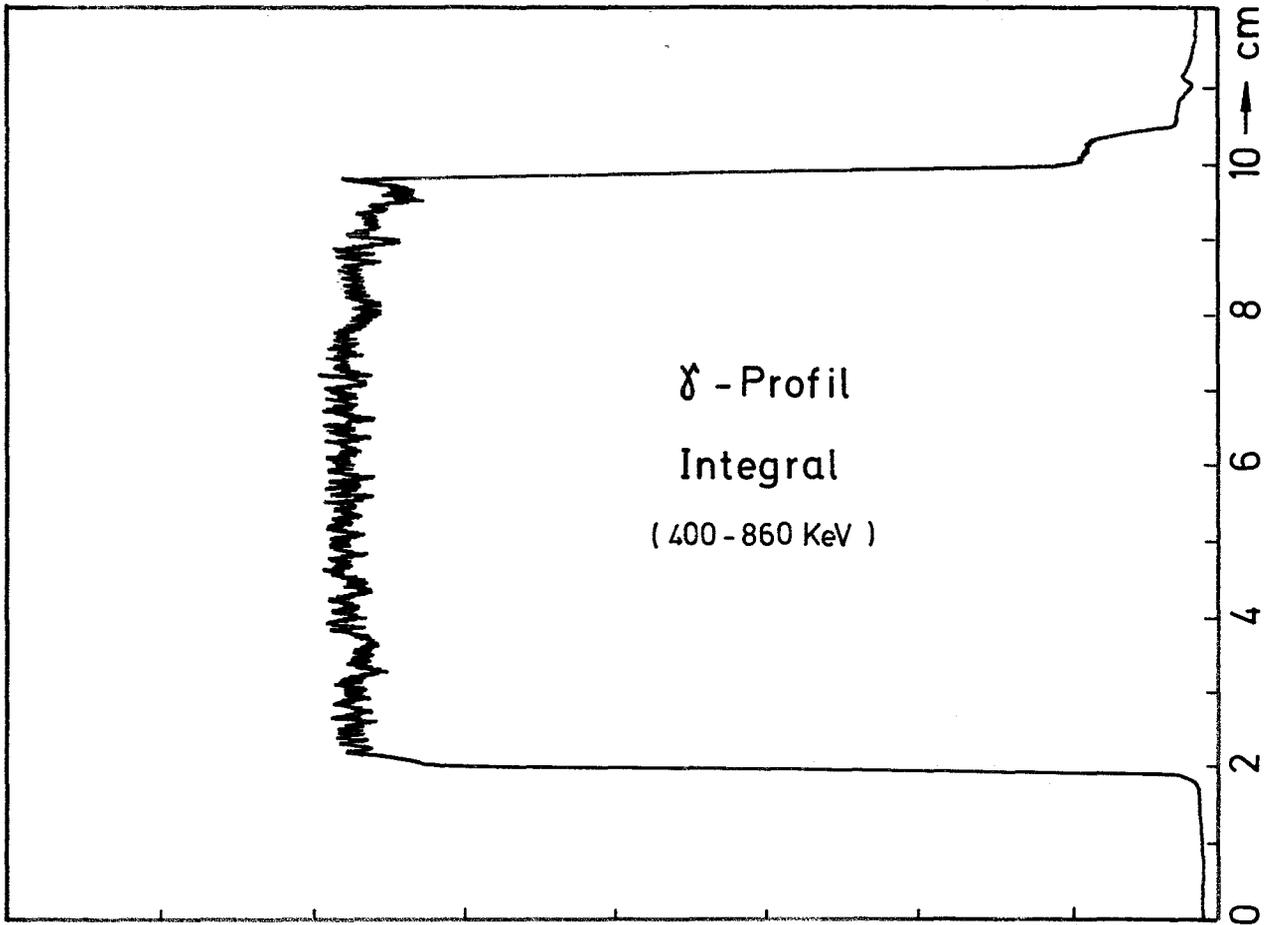
1mm

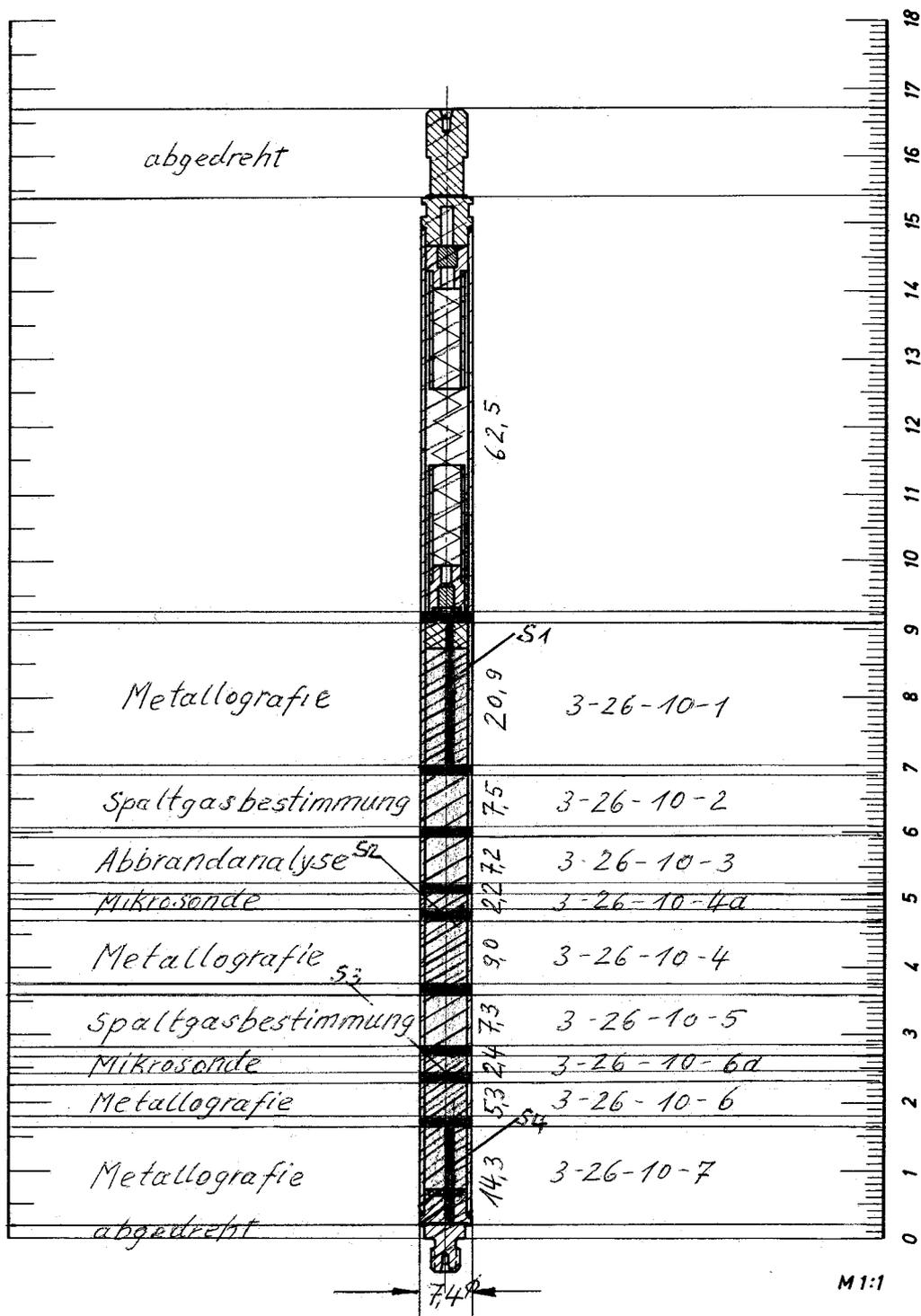


A



1mm





M1:1

Prüfling 12

Brennstoff :

Form : Tabl. ungeschliffen
Zusammensetzung : UO_2
Tablettendichte : 88 % th.D.

Hülle :

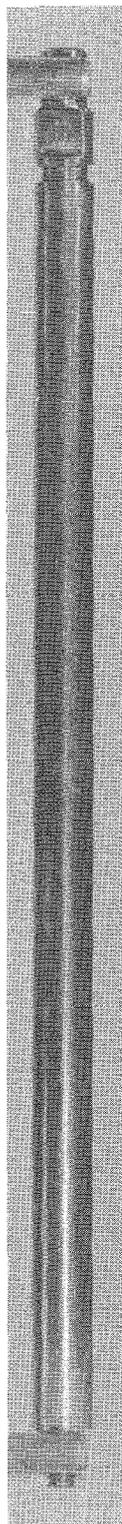
Material : X4CrNiNb 2025
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,5 mm

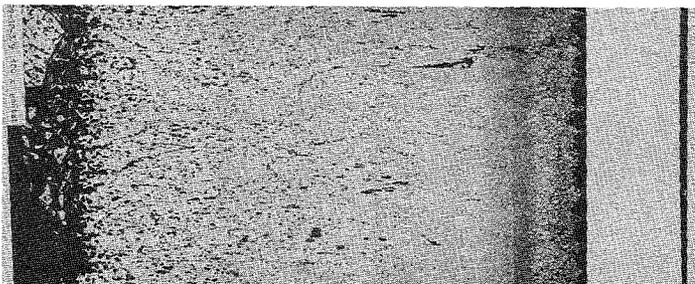
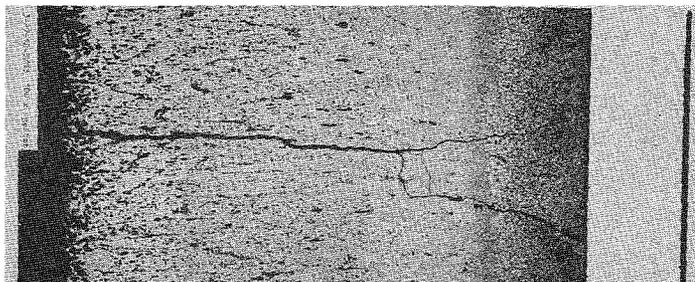
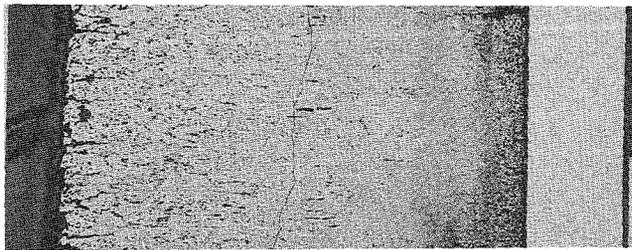
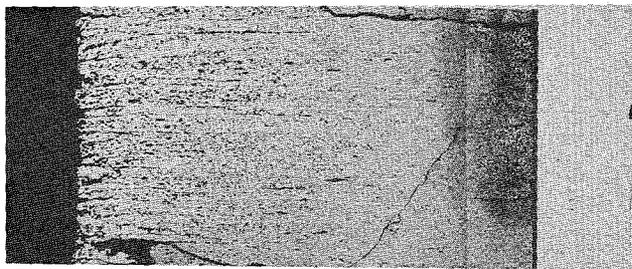
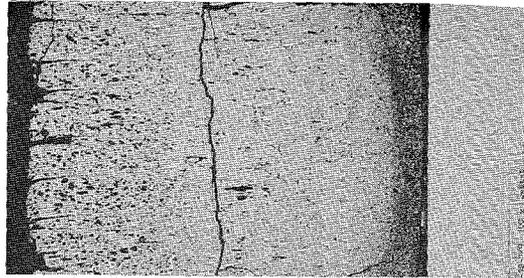
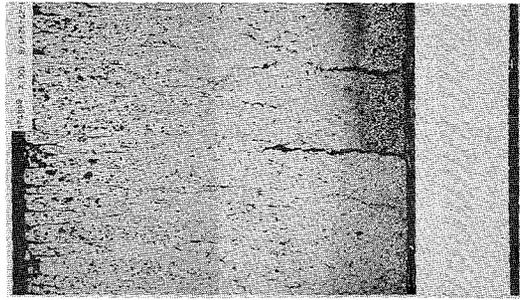
Geometrie :

Länge des Prüflings : 167,2 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80,4 mm
Radiale Spaltweite : 100,0 μm
Schmierdichte : -

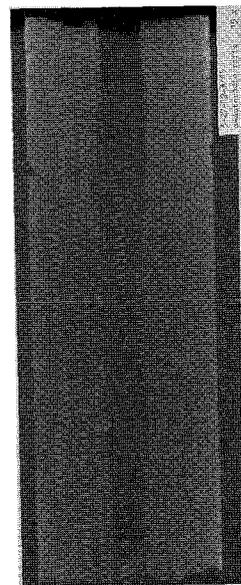
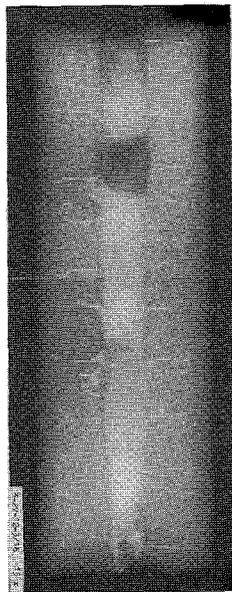
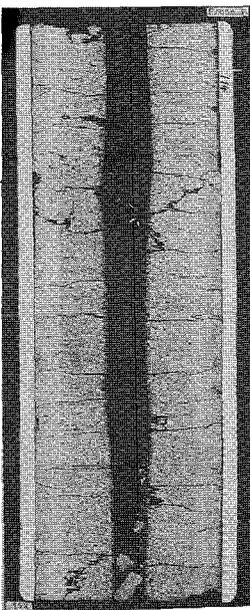
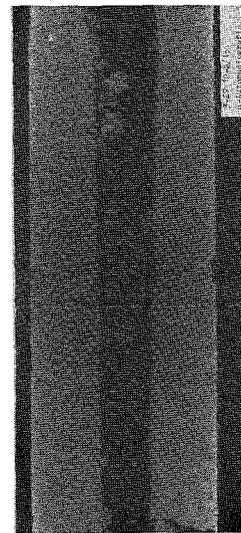
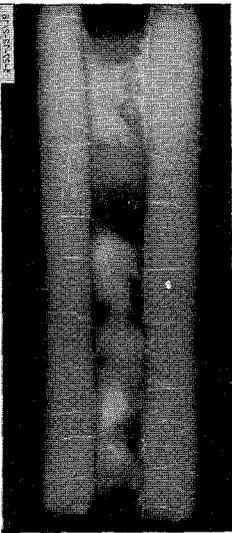
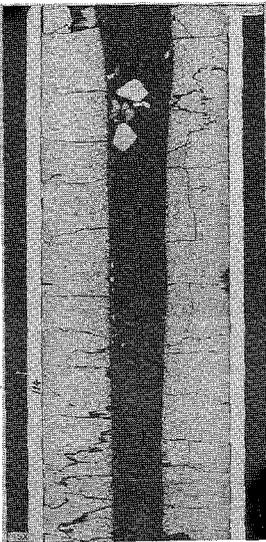
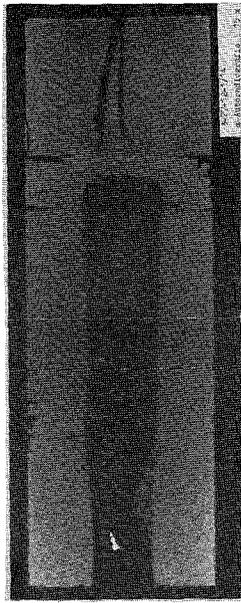
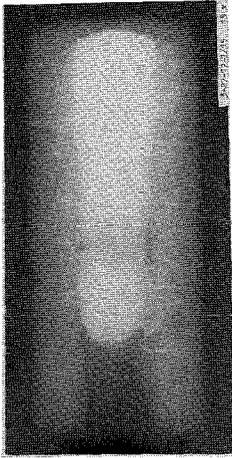
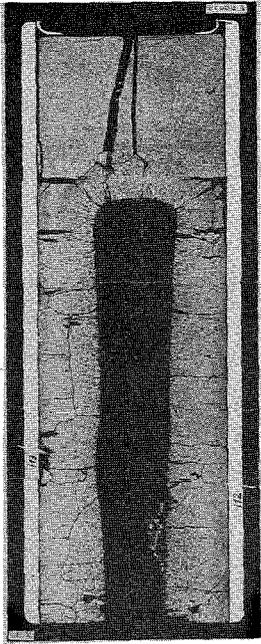
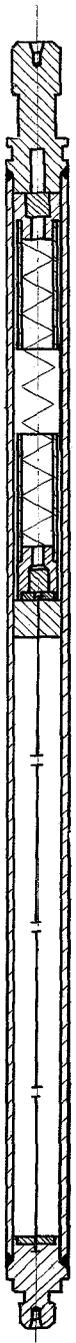
Bestrahlung :

Einrichtung : FR-2/KVE 27
Dauer : 400 Vollasttage
Ende : 10.2.69
Rechn. Abbrand : 55 686 MWd/t
Stableistung max./mittl.: 614/365 W/cm

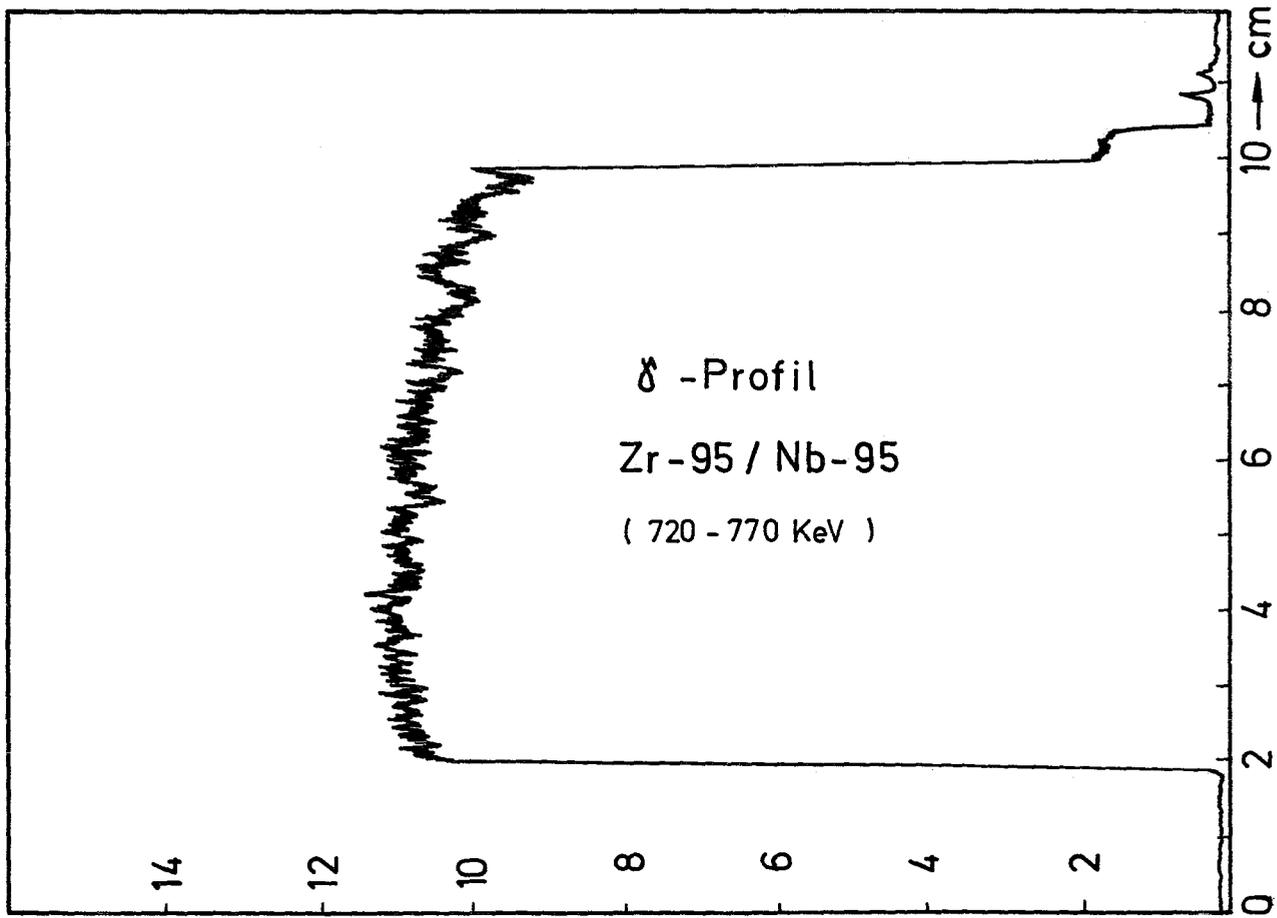
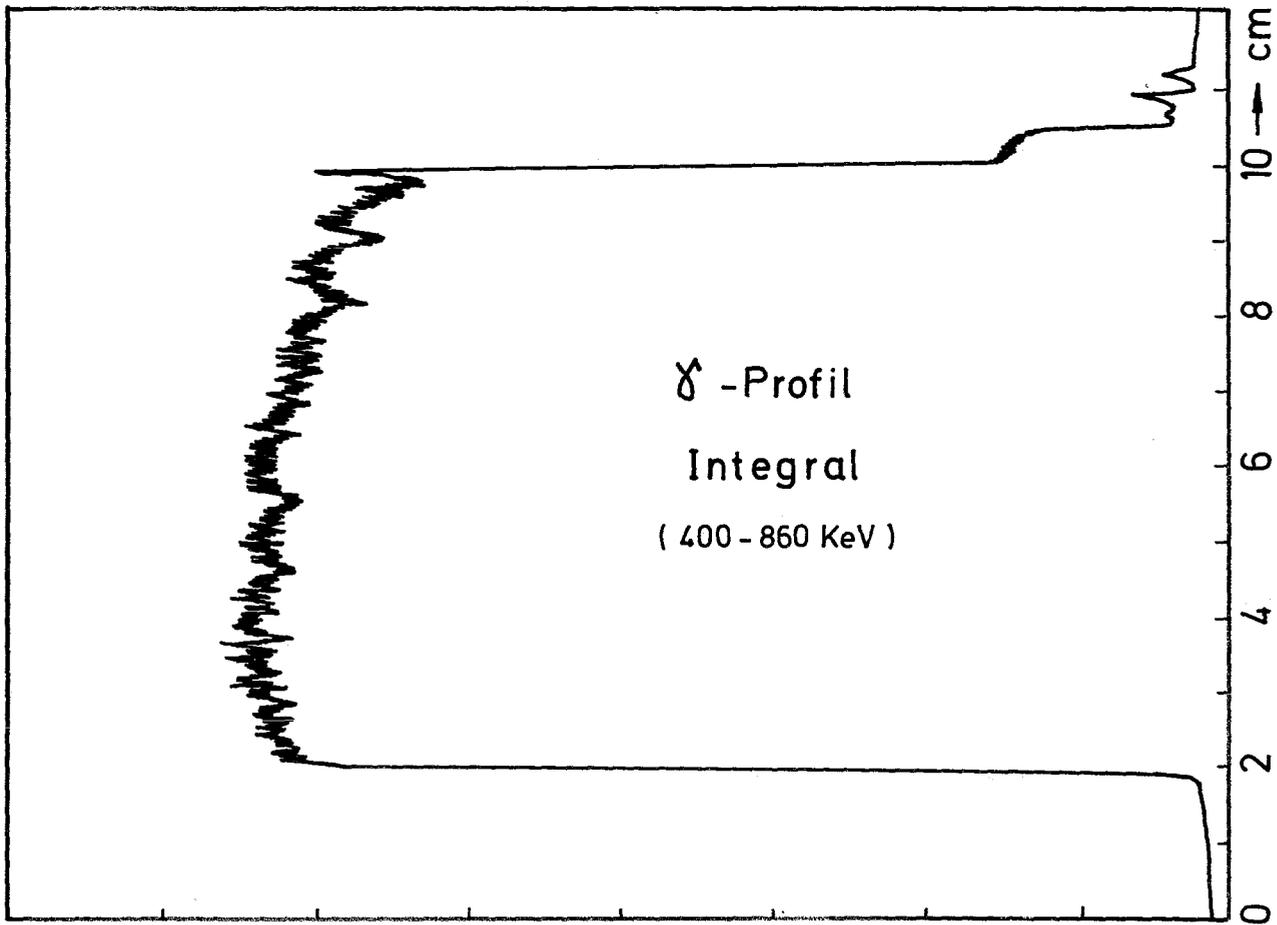




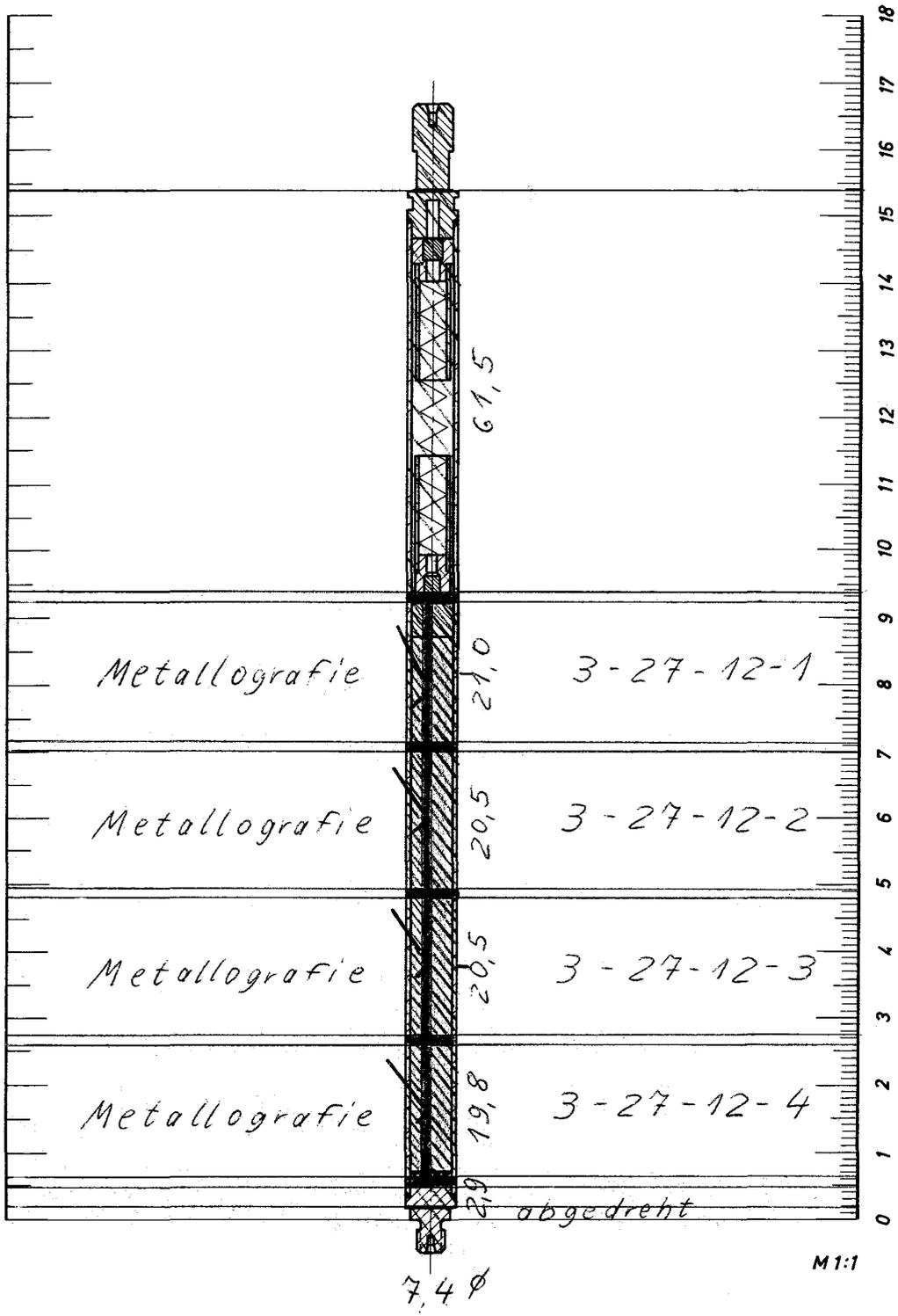
1mm



1mm



relative Einheiten \leftarrow



M1:1

Prüfling 14

Brennstoff :

Form : Tabl. geschliffen
Zusammensetzung : UO_2
Tablettendichte : 88 % th.D.

Hülle :

Material : X4CrNiNb 20 25
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,5 mm

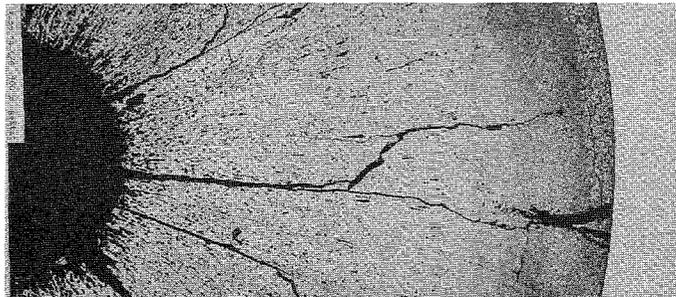
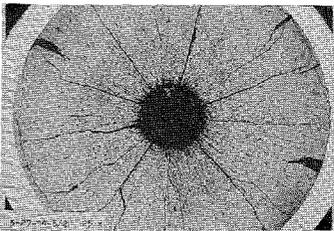
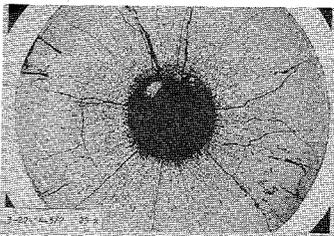
Geometrie :

Länge des Prüflings : 167,1 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80,1 mm
Radiale Spaltweite : 90,0 μm
Schmierdichte : -

Bestrahlung :

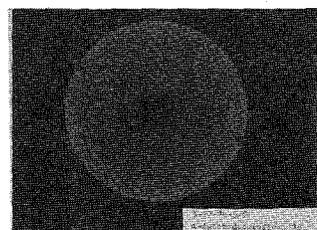
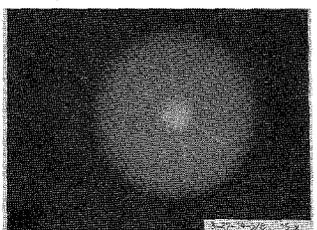
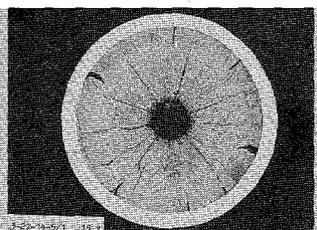
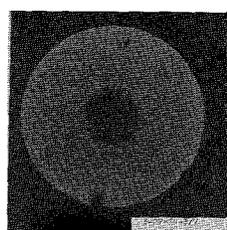
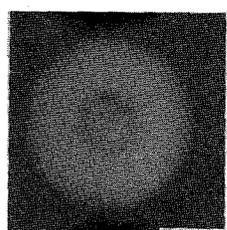
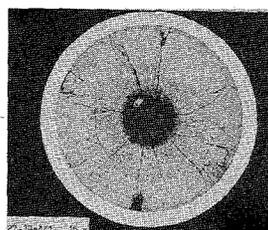
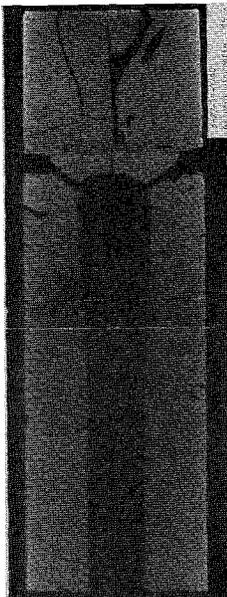
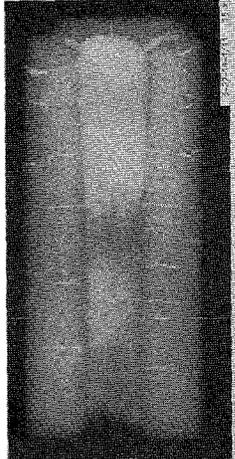
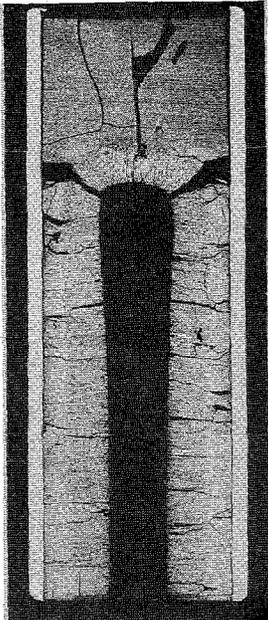
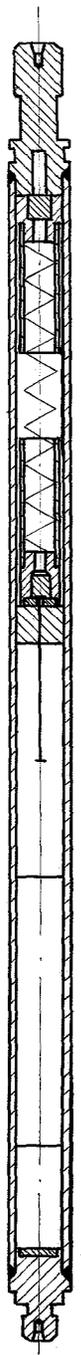
Einrichtung : FR 2/KVE 27
Dauer : 400 Vollasttage
Ende : 10.2.69
Rechn. Abbrand : 59 153 MWd/t
Stableistung max./mittl. : 576/390 W/cm



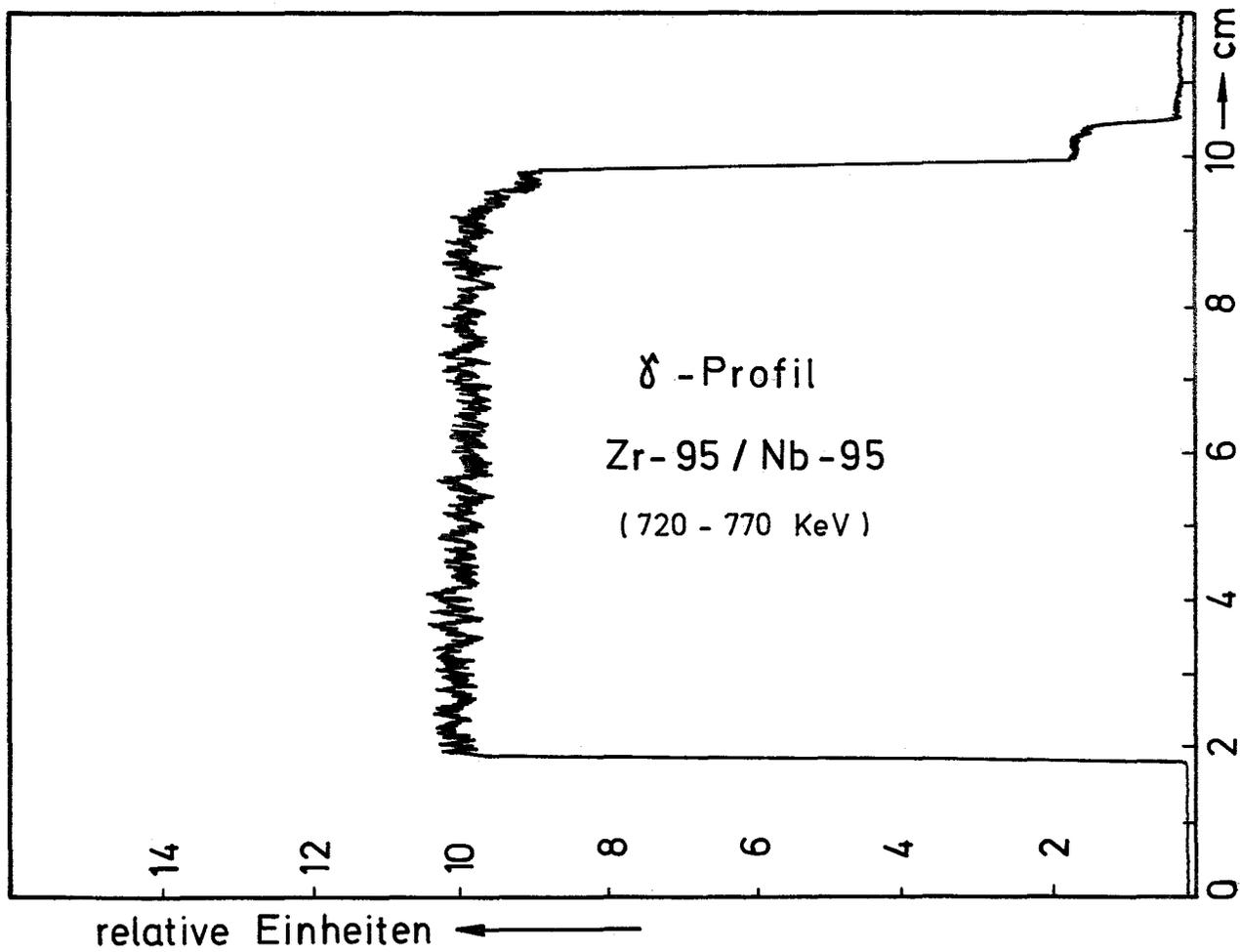
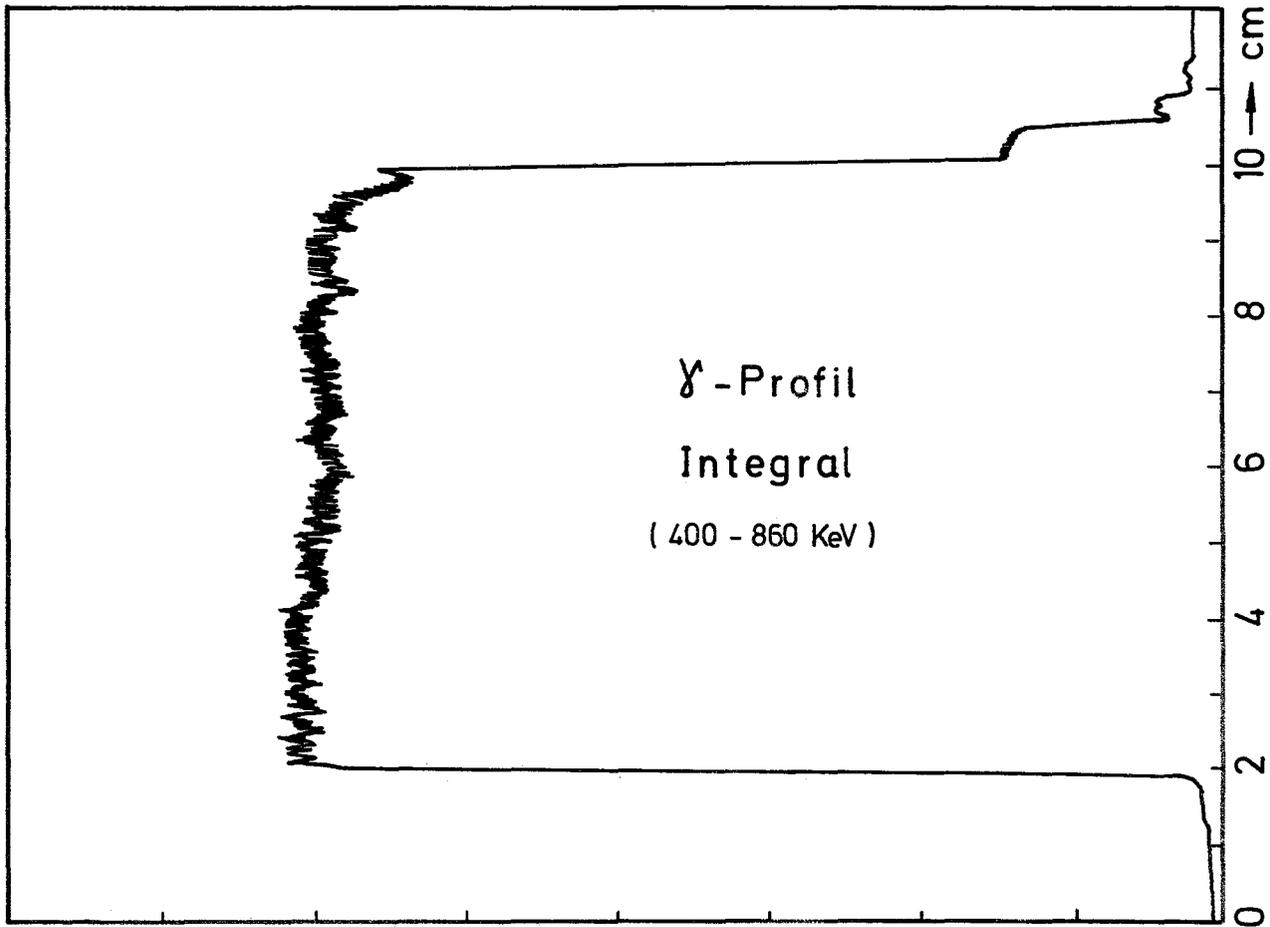


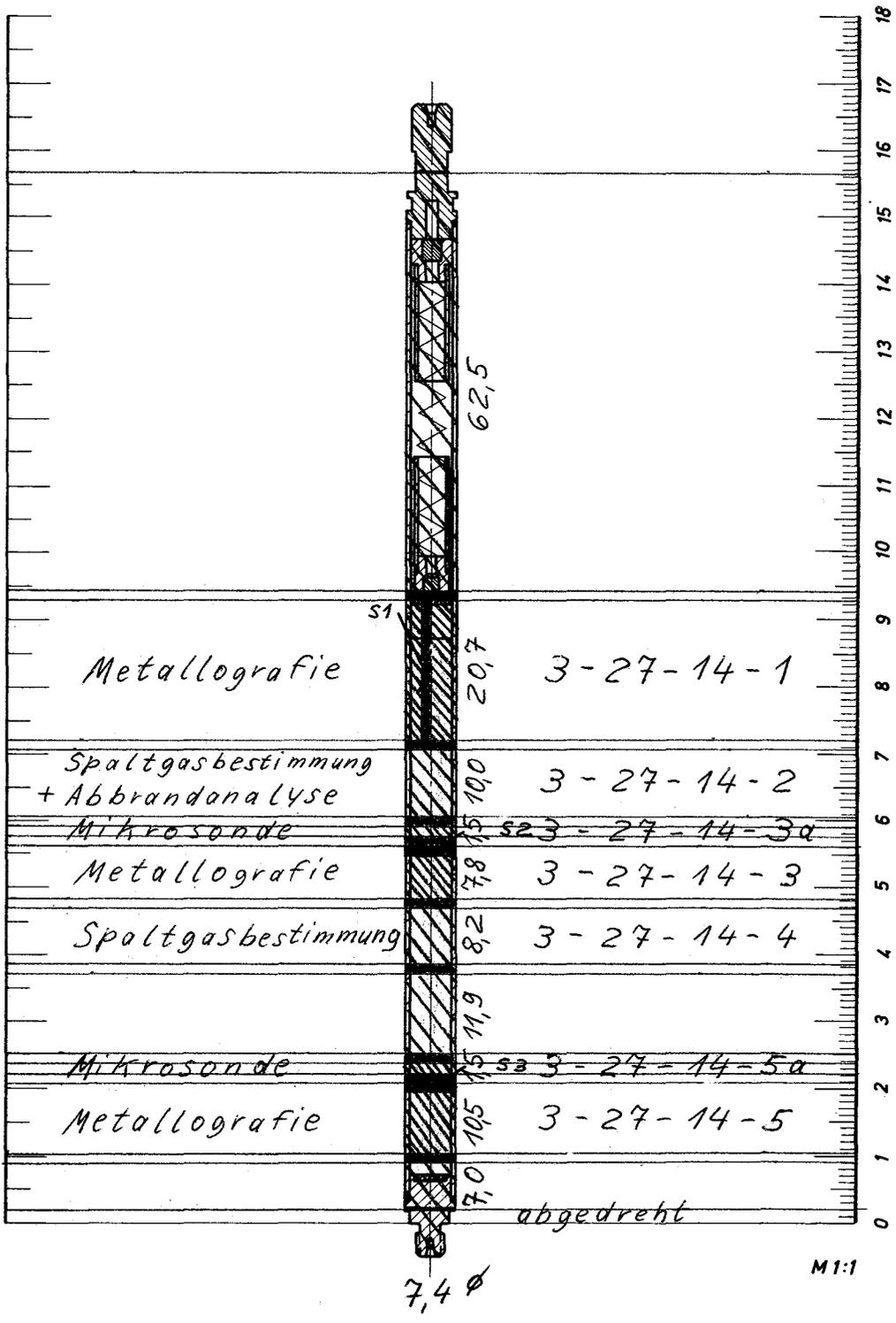
1mm

1mm



1
1mm





Prüfling BU

Brennstoff :

Form	: Tabl. ungeschliffen
Zusammensetzung	: UO_2
Tablettendichte	: 88 % th.D.

Hülle :

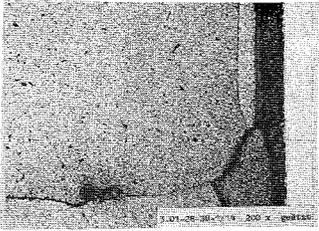
Material	: X4CrNiNb 20 25
Aussendurchmesser	: 7,4 mm
Wandstärke	: 0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings	: 167,2 mm
Länge der Brennstoffsäule	: 80,4 mm
Radiale Spaltweite	: 100,0 μ m
Schmierdichte	: -

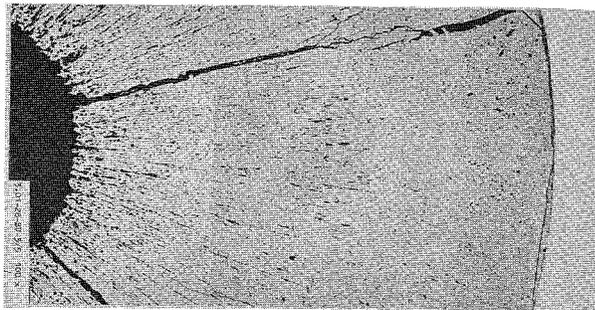
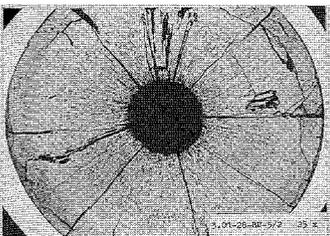
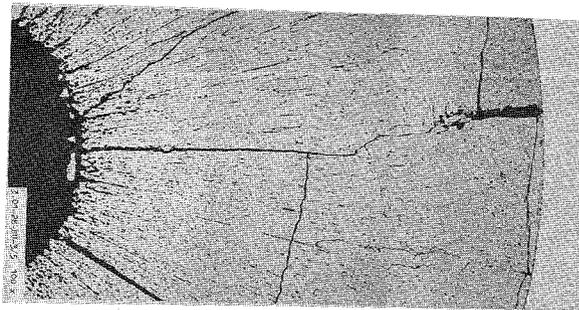
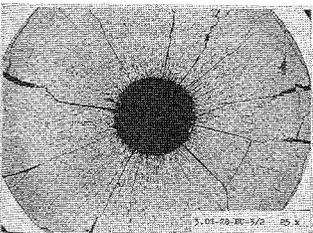
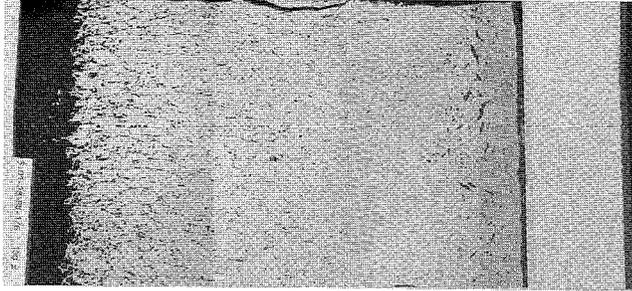
Bestrahlung :

Einrichtung	: FR 2/KVE 28
Dauer	: 543 Vollasttage
Ende	: 25.8.69
Rechn. Abbrand	: 65 984 MWd/t
Stableistung max./mittl.	: 503/317 W/cm



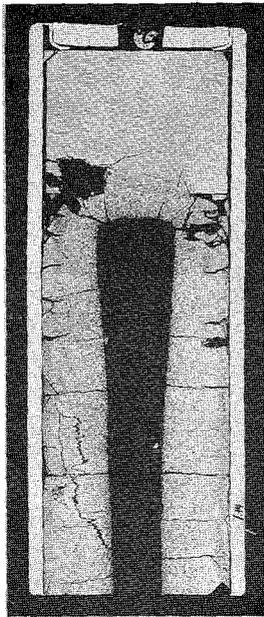
A

100 μ m

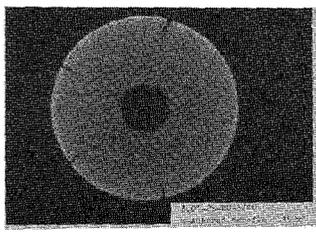
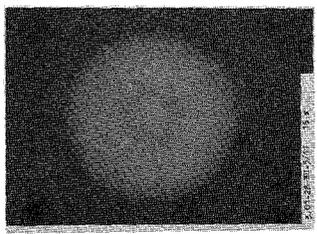
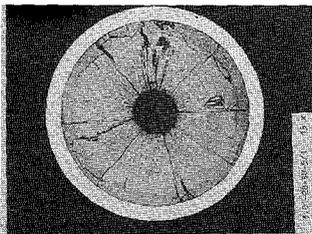
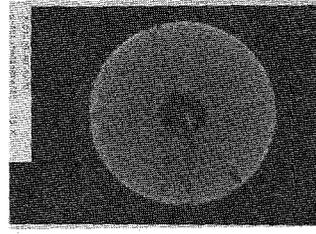
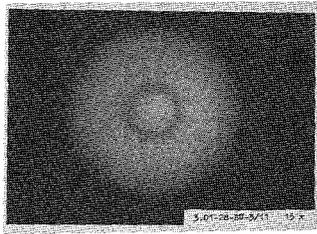
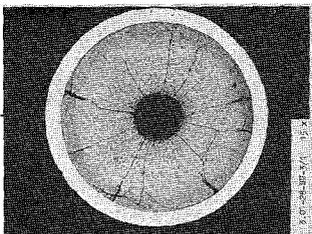
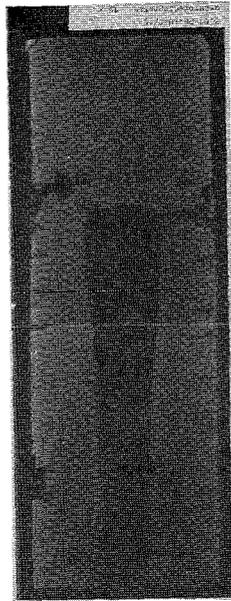
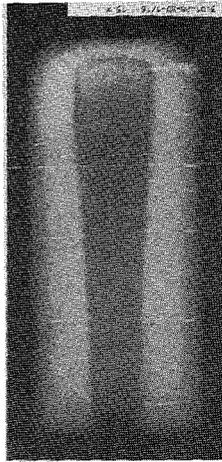


1mm

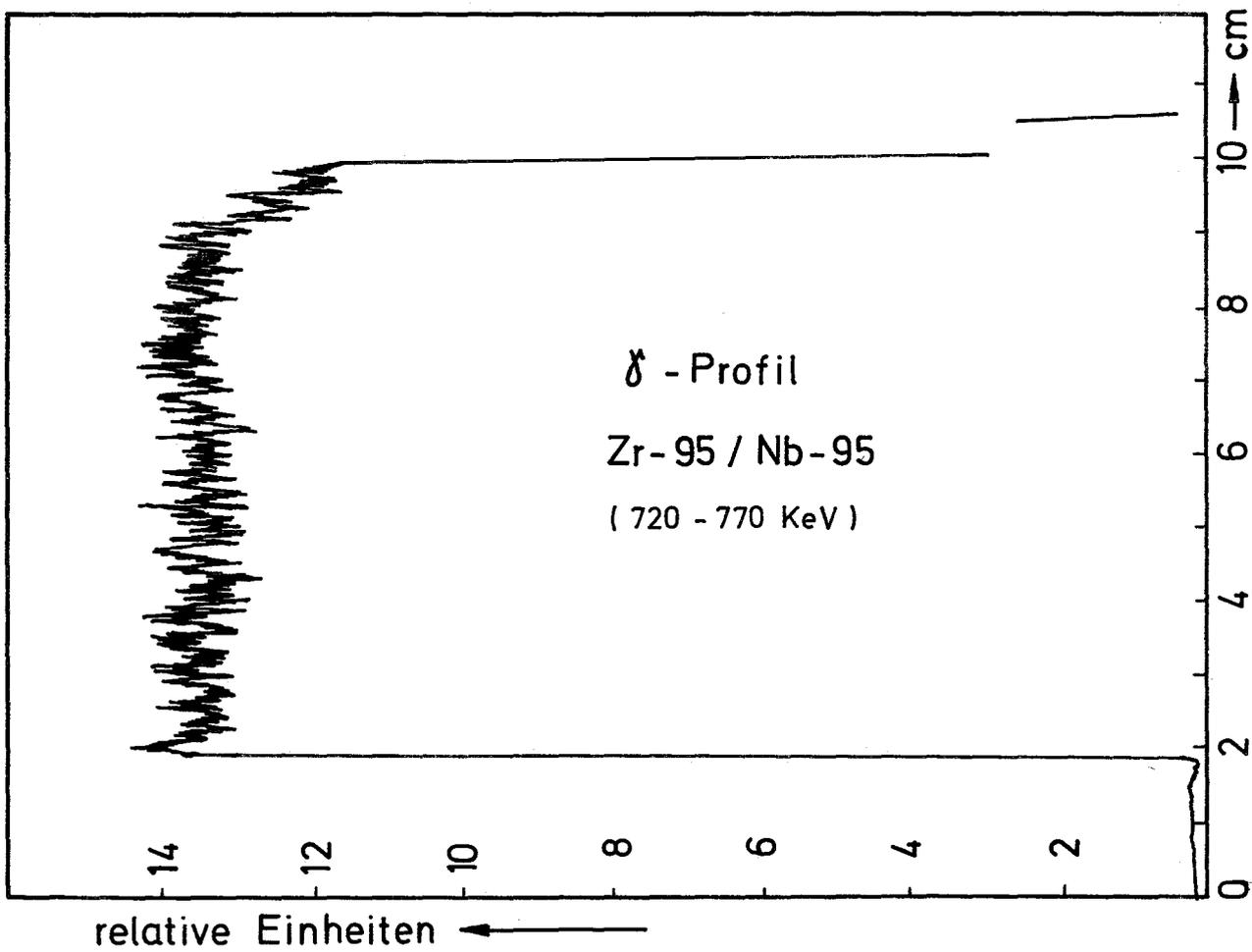
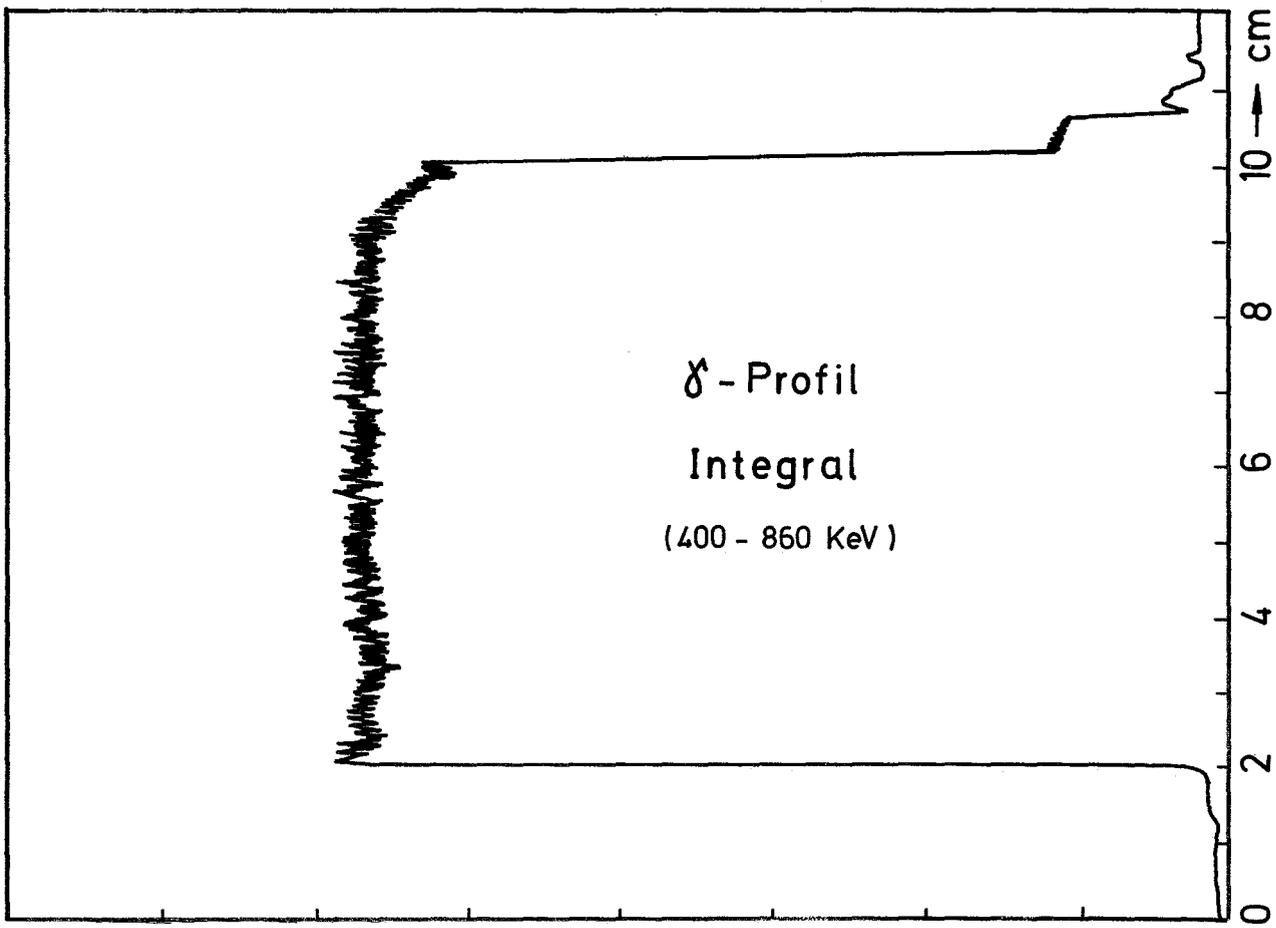
1mm



-A

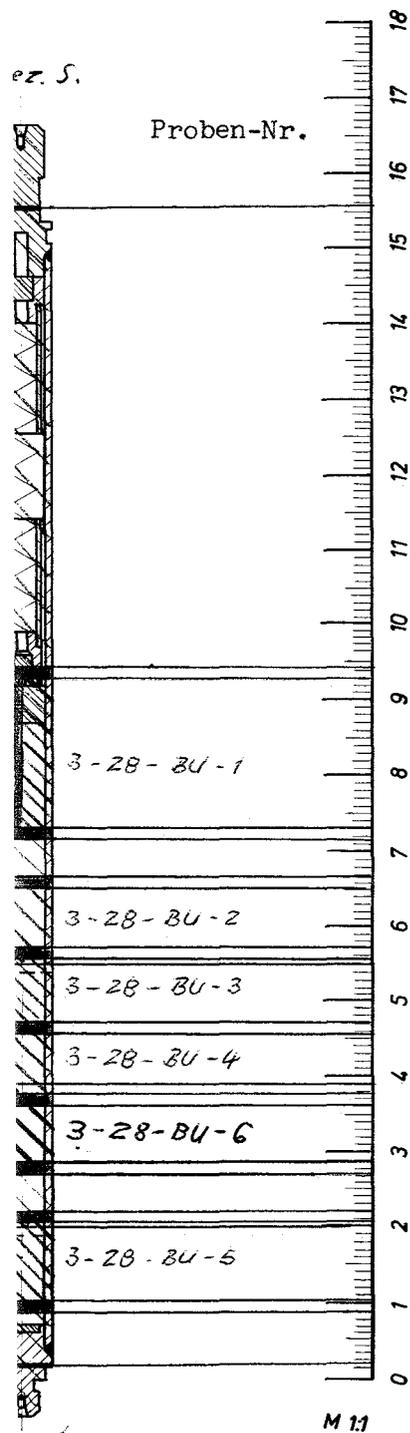


1
1mm



brennstoffmenge: 23,6 gr
 spaltstoffmenge: 2,4 gr
 toff: UO₂ - Tabl., ungerchl., 88 % H₂O
 istung: 503 W/cm max.
 325 W/cm mittl.

Oberflächentemperatur:
 Bestrahlungsdauer: 551 d
 Bestrahlungsende: 25. 8. 69
 Rechn. Abbrand: 64 900 MWd/t



Unters. 1. Visuelle Inspektion

2. Röntgengrobstrukturprüfung

3. γ -scanning

4. Dimensionskontrolle

~~5. Dichtheitsprüfung~~

~~6. Freie Spaltgase messen~~

~~7. Freies Volumen messen~~

8. Abbrandanalyse zur RCH

Probe: 3-28-BU-4

3-28-BU-6

9. Gebundene und gelöste Spaltgase bestimmen

Probe: 3-28-BU-2; 4

10. Metallographische Untersuchungen

Probe: 3-28-BU-1; 3; 5

11. Autoradiographie (β , γ - α)

Probe: 3-28-BU-1; 3; 5

12. Mikroprobenentnahme

Probe:

5.1

Prüfling 16

Brennstoff :

Form : Tabl. ungeschliffen
Zusammensetzung : UO_2
Tablettendichte : 88 % th.D.

Hülle :

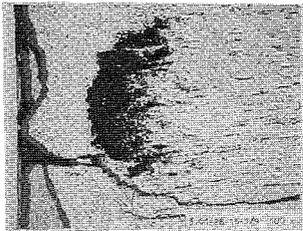
Material : X4CrNiNb 20 25
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 167,1 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80,3 mm
Radiale Spaltweite : 100,0 μm
Schmierdichte : -

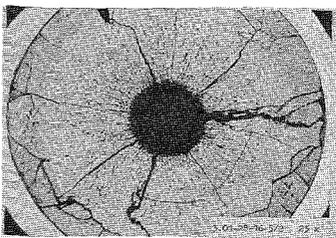
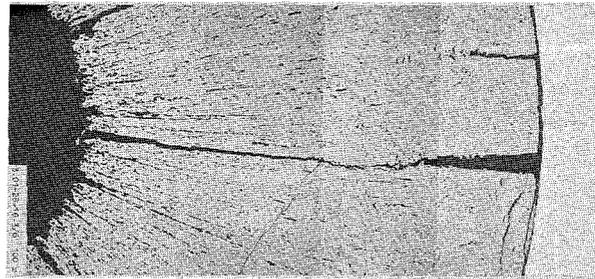
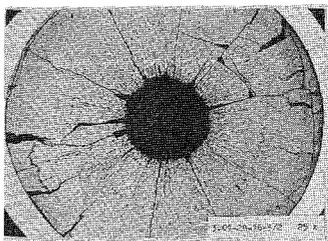
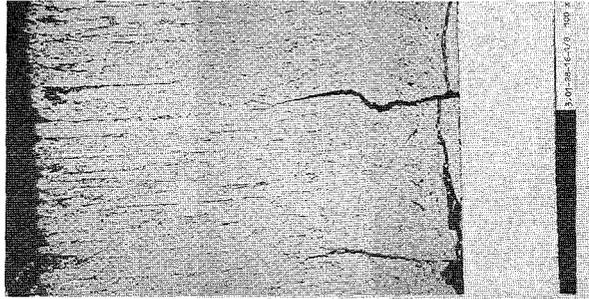
Bestrahlung :

Einrichtung : FR 2/KVE 28
Dauer : 543 Vollasttage
Ende : 25.8.69
Rechn. Abbrand : 60 575 Mwd/t
Stableistung max./mittl.: 550/292 W/cm



A

1mm



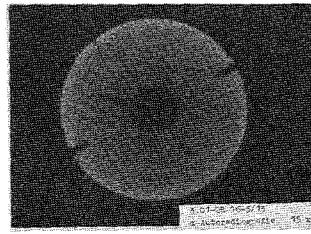
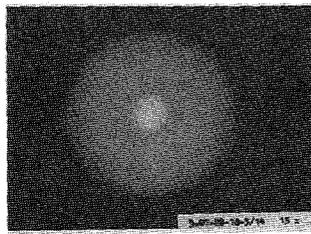
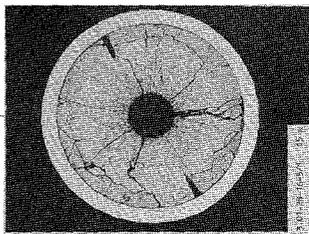
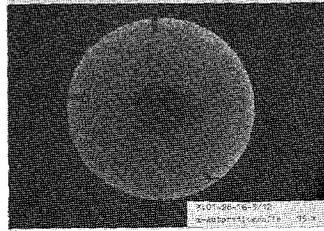
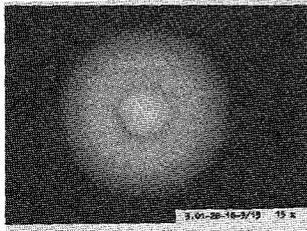
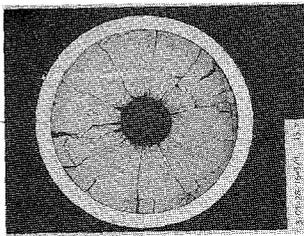
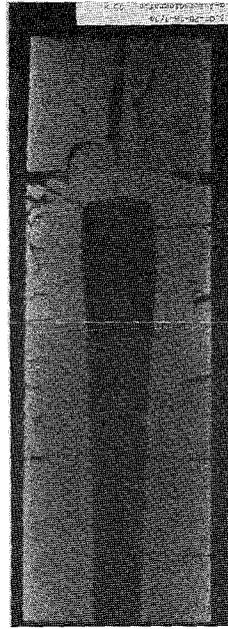
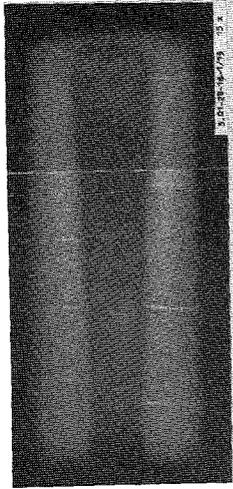
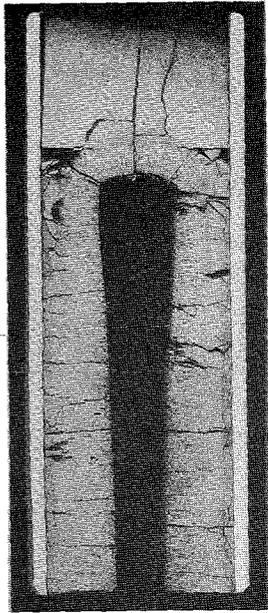
1mm



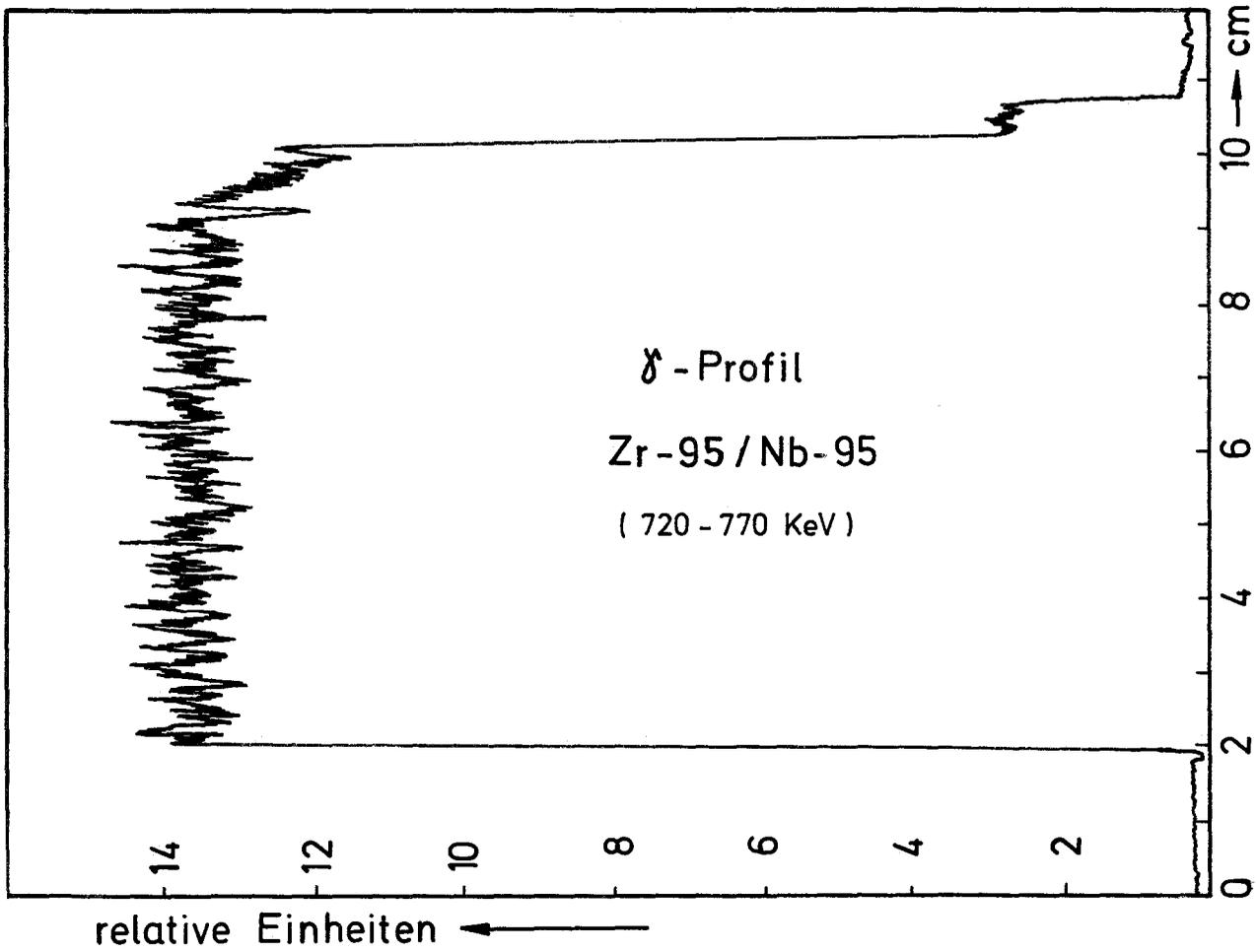
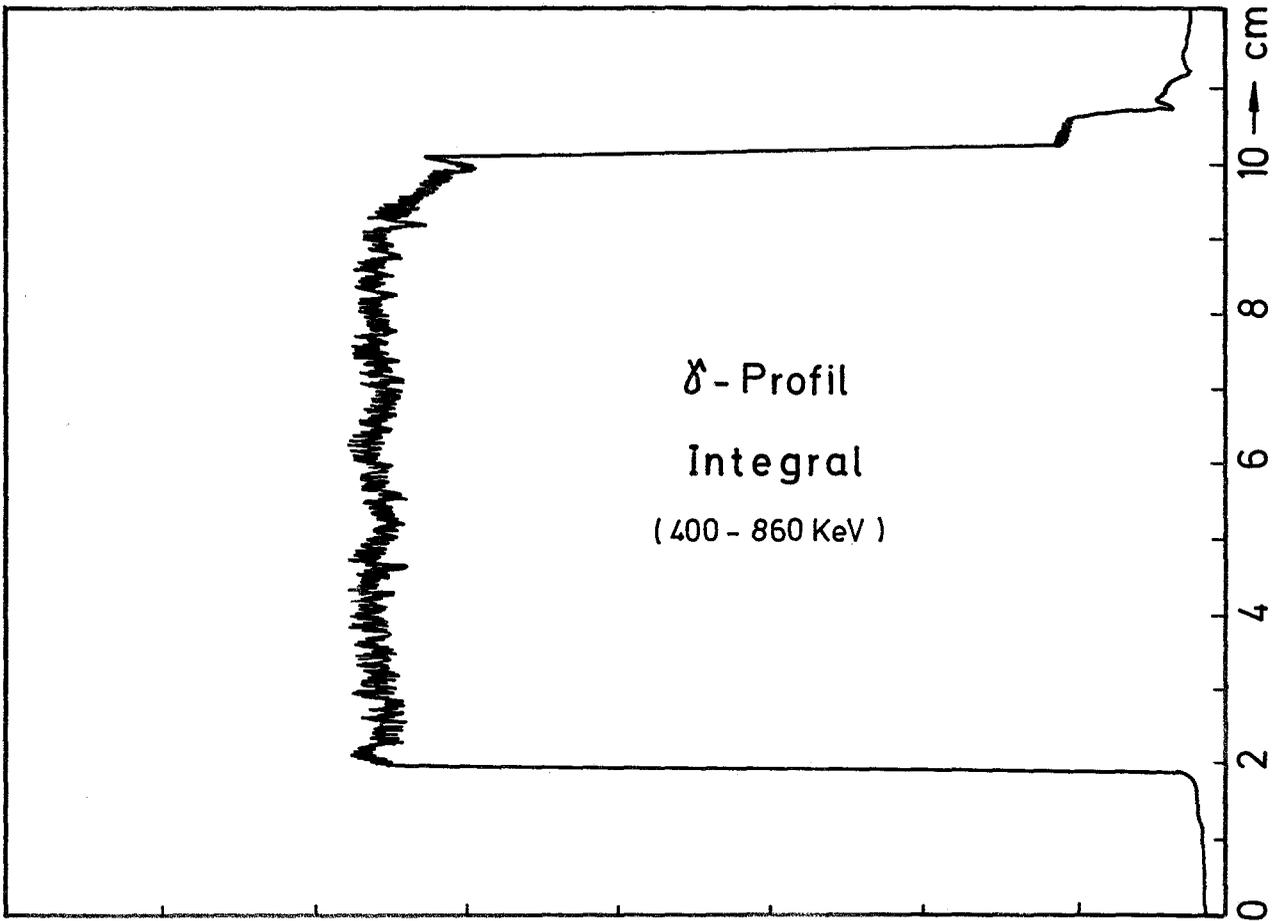
1mm

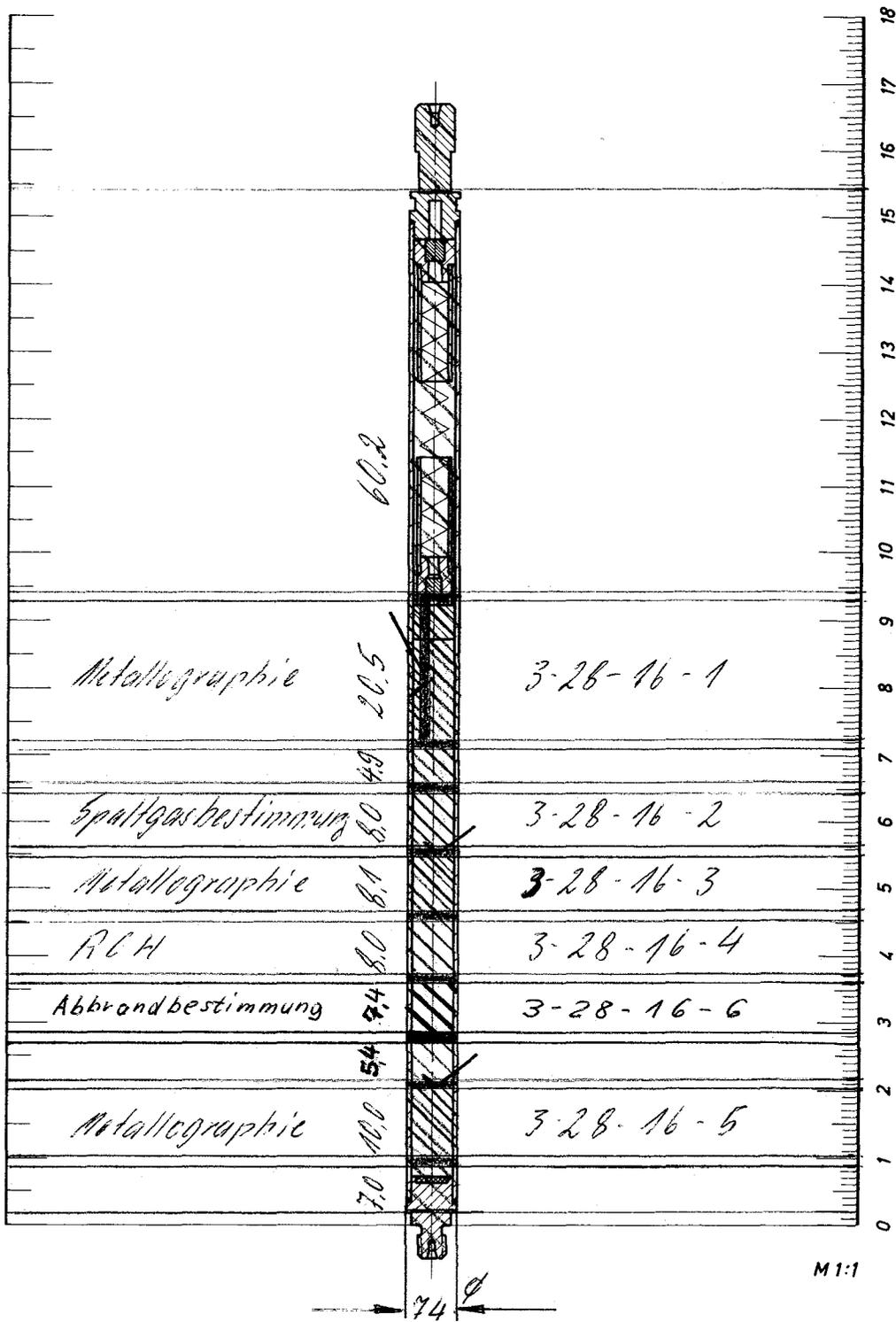


A



1mm





Prüfling 15

Brennstoff :

Form : Tabl. geschliffen
Zusammensetzung : UO_2
Tablettendichte : 93 % th.D.

Hülle :

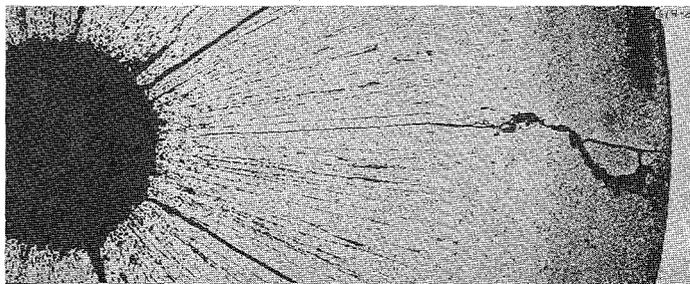
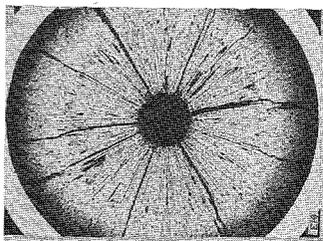
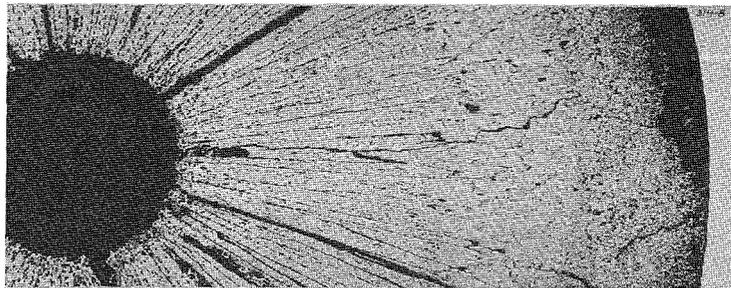
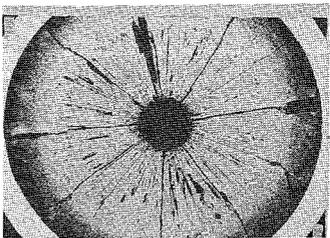
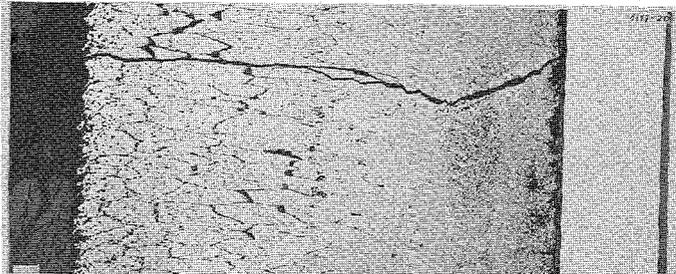
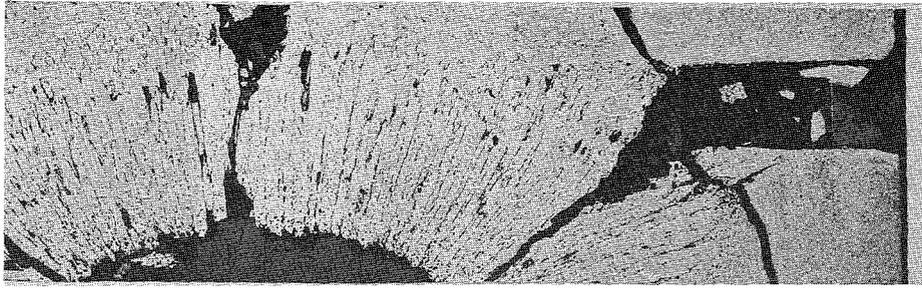
Material : X4CrNiNb 20 25
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 167,1 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80,1 mm
Radiale Spaltweite : 88,0 μm
Schmierdichte : -

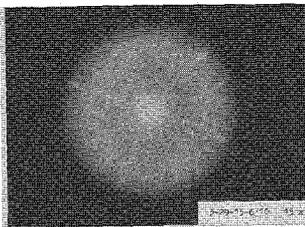
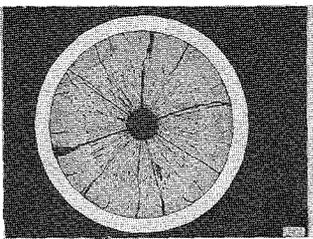
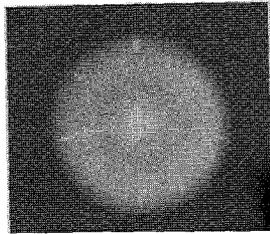
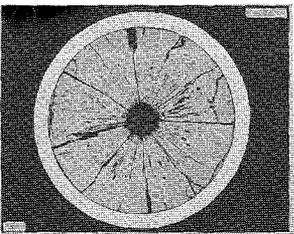
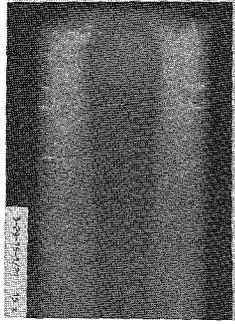
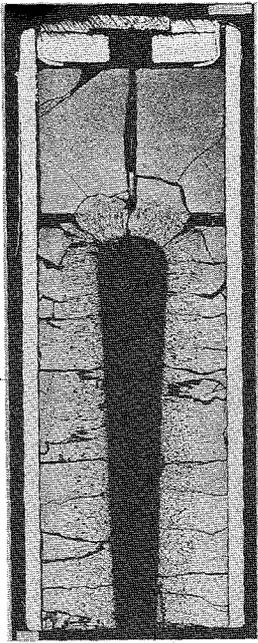
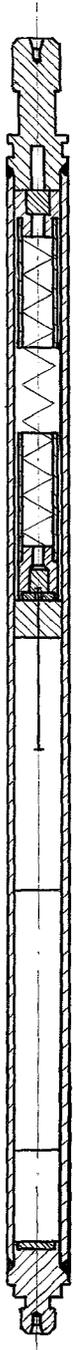
Bestrahlung :

Einrichtung : FR 2/KVE 29
Dauer : 133 Vollasttage
Ende : 8.4.68
Rechn. Abbrand : 24 250 MWd/t
Stableistung max./mittl.: 610/505 W/cm

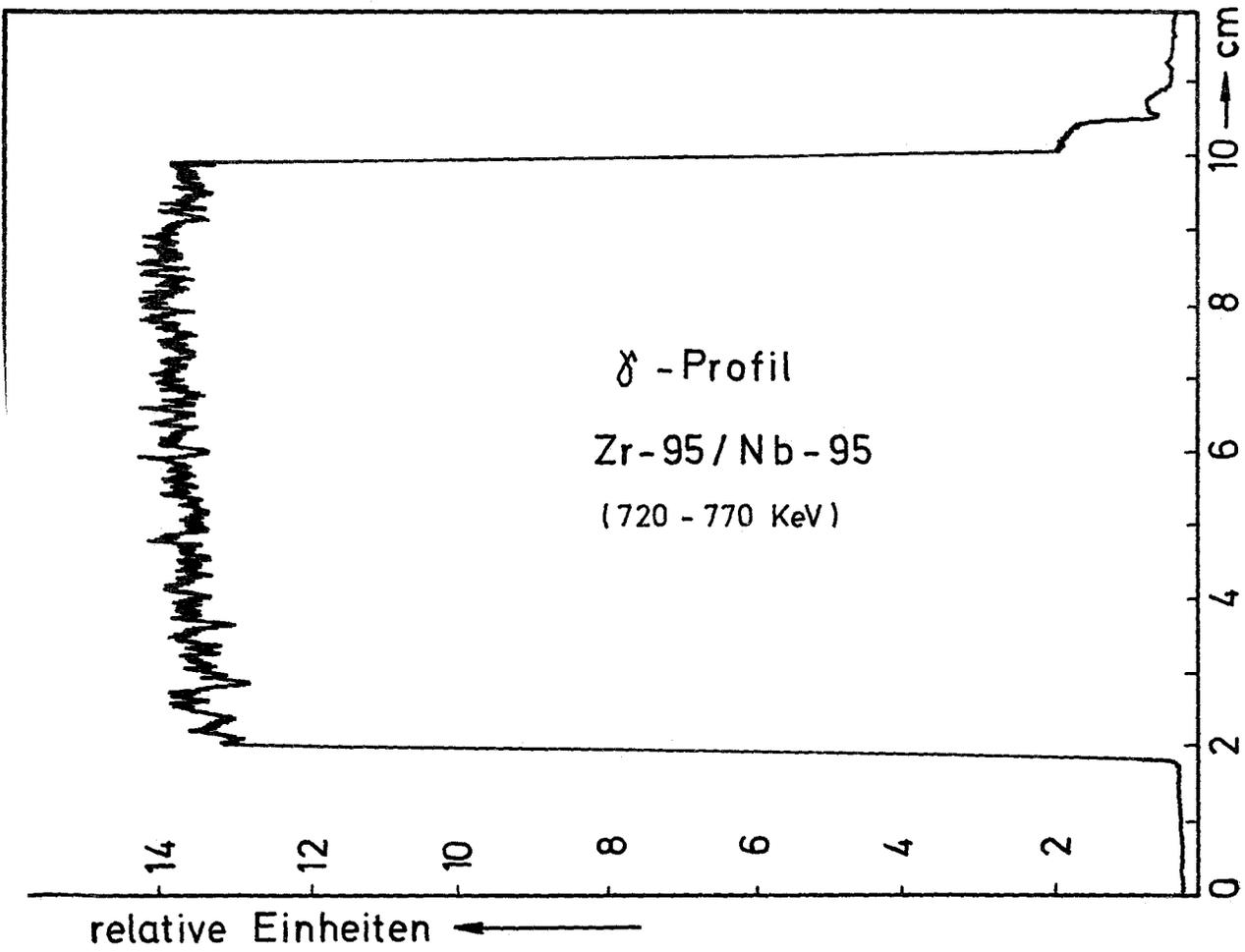
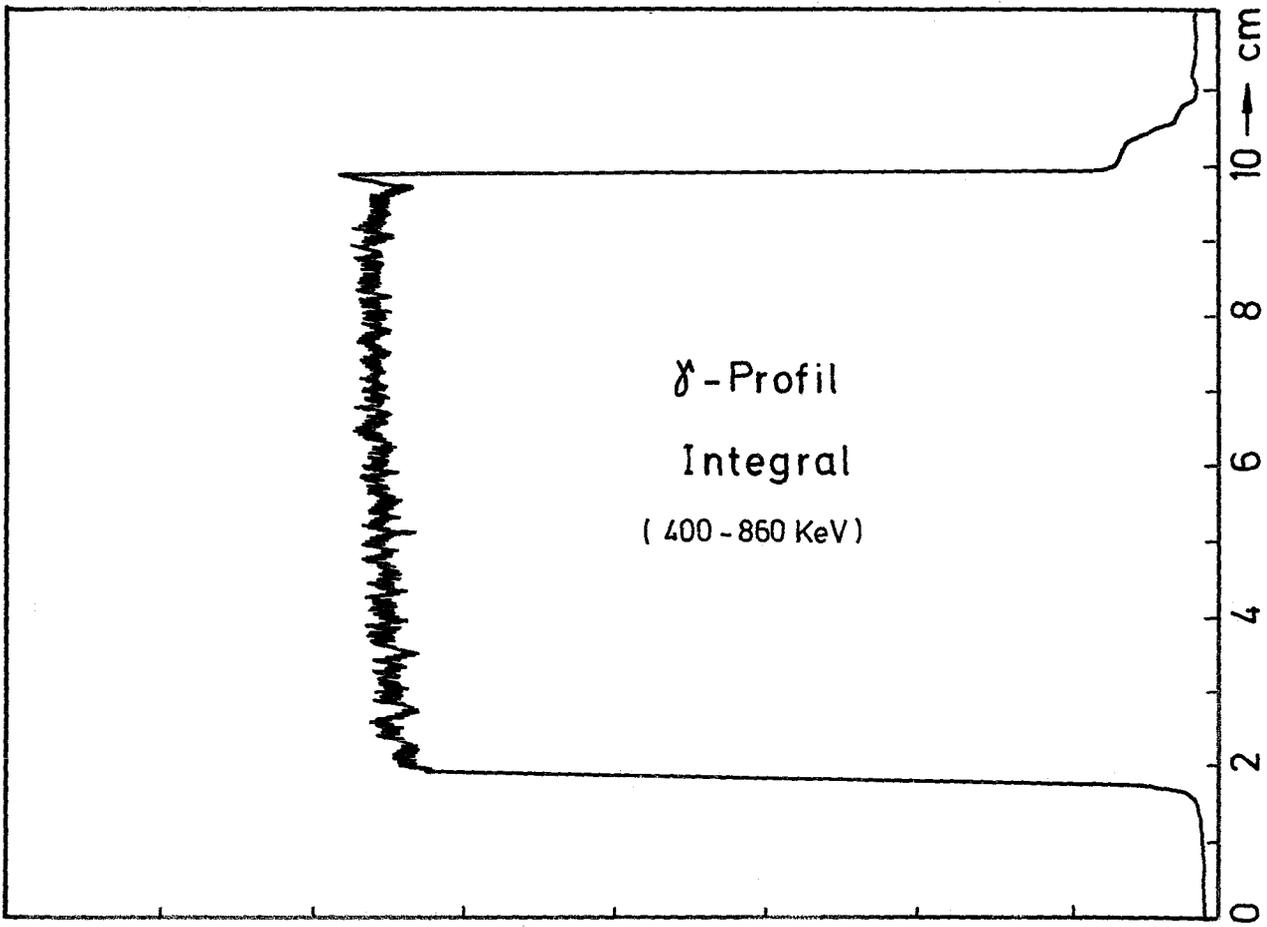


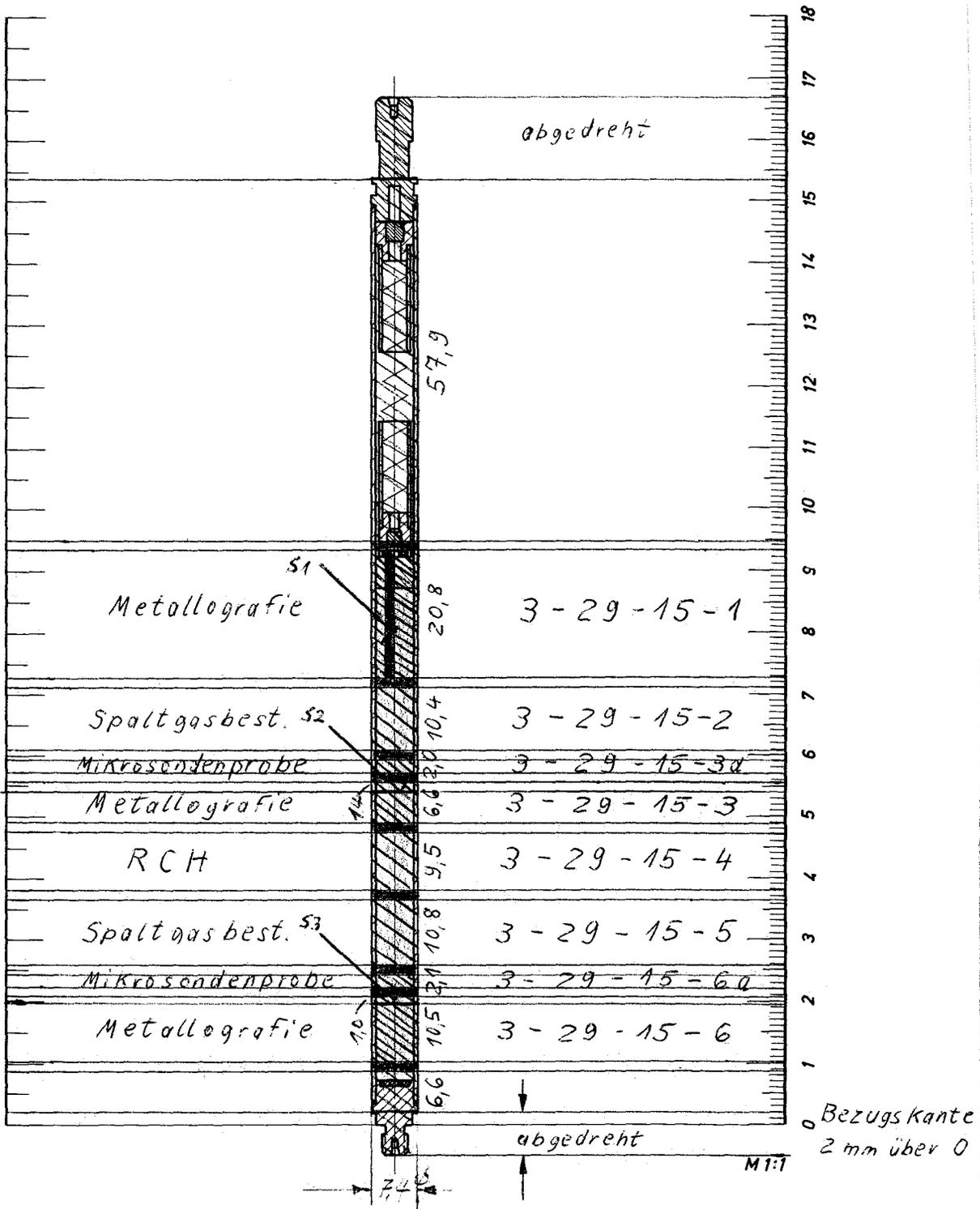
1mm

1mm



1
1mm





Prüfling AG

Brennstoff :

Form : Tabl. geschliffen
Zusammensetzung : UO_2
Tablettendichte : 88 % th.D.

Hülle :

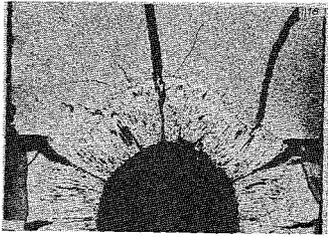
Material : X4CrNiNb 20 25
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

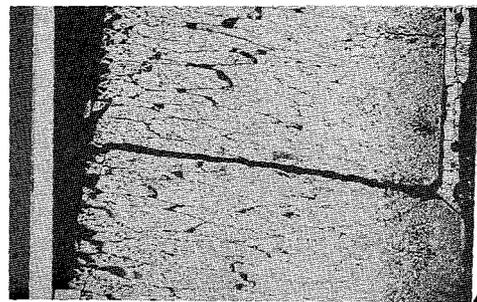
Länge des Prüflings : 167,1 mm
Länge der Brennstoffsäule : 90,0 mm
Radiale Spaltweite : 90,0 μm
Schmierdichte : -

Bestrahlung :

Einrichtung : FR 2/KVE 29
Dauer : 133 Vollasttage
Ende : 8.4.68
Rechn. Abbrand : 24 960 Mwd/t
Stableistung max./mittl. : 610/490 W/cm

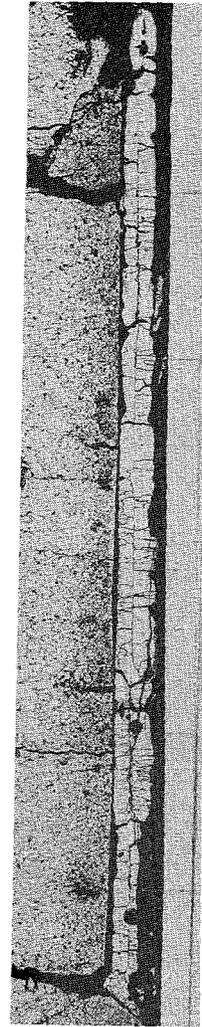


1mm



1mm

A2

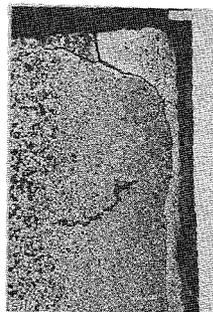


A1

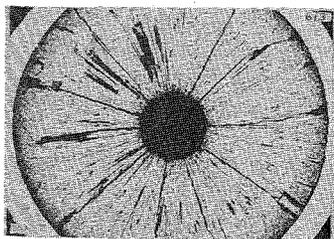
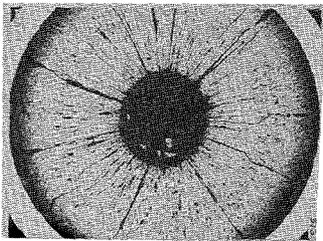


A3

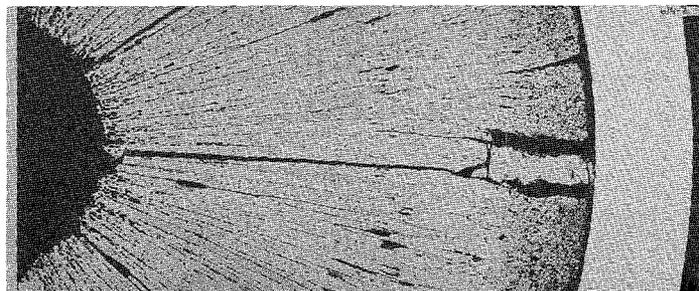
100μm



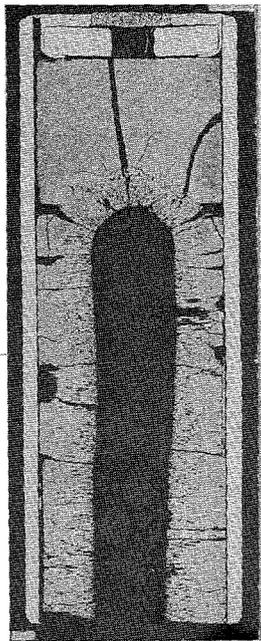
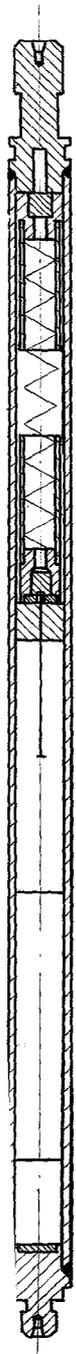
100μm



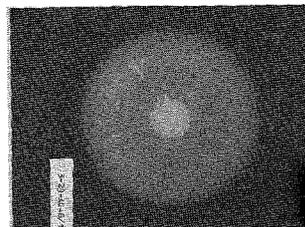
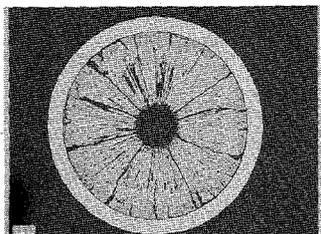
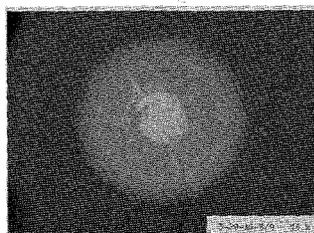
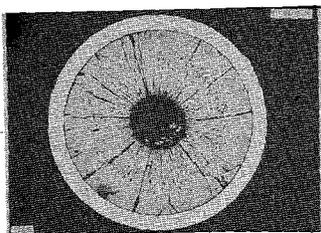
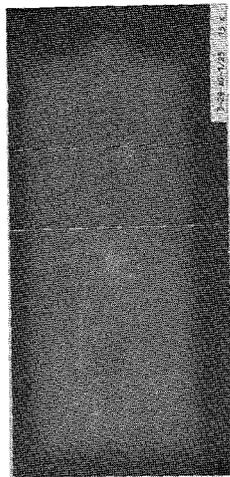
1mm



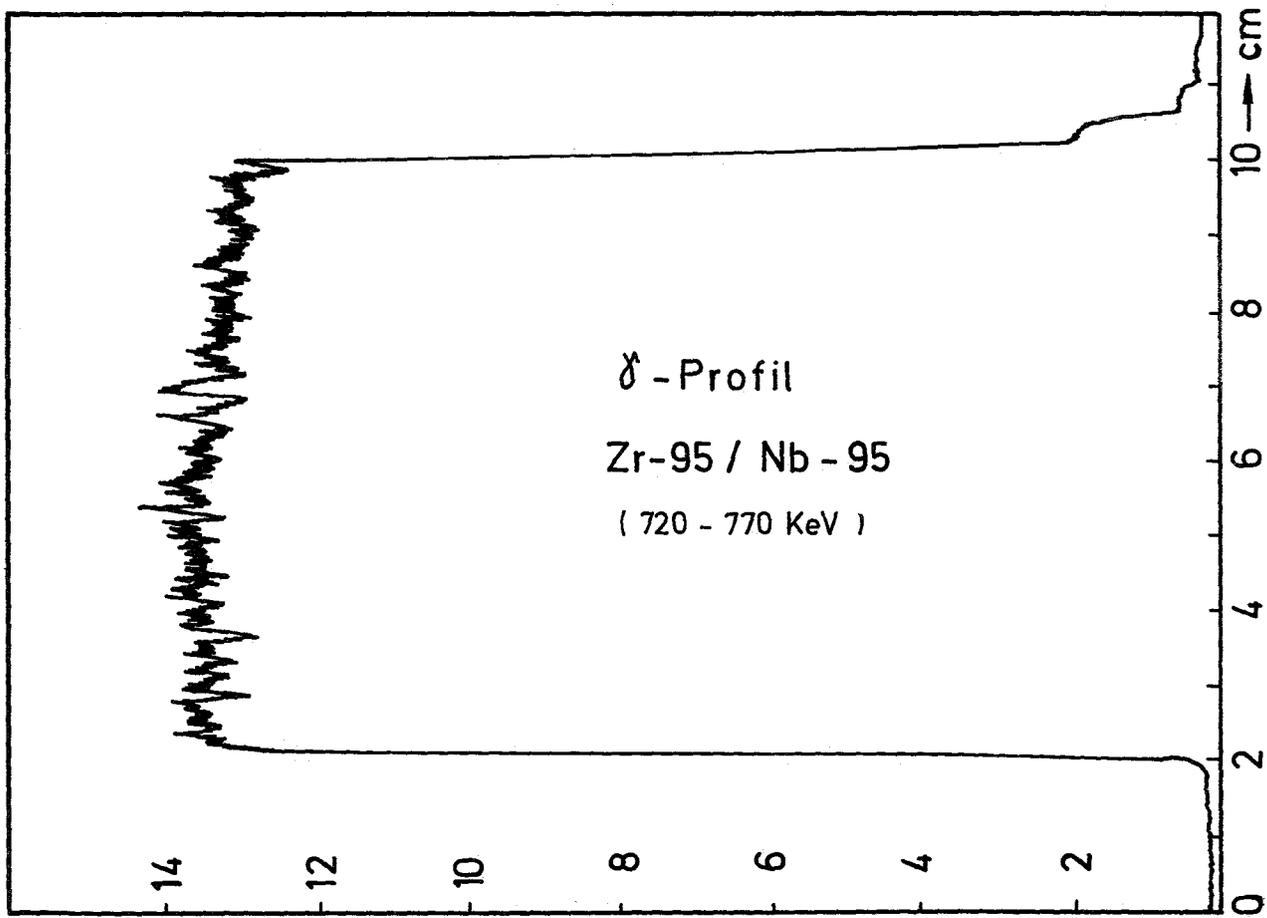
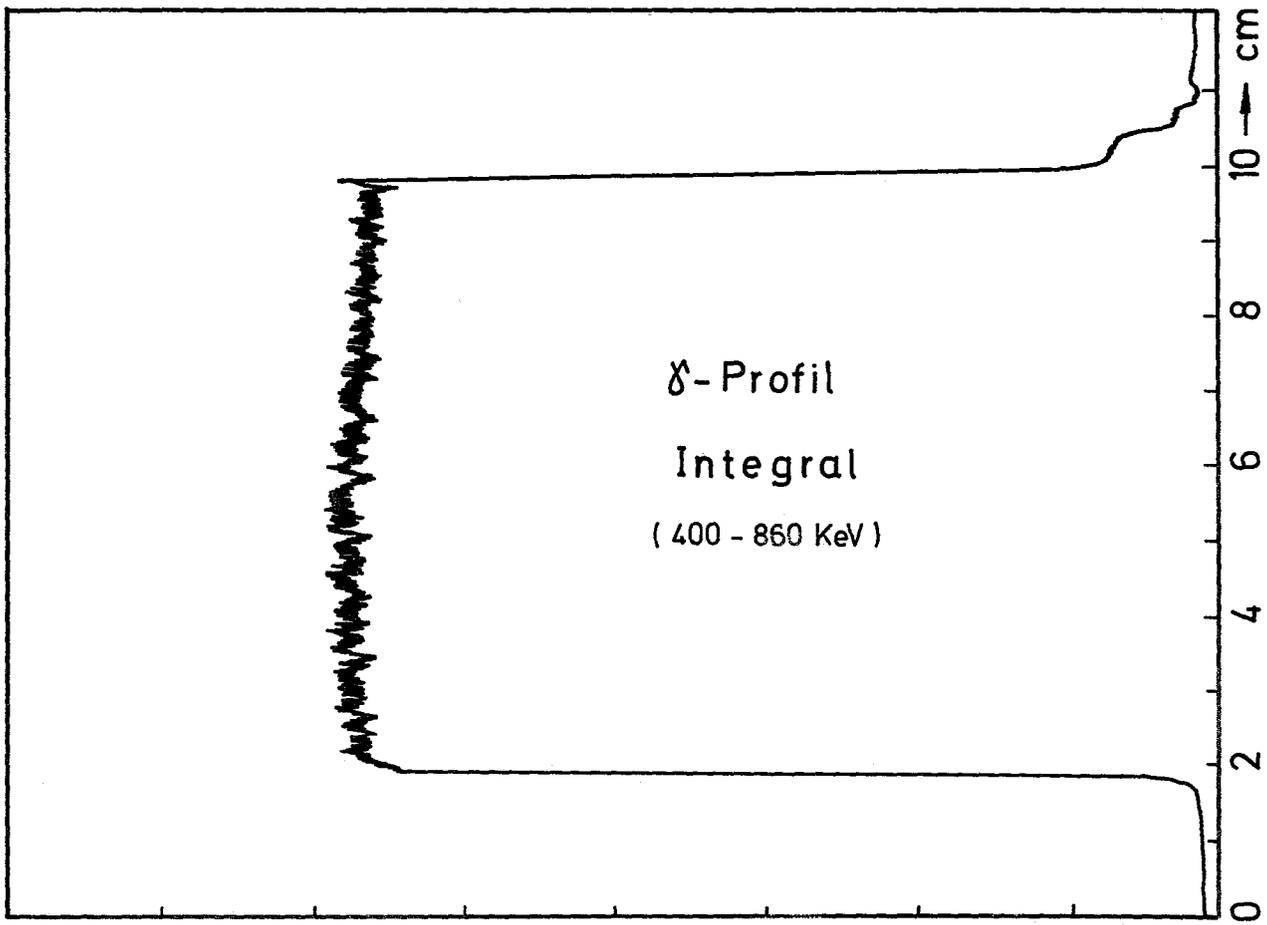
1mm

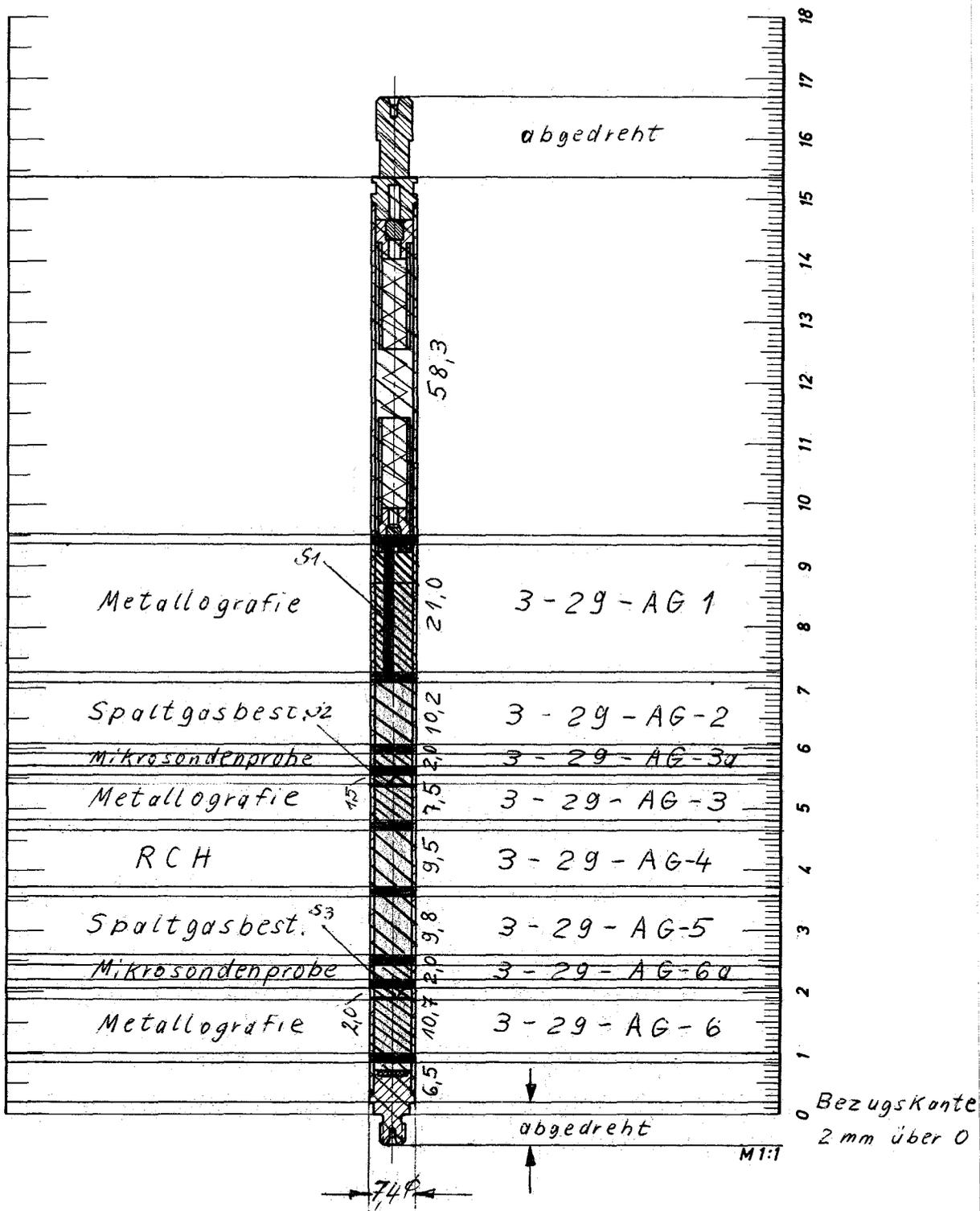


A_{1.2.3}



1
1mm





Prüfling CG

Brennstoff :

Form	:	Tabl. geschliffen
Zusammensetzung	:	UO ₂
Tablettendichte	:	93 % th.D.

Hülle :

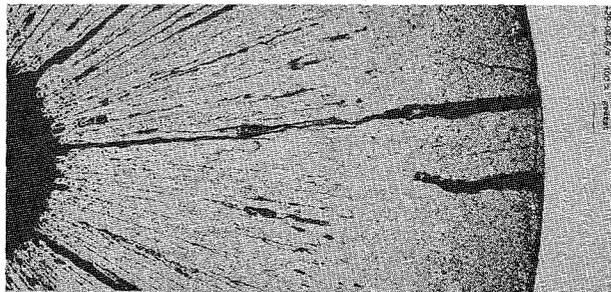
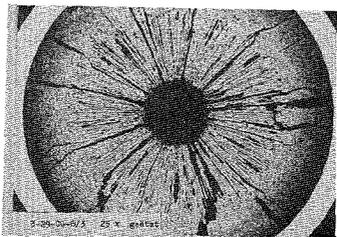
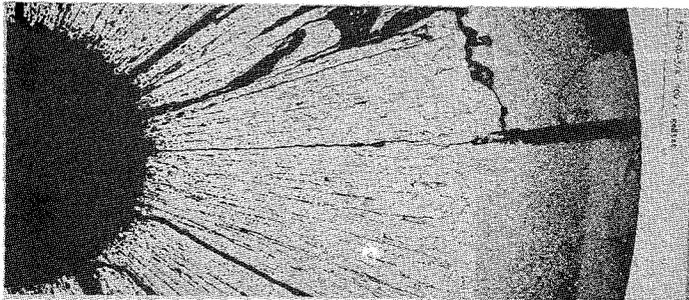
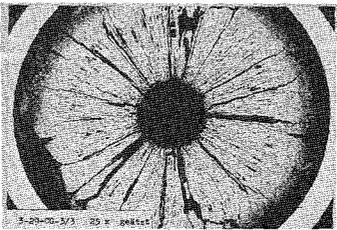
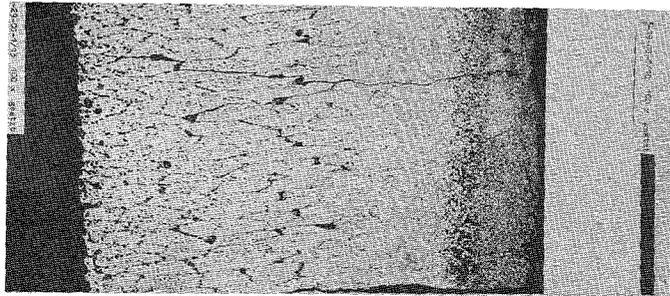
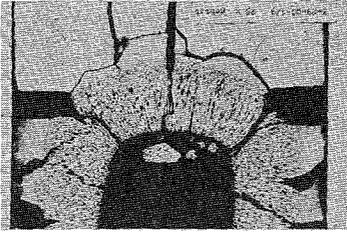
Material	:	X4CrNiNb 20 25
Aussendurchmesser	:	7,4 mm
Wandstärke	:	0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings	:	167,1 mm
Länge der Brennstoffsäule	:	80,4 mm
Radiale Spaltweite	:	88,0 µm
Schmierdichte	:	-

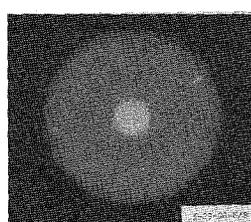
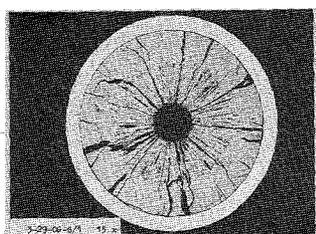
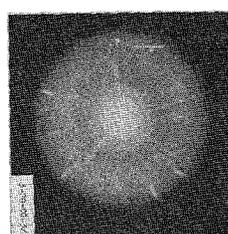
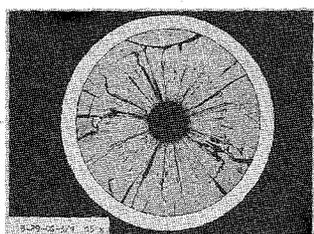
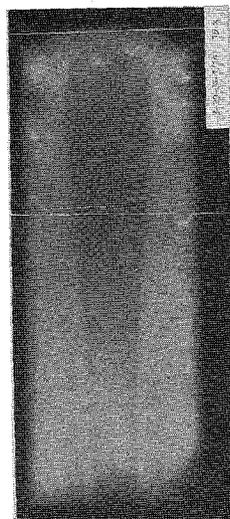
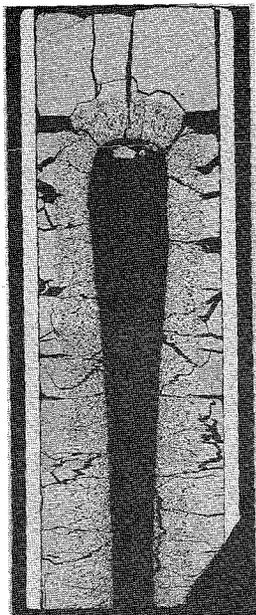
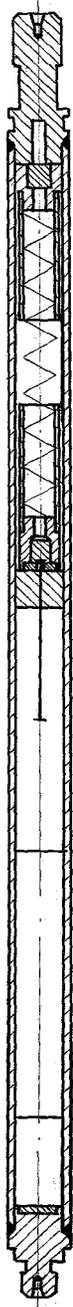
Bestrahlung :

Einrichtung	:	FR 2/KVE 29
Dauer	:	133 Vollasttage
Ende	:	8.4.68
Rechn. Abbrand	:	24 930 Mwd/t
Stableistung max./mittl.	:	688/516 W/cm

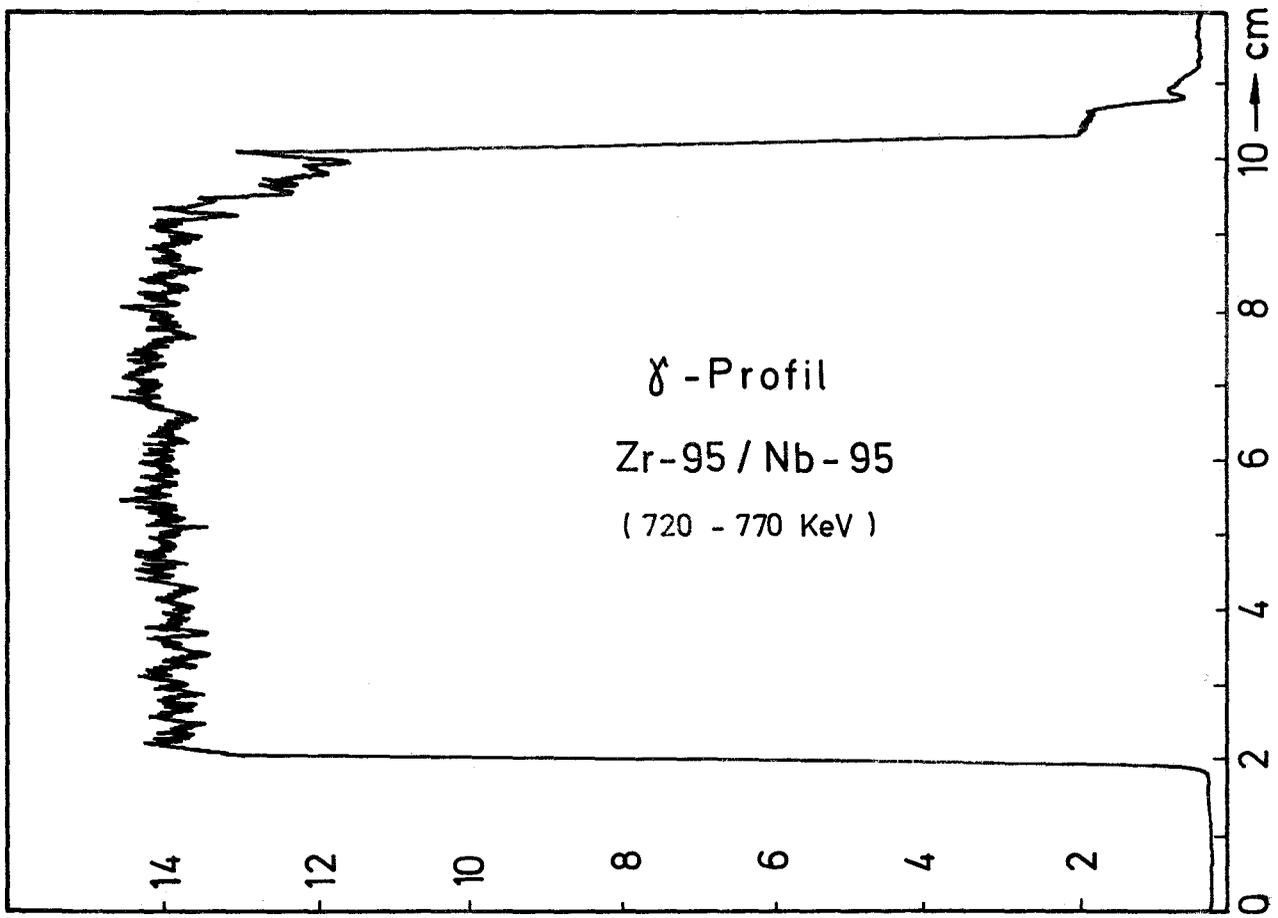
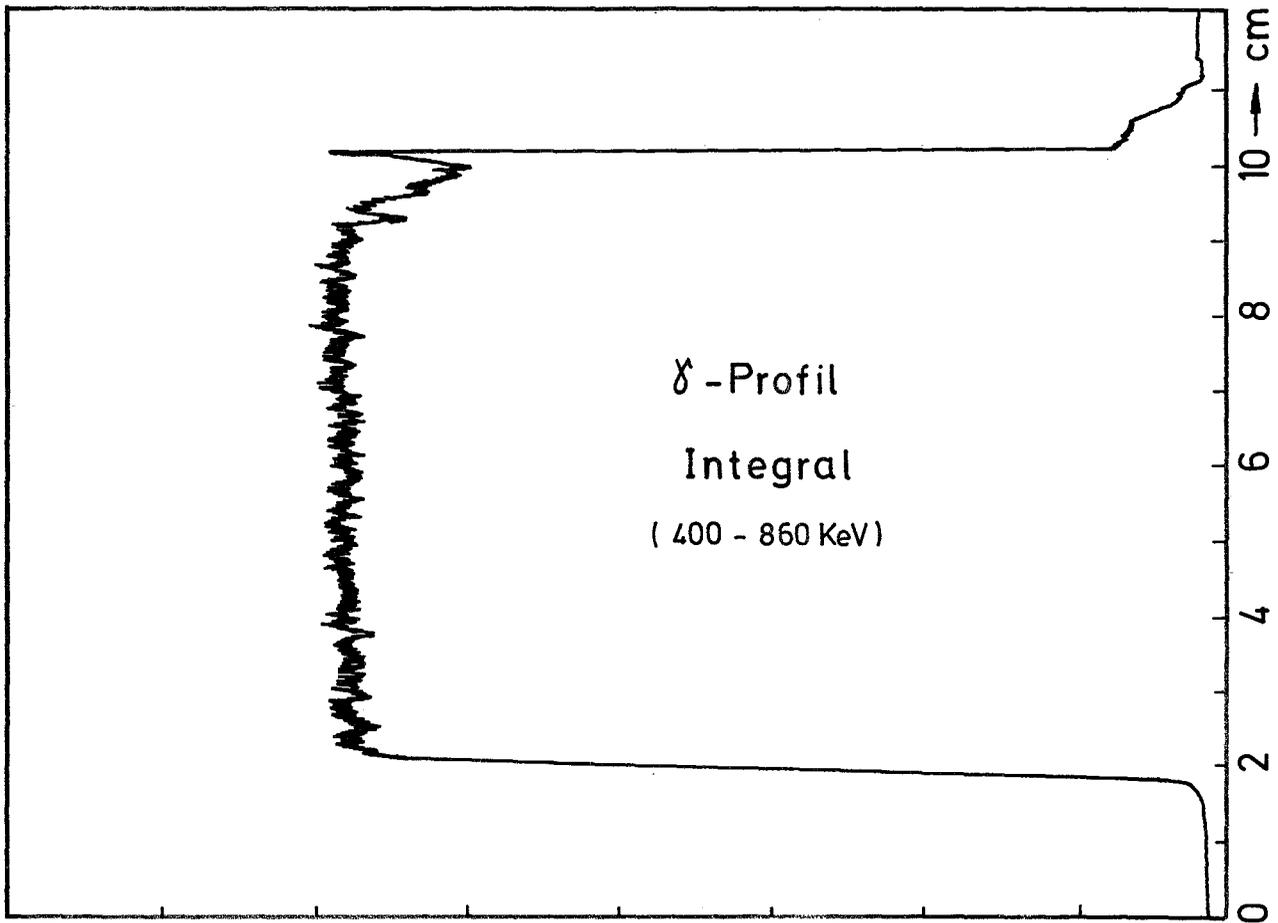


1mm

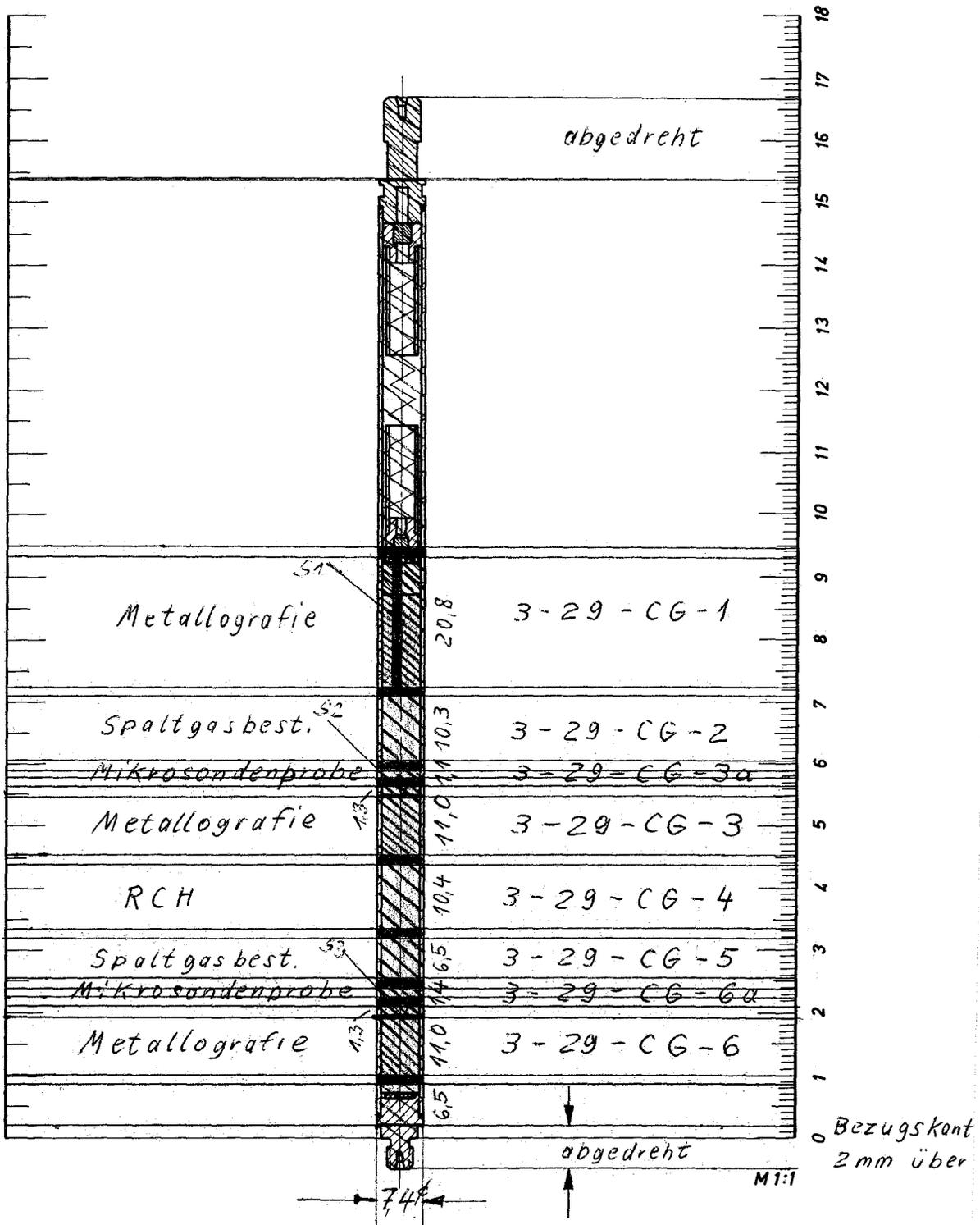
1mm



1
1mm



relative Einheiten \uparrow



Prüfling DU

Brennstoff :

Form : Tabl. ungeschliffen

Zusammensetzung : UO_2

Tablettendichte : 93 % th.D.

Hülle :

Material : X4CrNiNb 20 25

Aussendurchmesser : 7,4 mm

Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 167,1 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80,0 mm

Radiale Spaltweite : 90,0 μ m

Schmierdichte : -

Bestrahlung :

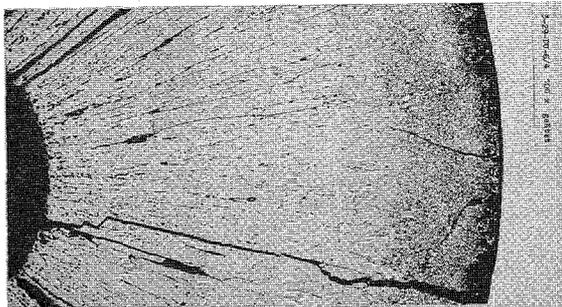
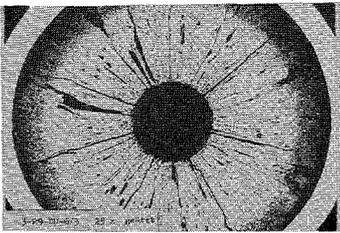
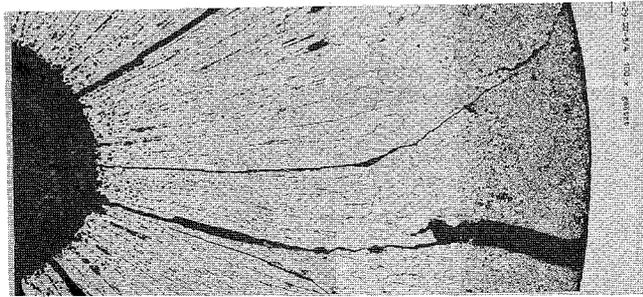
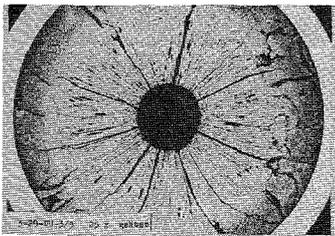
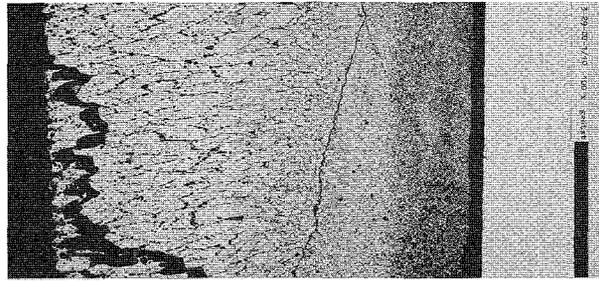
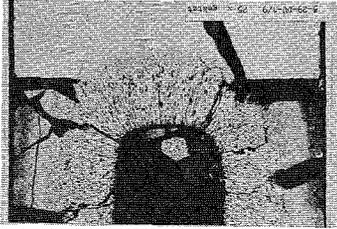
Einrichtung : FR 2/KVE 29

Dauer : 133 Vollasttage

Ende : 8.4.68

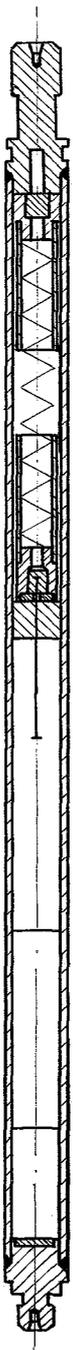
Rechn. Abbrand : 25 440 MWd/t

Stableistung max./mittl.: 604/524 W/cm

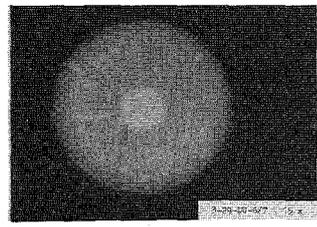
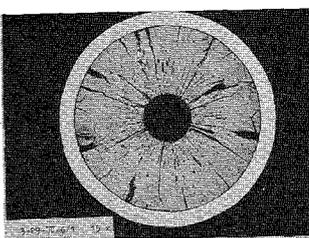
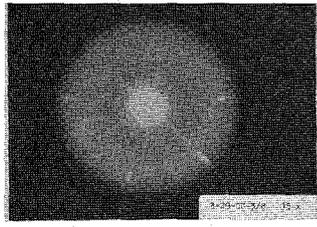
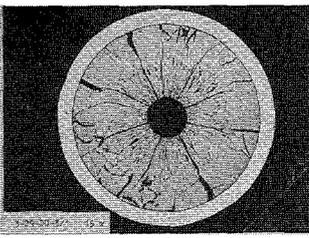
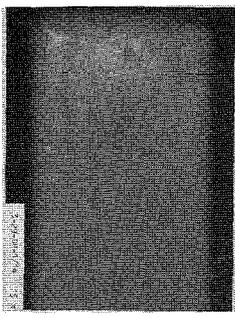
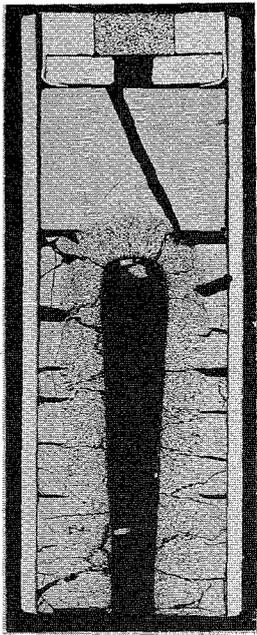


1mm

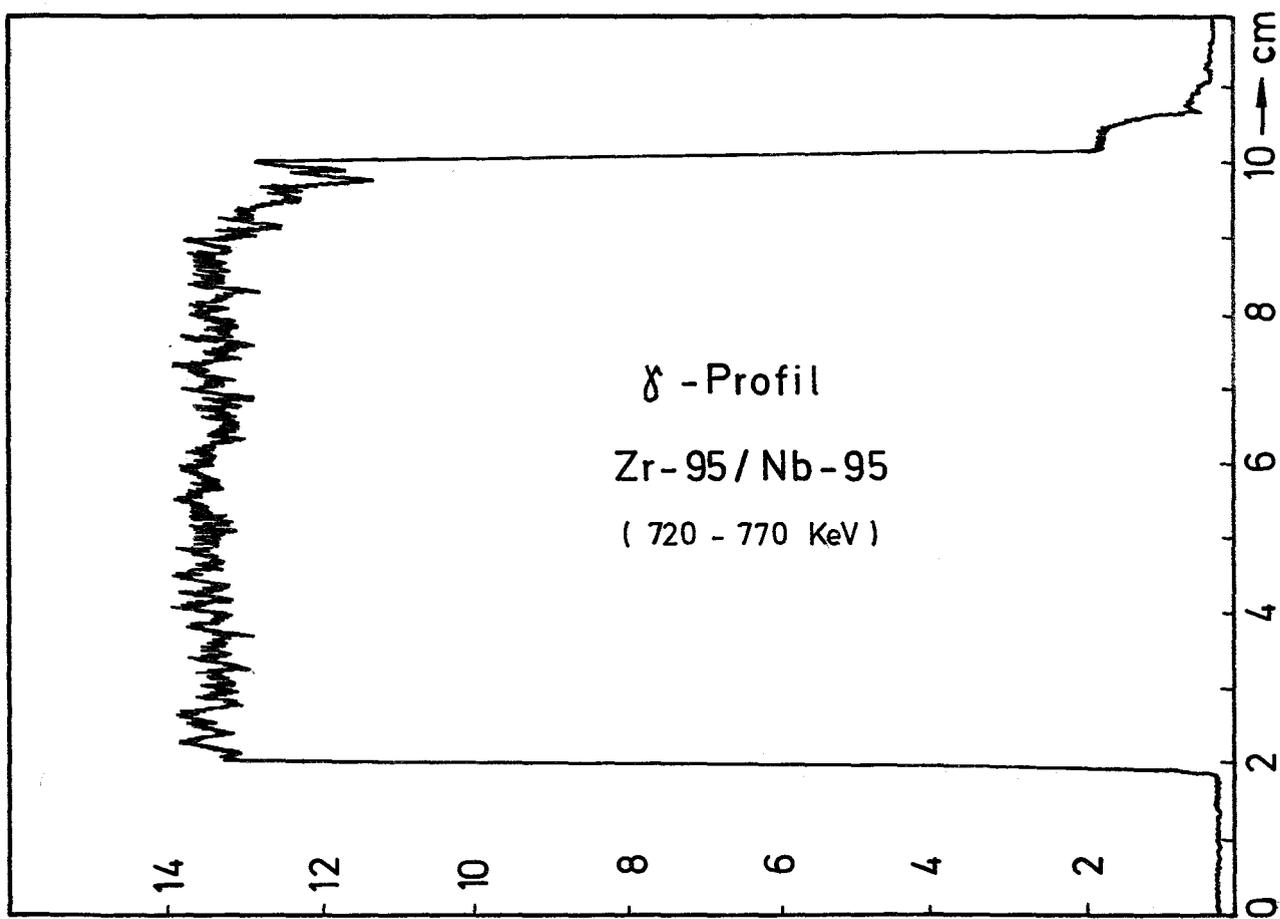
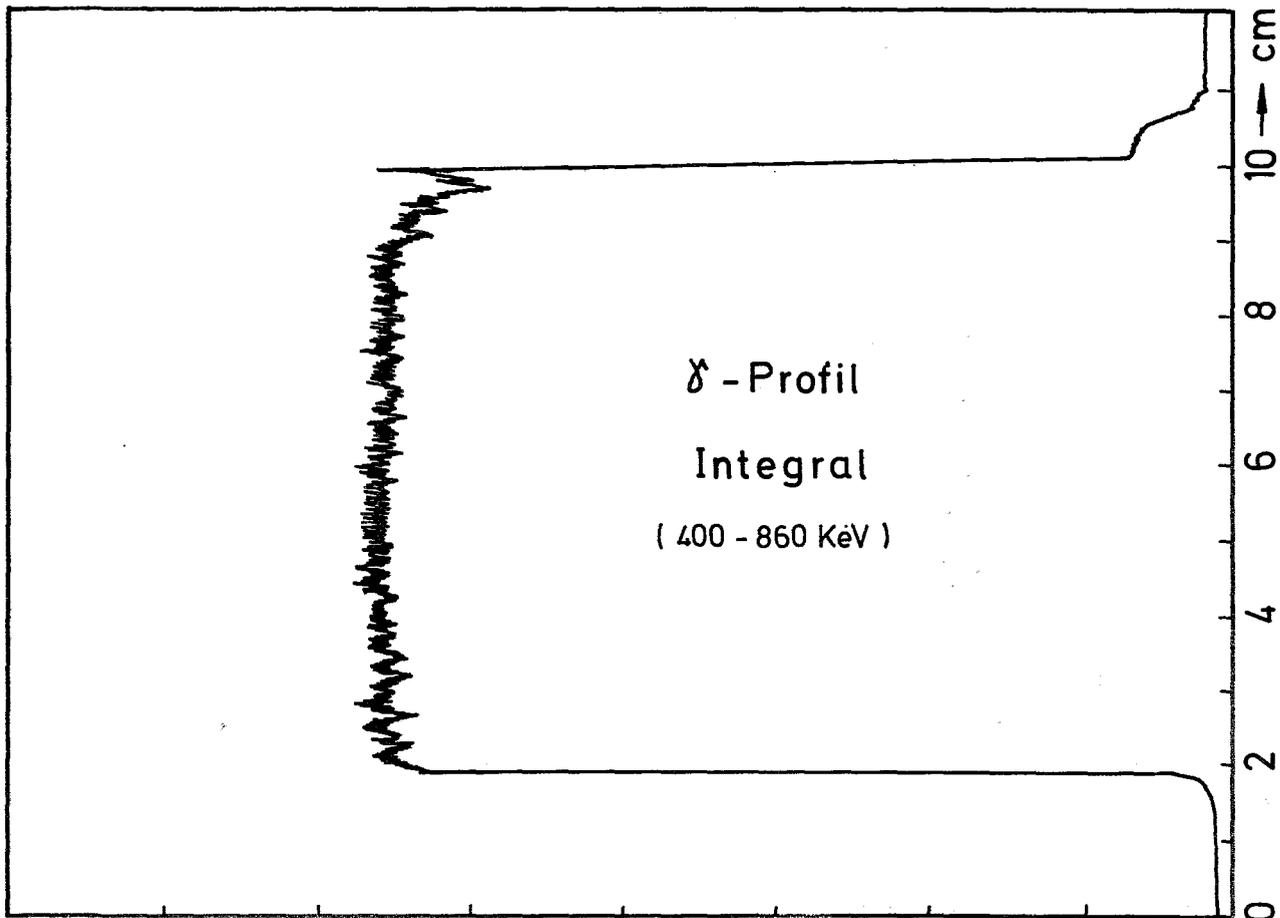
1mm



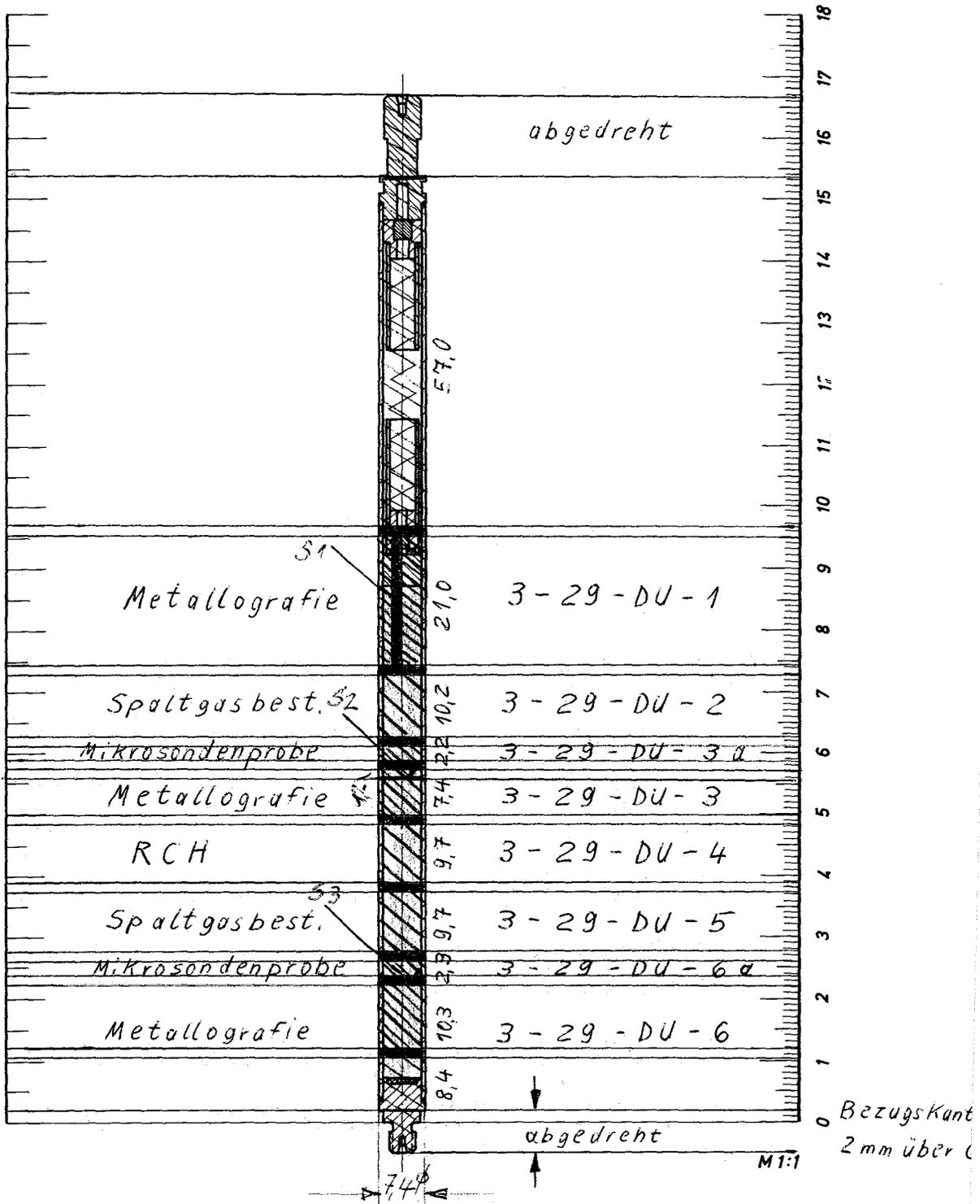
A



1
1mm



relative Einheiten \uparrow



Prüfling 33

Brennstoff :

Form : Pulver gesintert
Zusammensetzung : UO_2
Tablettendichte : -

Hülle :

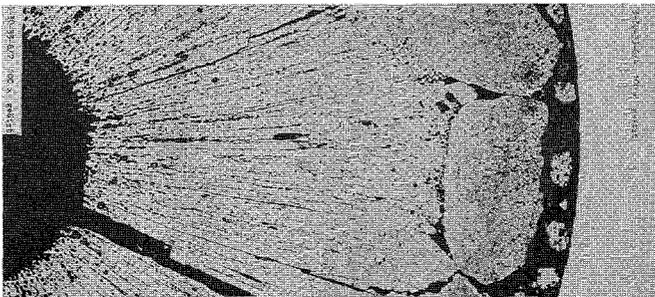
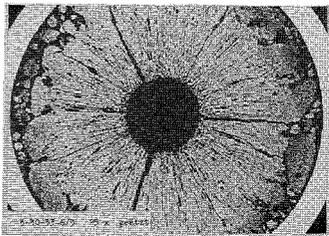
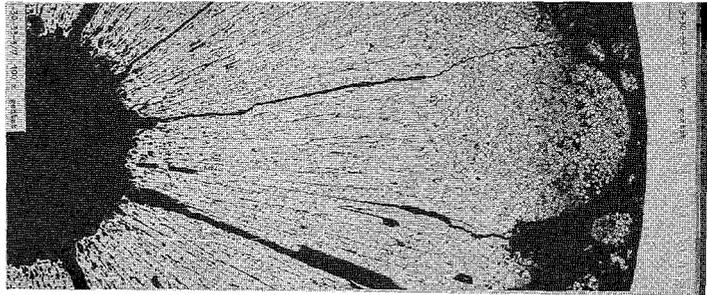
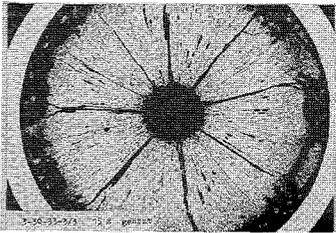
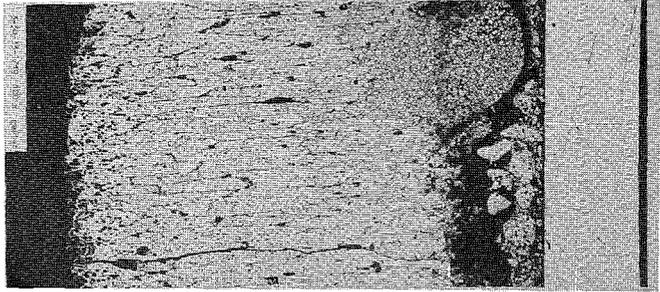
Material : X4CrNiNb 20 25
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 167,2 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80,0 mm
Radiale Spaltweite : -
Schmierdichte : 85,63 % th.D.

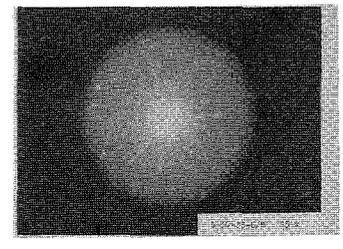
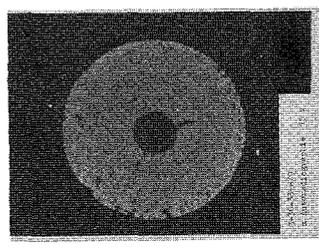
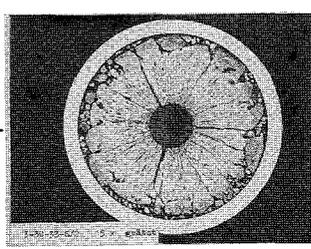
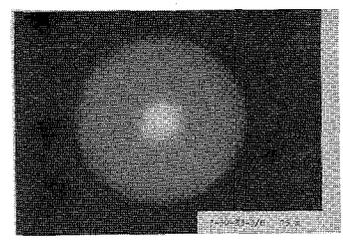
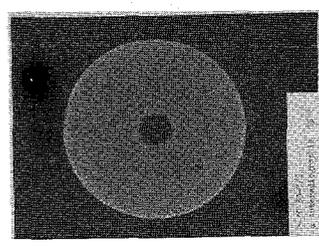
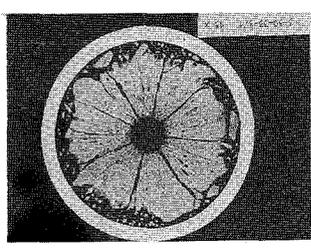
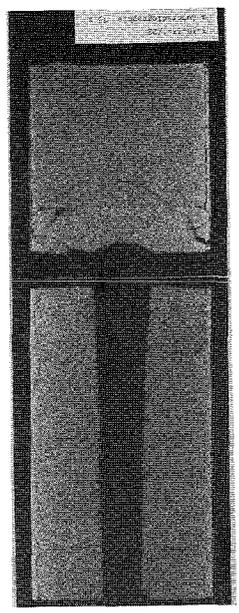
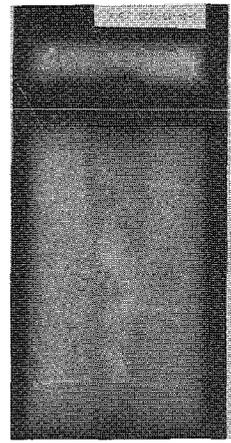
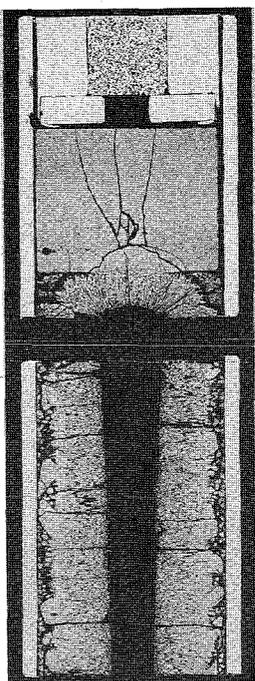
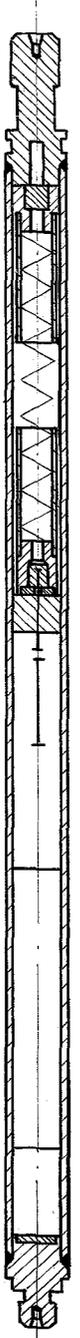
Bestrahlung :

Einrichtung : FR 2/KVE 30
Dauer : 223 Vollasttage
Ende : 22.7.68
Rechn. Abbrand : 35 410 MWd/t
Stableistung max./mittl.: 585/420 W/cm

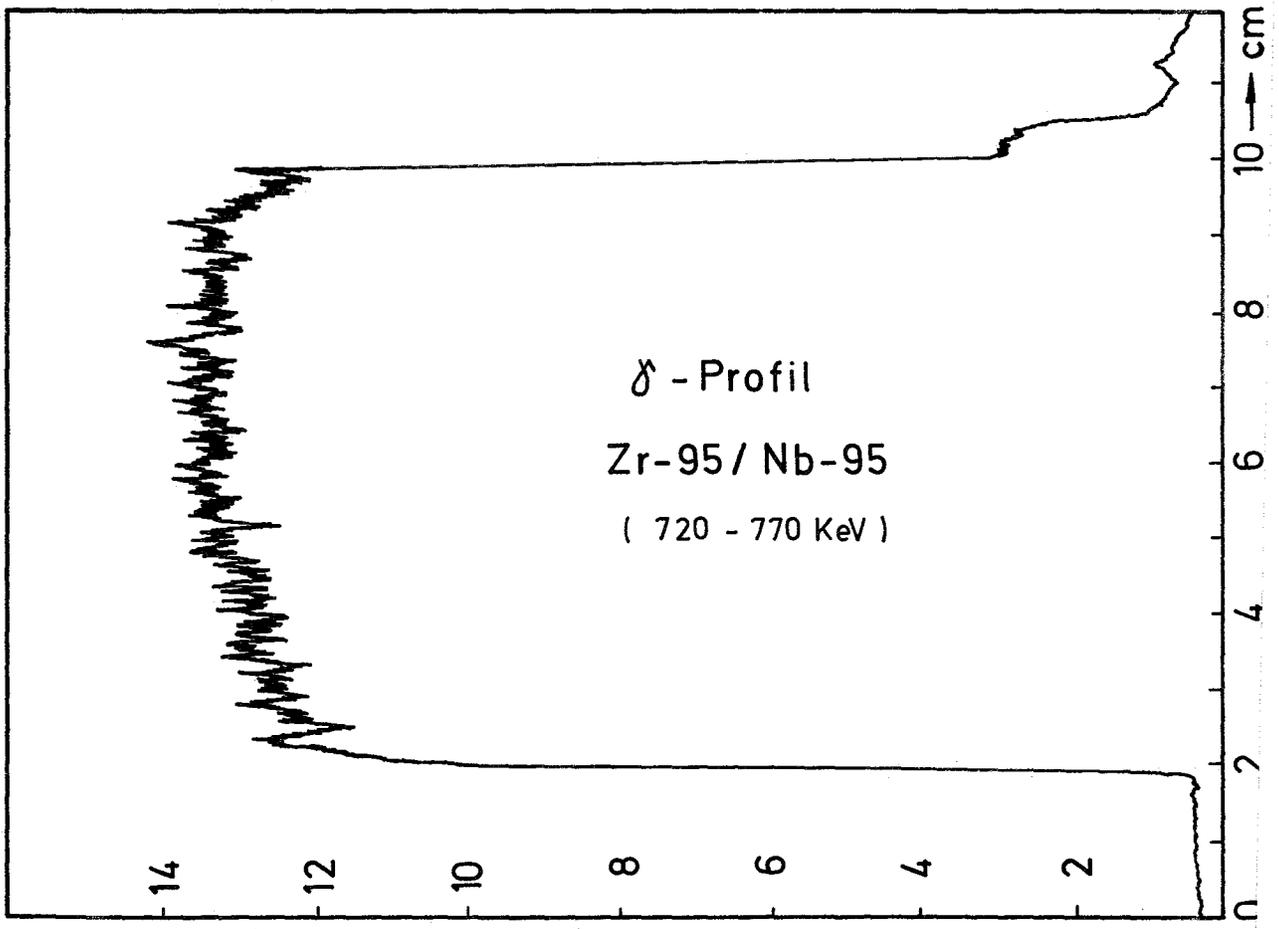
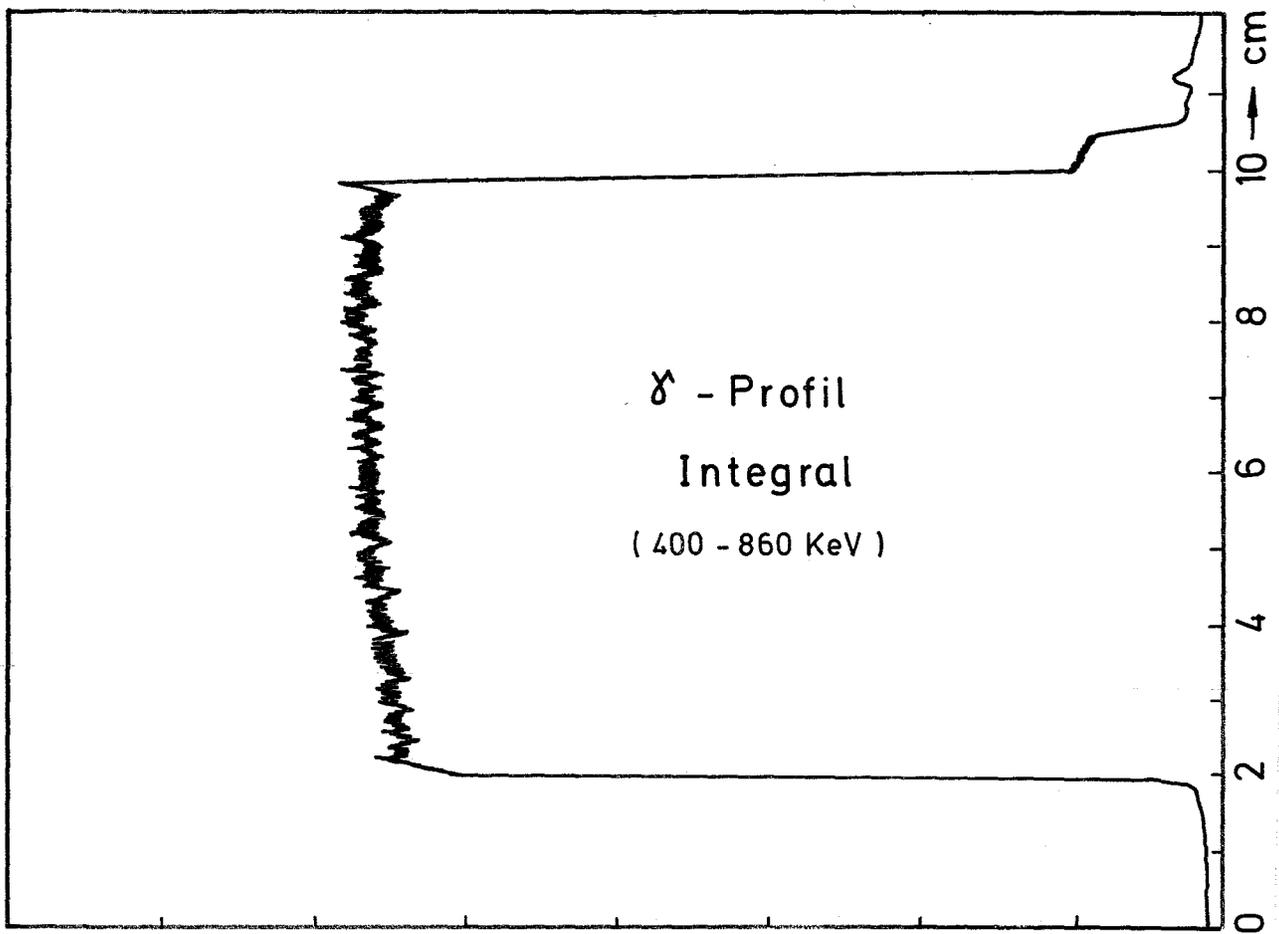


1mm

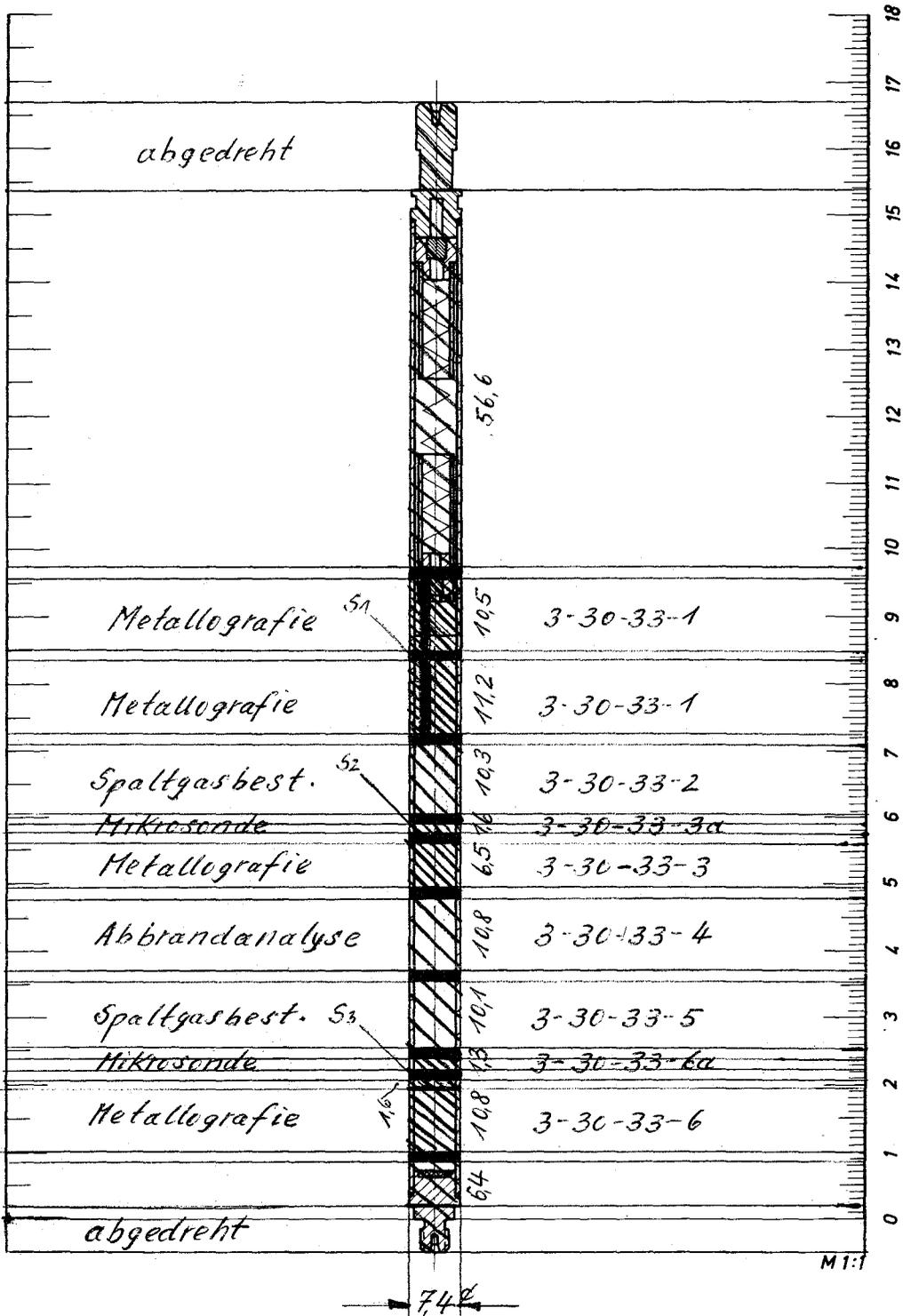
1mm



1mm



relative Einheiten \leftarrow



Prüfling 34

Brennstoff :

Form : Pulver geschmolzen
Zusammensetzung : UO_2
Tablettendichte : -

Hülle :

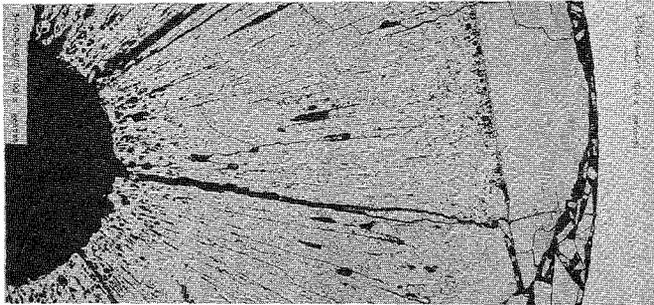
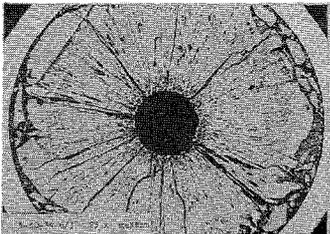
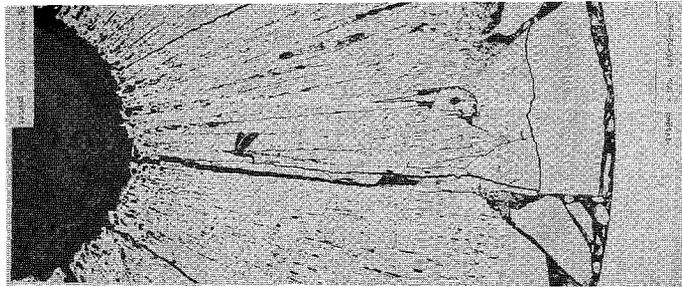
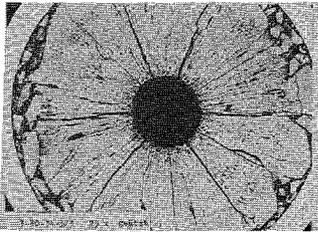
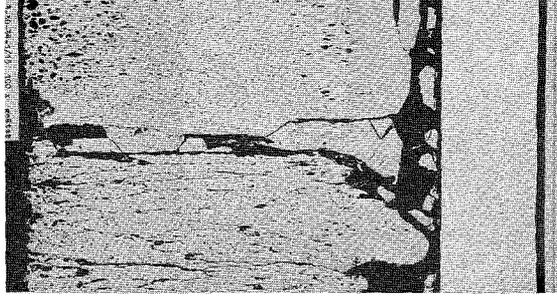
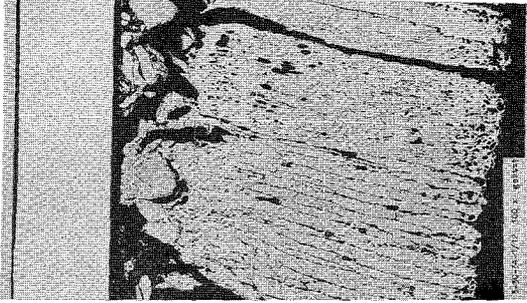
Material : X4CrNiNb 20 25
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,4 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 167,2 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80,1 mm
Radiale Spaltweite : -
Schmierdichte : 83,4 % th.D.

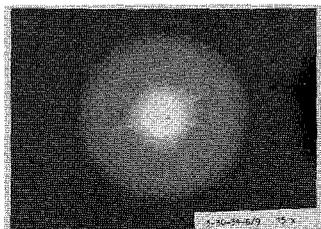
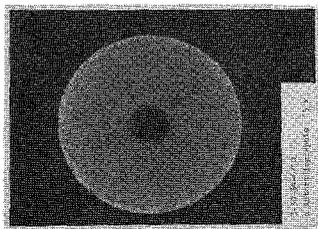
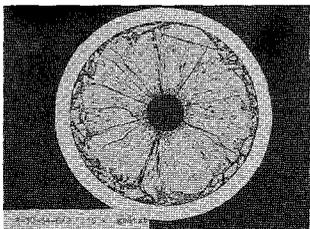
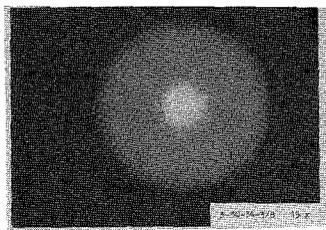
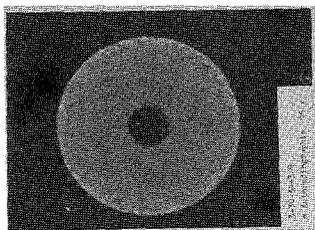
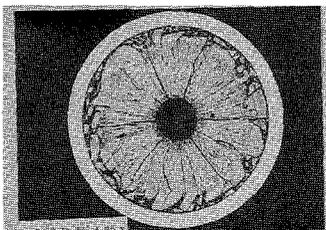
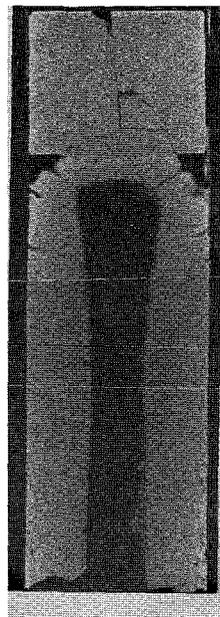
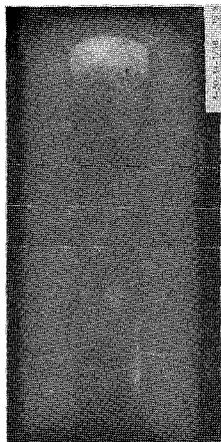
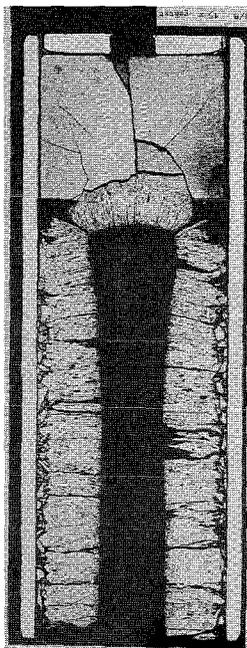
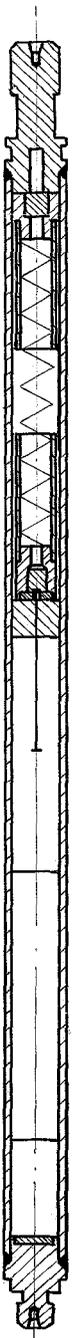
Bestrahlung :

Einrichtung : FR 2/KVE 30
Dauer : 223 Vollasttage
Ende : 22.7.68
Rechn. Abbrand : 37 060 MWd/t
Stableistung max./mittl. : 549/430 W/cm

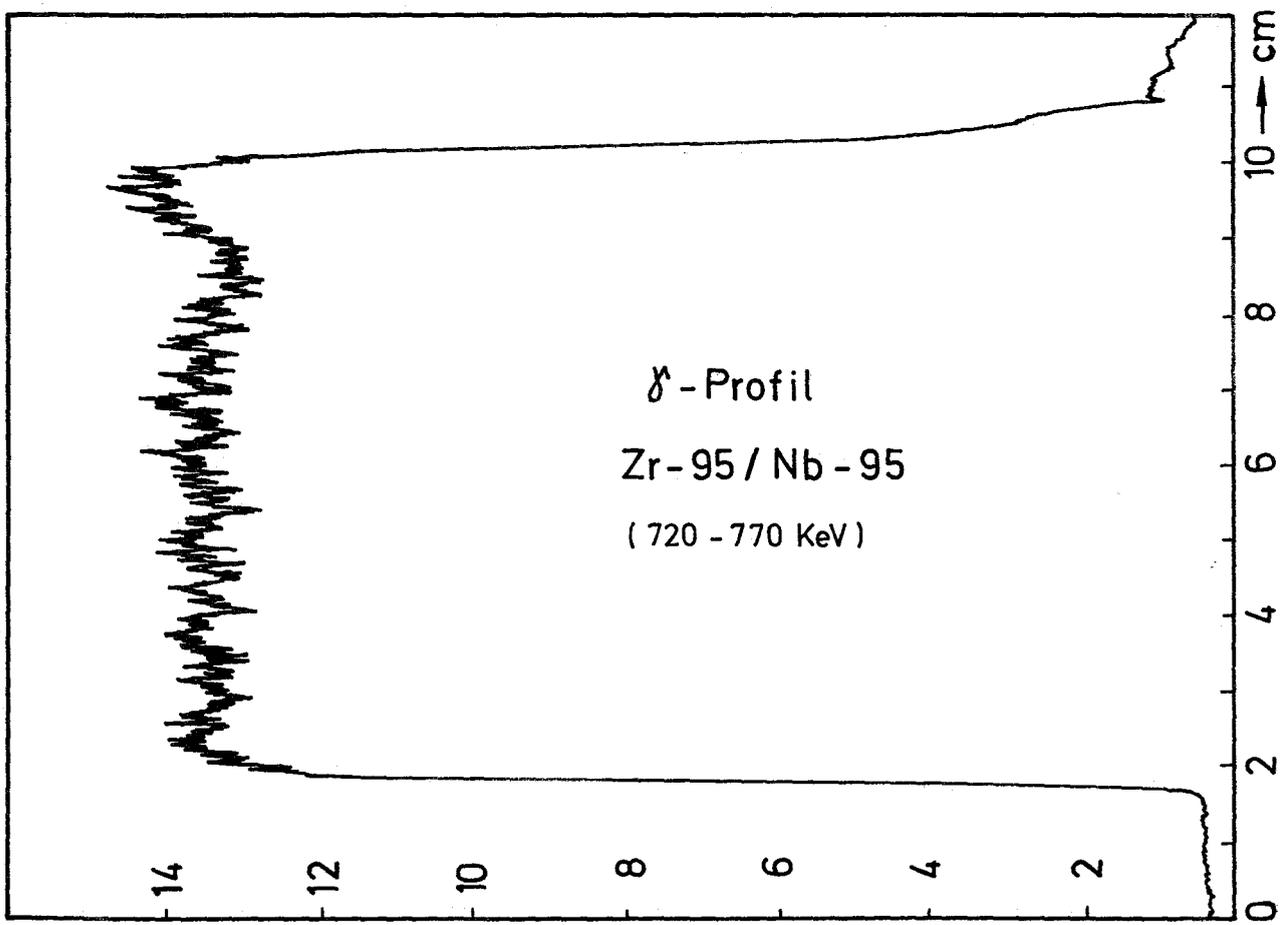
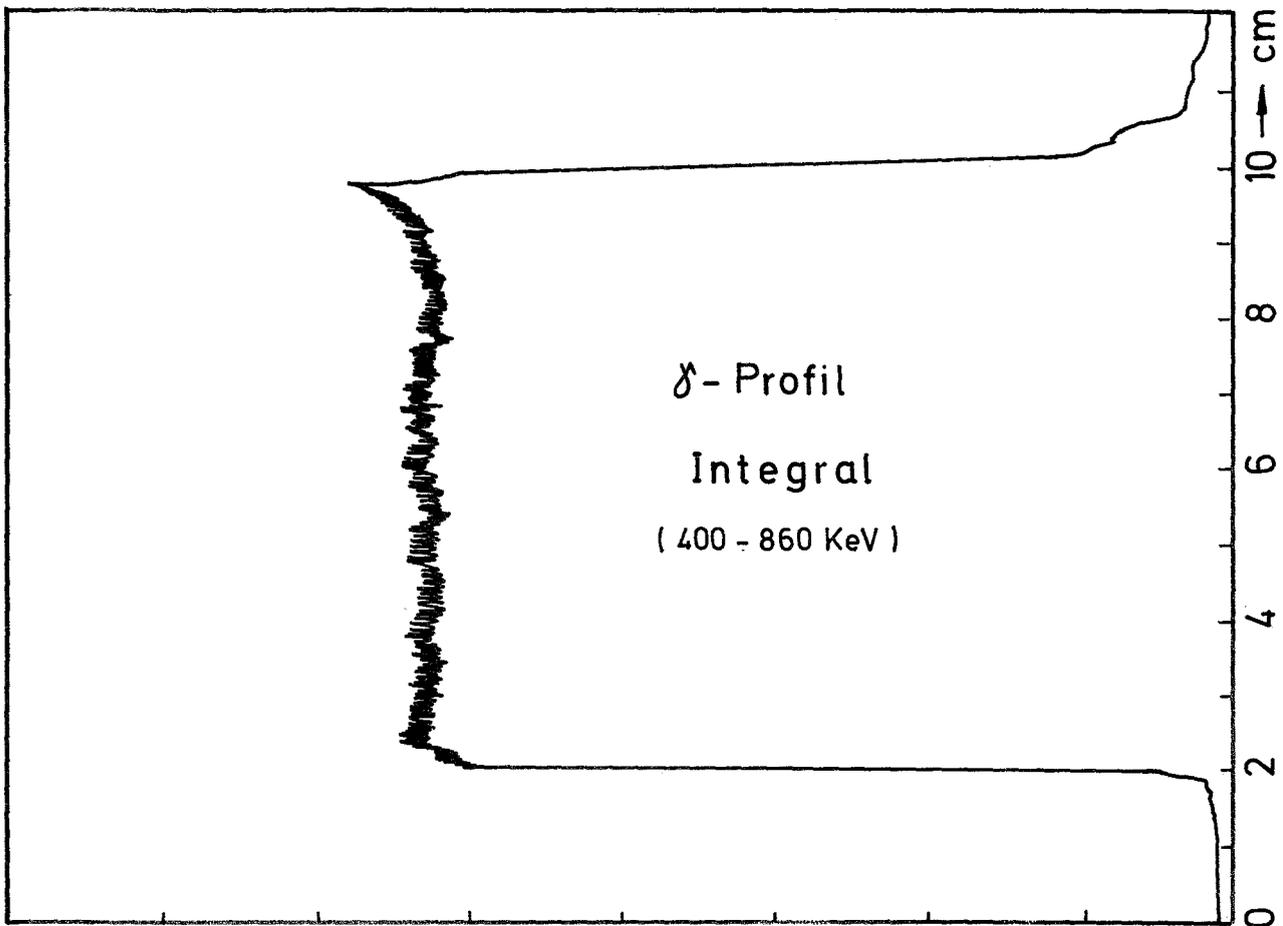


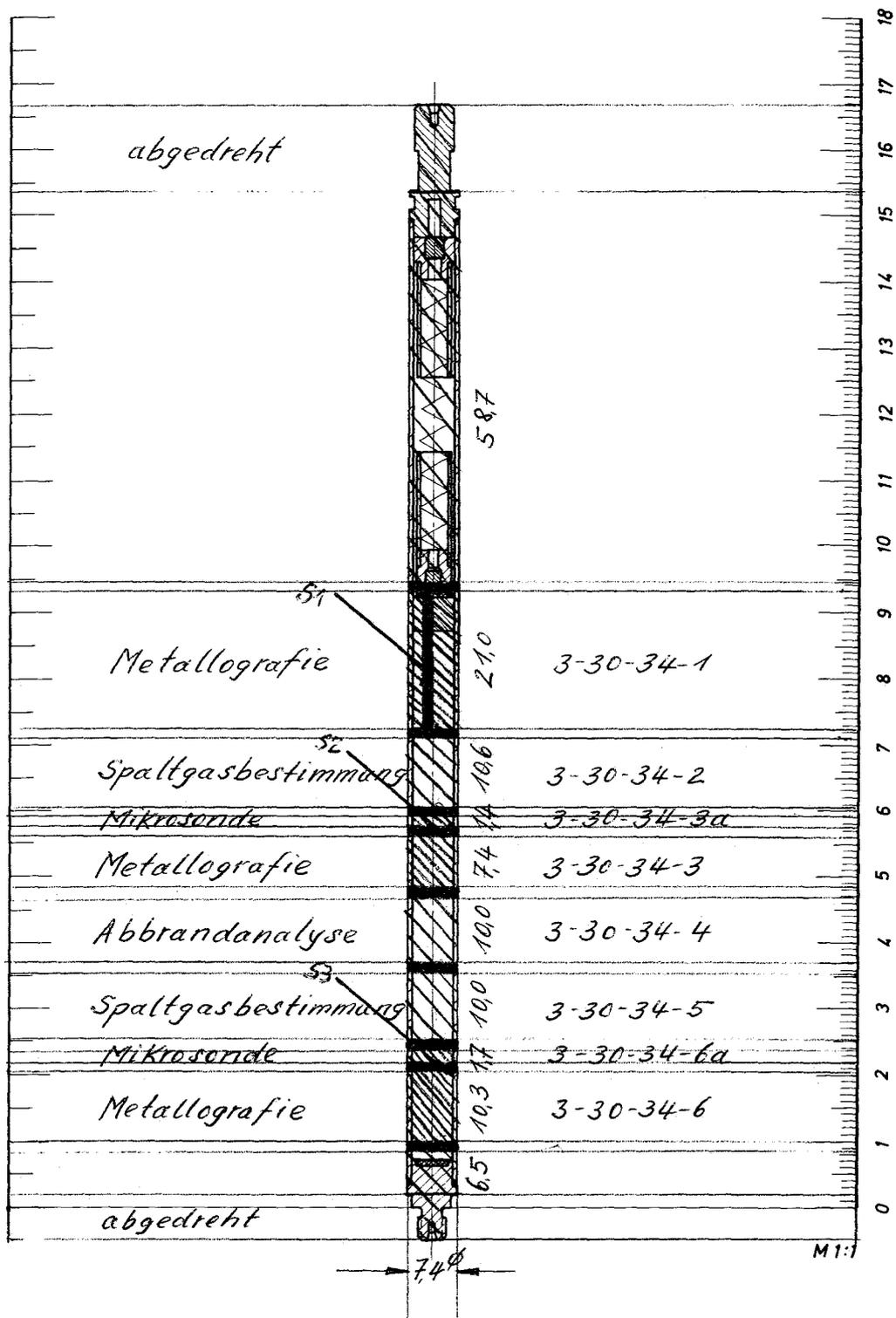
1mm

1mm



1
1mm





Prüfling 35

Brennstoff :

Form : Pulver gesintert
Zusammensetzung : UO_2
Tablettendichte : -

Hülle :

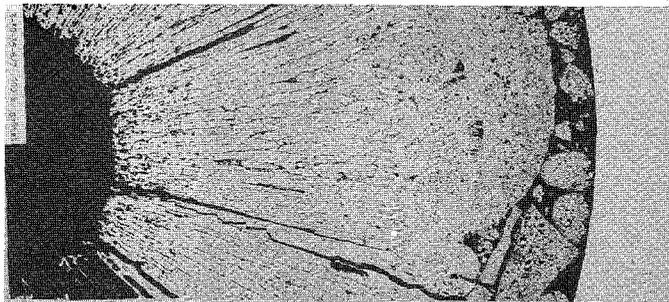
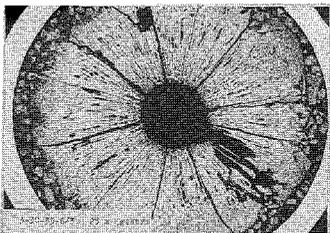
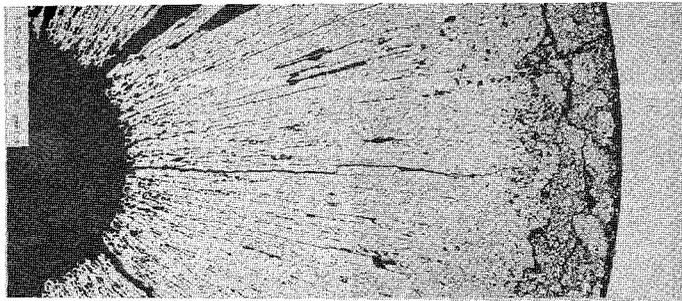
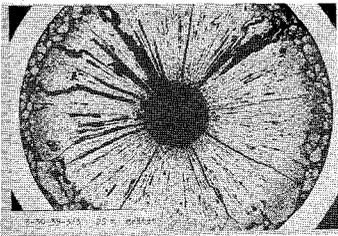
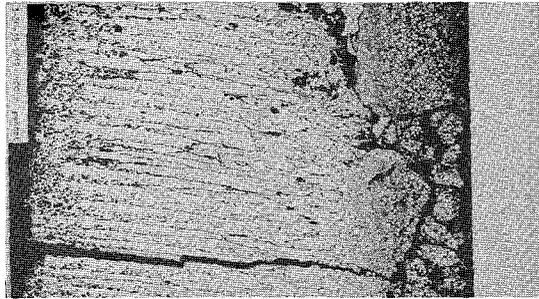
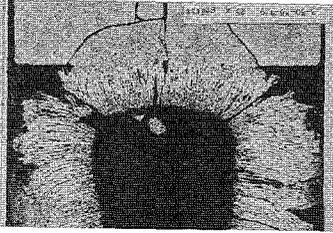
Material : X4CrNiNb 20 25
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 167,2 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80,3 mm
Radiale Spaltweite : -
Schmierdichte : 85,38 % th.D.

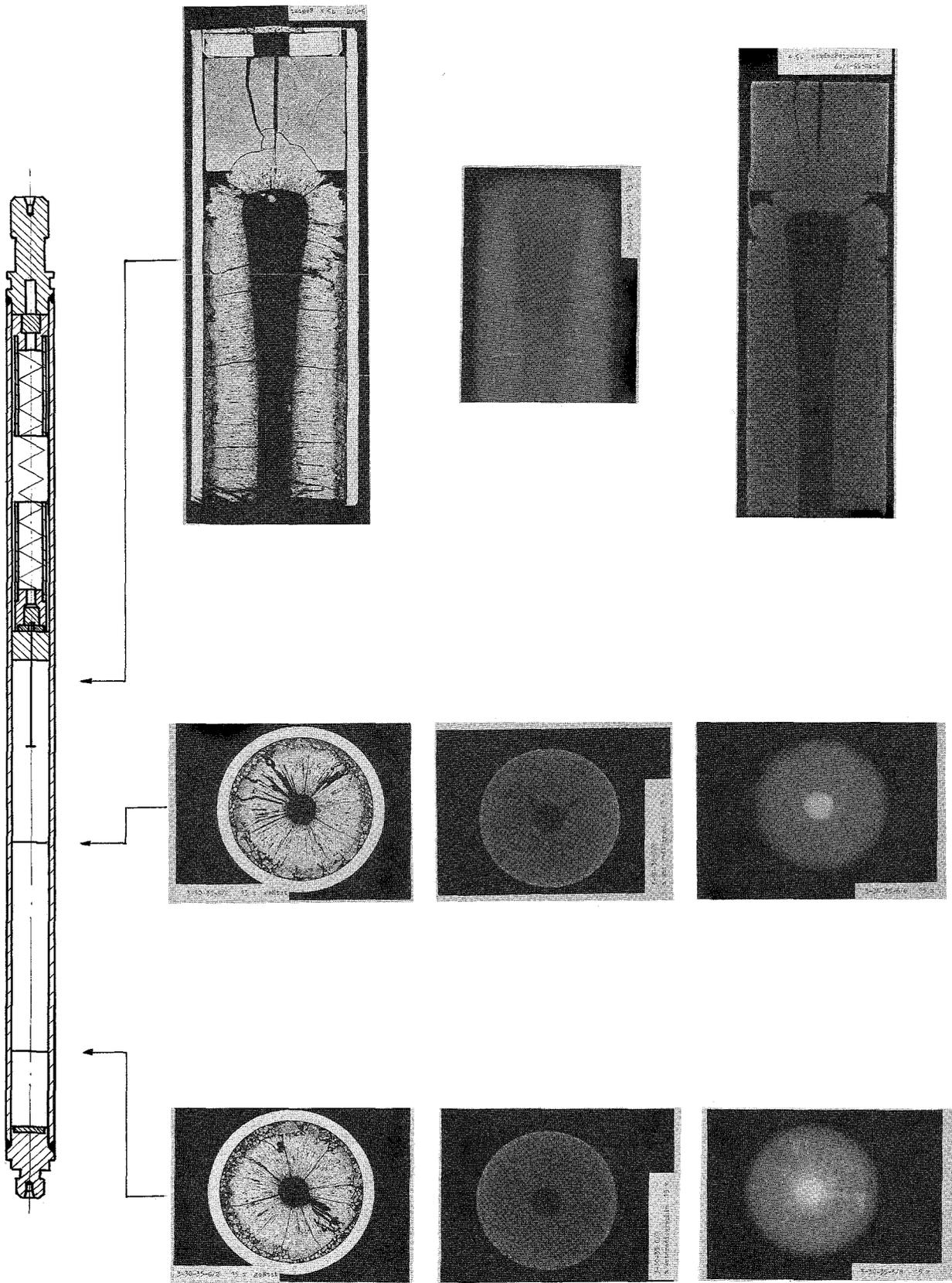
Bestrahlung :

Einrichtung : FR 2/KVE 30
Dauer : 223 Vollasttage
Ende : 22.7.68
Rechn. Abbrand : 37 050 MWd/t
Stableistung max./mittl.: 549/440 W/cm

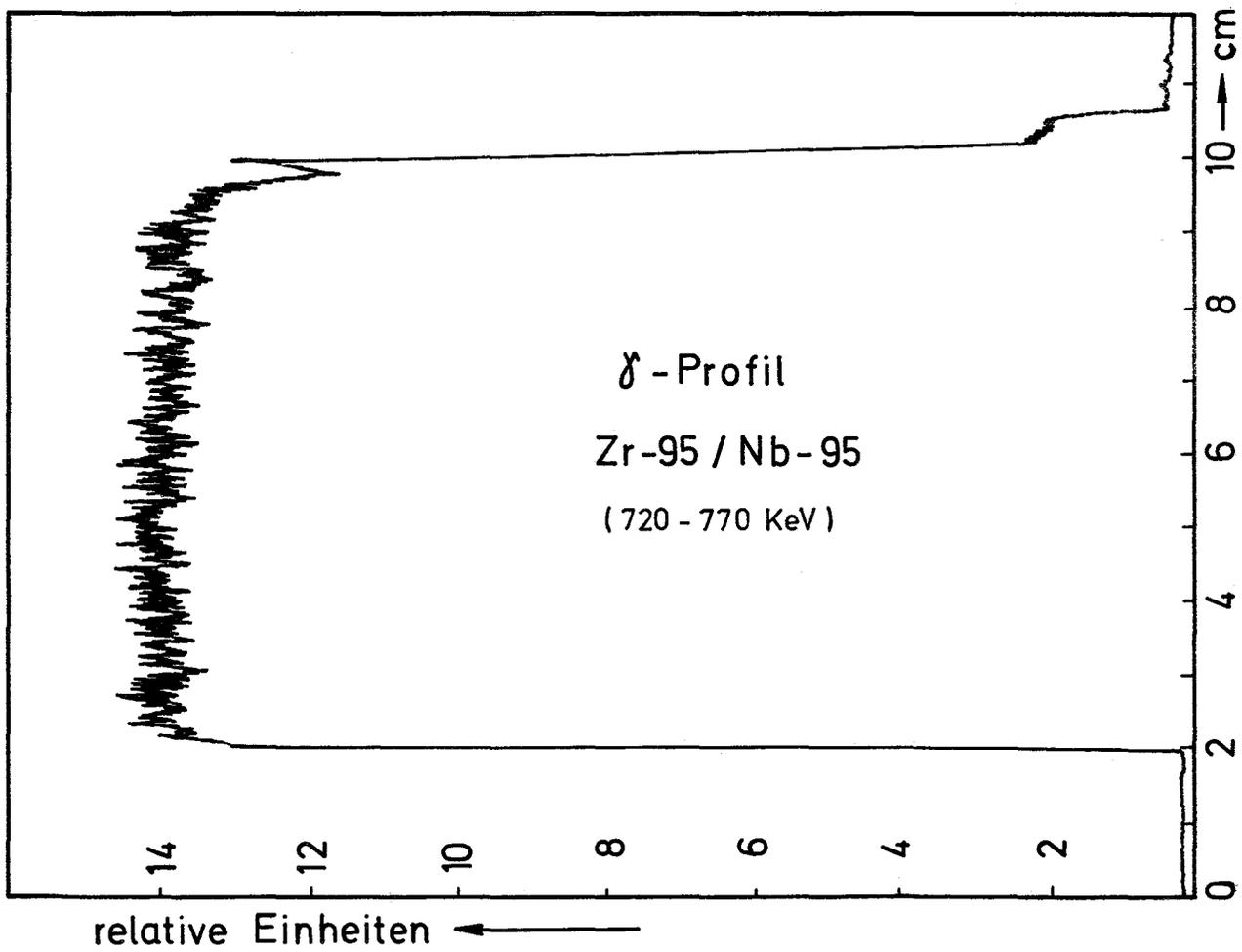
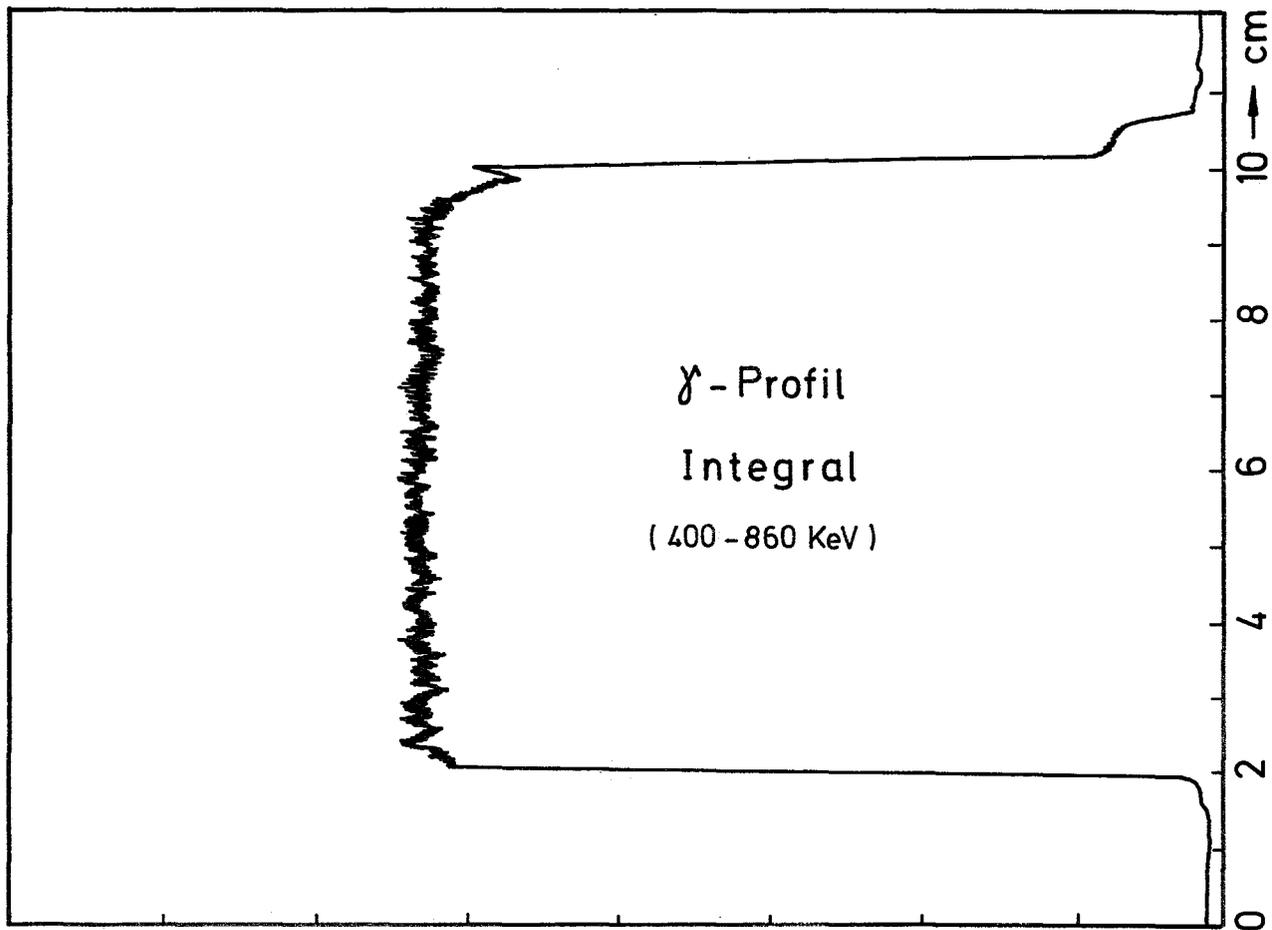


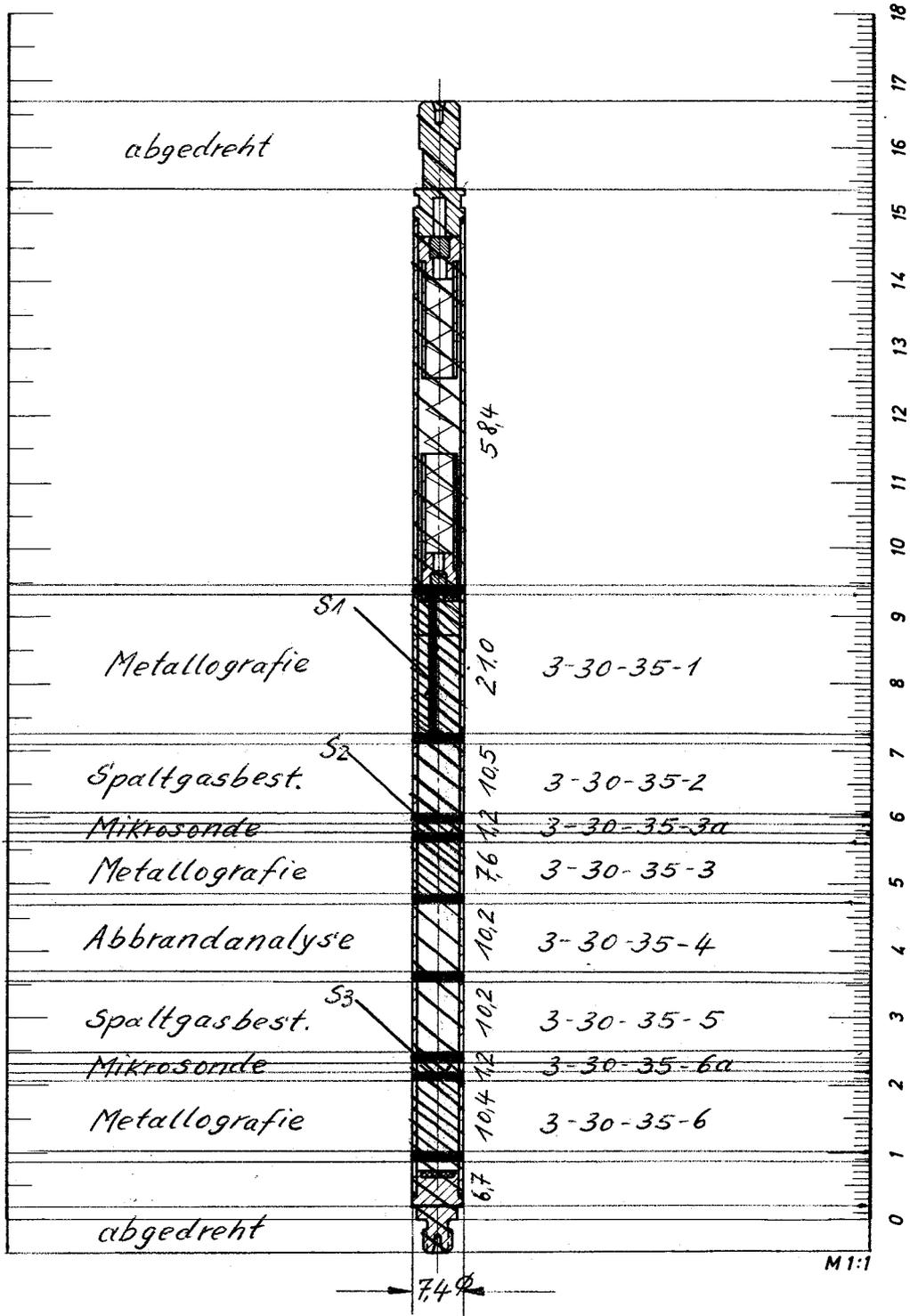
1mm

1mm



1
1mm





M 1:1

Prüfling 36

Brennstoff :

Form : Pulver geschmolzen
Zusammensetzung : UO₂
Tablettendichte : -

Hülle :

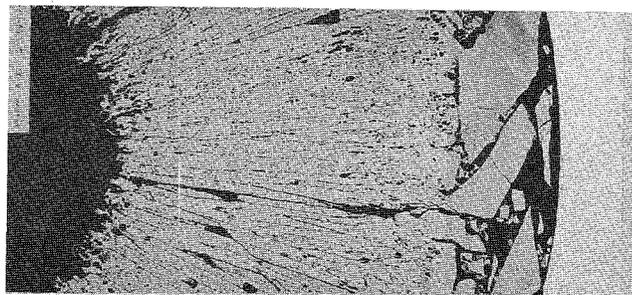
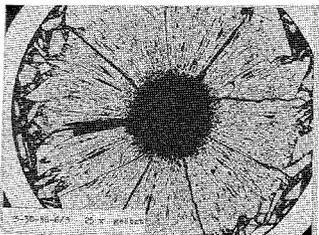
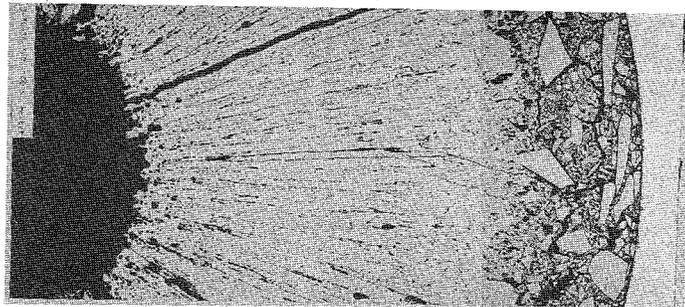
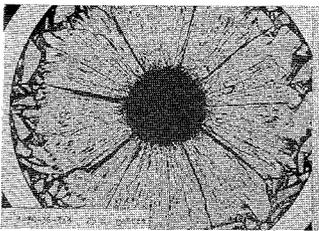
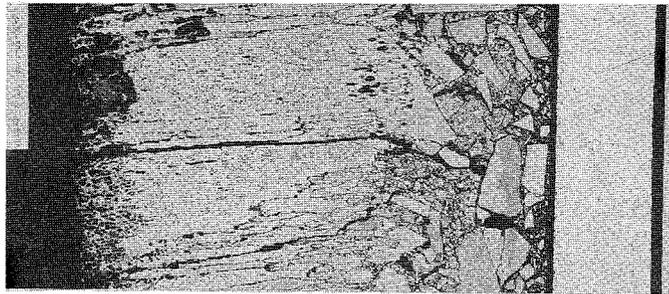
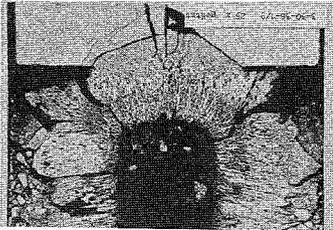
Material : X4CrNiNb 20 25
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 167,2 mm
Länge der Brennstoffsäule : 79,95 mm
Radiale Spaltweite : -
Schmierdichte : 83,28 % th.D.

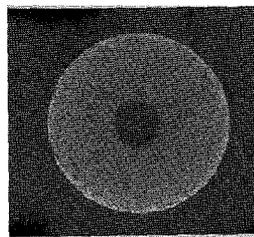
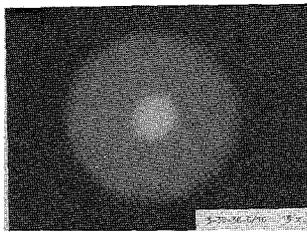
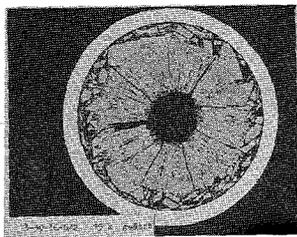
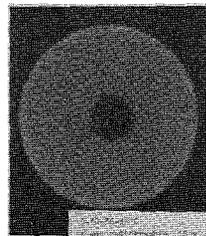
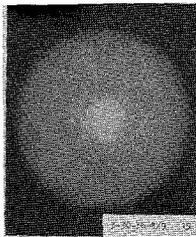
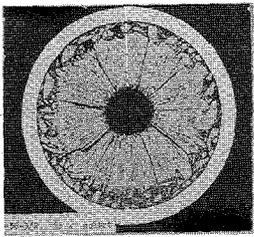
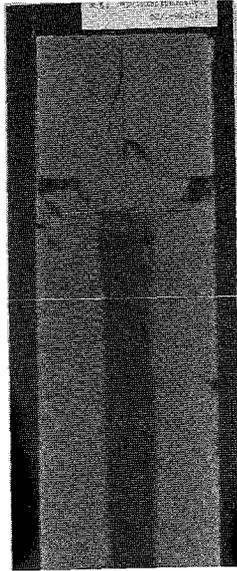
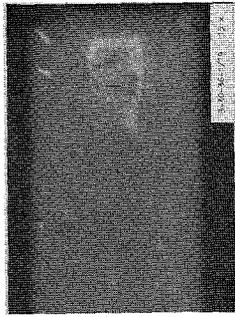
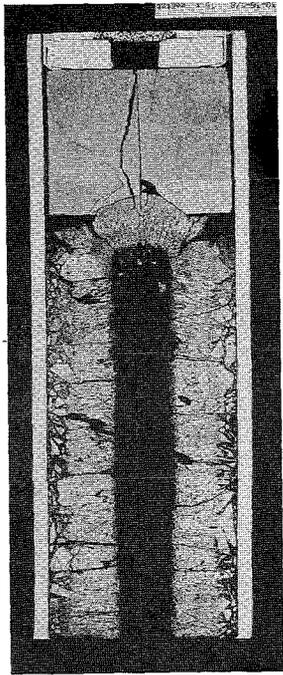
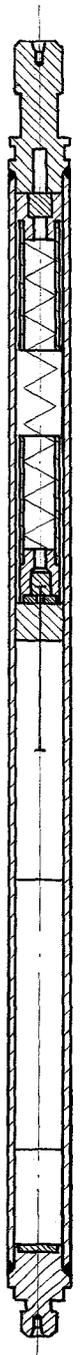
Bestrahlung :

Einrichtung : FR 2/KVE 30
Dauer : 223 Vollasttage
Ende : 22.7.68
Rechn. Abbrand : 35 490 MWd/t
Stableistung max./mittl.: 508/409 W/cm

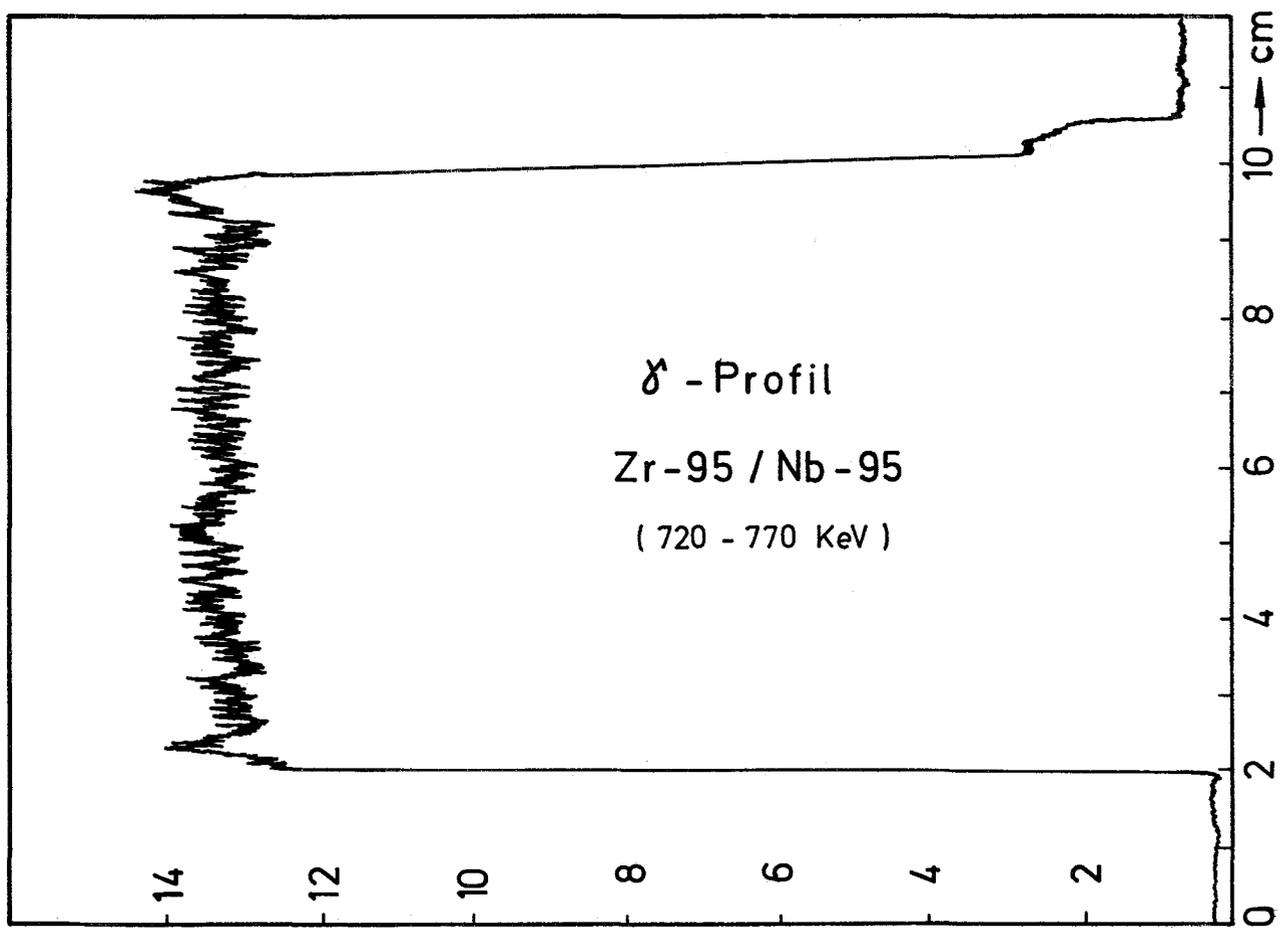
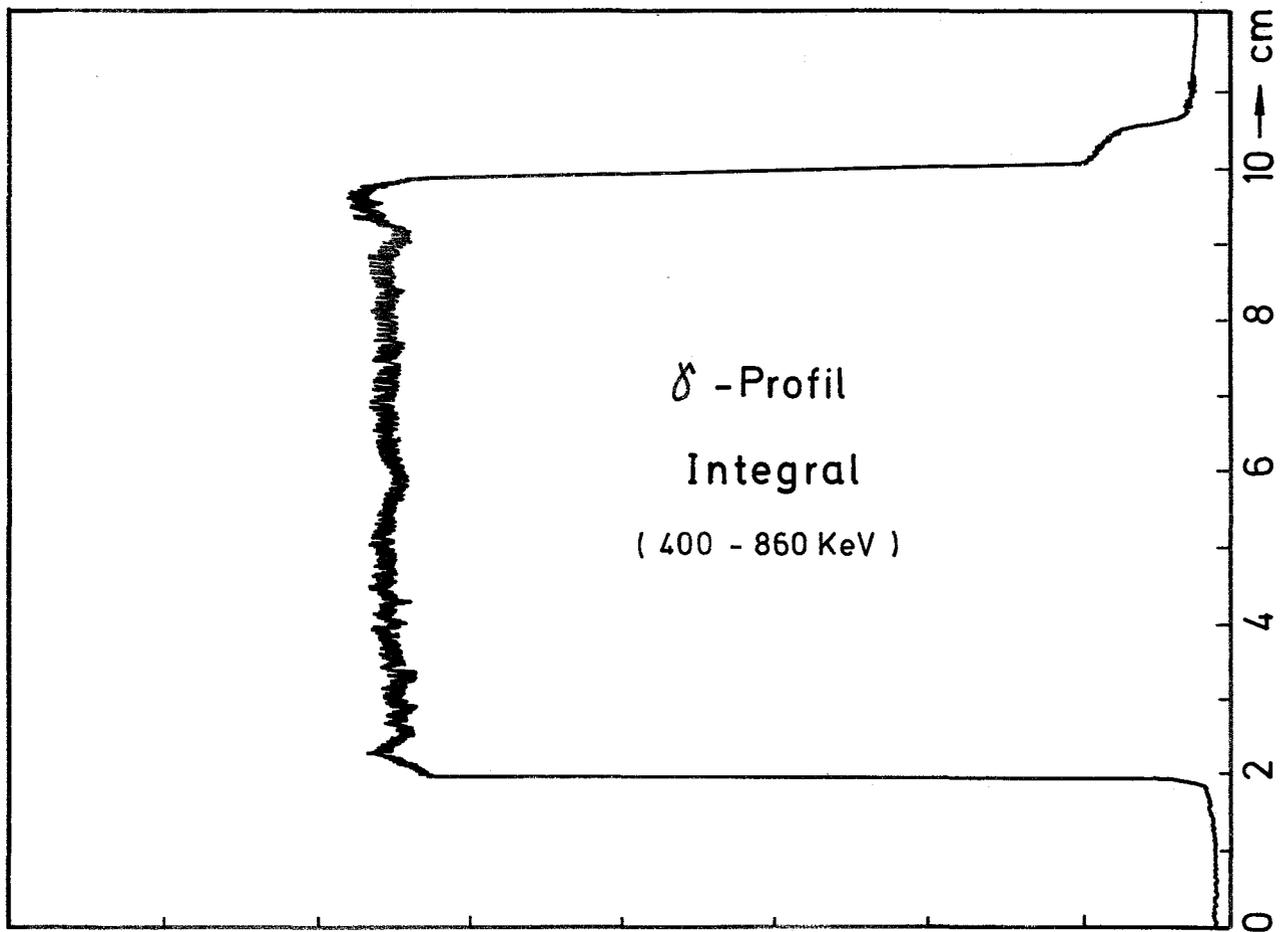


1mm

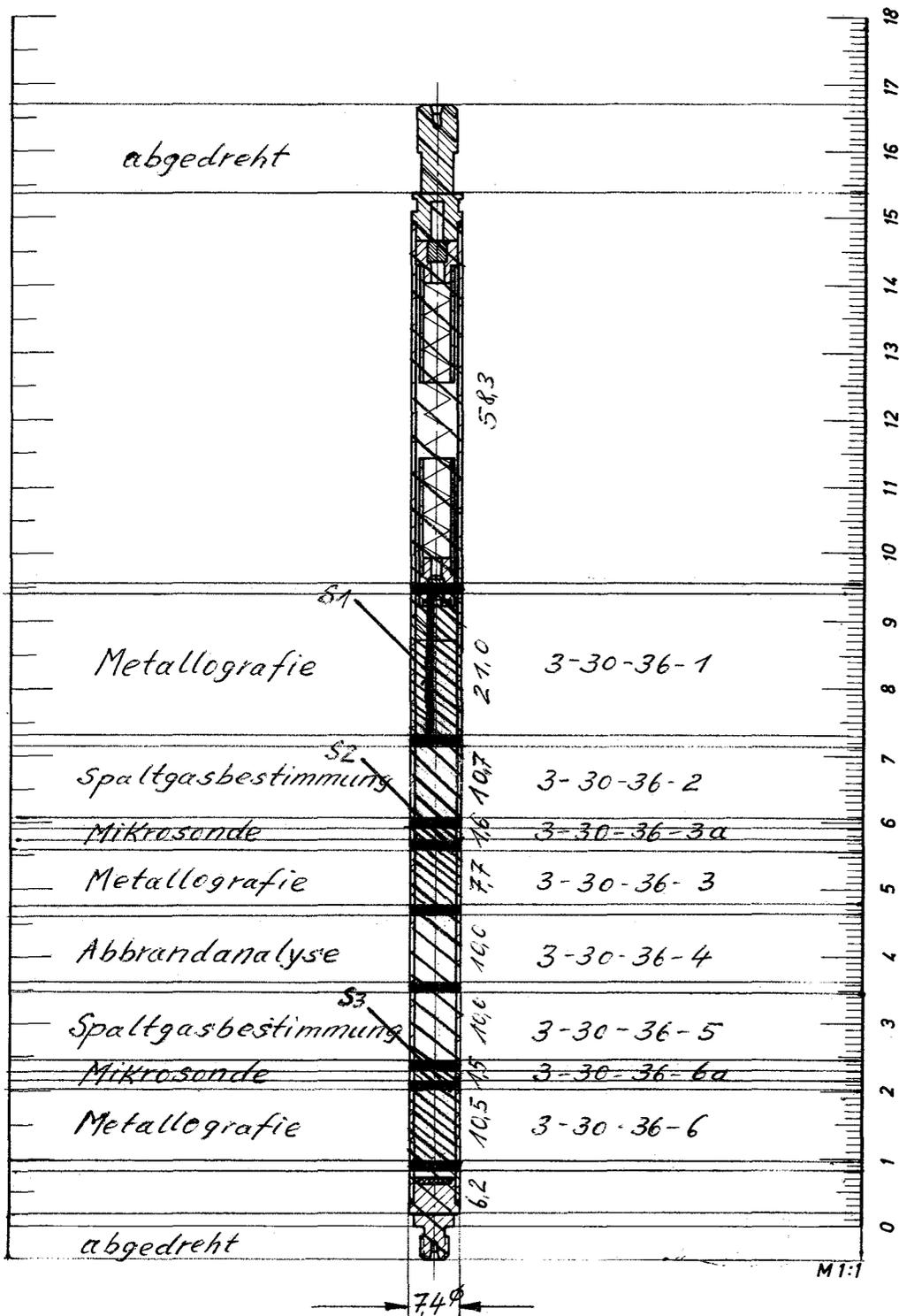
1mm



1mm



relative Einheiten ←



Prüfling 37

Brennstoff :

Form : Pulver, gesintert
Zusammensetzung : UO_2
Tablettendichte : -

Hülle :

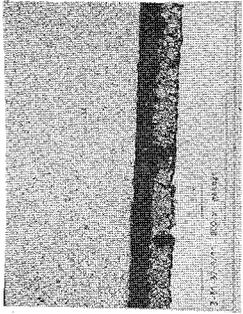
Material : X4CrNiNb 20 25
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

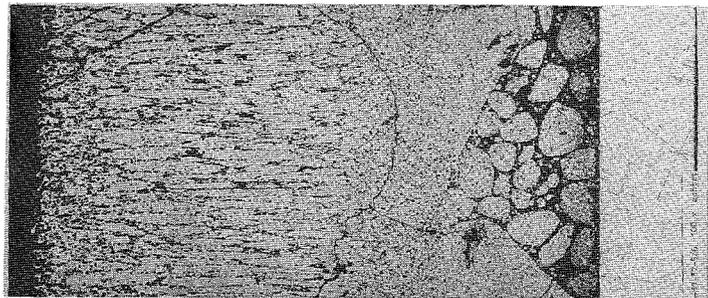
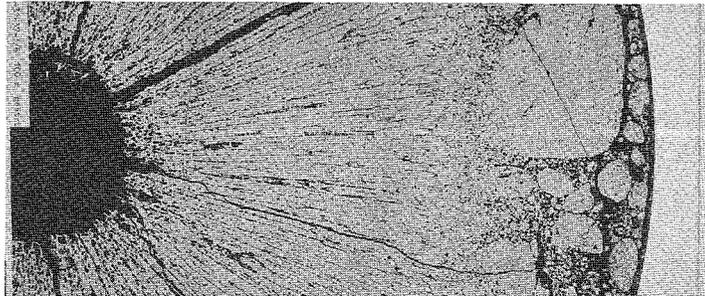
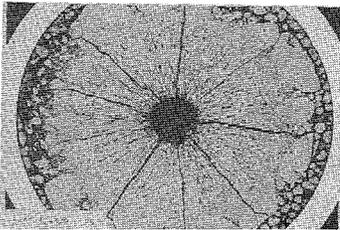
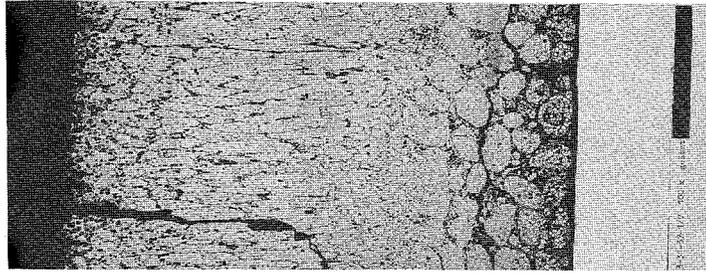
Länge des Prüflings : 167,2 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80,0 mm
Radiale Spaltweite : -
Schmierdichte : 86 % th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : FR 2/KVE 31
Dauer : 389 Vollasttage
Ende : 21.3.69
Rechn. Abbrand : 51 688 MWd/t
Stableistung max./mittl.: 613/372 W/cm

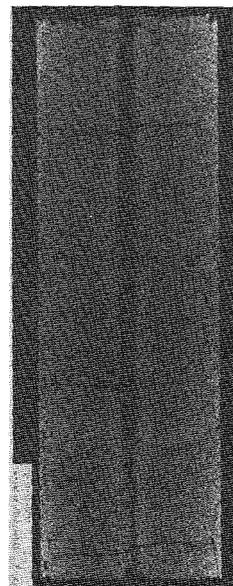
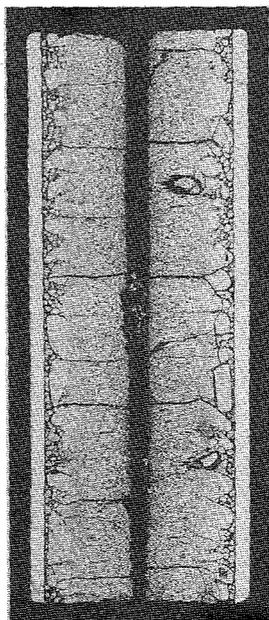
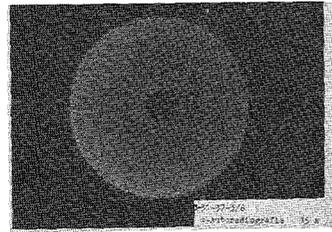
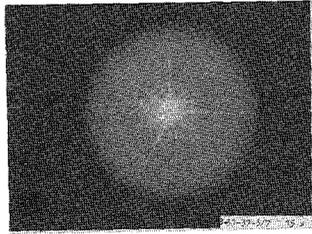
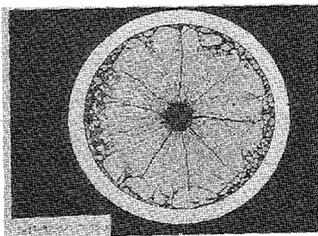
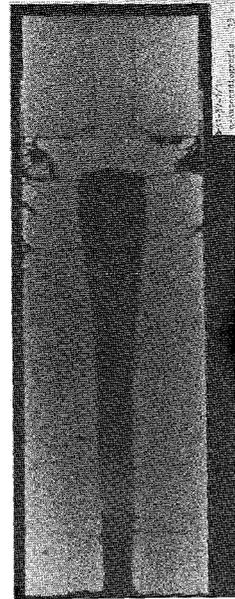
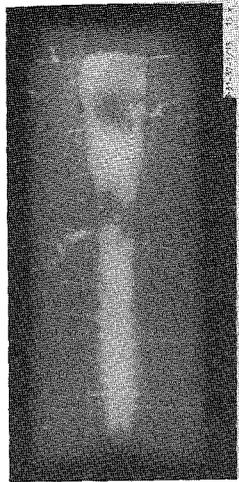
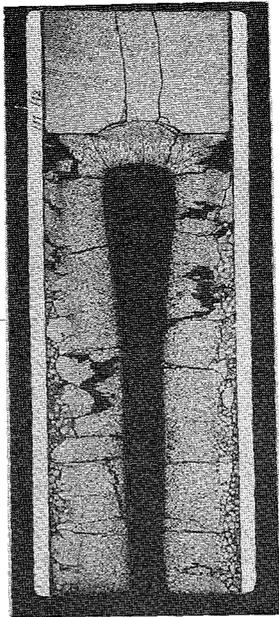
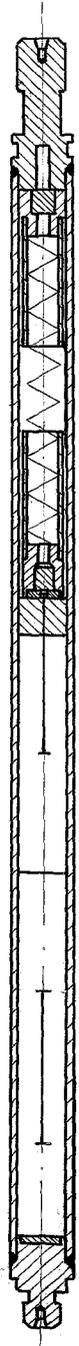


100μm

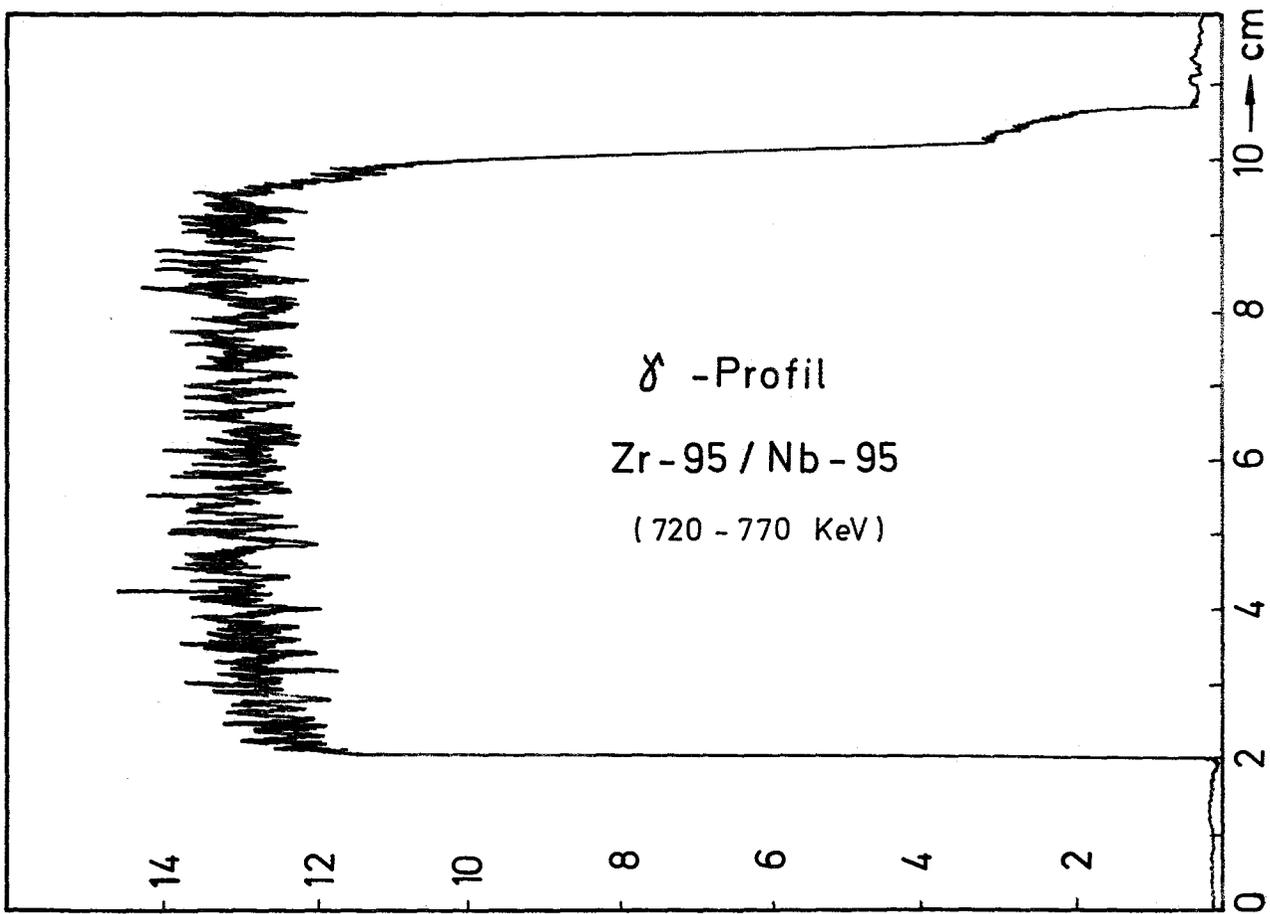
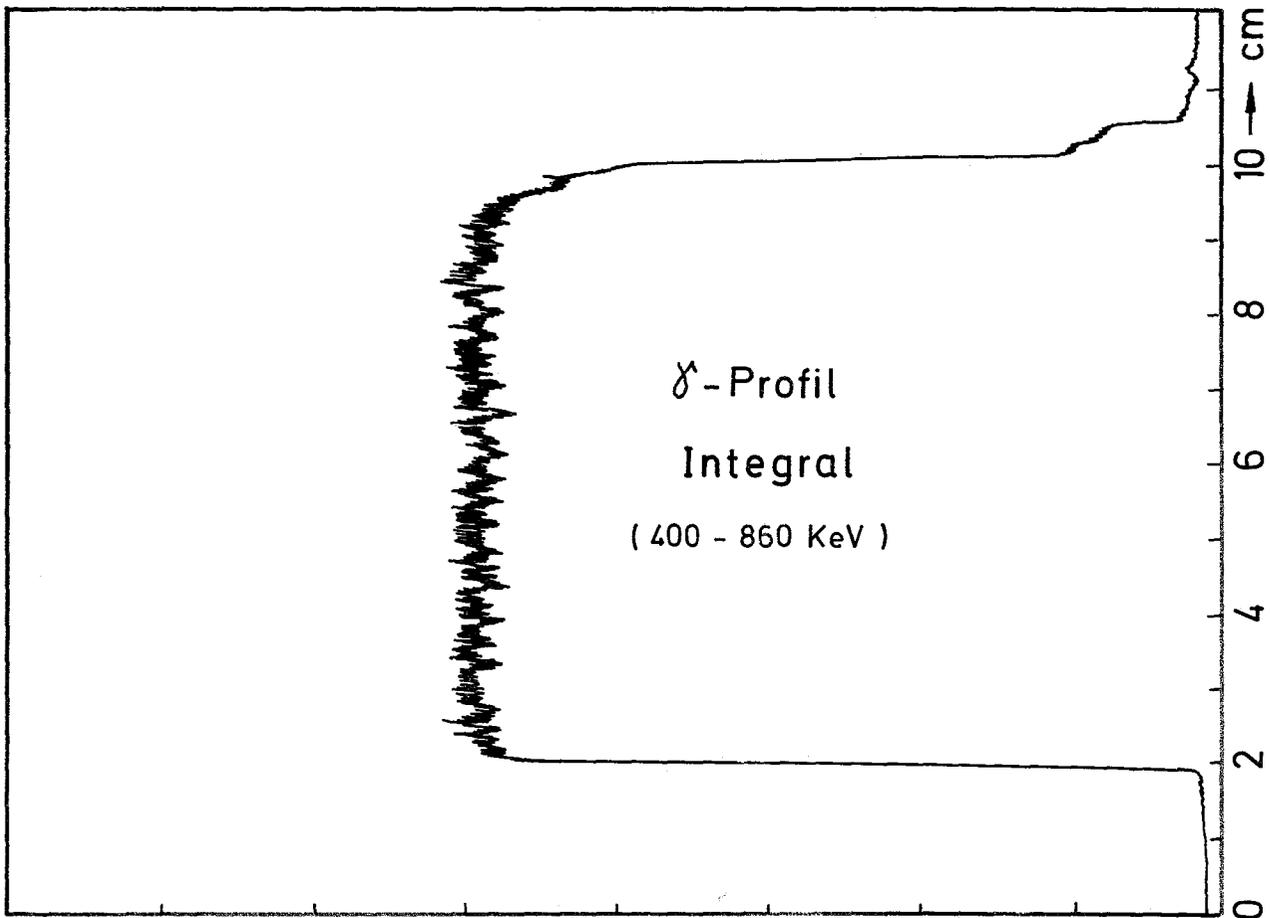


1mm

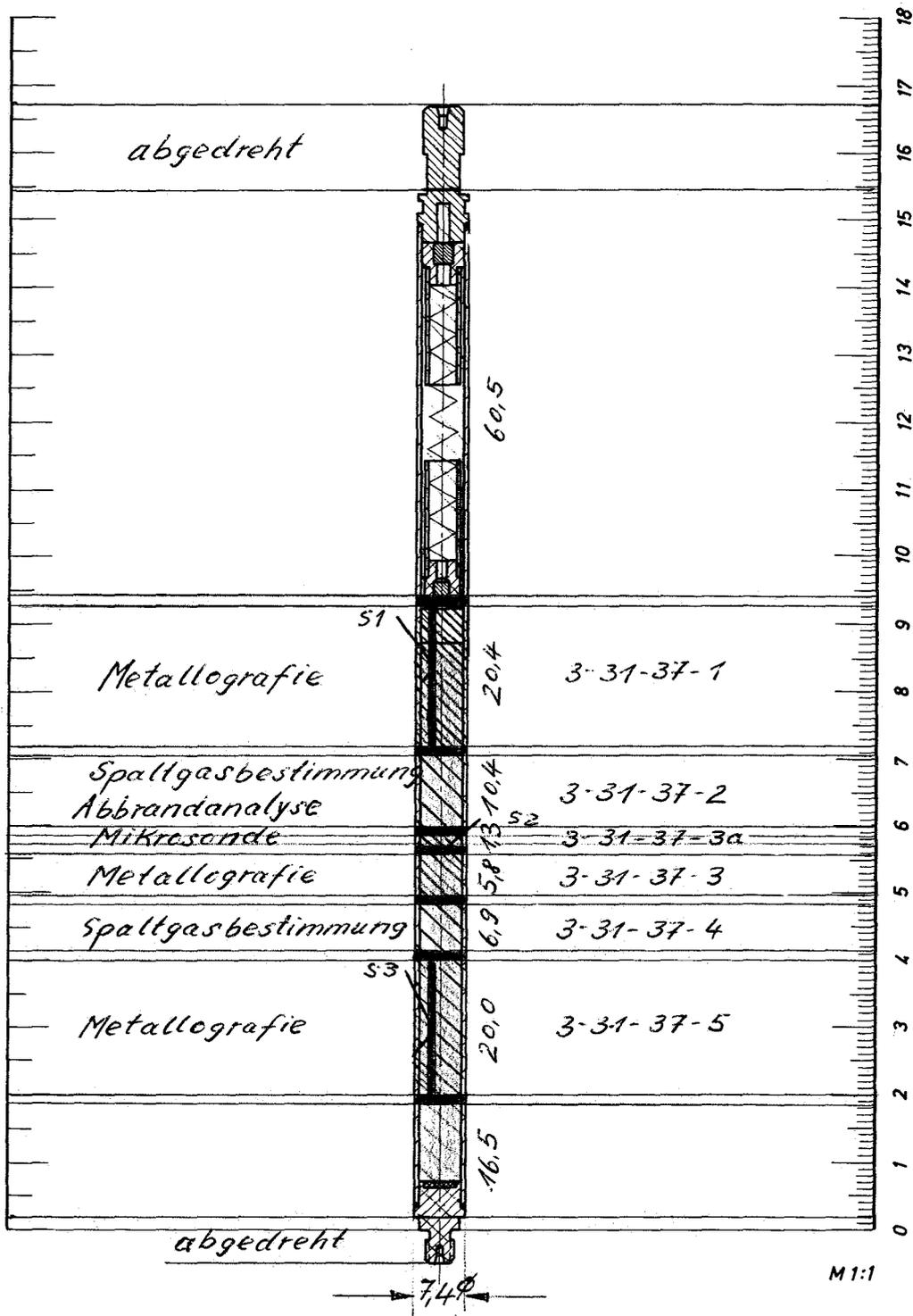
1mm



1mm



relative Einheiten \uparrow



Prüfling 38

Brennstoff :

Form : Pulver geschmolzen

Zusammensetzung : UO₂

Tablettendichte : -

Hülle :

Material : X4CrNiNb 20 25

Aussendurchmesser : 7,4 mm

Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 167,2 mm

Länge der Brennstoffsäule : 79,85 mm

Radiale Spaltweite : -

Schmierdichte : 85,35 % th.D.

Bestrahlung :

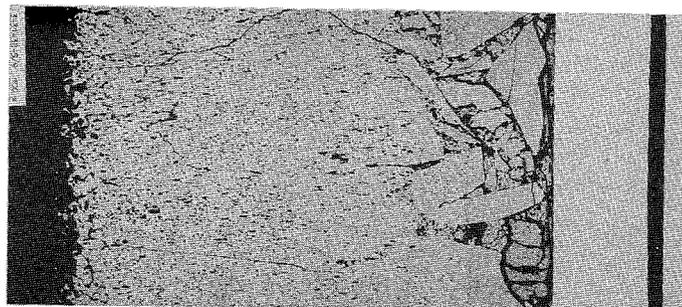
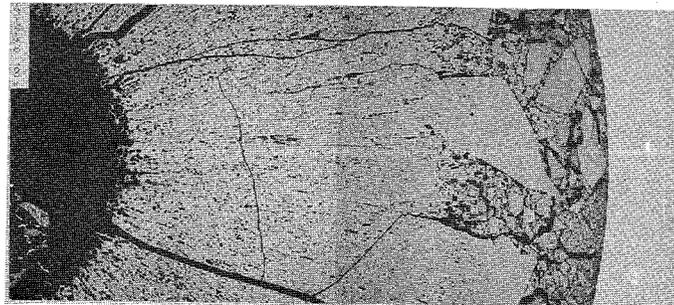
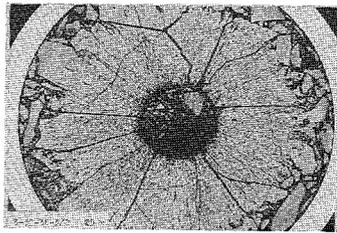
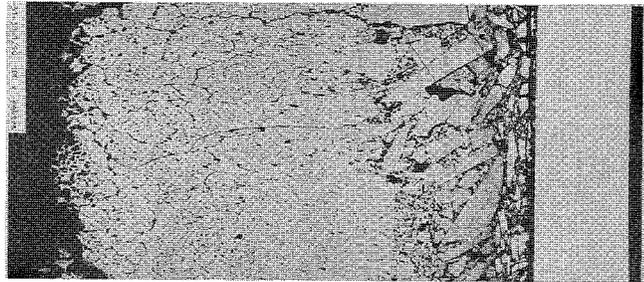
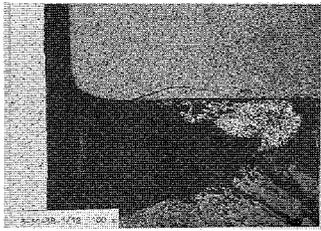
Einrichtung : FR 2/KVE 31

Dauer : 371 Vollasttage

Ende : 21.3.69

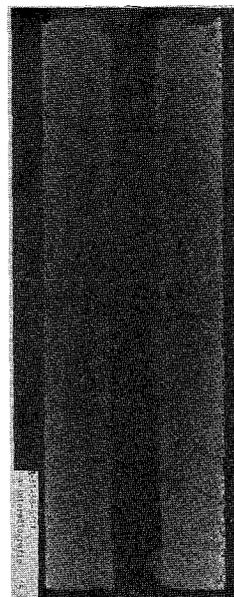
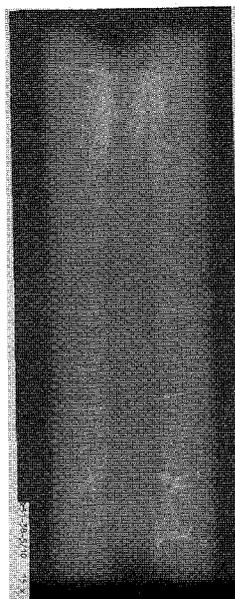
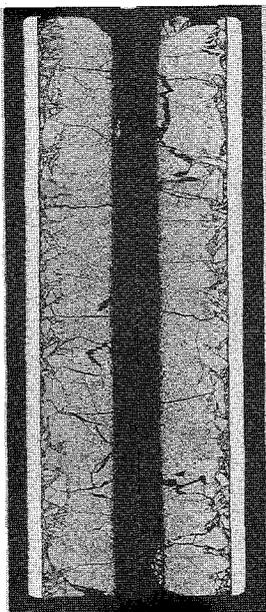
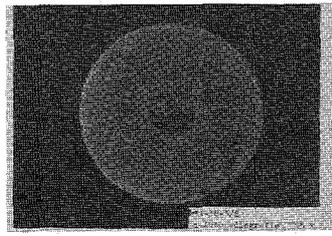
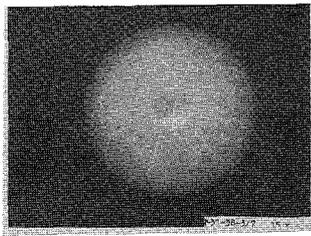
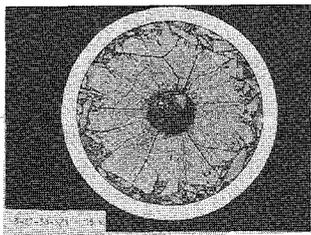
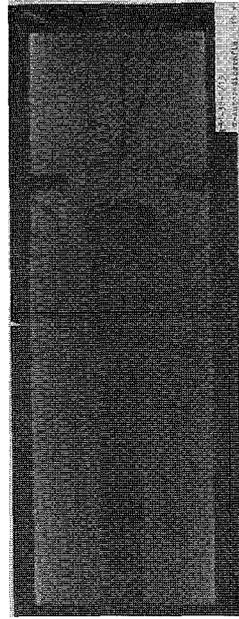
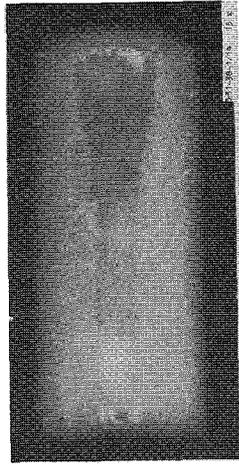
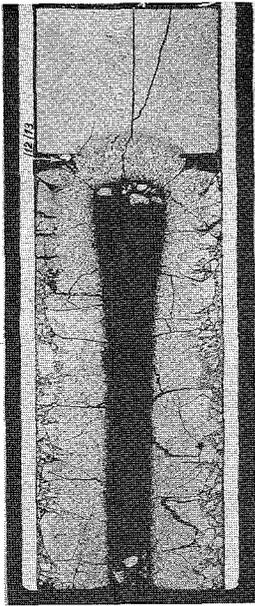
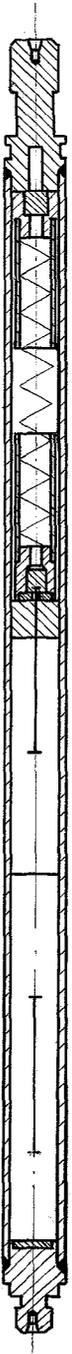
Rechn. Abbrand : 52 139 MWd/t

Stableistung max./mittl.: 613/374 W/cm

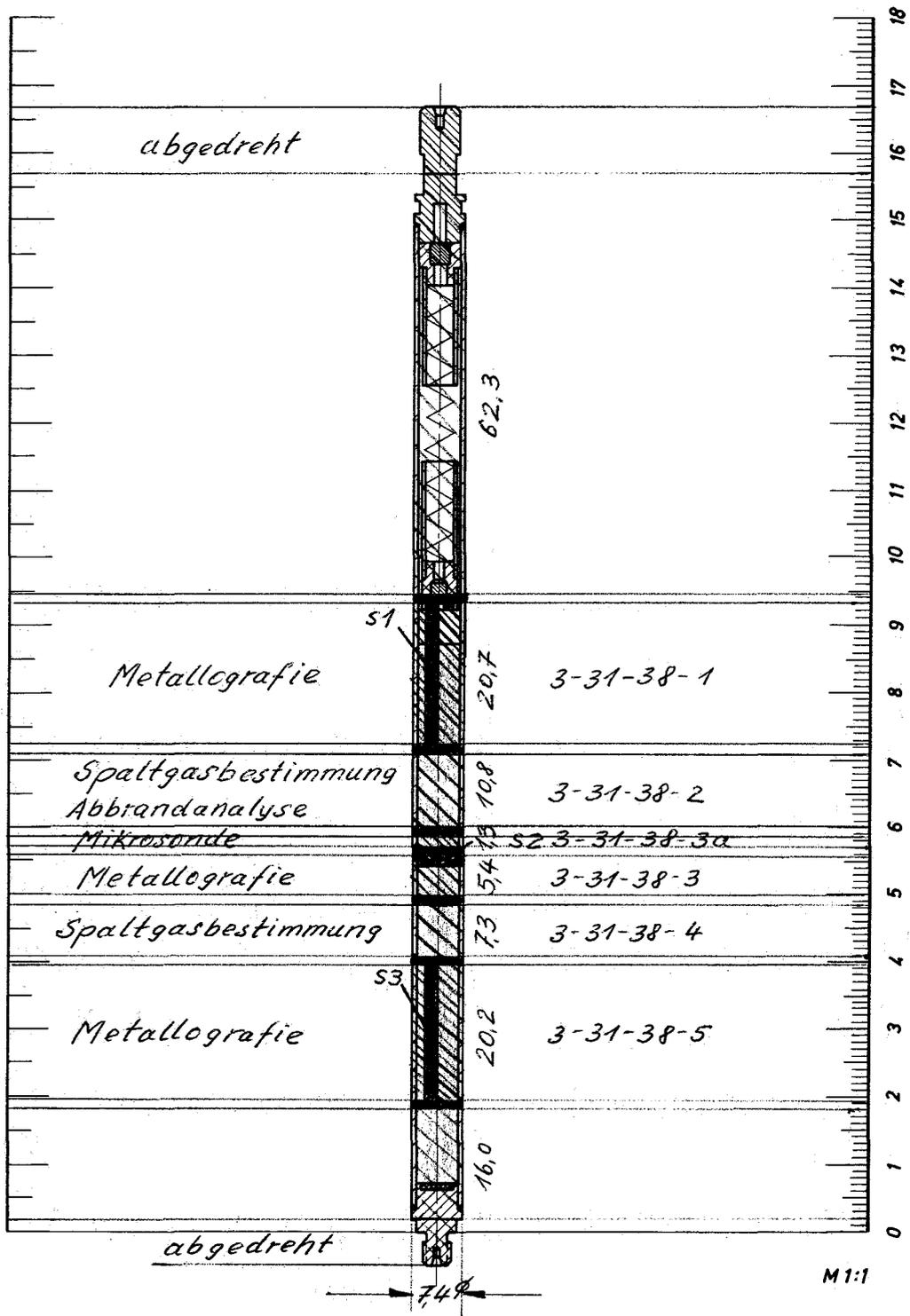


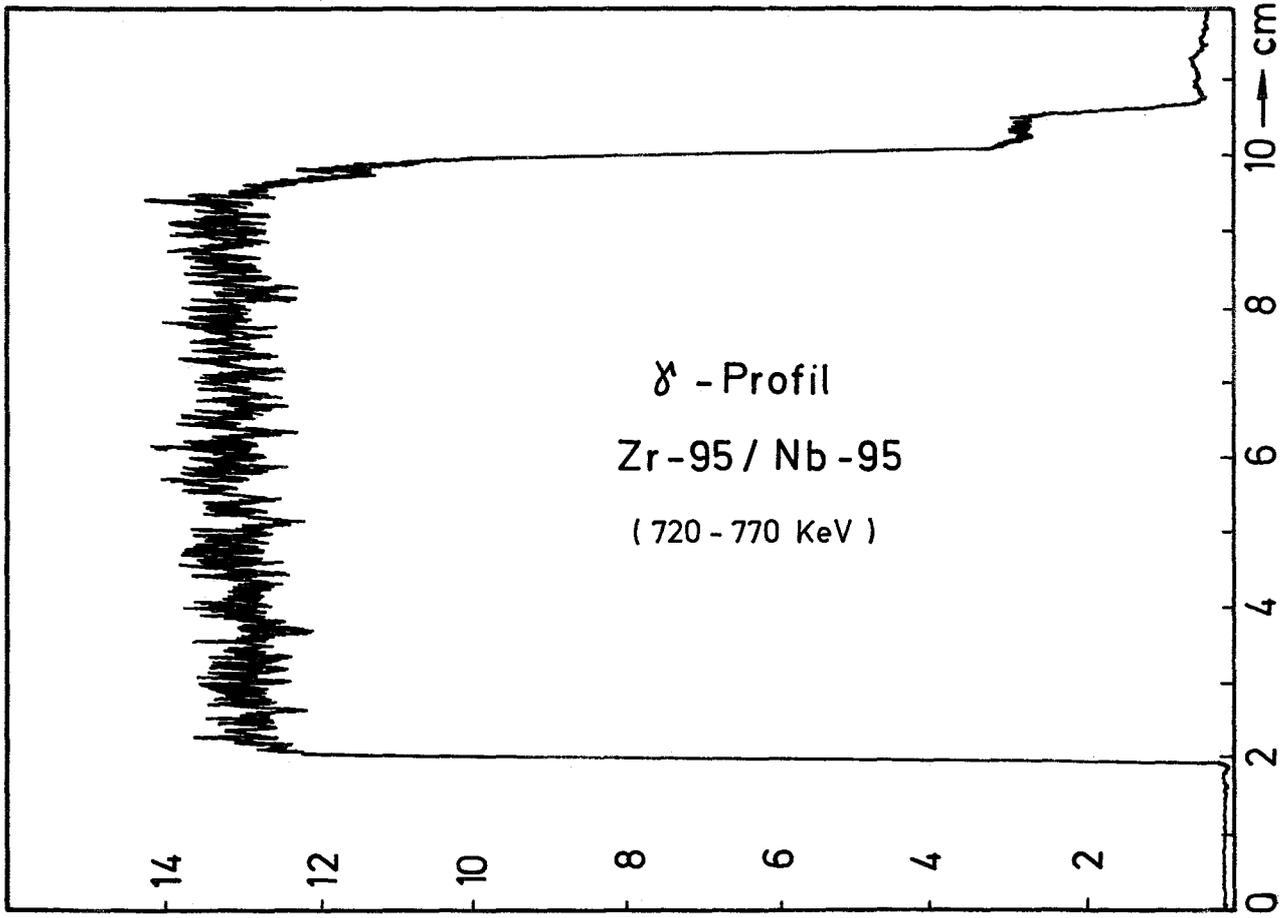
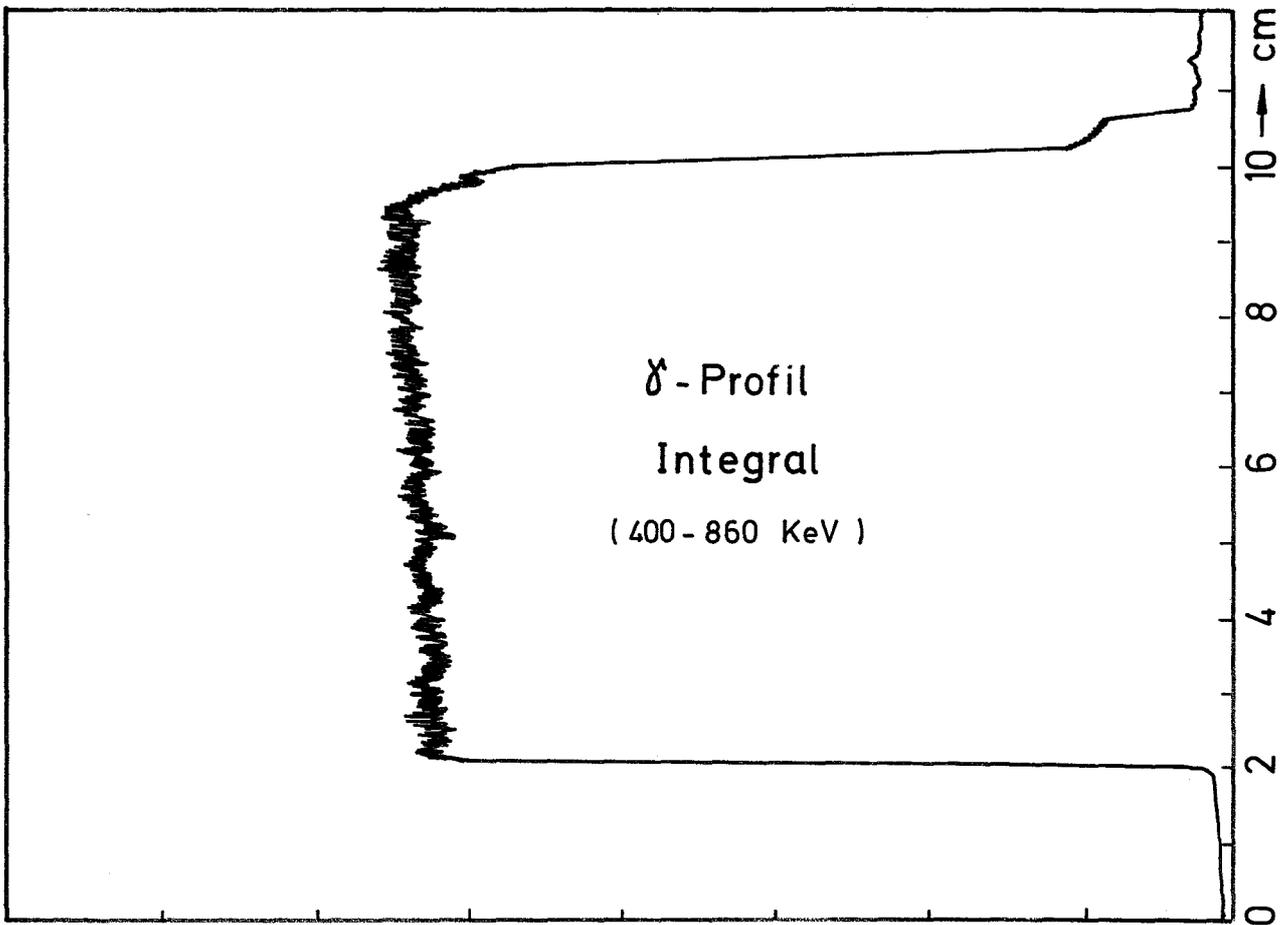
1mm

1mm



1mm





relative Einheiten ←

Prüfling 39

Brennstoff :

Form : Pulver gesintert

Zusammensetzung : UO_2

Tablettendichte : -

Hülle :

Material : X4CrNiNb 20 25

Aussendurchmesser : 7,4 mm

Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 167,1 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80,2 mm

Radiale Spaltweite : -

Schmierdichte : 85,70 % th.D.

Bestrahlung :

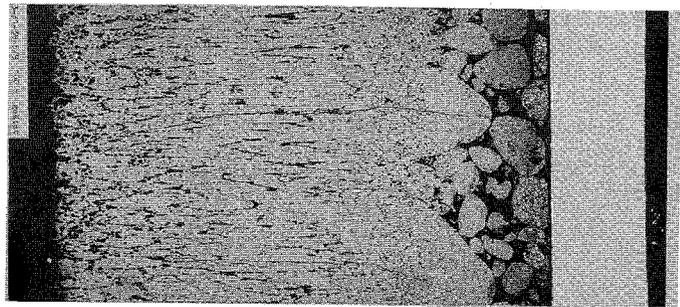
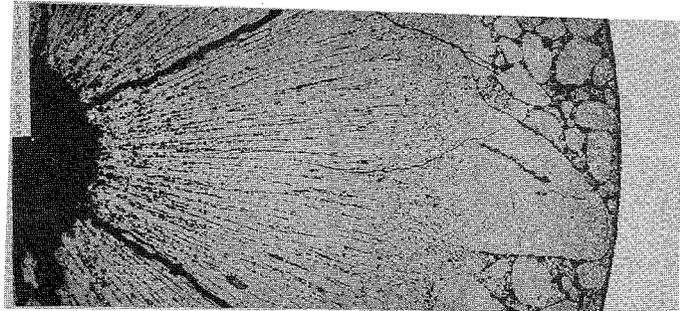
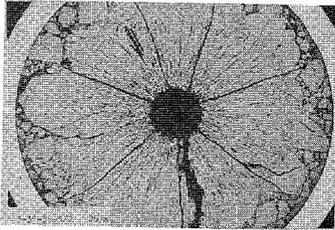
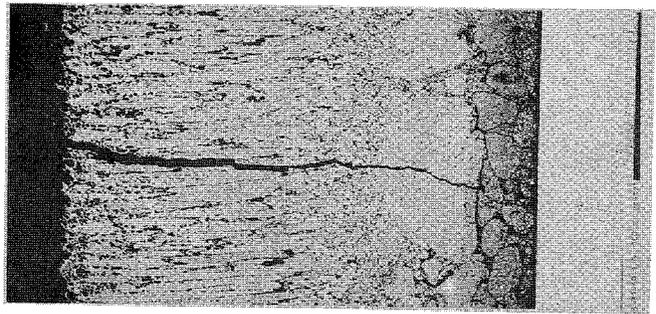
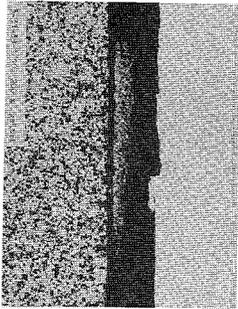
Einrichtung : FR 2/KVE 31

Dauer : 371 Vollasttage

Ende : 21.3.69

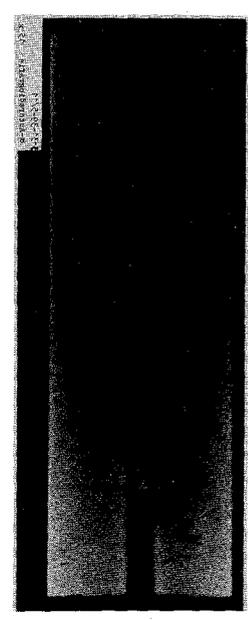
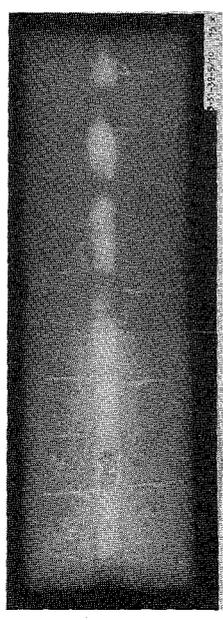
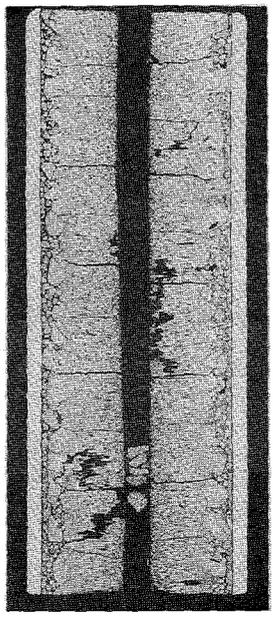
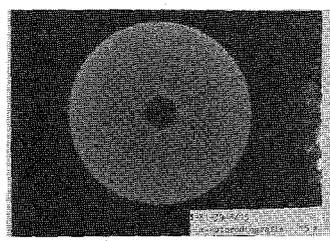
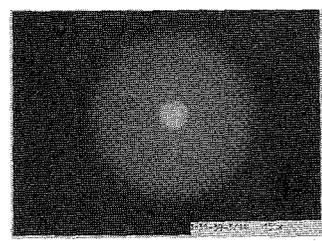
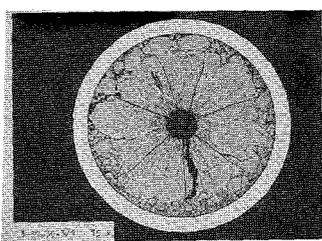
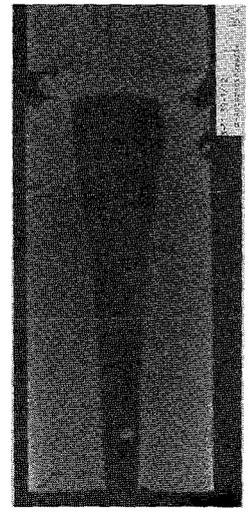
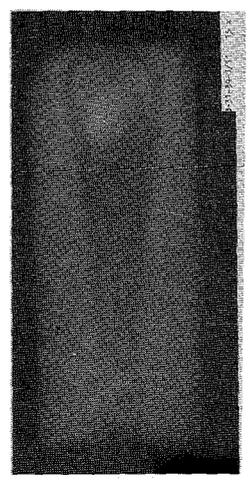
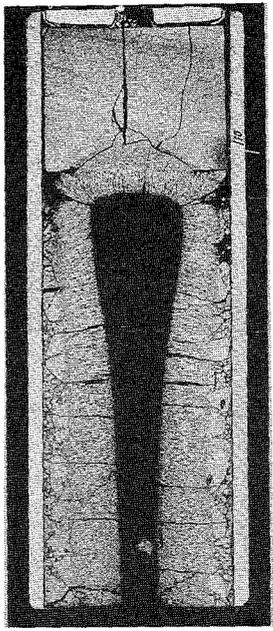
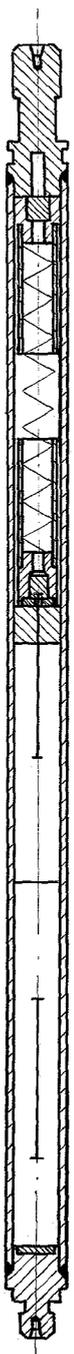
Rechn. Abbrand : 57 119 MWd/t

Stableistung max./mittl.: 613/411 W/cm

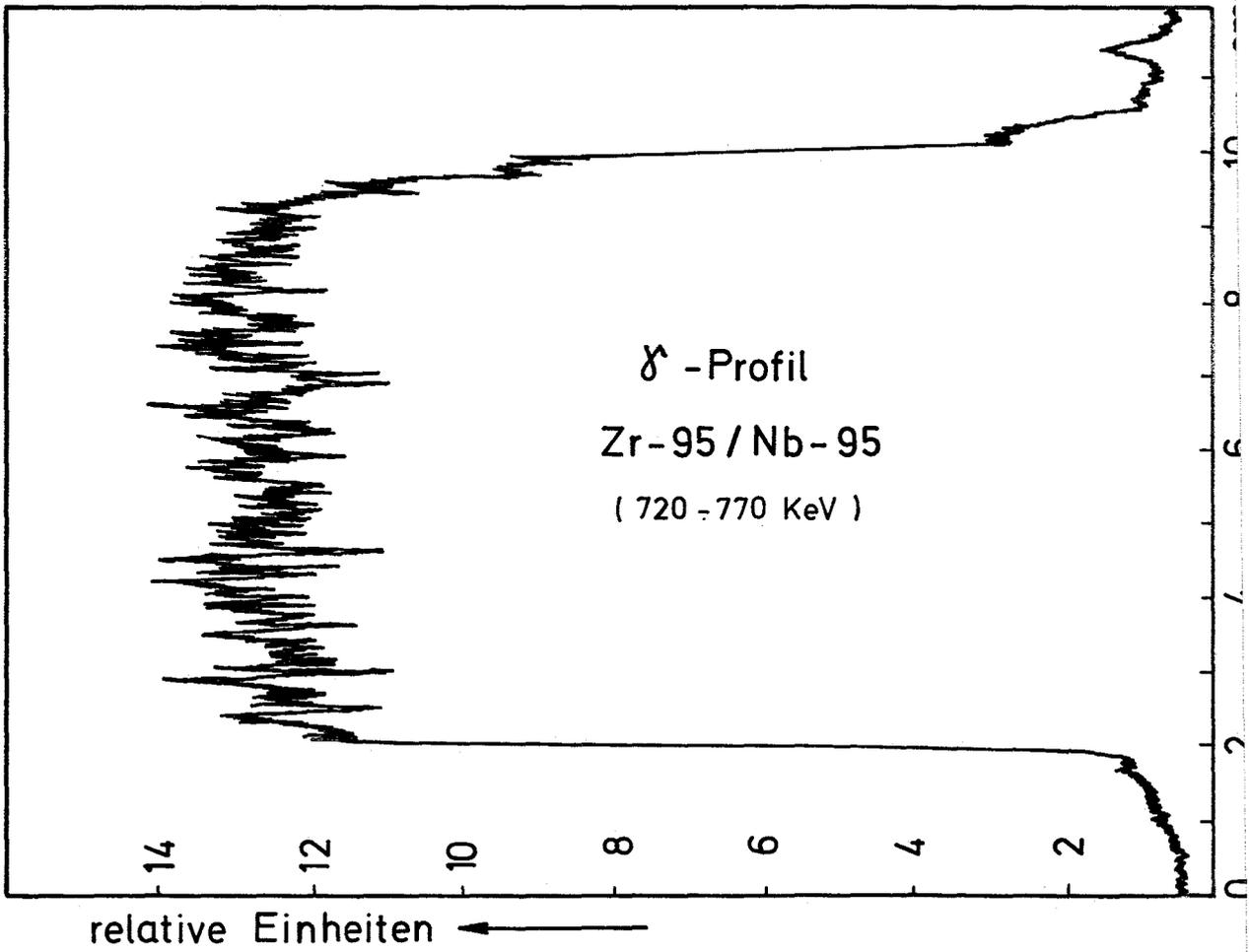
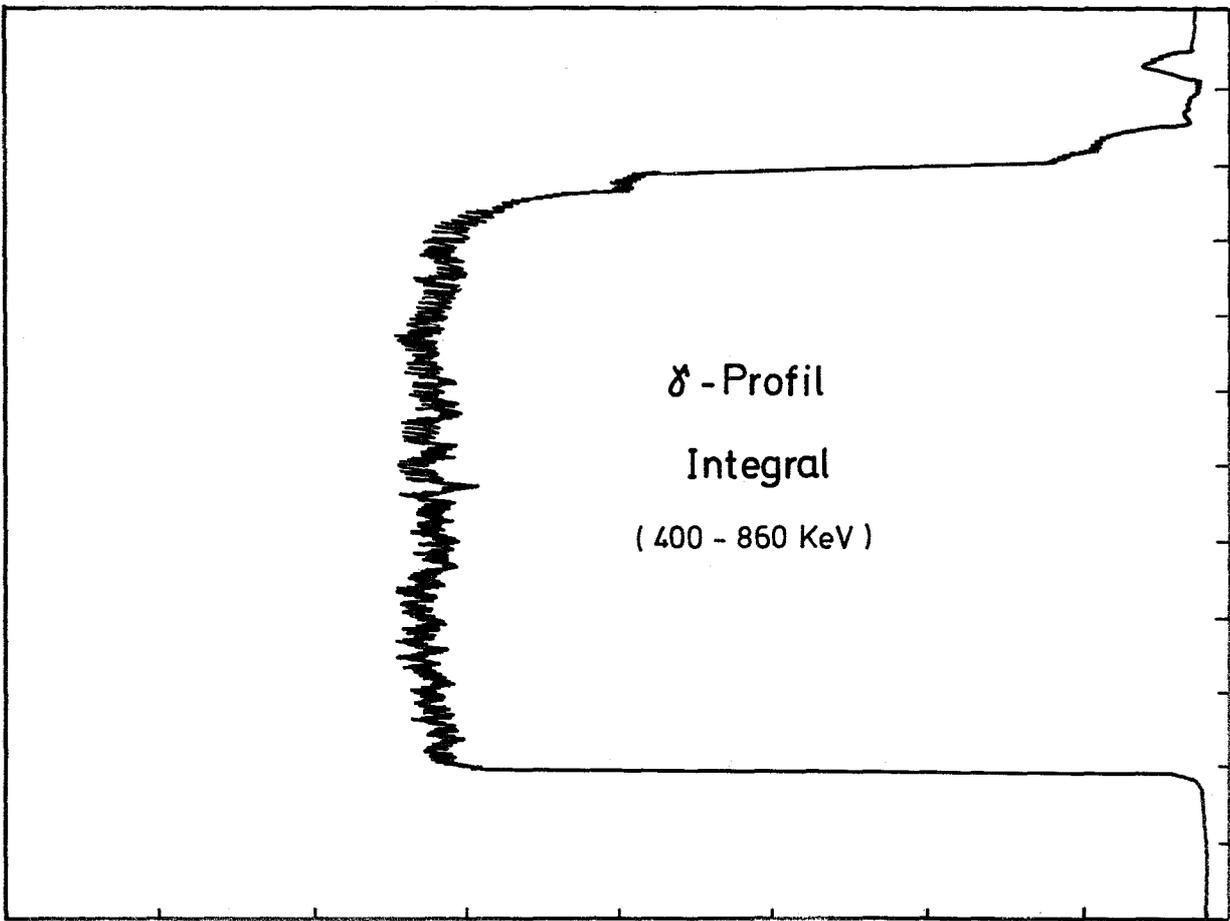


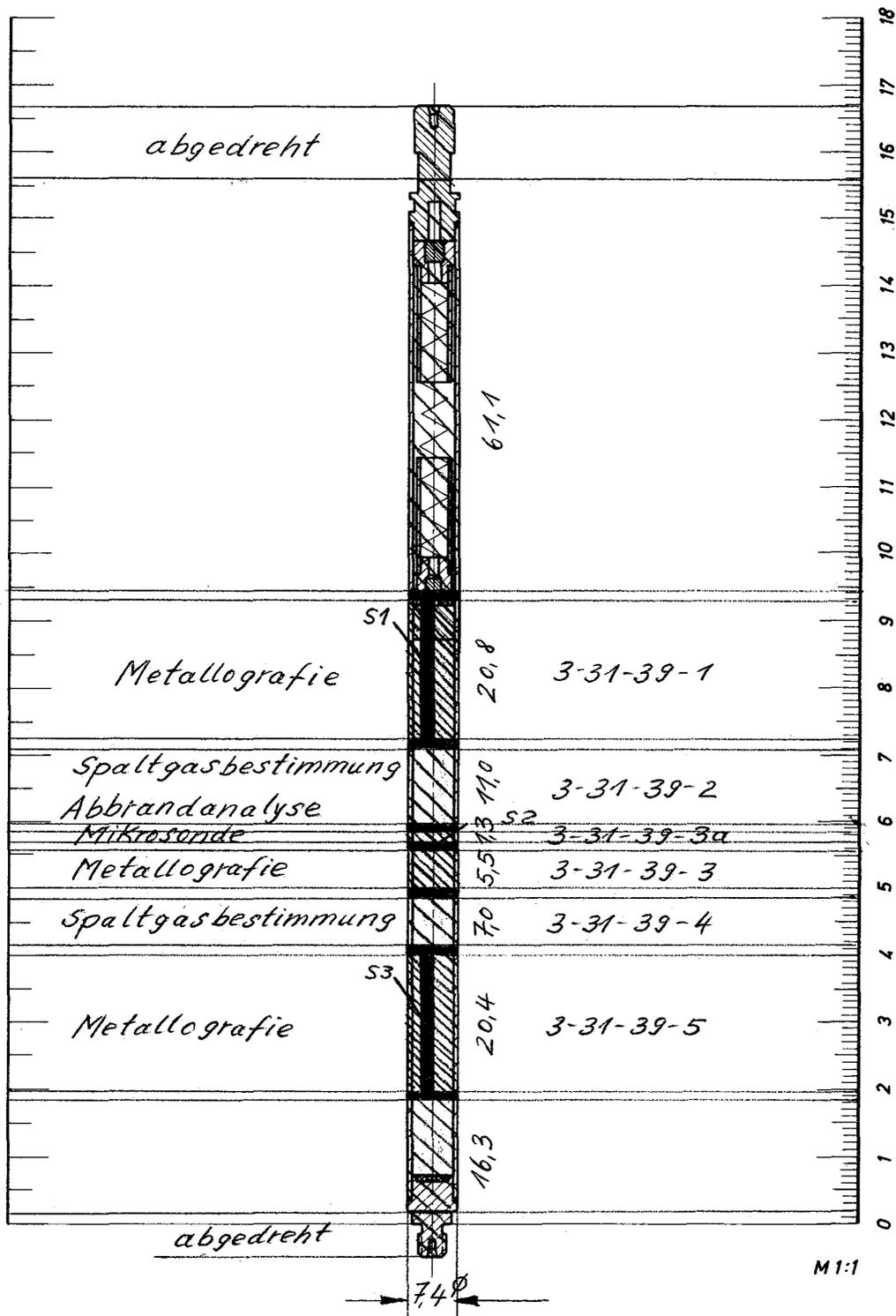
1mm

1mm



1mm





Prüfling 40

Brennstoff :

Form : Pulver, geschmolzen

Zusammensetzung : UO_2

Tablettendichte : --

Hülle :

Material : X4CrNiNb 20 25

Aussendurchmesser : 7,4 mm

Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 167,1 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80,1 mm

Radiale Spaltweite : --

Schmierdichte : 83,14 % th.D.

Bestrahlung :

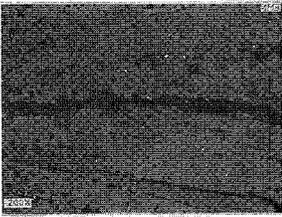
Einrichtung : FR 2/KVE 32

Dauer : 45,5 Vollasttage

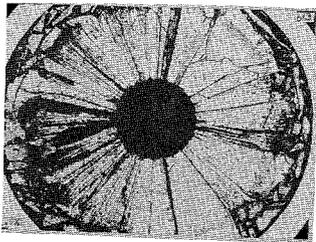
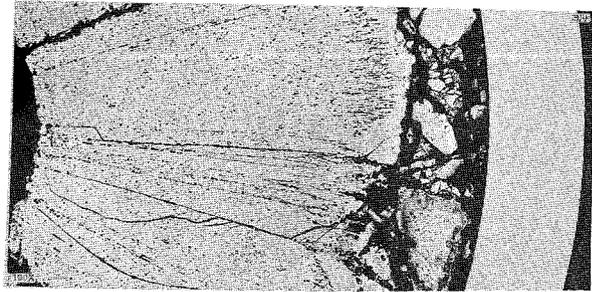
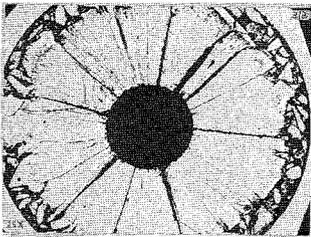
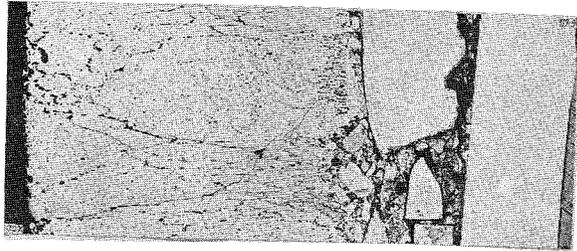
Ende : 29.1.68

Rechn. Abbrand : 8430 MWd/t

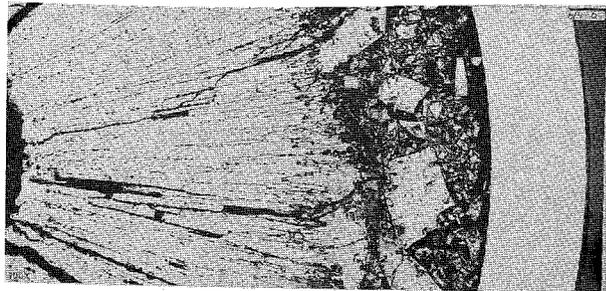
Stableistung max./mittl.: 586/476 W/cm



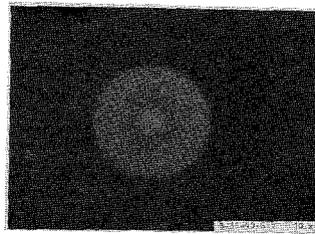
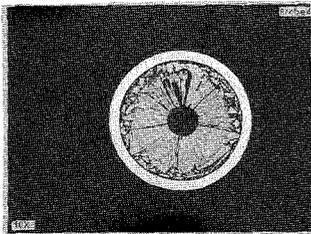
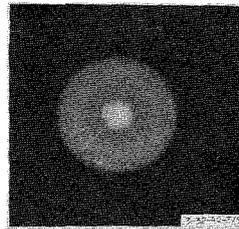
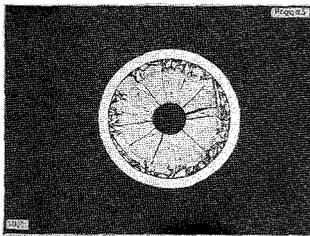
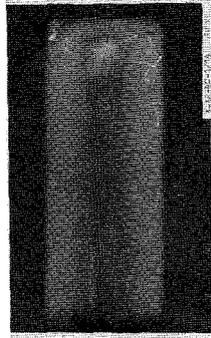
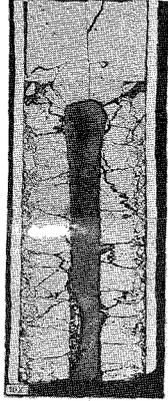
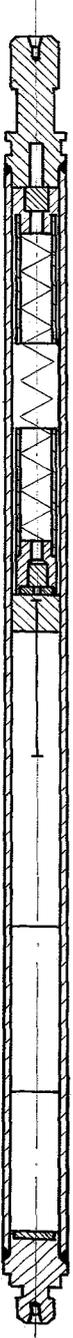
100 μm



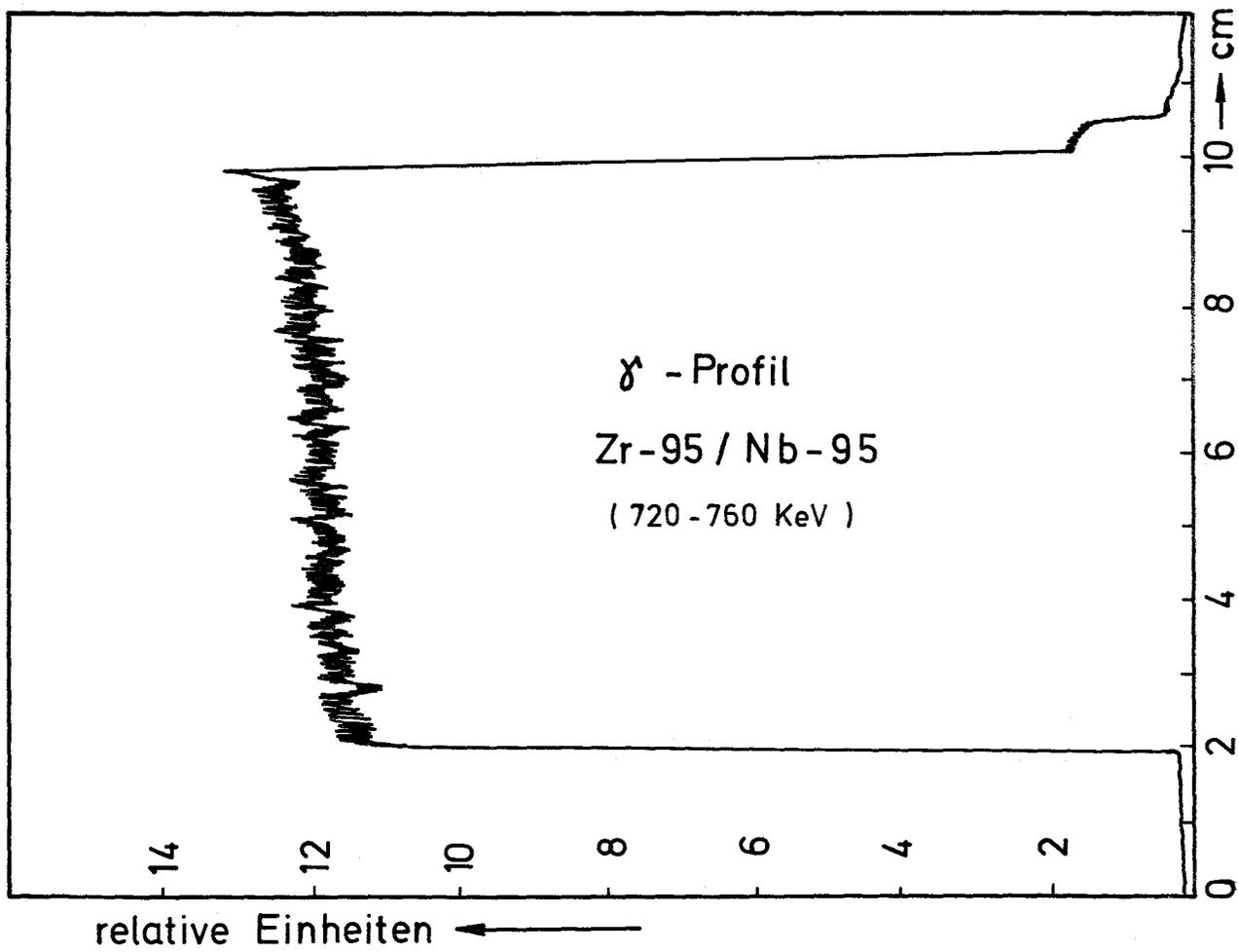
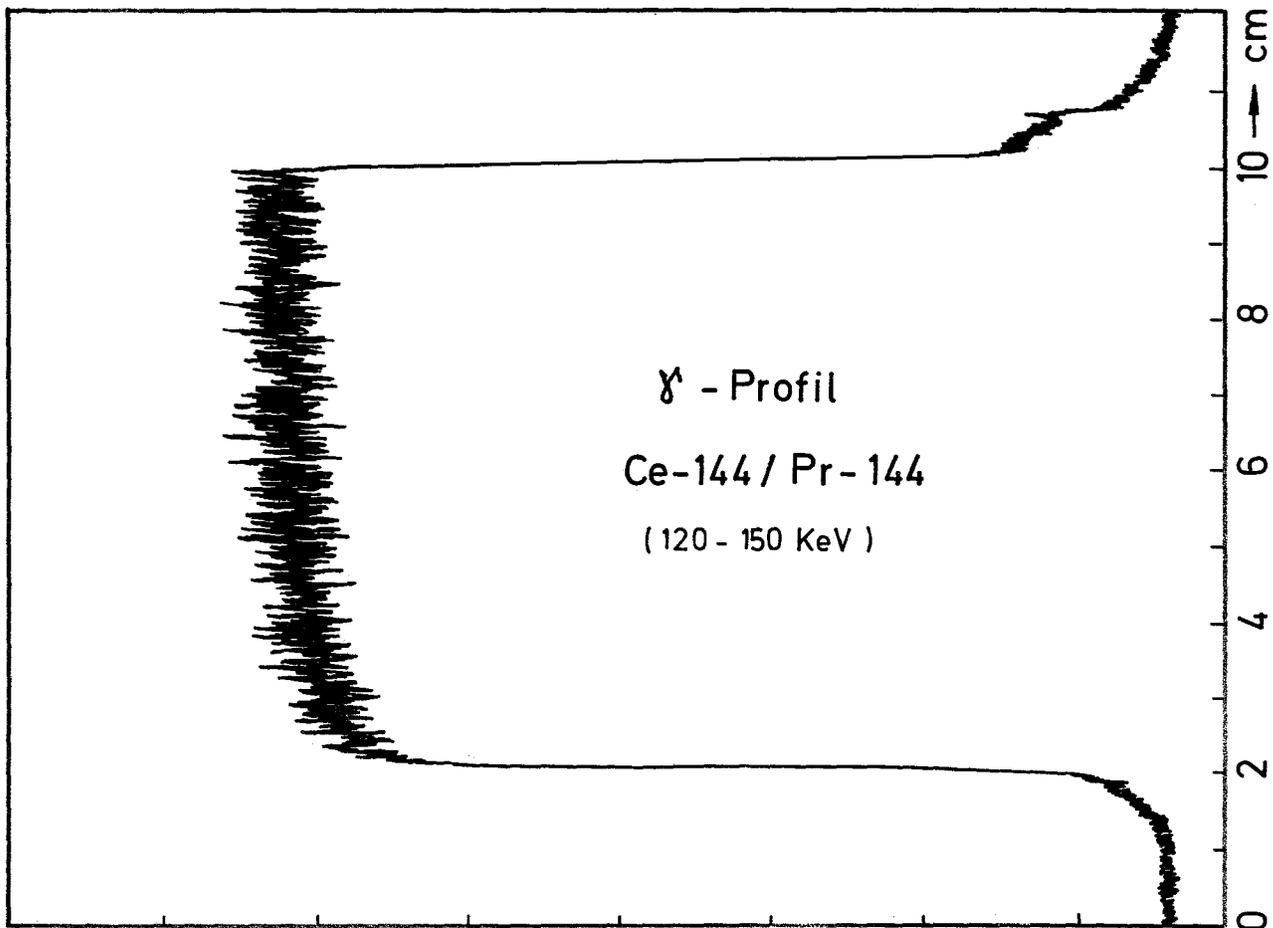
1 mm

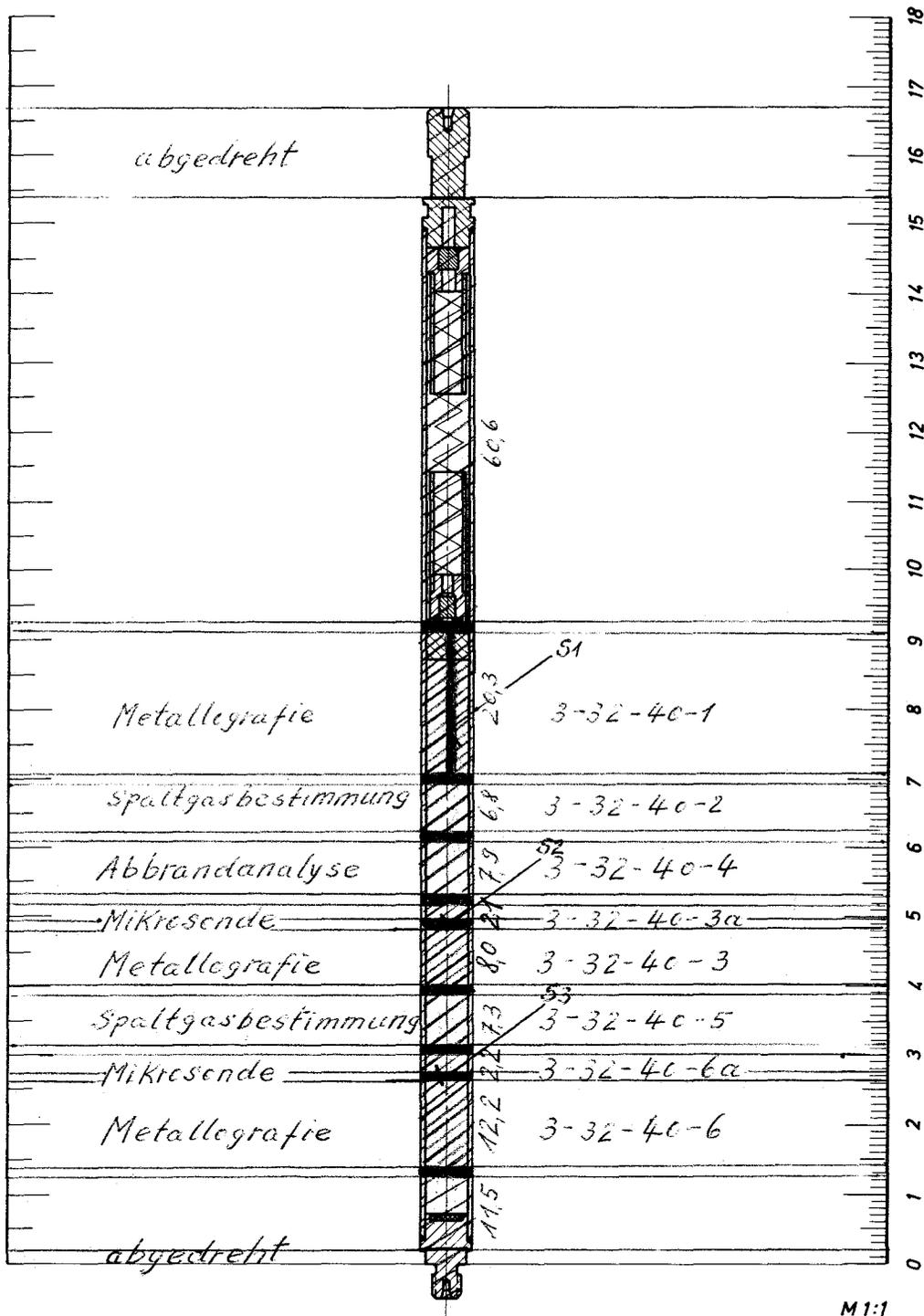


1 mm

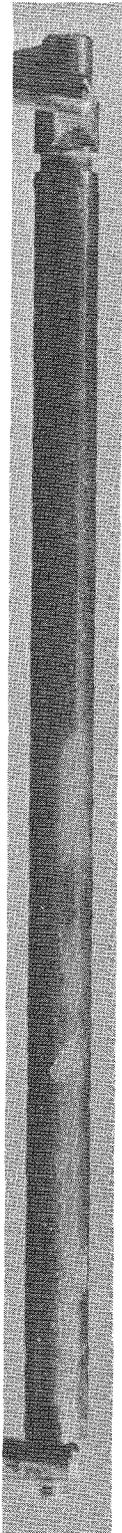


I
1mm





M 1:1



Prüfling I S

Brennstoff :

Form : Pulver, gesintert
Zusammensetzung : UO_2
Tablettendichte : -

Hülle :

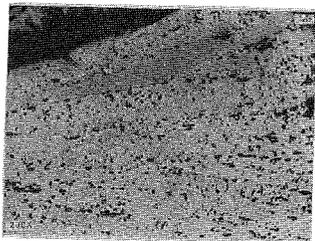
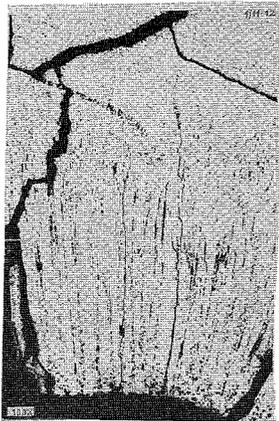
Material : X4CrNiNb 20 25
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

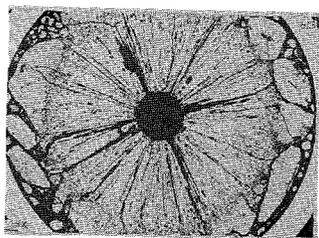
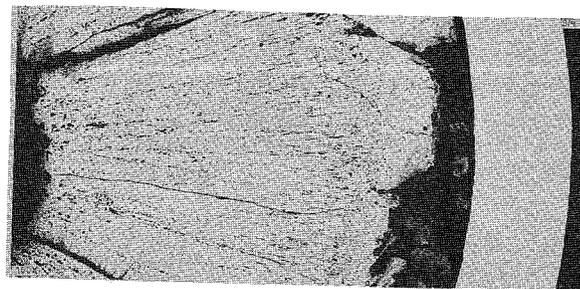
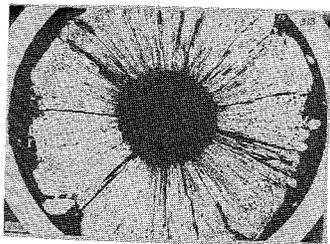
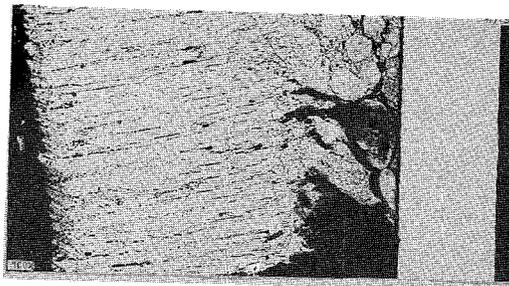
Länge des Prüflings : 167,1 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80,5 mm
Radiale Spaltweite : -
Schmierdichte : 85,39 % th.D.

Bestrahlung :

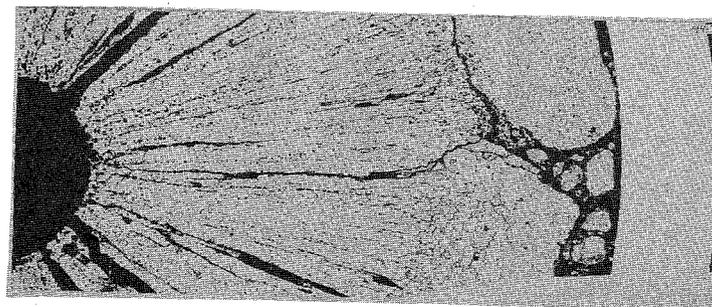
Einrichtung : FR 2/KVE 32
Dauer : 45,5 Volllasttage
Ende : 29.1.68
Rechn. Abbrand : 9460 MWd/t
Stableistung max./mittl.: 698/551 W/cm



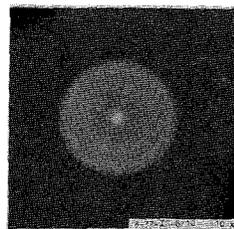
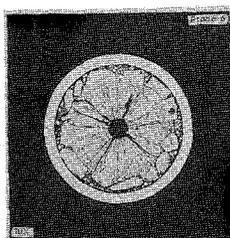
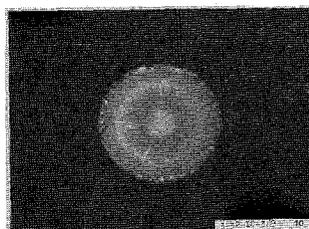
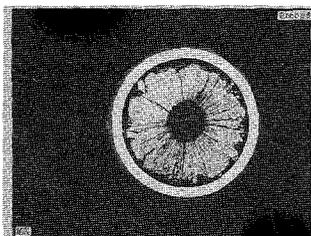
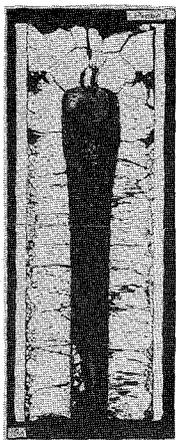
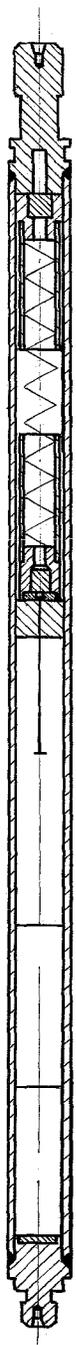
100 μ m



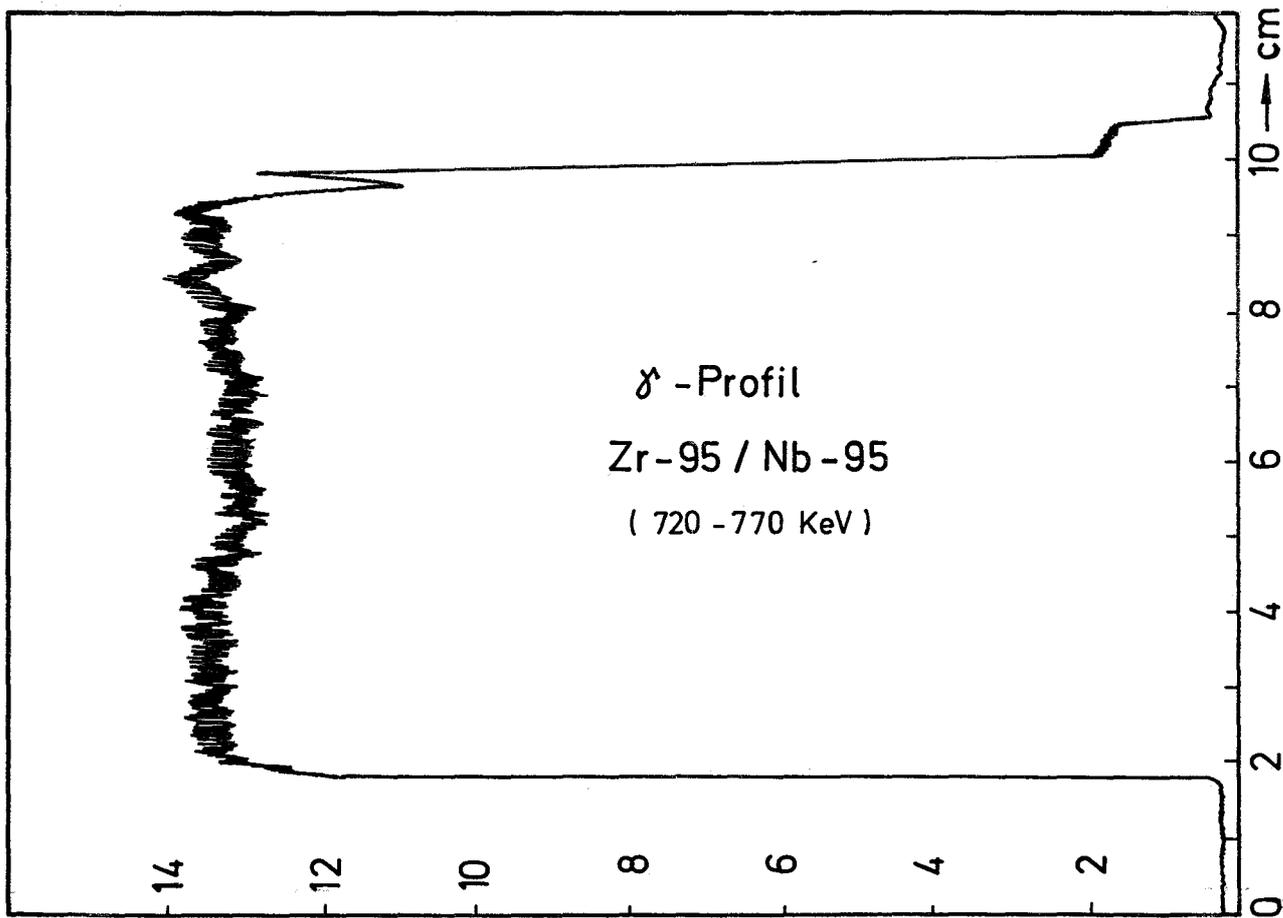
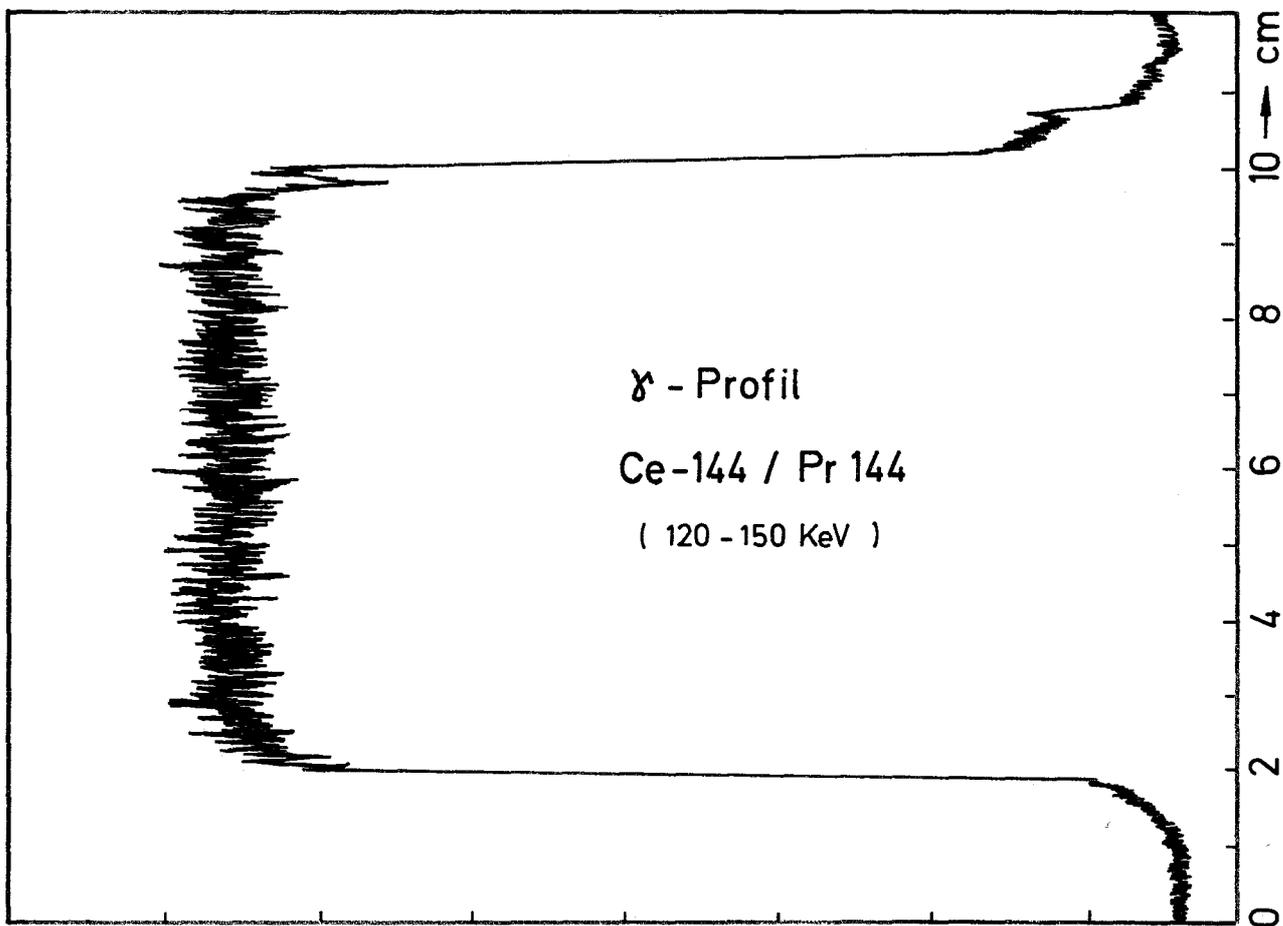
1 mm

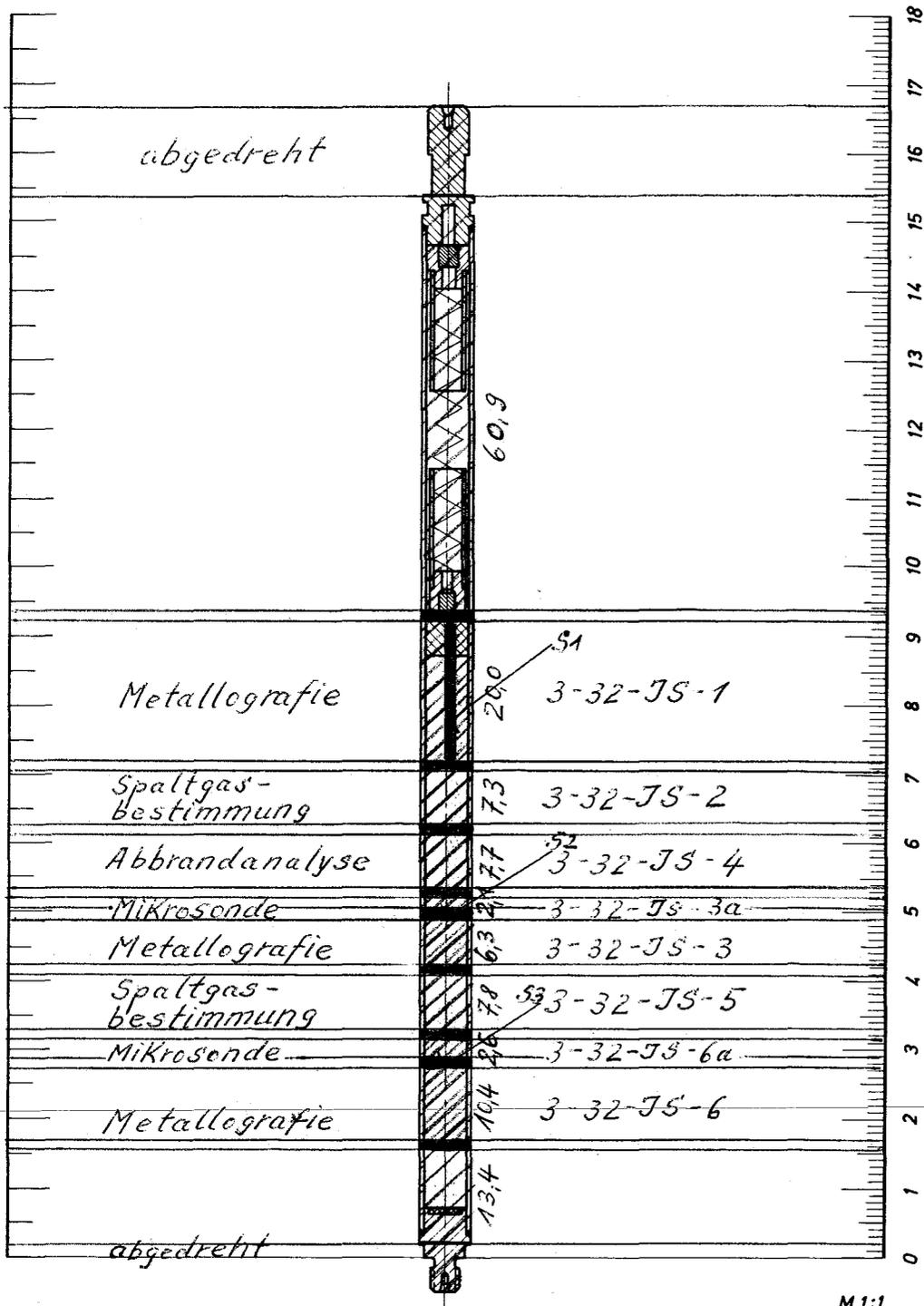


1 mm



1mm





abgedreht

Metallografie

Spaltgas-
bestimmung

Abbrandanalyse

Mikrosonde

Metallografie

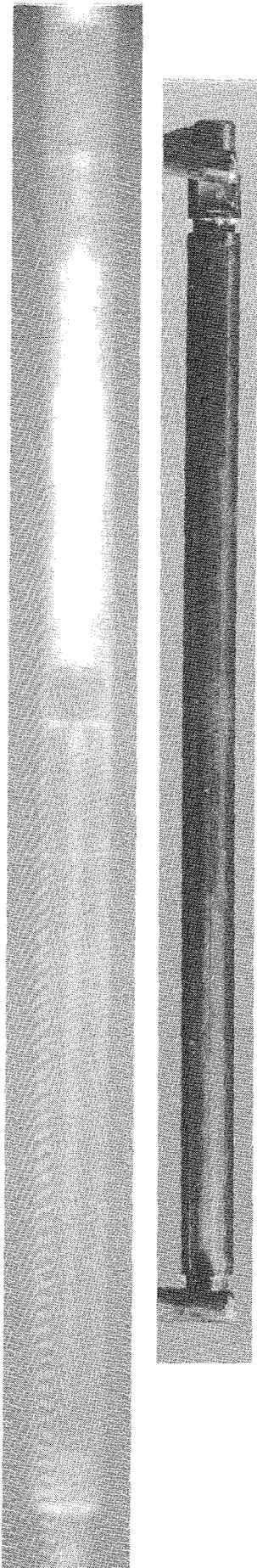
Spaltgas-
bestimmung

Mikrosonde

Metallografie

abgedreht

M1:1



Prüfling K M

Brennstoff :

Form : Pulver, geschmolzen
Zusammensetzung : UO_2
Tablettendichte : --

Hülle :

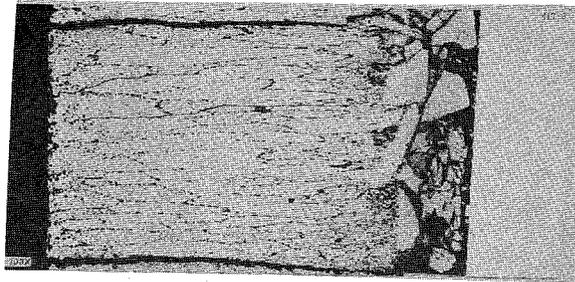
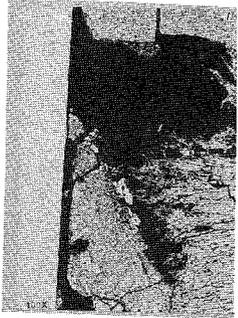
Material : X4CrNiNb 20 25
Aussendurchmesser : 7,4 mm
Wandstärke : 0,5 mm

Geometrie :

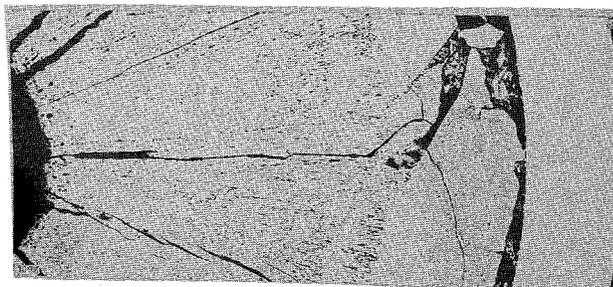
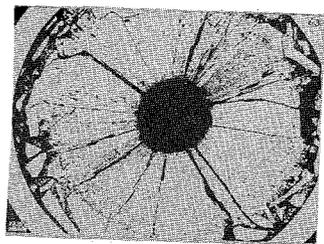
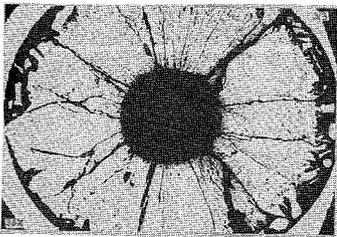
Länge des Prüflings : 167,3 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80,25 mm
Radiale Spaltweite : --
Schmierdichte : 84,86 % th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : FR 2/KVE32
Dauer : 45,5 Vollasttage
Ende : 29.1.68
Rechn. Abbrand : 8810 MWd/t
Stableistung max./mittl.: 754/510 W/cm

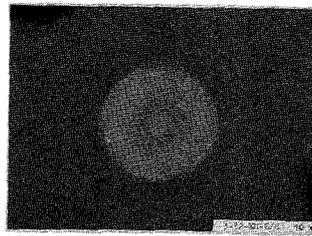
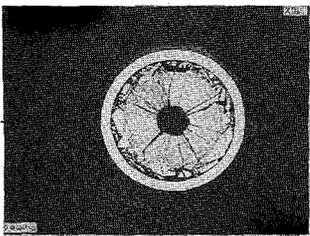
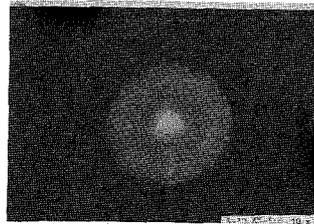
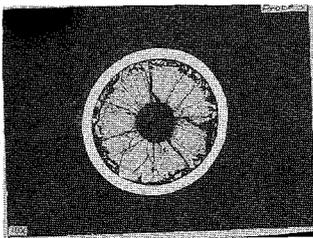
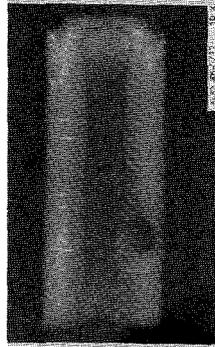
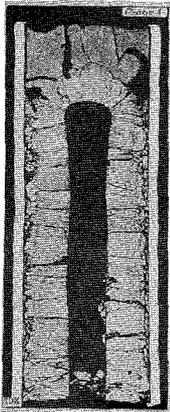
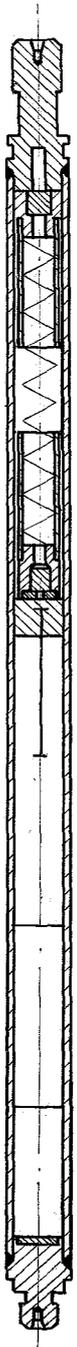


100 μm

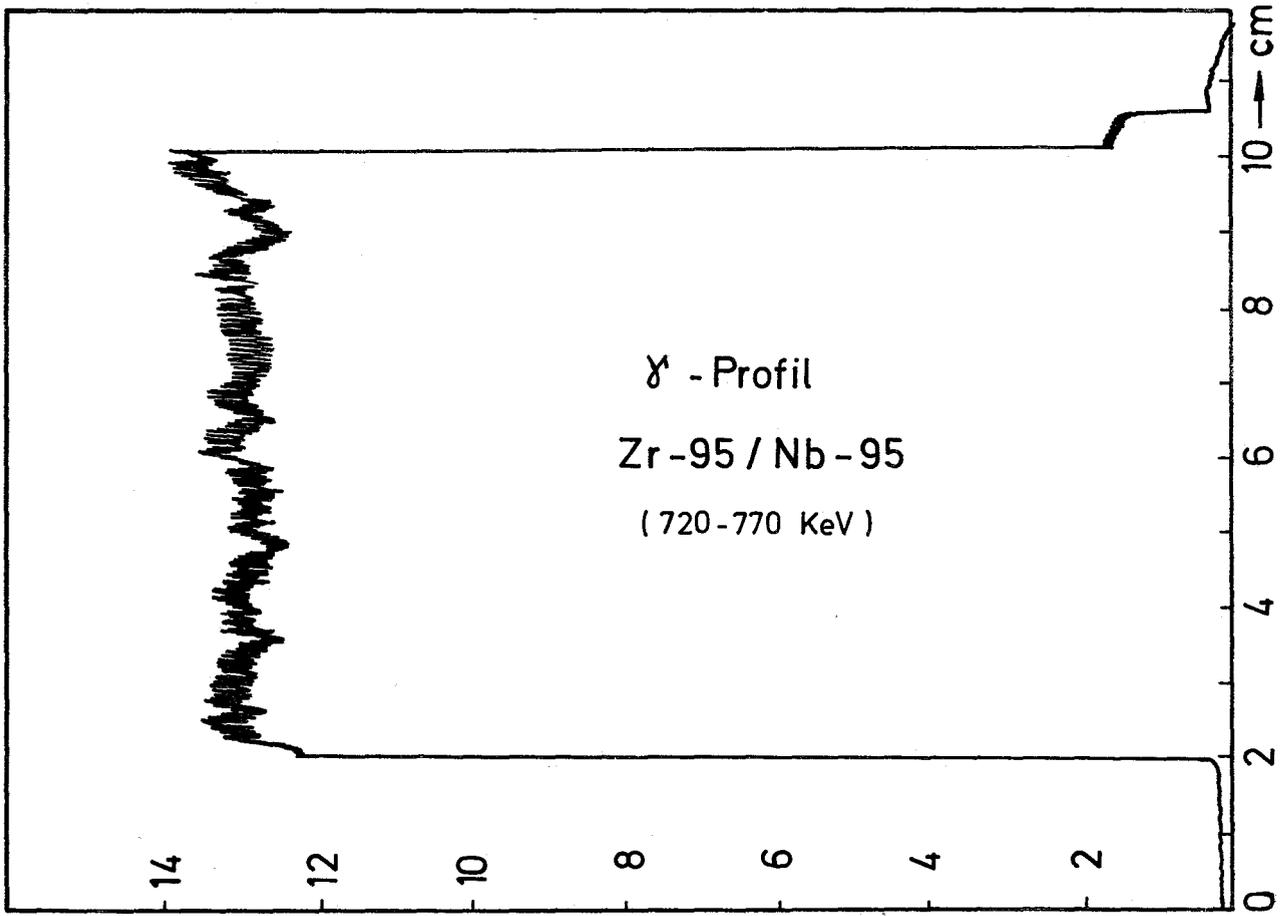
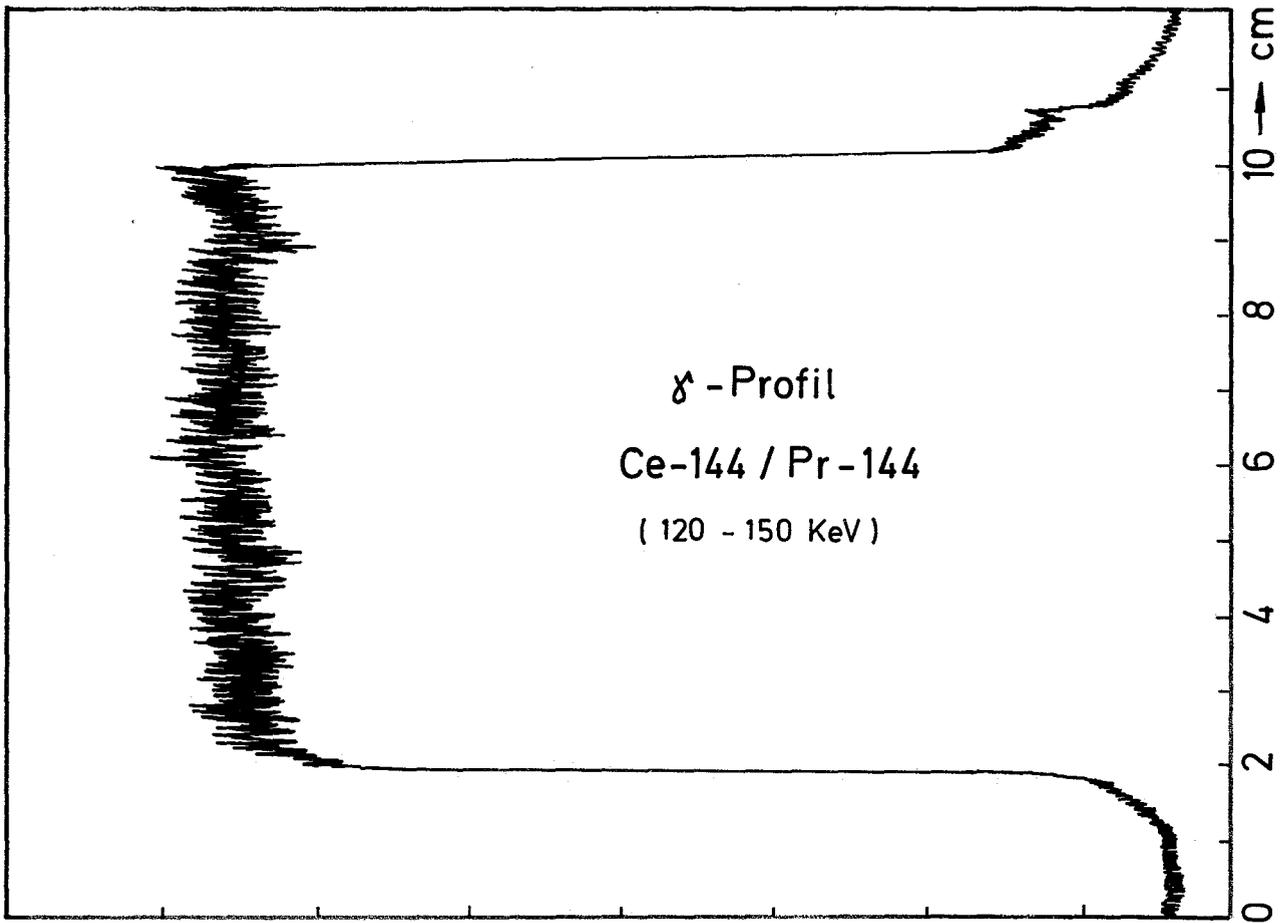


1 mm

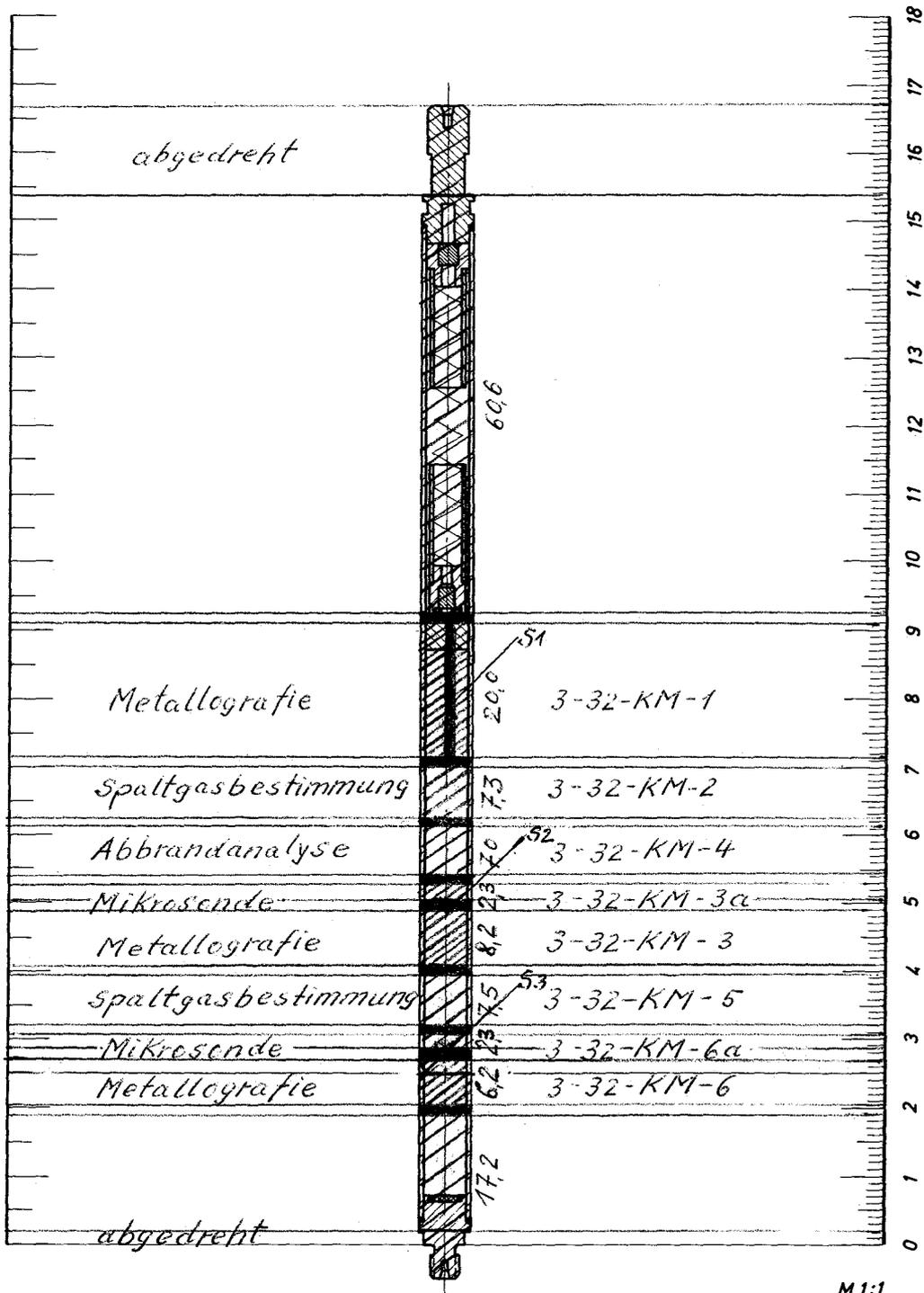
1 mm



1
1 mm



relative Einheiten \leftarrow



M 1:1